



УДК 004.896:535.8

Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ВИЗУАЛЬНЫМ ОДОМЕТРОМ

E.A. Devyaterikov, B.B. Mikhailov

MOBILE ROBOT MOVEMENT CONTROL SYSTEM WITH VISUAL ODOMETER

Представлена экспериментальная проверка визуального одометра, функционирующего в качестве датчика обратной связи по положению в системе управления мобильного робота. Визуальная одометрия – метод измерения координат с помощью технического зрения, основанный на измерении смещения ключевых точек пространства, информация о которых получается из анализа последовательности изображений. Такая система работает в заранее не подготовленной, недетерминированной среде, нечувствительна к проскальзыванию колес. Приведены структура и краткое описание реализованной системы управления, а также результаты эксперимента.

СТЕРЕОЗРЕНИЕ. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ. ОДОМЕТРИЯ. ВИЗУАЛЬНАЯ ОДОМЕТРИЯ. ИЗМЕРЕНИЕ ПУТИ. МОБИЛЬНЫЙ РОБОТ.

The paper presents test of visual odometer that operates as position feedback sensor in mobile robot control system. Visual odometry is a path recovering approach based on computer vision and calculating of surroundings keypoints flow. The keypoints data comes from image sequence processing. Such system capable of working in unprepared nondeterministic environment and wheels slipping insensitive. The paper consists of implemented system description and results of it's testing.

STEREOVISION. COMPUTER VISION. ODOMETRY. VISUAL ODOMETRY. TRAJECTORY RECOVERING. MOBILE ROBOT.

Для управления мобильным роботом в случае движения по траектории необходима система определения местоположения и ориентации в пространстве. В настоящее время для навигации широко используются [1]: энкодеры, инерциальные системы, GPS и дальномеры. Но перечисленные устройства имеют свои недостатки. Использование энкодеров невозможно при проскальзывании колес. Инерциальные системы накапливают ошибку. GPS недостаточно точна для локальной навигации, неустойчива в закрытых помещениях. Система с дальномером имеет высокую стоимость и сложна.

Рост производительности встраиваемых вычислительных решений позволяет обрабатывать видеоданные бортовой системы технического зрения робота в реальном

времени [2] и использовать их для решения все более сложных задач, в т. ч. и для навигации.

Метод визуальной одометрии [2–5] основан на измерении смещения ключевых точек в пространстве [6], информация о которых получается из анализа последовательности стереоизображений системы технического зрения. Такая система может работать в недетерминированной среде, позволяет решать сопряженные задачи, такие, как, например, построение карты помещения.

В [7, 8] предложен метод визуальной одометрии, позволяющий вычислять текущие координаты мобильного робота с помощью системы трехмерного технического зрения. Был собран макет визуального одометра, проверены его работоспособность,

точность и быстродействие. Результаты показали, что визуальный одометр позволяет с частотой 10 Гц измерять перемещение робота с точностью 7 % и угол курса с точностью 10 %. В этом эксперименте визуальный одометр не был задействован в контуре системы управления робота. Точность и время вычисления координат оценивались независимо.

Для оценки возможности использования предложенного способа измерения пути как датчика обратной связи по положению в [9] была смоделирована система управления для того же лабораторного трехколесного робота, который использовался в эксперименте, но с визуальным одометром в обратной связи. В модели были учтены несовершенства визуального одометра: дискретизация измерений по времени; квантование, обусловленное разрешением телекамер; внесены шумы, имитирующие неточности в каждой итерации. Результаты моделирования оказались удовлетворительными. Система оставалась устойчивой, даже если время обработки изображений достигало 0,3 с, что в три раза больше реальной характеристики. Относительная ошибка выхода в заданную точку при моделировании движения по траектории с несколькими поворотами составила 14 %.

Цель данной работы – экспериментальная проверка мобильного робота с визуальным одометром в обратной связи по положению. Для достижения этой цели по-

ставлены и решены следующие задачи:

- реализация системы управления мобильным роботом с использованием данных визуальной одометрии в обратной связи по положению;
- проверка работоспособности такой системы, определение ее точности.

Система управления с визуальным одометром

Отдельные блоки системы управления рассчитаны и смоделированы еще в [9]. В настоящей работе они приведены в более удобный вид для использования с реальным роботом. Линейная и угловая скорости робота ограничены в соответствии с возможностью телекамеры получать изображения без смазываний. Чтобы подчеркнуть независимость работы визуального одометра от проскальзывания колес и других несовершенств шасси, мы не регулировали конструкцию перед экспериментом. Радиусы колес отличаются от заданных в модели более чем на 5 %. Имеет место люфт колес $\pm 5^\circ$. Оси колес не совпадают. Основные характеристики робота представлены в табл. 1.

Также был реализован интерфейс обмена данными между компьютером и существующей мобильной платформой. Схема полученной системы управления показана на рис. 1.

Система состоит из следующих блоков:

1. Группа блоков «ПК» (персональный компьютер) реализована в программном

Таблица 1

Характеристики мобильного робота

Характеристика	Обозначение	Величина	Единицы измерения
Масса робота	m	30	кг
Радиус приводного колеса	r	$0,105 \pm 0,005$	м
Люфт колеса	γ	± 5	°
Расстояние между приводными колесами	l	0,370	м
Мощность каждого привода	P_n	30	Вт
Ограничение максимальной скорости робота	V_{\max}	0,1	м/с
Ограничение максимальной угловой скорости робота	ω_{\max}	0,1	рад/с

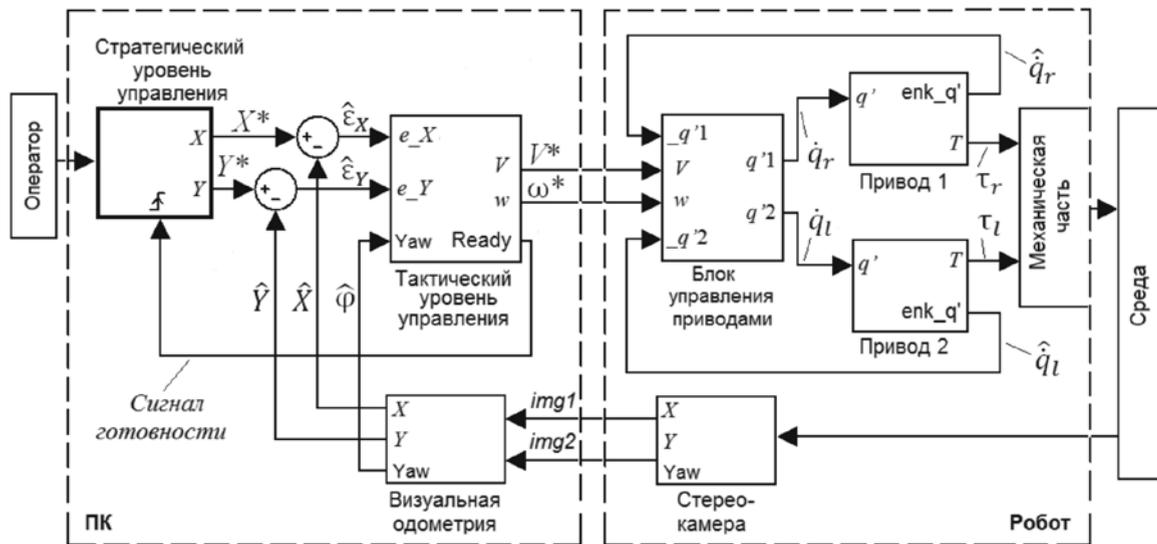


Рис. 1. Система управления мобильного робота с визуальным одометром

виде на мобильном компьютере (ноутбуке), устанавливаемом на роботе. Оператор записывает координаты целевых точек траектории в текстовый файл. Далее робот движется в автоматическом режиме.

1.1. «Стратегический уровень управления» выдает на выходе координаты X^* и Y^* очередной точки.

1.2. «Тактический уровень управления» на основе оценок ошибок по положению $\hat{\varepsilon}_x$, $\hat{\varepsilon}_y$ и оценки текущего угла курса робота $\hat{\varphi}$ формирует сигналы управления линейной V^* и угловой ω^* скоростями; в состав блока входит также программный интерфейс обмена данными с роботом.

1.3. «Визуальная одометрия» – блок, реализующий алгоритм визуальной одометрии. Блок оценивает текущие координаты \hat{X} , \hat{Y} и угол курса робота $\hat{\varphi}$, анализируя последовательность пар изображений $img1$ и $img2$, поступающих со стереокамеры.

2. Группа блоков «Робот» подключается к ПК через два USB порта (один для телекамеры и один для платы робота).

2.1. «Блок управления приводами» – вычислительное устройство, пересчитывающее поступающие с ПК V^* и ω^* в угловые скорости \dot{q}_l левого и \dot{q}_r правого приводов. Здесь реализована локальная обратная связь по скорости: с энкодеров приводов принимаются оценки угловых скоростей \hat{q}_l левого и \hat{q}_r правого колес.

2.2. «Привод 1(2)» состоит из мотор-редуктора, энкодера и силового драйвера;

2.3. Под блоком «Механическая часть» понимается конструкция робота.

Кинематическая и динамическая модели робота, на основе которых рассчитан тактический уровень управления, приведены в [9]. Принцип управления дискретно-позиционный. Робот движется в очередную точку дискретно заданной траектории. Принято, что боковое проскальзывание колес отсутствует, управление осуществляется по двум координатам: расстоянию до цели и углу курса на цель.

Результаты экспериментальных исследований

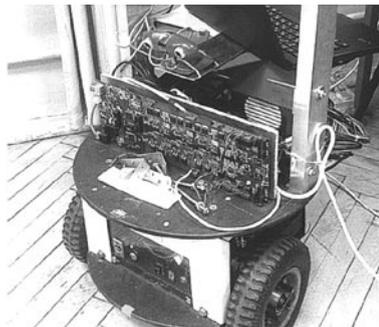
Объектом управления является существующий лабораторный трехколесный мобильный робот (рис. 2 а), использовавшийся в предыдущих экспериментальных исследованиях.

Состав системы:

1. Стереокамера Minogu 3D Webcam: КМОП матрица, разрешение 640×480 пикселей (макс. 800×600), стереобаза 60 мм. Камеры не синхронизированы [10], максимальное рассогласование по времени 16,5 мс. Горизонтальный угол обзора 42°. Угол наклона телекамер к горизонту 20°. Изображения с телекамер показаны на рис. 2 б.

2. Компьютер на базе процессора

а)



б)

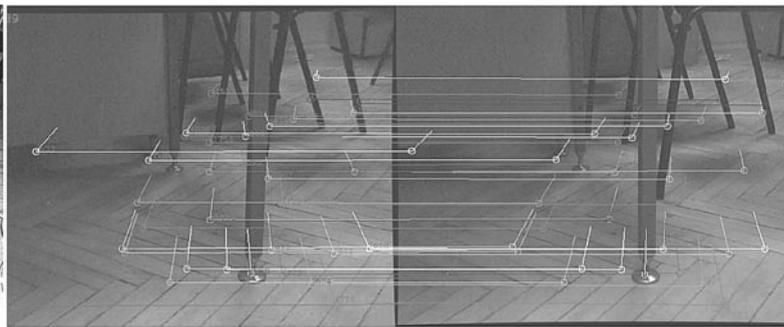


Рис. 2. Лабораторный мобильный робот с визуальным одометром – а; изображения с телекамер и иллюстрация поиска особых точек – б

Intel Core i3-2330M 2,2 ГГц, 1 поток.

3. Лабораторный мобильный робот с реализованным исполнительным уровнем управления. Характеристики робота см. в табл. 1.

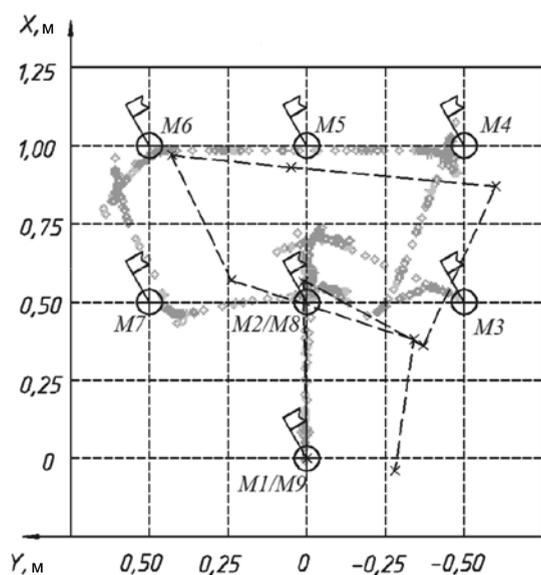
Эксперимент проводился в закрытом помещении. Робот девять раз проехал по дискретно заданной замкнутой траектории $M1, M2, \dots, M5$ (рис. 3 а) с участками длиной 0,5 м и шестью поворотами на 90° .

Траектория движения между точками не задавалась, определялась только на так-

тическом уровне и не учитывалась в этом эксперименте. Оценивалась относительная ошибка выхода в исходную точку. Измерения проводились в моменты остановки робота в заданных точках, для чего на подстилающей робот вручную устанавливался в начальное положение.

На рис. 3 а представлены результаты одного из девяти экспериментов. Реальные координаты робота в точках остановки обозначены крестами и для наглядности соединены пунктиром. На траектории,

а)



б)

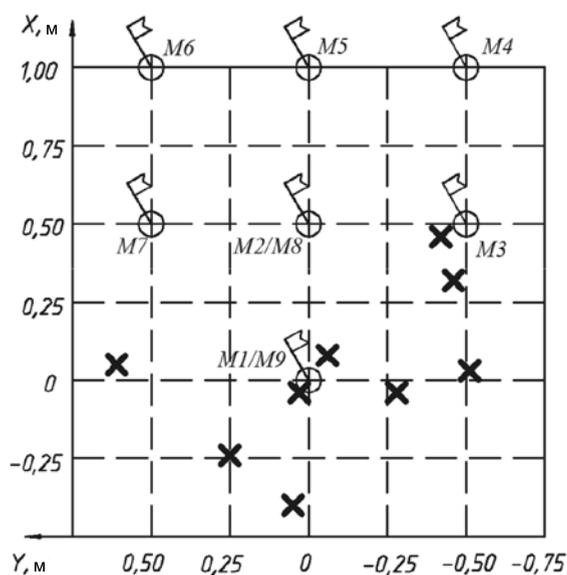


Рис. 3. Результаты эксперимента:

а – сопоставление заданных координат, показаний визуального одометра и реально достигнутых точек в одном из заездов; б – конечные точки в девяти заездах

(●) – показания визуального одометра; (⊕) – заданные точки; (×) – реальные точки; (⊗) – конечные точки

Таблица 2

Результаты девяти заездов

Номер заезда	Длина траектории, м	Количество поворотов на 90°	Конечные координаты		Ошибка выхода в исходную точку	
			X, м	Y, м	Абсолютная, м	Относительно длины траектории, %
1	4	6	-0,21	0,40	0,45	11
2			-0,24	0,25	0,35	9
3			-0,40	0,05	0,40	10
4			0,05	0,61	0,61	15
5			0,08	-0,06	0,10	2
6			-0,04	-0,03	0,05	1
7			0,46	-0,42	0,62	16
8			0,32	-0,46	0,56	14
9			0,03	-0,51	0,51	13
Средняя относительная ошибка без учета выбросов						13

измеренной визуальным одомером, в местах поворотов наблюдаются петли. Это не ошибка измерения. Как было сказано выше, шасси робота намеренно не отрегулированы: диаметры колес и положения их осей отличаются, характеристики приводов не соответствуют модели, имеет место люфт колес ($\pm 5^\circ$) и т. д., поэтому, когда поступает сигнал поворота на месте, робот совершает и значительное поступательное движение. Тем не менее такое незапланированное перемещение фиксируется визуальным одомером и траектория корректируется. Из рисунка видно, что ошибка выхода в исходную точку не превышает 0,3 м при заданной длине траектории 4 м (7,5 %). Результаты всех заездов представлены в табл. 2.

Из таблицы видно, что средняя ошибка выхода в исходную точку в семи экспериментах (без учета заездов 5 и 6, которые примем за выбросы) составляет 13 %

от длины траектории. На рис. 3 б показано множество конечных положений робота во всех девяти заездах.

В ходе работы реализована система управления мобильным роботом с визуальным одомером в обратной связи по положению. Эта система проверена экспериментально, определена ее точность при решении задачи объезда конкретной траектории длиной 4 м с шестью поворотами на 90°. Средняя ошибка выхода робота в исходную точку составила 13 % от длины траектории. При этом к конструкции робота не предъявлялись какие-либо специальные требования: диаметры колес отличались более чем на 5 % от заданных в модели; люфт колес достигал 10°. Результат носит предварительный характер, но подтверждает, что визуальный одомер может использоваться в системе управления мобильного робота в качестве датчика обратной связи по положению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siciliano, B. Springer handbook of robotics [Text] / B. Siciliano, O. Khatib. —Springer-Verlag Berlin, 2008. —P. 477–580.
 2. Nistrer, D. Visual odometry for ground vehicle applications [Text] / D. Nistrer, O. Naroditsky, J. Bergen // J. of Field Robotics. — 2006. —Vol.

23(1). —P. 3–20.
 3. Xu, J. Robust stereo visual odometry for autonomous rover [Text] / J. Xu, M. Shen, W. Wang, L. Yang [et al.] // 6th WSEAS Internat. Conf. on Signal, Speech and Image Processing. — 2006.
 4. Hirschmuller, H. Fast, unconstrained Camera

Motion Estimation from stereo without Tracking and Robust Statistics [Text] / H. Hirschmuller // 7th Internat. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision. – 2002. – Т. 2. – P. 1099–1104.

5. **Bota, S.** Camera Motion Estimation Using Monocular and Stereo-Vision [Text] / S. Bota, S. Nedeveschi // 4th Internat. Conf. on Intelligent Computer Communication and Processing. – 2008. – P. 275–278.

6. **Bradski, G.** Learning OpenCV [Text] / G. Bradski, A. Kaehler // Newgen Publishing and Data Services, 2008.

7. **Девятериков, Е.А.** Система технического стереозрения для измерения координат мобильного робота [Текст] / Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов // Техническое зрение в системах

управления 2012: Сб. трудов НТК. – М., 2012. – С. 72–78.

8. **Девятериков, Е.А.** Визуальный одометр [Текст] / Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2012. – Спецвып. – № 6. – С. 68–82.

9. **Девятериков, Е.А.** Использование данных визуального одометра в системе управления мобильного робота [Текст] / Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов // Экстремальная робототехника 2012: Сб. трудов НТК. – СПб., 2012. – С. 155–163.

10. Minoru 3D Webcam [Электронный ресурс] / Norishige Fukushima's web site // Режим доступа: <http://nma.web.nitech.ac.jp/fukushima/minoru/minoru3D-e.html>

REFERENCES

1. **Siciliano B., Khatib O.** Springer handbook of robotics. – Springer-Verlag Berlin, 2008. – P. 477–580.

2. **Nistrer D., Naroditsky O., Bergen J.** Visual odometry for ground vehicle applications / Journal of Field Robotics. – 2006. – Vol 23(1). – P. 3–20.

3. **Xu J., Shen M., Wang W., Yang L., Liu J., Kalyaev I.** Robust stereo visual odometry for autonomous rover / 6th WSEAS Internat. Conf. on Signal, Speech and Image Processing, 2006.

4. **Hirschmuller H.** Fast, unconstrained Camera Motion Estimation from stereo without Tracking and Robust Statistics / 7th Internat. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. – Vol. 2. – P. 1099–1104.

5. **Bota S., Nedeveschi S.** Camera Motion Estimation Using Monocular and Stereo-Vision / 4th Internat. Conf. on Intelligent Computer Communication and Processing. – 2008. – P. 275–278.

6. **Bradski G., Kaehler A.** Learning OpenCV. – Newgen Publishing and Data Services, 2008.

7. **Devyaterikov E.A., Mikhailov B.B.** Sistema tehničeskogo zreniya dlya izmereniya koordinat mobilnogo robota / Tehničeskoe zrenie v sistemah upravleniya 2012: Sb. Trudov NTK. – Moscow, 2012. – S. 72–78. (rus)

8. **Devyaterikov E.A., Mikhailov B.B.** Vizualniy Odometr / Vestnik MGTU im. N.E. Bauma-na. Priborostroenie. – 2012. – Spec. Vip. – № 6. – S. 68–82. (rus)

9. **Devyaterikov E.A., Mikhailov B.B.** Ispolzovanie dannikh vizualnogo odometra v sisteme upravleniya mobilnogo robota. Ekstremalnaya robototekhnika 2012: Sb. Trudov NTK. – St.-Petersburg, 2012. – S. 155–163. (rus)

10. Minoru 3D Webcam, Norishige Fukushima's web site, Available <http://nma.web.nitech.ac.jp/fukushima/minoru/minoru3D-e.html>

ДЕВЯТЕРИКОВ Егор Анатольевич – аспирант кафедры роботов и робототехнических систем Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

105037, Россия, Москва, Измайловская пл., д. 7.

E-mail: retegor@mail.ru

DEVYATERIKOV, Egor A. *Bauman Moscow State Technical University.*

105037, Izmaylovskaya square 7, Moscow, Russia.

E-mail: retegor@mail.ru

МИХАЙЛОВ Борис Борисович – доцент кафедры роботов и робототехнических систем Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, кандидат технических наук.

105037, Россия, Москва, Измайловская пл., д. 7.

E-mail: robot@bmstu.ru

MIKHAILOV, Boris B. *Bauman Moscow State Technical University.*

105037, Izmaylovskaya square 7, Moscow, Russia.

E-mail: robot@bmstu.ru