

8-17-2020

Multiresolution Scene Matching Algorithm for Infrared and Visible Images Based on Non-subsampled Contourlet Transform

Liu Gang

1. *College of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;*

Guangyu Wang

1. *College of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;*

Zhou Heng

2. *China Airborne Missile Academic, Luoyang 471009, China;*

Mingjing Wang

2. *China Airborne Missile Academic, Luoyang 471009, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multiresolution Scene Matching Algorithm for Infrared and Visible Images Based on Non-subsampled Contourlet Transform

Abstract

Abstract: Aiming at scene matching problem for taking infrared image as the actual data and the visible image as the referenced data, a multiresolution matching algorithm was proposed based on non-subsampled contourlet transform (NSCT). By using the transform of phase congruency transform, the difference of grayscale and contrast between infrared image and visible light image was weakened. *Subsequently, the two types of images were separately transformed into non-subsampled contourlet domain and the proposed method took the Krawtchouk invariant moment as matching feature. The presented method, which used the improved genetic algorithm (GA) as searching strategy which conquered the precocious phenomenon, realized the multiresolution matching between infrared image and visible light image. The presented method used the relative coefficient of Krawtchouk invariant moment between the two types of images as fitness criterion for searching.* Experimental results show that the proposed method has not only high matching accuracy and fast matching speed, but also better robustness in comparison with some classic matching algorithms, which can resist the geometric distortion of rotation for actual image.

Keywords

scene matching, phase congruency, non-subsampled contourlet transform, Krawtchouk invariant moment, genetic algorithm

Recommended Citation

Liu Gang, Wang Guangyu, Zhou Heng, Wang Mingjing. Multiresolution Scene Matching Algorithm for Infrared and Visible Images Based on Non-subsampled Contourlet Transform[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(8): 1795-1804.

NSCT 域多分辨率红外与可见光景象匹配算法

刘刚¹, 王光宇¹, 周珩², 王明静²

(1. 河南科技大学信息工程学院, 洛阳 471023; 2. 中国空空导弹研究院, 洛阳 471009)

摘要: 针对以可见光图像为基准、红外图像为实测的景象匹配问题, 提出一种基于非下采样轮廓波变换(NSCT)的多分辨率匹配方法。利用相位一致性变换削弱红外与可见光图像灰度与对比度差异, 对两类图像分别进行非下采样轮廓波变换, 引入 Krawtchouk 矩不变量提取匹配特征, 利用克服早熟现象的改进遗传算法作为搜索策略, 以两类图像的 Krawtchouk 不变矩相关系数作为搜索的适应度准则, 实现红外目标图像和可见光基准图像的多分辨率匹配。实验结果表明, 与常用景象匹配算法相比, 本文方法不仅具有更高的匹配精度和速度, 而且鲁棒性好, 能抵抗实测图像的旋转几何畸变。

关键词: 景象匹配; 非下采样轮廓波; 相位一致性; Krawtchouk 不变矩; 遗传算法

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 08-1795-10

Multiresolution Scene Matching Algorithm for Infrared and Visible Images
Based on Non-subsampled Contourlet TransformLiu Gang¹, Wang Guangyu¹, Zhou Heng², Wang Mingjing²

(1. College of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. China Airborne Missile Academic, Luoyang 471009, China)

Abstract: Aiming at scene matching problem for taking infrared image as the actual data and the visible image as the referenced data, a multiresolution matching algorithm was proposed based on non-subsampled contourlet transform (NSCT). By using the transform of phase congruency transform, the difference of grayscale and contrast between infrared image and visible light image was weakened. Subsequently, the two types of images were separately transformed into non-subsampled contourlet domain and the proposed method took the Krawtchouk invariant moment as matching feature. The presented method, which used the improved genetic algorithm (GA) as searching strategy which conquered the precocious phenomenon, realized the multiresolution matching between infrared image and visible light image. The presented method used the relative coefficient of Krawtchouk invariant moment between the two types of images as fitness criterion for searching. Experimental results show that the proposed method has not only high matching accuracy and fast matching speed, but also better robustness in comparison with some classic matching algorithms, which can resist the geometric distortion of rotation for actual image.

Keywords: scene matching; phase congruency; non-subsampled contourlet transform; Krawtchouk invariant moment; genetic algorithm

引言

景象匹配是一种依靠图像匹配技术对飞行器



收稿日期: 2015-09-06 修回日期: 2016-01-18;
基金项目: 航空科学基金(20130142004), 河南科技大学创新能力培育基金(2014ZCX010), 河南科技大学博士科研启动基金(Op001631);
作者简介: 刘刚(1974-), 男, 湖南, 博士后, 副教授, 研究方向为红外成像制导。

进行精确定位的辅助导航技术。虽然基准图和实时图都是可见光图像的下视景象匹配已在巡航导弹和末制导弹得到了成功应用, 但由于光学传感器容易受到恶劣天气条件的影响, 在很多情况下无法得到理想的高质量图像。红外成像传感器则不受云雾、黑夜等自然因素影响, 具有全天时成像能力。因此, 发展基准图为可见光图像, 实时图为红外图像的下

视景象匹配精确制导武器已成为主流方向之一。

现有的景象匹配主要可分为两大类：基于区域的方法^[1-4]和基于特征的方法^[5-11]。基于区域的匹配方法主要利用模板内的灰度信息或者灰度信息的某种变换进行匹配。由于异源图像的灰度属性关联性不大，使得在同源图像匹配领域里被广泛采用的基于区域的匹配方法在异源图像匹配领域里应用不是很广。基于特征的匹配方法并不直接利用灰度信息，使得该类型方法成为异源图像匹配领域里非常热门的研究方向。目前，匹配过程所用到的特征主要集中在点特征^[5-8]、线特征^[9]、梯度方向直方图特征^[10]和不变矩特征^[11]。

一般说来，景象匹配过程由特征空间、搜索空间、相似性度量、搜索策略四要素组成，提高景象匹配效率可从上述四要素出发。文献[4]从加快搜索速度的角度出发，利用粒子群算法对匹配参数的搜索进行加速。文献[5]从压缩搜索空间出发，利用小波的多分辨率特性构建小波金字塔数据结构，逐层搜索实现由粗到细的匹配，提高匹配效率。文献[11]在利用小波变换压缩图像以减少搜索空间的同时，提取图像的不变矩作为匹配特征并给出简化计算方法，从搜索空间和特征空间两个方面提高匹配精度和效率。

相对于小波变换，非下采样轮廓波变换(Non-Subsampled Contourlet Transform, NSCT)是一种真正的图像二维表示方法，能用不同尺度、不同方向频率的子带更准确的捕获图像中的分段二次连续曲线，具有方向性和各向异性，对于曲线有更稀疏的表示^[12]。故可考虑利用 NSCT 变换来进一步压缩匹配过程的搜索空间。

Yap^[13]等提出的 Krawtchouk 矩是一种新型正交矩，能够表征任何图像中感兴趣区域的局部特征，可以很好地恢复出原始图像。和传统正交矩相比，Krawtchouk 正交矩具有可以从任何感兴趣的图像区域中提取局部特征的优点。由其构成的 Krawtchouk 矩不变量具有 Krawtchouk 矩的基本性质，并具有良好的平移、旋转和尺度不变性。故可

考虑将 Krawtchouk 不变矩作为特征空间参与匹配过程以提高精度。

由于红外与可见光成像机理的不同，造成两者图像在灰度、对比度上存在明显差异，会对匹配特征的提取产生不利影响。图像相位一致性则刚好具有局部光照和对比度不变性，能用于消除图像灰度与对比度差异的影响^[14-16]。

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种全局搜索最优解的方法，具有自组织性、自适应性、自学习性和本质并行的突出特点，被广泛应用于搜索策略。但遗传算法的随机性使得其收敛速度较慢，迭代过程中容易出现早熟，即 GA 尚未搜索到全局最优解，但种群已经成熟(所有个体均相互接近的状态)，需要采取措施克服。

综上所述，本文在利用相位一致性变换削弱红外与可见光灰度差异的基础上，在 NSCT 域实现了一种多分辨率的景象匹配方法。它以对平移、旋转和放缩具有不变性的 Krawtchouk 不变矩作为目标的共性特征描述，利用克服早熟现象的改进遗传算法作为智能化搜索策略，在 NSCT 域高尺度低频图像上进行匹配，并将匹配结果作为低尺度低频图像匹配过程的指导，层层迭代得到全分辨率图像的匹配结果。

1 相位一致性变换、NSCT、Krawtchouk 不变矩的基本原理

1.1 图像相位一致性变换理论

红外与可见光图像间往往存在着较大灰度及对比度差异，从而导致共性匹配特征提取和描述非常困难。相位一致性变换理论是 Morrone 等学者在研究马赫带现象时提出的，并通过实验和理论证明了人类视觉感知的图像特征出现在图像 Fourier 谐波分量叠合最大的相位处^[14]。相位一致性变换是一个无量纲的值，反映的是图像的相位特征信息，也即相位一致性特征能够描述图像的特征，且具有局部光照和对比度不变性的特点，能用于削弱图像灰度与对比度差异的影响，可为多模图像的特征显

著性提供一个统一的度量。

P.Kovesi^[16]进一步借助 Gabor 滤波器, 将相位一致性变换扩展到二维空间, 则图像 I 的相位一致性变换函数为:

$$PC(x, y) = \frac{\sum_o \sum_n W_o(x, y) [A_{no}(x, y) \Delta \phi_{no}(x, y) - T_o]}{\sum_o \sum_n A_{no}(x, y) + \varepsilon} \quad (1)$$

式中: $A_{no}(x, y)$ 为图像 I 在给定滤波器尺度 n 和方向 o 的振幅; $W_o(x, y)$ 为滤波器频带加权因子; T_o 为估计噪声阈值, 只有当相位偏移量大于 T_o 时才用来计算相位一致; ε 为小常量以避免分母为 0; $\Delta \phi_{no}(x, y)$ 为相位偏移函数。

对实测图像和基准图像进行相位一致性变换, 得到具有局部光照和对比度不变性的相位一致性图像, 为可见光与红外图像匹配提供统一的相似性度量标准。该变换不仅保留了原来图像的边缘特征和抑制了图像的部分噪声, 还保留了边缘点附近的区域信息, 可降低图像灰度、对比度差异对匹配特征提取和描述的影响^[15]。

1.2 NSCT 理论

NSCT 把图像分解成各个尺度上的带通方向子带。非采样拉普拉斯金字塔(Laplacian pyramid, LP)塔形分解被用来完成 NSCT 的多尺度分解。每一级 LP 分解将产生一个上一级信号的低通采样和由低通采样与上一级信号的差值得到的一个带通分量。下一级多尺度分解在产生的低通采样上迭代进行。非采样方向滤波器组(directional filter bank, DFB)把 LP 分解得到的带通图像的频谱划分成楔形频率子带, 完成特定尺度上的方向分解。由于没有上采样和下采样, 图像的分解和重构过程中不具有频率混叠项, 这使得 NSCT 具有平移不变性以及各级子带图像与原图像具有尺寸大小相同的特性。

图像经 NSCT 变换后, 大部分变换系数的值都接近于零, 只有极少的系数具有相对较大的幅值, 并且这些系数代表原始图像中的明显特征, 如边缘。NSCT 变换系数这种特有的聚零性和稀疏性, 极有利于图像匹配。因此, 如果在 NSCT 域进行图

像的匹配过程, 势必会进一步大大压缩搜索空间, 提高匹配效率。

1.3 Krawtchouk 不变矩理论

在景象匹配应用中, 特征空间的选择是一个关键问题。图像矩作为图像的特征描述子, 既可表达图像形状的全局特征, 同时也可提供不同类型的几何特性信息。另外, 图像矩经过简单的变换和重新组合, 可得到若干个平移、尺度和旋转不变特征量, 其在图像经过平移、缩放或旋转后, 仍保持不变, 因此可作为图像匹配的特征向量。传统正交矩难于同时表示图像的全局信息和局部信息, 因此仅适用于分类具有显著差别的模式, 而难以区分具有细微差别的相似模式。和传统正交矩相比, Krawtchouk 正交矩具有可以从任何感兴趣的图像区域中提取局部特征的优点。作为一种性能更为优良的正交矩, 由其构成的 Krawtchouk 矩不变量具有 Krawtchouk 矩的基本性质, 并具有良好的平移、旋转和尺度不变性。Krawtchouk 矩不变量的正交性消除了传统矩描述图像时的信息冗余, 也消除了传统连续矩对数字图像产生的离散化误差, 作为特征向量完全满足图像目标特征提取的要求。图像 $f(x, y)$ 的 $(n+m)$ 阶 Krawtchouk 矩可表示为:

$$Q_{nm} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} \bar{K}_n(x; p_1, N-1) \bar{K}_m(y; p_2, M-1) f(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{i,n,p_1} a_{j,m,p_2} m_{i,j}}{\sqrt{\rho(n; p_1, N) \rho(m; p_2, M)}} \quad (2)$$

$m_{i,j}$ 是 $i+j$ 阶几何矩:

$$m_{ij} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} x^i y^j f(x, y) \quad (3)$$

$\bar{k}_n(x; p, N)$ 是归一化 Krawtchouk 多项式:

$$\bar{k}_n(x; p, N) = \frac{k_n(x; p, N)}{\sqrt{\rho(n; p, N)}} \quad (4)$$

$$\rho(n; p, N) = (-1)^n \left(\frac{1-p}{p}\right)^n \frac{n!}{(-N)_n} \quad (5)$$

$$k_n(x; p, N) = \sum_{k=0}^N a_{k,n,p} x^k = {}_2F_1(-n, -x; N; \frac{1}{p}) \quad (6)$$

其中: $x, n=0,1,2,\dots,N, N>0, p \in (0,1)$ 。 ${}_2F_1$ 是超几何函数:

$${}_2F_1(a,b;c;z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(a)_k (b)_k}{(c)_k} \frac{z^k}{k!} \quad (7)$$

其中: $(a)_k$ 是 Pochhammer 算子。

$$(a)_k = a(a+1)\dots(a+k-1) \quad (8)$$

为了构造仿射不变性 Krawtchouk 矩, 使其满足平移、旋转、尺度不变性, 需要将图像 $f(x,y)$ 平移到其质心位置, 将其旋转主轴转化为 x 轴, 并将平移和旋转之后的图像进行尺度变换得到归一化图像。计算归一化图像的几何矩, 可得到对平移、旋转、尺度具有不变性的仿射不变几何矩 v_{ij} 。将其带入到图像 Krawtchouk 矩计算公式, 可得到对平移、旋转和尺度变换具有不变性的 Krawtchouk 不变矩^[17]:

$$\bar{Q}_{nm} = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{i,n,p_1} a_{j,m,p_2} v_{ij}}{\sqrt{\rho(n;p_1,N)\rho(m;p_2,M)}} \quad (9)$$

2 NSCT 域的多分辨率景象匹配算法实现过程

本文算法以 Krawtchouk 不变矩建立的特征模型为基础, 在 NSCT 域空间对各尺度低频图像构建多分辨率稳健匹配模型, 低分辨率的匹配结果作为高分辨率匹配过程的指导, 层层迭代得到全分辨率图像的匹配结果。匹配过程中采用遗传算法作为搜索策略来搜索最佳匹配位置, 进一步提高搜索速度。NSCT 域多分辨率景象匹配算法描述如下:

步骤 1: 对红外与可见光图像进行相位一致性变换, 削弱两者在灰度和对比度上的差异;

步骤 2: 对红外目标图像和可见光参考图像分别进行非下采样轮廓波变换, 得到两组分解系数;

步骤 3: 在可见光最高尺度 L 的低频图像上初始化种群, 随机生成 m 个个体, 低频图像行列坐标 (x,y) 作为个体的描述;

步骤 4: 以目标和参考图像相应尺度低频部分的 $(3+3)$ 阶 Krawtchouk 不变矩相关系数作为适应度函数:

$$fit = \frac{\sum_{n=0}^3 \sum_{m=0}^3 (\bar{P}_{nm} - \bar{P})(\bar{Q}_{nm} - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{n=0}^3 \sum_{m=0}^3 (\bar{Q}_{nm} - \bar{Q})^2}} \quad (10)$$

式中: \bar{P}_{nm} 是实时图像的 $(n+m)$ 阶 Krawtchouk 不变矩, \bar{P} 为其均值; \bar{Q}_{nm} 是以种群个体位置为起始点、与实时图像大小一致的基准图像的 $(n+m)$ 阶 Krawtchouk 不变矩, \bar{Q} 为其均值。对种群中的每一个体, 利用 Krawtchouk 不变矩相关系数决定的个体适应度, 经过遗传算法的选择、交叉、变异等基因操作, 迭代出经过优化的新种群;

步骤 5: 遗传搜索直至最大迭代次数或满足给定的精度;

步骤 6: 根据迭代后最优解, 输出低频部分的匹配位置 (x,y) ;

步骤 7: 在尺度 $L-1$ 上, 以 (x,y) 为中心的邻域内继续搜索, 找到该层的最佳匹配位置。重复这个过程, 直至最终找到全分辨率下的最佳匹配位置。

遗传搜索中以可见光图像低频部分的行列坐标描述个体 $X(x,y)$, 且以十进制方式编码, 适应度函数为(10)式。交叉和变异采用文献[18]的算法。

为克服遗传算法的早熟现象, 假设第 t 代种群 n 个个体的适应度分别为 $f_t^1, f_t^2, f_t^3, \dots, f_t^n$ 。适应度最大值所代表的个体可认为是该种群的最优个体, \bar{f}_t 表示第 t 代种群适应度的平均值, 则可定义

$$\Delta f = \frac{\bar{f}_t}{f_t^{\max}} \quad (11)$$

从式(11)可看出, Δf 可衡量种群的成熟度, 其值趋于 1 时, 表示种群个体趋于成熟。

本文基于种群成熟度概念, 动态调整交叉、变异等基因算子的比率, 实现遗传迭代早熟问题的克服。本文定义的个体自适应交叉和变异比率如下:

$$p_c = \frac{p_{c\max} - p_{c\min}}{\Delta f_{\min} - \Delta f_{\max}} (\Delta f - \Delta f_{\min}) + p_{c\max} \quad (12)$$

$$p_m = \frac{p_{m\max} - p_{m\min}}{\Delta f_{\max} - \Delta f_{\min}} (\Delta f - \Delta f_{\min}) + p_{m\min} \quad (13)$$

Δf_{\min} 和 Δf_{\max} 是成熟度的上下限, p_c 和 p_m 代表交叉和变异比率, p_m 与成熟度同方向变化, 而 p_c 则

相反。 p_{cmax} 、 p_{cmin} 、 p_{mmax} 和 p_{mmin} 分别交叉比率和变异比率的上下限。

当遗传迭代出现早熟趋势即种群成熟度 Δf 提

高时, 按照(12)式降低个体间的交叉比率 p_c , 按照(13)式加大个体的变异比率 p_m , 进而克服遗传迭代的早熟问题。整个算法的完整流程如图 1 所示。

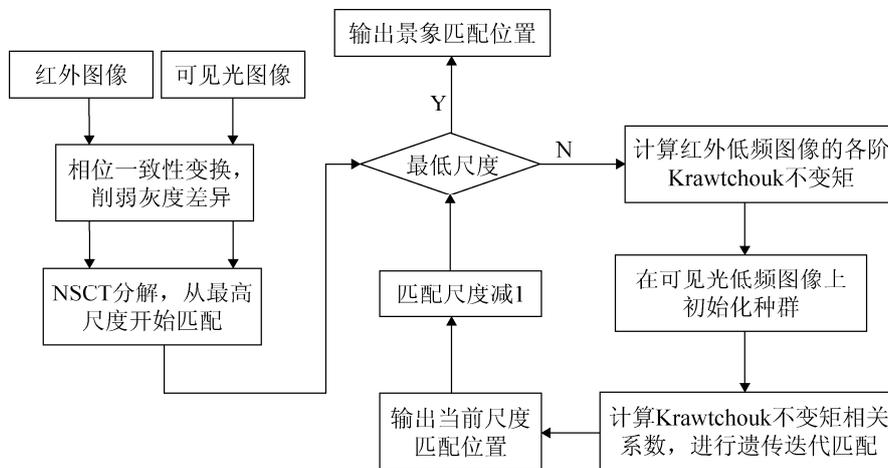


图 1 NSCT 域多分辨率匹配过程

3 实验与分析

实验硬件平台为方正台式机, CPU 主频 3.4 GHz, 内存 4 GB, 软件平台为 matlab 2008a。非下采样轮廓波变换中塔型滤波器为“9-7”, 方向滤波器为“pkva”。分解层数 L 的取值由实测图像的大小决定。 L 值偏小时, 需要较长的匹配时间才能得到准确的结果。 L 取较大值时, 匹配耗时减少, 但由于分解层数多, 低频部分所包含信息量减少, 易造成误匹配。综合考虑, 本文算法的分解层数取 3, 方向数取[16,8,4]。

按照遗传算法理论, 交叉和变异是遗传算法中产生新个体的方法, 且交叉算子是主要方法, 一般建议的比率取值范围是 0.4~0.9, 而变异算子的比率一般不超过交叉算子的下限。若变异比率取值较大, 虽然能产生出较多的新个体, 但有可能破坏掉较好的模式, 使遗传算法的性能近似接近随机搜索算法的性能; 若变异比率取值过小, 则变异操作产生新个体的能力和抑制早熟现象的能力就会较差。当判定出群体已经进化成熟且不再有进化趋势时即可终止算法运行过程, 可将相邻两代个体平均适应度的差异小于某一极小阈值作为判定算法终止的准则。此外, 需要限定进化迭代次数约束, 确保

遗传算法陷入局部最优达不到进化结束的条件时, 也能终止迭代过程。种群个体趋于成熟时, 衡量种群的成熟度的 Δf 其值趋于 1。鉴于此, 实验中遗传算法种群成熟度上下限 Δf_{min} 和 Δf_{max} 取 0.1 和 0.9, 交叉比率上下限 p_{cmax} 、 p_{cmin} 取 0.8 和 0.4, 变异比率上下限 p_{mmax} 和 p_{mmin} 取 0.4 和 0.1, 设定相邻两代个体平均适应度差异阈值为 0.01 或迭代 100 次作为各个尺度下遗传搜索结束的条件。

采用三组航拍可见光与红外视频图像序列进行匹配实验, 图像序列均为 100 帧。基准图像为可见光图像, 实测图像则采用红外图像, 大小分别为 640×720 像素、640×600 像素、720×240 像素, 实验中从三组视频中分别选取红外与可见光图像, 如图 2(a)和 2(b), 图 3(a)和 3(b)、图 4(a)和 4(b)所示。红外目标 1、2、3 从红外实测图像 2(b)中提取, 红外目标 4 来自于红外图像 3(b), 红外目标 5 从红外图像 4(b)中提取, 大小均为 128×128 像素。图 2 中 f、g、h, 图 3 中 d, 图 4 中 d 分别为红外目标 1、2、3、4 和 5 的相位一致性变换。通过运行本文算法, 在可见光基准图像上搜索红外目标的位置进行匹配实验。已知红外目标在可见光图像中的准确位置分别为(143, 82)、(342, 274)、(343, 69)、(420, 152)和(501, 141)。由于遗传算法求解具有一定的不确

定性,对 5 个红外目标在对应三帧可见光图像上的位置搜索分别重复运行本文算法 100 次,当且仅当匹配误差为(0, 0)时认为匹配正确,正确匹配结果如图 2(i)、图 3(e)、图 4(e)所示。从中可看出,尽管红外图像与可见光图像的对比度差异较大,但本文算法对图像的对比度差异不敏感,能够取得很好的匹配结果。表 1 代表本文算法的统计结果,其中 a 表示本文算法匹配平均误差和时间, b 代表采用标准遗传搜索策略、未克服种群早熟现象的本文算法。从中可看出,采用改进遗传搜索策略的本文算法在匹配精度和搜索速度上提升显著。本文算法的匹配正确率分别为 98%, 100%, 97%, 96%和 98%。如采用标准遗传搜索策略,本文算法的匹配正确率则分别为 86%, 92%, 88%, 84%和 87%。

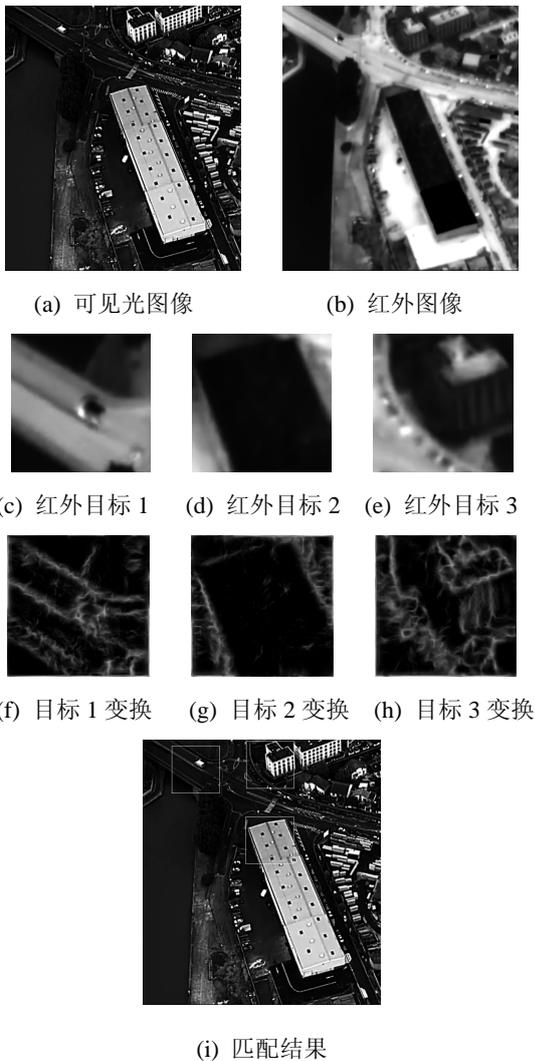


图 2 视频 1 图像匹配

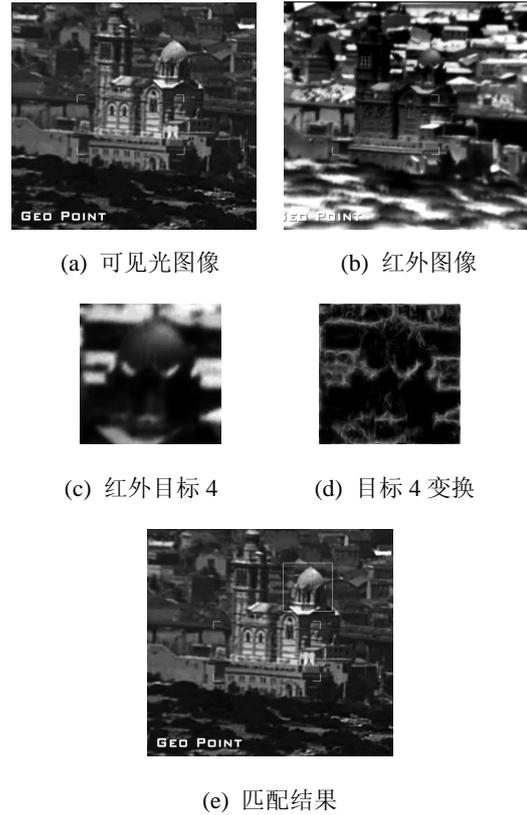


图 3 视频 2 图像匹配

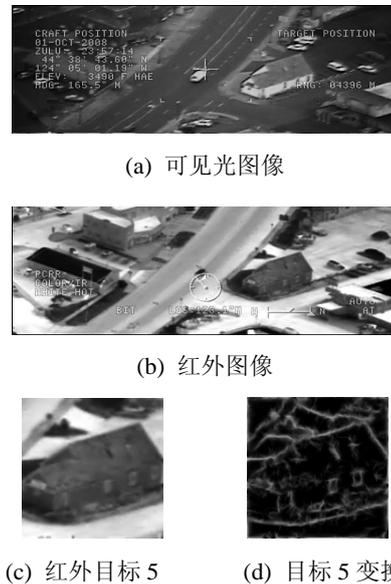


图 4 视频 3 图像匹配

表 1 本文算法的统计匹配结果

实验	平均匹配误差 a/像素	平均匹配误差 b/像素	平均匹配时间 a/s	平均匹配时间 b/s
1	(0.02,0.01)	(0.2,0.25)	1.164 9	1.453 7
2	(0,0)	(0.05,0.1)	0.802 7	1.021 6
3	(0.03,0.01)	(0.15,0.18)	1.376 9	1.824 9
4	(0.02,0.05)	(0.22,0.27)	1.146 3	1.793 4
5	(0.01,0.02)	(0.16,0.14)	1.083 9	1.482 1

下面以图 4 中红外目标 5 的一次成功匹配为例描述本文的算法过程。匹配过程从 NSCT 域最高级尺度开始, 第三级低频图像经过改进遗传搜索得到的匹配位置为(485, 160), 该级匹配过程的种群成熟度最高达到 0.26, 对应的交叉和变异比率分别为 0.72 和 0.16; 第二级低频图像匹配以上级匹配点为中心, 在(100,100)邻域内继续利用改进遗传搜索策略, 得到的新匹配位置为(492, 155), 该级匹配过程种群成熟度最高达到 0.52; 第一级低频图像得到的匹配位置为(497, 149), 种群成熟度最高达到 0.64; 进一步回溯到原图像, 得到最终匹配位置(501,141), 种群成熟度最高达到 0.75。整个匹配过程从第三级到原图像, 种群成熟度最高值从 0.26 变化到 0.75, 对应的交叉比率变化范围为 0.72~0.48, 变异比率则从 0.16 变化到 0.34, 实现了基于种群成熟度变化的遗传算子比率的自适应调整。

为进一步验证本文提出的克服早熟问题的改进遗传算法, 利用遗传算法性能测试 Scaffer 函数进行仿真:

$$f(x_1, x_2) = 0.5 - \frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{[1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2} - 100 < x_1, x_2 < 100 \quad (14)$$

此函数在(0,0)处得到全局最大值 1, 且在距(0,0)点约 3.14 范围内有多个次全局极大点。

将标准遗传算法和改进算法分别运行 50 次, 标准算法的求解结果为: 最大值 0.923 8, $x_1=1.826 2$, $x_2=2.119 3$; 改进算法的结果为: 最大值 0.997 8, $x_1=-0.054 7$, $x_2=0.092 5$ 。表 2 列出了算法的运行结果, 从中可看出改进遗传算法对于早熟问题的克

服起到了显著的作用。

表 2 改进遗传算法的数值仿真

参数	标准遗传算法	改进遗传算法
种群大小	100	100
独立运行次数	50	50
最大值	0.9238	0.9978
最优解	(1.826 2, 2.119 3)	(-0.054 7, 0.092 5)
收敛到 0.9~1 范围次数	6	32
收敛到 0.8-0.9 范围次数	12	14
运行结果均值	0.753 2	0.952 8

3.1 不同算法的比较

本文采用 3 种经典匹配方法进行比较: (a) 文献[4]的梯度互信息法; (b) 文献[5]的小波域多分辨率 SIFT 法; (c) 文献[11]的小波域多分辨率 Hu 不变矩法。对 5 个红外目标在对应三帧可见光图像上的位置搜索分别重复运行各算法 100 次。上述不同算法的匹配结果比较如表 3 所示。从中可看出: 算法(a)正确率较低且耗时明显比其它算法长, 这是因为互信息匹配法计算量最大; 算法(b)、(c)在保证正确率的同时, 速度明显提高, 原因在于匹配空间变换到小波域后, 压缩了搜索空间。算法(c)的速度要快于算法(b), 原因在于算法(b)提取的匹配特征点数量众多。本文算法由于在 NSCT 域引入 Krawtchouk 不变矩提取图像局部特征, 匹配精确度大于其它 3 种方法, 稳定性最好, 且搜索空间变换到更稀疏的 NSCT 域, 高尺度低频图像匹配结果指导低尺度低频图像匹配过程, 因此匹配速度较算法(a)、(b)、(c)来得快。

3.2 算法的抗噪性能

对 5 帧红外目标图像加入均值为 0, 方差分别为 0.005、0.05 和 0.1 的高斯噪声, 利用本文提出的算法进行匹配。对于每个加噪目标运行算法 50 次, 列出的最大匹配误差如表 4 所示。

表 3 不同算法匹配结果比较

实验	匹配算法	平均匹配误差/像素	平均匹配时间/s	正确率%
1	梯度互信息	(0.63, 0.67)	15.639 8	76
	小波+SIFT	(0.25, 0.27)	7.421 8	87
	小波+Hu 不变矩	(0.26, 0.19)	6.942 7	85
	本文方法	(0.02, 0.01)	1.164 9	98
2	梯度互信息	(0.62, 0.66)	13.254 6	77
	小波+SIFT	(0.22, 0.28)	5.783 4	86
	小波+Hu 不变矩	(0.18, 0.23)	4.537 6	88
	本文方法	(0, 0)	0.802 7	100
3	梯度互信息	(0.7, 0.64)	17.885 4	72
	小波+SIFT	(0.31, 0.27)	8.562 3	81
	小波+Hu 不变矩	(0.29, 0.22)	7.775 6	83
	本文方法	(0.03, 0.01)	1.376 9	97
4	梯度互信息	(0.53, 0.61)	16.154 8	78
	小波+SIFT	(0.25, 0.3)	7.853 6	84
	小波+Hu 不变矩	(0.22, 0.21)	6.297 7	86
	本文方法	(0.02, 0.05)	1.146 3	96
5	梯度互信息	(0.69, 0.71)	15.853 1	76
	小波+SIFT	(0.19, 0.23)	6.274 3	88
	小波+Hu 不变矩	(0.18, 0.31)	5.698 8	85
	本文方法	(0.01, 0.02)	1.083 9	98

表 4 本文算法的抗噪性能

红外目标	噪声强度	匹配误差/像素
1	0.005	(2,1)
	0.05	(-2,2)
	0.1	(3,-4)
2	0.005	(0,1)
	0.05	(1,1)
	0.1	(-3,3)
3	0.005	(1,1)
	0.05	(-1,-2)
	0.1	(4,3)
4	0.005	(1,-1)
	0.05	(3,3)
	0.1	(-4,2)
5	0.005	(1,0)
	0.05	(2,-2)
	0.1	(3,-4)

表中度量与正确匹配位置偏移的匹配误差值向右、向下为正，反之为负。可以看出，采用本文算法对带噪声的目标图像进行匹配，当噪声强度在

0.1 以下时，仍能得到较精确的匹配结果。当噪声强度达到 0.1 时，两个方向的匹配平均误差超过了 3 个像素，进一步验证了相位一致性变换对噪声的一定抑制能力。

3.3 算法的抗旋转几何畸变能力

实际应用中，几何畸变主要包括平移、尺度、旋转变换。对算法结果影响较大的是旋转几何畸变。对红外目标图像进行旋转变换如图 5，(2+2) 阶 Krawtchouk 不变矩如表 5。对每个目标的每个旋转角度图像运行本文算法 50 次，列出最大匹配误差的结果数据如表 6。从中可看出，本文方法基本不受图像旋转角度的影响，具备抗旋转几何畸变能力。由于 Krawtchouk 不变矩的稳定性，即便旋转角度达到 15°，本文方法仍然能够较精确定位，只是匹配计算量要略大一些。这进一步说明了 Krawtchouk 不变矩作为匹配特征的优越性。

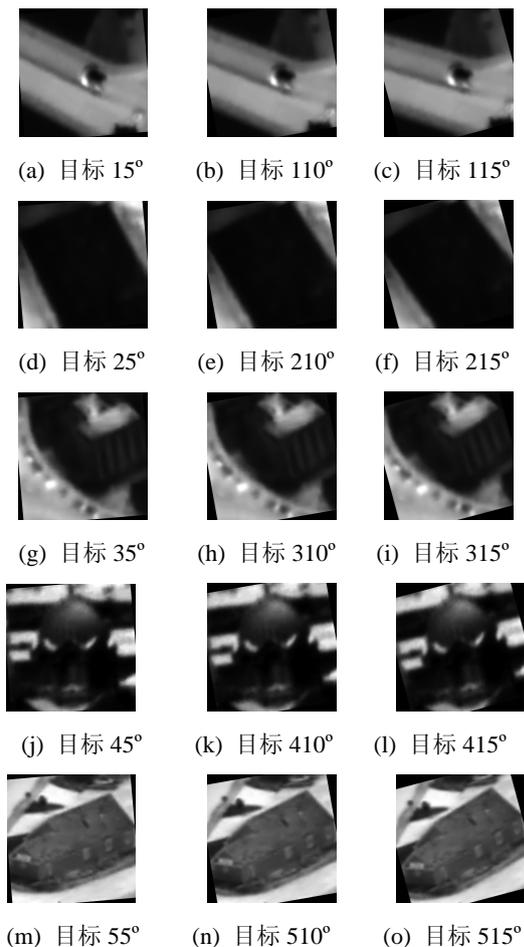


图 5 红外目标旋转

表 5 红外目标的 2 阶 Krawtchouk 不变矩

红外目标	旋转角度	2 阶 Krawtchouk 不变矩
1	0	31.060 2
	5	31.011 8
	10	31.018 5
	15	31.042 4
2	0	22.315 4
	5	21.677 9
	10	21.733 6
	15	21.245 4
3	0	28.679 7
	5	28.490 6
	10	28.368 1
	15	28.267 6
4	0	26.154 8
	5	26.076 7
	10	26.013 7
	15	25.942 3
5	0	34.163 2
	5	33.724 0
	10	33.366 9
	15	33.068 3

表 6 算法的抗旋转几何畸变结果

实验	旋转角度/ $^{\circ}$	匹配位置/ 像素	匹配误差/ 像素	匹配时 间/s
1	5	(143,83)	(0,1)	1.278 5
	10	(144,82)	(1,0)	1.973 1
	15	(142,83)	(-1,1)	2.367 9
2	5	(343,274)	(1,0)	0.826 7
	10	(341,273)	(-1,-1)	1.463 8
	15	(342,275)	(0,1)	1.886 3
3	5	(343,68)	(0,-1)	1.312 7
	10	(342,70)	(-1,1)	2.476 5
	15	(342,70)	(-1,1)	2.758 3
4	5	(420,154)	(0,2)	1.187 9
	10	(418,153)	(-2,1)	1.834 9
	15	(418,154)	(-2,2)	2.217 8
5	5	(500,140)	(-1,-1)	1.114 3
	10	(500,143)	(-1,2)	1.776 5
	15	(499,140)	(-2,-1)	2.158 3

4 结论

本文提出了一种利用非下采样轮廓波变换、Krawtchouk 不变矩和改进遗传算法的多分辨率红外与可见光景象匹配算法。该算法在利用相位一致性变换削弱红外与可见光图像灰度差异的基础上,对可见光基准图像和红外实测图像进行非下采样轮廓波变换,引入 Krawtchouk 不变矩来提取图像的局部特征,并利用克服早熟现象的改进遗传算法对高尺度低频低分辨率红外与可见光图像进行匹配操作,然后逐级上推,最终实现全分辨率情况下的景象匹配。通过本文研究,可得到以下结论:

(1) 将相位一致性理论引入到红外与可见光多模景象匹配中,通过对图像进行相位一致性变换得到具有光照和对比度不变的相位一致性图像,从而解决了红外与可见光图像因为模态不同而难以度量相似性的问题,同时提高匹配算法对噪声和局部形变的适应性。此外,由于通过非下采样轮廓波变换压缩了匹配搜索空间,使用 krawtchouk 不变矩描述匹配特征且利用改进遗传算法作为搜索策略,故本文方法与已有的基于特征匹配方法相比,不仅具有更高的匹配精度和运算效率,同时该算法

对噪声、几何畸变有鲁棒性，且计算速度较快。仿真结果证明了这一点。

(2) 尽管本文方法匹配速度较快，但距景象匹配导航工程实用的实时性要求还是有一定差距，还需要对算法进一步优化处理，如对匹配算法的并行性发掘及实现、采用 DSP 进行硬件加速等手段来提高匹配速度以满足工程实用的要求。此外，非下采样轮廓波变换塔型滤波器和方向滤波器的选择对匹配精度、匹配速度的影响本文没有深入讨论。这些问题将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] Stefano L D, Mattocia S, Tombari F. ZNCC-based template matching using bounded partial correlation [J]. Pattern Recognition Letter (S0167-8655), 2005, 26(14): 2129-2134.
- [2] 李俊山, 谭园园, 张媛莉. SSDA 的改进算法 [J]. 电光与控制, 2007, 14(2): 66-68.
- [3] 任三孩, 常文革, 刘向君. 一种基于小波变换和变尺度圆模板融合的景象匹配算法 [J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2200-2203.
- [4] 柏连发, 韩静, 张毅, 等. 采用改进梯度互信息和粒子群优化算法的红外与可见光图像配准算法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 248-254.
- [5] 武建明, 田铮, 刘向增, 等. 图像多尺度配准的小波域 SIFT 方法 [J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(1): 17-21.
- [6] Sima, A Aleksandra, Buckley, et al. Optimizing SIFT for matching of short wave infrared and visible wavelength images [J]. Remote Sensing (S2072-4292), 2013, 5(5): 2037-2056.
- [7] 朱英宏, 李俊山, 杨威, 等. 红外与可见光图像特征点边缘描述与匹配算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(6): 857-864.
- [8] 吉祥, 韩军伟, 梁楠, 等. 基于景象匹配的无人飞行器定位方法 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(6): 1291-1296.
- [9] 高峰, 文贡坚, 吕金建. 基于干线的红外与可见光最优图像配准算法 [J]. 计算机学报, 2007, 30(6): 1014-1021.
- [10] J H Lee, Y S Kim, D Lee, et al. Robust CCD and IR image registration using gradient-based statistical information [J]. IEEE Signal Processing Letters (S1070-9908), 2010, 17(4): 347-350.
- [11] 符艳军, 程咏梅, 潘泉, 等. 基于不变矩的景象匹配辅助导航快速匹配算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4): 847-853.
- [12] Cunha A L, Zhou J P, Do M N. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design and applications [J]. IEEE Trans. on Image Processing (S1057-7149), 2006, 15(10): 3089-3101.
- [13] Yap P T, Paramesran R, Ong S H. Image Analysis by Krawtchouk Moments [J]. IEEE Trans. on Image Processing (S1057-7149), 2003, 12(11): 1367-1377.
- [14] Morrone M C, Owens R A. Feature detection from local energy [J]. Pattern Recognition Letters (S0167-8655), 1987, 6(5): 303-313.
- [15] 凌志刚, 梁彦, 潘泉, 等. 一种鲁棒的红外与可见光多级景象匹配算法 [J]. 航空学报, 2010, 31(6): 1185-1195.
- [16] Kovese P. Image features from phase congruency [J]. Videre: Journal of Computer Vision Research (S1089-2788), 1999, 1(3): 1-6.
- [17] 张力, 肖薇薇, 钱恭斌, 等. 基于 Krawtchouk 不变矩的仿射攻击不变性局部水印算法 [J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1403-1408.
- [18] 刘刚, 梁晓庚. 遗传重采样粒子滤波的目标跟踪研究 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(19): 196-199.