

文章编号 1004-924X(2013)09-2348-06

彩色图像融合客观评价指标

逢浩辰^{1,2*}, 朱 明¹, 郭立强¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 由于已有的彩色图像融合客观评价指标与人眼视觉感知不符, 提出了基于四元数卷积的无参评价指标用于客观评价彩色图像融合。首先, 以四元数的形式对彩色图像进行建模, 充分考虑彩色图像作为一个整体所具有的颜色信息。然后, 利用四元数值边缘模板和彩色图像进行四元数卷积运算, 获取彩色图像的细节信息, 度量图像的清晰度及所融合得到的有用信息, 并以权重的形式给出。最后, 经过一系列的量化计算给出融合图像的客观评估结果。实验结果表明: 本文所提出的彩色图像融合客观评价方法充分利用了图像中的颜色信息以及人眼较为敏感的细节信息, 评价结果优于传统方法, 并且具有良好的稳定性。用本文方法所得到的评价结果与人类的视觉感知相符, 基本满足彩色图像融合客观评价的要求。

关键词: 彩色图像; 图像融合; 客观评价指标; 四元数卷积

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2348

Objective color image fusion performance index

PANG Hao-chen^{1,2*}, ZHU Ming¹, GUO Li-qiang¹

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
** Corresponding author, E-mail: phc@sina.com*

Abstract: As existing objective evaluation index for color image fusion is inconsistent with the human vision perception, a non-reference index based on quaternion convolution was proposed. First, a color image was modeled in a holistic manner, in which the color information of the color image was considered fully as a whole. Then, the quaternion-valued edge detection template and the color image were used to do a convolution operation and to get the detailed color information. Furthermore, the image definition and useful information from the fusion were measured and they were given by weight modes. Finally, a set of quantitative computations for the fusion images were performed and objective evaluation results were given. The experimental results show that the proposed method can utilize the color information and other detail information obtained by human vision. It works better than the traditional methods, and shows a better stability in the color image fusion evaluation. The evaluation results of proposed method are consistent with the human vision perception, and fulfill the needs of objective color image fusion.

Key words: color image; image fusion; objective evaluation index; quaternion convolution

收稿日期: 2013-05-08; 修订日期: 2013-05-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61203242, No. 60902067); 吉林省重大科技攻关项目 (No. 11ZDGG001)

1 引言

彩色图像融合在工程技术领域有着广泛的应用^[1-4],但是该领域仍有许多问题没有得到很好的解决,很重要的问题之一就是如何定义一个无参考的彩色图像融合客观评价指标。彩色图像融合评价是一个具有挑战性的课题,目前本领域并没有公认的客观评价指标,想要定义一个符合人眼视觉感知的无参客观评价指标是个难点。目前已有的客观评价指标绝大多数是针对灰度图像融合的,关于彩色图像融合评价指标的研究仍处于起步阶段^[5-11]。此外,作者针对彩色图像和红外图像的融合结果提出了基于奇异值分解的客观评价指标。对于源图像都是彩色图像这种情况,该评价指标还是存在一定的问题,其评价结果不能很好地与人眼的视觉感知相符合^[14]。实际上,彩色图像融合客观评价指标是对主观评价结果给出一个量化结果,其结果一定要与人眼对融合图像的视觉感知相符。

在实际的图像融合应用中,人们无法获取标准的参考图像,也就是无法对融合后的彩色图像与标准融合图像进行对比评估,均方根误差和峰值信噪比等一些传统的有参评价指标派不上用场。此外,经过有参评价指标所评估出的结果与人眼的视觉感知不符^[5-6]。目前已有的无参客观评价指标也都存在这样的问题,主要体现在视觉感知上比较好的融合结果,其图像相对清晰,基本没有颜色失真的反而客观评价结果较低;一些视觉感知上有明显的图像模糊及颜色失真的图像,其客观量化结果却较高^[7-11]。上述问题主要是客观评价指标在很多情况下都与主观评价相违背。

由于无法得到标准的融合图像作为参考,对融合图像的视觉感知以及融合图像中包含的后续处理所需的有用信息进行量化就非常重要。本文提出基于四元数卷积的彩色图像融合客观评价指标,以四元数的形式对彩色图像进行建模,充分考虑彩色图像作为一个整体所具有的颜色信息,同时利用四元数值边缘模板和彩色图像进行四元数卷积运算来获取彩色图像

的细节信息,对图像的清晰度及所融合得到的有用信息加以度量,以此来对融合图像进行客观的评估。

2 四元数卷积

2.1 四元数

四元数是复数的推广,是由1个实部和3个虚部构成,即:

$$q = q_r + q_i \cdot i + q_j \cdot j + q_k \cdot k, \quad (1)$$

其中:3个虚部满足如下乘法规则:

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1, \quad (2)$$

$$ij = -ji = k, jk = -kj = i, ki = -ik = j. \quad (3)$$

若四元数 q 的实部为0,称 q 为纯四元数。

四元数的范数为:

$$\|q\| = \sqrt{q_r^2 + q_i^2 + q_j^2 + q_k^2}. \quad (4)$$

对于一幅彩色图像 $f(x, y)$,把它以纯四元数的形式进行表示:

$$f(x, y) = f_R(x, y) \cdot i + f_G(x, y) \cdot j + f_B(x, y) \cdot k. \quad (5)$$

其中: $f_R(x, y)$ 、 $f_G(x, y)$ 和 $f_B(x, y)$ 分别代表彩色图像的R、G和B颜色分量。 x 和 y 分别代表像素所在图像矩阵的行号和列号。这样,一幅彩色图像就可以用四元数矩阵来表示。基于四元数的彩色图像处理就是直接对这个四元数矩阵来处理的,相对于传统的分通道或是变换成灰度图像后再处理的方法而言,四元数方法更能体现出彩色图像的整体性,对彩色信息的保持具有重要的作用。

2.2 四元数卷积

四元数卷积^[12]的定义:

假设 $f(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 都是四元数值平方可积函数,则 $f(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 的四元数卷积由如下公式给出:

$$f(x, y) * h(x, y) = \iint f(x - \tau, y - \eta) h(\tau, \eta) d\tau d\eta. \quad (6)$$

公式(6)所定义的四元数卷积表达式与传统卷积表达式一样,唯一不同的是 $f(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 都是四元数值函数,相应的积分也是四

元数值积分。对于四元数卷积的数值计算,我们可以在四元数傅立叶变换域实现,详见文献[12]。

3 基于四元数卷积的彩色图像融合客观评价指标

本文所构造的无参客观评价指标主要对融合图像的颜色信息和融合图像中包含的后续处理所需的有用信息进行量化,着重体现在要与人眼对融合图像的视觉感知相符合。

上一小节已利用四元数来对彩色图像进行建模,这种彩色图像的表达方式可以最大限度地体现出 R 、 G 和 B 颜色分量作为一个整体所具有的潜在颜色信息,在整个量化过程中对彩色图像的颜色信息能够给出一个比较客观的量化结果。

融合图像是否清晰以及是否把源图像中的有用信息都融合进来需要进一步评估。融合图像中的彩色边缘信息是评估的重要环节。本文提出基于四元数卷积的评估方法,通过四元数值边缘模板和融合图像的四元数卷积运算得到相应的边缘信息,经过一系列的量化计算便可得到相应的评估指标。

本文所构造的客观评价指标由以下几步构成:

步骤一,通过四元数卷积运算来计算原始待融合的彩色图像 A 、 B 以及融合图像 F 的彩色边缘信息。这里, x 轴和 y 轴方向四元数值边缘模板定义如下:

$$S_x(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 3 & 0 & -3 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \mu, \quad (7)$$

$$S_y(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -3 & -1 \end{bmatrix} \cdot \mu, \quad (8)$$

其中: $\mu = i + j + k$ 。

通过计算,可以得到图像 A 在 x 轴和 y 轴方向的边缘信息 $E_A^x(m, n)$ 和 $E_A^y(m, n)$ 。图像 B 及融合图像 F 的边缘信息记为 $E_B^x(m, n)$ 、 $E_B^y(m, n)$ 、 $E_F^x(m, n)$ 和 $E_F^y(m, n)$ 。

步骤二,对于 $E_A^x(m, n)$ 和 $E_A^y(m, n)$,由公式(9)和(10)计算彩色边缘的强度和方向信息:

$$S_A(m, n) = \sqrt{\|E_A^x(m, n)\|^2 + \|E_A^y(m, n)\|^2}, \quad (9)$$

$$\alpha_A(m, n) = \arctan\left(\frac{\|E_A^y(m, n)\|}{\|E_A^x(m, n)\|}\right). \quad (10)$$

通过类似的步骤可以得到图像 B 及融合后的图像 F 的强度和方向信息,记为: $S_B(m, n)$ 、 $\alpha_B(m, n)$ 、 $S_F(m, n)$ 和 $\alpha_F(m, n)$ 。

步骤三,计算融合图像 F 相对于原始图像 A 的相对边缘强度及方向信息,由如下 2 个公式计算得来:

$$S_{AF}(m, n) = \frac{S_F(m, n)}{S_A(m, n) + 0.01}, \quad (11)$$

$$\sigma_{AF}(m, n) = 1 - \frac{\|\alpha_F(m, n) - \alpha_A(m, n)\|}{\pi}. \quad (12)$$

同理,融合图像 F 相对于原始图像 B 的相对边缘强度及方向信息记为 $S_{BF}(m, n)$ 和 $\alpha_{BF}(m, n)$ 。

步骤四,把步骤三得来的相对边缘强度及方向信息带入公式(13)可得到权重 $\omega_{AF}(m, n)$,该权重衡量了源图像 A 有多少有用信息进入到融合图像 F 中。

$$\omega_{AF}(m, n) = P_{AF}^s(m, n)P_{AF}^a(m, n), \quad (13)$$

其中, $P_{AF}^s(m, n)$ 和 $P_{AF}^a(m, n)$ 采用文献[9]中的数学模型,由如下公式计算:

$$P_{AF}^s(m, n) = \frac{0.9994}{1 + e^{-15(S_{AF}(m, n) - 0.5)}}, \quad (14)$$

$$P_{AF}^a(m, n) = \frac{0.9879}{1 + e^{-22(\alpha_{AF}(m, n) - 0.8)}}. \quad (15)$$

类似地,我们可以得到融合图像 F 关于源图像 B 的权重值 $\omega_{BF}(m, n)$ 。

步骤五,利用步骤二所得到的 $S_A(m, n)$ 和 $S_B(m, n)$ 及步骤四所得到的权重 $\omega_{AF}(m, n)$ 和 $S_{BF}(m, n)$,通过公式(16)计算出最终的彩色图像融合客观评价指标:

$$Q =$$

$$\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [\omega_{AF}(m, n) \cdot S_A(m, n) + \omega_{BF}(m, n) \cdot S_B(m, n)]}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S_A(S_A(m, n) + S_B(m, n))]} \quad (16)$$

由公式(16)计算得来的数值结果越大,这里就认为相应图像的融合效果越好。上述步骤的流程图如图 1 所示。

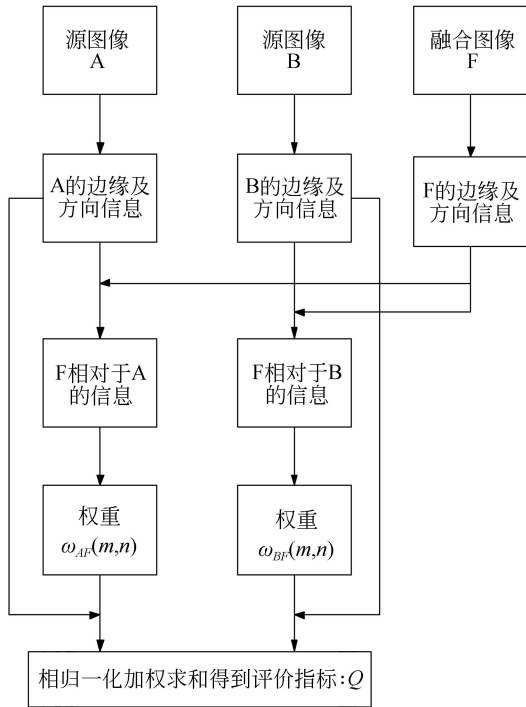


图 1 客观评价指标计算流程图

Fig. 1 Flowchart of computation of objective evaluation index

4 实验与结果分析

本节通过一些经典算法的融合图像来验证作者所提出的基于四元数卷积的彩色图像融合客观评价方法。针对两组待融合的原图像,分别采用均值方法、基于 PCA 的方法和基于小波变换的融合算法得到相应的融合图像。

针对视觉感知明显不同的三幅融合后的彩色图像,采用基于互信息(MI)的客观评价方法^[7-8]、基于相关系数(CC)的评价方法^[11]、基于光谱扭曲度(IDM)的评价方法^[10]、文献[9]中用于灰度图像融合的评价方法(记为 Qabf)和本文所提出的方法进行对比。

在图 2 中(彩图见期刊电子版), (a)和(b)是原始待融合的彩色图像,可以从网站^[13]上下载; (c)、(d)和(e)分别是采用均值方法、基于 PCA 的方法和基于小波变换方法得到的融合图像。对比(c)、(d)和(e)这三幅图像,不难发现均值方法具有一定的颜色失真且有一定的模糊,基于 PCA 的

方法基本没有颜色失真现象,只是背景有些模糊,而基于小波的方法在这三种方法中效果最好。表 1 是对应的客观评价指标评估结果。

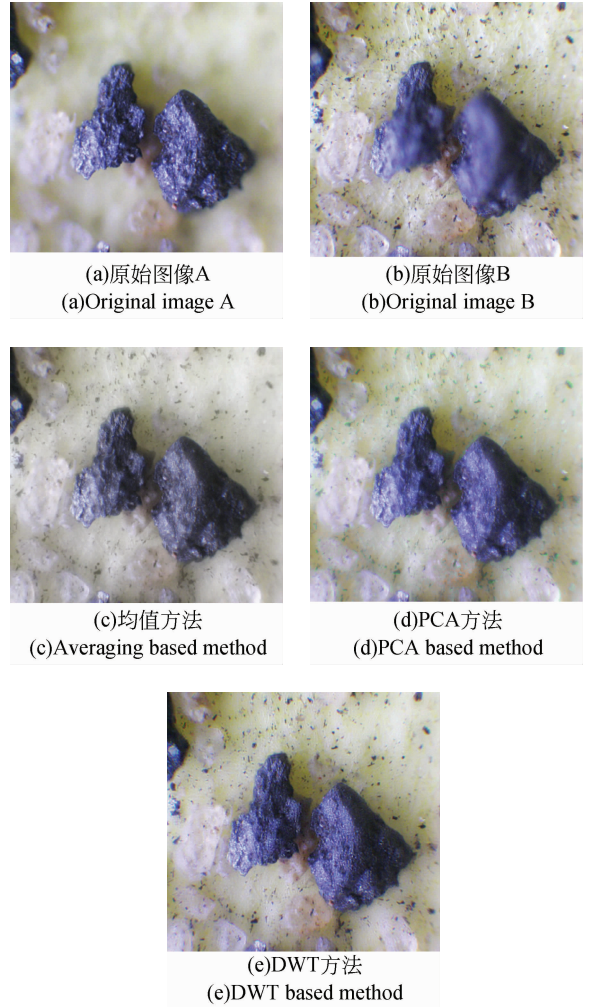


图 2 彩色图像融合实验

Fig. 2 Experiment of color image fusion

表 1 彩色图像融合结果比较

Tab. 1 Comparison of color image fusion algorithms

	图 2(c)	图 2(d)	图 2(e)
MI	12.983 2	13.972 4	13.785 2
CC	5.767 4	5.861 0	5.810 7
IDM	0.465 8	0.372 8	0.411 9
Qabf	0.465 1	0.440 3	0.532 5
本文方法	0.651 9	0.768 0	0.883 4

MI、CC、Qabf 和本文的评价指标的数值越大,表明相应方法的融合效果越好;而 IDM 指标

值越小,表明相应方法的融合效果越好。

从表 1 我们可以看出,MI、CC 和 IDM 三个指标结果认为基于 PCA 的融合算法最好,但这与图 2 中的视觉感知结果相违背。Qabf 指标虽然给出基于小波的融合算法结果最优,但该指标表明均值方法优于 PCA 方法。从图 2(c)和(d)可以看到均值方法有明显的颜色失真。因此,Qabf 指标也不能与人眼的视觉感知相符。相比之下,本文所提出的评价指标给出了令人满意的结果,该指标表明基于小波的方法融合结果最好,而均值方法结果最差。

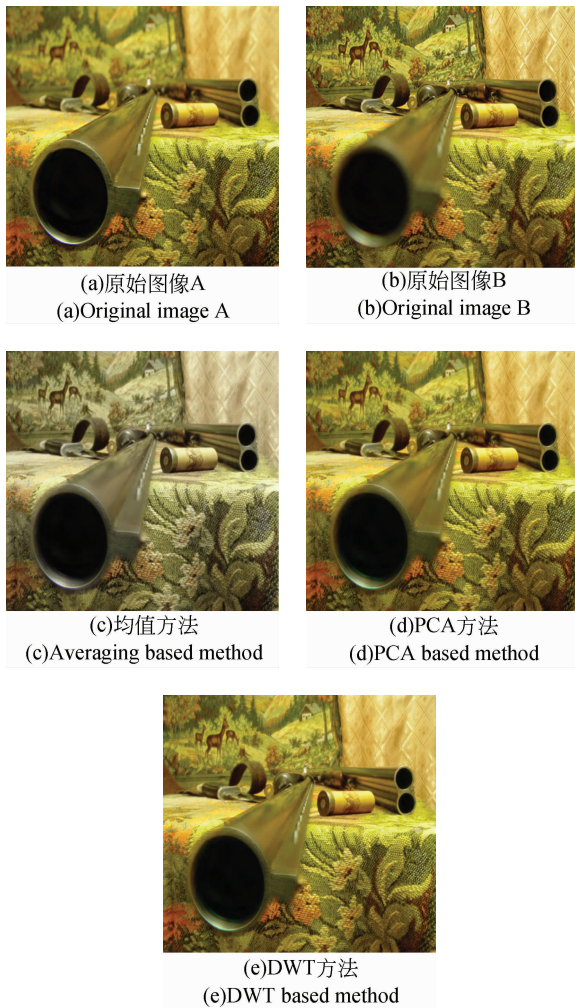


图 3 彩色图像融合实验

Fig. 3 Experiments of color image fusion

图 3 是第二组实验(彩图见期刊电子版),原始图像也是从网站^[13]上下载。从图 3 的第二组实验我们看到,均值方法所得到的融合图像存在颜色失真现象,而且该方法和 PCA 方法都存在模糊效应,总体来讲,PCA 方法优于均值方法。相

比之下,基于小波的方法融合效果最好。表 2 给出了上述 3 种彩色图像融合结果的客观评价。

表 2 彩色图像融合结果比较

Tab. 2 Comparison of color image fusion algorithms	图 2(c)	图 2(d)	图 2(e)
MI	11.378 9	12.181 7	11.123 6
CC	5.647 9	5.795 0	5.695 9
IDM	8.204 1	2.283 0	2.479 3
Qabf	0.565 3	0.559 6	0.606 4
本文方法	0.758 8	0.761 9	0.851 4

从表 2 我们可以看出,MI、CC 和 IDM 3 个指标结果表明基于 PCA 的融合算法最好,但这与图 3 中的视觉感知结果相违背,PCA 融合方法所得到的彩色图像背景存在模糊现象,其结果相对于小波方法要差一些。Qabf 指标同样表明基于小波的融合算法结果最优,但该指标表明均值方法优于 PCA 方法,这也是与视觉感知不符的。相比之下,本文所提出的评价指标结果与主观评价相符,给出了令人满意的结果,该指标表明基于小波的方法融合结果最好,PCA 方法次之,而均值方法结果最差。

上述实验表明,本文所提出的彩色图像融合客观评价方法充分利用了图像中的颜色信息以及人眼较为敏感的细节信息,评价结果优于传统方法。同时,本文所提出的评价指标对两组图像的评价结果一致,这说明算法具有良好的稳定性。

5 结 论

针对已有的彩色图像融合客观评价指标与人眼视觉感知不符这一问题,本文提出了基于四元数卷积的无参客观评价指标。该指标以四元数的形式对彩色图像进行建模,同时利用四元数值边缘模板和彩色图像进行四元数卷积运算来获取彩色图像的细节信息,对图像的颜色信息及清晰度给出量化结果,以此来对融合图像进行客观的评估。实验结果表明:用本文方法所得到的客观评价结果与人眼视觉感知相符,基本满足了彩色图像融合客观评价的要求。

参考文献:

- [1] IGNOTTE M. A multiresolution markovian fusion model for the color visualization of hyperspectral images [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(12): 4236-4247.
- [2] YIN S F. One color contrast enhanced infrared and visible image fusion method [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53: 146-150.
- [3] 高恒振,万建伟,粘永健,等. 组合核函数支持向量机高光谱图像融合分类[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 878-883.
GAO H Z, WANG J W, NIAN Y J, et al.. Fusion classification of hyperspectral image by composite kernels support vector machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 878-883. (in Chinese)
- [4] 王昕. 含噪声图像的多聚焦融合算法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2977-2984.
WANG X. Multi-focus fusion algorithm for noisy images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2977-2984. (in Chinese)
- [5] ZHOU W. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2004, 13(4): 600-612.
- [6] HAMID R S. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms [J]. *IEEE Trans. Image Process*, 2006, 15(11): 3441-3452.
- [7] QU G H, ZANG D L, YAN P F. Information measure for performance of image fusion [J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(7): 313-315.
- [8] HOSSNY M. Comments on "Information measure for performance of image fusion" [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(18): 1066-1067.
- [9] XYDEAS C S, PETROVIC V. Objective image fusion performance measure [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(4): 308-309.
- [10] LI Z. Color transfer based remote sensing image fusion using non-separable wavelet frame transform [J]. *Pattern Recognition Lett.*, 2005, 26(13): 2006-2014.
- [11] HAN S S. The study on image fusion for high spatial resolution remote sensing images. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [C]. Vol. XXXVII. Part B7: 1159-1164.
- [12] PEI S C. Efficient implementation of quaternion Fourier transform, convolution, and correlation by 2-D complex FFT [J]. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2001, 49(11): 2783-2797.
- [13] http://www.heliconsoft.com/focus_samples.html [OL].
- [14] PANG H C. Quaternion based assessment method for color image fusion algorithms [C]. *IEEE International Congress on Image and Signal Processing*, 2010: 2341-2346.

作者简介:



逢浩辰 (1980—),男,山东烟台人,博士研究生,工程师,2003年于吉林大学获得学士学位,2006年于吉林大学获得硕士学位,主要从事图像处理与质量评价等方面的研究。E-mail: phc@sina.com



朱明 (1964—),男,江西南昌人,研究员,博士生导师,1985年于南京航空航天大学获得学士学位,1991年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要从事视频图像处理、自动目标识别技术及成像目标跟踪等方面的研究。E-mail: zhu_mingca@163.com



郭立强 (1982—),男,吉林和龙人,助理研究员,2005年和2008年于延边大学获得学士和硕士学位,2011年于中科院长春光机所获得博士学位,现为中科院长春光机所博士后,主要从事图像处理、机器视觉等方面的研究。E-mail: math_circuit@qq.com