

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)09-1637-06

论文索引信息: 符艳军, 程咏梅, 潘泉, 孙开锋. 快速的自适应景象匹配算法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1637-1642

快速的自适应景象匹配算法

符艳军¹⁾, 程咏梅¹⁾, 潘泉¹⁾, 孙开锋²⁾

¹⁾(西北工业大学自动化学院, 西安 710072) ²⁾(西安精密机械研究所, 西安 710075)

摘要:在基于改进 Hausdorff 距离的景象匹配辅助导航系统中,为满足系统对实时性的要求,常采用小波多尺度图像分解进行由粗到精的分层匹配,但这种方法对于图像尺寸较小的情况不太适应。基于 Hausdorff 距离特性,首先提出一种跳跃式的搜索策略,通过对跳跃式搜索及小波多尺度分解两种方法的分析比较,进一步提出一种自适应的快速匹配方法。仿真结果表明,在保证匹配概率的同时,提出的自适应的快速匹配方法比仅采用小波多尺度分层匹配的实时性更好,且在图像尺寸较小时仍能精确定位。

关键词:相似性测度;小波分解;跳跃式搜索;阈值

Fast adaptive image matching algorithm

Fu Yanjun¹⁾, Cheng Yongmei¹⁾, Pan Quan¹⁾, Sun Kaifeng²⁾

¹⁾(College of Automation Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072 China)

²⁾(Xi'an Precision Machinery Research Institute, Xi'an 710075 China)

Abstract: In the scene matching aided navigation system based on the modified Hausdorff distance, a roughness-to-precision hierarchical matching using multi-resolution wavelet decomposition technique is often used to achieve a real-time matching. However, this method is not suitable for the case of small image. Based on the characteristic of Hausdorff distance, a pixel-jump searching method is proposed in this paper. Furthermore, by comparing the pixel-jump searching with wavelet decomposition, an adaptive matching method is brought forward. Simulation results show that the proposed fast adaptive matching method takes less time than multi-resolution wavelet decomposition matching, and that the match point is correct even when the image dimension is small.

Keywords: similarity measure; wavelet decomposition; pixel-jump matching; threshold

0 引言

景象匹配辅助导航系统是一种利用实时获取的地面景物图像(实测图)与机载计算机中预先存储的2维景象数字地图(参考图)相比较,用于确定飞行器位置的计算机导航系统,该系统对景象匹配算法的实时性要求很高。由于系统的

实测图和参考图之间的匹配通常为非相似匹配^[1],常采用基于改进 Hausdorff 距离 LTS-HD^[2](least trimmed square Hausdorff distance)的特征匹配方法,但 LTS-HD 计算复杂,难以满足这些应用对实时性的要求,因此,提高 LTS-HD 匹配算法的快速性是这些应用的关键。利用小波多尺度图像分解进行由粗到精的分级匹配是目前常用的一种实时匹配方法^[3-9],匹配效率很高。但当参

收稿日期:2010-04-20;修回日期:2010-10-18

基金项目:航空科学基金项目(20100853010)。

第一作者简介:符艳军(1972—)女,西北工业大学控制科学与工程专业博士研究生,主要研究方向为图像处理及模式识别。E-mail: yanjun-fu@163.com。

考图和实测图尺寸比较小时,这种通过改变分辨率的分层匹配方法会造成极大的失配概率,而此时如果直接在原分辨率图像上进行遍历搜索又不能满足实时性的要求,为此,本文提出一种小波分解与跳跃式搜索相结合的自适应快速匹配方法。仿真实验表明,这种自适应匹配方法在保证匹配概率的同时,匹配速度大大提高。

1 LTS-HD 与图像匹配

Hausdorff 距离是一种定义于两个点集上的最大最小(max-min)距离^[2]。若给定有限的两个点集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{NA}\}$, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{NB}\}$, 则 A 和 B 的 Hausdorff 距离定义为

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (1)$$

式中, $h(A, B)$ 和 $h(B, A)$ 表示点集 A 和 B 的有向 Hausdorff 距离。

由上述定义可知, Hausdorff 距离是度量两个点集之间最不匹配点的距离,对于远离中心的噪声点和出格点非常敏感,当图像中存在噪声或目标被部分遮挡时常出现误匹配。为了解决这个问题,文献[2]基于 LTS(least trimmed square)提出一种鲁棒的部分 Hausdorff 距离测度(LTS-HD),该距离测度综合了部分 Hausdorff 距离与距离均值两者的优点,对噪声、出格点及遮挡都比较鲁棒。

点集 A 和 B 的部分 Hausdorff 距离定义为

$$H_{K,L}(A, B) = \max(h_K(A, B), h_L(B, A)) \quad (2)$$

式中, $h_K(A, B) = K_{a \in A}^{th} d_B(a)$ 表示 A 到 B 的最小有向部分 Hausdorff 距离, $K_{a \in A}^{th}$ 表示 $d_B(a)$ 中排序为 K 的值。

部分 Hausdorff 距离量测通过参数 $f_1 = \frac{K}{N_A}$ 及 $f_2 = \frac{L}{N_B}$ 调整 K 及 L 的值,其取值范围为 $0.01 \sim 1.0$ 。参数 f 的取值决定了 Hausdorff 距离的性能,实验表明,当 $f = 0.6$ 左右时可以取得比较好的匹配结果。

改进后的 LTS-HD 测度可表示为

$$H_{LTS}(A, B) = \max(h_{LTS}(A, B), h_{LTS}(B, A)) \quad (3)$$

$h_{LTS}(A, B) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K d_B(a)_{(i)}$ 表示 A 到 B 的有向

部分 Hausdorff 距离, $K = f_1 \times N_A$, $d_B(a)_{(i)}$ 表示序列 $d_B(a)_{(1)} \leq d_B(a)_{(2)} \leq \dots \leq d_B(a)_{(NA)}$ 中的第 i 个值。

量测 $h_{LTS}(A, B)$ 是在去除了那些较大 Hausdorff 距离值后的平均值,因此,在目标部分遮挡及存在噪声污染的情况下都能取得较好的匹配结果。

2 小波分解及分层匹配

小波变换是一种时间-尺度分析方法,具有多分辨率的特点,这种多分辨率分析对图像信号具有连续逼近的能力,可以用来构造图像的塔式分解。小波金字塔把原始图像分解成分率由低到高的子图像集,而每一尺度上的低频平滑图像集中了原始图像的大部分能量,反映了图像的绝大部分信息,因此,可以用这些低频子图进行分层匹配。以改进的 LTS-HD 作为相似性测度,对不同分辨率低频子图进行边缘特征提取构建特征点金字塔。首先在含特征点较少的最低分辨率子图上找到实测图的大致位置 (r, c) , 据此推算出在下一层较高分辨率子图的位置 $(2r, 2c)$; 然后在以 $(2r, 2c)$ 为中心的一个邻域内搜索 LTS-HD 相似度最大的位置,以此类推,直至在原分辨率图像上找到精匹配点。其中分解层数的确定与图像尺寸及匹配所采用的相似性测度有关。如果分解层数太多,会因为信息损失过多而使最低分辨率层图像信息量过少而造成误匹配,这将直接导致最终的高分辨率图像失配。但若分解层数太少,则最低分辨率层图像仍然较大,因而不能有效提高匹配速度。目前,对小波分解层数的研究大多是建立在实验的基础上^[10-11],还没有系统的理论。本文以保证分解后实测图尺寸不小于 16×16 作为小波分解最大层数的选取准则,分别在光学卫星 IKONOS 及合成孔径雷达(SAR)两种传感器图像上进行仿真,仿真中实测图直接在参考图中截取,尺寸分别取为参考图的 $1/2$ 、 $1/4$ 及 $1/6$ 左右。仿真结果如表 1 所示。因为导航系统对参考图的预处理(包括小波分解、边缘特征提取及距离变换等)可以离线进行,仿真过程中的耗时不包括对参考图的预处理时间,而只包括对实测图的预处理及搜索匹配等在线处理时间。

表1 小波多尺度分层匹配仿真结果
Tab.1 Simulation result of wavelet decomposition hierarchical matching

仿真图类型及 参考图尺寸	实测图尺寸	真实匹配点	1层小波分解		2层小波分解		3层小波分解	
			仿真匹配点	匹配耗时/s	仿真匹配点	匹配耗时/s	仿真匹配点	匹配耗时/s
IKONOS 300 × 400	50 × 60	210,70	210,70	6.245 876	136,27	1.667 376	—	—
		150,150	150,150	7.168 667	150,150	2.476 601	—	—
	70 × 100	50,50	50,50	8.203 846	16,228	2.063 991	—	—
		100,200	100,200	6.154 460	128,101	1.628 719	—	—
	150 × 150	30,30	30,30	13.722 791	30,30	4.537 033	30,30	3.293 450
		100,150	100,150	28.835 128	100,150	4.526 336	149,151	2.862 093
70 × 70	90,80	90,80	16.075 849	32,96	2.504 953	—	—	
	130,130	130,130	13.678 678	47,148	2.396 063	—	—	
SAR 460 × 399	120 × 100	240,60	240,60	29.996 283	240,60	3.698 103	168,133	3.067 055
		50,150	50,150	27.532 940	50,150	3.721 937	50,150	2.792 019
	230 × 200	50,100	50,100	45.074 079	50,100	6.954 552	168,190	4.392 225
		30,30	30,30	41.943 910	30,30	6.871 875	181,156	4.658 994

注:表中的“—”表示在该层已不再对实测图进行小波分解。

3 跳跃式搜索及分层匹配

LTS-HD 距离主要用于衡量两个点集之间的不匹配程度,计算的是两个点集中所有点之间最近距离的最大值,计算时无须考虑两个点集中点与点之间的对应关系。基于 LTS-HD 距离的这一特性,如果在进行全局匹配时,每隔一定的像素数进行跳跃式搜索,所得的粗匹配点应该是所有搜索位置中与实测图最相近的位置,此时,若再以该匹配点为中心,在其某 δ 邻域内进行遍历搜索,就可能得到精匹配点。理论上,只要第 1 阶段的跳跃像素数 L 和第 2 阶段的邻域值 δ 选择适当,就总能找到精确的匹配位置。设实测图尺寸为 $m \times n$, $S = \min(m, n)$, 跳跃像素数 L 一般取为 $(1/7 \sim 1/10) S$, 邻域值 δ 一般取为 $(0.5 \sim 1.0) L$ 。为了与表 1 中小波多尺度分层匹配方法比较,跳跃式两级匹配算法采用与表 1 同样的图像,算法的耗时也只包括在线处理时间,不包括对参考图的预处理时间。仿真结果如表 2 所示。

4 导航用自适应快速景象匹配算法总流程

从表 1 可以看出,以保证分解后实测图尺寸不小于 16×16 作为小波分解最大层数的选取准

则时失配概率已经很高,因此,当实测图尺寸小于 32×32 时,不宜再进行小波分解。

对照表 1 和表 2 的结果可以看出,当实测图尺寸较大时,小波多分辨率分层匹配较跳跃式两级匹配耗时短,而当实测图尺寸小于 70×70 时,跳跃式两级匹配比小波多分辨率分层匹配耗时更短且匹配概率更高,这是因为跳跃式两级匹配是直接原分辨率图像上匹配,省去了对实测图进行小波分解及重构的时间,同时因为跳跃式搜索没有损失图像的高频信息而使正确匹配的概率也更大。据此,针对景象匹配辅助导航系统,本文提出一种自适应的快速匹配方法。设定阈值 T ,当实测图尺寸小于该阈值时,不需要进行小波分解,直接原分辨率图像上进行跳跃式两级匹配;否则,根据计算的分解层数 J 对实测图进行 J 层小波分解后再进行跳跃式两级匹配。自适应算法的流程如图 1 所示。图 1 中的虚线框内是对参考图的预处理,其分解层数 K 由经验取得,应该大于对实测图在线分解的层数 J 。

5 匹配算法仿真结果比较

为了与跳跃式两级匹配及小波多分辨率分层匹配算法进行比较,自适应快速匹配算法的仿真采用

表 2 跳跃式两级匹配仿真结果
Tab. 2 Simulation result of two-level pixel-jump matching

仿真图类型及参考图尺寸	实测图尺寸	真实匹配点	L	λ	仿真匹配点	匹配耗时/s
IKONOS 300 × 400	50 × 60	210, 70	6	0.5	210, 70	1.254 504
		150, 150	6	0.5	150, 151	1.193 083
	70 × 100	50, 50	8	0.5	50, 50	2.233 813
		100, 200	10	0.5	100, 200	2.126 227
	150 × 150	30, 30	20	0.5	30, 30	3.813 297
		100, 150	20	0.5	100, 150	3.610 476
SAR 460 × 399	70 × 70	90, 80	8	0.5	90, 80	2.435 808
		130, 130	8	0.6	130, 130	2.466 497
	120 × 100	240, 60	14	0.5	240, 60	3.155 493
		50, 150	14	0.5	50, 150	3.610 476
	230 × 200	50, 100	24	0.5	50, 100	7.145 893
		30, 30	24	0.6	30, 30	7.629 126

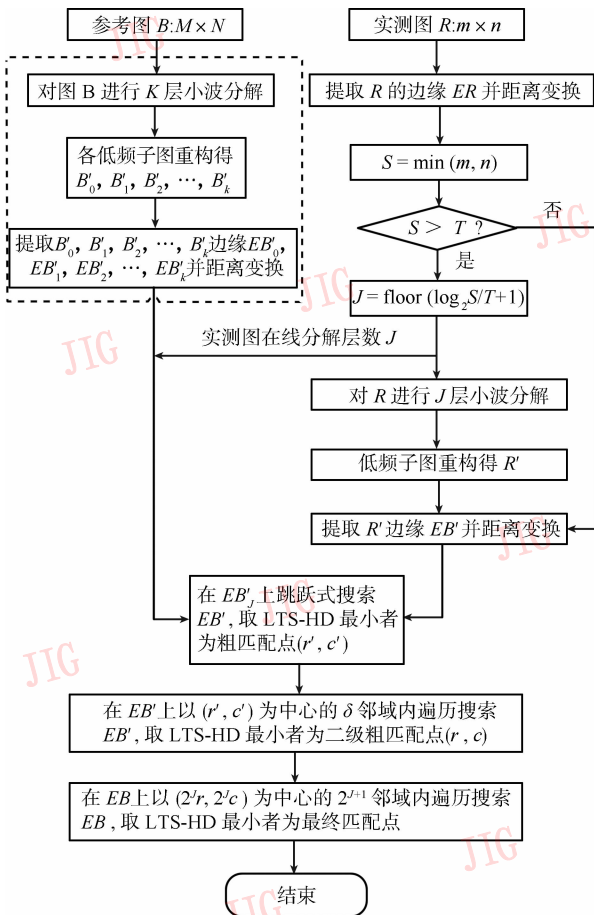


图 1 自适应景象匹配算法流程图

Fig. 1 Flow chart of adaptive scene matching algorithm

的处理及搜索匹配等在线处理时间。参考表 1 及表 2 中的仿真结果, 阈值 T 取为 64×64 , 跳跃式搜索的步长 L 及邻域 δ 的取值与表 2 方法相同, 该算法的部分匹配结果如图 2 和图 3 所示。图 2 中, 实测图 1 的尺寸为 50×60 , 正确匹配点为 $(210, 70)$; 实测图 2 的尺寸为 70×100 , 正确匹配点为 $(50, 50)$ 。图 3 中, 实测图 1 的尺寸为 70×70 , 正确匹配点为 $(90, 80)$; 实测图 2 的尺寸为 120×100 , 正确匹配点为 $(240, 60)$ 。表 3 列出了 3 种方法匹配结果的对比情况, 其中小波多分辨率分层匹配的耗时是表 1 中正确匹配的最短耗时。由表 3 可以看出, 在保证匹配精度的前提下, 本文提出的自适应快速匹配方法比小波多分辨率分层匹配速度更快。

6 结论

小波多尺度分层匹配是解决景象匹配实时性问题的常用方法, 但这种方法对于较小尺寸图像常产生较大的失配概率。基于 LTS-HD 特性的跳跃式搜索策略对较小尺寸图像仍然适用, 但在图像尺寸较大时的匹配效率不及小波分解高。结合小波分解及跳跃式搜索两种方法的匹配特点提出一种自适应的快速匹配方法, 从仿真结果可以看出, 在保证匹配概率的同时, 这种自适应的匹配方法不仅能加快小尺寸图像的匹配速度, 对于大尺寸图像的匹配, 其实时性也比单纯使用小波多分辨率分层匹配好。

与表 1 及表 2 相同的图像, 耗时也只包括对实测图

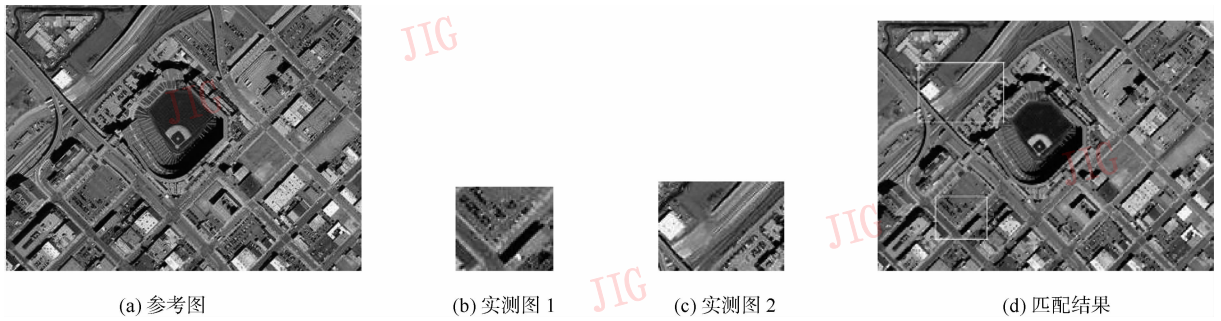


图2 光学卫星(IKONOS)图像匹配
Fig.2 Match result of IKONOS image

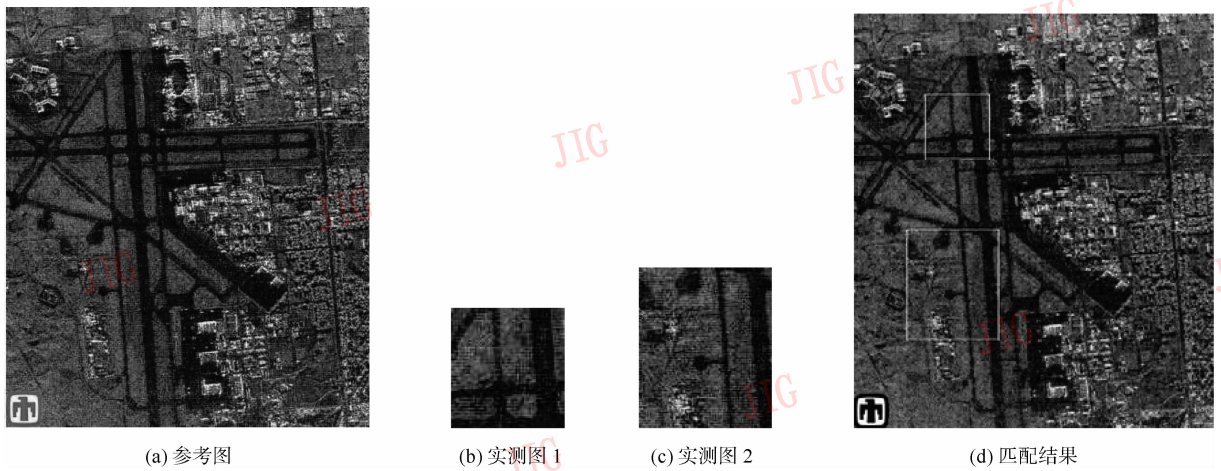


图3 合成孔径雷达(SAR)实测图与参考图的匹配
Fig.3 Match result of SAR image

表3 3种匹配算法仿真结果比较

Tab.3 Simulation results comparison among three algorithms

参考图类型及尺寸	实测图尺寸	真实匹配点	跳跃式两级匹配		小波多尺度分层匹配		自适应快速匹配	
			仿真匹配点	耗时/s	仿真匹配点	耗时/s	仿真匹配点	耗时/s
IKONOS 300×400	50×60	210,70	210,70	1.254 504	210,70	6.245 876	210,70	1.254 504
		150,150	150,151	1.193 083	150,150	2.476 601	150,150	1.193 083
	70×100	50,50	50,50	2.233 813	50,50	8.203 846	50,50	1.501 985
		100,200	100,200	2.126 227	100,200	6.154 460	100,200	1.178 199
	150×150	30,30	30,30	3.813 297	30,30	3.293 450	30,30	2.568 529
		100,150	100,150	3.610 476	100,150	4.526 336	100,150	2.403 542
SAR 460×399	70×100	90,80	90,80	2.435 808	90,80	16.075 849	90,80	1.740 395
		130,130	130,130	2.466 497	130,130	13.678 678	130,130	1.823 456
SAR 460×399	230×200	240,60	240,60	3.155 493	240,60	3.698 103	240,60	1.990 384
		50,150	50,150	3.610 476	50,150	2.792 019	50,150	2.067 585
		50,100	50,100	7.145 893	50,100	6.954 552	50,100	2.314 925
		30,30	30,30	7.629 126	30,30	6.871 875	30,29	2.106 317

参考文献 (References)

- [1] Liu Jianye, Leng Xuefei, Xiong Zhi, et al. Real-time multi-level scene matching algorithm for inertial integrated navigation system [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1401-1407. [刘建业, 冷雪飞, 熊智, 等. 惯性组合导航系统的实时多级景象匹配算法[J]. 航空学报, 2007, 28(6): 1401-1407.]
- [2] Sim D G, Kwon O K, Park R H. Object matching algorithm using robust Hausdorff distance measures [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(3): 425-429.
- [3] Jane You. A wavelet-based coarse-to-fine image matching scheme in a parallel virtual machine environment [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(9): 1547-1559.
- [4] Borgefors G. Hierarchical chamfer matching: a parametric edge matching algorithm [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(6): 849-865.
- [5] Jiang Xiaoyu, Huang Yingqing. Multiresolution template match using wavelet transform [J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5(4): 304-308. [蒋晓瑜, 黄应清. 基于小波变换的多分辨率模板匹配[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(4): 304-308.]
- [6] Xiong Zhi, Xiong Weidong, Leng Xuefei, et al. Study of hierarchical real-time matching algorithm for scene matching aided navigation system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(6): 926-929. [熊智, 熊卫东, 冷雪飞, 等. 景象匹配辅助导航中多级实时匹配算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(6): 926-929.]
- [7] Fan Lijie, Gao Xin, Wang Yanfei, et al. A high time-efficiency multi-modal images matching scheme for navigation [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(12): 2876-2880. [范俐捷, 高鑫, 王岩飞, 等. 一种快速多模态图像匹配导航方案[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2876-2880.]
- [8] Wang Jing, Zhu Mengyu, Zhao Baojun, et al. A remote sensing image registration method based on wavelet decomposition and the improved Hausdorff distance [J]. Acta Electronic Sinica, 2006, 34(12): 2167-2169. [王靖, 朱梦宇, 赵保军, 等. 基于小波和改进型 Hausdorff 距离的遥感图像配准方法[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2167-2169.]
- [9] Zhang Dengrong, Yu Le, Cai Zhigang. Matching method based on Harris operator and wavelet pyramid [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2007, 34(4): 465-468. [张登荣, 俞乐, 蔡志刚. 点特征和小波金字塔技术的遥感图像快速匹配技术[J]. 浙江大学学报(理学版), 2007, 34(4): 465-468.]
- [10] Chen Jinghang, Yang Yimin. A fast template matching algorithm based on Harr-wavelet [J]. Computer Engineering, 2005, 31(22): 167-171. [陈景航, 杨宜民. 一种基于 Harr 小波的快速模板匹配方法[J]. 计算机工程, 2005, 31(22): 167-171.]
- [11] Zhang Jingmin, Zhang Zhijia, Wang Dongshu. A fast pyramid image matching algorithm based on wavelet decomposition [J]. Computer Engineering, Microelectronics & Computer, 2007, 24(1): 207-213. [张敬敏, 张志佳, 王东署. 基于小波分解的塔式快速图像匹配算法[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(1): 207-213.]