

激光拼焊焊缝截面轮廓几何建模方法

邹媛媛^{1,2}, 左克铸^{1,2}, 李鹏飞^{1,2}, 蔡尚^{1,2}

¹沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

²高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 沈阳 110168

摘要 提出了一种激光拼焊焊缝截面轮廓的几何建模方法, 基于 Laws 纹理滤波和数学形态学闭运算提取了截面的轮廓边缘, 分别采用多项式函数模型、指数函数模型、高斯函数模型对提取的截面轮廓边缘进行了曲线拟合, 并对拟合结果进行了误差分析。分析结果表明, 基于指数函数模型拟合的焊缝截面轮廓上边缘的精度最高, 基于高斯函数模型拟合的焊缝截面轮廓下边缘的精度最高。对不同工艺参数条件下获得的激光拼焊焊缝截面轮廓边缘进行了几何建模实验, 实验结果表明, 提出的方法可以有效地实现激光拼焊焊缝截面轮廓的几何建模。

关键词 激光技术; 几何建模; 纹理滤波; 焊缝截面轮廓; 激光拼焊

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.091402

Geometric Modeling Methods for Cross-Sectional Profile of Welds in Tailored Blank Laser Welding

Zou Yuanyuan^{1,2}, Zuo Kezhu^{1,2}, Li Pengfei^{1,2}, Cai Shang^{1,2}

¹School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;

²National-Local Joint Engineering Laboratory of NC Machining Equipment and Technology of High-Grade Stone, Shenyang, Liaoning 110168, China

Abstract A geometric modeling method for the cross-sectional profile of welds in the tailored blank laser welding is proposed. The edges of the cross-sectional profile are extracted based on the Laws texture filtering and the mathematical morphological closed operation. The curve fitting for these edges of the cross-sectional profile are done with the polynomial function model, the exponential function model and the Gaussian function model, respectively. The error analysis of the fitting results is also conducted. The analysis results show that the fitting precision for the upper edge of the cross-sectional profile of welds based on the exponential function model is the highest, however the fitting precision for the lower edge of the cross-sectional profile of welds based on the Gaussian function model is the highest. The geometric modeling experiments for the edges of the cross-sectional profile of welds in the tailored blank laser welding under different welding parameters are carried out and the experimental results demonstrate that the proposed method is effective to realize the geometric modeling for the cross-sectional profile of welds in the tailored blank laser welding.

Key words laser technique; geometric modeling; texture filtering; cross-section profile of weld; tailored blank laser welding

OCIS codes 140.3390; 120.4630; 100.2000; 000.3870

1 引言

作为一种先进的焊接技术, 激光拼焊被广泛应用于航空、航天、汽车、造船等领域^[1-3]。相对于传统焊接方法, 激光拼焊具有热影响区小、焊接强度高、焊接均匀、变形小等优点^[4-5]。在焊接中, 焊缝成形质量决定着

收稿日期: 2017-03-16; **收到修改稿日期:** 2017-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(51405481)、辽宁省教育厅科研项目(LJZ2016016)、江苏省产学研合作项目(BY2015063-01)、沈阳建筑大学学科涵养计划(XKHY2-32)

作者简介: 邹媛媛(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: yyzou@sjzu.edu.cn

焊接质量。为了保证焊接质量,研究人员试图利用实验方法^[6]或数值模拟方法来建立焊缝成形与焊接工艺参数之间的定量关系,以准确预测焊缝几何形状并得到优化的焊接工艺参数^[7]。王蔚等^[8]研究了激光焊接工艺参数对焊缝成形的影响,并观察分析了不同工艺条件下的焊缝横截面。余淑荣等^[9]研究了影响焊接过程稳定性和焊缝成形性能的主要因素,并用有限元方法对焊接过程的温度场和应力场进行数值模拟,分析了拼焊板的残余应力分布和变形特点。

焊缝截面轮廓是焊缝成形的直接表征,其几何建模有助于检测焊缝成形质量,进而优化焊接工艺参数。目前关于焊缝截面形态数学模型的研究鲜有报道。尚小刚等^[7]采用正交实验设计和数理统计方法,建立了钨极稀有气体保护焊焊缝截面形态的多项式回归模型。曹勇等^[10]基于小波变换研究了熔化极活性气体保护电弧焊快速成形焊缝截面的建模方法。Xiong 等^[11]分别采用圆弧、抛物线、余弦函数建立了基于机器人熔化极气体保护焊的快速制造焊缝截面模型。

本文提出了一种激光拼焊焊缝截面轮廓几何建模方法。首先基于 Laws 纹理滤波和数学形态学闭运算,对激光拼焊焊缝截面轮廓边缘进行提取;其次,分别采用多项式函数模型、指数函数模型、高斯函数模型,对提取的截面轮廓边缘进行曲线拟合,并对上述模型拟合结果进行误差分析,得到最佳的截面轮廓边缘几何模型;最后,提取了不同工艺参数条件下激光拼焊的焊缝截面轮廓边缘,并拟合截面轮廓边缘几何模型。实验结果表明,所提的方法可以有效地实现激光拼焊焊缝截面轮廓的几何建模。

2 焊缝截面轮廓边缘的检测

2.1 激光拼焊焊缝截面轮廓

激光拼焊焊缝截面如图 1 所示,其为不等厚的焊缝截面,可以看出,截面主要包括母材部分和焊缝部分。其中焊缝截面轮廓特征主要包括上下表面轮廓曲线和焊缝边缘特征。依据截面轮廓几何模型,可以实现焊缝几何形貌的质量检测与判断。质量检测标准主要依据 ISO13919-1 国际标准。在激光拼焊中,工件的焊接质量必须达到或高于该标准中的 B 级要求。

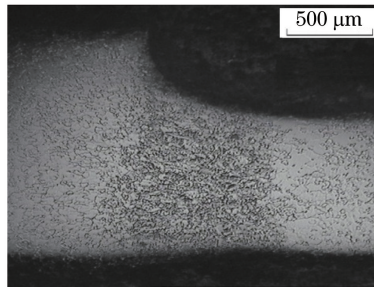


图 1 焊缝截面图

Fig. 1 Cross-sectional image of welds

2.2 焊缝截面轮廓边缘的检测

由图 1 可知,焊缝截面为纹理图像。焊缝区域截面轮廓边缘的检测流程如下。1) 为提高图像处理速度,依据图像特征选择感兴趣区域。2) 基于 Laws 纹理滤波提取焊缝截面区域,该方法是一种基于模板卷积的纹理测量方法^[12],即定义一维滤波模板,通过卷积形成一维、二维滤波模板,将纹理图像与这些滤波模板进行卷积;在卷积结果上统计各个估计窗口内的能量和局部方差等,将它们作为纹理特征以检测图像纹理信息。

Laws 纹理滤波选择三个基本的一维卷积核并进行卷积,延伸其长度可以得到一维纹理向量:

$$\begin{cases} L_5 = [1, 4, 6, 4, 1] \\ E_5 = [-1, -2, 0, 2, 1] \\ S_5 = [-1, 0, 2, 0, -1] \\ W_5 = [-1, 2, 0, -2, 1] \\ R_5 = [1, -4, 6, -4, 1] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 L_5 、 E_5 、 S_5 、 W_5 、 R_5 分别为灰度特征、边缘特征、点特征、波特特征、涟漪特征。将(1)式中的一维纹理向量

两两进行卷积,得到 25 个 Laws 纹理模板。利用 Laws 纹理模板提取图像纹理特征,将图像与每个二维纹理模板进行卷积,可以分别提取出图像的水平边缘、高频点、形状和垂直边缘等特征,进行卷积后得到相应的纹理图像。

针对激光拼焊焊缝的截面图像,采用 $L'_5 E_5$ (L'_5 为 L_5 的转置向量) 纹理滤波模板对焊缝截面图像进行卷积操作,即

$$g(i, j) = \sum_{s=-2}^2 \sum_{t=-2}^2 W_{L'_5 E_5}(s, t) f(i + s, j + t), \quad (2)$$

式中 i, j 分别为像素的横、纵坐标, s, t 分别为卷积窗口的横、纵坐标, $g(i, j)$ 为卷积后的图像表达, $f(i, j)$ 为图像表达, $W_{L'_5 E_5}(s, t)$ 为卷积窗口。此时滤波效果最好。滤波后,采用相对直径为 3 的圆形模板对图像进行中值滤波,去除噪声干扰。基于直方图对图像进行阈值分割,获得二值图像。对二值图像进行形态学闭运算操作,即采用相对半径为 9.5 的圆结构对焊缝区域进行闭运算,平滑焊缝区域边缘。由于焊缝区域面积最大,因此基于图像区域滤除其余噪声区域,提取出焊缝区域,并基于边界跟踪提取出焊缝边缘。上述一系列操作所得图像如图 2 所示。

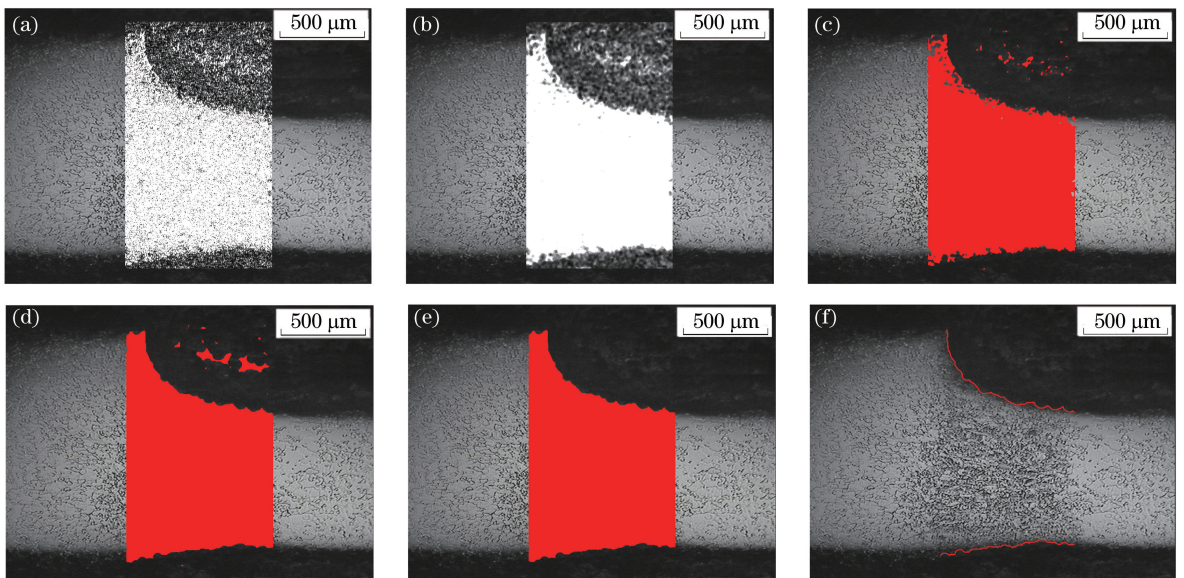


图 2 轮廓边缘提取过程。(a) Laws 纹理滤波;(b)中值滤波;(c)直方图阈值分割;(d)形态学闭运算;
(e)焊缝区域提取;(f)边缘检测

Fig. 2 Extraction process of profile edges. (a) Laws texture filtering; (b) median filtering; (c) threshold segmentation based on histogram; (d) morphological closed operation; (e) extraction of weld zone; (f) edge detection

3 焊缝截面轮廓的几何建模

为了实现激光拼焊焊缝轮廓的建模,分别采用多项式函数模型、指数函数模型、高斯函数模型对焊缝截面轮廓上下边缘进行曲线拟合,用 $f(x)$ 表示拟合后的曲线函数。

1) 多项式函数

$$f(x) = ax^2 + bx + c, \quad (3)$$

式中 a, b, c 为多项式函数系数。

2) 指数函数

$$f(x) = a_1 \exp(b_1 x) + c_1 \exp(d_1 x), \quad (4)$$

式中 a_1, b_1, c_1, d_1 为指数函数系数。

3) 高斯函数

$$f(x) = a_2 \exp\left[-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2\right] + a_3 \exp\left[-\left(\frac{x-b_3}{c_3}\right)^2\right], \quad (5)$$

式中 $a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ 为高斯函数系数。

将提取出的焊缝截面轮廓边缘点坐标代入(3)~(5)式,拟合得到焊缝截面轮廓的上下边缘数学模型,依据误差分析确定最优函数曲线拟合模型,实现焊缝截面轮廓的几何建模。

4 实验结果与分析

分别采用多项式函数模型、指数函数模型、高斯函数模型拟合焊缝截面轮廓的上下边缘,结果如图3所示。

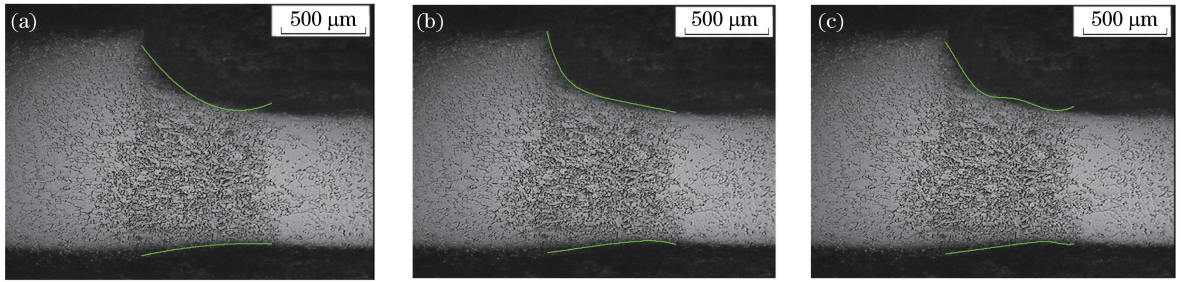


图3 基于不同模型的几何建模。(a)多项式函数模型;(b)指数函数模型;(c)高斯函数模型

Fig. 3 Geometric modeling based on different models. (a) Polynomial function model; (b) exponential function model; (c) Gaussian function model

将三种拟合方法得到的上下边缘分别与边缘检测获取的上下边缘进行误差比较,得到均方根误差结果,见表1。

表1 均方根误差

Table 1 Root-mean-square errors

Model	Root-mean-square error /pixel	
	Upper edge	Lower edge
Polynomial function model	12.560	2.717
Exponential function model	5.363	2.312
Gaussian function model	8.778	2.176

经过对比分析可以看出,在该实验条件下,焊缝截面上边缘采用指数函数拟合时,效果最好;焊缝截面下边缘采用高斯函数拟合时,效果最好。拟合得到的焊缝截面上边缘数学模型为

$$f(x) = 137.4 \exp(0.0009088x) - 2.432 \times 10^6 \times \exp(-0.03478x). \quad (6)$$

下边缘数学模型为

$$f(x) = 7.088 \times 10^{11} \times \exp\left[-\left(\frac{x + 1.601 \times 10^5}{34980}\right)^2\right] + 15.11 \exp\left[-\left(\frac{x - 552.1}{39.72}\right)^2\right]. \quad (7)$$

对不同工艺参数条件下获取的激光拼焊焊缝截面进行几何建模,工艺参数见表2。

表2 焊接工艺参数

Table 2 Parameters of welding process

No.	Plate thickness /mm	Plate material	Welding power /kW	Welding speed /($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Offset /mm	Defocusing distance /mm
1	0.9-1.5	Low-carbon steel	4.0	5.0	0.1	0.0
2	2.5-1.5	Low-carbon steel	4.0	5.2	0.0	-0.5
3	2.5-1.5	Low-carbon steel	3.0	2.0	0.0	-0.5

不同工艺参数条件下的焊缝截面图像如图4(a1)~(a3)所示。采用提出的边缘检测方法提取焊缝截面边缘,所得结果如图4(b1)~(b3)所示。依据提取的边缘,分别采用指数函数和高斯函数拟合焊缝截面上边缘和

下边缘,拟合结果如图 4(c1)~(c3)所示。实验结果表明,在上述工艺参数条件下,能够有效地提取并拟合焊缝截面的轮廓边缘。

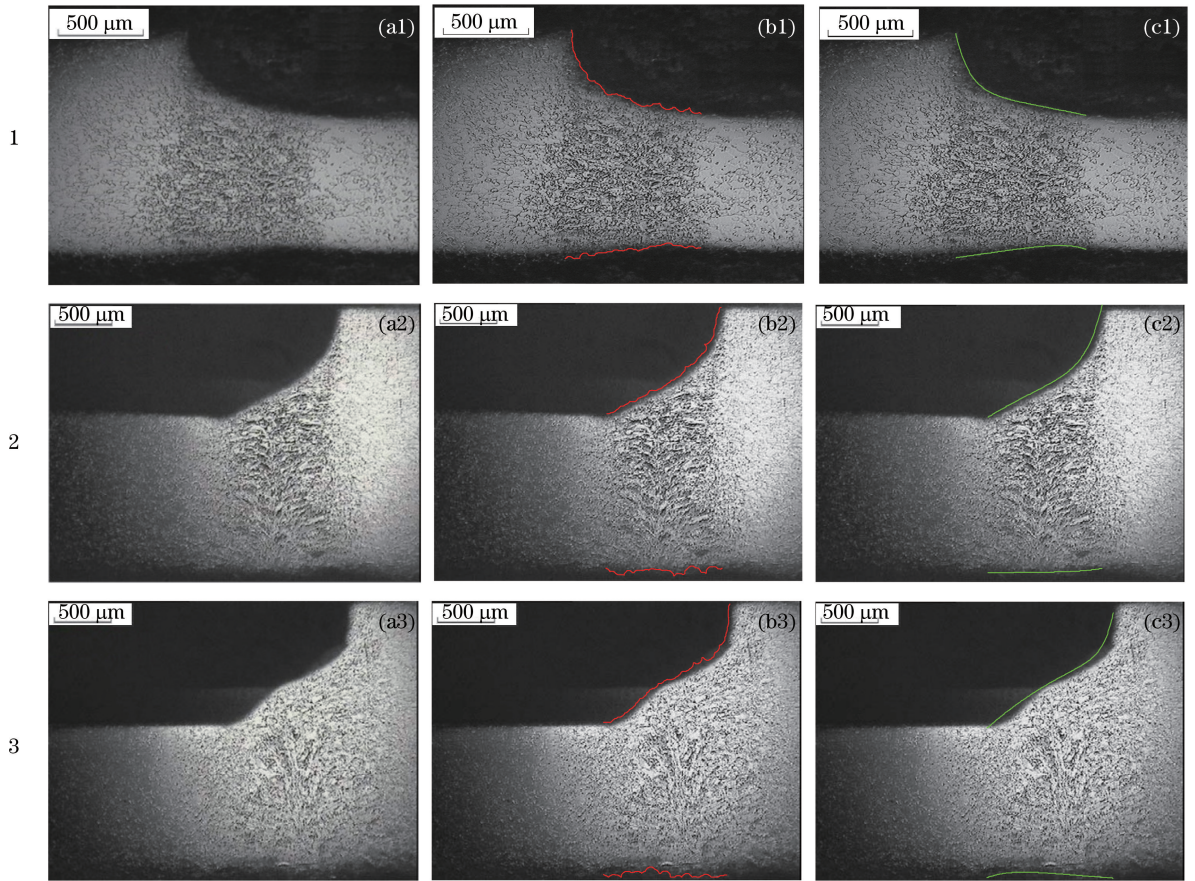


图 4 焊缝截面轮廓的拟合结果。(a1)~(a3)原始图像;(b1)~(b3)基于边缘检测的截面边缘;(c1)~(c3)拟合结果

Fig. 4 Fitting results of cross-sectional profile of welds. (a1)-(a3) Original images; (b1)-(b3) cross-sectional edges based on edge detection; (c1)-(c3) fitting results

5 结 论

提出了一种激光拼焊焊缝截面轮廓的几何建模方法;基于纹理滤波和数学形态学闭运算,实现了焊缝截面轮廓的边缘提取;利用三种不同曲线模型对提取的焊缝截面轮廓边缘进行了曲线拟合,并进行了对比分析。结果表明,基于指数函数模型拟合的焊缝截面轮廓的上边缘精度最高,基于高斯函数模型拟合的焊缝截面轮廓的下边缘精度最高。研究了不同工艺参数条件下的焊缝截面轮廓,结果表明,所提出的方法能够有效地建立焊缝截面轮廓的几何模型,为实现激光拼焊焊缝形貌的质量控制提供了一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Srinivas Naik B, Janaki Ramulu P, Ganesh Narayanan R. Application of a few necking criteria in predicting the forming limit of unwelded and tailor-welded blanks[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2010, 45(2): 79-96.
- [2] Zou Yuanyuan, Zhao Mingyang. Research and current application situation on quality inspection of laser welding of tailored blanks[J]. Welding Technology, 2014, 43(9): 63-66.
邹媛媛, 赵明扬. 激光拼焊焊缝质量自动检测技术研究及应用现状[J]. 焊接技术, 2014, 43(9): 63-66.
- [3] Zhang Fan, Li Fang, Hua Xueming, *et al.* Research of effects with Al-Si coating on distribution and performance of tailored laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0503005.

- 张帆, 李芳, 华学明, 等. Al-Si 镀层在激光拼焊板焊缝中分布及性能影响研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503005.
- [4] Lei Yucheng, Zhu Qiang, Chen Wei, *et al.* Analysis about formation and microstructure of laser-welding-tailored-blanks with unequal thickness of high strength steels[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(8): 9-12, 16.
雷玉成, 朱强, 陈炜, 等. 高强度钢差厚板激光拼焊焊缝成形及组织分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(8): 9-12, 16.
- [5] Li Tao, Li Fang, Wang Shien, *et al.* Research on car galvanized tailor-welded blanks of fiber laser welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011406.
李涛, 李芳, 王诗恩, 等. 车用镀锌钢板光纤激光拼焊工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011406.
- [6] Liu Dongyu, Li Dong, Li Kaibin, *et al.* Influence of laser with same line energy on the microstructure and properties of welded[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101402.
刘东宇, 李东, 李凯斌, 等. 相同激光能量对焊缝组织和性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101402.
- [7] 尚小刚, 朱六妹, 李红光. 焊缝截面形态的数学模型、预测与焊接规范参数的设计[J]. 物理测试, 1999, 1: 25-29.
- [8] Wang Wei, Chen Li, Zhao Xingke, *et al.* Effect of welding parameters on formation of welds during laser welding of NiTi shape memory alloy[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 291-296.
王蔚, 陈俐, 赵兴科, 等. 激光焊接工艺参数对 NiTi 形状记忆合金焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 291-296.
- [9] Yu Shurong, Fan Ding, Xiong Jinhui, *et al.* CO₂ laser welding of tailored aluminum alloy sheets with different thickness and numerical simulation[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1795-1800.
余淑荣, 樊丁, 熊进辉, 等. 铝合金不等厚板的 CO₂ 激光拼焊及数值模拟[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1795-1800.
- [10] Cao yong, Zhu Sheng, Sun Lei, *et al.* Cross-section modeling of weld bead for rapid prototyping by MAG welding based on wavelet transform[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(12): 29-32.
曹勇, 朱胜, 孙磊, 等. 基于小波变换的 MAG 快速成形焊缝截面建模[J]. 焊接学报, 2008, 29(12): 29-32.
- [11] Xiong J, Zhang G J, Gao H M, *et al.* Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(2): 417-423.
- [12] Laws K I. Textured image segmentation[D]. Los Angeles: University of Southern California, 1980.