

# 基于计算机视觉原理的自主足球机器人位置规划\*

屠运武, 张培仁, 张志坚

(中国科学技术大学 自动化系, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 在计算机视觉原理的基础上, 本文提出了一种求取从视平面坐标到实际坐标转换矩阵的算法。根据机器人及足球在视平面上的坐标, 即可计算出其实际坐标。运用于自主足球机器人比赛中, 可获取本方、对方及足球的位置和角度, 为制定比赛策略提供重要的数据。

**关键词:** 视平面; 坐标; 足球机器人

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A

## 1 概述

机器人足球大赛是近年来国内外发展极快的一项高技术对抗运动。机器人足球系统需要多个机器人之间的协同合作, 它融合了多个领域的知识, 包括机器人、自动控制、机械学、通信、传感器、图像处理、视觉识别及人工智能等。视觉系统是整个机器人足球比赛的关键, 它是从 2D 投影中提取有用的帧信息, 根据所捕获的图像建立现实世界的模型, 进而产生控制输出。通过视觉系统确定本方、对方机器人和足球的位置和角度, 为比赛策略系统的接口信息。图像识别的效果和速度直接关系到比赛的胜负。

计算机视觉系统是目前人工智能研究最重要的工具, 也是自主足球机器人的主要研究内容之一。其内容包括根据一幅或多幅视平面图像计算出视点目标到目标物体的距离、目标物体的运动参数、以及目标物体的表面特性等。比赛时球场及一些规划线的距离及相对位置是固定的, 而机器人和足球则不停地运动, 具有自主功能的足球机器人如何根据自带的微型摄像拍摄的图像进行分析, 得到有关参数是控制和决策成功的关键。在引入了计算机视觉系统后, 该问题就变成了根据视平面上某些参考点的坐标, 通过分析已知条件, 建立相应的数学模型, 求出空间平面(足球场所在的平面)上运动点(足球及机器人)的坐标参数。

## 2 空间坐标系

### 2.1 空间坐标的几何关系

在左手系的三维笛卡尔坐标系中, 取 OXYZ 为成正实像的投影变换坐标系, 即将视平面的位置与光心(空间坐标系的原点)的位置对调。得到空间坐标系如图 1 所示:

视平面上点  $P'(x, y)$  与空间对应的点  $P(x, y, z)$  之间的关系

如下: 
$$x = f \frac{X}{Z}; \quad y = f \frac{Y}{Z} \quad (1)$$

其中  $f$  为摄像机光心到视平面之间的距离, 通常为已知定值。如果空间的点  $P(x, y, z)$  所在的平面的方程为  $Z = pX + qY + r$ , 其中  $\{p, q\}$  为平面的斜率,  $r$  为光心沿  $Z$  轴到空间平面的距离。则点  $P(x, y, z)$  与视平面上对应点的坐标关系满足下式:

$$X = \frac{rx}{f - px - qy}; \quad Y = \frac{ry}{f - px - qy}; \quad Z = \frac{rf}{f - px - qy} \quad (2)$$

根据式 (2), 只要知道空间平面方程中三个参数  $p$ 、 $q$ 、 $r$ , 那么该平面上点的坐标就可根据其

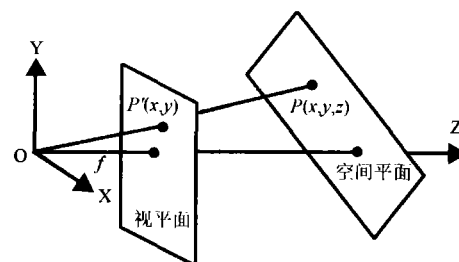


图 1 空间坐标系

\* 收稿日期: 2002-12-11 修订日期: 2003-08-25

视平面上对应的坐标计算出来。在足球比赛时，机器人的摄像机（视平面）存在平移和旋转两个运动，位置经常发生变化，参数  $p$ 、 $q$ 、 $r$  无法直接求出来。但可以根据空间平面上的已知点运用本文提出的算法间接地加以求出。

## 2.2 固定参考点的选取及相对位置

在球场平面上任取四个不共线且位置固定的点，根据它们之间的相对位置计算空间平面的参数。为了计算方便可选取的 4 个点为一矩形（如小禁区）的四个顶点，如图 2 所示的  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  和  $M_4$ 。

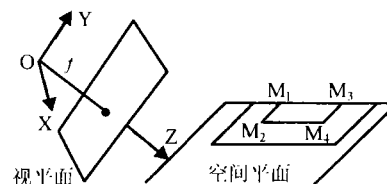


图2 空间点的选取

如果选不到这 4 个点（如机器人摄像机不是对着球门区附近）则可选另外 4 个点，只要它们

表1 坐标参数

空间点	视平面坐标	空间坐标
$M_1$	$(x_1, y_1)$	$(X_1, Y_1, Z_1)$
$M_2$	$(x_2, y_2)$	$(X_2, Y_2, Z_2)$
$M_3$	$(x_3, y_3)$	$(X_3, Y_3, Z_3)$
$M_4$	$(x_4, y_4)$	$(X_4, Y_4, Z_4)$

之间的相对位置确定，就可用平面几何的方法求出它们之间的距离和夹角，此时 4 个向量的矢量积不为 0，具体计算可参考文献 [5]。有关参数见表 1 和表 2。

表 1 中  $(x_i, y_i)$  为点  $M_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 在视平面上的坐标，可看成是已知的，另外  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  的大小也是确定的。在实际

应用中可选取多组参考点，通过离线计算制成表格，然后由 CPU 采用查表的方法获得。

表2 相对位置和距离

	$M_1M_2$	$M_1M_3$	$M_1M_4$	$M_2M_3$	$M_2M_4$	$M_3M_4$
距离	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_3$	$L_2$	$L_1$
垂直角	$M_1M_3$	$M_1M_4$			$M_2M_1$	$M_4M_2$

## 3 数学模型的建立

### 3.1 坐标参数的求解

根据空间中两点间的距离公式可得到下列方程组：

$$M_1M_2: (X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2 = L_1^2.$$

$$\text{将变换后 (2) 式代入得: } (x_1y_2y_1 - x_2y_1Y_2)^2 + y_1^2y_2^2(Y_1 - Y_2)^2 + (fy_2Y_1 - fy_1Y_2)^2 = L_1^2y_1^2y_2^2, \text{ 将} \quad (3)$$

$$\text{同理可得 } M_1M_3: A_3Y_1^2 + A_4Y_3^2 - 2B_2Y_1Y_3 = C_2 \quad (4)$$

$$M_1M_4: A_5Y_1^2 + A_6Y_4^2 - 2B_3Y_1Y_4 = C_3 \quad (5)$$

$$M_2M_3: A_7Y_2^2 + A_8Y_3^2 - 2B_4Y_2Y_3 = C_4 \quad (6)$$

以上 4 个方程含有 4 个未知数： $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ 、 $Y_4$ ，理论上可以求出其解，但这是一个四元二次非线性方程组，实际上无法求出。为此必须寻求其它解决办法。再导出其它两点间的距离：

$$M_2M_4: A_9Y_2^2 + A_{10}Y_4^2 - 2B_5Y_2Y_4 = C_5 \quad (7)$$

$$M_4M_3: Y_4^2 + A_{12}Y_3^2 - 2B_6Y_4Y_3 = C_6 \quad (8)$$

$$\text{令: } Y = (Y_1^2, Y_2^2, Y_3^2, Y_4^2)^T, \quad Y^* = (Y_1Y_2, Y_1Y_3, Y_1Y_4, Y_2Y_3, Y_2Y_4, Y_3Y_4)^T,$$

$$\text{整理 (3) ~ (8) 式后写成矩阵形式如下: } AY - 2BY^* = C \quad (9)$$

为了消去  $Y_iY_j$  ( $i, j=1, 2, 3, 4$ ) 项，还应引入空间两向量的向量积。由于选取的四个参考点为矩形的四个顶点故它们所形成的 4 个向量相互垂直。空间中两互相垂直的向量其向量积为 0，因此可得出下列方程组：

$$M_1M_2 \perp M_1M_3: (X_1 - X_2) \times (X_1 - X_3) + (Y_1 - Y_2) \times (Y_1 - Y_3) + (Z_1 - Z_2) \times (Z_1 - Z_3) = 0$$

$$\text{将变换后 2 式代入得: } (x_1y_2y_3Y_1 - x_2y_1y_3Y_2)(x_1y_2y_3Y_1 - x_3y_1y_2Y_3) + y_1y_2y_3(Y_1 - Y_2)(Y_1 - Y_3) + (fy_2y_3Y_1 - fy_1y_3Y_2)(fy_2y_3Y_1 - fy_1y_2Y_3) = 0$$

$$\text{展开后整理得: } D_1Y_1^2 + E_1Y_2Y_3 + E_2Y_1Y_2 + E_3Y_1Y_3 = 0 \quad (10)$$

$$\text{同理可得 } M_4M_2 \perp M_4M_3: D_2Y_4^2 + E_4Y_2Y_3 + E_5Y_4Y_2 + E_6Y_4Y_3 = 0 \quad (11)$$

$$M_3M_1 \perp M_3M_4: D_3Y_3^2 + E_7Y_1Y_4 + E_8Y_1Y_3 + E_9Y_3Y_4 = 0 \quad (12)$$

$$M_2M_1 \perp M_2M_4: D_4Y_2^2 + E_{10}Y_1Y_4 + E_{11}Y_1Y_2 + E_{12}Y_2Y_4 = 0 \quad (13)$$

$$\text{整理式 (10) ~ (13) 后有如下矩阵形式: } DY + EY^* = 0 \quad (14)$$

由式(9)得:  $Y^* = 1/2 \times (B^{-1}AY - B^{-1}C)$ , 代入 14 得:  $(2D + EB^{-1}A)Y = EB^{-1}C$ , 则:

$$Y = (2D + EB^{-1}A)^{-1} EB^{-1}C \quad (15)$$

通过求解系数变换矩阵  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  可求出  $Y$  再由 1 式求得  $X$  和  $Z$ , 取任一组  $\{X_1, Y_1, Z_1\}$  和  $\{x_1, y_1, z_1\}$  带入 16 式可求出空间平面的 3 个参数  $\{p, q\}$  和  $r$ 。

$$\begin{bmatrix} x & xX & yX \\ y & xY & yY \\ f & xZ & yZ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ p \\ q \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (16)$$

### 3.2 系数矩阵的满秩问题

为了使得视平面上的点与空间平面上的点一一对应, 即方程 15 有唯一解, 要求在作矩阵变换中必须保证  $B$  以及  $(2D + EB^{-1}A)$  为满秩。换句话说, 视平面上点与空间平面上点一一对应和上述两矩阵满秩互为充分必要条件, 反之, 若变换矩阵不满秩则说明视平面上的一点对应于空间平面无数点, 而这种情况当且仅当空间平面平行于  $Z$  轴且通过光心, 即  $r$  为 0, 此时空间平面在视平面上被映射成一条直线, 而这种情况在实际中是不可能发生的。因此在 3.1 中的所描述的系数矩阵及它们的代数运算后的矩阵均可认为是满秩。

坐标参数的计算机算法流程如图 3 所示。

### 3.3 主令机器人及误差校正

- 1) 截取原始图像;
- 2) 二值化处理, 提取空间平面图像的边界, 四个参考点坐标, 计算  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$ ;
- 3) 判断是否相互垂直?  
如果是则转 5), 否则转 4);
- 4) 计算四向量夹角;
- 5) 求解  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  系数矩阵
- 6) 根据 (15) 式求出  $Y_1$ , (1) 式求  $X_1$ 、 $Z_1$ ,  
根据 (16) 式求解  $r$ 、 $p$ 、 $q$ ;
- 7) 提取机器人、足球的视平面坐标, 根据 (2) 式求出其实际坐标, 将数据送往主令机器人;
- 8) 采样下一幅图像。

图 3 算法流程图

实际中由于机器人的位置、角度的不同以及在二值化、边界的提取方面存在误差, 这些因素必须加以考虑。在全部参赛的机器人中指定一个作为主令机器人, 其除了完成基本的参数计算外, 还将其他机器人传送的数据进行处理。采用 Mamdani 加权推理法消去误差, 得到系统得输出坐标, 为策略系统提供可靠和真实的坐标参数。

设  $X_{ij}$  为第  $i$  个机器人对第  $j$  个目标测得  $X$  轴的计算坐标,  $n$  为参赛的本方机器人人数, 则系统的输出坐标  $X_j$ :

$$X_j = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(X_{ij}) \times X_{ij}}{\sum_{i=1}^n \mu(X_{ij})} \quad (17)$$

式中  $\mu(X_{ij})$  为第  $i$  个机器人在本次采样  $X$  轴计算中的动态偏差加权系数, 求取方法如下:

$$\mu(X_{ij}) = 1 - \frac{|\bar{X}_j - X_{ij}|}{X_{j\max} - \bar{X}_j} \quad \text{其中: } X_{j\max} = \max\{X_{ij}, i=1, 2, \dots, n\}, \bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (18)$$

采用动态偏差的方法, 可以根据每次计算得到数据对加权系数进行调整, 因而更具合理性。同理可求出另外两个坐标, 这些坐标称为输出坐标, 作为系统的决策、行为以及路径规划的重要参数。

### 3.4 算法仿真

为了验证算法的合理性, 对其进行系统仿真。设目标物体位置保持不变, 图象的采样时间为 0.1 秒, 得到坐标的相对值和时间关系的仿真曲线如图 4 所示。图中①为目标物体的固定坐标, ②为一从机器人的计算值, ③为经主令机器人误差校正后的输出值, 可以看出其平均误差小于 4%。实际上, 由于目标物体的大小和形状的不同, 误差有所增加。经过实际测试 8% 以内的误差对于系统的决策来说是允许的。

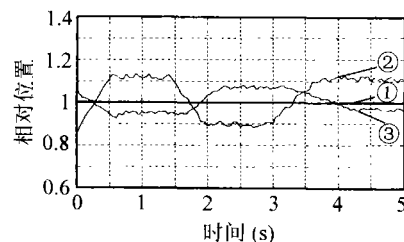


图 4 系统仿真曲线

## 4 结语

目前, 国际上比较有影响和流行的足球机器人比赛有韩国学者发起的“微型机器人世界杯足球赛 (Mirobot)”和日本人工智能研究会发起的“机器人世界杯足球赛 (RoboCup)”两项。基本上是由摄像机和计算机构成的集控式机器人比赛。而具有全自主功能的足球机器人的比赛包括了多项复杂技术。本文提出的基于计算机视觉原理构成的目标参数坐标计算的算法完全不同于以往利用超声定位对环境进行识别, 利用图像对宏观位置跟踪, 进行网格搜索, 获取目标物体内一点以及利用区域投影, 对目标物体定位等方法。只要用文中提出的算法, 求出任意时刻表征目标物体之间关系的动态参数  $\{p, q\}$  和  $r$ , 就可以实时地得到足球、本方及对方机器人在球场平面上的实际坐标。在决策系统允许的情况下, 图像的采样时间可以很短, 因而不像网格搜索法中存在时间上的盲区 (如场地空白区域)。全部由自主机器人参加的足球比赛将把比赛带入一个更高的层次, 随着 32 位兆赫级基于 linux 内核的嵌入式 CPU 的推广和应用, 研制全自主式足球机器人已成为可能。中国科学技术大学已组织技术力量进行研制和设计工作, 目前已取得了阶段性成果。

## 参考文献:

- [1] 高文, 陈熙霖. 计算机视觉—算法与系统原理 [M]. 第一版, 北京: 清华大学出版社、广西科学技术出版社, 1999-02, 20-58.
- [2] Hearn Donald, Baker M Pauline. 计算机图形学 [M]. 第一版, 北京: 电子工业出版社, 1998-04, 8-120.
- [3] Castleman Kenneth R. Digital Image Processing [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998-04, 16-73.
- [4] 洪炳熔. 基于视觉的足球机器人系统 [J]. 计算机应用研究, 2001, (1).
- [5] 杨文茂, 李全英. 空间解析几何 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997-01, 6-63.
- [6] 张培强. MATLAB 语言 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995-11, 62-75.

**作者简介:** 屠运武, 男, 博士研究生, 研究方向为模式识别与智能系统; 张培仁, 男, 教授, 博导, 中国科学技术大学 CCTV 足球机器人比赛指导教师。

## Path Planning of Autonomous Soccer Robots Based on the Principle of Computer Vision

TU Yun-wu, ZHANG Pei-ren, ZHANG Zhi-jian

(Automation Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Based on the principle of computer vision, this paper presents a matrix algorithm for the coordinate transformation from visual plane to geographical plane. Using this algorithm to the robot soccer match, geographical coordinates of the ball and robot players of either self team or the opponent team can be calculated from the their visual plane coordinates as to obtain the important data for making competition strategies to win the game.

**Key words:** visual plane; coordinate; soccer robot