

СИСТЕМА БИНОКУЛЯРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ПОМЕЩЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Бай Цайянь

NicoleBai2019@gmail.com

SPIN-код: 3886-2160

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

Аннотация

Рассмотрена задача построения карты помещения и локализации мобильного робота с использованием системы бинокулярного зрения, расположенной на самом роботе. Карта помещения создается с помощью полученного от телекамеры облака точек в процессе предварительного осмотра. При этом положение и ориентация робота с телекамерой предполагаются известными. Робот может определять свои координаты в любой точке помещения. Для этого достаточно найти фрагмент карты из данной точки с помощью имеющейся системы зрения. Для определения положения фрагмента на карте вычислен максимум взаимно корреляционной функции между ними. Далее с использованием положения фрагмента рассчитаны координаты мобильного робота.

Ключевые слова

Мобильный робот, построение карты, локализация робота, система бинокулярного зрения, преобразование координат, корреляционная функция

Поступила в редакцию 12.10.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

В настоящее время для выполнения задач в неизвестных средах обычно используются мобильные роботы. При этом для управления движением робота как минимум необходимо уметь строить карту исследуемого помещения и определять текущее положение робота на ней. Способ решения этих задач в значительной степени зависит от типа рабочего пространства и имеющихся на роботе датчиков [1–5].

В данной статье рассмотрено использование бинокулярной системы зрения для локализации робота в неизвестном помещении. На рис. 1 в качестве примера показана часть стены. Первоначально робот находится на позиции 1, координаты которой известны. Здесь робот получает координаты точек всей стены (облако точек) и строит карту помещения. Далее робот перемещается на позиции 2 и 3, откуда виден только фрагмент стены, по которому необходимо определить координаты робота на этих позициях.

Работа бинокулярной телекамеры показана на рис. 2, где знаками \pm обозначены матрицы левой и правой телекамер, с помощью которых измеряются координаты x_L и x_R точки пространства P , расположенной на расстоянии z . Буквами b и f обозначены расстояние между оптическими осями телекамер (база системы) и фокусное расстояние объективов соответственно, индексы s и w относятся к системе координат камеры и мировой системе координат соответственно.

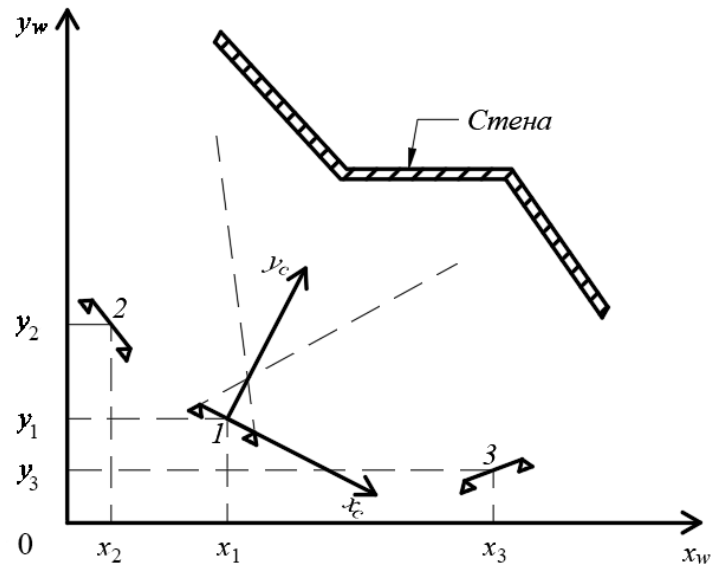


Рис. 1. План помещения

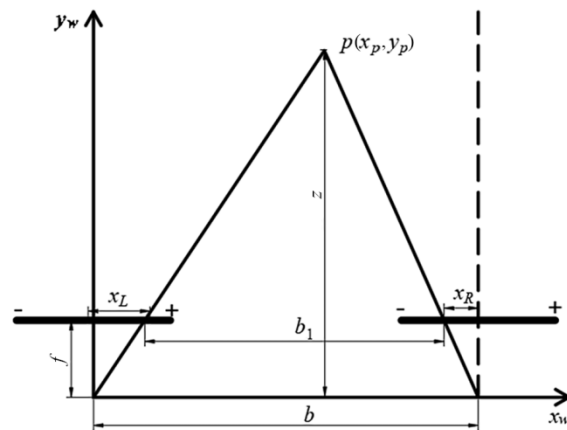


Рис. 2. Схема бинокулярной системы зрения

Используя значения координат x_L и x_R левого и правого изображений, рассчитаем расстояние до точки P и ее координаты в системе координат камеры [6]. В соответствии с теоремой подобия треугольников,

$$\begin{cases} \frac{z}{b} = \frac{z-f}{b_1}; \\ b_1 = b - x_L + x_R. \end{cases}$$

С учетом параллакса точки $d = x_L - x_R$ определим расстояние до точки P :

$$z = bf / d.$$

Начало системы координат на рис. 2 совпадает с оптической осью левой телекамеры и смещено на $-b/2$ относительно центра бинокулярной камеры. В соответствии с теоремой подобия треугольников,

$$\frac{x_L}{f} = \frac{b_2}{y},$$

где $b_2 = -b/2 - x$.

В результате получаем выражения для определения координат точки в системе координат бинокулярной камеры [7]:

$$\begin{cases} y_c = \frac{bf}{d}; \\ x_c = \frac{-b}{2} - \frac{x_L y}{f}. \end{cases} \quad (1)$$

Движение телекамеры на роботе (или вместе с роботом) — это движение твердого тела, которое гарантирует, что длина и угол одного и того же вектора в каждой системе координат не изменяются. Преобразование системы координат камеры в мировую систему координат относится к евклидовому преобразованию, состоящему из одного поворота и одного перемещения [8]. Для его реализации была использована матрица преобразования T :

$$T = \begin{bmatrix} R & S \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

В этом выражении R — матрица вращения, S — матрица сдвига. При построении двумерной карты предполагается, что камеры поворачивается на угол θ вокруг оси z и смещается вдоль осей x и y на расстояния Δx и Δy , соответственно. Тогда матрицы вращения и перевода можно определить следующим образом:

$$R = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad S = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Пусть L — вектор координат точки P в системе координат камеры (c); L' — вектор координат этой точки в мировой системе координат (w) — рис. 3:

$$L = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 0 \end{bmatrix}; \quad L' = \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Тогда преобразование между системой координатами камеры и мировой системой координат имеет вид

$$\begin{bmatrix} L' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & S \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L \\ 1 \end{bmatrix} \triangleq T \times \begin{bmatrix} L \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

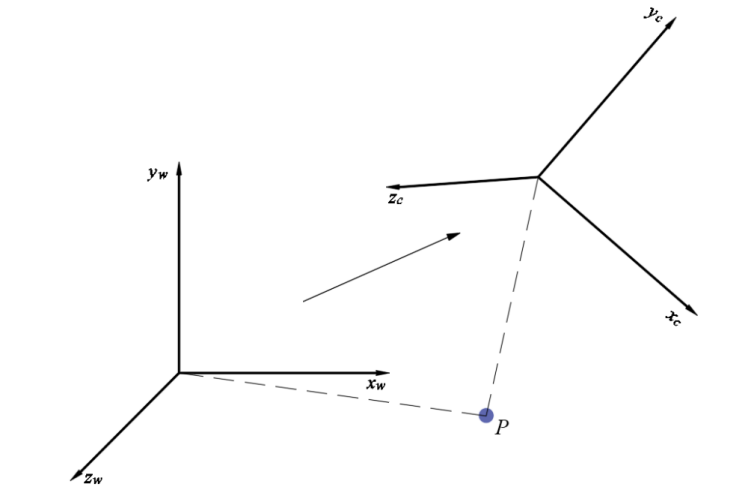


Рис.3. Преобразование систем координат

С помощью бинокулярной камеры по уравнениям (1) были вычислены координаты точек стены, показанной на рис. 1. Полученные результаты представлены на рис. 4, а, а на рис. 4, б приведены те же данные в мировой системе координат после использования преобразования (2).

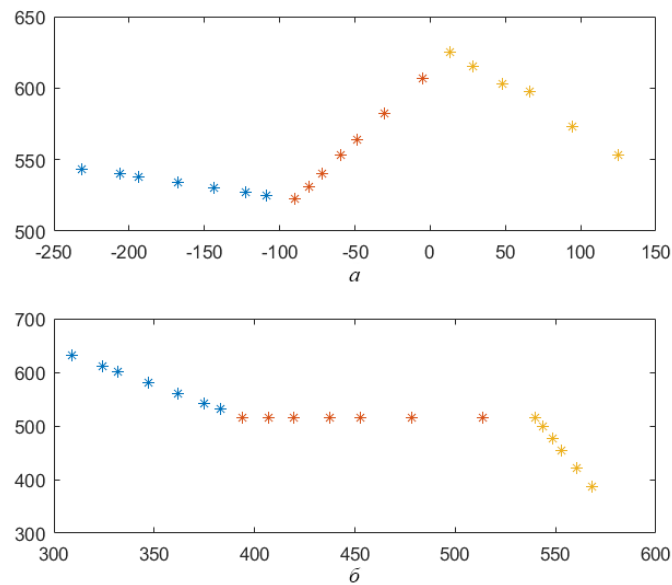


Рис. 3. Облако точек в разных системах координат:

a — в системе координат камеры; b — в мировой системе координат

Для описания полученных данных в мировой системе координат (облако точек, отмеченных крестиками на рис. 5) был использован метод наименьших квадратов. Этот метод является стандартным методом получения приближенного решения путем регрессионного анализа переопределенной системы путем миними-

зации суммы квадратов ошибок между измеренными значениями и аппроксимирующей функцией [9, 10]:

$$\min_b \sum_{i=1}^n (y_m - y_i)^2.$$

В данном примере для описания стены помещения была использована линейная модель — уравнение вида $y = kx + b$.

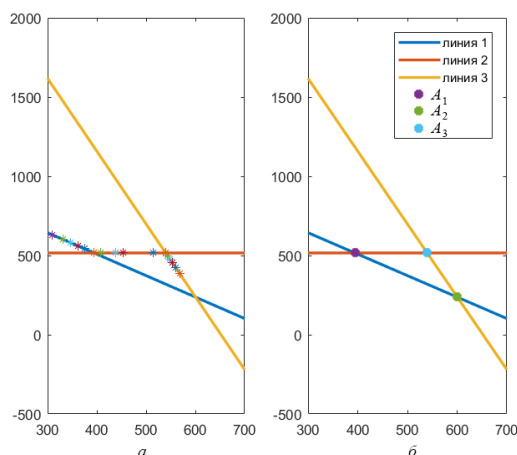


Рис. 4. Аппроксимирующие прямые и точки их пересечения

a — полученные точки; $б$ — точки пересечения

Параметры уравнения рассчитывали по следующим формулам:

$$\begin{cases} k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n (\bar{x})^2}; \\ b = \bar{y} - k \bar{x}, \end{cases}$$

где \bar{x} , \bar{y} — средние значения параметров.

Как видно на рис. 5, для описания стены достаточно использовать три прямые линии:

$$\begin{cases} y = k_1 x + b_1; \\ y = k_2 x + b_2; \\ y = k_3 x + b_3. \end{cases}$$

Точка пересечения первой и второй линий была найдена путем решения уравнений:

$$\begin{cases} x = \frac{b_1 - b_2}{k_1 - k_2}; \\ y = \frac{k_1 b_2 - k_2 b_1}{k_1 - k_2}. \end{cases}$$

Аналогично были определены координаты остальных точек пересечения (см. рис. 5). Далее с использованием простых эвристических отношений была построена карта помещения $\varphi_1(x)$, которая показана на рис. 6. Таким образом, первая задача была решена и робот смог перемещаться в известном рабочем пространстве.

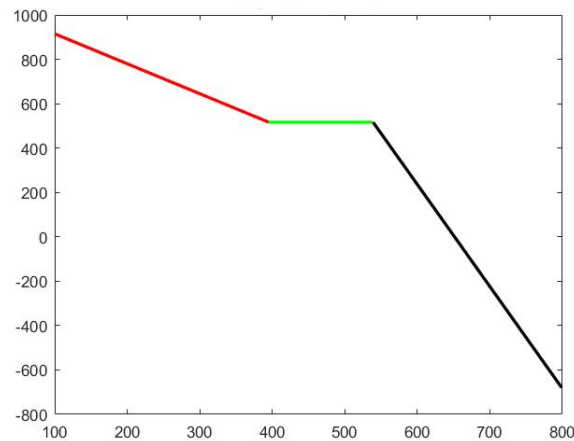


Рис. 5. Карта помещения

При решении задачи позиционирования полагаем, что робот «видит» только фрагмент стены $\varphi_2(x)$, который показан синим цветом на рис. 7. Вычисляя максимальное значение коэффициента корреляции $R(\Delta x)$ между $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x - \Delta x)$, можно определить положение фрагмента на карте помещения [11].

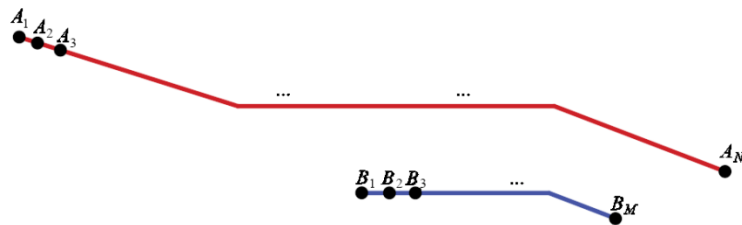


Рис. 6. Точки карты стены A_i и ее фрагмента B_i

Переходя к дискретной форме представления, можно считать, что карта помещения состоит из облака точек $[A_1 \dots A_N]$, а наблюдаемый роботом из неизвестной позиции фрагмент карты — из облака точек $[B_1 \dots B_M]$. Чтобы найти местоположение фрагмента на карте, последовательно сравниваем его точки со всеми точками карты и оцениваем степень их совпадения. В результате получаем коэффициент корреляции для каждого положения фрагмента [10]:

$$R_i = \int_i^{i+M-1} \varphi_1(A_i) \varphi_2(B_i) di, \quad i \in [1, N - M + 1].$$

Максимальное значение коэффициента корреляции $\max_i R_i(t)$ однозначно определяет положение фрагмента на карте помещения, которое обозначено на рис. 8 красным цветом.

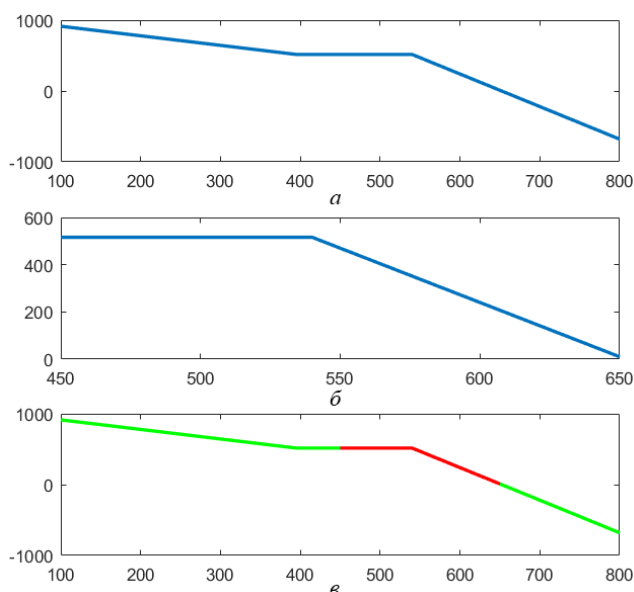


Рис. 7. Положение фрагмента стены на карте помещения:

a — для полной стены; b — для фрагмента стены, v — место фрагмента стены

Из сказанного выше очевидно, что мы определили положение фрагмента стены в мировой системе координат, которое не зависит от точки наблюдения робота.

Определяя угол поворота камеры θ вокруг оси z_w с помощью датчика привода камеры и используя векторы L' и L , получаем уравнение связи между системой координат камеры и мировой системой координат:

$$T^{-1} \times L' = L.$$

Здесь

$$T = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 & \Delta x \\ \cos \theta & \sin \theta & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\begin{cases} \Delta x = x_w + x_c \sin \theta - y_c \cos \theta; \\ \Delta y = y_w - x_c \cos \theta + y_c \sin \theta. \end{cases}$$

Для подтверждения работоспособности предложенного способа было проведено моделирование ситуации, показанной на рис. 1. Сначала робот строил карту в исходном положении 1, а затем перемещался в произвольные точки 2 и 3, координаты которых не были известны. Из этих точек робот находил фраг-

мент карты стены в системе координат камеры. Далее было определено положение найденного фрагмента на карте в мировой системе координат и вычислены текущие координаты робота. Результаты работы на основных этапах алгоритма локализации показаны на рис. 9.

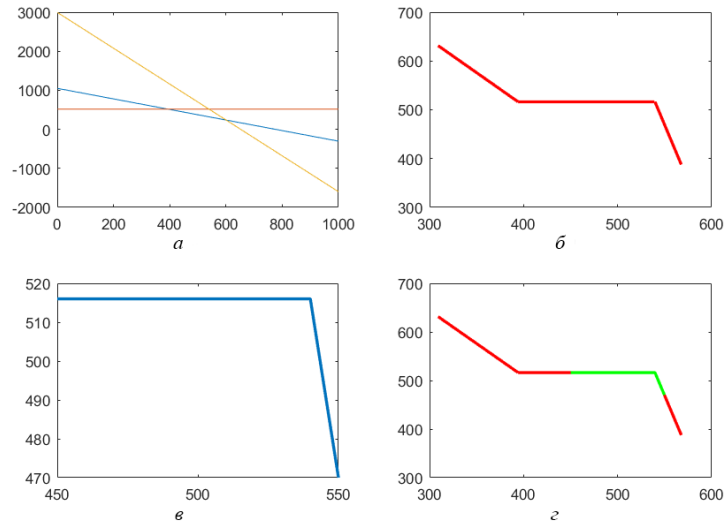


Рис. 8. Результаты работы алгоритма локализации:

a — исходные линии; $б$ — реальная стена; $в$ — фрагмент стены;
 $г$ — место фрагмента стены

Результаты моделирования показали высокую точность определения координат робота во всем рабочем пространстве: полученная ошибка изменения составила 0,1 %. В ближайшее время планируется провести экспериментальные исследования на реальном оборудовании.

Таким образом, была решена задача локализации мобильного робота по визуальной информации. Отметим, что рассмотренный способ локализации по построенной карте пространства полностью реализован с помощью одной бинокулярной камеры, которая располагается на самом мобильном роботе. При этом данный способ является достаточно универсальным, поскольку практически не зависит от вида рабочего пространства.

Литература

- [1] Юдин Д.А., Проценко В.В., Постольский Г.Г., Кижук А.С., Магергут В.З. Система технического зрения для автоматического ориентирования и позиционирования мобильного робота. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2014, № 1(2), с. 70–75.
- [2] Носков В.П., Носков А.В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2005, № 12, с. 16–21.
- [3] Володин Ю.С. *Телевизионная система объемного зрения для управления движением мобильного робота*. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 16 с.

- [4] Герасимов В.Н., Михайлов Б.Б. Решение задачи локализации мобильного робота в помещении. *Тр. XXII межд. науч.-тех. конф. «Экстремальная робототехника»*. Санкт-Петербург, Политехника-сервис, 2011, с. 441–449.
- [5] Михайлов Б.Б. Использование систем технического зрения для управления мобильными роботами. *10 всеросс. мультikonф. по проблемам управления*. Ростов-на-Дону, Тагарог, ЮФУ, 2017, с. 230–232.
- [6] Шапиро Л., Стокман Дж. *Компьютерное зрение*. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006, 752 с.
- [7] Dunn P.F. *Measurement and data analysis for engineering and science*. McGraw-Hill, 2005, 540 p.
- [8] Дэвид А., Понс Ж. *Компьютерное зрение. Современный подход*. Москва, Вильямс, 2004, 928 с.
- [9] Press H.W., Teukolsky A.S., Vetterling T.W., Flannery P.B. *Numerical recipes: the art of scientific computing*. Cambridge, 2007, pp. 776–780.
- [10] Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике*. Москва, Наука, 1974, 832 с.
- [11] Мошкин В.И., Петров В.С., Титов В.С., Якушенков Ю.Г. *Техническое зрение роботов*. Москва, Машиностроение, 1990, 272 с.

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.

**MOBILE ROBOT INDOOR MAP BUILDING AND LOCALIZATION
USING BINOCULAR VISION**
Bai Caiyan

NicoleBai2019@gmail.com

SPIN-code: 3886-2160

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**Abstract**

The paper considers the problem of mobile robot indoor map building and localization using binocular vision system located on the robot itself. The map of a room is built with point clouds obtained from a camera during preliminary observation. It is assumed that the position and orientation of the robot and camera are known. The robot can determine its coordinates at any point of the room. To that end the fragment of the map with the given point has to be located using the vision system. The maximum of cross-correlation function between two signal sources is calculated in order to locate the fragment on the map. After that the coordinates of the mobile robot are calculated using location of the fragment.

Keywords

Mobile robot, map building, robot localization, coordinate transformation, correlation function

Received 12.10.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Yudin D.A., Protsenko V.V., Postol'skiy G.G., Kizhuk A.S., Magergut V.Z. Computer vision system for automatic orientation and positioning of mobile robot. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2014, no. 1(2), pp. 70–75.
- [2] Noskov V.P., Noskov A.V. Mobile robot's navigation by means of 3-d laser images. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2005, no. 12, pp. 16–21.
- [3] Volodin Yu.S. Telezionnaya sistema ob'emnogo zreniya dlya upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Stereovision TV system for control on mobile robot. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman Press, 2011, 16 p.
- [4] Gerasimov V.N., Mikhaylov B.B. Reshenie zadachi lokalizatsii mobil'nogo robota v pomeshchenii [Solving localization problem for mobile robot in a room]. *Tr. XXII mezhd. nauch.-tekh. konf. "Ekstremal'naya robototekhnika"* [Proc. XXII Int. sci.-tech. conf. "Extremal robotics"]. Sankt-Petersburg, Politehnika-servis publ., 2011, pp. 441–449.
- [5] Mikhaylov B.B. Ispol'zovanie sistem tekhnicheskogo zreniya dlya upravleniya mobil'nymi robotami [Using technical vision systems for mobile robots control]. *10 vsereoss. mul'tikonf. po problemam upravleniya* [10 Russ. Multiconf. On control problems]. Rostov-na-Donu, Tagarog, SFEDU publ., 2017, pp. 230–232.
- [6] Shapiro L.G., Stockman G.S. Computer vision. Pearson, 2001, 608 p. (Russ. ed.: *Komp'yuternoe zrenie*. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy publ., 2006, 752 p.)
- [7] Dunn P.F. Measurement and data analysis for engineering and science. McGraw-Hill, 2005, 540 p.
- [8] Forsyth D.A., Ponce J. Computer vision: a modern approach. Pearson, 2003, 792 p. (Russ. ed.: *Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyy podkhod*. Moscow, Vil'yams publ., 2004, 928 p.)
- [9] Press H.W., Teukolsky A.S., Vetterling T.W., Flannery P.B. Numerical recipes: the art of scientific computing. Cambridge, 2007, pp. 776–780.

- [10] Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientists and engineers. McGraw Hill, 1961, 943 p. (Russ. ed.: Spravochnik po matematike. Moscow, Nauka publ., 1974, 832 p.)
- [11] Moshkin V.I., Petrov V.S., Titov V.S., Yakushenkov Yu.G. Tekhnicheskoe zrenie robotov [Robot technical vision]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1990, 272 p.

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

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