

МОНОКУЛЯРНАЯ СИСТЕМА ЗРЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА И ЛОКАЛИЗАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Лазич Боян

bojanlzc@gmail.com

SPIN-код: 3396-6378

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена задача построения карты помещения с использованием системы монокулярного зрения, т. е. с помощью одной телекамеры, которая находится на мобильном роботе. Расстояние вычисляется на основе анализа смещения особых точек объекта на двух последовательных изображениях, полученных от телекамеры. Приведены математические выражения для определения положения точек стен в глобальной системе координат. Телекамеры робота, последовательно располагающегося в разных точках рабочего пространства, снимают изображения стен. Аппроксимация проекций стен выполнена методом наименьших квадратов. Приведены результаты экспериментальных исследований реального помещения, определена погрешность измерений.

Ключевые слова

Мобильный робот, телевизионная камера, особые точки изображения, вычисление расстояния, построение карты, монокулярное зрение, положение робота

Поступила в редакцию 08.12.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Постановка задачи. Предполагается, что мобильный робот с одной телекамерой находится в помещении, для которого нужно построить карту. Исходное положение робота в мировой системе координат считается известным. Текущие координаты робота относительно исходного положения могут быть определены с помощью собственных датчиков (одометрии, акселерометра и т. д.). Пример помещения и возможные положения робота (и телекамеры) приведены на рис. 1.

Чтобы построить карту, необходимо получить информацию о положении стен помещения. Это предлагается сделать с помощью одной телекамеры робота, перемещающегося по нескольким точкам рабочего пространства. На полученных изображениях выделяют несколько точек, принадлежащих стене. Затем находят

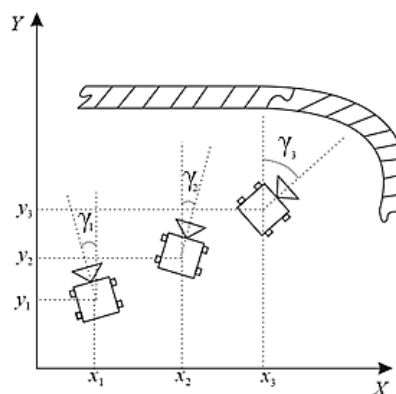


Рис. 1. Расположение робота в помещении

их пространственные координаты и аппроксимируют их методом наименьших квадратов [1–3]. При этом предполагают, что стены в плоскости $x y$ могут быть описаны прямыми и кривыми второго порядка (параболой, окружностью и т. д.).

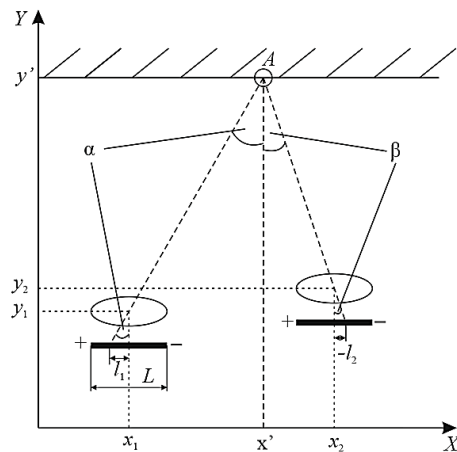


Рис. 2. Положения робота относительно стены

Определение 3D-координат точек стены. Работа камеры робота при измерении координат одной точки показана на рис. 2. Пусть робот последовательно находится в точках с координатами (x_1, y_1, γ_1) и (x_2, y_2, γ_2) . В этом примере углы поворота робота одинаковы и равны $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$, L — размер матрицы телекамеры. После определения значений расстояний l_1 и l_2 от центра изображения необходимо вычислить координаты x' и y' точки стены A .

Соотношения между углами и координатами на рис. 2 можно определить следующим образом:

$$x' - x_1 = (y' - y_1) \operatorname{tg} \alpha; \quad (1)$$

$$x_2 - x' = (y_2 - y') \operatorname{tg} \beta, \quad (2)$$

где α и β — углы направления на точку A в первом и втором положениях телекамеры соответственно; φ_{FOV} — угол зрения телекамеры в горизонтальной плоскости;

$$\alpha = \varphi_{FOV} \cdot 2l_1 / L;$$

$$\beta = -\varphi_{FOV} \cdot 2l_2 / L.$$

Отметим, что значения и знаки тангенсов углов α и β зависят от положения проекции точки A на матрице телекамеры.

Из уравнений (1) и (2) можно определить координаты точки A :

$$y' = \frac{x_2 - x_1 + y_1 \operatorname{tg} \alpha - y_2 \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}; \quad (3)$$

$$x' = x_1 + (y' - y_1) \operatorname{tg} \alpha. \quad (4)$$

В общем случае угловое положение робота может быть любым и необходимо учитывать углы γ_1 и γ_2 . Такой пример показан на рис. 3.

Чтобы учесть значение угла поворота, необходимо вместо углов α и β поставить $(\alpha - \gamma_1)$ и $(\beta - \gamma_2)$ в формулы (1) и (2). Если робот повернут влево, то угол γ_i ($i = 1, 2$) имеет отрицательное значение, а если вправо, то положительное.

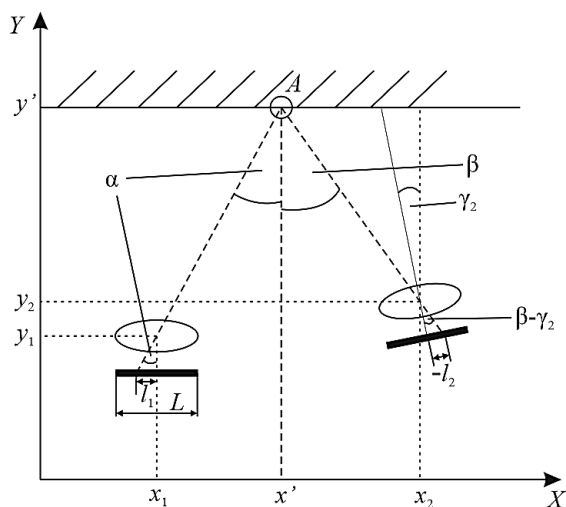


Рис. 3. Произвольное положение робота относительно стены

Экспериментальная часть. Эксперимент проводили в два этапа. На первом этапе с помощью телекамеры измеряли координаты меток, расположенных на вертикальной стене. Далее изменяли положение и угол поворота телекамеры относительно стены. По результатам измерений вычисляли 3D-координаты меток. На втором этапе метки наносили на три стены помещения. Процедуру повторяли и по полученному массиву координат методом наименьших квадратов определяли пространственное расположение стен и строили карту помещения.

Первый эксперимент. В первом этапе телекамеру устанавливали на расстоянии 29 см от стены, затем ее смещали на 12 см от стены и на 15 см вправо (рис. 4). В каждом положении определяли координаты метки под разными углами γ ($-15^\circ, \dots, 15^\circ$).

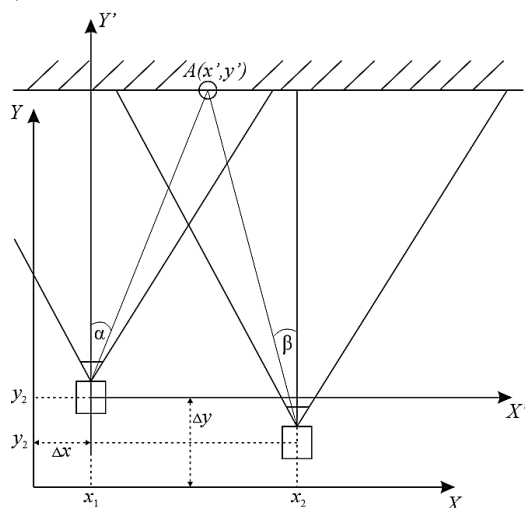


Рис. 4. Системы координат

Используя обозначения $X_1 = \Delta_x$, $Y_1 = \Delta_y$, $X_2 = \Delta_x + x_2$, $Y_2 = \Delta_y + y_2$, формулы (3) и (4) можно записать в следующем виде [4, 5]:

$$y' = \frac{x_2 - x_1 + y_1 \operatorname{tg} \alpha - y_2 \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta} + \Delta_y; \quad (5)$$

$$x' = x_1 + (y' - y_1) \operatorname{tg} \alpha + \Delta_x. \quad (6)$$

Отметим, что если $\Delta_x = 0$ и $\Delta_y = 0$, то мировая система координат будет совпадать с системой координат робота и все координаты будут измеряться в этой системе.

Реальные изображения, полученные от телекамеры, имеют дисторсию (рис. 5, а). Результат коррекции изображения с помощью программ библиотеки OpenCV [7] показан на рис. 5, б.

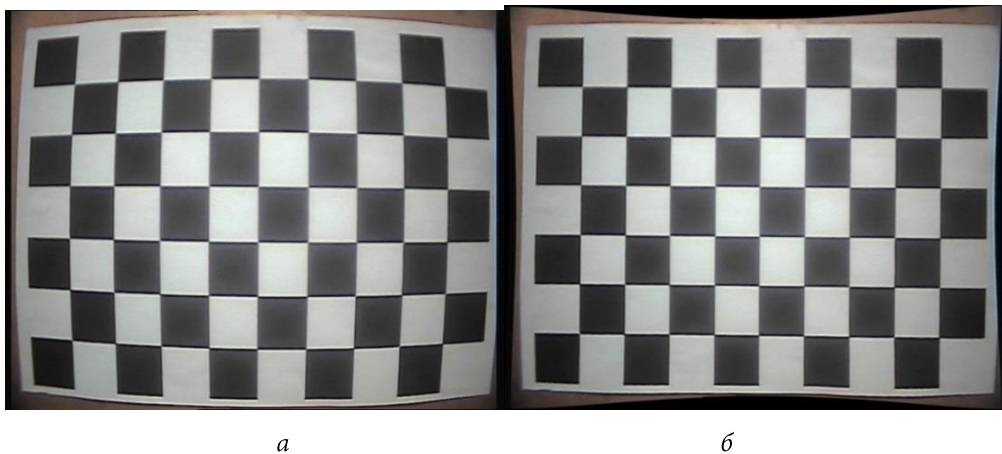


Рис. 5. Тестовое изображение до коррекции (а) и после (б)

Далее было определено поле зрения использующей телекамеры (field of view — FOV) в горизонтальной плоскости. Для этого на стене устанавливали две метки с координатами x_1 и x_2 на известном расстоянии друг от друга. Перемещая камеру в направлении стены, определяли момент, когда обе метки одновременно исчезают из поля зрения камеры. Полученное расстояние от камеры до стены фиксировали.

Для вычисления максимального угла зрения применяли формулу

$$\varphi_{FOV} = 2 \operatorname{arctg} \frac{x_2 - x_1}{2y} = 68^\circ.$$

Были проведены четыре эксперимента (8 измерений) при различных положениях телекамеры (рис. б) для вычисления положения одной метки.

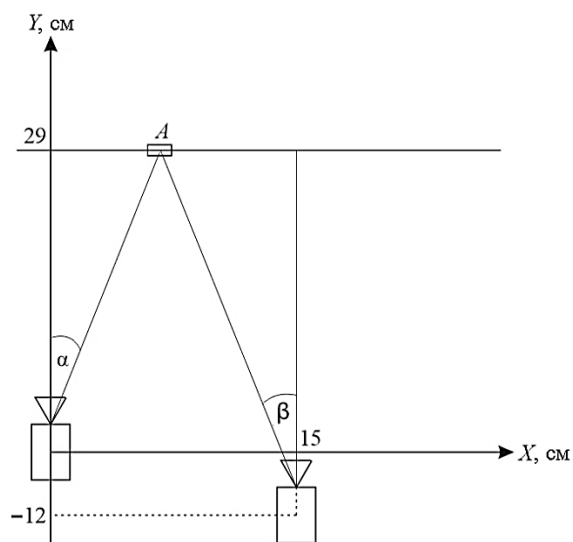


Рис. 6. Положение камеры в первом эксперименте

Примеры изображений, полученных из двух положений телекамеры с углами $\gamma_1 = 0$ и $\gamma_2 = 0$ после корректировки дисторсии, фильтрации [6, 7] и выделения центра масс метки, представлены на рис. 7.

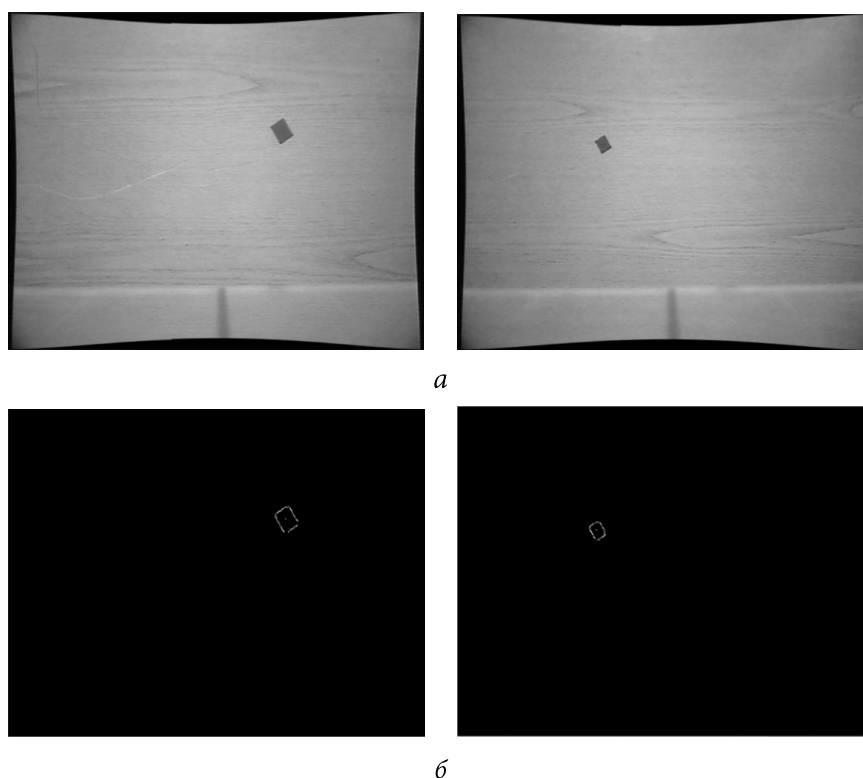


Рис. 7. Пример изображения меток:

а — исходное; *б* — после выделения их центров масс

По данным изображениям определились координаты центра масс метки и углы α и β в каждом положении камеры по формулам

$$\alpha = (x_1 - 330) \cdot 3,14 \cdot 34,0 / (330 \cdot 180) + \gamma_1;$$

$$\beta = (x_2 - 330) \cdot 3,14 \cdot 34,0 / (330 \cdot 180) + \gamma_2.$$

Здесь x_1 и x_2 — координаты центра масс метки на изображениях; γ_1 и γ_2 — углы поворота телекамеры (на рис. 6 они равны нулю).

Для измерения координат точки А использовали формулы (5) и (6). Результаты экспериментов при разных положениях телекамеры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований

Номер эксперимента	γ_1 , град	γ_2 , град	Y, см	X, см	α , град	β , град	Y', см	X', см	Погрешность (по оси x), %
1	0	0	29	6	11,13	-11,44	31,53	6,20	8,72
2	0	-15	29	6	11,23	-11,81	30,70	6,09	5,86
3	15	-15	29	6	11,71	-11,81	30,06	6,23	3,66
4	-15	15	29	6	12,60	-12,50	27,73	6,20	-4,38

Как видно из табл. 1, погрешность измерений не превышает 10 %, что достаточно для оценки положения стены относительно робота.

Второй эксперимент. Целью второго эксперимента было описание рабочего пространства, ограниченного тремя стенами (рис. 8). Положения стен определялось по их изображениям, полученным из двух точек помещения. Для более точного описания проекции стен на плоскость XOY, на каждой стене было установлено несколько меток, координаты которых аппроксимировались прямой по методу наименьших квадратов.

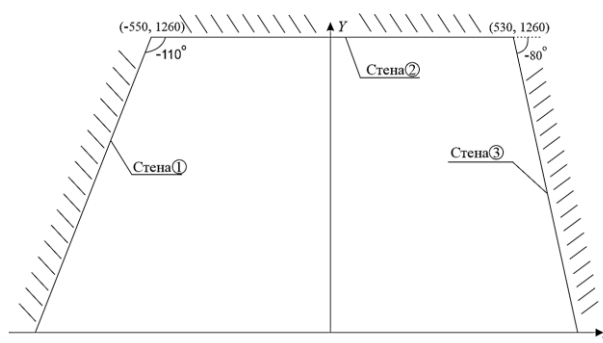


Рис. 8. Расположение стен в рабочем пространстве (размеры в миллиметрах)

В качестве примера на рис. 9 показаны точки расположения телекамеры, из которых определялись координаты меток на левой (первой) стене. На рис. 9, а показано первое положение телекамер, при котором получены фотографии левой стены, а на рис. 9, б — второе положение. Изображения левой стены с выде-

ленными метками из этих точек (для камеры с положением из рис. 9, *a*) даны на рис. 10, *a* и *б*, где верхние фотографии представляют собой изображения, полученные с помощью телекамер, а нижние — полученные обработкой помощью детектора границ Канны.

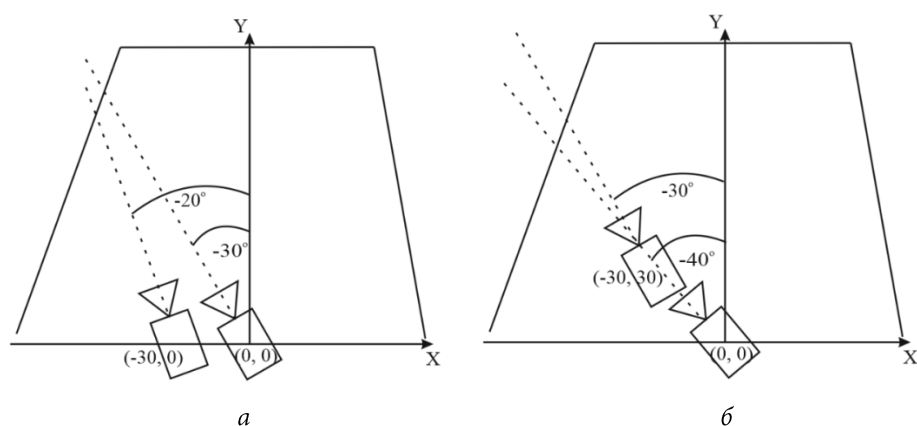


Рис. 9. Получение изображений левой стены

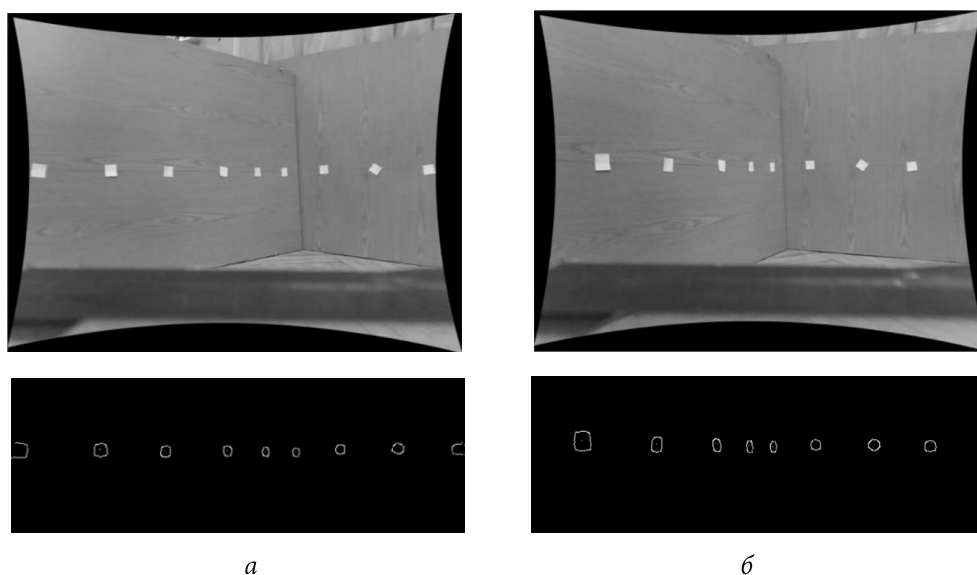


Рис. 10. Изображения левой стены

Аналогичные изображения были получены для второй и третьей стен. После вычисления координат точек, для каждой стены методом наименьших квадратов были найдены коэффициенты уравнения прямой, лежащей на её плоскости:

- для первой стены: $y_1 = 2,747x + 2771$;
- для второй стены: $y_2 = 1260$;
- для третьей стены $y_3 = -5,67x + 4266$.

С использованием полученных уравнений была построена карта помещения. Сначала было определено положение прямых (проекций стен) на плоскости XOY (рис. 11, *a*), а затем с использованием простых эмпирических отношений построена карта пространства, показанная на рис. 11, *a* красной пунктирной линией. Синей линией на рис. 11, *б* показано реальное расположение стен.

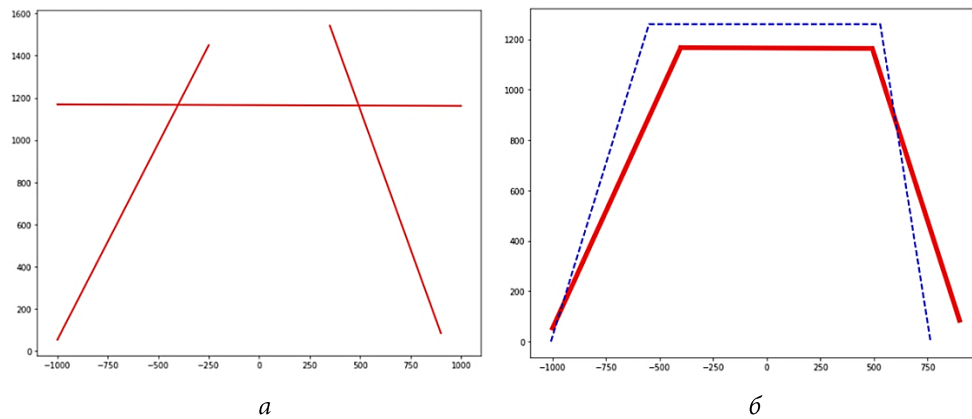


Рис. 11. Расположение прямых (*a*) и карта, полученная из облака точек (*б*)

Для оценки погрешности построения измеряли наименьшее расстояние от стены, нанесённой на карту, до ее реального положения. Чтобы это сделать, координаты преобразовывали таким образом, чтобы фронтальная часть стены была параллельна оси X . Для этого использовали новую систему координат, в которой ось X параллельна первой стене, и матрица трансформации, которая имеет следующий вид [8]:

$${}^A R_B = \begin{pmatrix} X_B \cdot X_A & Y_B \cdot X_A & Z_B \cdot X_A \\ X_B \cdot Y_A & Y_B \cdot Y_A & Z_B \cdot Y_A \\ X_B \cdot Z_A & Y_B \cdot Z_A & Z_B \cdot Z_A \end{pmatrix},$$

где $X_A, X_B, Y_A, Y_B, Z_A, Z_B$ — единичные векторы систем координат.

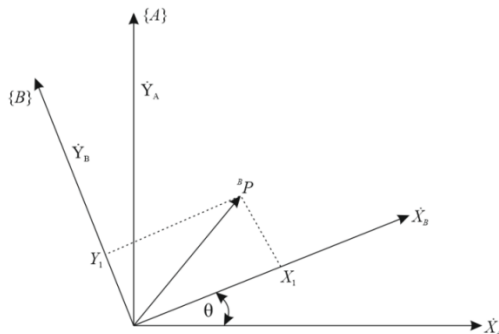


Рис. 12. Преобразование системы координат

Отметим, что в результате перемножения векторов определяется косинус угла между ними:

$$A \cdot B = |A| \cdot |B| \cos \theta = \cos \theta.$$

Пример перемещения точки ${}^B P$ из системы координат $\{B\}$ в систему координат $\{A\}$ показан на рис. 12.

Матрица трансформации для данного примера имеет вид

$${}^A_B R = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

В системе $\{B\}$ точка ${}^B P$ имеет следующие координаты:

$${}^B P = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad {}^B P = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Чтобы определить положение точки ${}^B P$ в координатной системе $\{A\}$, необходимо выполнить преобразование

$${}^A P = {}^A_B R \cdot {}^B P.$$

Расположение реальной стены после преобразования системы координат показано на рис. 13 черным цветом, а облако точек — красным цветом [9].

Подобным образом было выполнено преобразование координат правой (третьей) стены. Координаты фронтальной стены (второй) не нуждаются в преобразовании, поскольку она уже параллельна оси x . Погрешности построения карты (расстояния от точек до настоящей стены) приведены в табл. 2 для каждой стены.

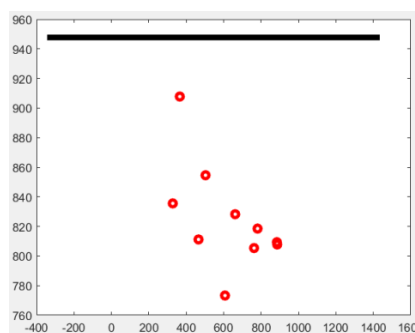


Рис. 13. Расположение полученных точек относительно настоящей стены

Таблица 2

Погрешности определения положения

X, мм	Y, мм	Погрешность, %	X, мм	Y, мм	Погрешность, %	X, мм	Y, мм	Погрешность, %
Левая стена			Правая стена			Фронтальная стена		
366	908	4,22	-871	714	3,62	-301	1246	1,11
503	855	9,81	-778	779	-5,16	-81	1312	-4,13
662	828	12,66	-647	817	-10,29	135	1374	-9,05
781	819	13,61	-508	823	-11,10	286	1245	1,19
885	809	14,66	-341	795	-7,32	408	1123	10,87
328	836	11,81	-323	743	-0,30	-323	1180	6,35
466	811	14,45	-205	853	-15,15	-192	977	22,46
607	773	18,46	-40	875	-18,12	-61	1049	16,75
763	805	15,08	—	—	—	79	1075	14,68
886	808	14,77	—	—	—	260	1126	10,63
—	—	—	—	—	—	383	1110	11,90

Среднюю погрешность измерений рассчитывали следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\sum_i^n \varepsilon_i}{n},$$

где ε_i — погрешность измерения одной метки; n — число измерений.

В результате были получены следующие значения ошибок для каждой стены $\varepsilon_1 = 13\%$, $\varepsilon_2 = 7,5\%$, $\varepsilon_3 = 8\%$. Таким образом, ошибка построения карты, достаточно сложной пространственной сцене не превышает 13%, что является хорошим результатом.

Заключение. Предложенный способ позволил построить карту помещения с использованием одной телевизионной камеры, установленной на мобильном роботе. Работоспособность способа была подтверждена экспериментально. Погрешность находится в допустимых пределах.

Литература

- [1] Press H.W., Teukolsky A.S., Vetterling T.W., et al. Numerical recipes. Cambridge University Press, 2007.
- [2] Корн. Г., Корн. Т. Справочник по математике. М., Наука, 1974.
- [3] Miller S.J. The method of least squares. URL: https://web.williams.edu/Mathematics/sjmiller/public_html/BrownClasses/54/handouts/MethodLeastSquares.pdf (дата обращения: 15.12.2020).
- [4] Szeliski R. Computer vision. Springer, 2011.
- [5] Patrick F.D. Measurement and data analysis for engineering and science. McGraw-Hill, 2005.
- [6] Camera calibration. *opencv-python-tutroals.readthedocs.io: веб-сайт*. URL - https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py_tutorials/py_calib3d/py_calibration/py_calibration.html (дата обращения: 15.12.2020).
- [7] Smoothing images. *docs.opencv.org: веб-сайт*. URL: https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_imgproc/py_filtering/py_filtering.html#filtering (дата обращения: 15.12.2020).
- [8] Тетерюков Д. Презентация предмета «Robotics – Forward kinematics». М., Сколтех институт науки и технологии, 2016.
- [9] Matlab. The language of technical computing. MathWorks, 2005.

Лазич Боян — магистр кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Михайлов Борис Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лазич Боян. Монокулярная система зрения для построения карты рабочего пространства и локализации мобильного робота. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 03(56). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-03-680>

MONOCULAR VISION SYSTEM FOR CONSTRUCTION OF WORKSPACE MAP AND LOCALIZATION OF A MOBILE ROBOT

Lazic Bojan

bojanlzc@gmail.com

SPIN-code: 3396-6378

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The problem of constructing a map of a room using a monocular vision system, i.e., using one television camera, which is located on a mobile robot, is considered. The distance is calculated based on the analysis of the object's special points displacement on two consecutive images received from the TV camera. Mathematical expressions are given for determining the position of wall points in the global coordinate system. Television cameras of the robot, which are sequentially located at different points of the workspace, take pictures of the walls. Approximation of wall projections is performed by the least squares method. The results of experimental studies of a real room are given, the measurement error is determined.

Keywords

Mobile robot, television camera, image special points, distance calculation, map building, monocular vision, robot position

Received 08.12.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Press H.W., Teukolsky A.S., Vetterling T.W., et al. Numerical recipes. Cambridge University Press, 2007.
- [2] Korn G.A., Korn T.M. Mathematical handbook for scientists and engineers. McGraw-Hill, 1968. (Russ. ed.: Spravochnik po matematike. Moscow, Nauka Publ., 1974.)
- [3] Miller S.J. The method of least squares. URL: https://web.williams.edu/Mathematics/sjmiller/public_html/BrownClasses/54/handouts/MethodLeastSquares.pdf (accessed: 15.12.2020).
- [4] Szeliski R. Computer vision. Springer, 2011.
- [5] Patrick F.D. Measurement and data analysis for engineering and science. McGraw-Hill, 2005.
- [6] Camera calibration. *opencv-python-tutroals.readthedocs.io: website*. URL: https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py_tutorials/py_calib3d/py_calibration/py_calibration.html (accessed: 15.12.2020).
- [7] Smoothing images. *docs.opencv.org: website*. URL: https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_imgproc/py_filtering/py_filtering.html#filtering (accessed: 15.12.2020).
- [8] Teteryukov D. Prezentatsiya predmeta "Robotics – Forward kinematics" [Presentation of "Robotics – Forward kinematics" course]. Moscow, Skoltech Publ., 2016 (in Russ.).
- [9] Matlab. The language of technical computing. MathWorks, 2005.

Lazic Bojan — Master's Degree Student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Mikhailov B.B., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Lazic Bojan. Monocular vision system for construction of workspace map and localization of a mobile robot. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 03(56). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-03-680.html> (in Russ.).
