

# Robocup 类人组技术挑战赛标志柱识别新探<sup>①</sup>

A new approach of cylindrical landmark recognition in Robocup Humanoid

林 昊 赵明国 (清华大学 自动化系 北京 100084)

**摘要:** 本文以 Robocup 类人组比赛为研究背景, 提出了基于扫描线以及椭圆拟合算法对场地上标志柱(圆柱体)的识别与测量方法。该方法首先通过生成的扫描线检测像素点的颜色信息, 然后通过特征颜色对判别目标物体进行边缘点的提取。最后利用直接最小二乘法对边缘点进行椭圆拟合, 从而确定目标物体的位置信息。利用现有的机器人 THHRP-4 平台, 运用 C++ 语言编程和调试, 实现机器人在比赛中的视觉应用和动作决策。多次实验验证了程序的稳定性, 其方案可应用于比赛中。

**关键词:** Robocup 类人组 机器视觉 圆柱体识别 椭圆拟合

RoboCup, 即机器人足球世界杯。早在 1992 年加拿大教授 AlanMackworth 在一次国际人工智能会议上首次提出通过机器人足球比赛, 为人工智能和智能机器人学科的发展提供一个具有标志性和挑战性的课题。1997 年首届 RoboCup 比赛成功在日本举行, 其后每年举办一次。我们实验室派出了代表队参加了在中国苏州举行的 Robocup2008 其中类人组的比赛, 并获得了 TeenSize 组的亚军。

## 1 引言

为了更好的性能, 目前大部分队伍都自己制作平台。在软件算法方面, 涉及以下几方面:

- 1) 图像与视觉算法: 颜色分类, 特征提取, 相对位置的估算
- 2) 自定位与导航: 全场机器人定位与球的定位。
- 3) 行为决策: 根据视觉与定位信息决定下一步策略, 并将决策结果传送到运动控制模块。
- 4) 运动控制: 控制电机运动的底层软件模块。根据行为决策通过直接对电机控制实现机器人的行走、踢球等动作。

技术挑战赛分为避障竞速、传球、带球绕柱。在避障竞速比赛中, 有六个黑色的障碍柱(直径 20cm, 高 90cm 的圆柱体)由裁判随机放置于黄色球门的半场, 模拟防守球员, 要求每两个柱子之间的距离须大

于机器人的宽度。当比赛开始计时, 进攻方机器人需要从中场开始, 至少要从 2 个柱子中间穿过并最终走进黄色球门, 过程中攻方机器人不允许触碰任何障碍柱。当机器人完成穿越并触碰黄色球门的门线时, 计时结束。用时最短的队伍获胜。

在带球绕柱的比赛中, 有粉色或者青色的圆柱, 大小尺寸与上述的黑色柱子一致。

在避障和带球绕柱比赛中, 机器人面临的重大挑战是对黑色、粉色和青色的圆柱的识别和位置的判断。本文将主要以黑色柱子的识别阐述该问题的解决方案。

## 2 现有识别方法及其缺陷简述

由于障碍柱的颜色上的鲜明特征, 它的识别方法主要围绕颜色的检测和边缘提取。但为了保证比赛对视觉处理方法的实时性要求, 现有方法并非对图像中每一个像素点都进行处理, 而是先按照一定规则生成一系列的扫描线, 只对扫描线上的点进行颜色检测。

扫描线生成之前先要计算出图像中地平线的位置, 即摄像头的虚像平面(镜头前方的焦平面)与镜头高度上的水平面的交线。根据透视原理, 地平线附近的物体距离机器人较远, 图像中显示的尺寸较小, 所以地平线附近的扫描线需要密集一些。相反, 距离地平线较远的部分, 扫描线可以相对稀疏一些。

具体的识别方法如下:

<sup>①</sup> 基金项目:清华大学教育基金会(202025001)  
收稿时间:2008-10-14

1) 在计算得到图像的地平线后,分别从水平线开始向下和向上生成若干条与水平线平行的扫描线。基于前面关于水平线附近有效信息集中的假设,扫描线的间距逐渐增大<sup>[1]</sup>。

2) 然后沿这些水平方向的扫描线检测黑色的色段(Run),同时同一扫描线上的由于噪声点而被隔断的多条线段合成一条特征线段(Feathers)。然后对所有这些色段依据长短和相对位置进行组合,得到黑色区域,作为标志柱候选。以该候选区域中最长的色段为标准,向上和向下各生成 4 条等间距的垂直于水平线的扫描线,用以检测构成标志柱区域的上下边界。如图 1 所示,可确定一个黑色柱子在图像中矩形区域。在对识别出的标志柱量测时,通常利用其直径,也就是该矩形区域的宽作为计算依据。原因在于标志柱形状为圆柱形,其水平方向上的特征在图像中基本不变<sup>[2,3]</sup>。

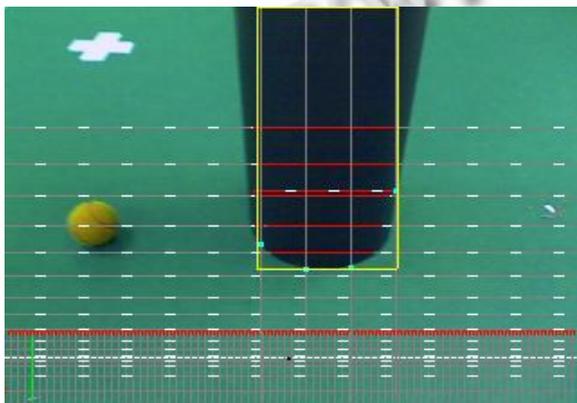


图 1 标志柱的识别过程

这种方法应用在 3v3 比赛中定位标志柱时十分有效,输出的距离与角度与实际测量值偏差相对较小。但是由于环境的差异,上述方法有着十分明显的技术缺陷。我们尝试利用视觉信息指导机器人完成挑战赛中的壁障比赛,却发现视觉的输出信息极不准确,主要体现在标志柱的距离以及与机器人所成的方位角的数值上。这样的结果导致我们几乎无法利用视觉输出信息指导机器人的决策。

分析以上现有的实验结果,最主要的原因是这种方法对距离有特殊要求。上述识别方法的核心是提取图像中柱子的矩形边框,再根据矩形的宽度和中心分别计算距离和所成角度。在 3v3 比赛中机器人在场内而定位标志柱在场外,这时机器人和柱子间距多数情况都比较大,柱子在图像中的轮廓更加近似于矩形,

有利于上述的方法进行识别。

相反,在避障比赛过程中,机器人大部分时间距离黑色柱子比较近。如同样应用上述方法,可能出现以下问题影响到识别结果:

1) 摄像头近距离观察柱子取得的图像有可能发生畸变。如果摄像头角度有偏差,得到的柱子图像是上大下小的。

2) 近距离时摄像头可能很难看到完整的柱子,往往只是其中的局部。

3) 当摄像头观察到前后放置的两个柱子重叠在一起时,这种算法并不能区分二者,而是算作一个柱子,导致距离计算误差。

### 3 利用椭圆拟合的标志柱识别

由上,对于相对近距离的圆柱体,不能采用原先的方法。新思路是借助圆柱体与水平地面交接处的信息来帮助识别柱体。这种想法来源于将机器人的视觉系统与入眼的简单比较。

众所周知,人眼能够对物体进行相对准确定位得益于人眼是双目视觉系统,能够从双眼中两幅不同图像中的差异获取定位信息。然而,THHRP-4 机器人上只装配了一个摄像头,就为定位带来了困难。对于单目视觉系统,我们有两种方法来尽可能获取定位信息,一是利用图像中物体图像的大小与实际物体大小的比例;二是利用现有的知识,先确定物体在三维空间中一个维度上的位置,再利用图像信息计算在另外两个维度构成平面中的位置。

根据上述的道理,为了方便对圆柱体进行定位,可先将其一个方向上的已知位置固定下来,同样选择在 Z 方向为零点,也就是地面。于是对圆柱体的相对位置的计算就可以以圆柱体与地面交线位置的信息作为依据。

根据立体几何知识,摄像头观测到圆柱体与地面的交线应该是椭圆的一段弧。利用椭圆的长轴长度可以计算柱体相对于机器人的距离,根据椭圆的中心坐标可估算所成角度。

具体的算法实现如下:

#### 3.1 扫描线生成(Scan)

机器人视觉图像的分辨率为  $320 \times 240$ 。首先进行竖直扫描。扫描间距的初始值为固定数值个像素(30)。如果上一条扫描到了黑色点,则扫描间距缩

小原来的 1.5 倍, 但不小于 10; 否则将间距扩大到原来的 2 倍, 但不大于 40。这样做的目的是尽可能多地扫描柱子有效部分, 避免关注其他非柱子部分。

### 3.2 沿扫描线逐点扫描判断颜色(scan for desired colors)

由于黑色的亮度很小, 从而比较 Y 是否小于设定阈值, 如果是, 则继续判断 UV 值在色表中是否符合要求。从而为 bool 变量赋值记录该点是否为黑色。

接着判断是否是一段连续的黑色线段 (Black Run), 并且将符合要求的线段 (Run) 利用加入一个特征集合。

### 3.3 排除噪点, 合并同一条特征线段 (add black feature)

首先判断后加入的线段与前一个是否是条扫描线上中断的两段 (有距离条件), 如是则合二为一。如不是则计数器加一, 表示特征数加一。然后更新最长的特征线段的长度。

### 3.4 图像中的坐标变换 (cluster beacon part)

先对已有的特征线段 (Features) 做旋转变换: 将扫描线的上端平移到原点, 旋转, 平移回原来位置。保证变换后的线段起点与终点 x 坐标基本相同。这样做的目的是为了之后的边界点提取做好准备。

### 3.5 提取边界点 (extract bottom edge)

找到各特征线段终点的位置为边界点。由于图像中的柱子存在上大下小的畸变, 边界点的位置不一定是此交线上的。考察相邻的边界点连线与水平线的夹角, 即连线的斜率。交线上的边缘点位于柱子底部, 相邻点连线与水平线夹角较小。利用这一特征筛选出位于底部交线上的边界点。

### 3.6 拟合椭圆 (ellipse fitting)

利用直接最小二乘法对已提取处的交线边界点拟合为椭圆交线。直接最小二乘法具体算法以及推导见文献[4]。这里简述如下:

椭圆用平面二次曲线的一般方程可表示为:

$$F(\mathbf{a}, \mathbf{x}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x} = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (1)$$

其中  $\mathbf{a} = [a, b, c, d, e, f]^T$ ,  $\mathbf{x}_i = [x_i^2, x_i y_i, y_i^2, x_i, y_i, 1]^T$ 。 $F(\mathbf{a}, \mathbf{x})$  称为平面上点  $(x_i, y_i)$  到曲线  $F(\mathbf{a}, \mathbf{x}) = 0$  的代数距离, 即可通过求解所有点的最小代数距离平方和的方法求解出相应的二次曲线。对于 N 点的观测数据, 数学准则为:

$$D_{\min}(\mathbf{a}) = \sum F(\mathbf{x}_i)^2 \quad (2)$$

按照上述准则, 若所有测定点均处在二次曲线上, 则应满足二次曲线的一般方程。对不满足方程的量作最小二乘拟合, 列出各点的误差方程组成法方程求解, 迭代至收敛即可得到系数  $\mathbf{a} = [a, b, c, d, e, f]^T$ 。求得上述系数后, 按照解析几何中的知识求得椭圆的中心点坐标、长、短半轴和旋转角。

为了保证避免零解  $\mathbf{a} = \mathbf{0}$ , 以及任何多重解  $\mathbf{a}$  表示的应是同一个二次曲线, 需对向量  $\mathbf{a}$  设定一些限制。式(1)中须限定  $b^2 - 4ac < 0$  才能保证拟合的结果为椭圆, 否则拟合结果有可能是抛物线或者双曲线的某一支。

根据 Bookstein 在文献[5]中的解释, 最值问题(2)可由下面的一个广义特征值系统解决

$$D^T D \mathbf{a} = \lambda C \mathbf{a}$$

其中  $D = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_i]^T$  称为设计矩阵, 而矩阵 C 则是对  $\mathbf{a}$  的限制。于是最值问题为

$$E_{\min} = \| D \mathbf{a} \|^2 \quad (3)$$

$$b^2 - 4ac < 0 \quad (4)$$

(3)式为最值目标, 同时引入了二次曲线的参数限制条件(4)作为图形限定条件, 既提高拟合精度, 也能保证拟合结果一定为椭圆。根据 Kuhn-Tucker 条件[4], 引入等式限制条件  $b^2 - 4ac = -1$ , 其矩阵形式表达为:

$$\mathbf{a}^T C \mathbf{a} = 1 \quad (5)$$

其中:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

引入 Lagrange 算子  $\lambda$ , 令  $S = D^T D$ , 并求导得:

$$S \mathbf{a} = \lambda C \mathbf{a}$$

对于上式, 可按广义特征值和特征向量的方法求解出 6 组特征值  $\lambda_i$  和对应的  $\mathbf{u}_i$ 。条件限制矩阵 C 特征值为  $\{-2, -1, 2, 0, 0, 0\}$ , 仅一个特征值为正。根据证明, 仅有唯一的广义特征值  $\lambda \in \mathbf{R}^+$  和广义特征向量  $\mathbf{u}$  作为椭圆拟合解。对于任意  $k \in \mathbf{R}^+$  而言, 应使  $(\lambda, k\mathbf{u})$  满足式(5), 即  $k^2 \mathbf{u}^T C \mathbf{u} = 1$ , 则:

$$k = \sqrt{\frac{1}{\mathbf{u}^T C \mathbf{u}}} = \sqrt{\frac{1}{\mathbf{u}^T S \mathbf{u}}}$$

唯一解:

$$a = ku$$

这样可以得到椭圆的长轴长、短轴长以及椭圆中心位置以及椭圆的偏转角度。由这几个量可确定一个椭圆的外切矩形，显示如图 2。

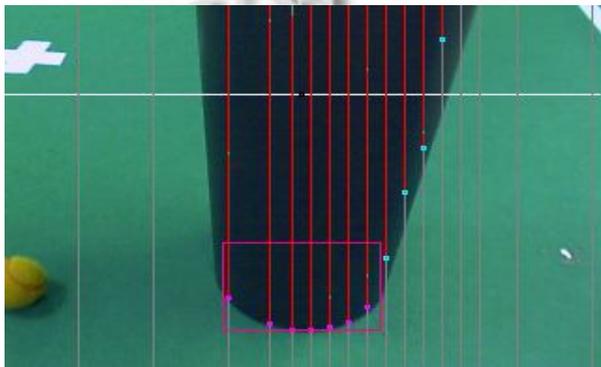


图 2 利用新方案对柱体识别结果

#### 4 实验结果与结论

新方法应用在机器人上进行视觉实验，对于 1.5m 内的纯黑色标志柱的识别情况明显好于原有的方法。但是对于 1.5m 到 2.5m 的目标识别效果与原有方法相近，对于 2.5m 外的目标基本上不能使用此方法。因为远距离的目标在图像中尺寸较

小，无法获得足够的边界点进行拟合，另外远距离的圆柱与地面交界部分在图像中几乎为直线，椭圆拟合精度下降，识别结果差。所以可以根据比赛情况和机器人的定位信息确定机器人与圆柱的距离，根据距离的远近选择识别方法。

#### 参考文献

- 1 Zhao M, Shi Z, Chen X, Lin H, et al. Tsinghua Hephaestus RoboCup 2008 Team Description. 2008. <http://www.au.tsinghua.edu.cn/jgsz/robot/doc/thuhephaestustechreport2008.pdf>.
  - 2 Röfer T, Laue T, Weber W, et al. Germanteam RoboCup 2005. 2005. <http://www.germanteam.org/GT2005.pdf>.
  - 3 Whaite D, Sammut C, Uther W. Team report of rUNSWift2005. 2005. <http://www.cse.unsw.edu.au/~robocup/2005site/reports05>.
  - 4 Fitzgibbon A, Pilu M, Fisher RB. Direct Least Square Fitting of Ellipses. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999.
  - 5 Bookstein FL. Fitting Conic Sections to Scattered Data. Computer Graphics and Image Processing, 1979, (9):
- 中国科学院软件研究所 <http://www.c-s-a.org.cn>