

16. Kocherov Y.N., Samoilenko D.V., Tikhonov E.E. Modeling of Parallel Data Encryption Algorithms, 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019, pp. 1-5.
17. Chervyakov Nikolay Ivanovich i dr. Neyronnaya set' s porogovoy (k, t) strukturoy dlya preobrazovaniya ostatochnogo koda v dvoichnyy pozitsionnyy kod [Neural network with threshold (k, t) structure for converting residual code into binary positional code]: pat. 2380751 USA, 2008.
18. Chervyakov N. i dr. Primenenie iskusstvennykh neyronnykh setey i sistemy ostatochnykh klassov v kriptografii [Application of artificial neural networks and systems of residual classes in cryptography]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 280 p.
19. Kocherov Y.N., Samoilenko D.V., Tikhonov E.E. Safe Storage of Biometric Data, 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020, pp. 1-5.
20. Kocherov Y.N., Samoilenko D.V., Koldaev A.I. Development of an Antinoise Method of Data Sharing Based on the Application of a Two-Step-Up System of Residual Classes, 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018, pp. 1-5.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.А. Евдокимов.

Кочеров Юрий Николаевич – Невинномысский технологический институт; e-mail: kocherov_yra@mail.ru; г. Невинномысск, Россия; тел.: 88655471776; к.т.н.; доцент базовой кафедры регионального индустриального парка.

Самойленко Дмитрий Владимирович – e-mail: 151082@mail.ru; ст. преподаватель кафедры информационных систем, электропривода и автоматики.

Kocherov Yuri Nikolaevich – Nevinnomyssk Technological Institute; e-mail: kocherov_yra@mail.ru; Nevinnomyssk, Russia; phone: +78655471776; cand. of eng. sc.; associate professor of the base department of the Regional Industrial Park.

Samoilenko Dmitry Vladimirovich – e-mail: 151082@mail.ru; art. lecturer at the department of information systems, electric drive and automation.

УДК 681.3 004.2 629.05

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-235-247

С.М. Соколов, Н.Д. Беклемишев, А.А. Богуславский

ОРГАНИЗАЦИЯ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОДВИЖНЫХ СРЕДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗРИТЕЛЬНЫХ ОРИЕНТИРОВ

Рассматривается решение навигационной задачи с помощью системы технического зрения, определяющей положение подвижного средства относительно ориентиров, указанных в окружающем пространстве. Навигация по ориентирам является наиболее объективным критерием расположения подвижного средства в окружающем пространстве. Способ измерения параметров соотношений, характеризующих расположение подвижного средства относительно ориентиров, является почти независимым от других навигационных измерений. Ввод данных для корректировки координат и других параметров движения может производиться не непрерывно, а в некоторые дискретные, и, в общем случае, довольно редкие моменты времени. Рассматривается общая схема решения: от постановки, до получения навигационной информации. Кратко описывается комплексирование полученных данных с данными от других навигационных средств, анализируются ключевые проблемы и параметры СТЗ, влияющие на точность получаемых результатов. Ключевым моментом в рассматриваемом способе является решение системы уравнений, описывающих положение робототехнических комплексов относительно указанных ориентиров. Эта система решается модифицированным методом Гаусса-Ньютона для нелинейной переоп-

ределенной системы уравнений. Заменой левой части каждого уравнения ее дифференциалом в точке начального приближения осуществляется линеаризация. Значения неизвестных в переопределенной системе линейных уравнений, при которых сумма квадратов невязок в уравнениях является минимальной, могут быть получены либо методом SVD (сингулярного разложения), либо с помощью симметризации системы. При этом SVD более устойчив к накоплению вычислительной погрешности, но несколько более требователен к ресурсам компьютера и сложнее в реализации. Мы использовали решение методом симметризации как более простое. Полученная система решается методом квадратного корня (Холецкого). Для обнаружения ориентиров в составе СТЗ используются два вида модулей СТЗ – панорамный, на основе камеры с объективом типа «рыбий глаз» и стерео. Предложенный способ позволяет решать задачу уточнения параметров движения по отдельным, разреженным измерениям собственного положения и скорости относительно ориентиров в окружающем пространстве. Независимо и в комплексе с другими средствами навигации описанный подход обеспечивает высокоточное определение навигационных параметров в различных условиях движения. Описываются результаты натурных экспериментов с макетом предложенной системы при движении в различных условиях. Обсуждаются пути совершенствования и развития рассмотренного подхода.

Системы технического зрения; беспилотные подвижные средства; навигация; ориентиров; каркас программного обеспечения; метод Гаусса-Ньютона.

S.M. Sokolov, N.D. Beklemishev, A.A. Boguslavsky

ORGANIZATION OF GOAL-DIRECTED MOVEMENTS OF VEHICLES USING VISUAL LANDMARKS

The report considers the solution of the navigation problem with the help of a technical vision system that determines the position of the mobile vehicle relative to the landmarks indicated in the surrounding space. Navigation by landmarks is the most objective criterion for the location of a mobile vehicle in the surrounding space. The method of measuring the parameters of the ratios that characterize the location of the mobile vehicle relative to the landmarks is almost independent of other navigation measurements. Data input for correcting coordinates and other motion parameters can be performed not continuously, but at some discrete, and, in general, quite rare moments of time. The general scheme of the solution is considered: from setting up, to receiving navigation information. The integration of the obtained data with data from other navigation tools is briefly described, and the key problems and parameters of the VS that affect the accuracy of the obtained results are analyzed. The key point in this method is the solution of a system of equations describing the position of robotic complexes relative to the specified landmarks. This system is solved by a modified Gauss-Newton method for a nonlinear redefined system of equations. By replacing the left side of each equation with its differential at the point of initial approximation, linearization is performed. The values of the unknowns in the redefined system of linear equations for which the sum of the squared residuals in the equations is minimal can be obtained either by the SVD (singular value decomposition) method or by using the system's symmetrization. At the same time, SVD is more resistant to the accumulation of computational error, but it is somewhat more demanding on computer resources and more difficult to implement. We used the symmetrization solution as a simpler one. The resulting system is solved by the square root (Cholesky) method. To detect landmarks in the VS, two types of VS modules are used – panoramic, based on a camera with a fish-eye lens, and stereo. The proposed method allows us to solve the problem of clarifying the parameters of motion by separate, sparse measurements of the proper position and speed relative to landmarks in the surrounding space. Independently and in combination with other navigation tools, the described approach provides high-precision determination of navigation parameters in various driving conditions. The results of field experiments with the model of the proposed system in motion under various conditions are described. The ways of improvement and development of the considered approach are discussed.

Vision systems; unmanned mobile means; navigation; landmarks; software framework; Gauss-Newton method.

Введение. Одной из тенденций в развитии современной подвижной робототехники является переход от телеуправления к автономным беспилотным средствам. На этом пути обеспечение супервизорного режима управления целенаправленными перемещениями с минимальным участием человека является текущей задачей. Эту задачу призваны решать подвижные робототехнические комплексы (РТК) с повышенной степенью автономности (ПСА). За человеком остаётся целеполагание – указание конечной цели перемещений, помощь бортовой системе управления (БСУ) в сложных ситуациях и общий контроль за выполнением миссии подвижного средства. Известны примеры такого режима работы в специальных средах (движение самосвалов в карьерах, поездов в тоннелях и т.п.) [1–5]. Ещё одной тенденцией подвижной робототехники является всё более активное выдвигание на основную роль среди средств информационного обеспечения робототехнических комплексов систем технического зрения (СТЗ). Видеокамеры различных диапазонов, радиолокационные системы в совокупности с высокопроизводительными вычислителями создают благоприятную основу для создания бортовых систем технического зрения. СТЗ представляют наиболее полную и достоверную информацию для идентификации и определения относительного расположения объектов окружающего пространства и подвижного средства. Широким фронтом ведутся работы по разработке эффективного алгоритмического обеспечения и его реализации на бортовых программно-аппаратных платформах [6–9].

Для наземных и воздушных средств наиболее полную систему информационного обеспечения решения навигационной задачи образует так называемый «навигационный крест», включающий: глобальную спутниковую навигационную систему; традиционную навигационную систему, состоящую из инерциальной навигационной системы, системы счисления пути и корректировки по ориентирам; интерпретирующую (или качественную) навигацию и оператора. Комплексное использование всех составляющих этого креста обеспечивает решение навигационной задачи в большинстве практических случаев, но требует разнообразной инфраструктурной и сенсорной поддержки. В тех случаях, когда инфраструктура области перемещений заранее известна и неизменна в процессе движения и доступны данные глобальной спутниковой навигационной системы, организация целенаправленных перемещений РТК с ПСА может быть сведена к подаче звуковых команд на естественном языке или указанию GPS координат места назначения. Существенно сложнее ставить задачи целенаправленных перемещений в изменчивой, новой обстановке, без доступа к данным ГСНС или в обстановке с большим количеством препятствий и необходимостью высокоточного маневрирования. Примерами таких условий являются движение в естественных условиях вне урбанистической среды, движение в аварийных условиях, развалов и т.п.

Мы сосредотачиваем свои усилия на формировании эффективной (по соотношению цена/качество) унифицированной модульной программно-аппаратной архитектуре СТЗ для решения задач целенаправленных перемещений подвижных средств с повышенной степенью автономности и полностью автономных в сложных условиях функционирования, когда нет возможности использовать все многообразие навигационных средств одновременно. В статье описываются исследования, в которых делается акцент на использовании СТЗ в части определения положения подвижного средства относительно ориентиров в окружающем пространстве. Использование СТЗ для других целей (оптическая одометрия, контроль геометрической проходимости, определение положения подвижного средства в полосе/колее движения и ряд других) выходит за рамки данной статьи. На текущем этапе исследований выбор ориентиров оставляем за оператором, осуществляющим супервизорное управление. СТЗ обеспечивает слежение за указанными ориенти-

рами и решение навигационной задачи. Построение карты местности и определение своего положения на ней (так называемый метод SLAM [10]) выполняется на основе концепции интерпретирующей навигации (ИН) [11].

В описании организации целенаправленных перемещений подвижных средств с использованием зрительных ориентиров выделяем такие составляющие. Навигация по зрительным ориентирам: формулировка, постановка задачи. Решение навигационной задачи. Объединение/комплексирование с другими способами навигации. Экспериментальные исследования.

Навигация по зрительным данным: формулировка, постановка задачи.

Одним из преимуществ СТЗ является возможность на основе зрительных данных параллельно решать различные задачи информационного обеспечения систем управления подвижными РТК, оперативно изменять обработку данных в зависимости от текущей обстановки. При решении навигационной задачи для наземных и воздушных средств СТЗ используются в двух основных направлениях: числение пути по оптическому потоку и определение параметров относительного движения и ориентации по отношению к внешним объектам – ориентирам. В данной работе описываются решения по второму направлению в основном для наземных подвижных РТК. Для сбора зрительных данных мы используем три вида регистрирующих блоков СТЗ: монокулярный, стерео и всенаправленный/панорамный. Решающих навигационные задачи в различной постановке на основе метода интерпретирующей навигации. Все поля зрения во внутреннем представлении РТК сведены в одно информационное поле – качественную модель окружающего пространства в виде районов и графа информационной эквивалентности. Такое представление на несколько порядков менее требовательно к объёмам хранимой информации при сохранении необходимой точности для целенаправленных перемещений [11].

На данном этапе исследований выбор ориентиров, как и постановка задачи на перемещение, остаётся за оператором. Оператор указывает в полях зрения СТЗ на те объекты, которые могут быть использованы в качестве ориентиров. СТЗ анализирует собранные зрительные данные на предмет возможности надёжного выделения этих объектов и слежения за их перемещением в поле зрения. Концепция ИН позволяет организовать экономное с точки зрения вычислительных ресурсов представление и обеспечение РТК информацией об области функционирования. Графы и районы информационной эквивалентности могут формироваться/использоваться как независимо, так и совместно с традиционными картами области функционирования. Все ориентиры подразделяются на долговременные (на всё время выполнения задания или значительную его часть) и кратковременные, необходимые для обеспечения текущих перемещений. Кроме того, в ряде условий функционирования возможно использовать относительную привязку положения подвижного РТК к ориентирам, когда по тем или иным обстоятельствам недоступны данные об абсолютных координатах этих ориентиров в заданной системе координат (например, ГИС). В любом случае абсолютной и относительной привязки выполняется идентификация каждого ориентира и их (ориентиров) взаимное расположение на основе чего возможно автоматическое построение обратного маршрута (решение задачи информационного обеспечения возврата) [12].

Постановка задачи навигации по зрительным ориентирам может быть реализована двумя способами: с использованием изображений с регистрирующих блоков, входящих в состав СТЗ и по карте. И в том, и в другом случае предполагается использование формализованного описания требуемых действий на тезаурусе предметной области в виде прецедентов и сценариев [13]. Примеры таких описаний: «Перемещение из исходной точки в заданную (по ориентирам)», «Перемеще-

ние по замкнутому маршруту из исходной точки (заданной на карте или с указанием расположения относительно известного ориентира) в исходную с посещением заданной». Сценарии уточняют условия и детализируют действия по реализации прецедента. Пример: «Выдвинуться к ориентиру 1 (труба котельной) и расположиться в 30–50 метрах от него в ориентации 90°. Условия: осень средней полосы, облачно, светлое время суток, движение по загородным дорогам».

Зрительные данные каждого из полей зрения в некотором, техническом смысле воспроизводят возможности человеческого зрительного осмотра, восприятия окружающей местности. Моноблок с переменным фокусным расстоянием позволяет в режиме фовеа (повышенного разрешения) рассмотреть детали объекта интереса. Всенаправленный или панорамный регистрирующий блок позволяет оперативно, без механических перемещений осмотреть большую область пространства. Стереосистема позволяет в пассивном режиме (без энергетического воздействия) оценивать дальность до объектов интереса. На описываемом этапе исследований на основе авторского алгоритма выделения особенностей в зрительных данных СТЗ фиксирует указанный оператором объект интереса, оценивает надёжность его выделения и возможность прослеживания. Эта операция осуществляется во всех полях зрения, формируется единое иерархическое (по приоритету надёжности и возможной длительности наблюдения) описание множества ориентиров.

Возможности использования в качестве регистрирующих блоков видеокамер разных диапазонов чувствительности, включая гиперспектрометры и РЛС существенно расширяют богатство информационных признаков объектов и условий наблюдения по отношению к естественным системам.

Решение навигационной задачи. Исходными данными для решения задачи на описываемом этапе являются координаты некоторого числа ориентиров, расположенных в пространстве движения и направления луча от подвижного РТК на ориентиры в моменты их обнаружения.

Координаты N ориентиров заданы в фиксированной «стартовой» прямоугольной системе координат (СК). Далее для каждого из ориентиров задано: время его обнаружения t , приближенные (текущие, или определяемые) значения координат подвижного РТК в стартовой СК в момент t , приближенные значения координат вектора скорости подвижного РТК в стартовой СК в момент t , приближенные значения угловых параметров движения подвижного РТК в момент t (три угла). Угловые параметры определяют матрицу вращения R_0 , задающую переход от системы координат, связанной с подвижным РТК (связанной СК) в стартовую СК.

Направление луча от подвижного РТК на ориентир в момент t может быть задано двумя углами α (азимут) и τ (углом места), так что $(\cos \tau \cos \alpha, \cos \tau \sin \alpha, \sin \tau)$ – единичный вектор с направлением на ориентир в связанной СК. Мы предполагаем, что координаты ориентиров, время их обнаружения, направление луча от подвижного РТК на ориентир известны точно, погрешностями здесь мы пренебрегаем, а координаты самого подвижного РТК, вектор скорости и угловые параметры имеют погрешности. Например, они были получены с помощью традиционных навигационных средств (БИНС), или оптической одометрией.

Требуется, используя данные об ориентирах, рассчитать поправки к координатам и (по опции) к вектору скорости и к угловым параметрам движения подвижного РТК и получить для каждого из ориентиров исправленные значения координат подвижного РТК, его вектора скорости и угловых параметров в соответствующий момент времени t .

Метод решения задачи. Данные о направлении луча на ориентир вычисляются по данным внутреннего ориентирования камер регистрирующих блоков, расположения этих блоков в связанной СК и пиксельным координатам образов ори-

ентиров на текущем изображении (результат выделения и слежения). Метод решения задачи состоит в том, что, исходя из данных об ориентирах, составляется, вообще говоря, переопределенная и нелинейная система алгебраических уравнений относительно неизвестных поправок к параметрам движения подвижного РТК. Затем эта система решается методом Гаусса-Ньютона. Метод Гаусса-Ньютона [14] решения нелинейной переопределенной системы уравнений состоит в проведении повторяющихся итераций следующего вида. Пусть дана система уравнений

$$f_i(x_1, \dots, x_n) = 0, 1 \leq i \leq m. \quad (1)$$

В нашем случае $m = 2N$ (или $m = 3N$, если в системе 3 зависимых уравнения для каждого ориентира). Пусть (x_1^0, \dots, x_n^0) – начальное приближение к решению.

Заменяем левую часть каждого уравнения ее дифференциалом в точке начального приближения, и рассмотрим получившуюся линейную систему относительно приращений неизвестных:

$$f_i(x_1^0, \dots, x_n^0) + \sum_j \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Delta x_j = 0. \quad (2)$$

Запишем (2) в виде $A \cdot \Delta x = u$, A – матрица из частных производных $m \times n$. Отсюда Δx находится методом наименьших квадратов. Далее получаем следующее приближение к решению $(x_1^1, \dots, x_n^1) = (x_1^0 + \Delta x_1, \dots, x_n^0 + \Delta x_n)$ и повторяем такие итерации до тех пор, пока приращения неизвестных не станут достаточно малыми.

Значения неизвестных в переопределенной системе линейных уравнений $A \cdot \Delta x = u$, при которых сумма квадратов невязок в уравнениях является минимальной, могут быть получены либо методом SVD (сингулярного разложения [15]), либо с помощью симметризации системы. При этом SVD более устойчив к накоплению вычислительной погрешности, но несколько более требователен к ресурсам компьютера и сложнее в реализации. Мы использовали решение методом симметризации как более простое.

Это решение состоит в переходе к системе $A^T A \cdot \Delta x = A^T u$ с симметрической неотрицательно определенной матрицей $A^T A$ размера $n \times n$. Здесь и далее верхнее T означает транспонирование. Полученная система решается, например, методом квадратного корня (Холецкого) [14, 15].

В нашем случае матрица A и правая часть u имеют вид:

$$A = (A_1, \dots, A_N)^T, u = (u_1, \dots, u_N)^T.$$

где $A_i \cdot \Delta x = u_i$ – те уравнения в системе, которые соответствуют i -му ориентиру, N – число ориентиров. В симметризованной системе уравнений $A^T A \cdot \Delta x = A^T u$ имеем: $A^T A = \sum_i A_i^T A_i$, $A^T u = \sum_i A_i^T u_i$.

В матрице $A_i^T A_i$ элемент в k -й строке и l -м столбце равен скалярному произведению k -го и l -го столбцов матрицы A_i , в правой части $A_i^T u_i$ k -й элемент равен скалярному произведению k -го столбца матрицы A_i на столбец u_i .

У нас столбцы матрицы A_i – это вектор-столбцы, составленные из частных производных в левой части (2), соответствующих i -му ориентиру, u_i – вектор-столбцы, составленные из значений левых частей (1) в точке начального приближения с противоположными знаками.

Число неизвестных поправок n в этом случае может быть от 3 до 12. А именно: поправки к координатам подвижного РТК; поправки к вектору скорости; поправки к угловым параметрам; скорости изменения поправок к угловым параметрам.

Предлагаемый метод решения данной задачи состоит в следующем. Для каждого ориентира рассматриваются два вектора в стартовой СК. Первый вектор от подвижного РТК к ориентиру, при этом координаты подвижного РТК являются функциями от неизвестных поправок. Второй вектор получен из данного направ-

ления луча на ориентир в связанной СК с помощью пересчета в стартовую СК, матрица вращения при пересчете также зависит от неизвестных поправок к угловым параметрам. Записывается условие параллельности этих двух векторов, что дает два независимых уравнения на неизвестные поправки для каждого из N ориентиров. Полученная (вообще говоря, переопределенная) система из $2N$ уравнений с n неизвестными решается методом Гаусса-Ньютона.

Таким образом, необходимое число ориентиров для расчета поправок определяется из условия $2N \geq n$.

Пусть O – положение некоторого ориентира в стартовой СК, P_0 – приближенное положение подвижного РТК, V_0 – приближенное значение вектора скорости подвижного РТК на момент обнаружения данного ориентира. Пусть

$$P = P_0 + \Delta P + (t - t_0)\Delta V, \quad (3)$$

уточненное положение подвижного РТК и уточненное значение вектора скорости. Здесь ΔP – поправки к координатам, ΔV – поправка к вектору скорости, t – время обнаружения данного ориентира, t_0 – начальный момент времени (время обнаружения первого ориентира). Тогда $P - O$ – вектор от ориентира к объекту в стартовой СК.

Будем считать, что направление от подвижного РТК к ориентиру в связанной СК на момент обнаружения ориентира задается двумя углами α (азимут) и τ (углом места), так что $r_0 = (\cos \tau \cos \alpha, \cos \tau \sin \alpha, \sin \tau)^T$ – единичный вектор-столбец с направлением на ориентир в связанной СК. Пусть матрица вращения R_0 приближенно задает переход от связанной СК в стартовую СК. Пусть уточненная матрица перехода

$$R = \Delta R_x \cdot \Delta R_y \cdot \Delta R_z \cdot R_0. \quad (4)$$

Здесь $\Delta R_x, \Delta R_y, \Delta R_z$ – матрицы вращения вокруг координатных осей на поправки к угловым параметрам:

$$\begin{aligned} \Delta R_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta\alpha_x & \sin \delta\alpha_x \\ 0 & -\sin \delta\alpha_x & \cos \delta\alpha_x \end{bmatrix}, \\ \Delta R_y &= \begin{bmatrix} \cos \delta\alpha_y & 0 & -\sin \delta\alpha_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \delta\alpha_y & 0 & \cos \delta\alpha_y \end{bmatrix}, \\ \Delta R_z &= \begin{bmatrix} \cos \delta\alpha_z & \sin \delta\alpha_z & 0 \\ -\sin \delta\alpha_z & \cos \delta\alpha_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

где $\delta\alpha_x = \Delta\alpha_x + (t - t_0)\Delta\dot{\alpha}_x$ и аналогично $\delta\alpha_y$ и $\delta\alpha_z$.

Тогда $R \cdot r_0$ – единичный вектор направления от подвижного РТК на ориентир в стартовой СК. Должно выполняться условие параллельности:

$$(P - O) \parallel R \cdot r_0. \quad (6)$$

Нам будет удобно использовать условие параллельности двух векторов в следующем виде. Пусть $u = (u_x, u_y, u_z)$ и $v = (v_x, v_y, v_z)$ – два вектора. Рассмотрим кососимметрическую матрицу

$$K(u) = \begin{bmatrix} 0 & u_z & -u_y \\ -u_z & 0 & u_x \\ u_y & -u_x & 0 \end{bmatrix}.$$

Тогда условие $u \parallel v$ эквивалентно векторному равенству $K(u) \cdot v = 0$ и (6) записывается в виде

$$K(P - O) \cdot R \cdot r_0 = 0. \quad (7)$$

Мы используем следующие три матрицы:

$$D_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, D_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Это производные от матриц $\Delta R_x, \Delta R_y, \Delta R_z$ по соответствующим параметрам в точке 0. Кроме того, частные производные от матрицы $K(u)$ по координатам вектора u равны данным матрицам, например $\partial K(u) / \partial (u_x) = D_x$.

Перепишем (7) в виде

$$K(P - O) \cdot \Delta R_x \cdot \Delta R_y \cdot \Delta R_z \cdot r = 0. \quad (8)$$

где $r = R_0 \cdot r_0$, левую часть (8) обозначим через f и найдем частные производные вектора f по поправкам $\Delta P_x, \dots, \Delta \dot{\alpha}_z$. При этом можно сразу записывать значения частных производных вектора f по поправкам в точке 0 (считая начальное приближение к поправкам нулевым). Это упрощает формулы.

Имеем

$$\begin{aligned} \partial f / \partial (\Delta P_x) &= D_x \cdot r, \quad \partial f / \partial (\Delta P_y) = D_y \cdot r, \quad \partial f / \partial (\Delta P_z) = D_z \cdot r, \\ \partial f / \partial (\Delta V_x) &= (t - t_0) D_x \cdot r, \quad \partial f / \partial (\Delta V_y) = (t - t_0) D_y \cdot r, \\ \partial f / \partial (\Delta V_z) &= (t - t_0) D_z \cdot r, \quad \partial f / \partial (\Delta \alpha_x) = K(P - O) \cdot D_x \cdot r, \\ \partial f / \partial (\Delta \alpha_y) &= K(P - O) \cdot D_y \cdot r, \quad \partial f / \partial (\Delta \alpha_z) = K(P - O) \cdot D_z \cdot r, \\ \partial f / \partial (\Delta \dot{\alpha}_x) &= (t - t_0) K(P - O) \cdot D_x \cdot r, \\ \partial f / \partial (\Delta \dot{\alpha}_y) &= (t - t_0) K(P - O) \cdot D_y \cdot r, \\ \partial f / \partial (\Delta \dot{\alpha}_z) &= (t - t_0) K(P - O) \cdot D_z \cdot r. \end{aligned}$$

От векторного уравнения (7) перейдем к линеаризованному уравнению, то есть заменим вектор-функцию f ее дифференциалом в точке начального приближения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \Delta P_x} \Delta P_x + \frac{\partial f}{\partial \Delta P_y} \Delta P_y + \frac{\partial f}{\partial \Delta P_z} \Delta P_z + \frac{\partial f}{\partial \Delta V_x} \Delta V_x + \frac{\partial f}{\partial \Delta V_y} \Delta V_y + \frac{\partial f}{\partial \Delta V_z} \Delta V_z + \\ + \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_x} \Delta \alpha_x + \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_y} \Delta \alpha_y + \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_z} \Delta \alpha_z + \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_x} \Delta \dot{\alpha}_x + \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_y} \Delta \dot{\alpha}_y + \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_z} \Delta \dot{\alpha}_z = \\ = -K(P_0 - O) \cdot r. \end{aligned} \quad (9)$$

Фактически (9) представляет собой систему из трех линейных уравнений с n неизвестными. Объединим теперь уравнения (9) для всех ориентиров в одну переопределенную систему уравнений и симметризуем ее, как было показано выше. Матрицу системы (9) для i -го ориентира представим как массив 3-мерных вектор-столбцов длины n :

$$DER_i = \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta P_x}, \frac{\partial f}{\partial \Delta P_y}, \frac{\partial f}{\partial \Delta P_z}, \frac{\partial f}{\partial \Delta V_x}, \frac{\partial f}{\partial \Delta V_y}, \frac{\partial f}{\partial \Delta V_z}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_x}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_y}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_z}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_x}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_y}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_z} \right).$$

При этом k -й столбец в массиве DER_i обозначим $DER_i[k]$. Правую часть (9) для i -го ориентира обозначим $RIGHT_i = -K(P_0 - O) \cdot r$.

Далее строится матрица симметризованной системы M размера $n \times n$ и столбец b длины n правых частей уравнений этой системы по формулам

$$\begin{aligned} M_{kl} &= \sum_i (DER_i[k], DER_i[l]), \\ b_k &= \sum_i (DER_i[k], RIGHT_i), \end{aligned}$$

где круглыми скобками обозначено скалярное произведение векторов, и решается система из n линейных уравнений с n неизвестными

$$M \cdot \Delta x = b.$$

Решением является вектор поправок

$$\Delta x = (\Delta P_x, \Delta P_y, \Delta P_z, \Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z, \Delta \alpha_x, \Delta \alpha_y, \Delta \alpha_z, \Delta \dot{\alpha}_x, \Delta \dot{\alpha}_y, \Delta \dot{\alpha}_z).$$

Далее найденные поправки учитываются для нахождения исправленных значений координат P , вектора скорости V и матрицы вращения R и описанные выше действия повторяются итеративно. Значения P_0 , V_0 и матрица R_0 заменяются на рассчитанные значения P , V и R и снова рассчитываются поправки. Обычно бывает достаточно провести 3–4 итерации, после этого поправки становятся пренебрежимо малыми.

Объединение/комплексирование с другими способами навигации. Каждый из способов навигации имеет свои ограничения по условиям применения. Описанный способ навигации по зрительным ориентирам также имеет свои особенности, ограничения. В частности, отсутствие или ограниченное количество в окружающей среде особенностей - объектов, которые могут быть использованы в качестве ориентиров. Одним из путей преодоления этого ограничения является использование регистрирующих блоков, позволяющих расширить пространство признаков объектов внешней среды (гиперспектрометры, РЛС и другие). Другим, признанным путём обеспечения надёжного результата в разнообразных условиях движения является комплексирование различных способов [17, 18]. Мы используем комплексирование навигации по ориентирам с такими способами навигации как оптическая одометрия [19], инерциальная навигационная система. В качестве объединяющего начала берём траекторию движения подвижного РТК. При построении этой траектории учитываем такие факторы, как механические характеристики подвижного РТК, вероятную необходимость построения обратного пути (решение задачи возврата в точку старта в автономном режиме). Алгоритм описания траектории мобильного робота, основывается на аппроксимации данных комплексированных навигационных систем в виде кусочно-полиномиальной функции (сплайна) 3-го порядка методом наименьших квадратов и проверки на отсутствие петель полученного сплайна [20].

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования описанного метода проводились на реальных зрительных данных, собранных в процессе движения подвижной робототехнической платформы по загородным дорогам. Движение происходило со скоростями от 0 до 45 км/час. Количество задаваемых ориентиров на кольцевом маршруте длиной около километра составило 60. В каждый момент времени в ходе движения в поле зрения СТЗ находилось от 3 до 5 ориентиров. Соответствующие алгоритмы были реализованы в рамках каркаса программного обеспечения СТЗ реального времени [21, 22]. В составе СТЗ в экспериментах использовалась всенаправленная камера с цветной матрицей 5 МПикс, объективом типа «рыбий глаз» с углом обзора 360° вокруг вертикальной оси и 90° относительно горизонта, стереосистема из двух синхронизованных 5 МПикс цветных камер с 60° объективами, установленных на базе 125 см. В качестве дополнительного средства, арбитражно фиксирующего перемещения и ориентацию подвижной платформы, использовался высокоточный интегрированный GPS приёмник, объединяющий спутниковую и инерциальную навигационные системы [23]. Дополнительно, в ряде позиций вручную были промерены положение и ориентация РТК. На рис 1. Приведены примеры изображений панорамного и стереомодулей СТЗ.



Рис. 1. Примеры изображений регистрирующих блоков макета СТЗ: а – всенаправленная/панорамная камеры; б – стереосистема (показан кадр с одной из камер). Красными квадратами отмечены объекты, которые могут использоваться в качестве ориентиров

Были получены такие количественные характеристики навигационных данных с помощью демонстрационного макета СТЗ. Точность определения положения подвижного средства, на котором установлены модули СТЗ: среднеквадратическое отклонение определения прямоугольных координат наземного РТК ВН в проекции UTM относительно координат бортовой карты – не хуже $0,0025 d$, где d – максимум расстояния до ориентиров (0,5 м при $d=200$ м); точность определения азимута наземного РТК ВН относительно бортовой карты – не хуже ± 20 угловых минут; частота получения данных – 10 Гц (ограничена частотой выдачи кадров видеокамерами высокого разрешения).

В результате исследований были проанализированы основные факторы, влияющие на качество решения навигационной задачи с помощью выделения и слежения за ориентирами:

- ◆ качество ректификации стереосистемы, включая точность синхронизации левого и правого изображений;
- ◆ количество и качество (с точки зрения выделения) ориентиров, указываемых в окружающем пространстве;
- ◆ погрешность указания координат ориентиров и определения положения их образов на изображении в зависимости от расстояния до них;
- ◆ обусловленность решаемой системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Кроме того, были проанализированы возможности вариантов использования системы в зависимости от условий движения. Если движение происходит в горизонтальной плоскости (перепады высот в пределах 1 м, а уклоны $\pm 5^\circ$), то для определения положения РТК достаточно трех ориентиров; при пространственном движении при трех ориентирах есть неоднозначность в решении системы уравнений, и практически нужно 4 ориентира или больше. И в одном, и в другом случае, для надежности решения навигационной задачи – чтобы избежать грубых ошибок, требуется 1 или 2 дополнительных ориентира.

Заключение. Рассмотренная организация целенаправленных перемещений подвижных средств с использованием зрительных ориентиров в модельных оценках и экспериментах показала высокую эффективность. Предложенный алгоритм расчёта поправок к параметрам движения на основе метода Гаусса-Ньютона позволяет решать задачу уточнения параметров движения по отдельным, разрежен-

ным измерениям собственного положения и скорости относительно ориентиров в окружающем пространстве. В комплексе с другими средствами навигации описанный подход обеспечивает высокоточное определение навигационных параметров в различных условиях движения.

Все составляющие описанного процесса организации целенаправленных перемещений на основе использования ориентиров продолжают совершенствоваться. В частности, формируются онтологии предметной области целенаправленных перемещений в различных средах. На их основе строится унифицированный интерфейс постановки заданий на перемещения. Расширяется база объектов, которые можно выбирать в качестве ориентиров, разрабатываются алгоритмы автоматического выбора таких объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. RSS новости. Новости искусственного интеллекта. – https://ai-news.ru/2021/01/bespilotnye_karemye_samosvaly.html.
2. ООО «МосТрансАренда». Тренд на беспилотные самосвалы набирает обороты. – [tps://mtarenda.ru/articles/trend-na-bespilotnye-samosvaly-nabiraet-oboroty/#](https://mtarenda.ru/articles/trend-na-bespilotnye-samosvaly-nabiraet-oboroty/#).
3. КОМЕК МАШИНЕРИ. Дойдут ли беспилотные самосвалы Komatsu до России? Исчезнет ли профессия водителя? – <https://www.komek.ru/staty/doydut-li-bespilotnye-samosvaly-komatsu-do-rossii-ischeznet-li-professiya-voditelya/>.
4. Tadviser. Продукт: БелАЗ-7513R (беспилотный самосвал). – [https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:БелАЗ-7513R_\(беспилотный_самосвал\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:БелАЗ-7513R_(беспилотный_самосвал)).
5. Кожемякин А. Самосвал на миллион. – <https://dev.by/news/samosval-na-million>.
6. Петричкович Я., Солохина Т. и др. RoboDeus – 50-ядерная гетерогенная СпК для встраиваемых систем и робототехники // Электроника. – 2020. – № 7. – С. 52-63.
7. NVidia Corp. NVidia Jetson AGX Xavier. – <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier/>.
8. Intel Corp. Accelerate Automotive with Intel. – <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/automotive/products/programmable/overview.html>
9. Shnkland S. Tesla self-driving car computer. – <https://www.cnet.com/news/meet-tesla-self-driving-car-computer-and-its-two-ai-brains>.
10. Mur-Artal R., Tardós J. ORB-SLAM: Tracking and mapping recognizable features // MVIRO Workshop at Robotics Science and Systems (RSS), Berkeley, USA, 2014.
11. Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М. Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2008. – № 19.
12. Богуславский А.А. и др. Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2019. – 228 с.
13. Ларман К. Применение UML 2.0 и шаблонов проектирования. – Вильямс, 2019. – 736 с.
14. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 510 с.
15. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления. – М.: Мир, 1999. – 548 с.
16. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 600 с.
17. Infineon Technologies AG. Sensor fusion for autonomous driving. – <https://www.infineon.com/cms/en/applications/automotive/chassis-safety-and-adas/sensor-fusion/>.
18. Kocic J., Jovičić N., Drndarevic V. Sensors and Sensor Fusion in Autonomous Vehicles // Proc. 26th Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 20-21 November 2018. – P. 420-425.
19. Sokolov S.M., Beklemishev N.D., Boguslavsky A.A. Coordinated use of visual odometry and landmarks for navigation of mobile ground vehicles // ISPRS International Workshop Photogrammetric and computer vision techniques for video Surveillance, Biometrics and Biomedicine Moscow, April 26-28, 2021. (в печати).

20. Sprunk C. Planning Motion Trajectories for Mobile Robots Using Splines // Faculty of Applied Sciences Department of Computer Science Autonomous Intelligent Systems. – 2008. – <http://www2.informatik.uni-freiburg.de/~lau/students/Sprunk2008.pdf>.
21. Соколов С.М., Богуславский А.А., Трифонов О.В. Интеллектуальные модули системы технического зрения для оперативного определения состояния и контроля объектов инфраструктуры железной дороги // Тр. 2-й международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте» (IntellectTrans-2012) 28-31 марта 2012 г. – СПб., 2012. – С. 346-355.
22. Sokolov S.M., Boguslavsky A.A., Vasilyev A.I., Trifonov O.V. Development of software and hardware of entry-level vision systems for navigation tasks and measuring // *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Springer). – 2013. – Vol. 208 AISC. – P. 463-476.
23. SBG Systems. Ellipse Series, 2021. – <https://www.sbg-systems.com/products/ellipse-series/>.

REFERENCES

1. RSS novosti. Novosti iskusstvennogo intellekta [RSS news. Artificial Intelligence News]. Available at: https://ai-news.ru/2021/01/bespilotnye_karernye_samosvaly.html.
2. ООО «MosTransArenda». Trend na bespilotnye samosvaly nabiraet oboroty [LLC «MosTransArenda». The trend for unmanned dump trucks is gaining momentum]. Available at: <https://mtarenda.ru/articles/trend-na-bespilotnye-samosvaly-nabiraet-oboroty/#>.
3. KOMEK MASHINERY. Doydut li bespilotnye samosvaly Komatsu do Rossii? Ischeznet li professiya voditelya? [KOMEK MACHINERY. Will Komatsu unmanned dump trucks reach Russia? Will the driver profession disappear?]. Available at: <https://www.komek.ru/staty/doydut-li-bespilotnye-samosvaly-komatsu-do-rossii-ischeznet-li-professiya-voditelya/>.
4. Tadviser. Produkt: BelAZ-7513R_(bespilotnyy_samosval) [Tadviser. Product: BelAZ-7513R (unmanned dump truck)]. Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Produkt:BelAZ-7513R_\(bespilotnyy_samosval\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Produkt:BelAZ-7513R_(bespilotnyy_samosval)).
5. Kozhemyakin A. Samosval na million [Dump truck for a million]. Available at: <https://dev.by/news/samosval-na-million>.
6. Petrichkovich YA., Solokhina T. i dr. RoboDeus – 50-yadernaya geterogennaya SnK dlya vstraivaemykh sistem i robototekhniki [RoboDeus – a 50-core heterogeneous SoC for embedded systems and robotics], *Elektronika* [Electronics], 2020, No. 7, pp. 52-63.
7. NVidia Corp. NVidia Jetson AGX Xavier. Available at: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier/>.
8. Intel Corp. Accelerate Automotive with Intel. Available at: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/automotive/products/programmable/overview.html>.
9. Shnkland S. Tesla self-driving car computer. Available at: <https://www.cnet.com/news/meet-tesla-self-driving-car-computer-and-its-two-ai-brains>.
10. Mur-Artal R., Tardós J. ORB-SLAM: Tracking and mapping recognizable features, *MVIGRO Workshop at Robotics Science and Systems (RSS)*, Berkeley, USA, 2014.
11. Kiril'chenko A.A., Platonov A.K., Sokolov S.M. Teoreticheskie aspekty organizatsii interpretiruyushchey navigatsii mobil'nogo robota [Theoretical aspects of the organization of interpretive navigation of a mobile robot], *Preprint IPM im. M.V. Keldysha RAN* [Preprint of the Institute of Applied Mathematics M.V. Keldysh RAS], 2008, No. 19.
12. Boguslavskiy A.A. i dr. Modeli i algoritmy dlya intellektual'nykh sistem upravleniya [Models and algorithms for intelligent control systems]. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha, 2019, 228 p.
13. Larman K. Primenenie UML 2.0 i shablonov proektirovaniya [Applying UML 2.0 and design patterns]. Vil'yams, 2019, 736 p.
14. Gill F., Myurrey U., Rayt M. Prakticheskaya optimizatsiya [Practical optimization]. Moscow: Mir, 1985, 510 p.
15. Golub Dzh., Van Loun Ch. Matrichnye vychisleniya [Matrix calculations]. Moscow: Mir, 1999, 548 p.
16. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. chislennyye metody [Numerical methods]. Moscow: Nauka, 1987, 600 p.
17. Infineon Technologies AG. Sensor fusion for autonomous driving. Available at: <https://www.infineon.com/cms/en/applications/automotive/chassis-safety-and-adas/sensor-fusion/>.
18. Kocic J., Jovičić N., Drndarevic V. Sensors and Sensor Fusion in Autonomous Vehicles, *Proc. 26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, 20-21 November 2018, pp. 420-425.

19. Sokolov S.M., Beklemishev N.D., Boguslavsky A.A. Coordinated use of visual odometry and landmarks for navigation of mobile ground vehicles, *ISPRS International Workshop Photogrammetric and computer vision techniques for video Surveillance, Biometrics and Biomedicine Moscow, April 26-28, 2021*. (в печати).
20. Sprunk C. Planning Motion Trajectories for Mobile Robots Using Splines, *Faculty of Applied Sciences Department of Computer Science Autonomous Intelligent Systems*, 2008. Available at: <http://www2.informatik.uni-freiburg.de/~lau/students/Sprunk2008.pdf>.
21. Sokolov S.M., Boguslavskiy A.A., Trifonov O.V. Intellektual'nye moduli sistemy tekhnicheskogo zreniya dlya operativnogo opredeleniya sostoyaniya i kontrolya ob'ektov infrastruktury zheleznoy dorogi [Intelligent modules of the technical vision system for rapid determination of the state and control of railway infrastructure facilities], *Tr. 2-y mezhduнародной nauchno-prakticheskoy konferentsii «Intellektual'nye sistemy na transporte» (IntellectTrans-2012) 28-31 marta 2012 g.* [Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference "Intelligent Systems in Transport" (IntellectTrans-2012) 28-31 March 2012-St. Petersburg, 2012]. Saint Petersburg, 2012, pp. 346-355.
22. Sokolov S.M., Boguslavsky A.A., Vasilyev A.I., Trifonov O.V. Development of software and hardware of entry-level vision systems for navigation tasks and measuring, *Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer)*, 2013, Vol. 208 AISC, pp. 463-476.
23. SBG Systems. Ellipse Series, 2021. Available at: <https://www.sbg-systems.com/products/ellipse-series/>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Х. Пшихопов.

Соколов Сергей Михайлович – Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН); e-mail: sokolsm@keldysh.ru; Москва, Россия; тел.: 89161220113; д.ф.-м.н.; профессор; г.н.с..

Беклемишев Николай Дмитриевич – e-mail: nbekl@mail.ru; тел.: +74992207994; к.ф.-м.н.; с.н.с.

Богуславский Андрей Александрович – e-mail: anbg74@mail.ru; тел.: 89167379448; д.ф.-м.н.; в.н.с.

Sokolov Sergey Mikhailovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: sokolsm@keldysh.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; dr. of phys. and math. sc.; professor; chief researcher.

Beklemishev Nikolay Dmitrievich – e-mail: kap56@mail.ru; phone: +74992207994; cand. of phys. and math. sc.; senior researcher.

Boguslavsky Andrey Alexandrovich – e-mail: anbg74@mail.ru; phone: +79167379448; dr. of phys. and math. sc.; leading researcher.

УДК 004.93'12

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-247-258

В.А. Бондаренко, П.А. Гессен, В.А. Павлова, М.В. Созинова, В.А. Тупиков

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ОБУЧЕНИЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

В целях создания нового алгоритма автоматического обнаружения объектов с обучением в реальном времени произведено исследование мирового научного задела в области автоматического сопровождения общего назначения с возможностью распознавания объекта слежения с потенциалом применения во встраиваемых вычислительных системах оптико-электронных систем перспективных робототехнических комплексов. На основе проведенных исследований отобраны и протестированы методы и подходы, которые позволяют с наибольшей точно-