

# 足球机器人全局视觉系统的快速标定方法

李奎<sup>1</sup>, 陈华<sup>2</sup>, 王婷婷<sup>1</sup>, 刘波<sup>1</sup>

(1. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022;

2. 河海大学 理学院, 南京 210098)

**摘要:** 足球机器人全局视觉系统为决策系统提供机器人位姿信息, 决策系统进行机器人的路径和动作规划; 竞赛规则要求视觉系统必须现场安装调试, 因此标定过程必须快速有效, 且具有较高的精度; 针对足球机器人全局视觉系统的特殊应用场景, 提出了一种基于两步法简化标定模型的快速有效标定算法; 利用近似欧拉角旋转矩阵建立摄像机标定模型, 确定需要求取的摄像机内外参数, 根据标定模型, 对内外参数的求解过程进行了推导; 借助场地上现有的一些标志点作为靶标, 对模型的内外参数进行分步求取初始值, 并利用 L-M 优化算法对摄像机内外参数进行分步优化求取精确值; 通过实验分别从标定误差和机器人动作实现效率两个方面与其他标定算法进行对比, 验证了该算法具有较高的标定精度; 实验表明, 本算法的优点在于不用借助专门的标定靶标, 即可快速有效完成相机标定, 标定精度可达±1 mm, 完全能够满足决策系统的控制精度要求, 且标定过程简单易实现。

**关键词:** 足球机器人; 全局视觉系统; 相机标定; 两步法简化标定模型; L-M 优化

## Fast Calibration Method Applied in Global Vision System of Soccer Robot

LI Kui<sup>1</sup>, CHEN Hua<sup>2</sup>, WANG Tingting<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. College of Science, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The global vision system of soccer robots can provide robot posture information for strategy system, which will plan moving path and action for robots. According to match rules, vision system must be installed and tested in field, which requires a fast calibration process with higher precision. For special application in global vision system of soccer robots, a fast and effective calibration algorithm was proposed based on two-stage simplified calibration model. The approximate Euler rotating matrix was used to build the camera calibration model with the intrinsic and extrinsic parameters to be achieved, and the solving process of parameters was derived according to the calibration model. Some mark points on the field were used as reference targets to obtain the initial value of parameters step by step, and the L-M method was adopted to optimize all the parameters step by step. Compared with other calibration methods from two aspects of calibration error and robot movement realization, the proposed algorithm verified the high calibration precision by experiments, respectively. Experimental results show that this algorithm easily and effectively realizes the calibration precision of 1 mm without special reference target, which can completely meet the requirement of control precision for the strategy system, and it is simple and easy for the calibration process to implement.

**Keywords:** soccer robot; global vision system; camera calibration; two-stage simplified calibration model; L-M optimization

## 0 引言

足球机器人系统一直是机器人研究的热门领域, 根据其视觉系统的形式不同, 可分为全局视觉系统和独立视觉系统两类。全局视觉系统采用单一或组合的相机安装于场地中心的正上方, 从而完成计算机对整个场地图像的采集, 根据相关处理算法, 视觉系统对场地上的机器人等所有目标体进行识别, 并获得所有目标体在场地上的实际位姿信息, 以便提供给机器人决策系统, 因此, 称之为全局视觉系统。决策系统根据机器人相关位姿信息完成路径规划等一系列决策, 最后控制各个机器人完成相应基本动作。

视觉标定是机器人能够感知周围环境、完成各种任务的首要前提。因此, 足球机器人视觉系统标定是视觉处理

获取目标位姿信息的前提条件, 目前视觉标定常用的方法可以分为 3 类: 传统的两步标定法<sup>[1-2]</sup>、摄像机自标定方法<sup>[3-6]</sup>和基于主动视觉<sup>[7-9]</sup>的标定方法。其中, 传统两步法对标定靶标的制作精度要求较高<sup>[10-11]</sup>, 且需要多角度拍摄多张标定靶标图像, 从而可以获得较高的标定精度, 如文献 [12] 利用 Matlab 自带的 Camera Calibration 完成相机标定, 用来检测人防门的位置和转过的角度。文献 [13] 采用张正友标定方法完成机场服务机器人的视觉标定。这些方法均需要借助辅助标定板以及专门软件工具箱进行计算, 且标定板图像拍摄的数量以及与相机的位置关系都有严格要求, 否则就会导致标定模型无解, 标定过程较为复杂, 费时费力, 不适用于需要快速标定以及无标定靶标的

收稿日期: 2023-06-02; 修回日期: 2023-07-02。

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK20201159)。

作者简介: 李奎(1982-), 男, 硕士, 讲师。

引用格式: 李奎, 陈华, 王婷婷, 等. 足球机器人全局视觉系统的快速标定方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 224-229.

场合。摄像机自标定方法利用图像之间的非线性约束, 使得标定在场景未知和摄像机任意运动的情形下成为可能, 本质上这也是由于摄像机内参数自身存在的约束所致。基于主动视觉的标定方法要求摄像机做某些特殊运动, 如纯平移运动, 利用这种特殊运动关系可以求解摄像机的内参数。上述 3 类标定方法均在不同场合得以应用。

目前, 国内外很多学者针对不同的足球机器人开展视觉系统标定的相关研究, 针对足球机器人的全局视觉系统, 文献 [14] 采用分段线性模型, 选取  $n$  个特征点, 建立  $2n$  个方程求解计算参数矩阵。文献 [15] 介绍了利用多项式来表示图像的非线性几何畸变, 根据特征点的畸变坐标和理论坐标建立方程组, 采用最小二乘法求解多项式的各项参数, 完成标定过程。文献 [16] 利用神经网络拟合图像和实际场地之间的对应关系。文献 [17] 利用两步法完成了大场地集控式足球机器人视觉系统的标定, 两步法从相机成像模型出发, 标定精度较高。针对自主式足球机器人视觉系统, TONG Chunyu 等<sup>[18]</sup> 利用小波变换完成了具有异构双目视觉的足球机器人视觉系统标定和信息融合, 并对球的运行轨迹进行三维重建。Tsornng-Lin Chia 等<sup>[19]</sup> 设计了一种线性全景凸透镜用以反射周围环境, 从而构成了足球机器人的全局视觉系统, 且目标在图像的位置和场地中的实际位置成线性关系, 大大简化了标定过程。SHU-YIN CHIANG 等<sup>[20]</sup> 针对人形足球机器人利用场地栅格点完成人形足球机器人视觉系统的标定, 从而根据步态计数和图像处理完成自定位以及障碍物距离估计。

分段线性标定和多项式、神经网络数等数值拟合标定方法并未从摄像机本身成像模型考虑, 标定误差较大。传统的标定方法虽然可以获得较高的标定精度, 但其标定模型和求解过程复杂程度高, 且标定时需要利用高精度的标定靶板并经过相关算法 (Harris 角点检测, 最小二乘法直线拟合求交点, 基于 Hough 变换的圆拟合求圆形坐标等) 获取参考点的图像像素坐标, 因此不能满足足球机器人视觉系统快速标定的要求, 由于机器人视觉系统具有安装调试时间有限, 经常需要更换场地以及比赛过程中可能需要重新标定等诸多特点, 显然传统标定方法无法适用于足球机器人视觉系统。因此, 需要在满足系统要求的精度下尽可能简化标定操作步骤和计算过程, 使得整个标定过程快速有效完成。本文在相机成像模型的基础上, 对成像模型进行简化, 从而达到减少计算量, 简化标定过程的目的, 并能够满足视觉系统标定的精度要求。

### 1 简化标定模型建立

如图 1 所示, 足球机器人全局视觉系统中, 摄像头以固定视点的方式对场地进行监控, 实时获取场地中机器人的位姿信息, 为决策系统提供数据支持以便能够采取最优的处理策略, 因此视觉标定是必不可少的前提工作。

摄像机通过成像透镜将三维场景投影到摄像机二维像平面上, 这个投影可用成像变换描述, 即摄像机成像模型,



图 1 足球机器人全局视觉系统

摄像机成像几何关系可用图 2 表示, 其中,  $X_c Y_c Z_c - O_c$  为摄像机坐标系,  $X_w Y_w Z_w - O_w$  是世界坐标系,  $uv - O_0$  是图像像素坐标系,  $XY - O_1$  是 CCD 靶面物理坐标系。标定参考点坐标定义在世界坐标系中, 最终要通过相机坐标系建立起世界坐标系和图像像素坐标系之间的对应关系, 其中, 图像像素坐标是指计算机获取图像后在内存中的坐标表示, 单位为像素, 坐标系原点通常在图像的左上角, 本文中用  $(X_f, Y_f)$  表示, 也有的文献中称为图像帧坐标。CCD 靶面物理坐标表示的是对应的图像像素点在 CCD 靶面物理元件上的坐标表示, 单位为 mm, 理想靶面坐标和畸变靶面坐标分别用  $(X_u, Y_u)$  和  $(X_d, Y_d)$  表示。图像像素坐标和靶面物理坐标存在着一定的转换关系。在图 2 所示的摄像机成像模型中, 空间物点从世界坐标系到摄像机坐标系存在如式 (1) 所示的映射关系:

$$P_c = RP_w + T \tag{1}$$

式 (1) 中  $R$  旋转矩阵一般为  $3 \times 3$  矩阵, 其元素为  $r_1$  至  $r_9$ , 考虑到求解的复杂性, 此旋转矩阵采用欧拉角  $R_x, R_y, R_z$  表示, 此时旋转可表示为式 (2)。  $T$  为平移矩阵, 其 3 个平移分量为  $T_x, T_y, T_z$ 。

$$R = \begin{bmatrix} cR_z cR_y & sR_z cR_y & -sR_y \\ -sR_z cR_x + cR_z sR_y sR_x & cR_z cR_x + sR_z sR_y sR_x & cR_y sR_x \\ sR_z sR_x + cR_z sR_y cR_x & -cR_z sR_x + sR_z sR_y cR_x & cR_y cR_x \end{bmatrix} \tag{2}$$

式 (2) 中  $s = \sin, c = \cos$ , 考虑到足球机器人全局视觉系统中, 摄像机竖直安装在场地正上方, 其光轴与场地平面近似垂直, 即成像平面和场地平面近似平行, 所以  $R_x \approx$

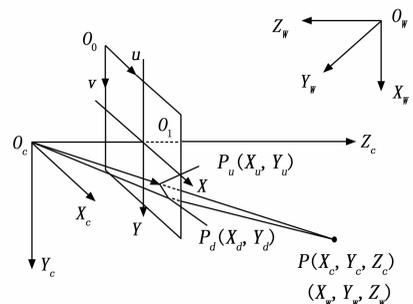


图 2 摄像机成像模型

0,  $R_y \approx 0$ , 因此, 对旋转矩阵进行近似处理, 在旋转矩阵第一行表达式中,  $\cos R_y \approx 1, \sin R_y \approx R_y$ , 第二行表达式中  $\cos R_x \approx 1, \cos R_y \approx 1, \sin R_y \approx 0, \sin R_x \approx R_x$ , 第三行表达式中  $\cos R_y \approx 1, \cos R_x \approx 1, \sin R_y \approx R_y, \sin R_x \approx R_x$ , 旋转矩阵可简化表示为式 (3)。

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} \cos R_z & \sin R_z & -R_y \\ -\sin R_z & \cos R_z & R_x \\ R_x \sin R_z + R_y \cos R_z & -R_x \cos R_z + R_y \sin R_z & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

此映射关系中共包含 6 个参数  $R_x, R_y, R_z, T_x, T_y, T_z$  需要求解, 称之为摄像机外部参数。

相机成像可以看成是小孔成像的透视投射, 根据其几何关系, 相机坐标和理想靶面坐标存在如下关系:

$$\begin{cases} X_u = f \frac{X_c}{Z_c} \\ Y_u = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (4)$$

由于图像存在畸变, 理想靶面坐标和畸变靶面坐标存在一定的变换关系, 通常图像畸变有径向畸变和切向畸变两种, 每种畸变都可用一个无限序列式进行表示, 在相机标定中只需考虑径向畸变, 忽略切向畸变, 且径向畸变表示式中只取无限表达式中的第一项, 即二次项, 具体表达式为:

$$\begin{cases} D_x = X_d k_1 (X_d^2 + Y_d^2) \\ D_y = Y_d k_1 (X_d^2 + Y_d^2) \end{cases} \quad (5)$$

理想坐标和畸变坐标的关系可表示为:

$$\begin{cases} X_u = X_d + D_x \\ Y_u = Y_d + D_y \end{cases} \quad (6)$$

相机标定最终为了建立世界坐标系和图像坐标系之间的对应关系, 因为需要考虑靶面坐标和图像坐标的对应变换关系, 通常 CCD 感光元件的两个像元中心到中心的距离水平方向和竖直方向分别定义为  $d_x$  和  $d_y$ , 由于相机工作时图像获取硬件和扫描硬件之间存在时间差, 不能完全同步, 或者相机本身曝光时间的不准确性, 因此, 引入不确定图像尺度因子用来消除硬件的不确定因素, 本文只考虑图像 X 方向的不确定尺度因子  $s_x$ , 由于 Y 方向的不确定性可通过标定焦距值来进行融合, 因此, 不再单独设置 Y 方向的不确定尺度因子。

根据上述参数设置, 畸变靶面坐标和图像像素坐标之间的关系式可表示为:

$$\begin{cases} X_d = (X_f - C_x) d_x / s_x \\ Y_d = (Y_f - C_y) d_y \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $C_x, C_y$  为图像的中心坐标, 当相机进行最大分辨率采集时, 图像中心坐标即为分辨率的一半, 当相机进行 ROI 采集时, 需将  $C_x, C_y$  作为标定参数进行求解, 综合 (1) (3) (4) (5) (6) (7) 式可得图像坐标  $(X_f, Y_f)$  和世界坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)$  之间的对应转换关系, 具体表达式不再进行详细推导, 由此可得, 整个标定过程中除旋转和平移 6

个外部参数需要标定外, 还有 5 个参数需要求解, 分别是焦距  $f$ , 图像 X 方向不确定尺度因子  $s_x$ , 径向畸变系数  $k_1$ , 光轴与 CCD 成像平面的交点 (原点) 在图像坐标系中的像素坐标  $C_x, C_y$ , 称之为内部参数。

## 2 内外参数求解

相机标定参数求解需要一组参考点在自定义世界坐标系下的坐标, 如现在常用的棋盘格等标定板, 另外还有一些特殊场合使用的标定板, 如文献 [21] 对大型多阵列圆标定板的基准点进行坐标提取。由于足球机器人竞赛的特殊性, 需要在有限时间内快速完成标定, 因为本文标定不采用其他辅助标定板, 而是利用场地上一些标志点作为参考点, 定义场地的左上角为世界系原点, 选择场地上 16 个特殊位置点作为标定参考点, 因此, 这些参考点的世界坐标已知, 为实现快速标定, 图像像素坐标采用手动方式进行鼠标点选获取, 最终使得标定的精度能够满足决策系统的控制要求。

首先, 根据公式 (7) 可计算参考点的图像像素坐标对应的靶面畸变坐标, 其中,  $C_x, C_y$  初值设为图像分辨率的一半。对于相机的内外参数采取分步求取初始值, 并利用 LM 优化算法对摄像机内外参数进行分步优化, 最终得到所有参数的最优解。

### 2.1 $R_z, T_x, T_y$ 初值求解

本视觉系统中靶面与标定平面共面, 令标定参考点  $Z_w = 0$ , 则由 (1) 式得:

$$X_c = X_w \cos R_z + Y_w \sin R_z + T_x \quad (8)$$

$$Y_c = -X_w \sin R_z + Y_w \cos R_z + T_y \quad (9)$$

由 (8) ~ (9) 两式相比得:

$$\frac{X_w \cos R_z + Y_w \sin R_z + T_x}{-X_w \sin R_z + Y_w \cos R_z + T_y} = \frac{X_c}{Y_c} = \frac{X_d}{Y_d} \quad (10)$$

令  $x_1 = \cos R_z / T_x, x_2 = \sin R_z / T_x, x_3 = T_y / T_x$ , 则根据式 (10) 可得:

$$(X_d Y_w - Y_d X_w) x_1 - (X_d X_w + Y_d Y_w) x_2 + X_d x_3 = Y_d \quad (11)$$

其中:  $(X_w, Y_w)$  为参考点世界坐标系坐标,  $(X_d, Y_d)$  为参考点对应的 CCD 靶面畸变坐标, 且  $X_d = d_x (X_f - C_x) / s_x, Y_d = d_y (Y_f - C_y)$ ,  $s_x$  为不确定图像尺度因子, 令其初始值为 1.0,  $(X_f, Y_f)$  为参考点在图像坐标系中的像素坐标,  $d_x, d_y$  为 CCD 像元中心到中心的水平方向和竖直方向距离,  $(C_x, C_y)$  为图像中心点在图像坐标系中的像素坐标, 初值取图像分辨率的一半。当参考点个数大于 3 时, 利用最小二乘法的广义逆法可求得  $x_1, x_2, x_3$ , 则  $T_y = T_x x_3, R_z = \arctan(x_2 / x_1), T_x = \sin R_z / x_2 = \cos R_z / x_1$ 。

### 2.2 不确定图像尺度因子 $s_x$ 初始值求解

不确定尺度因子是由相机硬件导致的内参之一, 同一类相机具有近似相同的数值。文献 [1] 认为在参考点共面的情况下不需要求解, 直接将该参数设置为 1。本文标定场景下, 虽然参考点在同一平面, 但由于相机安装位置和角度存在较大随机性, 为了保证标定的精度, 本文仍对该参

数进行初值求解。

根据文献 [1] 中参考点共面和不共面两种情况, 将不确定图像尺度因子在引入共面标定中, 可得到以下关系式:

$$\begin{bmatrix} Y_d X_w \\ Y_d Y_w \\ Y_d \\ -X_d X_w \\ -X_d Y_w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} T_y^{-1} s_x r_1 \\ T_y^{-1} s_x r_2 \\ T_y^{-1} s_x T_x \\ T_y^{-1} r_4 \\ T_y^{-1} r_5 \end{bmatrix} = X_d \quad (12)$$

该方程式包含  $T_y^{-1} r_1, T_y^{-1} r_2, T_y^{-1} T_x, T_y^{-1} r_4, T_y^{-1} r_5$  共 5 个未知数, 利用求解线性最小二乘问题的广义逆法可求得。令  $r'_1 = T_y^{-1} s_x r_1, r'_2 = T_y^{-1} s_x r_2, r'_3 = T_y^{-1} s_x T_x, r'_4 = T_y^{-1} r_4, r'_5 = T_y^{-1} r_5$ , 则共平面情况下:

$$s_x = \sqrt{(r_1^{prime})^2 + (r_2^{prime})^2} \cdot |T_y| \quad (13)$$

### 2.3 焦距 $f$ 初值求解

利用理想的小孔成像原理构造有效焦距求解模型, 采用相似三角形较为容易地求解  $f$  的初值, 如图 3 所示, 建立有效焦距求解模型,  $ab$  表示 CCD 成像靶面的宽度,  $AB$  表示与  $ab$  对应的拍摄视场宽度,  $oh$  表示有效焦距  $f$ ,  $oH$  表示摄像机镜头中心到场地的垂直距离。根据相似关系  $\frac{f}{oH} = \frac{ab}{AB}$ , 求得有效焦距初始值  $f = \frac{ab}{AB} \cdot oH$  作为后续非线性优化的初始值。

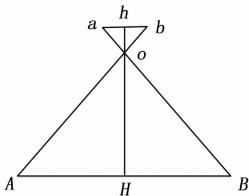


图 3 焦距初值求解示意图

### 2.4 $R_x, R_y, T_z$ 及 $k_1$ 初值求解

由式 (1) 式可得:

$$\begin{aligned} Z_c &= (R_x \sin R_z + R_y \cos R_z) X_w + \\ & (R_y \sin R_z - R_x \cos R_z) Y_w + T_z \end{aligned} \quad (14)$$

根据理想的小孔成像模型和径向畸变约束 (RAC):

$$Y_u = f \frac{Y_c}{Z_c} = \frac{Y_d}{1 + k_1 r^2} \quad (15)$$

式中,  $Y$  为 CCD 成像坐标系中无畸变的理想纵坐标值。将 (15) 式代入 (14) 式整理可得:

$$\begin{aligned} f Y_c &= Y_d (X_w \sin R_z - Y_w \cos R_z) R_x + \\ & Y_d (X_w \cos R_z + Y_w \sin R_z) R_y + Y_d T_z - f Y_c r^2 k_1 \end{aligned} \quad (16)$$

其中:  $r^2 = X_d^2 + Y_d^2, Y_c$  可由 (9) 式求得, 在忽略图像畸变的情况下, 令  $x_1 = R_x, x_2 = R_y, x_3 = T_z, x_4 = k_1$ , 求其初值。

### 2.5 参数优化

对于上述求得的参数大部分是在忽略图像畸变的情况下求得的初始值, 若是使用上述参数建立图像坐标和世界坐标的映射关系, 势必带来较大误差, 达不到摄像机标定

的目的。因此, 对于以上 11 个参数均需进行优化求精。

Levenberg-Marquardt 算法结合了高斯-牛顿法与梯度下降法的优点, 在靠近某个极小点时平方收敛, 具有高斯-牛顿法的局部快速收敛特性; 在远离解时则进行修正, 沿误差曲面进行搜索, 继承了梯度下降法的全局搜索特性。因此, 在不需过多的参数调整即能达到快速的收敛, 从而较好地修正训练参数。

对已求解的 11 个参数建立优化模型:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n (X_i - X_i^{prime})^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i^{prime})^2 \quad (17)$$

其中:  $x = (R_z, R_x, R_y, T_x, T_y, T_z, f, s_x, C_x, C_y, k_1), (X_i, Y_i)$  是参考点实际图像坐标系的坐标值转换为 CCD 成像平面的坐标值;  $(X_i^{prime}, Y_i^{prime})$  是参考点在世界坐标系下的坐标经标定模型转换到成像平面上的坐标值。

$$X_i^{prime} = f \cdot \frac{X_c}{Z_c} \quad (18)$$

$$Y_i^{prime} = f \cdot \frac{Y_c}{Z_c} \quad (19)$$

$(X_c, Y_c, Z_c)$  根据式 (8)、(9) 和 (15) 求取。

$$X_i = \frac{X_d}{(1 + k(X_d^2 + Y_d^2))} \quad (20)$$

$$Y_i = \frac{Y_d}{(1 + k(X_d^2 + Y_d^2))} \quad (21)$$

利用此模型进行优化, 其步骤为:

- 1) 令  $s_x = 1.0$ , 非线性优化 3 参数  $f, k_1, T_z$ 。
- 2) 考虑图像中心不可能完全匹配场地中心, 非线性优化 5 参数  $f, k_1, T_z, C_x, C_y$ 。
- 3) 考虑图像畸变系数及水平比例因子  $s_x$ , 重新计算  $X_d$  和  $Y_d$ , 再次优化求精 5 参数  $f, k_1, T_z, C_x, C_y$ 。
- 4) 保持图像中心  $(C_x, C_y)$  不变, 优化 9 参数  $R_z, R_x, R_y, T_x, T_y, T_z, f, s_x, k_1$ 。
- 5) 优化所有参数, 全部求得最优解。

## 3 实验结果及分析

根据上述标定模型参数求解过程, 对 Mirosot 5: 5 足球机器人视觉系统进行标定, 该系统比赛场地尺寸为  $240 \times 180$  cm, 视觉系统采用 Basler A312fc 1394 摄像机, 镜头为腾龙 12VM412ASIR 的手动变焦镜头, 镜头到场地的距离约为 2.5 m, 图像分辨率大小为  $640 \times 480$  pixels,  $C_x, C_y$  的初始值近似为图像中心 (320, 240)。

### 3.1 标定靶面及参数求解

由于足球机器人视觉系统要求标定过程便于操作及快速实现, 采用标准的标定靶板如棋盘格等虽然提高精度, 但标定过程过于繁琐, 且策略系统要求标定精度达到毫米级即可以满足控制要求。因此, 采用场地上一些固有的标志点作为标定靶标点, 场地中的靶标点分布如图 4 所示, 其图像坐标采用手动方式获取, 世界坐标根据建立的世界坐标系和靶标点在场地中的位置关系可以获得, 根据上述标定模型, 内外参数计算结果如表 1 和表 2 所示。

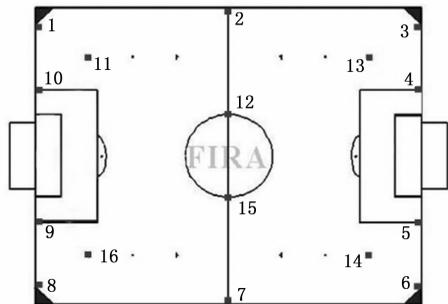


图 4 场地标定靶点分布

表 1 摄像机外部参数标定结果

外参数	计算结果
$R_x / \text{rad}$	0.018 785
$R_y / \text{rad}$	0.021 507
$R_z / \text{rad}$	-3.135 28
$T_x / \text{cm}$	141.109 85
$T_y / \text{cm}$	91.600 464
$T_z / \text{cm}$	-219.509 85

表 2 摄像机内部参数标定结果

内参数	计算结果
$f / \text{mm}$	5.0475 36
$C_x / \text{pixels}$	332.925 904
$C_y / \text{pixels}$	242.412 431
$s_x$	0.999 321
$k_1$	-0.007 512

### 3.2 误差对比

利用求解的参数对场地图像进行畸变校正, 图 5 为原始场地图像, 由于视觉系统采用广角镜头, 因此拍摄图像具有明显的桶形畸变, 采用上述标定结果对原始场地图像进行坐标校正后得到的场地如图 6 所示, 桶形畸变得到了很好的校正。

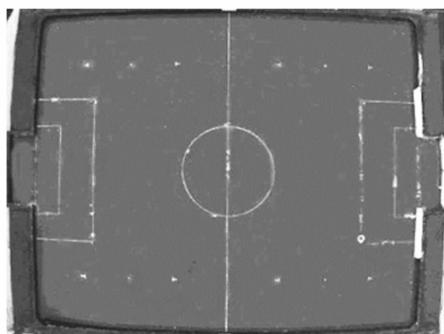


图 5 场地原始畸变图像

建立场地边框左下角为世界坐标系原点,  $X$  方向水平向右,  $Y$  方向竖直向上, 当球紧靠场地下边框时, 由于球的直径为 42.7 mm, 故其  $Y$  坐标理论值为 21.35 mm, 将球沿着

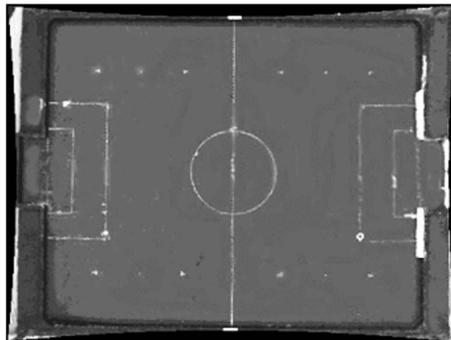


图 6 场地畸变校正后图像

场地下边框取 20 个采样点, 利用本文推导的简化两步法进行标定获取采样点的  $Y$  坐标, 并与多项式拟合法和分段线性标定法进行对比, 结果如图 7 所示, 可以看出简化两步法标定的数据相较于其他两种方法更接近理论真实值。通过图 8 所示的误差绝对值对比分析可以得到简化两步法最大误差绝对值约为 1 mm, 平均误差绝对值为 0.877 mm, 多项式拟合法最大误差绝对值约为 3 mm, 平均误差绝对值为 2.144 mm, 分段线性法最大误差绝对值约为 6 mm, 平均误差绝对值为 3.312 mm。

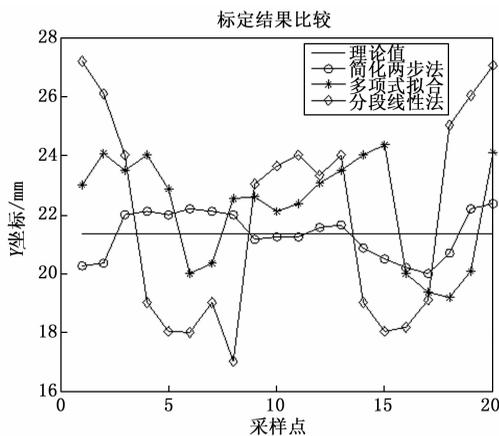


图 7 不同标定方法对应的结果比较

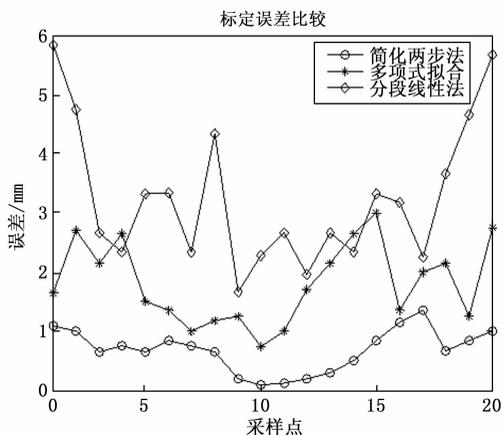


图 8 不同标定方法对应的误差比较

### 3.3 策略动作执行效率对比

足球机器人系统中最常用的策略之一是机器人射门,如图9所示,机器人需要根据球的运动轨迹进行预测,从而完成包抄射门得分。机器人最终是否能够完成射门动作以及得分是和球的运动轨迹预测直接相关的,而球的运动轨迹预测直接和视觉系统的标定及识别结果相关,因此,对于上述机器人动作,分别在采用分段线性、多项式拟合及简化两步法标定的视觉系统中进行测试,测试结果如表3所示。实验结果表明,利用简化两步法能够提高视觉系统的标定精度和识别精度,从而大大提高策略系统的效率。

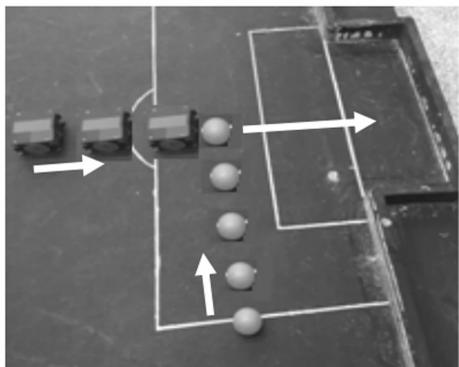


图9 机器人射门动作示意图

表3 机器人动作完成测试

标定方法	测试次数	成功次数	成功率/%
分段线性法	50	28	56
多项式拟合	50	40	80
简化两步法	50	47	94

## 4 结束语

本文针对足球机器人全局视觉系统的特殊应用场景,对标定模型进行近似简化处理,采用近似欧拉角旋转矩阵建立标定模型,并获得了待求解的内外参数。根据简化标定模型推导了内外参数的求解过程,并采取分步优化对所有内外参数进行处理得到最优解。最后对Mirobot 5:5足球机器人视觉系统进行标定验证,手动获取场地上的标志点作为参考点进行摄像机内外参数的求解,实验结果表明,简化两步法的标定精度可达 $\pm 1$  mm,相对于分段线性及多项式拟合等方法相比具有更高的标定精度,完全能够满足机器人决策系统的控制要求。今后可采用图像处理方法自动获取场地上标定参考点的图像坐标,达到亚像素精度,从而进一步提高系统标定的精度。

### 参考文献:

[1] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3 (4): 323 - 344.  
 [2] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration

[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330 - 1334.  
 [3] FAUGERAS O, LUONG Q T, MAYBANK S. Camera self-calibration: Theory and experiments [C] // Italy: In: Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Vision, 1992: 321 - 334.  
 [4] MAYBANK S, FAUGERAS O. A theory of self calibration of a moving camera [J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8 (2): 123 - 151.  
 [5] 张雪波, 路 晗, 方勇纯, 等. 室外环境下 PTZ 摄像机全自动标定技术及其应用 [J]. 机器人, 2013, 35 (4): 385 - 393.  
 [6] 郑 红, 刘振强. 基于精确模型的云台摄像机自标定 [J]. 机器人, 2013, 35 (3): 326 - 331.  
 [7] HARTLEY R. Self calibration of stationary cameras [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 22 (1): 5 - 23.  
 [8] 王 宪, 谭建平, 陈国强, 等. 基于主动视觉的测量装置精度校准方法 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45 (4): 1071 - 1076.  
 [9] 朱 嘉, 李醒飞, 徐颖欣. 摄像机的一种主动视觉标定方法 [J]. 光学学报, 2010, 5, 30 (5): 1297 - 1303.  
 [10] 张 曦, 程东勤, 李 伟. 构建虚拟立体靶标的大视场高精度视觉标定 [J]. 光学·精密工程, 2017, 25 (4): 359 - 367.  
 [11] 张李俊, 黄学祥, 冯渭春, 等. 基于运动路径靶标的空间机器人视觉标定方法 [J]. 机器人, 2016, 38 (2): 193 - 199.  
 [12] 屈霞, 贡启明. 基于视觉测量的人防门位置检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (4): 57 - 61.  
 [13] 赵小勇, 章伦琿, 王 勇, 等. 机场视觉移动服务机器人的设计与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 209 - 213.  
 [14] 于秋水, 郭 辉, 段 洁, 等. 足球机器人视觉中的摄像机标定 [J]. 长春理工大学学报, 2008, 31 (3): 31 - 34.  
 [15] 刘婵楨. 关于机器人足球视觉系统中场地标定方法综述 [J]. 重庆工商大学学报, 2011, 28 (3): 268 - 270.  
 [16] 袁 野, 仲崇权, 欧宗瑛. 基于 BP 网络的足球机器人视觉系统的标定 [J]. 机器人, 2001, 23 (7): 752 - 755.  
 [17] LI X S, ZHAO F D. Design of vision system for large filed robot soccer [P]. WIT Transactions on Information and Communication Technologies, 2015, 46: 445 - 451.  
 [18] TONG C Y. Three-dimensional reconstruction of dribble track of soccer robot based on heterogeneous binocular vision [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 11 (11): 6361 - 6372.  
 [19] TSORNGLIN C, SHUYIN C, CHAURHEH H. Rapid self-localization of robot based on omnidirectional vision technology [J]. Machine Vision and Applications, 2020: 31 - 74.  
 [20] SHUYIN C, LU J H. Localization and obstacle avoidance in soccer competition of humanoid robot by gait and vision system [J]. The Knowledge Engineering Review, 2019, 34 (16): 1 - 13.  
 [21] 余佳磊, 何越磊, 龚佩毅, 等. 基于区域生长重心的大型多阵列圆标定板基准点的提取技术 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 146 - 149.