# 机器人视觉装配中的精确定位策略研究

吴广雨 张伟军 杨保佳

（上海交通大学机械与动力工程学院 ,上海 200240）

摘 要：机器人与机器视觉技术的发展，使得工业生产线的柔性化程度不断提高，装配过程可由载着工件的自动导航小车从一个机器人工位移动到另一个来完成。针对自动导航小车存在定位不精准的问题，通过机器视觉方法来校正小车位姿。从源图像中识别出定位孔的像素坐标并计算转换到全局坐标系下，通过多组匹配点计算小车实际位姿。在分析相机标定与位姿计算过程中可能引入误差的基础上，提出相应误差消除策略。通过实验，验证了视觉标定结果的可靠性和误差消除算法的正确性，为视觉引导下的机器人装配工作提供了依据。

关键词：机器视觉；手眼标定；机器人；位置校正；柔性生产

中图分类号：TP24 文献标识码：A

**Research on Precisely Target Positioning in Vision Guided**

**Robot Assembly System**

#### WU Guangyu ZHANG Weijun YANG Baojia

#### (School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract**：With the development of robotics and machine vision technology, industrial production lines are getting more flexible. The assembly process is accomplished by moving the automatic guided vehicle (AGV) with workpiece from one robot station to another. Inaccurate positioning will be introduced by the use of AGV. The accurate position of AGV can be corrected by machine vision methods. Recognize the positioning holes on AGV and get its pixel coordinate from the source image. Transform the value into the global reference. Calculate the actual pose of AGV through multiple sets of matching points. Based on analyzing possible errors in the calibration and calculation process, some error cancelling algorithms are proposed. Finally, experiment result proves the reliability of visual calibration and the correctness of error cancelling strategy. As a result, vision guided robot assembly task is reliable.

**Key words：**machine vison; hand-eye calibration; robotics; position correction; flexible production

#### 0 引言

在传统工业生产中大量应用的是基于传送带的生产模式，固定的流水线适合大规模量产，但面对不同产品的生产需求，传统的生产线需要进行大量改造以适应新的装配工艺和工序，存在适应性差的情况。同时增加了制造成本，影响到生产效益[1]。随着工业4.0的提出，生产的个性化和灵活性要求生产线具有高度柔性的特点，可以灵活地处理组装零件和工艺顺序的变化[2]。同时无人驾驶运输系统快速发展，通过将原本只是用作物料搬运的小车和机器人进行深度融合，打破现有的固定流水线，取而代之的是载着工件的自动导航小车从一个机器人工位移动到另一个机器人工位形成一条移动的生产线。这种方式可以适应个性化需求，提升生产线的柔性和自主性。

但由于自动导航小车每次到达机器人工位时的位置存在不确定性，给机器人的装配任务引入了偏差，即便使用了定位板等辅助技术来提高自动导航小车的定位精度，仍存在3-5cm的定位偏差，无法满足精度要求高的任务，如自动打螺钉，插销孔等[3]。为校正定位偏差，本文运用机器视觉技术，通过在机器人的末端安装工业相机，对到达机器人工位小车上的多个定位孔进行识别，并计算转换到全局坐标系下，结合多组匹配点来计算小车实际位姿，进而调整机器人抓取的目标位置来实现既定的装配任务。

本文作者研究了利用机器视觉技术进行位置校正的各个关键环节，推导了目标位置的计算公式及小车位姿的校正算法。在此基础上分析过程中可能引入的误差，并提出了一系列消除偏差、提高精度的策略，最后通过对比实验验证了误差消除算法的效果，为视觉引导下的机器人装配工作提供了依据。

## 1 机器人视觉装配系统

本文中的机器人视觉装配系统包括工控机、工业机器人及末端执行器、工业相机及光源、自动导航移动平台及其上定位孔等。系统整体如图1所示。



图1 机器人视觉装配系统

视觉校正过程主要分为两步。第一，从源图像中识别出定位孔中心并计算定位孔的实际坐标；第二，根据多个定位孔的位置计算小车实际位姿相对于基准位姿的转换关系。

分析定位孔的识别和计算过程，其中涉及到了坐标在多个参考系间的转换，过程如图2所示。

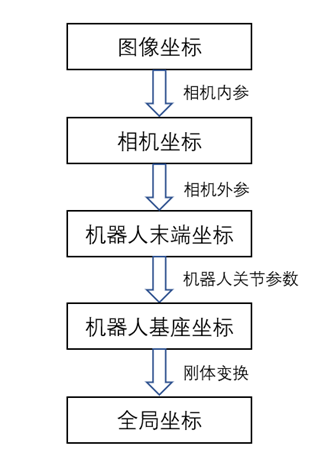


图2 坐标间转换图

根据以上得到的每个定位孔在全局坐标系下的位置，通过多组匹配点校准计算最优的旋转平移矩阵，即当前小车位姿相对于基准位姿的关系，并利用该矩阵计算装配工件的实际位置，控制机器人到目标点进行装配作业。

## 2 视觉定位算法

机器视觉系统中涉及多个坐标系间的转换，包括像素坐标系(u,v)，相机坐标系(Xc,Yc,Zc)和世界坐标系(Xw,Yw,Zw)[4]。各坐标系间的关系如图3所示。

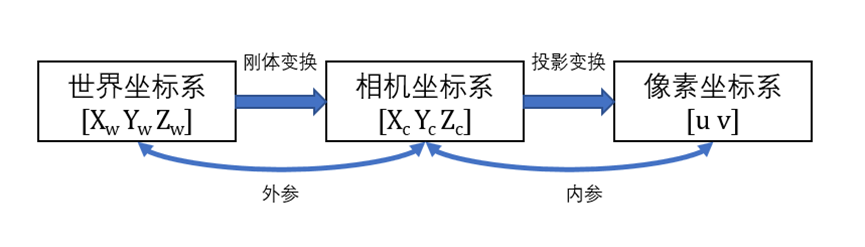
相机标定的参数可以分为内参和外参。相机内参，顾名思义描述相机的内部属性，如相机的焦距、像素点大小、相机畸变属性等。内参用于像素坐标系和相机坐标系间的转换。外参描述相机的空间位置，也即相机坐标相对于世界坐标系的旋转和平移。

图3 坐标系关系转换图

**2.1** 相机参数标定

相机内参矩阵定义为

其中和表示以像素为单位的焦距参数；表示x轴和y轴间的倾斜系数，其值通常为0；和表示主点，即理想条件下图像的中点。相机内参的标定可以采用张正友标定法，对单平面棋盘格采集*n*幅图像，每幅图像中有棋盘格角点*m*个，利用多参数非线性系统优化问题的Levenberg-Marquardt算法[5]进行迭代求最优解。相机内参标定有成熟的算法和标定工具，根据极大似然估计得到的内参在相机定焦的情况下相当稳定。利用内参可以计算出目标物体在相机坐标系下的位置。计算公式如下

(1)

相机外参的标定即手眼标定，涉及到相机、机器人基座、末端执行器和标定板坐标系之间的关系。根据相机是与机器人末端或是与基座固连可以分为eye on hand和eye to hand两种方式[6]。本文采用eye on hand模式，坐标系之间的关系如图4所示。相机和机器人末端固定在一起，标定板和机器人基坐标系固定在一起。在这种关系下，机器人移动过程中任意两个位姿，标定板和底座的关系始终不变，求解的量为相机和机器人末端之间的关系。

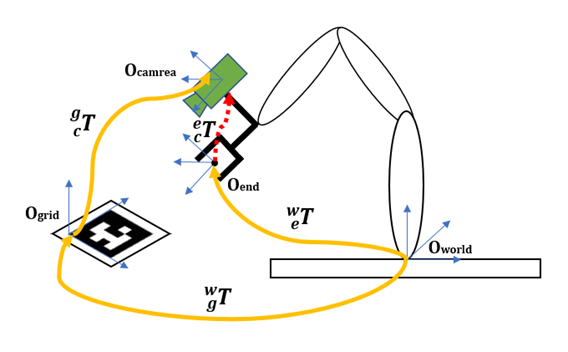


图4 手眼标定坐标系转换图

本文使用arUco标定板，该标记的外围都有一组黑色边框，同时内部有确定该标记ID的二维矩阵，黑色的边框能加速标记在图像中的检测速度，内部的二维编码能唯一识别该标记，同时进行错误检测和错误修复。标记的大小确定了内部矩阵的大小，例如4x4大小的标记有16个bit。其检测结果返回图片中四个角点的位置以及标记的id号。利用OpenCV中的solvePnP函数可以得到标定板相对于相机坐标系的齐次矩阵。为了得到精确的手眼关系，相机在不同位姿对标定板拍摄17-20张图片进行计算。任意两次拍摄满足以下约束：

(2)

(3)

其中和表示第*i*次和第*j*次拍摄时机器人末端TCP坐标系相对于机器人基坐标系的齐次变换矩阵，表示相机坐标系相对于机器人末端TCP坐标系的变换矩阵，也即手眼标定要求解的目标。表示标定板坐标系相对于机器人基坐标系的变换矩阵，由于在标定过程中保持标定板位置不动，所以是一个常量矩阵。和表示相机坐标系相对于标定板坐标系的齐次变换矩阵。联立上述两个式子消除常量矩阵得

(4)

等式两边左乘和右乘得

(5)

令，，，则上式可以化简为

(6)

其中***A***表示相邻两次运动中机器人末端关节的变换关系；***B***表示相邻两次运动时相机坐标的相对运动。以上方程为手眼标定的最终求解方程，可以通过Tsai-Lenz方法[7]计算转换矩阵***X***。求解得到结果用四元数和向量表示。其中四元数的定义满足

(7)

四元数转换为旋转矩阵的公式为

(8)

则相机坐标系和末端坐标系的手眼关系可以表示为：

(9)

**2.2** 位姿校正算法

上一小节完成了定位孔在全局坐标系中坐标的计算推导。第二步是根据多个定位孔的计算结果来估计小车实际位姿相对于基准位姿的旋转平移矩阵。基准位姿和实际位姿如图5所示，虚线部分表示AGV基准位姿及其四个定位孔的位置，实线部分表示当前AGV到达机器人工位时的实际位姿，十字形标记表示待装配工件。

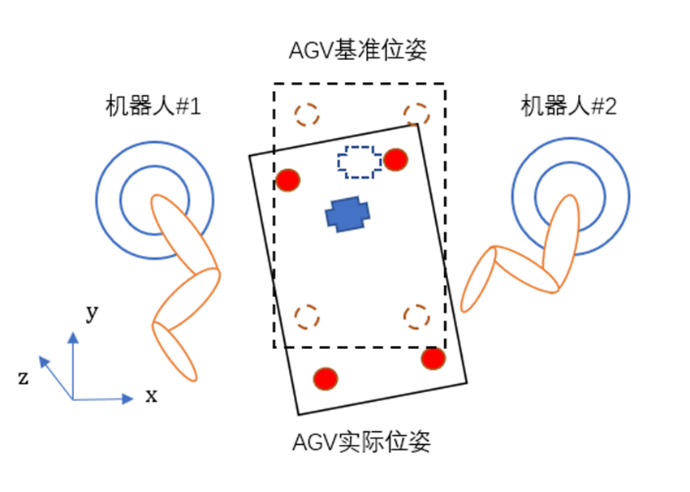
****

图5 AGV实际位姿图

记基准位置上的定位孔为，计算得到定位孔中心的坐标为，实际位置上的定位孔为，孔中心的坐标为。因为定位孔间相对位置不变，所以到是刚性变换，设变换矩阵为，对于每一组对应点有

(10)

对于所有匹配点，满足

(11)

简记为，求解得。刚性变换矩阵***M***包含6个参数，通过视觉识别并计算得到的4个定位孔位置包含12个已知量，所以存在冗余，且可以得到多组可行解。将每一对匹配点的欧氏距离作为误差目标函数，利用SVD分解求出***R***和***T***，使得误差目标函数最小。

在得到***M***的最优估计后，利用该旋转平移矩阵计算出待装配工件的实际位置，以此作为视觉校正后的目标位置控制机器人进行装配工作。

## 3 误差及消除策略

**3.1 误差分析**

本节分析在计算目标位置的各阶段中可能引入误差的情形。

首先，相机获取到一张原始图像，应用机器视觉算法从源图像中找到定位孔的中心位置。本文设计了一种基于特征的模板匹配算法，利用边缘的梯度方向作为特征，训练出一系列不同角度不同尺寸的模板。在识别时将图像中的特征与这一系列模板进行匹配，根据匹配率筛选出符合条件的模板。可能会出现多个相似模板同时匹配的情况，例如大小十分接近，转角存在微小差异的模板，如图6所示。若从其中随机取一个模板，虽然和实际的中心位置只有几个像素的偏差，但这些误差经过相机内参和外参的传递，在实际计算目标位置中会被放大，甚至会因此造成装配任务的失败。



图6 多个相似模板同时匹配上

其次，手眼标定计算相机外参齐次矩阵的结果受标定过程中采样点的选择影响大，包括拍摄标定板采样点的数量及相对位置关系等。计算手眼标定矩阵采用Tsai文献中提出的旋转轴-旋转角方法，在优化阶段以匹配点欧氏距离作为误差目标函数，其中用到了最小二乘法的思想。如果某一次标定板局部或全部出相机视野则会出现标定板识别错误，导致数据不可用，一组点的明显偏离会对拟合结果造成非常大的偏差。

**3.2 误差消除策略**

针对上一小节中的误差分析，本文提出相应的误差消除策略，减小可能引入的误差，提高目标位置计算的精度。

首先，在图像识别阶段，利用模板匹配筛选出一组特征匹配度高的模板后，利用圆孔识别的特殊性，选择最靠近中心尺寸最小的圆作为识别结果，如图7所示。



图7 对多个模板进行优选

此外，如果在视野内出现多个圆孔干扰项，如待装配工件上的螺钉孔，则根据孔的位置与相机视野中心的距离并结合识别孔与实际定位孔的大小差别来进行干扰项的过滤。

其次，手眼标定时增加拍摄标定板的数量，用更多的输入点来优化外参矩阵的准确度。同时调整机器人不同末端姿态，改变相机和标定板之间的旋转和平移关系。例如，对于每一组采样点的选择，控制机器人末端的位移达到5mm，旋转角度达到10°，从不同视角进行拍摄。对于误检的标定板，采用RANSAC算法通过多次迭代将不匹配的输入点进行剔除，最后利用可靠的位置点进行手眼标定矩阵的计算。

**3.3 模型简化**

由于本文应用场景的特殊性，即AGV小车的高度在过程中不会发生变化，所以定位孔在z方向上恒为常数，故位姿校正可以简化为两个平面间的刚性变换过程。三维场景退化为二维后，矩阵***M***中需要确定的参数缩减到3个，一个旋转角和两个平移量。同时数据流的传递过程也可以得到简化，如图8所示，直接从相机坐标系转换到全局坐标系。

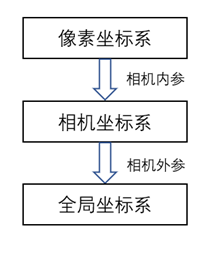


图8 二维空间下的坐标转换关系

以上做法的优势有两点，一是省去了中间转换到机器人基坐标系再转换到世界坐标系的过程，简化了问题的复杂度和计算的过程，二是由于坐标系的直接转换而带来的误差减小，同时保证了精度的可靠性。

这种情况下，相机外参的标定即为相机坐标系x-y平面到世界坐标系x-y平面的刚体变换矩阵的求解。如图9所示，利用机器人定位的高精度，控制机器人分别在x方向和y方向上移动指定的距离，分别求出定位孔在相机坐标系下的位置，以此计算两个平面间的变换矩阵。

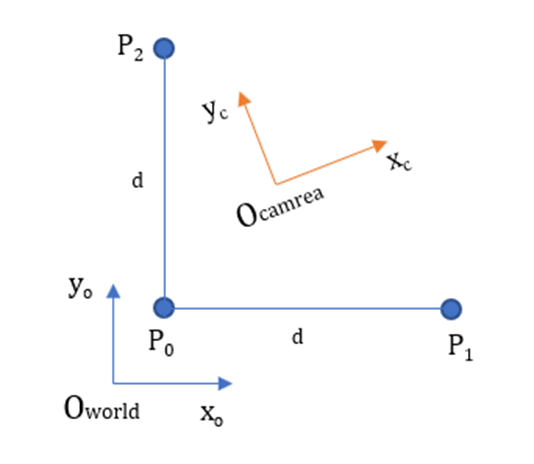


图9 相机坐标系x-y与世界坐标系x-y关系

具体计算过程如下：利用视觉识别计算出和在相机坐标系下的向量值，分别记和，而和在全局坐标系下的向量值是已知的和，设旋转矩阵为***R***。则有

(12)

其中，

容易计算求解得到旋转矩阵***R***。通过该矩阵可将定位孔的坐标从相机坐标系的x-y平面直接转换到全局坐标系x-y平面下。在此基础上进行后续计算，整个视觉校正过程得到了简化，同时保证了定位精度。

## 4 实验验证

通过实验，对以上提出的提高视觉定位精度的方法进行验证。实验原理如图10所示，通过测量视觉校正计算后得到位置P'和实际位置P在世界坐标系x-y平面上的偏差，来反映视觉校正结果的精确度。

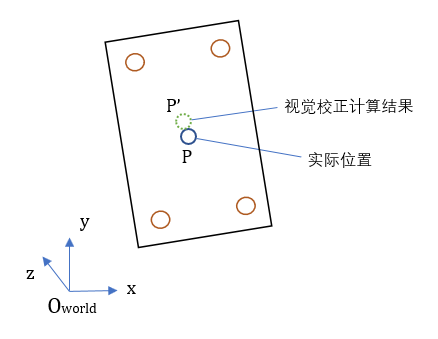


图10 测量视觉校正结果的偏差

本文设计了两组实验，一组采用普通视觉标定流程得到的参数，另一组采用误差消除策略改进后标定得到的参数。按上文反映精度的方法测量视觉校正得到的位置与实际位置的偏差值，将最终的偏差结果表现在同一张图中，如图11所示，横坐标为x方向上的偏差，纵坐标为y方向上的偏差。



图11 消除偏差策略实验效果

其中圆圈表示直接用标定结果计算的偏差，星号表示误差消除算法改进后的结果，可以看出偏差问题得到了明显的改善，直接标定结果的偏差值均方根为1.4289mm，改进后的偏差值均方根为0.1881mm。两组数据在y方向上偏差分布均匀，在x方向上多数出现偏大，分析原因可能是相机坐标系z轴与世界坐标系z轴的平行程度存在微小偏差导致。同时测量数据显示，应用误差消除算法后定位偏差可以控制在0.5mm以内，满足精度要求高的装配需求。

## 5 结束语

本文通过机器人视觉系统来完成装配目标位置的精确定位和校正。在分析了相机标定原理的基础上，通过内参标定和手眼标定计算出各坐标系间转换的齐次矩阵。分析坐标从源图像到世界坐标系的计算过程中可能引入的误差并提出相应的误差消除策略。针对定位孔识别的特殊性，提出了简化计算模型和坐标转换过程的算法，最后通过实验验证了误差消除策略的可行性，精度提升效果明显，为机器人视觉装配工作提供了依据。

参 考 文 献

1. 张泉灵, 洪艳萍. 智能工厂综述[J]. 自动化仪表, 2018, 39(8): 1.
2. 张辰, 张华, 冯兴华, 等. 视觉引导技术在 SCARA 机器人装配任务中的应用[J]. 传感器与微系统, 2019 (2): 45.
3. 赵国庆. 安全带壳体尺寸及插锁装配视觉检测系统研究[D]. 长春工业大学, 2014.
4. 傅华强. 装配机器人视觉系统应用与软件开发[D]. 东南大学, 2016.
5. Pachtrachai K, Vasconcelos F, Dwyer G, et al. Hand-eye calibration with a remote centre of motion[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(4): 3121-3128.
6. 陈勋漫. 基于手眼视觉的 Baxter 双臂机器人轴孔抓取与装配方法研究[D]. 华南理工大学, 2016.
7. Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. IEEE Transactions on robotics and automation, 1989, 5(3): 345-358.

作者简介：

**吴广雨**，男，（1995-），浙江绍兴人，硕士研究生，研究方向为机器人控制与视觉应用。

**张伟军**，男，（1971-），上海人，博士，副教授，研究方向为特种机器人设计、智能机器人。

**杨保佳**，男，（1996-），湖北天门人，硕士研究生，研究方向为机器视觉与机电一体化。