

文章编号:1001-9081(2010)02-0441-04

基于形状模板的快速高精度可靠图像匹配

赵振民, 彭国华, 符立梅

(西北工业大学 理学院, 西安 710072)

(die0lian0hua@126.com)

摘要:为了提高工业检测中图像匹配精度和速度,提出一种基于形状模板的快速高精度图像配准算法:根据定义的图像匹配相似度量,采用图像金字塔搜索匹配策略,利用形状信息进行模板匹配。具体流程为:首先在参考图像上选择感兴趣区域生成模板,使用Canny滤波器对模板和搜索图像进行滤波,并计算边缘点的方向向量;其次,在此基础上构造该模板和搜索图像的图像金字塔,在图像金字塔最高层图像进行完全遍历匹配,获得具有匹配分值的潜在匹配点,然后根据匹配分值大小逐层逐次跟踪潜在匹配点,进行匹配,直至图像金字塔最底层;最后使用最小二乘法调整位姿参数,使其达到亚像素精度。实验表明该方法匹配速度快,匹配精度高,而且匹配鲁棒性高,不受遮挡、混乱、非线性光照变化、离焦、对比度低、全局对比度反转、局部对比度反转等情况的影响,完全可以满足实际工业需求。

关键词:形状模板匹配;图像金字塔;最小二乘法;方向向量;Canny算子

中图分类号: TP751; TP391.41 **文献标志码:** A

Fast high-precision reliable image matching algorithm based on shape

ZHAO Zhen-min, PENG Guo-hua, FU Li-mei

(College of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

Abstract: A shape-based matching algorithm was proposed to improve the accuracy and speed of image matching in industrial detection. It is the template matching based on shape information, using image pyramid strategy, according to matching similarity measures defined. Specific process was as follows: first, the template was generated by selecting the interest region in the reference image. Then, the template and the search image were filtered using Canny operator, and the direction vectors of their edges were computed. The image pyramids were constructed for the filtered template and the filtered search image on this basis. The image matching was carried out on the highest level of the image pyramids according to the similarity measures defined. After the potential matches with matching scores were identified, they were tracked through the resolution hierarchy according to scores descending in successive until they were found on the lowest level of the image pyramids. Finally, the sub-pixel precision pose parameters were achieved through the least-squares method. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm has fast speed and high accuracy, moreover it is robust to the occlusion, clutter, nonlinear illumination, defocus, low contrast, global contrast change, local contrast change, and so on, which meets the actual industrial demand effectively.

Key words: shape-based image matching; image pyramid; least-square method; direction vector; Canny operator

0 引言

许多计算机视觉应用需要进行目标识别匹配,特别是工业检测,往往待检测目标的图像需要和目标的模板进行匹配,而且要求图像匹配具有很高的鲁棒性,同时还要求较高的匹配精度和较少的匹配的时间。以光刻技术为例,随着高集成度、高精度集成电路以及相关器件的研发,集成电路(Integrated Circuit, IC)特征尺寸越来越小,对光刻技术以及光刻系统的相关精度要求越来越高。其中光刻对准技术作为光刻的三大核心技术之一,一般都要求对准精度在几个纳米,而传统的测量对准技术几乎无法满足这种需求。图像测量技术和图像配准技术以其非接触、全视场、高精度的特点逐渐成为机械加工领域的新技术。运用图像测量技术和图像配准技术提高对准精度在光刻技术中占有非常重要的位置。目前该领域开发的比较成熟的图像精确定位识别匹配工具有 Cognex 公司的 VisionPro PatMax, Euresys 公司的 EasyAccess EasyFind

以及 Adept 公司的 HexSight。光刻技术中掩模一硅片图像匹配不仅要求高精度地快速匹配,还要求图像匹配鲁棒性很高,不受遮挡、混乱、非线性光照变化、离焦、对比度低、全局对比度反转、局部对比度反转等情况的影响。近年来很多亚像素快速图像匹配算法被提出,多是对传统方法的改进,如对比较经典的图像相关匹配方法的改进^[1],对基于灰度矩的匹配方法的改进^[2]。一般而言,要求图像匹配具有精度高、鲁棒性强等特点多从基于像素的匹配方法考虑,而要求图像匹配计算量小、速度快等特点多从基于特征的匹配方法考虑。在众多特征中物体的形状无疑是非常显著而又独特可靠的特征信息。近些年国内外学者在图像形状表示^[3-4]和图像形状匹配^[5-6]方面做了一些卓有成效的研究工作。基于将三者优点相结合的考虑,本文提出一种形状匹配和模板匹配相结合的匹配方法,先利用 Canny 算子获取模板图像和待搜索图像边缘信息,然后计算其方向向量,然后根据定义的相似度量^[7-10]进行匹配,最后使用最小二乘法调整匹配参数^[9,11]使

收稿日期:2009-08-05;修回日期:2009-09-23。

作者简介: 赵振民(1981-),男,黑龙江穆棱人,硕士研究生,主要研究方向:计算机图像处理、计算机视觉; 彭国华(1962-),男,湖北黄冈人,教授,博士生导师,主要研究方向:计算机图像处理、计算机图形学、计算机辅助几何设计; 符立梅(1985-),女,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向:计算机图像处理、计算机视觉。

其达到亚像素精度^[12]。其中采用图像搜索匹配策略是图像金字塔搜索策略^[13-14]。之所以采用定义的相似度量,是因为该相似度量不仅具有不受遮挡、混乱、非线性光照变化、离焦、对比度低、全局对比度反转、局部对比度反转等情况的影响的特点,而且还具有加速搜索匹配和筛选匹配的功能。之所以采用最小二乘法获得亚像素精度匹配参数,是因为最小二乘法匹配算法具有高精度和鲁棒性强特点^[15-16]。之所以采用图像金字塔搜索匹配策略,是因为该策略具有非常显著的特点,可以指数级地减少计算量。

1 基于形状模模板的快速高精度可靠匹配

1.1 相似度量

设目标模板像素点为 $p_i = (r_i, c_i)^T$, 其相应的方向向量 $d_i = (t_i, u_i)^T, i = 1, 2, \dots, n$, 方向向量通过 Canny 滤波后计算得到, 搜索图像也使用 Canny 滤波后计算出每个点 (r, c) 的方向向量 $e_{r,c} = (v_{r,c}, w_{r,c})^T$ 。将模板进行仿射变换, 将仿射变换的平移部分分离出去, 变换后的模板点为 $p_i' = Ap_i$, 相应的方向向量为 $d_i' = Ad_i$, A 为二阶标准旋转矩阵。在搜索图像某个特定点 $q = (r, c)^T$ 处, 模板与搜索图像进行匹配, 计算变换后的模板中所有点的归一化方向向量和搜索图像相应处的归一化方向向量的点积的总和, 并以此作为匹配分值, 即变换后的模板在 q 点的相似度量, 计算这个相似度量如下:

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d_i'^T e_{q+p'}}{\|d_i'\| \|e_{q+p'}\|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_i' v_{r+r_i', c+c_i'} + u_i' w_{r+r_i', c+c_i'}}{\sqrt{t_i'^2 + u_i'^2} \sqrt{v_{r+r_i', c+c_i'}^2 + w_{r+r_i', c+c_i'}^2}} \quad (1)$$

这个相似度量不受遮挡和混乱影响, 这是因为如果在模板中或者搜索图像中某个特征丢失, 噪声将导致一个随机的方向向量, 这些方向向量平均起来将不会对总和造成影响。对于各向同性像素点, 可以设置其方向向量为 0 向量, 只保留各向异性的像素点, 并计算其归一化方向向量, 这样遮挡和混乱构成的特征就不会对这个总和造成影响。这个相似度量也不受任意的光照变化的影响。因为方向向量的长短取决于图像的亮度。这个相似度量把方向向量归一化, 所有的方向向量都变成 1, 相似度量就不会受任意光照变化影响了。在有的应用中需要在目标物体明暗对比度反转情况下也能够搜索到目标物体, 修改相似度量如下:

$$s = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d_i'^T e_{q+p'}}{\|d_i'\| \|e_{q+p'}\|} \right| \quad (2)$$

在某些特殊的场合下, 需要忽略局部的明暗对比度反转。修改相似度量如下:

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|d_i'^T e_{q+p'}|}{\|d_i'\| \|e_{q+p'}\|} \quad (3)$$

这些相似度量还具有一个良好特性, 即在潜在的匹配位置可以通过限定匹配分值 s_{\min} 来筛选出潜在匹配对象, 还可以提高识别匹配过程的速度。我们使用 s_j 表示累计到模板的第 j 个元素时归一化点积的总和:

$$s_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^j d_i'^T e_{q+p'} \quad (4)$$

显然, 如果 $s_j < s_{\min} - 1 + j/n$, 那么匹配分值不可能达到阈值 s_{\min} , 因此当这个条件满足时就可以在第 j 个元素后停止计算。这个标准可以大大提高识别匹配过程速度。需要在图像金字塔最顶层进行彻底地搜索, 使用式(1)~(3), 计算模板在所有可能的位姿上的相似度量。一个潜在的匹配必须大于

s_{\min} , 并且还是局部最大值。设置阈值 s_{\min} 尽早结束无用的相似度量的计算可以提高搜索速度。因此这个表面看起来需要完全遍历的搜索实际上非常高效。

1.2 最小二乘法调整位姿参数

为了得到比搜索空间分辨率更精确的位姿, 可以通过最小二乘法调整匹配参数来实现。我们假设 $q_i = (r_i', c_i')^T$ 表示与模板点 p_i 对应图像, 对于提取的边缘, 由于模板点的方向向量与目标物体边界垂直, 因此通过模板点并与物体边界相切的直线为:

$$t_i(r - r_i) + u_i(c - c_i) = 0 \quad (5)$$

理论上 $t_i(r_i' - r_i) + u_i(c_i' - c_i) = 0$ 同样成立, 那么将下面函数最小化使得位姿 a 更精确:

$$\chi^2(a) = \sum_{i=1}^n [t_i(r_i'(a) - r_i) + u_i(c_i'(a) - c_i)]^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

a 可以通过下式计算:

$$a_{\min} = a_{\text{approx}} + D^{-1} \cdot [-\nabla \chi^2(a_{\text{approx}})] \quad (7)$$

其中: a_{approx} 为匹配参数近似值, $\nabla \chi^2$ 为 χ^2 的梯度矩阵, D 为 χ^2 的 Hessian 矩阵。一般而言, 通过三次迭代就能得到位姿的稳定解。

1.3 图像匹配流程

图像匹配可分为离线阶段和在线阶段。离线阶段主要进行图像预处理, 在线阶段进行相似性度量匹配和通过最小二乘调整返回位姿参数。

1.3.1 离线阶段

1) 用户从参考图像选取含目标物体的感兴趣区域生成其模板, 使用 Canny 滤波器处理模板和搜索图像, 并计算出边缘上点的方向向量。

2) 构建模板和搜索图像的图像金字塔, 并用 2×2 均值滤波器平滑。

1.3.2 在线阶段

1) 使用图像金字塔分层搜索策略。首先在图像金字塔最顶层遍历搜索进行相似性度量匹配, 并返回潜在匹配点、匹配分值及其变换参数, 并将模板进行相应的变换。可以通过设置匹配阈值 s_{\min} 和上述搜索停止标准加速搜索匹配过程; 然后按照这些潜在匹配点匹配分值的大小依次跟踪到图像金字塔下一层潜在匹配点位置, 在潜在匹配点 5×5 邻域将变换后模板与搜索图像匹配, 并返回潜在匹配点及其变换参数。如此反复直至图像金字塔最底层匹配结束。

2) 使用最小二乘法调整匹配参数, 使其达到亚像素精度。

2 实验结果与分析

本文选择三种标准来评价目标图像识别匹配结果。

第一个标准是图像正确识别匹配率即鲁棒性。本文给出两组图像匹配实例: 第一组为光刻系统掩模一硅片简单几何标记图像匹配实例(图1); 第二组为复杂几何标记图像匹配实例(图2)。在第一组实验中, 基于形状模板匹配不仅能够识别匹配被遮挡的目标(图1(b)、图1(f)), 而且还可以通过设置相似度量的匹配分值进行多目标识别匹配(图1(b))。对于离焦(图1(c))和非线性光照变化(图1(d)), 该方法能够快速有效识别匹配。在掩模一硅片的双面对准工艺中, 往往标记和背景区分度很差(图1(e)、图1(f)), 使得标记很难从背景中分离出来, 也就是说只有少量的边缘能提取出来。本文算法基于形状模板匹配仅仅通过少量的边缘信息(边缘点的方向向量和形状信息)就能进行高效地识别匹配目标。

在第二组实验中,标记是复杂的几何结构。基于形状模板匹配依然能够识别匹配被遮挡的标记(图2(b)、图2(e))和发生离焦(图2(d))和非线性光照变化(图2(f))时的标记。这组考虑了复杂背景情况(图2(c)),因为标记的背景复杂使得标记和背景区分变得困难,也就是说会有大量混乱信息被提取出来,基于形状模板匹配能够有效抑制混乱信息对匹配分值的影响,进而可以高效识别匹配。在特殊场合,有时需要在图像对比度发生全局反转或者局部反转时,仍能够识别匹配目标。对于这种情况使用相似度量式(4)、(5):式(4)可以识别匹配对比度发生全局反转的情况(图2(e)),式(5)可以识别匹配对比度发生局部反转的情况(图2(f))。

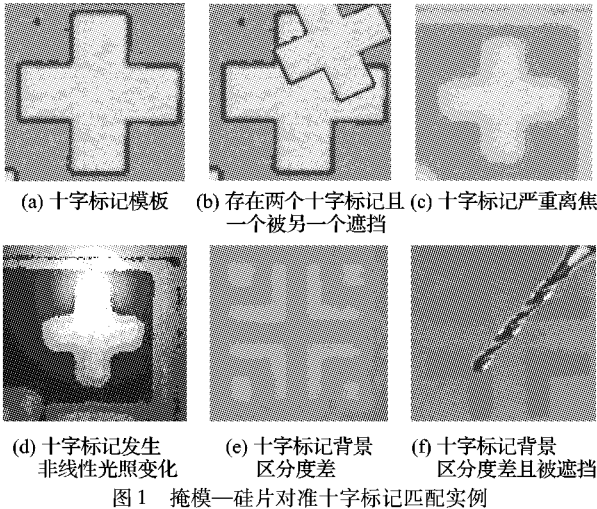


图1 掩模—硅片对准十字标记匹配实例

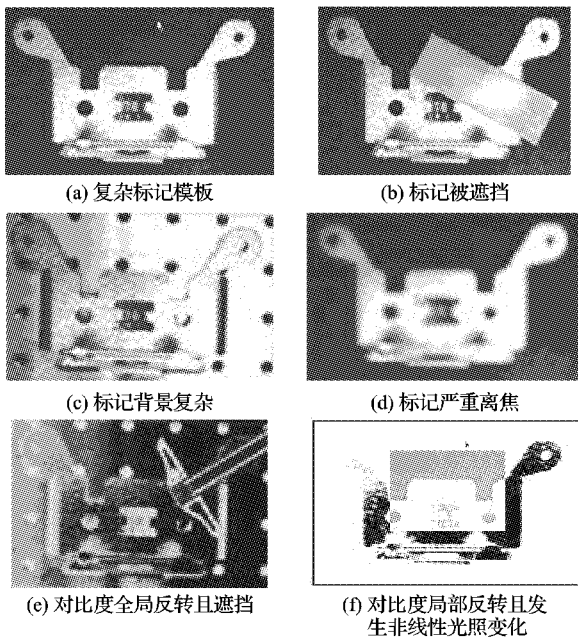


图2 复杂标记匹配实例

通过以上两组实验可以发现,对于遮挡、混乱、非线性光照变化、离焦、对比度低、全局对比度反转、局部对比度反转等情况,基于形状模板匹配具有非常强的鲁棒性。该方法比通用的归一化相位相关匹配方法鲁棒性要好得多,和 Cognex 公司的 VisionPro PatMax 比较接近(图3),具有非常高的识别率。

第二个标准是图像匹配方法得到的变换参数精度。这里以 PatMax 匹配得到参变换参数作为基准,与归一化相位相关匹配进行比较。在这里只给出旋转(图4)和平移(图5)的精度比较。从图4和5可以看出,基于形状模板匹配获得参数精度比归一化相位相关匹配要好许多:归一化相位相关匹配

的参数精度很大程度上也可以小于0.1像素,但是波动很剧烈,稳定性不好;基于形状模板匹配获得参数精度总体上小于0.1像素,稳定性好。

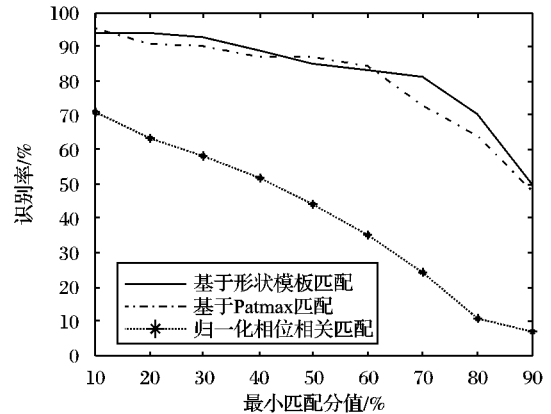


图3 鲁棒性比较

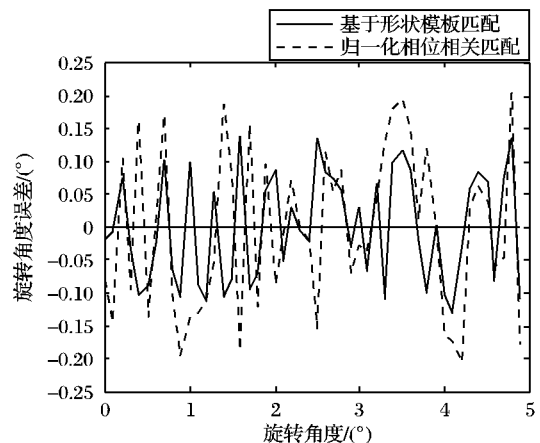


图4 旋转角度精度比较

第三个标准是图像匹配方法所用的时间。这个标准与图像的大小、计算机处理器和一些限定条件(如旋转角度限定)密切相关。在这里我们使用计算机处理器为 Intel core(TM2) Quad Q6600 2.40 GHz。选取模板图像大小为 300 pixel × 350 pixel,搜索图像大小为 512 pixel × 512 pixel、1000 pixel × 1000 pixel、2000 pixel × 2000 pixel 三种情况,不限定旋转角度,进行图像匹配试验,试验结果见表1。由表1可知,本文算法平均匹配时间最少,Patmax 次之,但是两者相差不大,本文算法略优,归一化相位相关平均匹配时间比较差。随着搜索图像尺寸增加,本文算法平均匹配时间增长率要小于 Patmax 方法平均匹配时间增长率,即图像尺寸越大,本文算法优势越明显,归一化相位相关平均匹配时间增长率比较大。

表1 平均匹配时间及其增长率对比表

算法	平均匹配时间/ms			平均匹配时间增长率/%
	512 × 512	1024 × 1024	2048 × 2048	
本文算法	153	265	412	64
Patmax 方法	187	334	534	69
归一化相位相关方法	355	681	1277	89

3 结语

本文提出的基于形状模板的快速高精度可靠匹配算法,将形状匹配和模板匹配以及图像金字塔搜索策略、最小二乘法相结合,在保证图像匹配具有较高的鲁棒性的前提下,有效地提高了匹配算法的速度和精度。由于定义的相似度量具有

加速搜索功能和筛选功能和图像金字塔搜索策略的使用,极大地约束了模板匹配和最小二乘法计算量,从而使得匹配速度很快;而形状匹配和模板匹配又保证了匹配的稳健性;最小

二乘法能够有效提高匹配精度和保证精度的稳定性。实验证明该算法是行之有效的,为光刻技术提供了一种精确识别定位匹配方法。

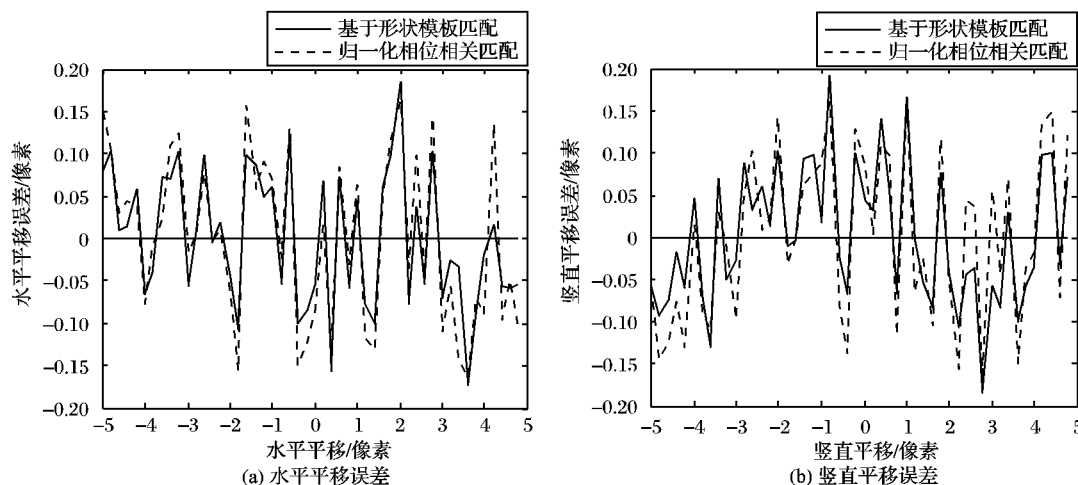


图5 平移精度比较

参考文献:

- [1] 刘进, 闫利. 图像相关匹配算法的快速实现[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(8): 684-687.
- [2] 罗钧, 侯艳, 付丽. 一种改进的灰度矩边缘检测算法[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(5): 549-552.
- [3] PETER A, RANGARAJAN A. Shape analysis using the Fisher-Rao Riemannian metric: Unifying shape representation and deformation [C]// Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: Nano to Macro. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 1164-1167.
- [4] PETER A, RANGARAJAN A. Maximum likelihood wavelet density estimation with applications to image and shape matching[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(4): 458-468.
- [5] EL MUNIM H A, FARAG A A. Shape representation and registration using vector distance functions [C]// CVPR'07: Proceedings of the 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 1-8.
- [6] 张素, 苏和, 陆雪松, 等. 基于形状匹配的快速图像配准[J]. 天津大学学报, 2008, 41(4): 433-438.
- [7] STEGER C. Occlusion, clutter, and illumination invariant object recognition [J/OL]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, XXXIV(3A): 345-350. [2009-08-01]. <http://www.isprs.org/commission3/proceedings02/papers/paper006.pdf>.
- [8] STEGER C. Similarity measures for occlusion, clutter, and illumination invariant object recognition [C]// Proceedings of the 23rd DAGM - Symposium on Pattern Recognition, LNCS 2191. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 148-154.
- [9] ULRICH M, STERGER C. Performance comparison of 2D object recognition techniques [J/OL]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, XXXIV(3A): 368-374. [2009-08-01]. <http://www.isprs.org/commission3/proceedings02/papers/paper039.pdf>.
- [10] ULRICH M, STERGER C. Empirical performance evaluation of object recognition methods [C]// Empirical Evaluation Methods in Computer Vision. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2001: 62-76.
- [11] WALLACK A, MANOCHA D. Robust algorithms for object localization [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 27(3): 243-262.
- [12] STEGER C. Subpixel - precise extraction of lines and edges [J/OL]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, XXXIII(B3): 141-156. [2009-08-01]. <http://www9.in.tum.de/people/steger/publications/2000/ISPRS-Congress-00-Steger.pdf>.
- [13] TANIMOTO S L. Template matching in pyramids [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 16(4): 356-369.
- [14] BORGEFORS G. Hierarchical chamfer matching: A parametric edge matching algorithm [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(6): 849-865.
- [15] 陈钊, 郭永彩, 许丹宇. 互相关 DPIV 亚像素匹配方法研究[J]. 应用力学学报, 2008, 25(2): 289-292.
- [16] DELMAS P, FARF G G, SHORIN A, et al. Robust least-squares image matching in the presence of outliers [C]// CAIP 2007: Proceedings of the 12th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, LNCS 4673. Berlin: Springer, 2007: 776-783.

(上接第429页)

- [5] EMBERSON P, BATE I. Minimising task migration and priority changes in mode transitions [C]// Proceedings 13th IEEE RTAS 2007. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 158-167.
- [6] FISHER N, BARUAH S. A fully polynomial - time approximation scheme for feasibility analysis in static-priority systems with arbitrary relative deadlines [C]// Euromicro Conference on Real-time Systems. Amsterdam: IOS Press, 2005: 117-126.
- [7] RICHARD P, GOOSENS J. Approximating response times for static-priority tasks with release jitters [C/OL]// Euromicro Conference on Real-time Systems (WiP session). [2009-08-01]. <http://www.lisi.ensma.fr/ftp/pub/documents/papers/2006/2006-EICRTSW-Richard.pdf>.
- [8] BINI E, BARUAH S K. Efficient computation of response time bounds under fixed-priority scheduling [C]// Proceedings of the 15th Conference on Real-time and Network Systems. [S.l.]: IEEE, 2007: 95-104.
- [9] MÄKI - TURJA J, NOLIN M. Efficient implementation of tight response-times for tasks with offsets [J]. Real-time Systems, 2008, 40(1): 73-113.
- [10] BINI E, BUTTAZZO G C. Measuring the performance of schedulability tests [J]. Real-time Systems, 2005, 30(1/2): 129-154.
- [11] LIU C L, LAYLAND J W. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment [J]. Journal of the ACM, 1973, 20(1): 46-61.