

物流业几何尺寸智能化测量系统

李 娟 周富强 李作新 李潇婕

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

摘 要 互联网与电子商务的高速发展带来了物流业的颠覆性变革,但目前我国物流业存在总成本偏高、技术装备偏低、配送系统效率低下的缺点。长久以来,物资的几何尺寸信息的利用在物流行业中处于薄弱环节,有效利用几何尺寸信息将极大地改善物流业的包装、分拣以及分类运送等环节。基于此,设计了物流业物资的几何尺寸测量系统,该系统基于双目视觉系统,将视差法三维重构算法与特征提取及定位算法紧密结合,能够在复杂场景下对一般物流业物资进行现场测量,且受光照影响较少。测量系统的关键环节是目标物体特征的提取以及几何尺寸的测量。实验结果表明,几何尺寸的平均测量误差小于2%,最大误差小于3%,能够满足物流业的基本要求,可使之更加快速和智能。

关键词 物流业,几何尺寸,双目视差,特征提取

中图法分类号 TP391

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.08.039

Intelligent Geometry Size Measurement System for Logistics Industry

LI Juan ZHOU Fu-qiang LI Zuo-xin LI Xiao-jie

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract The rapid development of Internet and e-commerce has brought disruptive change of logistics industry. However, there are still some problems for logistics industry, such as high cost, low technical equipment and low efficiency in the distribution system. For a long time, the use of goods' geometry information, which can be very helpful in improving packing, classification and transport, is a weak process in logistics industry. Focusing on the above problems, this paper built an intelligent system to measure geometry size of logistic goods. Based on stereo vision system and by the combination of disparity algorithm for 3D reconstruction and feature extraction algorithm, the system computes the geometry size for general logistics in complex background and is less affected by light. The experimental results show that this system can be implemented to compute the geometry size quickly for the logistics industry, and its mean measurement error is less than 2% and maximum error is less than 3%, which can meet the basic requirement of logistics.

Keywords Logistics industry, Geometry size, Stereo vision, Feature extraction

市场经济的强有力驱动,促使国内外物流体系发生着根本变化,物流业在给人们带来巨大利润的同时,也整合了多种社会资源^[1]。

目前,我国物流仍存在很多不足,物流业的三大关注焦点是:1)物流成本是发达国家先进地区的两倍^[2];2)物流技术落后,包装以及分拣过程多采用人工或基本机械设备的方式;3)物流效率低下,统计显示,我国流通环节货运车辆空驶率超37%,仓储空间的利用不科学,物资存在挤压变形、损坏的现象。目前,物流业对物资几何尺寸信息的利用处于薄弱环节,合理利用尺寸能够极大地改进物流业。根据几何尺寸优化包装的结构设计,可以提高包装有效体积,实现较高的体积利用率。包装的结构设计关系到包装的有效体积以实现高体积的利用率^[3];基于货物几何尺寸的分拣和打包可以实现仓库的高效管理;合理配置物资可以减少空车率以及物资损坏。许多研究者搭建了基于物流业几何尺寸的测量装置,日本学

者开发了很多几何尺寸自动测量的装置,国内早期出现了基于光电扫描方式的“测量架”,其测量精度对硬件要求很高,且效率低下^[4];广州市西克传感器公司研发的DWS系统^[5],利用激光或光栅式体积扫描系统测量包裹体积,该设备对环境要求比较高,且成本昂贵;堆垛货物体积测量系统^[6]主要针对航空货运,不具备普世效果。为满足一般物流业需求,本文设计了一种可在复杂场景下对物资几何尺寸进行现场测量的系统,其通过双目匹配获取视差还原场景的三维结构,并对图像进行预处理来提取被测物特征信息,实现对被测尺寸的定位,将两者结合以达到测量物体几何尺寸的目的。该系统具有快速测量、高效测量、稳定测量的优点。

1 基于立体视觉的几何尺寸智能化测量

以计算机视觉为基础,物流业几何尺寸测量系统的测量过程可概括为摄像机对物资空间信息进行采集以及计算机通

到稿日期:2017-05-01 返修日期:2017-08-20 本文受国家自然科学基金(61372177)资助。

李娟(1994—),女,硕士生,主要研究方向为机器视觉和图像处理;周富强(1973—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为视觉测量, E-mail:zfq@buaa.edu.cn(通信作者);李作新(1994—),男,硕士生,主要研究方向为机器学习;李潇婕(1994—),女,硕士生,主要研究方向为图像处理。

过已有的信息计算几何尺寸信息。下面简单分析摄像机模型、双目视差原理以及本文测量三维尺寸的方法。

1.1 摄像机模型

摄像机透视投影模型描述了三维空间的物体经过光学系统成像到二维图像平面的过程。如图 1 所示,世界坐标系($O_w X_w Y_w Z_w$)下的空间点 M 转换到摄像机坐标系($O_c X_c Y_c Z_c$)下,再经过透镜成像于像面,像面涉及图像物理坐标系($O_i XY$)与图像像素坐标系($O_0 uv$)之间的转换, u_0 和 v_0 是摄像机在像素坐标系中的主点坐标^[7]。具体的数学表达如式(1)所示,其中, α_x, α_y, u_0 和 v_0 只与相机的内部结构有关,是内部参数; R 和 T 分别为摄像机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵和平移向量,与摄像机在世界坐标系的位置有关,是摄像机的外部参数^[8],这些参数都通过标定过程来进行求解。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

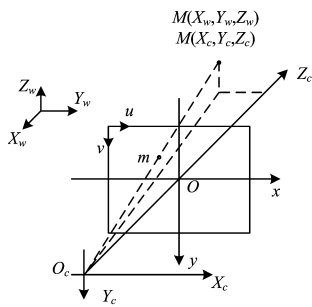


图 1 摄像机模型示意图

Fig. 1 Camera model

1.2 双目视差模型

智能测量系统采用双目模型获取图像信息,双目匹配能还原空间三维结构。双目立体视觉的本质是“视差”,通过视差来感知被测物体在场景中的深度信息,理想的双目立体视觉模型如图 2 所示^[9]。模型中两个摄像机的光轴平行,左右摄像机的图像空间中不存在旋转关系,它们位于同一平面且行对准。规定左摄像机为世界坐标系, P_l 和 P_r 分别是空间的某点 P 在左右图像的投影点, f 表示左右摄像机的焦距。以左摄像机为例,根据三角几何关系可得式(3),根据视差公式 $Disparity = X_{left} - X_{right}$,可以计算 P 点的三维坐标,即式(2),其中 B 表示两个摄像机投影中心之间连线的距离^[9]。

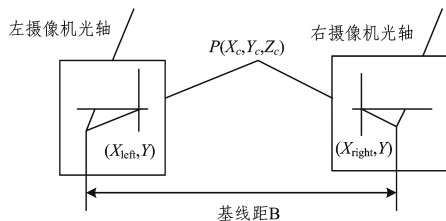


图 2 双目立体视觉系统原理图

Fig. 2 Binocular stereo vision system

在双目视场中,若能在两幅图像中分别找到同一空间点的成像位置,便能获知该点的视差值,进而可以根据视差及摄

像机部分参数的值,计算得出该点的空间三维坐标,也就是说可以从双目图像中恢复空间点的三维信息。

$$x_c = \frac{B \cdot X_{left}}{Disparity}$$

$$y_c = \frac{B \cdot Y}{Disparity} \quad (2)$$

$$z_c = \frac{B \cdot f}{Disparity}$$

$$X_{left} = f \frac{x_c}{z_c}$$

$$X_{right} = f \frac{(x_c - B)}{z_c} \quad (3)$$

$$Y = f \frac{y_c}{z_c}$$

1.3 几何尺寸智能化测量

几何尺寸智能化测量系统通过结合视差对三维结构的还原以及图像特征信息对被测物体的定位求出物体的几何尺寸。前文重点阐述了视差对三维结构的还原,本节将着重描述定位以及如何结合两者完成测量。测量算法的几何尺寸获取流程图如图 3 所示。

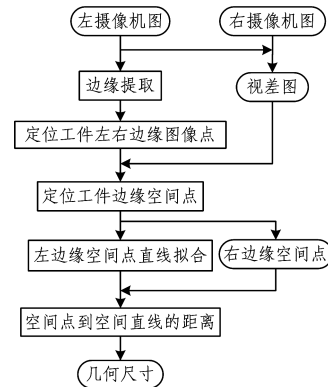


图 3 几何尺寸获取流程图

Fig. 3 Flowchart of geometric size measurement

算法的主要步骤为:

- 1) 图像采集,用双目摄像机拍摄被测物体,以获得左右图像对。
- 2) 视差获取,对左右图像进行双目匹配,以获取相应的视差图。
- 3) 边缘检测,对左摄像机图像进行边缘检测,以获得目标的轮廓信息。
- 4) 直线拟合与目标识别,定位被测物体的图像边缘点和空间边缘点,并对边缘点进行直线拟合。
- 5) 几何尺寸计算,求取右边缘点对左边缘点拟合直线的距离。

在测量算法实现的过程中,需要对图像进行预处理,目的是在有复杂背景的图片中定位被测物体的边缘。该边缘具有幅值和方向两个特性,通过边缘检测算子对图像区域进行检验^[10]。由于实际的图像具有很多高频噪声,容易造成许多假边缘点,选取 Canny 边缘检测算子先对图像进行平滑滤波以去除高频噪声,然后进行边缘提取,以寻找和绘制轮廓,去除背景的干扰。Canny 算子的实际边缘与检测到的边缘位置之间的偏差最小,且不会丢失重要边缘能保证其检测的最优性^[11]。

2 实验验证

为了验证该系统满足一般物流业复杂的测量背景、较低的光照要求,以及达到在现场进行快速测量的目的,本文将曲面物体圆柱体作为在深度方向有遮挡的代表物体,规则长方体作为在深度方向无遮挡的代表物体进行实验;在日常生活场景和普通光照条件下搭建测量系统,分别测量其直径和长度尺寸,为后续研究不规则物体和特殊场景奠定基础,同时,几何尺寸等信息的利用将大大改善物流业的现状。系统采用了 IMPERX 公司的 IGV-B2020-MKFO 工业相机,该相机属于 IMPERX 公司最新 BOBCAT 系列相机,继承了 IMPERX 相机的内部处理功能方面的优势,性价比较高,能够满足多数机器视觉应用的工业需求。该相机在自然光及一般照明条件下进行图像采集,搭建物体三维尺寸测量系统,实现对目标物体的几何尺寸的测量。

2.1 系统搭建及标定分析

考虑到物流业对测量的快速性以及测量系统的稳定性的要求,本文将两个摄像机平行放置于基座,搭建双目系统,这种方式的摄像机位置固定,一旦系统搭建完毕,只需要一次标定^[12]。

如图 4 所示,系统采用的是双目的结构方式,在实际过程中使用精细加工的托盘和标尺以达到近似平行,相机分辨率可达 2060×2050 ,同时相机结构紧凑,占地很小。单目标定和双目标定是进行测量的前提。借助靶标对摄像机内外参数进行标定是目前广泛采取的方法,最具代表性的为张正友靶标定算法^[14],其基于二维黑白正方形棋盘平面靶标(本文靶标尺寸为 9 行 7 列,边长为 40 mm),将棋盘角点作为特征点,每幅靶标图像中角点图像坐标和世界坐标的对应关系提供了两个关于内参矩阵的基本约束,大于 3 幅的标定图像即可求解包含 5 个位置参数的内参矩阵。实际标定时,为了求解最优参数,拍摄 25 张不同的靶标图像,以实现单目标定。双目标定求解两个摄像机之间的相对旋转和平移关系时,以单目标定中的世界坐标系为中介进行求取。为方便后续图像的处理操作,采取 OpenCV 实现单目和双目的在线标定,其在标定过程中直接读取左右靶标图片,自动提取每张图片的角点,该提取能达到亚像素级别,无需人工提取角点,能够一定程度地避免手动操作带来的误差,更加高效。

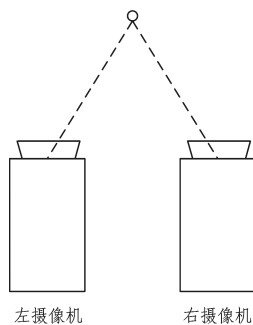


图 4 双摄像机双目系统结构

Fig. 4 Binocular system structure based on two cameras

标定结果如表 1 所列,单目结果包含内参矩阵(单位:像

素)、畸变系数以及重投影误差(单位:像素);双目结果包含旋转和平移矩阵(单位:毫米)。用卡尺反复测量系统中两个相机的内径和外径的尺寸能够近似求解得到极线距为 125 mm,与平移矩阵相比,该误差较小,可以接受;同时,旋转和平移矩阵的获取能够为后续的图片矫正以及视差获取带来极大的便利,也便于为双目系统搭建集成化软件。

表 1 摄像机标定结果

Table 1 Results of camera calibration

	左摄像机参数	右摄像机参数
内参数矩阵	$\begin{bmatrix} 2483.49 & 0 & 462.46 \\ 0 & 2474.31 & 528.70 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2484.81 & 0 & 440.52 \\ 0 & 2476.14 & 522.12 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
畸变系数 矩阵	$\begin{bmatrix} -0.0357, -0.4243, \\ 0.0009187, -0.00588, \\ -2.0059 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.1070, 2.6780, \\ 0.0003894, -0.00421, \\ -0.4691 \end{bmatrix}$
重投影误差	0.4	0.39
	双目摄像机外参数	
旋转矩阵	$\begin{bmatrix} 0.9999 & 0.004973 & 0.001917 \\ 0.004988 & 0.99995 & -0.0078021 \\ -0.001878 & 0.0078115 & 0.99996 \end{bmatrix}$	
平移矩阵	$\begin{bmatrix} -125.3023 & -1.6230 & 1.5712 \end{bmatrix}$	

2.2 双目匹配获取视差

视差的获取过程包括矫正、匹配、求解视差和可视化 4 个步骤(以圆柱物体为例)。

使用左右摄像机在场景中拍摄被测物体,采集对应图像对,利用标定的畸变系数先对其进行畸变矫正;根据 Bouguet 算法^[13],用标定结果的旋转和平移矩阵对图像对进行极线矫正,该矫正基于双目相机的极线几何^[15],目的是使两个相机的主光线平行且实现对准。图 5(a)和图 5(b)分别是左右摄像机拍摄圆柱物体的原始图片,图 5(c)是对其进行畸变和极线矫正后的结果图。像点在左右图像上只存在水平方向的差异,后续匹配只需在同一行上搜索左右相似匹配点,这极大地提高了算法的执行效率。

本文采用了两种基于区域的配准方法:1)区域匹配(Block Matching, BM)^[16],匹配代价函数是两者灰度差的绝对值。设置 SAD(Sum of Absolute Differences)邻域窗口,对于左图,选定锚点;对于右图,利用 SAD 窗口沿着极线进行匹配搜索,依次计算候选区域中每个点与锚点邻域窗口中像素灰度差的绝对值并求和(如式(4)所示),最后选取使得匹配代价最小的点作为最优匹配点。2)半全局块匹配(Semi Global Block Matching, SGBM)^[17],采用 8 个方向的一阶梯度来计算匹配代价,以改善灰度值对光照敏感的特性,其思路为对视差图(Disparity Map)设置一个与其相关的全局能量函数,通过使能量函数最小化达到求解每个像素最优视差的目的。

$$E_{\text{SAD}}(x, y, d) = \sum_{(x, y) \in S} |I_L(x, y) - I_R(x - d, y)| \quad (4)$$

$$E(D) = \sum_p (C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 I[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 I[|D_p - D_q| > 1]) \quad (5)$$

其中, D 表示视差图; p 和 q 表示像素; N_p 为 p 的相邻像素点(8 连通); $C(p, D_p)$ 为当前像素的代价函数; P_1 为惩罚系数,适用于与 p 相邻像素中视差相差 1 的像素; P_2 为惩罚系数,适用于与 p 相邻像素中视差相差大于 1 的像素。两种匹配算

法的速度都比较快,SGBM 的效果较好,而 BM 视差图的噪声略大,图 5(d)和图 5(e)是两种匹配方法的效果图。匹配完成后,左右图像坐标之差即是所求得得的视差值。

对于上述求得的每个像素的视差值,借助双目图像进行立体校正后获取重投影矩阵,恢复出空间点的深度信息,求得点的空间坐标,并对点云数据进行可视化操作,即三维重构以寻找一种拓扑连接关系,逼近被测物原始曲面^[18-19],效果图如图 5(f)所示。可以看出,该方法比较好地还原出了被测物的空间形状和结构。由于被测物特征分布较均匀,因此可对数据处理进行优化操作,这样选择对点云数据进行一定稀疏系数的降采样操作,这样能加快数据运算效率,效果如图 5(g)所示。

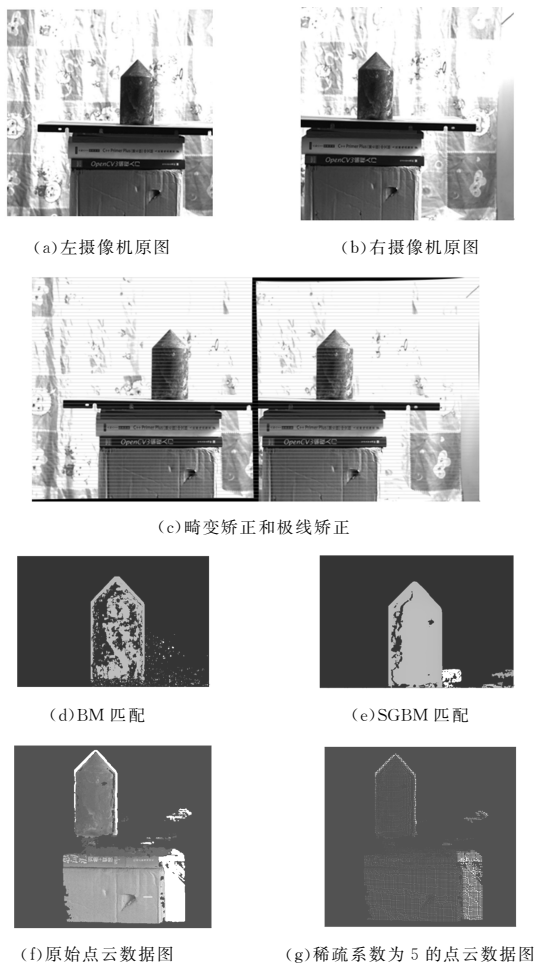


图 5 双目立体匹配获取的视差图

Fig. 5 Results obtained by binocular stereo matching

双目视差还原三维空间结构是物流业几何尺寸智能化测量系统中最关键的环节。下面考察算法实现时对时间的要求,以达到快速测量的目的。实验中,基于 Inter(R) Core(TM) i5-3210M2.50 GHz 处理器,64 位 Windows10 操作系统和 Visual Studio 2012 平台进行操作,采集的左右被测物体的图像的分辨率为 1024×1024 。对于邻域窗口 $5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9, 11 \times 11$,采用 BM 算法求取视差,测量视差获取所需的时间,结果如表 2 所列。由表 2 可知,双目匹配获取视差所需的平均时间为 738 ms,依据视差图还原三维空间结构所需的平均时间为 23 ms,共需要 761 ms,因此该方法能达到快速测量的要求。

表 2 双目匹配获取视差所需的时间

Table 2 Time performance of disparity map acquisition by stereo matching

(单位:ms)					
邻域窗口大小	5×5	7×7	9×9	11×11	平均值
时间	750	718	719	765	738

2.3 特征提取及尺寸测量

几何尺寸智能化测量系统通过结合视差对三维结构的还原以及图像特征信息对被测物体的定位求出物体的几何尺寸。图 6 展示了尺寸测量的效果,图 6(a)为边缘检测结果,图 6(b)和图 6(c)分别为对左摄像机拍摄的圆柱和长方体图像进行预处理以定位边缘位置的结果示意图。首先,在工件左右两端各取两点画出假边缘线,如图 6(b)和图 6(c)所示;然后,在真边缘提取的轮廓输出点中分别寻找离左假边缘距离小于 10 个像素(图像的像素尺寸为 1024×1024)的点集 E_l 和离右假边缘距离小于 10 个像素的点集 E_r ,根据视差图,对相应的图像坐标进行空间坐标转换,得到空间点 P_l 和 P_r ,并对 P_l 进行直线拟合;最后,对于 P_r 点集中的每个点,求取点到直线的距离,其平均值即为所求得得的被测物的几何尺寸。

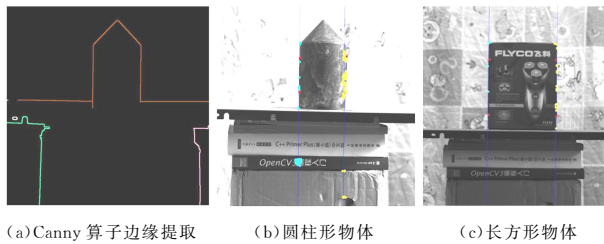


图 6 尺寸测量的效果图

Fig. 6 Effect of measurement process

在一般光照条件下,我们在现场对多个圆柱和长方体物体都进行了上述操作,获得的尺寸数据结果如表 3 所列,表 4 为对真实值、测量值、平均误差和最大误差的分析结果。结果表明,测量值与实际值相符,平均误差小于 2%,最大偏移误差小于 3%。参考国际快递标准中几何尺寸测量需精确到厘米的要求,本文搭建的测量系统基本可以满足一般物流业几何尺寸的测量标准,且误差在允许的范围内。

表 3 被测物几何尺寸测量结果

Table 3 Geometric size measurement results of target objects

(单位:mm)						
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	均值
圆柱 1	77.7845	77.4721	76.2631	76.3372	78.3042	77.2322
圆柱 2	15.5731	15.0623	15.1952	15.8405	15.6403	15.4623
长方形 1	121.842	123.857	123.914	123.233	122.5	123.0692
长方形 2	54.4608	55.0169	54.8493	54.2963	55.0001	54.7247

表 4 测量结果的误差分析

Table 4 Error analysis of measurement results

	真实值	均值	误差/%	最大误差取值	最大误差/%
圆柱 1	78	77.2322	0.98	76.3372	2.13
圆柱 2	15.5	15.4623	0.24	15.0623	2.82
长方形 1	125	123.0692	1.54	121.842	2.52
长方形 2	55	54.7247	0.50	54.2963	1.27

本文物流业测量系统的测量误差可能表现在以下几个方面:

1) 相机标定结果中, 单目参数直接关系到相机内的参数, 双目参数关系到基线距等外部尺寸的求解, 这些参数的精度可能导致图像对矫正存在偏差。

2) 进行双目匹配时, 匹配受光学失真和噪声的影响, 且双目系统中的一个严重的问题是遮挡问题^[20] (即不同视角图像中同一特征的属性差异), 原因是在 Z 轴方向有深度值, 表现在结果上是理论上求的结果略小于圆柱真实直径的弦值。

3) 在左摄像机图像的边缘提取过程中, 在边缘上取点存在像素误差, 虽然 Canny 的内部包含非极大值抑制的操作, 能减少误差, 但是在边缘点的定位筛选过程中必然存在像素误差。

结束语 基于当下物流业现状, 本文研究了一种基于一般物流业几何尺寸的测量系统, 将双目系统视差原理和图像特征信息定位紧密结合在一起。实验结果表明, 该系统可在一般光照条件下, 在复杂背景下现场测量物资的三维尺寸, 其平均测量误差小于 2%, 最大误差小于 3%, 测量结果满足物流业对几何尺寸的测量需求。在测量的实时性和效率方面, 该系统能够实现单目和双目的在线标定, 实现矫正和双目匹配, 高效便捷; 在对提取测物特征信息时, 其能够比较准确地定位被测物边缘的图像坐标和空间坐标。后续的研究将继续针对物流业的实际物体进行大量的实验和改进, 以使测量系统能够满足物流业的高效合理包装、有序快速分拣、正确规划路径等方面的要求, 极大程度地节省物流成本, 提升物流技术, 实现高效物流, 使物流业更加惠民, 最终促进经济的发展。

参 考 文 献

- [1] SUN D F. Discussion on Reducing the Cost of Logistic Enterprises [J]. China Economist, 2011(4): 185-186. (in Chinese)
孙德凤. 关于降低物流企业成本的探讨[J]. 经济师, 2011(4): 185-186.
- [2] ZHOU J. Research on Optimization of the Key-Link in Self-support Logistics Distribution [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016. (in Chinese)
周洁. 自营物流配送系统关键环节优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [3] LU F. Design and Implementation of Amazon Logistics Line Haul Settlement System [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
卢飞. 亚马逊物流干线运输结算系统的设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [4] YUAN Z Y. Automatic Size Measurement Device of Deliver Supplies [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 1995(3): 56. (in Chinese)
袁志毅. 测量运送物尺寸重量的自动计量装置——“测量架”[J]. 工业仪表与自动化装置, 1995(3): 56.
- [5] Sensor Intelligence. Volume-weight Measurement and Bar Code Scanning System [J]. Maschinen Markt, 2016(38): 63. (in Chinese)
广州市西克传感器有限公司. 体积重量测量及条码扫描系统[J]. 现代制造, 2016(38): 63.
- [6] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 33-36.
- [7] WENG J, COHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [8] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 134-135.
- [9] YANG J. Research on Binocular Stereo Vision Measurement Technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese)
杨洁. 双目立体视觉测距技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [10] LIU Q H. Theoretical and Experimental Research on 3D Size Measurement of High-temperature Components Based on Infra-red Vision [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
刘启海. 高温构件三维尺寸红外视觉测量的理论和实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [11] WEN Z, ZHANG X, ZHOU C S, et al. Modified Edge Detection Algorithm based on Canny [J]. Communications Technology, 2017, 50(10): 2236-2240. (in Chinese)
文章, 张欣, 周昌顺, 等. 一种基于 Canny 的边缘检测改进算法[J]. 通信技术, 2017, 50(10): 2236-2240.
- [12] HUANG S H, BI Y W, LIU D T, et al. Research on Noncontact Measurement Based on Binocular Stereo Vision [J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2017, 30(4): 323-327. (in Chinese)
黄松梅, 毕远伟, 刘殿通, 等. 双目立体视觉非接触式测量研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2017, 30(4): 323-327.
- [13] FUSIELLO A, TRUCCO E, VERRI A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs [J]. Machine Vision & Applications, 2000, 12(1): 16-22.
- [14] ZHANG Z Y. A Flexible New Technique for Camera Calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [15] GUNAY F, GEIGER A. Displets: Resolving stereo ambiguities using object knowledge [C] // Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2015: 4165-4175.
- [16] KANADE T, OKUTOMI M. A Stereo Matching Algorithm with an Adaptive Window: Theory and Experiment [J]. IEEE Computer Society, 1994, 16(9): 920-932.
- [17] HIRSCHMULLER H. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2007, 30(2): 328-341.
- [18] WANG C Y. Research on Point Cloud Mosaic Algorithm in 3D Reconstruction [D]. Taiyuan: North University of China, 2017. (in Chinese)
王程远. 三维重建中的点云拼接算法研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [19] LIANG Q X. A Research Based on 3D Point Cloud Data Surface Reconstruction of Laser Radar [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
梁群仙. 基于激光雷达三维点云数据曲面重构技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [20] YANG Z R. Research on Stereo Matching Approaches and Occlusion in Binocular Vision [D]. Qihuangdao: Yanshan University, 2010. (in Chinese)
杨志荣. 双目视觉立体匹配方法和遮挡问题研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.