基于体积扫描容重法的社区垃圾分类系统研究

张莉彦[1]，钱育浩[1]，罗伟[2]，陈鹏鹏[3]，葛春玲[4]，谢鹏程[1*]

（1.北京化工大学，北京 100029；2.中信环境技术有限公司，广州 511466；
3.北京京环智慧环保科技有限公司，北京 100020；4.北京城市矿产资源开发有限公司，北京 100020）

摘要：目的 响应国家垃圾分类政策，通过设计社区生活垃圾分类设备检测系统，提高分类正确率，改善“混投乱投”的现状，从源头提高城市垃圾分类投递的准确性。**方法** 结合现有针对垃圾容重区间划分方法和多种评价标准，总结归纳各类垃圾的容重阈值划分区间，并将其作为垃圾分类的判断方法。设计体积检测模块，利用激光测距传感器点阵获得待测物切片遮挡图和截面积，并计算待测物体积，结合称重传感器计算待测物容重，并依据容重区间对待测物进行分类判断。**结果** 根据容重阈值分类标准，对多种随机样本进行检测。绝大多数可回收物和厨余垃圾的容重检测值在各分类的容重阈值内，可以被正确分类；其余样本在混合垃圾容重阈值内，符合边界条件设定和模糊垃圾的样本按其他垃圾标准处理的分选原则，检测结果符合分类要求。**结论** 基于体积扫描检测容重的社区生活垃圾分类系统可以满足居民前端投递环节中对生活垃圾分类检测的需求，有助于提高源头分类的准确性，能有效推进我国垃圾分类和再生资源利用工作的发展。

关键词：垃圾分类；容重；检测技术；智能分类设备

中图分类号：X799.3；TP274.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-3563(2023)21-0221-08

DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.027

Community Garbage Sorting System Based on Measurement of Volume and Bulk Density

ZHANG Li-yan[1], *QIAN Yu-hao*[1], *LUO Wei*[2], *CHEN Peng-peng*[3], *GE Chun-ling*[4], *XIE Peng-cheng*[1*]

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Citic Environmental Technology Co., Ltd., Guangzhou 511466, China; 3. Beijing Jinghuan Wisdom Environmental Protection Technology Co., Ltd., Beijing 100020, China; 4. Beijing City Mineral Resources Development Co., Ltd., Beijing 100020, China)

ABSTRACT: The work aims to design a detection system of community domestic garbage sorting equipment to respond to the trend of national garbage sorting policy, improve the sorting accuracy, change the current situation of "mixing and throwing", increase the accuracy of urban garbage sorting and delivery from the source. Combined with the existing garbage sorting methods of bulk density threshold and multiple evaluation criteria, the bulk density threshold of each type of garbage was summarized as a judgment method of garbage sorting. The volume detection module was designed, which used the laser ranging sensor lattice to obtain the occlusion map and cross-sectional area of the object to be measured, and calculated the volume of the object to be measured, and calculated the bulk density of the object to be measured in combination with the weighing sensor, and classified and judged the object to be measured according to the bulk density interval. According to the sorting standard of bulk density threshold, a variety of random samples were detected. The bulk

收稿日期：2023-03-20

基金项目：国家重点研发计划（2019YFC1906105）

*通信作者

density detection values of most recyclables and kitchen garbage were within the bulk density threshold of each category and could be correctly sorted. The remaining samples were within the bulk density threshold of mixed garbage, which conformed to the principle of boundary condition setting and fuzzy garbage samples were treated according to other garbage standards, and the test results met the sorting requirements. The community domestic garbage sorting system based on measurement of volume and bulk density can meet the function of sorting and detecting domestic garbage in the front-end delivery of residents, help to improve the accuracy of sorting from the source, and effectively promote the development of garbage sorting and renewable resource utilization in China.

KEY WORDS: garbage sorting; bulk density; detection technology; intelligent sorting equipment

随着我国互联网经济及快递业的快速发展，以及城市化进程的迅速推进，快速增加的包装材料等生活垃圾造成的负面影响也逐渐暴露，目前全国约有 2/3 的大中城市出现了“垃圾围城”的严峻形势。年垃圾产生量的增速不断提高，垃圾处理、处置已成为社会发展进程中亟待解决的资源与环境问题[1]，能否及时、安全地无害化处理垃圾，将对我国的生态文明建设产生重要影响[2-4]。包装垃圾的体积约占生活垃圾的 30%，通常由塑料、纸板、金属、玻璃等材料制成，绝大多数包装材料属于可回收物范畴。文中分析了我国城市生活垃圾收集处理和管理过程中存在的问题，提出一种提高垃圾分拣环节效率的检测技术方案，结合多项容重阈值划分方法和评价标准，探讨现有基于容重原理的生活垃圾检测方法的可行性，设计了基于激光体积扫描容重法的垃圾分类检测系统，并验证该系统分类识别方法的可行性。

1 社区生活垃圾分类投放问题

目前，我国的垃圾分类存在很多问题[5]。由于起步时间较晚，民众对垃圾分类的意识不够强，导致垃圾分类基建设施形同虚设，城市生活垃圾最终仍需处理厂等后处理机构进行再分类，源头分类环节的作用微乎其微。统计数据表明，北京市作为最早试行垃圾分类的城市，分类投放正确率为 16.92%~34.56%[6]。混合收集、分类投放正确率低导致其中的可回收物无法循环利用，并失去回收利用价值，同时增加了焚烧、填埋的处理成本。为了解决垃圾处理与资源化的问题，需要尽快做好生活垃圾分类工作，将垃圾分类变成日常的生活习惯[7-8]。

针对城市生活垃圾的智能化分拣系统，目前业内已有较成熟的产品[9]，但其面对的工作场景主要以处理场流水线为主，处于焚烧、填埋前的末端分类环节，其设备体量庞大、智能化程度高。目前，针对前端垃圾分类的检测技术较匮乏，缺少效率高、精度高、成本低的检测技术，难以实现用户投递时的前端垃圾分类功能。

这里提出一种依托容重原理的前端垃圾分类检测技术，从源头分类，以提高城市生活垃圾分类投递的准确性，减轻后续各处理环节的压力与成本，完善优化垃圾分类收运的环节。

2 垃圾分类检测技术

国内外有许多针对垃圾处理厂中生活垃圾识别分类检测的研究方法。随着机器人和人工智能技术的飞速发展[10]，它们在垃圾分类领域中的应用范围不断扩大，逐步取代了传统的人工分拣工序。基于深度学习的分类检测系统[11]，首先依靠工业相机对待分拣物进行图像信息采集，在目标检测网络的模型内判断待分拣物的种类和位置标记，在输出分类结果后结合后续分拣系统中的工业机器人对待分拣物进行分选[12]。

部分发达国家较早提出将机器人投入垃圾分类领域中。芬兰的 ZenRobotics 公司在 2013 年推出了用于垃圾分类的工业机器人，可以高效率地识别、分拣建筑垃圾中的可回收物[13]。美国光学分类设备生产商 National Recycling Technologies 研发的智能垃圾分拣机器人 Max-AI，利用视觉采集系统和深度学习目标检测模型，对目标物体进行检测判断后分拣[14]。ABB 公司在 2019 年第 21 届中国国际工业博览会上展示了结合人工智能技术的 YuMi 垃圾分类演示单元[15]，利用工业机器人、视觉采集系统和深度学习目标检测系统实现了识别、定位不同类型垃圾并分拣的全面功能。

基于深度学习的垃圾分类检测技术主要应用于垃圾处理厂等后端分拣场景，与大型分拣流水线相结合，实现了将不同类型垃圾分拣后送入焚烧、填埋等后处理环节。在前端的用户分类投递环节中较少具备分类检测技术的硬件设备，导致前端生活垃圾的分类准确率较低，且无法通过智能设备对居民分类投递进行管理和监督。

目前，前端投递环节的分类工作以用户自行分类为主，以志愿者、分类设备提示为辅。市面上的主要智能分类设备为用户提供了多种类型垃圾投口和分类指导宣传，用户投递后通过人机交互界面选择投递

类别，设备对类别、积分等信息进行反馈。由于设备并不具备主动分类检测功能，因此无法原位识别投递物的分类准确性。分类准确与否只能由用户的分类水平决定，加上部分设备存在运维故障、缺乏志愿者等问题，导致频繁发生混投、乱投等现象。

结合前端投递的应用场景，研究了容重法垃圾分类检测技术，使分类设备实现原位垃圾分类检测的智能化功能。目前，容重法垃圾分类检测技术并无成熟的体系，仅在分类原理上进行了一定的研究和探索。清华大学的李忠磊等[16]提出一种基于容重阈值的城市生活垃圾分类识别方法，该方法通过对垃圾理化性质进行分析，划分出多种生活垃圾的容重阈值，为容重法判断生活垃圾类型提供了部分理论依据。在此基础上，结合多项容重阈值划分方法和评价标准，探讨现有基于容重原理的生活垃圾检测方法的可行性，最终实现基于激光体积扫描容重法的垃圾分类检测系统。

3　社区生活垃圾分类系统设计

3.1　容重检测原理

固体废物的容重指一定空间内单位体积容纳废物的质量，通常以 kg/m^3 为单位。由于固体废物不同的物理组分一般有自身特征性的容重，因此废物的物理组成是影响其容重的重要因素。另外，固体废物的容重还与粒径和含水率有关，粒径小且潮湿的废物的容重较高。

容重的测定一般采用将废物样品装填满固定尺寸容器后进行称量的方法，计算见式（1）。由于混合组分固体废物（如城市生活垃圾）的容重受到物理组成的影响较大，因此大多按废物的物理组分分别测定其容重，再按物理组成加权计算方法确定混合废物的容重。

$$\rho=\frac{m_j-m}{V} \tag{1}$$

式中：ρ 为生活垃圾容重；m 为生活垃圾桶质量；m_j 为每次称量的总质量；V 为生活垃圾桶容积。

主要成分不同的垃圾，其容重各不相同。同时，固体废物垃圾的容重也受到含水率的影响。部分常见生活垃圾的容重数据如表 1 所示。

现阶段，根据我国垃圾分类政策，将垃圾划分为厨余垃圾、可回收物、其他垃圾、有害垃圾等。国内垃圾源头分类的重点是分离低附加值的厨余垃圾和其他垃圾，以便分别进行厌氧发酵和焚烧处理。同时，区分出可回收物，以提高资源回收利用率，减少后处理环节成本。基于主要功能目标，对厨余垃圾和可回收物的精准判断显得尤为重要。通过对主要垃圾组分的分析，可以大致划分出城市生活垃圾中主要组分的容重区间。

清华大学的李忠磊等[16]提出分类识别方法，建立了分类准确率、含水率和容重的线性回归关系，并量化出不同类型垃圾的显著容重阈值。根据该识别法可知，其他垃圾、混合垃圾和厨余垃圾的容重阈值存在显著差异，分别为<115 kg/m^3、115~211 kg/m^3、>211 kg/m^3。在该分析方法中，对生活垃圾的分类定义与现行标准存在差异，该分析方法中制定的可回收物包括玻璃、金属，其他垃圾包括纸类、橡塑、织物、木材、灰土和砖瓦。根据《城市生活垃圾分类及其评价标准》，纸类、橡塑、织物、木材可以归为可回收物；灰土和建筑砖瓦的平均容重分别约为 500、1 600 kg/m^3，与其余容重阈值存在明显差距且无交叉；由于厨余垃圾和其他垃圾受到含水率等因素的影响，其容重普遍大幅超过可回收垃圾的容重，划分区间较明显。结合上述多项容重阈值划分方法和评价标准，可回收物、混合垃圾、厨余垃圾、其他垃圾的容重阈值分别为<115 kg/m^3、115~211 kg/m^3、211~500 kg/m^3、>500 kg/m^3。

这里研究的主要目标在于原位识别厨余垃圾和可回收物，将分选后的厨余垃圾、可回收物分别原位处理并收纳转运；将无法精确分选的厨余垃圾、可回收物和混合垃圾均按照其他垃圾标准处理，并进入后处理工序。鉴于功能目标的特殊性和针对性，可以适当提高容重阈值的分辨容错率，前述无辨识度的待测物或混合垃圾均按其他垃圾处理。

表 1　部分生活垃圾的容重数据
Tab.1 Bulk density of some household garbage

种类		容重/($kg\cdot m^{-3}$)	
		范围	典型值
可回收物	纸张	40~130	90
	包装箱	40~80	50
	塑料袋	40~130	65
	织物	40~100	65
	橡胶	100~200	130
	皮革	100~260	160
	木料	130~320	240
	玻璃瓶	160~480	195
	铁罐	50~160	90
	铝罐	65~240	160
其他垃圾	其他金属	130~1 150	320
	灰渣	320~1 000	480
	建筑垃圾	1 000~1 600	1 420
厨房垃圾	食物	130~480	290

3.2 系统设计方案

结合社区垃圾分类系统的应用场景和功能需求，考虑到生活垃圾投放环境较复杂，为了保证垃圾检测识别的准确度，采用激光切片体积扫描技术为容重法检测提供技术支持。通过调研已有实验结果可知，纯净干湿垃圾存在容重阈值差异，将待测物的容重测量值与数据库中各类型垃圾容重阈值进行对比，最终判断待测物的种类。系统检测逻辑如图 1 所示。

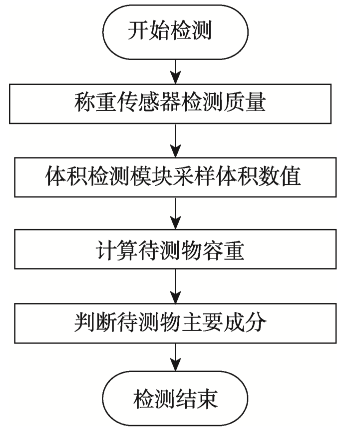

图 1 容重法分类系统检测逻辑
Fig.1 Logic of sorting system based on bulk density

3.3 体积检测模块

待测物从激光传感器阵列间通过，利用激光测距传感器点阵获得待测物的轮廓及切片遮挡图，依据切片遮挡图片计算待测物的横截面积，确定采样频率，采用多轮廓切面算法积分求得不规则被检袋装投放垃圾的体积。体积的检测逻辑如图 2 所示。

如图 3 所示，激光发送装置阵列由 2 排阵列布置的激光测距传感器组成。在每侧发射端上布置 5 个激光测距传感器，分别负责待测物左右半区的切片轮廓检测。激光通过光源发射后由待测物表面反射回传感器，得到各传感器距待测物的实时距离，整合所有传感器的数据后，可得到该时刻下待测物的截面轮廓和切片遮挡图。待测物匀速通过检测平台，通过设置固定采样频率，采用多轮廓切面算法积分求得不规则被检袋装投放垃圾的体积。实际样机如图 4 所示。

考虑到实验平台传感器的精度，设计了检测平台的精度补偿方案，如图 5 所示。由于单组激光测距传感器阵列上可安装的传感器数量有限，因此传感器的

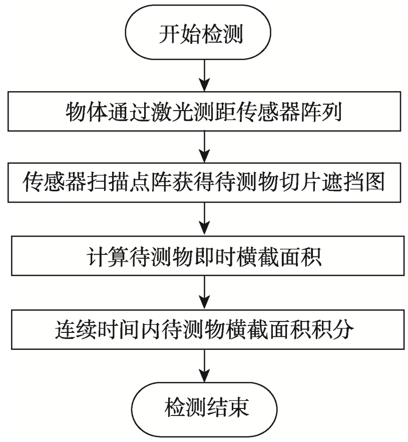

图 2 体积检测模块运算逻辑
Fig.2 Logic of volume detection module

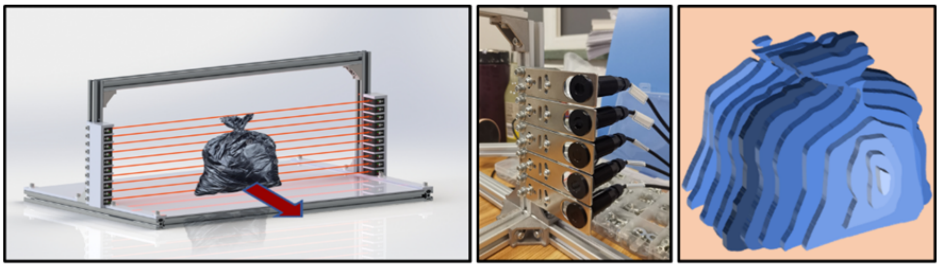

图 3 体积检测装置
Fig.3 Device of volume detection

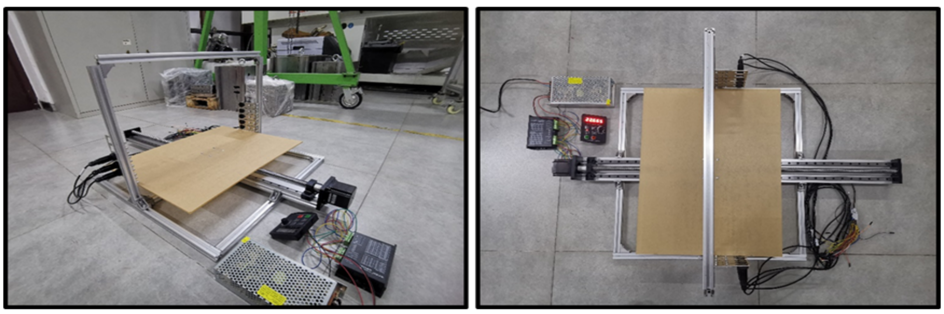

图 4 容重检测装置样机
Fig.4 Prototype of bulk density detection

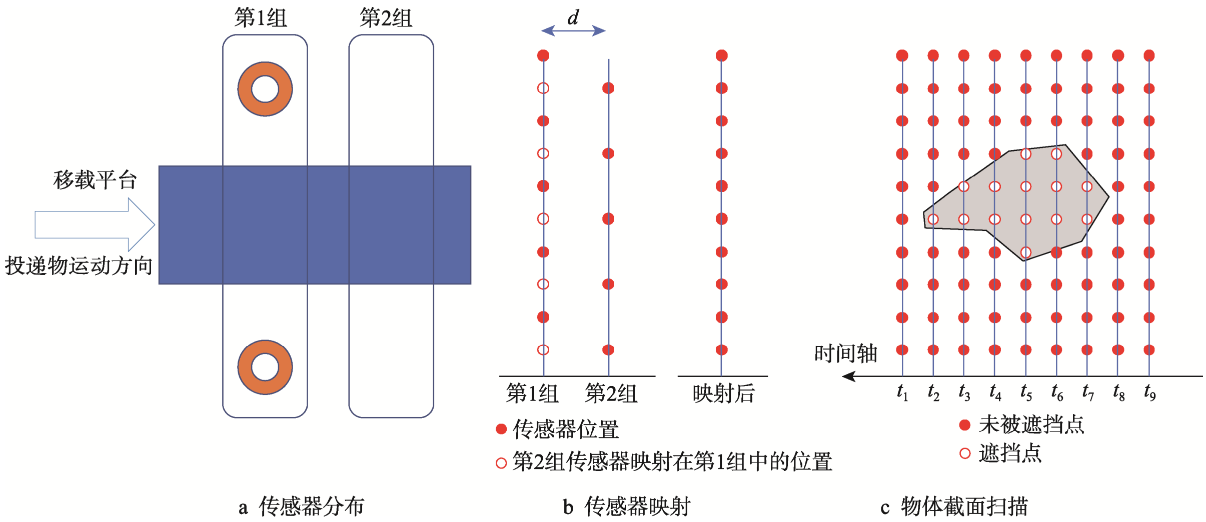

图 5　精度补偿

Fig.5 Accuracy compensation

间距需要考虑尺寸限制，间隙过大会对获取的待测物截面信息产生较大误差。这里尝试设置 2 组平行布置的激光测距传感器阵列，2 组传感器阵列间距相同，第 2 组传感器与第 1 组交错布置。待测物经过 2 组检测光幕的时间为 t_1、t_2，第 2 组传感器将 t_2 内识别到的截面图像与第 1 组传感器在 t_1 内识别的截面图像合并，以此来提高物体截面轮廓的精度。

3.4　透射识别

待测物匀速经过检测平台后，经过两侧对称布置的激光测距传感器阵列，各传感器输出固定检测点位与待测物的距离。将第 1 组传感器阵列输出数据记为 l_1，第 2 组传感器阵列输出数据记为 l_2。通过设置固定边界条件，结合传感器测试数据，采用相关公式可以求得该时刻下待测物的轮廓和截面面积，截面效果如图 6 所示。

待测物截面面积 S_t 的计算见式（2）。

$$S_t=(n-1)h\cdot D-S'_t \tag{2}$$

式中：S_t 为待测物截面面积；S'_t 为空余截面面积；n 为单侧传感器数量；h 为相邻传感器间距；D 为检测平台宽度。

进一步地可以推算出空余截面面积 S'_t，见式（3）。

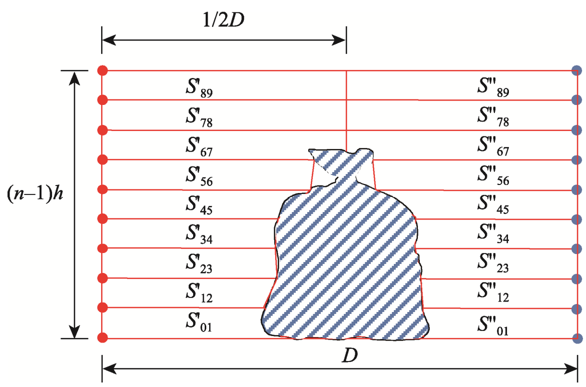

图 6　截面区域划分

Fig.6 Cross-sectional area division

$$S'_t=S'+S'' \tag{3}$$

式中：S'_t 为空余截面面积；S' 为左半区空余截面面积；S'' 为右半区空余截面面积。

以传感器为界限进一步计算截面面积，见式（4）—（5）。

$$S'=\sum_{i=0}^{n-2}S'_{i(i+1)} \tag{4}$$

$$S''=\sum_{i=0}^{n-2}S''_{i(i+1)} \tag{5}$$

式中：n 为单侧传感器数量；$S'_{i(i+1)}$ 为左半区第 i 个传感器和第 i+1 个传感器之间的空余截面积；$S''_{i(i+1)}$ 为右半区第 i 个传感器和第 i+1 个传感器之间的空余截面积。

通过前述计算，可以获得连续时间内待测物的截面积。相应地设置检测平台移速 v 恒定，结合控制器设定传感器的采样频率，对该时间段内的待测物截面积进行叠加，以获得体积。

3.5　测试实验

检测的实验样本为常见的生活垃圾，包含可回收物、厨余、其他等多种类型垃圾。样本共计 12 种，包含规则形状样本和不规则形状样本各 6 种，以考察样本形状复杂程度对激光扫描体积检测准确率的影响规律。此次实验共计 96 组，针对 12 种样本各进行了 8 轮重复检测。设定每轮检测时样本的位姿角度，以考察样本不同位姿对体积检测误差的影响。

3.5.1　规则形状样本体积检测

检测平台样机设置了 10 个传感器，并对称布置，分别编号为 1~10，由控制终端导出传感器实时检测数据。数据处理方法以样本 1 为例，首先采用形状分布规则、体积变动不大的样本作为待测物进行实验。该样本的尺寸（长度、宽度、高度）为 110 mm×85 mm×100 mm，体积为 935 000 mm^3。

基于导出的 10 个传感器原始数据，对不同时刻下

的截面积和体积进行计算。分别求得左右半区空余截面积、待测物截面积、不同时刻下样本截面体积微元，通过对所有体积微元求和，得到检测体积为 901 206 mm^3。与实际情况对比，可以判断该样本的体积检测准确率为 96.39%。计算明细如表 2 所示。

表 2 样本 1 的检测结果
Tab.2 Detection result of sample 1

时间	左半区空余面积/mm^2	右半区空余面积/mm^2	待测物截面积/mm^2	截面体积微元/mm^3
1	13 988	11 622	7 990	23 640
2	13 884	11 687	8 029	23 755
3	13 585	11 557	8 458	25 024
4	13 780	11 414	8 406	24 870
5	13 728	11 596	8 276	24 486
6	13 677	11 596	8 328	24 640
7	13 678	11 401	8 523	25 217
8	13 673	11 505	8 419	24 909
9	13 455	11 609	8 536	25 255
10	13 377	11 518	8 705	25 755
11	13 624	11 622	8 354	24 717
12	13 429	11 635	8 536	25 255
13	13 481	11 635	8 484	25 101
14	13 598	11 323	8 679	25 678
15	13 611	11 466	8 523	25 217
16	13 533	11 544	8 523	25 217
17	13 481	11 440	8 679	25 678
18	13 728	11 544	8 328	24 640
19	13 676	11 362	8 562	25 332
20	13 624	11 349	8 627	25 524
21	13 767	11 622	8 211	24 293
22	13 715	11 791	8 094	23 947
23	13 702	11 440	8 458	25 024
24	13 676	11 557	8 367	24 755
25	13 702	11 388	8 510	25 178
26	13 702	11 505	8 393	24 832
27	13 637	11 466	8 497	25 140
28	13 663	11 349	8 588	25 409
29	13 741	11 362	8 497	25 140
30	13 702	11 622	8 276	24 486
31	13 923	11 752	7 925	23 447
32	14 053	11 778	7 769	22 986
33	14 014	11 804	7 782	23 024
34	14 352	11 817	7 431	21 986
35	14 404	12 012	7 184	21 255
36	14 521	12 194	6 885	20 370
37	14 404	12 428	6 768	20 024

3.5.2 不规则形状样本体积检测

经过实际测试，该实验平台检测简单形状的待测物体积时较准确，对于形状更复杂、体积更庞大的待测物，其精度仍有待提升。以样本 2 为例，该样本通过排水法测得的真实体积为 1 408 750 mm^3，通过对所有体积微元求和，得到检测体积为 1 378 205 mm^3。与实际情况对比，可以判断该样本的体积检测准确率为 97.83%。计算明细如表 3 所示。

表 3 样本 2 检测结果
Tab.3 Detection result of sample 2

时间	左半区空余面积/mm^2	右半区空余面积/mm^2	待测物截面积/mm^2	截面体积微元/mm^3
1	27 573	28 977	7 850	81 925.45
2	27 534	24 882	11 984	125 069.4
3	27 144	24 622	12 634	131 853
4	26 923	24 622	12 855	134 159.5
5	26 507	25 155	12 738	132 938.4
6	26 520	25 337	12 543	130 903.3
7	26 793	25 337	12 270	128 054.2
8	26 585	24 921	12 894	134 566.5
9	26 936	24 986	12 478	130 224.9
10	27 144	24 947	12 309	128 461.2
11	27 482	25 415	11 503	120 049.5

3.5.3 不同位姿体积检测

为了更好地评估该检测系统的准确性，进一步扩大实验的适用范围，将 12 个样本以不同位姿角度进入检测平台进行重复测试。每个样本分别设计 8 种测试角度，以验证该检测系统的准确性，并检验误差，测试结果如表 4 所示。不同位姿角度的误差测试实验结果表明，96 份测试实验的准确率都保持在 95%以上，各样本的平均准确率也在 96%以上。

3.5.4 容重分类检测

计算得到 12 种待测物测量的体积后，结合称重传感器反馈的质量数据，计算出各样本的实际容重，并与前述划分的各类型垃圾的容重阈值区间进行对比，进一步判断待测物的主要成分。判断结果如表 5 所示，列举了所有测试样本的多项检测结果，测量体积、容重是由系统计算得出的样本容重数据，样本材质指样本所属材料的类型，实际分类是根据样本材质进行分类判断的结果，检测分类由系统将计算容重与容重阈值进行对比后得出。结合实际分类与检测分类的判别结果，最终判断检测结果是否正确。

表 4　不同位姿检测结果
Tab.4 Detection results at different angles
%

样本	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	平均值
1	97.83	96.98	99.42	96.28	97.15	97.09	96.75	95.95	97.18
2	96.39	97.01	96.54	99.98	97.53	96.43	99.06	98.71	97.71
3	96.92	98.15	96.08	96.88	99.63	97.71	94.97	96.01	97.04
4	98.40	98.65	99.50	97.79	97.84	98.65	98.42	98.75	98.50
5	99.01	99.66	96.72	97.40	96.83	98.48	98.01	98.43	98.07
6	96.63	96.53	95.47	95.98	97.93	94.68	99.01	95.72	96.49
7	95.29	93.61	94.28	96.74	95.88	98.76	97.45	99.38	96.42
8	95.23	97.99	95.92	97.09	97.83	98.52	99.53	97.58	97.46
9	96.16	97.52	98.99	97.97	95.72	95.47	94.83	99.85	97.06
10	97.09	98.33	99.84	97.29	96.43	99.10	97.31	96.28	97.71
11	94.56	99.80	94.71	99.79	97.71	95.09	92.95	96.62	96.40
12	97.70	96.30	97.67	97.10	95.37	98.23	97.58	97.12	97.13

表 5　所有样本的检测结果
Tab.5 Detection results of all samples

待测物	平均测量体积/mm^3	质量/g	容重/($kg \cdot m^{-3}$)	样本材质	实际分类	检测分类	检测结果
样本 1	901 206	56	61	纸板	可回收	可回收	正确
样本 2	1 378 205	69	50	纸板	可回收	可回收	正确
样本 3	378 465	77	204	木材	可回收	混合	正确
样本 4	1 769 076	180	102	金属罐	可回收	可回收	正确
样本 5	730 614	69	94	塑料	可回收	可回收	正确
样本 6	1 073 012	516	481	水果	厨余	厨余	正确
样本 7	247 231	107	433	蔬菜	厨余	厨余	正确
样本 8	1 025 305	69	67	塑料	可回收	可回收	正确
样本 9	548 404	48	88	纸板	可回收	可回收	正确
样本 10	1 909 248	136	71	织物	可回收	可回收	正确
样本 11	592 885	34	58	塑料	可回收	可回收	正确
样本 12	823 212	69	84	织物	可回收	可回收	正确

4　结果与分析

根据多项容重阈值划分方法和评价标准，总结归纳出不同类型垃圾的容重阈值。考察了检测系统对不同类型待测物体积检测的可行性（表 4），实验结果表明，在检测过程中，样本在不同位姿下的体积检测准确率波动不大，对后期判断待测物容重和分类的影响较小，具有较强的适用性。将检测结果与待测物已知分类进行了对比，具体结果如表 5 所示。整理计算结果，在随机挑选的 12 种不同类型垃圾样本中，绝大多数可回收物和厨余垃圾的容重检测值在各分类的容重阈值内，可以被正确识别检测；木材样本可回收物的容重检测值在混合垃圾分区内。由于垃圾的成分复杂、容重边界条件模糊，因此划分容重阈值时需考虑过渡区间，并设置非精确判断样本以其他垃圾处理的分选原则。该检测结果符合分类要求。测试结果表明，可以通过该检测系统实现前端分类环节中可回收垃圾、厨余垃圾的精确判断，以及其他垃圾、混合垃圾、无法精确识别垃圾均以其他垃圾处理的主要功能目标。

5　结语

探索了一种基于体积扫描采样容重阈值的生活垃圾分类识别方法。研究发现，依托激光切片扫描体

积可以有效获得待测物的空间体积，结合质量传感器计算容重。通过综合分析现有的多种生活垃圾容重阈值分类方法，归纳出可回收物、厨余垃圾和其他垃圾在一定区间内的容重阈值。该系统所需硬件设备较少，对社区一线分类亭、分类厢房等设备的升级改造具有一定可行性，可以满足居民前端投递环节中对生活垃圾分类检测的功能，有助于提高源头分类的准确性，并为垃圾原位处理提供技术支持，同时能够对投递行为及时给予反馈。该检测技术系统可对社区生活垃圾分类回收设备进行功能升级和创新，有助于提高居民的垃圾分类准确率，对培养良好的资源再利用社会氛围具有重大作用，能有效推进我国垃圾分类和再生资源的利用工作。

参考文献：

[1] REINHART D, BOLYARD S C, BERGE N. Grand Challenges-Management of Municipal Solid Waste[J]. Waste Management, 2016, 49: 1-2.

[2] LEBRETON L, SLAT B, FERRARI F, et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is Rapidly Accumulating Plastic[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4666.

[3] THOMPSON R. Environment: A Journey on Plastic Seas[J]. Nature, 2017, 547(7663): 278-279.

[4] 张英民, 尚晓博, 李开明, 等. 城市生活垃圾处理技术现状与管理对策[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 389-396.
ZHANG Ying-min, SHANG Xiao-bo, LI Kai-ming, et al. Technologies Status and Management Strategies of Municipal Solid Waste Disposal in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(2): 389-396.

[5] 孙晓杰, 王洪涛, 陆文静. 我国城市生活垃圾收集和分类方式探讨[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(10): 200-202.
SUN Xiao-jie, WANG Hong-tao, LU Wen-jing. Discussion on Municipal Solid Waste Collection and Classification Model in China[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(10): 200-202.

[6] 邓俊, 徐琬莹, 周传斌. 北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 395-400.
DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin. Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing[J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 395-400.

[7] WEN Xue-feng, LUO Qing-ming, HU Hua-long, et al. Comparison Research on Waste Classification between China and the EU, Japan, and the USA[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2014, 16(2): 321-334.

[8] ZHANG Lei-bao, HU Qiu-xian, ZHANG Shuai, et al. Understanding Chinese Residents' Waste Classification from a Perspective of Intention–Behavior Gap[J]. Sustainability, 2020, 12(10): 4135.

[9] GUNDUPALLI S P, HAIT S, THAKUR A. Multi-Material Classification of Dry Recyclables from Municipal Solid Waste Based on Thermal Imaging[J]. Waste Management, 2017, 70: 13-21.

[10] GUO Qing-lin, ZHANG Ming. An Agent-Oriented Approach to Resolve Scheduling Optimization in Intelligent Manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(1): 39-45.

[11] 王小燕, 谢文昊, 杨艺芳, 等. 基于深度学习的垃圾分类检测方法[J]. 现代电子技术, 2021, 44(21): 110-113.
WANG Xiao-yan, XIE Wen-hao, YANG Yi-fang, et al. Garbage Classification and Detection Method Based on Deep Learning[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(21):110-113.

[12] 李浩浩. 基于深度学习的可回收垃圾视觉分拣系统[D]. 西安: 西安理工大学, 2021: 9-17.
LI Hao-hao. Visual Sorting System of Recyclable Garbage Based on Deep Learning[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021: 9-17.

[13] LUKKA T J, TOSSAVAINEN T, KUJALA J V, et al. ZenRobotics Recycler–Robotic Sorting Using Machine Learning[C]// Proceedings of the International Conference on Sensor-Based Sorting (SBS), 2014: 2-7.

[14] Waste Management World Group. Max-Ai Is Dramatically Changing The Waste & Recycling Industry[J]. Waste Management World, 2021, 22(5): 39-39.

[15] 张兰. 尖端技术与数字化转型[J]. 今日制造与升级, 2019(10): 6.
ZHANG Lan. Cutting-Edge Technology and Digital Transformation[J]. Manufacture & Upgrading Today, 2019(10): 6.

[16] 李忠磊, 王洪涛, 王清威, 等. 一种新型的基于容重的厨余垃圾和其他垃圾识别方法[C]// 2020 年全国有机固废处理与资源化利用高峰论坛论文集, 2020: 48-56.
LI Zhong-lei, WANG Hong-tao, WANG Qing-wei, et al. A Method for Identifying Kitchen Waste and Other Garbage Based on Bulk Density[C]// Proceedings of the National Conference on Organic Solid Waste Treatment and Resource Utilization, 2020: 48-56.

责任编辑：彭颋