

doi: 10.7690/bgzd.2017.05.017

三轮全向移动机器人的航迹推算定位方法

李雪茹, 王禹林, 欧屹, 王志荣, 汪满新

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为提高自主定位机器人的定位精度, 设计一种基于三轮全向从动的航迹推算定位机器人机构。机器人的主动轮系统由 4 个麦克纳姆轮组成, 从动轮系统由 3 个全向轮组成。通过离散化航迹推算定位公式计算并更新机器人的位姿信息。最后通过实验测量多种运动方式、不同采样周期下的定位误差。结果表明: 该方法可基本满足机器人室内定位要求, 为航迹推算定位提供理论依据和实验参考。

关键词: 移动机器人; 航迹推算定位; 结构设计; 误差; 精度

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Dead Reckoning Positioning Method of 3 Wheels Omnidirectional Mobile Robot

Li Xueru, Wang Yulin, Ou Yi, Wang Zhirong, Wang Manxin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To improve the positioning accuracy of autonomous positioning robot, a dead reckoning positioning robot structure based on 3 omnidirectional driven wheels was designed. Robot's driving wheel system was composed of 4 Mecanum wheels and driven wheel system was composed of 3 omnidirectional wheels. Robot's pose information was calculated and updated according to discretized dead reckoning positioning formula. Finally, positioning error was obtained by experiments of various motion modes and different sampling periods. The experiment results show the method meets the requirements of robot indoor positioning. Theoretical basis and experimental reference of dead reckoning positioning were provided.

Keywords: mobile robot; dead reckoning positioning; structure design; error; precision

0 引言

移动机器人的自主定位问题一直是机器人研究领域的难点和重点^[1]。机器人根据内部传感器或者外部传感器获得自身与环境信息以确定相对位置信息^[2]。常见的机器人定位方式有 GPS 定位、航迹推算定位、地图匹配定位、基于信标的定位和多传感器信息融合定位。用于机器人定位的传感器可分为内部传感器和外部传感器。内部传感器如编码器、加速度计、陀螺仪通过不断累积自身数据进行位姿推算。使用内部传感器的定位方法主要包括基于惯性传感器的惯性导航法和基于编码器的测距法^[3]。外部传感器如超声波传感器、激光雷达、视觉传感器获得的信息会随外界环境的改变发生显著变化, 将提高系统的运算量, 出现“绑架”问题, 降低定位精度。目前运用较多的航迹推算定位方法为双轮差动航迹推算定位法^[4]。该定位方法不易受环境影响, 具有成本低且容易实现等特点。笔者在此基础上设计出基于 3 个旋转全向轮的航迹推算定位机器人机构, 并在该机器人基础上建立系统的运动学微分方程, 通过离散化的航迹推算定位公式, 实现机器人位姿信息的积分迭代推算^[5-6], 得到机器人在全

局坐标系下的位姿信息。通过不同采样周期对比实验进行方案的可行性验证。

1 底盘硬件平台设计

本机器人底盘包括主动轮系与从动轮系 2 部分, 主动轮系由 4 个左右对称的麦克纳姆轮组成, 用于底盘的驱动; 从动轮系由 3 个 120°均匀分布的全向轮组成, 全向轮与旋转编码器同轴同步转动, 采集从动轮旋转角度进而计算从动轮转速。机器人系统方框图如图 1 所示。

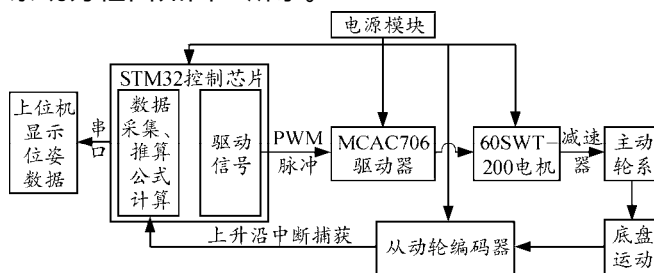


图 1 机器人系统

1.1 主动轮系统设计

主动轮系统由对称均布在底盘两侧边的 4 个麦克纳姆轮组成, 伺服电机通过减速器与麦克纳姆轮连接, 提供机器人运动的动力。为实现机器人的移

收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(51605225), 中央高校基本科研业务费专项资金(30915118830)

作者简介: 李雪茹(1992—), 男, 安徽人, 在读硕士, 从事机器人定位与导航研究。

动和自转，左前轮与右后轮使用右旋麦克纳姆轮，右前轮与左后轮使用左旋麦克纳姆轮。传统的麦克纳姆轮移动平台运行在不平整面时会出现单个轮系打滑的现象，为避免轮子打滑及机构振动对运动控制的影响，运动平台设计了弹簧减震机构使4个驱动轮压紧地面。主动轮系统结构3维模型如图2。

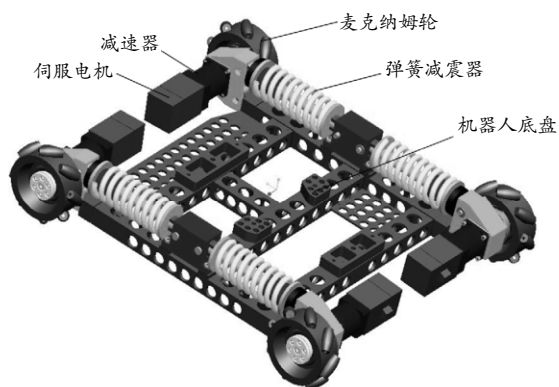


图2 主动轮系统结构3维模型

1.2 从动轮系统设计

从动轮系由轴线互成 120° 的3个全向轮组成，从动轮系不提供动力，随机器人运动。3个从动轮均布在半径为 d 的圆周上。从动轮与旋转编码器同轴并同步转动以测得从动轮的转角，如图3所示。编码器分辨率为 P ，从动轮半径为 r 。为了避免从动轮与地面打滑导致采集数据不完整，在从动轮支架上方设计了2个对称的弹簧机构^[7]，弹簧机构的运动方向垂直于机器人运动平面，该弹簧机构可保证从动轮沿直线轴承小距离垂直方向往复运动，进而保证采集数据的完整性，减小打滑的影响。

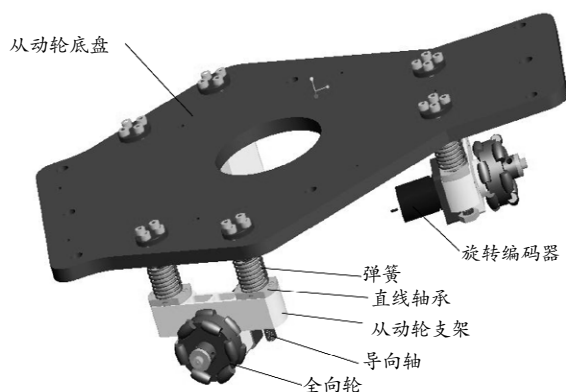


图3 从动轮系统结构3维模型

2 底盘运动学模型

图4中，主动轮的坐标系与从动轮的坐标系重合，为 $X_R O Y_R$ ，世界坐标系为 $X_W O Y_W$ ， θ 为机器人坐标系与世界坐标系的夹角。

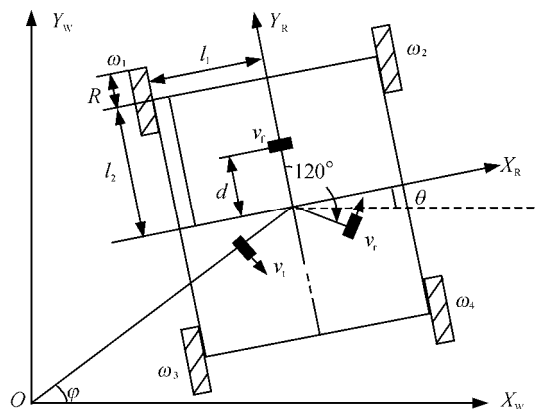


图4 机器人坐标系

2.1 主动轮运动学方程

以机器人底盘中心 O 为原点建立坐标系 $X_R O Y_R$ ，车身有效长度为 $2l_2$ ，宽为 $2l_1$ ，麦克纳姆轮轮轴和轴子轴线间夹角为 α ， $v_i (i=1,2,3,4)$ 是4个主动轮的线速度且 $v_i = R \times \omega_i$ ，其中 R 是主动轮的半径， ω_i 是对应车轮的旋转角速度， v_{gi} 为对应主动轮上与地面接触轴子的速度。当电机驱动车轮旋转时，车轮具有沿垂直于驱动轴方向前进及与地面接触的轴子绕其自身轴线旋转的运动^[8]。主动轮运动学方程为

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(l_1 \tan \alpha + l_2) \\ \tan \alpha & 1 & \tan \alpha \\ -1 & 1 & l_1 \tan \alpha + l_2 \\ \tan \alpha & 1 & \tan \alpha \\ -1 & 1 & -(l_1 \tan \alpha + l_2) \\ \tan \alpha & 1 & \tan \alpha \\ 1 & 1 & l_1 \tan \alpha + l_2 \\ \tan \alpha & 1 & \tan \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_R \\ \dot{Y}_R \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： \dot{X}_R 、 \dot{Y}_R 、 $\dot{\theta}$ 为底盘在 $X_W O Y_W$ 下的速度矢量； $\alpha = 45^\circ$ 。

2.2 从动轮运动学方程

从动轮坐标系与主动轮坐标系重合为 $X_R O Y_R$ 。定义3个从动轮的实时转速 v_f 、 v_i 、 v_r ，机器人坐标系中机器人的速度为 $[v_x, v_y, \dot{\phi}]^T$ ， v_x 和 v_y 为机器人瞬时速度 v 在 $O X_R$ 和 $O Y_R$ 方向上的投影，将机器人坐标系下机器人的速度在3个从动轮方向分解^[9]：

$$\begin{bmatrix} v_f \\ v_i \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & d \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & d \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

机器人坐标系与世界坐标系的关系为

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

则从动轮速度与底盘速度之间的关系^[10]为:

$$\begin{bmatrix} v_f \\ v_l \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\sin \theta & d \\ \sin(30^\circ + \theta) & \sin(\theta - 60^\circ) & d \\ \sin(30^\circ - \theta) & \sin(\theta + 60^\circ) & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中 $[\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}]^T$ 为世界坐标系中机器人的速度。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{3}\cos \theta & \frac{\cos \theta + \sqrt{3}\sin \theta}{3} & \frac{\cos \theta - \sqrt{3}\sin \theta}{3} \\ -\frac{2}{3}\sin \theta & \frac{\sin \theta - \sqrt{3}\cos \theta}{3} & \frac{\sin \theta + \sqrt{3}\cos \theta}{3} \\ \frac{1}{3d} & \frac{1}{3d} & \frac{1}{3d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f \\ v_l \\ v_r \end{bmatrix}. \quad (5)$$

上式为系统的正运动学模型。

航迹推算定位的基本计算公式为:

$$\begin{cases} x(i+1) = x(i) + \Delta x \\ y(i+1) = y(i) + \Delta y \\ \theta(i+1) = \theta(i) + \Delta \theta \end{cases}. \quad (6)$$

上式表明机器人第 $i+1$ 个采样时刻的位姿参数, 可以通过第 i 个采样时刻的位姿参数加上期间坐标和方向的改变量得到。则从动轮系的航迹推算公式为:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + \left(-\frac{2}{3}\cos \theta_i \cdot \int v_f dt \right) + \frac{\cos \theta_i + \sqrt{3}\sin \theta_i}{3} \cdot \int v_l dt + \frac{\cos \theta_i - \sqrt{3}\sin \theta_i}{3} \cdot \int v_r dt, \\ y_{i+1} &= y_i + \left(-\frac{2}{3}\sin \theta_i \cdot \int v_f dt \right) + \frac{\sin \theta_i - \sqrt{3}\cos \theta_i}{3} \cdot \int v_l dt + \frac{\sin \theta_i + \sqrt{3}\cos \theta_i}{3} \cdot \int v_r dt, \\ \theta_{i+1} &= \theta_i + \frac{1}{3d} \int (v_f + v_l + v_r) dt. \end{aligned} \quad (7)$$

在采样时间较短情况下, 认为从动轮的转速为定值, 通过离散化航迹推算公式以小段直线拟合曲线得到相邻两采样时刻机器人底盘位姿的关系式:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + \left[-\frac{2}{3}\cos \theta_i \cdot v_{fi} + \frac{\cos \theta_i + \sqrt{3}\sin \theta_i}{3} v_{li} + \frac{\cos \theta_i - \sqrt{3}\sin \theta_i}{3} v_{ri} \right] \cdot T, \\ y_{i+1} &= y_i + \left[-\frac{2}{3}\sin \theta_i \cdot v_{fi} + \frac{\sin \theta_i - \sqrt{3}\cos \theta_i}{3} v_{li} + \frac{\sin \theta_i + \sqrt{3}\cos \theta_i}{3} v_{ri} \right] \cdot T, \\ \theta_{i+1} &= \theta_i + \frac{1}{3d} (v_{fi} + v_{li} + v_{ri}) \cdot T. \end{aligned} \quad (8)$$

式中: T 为采样时间间隔; $[x_{i+1}, y_{i+1}, \theta_{i+1}]^T$ 和 $[x_i, y_i, \theta_i]^T$ 分别为第 $i+1$ 和第 i 个采样时刻机器人底盘在世界坐标系下的位姿。机器人坐标系与世界坐标系在 $i=0$ 时重合, 即 $[x_0, y_0, \theta_0]^T = [0 \ 0 \ 0]^T$ 。则可由式(8)推算得到任意采样时刻机器人在世界坐标系下的位姿。

3 实验验证

笔者分别在机器人直线前进、直线右移、直线斜向运动、自转情况下, 通过比对由航迹推算公式计算得到的位置数据与实际测量得到的位置数据, 计算定位误差^[11]。

3.1 向前运动

当 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4$ 时, 机器人向正前方运动, 编写程序使机器人最后减速运动直至停下, 图 5 为向前运动情况下, 采样周期分别取 $T=10 \text{ ms}$ 和 $T=20 \text{ ms}$ 时的误差对比。

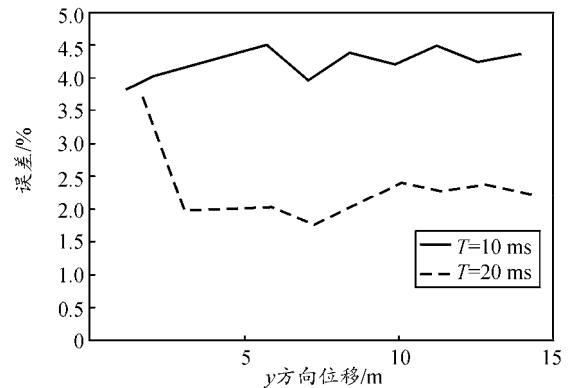


图 5 向前运动误差曲线

3.2 水平右移

当 $\omega_1 = \omega_4 = -\omega_2 = -\omega_3$ 时, 机器人水平移动, 图 6 为机器人水平右移情况下, 采样周期分别取 $T=10 \text{ ms}$ 和 $T=20 \text{ ms}$ 时的误差对比。

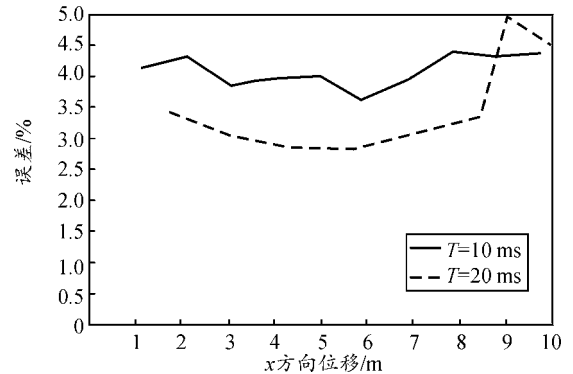


图 6 水平右移误差曲线

3.3 自转

当 $\omega_1 = \omega_3 = -\omega_2 = -\omega_4$ 时, 机器人原地自转, 图

7 为机器人顺时针自转情况下，采样周期分别取 $T=10\text{ ms}$ 和 $T=20\text{ ms}$ 时的误差对比。

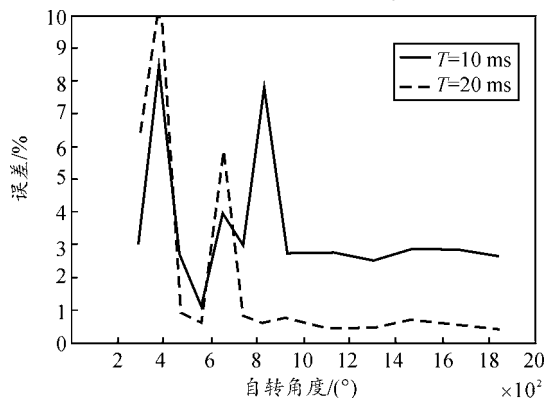
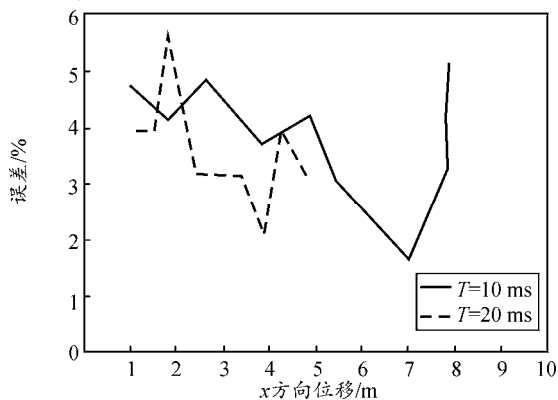


图7 顺时针自转误差曲线

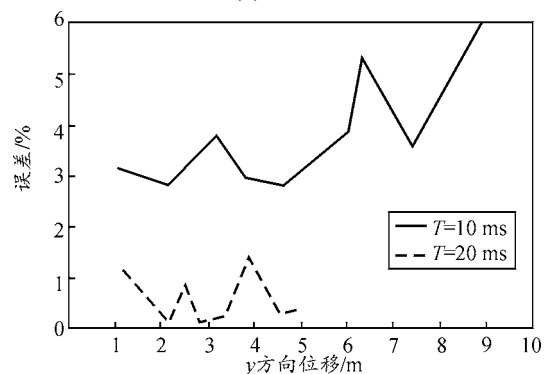
3.4 斜向运动

根据式(1)，当 $\omega_1 = \omega_4 = \frac{v}{R}(\cos\theta + \sin\theta)$ ，

$\omega_2 = \omega_3 = \frac{v}{R}(-\cos\theta + \sin\theta)$ 时，机器人沿与 x 轴成 θ 角的方向平动，取 $\theta=45^\circ$ 。图8(a)为机器人斜向平动情况下，采样周期分别取 $T=10\text{ ms}$ 和 $T=20\text{ ms}$ 时 x 轴位移的误差对比。图8(b)为机器人斜向平动情况下，采样周期分别取 $T=10\text{ ms}$ 和 $T=20\text{ ms}$ 时 y 轴位移的误差对比。



(a) x 方向



(b) y 方向

图8 斜向平动误差曲线

3.5 实验结果分析

对比以上多组实验可知，采样周期 $T=20\text{ ms}$ 时的定位误差比采样周期 $T=10\text{ ms}$ 时的定位误差小。随着运动距离(旋转角度)的增加，绝对误差增加，但误差基本保持在6%以下，定位精度高于基于左右两轮旋转编码器的航迹推算定位方法。

4 结束语

笔者针对三轮全向旋转编码器的航迹推算定位方式，设计了一款高负载、可将轮子打滑影响降至最低的自主定位机器人。笔者通过研究航迹推算定位公式，编写程序驱动机器人运动并采集不同采样周期下机器人位姿信息，以验证定位方案的可行性。结果证明：相比于传统两轮的航迹推算定位方法，该定位方式的定位精度有所提高，且定位误差相对稳定，为航迹推算定位提供了理论依据和实验参考。

参考文献：

- [1] Ahmad Kamal Nasir, Hubert Roth. Pose Estimation by Multisensor Data Fusion of Wheel Encoders, Gyroscope, Accelerometer and Electronic Compass[J]. Embedded Systems, Computational Intelligence & Telematics in Control, 2012, 45(4): 49-54.
- [2] 申伟锋, 钱东海, 胡猛. 改进路标定位传感模型在机器人定位中的应用[J]. 机械设计与制造, 2013(8): 74-77.
- [3] 高云峰, 周伦, 吕明睿. 自主移动机器人室内定位方法研究综述[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(12): 1-5, 9.
- [4] 徐明钊, 于海涛, 杨春, 等. 基于陀螺仪和码盘的自主定位机器人系统[J]. 兵工自动化, 2016, 35(10): 60-63.
- [5] Han S M, Lee K W. Mobile robot navigation using circular path planning algorithm[C]//International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Korea, 2008, 15(1): 2082-2084.
- [6] 张利, 潘承毅, 刘征宇, 等. 差动驱动机器人的一种航迹推算定位方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(11): 1605-1608, 1622.
- [7] 陈博翁, 范传康, 贺骥. 基于麦克纳姆轮的全方位移动平台关键技术研究[J]. 东方电气评论, 2013, 27(4): 7-11.
- [8] 张立娟, 姜世公, 崔登祺, 等. 人体下肢运动康复训练机器人的设计[J]. 兵工自动化, 2015, 34(5): 50-53.
- [9] 阎世梁. 三轮全向机器人运动特性分析[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(6): 81-83, 85.
- [10] Kochem, M. Data fusion for precise dead-reckoning of passenger cars[J]. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-Papers Online), 2002, 35(1): 397-402.
- [11] 蔡艺超, 周军. 一种水下机器人的水面平台控制系统设计[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1221.