

РАЗРАБОТКА БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Шаошань Лю
Лиунь Ли
Цзе Тан
Шуаш Ву
Жан-Люк Годье

A futuristic wireframe car is shown on a road that recedes into the distance. The car is composed of a complex network of green lines, and a bright blue light emanates from its front. The road is marked with dashed lines and is set against a dark background with a grid of lines.

ОМК
ПРЕСС
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Шаошань Лю, Лиюнь Ли, Цзе Тан, Шуаш Ву, Жан-Люк Годье

Разработка беспилотных транспортных средств

Creating Autonomous Vehicle Systems

Shaoshan Liu, Liyun Li, Jie Tang, Shuang Wu, and Jean-Luc Gaudiot



MORGAN & CLAYPOOL PUBLISHERS

Разработка беспилотных транспортных средств

Шаошань Лю, Лиюнь Ли, Цзе Тан, Шуаш Ву, Жан-Люк Годье



Москва, 2022

УДК 629.7.02n
ББК 39.52
Л91

Шаошань Лю, Лиюнь Ли, Цзе Тан, Шуаш Ву, Жан-Люк Годье
Л91 Разработка беспилотных транспортных средств / науч. ред. В. С. Яценков;
пер. с англ. П. М. Бомбаковой. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 246 с.: ил.

ISBN 978-5-97060-969-9

В книге представлен один из первых технических обзоров беспилотных транспортных средств (БТС), адресованных широкой аудитории компьютерных специалистов и инженеров, а также студентов технических вузов и всех, кто сталкивается с БТС на практике.

Авторы делятся практическим опытом разработки БТС – начиная с алгоритмов локализации, восприятия, планирования и контроля и заканчивая глубоким обучением моделей. Рассматриваются последние достижения в области управления БТС, а также практические примеры из реальной жизни, что позволит читателям эффективно применять полученные знания в коммерческих проектах.

В разделе «Преподавание и обучение» множество полезной информации, которая поможет использовать книгу как часть программы учебных курсов.

УДК 629.7.02
ББК 39.52

© 2020 Morgan and Claypool Publishers All Rights Reserved Morgan and Claypool Publishers

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN (анг.) 978-1-68173-935-9
ISBN (рус.) 978-5-97060-969-9

© 2020 by Morgan & Claypool
© Оформление, издание, перевод, ДМК Пресс, 2022

Оглавление

Об авторах	10
Вступительное слово от издательства	13
Предисловие к русскому изданию	14
Предисловие ко второму изданию	16
Глава 1. Знакомство с беспилотными технологиями	19
1.1. Обзор технологий в составе БТС	19
1.2. Алгоритмы БТС	20
1.2.1. Сбор данных об окружающей среде (сенсорное сканирование)	20
1.2.2. Восприятие	21
1.2.3. Распознавание и отслеживание объектов	24
1.2.4. Действия	24
1.3. Клиентская система БТС	26
1.3.1. Операционная система для роботов (ROS)	26
1.3.2. Аппаратная платформа	28
1.4. Облачная платформа БТС	29
1.4.1. Симуляция	29
1.4.2. Создание HD-карт	30
1.5. Это только начало	31
Глава 2. Локализация БТС	32
2.1. Локализация с помощью спутниковых навигационных систем	32
2.1.1. GNSS	32
2.1.1. Анализ погрешностей GNSS	33
2.1.3. Спутниковые системы дифференциальной коррекции	35
2.1.4. Кинематический и дифференциальный режимы GPS	35
2.1.5. Позиционирование высокой точности	37
2.1.6. Интеграция GNSS и INS	39
2.2. Локализация с помощью лидара и HD-карт	40
2.2.1. Технология LiDAR	40
2.2.2. HD-карты. Краткий обзор	43
2.2.3. Локализация посредством лидара и HD-карт	47
2.3. Визуальная одометрия	51
2.3.1. Стереовизуальная одометрия	52
2.3.2. Монокулярная визуальная одометрия	53
2.3.3. Инерциальная визуальная одометрия	54

2.4. Счисление координат и колесная одометрия	55
2.4.1. Колесные энкодеры.....	56
2.4.2. Погрешности колесной одометрии	57
2.4.3. Минимизация погрешностей колесной одометрии.....	58
2.5. Сбор и обобщение данных нескольких сенсоров	60
2.5.1. Беспилотный автомобиль Boss для городских условий от Университета Карнеги–Меллона (CMU)	60
2.5.2. Беспилотный автомобиль Junior для городских условий от Стэнфордского университета	62
2.5.3. Bertha от Mercedes Benz	64
2.6. Справочные материалы.....	66

Глава 3. Алгоритмы восприятия беспилотных технологий

3.1. Введение	69
3.2. Датасеты	70
3.3. Обнаружение	72
3.4. Сегментация	74
3.5. Стереозрение, оптический поток, поток сцен	76
3.5.1. Стереоскопия и глубина	76
3.5.2. Оптический поток.....	77
3.5.3. Поток сцен	78
3.6. Отслеживание.....	79
3.7. Заключение.....	82
3.8. Справочные материалы.....	82

Глава 4. Глубокое обучение в алгоритмах восприятия

беспилотных технологий

4.1. Сверточные нейронные сети	85
4.2. Обнаружение	86
4.3. Семантическая сегментация.....	90
4.4. Стереозрение и оптический поток	93
4.4.1. Стереозрение.....	93
4.4.2. Оптический поток.....	95
4.4.3. Обучение без учителя для плотного сопоставления изображений ...	97
4.5. Заключение	99
4.6. Справочные материалы.....	100

Глава 5. Прогнозирование и маршрутизация

5.1. Планирование и управление. Общие сведения	102
5.1.1. Архитектура: планирование и управление в широком смысле ...	102
5.1.2. Область ответственности каждого модуля: какие задачи решают модули	104
5.2. Прогнозирование движения	107
5.2.1. Поведенческое прогнозирование с точки зрения классификации объектов	109
5.2.2. Генерация траектории транспортного средства.....	113

5.3. Маршрутизация на основе полос движения	116
5.3.1. Применение взвешенного ориентированного графа для задач маршрутизации	117
5.3.2. Распространенные алгоритмы маршрутизации	120
5.3.3. Стоимость графа маршрутизации: слабая или сильная маршрутизация	123
5.4. Заключение	124
5.5. Справочные материалы.....	124
Глава 6. Принятие решений, планирование и управление	126
6.1. Принятие поведенческих решений	126
6.1.1. Подход с применением марковского процесса принятия решений	128
6.1.2. Подход «разделяй и властвуй» на основе сценариев	131
6.2. Планирование движения.....	139
6.2.1. Модель транспортного средства, модель дороги и система координат SL.....	142
6.2.2. Планирование движения на основе планирования пути и скорости	143
6.2.3. Планирование движения посредством продольного и поперечного планирования.....	150
6.3. Управление на основе обратной связи	154
6.3.1. Модель «Велосипед»	155
6.3.2. ПИД-регулирование.....	157
6.4. Заключение	158
6.5. Справочные материалы.....	159
Глава 7. Планирование и управление на основе обучения с подкреплением.....	161
7.1. Введение	161
7.2. Обучение с подкреплением.....	163
7.2.1. Q-обучение	166
7.2.2. Методы «субъект–критик».....	170
7.3. Планирование и управление БА на основе алгоритмов с обучением.....	172
7.3.1. Применение обучения с подкреплением на уровне принятия поведенческих решений.....	173
7.3.2. Применение обучения с подкреплением на уровнях планирования и управления	173
7.4. Заключение	177
7.5. Справочные материалы	177
Глава 8. Клиентские системы для беспилотных технологий	179
8.1. Сложность системы беспилотного управления	179
8.2. Операционная система для беспилотной технологии	181
8.2.1. Обзор ROS	181

8.2.2. Надежность системы.....	183
8.2.3. Повышение производительности.....	185
8.2.4. Управление ресурсами и безопасность	185
8.3. Вычислительная платформа	186
8.3.1. Реализация вычислительной платформы.....	186
8.3.2. Существующие вычислительные решения	186
8.3.3. Вопросы архитектуры вычислительной системы	188
8.4. Справочные материалы.....	191

Глава 9. Облачные платформы для беспилотных технологий.....

9.1. Введение	192
9.2. Инфраструктура	193
9.2.1. Структура распределенных вычислений	194
9.2.2. Распределенное хранение	194
9.2.3. Гетерогенные вычисления	195
9.3. Симуляция	197
9.3.1. BinPipeRDD	198
9.3.2. Объединение Spark и ROS.....	199
9.3.3. Производительность.....	199
9.4. Обучение модели	200
9.4.1. Почему именно Spark?.....	200
9.4.2. Архитектура обучающей платформы	201
9.4.3. Гетерогенные вычисления	202
9.5. Создание HD-карт	203
9.5.1. HD-карты	204
9.5.2. Создание карт в облаке.....	205
9.6. Заключение	206
9.7. Справочные материалы	207

Глава 10. Беспилотная доставка «до двери»

в сложных дорожных условиях.....

10.1. Предыстория и предпосылки	208
10.2. Технологии беспилотной доставки в сложных дорожных условиях ...	209
10.3. JD.com: решение с использованием беспилотных технологий	211
10.3.1. Архитектура беспилотных технологий.....	211
10.3.2. Локализация и HD-карты	212
10.3.3. Восприятие	214
10.3.4. Прогнозирование, принятие решений и планирование движения.....	216
10.4. Стратегии защиты и обеспечения безопасности.....	219
10.4.1. Проверка в симуляции.....	219
10.4.2. Мониторинг на стороне транспортного средства	220
10.4.3. Удаленный мониторинг.....	220
10.5. Развертывание в производственной среде	220
10.6. Полученные уроки	221
10.7. Справочные материалы	222

Глава 11. Беспилотные транспортные средства от PerceptIn	223
11.1. Введение	223
11.2. Дорогостоящие технологии.....	224
11.2.1. Сенсорное сканирование.....	224
11.2.2. Локализация	225
11.2.3. Восприятие	225
11.2.4. Принятие решений	226
11.2.5. Создание и обслуживание HD-карт	226
11.2.6. Интеграция системы.....	227
11.3. Достижение ценовой доступности и надежности	227
11.3.1. Сбор и обобщение данных нескольких сенсоров	228
11.3.2. Модульная конструкция	229
11.3.3. Высокоточные визуальные карты.....	230
11.4. Развертывание сети беспилотных низкоскоростных электромобилей (LSEV) для предоставления услуг.....	231
11.5. Выводы.....	232
11.6. Справочные материалы.....	232
Применение этой книги в преподавании и обучении	234
1. Введение	234
2. Существующие учебные курсы по управлению БТС.....	235
3. Модульный и интегрированный подход к обучению	236
3.1. Методика преподавания	236
3.2. Учебные материалы к модулям	237
3.3. Интеграционные экспериментальные платформы	238
4. Пилотные тематические курсы.....	238
4.1. Введение в курс БТС	239
4.2. Изучение БТС как дополнение курса о встроенных системах.....	240
4.3. Курс профессиональной подготовки.....	240
5. Заключение	241
Справочные материалы.	242
Предметный указатель	244

Об авторах



Доктор Шаошань Лю (Dr. Shaoshan Liu) является основателем и генеральным директором PerceptIn, компании, занимающейся разработкой беспилотных технологий. С момента основания PerceptIn получила финансирование на сумму более 12 млн долл. США от ведущих венчурных компаний, таких как Walden International, Matrix Partners и Samsung Ventures. До основания PerceptIn д-р Шаошань Лю посвятил более 10 лет работе в ведущих научно-исследовательских институтах, среди которых Baidu USA, LinkedIn, Microsoft, Microsoft Research, INRIA, Intel Research и Broadcom. Доктор Шаошань Лю получил степень доктора компьютерной инженерии в Калифорнийском университете в Ирвайне. Он является автором более чем 60 исследовательских трудов, а также обладателем более 150 международных патентов США в области робототехники и беспилотных технологий. Также он является ведущим автором популярной серии пособий «Создание беспилотных транспортных систем» (*Creating Autonomous Vehicle Systems*) и «Разработка беспилотных транспортных средств и роботов» (*Engineering Autonomous Vehicles and Robots*). Доктор Шаошань Лю – старший член ассоциации Института инженеров электротехники и электроники (IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers), а также выдающийся спикер компьютерного общества IEEE (IEEE Computer Society) и Ассоциации вычислительной техники (ACM – Association for Computing Machinery). Также он является основателем Специального технического сообщества IEEE (IEEE Special Technical Community) в направлении разработки беспилотных транспортных систем. Электронный адрес: shaoshan.liu@perceptin.io.



Доктор Лиунь Ли (Dr. Liyun Li) имеет более чем шестилетний опыт разработки ПО для беспилотных технологий. В настоящее время он является главным инженером и менеджером в Xpeng Motors (NYSE: XPEV), где он руководит разработкой программного обеспечения для Navigation Guided Pilot (NGP). До прихода в Xpeng Motors он занимал должность главного инженера в JD.com. Он является одним из основателей команды по разработке беспилотных технологий Baidu USA, где руководил работой по созданию основных модулей в беспилотной системе Baidu с открытым исход-

ным кодом, в частности модулей планирования и прогнозирования. Доктор Ли является автором двух книг в области беспилотных технологий, а именно «Создания беспилотных транспортных систем» (Creating Autonomous Vehicle Systems) (Morgan & Claypool Publishers) и «Первая книга о беспилотных технологиях» (The First Technology Book in Autonomous Driving) (Publishing House of Electronics Industry (PHEI)). Также он является обладателем более чем 20 международных патентов в области беспилотных технологий. Доктор Ли получил степень доктора компьютерных наук в Нью-Йоркском университете (New York University) и степень бакалавра электронной инженерии в Университете Цинхуа (Tsinghua University).



Доктор Цзе Тан (Dr. Jie Tang) является действующим доцентом факультета компьютерных наук и инженерии Южно-Китайского технологического университета (Гуанчжоу, Китай) (South China University of Technology). Ранее она работала в качестве научного сотрудника в Калифорнийском университете (Риверсайд) (University of California) и в Университете Кларксона (Clarkson University) с декабря 2013-го по август 2015 г. В 2006 г. д-р Тан получила степень бакалавра по направлению компьютерных наук в Оборонном научно-техническом университете. В 2012 г. она получила степень доктора

компьютерных наук в Пекинском технологическом институте (Beijing Institute of Technology). С 2009 по 2011 год она была приглашенным исследователем в Лаборатории параллельных систем и компьютерной архитектуры (PASCAL – PARallel Systems and Computer Architecture Lab) Калифорнийского университета в Ирвайне, США. Электронный адрес: cstangjie@scut.edu.cn.



Доктор Шуан Ву (Dr. Shuang Wu) является действующим научным сотрудником Yitu Technology. Ранее он работал старшим научным сотрудником лаборатории искусственного интеллекта Baidu (Baidu's AI lab) в Сан-нивейле, Калифорния, и старшим архитектором в Baidu USDC. Он получил степень доктора физики в Университете Южной Калифорнии (University of Southern California) и некоторое время работал в качестве молодого научного сотрудника в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе (UCLA – University of California, Los Angeles). Он занимался исследованиями в области компьютерного и биологического зрения, а также изучал

прикладное машинное обучение и его применение в промышленности для компьютерной рекламы и распознавания речи. Его труды были опубликованы такими конференциями, как NIPS (Neural Information Processing Systems) и ICML (International Conference on Machine Learning).



Доктор Жан-Люк Годье (Dr. Jean-Luc Gaudiot) получил диплом инженера (Diplôme d'Ingénieur) в ESIEE (Париж, Франция) в 1976 г. После он получил степени магистра и доктора компьютерных наук в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе в 1977 и 1982 г. соответственно. В настоящее время он является профессором кафедры электротехники и информатики в Калифорнийском университете в Ирвайне (UCI – University of California, Irvine). До прихода в UCI в 2002 г. с 1982 г. он был профессором электротехники в Университете Южной Калифорнии (University of Southern California). В об-

ласть его научных интересов входят многопоточные архитектуры, отказоустойчивые мультипроцессоры, а также реализация реконфигурируемых архитектур. На его счету более 250 опубликованных статей для журналов и конференций. Спонсорами его исследований были NSF, DoE и DARPA, а также ряд других промышленных компаний. Доктор Жан-Люк Годье находился на самых разных должностях и в 2017 г. был избран президентом компьютерного сообщества IEEE (IEEE Computer Society). Электронный адрес: gaudiot@uci.edu.

Вступительное слово от издательства

Отзывы и пожелания

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге, – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте www.dmkpress.com, зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com; при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу http://dmkpress.com/authors/publish_book/ или напишите в издательство по адресу dmkpress@gmail.com.

Список опечаток

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг – возможно, ошибку в основном тексте или программном коде, – мы будем очень благодарны, если вы сообщите нам о ней. Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

Если вы найдете какие-либо ошибки в коде, пожалуйста, сообщите о них главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com, и мы исправим это в следующих тиражах.

Нарушение авторских прав

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательство «ДМК Пресс» очень серьезно относится к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу dmkpress@gmail.com.

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

Предисловие к русскому изданию

Книга «Разработка беспилотных транспортных средств» авторского коллектива под руководством Шаошань Лю погружает читателя в захватывающий мир современных технологий в области транспорта и особенно автоматизации движения автомобильного транспорта при помощи беспилотных автомобилей и высокоавтоматизированных транспортных средств.

Это издание позволяет очень детально ознакомиться с современными достижениями в области построения как операционных систем для управления высокоавтоматизированными транспортными средствами, так и алгоритмов для решения конкретных задач, которые основаны на методах искусственного интеллекта и управляют отдельными аспектами движения беспилотников.

Инженерам-транспортникам, которые работают в области построения интеллектуальных транспортных систем и разработки самих беспилотных транспортных средств, представленная книга станет фактически настольной книгой на ближайшие годы, поскольку она описывает все самые современные технологии и даже немного смотрит в будущее, чтобы охватить своими идеями все возможные варианты развития беспилотников.

Впрочем, отдельные аспекты функционирования беспилотников, или высокоавтоматизированных транспортных средств, в этой книге не раскрыты. В частности:

- не раскрыто получение информации от централизованной интеллектуальной транспортной системы по технологиям V2X;
- нет описания одноранговых сетей VANET для передачи информации между беспилотниками;
- не описаны возможные сценарии задач, которые могут быть решены роением беспилотников, но не могут быть решены отдельными беспилотным транспортным средством.

Тем не менее книга крайне интересная, но для ее изучения читателю важно быть готовым, поскольку в ней не раскрывается сущность и природа новых технологий как с точки зрения «железа», так и с точки зрения программного обеспечения. Еще очень важно понимать физику действия сенсоров беспилотного автомобиля и логику работы алгоритмов на основе искусственного интеллекта, которые управляют беспилотным транспортным средством. Поэтому перед чтением этой книги, перед погружением в область проектирования и производства беспилотников желательно ознакомиться с современными достижениями в области искусственного интеллекта, сенсорики, транспортных платформ и им подобным.

Важным моментом в этой книге является то, что она дает методические рекомендации для преподавателей высших учебных заведений транспортной направленности, в которых обучаются будущие транспортные инженеры, и ее можно использовать в качестве прямого методического пособия и источника получения информации для обучения всем технологиям создания беспилот-

ных транспортных средств. Это очень важно, поскольку того количества инженеров, работающих в этой области, и того количества выпускающихся молодых специалистов сегодня недостаточно из-за бурно развивающейся отрасли автоматизации автомобильного движения. И мне будет очень приятно, если эта книга станет использоваться в таких институтах, как МАДИ, РУТ и прочих подобных высших учебных заведениях для подготовки будущих инженеров-транспортников.

Мы, как люди, которые сегодня непосредственно участвуют в автоматизации дорожного движения на автомобильных дорогах России, также рекомендуем использовать эту книгу для работы в области построения интеллектуальных транспортных систем, в области разработки сервисной V2X-платформы для централизованного управления беспилотными транспортными средствами и решения других подобных задач.

Кроме того, эта книга будет полезна сегодня для решения вопросов в области стандартизации различных аспектов функционирования беспилотных транспортных средств. Именно поэтому выход этой книги на русском языке крайне актуален и очень полезен для развития беспилотных технологий в России.

Несмотря на то что книга является описанием авторского опыта и описанием авторских подходов к разработке беспилотных автомобилей, она имеет отношение к общему принципу построения беспилотных транспортных средств любой модальности, таких как автомобили, летательные аппараты, роботы в трубопроводном транспорте и т. д. Все представленные принципы являются универсальными для всех видов транспорта, поэтому книга также рекомендуется для изучения инженерам-транспортникам, которые занимаются автоматизацией не только автомобильного транспорта, но и транспорта других модальностей – в первую очередь воздушного, водного и железнодорожного.

Я выражаю свое восхищение коллективом издательства, который перевел книгу на русский язык и издает ее в России для наших специалистов, и благодарю авторский коллектив за ее написание.

*Душкин Роман Викторович,
главный архитектор
Интеллектуальных транспортных систем
ООО «Ростелематика»*

Предисловие ко второму изданию

На сегодняшний день беспилотные транспортные средства (БТС) – наземные, водные или воздушные – уже вошли в нашу жизнь и применяются в самых разных областях, начиная от сервисов беспилотного такси и заканчивая автоматическими системами воздушного наблюдения за особо важными удаленными районами. Благодаря непрерывному техническому прогрессу за последние несколько десятилетий человечество смогло реализовать подобные инновации. Однако на сегодняшний день в этой области существует ряд проблем, связанных с проектированием. Так, задача исследователей и инженеров заключается в преодолении этих проблем, что позволит обеспечить продуктивное, эффективное и, что особенно важно, безопасное функционирование описанных выше многочисленных и сложных автономных устройств.

Таким образом, цель этой книги – предоставить обзор проблем проектирования беспилотных транспортных систем, а также познакомить читателя с некоторыми общими проектными решениями. Обязательными условиями успешной разработки беспилотных систем являются хорошее технологическое оснащение, интеграция оборудования и программного обеспечения, а также синергия с резидентными платформами (такими как облачные серверы). Основное внимание в этой книге уделяется наземным транспортным средствам и, в частности, автомобилям и их функционированию в городских и внегородских условиях, а также в условиях бездорожья. Эта книга адресована инженерам, работающим как в академической, так и в промышленной областях. Она предлагает обзор и решение текущих проблем, а также проблем, которые могут возникнуть при будущих исследованиях. Среди них могут оказаться как проблемы сенсорного сканирования и восприятия у автономных систем, так и проблемы иного плана, например поддержка облачных серверов. Полезным дополнением к книге является большое количество библиографических ссылок, которые помогут читателю сориентироваться в «дебрях» предыдущих работ.

Аудитория тепло приняла первое издание этой книги. Многие университеты включили ее в программы своих курсов обучения, а также она послужила материалом для внутренних тренингов в некоторых организациях (более подробную информацию об этом можно найти в новом разделе «Преподавание и обучение»). Кроме того, первое издание получило множество полезных комментариев и отзывов от читателей, которые значительно повлияли на совершенствования содержания второго издания. В частности, на основе этих комментариев и отзывов мы внесли следующие изменения: во-первых, мы расширили главы 3 и 4 и добавили в них информацию о передовых методах восприятия; во-вторых, мы переработали главы 5, 6 и 7, что позволило доступнее донести содержащуюся в них информацию до читателей; в-третьих, в главы 10 и 11 мы добавили примеры промышленных испытаний систем, которые позволят читателям применять полученные знания на практике. Помимо

этого, для преподавателей мы добавили раздел под названием «Преподавание и обучение», который призван содействовать при использовании этой книги в программе обучающих курсов. Мы считаем, что преимущество второго издания состоит в том, что наряду с информацией о последних достижениях в области автономных транспортных систем оно содержит и практические примеры из реальной жизни, которые позволят читателям успешно применять полученные знания на практике.

СТРУКТУРА КНИГИ

В главе 1 представлена краткая история информационных технологий, а также обзор алгоритмов, лежащих в основе автономных транспортных систем, архитектуры таких систем и необходимой инфраструктуры поддержки. В главе 2 представлены наиболее популярные подходы к локализации, которая является одной из наиболее важных задач области. Также здесь подробно описаны преимущества, недостатки и особенности интеграции различных версий принципов *глобальной спутниковой навигационной системы (GNSS – Global Navigation Satellite System)*, *инерциальной навигационной системы (INS – Inertial Navigation system)*, а также принципов работы *лидара (LiDAR – Light Detection and Ranging)* и колесной одометрии. В главе 3 описаны принципы восприятия («понимания») окружающей среды на основе данных сенсорного сканирования, а также представлены обзорные описания различных прикладных алгоритмов, таких как интерпретация сцен, обработка потоков изображений, отслеживание и др. В главе 4 представлены подходы глубокого обучения к восприятию, основанные на обработке больших наборов данных и сложных вычислениях, необходимых для классификации изображений, обнаружения объектов, семантической сегментации и многого другого. Глава 5 описывает задачи БТС, возникающие после исследования окружающей среды, такие как прогнозирование будущих событий (например, движения другого транспортного средства, находящегося неподалеку). Далее, в главе 6, подробно описываются процессы принятия решений, планирования и контроля. Обратная связь между модулями, в том числе и принятие ими независимых друг от друга решений, а также разрешение конфликтов (например, один модуль может рекомендовать смену полосы движения, а другой может обнаружить препятствие на этой полосе) рассматривается с упором на описание алгоритмов принятия поведенческих решений (таких как *марковский процесс принятия решений [MDP – Markov decision process]*, основанный на принципе «разделяй и властвуй») и планирования движения. Все это подводит нас к главе 7, где говорится о необходимости реализации алгоритмов планирования и контроля, основанных на обучении с подкреплением, для полной интеграции ситуационных сценариев при разработке автономной системы. Глава 8 содержит информацию о бортовой вычислительной платформе. Здесь вы можете найти общее описание экосистемы под названием *операционная система для роботов (ROS – Robot Operating System)*, а также описание реально используемого оборудования. Рассказывая о потребности в гетерогенных вычислениях, мы также подчеркиваем необходимость умения автономных систем производить вычисления в режиме реального времени (обработка данных с сенсоров), а также рассматриваем некоторые приклад-

ные аспекты (энергопотребление и рассеивание тепла). Таким образом, делаем вывод, что для создания автономных систем требуется использование разных обрабатывающих модулей на основе *центральных процессоров* (CPU – Central Processing Unit) общего назначения, *графических процессоров* (GPU – Graphic Processing Unit), *программируемых пользователем вентильных матриц* (FPGA – Field-Programmable Gate Array) и т. д. В главе 9 рассматривается инфраструктура облачной платформы, которая служит для «связывания всех модулей воедино» (т. е. обеспечивает распределение имитационных тестов для новых алгоритмов, автономного обучения модели глубокого обучения и построения карт высокой четкости (HD-карт). Глава 10 представляет учебный пример коммерческого беспилотного автомобиля (БА), предназначенного для доставки «до двери» в сложных дорожных условиях. В главе 11 представлен анализ доступных на сегодняшний день БТС, используемых для оказания услуг микротранзитных перевозок.

Глава 1

Знакомство с беспилотными технологиями

Сегодня мы стоим на пороге рассвета беспилотных технологий. Чтобы понять, что нас ожидает в будущем, необходимо обратиться к истории, с чего мы и начнем.

Начало развития информационных технологий приходится на 1960-е, когда Fairchild Semiconductors и Intel заложили их фундамент, выпустив первые в мире микропроцессоры, а в качестве побочного продукта основав Кремниевую долину. Однако, несмотря на то что микропроцессорные технологии обеспечивали значительный прирост производительности, они были недоступны для широкого применения. В 1980-х годах Microsoft и Apple заложили фундамент второго этапа развития информационных технологий, представив графический пользовательский интерфейс и реализовав концепцию «ПК/Мас в каждом доме». В 2000-х интернет-компании под эгидой Google дали старт третьему этапу, связав людей и информацию, т. е. обеспечили потенциальную связь между источниками и потребителями информации. Затем в 2010-х создатели социальных сетей, таких как Facebook и LinkedIn, положили начало четвертому этапу, буквально переместив человеческое общество в интернет и позволив людям напрямую взаимодействовать друг с другом. По мере значительного увеличения количества интернет-пользователей примерно в 2015 году появились Uber и Airbnb, которые начали пятый этап развития информационных технологий и сформировали коммерческие интернет-площадки. Однако, несмотря на то что Uber и Airbnb предоставили пользователям средства для доступа к поставщикам услуг через интернет, услуги по-прежнему предоставлялись людьми.

1.1. ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ В СОСТАВЕ БТС

Как представлено на рис. 1.1, БТС представляет собой не одну технологию, а сложную систему технологий, состоящую из множества подсистем. Итак, разобьем их на три основные группы: алгоритмы сенсорного сканирования, восприятия и принятия решений (требующие, как правило, построения сложных логических выводов); клиентские системы, включая операционную систему и аппаратную платформу; и облачные платформы, в том числе создание карт высокой четкости (HD-карт), обучение моделей глубокого обучения, моделирование и хранение данных.

Первая подсистема отвечает за извлечение важной информации из необработанных данных, полученных сенсорами, и обеспечивает исследование роботом окружающей среды, на чем в дальнейшем строится принятие решений относительно его будущих действий. Клиентские системы объединяют алгоритмы первой подсистемы, тем самым позволяя им работать в режиме реального времени и обеспечивая надежность. Например, если камера генерирует данные с частотой 60 Гц, клиентским системам необходимо убедиться, что самый длинный этап обработки занимает менее 16 мс. Платформа облачных вычислений отвечает за автономные вычисления и хранение данных. С ее помощью мы можем тестировать новые алгоритмы, обновлять HD-карты и обучать БТС более качественным моделям распознавания, отслеживания и принятия решений.

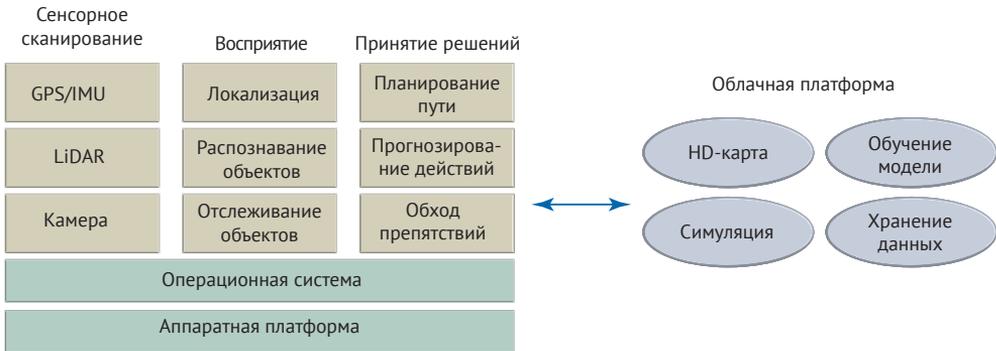


Рис. 1.1. Обзор архитектуры БТС

1.2. Алгоритмы БТС

Алгоритмы БТС включают в себя: сенсорное сканирование окружающей среды, т. е. извлечение важной информации из необработанных данных, полученных датчиками; восприятие, сущность которого заключается в локализации транспортного средства и исследовании окружающей среды; и принятие решений, другими словами, принятие мер, обеспечивающих надежное и безопасное достижение транспортным средством – чаще всего беспилотным автомобилем (БА) – пункта назначения.

1.2.1. Сбор данных об окружающей среде (сенсорное сканирование)¹

Обычно на борту БА располагается несколько основных сенсоров. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, поэтому – из соображений надежности и безопасности – сенсоры работают в совокупности. Рассмотрим их виды:

- *GPS/IMU*: система GPS/IMU обеспечивает локализацию (вычисление пространственных координат) БТС, сообщая данные инерциальной си-

¹ На английском языке процесс сбора информации при помощи сенсоров называется *sensing*, однако устоявшегося русского перевода у этого термина нет, поэтому в данной книге будет применяться перевод «сенсорное сканирование», так как он лучше всего отражает суть циклического сбора данных с набора сенсоров. – Прим. перев.

стемы и глобальную оценку местоположения с высокой частотой (примерно 200 Гц). GPS – довольно точная система, но она имеет низкую частоту обновления (всего около 10 Гц) и поэтому не может предоставлять информацию в режиме реального времени. Что касается IMU, у таких сенсоров наблюдается тенденция накопления погрешностей, что впоследствии приводит к ухудшению оценок местоположения. Но зато IMU может предоставлять обновления чаще, с частотой 200 Гц или выше. Комбинируя GPS и IMU, мы можем предоставлять точные данные о местоположении транспортных средств в реальном времени;

- *LiDAR*: лидар используется для обзора местности, определения местоположения и обхода препятствий. Способ его работы заключается в том, что за счет отражения луча от окружающих предметов он измеряет время прохождения луча и вычисляет расстояния до них. Благодаря высокой точности лидар применяется для создания HD-карт, определения местоположения движущегося транспортного средства на HD-картах, обнаружения препятствий и многого другого. Обычно блок лидара, такой как 64-лучевой лазер Velodyne, вращается с частотой 10 об/мин и осуществляет около 1,3 млн считываний в секунду;
- *камеры*: в основном камеры используются для отслеживания и распознавания объектов, а также для решения задач типа выбора полосы движения, обнаружения светофоров, пешеходов и т. д. В существующих реализациях, как правило, на БА по кругу устанавливают восемь или более камер с разрешением 1080p. Таким образом, появляется возможность обнаружения, распознавания и отслеживания объектов спереди, сзади и по обе стороны БА. Обычно камеры работают с частотой 60 Гц и в совокупности генерируют около 1,8 Гб необработанных данных в секунду;
- *радар и сонар*: радар и сонар используются в качестве последней линии обороны при уклонении от препятствий. Данные, получаемые этими датчиками, показывают расстояние до ближайшего объекта, а также скорость транспортного средства. Как только БА обнаруживает, что приближается к какому-либо объекту и возникает опасность столкновения, он тормозит или поворачивает, чтобы избежать препятствия. Следовательно, данные, генерируемые радаром и сонаром, практически не требуют обработки и обычно поступают непосредственно в процессор управления, что позволяет реализовать такие «экстренные» функции, как поворот, торможение или предварительное натяжение ремней безопасности.

1.2.2. Восприятие

Далее данные с сенсоров передаются на стадию восприятия. Три основных задачи этапа восприятия – это локализация, обнаружение и отслеживание объекта.

Для локализации можно использовать связку GPS/IMU, и, как упоминалось выше, GPS обеспечивает довольно точную локализацию, но со сравнительно низкой частотой обновления, в то время как IMU предоставляет моментальные обновления за счет менее точных данных. Для объединения преимуществ двух сенсоров обычно используют *фильтр Калмана*. Суть этого метода представлена на рис. 1.2: IMU обновляет положение автомобиля каждые 5 мс, но со временем накапливаются погрешности. Каждые 100 мс приходят обновления от GPS, которые помогают исправить погрешности IMU. Благодаря

этому методу комбинация GPS/IMU может обеспечивать быструю и точную локализацию БА. Тем не менее мы не можем полагаться исключительно на эту комбинацию по трем причинам: (1) сенсоры могут работать с необходимой точностью лишь в пределах одного метра; (2) сигнал GPS имеет проблемы с многолучевым распространением, поэтому он может отражаться от зданий, создавая помехи; и (3) GPS требует беспрепятственной передачи со спутников и, следовательно, не будет получать данные в туннелях или подобных местах.

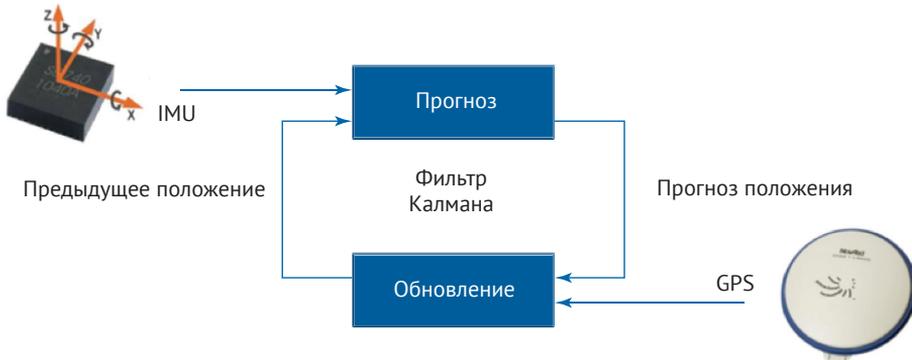


Рис. 1.2. Локализация при помощи GPS/IMU

Также для локализации можно использовать данные камер. Локализация с помощью камер может быть реализована в виде упрощенной схемы: (1) сначала путем триангуляции пар стереоизображений мы получаем *карту диспаратности*² (disparity map), которую можно использовать для получения информации о глубине для каждой точки; (2) сопоставив характерные признаки между последовательными кадрами стереоизображения, мы можем установить корреляции между ними в разных кадрах. Затем можем оценить перемещение БТС за время, прошедшее между двумя прошлыми кадрами; а также, (3) сравнивая характерные особенности с теми, что есть на известной карте, мы можем получить данные о текущем положении транспортного средства. Все же такой подход к локализации очень чувствителен к условиям освещения и, следовательно, не является надежным.

Именно поэтому лидар использует методы *фильтра частиц*. Облако точек, генерируемое лидаром, «описывает форму» окружающей среды, но отдельные точки датчик различает с трудом. Используя фильтр частиц, система сравнивает конкретную наблюдаемую форму облака точек с уже имеющейся картой. Для определения местонахождения движущегося транспортного средства относительно этих карт мы можем применить метод фильтра частиц, который позволяет сопоставить данные лидара с картой. Мы выяснили, что метод фильтрации частиц обеспечивает локализацию в реальном времени с точностью до 10 см и эффективен в городских условиях. Однако у лидара есть одна проблема: когда в воздухе много взвешенных частиц, таких как капли дождя

² Карта смещений/расхождений между двумя изображениями. – Прим. ред.

и пыль, точность измерений снижается за счет возникающего шума. Следовательно, как представлено на рис. 1.4, для достижения надежной и точной локализации нам необходимо использовать все датчики в совокупности, объединяя их преимущества.

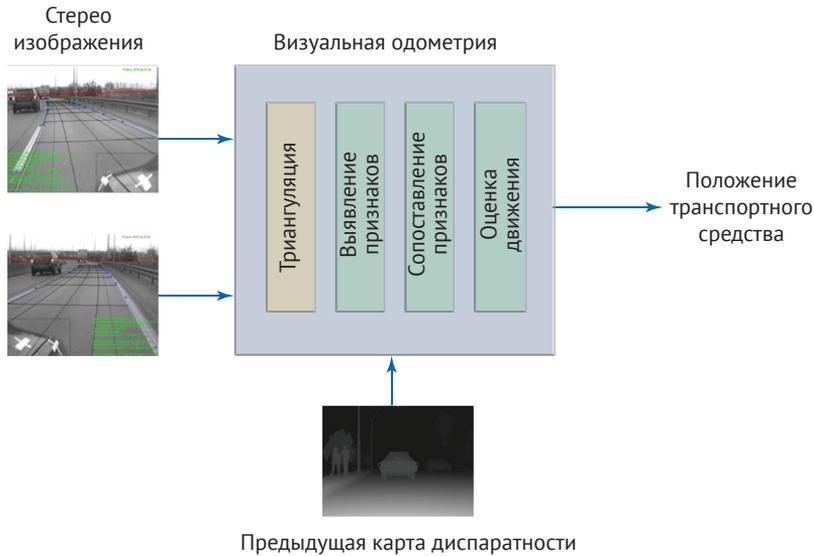


Рис. 1.3. Стереовизуальная одометрия

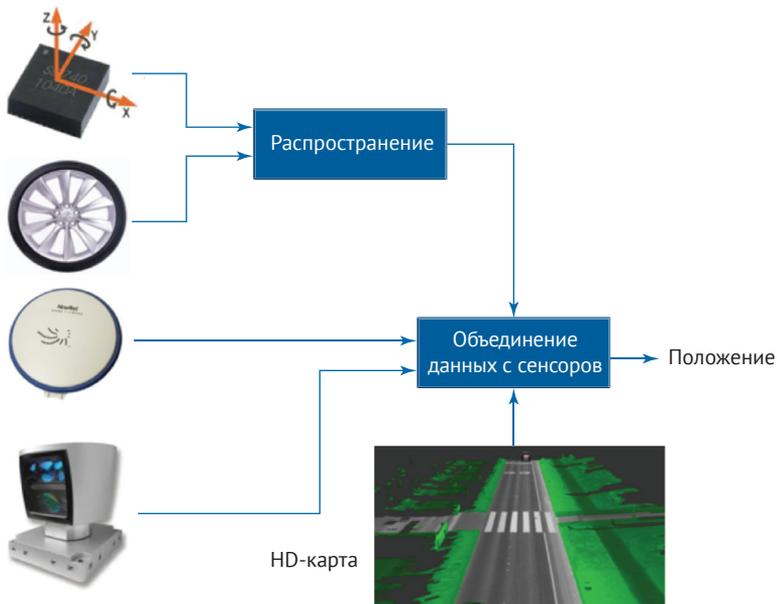


Рис. 1.4. Процесс локализации с помощью объединения сенсоров

1.2.3. Распознавание и отслеживание объектов

Первоначально для обнаружения и отслеживания объектов использовался лидар, поскольку он способен предоставлять точную информацию о глубине. В последние годы мы стали свидетелями быстрого развития технологии глубокого обучения, которая позволяет относительно точно обнаруживать и отслеживать объекты. *Сверточная нейронная сеть (CNN – Convolution Neural Network)* – это тип *глубокой нейронной сети (DNN – Deep Neural Network)*, которая широко используется для распознавания объектов. CNN обычно состоит из нескольких слоев. (1) *Сверточный слой*, используя разные фильтры, извлекает различные признаки из образов входных данных. Каждый фильтр содержит набор «обучаемых» параметров. (2) *Слой активации* принимает решение об активации целевого нейрона. (3) *Объединяющий слой* уменьшает пространственный размер представления, чтобы уменьшить количество параметров и, следовательно, вычислений в сети. (4) *Полностью подключенный слой* характерен тем, что нейроны устанавливают полные связи с активированными нейронами предыдущего слоя.

Отслеживание объектов относится к автоматической оценке траектории объекта во время его движения. После того как отслеживаемый объект идентифицирован с использованием методов распознавания объектов, цель отслеживания объекта состоит в том, чтобы впоследствии автоматически отслеживать траекторию объекта. Такая технология может использоваться для отслеживания ближайших движущихся транспортных средств, а также людей, переходящих дорогу, чтобы предотвратить столкновение БА с ними. В последние годы методы глубокого обучения демонстрировали преимущества в отслеживании объектов в сравнении с традиционными методами. В частности, с помощью вспомогательных естественных изображений *составной автокодировщик* можно обучать в автономном режиме, что позволит изучить общие признаки изображения, которые более устойчивы к вариациям точек обзора и положениям транспортных средств. Затем автономную обученную модель можно применять для онлайн-трекинга.

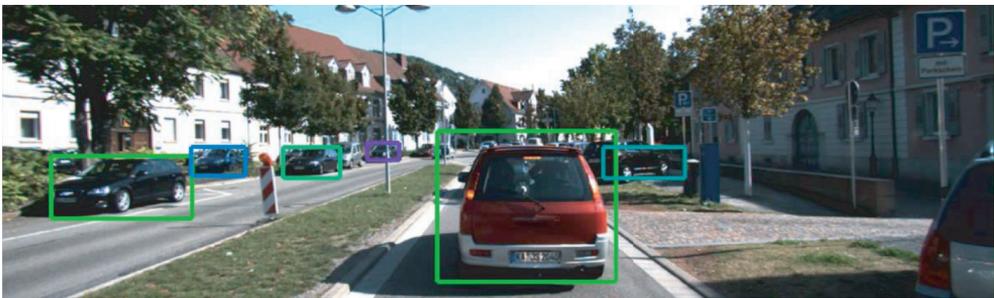


Рис. 1.5. Распознавание и отслеживание объектов [34] (используется с разрешения правообладателя)

1.2.4. Действия

Основываясь на исследовании среды, в которой находится БА, этап принятия решения обеспечивает безопасный и эффективный план действий в режиме реального времени.