

### 3D-РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОМЕЩЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ БИНОКУЛЯРНОГО ЗРЕНИЯ

Бай Цайянь

NicoleBai2019@gmail.com

SPIN-код: 3886-2160

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

---

#### Аннотация

*Рассмотрена задача реконструкции трехмерного пространства с использованием системы бинокулярного зрения, расположенной на мобильном роботе. Для калибровки системы бинокулярного зрения в работе использован простой метод калибровки по плоскости, имеющий высокую точность. После калибровки и исключения искажений выполнена сегментация изображений для обнаружения краев и выделения характерных точек. На основе анализа пар характерных точек на изображениях левой и правой телекамер вычислены их пространственные координаты. Для описания фрагментов помещения — локальных плоскостей — использовался метод наименьших квадратов. С помощью полученных фрагментов выполнена реконструкция трехмерного окружающего пространства. Полученные результаты проверены экспериментально.*

#### Ключевые слова

*Система бинокулярного зрения, калибровка телекамеры, признаки изображения, описание плоскости, трехмерная реконструкция*

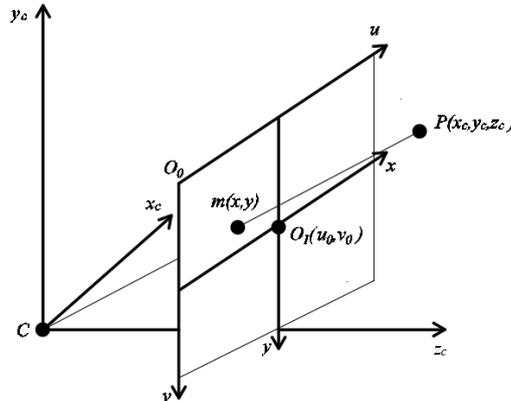
Поступила в редакцию 03.06.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

---

**Введение.** Основная задача стереозрения заключается в том, чтобы получить информацию об окружающем пространстве из изображений бинакулярной телекамеры, и затем описать (реконструировать) это трехмерное пространство. Взаимосвязь между положением точки в трехмерном геометрическом пространстве и расположением этой точки на изображении определяется моделью телекамеры с индивидуальными параметрами. Калибровка камеры — это процесс получения этих параметров посредством физических экспериментов с помощью тестовых изображений, который позволяет определить геометрические и оптические свойства камеры (внутренние параметры), а также пространственное положение и ориентацию системы координат камеры в мировой системе координат. Отметим также, что калибровка камеры позволяет определить взаимосвязь между двумя или более камерами, расположенных в разных точках пространства, что очень важно при использовании систем бинокулярного зрения. Ниже рассмотрены алгоритмы для описания рабочего пространства. Работоспособность всех алгоритмов была проверена в реальном помещении, имеющем три стены [1].

**Параметры для калибровки.** Используем модель камеры-обскуры (рис. 1) [2–4].



**Рис. 1.** Пространственное расположение систем координат:

$X_c, Y_c, Z_c$  — координаты точки пространства  $P$ ;  
 $x, y$  — координаты точки проекции  $m$  на изображении

Для этой камеры справедливо выражение

$$Z_c \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \times M_2 \times \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь  $u_0, v_0$  — координаты центра (главной точки);  $f_u = f/d_x, f_v = f/d_y$  — масштабные коэффициенты для осей  $u$  и  $v$  соответственно;  $s$  — коэффициент наклона камеры;  $M_1, M_2$  — матрицы внутренних и внешних параметров камеры, соответственно.

Выражение (1) можно переписать более компактно:

$$\lambda \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \times \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \times \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Здесь  $\lambda$  — масштабный коэффициент;  $R, t$  — матрица вращения и вектор переноса центра робота в системе координат помещения соответственно;  $K$  — матрица внутренних параметров;  $M = K \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix}$  — матрица проекции телекамеры.

Отсюда можно определить параметры телекамеры, которые необходимо откалибровать:

– внутренние параметры камеры: координаты главной точки изображения  $u_0, v_0$ ; масштабные коэффициенты  $f_u, f_v$  осей  $u$  и  $v$ ; коэффициент наклона объектива  $s$  (по двум координатным осям), значение которого обычно считают равным нулю;

– внешние параметры камеры: матрицу вращения  $R$  и вектор взаимного расположения левой и правой телекамер  $T$ , которые показывают ориентацию и положение бинокулярной камеры в мировой системе координат.

**Калибровка телекамеры.** Для калибровки камеры был использован метод Чжана по плоскости [6]. В поле зрения бинокулярной телекамеры помещался калибровочный шаблон (тестовое изображение из серии черных и белых квадратов показано на рис. 2). Шаблон перемещался и поворачивался так, чтобы левая и правая камеры одновременно захватывали его изображение под разными углами.

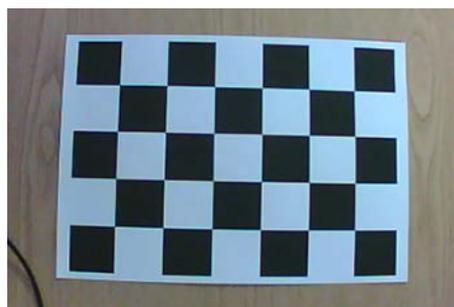


Рис. 2. Калибровочный шаблон

Для всех изображений определяли координаты углов каждого квадрата на изображении шаблона. Верхний левый угол шаблона был выбран в качестве центра мировой системы координат, направление осей  $Y$  и  $X$  вправо и вниз по сторонам шаблона, направление оси  $Z$  перпендикулярно к плоскости шаблона. Каждый квадрат шаблона имеет длину стороны 40,0 мм, поэтому определить мировые координаты всех углов достаточно легко. На рис. 3 показаны изображения шаблона, снятые под произвольными углами. Начало и оси мировой системы координат показаны зелеными линиями, а угловые точки отмечены красными крестиками.

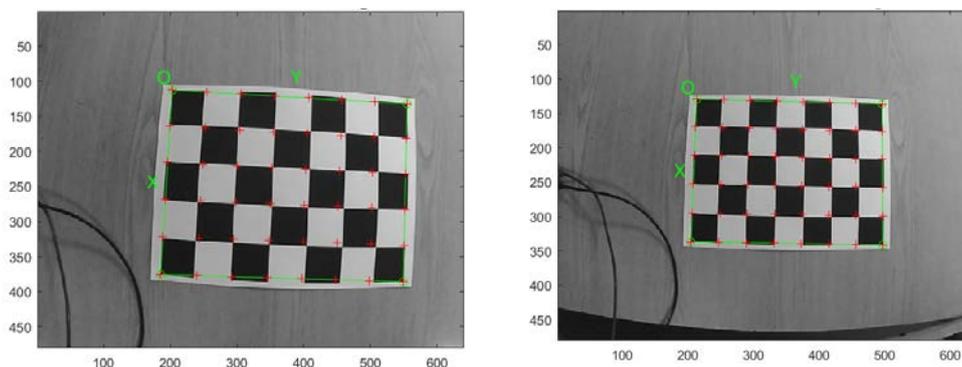


Рис. 3. Результаты обработки изображения шаблона

С использованием программной среды MATLAB были определены внутренние параметры левой и правой телекамер  $K_l$  и  $K_r$ , матрица относительного вращения  $R$  и вектор взаимного расположения  $T$ :

$$K_l = \begin{bmatrix} 626,6180 & 0 & 308,2265 \\ 0 & 624,6360 & 225,0145 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$K_r = \begin{bmatrix} 615,0031 & 0 & 328,9667 \\ 0 & 615,0336 & 238,4877 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$R = \begin{bmatrix} 0,9985 & -0,0235 & 0,0501 \\ 0,0237 & 0,9997 & -0,0029 \\ -0,0499 & 0,0041 & 0,9987 \end{bmatrix};$$

$$T = [-111,3615; 3,1717; 11,8806]^T.$$

Отметим, что матрица вращения, которая отражает относительный угол поворота двух камер, близка к единичной. Это показывает, что две камеры установлены практически параллельно, и согласуется с результатами проведенных экспериментов. Параметры вектора взаимного расположения составляют: для оси  $X$  —  $-111,3615$  мм; для оси  $Y$  —  $3,1717$  мм и для оси  $Z$  —  $11,8006$  мм, и также подтверждают параллельное расположение двух телекамер на расстоянии около  $110$  мм друг от друга.

**Коррекция искажений телекамеры.** Оптическая линза камеры имеет радиальные искажения, которые описываются уравнениями с постоянными коэффициентами  $k_1, k_2, k_3$ . Вследствие погрешностей сборки матрица камеры и оптическая линза не параллельны, что вызывает тангенциальные искажения, которое описываются уравнениями с коэффициентами  $p_1, p_2$ . Цель калибровки — определение значений этих пяти коэффициентов (как правило, необходимо определить только  $k_1, k_2, p_1$  и  $p_2$ , а  $k_3$  рассчитывают для радиальных искажений объективов типа «рыбий глаз») [7, 8].

Для коррекции радиальных искажений использованы уравнения

$$x_r = x_d [1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6];$$

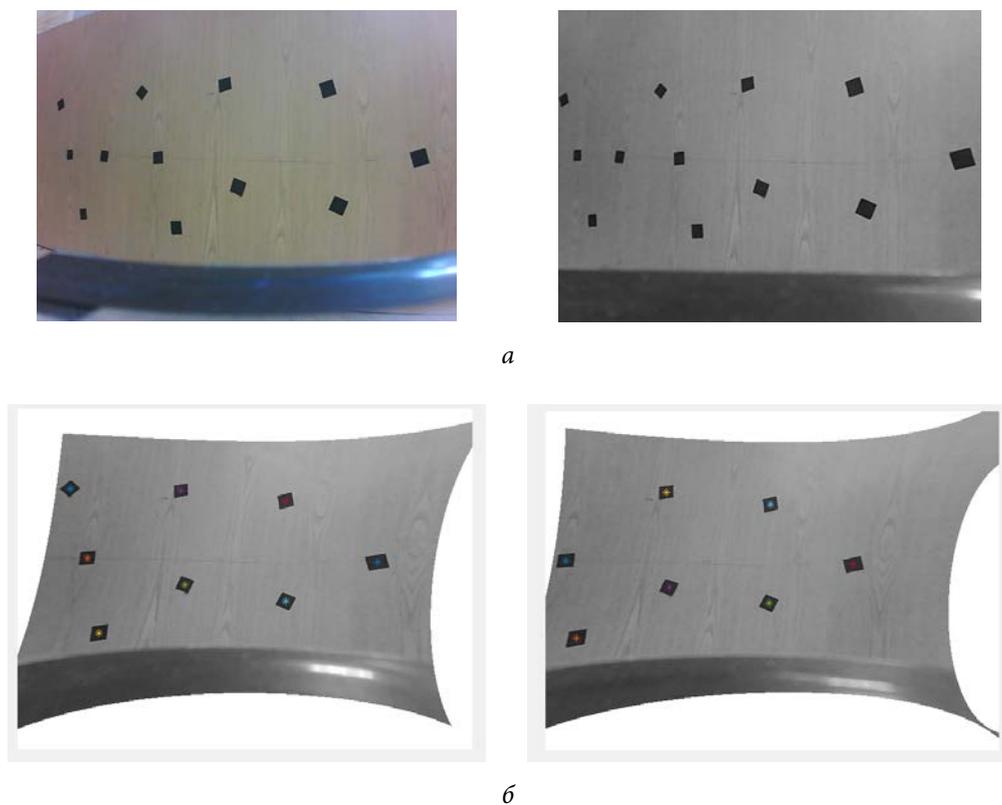
$$y_r = y_d [1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6],$$

для коррекции тангенциальных искажений — уравнения

$$x_t = x_d + [2p_1 y + p_2 (r^2 + 2x^2)];$$

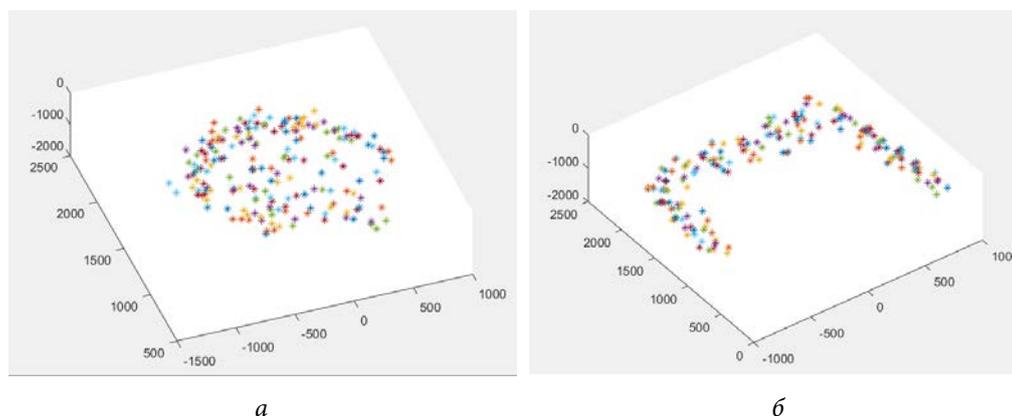
$$y_t = y_d + [p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 x].$$

**Экспериментальные исследования.** Реальные изображения бинокулярной телекамеры откорректированы по результатам калибровки. Изображения стены помещения (плоскости) с нанесенными метками показаны на рис. 4 до и после коррекции, соответственно.



**Рис. 4.** Изображения стены до (а) и после проведения коррекции (б)

Расположение выделенных характерных точек сцены, имеющей три стены, в системе координат бинакулярной камеры показано на рис. 5, а. Преобразование координат характерных точек в мировую систему координат было выполнено в соответствии с выражением (1). Полученные результаты показаны рис. 5, б.



**Рис. 5.** Облако точек в системе координат телекамеры (а) и в мировой системе координат (б)

Общее выражение для описания положения плоскости в пространстве имеет вид

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (C \neq 0).$$

Получим

$$z = a_0x + a_1y + a_2.$$

Из массива координат точек  $\{x_i, y_i, z_i\}$  ( $i = 3, \dots, n$ ), найдем уравнение плоскости методом наименьших квадратов [9, 10]:

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} (a_0x + a_1y + a_2 - z)^2.$$

Для получения наилучшего результата значение  $S$  должно удовлетворять условию

$$\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0, \quad k = 0, 1, 2.$$

Эти уравнения использованы для обработки массива координат точек сцены (рисунок 6, б). В результате получены коэффициенты уравнений для описания трех плоскостей:

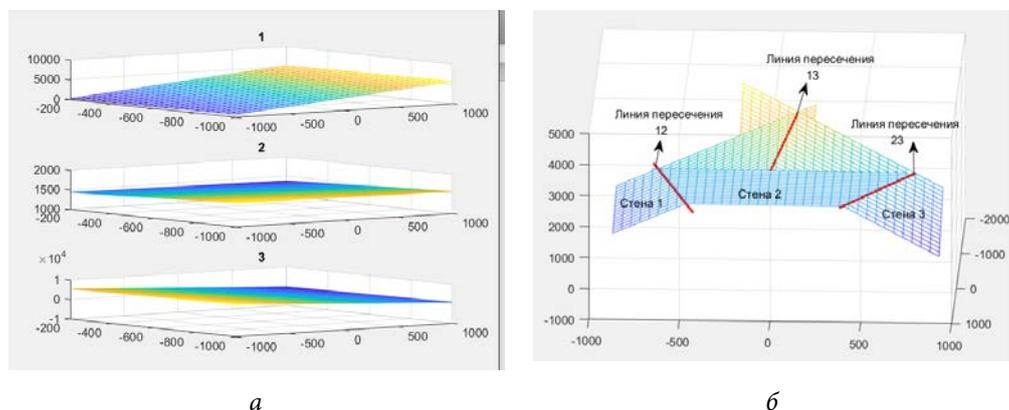
$$\begin{cases} z_1 = 2479 + 2,446x_1 - 0,7777y_1; \\ z_2 = 1357 + 0,03024x_2 - 0,24y_2; \\ z_3 = 2176 - 2,998x_3 - 1,638y_3. \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 6, а показано положение плоскостей в мировой системе координат.

В результате попарного решения уравнений (2) получены выражения для линий пересечения плоскостей:

$$\begin{cases} y_{12} = 4,6052x_{12} + 2086,7; \\ z_{12} = -1,1355x_{12} + 865,2003; \\ y_{23} = -2,1229x_{23} + 585,8369; \\ z_{23} = 0,4792x_{23} + 1216,4, \\ y_{13} = -6,3280x_{13} - 352,2027; \\ z_{13} = 7,3673x_{13} + 2752,9. \end{cases}$$

Расположение линий пересечения показано на рис. 6, б красными прямыми. Отметим, что левая и правая линии расположены в углах пересечения стен реального помещения, а средняя является мнимой и в помещении она отсутствует. Теперь, используя простые эвристические соотношения, легко составить пространственное описание рабочей области, в которой находится мобильный робот.



**Рис. 6.** Расположение плоскостей (а) и линий пересечения (б) в мировой системе координат

Для оценки качества работы предложенного алгоритма были определены координаты линий пересечения с горизонтальной плоскостью:  $(-544, 1480)$  для первой линии  $(535, 1470)$  и для второй. Реальные координаты этих точек имеют значения  $(-550, 1360)$  и  $(530, 1390)$ . Таким образом, погрешность измерения по координате  $X$  практически отсутствует, а по координате  $Y$  не превышает 10 %, что характерно для измерения расстояния бинокулярными системами зрения.

**Заключение.** Полученные результаты показывают, что использование бинокулярной телекамеры и предложенных алгоритмов дают возможность описать рабочее пространство с хорошим качеством. Это позволяет использовать полученные результаты для решения задачи картографирования и локализации (SLAM) с помощью мобильного робота, оснащенного бинокулярной телекамерой.

### Литература

- [1] Володин Ю.С. Телевизионная система объемного зрения для управления движением мобильного робота. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. М., 2011.
- [2] Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М., Бином. Лаборатория знаний, 2006.
- [3] Бай Цайянь. Система бинокулярного зрения для построения карты помещения и локализация мобильного робота. *Политехнический молодежный журнал*, 2018, № 11. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-11-405  
URL: <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/405.html>
- [4] Михайлов Б.Б. Использование систем технического зрения для управления мобильными роботами. *10 Всеросс. Мультиконф. по проблемам управления*. Ростов-на-Дону, Тагарог, Изд-во ЮФУ, 2017, с. 230–232.
- [5] Dunn P.F., Davis M.P. Measurement and data analysis for engineering and science. McGraw Hill, 2005.
- [6] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. *Proc. 7<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. Computer Vision*, 1999 pp. 666–673. DOI: 10.1109/ICCV.1999.791289 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/791289>

- [7] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2000, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/888718>
- [8] Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. *Digital image processing*. Prentice-Hall, 2002.
- [9] Kirschvink J.L. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophys. J. Int.*, 1980, vol. 62, no. 3, pp. 699–718. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x URL: <https://academic.oup.com/gji/article/62/3/699/655282>
- [10] Eberly D. Least squares fitting of data by linear or quadratic structures. URL: <https://www.geometrictools.com/Documentation/LeastSquaresFitting.pdf> (дата обращения: 15.04.2019).

**Бай Цайянь** — студентка магистратуры 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.

### 3D RECONSTRUCTION OF PREMISES USING THE BINOCULAR VISION SYSTEM

Bai Caiyan

NicoleBai2019@gmail.com

SPIN-code: 3886-2160

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

#### Abstract

*In this paper, the author considered the task of the reconstructing 3D space using a binocular vision system that located on a mobile robot. To calibrate the binocular vision system, a simple plane-level calibration method with high accuracy was used. After calibration and elimination of the distortions, the images are segmented to detect edges and highlight characteristic points. Based on the analysis of pairs of the typical points on the images of the left and right cameras, their spatial coordinates are calculated. The author used the method of least squares to describe the fragments of the room — local planes. Using the obtained fragments, a reconstruction of 3D surrounding space was performed. The author verified the obtained results experimentally.*

#### Keywords

*Binocular vision system, camera calibration, image attribute, plane image description, 3D reconstruction*

Received 03.06.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

---

#### References

- [1] Volodin Yu.S. *Televizionnaya sistema ob'`emnogo zreniya dlya upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Television system of stereoscopic vision for control on mobile robot movement. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2011 (in Russ.).
- [2] Shapiro L.G., Stockman G.C. *Computer vision*. Pearson, 2001. (Russ. ed.: *Komp'yuternoe zrenie*. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2006.)
- [3] Bay Tsayyan'. *Mobile robot indoor map building and localization using binocular vision*. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2018, no. 11. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-11-405 URL: <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/405.html> (in Russ.).
- [4] Mikhaylov B.B. [Using technical vision systems for control on mobile robots]. *10 Vseross. Mul'tikonf. po problemam upravleniya* [10<sup>th</sup> Russ. Conf. on Control Problems]. Rostov-na-Donu, Tagarog, SFeDU Publ., 2017, pp. 230–232 (in Russ.).
- [5] Dunn P.F., Davis M.P. *Measurement and data analysis for engineering and science*. McGraw Hill, 2005.
- [6] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. *Proc. 7th IEEE Int. Conf. Computer Vision*, 1999 pp. 666–673. DOI: 10.1109/ICCV.1999.791289 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/791289>
- [7] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2000, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/888718>

- [8] Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. Digital image processing. Prentice-Hall, 2002.
- [9] Kirschvink J.L. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophys. J. Int.*, 1980, vol. 62, no. 3, pp. 699–718. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x  
URL: <https://academic.oup.com/gji/article/62/3/699/655282>
- [10] Eberly D. Least squares fitting of data by linear or quadratic structures.  
URL: <https://www.geometrictools.com/Documentation/LeastSquaresFitting.pdf> (accessed: 15.04.2019).

**Bai Caiyan** — Master Student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

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