

Нин Жуйтин

Бакалавр

Южно-Уральский государственный университет

Челябинск, Россия

Ма Юэян

Бакалавр

Южно-Уральский государственный университет

Челябинск, Россия

АРХИТЕКТУРА И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ В МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

Аннотация: В статье представлено систематическое исследование архитектуры и принципов работы сенсорных систем в мобильной робототехнике. На основе методологии системного анализа разработана таксономия сенсоров, разделяющая их на проприоцептивные и экстероцептивные с детализацией физических принципов действия и метрологических характеристик. Проанализированы ключевые архитектурные парадигмы: централизованная, распределенная и иерархическая, выявлены их компромиссы в аспекте надежности, производительности и масштабируемости. Особое внимание уделено принципам сенсорной фузии на различных уровнях абстракции данных и математическому аппарату, обеспечивающему её реализацию, включая фильтры Калмана, байесовские методы и нейросетевые подходы. Теоретическая значимость работы заключается в формировании целостной концепции построения сенсорных систем, а практическая ценность в предоставлении критериев для выбора и интеграции сенсорных комплексов при проектировании автономных роботов.

Ключевые слова: Сенсорные Системы, Мобильная Робототехника, Архитектура Систем, Сенсорная Фузия, Классификация Сенсоров, Автономная Навигация.

Ning Ruiting

Bachelor
South Ural State University
Chelyabinsk, Russia

Ma Yueyang

Bachelor
South Ural State University
Chelyabinsk, Russia

Architecture and Operating Principles of Sensor Systems in Mobile Robotics

Abstract: This article presents a systematic study of the architecture and operating principles of sensor systems in mobile robotics. Using systems analysis methodology, a taxonomy of sensors has been developed, dividing them into proprioceptive and exteroceptive, detailing their physical operating principles and metrological characteristics. Key architectural paradigms centralized, distributed, and hierarchical are analyzed, identifying their tradeoffs in terms of reliability, performance, and scalability. Particular attention is paid to the principles of sensor fusion at various levels of data abstraction and the mathematical apparatus supporting its implementation, including Kalman filters, Bayesian methods, and neural network approaches. The theoretical significance of this work lies in the development of a holistic concept for constructing sensor systems, while its practical value lies in providing criteria for selecting and integrating sensor systems in the design of autonomous robots.

Keywords: Sensor Systems, Mobile Robotics, System Architecture, Sensor Fusion, Sensor Classification, Autonomous Navigation.

Введение

Фундаментальным условием автономности мобильных роботов является их способность к восприятию и осмыслению окружающего пространства. Сенсорные системы выполняют роль искусственной сенсорики, формируя цифровую модель среды, без которой невозможны планирование движений, навигация и целевое поведение. Значение этих систем непрерывно возрастает в контексте экспансии робототехники в новые сферы человеческой деятельности, такие как автономная логистика, обслуживание инфраструктуры, работы в

экстремальных и опасных для человека условиях [1]. Эффективность работа в реальных, неструктурированных средах прямо коррелирует с возможностями его сенсорного аппарата. Многообразие решаемых задач порождает широкий спектр применяемых сенсоров, основанных на различных физических принципах действия от оптических и ультразвуковых до инерциальных и электромагнитных. Это разнообразие, в свою очередь, приводит к необходимости выбора и обоснования архитектурных решений для их интеграции в единый вычислительный контур. Отсутствие унифицированного подхода к систематизации данных решений создает значительную проблему для проектировщиков, заключающуюся в трудности сопоставительного анализа и оптимизации комплекса «сенсоры-вычисления-управление». Таким образом, насущной научно-технической задачей становится теоретическое обобщение и структурирование накопленных знаний в области архитектуры и функционирования сенсорных систем.

Целью настоящей работы является систематизация архитектурных решений и принципов работы сенсорных систем, обеспечивающих функционирование мобильных роботов. Данная цель реализуется через последовательное решение ряда задач. Первостепенной задачей выступает раскрытие ключевых понятий и формирование классификации сенсоров по физическим принципам действия и решаемым задачам. Следующей задачей является сравнительный анализ преобладающих архитектурных подходов к построению сенсорных систем, выявление их дидактических преимуществ и ограничений. Наконец, предметом исследования являются принципы обработки сенсорной информации, в частности, методология сенсорной фузии, рассматриваемая как ключевой механизм повышения надежности и достоверности данных для решения задач одновременной локализации и построения карт, навигации и избегания препятствий.

Методологической основой исследования выступает системный анализ, позволяющий рассматривать сенсорный комплекс как неотъемлемую и интегрированную подсистему мобильного робота. В сочетании с методами

теоретического обобщения и классификации данный подход позволяет выявить внутренние закономерности и сформулировать универсальные принципы построения таких систем, что составляет основную научную ценность работы и определяет ее теоретический вклад в робототехнику.

Классификация и принципы действия сенсоров мобильных роботов

Функционирование мобильного робота в недетерминированной среде критически зависит от способности его сенсорной системы получать достоверную и многомерную информацию о собственном состоянии и внешнем пространстве. Базовым принципом, лежащим в основе любой таксономии сенсоров, является разделение по характеру измеряемых величин на проприоцептивные и экстероцептивные. Проприоцептивные сенсоры ориентированы на мониторинг внутренних параметров системы. К этой категории относятся одометрические системы, оценивающие пройденный путь по данным о вращении колес, инерциальные измерительные блоки, интегрирующие в себе акселерометры и гироскопы для определения линейных ускорений и угловых скоростей платформы. Эти сенсоры обеспечивают высокочастотную оценку собственного движения, однако их фундаментальным ограничением является свойство дрейфа показаний, кумулятивно накапливающего ошибку локализации во времени.

Экстероцептивные сенсоры предназначены для восприятия внешней по отношению к роботу среды, формируя ее цифровую модель. Данный класс отличается значительным разнообразием решений, обусловленным физическими принципами действия. Оптические методы, в частности лидары, базируются на двух основных подходах: измерении времени пролета лазерного импульса и триангуляции. Метод времени пролета обеспечивает высокую точность и дальность измерений, находя применение в построении подробных трехмерных карт окружения [2]. Триангуляционные методы, как в ряде сканирующих систем структурированной подсветки, позволяют достигать высокого разрешения на близких расстояниях. Ультразвуковые сенсоры, или сонары, используют низкочастотные акустические волны, принцип их работы основан на корреляции

между временем возвращения отраженного сигнала и расстоянием до объекта. Их ключевым преимуществом является устойчивость к оптическим помехам, однако низкая направленность и разрешающая способность ограничивают их применение задачами грубого обнаружения препятствий.

Электромагнитные методы, представленные в робототехнике радарными миллиметрового диапазона, основаны на излучении и приеме радиоволн. Их отличительная особенность инвариантность к условиям видимости, таким как туман, дождь или задымление, а также способность непосредственно измерять радиальную скорость объекта благодаря эффекту Доплера. Это делает их незаменимыми для всепогодного мониторинга динамических объектов в реальном времени. Визуальные методы, реализуемые с помощью пассивных оптических систем камер, опираются на анализ светового потока. Стереозрение позволяет восстанавливать трехмерную структуру сцены путем сопоставления признаков на двух и более калиброванных изображениях, вычисляя карту диспаратности. Фотометрические методы, в свою очередь, нацелены на анализ таких параметров, как интенсивность отраженного света, текстура поверхности и цвет, что используется для распознавания объектов и навигации по визуальным маркерам.

Выбор конкретного сенсора или их комбинации определяется совокупностью ключевых метрологических и эксплуатационных параметров. Точность определяет степень близости результата измерения к истинному значению величины. Разрешение характеризует минимальное изменение входного сигнала, которое может быть детектировано системой. Частота обновления данных является критически важной для работы в динамических средах, где запаздывание информации может привести к нестабильности системы управления [3]. Помехозащищенность отражает устойчивость сенсора к внешним дестабилизирующим факторам, будь то оптические помехи для камер или акустические для сонаров. Энергопотребление напрямую влияет на автономность мобильной платформы, что заставляет искать компромисс между информационной насыщенностью и продолжительностью функционирования.

Таким образом, классификация и анализ физических принципов действия создают теоретический фундамент для последующего синтеза оптимальных сенсорных систем, адекватных целевым задачам мобильного робота.

Архитектурные решения сенсорных систем

Эффективность функционирования сенсорной системы мобильного робота определяется не только характеристиками отдельных датчиков, но и выбранной архитектурой их интеграции в общий вычислительный контур. Архитектура предопределяет принципы организации потоков данных, распределения вычислительной нагрузки и, в конечном счете, надежность и быстродействие всей системы в целом. В современной робототехнике сформировалось несколько фундаментальных архитектурных парадигм, каждая из которых обладает уникальными компромиссами между сложностью, производительностью и отказоустойчивостью.

Централизованная архитектура представляет собой исторически первоначальный и концептуально простой подход. В данной конфигурации все сырые данные от разнородных сенсоров, таких как лидары, камеры и инерциальные блоки, передаются по отдельным каналам связи в единый центральный вычислительный узел, часто представленный мощным бортовой компьютер. Главное концептуальное преимущество этой схемы заключается в возможности реализации сложных алгоритмов сенсорной фузии на уровне исходных данных, что теоретически позволяет достичь максимальной точности и полноты создаваемой модели окружения. Всесторонняя корреляция информации происходит в одном месте, обеспечивая целостность обработки. Однако этот подход обладает существенным системным ограничением, известным как «узкое горлышко». Пропускная способность шин передачи данных и вычислительные ресурсы центрального процессора оказываются жестким лимитирующим фактором. С ростом количества и разрешающей способности сенсоров, особенно видеокамер высокого разрешения, система быстро достигает потолка своих возможностей, что приводит к задержкам в обработке, недопустимым для систем реального времени, требующих

детерминированных временных характеристик[4]. Кроме того, отказ центрального вычислительного узла приводит к полной и безусловной потере работоспособности всего робота, что критически снижает надежность.

В противовес централизованному, распределенный архитектурный подход предполагает делегирование вычислительных функций на периферию. Каждый сенсор или их логически объединенная группа оснащается собственным специализированным процессором, например, микроконтроллером или системой-на-кристалле. На этом уровне выполняется предварительная обработка сырых данных: фильтрация шумов, первичная компрессия информации, выделение значимых признаков и базовое абстрагирование. Вместо потоков видеопиксели центральный узел получает уже готовые, семантически насыщенные дескрипторы, такие как координаты обнаруженных объектов, точечные облака с пониженной плотностью или оценки локальной скорости. Принцип организации такой архитектуры основан на концепции сервис-ориентированных взаимодействий, где каждый умный сенсор выступает в роли поставщика определенной услуги. Это коренным образом снижает нагрузку на центральный канал связи и вычислительное ядро, позволяет системе масштабироваться практически без ограничений. Повышается и отказоустойчивость: выход из строя одного сенсорного модуля, как правило, не является катастрофическим, поскольку остальные продолжают поставлять жизненно важную информацию. Ключевой инженерной задачей при реализации данной архитектуры становится обеспечение временной синхронизации всех распределенных источников данных.

Наиболее сбалансированным и функционально богатым представляется иерархический архитектурный подход, синтезирующий идеи двух предыдущих. Данная архитектура организуется в виде нескольких уровней обработки, выстроенных по вертикальному принципу. Нижний уровень реализует распределенную предварительную обработку данных на уровне сенсорных модулей, аналогично распределенной архитектуре. Преобразованные данные затем передаются на средний уровень, где осуществляется их пространственно-

временная привязка и сенсорная фузия. Именно на этом уровне создается единая, непротиворечивая модель окружающей среды, интегрирующая информацию от всех источников. Высший уровень архитектуры отвечает за стратегические задачи, такие как глобальное планирование пути, принятие решений о поведении робота и генерация сложных целевых команд. Он оперирует уже не данными сенсоров, а абстрактной моделью мира, поступающей с среднего уровня. Таким образом, иерархическая архитектура инкапсулирует обработку на разных уровнях абстракции, минимизируя избыточность передаваемых данных и распределяя вычислительную нагрузку в соответствии со сложностью решаемых задач. Это позволяет достичь высоких показателей как по производительности, так и по структурной надежности, делая данную парадигму преобладающей при создании сложных автономных систем, функционирующих в реальном мире.

Принципы обработки сенсорной информации и сенсорной фузии

Современные автономные мобильные роботы функционируют в условиях неопределенности и динамически изменяющейся среды, где поток сырых сенсорных данных сам по себе не эквивалентен обладанию оперативной и достоверной информацией. Преобразование этого потока в семантически насыщенную и геометрически точную модель мира составляет суть обработки сенсорной информации. Ключевыми задачами, предъявляющими высочайшие требования к этому процессу, являются одновременная локализация и построение карт, обнаружение и избегание препятствий, а также распознавание объектов и навигация по цели. Каждая из этих задач обладает уникальными требованиями к точности, задержкам и уровню абстракции данных. Проблема заключается в принципиальной ограниченности, зашумленности и неполноте информации, получаемой от любого отдельного сенсора, что порождает необходимость в их синергетическом объединении. Концепция сенсорной фузии предлагает системное решение данной проблемы через целенаправленную интеграцию информации от разнородных источников. Ее фундаментальная цель не простое суммирование данных, а генерация информационного представления, превосходящего по точности, надежности и полноте данные любого отдельного

сенсора. Этот процесс структурно организуется по уровням абстракции. Низкоуровневая фузия оперирует непосредственно сырыми данными, например, объединяя поток показаний акселерометра и гироскопа для получения более стабильной оценки ориентации. Такой подход потенциально обладает высокой точностью, но предъявляет экстремальные требования к пропускной способности каналов связи и точной временной привязке данных.

Среднеуровневая фузия работает с признаками, извлеченными из сырых данных на предыдущем этапе. На этом уровне производится ассоциация объектов, обнаруженных в различных сенсорных модальностях. Например, контур, выделенный на изображении с камеры, может быть коррелирован с кластером точек от лидара, что позволяет сформировать единый описатель препятствия с атрибутами геометрии, текстуры и, возможно, динамического состояния [5]. Этот уровень абстракции значительно снижает объем передаваемой информации и позволяет эффективно компенсировать взаимные недостатки сенсоров: лидар обеспечивает точное расстояние, а камера богатое семантическое описание. Высокоуровневая фузия нацелена на принятие решений на основе консолидированной модели мира, созданной из множества источников. Здесь происходит интеграция не данных или признаков, а гипотез и интерпретаций. Система может независимо получать от визуального классификатора гипотезу о том, что в поле зрения находится «дверь», а от лазерного дальномера доказательство того, что в заданном секторе существует проем. Фузия на этом уровне, оценивая достоверность этих гипотез, формирует окончательное, обоснованное знание о наличии открытого дверного проема, которое затем используется планировщиком маршрута.

Математический аппарат, обеспечивающий реализацию сенсорной фузии, основан на теориях оценки и вероятностного вывода. Фильтр Калмана и его нелинейные расширения, такие как Расширенный фильтр Калмана и фильтр Калмана без запаха, предоставляют строгий математический каркас для рекуррентной оценки состояния динамической системы в условиях гауссовских шумов. Они являются стандартом де-факто в задачах инерциальной навигации и

слияния данных одометрии с данными глобальных систем позиционирования. Более общий байесовский подход, включая методы частицных фильтров, позволяет работать с мультимодальными распределениями вероятностей и нелинейными динамиками, что критически важно для надежного решения задачи SLAM в симметричных и лишенных особенностей средах. В последнее время методы, основанные на глубоких нейронных сетях, демонстрируют высокую эффективность в задачах сенсорной фузии, особенно на уровне признаков и принятия решений. Нейросетевые архитектуры, такие как трансформеры, способны неявно обучаться сложным пространственно-временным зависимостям между разнородными потоками данных, напрямую отображая сырые данные с камер, лидаров и радаров в целостную модель окружающей среды, что открывает новые перспективы для создания полностью интегрированных и когнитивных сенсорных систем.

Заключение

Проведенное исследование позволило разработать целостную теоретическую концепцию построения и функционирования сенсорных систем мобильных роботов. В работе систематизирована таксономия сенсоров на основе проприоцептивных и экстероцептивных функций, детализированы их физические принципы действия и метрологические характеристики. Проанализированы фундаментальные архитектурные парадигмы централизованная, распределенная и иерархическая, выявлены их дидактические компромиссы применительно к задачам обеспечения надежности, производительности и масштабируемости. Теоретическое обобщение принципов сенсорной фузии, охватывающее уровни абстракции данных и лежащий в их основе математический аппарат, завершает формирование системного видения. Теоретическая значимость работы заключается в структурном обобщении разрозненных знаний, что формирует прочный концептуальный фундамент для дальнейших научных изысканий в области робототехники. Практическая ценность определяется предоставлением инженерам-разработчикам четких критериев для выбора и интеграции сенсорных

комплексов, адекватных целевым применениям автономных систем. Перспективы последующих исследований видятся в развитии интеллектуальных сенсорных систем, где элементы искусственного интеллекта, реализованные на уровне периферийных устройств, позволят осуществлять продвинутую предобработку и семантический анализ данных непосредственно на сенсоре

Список литературы

1. Ковшов Е. Е., Кравцов В. А. Применение мобильной ассистивной робототехники для качественного развития цифровой инженерной школы // Техническое творчество молодежи. – 2018. – № 5. – С. 37.
2. Черских Е. О., Савельев А. И. Анализ и классификация распределенных сенсорных систем коллаборативных робототехнических средств // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2021. – № 6 (104). – С. 78–94.
3. Гутьеррес С. Н. Р. Методы расположения и навигации для мобильных роботов // Исторические, философские, методологические проблемы современной науки : – 2020. – С. 380–387.
4. Павлюк Н. А., Смирнов П. А., Ковалев А. Д. Конструктивные и архитектурные решения для сервисной мобильной платформы со сменными компонентами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 10. – С. 181–193.
5. Васильева Н. Н., Рожкова Г. И. Восприятие виртуальных стереообъектов: особенности взаимодействия зрительных механизмов и пространственные перспективные эффекты // Экспериментальная психология. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 79–90.