

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК: 681.2.083

СПОСОБ КАЛИБРОВКИ СИСТЕМ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ¹

Статья поступила в редакцию 09.03.2017, в окончательном варианте – 16.03.2017.

Климов Матвей Андреевич, студент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: klimatt.gu@gmail.com

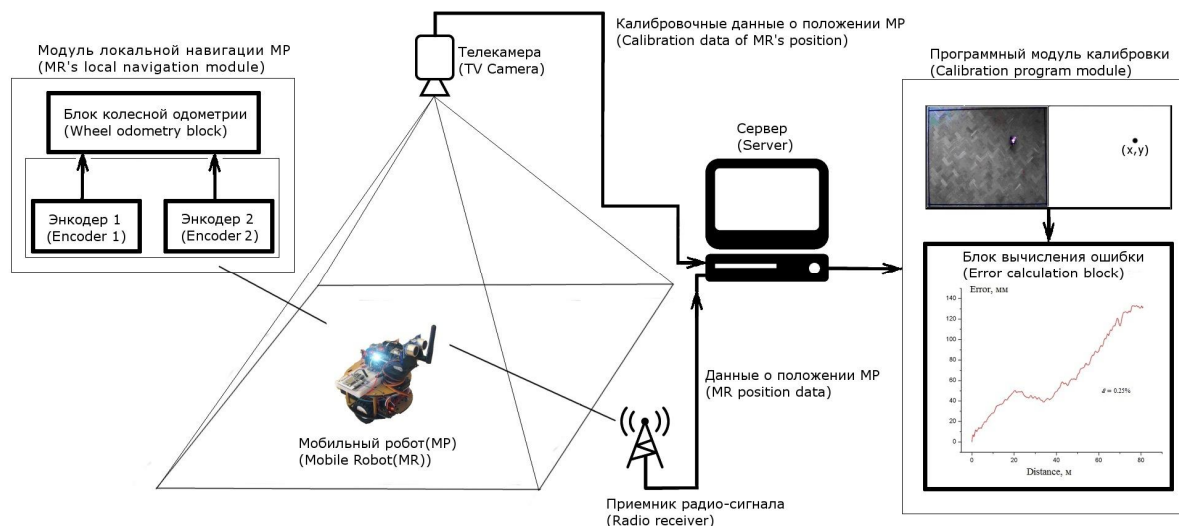
Воротников Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: vorotn@bmtu.ru

Выборнов Николай Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: do_vybornov@aspu.ru

В статье описан способ калибровки системы локальной навигации мобильного робота, основанный на измерении текущих значений абсолютных координат с помощью неподвижной телекамеры и использования системы нелинейных полиномов различного порядка. Порядок полинома выбирается исходя из значений погрешностей оптического канала и матрицы телекамеры. Приведены результаты экспериментальных исследований алгоритма калибровки системы локальной навигации на макете МР. Также показана его настройка с помощью аппроксимирующего нелинейного полиномиального преобразования, связывающего абсолютные координаты маркера, находящегося на борту МР, с пикселями его изображения. Эксперимент показал, что при порядке полинома равном двум и применении телекамеры с разрешением 640×480 пикселей достигается погрешность определения абсолютных координат МР не более 7 мм. Предложенный способ может использоваться для калибровки средств локальной навигации на основе одометрических и инерциальных датчиков, как для отдельных МР, так и для МР, перемещающихся в составе группы.

Ключевые слова: мобильный робот, локальная навигация, одометрия, телекамера, нелинейные искажения, полиномиальное преобразование координат, калибровка

Графическая аннотация (Graphical annotation)



¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 16-07-01080.

SYSTEM CALIBRATION METHOD OF LOCAL NAVIGATION OF MOBILE ROBOTS

The article has been received by editorial board 21.06.2016, in the final version – 17.01.2017.

Klimov Matvey A., student, Bauman Moscow State Technical University, 5, 2-aya Baumanskaya St., Moscow, 105007, Russian Federation, e-mail: klimatt.gu@gmail.com

Vorotnikov Sergey A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, 5, 2-aya Baumanskaya St., Moscow, 105007, Russian Federation, e-mail: vorotn@bmstu.ru

Vibornov Nikolay A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Astrakhan State University, 20a Tatishchev St, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: do_vybornov@aspu.ru

In this article, there is a description of a system calibration method of local navigation of a mobile robot, based on measuring current values of absolute coordinates with help of a motionless camera and using a system nonlinear polynomials of various orders. The order of the polynomial is chosen based on the values of errors of the optical channel and the matrix of the camera. The results of experimental studies of the algorithm of calibration of the navigation system on the MR model are given. Also its configuration is shown by means of an approximated nonlinear polynomial transformation connecting the absolute coordinates of the marker onboard the MR with the pixels of its image. The experiment showed that, for a polynomial order equal to two and the use of a camera with pixel resolution 640×480, the error in determining absolute coordinates is no more than 7mm. The proposed method can be used to calibrate the means of local navigation based on odometric and inertial sensors, both individual MR and MR moving in a group.

Keywords: mobile robot, local navigation, odometric, camera, nonlinear distortion, polynomial coordinate transformation, calibration

Введение. Навигационные системы (НС) являются важной частью робототехнических комплексов разного назначения. Особенно популярны НС в сервисных и мобильных роботах (МР), перемещающихся как внутри, так и вне закрытых помещений. Задачами НС являются определение положения МР относительно предметов окружающего пространства и построение допустимого маршрута движения. По способу определения положения МР различают системы локальной и глобальной навигации. В первом случае определяются относительные координаты МР с помощью средств колесной одометрии и инерциальных датчиков, использования активных маяков и/или пассивных меток. Во втором случае вычисляются абсолютные координаты МР с помощью магнитного компаса, датчиков GPS и т.д. В обоих случаях широко применяется метод одновременной локализации и построения карты (SLAM) и его разновидности. При этом оба подхода имеют свои достоинства и недостатки. Поэтому обычно используются различные комбинации указанных НС [10]. Так, совместное использование колесной одометрии и инерциальных датчиков в силу своей простоты и относительной дешевизны целесообразно в НС простых малогабаритных МР.

При построении НС широко используются различные физические принципы. Некоторые из предлагаемых решений достаточно сложны и дорогостоящи [9, 14]. Другие, основанные на использовании ультразвуковых [4, 8, 10, 13, 15, 18] и инфракрасных датчиков [4, 11, 12], не обладают достаточной точностью. Наибольший интерес представляют системы, где датчиком служит телевизионная камера (ТК) [1, 16, 17]. При этом для повышения точности определения абсолютных координат МР информация с неподвижной ТК комплексируется с данными колесной одометрии, гироскопа и компаса [17]. Подобный подход позволяет строить измерительные системы высокой точности. Так, в работе [1] приведен пример измерительной системы, использующейся совместно со станком с ЧПУ.

Отметим, однако, что в большинстве случаев для вычисления абсолютных координат МР по измеренным координатам (пикселям) в пространстве изображений ТК, обычно используют линейные преобразования. Это не позволяет учесть различные нелинейные искажения, вызванные дисторсией объектива, его расфокусировкой, неидеальностью фоточувствительной матрицы [1, 17]. Кроме того, калибровка систем локальной навигации производится индивидуально для каждого МР и является достаточно трудоемкой процедурой, требующей к тому же, периодической проверки и настройки. Поэтому целью данной статьи является разработка способа калибровки системы локальной навигации МР на основе использования неподвижной ТК и проверка (апробация) этого способа с помощью созданного авторами аппаратно-программного комплекса.

К комплексу предъявляются следующие требования:

- обеспечение синхронного измерения текущих координат и угловой ориентации МР в собственной системе координат ТК (назовем эти координаты абсолютными) и получение соответствующих данных от тестируемых средств локальной навигации;
- обеспечение работоспособности НС в ограниченных пространствах закрытых помещений;
- отсутствие накопления погрешности в НС со временем;
- относительная простота и дешевизна решения.

Для вычисления абсолютных координат МР предлагается использовать аппроксимированное нелинейное полиномиальное преобразование, связывающее абсолютные координаты оптического маркера, находящегося на борту МР, с пикселями его изображения в пространстве изображений. Этот подход позволяет учесть дисторсию и др. нелинейные искажения независимо от их происхождения. Обработка потокового видео с ТК одновременно с получением данных от датчиков локальной навигации по радиоканалу, позволит сравнивать их с абсолютными координатами в реальном масштабе времени.

Преобразование координат изображения оптического маркера к координатам МР. Как уже отмечалось выше, при использовании линейных преобразований координат обычно не учитываются многочисленные нелинейные искажения. К ним относятся, в частности следующие:

- дисторсия объектива;
- проективные искажения, вызванные неперпендикулярностью оптической оси ТК той плоскости, в которой движется МР;
- прочие искажения (неперпендикулярность расположения пикселей матрицы относительно оптической оси объектива, расфокусировка объектива и т.д.).

В работах [3, 6, 7] показано, что увеличение точности измерения абсолютных координат МР с помощью ТК и оптической системы с нелинейными искажениями, возможно с помощью полиномиальных преобразований вида:

$$\begin{aligned} x' &= \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^i a_k x^{i-j} y^j \\ y' &= \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^i b_k x^{i-j} y^{j-i-j} y^j \end{aligned} \quad (1)$$

где (x, y) – координаты маркера (пикселя) в изображении, (x', y') – координаты маркера на площадке полигона, t – порядок полинома, a_k и b_k – коэффициенты; при этом индекс k для них вычисляется следующим образом [6]:

$$k = \frac{i^2 + j}{2} + j.$$

Заметим, что в зависимости от искажения изображения, количества реперных точек и их размещение относительно друг друга, для выражения необходимого преобразования могут потребоваться полиномы достаточно высокого порядка. Подбирая соответствующий порядок полинома, нелинейные искажения можно аппроксимировать константами, что позволит уменьшить погрешность преобразований координат.

Для полиномов различных порядков, количество N коэффициентов a_k или b_k может быть найдено из таблицы 1.

Таблица 1 – Зависимость количества необходимых коэффициентов от порядка полинома [6]

Порядок полинома, t	Количество необходимых коэффициентов, N
1	3
2	6
3	10
4	15
5	21
6	28
7	36
8	45

Значения коэффициентов для преобразования соответствующей степени могут быть найдены при решении системы уравнений (1), в которой используется N уравнений для N пар реперных точек (x_i, y_i) и (x'_i, y'_i) , измеренных при калибровке навигационной системы (рис. 1).

Как следует из таблицы 1, для точного решения системы уравнений для полинома второго порядка, потребуется 6 пар реперных точек. Однако такой подход не гарантирует хорошего совпадения результатов в других точках. Для повышения точности преобразования по всей поверхности полигона, при калибровке предлагается использовать равномерную сетку с $L = 18$ парами реперных точек, а коэффициенты преобразования рассчитывать методом наименьших квадратов. Как видно из таблицы 1, при такой калибровочной сетке может использоваться полиномиальное преобразование до четвертой степени включительно.

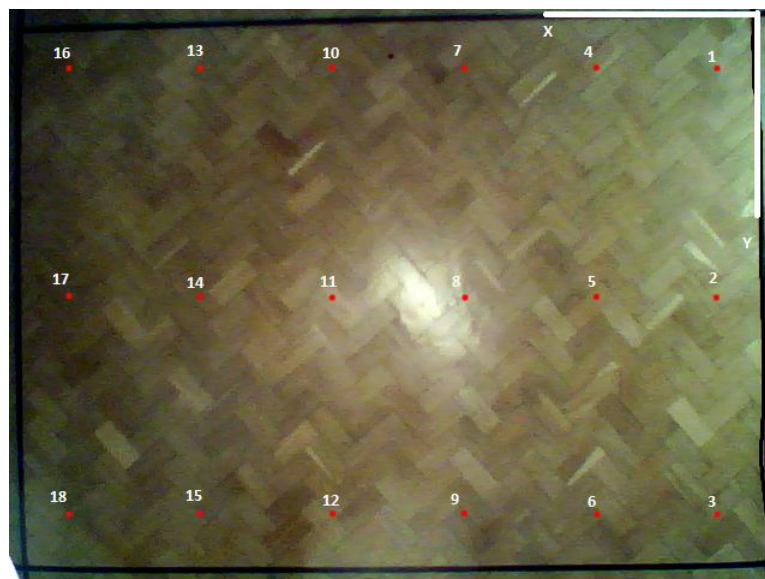


Рисунок 1 – Изображение полигона с расположенными на нем реперными точками в количестве 18 единиц

Вычисление коэффициентов полиномиального преобразования. Для краткости формулировок будем рассматривать преобразования только по одной координате, поскольку вычисления по другой координате полностью идентичны.

Допустим, нам известны коэффициенты a_j для преобразования степени t . Тогда, согласно (1), по известным реперным точкам в изображении, соответствующие координаты на полигоне могут быть найдены из уравнений:

$$M_{ij} \cdot a_j = x_i'', \quad (2)$$

здесь $[M]$ – матрица полиномов N -ой степени, x_i'' – это некоторые числа, которые получаются при подстановке реперной точки изображения (x_i, y_i) в матрицу $[M]$; $i = 1 \dots L$; $j = 1 \dots N$, где N – количество необходимых коэффициентов для преобразования степени t , L – число пар реперных точек в калибровочной таблице 2. В ней приведены координаты соответствующих реперных точек на полигоне (в мм) и на его изображении (в пикселях, пкс).

Таблица 2 – Калибровочная таблица для полигона, приведенного в данной статье

Номер точки	X, пкс	Y, пкс	X, мм	Y, мм
1	100.54	134.06	330	472
2	97.50	25.04	330	890
3	95.80	363.70	330	1259
4	191	134	647	472
5	188.5	257.8	647	890
6	187	365	647	1259
7	283.81	134.49	964	472
8	275.44	261.1	964	890
9	279.2	366.38	964	1259
10	375.98	135.96	1281	472
11	374.5	263.6	1281	890
12	372	376	1281	1259
13	464.25	137.9	1598	472
14	463.6	265.32	1598	890
15	462.74	367.27	1598	1259
16	554.38	140.39	1915	472
17	553.52	267.61	1915	890
18	551.55	367.30	1915	1259

Тогда для $t = 2$ ($N = 6$) и $L = 18$ уравнения (2) принимают вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 \cdot y_1 & y_1^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{18} & y_{18} & x_{18}^2 & x_{18} \cdot y_{18} & y_{18}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1'' \\ \dots \\ x_{18}'' \end{pmatrix}.$$

Ошибка преобразования, возникает вследствие несоответствия реальной и идеальной моделей полигона, обусловленного дисторсией объектива, неровностями поверхности полигона в поле зрения ТК и др. Для вычисления этой ошибки вычтем из обеих частей уравнений «идеальные» реперные значения (x_i', y_i') :

$$M_{ij} \cdot a_j - x_j'' = x_i'' - x_i',$$

или

$$x_i'' - x_i' = XR_i = \left(\sum_{j=1}^N M_{ij} a_j \right) - x_i',$$

где XR_i – ошибка преобразования в точке x_i при данных коэффициентах a_j . Тогда, учитывая, что YR_i – ошибка преобразования в точке y_i при данных коэффициентах, a_j , вычисляется аналогично XR_i . При этом мы получим:

$$E = \sum_{i=1}^L (XR_i^2 + YR_i^2),$$

где E – суммарная ошибка преобразования.

Теперь рассчитаем новые значения коэффициентов a_i так, чтобы ошибка E стала минимальной. Для этого найдем ее частную производную по a_k , ($k = 1 \dots N$):

$$\frac{\partial(XR_i)}{\partial a_k} = M_{ik}, \text{ тогда, например, при } N = 6 \text{ и } L = 18, \quad \frac{\partial(XR_{12})}{\partial a_5} = x_{12} y_{12},$$

$$\frac{\partial(XR_i)}{\partial a_k} = 2M_{ik} \left(\sum_{j=1}^N M_{ij} a_j - x_i' \right)$$

и приравняем ее к нулю.

$$\frac{\partial(E)}{\partial a_k} = \sum_{i=1}^L 2M_{ik} \left(\sum_{j=1}^N M_{ij} a_j - x_i' \right) = 0.$$

В эти уравнения входят все N искоемых a_k . Получим систему из N уравнений с N неизвестными. Решая ее, найдем новые коэффициенты a_k , которые дадут минимальную ошибку для всех данных из калибровочной таблицы (см. табл. 2). Все то же самое надо проделать и для коэффициентов b_i по y .

Распишем первое ($k = 1$) уравнение для $N = 6$ и $L = 18$:

$$\sum_{i=1}^{18} M_{i1} D_i = 0, \quad \text{или} \quad 1 \cdot D_1 + 1 \cdot D_2 + \dots + 1 \cdot D_{18} = 0,$$

$$\text{где } D_i = \left(\sum_{j=1}^6 (M_{ij} \cdot a_j - x_i') \right) = a_1 + a_2 x_i + a_3 y_i + a_4 x_i^2 + a_5 x_i y_i + a_6 y_i^2 - x_i'.$$

$$\text{Для второго уравнения } (k = 2): \quad x_1 \cdot D_1 + x_2 \cdot D_2 + \dots + x_{18} \cdot D_{18} = 0$$

$$\text{Для третьего уравнения } (k = 3): \quad y_1 \cdot D_1 + y_2 \cdot D_2 + \dots + y_{18} \cdot D_{18} = 0 \text{ и т.д.}$$

Преобразуем эти уравнения так, чтобы выделить a :

$$\sum_{i=1}^L M_{ik} \left(\sum_{j=1}^N (M_{ij} \cdot a_j) - x_i' \right) = 0,$$

здесь $k = 1 \dots N$ – номер уравнения:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^L M_{ik} \sum_{j=1}^N (M_{ij} \cdot a_j) &= \sum_{i=1}^L M_{ik} x_i' \\ \sum_{j=1}^N a_j \sum_{i=1}^L (M_{ik} \cdot M_{ij}) &= \sum_{i=1}^L M_{ik} x_i' \\ \sum_{j=1}^N P_{kj} a_j &= Q_k, \end{aligned} \quad (3)$$

где $P_{kj} = \sum_{i=1}^L M_{ik} \cdot M_{ij}$ – элементы матрицы $N \times N$, $Q_k = \sum_{i=1}^L M_{ik} x_i$ – вектор-столбец.

Таким образом, решение системы уравнений (3) позволяет определить желаемые коэффициенты a_j для калибровочной таблицы из L точек. Аналогичные расчеты необходимо провести и для коэффициентов b_j по другой координате.

Экспериментальная часть. В состав экспериментальной установки входил макет двухколесного четырехопорного МР размером $200 \times 200 \times 150$ мм с бортовой системой локальной навигации (рис. 2) и ТК (USB2.0 web-камера Ritmix RVC-047M) с разрешением 640×480 пикселей, стационарно закрепленная на высоте 2644 мм от пола. Такое расположение ТК позволило наблюдать на полу полигон, размером 2230×1630 мм. При этом разрешение на один пиксель составляло около 3.5 мм.

К компьютеру, обрабатывающему видеопоток с ТК, был подключен радиомодуль, позволяющий получать по радиоканалу в реальном времени данные с датчиков бортовой системы локальной навигации. Она включала в себя одометр и инерциальные датчики, а также источники другой телеметрической информации.

Программа для обработки видеопотока была написана на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV. Эта же программа получала по радиоканалу данные о текущих координатах, измеренных одометром МР и системой инерциальных датчиков. Это позволило сравнивать их в реальном времени с абсолютными координатами, вычисленными по изображениям оптического маркера.

Движение макета МР может быть как автономным, так и дистанционно-управляемым оператором с помощью инфракрасного пульта.

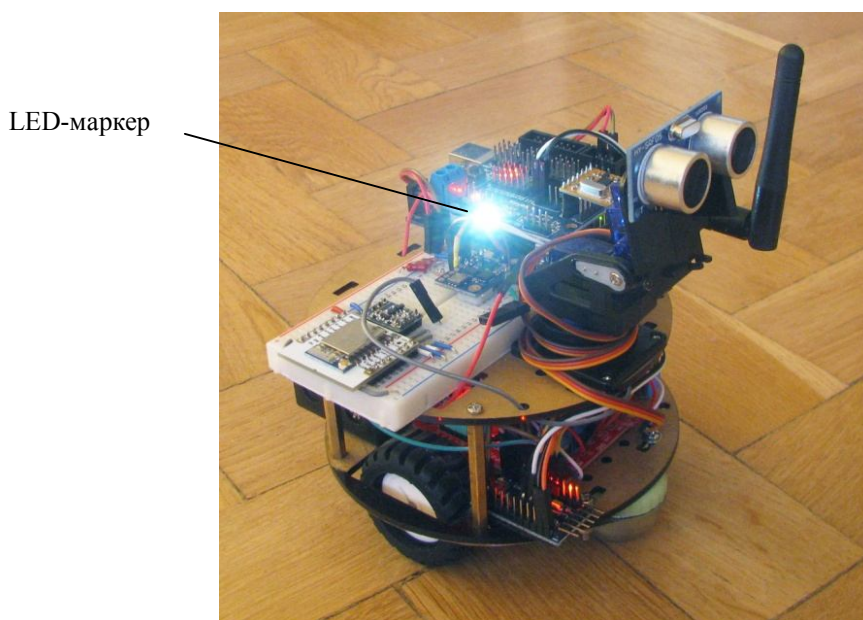


Рисунок 2 – Фотография макета МР с включенным LED-маркером

В качестве оптического маркера на макете МР использовался белый SMD светодиод ARL-1210UWC (см. рис. 2) с диаграммой направленности излучения 120 град. В этом случае, при допустимом отдалении от оптической оси ТК в 1000 мм, светодиод уверенно детектировался ТК.

Пороговая обработка видеопотока, получаемого с ТК, позволяла отделить яркое световое пятно маркера от бликов и фона (рис. 3а).

При настройке, сначала изменяли управляемые параметры ТК. При этом повышали контрастность, а экспозицию и яркость уменьшали. Затем, каждый кадр потокового видео получали в градациях серого и применяли к нему пороговый по яркости фильтр. В результате на выходе получалось бинарное изображение, показанное на рисунке 3б.

Исследование показало, что для уверенного выделения маркера на фоне различных по яркости бликов, его интенсивность должна быть достаточно высокой, а размер – не менее 5 пикселей по обеим осям. Для получения точных координат маркера, в обработанном бинарном кадре происходило усреднение числа «белых» пикселей по каждой из осей, что в итоге позволяло получить усредненную координату центра «пятна».

Быстродействие разработанных алгоритмов позволило вычислять значения абсолютных координат макета МР с частотой 25 Гц.

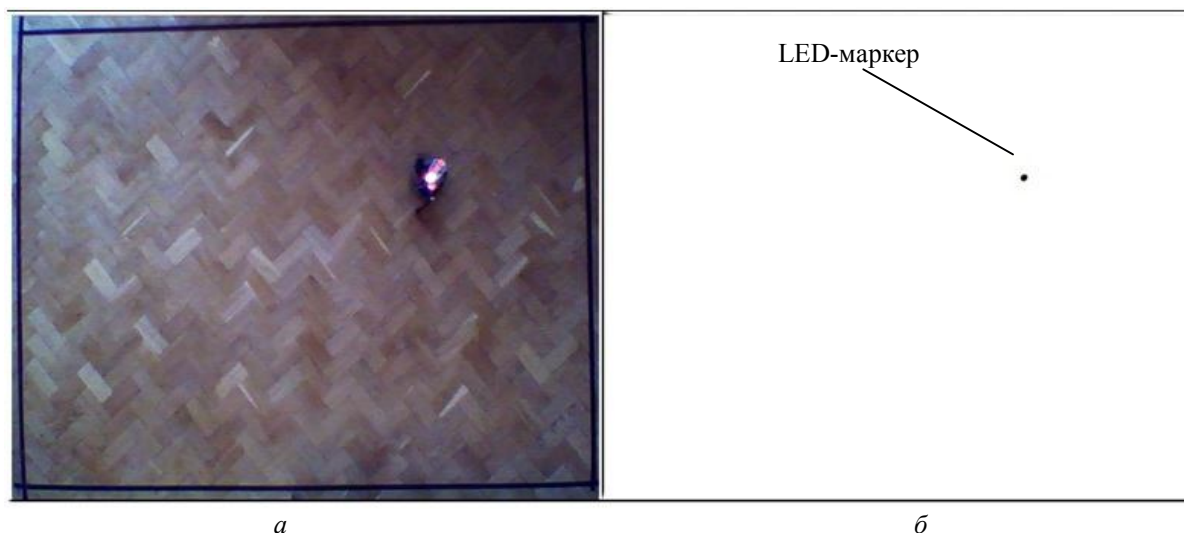


Рисунок 3 – Изображения рабочей сцены с макетом МР и с LED-маркером на борту: *а* – исходное, *б* – после обработки (инвертировано)

Калибровка алгоритма проводилась следующим образом. Макет МР помещался в определенную точку полигона, в которой абсолютные координаты его оптического маркера измерялись с помощью лазерного дальномера с точностью не хуже ± 2 мм. При этом фиксировались усредненные координаты изображения маркера, полученные ТК. Было взято 18 таких реперных точек, равномерно распределенных по поверхности полигона (табл. 2). На основании этих данных методом наименьших квадратов рассчитывались коэффициенты преобразования a_j для полиномов от первой до четвертой степени.

Для уточнения реальных координат макета МР с помощью ТК, таким же образом были проведены измерения относительно 10 других (произвольных) точек, не попадающих во множество реперных. Далее была подсчитана среднеквадратичная ошибка для каждой использовавшейся степени полинома (табл. 3). Как следует из нее, наименьшей ошибкой обладает полином 2-ой степени.

Таблица 3 – Зависимость среднеквадратичной ошибки от степени полинома для рассматриваемого полигона

Степень полинома	Среднеквадратичная ошибка (мм)
1	8,178
2	6,958
3	18,273
4	179,337

Полиномы других степеней имеют большее значение среднеквадратичной ошибки. При этом, например, полином 4-ой степени имеет хорошую точность в реперных точках полигона. Однако в других точках величина среднеквадратичной ошибки существенно возрастает.

Оценка точности системы колесной одометрии МР. Предложенный подход использовался для оценки точности системы колесной одометрии макета МР, после проведенной калибровки. Приводная часть макета содержала мотор-редукторы с передаточным числом 1 : 100, объединенные с энкодерами [5]. Частота опроса последних составляла 200/оборот выходного вала. Для поддержания заданной угловой скорости на каждом из колес использовались ПИД-регуляторы скорости.

Результаты испытаний представлены на рисунке 4а, в виде траекторий движения макета, построенных с использованием ТК (синяя кривая) и системы колесной одометрии (красная кривая).

Как следует из рисунка 4а, траектория движения макета МР, полученная от системы колесной одометрии, примерно совпадает с траекторией, измеренной описанным выше способом.

На прилагаемом к статье видеоролике (адрес в Интернете – <https://youtu.be/cUeT-Q8sT7Y>) в динамике представлен эксперимент по трассировке маршрута перемещения МР в пределах полигона с помощью ТК (синяя линия) и системы колесной одометрии (красная линия). Для просмотра видеоролика можно использовать программу Media Player Classic или проигрыватель Windows Media.

Текущая ошибка рассчитывалась в реальном времени для каждой измеренной точки. Ее зависимость от пройденного расстояния приведена на рисунке 4б. Максимальная ошибка определения положения при движении по трассе длиной 10 м не превышала 20 мм.

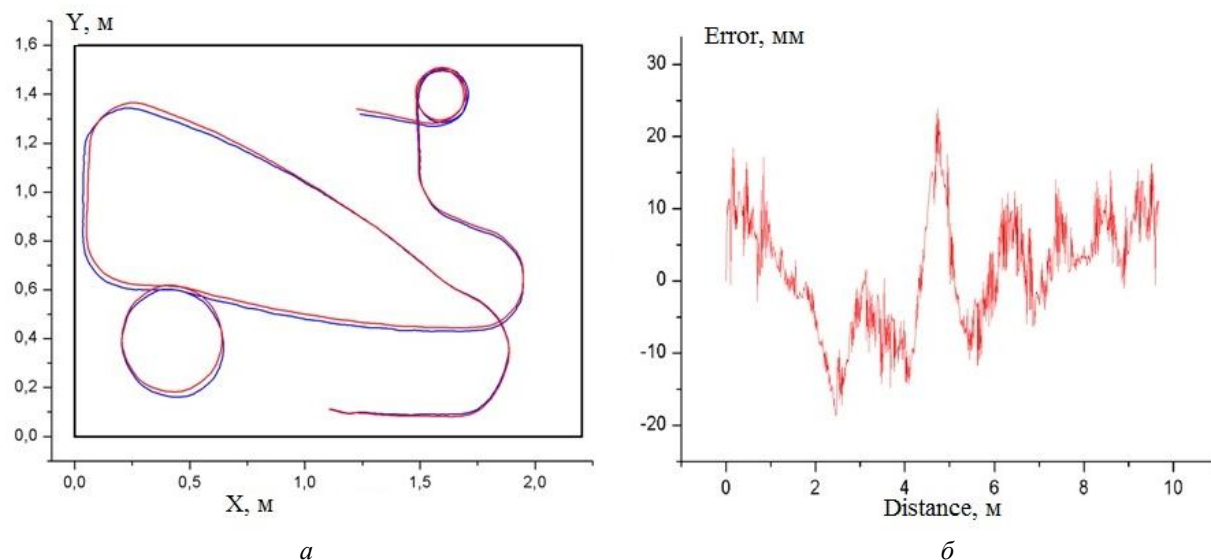


Рисунок 4 *а* – траектория движения макета МР по полигону (его границы отмечены черным прямоугольником). Синяя кривая – траектория, полученная с помощью ТК, красная – траектория, полученная системой одометрии МР; *б* – график зависимости абсолютной ошибки измерения положения макета МР от длины пройденного пути

Как известно, колесная одометрия является методом измерения относительных координат, при котором невозможно избежать накопления ошибки с увеличением длины пройденного пути. Поэтому всегда встает вопрос об измерении скорости нарастания этой ошибки в конкретной системе. Целью может быть определение интервала, через который необходимо осуществлять привязку показаний одометра к абсолютным координатам, или корректное комплексирование одометрических данных с данными других навигационных устройств [2]. Для определения скорости нарастания ошибки в тестируемой системе был проведен опыт, в котором макет МР, управляемый оператором, двигался по сложной траектории в пределах полигона в течение длительного времени. Зависимость величины ошибки от пройденного расстояния в отношении определения положения макета системой колесной одометрии относительно абсолютных координат, измеренных ТК, приведена на рисунке 5.

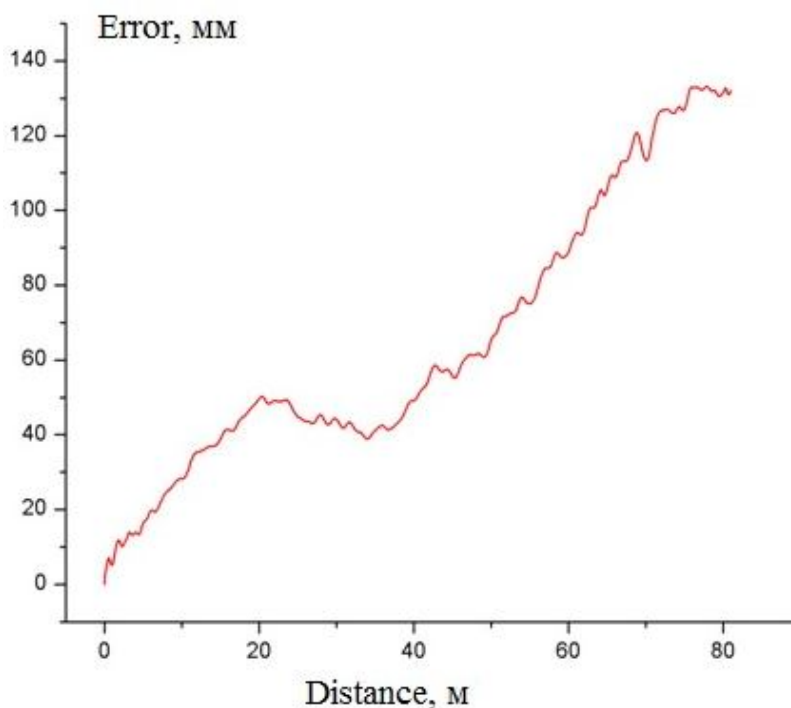


Рисунок 5 – Зависимость величины усредненной ошибки одометрической системы в зависимости от пройденного МР расстояния

Из графика видно, что скорость нарастания ошибки в тестируемой системе колесной одометрии составляет около 2.5 мм на каждый пройденный метр (или около 0,25 %).

Заключение. При использовании приведенного в статье метода калибровки систем локальной навигации МР с помощью неподвижной ТК и системы нелинейных полиномов второго порядка достигается суммарная ошибка определения положения МР примерно 2 пикселя. При разрешении ТК в 640×480 пикселей это составило 7 мм для рассмотренного полигона. Используя ТК с более высоким разрешением можно пропорционально увеличить точность определения координат МР для полигона тех же размеров, или же увеличить размеры полигона при том же значении абсолютной ошибки.

Список литературы

1. Бабаян Л. М. Видеоизмерительная система оценки траектории движения мобильного робота / Л. М. Бабаян, Д. А. Носенков, И. И. Понимаш // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании – 2014 : интернет-конференция. – 2014.
2. Горбачев А. Ю. Применение одометров для коррекции интегрированных навигационных систем / А. Ю. Горбачев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2009. – № 4. – С. 37–53.
3. Грузман И. С. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2002. – 352 с.
4. Ермишин К. В. Мультиагентная сенсорная система сервисного мобильного робота / К. В. Ермишин, С. А. Воронников // Инженерный журнал: Наука и инновации. – 2012. – № 6. – С. 50–59.
5. Ермишин К. В. Система управления образовательным мобильным роботом / К. В. Ермишин, С. А. Воронников, Н. А. Выборнов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 4. – С. 226–238.
6. Полиномиальные преобразования для географической привязки растровых данных. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/polynom.html> (дата доступа 03.03.2017), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус..
7. Цодокова В. В. Роль искажений изображения в решении астрономо-геодезических задач / В. В. Цодокова, С. В. Гайворонский, Е. В. Русин // Навигация и управление движением : VII конференция молодых ученых. – Санкт-Петербург, 2015.
8. Юлдашев М. Н. Ультразвуковые системы для определения пространственного положения подвижного объекта / М. Н. Юлдашев // Научные технологии и интеллектуальные системы 2015 : сборник научных трудов. 17-ая молодежная научно-техническая конференция. – Москва : Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2015. – С. 465–472.
9. Яковенко И. А. Навигация внутри помещений. Обзор и сравнительный анализ технологий: GSM, Bluetooth, Wi-Fi, GPS, RFID, NFC / И. А. Яковенко // Молодежный научно-технический вестник. – 2014. – № 5. – С. 77–87.
10. Borenstein J. Mobile Robot Positioning – Sensors and Techniques / J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng, D. Wehe // Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots. – 1997. – Vol. 14, no. 4. – P. 231–249.
11. Gorostiza E. M. Infrared Sensor System for Mobile-Robot Positioning in Intelligent Spaces / E. M. Gorostiza, J. L. L. Galilea, F. J. M. Meca, D. S. Monzú, F. E. Zapata, L. P. Puerto // Sensors. – 2011. – Vol. 11. – P. 5416–5438.
12. Ghidary Saeed Shiry. A new Home Robot Positioning System (HRPS) using IR switched multi ultrasonic sensors / Ghidary Saeed Shiry, Tani Takahiro, Takamori Toshi, Hattori Motofumi // Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. – 1999. – Vol. 4. – P. 73–74.
13. Ijaz Faheem. Indoor Positioning: A Review of Indoor Ultrasonic Positioning systems / Ijaz Faheem, Lee Chankil // Proceedings of 15th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). – Korea, 2013. – P. 1146–1150.
14. Mautz Rainer. The Challenges of Indoor Environments and Specification on some Alternative Positioning Systems / Mautz Rainer // Proceedings Of The 6th Workshop On Positioning, Navigation And Communication. – 2009. – P. 29–36.
15. Medina C. Ultrasound Indoor Positioning System Based on a Low-Power Wireless Sensor Network Providing Sub-Centimeter Accuracy / C. Medina, J. C. Segura, A. Torre // Sensors. – 2013. – Vol. 13, issue 3. – P. 3501–3526.
16. Ling Mao. Relative Localization Method of Multiple Micro Robots Based on Simple Sensors / Ling Mao, Jiapin Chen, Zhenbo Li, Dawei Zhang // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Vol. 10. – P. 1.
17. Panich S. Mobile Robot Integrated with Gyroscope by Using IKF / S. Panich, N. Afzulpurkar // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2011. – Vol. 8, no. 2. – P. 122–136.
18. Su Yong Kim. Estimation of Absolute Positioning of Mobile Robot Using U-SAT / Su Yong Kim, SooHong Park // Proceedings of IFIP International Conference. – 2007. – P. 143–150.

References

1. Babayan L. M., Nosenkov D. D., Ponomash I. I. Videoizmeritel'naya sistema otsenki traektorii dvizheniya mobil'nogo robota [Video measuring system for assessing the trajectory of a mobile robot]. *Sovremennye problemy i puti ikh resheniya v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii* – 2014 : internet-konferentsiya [Modern Problems and Solutions to them in Science, Transport, Production and Education – 2014. Internet conference], 2014.
2. Gorbachev A. Yu. Primenenie odometrov dlya korrektsii integrirovannykh navigatsionnykh system [Application odometers for the correction of integrated navigation systems]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Ser. «PriBOROSTROENIE»* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument-making], 2009, no. 4, pp. 37–53.

3. Gruzman I. S., Kirichuk V. S., Kosykh V. P., Peretyagin G. I., Spektor A. A. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh* [Digital image processing in information systems], Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. House, 2002. 352 p.
4. Yermishin K. V., Vorotnikov S. A. Multiagentnaya sensornaya sistema servisnogo mobilnogo robota [Multiagent sensor system of the service mobile robot]. *Inzhenernyy zhurnal: Nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations], 2012, no. 6, pp. 50–59.
5. Yermishin K. V., Vorotnikov S. A., Vybornov N. A. Sistema upravleniya obrazovatelnyy mobilnyy robotom [The educational mobile robot management system]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2014, no. 4, pp. 226–238.
6. *Polynomialnye preobrazovaniya dlya geograficheskoy privyazki rastrovyykh dannykh* [Polynomial transformations for the geo-referencing of raster data]. Available at: <http://gis-lab.info/qa/polynom.html>.
7. Tsodokova V. V., Gayvoronskiy S. V., Rusin Ye. V. Rol iskazheniy izobrazheniya v reshenii astronomo-geodezicheskikh zadach [The role of image distortions in solving astronomical and geodetic problems]. *Navigatsiya i upravlenie dvizheniem : VII konferentsiya molodykh uchenykh* [Navigation and Traffic Management. VII Conference of Young Scientists], Saint Petersburg, 2015.
8. Yuldashev M. N. Ultrazvukovye sistemy dlya opredeleniya prostranstvennogo polozheniya podvizhnogo obekta [Ultrasonic systems for determining the spatial position of a movable object]. *Naukoemkie tekhnologii i intellektualnye sistemy – 2015 : sbornik nauchnykh trudov. 17-aya molodezhnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [High Technology and Intelligent Systems – 2015. Proceedings. The 17th Youth Scientific and Technical Conference], Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ. House, 2015, pp. 465–472.
9. Yakovenko I. A. Navigatsiya vnuti pomeshcheniy. Obzor i sravnitelnyy analiz tekhnologiy: GSM, Bluetooth, Wi-Fi, GPS, RFID, NFC [Indoor navigation. Overview and comparative analysis of technologies: GSM, Bluetooth, Wi-Fi, GPS, RFID, NFC]. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskyy vestnik* [Youth scientific and technical bulletin], 2014, no. 5, pp. 77–87.
10. Borenstein J., Everett H. R., Feng L., Wehe D. Mobile Robot Positioning – Sensors and Techniques. *Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots*, 1997, vol. 14, no. 4, pp. 231–249.
11. Gorostiza E. M., Galilea J. L. L., Meca F. J. M., Monzú D. S., Zapata F. E., Puerto L. P. Infrared Sensor System for Mobile-Robot Positioning in Intelligent Spaces. *Sensors*, 2011, vol. 11, pp. 5416–5438.
12. Ghidary Saeed Shiry, Tani Takahiro, Takamori Toshi, Hattori Motofumi. A new Home Robot Positioning System (HRPS) using IR switched multi ultrasonic sensors. *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 1999, vol. 4, pp. 737–74.
13. Ijaz Faheem, Lee Chankil. Indoor Positioning: A Review of Indoor Ultrasonic Positioning systems. *Proceedings of 15th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, Korea, 2013, pp. 1146–1150.
14. Mautz Rainer. The Challenges of Indoor Environments and Specification on some Alternative Positioning Systems. *Proceedings of The 6th Workshop On Positioning, Navigation And Communication*, 2009, pp. 29–36.
15. Medina C., Segura J. C., Torre A. Ultrasound Indoor Positioning System Based on a Low-Power Wireless Sensor Network Providing Sub-Centimeter Accuracy. *Sensors*, 2013, vol. 13, issue 3, pp. 3501–3526.
16. Ling Mao, Jiapin Chen, Zhenbo Li, Dawei Zhang. Relative Localization Method of Multiple Micro Robots Based on Simple Sensors. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, vol. 10, p. 1.
17. Panich S., Afzulpurkar N. Mobile Robot Integrated with Gyroscope by Using IKF. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2011, vol. 8, no. 2, pp. 122–136.
18. Su Yong Kim, SooHong Park. Estimation of Absolute Positioning of Mobile Robot Using U-SAT. *Proceedings of IFIP International Conference*, 2007, pp. 143–150.