

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.054

HSR-JR603 机器人视觉抓取系统自动定位程序优化设计

唐兴贵

(昆明工业职业技术学院, 云南 安宁 650302)

摘要:为了提高机器人视觉抓取系统自动定位程序的准确性和鲁棒性,解决传统方法过于依赖纹理信息导致误差较大的问题,提出基于点线特征匹配的 HSR-JR603 机器人视觉抓取系统自动定位程序优化方法。以最小化重投影误差为目标,求解出最优手眼标定参数,调整相机工作状态;通过图像处理技术对采集的目标图像进行优化处理,提取包含抓取目标的点特征和线特征,构建点线特征的视觉里程计;根据里程计模型,自动求解出点特征匹配结果和线特征匹配结果,将二者相结合得到最优定位结果。实验结果表明:所提优化方法应用后,能够显著提高自动定位程序的准确性,具有较高的实用价值和应用前景。

关键词:机器人;视觉抓取系统;自动定位;点特征;线特征;优化方法

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)02-0276-05

Program Optimization Design for Automatic Positioning of HSR-JR603 Robot Visual Grabbing System

TANG Xinggui

(Kunming Vocational and Technical College of Industry, Anning 650302, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and robustness of the automatic positioning program of robot visual grasping system and solve the problem of over-reliance on texture information by traditional method resulting in large errors, an automatic positioning program optimization method of HSR-JR603 robot visual grasping system based on point line feature matching is proposed. The optimal hand eye calibration parameters are solved with the goal of minimizing reprojection errors and the camera's working state is adjusted. With image processing technology, the collected target image is optimized, point and line features including the captured targets are extracted to construct a visual odometer with point and line features. Based on the odometer model, the point feature matching results and line feature matching results are automatically solved and combined, obtaining the optimal positioning result. The experimental results show that the application of the optimized method can significantly improve the accuracy of automatic positioning programs and has high practical value and application prospects.

Keywords: robot; visual grabbing system; automatic positioning; point features; line features; optimization method

0 引言

机器视觉技术投入工业生产后,涌现出多种智能化设备^[1],以期达到生产智能化的目的。目前,以机器视觉技术为核心的机器人抓取系统开始出现,HSR-JR603 机器人视觉抓取系统是最新提出的一个系统,该系统由信捷智能视觉控制系统、HSR-JR620 机器人控制系统、S7-1200 流水线控制系统 3 部分构成,并且包含高效的自动化编程功能^[2],可以实现对工件的智能识别、定位和抓取。但经过实际运行可以发现,该系统在抓取过程中,对目标工件的自动定位存在偏差,从而影响了抓取工作效率。因此,如何优化 HSR-JR603

机器人视觉抓取系统自动定位程序,成为很多研究人员所关注的重点。

文献[3]针对动态环境中的视觉定位优化问题进行研究,提出利用目标检测和语义分割原理,获取动态环境中的语义实体和动态语素,结合特征匹配策略过滤动态特征点,得到优化后的视觉定位结果。但是,该方法定位结果存在较大偏差。文献[4]为了得到更加准确的目标定位结果,在特征提取过程中应用基于残差网络的特征编码策略,同步获取图像几何特征、语义特征。通过优化后的动态路由网络描述全局特征向量,由此得出优化后的自动定位结果。实验结果表明,该定位优化方法鲁棒性较差。文献[5]提出应用改进遗

基金项目:云南省教育科学规划单位资助项目(BE22014)

作者简介:唐兴贵(1984—),男,云南安宁人,讲师,本科,研究方向为工业机器人现场编程、工业机器人系统集成技术和三维数字化技术等, rangranlubvv@163.com。

传算法对传统的神经网络进行优化,形成一种具有更强全局寻优的网络结构,通过该网络展开双目视觉定位分析,得到自动定位结果。研究结果表明,优化定位方法需要经过长时间的迭代计算,定位效率较低。

为了提升机器人视觉抓取系统的工作质量,本文以 HSR-JR603 机器人视觉抓取系统自动定位程序为研究对象,设计一种基于点线特征匹配的自动定位程序优化方法。本文方法不仅考虑了抓取目标的点特征,还引入了线特征,能更加准确地匹配目标物体的位置和姿态信息。同时,本文方法针对传统自动定位程序过于依赖纹理信息的问题,通过最小化重投影误差来求解最优手眼标定参数,调整视觉抓取系统中相机工作状态,提高了自动定位程序的准确性和鲁棒性。

1 设计 HSR-JR603 机器人视觉抓取系统自动定位程序优化方法

1.1 求解视觉抓取系统最优手眼标定参数

针对 HSR-JR603 机器人视觉抓取系统中的智能相机进行研究,展开参数优化分析,确保采集高质量的图像作为自动定位程序优化的基础环节。在求解最优手眼标定参数时,需要先明确不同坐标系之间的转换关系,将其作为参数推理的依据^[6]。其中,摄像机外参数转换过程如图 1 所示。

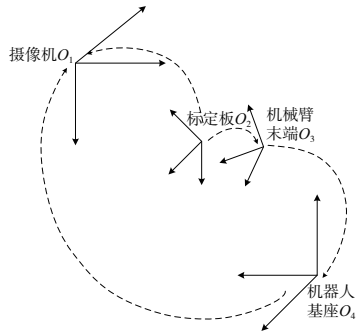


图 1 摄像机外参数转换示意图

在求解 HSR-JR603 机器人视觉抓取系统的手眼标定参数时,需要满足最小化重投影误差要求,在非线性优化求解策略的辅助下,计算出最优参数^[7]。先确定标定过程中棋盘格角点像坐标和世界坐标,并对其进行重投影处理,得到投影点为

$$q' = (q, T_a^b, T_w^a, T_b^d) \quad (1)$$

式中: q 表示角点在世界坐标系中的位置; q' 表示投影点; T 表示坐标转换矩阵; a, b, w, d 分别表示机器人抓取末端坐标系、机器人基座坐标系、标定

板坐标系和摄像机坐标系。

针对上述计算出的投影点进行分析,可以将重投影误差表示为式(2)。

$$E = (q - (q, T_a^b, T_w^a, T_b^d))^2 \quad (2)$$

式中 E 表示角点重投影误差。

以最小重投影误差为目标,对 HSR-JR603 机器人视觉抓取系统的最优手眼标定参数进行求解时,可以定义求解目标函数为

$$F = \min (q - (q, T_a^b, T_w^a, T_b^d))^2 \quad (3)$$

式中 F 表示目标函数。

针对式(3)所示的目标函数进行求解时,可以引入非线性优化方法中的 L-M 算法。以目标函数为依据,在待求解参数的邻域区域内展开线性近似分析,依托于广泛的非线性最小二乘原理,不断求取最大梯度值和最小梯度值,模拟“爬山”的过程一步步进行求解,直到得到最优的手眼标定参数,将其看做手眼变换矩阵的初始值,保证机器人视觉抓取系统的相机处于最优状态,而后再针对抓取目标进行观测,作为自动定位程序优化的基础环节。

1.2 提取抓取目标图像的点线特征

为了提高机器人视觉抓取系统的自动定位精度,本文采用了图像处理技术对采集的目标图像进行优化处理和边缘检测^[8]。首先使用中值滤波处理去除图像噪声干扰,然后通过全局二值化原理进行图像分割,最后利用 Sobel 算子计算像素点梯度来标识图像边缘,并获取图像轮廓信息,以此来实现机器人视觉抓取系统的自动定位。

针对优化处理后的图像进行点特征和线特征提取,利用这两类特征信息,对 HSR-JR603 机器人视觉抓取系统自动定位程序进行优化。在提取抓取目标图像的点线特征时^[9],先定义三维空间点在相机图像中投影点如式(4)所示。

$$p = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K P' = \begin{bmatrix} f & 0 & \varepsilon_x \\ 0 & f & \varepsilon_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} \\ \frac{Y}{Z} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: (u, v) 表示二维图像平面的像素点坐标; p 表示图像像素坐标; K 表示内参矩阵; P' 表示归一化坐标; f 表示焦距; $(\varepsilon_x, \varepsilon_y)$ 表示原点平移坐标; (X, Y, Z) 表示三维坐标点。

考虑到机器人视觉抓取过程中相机处于运动状态,及在运动过程中空间点的不同坐标之间变换,可以定义特征点的观测方程。

$$p = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & \varepsilon_x \\ 0 & f & \varepsilon_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{R}$ 表示旋转矩阵; $\mathbf{t}$ 表示平移矩阵。

在提取图像线特征时,先定义空间直线投影方程为

$$L = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ -f\varepsilon_x & f\varepsilon_y & f^2 \end{bmatrix} \mathbf{n} \quad (6)$$

式中: L 表示投影直线; $\mathbf{n}$ 表示空间线段与相机光心组成平面的法向量。

相机坐标系和世界坐标系之间的空间线变换,可以表示为普吕克坐标,引入该坐标后,即可得到图像线观测方程。

$$L = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ -f\varepsilon_x & f\varepsilon_y & f^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \times \mathbf{R} \\ 0 & \mathbf{R} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (7)$$

利用点观测方程和线观测方程,提取抓取目标图像的点线特征,将点线特征提取方程引入到自动定位程序中,作为定位优化的基础。

1.3 基于点线特征匹配实现自动定位程序优化

自动定位程序优化的实现,需要考虑极限约束对点线特征分别进行匹配分析,从而得到最优定位结果。经过左、右图像特征点匹配分析,可以确定特征点的实际三维坐标^[10]。

$$\begin{cases} X = \frac{(\chi_1 - \varepsilon_x)Z}{f} = \frac{\chi_1 - \varepsilon_x}{\chi_1 - \chi_2} \\ Y = \frac{(\delta_1 - \varepsilon_y)Z}{f} = \frac{\delta_1 - \varepsilon_y}{\chi_1 - \chi_2} \\ Z = \frac{f}{\chi_1 - \chi_2} \end{cases} \quad (8)$$

式中 (χ_1, δ_1) 、 (χ_2, δ_2) 表示匹配的特征点对。

依靠点特征匹配得到的自动定位结果可能会受到环境干扰出现误差,在优化自动定位程序时,还需要定义基于线特征的视觉里程计,准确传达环境的结构信息,在空间线表达过程中引入普吕克坐标,进一步优化自动定位结果。对于任意一个三维线段来说,其在双目图像上初始化匹配线段的普吕克坐标如图2所示。

基于图2所示的坐标冠词,可以定义左、右相机的像平面,如式(9)所示。

$$\begin{cases} \mu_1 = [(C_1 - S_1) \times (D_1 - S_1) - (C_1 \times D_1)]_{4 \times 1} \\ \mu_2 = [(C_2 - S_2) \times (D_2 - S_2) - (C_2 \times D_2)]_{4 \times 1} \end{cases} \quad (9)$$

式中: μ_1 表示左相机的像平面; μ_2 表示右相机的像平面; C_1 、 D_1 分别表示左相机像平面中端点 C 、 D 的投影点; C_2 、 D_2 分别表示右相机像平面中端点 C 、 D 的投影点; S_1 、 S_2 分别表示左、右相机位置点。

依托于式(9)推算出的像平面表达式,结合余弦确定的一个三点平面,即可确定当前抓取工件所在空间点的齐次坐标。

$$\Psi = (\mu_1 \mu_2^v - \mu_2 \mu_1^v) \sigma = \begin{pmatrix} m & \tau \\ -\tau & 0 \end{pmatrix} \sigma \quad (10)$$

式中: v 表示常数; Ψ 表示空间点的齐次坐标; σ 表示余弦确定的一个三点平面; (m, τ) 表示匹配的特征线的对偶普吕克坐标。

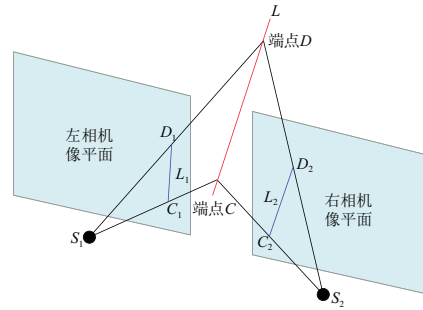


图2 双目初始化普吕克坐标

结合点特征匹配结果和线特征匹配结果,求出工件具体空间坐标,再通过相机的双目匹配得到精确的位姿信息,作为优化后自动定位程序的输出结果。

2 实验

2.1 搭建实验平台

在测试所提自动定位程序优化方法的有效性时,搭建了图3所示的机器人视觉抓取实验平台,并定义法兰工件作为抓取目标,针对法兰中心进行自动定位优化分析。

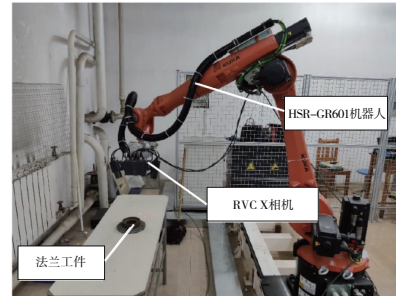


图3 实验平台

在图 3 所示的实验环境中进行抓取实验。分析所提的优化方法应用后,自动定位程序的定位结果的准确性,可以反映本文提出优化方法的应用效果。

2.2 调整相机参数

考虑到相机的参数设置结果会影响自动定位结果,按照上文研究内容,求解最优手眼标定参数,并观察参数调整前后标定误差收敛趋势,得到图 4 所示的对比结果。

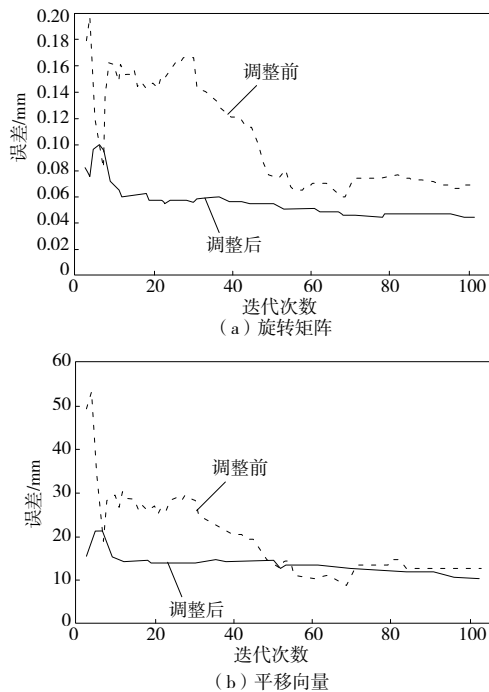


图 4 调整前后误差收敛曲线对比

根据图 4 可知,无论是旋转矩阵还是平移向量,在最优手眼标定参数求解和设置完成后,相机标定误差达到了大幅降低,且误差波动范围较小,不会对自动定位优化结果产生负面影响。

2.3 优化后自动定位结果

将待抓取的法兰工件放置在目标区域,驱动 HSR-JR603 机器人视觉抓取系统运行,并利用优化后的自动定位程序控制机械臂夹持标定针移动到工件中心,如图 5(a) 所示,并由示教器读取此时自动定位坐标,如图 5(b) 所示。



图 5 自动定位结果

利用所提方法优化后的自动定位程序进行 6 次定位分析,每次定位的工件放置区域存在细微差别,对比自动定位坐标和实际坐标,可以分析本文优化方法的应用效果。同时,为了加强对比性,采用文献[3]和文献[4]方法优化自动定位程序,按照同样的方式进行 6 次自动定位,做出的定位结果如表 1 所示。

表 1 不同方法优化后自动定位结果

单位:mm

实验次数	本文方法			文献[3]方法			文献[4]方法		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	-57.51	-880.33	1 130.78	-56.99	-880.02	1 130.57	-55.86	-879.79	1 132.01
2	-100.45	-945.36	1 131.97	-99.78	-945.11	1 131.72	-98.78	-944.23	1 131.12
3	-183.02	-985.73	1 130.54	-180.16	-986.32	1 131.14	-180.13	-986.01	1 130.98
4	-148.63	-1 136.85	1 128.94	-149.38	-1 136.10	1 127.03	-148.71	-1 135.12	1 126.87
5	-117.75	-1 254.07	1 129.81	-117.02	-1 255.76	1 130.71	-116.32	-1 255.16	1 139.64
6	-215.84	-1 164.57	1 166.78	-216.98	-1 163.85	1 167.99	-214.98	-1 162.79	1 165.73

以表 1 所示的自动定位坐标数据为依据,结合真实工件坐标信息,计算不同方法优化后抓取目标自动定位误差,对比图像如图 6 所示。

根据图 6(a) 可知,本文优化方法和文献[3]、文献[4]提出优化方法应用后, x 方向自动定位程

序的定位结果最大误差分别为 1.2 mm、2.2 mm、3.4 mm。而图 6(b) 和图 6(c) 显示,3 种优化方法应用后 y 方向定位结果的最大误差分别为 0.9 mm、2.0 mm、3.0 mm, z 方向的最大定位误差分别为 0.8 mm、2.1 mm、3.4 mm。本文优化方法应

用后,自动定位程序可以得到更加精确的定位结果。这是因为本文优化方法不仅考虑了抓取目标的点特征,还引入了线特征,从而提高了自动定位程序的准确性和鲁棒性。同时,通过最小化重投影误差来求解最优手眼标定参数,降低了对纹理信息的依赖,从而使得自动定位程序更加稳定可靠。

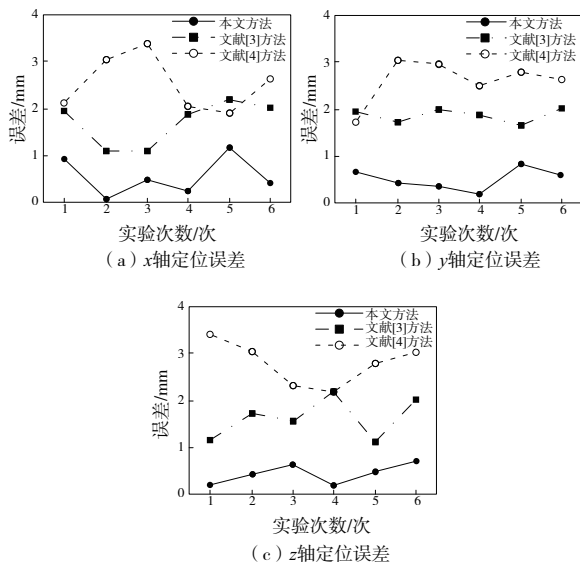


图6 不同方法优化后抓取目标自动定位误差对比

3 结语

在 HSR-JR603 机器人视觉抓取系统应用过程中,面临的最大的挑战就是定位精度较低。为此,设计一种基于点线特征匹配的自动定位程序优化方法,本优化方法实施后,改进了系统的自动定位程序,使得抓取系统可以更准确地自动定位不同规格的工件,有效地提高机器人视觉抓取系统的自动定位精度,并且满足各种场景的抓取需求,提

高了系统的生产效率,对于实现机器人抓取自动化具有重要的意义和应用价值。

参考文献:

- [1] 王连庆,钱莉. 基于视觉引导的工业机器人无序抓取系统设计[J]. 制造业自动化, 2022, 44(3): 86-89, 196.
- [2] 刘超,陈锦明,刘慧,等. 基于三维激光雷达与优化 DBSCAN 算法的果树定位方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 214-221, 240.
- [3] 邵晓航,吴杭彬,刘春,等. 语义关联约束的动态环境视觉定位优化[J]. 测绘学报, 2021, 50(11): 1478-1486.
- [4] 仇新,郑颺默,谭振华,等. 基于特征编码和动态路由优化的视觉定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(4): 451-460.
- [5] 褚新建,何丹,张伏. 基于改进 GA 优化 BP 网络的双目视觉定位研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(2): 28-30, 36.
- [6] 李哲,于海生,吴贺荣,等. 基于新型 RRT 算法与视觉定位的机械臂工件抓取[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(12): 148-153.
- [7] 米西峰,尚展奎,范媛媛,等. 基于双目视觉的食品分拣 Delta 机器人定位抓取技术[J]. 食品与机械, 2022, 38(6): 112-116, 212.
- [8] 李雪梅,李喆,张鑫,等. 基于机器视觉的阀口袋动态抓取系统设计[J]. 机床与液压, 2022, 50(12): 77-82.
- [9] 罗晶,陈金海,彭志轩,等. 基于机器视觉的机器人抓取实验系统[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(4): 45-50.
- [10] 王校峰,王建文,曹鹏勇,等. 机器视觉主导的机械臂动态抓取策略研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(17): 38-42.

收稿日期:2023-05-09