

# 基于平面模板的机器人双目标定与目标定位

晁衍凯,徐昱琳,周勇飞,吕晓梦,王 明

(上海大学 机电工程与自动化学院,上海 200072)

**摘 要:**视觉是机器人获取外界信息最主要的途径,通过视觉系统准确地定位目标物体是机器人控制中的关键技术。为了使机器人准确地获取目标物体的位置,文中采用平面模板法对双目摄像头进行标定,构建机器人坐标系,完成对目标物体的定位。经过标定,双目摄像头可以获取目标物体在空间坐标系中的位置,经过坐标系转换,可以获得目标物体在机器人世界坐标系中的坐标值,该值是机器人实现对目标物体伺服跟踪和抓取的重要数据。最后,本方法在家庭机器人上得到了验证,机器人能够准确地定位目标物体。

**关键词:**双目标定;平面模板;目标定位;服务机器人

**中图分类号:**TP24

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2013)06-0027-04

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2013.06.007

## Robots Binocular Calibration and Target Location Based on Planar Template

CHAO Yan-kai, XU Yu-lin, ZHOU Yong-fei, LÜ Xiao-meng, WANG Ming

(College of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Vision is the most important way to obtain information from the world, the accurate location of object through visual system is the key technology of robot controls. For the purpose that robot can get the position of object exactly, the binocular camera is calibrated with the planar template method, the coordinate of the robot is structured, and the object is located in this paper. After calibration, binocular camera can obtain coordinate position of object. And after transfer of coordinate system, robot can acquire the coordinate value of object which is important data for serving trace and capturing object. Experimental results are conducted for illustration of effectiveness of the proposed methods, the robot can locate the object accurately.

**Key words:** binocular calibration; plane template; object location; service robot

## 0 引 言

从1959年美国英格伯格和德沃尔制造出世界上第一台工业机器人后,机器人的时代才真正来临。近百年来发展起来的机器人大致可以分为三代:第一代简单个体机器人,它属于示教再现;第二代为群体劳动机器人,它已经具备了感觉能力了;第三代为类似人类的智能机器人,它除了具有感觉能力外,还可以进行独立判断和行动的能力。

近年来,随着智能机器人技术的迅速发展,智能机器人的应用领域正在不断地扩大。并且已经开始进入了家庭服务行业,这种服务机器人是一种能够自主或者半自主提供服务而不是提供生产的机器人,这些机器人使人们的生活质量有了明显的提高。家庭服务机

器人是未来机器人发展的一个方向,能够实时地与外界环境以及环境中的其他机器人或者人进行交互<sup>[1]</sup>。所以它一般包括行走装置、感知装置、控制装置、执行和存储装置。感知装置就是获取外界信息的一些装置,其中就包括机器人的双目。

双目摄像机的标定和目标物体的定位是机器人控制的基础问题。

摄像机的标定,就是通过建立目标物体、图像对应模型,计算出精确的模型参数<sup>[2]</sup>。目标物体的定位,就是根据标定参数,结合目标物体在双目图像中的坐标值,计算出目标物体在世界坐标系中的坐标值<sup>[3,4]</sup>。摄像机的标定和目标物体的定位可以为后续的机器人控制做好准备<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2012-09-19

修回日期:2012-12-21

网络出版时间:2013-03-05

基金项目:机器人技术与系统国家重点实验室开放基金(SKLS-2009-MS-10);上海大学研究生创新基金(SHUCX120083)

作者简介:晁衍凯(1988-),男,硕士,从事嵌入式系统研究。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130305.0829.057.html>

## 1 双目视觉系统模型建立

文中采用的双目摄像机来源于课题组机器人,该机器人如图 1 所示,它的视觉传感器是采用加拿大 Point Grey 公司的 Bumblebee2。

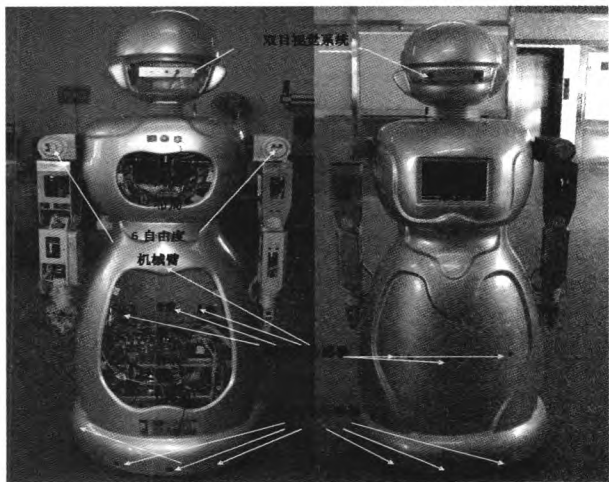


图 1 服务机器人硬件结构

双目标定的目的是建立三维世界坐标与二维图像坐标之间的一种对应关系<sup>[6]</sup>。本平台的双目摄像机均为针孔相机,如图 2 所示为双目摄像机模型,所以说文中的标定方法也是建立在针孔相机模型的基础之上的。

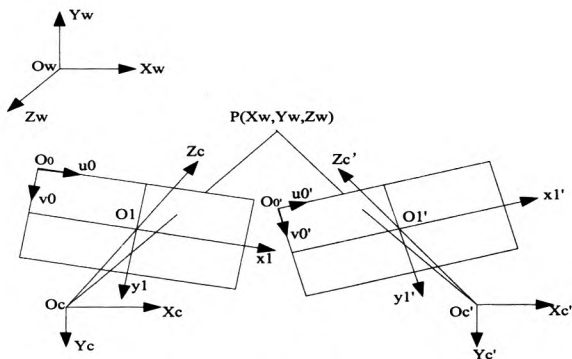


图 2 双目摄像机模型

文中采用简单易行的张氏平面模板标定法<sup>[3]</sup>来完成摄像机内参数的标定。为了能够清晰地进行摄像机的标定,首先定义四个坐标系:

### (1) 计算机图像坐标系。

摄像机采集的图像以标准电视信号的形式输入到计算机,经过数模转换器转换为数字图像,用像素来表示,原点  $O_0$  位于图像平面的左上角,  $(u, v)$  是以像素为单位的图像坐标系坐标,在图像上定义直角坐标系  $O_0 - uv$ 。

### (2) 成像平面坐标系。

由于图像坐标系只表示像素位于数组中的列数和行数,并没有用物理单位表示出该像素在图像中的位置,因此还需要建立以物理单位表示的图像坐标系  $O_1$

$-xy$ , 原点  $O_1$  位于摄像机光轴与图像平面的交点。设  $O_1$  在计算机图像坐标系中的像素坐标为  $(u_0, v_0)$ , 则两个坐标系间的转换关系可用公式(1)表示。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & s_1 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

### (3) 摄像机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 。

$O_c$  为摄像机的光心,  $X_c$  轴和  $Y_c$  轴分别与成像平面坐标系的  $x$  轴和  $y$  轴平行,  $Z_c$  轴与摄像机的光轴重合, 光心到图像平面的距离就是摄像机的有效焦距  $f$ , 则摄像机坐标系与成像平面坐标系的转换关系为公式(2)。

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### (4) 世界坐标系 $O - X_w Y_w Z_w$ 。

世界坐标系是作为一般参考用的, 其坐标原点和坐标轴方向是人为设定或者根据具体情况来选择的。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = [R \quad T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = [r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中  $R, T$  分别为摄像机坐标系与世界坐标的旋转与平移矩阵。

## 2 双目标定

文中采用的是张氏平面标定法, 该方法需要摄像机从不同的角度拍摄平面模板的多幅图像, 通过平面模板上的每个特征点与其图像上点之间的对应关系, 考虑径向畸变并用最大似然准则对计算结果进行非线性优化, 利用内参数矩阵和单应性矩阵求出对应的外部参数。

具体做法如下:

(1) 在内参数标定时, 采用棋盘格, 根据张友定提出的线性摄像机模型, 假设棋盘格所在平面正好是世界坐标系的  $Z_w = 0$  平面。通过坐标变换可以得到<sup>[4]</sup>:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & s_1 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & s_1 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

即:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & s_1 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}$$

$$[r_1 \ r_2 \ r_3 \ T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

可以表示为:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K[r_1 \ r_2 \ r_3 \ T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$K[r_1 \ r_2 \ T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中  $K$  是内参数矩阵,  $H$  是一个  $3 \times 3$  的单应性矩阵。

$$H = [h_1 \ h_2 \ h_3] = sK[r_1 \ r_2 \ t] \quad (7)$$

$H$  为标靶平面与图像平面之间的映射矩阵, 在计算映射矩阵时不考虑摄像机的成像模型, 根据平面标靶坐标点和对应的图像坐标点的数据, 利用最小二乘法就可以计算得到  $H$ 。

(2) 因为  $R$  是单位正交矩阵, 所以  $r_1, r_2$  满足:

$$r_1^T r_2 = 0 \quad (8)$$

$$\|r_1\| = \|r_2\| = 1$$

由公式(7)和(8)可得:

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = 0 \quad (9)$$

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = h_2^T K^{-T} K^{-1} h_1$$

设  $C = K^{-T} K^{-1}$ , 包含了摄像机内参数的所有信息, 因为  $C$  是对称矩阵, 则令:

$$C = [C_{11} \ C_{12} \ C_{22} \ C_{13} \ C_{23} \ C_{33}]^T \quad (10)$$

则公式(9)可以表示为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} c = 0 \quad (11)$$

$$\text{其中 } v_{ij} = \begin{bmatrix} h_{i1} h_{j1} \\ h_{i1} h_{j2} + h_{i2} h_{j1} \\ h_{i2} h_{j2} \\ h_{i3} h_{j1} + h_{i1} h_{j3} \\ h_{i3} h_{j2} + h_{i2} h_{j3} \\ h_{i3} h_{j3} \end{bmatrix}$$

$h_{ij}$  为矩阵  $h$  的第  $i$  列第  $j$  行的值。

如果有  $n$  幅模板平面的图像, 则可以得到:

$$Vc = 0 \quad (12)$$

如果有三幅以上的图像参与定标, 求出满足方程的最小二乘的向量  $c$ , 则可以得出摄像机的内参数:

$$\begin{cases} v_0 = \frac{(c_{12}c_{13} - c_{11}c_{23})}{c_{11}c_{22} - c_{12}^2} \\ \lambda = c_{33} - \frac{c_{13}^2 + v_0(c_{12}c_{13} - c_{11}c_{23})}{c_{11}} \\ f_u = \sqrt{\frac{\lambda}{c_{11}}} \\ f_v = \sqrt{\frac{\lambda c_{11}}{c_{11}c_{22} - c_{12}^2}} \\ s = -\frac{c_{12}f_u^2 f_v}{\lambda} \\ u_0 = \frac{sv_0}{f_v} - \frac{c_{13}f_u^2}{\lambda} \end{cases} \quad (13)$$

根据内参数矩阵  $K$  和单应性矩阵  $H$ , 由公式(7)可以计算每幅图像的外参数:

$$\begin{cases} r_1 = \lambda K^{-1} h_1 \\ r_2 = \lambda K^{-1} h_2 \\ r_3 = r_1 \times r_2 \\ T = \lambda K^{-1} h_3 \end{cases} \quad (14)$$

(3) 畸变参数的求解。

在机器人立体视觉中, 存在镜头畸变。但是文中为了简化处理, 忽略部分影响小的畸变, 只考虑径向畸变。畸变后的成像坐标为<sup>[6]</sup>:

$$X_d = x + x(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (15)$$

$$Y_d = y + y(k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

其中,  $(x, y)$ ,  $(X_d, Y_d)$  分别为图像理想坐标和实际坐标,  $r^2 = x^2 + y^2$ , 由于径向畸变的中心与图像中心重合, 取  $(c_x, c_y)$  为图像坐标的坐标原点的像素坐标, 得到矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} (u - c_x)r^2 & (u - c_x)r^4 \\ (v - c_y)r^2 & (v - c_y)r^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 - u \\ v_0 - v \end{bmatrix} \quad (16)$$

给定标定图像中的  $n$  个点的坐标, 公式(16)可写成  $Dk = d$ , 利用最小二乘法求得  $k = (D^T D)^{-1} D^T d$ , 从而求得畸变参数  $k_1$  和  $k_2$ <sup>[7,8]</sup>。

(4) 立体标定。

得到左右摄像机的内参数后<sup>[9]</sup>,可以求得某点  $P$  在左右摄像机中对应的点为  $P_l$  和  $P_r$ 。 $R_l$  和  $T_l$ 、 $R_r$  和  $T_r$  分别是左右摄像机的旋转矩阵和平移矩阵, $R$  和  $T$  是两摄像机之间的旋转矩阵和平移矩阵。则由该点在左右图像中的关系可以得到:

$$P_l = R_l P + T_l, P_r = R_r P + T_r, P_l = R^T (P_r - T) \quad (17)$$

则由式(17)可以得到两个摄像机之间的旋转矩阵和平移矩阵:

$$R = R_l R_r^{-1}, T = T_l - R_l^{-1} T_r \quad (18)$$

### 3 目标定位

目标物体的定位就是根据标定参数,利用目标物体在双目摄像头左右图像坐标系上的坐标,计算出目标物体在以右眼为原点的空间坐标系的三维坐标值<sup>[10]</sup>,然后根据机器人的结构参数,转化到以机器人右肩为原心的空间坐标系的坐标值<sup>[11,12]</sup>。

理论上,经过摄像机标定后,通过计算能够得出目标物体的三维坐标值。然而,当目标物体与摄像机的距离太大或太小时,得到的坐标值的深度信息会产生很大的误差,只有距离适度时,得出的深度信息才是相对准确的。为了修正这个误差,文中采用的方法是,离线学习得到目标物体与双目距离适中时,物体在双目图像中的轮廓阈值,并建立特征库。程序运行时,调整机器人的位置,使得到的轮廓大小满足特征库中的轮廓阈值。这样不仅识别到了目标物体,而且使机器人与目标物体处于最佳的相对位置,从而消除了深度信息求解过程中存在的误差。

### 4 实验

(1) 标定实验。

文中的双目摄像头所采集的标定图像的分辨率为  $640 \times 480$ 。标定的模板是  $6 \times 7$  个方格,每格的边长为  $28mm$  的棋盘格,用摄像机获取左右眼对应的图像如图 3 所示,上两行和下两行分别是左右摄像机同步获取的六组图像。经标定得到左右眼内参数分别为:

$$\begin{bmatrix} 485.855 & 0 & 322.058 \\ 0 & 485.248 & 249.874 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 486.815 & 0 & 321.985 \\ 0 & 486.765 & 250.918 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

按公式(14)可以确定每一幅图片的旋转和平移矩阵。最终可以得到两台摄像机之间的相对旋转平移矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.0032 & -0.0013 \\ 0.0031 & 1 & -0.02 \\ 0.01 & -0.022 & 1.003 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} 120.34 \\ -1.01 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

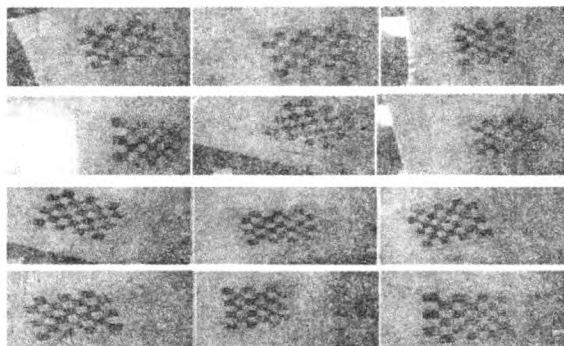


图 3 左右眼获取的六幅对应图像

由结果可以看出  $R$  近似于单位矩阵,说明两个摄像机的光轴接近平行状态, $T$  的值反应了两个摄像机只在  $X$  轴方向有偏差,这个偏差就是两个摄像机光心之间的距离,说明标定的结果符合预期的标定结果。

(2) 定位实验。

图 4 为机器人经过离线学习后,目标物体处于最佳位置时的左右眼图像。同时获取四个顶点的坐标,如表 1 所示。以机器人右肩为世界坐标系的原点,摄像机的坐标系方向为世界坐标系的方向,从而计算出四个点的世界坐标系,计算结果如表 1 所示。

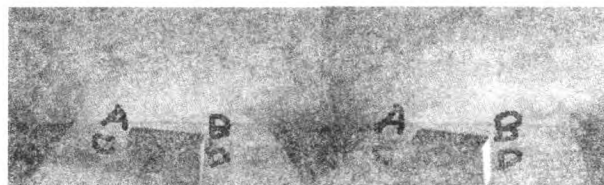


图 4 左右眼摄像机中的图像

表 1 坐标计算结果

	左眼坐标	右眼坐标	世界坐标(mm)
点 A	(298,335)	(205,355)	(-56.3,48.4,233.9)
点 B	(417,371)	(317,371)	(-21.3,50.3,206.8)
点 C	(287,375)	(186,375)	(-60.3,40.7,224.9)
点 D	(413,393)	(306,392)	(-19.9,38.2,205.0)

目标物体四个顶点之间距离的计算值与实际值如表 2 所示。

表 2 观测点实际与计算距离

	点 A、B 的距离	点 A、C 的距离	点 B、D 的距离	点 C、D 的距离
计算值	44.3	12.5	12.3	45.1
实际值	44	12	12	45

结果表明,计算出的距离与实际的距离很接近,能够满足实验的要求。对于引起的误差可能是:

(下转第 34 页)

法后,对较低的 5 个位平面不重新编码,仅增加每个游长子序列的 2 位压缩状态标记  $S_e$  和  $S_o$ ,从而实现对较高 3 个位平面压缩的同时,避免了较低的 5 个位平面重新编码后导致的数据膨胀,压缩比大于 1,实现了数据压缩。

游长多次缩减编码方法对二元序列的编码主要依据游长缩减值和游长转换关系码元,所以解码时仅需要通过游长缩减起始值和相应的转换关系码元,通过游长逐次复原,即可恢复原始游长序列,而无需类似 CCITT.4(G3)方法,按游长编码表逐一匹配进行解码,故此,文中提出的二元序列游长多次缩减无损压缩编码方法也是一种运行效率较高的编码方法。

### 3 结束语

文中提出一种具有自适应性的二元序列游长多次缩减的无损压缩编码方法,采用试探法选取游长子序列中奇偶游长缩减起始值,基于游长缩减起始值对较长游长进行缩减,而对小于游长缩减起始值的游长不进行游长缩减处理(即对较短游长保留其原始游长,不重新进行游长编码),解决了较短游长重新编码后导致的数据膨胀。此外,文中提出的方法可对游长子序列进行多次游长缩减处理,直至达到最佳压缩效果。通过与国际传真标准 CCITT.4(G3)进行试验对比,证明了文中提出的方法对二元序列的压缩具有更高的压缩比。

(上接第 30 页)

- 1) 角点提取的精度有误差;
- 2) 目标物体不是标准的长方体,会有一定误差。

### 5 结束语

文中是结合了传统的张氏平面模板标定法,在家庭服务机器人平台上,用 OPENCV 和 VC++ 6.0 完成了双目摄像头的标定与目标物体的定位。实验结果表明该标定方法有效,定位结果可以满足要求,双目摄像机的成功标定和目标物体定位为后续的机器人控制做了很好的铺垫。

#### 参考文献:

- [1] 张宗华,彭翔.实物表面三维相位图定标的研究[J].仪器仪表学报,2000,21(5):539-541.
- [2] 贺振,李琼砚.基于立体视觉的摄像机标定方法的研究[J].科技创新导报,2012(15):16-17.
- [3] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000(11):1330-1334.

#### 参考文献:

- [1] 沈世铨,陈鲁生.信息论与编码理论[M].北京:科学出版社,2002:11-27.
- [2] 张海燕,王东木,宋克欧,等.图像压缩技术[J].系统仿真学报,2002,14(7):831-835.
- [3] 张春田,苏育挺,张静.数字图像压缩编码[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [4] Berghorn W, Boskamp T, Lang M, et al. Fast Variable Run-length Coding for Embedded Progressive Wavelet-based Image Compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001,10(12):1781-1790.
- [5] 韩玉坤.数字图像压缩方法研究[J].计算机与信息技术,2007(16):324-325.
- [6] Papadonikolakis M E, Kakarountas A P, Goutis C E. Efficient high-performance implementation of JPEG-LS encoder[J]. Journal of Real-time Image Processing,2008(3):303-310.
- [7] Feng Xi. Comparison research of some image lossless compression algorithm[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences,2008.
- [8] Stabno M, Wrembel R. RLH: Bitmap compression technique based on run-length and Huffman encoding[J]. Information Systems,2009,34(4-5):400-414.
- [9] 祝本明,刘桂华.一种改进的游程编码算法[J].西南科技大学学报,2007,22(3):75-78.
- [10] 崔春晖.基于二次游程编码和动态码表截取的变长编码方法[D].武汉:华中科技大学,2006.
- [11] 孟君.文档图像压缩的 RLC 实现[J].贵州工业大学学报(自然科学版),2002,31(4):105-106.

- [4] 吕朝辉,张兆杨.基于神经网络的立体视觉摄像机标定[J].机械工程学报,2003(9):93-95.
- [5] Ma S. A self-calibration technique for active vision system[J]. IEEE Trans. on Robotics and Automation,1996(12):114-118.
- [6] 许俊勇,王景川,陈卫东.基于全景视觉的移动机器人同步定位与地图创建研究[J].机器人,2008,30(4):289-297.
- [7] 张伟华,陈军. CCD 摄像机标定[J].传感器与微系统,2009,28(20):107-109.
- [8] 林慧英,苏建,刘玉梅,等.基于图像畸变矫正的摄像机标定方法[J].吉林大学学报,2007,37(2):433-437.
- [9] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Trans. on PAMI,1992,14(10):965-980.
- [10] 王科俊,魏娟.基于双面圆的双目视觉分布定位法[J].应用科技,2010,37(1):36-40.
- [11] 尚倩,阮秋琦.双目立体视觉的目标识别和定位[J].智能系统学报,2011,8(4):303-308.
- [12] 周子啸,赵晓琳.基于仿真机器人的双目视觉定位[J].电视技术,2010(8):106-109.

基于平面模板的机器人双目标定与目标定位

作者：

晁衍凯，[徐昱琳](#)，[周勇飞](#)，[吕晓梦](#)，[王明](#)，[CHAO Yan-kai](#)，[XU Yu-lin](#)，[ZHOU Yong-fei](#)，[L\(U\)](#)  
[Xiao-meng](#)，[WANG Ming](#)

作者单位：

[上海大学机电工程与自动化学院, 上海, 200072](#)

刊名：

[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：

2013, 23(6)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjz201306007.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjz201306007.aspx)