

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **6**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年6月 第17卷 第6期(总第194期)

目次

综述

- 人脸图像的年龄估计技术研究 王先梅, 梁玲燕, 王志良, 胡四泉(603)
- 图像统计模型参数估计中的期望最大值算法 李旭超(619)

图像处理和编码

- 鲁棒的梯度驱动图像修复算法 叶学义, 王靖, 赵知劲, 陈华华(630)
- 快速去块效应的线性规划方法 金剑秋, 刘春晓, 王勋, 章志勇(636)
- DWT-SVD 域全盲自嵌入鲁棒量化水印算法 叶天语(644)
- Mean-shift 滤波和直方图增强的图像弱边缘提取 冀峰, 高新波, 谢松云(651)

图像分析和识别

- 梯度点对约束的结构化车道检测 王永忠, 王晓云, 文成林(657)
- 多水平外区抑制的轮廓检测 闫超, 张建州(664)
- 基于局部投影与块 LBP 特征的图像检索 邹彬, 潘志斌, 胡森(671)

图像理解和计算机视觉

- 视觉陌生度驱动的增量自主式视觉学习算法 瞿心昱, 姚明海, 顾勤龙(678)
- 霍夫空间中多足球机器人协作目标定位算法 许家铭, 解仑, 王志良, 倪善超(687)

计算机图形学

- 虚拟 CCD 线阵星载光学传感器内视场拼接 张过, 刘斌, 江万寿(696)

“第八届数字电视与无线多媒体通信国际论坛”会议专栏

追踪盗版者的抗共谋数字指纹 李晓强, 张煌, 赵洋洋, 汪晶晶(702)

LBP 与鉴别模式结合的热红外人脸识别 谢志华, 伍世虔, 方志军(707)

电影中复杂事件的检索与识别 杜吉祥, 郭一兰, 翟传敏(712)

方向特征和网格特征融合的离线签名鉴别 杨丹凤, 吕岳(717)

视觉关注度的立体图像质量评价 张艳, 安平, 张秋闻, 张兆杨(722)

低开销的异构数据交换 赵凯, 赵正德(726)

灵活的多视点视频编码预测结构 张艳, 蔡灿辉(730)

跨层反馈在无线视频自适应编码中的应用 王垚中, 郑世宝, 张重阳, 刘勃(736)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 6 期

2012 年 6 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所
主 编 李小文
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
北京 9718 信箱 邮编 100101
电子信箱:jig@irsa.ac.cn
电话:010-64807995 010-82614429
网 址:www.cjig.cn
印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
(中国国际书店)
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail:jig@irsa.ac.cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 6 June 2012

Contents

Review

- Age estimation by facial image: a survey Wang Xianmei, Liang Lingyan, Wang Zhiliang, Hu Siqian(603)
Expectation maximization method for parameter estimation of image statistical model Li Xuchao(619)

Image Processing and Coding

- Robust gradient driving image inpainting method Ye Xueyi, Wang Jing, Zhao Zhijing, Chen Huahua(630)
Fast image de-blocking by linear programming Jin Jianqiu, Liu Chunxiao, Wang Xun, Zhang Zhiyong(636)
Perfectly blind self-embedding robust quantization-based watermarking scheme in DWT-SVD domain Ye Tianyu(644)
Weak edge detection using Mean-shift filtering and histogram enhancement Ji Feng, Gao Xinbo, Xie Songyun(651)

Image Analysis and Recognition

- Gradient-pair constraint for structure lane detection Wang Yongzhong, Wang Xiaoyun, Wen Chenglin(657)
Contour detection based on multilevel inhibition Yan Chao, Zhang Jianzhou(664)
Image retrieval method based on local projection and block LBP feature Zou Bin, Pan Zhibin, Hu Sen(671)

Image Understanding and Computer Vision

- Visual novelty driven incremental and autonomous visual learning algorithm Qu Xinyu, Yao Minghai, Gu Qinlong(678)
Target localization algorithm for cooperative multi-soccer robots based on Hough space
..... Xu Jiaming, Xie Lun, Wang Zhiliang, Ni Shanchao(687)

Computer Graphics

- Inner FOV stitching algorithm of spaceborne optical sensor based on the virtual CCD line
..... Zhang Guo, Liu Bin, Jiang Wangshou(696)

Special Issue of the IFIC' 2011

- Anti-collusion fingerprinting scheme capable of tracing pirate Li Xiaoqiang, Zhang Huang, Zhao Yangyang, Wang Jingjing(702)
Infrared face recognition using LBP and discrimination patterns Xie Zhihua, Wu Shiqian, Fang Zhijun(707)
Recognize and retrieval complex events in real movies Du Jixiang, Guo Yilan, Zhai Chuanmin(712)
Off-line signature verification based on combination of direction feature and grid feature Yang Danfeng, Lv Yue(717)
Stereo image quality assessment based on visual attention Zhang Yan, An Ping, Zhang Qiuwen, Zhang Zhaoyang(722)
Low overhead of heterogeneous data exchange Zhao Kai, Zhao Zhengde(726)
Flexible prediction structure for multi-view video coding Zhang Yan, Cai Canhui(730)
Cross-layer feedback based adaptive coding for wireless video transmission
..... Wang Yaozhong, Zheng Shibao, Zhang Chongyang, Liu Bo(736)

中图法分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)06-0687-09

论文引用格式: 许家铭, 解仑, 王志良, 倪善超. 霍夫空间中多足球机器人协作目标定位算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(6): 687-695.

霍夫空间中多足球机器人协作目标定位算法

许家铭, 解仑, 王志良, 倪善超

北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083

摘要: 针对嵌入式仿人足球机器人提出一种霍夫空间中的多机器人协作目标定位算法。机器人利用实验场地中的标志物采用基于三角几何定位方法进行自定位, 把机器人多连杆模型进行简化, 通过坐标系位姿变换把图像坐标系转换到世界坐标系中, 实现机器人目标定位; 在多机器人之间建立 ZigBee 无线传感器网络进行通信, 把多个机器人定位的坐标点进行霍夫变换, 在霍夫空间中进行最小二乘法线性拟合, 获取最优参数, 然后融合改进后的粒子滤波实现对目标小球的跟踪; 最后在 21 自由度的仿人足球机器人上进行仿真和实验。数据结果表明, 这种多机器人协作的定位算法的精度提高了约 48%, 在满足实时性的前提下, 对目标的跟踪效果也得到了改善。

关键词: 仿人足球机器人; 霍夫空间; 目标定位; 多机器人协作; 粒子滤波

Target localization algorithm for cooperative multi-soccer robots based on Hough space

Xu Jiaming, Xie Lun, Wang Zhiliang, Ni Shanchao

School of Computer and Communication Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China

Abstract: In this paper, a targeting algorithm for cooperative multi-soccer robots based on Hough space is proposed. The robot uses the landmark in the field for self-localization based on triangular relationships. Object localization for the robot is achieved by position and pose transformation from the image coordinate systems to the world coordinate system on a simplified multi-link robot model. ZigBee wireless sensor network is established between multiple robots for wireless communication. Transforming the coordinate points of the multi-robot target localization into Hough space, the optimal estimation can be obtained by least square fitting. Then, the ball tracking is achieved by fusing the improved particle filter. Finally, a simulation experiment is carried out on 21-degree-freedom humanoid soccer robots. Test data showed that the precision of the targeting algorithm for cooperative multi-soccer robots had risen by 48% and the efficiency of target tracking was improved on the premise of meeting the real-time requirement.

Key words: humanoid soccer robot; Hough space; target localization; multi-robot cooperation; particle filter

0 引言

在人工智能研究领域, 仿人足球机器人作为当前仿人形机器人技术研究的重要平台, 它为多智能体系统提供了很好的实验载体。具有类似人

类的双足结构, 可以通过视觉传感器获取环境信息, 并根据环境信息调节自身姿态和方位, 以实现有目的、平衡的行走^[1]。它是以体育竞赛为载体的高科技对抗, 同时也是促进科技成用化和产业化的有效途径。目前, RoboCup、FIRA 和 IHOG 都已经设立了仿人机器人足赛项目, 而如何快速

收稿日期: 2011-09-21; 修回日期: 2011-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(61170115); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(FRF-BR-09-023B)

第一作者简介: 许家铭(1987—), 男, 北京科技大学控制科学与工程在读硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式视觉、智能控制、物联网。

E-mail: jacoxu@126.com

准确地对目标进行定位是足球比赛中取胜的关键。

近年来,基于机器人视觉信息的目标定位算法有很多研究成果。而目前,国内外研究学者对全局视觉机器人的研究比较多,主要是通过全局的视觉传感器采集图像,通过有线或无线方式传回到 PC 机进行图像处理。但是,他们研究的特点是所有的图像处理算法都在 PC 机上实现,这样就可以较少考虑算法复杂程度及实时性问题。而基于嵌入式的仿人足球机器人的图像处理模块及舵机控制模块均采用嵌入式系统,其实时性问题要得到充分保证,并且机器人是运动的,虽然在检测速度和测量精度问题上,PC 视觉系统要更胜一筹,但在系统成本、工作空间及集成能力上,嵌入式视觉有着显著的优势,而且随着嵌入式性能的逐步提高,嵌入式的劣势逐渐减小。

多机器人合作定位最早于 2000 年被 Fox 和 Bekey 等人提出,近年来逐渐成为相关研究领域的热点^[2]。相对于单个机器人系统,多机器人系统对环境的感知能力会更丰富,在最优性、鲁棒性等方面都具有极大的优越性。为提高机器人定位精度,利用足球场上的多个机器人进行协同合作,完成定位任务,可以更可靠、更快速地完成目标定位跟踪任务^[3-4]。蔡自兴曾于 2008 年提出基于相对观测量的多机器人合作快速定位方法^[5]。而相关学者的工作均是侧重于多轮式机器人的机器人定位研究,很少采用仿人结构的足球机器人进行被动目标的合作定位研究。

本文介绍了一种基于嵌入式的仿人足球机器人设计方法;建立被动目标定位模型,实现单机器人目标定位;搭建自组织无线传感器网络,实现多机器人间无线通信;提出一种适用于多机器人协同目标定位方法,并融合改进的粒子滤波实现轨迹跟踪;通过仿真和实际物理实验,验证了算法正确性的同时,指导算法进行有效的改进。

1 仿人足球机器人系统设计

实验平台采用仿人足球机器人,其全身共有 21 个舵机,头部装有 CCD 摄像头,胸腔内装有 ARM7 舵机控制模块及 ZigBee 无线发射模块,图像处理模块 DSP 位于机器人背部。机械结构和几何模型如图 1 所示。

基于嵌入式的仿人足球机器人,其图像处理

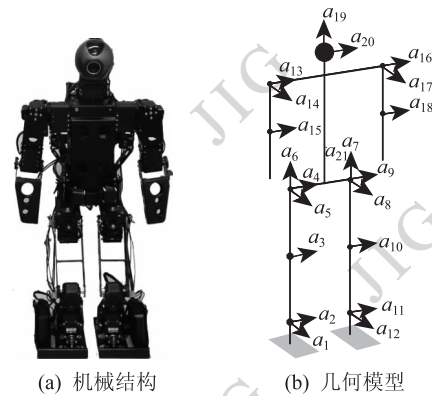


图 1 足球机器人示意图
Fig. 1 The diagram of the soccer robot

系统是在选定好的专用于数字媒体应用的高性能 32 位定点 DSP TMS320DM642,其工作主频高达 720 MHz,处理性能可达 5 760 MIPS。由 CCD 摄像头输入 PAL 制模拟视频信号,通过支持 PAL 标准的高性能视频解码器 TVP5150PBS 输出 YUV422 图像格式。图像采集速度为 25 帧/s,分辨率为 720 × 625。舵机控制模块由恩智浦公司生产的 LPC2132 做为主控芯片,在 LPC2132 上移植 μC/OS-II 操作系统,采用分时复用思想,利用有限个计时器输出可多达 24 路 PWM 波。ZigBee 模块采用 TI/Chipcon 公司生产的 CC2430 芯片搭建无线传感器网络。系统结构简图如图 2 所示。

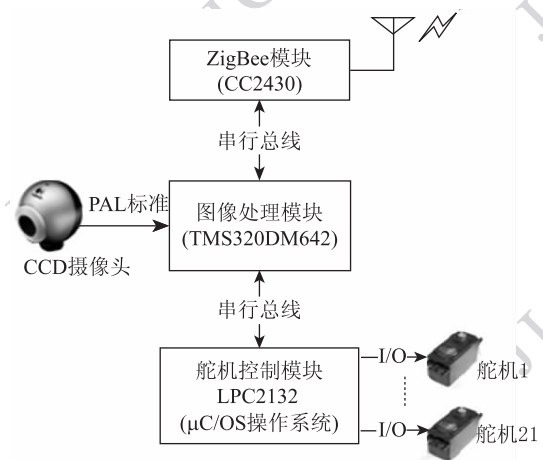


图 2 系统结构简图
Fig. 2 The schematic diagram of the control system

进行定位实验的环境场地符合 RoboCup 标准, 4 m × 6 m,如图 3 所示。

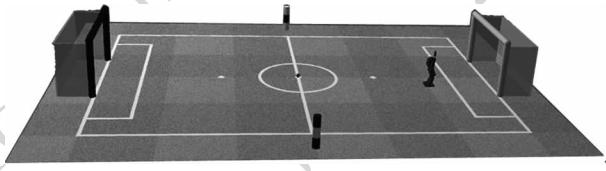


图3 实验环境

Fig.3 Experiment environment

2 霍夫空间变换

本文定位方法是基于多机器人协同定位和霍夫空间中最小二乘曲线拟合求取最优,并在此基础上融合改进后的粒子滤波算法来实现目标跟踪。

霍夫变换是将笛卡儿空间的表示方法转换到极坐标系下进行表示。图4(a)是笛卡儿坐标系中的多条直线,若 ρ_i 代表第 i 条直线到原点的法线距离, θ_i 为该法线与 x 轴的夹角,则

$$\rho_i = xg \cos \theta_i + yg \sin \theta_i \quad (1)$$

可知,笛卡儿空间中的点对应霍夫空间中的正弦曲线,笛卡儿空间中的若干条相交于一点的直线则对应霍夫空间中的共正弦曲线的点,如图4所示。

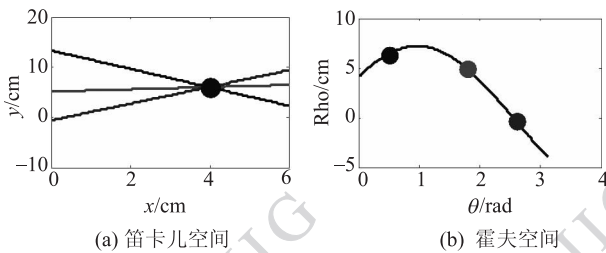


图4 多条直线相交时的霍夫变换

Fig.4 Hough space transform for intersected multi-lines

当多机器人对目标进行定位时,可得到多条从机器人到观测目标的投影线 L_i ,这多条投影线应交于一点,即目标点 P 。

3 机器人自定位与目标定位算法

由于嵌入式系统要充分考虑实时性,因而选用基于颜色的识别。对视觉系统输出的YUV422颜色模型进行中值滤波后进行阈值设定,进行二值化处理后可实现目标范围的标定,进而在机器人上实现定位算法。

视觉系统可分为Eye-to-hand与Eye-in-hand两种模型。仿人足球机器人的视觉云台安装在头部末端,属于Eye-in-hand,且是个多连杆模型。考虑足

球机器人在比赛时,80%的时间处于两种步态:稳步行走和直立,而在这两种步态时,机器人的高度变化 Δh 在计算时可以忽略。本文把定位算法限制在这两种步态下。

3.1 基于地标的机器人自定位

实验环境中标志物的位置坐标 (x_i, y_i) 是固定的,机器人视觉云台的水平旋转角度 α 和垂直旋转角度 β 都是可获知的。那么通过足球机器人头部的摄像头对场地环境的标志点进行识别,即可求出标志物相对于摄像头朝向的夹角 ϕ_i 。由于机器人摄像头的视角只有 51° ,所以在一幅图片中不能一次看到足够多的标志物供机器人进行定位。这就需要摄像头转过一定角度后再拍下一幅图片,将多幅图进行整合后的信息用于定位。利用基于三角几何关系的三角定位很容易把向量 RP 的方向和 R 点的坐标求解出来,其中向量 RP 的方向为机器人朝向, R 点的坐标为机器人当前位置,如图5所示。

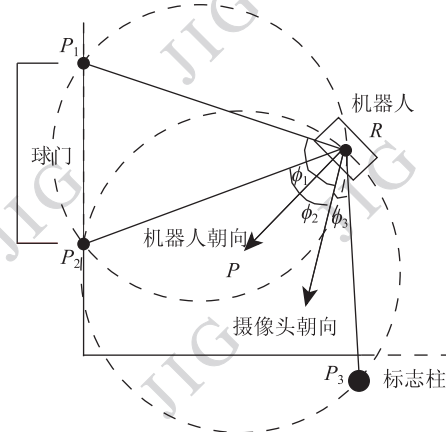


图5 机器人自定位模型

Fig.5 Robot self-localization model

假设 P_1, P_2, R 共圆的半径为 r_1 , P_2, P_3, R 共圆的半径为 r_2 ,那么由圆周角的三角集合关系可知

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{(|P_1P_2|/2)}{\sin(\phi_1 - \phi_2)} \\ r_2 &= \frac{(|P_2P_3|/2)}{\sin(\phi_2 + \phi_3)} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)可求出 r_1, r_2 ,再利用 P_1, P_2, P_3 坐标可求圆心 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,建立方程

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \end{cases} \quad (3)$$

对于二元二次方程组利用数值解法很容易得到机器人自定位的坐标 (x_R, y_R) ,机器人朝向 RP 可

以利用摄像头旋转角度求出。

3.2 基于颜色的目标定位

仿人足球机器人定位模型可简化为如图6所示的针孔式模型,世界坐标系 (x_w, y_w, z_w) 以机器人质心在水平地面的投影为零点 $O_w = (0, 0, 0)$,在摄像机的光轴中心建立摄像机坐标系 (x_c, y_c, z_c) ,成像平面是2维坐标系 (x_1, y_1) ,把光轴中心与成像平面的交点设为坐标零点^[6],目标小球 P 在世界坐标系下的坐标 P_w 为 (x_{wp}, y_{wp}, z_{wp}) ,在摄像头坐标系下的坐标 P_c 为 (x_{cp}, y_{cp}, z_{cp}) ,在成像平面的坐标 P_1 为 (x_{1p}, y_{1p}) ,则

$$\begin{cases} \frac{x_{cp}}{y_{cp}} = \frac{x_{1p}}{f} \\ \frac{z_{cp}}{y_{cp}} = \frac{y_{1p}}{f} \end{cases} \quad (4)$$

式中, f 是摄像头的焦距。

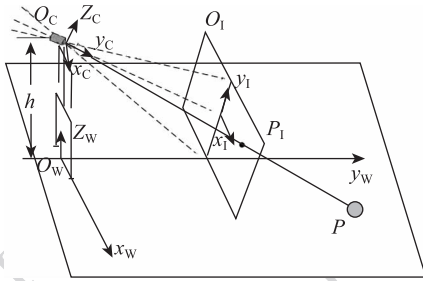


图6 仿人足球机器人目标定位模型

Fig. 6 Target localization model for humanoid soccer robot

摄像头采集的图片是成像平面经过放大处理后

$$\begin{cases} \frac{u - u_0}{k \cdot f} = \frac{x_{wp} \cdot \cos \alpha - y_{wp} \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot x_{wp} + \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot y_{wp} - \sin \beta \cdot (z_{wp} - h)} \\ \frac{v - v_0}{k \cdot f} = \frac{\cos \alpha \cdot x_{wp} - \sin \alpha \cdot y_{wp}}{\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot x_{wp} + \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot y_{wp} + \cos \beta \cdot (z_{wp} - h)} \end{cases} \quad (7)$$

式中, k 、 u_0 、 v_0 可由摄像头内参数标定获得,且 $z_{wp} = 0$,则只有 x_{wp} 和 y_{wp} 是未知量,故此方程有唯一解。 (x_{wp}, y_{wp}) 即为目标小球在世界坐标系下相对于足球机器人的坐标。

完成了机器人自定位和单机器人目标定位之后可以通过 ZigBee 网络无线通信在霍夫空间中进行多机器人协同目标定位。

4 多机器人协同目标定位跟踪

在球场上当有多个机器人 $R_1, R_2, \dots, R_n (n >$

得到的数字图像。成像平面上的目标点 (x_{1p}, y_{1p}) 转换为数字图像点 (u, v) ,光轴中心线在成像平面的交点转换到数字图像的坐标记为 (u_0, v_0) ,如果忽略 X 轴与 Y 轴之间放大系数 k_x 和 k_y 的差异,且不考虑摄像头镜头畸变的影响,则成像平面与数字图像之间呈线性关系为

$$\begin{cases} u - u_0 = kx_{1p} \\ v - v_0 = ky_{1p} \end{cases} \quad (5)$$

机器人在搜索目标时,摄像头的转动角度是受控制板控制的,即转动角度是可知的。记摄像头先绕 z_c 转动角度 α ,再绕 x_c 转动角度 β ,机器人高度 h 已知,则

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{Rot}(x_w, \beta) \cdot \mathbf{Rot}(z_w, \alpha) \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w - h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w - h \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, \mathbf{Rot} 为旋转矩阵。

根据矩阵乘法不具有交换性质,即 $\mathbf{AB} \neq \mathbf{BA}$,要特别注意式(4)中两个旋转矩阵顺序不可颠倒。这也是由机器人头部视觉云台的机械结构决定的,即带动云台整体运动的自由度要先做矩阵旋转。本文所采用机器人的云台结构整体由 z 方向自由度控制。

由式(4)一(6)联立,可得

1) 同时观测到目标 P 时,在笛卡儿空间中可获得多条直线 $L_1, \dots, L_n (n > 1)$,这 n 条直线的交点即为目标点 P 。

4.1 多机器人协同定位模型

实际中摄像机节点和机械结构存在很多误差导致多条投影线不会交于一点,如图7所示。考虑把直线映射到霍夫空间成为离散点 (θ_i, ρ_i) ,然后使用最小二乘算法,进行拟合可以得到一条最优的正弦曲线 $h(P)$ ^[7-8],如图8所示。这条最优正弦曲线 $h(P)$ 即为笛卡儿空间中目标定位的最优点 P' 。

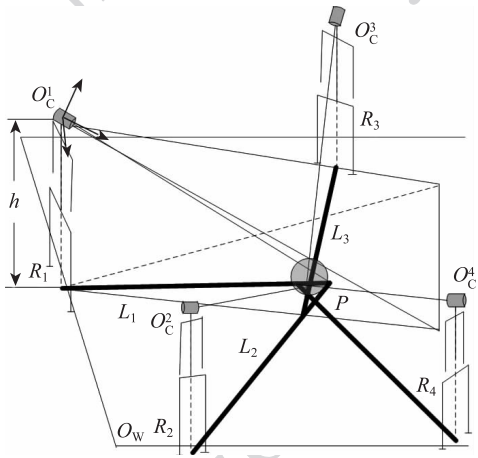


图 7 多机器人协同定位模型

Fig. 7 Localization model for cooperative robots

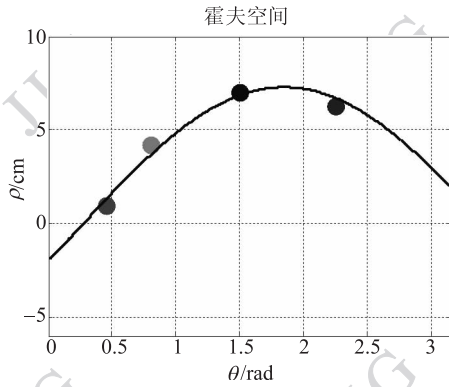


图 8 在霍夫空间中的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve in Hough space

对映射到霍夫空间中的多个离散点 (θ_i, ρ_i) 建立一条正弦曲线

$$\rho = X'_p \cdot \cos \theta + Y'_p \cdot \sin \theta \quad (8)$$

其误差评估函数为

$$J = \sum_{i=1}^n (\rho_i - \cos \theta_i \cdot X'_p - \sin \theta_i \cdot Y'_p)^2 \quad (9)$$

求解得到最优的参数点 (X'_p, Y'_p) 使 J 最小,映射到笛卡儿空间即为目标最优坐标点。

4.2 多机器人加权定位

目标定位采用摄像头视觉系统,由摄像机节点和机械结构引入的误差会随识别距离的扩大而变大。当识别到目标小球的机器人个数 $n > 1$ 时,考虑离目标位置 L_i 越大,误差 Δ_i 越大,赋予不同的权值 K_i ,其距离 L_i 越小则权值 K_i 越大,定义第 i 个机器人的归一化权值为

$$K_i = \frac{1}{L_i} \quad (10)$$

把加权系数式(10)引入到误差评估函数式(9)中,得

$$J_k = \sum_{i=1}^n K_i \cdot (\rho_i - \cos \theta_i \cdot X'_p - \sin \theta_i \cdot Y'_p)^2 \quad (11)$$

这样即可求到加权后的目标最优坐标点。

4.3 协同定位算法仿真

假定机器人和目标小球在场地中的位置坐标如表 1 所示。

表 1 假定放置坐标和距离

Table 1 Assumed the placement coordinates and the distances

名称	坐标/mm	距离/mm
目标小球	(3 000, 3 200)	—
机器人 1	(1 000, 3 500)	2 022.4
机器人 2	(250, 2 000)	3 000.4
机器人 3	(1 750, 350)	3 112.1
机器人 4	(4 250, 2 400)	1 484.1
机器人 5	(5 600, 3 900)	2 692.6

在 Matlab 的实验平台上对在霍夫空间中的协同定位算法进行仿真。参考表 1 中的设定参数,假定目标小球从坐标(3 000, 3 200),以步长 50 mm,均匀移动到(4 500, 1 200),对节点加入标准差为 192 mm 的高斯白噪声,分别采用等权算法和加权算法对目标进行定位,结果如图 9 所示。

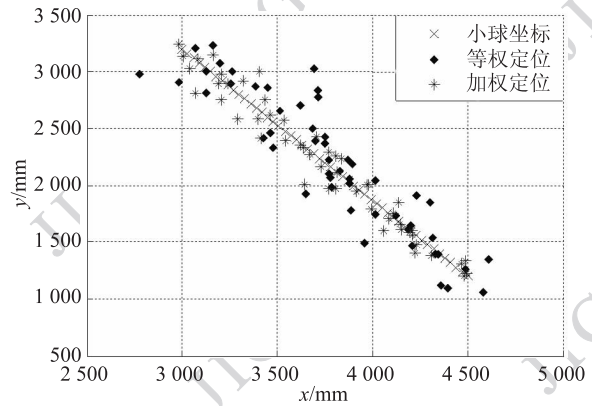


图 9 定位算法仿真结果

Fig. 9 The results of localization algorithm simulation

从仿真的实验数据中得到,等权定位的平均误差为 118 mm,加权定位的平均误差为 87 mm。可见,定位精度显著提高。

依次减少参与协同定位的机器人个数,进行仿真实验,来分析节点数对定位精度和时间复杂度的

影响。每次分别对加权算法和定位算法实验 50 次求取平均误差,仿真实验数据如图 10 所示。

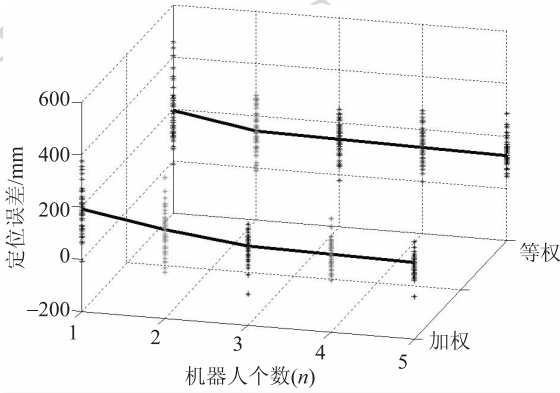


图 10 机器人个数对定位精度的影响

Fig. 10 The influence of the robots number on localization accuracy

由仿真结果可见,随着节点数的减少,定位误差加大,当节点数为 3~5 阶段时,精度几近平稳,同时考虑节点数的增加对算法时间复杂度的影响,实际物理实验中,我们采用 4 个机器人进行定位实验。

5 融合粒子滤波的小球跟踪

通过多机器人之间的协同定位可以得到目标小球的位置坐标,但输出的坐标值在真值附近上下波动严重(如图 9),影响足球机器人对目标小球运动轨迹的跟踪效果,因此本文融合粒子滤波算法来改善这种情况。跟踪过程如图 11 所示。

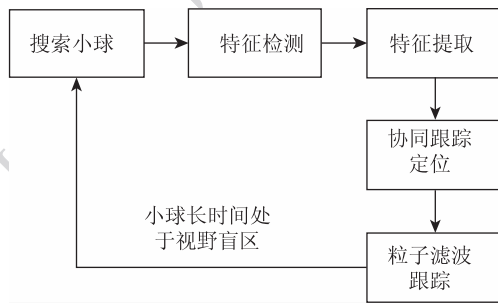


图 11 融合粒子滤波的小球跟踪过程

Fig. 11 The process of tracing the ball by fusing particle filter

协同定位阶段输出目标小球的坐标位置后,通过粒子滤波进行跟踪,利用粒子滤波的状态跟踪和预测功能可以在目标短暂离开视野区域后迅速找到小球,而当小球长时间处于视野盲区时,则需要机器人重新进行全局搜索。

5.1 裂变自举粒子滤波

在目标定位跟踪领域,自举粒子滤波(BPF)是一种经典而且广泛应用的粒子滤波算法。但 BPF 算法在重采样之后常会出现严重的样本枯竭问题。针对此问题,有文献[9]提出以“裂变繁殖”为核心的预处理克服方法,在重采样前增加 SFN 预处理,即:权值排序(sorting)、裂变繁殖(fission)和权值归一(normalizing)。可以归纳如下: $k=0$ 时初始化,采样粒子 $x_0^i \sim p(x_0)$, $w_0^i = 1/N_s, i = 1, \dots, N_s$; $k = 1, 2, \dots$ 时作循环迭代:

- 1) $i = 1, \dots, N_s$, 采样粒子 $x_k^i \sim p(x_k | x_{k-1}^i)$, 计算非归一化权重 $w_k^i = p(y_k | x_k^i)$, 构成粒子集 $\mathcal{X}_k = \{x_k^i, w_k^i\}_{i=1}^{N_s}$;
- 2) $i = 1, \dots, N_s$, 计算归一化权重 $\tilde{w}_k^i = w_k^i / \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i$, 得到粒子集 $\tilde{\mathcal{X}}_k = \{x_k^i, \tilde{w}_k^i\}_{i=1}^{N_s}$;
- 3) 结果输出, 根据要求, 由粒子集 \mathcal{X}_k 估算所需的状态统计信息;
- 4) 权值锐化检测, 估算粒子集 \mathcal{X}_k 的有效样本容量 N_{eff} ;
- 5) 若 $N_{\text{eff}} < N_{\text{th}}$ (N_{th} 为锐化检测门限, $N_{\text{th}}/N_s = 0.3 \sim 0.8$), 则进行 SFN 预处理过程, 得到新的粒子集 $\hat{\mathcal{X}}_k = \{\hat{x}_k^i, \hat{w}_k^i\}_{i=1}^{N_s}$, 否则直接转入下一步;
- 6) 重采样得到粒子集 $\hat{\mathcal{X}}_k = \{\hat{x}_k^i, \hat{w}_k^i\}_{i=1}^{N_s}$, 然后返回步骤 1)。

5.2 基于足球机器人的改进 FBPF

FBPF 算法有大量的乘除、指数、三角运算,计算量大。考虑对算法进行简化,减少硬件开销,提高系统实时性^[10]。改进 FBPF(简称为 MFBPF)算法是在 FBPF 算法的基础上对权值计算和权值归一化进行改进从而减少运算量来降低硬件开销,能够适用于整个足球机器人平台。

在多机器人协同定位阶段,可以得到目标小球状态 X 的参数包括 x 坐标、 y 坐标、 x 方向速度、 y 方向速度。状态变量可以描述为

$$X_t = (p_x, p_y, v_x, v_y)$$

状态方程为

$$X_t = A \cdot X_{t-1} + B \cdot W_t$$

式中, $A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T^2}{2} & 0 \\ \Delta T & 0 \\ 0 & \frac{\Delta T^2}{2} \\ 0 & \Delta T \end{bmatrix}$,

ΔT 为采样周期, W_t 是一个 2 维的高斯白噪声。

下面用改进的 FBPF 方法来实现足球机器人系统的跟踪, 步骤如下: $k = 0$ 时初始化, 采样粒子 $x_0^i \sim p(x_0)$, $w_0^i = 1/N_s$, $i = 1, \dots, N_s$; $k = 1, 2, \dots$ 时进行以下迭代循环:

1) $i = 1, \dots, N_s$, 采样粒子 $x_k^i \sim p(x_k | x_{k-1}^i)$, 计算非归一化权重 $w_k^i = w_{k-1}^i \cdot p(y_k | x_k^i)$, 计算权重的同时对这一时刻的权重累加求和, 得到非归一化的权值-粒子集 $\chi_k = \{x_k^i, w_k^i\}_{i=1}^{N_s}$ 和权重累加

$$S_k = \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i;$$

2) 输出结果, $\chi_k = (\sum_{i=1}^{N_s} x_k^i, w_k^i) / S_k$;

3) 权值锐化检测, 估算粒子集 χ_k 的有效样本容

$$N_{\text{eff}} = S_k^2 / \sum_{i=1}^{N_s} (w_k^i)^2;$$

4) 若 $N_{\text{eff}} \geq N_{\text{th}}$ (取 $N_{\text{th}}/N_s = 0.5$), 则进行 SFN 预处理过程, 得到新的权值-粒子集 $\tilde{\chi}_k = \{\tilde{x}_k^i, w_k^i\}_{i=1}^{N_s}$, 并对新裂变粒子的 w_{k-1}^i 置为 $1/N_s$, 然后返回步骤 1), 否则直接转入下一步;

5) 重采样过程是赋值权重大的粒子并用其覆盖权重小的粒子, 然后返回步骤 1)。

5.3 改进粒子滤波算法仿真

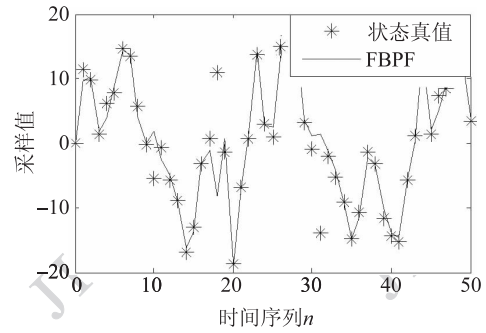
由于目标小球的运动规律具有很大的随机性, 这里选用一个经典例子进行仿真实验, 其状态方程和观测方程分别为

$$x_{k+1} = \frac{x_k}{2} + 25 \frac{x_k}{1 + x_k^2} + 8\cos(1.2k) + v_{k+1}$$

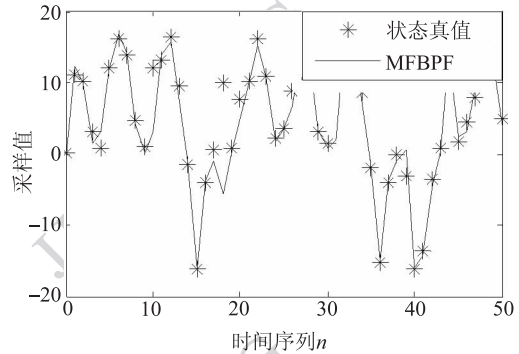
$$y_k = 0.05x_k^2 + w_k$$

式中, 状态噪声 $v_k \sim N(0, 10)$ 。观测噪声 $w_k \sim N(0, 1)$, $x_0 \sim N(0, 10)$ 。这个例子具有很强的非线性, 是一个复杂的非线性递推贝叶斯滤波问题, 其精确的解析解不存在。在此, 分别就 FBPF 和 MFBPF 进行仿真实验, 仿真的数据样点为 50, 选取粒子个数为 100, FBPF 中取有效的容量限 $N_{\text{th}} = 50$, 当 $N_{\text{eff}} < N_{\text{th}}$ 时, 对权重高的粒子进行裂变繁殖, 改进后的 FBPF 中, 也取 $N_{\text{th}} = 50$, 当 $N_{\text{eff}} \geq N_{\text{th}}$ 时进行裂变繁殖。裂变繁殖的方差为 1。粒子状态估计和 RMSE 比较如图 12 所示。

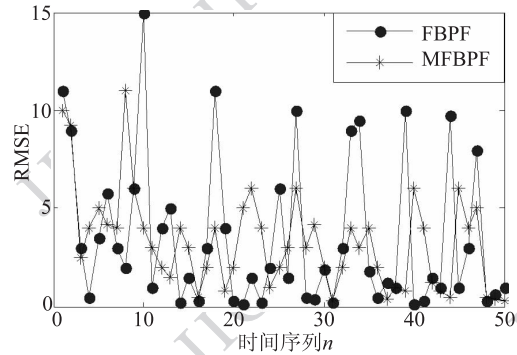
通过 RMSE 比较可以看出, 仿真中 MFBPF 要略优于 FBPF, 但是 MFBPF 中对算法的优化使其更适用于机器人平台的硬件实现。



(a) 状态真值和FBPF估计



(b) 状态真值和MFBPF估计



(c) FBPF和MFBPF估计的RMSE比较

图 12 粒子状态估计和 RMSE 比较

Fig. 12 The state values estimation and compared the RMSE comparison

6 实验结果

在图 3 所示的实验环境中放置 4 个仿人足球机器人。场地长 600 cm, 宽 400 cm, 机器人 1~4 人和目标小球放置位置按照之前仿真实验中表 1 的数据放置。如图 13 所示, 机器人在场地中需通过定位算法进行自定位。机器人处于直立和稳步行走时身高 $h = 56$ cm, 头部配有 CCD 摄像头, 以 25 帧/秒的采集速度采集分辨率为 720×625 的 YUV422 格式图像。图像处理及定位跟踪算法在高性能 32-位定点 DSP TMS320DM642 中运行。

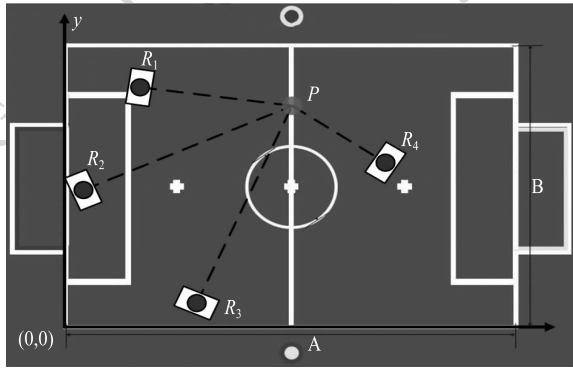


图 13 机器人和目标小球放置位置

Fig. 13 The placement of the robots and the target ball

先进行视野内的目标小球定位实验,分别采用单机器人定位,多机器人等权协作定位和加权协作定位进行定位实验,实验重复 300 次,统计绝对误差,然后以 0.5 为步长绘出统计结果,如图 14 所示。

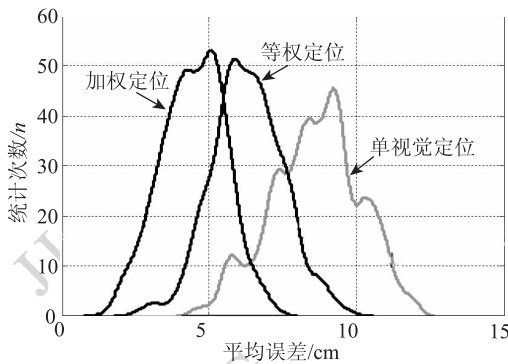


图 14 目标定位误差结果

Fig. 14 The errors of the target localization

可见加权后的定位误差有明显的改善,平均误差由 8.6 cm 缩减到 4.5 cm,精度提高了约 48%。由于足球机器人的定位误差也会随距离目标小球的距离缩短而减少,因而这个误差范围在可接受的范围内。

下面对在硬件平台上使用的粒子滤波算法进行实验。考虑粒子数量与跟踪精度及时间的关系,通过大量的实验,采用 100 个粒子进行跟踪。为对比本文算法的效果,使用简单协同定位和采用粒子滤波之后的跟踪效果,人为地使小球在场地中做不规则运动 2 min,其中第 40~65 s 的跟踪误差如图 15 所示。

可以看到,采用改进后粒子滤波的跟踪效果,对运动轨迹的滤波和预测有助于足球机器人快速执行决策。

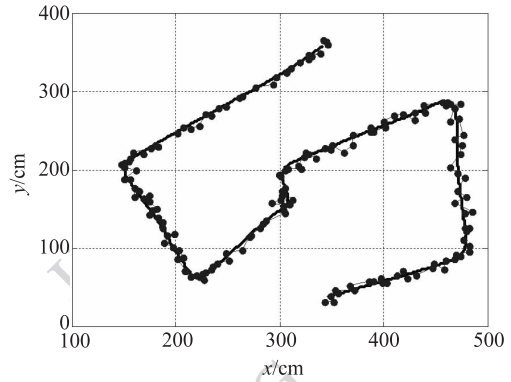


图 15 跟踪轨迹

Fig. 15 Tracking path

7 结 论

本文针对基于嵌入式的仿人足球机器人给出了一种基于霍夫空间的多机器人协作目标定位算法。通过机器人基于地标的自定位和视觉坐标系到世界坐标系的转换实现目标定位。在多机器人之间建立 ZigBee 自组织无线传感器网络进行无线通信,传递视觉要素信息及决策指令。随时更换上场的足球机器人可自组织联网,在霍夫空间中进行二项式拟合,求取了最优的目标参数。同时,融合改进后的粒子滤波实现了对目标的实时跟踪。实验数据结果表明,定位误差得到了大幅度改善,采用改进后粒子滤波算法具有较好的跟踪效果。

参考文献 (References)

- [1] Li W, Zhang J F, Wang Q, et al. Designing of autonomous humanoid robot soccer system [C] // Proceedings of 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010: 702-706.
- [2] Menegatti E, Behnke S, Zhou C J. Humanoid soccer robots [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(8): 759-760.
- [3] Wu J, Xu X, Lian C Q, et al. A survey of recent advances in cooperative multi-robot systems [J]. Transactions on Intelligent Systems, 2011, 6(1): 13-27. [吴军, 徐昕, 连传强, 等. 协作多机器人系统研究进展综述 [J]. 智能系统学报, 2011, 6(1): 13-27.]
- [4] Rajaie H, Zweigle O, Haussermann K, et al. Hardware design and distributed embedded control architecture of a mobile soccer robot [J]. Mechatronics, 2011, 21(2): 455-468.
- [5] Zhang L L, Cai Z X, Chen B F. Co-FastSLAM algorithm based

- on relative observation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2008, 36(S1): 171-173. [张莉莉, 蔡自兴, 陈白帆. 基于相对观测量的机器人合作 FastSLAM 算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008. 36(S1): 171-173.]
- [6] Shao G F, Wen Y H. Target localization for autonomous soccer robot based on vision perception [C]//Proceedings of 3rd International Conference on Intelligence Computation and Applications. Berlin: Springer-Verlag Berlin, 2008: 831-840.
- [7] Fang F, Ma X D, Dai X Z. Mobile robot global localization based on model matching in hough space [J]. Robot, 2005, 27(1): 35-40. [房芳, 马旭东, 戴先中. 基于霍夫空间模型匹配的移动机器人全局定位方法[J]. 机器人, 2005, 27(1): 35-40.]
- [8] Zhang B, Luo H Y, Hu G D, et al. Passive target localization algorithm for multimedia sensor networks [J]. Journal of Southeast University: Nature Science Edition, 2011, 41(2): 266-269. [张波, 罗海勇, 胡广大, 等. 多媒体传感器网络中被动目标定位算法 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(2): 266-269.]
- [9] Cheng S Y, Zhang J Y. Fission bootstrap particle filtering [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 500-504. [程水英, 张剑云. 裂变自举粒子滤波 [J]. 电子学报, 2008, 36(3): 500-504.]
- [10] Bo C, Zhu Z Y. Application of improved fission bootstrap particle filtering algorithm to GPS navigation system [J]. Application of Electronic Technique, 2010, (1): 24-27. [薄超, 朱志宇. 改进的裂变自举粒子滤波算法在 GPS 导航系统中的应用 [J]. 电子技术应用, 2010, (1): 24-27.]