

一种小型足球机器人简便视觉标定方法

马昕悦 向思怡 冯都忠
(河海大学机电工程学院 江苏 常州 213000)

摘要: 小型足球机器人标定需要满足一定的精度与快速性要求, 现有方法各有优势。现综合考虑准确性与快速性, 提出一种离线与在线结合标定方法, 离线时利用传统标定法进行相机内参的标定, 在线时通过简化外参模型进行相机外参标定, 减少现场操作与计算时间。本方法的优点在于能够考虑相机模型中所有参数, 并在小型足球机器人实施标定的现场所需操作时间更短, 达到足球机器人系统所需的精度。

关键词: 足球机器人; 标定算法; 相机模型

0 引言

小型足球机器人系统产于多学科交叉与高速计算机的发展, 包括机器视觉、无线通信、电机控制、高级编程等技术, 是一个适合于研究多学科交叉智能系统的平台。其中, 机器视觉部分是整个小型足球机器人系统的基础, 机器视觉的任务分为标定与识别, 标定部分决定了足球机器人的精度, 是足球机器人比赛的基础。现在已经存在的足球机器人标定方法大致分为基于摄像机成像几何模型的标定方法与基于摄像机光学畸变的标定方法, 前者采用线性模型描述像素坐标与世界坐标的关系, 后者则又分为基于神经网络和基于畸变与成像原理两种方法, 通过各支队伍的实践与应用, 图 1 经典相机成像原理图

目前采用比较多的是基于畸变与成像原理的标定和基于线性模型的标定。基于线性模型的标定方法因为没有考虑畸变和相机成像模型, 标定精度比较差, 只是在第一代足球机器人中应用较多, 而且标定现场操作比较复杂, 不利于足球机器人赛前准备。第二代足球机器人则多采用基于畸变和成像原理的标定方法, 这种方法的主要代表就是张正友标定算法与 Tsai 经典标定算法, 适用于足球机器人的改进与简便方法也有一定研究。对于已有的标定方法, 张正友标定法和 Tsai 经典标定算法需要足够精细与足够大面积的标定板来获取已知点的像素坐标, 而获得这些像素点坐标的方法涉及到角点检测, 直线拟合, 圆拟合等视觉算法, 在足球机器人标定过程中无法满足快速性要求, 而且无法确定世界坐标, 标定结果不具有实际意义。一些改进的方法同样存在鼠标选取坐标点的误差以及忽略 X,Y 方向旋转的误差, 而且只考虑了一阶径向畸变, 在某些特殊情况下比如相机安装出现一定误差的情况下会有较大的误差。在经典标定算法的基础上参考手眼标定算法思想, 提出一种不简化模型, 操作简便的标定方法, 并且充分结合离线计算, 减少现场操作与计算时间, 能满足足球机器人视觉系统需要的精度与快速性要求。

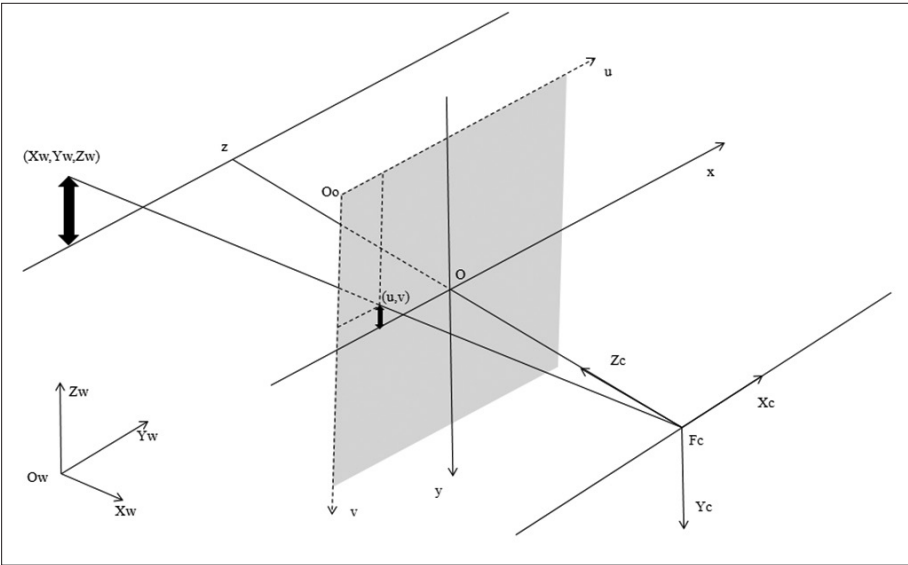


图 1 经典相机成像原理图

1 足球机器人视觉标定模型

经典相机成像原理如图 1, (X_w, Y_w, Z_w) 代表世界坐标系, (X_c, Y_c, Z_c) 代表相机坐标系, (u, v) 代表成像物理坐标系, (x, y) 代表图像像素坐标系。

从像素坐标到世界坐标的变换方程:

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f/s_x \\ f/s_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x u_2 + c_x \\ f_y v_2 + c_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, (u_2, v_2) 表示实际成像坐标:

$$\begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 + u_1(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2u_1^2) + 2p_2 u_1 v_1 \\ v_1 + v_1(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_2(r^2 + 2v_1^2) + 2p_1 u_1 v_1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

(u_1, v_1) 表示理想成像坐标:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{pmatrix} \quad (5)$$

r 表示到成像中心的距离:

$$r^2 = u_1^2 + v_1^2 \tag{6}$$

2 标定模型简便求解

2.1 内参求解

传统标定法中张正友标定法和 Tsai 两步法可以利用标定板确定世界坐标,进而标定出相机的内外参,注意到相机的内参生产出来是不发生变化的,而采用定焦镜头,焦距和畸变系数不发生变化,对相机模型不产生影响,所以内参矩阵保持不变。离线状态下采用传统标定法求出相机内参,利用到了圆形标定板,如图 2。

最后内参标定结果如表 1 所示。
十次实验平均标定误差如图 3 所示。

表 1 内参标定结果

内参	标定结果	内参	标定结果
f(mm)	8.93356	K1(1/m2)	2049.2
Cx(pixel)	974.115	K2(1/m4)	-1.40079e+007
Cy(pixel)	599.623	K3(1/m6)	-2.39789e+011
Sx(um)	5.8605	P1(1/m2)	0.10723
Sy(um)	5.86	P2(1/m2)	0.00623911

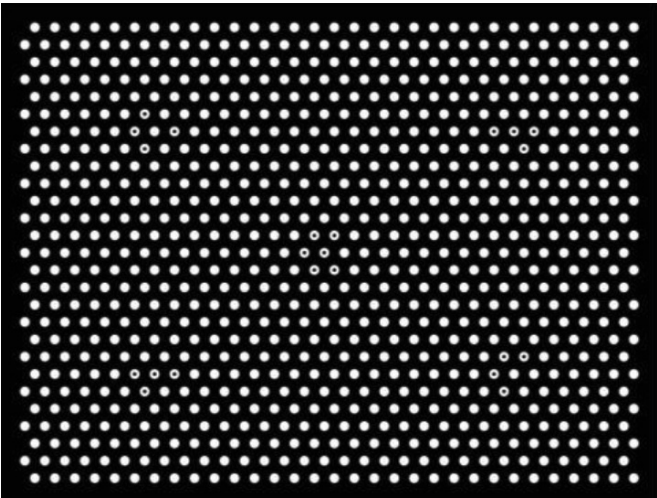


图 2 圆形标定板

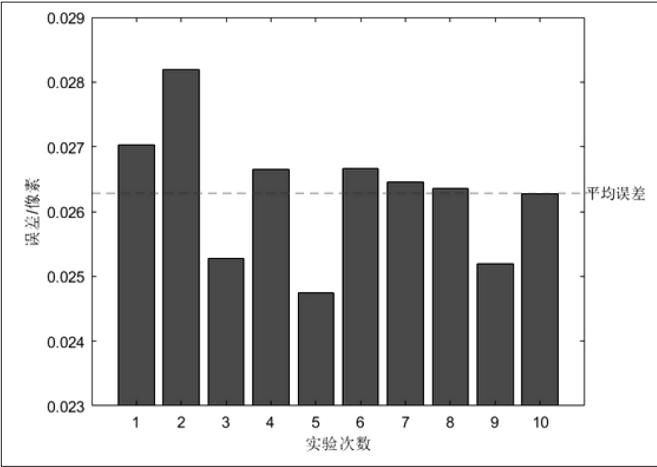


图 3 平均标定误差

2.2 外参求解

离线标定好内参后,在线部分则只需要简化外参矩阵,求解简化后的参数再求解所需参数,只需三组点的数据即可解出,这样一来减少了在线运算的复杂度,同样可以在离线状态下进行尽量精准的内参标定。

一般形式的坐标变换矩阵表示为:

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos R_z \cos R_y & \sin R_z \cos R_y & -\sin R_y & T_x \\ -\sin R_z \cos R_y + \cos R_z \sin R_y \sin R_x & \cos R_z \cos R_y + \sin R_z \sin R_y \sin R_x & \cos R_y \sin R_x & T_y \\ \sin R_z \sin R_y + \cos R_z \sin R_y \cos R_x & -\cos R_z \sin R_y + \sin R_z \cos R_y \cos R_x & \sin R_y \cos R_x & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \tag{7}$$

将场地坐标默认设置为基准,同时令 $Z_c Z_w = 1$,前两行展开得到:

$$X_c = \cos R_z \cos R_y X_w + \sin R_z \cos R_y Y_w - \sin R_y T_x + T_x \tag{8}$$

$$Y_c = (-\sin R_z \cos R_y + \cos R_z \sin R_y \sin R_x) X_w + (\cos R_z \cos R_y + \sin R_z \sin R_y \sin R_x) Y_w + \cos R_y \sin R_x T_y + T_y \tag{9}$$

上述方程求解较困难,考虑到外参矩阵其实是六个参数构成的, $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z$, 分别代表三个方向的平移和旋转,可以将源矩阵简化为 2 行 3 列的矩阵,类似于手眼标定方法。

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{pmatrix} \tag{10}$$

展开得到:

$$X_c = a_{11} X_w + a_{12} Y_w + a_{13} \tag{11}$$

$$Y_c = a_{21} X_w + a_{22} Y_w + a_{23} \tag{12}$$

在图像上点击已经确定的四个点,得到像素坐标,通过三组方程,可以解出 $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}$ 六个参数。

计算出外参矩阵之后,将各个计算出来的世界坐标反投影到像素坐标,与实际像素坐标之差的总和取得最小,也就是最优解。

$$\min \sum_{i=1}^n (Ax_i - b) \tag{13}$$

解出 $a_{11}-a_{23}$ 之后,通过求解线性方程组即可解出 $R_x, R_y, R_z, T_x, T_y, T_z$ 。

通过上述求解,计算出外参如表 2 所示。

表 2 外参标定结果

外参	标定结果	外参	标定结果
Tx(cm)	-109.975	Rx(rad)	0.273725
Ty(cm)	-94.1762	Ry(rad)	5.09122
Tz(cm)	259.245	Rz(rad)	1.0852

3 实验结果

利用上述标定过程,对足球机器人场地进行标定,比赛场地如下图,尺寸为 220cmX180cm,并选取场地图像上的 16 个标志点(需要画出 16 个标志点位置)。

通过点击 16 个标志点获取点的像素坐标,再利用已经

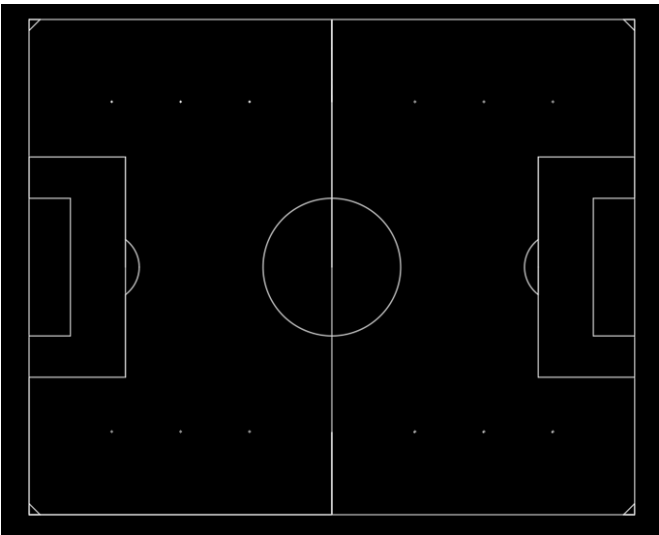


图 4 足球机器人场地标定图

求解出来的内外参数，求出对应的世界坐标，计算求出的世界坐标与实际的世界坐标的距离，将其定义为误差，16 个点的误差如下图，平均误差为 0.1127cm，能达到足球机器人定位要求。

4 结语

离线与在线相结合的标定方法将相机内参提前计算出，在线时使用简化的外参快速计算出六个外参，当选取的点大于 3 时，使用最小方差方法进行求解。通过计算出的内外参数将像素坐标反投影到世界坐标，其与理想世界坐标的距离定义为误差。实验结果表明，该标定方法识别精度能达到足球机器人系统要求，并且节省赛前标定操作时间，具有一定的应用价值。

参考文献：

[1] 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(自然科学版), 2011, 28(03): 268-270.
[2] 袁野, 仲崇权, 欧宗瑛. 基于 BP 网络的足球机器人视

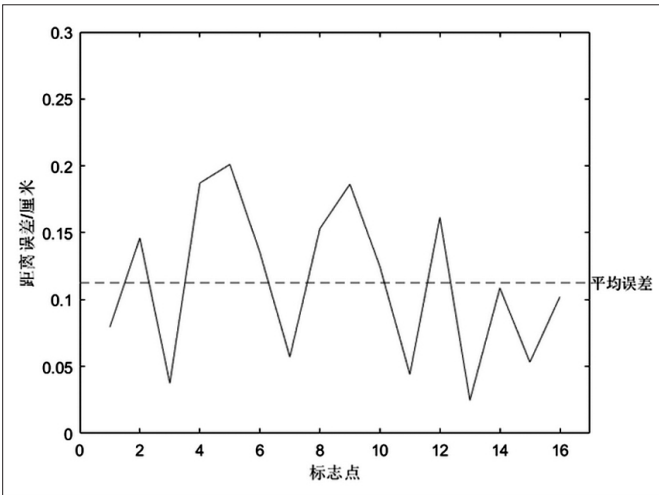


图 5 平均误差图

觉系统的标定[J]. 机器人, 2001(S1): 752-755. DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2001.s1.045.

[3] 王婷婷, 王朝辉. 机器人足球视觉系统图像畸变的几何校正[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2007(01): 56-59.

[4] 何校正[J]. 北京机械工业学院学报, 2009, 24(01): 49-52. DOI: 10.16508/j.cnki.11-5866/n.2009.01.017.

[5] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000, 22(11): 1330-1334.

[6] 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.

作者简介：马昕悦(2001-)，女，河北邯郸人，本科，研究方向：本体设计与可再生能源。

