

基于自控测距法的机器人位姿估计

王晓宇¹, 闫继宏², 徐莉红³

(1. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094; 2 哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3 304 厂科研 2 所, 山西 长治 046012)

摘 要: 针对两轮自平衡机器人运行过程中遇到打滑、越障、碰撞等异常事件, 测程法进行位姿估计失效的情况, 提出一种自控测距法. 结合改进的 Gyrodometry 方法, 通过融合码盘、陀螺仪与加速度计数据对机器人的位姿进行估计, 实现了机器人的准确定位, 解决了非系统定位误差对机器人位姿估计的影响, 降低了陀螺仪、加速度计固有漂移的不利影响, 提高了两轮自平衡机器人的定位精度. 实验结果显示与测程法误差相比自控测距法位置误差降为 1/3, 方向误差降为 1/6, 验证了自控测距法的有效性.

关键词: 位姿估计; 自控测距法; Gyrodometry 法

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785 (2009) 02-0169-06

Improving estimations of a robot 's position and attitude
with accelerometer enhanced odometry

WANG Xiao-yu¹, YAN Ji-hong², XU Li-hong³

(1. DFH Satellite Company Ltd., Beijing 100094, China; 2 Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China; 3 Number 2 Scientific Research Institute, Number 304 Factory, Changzhi 046012, China)

Abstract: Unpredictable events can occur in the navigational processes of two-wheeled self-balancing robots, such as wheel-slippage, interaction with obstacles, and bumps. These invalidate position and attitude estimates. Therefore, an improved method was developed for accurate positioning of robots. The accodomerty method adds accelerometer data to the improved Gyrodometry method, fusing encoder data with inertial sensor data. This method eliminates the effect of non-systematic errors on robot position and attitude estimation and reduces ill-effects due to inherent drift of the gyro and accelerometer. As a result, positional accuracy is greatly improved. Experimental results showed that positional errors decrease by one-third and orientation errors decline by one-sixth, verifying the effectiveness of the accodomerty method.

Keywords: position and attitude estimation; accodomerty method; Gyrodometry method

机器人定位是导航的一个重要的研究方向, 要求机器人能够在运动过程中精确的感知自身在环境中的位置和姿态. 移动机器人通常采用 2 种基本的定位方法: 绝对定位法和相对定位法, 大多数方法采用绝对定位与相对定位相结合来进行位姿估计^[1-3].

测程法根据路程随时间累积而增加的原理, 通过控制车轮旋转和车轮转向角的光电码盘获得机器人的当前位置与初始位置的偏差, 然后计算机器人本体与车轮、转向之间的关系得到位置信息, 不需要

外部传感器的信息就能实现对机器人位置的估计. 测程法具有良好的短期精度、实现简单、成本低、采样速率高、实时性好的优点, 但是存在误差无界的累积增长. 因此需要采用路标、光电探测器和超声传感器等绝对定位系统进行外部测量, 对测程法产生的累积误差进行修正以提高机器人的定位精度. 安装绝对定位系统将增加成本; 因此需要提高测程法与传感器精度, 减少使用绝对定位系统的密度和修正的次数, 提高系统响应的实时性, 降低成本提高定位精度^[4-7].

密歇根大学的 Borenstein 等^[8]提出了 UMBmark (University of Michigan benchmark test) 方法, 针对测

收稿日期: 2008-05-14.
基金项目: “863 国家高技术研究发展计划资助项目 (2006AA04Z245).
通信作者: 王晓宇. E-mail: wxyhit197745@yahoo.com.cn

程法系统误差进行测量和修正,并用实验验证了该方法能够使定位精度至少提高一个数量级.华中科技大学的王卫华等^[2]针对 UMBmark 提出了改进的算法,进一步提高了测程法的定位精度.对于非系统误差中的转向问题, Borenstein 等^[9]提出了 Gyrodometry 方法,几乎完全消除了陀螺仪漂移误差的影响,有效地解决了异常情况下的转向估计问题,提高了测程法精度.还针对测程法中的非系统误差车轮打滑提出改进的测程法,进一步提高定位精度^[10].

当前机器人异常情况下定位问题的研究主要针对多轮机器人,研究方向主要集中在转向(偏航轴)方面,解决问题时只考虑方向信息而未考虑异常情况时的位置估计问题,对于两轮机器人异常情况下的定位研究还未开展.针对两轮机器人运行过程中可能遇到的打滑、越障、碰撞等异常情况造成不可预测的定位误差,位姿估计失效、机器人任务失败时,提出一种直接、有效的自控测距法(accelerometer odometry),结合改进的 Gyrodometry 方法发现并修正非系统的定位误差,提高定位精度.

1 测程法误差分析

测程法的前提假设是车轮旋转可以转换成相对地面的线位移,此假设只在有限范围内有效,在极端情况下比如车轮打滑会造成较大的误差.除了完全打滑这种极端情况以外还有几种造成码盘读数不能正确转换成位移的因素.这些误差源可以分成系统误差和非系统误差 2 类:

- 1) 系统误差:机器人结构误差、车轮直径不相等、车轮实际直径的平均值与标称值不一致、车轮偏心、有效轮距不确定、码盘分辨率、采样率限制.
- 2) 非系统误差:车轮打滑、地面不平、越障、碰撞、干扰、惯性传感器漂移误差.

系统误差主要由运动学模型不完善造成,非系统误差主要由外部环境影响造成.在平坦的室内环境中,系统误差对定位误差的影响超过了非系统误差;在地面不规则的环境中,非系统误差是定位误差的主要误差源.非系统误差是不可预期的,它们会导致产生大的位置误差.

2 位姿估计用传感器

机器人位姿估计采用绝对定位与相对定位相结合的方法,通过分析常用位姿测量传感器的特点,综合考虑机器人控制的实际情况和经济性因素,最终

选用相对定位传感器加速度计、陀螺仪、码盘实时测量机器人姿态,采用码盘、加速度计实时测量机器人位置,并定期通过绝对定位传感器超声传感器组、光电探测器组和路标系统对实时位姿信息进行修正.定位用传感器组成如图 1 所示.

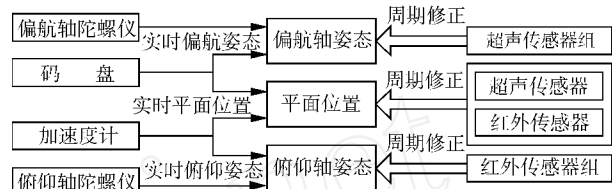


图 1 传感器配置示意图

Fig 1 Schematic diagram of sensors

3 自控测距法

为解决异常情况下非系统误差问题,对机器人车轮与地面的相互作用进行了研究,提出一种融合码盘数据与加速度计数据的方法进行位置估计.

3.1 异常过程分析

当两轮自平衡机器人进行直线运动,左轮越过一个障碍物时,要想保持机器人继续进行直线运动左轮就要多走一段距离 D (D 与车轮直径和障碍物的高度有关).当码盘没有“意识到”碰到障碍物时,机器人的 2 个车轮将尽量保持相同的转速前进,左轮将比右轮少移动 D 距离,造成机器人向有障碍物一侧偏移,运动轨迹也从直线变成曲线.越障结束后机器人将继续保持直线运动,但是却产生了方向误差和位置误差,如图 2 所示.越障前机器人车轴方位如线 L_1 所示,越障后车轴方位如线 L_2 所示, L_3 为没有障碍时机器的方位, L_4 为机器人瞬时俯仰轴姿态, F 方向为辅助计算方向.

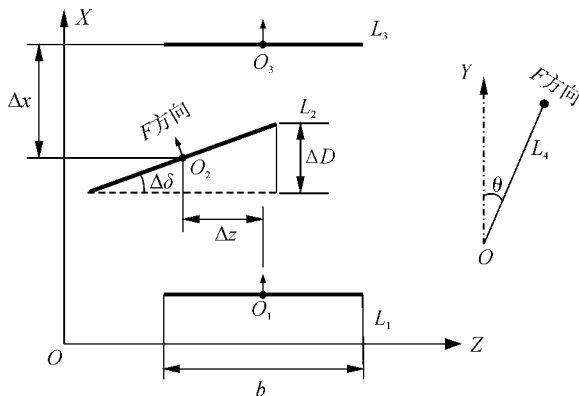


图 2 测程法误差示意图

Fig 2 Schematic diagram of odometry error

机器人越障过程位姿变化非常复杂,需要采用绝对定位传感器的测量值,再结合机器人的瞬时姿

态值,才能得到越障过程中机器人的位姿信息.其中:方向角 由测量偏航轴姿态的超声传感器组测量值计算后得到;俯仰轴姿态角 由测量俯仰轴姿态的光电探测器组测量值计算后得到;横向位移 z

$$\begin{cases} \theta(t) = \arctan \frac{L_{ped_1}(t) - L_{ped_2}(t)}{D_{ped}}; \\ \phi(t) = \arctan \frac{L_{us_1}(t) - L_{us_2}(t)}{D_{us} \cos(\theta(t))}; \\ x(t) = [L_{us}(t) + D_{us_1}] \cos(\theta(t)) \cos(\phi(t)) - D_{us_2} \sin(\theta(t)) \cos(\phi(t)); \\ z(t) = [L_{us}(t) + D_{us_1}] \cos(\theta(t)) \sin(\phi(t)) - D_{us_2} \sin(\theta(t)) \sin(\phi(t)). \end{cases} \tag{1}$$

式中: L_{ped_1} 、 L_{ped_2} 分别为测量俯仰轴姿态的光电探测器 1、2测得的距离, D_{ped} 为测量俯仰轴姿态的 2 个光电探测器之间的距离, L_{us_1} 、 L_{us_2} 分别为测量方向角的超声传感器 1、2测得的距离, D_{us} 为测量方向角的 2 个超声传感器之间的距离, L_{us} 为测量位置的超声传

$$\begin{cases} \theta(t) = \arctan \frac{L_{ped_1}(t) - L_{ped_2}(t)}{D_{ped}}; \\ \phi(t) = \arctan \frac{L_{us_1}(t) - L_{us_2}(t)}{D_{us} \cos(\theta(t))}; \\ x(t) = V(t)t - [L_{us}(t) + D_{us_1}] \cos(\theta(t)) \cos(\phi(t)) - D_{us_2} \sin(\theta(t)) \cos(\phi(t)); \\ z(t) = [L_{us}(t) + D_{us_1}] \cos(\theta(t)) \sin(\phi(t)) - D_{us_2} \sin(\theta(t)) \sin(\phi(t)) - (L_{us_0} + D_{us_1}). \end{cases} \tag{2}$$

式中: 为机器人俯仰轴姿态角, 为方向误差, x 为 X 方向的位置误差, z 为 Z 方向的位置误差, V 为机器人前进速度, L_{us_0} 为测量位置的超声传感器测得的机器人与路标的初始距离.

由于机器人越障时间很短,越障过程中 z 方向的位置变化较小,与机器人正常运行时由于方向偏差导致的位置误差相比很小,而 x 方向的位置变化较大;因此不研究 z 方向的位置估计问题,只研究 x 方向的位置估计问题.

在机器人越障过程中值得注意的问题是,机器人越障时先向障碍物一侧运动,然后再向远离障碍物方向运动.因为机器人遇到障碍时左轮上坡,此时左轮动能转化为势能,机器人左轮速度变慢,机器人向左侧偏移;到达障碍物最高点后下坡,左轮势能转化为动能,机器人左轮速度变快,机器人向右侧偏移.由于码盘“意识到”左轮转速的变化,因此对右轮转速提供对应于左轮转速的修正信息;但是码盘并没有“意识到”此时左轮产生了距离误差 D ,因此机器人没有完全回到原来的方向,而是产生了方向偏移 和距离偏移 D .

机器人以 0.1 m/s 的速度在光滑路面运行,运行距离为 3 m ,采样周期 10 ms ,选择间隔 0.5 m 的电

前进方向的位移 x 由测量机器人位置的超声传感器的测量值、测量机器人位置的光电探测器的测量值、方向误差和俯仰轴姿态共同确定.通过上述分析,可以得到机器人越障过程中的位姿方程:

传感器测得的距离, D_{us_1} 、 D_{us_2} 分别为测量位置的超声传感器与机器人中心、机器人底盘之间的距离.

根据图 2和式 (1),可以得到机器人越障过程中的位姿误差方程:

缆作为障碍物.单个障碍物对机器人位置的影响如图 3所示,在越障过程中加速度计只在越障时启动,越障结束后停止,尽管其自身存在位置误差累积,但是由于工作时间很短,因此位置误差累积可以忽略.由图可见,加速度计测量的位置较测程法测量的位置更接近于真实位置.

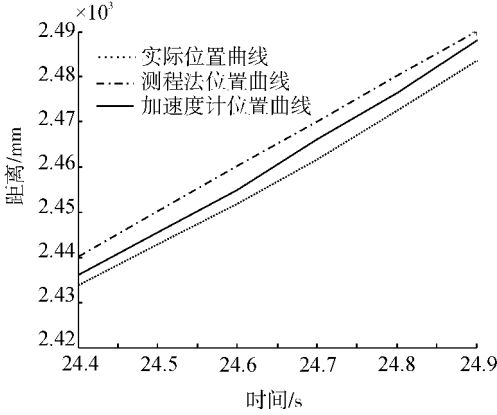


图 3 越过单个障碍时各传感器位置估计曲线

Fig 3 The position curves of the single obstacle negotiation

测程法根据车轮运行路程进行位置估计,越障过程中车轮运行路程大于真实距离,码盘认为已经到达指定位置,但事实上并没到达;因此测程法的误

差较大,不应再完全信任测程法数据. 加速度计测量数据波动较大,由于存在漂移误差导致加速度计产生位置误差,但其测得的位置数据短期精度高,可以与测程法数据融合共同使用测量位置信息. 单独的一次碰撞对机器人传感器位姿的影响如图 4 所示.

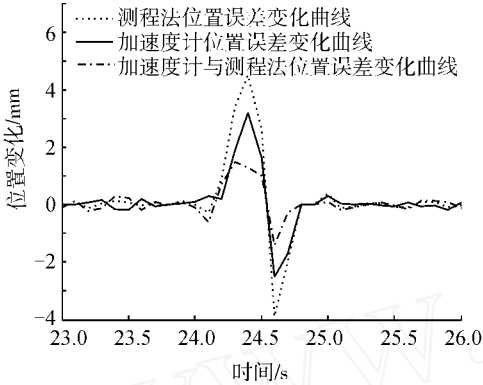


图 4 越过单个障碍时各传感器位置误差变化曲线
Fig 4 The position error change curves of the single obstacle negotiation

3 2 自控测距法的具体实现

针对机器人处于异常情况时,各传感器的误差特性,提出一种融合加速度计与测程法数据的自控测距算法. 测程法存在的最严重的问题就是系统遭遇异常情况时,会出现非系统误差. 机器人不能通过标定来补偿非系统误差,也无法预测这些误差. 加速度计存在的主要问题是固有的漂移误差,将导致位置误差无界增长. 而自控测距法能够降低上述问题的不利影响.

自控测距法是根据测量得到的测程法位置估计曲线与加速度计位置估计曲线仅在短时间不重合的假设提出的,实验数据如图 3 所示.

图 4 中虚线是测程法位置误差变化曲线,用 D_{odo} 表示;实线表示加速度计位置误差变化曲线,用 D_{acc} 表示;点划线表示测程法位置变化与加速度计位置变化之差,用 $D_{ao} = D_{odo} - D_{acc}$ 表示. 自控测距法就是将 D_{ao} 与预先设置的阈值 D_{thres} 进行比较,如果有

$|D_{ao}| > D_{thres}, \tag{3}$

机器人瞬时位置估计信任加速度计数据,位置值根据加速度计位置增量 D_{acc} 计算得到. 如果有:

$|D_{ao}| < D_{thres}, \tag{4}$

机器人瞬时位置估计信任测程法数据,位置值根据测程法位置增量 D_{odo} 计算得到.

从越障的整体过程分析,加速度计信息只在越障过程中很少的采样间隔中起作用,其余时刻都采

用测程法数据,减小了由于使用加速度计而产生的漂移误差,加速度计起作用的时刻往往是测程法误差最大的时刻.

4 直线越障实验

为验证自控测距法结合改进的 Gyrodometry 方法处理机器人越障等异常情况时的性能,将其应用于两轮自平衡机器人系统. 系统误差采用 UMBmark 方法处理,非系统误差中的转向误差采用改进的 Gyrodometry 方法处理,非系统误差中的位置误差采用自控测距法处理.

4 1 实验系统

两轮自平衡机器人系统由机器人本体、控制器、驱动器、电池、光电码盘、传感与检测系统和车轮组成. 机器人采用两轮同轴、分别独立驱动的方式. 机器人 H II Bot 高 0.24 m,重 2.0 kg 两轮距离 0.2 m,轮半径 0.07 m,结构如图 5 所示.

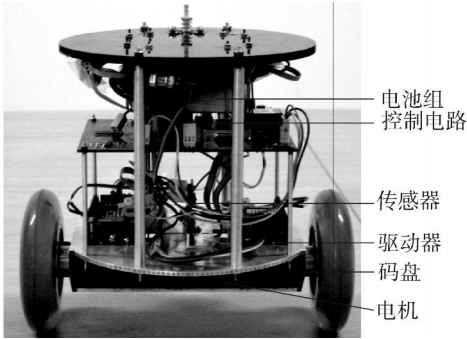


图 5 两轮自平衡机器人 H II Bot
Fig 5 Two-wheeled self-balanced robot-H II Bot

4 2 实验过程

机器人沿连续的直墙进行直线越障实验,根据机器人的实际尺寸、越障能力及实验平台,选择电缆作为障碍物,障碍物的数量及尺寸如表 1 所示,路标及障碍物布置如图 6 所示.

表 1 障碍物的数量及尺寸

Table 1 Number and dimension of obstacles						
障碍物	1	2	3	4	5	6
直径 /mm	2	2	4	4	6	6

使用路标对位置信息进行周期性修正,以消除惯性传感器无界的累积误差影响. 每隔 0.5 m 设置 2 个路标,障碍物距离路标 0.05 m. 在奇数路标处启动加速度计、陀螺仪开始提供位姿信息,其初值由自控测距法、改进的 Gyrodometry 方法计算得到的位姿终值确定;运行 0.1 m 后遇到偶数路标停止加速度

计、陀螺仪位姿估计运算,直到遇到下一个路标时再次循环启动.

由超声传感器修正得到的方向角度和路标、超声传感器修正得到的位置认为是机器人的实际位姿,因此定义传感器误差:

$$odop = D_{odo} - D_{real}, \tag{5}$$

$$acc = D_{acc} - D_{real}, \tag{6}$$

$$ao = D_{ao} - D_{real}. \tag{7}$$

式中: D_{odo} 、 D_{acc} 、 D_{ao} 分别为测程法、加速度计、自控测距法提供的瞬时位置, D_{real} 为真实位置, $odop$ 、 acc 、 ao 分别为测程法、加速度计、自控测距法的瞬时位置误差.

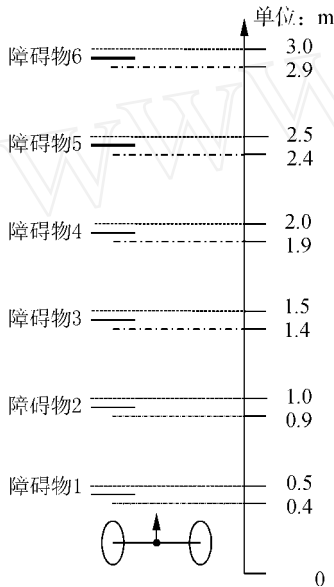


图 6 直线越障实验示意图

Fig 6 Schematic diagram of straight line obstacle negotiation

4 3 实验结果及分析

根据实验数据确定 D_{thres} 为 0.4 mm、 θ_{thres} 为 0.05°;自控测距法修正后的越障过程位置曲线如图 7 所示,位置误差曲线如图 8 所示,改进的 Gyrodometry法修正后的越障过程方向误差曲线如图 9 所示.自控测距法和改进的 Gyrodometry法得到的位姿曲线最接近真实值,但是由于始终存在小的方向偏差,导致位置曲线与真实位置之间存在位置偏差.改进的 Gyrodometry法修正的方向偏差绝对值不超过 0.4°,方向偏差的极值主要出现在后 2 个越障过程.而经自控测距法修正的位置曲线在越前 2 个障碍时,由于方向偏差很小,因此位置偏差曲线几乎不受累积效应影响,通过自控测距法修正了越障时测程法位置剧烈变化的影响.越过 4 个障碍时,方向偏差由于累积而逐渐变大,误差极值达到了 4 mm.经自控测距法和改进的 Gyrodometry法的修正,位置偏

差提高为测程法的 1/3,方向偏差提高为测程法的 1/6

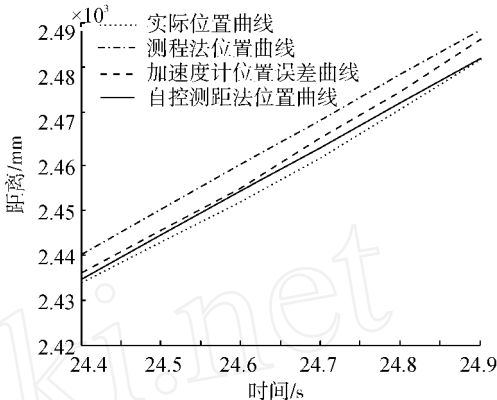


图 7 修正后越障过程位置曲线

Fig 7 The position curve of obstacle negotiation after correction

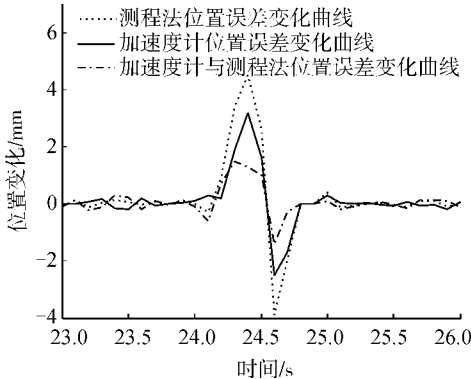


图 8 修正后越障过程位置误差曲线

Fig 8 The position error of obstacle negotiation after correction

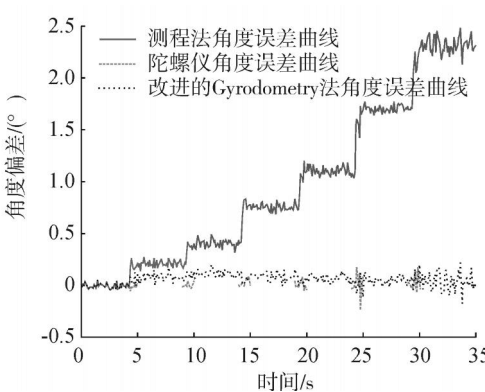


图 9 修正后越障过程方向误差曲线

Fig 9 The orientation error of obstacle negotiation after correction

5 结束语

通过本文提出的自控测距法,结合改进的多轮机器人方向误差处理方法,解决了两轮自平衡机器人处于异常情况下的位姿估计问题.两轮自平衡机

器人直线越障实验结果验证了该方法能有效地提高机器人的定位精度,降低定位误差.现阶段仅通过两轮自平衡机器人的直线越障实验对自控测距法进行验证,下一步还将研究机器人进行平面自由运动、坡面运动等复杂运动情况下自控测距法的有效性.

参考文献:

- [1] 汪卫华,熊有伦,孙容磊. 测程法系统误差的测量与校核[J]. 机器人, 2004, 26(5): 454-460
WANG Weihua, XIONG Youlun, SUN Ronglei Measurement and calibration of systematic errors of odometry[J]. Robot, 2004, 26(5): 454-460
- [2] LI Yan, GAO Feng, LI Ningqi, et al Study on multi-sensor data fusion for the wheeled mobile robot [C]// Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation Hangzhou, China, 2004: 4623-4626
- [3] OJEDA L, BORENSTEN J. FLEXnav: fuzzy logic expert rule-based position estimation for mobile robots on rugged terrain[C]// Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation Washington DC, USA, 2002: 317-322
- [4] BARSHAN B, DURRANT-WHYTE H F. Inertial navigation systems for mobile robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(3): 328-342
- [5] 汪卫华,熊有伦,孙容磊. 一种移动机器人轮子打滑的实验校核方法[J]. 机器人, 2005, 27(3): 197-202
WANG Weihua, XIONG Youlun, SUN Ronglei An experimental calibration method for wheel-slippage in mobile robots[J]. Robot, 2005, 27(3): 197-202
- [6] CHUNG H, OJEDA L, BORENSTEN J. Accurate mobile robot dead-reckoning with a precision-calibrated fiber optic gyroscope[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(1): 80-84
- [7] ANTONELLI G, CHIAVERINI S, FUSCO G. A calibration method for odometry of mobile robots based on the least-

squares technique: theory and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(5): 994-1004

- [8] BORENSTEN J, FENG L. UMBmark: a benchmark test for measuring odometry errors in mobile robots [C]//1995 SPIE Conference on Mobile Robots Philadelphia, USA, 1995: 305-311.
- [9] BORENSTEN J, FENG L. Gyrodometry: a new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots [C]//Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation Minneapolis, MN, USA, 1996: 423-428
- [10] BORENSTEN 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

作者简介:



王晓宇,男,1977年生,工程师,博士,主要研究方向为移动机器人导航与控制、多传感器信息融合与数据处理,发表学术论文13篇.



闫继宏,女,1974年生,副研究员,博士,主要研究方向为遥操作机器人系统,发表学术论文20篇.



徐莉红,女,1973年生,工程师,主要研究方向为引信设计.