

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ РОБОТОВ НА ПОЛИГОНЕ

Сорокопудов Н.¹, Филипас А.А.²

¹ТПУ, ИШИТР, гр.8ЕМ42, e-mail: nas65@tpu.ru

²ТПУ, ИШИТР, к.т.н., доцент ОАР, e-mail: filipas@tpu.ru

Аннотация

В работе рассматривается процесс разработки оптической системы для определения местоположения роботов на полигоне посредством оценки положения ArUco-меток. В работе представлены структурная и функциональная схемы, подбор компонентов системы. Система разрабатывается в рамках проекта «Программно-аппаратный комплекс на базе всенаправленного робота с манипулятором для лабораторных работ».

Ключевые слова: компьютерное зрение, навигация, локализация, ArUco-метки.

Введение

Определение местоположения робота является базовой задачей в мобильной робототехнике. Такие системы востребованы в логистике для отслеживания перемещения товаров, в сельском хозяйстве для мониторинга работы сельскохозяйственной техники, в складских комплексах для автоматизации работы погрузчиков. Яндекс-роверы определяют свое положение с помощью лидаров, чтобы доставить посылку на правильный адрес [1].

Для глобальной навигации используются GPS, ГЛОНАСС, GNSS (Глобальные навигационные спутниковые системы), INS (инертные навигационные системы), SLAM (картографирование и локализация) [2], локальные системы позиционирования с использованием радио, ультразвуковых и других меток, визуальная навигация. В данной работе предстояло разработать систему, которая будет работать в замкнутых помещениях. В таких условиях спутниковые системы не способны работать, а точность составляет 3-7 м. Инертные навигационные системы со временем накапливают ошибки, при этом робот не получает информацию о внешней среде, динамических препятствиях. SLAM метод удобен для навигации и планирования пути роботов, которые находятся рассредоточено, например, роботы-доставщики, а в тесных условиях (лаборатория, склад), где на небольшой территории находится несколько роботов одновременно – его использование излишне. Визуальная навигация позволяет локализовать сразу несколько роботов, обрабатывая информацию с одного датчика (камеры), масштабирование системы планирования пути в таком случае облегчается.

Целью работы является разработать оптическую систему для определения положения роботов на полигоне с использованием ArUco-меток. Актуальность работы обусловлена необходимостью автоматизации процессов управления и мониторинга в робототехнических системах, реализация уже имеющихся частей в одну общую систему для дальнейшего обучения студентов.

Основная часть

В начале разработки системы было решено, что полигон для роботов будет разделен на 4 зоны, для каждой зоны будет использоваться своя камера. Чтобы роботы получали информацию от реализуемой глобальной системы навигации необходимо использовать беспроводные передатчики, в связи с этим будет использоваться локальная сеть Wi-Fi, а данные будут передаваться через запросы на сервер внутри данной сети. Исходя из всего вышесказанного была реализована структурная схема системы, где $frame_i$ – изображение с i -ой камеры, $\{id, pos\}$ – массивы данных, состоящие из ID ArUco-метки и ее положения, id_i – соответствующий роботу ID ArUco-метки, pos_i – массив состоящий из координат положения метки, соответствующий отправленному роботом id_i . Схема представлена на рисунке 1.

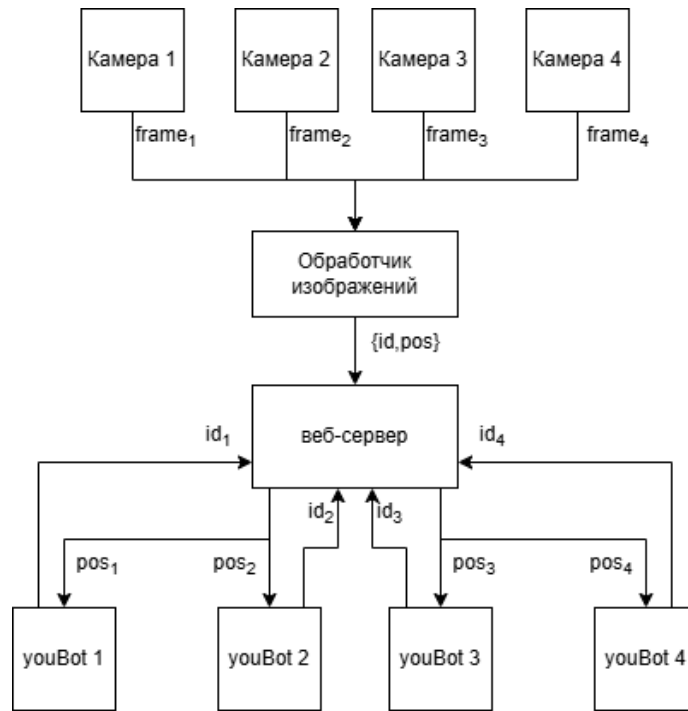


Рис. 1. Структурная схема оптической системы

Согласно разработанной схеме был произведен выбор компонентов системы. В первую очередь выбрать предстояло камеры. Для этого были измерены габариты полигона, которые составили 5 м в длину и 4 м в ширину, а высота потолков равна 2.7 м. Основные параметры камеры, которые должны быть получены: высокое качество изображения и большое количество кадров в секунду (далее *fps*, от англ. *frame per second*). Минимальное количество кадров определим следующим образом:

$$t = \frac{\delta S}{v_p} = \frac{1}{fps}, \quad (1)$$

где δS – перемещение робота, v_p – скорость робота, *fps* – частота кадров в секунду. Из (1) можно выразить *fps*, заодно подставив в формулу максимальную скорость робота, а перемещение будет принято 1/20 от его длины, тогда:

$$fps = \frac{v_p}{\delta S} = \frac{0,8 \text{ м\c}}{0,029 \text{ м}} = 28 \text{ с}^{-1}. \quad (2)$$

Из (2) было получено требуемая частота кадров. Качество камеры определяется из желаемой точности, то есть сколько миллиметров будет в одном пикселе. Это особенно важно, так как от этого будет зависеть минимально возможный размер ArUco-метки. Допустим будут использоваться метки, состоящие из матрицы 4x4, потому что их легче обнаружить. Так как они будут располагаться на роботах, то, чем меньше метка – тем удобнее, однако ее необходимо расположить в таком месте, где их будет видно большую часть времени манипулирования. Можно расположить на корпусе с зеркальной стороны от манипулятора, но в таком случае, если потребуется составлять груз на робота – метка будет закрыта, или если робот имеет два манипулятора, то подобное расположение также будет невыгодно. Поэтому предлагается вынести место для маркера на специальную платформу вне корпуса. На рисунке 2 представлено 3 варианта расположения ArUco-метки размером 4x4 см [3]. Первый вариант должен состоять из 2 меток и показывает переднюю и заднюю часть робота, в данном случае они выносятся за корпус робота, второй вариант – показывает центр робота и состоит из одной

метки, третий вариант – метки расположены над каждым колесом. Метки большего размера будет неудобно располагать на работе вне зависимости от выбранного варианта.

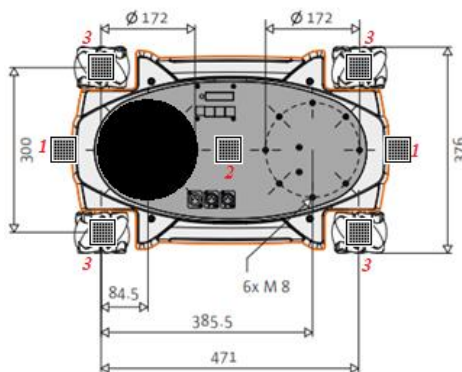


Рис. 2. Варианты расположения меток на платформе

Согласно документации библиотеки OpenCV, используемой для работы с ArUco-метками, как минимум один пиксель должен четко определять один бит матрицы метки [4]. Для большей надежности системы минимально один бит будет определяться четырьмя пикселями, исходя из этого точность камеры должна обеспечивать:

$$C = \frac{l_{n \cdot n}}{n \cdot 4} = \frac{0,04 \text{ м}}{4 \cdot 4} = 0,0025 \frac{\text{м}}{\text{пикс.}}, \quad (3)$$

где $l_{n \cdot n}$ – длина метки с матрицей размерности $n \cdot n$. Тогда разрешение камеры можно вычислить по формуле:

$$p = \frac{L}{C}, \quad (4)$$

где L – длина желаемой видимой области. Подставив 2,5 м и 2 м (длина и ширина желаемой покрываемой зоны на полигоне), были получены значения 1000 и 800 пикселей, соответственно. В итоге камера должна обладать частотой кадров не менее 28 fps и качеством изображения 1000x800 пикселей. Чем выше качество у камеры, тем меньше частота кадров, стандартно камеры обладают следующими параметрами: 10/15/20/30/60/120 и т. д. кадров в секунду, 640 x 360/1280 x 720/1920 x 1080 и т. д. пикселей (или 0,5МП/1МП/2МП, соответственно), при соотношении сторон 16:9. Была выбрана камера с максимальными параметрами 1920 x 1080 пикселей и частотой 30 кадров в секунду на матрице CMOS OV4689. Выбор объектива для камеры определяет какую зону и дальность видимости будет иметь камера. Сенсор имеет следующие параметры: оптический формат 1/3", размер пикселя 2,0 мкм, область изображения 5440 x 3072 мкм. Тогда по формуле фокусного расстояния необходимый объектив должен иметь параметры фокусного расстояния:

$$\frac{wd}{W} \geq f \leq \frac{hd}{H}, \quad (5)$$

где w, h – размеры изображения (ширина и высота соответственно) на матрице, d – высота расположения камеры, W, H – реальные размеры просматриваемой зоны (ширина и высота, соответственно). Размер изображения можно получить из формулы:

$$w, h = pr, \quad (6)$$

где r – размер пикселя, тогда, подставив (6) в (5) и известные параметры:

$$f \leq 0,0029 \text{ м.}$$

Стандартно поставляются объективы с фокусным расстоянием 2,8 мм, 3.6 мм, 6 мм и т. д., а при увеличении фокусного расстояния уменьшается угол обзора, следовательно, необходимо выбрать объектив с меньшим фокусным расстоянием, то есть 2.8 мм. Изменив (5), был вычислен размер просматриваемой зоны:

$$W_{2.8} = 3,7 \text{ м}, H_{2.8} = 2,08 \text{ м.}$$

При разрешении 2МП точность камеры согласно (4) будет равна 0,0019 м/пикс.

Исходя из параметров просматриваемой зоны камеры была составлена схема расположения камер на полигоне, представленная на рисунке 3, где штриховкой показана зона покрытия камеры. Объектив камеры располагается перпендикулярно полу для того, чтобы уменьшить влияние дисторсии.

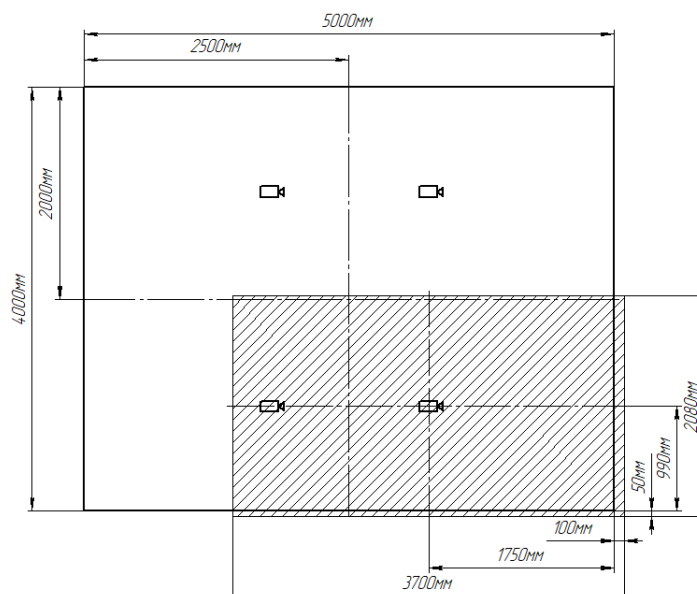


Рис. 3. Расположение камер на полигоне

Дальше необходимо было определить устройство для обработки изображений и определения положений меток. Выбранные камеры имеют интерфейс передачи только через USB, поэтому было выделено три возможных варианта:

1. Одноплатный компьютер:

– *Преимущества:* низкая стоимость.

– *Недостатки:* для каждой камеры свой компьютер, дополнительная задержка из-за передачи информации о метках на основной сервер, невысокие вычислительные возможности.

2. Настольный компьютер (Intel core i5/Ryzen 5, 8 ГБ RAM, видеокарта с поддержкой CUDA):

– *Преимущества:* Достаточная вычислительная мощность для обработки нескольких камер и запуска веб-сервера, задержки только от коммуникации типа клиент-сервер.

– *Недостатки:* Обработка небольшого числа камер и ArUco-меток одновременно, запуск не сильно нагруженного сервера.

3. Высокопроизводительный сервер (Intel Xeon/AMD EPYC, 32 ГБ RAM, CUDA GPU):

– *Преимущества:* Максимальные вычислительные возможности, запуск высоконагруженных и сложно архитектурных веб-серверов.

– *Недостатки:* Самая высокая стоимость, специализированное обслуживание, высокое энергопотребление.

Третий вариант излишен для условий аудитории, но подойдет для реализации системы на производстве, например, для эксплуатации на большом складе. Первый вариант требует помимо четырех одноплатных компьютеров еще один персональный компьютер, при условии централизованного управления для запуска сервера, алгоритмов глобального планирования и т. д., поэтому был выбран вариант два – настольный компьютер. Компьютер со средними параметрами сможет обеспечить полигон необходимыми вычислительными возможностями.

Для подключения камер к компьютеру необходимы удлинители (с дополнительным питанием), так как базовый провод имеет длину лишь 1 метр, а также потребуется разветвитель для USB.

Для передачи информации о положении маркеров между компьютером и роботами было предложено использовать локальный веб-сервер. Он основная часть была реализована с помощью языка программирования Python и фреймворка FastAPI. Так как передача видеопотока имеет достаточную задержку, то через сервер роботы будут получать уже определенные компьютером позиции меток по запрошенным *ID*.

Дальше была разработана функциональная схема системы, представленная на рисунке 4, где видеопоток – данные с камер, *id* – номер ArUco-метки, *pos{x, y}* – массив данных содержащий координаты *x, y*. Камера подключена к компьютеру через USB-разветвитель, взаимодействие компьютер-сервер-робот происходит по протоколу HTTP.

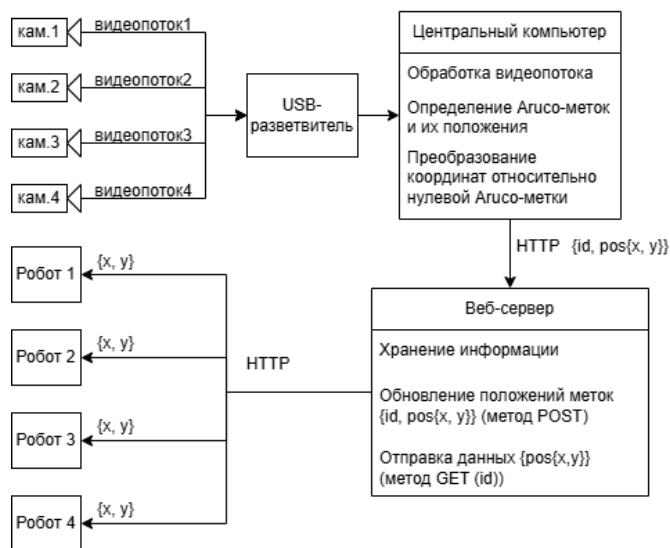


Рис. 4. Функциональная схема оптической системы

В конце был реализован веб-сервер с расширенным функционалом для задания скоростей роботам, целевой координаты и многое другое помимо передачи позиций меток.

Результаты

В результате работы были выбраны и закуплены камеры для оптической системы полигона, на рисунке 5 представлена камера в конструкции для монтажа на потолок и коррекции угла между камерой и желаемой областью просмотра.

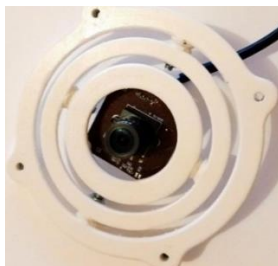


Рис. 5. Используемая камера в проекте

На рисунке 6 представлено отображение отладочной документации для веб-приложения системы. На данной странице разработчики могут посмотреть какой тип имеет сообщение, его конструкцию и адрес.

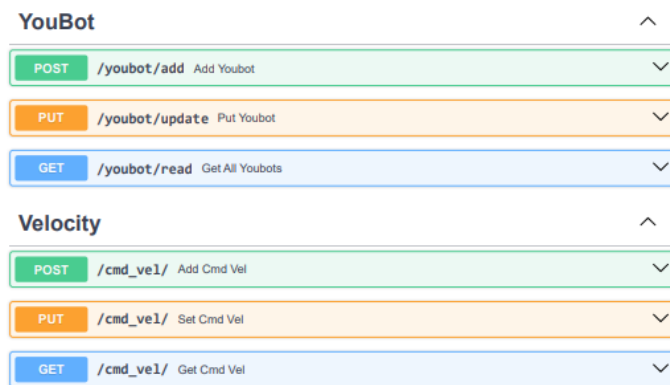


Рис. 6. Страница отладочной документации веб-приложения

На рисунке 7 представлен набор фрагментов фотографий, на которых представлено отображение позиций маркеров в сантиметрах. Опыты проводились с использованием ранее представленной камеры, установленной на потолке полигона.

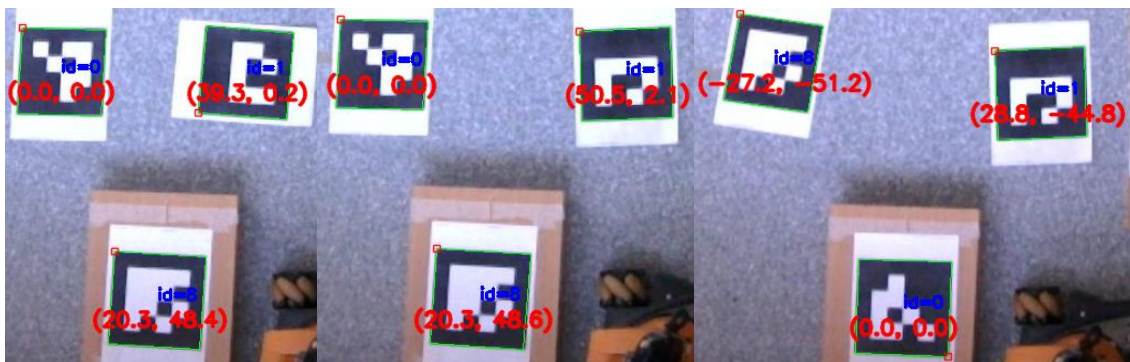


Рис. 7. Результат определения положения меток относительно нулевой

Заключение

В данной работе был представлен процесс разработки оптической системы для определения местоположения роботов, основанном на компьютерном зрении, а именно определения положения ArUco-меток и последующей передачей информации через разработанный веб-сервер. Разработанная система позволит одновременно локализовать и управлять парком роботов, она имеет возможность на масштабирование, за счет назначения неиспользуемых ArUco-меток роботу или необходимому объекту. В дальнейшем данную систему можно будет включать в программы обучения по дисциплинам «Компьютерное зрение», «Системы управления автономными роботами», «Мобильные роботы» и другим непосредственно связанным с робототехникой дисциплинам.

Список используемых источников

1. Роверы в Москве: как роботы-доставщики находят путь до клиентов // Москвич MAG: сайт. [Электронный ресурс]. – URL: moskvichmag.ru/gorod/rovery-v-moskve-kak-roboty-dostavshhiki-nahodyat-put-do-klientov/ (дата обращения 30.02.2025).
2. Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Cremers, D., Davison, A. J., Pineau, J., ... & Neira, J. (2016). Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE transactions on robotics*, 32(6), 1309-1332
3. KUKA youBot // aetlabs: сайт. [Электронный ресурс] – URL: aetlabs.com/wp-content/uploads/2016/05/youBot_data_sheet.pdf (дата обращения: 30.10.2024)
4. Detection of ArUco Markers // OpenCV: сайт. [Электронный ресурс] – URL: docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html (дата обращения: 30.03.2025)