第 49 卷第 8 期
2021 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 8
August，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200981

# 基于改进分水岭算法的堆积态再生混合粗骨料图像分析

杨子晴[1,2,3]，杨 健[1,2,3]，熊吴越[1,2,3]

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院，上海 200240；2. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室，上海 200240；
3. 上海市公共建筑和基础设施数字化运维重点实验室，上海 200240)

**摘 要**：提出了一种基于改进分水岭算法分析堆积态混凝土–碎砖再生混合粗骨料图像的方法，并基于体视学原理建立了二维轮廓信息与三维粗骨料几何特性的数学关系。根据混凝土再生粗骨料和碎砖再生粗骨料的色相差异和粗骨料颗粒间的距离，引入阈值分割和距离变换分步对堆积态的再生混合粗骨料图像进行颗粒边缘的识别和分割。结果表明：提出的分析方法可以识别不同种类粗骨料和提取粗骨料颗粒轮廓信息，并快速计算出粗骨料的粒径、级配、碎砖粗骨料含量、长宽比、球度等几何特性。

**关键词**：混凝土；再生骨料；数字图像技术；图像分割；几何特性
**中图分类号**： TU525　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)08–1691–08
**网络出版时间**： 2021–07–15

## Practical Method for Identifying Morphological Information of Recycled Coarse Aggregate Bulk Based on Watershed Algorithm

*YANG Ziqing*[1,2,3], *YANG Jian*[1,2,3], *XIONG Wuyue*[1,2,3]

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Key Laboratory for Digital Maintenance of Buildings and Infrastructure, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to achieve particle segmentation and extract morphological information from the images of brick-containing recycled coarse aggregate bulk in the stacked state, an image-based method was proposed. Based on the differences in hue and distance between particles of the recycled concrete and crushed brick aggregate, the model was incorporated into the threshold segmentation and distance transformation, thus optimizing the watershed segmentation algorithm. It is indicated that the optimized segmentation algorithm could be used to effectively extract the contours of individual aggregate particles and calculate their morphological information, such as aggregate gradation, proportion of each aggregate, flakiness ratio and sphericity.

**Keywords:** concrete; recycled coarse aggregate; digital image technology; image segmentation; morphological characteristics

据统计，我国每年因新建、拆除、装修等产生的建筑垃圾约为 20 亿 t。为提高建筑垃圾资源利用率和减少砂石等天然骨料资源的开采，采用专业设备对拆解建筑物的混凝土块、砖瓦等建筑垃圾进行筛选、破碎、打磨等，实现建筑垃圾回收再利用。其中，废弃的砌体建筑拆解生产出的混凝土–碎砖混合粗骨料占据了再生粗骨料资源较高的比重。混凝土–碎砖再生混合粗骨料的级配和碎砖粗骨料含量对再生混凝土性能有显著影响[1–3]。随着计算机视觉的发展，利用数字图像处理技术(DIP)快速检测粗骨料的几何特性成为国内外专家研究的热点[4–10]。相比于筛分法、电子显微镜法等常见的粗骨料颗粒检测方式，DIP 技术具有设备便携、操作方便、分析快速的优势[11]。陆秀峰等[12]应用 DIP 技术研究混

收稿日期：2020–10–21。　修订日期：2020–12–14。
基金项目：上海市科委“科技创新行动计划”(18DZ1205603, 20DZ1201301)。
第一作者：杨子晴 (1996—)，女，硕士研究生。
通信作者：杨 健 (1974—)，男，教授。

**Received date:** 2020–10–21.　**Revised date:** 2020–12–14.
**First author:** YANG Ziqing (1996–), female, Master candidate.
**E-mail:** yangzq@sjtu.edu.cn
**Correspondent author:** YANG Jian (1974–), male, Professor.
**E-mail:** j.yang.1@sjtu.edu.cn

凝土二维截面骨料分布与三维空间骨料粒径分布的关系，提出了二维截面推测骨料粒径的方法。Ghuzla等[13]采集了 50 个粗骨料样本的俯视图和侧视图并应用 DIP 技术计算每个颗粒的长宽比、宽厚比和球度，计算结果速度快、误差小。

在以往的研究中，大多数学者主要利用 DIP 技术分析分离态粗骨料的图像[14–19]，并未涉及多种类别粗骨料混合的图像和自然状态下堆积态粗骨料的图像研究。而在实际工程中，混凝土–碎砖再生混合粗骨料多以堆积态出现于建筑垃圾拆解现场和再生混凝土生产场所。因此本文通过对传统的分水岭算法的改进研究堆积态再生混合粗骨料图像，并基于颗粒轮廓计算粗骨料的几何特性。

## 1 实验

### 1.1 图像采集

根据 GB/T 25177–2010《混凝土用再生粗骨料》[20]，选用表观密度为 2.78 g/cm$^3$、含水率为 1%、粒径为 5~31.5 mm 的再生混凝土骨料和表观密度为 2.55 g/cm$^3$、含水率为 3.6%、粒径为 5.0~31.5 mm 的再生碎砖骨料。

正交投影拍摄可以尽可能保证图像数据的真实性，但由于构造原因，采集的图像中央会留下拍摄设备的阴影，因此对拍摄设备进行改造，如图 1 所示。正交投影图像采集装置含 1 个环形 LED 灯，1 个正方形容器和拍摄支架。图 1a 为带有漫射面板、可调节光强和灯光颜色的环形 LED 灯，模拟自然光线以减少光源对图像处理的影响。图 1b 为 20 cm×20 cm×5 cm 黑色胶带覆盖的亚克力正方形容器盛装被拍摄的粗骨料，模拟自然状态下堆积态的再生混合粗骨料，并标记容器的 4 个顶点为定位点。容器底部铺设白纸，因为黑色和白色是图像处理中常用的背景色，选择与红橙色碎砖颗粒和灰白色混凝土颗粒色相差距最大的黑色作为粗骨料样本的背景色，选用白色作为黑色容器的背景色。图 1c 为可调节高度和角度的拍摄支架。实验开始前，需保证环形 LED 灯、相机镜头、正方形容器的中心在一条直线上，且垂直于桌面。同时，调整相机支架与环形灯的距离，使得成像图片的没有拍摄设备的阴影。

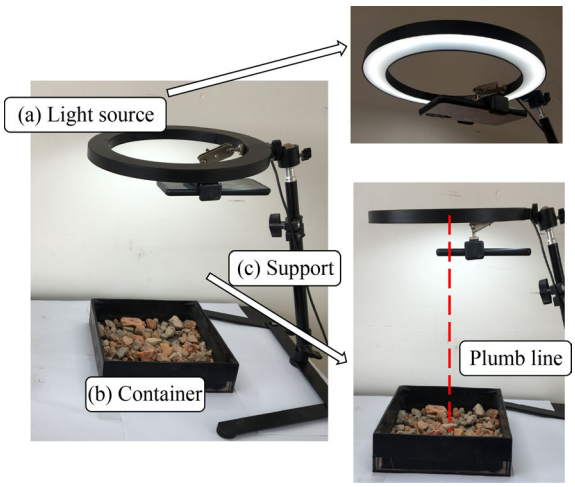



图 1 正交投影图像采集装置

Fig. 1 Equipment of orthogonal projection shooting

### 1.2 图像预处理

采用 C++语言和 OpenCV3 图像处理库编写程序进行“识别定位点、透视修正、裁剪、通道统一”的过程，如图 2 所示。

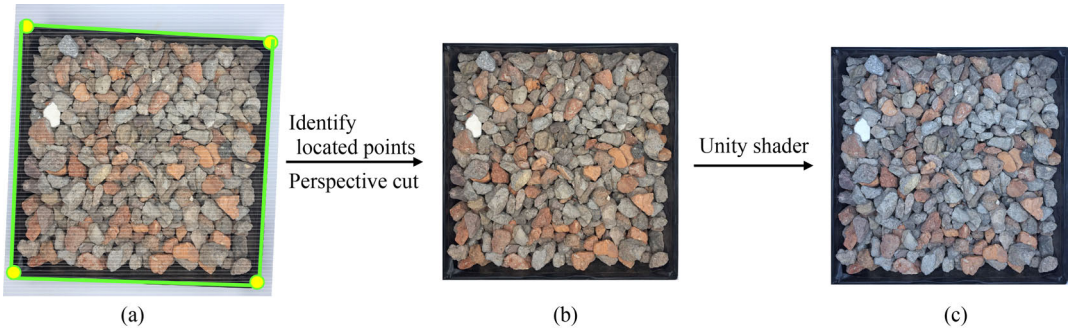



图 2 预处理过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of preprocessing

由于相机与物体之间的距离较近，不可避免存在图像“透视失真”[21]问题，投影图像中，成像的正方形容器边长互不垂直。首先利用容器的 4 个顶点定位点进行透视还原[式(1)]，将原图像中定位点点

集[*Lo*]=[($x_1$,$y_1$), ($x_2$,$y_2$), ($x_3$,$y_3$), ($x_4$,$y_4$)]转换成[*New*]=[(0,0), (0,$Z_2$), ($Z_1$,0), ($Z_1$,$Z_2$)]，即 4 个定位点作为“透视-裁剪”处理后图像(图 2b)的 4 个端点。处理后图像长的像素值为 $Z_1$，宽的像素值为 $Z_2$，理想状态下 $Z_1=Z_2=Z$，即处理后正方形的长 $\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2}$ 与宽 $\sqrt{(x_2-x_3)^2+(y_2-y_3)^2}$ 相等。[*Lo*]范围内的图像的各像素点也根据公式(1)转换到[*New*]内。

$$[x',y',w']=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} & a_{13}\\ a_{21} & a_{22} & a_{23}\\ a_{31} & a_{31} & a_{33}\end{bmatrix}[u,v,w] \tag{1}$$

$$\begin{cases}x=\dfrac{x'}{w'}=\dfrac{a_{11}u+a_{21}v+a_{31}}{a_{13}u+a_{23}v+a_{33}}\\ y=\dfrac{y'}{w'}=\dfrac{a_{12}u+a_{22}v+a_{32}}{a_{13}u+a_{23}v+a_{33}}\end{cases}$$

式中：($u$,$v$)是原始图像像素坐标，($x$=$x'$/$w'$，$y$=$y'$/$w'$)为处理后图像像素坐标。

同时，利用定位点可以计算目标物体的一维尺寸(长径、短径)和二维尺寸：

$$S_r=\frac{L}{z}S_p=\frac{2L}{z_1+z_2}S_p \tag{2}$$

$$A_r=\left(\frac{2L}{z_1+z_2}\right)^2A_p \tag{3}$$

式中：$S_r$ 和 $S_p$ 分别表示目标物体的像素长度和实际长度，cm；$A_r$ 和 $A_p$ 分别为像素面积和实际面积，$cm^2$；$L$ 和 $Z$ 为定位点的实际长度(容器边长 20 cm)和像素长度，cm；$Z_1$ 和 $Z_2$ 为预处理后图像的长和宽像素值。

将图像的 RGB 通道转换成 HSV 通道，对图像的色调、饱和度、亮度进行统一，以提高样本的一致性和目标物体可检测性(图 2c)。

### 1.3　分割算法

1) 不同种类骨料的颗粒分割

本研究对象含橙红色的碎砖粗骨料和灰白色混凝土粗骨料 2 种粗骨料。首先采用阈值分割算法[式(4)]根据两种骨料的色相阈值对不同种类粗骨料进行分割识别。阈值范围内的像素点保持原像素值 $f(x,y)$，其他区域转换为黑色，即 0。

$$f'(x,y)=\begin{cases}f(x,y), f(x,y)\in(T_1,T_2)\\ 0, f(x,y)\notin(T_1,T_2)\end{cases} \tag{4}$$

式中：$T_1$ 和 $T_2$ 表示设定阈值的上限和下限；$f'(x,y)$ 表示变换后的图像。橙红色碎砖粗骨料 HSV 阈值范围为：$T_{bH}\in(0,30)$，$T_{bS}\in(65,225)$，$T_{bV}\in(100,225)$；灰白色混凝土粗骨料 HSV 阈值范围为：$T_{cH}\in(25,180)$，$T_{cS}\in(0,75)$，$T_{cV}\in(130,225)$。

选用“膨胀-腐蚀”组合式图像处理方法消除噪声，尽可能消除噪声，减少数据失真。

2) 同种类骨料的颗粒分割

利用距离变换公式[22]弱化颗粒群的边缘、突出颗粒群的中心、分离重叠边缘，二值化处理后图像作为分水岭算法所需的标记图以实现分水岭算法的自动运算。图 3 为距离变换原理示意图，白色和黑色的像素值分别为 1 和 0。距离变换公式见式(5)。

$$\mathrm{DIST_L1}=|x_1-x_2|+|y_1-y_2| \tag{5}$$

图 4 为整个算法程序对图像的处理过程：图 4a~图 4c 为预处理过程，批量处理得到基本属性统一的图像集；图 4c~图 4e 为阈值分割过程，识别出不同类别的粗骨料边缘；图 4e~图 4j 是得到标记图像的过程，若部分粗骨料间仍连通，应用腐蚀函数分离连通处。1 个标记代表了预设的 1 个目标，分水岭算法根据图 4e 的灰度梯度寻找图 4j 中该目标的范围，最终得到每个粗骨料的轮廓图 4l 和图 4m，1 个颜色代表 1 个粗骨料。图 4n 应用 OpenCV 的“arclength()”、“contourArea()”等函数计算轮廓的周长、面积、长径和内径。混凝土粗骨料图像分割过程(图 4d 到图 4m)与碎砖粗骨料图像(图 4e 到图 4l)相同。

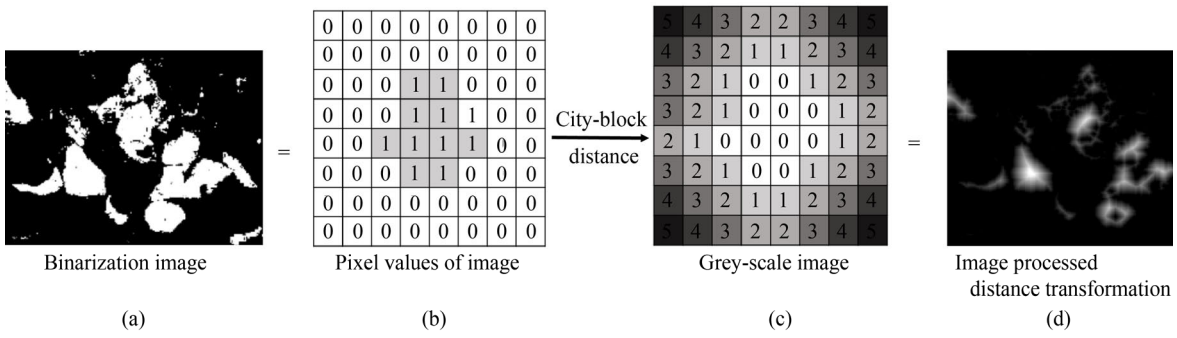



图 3　距离变换的原理

Fig. 3　Principle of distance transformation

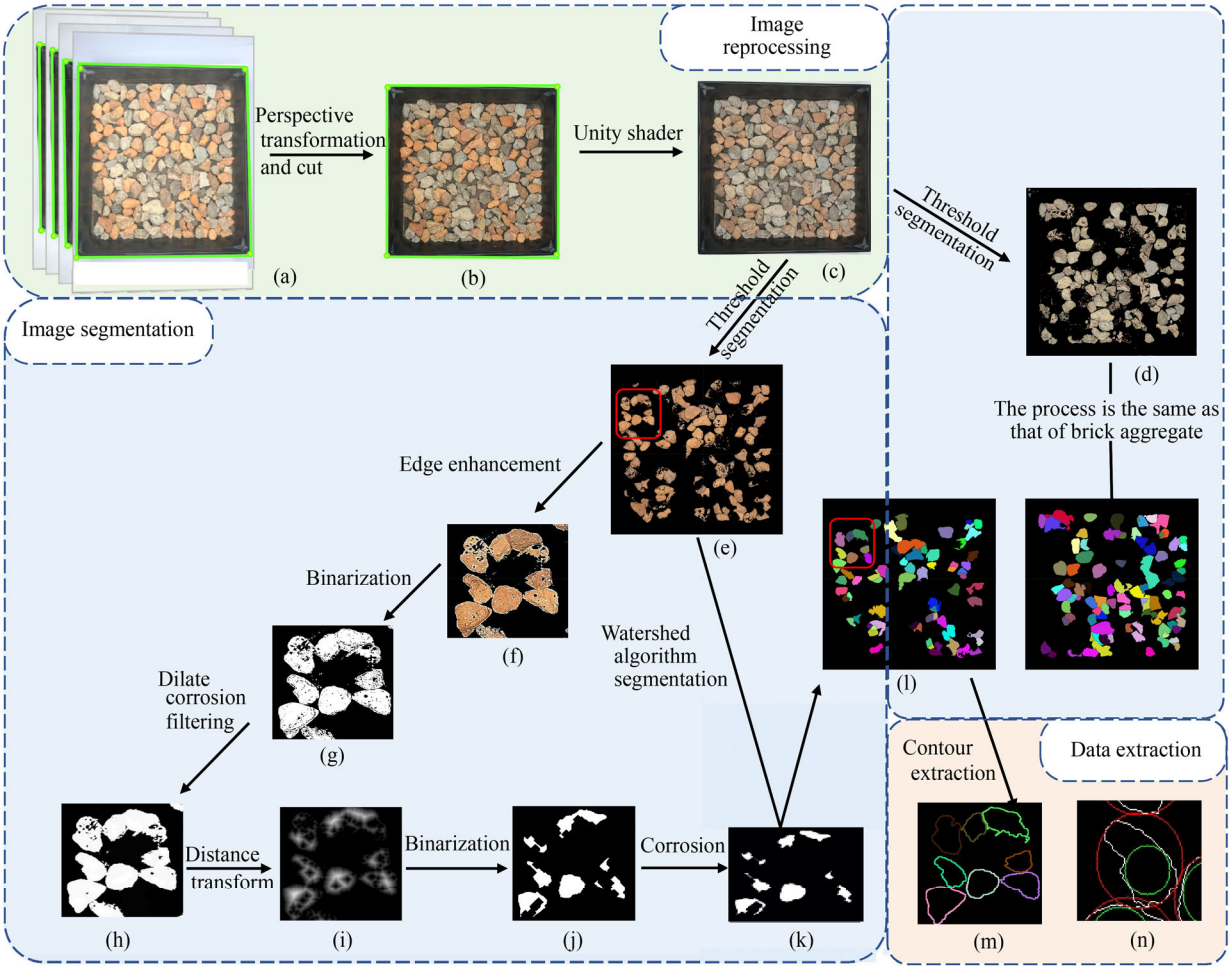



图 4 图像处理技术过程示意图

Fig. 4 Whole process diagram of image processing technology

### 1.4 特征提取

采用 Kwan[4]论证的平均厚度 $h$ 与颗粒的投影长径 $D_L$ 呈线性关系的结论，引入厚度参数 $\lambda$ 建立二维投影轮廓信息与三维几何性质的数学关系，并通过后续实验进行修正和验证。

$$h = \lambda \times D_L \tag{6}$$

$$M = \rho V = \rho\lambda\sum_{i=1}^{n} D_L A \tag{7}$$

$$\lambda = \frac{M}{\rho\sum_{i=1}^{n} D_L A} \tag{8}$$

式中：$M$ 为同类别骨料的质量，g；$\rho$ 为同类别骨料的表观密度，g/cm$^3$；$V$ 为同类别骨料的体积，cm$^3$；$A$ 为单个投影轮廓的面积，cm$^2$；$n$ 是投影轮廓图中的轮廓总个数。

1) 粒径和级配

再生粗骨料的规格按粒径尺寸分为连续粒级和单粒级。连续粒级分为 5~16 mm、5~20 mm、5~25 mm 和 5.0~31.5 mm 4 种规格，单粒级分为 5~10 mm，10~20 mm 和 16~31 mm 3 种规格。根据式(2)得到粗骨料粒径，并统计每个规格下的数字筛余量。

2) 碎砖粗骨料含量

采用式(9)分析堆积态混凝土-碎砖再生混合粗骨料的含砖率。

$$r \approx \frac{\rho_b\sum_{i=1}^{n} D_{Lb}A_b}{\rho_b\sum_{i=1}^{n} D_{Lb}A_b + \rho_c\sum_{i=1}^{n} D_{Lc}A_c} \tag{9}$$

$$r = \frac{m_b}{m_a} = \frac{m_b}{m_b + m_c} \approx \frac{\rho_b\sum_{i=1}^{n} D_{Lb}A_b}{\rho_b\sum_{i=1}^{n} D_{Lb}A_b + \rho_c\sum_{i=1}^{n} D_{Lc}A_c}$$

式中：$m_a$、$m_b$ 和 $m_c$ 表示所有粗骨料、碎砖粗骨料和混凝土粗骨料的质量，g；$\rho_b$ 和 $\rho_c$ 表示碎砖粗骨料和混凝土粗骨料的表观密度，g/cm$^3$；$\lambda_b$ 和 $\lambda_c$ 表示 2 种粗骨料的厚度参数；$D_{Lb}$ 和 $D_{Lc}$ 表示 2 种粗骨料的投影长径，cm；$A_b$ 和 $A_c$ 表示 2 种粗骨料的

投影面积，$cm^2$。

3) 颗粒几何特性

采用 Krumbein[23]提出的简化模型，将颗粒考虑为椭球体，体积为 $V=(\pi/6)hD_sD_L$，则球度 $S_p$ 表达式为：

$$S_p=\frac{V}{V_d}=\frac{(\pi/6)hD_sD_L}{(\pi/6)D_L^3}=\lambda\left(\frac{D_s}{D_L}\right)^2 \tag{10}$$

混凝土用再生骨料的长度大于该颗粒所属相应粒级的平均粒径 2.4 倍时为针状颗粒，长宽比 $D_L/D_s$ 大于 2.4。厚度小于平均粒径 0.4 倍为片状颗粒(平均粒径指该粒级上下限粒径的平均值)，平均厚度 $h$ 与平均粒径 $\bar{D}$ 的比值 $h/\bar{D}$ 小于 0.4。

## 2　分析结果

### 2.1　分割算法评估

采用的改进分割算法在传统的分水岭算法的基础上引入阈值分割和距离变换 2 个步骤，提高算法的分割效果。为比较这 2 个步骤对改进分割算法的提升作用，编写 3 个算法对同一张图进行处理比较结果，如图 5。算法 1 是传统的分水岭算法，目标过分割错误严重。算法 2 是只引入距离变换、未引入阈值分割的算法，未对不同类别粗骨料分别处理，图像灰度梯度整体偏大，目标部分出现欠分割错误。算法 3 是本研究提出的改进算法，可以较好地实现边缘分割和识别。

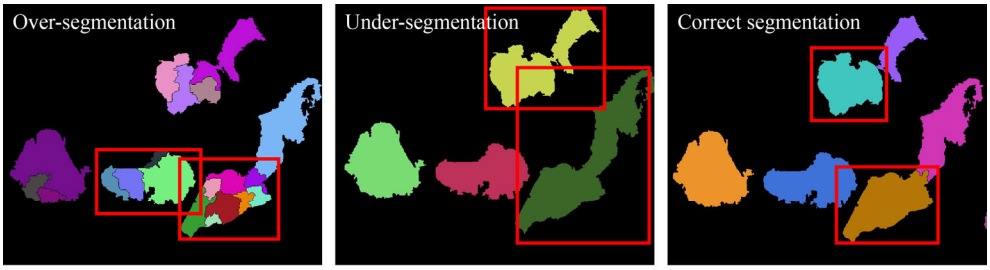



图 5　3 种算法的分割效果

Fig. 5　Results of three segmentation algorithms

同时，采用如下公式定量分析比较 3 种算法的分割结果，采用 3 个评价指标评价改进前后的分割算法：过分割率($R_{OS}$)、欠分割率($R_{US}$)、正确分割率($R_{CS}$)：

$$R_{OS}=N_o/N_A \tag{11}$$

$$R_{US}=N_u/N_A \tag{12}$$

$$R_{CS}=N_c/N_A \tag{13}$$

式中：$N_o$ 表示过分割的轮廓数，即 1 个粗骨料被分别成多个轮廓的数量；$N_u$ 表示欠分割的轮廓数，即粗骨料的轮廓未被完全提取或与其他颗粒一起识别为 1 个轮廓的数量；$N_c$ 表示粗骨料轮廓被准确提取的轮廓数；$N_A$ 表示图像中轮廓的总个数。

图 6 是 3 种算法对 5 组不同含砖率图像的 CSR 的比较结果。结果表明改进算法(算法 3)使 CSR 从 9.5%提高到 75.7%，提高了约 65%，这意味着阈值分割和距离变换可以有效提高分水岭算法的正确分割率。含砖率对 CSR 的影响不大，算法具有较好的鲁棒性，相对而言含砖率 40%的混合粗骨料对分割算法最敏感。图 7 是 3 种算法的 $R_{US}$、$R_{OS}$ 和 $R_{CS}$ 结果，结果表明传统的分水岭算法(算法 1)存在严重的过分割问题，过分割率 $R_{OS}$ 为 82%。算法 2 主要缺陷是无法准确地分割出重叠粗骨料群的轮廓，欠分割率 $R_{US}$ 为 64.6%。所提出的改进算法，$R_{US}$(14%)略高于 $R_{OS}$(10.3%)。

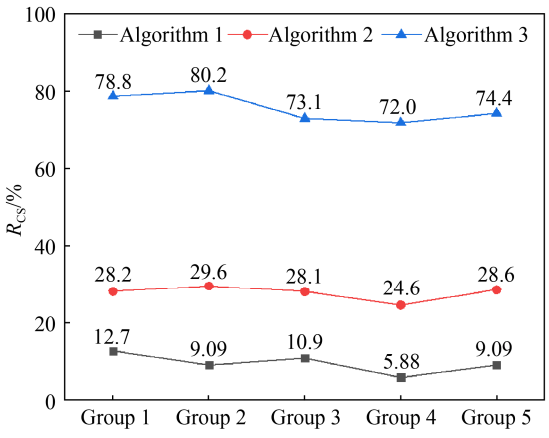



图 6　3 种算法处理不同含砖率图像的 $R_{CS}$

Fig. 6　$R_{CS}$ of three algorithms in five different brick-content ratio groups

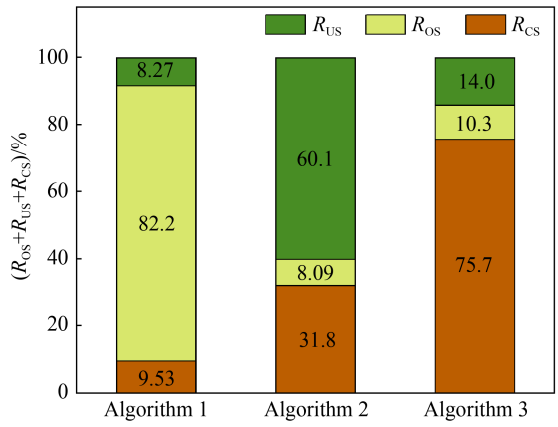



图 7 3 种算法的评价指标

Fig. 7 $R_{US}$, $R_{OS}$ and $R_{CS}$ of three algorithms

## 2.2 混凝土–碎砖再生粗骨料的级配分析

根据规范的 4 种连续粒级各配置 2 组样本(每组 500 g)，每组样本随机振捣拍摄 10 张照片，1 种连续粒级共 20 组数据集。投影长径 $D_L$ 作为粗骨料的粒径进行数字筛分，各项累计筛余取 20 组数据集平均值，并与机械筛分机得到的结果进行对比，结果见表 1。

**表 1 连续粒级的机械筛分与数字筛分的累计筛余**

**Table 1 Cumulative percentage retained by sieving machine and DIP technology for Continuous grain size** *m*/%

| Method | Side length of square hole sieve/mm | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2.36 | 4.75 | 9.50 | 16.0 | 19.0 | 26.5 | 31.5 | 37.5 |
| Seiving | 100 | 100 | 50 | 0 | 0 | | | |
| | 100 | 100 | 50 | | 0 | 0 | | |
| | 100 | 100 | | 50 | | 0 | 0 | |
| | 100 | 100 | 80 | | 30 | | 0 | 0 |
| DIP | 92.1 | 91.2 | 46.7 | 8.5 | 2.3 | | | |
| | 95.8 | 93.8 | 42.6 | | 6.9 | 1.9 | | |
| | 100 | 92.4 | | 57.2 | | 3.8 | | |
| | 100 | 94.3 | 73.6 | | 36.5 | | 2.8 | |

由于 DIP 方法的正确分割率无法达到 100%，过分割导致部分粗骨料被识别为更小的颗粒，连续粒级中小于 5 mm 的累计筛余约为 93%；欠分割导致部分重叠粗骨料群被识别为一个整体，DIP 的累计筛余与机械不完全一致。因此对数字筛分的数据进行修正[式(14)]，结果见表 2，其中 31.5 mm 与 37.5 mm 累计筛余大于 5%时，视为欠分割的大误差而删去。

$$D = cD_L \tag{14}$$

式中：$c$ 为修正系数。修正后累计筛余误差小于 5%。

**表 2 粒级的修正系数和误差**

**Table 2 Correction factor and error**

| Length/mm | $c$ | Error/% |
|---|---|---|
| 2.36 | 1.006 | 0.39 |
| 4.75 | 1.130 | 1.37 |
| 9.50 | 1.102 | 1.86 |
| 16.0 | 0.892 | 4.64 |
| 19.0 | 0.737 | 4.72 |
| 26.5 | 0.923 | 2.05 |
| 31.5 | | |
| 37.5 | | |

图 8 为 5.0~31.5 mm 组修正前后的级配曲线。修正后级配曲线与真实曲线基本重合，验证了所提出的算法和数据处理方法可以较为准确地分析骨料级配情况。

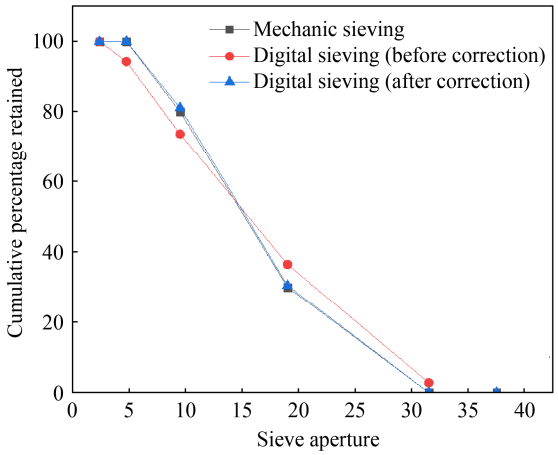



图 8 5.0~31.5 mm 组修正前后的级配曲线

Fig. 8 Grading curve before and after correction in 5.0–31.5 mm group

## 2.3 碎砖粗骨料含量分析

配置 30%、40%、50%、60%和 70% 5 种含砖率的混合骨料共 5 组，采用随机振捣的方式进行骨料图形再生成，每组各拍摄 10 张照片。图 9 为 50 组图像的含砖率计算值与理论值比较结果。

由于骨料的投影面具有随机性，每张图像计算得到的含砖率不同，最大误差为 7%。随机振捣得到的 5 组平均含砖率的误差为 1.82%，最大 1 组的含砖率误差为 3.2%，且适用于各种含砖率情况，验证了本方法分析含砖率的适用性和准确性。

## 2.4 颗粒几何特性

粗骨料粒形对混凝土性能影响较大，粒形为球形或近球形较好，针片状粗骨料较差[24]。选定 6 个 25.0~31.5 mm 颗粒样本(图 10)，其中样本 1、2、3、

4 为近球形，样本 5、6 为片状骨料。6 个样本混入同单粒级粗骨料堆中，随机振捣 5 次获得 5 组图像。实验应用数字图像技术提取样本的 4 个几何特性参数 $D_L$、$D_L/D_s$、$h/\bar{D}$ 和 $S_p$，计算平均值作为实验值。比较实验值与游标卡尺测量的理论值，结果如表 3。

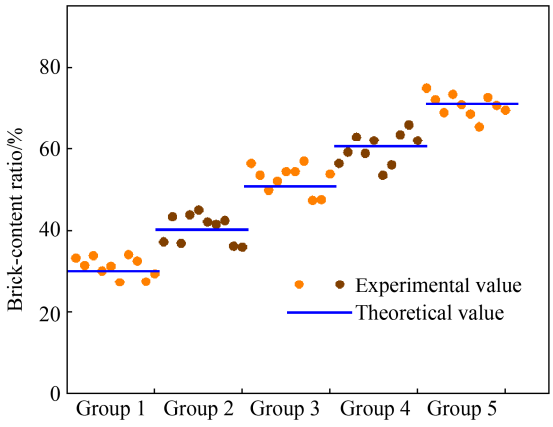



图 9　50 组图像的含砖率实验结果

Fig. 9　Experimental results of brick-content ratio in 50 groups of images



图 10　几何特性样本

Fig. 10　Sample of particle shape feature

**表 3　样本的几何特性参数**

**Table 3　Particle morphological characteristic parameters of samples**

| Sample No. | Experimental values | | | | Theoretical values | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $D_L$/mm | $D_L/D_s$ | $h/\bar{D}$ | $S_p$ | $D_L$/mm | $D_L/D_s$ | $h/\bar{D}$ | $S_p$ |
| 1 | 29.2 | 1.61 | 0.57 | 0.385 | 29.2 | 1.51 | 0.586 | 0.375 |
| 2 | 27.7 | 1.66 | 0.51 | 0.363 | 27.1 | 1.50 | 0.518 | 0.359 |
| 3 | 26.5 | 1.36 | 0.50 | 0.541 | 25.9 | 1.31 | 0.615 | 0.512 |
| 4 | 25.2 | 1.60 | 0.55 | 0.391 | 24.7 | 1.54 | 0.565 | 0.419 |
| 5 | 36.2 | 1.84 | 0.68 | 0.295 | 34.5 | 1.81 | 0.382 | 0.283 |
| 6 | 34.0 | 1.93 | 0.64 | 0.258 | 32.1 | 1.86 | 0.394 | 0.217 |

对比实验值与理论值，长径的理论值平均误差为 3.3%，最大误差为 6.2%；长宽比 $D_L/D_s$ 平均误差为 6.4%，最大误差为 10.6%，可以用于判断骨料是否为针状；球度 $S_p$ 平均误差为 2.4%，最大误差为 5.2%，可以用于判断骨料的球度，越接近 1 颗粒越接近球体。但所提出的方法不分别称取碎砖和混凝土粗骨料，因此该方法不能用于判断粗骨料是否为片状($h/\bar{D}$<0.4)。

## 3　结论

对传统的分割算法进行改进，引入阈值分割和距离变换提出了基于改进分水岭算法的数字图像处理技术来分割堆积状态下混凝土–碎砖再生混合粗骨料颗粒群图像。该方法可以准确识别出混合粗骨料的骨料类型和轮廓，并根据轮廓分析粗骨料的几何特性。

与传统分割算法相比，引入阈值分割和距离变换的分水岭算法可以提高 65%的正确分割率，有效降低了重叠粗骨料群的过分割和欠分割情况。粗骨料分布具有偶然性，通过多次随机振捣综合分析图像集数据的方式，可以准确计算出堆积态混凝土–碎砖再生混合粗骨料的级配情况、含砖率、长宽比、球度，修正后级配曲线与真实曲线基本重合，平均含砖率最大误差为 3.2%，长宽比最大误差为 10.6%，球度最大误差为 5.2%。

**参考文献**:

[1] 王磊, 李泉龙, 陈杏. 再生粗骨料混凝土的变形性能及影响因素分析[J]. 建筑结构, 2016, 2: 30–34.
WANG Lei, LI Quanlong, CHEN Xin. Build Struct(in Chinese), 2016, 2: 30–34.

[2] 刘数华, 阎培渝. 高性能再生骨料混凝土的性能与微结构[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 66–70.
LIU Shuhua, YAN Peiyu. J Chin Ceram Soc, 2007, 35(4): 66–70.

[3] 胡曙光, 丁庆军, 何永佳, 等. 利用废弃混凝土制备再生胶凝材料[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(5): 593–599.
HU Shuguang, DING Qingjun, HE Yonggui, et al. J Chin Ceram Soc, 2007, 35(5): 593–599.

[4] KWAN A K H, MORA C F, CHAN H C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing[J]. Cem Concr Res, 1999, 29(9): 1403–1410.

[5] MORA C, KWAN A. Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing[J]. Cem Concr Res, 2000, 30(3): 351–358.

[6] 张雄, 钟晨, 黄廷皓, 等. 基于灰度形态学重建的骨料颗粒群图像分析方法[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6): 36–41.
ZHANG Xiong, ZHONG Chen, HUANG Tinghao, et al. J Build Mater (in Chinese), 2018, 21(6): 36–41.

[7] 李北星, 王威, 陈梦义, 等. 粗骨料的等轴率、圆度和球度及其相互关系[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(4): 531–536.
LI Beixing, WANG Wei, CHEN Mengyi, et al. J Build Mater (in Chinese), 2015, 18(4): 531–536.

[8] DING X, MA T, GAO W. Morphological characterization and

mechanical analysis for coarse aggregate skeleton of asphalt mixture based on discrete-element modeling[J]. Constr Build Mater, 2017, 154(15): 1048–1061.

[9] 李曙光, 陈改新, 纪国晋, 等. 基于数字图像处理技术的引气混凝土冻融损伤定量评价[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(8): 951–959.
LI Shuguang, CHEN Gaixin, JI Guojin, et al. J Chin Ceram Soc, 2014, 42(8): 951–959.

[10] 王培铭, 彭宇, 刘贤萍. 聚合物改性水泥水化程度测定方法比较[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(8): 1116–1123.
WANG Peiming, PENG Yu, LIU Xianping. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(8): 1116–1123.

[11] 李红俊, 韩冀皖. 数字图像处理技术及其应用[J]. 计算机测量与控制, 2002, 10(9): 620–622.
LI Hongjun, HAN Jiwan. Comput measurement control (in Chinese), 2002, 10(9): 620–622.

[12] 陆秀峰, 刘西拉, 覃维祖. 从混凝土二维截面推测骨料粒径分布[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3107–3112.
LU Xiufeng, LIU Xila, QIN Weizu. Chin J Rock Mech Eng (in Chinese), 2005, 24(17): 3107–3112.

[13] GHUZLAN K A, OBAIDAT M T, ALAWNEH M M. Cellular-phone-based computer vision system to extract shape properties of coarse aggregate for asphalt mixtures[J]. Eng Sci Technol, 2019, 22(3): 767–776.

[14] ZHANG S, LI R, PEI J. Evaluation methods and indexes of morphological characteristics of coarse aggregates for road materials: a comprehensive review[J]. J Traffic Transport Eng, 2019, 6(3): 256–272.

[15] BARBOSA F S, BEAUCOUR A L, FARAGE M C R, et al. Image processing applied to the analysis of segregation in lightweight aggregate concretes[J]. Constr Build Mater, 2011, 25(8): 3375–3381.

[16] NIE Z, LIAO J, ZHOU S, et al. Image processing and shape quantitative analysis of volcanic cinder particles[J]. J Hunan Univ Nat Sci, 2020, 47(3): 131–139.

[17] REYES-ORTIZ O J, MEJIA M, USECHE-CASTELBLANCO J S. Aggregate segmentation of asphaltic mixes using digital image processing[J]. Bull Polish Academy Sci, 2019, 67(2): 279–287.

[18] HAN J, WANG K, WANG X, et al. 2D image analysis method for evaluating coarse aggregate characteristic and distribution in concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 127: 30–42.

[19] 周双喜, 盛伟, 魏星, 等. 基于深度学习的混凝土孔结构图像法快速分析[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5): 653–663.
ZHOU Shuangxi, SHENG Wei, WEI Xing, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(5): 653–663.

[20] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 25177—2010 混凝土用再生粗骨料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[21] BOUSAID A, THEODORIDIS T, NEFTI-MEZIANI S, et al. Perspective distortion modeling for image measurements[J]. IEEE Access, 2020, 8: 15322–15331.

[22] KIM T, KIM D, LEE S. Cell counting algorithm using radius variation, watershed and distance transform[J]. J Inform Process Systems, 2020, 16(1): 113–119.

[23] KRUMBEIN W C. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles[J]. J Sedimentary Res, 1941, 11(2): 64–72.

[24] 王松亮, 孙琳, 马树泉. 粗骨料粒形对混凝土性能的影响[J]. 商品混凝土, 2019, 22(5): 40–41.
WANG Songliang, SUN Lin, MA Shuquan. Eady-mixed Concr (in Chinese), 2019, 22(5): 40–41.