Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.932.2

Бурень
Максим Николаевич

Определение координат мобильного робота на основе систем технического зрения

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание степени магистра технических наук

по специальности 7-06-0611-05 Компьютерная инженерия. Хранение и обработка данных

Научный руководитель
Татур Михаил Михайлович
доктор технических наук,
профессор кафедры ЭВМ

Минск 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Данная работа выполнена на тему «Определение координат мобильного робота на основе систем технического зрения»

Объект исследования – мобильный робот с установленной системой технического зрения.

Методы исследования – теоретический анализ и компьютерное моделирование.

Цели исследования:

1. Разработка математической модели алгоритмов определения координат с помощью систем технического зрения.
2. Повышение надежности систем навигации, снижение риска потери ориентации при утрате внешнего сигнала.

Задачи исследования:

1. Провести обзор литературных источников сред моделирования и алгоритмов управления.
2. Обосновать выбор среды проектирования, моделирования и работы робота (ROS, Simulink, Gazebo или др.).
3. Разработать модели и алгоритмы получения координат изображениям с камеры робота.
4. Провести исследование по оценке работоспособности и качества (эффективности) алгоритмов определения координат.

Практическая значимость работы: благодаря разработке математических моделей и соответствующих алгоритмов управления, а также их программной реализации это исследование позволяет повысить надежность систем навигации реальных мобильных систем. Используя эти достижения, реальные робототехнические комплексы могут быть оптимизированы для повышения автономности и функциональности.

Материалы диссертации были опубликованы в сборниках материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, четвертой интернациональной конференции по цифровизации сельского хозяйства и органического производства (ADOP 2024), третьего интернационального семинара по обеспечению надежности и вычислительному интеллекту (RECI 2024).

ВВЕДЕНИЕ

Позиционирование (определение координат местоположения) объекта является исходной и ключевой функцией в задаче навигации мобильной робототехники. От того с какой точностью и достоверностью будут определены координаты будет зависеть точность наведения робота в текущую точку маршрута и, в конечном итоге, в точку назначения. В большинстве случаев позиционирование осуществляется посредством глобальной системы позиционирования (GPS). В отдельных случаях для повышения точности глобального позиционирования, прибегают к локальным системам позиционирования (LPS), основанным на различных физических принципах: инерциальных, акустических, RFID, в том числе на основе систем технического зрения, с последующим слиянием данных для принятия решений.

Наиболее значимые практические результаты в области локального позиционирования получены в рамках технологии SLAM (Simulated Location and Mapping). Это направление исследований представлено достаточно широким спектром алгоритмов и программного обеспечения, в основном ориентированного на применение в замкнутом пространстве с использованием лидаров в качестве сенсоров. Однако, существуют объективные ограничения для применения лидаров на открытой местности.

В настоящей диссертации автор исследует вопрос возможности применения системы технического зрения на основе обычных камер в диапазоне видимого спектра для локального определения координат. Подобные системы в основном применяются для контроля и удержания полосы движения автотранспорта, обнаружения препятствий и получения локальных данных для торможения или их объезда. Однако, о результатах успешного внедрения систем технического зрения в технологию SLAM, автору неизвестно. Поэтому, целью работы является формализация модели расчета координат с использованием системы технического зрения и оценка перспектив ее практического применения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В области визуальной навигации решающее значение играют алгоритмы распознавания объектов, математические модели навигации по ориентирам и архитектурные решения для интеграции подсистем управления мобильным роботом.

Классификация объектов на изображении одна из основных задач машинного зрения. Несмотря на то, что это тривиальная задача для человека, ее автоматизация долгое время не представлялась возможной. Причиной этому служило отсутствие простого алгоритма, по которому было бы возможно классифицировать большое количество объектов на изображении. Задача могла быть решена с использованием нейронных сетей, но долгое время вычислительных мощностей компьютеров для этого было недостаточно. Ситуация изменилась в XXI веке с развитием многопроцессорных (многоядерных систем) и графических ускорителей, которые позволили распараллелить вычисления, используемые в работе и обучении нейронных сетей.

На сегодняшний день одним из самых популярных решений для идентификации объектов на изображении является фреймворк YOLO. Оригинальная версия YOLO (You Only Look Once) была создана Джозефом Редмоном в 2016 году. Исходная модель YOLO была первой сетью обнаружения объектов, которая объединила проблему формирования ограничивающих рамок и идентификации классов в одной сквозной дифференцируемой сети. Некоторые модели обнаружения объектов рассматривают распознавание как задачу, состоящую из двух частей. Сначала определяется области интереса (ограничивающая рамка), в которой находится объект. Во-вторых, классифицируют эту конкретную область интересов. Рассматривая задачу обнаружения как однократный регрессионный подход для определения ограничивающих рамок, модели YOLO часто оказываются более производительными чем их аналоги, что упрощает их использование на устройствах с ограниченными вычислительными возможностями.

Сегодня основными способами навигации мобильных роботов являются системы глобального позиционирования, инерциальные навигационные системы, определение положение на основе RFID меток и, если робот оперирует в замкнутом пространстве, SLAM системы.

Наиболее популярной технологией для интеграции различных подсистем в робототехнике является Robot Operation System (ROS). Она представляет собой псевдо операционную систему работающую на базе ОС семейства unix (linux,

mac os). Благодаря этому возможно вести разработку и тестирование приложений непосредственно на персональных компьютерах и ноутбуках. Архитектура приложения на ROS базируется на понятии Node. В ROS2 узел (Node) — это фундаментальная единица программной архитектуры, представляющая собой отдельный процесс, выполняющий одну или несколько задач в рамках робототехнической системы. Узлы в ROS2 используются для разделения задач на независимые компоненты, которые могут взаимодействовать друг с другом посредством передачи сообщений, вызова сервисов и совместного использования данных.

При создании систем навигации главным этапом является создание математической модели. Этот процесс начинается с постановки задачи. Пусть задан участок местности произвольной формы. Обозначим рассматриваемый участок через Q. По периметру участка установлены стационарные вехи (маяки) с известными абсолютными или относительными координатами. Будем полагать, что линейные размеры участка являются таковыми, что при расчетах можно пренебрегать кривизной земли, поэтому для определения координат можем вводить прямоугольную декартовую систему координат Oxy. Разместим начало координат в произвольной точке, оси Ox и Oy направим, соответственно, на Восток и на Север. Пронумеруем маяки по часовой стрелке ($k = 1, 2, \dots, N$).

Пусть на участке оперирует мобильный робот, который находится в оптическом контакте с несколькими маяками. Примем, что $(x, y) \in Q$ - искомые координаты мобильного робота. Целевое назначение робота – не принципиально (обработка почвы, кошение, опрыскивание и т.п.). При этом основная исследуемая функция - движение по маршруту, представленному в виде последовательности точек маршрута с заданными координатами.

Считается, что мобильный робот оснащен системой технического зрения, которая позволяет автоматически идентифицировать маяки, находящиеся в зоне оптического контакта, а также определить угол между, направлением на каждый идентифицированный маяк и фиксированный «ориентир», например, направлением на Восток.

Очевидно, маяки должны располагаться разумно, например, равномерно вдоль границы обрабатываемого участка. Считается, что координаты всех маяков известны, обозначим их относительно системы Oxy через (x_k, y_k). Также обозначим через φ_k положительный угол между линией, направленной на k-й маяк и направлением оси Ox. Схема расположения робота и маяков приведена на рисунке 1.

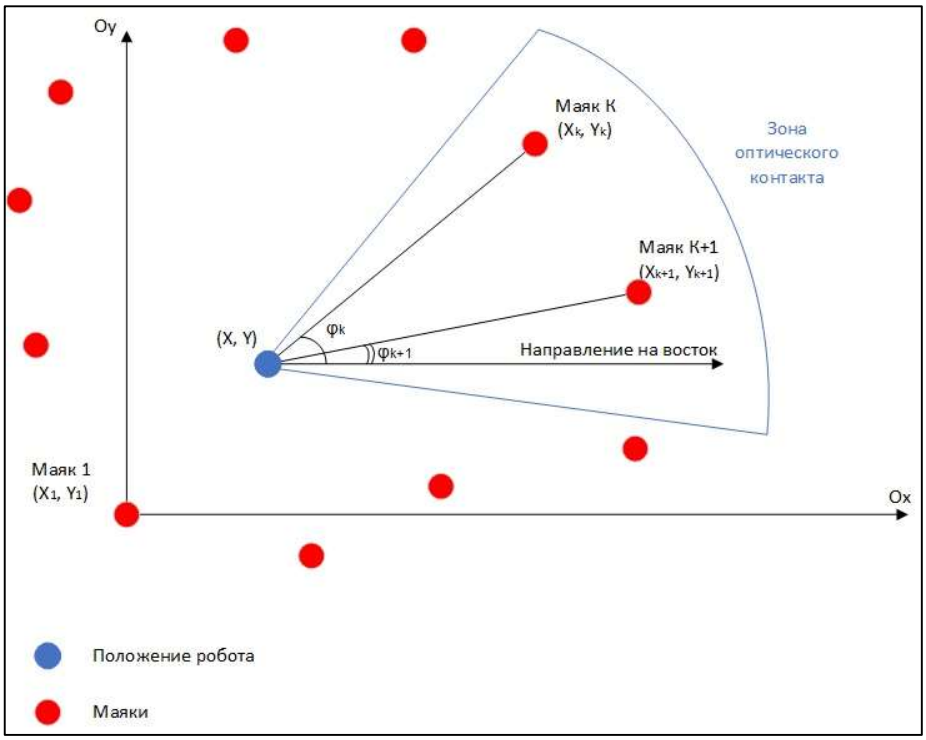


Рисунок 1 – Размещение маяков по периметру обрабатываемого участка

Из известных соотношений тригонометрии выводим следующие формулы для определения координат:

$$x = \frac{\Delta_x}{\Delta}, \tag{1}$$

$$y = \frac{\Delta_y}{\Delta}, \tag{2}$$

где

$$\Delta = \sum_{k=1}^{N} \sin^2 \varphi_k \sum_{k=1}^{N} \cos^2 \varphi_k - \left(\sum_{k=1}^{N} \sin \varphi_k \cos \varphi_k \right)^2, \tag{3}$$

$$\Delta_x = \sum_{k=1}^{N} \cos^2 \varphi_k \sum_{k=1}^{N} (x_k \sin \varphi_k - y_k \cos \varphi_k) \sin \varphi_k + \tag{4}$$

$$+\sum_{k=1}^{N}\sin\varphi_k\cos\varphi_k\sum_{k=1}^{N}(-x_k\sin\varphi_k+y_k\cos\varphi_k)\cos\varphi_k,$$

$$\Delta_y=-\sum_{k=1}^{N}\sin^2\varphi_k\sum_{k=1}^{N}(x_k\sin\varphi_k-y_k\cos\varphi_k)\cos\varphi_k+$$
$$+\sum_{k=1}^{N}\sin\varphi_k\cos\varphi_k\sum_{k=1}^{N}(x_k\sin\varphi_k-y_k\cos\varphi_k)\sin\varphi_k. \quad (5)$$

Для моделирования робота и системы технического зрения была выбрана система Gazebo. В ней были проведены эксперименты по верификации выведенных математических моделей.

Схема эксперимента с 3-мя видимыми маяками приведена на рисунке 2, результаты эксперимента приведены в таблице 1.

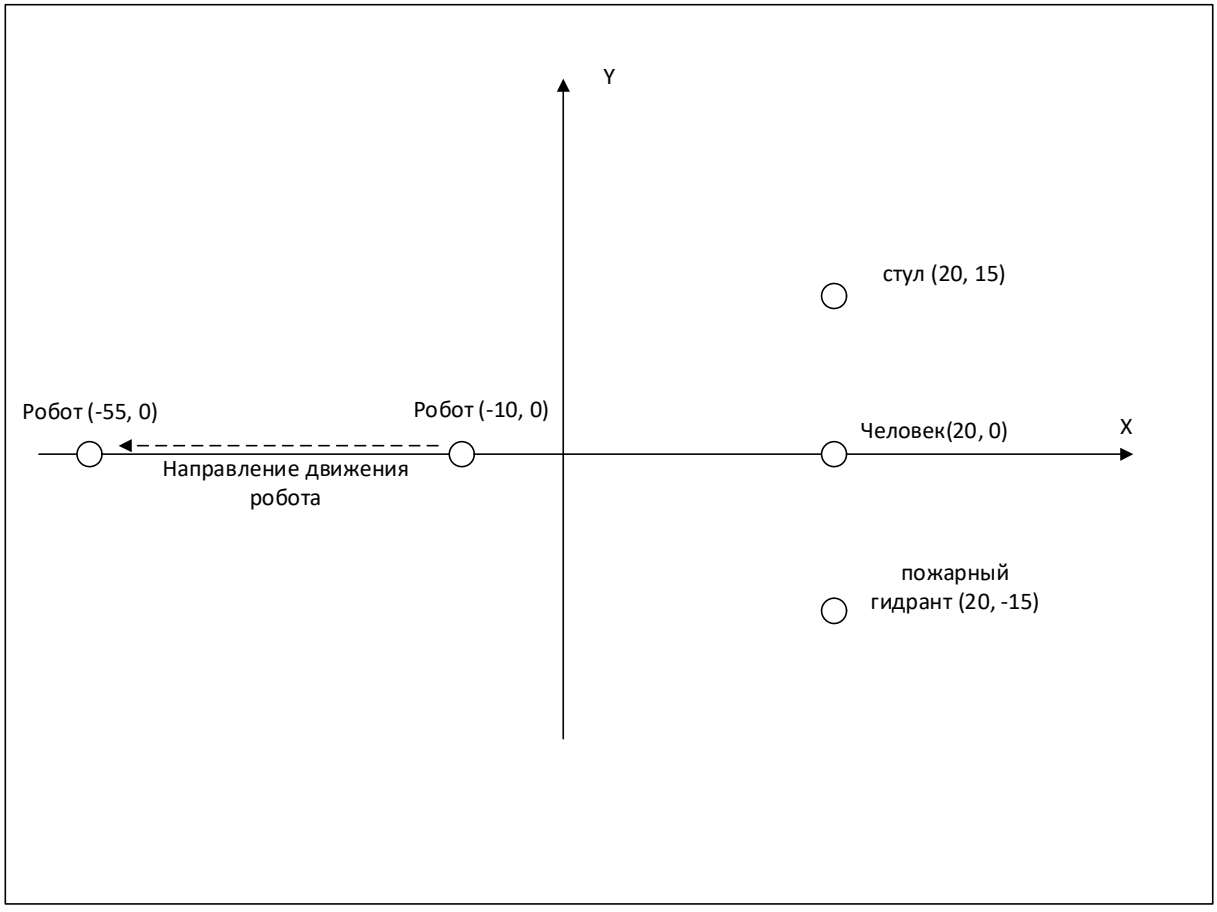


Рисунок 2 — схема эксперимента с 3 маяками

таблица 1 – Положение робота и расчетный координаты в эксперименте с 3-мя маяками

X	Y	X`	Y`	Квадратичное расстояние
-10	0	-9.73460491816924	-0.023752862648267297	0,266455902
-15	0	-15.641129062152803	-0.013752771119249116	0,64127655
-20	0	-21.429368271951944	-0.023484805278777537	1,429561189
-25	0	-27.157382050832773	-0.01758465203301963	2,157453715
-30	0	-32.84266935070613	-0.01952942178002422	2,842736434
-35	0	-38.4731968682081	-0.021477839875441964	3,473263276
-40	0	-44.1062753850812	-0.011721963062351421	4,106292116
-45	0	-49.7480148273402	-0.0127129973854983	4,748031847
-50	0	-55.31769041667121	-0.027392736904470243	5,31776097
-55	0	-60.88980700389149	-0.01468413750305398	5,889825309

Как видно из полученных результатов, математическая модель прошла проверку. С ростом дальности наблюдается линейный рост погрешности определения координат, график показан на рисунке 4.3, но тем не менее в разных точках координаты были определены с приемлемой погрешностью

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему «Определение координат мобильного робота с помощью средств технического зрения» представляет собой всестороннее исследование тонкостей разработки и совершенствования алгоритмов определения пространственного положения, имеющих решающее значение для эффективного управления мобильными роботизированными системами и маневрирования ими. Исследование проводится на фоне растущих требований к автоматизации и растущей роли робототехники в различных отраслях.

Исследование проводится в рамках методологической базы, включающей теоретический анализ и сложные методы компьютерного моделирования, с четким определением его целей. Главной из этих целей является разработка надежной математической моделей, пригодных для определения координат мобильного робота в локальной системе координат. Эти цели сформулированы с помощью структурированного подхода, который включает в себя тщательный обзор соответствующей литературы, кульминацией которого является тщательный выбор сред моделирования и исполнения, таких как ROS, Gazebo и других.

Глава 2 является краеугольным камнем диссертации, в которой представлена разработка математических моделей определения координат с помощью разного количества видимых визуальных маяков. Некоторые из разработанных моделей были проверены путем решения ряда расчетных задач, другие требовали верификации в системе моделирования. Процесс валидации подчеркивает не только точность, но и функциональную надежность модели, обеспечивая тем самым прочную основу для последующих итераций и усовершенствований. Опираясь на этот фундамент, глава 3 приступает к разработке системы моделирования, а также программной реализации выработанных моделей на базе ROS2.

В рамках главы 4 была проведена валидация математических моделей, путем проведения ряда экспериментов. Были выявлены основные параметры, влияющие на точность определения координат, а именно: дальность до от робота до маяков, угловая разность между маяками на изображении, а также разрешение изображения, которое влияет на точность распознавания. Была подтверждена работоспособность всех методов, полученных во 2 главе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

[1-A] Бурень М.Н. ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ YOLO V8 В РАМКАХ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ // 60-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР – Минск 2024 – С.28 – 33.

[2-A] Buren M.N. Use of ROS2 in Conjunction with YOLOv8 Image Recognition System for Mobile Robot Control System // The Third Int. Workshop on Reliability Engineering and Computational Intelligence (RECI 2024), Žilina, Slovakia, 6-8.11.2024 c. 30.

[3-A] Tatur, M., Buren, M., Bushuk, S., Pashayev, A., Sabziev, E., Fu, M. (2024). Local Positioning of an Agricultural Mobile Robot Based on a Vision System. In: Ronzhin, A., Bakach, M., Kostyaev, A. (eds) Agriculture Digitalization and Organic Production. ADOP 2024. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 397. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4410-7_7.