СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Жэнь Шуфэн

rsf45355382@gmail.com

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

Аннотация	Ключевые слова
<i>Решена задача позиционирования мобильного робота на основе информации системы технического зрения. Местоположение мобильного робота рассчитано с помощью трех реперов, координаты которых известны, а текущие направления на них определено с помощью системы технического зрения. Проанализированы погрешности измерения координат указанным методом и предложено решение проблемы выбора комбинации реперов</i>	<i>Мобильный робот, навигация роботов, реперная точка, система технического зрения, ошибки измерения координат</i> Поступила в редакцию 07.04.2017 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

В настоящее время для выполнения инспекционных разведывательных и спасательных работ обычно используют мобильные роботы. При этом для управления движением робота необходимо знать его текущие координаты. Навигация мобильного робота в общем случае является достаточно сложной задачей и подробно исследована в целом ряде работ [1].

В данной статье предложен способ навигации робота, который обслуживает автоматизированный склад-магазин. Робот используется для транспортировки товаров от стеллажей до места выдачи заказа. Поскольку стеллажи расположены стационарно, можно использовать различные системы навигации:

- контрастную линию, нанесенную на полу;
- высокочастотный кабель, расположенный под полом;
- металлическую полосу;
- оптические или радиомаяки и др.

Однако при использовании большинства этих способов необходимо переоборудовать помещения склада [2]. Предлагаем использовать систему технического зрения, установленную на роботе и несколько реперов (маркеров), координаты которых заранее известны. На рис. 1, в качестве примера, показаны три стеллажа и четырнадцать реперов. Из каждой точки помещения склада робот может видеть одновременно не менее трех реперов и измерять направления на них.

Как следует из постановки задачи, графически ее можно представить так, как показано на рис. 2. В качестве примера рассмотрен наиболее простой вариант движения робота по плоскости, хотя задача в общем случае является трехмерной. Чтобы получить координаты местоположения робота необходимо иметь не менее трех реперов, местоположение которых известно. На плоскости произвольно

расположены три репера A , B и C , координаты которых измерены в мировой системе координат XOY . Система технического зрения робота измеряет направления до них и определяет углы α (угол APB) и β (угол BPC). На основе полученных данных необходимо определить координаты робота (точки P).

Рис. 1. Схема автоматизированного склада:

D_1 – D_{14} — репера, местоположение которых известно

Рис. 2. Определение координат местоположения робота на плоскости:

A, B, C — репера; R_1, R_2, O_1, O_2 — радиусы и центры проведенных окружностей;
 F, S — начальная и конечная точки траектории

Поскольку координаты реперов A, B, C известны, то легко рассчитать расстояние между ними L_{AB}, L_{BC}, L_{AC} . Приведем две окружности: одну через точки A, B и P с центром O_1 и радиусом R_1 и другую — через B, C и P с центром O_2

и радиусом R_2 . Радиусы этих окружностей определим по формулам:

$$R_1 = \frac{L_{AB}}{2\sin\alpha};$$

$$R_2 = \frac{L_{BC}}{2\sin\beta}.$$

Отрезки AB и BC представляют собой хорды окружностей с центрами O_1 и O_2 , соответственно. Центр первой окружности O_1 находится на перпендикуляре, построенном из середины отрезка AB , а центр другой окружности O_2 — на перпендикуляре середины отрезка BC . Если углы α и β меньше или равны 90° , то центральные углы отрезков AB и BC равны 2α и 2β , соответственно. Если углы α и β больше 90° , то центральные углы отрезков AB и BC равны $2(180^\circ - \alpha)$ и $2(180^\circ - \beta)$. Введем местные системы координат $X'O'Y'$ и $X''O''Y''$. Пусть начало системы координат $X'O'Y'$ находится в точке A и ее ось $O'X'$ направлена вдоль отрезка AB ; начало системы координат $X''O''Y''$ находится в точке B и ее ось $O''X''$ направлена вдоль отрезка BC . Тогда координаты реперов в соответствующих системах координат имеют следующие значения: $X'_A = 0$, $Y'_A = 0$, $X'_B = L_{AB}$, $Y'_B = 0$; $X''_B = 0$, $Y''_B = 0$, $X''_C = L_{BC}$, $Y''_C = 0$.

В локальных системах координат $X'O'Y'$ и $X''O''Y''$ координаты центров O_1 и O_2 определяем по следующим уравнениям:

$$X'_{o1} = \frac{L_{AB}}{2};$$

$$Y'_{o1} = \frac{-L_{AB}}{2\tan\alpha};$$

$$X''_{o2} = \frac{L_{BC}}{2};$$

$$Y''_{o2} = \frac{-L_{BC}}{2\tan\beta}.$$

С помощью матрицы преобразования систем координат, получим координаты точек O_1 и O_2 в мировой системе координат XOY . Для этого, используя координаты (X_A, Y_A) , (X_B, Y_B) и (X_C, Y_C) , рассчитаем углы θ и φ между осью OX и осями $O'X'$ и $O''X''$. Тогда матрица преобразования из системы координат $X'O'Y'$ в мировую систему координат XOY будет иметь вид

$${}^{O'}_OT = \begin{bmatrix} C_\theta & -S_\theta & X_A \\ S_\theta & C_\theta & Y_A \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} X^w_{o1} & Y^w_{o1} & 1 \end{bmatrix}^T = {}^{O'}_OT \times \begin{bmatrix} X'_{o1} & Y'_{o1} & 1 \end{bmatrix}^T.$$

Аналогично получим матрицу преобразования из системы координат $X''O''Y''$ в мировую

$${}^{O''}_O T = \begin{bmatrix} C_\varphi & -S_\varphi & X_B \\ S_\varphi & C_\varphi & Y_B \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} X_{o2}^w & Y_{o2}^w & 1 \end{bmatrix}^T = {}^{O''}_O T \times \begin{bmatrix} X_{o2}'' & Y_{o2}'' & 1 \end{bmatrix}^T.$$

Из этих выражений можно вычислить координаты центров окружностей O_1 и O_2 в мировой системе координат. Из рис. 2 следует, что точки P и B расположены симметрично относительно линии O_1O_2 . Используя это обстоятельство, легко определить координаты робота в точке P [3].

Пусть линии O_1O_2 — прямая типа $x + ky + b = 0$, тогда ее можно записать в виде

$$x - \frac{X_{o1}^w - X_{o2}^w}{Y_{o1}^w - Y_{o2}^w} y + \frac{X_{o1}^w - X_{o2}^w}{Y_{o1}^w - Y_{o2}^w} Y_{o1}^w - X_{o1}^w = 0. \quad (1)$$

Учитывая симметричность расположения точек относительно линии $x + ky + b = 0$ и считая, что $u = X_{o1}^w - X_{o2}^w$; $v = Y_{o1}^w - Y_{o2}^w$; $c = X_{o1}^w Y_{o2}^w - X_{o2}^w Y_{o1}^w$, получим координаты робота:

$$\begin{cases} X_P = X_B - 2 \frac{v^2 X_B - uv Y_B + vc}{u^2 + v^2}; \\ Y_P = Y_B - 2 \frac{uv X_B - u^2 Y_B + uc}{u^2 + v^2}. \end{cases} \quad (2)$$

Описанный аналитический способ решения задачи определения положения мобильного робота, был реализован с помощью программы и показал высокую точность и надежность, а использование в нем несложных формул и малого числа измеряемых параметров обеспечило высокую скорость работы.

Следует отметить, что задача не имеет решения, если реперы A , B , C и робот P находятся на одной окружности, так как в этом случае окружности совпадают, и отрезка O_1O_2 не существует.

Для выполнения поставленной задачи были получены выражения для оценки погрешности определения координат робота. Поскольку координаты реперов известны, их можно считать константами. Из выражений (2) очевидно, что $X_P = F_X(u, v, c)$ и $Y_P = F_Y(u, v, c)$. Для облегчения дифференцирования уравнений при определении ошибок измерения координат ΔX_P и ΔY_P точки P , введем следующие обозначения: $M = v^2 X_B - uv Y_B + vc$; $N = u^2 + v^2$; $H = uv X_B - u^2 Y_B + uc$. Далее запишем

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta X_p = -2 \frac{(-vY_B N - 2uM) \Delta u + [(2vX_B - vY_B + c)N - 2vM] \Delta v + vN \Delta c}{N^2}; \\ \Delta Y_p = 2 \frac{[(vX_B - 2uY_B + c)N - 2uH] \Delta u + (uX_B N - 2vH) \Delta v + uN \Delta c}{N^2}; \\ E_p = \sqrt{\Delta X_p^2 + \Delta Y_p^2}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Здесь E_p — размер области ошибок определения координат мобильного робота. Значения Δu , Δv и Δc находят из уравнений для различных значений углов α и β с учетом их средних квадратических погрешностей ($\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$) [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta u = \frac{-L_{AB} \sin \theta}{2 \sin^2 \alpha} \Delta \alpha + \frac{L_{BC} \sin \varphi}{2 \sin^2 \beta} \Delta \beta; \\ \Delta v = \frac{L_{AB} \cos \theta}{2 \sin^2 \alpha} \Delta \alpha - \frac{L_{BC} \cos \varphi}{2 \sin^2 \beta} \Delta \beta; \\ \Delta c = \frac{-L_{AB} (\cos \theta X_{o2}^w + \sin \theta Y_{o2}^w)}{2 \sin^2 \alpha} \Delta \alpha + \frac{L_{BC} (\cos \varphi X_{o1}^w + \sin \varphi Y_{o1}^w)}{2 \sin^2 \beta} \Delta \beta. \end{array} \right.$$

Очевидно, что общая ошибка определения координат подвижного робота зависит от взаимного расположения реперов в рабочем пространстве. На рис. 3 представлены зависимости величины E_p от положения реперов А, В, С во время движения робота в рабочем пространстве размером 10×10 м при условии, что $\Delta\alpha = \Delta\beta = \epsilon = 1$. Как видно, величина E_p в значительной степени зависит от расположения реперов и может изменяться как монотонно (рис. 3, а), так и иметь выраженные экстремумы (рис. 3, б). К тому же при правильном выборе положения реперов E_p , значения не превышают 0,3 м. Таким образом, ошибка измерения координат составляет менее 3 %, что достаточно для позиционирования робота относительно стеллажей склада.

Отметим, что существуют такие варианты расположения реперов, при которых погрешность определения координат робота значительно превышает размеры рабочей области. Чтобы исключить эту ситуацию обычно используют четыре репера. Для этого распределяем реперы по территории склада так, чтобы из каждой точки траектории движения робота было видно не менее четырех реперов. Предварительно рассчитываем погрешность по всей траектории движения, используя три репера из четырех. Сравниваем полученные результаты и выбираем вариант, имеющий минимальную погрешность.

Рис. 3. Зависимость величины E_p от положения реперов A, B, C во время движения робота:
а, в — монотонное изменение ошибки измерений; *б* — резкое увеличение ошибки измерений;
г — ошибка измерений постоянна

На рис. 4 показан пример такого решения. Красным цветом обозначена область с минимальной погрешностью при выборе реперов (A, B, C), зеленым, синим и желтым цветами показаны области при выборе вариантов (B, C, D), (A, C, D) и (A, B, D), соответственно. Таким образом, можно предварительно оценить всю траекторию движения робота и выбрать варианты расположения реперов с минимальной погрешностью для каждого участка.

Поскольку изображение репера считывается с помощью телекамеры системы зрения, ошибка определения угла направления на репер e имеет две основные составляющие: $\Delta_{пр}$ — ошибка датчика привода поворота телекамеры; Δ_r — ошибка определения координат репера в поле зрения телекамеры (изображение рабочей сцены). Так как составляющие независимы, максимальную погрешность измерения угла определим как $e = \Delta_{пр} + \Delta_r$.

Величину $\Delta_{пр}$ рассчитываем исходя из характеристик датчика углового положения привода телекамеры. При этом ее значение не зависит от точности работы привода поворота телекамеры, а определяется исключительно погрешностью самого датчика. Поэтому даже при неточном приводе эта ошибка не возрастает, если используется точный датчик угла поворота, например, десяти-разрядный датчик ($\Delta_{пр} = 0,35^\circ$).

В работе [5] показано, что если линейные размеры изображения репера при движении мобильного робота не будут меняться между отдельными измерениями более чем на 10–15 %, то система зрения находит репер с погрешностью, не

превышающей 2 пикселя по каждой оси координат (для телекамеры, имеющей разрешения 320×200 пикселей). Тогда для такой телекамеры с углом зрения 45° $\Delta p = 0,28^\circ$.

Рис. 4. Распределение погрешности измерения координат робота при различных комбинациях реперов

В таких условиях максимальная погрешность измерения угла направления на репер не превышает 0,63°. Зная эту ошибку и расположение реперов в рабочей зоне, можно предварительно оценить погрешность определения координат мобильного робота в рабочей зоне и определить технические характеристики устройств разрабатываемой системы навигации.

Предложенный способ навигации мобильного робота экспериментально протестирован в лаборатории. Три репера были установлены на расстояние 1000 мм друг от друга. Используя выражение (2), определены координаты местоположения робота при перемещении сначала вдоль оси X , а затем вдоль оси Y с шагом равным 100 мм. Результаты измерения представлены на рис. 5, а и б. Максимальная и среднеквадратическая ошибки при измерении составили $\Delta x = 54,3$ мм; $\varepsilon_x = 24,2$ мм; $\Delta y = 58,6$ мм; $\varepsilon_y = 40,0$ мм по осям Y и X , соответственно (рис. 5, в и г).

а

б

в

г

Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований:

а, б — при движении робота вдоль осей X и Y; в, г — среднеквадратические ошибки измерений

Таким образом, можно сделать вывод о том, что рассмотренный метод навигации позволяет определять достаточно точно текущие координаты местоположения робота во время перемещения. Предложенный метод допустимо использовать и в других условиях, если возможно установить координаты нескольких реперов, например при выполнении разведки на зараженной территории.

Литература

- [1] Шаветов С.В., Ведяков А.А., Бобцов А.А. Система технического зрения в архитектуре системы удаленного управления. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2014, № 2(90), с. 164–166.
- [2] Тищенко А.С., Михайло Б.Б. Алгоритм поиска объектов для навигации мобильного робота в экстремальных условиях с помощью системы технического зрения. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2004, № 4, с. 22–27.
- [3] Дьяков Б.Н. *Геодезия. Общий курс*. Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, 1993. 171 с.
- [4] Кудинов И.А., Павлов О.В., Холопов И.С. Реализация алгоритма определения пространственных координат и угловой ориентации объекта по реперным точкам, ис-

пользующего информацию от одной камеры. *Компьютерная оптика*, 2015, т. 39, № 3, с.413–419.

- [5] Михайлов Б.Б. Техническое зрение мобильных роботов. *Механика, управление и информатика*, 2011, № 6, с. 191–201.
- [6] *Экстремальная робототехника*. Мат. науч.-техн. конф. Санкт-Петербург. СПбГПУ, 2003, с. 258–264.

Жэнь Шуфэн — магистрант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Б.Б. Михайлов, канд. техн. наук, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

MACHINE VISION SYSTEM FOR MOBILE ROBOT NAVIGATION

Ren Shufeng

rsf45355382@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

We solve the problem of positioning a mobile robot based on the information from the machine vision system. Three reference points with known coordinates form the basis for computing the mobile robot's position, and the machine vision system determines current directions towards those points. We analysed the coordinate measurement error for the method we describe and suggest a solution to the problem of selecting the reference point combination

Keywords

Mobile robot, robot navigation, reference point, machine vision system, coordinate measurement error

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Shavetov S.V., Vedyakov A.A., Bobtsov A.A. The system of technical vision in the architecture of the remote control system. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2014, no. 2(90), pp. 164–166.
- [2] Tishchenko A.S., Mikhaylo B.B. Objects search algorithm for mobile robot navigation in extremal conditions using technical vision system. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2004, no. 4, pp. 22–27.
- [3] D'yakov B.N. Geodeziya. Obshchiy kurs [Geodesy. Guide line]. Novosibirsk, Novosibirsk University publ., 1993. 171 p.
- [4] Kudinov I.A., Pavlov O.V., Kholopov I.S. Object spatial coordinates and attitude definition algorithm by reference points using information from single camera. *Komp'yuternaya optika*, 2015, vol. 39, no. 3, p. 413–419.
- [5] Mikhaylov B.B. Computer vision of mobile robots. *Mekhanika, upravlenie i informatika*, 2011, no. 6, pp. 191–201.
- [6] Ekstremal'naya robototekhnika. Mat. nauch.-tekhn. konf. Sankt-Peterburg. SPbGPU, 2003, pp. 258–264.

Ren Shufeng — graduate student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

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