

## 应用技术

## 多传感器数据融合在轮式机器人朝向角控制中的应用

吴振宇, 李 航, 冯 林, 杜 猛

(大连理工大学 创新实验学院, 辽宁 大连 116023)

**摘 要:** 针对轮式全向移动机器人运动时容易产生朝向角偏差这一问题, 分析了轮式全向移动机器人的运动模型, 对当前普遍采用的仅依靠编码器反馈的朝向角控制方法进行改进, 将 MEMS 陀螺仪和数字罗盘应用到机器人系统中, 提出了基于多传感器数据融合的朝向角控制方法, 提高了朝向角的控制精度。通过实验数据和在机器人足球比赛中的实际表现, 证明了该方法的优点。

**关键词:** 多传感器数据融合; 互补滤波器; 机器人控制; 轮式机器人

中图分类号: TP 242.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2011)07-0140-03

# Application of multi-sensor data fusion technology in orientation angle control of wheeled robots

WU Zhen-yu, LI Hang, FENG Lin, DU Meng

(School of Innovation and Experiment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The orientation angle error is inevitable when wheeled omnidirectional mobile robots move. In view of this situation, the motion model of the wheeled omnidirectional mobile robot is analyzed, and a new method based on multi-sensor data fusion technology with the MEMS gyroscope and digital compass is introduced. The traditional orientation angle control method which only relying on encoders and the control precision is improved. The advantages of the new method have been proved by experimental data in labs and the performance in soccer-like games.

**Key words:** multi-sensor data fusion; complementary filter; robot control; wheeled robot

## 0 引言

轮式全向移动机器人作为良好的机器人实验平台, 广泛应用在机器人足球比赛等场合。足球机器人比赛是一项新兴的人工智能研究领域, 它融合了实时视觉、机器人控制、无线通信、多机器人协作等多个领域的技术<sup>[1]</sup>。机器人足球比赛要求轮式全向移动机器人全自主运行, 即传感器信息获取、路径规划、运动控制都是由机器人系统独立完成<sup>[2]</sup>。朝向角与运动方向和射门精度密切相关, 因此, 机器人的朝向角控制在整个运动控制系统中显得尤为关键。

当前普遍采用的方法是使用编码器获取每个驱动轮的线速度, 由相应算法计算出机器人的平动速度和转动角速度<sup>[3]</sup>, 对角速度积分得出机器人的朝向角。然而, 由于控制方法的局限性和机械结构加工精度的影响, 该方法获得的朝向角精度较低, 不足以满足不断提高的竞赛水平对机器人精确运动的需求。

## 1 运动模型与控制方法

本文研究的轮式机器人机械结构采用四轮蝶形分布, 4个

驱动轮均为全方位轮。机器人具有3个自由度(2个水平移动分量和一个自身旋转分量), 通过控制4个驱动轮的转动, 可以调整机器人位姿, 实现平面内任意速度、任意朝向的移动。

以机器人运动的地面作为工作平面建立  $XOY$  坐标系,  $O$  为车体的几何中心, 机器人朝向方向为  $Y$  轴, 顺时针转动  $90^\circ$  后朝向方向为  $X$  轴, 如图1所示。假设机器人的速度矢

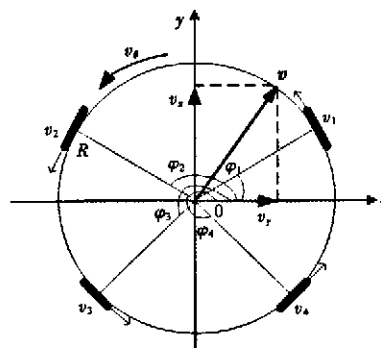


图1 轮式全向移动机器人运动模型

Fig 1 Motion model of wheeled omnidirectional mobile robot

量为  $v = [v_x, v_y, v_\theta]$ , 其中,  $[v_x, v_y]$  为平动速度矢量,  $v_\theta$  为转动角速度矢量, 4 个驱动轮的速度矢量为  $[v_1, v_2, v_3, v_4]^T$ 。机器人驱动轮中心到车体几何中心的距离为  $R$ ;  $v_i$  与  $X$  轴的夹角为  $\varphi_i (i=1, 2, 3, 4)$ 。

机器人整体速度可以看成是平动和转动的集合。在轮子不打滑的条件下, 由参考文献[4], 容易得到机器人运动模型<sup>[4]</sup>

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & R \\ -\sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & R \\ -\sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 & R \\ -\sin \varphi_4 & \cos \varphi_4 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_\theta \end{pmatrix}.$$

将上式简记为

$$m = Dv. \quad (1)$$

通过公式(1)可以对机器人进行速度分解, 即将机器人整体的期望速度解算到 4 个驱动轮上, 驱动轮期望速度为  $ev = [ev_1, ev_2, ev_3, ev_4]^T$ 。

对于公式(1), 显然存在  $D$  的伪逆矩阵  $\text{pinv}(D) = D^+ = [D^T D]^{-1} D^T$ , 使得

$$v = D^+ m. \quad (2)$$

通过公式(2)可以对机器人进行速度合成, 即利用编码器测得的速度值合成机器人的平动速度和转动角速度。

若实测转动角速度为  $v_\theta(t)$ , 初始朝向角度为  $\theta(0)$ , 则当前朝向角为

$$\theta(t) = \int_0^t v_\theta(t) dt + \theta(0).$$

仅使用编码器作为传感器进行速度合成时, 机器人运动控制模型如图 2 所示。

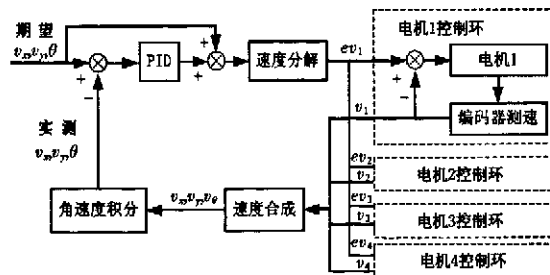


图2 使用编码器反馈的控制模型

Fig 2 Control model using encoder as feedback

运动控制系统接收来自决策系统的期望平动速度、期望朝向角度  $[v_x, v_y, \theta]$  等命令; 外环 PID 控制器将期望值与实测值进行反馈比较, 得出机器人平动速度和转动角速度的控制量; 控制量经速度分解后可得每个电机的期望速度  $[ev_1, ev_2, ev_3, ev_4]^T$ ; 编码器采集电机转速  $[v_1, v_2, v_3, v_4]^T$  用于电机闭环控制和速度合成; 角速度积分环节将速度合成计算出的转动角速度进行积分得到实测朝向角, 反馈到外

环 PID 控制器; 从而完成机器人朝向角的闭环控制。

对于上述控制模型而言, 主要存在以下不足

1) 速度分解与合成算法建立在驱动轮和地面之间没有打滑的前提下, 然而因碰撞和突然加减速导致的驱动轮打滑是不可避免的, 必然会带来角速度的计算误差;

2) 该控制模型使用电机转速表示驱动轮的线速度, 并假设驱动轮线速度与车体切线方向完全重合, 并且驱动轮中心到车体几何中心的距离相等, 忽视了驱动轮直径误差、车体加工和安装误差;

3) 由于积分算法的特性, 朝向角误差会随着时间不断增长。

## 2 多传感器数据融合

### 2.1 角速度数据融合

陀螺仪是一种惯性导航器件, 它的测量数据反映机器人整体的运动状态, 能够较为准确地测量出机器人的瞬时转动角速度, 修正因驱动轮打滑和机械精度造成的角速度误差。本文对陀螺仪和编码器 2 种传感器所测得的角速度值采用加权平均法进行数据融合, 可以提高角速度测量的精度和可靠性<sup>[5]</sup>。

使用加权平均法进行数据融合实际上就是求传感器输出数据的加权平均值。若传感器  $i (i=1, 2, \dots, n)$  输出为  $x_i$ , 测量结果均方差为  $\sigma_i$ , 权值为  $w_i$ , 数据融合结果为

$$y = WX = [w_1, w_2, \dots, w_n] [x_1, x_2, \dots, x_n]^T.$$

权值分配得当, 融合效果较好; 分配不合理, 对系统的精度和可靠性提高不大。权值最优分配的准则如下<sup>[6]</sup>

$$w_i = \frac{\lambda}{2\sigma_i^2}, (\lambda = \frac{2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}). \quad (3)$$

依以上原则和方法对陀螺仪和编码器测得的角速度数据进行融合, 分别用  $w_{gyro}$  和  $w_{encoder}$  为陀螺仪和编码器测量结果所占权值,  $\sigma_{gyro}^2$  和  $\sigma_{encoder}^2$  为测量结果的方差, 根据式(3), 权值分配如下

$$w_{gyro} = \frac{\lambda}{2\sigma_{gyro}^2}, w_{encoder} = \frac{\lambda}{2\sigma_{encoder}^2}.$$

融合后的角速度

$$v_\theta = w_{gyro} v_{\theta_{gyro}} + w_{encoder} v_{\theta_{encoder}}.$$

其中,  $v_{\theta_{gyro}}$  和  $v_{\theta_{encoder}}$  为陀螺仪和编码器测得的角速度值。

### 2.2 角速度与磁偏角的数据融合

陀螺仪与编码器测量结果的数据融合有效地提高了角速度的测量精度, 但是由于陀螺仪自身的噪声、漂移, 以及朝向角算法的积分性质, 角度误差会随着时间不断增大, 因此, 需要辅助传感器来抑制误差增长。数字罗盘是利用感应式磁传感器测量载体朝向角的装置, 它能够输出测量轴

与磁北方向之间的磁偏角<sup>[7]</sup>。从传感器的特性上来看,数字罗盘测角没有积累误差,但常用 MEMS 数字罗盘响应速度较低;陀螺仪和编码器测定的角速度进行积分时有累积误差,但是响应速度快。利用两者在频域上的互补特性,可以采用互补滤波器对角速度和数字罗盘的测得的磁偏角进行数据融合,以提高测量精度和动态性能<sup>[8]</sup>。

将互补滤波器计算出的估计朝向角记作  $\hat{\theta}$ , 陀螺仪和编码器融合得到的角速度记作  $\omega$ , 数字罗盘输出的测量朝向角为  $\theta_{\text{mag}}$ , 它们的拉普拉斯变换分别为  $\hat{\theta}(s)$ ,  $\omega(s)$ ,  $\theta_{\text{mag}}(s)$ 。

令  $\hat{\theta}(s) = G_L(s) \cdot \hat{\theta}(s) + G_H(s) \cdot \hat{\theta}(s)$ , 取传递函数  $G_L(s) = \frac{K}{s+K}$ , 该函数具有低通特性, 可以滤除数字罗盘的

测量噪声; 取传递函数  $G_H(s) = \frac{s}{s+K}$ , 该函数具有高通特性, 可以抑制角速度积分产生的低频累积误差, 同时保留陀螺仪和编码器的高频动态性能。由互补滤波器原理, 可得互补滤波器的融合公式<sup>[9]</sup>

$$\hat{\theta}(s) = \frac{K}{s+K} \theta_{\text{mag}}(s) + \frac{s}{s+K} \cdot \frac{1}{s} \cdot \omega(s) \quad (4)$$

公式(4)在复频域内描述了互补滤波器的模型, 为了便于计算需将其转换到时域内, 将公式(4)变形为

$$s\hat{\theta}(s) = K(\theta_{\text{mag}}(s) - \hat{\theta}(s)) + \omega(s)$$

对上式进行拉普拉斯反变换, 可得时域形式

$$\dot{\hat{\theta}} = K(\theta_{\text{mag}} - \hat{\theta}) + \omega \quad (5)$$

在计算中, 可以使用一阶前向差分对公式(5)进行求解。公式(5)描述的互补滤波器的结构如图3所示。

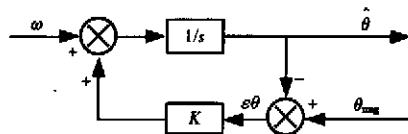


图3 互补滤波器结构图

Fig 3 Structure of complementary filter

互补滤波器首先计算估计朝向角和参考朝向角之间的误差  $\varepsilon\theta$ , 然后将误差乘以比例因子  $K$  后反馈到角速度信号端。其中, 比例因子  $K$  与低通滤波的截止频率  $f_r$  相关, 满足  $f_r = \frac{K}{2\pi}$ 。在大于  $f_r$  的高频段, 朝向角的测量结果主要依靠陀螺仪和编码器提供的角速度信息; 在小于  $f_r$  的低频段, 数字罗盘对测量结果起主要作用。因此, 需要根据传感器特性和测量精度的要求恰当地选取  $K$  值。此外, 本文实现的系统角速度计算频率(140 Hz)与数字罗盘的采样频率(20 Hz)不一致, 因此, 互补滤波器仅在数字罗盘的测量结果更新时计算  $\varepsilon\theta$ , 没有更新时对  $\varepsilon\theta$  作零阶保持。

### 3 实验测试

为了验证本文提出的多传感器数据融合的朝向角控制

方法的性能, 本文对机器人朝向角和运动轨迹进行了测试, 并以改进前的测试结果作为对比。

实验一: 将机器人置于水平地面, 初始化当前朝向角为  $0^\circ$ 。控制机器人原地旋转指定的角度, 等待角度稳定后测量并记录机器人实际朝向角。每个朝向角重复测试 10 次, 计算出实际朝向角与规定朝向角之间的平均误差。改进前和数据融合后的朝向角误差对比如表 1 所示。

表1 数据融合前后朝向角误差对比

Tab 1 Error comparison of orientation angle before and after data fusion

规定朝向角 (°)	改进前的角度误差 (°)	数据融合后的角度误差 (°)
90	2.42	-1.90
180	5.63	-0.52
270	9.78	1.36
360	12.60	0.28

以上实验数据表明: 仅使用编码器作为反馈元件时, 随着机器人旋转角度的增大, 不断积累的测量误差也越来越大。多传感器数据融合后, 对于任意朝向角的控制精度都在  $2^\circ$  以内, 远小于改进前的误差。

实验二: 测试场地为平整的实验室地面, 大小为  $5\text{ m} \times 3\text{ m}$ , 机器人上安装蝶形色标以标识机器人位置和朝向, 场地上方安装 AVT Stingray 工业摄像机作为观测摄像头, 视频图像已进行消除畸变处理, 用于记录和测量机器人运动轨迹。将机器人放置于全局坐标系的零点位置, 初始朝向角为  $0^\circ$ , 纵向运动速度约为  $0.05\text{ m/s}$ , 横向运动速度为零。图4为全局坐标系下机器人的运动轨迹和朝向角。

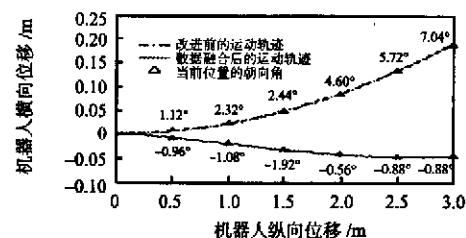


图4 机器人的运动轨迹和朝向角

Fig 4 Trajectory and orientation angle of robot

图4表明: 使用多传感器数据融合控制方法后, 最大朝向角误差控制在  $2^\circ$  之内, 最大横向位移不超过  $5\text{ cm}$ 。由于朝向角控制精度的提高, 使得机器人的运动轨迹也较为接近理想运动轨迹。

由以上实验可见, 采用多传感器数据融合技术的朝向角控制方法能够结合各种传感器的优点, 得到无漂移的, 且没有剧烈瞬态变化的朝向角信息, 进一步提高了机器人的运动控制精度。

### 4 结论

本文研究了四轮蝶形分布轮式机器人的运动模型与

(下转第145页)

由上分析可知,系统优化函数为终端零约束,并且满足式(14),则  $J_0^*$  作为 Lyapunov 函数便可保证闭环系统的稳定性<sup>[14,15]</sup>。

#### 4 仿真结果

假设所有障碍物的形状已知,而具体方位未知,任务要求无人机依次到达3个目标点,但不考虑最大速度、最小速度约束。仿真参数取值为飞行器速度为  $v=12.5\text{ m/s}$ ,最小转弯半径  $r_{\min}=50\text{ m}$ ,采样时间为  $\Delta t=3.2\text{ s}$ ,预测步数为  $N=5$ ,雷达探测半径  $L=215\text{ m}$ ,仿真结果如图2所示。

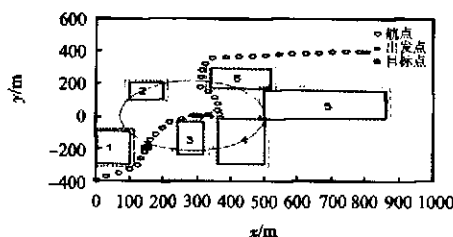


图2 复杂环境下的航迹规划

Fig 2 Trajectory planning in complex circumstance

飞行器成功地避开障碍物4,5,6组成的凹形障碍物空间,规划出了可飞的航迹并顺利到达目标点。

#### 5 结论

本文主要研究了预测控制与混合整数线性规划用以设计飞行器任务规划系统的控制器问题。基于提出的有限时域滚动优化性能指标,对算法的全局最优、Lyapunov 稳定性验证。通过反复的在线求解性能指标,可以得到满足要求的飞行器任务规划。最后通过飞行器航迹规划系统的仿真,验证了方法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 徐祖华. 模型预测控制理论及其研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- [2] 管善功. 模型预测控制算法在应用中的研究和软件包的实现[D]. 北京:华北电力大学,2006.

#### (上接第142页)

控制算法,结合编码器、陀螺仪、数字罗盘3种传感器的特点,采用数据融合技术,对编码器和陀螺仪的测量结果进行加权平均得出角速度,并使用互补滤波器将该角速度与数字罗盘测出的朝向角进行融合,相比单纯使用编码器的控制方法提高了朝向角的控制精度,取得了理想的效果。使用该控制方法的机器人在2010年中国机器人大赛暨RoboCup中国公开赛小型组机器人足球比赛中获得全国冠军。

#### 参考文献:

- [1] 吴洪兵. 足球机器人运动控制研究[J]. 机床与液压,2009,37(1):128-130.
- [2] 徐勇明,张培仁. 基于F2812的足球机器人底层控制[J]. 自动化与仪表,2004(6):10-14.
- [3] 李实,徐旭明,叶榛,等. 国际机器人足球比赛及其相关技术[J]. 机器人,2000,2(5):420-426.
- [4] 廖华丽,李波,赵俊. 轮式移动机器人的全方位运动分

- [3] 谢晓理. 非完整移动机器人避障控制器的设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [4] Kamal W A, Gu Dawei. Real time trajectory planning for UAVs using MILP[C]//Proceeding of the 44th IEEE Conference on Decision and Control,2006:3381-3386.
- [5] Kuwata Y. Real-time trajectory design for unmanned aerial vehicles using receding horizon control[D]. Boston:MIT,2003.
- [6] Bellingham J S. Coordination and control of UAV fleets using mixed-integer linear programming[D]. Boston:MIT,2002.
- [7] 吕畅,万小鹏,师勇. 基于混合整数线性规划的飞行器防撞航迹规划[J]. 飞行力学,2005,23(2):81-84.
- [8] 朱彦伟,杨乐平. 航天器近距离相对运动的鲁棒约束模型预测控制[J]. 控制理论与应用,2009,26(11):1273-1276.
- [9] Kwon W H, Pearson A E. On feedback stabilization of time-varying discrete linear system[J]. IEEE Transaction on Automatic Control,1978,23(3):479-481.
- [10] 席裕庚,李德伟. 预测控制定性综合理论的基本思路和研究现状[J]. 自动化学报,2008,34(10):1225-1234.
- [11] 耿晓军,席裕庚. 不确定系统的滚动时域  $H_\infty$  控制设计[J]. 控制与决策,2000,15(2):149-152.
- [12] Mayne D Q, Rawling J B, Rao C V. Constrained model predictive control stability and optimality[J]. Automatica, 2000,36(6):789-814.
- [13] Mayne D Q, Seron M M, Rakovic S V. Robust model predictive control of constrained linear systems with bounded disturbances[J]. Automatica,2005,41(2):219-224.
- [14] 丁宝苍. 预测控制的理论与方法[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [15] 牛永肖,丁宝苍,孙鹤旭. 输入非线性系统的两步法预测控制的鲁棒稳定性[J]. 控制与决策,2006(21):475-4651.

#### 作者简介:

许健(1984-),男,福建漳州人,硕士研究生,研究方向为导航、制导与控制。


析[J]. 机电一体化,2009,15(5):61-64.

- [5] 马明山,朱绍文,何克中,等. 室外移动机器人定位技术研究[J]. 电工技术学报,1998,13(2):43-46.
- [6] 凌林本,李滋刚,陈超英,等. 多传感器数据融合时权的最优分配原则[J]. 中国惯性技术学报,2000,8(2):36-39.
- [7] 王成豪. 航空仪表[M]. 北京:科学出版社,1992:208-212.
- [8] Ellsworth J C, Whitmore S A. Reentry air data system for a sub-orbital spacecraft based on X-34 design [C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada, America, 2007:18-29.
- [9] Robert M, Tarek H, Jean M P. Complimentary filter design on the special orthogonal group  $SO(3)$  [C]//44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (ECC), 2005, Seville, Spain, 2005:1477-1484.

#### 作者简介:

吴振宇(1971-),男,甘肃定西人,副教授,现从事机器人、自动控制、图像采集等领域的研究。

## 多传感器数据融合在轮式机器人朝向角控制中的应用

作者: [吴振宇](#), [李航](#), [冯林](#), [杜猛](#), [WU Zhen-yu](#), [LI Hang](#), [FENG Lin](#), [DU Meng](#)  
作者单位: [大连理工大学创新实验学院, 辽宁大连, 116023](#)  
刊名: [传感器与微系统](#)   
英文刊名: [Transducer and Microsystem Technologies](#)  
年, 卷(期): 2011, 30 (7)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_cgqjs201107043.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_cgqjs201107043.aspx)