

非下采样轮廓波域红外与可见光图像配准算法

刘 刚¹ 周 珩² 梁晓庚² 王明静²

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

摘 要 针对灰度和对比度存在较大差异的可见光图像与红外图像的配准问题,提出了一种基于非下采样轮廓波变换的多分辨率配准方法。该方法分别对可见光图像和红外图像进行非下采样轮廓波分解,引入梯度归一化互信息作为配准图像的相似性测度,利用基于种群成熟度描述的自适应确定交叉和变异比率的改进遗传算法作为搜索策略,对高尺度低频图像进行粗配准。然后,根据粗匹配结果在低尺度低频图像上进行进一步配准,最终实现全分辨率条件下红外和可见光图像的配准。实验结果表明,提出的算法能够有效提高配准精度和速度。

关键词 图像配准,红外与可见光,非下采样轮廓波,梯度归一化互信息,遗传算法

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.061

Image Registration Algorithm for Infrared and Visible Light Based on Non-subsampled Contourlet Transform

LIU Gang¹ ZHOU Heng² LIANG Xiao-geng² WANG Ming-jing²

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

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

Abstract For the problem of registration which takes infrared image as the actual data and the visible light image as the referenced data, a multiresolution registration algorithm was presented based on non-subsampled contourlet transform (NSCT). The infrared image and the visible image are transformed into non-subsampled contourlet domain firstly, then the proposed method takes the gradient normalized mutual information as the analogous measure for the low frequency image of high scale and searches the registration parameters with the improved genetic algorithm (GA). The improved GA adopts the adaptive crossover operator and mutated operator and conquers the precocious phenomenon based on the description for the population grade of maturity. Therefore, the coarse registration result could be acquired. Subsequently, the low scale registration procedure is gone on furtherly under the guide of the coarse result and the whole registration result would be obtained in the end. The experimental results show that the proposed method has high registration accuracy and fast speed.

Keywords Image registration, Infrared and visible light, Non-subsampled contourlet transform, Gradient normalized mutual information, Genetic algorithm

1 引言

图像配准技术是指依据一些相似性度量决定图像间的变换参数,使从不同传感器、不同视角、不同时间获取的同一场景的两幅或多幅图像变换到同一坐标系下的过程,其已在军事、遥感、医学、计算机视觉等领域得到广泛的应用。图像配准可分为单模态(同源)图像配准和多模态(异源)图像配准。由于红外图像和可见光图像信息互为补充,可以融合在一起用于目标定位和识别,而融合的前提是红外与可见光图像的配准。红外图像与可见光图像配准是最典型的多模图像配准之一。

现有的图像配准方法主要可分为两大类:基于区域的方

法^[1-5]和基于特征的方法^[6-12]。基于区域的配准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。基于特征的配准方法并不直接利用灰度信息,配准过程从特征出发,所用到的特征主要集中在点特征^[6-9]、线特征^[10]、梯度方向直方图特征^[11]和不变矩特征^[12]。

作为一种区域配准方法,互信息法不需要对不同成像模式下图像灰度间的关系作任何假设,也不需要图像进行分割或任何预处理,故互信息法可用于任何异源图像的配准。但传统互信息法计算量较大,为了达到实用化的目的,必须对其改进。一般说来,图像配准过程由特征空间、搜索空间、相似性度量、搜索策略 4 个要素组成。因此,提高配准效率可从上述 4 个要素出发。Studholme 等^[3]将重叠区域的变化考虑

到稿日期:2015-10-07 返修日期:2016-02-22 本文受航空科学基金(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(0p001631)资助。

刘 刚(1974—),男,博士后,副教授,主要研究方向为图形图像处理、测控技术、嵌入式开发,E-mail:lg19741011@163.com;周 珩(1972—),女,硕士,研究员,主要研究方向为红外成像制导;梁晓庚(1960—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为飞行器总体设计以及导航、制导与控制。

在内,提出了归一化互信息(Normalized Mutual Information, NMI)。柏连发等^[4]以梯度归一化互信息作为配准的相似性测度,从改进搜索策略的角度出发,采用粒子群算法对配准参数的搜索进行加速。臧丽等^[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,以归一化互信息为相似性测度,逐层搜索实现由粗到细的配准。

小波在表示具有点奇异性的函数时是最优基,但在高维情况下,图像特征主要表现为各种类型的曲线或曲面,即线或面的奇异性。由于小波变换核为各向同性,无法表达图像沿边缘的特性,因此用小波进行表示并不是渐进最优的。相对于小波变换,非下采样轮廓波变换(Non-Subsampled Contourlet Transform, NSCT)能用不同尺度、不同方向频率的子带更准确地捕获图像中的分段二次连续曲线,具有方向性和各向异性,对曲线有更稀疏的表示^[13]。故可考虑利用 NSCT 来进一步压缩配准过程的搜索空间。

为进一步提高配准效率,本文考虑应用智能化的搜索策略来加速配准过程。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。但遗传算法的随机性使其收敛速度较慢,迭代过程中容易出现早熟,即 GA 尚未搜索到全局最优解时种群已经成熟(所有个体均相互接近的状态),需要采取措施来避免。

综上所述,本文在非下采样轮廓波域实现了一种多分辨率的红外与可见光图像配准方法。该方法首先将红外图像与可见光图像变换到 NSCT 域,压缩配准过程的搜索空间;然后以红外图像与可见光图像的梯度归一化互信息作为配准特征的相似性测度,利用克服早熟问题的改进遗传算法作为配准参数的搜索策略,得到 NSCT 域高尺度低频图像配准参数并以此指导低尺度低频图像配准,层层迭代,最终得到全分辨率下的红外与可见光图像的配准结果。实验结果验证了本文方法在配准精度和配准速度上的优势。

2 NSCT 和互信息的基本原理

2.1 NSCT 基本理论

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相同尺寸大小的特性。

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 变换系数特有的聚零性和稀疏性使其极有利于图像配准。因此,如果在 NSCT 域进行图像的配准过程,势必会进一步大大压缩搜索空间,提高效率。

2.2 互信息理论

互信息的概念来源于信息论中的熵,是两个随机变量统

计相关性的测度。当两幅基于共同物理结构的图像达到最佳配准时,其对应像素的灰度互信息应为最大。由于该测度不需要对不同成像模式下图像灰度间的关系做任何假设,因此该测度可以被广泛地应用于多模图像配准。

图像 A 和图像 B 的互信息综合了图像的边缘熵、联合熵,其形式为两者的差,可表示为:

$$\begin{aligned} I(A, B) &= H(A) + H(B) - H(A, B) \\ H(A, B) &= H(A) + H(B|A) = H(B) + H(A|B) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $H(A)$ 和 $H(B)$ 代表图像 A 和 B 的边缘熵, $H(A, B)$ 表示两幅图像的联合熵, $I(A, B)$ 为图像的互信息。

当图像 A 和 B 完全配准时,条件边缘熵 $H(B|A)$ 和 $H(A|B)$ 最小,从而使 $H(A, B)$ 最小,互信息 $I(A, B)$ 达到最大值。

互信息对重叠区域的变化很敏感。对于多个目标存在相似灰度分布的情况,景物间可能存在多种配准情况,导致联合熵产生波动,边缘熵与联合熵的差值发生变化,在配准过程中将会导致错误的结果。归一化互信息将重叠区域的变化考虑在内,表达式为:

$$NMI(A, B) = \frac{H(A) + H(B)}{H(A, B)} \quad (2)$$

为了避免红外与可见光配准过程陷入局部极值,可考虑将图像互信息与特征相结合。虽然红外图像与可见光图像成像机理不同,但它们都可描述出物体的相同几何结构,而梯度图像能反映出这种相似性。进一步可定义梯度归一化互信息(Gradient Normalized Mutual Information, GNMI)^[4]:

$$GNMI(\nabla A, \nabla B) = \frac{H(\nabla A) + H(\nabla B)}{H(\nabla A, \nabla B)} \quad (3)$$

其中, $\nabla A, \nabla B$ 分别表示红外与可见光的梯度图像, GNMI 计算梯度图像的归一化互信息。本文算法采用梯度归一化互信息作为红外与可见光图像配准的相似性测度。

3 NSCT 域多分辨率配准算法实现过程

本文提出的 NSCT 域多分辨率红外与可见光图像配准算法可描述如下。

步骤 1 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 2 针对 NSCT 变换域最高尺度低频图像的配准参数空间,随机生成遗传算法初始种群的 n 个个体;

步骤 3 以目标和参考图像相应尺度低频部分的梯度归一化互信息作为种群个体的适应度函数,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 4 进行遗传搜索直至最大迭代次数或满足给定的精度;

步骤 5 根据迭代后最优解,输出相应尺度低频图像的配准参数;

步骤 6 针对 $L-1$ 尺度的低频图像,在上一级尺度配准参数的邻域内继续搜索,找到该层的最佳配准参数。重复这个过程,直至找到全分辨率下的配准参数。

遗传搜索中以配准参数描述个体且以十进制方式编码,适应度函数为式(3)。按照实数编码两个个体间的交叉过程可描述为式(4)。

$$\begin{aligned} x_i &= \alpha x_i + (1 - \alpha) x_j \\ x_j &= \beta x_j + (1 - \beta) x_i \end{aligned} \quad (4)$$

其中, α, β 为权值系数, 可由式(5)确定。

$$\alpha = \frac{GNMI(x_i)}{GNMI(x_i) + GNMI(x_j)} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{GNMI(x_j)}{GNMI(x_i) + GNMI(x_j)}$$

$GNMI(x_i)$ 是当前迭代时个体 x_i 的适应度, 以 x_i 所代表的配准参数对 NSCT 域某尺度下红外与可见光低频图像计算梯度归一化互信息来表达。这样的交叉过程使得结果更接近于适应度较大的个体。个体的变异采用非均匀变异方法^[14]。

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预防。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, $f_t^{\max}$ 代表适应度最大值, 则可定义:

$$\Delta f = \frac{\bar{f}_t}{f_t^{\max}} \quad (6)$$

易见, 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。

基于以上种群成熟度的定义, 自适应交叉和变异比率可描述如下:

$$p_c = \frac{p_{c\max} - p_{c\min}}{\Delta f_{\min} - \Delta f_{\max}} (\Delta f - \Delta f_{\min}) + p_{c\max} \quad (7)$$

$$p_m = \frac{p_{m\max} - p_{m\min}}{\Delta f_{\max} - \Delta f_{\min}} (\Delta f - \Delta f_{\min}) + p_{m\min} \quad (8)$$

其中, $\Delta f_{\min}$ 和 $\Delta f_{\max}$ 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。 $p_{c\max}$, $p_{c\min}$, $p_{m\max}$ 和 $p_{m\min}$ 分别为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, 按照式(7)降低个体间的交叉比率 p_c , 按照式(8)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。

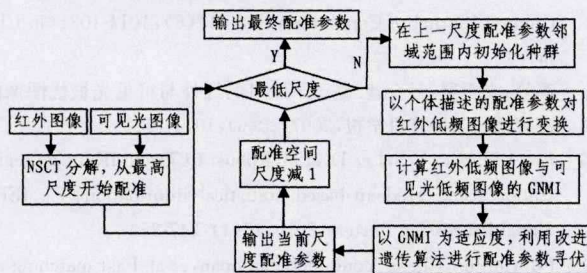


图 1 非下采样轮廓波域(NSCT)红外与可见光图像配准过程

4 实验与分析

实验硬件平台为方正台式机, CPU 主频 3.4GHz, 内存 4GB, 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”。本文算法的分解层数取 3, 方向数取 [16, 8, 4]。遗传算法种群成熟度上、下限 $\Delta f_{\max}$ 和 $\Delta f_{\min}$ 取 0.9 和 0.1, 交叉比率上、下限 $p_{c\max}$ 和 $p_{c\min}$ 取 0.8 和 0.4, 变异比率上、下限 $p_{m\max}$ 和 $p_{m\min}$ 取 0.4 和 0.1。在各个尺度分辨率下, 若相邻两次迭代最优配准参数对应的适应度值偏差小于 10^{-2} 或迭代次数达到 100, 则遗传搜索结束。

采用 3 组已配准可见光与红外图像进行实验, 大小分别为 396×233 , 394×291 和 395×234 , 如图 2 所示。实验中将

红外图像作为浮动图像, 分别做平移和旋转变换, 然后利用本文算法进行配准实验, 结果如表 1 所列。平移变换范围为 $[-20, 20]$, 负号表示向左向上平移, 正号表示向右向下平移。旋转变换范围为 $[-15^\circ, 15^\circ]$, 负号代表顺时针旋转, 正号代表逆时针旋转。

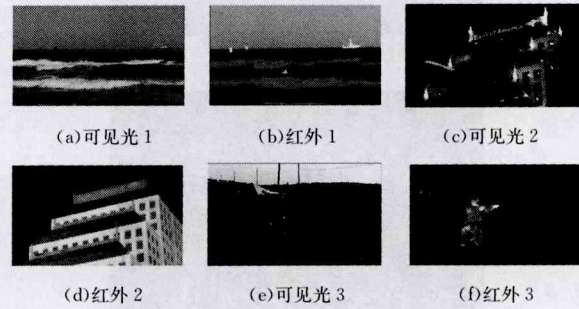


图 2 红外与可见光图像对

表 1 本文算法的配准结果

实验图像对		1	2	3
旋转变换	真值	5	10	-10
	计算值	5.62	9.37	-9.25
水平位移	真值	8	15	20
	计算值	7.32	15.54	19.28
垂直位移	真值	7	14	18
	计算值	7.45	13.28	17.39
迭代次数	NSCT+GA	82	95	88
	本文算法	65	79	72
配准时间 (s)	NSCT+GA	1.94	2.68	2.17
	本文算法	1.76	2.13	1.88

将本文算法与 3 种经典配准方法进行比较: (a) 文献[6]的小波域多分辨率 SIFT 法; (b) GNMI+改进 GA 法; (c) 文献[5]的小波域多分辨率+NMI 法。上述不同算法的配准结果比较如表 2 所列。从中可看出: 算法(a)配准精度较低, 这是因为 SIFT 特征点数量众多且受图像灰度变化影响较大; 算法(b)和算法(c)分别采用 GNMI 和 NMI 作为相似性测度, 配准精度要优于算法(a); 算法(c)在保证配准精度的同时, 速度上优于算法(b), 与算法(a)相当, 原因在于配准空间变换到小波域后, 压缩了搜索空间; 本文算法在非下采样轮廓波域引入 GNMI 作为配准过程的相似性测度, 搜索空间变换到更稀疏的 NSCT 域, 用低分辨率配准结果指导高分辨率配准过程, 同时利用克服早熟现象的改进遗传算法加快配准参数的搜索过程, 配准精确度高于其它 3 种方法, 且配准速度最快。本文算法的配准结果以边缘图叠加的方式展示, 如图 3 所示。红外图像的变换参数为: 旋转 10° , 水平位移 15 个像素, 垂直位移 14 个像素。

表 2 不同算法配准结果比较

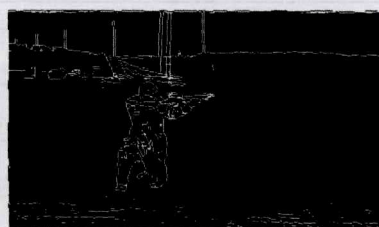
	配准算法	配准参数	配准时间(s)
图像 1	小波+SIFT	3.17, 5.21, 4.39	2.19
	GNMI+改进 GA	4.87, 6.96, 5.93	8.23
	小波+NMI	4.36, 6.17, 5.28	1.97
	本文算法	5.62, 7.32, 7.45	1.76
图像 2	小波+SIFT	6.27, 11.17, 10.63	3.13
	GNMI+改进 GA	8.73, 13.38, 12.67	10.43
	小波+NMI	8.18, 12.79, 11.91	2.98
	本文算法	9.37, 15.54, 13.28	2.13
图像 3	小波+SIFT	-6.16, 16.87, 14.18	2.47
	GNMI+改进 GA	-8.96, 18.76, 16.12	9.63
	小波+NMI	-7.92, 18.06, 15.63	2.36
	本文算法	-9.25, 19.28, 17.39	1.88



(a)图像对 1



(b)图像对 2



(c)图像对 3

图3 配准结果边缘叠加效果

结束语 本文提出了一种利用非下采样轮廓波变换、梯度归一化互信息和改进遗传算法的多分辨率红外与可见光图像配准算法。该算法对可见光图像和红外图像分别进行非下采样轮廓波变换,引入梯度归一化互信息作为配准过程的相似性测度,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配准操作,然后逐级上推,最终实现全分辨率情况下的图像配准。本文算法的创新之处在于:1)在非下采样轮廓波域以梯度归一化互信息为相似性测度构建红外与可见光图像配准模型;2)基于种群成熟度定义,自适应确定交叉和变异比率,利用克服早熟现象的改进遗传算法加快配准参数的搜索过程。实验结果表明,与部分经典配准算法相比,本文方法具有较高的配准精度和较快的配准速度。

参考文献

- [1] Stefano L D, Mattocia S, Tombari F. ZNCC-based template matching using bounded partial correlation[J]. Pattern Recognition Letter, 2005, 26(14): 2129-2134
- [2] Li Jun-shan, Tan Yuan-yuan, Zhang Yuan-li. An improved SSDA[J]. Electronic Optics Control, 2007, 14(2): 66-68 (in Chinese)
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] Studhotme C, Hill D L G, Hawkes D J. An overlap invariant entropy measure of 3D medical image alignment[J]. Pattern Recognition, 1999, 32(1): 71-86
- [4] Bai Lian-fa, Han Jing, Zhang Yi, et al. Registration algorithm of infrared and visible images based on improved gradient normalized mutual information and particle swarm optimization[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 248-254 (in Chinese)
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] Zang Li, Wang Jing-dong. Infrared and visible light image fast registration based on mutual information[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 164-168 (in Chinese)
臧丽, 王敬东. 基于互信息的红外与可见光图像快速配准[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 164-168
- [6] Wu Jian-ming, Tian Zheng, Liu Xiang-zeng, et al. Proposing an Effective Method for Image Multi-Scale Registration by Combining SIFT with Wavelet Transform[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(1): 17-21 (in Chinese)
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
- [7] Aleksandra S A, Buckley, et al. Optimizing SIFT for matching of short wave infrared and visible wavelength images [J]. Remote Sensing, 2013, 5(5): 2037-2056
- [8] Zhu Ying-hong, Li Jun-shan, Yang Wei, et al. A Feature Points Description and Matching Algorithm for Edge in IR/Visual Images[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(6): 857-864 (in Chinese)
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
- [9] Ji Xiang, Han Jun-wei, Liang Nan, et al. UAV Positioning Simulation Method Based on Scene Matching[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(6): 1291-1296 (in Chinese)
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
- [10] Gao Feng, Wen Gong-jian, Lv Jin-jian. An Optimal Algorithm for IR/Visual Image Registration Based on Main-Line-Pairs[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(6): 1014-1021 (in Chinese)
高峰, 文贡坚, 吕金建. 基于干线对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
- [11] Lee J H, Kim Y S, Lee D, et al. Robust CCD and IR image registration using gradient-based statistical information[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(4): 347-350
- [12] Fu Yan-jun, Cheng Yong-mei, Pan quan, et al. Fast matching algorithm for scene matching aided navigation based on invariant moments[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(4): 847-853 (in Chinese)
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
- [13] Cunha A L, Zhou J P, Do M N. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design and applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101
- [14] Liu Gang, Liang Xiao-geng. Research on target tracking based on Gene Algorithm's resampling particle filter[J]. Computer Engineering and Application, 2010, 46(19): 196-199 (in Chinese)
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