

基于层间信息熵的混凝土 3D 打印构件精细分割

马宗方¹, 杨兴伟^{1*}, 宋琳¹, 刘超², 刘化威³, 武怡文³

¹西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055;

²西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055;

³西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055

摘要 面向复杂环境下固废基混凝土 3D 打印构件的智能检测需求, 引入机器视觉理论, 提出一种基于层间信息熵的目标精细分割算法, 实现 3D 打印构件的特征分析与智能检测。首先, 考虑到混凝土 3D 打印的复杂环境, 构建一种视觉特征增强的预处理方法, 通过 Gamma 灰度变换和直方图均衡化算法调整对比度, 增强图像特征细节, 并结合自适应中值滤波去除图像中的随机噪声; 随后, 针对构件的分层叠加特性, 定义了层间信息熵指标, 设计了一种基于层间信息熵和双阈值优化的打印构件精细分割方法, 实现了复杂环境下对 3D 构件的分层检测与精细分割; 最后, 采集真实混凝土 3D 打印构件的目标影像, 对所提算法进行有效性验证。实验结果表明, 所提算法的准确率值平均提高了 12.44%, F_1 值平均提高了 30.79%, 极大地提高了目标分割精度, 为进一步实现 3D 打印构件的精确测量与路径优化奠定基础。

关键词 图像处理; 混凝土 3D 打印; 分层检测; 层间信息熵; 优化建模

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0410005

Fine Segmentation of Concrete 3D-Printed Elements Based on Information Entropy Between Layers

Ma Zongfang¹, Yang Xingwei^{1*}, Song Lin¹, Liu Chao², Liu Huawei³, Wu Yiwen³

¹College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

²School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

³School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

Abstract Because of the demand for intelligent detection of solid waste-based concrete three-dimensional (3D)-printed components in complex environments, this paper introduces the machine vision theory and proposes a target fine-segmentation algorithm based on the interlayer information entropy to realize the feature analysis and intelligent detection of 3D-printed components. First, considering the complex environment of concrete 3D printing, a preprocessing method for visual feature enhancement was constructed, the contrast was adjusted, and the image feature details were enhanced using Gamma grayscale transformation and histogram equalization algorithm. It was combined with adaptive median filtering to remove the random noise in images. Then, considering the layered superposition characteristics of the components, the interlayer information entropy index was defined, and a fine-segmentation method of printing components based on the interlayer information entropy and double threshold optimization was designed to realize the complex environment hierarchical detection and fine

收稿日期: 2021-07-18; 修回日期: 2021-08-19; 录用日期: 2021-09-13

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1907105)、陕西省重点研发计划(2020GY-186, 2020SF-367)

通信作者: *1124985981@qq.com

segmentation of 3D components. Finally, the target images of real concrete 3D-printed components were collected to verify the effectiveness of the proposed algorithm. Experimental results show that the proposed algorithm increases the accuracy by 12.44% and the F_1 value by 30.79% on average, considerably improving target segmentation accuracy. It lays the foundation for further realizing accurate measurement and path optimization of 3D-printed components.

Key words image processing; concrete 3D printing; layered detection; interlayer information entropy; optimal modeling

1 引言

混凝土 3D 打印技术是融合多领域交叉学科知识的新型建造技术,是实现制造-建造一体化的关键手段之一,因无模板化施工、高效自动化、可实现复杂几何形状等特点已经成为建造领域研究应用的前沿和热点^[1]。然而,当前混凝土 3D 打印技术仍然存在许多关键问题亟需解决^[2]。其中,打印构件成形质量是关键问题之一,主要包括打印构件的形状、尺寸和表面粗糙度等质量问题,制约了混凝土 3D 打印技术在实际应用中的发展^[3]。诸多学者通过改进打印工艺^[4]、材料性能^[5]和路径规划^[6]等研究思路来提高构件的成形质量,然而有关如何有效地检测混凝土 3D 打印构件成形质量的研究相对欠缺。

在混凝土 3D 打印构件成型质量的检测方面,传统的检测方法主要通过材料性能、工艺参数和路径规划等方面,对构件的成形过程进行分析,进而判断构件的成形质量。但是混凝土 3D 打印构件的工业需求较大,所以传统方法存在一定的误差和限制。目前检测混凝土 3D 打印构件成型质量的方法是:使用双目摄像头采集图像来表征构件实体,然后基于机器视觉和模式识别方法对构件图像进行分割^[7-8]。经典的分割方法有两种,包括基于阈值的分割算法^[9-10]和基于边缘检测的分割算法^[11]。前者通常进行粗糙的像素级别的分割,未考虑图像的语义、空间等特征信息且易受噪声影响,对复杂的图像阈值分割的效果并不理想。后者通过搜索图像区域中的各个边界达到图像分割的目的^[12],常用的边缘检测算子有 Roberts、Sobel^[13]、LOG^[14]等,该类算法简单且检测速度较快,但对噪声比较敏感,容易有真边缘被视为噪声的情况,同时存在检测出的图像边缘模糊、边缘精度不高等问题。

为了提高对混凝土 3D 打印构件图像的分割精度,以工程实际应用的基础构件作为研究对象,提出基于层间信息熵的精细分割算法。首先,基于混凝土 3D 打印构件图像特性,对构件图像进行

Gamma 灰度变换,使用直方图均衡化算法提高图像的对比度,结合自适应中值滤波去除图像中的随机噪声,完成图像预处理;然后,利用边缘检测算法对目标对象的边缘信息进行识别,使用非极大值抑制算法去除伪边缘,找到最佳的目标边界框,结合层间信息熵和双阈值对构件图像的梯度信息和纹理信息进行分割;最后,利用 Laplacian 算子锐化边缘轮廓,通过开闭运算获得较连续且具有较少噪声点的边缘图像,完成精细分割。所提算法为解决混凝土 3D 打印构件的成形质量问题提出一种新的解决思路和可行方案。

2 精细分割算法

提出一种针对混凝土 3D 打印构件图像的精细分割算法,该算法提高混凝土 3D 打印图像分割精度,保留构件图像纹理信息和边界轮廓信息,同时减少噪声对图像边缘信息的干扰,改善边缘轮廓连接程度。所提算法对构件图像进行灰度变换,扩展对比度,提高图像细节特征,结合自适应中值滤波进一步除噪,完成图像预处理;根据图像梯度矩阵检测层间信息,利用非极大值方法去除伪边缘并通过层间信息熵和双阈值方法完成目标优化建模;通过 Laplacian 算子对目标图像的边缘细节进行增强和锐化,并利用膨胀-腐蚀算法平滑目标对象,完成精细分割。算法流程如图 1 所示。

2.1 图像预处理

在采集混凝土 3D 打印构件图像过程中,存在许多噪声干扰,例如大量石灰颗粒飘浮在空气中、工作台有漏斗滴落的水泥、太阳光照等。传统直方图均衡化对图像像素灰度进行映射变换,变换后的图像像素灰度概率密度呈均匀分布,由于噪声干扰,实际情况下很少能够得到完全平坦的直方图。因此对构件图像进行 Gamma 灰度变换,调整高低灰度级,扩大图像灰度范围,使用直方图均衡化算法提高原始图像 $I(x, y)$ 整体或局部对比度。

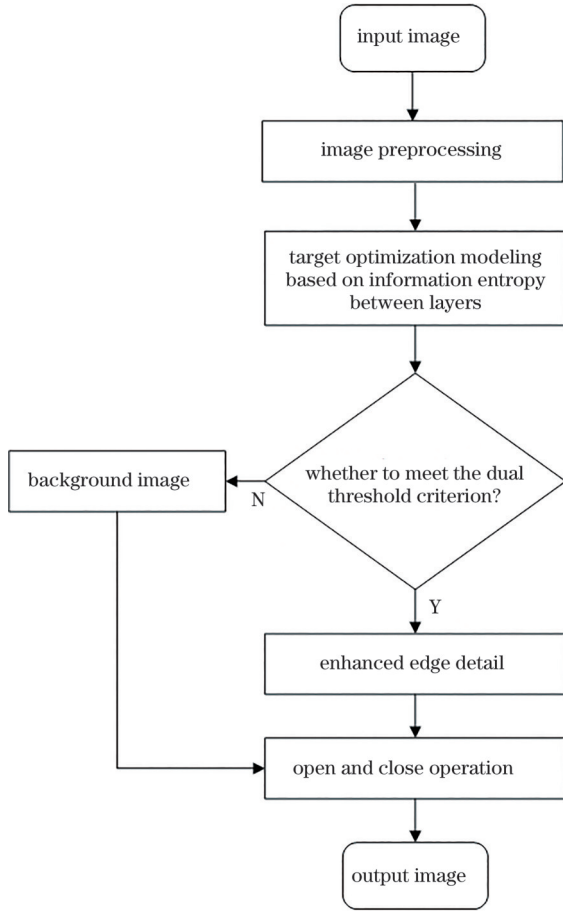


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow

$$O = AI^\gamma, \quad (1)$$

$$S = T(r) = \sum_0^{255} \frac{k}{n}, \quad (2)$$

式中: O 为输出图像灰度值; I 为输入图像灰度值; A 为常数, 通常为 1; $\gamma = 1$ 为线性变换, $\gamma \neq 1$ 为非线性变换; S 为直方图均衡化后的图像灰度; r 为原图像灰度; k 为灰度级 0~255 中每个灰度级的像素数量; n 为图像的总像素数。

混凝土 3D 打印构件图像经过直方图均衡化后, 使用自适应中值滤波平滑目标对象 $S(x, y)$ 的其他非脉冲噪声, 减少物体边界细化或粗化的失真情况, 最大程度地保留混凝土 3D 打印构件图像的纹理信息, 得到处理后图像 $K(x, y)$ 。

2.2 目标优化建模

混凝土 3D 打印构件图像表面结构复杂, 具有台阶效应, 当固化或挤出的材料线条数量较多或线条粒度较大时, 这种台阶效应将会变得明显。因此, 对目标对象进行优化建模, 对预处理后的图像进行层间边缘检测, 并根据梯度信息检测构件图像

的边缘细节; 利用非极大值抑制找到最佳的目标边界框, 消除冗余的边界框; 通过层间信息熵和双阈值划分梯度信息和整体纹理信息, 完成构件图像的分割。基于层间信息熵的优化模型融合构件图像层间的灰度信息和邻域空间信息, 抗干扰能力强。度量像素及其邻域像素之间的信息相关性, 求解阈值使目标和背景的层间信息熵之和最大, 获得最佳的目标和背景图像的均匀程度, 前景和背景图像得到很好的分割。

图像层间信息熵为

$$M(x, y) = \sqrt{K_x(x, y)^2 + K_y(x, y)^2}, \quad (3)$$

式中: K_x 和 K_y 分别是处理后图像 $K(x, y)$ 被滤波器沿行和列分别作用的结果。

$$p_i = \frac{n_i}{M \times N}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, l-1, \quad (4)$$

$$H(t) = -\sum_0^{l-1} p_i \ln p_i, \quad (5)$$

式中: t 为分割阈值; p_i 为第 i 个像素灰度特征显示的几率; n_i 为数字图像中灰度值为 i 的像素个数; M 和 N 分别表示图像的长度和宽度; l 表示灰度等级。

将图像分为前景和背景时, 前景的图像信息熵 $H_f(t)$ 与背景的图像信息熵 $H_b(t)$ 分别为

$$H_f(t) = -\sum_{i=0}^t \left(\frac{p_i}{p_t} \right) \times \ln \left(\frac{p_i}{p_t} \right), \quad i = 1, 2, \dots, t, \quad (6)$$

$$H_b(t) = -\sum_{i=t+1}^{l-1} \left(\frac{p_i}{1-p_t} \right) \times \ln \left(\frac{p_i}{1-p_t} \right), \quad (7)$$

$$i = t+1, t+2, \dots, l-1.$$

整体图像层间信息熵值为

$$H(t) = H_f(t) + H_b(t) = \frac{h_t}{p_t} + \frac{H - h_t}{1 - p_t} + \ln p_t(1 - p_t), \quad (8)$$

式中: $p_t = \sum_{i=0}^t p_i$, $h_t = -\sum_{i=0}^t p_i \ln p_i$ 。

最优阈值 t^* 划分整体图像层间信息熵并取最大值, 则

$$t^* = \arg \max_{0 \leq t \leq l-1} H(t). \quad (9)$$

基于迭代优化思想实现基于层间信息熵的目标分割的具体过程如下:

- 1) 根据(3)式计算预处理后图像的层间梯度幅值 $M(x, y)$;
- 2) 根据(4)式获得灰度直方图中各灰度对应的概率 p_i ;
- 3) 根据(5)式将 256 个灰度作为 256 个分割阈值, 分别计算各阈值下的概率密度函数 $H(t)$;

4) 根据(6)、(7)式计算各个阈值下的构件前景 $H_f(t)$ 和背景 $H_b(t)$ 概率密度函数;

5) 根据(8)式计算各阈值下的前景像素和背景像素的累计熵 $H(t)$;

6) 根据(9)式得到最优阈值 t^* , 若阈值满足 $H_f(t) \geq H_b(t)$, 则停止迭代, 否则 $t=t+1$, 转至步骤 2) 继续迭代。

最佳低阈值 t_l 和高阈值 t_h 的关系为 $t_h = \alpha t_l$ 。若层间灰度值大于高阈值, 划分为目标区域, 小于低阈值, 划分为背景区域; 若层间灰度值介于高低阈值之间, 则在该像素 8 邻点域搜寻层间信息熵对应的灰度值。分割后的图像为 $H(x, y)$, 通过多次实验对比得到 $\alpha = 2$ 。

2.3 增强边缘细节

混凝土 3D 打印构件图像分割后, 存在部分边缘细节模糊信息和部分伪边缘信息。因此, 使用 Laplacian 算子进行边缘锐化, 有效地增强图像的边缘细节^[15], 对检测出的轮廓信息进行信息融合。对于阈值分割后的二维图像 $H(x, y)$, Laplacian 算子定义为

$$\begin{cases} \nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = H(x+1, y) + H(x-1, y) - 2H(x, y), \\ \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = H(x, y+1) + H(x, y-1) - 2H(x, y) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\nabla^2 H(x, y)$ 为图像 $H(x, y)$ 的二阶偏微分; x, y 是图像像素点的坐标。Laplacian 算子边缘细节增强的计算公式为

$$e(x, y) = H(x, y) - c[\nabla^2 H(x, y)], \quad (11)$$

式中: $e(x, y)$ 为输出图像; c 为系数。通过多次实验对比得到 $c = 1$ 。

2.4 开闭运算

分割后的混凝土 3D 打印构件图像因部分噪声存在, 在纹理的缺失或者分割过程中存在一些非目标颗粒物。膨胀实质是填补目标区域中的空洞^[16]。则膨胀后图像为

$$e(u, v) = (e \oplus s)(x, y) = \max\{e(x-u, y-v)\} + s(u, v), \quad (x-u, y-v) \in E_e, (u, v) \in E_s, \quad (12)$$

式中: E_e 和 E_s 分别是 e 和 s 定义域; $e(x, y)$ 为边缘锐化后的图像; $s(u, v)$ 为结构元素。腐蚀实质是收缩图像的边界, 用来消除小且无意义的目标物。则腐蚀后图像为

$$e(u, v) = (e \ominus s)(x, y) = \min\{e(x+u, y+v)\} + s(u, v),$$

$$(x+u, y+v) \in E_e, (u, v) \in E_s. \quad (13)$$

3 实验讨论与分析

在“十三五”国家重点研发计划支持下, 对固废混凝土 3D 打印构件的视觉特性展开分析与研究, 由于未在现有文献中查到相关支撑材料, 没有公开的数据集和分类依据。课题组成员在土木学科专家的指导下, 根据工程实际应用自建目标数据集。按照基础构件的层间结构、采集角度、光照环境及台阶效应采集构件图像。实验时选择 9 种代表性基础构件进行研究, 如图 2 所示。根据层间结构, 分为多层 element 1、element 2, 单层 element 9; 根据采集角度, 分为侧面 element 7、正面 element 4、element 6; 根据光照环境, 分为高曝光度 element 8、光照不足 element 5; 台阶效应 element 3。因此, 选择 9 种代表性构件进行研究, 在工程应用中更具有普适性。从主观和客观评价两个指标验证所提算法的性能。为计算在固定阈值下的各项指标, 所提算法、FCM、Watershed 算法的自适应阈值为自身灰度值的 0.5, 其他对比阈值分割算法为其自适应阈值, 进行二值化分割。

3.1 主观评价

所提算法分别与模糊 C-均值聚类(FCM)、大津法(OTSU)、分水岭算法(Watershed)、基于阈值分割的最大熵法(MET)及均值迭代法(MIT)进行对比, 以验证所提算法的优越性, 对比结果如图 2 所示。由图 2 可知, 所提算法不仅把混凝土 3D 打印构件图像从背景中分割出来, 而且保留了轮廓边缘细节, 达到精细分割。针对构件特性设计的所提算法适用于复杂层数的混凝土构件, 能检测有高噪声背景下的混凝土 3D 打印构件, 并且能准确地识别出存在缺陷的构件图像。

3.2 客观评价

为了更好地验证算法的有效性, 以准确率(P_{acc})、精确率(P)、召回率(R)以及 F-measure(F_1) 作为分割的评价指标。准确率 P_{acc} 表示被分对的构件像素个数除以所有的样本数; 精确率 P 表示正确分割构件像素个数与真实构件图像区域像素个数之比; 召回率 R 又称查全率, 反映被正确分割为构件图像的像素个数占总构件像素个数的比例。

$$P_{acc} = \frac{N_{TP} + N_{TN}}{N_{TP} + N_{TN} + N_{FP} + N_{FN}}, \quad (14)$$

$$P = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FP}}, \quad (15)$$

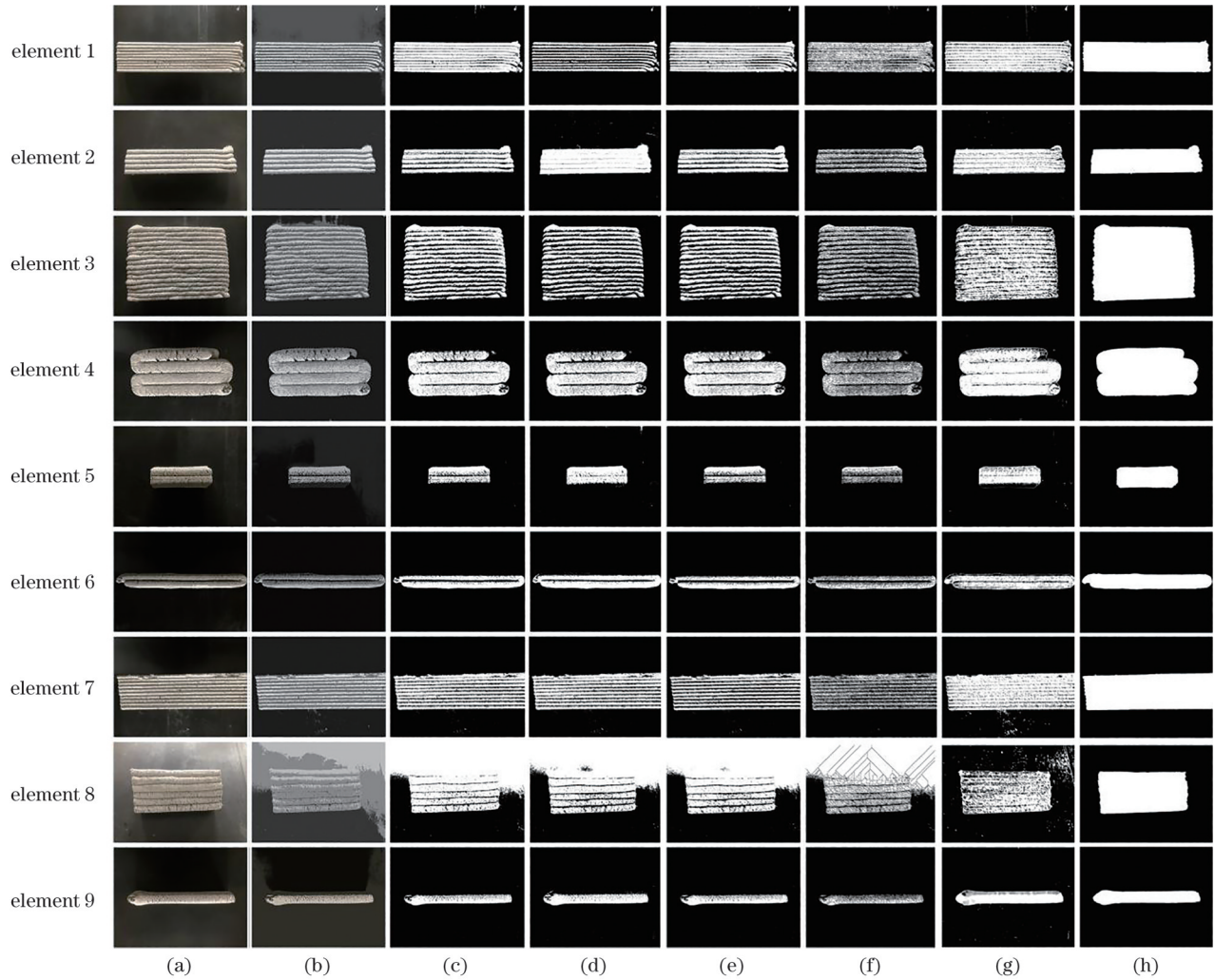


图 2 分割算法对比结果。(a)原图;(b)FCM;(c)OTSU;(d)MET;(e)MIT;(f)Watershed;(g)所提算法;(h)人工标记图
Fig. 2 Comparison results of segmentation algorithm. (a) Original image; (b) FCM; (c) OTSU; (d) MET; (e) MIT; (f) Watershed; (g) proposed algorithm; (h) manually labeled image

$$R = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}}, \quad (16)$$

$$F_1 = \frac{2 \times P \times R}{P + R}, \quad (17)$$

式中： N_{TP} 为被正确分割为构件区域的像素数； N_{FP} 为构件区域被误分为背景的像素数，也称为误分率； N_{FN} 为背景区域被误分为构件区域的像素数； N_{TN} 为被正确分割为背景区域的像素数。

图 3 为不同算法对混凝土 3D 构件的准确率，可知所提算法对构件的分割准确率均高于其他传统算法，实验数据表明，准确率平均提高了 12.44%。 P 和 R 指标有时候会出现矛盾的情况，因此需要综合评价指标 F_1 。 F_1 是 P 和 R 的加权调和平均，当 F_1 较大时，说明算法比较有效。图 4 为所提算法与传统图像分割算法的 F_1 值对比结果，所提算法 F_1 值相比其他分割算法更高，实验数据表明， F_1 值相比于

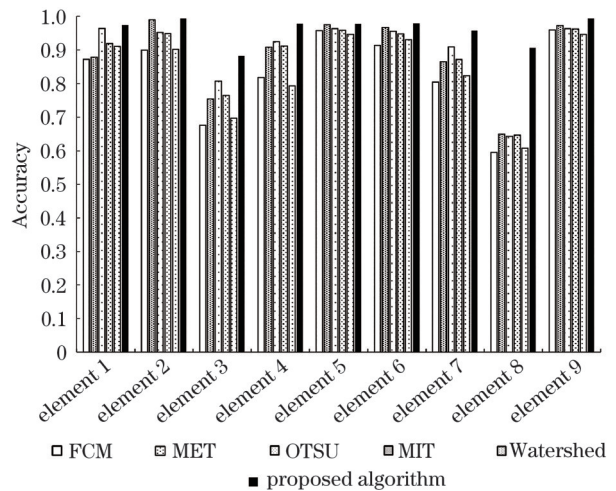


图 3 不同算法对混凝土 3D 构件的准确率
Fig. 3 Accuracy of different algorithms for concrete 3D components

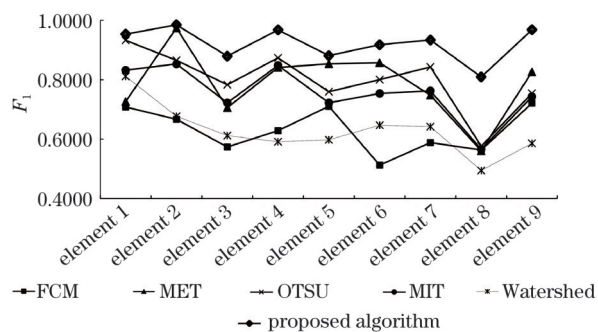


图 4 不同算法对混凝土 3D 构件的 F_1

Fig. 4 F_1 of different algorithms for concrete 3D components

其他对比分割算法平均提高了 30.79%，说明所提算法分割质量更好。

图 5 为 element 4、element 6、element 9 的局部放大图，可以看出，存在部分缺陷。传统算法对层间结构不完整构件 element 4、端部层间过填充构件 element 6、单层过填充构件 element 9 的分割结果中，缺陷部分边缘连接不完整，目标纹理信息大量缺失。所提算法准确检测出构件的层间边缘轮廓和内部纹理信息，同时识别出缺陷部分。

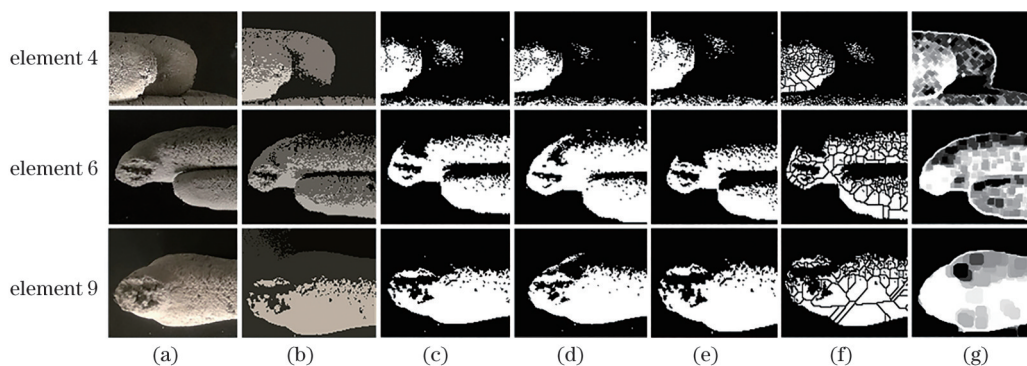


图 5 构件缺陷检测结果。(a)原图；(b) FCM；(c) OTSU；(d) MET；(e) MIT；(f) Watershed；(g)所提算法

Fig. 5 Detection results of element defect. (a) Original image; (b) FCM; (c) OTSU; (d) MET; (e) MIT; (f) Watershed; (g) proposed algorithm

3.3 阈值讨论

所提算法灰度变换中 γ 阈值和数学形态滤波中膨胀腐蚀半径 d 阈值的选择会影响分割结果。因此，固定其中一个阈值进行实验讨论，选择最优阈值。

1) γ 阈值选取

灰度变换中不同 γ 阈值选择会影响分割效果，固定膨胀腐蚀半径阈值，多次实验结果下对比确定 γ 阈值。选择 element 3 为实验对象，如图 6 所示，计算不同 γ 阈值下各个评价指标，结果如表 1 所示。

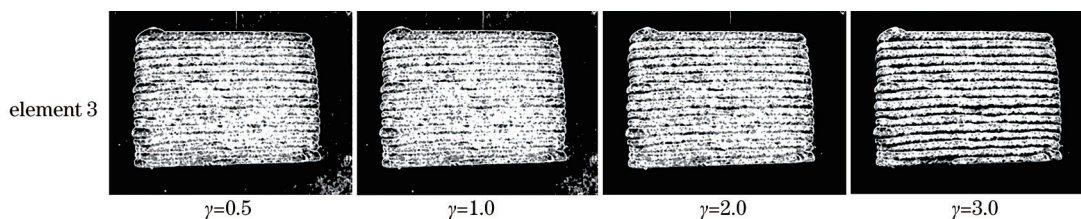


图 6 不同 γ 阈值下的分割结果

Fig. 6 Segmentation results under different γ thresholds

表 1 不同 γ 阈值分割结果指标对比

Table 1 Index comparison of segmentation results with different γ thresholds

γ	Precision	Recall	Accuracy	F-measure
0.5	0.9762	0.7707	0.8659	0.8614
1	0.9790	0.8036	0.8845	0.8827
2	0.9883	0.7921	0.8825	0.8794
3	0.9893	0.6835	0.8249	0.8085

由图 6 可知，不同 γ 阈值下的分割结果中， $\gamma=2$ 阈值分割下构件图像的纹理信息和轮廓信息比较完整，分割结果中噪声相比于其他 γ 阈值情况较小。由表 1 可知，在评价指标对比结果中， $\gamma=2$ 阈值下各项分割指标相比于其他 γ 阈值下较高。综上所述，当 $\gamma=2$ 时，分割效果较好。

2) 膨胀腐蚀半径选取

膨胀腐蚀半径大小决定孔洞填补效果，影响分

割图像整体的平滑程度,固定灰度变换中 γ 阈值,多次实验确定膨胀腐蚀半径阈值 d 。选择构件 element 3

为实验对象,如图 7 所示,分别对不同半径 d 阈值下各个指标进行对比,结果如表 2 所示。

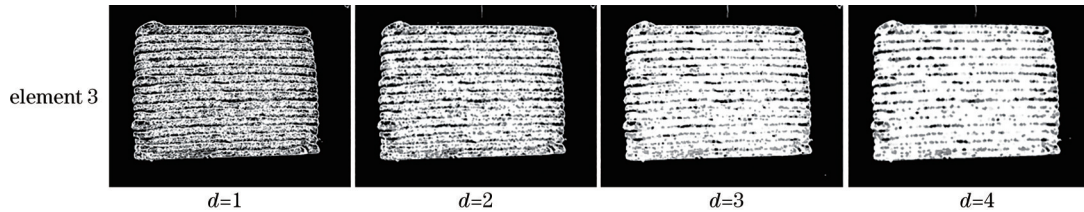


图 7 不同 d 阈值下的分割结果

Fig. 7 Segmentation results under different d thresholds

表 2 不同 d 阈值分割结果指标对比

Table 2 Index comparison of segmentation results with different d thresholds

d	Precision	Recall	Accuracy	F-measure
1	0.9861	0.6496	0.8056	0.7832
2	0.9883	0.7291	0.8825	0.8794
3	0.9885	0.8629	0.9205	0.9215
4	0.9893	0.9128	0.9475	0.9495

由图 7 可知: $d=2$ 阈值分割下,构件图像的纹理信息和轮廓信息相比于其他阈值情况比较完整; $d=3$ 、 $d=4$ 阈值时,构件图像纹理和轮廓信息变得模糊。由表 2 可知,在指标对比结果中, $d=2$ 阈值下,各项分割指标相比于其他 d 阈值情况略低,但是 $d=3$ 、 $d=4$ 时的阈值分割图像失真比较严重。综上所述,当 $d=2$ 时,分割效果较好。

4 结 论

提出一种基于层间信息熵的混凝土 3D 打印构件图像精细分割算法。利用层间信息熵和双阈值相结合的方法对构件图像进行精细分割,有效地解决传统算法边缘连通性不足和噪声敏感的问题,检测出构件图像的层间边缘信息,提高了边缘连接完整性,识别出有缺陷的构件,为实际工程应用中判断构件成形质量提供依据。研究表明,相比其他算法,所提算法的准确率平均提高了 12.44%, F_1 值平均提高了 30.79%。所提算法极大地提高了检测精度和分割精度,体现了对混凝土 3D 构件图像检测的有效性和优越性。但是,针对本文研究对象设计的精细分割算法普适性有待提高,今后的研究会根据这一问题将算法应用到其他目标对象中,同时对其进行优化。

参 考 文 献

[1] Xu J. Research on forming quality analysis and toolpath optimization of three-dimensional concrete

printing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

徐捷. 3D 混凝土打印成形质量分析与路径优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

[2] Lu B H, Li D C. Development of the additive manufacturing(3D printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4.

卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.

[3] Ding L Y, Xu J, Qin Y W. Research and application review of the digital construction technology of 3D printing for construction[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015, 32(3): 1-10.

丁烈云, 徐捷, 覃亚伟. 建筑 3D 打印数字建造技术研究应用综述[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(3): 1-10.

[4] Gao Y F. The research on electric inertia simulation based on dual-stator motor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

高云帆. 基于双定子电机的机械惯量模拟技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[5] Wolfs R J M, Bos F P, Salet T A M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: numerical modelling and experimental testing[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 106: 103-116.

[6] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, et al. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1/2/3/4): 173-183.

[7] Li D X, Zhang Z. Improved U-Net segmentation algorithm for the retinal blood vessel images[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1010001.

李大湘, 张振. 基于改进 U-Net 视网膜血管图像分割算法[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1010001.

[8] Wang Y T, Li Q. Terahertz holographic reconstructed image segmentation based on optimized region

- growth by evolutionary algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0814003.
- 王宇彤, 李琦. 进化算法优化区域生长的太赫兹全息再现图像分割[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0814003.
- [9] Wu Z P, Ma Z W, Yan H, et al. Local threshold segmentation method based on multi-direction grayscale wave for image[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 061016.
- 吴正平, 马占稳, 颜华, 等. 基于图像的多方向灰度波动局部阈值分割方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(6): 061016.
- [10] Pun T. A new method for grey-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. Signal Processing, 1980, 2(3): 223-237.
- [11] Liu Y Q, Zhong B J, Zheng H J. Algorithm for detecting straight line segments in color images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 211002.
- 刘雨晴, 钟宝江, 郑行家. 一种彩色图像的直线段检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 211002.
- [12] Hua C J, Sun K K, Chen Y. Image segmentation algorithm of mesh fabric based on regional minimum gray value[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(2): 0210014.
- 化春键, 孙康康, 陈莹. 基于区域灰度极小值的网孔织物图像分割算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(2): 0210014.
- [13] Zhu H, Lin L, Chen D Q, et al. PCB image orientation rectification method based on multi-directional improved Sobel operator[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 121-128.
- 朱寒, 林丽, 陈德全, 等. 基于多方向改进 Sobel 算子的 PCB 图像定位校正方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 121-128.
- [14] Ma Y J, Chen M L. Shadow removal method based on improved Laplace-Gaussian operator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(12): 121004.
- 马永杰, 陈梦利. 基于改进拉普拉斯-高斯算子的阴影消除方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 121004.
- [15] Zhou B, Qin L, Gong W. Stereo-matching algorithm using weighted guided image filtering based on Laplacian of Gaussian operator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 101502.
- 周博, 秦岭, 龚伟. 基于高斯拉普拉斯算子的加权引导图滤波立体匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 101502.
- [16] Yu X Q, Chen R W, Tang J, et al. Edge detection for noisy image based on wavelet transform and new mathematical morphology[J]. Computer Science, 2018, 45(S2): 194-197.
- 余小庆, 陈仁文, 唐杰, 等. 融合小波变换和新形态学的含噪图像边缘检测[J]. 计算机科学, 2018, 45(S2): 194-197.