

基于信息熵与 SIFT 算法的天文图像配准

岳 昕¹ 尚振宏¹ 强振平² 刘 辉¹ 付晓东¹ 张志华¹

(昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650504)¹ (西南林业大学计算机与信息学院 昆明 650224)²

摘 要 天文图像配准是研究天体运动的一项关键技术,图像内部结构往往存在轻微的不规则运动。但是图像配准涉及到计算整个图像的变换关系,在此情况下,无论是采用基于统计特征还是基于局部特征的配准方法,都难以取得理想的效果。为此,提出基于信息熵与 SIFT 算法的天文图像配准方法。该方法首先需对图像进行均匀分块并计算每块熵值,以熵值最大者作为配准的局部子图,然后通过尺度不变特征变换(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)及仿射变换建立变换关系,继而利用局部子图变换关系完成图像的配准。该方法一方面能缩短变换关系的建立时间,另一方面能保证图像中信息熵最大区域配准,有效提高天文图像配准质量。

关键词 信息熵, SIFT 算法, 均匀分割, 仿射变换, 变换关系

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.6.013

Astronomical Image Registration Combining Information Entropy and SIFT Algorithm

YUE Xin¹ SHANG Zhen-hong¹ QIANG Zhen-ping² LIU Hui¹ FU Xiao-dong¹ ZHANG Zhi-hua¹

(Department of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)¹

(Department of Computer and Information Science, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)²

Abstract Astronomical image registration is a key technology of astronomical movement study, and often there is some slight irregular motion of internal structures in the image. However, in image registration the transformation of an entire image needs to be calculated. In this case, no matter whether registration is based on statistical characteristics or local features, it is difficult to achieve the desired results. On this basis, image is divided into several small squares firstly, and the entropy is calculated. Then square with maximum entropy is considered as the local sub-graph to register. Scale invariant feature transform and the affine transformation are used to establish relationships between local sub-graphs to complete image registration. On the one hand, this method can reduce the time of building transform relationship. On the other hand, it ensures the registration of the image area with maximum information entropy, and it also improves the registration quality of astronomical images effectively.

Keywords Entropy, SIFT algorithm, Evenly split, Affine transformation, Transform relation

1 引言

图像配准是将两幅或多幅来自不同时间、不同视角甚至不同成像设备但具有一定重叠区域的图像进行对齐的一个操作过程^[1]。它是近年来研究的一个热点,被广泛应用于机器视觉、目标识别、全景图像拼接、遥感图像处理、医学图像分析等领域,同时,在天文图像中也被大量用于辅助研究星体运动、制作磁场图等。

天体运动存在一个普遍现象,就是各星体甚至内部各结构并不是统一朝一个方向运动或旋转,它们之间存在一定的相对运动。因此,为了能更准确获得它们的位置和关系,在进行天文图像研究时,往往需要拍摄大量的序列图像进行配准。

图像配准的方法众多,现阶段可大致分为两类,分别是基

于统计特征的配准方法和基于局部特征的配准方法。基于统计的配准方法通常需要用相似性测度确定代价函数,然后根据搜索策略寻找最小代价以完成图像配准,最常见的是基于最大互信息的图像配准。在基于局部特征的配准方法中,常用的局部特征有点、直线、轮廓、闭合区域、不变矩,甚至可能运用它们的混合特征。

SIFT 是一种常用的基于局部点特征的配准方法,由 Lowe 等人将特征点检测、矢量生成、匹配搜索等步骤结合而产生^[2,3]。文献[4]对 SIFT 算法进行尺度缩放、视角变化、光照变化以及图像模糊,证明了 SIFT 算法具有一定的鲁棒性。Mikolajczyk 和 Schmid 在文献[5]中也对不变矩、互相关、SIFT 等 10 种最具代表性的算法进行实验比较,实验结果显示: SIFT 特征描述算子在光照变化、图像旋转、缩放、扭曲、模

到稿日期:2014-04-18 返修日期:2014-06-01 本文受国家自然科学基金资助项目(61462052,71161015),昆明市科技局项目(08S100310),中国科学院太阳活动重点实验室项目(KLSA201310)资助。

岳 昕(1989-),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理;尚振宏(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机视觉、数字图像处理等, E-mail: shangzhenhong@126.com(通信作者);刘 辉(1969-),男,博士,教授,主要研究方向为计算机视觉、模式识别等;张志华(1990-),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理。

糊等情况下性能最好。然而, SIFT 算法在具有好的鲁棒性及能有效处理缩放、旋转及遮挡等问题的同时, 也具有较低的实时性。由于其构建尺度空间需利用周围 26 点定位极值点, 对每个极值点方向、位置、模值进行描述以及在所获得的极值点中寻找同名点都需要进行大量计算, 因此非常耗时。

在文献[6]中, 作者利用区域生长提取目标区域, 完成视频率序列图像融合, 该方法简单易行并能取得良好效果。Zhang 等尝试运用图像中的显著特征区域来完成视网膜图像配准, 也获得了理想效果[7]。然而, 这样的方法也存在一个问题, 就如在天文图像中, 星体一般都分布散乱, 若利用轮廓分割或显著特征提取所获区域来完成图像配准, 就不能将配准对象有效地缩小到理想范围内。文献[8]以最大区域熵值作为分割标准, 在基于信息熵的图像配准中, 熵值是图像匹配考虑的关键, 那么可以将图像分割成众多小块, 以熵值来作为配准区域的选择标准。基于以上分析, 本文拟从均匀分割后的天文图像中提取局部图像作为配准区域, 这样不仅能缩小参与 SIFT 配准的像素点范围以减少计算时间, 还能保障图像中信息熵值最大部分的最好对准, 也就在一定程度上保障了图像整体的信息熵, 该方法优于直接利用 SIFT 算法配准。

2 SIFT 特征点与信息熵的关系

本文拟将 SIFT 配准与信息熵有效结合, 因此有必要先了解它们各自的原理。

2.1 SIFT 算法配准流程

SIFT 的配准步骤可大致分为 4 步, 分别是: 建立高斯差分尺度空间、获取极值点位置及方向、生成特征描述符和寻找同名点。

2.1.1 建立高斯差分尺度空间

尺度空间的建立是为了从图像中获得更多的信息, 大尺度图像可获得概貌特征, 小尺度图像可获得大量细节信息。高斯核是实现尺度变换的唯一变换核, Koenderink^[9]、Florack^[10]、Lindeberg^[11] 等人通过不同的途径对此进行了证明。二维高斯函数表示为:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

其中, σ 代表高斯正态分布的方差。

那么, 图像 $I(x, y)$ 的尺度空间函数 $L(x, y, \sigma)$ 由二维高斯函数与图像的卷积产生。

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \otimes I(x, y) \quad (2)$$

在此基础上, 通过相邻尺度空间两两相减获得高斯差分尺度空间, 其高斯差分响应值 $D(x, y, \sigma)$ 的数学表达式为:

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) \otimes I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, k 是表示两尺度空间倍数的常数。

2.1.2 获取极值点位置与方向

为了获得极值点位置, 每一个采样点均需要与自身及相邻尺度空间的邻域点进行比较, 也就是一个 $3 \times 3 \times 3$ 立方体的中心点同其上下相邻尺度及同尺度空间的共计 26 个点比较求极值, 以确保所获点在尺度空间及二维图像位置空间中都是理想极值点。在 SIFT 算法中, 每个极值点除了包含位置信息外, 还包含该点梯度的幅值信息 $m(x, y)$ 和方向信息

$\theta(x, y)$:

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (4)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}\right) \quad (5)$$

2.1.3 生成描述符

为了确保描述符的旋转不变性, 首先需旋转坐标, 保持坐标方向与极值点方向一致; 然后将平面内可能分布的 360 度梯度方向划为 8 个方向范围, 每个方向范围各包含 45 度角, 在子区域为 4×4 的情况下, 共计有 $4 \times 4 \times 8 = 128$ 个数据, 即生成 128 维描述符。方向与信息联合不仅增强了抗噪性, 还消除了尺度变化、旋转和变形的影响。

2.1.4 寻找同名点

在 SIFT 算法中, 以欧氏距离 d 作为图像间的相似性度量以确定同名点。欧氏距离二维表示为:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (6)$$

具体做法是: 首先在待配准图像中找出两个与参考图像中对应某极值点的欧氏距离最短的点; 然后以两个值中小小的值作为分子, 大的值作为分母, 若该分数值在给定的阈值范围内, 那么建立对应点的同名点关系, 称为匹配点。阈值的选取将直接影响同名点的数量, 阈值越大, 获得响应的同名点越多, 但这并不意味着配准效果越好; 相反地, 在阈值较小时, 获得较少的同名点将更稳定, 具有好的鲁棒性。对大量任意存在尺度、旋转和亮度变化的两幅图片进行匹配实验, 结果表明: 距离比值在 0.4~0.6 之间最佳, 小于 0.4 的很少有匹配点, 大于 0.6 的则存在大量错误匹配点。距离比值为 0.4 适合准确度要求高的匹配; 而 0.6 适合要求匹配点数目比较多的匹配; 一般情况下可设定距离比值为 0.5。

2.2 信息熵

对于一幅图像 A , 以 a 表示图像 A 中的元素, 假设每一元素具有 L 种状态, 则可定义变量 i 使其满足 $1 \leq i \leq L$, 并以 $p_i(a)$ 表示状态 i 的概率分布函数, 那么图像对应的信息熵 $H(A)$ 可定义为:

$$H(A) = -\sum_{i=1}^L p_i(a) \log p_i(a), i \in [1, L] \quad (7)$$

概率分布函数 $p_i(a)$ 表示如下, 其中 $h_i(a)$ 表示当状态为 i 时的累积数量:

$$p_i(a) = \frac{h_i(a)}{\sum_{i=1}^L h_i(a)}$$

从公式中可以看出: 图像中像素点取值不确定性越大时, 熵值越大; 而对于像素点值均为 0 的全黑图像, 它的任意一点的像素值都不存在不确定性, 因此熵值最小, 计算结果为 0。

2.3 SIFT 特征点与信息熵的比较

通过前面对 SIFT 算法及信息熵的分析, 不难发现它们的共同点: 无论是基于局部特征配准中的 SIFT 特征点还是基于统计特征配准中的信息熵值, 二者都强烈依赖于图像的灰度值的强度变化。前者在提取特征点时在相邻尺度与同尺度空间邻域内搜索极值点; 后者根据灰度值的概率分布获得信息熵。但是由于 SIFT 算法在计算过程中考虑了位置信息, 而信息熵值计算中无位置信息, 这就导致了一幅图像中的

特征点的数量并不能严格随熵值的增长而增长。为了更准确地分析 SIFT 特征点与信息熵之间的关系,本文设计了一个关于图像有重叠分割比较的实验,而鉴于有重叠需要大量分割图像和计算各子图区域的熵值,进一步设计了无重叠分割比较的实验。这里的有重叠指在一幅图像中随机截取若干块图像,块间允许有重叠区域出现,属于非均匀分割,该实验便于观察一幅图像中各个小区域的特征点和熵值的对应关系。无重叠是指对全图均匀分割,该实验在获得有重叠分割实验中特征点和熵值的一般对应关系后,进一步使用均匀分割探讨特征点与熵值的关系。无重叠分割既能保证全图中所有子图都参与熵值计算,又能大量节省图像分割和熵值计算的时间。

2.3.1 有重叠比较

图 1 是从 10 幅大小为 400×400 像素的天文灰度图像中,对每幅图像随机截取 20 幅尺寸均为 200×200 的子图区域,然后各自计算 200 幅子图区域的 SIFT 特征点数量和信息熵值的分布图,其中同一类型的点代表从同一幅灰度图像中截取的多幅子图的信息分布。观察图 1 发现:由于 SIFT 算法从邻域角度出发考虑灰度值强度的变化,而熵值大小却受整幅图像概率分布影响,因此两者间并不能严格地随对方的增长而增长,但它们仍从整体上呈增长走势。此外,在同一幅图像中比较,当子图熵值较大时,运用 SIFT 算法提取的特征点也较多。同时,熵值计算从全局考虑,具有高稳定性,而 SIFT 算法适应性强,具有较高的鲁棒性。

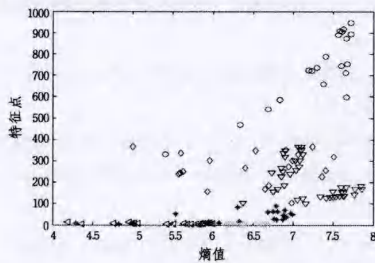


图 1 有重叠 SIFT 特征点数量和信息熵值的分布图

2.3.2 无重叠比较

图 2 是在对 10 幅大小为 400×400 像素的天文灰度图像均匀分割截取大小均为 200×200 像素的子图区域后,SIFT 特征点数量和信息熵值的分布图,其中,同一类型标记代表从同一全图中截取子图的信息。

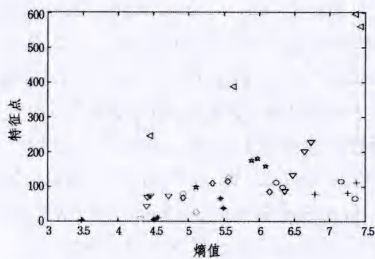


图 2 无重叠 SIFT 特征点数量和信息熵值的分布图

图 2 显示:用于实验的 10 幅天文图像中,有 5 幅图像的子图区域的最多特征点对应最大熵值,另 5 幅分别与第二大熵值相对应,并且在这 5 幅子图中,最大熵值与第二大熵值相差很小,其中有 4 幅子图的熵值相差仅在 0.2 范围内。对于那些信息量较少而导致熵值较小的子图区域,其获取的特征

点也相应较少。因此,以熵值作为实验的参考标准,能过滤掉图像中信息量少的子图区域。

基于以上分析可确认,考虑均匀分割,用最大熵值选择子图区域,并以 SIFT 完成区域配准,具有一定的可行性。

3 算法设计与实验分析

3.1 算法设计

图 3 为本实验使用的序列太阳核子图像中的一幅图像。

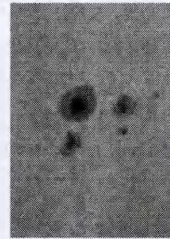


图 3 序列图之一

基于前面部分的考虑和分析,本文拟采用如下操作来完成图像配准。

1. 分割图像为等大小子图区域,子图区域数编号为 1, ..., n;
2. 计算各子图区域的熵值,熵值记为 $H(1), \dots, H(n)$;
3. 筛选最大熵值子图区域 $H(i)_{\max}$;
4. 选择子图区域 i ,以欧氏距离寻找同名点,以仿射变换确立变换关系,然后参与 SIFT 配准运算;
5. 以子图区域 i 的变换关系来建立总图的变换关系;
6. 进行图像融合。

本文算法的具体流程如图 4 所示。

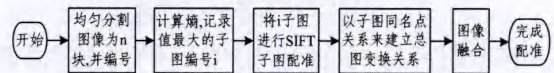


图 4 本文配准流程

3.2 实验结果与分析

图 5 显示的是将实验用图太阳核子图像分割成 9 个等大小子图区域。图 6、图 7 分别显示的是从待配准图像中检测出的特征点位于参考图像上的位置,其中图 6 是直接使用 SIFT 算法的特征点分布情况,而图 7 运用本文方法。从图 6 中能明显看出待配准图像与参考图像中各结构部分的不规则运动,在这类情况下,难以建立合理的全局变换关系。图 7 采用本文方法,仅由熵值最大的子图区域参与同名点计算,虽然其特征点较图 6 少,且相对集中,但各结构间的变化相对有规律,易于建立变换关系。

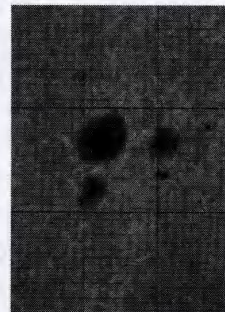


图 5 子图划分

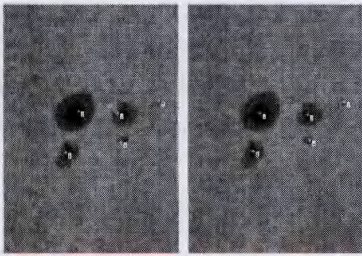


图6 SIFT方法特征点位置(左为参考图像,右为待配准图像)

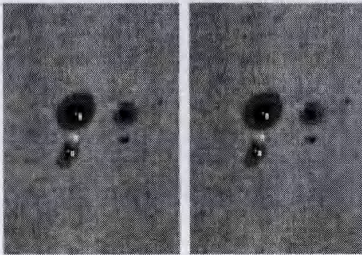


图7 本文方法特征点位置(左为参考图像,右为待配准图像)

图8、图9分别是直接运用SIFT算法和使用本文方法生成的融合图像。

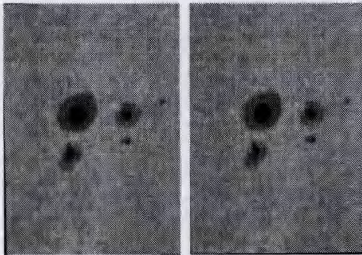


图8 直接配准 图9 本文方法配准

对比图6与图7可以发现:在存在不规则运动的天文图像中,直接进行SIFT匹配能获得更多同名点,而采用本文方法获取的同名点相对减少,但是更为准确。为了进一步证明本文方法的可行性,继续对图8、图9进行分析。表1列出了对比分析结果。

表1 配准优缺点对比

	配准时间	同名点数量	信息熵	相似性测度(1)	相似性测度(2)
直接SIFT配准	9.314804	8	4.8443	0.8345	0.8541
本文方法配准	5.147244	5	4.8538	0.9296	0.9083

由表1可知,本文方法的同名点数量较少,但配准时间大幅度减少;其信息熵略大于直接配准,但是本文方法以保证图像最大信息熵为前提,在多幅图像进行配准时,其信息熵值的差距能明显显现出来;配准后的图像,无论是与参考图像还是待配准图像进行相似性测度比较,本文方法均优于直接配准。

此外,对于天文序列图像而言,成像设备位置固定,图像内容在短时间内变化较小,位移、旋转和仿射变换较少,于是在连续成像的图像中,各子图的熵值基本不变,完全可以根据几幅子图区域间的熵值大小关系推测出该系列序列图像熵值最大的子图区域,减少配准预处理工作,这也为序列图像的子图区域配准提供了可能性。

结束语 图像配准是天文图像处理、分析中的重要环节,

但天文图像的内部结构间往往存在不规则运动,这就难以用常规方法达到理想的图像配准效果。

本文截取熵值最大的区域对天文序列图像匹配,建立图像间变换关系,并以局部关系完成全局配准。该方法简单易操作,能提高单纯使用SIFT算法配准的实时性,并且其运用图像中信息熵最大部分配准,这就能保证存在不规则局部运动的图像配准后的质量。由于在图像匹配前期预处理阶段含有图像均匀分割操作,因此图像内容不宜产生过大变动,因为灰度值的剧烈变化易导致各子图熵值变动,造成最大熵值子图块转移而出现误匹配。所以,使用该方法前需要观察图像,根据已有经验区分图像的显著区域,在此基础上进行图像分割,有助于划分出熵值较大的子图,可避免将显著区域均匀分割而使得各子图区域间熵值大小变化微弱,导致熵值最大子图区域与其余子图区域的差值较小。此外,该方法适用于内容变化较小的天文序列图像,能有效节省配准时间,提高运行效率,并能更好地保证图像的配准质量。

参考文献

- [1] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a survey [J]. *Image and vision computing*, 2003, 21(11): 977-1000
- [2] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]//The proceedings of the seventh IEEE international conference on Computer Vision, 1999. IEEE, 1999, 2: 1150-1157
- [3] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International journal of computer vision*, 2004, 60(2): 91-110
- [4] 王永明,王贵锦. 图像局部不变性特征与描述[M]. 北京:国防工业出版社, 2010
Wang Yong-ming, Wang Gui-jin. *Image Local Invariant Features and Description* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010
- [5] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(10): 1615-1630
- [6] 周锋飞,陈卫东,李良福. 一种基于区域生长的红外Z与可见光的图像融合方法[J]. *应用光学*, 2007, 28(6): 737-741
Zhou Feng-fei, Chen Wei-dong, Li Liang-fu. Fusion of IR and Visible Image Using Region Growing [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(6): 737-741
- [7] Zheng J, Tian J, Deng K, et al. Salient feature region: a new method for retinal image registration [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2011, 15(2): 221-232
- [8] 孟芳兵. 一种基于最大区域熵值的图像融合方法[J]. *武汉理工大学学报:信息与管理工程版*, 2009, 31(1): 19-21
Meng Fang-bing. An Image Fusion Technique Based on the Maximum Region Entropy [J]. *Journal of WVT: Information & Management Engineering*, 2009, 31(1): 19-21
- [9] Koenderink J J. The structure of images [J]. *Biological cybernetics*, 1984, 50(5): 363-370
- [10] Florack L M J, ter Haar Romeny B M, Koenderink J J, et al. Scale and the differential structure of images [J]. *Image and Vision Computing*, 1992, 10(6): 376-388
- [11] Lindeberg T. *Scale-space theory in computer vision* [M]. Springer, 1993