

文章编号 1004-924X(2015)增-0784-07

高斯牛顿法图像配准的工件精确识别

李 博, 陈 燕*, 邹湘军, 刘 念, 蒋志林

(华南农业大学 工程学院 南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:为提高机器视觉系统对工件的识别精度,提出在工件图像匹配时加入高斯牛顿图像配准算法,以使工件的识别精度达到亚像素级。首先,构建模板和目标之间的刚体变换模型,建立模板图像和目标图像的相似度残差项,利用 Sobel 算子对待检测图像的 x 方向和 y 方向分别进行卷积运算得到待检测图像的差分图;然后,利用该差分图计算待检测图像的雅可比矩阵,应用双线性插值法计算模板进行刚性变化后的变换矩阵;最后,运用高斯牛顿法寻找到使变换矩阵和目标区域相似度残差项达到极小值点的亚像素目标位置,从而使工件目标的识别精度达到亚像素级。实验结果表明,该方法对工件的识别精度为 0.1 pixel,角度均差为 0.05° ,满足了高精度识别工件的要求。

关键词:机器视觉;图像配准;高斯牛顿法;工件;精确识别

中图分类号:TP242.6;TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0784

Accurate recognition of work-pieces based on Gauss-Newton image registration

LI Bo, CHEN Yan*, ZOU Xiang-jun, LIU Nian, JIANG Zhi-lin

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment of the Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

* Corresponding author, E-mail: cy123@scau.edu.cn

Abstract: To improve the recognition accuracy of a machine vision system for work-pieces, the Gauss-Newton algorithm was employed to the intelligent robot's machine vision and the vision's recognition accuracy was improved by sub pixel. Firstly, a rigid transformation model between template and target was built and the residual similarity between template and target image was established. Then Sobel algorithm was used for folded operation of the images detected in the x direction and the y direction to get the directional diagram of the images. The Jacobian matrix of the images to be detected was calculated using this directional diagram, as long as the transformation matrix was calculated using Bilinear interpolation after image rigid transformation. Finally, the target location of sub pixel where the residual similarity between template and directional diagram reach the minimum was detected using Gauss-Newton algorithms, and the recognition accuracy was in sub-pixel. Experimental results show that the precision of work-piece recognition is 0.1 pixel, which satisfies the requirement of high accuracy recognition on work-pieces.

Key words: machine vision; image registration; Gauss-Newton algorithm; work piece accuracy recognition

收稿日期:2015-06-02;修订日期:2015-06-20.

基金项目:广东省教育部产学研结合专项资金资助项目(No. 2012B091000167);广州市科技计划资助项目(No. 201510010140);广东省省级科技计划资助项目(No. 2014A020208091;No. 2015A020209120)

1 引言

机器视觉在工业领域主要用于工件识别、工件位置和方向的检测、质量检验等^[1-3]。有许多学者对工件的识别算法进行了研究。林黄耀研究了基于数字图像轮廓特征的工件识别方法,提出了基于连通域的边缘提取方法,利用工件位置、形状等几何特性相结合的方法来识别工件^[4]。该方法由于识别工件时只利用了像素信息,识别精度难达到很高的水平。黄彦等人在尺度不变特征变换(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)特征匹配的工件识别算法中,引入欧氏距离作为图像匹配的相似性度量,解决了工件平移、缩放、旋转等问题^[5]。但受工业环境杂乱背景的影响,提取的特征点很多与目标无关,进而影响匹配精度。黄伟国等人在形状上下文的基础上融合了主成分分析法,对图像特征值进行降维处理之后,将新形成的特征矩阵用于匹配和识别,即抑制了噪声又提高了识别率^[6]。但该算法的识别精度并不适用于高精度加工环境。林玉池等人改进了形态学边缘提取方法,提出多结构元边缘提取算子,可以很好地抑制噪声、保持图形边缘细节,最终还利用模糊综合评判技术对目标进行了有效的识别^[7]。虽然该算法在复杂背景下识别率有所提高,但对复杂背景下的目标的识别精度无法达到亚像素级。

高斯牛顿法利用泰勒级数展开模板图像和待配准图像的灰度值残差平方和进行图像配准,计算迭代步长。有研究指出经过多次迭代,其可使该残差平方和达到极小值。本文对其进行实验验证。

2 算法原理

2.1 ShapeMatch 模板匹配

工件目标在精识别之前,需要对目标进行粗识别。为使粗识别的结果更加接近目标真实位置,本文利用模板匹配方法确定工件目标的粗略位置。ShapeMatch 算法是 Carsten Steger 在 2001 年提出来的,它对非线性光照,复杂背景以及轻微的遮挡不敏感,因此稳定性很强,广泛应用于工业领域^[8]。ShapeMatch 的具体思路如下:利用边缘提取算子提取模板图像边缘点,得到点集

$p_i = (x_i, y_i)$ 。利用 sobel 算子提取这些边缘点的方向向量 $d_i = (t_i, u_i)^T$,同时提取待匹配图像窗口区域相应点的方向向量 $e_{x,y} = (v_{x,y}, w_{x,y})^T$,则模板跟待匹配图像窗口区域相似性得分 s 通过下式计算:

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\langle d_i, e_{x+y_i} \rangle|}{\|d_i\| * \|e_{x+y_i}\|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_i v_{x+y_i} + u_i w_{x+y_i}}{\sqrt{t_i^2 + u_i^2} * \sqrt{v_{x+y_i}^2 + w_{x+y_i}^2}}, \quad (1)$$

式中: n 为模板边缘点的个数, x 为模板边缘点水平方向的位置, y 为模板边缘点垂直方向的位置, x_i 为模板在待检测图像上滑动的 x 方向的距离, y_i 为模板在待检测图像上滑动的 y 方向的距离。

将模板在待匹配图像上滑动得到一系列的得分 s ,把这些得分 s 贮存在一个矩阵 M 中,利用极大值抑制法找到矩阵中的极大值位置,即所求工件的粗略位置。

2.2 图像金字塔加速

由于传统模板匹配速度相当缓慢,本文利用图像金字塔来加速形状匹配。图像金字塔是由 Tanimoto 等人在 1981 年提出来的一种图像集合,该集合通过对原始图像连续采样获得^[9]。其具体原理如下:利用高斯卷积核对第 i 层图像进行卷积,删除所有的偶数行和偶数列,新得到的图像为 $i+1$ 层图像,该图像为第 i 层图像的四分之一。对输入的图像循环执行上述操作,直到到达所需要的第 n 层,即可得到 n 层图像金字塔。

同时建立模板图像和待匹配图像的金字塔模型,在金字塔的最高层利用模板图像对待匹配图像进行形状匹配,将该层的得分极值点位置记录下来;利用该位置的坐标乘以 2 作为下一层的坐标输入,在下一层 3×3 或者 5×5 邻域内继续进行形状匹配并寻找该邻域内的极大值,以此类推,直到金字塔最底层,得到最后结果。模板匹配结果如图 1 所示。

2.3 构建刚体变换模型

配准过程实际上就是通过某种空间变换的模板重新投影到待配准图像上,使模板上的点与待配准图像上与模板同样大小的窗口区域上的点的配准信息一致。本文选定模板和待配准图像之间的空间变换为刚性变换,刚性变换指的是在变换过程中模板图像任意两点之间的距离保持不变^[10]。假设模板图像原坐标为 (x_0, y_0) ,经过刚

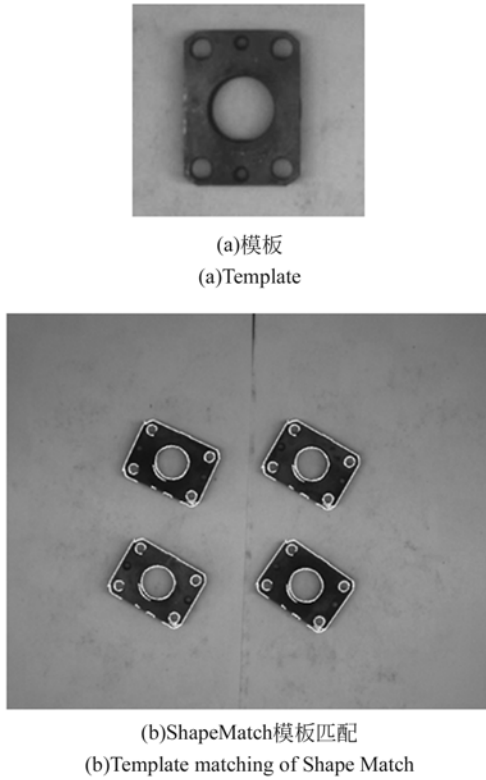


图 1 模板及模板匹配结果
Fig. 1 Template and template matching results

性变换后的坐标为 (x_1, y_1) , 则根据刚性变换公式有:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: t_x 为模板的水平移动距离, t_y 为模板的垂直移动距离, θ 为模板旋转角度。

2.4 双线性插值

模板图像的像素点坐标 $p(x_p, y_p)$ 经过刚性变换之后成为 $p_n(x_n, y_n)$, x_n 和 y_n 不一定是整数型, 这就无法与浮动图像完全对齐, 并进行相应的灰度运算。双线性插值法是解决旋转后图像像素点坐标无法对应到整数点问题的有效方法。其思想是利用插值点周围的 4 个像素点作为加权运算点, 利用它们计算该点的灰度值。该算法是通过两次线性内插获得的, 故称双线性插值^[11]。

其具体原理如下: 插值点 $p_n(x_n, y_n)$ 的位置如图 2 所示, 为计算 p_n 的灰度值, 先在 x 方向进行第一次插值, 计算 x 方向的插值点 s_1, s_2 的灰度值 f_{s1} 和 f_{s2} :

$$f_{s_1} = f_{p_{11}} * \frac{x_2 - x_n}{x_2 - x_1} + f_{p_{21}} * \frac{x_n - x_1}{x_2 - x_1}, \quad (3)$$

$$f_{s_2} = f_{p_{12}} * \frac{x_2 - x_n}{x_2 - x_1} + f_{p_{22}} * \frac{x_n - x_1}{x_2 - x_1}, \quad (4)$$

式中: x_1 为 p_{11} 和 p_{12} 点的横坐标, x_2 为 p_{21} 和 p_{22} 点的横坐标, $f_{p_{11}}$ 为 p_{11} 点的灰度值, $f_{p_{21}}$ 为 p_{21} 点的灰度值, $f_{p_{22}}$ 为 p_{22} 点的灰度值, $f_{p_{12}}$ 为 p_{12} 点的灰度值, x_n 为 p_n 点的横坐标。

再在 y 方向进行第二次插值求得 p_n 点的像素值^[12]:

$$f_n = f_{s_1} * \frac{y_2 - y_n}{y_2 - y_1} + f_{s_2} * \frac{y_n - y_1}{y_2 - y_1}, \quad (5)$$

式中: y_1 为 p_{11} 和 p_{21} 点的纵坐标, y_2 为 p_{12} 和 p_{22} 点的纵坐标, y_n 为 p_n 点的纵坐标。

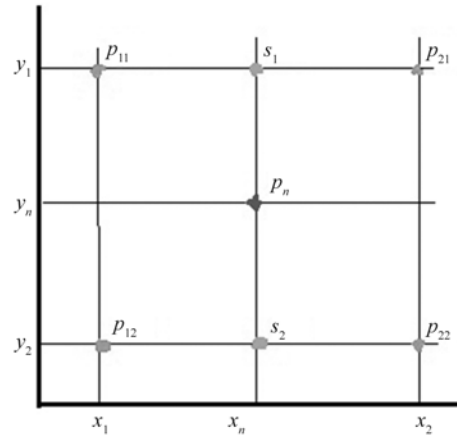


图 2 双线性插值

Fig. 2 Bilinear interpolation

2.5 高斯牛顿法图像配准原理

基于图像灰度值配准的方法直接利用模板图像和待匹配图像的灰度统计信息来计算两幅图像的匹配程度^[13]。首先构造目标函数:

$$F = \sum_{x,y} [T(x, y) - M * I(x, y)]^2 = \sum_{x,y} [T(x, y) - I(\omega(x, y; p(\theta, t_x, t_y)))]^2, \quad (6)$$

式中: x 为模板像素横坐标, y 为模板像素纵坐标, T 为模板灰度值, θ 为模板配准旋转角度, t_x 为模板配准移动的横坐标, t_y 为模板配准移动的纵坐标, p 为刚性变换, ω 为 (x, y) 经过 p 刚性变换后得到点, I 为待配准图像上 ω 的像素值。从式 (2) 可以看出这是一个非线性优化问题。式 (5) 经过一次泰勒展开可得:

$$F(p + \Delta p) = \sum_{x,y} [T(x, y) - I(\omega(x, y; p)) - \frac{\partial I(\omega(x, y; p))}{\partial p} * \Delta p]^2, \quad (7)$$

式中: x 为模板像素横坐标, y 为模板像素纵坐标, T 为模板灰度值, p 为刚性变换, Δp 为 p 的步长, w 为 (x, y) 经过 p 刚性变换后得到的点, I 为待配准图像上 w 的像素值。

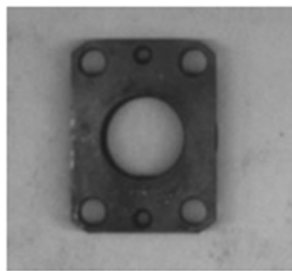
则由此式可计算步长 Δp :

$$\Delta p = \sum_{x,y} [\mathbf{J}^T(P)\mathbf{J}(P)]^{-1} \mathbf{J}^T(P) [T(x,y) - I(w(x,y;p))], \quad (8)$$

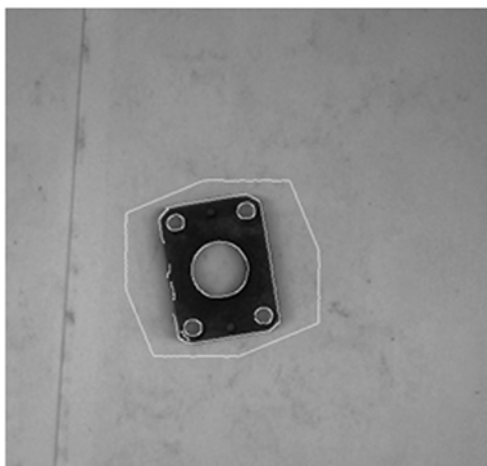
式中: x 为模板像素横坐标, y 为模板像素纵坐标, T 为模板灰度值, p 为刚性变换, Δp 为 p 的步长, w 为 (x, y) 经过 p 刚性变换后得到的点, I 为待配准图像上 w 的像素值, \mathbf{J} 为待配准图像的雅可比矩阵。

高斯牛顿法寻找最优匹配点的过程如下^[14]:

(1) 给定一个初始点 x_0 ; (2) 利用式(7)计算步长 Δp ; (3) 下一次迭代初始值为 $x_1 = x_0 + \Delta p$; (4) 当步长小于迭代误差 e 时, 返回结果, 否则进行下一次迭代。



(a)模板
(a)Template



(b)高斯牛顿法配准
(b)Registration of Gauss-Newton

图 3 图像配准实验结果

Fig. 3 Experimental results of image registration

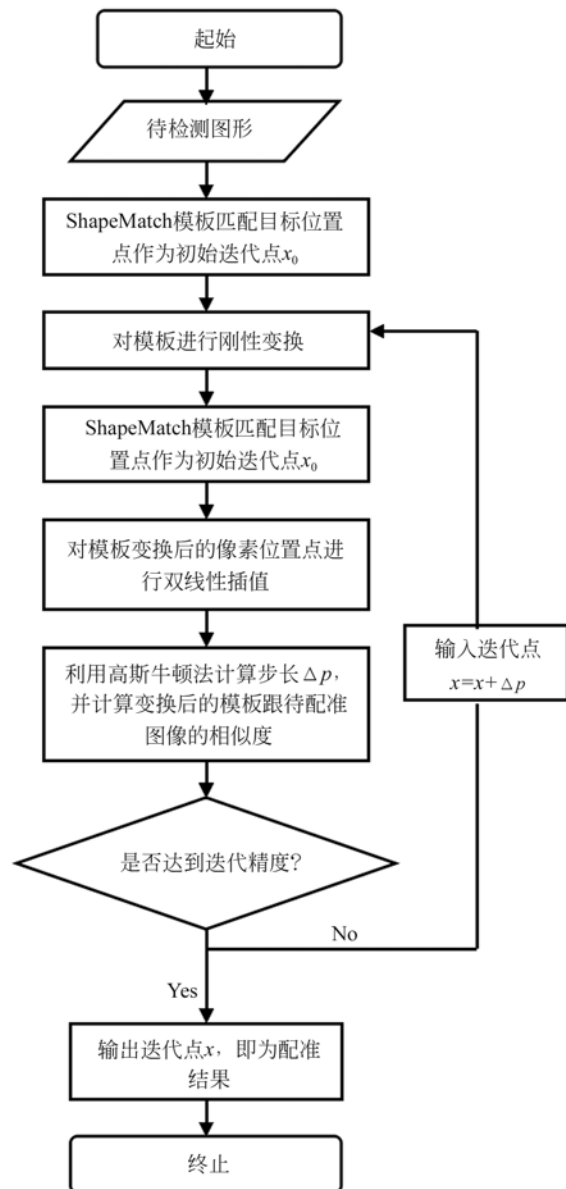


图 4 高斯牛顿法图像配准流程

Fig. 4 Flowchart of Gauss-newton image registration

3 实例验证

3.1 仿真实验

从模拟工业环境的实验平台上采集的 100 幅模板图像中随机抽取 10 幅。实验环境为 Windows 7, 主频为 2.5 GHz, 内存为 2G 的戴尔台式机, 测试软件为 Microsoft visual studio 2008, 链接库为 Opencv2.3.1。利用模板仿真图像对本文算法的进行精度评估。每幅模板图像的平移像

素量为 $[-4, 4]$, 旋转角度量为 $[-25, 25]$, 在此基础上进行均匀变换, 生成 100 幅仿真图像。使用 ShapeMatch 进行模板匹配, 以 ShapeMatch 模板匹配为初始点进行高斯牛顿法亚像素图像配准。

3.2 结果分析

从表 1 可以看出, 传统 ShapeMatch 方法在以 ShapeMatch 模板匹配为初始点进行高斯牛

顿法亚像素配准后, x 方向和 y 方向的匹配精度均有很大程度的提高, 精度在 0.1 pixel 以内。ShapeMatch 模板匹配的工件旋转角度误差在 -0.429° 左右, 而高斯牛顿法图像配准的旋转角度精度提高到了 0.052° (对比结果如图 5 所示)。由此可见高斯牛顿法图像配准是工件精识别的一种较实用的方法。

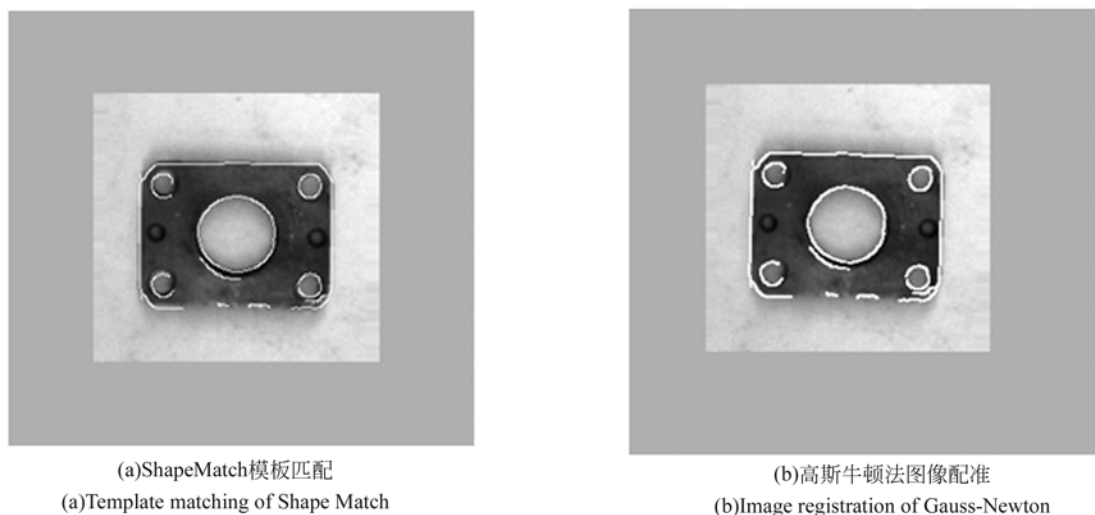


图 5 仿真实验对比结果

Fig. 5 Comparison of simulation results

表 1 ShapeMatch 模板匹配和高斯牛顿算法的对比

Tab. 1 Comparison of ShapeMatch template matching and Gauss-newton algorithm

算法	X 方向均差	Y 方向均差	X 方向标准差	Y 方向标准差	工件旋转角度 误差/ $(^\circ)$	工件旋转角度 标准差
ShapeMatch	-0.542 8	0.751	0.801	0.548	-0.429	1.692
高斯牛顿法	-0.034 9	0.088 4	0.148	0.134	0.052	0.405

4 结 论

针对工业生产环境中智能机器人对工件的识别精度不高的问题, 本文以 ShapeMatch 模板匹配结果为初始迭代点, 使用高斯牛顿法进行图像

精配准。实验结果证明: 该方法对工件的识别精度为 0.1 pixel, 角度均差为 0.05° 。下一步研究将围绕如何进一步提高机器人在复杂环境下对工件的识别精度, 以及如何提高配准算法效率, 减少迭代次数展开。

参考文献:

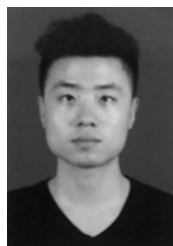
- [1] 李振伟, 张涛, 孙明国. 星空背景下空间目标的快速识别与精密定位[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 590-599.
LI ZH W, ZHANG T, SUN M G. Fast recognition

and precise orientation of space objects in star background [J]. *Opt Precision Eng.*, 2015, 23(2): 590-599. (in Chinese)

- [2] 王云飞. 基于 SIFT 和归一化互信息的 SAR 图像配准算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014, 1.
WANG Y F. *Research on SAR Image Registration*

- Arithmetic based on SIFT and NMI [D]. Xi'an: Xidian University, 2014, 1. (in Chinese)
- [3] 李平, 魏仲慧, 何昕, 等. 采用多形状特征融合的多视点目标识别[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3369-3375.
- LI P, WEI ZH H, HE X, *et al.*. Object recognition based on shape feature fusion under multi-views [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3369-3375. (in Chinese)
- [4] 林黄耀. MVS 在机械工件识别中的应用[J]. 工程技术, 2013, 427(6): 191-194.
- LIN H Y. MVS's application in the work-piece recognition [J]. *Engineering and Technology*, 2013, 427(6): 191-194. (in Chinese)
- [5] 王彦, 傅卫平, 朱虹, 等. 一种基于 SIFT 特征匹配的工件识别方法[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(2): 203-206.
- WANG Y, FU W P, ZHU H, *et al.*. A method for recognition of work-pieces based on SIFT characteristics matching [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2009, 25(2): 203-206. (in Chinese)
- [6] 黄伟国, 顾超, 朱忠奎. 用于目标识别的 PCA-SC 形状匹配算法[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2104-2110.
- HUANG W G, GU CH, ZHU ZH K. PCA-SC shape matching for object recognition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2104-2110. (in Chinese)
- [7] 林玉池, 崔彦平, 黄银国. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 510-514.
- LIN Y CH, CUI Y P, HUANG Y G. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 510-514. (in Chinese)
- [8] STEGER C. Similarity measures for occlusion, clutter, and illumination invariant object recognition [J]. *Pattern Recognition*, 2001, 2191: 148-154.
- [9] 张彦峰, 艾海滨, 杜全叶, 等. 基于金字塔影像分割的水域提取在海岛礁空中三角测量中的应用[J]. 测绘通报, 2014(12): 70-73.
- ZHANG Y F, AI H B, DU Q Y, *et al.*. Application of water extraction algorithm based on pyramid image segmentation in automatic aerial triangulation for island and reef [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(12): 70-73. (in Chinese)
- [10] 别术林. 基于互信息的医学图像配准算法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- BIE S L. *Research of medical image registration method based on mutual information* [D]. Beijing: Beijing jiaotong university, 2014. (in Chinese)
- [11] 龚昌来, 杨冬涛. 一种改进的双线性插值图像放大算法[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 899-901.
- GONG CH L, YANG D T. A novel bilinear interpolation method based on edge direction [J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(8): 899-901. (in Chinese)
- [12] 张小红, 刘刚. 基于小波变换与双线性插值图像配比算法研究[J]. 江西理工大学学报, 2011, 32(1): 2-4.
- ZHANG X H, L G. Research of image matching algorithm based on the wavelet transform and bilinear Interpolation [J]. *Journal of Jiangxi University of Science and Technology*, 2011, 32(1): 2-4. (in Chinese)
- [13] 杨金宝. 基于灰度相似性测度的医学图像配准技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- YANG J B. *Medical image registration based on gray-level similarity techniques* [D]. Jinan: Shandong University, 2008. (in Chinese)
- [14] 于浩, 陈雄, 范晶晶. 高斯-牛顿法在基于能量的目标定位中的运用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(27): 124-126.
- YU H, CHEN X, FAN J J. The application of Gauss-Newton method based on target location of energy [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(27): 124-126. (in Chinese)

作者简介:



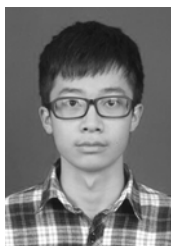
李 博(1989—), 男, 山西临汾人, 博士研究生, 2012 年于华南农业大学获得学士学位, 主要从事机器视觉、图像处理算法研究。E-mail: 357377389@qq.com



陈 燕(1964—), 女, 广东广州人, 副教授, 硕士生导师, 1986 年毕业于武汉理工大学, 2003 年于华南农业大学获得工学硕士学位, 主要从事农业机械研究, 生物机械损伤理论; 智能设计与制造; 虚拟仿真。E-mail: cy123@scau.edu.cn



邹湘军(1957—),女,湖南衡阳人,教授,博士生导师,1981年于湖南农业大学获得工学学士学位,2005年于广东工业大学获得工学博士学位,主要从事机器视觉、智能设计与制造研究。
E-mail: xjzou1@163.com



蒋志林(1990—),男,广东中山人,硕士研究生,2010年于华南农业大学获得学士学位,主要从事农业机器人、智能设计与制造。Email: 313786159@qq.com



刘 念(1991—),男,湖北黄冈人,硕士生,2009年于华南农业大学获得工学学士学位,主要从事农业机器人、机器视觉、图像处理等方面的研究。
Email: liunian_scau@163.com