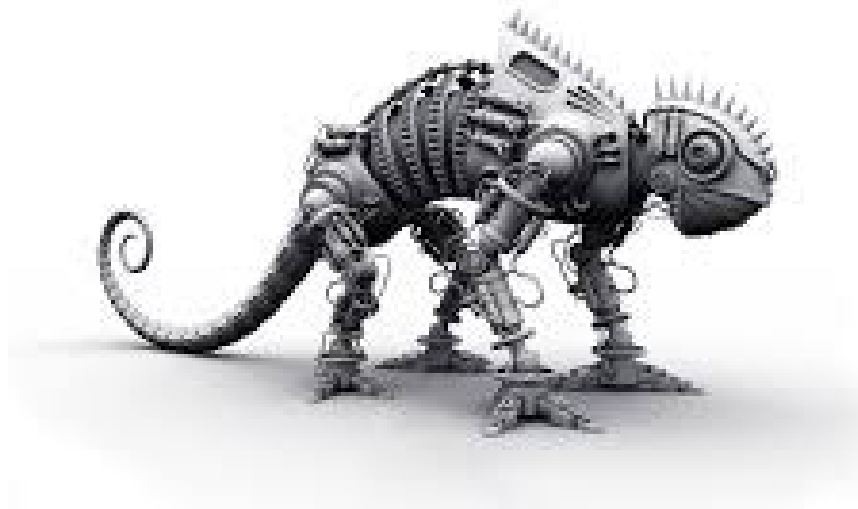


**Власов С. М., Бойков В. И., Быстров С. В.,
Григорьев В. В.**

**Бесконтактные средства локальной
ориентации роботов**



Санкт-Петербург

2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Власов С. М., Бойков В. И., Быстров С. В.,
Григорьев В. В.**

**Бесконтактные средства локальной
ориентации роботов**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки (специальности) 15.04.06 — Мехатроника и робототехника
(магистерская программа «Интеллектуальные технологии в робототехнике») в качестве
учебного пособия для реализации основных профессиональных образовательных
программ высшего образования магистратуры



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2017

Власов С. М., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. — СПб: Университет ИТМО, 2017. — 169с.

Рецензенты:

Шаветов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры интеллектуальных технологий промышленной робототехники Университета ИТМО;

Кульчицкий Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета.

В учебно-методическом пособии приведены основные сведения о средствах бесконтактной ориентации роботов в локальном пространстве. Рассмотрены наиболее широко применяемые датчики, способы их подключения и методики обработки получаемых от них данных.



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО — ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО — участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО — становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

Оглавление

Введение	5
1. Задачи локальной ориентации роботов	13
1.1. Управление траекторным движением	15
1.2. Обнаружение и пространственная локализация препятствий	15
1.3. Обеспечение движения по заданному маршруту: вдоль полосы, в лабиринте, по карте местности	17
1.4. Определение собственных координат в локальном пространстве	20
1.5. Системы сканирования пространства	21
1.6. Карта местности и привязка к ней	22
1.7. Иерархическая структура системы управления роботом . . .	24
2. Организация управления траекторным движением. Движение по полосе	29
2.1. Математическая модель движения тележки робота	29
2.2. Инкрементный датчик угла поворота колеса	31
2.3. Магнитный датчик угла разворота робота (электронный компас)	36
2.4. Организация управления движением робота	47
2.5. Теневой фотоэлектрический датчик	55
2.6. Фотоэлектрический датчик отклонения от полосы	59
2.7. Датчики отклонения от полосы на многоэлементных фотоприемниках	64
2.8. Применение скан-кодов для навигации вдоль полосы	68
3. Навигационные системы со сканированием пространства	73
3.1. Задача сканирования пространства, схема сканера	73
3.2. Фотоэлектрический датчик, принцип действия	75
3.3. Модели систем пространственного слежения	80
3.4. Исследование режимов захвата и автосопровождения навигационных систем мобильных роботов	84
3.5. Виды устойчивости дискретных систем.	95
3.5.1. Асимптотическая устойчивость.	95
3.5.2. Экспоненциальная устойчивость.	95
3.5.3. Качественная экспоненциальная устойчивость.	96

3.6. Метод Ляпунова для анализа свойства устойчивости дискретных систем.	98
3.6.1. Уравнения Ляпунова для анализа свойства устойчивости линейных дискретных систем.	101
4. Системы технического зрения. Обнаружение препятствий	109
4.1. Ультразвуковой датчик препятствий	109
4.2. Датчик препятствий на базе системы технического зрения .	111
4.2.1. Метод стереовидения в задаче определения расстояния до препятствия	112
4.2.2. Метод триангуляции в задаче определения расстояния до препятствия	116
4.2.3. Метод определения расстояния до препятствия с использованием динамически меняющегося изображения . . .	120
4.3. Устранение возмущений изображения перспективной проекцией	126
4.4. Определение геометрии препятствия	134
4.5. Определение параметров движения по текстуре поверхности препятствия	135
5. Маячные системы локальной ориентации	147
5.1. Пассивная ультразвуковая маячная система	147
5.2. Активная маячная система	148
5.3. Организация движения по карте в локальном пространстве. Алгоритм SLAM	150
Заключение	156
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	158

Введение

Пока основной проблемой всех ныне существующих мобильных аппаратов, перемещающихся самостоятельно, без управления со стороны человека, остается навигация. Для успешной навигации в пространстве бортовая система робота должна уметь строить маршрут, управлять параметрами движения (задавать угол поворота колес и скорость их вращения), правильно интерпретировать сведения об окружающем мире, получаемые от датчиков, и постоянно отслеживать собственные координаты.

Компьютерные системы построения маршрута разработаны достаточно хорошо. Первоначально они создавались для простейших виртуальных сред, и программа, моделирующая действия робота, быстро находила оптимальный путь к цели в двумерных лабиринтах и комнатах, наполненных простыми препятствиями. Когда появились быстрые процессоры, стало возможным формировать траекторию движения уже на сложных трехмерных картах, причем в реальном времени. Интересно, что существенный вклад в это алгоритмическое направление внесли компании — разработчики компьютерных игр, финансирующие соответствующие исследования. В современных играх с каждой из конфликтующих сторон участвует несколько сотен боевых единиц, действующих на случайно сгенерированных трехмерных картах, и каждая единица быстро и достаточно эффективно находит путь к цели. Правда, при этом она, как правило, неявно обладает полной информацией о карте и своем местоположении на ней. Поэтому в реальных условиях эксплуатации такие алгоритмы малоэффективны. Полноценный робот должен определять собственные координаты и выбирать направление движения только на основании показателей бортовых датчиков, поэтому системы искусственного интеллекта, создаваемые для автономных машин, ориентированы на поддержку непрерывного цикла «опрос датчиков — принятие оперативного решения об изменении маршрута». Таких циклов может быть несколько — один ответственен за следование по основному маршруту, другой — за обход препятствий и т. д. Кроме того, на аппаратном уровне каждый цикл может поддерживаться датчиками разных типов и разных принципов действия, формирующих потоки данных разного объема и интенсивности.

До 30-х годов прошлого века навигационные задачи решались по старинке — с помощью карты, компаса, секстанта, по солнцу, звездам и т. д. В 50-е годы у летчиков и моряков получила широкое распространение схема навигации по радиомаякам, а когда в 1957-м был запущен в кос-

мос советский «Спутник-1», специалисты Массачусетского технологического института быстро придумали простой способ измерения параметров его орбиты по изменению спектра передаваемого спутником сигнала. Эта идея легла в основу современных систем спутниковой навигации. Глобальная спутниковая система GPS, стартовавшая в 1973 г. усилиями ВМС, ВВС и министерства транспорта США, с каждым годом продолжает набирать популярность у разработчиков навигационных систем для автономных роботов. Она относится к категории пассивных глобальных систем.

Хотя на рынке имеется множество коммерчески доступных GPS-приемников, их применение в глобальной навигации пока ограничено задачами соблюдения общего курса. Связано это с очевидным требованием законов робототехники о точности такой навигации — ошибка в определении собственных координат не может превышать размера автономного аппарата (в противном случае возможны столкновения с устройствами такого же или меньшего размеров и другие конфликты со средой). Типичный самоходный коммерческий робот обычно не превышает в длину одного–двух метров и может удаляться от места старта на 10 км, а вот GPS-сигнал дает точность около 100 м, и гражданским организациям в ближайшие годы будут доступны обновленные GPS-приемники с точностью 10–30 м. Поэтому в качестве базовой GPS-навигация применяется преимущественно в автопилотах крупных самолетов или океанских лайнеров. Кроме того, в различных регионах Земли, на местности со сложным рельефом и в зданиях GPS-сигнал может приниматься неустойчиво и с помехами. Таким образом, эта система еще довольно долго не сможет использоваться как основная в задачах глобальной навигации небольших аппаратов.

У разработчиков систем пассивной локальной навигации популярна идея использования для ориентирования искусственных сооружений (например, специальных вышек). Она неплохо реализована в коммерческих версиях, и робот, снабженный системой машинного зрения, может довольно точно рассчитать расстояние до вышки по анализу изменения геометрических размеров ее видимого образа. Если же установить искусственные маяки не удастся, робот может попытаться самостоятельно выделить статичные элементы окружающей обстановки (высокое дерево, гора) и выполнить привязку к ним своих координат. Недостаток такого подхода заключается в проблемах с нахождением ключевых объектов при изменении условий внешней среды (например, уровня освещенности).

Здесь может помочь использование стереокамер — зная угол зрения каждой из них, можно вычислить расстояние до цели. Но все равно оста-

ется актуальной задача распознавания одного и того же объекта каждой камерой и последующая синхронизация их «взглядов», что роботам пока сложно делать в масштабе реального времени.

Другая пассивная концепция локальной навигации — с помощью радиомаяков — заключается в размещении в зоне действий робота источников радиосигналов, которые обрабатываются бортовым микропроцессором. Но так как радиомаяки располагаются в фиксированных точках некоторого маршрута, аппарат теряет возможность обходить препятствия или выбирать альтернативный путь движения. Если же сделать такую систему более гибкой и использовать радарные комплексы для определения координат попавших в зону их действия объектов, то будет теряться время (как правило, десятые доли секунды) на организацию запроса бортовой системы робота к радарной станции и ожидание от последней ответа [25].

Успешно применяются и активные навигационные схемы. Самые известные представители этой группы — инерционные навигационные системы (ИНС). Впервые они были задействованы в немецких ракетах V2, а на рынке появились в 60-х годах. Механические гироскопы позволяют измерять усилие (момент внешней силы), прикладываемое к телу, на котором они размещены, и на этой основе определять положение тела относительно позиции, с которой началось движение, и его скорость. Механические акселерометры схожим способом умеют определять собственное ускорение.

В 70-е годы были созданы относительно небольшие по размерам ИНС, и по сей день применяемые в самолетах, кораблях, устройствах наведения бомб, ракет и торпед. Главный недостаток механических ИНС — накопление ошибок измерения за время активной работы, т. е. чем дольше в движении находится объект, оснащенный ИНС, тем больше будет погрешность в определении координат. Кроме того, ИНС малоэффективны в случаях, когда скорость объекта часто и резко меняется. Они также плохо подходят для задач навигации роботов среднего и малого размеров. Навигационные версии гироскопов должны устанавливаться на стабильной платформе, к тому же цена их высока. Коммерческая авиационная ИНС среднего качества стоимостью в 50 тыс. долл. накапливает за час работы погрешность измерения 2000 м. Погрешность более дорогих версий (200 тыс. долл.) составляет около 0,1% от всего пройденного пути[2].

Простейший вариант хорошо известного всем автолюбителям активного навигационного устройства — одомер. Он периодически измеряет скорость вращения колеса и, так как диаметр последнего известен, определяет пройденный путь. Но колеса любого автомобиля не идеально

ровные, из-за чего реальная длина покрышки всегда будет отличаться от рассчитанной, к тому же они могут прокручиваться вхолостую или про- скальзывать на льду, а сам одомер под воздействием внешних и внутрен- них помех постоянно накапливает ошибки измерения. Однако несмотря на все эти недостатки данная технология применяется очень активно. Ее распространение связано прежде всего с инвестициями автопроизводи- телей. Так, одометры нового поколения будут содержать микроволновые радары и более точно измерять реально преодоленное расстояние. Кро- ме того, одометры — это иногда единственно возможное навигационное решение (например, при нахождении робота на другой планете).

Развивается рынок бесконтактных систем локальной навигации, ис- пользующих генератор радио или каких-либо других (чаще всего ульт- развуковых и инфракрасных) сигналов, а также лазерных дальномеров. Однако эффективность и точность подобных устройств в значительной степени зависит от характеристик среды.

С появлением первых микроконтроллеров в 80-е годы началось со- здание довольно дешевых бортовых систем машинного зрения, позволя- ющих решать задачи навигации. Сегодня на них возлагаются большие надежды.

Недостаток вышеперечисленных способов навигации связан с отсут- ствием в реализующих их устройствах интеллектуальной составляющей. Независимо от того, пытается ли робот определить свое местонахождение и маршрут движения самостоятельно или на основе сигналов от внешне- го источника, он делает это, как животное (птица, движимая инстинктом, знает, куда ей лететь, но не понимает, почему ей следует лететь имен- но туда). Гибридная бортовая система управления роботом использует навигационные средства всех видов, но занимается прежде всего оцен- кой окружающей обстановки, анализом выполняемого задания и приня- тием решений. Аппарат пытается построить собственный образ среды, в которой ему приходится действовать, после чего формирует маршрут и движется по нему, постоянно сопоставляя свою карту пространства с данными, полученными от устройств навигации.

Существующие интеллектуальные модели умеют строить двумерные карты области, в которой движутся. Для этого, как правило, применяются лазерные дальномеры в комбинации с ультразвуковыми генераторами и инерционными системами. Но с помощью ультразвука удастся получить лишь весьма нечеткие образы, к тому же скорость звука варьируется, за- висит от множества факторов и невысока (если пространство открытое, то ответного эха можно ждать несколько секунд). А из-за ограниченности плоской модели мира роботы нередко попадают в логические тупики, и в

условиях промышленной эксплуатации на восстановление реальной картины в «головах» машин и возвращение таких «блудных сынов» в строй уходят часы, а то и дни[2].

Значительно более перспективно формирование точной геометрической модели окружающего пространства. Но для этого надо иметь максимально детальную информацию об окружающей среде, а предоставить ее могут устройства визуального наблюдения (машинного зрения) высокого разрешения и хорошие системы распознавания объектов. Такие системы пока либо очень дороги, либо существуют только в экспериментальных версиях, а базирующиеся на них роботы уверенно двигаются только в простой обстановке. Во многих случаях карта может быть подготовлена заранее, но тогда возникает проблема определения собственного местоположения на ней, что весьма сложно в случаях, когда отсутствуют различные особенности местности. Неплох вариант, когда робот самостоятельно строит карту, а затем, сопоставляя ее с исходной фиксированной версией, уточняет и корректирует. Но задача такого сопоставления для компьютера также очень трудоемка. Ведь трехмерные цифровые карты местности требуют для хранения в тысячи раз больше памяти, нежели двумерные. Соответственно и для обработки таких объемов данных нужны приличные вычислительные ресурсы. В дополнение к задаче определения координат устройству необходимо уметь строить план движения по такой карте. Существующие алгоритмы позволяют делать это достаточно точно, однако они пока не учитывают скорость движения аппарата по маршруту — а она может внести серьезные коррективы в теоретический план. Тем не менее некоторые роботы способны за секунду создавать вполне точный трехмерный образ окружающего пространства при нахождении внутри зданий типовых конструкций с жестко predetermined геометрией.

Следующие модели будут уже в обязательном порядке снабжаться функциями построения карты и ее сопоставления с исходным готовым вариантом. Ведь если расположение устройства на ней определено, навигация становится совсем простой и не требует расхода временных ресурсов. А когда робот попадает в совершенно незнакомую обстановку, он может попытаться понять, где находится, обратившись к базе цифровых карт. Алгоритмы классификации, иерархической организации и компактного хранения карт готовы, остается только дожидаться очередного удешевления вычислительных ресурсов.

Очень заманчива новая концепция абстрактного описания окружающего мира. В ее рамках робот не использует predetermined модели пространства и не пытается придавать смысл различным элементам местности (не занимается распознаванием привычных человеку объектов

— «холм» или «яма»). Он исследует мир, не переводя его в формальное, смысловое или топографическое представление, выделяя в ходе исследования характерные признаки наиболее выделяющихся элементов внешней среды для идентификации своего местоположения. Но для успеха такого подхода придется серьезно улучшить ныне действующие системы автоматического обучения и классификации. В то же время эта концепция оказалась работоспособной в экспериментах с роботами, путешествующими внутри зданий, где число внешних объектов ограничено (стены, коридоры, комнаты, столы, стулья, двери и ступени). Робот Scout Стокгольмского Королевского института технологий, оборудованный 16 сонарами и современным процессором, настолько освоился в университетских коридорах, что уверенно «носился» по ним с невиданной для таких устройств скоростью 1 м/с. На международной конференции по робототехнике IROS, прошедшей в октябре 2003 г. в Лас-Вегасе, эта система получила высшую награду, а всего оценивалось 500 проектов.

Интересна идея динамической модификации среды, когда робот, определив точную координату некоторой точки, помечает ее, например, радиомаяком. Для этого ему приходится прибегать к услугам службы персональной навигации — позиционирования частей своего «тела» друг относительно друга и ближайших предметов. Оказывается, система обратной связи «рука — глаз», в которой в качестве глаза используется группа подвижных дешевых видеокамер с несколькими степенями свободы, способна определять местоположение руки-манипулятора и позиционировать ее с точностью до миллиметра. Но полноценная коммерческая версия такого решения пока сложна и дорога [2].

Продолжается исследование биологических систем навигации. Птицы и насекомые прекрасно ориентируются в пространстве и способны преодолевать большие расстояния, не отклоняясь от курса. Как они это делают, пока остается загадкой. Возможно, животные каким-то образом ощущают изменение магнитного поля Земли, уровня гравитации, температуры, концентрации различных примесей в воздухе, улавливают тончайшие оттенки запахов, звуков, воспринимают свет в широком диапазоне спектра и т. д. При этом «логическая часть» живых организмов, обрабатывающая подобные сигналы, несложна — например, мозг пчелы состоит всего из 800 тыс. нейронов. Остается только понять, как устроены столь чувствительные биологические датчики.

Компания Centeye недавно продемонстрировала небольшой автономный самолет, оснащенный системой машинного зрения собственного производства. Специализированный чип, реализующий алгоритмы нейронных сетей, выполняет промежуточную интеллектуальную обработку мощ-

ного потока «сырых» данных от видеокамер. Благодаря этому бортовая система получает уже готовые распознанные образы, передача которых требует пропускной способности всего в несколько килобайтов в секунду. В ближайшее время специалисты компании обещают научить самолет летать по узким и извилистым тоннелям. Через 15 лет, полагают они, на базе подобных аппаратных нейрорешений будет построено множество автономных механизмов.

Пока же биотехнологи больше озабочены обучением автономных устройств пониманию среды с помощью более простых, базовых механизмов человеческого восприятия — слуха и осязания. Распознавание речи и управляющих сигналов — перспективные направления в задачах локальной и персональной навигации, а повышение качества обратной связи в цикле «глаз — рука — касание» позволит повысить эффективность активного взаимодействия робота со средой, его возможности познания окружающего мира и соответственно понимания своего места в этом мире.

Ведутся первые исследования по организации целенаправленного поведения коллективов роботов. Аппараты, действующие совместно в некоторой области, могут уточнять друг у друга свои координаты, сравнивать взаимное положение и таким образом быстро передвигаться. Достижений в этой области немного, и все они пока ограничены исследованиями и экспериментами[2].

Прогресс локальной навигации роботов во многом будет определяться развитием систем машинного зрения. Но пока не появятся высокоэффективные решения, сохранится интерес к технологиям локальной навигации по сигналам внешних маяков. Эти маяки обретут интеллектуальные свойства и состыкуются с GPS-службой (первые эксперименты показали высокую результативность такого подхода).

Хорошо известные на рынке роботы и относительно дешевые наборы для их создания, предлагаемые фирмой Evolution Robotics [54], основываются на коммерчески доступных одометрах и системах машинного зрения. Решения, использующие более точные лазерные дальнометры, пока дороги (около 5 тыс. долл.).

Технологии машинного зрения (включая «зрение» с помощью сонаров и лазеров), обработки сигналов глобальных навигационных систем типа GPS и ориентации по маякам считаются сегодня ключевыми в задачах навигации роботов.

Желающим попрактиковаться в построении собственных систем навигации роботов можно порекомендовать Linux-набор разработчика Carmen (Carnegie Mellon Robot Navigation Toolkit, ~carmen/index.html), созданный

в университете Карнеги — Меллона и свободно доступный в исходных текстах. Предоставляемые в нем инструменты позволяют решать такие задачи, как планирование маршрута, обход препятствий, распознавание людей, формирование карты, определение местонахождения (на базе вероятностного алгоритма локализации Маркова), управление бортовыми датчиками (лазерными сканерами, GPS-приемниками и сонарами) и др. Carmen можно использовать с моделями роботов ATRV, ATRVjr и B21R фирмы iRobot; Pioneer I / II фирмы ActivMedia, а также Technologies Scout и XR4000 фирмы Nomadic.

Глава 1

Задачи локальной ориентации роботов

Быстрое развитие техники за последние полвека, привело к бурному развитию робототехники и успешному внедрению промышленных роботов в процесс автоматизированного производства различной продукции. В настоящее время значительно расширилась область применения роботов. Здесь нужно упомянуть космических роботов для изучения поверхности небесных тел Солнечной системы, роботов для эксплуатации Международной космической станции, роботов для подводных исследований. В ходе борьбы с терроризмом возникла острая необходимость в роботах, предназначенных для разминирования подозрительных предметов в местах скопления людей (например, в аэропортах или общественном транспорте). Нужны роботы, которые могут без помощи оператора тушить пожары, самостоятельно передвигаться по заранее неизвестной реальной пересеченной местности, выполнять спасательные операции во время стихийных бедствий, аварий атомных электростанций и т.п.

На текущий момент, неполный список сфер человеческой деятельности где применяются или могут быть применены мобильные роботы достаточно широк:

- Промышленность;
- Бытовая сфера;
- Социальная сфера;
- Медицина;
- Исследования;
- Военная сфера;
- Логистика...

В последнее время возникла еще одна область применения мобильных роботов. Во многих странах начали проводить соревнования, чемпионаты различного уровня между мобильными роботами, созданными студенческими командами ведущих университетов мира. Появился даже новый термин — интеллектуальный спорт, участники которого соревнуются в конструировании наиболее совершенных робототехнических систем. Примером и одним из самых крупнейших робототехнических соревнований служит научно-технический молодежный фестиваль: «Мобильные

роботы» имени профессора Е.А. Девянина. Среди упражнений предложенных регламентом соревнований В 2010 году были: объезд подвижного препятствия, объезд нескольких препятствий с выходом в заданную точку, движение по заданной траектории с фиксацией времени, гонки роботов, в которых разрешалось проводить обгон, движение по трассе, управляемое светофором, разнообразные движения с использованием маяков и проезд «ворот», а также выполнение таких сложных задач, как движение по «восьмерке» .

Самым распространенным на сегодняшний день испытанием в соревнованиях мобильных роботов является «Line Tracing» или «следование по линии» (см. регламент крупнейшего российского соревнования — Открытого робототехнического турнира г. Москва [6]).

Независимо от сферы применения, роботу необходимо перемещаться в среде своего функционирования. Для этого применяется система навигации. Навигация мобильного робота охватывает большой диапазон различных технологий и применений. Она опирается как на очень старые технологии, так и на самые продвинутые достижения науки и техники. Систему навигации в робототехнике подразделяют на три уровня:

- глобальная — определение абсолютных координат устройства при движении по длинным маршрутам;
- локальная — определение координат устройства по отношению к некоторой (обычно стартовой) точке. Эта схема востребована разработчиками тактических беспилотных самолетов и наземных роботов, выполняющих миссии в пределах заранее известной области;
- персональная — позиционирование роботом частей своего тела и взаимодействие с близлежащими предметами, что актуально для устройств, снабженных манипуляторами.

Считается, что чем крупнее аппарат, тем выше для него важность глобальной навигации и ниже — персональной. У роботов — малышей все наоборот.

Системы навигации классифицируются еще по одному признаку — они могут быть пассивными и активными. Пассивная система навигации подразумевает прием информации о собственных координатах и других характеристиках своего движения от внешних источников, а активная рассчитана на определение местоположения только своими силами. Как правило, все глобальные схемы навигации пассивные, локальные бывают и теми и другими, а персональные схемы — всегда активные [3].

Именно локальная навигация и является основной темой данного по-

собия. В процессе осуществления локальной навигации возникает ряд задач:

- Управление траекторным движением;
- Обнаружение и пространственная локализация препятствий;
- Обеспечение движения по заданному маршруту: вдоль полосы, в лабиринте, по карте местности;
- Определение собственных координат в локальном пространстве;
- Сканирование пространства;
- Составление карты местности и привязка к ней.

Рассмотрим данные задачи подробнее, а так же приведем некоторые примеры их решения.

1.1. Управление траекторным движением

Задача траекторного управления состоит в формировании управляющего воздействия, обеспечивающего движение мобильного робота по заданной траектории. Траектория описывается аналитически, но может быть сформирована на основе данных, поступающих от системы датчиков робота. Ярким практическим примером данной задачи может служить автоматическое пилотирование летательного аппарата, а так же формирование траектории движения спутника.

1.2. Обнаружение и пространственная локализация препятствий

Одна из возможных схем конструкций автономного мобильного робота показана на рисунке 1.1. С помощью трех лазерных сканеров осуществляются задачи локальной и персональной навигации, формирование трехмерной карты местности и избегания столкновений. Кроме этого, глобальная навигация осуществляется с помощью приемника GPS, гироскоп контролирует максимально допустимый наклон транспортного средства, лазерный радар позволяет отслеживать объекты, находящиеся на значительном расстоянии. Использование систем технического зрения позволяет значительно расширить задачи, стоящие перед таким устройством.

Рассмотрим задачу навигации мобильного робота, решаемую в искусственной среде, где поверхность движения представляет собой плоскость,



Рисунок 1.1 — Схема конструкции автономного мобильного робота

и лазерный дальномер установлен на работе для измерения дальностей до окружающих объектов в плоскости параллельной плоскости движения. Задача навигации состоит из подзадач определения положения робота — локализации, и составления описания окружающей среды — картографии. Задача локализации решается за счет определения взаимного расположения дальнометрических изображений (сканов), полученных в различных точках рабочей зоны (см. рисунок 1.2).

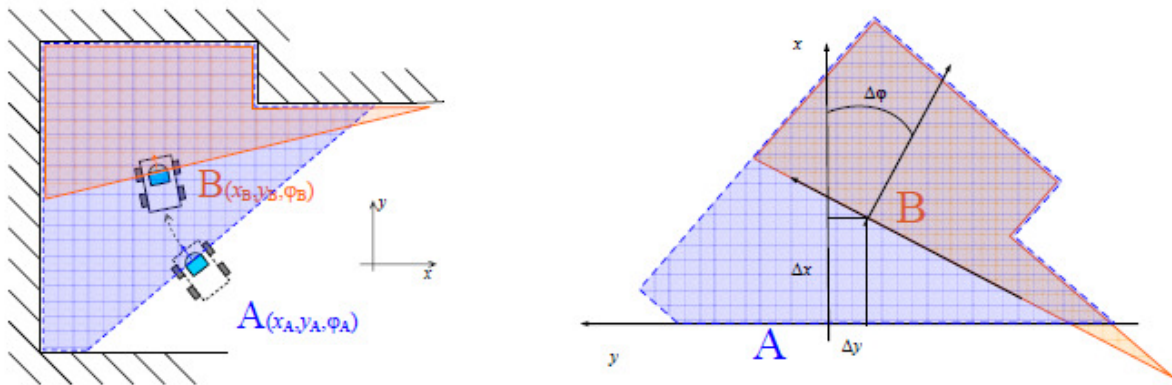


Рисунок 1.2 — Определение перемещения робота по сканам

Задача картографии непосредственно связана с задачей локализации, поэтому после определения собственного положения МР дальнометрические изображения, полученные в различных точках рабочей зоны, могут быть приведены к общей неподвижной системе отчета, формируя, таким образом, план местности.

Задача локальной навигации, состоящая в определении относительно-

го перемещения робота по последовательно получаемым сканам, имеет существенный недостаток — накапливающуюся ошибку. Это может приводить к тому, что при повторном прохождении одних и тех же участков рабочей зоны будет наблюдаться несоответствие данных дальномера (см. рисунок 1.3), карта, построенная по таким данным, будет неточной. Решением этой проблемы, называемой также проблемой замыкания циклов, занимается задача глобальной локализации, в которой определяется абсолютное положение робота [38].

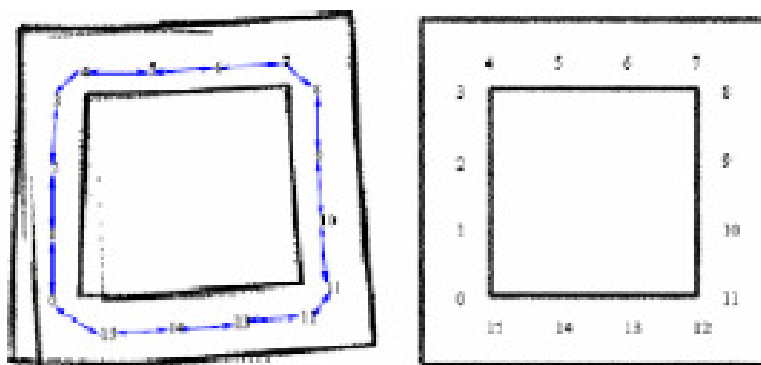


Рисунок 1.3 — Проблема замыкания циклов

1.3. Обеспечение движения по заданному маршруту: вдоль полосы, в лабиринте, по карте местности

Первые модели промышленных роботов с более или менее автономной навигацией, созданные в 60-е годы, передвигались по маршруту, жестко заданному с помощью электрических кабелей, проложенных под полом заводских сооружений.

На роботах устанавливались несложные устройства приема электромагнитного излучения кабеля, позволявшие определять направление перемещения. Аппараты могли двигаться по различным маршрутам благодаря тому, что по нескольким кабелям передавался сигнал с разной частотой. Но такая схема была дорогой и негибкой

С появлением первых систем машинного зрения [45, 11, 28] удалось отказаться от кабелей и перейти к навигации по ярко нарисованным (или флуоресцентным) линиям на полу. Робот с помощью камеры следил за такой линией и самостоятельно двигался вдоль нее. Правда, линии часто стирались, нередко загорались другими аппаратами и людьми, а на перекрестках, где сходились несколько маршрутных линий, роботы

обычно терялись и останавливались, не в силах понять, куда же двигаться дальше.

Испытывались и другие похожие концепции. По маршруту движения на определенной высоте размещались предметы — маркеры заданной формы, которые робот с помощью простых датчиков «ощупывал», узнавая тем самым свое местонахождение. Но такая схема навигации основана на нежелательном физически активном контакте машины с окружающим миром, что может привести к разрушительным последствиям. Кроме того, роботы не всегда могли правильно идентифицировать маркеры, а расположение последних приходилось выбирать очень точно.

Постепенно модели маркерной навигации были оснащены более совершенными аналоговыми датчиками, научившимися измерять силу реакции контакта и определять форму маркера, а сейчас в этих целях применяются цифровые матричные датчики, способные получать от маркеров подробные данные об окружающей среде.

Следующий способ навигации — это использование лазерных дальномеров и ультразвуковых генераторов (сонаров). Однако лазерный луч поможет получить образ среды только в зоне прямой видимости.

Кроме того, на пути луча часто возникают мелкие помехи, вносящие погрешность в такой образ. А ультразвуковые датчики характеризуются большим временем отклика (если робот находится в большом и открытом пространстве), порядка десятых долей секунды, что не позволяет роботу перемещаться быстро. Скорость звука в разных условиях также может «плавать», влияя на точность оценки расстояния, в результате в «голове» робота искажается общая картина окружающей среды. Создание трехмерных карт с помощью лазеров в масштабе реального времени еще более затруднительно и, как минимум, требует существенных вычислительных мощностей, которые пока не удается воплотить в виде компактных бортовых плат. По этим причинам ценность информации, поступающей от бортовых датчиков, невелика. Роботу необходимо перевести ее в формальное и структурированное «словесное» описание мира (задача распознавания).

В настоящее время очень широкое распространение в мобильной робототехнике получили лазерные сканеры. Можно было бы привести множество примеров их использования, но наиболее наглядным будет пример марсохода NASA, еще одним показательным фактом — победа беспилотного автомобиля Volkswagen Tuareg в песках Дакара в 2005 году.

Огромным преимуществом данного прибора является возможность сканирования в плоскости с углом обзора до 360° . Это позволяет системе с лазерным сканером решить как задачи навигации и избегания столкновений, так и построения трехмерных карт в реальном масштабе

времени.

Среда разработки роботов динамично развивается и для того чтобы изобретатели могли делиться опытом, находить новые решения для поставленных задач по всему миру проводятся соревнования роботов. Соревнования проходят практически для всех категорий роботов. Однако в рамках данной работы подробно будет рассмотрен регламент соревнований именно для мобильных роботов — следование по линии. Именно на этих соревнованиях используются мобильные роботы с датчиками полосы. Но в рамках данной работы мы будем разрабатывать робота не для соревнований, а для учебных целей — проведения лабораторных работ по курсу «Микропроцессорная техника». Однако, и при проектировании робота мы будем руководствоваться правилами именно этих соревнований.

Условия состязания — за наиболее короткое время робот, следуя черной либо белой линией, должен добраться от места старта до места финиша. На прохождение дистанции дается максимум 5 минут.

Если робот потеряет линию более чем на 5 секунд, он будет дисквалифицирован. Покидание линии, при котором любая часть робота не находится над линией, может быть допустимо только по касательной, и не должно быть больше чем три длины корпуса робота. Длина робота в этом случае считается по колесной базе. Во время проведения состязания участники команд не должны касаться роботов.

Трасса представляет собой полигон, с нарисованными на нем линиями (см рисунок 1.4). Цвет полигона — белый, черный. Поле может иметь



Рисунок 1.4 — Полигон для соревнований следования по линии

шахматную раскраску. Цвет линии — инверсный относительно цвета полигона, ширина линии — 20 мм, минимальный радиус кривизны линии —

300 мм по осевой линии.

Допуск робота к состязаниям — максимальная ширина 30 см, длина — 40 см. Вес робота не должен превышать 10 кг. Робот должен быть автономным.

Правила отбора победителя — на прохождение дистанции каждой команде дается не менее двух попыток (точное число определяется судейской коллегией в день проведения соревнований). В зачет принимается лучшее время из попыток. Победителем будет объявлена команда, потратившая на преодоление дистанции наименьшее время. Если робот потеряет линию более чем на 5 секунд и/или «срежет» траекторию движения, он будет дисквалифицирован.

1.4. Определение собственных координат в локальном пространстве

Очередная разработка японских ученых — робот-грузчик, или робот-перевозчик, как угодно, сейчас находится на стадии тестирования и показывает очень неплохие результаты. Эта машина под названием Intelligent Carry («Умный носильщик», если переводить буквально) пригодится для работы на складах и на предприятиях, где необходимо доставлять грузы или предметы из одного помещения в другое или в одном большом пространстве. Работает Intelligent Carry в помещениях с радиусом примерно в 30 м. Робот-доставщик Intelligent Carry представлен на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 — Робот-доставщик Intelligent Carry

Данная разработка инженеров из компании Hitachi подобна детищу Muratech — MKR 003, роботу-санитару, который предназначен для работы в больничных отделениях для доставки лекарств больным. Также как и в случае с MKR 003, Intelligent Carry может автономно передвигаться по заданному маршруту без необходимости управления им оператором. Функционирует данный робот-перевозчик на базе специального алгоритма SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) — системы одновременной локализации и картирования. Эта система позволяет Intelligent Carry один раз запомнить маршруты своего передвижения, чтобы затем безошибочно узнавать их и доставлять нужные предметы быстро и, определяя самый короткий и удобный путь.

С препятствиями Intelligent Carry справляется также умело: в нем встроены целых два набора лазерных сенсоров. Это немецкие лазерные сенсоры SICK и еще один набор от японской компании Hokuuo. Даже если робот будет передвигаться по изведанному маршруту и встретит препятствие, не обозначенное на его собственной карте, он без проблем обойдет преграду.

Как сообщают инженеры — создатели Intelligent Carry, данный механизм способен развивать скорость до 7,2 км/ч и перевозит грузы весом до 1000 кг. Для маневренного движения роботу-перевозчику не нужны маркеры и определители границ движения. Ожидается, что в продажу Intelligent Carry поступит в 2015 году и принесет Hitachi прибыль в \$47 миллионов за первый год.

1.5. Системы сканирования пространства

Южнокорейская компания Mint Pass заявила о выпуске домашнего робота Music Tank, который весьма понравится истинным меломанам. Робот способен воспроизводить музыку и любую другую звуковую информацию и при этом двигаться по дому вслед за своим хозяином. Фактически это две миниатюрные самоходные аудиоколонки на гусеничном приводе. Робот Music Tank изображен на рисунке 1.6.

Робот оснащен чувствительными сенсорными датчиками, благодаря которым он способен сканировать пространство и улавливать тепловое излучения человеческого тела. Встроенные беспроводные Wi-Fi и Bluetooth — интерфейсы позволяют хозяину даже задавать место, куда робот должен прибыть, если он «заблудился». Так же экран дисплея на пульте управления отражает всю информацию о состоянии робота - уровень зарядки, объем памяти, характеристики воспроизводимого звукового материала.

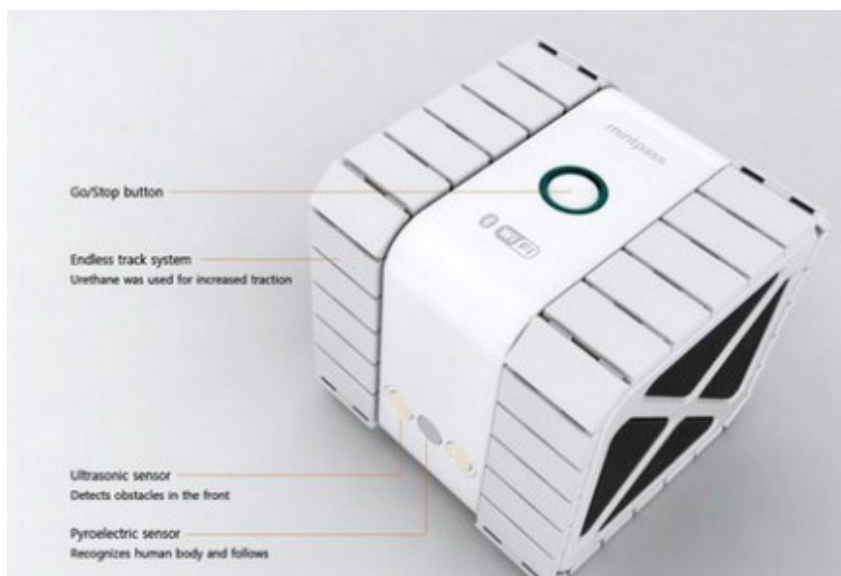


Рисунок 1.6 — Робот Music Tank

Робот Music Tank является первым в серии подобных продуктов, которые компания Mint Pass планирует выпустить на рынок. Поэтому у робота предусмотрена возможность взаимодействия с «себе подобными» автоматизированными плеерами, что позволит обладателям создавать целую самоходную акустическую систему.

1.6. Карта местности и привязка к ней

Робот-пылесос от калифорнийской компании Neato Robotics. Начало продаж Neato XV-11 состоялось в 2010 году. Внешний вид робота Neato XV-11 представлен на рисунке 1.7.

Робот Neato составляет карту комнаты и движется по запланированной траектории, покрывая пространство с минимальным перекрытием. Это возможно, так как Neato оборудован сканирующим лазерным дальнометром, который вращается на 360 градусов и позволяет роботу построить карту помещения (используется алгоритм SLAM). Так же, Neato умеет определить местоположение зарядного устройства и самостоятельно возвращаться для подзарядки; при этом он может продолжить уборку помещения с места, на котором она была прервана.[20]

На вершине полумесяца XV-11 установлен ключевой сенсор Neato — лазерный сканирующий дальномер. Использование этого сенсора и позволяет роботу построить двумерную карту помещения (при помощи SLAM), на которой уже прокладывается маршрут уборки.

Так же, лазерный дальномер позволяет роботу избегать препятствия и всё время контролировать изменения окружающей обстановки (напри-



Рисунок 1.7 — Робот Neato XV-11

мер, вернуться к зоне, которая раньше была недоступна). SLAM позволяет Neato выполнить уборку быстрее и эффективнее, т.к. робот не будет вслепую наматывать спирали, наткаться бампером на предметы, а может двигаться более системно, начиная с одного края, а затем двигаясь назад и вперед по всей длине помещения, пока уборка не будет завершена. Траектория движения робота изображена на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 — Траектория движения робота Neato

Построение «умной системы» — основное преимущество робота перед конкурентами. На роботе установлены встроенный компьютер и лазерный сканирующий дальномер, которые позволяют роботу строить карту помещения, после чего спланировать траекторию уборки с минималь-

ным перекрытием, чтобы не убирать одно место дважды, что позволило использовать более мощный пылесос.

Впоследствии, разработчиками Neato было добавлено определение дверных проемов, т.о. робот может совершить сначала «объезд территории» и составить карту всего помещения, а потом спланировать маршрут уборки помещения.

1.7. Иерархическая структура системы управления роботом

При построении системы навигации роботов возникает немало технических сложностей, решение которых возлагается на систему управления. Рассмотрим их более подробно.

Чтобы двигаться к цели, роботу необходимо сформировать достаточно точный образ окружающего его пространства. Сегодня это достигается преимущественно использованием лазерных дальномеров и ультразвуковых излучателей (сонаров). Однако лазерный луч поможет получить образ среды только в зоне прямой видимости. Кроме того, на пути луча часто возникают мелкие помехи, вносящие погрешность в такой образ. А ультразвуковые датчики характеризуются большим временем отклика (если робот находится на большом и открытом пространстве), порядка десятых долей секунды, что не позволяет роботу перемещаться быстро. Скорость звука в разных условиях также может «плавать», влияя на точность оценки расстояния, в результате в «голове» робота искажается общая картина окружающей среды. Создание трехмерных карт с помощью лазеров в масштабе реального времени еще более затруднительно и, как минимум, требует существенных вычислительных мощностей, которые пока не удастся воплотить в виде компактных бортовых плат. По этим причинам ценность информации, поступающей от бортовых датчиков, невелика. Роботу необходимо перевести ее в формальное и структурированное «словесное» описание мира (задача распознавания), что пока получается плоховато. Наибольший эффект здесь обещают дать системы машинного зрения, но они также еще несовершенны. Вместе с тем данный недостаток уже преодолен в проектах, где роботы действуют в зданиях и в любой другой предопределенной обстановке.

Перспективной идеей оказалось хранение в памяти машины полной карты местности. Обычно она представляется в геометрическом (очень подробно, но и очень объемно) либо топологическом (компактно, условными обозначениями, но менее подробно) виде. Наилучший результат дают трехмерные карты, однако их хранение и обработка бортовой систе-

мой работа затруднены: нужны слишком большие по сегодняшним меркам вычислительные ресурсы. А самое главное, роботу далеко не всегда удастся правильно определить свое реальное местонахождение на такой карте.

Ведется множество исследовательских работ по обучению автономных аппаратов методам самостоятельного построения карт местности. Эта область активно финансируется военными, заинтересованными в автоматизации процессов построения карт любой области Земли. Пока эти исследования не имеют серьезных практических воплощений в системах реального времени. Впрочем, препятствие к этому заключается не столько в слабости алгоритмов, сколько в относительно медленных бортовых процессорах.

В ходе движения робот должен быстро и точно управлять мотором и положением колес. Некоторые задачи робототехники в принципе не допускают точного решения (это, например, задача управления крутящим моментом электромотора таким образом, чтобы робот неукоснительно следовал маршруту). В других задачах, связанных с динамикой движения роботов (область теоретической механики), до нахождения ответа еще очень далеко, а поиск приближенных коэффициентов, определяющих параметры движения, требует от бортового устройства постоянного решения систем дифференциальных уравнений.

Робот должен знать свое реальное местонахождение, а оно почти всегда отличается от хранящегося в бортовой системе. Определение своих координат — фундаментальная задача навигации, ответ на которую интересен не только робототехникам, но и специалистам из множества других областей — прежде всего космической, авиационной и автомобильной.

Общая функциональная схема оцувствленного робота, снабженного системой технического зрения (возможно, вместе с другими датчиками внешней информации), показана на рисунке 1.9. Сенсорная система робота должна снабжать его систему управления информацией о текущей ситуации во внешней среде: наличии, типе, параметрах, местоположении и ориентации объектов манипулирования (воздействия); правильности и качестве выполнения роботом технологических операций и/или других действий; существовании препятствий и путях их обхода и т. д. В систему управления поступают также задания (команды) роботу от человека-оператора, других роботов, ЭВМ высших уровней, технологического оборудования или иных устройств.

В современных робототехнических системах наиболее предпочтительна многоуровневая иерархическая структура управления [39, 34]. В соответствии с приведенной схемой информация от системы техническо-

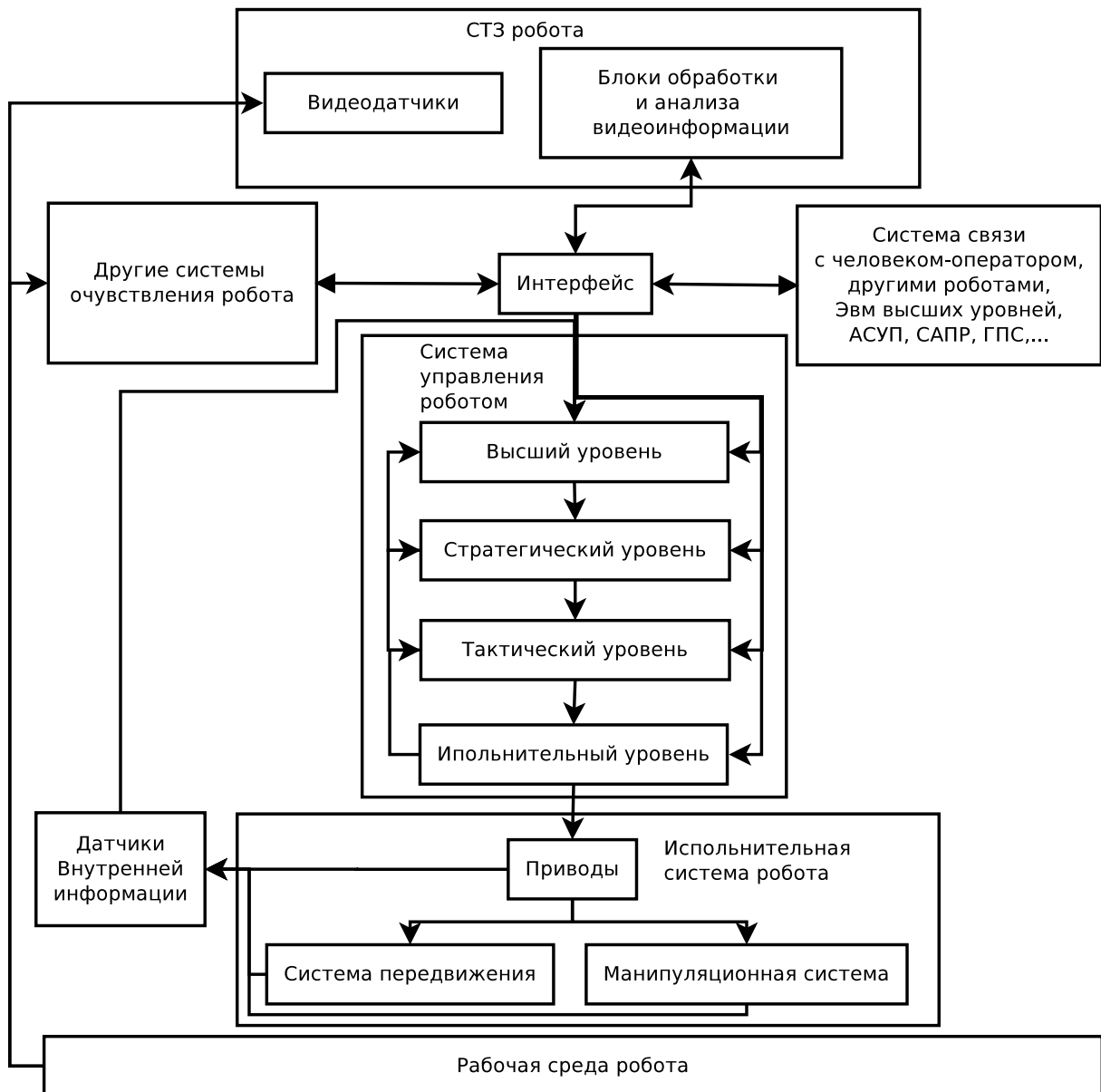


Рисунок 1.9 — Функциональная схема иерархической системы управления робота

го зрения, вообще говоря, может поступать на разные уровни системы управления. Например, данные о расположении препятствий нужны на верхнем уровне для построения модели рабочей среды в целях планирования действий робота; результаты классификации объектов необходимы на стратегическом уровне для расчленения общего плана действий на конкретные манипуляционные операции, задания их последовательности и параметров; сведения о местоположении и ориентации объектов необходимы для формирования на тактическом уровне требуемых движений робота, по которым, в свою очередь, строятся программные законы согласованного изменения соответствующих степеней подвижности: информа-

ция об отклонении фактической траектории от запрограммированной может быть использована непосредственно на исполнительном уровне для выработки управляющих сигналов на приводы при отработке программы в целях коррекции перемещения рабочего органа робота.

Независимо от способа размещения видеосенсоров, полученная с их помощью информация используется для управления адаптивным роботом в соответствии с одним из двух следующих принципов. Первый базируется на непрерывном (или квазинепрерывном) поступлении видеосигнала обратной связи для коррекции траектории движения робота. По этому принципу действуют сервосистемы, минимизирующие отклонения текущего положения от желаемого, которое определяется по данным визуального наблюдения за целевым объектом. Второй принцип основан на вводе информации от видеосенсора в устройство управления робота дискретными порциями. Каждая такая порция служит для выработки программных движений на очередной интервал времени, в течение которого робот перемещается в следующее целевое положение «вслепую», т. е. без непрерывной визуальной обратной связи.

Каждый из указанных принципов использования видеоинформации для управления роботами имеет свою сферу приложения. Так, адаптивные сварочные роботы, визуально определяя стык свариваемых деталей, корректируют движение головки вдоль шва при непрерывном поступлении сигнала обратной связи. Такой способ находит применение при взятии движущихся деталей с конвейера, слежении за полосой, направляющей движения мобильного робота, поддержании заданного расстояния до ведущего робота и т. п. В рамках этого подхода в последние годы разрабатываются методы визуального сервоуправления непосредственно по виду получаемого СТЗ изображения или по параметрам, рассчитываемым в результате его обработки. Хотя системы с «визуальным сервоуправлением», несомненно, перспективны, до сих пор намного шире распространены видеосенсоры, основанные на втором из описанных выше принципов — «целуказании».

В простейшем случае по результатам работы видеосенсора на основании априорно указанных условий принимается решение только о запуске или останове (прерывании) заранее заданной программы действий робота, уходе на ту или иную жесткую подпрограмму, изменении последовательности выполнения команд управляющей программы, полная информация о каждой из которых должна быть внесена в управляющее устройство еще до начала работы робота.

Более широкие возможности обеспечиваются при адаптивном изменении самих управляющих программ робота в соответствии с фактической

обстановкой, определяемой по информации от видеосенсора. Адаптивные роботы способны автоматически формировать движения в процессе работы без необходимости априорного указания человеком детальных законов изменения всех управляемых координат.

Глава 2

Организация управления траекторным движением. Движение по полосе

2.1. Математическая модель движения тележки робота

Рассмотрим организацию нижнего уровня системы управления траекторным движением мобильного робота на примере трехколесного робота с двумя независимыми ведущими колесами. В приводе такого робота используются два электродвигателя, каждый из которых вращает одно из двух ведущих колес. Третье колесо пассивное и является опорным. Это колесо может свободно поворачиваться вокруг вертикальной оси и называется флюгерным.

На рисунке 2.1 схематично показан рассматриваемый мобильный робот.

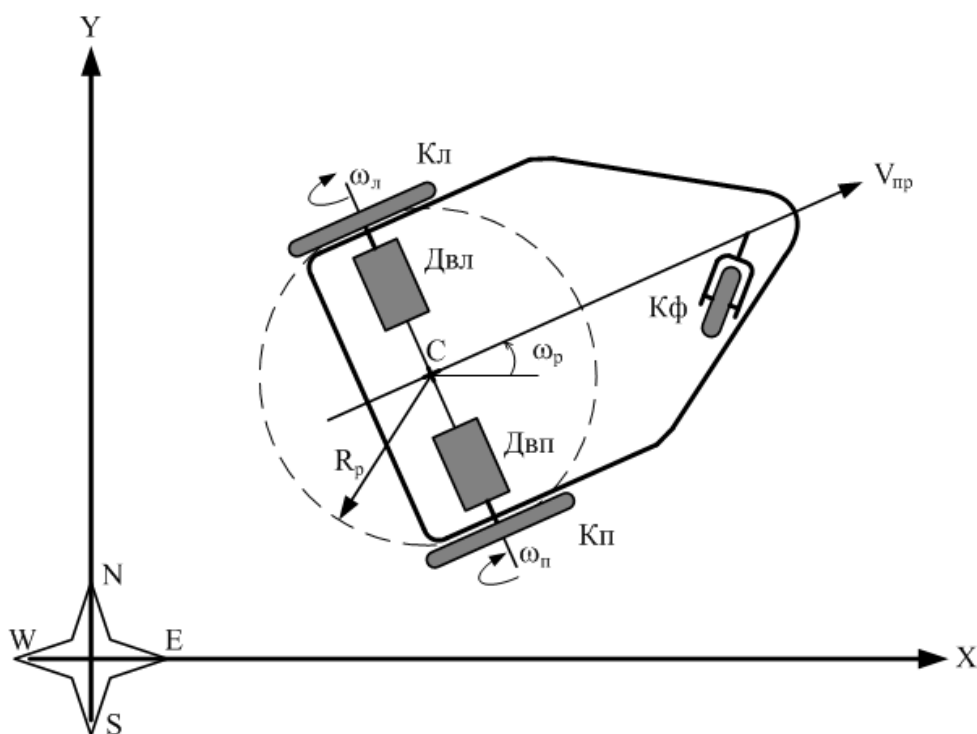


Рисунок 2.1 — Мобильный робот с двумя ведущими колесами

Относительно продольной оси робота выделим правый Двп и левый Двл электродвигатели. Электродвигатели приводят во вращение ведущие колеса — правый Кп и левый Кл, соответственно. Флюгерное колесо Кф

является пассивным и оказывает незначительное влияние на движение робота.

Движение робота по плоскости опишем изменением координат точки C во времени. В точке C поместим начало координат собственной системы координат робота. При выводе уравнений движения мобильного робота будем предполагать, что проскальзывания ведущих колес отсутствуют, а флюгерное колесо не оказывает влияния на характер движения робота. Движение точки C зададим продольной (линейной) скоростью движения робота $V_{пр}$ и угловой скоростью вращения ω_p относительно вертикальной оси. Эти две переменные позволяют задать изменение координат робота на плоскости, но не позволяют определить его положение и ориентацию, т.е. локализовать положение робота в окружающем пространстве. Для решения задачи локализации положения обычно вводят неподвижную систему координат, привязанную к некоторой характерной точке окружающего пространства, оси которой направлены в направлениях юг-север, запад-восток.

Величина продольной скорости движения робота $V_{пр}$ определяется, как средняя скорость линейного перемещения каждого из ведущих колес, т.е.

$$V_{пр} = \frac{(\omega_{л} + \omega_{п})}{2} \cdot r_{к}, \quad (2.1)$$

где: $\omega_{п}$, $\omega_{л}$ — угловые скорости вращения правого и левого ведущих колес, соответственно; $r_{к}$ — радиус колеса. При различии угловых скоростей вращения ведущих колес, кроме линейного перемещения со скоростью $V_{пр}$, возникает вращательное движение вокруг вертикальной оси, проходящей через точку C . Угловая скорость вращения выражается через угловые скорости вращения колес, как:

$$\omega_p = \frac{(\omega_{л} - \omega_{п})}{2} \cdot \frac{r_{к}}{R_p}, \quad (2.2)$$

где: R_p — полуширина колесной базы робота (радиус вписанной окружности с центром в точке C).

Управление движением робота выполняется за счет подачи управляющих напряжений на ведущие электродвигатели. При известных значениях параметров передаточных функций по скорости $W_{дп}(s)$, $W_{дл}(s)$ для правого и левого электродвигателей легко получить связь между изображениями Лапласа угловых скоростей вращения колес и управляющих напряжений в виде:

$$\begin{aligned} \omega_{п}(s) &= W_{дп}(s) \cdot U_{п}(s), \\ \omega_{л}(s) &= W_{дл}(s) \cdot U_{л}(s), \end{aligned} \quad (2.3)$$

где: $U_{\Pi}(s)$, $U_{\text{Л}}(s)$ — изображения Лапласа управляющих напряжений; s — независимая переменная преобразования Лапласа. Уравнения (2.1) — (2.3) описывают движение точки C на плоскости при приложении к электродвигателям управляющих напряжений, т.е. являются математической моделью (в линейном приближении) исполнительской части мобильного робота [31].

На рисунке 2.2 показана структурная схема исполнительской части мобильного робота.

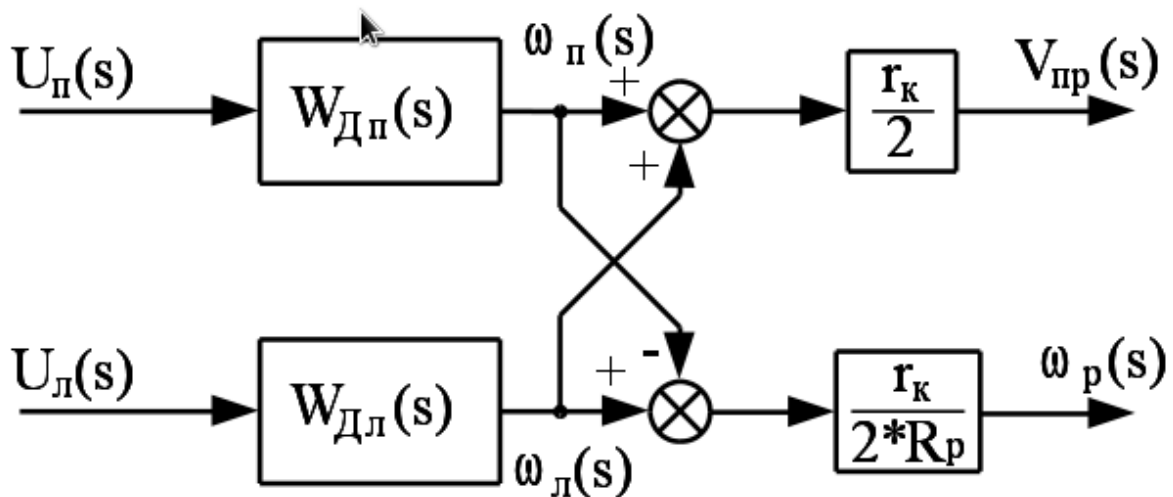


Рисунок 2.2 — Структурная схема исполнительской части мобильного робота

Независимые управляющие напряжения, обозначенные переменными $U_{\Pi}(s)$, $U_{\text{Л}}(s)$, преобразуются динамическими звеньями $W_{\text{Д}\Pi}(s)$, $W_{\text{Д}\text{Л}}(s)$ в угловые скорости вращения колес, обозначенные переменными $\omega_{\Pi}(s)$, $\omega_{\text{Л}}(s)$. Далее эти переменные посредством несложных алгебраических действий в соответствии с формулами (2.1) и (2.2) при известных значениях конструктивных констант r_k и R_p преобразуются в выходные переменные $V_{\text{пр}}(s)$ и $\omega_p(s)$. Для организации управления таким объектом целесообразно организовать локальные контуры управления скоростями вращения ведущих колес, управление продольной скоростью перемещения $V_{\text{пр}}$ и угловой скоростью вращения робота ω_p . Для этого в первую очередь необходимы датчики регулируемых переменных.

2.2. Инкрементный датчик угла поворота колеса

Для измерения скорости вращения ведущего колеса могут быть использованы различные датчики. Классическим датчиком скорости вращения вала является тахогенератор — аналоговое измерительное устрой-

ство, преобразующее угловую скорость вращения вала в величину электрического напряжения [31]. В современной технике чаще используется энкодер — цифровой инкрементный датчик угла поворота вала. Этот датчик обладает более высокой стабильностью работы, чем тахогенератор, и обеспечивает меньшую погрешность измерений. Современная промышленность выпускает энкодеры в виде отдельных законченных устройств. Рассмотрим принцип действия такого датчика на примере оптического энкодера.

Датчик строится на основе кольцевого оптического растра, механически связанного с валом колеса робота. В качестве растра может быть использован прозрачный (например стеклянный) диск с нанесенными на его поверхности непрозрачными секторами, либо непрозрачный (например металлический или пластмассовый) диск с прорезями. Диск крепится на валу колеса и вращается вместе с ним. Для снятия информации о вращении диска применяется оптопара: светодиод — фотоприемники. Светодиод И1, расположенный с одной стороны диска, излучает световой поток. Этот поток, проходя сквозь прорези попадает на фотоприемники ФП1 и ФП2, расположенные с другой стороны диска [48, 9], как показано на рисунке 2.3.

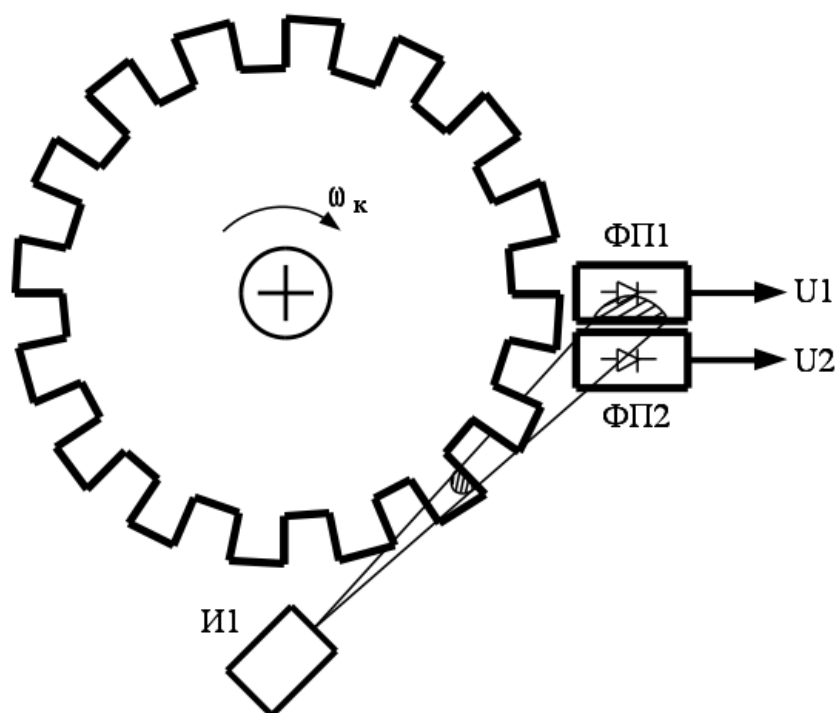


Рисунок 2.3 — Устройство простейшего оптического энкодера

Выходные сигналы U_1 (канал А) и U_2 (канал Б) фотоприемников обычно формируют в прямоугольные импульсы с помощью компараторов. При повороте диска на один оборот на выходе каждого фотоприем-

ника сформируется N импульсов, где N — число прорезей на диске. При вращении диска с угловой скоростью ω_k частота следования импульсов на выходе каждого из фотоприемников будет равна

$$f = \frac{N \cdot \omega_k}{2\pi}. \quad (2.4)$$

Частота следования импульсов f линейно связана с частотой вращения диска, а следовательно и с частотой вращения ведущего колеса ω_k . Поэтому в системе управления измеряется частота следования импульсов f (реже — период следования импульсов) на выходе энкодера, по которой вычисляется скорость вращения колеса.

Энкодер называют инкрементным, так как информация о вращении диска проявляется в поступлении импульсов от фотоприемников за определенное время. Основная проблема энкодера заключается в том, что частота поступающих импульсов не зависит от направления вращения колеса. Другими словами простой подсчет числа импульсов в единицу времени не позволяет определить направления вращения колеса.

Для разрешения указанной проблемы в энкодере используется два фотоприемных канала. На рисунке 2.4 показаны временные диаграммы изменения сигналов U_1 и U_2 для двух случаев: а) — в случае вращения колеса по часовой стрелке, и б) — в случае вращения колеса против часовой стрелки.

При вращении колеса по часовой стрелке световой поток сначала попадает на фотоприемник ФП1, а затем на фотоприемник ФП2. В результате выходной сигнал U_2 запаздывает относительно выходного сигнала U_1 . Если проверить состояние сигнала U_2 в момент спада сигнала U_1 , что отмечено пунктирной линией на рисунке 2.4, то всегда оно будет равно единице.

При вращении колеса против часовой стрелки, ситуация будет противоположной. Сигнал U_1 будет запаздывать относительно сигнала U_2 . При проверке состояния сигнала U_2 в момент спада сигнала U_1 , то в результате будет получаться ноль. Таки образом проверка состояния сигнала U_2 в момент спада сигнала U_1 позволяет определить направление вращения колеса.

Алгоритм обработки сигналов энкодера обычно строится следующим образом: приход очередного импульса сигнала U_1 на вход схемы обработки означает, что колесо повернулось на угол

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot \pi}{N},$$

пройден дополнительный путь

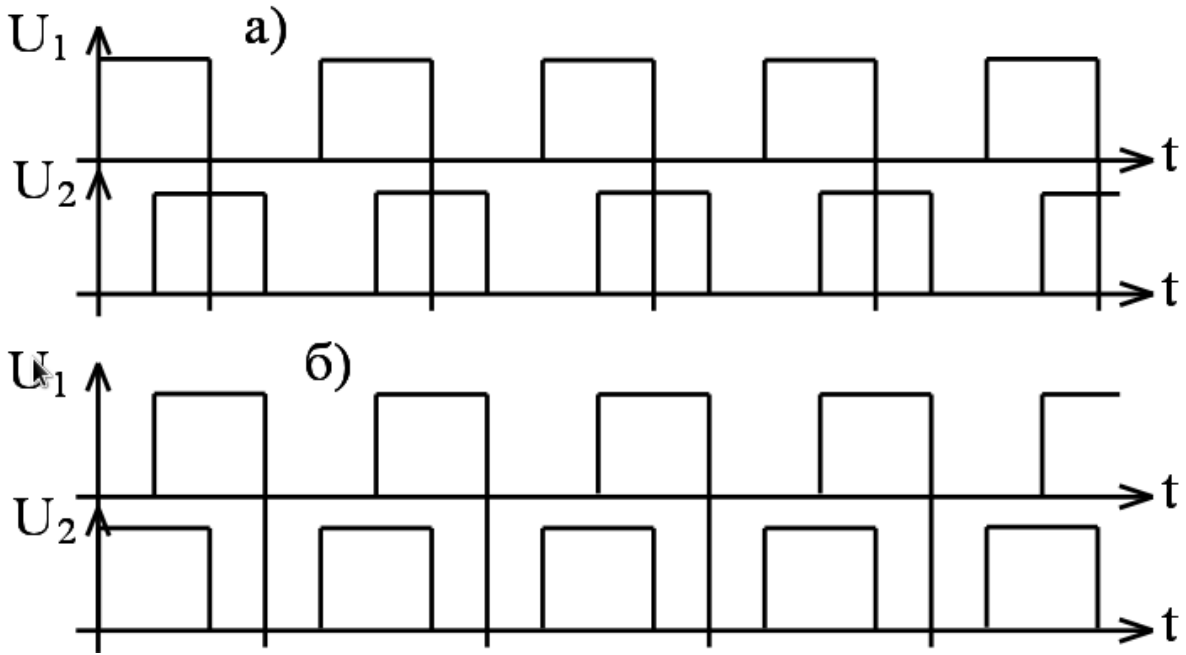


Рисунок 2.4 — Временные диаграммы работы энкодера в случаях вращения колеса а) — по часовой стрелке, б) — против часовой стрелки

$$\Delta l = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_k}{N},$$

где: N — число прорезей на диске; r_k — радиус колеса. Для определения угла поворота или пройденного пути используется специальный счетчик импульсов сигнала U_1 . По заднему фронту импульса U_1 проверяется состояние сигнала U_2 . Если состояние сигнала U_2 равно единице, то содержимое счетчика увеличивается на единицу, иначе — уменьшается на единицу. В результате такой обработки число в счетчике пропорционально углу поворота колеса или пройденному пути, а приращение числа за фиксированное время пропорционально скорости вращения колеса.

Другая проблема применения энкодера связана с отсутствием начала отсчета, т.е. отсутствием измерительного нуля. Действительно, инкрементный энкодер позволяет определить приращение угла поворота колеса относительно некоторого начального положения, которое никак не определяется. Выпускаемые промышленностью энкодеры часто имеют специальный третий фотоприемник и особую прорезь на диске, позволяющие определить начало отсчета импульсов в пределах одного оборота диска. Однако в робототехнике определение абсолютного положения колеса в пределах одного оборота не является важной задачей. Приведенная на рисунке 2.2 модель тележки робота требует перемещения робота не относительно колеса, а в неподвижной системе координат, не связанной с

роботом. Более того, проблема нуля не важна, если энкодер используется в качестве датчика скорости вращения колеса, что характерно для задач робототехники. Поэтому энкодер в рассматриваемых задачах относят не к датчикам положения, а к датчикам приращения угла колеса.

В структурной схеме системы управления роботом энкодер представляется математической моделью. Вид модели зависит от алгоритма обработки сигнала энкодера и от принятых допущений. Обычно выходные сигналы энкодера подают на входы микроконтроллера, имеющего в архитектуре аппаратный счетчик внешних импульсов. Подсчет импульсов энкодера осуществляется счетчиком за определенный период времени T , задаваемый с помощью таймера микроконтроллера. В результате с периодом T с счетчика программно может быть считано число N_ω , пропорциональное угловой скорости вращения вала энкодера (колеса робота). Так как число в счетчике импульсов может быть только целым, то в соответствии с (2.4) значение N_ω определяется, как

$$N_\omega = \text{int}(T \cdot f)$$

или

$$N_\omega = \text{int}\left(\frac{N \cdot T}{2\pi} \omega_k\right), \quad (2.5)$$

где: $\text{int}(\cdot)$ — операция выделения целой части; N — число прорезей на диске; ω_k — угловая скорость вращения вала энкодера.

Обычно при синтезе систем управления для упрощения расчетов пренебрегают эффектом квантования уровня сигнала в цифровых датчиках. При таком подходе энкодер представляется импульсным элементом, работающим с периодом квантования времени, равным T , а выражение (2.5) заменяется более простым:

$$N_\omega = \frac{N \cdot T}{2\pi} \omega_k. \quad (2.6)$$

В результате энкодер представляется линейным дискретным звеном с коэффициентом передачи

$$K_\omega = \frac{N \cdot T}{2\pi}. \quad (2.7)$$

На рисунке 2.5 показано представление энкодера в структурной схеме, как элемента измерения скорости вращения вала. Так, если диск энкодера содержит $N = 1000$ прорезей, а период съема информации с счетчика импульсов составляет 20 мс., то в соответствии с (2.7) коэффициент передачи будет равен $K_\omega = 1000 \cdot 0,02/6,28 = 3,18$ с/рад. При использовании в микроконтроллере 8-битового счетчика импульсов, способного

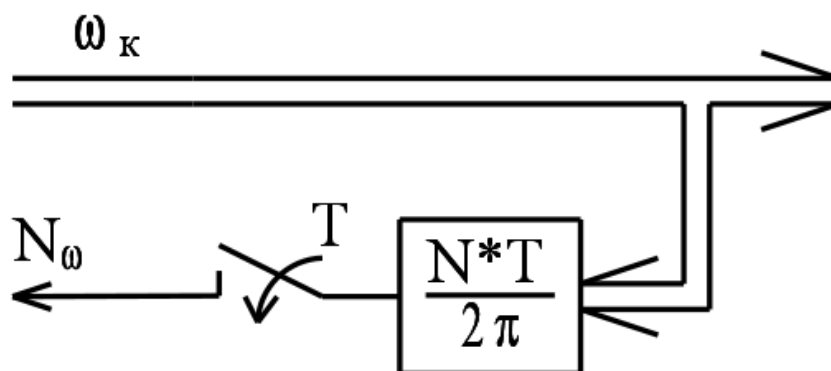


Рисунок 2.5 — Структурное представление энкодера, как датчика угловой скорости вращения вала

считать импульсы от 0 до 255, диапазон измеряемых угловых скоростей составит от 0 до $255/3,18 = 80$ рад/с. Расширить диапазон измеряемых скоростей можно за счет использования например 16-битового счетчика. Однако следует помнить, что в силу эффекта квантования уровня сигнала разрешающая способность такого датчика будет равна $1/K_э$, которая в рассматриваемом примере составит 0,314 рад/с независимо от разрядности используемого счетчика импульсов. Другими словами, минимальная отличная от нуля скорость, которую сможет зафиксировать такой датчик, будет равна 0,314 рад/с. Это значение определяется конструктивным параметром энкодера N и выбранным периодом квантования времени T .

Таким образом в системе управления роботом для измерения скоростей вращения колес можно использовать цифровые датчики приращения углов — энкодеры. Информация от этих датчиков может использоваться для организации управления приводными электродвигателями, а также для вычисления скорости продольного перемещения $V_{пр}$, угловой скорости вращения ω_p робота и пройденного пути.

2.3. Магнитный датчик угла разворота робота (электронный компас)

Задача траекторного управления робота часто требует измерения направления движения робота в неподвижной системе координат. Направление движения робота задается углом α_p , образуемым вектором скорости продольного перемещения и осью X неподвижной системы координат, как показано на рисунке 2.1. Вычисление указанного угла α_p по данным энкодеров оказывается невозможным, так как энкодеры измеряют изменения углов поворота колес относительно подвижной системы координат

нат, связанной с роботом. Другими словами, по данным энкодеров можно вычислить угловую скорость вращения робота в горизонтальной плоскости, интегрируя которую по времени можем получить значение угла α_p с точностью до произвольной постоянной. Поэтому для измерения угла поворота α_p необходимо использовать специальный датчик.

Как указывалось выше, задача определения значения угла α_p ориентации робота может быть существенно упрощена, если оси неподвижной системы координат ориентированы относительно сторон света. Для определенности можно считать, что положительное направление оси X совпадает с направлением на восток, а положительное направление оси Y совпадает с направлением на север, определяемым по показаниям магнитного компаса. В этом случае направление движения может быть считано с магнитного компаса, установленного на тележке робота.

Современная промышленность выпускает магниточувствительные электронные элементы, позволяющие создать магнитный компас без использования подвижных механических элементов. Для того, чтобы лучше понимать работу таких элементов, напомним основные свойства магнитного поля Земли. Магнитное поле можно количественно характеризовать двумя способами: либо величиной силы, действующей на постоянный магнит, либо величиной импульса электрического напряжения, индуцируемого в пробной катушке при наложении или снятии поля.

При использовании постоянного магнита определяют так называемую напряженность магнитного поля. Так как магнитные полюсы не существуют по отдельности, то на северный и южный полюсы магнита действуют противоположные силы и возникает момент пары сил. Этот момент характеризует вектор напряженности поля H в данном месте. Направление вектора напряженности магнитного поля в каждой точке совпадает с направлением силовых линий. Внутри магнита он направлен от южного полюса к северному, вне магнита — от северного полюса к южному.

Напряженность магнитного поля H измеряется в амперах на метр (А/м). Иногда напряженность магнитного поля указывают в старых единицах измерения — эрстедах (Э). Названа эта единица была в честь датского физика Ганса Эрстеда (1777–1851), открывшего связь между электрическими и магнитными явлениями. Связь между единицами следующая:

$$1 \text{ Э} = \frac{1000}{4\pi} \text{ А/м} = 79,6 \text{ А/м}.$$

Единица измерения напряженности магнитного поля эрстед не принадлежит к СИ и с 1980 г. не допускается к применению.

Какова же напряженность магнитного поля Земли? Она везде разная и варьирует от 19 А/м (в Бразилии) до 54 А/м (в Антарктиде). Считается, что в среднем напряженность геомагнитного поля равна 39,8 А/м. В местах, где встречаются большие залежи ферромагнитных материалов (железных руд), возникают магнитные аномалии. В России широко известна Курская магнитная аномалия, где напряженность поля достигает 160 А/м [1].

При использовании для характеристики поля пробной катушки определяют магнитную индукцию. Магнитной индукцией B называют приходящееся на один виток отношение площади под кривой импульса напряжения, индуцированного в катушке, к площади сечения катушки. В системе СИ магнитная индукция измеряется в тесла (Тл). Магнитная индукция — векторная величина. В вакууме ее направление совпадает с направлением напряженности магнитного поля. Иногда магнитную индукцию указывают в старых единицах измерения — гауссах (Гс). Связь между единицами следующая: $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$. Единица измерения магнитной индукции Гс не принадлежит к СИ и с 1980 г. не допускается к применению.

Так как обоими способами количественно характеризуют одно и то же поле, то существует связь между определяемыми величинами. Для вакуума эта связь линейна:

$$B = \mu_0 H,$$

где: $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{с} / \text{А} \cdot \text{м}$ — магнитная постоянная. В соответствии с приведенными выше данными, среднее значение магнитной индукции поля Земли составляет $5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$.

Напомним, что магнитными полюсами Земли называются точки, в которых сходятся магнитные силовые линии. Магнитные полюса Земли не совпадают с ее географическими полюсами. Северный магнитный полюс находится в южном полушарии, в точке с координатами: $70^\circ 10'$ южной широты и $150^\circ 45'$ восточной долготы. Южный магнитный полюс находится в северном полушарии, в точке с координатами: $70^\circ 50'$ северной широты и 96° западной долготы. При этом точки схождения силовых линий земного магнитного поля находятся не на самой поверхности Земли, а под ней. Расстояние между ними равно 2300 километров, тогда как поперечник Земли — свыше 12000 км. Магнитная ось Земли, т.е. прямая, проходящая через оба магнитных полюса, не проходит через ее центр и, таким образом, не является диаметром Земли. Так как магнитные и географические полюсы Земли не совпадают, то магнитная стрелка компаса указывает направление север-юг только приблизительно. Плоскость, в которой устанавливается магнитная стрелка, называется **плоскостью**

магнитного меридиана данного места, а прямая, по которой эта плоскость пересекается с горизонтальной плоскостью, называется **магнитным меридианом**. Угол между направлениями магнитного и географического меридианов называют **магнитным склонением**. Величина магнитного склонения меняется от места к месту на земном шаре. Магнитное склонение называют **западным** или **восточным**, в зависимости от того, к западу или к востоку от плоскости географического меридиана отклоняется **северный** полюс магнитной стрелки. Величину склонения измеряют от 0 до 180° .

Силовые линии земного магнитного поля не параллельны поверхности Земли. Это значит, что напряженность магнитного поля Земли не лежит в плоскости горизонта данного места, а образует с этой плоскостью некоторый угол. Этот угол называется **магнитным наклоением**. Величина магнитного наклоения в разных местах Земли различна, что усложняет выполнение точных измерений глобальной угловой ориентации робота. Однако, в пределах помещения, цеха, здания или завода магнитное поле Земли достаточно стабильно. Если оси неподвижной системы координат привязаны к магнитному меридиану данной местности, то в задачах локальной навигации применение магнитных угловых измерений вполне приемлемы.

Для измерения характеристик магнитного поля применяются различные электронные или электромеханические устройства. Обычно датчики магнитного поля обеспечивают на выходе электрическое напряжение (разность потенциалов), пропорциональное величине магнитной индукции [49].

Самым известным и используемым устройством для измерения величины магнитной индукции является датчик Холла. Если через полупроводник в одном направлении пропускать постоянный ток I , а в другом направлении воздействовать магнитным полем с индукцией B , то в третьем направлении возникает электрическое напряжение V , меняющееся пропорционально магнитной индукции. Данное явление получило название эффекта Холла, по имени физика Эдвина Герберта Холла, открывшего этот эффект в 1879 году в тонких пластинках золота. Так как измеряемое напряжение меняет знак на обратный при изменении направления магнитного поля на обратное, то эффект Холла относится к нечетным гальваномагнитным явлениям. Зависимость величины напряжения от магнитной индукции поля линейная, поэтому, если прокалибровать связь между измеренным напряжением и величиной магнитного поля, можно использовать датчики на основе эффекта Холла для измерения величины неизвестных магнитных полей. Измерители на основе этого устройства проек-

тируются как пробники небольших габаритов, которые могут содержать один, два или три кристалла полупроводника для измерения магнитного поля в одно-, двух- или трех- взаимно перпендикулярных направлениях. Однако датчики на основе эффекта Холла обладают низкой чувствительностью и поэтому применяются для измерения сильных магнитных полей, для измерения магнитного поля Земли их чувствительности как правило не хватает.

Постоянное магнитное поле может быть также измерено вращающейся с постоянной скоростью катушкой индуктивности. Переменное напряжение, образующееся в катушке при пересечении линий магнитного поля, пропорционально величине магнитной индукции. В последнее время для измерения характеристик магнитного поля широко применяют датчики на основе анизотропных резистивных магниточувствительных материалов. Эти датчики не содержат подвижных механических элементов и изготавливаются в виде микросхем.

Принцип действия анизотропных магниторезистивных датчиков (АМР) основан на применении анизотропного магнитного эффекта, то есть на способности магниторезистивного материала, например пермаллоевой (NiFe) пленки, изменять сопротивление в зависимости от взаимной ориентации протекающего тока и вектора преимущественной намагниченности магнитных доменов пленки.

В настоящее время АМР — датчики находят всё большее применение в решении таких задач, как бесконтактное измерение скорости и направления вращения зубчатых колес и многополюсных магнитных роторов, определение угла поворота или величины линейного перемещения, бесконтактное измерение электрического тока (мощности), а также определение курса объекта по магнитному полю Земли [49].

Для примера рассмотрим АМР — датчик, выпускаемый в виде электронного модуля марки LSM303. Модуль построен на базе микросхемы LSM303DLH, которая сочетает в одном корпусе трех осевой цифровой МЭМС — акселерометр (МЭМС — микроэлектромеханическая система) и трех осевой магнитный датчик [59].

Цифровой магнитный датчик в компасе разработан на основе магниторезистивной технологии компании Honeywell (Anisotropic Magnetoresistive — AMR). Эта технология обеспечивает высокую стабильность измерений и высокую чувствительность к измеряемому магнитному полю при низком потреблении тока. Технология AMR имеет высокую стабильность измерения магнитного поля по всем осям (x , y , z), что снимает необходимость в концентраторах магнитного потока, как это требуется в случае использования датчиков Холла. Благодаря повышенной стабильно-

сти прибор способен определять направление поля в местах, где магнитное поле Земли ниже среднего, как например, в металлических зданиях, или в странах находящихся в высоких географических широтах (Россия, Канада, Норвегия, и т.д.). Вдобавок, магнитная часть этого датчика имеет встроенную систему отмены внутреннего смещения, что минимизирует процедуры калибровки датчика [59].

На рисунке 2.6 показан внешний вид модуля LSM303.

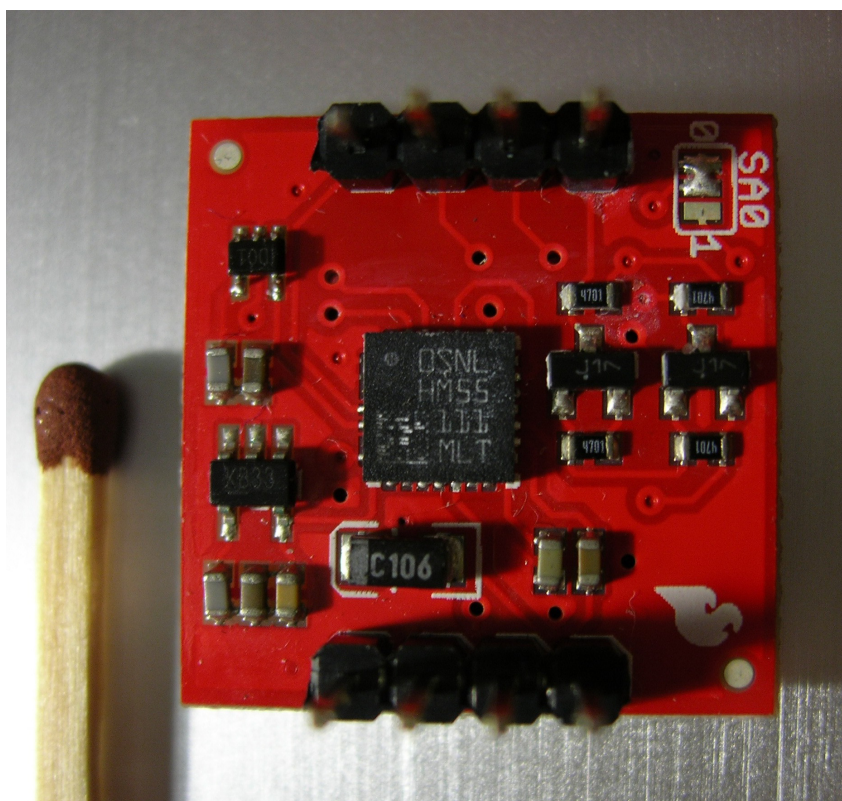


Рисунок 2.6 — Внешний вид модуля LSM303

Микросхема LSM303DLH установлена на печатной плате, размера 21x21 мм. По краям печатной платы установлены два штыревых разъема для подключения модуля к источнику питания и цифровым линиям связи с внешним микроконтроллером. В таблице 2.1 приведены основные технические характеристики микросхемы LSM303DLH [59].

Приведенные в таблице 2.1 параметры микросхемы позволяют сделать вывод, что микросхема обладает очень высокой чувствительностью к магнитному полю и позволяет измерять магнитную индукцию поля Земли в северных широтах. Погрешность измерения направления магнитного поля составляет порядка 1 угл. градуса, что обычно вполне достаточно для задач локальной навигации мобильных роботов.

На рисунке 2.7 показана архитектура микросхемы LSM303DLH.

Магниточувствительными элементами устройства являются магнито-

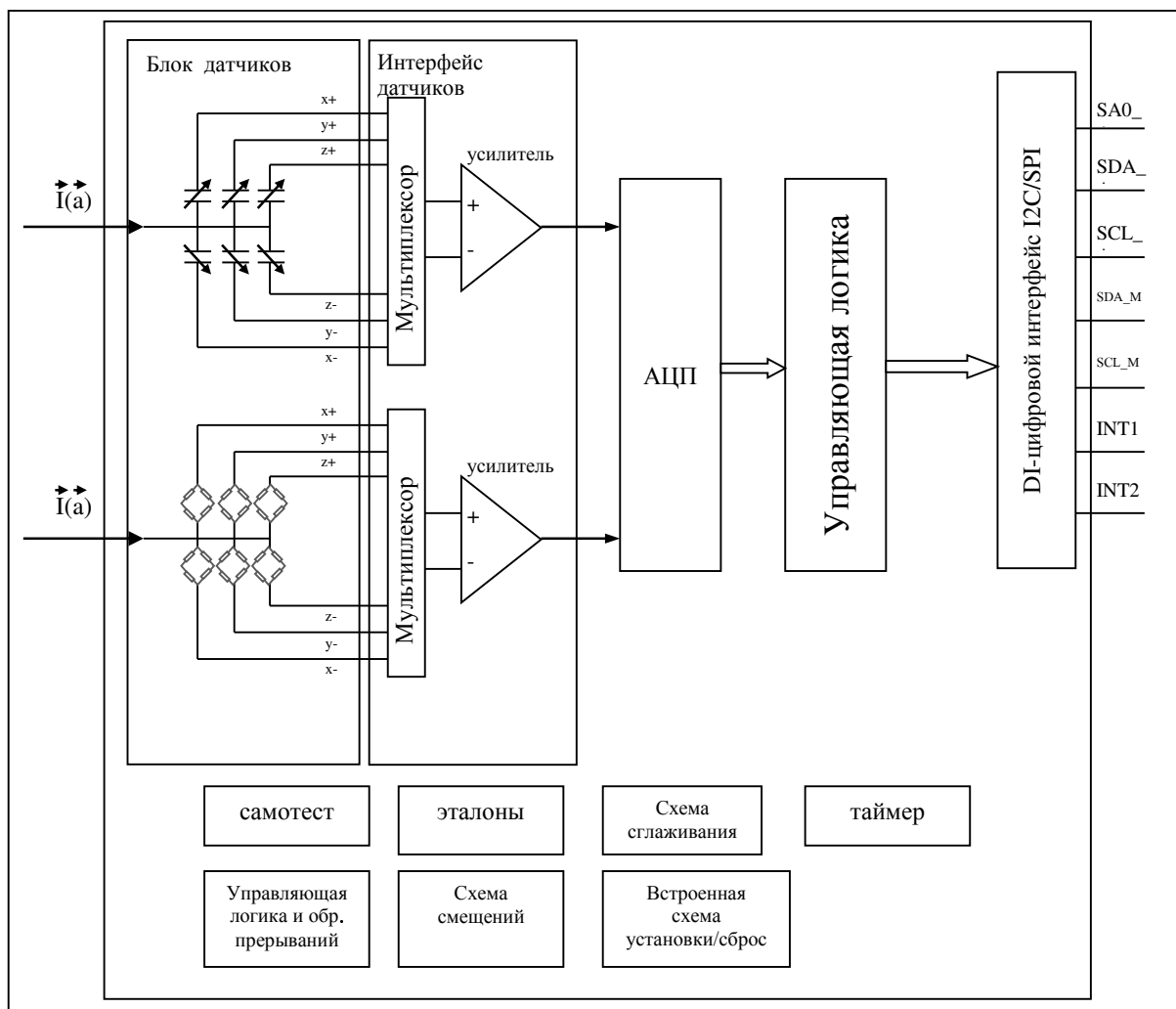


Рисунок 2.7 — Архитектура микросхемы LSM303DLH

чувствительные резисторы, включенные по схеме измерительного моста. Шесть измерительных мостов используются для преобразования изменения величин сопротивлений под действием внешнего магнитного поля по трем пространственным координатам в электрические напряжения. Эти напряжения коммутируются мультиплексором и после усиления преобразуются в цифровые эквиваленты с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Управляющая логика организует работу АЦП и позволяет передавать цифровые данные внешнему микроконтроллеру по цифровым линиям связи с интерфейсами I^2C и SPI. Аналогично построена схема обработки сигналов акселерометров. Блок датчиков акселерометров выполнен по технологии микроминиатюрных электромеханических систем, микроперемещение масс которой преобразуются в электрические сигналы емкостными датчиками перемещения. Вспомогательные

Таблица 2.1 — Основные технические характеристики микросхемы LSM303DLH

Характеристика		Диапазон
Напряжение питания, В		2,5 – 3,35
Диапазон рабочих температур, °C		-30 – +85
Диапазон измерений (регулируемый)	Магнитометр, $\times 10^{-4}$ Тл	-/ + 1,3, -/ + 1,9, -/ + 2,5, -/ + 4,0, -/ + 4,7, -/ + 5,6, -/ + 8,1
	Акселерометр, <i>g</i>	-/ + 2, -/ + 4, -/ + 8
Частота опроса датчика (выходная скорость данных), Гц	Магнитометр	7,5
	Акселерометр	50
Предельное значение магнитного поля, $\times 10^{-4}$ Тл		20
Размеры, мм		5 × 5 × 1
Цифровой интерфейс передачи данных		I2C
Разрядность выходных данных, бит		16
Диапазон измерений по азимуту, град.		0–259,9
Погрешность измерения угла по азимуту, град. (наклон в пределах ± 50 град.)		<2
Диапазон измерений по тангажу и крену, град.		-90 – +90
Погрешность измерения угла по тангажу и крену, град. (наклон в пределах ± 50 град.)		<1
Разрешение по тангажу, крену, азимуту, град.		0,1

цепи устройства осуществляют компенсацию воздействия внешней температуры,

подавление шумов сигнала путем его сглаживания, формирование эталонных электрических токов $I(a)$ в измерительной части и т.д. Все перечисленные элементы располагаются на одном кристалле микросхемы.

Кристалл микросхемы размещен в пластмассовом корпусе типа LGA-28L, имеющем 28 выводов. Габаритные размеры корпуса 5x5x1 мм, выводы для подключения электрических цепей расположены на его донной части, как показано на рисунке 2.8 а) и б). Первый вывод микросхемы

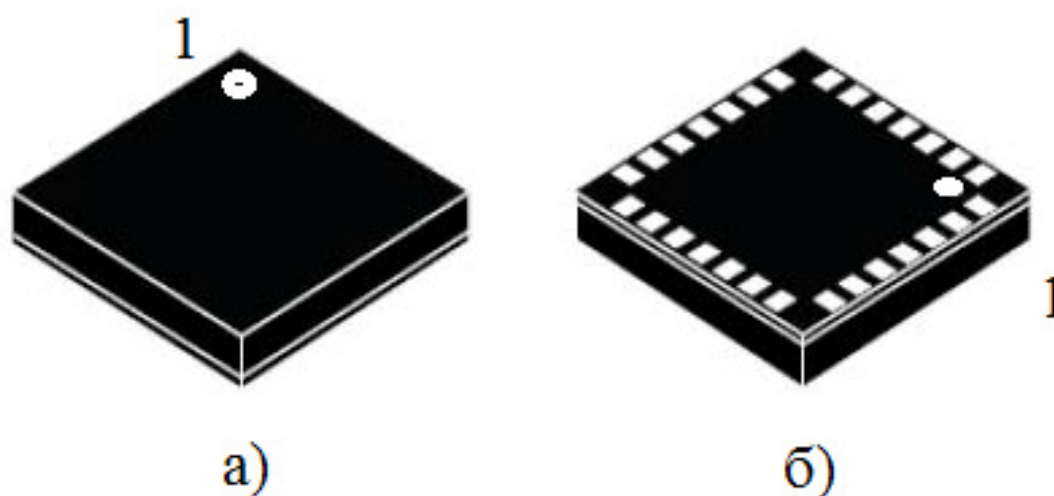


Рисунок 2.8 — Корпус типа LGA-28L, а) — вид сверху, б) — вид снизу

отмечен точкой на верхней поверхности корпуса, там же нанесена маркировка микросхемы. Отсчет номера вывода выполняется от первого вывода против часовой стрелки.

При установке в корпус кристалл микросхемы ориентируют так, чтобы оси магниточувствительного датчика были ориентированы относительно выводов микросхемы, как показано на рисунке 2.9 а). Магнитная ось X_m ориентирована перпендикулярно ряду выводов 1–7, а ось Y_m — вдоль этих выводов. Оси чувствительных элементов акселерометров на кристалле расположены коллинеарно осям магниточувствительного датчика. Поэтому относительно корпуса микросхемы эти оси расположены также, как и магнитные, см. рисунок 2.9 б).

Фиксированная ориентация осей координат датчика позволяет нужным образом расположить датчик на тележке робота. Для обеспечения измерений в принятой системе координат, показанной на рисунке 2.1, мо-

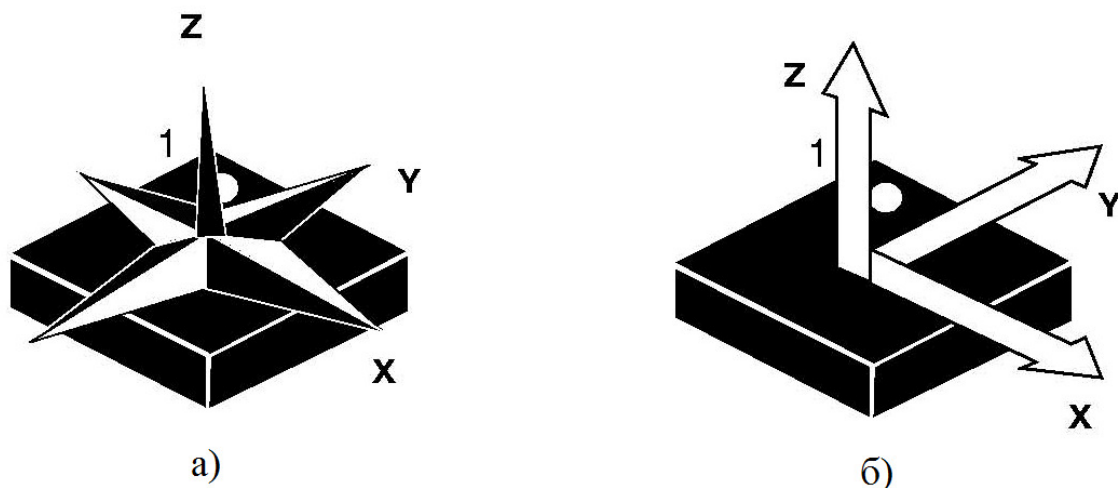


Рисунок 2.9 — Расположение осей координат микросхемы LSM 303DLH, а) — расположение осей датчика магнитного поля; б) — расположение осей акселерометра

дуль электронного компаса необходимо расположить так, чтобы линия выводов 1–7 микросхемы была параллельна оси ведущих колес робота. На рисунке 2.10 показано требуемое расположение модуля электронного компаса на тележке и реализуемая при этом система локальных координат робота.

При измерениях в диапазоне $\pm 1,3 \cdot 10^{-4}$ Тл изменение магнитного поля по магнитным осям X_M и Y_M на 10^{-4} Тл преобразуется микросхемой в изменение выходной переменной на 1055 единиц, т.е. коэффициенты передачи датчика по изменению магнитного поля вдоль этих осей составляют [59]:

$$K_{X_M} = K_{Y_M} = 1,055 \cdot 10^7.$$

Для магнитной оси Z этот коэффициент меньше, он равен

$$K_{Z_M} = 0,95 \cdot 10^7.$$

Высокие значения коэффициентов передачи датчика при средней величине магнитной индукции $5 \cdot 10^{-5}$ Тл позволяют снимать значения сигналов по координатным осям в несколько сотен единиц. По полученным данным нетрудно вычислить угловую ориентацию робота, которая в случае горизонтального перемещения тележки и для удобства представления результата вычисляется по формуле:

$$\varphi = \frac{180}{\pi} \arctg \frac{N_{Y_M}}{N_{X_M}}, \quad (2.8)$$

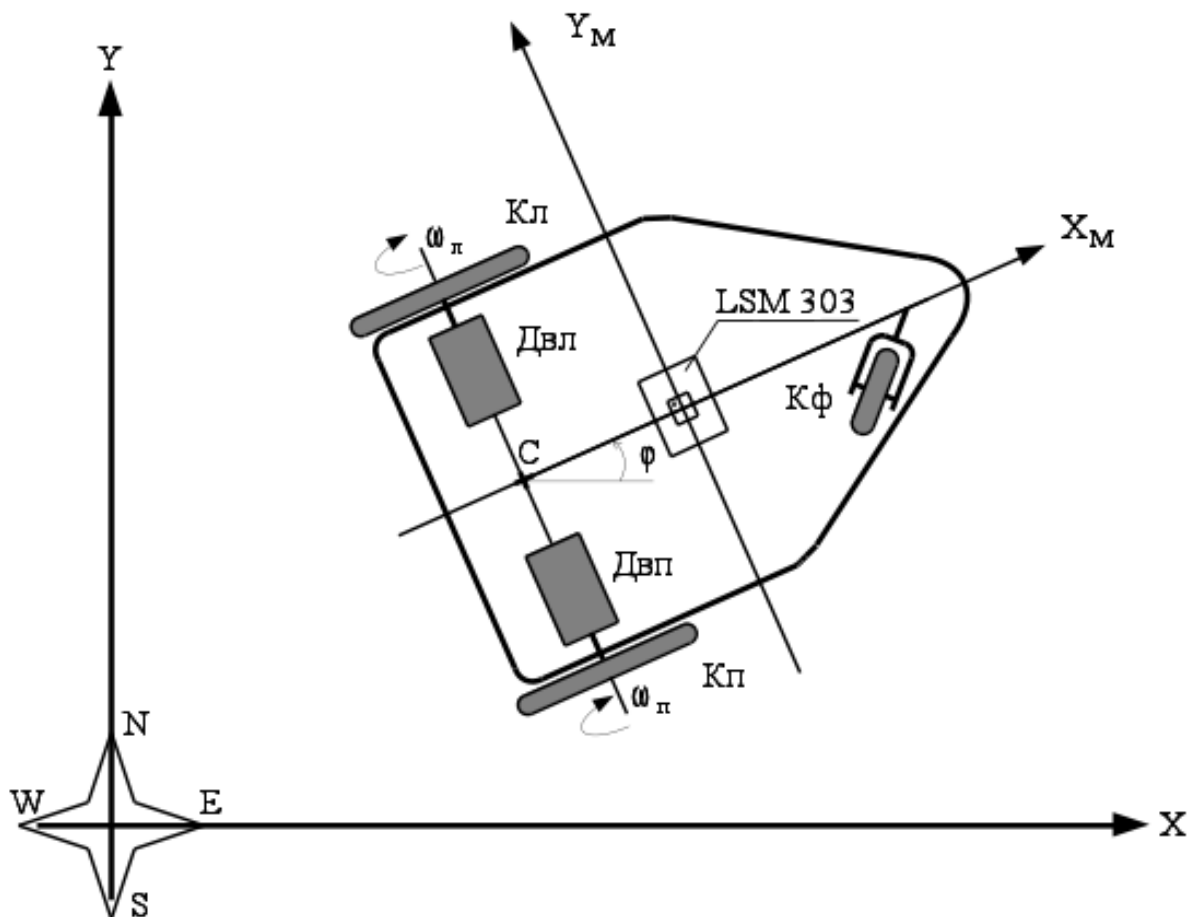


Рисунок 2.10 — Схема расположения модуля LSM 303 на тележке робота

где: N_{Y_m} , N_{X_m} — сигналы датчика поля для осей Y_M , X_M соответственно; $K_{ДУ} = 180/\pi$ — коэффициент передачи датчика угла, град/рад. Учет знаков сигналов N_{Y_m} , N_{X_m} позволяют легко определить квадрант и привести вычисленное по формуле (2.8) значение угла φ к представлению из диапазона ± 180 град.

Считываемые с датчика магнитного поля данные обычно нестабильны. Нестабильность считываемых данных порождается, как шумами магниточувствительных резистивных элементов, так и различными возмущениями магнитуды поля в процессе движения робота. Для использования в системе управления вычисленное значение угла φ необходимо фильтровать. В качестве фильтров обычно применяют алгоритмы сглаживания данных по методу скользящего среднего, либо используют для этой цели цифровые эквиваленты апериодических звеньев первого или второго порядков.

2.4. Организация управления движением робота

Рассмотрим задачу управления движением робота в локальном пространстве, подразумевая реализацию простейшей цели — управление скоростью продольного движения и управление угловой ориентацией робота. Решение такой задачи является технической базой, позволяющей решать более сложные прикладные задачи управления мобильными роботами [10, 50, 42, 4].

Как показано в параграфе 2.1 управление движением робота в такой постановке сводится к согласованному управлению скоростями вращения ведущих колес. Для этого скорость вращения каждого колеса будем измерять инкрементным датчиком. Угловую ориентацию робота в локальном пространстве определим при помощи электронного компаса. В результате получается функциональная схема системы управления мобильным роботом, приведенная на рисунке 2.11. Управляющий микроконтрол-

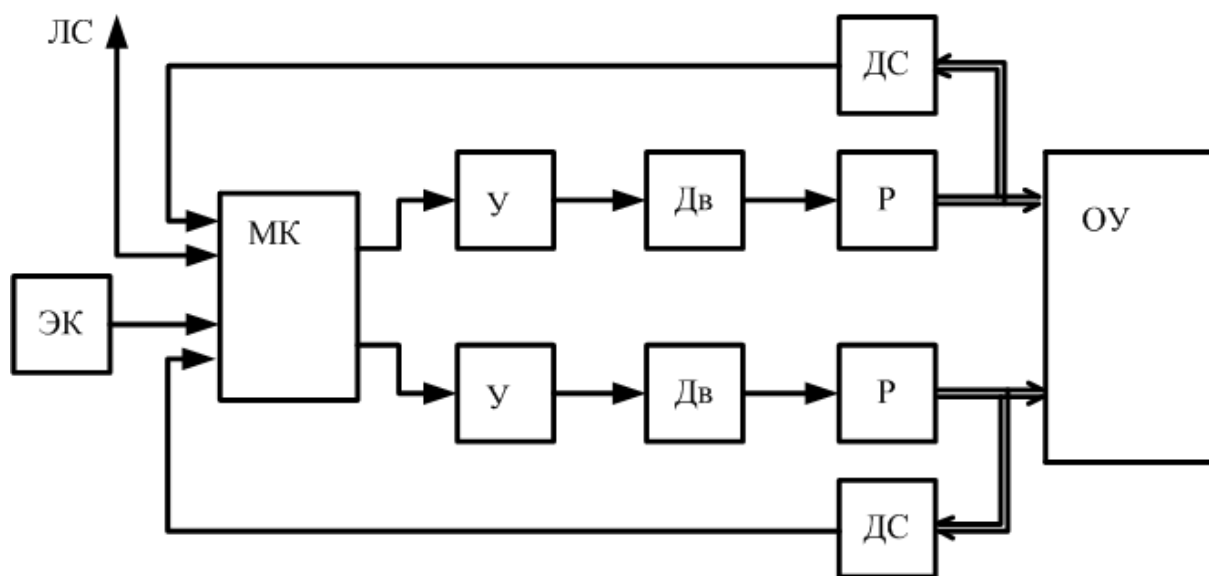


Рисунок 2.11 — Функциональная схема системы управления роботом (ЭК — электронный компас, МК — микроконтроллер, У — усилитель, Дв — двигатель, Р — редуктор, ДС — датчик скорости, ОУ — объект управления)

лер МК вырабатывает сигналы управления скоростью вращения каждым из двух электродвигателей Дв. Эти сигналы усиливаются по мощности усилителями У. Обычно в современных цифровых системах управления сигналы управления для управления двигателями используется широтно-импульсная модуляция [17].

Использование широтно-импульсной модуляции позволяет существенно уменьшить габариты усилителей мощности за счет существенного

увеличения коэффициента полезного действия.

Электродвигатели через понижающие редукторы вращают ведущие колеса тележки робота (объекта управления ОУ), обеспечивая ее движение.

Скорость вращения каждого колеса измеряется инкрементным датчиком скорости ДС, сигналы от которых поступают на управляющий микроконтроллер МК. В результате в микроконтроллер поступает информация об углах поворота ведущих колес, пройденном пути и скорости движения, позволяющая организовывать обратные связи в системе управления.

Скорость вращения каждого колеса измеряется инкрементным датчиком скорости ДС, сигналы от которых поступают на управляющий микроконтроллер МК. В результате в микроконтроллер поступает информация об углах поворота ведущих колес, пройденном пути и скорости движения, позволяющая организовывать обратные связи в системе управления.

Система управления робота состоит из управляющей, исполнительной и измерительной частей. Управляющая часть реализуется в виде программы работы микроконтроллера МК. Исполнительная часть включает усилители мощности У, электродвигатели Дв, редукторы Р и объект управления ОУ. Измерительная часть состоит из датчиков скорости вращения колес ДС и датчика направления движения (электронного компаса) ЭК. Особенности организации системы управления движением тележки рассмотрим в рамках линейных моделей первого приближения. Для простоты пренебрежем эффектами квантования времени и уровней сигналов в цифровой системе управления. В качестве отправной точки воспользуемся моделью исполнительной части робота (2.1) – (2.3), структурно представленной на рисунке 2.2.

Рассматриваемая задача при принятой модели ОУ заключается в обеспечении управления скоростью продольного перемещения $V_{пр}$ и направлением движения φ_p робота. Для ее реализации на вход управляющей части должны поступать заданное значение скорости продольного перемещения V_z робота и заданное направление φ_z его движения. Для замыкания системы обратными связями от измерительной части должны поступать измеренные текущие значения $V_{пр}$ и φ_p робота. Так как робот не имеет датчика скорости продольного движения $V_{пр}$, то текущее значение этой величины необходимо вычислять по сигналам датчиков скорости колес. В результате получаем структурную схему системы управления движением робота, как показано на рисунке 2.12. От датчиков скорости колес в управляющую часть поступают сигналы $\omega_{п}^*(s)$ и $\omega_{л}^*(s)$. По этим данным вычисляется оценка $V_{пр}^*(s)$ скорости продольного движения робота, равная

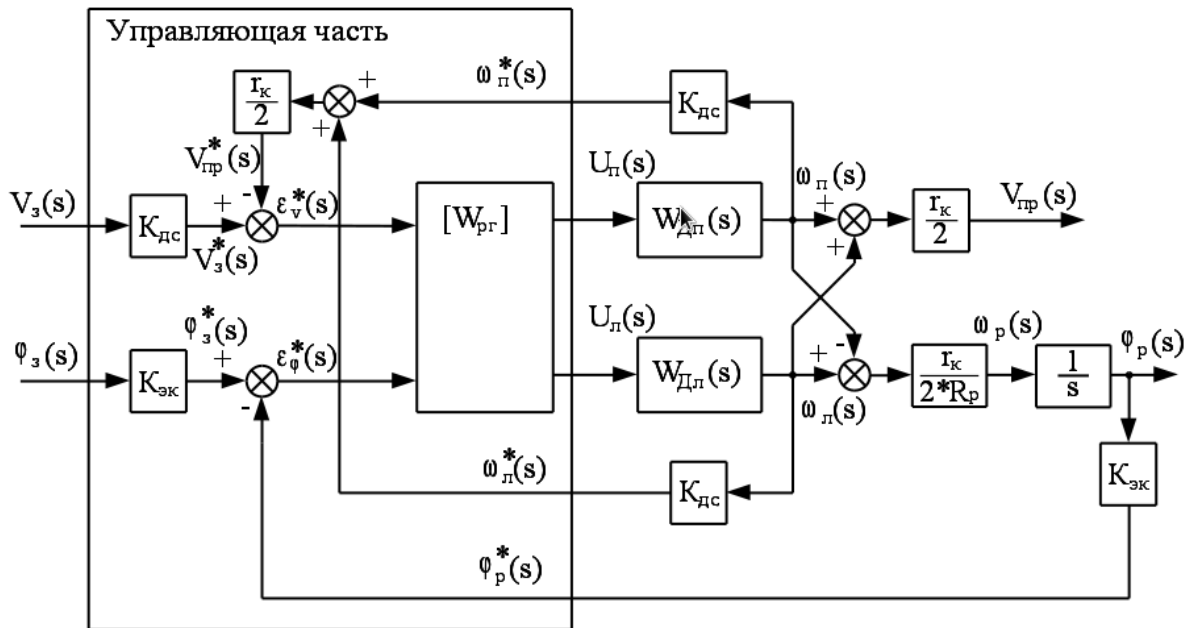


Рисунок 2.12 — Структурная схема системы управления движением робота

$$V_{\text{пр}}^*(s) = \frac{r_{\text{к}}}{2} \cdot (\omega_{\text{п}}^*(s) + \omega_{\text{л}}^*(s))$$

или, с учетом коэффициента передачи датчика скорости $K_{\text{дс}}$,

$$V_{\text{пр}}^*(s) = \frac{r_{\text{к}}}{2} \cdot (K_{\text{дс}} \cdot \omega_{\text{п}}(s) + K_{\text{дс}} \cdot \omega_{\text{л}}(s)) \quad (2.9)$$

От электронного компаса в управляющую часть поступает сигнал $\varphi_{\text{п}}^*(s)$, равный

$$\varphi_{\text{п}}^*(s) = K_{\text{эжк}} \cdot \varphi_{\text{п}}(s) \quad (2.10)$$

Кроме этих сигналов по цифровой линии связи от устройства управления верхнего уровня в управляющую часть подаются значения заданных скорости продольного движения $V_3^*(s)$ и угла направления движения $\varphi_3^*(s)$. В общем случае эти сигналы поступают в цифровом виде с некоторым масштабом, т.е. можем записать (в линейном приближении)

$$V_3^*(s) = M_V \cdot V_3(s),$$

$$\varphi_3^*(s) = M_{\varphi} \cdot \varphi_3(s),$$

где: $V_3(s)$ — задание скорости продольного движения; $\varphi_3(s)$ — задание требуемого направления движения; $V_3^*(s)$, $\varphi_3^*(s)$ — представление сигналов управляющей части с учетом масштабов переменных; M_V , M_{φ} — постоянные масштабные коэффициенты по скорости и углу направления движения, соответственно.

В управляющей части измеренные и заданные значения параметров движения робота сравниваются. Сравнивающие устройства формируют сигналы рассогласования:

- по скорости продольного движения:

$$\varepsilon_V^*(s) = V_3^*(s) - V_{\text{пр}}^*(s), \quad (2.11)$$

- по углу направления движения:

$$\varepsilon_\varphi^*(s) = \varphi_3^*(s) - \varphi_p^*(s), \quad (2.12)$$

Для корректного выполнения операций сравнения желательно, чтобы масштабы представления сравниваемых величин были одинаковыми, т.е. чтобы масштабы M_V и M_φ представления параметров движения были выбраны равными коэффициентам передачи $K_{\text{ДС}}$ и $K_{\text{ЭК}}$ датчиков, соответственно. Следует отметить, что иногда для компенсации ошибок работы систем управления, масштабы представления переменных делают различными [17]. Однако, этот случай мы рассматривать не будем, а будем считать, что для передачи по линии связи заданных параметров движения выбраны масштабы:

$$\begin{aligned} M_V &= K_{\text{ДС}}, \\ M_\varphi &= K_{\text{ЭК}}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Использование равенств (2.10) и (2.14) в (2.12) и (2.13) позволяет выразить сигналы рассогласования в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_V^*(s) &= K_{\text{ДС}} \cdot V_3(s) - \frac{r_k}{2} \cdot (K_{\text{ДС}} \cdot \omega_{\text{п}}(s) + K_{\text{ДС}} \cdot \omega_{\text{л}}(s)), \\ \varepsilon_\varphi^*(s) &= K_{\text{ЭК}} \cdot \varphi_3(s) - K_{\text{ЭК}} \cdot \varphi_p(s). \end{aligned} \quad (2.14)$$

Учитывая, что скорость продольного движения робота равна

$$V_{\text{пр}}(s) = \frac{r_k}{2}(\omega_{\text{п}}(s) + \omega_{\text{л}}(s)),$$

и вынося за скобки постоянные множители, получаем:

$$\begin{aligned} \varepsilon_V^*(s) &= K_{\text{ДС}} \cdot (V_3(s) - V_{\text{пр}}(s)), \\ \varepsilon_\varphi^*(s) &= K_{\text{ЭК}} \cdot (\varphi_3(s) - \varphi_p(s)). \end{aligned} \quad (2.15)$$

Использование приведенных алгебраических преобразований и полученных равенств (2.16) позволяет преобразовать структурную схему системы

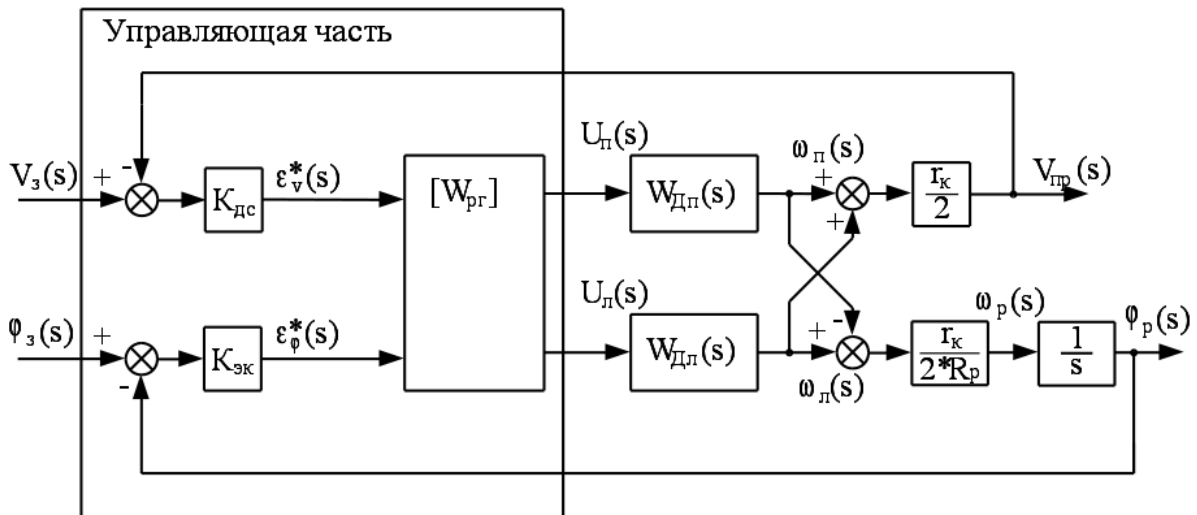


Рисунок 2.13 — Преобразованная структурная схема системы управления движением робота

управления к виду, показанному на рисунке 2.13. Как видно из приведенной схемы, при использовании масштабов (2.14), система управления замыкается единичными отрицательными обратными связями по скорости продольного движения и углу направления.

Дальнейшая разработка управляющей части связана с синтезом матричной передаточной функции $[W_{\text{пр}}]$ регулирующего устройства. Применение матричного представления вызвано тем обстоятельством, что система управления состоит из двух контуров — контура скорости движения и контура угла направления. Регулирующее устройство должно вырабатывать два управляющих сигнала $U_{\text{п}}(s)$ и $U_{\text{л}}(s)$, используя два сигнала рассогласования $\varepsilon_v^*(s)$ и $\varepsilon_\varphi^*(s)$. Объединяя входные и выходные сигналы в соответствующие векторы, получаем матричное уравнение регулирующего устройства в виде:

$$\begin{bmatrix} U_{\text{п}}(s) \\ U_{\text{л}}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_v^*(s) \\ \varepsilon_\varphi^*(s) \end{bmatrix},$$

где $\begin{bmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) \end{bmatrix} = [W_{\text{пр}}]$ — матричная передаточная функция регулирующего устройства. Синтез такого устройства обычно ведется машинными методами на компьютере. С другой стороны, применение некоторых простых структурных преобразований позволяет развязать каналы регулирования и свести задачу синтеза матричного регулятора к задаче синтеза двух независимых регуляторов.

Действительно, обычно в мобильных роботах двигатели у обоих колес

одинаковые, т.е. $W_{ДП}(s) = W_{ДЛ}(s) = W_{Д}(s)$. При этом условии будем формировать два вспомогательных сигнала управления $U_1(s)$ и $U_2(s)$ такие, что

$$\begin{aligned} U_{П}(s) &= U_1(s) - U_2(s), \\ U_{Л}(s) &= U_1(s) + U_2(s). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Нетрудно показать, что между управлениями $U_{П}(s)$, $U_{Л}(s)$ и управлениями $U_1(s)$, $U_2(s)$ имеется взаимно однозначное соответствие. Введенные вспомогательные управления также определяют выходные переменные $V_{ПР}(s)$ и $\varphi_{Р}(s)$, однако в силу уравнений модели исполнительской части системы (2.1) – (2.3), эти переменные определяются равенствам

$$\begin{aligned} V_{ПР}(s) &= \frac{r_{к}}{2} \{W_{Д}(s)[U_1(s) - U_2(s)] + W_{Д}(s)[U_1(s) + U_2(s)] + \}, \\ \varphi_{Р}(s) &= \frac{r_{к}}{2R_{РS}} \{-W_{Д}(s)[U_1(s) - U_2(s)] + W_{Д}(s)[U_1(s) + U_2(s)] + \}. \end{aligned}$$

Раскрытие скобок и приведение подобных членов позволяет упростить выражения; в итоге получаем

$$\begin{aligned} V_{ПР}(s) &= r_{к} \cdot W_{Д}(s) \cdot U_1(s), \\ \varphi_{Р}(s) &= \frac{r_{к}}{R_{РS}} \cdot W_{Д}(s) \cdot U_2(s). \end{aligned} \quad (2.17)$$

Из уравнений (2.18) следует, что сигнал управления $U_1(s)$ определяет только скорость продольного движения робота, а сигнал управления $U_2(s)$ — только угол направления движения. Оказывается целесообразным спроектировать два скалярных регулятора: один из которых регулирует скорость продольного перемещения, а другой — угол направления движения. Эти регуляторы могут работать по информации о рассогласованиях в системе, т.е

$$\begin{aligned} U_1(s) &= W_{V}(s) \cdot \varepsilon_{V}^*(s), \\ U_2(s) &= W_{\varphi}(s) \cdot \varepsilon_{\varphi}^*(s), \end{aligned} \quad (2.18)$$

где: $W_{V}(s)$ — передаточная функция регулятора скорости продольного движения; $W_{\varphi}(s)$ — передаточная функция регулятора угла направления движения робота.

Уравнения (2.16) – (2.19) определяют структурную схему системы управления с отдельными регуляторами скорости и направления движения, показанную на рисунке 2.14. На этой схеме в управляющей части

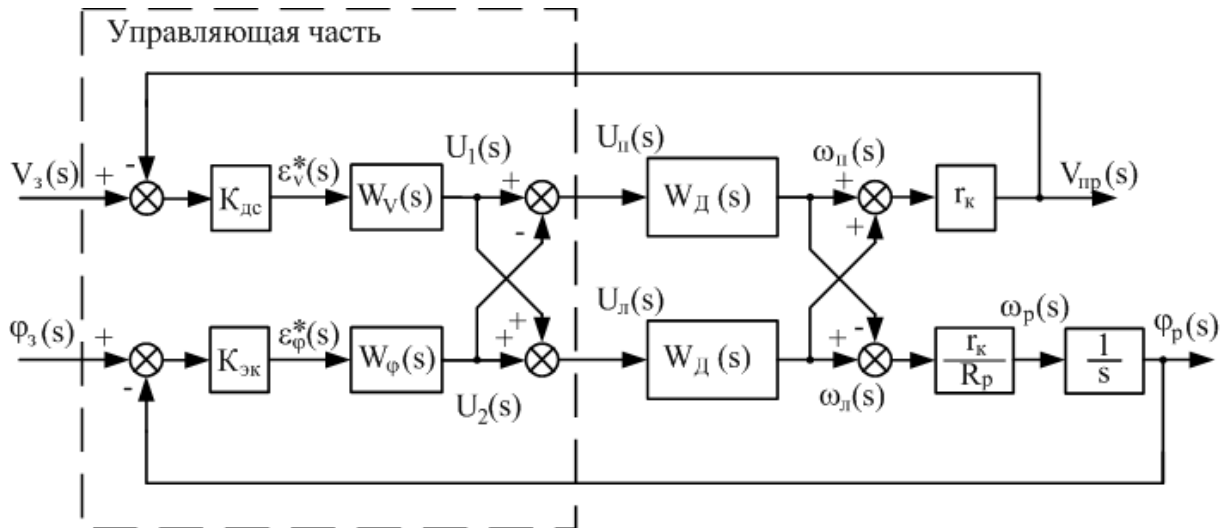


Рисунок 2.14 — Структурная схема системы управления робота с отдельными регуляторами скорости и направления движения

показана, введенная уравнениями (2.17), перекрестная связь между каналами регулирования. Эта перекрестная связь фактически предназначена для компенсации физической перекрестной связи исполнительской части, определяемой уравнениями (2.1) и (2.2). Так как передаточная функция $W_{\text{д}}(s)$ является линейным оператором, то можно еще преобразовать структурную схему системы. Действительно, из уравнений (2.18) и (2.19) следует, что исключение из модели внутренних переменных $U_{\text{п}}(s)$, $U_{\text{л}}(s)$ и $\omega_{\text{п}}(s)$, $\omega_{\text{л}}(s)$ приводит к разделению каналов регулирования системы управлением движением робота на два независимых канала. Канал регулирования скорости продольного движения робота описывается уравнениями:

- $\varepsilon_V^*(s) = K_{\text{дс}} \cdot (V_3(s) - V_{\text{пр}}(s))$ — вычисления рассогласования;
- $U_1(s) = W_V(s) \cdot \varepsilon_V^*(s)$ — вычисления управления;
- $V_{\text{пр}}(s) = r_{\text{к}} \cdot W_{\text{д}}(s) \cdot U_1(s)$ — модели исполнительской части.

Структурная схема для автономного канала регулирования скорости продольного движения робота показана на рисунке 2.15.

Аналогично, канал регулирования угла направления движения описывается уравнениями:

- $\varepsilon_{\varphi}^*(s) = K_{\text{эк}} \cdot (\varphi_3(s) - \varphi_{\text{р}}(s))$ — вычисления рассогласования;
- $U_2(s) = W_{\varphi}(s) \cdot \varepsilon_{\varphi}^*(s)$ — вычисления управления;
- $\varphi_{\text{р}}(s) = \frac{r_{\text{к}}}{R_{\text{пс}}} \cdot W_{\text{д}}(s) \cdot U_2(s)$ — модели исполнительской части.

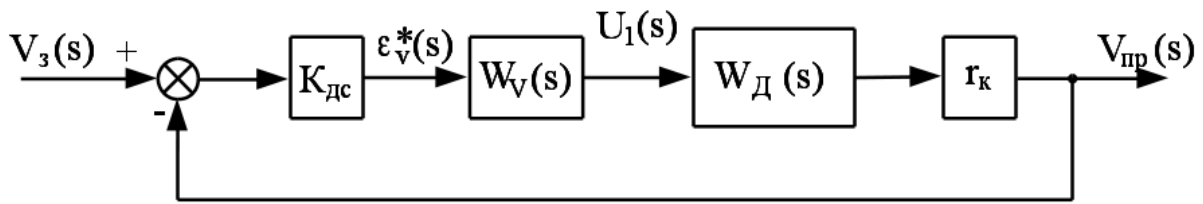


Рисунок 2.15 — Структурная схема для канала регулирования скорости продольного движения робота

На рисунке 2.16 показана структурная схема для канала регулирования угла направления движения. Следует отметить, что по сравнению

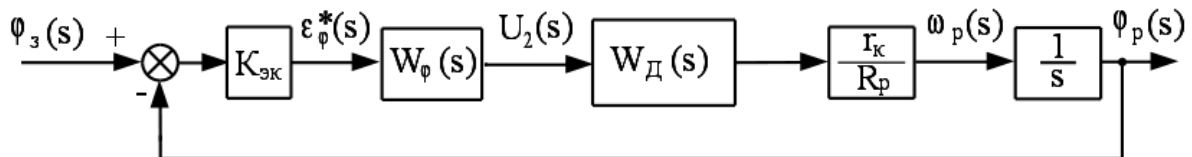


Рисунок 2.16 — Структурная схема для канала регулирования угла направления движения робота

с каналом регулирования скорости, в канале регулирования угла присутствует дополнительный интегратор, связывающий угол направления движения $\varphi_p(s)$ с угловой скоростью $\omega_p(s)$.

Таким образом, введение в управляющую часть дополнительных перекрестных связей (2.17) позволяет полностью развязать каналы регулирования системы управления. В результате синтез регуляторов каждого из полученных автономных каналов может быть выполнен по обычным методикам, применяемым для синтеза одноканальных систем управления [15].

Для реализации системы управления движением робота в рамках рассмотренной модели необходимо использовать всего два типа датчиков — датчик скорости колеса и электронный компас. Обычно оба датчика цифровые, следовательно, желательно при синтезе использовать методики дискретных систем управления. Основной вопрос — как выбрать период квантования информации в такой системе? Опыт показывает, что для электромеханических систем такого класса период квантования времени целесообразно выбирать из диапазона $T=[0,01\dots0,05]$ с., т.е. частота поступления измерений в систему выбирается от 20 до 100 Гц. Это связано с типовой инерционностью подвижных электромеханических объектов, время разгона/торможения которых редко бывает менее 0,1 с. Выбор

очень высокой частоты обновления информации в таком случае не приводит к улучшению качества работы системы, а требует только повышенных затрат вычислительных ресурсов управляющего микроконтроллера.

Рассмотренная задача организации управления движением робота, как правило, не имеет самостоятельного значения, так как не решает проблемы целевого использования робота. Иногда такую систему используют при дистанционном ручном управлении движением робота по радиоканалу или инфракрасной оптической линии связи. Но чаще всего рассмотренная система управления используется в качестве подсистемы нижнего уровня управления при организации более сложных интеллектуальных иерархических автономных систем управления роботами, решающими конкретные прикладные задачи.

2.5. Теневой фотоэлектрический датчик

Управление движением робота вдоль контрастной полосы является базовой задачей управления мобильными роботами. При решении этой задачи используются самые простые датчики ориентации робота, используемые в тоже время и во многих более сложных задачах. На рисунке 2.17 показана компоновка мобильного робота,двигающегося вдоль контрастной полосы.

На шасси 1 установлены электродвигатели 5,6, вращающие ведущие

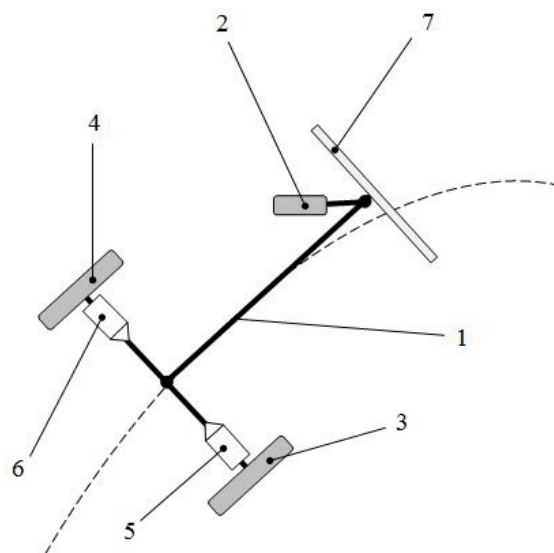


Рисунок 2.17 — Конструктивная схема трехколесного робота (1 — шасси, 2 — пассивное колесо, 3,4 — ведущие колеса, 5,6 — электродвигатели, 7 — датчик полосы)

колеса 3,4. Устойчивое горизонтальное расположение шасси робота обес-

печивается пассивным флюгерным колесом 2. В передней части робота расположен датчик 7 смещения средней линии полосы от продольной оси робота. Управление роботом в простейшем случае строится по углу направления движения так, чтобы при заданной скорости продольного движения шасси измеренное отклонение от полосы было минимальным, в идеальном случае равным нулю. Организация управления движением робота подробно описана в главе 2, поэтому в этой главе рассмотрим только особенности работы датчика отклонения от полосы. Простейшим датчиком отклонения от полосы является фотоэлектрический теневой датчик [24]. Выходной сигнал такого датчика пропорционален смещению энергетического центра светового потока, попадающего на входной зрачок, относительно геометрической оси датчика.

Простой теневой фотодатчик состоит из фотоприемника F, диафрагмы D и источника излучения I. Для упрощения анализа работы представим падающий световой поток исходящим от точечного источника света, расположенного так, чтобы энергетический центр потока сохранялся. Схема такого теневого датчика показана на рисунке 2.18.

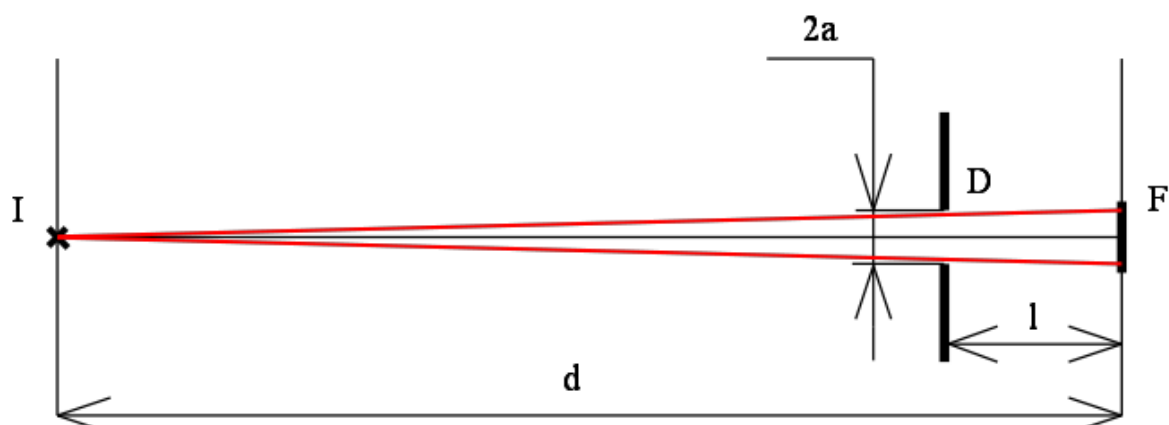


Рисунок 2.18 — Схема теневого датчика: I — источник света (оптического излучения), D — диафрагма, F — фотоприемник

Примем, что расстояние от плоскости фотоприемника до плоскости источника излучения равно d , расстояние до плоскости диафрагмы равно l , размер отверстия в диафрагме равен $2a$, форма отверстия — квадрат. При смещении источника света относительно геометрической оси датчика световое пятно смещается по площадке фотоприемника за его геометрический край и электрический сигнал на выходе фотоприемника уменьшается из-за уменьшения попадающего на него потока излучения. Этот случай иллюстрируется рисунком 2.19.

Размер диафрагмы $2a$ и ее положение « l » определяет технические ха-

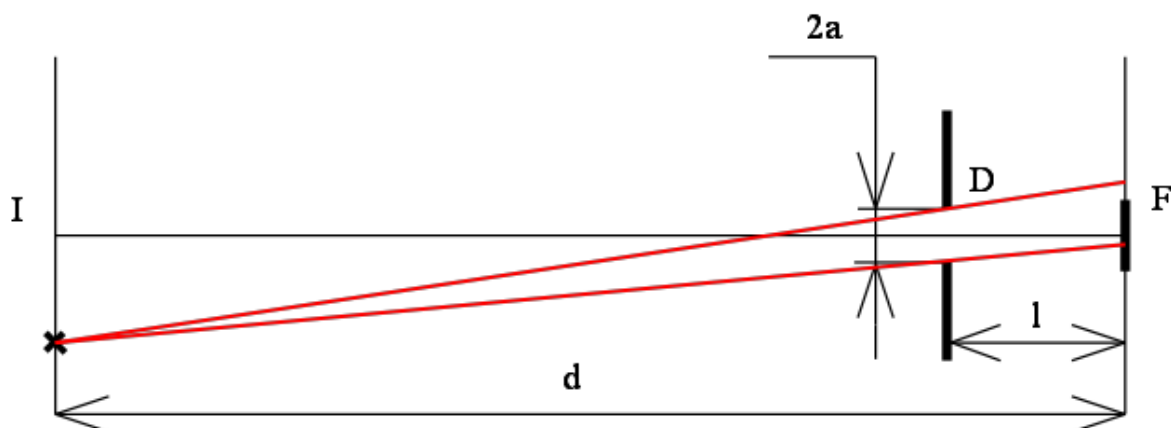


Рисунок 2.19 — Смещение оптического пятна при смещении источника излучения

рактеристики датчика.

Размер диафрагмы $2a$ можем определить из условия, что размер оптического пятна на фотоприемнике должен быть максимальным, но не больше размеров чувствительной площадки фотоприемника. Обозначим размер оптического пятна на фотоприемнике как $2b$ и будем считать, что форма чувствительной площадки — квадрат со стороной $2b$. Тогда очевидно равенство

$$a/(d - l) = b/d,$$

откуда

$$a = b(d - l)/d. \quad (2.19)$$

В полученной формуле (2.19) неизвестные — a и l . Так как максимальная величина b равна размеру чувствительной площадки фотоприемника, то с увеличением l размер $2a$ уменьшается. Это приводит к уменьшению светового потока излучения, попадающего на фотоприемник, что уменьшает абсолютную величину сигнала, соотношение сигнал/шум фотоприемника и приводит к необходимости использовать мощные источники света для подсветки полосы. Поэтому, желательно выбирать значение l по возможности меньшим.

С другой стороны величина l определяет позиционную чувствительность прибора. Действительно, если обозначить смещение нижней (как на рисунке 2.19) границы светового пятна на фотоприемнике переменной y , а смещение источника излучения переменной x , то

$$y/l = x/d$$

или

$$y = \frac{l}{d} \cdot x.$$

Но так как переменная y определяет величину электрического сигнала на выходе фотоприемника, то отношение $K = 1/d$ — определяет коэффициент передачи датчика по перемещению. Очевидно, что для увеличения коэффициента передачи необходимо увеличивать l .

Еще одна важная характеристика датчика зависит от положения диафрагмы. Эта характеристика — поле зрения датчика. Поле зрения — максимальное смещение излучателя, при котором световой поток попадает на фотоприемник. Поле зрения датчика может выражаться в линейной мере, однако чаще его выражают в угловой мере. Поле зрения датчика ограничено, так как чувствительная площадка фотоприемника имеет конечные геометрические размеры.

На рисунке 2.20 показано максимально смещенное положение источника света I , которое и определяет поле зрения датчика. Как видно из рисунка 2.20, поле зрения датчика (в угловой мере) будет равно

$$\gamma = 2\frac{b}{l},$$

где: $2b$ — размер светового пятна в плоскости фотоприемника.

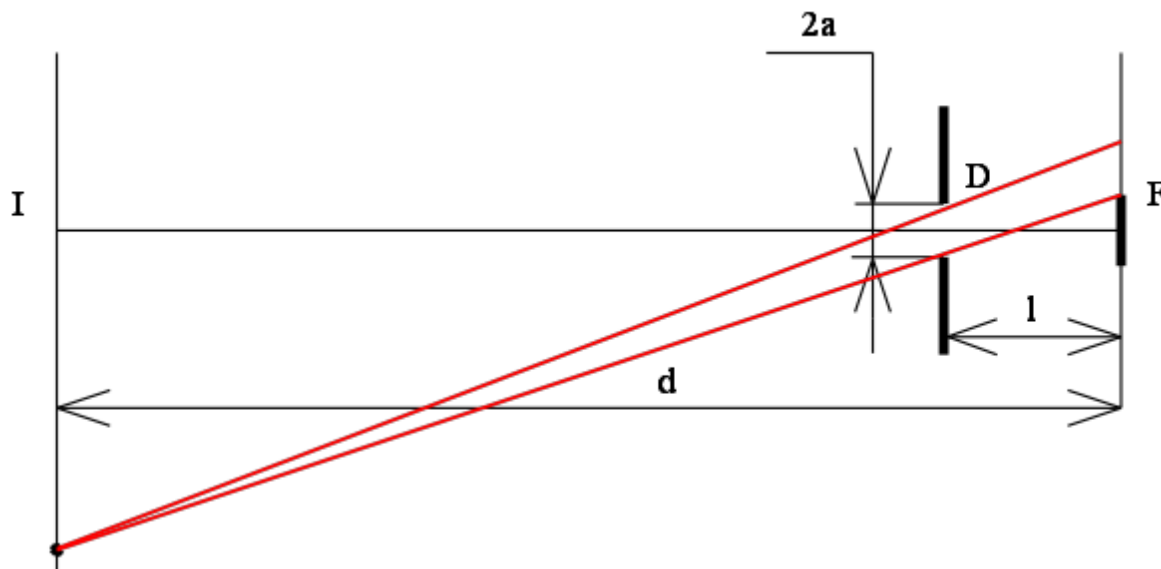


Рисунок 2.20 — Определение поля зрения прибора по смещению оптического пятна на край фотоприемника

В линейной мере смещению оптического пятна по фотоприемнику на величину $2b$, как показано на рисунке 2.20, соответствует смещение излучателя на величину

$$x = 2 \cdot b \frac{d}{l}$$

Таким образом, теневой фотоэлектрический датчик является позиционно-чувствительным преобразователем, позволяющим преобразовать смещение источника излучения в электрический сигнал. Выбор параметров датчика полосы существенно зависит от конструктивного исполнения мобильного робота: расстояния от датчика до полосы, ширины полосы, отражающей способности полосы, мощности осветителя и др.

2.6. Фотоэлектрический датчик отклонения от полосы

Конструктивно датчик полосы также может быть выполнен несколькими способами. Конструкция одного из самых простых датчиков показана на рисунке 2.21. Датчик построен по принципу отражения свето-

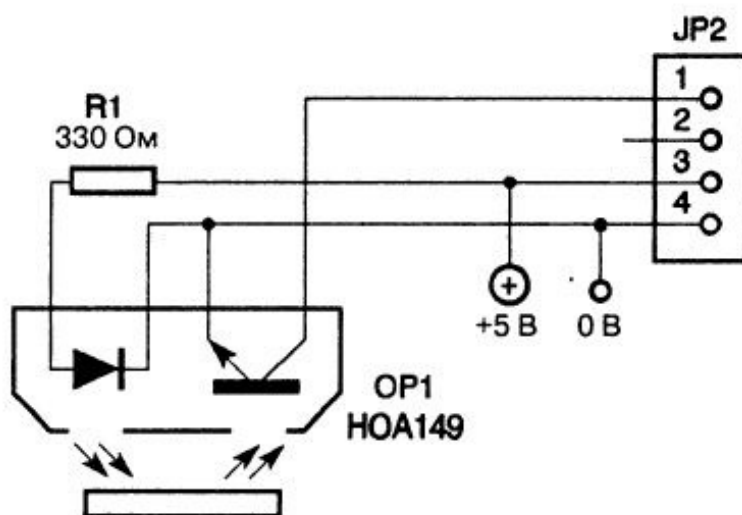


Рисунок 2.21 — Схема датчика полосы

вого потока от полосы и использует всего одну оптопару: светодиод—фототранзистор. Светодиод используется в качестве осветителя полосы.

Для этого он подключается к источнику питания + 5 В через токоограничивающий резистор R1 330 Ом (вывод 3 разъема JP2). Отраженный от полосы поток воспринимается фототранзистором. В коллекторную цепь фототранзистора включается нагрузочный резистор номиналом от 3 до 10 КОм. Фототранзистор имеет большой внутренний коэффициент усиления фототока, что позволяет снимать с нагрузочного резистора электрический сигнал, амплитуда которого достаточна для аналого-цифрового преобразования в управляющем микроконтроллере. Т.е. такой датчик полосы не

требует даже дополнительного усилителя сигнала фотоприемника. Зависимость выходного сигнала такого датчика от величины смещения полосы определяется площадью S светового пятна на фотоприемнике и имеет вид, показанный на рисунке 2.22 б) и 2.22 в). Вид характеристики будет зависеть от того, какая полоса находится под датчиком — светлая или темная.

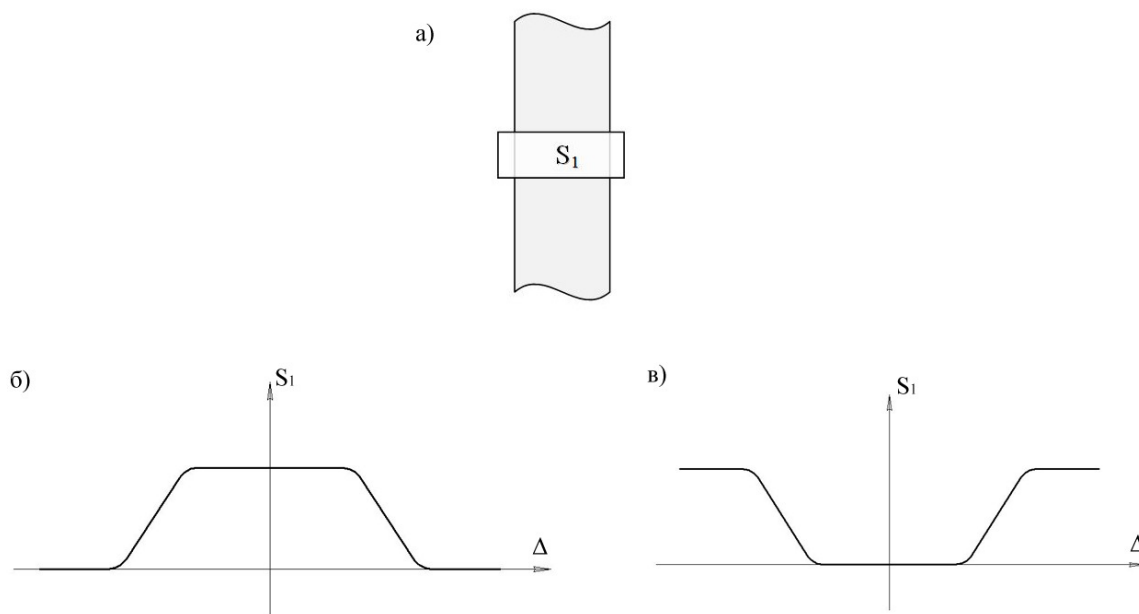


Рисунок 2.22 — Использование одного оптического датчика, а) — расположение области приема оптического датчика относительно полосы, б) — сигнал с датчика, расположенного над белой полосой, в) — сигнал с датчика, расположенного над черной полосой

Однако надежность измерения смещения полосы простейшим датчиком невелика. Для обеспечения точности измерений смещения поле зрения датчика уменьшают. При движении робота вдоль полосы на поворотах возникают динамические ошибки движения, что зачастую приводит к выходу полосы за поле зрения датчика, т.е. потери полосы. Кроме того, при эксплуатации системы из-за загрязнений полосы ее отражающие свойства могут быть различными на различных участках. При использовании одного фотоприемника изменение выходного сигнала из-за изменения отражающей способности полосы будет воспринято системой управления, как и отклонение от полосы.

Для повышения надежности измерения смещения полосы используют несколько фотоприемников, сигналы которых обрабатывают с применением разностных схем с нормированием сигнала. В большинстве мобильных роботов используется линейка из нескольких оптических датчиков.

От их числа напрямую зависит способность робота следовать по линии.

В случае, когда используются два датчика (в соответствии с рисунком 2.23 а), возможно следование по достаточно широким полосам. Такой

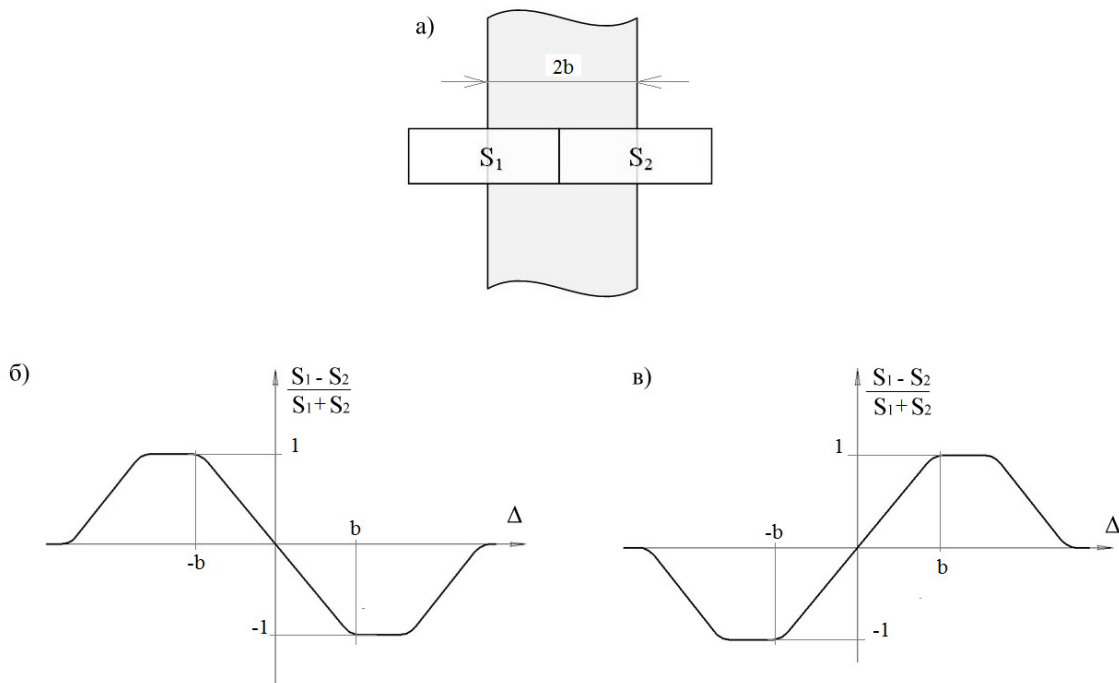


Рисунок 2.23 — Датчик полосы из двух оптических датчиков, а) — расположение областей приема оптических датчиков относительно полосы, б) — статическая характеристика линейки датчиков, расположенных над черной полосой, в) — статическая характеристика линейки датчиков, расположенных над белой полосой

датчик «видит» как саму линию, так и ее края. Характеристики датчика для белой и черной линий представлены на рисунке 2.23 б) и 2.23 в) соответственно. При ширине $2b$ изображения полосы в плоскости фотоприемников линейный участок статической характеристики датчика полосы располагается в пределах $[-b, b]$. В результате крутизна статической характеристики (т.е. коэффициент передачи датчика на линейном участке) обратно пропорциональна b . Следует также отметить, что деление разности сигналов фотоприемников на их сумму позволяет нормировать на единицу статическую характеристику датчика. В результате статическая характеристика оказывается практически нечувствительной к изменениям отражающей способности полосы.

Часто при движении робота вдоль полосы бывает заранее неизвестен цвет линии; более того на различных участках траектории цвет линии может меняться. Так в соревнованиях мобильных роботов, проводимыми институтом механики МГУ [41], испытательный полигон разбит на квад-

раты: на одних квадратах полоса рисуется белой на черном фоне, на других — черной на белом фоне.

Добавляя третий фотодатчик к предыдущему варианту (в соответствии с рисунком 2.24 а), удастся построить алгоритм обработки информации линейки фотодатчиков, определяющий и смещение, и смену цвета линии.

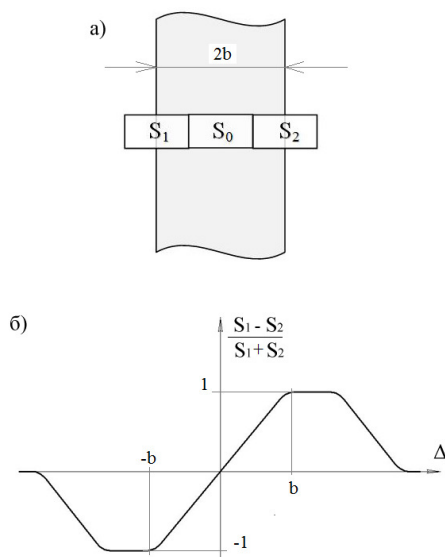


Рисунок 2.24 — Использование линейки из трех оптических датчиков, а — расположение областей приема оптических датчиков относительно полосы, б) — основная характеристика линейки датчиков

Это осуществляется за счет использования центрального датчика, по уровню сигнала с которого осуществляется «переключение» характеристики с основной на инверсную и обратно. В результате статическая характеристика датчика становится однозначной, не зависящей от цвета линии (показана на рисунке 2.24 б).

Дальнейшее увеличение количества фотодатчиков в линейке дает возможность приспособливаться к таким ситуациям, как кривые линии и повороты. Это особенно важно для увеличения максимальной скорости движения робота по прямой, а также для более тонкого регулирования скорости движения при различных поворотах.

Добавление еще двух датчиков (в соответствии с рисунком 2.25 а) увеличивает чувствительность, датчики более точно определяют местоположение линии. Когда робот двигается медленно, есть много времени для того, чтобы изменить скорость и удержаться на линии. Но когда скорость резко увеличивается, вместо точного движения вдоль линии робот начнет выезжать за нее и проскакивать повороты.

Решить проблему потери линии можно двумя различными путями:

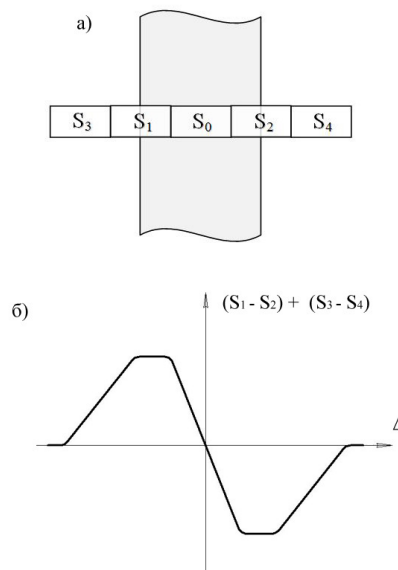


Рисунок 2.25 — Использование линейки из пяти оптических датчиков, а — расположение областей приема оптических датчиков относительно полосы, б) — основная характеристика линейки датчиков

- Уменьшить скорость;
- Предусмотреть и скомпенсировать выезд за пределы линии и проскакивание поворотов.

В какой-то момент скорость робота превышает его способность управлять собой. Учитывая эти ситуации, можно запрограммировать робота для исправления проскакивания и возвращения на линию.

В примере, изображенном на рисунке 2.26, робот потерял линию, поскольку она повернула в сторону. Линия начала поворачивать влево (точка А) перед тем, как робот потерял линию (точка Б). Следовательно, необходимо повернуть налево, пока датчик снова не найдет линию. Крайний левый датчик найдет линию (точка В) раньше любого другого датчика. Очевидно предположение, что при срабатывании одного крайнего левого датчика линия круто ушла влево. Но в этом случае, возвращаясь на линию, робот может пересечь ее (точка Д), а не просто коснуться. Этого можно избежать, изменив логику движения при срабатывании только крайнего левого датчика — линия круто ушла влево. Но в этом случае, возвращаясь на линию, робот может пересечь ее (точка Д), а не просто коснуться. Этого можно избежать, изменив логику движения при срабатывании только крайнего левого датчика — следует резко повернуть вправо после касания линии этим датчиком (точка Г). Тем самым гарантируется возвращение робота назад, на линию, вместо того, чтобы пересечь линию поперек.

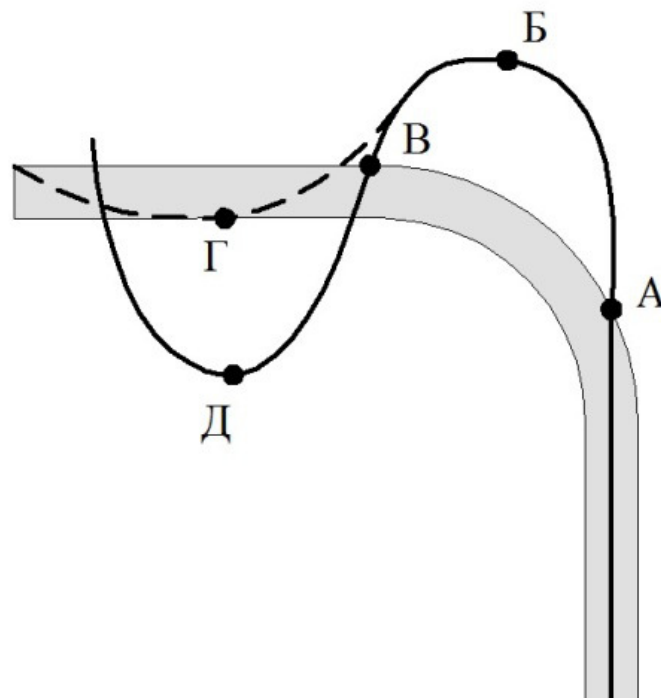


Рисунок 2.26 — Компенсация проскакивания поворотов при движении по линии

Описанное здесь действие объясняет, почему два дополнительных датчика так важны при повышении скорости движения робота. Они обеспечивают более высокое качество управления, высокий уровень контроля и более быструю реакцию, что решает проблему промаха и проскакивания.

Функция центрального датчика такая же, как и в случае линейки с тремя датчиками — «переключать» статическую характеристику датчика при изменении цвета полосы.

Датчики отклонения от полосы на многоэлементных фотоприемниках В настоящее время среди многоэлементных приемников наиболее часто используют ПЗС-линейки и ПЗС-матрицы. Данный тип приборов в настоящее время имеет очень широкий круг применений в самых различных оптоэлектронных устройствах для регистрации изображения [46, 18, 35].

Применение ПЗС матрицы позволяет еще более обогатить сигнал, например, получив аналитическое описание кривой, которой необходимо следовать [29].

2.7. Датчики отклонения от полосы на многоэлементных фотоприемниках

В настоящее время среди многоэлементных приемников наиболее часто используют ПЗС-линейки и ПЗС-матрицы. Данный тип приборов в

настоящее время имеет очень широкий круг применений в самых различных оптоэлектронных устройствах для регистрации изображения.

В ПЗС-приемнике чувствительных элементов очень много, от нескольких сот до нескольких тысяч. Размеры отдельных пикселей одинаковы и могут быть от единиц до десятков микрон. Пиксели могут быть выстроены в один ряд — тогда приемник называется ПЗС-линейкой, или ровными рядами заполнять участок поверхности — тогда приемник называют ПЗС-матрицей (см. рисунок 2.27).

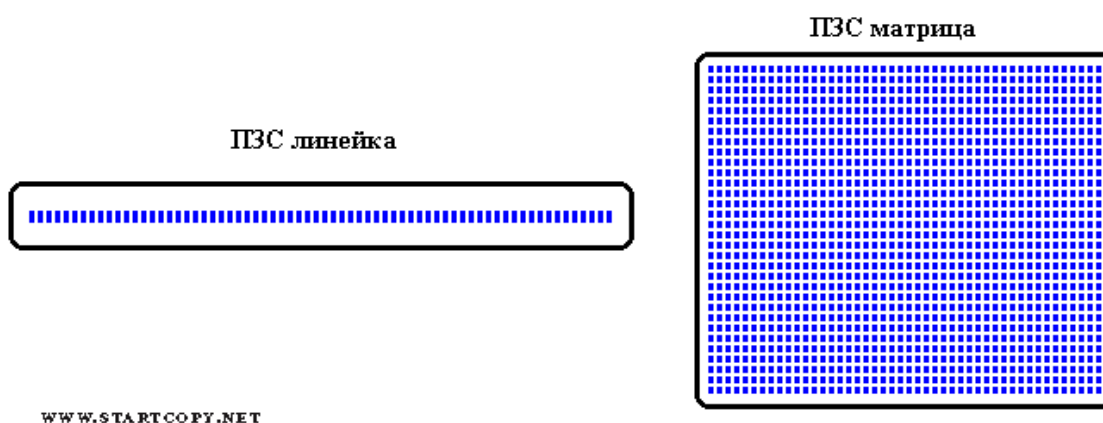


Рисунок 2.27 — Расположение светочувствительных элементов (прямоугольники синего цвета) в ПЗС-линейке и ПЗС-матрице

В ПЗС-приемнике, внешне похожем на обычную микросхему, нет огромного числа электрических контактов для вывода электрических сигналов, которые, казалось бы, должны идти от каждого светочувствительного элемента. Зато к ПЗС-приемнику подключается электронная схема, которая позволяет извлекать с каждого светочувствительного элемента электрический сигнал, пропорциональный его засветке.

Действие ПЗС можно описать следующим образом: каждый светочувствительный элемент — пиксель — работает как копилка для электронов. Электроны возникают в пикселях под действием света, пришедшего от источника. В течение заданного интервала времени каждый пиксель постепенно заполняется электронами пропорционально количеству попавшего в него света, как ведро, выставленное на улицу во время дождя. По окончании этого времени электрические заряды, накопленные каждым пикселем, по очереди передаются на «выход» прибора и измеряются. Все это возможно за счет определенной структуры кристалла, где размещаются светочувствительные элементы, и электрической схемы управления.

Практически точно так же работает и ПЗС-матрица. После экспониро-

вания (засветки проецируемым изображением) электронная схема управления прибором подает на него сложный набор импульсных напряжений, которые начинают сдвигать столбцы с накопленными в пикселях электронами к краю матрицы, где находится аналогичный измерительный ПЗС-регистр, заряды в котором сдвигаются уже в перпендикулярном направлении и попадают на измерительный элемент, создавая в нем сигналы, пропорциональные отдельным зарядам. В основе работы прибора лежит принцип зарядовой связи. Принцип зарядовой связи использует два известных из электростатики положения: одноименные заряды отталкиваются, заряды стремятся расположиться там, где их потенциальная энергия минимальна.

Для начала представим себе МОП-конденсатор (МОП - сокращение от слов металл-окисел-полупроводник). Это то, что остается от МОП-транзистора, если убрать из него сток и исток, то есть просто электрод, отделенный от кремния слоем диэлектрика. Для определенности будем считать, что полупроводник — р-типа, т. е. концентрация дырок в равновесных условиях много (на несколько порядков) больше, чем электронов. В электрофизике «дыркой» называют заряд, обратный заряду электрона, т.е. положительный заряд.

Электрическое поле, создаваемое затвором, проникая в кремний сквозь диэлектрик, отталкивает подвижные дырки; возникает обедненная область — некоторый объем кремния, свободный от основных носителей. При параметрах полупроводниковых подложек, типичных для ПЗС, глубина этой области составляет около 5 мкм. Напротив, электроны, возникшие здесь под действием света, притянутся к затвору и будут накапливаться на границе раздела окисел-кремний непосредственно под затвором, т. е. сваливаются в потенциальную яму (рисунок 2.28).

Пусть теперь рядом с затвором расположен еще один затвор, и на него тоже подан положительный потенциал, причем больший, чем на первый (рисунок 2.29). Если только затворы расположены достаточно близко, их потенциальные ямы объединяются, и электроны, находящиеся в одной потенциальной яме, перемещаются в соседнюю, если она «глубже».

Теперь уже должно быть ясно, что если мы имеем цепочку затворов, то можно, подавая на них соответствующие управляющие напряжения, передавать локализованный зарядовый пакет вдоль такой структуры. Замечательное свойство ПЗС — свойство самосканирования — состоит в том, что для управления цепочкой затворов любой длины достаточно всего трех тактовых сигналов. Действительно, для передачи зарядовых пакетов необходимо и достаточно трех электродов: одного передающего, одного принимающего и одного изолирующего, разделяющего пары при-

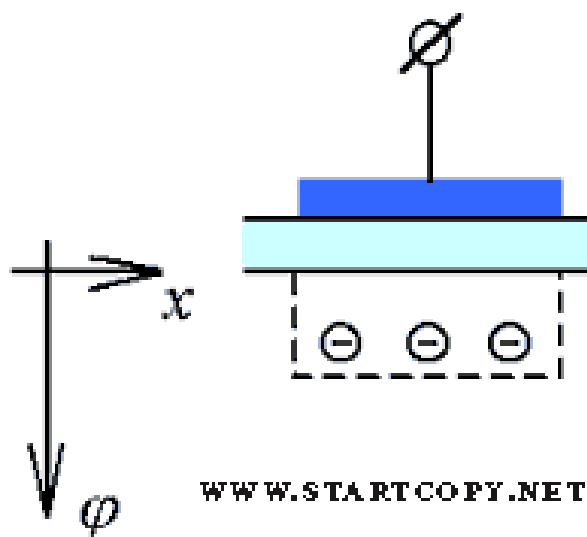


Рисунок 2.28 — Образование потенциальной ямы при приложении напряжения к затвору

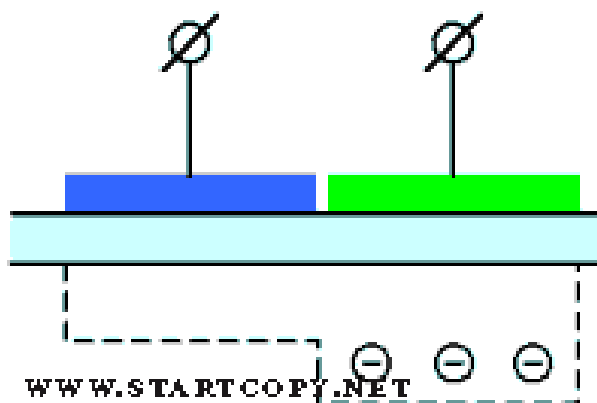


Рисунок 2.29 — Перекрывание потенциальных ям двух близко расположенных затворов. Заряд перетекает в то место, где потенциальная яма глубже

нимающих и передающих друг от друга, причем одноименные электроды таких троек могут быть соединены друг с другом в единую тактовую шину, требующую лишь одного внешнего вывода (рисунок 2.30).

Это и есть простейший трехфазный регистр сдвига на ПЗС. Тактовые диаграммы работы такого регистра показаны на рисунок 2.31.

Видно, что для его нормальной работы в каждый момент времени, по крайней мере, на одной тактовой шине должен присутствовать высокий потенциал, и, по крайней мере, на одной — низкий потенциал (потенциал барьера). При повышении потенциала на одной шине и понижении его на другой (предыдущей) происходит одновременная передача всех зарядовых пакетов под соседние затворы, и за полный цикл (один такт на каждой фазной шине) происходит передача (сдвиг) зарядовых пакетов на

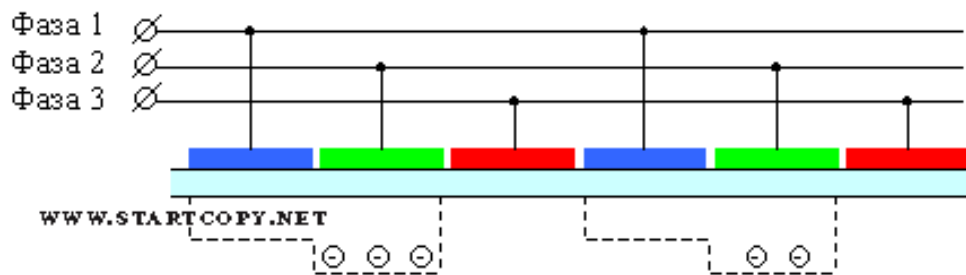


Рисунок 2.30 — Простейший трехфазный ПЗС-регистр.

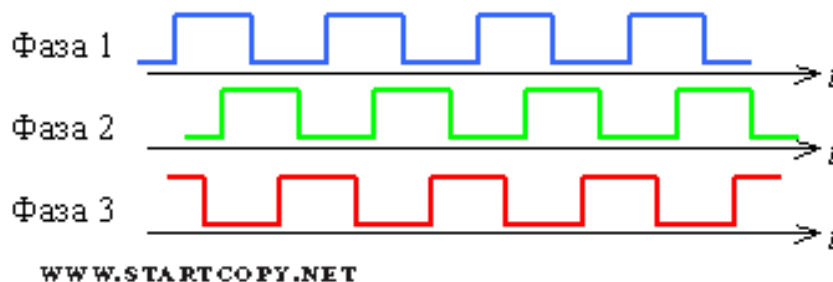


Рисунок 2.31 — Тактовые диаграммы управления трехфазным регистром

один элемент регистра. Поэтому фазовые сигналы — это три меандра, сдвинутые на 120 градусов. При смене потенциалов происходит передвижение зарядов [35, 37].

2.8. Применение скан-кодов для навигации вдоль полосы

На рисунке 2.32 показан пример одномерного штрих-кода.

Штриховой код (штрих-код) — это последовательность черных и белых полос, представляющая некоторую информацию в виде, удобном для считывания фотоэлектрическими техническими средствами. Информация, содержащаяся в коде, может быть напечатана в читаемом виде под кодом (расшифровка).

Штриховые коды широко используются в торговле, складском учете, библиотечном деле, охранных системах, почтовом деле, сборочном производстве, обработка документов.

В мировой практике торговли принято использование штрих-кодов символики EAN для маркировки товаров. В соответствии с принятым порядком, производитель товара наносит на него штриховой код, формируемый с использованием данных о стране местонахождения производителя и кода производителя.

В 1948 году Бернард Сильвер (Bernard Silver) (1924–1962), аспирант



Рисунок 2.32 — Пример одномерного (линейного) скан-кода

Института Технологии Университета Дрекслея (Drexel University) в Филадельфии, услышал, как президент местной продовольственной сети просил одного из деканов разработать систему, автоматически считывающую информацию о продукте при его контроле. Сильвер рассказал об этом друзьям — Норману Джозефу Вудланду (Norman Joseph Woodland) (род. 1921) и Джордину Джохэнсону (Jordin Johanson). Втроем они начали исследовать различные системы маркировки. Их первая работающая система использовала ультрафиолетовые чернила, но они были довольно дороги, а кроме того, со временем исчезали.

Убежденный в том, что система реализуема, Вудланд покинул Филадельфию и перебрался во Флориду в апартаменты своего отца для продолжения работы. Его следующее вдохновение неожиданно дала Азбука Морзе — он сформировал свой первый штриховой код из песка на берегу. Как он сам сказал: «Я только расширил точки и тире вниз и сделал из них узкие и широкие линии». Чтобы прочитать штрихи, он приспособил технологию саундтрек (звуковой дорожки), а именно оптический саундтрек, используемую для записи звука в кинофильмах. 20 октября 1949 года Вудланд и Сильвер подали заявку на изобретение. В результате ими был получен патент США № 2 612 994, изданный 7 октября 1952.

К настоящему времени разработаны различные способы кодирования информации, называемые (штрих-кодowymi кодировками или символиками). Различают линейные и двухмерные символика штрих-кодов.

Линейными (одномерными) в отличие от двухмерных называются штрих-коды, читаемые в одном направлении. Наиболее распространенные ли-

нейные символики: EAN, UPC, Code39, Code128, Codabar, Interleaved 2 of 5. Линейные символики позволяют кодировать небольшой объем информации (до 20–30 символов — обычно цифр) с помощью несложных штрих-кодов, читаемых недорогими сканерами. Пример кода символики EAN-13, показанная на рисунке 2.33.



Рисунок 2.33 — Пример одномерного штрих-кода в кодировке EAN-13

Для считывания штрих-кодов применяется последовательное считывание контрастных линий с помощью фотоприемника. Сканер засвечивает штрих-код своим осветителем и считывает полученную картинку. После этого он определяет наличие на картинке черных полос штрих-кода.

Линейный штрих-код удобно встраивать в полосу, вдоль которой движется робот. Используя движение робота непосредственно с датчика полосы получается дополнительная информация, а именно, информация, записанная в штрих-коде. Это может быть номер участка трассы, по которой перемещается робот, а также расстояние от начала данного участка. Расшифровка обычного штрих-кода в кодировке EAN-13, применяемого в торговле, показана на рисунке 2.34.



Рисунок 2.34 — Кодировка EAN-13, применяемая в торговле

Распространенный код EAN-13 записать в одной марке 13 цифр. При необходимости поместить в марку большой объем информации, можно использовать двумерные QR-коды.

Двухмерными называются символика, разработанные для кодирования относительно большого объема информации (до нескольких страниц текста). Расшифровка такого кода проводится в двух измерениях (по горизонтали и по вертикали). Примеры двумерных скан-кодов показаны на рисунке 2.35.



Datamatrix



Data Glyph



Aztec

Рисунок 2.35 — Двумерные скан-коды различных систем кодирования

Максимальное количество символов, которые помещаются в один QR-код:

- цифры — 7089;
- цифры и буквы (латиница) — 4296;
- двоичный код — 2953 байт (следовательно, около 2953 букв кириллицы в кодировке windows-1251 или около 1450 букв кириллицы в utf-8);
- иероглифы — 1817.

Для исправления ошибок применяется код Рида-Соломона с 8-битным кодовым словом. Есть четыре уровня избыточности: 7, 15, 25 и 30 %. Благодаря исправлению ошибок, удаётся нанести на QR-код рисунок и всё равно оставить его читаемым [63].

Чтобы в коде не было элементов, способных запутать сканер, область данных складывается по модулю 2 со специальной маской. Корректно работающий кодер должен перепробовать все варианты масок, посчитать штрафные очки для каждой по особым правилам и выбрать самую удачную.

Считывание информации двумерного скан-кода возможно только с помощью многоэлементного фотоприемника в виде двумерного изображения. Три квадрата в углах изображения и меньшие синхронизирующие

квадратики по всему коду позволяют нормализовать размер изображения и его ориентацию, а также угол, под которым сенсор расположен к поверхности изображения. Точки переводятся в двоичные числа с проверкой по контрольной сумме. Для этих целей очень хорошо подходит твердотельная видеокамера. Современная промышленность освоила выпуск достаточно быстрых, недорогих и компактных видеокамер, применение которых существенно упрощает решение задач локальной навигации мобильных роботов.

Хотя обозначение «QR code» является зарегистрированным товарным знаком «DENSO Corporation», использование кодов не облагается никакими лицензионными отчислениями, а сами они описаны и опубликованы в качестве стандартов ISO (ISO/IEC 18004:2006).

Глава 3

Навигационные системы со сканированием пространства

3.1. Задача сканирования пространства, схема сканера

К системам пространственного слежения относятся следующие системы, предназначенные для автоматического сопровождения и выработки пространственных координат подвижных объектов, перемещающихся в пространстве по неизвестной траектории. К этому классу систем можно отнести радиотехнические, оптические следящие системы, а также системы наведения и ориентации научных приборов. Эти системы объединяют общность выполняемых функций и принципов их построения. Для обнаружения и сопровождения подвижных объектов в подобных системах используется широкий спектр электромагнитных колебаний рентгеновского, оптического, радио- и звукового диапазона.

В системах пространственного слежения в явном виде можно выделить три канала: канал дальности, канал угла места и канал азимута. Как правило, канал дальности является независимым и не влияет на работу каналов азимута и угла места. Каналы угла места и азимута взаимосвязаны между собой и их влияние друг на друга определяется спецификой системы.

Значительные достижения оптоэлектроники позволили создать уникальные системы пространственного слежения. Эти системы позволяют измерять с большой точностью направление на объект. Вместе с тем, оптоэлектронные устройства могут иметь сравнительно небольшие габариты, что расширяет область их применения.

Обзор пространства для получения информации о находящихся в нем объектах - задача, которая решается повсеместно, каждый из нас делает это сотни раз за день. Особым классом таких задач является определение направления на объект. Другими словами пеленга на объект.

Пеленгом в навигации называют угол между северной частью меридиана наблюдателя и направлением из точки наблюдения на объект. Пеленг измеряется по часовой стрелке от нуля до полной дуги окружности. Для измерения пеленга необходимы две точки: наблюдатель и объект, а также на направление на север. Для определения пеленга на объект существует целый класс специальных устройств — пеленгаторов. В робототехнике

пеленгатор привязан к тележке робота, поэтому он определяет направление на объект относительно собственно системы координат робота.

Измерение направления на объект в движении позволяет по совокупной информации определить не только угловое положение робота относительно пеленгуемого объекта (например маяка), но и расстояние до него. Таким образом использование пеленгаторов, установленных на роботе, позволяет успешно решать задачи локальной навигации.

Рассмотрим типовую функциональную схему системы пространственного слежения [51], представленную на рисунке 3.1. Пеленгатор или пе-

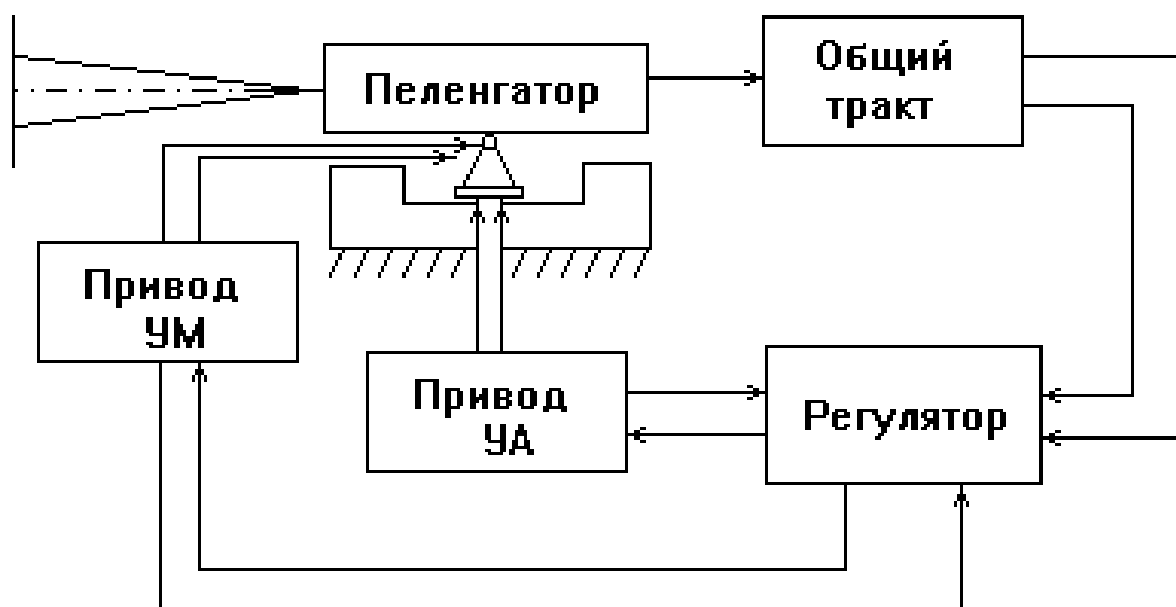


Рисунок 3.1 — Функциональная схема системы пространственного слежения

ленигационное устройство удерживает в поле зрения подвижный объект, обрабатывая с помощью приводов углов места (УМ) и азимута (УА) рассогласование между направлением на объект и осью направленности излучения (осью визирования). Относительное рассогласование между направлением на объект и осью визирования преобразуется пеленгатором и общим трактом в электрические сигналы, поступающие на регулятор, управляющий приводами УМ и УА. Выходные сигналы общего тракта, как правило, зависят нелинейно от ошибок по углам места и азимута. Регулятор может быть выполнен в виде двух автономных регуляторов для каждого из каналов.

В приводах имеют место измерители скорости угловых перемещений (тахогенераторы) и информация о скорости используется для выработки управляющих воздействий в регуляторе, что отражено на рисунке 3.1 в

виде обратных связей с приводов УМ и УА.

Для первоначального наведения пеленгатора на объект используется система целеуказаний. При недостаточной априорной информации о положении объекта цели организуется поиск объекта. Переход от поиска к сопровождению объекта называют захватом цели. Информация о направлении на объект снимается с датчиков углов разворота пеленгатора [24, 25, 51].

3.2. Фотоэлектрический датчик, принцип действия

Оптическая система вырабатывает сигнал, который содержит в себе данные о перемещении, на которое двигателю необходимо переместить пеленгационное устройство. Сигнал, пройдя через общий тракт, функциональная схема которого представлена на рисунке 3.1, поступает на микроконтроллер, который по определенному алгоритму обрабатывает его и передает драйверам двигателей. Драйверы вырабатывают управляющие воздействия для шаговых двигателей. После этого двигатели перемещают пеленгационное устройство по двум осям на заданные углы. Датчики нуля угла поворота отслеживают перемещение пеленгационного устройства по двум координатным осями и передают данные о нем микроконтроллеру. На основе этих данных микроконтроллер корректирует сигналы, передаваемые драйверам. Таким образом, осуществляется перемещение пеленгационного устройства на углы, указанные задающим устройством с необходимой точностью.

На рисунке 3.2 представлена функциональная схема блока обработки сигнала, поступающего с квадрантного фотодиода. На схеме показаны зоны квадрантного фотодиода, каждая из которых принимая световое излучение, выдает переменное напряжение соответствующее принятому излучению. Для обеспечения малой погрешности измерений сигнал маяка модулируется по яркости с фиксированной частотой, например 16 кГц. Затем, напряжение с фотодиодов, усиленное на усилителях, поступает на полосовые усилители, где выделяется напряжение частотой 16кГц, соответствующее частоте излучения маяка. Далее все сигналы с полосовых усилителей суммируются. На каждый фазочувствительный выпрямитель поступает сигнал с соответствующего полосового усилителя и суммарный сигнал. ФЧВ выдает импульсное напряжение, которое проходя через RC фильтр сглаживается и поступает на АЦП МК [48, 36, 9].

На рисунке 3.3 показано взаимное расположение квадрантов фотоприемника в системе координат X-Y пеленгатора.

Квадранты фотоприемника расположены вдоль осей координат попар-

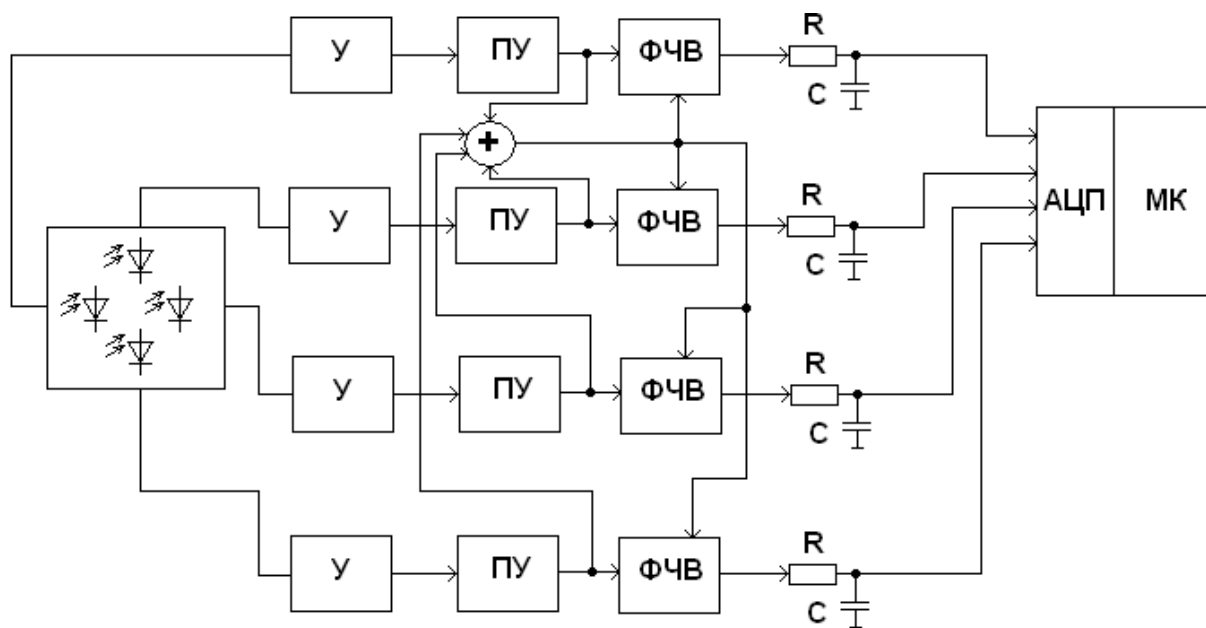


Рисунок 3.2 — Функциональная схема блока обработки сигнала, поступающего с квадрантного фотодиода (У — усилитель; ПУ — полосовой усилитель; ФЧВ — фазочувствительный выпрямитель; R- резистор; С — емкость; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; МК — микроконтроллер)

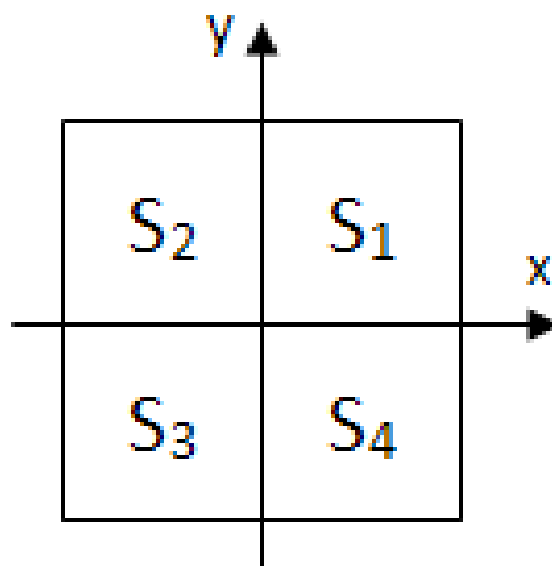


Рисунок 3.3 — Система координат фотоприемника пеленгатора (S1–S4 — чувствительные площадки квадрантного фотоприемника)

но. Когда маяк движется относительно пеленгатора, оптическое пятно смещается по чувствительной области от центра фотоприемника на некоторое расстояние l . Когда смещается центр пятна, изменяются площади засветки каждого из квадрантов фотоприемника, а вместе с этим меняются величины оптических потоков, попадающих на каждый квадрант фотоприемника. Будем считать, что оптические потоки по площадям засветки распределяются равномерно, так как диафрагма ограничивает поток излучения. Изменение потоков приводит к изменению напряжений, выдаваемых фотоприемником с каждого квадранта чувствительной области. Изменение напряжений способствует изменению разностей сигналов по горизонтальной и вертикальным осям, а следовательно изменению величин рассогласований углов ε по каждой из осей.

Рассмотрим случай, представленный на рисунке 3.4, когда центр оптического пятна перемещается по двум координатным осям, но пятно пока еще полностью попадает на чувствительную область фотоприемника.

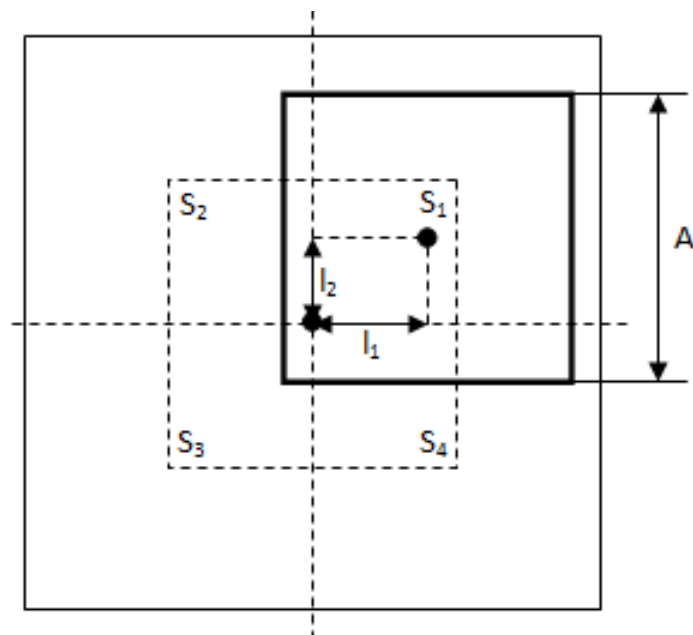


Рисунок 3.4 — Траектория смещения оптического пятна по чувствительной области фотоприемника

Исходя из рисунка 3.4, рассчитаем площади засветки для каждого квадранта фотоприемника:

$$s_1 = \left(\frac{A}{2} + l_1\right)\left(\frac{A}{2} + l_2\right);$$

$$s_2 = \left(\frac{A}{2} - l_1\right)\left(\frac{A}{2} + l_2\right);$$

$$s_3 = \left(\frac{A}{2} - l_1\right)\left(\frac{A}{2} - l_2\right);$$

$$s_4 = \left(\frac{A}{2} + l_1\right)\left(\frac{A}{2} - l_2\right).$$

Приращения площадей засветки для горизонтальной и вертикальных осей составят:

$$\Delta s'_1 = \Delta s_1 + \Delta s_4 - \Delta s_2 - \Delta s_3 = 2 \cdot A \cdot l_1;$$

$$\Delta s'_2 = \Delta s_1 + \Delta s_2 - \Delta s_3 - \Delta s_4 = 2 \cdot A \cdot l_2.$$

а суммарная площадь засветки равна:

$$S = A^2$$

Рассмотрим случай, когда центр оптического пятна перемещается по двум координатным осям, и пятно перестает полностью попадать на чувствительную область фотоприемника, т.е. маяк постепенно исчезает из поля зрения пеленгатора (см. рисунок 3.5).

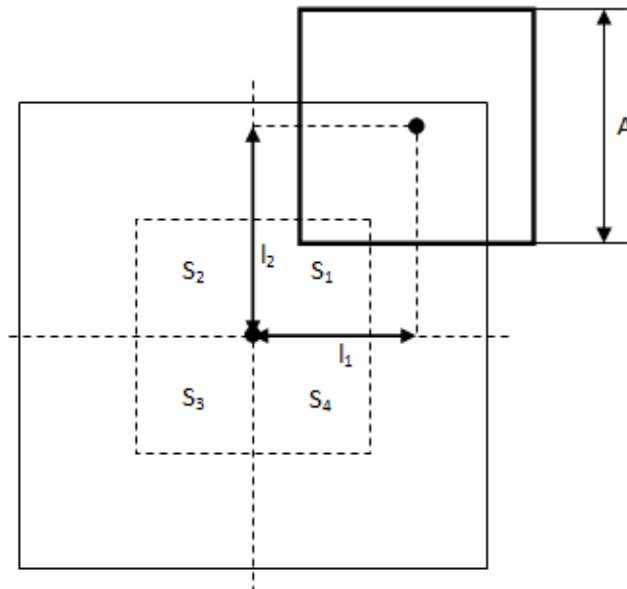


Рисунок 3.5 — Траектория смещения оптического пятна по чувствительной области фотоприемника

Исходя из рисунка 3.5, рассчитаем площади засветки для каждого квадранта фотоприемника:

$$s_1 = \frac{9 \cdot A^2}{4} + l_1 \cdot l_2 - \frac{3 \cdot A}{2} l_1 - \frac{3 \cdot A}{2} l_2;$$

$$s_2 = 0;$$

$$s_3 = 0;$$

$$s_4 = 0.$$

Следовательно, приращения площадей засветки по двум осям $\Delta s'_1$ и $\Delta s'_2$ будут равны величине площади s_1 .

Отсюда видно, что в случае, когда пятно начинает исчезать с чувствительной области фотоприемника, приращение площади засветки нелинейно зависит от смещения l .

Чтобы избавиться от нелинейности и упростить синтез системы, нормируем пеленгационную характеристику на l , т.е. разделим приращения площадей $\Delta s'_1$ и $\Delta s'_2$ на суммарную площадь засветки. Тогда пеленгационная характеристика будет иметь вид, представленный на рисунке 3.6.

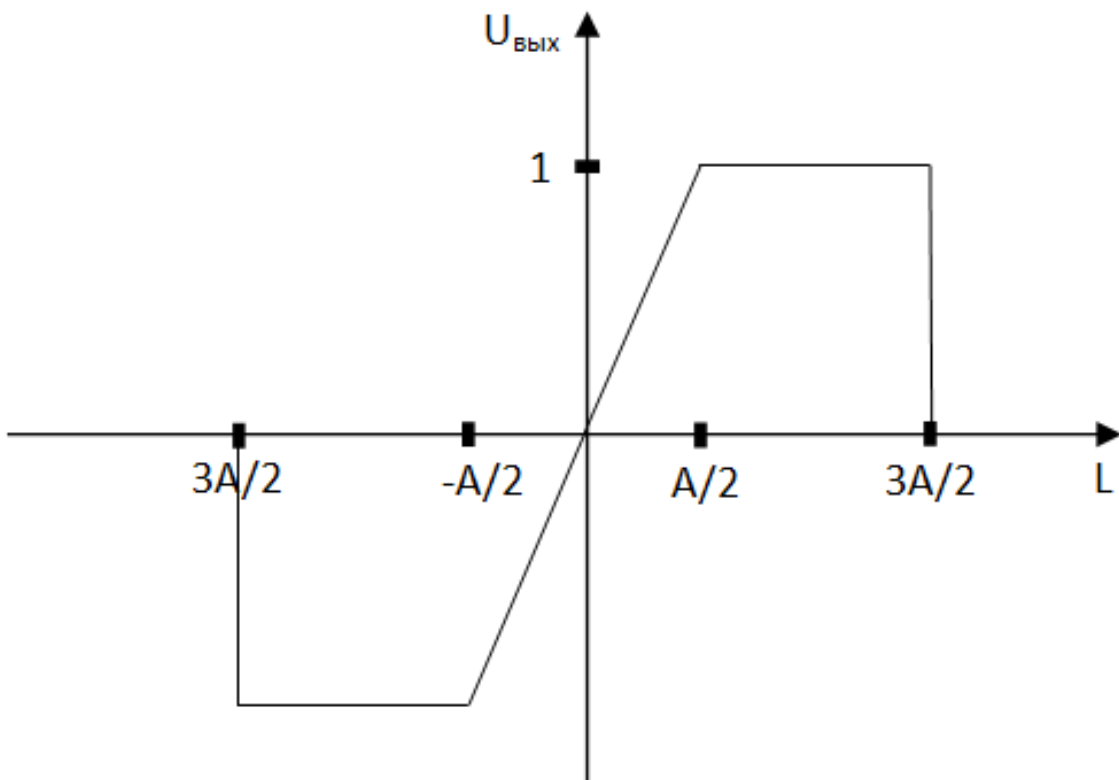


Рисунок 3.6 — Нормированная пеленгационная характеристика

Нормирование сигналов фотоприемников позволяет сделать фотоприемную систему, не зависящей от величины потока излучения и расстояния до маяка. Однако на практике получить характеристику, как на рисунке 3.6, обычно не удается. Это связано с тем, что форма светового пятна

при изменении дальности до маяка не сохраняется. В результате реальная статическая характеристика оказывается сглаженной, и коэффициент передачи на линейном участке изменяется при изменении дальности до объекта визирования [51].

3.3. Модели систем пространственного слежения

Основными требованиями, предъявляемыми к системам пространственного слежения, являются обеспечение надежного захвата и высокая точность слежения за объектом в режиме сопровождения. В данном разделе в основном остановимся на решении задачи захвата и синтеза регуляторов, обеспечивающих требуемые динамические свойства с учетом специфики систем пространственного слежения.

В соответствии с функциональной схемой (рисунок 3.1) структуру систем пространственного слежения по каналам УМ и УА можно представить в виде, изображенном на рисунке 3.7.

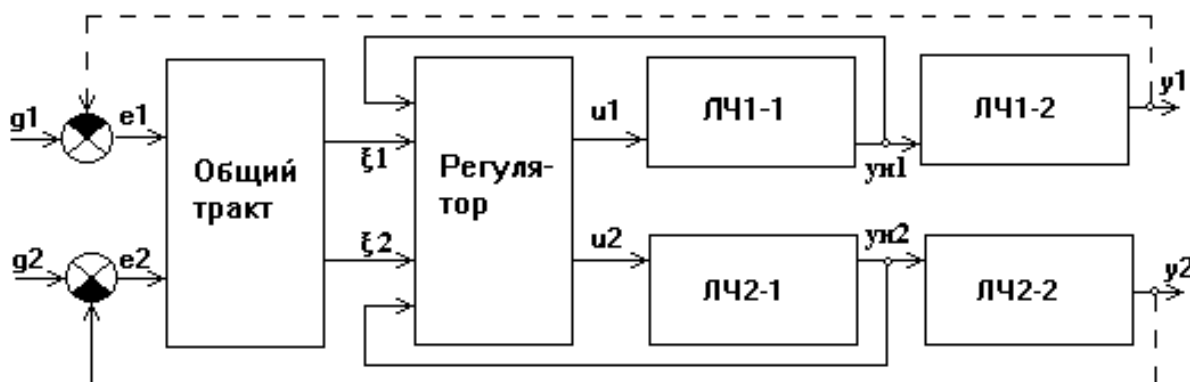


Рисунок 3.7 — Структурная схема каналов углов места и азимута

На этом рисунке применены следующие обозначения: y_1, y_2 — регулируемые величины — угловые значения направления оси визирования по углам места и азимута соответственно; q_1, q_2 — входные значения, определяющие значения углов места и азимута направления на подвижный объект; e_1, e_2 — ошибки рассогласования; ξ_1, ξ_2 — выходные сигналы с общего тракта функционально нелинейно связанные с ошибками рассогласования e_1 и e_2 ; u_1 и u_2 — управляющие воздействия, вырабатываемые регулятором и поступающие на приводы УМ и УА соответственно; y_{u1}, y_{u2} — измеряемые переменные, величины, пропорциональные скоростям изменения угловых положений y_1, y_2 ; ЛЧ i -1 и ЛЧ i -2 ($i=1,2$) — линейные части моделей описания приводов УМ и УА [31, 51].

Детализируем модели общего тракта и линейных частей системы пространственного слежения, которые наиболее часто используются для анализа и синтеза подобного класса систем. Модель общего тракта представлена на рисунке 3.8.

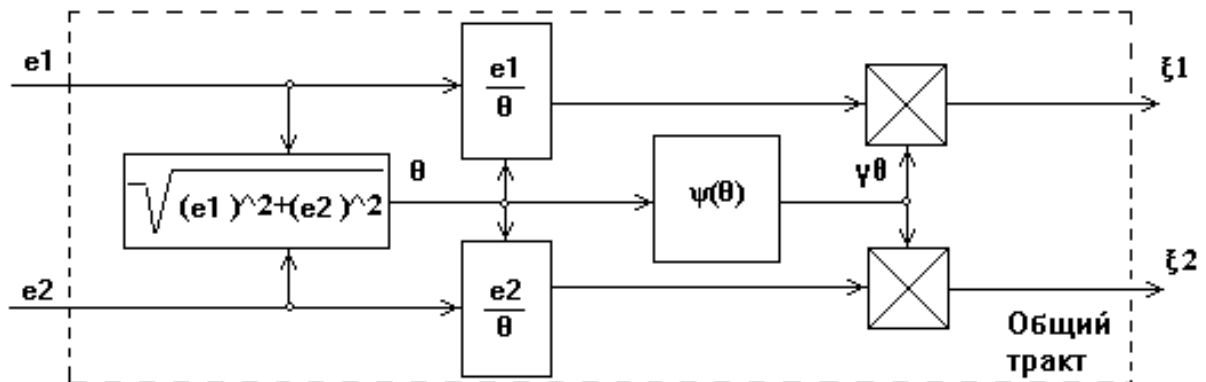


Рисунок 3.8 — Структурная схема общего тракта

Выходными переменными являются ошибки рассогласования между угловыми значениями направлений на подвижный объект и осью направления визирования e_1 и e_2 , величина Θ есть длина вектора ошибки $e = [e_1 \ e_2]^T$ и равна

$$\Theta = \sqrt{e_1^2 + e_2^2} = \|e\|. \quad (3.1)$$

$\psi(\Theta)$ — нелинейная зависимость, изображенная на рисунке 3.9, отра-

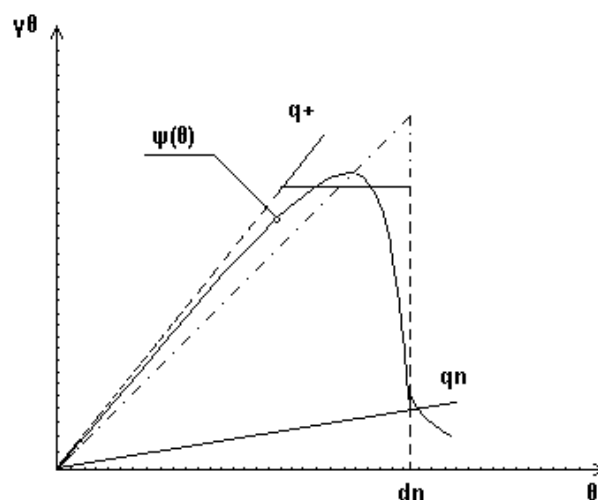


Рисунок 3.9 — Реальная пеленгационная характеристика

жающая свойства пеленгатора и удовлетворяющая ограничениям

$$0 < \psi(\Theta) \leq q_+ \cdot \Theta,$$

$$\psi(0) = 0.$$

Условные обозначения структурной схемы (рисунок 3.8) означают, что сигналы $p1$ и $p2$ после умножителей равны

$$p1 = \psi(\Theta) \cdot \frac{e1}{\Theta},$$

$$p2 = \psi(\Theta) \cdot \frac{e2}{\Theta},$$

или если ввести вектор $p = [p1 \ p2]$, то

$$p = \psi(\Theta) \cdot \frac{e}{\Theta}$$

Нелинейную зависимость $\psi(\Theta)$ (рисунок 3.9) называют пеленгационной характеристикой. Эта характеристика существенно нелинейна, но при решении задач анализа и синтеза допускает ее аппроксимацию кусочно — линейными функциями, отрезком синусоиды или более сложными зависимостями. На рисунке 3.9 для примера изображены аппроксимации пеленгационной характеристики линейной зависимостью (штрихпунктирная линия) в пределах $\Theta \in [0, d_n]$, где d_n такое значение, которое определяет поле зрения (апертуру) пеленгационного устройства, и линейной характеристикой с насыщением $\Theta \in [0, d_n]$ (пунктирная линия). Отметим, что нелинейная функция $\psi(\Theta)$ является функцией компонент вектора ошибки $e1$ и $e2$, так как значение Θ есть длина вектора ошибки. Поэтому эту нелинейную функцию можно трактовать как зависимость от двух переменных $e1$ и $e2$, а геометрическая интерпретация этой зависимости приведена на рисунке 3.10 а).

При такой трактовке зависимость выходной переменной нелинейности γ_Θ от переменных $e1$ и $e2$ задается поверхностью, образованной вращением кривой $\gamma_\Theta = \psi(e1)$ при $e2=0$ вокруг оси в пространстве $(\gamma_\Theta, e1, e2)$. При этом всем векторам ошибок одной и той же длины $\Theta = \sqrt{(e'_1)^2 + (e'_2)^2} = d_1$ соответствует одно и то же значение выходной переменной γ_1 . На рисунке 3.10 б) в плоскости ошибок $e1$ и $e2$ изображена поверхность постоянного уровня (окружность) $v^2 = d_1^2$, определяющая задание множества векторов ошибок одинаковой длины d_1 , которые неразличимы по значению γ_1 выходной переменной нелинейности. Поверхность постоянного уровня $v^2 = d_n^2$ ограничивает поле зрения — апертуру пеленгатора. Значение d_n^2 зависит от уровня полезного сигнала на выходе пеленгатора на спаде пеленгационной характеристики. Заметим, что величина, определяемая соотношением (5.1) евклидова норма вектора ошибок, т. е. $\Theta = \|e\|$, а поэтому $\psi(\Theta) = \psi(\|e\|)$.

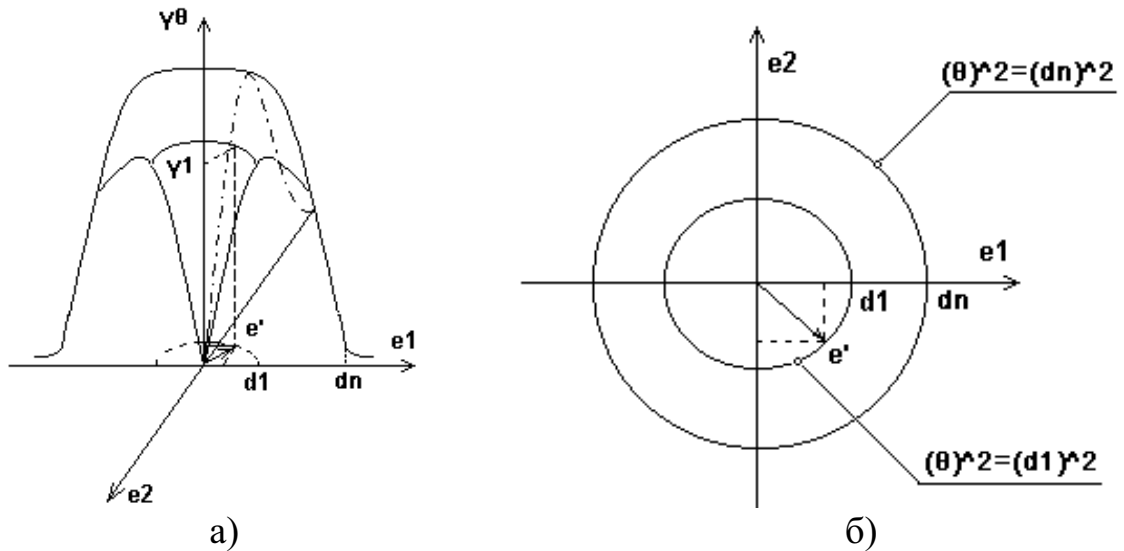


Рисунок 3.10 — Реальная пеленгационная характеристика, а) — в пространстве ошибок и выходной переменной, б) — в пространстве ошибок

На рисунке 3.11 изображена типовая структура привода следящей радиолокационной станции по одному из каналов, состоящего из двигателя постоянного тока и редуктора. На структурной схеме приняты следующие обозначения:

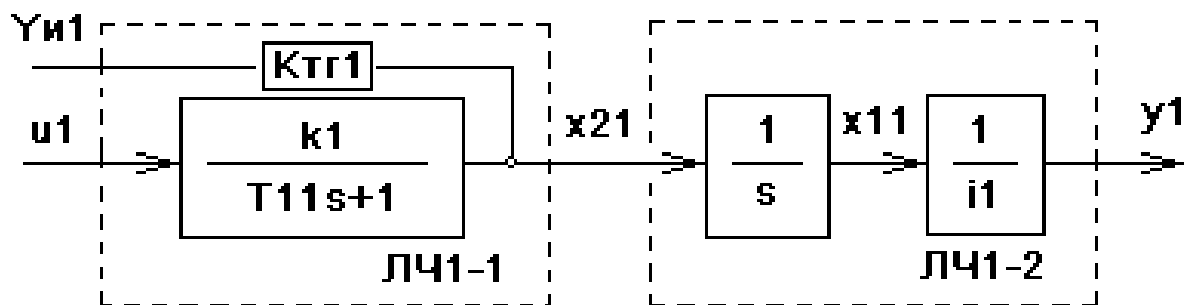


Рисунок 3.11 — Структурная схема привода

щие обозначения: x_{1i} — угол поворота ротора двигателя; x_{2i} — скорость изменения угла поворота ротора двигателя; i_i — коэффициент редукции; k_i — коэффициент передачи двигателя; T_i — постоянная времени двигателя постоянного тока. В рассматриваемом приводе к ЛЧ1-1 относится модель описания двигателя постоянного тока относительно скорости вращения ротора двигателя x_{2i} . К ЛЧ1-2 относится модель, описывающая связь угловых положений пеленгатора (антенны) y_i со скоростью вращения ротора двигателя x_{2i} . Скорость вращения двигателя измеряется посредством тахогенератора с коэффициентом передачи $k_{тгi}$ и y_{ni} — переменная (на-

пряжение) пропорциональная скорости вращения x_{2i} .

Итак, совместное описание общего тракта и линейных частей определяет модель ОУ.

В системах пространственного слежения переход от режима поиска к режиму автосопровождения объекта наблюдения называют захватом цели. Под режимом захвата будем понимать состояние системы начиная с момента попадания объекта наблюдения в поле зрения системы (в пределы апертуры пеленгационной характеристики) до момента, начиная с которого система пространственного слежения сопровождает цель с требуемой для обеспечения заданной цели функционирования этой системы точностью. Анализ захвата состоит в определении условий захвата — области начальных отклонений, из которой все траектории системы стягиваются к устойчивому положению равновесия, т.е. осуществляется переход к режиму автосопровождения. Режим захвата может дополнительно характеризоваться временем перехода от режима поиска к режиму сопровождения.

В этом параграфе остановимся на вопросе определения области захвата для систем пространственного слежения[51].

В режиме сопровождения целью функционирования систем является поддержание малых рассогласований при слежении за объектом наблюдения.

3.4. Исследование режимов захвата и автосопровождения навигационных систем мобильных роботов

В данном подразделе мы исследуем режимы работы системы пространственного слежения (захват и автосопровождение). Для каждой системы (дискретной) мы посмотрим диапазоны входных постоянных воздействий, при которых работает захват цели, и линейно нарастающих, при которых работает слежение или автосопровождение. Также найдем критические значения этих воздействий, при которых происходит срыв процесса наблюдения за целью. Еще оценим [15] применение тех или иных регуляторов в зависимости от динамики поведения системы [27, 8, 23, 51].

На рисунке 3.12 представлена нелинейность, присутствующая в схеме общего тракта (см. рисунок 3.13).

Она описывается следующим соотношением:

$$\psi(\Theta) = a \cdot \sin(b \cdot \Theta),$$

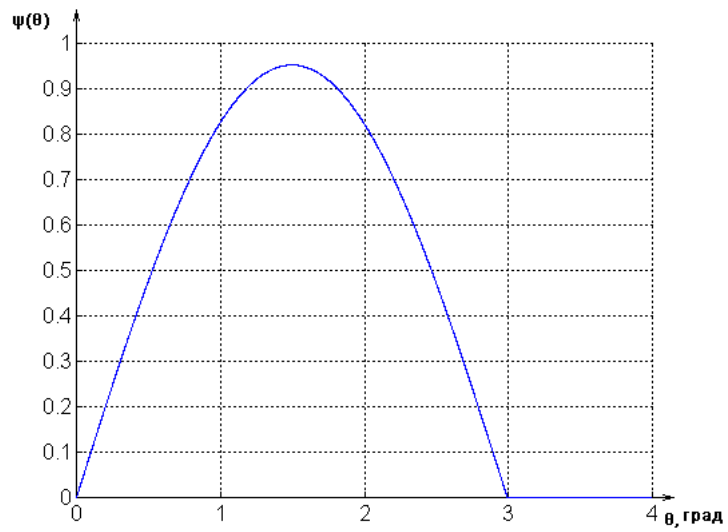


Рисунок 3.12 — Пеленгационная характеристика

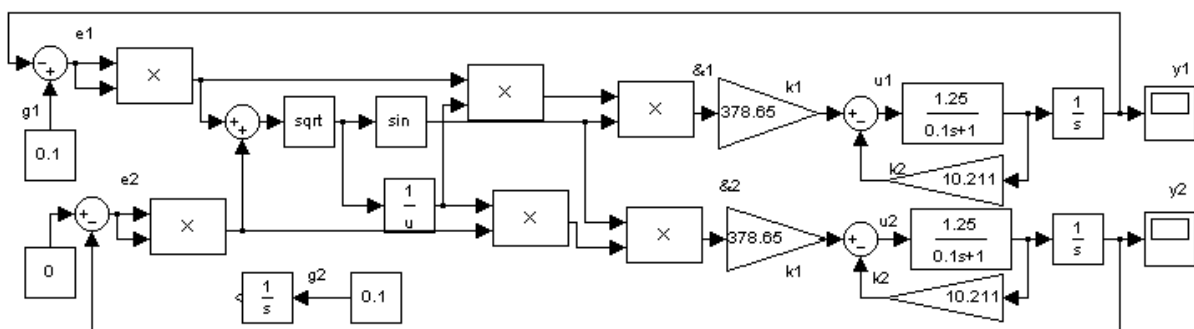


Рисунок 3.13 — Схема моделирования системы пространственного слежения с непрерывным П регулятором

где a — амплитуда нелинейности, b — частота. Первый параметр выбирается из условия, что касательная, проведенная к нелинейности, так, что тангенс угла наклона равен 1, т.е. $tg \alpha = 1$. Второй же — из условия, что полупериод нелинейности $\Theta = 3^\circ$. Таким образом, мы получаем нелинейность следующего вида $\psi(\Theta) = \frac{1}{0,105} \cdot \sin(0,105 \cdot \Theta)$.

На рисунке 3.14 можно видеть, что при различных значениях постоянных сигналов система ведет себя по-разному. При $g(t) = 2,8(t)$ проис-

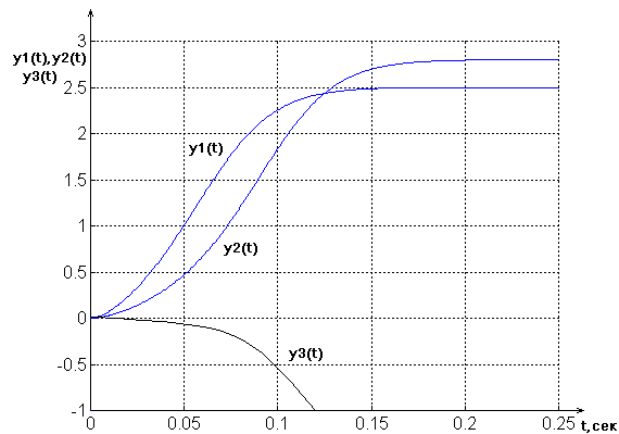


Рисунок 3.14 — Графики переходных процессов при граничных значениях постоянного воздействия $g(t)$

ходит затягивание переходного процесса в сравнении с переходным процессом при $g(t) = 2,5(t)$. Это обуславливается различными положениями входного сигнала на пеленгационной характеристике. При $g(t) = 3(t)$ и больше система прекращает захват и становится неустойчивой.

На рисунке 3.15 можно видеть, что при различных значениях линейно — нарастающего сигнала система ведет себя по-разному. При $g(t) =$

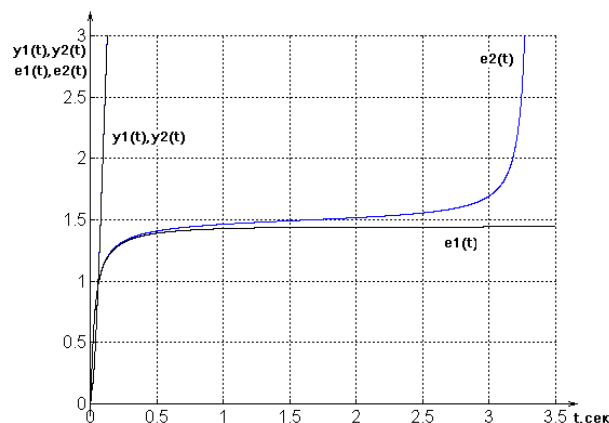


Рисунок 3.15 — Графики переходных процессов при граничных значениях линейно — нарастающего воздействия $g(t)$ и ошибок слежения $e(t)$

$32,7 \cdot t$ происходит слежение за целью. Это обуславливается различны-

ми положениями входного сигнала на пеленгационной характеристике. При $g(t) = 32,8 \cdot t$ система прекращает автосопровождение и становится неустойчивой.

Данные результаты (см. рисунки 3.14, 3.15) получены для непрерывной системы с П — регулятором, рассчитанным методом модального управления. Для оптимального же управления схема моделирования аналогична схеме, представленной на рисунке 3.13, с учетом того, что во втором случае матрица ЛСОС $k = [378,12 \ 10,2]$, результаты моделирования приведены на рисунках 3.16–3.17.

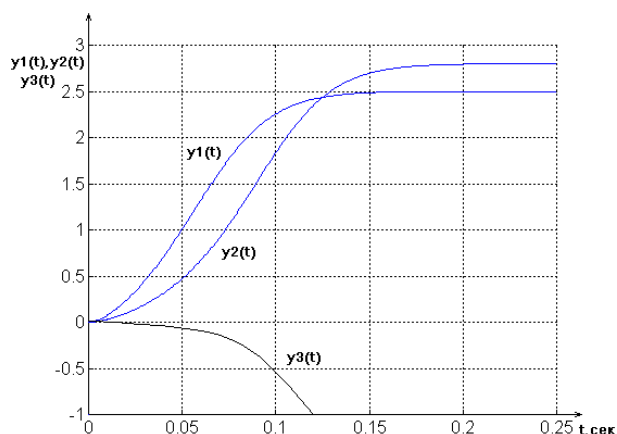


Рисунок 3.16 — Графики переходных процессов при граничных значениях постоянного воздействия $g(t)$

При $g(t) = 32,7 \cdot t$ система прекращает автосопровождение и становится неустойчивой.

На рисунке 3.17 можно видеть, что при различных значениях постоянных сигналов система ведет себя по-разному. При $g(t) = 2,8(t)$ проис-

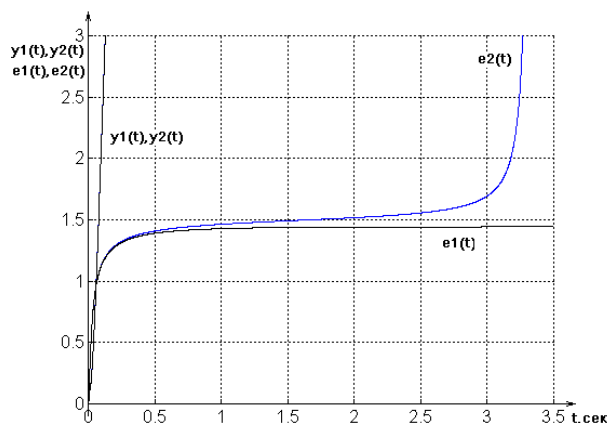


Рисунок 3.17 — Графики переходных процессов при граничных значениях линейно — нарастающего воздействия $g(t)$ и ошибок слежения $e(t)g(t)$

ходит затягивание переходного процесса в сравнении с переходным про-

цессом при $g(t) = 2,5(t)$. Это обуславливается различными положениями входного сигнала на пеленгационной характеристике. При $g(t) = 3(t)$ и больше система прекращает захват и становится неустойчивой.

На рисунке 3.20 можно видеть, что при различных значениях линейно — нарастающего сигнала система, показанная на рисунке 3.18, ведет себя по-разному. При $g(t) = 25,7 \cdot t$ происходит слежение за це-

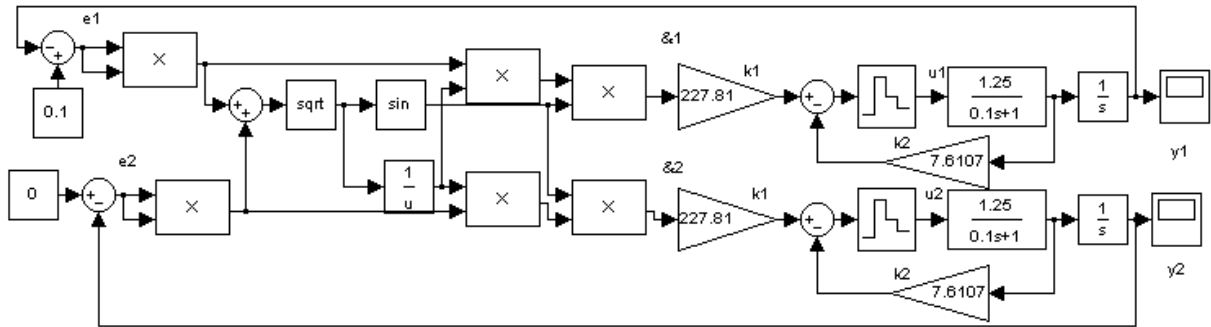


Рисунок 3.18 — Схема моделирования системы пространственного слежения с дискретным П регулятором.

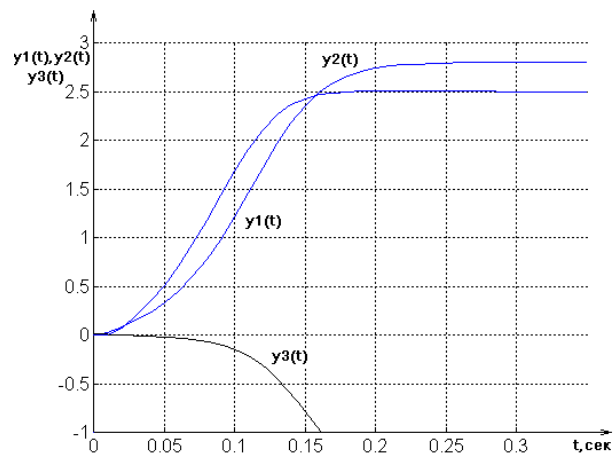


Рисунок 3.19 — Графики переходных процессов при граничных значениях постоянного воздействия $g(t)$

лю. Это обуславливается различными положениями входного сигнала на пеленгационной характеристике. При $g(t) = 25,9 \cdot t$ система прекращает автосопровождение и становится неустойчивой. Данные результаты (см. рисунки 3.18–3.20) получены для дискретной системы с П регулятором, рассчитанным методом модального управления. Для оптимального же управления схема моделирования аналогична схеме, представленной на рисунке 3.18, с учетом того, что во втором случае матрица ЛСОС $k = [197,11 \quad 6,906]$, результаты моделирования приведены на рисунках

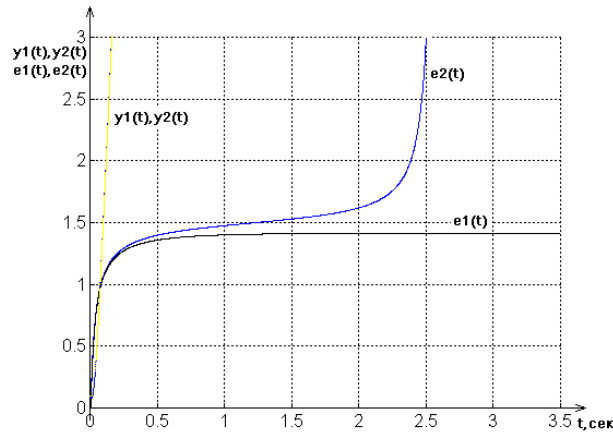


Рисунок 3.20 — Графики переходных процессов при граничных значениях линейно — нарастающего воздействия $g(t)$ и ошибок слежения $e(t)g(t)$

3.21–3.22.

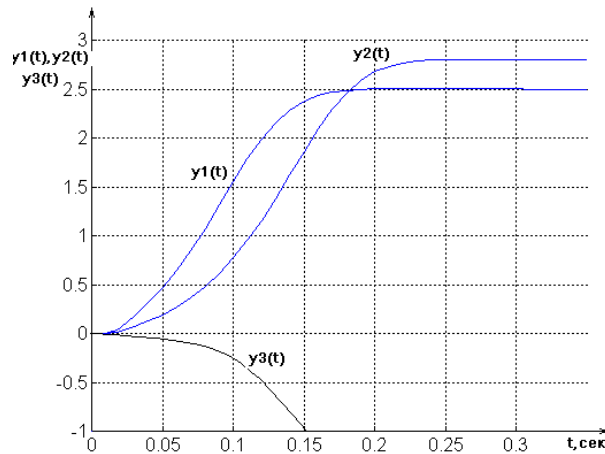


Рисунок 3.21 — Графики переходных процессов при граничных значениях постоянного воздействия $g(t)$

При $g(t) = 24,5 \cdot t$ система прекращает автосопровождение и становится неустойчивой.

На рисунке 3.24 можно видеть, что при различных значениях постоянных сигналов система, показанная на рисунке 3.23 ведет себя по-разному.

При $g(t) = 2,8(t)$ происходит затягивание переходного процесса в сравнении с переходным процессом при $g(t) = 2,5(t)$. Это обуславливается различными положениями входного сигнала на пеленгационной характеристике. При $g(t) = 2,99(t)$ и больше система прекращает захват и становится неустойчивой.

На рисунке 3.25 можно видеть, что при различных значениях линейно — нарастающего сигнала система ведет себя по-разному. При $g(t) = 207,7 \cdot t$ происходит слежение за целью. Это обуславливается различны-

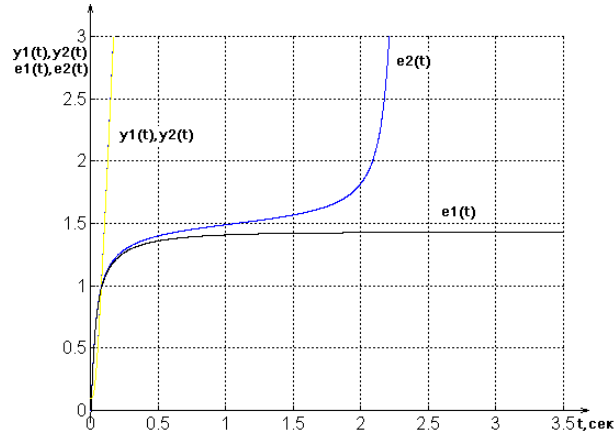


Рисунок 3.22 — Графики переходных процессов при граничных значениях линейно — нарастающего воздействия $g(t)$ и ошибок слежения $e(t)g(t)$

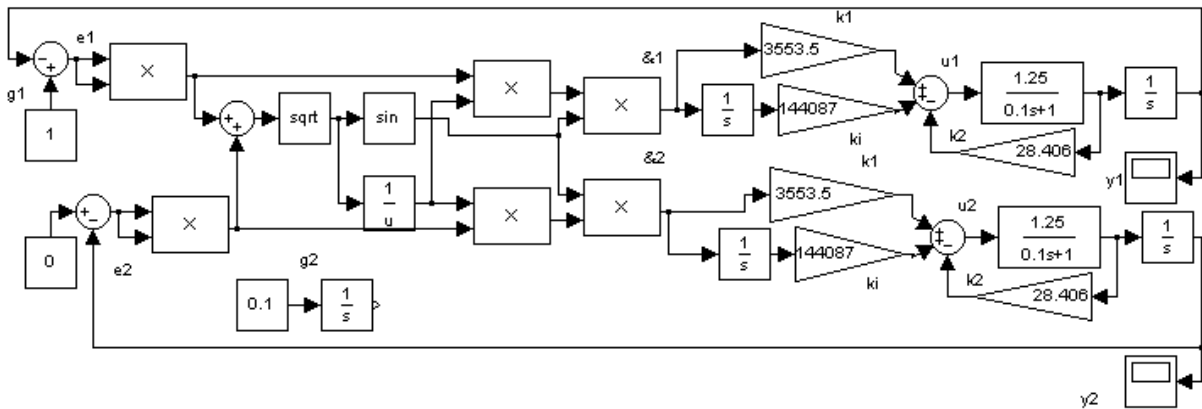


Рисунок 3.23 — Схема моделирования системы пространственного слежения с непрерывным ПИ регулятором

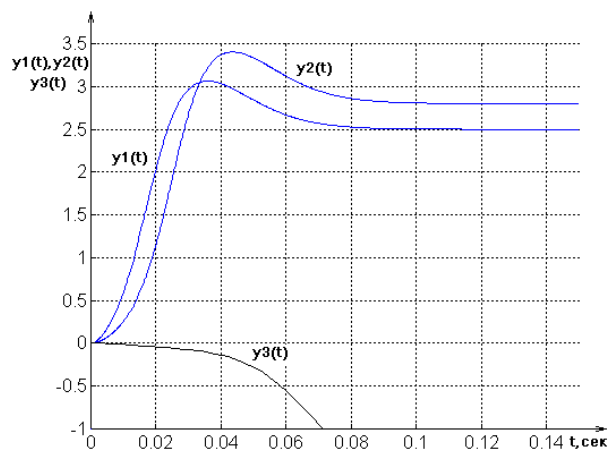


Рисунок 3.24 — Графики переходных процессов при граничных значениях постоянного воздействия $g(t)$

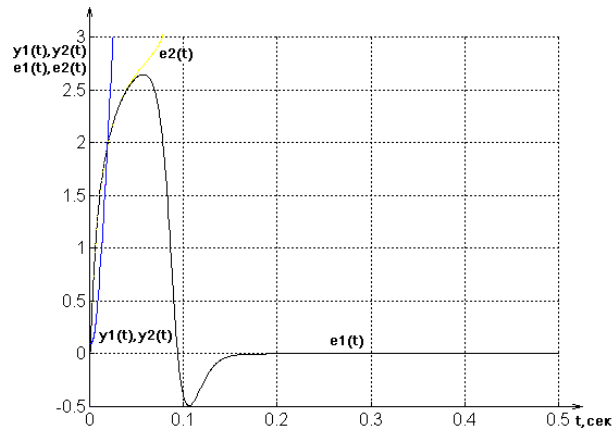


Рисунок 3.25 — Графики переходных процессов при граничных значениях линейно — нарастающего воздействия $g(t)$ и ошибок слежения $e(t)g(t)$

ми положениями входного сигнала на пеленгационной характеристике. При $g(t) = 207,8 \cdot t$ система прекращает автосопровождение и становится неустойчивой.

Данные результаты (см. рисунки 3.24, 3.25) получены для непрерывной системы с ПИ регулятором, рассчитанным методом модального управления. Для оптимального же управления схема моделирования аналогична схеме, представленной на рисунке 3.23, с учетом того, что во втором случае матрица ЛСОС $k = [-118186 \quad 3113,1 \quad 26,534]$, результаты моделирования приведены на рисунках 3.26–3.27.

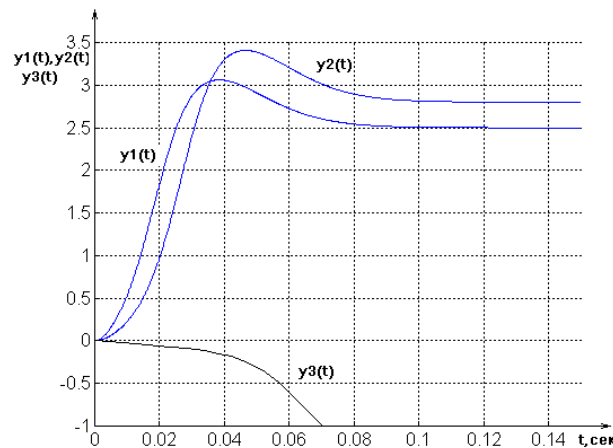


Рисунок 3.26 — Графики переходных процессов при граничных значениях постоянного воздействия $g(t)$

При $g(t) = 2,99(t)$ система прекращает захват цели и становится неустойчивой. При $g(t) = 194,5 \cdot t$ система прекращает автосопровождение и становится неустойчивой.

На рисунке 3.29 можно видеть, что при различных значениях постоян-

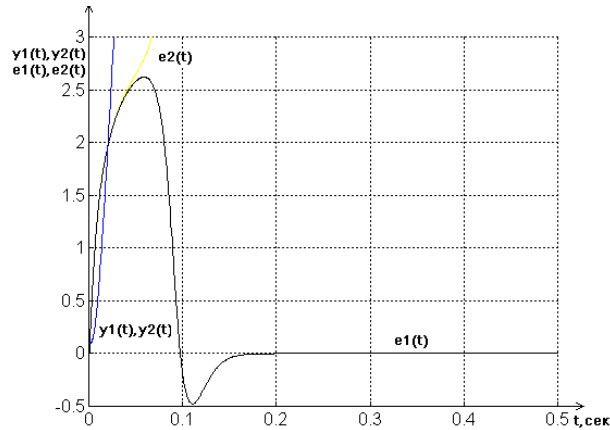


Рисунок 3.27 — Графики переходных процессов при граничных значениях линейно — нарастающего воздействия $g(t)$ и ошибок слежения $e(t)g(t)$

ных сигналов система, показанная на рисунке 3.28, ведет себя по-разному. При $g(t) = 2, 8(t)$ происходит затягивание переходного процесса в срав-

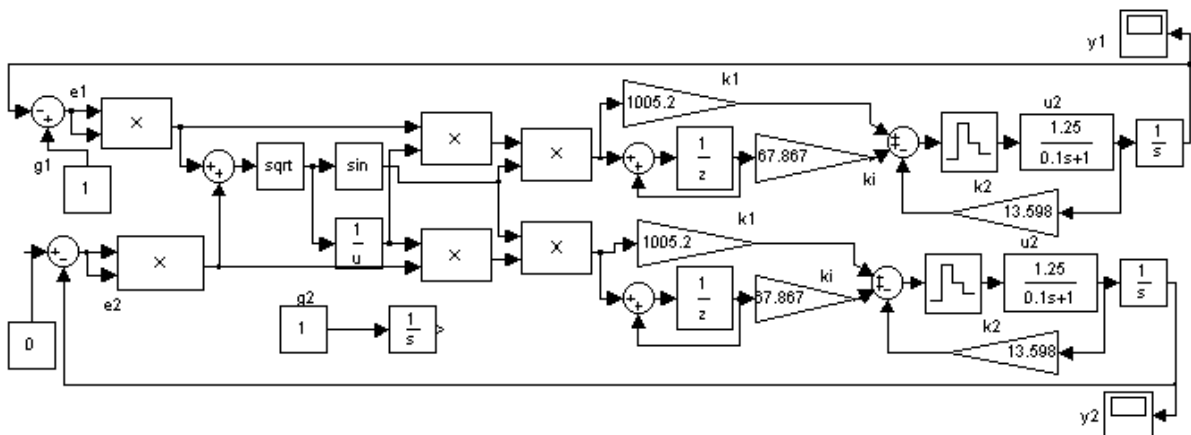


Рисунок 3.28 — Схема моделирования системы пространственного слежения с дискретным ПИ регулятором

нении с переходным процессом при $g(t) = 2, 5(t)$. Это обуславливается различными положениями входного сигнала на пеленгационной характеристике. При $g(t) = 2, 99(t)$ и больше система прекращает захват и становится неустойчивой.

На рисунке 3.30 можно видеть, что при различных значениях линейно нарастающего сигнала система ведет себя по-разному. При $g(t) = 194, 4 \cdot t$ происходит слежение за целью. Это обуславливается различными положениями входного сигнала на пеленгационной характеристике. При $g(t) = 194, 5 \cdot t$ система прекращает автосопровождение и становится неустойчивой.

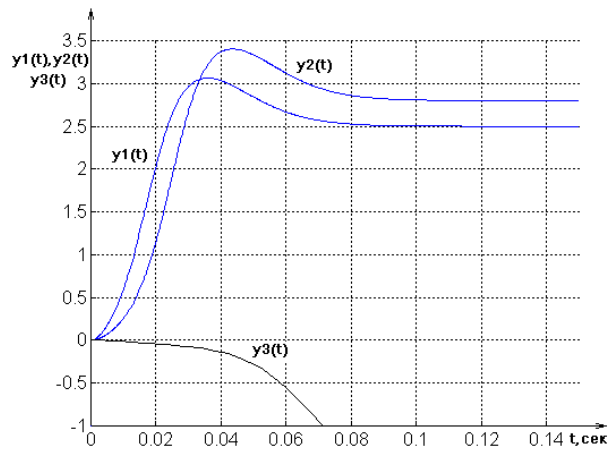


Рисунок 3.29 — Графики переходных процессов при граничных значениях постоянного воздействия $g(t)$

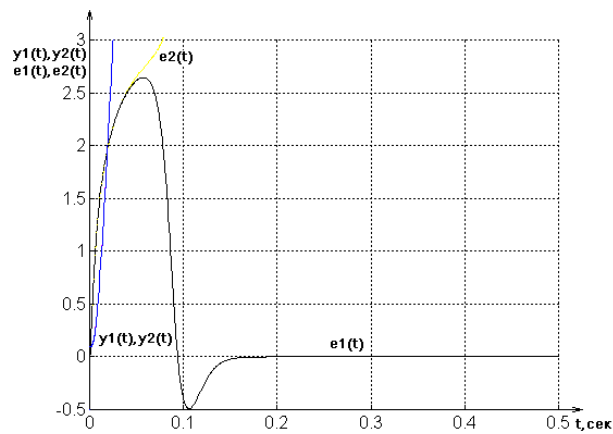


Рисунок 3.30 — Графики переходных процессов при граничных значениях линейно — нарастающего воздействия $g(t)$ и ошибок слежения $e(t)g(t)$

Данные результаты (см. рисунки 3.29, 3.30) получены для дискретной системы с ПИ регулятором, рассчитанным методом модального управления. Для оптимального же управления схема моделирования аналогична схеме, представленной на рисунке 3.28, с учетом того, что во втором случае матрица ЛСОС $k = [-67, 867 \quad 1005, 2 \quad 13, 598]$, результаты моделирования приведены на рисунках 3.31–3.32. При $g(t) = 2,99(t)$ система

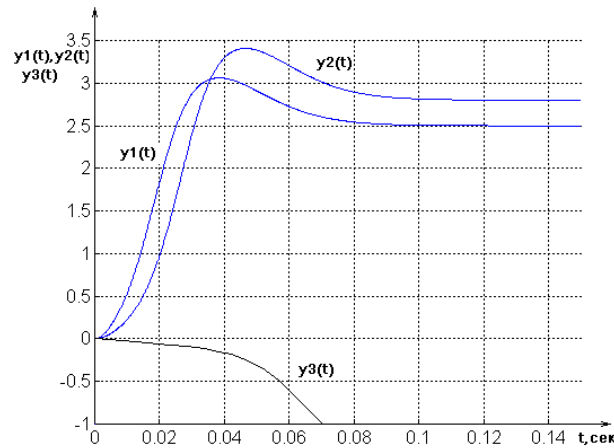


Рисунок 3.31 — Графики переходных процессов при граничных значениях постоянного воздействия $g(t)$

прекращает захват цели и становится неустойчивой. При $g(t) = 190,7 \cdot t$ система прекращает автосопровождение и становится неустойчивой.

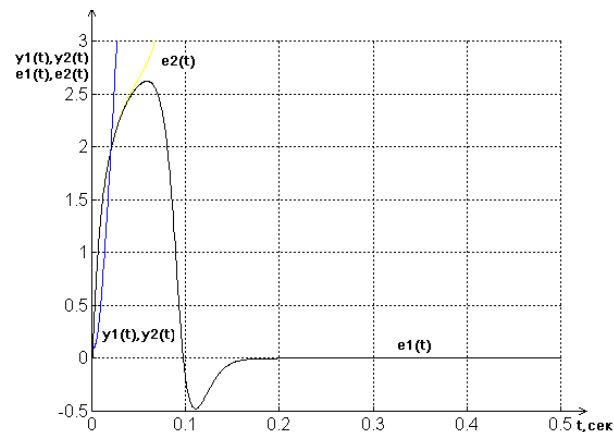


Рисунок 3.32 — Графики переходных процессов при граничных значениях линейно — нарастающего воздействия $g(t)$ и ошибок слежения $e(t)g(t)$

Из данного раздела видно, что при определенных условиях, становится невозможным обеспечить гарантированное сопровождение цели. Для принятия своевременного решения о переходе от захвата к сопровождению необходима методика, позволяющая заключить, что сопровождение будет успешным [51].

3.5. Виды устойчивости дискретных систем.

Рассмотрим невозмущенное уравнение движения дискретной системы, заданное в пространстве состояний:

$$x(m+1) = F(x(m)), \quad (3.2)$$

где $x \in R^m$ вектор состояний, F — n -мерная, нелинейная, векторзначная функция векторного аргумента такая, что при любых $x(0) \in R^n$ решение исходного разностного уравнения (3.2) существует и единственно, m — номер интервала дискретности $m = 0, 1, 2, \dots$

3.5.1. Асимптотическая устойчивость.

Определение 3.1. Будем говорить, что положение равновесия $x = 0$ асимптотически устойчиво (а.у.) во всем пространстве состояний, если для всех траекторий движения системы (3.2), исходящих из произвольных начальных условий для любого $x(0) \in R^n$, выполняется предельное соотношение

$$\left(\lim_{m \rightarrow \infty} \|x(m)\| = 0 \right),$$

т.е. вектор состояния, с течением времени — ростом номера интервала дискретности, стремится к началу координат.

Асимптотическая устойчивость говорит о стремлении траекторий движений к положению равновесия, но о быстроте стремления траекторий движения системы к устойчивому положению информация отсутствует. Для нелинейных систем свойство асимптотической устойчивости может иметь место в ограниченной области пространства состояния, а поэтому понятие асимптотической устойчивости нелинейных систем подразделяют на устойчивость в «большом» — во всем пространстве состояний и на устойчивость в «малом» — в ограниченной области пространства состояний.

3.5.2. Экспоненциальная устойчивость.

Определение 3.2. Будем говорить, что положение равновесия $x = 0$ экспоненциально устойчиво, если существуют такие положительные числа $\beta \geq 0$ или $0 < \alpha < 1$, что для всех траекторий движения системы (3.2), исходящих из произвольных начальных условий $x(0) \in R^n$, для любого номера интервала дискретности $m = 0, 1, 2, \dots$, выполняется неравенство:

$$\|x(m)\| \leq \beta \cdot \alpha^m \cdot \|x(0)\|.$$

Параметр α характеризует скорость сходимости процессов к положению равновесия, и чем меньше его значение, тем быстрее процессы стремятся к положению равновесия. Косвенно, этот параметр характеризует быстродействие системы. Геометрическая интерпретация данного вида сходимости на рисунке 3.33.

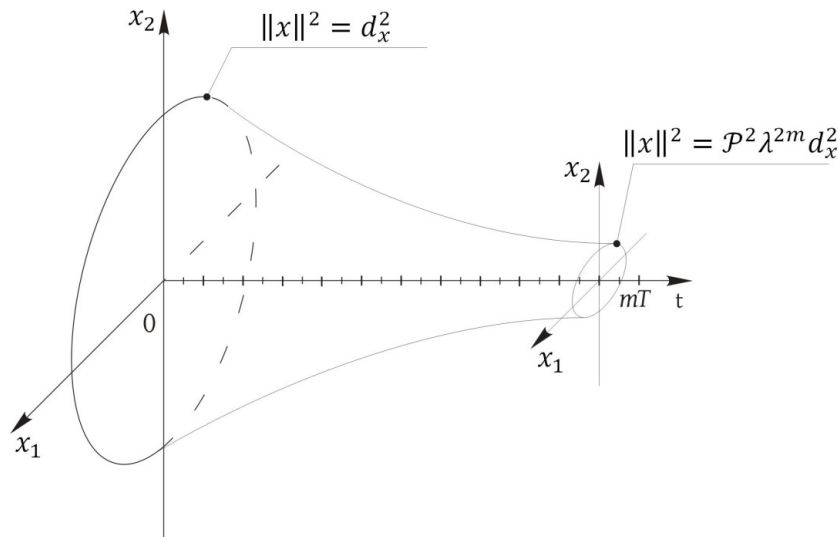


Рисунок 3.33 — Экспоненциальная устойчивость

Как и для вида асимптотической устойчивости в общем случае для нелинейных систем различают экспоненциальную устойчивость в «большом» — во всем пространстве состояний и в «малом» — в ограниченной области пространства состояний.

3.5.3. Качественная экспоненциальная устойчивость.

Определение 3.3. Положение равновесия $x = 0$ дискретной динамической системы называется качественно экспоненциально устойчивым (КЭУ) «в большом», если для любых траекторий движения $x(m)$ системы (3.2), исходящих из произвольных начальных условий $x(0) \in R^n$, существуют такие параметры $r > 0$, $\rho \geq 1$, $\beta : -1 < \beta + r < 1$, что для любого номера интервала дискретности $m : m = 0, 1, 2 \dots$ имеет место следующее неравенство:

$$\|x(m) - \beta^m x(0)\|_\nu \leq \rho [(\beta + r)^m - \beta^m] \|x(0)\|_\nu,$$

где норма определяется по выражению:

$$\|x(m)\|_\nu = \left[\sum_{i=1}^n |x_i|^\nu \right]^{\frac{1}{\nu}},$$

где ν - целое число, равное $\nu = 1, 2, \dots$, а x_i — i -ая компонента вектора состояния x . При $\nu = 2$ имеем евклидову норму, которая определяет «естественную» длину вектора, при $\nu = 1$ имеем модульную норму.

Поверхности постоянного уровня для различных значений ν приведены на рисунке 3.34.

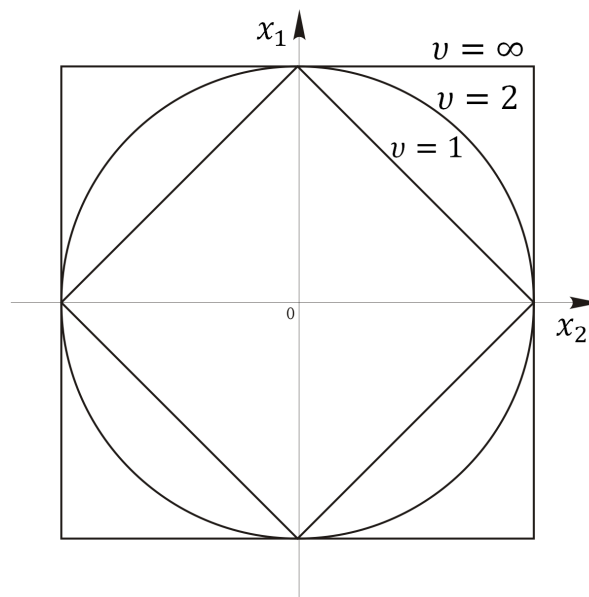


Рисунок 3.34 — Геометрическая интерпретация различных норм

Отметим, что для детерминированных процессов из сходимости по какой-либо норме следует сходимость по любой из норм.

Определение КЭУ дискретной динамической системы «в малом» может быть введено для ограниченной области, включающей начало координат с использованием аналогичного подхода.

Понятие качественной экспоненциальной устойчивости представляет собой наиболее общий случай всех видов устойчивости, в частности из КЭУ следует экспоненциальная и асимптотическая устойчивость [16, 33]. Для непрерывных и дискретных динамических систем параметры качественной экспоненциальной устойчивости r и β имеют следующий смысл. Параметр β определяет среднюю скорость сходимости траекторий движения к положению равновесия $x = 0$ и, следовательно, связан со временем переходного процесса t_n . Параметр r определяет отклонения (разброс) траекторий движения от усредненной траектории и характеризует степень колебательности процессов системы. Другими словами, па-

параметр β подобен коэффициенту сноса (среднее значение), а параметр r коэффициенту диффузии отклонение от среднего значения) при описании случайных процессов.

На основе определений КЭУ непрерывных и дискретных систем управления по соотношениям соответственно можно получить аналитическую связь таких показателей качества как время переходных процессов, значений первого выброса σ_0 и перерегулирования по множеству траекторий, геометрическая интерпретация которых приведена на рисунке 3.35 [12, 19].

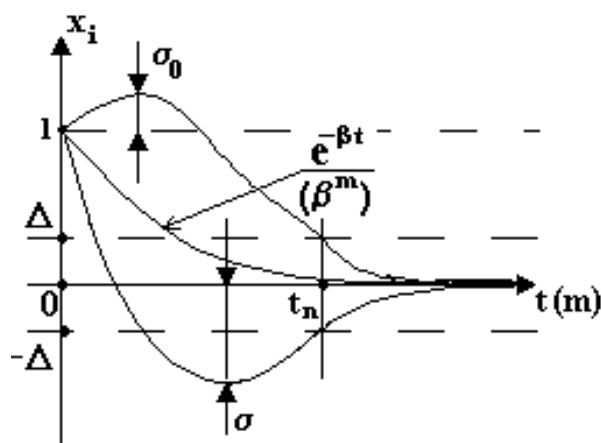


Рисунок 3.35 — Геометрическая интерпретация качественной экспоненциальной устойчивости

3.6. Метод Ляпунова для анализа свойства устойчивости дискретных систем.

Рассмотрим невозмущенное уравнение движения системы (3.2).

Метод Ляпунова основан на сопоставлении движений системы в пространстве состояний размерности n с отображениями движений системы в скалярное пространство положительных чисел [14, 7, 51]. При этом, если функции в пространстве положительных чисел будут убывать, то можно считать, что траектории движения системы стремятся к положению равновесия. Убывание функции в пространстве положительных чисел гарантирует отрицательное значение первой разности этой функции на траекториях движения системы.

Формализуем метод Ляпунова для исследования устойчивости дискретных систем.

Введем функцию Ляпунова $V(x)$ как функцию, задающую отображение векторов n пространства в пространство положительных чисел

$R^n \xrightarrow{\nu} R^+$ для которой выполняются следующие свойства:

1. $V(x) \geq 0$ для любого $x \in R^n$, и при $x = 0 \iff V(x) = 0$;
2. поверхности постоянного уровня $V(x) = c, c > 0 - const$ охватывают начало координат (положение равновесия);
3. функция $V(x)$ равномерно возрастает при равномерном возрастании нормы вектора $x : \|x\|$.

Наиболее простой и распространенный способ выбора функции Ляпунова является выбор ее в виде квадратичной формы. В качестве примера рассмотрим задание функции Ляпунова в виде квадратичной формы для объекта или системы второго порядка

$$V(x) = x^T P x,$$

где P — положительно определенная симметрическая матрица.

При этом $n = 2$. Рассмотрим поверхность постоянного уровня

$$V(x) = x^T P x = c,$$

которая представляет из себя поверхность — эллипсоид, охватывающий начало координат (точку равновесия). Причем большее значение поверхности постоянного уровня определяет поверхность, которая включает в себя поверхность более малого значения. 00

Теорема 3.1 Теорема Ляпунова [51]. *Для того, чтобы исходная система (3.2) была бы асимптотически устойчивой, требуется, чтобы существовала такая функция Ляпунова $V(x)$, что на всех траекториях движения системы, исходящих из произвольных начальных условий для любого номера интервала дискретности m , первая разность от функции Ляпунова должна быть отрицательной*

$$V(x(m+1)) - V(x(m)) < 0.$$

Другими словами, значение последующего значения функции Ляпунова на всех траекториях движения системы должно меньше предшествующего значения

$$V(x(m+1)) < V(x(m)),$$

то есть требуется, чтобы последующее значение вектора состояния лежало бы внутри области, ограниченной поверхностью постоянного уровня, значение которой определяется предшествующим значением вектора состояния.

Следствие 3.1 из теоремы 3.1. *Дискретная система будет экспоненциально устойчивой, если существует такая функция Ляпунова $V(x)$, что для всех траекторий движения системы, исходящих из произвольных начальных условий для любого номера интервала дискретности выполняется неравенство:*

$$V(x(m+1)) < \lambda^2 V(x(m)),$$

где $0 < \lambda < 1$, а функция Ляпунова $V(x)$ из класса квадратичных форм.

Покажем, что для любого номера интервала дискретности m выполняется соотношение:

$$\|x(m)\| < \beta \lambda^m \|x(0)\|,$$

где $\|x(m)\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$ — Евклидова норма, а

$$V(x) = x^T P x,$$

где $P \in R^{n \times n}$ — квадратичная форма.

Воспользуемся соотношением Релея

$$c_1^2 \|x\|^2 \leq x^T P x \leq c_2^2 \|x\|^2,$$

где c_1 — минимальное, а c_2 — максимальное собственные числа матрицы.

Из соотношения Релея следует что

$$c_1 \|x\| \leq V^{\frac{1}{2}}(x) \leq c_2 \|x\|,$$

а из условия экспоненциальной устойчивости следуют неравенства

$$\begin{aligned} V(x(m+1)) &\leq \lambda^2 V(x(m)) \\ V^{\frac{1}{2}}(x(m+1)) &\leq \lambda V^{\frac{1}{2}}(x(m)) \end{aligned}$$

Последовательно усиливая неравенства от $m=0$, получаем цепочку неравенств

$$\begin{aligned} m = 0 : V^{\frac{1}{2}}(x(1)) &\leq \lambda V^{\frac{1}{2}}(x(0)) \\ m = 1 : V^{\frac{1}{2}}(x(2)) &\leq \lambda V^{\frac{1}{2}}(x(1)) \leq \lambda^2 V^{\frac{1}{2}}(x(0)) \\ &\dots \\ V^{\frac{1}{2}}(x(m)) &\leq \lambda^m V^{\frac{1}{2}}(x(0)) \end{aligned}$$

и используя соотношение Релея, приходим к неравенству

$$c_1 \|x(m)\| \leq \lambda^m c_2 \|x(0)\|,$$

$$\|x(m)\| \leq \lambda^m \frac{c_2}{c_1} \|x(0)\|,$$

где

$$\beta = \frac{c_2}{c_1} \geq 1, \lambda = \alpha.$$

Геометрическая интерпретация экспоненциальной устойчивости приведена на рисунок 3.36.

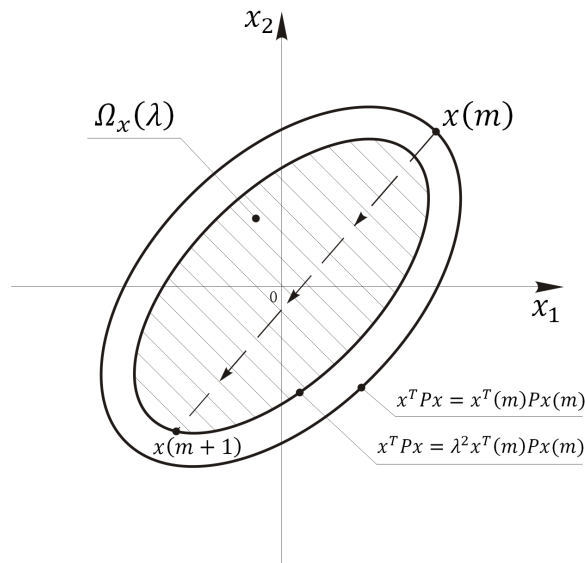


Рисунок 3.36 — Локальное поведение траекторий дискретных экспоненциально-устойчивых систем

3.6.1. Уравнения Ляпунова для анализа свойства устойчивости линейных дискретных систем.

Рассмотрим систему с невозмущенным уравнением движения

$$x(m+1) = Fx(m),$$

где $x \in R^m$ вектор состояний, $F \in R^{n \times n}$ — квадратная матрица с постоянными коэффициентами, определяющая динамические свойства системы.

Асимптотическая устойчивость.

Для исследования устойчивости выберем функцию Ляпунова из класса квадратичных форм:

$$V(x) = x^T P x,$$

где $P \in R^{n \times n}$ — положительно определенная симметрическая матрица.

Вычислим значение функции Ляпунова на траекториях движения системы для произвольного номера интервала дискретности, подставив правую часть исходного уравнения движения вместо последующего значения вектора состояния $x(m+1)$, в результате получим

$$V(x(m+1)) = x^T(m+1) P x(m+1) = x^T(m) F^T P F x(m)$$

Применим теорему Ляпунова об асимптотической устойчивости

$$\begin{aligned} V(x(m+1)) &< V(x(m)), \\ x^T(m) F^T P F x(m) &< x^T(m) P x(m) \\ x^T(m) (F^T P F - P) x(m) &< 0 \end{aligned}$$

Введем в рассмотрение дополнительную квадратичную форму $x^T Q x$, где $Q \in R^{n \times n}$ — положительно определенная симметрическая матрица. Рассмотрим, наряду с полученным неравенством, уравнение:

$$x^T(m) (F^T P F - P) x(m) < -x^T(m) Q x(m).$$

Из этого уравнения следует условие асимптотической устойчивости, а так как данное уравнение должно быть справедливо для любого значения вектора состояния $x \in R^n$, то выполняется и матричное уравнение:

$$F^T P F - P < -Q,$$

которое является матричным уравнением Ляпунова для дискретных систем.

Условие асимптотической устойчивости.

Для того, чтобы линейная дискретная система была бы асимптотически устойчивой, необходимо, чтобы для любой и достаточно, чтобы для какой-либо, по крайней мере, положительно полуопределенной матрицы Q решение уравнения Ляпунова относительно матрицы P было бы положительно полуопределенным.

Практическое использование условий асимптотической устойчивости линейной дискретной системы заключается в использовании достаточного условия. При этом процедура анализа устойчивости включает следующие последовательные шаги

1. Производится выбор матрицы $Q \geq 0$, по крайней мере, положительно полуопределенной (обычно $Q = I$).
2. Решается уравнение Ляпунова относительно матрицы P .
3. Осуществляется проверка матрицы P на положительную определенность.

Пример. Рассмотрим систему с уравнением движения

$$x(m+1) = Fx(m),$$

где $x(m) = \begin{bmatrix} x_1(m) \\ x_2(m) \end{bmatrix}$ – вектор состояния, $F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ матрица описания движений системы с нулевыми корнями характеристического уравнения. Исследуем данную систему на устойчивость. Для этого выберем $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ и разрешим уравнение Ляпунова относительно матрицы P :

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 \end{bmatrix},$$

$$F^T P F = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F^T P F - P = \begin{bmatrix} -p_1 & -p_2 \\ -p_2 & p_1 - p_3 \end{bmatrix},$$

$$\begin{cases} p_1 = 1 \\ p_2 = 0 \\ p_3 = 0 \\ p_4 = 2 \end{cases}$$

В результате получаем матрицу $P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$, которая является положительно определенной, а следовательно исходная система асимптотически устойчива.

Модифицированное уравнение Ляпунова для исследования экспоненциальной устойчивости (э.у).

Получим модифицированное уравнение Ляпунова для исследования экспоненциальной устойчивости дискретной линейной системы. Условие экспоненциальной устойчивости дискретной линейной системы

$$V(x(m+1)) \leq \lambda^2 V(x(m))$$

Вычислим значение функции Ляпунова на траектории движения системы, для чего подставим вместо последующего значения вектора состояния системы его выражение через предшествующее значение вектора состояния

$$\begin{aligned} V(x(m)) &= x^T(m)Px(m), \\ x^T(m+1)Px(m+1) - \lambda^2 x^T(m)Px(m) &\leq 0, \\ x^T(m)F^T PFx(m) - \lambda^2 x^T(m)Px(m) &\leq 0, \\ x^T(m)(F^T PF - \lambda^2 P)x(m) &\leq 0, \\ x^T(m)(F^T PF - \lambda^2 P)x(m) &= -x(m)^T Qx(m) \end{aligned}$$

Если матрица $Q \in R^{n \times n}$, по крайней мере положительно полуопределенная матрица, $Q \geq 0$, то из этого уравнения следует, что выполняется неравенство экспоненциальной устойчивости, для любого $x \in R^n$. Полученное уравнение эквивалентно матричному уравнению

$$F^T PF - \lambda^2 P = -Q,$$

которое является модифицированным уравнением Ляпунова и при значениях $\lambda < 1$ позволяет исследовать экспоненциальную устойчивость, а при значении $\lambda = 1$ совпадает с обычным уравнением Ляпунова для дискретных систем.

Модифицированное уравнение Ляпунова для исследования качественной экспоненциальной устойчивости.

На основе условий качественной экспоненциальной устойчивости повторяя те же самые выкладки приходим к модифицированному уравнению Ляпунова вида

$$(\bar{F} - \beta I)^T P(\bar{F} - \beta I) - r^2 P = -\bar{Q},$$

где β и r параметры качественной экспоненциальной устойчивости. Отметим, что при значении $\beta = 0$ и $r = 1$, данное уравнение совпадает с классическим уравнением Ляпунова для дискретных систем, а при $\beta = 0$ и при значении r меньшим единицы с модифицированным уравнением Ляпунова для исследования экспоненциальной устойчивости [12, 19, 20, 51].

Необходимые и достаточные корневые условия устойчивости дискретных систем.

Рассмотрим невозмущенное уравнение движения дискретной системы:

$$x(m+1) = Fx(m),$$

где $x \in R^m$ вектор состояний, $F \in R^{n \times n}$ — квадратная матрица с постоянными коэффициентами, определяющая динамические свойства системы.

Определим характеристическое уравнение системы и найдем корни:

$$\det(zI - F) = z^n + a_{n-1}z^{n-1} + \dots + a_1z + a_0 = 0,$$

причем z_1, z_2, \dots, z_n — корни уравнения.

Положим, что все корни z_1, z_2, \dots, z_n — вещественны и различны и найдем условие, когда система будет асимптотически устойчива:

$$\begin{aligned} x(m) &= F^m x(0), \\ \lim_{m \rightarrow \infty} x(m) &= \lim_{m \rightarrow \infty} F^m x(0) = 0 \end{aligned}$$

Для анализа поведения процессов в системе заменим базис в исходной системе таким образом, чтобы в новых координатах матрицы F была бы в диагональном виде, т.е. произведем замену переменных

$$x = M\xi,$$

где $\xi \in R^n$, $M \in R^{n \times n}$, ($\exists M^{-1}$) а матрица M , такая, что существует обратная матрица. Тогда исходное уравнение движения приобретает вид

$$\xi(m+1) = M^{-1}FM\xi(m),$$

Из множества матриц M выберем такую, которая приводит матрицу описания движения исходной системы к диагональной форме

$$M^{-1}FM = F_g = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & z_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & z_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & z_n \end{bmatrix},$$

тогда уравнения движения системы в новом базисе приобретают вид

$$\begin{bmatrix} \xi_1(m+1) \\ \xi_2(m+1) \\ \dots \\ \xi_n(m+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & z_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & z_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1(m) \\ \xi_2(m) \\ \dots \\ \xi_n(m) \end{bmatrix},$$

из которых следует, что для каждой из переменных вектора состояния в новом базисе последующее значение этой переменной от предшествующего значения переменной определяется соотношением

$$\xi_i(m+1) = z_i \xi_i(m), i = \overline{1, n}.$$

Другими словами, описание движения исходной системы эквивалентно системе из n скалярных разностных уравнений. Запишем решение каждого из n скалярных уравнений по каждой из переменных в зависимости от начальных значений

$$\xi_i(m) = z_i^m \xi_i(0),$$

откуда следует, что каждая из переменных вектора состояния с течением времени будет стремиться к нулю

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \xi_i(m) = \lim_{m \rightarrow \infty} z_i^m \xi_i(0) = \xi_i(0) \lim_{m \rightarrow \infty} z_i^m = 0,$$

тогда и только тогда, если модуль каждого из корней $|z_i| < 1$ меньше единицы.

Необходимые и достаточные корневые условия асимптотической устойчивости дискретных систем.

Для того, чтобы линейная дискретная система была бы асимптотически устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения по модулю были бы меньше единицы.

Если хотя бы один из корней по модулю больше единицы, то система неустойчива.

Уравнения Ляпунова как критерии расположения корней замкнутой системы в определенных областях комплексной плоскости внутри (вне) единичного круга с центром в начале координат.

Расположение корней на комплексной плоскости для случаев к.э.у. и э.у. процессов дискретных систем.

Рассмотрим множество матриц \bar{F} , с собственными числами (корнями характеристического уравнения) $\bar{z}_1, \bar{z}_2, \dots, \bar{z}_n$, расположенными в круге радиуса r с координатами в точке $(\beta; j0)$ — смещенный круг.

Рассмотрим множество матриц F , являющихся функциями от матрицы \bar{F} , т.е. таких, которые связаны подобными преобразованиями $F = \frac{1}{r}(\bar{F} - \beta I)$. И обозначим через собственные числа или корни характеристического уравнения матрицы F , т.е.

$$z_i = \frac{\bar{z}_i - \beta}{r},$$

где $i = \overline{1, n}$.

Т.к. все собственные числа \bar{z}_i лежат в круге радиуса r , смещенном на значение β , то все собственные числа z_i по модулю меньше 1.

С другой стороны, если все собственные числа z_i по модулю меньше 1, то для матрицы \bar{F} все собственные числа лежат в круге радиуса r , смещенном на значение β .

Запишем уравнение Ляпунова, как критерий расположения корней матрицы F , в единичном круге:

$$F^T P F - P = -Q,$$

подставим в уравнение Ляпунова выражение матрицы F через \bar{F} :

$$\frac{1}{r^2}(\bar{F} - \beta I)^T P (\bar{F} - \beta I) - P = -Q.$$

Домножив на r^2 получим:

$$(\bar{F} - \beta I)^T P (\bar{F} - \beta I) - r^2 P = -\bar{Q},$$

где $\bar{Q} = r^2 Q$.

На рисунке 3.37 изображены различные окружности, ограничивающие области корней при обеспечении различных видов устойчивости

Если $\beta = 0$ (круг центральный), то модифицированное уравнение принимает вид:

$$(\bar{F})^T P (\bar{F}) - r^2 P = -\bar{Q}.$$

Если $\beta = 0; r = 1$ (круг центральный, единичного радиуса), то модифицированное уравнение принимает вид:

$$(\bar{F})^T P (\bar{F}) - P = -\bar{Q}.$$

Практическое использование условий Качественной экспоненциальной устойчивости линейной дискретной системы заключается в использовании достаточного условия. При этом процедура анализа устойчивости включает следующие последовательные шаги

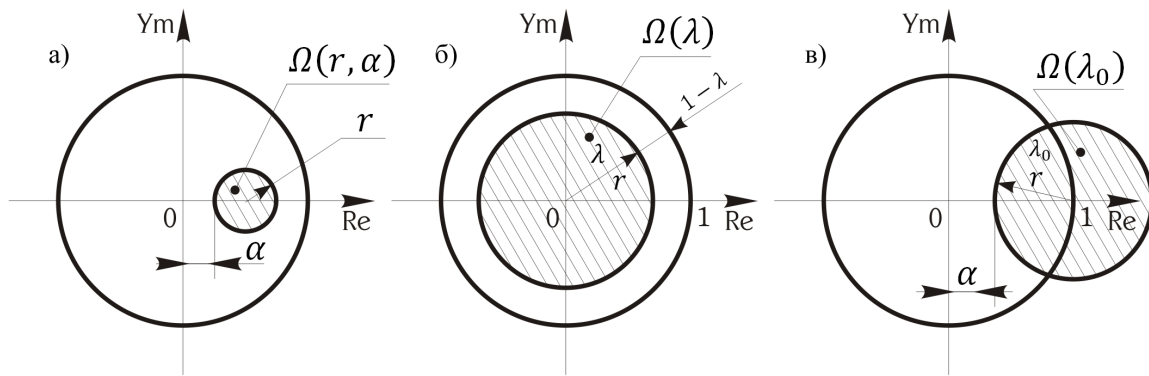


Рисунок 3.37 — Отображение круга в круг, а) — смещенный круг — к.э.у, б) — центральный круг — э.у.

1. Выбираются параметры β, r , производится выбор матрицы $Q \geq 0$, по крайней мере, положительно полуопределенной (обычно $Q = I$).
2. Решается модифицированное уравнение Ляпунова относительно матрицы P .
3. Осуществляется проверка матрицы P на положительную определенность. Если P положительно — определенная, то корни характеристического уравнения матрицы \bar{F} лежат в круге радиуса r , смещенном на значение β относительно начала координат.

Рассмотрим ситуацию, когда $\beta = 0; r < 1$.

Если все корни характеристического уравнения системы расположены в круге радиуса $r < 1$, т.е. $|z_i| < r, i = \overline{1, n}$, то в этом случае говорят, что система обладает запасом устойчивости $\eta = 1 - r$.

Запас устойчивости характеризует отклонение доминирующих корней (наибольших по модулю) от границы устойчивости.

Степень устойчивости косвенно характеризует быстродействие системы: чем больше значение степени устойчивости, тем более быстрые процессы характеризуют систему.

Приведенная классификация видов устойчивости справедлива, так же и для линейных непрерывных систем, а так же для систем со стохастическими возмущениями. Так же существуют и модификации критериев для исследования таких систем [33, 12, 51]

Глава 4

Системы технического зрения. Обнаружение препятствий

Существует множество способов обнаружения препятствий. К ним могут быть отнесены ультразвуковые, радарные, оптические и др. датчики. Приведем пример такого датчика.

4.1. Ультразвуковой датчик препятствий

Ультразвуковой датчик препятствия строится обычно по схеме ультразвукового дальномера [5]. Устройство представляет из себя головку излучателя с платой контроллера. Контроллер собран на базе микросхемы PIC16F676. Основным элементом — пьезоизлучатель фирмы MaxBotix. Параметры излучателя приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Параметры излучателя фирмы MaxBotix

Параметр	Значение
Уровень звукового давления (SPL), Дб	117
Чувствительность (SEN), Дб	-60
Импеданс, КОм	1
Длительность импульса, мс	<1
Собственная емкость, пф	2400 ± 20%
Диапазон рабочих частот, КГц	38–42

На рисунке 4.1 показан внешний вид ультразвукового датчика препятствия, а его параметры приведены в таблице 4.2.

Выходной сигнал представлен в цифровой и аналоговой формах. В качестве передатчика цифрового сигнала использован UART, аналоговый сигнал снимается с цифро-аналогового преобразователя.

Другой пример дальномера — промышленная модель URM37 v3.2 (разработка YeRobot, производство DFRobot). Сенсор работает в импульсном режиме: посылает ультразвуковой пучок и по задержке отраженного сигнала относительно посланного определяет расстояние до цели. Предусмотрены разные режимы работы дальномера: определение расстояния по запросу, постоянное сканирование пространства. Всё это делает сен-

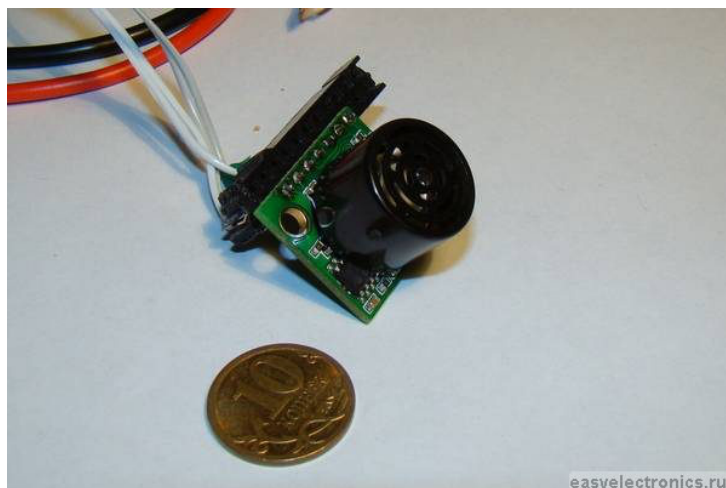


Рисунок 4.1 — Внешний вид ультразвукового датчика препятствия

Таблица 4.2 — Параметры датчика препятствия

Параметр	Значение
Автоматическая регулировка коэффициента усиления	Да
Обнаружение объектов практически на нулевом расстоянии	Да
Напряжение питания, В	2,5–5,5
Ток потребления, мА	2
Период измерений, мс	50

сор крайне гибким в использовании и подходящим для широкого круга задач. Выбор интерфейса TTL или RS232 производится простой перестановкой джамперов.

Оба эти датчика, как и большинство других, из перечисленных в начале раздела, обладают следующим недостатком: измерение производится только вдоль определенного вектора. В поле «зрения» датчика объекты незначительного размера могут не попасть. Конечно, может быть увеличен угол «обзора», но в данном случае маленький объект будет рассматриваться наравне с фоном, а значит дистанция до него будет оценена неверно. Второй, наиболее часто встречающийся подход — сужение измерительной трассы, с организацией сканирования пространства (см. главу 3). Это значительно усложняет систему, кроме того, восприятие пространства осуществляется последовательно, а не одновременно.

Альтернативой сканирующим дальнометрическим системам, лишенной упомянутых недостатков, может служить система технического зрения (СТЗ). Однако, СТЗ строится не на базе дальнометрических устройств, что усложняет алгоритм преобразования полученных от СТЗ данных в информацию о дистанции до объекта.

4.2. Датчик препятствий на базе системы технического зрения

В практике управления мобильным роботом возникает проблема быстрого сбора информации об окружающем его пространстве для корректного выполнения задания. Для повышения скорости выполнения задания приходится увеличивать как скорость движения его механических частей, так и скорость сбора и обработки информации [21]. Вследствие этого механическое воздействие при физическом контакте между роботом и препятствием или объектами манипулирования может стать разрушительным для системы.

Помимо этого мобильный робот должен обладать возможностью получения информации обо всех окружающих его объектах как неподвижных, так и двигающихся, что позволило бы ему обучаться, прокладывая наикратчайший курс для ускорения выполнения задания.

Случаи, когда информация об окружении заранее заложена разработчиками в программу, всё более становятся исключением, так как такие устройства недостаточно универсальны и безопасны [18, 22]. Рассмотрим основные методы обнаружения препятствий и идентификации их координат.

Предположим, что видеодатчик расположен на мобильном основании

и направлен по ходу его движения. В этом случае в поле зрения попадают препятствия, столкновения с которыми необходимо избежать или навигационные маяки. Для этого необходимо определить наличие самого препятствия и расстояние до него.

Предположим, что контур или характерные точки препятствия могут быть определены по изображению. В таком случае существует два основных подхода к определению расстояния до этого препятствия. Один из них основан на использовании методов стереовидения и родственного стереовидению метода — триангуляции, а второй — на использовании при обработке ряда кадров, а не одного, наряду с измерением параметров движения робота.

4.2.1. Метод стереовидения в задаче определения расстояния до препятствия

Метод стереовидения определения расстояния до препятствия основан на том, что видеокамера, ровно как и фотокамера, является по сути угловым прибором.

Каждая точка реального объекта O отображается в точку I действительного изображения, расположенную за фокусом f объектива или линзы, посредством излучаемого или отражаемого этим объектом света, как это показано на рисунке 4.2.

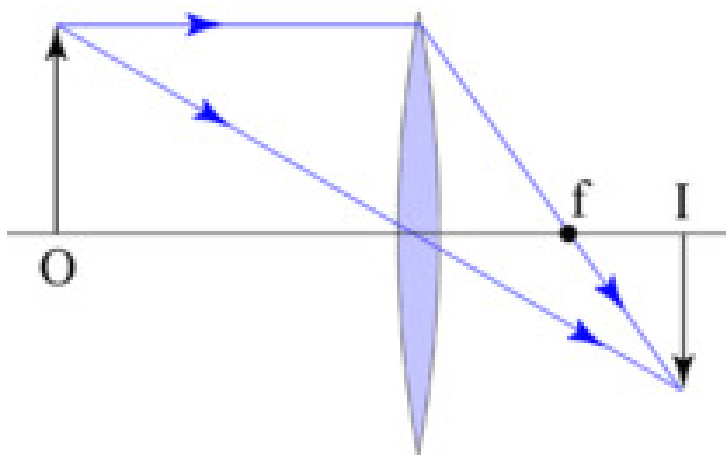


Рисунок 4.2 — Формирование точки оптического изображения

Для построения оптического изображения используют оптический объектив или собирающую линзу. В оптике эти устройства считаются равнозначными, но объектив состоит из набора линз (в некоторых объективах — из зеркал), рассчитанных для взаимной компенсации aberrаций и собранных в единую систему внутри оправы [32].

Изображение одной плоскости, перпендикулярной главной оптической оси объектива строится в одной плоскости действительного изображения, которая для изображаемой плоскости называется плоскостью наилучшего видения. Изображение любой другой плоскости будет смещено вдоль главной оптической оси объектива. Для ввода изображения в ЭВМ (преобразования оптического изображения в графическое), в большинстве случаев, используется прибор с зарядовой связью (ПЗС). Также могут быть использованы приборы с зарядовой инжекцией (ПЗИ) и другие.

ПЗС располагается в плоскости перпендикулярной главной оптической оси за фокусом объектива. В плоскости ПЗС будет построено действительное изображение плоскости находящейся на некотором, заранее определенном, расстоянии от объектива. Данное расстояние определяется объективом и расположением ПЗС относительно него. Любая другая плоскость будет изображена в плоскости ПЗС в виде пятна, тем большего, чем дальше ее плоскость наилучшего видения от плоскости ПЗС. До тех пор, пока получаемое на ПЗС пятно не превышает по размеру одного фоточувствительного элемента, изображение будет получаться резким, в противном случае начнет расплываться. Дистанция между крайними плоскостями оптического изображения, в которых изображение на ПЗС остается резким, называется глубиной резкости объектива. Каждой из этих плоскостей соответствует плоскость в пространстве предметов. Изображение сцены, построенной в пространстве предметов между этими плоскостями, снимаемое с ПЗС, будет резким. Предметы находящиеся вне пределов этих плоскостей будут размываться (см. рисунок 4.3).

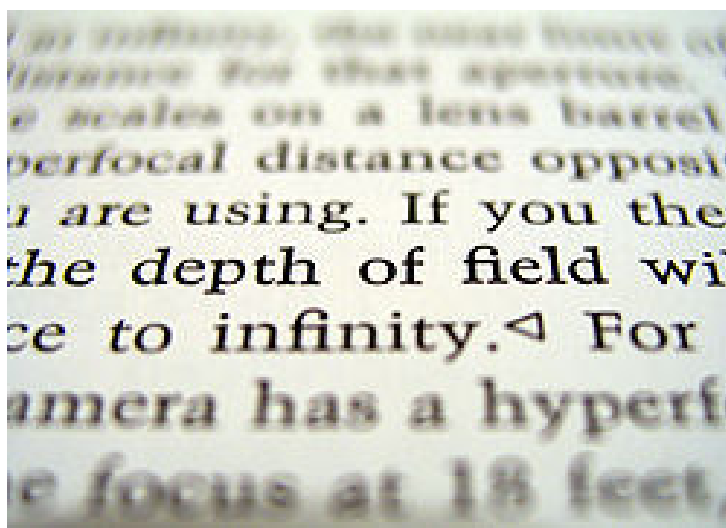


Рисунок 4.3 — Иллюстрация глубины резкости объектива

Из рисунка 4.2 видно, что энергетический центр светового потока, проходящего между точками O и I , лежит на линии OI . Любая точка в

пространстве предметов, лежащая на OI , чье изображение находится в пределах глубины резкости, будет иметь на графическом изображении, снимаемом с ПЗС, одну и ту же координату. Если изображение точки — вне глубины резкости, то сказанное, в определенном смысле, также справедливо, за исключением того, что оптическое изображение выйдет за пределы одного фотоэлемента ПЗС, и графическое изображение этой точки, строго говоря, будет определяться диапазоном координат. Однако, координаты энергетического центра, останутся теми же.

Таким образом, координата точки по каждой оси на изображении является функцией угла между оптической осью и проекцией луча формирующего эту точку на плоскость образуемую оптической осью и перпендикулярном к ней, соответствующим рассматриваемой оси изображения.

Идея метода стереовидения проста: Имеется две камеры, в поле зрения каждой из которых попадает характерная точка препятствия, а сами камеры находятся на известном расстоянии друг от друга. Удобно, и предположим, что камеры ориентированы именно так, чтобы оптические оси объективов были коллинеарны, линия соединяющая фокусы объективов была бы перпендикулярна обеим оптическим осям, а параллельные ей линии, проходящие через оптические оси и попадающие в поле зрения обеих камер, совпадали с горизонтальной осью (X) графического изображения. Если характерная точка определена на каждом изображении, может быть построен эквивалентный треугольник, показанный на рисунке 4.4.

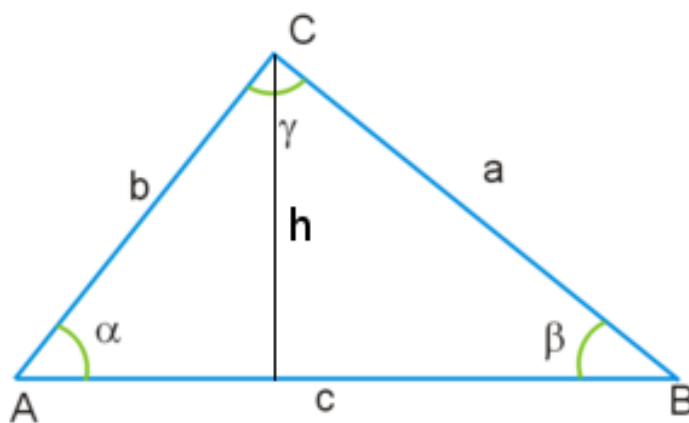


Рисунок 4.4 — Эквивалентный треугольник (точка A — положение камеры 1, точка B — камеры 2, точка C — проекция точки в пространстве предметов на плоскость, в которой лежат оптические оси объективов)

Основание «с» треугольника эквивалентно расстоянию между камерами, а углы при основании — определяются по изображению с каждой камеры. Теперь, когда для треугольника определены одна сторона и два

угла, могут быть вычислены любые его характеристики, в том числе его высота. Высота соответствует расстоянию от линии, соединяющей центры ПЗС матриц, до проекции точки в пространстве предметов на плоскость, в которой лежат оптические оси объективов, и определяется по формуле:

$$h = \frac{c \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \alpha}. \quad (4.1)$$

Теперь по углу γ возвышения точки в пространстве над своей проекцией на плоскость, в которой лежат оптические оси объективов, может быть рассчитано искомое расстояние L до самой точки в пространстве предметов по формуле

$$L = \frac{h}{\operatorname{tg} \gamma}. \quad (4.2)$$

Угол γ определяется по вертикальной координате (Y) на графическом изображении, полученном с любой камеры или по среднему значению.

Одним из проблемных мест в стереовидении является определение зависимости между координатами на изображении и угловыми координатами пришедшего от изображаемой точки луча.

Наиболее рациональным методом решения данной проблемы является экспериментальный. Для пары камера — объектив, в плоскости перпендикулярной оптической оси камеры, на заданном расстоянии, ставится калибровочная поверхность с нанесенной на нее равномерной сеткой. Узлы сетки, находящиеся на осях изображения, имеют с одной стороны известную координату на изображении, а с другой известную координату в пространстве, а значит может быть составлена таблица соответствия углов и координат по каждой оси изображения. В промежуточных точках функция находится линейной интерполяцией.

Еще одной проблемой является само определение общей точки на двух изображениях. Наиболее прямолинейным способом решения данной проблемы является непосредственное распознавание образов по двум изображениям. Однако, данная задача является достаточно сложной, и ее решение непосредственно по изображениям сложно, ресурсоемко, обладает значительной погрешностью определения координат. Кроме того, даже при удачном детектировании объектов (особенно схожей формы и цвета), в случае попадания нескольких из них в поле зрения камеры, особенно в случаях, когда попадание некоторых из них происходит в поле зрения только одной камеры, возникает проблема установления соответствия друг другу детектированных на разных камерах изображений одного объекта.

Для решения данной проблемы применяют активные или пассивные маячки, которыми помечают препятствия или навигационные маяки. Это могут быть разноцветные излучатели или цветные уголкового отражатели, при наличии прожектора на самом мобильном роботе. Главное условие — это возможность легко отличить на изображении один маячок от другого и от фонового излучения. Для чего применяется вариация простых геометрических форм, легко поддающихся распознаванию, и цветов.

В случае когда предполагается работа вблизи источников помех, желательно выбирать маячки или прожектор излучающие в отличном от присутствующей помехе диапазоне длин волн. Например, если робот работает в скоплении людей, неразумно использовать инфракрасный диапазон. Кроме того, необходимо оснастить систему оптическими фильтрами, отсекающими незадействованные на маячках длины волн. Это могут быть полосовые фильтры или, в случае использования маячков одного цвета, линейчатые — позволяющие выделить практически только одну длину волны и полностью отсеять фоновое излучение на других длинах волн. Поскольку типовая ПЗС матрица воспринимает излучение в достаточно широком диапазоне длин волн, даже при значительной яркости монохроматического маячка, интенсивность светового потока от незначительной на первый взгляд помехи, при интегрировании по всему диапазону длин волн, может породить ложные изображения маячков. Таким образом, применение оптических фильтров позволяет организовать поиск маячков даже в очень зашумленной среде.

4.2.2. Метод триангуляции в задаче определения расстояния до препятствия

Еще одним методом, применяемым для детектирования точек принадлежащих объекту на видеоизображении и расстояния до них, является метод триангуляции [40, 43, 13], с использованием подсветки лазерным лучом или разверткой лазерного луча. Подобные методы хороши для определения расстояний до предметов на которые направлен луч, однако применяются все больше в дальномерах или профилометрах.

Для использования в ориентации мобильных роботов триангуляция с применением подсветки лазером не очень подходит, поскольку необходимо организовать сканирование лазером пространства, что наряду с низким быстродействием бытовых видеокамер (25 кадров в секунду), дает достаточно низкое разрешение. Кроме того появляются дополнительные приводы и подвижные части, а значит увеличивается вес, возникают дополнительные динамические моменты и усилия, а так же уязвимые места

конструкции, поскольку именно механические узлы обладают наименьшей надежностью.

Надо признать, что использование видеодатчика в такой системе избыточно, поскольку вместо пары видеодатчик/лазер может быть использован лазерный лидар [30], обеспечивающий большую скорость и точность сканирования.

Другой подход — триангуляционный метод с применением световой полосы. Использование подсветки, исполненной в виде развертки лазерного луча в плоскости параллельной полу, подобной показанной на рисунках 4.5–4.6, за исключением случаев когда предполагается наличие препятствий, находящихся ниже или выше этой плоскости — вполне допустимо.

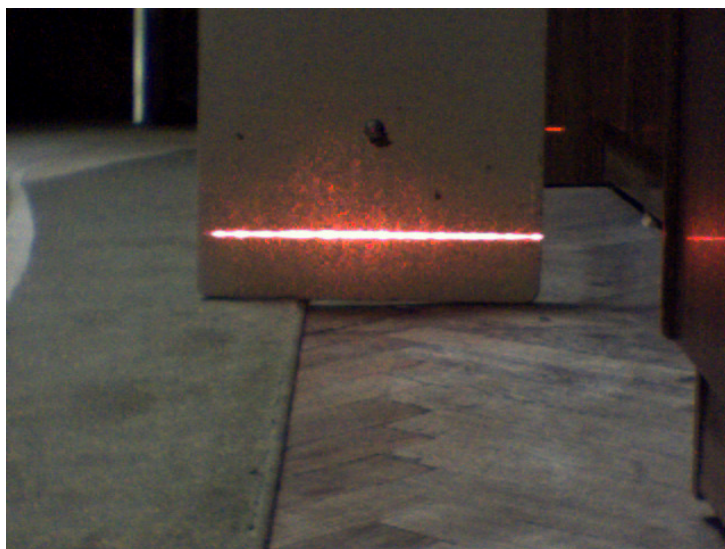


Рисунок 4.5 — Изображение близко расположенного объекта, подсвеченного лазерной разверткой

Из рисунков 4.5–4.6 видно, что линия лазерной развертки на изображении имеет ломанный характер. Участки между разрывами линии на изображении соответствуют отдельным объектам, подсвеченным лазерной разверткой. Это дает механизм выделения отдельных объектов и оценки их размера. Кроме того из рисунков 4.5–4.6 видно, что при удалении объекта, изображение пересечения объекта с плоскостью лазерной подсветки удаляется от последней, что дает механизм оценки расстояния до идентифицированного объекта.

Данный способ выглядит достаточно простым, однако следует помнить, что при использовании бытовых камер и объективов изображение линии будет достаточно резким только в конечных пределах, определяемых глубиной резкости объектива.



Рисунок 4.6 — Изображение далеко расположенного объекта, подсвеченного лазерной разверткой

Расчетная часть триангуляционного метода практически повторяет расчетную часть метода стереовидения. Дополнительным плюсом такого подхода является то, что нет необходимости в использовании двух камер. Вместо этого развертка организуется так, чтобы в эквивалентном треугольнике на рисунке 4.4, она исходила из основания и совпадала с высотой. Тогда Известны три величины: угол α , как и прежде определяемый по изображению, расстояние от вершины А до высоты h (от фокуса видеокамеры до лазерной развертки), которое мы обозначим l , а так же угол между высотой и основанием, равный 90 градусам. Таким образом, справедливо следующее выражение:

$$h = l \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.3)$$

Главным недостатком данного подхода, является детектирование и определение расстояния только до предметов в плоскости лазерной развертки, именно поэтому вместо двух формул (4.1)–(4.2), здесь фигурирует одна (4.3). Для того, чтобы уловить обратный луч в такой системе, необходимы подходящие условия освещения и отражающей способности поверхности цели, чтобы полоса была самой яркой на изображении. На практике этого достигают обработкой поверхности цели матовым покрытием, использованием высоко контрастных камер или уменьшением уровня внешнего освещения. Во время использования системы в работе для распознавания объектов в комнатной обстановке велико количество шумов затрудняющих работу: гладкие поверхности могут стать причиной вторичных отражений, грани и текстуры могут иметь штрихованный

вид, в конце концов возможна перекрестная помеха при работе не одного робота с подобной системой.

Было найдено несколько подходов для повышения робастности таких систем. Использование стереопары для регистрации полосы позволяет убрать ложные отражения, но сильно зависит от пользовательской информации по объекту данной априори [60].

Можно не смешивать картинки с двух камер, а использовать одну как проверяющую для другой [53]. Робастность достигается за счет последовательных проверок полученной дальнометрической информации, самые важные из них требуют независимых преобразований с одной из камер. Другим ограничением является то, что в методе корректировки ошибок не предложен способ избавления от множественных изображений полосы, появляющихся в результате вторичных отражений. В результате все измерения без разбора при вторичных отражениях не учитываются.

Также, устранение неверной информации может быть достигнуто при взаимодействии независимых сканирующих устройств [61]: используется две лазерных полосы и одна камера. В добавление к робастному измерению дальности можно получить нормали поверхностей. Недостатком метода является то, что из изображения можно получить расстояние только до точки пересечения полос, таким образом потребуется гораздо больше времени на получение полной карты расстояний.

В некоторых других методах представляющих интерес предлагается использовать одну камеру с одной полосой [56].

Отражения могут распознаваться за счет движения датчика относительно окружения и анализа изменения преобразованной дальнометрической информации. За счет модуляции периодичной интенсивности луча исключают посторонние шумы [58].

Оба эти метода получают дальнометрическую информацию из нескольких изображений, что делает их склонными к появлению ошибок. Более того модуляция интенсивности луча не устраняет вторичные отражения, которые изменяются в унисон с первичным отражением. Для устранения вторичных отражений от металлических поверхностей может быть использован линейно поляризованный свет [56, 55], таким образом с каждым новым отражением такой луч меняет свою поляризацию. Однако, представляет сложность способ регистрации на приемнике: требуется несколько измерений через различные поляризационные фильтры.

4.2.3. Метод определения расстояния до препятствия с использованием динамически меняющегося изображения

Особенностью видео и фото изображения является то, что оно формируется посредством перспективной, а не ортогональной проекции пространства предметов на матрицу ПЗС. При ортогональной проекции не происходит нарушения форм, пропорций и размеров изображения некой плоскости относительно оригинала, в то время как при перспективной происходит (см. рисунок 4.7) [47].

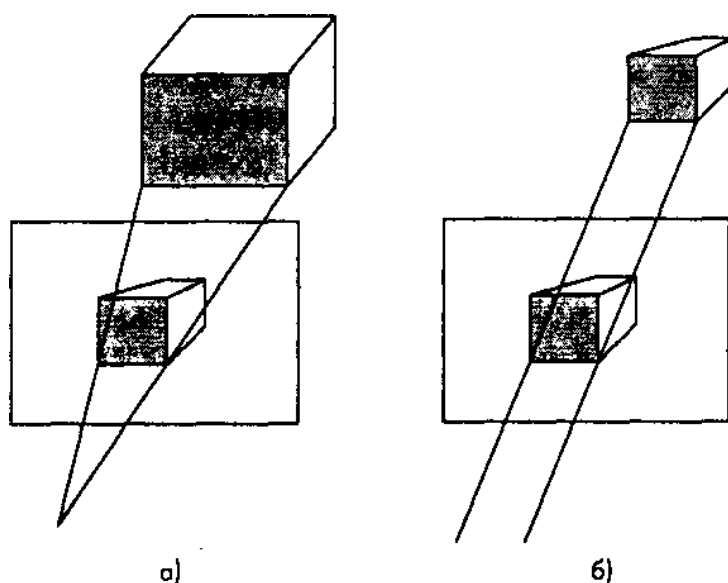


Рисунок 4.7 — Проекция изображения, а) — Перспективная (центральная) и б) — ортогональная

Таким образом, если приближать к видеокамере некий предмет, в ортогональной проекции размер его изображения не изменится, а в перспективной увеличится. Если приближать материальную точку, то в ортогональной проекции она не будет менять своего положения, а в перспективной будет. Это свойство перспективной проекции может быть применено для оценивания расстояния до препятствия или навигационного маяка в случае если известна скорость движения точки относительно видеокамеры.

Пусть видеокамера установлена на мобильном роботе и ее оптическая ось находится в горизонтальной плоскости и коллинеарна направлению движения робота. Предположим, также, что объекты в пространстве предметов неподвижны.

Перспективная проекция изображение материальной точки на ПЗС в некий момент времени строится как это показано на рисунке 4.8.

Из рисунка 4.8 видно, что ПЗС располагается на расстоянии z_3 от цен-

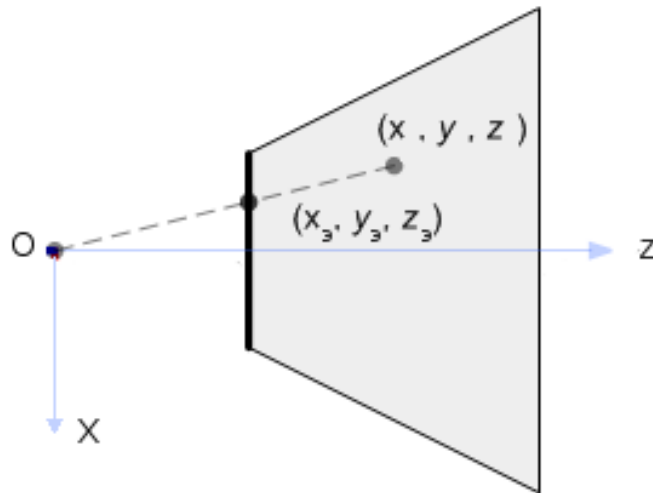


Рисунок 4.8 — Перспективная проекция точки с координатами (x, y, z) на ПЗС расположенную на расстоянии z_3 от центра перспективной проекции

тра перспективной проекции O , т.е. от точки в которой пересекаются лучи, изображающие разные точки объекта (Центр линзы или объектива). Строго говоря, поскольку изображение строится за фокусом объектива, на рисунке 4.8 ПЗС должна располагаться левее точки O на том же расстоянии z_3 . Однако, поскольку оптическое изображение получается перевернутым, при снятии графического изображения с ПЗС его координаты обращаются, что в конечном итоге дает изображение, соответствующее реальному объекту, а не его перевернутую по осям копию. Если рассматривать формирование изображения в плоскости ПЗС, как происходящее по лучу OI на рисунке 4.2 (т.е. вся энергия излучаемая или отражаемая материальной точкой распространяется по лучу), то изображение можно построить в плоскости показанной на рисунке 4.8 и оно будет неперевернутым, т.е. соответствовать изображению с ПЗС после предобработки. В реальности такое изображение будет нерезким, однако схема, приведенная на рисунке 4.8, отражает получение изображения на ПЗС и предобработку, и является адекватной на уровне построения соответствия координат пространства предметов экранным.

Поскольку проекция осуществляется на плоскость, в экранных координатах координата z_3 становится излишней, остаются актуальными лишь экранные координаты x_3 и y_3 . При этом:

$$x_3 = x \frac{z_3}{z} \quad (4.4)$$

$$y_3 = y \frac{z_3}{z} \quad (4.5)$$

Из (4.4)–(4.5) видно, что при постоянных координатах x, y объекта,

фиксированном положении ПЗС относительно объектива (постоянная z_3), и оси z направленной вдоль оптической оси, при изменении координаты z , т.е. при приближении к или удалении от объекта, экранные координаты действительно изменяются. Значит, если известна скорость движения робота и скорость его поворота, может быть построена модель изменения его экранных координат.

Рассмотрим случай без учета вертикальной составляющей, т.е. будем рассматривать задачу определения расстояния до материальной точки по координате x_3 ее изображения. Введем дополнительные соглашения. Будем рассматривать как положительную скорость движения робота V_p вперед, к точке, и скорость его вращения вокруг оси по часовой стрелке. Если робот не может вращаться, как танк, вокруг своей оси, то его движение не описывается непосредственно через V_p и, однако может быть сведено к эквивалентным величинам. При принятых соглашениях и допущениях изменение реальных координат робота будет происходить по схеме показанной на рисунке 4.9.

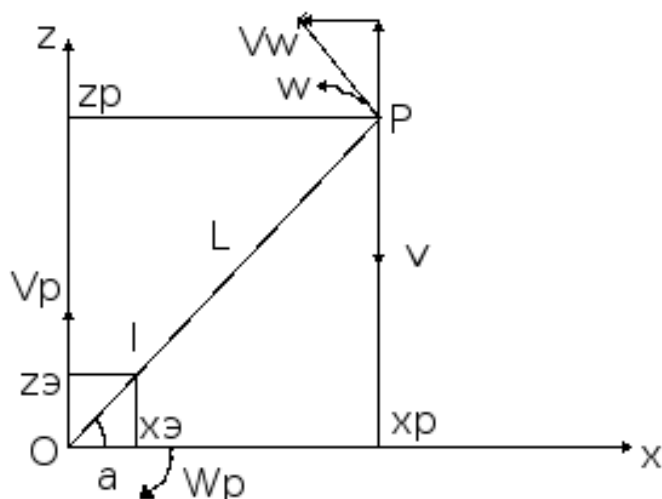


Рисунок 4.9 — Движения материальной точки в локальных координатах робота

На рисунке 4.9 за ось Z принято направление оптической оси камеры, а за X — горизонтальный перпендикуляр к оптической оси. Точка O — центр объектива где сходятся лучи, следующие по наикратчайшей траектории от материальных точек P окружающей реальности (в дальнейшем принимается за положение камеры и, соответственно, робота). z_3 , как и прежде, — координата ПЗС относительно центра объектива. x_3 — координата изображения I материальной точки P , с координатами x_p, y_p . Следует отметить, что выход с видеодатчика x_3 предполагается имеющим размерность пиксел, однако, на рисунке 4.9, x_3 измеряется в метрах. Эти величины могут быть легко поставлены в соответствие посредством мас-

штабирующего коэффициента K , определяемого из простейшего опыта. При движении и вращении робота со скоростями V_p и, при переходе к координатам фиксированным на роботе, точка P будет двигаться и вращаться в них со скоростями равными по модулю и обратными по направлению исходным $V = -V_p$ и. Кроме того, поскольку точка P находится от начала координат на расстоянии L , угловой скорости может быть поставлена в соответствие линейная скорость. Поскольку дистанция L до точки P и азимут на нее однозначно связаны с координатами x_p, y_p , постольку достаточно получить описание динамики изменения x_p, y_p и зависимости от них x_3 .

Непосредственно из рисунка 4.9, изменение положения точки P и координаты ее на изображении будет происходить по закону:

$$\begin{cases} \dot{z}_p = -V + V_{\omega z} \\ \dot{x}_p = -V_{\omega x} \\ x_3 = K x_p \frac{z_3}{z_p} \end{cases}, \quad (4.6)$$

где z_3 — постоянная величина, характеризующая оптическую схему, а $V_{\omega x}, V_{\omega z}$ — составляющие скорости по осям x, z . K — масштабирующий коэффициент, позволяющий привязать схему на рисунке 4.9 непосредственно к графическому изображению. Распишем (4.6) более подробно:

$$\begin{cases} \dot{z}_p = -V + \omega \cdot L \cos \alpha \\ \dot{x}_p = -\omega \cdot L \sin \alpha \\ x_3 = K x_p \frac{z_3}{z_p} \end{cases}. \quad (4.7)$$

Благодаря тому, что имеет место быть $L = z_p^2 + x_p^2$ и справедливы соотношения $L \cos \alpha = z_p$ и $L \sin \alpha = x_p$, которые так же можно записать в виде $(z_p^2 + x_p^2) \cos \alpha = z_p$ и $(z_p^2 + x_p^2) \sin \alpha = x_p$, (4.7) может быть преобразовано в систему

$$\begin{cases} \dot{z}_p = -V + \omega \cdot x_p \\ \dot{x}_p = -\omega \cdot z_p \\ x_3 = K x_p \frac{z_3}{z_p} \end{cases}. \quad (4.8)$$

Если теперь считать, что рассматривается интервал постоянства линейной и угловой скоростей движения робота, то (4.8) можно переписать в виде системы

$$\begin{cases} \dot{q} = A \cdot q + B \cdot u \\ x_3 = f(q) \end{cases}, \quad (4.9)$$

где $q = \begin{bmatrix} z_p \\ x_p \end{bmatrix}$ — обобщенная координата; $A = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix}$ — матрица динамики обобщенной координаты q ; $u = V$ — входное воздействие; $B = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}$ — матрица входов; $f(q) = K x_p \frac{z_3}{z_p}$ — функция выхода.

Как видно из (4.9), динамика системы линейна, однако наблюдается нелинейность по выходу. Чтобы исследовать свойства системы произведем линеаризацию. Для этого предположим, что координаты препятствия известны хотя бы приблизительно и $x_p = x_p^*$, $y_p = y_p^*$. Тогда отклонение координаты препятствия от координаты x_p^* , y_p^* описывается линеаризованной системой:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{q}} = A \cdot \tilde{q} + B \cdot u \\ x_3 = C \cdot \tilde{q} \end{cases}, \quad (4.10)$$

где $\tilde{q} = [q - q^*] = \begin{bmatrix} z_p - z_p^* \\ x_p - x_p^* \end{bmatrix}$ — отклонение обобщенной координаты от x_p^* , y_p^* ; матрицы динамики и входа — остаются неизменными, ввиду линейности динамики исходной системы (4.9); $C = \begin{bmatrix} -\frac{x_p^* \cdot z_3}{z_p^{*2}} & \frac{z_3}{z_p^*} \end{bmatrix}$ — линейная матрица выхода.

Для системы (4.10) матрица наблюдаемости имеет вид $W_H = K \begin{bmatrix} C \\ C \cdot A \end{bmatrix}$

или $W_H = K \begin{bmatrix} \frac{-x_p^* \cdot z_3}{z_p^{*2}} & \frac{z_3}{z_p^*} \\ -\omega \cdot \frac{z_3}{z_p^*} & \omega \cdot \frac{-x_p^* \cdot z_3}{z_p^{*2}} \end{bmatrix}$, откуда ее определитель записывается

как $|W_H| = \omega \frac{x_p^{*2} \cdot z_3^2}{z_p^{*4}} + \omega \frac{z_3^2}{z_p^{*2}}$ или $|W_H| = \omega z_3^2 \frac{x_p^{*2} + z_p^{*2}}{z_p^{*4}}$. В случае, когда $|W_H| = 0$ невозможно восстановить обобщенные координаты по выходу. Это наблюдается при следующих, практически важных условиях:

1. $\omega = 0$, т.е. в случае когда робот движется прямо, не поворачивая. Несмотря на то, что в этом случае координата точки на экране изменяется, этому изменению может соответствовать различная скорость движения материальной точки, зависящая от расстояния до нее L , что вносит неоднозначность и не позволяет оценить координаты по выходу;
2. $x_p^{*2} + z_p^{*2} = 0$, т.е. расстояние до материальной точки отсутствует;

3. $x_p^{*2} \ll z_p^{*2}$, что эквивалентно нахождению материальной точки на оптической оси камеры. В таком случае при приближении к материальной точке координата ее изображения изменяться не будет.

В случае если $|W_H| \neq 0$, как известно из теории автоматического управления для линейных систем, для (4.10) может быть синтезировано наблюдающее устройство [17]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{q}} = A \cdot \hat{q} + B \cdot u + K_H \cdot \tilde{x}_3 \\ \hat{x}_3 = C \cdot \hat{q} \end{cases}, \quad (4.11)$$

где $\hat{q} \hat{x}_3$ — оценка координаты и выхода системы, даваемая наблюдающим устройством; $\tilde{x}_3 = x_3 - \hat{x}_3$ — отклонение оцененной координаты материальной точки на изображении от измерения по видеодатчику. $K_H = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$ — матрица линейных стационарных обратных связей наблюдающего устройства. Чтобы состояние наблюдающего устройства сошлось к вектору состояния, определяющему положение материальной точки, необходимо, чтобы K_H доставлял отрицательные собственные числа матрице динамики невязки $(A - K_H \cdot C)$.

Приведем еще некоторые соображения. Использование вертикальной координаты на изображении для синтеза наблюдающего устройства ничем не отличается от показанного выше, однако в этом случае предполагается постоянное измеряемое изменение угла возвышения камеры, что труднее реализуемо для мобильного робота, чем в случае горизонтальной координаты.

В случае нарушения условия постоянства угловой и линейной скоростей, можно рассматривать их как кусочно-постоянные на малых временных интервалах, для каждого из которых необходимо рассчитывать коэффициенты K_H .

Наблюдающее устройство, полученное в виде (4.11), в показанной форме м.б. Использовано только в случае если есть грубая оценка положения материальной точки. Это м.б. полезно в случае, когда автономный мобильный робот отрабатывает некоторую траекторию, рассчитывая свое положение по показаниям датчиков приводов (известна скорость вращения и поворота колес). В реальных условиях, при таком подходе, будет накапливаться ошибка, за счет погрешности измерений, расчетов и проскальзывания колес по несущей поверхности. В связи с этим, необходимо периодически уточнять свое местоположение относительно некоторого маяка с заранее заданной координатой, для чего и подходит устройство (4.11). Примером такой системы из практики м.б. прокладка курса на

корабле, осуществляемая по показанной схеме.

Условия 1 и 3, нарушающие наблюдаемость объекта означают, что в периоды уточнения своего местоположения, необходимо подавать на вход системы тестовый сигнал, т.е. обеспечивать ненулевую угловую скорость мобильному роботу, тем самым, заодно, убирая оптическую ось видеодатчика на некоторый угол от маяка или препятствия.

В случае, когда неизвестна даже приблизительная оценка положения препятствия, необходимо синтезировать нелинейное наблюдающее устройство, либо использовать некоторый алгоритм поиска с последовательным обновлением x_p^* , y_p^* по последним полученным оценкам.

К главному недостатку метода можно отнести то, что полученные положения справедливы в условиях допущения о неподвижности предметов окружающего мира. В случае если это не так, оценку получить не представляется возможным. Однако, в тех случаях когда препятствия движутся заведомо медленнее чем мобильная платформа с датчиком, оценка с некоторой погрешностью возможна. Примером такого случая может служить оценка расстояния от автомобиля до пешеходов, чья скорость на порядок меньше.

4.3. Устранение возмущений изображения перспективной проекцией

Типовая задача управления роботом — следование контрастной цветовой линии. Задача следования траектории, заданной контрастной полупрямой, может быть решена с использованием релейного управления. В данном случае необходимо синтезировать закон управления в зависимости от того: слева или справа от робота находится линия. Использование в данном подходе видеокamеры не чем не отличается от использования линейки оптопар. Линия идентифицируется на изображении после чего выносятся решение: в какую сторону необходимо подруливать. У этого способа есть недостатки (см. главу 1). Ориентирование происходит только по участку траектории в пределах апертуры камеры на достаточно малом расстоянии, что не позволяет синтезировать адекватное управление с учетом резких изгибов линии, при следовании по ней, и в задаче поиска линии. При таком подходе может происходить пересечение линии под значительными углами, что приводит к возникновению колебательных процессов. Интенсивность подруливания может быть функцией времени нахождения вне линии (необходимо использовать ограничение интегральной составляющей, во избежание движения по кругу), а также вычисляться по наклону кривой. Однако, если кривая имеет сложную

форму, вынести суждение об оптимально интенсивности подруливания затруднительно.

Задача следования траектории описанной математически широко исследована. Проблема заключается в том, что как было замечено, фото-видео съемка дает изображение, полученное посредством перспективной проекции. Таким образом, в случае когда линия идентифицирована на изображении и описана математически, это описание будет содержать возмущение внесенное перспективной проекцией. Если устранить это возмущение, то решение задачи сводится к идентификации линии, ее математическому описанию и следованию полученной траектории [26].

Пусть камера расположена на мобильном основании оптической осью под некоторым углом α к поверхности. Это означает, что наблюдаемая плоскость коллинеарна одной из осей фотоэлектрической матрицы. Для удобства иллюстраций предположим, что это ось X камеры (камера расположена на боку).

Абстрагируясь от оптической схемы представим прохождение сходящихся в точку лучей света через плоскую фотоэлектрическую матрицу, формирующую изображение и интересующую нас плоскость, как это показано на рисунке 4.10.

На рисунке 4.10 интересующая нас плоскость OCG пересекает плоскость ПЗС матрицы ODB в начале координат, ось Y ПЗС матрицы принадлежит плоскости OCG, а сама плоскость OCG развернута относительно плоскости ODB на α градусов.

Введем обозначения углов: $\angle OAD = \gamma$; $\angle BAF = \lambda$; $\angle OAB = \varphi$; $\angle DAF = \Theta$; $\angle COB = \alpha$; $\angle HDF = \beta$;

Введем обозначения отрезков: $AO=d$ — конструктивный параметр, соответствующий расстоянию от центра объектива до ПЗС матрицы, является постоянной величиной определяемой экспериментально; Исходя из того, что F — точка изображенная на ПЗС, $OB=X_3$; $OD=Y_3$ — координаты точки F на ПЗС. Исходя из того, что F является изображением на ПЗС точки H в пространстве предметов, $OC=X_p$; $CH=Y_p$ — координаты точки H в пространстве предметов.

Кроме того, точки O, A лежат на оптической оси камеры, а углы $\angle AOD$, $\angle AOB$ — прямые.

Обратим внимание на то, что если рассмотреть плоскость OCG', параллельную OCG, но отстоящую по оси z на некоторое расстояние, то, дополнив ее плоскостью ODB' параллельной плоскости ODB, отстоящей по оси Z на это же расстояние, получим систему пространственных геометрических построений подобную рассматриваемой, отличающихся только масштабом (смотри рисунок 4.11).

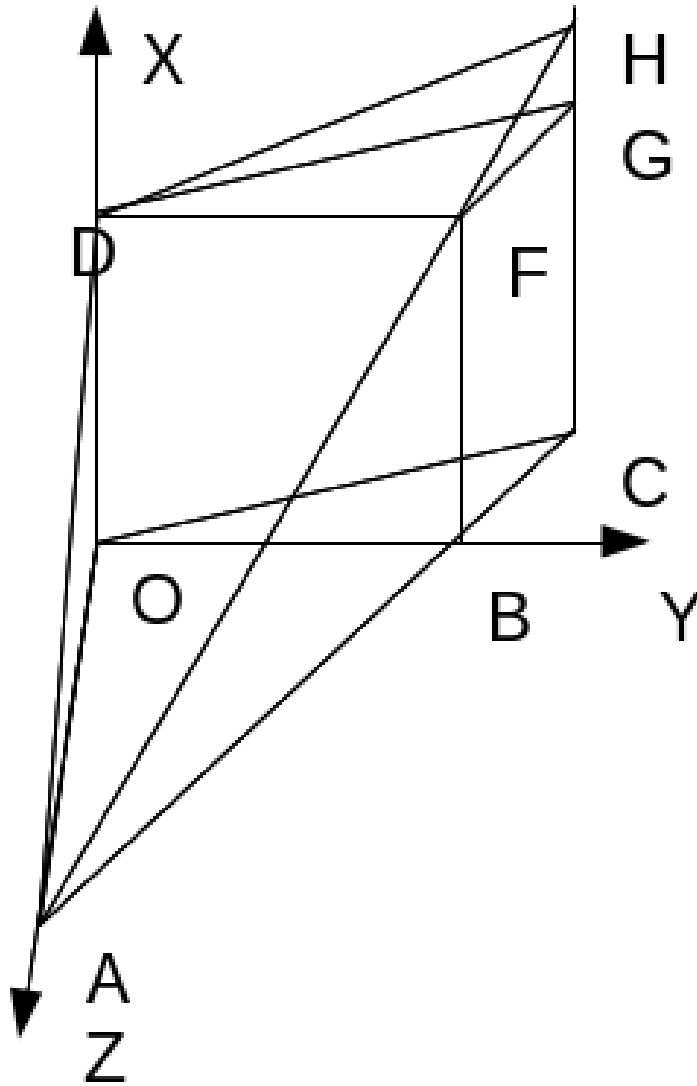


Рисунок 4.10 — Схема прохождения сходящихся в точку лучей света через плоскую фотоэлектрическую матрицу и плоскость поверхности

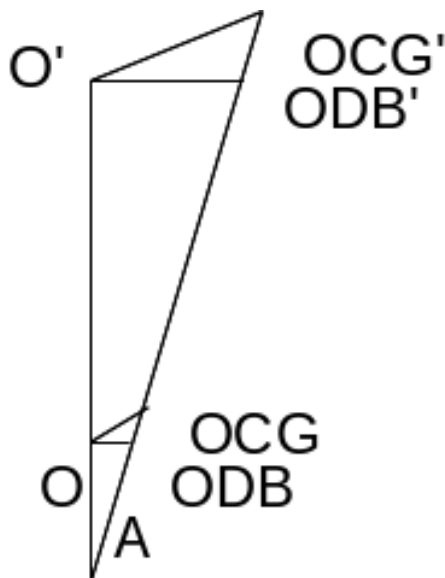


Рисунок 4.11 — Рассматриваемая и подобная ей системы пространственных геометрических построений

Очевидно, что выражения связывающие $X_э$ и $Y_э$ с X_p и Y_p в рассматриваемой системе неизменны и для подобной ей системы, показанной на рисунке 4.11, с точностью до обозначений. Таким образом из рисунка 4.11 следует, что связь между $X_э$, $Y_э$ рассматриваемой системы и X_p , Y_p подобной ей системы может быть получена как связь между $X_э$, $Y_э$ и X_p , Y_p одной из этих систем, с последующим масштабированием. Поскольку коэффициент масштабирования зависит от не заданных элементов оптической схемы (например объектива), то получим искомую связь экранных и пространственных координат для рассматриваемой на рисунке 4.10 системы, что позволит устранить вносимые перспективной проекцией нелинейности. После этого можно будет экспериментально определить масштабный коэффициент, что позволит связать между собой метрики линеаризованного изображения и плоскости OCG' .

Получим связь экранных и пространственных координат для рассматриваемой на рисунке 4.10 системы. Для этого рассмотрим отдельно координату X и координату Y .

Для координаты X , рассмотрим сначала плоскость OAB . В этой плоскости справедливы построения, приведенные на рисунке 4.12.

Поскольку на рисунке 4.12 $\angle OAB = \varphi$; $\angle COB = \alpha$, а отрезок OA параллелен CP , то легко показать, что

$$X_э = X_p \cdot \cos \alpha - X_p \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (4.12)$$

В (4.12) α считается заданной постоянной величиной (характеризует положение наблюдаемой камерой плоскости относительно камеры), а

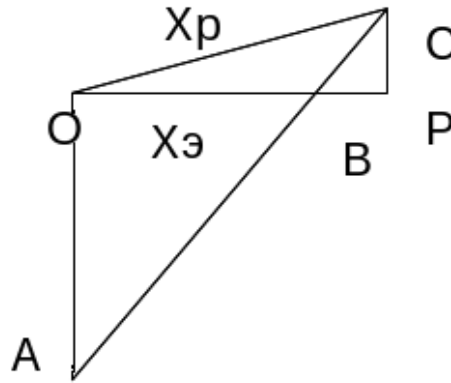


Рисунок 4.12 — Геометрические построения в плоскости OAB

$\operatorname{tg} \varphi$, очевидно зависит от X_p и нуждается в определении. Следует заметить, что в случае отрицательных координат X_p изменится и знак при угле $\operatorname{tg} \varphi$, поэтому знак при $X_p \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi$ в (4.12) остается неизменным (если это не учитывать потребуется операция взятия модуля от X_p). Поскольку из рисунка 4.12 видно, что $\operatorname{tg} \varphi = X_э/d$, а d — считается известной постоянной то (4.12) можно переписать в виде:

$$X_э = \frac{X_p \cdot \cos \alpha}{1 + X_p \cdot \frac{\sin \alpha}{d}}. \quad (4.13)$$

Из рисунка 4.10 видно, что при изменении координаты $Y_э$, Координаты $X_э$ и X_p изменяться не будут, поэтому соотношение (4.13) является искомым.

Поскольку при изменении координаты $X_э$ и постоянной Y_p , координата $Y_э$ изменяется, то решать задачу упрощенным способом, как это было сделано при получении связи $X_э$ и X_p , нет возможности. Для координаты Y , рассмотрим плоскость ACH. В этой плоскости справедливы построения, приведенные на рисунке 4.13. На рисунке 4.13 $Y_э = BF$, $Y_p = CH$,

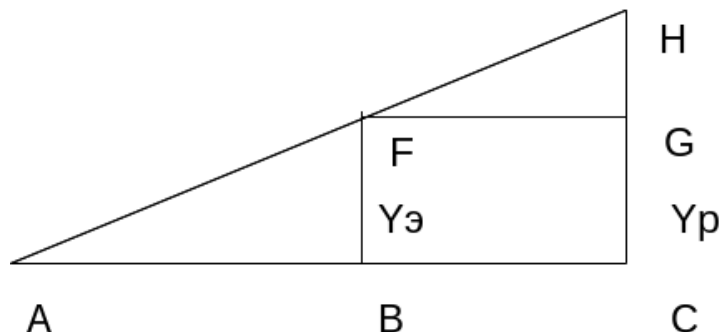


Рисунок 4.13 — Геометрические построения в плоскости ACH

$\angle BAF = \lambda$, а отрезок FG обозначим как d_l . Несложно получить связь экранных и пространственных координат по Y :

$$Y_3 = Y_p - dl \cdot \operatorname{tg} \lambda. \quad (4.14)$$

Определим dl и $\operatorname{tg} \lambda$. Из рисунка 4.12 несложно показать, что

$$dl = \frac{X_p \cdot \sin \alpha}{\cos \varphi}. \quad (4.15)$$

Из рисунка 4.10 видно, что, если обозначить АВ как r , то $\operatorname{tg} \lambda = Y_3/r$, а $\operatorname{tg} \gamma = Y_3/d$, тогда, если учесть, что $r = \frac{d}{\cos \varphi}$, будет справедливо выражение:

$$\operatorname{tg} \lambda = \operatorname{tg} \gamma \cdot \cos \varphi. \quad (4.16)$$

Подставляя (4.15) и (4.16) в (4.14) получим:

$$Y_3 = Y_p - X_p \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (4.17)$$

С учетом того, что $\operatorname{tg} \gamma = Y_3/d$, получим окончательную форму записи:

$$Y_3 = \frac{Y_p}{1 + X_p \cdot \frac{\sin \alpha}{d}}. \quad (4.18)$$

Таким образом искомое преобразование координат определяется выражениями (4.13) и (4.18). Стоит отметить, что при расчетах, для упрощения геометрических построений, полагалось, что ПЗС находится перед центром объектива, в то время как на практике это не так. Как было сказано в разделе 4.2, ПЗС располагается позади центра объектива, а значит знак при $X_p \cdot \frac{\sin \alpha}{d}$ в (4.13) и (4.18) должен быть изменен на противоположный, и для обработки изображения должны применяться модифицированные формулы:

$$X_3 = \frac{X_p \cdot \cos \alpha}{1 - X_p \cdot \frac{\sin \alpha}{d}}; \quad (4.19)$$

$$Y_3 = \frac{Y_p}{1 - X_p \cdot \frac{\sin \alpha}{d}}. \quad (4.20)$$

Отдельного упоминания заслуживает определение параметра d . Для нахождения d необходимо воспользоваться калибровочной плоскостью (КП) с нанесенным на ней калибровочным рисунком (например квадраты известного размера), расположенной ортогонально главной оптической оси на известном расстоянии от фокусной точки видео датчика. Тогда, если Z — расстояние от фокусной точки до КП, X_z — расстояние между точками на КП, изображение одной из которых лежит в центре ПЗС (изображения), а второй — на оси X ПЗС и имеет на ПЗС координату X_d , то из простейшей пропорции следует

$$d = \frac{X_d \cdot Z}{X_z}, \quad (4.21)$$

где все величины измеряются в метрах, что однако не совсем удобно. Если находить X_d по изображению, то X_d будет задано в количестве пикселей, что приведет к эквивалентной размерности и для d . Такие же размерности будут справедливы и для X_3 , X_p , Y_3 , Y_p . Последнее позволяет непосредственно преобразовывать изображение по (4.19), (4.20), однако следует понимать, что d определяется для конкретной наблюдаемой плоскости и зависит от Z , т.е. является конструктивным параметром пары видео датчик — наблюдаемая плоскость.

Поскольку для удобства геометрических построений камера была положена набок, что редко встречается на практике, необходимо произвести дополнительный поворот изображения. Для этого применяется аффинное преобразование поворота координат на угол приводящий ось X в горизонталь [47]:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Таким образом, найдя конструктивный параметр по (4.21), можно найти связь экранных и мировых координат по (4.19), (4.20) и (4.22). Также стоит отметить, что полученные выражения задают преобразования из мировых в экранные координаты, хотя по условию задачи требуется обратное. Если производить обратное преобразование, то при программной реализации возможно появление пробелов на целевом изображении, поэтому использование выражений в приведенной форме предпочтительнее. При таком подходе перебираются все точки искомого линеаризованного изображения, их координаты преобразуются по полученным формулам и дают координаты точек на изображении с ПЗС, откуда и производится копирование значения яркости цветовой компоненты. Пример результата работы алгоритма по искаженному перспективой изображению калибровочной плоскости, показанному на рисунке 4.14, приведен на рисунке 4.15.

После устранения искажения перспективой и установки камеры на основание, расположенное на фиксированном возвышении над поверхностью, может быть произведена калибровка системы по калибровочной плоскости, после чего через масштабирующие коэффициенты производится связывание метрики изображения и метрики поверхности по которой осуществляется движение.



Рисунок 4.14 — Изображение калибровочной плоскости

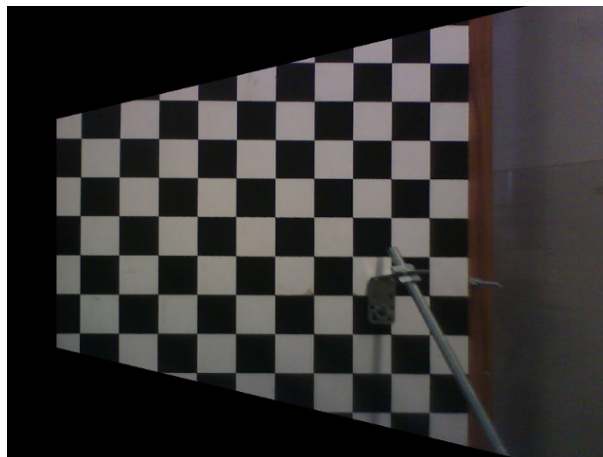


Рисунок 4.15 — Результат обработки изображения на рисунке 4.14 по (4.19), (4.20), для WEB камеры наблюдающей шахматную доску при $d=1603$ и $\alpha = 40$ градусов

4.4. Определение геометрии препятствия

Следует заметить, что в роли изображаемой плоскости может выступать и лазерная развертка. В этом случае, поскольку расстояние от центра объектива до плоскости развертки и угол между этой плоскостью и оптической осью камеры заданы конструктивно, (4.19)–(4.22) так же могут быть применены. Тогда после простейшей калибровки (необходимо найти единственный коэффициент масштабирования), расстояние до предметов очерченных лазерной разверткой может быть определено непосредственно из экранных координат. Пример обработки изображения сцены, показанной на рисунке 4.16, подсвеченной лазерной подсветкой, приведен на рисунке 4.17.

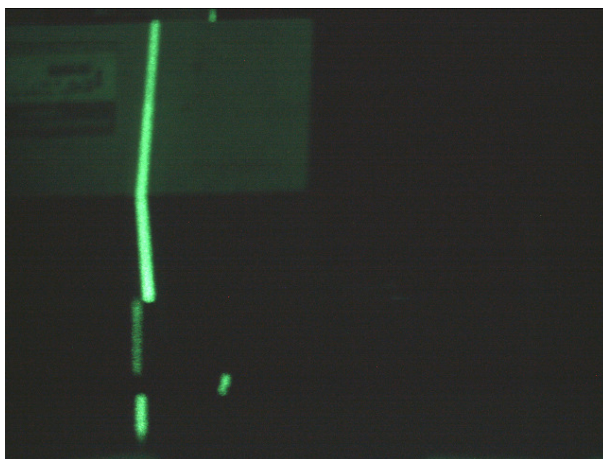


Рисунок 4.16 — Изображение сцены подсвеченной лазерной разверткой

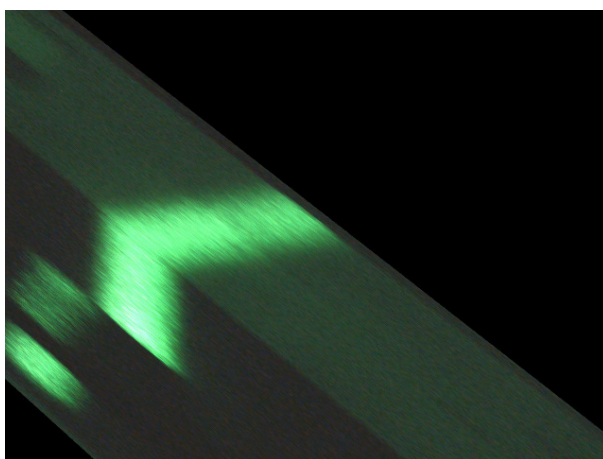


Рисунок 4.17 — Результат обработки изображения на рисунке 4.16 по (4.19), (4.20), для камеры высокого разрешения при $d=21780$ и $\alpha = 86$ градусов

Сцена на рисунке 4.16 получена при очень близком расположении камеры и развертки, что позволяет проиллюстрировать минусы такого

подхода. Если угол α составляет значительную величину, один экранный пиксель будет соответствовать достаточно большому расстоянию, т.е. будет наблюдаться значительная погрешность.

Кроме того, в пределах одной сцены, край изображения, находящийся ближе к развертке, будет давать лучшее пространственное разрешение и меньшую погрешность измерения.

Сказанное можно обобщить. Ввиду того, что камера является угловым прибором, при любом способе определения расстояния или размера по изображению, погрешность будет возрастать при удалении видеодатчика от объекта.

Из рисунка 4.17 видно, что после устранения искажения перспективной проекцией непосредственно по изображению пересечения предмета плоскостью лазерной подсветки, может быть определена форма объекта в плоскости подсветки и даже оценены количественные показатели формы.

Кроме того, как видно из рисунка 4.15, при разумном наклоне камеры преобразование дает достаточно качественное, не деформированное изображение, т.е. применимое для использования в задачах локального ориентирования.

4.5. Определение параметров движения по текстуре поверхности препятствия

В случае когда робот не оснащен датчиками линейной и угловой скоростей, для работы многих алгоритмов управления и оценки сцены по видеоизображению необходимо производить их оценку. Если других сенсоров, позволяющих косвенно оценить параметры движения робота нет, то такая оценка может быть произведена по видеодатчику.

Для этого необходимо надежно привязать робот к окружающим маркерам, после чего задействовать способы определения расстояния до них не использующие сведения о параметрах движения робота.

Один из возможных способов — это использование рассмотренных в разделе 4.2 методов стереовидения и триангуляции по световой полосе, полученной, например, разверткой лазерного луча. Все преимущества и недостатки данных подходов остаются в силе

При использовании стереовидения, так же как и в задаче определения расстояния и азимута на препятствие, очень актуальна проблема распознавания образов и идентификации принадлежности их одному объекту. Однако, в случае решения этой проблемы, очевидным плюсом метода является относительная свобода в выборе ориентиров.

Использование лазерной развертки позволяет надежно идентифицировать и определять расстояние до предметов, расположенных в плоскости лазерной развертки. Если таких объектов в поле обзора нет, идентификация параметров движения робота невозможна.

Если расстояния до маркеров и азимуты на них определены, то зная изменение этого расстояния и частоту следования кадров (FPS) можно оценить линейную и угловую скорость как

$$Y = \frac{fps}{\delta f} X, \quad (4.23)$$

где X — это изменение расстояния (при определении линейной скорости) или азимута (при определении угловой скорости) за δf кадров, а Y — собственно оценка линейной или угловой скорости.

В случае, когда необходимо гарантировать устойчивое определение параметров перемещения, несмотря на отсутствие маркеров естественного или искусственного происхождения, выступающих на заданную высоту, может быть использован другой подход. Идентификация опорных маркеров может быть заменена на оценку текстуры [52, 57, 62].

Текстура — это широко распространенное явление, которое легко распознать, но которому сложно дать определение. Как правило, относится эффект к текстуре или нет, — зависит от масштаба, при котором рассматривается. Листок, занимающий почти все изображение, — это объект, но листва дерева — это текстура. Источников текстуры множество. Во-первых, изображения, состоящие из большого количества мелких предметов, лучше всего считать текстурой. В качестве примеров можно назвать траву, листву деревьев, гравий, шерсть, щетину. Во-вторых, многие поверхности покрыты правильными узорами, которые выглядят как большое количество мелких предметов. Примеры: пятна на шкуре животных, как у гепарда или леопарда; полосы, как у тигра или зебры; узоры на коре деревьев, древесине, коже.

С текстурой обычно связаны три основные задачи:

- Анализ и сегментация текстуры. Сегментация текстуры — задача, которая состоит в разбиении изображения на участки с постоянной текстурой. Сегментация текстуры включает в себя как представление текстуры, так и вычисление базиса, в котором будут определяться границы сегментов [52].
- Синтез текстуры служит для создания больших текстурных областей из маленьких элементов изображений. Это делается с помощью пробных изображений, по которым строятся вероятностные

модели текстуры, а затем эти вероятностные модели применяются для создания изображений с текстурой [57, 62].

- Определение формы по текстуре состоит в восстановлении ориентации поверхности или ее формы по текстуре изображения. Это можно сделать, допустив, что текстура “выглядит одинаково” в различных точках поверхности, т.е. изменение структуры от одной точки к другой может быть ключом к форме поверхности [62].

Для идентификации параметров движения робота наиболее интересна первая задача, которая рассмотрена далее более подробно.

Текстура изображения обычно включает упорядоченные узоры, состоящие из правильных элементов (которые иногда называют текстонами). Например, одна из текстур на рисунке 4.18 (Перепечатано из [57]). состоит из треугольников. Другая текстура на этом рисунке состоит из стрелочек. Естественный способ представления текстуры — это найти текстоны и описать их расположение.



Рисунок 4.18 — Примеры текстуры для экспериментов — людям предлагается описать внешний вид различных текстур. Обратите внимание, что примеры включают достаточно стилизованные элементы, повторяющиеся в определенном порядке

Недостаток описанного метода заключается в том, что нет известного канонического набора текстонов, т.е. не ясно, что следует искать. Вместо того, чтобы искать узоры на уровне стрелочек и треугольников, можно искать еще более простые элементы — скажем, точки и полосочки — и рассуждать об их пространственном расположении. Преимущество такого метода состоит в том, что простые элементы узора нетрудно найти с помощью фильтрации изображения.

Свертка изображения с линейным фильтром представляет изображение в другом базисе. Преимущество преобразования изображения в новый базис, которое дает его свертка с фильтром, состоит в том, что этот процесс выявляет структуру изображения. Это происходит благодаря тому, что реакция фильтра сильнее тогда, когда узор изображения на каком-либо участке похож на ядро фильтра, и слабее в противном случае.

Таким образом, можно представить текстуру изображения в виде реакции набора фильтров. Набор различных фильтров должен состоять из

серий узоров — как правило, пятен и полос — при определенной последовательности масштабов (чтобы, например, можно было определять размер этих пятен или полос). Значение каждой точки полученного изображения будет описывать “пятнистость” (“полосатость” и т.д.) в соответствующей точке изображения при определенном масштабе. Несмотря на то, что на данный момент такой подход является сильно избыточным, он дает представление структуры (ее “пятнистости”, “полосатости” и т.д.), которое оказалось очень полезным.

Следует отметить, что фильтры пятен полезны благодаря сильной реакции на небольшие участки, которые отличаются от соседних (например, это может быть либо одна сторона края, либо пятно). Еще одна привлекательная черта — фильтры пятен могут определять неориентированную структуру. Фильтры полос, с другой стороны, ориентированы и лучше реагируют на ориентированную структуру.

Какими фильтрами стоит пользоваться? Ответа на этот вопрос нет. Точнее, могут подойти многие ответы. По аналогии с процессами, происходящими в коре головного мозга человека, обычно берется по меньшей мере один фильтр пятен и набор ориентированных фильтров полос для различных направлений, масштабов и фаз. Фазой полосы называют фазу поперечного сечения перпендикулярно полосе, которую определяют по аналогии с фазой синусоиды (например, если поперечное сечение проходит через нуль в начале координат, фаза равна 0°).

Один из способов получить требуемый фильтр — это найти взвешенную разность гауссовых фильтров при различных масштабах [52, 57, 62]; именно этот метод применялся для получения изображения на рисунке 4.19.

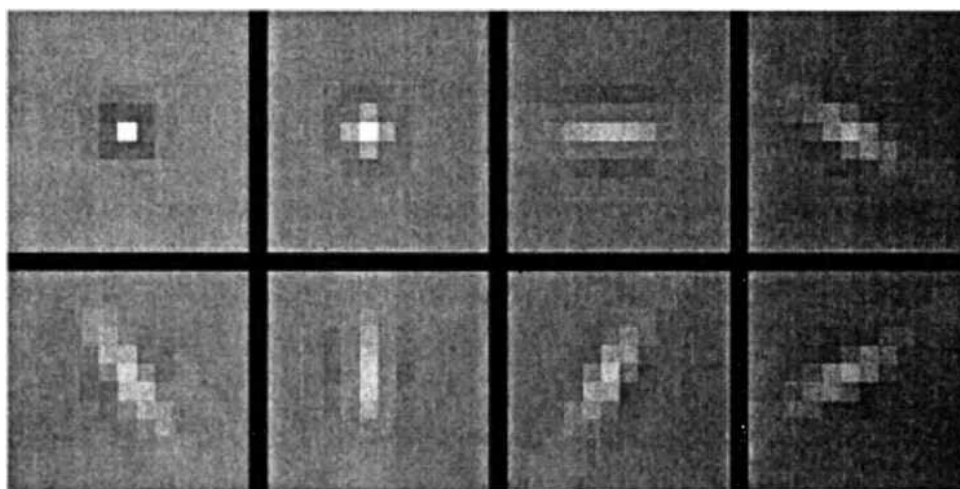


Рисунок 4.19 — Набор из восьми фильтров, которые используются для разложения изображения на серию характеристик

Перечислим элементы фильтров приведенного примера:

- Пятно, которое задается взвешенной суммой трех concentрических симметричных гауссианов с весовыми коэффициентами 1; -2 и 1, причем соответствующие дисперсии равны 0,62; 1 и 1,6;
- Другое пятно, которое задается взвешенной суммой двух concentрических симметричных гауссианов с весовыми коэффициентами 1 и -1, причем соответствующие дисперсии равны 0,71 и 1,14;
- Набор ориентированных полос, состоящий из взвешенной суммы трех ориентированных гауссианов, которые расходятся в разные стороны. Существует шесть вариантов таких полос; каждая из них представляет собой повернутую под некоторым углом горизонтальную полосу. Весовые коэффициенты полос равны -1; 2 и -1, причем дисперсия у них отличается по осям x и y ; все σ_x равны 2, а все σ_y равны 1. Центры полос расположены на оси y в точках (0,1); (0,0) и (0, -1).

Следует понимать, что выбор фильтра почти всегда происходит интуитивно. Опыт подсказывает, что фильтр должен состоять из набора пятен и полос различного масштаба и направления (что и представляет собой данный набор), но очень мало причин верить, что оптимизируя выбор фильтра, можно достичь серьезного улучшения.

Точно неизвестно, какое количество фильтров будет “самым лучшим” для хороших текстурных алгоритмов. На практике, число масштабов колеблется от четырех до одиннадцати, и число направлений — от двух до восемнадцати. Количество направлений меняется в зависимости от задачи и не имеет большого значения, по крайней мере, до тех пор, пока используется около шести направлений. Как правило, фильтрами “пятен” выступают гауссианы, а фильтры “полос” определяются дифференцированием ориентированных гауссианов.

Подобным образом, не особо выгодно пользоваться более сложными наборами фильтров, чем основная комбинация фильтров пятен и полос. В этом есть тонкий момент: применение большего числа фильтров приводит к более подробному (и более перегруженному) описанию изображения; кроме того, придется находить свертку изображения со всеми этими фильтрами, что само по себе достаточно недешево. Единственное, как можно упростить процесс, — построить пирамиду, чтобы контролировать объем лишней информации, с которой приходится иметь дело.

Набор отфильтрованных изображений сам по себе не является описанием текстуры, поскольку еще требуется описание общего распределе-

ния элементов текстуры. Например, поле желтых цветов может состоять из множества маленьких желтых пятен с вертикальными зелеными полосками; зебра может состоять из черных полос на белом фоне. Неявно предполагается, что масштаб текстуры описан. Маленькое окно изображения поля желтых цветов может вмещать только один цветок; для изображения зебры оно может состоять из однородного черного или белого участков. Подобным образом, слишком большое окно может содержать не только нужную текстуру, но и фон. Обратите внимание, что здесь есть два масштаба: во-первых, масштаб фильтров, а во-вторых — масштаб, при котором рассматривается распределение фильтров.

Предположим, что известен размер значимого окна изображения, для которого нужно описать текстуру. Характерное описание состоит из набора статистических данных с выходов фильтров для этого окна. Выходные данные обычно возводят в квадрат (помимо всего прочего, это позволяет подсчитать число черных полос, следующих за белыми, и число белых, следующих за черными). Например, на рисунке 4.20 показано возможное представление через вертикальную и горизонтальную текстуры. Это представление было получено путем отбора с выходов фильтров

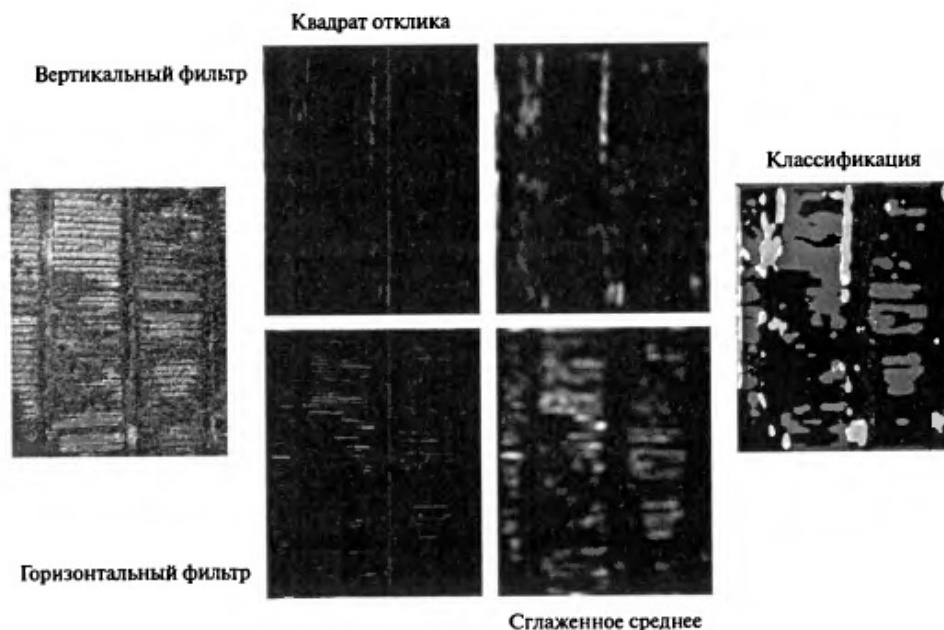


Рисунок 4.20 — Предположительное представление текстуры через выходы фильтров (два фильтра производных, один вертикальный и один горизонтальный)

вертикальных (или горизонтальных) полос и возведения их в квадрат. Затем результат сглаживался при более грубом масштабе. Это сглаживание эквивалентно оценке среднего значения возведенных в квадрат выходов фильтров для определенного окна. Наконец, сглаженные данные попада-

ют в классификатор, который собственно и дает представление текстуры.

На рисунке 4.20 слева показано исходное изображение. Слева в центре показаны возведенные в квадрат выходы фильтров. Значения приведены к одинаковому линейному масштабу, причем более светлые точки указывают на более сильную реакцию. В центре справа показано сглаженное изображение (которое можно интерпретировать как среднее значение квадрата реакции по малому окну). Средняя реакция на вертикальные полосы сильнее на вертикальной карте, а на горизонтальные полосы — на горизонтальной карте. Наконец, эти два изображения сравнивались с порогом, их комбинация показана на рисунке справа (черные значения не относятся ни к вертикальным, ни к горизонтальным; темно-серые значения горизонтальны; светло-серые — вертикальны; а белые значения относятся и к тем, и к другим)

То, какую статистику следует собирать, зависит в некоторой степени от описываемого объекта. Однако работа над синтезом текстуры налагает некоторые ограничения на выбор соответствующей модели. Предположим, что масштаб окна, по которому нужно собрать статистику, установлен (один из путей — найти среднее значение квадрата выходов фильтра для ряда фильтров).

Затем окно описывается вектором значений, каждое из которых — это квадрат средней по окну реакции определенного фильтра. С помощью этого метода можно отличить, например, пятнистые окна — те, в которых будет высокой средняя реакция фильтров пятен, — от полосатых окон, где высокой будет средняя реакция фильтров полос.

Альтернативный подход — вычислять среднее значение и среднеквадратическое отклонение выходов фильтров по всему окну и пользоваться результатами этих вычислений для построения характеристического вектора.

В задаче локального ориентирования наиболее разумным выглядит выделение небольших, по возможности изолированных, окон, содержащих текстоны редко повторяющиеся на других окнах. После этого, следует объединить текстоны в соседних окнах и вычислить среднее значение их координаты. Координаты этой точки и будут служить маркером для определения параметров перемещения по формуле (4.23).

Следует заметить, что ориентирование в отсутствие выступающих над поверхностью маркеров идет по текстуре на поверхности, по которой перемещается робот. И в этом задача по сути является схожей с задачей ориентирования по разметке, поэтому перед фильтрацией изображения и выделением текстонов, следует устранить искажение вносимое перспективной проекцией, как это описано в разделе 4.2. В противном случае,

при перемещении робота, взаимное расположение текстонов в пределах одного окна будет меняться со временем, а это равносильно дополнительному динамическому возмущению оцениваемого положения маркера. Последнее, в свою очередь, будет давать неточность в оценке параметров перемещения.

Теперь, когда устранено искажение перспективной проекцией, произведена фильтрация изображения, выделены локальные скопления текстонов, чьи координаты приведены к среднему значению, это значение может быть использовано в (4.23) в качестве координат маркера.

Помимо проиллюстрированной в разделе 4.2 зависимости точности измерения от дальности от видеодатчика до изображаемого объекта, можно выделить следующие источники погрешностей:

- Структурные погрешности установки: неверно заданная база или угол приемника к излучателю, для триангуляционного метода, или двух приемников для метода стереовидения, неверная базировка камеры при ориентировании по кривой и.т.д.;
- Погрешности порождаемые элементами установки: приемником (камера), излучателем (лазер), оптической системой;
- Ошибки в алгоритме обработки;
- Внешние помехи (блики, засветки, повторные отражения, и т.п.).

Первый источник устраняется за счет калибровки и юстировки, третий — за счет верификации алгоритмов и правильной организации вычислений. Второй и четвертый источники рассмотрим ниже. Из-за большого числа производимых измерений и возможности замерить параметры приемника, который является самым сложным и помехогенерирующим элементом в тройке устройств, можно сказать, что основной вклад в получении ошибочных измерений вносят внешние помехи. Но так как они по сути являются результатом взаимодействия с внешним окружением, то можно лишь предсказать ограниченный набор ситуаций, которые могут произойти. Так, например, здесь будут рассмотрены некоторые сложные препятствия на пути робота, но учитывая, что действовать он будет в комнатных условиях, то не будет рассматриваться влияние погодных условий.

Рассмотрим основные ошибки, вносимые видеокамерой, на примере видеокамеры с КМОП-матрицей. За счет использования такой технологии все основные элементы собраны на одном чипе и на выходе получаем цифровой сигнал. Здесь будет непосредственно рассмотрены погрешности вносимые матрицей приемников.

По сути единичный приемник можно представить как интегратор с нелинейностью на выходе и двумя передающими коэффициентами. Заряд полученный преобразованием из света хранится на конденсаторе, ограниченность емкости конденсатора порождает нелинейность типа насыщение. Коэффициент на входе обозначается как η — квантовая эффективность и в общем случае характеризует с какой эффективностью свет какой длины волны улавливает приемник. Выходной коэффициент обозначается как g измеряется в Вольтах на электрон и завязывает количество заряда на конденсаторе с напряжением на выходе. Чувствительность такого приемника зависит от ряда факторов (температура, длины волны), но может быть выражена формулой Важным свойством каждого из приемников является наличие своего значения темнового тока. Это ток появляющийся не из-за падения света на фотодиод, а из-за разогрева и рассеивания заряда. Темновой ток имеет постоянную и колебательную составляющую (дробовой шум), таким образом часть его устраняется, если измерить постоянную составляющую как среднюю величину на выходе [22, 44].

Приведем все источники шумов в таких системах. Предположим, что все эти источники не коррелируют друг с другом, тогда общий шум системы $\varepsilon_{\text{сис}}$ может быть получен суммированием отдельных составляющих. Найдем шум системы как:

$$\varepsilon_{\text{сис}}^2 = \varepsilon_{\text{темн}}^2 + \varepsilon_{\text{физ}}^2 + \varepsilon_{\text{сбр}}^2 + \varepsilon_{\text{АЦП}}^2, \quad (4.24)$$

где $\varepsilon_{\text{темн}}$ — дробовой шум темнового тока, $\varepsilon_{\text{физ}}$ — шум являющийся результатом физического не единообразия структуры матрицы, неизменно присутствует на разных кадрах, $\varepsilon_{\text{сбр}}$ — шум сброса (результат остаточного заряда в приемнике) и шум усилителя, $\varepsilon_{\text{АЦП}}$ — шум квантования от аналого цифрового преобразования. В добавок итоговый шум на выходе будет еще иметь в виде составляющей фотонный шум:

$$\varepsilon_{\text{итог}}^2 = \varepsilon_{\text{сис}}^2 + \varepsilon_{\text{фот}}^2. \quad (4.25)$$

Теперь подробнее о вышеперечисленных шумах. Важно сразу выделить две категории пикселей, которые могут присутствовать в любой матрице, но влияние которых легко устранить: «горячие» пик сели и «мертвые» пик сели. Последние не учитываются в общем уравнении, так как являясь по сути сломанным элементом матрицы, не накапливают и не отдают заряд, а на изображении выглядят как черные точки. Бороться с этим дефектом можно либо кардинально — заменой матрицы, либо программно — заполнением ее за счет окружения, но этот вариант приемлем лишь для любительских задач.

«Горячие» пик сели представляют гораздо большую проблему. Они становятся заметны где-то после пяти минут работы, когда устройство прогреется. Такие пик сели выделяются своей повышенной яркостью. Происходит это из-за заполнения за счет темнового тока, который зависит от температуры. «Горячий» пиксель — такой же дефектный элемент как и «мертвый» пиксель, но устранить его влияние проще: можно использовать охлаждение или можно использовать кадр с закрытым затвором для последующей корректировки изображения.

Важно заметить, что остальные пик сели также не однородны. У каждого из них различная чувствительность к свету, утечка и остаточный заряд. Остаточный заряд — результат того, что невозможно полностью сбросить все электроны из элемента. Эти шумы повторяются во многих кадрах и их можно назвать структурными шумами матрицы, помимо зернистости в кадре могут проявляться в виде линий и клетчатой текстуры. Так как темновой ток зависит от температуры, то необходимо сказать, что любой греющийся элемент расположенный неаккуратно близко к матрице может дать «засветку», выглядит это как пятно с краю изображения, удаляется так же с помощью кадра с закрытым затвором.

Найдем фотонный шум матрицы. Учитывая, что q — общее число фотонов упавших на единицу площади, можно сказать, что будет $q^{\frac{1}{2}}$ шумовых фотонов на единицу площади (т.к. многие шумы подчиняются распределению Пуассона).

Тогда соотношение сигнал-шум (S/N) на входе имеет вид $(S/N)_{\text{вх}} = \frac{q}{q^{\frac{1}{2}}} = q^{\frac{1}{2}}$, откуда $(S/N)_{\text{вх}}^2 = q$. Экспозиция даст ηq фотоэлектронов на единицу площади и $g\eta q$ Вольт η — квантовая эффективность, g — выходной коэффициент вольты на электрон). Среднеквадратичный округленный шум на выходе в силу этих фотоэлектронов будет $\varepsilon_{\text{фот}} = (\eta q)^{\frac{1}{2}}$ электрон или $\varepsilon_{\text{фот}} = g(\eta q)^{\frac{1}{2}}$ Вольт. Возведя в квадрат и используя Вольты за единицу измерения $\varepsilon_{\text{фот}}^2 = g^2\eta q$. Тогда итоговый шум из 4.25 примет вид:

$$\varepsilon_{\text{итог}}^2 = \varepsilon_{\text{сис}}^2 + g^2\eta q. \quad (4.26)$$

Стоит заметить, что помимо яркостных шумов, желательно учитывать и физическую неоднородность матрицы, ввиду того, что графическое изображение, принимаемое за изотропную линейную последовательность пикселей, формируется по оптическому изображению на матрице. Последняя может быть изготовлена неидеально, фоточувствительные элементы могут иметь разный размер, выступать над поверхностью, кроме того над каждым элементом обычно имеется пластиковая капельная микролинза, для увеличения светосилы, которая так же, при неидеальном

изготовлении, может смещать энергетический центр светового пучка. Однако эти эффекты малозначительны учитываются редко. Даже при самом грубом качестве изготовления матрицы, погрешность расположения фоточувствительного элемента не должна превышать половины пикселя

Под внешними помехами будем подразумевать помехи, вносимые структурными свойствами объектов и засветку внешним освещением. Так тёмные матовые поверхности могут в значительной степени поглощать луч лазера. Отражающие поверхности порождают блики, засветки и повторные отражения, затрудняющие определение реального положения полосы, а поверхности с разной степенью сложности и прозрачности могут расщепить луч. Подобные эффекты могут особенно сильно влиять на оценки, получаемые при использовании лазерной подсветки (см. рисунки 4.21–4.23). Из рисунков 4.21–4.23 видно, что различные оптические

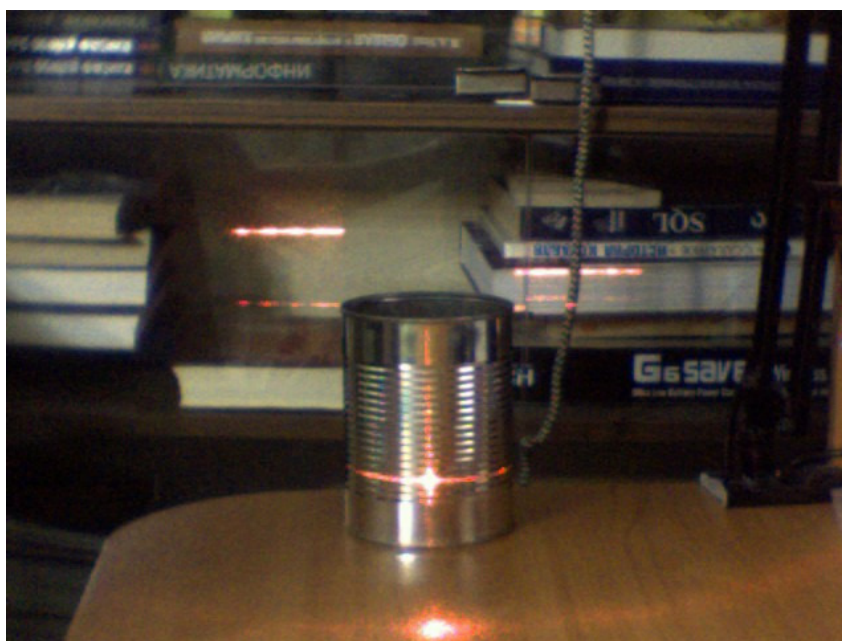


Рисунок 4.21 — Изображение металлической банки, отчетливо видны вторичное отражение и деформирование световой полосы

эффекты могут значительно исказить изображение и осложнить его обработку. Это необходимо учитывать, заранее предполагая в каком окружении будет работать мобильный робот, и планировать иерархию алгоритмов обработки изображения, соответственно.



Рисунок 4.22 — Изображение стакана, световой луч расщепляется и почти не отражается от поверхности



Рисунок 4.23 — Изображение стакана сложной структуры, световой луч расщепляется и, за счет внутренних отражений, виден как несколько точек

Глава 5

Маячные системы локальной ориентации

5.1. Пассивная ультразвуковая маячная система

Компания iRobot Corporation, производящая популярные роботы пылесосы Roomba запатентовала новую систему навигации для своих роботов. Специалисты считают, что это наиболее значимый шаг в деле модернизации «самоходных» пылесосов Roomba с момента выпуска в 2002 году. Тем более, что конкуренты iRobot не дремлют.

Новая навигационная система iRobot очень похожа на древний способ мореплавателей ориентироваться по звездам. Трехмерная лазерная система видеонаблюдения сканирует комнату и выставляет на потолке инфракрасные точки, которые и служат ориентиром для движения робота пылесоса Roomba. Предыдущие версии пылесоса проектировали траекторию своего движения в пространстве по датчикам, размещенным в разных местах комнаты. Компьютерная программа робота высчитывала его местоположение и определяла направление дальнейшего пути. Навигационная система iRobot изображена на рисунке 5.1.

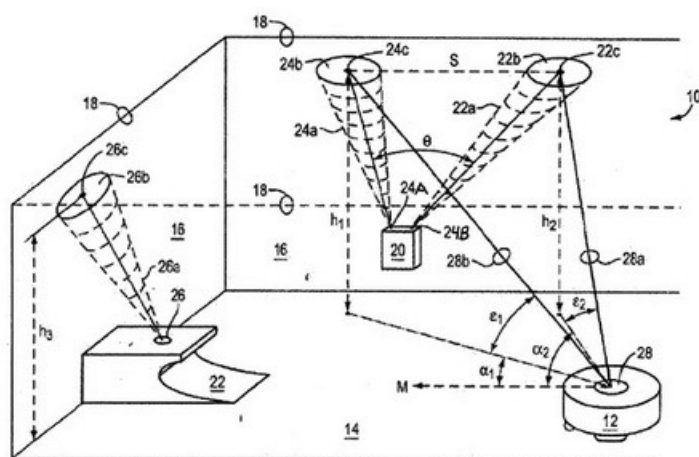


Рисунок 5.1 — Навигационная система iRobot

Основная проблема, которая сразу бросается в глаза в связи с новой системой навигации Roomba, это все-таки мобильность. Сканер с передатчиком устанавливаются в одной комнате, то как переместить пылесос в другое помещение? Надо либо вручную переносить и устанавливать

всю конструкцию, либо в каждой комнате иметь свой сканер. Компания iRobot Corporation предлагает второй вариант. Однако здесь возникает вопрос цены: сколько будет стоить один робот пылесос Roomba с новой системой навигации, если лазерные сканеры понадобятся для каждого помещения в доме?

5.2. Активная маячная система

В качестве модели МР рассмотрим модель робота с двумя ведущими колесами [38].

Рассмотрим две группы методов управления МР: управление по данным дальномера и управление по построенной карте.

Первая группа алгоритмов управления предназначена для управления робота по ориентирам, которые можно выделить в дальнометрическом изображении.

Одним из вариантов управления МР вдоль стены на заданном расстоянии является движение на виртуальный маяк, положение которого рассчитывается для каждого момента времени в зависимости от текущего дальнометрического изображения.

Виртуальный маяк помещается на прямую, параллельную хорде сечения рельефа, которая проведена через ближайшую к МР точку (см. рисунок 5.2) и самую далекую от него точку стены. Параметр прямой

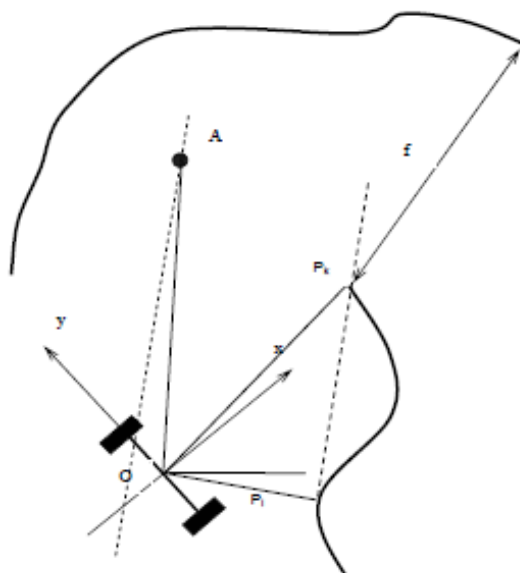


Рисунок 5.2 — Алгоритм движения вдоль стены

и направление на виртуальный маяк могут быть определены по дальнометрическому изображению. Известные геометрические соотношения

позволяют установить значение угла ψ между направлением на маяк и текущим направлением МР. Полученный угол может быть использован в качестве ошибки управления: $\omega = k\psi$.

Помимо движения на виртуальный маяк предложен алгоритм движения вдоль стены с помощью виртуального щупа. В этом случае выбирается луч дальнометрического изображения, служащий виртуальным щупом, например, в этом качестве может быть использован луч с углом отклонения от оси робота (-45°) для движения вдоль правой стены (см. рисунок 5.3). Ошибкой управления будет разность между текущей длиной щупа

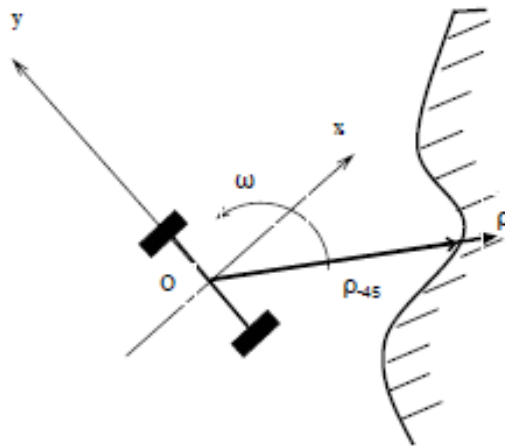


Рисунок 5.3 — Движение вдоль стены с помощью виртуального щупа

ρ_{-45} и его опорной длиной ρ : $\omega = k(\rho_{-45} - \rho)$.

Предложенные алгоритмы управления недостаточно гибки и требуют дополнительного анализа дальнометрического изображения для предотвращения столкновения с препятствиями на пути МР.

Вторая группа алгоритмов управления МР использует сетчатую карту и информацию о текущем положении робота, полученные при решении задачи навигации по дальнометрическим данным. Задача управления может в этом случае формулироваться в виде целевой точки на карте.

Планирование пути в целевую точку по сетчатой карте может быть осуществлено с помощью нескольких известных алгоритмов (волновой алгоритм, алгоритм Дейкстры, алгоритм А* и др.). Например, модификация алгоритма планирования пути в точку, позволяющая найти путь, проходящий удаленно от препятствий в рабочей зоне МР. Первоначальное планирование пути происходит с помощью любого из известных алгоритмов, например, волнового с учетом размера МР (рисунок 5.4) а).

Затем точки пути перемещаются в соответствии с картой штрафов (рисунок 5.4) б), в которой величина штрафа уменьшается пропорционально

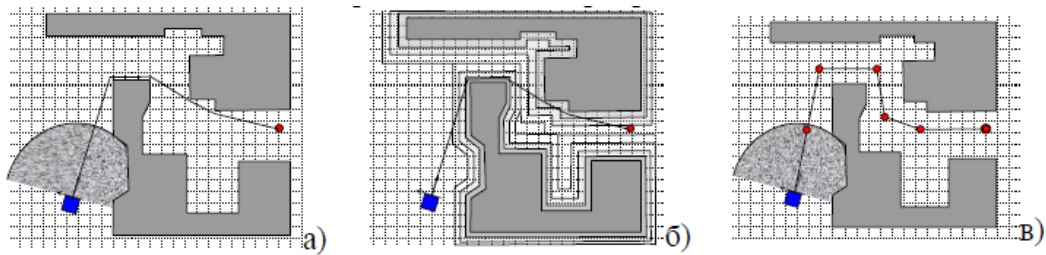


Рисунок 5.4 — Модификация алгоритма планирования пути в точку

расстоянию до препятствия, в зоны с меньшей величиной штрафа. Полученный маршрут разбивается опорными точками на участки, длиной, не превышающей дальность работы дальномера (рисунок 5.4) в).

Опорные точки используются как промежуточные целевые точки, достигая которые последовательно, МР движется к конечной цели. Условие близости опорных точек позволяет использовать для управления движением МР в опорную точку лишь фрагмент карты - текущий скан, что позволяет осуществлять процесс планирования пути в режиме реального времени [38].

5.3. Организация движения по карте в локальном пространстве. Алгоритм SLAM

SLAM — синхронное определение местоположения и составление карты. Эта задача связана с построением карты неизвестного пространства мобильным роботом во время навигации по строящейся карте. Исходные данные: некоторая среда (помещение, открытая местность, водная или воздушная среда) и робот с датчиками. Требуется: в каждый момент времени необходимо знать местоположение робота и карту той части окружающего пространства, которая была доступна для наблюдения с начального момента времени до текущего. Местоположение робота логично требовать в системе локальных координат, связанных с исходным положением робота, так как априорной информации об его положении относительно пространства нет.

Требования к построенной карте могут быть весьма разнообразны. Главным из них является возможность робота ориентироваться по ней. Без этого вычисление местоположения и построение карты будут осуществляться независимо, что приведет к непрерывному росту погрешности. Другими требованиями могут быть возможность навигации, доступность для человеческого восприятия, поддержка больших пространств и т. д.

Приведем ряд пояснительных примеров к задаче. На рисунке 5.5 а) изображены две траектории — реальная траектория робота (пунктиром) и траектория, вычисленная по алгоритму (сплошная линия).

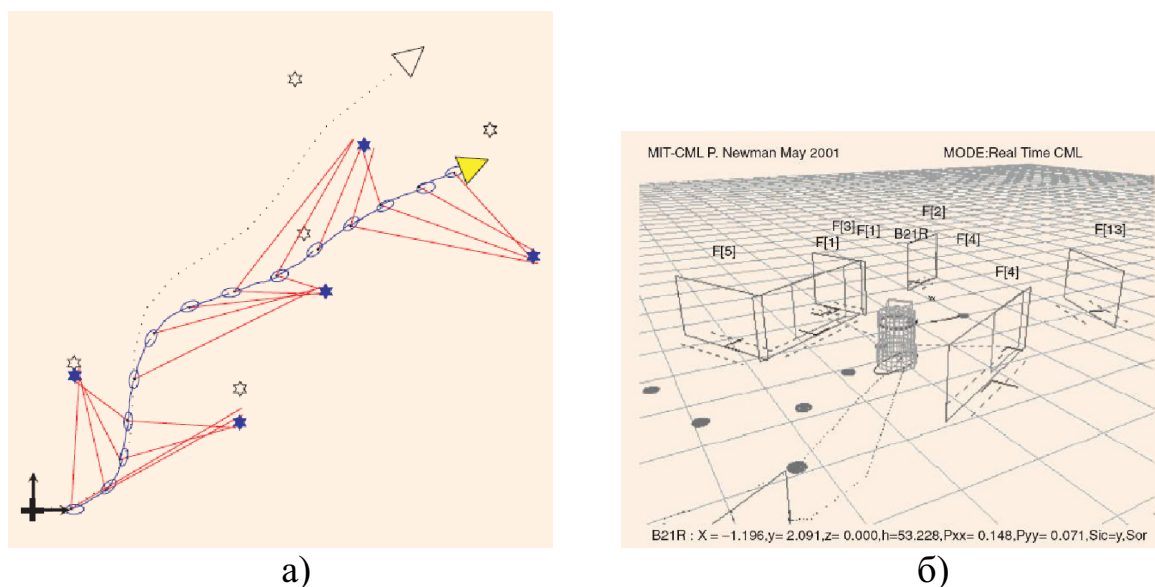


Рисунок 5.5 — 2D-карта, а) — одна из траекторий движения робота вычисленная с помощью алгоритма FastSLAM, б) — карта препятствий, полученная в режиме реального времени с использованием лазерного дальномера и одометра

Промежуточные положения робота указаны синими эллипсами. Ориентиры изображены звездами: реальные - прозрачными, а вычисленные — синими. По рисунку видно, как накапливается погрешность на каждом следующем шаге.

В данном случае построенной картой является 2D-карта ориентиров. Рисунок 5.5 б) показывает одну из реализаций построения карты препятствий. В качестве датчиков робота использовались 2D-лазерный дальномер и одометр. Подобная карта может применяться для навигации. При использовании данной карты для ориентации робота требуется достаточно точная информация о его местоположении. При этом появляется возможность нахождения соответствия между видимыми препятствиями (их формой, размером, ориентацией) и препятствиями на карте.

В настоящее время методы решения задачи SLAM быстро развиваются. Это обусловлено увеличением производительности вычислительных машин, улучшением качества датчиков и появлением новых, развитием робототехники. Задача SLAM является очень важной, так как без ее решения вряд ли возможно создание по-настоящему автономного робота. Задача SLAM состоит из множества подзадач.

Задача SLAM состоит из множества частей : нахождение ориентиров в

пространстве, поиск их соответствий, вычисление местоположения, уточнение местоположения и положений ориентиров. Существуют различные способы реализации разных подзадач. Таким образом, появляется возможность комбинировать различные реализации отдельных алгоритмов и улучшать их по отдельности. Например, замена может потребоваться для работы на больших пространствах вместо работы в помещениях.

В настоящее время выполнено огромное число исследований, связанных с разработкой алгоритмов управления, обеспечивающих решение с помощью мобильных роботов таких нетривиальных операций, как: составление карты местности, ее уточнение, планирование траекторий, обход препятствий, выявляемых при движении, проникновение в труднодоступные зоны и т.д.

Дальнейшие исследования новых типов мобильных роботов стимулируется многочисленными приложениями в самых различных областях человеческой деятельности (автоматизация управления движением транспортных средств, борьба с терроризмом и разминирование подозрительных предметов, работа в условиях сильной задымленности во время пожаротушения, инспекция территорий, зараженных химическими веществами, самостоятельное патрулирование назначенных территорий и др.). Для эффективного функционирования интеллектуальные роботы снабжены системой восприятия внешней среды, средствами анализа ситуаций и принятия решений и осуществляют планирование движения (в том числе и построение трассы).

Адаптация(аккомодация)является основной реакцией живого организма, обеспечивающей ему возможность выживания. Она означает приспособление организма к изменяющимся внешним и внутренним условиям. Реализация этого принципа в технических системах, а именно в робототехнике имеет много достоинств, а иногда и просто необходима. Реакция адаптивной системы управления проявляется в изменении структуры, параметров, а иногда и алгоритма действий так, чтобы гарантировать достижения поставленной цели.

Существуют общие свойства, характеризующие процесс адаптации:

- выходные параметры объекта регулирования и характеристики возмущающих факторов находятся под постоянным контролем и управлением с помощью устройств, дополнительно включаемых в состав управляющей системы;
- наблюдаемое поведение объекта описывается некоторым показателем качества, оценивающим в количественной форме характер протекания процесса управления;

- отклонение показателя качества за пределы допуска влечет за собой автоматическую настройку параметров регулятора или замену алгоритма управления, результатом которых является достижение желаемого показателя качества или реализации поставленной цели.

Описанные свойства присущи в более или менее ярко выраженной форме всем адаптивным системам управления, всегда являющимися системами с обратной связью.

В зависимости от цели управления адаптивные системы в робототехнике можно условно разделить на следующие уровни.

Первый уровень характеризуется способностью самонастройки параметров регулятора на основе информации о состоянии объекта, находящегося под возмущающим действием внешней среды. Оценка состояния объекта может осуществляться либо прямым измерением требуемых параметров, либо путем их идентификации. В последнем случае на объект подаются определенные пробные управляющие воздействия, фиксируется его реакция и на основании анализа поведения объекта дается оценка априорно неизвестным или изменившимся его параметрам. Характерным примером этого уровня адаптации робототехнической системы может служить регулятор, управляющий замкнутым по положению электрогидравлическим приводом манипулятора подводного аппарата. Особенность эксплуатации подводных роботов заключается в необходимости поддержания на заданном уровне статических и динамических параметров гидроприводов в широком диапазоне температур и давлений окружающей среды. Температура слоев воды может значительно отличаться, что может привести к изменению вязкости рабочей жидкости и, как следствие, к непредсказуемому дрейфу характеристик привода. Устранить это неприятное явление способна адаптивная система управления, идентифицирующая изменение характеристик и обеспечивающая соответствующую самонастройку параметров регулятора.

Для второго уровня адаптации робототехнических систем характерно включение в состав управляющего устройства дополнительных информационных средств, обеспечивающих сбор и обработку данных о состоянии внешней среды. На основании анализа изменений внешней среды осуществляется коррекция управляющей программы робота, позволяющая в новых условиях достичь поставленной цели. Хотя на этом уровне адаптации коррекция программных действий допускается лишь в небольших пределах, эффект от применения таких адаптивных систем управления на практике значителен. Примером может служить электродуговая роботизированная сварка крупногабаритных изделий. В этом технологическом

процессе трудно обеспечить постоянство пространственного расположения линии стыка свариваемых частей от изделия к изделию. Поэтому сварочный робот должен уметь корректировать программную траекторию движения электрода в соответствии с реальным положением линии стыка, измеряемым специальными датчиками.

Примером адаптации робототехнической системы, при которой происходит изменение алгоритма управления, служит гибкая производственная система (ГПС), например, механообработки, включающая в себя несколько единиц или десятков металлорежущих станков, объединенных автоматической транспортной складской системой. Такая система функционирует по заданной программе до тех пор, пока не произойдет какой-либо сбой. Если, например, выйдет из строя один из обрабатывающих центров, то система управления ГПС должна, оперативно оценив обстановку, принять решение о последующих действиях, разработать, возможно ценой снижения производительности, новую технологическую схему последовательной обработки изделий, выпускаемых данной гибкой производственной системой, и обеспечить функционирование станков и транспорта по новой маршрутной схеме до тех пор, пока ремонтная бригада не вернет в строй аварийный станок.

Рассмотренные уровни адаптации робототехнических систем различаются не столько количеством дополнительных устройств, обеспечивающих сбор и обработку информации об изменении параметров оборудования, внешней среды и характере их взаимодействия, сколько возможностью организовывать системы, способные функционировать во все более сложных, непредсказуемых изменениях условий эксплуатации.

Анализируя функции программной и адаптивной систем управления роботом, решающим рассматриваемую задачу, можно заметить, что они отличаются только устройствами, воспринимающими информацию о внешней среде. Эти устройства обрабатывают эту информацию и выбирают из памяти робота последовательность обхода уже имеющихся точек позиционирования (рисунок 5.6).

Компоненты адаптивной и программной сред, отвечающие за исполнение выбранной последовательности обхода заданных точек, оказываются сходными.

Таким образом, основное свойство адаптивных систем — реализация цели управления в условиях недетерминированной внешней среды и дрейфа параметров робота — отражается в структуре двумя новыми элементами: информационной системой, а также устройством для вычисления координат целевых точек и последовательности их обхода, использующим информацию об изменениях, произошедших во внешней среде и

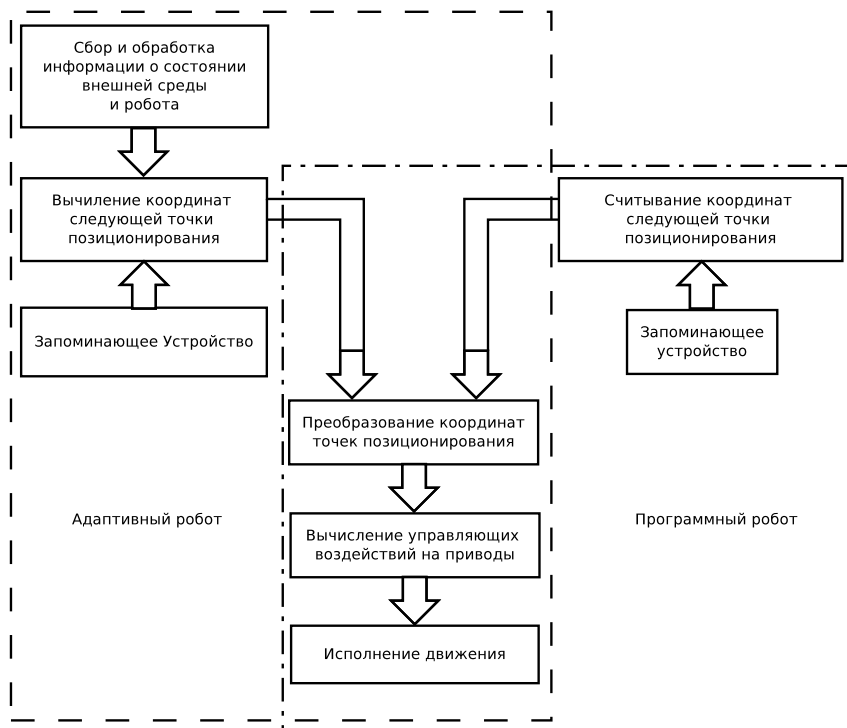


Рисунок 5.6 — Схемы управления адаптивным и программным роботом

компонентах робота.

Функции управления адаптивным роботом выполняет вычислительное устройство, уровень сложности которого определяется уровнем адаптации робота. В простейшем случае это может быть микроконтроллер или микроЭВМ, для сложных адаптивных робототехнических систем вычислительное устройство может представлять собой мультимикропроцессорную сеть.

Заключение

Задача навигации остается ключевой проблемой мобильной робототехники, что подразумевает под собой определение положения мобильного робота в рабочем пространстве — локализацию и составление представления, описания окружающего мира — картографию.

Информация о текущем положении робота необходима для решения большинства встречающихся задач управления: прохождения заданной траектории, поиска пути в заданную точку, возвращения в исходное положение. Информация об окружающем мире, которая чаще всего представляется в виде карты или плана местности, необходима для запоминания пройденного маршрута, планирования траектории в обход статических препятствий, слежения за динамическими объектами.

Задача локализации является наиболее сложной, хотя она может быть решена при помощи датчиков спутниковых навигационных систем (СНС) таких как GPS и ГЛОНАСС, но на настоящий момент в большинстве случаев эти системы не позволяют получить точности, необходимой для управления мобильным роботом. Кроме того, их применение ограничивается зонами доступности сигнала спутников, что делает невозможным определение положения робота внутри зданий, а также вблизи высоких сооружений и деревьев.

Наиболее точное решение навигационной задачи может быть получено с помощью систем технического зрения на основе видеокамер, лазерных дальномеров и других сенсоров. Такие системы также позволяют формировать описание окружающей робот зоны, выявлять потенциальные опасности, находить ориентиры целей. Информационный поток с таких датчиков довольно высок (от 5 КБайт/сек. для лазерного дальномера до 8 Мбайт/сек. для видеокамер), поэтому методы обработки такой информации требуют сложных алгоритмов, значительных вычислительных мощностей и получили развитие только в последнее время.

Среди датчиков, входящих в системы технического зрения мобильных роботов, большой популярностью среди разработчиков пользуются лазерные сканирующие дальномеры. Эти датчики позволяют измерять расстояния до ближайших объектов за счет излучения пучка лучей лазера в плоскости. Результатом измерения является массив дальностей до ближайших объектов, находящихся на пути лучей - своеобразное изображение сечения окружающего мира в плоскости, называемое также сканом.

Лазерные дальномеры имеют высокую точность измерения расстоя-

ния (до 10-15 мм.) при больших диапазонах (до 80 м.) и скоростях измерения (до 75 сканов в секунду). Они могут применяться на мобильных роботах,двигающихся по пересеченной местности, для составления цифрового описания рельефа рабочей зоны и определения ее проходимости.

Более эффективное использование лазерного дальномера возможно в искусственных средах, например офисных и производственных помещениях, где движение совершается в плоскости и сечение рельефа неизменно с высотой. Измерение такого рельефа может быть получено с помощью лазерного дальномера, установленного на мобильном роботе в плоскости, параллельной поверхности движения. В этом случае, информации сканирующего дальномера оказывается достаточно для решения задачи навигации и управления мобильного робота.

Современная робототехника в целом и мобильная робототехника в частности развиваются семимильными шагами. Прогресс достигается благодаря усовершенствованию исполнительных механизмов и вычислительных средств.

Основной тенденцией современной мобильной робототехники является переход от телеуправляемых систем, которые требуют непосредственного участия человека для выполнения всех действий робота, к автономным системам, в которых оператор лишь указывает конечные и промежуточные цели [38].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия магнетизма // Электронный ресурс. — Режим доступа: www.valtar.ru/Magnets4/mag_4_17.htm.
2. Навигация мобильных роботов // Электронный ресурс, Издание PC Week/RE («Компьютерная неделя»). — Режим доступа: <https://www.itweek.ru/>.
3. Навигация мобильных роботов // Электронный ресурс, Виртуальный компьютерный музей. — Режим доступа: <http://www.computer-museum.ru/frgnhist/robonav.htm>.
4. Пример разработки компаса // Электронный ресурс. — Режим доступа: www.easyelectronics.ru/elektronnyj-kompas-na-lsm303dlh.htm.
5. Пример ультразвукового дальномера // Электронный ресурс. — Режим доступа: <http://radio.delanet.ru>.
6. Регламент соревнований открытого робототехнического турнира г. Москва // Электронный ресурс. — Режим доступа: <http://www.railab.ru>.
7. Бойков В. И., Григорьев В. В., Николаев П. В. Анализ дискретных многосвязных стохастических систем на основе векторных функций Ляпунова // Тез. докл. I ВНТК «Синтез и проектирование многоуровневых систем управления». — Барнаул, 1982.
8. Бушуев А. В., Григорьев В. В., Литвинов Ю. В. Синтез управлений по заданным оценкам качества дискретных систем с изменяющимися параметрами // Автоматика и телемеханика. — 1984. — № 11. — С. 10–18.
9. Быстров Ю. А., Гапунов А. П., Персианов Г. М. Оптоэлектронные устройства в радиолобительской практике. — М. : Радио и связь, 1995.
10. Бурдаков С. Ф., Мирошник И. В., Стельмаков Р. Э. Системы управления движением колесных роботов. — СПб. : Наука, 2001.
11. Гридин В. Н., Титов В. С., Труфанов М. И. Адаптивные системы технического зрения. — М. : Наука, 2009.
12. Анализ качества переходных процессов в непрерывных и дискретных системах на основе условий качественной экспоненциальной устойчивости / С. В. Быстров, В. В. Григорьев, Е. Ю. Рабыш, О. К. Мансурова // Мехатроника, Автоматизация, Управление. — 2012. — № 9. — С. 32–36.
13. Захаров В. М., Костко О. К. Метеорологическая лазерная локация. — Л. : Гидрометеоиздат, 1977.
14. Григорьев В. В., Коровьяков А. Н. Анализ процессов в многосвязных системах на основе векторных функций Ляпунова // Автоматика и телемеханика. — 1984. — № 4. — С. 39–47.

15. Григорьев В. В., Коровьяков А. Н. Исследование качества многосвязных систем на основе метода сравнения // Автоматика и телемеханика. — 1988. — № 6. — С. 58–66.
16. Григорьев В. В., Мансурова О. К. Построение областей гарантированного качества допустимых изменений параметров для дискретных систем // ЛИТМО. — 1989.
17. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. — СПб. : Профессия, 2003. — ISBN: 93913-035-6. — (Серия Специалист).
18. Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К. Основные направления развития телевизионной техники // Вопросы радиоэлектроники. — 2006. — № 1. — С. 3–12.
19. Быстров С. В., Григорьев В. В. Качественная устойчивость и неустойчивость динамических систем и оценка областей допустимых изменений параметров // Труды X Международной Четаевской конференции. — Т. 2. — Устойчивость. — Казань : Издательство Казан. гос.техн. ун-та, 2012. — С. 207–214.
20. Построение областей допустимых изменений параметров гарантированного качества процессов динамических систем / А. А. Бобцов, С. В. Быстров, В. В. Григорьев и др. // Мехатроника, Автоматизация, Управление. Приложение. — 2006. — № 10. — С. 2–5.
21. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие. / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых и др. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002.
22. Форсайт Дэвид, Понс Жан. Компьютерное зрение. Современный подход. — М. : Вильямс, 2004. — ISBN: 5-8459-0542-7.
23. Аналитическое конструирование регуляторов по корневым показателям качества / А. П. Богачев, В. В. Григорьев, В. Н. Дроздов, А. Н. Коровьяков // Автоматика и телемеханика. — 1979. — № 8. — С. 21–28.
24. Исследование систем пространственного слежения с периодическими коэффициентами / В. В. Григорьев, О. К. Мансурова, М. М. Мотылькова, Е. Ю. Рабыш // Изв.вузов. Приборостроение. — 2009. — Т. 52, № 11. — С. 12–27.
25. Анализ поведения автоматических радиодальномеров при случайных возмущениях / В. В. Григорьев, Д. В. Козис, А. Н. Коровьяков, Ю. В. Литвинов // Изв.вузов. Приборостроение. — 2010. — № 7. — С. 26–32.
26. Коррекция искажения перспективой в системе технического зрения / А. А. Блиников, В. И. Бойков, В. В. Булатов и др. // Изв.вузов. Приборостроение. — 2014. — Т. 56, № 4. — С. 89–93.
27. Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ / В. В. Григорьев, В. Н. Дроздов, В. В. Лаврентьев, А. В. Ушаков. — Л. : Машиностроение, 1983.
28. Хорн Б. К. П. Зрение роботов. — М. : Мир, 1989.
29. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. — 2 изд. — М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962.
30. Молебный В. В. Оптико-локационные системы. — М. : Машиностроение, 1981.

31. Сабинин Ю. А. Электромашинные устройства автоматики. — М. : Энергоатомиздат, 1988.
32. Русинов М. М. Композиция оптических систем. — Л. : Машиностроение, 1989.
33. Григорьев В. В. Аналитические методы синтеза регуляторов на основе качественной устойчивости : Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук / В. В. Григорьев ; ЛИТМО. — Л., 1989.
34. Гольдштейн Б. С. Сигнализация в сетях связи. 2 тома. — М. : Радио и связь, 1998.
35. Ракович Н. Н. CameraChip: полная видеосистема на кристалле // Компоненты и технологии. — 2004. — № 1. — С. 128–130.
36. Котюк А. Ф. Датчики в современных измерениях. — М. : Радио и связь, 2006.
37. Березин В. В. Видеосистемы на кристалле: новые системные возможности возможности // Вопросы радиоэлектроники. сер Техника телевидения. — 2006. — № 1. — С. 63–71.
38. Минин Андрей Анатольевич. Навигация и управление мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером : Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.02.05 / Андрей Анатольевич Минин ; [Место защиты: Москва. ун-т им. Н.Э. Баумана]. — Москва, 2008.
39. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. — М. : Горячая линия-Телеком, 2009. — ил.
40. Давыденко Егор Викторович. Разработка и анализ алгоритмов цифровой обработки сигналов в задаче оптической лазерной триангуляции : Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.12.04 / Егор Викторович Давыденко ; [Место защиты: Владимир. гос. ун-т]. — Ярославль, 2009.
41. Филиппов С. А. Робототехника для детей и родителей / Под ред. А.Л. Фрадкова. — СПб. : Наука, 2010.
42. Новый цифровой МЭМС компас от компании STMicroelectronics // compel.ru, Компэл — электронные компоненты и сервисы. — Режим доступа: <http://catalog.compel.ru/blog/2010/01/20/stmicroelectronics-vypustila-novyj-cifrovoj-mems-kompas/> (дата обращения: 27.05.2012).
43. Лазерный контроль атмосферы / Р.Т.Х. Коллис, Э.Д. Хинкли, Д. Инаба, и др. ; Под ред. Э.Д. Хинкли. — М. : Мир, 1979. — ил.
44. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: В 2 т. — М. : Мир, 1982.
45. Техническое зрение роботов / В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов, Ю. Г. Якушенков ; Под ред. Ю. Г. Якушенкова. — М. : Машиностроение, 1990.
46. Фомин Д. «Кремний на бумаге» или FABLESS? // Электронные компоненты. «Живая электроника России — 2001». — 2001. — С. 19–21.
47. Порев В. Компьютерная графика. — СПб. : БХВ-Петербург, 2004.

48. Предко М. Устройства управления роботами: схемотехника и программирование. — М. : ДМК-Пресс, 2004.
49. Борисов А. Современные АМР датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей // Компоненты и технологии. — 2006. — № 7.
50. Жимарши Ф. Сборка и программирование мобильных роботов в домашних условиях/ Фредерик Жимарши; пер. с фр. М. А.Комаров. — М. : НТ-Пресс, 2007.
51. Цифровые системы управления / В. В. Григорьев, С.В. Быстров, В.И. Бойков и др. — СПбГУ ИТМО, 2011.
52. A.Efros, T.K.Leung. Texture Synthesis by Non-parametric Sampling // Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on. — Vol. 2. — 1999. — P. 1033–1038.
53. E.Trucco, R.B.Fisher. Acquisition of consistent range data using local calibration // IEEE International Conference on Robotics and Automation. — Vol. 4. — 1994. — P. 3410–3415.
54. Evolution Robotics // Электронный ресурс. — Режим доступа: <http://www.irobot.com/>.
55. J.Clark, E.Trucco, H-F.Cheung. Improving laser triangulation sensors using polarization // Computer Vision, 1995. Proceedings., Fifth International Conference on. — 1995. — P. 981–986.
56. J.Haverinen, J.Roning. An obstacle detection system using a light stripe identification based method // IEEE International Joint Symposium on Intelligence and Systems. — 1998. — P. 232–236.
57. J.Malik, P.Perona. A computational model of texture segmentation // Computer Vision and Pattern Recognition, 1989. Proceedings CVPR '89., IEEE Computer Society Conference on. — 1989. — P. 326–332.
58. J.Nygards, A.Wernersson. Specular objects in range cameras: reducing ambiguities by motion // IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. — 1994. — P. 320–328.
59. STMicroelectronics. — LSM303DLH. Sensor module: 3-axis accelerometer and 3-axis magnetometer, 1 edition, 2009. — October.
60. M.Magee, R.Weniger, E.A.Franke. Location of features of known height in the presence of reflective and refractive noise using a stereoscopic light-stripping approach // Optical Engineering. — 1994. — April. — P. 1092–1098.
61. Nakano Kouichi, Watanabe Yasuo, Kanno Sakeyasu. Extraction and recognition of 3-dimensional information by projecting a pair of slit-ray beams // Pattern Recognition, 1988., 9th International Conference on. — Vol. 2. — 1988. — P. 736–743.
62. Nixon S. M., A. Aguado S. Feature Extraction and Image Processing. — Academic Press, 2008.

63. QR-код // Электронный ресурс, Материал из Википедии — свободной энциклопедии. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/QR-код>.

Миссия университета — генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАТИКИ

Кафедра систем управления и информатики (до 2001 года автоматике и телемеханики) была образована в 1945 году как подразделение основанного в тот же год факультета Электроприборостроения ЛИТМО и именовалась кафедрой Электроприборостроения (№80). Основание кафедры связано с именем ее первого заведующего и первого декана факультета Электроприборостроения профессора Марка Львовича Цуккермана. Профессор М. Л. Цуккерман в 1913-м году закончил электромеханический факультет Санкт-Петербургского политехнического института им. Петра Великого, в двадцатые годы организовал в Ленинграде отраслевую лабораторию электроизмерений (ОЛИЗ) и был известен в стране как крупный специалист в области систем телеизмерений. С 1933-го по 1935-й год профессор М. Л. Цуккерман руководит кафедрой «Автоматизации и телемеханизации» ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина). В 1935-м году профессор М. Л. Цуккерман вплоть до начала Великой отечественной войны находится в научной командировке в Европе.

В отличие от существовавших к тому моменту кафедр аналогичного профиля в ЛПИ им. М. И. Калинина и ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), на кафедре автоматике и телемеханики ЛИТМО была возложена задача подготовки специалистов по автоматизации приборостроительной, оптической и оборонной промышленности, автоматических систем управления, систем телемеханики и телеизмерений. Осенью 1945 года кафедра провела первый набор студентов по специальности электроприборостроение. В 1947-м году кафедра претерпевает первое изменение своего названия, после которого называется кафедрой Автоматики и телемеханики (№80 вплоть до XX-го съезда КПСС). Первый выпуск инженеров-электромехаников по специальности «приборы автоматики и телемеханики» состоялся уже в 1948 году и составил 17 человек. По временной хронологии это событие совпало в выходом в свет на английском языке

известной книги Норберта Винера «Кибернетика или наука об управлении и связи в машинах, живом организме и обществах», в которой дается обоснование кибернетического подхода, выдвигающего на передний план информационное содержание природных, социальных и технических процессов и рассматривающего проблемы автоматического управления с точки зрения преобразования, передачи и использования информации. Советская научная общественность познакомится с этой книгой в переводе на русский язык только в 1958-м году.

Профессор М. Л. Цуккерман руководил кафедрой с 1945 по 1959 год. К своей работе кафедра приступила, имея преподавательский состав, включавший профессора Д. И. Зорина, доцентов Е. А. Танского и Р. И. Юргенсона и заведующего лабораторией А. А. Мезерина. В пятидесятые годы в преподавательский состав кафедры вошли профессор А. А. Кампенемм, доцент Г. А. Тацитов, а также старшие преподаватели В. А. Борисов, В. Г. Новиков и В. В. Соколов. К концу пятидесятых годов преподавательский состав пополнился выпускниками ЛИТМО доцентом Н. М. Яковлевым, старшими преподавателями Л. Т. Никифоровой, Н. М. Перевозчиковым, Ю. Б. Ганту и ассистентом А. М. Шпаковым, а также доцентом Б. А. Арефьевым. В 1955 году при кафедре образована научно-исследовательская лаборатория (НИЛ). В этот период основные направления научно-исследовательских работ представляли задачи автоматизации измерения и регистрации параметров кораблей во время их мореходных испытаний, а также стабилизации скорости и фазирования двигателей. Под научным руководством проф. М. Л. Цуккермана была налажена подготовка научных кадров высшей квалификации через систему аспирантуры.

С 1959 года по 1970 кафедру возглавлял ученик М. Л. Цуккермана, выпускник кафедры Автоматики и телемеханики ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина) 1936 года, доцент Евфимий Аполлонович Танский. За время его руководства профессорско-преподавательский состав пополнился старшим преподавателем Л. Л. Бориной, доцентами А. И. Новоселовым и И. П. Пальтовым, пришедшими из промышленности и высших военных учебных заведений, а также выпускниками кафедры, успешно закончившими обучение в ее аспирантуре, доцентами В. Н. Дроздовым, А. В. Ушаковым, В. А. Власенко, и ассистентом И. Н. Богоявленской. В этот период защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук доценты Б. А. Арефьев и Р. И. Юргенсон. В научно-исследовательской работе на кафедре произошел заметный поворот к проблемам автоматизации оптико-механического приборостроения, что привело к длительному научно-техническому сотрудничеству кафедры с ЛО-

МО им. В. И. Ленина, в рамках которого для нужд оборонной техники была разработана целая гамма прецизионных фотоэлектрических следящих систем. В рамках научно-технического сотрудничества с НИИЭТУ кафедра приняла участие в разработке автоматической фототелеграфной аппаратуры, реализованной в виде комплекса «Газета-2».

С 1970 по 1990 год кафедрой руководил известный в стране специалист в области автоматизированного электропривода и фотоэлектрических следящих систем доктор технических наук, профессор Юрий Алексеевич Сабинин. В эти годы заметно изменилась структура дисциплин и курсов, читаемых студентам кафедры. К традиционным курсам «Теория автоматического регулирования и следящие системы», «Теория автоматического управления, экстремальные и адаптивные системы», «Элементы автоматики» и «Телемеханика» были добавлены дисциплины: «Теоретические основы кибернетики», «Локальные системы управления», «САПР систем управления» и другие. Коллектив преподавателей пополнился новым отрядом выпускников ее аспирантуры: доцентами Ю. Л. Тихоновым, В. В. Лаврентьевым, В. В. Григорьевым, В. В. Хабаловым, Л. С. Громовой, В. И. Бойковым, С. В. Быстровым, А. Б. Бушуевым, А. Н. Коровьяковым, И. В. Мирошником, Ю. П. Котельниковым, Г. И. Болтуновым, старшим преподавателем И. П. Салмыгиным. Из промышленности и других подразделений института пришли на кафедру доценты И. Ю. Рогинский, П. В. Николаев, И. П. Болтунов. Приобрела устойчивый характер система подготовки кадров высшей квалификации. В период с 1970-го по 1990-й защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук доценты И. П. Пальтов, В. В. Григорьев и В. Н. Дроздов. Более 40 человек успешно завершили обучение в аспирантуре. Прикладные разработки кафедры были связаны с задачами адаптивной оптики для многоэлементных зеркал оптических телескопов и коррекции волнового фронта технологических лазеров; с задачами адаптивной радиооптики применительно к проблеме управления большими полноповоротными радиотелескопами; с задачами автоматизации обработки снимков в пузырьковых камерах; гребного электропривода и робототехнических систем, автоматического управления процессом мягкой посадки летательных аппаратов. Новый облик теории управления 1970 годов, внедрение метода пространства состояний и вычислительной техники, повышение математического уровня научных исследований нашли отражение в научных разработках кафедры, многочисленных трудах и монографиях. В эти годы интенсивно разрабатываются проблемы теории многомерных динамических систем, качественная теория устойчивости, методы согласованного и многорежимного управления, положено начало теоретическим работам

в области робототехники. Научное руководство перечисленными работами осуществляли профессора кафедры Ю. А. Сабинин, В. Н. Дроздов, А. В. Ушаков, В. В. Григорьев и И. В. Мирошник .

С 1990 года по 1995-й год кафедра переживает «смутное время» на уровне руководства ею, но не на уровне интеллектуальной обстановке в ее коллективе. Известно высказывание ректора НИУ ИТМО: «Интересно, на кафедре автоматики нет номинального заведующего вот уже столько лет и ни одного скандала». Лучшего комплимента кафедре не придумаешь. С 1990 года по 1992-й обязанности заведующего кафедрой исполнял профессор В. В. Григорьев, в 1992-м году в результате проведенного конкурса заведующим кафедрой автоматики и телемеханики становится профессор Таганрогского радиотехнического института Анатолий Аркадьевич Колесников, известный специалист в области синергетики. К сожалению, по причинам личного характера он так и не покинул Таганрог и не приступил к руководству кафедрой автоматики и телемеханики ЛИТМО. В 1994-м году его заведование руководством института приостанавливается, объявляется новый конкурс, в результате которого с 1995-го года по 2010-й кафедрой руководил ее воспитанник доктор технических наук, профессор Валерий Владимирович Григорьев, по инициативе которого в 2001-м году кафедра получила название кафедры «Систем управления и информатики». В эти годы профессорско-преподавательский состав пополнился профессором Е. Ф. Очиным (1993–1996годы), а также выпускниками аспирантуры ИТМО В. В. Черноусовым, А. П. Баевым, В. О. Никифоровым, М. С. Чежиным, А. В. Лямыным, А. А. Бобцовым и К. А. Сергеевым. Продолжала эффективно работать система подготовки кадров высшей квалификации, диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук защитили И. В. Мирошник, Р. О. Оморов, А. В. Ушаков, А. И. Скалон, В. О. Никифоров, А. А. Бобцов.

Помимо традиционной подготовки инженеров-электриков была начата подготовка бакалавров по направлению «Управление и автоматизация». С введением локальной сети и подключением к Интернет проведена модернизация компьютерного класса и учебных лабораторий. Научно-исследовательская работа ведется по целевым программам и конкурсным проектам РФФИ, Минобразования и Администрации Санкт-Петербурга. Завершилось формирование научной школы кафедры и ее основных направлений, возглавляемых профессорами В. В. Григорьевым, А. В. Ушаковым, И. В. Мирошником, В. О. Никифоровым и доцентом В. И. Бойковым. С целью расширения исследований, проводимых по теории нелинейных и адаптивных систем, роботов и микропроцессорной техники, а также активизации подготовки кадров в 1994 году образована научная лабора-

тория Кибернетики и Систем управления (руководитель проф. И. В. Мирошник). С 1994 года существенно расширились международные контакты кафедры, участие в международных научных мероприятиях, организации конференций и симпозиумов. Профессора кафедры Григорьев В. В., Мирошник И. В., Ушаков А. В., а позднее и Никифоров В. О. становятся действительными членами (академиками) Международной Академии нелинейных наук.

В феврале 2010 года заведующим кафедрой Систем управления и информатики был избран выпускник кафедры 1996-го года декан факультета компьютерных технологий и управления, доктор технических наук, профессор Алексей Алексеевич Бобцов, А. А. Бобцов является также председателем Совета молодых ученых и специалистов при Правительстве Санкт-Петербурга, действительным членом академии Навигации и управления движением и членом научного совета РАН по теории управляемых процессов и автоматизации.

В последние годы профессорско-преподавательский состав кафедры пополнился молодыми кадрами: доцентами Кремлевым А. С., Чепинским С. А. (выпуска кафедры 2002-го года), Дударенко Н. А., Нуйей (Осипцевой) О. С., Николаевым Н. А., Слитой О. В. (выпуска кафедры 2003-го года), Герасимовым Д. Н. (выпуска кафедры 2005-го года), Арановским С. В., Блинниковым А. А. (выпуска кафедры 2006-го года), Сержантовой (Поляковой) М. В. (выпуска кафедры 2007-го года), Пыркиным А. А. (выпуска кафедры 2008-го года), Колюбиным С. А. (выпуска кафедры 2010-го года). К участию в подготовке магистров подключились профессоры из Санкт-Петербургских университетов Фрадков А. Л., Андриевский Б. Р., Тертычный В. Ю. и Фуртат И. Б.

В настоящее время кафедра является одним из ведущих российских научных и образовательных центров, ориентированным на фундаментальные и прикладные исследования в области автоматических систем и прикладной информатики, подготовку высококвалифицированных специалистов XXI-го столетия. На кафедре функционируют четыре научно-исследовательские группы: «Технической кибернетики» (основатель профессор И. В. Мирошник, научный руководитель профессор А. А. Бобцов), «Автоматизированного оптоэлектронного мониторинга технических объектов и комплексов» (основатели профессор Ю. А. Сабинин и доцент П. В. Николаев, научные руководители — доцент В. И. Бойков и профессор А. В. Ушаков) и «Технической информатики и телемеханики» (основатель профессор М. Л. Цуккерман, научный руководитель профессор А. В. Ушаков), «Интеллектуальной робототехники» (основатель и научный руководитель профессор А. А. Бобцов). Усилиями ученых кафедры создана научная

школа — «Управление в условиях системных неопределенностей», при кафедре вот уже второе десятилетие проводятся ежегодные «Крещенские научные чтения», имеющие статус городского семинара по теории управления.

Ученые кафедры издают монографии, печатаются в журналах академий наук РФ и стран бывшего СССР, отраслевых журналах, известиях высших учебных заведений, а также зарубежных журналах и трудах международных конференций. Сотрудниками кафедры опубликовано более 120 монографий и учебников, 250 методических и учебных пособий, 3500 статей, из них более 380 в журналах академий наук, около 300 статей и докладов в зарубежных научных изданиях. Ученые кафедры являются авторами более 600 изобретений, постоянно принимают участие в работе российских и зарубежных семинаров, конференций и конгрессов. Кафедра поддерживает контакты с 20 техническими зарубежными университетами.

На седьмом десятке своего существования кафедра систем управления и информатики представляет собой работоспособный коллектив, полный новых идей и творческих планов. Кафедра активно готовится к своему семидесятилетию, которое будет иметь место осенью 2015-го года.

Власов Сергей Михайлович
Бойков Владимир Иванович
Быстров Сергей Владимирович
Григорьев Валерий Владимирович

Бесконтактные средства локальной ориентации роботов

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО
Подписано к печати
Заказ No 3212
Тираж 150
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49