

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.06.003

堆叠筒子纱机器人无序分拣方法

刘 博¹, 金守峰¹, 宿月文^{2*}, 严 楠³, 李 毅⁴

- (1. 西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048;
2. 宝鸡文理学院 陕西省机器人关键零部件先进制造与评估省市共建重点实验室, 陕西 宝鸡 721016;
3. 宁波职业技术学院 机电工程学院, 浙江 宁波 315800; 4. 陕西省计量科学研究院, 陕西 西安 710100)

摘 要:针对筒子纱分拣机器人对作业目标堆叠时识别不准确、抓取位置不稳定的问题,课题组提出了一种堆叠筒子纱的机器人无序分拣方法。构建了具有3D视觉感知的筒子纱分拣机器人系统,利用 Kinect V2 相机获取堆叠筒子纱的图像信息,对采集到的筒子纱点云进行处理;通过 M 估计抽样一致性算法(MSAC)和直通滤波算法对原始点云进行裁剪,采用改进 E-R 分割算法和 ICP 算法完成点云的分割和配准,得到筒子纱的位姿信息;最后使用机器人进行抓取实验。实验结果表明:该方法能够实现对堆叠场景下的作业目标的识别定位,系统的抓取成功率达到 86%,可以满足筒子纱分拣的实际生产需求。

关 键 词:筒子纱;分拣机器人;点云分割;点云配准;M 估计抽样一致性算法

中图分类号:TP242;TH164

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2022)06-0014-08

Robotic Unordered Sorting Method for Stacked Bobbin Yarns

LIU Bo¹, JIN Shoufeng¹, SU Yuewen^{2*}, YAN Nan³, LI Yi⁴

- (1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
2. Shaanxi Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Evaluation of Robot Key Components, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721016, China;
3. Mechanical & Electrical Engineering Institute, Ningbo Polytechnic, Ningbo, Zhejiang 315800, China;
4. Shaanxi Institute of Metrology Science, Xi'an 710100, China)

Abstract: In response to the problems of inaccurate recognition and unstable grasping position of the stacked operation targets by the bobbin yarn sorting robot, a disorderly sorting method by robot for stacked bobbin yarns was proposed. The robot system with 3D vision perception was built, using the Kinect V2 camera to acquire the image information of the stacked yarn, and the point cloud of collected yarn was processed. The original point cloud was cropped by MSAC (M-Estimation Sampling Consistency Algorithm) and straight pass filtering algorithm, and the segmentation and alignment of the point cloud was completed by improved E-R segmentation algorithm and ICP algorithm to obtain the positional information of the bobbin yarn, and finally the robot was used for verification by grasping. The experimental result shows that this method can recognize and locate the working target in stacking scenario, and the success rate of the system reaches 86%, which meets the actual production requirements of bobbin yarn sorting.

Keywords: bobbin yarn; sorting robot; point cloud segmentation; point cloud alignment; MSAC (M-Estimation Sampling Consistency Algorithm)

纺织行业是典型的劳动密集型产业,在社会经济发展中具有重要地位。筒子纱是纺织工艺的一个终端

产品,一般为圆柱或圆锥形,是生产布料、衣物和毛巾等产品的重要原材料^[1]。目前,筒子纱在搬运时使用

收稿日期:2022-06-20;修回日期:2022-09-07

基金项目:陕西省科技厅重点研发计划项目(2020GY-172);陕西省重点研发计划项目(2021GY-326);宁波市科技创新 2025 重大专项(2019B10075)。

第一作者简介:刘博(1997),男,陕西富平人,硕士研究生,主要研究方向为机器人视觉及控制。通信作者:宿月文(1979),男,山西忻州人,博士,副教授,主要研究方向为机器人及关节减速器。E-mail: suyuewen@163.com

了机器人分拣大大提高了生产力。然而,在筒子纱堆放、遮挡场景下,传统示教型机器人的分拣存在巨大困难,随着纺织行业生产向智能化、自动化转变,机器视觉辅助作业已成为一种必然趋势^[2-3]。

利用视觉辅助机器人完成相关动作是目前研究的热点,受到了研究人员高度关注。张勤等^[4]针对复杂背景下番茄串采摘点识别定位问题,提出了基于 RGB-D 信息融合和目标检测的番茄串采摘点识别定位方法,引导机器人完成采摘任务。饶期捷等^[5]融合机器视觉技术提出了一种基于改进的 Canny 边缘检测和 Hough 变换的机器人抓取检测分类算法,实现了机器人的目标抓取。高茂源等^[6]针对管件在机器人抓取中的分类识别、位姿估计等问题,提出了一种基于双目视觉的多类型管件分类识别与位姿估计方法。Lou^[7]提出了一种基于机器视觉模型的高斯混合机械臂识别与抓取方法,提高了机器人的抓取精度。陶杰等^[8]建立了一套基于机器视觉的零部件抓取系统,实现了水泵生产自动化。Gao 等^[9]开发了一种基于视觉的密封圈组装系统,提高了生产线的效率。滕臻等^[10]针对静脉药物调配机器人在药瓶类型分类、药瓶关键尺寸测量的问题,结合机器视觉和深度学习,提出了一种高效稳定的识别测量方法。权宁等^[11]搭建了一套工业机器人视觉码垛实验系统,提高了工件的码垛效率,降低了工人劳动强度。周其洪等^[12]利用工业相机采集纱线被吸入吸嘴的图像,实现了对细纱接头机器人的纱线断头的识别定位。

为了实现筒子纱分拣机器人对堆叠目标的抓取,必须要能够有效识别类圆柱体的空间位置与姿态。为此,课题组提出了一种具有 3D 视觉感知的解决方法,通过 Kinect V2 相机获取筒子纱目标的点云图像,根据点云处理及目标识别等算法获得筒子纱的位姿信息,最后引导机器人完成对筒子纱的抓取任务,并实验验证了方法的有效性。

1 堆叠筒子纱机器人无序分拣系统构建

1.1 堆叠筒子纱机器人无序分拣系统实验平台

基于 3D 视觉的筒子纱分拣实验平台如图 1 所示,由 Kinect V2 相机、HIWIN 6 自由度机械臂、二指电动夹爪、计算机和抓取目标筒子纱构成。Kinect V2 相

机作为采集筒子纱数据的视觉感知元件,由 RGB 彩色摄像头、红外线发射器和红外 CMOS 摄影机组成,以 30 帧/s 的帧速获取 $1\,920 \times 1\,080$ 像素分辨率的 RGB 图像、红外图像和 512×424 像素分辨率的深度图像。相机采集到的筒子纱图像如图 2 所示。

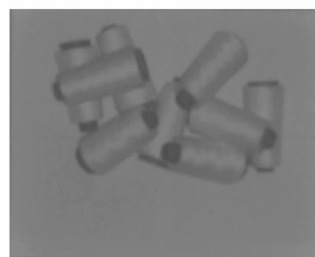


图 1 实验平台

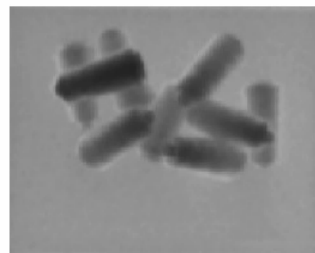
Figure 1 Experimental platform



(a) RGB图像



(b) 红外图像



(c) 深度图像

图 2 Kinect V2 采集的筒子纱图像

Figure 2 Image of bobbin yarn captured by Kinect V2

机械臂与 Kinect V2 相机组成了手眼标定(eye-to-hand)系统^[13],计算机作为上位机,通过数据处理获取筒子纱目标的三维信息,同时引导机械臂完成分拣作业。由图 1 可知,Kinect V2 相机置于筒子纱上方,获取筒子纱 RGB 图像与深度图像信息,并将 2 种图像信息相融合创建筒子纱点云数据,对其进行点云裁剪及点云分割,采用 ICP 算法进行点云配准,得到筒子纱的位姿信息,引导机器人完成筒子纱的无序分拣。

1.2 Kinect V2 相机标定

为了实现对筒子纱目标的精确定位,需要对相机

进行标定。Kinect V2 相机的标定主要包括深度图像与 RGB 图像的重合,以及摄像头的标定。目前采用 Open NI 函数完成 RGB 图像与深度图像的校正工作。课题组基于 MATLAB2020a 标定工具箱对 Kinect V2 相机的摄像头进行标定,根据所获取的标定板图像及标定板的参数可检测到棋盘格的角点,通过返回检测到的角点的像素点坐标来完成标定,标定板图像如图 3(a)所示,9 张标定板与相机的相对位置关系如图 3(b)所示,重投影误差平均为 0.43%,小于 0.50%,满足使用要求,具体每张图像的重投影误差如图 3(c)所示。

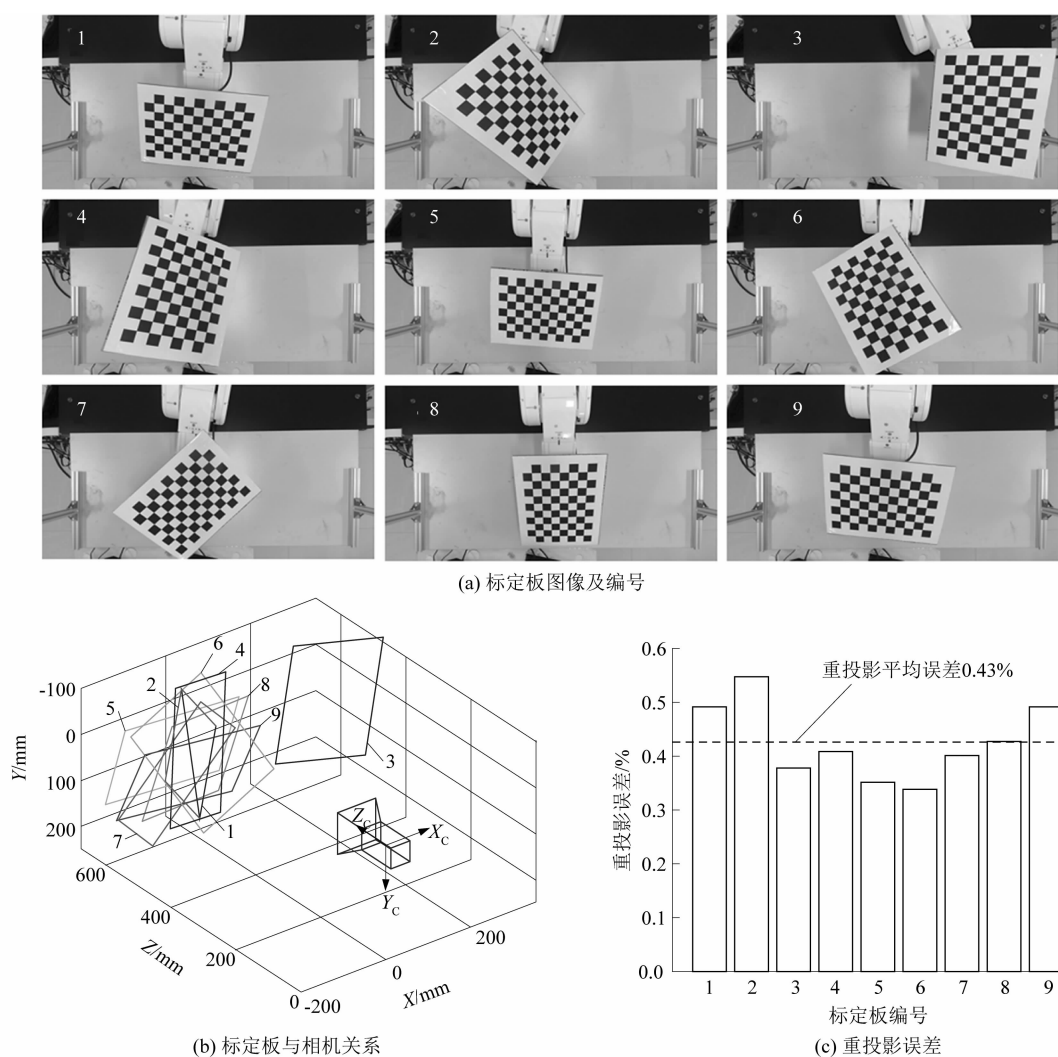


图 3 相机标定

Figure 3 Camera calibration

2 点云获取及预处理

2.1 筒子纱点云获取

Kinect V2 相机采集到的筒子纱点云如图 4(a)所

示,受相机工作场景的影响,图像中存在筒子纱、承装筒子纱的盒体以及周围背景的点云,盒体以及周围背景的点云为干扰点云。为了准确获取筒子纱的点云数

据,课题组采用 MSAC 算法和直通滤波算法对筒子纱 的原始点云数据进行预处理。

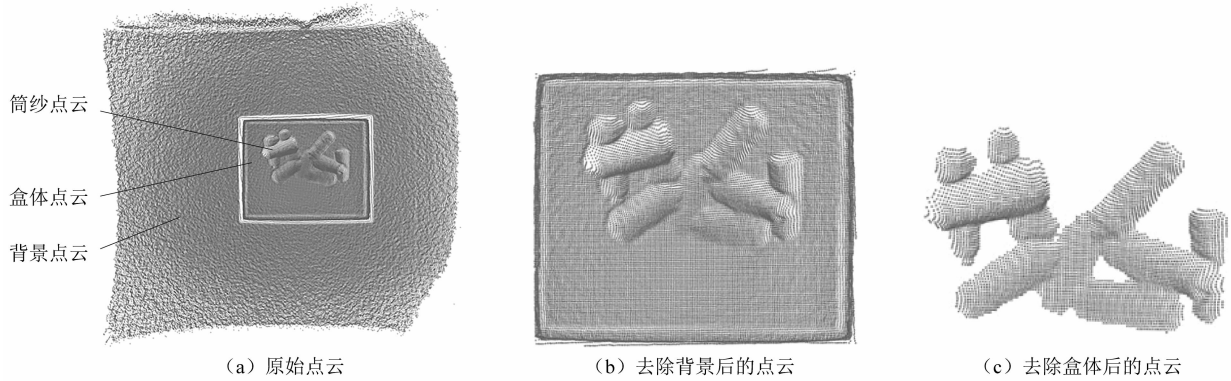


图 4 点云预处理过程

Figure 4 Pretreatment process of point cloud

M 估计抽样一致性算法 (M-estimation sampling consistency algorithm, MSAC) 是随机抽样一致性算法 (random sample consensus, RANSAC) 的变体,通过修改 RANSAC 算法的代价函数解决阈值敏感的问题^[14],算法步骤为:

- 1) 在点云数据中随机选取 3 个点;
- 2) 依据选取的点组成一个平面 s ;
- 3) 设定阈值 d_r ,计算其它所有点到平面 s 的距离 d ,将距离 d 小于 d_r 的点判定为局内点,否则为局外点;
- 4) 确定场景中的局内点,并记录其数目;
- 5) 重复步骤 1) ~ 4),当平面模型中的局内点数目最多时即为拟合得到的最佳平面。

直通滤波是提取感兴趣区域最常用的方法,通过指定方向、指定阈值进行裁剪,达到快速去除点云的目的。设置三维坐标轴上的阈值,当点云处于这个范围时会被保留下来,而超出这个范围的点云就会被去除。本研究中,坐标轴上的阈值分别为:

$$\left. \begin{aligned} -1.9 \text{ mm} \leq x \leq 2.0 \text{ mm}; \\ -1.6 \text{ mm} \leq y \leq 1.8 \text{ mm}; \\ 7.9 \text{ mm} \leq z \leq 9.4 \text{ mm}。 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: x, y, z 为目标区域在三维坐标轴上的阈值范围。

通过 MSAC 算法和直通滤波算法提取出筒子纱的点云数据如图 4(c) 所示,对比滤波前后的点云图,可以看出本研究算法有效地去除了干扰点云。

2.2 点云分割

堆叠状态下的筒子纱之间存在遮挡、接触等情况,为了获取筒子纱目标准确的位姿信息,课题组采用基于聚类的分割方法,对堆叠状态下的点云数据进行分割。

在实际工业应用场景中,点云分割常用的分割方法为聚类分割^[15]、欧式距离分割^[16]及区域生长分割^[17]。由于堆叠的筒子纱之间比较紧密,各筒子纱点云之间距离过近,基于欧式距离的分割方法的结果如图 5(a) 所示,可以看出各筒子纱之间没有完全分割,还存在接触的问题;基于区域生长分割方法的结果如图 5(b) 所示,可以看出由于筒子纱朝向及位姿接近,容易将多个不同的筒子纱分割为一类。为了准确分割堆叠状态下的筒子纱,课题组提出一种融合欧式距离与区域生长的 E-R 分割方法。

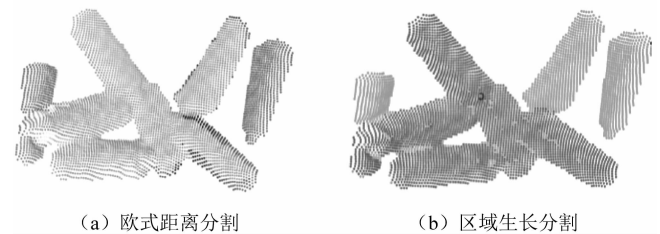


图 5 2 种点云分割算法效果

Figure 5 Effect of two point cloud segmentation algorithms

机器人每次只抓取单个筒子纱,因此只需分割出待抓取筒子纱的点云信息。故 E-R 分割方法不对堆

叠状态下的所有点云进行聚类分割,仅对待抓取筒子纱进行分割。同时,E-R分割将欧氏距离与区域生长分割相融合,在考虑点与点之间的距离基础上,再考虑筒子纱接触法线之间的夹角,选定特定点代替随机种子点,对距离 Kinect V2 相机最近的筒子纱点云进行分割,避免了因筒子纱堆叠导致的分割效果不佳的问题。

E-R 算法的步骤为:

- 1) 遍历筒子纱点云中所有点,找出 z 轴方向最大的点 p_z 作为种子点;
- 2) 计算 p_z 到其邻点 p_s 的距离 d_z ,将距离小于设定的距离阈值 d_λ 的点放入待抓取筒子纱的点云集合 M 中;
- 3) 计算 p_z 与 p_s 的法向量之间的夹角 θ ,将夹角小于设定的角度阈值 Φ 的点放入集合 P 中。则集合 M 可表示为 $\{M | d_z \leq d_\lambda, \theta \leq \Phi\}$;
- 4) 重复步骤 1) ~ 3),直到所有筒子纱被分割完毕。

3 分拣作业筒子纱的识别与定位

3.1 筒子纱点云的特征提取

内部形态描述子 (intrinsic shape signatures, ISS) 是一种表示立体几何形状的方法,含有丰富的几何信息,可以在局部坐标系下对特征点进行提取^[18]。课题组以筒子纱点云中的角点、梯度和灰度急剧变换的点作为关键点,对其进行特征提取,结果如图 6 所示。

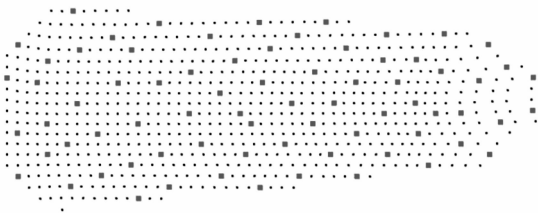


图 6 ISS 关键点提取结果

Figure 6 ISS key point extraction results

提取关键点的步骤为:

- 1) 对筒子纱点云中的点 p_i 建立局部坐标系,并设定该点的搜索半径 r ;
- 2) 以 p_i 为中心, r 为邻域半径,遍历邻域范围内的所有点,并计算其权值:

$$w_{ij} = 1 / \|\{p_j : |p_j - p_i| < r\}\|。 \quad (2)$$

式中: p_j 为 p_i 搜索半径内所有邻点。

3) 计算 p_i 的协方差矩阵 $\text{cov}(p_i)$:

$$\text{cov}(p_i) = \sum_{|p_i - p_j| < r} w_{ij} (p_i - p_j)(p_i - p_j)^T / \sum_{|p_i - p_j| < r} w_{ij}。 \quad (3)$$

式中: p_i 为筒子纱点云某点, r 为设定的搜索半径, p_j 为 p_i 搜索半径内所有邻点, w_{ij} 为 p_j 权值, $\text{cov}(p_i)$ 为 p_i 的协方差矩阵, T_i 为矩阵变换。

4) 计算 $\lambda_i^1, \lambda_i^2, \lambda_i^3$, 将满足下式的点作为筒子纱点云目标的关键点:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i^2 / \lambda_i^1 &\leq \varepsilon_1; \\ \lambda_i^3 / \lambda_i^2 &\leq \varepsilon_2。 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\lambda_i^1, \lambda_i^2, \lambda_i^3$ 为 $\text{cov}(p_i)$ 的特征值, $\lambda_i^1 > \lambda_i^2 > \lambda_i^3$; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为设定的阈值,通常小于 1。

5) 重复步骤 1) ~ 4),直至遍历所有点。

3.2 点云配准

机器人成功抓取目标的前提是获得目标对象的位姿参数,通过模板点云的关键点的特征找到实际场景中筒子纱点云中目标点云的位姿,即得到模板点云与目标点云之间的刚性变换关系(平移、旋转),为了获得筒子纱点云分割后的抓取姿态,课题组采用精准配准的迭代最近点算法 (iterative closest point algorithm, ICP) 对点云进行配准^[19]。

以下为具体步骤。

- 1) 将模板点云 P 和目标点云 Q 作为初始点集。
- 2) 建立 P 和 Q 的相关性,利用点云关联算法,寻找 Q 中对应距离最近点的点集 P_m^k :

$$P_m^k = \arg \min_{m=1}^n \|R^k Q_m + t^k - P_m\|。 \quad (5)$$

式中: m 为点云中某点, k 为对应距离最近的点, P_m^k 为所有对应距离最近点的集合; n 表示点云中点的数量; P_m 为模板点云 P 中某点; Q_m 为目标点云 Q 中某点; R^k , t^k 表示对应点的旋转变换。

3) 构建最小二乘的约束条件,计算最优刚性变换:

$$(R, t) = \arg \min_{m=1}^n \|R P_m + t - Q_m\|^2。 \quad (6)$$

式中: R 为旋转矩阵, $t \in R^3$, (R, t) 为最优刚性变换的

目标函数。

4) 计算平均距离:

$$d_k = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \| Q_m - (RP_m + T) \|^2. \quad (7)$$

式中: T 为平移矩阵; d_k 为所有对应点的平均距离。

5) 设定阈值 d_e 和最大迭代次数 $N_{\max}$ 。

6) 重复步骤 1) ~ 5), 直至满足收敛条件。

4 实验结果与分析

课题组在 MATLAB2020a 环境和图 1 平台进行实验, 配置为 Intel Core i5 CPU、4 GiB 内存的 PC 作为数据处理中心, 实验抓取目标质量为 150 g 的筒子纱, 分拣机器人的最大抓取质量为 500 g。

4.1 点云分割及配准实验

为验证课题组提出方法的可靠性, 以实际生产中筒子纱成品为对象进行实验验证, 将 9 个筒子纱目标随意散乱堆叠在实验平台上, 采集点云数据并对其进行裁剪, 根据 E-R 分割方法对裁剪完成的筒子纱点云进行分割, 获取如图 7(a) 所示的筒子纱点云分割结果。依据点云分割结果依次选取序号为 1~9 的 9 个筒子纱目标进行位姿估计实验, 使用 ICP 算法对其进行点云配准, 获取各个目标在机器人坐标系下的位姿, 如图 7(b) 所示。为了评估文中提出 E-R 分割算法的性能, 与欧式距离分割法和区域生长分割方法进行比较, 结果如表 1 所示。

表 1 点云分割方法准确率对比

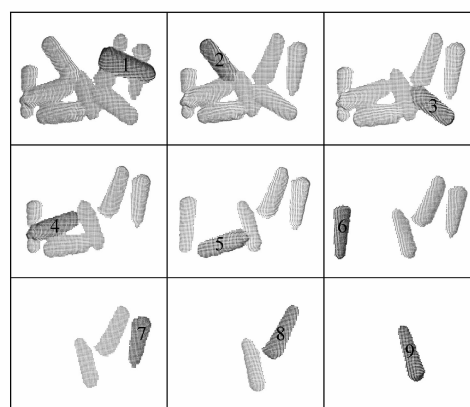
Table 1 Comparison of accuracy rate of point cloud segmentation methods

方法	筒子纱数	分割数	准确率/%
欧式距离分割法	9	4	44
区域生长分割法	9	3	33
E-R 分割法	9	9	100

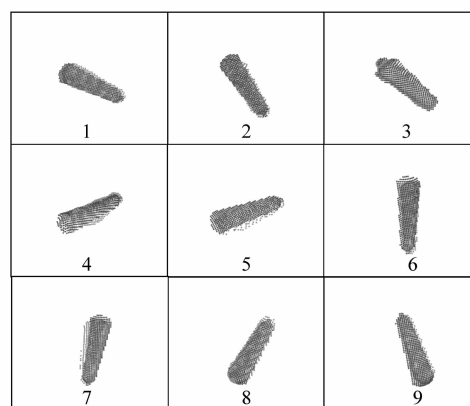
从表 1 可以看出, 对于堆叠状态下的筒子纱点云, E-R 分割结合了欧式距离和区域生长的特点, 有效的弥补了其他 2 种方法的不足, 分割准确率达到了 100%。实验验证了本系统方法对于堆叠状态的点云场景具有较好的分割效果。

4.2 筒子纱抓取实验

实验中的抓取系统采用手眼标定 (eye-to-hand) 模式, 即相机固定, 与机械臂基坐标系相对位置不变, 依



(a) E-R分割效果



(b) ICP配准结果

图 7 点云处理结果

Figure 7 Point cloud processing results

照散乱堆叠摆放的原则进行了 10 批次抓取测试, 每批次进行 9 次抓取, 总共抓取 90 次。将装有筒子纱的盒子放在机器人的工作范围内, Kinect V2 相机获取筒子纱图像并通过图像处理系统得到筒子纱的位姿, 根据处理结果确定抓取的顺序; 再通过标定结果将配准得到的筒子纱位姿转换到机器人基坐标系下, 机器人控制夹爪移动到筒子纱上方并调整末端姿态, 夹爪闭合进行夹取。每完成抓取一次目标后, 机械臂返回到初始位置, 等待下一个目标的抓取, 重复上述步骤, 直至将所有筒子纱全部分拣完成。实际抓取过程如图 8 所示。

为了定量评价该分拣方法的性能, 从抓取时长和抓取成功率 2 个指标进行评估。抓取时长定义为从 Kinect V2 相机采集筒子纱点云到机械臂抓取目标并返回初始点的时间。抓取成功率 η 有:

$$\eta = (n_c / n_z) \times 100\%。 \quad (8)$$

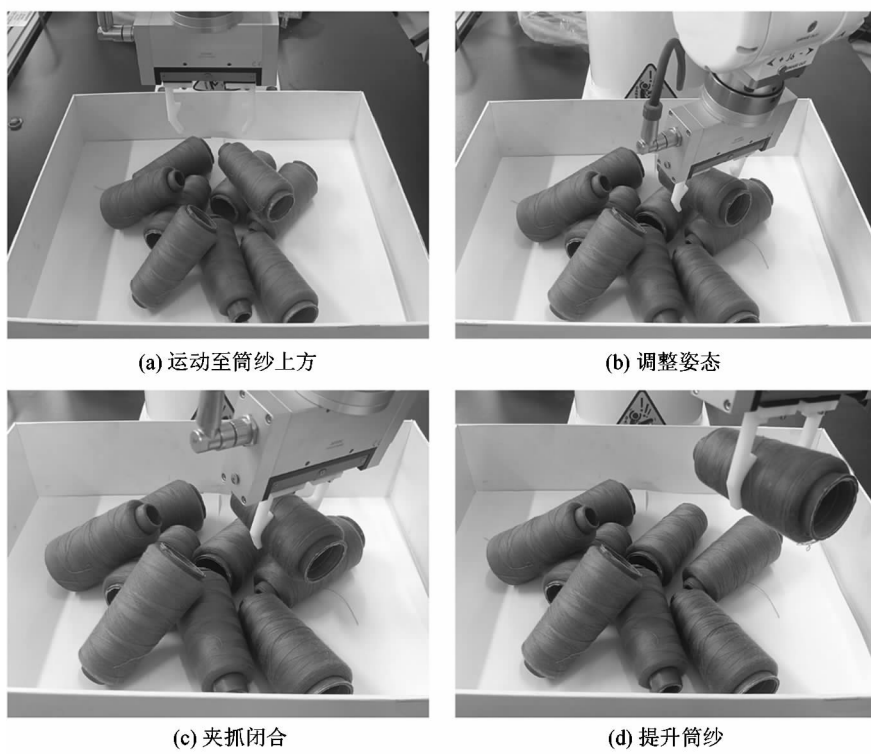


图8 筒子纱抓取过程

Figure 8 Grabbing process of bobbin yarn

式中: n_c 为每批实验成功抓取筒子纱的次数; n_z 为每批实验的抓取总次数。

分别对从视觉系统获取目标信息到机械臂完成抓取时长和抓取成功率进行记录,实验结果如表2所示。由表2可知,课题组所设计的堆叠筒子纱的机器人无序分拣方法能成功获取筒子纱目标的位姿信息并完成抓取工作,抓取时间平均为11.14 s,总成功率可以达到86.61%。

表2 抓取实验结果

Table 2 Results of grabbing experiment

抓取批次	抓取时长/s	抓取次数	成功次数	成功率/%
1	11.2	9	8	88.8
2	11.5	9	9	100.0
3	10.9	9	7	77.7
4	11.3	9	8	88.8
5	11.6	9	9	100.0
6	11.3	9	8	88.8
7	11.1	9	7	77.7
8	10.8	9	6	66.6
9	11.0	9	9	100.0
10	10.7	9	7	77.7

5 结语

课题组提出一种堆叠筒子纱的机器人无序分拣方法,研究了筒子纱点云数据的获取及预处理方法,将MSAC和直通滤波算法结合,去除多余点云,提出改进E-R分割算法对堆叠场景下的筒子纱点云进行分割,分割效率达到了100%;研究了筒子纱的位姿估计问题,基于ISS算法对筒子纱点云的关键点进行提取,采用ICP算法实现点云精准配准,结合标定结果确定了所识别筒子纱的精确位姿;搭建了真实环境下的实验平台进行实验验证。实验结果表明,该方法能够适用于多个圆柱或圆锥目标散乱堆叠场景下的分拣,其性能可以满足实际生产需求。

参考文献:

- [1] 郭政良,马思乐,陈纪咏,等. 筒子纱包装自动整列系统的设计与实现[J]. 包装工程,2019,40(11):137.
- [2] 王蕾,潘如如,周建,等. 机器视觉在纺织智能化中的应用进展[J]. 棉纺织技术,2021,49(11):10.
- [3] 张鑫鹏,魏立峰,苑玮琦,等. 基于机器视觉的板式换热器板片微裂纹检测方法研究[J]. 机电工程,2020,37(7):856-860.
- [4] 张勤,陈建敏,李彬,等. 基于RGB-D信息融合和目标检测的番茄

- [1] 串采摘点识别定位方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 143 - 152.
- [2] 饶期捷, 黄海松, 张松松. 基于机器视觉的 Baxter 机器人抓取算法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(9): 1 - 5.
- [3] 高茂源, 王好臣, 丛志文, 等. 基于视觉引导的多类型管件识别与位姿估计研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(8): 24 - 29.
- [4] LUO J. Crawling robot manipulator tracking based on gaussian mixture model of machine vision[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(9): 6683 - 6693.
- [5] 陶杰, 吴尧才, 朱熙豪, 等. 基于 3D 视觉的水泵生产线零部件无序抓取研究[J]. 机电工程, 2022, 39(5): 604 - 611.
- [6] GAO M Y, LI X, HE Z W, et al. An automatic assembling system for sealing rings based on machine vision[J]. Journal of Sensors, 2017, 2017(1): 12.
- [7] 滕臻, 崔国华, 高鹏, 等. 基于机器视觉及深度学习的静脉药物调配机器人药瓶识别[J]. 机床与液压, 2022, 50(5): 33 - 37.
- [8] 权宁, 徐志鹏. 基于视觉的工业机器人码垛系统设计与分析[J]. 包装工程, 2021, 42(15): 233 - 238.
- [9] 周其洪, 彭轶, 岑均豪, 等. 基于机器视觉的细纱接头机器人纱线
- [10] 断头定位方法[J]. 纺织学报, 2022, 43(5): 163 - 169.
- [11] CUI H H, SUN R C, FANG Z, et al. A novel flexible two-step method for eye-to-hand calibration for robot assembly system[J]. Measurement and Control, 2020, 53(9/10): 2020 - 2029.
- [12] EBRAHIMI A, CZARNUCH S. Automatic super-surface removal in complex 3D indoor environments using iterative region-based RANSAC[J]. Sensors, 2021, 21(11): 3724.
- [13] 周炳南, 闵华松, 康雅文. PCL 环境下的 3D 点云分割算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2018, 35(6): 101 - 105.
- [14] 陈向阳, 杨洋, 向云飞. 欧氏聚类算法支持下的点云数据分割[J]. 测绘通报, 2017(11): 27 - 31.
- [15] 朱军桃, 王雷, 赵传, 等. 基于区域生长算法的复杂建筑物屋顶点云分割[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(4): 20 - 25.
- [16] ZHONG Y. Intrinsic shape signatures: a shape descriptor for 3d object recognition[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops. Kyoto, Japan: IEEE, 2009: 690.
- [17] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239 - 256.

(上接第 13 页)

- [6] ZHANG X, KOU H, ZHANG Y, et al. Trajectory planning and control of handling robot manipulator [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1802(2): 022067.
- [7] 赵国勇, 赵玉刚, 赵庆志. 数控运动中加加速度连续的加减速方法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(2): 16.
- [8] 李黎, 尚俊云, 冯艳丽, 等. 关节型工业机器人轨迹规划研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(5): 36-50.
- [9] SEDDAOUI A, SAAJ C M. Collision-free optimal trajectory generation for a space robot using genetic algorithm [J]. Acta Astronautica, 2021, 179: 311-321.
- [10] JIN R Y, ROCCO P, GENG Y H. Cartesian trajectory planning of space robots using a multi-objective optimization [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 108(1): 106361.
- [11] 沈悦. 六自由度工业机器人轨迹规划及控制算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 44.
- [12] 学, 2020: 40.
- [13] 赵皓, 刘满禄, 张华. 基于三次非均匀 B 样条的 6DOF 机械臂轨迹规划[J]. 机器人技术与应用, 2016(6): 43-48.
- [14] 赖永林, 林茂松, 梁艳阳. 基于三次非均匀 B 样条曲线的机器人轨迹规划算法研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(35): 10511-10517.
- [15] 陆佳皓, 平雪良. 一种机械臂最优时间-冲击轨迹优化算法[J]. 机械科学与技术, 2018, 38(10): 1548-1554.
- [16] WANG Z S, LI Y B, SUN P, et al. A multi-objective approach for the trajectory planning of a 7-DOF serial-parallel hybrid humanoid arm [J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 165: 104423.
- [17] 司艳伟. 基于 5 次 B 样条函数的果蔬采摘机器人轨迹规划的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017: 43.
- [18] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 212.