

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 681.783.25

doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-5

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ГИБРИДНОГО ДАТЧИКА В ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НАВИГАЦИИ

М. М. Морозов¹, А. А. Трофимов², И. Н. Урваев³, К. Д. Целикин⁴, О. Н. Бодин⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

⁵ Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹morozov1295@mail.ru, ²alex.t1978@mail.ru, ³iurvaev@mail.ru, ⁴kdts777@yandex.ru, ⁵bodin_o@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Системы навигации реализуются с помощью спутникового позиционирования, однако спутниковое позиционирование не может передавать информацию об окружающих объектах. *Материалы и методы.* Для определения местоположения объектов, располагающихся вокруг транспортного средства, необходимо использовать персональные системы позиционирования. Предлагается реализация таких систем с помощью гибридного датчика расстояния, представляющего собой интеграцию монокулярной видеокамеры и 2D-лазерного дальномера, что позволяет оценить окружающую транспортное средство обстановку. *Результаты и выводы.* Отличительной особенностью разработки гибридного датчика расстояния является применение калибровочного стенда, существенно повышающего тактико-технические характеристики гибридного датчика.

Ключевые слова: гибридный датчик расстояния, система навигации, калибровочный стенд, калибровка лазера и видеокамеры, имитационное моделирование

Для цитирования: Морозов М. М., Трофимов А. А., Урваев И. Н., Целикин К. Д., Бодин О. Н. Особенности разработки гибридного датчика в инерциальной системе навигации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 40–50. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-5

FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF A HYBRID SENSOR IN AN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

M.M. Morozov¹, A.A. Trofimov², I.N. Urvaev³, K.D. Celikin⁴, O.N. Bodin⁵

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

⁵ Penza State Technological University, Penza, Russia

¹morozov1295@mail.ru, ²alex.t1978@mail.ru, ³iurvaev@mail.ru, ⁴kdts777@yandex.ru, ⁵bodin_o@inbox.ru

Abstract. *Background.* Navigation systems are implemented using satellite positioning, but satellite positioning cannot transmit information about surrounding objects. *Materials and methods.* To determine the location of objects located around the vehicle, it is necessary to use personal positioning systems. It is proposed to implement such systems using

a hybrid distance sensor, which is an integration of a monocular video camera and a 2D laser rangefinder, which allows you to assess the environment of the vehicle. *Results and conclusions.* A distinctive feature of the development of the hybrid distance sensor is the use of a calibration stand, which significantly increases the tactical and technical characteristics of the hybrid sensor.

Keywords: hybrid distance sensor, navigation system, calibration stand, laser and video camera calibration, simulation modeling

For citation: Morozov M.M., Trofimov A.A., Urvaev I.N., Celikin K.D., Bodin O.N. Features of the development of a hybrid sensor in an inertial navigation system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):40–50. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-5

Введение

В настоящее время беспилотные транспортные средства (БТС) применяют спутниковые системы навигации, которые обеспечивают определение абсолютного положения и помогают инерциальной навигационной системе [1]. Однако такого типа навигационной системы недостаточно, поскольку БТС должно иметь возможность определять свое положение в зонах, где нет доступа спутниковой навигации. Например, городские кварталы, подземные туннели и паркинги, пересеченная местность (овраги, горы, реки и т.д.) создают помехи, которые являются причинами низкой точности позиционирования систем спутниковой навигации. Поэтому актуальна задача разработки других типов датчиков, дополнительно предоставляющих точную информацию об окружающих БТС объектах. Оснащение БТС дополнительными датчиками, способными передавать информацию об окружающих объектах, позволяет осуществлять автономные передвижения в пространстве без участия человека [1]. Данные типы датчиков не предоставляют информацию об абсолютном местоположении БТС, но повышают надежность и точность инерциальной навигационной системы за счет определения расстояния до окружающих объектов. Широко используемый метод визуальной одометрии предлагает подходы к решению этой задачи. Например, можно использовать две видеокамеры [2]. Они позволяют определить размер объекта с помощью метода триангуляции [3]. Другим решением являются лазерные дальномеры, которые предоставляют точную информацию о расстоянии без триангуляции [4]. Лазерные дальномеры рассчитаны, в основном, на структурированную среду, например стены в помещении. Авторы предлагают объединить оба известных метода позиционирования для получения точной информации об окружающих объектах БТС на открытой местности. При таком синергетическом объединении методов позиционирования необходима точная информация о взаимоположении составных элементов гибридного датчика – камеры и лазера, что в свою очередь требует внешнюю калибровку.

Целью данной работы является разработки гибридного датчика расстояния в структуре бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), установленного на беспилотном транспортном средстве.

Структура бесплатформенной инерциальной навигационной системы

В данной работе рассматривается гибридный датчик расстояния для навигационного обеспечения БТС. Навигационное обеспечение БТС может быть обеспечено с помощью бесплатформенной инерциальной навигационной системы [11]. Однако продолжительное использование БИНС сопровождается увеличением значения погрешностей при определении координат. Поэтому для коррекции в процессе эксплуатации параметров БИНС необходимо, по мнению авторов, применять гибридный датчик расстояния на основе лазера и видеокамеры. Структура БИНС с коррекцией параметров на основе гибридного датчика расстояния приведена на рис. 1.

Кратко опишем работу предлагаемой структуры БИНС. Данные об угловой скорости и ориентации поступают с трехосевого гироскопа, а данные о линейном ускорении поступают с трехосевого акселерометра, после чего они обрабатываются в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Последовательность обработки данных в ПЛИС приведена на рис. 2.

Для правильного функционирования БИНС необходимо задать начальные условия. Flash-память предназначена для загрузки файла конфигурации ПЛИС. Гибридный датчик расстояния на основе лазера и видеокамеры предназначен для коррекции данных, поступающих с гироскопа и акселерометра. В результате обработки данных, производимых в ПЛИС, на выходе БИНС формируются данные о положении беспилотного транспортного средства.

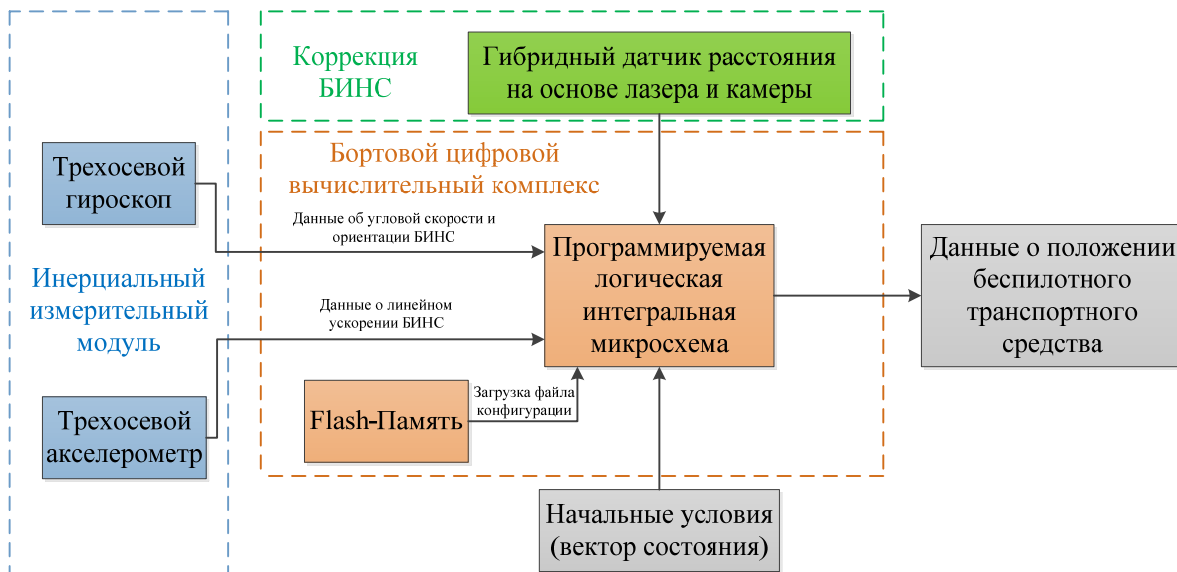


Рис. 1. Структура беспилотной инерциальной навигационной системы

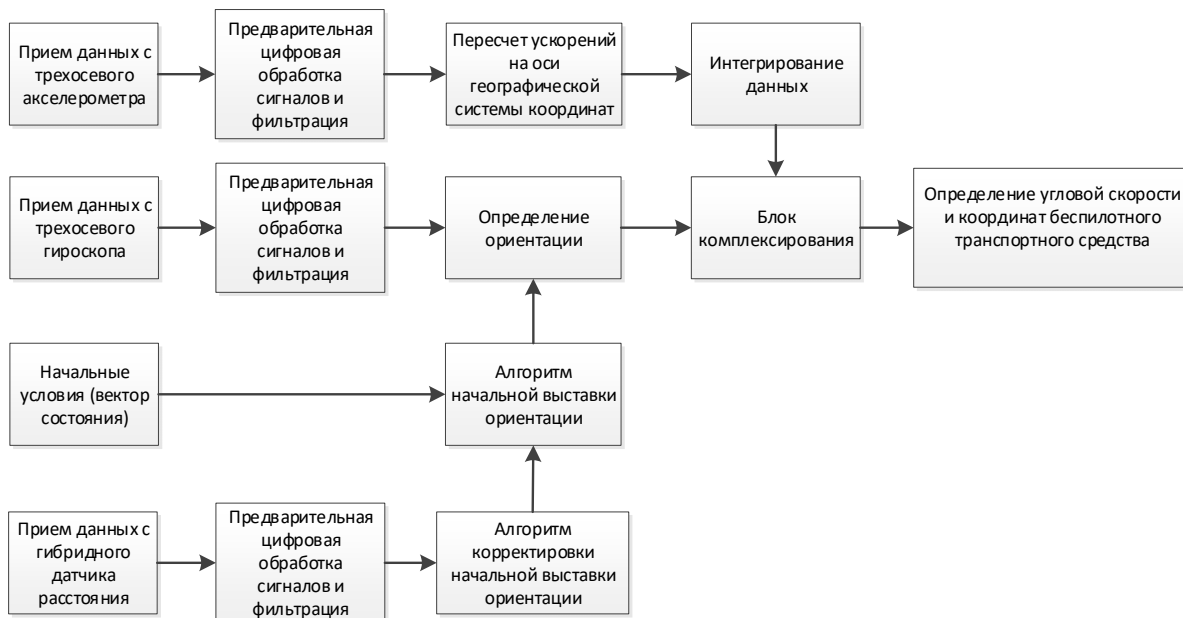


Рис. 2. Последовательность обработки данных в ПЛИС

Метод калибровки гибридного датчика расстояния

В данном разделе статьи подробно рассмотрим метод калибровки гибридного датчика расстояния. Пространственная система координат гибридного датчика расстояния задается следующим образом: начало координат находится в центре корпуса датчика; ось X направлена вперед; ось Y направлена вправо; ось Z направлена вниз.

Для объединения в единое целое оба взаимодополняющих устройства, а именно монокулярную видеокамеру и лазерный 2D-дальномер, важно иметь их «жесткую привязку» друг к другу. Для этого точка лазерного луча на объекте должна быть присвоена пикселям изображения видеокамеры.

Калибровка видеокамеры и лазерного дальномера осуществляется с помощью калибровочного стенда, 3D-модель которого и ее схематическое изображение приведены на рис. 3, а и б соответственно.

Калибровочный стенд состоит из двух параллельных плоскостей (представлены на рис. 3 серым и оранжевым цветами). Каждый цвет на рис. 3 показывает свою плоскость лазерного сканирования с собственным углом наклона в пространстве. Оранжевая плоскость расположена на заднем плане и представляет собой прямоугольный треугольник, а серая плоскость

располагается на переднем плане (рис. 3,б). На серой плоскости по углам закреплены калибровочные кольца.

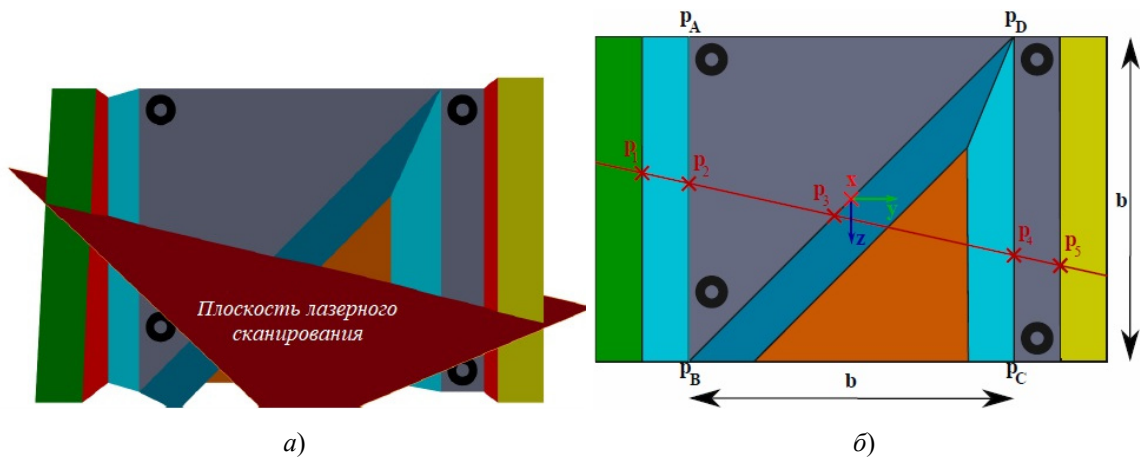


Рис. 3. 3D-модель калибровочного стенда (а) и ее схематическое изображение (б)

Калибровка видеокамеры и лазерного дальномера осуществляется следующим образом: с помощью видеокамеры обнаруживают калибровочные круглые кольца. Затем сканируют калибровочный объект лазером, в результате плоскость лазерного сканирования пересекается с калибровочным объектом по прямой линии от точки p_1 до точки p_5 (рис. 3,б). При этом возникают разрывы глубины, поскольку при наведении лазера на рифленые поверхности луч рассеивается. В частности, точки от p_1 до p_5 , расположенные на рис. 3,б, не распознаны видеокамерой.

Для устранения возникших разрывов глубины используются калибровочные круглые кольца, которые позволяют восстановить точки на изображении.

Можно получить соответствия между лазерными точками на объекте и точками, полученными на изображении видеокамеры.

Положительный результат калибровки достигается, когда поле зрения камеры включает все четыре круговых кольца, а плоскость лазерного сканирования включает как минимум точки от p_2 до p_4 (рис. 3,б).

В качестве метода калибровки было выбрано адаптивное извлечение линий [5]. При наличии шума этот метод показывает надежную работу в отношении проблемы ложного разрыва истинных сегментов линий [6]. Лазерные точки на калибровочном объекте принадлежат сегментам линий, конечные точки которых включают точки от p_2 до p_4 . Следовательно, соответствующие точки, полученные с помощью видеокамеры, определяются со всеми лазерными точками, которые соответствуют отдельным сегментам линии на калибровочном стенде.

После обнаружения точек p_2 – p_4 лазера на стенде необходимо восстановить данные точки на изображении, которое получено с помощью видеокамеры. Для этого сначала точки описываются в координатах объекта путем простых геометрических вычислений. Затем точки определяются в координатах изображения с помощью калибровочных круглых колец. Точку геометрического расчета p_3 можно вычислить по теореме о пересечении [4]. Точка пересечения p_3 обусловлена линиями (p_B, p_D) и (p_2, p_4) , проходящими через точки p_B, p_D и точки p_2, p_4 соответственно. Расстояния p_{23}, p_{34} задаются выделенными лазерными характерными точками и определяются по формуле

$$p_{ij} := p_i^l - p_j^l = p_i^c - p_j^c. \quad (1)$$

Длина диагонали между точками p_B и p_D равна $\sqrt{b^2 + b^2} = \sqrt{2}b$. Таким образом, отмеченное расстояние от точки p_B до точки p_3 на рис. 3,б можно рассчитать по формуле

$$p_{B3} = \frac{p_{23}\sqrt{2}b}{p_{23} + p_{34}}. \quad (2)$$

На рис. 4 приведены соответствующие сегменты для определения точек в координатах объекта калибровки.

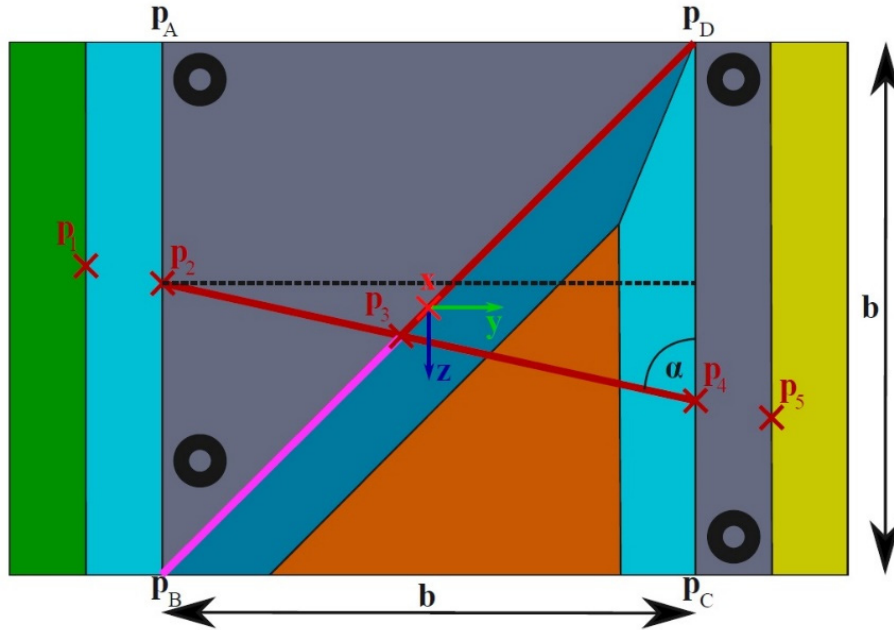


Рис. 4. Соответствующие сегменты для определения точек в координатах объекта калибровки

Из уравнения (2) определяются координаты точки p_3 в координатах калибровочного стенда следующим образом:

$$p_3^o = \begin{pmatrix} p_{3,x}^o \\ p_{3,y}^o \\ p_{3,z}^o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{p_{B3}}{\sqrt{2}} - \frac{b}{2} \\ -\frac{p_{B3}}{\sqrt{2}} + \frac{b}{2} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Вычисление p_2 и p_4 в координатах объекта производится с помощью теоремы косинусов [7]:

$$p_{B2} = \sqrt{p_{B3}^2 + p_{23}^2 - 2p_{B3}p_{23}\cos\left(\pi - \frac{\pi}{4} - \alpha\right)};$$

$$p_{B4} = \sqrt{\left(\sqrt{2}b - p_{B3}\right)^2 + p_{34}^2 - 2\left(\sqrt{2}b - p_{B3}\right)p_{34}\cos\left(\pi - \frac{\pi}{4} - \alpha\right)}. \quad (4)$$

Затем определяется угол α , показанный на рис. 4:

$$\alpha = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{b}{p_{24}}\right), \\ \pi - \arcsin\left(\frac{b}{p_{24}}\right). \end{cases} \quad (5)$$

По формуле (4) определяются координаты точек p_2^o :

$$p_2^o = \begin{pmatrix} p_{2,x}^o \\ p_{2,y}^o \\ p_{2,z}^o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{b}{2} \\ \frac{b}{2} - p_{B2} \end{pmatrix}; \quad (6)$$

$$p_2^o = \begin{pmatrix} p_{4,x}^o \\ p_{4,y}^o \\ p_{4,z}^o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ b - \frac{b}{2} \\ -\left(b - p_{D4} - \frac{b}{2}\right) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

После определения точек p_i^o в координатах стенда они проецируются на изображение, полученное с помощью видеокамеры. Для проецирования произвольной точки серой плоскости калибровки ($p_{i,x}^o = 0$) на плоскость изображения накладывается матрица преобразования H . Эта матрица отображает данные точки на координатах изображения следующим образом:

$$H \begin{pmatrix} p_{i,y}^o \\ p_{i,z}^o \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Для наложения матрицы необходимо не менее четырех точек на плоскости. Это возможно с помощью круглых колец, поскольку положения их центров известны в координатах объекта и находятся в координатах изображения, полученного с помощью видеокамеры. Для этого на бинарном изображении обнаруживают контуры объектов и выделяются эллиптические формы. Полученные точки можно представить как

$$f_i^c = \frac{K^{-1}(u_i \quad v_i \quad 1)^T}{K^{-1}(u_i \quad v_i \quad 1)} = \frac{p_i^c}{p_i^c}, \quad (9)$$

где K – внутренняя матрица камеры; u_i и v_i – двумерные точки, записанные в виде единичных векторов.

Благодаря тому, что внешний и внутренний контуры кольца имеют одинаковые соотношения расстояний между большой и малой осями, повышается точность обнаружения кругового маркера.

Результаты и обсуждение

Авторами проведено моделирование предложенного метода калибровки. Сравнение двух показаний дальности лазера, полученных с помощью исходного [4] и модифицированного калибровочного стенда, показано на рис. 5.

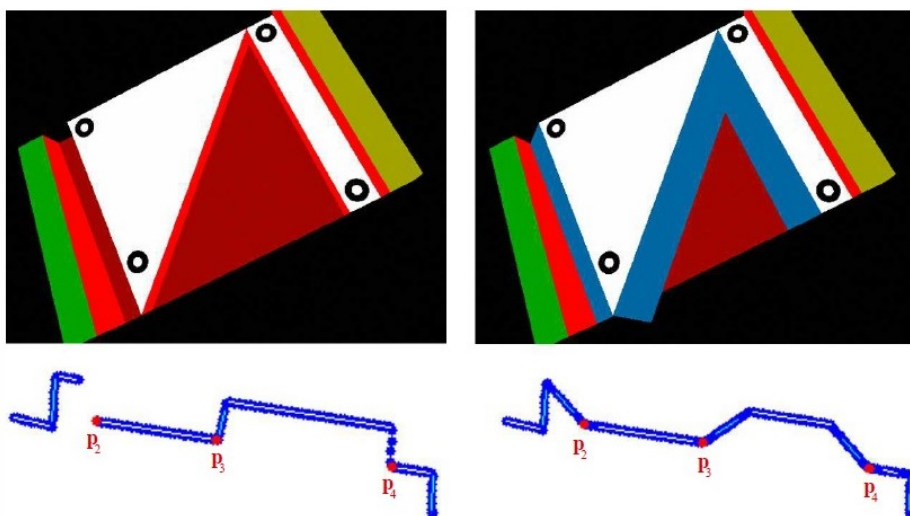


Рис. 5. Сравнение показаний лазерной глубины между оригиналом (слева) и модифицированным калибровочным стендом (справа)

Из рис. 5 видно, что все соответствующие сегменты линий видны на изображении, полученном видеокамерой с разных точек обзора, что позволяет добиться точного определения положения точки лазера на объекте.

Разработанная 3D-модель объекта калибровки визуализирована с помощью программной среды MatLab Simulink. В результате моделирование для видеокамеры выделены области калибровки площадью $0,01 \text{ м}^2$, в которых видеокамера определяла точки, излучаемые лазером. Таким образом, получены данные о положении гибридного датчика расстояния относительно стенда. Визуальное представление сгенерированных точек лазера на стенде представлено на рис. 6.

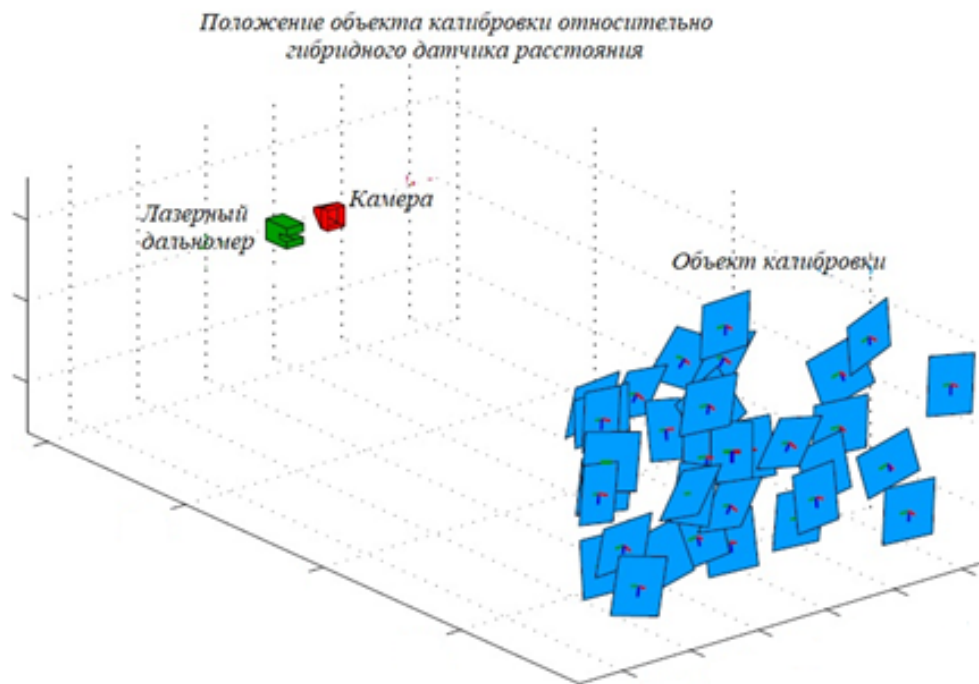


Рис. 6. Визуальное представление сгенерированных положений точек лазерного луча

Моделирование каждой позиции лазерной точки на стенде производилось 100 раз, после чего распознанные точки лазера, которые выходили за область калибровки, отсеивались, вследствие чего область определения видеокамерой лазерной точки уменьшалась. Таким образом, получена диаграмма, показывающая отношение выявленных точек к отсеянным. Данная диаграмма представлена на рис. 7.



Рис. 7. Диаграмма выявленных точек лазера

Крестами обозначены отсеянные лазерные точки, которые не попали в калибровочную область. Горизонтальные линии представляют процентное соотношение выявленных точек лазера, которые попали в калибровочную область к точкам, которые были отсеяны; данное отношение описывается следующей формулой:

$$\delta_t = \frac{\|\Delta t_{lc}^l\|}{\|\bar{t}_{lc}^l\|} = \frac{\|\hat{t}_{lc}^l - \bar{t}_{lc}^l\|}{\|\bar{t}_{lc}^l\|}. \quad (10)$$

Очевидно, что область калибровки уменьшается при увеличении калибровочных позиций лазерных точек на калибровочном стенде. Используя все калибровочные позиции лазерных точек на калибровочном стенде, можно достичь средней ошибки смещения лазерной точки, выявленной камерой, относительно их положения на стенде 2,49 %.

Для сравнения, в исходном методе и с немодифицированным стендом (рис. 5 слева), предложенным Хоангом и другими в работе [4], относительная ошибка смещения лазерной точки из калибровочной области составляет 4,28 %.

В ходе калибровки все проекции лазерных точек выявляются видеокамерой. Конечные точки лазерных линий выравниваются по краям объектов, в этом случае видеокамера обнаруживает также длины волн ближнего инфракрасного диапазона. В табл. 1 показано, что с помощью уменьшения Δp_{23} можно снизить погрешность.

Таблица 1

Результаты сравнения ошибки расстояния Δp_{23} и результирующей ошибки Δp_{B3}

Ошибка объекта калибровки	Δp_{23}	Δp_{B3}
Ошибка калибровочного стенда [5], м	-0,062	-0,086
Ошибка модифицированного калибровочного стенда, м	0,024	0,035

Таким образом, с помощью предложенного метода калибровки удалось повысить тактико-технические характеристики гибридного датчика расстояния, что, в свою очередь, позволяет с большей достоверностью корректировать показания БИНС.

Заключение

В статье предложен гибридный датчик расстояния, встроенный в БИНС и реализованный на основе видеокамеры и 2D-лазера, вращающегося вокруг своей оси. В результате модификации калибровочного стенда разработан метод калибровки предложенного гибридного датчика расстояния. Применение этого метода калибровки позволяет повысить точностные показатели датчика и снижает среднюю ошибку смещения до 2,49 %. Гибридный датчик расстояния может быть использован для ориентации в неструктурированных областях открытой местности, где спутниковая система навигации недоступна или не применима. Накопив данные лазерного сканирования, можно создать объемную модель окружающего пространства. В этом случае необходимо использовать второй гибридный датчик расстояния, установленный вертикально с вращающейся площадкой.

Список литературы

1. Чикрин Д. Е., Савинков П. А., Кокунин П. А., Шагиев Р. И. Разработка высокоточной спутниковой локально-инерциальной системы навигации для беспилотного управления транспортными средствами // Известия вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 12. С. 1094–1102.
2. Schmid K., Lutz P., Tomi'c T. [et al.]. Autonomous vision-based micro air vehicle for indoor and outdoor navigation // J. Field Robot. 2014. Vol. 31. P. 537–570.
3. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry [Tutorial] // IEEE Robot. Autom. Mag. 2011. № 18. P. 80–92.
4. Hoang V. D., Hernández D. C., Jo K. H. Simple and efficient method for calibration of a camera and 2D laser rangefinder // Intelligent Information and Database Systems. Springer : Cham, Switzerland, 2014. P. 561–570.
5. Yaghibi M., Jadhaliha M., Zolghadr J., Norouzi M. Adaptive line extraction algorithm for SLAM application // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2008) (Bangkok, Thailand, 22–25 February 2009). Bangkok, 2009. P. 1850–1855.
6. Crocoll P. Modellbasierte Quadrocopter-Navigation mit Laserstützung : Ph.D. Thesis, Karlsruhe Institute of Technology (KIT). Karlsruhe, Germany, 2015.
7. Кузовков Н. Т., Салычев О. С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М. : Машиностроение, 1982.

8. Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Патрикеев А. П. [и др.]. Объектно-ориентированная технология интеграции навигационных измерителей и ее реализация в бесплатформенной инерциальной навигационной системе БИНС-1000 на волоконно-оптических гироскопах // Доклады XVI Санкт-Петербургской Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 25–27 мая 2009 г.). СПб., 2009. С. 21–30.
9. Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Прилуцкий В. Е. [и др.]. Исследование работы БИНС в условиях высоких широт с учетом погрешностей реальных датчиков // Доклады XVI Санкт-Петербургской Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 25–27 мая 2009 г.). СПб., 2009. С. 57–60.
10. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2009.
11. Мелешко В. В., Нестеренко О. И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Кировград : Полимед-Сервис, 2011.
12. Соколов С. В., Погорелов В. А. Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М. : Физматлит, 2009.
13. Халютин С. П., Жмуров Б. В. Алгоритм определения состава и параметров первичных источников электроэнергии БПЛА // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2010. Т. 1. С. 425–429.
14. Чернодаров А. В., Патрикеев А. П. Разработка программно-математического обеспечения инерциально-спутниковой навигационной системы на базе трехкомпонентного лазерного моноблока // XX Санкт-Петербургская Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб. : Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"», 2013. С. 173–176.
15. Евдокимов А. О., Зуев А. В., Кислицын А. А. Комплексование алгоритмов обработки радионавигационных данных и анализа изображений для корректировки маршрута движения наземного транспортного средства // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 2. С. 61–72.

References

1. Chikrin D.E., Savinkov P.A., Kokunin P.A., Shagiev R.I. Development of a high-precision satellite locally inertial navigation system for unmanned vehicle control. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = News of universities. Instrumentation*. 2020;63(12):1094–1102. (In Russ.)
2. Schmid K., Lutz P., Tomić T. et al. Autonomous vision-based micro air vehicle for indoor and outdoor navigation. *J. Field Robot.* 2014;31:537–570.
3. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry [Tutorial]. *IEEE Robot. Autom. Mag.* 2011;(18):80–92.
4. Hoang V.D., Hernández D.C., Jo K.H. Simple and efficient method for calibration of a camera and 2D laser rangefinder. *Intelligent Information and Database Systems*. Springer: Cham, Switzerland, 2014:561–570.
5. Yaghobi M., Jadaliha M., Zolghadr J., Norouzi M. Adaptive line extraction algorithm for SLAM application. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2008) (Bangkok, Thailand, 22–25 February 2009)*. Bangkok, 2009:1850–1855.
6. Crocoll P. *Modellbasierte Quadropter-Navigation mit Laserstützung*: Ph.D. Thesis, Karlsruhe Institute of Technology (KIT). Karlsruhe, Germany, 2015.
7. Kuzovkov N.T., Salychev O.S. *Inertsial'naya navigatsiya i optimal'naya fil'tratsiya = Inertial navigation and optimal filtration*. Moscow: Mashinostroenie, 1982. (In Russ.)
8. Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Patrikeev A.P. i dr. Object-oriented technology of integration of navigation meters and its implementation in the free-form inertial navigation system BINS-1000 on fiber-optic gyroscopes. *Doklady XVI Sankt-Peterburgskoy Mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam (g. Sankt-Peterburg, 25–27 maya 2009 g.) = Reports of the XVI St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (St. Petersburg, May 25-27, 2009)*. Saint Petersburg, 2009:21–30. (In Russ.)
9. Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Prilutskiy V.E. et al. Investigation of the operation of BINS in high latitude conditions, taking into account the errors of real sensors. *Doklady XVI Sankt-Peterburgskoy Mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam (g. Sankt-Peterburg, 25–27 maya 2009 g.) = Reports of the XVI St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (St. Petersburg, May 25-27, 2009)*. Saint Petersburg, 2009:57–60. (In Russ.)
10. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. *Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh sistem = Fundamentals of building free-form inertial navigation systems*. Saint Petersburg: TsNII «Elektro-pribor», 2009. (In Russ.)
11. Meleshko V.V., Nesterenko O.I. *Besplatformennye inertsial'nye navigatsionnye sistemy = Free-form inertial navigation systems*. Kirovograd: Polimed-Servis, 2011. (In Russ.)
12. Sokolov S.V., Pogorelov V.A. *Osnovy sinteza mnogostrukturnykh besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh sistem = Fundamentals of synthesis of multistructural free-form inertial navigation systems*. Moscow: Fizmatlit, 2009. (In Russ.)

13. Khalyutin S.P., Zhmurov B.V. Algorithm for determining the composition and parameters of primary UAV power sources. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2010;1:425–429. (In Russ.)
14. Chernodarov A.V., Patrikeev A.P. Development of software and mathematical support for an inertial satellite navigation system based on a three-component laser monoblock. *XX Sankt-Peterburgskaya Mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam = XX St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. Saint Petersburg: Kontsern «TsNII "Elektropribor"», 2013:173–176. (In Russ.)
15. Evdokimov A.O., Zuev A.V., Kislitsyn A.A. Integration of algorithms for processing radio navigation data and image analysis for correcting the route of a ground vehicle. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy = Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Radio engineering and infocommunication systems*. 2013;(2):61–72. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Михайлович Морозов

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mmorozov1295@mail.ru

Mikhail M. Morozov

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Alexei A. Trofimov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Илья Николаевич Урваев

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iurvaev@mail.ru

Ilya N. Urvaev

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кирилл Дмитриевич Целикин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kdts777@yandex.ru

Kirill D. Celikin

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Олег Николаевич Бодин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
профессор кафедры технического
управления качеством,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: bodin_o@inbox.ru

Oleg N. Bodin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of information-measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
professor of the sub-department
of technical quality management,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 11.03.2024

Поступила после рецензирования/Revised 08.04.2024

Принята к публикации/Accepted 13.05.2024