

# 基于 Data Matrix 的彩色直接零件标识激光 标刻技术研究

耿影, 李建美\*, 高鸿志

山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061

**摘要** 在工业领域中,具有可追溯性的直接零件标识技术受到越来越多的关注。但是很多产品零部件对于直接零件标识有尺寸要求,限制了信息存储容量。为了提高直接零件标识的数据存储密度,在直接零件标识技术中引入彩色二维条码的概念,设计了一种彩色 Data Matrix 二维条码直接零件标识。利用纳秒激光标刻设备在钛合金材料上进行标刻实验,成功实现彩色二维条码的激光标刻,并进行质量评估。为了进一步验证条码的可靠性,采集激光标刻二维条码的图像,依照评估结果选择是否在信息提取前进行条码重构,从而校验条码信息。校验结果证明了所加工彩色 Data Matrix 二维条码是可靠的,彩色直接零件标识技术具有可行性,可以在工业直接零件标识领域进行推广应用。

**关键词** 测量; 激光标刻; Data Matrix; 彩色二维条码; 直接零件标识

**中图分类号** TN249

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.091202

## Laser Marking Technology of Color Direct Part Marking Based on Data Matrix

Geng Ying, Li Jianmei\*, Gao Hongzhi

*Key Laboratory of High-Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education,  
School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*

**Abstract** In the field of industry, the technology of direct part marking with traceability has been paid more and more attention. However, many product components have requirements of size restriction for direct part marking, thus the information storage capacity has been restricted. In order to improve the data storage density of direct part marking, the concept of color two-dimensional barcode is introduced into the technology of direct part marking, and the color Data Matrix two-dimensional barcodes are designed by direct part marking. The laser marking experiment of color two-dimensional barcodes on titanium alloy materials are carried out with nanosecond laser marking equipment, and the laser marking of color two-dimensional barcodes are successfully implemented, and barcodes' qualities are evaluated. In order to further verify the reliability of barcodes, the images of two-dimensional barcodes marked by laser are collected for choosing whether to carry out barcode reconstruction before information extraction according to the evaluation results to verify barcodes information. The verification results prove that the processed color Data Matrix two-dimensional barcodes are reliable, and the color direct part marking technology is feasible, which can be promoted and applied in the field of industrial direct part marking.

**Key words** measurement; laser marking; Data Matrix; color two-dimensional barcode; direct part marking

**OCIS codes** 120.4610; 140.3390; 120.4570

## 1 引言

直接零件标识(DPM)技术是直接在工业产品

零部件表面标记字符数字或条码,用于记录产品信息,以便实现产品全寿命周期的追溯,因而在工业领域得到广泛应用和推广。由于直接零件标识需在产

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2019-09-04; 录用日期: 2019-09-16

基金项目: 山东省重点研发计划(公益性科技攻关类)项目(2019GGX104098)

\* E-mail: lijianmei@sdu.edu.cn

品表面形成永久性标识,为了避免或最大程度上减少标识加工对产品性能可能带来的影响,一般希望所加工的标识尺寸尽可能小,即条码数据密度越高越好。

彩色条码相比传统黑白条码具有更高的条码数据密度,逐渐成为条码技术领域研究与开发的热点。国外的研究起步较早,微软研究院在2007年提出了高容量彩色条码(HCCB)<sup>[1]</sup>,具有4色和8色两个版本;韩国Color Zip公司推出的彩色二维条码业务在日韩等国家已得到广泛应用;Querini等<sup>[2]</sup>在2011年设计了高容量彩色二维(HCC2D)条码,较二维码具有更强的鲁棒性和纠错特性。国内也相继研发出了彩色二维码技术,李朝辉<sup>[3]</sup>、刘铁等<sup>[4]</sup>、郑河荣等<sup>[5]</sup>、黄杰等<sup>[6]</sup>先后提出了自有知识产权的彩色二维码技术方案,徐铭阳<sup>[7]</sup>在2016年设计了一种基于生物特征的彩色多码。

尽管彩色二维条码的研究取得了不错的进展,但目前的应用场合均集中在印刷条码领域,尚未被应用于直接零件标识领域。基于此,为实现直接零件标识具有更高的数据密度,本文设计了一种基于彩色Data Matrix二维条码的直接零件标识技术,在原有黑白Data Matrix二维条码基础上,增加新的维度——颜色,形成三维条码来存储信息。同时,选择激光标刻技术作为直接零件标识的加工方式,钛合金作为实验材料,进行彩色二维条码的激光标刻实验研究,本文的研究成果可对彩色直接零件标识的工业化应用提供技术基础。

## 2 彩色Data Matrix二维条码的生成与激光标刻

彩色Data Matrix二维条码是在黑白Data

Matrix二维条码的基础上增加了颜色信息,以满足二维条码对储存更多信息的要求。从码字流到二进制流的转换以及进制流之间可转换的思想<sup>[8]</sup>为彩色Data Matrix二维条码的应用奠定了技术基础,激光标刻技术<sup>[9-13]</sup>则使其在直接零件标识领域的进一步实现成为可能。

### 2.1 彩色Data Matrix二维条码的生成

彩色Data Matrix二维条码的生成过程如下:

1) 将数据信息流生成为Data Matrix二维条码,如图1(a)所示;

2) 提取Data Matrix二维条码的信息区,按“黑色为1,白色为0”的准则将Data Matrix二维条码转化为二进制数字矩阵,如图1(b)和图1(c)所示;

3) 将二进制数字矩阵按行展开转换为一维数组,如图1(d)所示;

4) 由左至右组合一维数组的每两位二进制数字为一个四进制数字,如图1(e)所示;

5) 将四进制的一维数组由上到下按行转换为方形矩阵,方形矩阵的维数需保证其总元素数量要大于等于一维数组的元素个数,其中,当一维数组元素个数不足以构成一个完整的方形矩阵时,需要在尾部填补一定数目的四进制补足码。本次实验中按01230123……的顺序进行填补,如图1(f)所示;

6) 选择对比度较大的颜色表示四进制矩阵中不同的数字,这里选择白、黄、紫、蓝四种颜色分别描述数字0、1、2、3,填充好的颜色模块形成彩色二维条码的信息区,如图1(g)所示;

7) 在彩色二维条码的信息区四周添加L型定位区,定位区的颜色选择信息区某一模块的颜色,得到完整的彩色Data Matrix二维条码,如图1(h)所示。

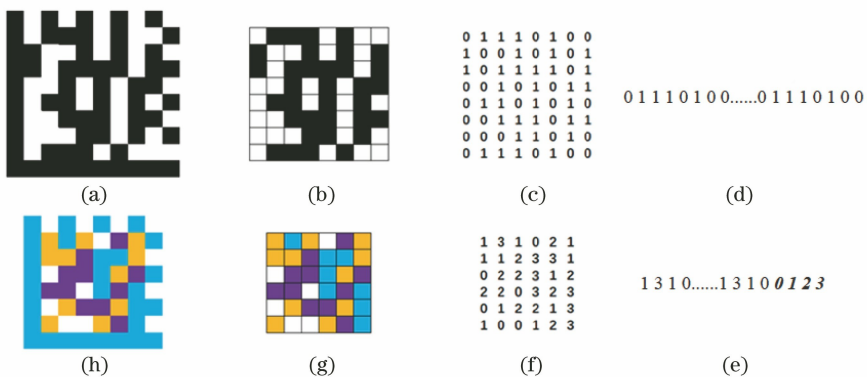


图1 彩色Data Matrix二维条码的生成过程

Fig. 1 Generation process of a color Data Matrix two-dimensional barcode

从上述过程可以看出,彩色Data Matrix二维条码的尺寸在原Data Matrix二维条码尺寸基础上

得到了压缩,压缩效果如表 1 所示。从表 1 可以看出,在同等源数据信息流的情况下,与原始 Data Matrix 二维条码相比,彩色 Data Matrix 二维条码具有更小的尺寸,尺寸压缩率在 27% 以上,具有更高的条码数据密度。

表 1 彩色 Data Matrix 二维条码与原 Data Matrix 二维条码容量对比

Table 1 Capacity comparison between color Data Matrix two-dimensional barcodes and original Data Matrix two-dimensional barcodes

Size of original Data Matrix two-dimensional barcode $S_1$	Size of color Data Matrix two-dimensional barcode $S_2$	Compression ratio $(S_1 - S_2) / S_1 \times 100\%$ / %
10×10	8×8	36
12×12	10×10	31
14×14	12×12	27
16×16	12×12	43
18×18	14×14	40
⋮	⋮	⋮

### 2.2 彩色 Data Matrix 二维条码的激光标刻

实验材料为 100 mm×100 mm×1 mm 的 TC4 钛合金[化学成分(质量分数, %): Ti=88.04%, Fe=0.30% max, C=0.10% max, N=0.05% max, H=0.015% max, O=0.20% max, Al=6.8% max, V=4.5% max]。大气环境下,使用 YAG-T80C 半导体泵浦固体激光打标机(激光波长为 1064 nm,最大激光输出功率为 70 W,聚焦激光束直径为 0.15 mm,可在 1~40 kHz 的频率范围内产生 80~260 ns 的脉冲)在清洗打磨后的材料表面进行标刻实验。

图 1 中的彩色二维条码包含 64 个模块,为了确定加工方式和加工颜色,保证连续加工过程中模块颜色的稳定性和均匀性,对实验材料进行激光着色实验。首先进行多模块连续标刻实验,发现合并加工相邻同色模块可消除中间边界。通过进行同色模块合并加工实验,发现最多只对两个相邻同色模块进行合并加工时,可以保证颜色的均匀性。进一步进行激光着色稳定性实验,发现在材料表面着色稳定性较好的颜色有黄色、紫色、蓝色。因此,选择此三种颜色和钛合金基色(银色),共四种颜色,用于描述彩色条码的颜色信息,所选择的最优激光加工参数如表 2 所示。

为此,根据彩色二维条码不同颜色的位置分布情况,画出各个颜色模块矢量图,依次建立不同颜色的激光标刻矢量文件。如图 2 所示,本文设计的彩

表 2 黄色、紫色和蓝色的激光加工参数

Table 2 Laser processing parameters of yellow, purple, and blue

Observed color	Current intensity / A	Pulse frequency / kHz	Scanning speed / (mm/s)	Fill spacing / $\mu\text{m}$
Yellow	16	10	72.5	36
Purple	16	10	78	21
Blue	16	10	47.5	45

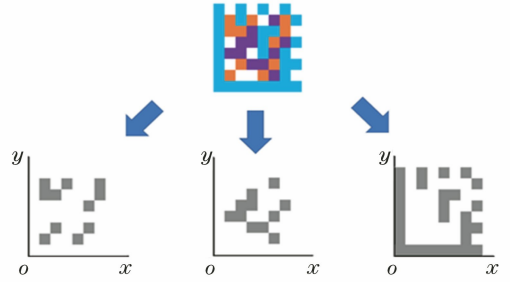


图 2 彩色 Data Matrix 二维条码标刻过程

Fig. 2 Marking process of a color Data Matrix two-dimensional barcode

色二维条码需要标刻的颜色有黄色、紫色、蓝色三种,因此只需建立三种颜色的矢量文件,标刻时根据标刻颜色设定好激光参数,同时保持靶材与激光器的相对位置不变,分别执行三个打标文件进行打标操作。

对激光标刻完成的彩色二维条码进行质量评估,质量评估方法参考 ISO/IEC 15426-2 中规定的网格不一致、轴向不一致等各参数的允许误差及一致性校准板等要求。图 3 给出了激光标刻彩色二维条码样本示例,条码实际边长约为 17 mm。从图 3 可以看出,图 3(a)的网格一致性好,颜色对比度大,各模块之间边界分明,质量较好;图 3(b)的网格一致性好,颜色对比度大,但出现部分模块边界混合现象。

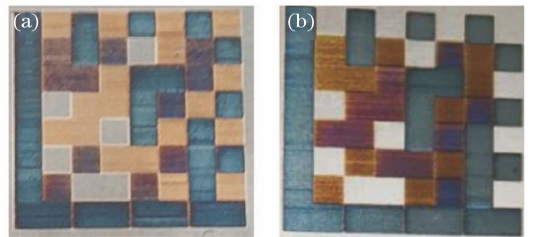


图 3 彩色 Data Matrix 二维条码样本示例

Fig. 3 Example of color Data Matrix two-dimensional barcode samples

### 3 彩色激光标刻二维条码信息校验

为了进一步验证激光标刻彩色二维条码的可靠

性,采集激光标刻二维条码的图像,进行条码信息校验实验。对于采集到的质量高的二维条码图像,对其进行信息提取,确定条码各颜色模块位置和数目,将信息提取后的彩色 Data Matrix 二维条码四进制信息转化回黑白 Data Matrix 二维条码二进制信息,从而通过译码得出原始数据信息;对于采集到的质量不高的二维条码图像,例如存在模块边界混合、网格不一致等情况的二维条码,需对其进行条码重构,转换为标准的彩色二维条码图像后再进行信息

提取。

### 3.1 条码重构

以图 3(a)所示的二维条码为例,其对应的模块颜色归一化过程如图 4 所示。获取的原始条码图像如图 4(a)所示,倾斜、畸变校正后在图像上生成如图 4(b)所示的  $8 \times 8$  网格,对划分好的每个模块取 R、G、B 均值,得到的颜色均值作为其新模块中对应位置的颜色,各模块颜色归一化后得到图 4(c),从图中可以看出,同色模块之间的颜色也存在差异。

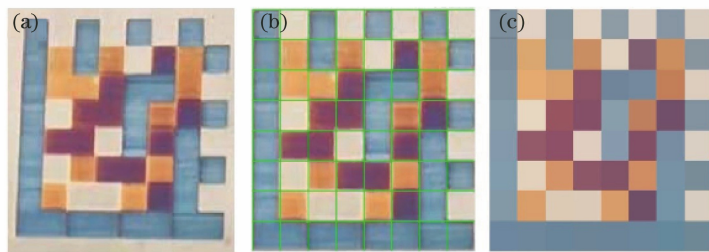


图 4 各模块颜色归一化过程。(a)获取的彩色条码图像;(b)划分好的校正图像;(c)各模块颜色统一后的图像  
Fig. 4 Color normalization process of each module. (a) Color barcode image; (b) division of the corrected image; (c) image after color unification of each module

为了归一化同种颜色,选择  $k$ -means 算法<sup>[14-15]</sup>进行颜色聚类。以欧氏距离作为相似度量标准,使用  $k$ -means 算法将所有模块的 RGB 值向量分为四类,分别对应本次实验中采用的黄、紫、蓝及钛合金基色,相同类别的向量彼此之间有很小的欧氏距离,并且与一个质心相关联,这个质心即表示类别的“中点”,属于相应类别的 RGB 值的均值<sup>[16]</sup>,颜色聚类的质心及相应颜色如表 3 所示。

表 3 颜色聚类的质心及相应颜色

Table 3 Centriods and corresponding colors of color clustering

Category	Centriod	Color
Base color	(226, 211, 190)	
Blue	(123, 142, 164)	
Purple	(134, 80, 107)	
Yellow	(217, 153, 96)	

各颜色模块重新排序好的图像如图 5 所示,重构后的条码图像为网格一致性好,轴向一致性好,颜色对比度大且各模块之间边界分明的标准图像。

### 3.2 信息提取

彩色二维条码图像的信息矩阵提取是确定条码各颜色模块位置和数目的关键,提取过程如图 6 所

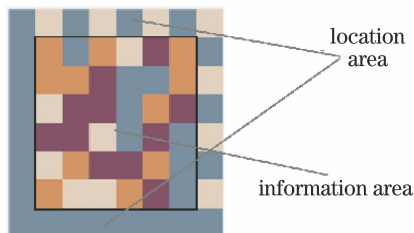


图 5 条码重构后的 4 色 Data Matrix 二维条码  
Fig. 5 4 colors Data Matrix two-dimensional barcode after barcode reconstruction

示。彩色图像的基本模型有 HSI 和 RGB 两种颜色空间<sup>[17]</sup>,本文选择基于 RGB 通道,利用各颜色通道差不同<sup>[18]</sup>的特点进行图像分割,算法原理如图 7 所示,提取效果如图 6(b)~(d)所示,可以看出,该算法准确分割出了信息区的颜色区域;在各颜色区域二值化的图像上生成  $6 \times 6$  网格,进行形态学图像处理并去除噪点后的图像如图 6(e)~(g)所示,已准确定位出各颜色区域的模块位置和数目;按照“白色模块为 1,黑色模块为 0”的规则,得到二进制数据矩阵  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ ,分别乘以相应系数 1、2、3(由相应颜色确定),相加后得到彩色条码的信息矩阵。

分析实验结果,运用上述方法得到的信息矩阵完全正确,能正确地转化为原 Data Matrix 二维条码。因此,本文所研究的彩色 Data Matrix 二维条码是可靠的,在工业直接零件标识领域具有技术可行性,可进行推广应用。

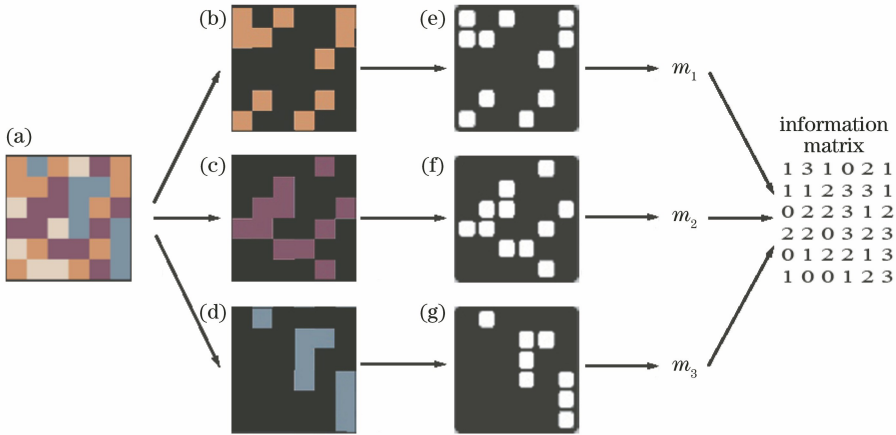


图 6 彩色二维条码的信息矩阵提取过程。(a)彩色二维条码的信息区;(b)~(d)各颜色区域;(e)~(g)各颜色模块的位置和数目

Fig. 6 Information matrix extraction of color two-dimensional barcode. (a) Information area of color two-dimensional barcode; (b)-(d) areas of each color; (e)-(g) locations and numbers of each color module

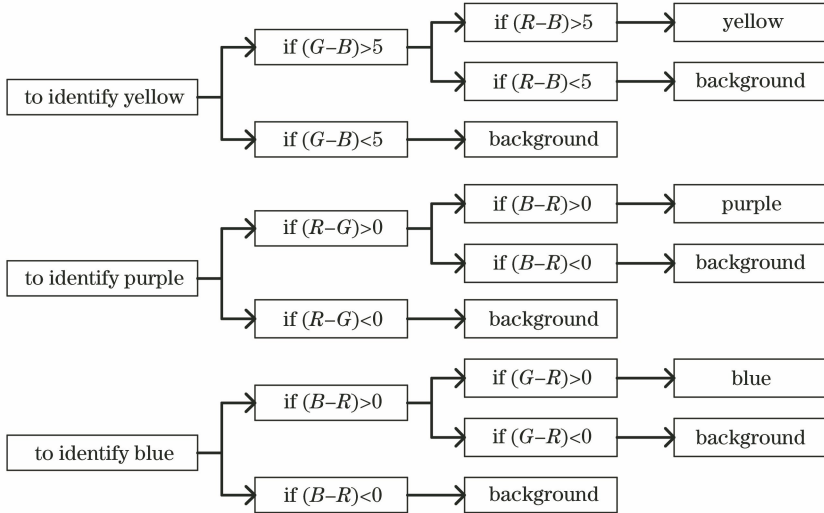


图 7 彩色二维条码图像分割过程

Fig. 7 Segmentation process of color two-dimensional barcode image

## 4 结 论

本文为了提高直接零件标识的信息存储密度,在 Data Matrix 二维条码的基础上,设计了一种基于彩色二维条码的直接零件标识。选择纳秒激光标刻设备对钛合金材料进行标刻实验,成功实现彩色二维条码直接零件标识的激光标刻。为了进一步验证条码的可靠性,采集激光标刻二维条码的图像并校验条码信息。校验结果表明,所提取的信息与原始信息一致,证明激光标刻彩色直接零件标识技术是可行的,可以在工业直接零件标识领域推广应用。

## 参 考 文 献

[1] Jia H G, Yuan Y S, Liu Z. Design and implementation of colorful two-dimensional barcode for Chinese character with high compression ratio[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2010, 38(5): 561-565.  
 贾华国, 袁远松, 刘志. 一种面向汉字的高压缩比彩色二维条码的设计与实现[J]. 浙江工业大学学报, 2010, 38(5): 561-565.

[2] Querini M, Grillo A, Lentini A. 2D color barcodes for mobile phones [J]. International Journal of Computer Science and Applications, 2011, 8(1): 155.

- [3] Li C H. Study on the color two-dimension barcode based on image processing [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2009.  
李朝辉. 基于图像处理的彩色二维条码的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2009.
- [4] Liu T, Zhao J, Liu L Z. Encoding method of matrix color two-dimensional bar code: 110149813A [P]. 2008-03-26.  
刘铁, 赵静, 刘利章. 一种矩阵式彩色二维条形码的编码方法: 110149813A [P]. 2008-03-26.
- [5] Zheng H R, Yuan S Y, Zhao X M. Color two-dimensional bar code with high compression ratio Chinese character encoding capability and its encoding and decoding method: 101515335A [P]. 2009-08-26.  
郑河荣, 袁松远, 赵小敏. 具有高压缩比汉字编码能力的彩色二维条码及其编解码方法: 101515335A [P]. 2009-08-26.
- [6] Huang J, Qian W M, Xiong C F. Method and system for generating color bar code, and method and system for analyzing color bar code: 102243712A [P]. 2011-11-16.  
黄杰, 钱卫民, 熊超凡. 彩色条码的生成方法及系统、彩色条码的解析方法及系统: 102243712A [P]. 2011-11-16.
- [7] Xu M Y. Design and implementation of color multi-dimensional code application system based on biometric [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.  
徐铭阳. 基于生物特征的彩色多维码应用系统设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [8] Guan T. Design and research on colorized data matrix barcode[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.  
关涛. 彩色 Data Matrix 条码的设计以及若干问题的研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [9] Akman E, Cerkezoglu E. Compositional and micro-scratch analyses of laser induced colored surface of titanium [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 84: 37-43.
- [10] Adams D P, Murphy R D, Saiz D J, et al. Nanosecond pulsed laser irradiation of titanium: Oxide growth and effects on underlying metal [J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 248: 38-45.
- [11] Liu Z M, Zhang Q M, Guo L, et al. Influence of laser process parameters on color obtained by marking[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0403011.  
刘忠民, 张庆茂, 郭亮, 等. 激光工艺参数对打标彩色效果的影响 [J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403011.
- [12] Li X S, He W P, Lei L, et al. Process and optimal parameter domain of laser marking two-dimensioncode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7):0703006.  
李夏霜, 何卫平, 雷蕾, 等. 激光标刻二维码工艺及最优参数域研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0703006.
- [13] Qiu H D, Lu C H, Xiao R J. Laser parameters influence in direct-part marking barcodes on aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(8): 0803006.  
邱化冬, 路长厚, 肖如镜. 激光参量对铝合金直接标识条码的影响 [J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0803006.
- [14] Kanungo T, Mount D M, Netanyahu N S, et al. An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 881-892.
- [15] Velmurugan T. Performance based analysis between k-means and fuzzy C-means clustering algorithms for connection oriented telecommunication data [J]. Applied Soft Computing, 2014, 19: 134-146.
- [16] van der Merwe D W, Engelbrecht A P. Data clustering using particle swarm optimization [C] // The 2003 Congress on Evolutionary Computation, 2003. CEC '03., Canberra, ACT, Australia. IEEE, 2003: 215.
- [17] Nor Hazlyna H, Mashor M Y, Mokhtar N R, et al. Comparison of acute leukemia image segmentation using HSI and RGB color space [C] // 10th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA 2010), May 10-13, 2010. Kuala Lumpur, Malaysia. IEEE, 2010: 749.
- [18] Feng Y, Ren G, He K, et al. RGB color channel variation based segmentation of crop leaf lesion [C] // IEEE Conference on Industrial Electronics & Applications. IEEE, 2015.