

基于点云的堆叠玛钢管件识别定位方法

杨喜年^{1,2}, 金守峰^{1,2}, 咎 杰^{1,2}

(1. 西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安市现代智能纺织装备智能实验室, 陕西 西安 710600)

摘要:针对机器人抓取堆叠玛钢管件识别定位精度较低等问题,提出基于点云信息的堆叠玛钢管件识别定位方法。通过双目视觉获取管件的视差图,采用 HSI 权重分配及左右一致性校验法对玛钢管件的遮挡点进行校验,得到完整的管件视差图;基于玛钢管件点云的法向量特征,剔除管件接触部分边缘点,利用欧式聚类对相互独立的管件点云进行分割提取,采用 ISS 算法得到玛钢管件的关键点云数据信息,通过 RANSAC 算法与 ICP 算法进行点云匹配,确定玛钢管件的位姿。实验结果表明,该方法对不同工况下堆叠玛钢三通管件的平均识别率为 89.5%,机器人抓取精度平均提升了 37%。

关键词:双目视觉;改进欧式聚类;堆叠管件;点云匹配;三维重构

中图分类号:TP391.4

文章编号:1000-0682(2024)02-0067-08

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.012

Identification and positioning method of stacked malleable steel pipe fittings based on point cloud

YANG Xinian^{1,2}, JIN Shoufeng^{1,2}, ZAN Jie^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Shaanxi Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Modern Intelligent Textile Equipment Key Laboratory, Shaanxi Xi'an 710600, China)

Abstract: Aiming at the problem of low recognition and positioning accuracy of robot grasping stacked steel pipe fittings, a recognition and positioning method of stacked steel pipe fittings based on point cloud information was proposed. Binocular vision was used to obtain the disparity map of the pipe fittings. HSI weight distribution and left-right consistency verification method were used to verify the occlusion points of the pipe fittings, and the complete disparity map of the pipe fittings was obtained. Based on the normal vector characteristics of the point cloud of the pipe fittings, the edge points of the contact part of the pipe fittings are eliminated, and the European clustering is used to segment and extract the independent point cloud of the pipe fittings. The ISS algorithm is used to obtain the key point cloud data information of the pipe fittings. The experimental results show that the average recognition rate of the proposed method for stacked Masteel three-way pipe fittings under different working conditions is 89.5%, and the robot grasping accuracy is improved by 37% on average.

Keywords: binocular vision; improved European-style clustering; stack fitting point; cloud matching; 3D reconstruction

收稿日期:2023-10-13

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-YB-288);湖北省数字化纺织装备重点实验室开放课题(KDTL2020005)

第一作者:杨喜年(2000—),男,甘肃武威人,硕士研究生,研究方向为机器视觉。E-mail:15193505579@139.com

通信作者:金守峰(1979—),男,满族,教授,硕士生导师,博士,研究方向为机器人视觉检测与控制。E-mail:jdxysf@126.com

0 引言

玛钢管件是以玛钢为原料制成的二通、三通等管件,在进行平口处理时,采用机器人代替人工完成管件操作,大大提高了工作效率,降低了人工操作的劳动强度^[1]。但是机器人在操作过程中,对物料箱中随机堆叠的管件识别定位精度不高,导致抓取成

功率下降。

随着 3D 视觉技术的快速发展,通过 3D 视觉获取堆叠状态下的目标位姿从而引导机器人进行操作,在各领域得到了广泛应用。杨小青等^[2]针对不同视角下点云的多视定位和配准效率问题,提出一种基于法向量改进的 ICP 算法,引入平衡因子的概念,给出适用范围,在不同的点云分布下,达到最优匹配。刘哲等^[3]提出了一种改进的基于 PCA 的快速 ICP 匹配算法,通过对 2 组点云进行主成分求解,形成各自的 PCA 坐标系;利用 K-D tree 快速搜索最近点完成点云的快速精确配准,有效处理了点云初始位置较差的情况,实现任意位姿关系下的 2 组点云的快速精确配准。沈晓晨等^[4]提出一种基于机器视觉的棉花识别与定位方法,通过改进脉冲耦合神经网络对双目立体视觉获取的棉花植株进行分割,利用立体匹配确定棉花的点云信息,解决了棉花定位难的问题。Andy z 等^[5]采用深度学习结合多视图 RGB-D 图像的方法对管件进行识别定位,通过模板匹配结合 ICP 算法计算管件的位姿,实现了机器人对管件的识别抓取。钱磊^[6]针对堆叠状态下的箱盒定位准确度低的问题,提出了基于视差信息对堆叠箱盒位姿估计的方法,通过 Blob 图像处理技术分割出需抓取箱盒的前景平面,根据所得位姿信息实现对箱盒的定位。WANG L L 等^[7]针对番茄采摘工序繁琐、难度大等问题,根据番茄的实际生长特点和采摘作业需求,通过双目视觉技术引导机器人进行采摘作业,实现对成熟番茄的识别和采摘。赵鹏宇等^[8]针对并联机器人在分拣过程中无法识别特定工件的问题,提出了一种基于机器视觉的工件识别定位技术,通过提取待识别图像中工件轮廓与工件模板轮廓的 Hu 矩特征进行相似性度量,实现了对工件的识别与定位。嵇登臣等^[9]针对零散多目标工件的分拣精度低的问题,提出了一种基于机器视觉的零散多目标分拣系统,利用形状模板匹配算法完成多个工件的识别定位,有效提高了平面上零散放置的多个工件的识别定位精准。熊雨农等^[10]提出了一种基于环形编码对角标志识别定位算法的视觉测量技术,通过 EDCircles 圆检测算法的标志点识别,Harries 角点检测算法的亚像素级定位及坐标变换的编码信息解码等技术实现了飞行试验动态的视觉测量。柳长源等^[11]为解决近色背景果实识别困难问题,提出了一种利用深度图像从果实形态角度进行果实识别定位的算法,根据散度最大原则,将边界点形成的封闭区域的果实图像导入点

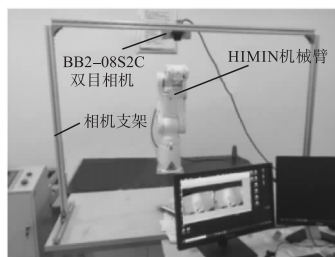
云,利用 RANSAC 算法得到目标果实的拟合球形,进而得出果实的尺寸以及三维空间位置。

针对堆叠状态的玛钢管件识别定位精度不高等问题,该文提出基于双目视觉的管件识别定位方法。通过双目视觉系统获取管件点云数据信息,采用改进欧式聚类分割算法提取单个管件的点云特征,以 SHOT 特征描述子对管件点云特征进行描述,得到了堆叠状态下的玛钢管件的位姿,实现对玛钢管件的识别定位。

1 玛钢管件的点云信息获取及预处理

1.1 基于双目视觉的玛钢管件点云信息

图 1 所示为基于双目视觉的玛钢管件识别定位系统。为了获取玛钢管件的点云信息,构建如图 1(a)所示的基于双目视觉的玛钢管件点云信息获取系统,通过 BB2-08S2C 双目相机获取如图 1(b)所示的堆叠状态下的玛钢管件的左右 2 个视图。HIWIN 六自由度机器人为抓取机构,双目视觉系统与机器人采用 Eye-to-Hand 方式。



(a) 玛钢管件视觉引导抓取系统



(b) 玛钢管件的左右视图

图 1 基于双目视觉的玛钢管件识别定位系统

由图 1(b)的左右视图进行立体匹配,得到玛钢管件的视差图,如图 2 所示。由于玛钢管件之间存在遮挡,导致管件的图像信息缺失,该文采用左右一致性校验法对视差图进行优化,结果如图 2(b)所示,填充了缺失视差值部分,提高了视差图中管件的完整性。

采用 HALCON 软件对图 2(b)中的玛钢管件视差图进行三维重构,得到如图 3(a)所示的玛钢管件深度图,由深度图像数据生成如图 3(b)所示的玛钢管件三维点云。

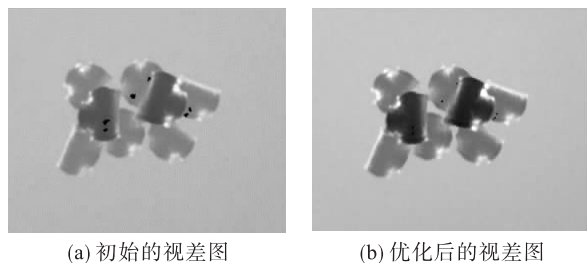


图 2 立体匹配视差图

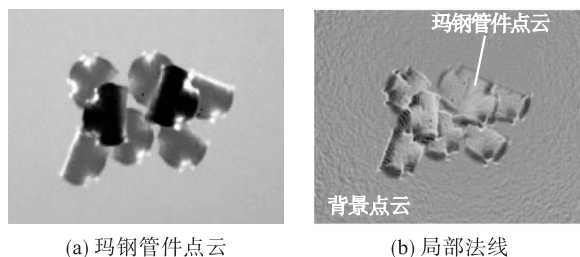


图 3 玛钢管件深度图和点云图

1.2 玛钢管件点云信息的预处理

在图 3(b) 的玛钢管件点云图中包括了玛钢管件点云和背景点云,背景点云的存在会形成一定的干扰^[12-13]。该文采用 M 估计抽样一致算法,拟合出如图 4(a) 所示的背景点云平面模型。由于背景点云与玛钢管件点云在 xyz 三个维度上的数值存在较大区别,因此设置玛钢管件点云信息在 xyz 三个维度的阈值为:

$$\begin{cases} -0.25 \leq X < 0.30 \\ -0.5 \leq Y < 0.5 \\ 0.6 \leq Z < 0.86 \end{cases} \quad (1)$$

通过直通滤波算法^[14]对拟合的背景点云中不在值域范围内的点进行剔除,保留满足各维度值域的点。图 4 所示为管件的点云处理,剔除背景点云及离群点后的玛钢管件点云如图 4(b) 所示。

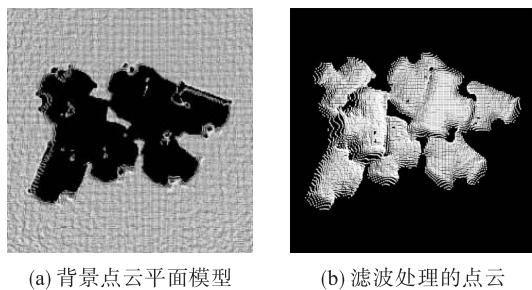


图 4 管件的点云处理

2 基于点云信息的识别与定位方法

2.1 基于改进欧式聚类的管件点云分割

玛钢管件点云信息由各单独的管件点云信息组成,各管件之间相互堆叠接触,部分相互接触的管件

点云在匹配时容易出现误匹配。图 5 所示为基于欧式聚类算法对堆叠状态下的玛钢管件点云信息分割后存在欠分割的情况^[15-18]。

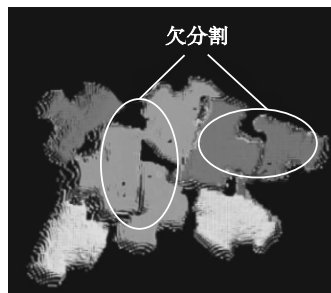


图 5 玛钢管件的欠分割

图 6 所示为管件接触位置的法向量。由如图 6 可知,由于玛钢管件接触位置点云信息的法向量密度与非接触部分的法向量密度存在很大区别,因此该文提出改进欧式聚类算法。

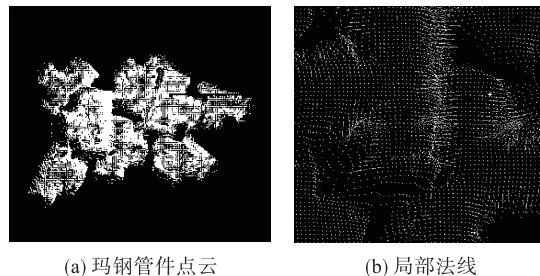


图 6 管件接触位置的法向量

图 7 所示为改进欧式聚类算法分割图,算法流程如下:

- (1) 通过 KD-Tree 建立玛钢管件点云 P 的拓扑关系;
- (2) 为玛钢管件点云创建模板,并将模板点云邻域的法向夹角阈值设为 σ_{th} ,采集邻域的半径 r ;
- (3) 计算玛钢管件点云中各点 P_i 的邻域半径内的所有点的法线夹角 σ_{pi} ,若 $\sigma_{pi} > \sigma_{th}$,则该点为边缘点,否则不为边缘点;
- (4) 剔除玛钢管件点云中接触点云的边缘点,得到各管件的边缘信息如图 7(a) 所示;通过改进欧式聚类算法对玛钢管件点云进行分割,结果如图 7(b) 所示。

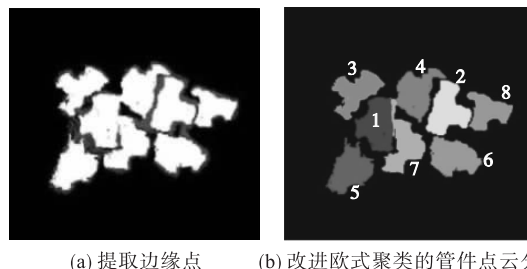


图 7 改进欧式聚类算法分割图

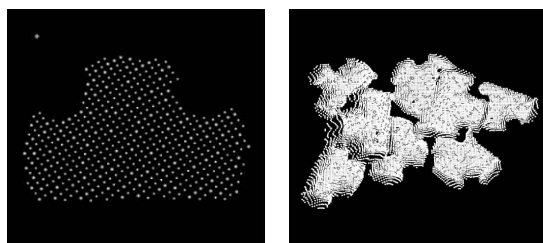
2.2 建立标准模板及关键点特征提取

通过双目视觉系统对标准玛钢管件进行测量和重建,得到如图 8 所示的模板点云数据。



图 8 模板点云

由于玛钢管件点云的数据量大,影响匹配效率,采用 ISS 算法对玛钢管件模板点云及堆叠管件点云信息进行关键点云特征提取,结果如图 9 所示,降低了玛钢管件点云数据量,保留了玛钢管件原本的特征。



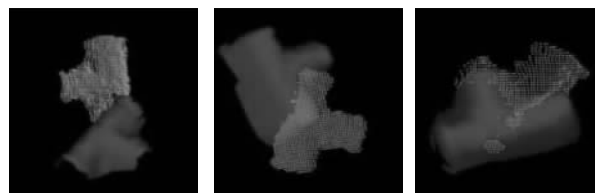
(a) 模板点云关键点提取 (b) 玛钢管件关键点提取

图 9 ISS 关键点云提取

2.3 点云匹配

玛钢管件的识别定位是通过模板点云的点对特

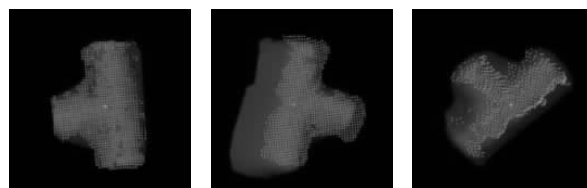
征找到实际场景中玛钢管件点云中各目标点云的位姿^[19-21]。该文基于 RANSAC 算法去除匹配中的错误点,采用 3 个不同序号的管件点云与模板点云进行粗匹配,结果如图 10 所示。



(a) 目标点云1 (b) 目标点云2 (c) 目标点云3

图 10 目标点云粗匹配结果

由图 10 可知,粗匹配仅仅将目标点云与模板点云的位姿大致重合,精度较低。为了进一步降低目标点云与模板点云位姿之间的重合误差,通过 ICP 算法实现点云位姿的精匹配,以得到精确的匹配结果。在粗匹配的基础上进行 ICP 点云精匹配,匹配结果如图 11 所示,目标点云的管口与模板点云的管口重合。



(a) 目标点云1 (b) 目标点云2 (c) 目标点云3

图 11 堆叠接触状态下的玛钢管件匹配过程

通过精匹配得到的各目标点云位姿数据见

表 1。

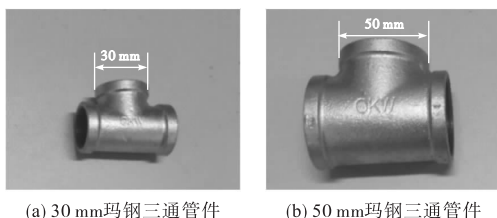
表 1 各目标点云相对于双目相机的位姿

目标序号	三维位姿坐标					
	x/mm	y/mm	z/mm	$R_x/(\circ)$	$R_y/(\circ)$	$R_z/(\circ)$
1	-233.14	777.24	-499.63	355.16	123.10	384.90
2	-217.91	793.44	523.81	335.61	843.08	-177.45
3	48.63	574.33	505.05	31.52	872.51	-123.88

3 实验分析

3.1 实验用玛钢管件

该文选用图 12 所示的 2 种不同型号玛钢三通管件进行实验分析。



(a) 30 mm 玛钢三通管件 (b) 50 mm 玛钢三通管件

图 12 实验用管件

3.2 实验数据分析

3.2.1 玛钢管件的识别定位实验

(1) 同规格的堆叠玛钢管件识别定位

同规格的堆叠玛钢管件定位识别结果如图 13 所示。选取 8 个规格为 50 mm 的玛钢管件在如图 13(a)所示的堆叠状态下进行识别定位实验,点云分割结果如图 13(b)所示,8 个点云匹配结果如图 13(c)所示。

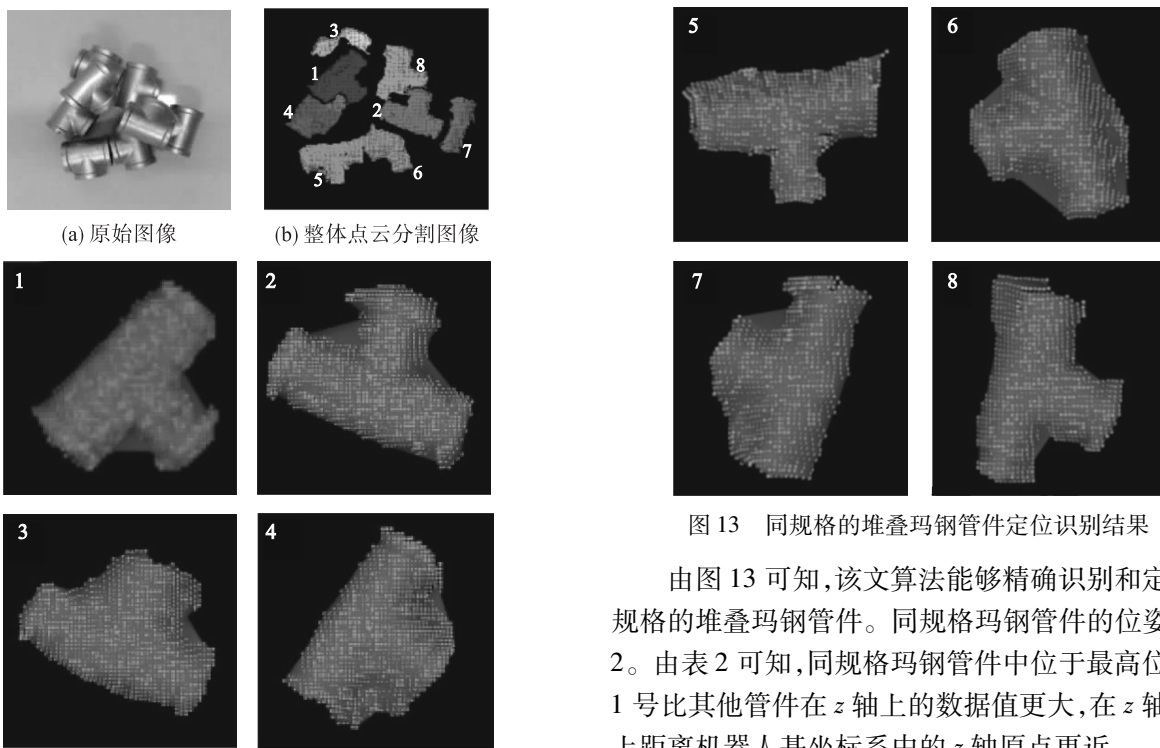


图 13 同规格的堆叠玛钢管件定位识别结果

由图 13 可知,该文算法能够精确识别和定位同规格的堆叠玛钢管件。同规格玛钢管件的位姿见表 2。由表 2 可知,同规格玛钢管件中位于最高位置的 1 号比其他管件在 z 轴上的数据值更大,在 z 轴方向上距离机器人基坐标系中的 z 轴原点更近。

表 2 同规格玛钢管件的位姿

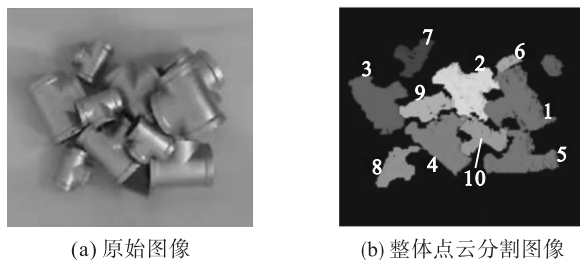
目标序号	三维位姿坐标					
	x/mm	y/mm	z/mm	$R_x/(\circ)$	$R_y/(\circ)$	$R_z/(\circ)$
1	90.602	411.083	-215.65	-179.443	1.587	96.774
2	-50.001	402.196	-222.768	-179.366	-7.757	91.348
3	-4.301	500.01	-287.42	-179.956	-4.760	104.470
4	111.935	469.101	-286.981	-176.130	6.410	90.946
5	79.120	343.496	-278.525	179.037	-2.476	84.661
6	-35.387	337.869	-272.010	178.102	-5.113	103.893
7	17.385	417.805	-290.299	179.652	-3.541	95.041
8	-84.997	433.239	-288.580	179.719	-4.655	108.501

(2) 不同规格的堆叠玛钢管件识别定位

选取 5 个规格为 50 mm, 5 个规格为 30 mm 的不同规格玛钢管件在如图 14(a) 所示的堆叠状态下进行识别定位实验, 点云分割结果如图 14(b) 所示, 点云匹配结果如图 14(c) 所示。

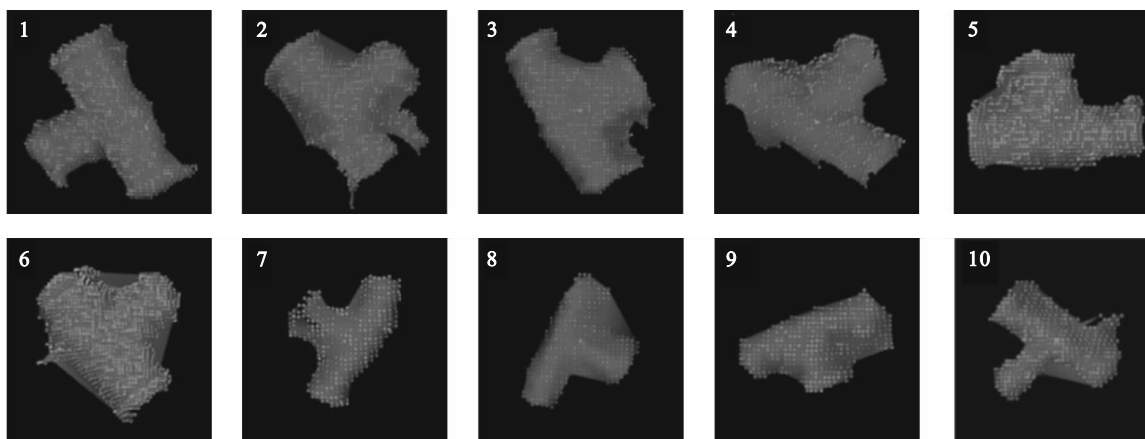
由图 14 可知, 该文算法能够精确的识别和定位

不同规格的堆叠玛钢管件。不同规格玛钢管件的位姿见表 3。由表 3 可知, 不同规格的堆叠玛钢管件的 1 号管件位于最高处, 在 z 轴方向上距离机器人基坐标系中的 z 轴原点更近, 优先抓取 1 号管件。9 号和 10 号管件位于次高处, 在 z 轴方向上的数值比 1 号管件小, 比其他位于底部的管件的数值大。



(a) 原始图像

(b) 整体点云分割图像



(c) 玛钢管件点云匹配图像

图 14 不同规格的堆叠玛钢管件定位识别结果

表 3 不同规格玛钢管件的位姿

目标序号	三维位姿坐标					
	x/mm	y/mm	z/mm	$R_x/(\circ)$	$R_y/(\circ)$	$R_z/(\circ)$
1	90.602	411.083	-215.65	-179.443	1.587	96.774
2	-50.001	402.196	-272.768	-179.366	-7.757	91.348
3	-4.301	500.01	-277.420	-179.956	-4.760	104.470
4	111.935	469.101	-276.981	-176.130	6.410	90.946
5	79.120	343.496	-278.525	179.037	-2.476	84.661
6	-35.387	337.869	-272.010	178.102	-5.113	103.893
7	17.385	417.805	-290.299	179.652	-3.541	95.041
8	-84.997	433.239	-288.580	179.719	-4.655	108.501
9	-197.869	516.830	-253.900	178.450	2.451	128.920
10	47.281	359.304	-242.679	-178.460	5.242	90.793

为验证 ICP 算法的有效性,通过标记点匹配误差(FRE)对同一工况下的不同目标点云的匹配效果进行验证。定义评价匹配误差的参数 θ 为:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^N F(p_1, p_2)}{N} \quad (2)$$

式(2)中的 $F(P_1, P_2)$ 定义为:

$$F(P_1, P_2) = \begin{cases} 1 & \text{Dist}(P_1, P_2) > \mu \\ 0 & 0 \leq \text{Dist}(P_1, P_2) \leq \mu \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\text{Dist}(P_1, P_2)$ 为匹配点对 P_1 至 P_2 的距离; μ 为阈值精度; N 为目标点云的对应点对数量; θ 为

未达到匹配精度对应点所占的比率。

分别对图 7(b) 中的目标点云 1、目标点云 2、目标点云 3、目标点云 4、目标点云 5 进行匹配,其中目标点云 1 的点云数量为 1100 个,目标点云 2 的点云数量为 971 个,目标点云 3 的点云数量为 809 个,目标点云 4 的点云数量为 1102 个,目标点云 5 的点云数量为 903 个。得到的不同点云数据的匹配误差见表 4。由表 4 可知,ICP 精匹配算法在匹配时间和匹配误差上相对于 RANSAC 点云粗匹配算法均有所提升,进一步验证了 ICP 算法的有效性。

表 4 各目标点云匹配误差对比

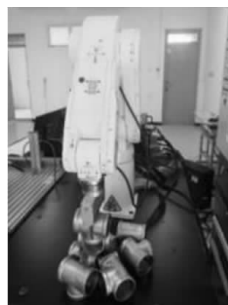
点云数据	RANSAC 粗匹配		ICP 精匹配	
	匹配时间/s	匹配误差/%	匹配时间/s	匹配误差/%
目标点云 1	3.2	0.000 25	2.6	0.000 13
目标点云 2	2.6	0.000 17	1.4	0.000 12
目标点云 3	2.2	0.000 32	1.1	0.000 25
目标点云 4	2.4	0.000 14	1.5	0.000 08
目标点云 5	2.5	0.000 29	1.2	0.000 16

3.2.2 玛钢管件的抓取实验

在双目视觉系统获取堆叠管件位姿的基础上,通过 HIWIN 六自由度机器人对不同场景的玛钢管件进行抓取,过程如图 15 所示。

对 2 种不同场景的玛钢管件进行多次实验,结果如表 5 所示。根据表 5 所示抓取实验结果可知,基于点云信息的玛钢管件抓取机器人系统可实现对散乱堆叠的玛钢管件的识别和定位,并根据管件的位姿完成抓取。其中,同规格堆叠的玛钢管件的识别定位成功率为 92%,不同规格堆叠的玛钢管件的识别定位成功率为 87%;机器人抓取同规格管件的精度提高了 32%,效率提高了 33.5%;机器人抓取不同规格管件的精度提高了 42%,效率提高了

32.8%。该方法有效提高了对散乱堆叠的玛钢管件的识别和定位精度,提高了抓取机器人的抓取精度和抓取效率。



(a) 同规格堆叠钢管件抓取



(b) 不同规格堆叠钢管件抓取

图 15 玛钢管件抓取实验

表 5 抓取实验结果

抓取系统	堆叠状态	抓取时长/s	实验次数/次	成功次数/次	成功率/%
有识别定位	同规格	5.56	100	92	92%
	不同规格	6.89	100	87	87%
无识别定位	同规格	8.36	100	60	60%
	不同规格	10.25	100	45	45%

4 结语

(1) 该文提出基于点云信息的堆叠玛钢管件识别定位方法,机器人抓取同规格管件的精度提高了 32%,效率提高了 33.5%;机器人抓取不同规格管件的精度提高了 42%,效率提高了 32.8%。

(2) 提出了一种优化的自适应权重立体匹配算法,采用 HSI 权重分配及左右一致性校验法对玛钢管件左右视图的遮挡点进行校验,填充左右图像遮挡部分的视差值,提高了玛钢管件视差图的精度。通过 M 估计抽样一致算法对目标点云及环境点云进行分割,得到了单独的目标点云。

(3) 提出了改进欧式聚类分割算法,利用点云的法向量特征,对玛钢管件接触部分边缘点进行剔除,解决了堆叠状态下各单独玛钢管件的点云分割问题。

参考文献:

- [1] 孟明辉,周传德,陈礼彬,等. 工业机器人的研发及应用综述[J]. 上海交通大学学报,2016(S1):98-101.
- [2] 杨小青,杨秋翔,杨剑. 基于法向量改进的 ICP 算法[J]. 计算机工程与设计,2016,37(01):169-173.
- [3] 刘哲,周天,彭东东,等. 一种改进的基于 PCA 的 ICP 点云匹配算法研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报,2019,36(4):473-478.
- [4] 沈晓晨,李霞,王维新,等. 基于双目立体视觉的成熟棉花识别定位[J]. 江苏农业科学,2017,45(16):

185-188.

- [5] BAKKER T, ASSELT K V, BONTSEMA J, et al. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field[J]. Biosystems Engineering,2011,109(4):357-368.
- [6] 钱磊. 基于双目视觉的堆叠箱盒目标识别与定位技术研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
- [7] WANGL L, ZHAO B, FAN J W, et al. Development of a tomato harvesting robot used in greenhouse[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2017,10(4):140-149.
- [8] 赵鹏宇,王宗彦,丁培燎,等. 基于机器视觉的并联机器人工件识别定位[J]. 制造技术与机床,2021,714(12):15-20.
- [9] 嵇登臣,王怡. 基于机器视觉的零散多目标分拣系统研究[J]. 工业控制计算机,2018,31(12):34-35+38.
- [10] 熊雨农,李宏. 一种基于靶标识别定位算法的视觉测量技术[J]. 测控技术,2023,42(01):28-34.
- [11] 柳长源,赖楠旭,毕晓君. 基于深度图像的球形果实识别定位算法[J]. 农业机械学报,2022,53(10):228-235.
- [12] 范娟,陈昌海,王静,等. 一种基于双边滤波和梯度信息的滤波算法[J]. 电视技术,2018,42(11):7-10.
- [13] 温维亮,郭新宇,杨涛,等. 玉米果穗点云分割方法研究[J]. 系统仿真学报,2017,29(12):3030-3034+3041.
- [14] GUO Y, SOHEL F, BENNAMOUN M, et al. Rotational projection statistics for 3D local surface description and object recognition[J]. International Journal of Com-

- puter Vision, 2013, 105(1):63–86.
- [15] 王鹏, 朱睿哲, 孙长库. 基于改进的 RANSAC 的场景分类点云粗匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(04): 312–320.
- [16] SALT I S, TOMBARI F, STEFANOL D. SHOT: Uniquesignatures of histograms for surface and texture description[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2014, 125(8):251–264.
- [17] WU L S, WANG G L, HU Y. Iterative closest point registration for fast point feature histogram features of a volumedensity optimization algorithm[J]. Measurement and on-trol-London-Institute of Measurement and Control, 2020, 53(1–2):29–39.
- [18] HELLER J, HENRION D, PAJDLA T. Hand-Eye and Robot-World Calibration by Global Polynomial Optimization[J]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), Hong Kong, 2014:3157–3164.
- [19] 周晏, 韩毅, 王旭彬, 等. 基于双目视觉的机器人抓取系统[J]. 河南科技, 2020, 39(35):4–7.
- [20] 温维亮, 郭新宇, 杨涛, 等. 玉米果穗点云分割方法研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(12):3030–3034+3041.
- [21] 熊风光, 霍旺, 韩燮, 等. 三维点云中关键点误匹配剔除方法[J]. 光学学报, 2018, 38(02):128–138.

(上接第 9 页)

表 4 多线程分离时间

文件大小/MB	单线程		自适应线程	
	线程数量	用时/s	线程数量	用时/s
100	1	183	1	183
500	1	915	3	314
1000	1	1833	4	466
2000	1	3672(≈1.0 h)	5	749(≈0.2 h)
5000	1	9166(≈2.5 h)	5	1842(≈0.5 h)

5 结论

该文针对不同型号弹载姿态记录仪在数据上传方式, 编帧结构, 回读指令等方面要求不同而设计的一种回读系统, 不仅读数接口多样, 还可以实现自定义回读指令, 数据实时绘制, 自定义数据分离规则等功能, 最大程度上适应了多种型号弹载记录仪的回读需求, 硬件上结合国产 FPGA, 通过较低的成本和功耗实现较高的功能性, 整体系统具有较强的通用性和实用性, 有较高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 刘俊, 石云波, 李杰. 微惯性技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] 郝晓明, 李杰, 胡陈君, 等. 基于 FPGA 的弹载数据回读系统设计[J]. 传感技术学报, 2015, 28(07):1023–1027.
- [3] 赵阳刚, 郭涛, 黄玉岗. 基于 FPGA 和 LVDS 的弹载数据回读系统设计[J]. 电子器件, 2017, 40(01):113–117.
- [4] 薛栋, 李杰, 张德彪, 等. 基于 LVDS 的高速数据回读系统设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2021, 42(02):135–139.
- [5] 张波, 李杰, 张海鹏, 等. 基于 FPGA 的 LVDS 传输链路的可靠性设计[J]. 电子器件, 2018, 41(05):1237–1241.
- [6] 李锦明, 郑志旺. 基于 LVDS 和 USB3.0 的高速数据传输接口的设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(07):1–6.
- [7] 崔文涛, 李杰, 张德彪, 等. 高过载高精度数据记录仪的设计与实现[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2021, 42(06):558–563.
- [8] 梁欣宇. 高动态图像传感器数据获取[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [9] 周方浩. 基于国产 FPGA 的分布式数据采集传输子系统的设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [10] 王万富, 王琢, 刘佳鑫, 等. 基于 Qt/Embedded 的农林智能装备导航定位算法研究及软件设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(03):63–68.
- [11] 薛登峰. 基于多线程技术的综合指显系统的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [12] 向明尚, 张志华, 潘丽艳. 基于 Qt 的多线程嵌入式系统设计与实现[J]. 科技与创新, 2017, No. 76(04):11–13.
- [13] Future Technology Devices International Ltd. AN_379 D3xx ProgrammersGuide[EB/OL]. (2017–06–07)[2023–07–8].
- [14] 张嘉璐, 段俊萍, 王淑琴. 基于 FIFO 缓存的数据混合编帧技术研究及实现[J]. 电子测量技术, 2020, 43(18):125–130.
- [15] 陈航宇. 正则表达式匹配算法研究[D]. 燕山: 燕山大学, 2016.