

移动机器人里程计系统误差的校正方法*

张铁¹ 陈伟华^{1,2†} 邹焱飏¹ 马琼雄¹

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学广州学院 工程研究院, 广东 广州 510800)

摘 要: 为提高系统的定位精度和减小系统误差, 针对低运动控制模型精度移动机器人, 基于3个主要的系统误差来源——“左右轮子直径的不相等”、“轮距的不确定”和“左右轮子直径实际的平均值与标称平均值不相等”所产生的位置误差和方向误差, 提出了校正里程计系统误差的方法, 并设计校正实验来校正系统参数——左右轮子的直径和轮距. 该校正方法分别考虑了系统误差对机器人直线运动和旋转运动的影响, 通过直线运动和旋转运动的实验数据校正系统参数. 实验结果表明, 校正后的系统参数更接近其实际值, 系统误差更小, 系统定位精度更高, 并且实验简单, 容易操作.

关键词: 移动机器人; 里程计; 系统误差; 定位

中图分类号: TP24

doi: 10. 3969/j. issn. 1000-565X. 2014. 09. 002

移动机器人定位是指机器人通过内外传感器确定自身在工作环境中的精确位置^[1-3]. 定位方法分为绝对定位和相对定位两种方法. 里程计定位方法是一种重要的相对定位方法^[4-9], 它属于航位推算法, 是未知环境中移动机器人导航定位的主要方法^[10]. 里程计定位方法能简化确定位姿的基本问题, 无需外部传感器信息实现对机器人位置和方向的估计. 该方法简单, 使移动机器人系统安装成本低, 容易实现实时性工作^[4,7,11], 但会产生无界的误差累积, 甚至会导致移动机器人导航任务的失败, 因此里程计的误差校正是实现机器人准确位姿估计的前提^[4-7].

里程计的误差分为系统误差和非系统误差^[12]. 里程计的系统误差与外界环境无关, 它以常量进行误差累积, 在很长的时间内不会改变^[13]. 为了减小里程计的系统误差, 国内外学者提出了多种方法, 其中以 Borenstein 等^[5-6]提出的移动机器人里程计系统误差校正方法影响最大. 该方法明确指出里程计

系统误差的两个主要来源为“不相等的轮直径”和“轮距的不确定”, 并且为校正这两个误差设计了“双向正方形路径”实验(UMBmark 实验). 该实验方法简单, 已经系统化, 容易实现. 文献[13]在 Borenstein 等的基础上提出了改进方法, 定义了新的系统误差模型, 并提出了详细的算法来计算差分移动机器人的系统参数及对应的纠正系数.

在现有里程计系统误差主要来源的基础上, 文中分析了3个主要的系统误差来源, 针对低运动控制模型精度移动机器人, 提出了一种校正里程计系统误差的方法, 并根据该校正方法设计校正实验, 通过实验验证所提出的校正方法的可行性.

1 里程计系统误差来源

Borenstein 等^[5]经过长达12年多的实验观察, 发现里程计的主要系统误差来源是“不相等的轮直径”和“轮距的不确定”. 由“不相等的轮直径”导致

收稿日期: 2014-04-10

* 基金项目: 广东省-教育部产学研结合项目(2012B090600028); 广东省科技计划项目(2011A091101001, 2012B010900076); 广州市科技计划项目(2014Y2-00014)

作者简介: 张铁(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事机器人技术研究. E-mail: merobot@scut.edu.cn

† 通信作者: 陈伟华(1985-), 女, 博士, 讲师, 主要从事机器人技术研究. E-mail: adahuachen@foxmail.com

的误差 E_d 仅对机器人的直线运动造成影响,而由“轮距的不确定”导致的误差 E_b 仅对机器人的旋转运动造成影响,其中

$$E_d = D_r/D_l \quad (1)$$

$$E_b = B_a/B_n \quad (2)$$

式中, D_l 和 D_r 分别为机器人左轮子和右轮子的实际直径, B_a 为机器人的实际轮距, B_n 为标称轮距。

文献[6]中指出里程计系统误差的另一个主要来源为“两轮子直径的实际平均值与标称平均值不相等”,其产生的系统误差称为比例误差 E_s ,该误差同时影响机器人的直线运动和旋转运动。

$$E_s = D_a/D_n \quad (3)$$

式中, D_a 和 D_n 分别为机器人两轮子直径的实际平均值和标称平均值。

Borenstein 等^[5]认为虽然比例误差 E_s 是一个重要的误差,但该误差可以在 UMBmark 实验之前通过尺量法测量和校正,故 UMBmark 实验中只考虑校正误差 E_d 和 E_b 。

文献[13]认为,在机器人控制精度较低的情况下,利用尺量法不容易精确测量误差 E_s ,因此定义了新的系统误差模型,在新模型中3个主要的系统误差为 E_d 、 E_b 、 E_o 。 E_o 为由 E_s 导致的方向误差,其计算公式如下:

$$E_o = D_a/D_n \quad (4)$$

综上所述,里程计3个主要的系统误差来源为“不相等的轮直径”、“轮距的不确定”和“两轮子直径的实际平均值与标称平均值不相等”,它们分别对应的系统误差为 E_d 、 E_b 和 E_s 。

对于低运动控制模型精度的机器人,比例误差 E_s 利用尺量法不容易精确测量。文献[5]中 UMBmark 实验的前提是在实验前测量和校正 E_s 。文献[13]中的改进方法虽然在实验前不用测量和校正 E_s ,而是通过实验同时校正3个主要系统误差 E_d 、 E_b 和 E_s ,但该方法只考虑由 E_s 导致的方向误差 E_o ,忽略了其对直线运动造成的影响。为此,文中提出了通过实验同时校正3个主要系统误差 E_d 、 E_b 和 E_s 的方法,该方法考虑了由 E_s 对机器人旋转运动和直线运动都造成的影响。

2 校正里程计系统误差的新方法

针对低运动控制模型精度的移动机器人,文中提出的校正方法既考虑了“不相等的轮直径”和“两

轮子直径的实际平均值与标称平均值不相等”对机器人直线运动的影响,又考虑了“轮距的不确定”和“两轮子直径的实际平均值与标称平均值不相等”对机器人旋转运动的影响。

2.1 误差对直线运动的影响

影响机器人直线运动的两个主要系统误差来源中,“不相等的轮直径”将导致机器人直线运动过程中产生侧偏,而“两轮子直径的实际平均值与标称平均值不相等”将导致机器人实际运动的路程值比路程输入值大或小。如图1所示,假设左轮运动路程比右轮运动路程大,机器人低速直线运动,路程输入值为 L ,而机器人实际运动的路程值为 L_{ca} ,机器人偏离直线轨迹的侧偏距为 C (这里规定初始前进方向右手边 C 为正值,左手边 C 为负值),机器人运动中实际转过的角度为 ψ 。

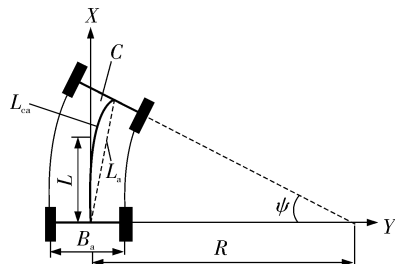


图1 移动机器人直线运动的实际路径

Fig. 1 Actual path of linear motion in mobile robot

左、右轮子的实际运动路程 L_l^1 和 L_r^1 分别为^[5]

$$L_l^1 = \frac{N_l^1 D_l^a \pi}{n} \quad (5)$$

$$L_r^1 = \frac{N_r^1 D_r^a \pi}{n} \quad (6)$$

式中, N_l^1 和 N_r^1 分别为左、右两个编码器的脉冲增量(轮子前进为正值,后退为负值), D_l^a 和 D_r^a 分别为左、右轮子的实际直径, n 为轮子每转对应的脉冲量。

根据差动机器人运动学模型,直线运动的实际路程 L_{ca} 和转角 ψ 分别为^[4,14-15]

$$L_{ca} = \frac{L_l^1 + L_r^1}{2} = \frac{\pi(N_l^1 D_l^a + N_r^1 D_r^a)}{2n} \quad (7)$$

$$\psi = \frac{L_l^1 - L_r^1}{B_a} = \frac{\pi(N_l^1 D_l^a - N_r^1 D_r^a)}{nB_a} \quad (8)$$

在只有“不相等的轮直径”和“两轮子直径的实际平均值与标称平均值不相等”的影响下,机器人直线运动的实际轨迹可以看似圆弧形,如图1所示。根据几何关系可求出机器人在直线运动中实际转过的角度 ψ ,即由

$$\sin \frac{\psi}{2} = \frac{C}{L_a} \Rightarrow \psi = 2 \arcsin \frac{C}{L_a} \quad (9)$$

式中, L_a 为始末两点间实际的距离(圆弧的弦长)。

根据几何关系可求出机器人直线运动的实际路程 L_{ca} , 即由

$$\begin{cases} \sin \frac{\psi}{2} = \frac{L_a}{2R} \\ L_{ca} = R\psi \end{cases} \Rightarrow L_{ca} = \frac{L_a \psi}{2 \sin \frac{\psi}{2}} \quad (10)$$

式中, R 为机器人实际轨迹的圆弧半径。

2.2 误差对旋转运动的影响

影响机器人旋转运动的主要系统误差来源是“轮距的不确定”和“两轮子直径的实际平均值与标称平均值不相等”。这两个误差来源将共同导致机器人实际旋转的角度比旋转角度输入值大或小。如图2所示, 假设左轮运动路程比右轮运动路程大, 机器人低速在原地旋转, 旋转角度输入值为 τ , 而实际旋转角度为 τ_a 。

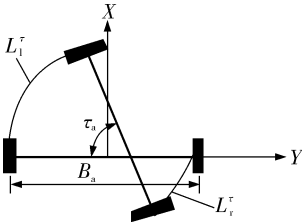


图2 机器人旋转运动的实际路径

Fig. 2 Actual path of rotation motion in mobile robot

机器人左、右轮子的实际旋转路程 L_l^r 和 L_r^r 分别为

$$L_l^r = \frac{N_l^r D_l^a \pi}{n} \quad (11)$$

$$L_r^r = \frac{N_r^r D_r^a \pi}{n} \quad (12)$$

式中, N_l^r 和 N_r^r 分别为左、右两个编码器的脉冲增量(轮子前进为正值, 后退为负值), D_l^a 和 D_r^a 分别为左、右轮子的实际直径。

根据差动机器人运动学模型, 机器人旋转运动的实际旋转角度 τ_a 为^[4, 14-15]

$$\tau_a = \frac{L_l^r - L_r^r}{B_a} = \frac{\pi(N_l^r D_l^a - N_r^r D_r^a)}{n B_a} \quad (13)$$

由式(7)和(10)消去 L_{ca} 可得

$$\pi \sin \frac{\psi}{2} (N_l^l D_l^a + N_r^l D_r^a) = n L_a \psi \quad (14)$$

综合式(8)、(13)和(14)可求出左、右轮子的直径 D_l^a 、 D_r^a 和轮距 B_a ：

$$\begin{cases} D_l^a = \frac{\frac{n L_a \psi}{\pi \sin \frac{\psi}{2}} \left(1 - \frac{N_r^l \tau_a}{N_r^r \psi} \right)}{N_l^l - \frac{N_r^l \left(\frac{2 \tau_a N_l^l}{\psi} - N_l^r \right)}{N_r^r}} \\ D_r^a = \frac{1}{N_r^r} \left[\frac{n L_a \tau_a}{\pi \sin \frac{\psi}{2}} - \left(\frac{2 \tau_a N_l^l}{\psi} - N_l^r \right) D_l^a \right] \\ B_a = \frac{2 \pi N_l^l D_l^a}{n \psi} - \frac{L_a}{\sin \frac{\psi}{2}} \end{cases} \quad (15)$$

综上所述, 文中提出的里程计系统误差校正方法中, 左、右轮子的直径 D_l^a 、 D_r^a 和轮距 B_a 是直线运动与旋转运动两部分数据的综合结果。

3 实验及结果分析

实验平台是华南理工大学广州学院自主研发的机器人底盘(见图3)。左、右两个编码器直接与两个被动轮子连接, 为底盘的运动控制系统提供反馈。左、右轮子每转对应的脉冲量 $n = 2000 \text{ PUL/r}$ 。实验的目的就是校正两个被动轮子的直径和轮距, 以验证文中所提出的校正方法的可行性。

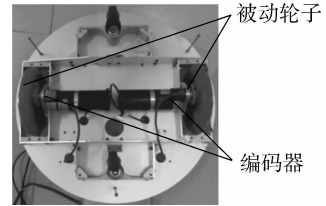


图3 机器人底盘

Fig. 3 Chassis of robot

为了防止机器人运动时发生滑动, 直线运动速度为 100 mm/s , 旋转运动速度为 $10^\circ/\text{s}$ 。实验中测量距离使用普通的测量精度为 mm 的卷尺; 测量角度使用测量精度为 $(^\circ)$ 的三角板。实验步骤如下:

(1) 实验前, 用千分尺测量左、右两个被动轮子的直径 D_l 、 D_r 和轮子间距 B ;

(2) 以 100 mm/s 的速度直线运动一定的距离 L , 记录左、右两个编码器的脉冲增量 N_l^l 和 N_r^l , 测量始末两点间实际的距离 L_a 和侧偏距 C ;

(3) 重复步骤(2) h 次, 根据这 h 次数据分别求 N_l^l 、 N_r^l 、 L_a 和 C 的平均值;

(4) 以 $10^\circ/\text{s}$ 的转动速度在原地旋转角度 τ , 记录左、右两个编码器的脉冲增量 N_l^r 和 N_r^r , 测量机器

人实际转过的角度 τ_a ;

(5)重复步骤(4)分别顺时针和逆时针各旋转 $h/2$ 次(h 为偶数),根据这 h 次数据分别求 N_l^r 、 N_r^r 和 τ_a 的平均值;

(6)将 N_l^l 、 N_r^l 、 L_a 、 C 、 N_l^r 、 N_r^r 和 τ_a 代入式(9)和(14),求出左、右被动轮子实际的直径 D_l^a 、 D_r^a 和轮子间距 B_a 。

依照实验步骤,实验前测得 D_l 为40.670 mm, D_r 为40.670 mm, B 为290.820 mm。由于测量值与实际值之间的误差较大,校正前的直线运动侧偏距很大,故先直线运动2 m和旋转 630° 各1次做一组粗校正实验,第1组实验数据为 $N_l^l = 31\,352$ PUL, $N_r^l = 31\,369$ PUL, $L_a = 2\,009.1$ mm, $C = -297.0$ mm, $N_l^r = 25\,023$ PUL, $N_r^r = -24\,939$ PUL, $\tau_a = 632.0^\circ$,根据实验数据可求出 $D_l^a = 40.068$ mm, $D_r^a = 41.800$ mm, $B_a = 291.229$ mm。

以上面得出的系统参数作为实验前的系统参数输入值,重新做实验:直线运动4 m和旋转 630° 各8次,第2组实验数据的平均值为 $N_l^l = 63\,570$ PUL, $N_r^l = 60\,957$ PUL, $L_a = 3\,977.6$ mm, $C = 149.9$ mm, $N_l^r = 25\,406$ PUL, $N_r^r = -24\,385$ PUL, $\tau_a = 629.1^\circ$,根据实验数据可求出 $D_l^a = 39.952$ mm, $D_r^a = 41.436$ mm, $B_a = 289.753$ mm。

为了验证该方法的可行性和获取系统误差精度,采用Borenstein等^[5]定义的 $E_{\max, \text{sys}}$ 表示里程计系统误差的大小。

由于实验场地是4 m × 6 m的空地,故实验采用3 m × 3 m的双向正方形路径实验。首先以没校正前系统参数的测量值($D_l = 40.670$ mm, $D_r = 40.670$ mm, $B = 290.820$ mm)作为输入值做实验,发现机器人直线运行完第一段3 m的路径停止时,其侧偏距已达到625 mm,实验场地无法让它走完3 m × 3 m的正方形路径(这也说明了在该场地无法进行UMBmark校正实验)。接着以第2组实验数据计算得出的系统参数($D_l^a = 39.952$ mm, $D_r^a = 41.436$ mm, $B_a = 289.753$ mm)作为输入值做实验,结果如图4所示,可求出 $E_{\max, \text{sys}}$ 为295.042 mm。

实验结果表明:①校正后的系统误差精度提高了很多;②实验简单,需要的实验场地不大;③可以根据校正前系统参数误差的大小选择直线运动的长度和旋转运动的角度(如本实验先选取2 m做粗校正实验,再选4 m做细校正实验),以提高校正精度。

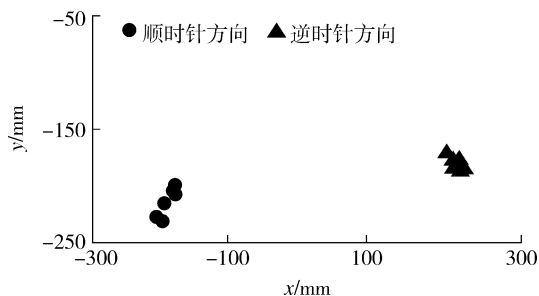


图4 校正后机器人走双向正方形路径的位置误差

Fig. 4 Position errors of robot running through bidirectional square path after correction

4 结论

里程计的误差校正是实现机器人位姿准确估计的前提。文中针对低运动控制模型精度移动机器人,提出了同时考虑“不相等的轮直径”、“轮距的不确定”和“两轮子直径的实际平均值与标称平均值不相等”影响的校正里程计系统误差方法。实验结果表明,校正后的系统误差更小,并且实验简单,需要的实验场地不大。由于可以根据具体底盘的精度和实验场地选择实验运动的路程和重复次数,故该方法的实验简单方便。

参考文献:

- [1] 蔡自兴,贺汉根,陈虹. 未知环境中移动机器人导航控制理论与方法 [M]. 北京:科学出版社,2009:171.
- [2] Leonard John J, Durrant-Whyte Hugh F. Mobile robot localization by tracking geometric beacons [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(3): 376-382.
- [3] Ganganath N, Leung H. Mobile robot localization using odometry and Kinect sensor [C] // Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Emerging Signal Processing Applications. Las Vegas: IEEE, 2012: 91-94.
- [4] Kok Seng Chong, Kleeman L. Accurate odometry and error modelling for a mobile robot [C] // Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque: IEEE, 1997: 2783-2788.
- [5] Borenstein J, Feng L. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(6): 869-880.
- [6] Borenstein J, Feng L. Correction of systematic odometry errors in mobile robots [C] // Proceedings of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Pittsburgh: IEEE, 1995: 569-574.
- [7] Borenstein J, Feng L. Gyrodometry: a new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots [C] // Proceedings of 1996 IEEE International Conference on

- Robotics and Automation. Minneapolis: IEEE, 1996: 423-428.
- [8] Mondal Sharifuddin, Yun Youngmok, Chung Wan Kyun. Terminal iterative learning control for calibrating systematic odometry errors in mobile robots [C] // Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Montreal: IEEE, 2010: 311-316.
- [9] Abbas T, Arif M, Ahmed W. Measurement and correction of systematic odometry errors caused by kinematics imperfections in mobile robots [C] // Proceedings of International Joint Conference SICE-ICASE. Busan: IEEE, 2006: 2073-2078.
- [10] 于金霞, 蔡自兴, 邹小兵, 等. 基于神经网络辨识的移动机器人航向误差校准方法 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(5): 745-750.
Yu Jin-xia, Cai Zi-xing, Zou Xiao-bing, et al. Calibration method for heading error of mobile robot based on neural networks identification [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(5): 745-750.
- [11] Borenstein J. Experimental results from internal odometry error correction with the OmniMate mobile robot [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 963-969.
- [12] Yun Youngmok, Park Byungjae, Chung Wan Kyun. Odometry calibration using home positioning function for mobile robot [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena: IEEE, 2008: 2116-2121.
- [13] 王卫华, 熊有伦, 孙容磊. 测程法系统误差的测量与校正 [J]. 机器人, 2004, 26(5): 454-460.
Wang Wei-hua, Xiong You-lun, Sun Rong-lei. Measurement and calibration of systematic errors of odometry [J]. Robot, 2004, 26(5): 454-460.
- [14] 赵立军. 室内服务机器人移动定位技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电学院, 2009: 31-33.
- [15] 杨晶东. 移动机器人自主导航关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 2008: 24-26.

Calibration Method of Systematic Odometry Errors of Mobile Robot

Zhang Tie¹ Chen Wei-hua^{1,2} Zou Yan-biao¹ Ma Qiong-xiong¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

2. Engineering Institute, Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800, Guangdong, China)

Abstract: In order to improve the localization accuracy and to reduce the systematic errors, a calibration method of systematic odometry errors is proposed for the mobile robot with a low accuracy of motion control model, and an experiment is designed to correct the system parameters, namely, the left and right wheel diameters and the wheel-base. This calibration method takes into account the position and orientation errors caused by three main systematic error sources, namely, the inequality between left and right wheel diameters, the uncertainty of wheelbases and the difference between the average actual wheel diameter and the nominal wheel diameter. This calibration method also considers the influences of the systematic errors on the linear motion and the rotation motion of the mobile robot, and uses the experimental data of linear motion and rotation motion to correct the systematic parameters. Experimental results demonstrate that the corrected diameters are closer to their actual values with smaller systematic errors and higher localization accuracy, and the experiment is simple and easy to handle.

Key words: mobile robot; odometry; systematic error; localization