

一种新的用于足球机器人的全向视觉系统

卢惠民 刘斐 郑志强

(国防科技大学机电工程与自动化学院,长沙 410073)

摘要 全向视觉系统是 RoboCup 中型组足球机器人最重要的传感器之一。为了实现足球机器人的目标识别与自定位,提示了一种新的足球机器人全向视觉系统的设计与实现,其中在硬件上设计了一种由水平等比镜面和垂直等比镜面组合而成的新型全向反射镜面,其能够采集到较理想的全景图像;软件上则根据该镜面的成像特性实现了一种新颖的基于场地标志线信息的机器人自定位算法,该算法能够获得较准确的机器人自定位值。实验结果表明,该全向视觉系统能够有效地应用于机器人足球赛中。

关键词 全向视觉系统 全向反射镜面 图像处理 自定位

中图分类号: TP242.6+2 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)07-1243-06

A Novel Omni-vision System for Soccer Robots

LU Hui-min, LIU Fei, ZHENG Zhi-qiang

(College of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Omni-vision system is one of the most important sensors for robocup middle-size league soccer robots. The Paper introduces the design and the implementation of a new omni-vision system. A new omni-mirror made up of an isometric horizontal mirror and an isometric vertical mirror was designed as part of the hardware. It can capture good panoramic image. A novel robot's self-localization algorithm based on the mark lines of field was implemented according to the imaging characteristic of the new omni-mirror. It can obtain accurate self-localization value. The experimental result shows that the omni-vision system can be applied in robot soccer effectively.

Keywords omni-vision system, omni-mirror, image processing, self-localization

1 引言

目前,在 RoboCup 中型组机器人足球赛中,使用折反射全向视觉系统是一个重要发展趋势。该系统具有 360°的水平视角,能够获取机器人周围场地的全景图像,经过图像处理可实现目标识别和机器人的自定位,并能提供机器人决策所需要的信息,该系统是中型组足球机器人最重要的传感器之一。

本文根据 RoboCup 机器人足球赛对全向视觉系统的要求,设计了一种新的由水平等比镜面和垂直等比镜面组合而成的全向反射镜面,并根据该镜

面的成像特性,设计实现了一种新颖的基于场地标志线信息的机器人自定位算法。

2 全向反射镜面的设计

全向视觉系统由全向反射镜面和摄像机组成^[1],其中全向反射镜面起着反射光线的作用,而摄像机则通过镜头折射采集全向反射镜面反射的光线来获取全景图像。全向视觉系统作为 RoboCup 中型组机器人最重要的传感器,其主要用于采集全景图像,以进行目标识别和自定位,因此要求系统获得的图像能够满足以下要求:在距机器人较近的一定范围内,能够

基金项目:国家高技术研究发展计划“863”项目(2001AA422270);国家自然科学基金项目(69975023)

收稿日期:2005-12-01;改回日期:2006-04-21

第一作者简介:卢惠民(1980~),男。2005年于国防科技大学获得硕士学位,现为国防科技大学博士生。主要研究方向为机器人视觉、图像处理、机器人足球。E-mail:lhnew@nudt.edu.cn

进行精确的目标识别和自定位,以便得到精确的球、其他机器人的位置和机器人自身的位置、朝向等信息,用于带球、避障等运动的控制;对于距离机器人较远的场地区域,能够进行较为准确的目标识别和辨识双方机器人,以便得到准确的球以及其他机器人相对该机器人自身的距离、角度等信息。

2.1 几种典型镜面介绍

全向反射镜面的形状对采集到的全景图像的特性有着决定性的影响。文献[2]中介绍了几种常见的全向反射镜面,包括圆锥形镜面、球形镜面、椭球形镜面、抛物线镜面以及双曲线镜面等。图 1 即为由双曲线镜面获得的球场全景图像。这些镜面的共同特点是镜面形状简单,其剖面曲线能够用数学解析式精确的描述,加工难度相对比较小,适合构建紧凑廉价的全向视觉系统。但通过这些镜面所获取的图像存在严重的桶形失真,由图 1 可以明显看出,场地边界标志线成像为弧线,图像中各点的分辨率随着与机器人距离的增大而降低,即图像上和实际场地中各点的距离关系是非线性的。通常由于镜面加工的误差和镜面安装上的偏差,这个桶形失真很难校正,因此很难通过图像来准确估计场地上目标点的位置,这就给机器人的自定位带来了很大的误差,且远处场景成像太小,不利于机器人进行目标识别。因此需要设计新的镜面,以满足机器人进行更好的目标识别和自定位的要求。

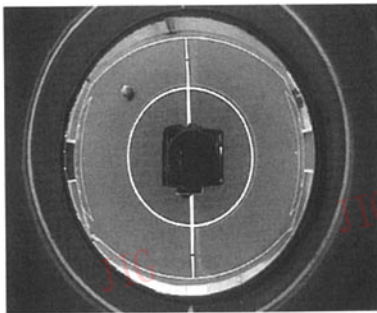


图 1 双曲线镜面获得的球场全景图像(12×7m)

Fig. 1 Panoramic image captured by a hyperboloidal mirror

2.2 设计新型组合镜面

组合镜面由不同形状的镜面组合而成,各部分镜面分别用于满足机器人对于距离其自身不同范围内的物体的不同成像要求。基于上述典型镜面的不足,本文要求所设计的镜面能满足图像和现实场景中的对应点的距离关系是线性的,即分辨率不变

(constant resolution)的概念。文献[3]中定义了 3 种分辨率不变的镜面,本文分别称之为水平等比镜面、垂直等比镜面、角度等比镜面。本文设计了一种新的由水平等比镜面和垂直等比镜面组成的组合镜面。下面分别推导水平等比镜面和垂直等比镜面的剖面曲线的数学描述。

水平等比镜面是指水平面和所成图像中的对应点之间的距离关系是线性的,其镜面成像示意图如图 2 所示。 $F(t)$ 为镜面剖面的函数,水平面上的到光轴距离为 d 的点 $P(d,0)$ 成像于摄像机 CCD 上距光轴 x 远处。

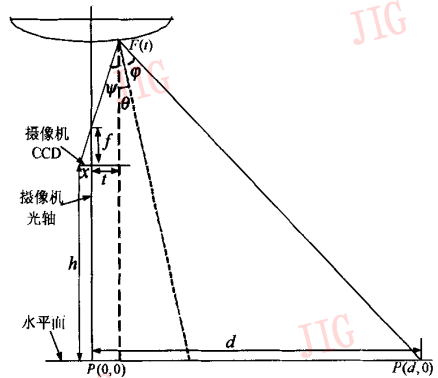


图 2 水平等比镜面设计示意图

Fig. 2 Designing sketch map of isometric horizontal mirror

根据光线反射时,入射角等于出射角的原理, $\varphi = \psi + \theta$,所以 $\tan(\varphi + \theta) = \tan(\varphi + 2\theta)$,又因为 $\tan\theta = F'(t)$, $\tan\psi = \frac{x}{f}$,其中 f 为摄像机焦距,所以有

$$\frac{d-t}{f} = \left(\frac{x}{f} + \frac{2F'}{1-(F')^2} \right) / \left(1 - \frac{x}{f} \times \frac{2F'}{1-(F')^2} \right) \tag{1}$$

因为水平距离等比,所以可以设

$$d = ax + b, a \gg b \tag{2}$$

由式(1)可得 $z(F')^2 + 2F' - z = 0$,因为镜面为凸形镜面,故取其正根

$$F' = \frac{-1 + \sqrt{1+z^2}}{z} \tag{3}$$

其中

$$z = \frac{tf - df + xF}{tx - dx - fF} \tag{4}$$

$$x = \frac{tf}{F - h - f} \tag{5}$$

将式(2)、式(4)、式(5)代入式(3)后所得的微分方

程即描述了水平等比镜面的剖面曲线。该方程没有解析解,只有数值解。

垂直等比镜面是指到摄像机光轴一定距离的垂直面和所成图像中的对应点之间的距离关系是线性的,镜面成像示意图如图 3 所示。 $F(t)$ 为镜面剖面的函数,水平面上的到光轴距离为 r 的点 $P(r,0)$ 成像于摄像机 CCD 上距离光轴 x_0 远处,该点上方高度 z 处的点 $P(r,z)$ 成像于摄像机 CCD 上距离光轴 x 远处。

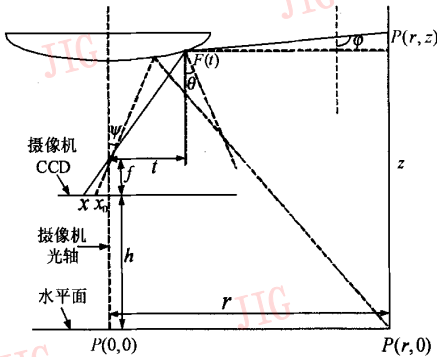


图 3 垂直等比镜面设计示意图

Fig. 3 Designing sketch map of isometric vertical mirror

根据光线反射时,入射角等于出射角的原理,可推出 $\varphi = \psi + 2\theta$, 所以 $\tan\varphi = \tan(\psi + 2\theta)$, 又因为 $\tan\theta = F'(t)$, $\tan\varphi = -\frac{r-t}{z-F'}$, $\tan\psi = \frac{x}{f}$, 其中 f 为摄像机焦距, 所以有

$$-\frac{r-t}{z-F'} = \left(\frac{x}{f} + \frac{2F'}{1-(F')^2}\right) / \left(1 - \frac{x}{f} \times \frac{2F'}{1-(F')^2}\right) \quad (6)$$

因为垂直距离等比,所以可以设 $r=C$, 此时

$$z = a(x - x_0) + b, a \gg b \quad (7)$$

由式(6)可得 $(F')^2 + 2\alpha F' - 1 = 0$, 因为镜面为凸形镜面,故取其正根

$$F' = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 1} \quad (8)$$

其中

$$\alpha = \frac{fz - fF + xt - xC}{xF - xz + ft - fC} \quad (9)$$

$$x = \frac{tf}{F - h - f} \quad (10)$$

将式(7)、式(9)、式(10)代入式(8)后所得的微分方程即描述了垂直等比镜面的剖面曲线。其与水平等比镜面情况一样,该方程只有数值解。

鉴于水平等比镜面和垂直等比镜面分别具有使

水平场景和一定距离处的垂直场景成像的分辨率不变的优良特性,而单独的水平等比镜面和垂直等比镜面又分别有使垂直场景和水平场景的成像失真较大的不足,且单独的水平等比镜面的高度视野太小,无法观察到远处具有一定高度的物体,所以本文结合两种镜面的优点,并弥补相互的不足,设计了一种新型组合镜面,其内侧部分为水平等比镜面,外侧部分为垂直等比镜面。这样根据全向视觉系统不同应用场合和应用要求,通过调整镜面设计参数,使用 Matlab 工具就可以求解出镜面剖面曲线的数值解,在求解过程中,使两部分镜面的剖面曲线的斜率在镜面组合的连接处连续。本文设计的镜面使水平等比部分能看到 6.5m 远的距离,而垂直等比部分在 6.5m 远处能看到 1m 高度的物体。新设计的组合镜面的剖面曲线和获得的球场全景图像分别如图 4 和图 5 所示。从图 5 中可以看出,所设计的组合镜面可使距机器人较近的范围内的水平场地的成像保持原始形状,该范围内的图像无需校正,这样物体之

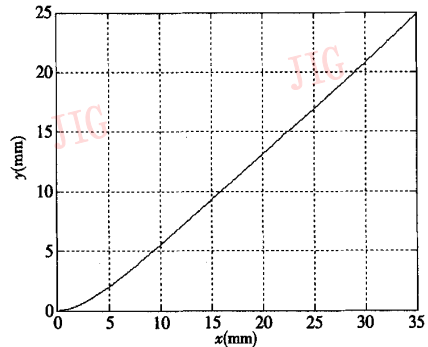


图 4 新设计镜面的剖面曲线图(单位为 mm)

Fig. 4 The curve of new omni-mirror section(unit: mm)

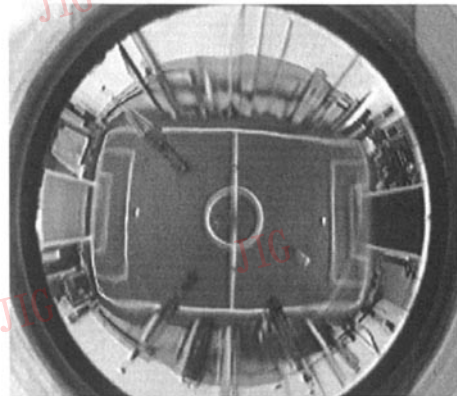


图 5 新设计镜面获得的球场全景图像(12m x 7m)

Fig. 5 Panoramic image captured by new omni-mirror(12m x 7m)

间在图像上的距离乘以一个固定参数就能得到其在场地上的实际距离,由于较远处的物体成像高度上变形较小,球门在图 5 中的成像比图 1 中的成像更真实合理,对球门的识别更加容易完成,因此能很好地满足机器人足球赛的要求,即能够利用近处场景的成像来实现精确的目标识别和机器人自定位,而利用远处场景的成像来实现准确的目标识别。

3 机器人自定位算法

全向视觉系统的软件包括图像处理算法和机器人自定位算法。由于该系统是在高度动态的机器人足球赛环境下运行,因此要求算法必须有效快速。

获得全景图像后,本文使用基于颜色的图像分割,给图像的每个属于某一颜色类的像素点赋予相应的颜色标号,然后使用游程长度编码算法^[4]将相邻的具有相同颜色标号的像素点连接成一系列区域,进而就可提取出球、球门、立柱等地标信息。图 5 中的全景图像颜色分割和地标提取的结果如图 6 所示。图中黑色的方块点分别表示球、甲方球门、乙方球门等地标点在图像上的位置。

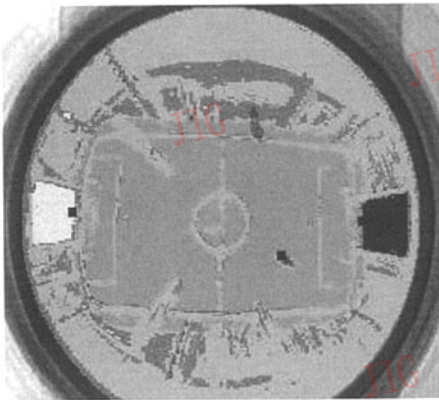


图 6 图像颜色分割和地标特征提取的结果图

Fig. 6 Result of image segmentation and landmark extraction

目前基于全向视觉的足球机器人自定位方法主要是一种利用球门、立柱等地标信息的几何三角定位方法^[5],这样当地标被遮挡时(这在比赛中是常见的),这种定位算法就失效了。本文由于设计使用了新型全向反射镜面,因此机器人周围一定范围内的场地上的物体在图像中的成像是等比例变化的(如图 5 所示),场地上的白色标志线仍然成像为直线,如果能够快速提取出场地上的标志线,那么利用

已知的关于场地环境的知识就能够判定所检测直线的归属,进而通过与环境的几何模型的比较就可实现机器人在球场上的实时自定位。该算法在地标被遮挡或者标志线被部分遮挡时仍然有效,同时由于标志线也是场地上最多的信息,因此使用它来定位能得到更加精确和鲁棒的结果。

3.1 标志线特征提取

Hough 变换是提取直线的最有效的方法,但是由于传统 Hough 变换算法不仅具有很大的盲目性,而且需要较大的存储空间,计算量较大,这将导致算法效率低下,因此不适合机器人足球赛这种实时性要求较高的应用场合。笔者在分析现有常用的改进 Hough 变换算法思想的基础上,设计了一种新的快速 Hough 变换算法^[6]用于提取直线。标志线特征提取时,先以一定间隔扫描颜色分割后的全景图像,找到图像上存在绿白绿过渡的特征点后,再使用该快速 Hough 变换算法提取全景图像中的场地白色标志线,结果如图 7 所示,图中红色点(黑白图中为黑色)即为用于提取直线的特征点。该快速 Hough 变换算法所检测出来标志线的参数 ρ 和 θ ,分别表示图像上机器人自身成像位置到该条标志线的距离和机器人自身成像位置到该条标志线的垂线的方位角。图 7 中所检测出来的直线的参数对 (ρ, θ) 分别为 $(73.8, 0.016)$ 、 $(46.8, 1.557)$ 、 $(1.59, 4.246)$ 、 $(0.45, 3.128)$ 、 $(56, 0)$ 、 $(64, 3.142)$ 、 $(49.06, 4.712)$ 。

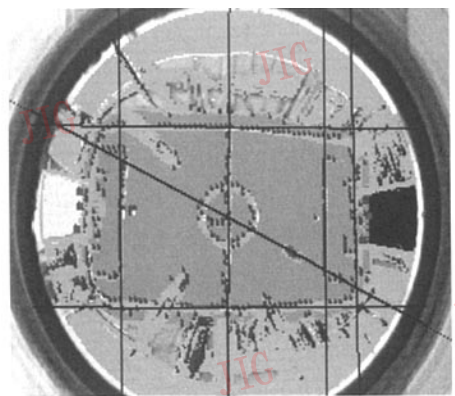


图 7 快速 Hough 变换提取场地标志线的结果图

Fig. 7 Result of detecting field lines by fast Hough Transform

3.2 基于标志线信息的机器人自定位

机器人自定位就是获得机器人在世界坐标系中的位置和朝向信息,这是机器人导航和规划的基础。

定位值用 (x, y, γ) 表示,其中 x, y 表示位置, γ 表示朝向。

通过上述图像处理就可以获得一系列地标和场地标志线信息,再使用正交法则和场地知识去除误检测直线,即可判明所检测直线的归属。如图 7 所示,提取场地标志线的结果中有一条直线是误检测的结果,利用场地上的标志线两两之间一定互相垂直或互相平行的性质,就可以将该条误检测直线去掉。由于机器人周围 6.5m 范围内的场地上物体成像是等比例变化的,因此该范围内图像上物体间的距离通过乘以一个固定参数就能换算到实际世界坐标系中物体间的距离。利用已知的关于场地环境的知识,如标志线之间的距离、球门到标志线的距离、标志线和球门之间的方位等,就可以判断出每条直线的归属。因此只要检测出一组互相垂直的标志线对,就可利用机器人到标志线的距离 ρ 获得机器人在场地上的位置,再利用机器人到标志线的垂线的方向角 θ ,即可获得机器人的朝向。如果只能检测到一条标志线,那么再利用一个地标点的信息也能使用类似的方法求解出机器人的自定位值。利用图 7 中检测出来的距离机器人最近的一组标志线对,就可以获得图 5 中的机器人在场地世界坐标系中的定位结果 $(3.34, -5.34, 6.27)$,其中位置单位为 cm,朝向单位为 rad,场地世界坐标系是一个以场地中心为原点,蓝色球门(黑白图中为深色)方向为正方向的右手坐标系。定位结果表明,该定位方法能够有效准确地实现机器人自定位。

4 实验结果与分析

由于无法精确地得到机器人在获得自定位值时刻的实际位置和朝向信息,因此本文设计了几个特定的定位实验来评估基于标志线信息的机器人自定位的精度。

实验首先在场地世界坐标系中的 X 方向上按一定间隔选择若干条平行于 Y 方向的直线,再使机器人分别在这些直线上来回运动多次,并记录其位置的自定位值,而记录下的 X 坐标定位值与相应直线的 X 值的偏差即认为是机器人自定位结果的误差,在场地世界坐标系中的 Y 方向上也做同样的实验。图 8 所示即为机器人位置自定位值的误差。

然后在机器人周围 360° 范围内按一定间隔选择若干朝向,使机器人分别对准这些朝向运动多次,

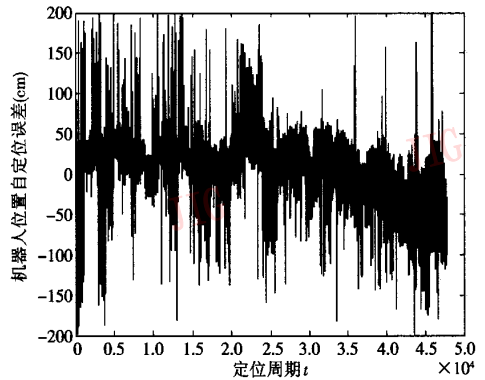


图 8 机器人位置自定位值的误差

Fig. 8 Position error of robot's self-localization

同时记录其运动过程中的所有朝向自定位值。而记录下的机器人朝向定位值与相应的机器人对准朝向之间的偏差即认为是机器人朝向自定位的误差。图 9 所示即为机器人朝向自定位值的误差。

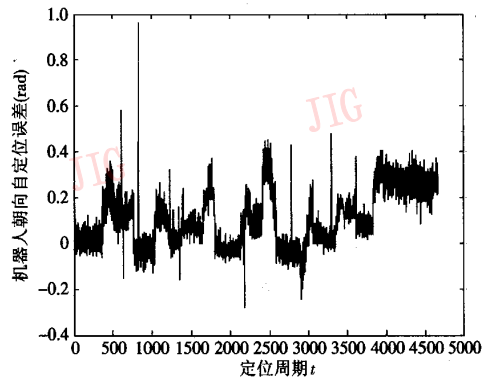


图 9 机器人朝向自定位值的误差

Fig. 9 Orientation error of robot's self-localization

最后使机器人沿着场地上的一定路线运动,并记录其在运动过程中得到的所有机器人位置的自定位值。在场地图上分别绘制出机器人的实际运动轨迹和自定位值的轨迹(如图 10 所示),其中黑色的圆圈描绘的是机器人实际的运动轨迹,红色的方块(黑白图上为浅色)描绘的是机器人使用基于标志线的定位方法得到的位置自定位值的轨迹。

从图 8 和图 9 可以看出,机器人位置的自定位值的误差基本上在 100cm 以内,其中绝大多数误差值在 50cm 以内,朝向自定位值的误差基本上在 0.3rad 以内,其中绝大多数误差值在 0.2rad 以内,可见机器人能够得到大致准确的位置自定位值和比较准确的朝向自定位值。从图 10 中可以看出,机器

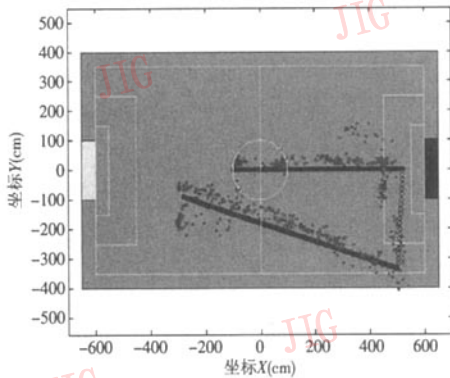


图 10 机器人自定位结果与实际运动的轨迹对比图
Fig. 10 Track comparison of robot's self-localization and actual motion

人的自定位值基本上与机器人的实际运动轨迹一致,但是由于基于标志线的机器人自定位是一种完全利用全向视觉信息的定位方法,具有单信息源的局限性,因此机器人的自定位精度依赖于图像处理 and 特征提取的精度,且由于本全向视觉系统选用的数字摄像机具有较大的噪声干扰,以及由于实验室的全向移动机器人运动过程中存在较大的震动造成图像变形等因素,致使机器人的位置自定位值存在较大的跳动,因而定位结果不够稳定。由于颜色标定不是本文的研究重点,本文所使用的图像颜色标定算法较为简单,仅仅在球场中心进行颜色标定,没有考虑使同一颜色类的颜色阈值对球场的不同位置具有一定的适应能力,因而造成机器人在球场上的某些位置的图像颜色分割不理想,进而造成地标提取和白线检测的误差较大,使得部分定位值的误差比较大。在进一步的工作中需要设计更加鲁棒的颜色标定算法,以提高图像处理的精度,还要设计基于信息融合的机器人自定位方法,通过融合里程计、加速度计等其他机器人传感器获得的信息,以获得更加稳定和精确的机器人自定位结果。

本文设计的全向视觉系统,从采集并处理全景图像到求解出机器人的自定位值,其整个过程所需要的运行时间约为 34ms,即该系统每秒能处理 30 帧的图像,因此能够很好地满足机器人足球赛的实时性要求。

5 结 论

本文设计并实现了一种新的用于足球机器人的全向视觉系统。实验表明,该系统硬件上能够采集较为理想的全景图像,软件上能够快速有效地提取图像中的标志线特征,并能实时给出较为准确的机器人自定位结果,因此该系统能够有效地应用于机器人足球赛中。

参考文献 (References)

- 1 Simon Baker, Shree K Nayar. A theory of catadioptric image formation [A]. In: Proceedings of Sixth International Conference on Computer Vision [C], Bombay, India, 1998: 35 ~ 42.
- 2 Benosman R, Kang S B, editors. Panoramic Vision: Sensors, Theory and Applications [M]. New York: Springer-Verlag, 2001.
- 3 Gaspar J, Decco C, Okamoto Jr J, et al. Constant resolution omnidirectional cameras [A]. In: Proceedings of ECCV02 Third Workshop on Omnidirectional Vision [C], Copenhagen, Denmark, 2002: 27 ~ 34.
- 4 LIU Wei. The Design and Realization of the Omni-vision System for RoboCup Middle Size League Robot [D]. Changsha: Master degree thesis in National University of Defense Technology, 2004. [刘伟. RoboCup 中型组机器人全景视觉系统设计与实现 [D]. 长沙:国防科学技术大学研究生院硕士论文, 2004.]
- 5 Margrit Betke, Leonid Gurvits. Mobile robot localization using landmarks [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997, 13 (2): 251 ~ 263.
- 6 LU Hui-min, ZHENG Zhi-qiang. New fast Hough transform for line detection [J]. Computer Applications, 2005, 25 (10): 2379 ~ 2380. [卢惠民, 郑志强. 一种新的用于检测直线的快速 Hough 变换 [J]. 计算机应用, 2005, 25 (10): 2379 ~ 2380.]