

基于激光雷达的托盘位姿识别算法及验证*

赵俊宏^{1,2}, 吕恩利^{1,2}, 陆华忠^{1,2}, 王昱^{1,2}, 王飞仁^{1,2}

(1. 华南农业大学工程学院 广州 510642; 2. 广东省农产品冷链物流工程技术研究中心 广州 510642)

摘要: 托盘拾取是自动化仓储的重要环节之一, 为提高叉车的托盘拾取能力, 提出一种基于 2-D 激光雷达的托盘探测算法, 实现托盘位置和姿态的识别。建立了托盘探测模型, 确立了算法有效探测范围与激光点数量(分布于托盘支架正面)、托盘支架宽度和激光雷达分辨率的函数关系; 通过改进的增量式直线提取算法, 获取托盘姿态; 根据托盘姿态, 建立动态模板, 以滑动窗口模式进行匹配, 获取托盘位置。结果表明, 有效探测范围, 随激光点数量减小扩大, 随托盘宽度增加而扩大, 随分辨率增加而扩大; 当激光扫描仪分辨率为 0.33° , 托盘支架宽度为 90 mm 时, 实际探测范围符合托盘探测模型计算, x 轴方向定位误差为 ± 60 mm, y 轴方向定位误差为 ± 59 mm, 托盘角度探测误差为 $\pm 6^\circ$ 。本算法实现托盘位姿可靠识别, 明确探测范围, 为提高智能仓储装备拾取作业能力提供理论基础。

关键词: 2-D 激光雷达; 托盘; 位姿估计; 识别算法

中图分类号: TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.2040

Pallet localization detecting algorithm based on laser scanning

Zhao Junhong^{1,2}, Lv Enli^{1,2}, Lu Huazhong^{1,2}, Wang Yu^{1,2}, Wang Feiren^{1,2}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Engineering Research Center of Agricultural Product Cold Chain Logistic, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Pallet picking is one of the important links of automated warehousing. An algorithm was proposed for estimating the localization and angle of pallet with lake information, based on 2-D Lidar. It aims at improving the recognition pallet ability of forklift and the flexibility in automated warehousing. A detection model was built to define the geometry relationship between detection region the number of lidar point (detecting the pallet foot), the width of pallet foot and the resolution of Lidar. The algorithm extracted the lines as candidate pallet foot with the improved incremental algorithm and calculate the angle of pallet. Then the dynamic template was created and matched with sliding window, to calculated the position of the pallet. The result shows that the detect region was expend with smaller the threshold number of laser, longer the width of pallet foot and higher resolution of Lidar; the detect region met the result calculated based on the pallet detect model; error on x axis and y axis were ± 60 mm mm and ± 59 mm respectively; pallet angle error was . With the flexible pallet detecting algorithm, the requirement of localization of warehouse equipment and human was reduced and effect would be enhanced.

Keywords: 2D-lidar; pallet; pose estimate; detection algorithm

0 引言

托盘拾取是自动化仓储的关键环节之一。拾取过程中需要获得托盘的准确位姿^[1-3]。现有方案中, 机器视觉

系统易受光线影响, 3-D 激光雷达探测系统所需运算量较大, 2-D 激光雷达数据可靠、数据量较小, 符合实时托盘识别需求。本文提出一种基于 2-D 激光雷达的托盘位姿探测算法, 改善叉车对托盘的识别能力, 提高拾取环节灵活性。

托盘拾取是智能化仓储的基础构成^[4-5], Lecking D 等人^[6]等在托盘侧面布置反光材料,通过检测反光材料与2-D激光雷达的位置关系,实现仓库环境下托盘位姿识别,但没有基于托盘共性特征,需要布置、维护反光材料,难以推广; Aref M. M. 等人^[7]、Seelinger M 等人^[8]和 Byun S 等人^[9]在托盘支架上添加人工目标,通过单目视觉进行托盘识别,该方法受环境光照限制,人工目标易损坏; Varga R 等人^[10]通过建立托盘特征向量,用机器学习的方法训练识别模型,实现基于图像的托盘识别,但需要数据库支持; Cintas R 等人^[11]和 Spampinato G 等人^[12]基于双目视觉对托盘位姿进行估计,但图像匹配成功率受仓储环境光线影响较大; Bellomo N 等人^[3]采用高精度激光扫描仪与视觉融合的方法,实现托盘识别,但系统成本较高。

针对上述问题,本文建立托盘探测模型,确立算法有效探测范围边界与分布于托盘支架的激光点数量、托盘支架宽度和激光雷达分辨率函数的关系;基于托盘共性特征,实现托盘位姿探测,具有不受光线影响、鲁棒性强、成本低等特点。研究结果将为托盘自动拾取作业提供理论依据。

1 托盘探测模型研究

探测物体待测面的数据越多,统计提取的位置信息越可靠。而雷达数据分布不均匀,随着待测表面位姿变化,有效数据数量会发生较大的改变,影响结果的准确性与可靠性。本文根据激光雷达特性,建立托盘探测模型,研究探测数据数量与物体位姿的关系,对探测结果准确性、可靠性进行分析。

1.1 托盘探测模型

托盘探测模型由托盘和2-D激光雷达组成。托盘为木制,由顶面、底面及9个托盘支架组成。2-D激光雷达是基于飞行时间(time of flight, TOF)测量方法的主动测距仪器,距离数据按激光束序号排列^[13-15]。当激光雷达垂直扫描到托盘支架时,2-D激光雷达所获得数据,如图1所示。激光雷达位于原点,雷达中线为y轴,x轴垂直y轴于传感器中心,托盘位置及姿态如图1虚线所示。

以托盘侧面为待测面,托盘探测模型可简化为托盘待测面平行于x轴的情景,如图2所示。激光束以雷达为中心发射,当图1中的数据点,以原点即激光雷达为中心,旋转一定角度,至托盘待测面平行于x轴时,激光雷达、激光束和托盘的相对位置,没有改变。因此待测面斜率主要影响探测范围朝向,对探测算法的探测范围及精度影响较小。因此,研究托盘待测面平行与x轴的情景的结论,可以推广到托盘任意角度的情景。

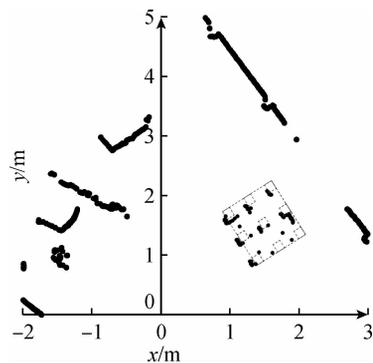


图1 托盘探测数据

Fig. 1 Lidar data of detecting pallet

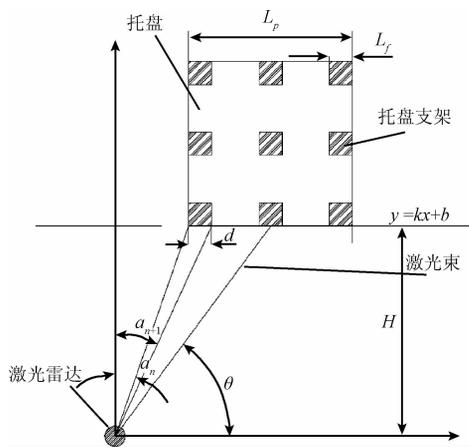


图2 托盘探测模型示意图

Fig. 2 The model of pallet detecting

1.2 托盘探测范围研究

以激光点数量(分布于单个托盘支架正面)为阈值,计算托盘探测算法的边界。随激光雷达探测距离的增加,激光雷达的激光束变稀疏,距离越远,探测到托盘支架的激光束就越少。若激光束过少,将无法识别出托盘支架。

设 k 为待测面斜率, b 为截距, (x_p, y_p) 为托盘侧面中心坐标, L_f 为托盘支架宽度, L_p 为托盘宽度, m 为一个支架上的激光点数量, d 为托盘支架表面相邻激光点的距离, H 为原点到待测面垂线长度, a_n 为第 n 个激光束与的夹角, Δa 为相邻激光束夹角, (x_p, y_p) 与 x 轴夹角为 θ 。根据几何关系计算,托盘中心位置计算式如下:

$$d = \frac{L_f}{m} \quad (1)$$

$$\tan(a_{n+1})H - \tan(a_n)H = d \quad (2)$$

$$\tan(a_n + \Delta a)H - \tan(a_n)H = d \quad (3)$$

$$H = \frac{L_f}{\frac{m \sin(\Delta a)}{\cos(a_n + \Delta a) \cos(a_n)}} \quad (4)$$

$$a_n = \frac{a \cos\left(\frac{2mH \sin(\Delta a)}{L_f} - \cos(\Delta a)\right)}{2} - \Delta a \quad (5)$$

$$\theta =$$

$$\begin{cases} a \tan(k) + \frac{\pi}{2} - a \tan\left(\frac{2 \tan(a_n)H + L_p}{2H}\right), & k < 0 \\ \frac{\pi}{2} - a \tan(k) - a \tan\left(\frac{2 \tan(a_n)H + L_p}{2H}\right), & k \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$x_p = \frac{H \sin(\theta)}{\cos(a_n)} \quad (7)$$

$$y_p = \frac{H \cos(\theta)}{\cos(a_n)} \quad (8)$$

式中: H 表示探测距离。根据式(4),当 $a_n=0$ 时, H 为最大值,托盘探测距离最远, H_{\max} 计算式为:

$$H_{\max} = \frac{L_f(1 + \cos(\Delta a))}{2m \sin(\Delta a)} \quad (9)$$

探测最远的距离 H_{\max} ,与支架上激光点数量 m 成反比,当 m 越大, H_{\max} 越小,且减小速率逐渐变缓。但是当 m 过小,连续点将无法表示直线,同时会增加算法运算量。 H_{\max} 与 L_f 成正比,当托盘支架越宽,托盘探测距离越远,增加托盘支架宽度,可以提高算法探测距离。

a_n 表示算法探测角度, a_n 最大值越大,托盘所能探测的角度范围越大,根据式(5), a_n 与 m 负相关, m 越小,探测角度 a_n 最大值越大,增大速率逐渐增大。 a_n 与 L_f 呈正相关,托盘支架越宽,探测角度 a_n 最大值越大。

由式(5)和(9)得,当 Δa 减小, H_{\max} 与 a_n 最大值增大。所以随激光传感器分辨率提高, Δa 减小,激光点束密度增加, H_{\max} 与 a_n 最大值增大,托盘探测范围扩大。

1.3 模型推广

托盘探测模型以托盘侧平面为目标,与任意物体平面的探测情况相同,因此上述模型可以推广到激光雷达对任意物体平面的探测范围推导。

2 托盘探测算法

2.1 托盘支架平面提取算法

直线提取算法是托盘识别的关键环节。在激光雷达数据集中,托盘支架表现为由离散点组成的短小线段。而线段所在直线包含托盘位置及姿态特征。因此,直线提取算法应对短小线段敏感。但当探测距离 H 和探测角度 a_n 较大时,分布托盘支架的激光点较少,有效数据有限。同时雷达扫描数据存在噪声,对短小线段影响显著,增加了目标直线提取难度。

常用直线提取算法,如随机抽样一致性检验、霍夫变化和期望最大化法等算法,为全局直线提取算法,对墙壁等长直线有较好的效果,而对短小直线段不敏感,忽略了

激光点的空间序列^[16],对环境较复杂场景下,短直线识别率较低,提取速度较慢。

采用改进后的增量式直线提取算法,基于空间序列顺序对数据点集合进行处理,以加入新数据点后拟合直线角度变化值,作为该点是否在直线上的判断条件。同时,增加线段初始角度、线段点数最小阈值和线段长度阈值,筛选出符合托盘支架几何约束的线段,改进原增量式算法中对曲率较小的曲线不敏感问题。

算法具体步骤如下:

1) 选择曲线前4个点,建立窗口,构造一条直线,如图3所示,计算当前窗口内拟合的直线角度,记录直线与坐标轴夹角,记为初始角度 θ_0 。

2) 保证窗口为4个点,由左至右,向窗口加入下一个点,放出窗口内第1个点,重新计算直线与坐标轴夹角 θ_n ,作为新直线参数。

3) 当新的直线角度变化 $\theta_n - \theta_{n-1}$ 小于阈值 $\Delta\theta$,且与初始角度 θ_0 参数差值小于阈值,该点记作直线上一点,并转到步骤2),否则进行步骤4)。

4) 当线段小于点数阈值 m ,或大于长度阈值,舍弃,进入步骤6)。否则,进行步骤5)。

5) 返回提取直线,并记录直线参数,并进行步骤6)。

6) 取曲线剩下的前4个点,构造一条直线,记录直线与坐标轴夹角,并记为初始角度 θ_0 ,如图3所示,转到步骤2)。

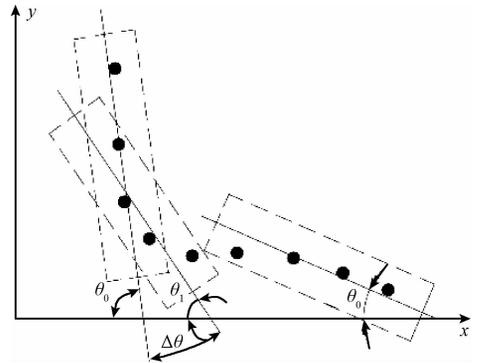


图3 改进式增量式直线提取算法示意图

Fig. 3 Diagram of improving incremental lines extract algorithm

2.2 基于动态模板的托盘位姿提取算法

提取的直线作为托盘候选对象,根据托盘先验信息,建立分类器,对直线进行筛选,实现托盘支架的候选点集合提取。通过模板匹配的方法,对托盘支架的候选点集进行匹配,获得托盘候选位置以及角度。

首先筛选出托盘候选点集合。选取直线正负方向上,托盘长度距离内,到直线距离小于阈值的点,距离计算如式(10)所示,作为托盘支架候选点集合成员,转为二值图,如图4(a)所示。



图4 候选数据点集及托盘模板二值图
Fig. 4 Binary map of pallet data and template

为获得候选点集对应托盘的位置,采用模板匹配的方法,提取托盘位置。根据候选点集斜率,创建模板如图4(b)所示,用模板与候选点集的二值图进行匹配,获得托盘位置。模板匹配方法是根据已知模式到图像空间,寻找相应模式的机器视觉匹配方法,简单易实现。

匹配前对候选点集进行预处理,减少噪声影响。模板匹配对噪声敏感,易发生匹配错误^[19-21],而且激光雷达数据存在噪声^[13, 17-19],随着探测距离增加,分布到托盘支架的激光点减少,噪声影响增大。

预处理时假设:点集为托盘支架,则将候选点集合投影到托盘待测面后,托盘支架几何特征不变。基于假设,计算托盘候选点集所在直线,将托盘候选点集,投影到直线上,投影点坐标计算式如式(11)所示,从而减少数据波动,并保持托盘特征不变。基于托盘几何特征,分别建立托盘支架长度、托盘长度、尺寸比例的滤波器,对候选点集再次进行分类,筛选托盘候选点集,获得托盘支架探测数据二值图像。

模板匹配采用绝对误差和匹配方法,该方法计算量小,资源占用少,可提高计算速度,计算如式(12)所示。根据预处理后的候选点集斜率及托盘先验信息,建立托盘动态模板,转为二值图,如图3(b)所示。模板匹配结果如图5所示。



图5 模板匹配结果
Fig. 5 Result of template match

每组候选点集,获得一组托盘位姿向量。从多帧数据中获得的托盘位姿向量,建立托盘位姿候选集。

$$Dis = \cos\left(\frac{\pi}{2} \text{atan}(k)\right) \begin{bmatrix} k & -1 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & k & -bk \\ k+1 & k+1 & -k+1 \\ k & k^2 & -bk^2 \\ k+1 & k+1 & -k+1 + b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$D(i, j) = \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N |S(i+s-1, j+t-1) - T(s, t)| \quad (12)$$

式中: Dis 候选数据点距离直线段距离, (x, y) 为候选数据点坐标, k, b 为直线斜率与截距, (x_c, y_c) 为投影点坐

标, $D(i, j)$ 为图像 (i, j) 点绝对误差和, $S(i, j)$ 为候选数据点集二值图的点的值, (s, t) 为模板二值图的点的值。

2.3 基于 K-means 的托盘位姿优化算法

从托盘位姿候选集合中,筛选出托盘最优位姿,转化为无监督聚类分析问题,采用 K-means 算法^[22],选择成员最多的分类,融合获得托盘最优位姿。K-means 算法是一种无监督、自适应聚类算法,无需设置初值,通过迭代计算代价函数,更新聚类中心位置,并根据数据集到聚类中心距离,进行分类。

以候选点坐标作为对象,进行聚类分析,将托盘位姿候选集合分为 3 类,多次迭代后 3 个子集满足误差平方和最小,目标函数 δ 和聚类核心 c_i 计算如式(13)、(14)所示,聚类迭代阈值设置为 L_f 。选择权重最大的聚类中心作为托盘中心。选择对应点集,进行斜率计算,获得托盘位姿。

$$\delta(P) = \operatorname{argmin}_{P=\{P_i\}_{i=1}^3} \sum_{i=1}^3 \sum_{x \in P_i} \|a - c_i\|_2^2 \quad (13)$$

$$c_i = \frac{1}{|P_i|} \sum_{x \in P_i} x \quad (14)$$

式中: P_i 为第 i 类的候选点集合, c_i 为第 i 类的聚类中心, a 候选点坐标向量集合, $\delta(P)$ 为点集到聚类核心的距离。

2.4 托盘探测算法流程

托盘探测算法,首先根据阈值分割数据集,提取曲线点集合,对曲线进行均值滤波。用改进式增量式直线提取算法,对每条曲线集合进行直线提取,将提取的直线段作为托盘支架候选对象。

基于直线段信息,采集直线邻域的数据,组成获得托盘候选数据点集合。基于托盘先验信息,建立分类器,判断点集中线段数量、线段长度、线段间距离和线段间比例,筛选出托盘候选点集。根据直线斜率及托盘几何信息建立托盘二值图模板,通过模板匹配的方法,获得托盘位置,将多帧结果数据组成托盘位置集合。

对托盘位置集合数据,进行聚类分析,选择权重最大的类的核心,作为托盘中心,提取托盘位姿。

3 试验设计与方法

3.1 试验系统

本研究使用的 2-D 激光雷达为德国 SICK 公司生产的 TIM561 型激光雷达。试验过程中激光雷达通过以太网连接到工控机,建立通讯获得实时数据。雷达扫描角度为 270° ,扫描角度范围为 $-45^\circ \sim 225^\circ$,角度分辨率为 0.33° ,扫描频率 10 Hz,系统误差 ± 60 mm,最大扫描范围为 10 m。使用的托盘长度 820 mm,支架宽度 90 mm。试验数据采用 MATLAB 软件处理。

3.2 托盘探测范围计算

基于托盘探测模型,计算托盘探测范围。根据试验设备,设托盘斜率 $k=0$,分布到一个支架激光束数量阈值 $m=5$,托盘支架宽度 $L_f=90\text{ mm}$,托盘长度 $L_p=820\text{ mm}$,传感器分辨率 $\Delta\alpha=0.33^\circ$ 。

根据式(7)、(8)计算托盘待测面中心坐标 (x_p, y_p) ,结果如图 6 所示。探测模型预测边界为图中曲线;曲线内部为可探测范围,当托盘待测面中心处于曲线内部时,托盘位姿可被探测;当中心处于曲线外部时,托盘位姿不可测得。

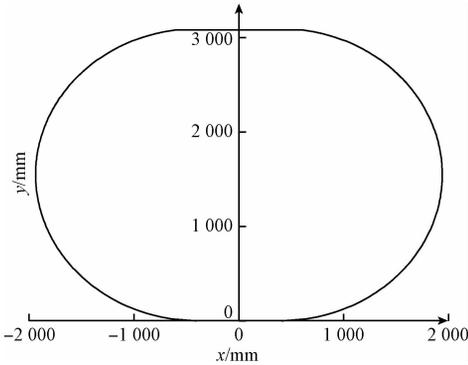


图 6 托盘探测范围

Fig. 6 Range of detect

探测范围呈椭圆形, y 轴方向探测最大值为 $3\ 080\text{ mm}$, x 轴方向探测最大值为 $1\ 940\text{ mm}$;当 y_p 为 $1\ 540\text{ mm}$ 时, x_p 最大为 $1\ 940\text{ mm}$ 。探测范围相对于 y 轴对称;随 y 轴方向探测距离增加, x 轴方向探测距离,先增大后减小。

3.3 托盘探测试验

为验证托盘探测模型及算法探测精度,进行托盘探测试验。研究托盘在不同位置时,算法探测范围及探测精度。由于探测范围关于 y 轴对称,且与托盘斜率 k 无关,所以只验证 $k=0$,且只在 x 和 y 轴正方向偏移的情况。每 10 帧激光雷达数据作为一组,进行托盘位姿识别。

试验过程中,激光雷达布置在地面上,扫描平面与地面平行。设雷达中轴为 y 轴, x 轴垂直 y 轴于传感器中心。托盘待测面平行 x 轴,如图 7 所示。通过卷尺对托盘中心位置进行测量,托盘沿 y 轴正方向和 x 轴正方向移动,取值 $500、1\ 000、1\ 500、2\ 000、2\ 500\text{ mm}$;取值 $1\ 000、1\ 500、2\ 000、2\ 500、3\ 000\text{ mm}$ 。当托盘放置完毕后,打开传感器及工控机记录传感器数据。MATLAB 处理数据,通过托盘探测算法,计算出托盘中心坐标,以及倾斜角度^[6]。

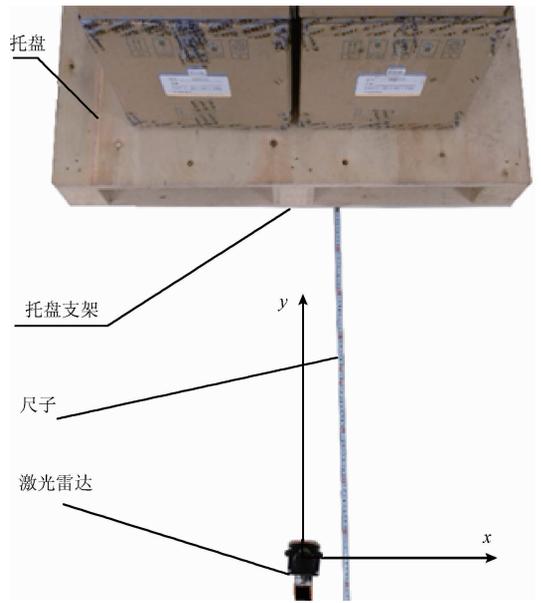


图 7 托盘探测算法试验系统

Fig. 7 Test system of pallet detecting algorithm

4 结果分析与讨论

4.1 托盘探测范围模型验证

托盘探测试验结果如表 1 所示。 (x_p, y_p) 为托盘侧面中心坐标, (x, y) 为算法检测到的托盘中心位置, (x_e, y_e) 为测量误差, φ_e 为角度探测误差。未获得托盘位姿的组别如表 1 所示。根据结果,可获得算法的探测范围: $y_p=1\ 000\text{ mm}$ 时,实际探测 x_p 为最大值为 $1\ 500\text{ mm}$; $y_p=1\ 500\text{ mm}$ 时,实际探测 x_p 为最大值为 $2\ 000\text{ mm}$; $y_p=2\ 000\text{ mm}$ 时,实际探测 x_p 为最大值为 $2\ 000\text{ mm}$; $y_p=2\ 500\text{ mm}$ 时,实际探测 x_p 最大值为 $1\ 500\text{ mm}$; $y_p=3\ 000\text{ mm}$ 时,实际探测 $x_p=500、1\ 000\text{ mm}$ 时托盘位置,没有探测到 $x_p=0$ 时托盘的位姿。

算法实际的探测范围符合托盘探测模型预测。在探测范围内(除 $(x_p, y_p) = (0, 3\ 000)$ 时),托盘位姿都可以被探测到。托盘探测范围略大于预测范围(对比图 6),可能是因为:托盘沿 x 轴方向移动时,部分激光束照到托盘支架侧面,被判断为待测表面,使激光束数量达到 m 阈值要求,托盘被探测到,从而增加了探测范围。从表 1 可知,托盘处于边界附近时,托盘探测角度精度下降,或托盘识别失败,如当 $(x_p, y_p) = (0, 3\ 000)$ 时,可能因为激光点噪声较大,且激光点分布稀疏,托盘支架上部分激光点被过滤,造成托盘识别失败。

表1 托盘探测结果

Table 1 Result of detecting pallet

编码	$x_p/$ mm	$y_p/$ mm	$x/$ mm	$y/$ mm	$x_e/$ mm	$y_e/$ mm	$\varphi_e/$ (°)
1	0	1 000	21	1 021	-21	-21	-2.81
2	500	1 000	475	1 024	25	-24	-1.86
3	1000	1 000	959	1 020	41	-20	1.05
4	1500	1 000	1 463	1 018	37	-18	3.94
5	0	1 500	10	1 522	-10	-22	-2.10
6	500	1 500	463	1 528	37	-28	-0.15
7	1 000	1 500	953	1 539	47	-39	-0.36
8	1 500	1 500	1 461	1 533	39	-33	0.56
9	2 000	1 500	1 945	1 536	55	-36	-0.22
10	0	2 000	-24	2 028	24	-28	2.20
11	500	2 000	508	2 025	-8	-25	3.74
12	1 000	2 000	998	2 027	2	-27	0.21
13	1 500	2 000	1 452	2 076	48	-76	-3.78
14	2 000	2 000	1 980	1 980	20	20	3.74
15	0	2 500	58	2 511	-58	-11	1.18
16	500	2 500	442	2 520	58	-20	5.96
17	1 000	2 500	972	2 530	28	-30	-3.43
18	1 500	2 500	1 440	2 556	60	-56	5.39
19	500	3 000	963	3 019	37	-19	2.61
20	1 000	3 000	1 444	3 059	56	-59	3.43

4.2 托盘探测算法精度讨论

托盘探测算法在探测范围内,可以获得托盘位姿。 x 轴方向最远探测距离达到了2 000 mm, y 轴方向最远探测距离达到了3 000 mm。 x 轴方向平均误差为35.55,标准差为17.36; y 轴方向平均误差为30.6,标准差为15.65。

x 轴方向定位最大误差为 ± 60 mm,可能由激光雷达测量误差和识别算法误差两部分造成。雷达测量误差为 ± 60 mm。距离测量误差导致直线斜率计算偏差。在测量物体边缘时,由于激光束测量角度发生较大变化,测量误差增大。识别算法在提取直线时,未能识别出所有待测平面数据,导致 x 轴方向数据不完整。而模板匹配时,可能因激光数据稀疏、不完整,计算位置时发生偏移,造成位置提取误差。

y 轴方向定位最大误差为 ± 59 mm,误差主要来源可能是激光雷达测量误差。托盘码放于雷达前方,激光测量误差在 y 轴方向分量较大,影响 y 轴方向定位。

托盘角度误差为 $\pm 6^\circ$,可能主要受激光雷达噪声干扰。直线提取过程中,托盘支架为短直线,数据量较少,斜率拟合算法对噪声敏感,提取的斜率易发生偏差。

4.3 算法对比

对比文献[3]采用霍夫变换及文献[16]中的增量式直线提取算法,本文所提出的直线提取算法对短直线以及连续曲面分割有较好的提取效果,图8(a)所示为托盘坐标为(2 000,1 500)时,激光雷达10帧原始数据,图8(b)所示为霍夫算法提取的直线结果,图8(c)所示为增量式算法所提取的直线,图8(d)所示为本文算法提取的直线。

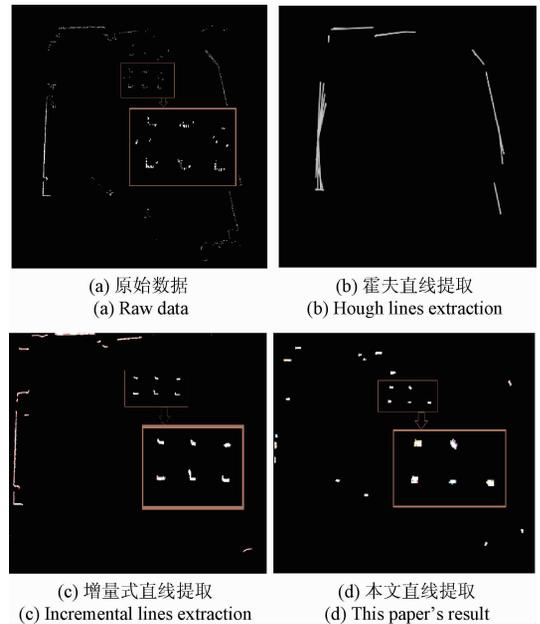


图8 直线提取算法比较

Fig. 8 Comparison of Line Extraction Algorithms

霍夫变换是通过统计直线上点的数量,对直线从大到小排序依次提取。当探测到托盘的数据数量不足,或噪声较强的情况下,目标直线信息被不易提取,准确度降低。同时数据转为二值图,部分细节信息会被压缩,导致目标直线提取失败。

增量式提取算法,按序列顺序不断向直线添加数据点,并更新直线参数。但随着数据量增加,对于小曲率变化不敏感,提取的直线,易带转角,如图8(c)所示。

改进后的增量式提取算法增强了曲率变化的敏感度,并添加直线长度的筛选,更加适用于短直线的提取。

如图8(a)所示托盘原始数据存在数据量较少,噪声影响等问题,与模板存在差异,而且数据与模板都为二值图,在模板匹配过程中,若未采取本文提出的预处理算法,会发生匹配错误,如图9所示。



图9 模板匹配错误示例

Fig. 9 Error of Matching

5 结 论

本文建立托盘探测模型,确立了影响探测范围的各项变量间的函数关系,研究了探测范围边界性质,预测托盘探测算法有效范围。托盘探测算法实现了托盘的识别,并提取托盘位置、角度信息,并得到以下结论。

1) 托盘探测模型简化了激光雷达探测托盘的情景。确立了算法有效探测范围与激光点数量(分布于托盘支架正面)、托盘支架宽度和激光雷达分辨率的关系,为结果可靠性判断提供理论参考。

2) 托盘探测范围具有如下性质:探测范围与激光点数量(分布于托盘支架正面)阈值负相关,随阈值减小而增加;与待测托盘支架宽度成正比,随支架宽度增加而增加;与激光雷达分辨率正相关,随分辨率增加而增加。

3) 在探测范围内,托盘探测算法于 x 轴方向定位误差为 ± 60 mm, y 轴方向定位误差为 ± 59 mm,托盘角度误差 $\pm 6^\circ$ 。

本文所提出的托盘探测算法,实现托盘位姿识别,降低智能仓储装备的定位精度要求,改善各个工位间衔接的灵活性。本课题组将基于托盘位姿信息,对自动仓储装备对位姿不确定的托盘拾取问题进行深入研究。

参考文献

- [1] TAMBA T A, HONG B, HONG K S. A path following control of an unmanned autonomous forklift [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2009, 7(1): 113-122.
- [2] NYGARDS J, HOGSTROM T, WERNERSSON A. Docking to pallets with feedback from a sheet-of-light range camera [C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2000: 1853-1859.
- [3] BELLOMO N, MARCUZZI E, BAGLIVO L, et al. Pallet pose estimation with LIDAR and vision for autonomous forklifts [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2009, 42(4): 612-617.
- [4] WALTER M R, FRIEDMAN Y, ANTONE M, ET AL. Appearance-based object reacquisition for mobile manipulation [C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2010: 1-8.
- [5] WALTER M R, ANTONE M, EKAPOL C, et al. A situationally aware voice-commandable robotic forklift working alongside people in unstructured outdoor environments [J]. *Journal of Field Robotics*, 2015, 32(4): 590-628.
- [6] LECKING D, WULF O, VIERECK V. The RTS-STILL robotic fork-lift: Variable pallet pick-up and 3D localization in industrial environments [J]. *European Robotic Network (EURON)*, 2006.
- [7] AREF M M, GHABCHELOO R, KOLU A, et al. A multistage controller with smooth switching for autonomous pallet picking [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016: 2535-2542.
- [8] SEELINGER M, YODER J. Automatic visual guidance of a forklift engaging a pallet [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, 54(12): 1026-1038.
- [9] BYUN S, KIM M. Real-time positioning and orienting of pallets based on monocular vision [C]. *20th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, 2008: 505-508.
- [10] VARGA R, NEDEVSCHI S. Vision-based autonomous load handling for automated guided vehicles [C]. *IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, 2014: 239-244.
- [11] CINTAS R, MANSO L J, PINERO L, et al. Robust behavior and perception using hierarchical state machines: A pallet manipulation experiment [J]. *Journal of Physical Agents*, 2011, 5(1): 35-44.
- [12] SPAMPINATO G, LIDHOLM J, ASPLUND L, et al. Stereo vision based navigation for automated vehicles in industry [C]. *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, 2009: 1-4.
- [13] 郑芳,李贇华,蔡宣平. 基于激光传感器的统计特征提取和误差分析 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(6): 705-708.
ZHENG F, LI G H, CAI X P. Statistical characteristics detection and error analysis of LMS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 705-708.
- [14] 晓东,刘文耀,金月寒,等. 嵌入式 DSP 激光雷达距离图像处理系统 [J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(10): 1044-1046.
WANG X, LIU W Y, JIN Y H, et al. An embedded DSP system of laser radar range image processing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(10): 1044-1046.
- [15] 钱晓明,张浩,王晓勇,等. 基于激光扫描匹配的移动机器人相对定位技术研究 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 14-21.
QIAN X M, ZHANG H, WANG X Y, et al. Relative localization technology for mobile robot based on laser scan matching [J]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 14-21.
- [16] NGUYEN V, MARTINELLI A, TOMATIS N, et al. A comparison of line extraction algorithms using 2D range

- data for indoor mobile robotics[J]. *Autonomous Robots*, 2007, 23(2):97-111.
- [17] 王亚雄,康峰,李文彬,等. 基于2D激光探测的立木胸径几何算法优化[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 290-296.
WANG Y X, KANG F, LI W B, et al. Optimization of geometry algorithm for DBH of standing tree on 2D laser detection[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 290-296.
- [18] 刘洞波,刘国荣,胡慧,等. 基于激光测距的温室移动机器人全局定位方法[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(5):158-163.
LIU D B, LIU G R, HU H, et al. Method of mobile robot global localization based on laser range finder in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(5): 158-163.
- [19] 侯维岩,张利伟,党麟,等. 一种基于图像处理的棒材计数测量系统的设计与实现[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(5):1100-1106.
HOU W Y, ZHANG L W, DANG M, et al. Design and implementation of bar count measurement system based on image processing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(5): 1100-1106.
- [20] 吴晓军,邹广华. 基于边缘几何特征的高性能模板匹配算法[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(7):1462-1469.
WU X J, ZOU G H. High performance template matching algorithm based on edge geometric features [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(7): 1462-1469.
- [21] 陈硕,骆腾斌,刘丰,等. 应用于水表检定的机器视觉技术研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(1): 144-149.
CHEN SH, LUO T B, LIU F, et al. Research on machine vision technology applied in water meter verification[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(1): 144-149.
- [22] 霍迎秋,秦仁波,邢彩燕,等. 基于CUDA的并行Kmeans聚类分割算法优化[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(11):47-74.
HUO Y Q, QIN R B, HE C Y, et al. CUDA-based parallel k-means clustering algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11): 47-74.

作者简介



赵俊宏, 2013年于华南农业大学获得学士学位,现为华南农业大学博士生,主要研究方向为智能仓储装备、多传感器融合。
E-mail:junhongzhao@126.com.

Zhao Junhong received his B. Sc. degree from South China Agricultural University in 2013. Now he is a Ph. D. candidate in South China Agricultural University. His main research interests include intelligent storage equipment and multi-sensor fusion.



陆华忠(通讯作者), 1983年于浙江农业大学获得学士学位,分别在1986年和1992年于华南农业大学获得硕士学位和博士学位,现为华南农业大学教授、博士生导师,主要研究方向为农业工程、农产品冷链物流装备研究。
E-mail:huazhonglu@scau.edu.cn

Lu Huazhong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhejiang Agricultural University in 1983, received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from South China Agricultural University in 1986 and 1992, respectively. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in South China Agricultural University. His main research interests include agricultural engineering and cold chain logistics equipment for agricultural products.