电动汽车自动充电机器人导航程序设计及应用*

刘文奇，胡晓羽

（上海电气集团股份有限公司中央研究院，上海 200040）

摘 要：电动汽车自动充电机器人是解决电动汽车充电难，充电操作不便的重要途径之一。设计了一种基于椭圆检测和双目视觉的电动汽车直流充电口位姿估计程序，该程序首先需要对图像进行预处理操作，然后进行轮廓提取与筛选，最后进行最小二乘法椭圆拟合、过滤，并针对拟合过滤后的椭圆进行电动汽车直流充电口位姿的估计。经过针对该方法程序的第三方测试，得出的结论是精确度满足需求，并且算法稳定，应用场景普适性高。

关键词：电动汽车；机器人导航；位姿估计；双目视觉；椭圆拟合

中图分类号：U469.72 **文献标识码**：B **文章编号**：1009－5438(2021)05－0091－05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.05.023

The navigating designation and application of electric vehicle automatic charging robot

Liu Wen－qi, Hu Xiao－yu

(*Center Academy of Shanghai Electric Group Co. Ltd., Center Academe Shanghai* 200040, *China*)

Abstract: Electric vehicle automatic charging robot is one of the ways to solve the difficult and inconvenient of charging operation of electric vehicles. A pose estimation method of electric vehicle DC charging port was designed based on ellipse detection and binocular vision in this paper. Firstly, the image is preprocessed, then the edges are extracted and filtered, and finally the least square ellipse fitting is carried out after filtering, the pose of the DC charging port is estimated according to the ellipse after filtering. Through the third－party test, it could be found that the accuracy of the method meets the requirements, and the algorithm is robust and the application scenario has high universality.

Key words: electric vehicle; robot navigation; pose estimation; binocular vision; ellipse fitting

随着新能源汽车的推广，电动汽车产业取得了长足的发展，然而，目前电动汽车的普及范围依然有限，充电难、充电操作不方便是其中一个重要的原因。随着机器视觉技术的发展，装备视觉技术的机器人被广泛应用到各种各样的场景中。本文通过为装有双目视觉系统的电动汽车自动充电机器人，设计一种充电口位姿估计程序来解决这一问题。

1 背景分析

在电动汽车自动充电机器人的使用场景中，如何实现对不添加特征点的电动汽车充电口准确定位，提高视觉程序普适性是研发过程中一个亟待解决的重点问题。这一问题可以通过将电动汽车充电口类比成工件的形式，来寻求解决办法。目前，比较

* **收稿日期**：2021－08－17

作者简介：刘文奇(1993－)，男，山西省长治市人，硕士，工程师，现从事机器视觉算法研究工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

常见的工件识别方法是钟佩思等人[1]提出的改进的加速鲁棒特征(SURF)算法,能够实现实时准确定位。该方法基于加速分割测试特征检测器(FAST),对SURF算法的特征提取方式进行了改进。该方法与传统SURF算法相比,在提高了精度的同时,还大大缩短了运行时间。翟永杰等人[2]在进行工件定位时,采用利用最小外接矩形定位的方法,首先要建立了一个模板,记录模板最小外接矩形的中心以及长轴的斜率,然后在采集到图像后,计算工件的最小外接矩形的中心以及长轴斜率,并与模板进行比较,最终实现位姿估计。然而这些定位算法只能对充电口的中心以及旋转矢量求解进行定位,并不包含其倾斜矢量的求解,因此,更适用于电动汽车充电接口角度不变的情况。本文的识别方法的应用场景为针对多种车型的通用型充电装置,由于不同车辆的充电口倾斜矢量有所差异,但旋转矢量基本不变,因此,目前大部分的定位方法都不适用。由于车辆与机器人之间的距离不固定,需使用双目视觉来确定充电口的中心与机器人之间的距离。考虑到国标规定的直流充电接口的插接处是如图1所示的有多个圆形的工件,圆形为一种规则形状,与其他不规则形状相比,圆形在处理上难度较低。针对目前场景的这些特殊性,本文设计了一种基于椭圆检测和双目视觉的位姿估计程序。

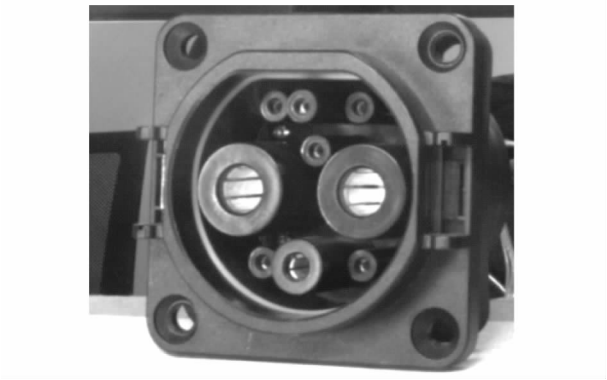


图1 电动汽车直流充电口工件

2 方法概述

在运行程序的主体部分之前,需要对视觉系统目前所使用的两个相机的内外参数进行标定,即双目标定。标定所得相机外部参数用于计算两个相机之间的位置关系,相机内部参数可以消除由于镜头造成的两个相机所拍摄图片的畸变。在使用时,应尽量使二者最终输出的误差较小。之后需要通过标定得到的内部参数对图片进行图像预处理操作,得到几乎没有畸变的图像,以便为后续的算法提供一个良好的处理环境。图像预处理之后,还需要对图像进行边缘提取,然后再进一步筛选边缘。将筛选后的边缘进行最小二乘法椭圆拟合,经过拟合之后,可以进一步得到每个椭圆的中心坐标、长轴偏转角度、长短轴长度等信息,通过这些信息进而进行位姿估计,来获得充电口的重心坐标、倾斜矢量,并由此获得直流充电口的位姿参数,并最终输出。

2.1 椭圆检测

通过程序调用椭圆检测模块来进行椭圆检测和椭圆过滤,该模块将确定类似图2所示左右相机拍摄的两张图片中电动汽车充电接口下半部分的3个大圆在图片上的参数。由于拍摄角度的原因,这些圆在图片中会表现为椭圆的形式。在这个模块中,程序首先通过canny算法对充电口进行边缘检测。在检测到边缘之后,程序会对弧度不够大或长度不够的边缘进行过滤,之后剩下的弧线则通过最小二乘法进行椭圆拟合。

椭圆的一般方程可写为:

$$x^2 + Axy + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \tag{1}$$

由式(1)可知,确定一个椭圆需求得A、B、C、D、E五个未知数,因此,要求采样点至少为5组。

在$N(N \geqslant 5)$组采样点(x_i, y_i),$(i = 1,2,3,\cdots\cdots,N)$中,根据椭圆非标准方程与最小二乘法原理,求目标函数:

$$F(A,B,C,D,E) = \sum_{i=1}^{N}(x_i^2 + Ax_iy_i + By_i^2 + Cx_i + Dy_i + E)^2 \tag{2}$$

的最小值确定参数A、B、C、D、E。令$F(A,B,C,D,E)$对各个参数的偏导数均为0,得:

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \frac{\partial F}{\partial B} = \frac{\partial F}{\partial C} = \frac{\partial F}{\partial D} = \frac{\partial F}{\partial E} = 0 \tag{3}$$

通过联立式(2)、(3),并将结果转化为矩阵的形式,即可得到线性方程:

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\begin{bmatrix} \sum x^2y^2 & \sum xy^3 & \sum x^2y & \sum xy^2 & \sum xy \\ \sum xy^3 & \sum y^4 & \sum xy^2 & \sum y^3 & \sum y^3 \\ \sum x^2y & \sum xy^2 & \sum x^3 & \sum y^3 & \sum xy \\ \sum xy^2 & \sum y^3 & \sum xy & \sum y^2 & \sum y \\ \sum xy & \sum y^2 & \sum x & \sum y & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \sum x^2y \\ \sum x^2y^2 \\ \sum x^3 \\ \sum x^2y \\ \sum x^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

解线性方程(4)，可得 A、B、C、D、E 五个未知数的值。通过这五个数，即可确定照片中椭圆的中心坐标 (x_0, y_0)，半长轴 a，半短轴 b，长轴偏转角度 θ 为:

$$x_0 = \frac{2BC - AD}{A^2 - 4B} \tag{5}$$

$$y_0 = \frac{2D - AD}{A^2 - 4B} \tag{6}$$

$$a = \sqrt{\frac{2(ACD - BC^2 - D^2 + 4BE - A^2E)}{(A^2 - 4B)(B + 1 - \sqrt{A^2 + (1 - B)^2})}} \tag{7}$$

$$b = \sqrt{\frac{2(ACD - BC^2 - D^2 + 4BE - A^2E)}{(A^2 - 4B)(B + 1 + \sqrt{A^2 + (1 - B)^2})}} \tag{8}$$

$$\theta = \tan^{-1}\sqrt{\frac{a^2 - b^2B}{a^2B - b^2}} \tag{9}$$

由式(5)(6)(7)(8)(9) 即可求得椭圆的五个参量。

之后，所有检测到的椭圆会经过一系列的过滤，过滤的方法主要包括两种，一种是通过椭圆的参数 a 的大小，另一种是通过椭圆的位置。通过比较椭圆半长轴大小，在过滤掉明显过大的椭圆之后，通过对椭圆半短轴的排序，那些明显过小的椭圆也会被过滤掉，另外，一些长轴偏转角度 θ 过大的椭圆因为明显变形也会被过滤。之后，主要通过比较各个椭圆中心坐标 (x_0, y_0) 的相对位置辅以对半长短轴 a、b 大小的比较，不需要的同心圆，如螺丝孔以及 3 个圆接口上方的两个小接口也会被过滤掉。最终的过滤结果将会如图 2 所示，左右各一张的含有贴合圆形接口边缘的绿色椭圆图片的形式，保存在过程文件夹中便于查看。

最后，椭圆检测模块会将通过过滤的左右两张图片的所有椭圆的参量进行输出，输出的参数只包括检测出 2、3 个圆的情况。当检测出的椭圆少于 3 个时，程序会根据已经检测到的两个椭圆的相对位置，推算出第三个圆的大致位置，并对这个位置的图片进行切割和二次检测，若依然没有检测到椭圆，程序会报错并跳出。

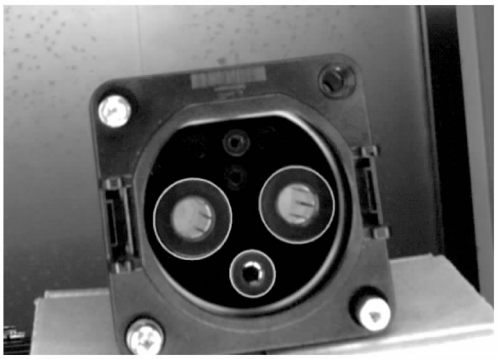


图 2　椭圆检测筛选后的最终结果示例

2.2　位姿估计

根据在单目视觉下，目标圆平面的几何测量模型为椭圆的原理[3]，在新相机坐标系(左相机为例) $G_lu_lv_l\omega_l$ 下，设空间圆面上 P_l 点的坐标为 $P'_l(\gamma_l u_{pl}, 0, \gamma_l f_l)$，空间圆面上 Q_l 点的坐标为 $Q'_l(-\gamma_l u_{pl}, 0, \gamma_l f_l)$，$\gamma_l$ 是一个包含半径 R 的比例系数。所以，在圆上的第一个特殊的空间向量为 $Q'_lP'_l = (\gamma_l u_{pl} + \gamma_l u_{ql}, 0, 0)^T$，其中 u_{pl} 和 u_{ql} 是左图像上两个特殊的像素点的第一个坐标分量，这两个像素点是通过对上一节求得的椭圆标量的计算，所得到椭圆长轴顶点 $\tilde{p}_l(u_{pl}, v_{pl}, f_l)$ 和 $\tilde{q}_l(u_{ql}, v_{ql}, f_l)$，而同时这两个像素点使得在最初的左相机坐标系(Left camera coordinate system，LCCS) 下使得可视角 $\angle\tilde{p}_lG_l\tilde{q}_l$ 达到最大。

由于 $Q'_lP'_l = (\gamma_l u_{pl} + \gamma_l u_{ql}, 0, 0)^T$ 包含有未知的变量，所以将其单位化，在这个变化过程中不改变其空间指向，$Q'_lP'_l$ 对应的单位向量设为 $\vec{n}_i = (1, 0, 0)^T$。

考虑到最初的 LCCS 坐标系和旋转后，$G_lu_lv_lw_l$ 坐标系相机光心 G 并没有改变，所以它们之间的变化可以用一个旋转矩阵来表示，从 $G_lu_lv_lw_l$ 到 LCCS 之间的旋转矩阵表示为 R_{Gl}，$R_{Gl} = [\vec{u}_l, \vec{v}_l, \vec{w}_l]$。单位向量 $\vec{n}_l = (1, 0, 0)^T$，从 $G_lu_lv_lw_l$ 到 LCCS 坐标系下的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

转变可以表示为:

$$\vec{n}_l = R_{Gl}\vec{n}_l \tag{10}$$

同样的依照与式(10)相似的方式,右相机坐标系(RCCS)下,可以同样的得到特殊向量 $Q'_rP'_r$,被单位化后为 $\vec{n}_r = (1,0,0)^T$。单位向量 $\vec{n}_r = (1,0,0)^T$,从 $G_ru_rv_rw_r$ 到 RCCS 坐标系下的转变可以表示为:

$$\vec{n}_r = R_{Gr}\vec{n}_r \tag{11}$$

现在,借助双目相机的优势[4],双目标定之后会得到左右相机之间的位置关系表示——旋转 R_{lr} 矩阵和平移 T。因为求得一个圆平面的法向量需要圆面上两个不共线向量的叉乘,左相机观测下,我们获得了一个 $Q'_lP'_l$; 右相机观测下,也获得了一个 $Q'_rP'_r$,为了消除未知变量的影响,它们被单位化了,但是并不改变各自的空间指向。由于是各自坐标系下的观测结果,将其统一到一个坐标系下,将式(11)从 RCCS 转换到 LCCS 下,可以按下列公式转变:

$$\vec{n}_r = R_{lr}^{-1}\vec{n}_r \tag{12}$$

$\vec{n}_r$ 是在左相机坐标系下,观测到的 $Q'_rP'_r$。

最后,同一坐标系在同一平面下不共线的两个向量式(10)(12),进行叉乘运算可以得到目标圆上四点,且其中任意三点不共线,由此可以通过连接任意两点作垂直平分线,三条垂直平分线的交点为三点所在目标圆的圆心 O。

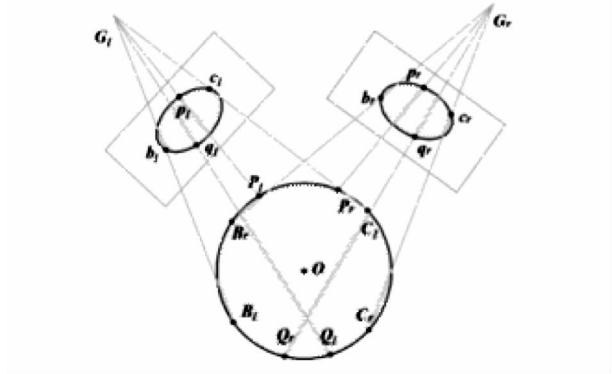


图3 空间目标圆平面双目测量模型示意图

如图3所示,通过对圆心位置进行判断,可以将上方的两个圆心连线的中点的坐标作为最终的插座位置坐标进行输出。另外,根据三点确定一个平面的原理,程序会根据三个圆心的坐标确定接口平面及其法向量,通过这个法向量,即可得到插座的角度信息,并能由此计算出机械臂需要运动的角度数据。

2.3 数据输出

最终视觉程序会通过法向量计算出机械臂的大致运动角度,以便对下一步运动做参考。之后,接口相对于左相机的坐标(X,Y,Z)、法向量(R_X,R_Y,R_Z),以及机械臂的参考运动角度(绕 X 轴转角,绕 Y 轴转角)就会被输出并保存,以便机械臂运动程序调用。通过对上文程序流程的整理,可以看到程序的实际运行流程如图4所示。

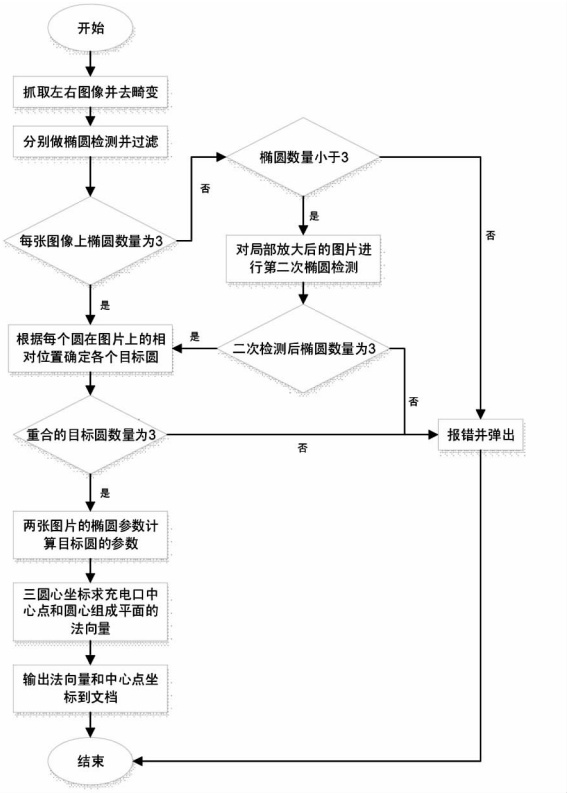


图4 视觉程序流程图

3 实验结果

为了测试程序的准确性,在浙江省计量科学院对该程序进行了第三方测试,分别对程序在元件横向、纵向、深度位置、水平角、俯仰角姿态等进行了测量及能力评估。测试使用 AT402 型激光跟踪仪,其误差范围为 $\pm(15+6\times10^{-6})$ μm。

对于元件在横向、纵向、深度方向上位移的距离的测量,第三方测试进行了14次,其误差距离的绝

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对值如图 5 所示，该程序测量的位置误差不大于 0.6 mm，且大部分情况下测量误差不会大于 0.3 mm，考虑到全自动充电机器人的充电接口可以加装柔顺机构，因此该范围是可以接受的。

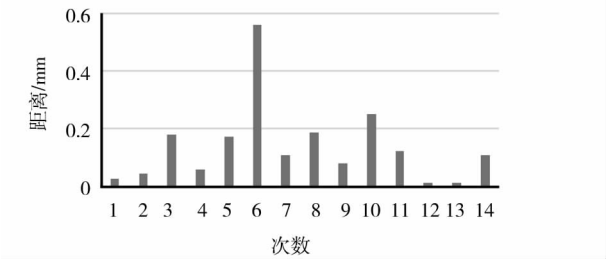


图 5　误差距离绝对值

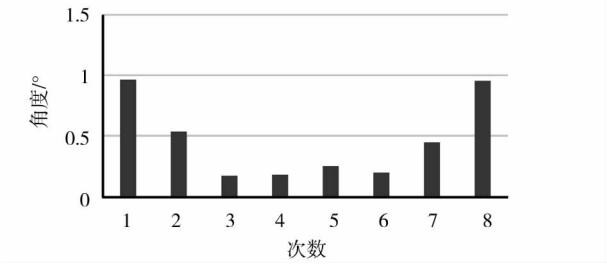


图 6　误差角度绝对值

图 6 是对元件水平角、俯仰角变化时，进行测量得到的误差角度的绝对值，角度变化的测量进行了 8 次。通过图 6 可以看出，视觉程序的角估算误差不超过 1°，且在大部分情况下都在 0.5°左右，依然是一个可以通过在充电口加装柔顺机构来解决的角度。

4　结语

本文针对电动汽车直流充电接口圆形的特点，提出了一种基于椭圆特征的电动汽车直流充电接口位姿估计方法，利用圆与椭圆之间的关系，针对最小二乘法拟合后的椭圆，进行相关参数求解，进而得到直流充电接口的位姿参数。该方法能够对电动汽车直流充电接口进行较准确的位姿估计，满足全自动充电机器人的导航精度需求。该方法简单可靠，不需要额外添加任何特征点，普适性高。

参　考　文　献

[1] 钟佩思，刘敬华，刘梅，等. 基于改进的加速鲁棒特征算法的工件定位方法[J]. 科学技术与工程，2019，19(5)：197－202.

[2] 翟永杰，刘金龙，程海燕. 基于机器视觉的汽车工件抓取定位系统设计与开发[J]. 现代电子技术，2018，41(20)：6－9，13.

[3] Fornaciari M.，Prati A.，Cucchiara R. A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications [J]. Pattern Recognition，2014，47：3693－3708.

[4] 潘琪，秦襄培，尹雄，等. 基于双目视觉的工件测量研究[J]. 智能计算机与应用，2018，8(1)：18－21，26.

(上接第 71 页)

[3] 武会宾，尚成嘉，赵云堂，等. 回火对低碳贝氏体钢组织稳定性及力学性能的影响[J]. 钢铁，2005，40(3)：62－65.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net