

文章编号 1004-924X(2015)增-0540-06

用于静脉增强显示的图像融合算法

邸 思^{1,2}, 金 建^{1*}, 陈贤帅¹

(1. 广州中国科学院 先进技术研究所, 广东 广州 511458;

2. 深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055)

摘要: 现有的静脉显示系统通常采用单纯的近红外图像凸显静脉分布, 而这会丢失人体皮肤的真实色彩和细节特征。采用可见光和近红外双波段成像方式获取原始图像, 并对人手部的近红外图像和彩色图像进行融合, 可以提高显示效果。本文提出了一种结合直方图最值映射、主成分分析和双边滤波等技术的新的图像融合算法。应用该算法进行了融合测试, 结果表明融合后的图像既能清晰显示静脉分布信息, 又能基本保持背景部分的颜色与细节特征, 显示效果优于其他几种典型的融合算法。计算显示, 本算法与原始彩色图像的平均相关系数、平均梯度、平均光谱失真分别为 0.843 1, 1.730, 8.642 9, 这些结果均好于其他几种对比算法。实验显示, 本文提出的融合算法在人体静脉显示方面具有重要的应用价值。

关键词: 静脉显示; 图像融合; 主成分分析; 直方图映射; 双边滤波

中图分类号: TP391.4; R543 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0540

Image fusion algorithm for vein enhance display

DI Si^{1,2}, JIN Jian^{1*}, CHEN Xian-shuai¹

(1. *Guangzhou Institute of Advanced Technology,*

Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China;

2. *Shenzhen Institute of Advanced Technology, Shenzhen 518055, China)*

** Corresponding author, E-mail: jian.jin@giat.ac.cn*

Abstract: The existing subcutaneous vein display system usually uses a near infrared image to outstand vein distribution. However, it may loss the true color and detail feature of human skin. To solve the problem, a probable method is proposed to capture the infrared image and color image at the same time and to fuse the two images. This paper proposes a new image fusion algorithm related to the best mapping of histogram, Principal Component Analysis (PCA) and image bilateral filtering. The fusion experiments are performed by proposed method, and the final fusion image shows that it can display the vein distribution clearly and keep the epidermis color and detail features unchanged. Through the calculation, the average correlation coefficient, average gradient and the average spectral distortion to original color image are 0.8431, 1.730 and 8.6429 respectively. The results show that the proposed fusion algorithm is better than several other algorithms. It concludes that the proposed algorithm has

收稿日期: 2015-04-16; 修订日期: 2015-05-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61204125); 广东省自然科学基金资助项目 (No. 2014A030313689); 深圳市基础研究基金资助项目 (No. JCYJ20140417113430660)

an important application value in the field of vein display of the human body.

Key words: vein display; image fusion; principal component analysis; histogram mapping; bilateral filter

1 引言

静脉分布图像的获取与处理在个体识别和医学诊疗等领域具有重要的应用价值,已成为生物医学成像领域的重要研究课题之一。例如,利用人体手指或手掌静脉分布的差异,可通过提取分布特征实现个体辨识^[1-2];借助静脉显示设备进行静脉穿刺,则能够显著地提高穿刺成功率^[3-4],然而在可见光波段往往难以获得完整的静脉分布,人们通常利用血红蛋白对近红外光的强吸收特性,通过近红外成像获取清晰的静脉分布图。此时的静脉分布近似黑白图像,丢失了人体皮肤的正常色彩,在实际诊疗过程中会给医生带来不真实感。因此,在保留真实皮肤色彩的前提下凸显静脉分布成为人们的新目标。一种可能的方法是从近红外图像中提取静脉分布^[2],而后将其叠加在可见光图像中。尽管这种方法可以通过增强多光谱图像对比度提高特征提取的准确性^[5],但在静脉过细或者成像不清晰时静脉分布的提取效果依然不理想。

将包含静脉分布信息的近红外图像与包含正常背景肤色的彩色图像进行融合是解决上述问题的有效途径。图像融合技术能够兼顾两幅图像所包含的不同特征,这在保留正常背景肤色的同时,为凸显静脉分布提供了便利。一种简单的图像融合算法是将自适应的 IHS(Intensity-Hue-Saturation)变换和色彩正规化变换相结合^[6]。该方法的思想是采用加权平均或比值法把不同图像融合在一起,其计算过程简单但融合图像会出现明显的失真或对比度信息损失。近年来双边滤波技术也被引入到图像融合中,许多学者对其进行了深入研究。这类方法的思想是利用双边滤波在保留图像边缘的前提下有效地增强图像^[7-9]。Bennett 等人利用双边滤波把彩色图像和红外图像融合起来,从而得到了信噪比高、图像细节丰富的彩色图像^[7]。但该方法的不足之处在于人为设计参数过多导致处理时间过长。吴川等人进一步简化了融合算法中的核函数,通过减少设计参数,不仅使图

像细节和对比度得到了增强,处理速度也大大提高^[9]。N. H. Kaplan 等人则提出了一种新的基于 IHS 变换和多级双边滤波的融合方法,进一步降低了融合图像的光谱扭曲程度^[8]。

在此基础上,本文提出了一种新的结合主成份分析(PCA)、直方图映射和双边滤波的图像融合算法。融合后的图像可同时实现凸显静脉分布与保持背景肤色。

2 图像融合算法设计

2.1 近红外图像与 RGB 彩色图像融合流程

本文提出的图像融合算法结合了直方图映射、PCA 变换和双边滤波,是一种新的图像融合方法。其核心思想是将图像转换到 IHS 颜色空间,对近红外与 RGB 彩色图像的亮度分量进行匹配处理,本文称之为直方图最值映射;再通过 PCA 变换分离彩色图像所包含的色彩成分信息并进行残差加权增强;最后,对上述处理结果进行双边滤波融合。这样在保持原近红外图像纹理细节的同时又能保持彩色图像的色彩分布。该图像融合算法具体流程见图 1。

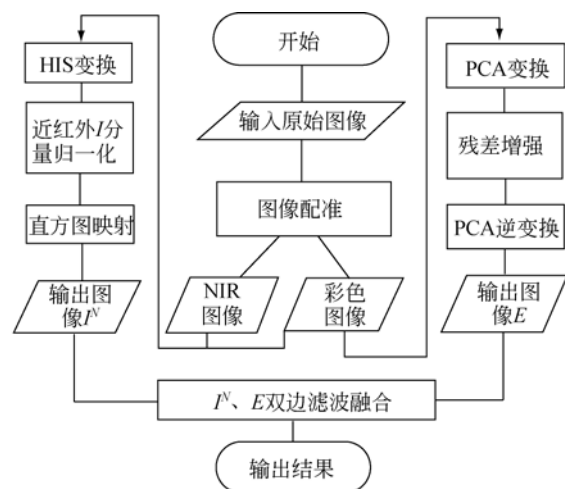


图 1 图像融合流程图

Fig. 1 Flowchart of image fusion algorithm

第一,输入近红外图像和 RGB 彩色图像,将图像分割对齐,得到两幅大小一致,成像物体所在位置相对应的图像;第二,将近红外与彩色图像进行 IHS 变换,获得亮度分量 I ,再对近红外图像的亮度分量进行直方图最值映射,使其变化范围与彩色图像的亮度分量一致,输出处理后的亮度分量图像 I^N 。第三,对彩色图像进行 PCA 变换,对变换后的色彩分量进行差异化加权增强并进行 PCA 逆变换得到输出图像 E 。最后,对 I^N , E 图像进行双边滤波融合,得到最终结果。

2.2 近红外与彩色图像直方图最值映射

由于近红外图像与彩色图像的拍摄设备和照明方面存在差异,两幅图像经过 IHS 变换后,对应图像的亮度分量 I 的统计直方图存在较大差异。在后续的融合过程中需要将处理后的近红外图像亮度分量替代彩色图像的亮度分量,若近红外图像与对应彩色图像的亮度分量极值相差很大,势必会导致融合结果在亮度方面与原彩色图像存在较大差异。因此,本文提出一种直方图最值映射方法来解决此问题,具体流程如下:

1)对近红外图像亮度分量进行最大-最小归一化。其表达式为^[10]:

$$pix'_{(x,y)} = \frac{pix_{(x,y)} - pix_{\min}}{pix_{\max} - pix_{\min}}, \quad (1)$$

式中: $pix_{(x,y)}$ 为各分量的原始像素值, $pix'_{(x,y)}$ 为处理后像素值, pix_{\max} 和 pix_{\min} 是亮度分量的最大值和最小值。

2)统计彩色图像亮度分量的最大值与最小值分别称为 pix_{\max}^R 和 pix_{\min}^R 。

3)使近红外图像与彩色图像亮度分量的极值对应。其表达式为:

$$pix_{(x,y)}^{\text{fusion}} = pix_{\min}^R + pix'_{(x,y)} \times (pix_{\max}^R - pix_{\min}^R). \quad (2)$$

经过上述处理,近红外图像与彩色图像亮度分量的直方图统计将在相同的范围内变化。该方法能有效解决由于设备和照明条件的不同所导致的融合后图像与原彩色图像在亮度上存在较大差异的问题。

2.3 彩色图像 PCA 残差增强

PCA 变换可得到三个分量,第一个分量为无色信号,代表亮度信息,其余两个分量则代表色彩

信息^[11]。PCA 变换为通道间提供了良好的正交性。对 2 个色彩度分量适当加权能有效改善融合图像的色彩分布^[12]。

首先将三维彩色图像矩阵 $\mathbf{x}_{[A,B,n]}$ 转换为二维矩阵 $\mathbf{X}_{[m,n]}$ 。其中 A, B 为彩色图像的像素长度和宽度,则 $m = A \times B$, $n = 3$ 。则 \mathbf{X} 可表示为:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}^{(1)} \mathbf{x}^{(2)} \mathbf{x}^{(3)} \dots \mathbf{x}^{(m)}]^T, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{x}^{(i)}$ ($i = 1, \dots, m$) 是列向量, \mathbf{X} 是 $m \times n$ 矩阵。其协方差矩阵可由下式获得:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} = \left[\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (\mathbf{x}^{(k)} - \boldsymbol{\mu}_k) (\mathbf{x}^{(k)} - \boldsymbol{\mu}_k)^T \right]. \quad (4)$$

$$\text{这里 } \boldsymbol{\mu}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i^{(k)}.$$

进而计算协方差矩阵 $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ 的特征值和对应的特征向量,并记为 $\{\mathbf{q}^{(j)}, \gamma_j\}_{j=1}^3$, 其中 γ 为 $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ 的秩, $\mathbf{q}^{(j)}$ 为对应的特征向量。那么,变换矩阵可表示为 $\mathbf{Q} = [\mathbf{q}^{(1)} \mathbf{q}^{(2)} \mathbf{q}^{(3)}]$ 且 $\mathbf{q}^{(1)} > \mathbf{q}^{(2)} > \mathbf{q}^{(3)}$ 。对于每个 $\mathbf{x}^{(k)}$, 有:

$$\mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{Q}^T \mathbf{x}^{(k)}. \quad (5)$$

由 $\mathbf{Y} = [\mathbf{y}^{(1)} \mathbf{y}^{(2)} \mathbf{y}^{(3)}]$ 构成投影矩阵,这里 \mathbf{Y} 是 $n \times m$ 矩阵。对彩色图像的色彩分量残差进行加权增强,被增强的 k 通道图像信号 $\mathbf{y}_e^{(k)}$ 表示为^[13]:

$$\mathbf{y}_e^{(k)} = \mathbf{W}(\mathbf{y}^{(k)} - \bar{\mathbf{y}}) + \mathbf{y}^{(k)}. \quad (6)$$

\mathbf{W} 是 $m \times m$ 矩阵, $\bar{\mathbf{y}}$ 是 $\mathbf{y}^{(k)}$ 的均值。矩阵 \mathbf{W} 决定被增强图像的结果。 \mathbf{W} 的第 p 行、第 q 列元素为:

$$[\mathbf{W}]_{pq} = \begin{cases} \partial, & p = q \text{ and } \mathbf{y}^{(k)} > \bar{\mathbf{y}} \\ 0 & \text{others} \end{cases}. \quad (7)$$

∂ 的确定过程如下:首先任意选取一个值(通常在 1-2 之间)作为初始值,进行图像融合获取融合结果;然后对初始融合图像和原始的 RGB 彩色图像同时进行 PCA 变换;接着计算 PCA 变换后两个分量的比值,并取其平均,从而确定出最终的 ∂ 。上述过程实现了彩色图像中色彩分量的增强,且比重较大的主成分得到了保持。对增强后的投影矩阵 \mathbf{Y} 进行 PCA 逆变换从而得到图像 E 。由于双边滤波融合算法具有良好的边缘保持特性,能把图像 I^N 中的纹理和边缘信息抽取出来,

因此,下一步将采用双边滤波融合算法处理图像 I^N 后再和图像 E 进行融合,从而得到一幅静脉分布清晰的图像。

2.4 图像 I^N 与图像 E 双边滤波融合

本文采用的双边滤波融合算法的具体流程为:首先采用快速双边滤波算法对输出的亮度分量 I^N 进行双边滤波,输出 I_{BL}^N 。

接着,用图像 I^N 减去输出的 I_{BL}^N ,从而获得图像 I_{DT} ,其表达式为:

$$I_{DT} = I^N - I_{BL}^N. \quad (8)$$

显然,图像 I_{DT} 蕴含着大量的细节信息,故称它为细节图像。将图像 I_{DT} 叠加到 I^N 上,即可得到融合后的亮度分量:

$$I_{fusion} = I^N + I_{DT}. \quad (9)$$

最后,将该亮度分量和图像 E 的颜色信息重新组合即可得到融合后的彩色图像。采用上述方法能够把包含清晰静脉分布的近红外图像中的纹理、边缘信息抽取出来,并通过上述融合算法作用于彩色图像中,使处理后的图像质量清晰、静脉分布明显并且表皮原色得到良好保持。

3 实验设计与结果分析

本文以人手部作为成像目标,针对手部静脉进行融合算法验证。在实验中,使用 Acutance UC1000 彩色工业相机对目标物成像,其分辨率为 1 000 万像素。获取图像的照明条件为 D65 灯和中心波长为 850nm 的 LED 灯。该相机外加近红外(700 nm-)截止滤光片可获取彩色 RGB 图像、外加可见光截止(400 nm~700 nm)滤光片可获取近红外(NIR)图像。

为了评价本文算法的融合效果,同时采用 IHS 融合、高通滤波融合、快速双边滤波^[9] 3 种典型算法进行图像融合实验,并引入相关系数、平均梯度和平均光谱失真 3 个评价参数进行量化对比。

(1) 相关系数

原始图像和融合图像之间的相关系数表征两幅图像间的相似度,它应该尽可能的接近 1。相关系数 ρ 为:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (M(i,j) - \bar{M}(i,j))(F(i,j) - \bar{F}(i,j))}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (M(i,j) - \bar{M}(i,j))^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (F(i,j) - \bar{F}(i,j))^2}}. \quad (11)$$

式中 $M(i,j)$, $F(i,j)$ 分别是原始图像和融合图像在某一波段的像素值,相应地, $\bar{m}(i,j)$, $\bar{F}(i,j)$ 分别是 $M(i,j)$ 和 $F(i,j)$ 的均值, M 和 N 分别是图像的宽和高。

(2) 平均梯度

平均梯度能精确地反映图像的清晰度。通常,平均梯度越大表明图像越清晰。平均梯度 $\nabla \bar{G}$ 为:

$$\nabla \bar{G} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\Delta x f^2(x,y) + \Delta y f^2(x,y)}, \quad (12)$$

式中 $\Delta x f(x,y)$ 和 $\Delta y f(x,y)$ 分别表示图像各波段在 x 和 y 方向的差分。

(3) 平均光谱失真

平均光谱失真能够准确地描述原始图像和融

合图像间色彩上的差异。第 K 波段的光谱失真定义如下:

$$D^K = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j |V_{i,j}^k - V'_{i,j}^k|, \quad (13)$$

式中: $V_{i,j}^k$ 和 $V'_{i,j}^k$ 分别是彩色图像和融合图像在第 K 波段 (i,j) 位置的像素值。光谱失真是由多波段的合成图像来表达,本文使用平均光谱失真 D 来表述。 D 越大则失真越大。

采用前文提到的工业相机拍摄人体手背,获取的可见光图像和近红外图像分别如图 2(a) 和 2(b) 所示。

从图 2(a) 可以看出可见光图像的静脉分布不明显,而近红外图像(图 2(b)) 则能清楚地显示手背静脉分布,但其显示效果类似于黑白图像。图 2(c)~2(e) 分别显示了高斯滤波图像融合、IHS 图像融合和文献[9] 所提出的快速双边滤波图像融合算法所得到的处理效果。从图中可以看

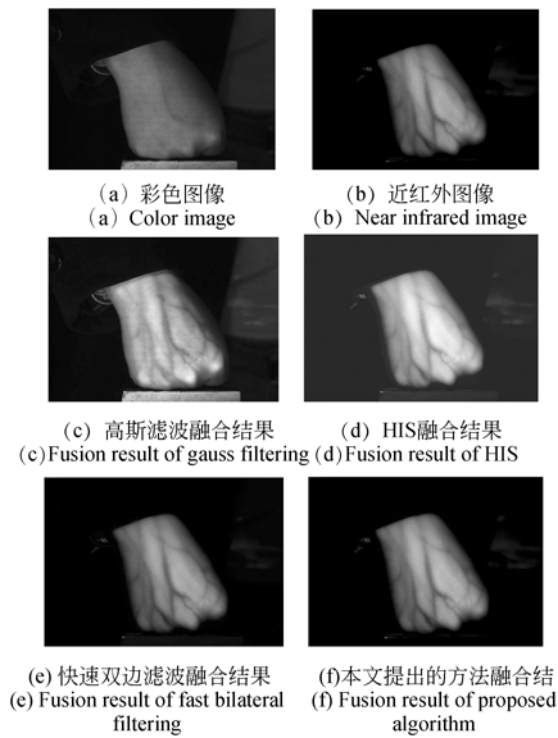


图 2 使用几种融合算法得到的效果图像
Fig. 2 Fusion results of several fusion methods

出,高斯滤波图像融合虽然很好地保留了图像的细节,但是某些细节被夸大且背景肤色有明显失真。IHS 图像融合保留了静脉分布信息但背景肤色过亮,与图 2(a)相比存在较大差距。而快速双边滤波图像融合能够很好地保留静脉分布信息,但背景肤色依然失真明显。图 2(f)是本文方法得到的融合结果(这里 $\rho = 1.6$)。可以看出在静脉分布细节得到凸显的同时,背景肤色最接近于实际色彩,达到了预期的图像融合目标。

表 1 列出了采用 4 种不同算法获得的融合结果,本算法的平均相关系数、平均梯度、平均光谱失真分别为 0.8431、1.730、8.6429。从表中数据可以看出,与其他几种方法相比,本文方法的上述

3 个评价参数都最优。

表 1 几种融合算法评价结果

Tab. 1 Estimation results of several fusion algorithms

图像 IMAGE	波段 BAND	相关系数 C. C	平均梯度 A. G	平均光谱 扭曲 A. D
源彩色图像	1	1.000 0	2.491 5	—
	2	1.000 0	2.600 4	
	3	1.000 0	2.609 4	
高斯滤波融合图像	1	0.680 3	0.833 3	19.034 7
	2	0.679 3	0.880 3	
	3	0.664 4	0.787 7	
IHS 融合图像	1	0.772 0	1.055 1	35.626 7
	2	0.765 4	1.021 0	
	3	0.638 6	0.994 3	
双边滤波融合图像	1	0.780 1	0.755 7	18.012 7
	2	0.740 0	0.759 9	
	3	0.646 4	0.710 2	
本文方法融合图像	1	0.877 1	1.782 9	8.642 9
	2	0.877 4	1.723 5	
	3	0.774 8	1.684 7	

4 结 论

为了在保持背景真实色彩的前提下,获取清晰准确的静脉分布图像,本文提出了一种结合直方图最值映射、PCA 变换和快速双边滤波的算法对人体手部的 RGB 彩色图像和近红外图像进行融合。融合结果表明,该算法能够获得清晰的静脉分布,且最大限度地保证了融合后的图像和原彩色图像背景肤色的一致性。通过计算,本算法与原始彩色图像的平均相关系数、平均梯度、平均光谱失真分别为 0.8431、1.730、8.6429。相比其他几种典型的图像融合算法,本算法在融合效果上更具优势。因此,本文提出的融合算法在静脉显示方面将具有重要的应用价值。

参考文献:

[1] SHARMA S, BHUSHAN M S, KAUR M J. Improved human identification using finger vein images [J]. *IJCSCMC*, 2014, 3(1):262 - 271.
[2] LEE J C, CHANG C P, CHEN W K. Palm vein recognition based on directional empirical mode de-

composition[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53 (4): 043102.
[3] DAI X B, ZHOU Y, HU X M. A fast vein display device based on the camera-projector system [J]. *2013 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, 2013, 23:146-149.
[4] CUPER N J, de GRAAFF J C, VERDAASDONK

- R M, *et al.*. Near-infrared imaging in intravenous cannulation in children: a cluster randomized clinical trial [J]. *Pediatrics*, 2013, 131(1): e191-e197.
- [5] WANG F, BEHROOZ A, MORRIS M, *et al.*. High-contrast subcutaneous vein detection and localization using multispectral imaging[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2013, 18(5): 050504.
- [6] TU T M, LEE Y C, CHANG C P, *et al.*. Adjustable intensity-hue-saturation and Brovey transform fusion technique for IKONOS/QuickBird imagery [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(11): 116201-116201-10.
- [7] BENNETT E P, MASON J L, MCMILLAN L. Multispectral bilateral video fusion [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(5): 1185-1194.
- [8] KAPLAN N H, ERER I, ELIBOL F. Fusion of multispectral and panchromatic images by combining bilateral filter and IHS transform[C]. 2012 *Proceedings of the 20th European IEEE Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2012: 2501-2505.
- [9] 吴川, 杨冬. 改进的多光谱双边滤波图像融合[J]. *中国图象图形学报*, 2013, 18(9): 1170-1175.
- WU CH, YANG D. Improved multispectral bilateral filter video fusion algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(9): 1170-1175. (in chinese)
- [10] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011, 6: 77-89. GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011, 6: 77-89. (in Chinese)
- [11] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODS R E. Properties and performance of a center/surround retinex[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [12] 冯瑞利, 蔡自兴, 郭璠. 基于 PCA 的可变框架模型 Retinex 图像增强算法[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(1): 395-397. FENG R L, CAI Z X, GUO P. Variation modal Retinex image enhancement algorithm based on PCA[J]. *Application Research of Computation*, 2011, 28(1): 395-397. (in chinese)
- [13] HASHIMOTO N, MURAKAMI Y, BAUTISTA P A, *et al.*. Multispectral image enhancement for effective visualization[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9315-9329.

作者简介:



邸 思(1981—),男,北京人,助理研究员,2007年于北京交通大学获得硕士学位,2011年于中国科学院深圳先进技术研究院获得博士学位,主要研究方向为微细加工技术及微型光机电系统。E-mail: si.di@giat.ac.cn



陈贤帅(1984—),男,广西人,2008年于哈尔滨工业大学获得学士学位、2010年、2012年于香港中文大学分别获得硕士、博士学位,现任广州中国科学院先进技术研究所精密工程研究中心副主任,研究方向为金属成型机床的设计、制造与控制,精密加工技术与设备,数控产品开发,生物医疗器械制造。E-mail: xs.chen@giat.ac.cn



金 建(1987—),男,江西九江人,硕士研究生,研究助理,2009年、2012年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微纳加工技术。E-mail: jian.jin@giat.ac.cn