

*В. Е. Неудахин<sup>1</sup>\**

## **Разработка системы оптической навигации**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: neudakhinvaldim@gmail.com

**Аннотация.** Разработка унифицированной системы навигации внутри помещений является одной из важнейших задач indoor навигации. В статье представлена возможная реализация оптической системы навигации с использованием инфракрасного светодиода в качестве маркера. Рассмотрены главные задачи indoor навигации, представлена классификация методов внутренней навигации, выбран метод сегментации изображений, изучен метод фотограмметрической засечки. В результате работы было подобрано оборудование, создан тестовый стенд, выполнена калибровка камер, определены элементы внешнего ориентирования и разработано программное обеспечение для получения плоских координат объекта.

**Ключевые слова:** indoor навигация, система навигации, фотограмметрическая засечка

*V. E. Neudakhin<sup>1</sup>\**

## **Development of optical navigation system**

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: neudakhinvaldim@gmail.com

**Abstract.** The development of a unified indoor navigation system is one of the most important tasks of indoor navigation. This article presents a possible realization of an optical navigation system using infrared LED as a marker. The article considers the main indoor navigation tasks, presents the classification of indoor navigation methods, chooses the method of image segmentation and studied the method of photogrammetric intersection. As a result of the work the equipment was selected, a test bench was created, cameras were calibrated, elements of external orientation were determined and software for obtaining flat coordinates of object was developed.

**Keywords:** indoor navigation, navigation system, photogrammetric intersection

### ***Введение***

Определение координат объектов на поверхности земли остается важной задачей в различных отраслях. Главным методом определения позиции являются глобальные системы навигации. В них используются искусственные спутники земли, постоянно передающие сигнал на поверхность земли. Главным условием для работы данных систем навигации является наличие прямой видимости на несколько спутников [1].

Навигация внутри помещений или закрытых пространствах (indoor навигация) применяется в условиях отсутствия сигнала систем глобальной навигации [2]. Такие условия наблюдаются внутри зданий, в подземных комплексах, складских помещениях, тоннелях, шахтах. Сигнал, исходящий от спутников, не может

преодолеть преграды, возникающие на его пути, также он может быть многократно переотражен, что приводит к невозможности определения позиции методами глобальной навигации [2].

Навигация внутри помещений часто используется для определения положения динамических объектов, таких как беспилотные летательные аппараты, роботизированные устройства, человек. Решение данной задачи требует высокой точности и скорости работы системы навигации [3].

Не существует унифицированного метода для построения системы внутренней навигации. Различные условия требуют разработки специальной системы, создание универсальной системы является важной задачей indoor навигации.

### *Методы и материалы*

Для разработки систем внутренней навигации применяются различные методы, которые можно выделить в следующие категории [4]:

- инерциальные;
- с использованием псевдоспутников;
- на основе радиоволн;
- с использованием аномалии магнитного поля;
- оптические системы.

Инерциальные системы внутренней навигации используют систему инерциальных датчиков для определения позиции объекта. В качестве датчиков используются гироскопы, одометры, магнетометры, барометры, акселерометры. Главным недостатком данных систем является невозможность использования ее в качестве основной. Это связано с особенностью работы, инерциальная система используется в качестве дополнительной и начинает работать, когда основная система перестает функционировать. Чаще всего инерциальная система применяется совместно с глобальной системой навигации. Со временем инерциальные датчики накапливают ошибку, что приводит к значительному снижению точности при длительном вычислении координат. Достоинствами являются полная автономность, для навигации требуется лишь наличие одного устройства. Также инерциальная система может определять положение объекта с достаточно высокой скоростью [5].

Система на основе псевдоспутников использует схожий принцип с системами глобальной навигации. Для определения позиции применяются устройства, которые имитируют искусственные спутники Земли [4]. Псевдоспутниками могут являться различные устройства, такие как оптические дальнометры, электромагнитные излучатели, ультразвуковые излучатели. Расчет координат в большинстве случаев выполняется на самом устройстве, с использованием приемника и вычислительного блока [5]. При использовании ультразвуковых излучателей, для получения сигнала применяется система микрофонов. Также ультразвуковые излучатели подвержены проблеме “Ближнего-Дальнего” сигнала [6]. Преимуществом является невысокая стоимость и высокая точность.

Применение радиоволн в системах внутренней навигации, основано на физических свойствах данных волн и их способности проникать сквозь твер-

дые объекты. Для определения позиции объекта используются Radio Frequency Identification (RFID) метки или Wi-Fi роутеры [3]. Если известны координаты устройств и сила получаемого сигнала, возможно определение координат объектов внутри помещения. Главным недостатком является низкая точность, ошибка определения положения может достигать нескольких метров. Достоинством данной системы является легкая расширяемость и дешевизна устройств [4].

Внутри помещений магнитное поле размещается неравномерно, самые большие отклонения заметны на металлических сооружениях, электронных устройствах и системах электроснабжения. Эти отклонения можно использовать, как маяки относительно которых возможно определение координат объектов. Для навигации используются карты магнитных аномалий, которые строятся при помощи магнитометра [7]. Главными недостатками являются дорогостоящее оборудование и невысокая точность, до одного метра. Данный метод обеспечивает высокую скорость и не требует сложного оборудования на определяемом объекте.

### ***Результаты***

В настоящей работе рассмотрим разрабатываемую на кафедре ФидЗ оптическую систему навигации. Оптическая система навигации использует камеры, которые устанавливаются в зоне перемещения объекта. В качестве камер можно использовать недорогие устройства с низким разрешением и небольшим размером матрицы. Благодаря невысокой разрешающей способности возможно добиться высокой частоты получения координат объекта, с сохранением высокой точности, до 10 сантиметров. Также необходимым условием является наличие возможности установки фокусного расстояния вручную. Перед установкой камер следует выполнить их калибровку, для определения координат главной точки снимка, значения фокусного расстояния и коэффициентов дисторсии. Это позволит устранить систематические ошибки и повысить точность определения координат.

В оптических методах для определения координат требуется наличие оптического маркера, который можно распознать на снимках [8, 9]. В данной системе таким маркером является инфракрасный светодиод. Преимуществами использования светодиода является возможность использования в условиях отсутствия освещения и полная невидимость для человеческого глаза [8]. Эти особенности делают данный маркер устойчивым к влиянию внешних факторов. Камеры чувствительны к видимому спектру и частично к инфракрасному, для отделения инфракрасного свечения необходимо использовать инфракрасный фильтр, который должен быть установлен на объектив [10].

Определение координат происходит на отдельном вычислительном устройстве, которое способно параллельно выполнять обработку видеопотока с нескольких камер и используя полученные данные выполнять фотограмметрические вычисления. Вычислительное устройство должно содержать, как минимум четыре физических ядра, для параллельной обработки нескольких

устройств. После вычисления координат объекта, они будут переданы на устройство при помощи внешнего радио модуля.

Преимуществом данного подхода является возможность вычисления координат сразу нескольких объектов, это достигается за счет периодического переключения свечения инфракрасного светодиода. Свечение светодиода от разных устройств будет попадать в определенные кадры, что позволит определять координаты независимо. Также не требуется установка дорогостоящего оборудования на борту вычисляемого объекта. На рис. 1 изображена общая схема оптической системы навигации.

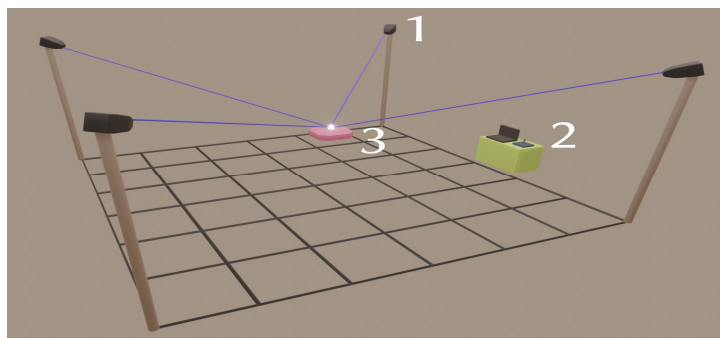


Рис. 1. Схема оптической системы навигации

1 – камера, 2 – вычислительное устройство и радиомодуль,  
3 – объект с установленным инфракрасным светодиодом

Во время обработки видеопотока, возникает проблема избытка информации. Для решения применяется сегментация получаемых изображений, чтобы разделить пиксели на два класса, те которые относятся к инфракрасному свечению и фону [11].

Для решения задачи сегментации, в данном случае достаточно использовать пороговую сегментацию на основе глобального порога. В области свечения светодиода яркость принимает максимальное значение, во всех каналах изображения. Чтобы отделить его от фона достаточно использовать пороговое значение, близкое к максимальному значению яркости, на рис. 2 показан результат сегментации.

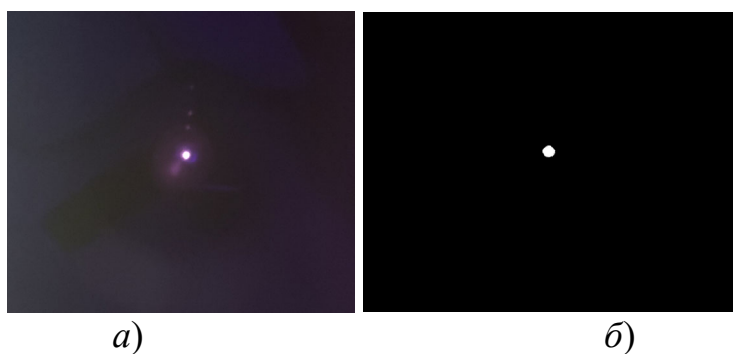


Рис. 2. Результаты сегментации изображения:

а) до сегментации, б) после сегментации

Для вычисления координат фотограмметрическим методом, необходимо знать пространственные координаты точек фотографирования каждой камеры и углы наклона камер, элементы внутреннего ориентирования каждой камеры. Вычисление пространственных координат светодиода можно выполнять по формулам [12, 13]:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_1^S + N x_1^0 \\ Y &= Y_1^S + N y_1^0 \\ Z &= Z_1^S - N f \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $f$  – фокусное расстояние, м;  
 $X_1^S, Y_1^S$  и  $Z_1^S$  – пространственные координаты левого снимка, м;  
 $x_1^0$  и  $y_1^0$  – трансформированные координаты на левом снимке.  
 Масштабный коэффициент  $N$  вычисляется по формуле [6]:

$$N = \frac{B}{p_0}, \quad (2)$$

где  $B$  – базис фотографирования в м, а  $p_0$  – остаточный поперечный параллакс.

В качестве съемочных устройств в работе были использованы веб-камеры Defender C90 и Logitech C120. Данные камеры полностью соответствуют необходимым требованиям, имеют разрешение 640 x 480 пикселей с частотой 30 кадров в секунду и не требуют внешнего источника питания. Объектом для отслеживания на изображениях является инфракрасный светодиод размером 5 мм и длиной волны 940 нм. Имеет небольшой размер и вес, может свободно располагаться на любом отслеживаемом объекте.

Для отделения излучения в видимом диапазоне от инфракрасного применяется инфракрасный фильтр ИКС-5. Он пропускает излучение выше 800 нм [10], что позволит эффективно отделить инфракрасное излучение.

Применяемые веб-камеры не являются метрическими и не могут использоваться для высокоточных измерений. Для устранения систематических ошибок была выполнена калибровка в программном обеспечении Agisoft Metashape, с использованием тест-объекта в виде шахматной доски. На рис. 3 представлены полученные значения калибровки для камеры Defender-C90.

```
<f>831.17614352622252</f>
<cx>-34.325875410894113</cx>
<cy>-35.206798327055438</cy>
<b1>0.53869909867630483</b1>
<b2>-2.0562674427536698</b2>
<k1>0.028603567256755145</k1>
<k2>4.9867384011324196</k2>
<k3>-35.4023303079206</k3>
<k4>69.631049396222906</k4>
<p1>0.0046152180544704333</p1>
<p2>0.005682053992475216</p2>
```

Рис. 3. Результаты калибровки

В программном обеспечении Photomod была произведена фотограмметрическая обработка и получены элементы внешнего ориентирования, рисунок 4.

```

Элементы внешнего ориентирования
-----

Снимок: frame2
центр проекции
      -0.910186      -2.814796      1.903697
матрица поворота
      0.9829210359    0.0069203603    -0.1838976502
      -0.1613748283    0.5127373523    -0.8432428905
      0.0884556496    0.8585176272    0.5050971014
альфа, омега, каппа (°)
      20.0057432863    57.4841620107    -17.4704546243
-----

Снимок: frame4
центр проекции
      1.019600      -2.931913      2.146941
матрица поворота
      0.8761428160    -0.3554056294    0.3256694714
      0.4597238195    0.4128108491    -0.7862831631
      0.1450095715    0.8386143580    0.5250696933
альфа, омега, каппа (°)
      -31.8088638632    51.8395113947    48.0776193700

```

Рис. 4. Элементы внешнего ориентирования

На языке программирования Python с использованием библиотеки OpenCV была написана программа для получения плоских координат светодиода. Программа получает изображения из видеопотока, выполняет мультипроцессорную обработку получаемых изображений, применяет сегментацию и определяет плоские координаты объекта. Для визуализации получаемых плоских координат, они изображаются на графике. Определение плоских координат выполняется с высокой скоростью, до 30 раз в секунду. На рис. 5 показан пример работы программы.

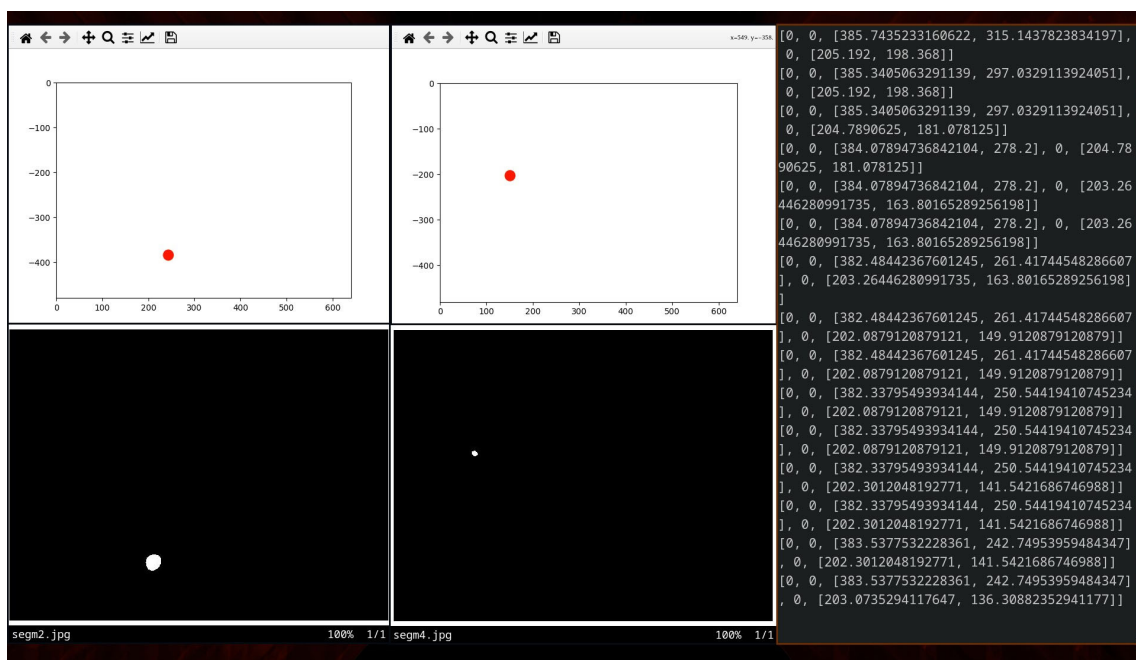


Рис. 5. Пример работы программы

## *Заключение*

В ходе работы были изучены методы навигации внутри помещений, выполнена разработка схемы построения оптической системы навигации, изучен метод фотограмметрической засечки, создан тестовый стенд, получены элементы внешнего и внутреннего ориентирования и разработана программа получения плоских координат объекта с изображений.

Проведенные исследования позволяют выполнить разработку оптической системы навигации. В ходе исследования система была частично разработана и показывает достаточно высокую скорость получения плоских координат. В перспективе следует продолжить разработку оптической системы навигации

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bernhard Hofmann-Wellenhof. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more : учебное пособие // Springer. – Германия, 2008.
2. Nel Samama. Indoor Positioning. Technologies and Performance : учебное пособие // Institut Mines-Telecom. – Франция, 2019. – 348 с. – ISBN 9781119421863.
3. Монгуш А. В. Обзор технологий Indoor-навигации // Интерэкспо Гео–Сибирь. – 2017. – №1. – С. 119–123.
4. Chun Ting Li, Jack C.P. Cheng, Keyu Chen. Top 10 Technologies for Indoor Positioning on Construction Sites // Automation in Construction. – США, 2020. – №118. – С. 514-520.
5. Nel Samama. Indoor Positioning. Technologies and Performance : учебное пособие // Institut Mines-Telecom. – Франция, 2019. – 348 с. – ISBN 9781119421863.
6. Xiaoguang Wan, X. Zhan. The Research of Indoor Navigation System using Pseudolites // Procedia Engineering. – Нидерланды, 2011. – №15. – С. 1446-1450.
7. Brandon Gozick, Kalyan Pathapati Subbu, Ram Dantu, Tomyo Maeshiro. Magnetic Maps for Indoor Navigation // IEEE
8. Chang Li, Kosuke Sato. Indoor Navigation System using ID-Modulated LED Tube Lights // IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. – Япония, 2012. – №7 (5). – С. 514-520.
9. Ranga Rodrigo, Mehrnaz Zouqi, Zhenhe Chen, Jagath Samarabandu. Robust and Efficient Feature Tracking for Indoor Navigation // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Канада, 2009. – №39 (3). – С. 658-671.
10. ГОСТ 9411–91, Стекло оптическое цветное: технические условия // СССР : Комитет Стандартизации и Метрологии, 1992. – 48 с. – Текст : непосредственный.
11. Арбузов, С. А. Методы обработки цифровых изображений : учебное пособие // Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 100 с. – УДК 528.8: 528.7:004.
12. Лобанов, А. Н. Фотограмметрия : учебное пособие // Москва : Недра, 1984. – 552 с.
13. Назаров, А. С. Фотограмметрия : учебное пособие для студентов вузов // Тетра Системс, Минск, 2006. – 368 с. – ISBN: 9854704025; 9789854704029.

© В. Е. Неудахин, 2024