基于特征点集的匹配算法应用于卫星姿态确定

蔡晓东 叶培建

(中国空间技术研究院 总体部,北京 100094) (北京航空航天大学 计算机学院,北京 100083)

摘 要: 综合了灰度与几何特征匹配方法,依据局部纹理能量分布选取特征点集,并利用特征点集的几何约束关系构建了可描述图像整体特征的模板. 通过逐步求精方法实现了实时图像与基准图像的匹配. 首先通过特征点集匹配进行粗搜索;然后通过精搜索以及角度校正得到实时图像中目标偏移旋转量. 该特征点集算法与传统图像匹配算法相比较,在保证精度的基础上能提高匹配速度,且具有一定的旋转不变性和抗噪性. 仿真实验证明了该算法的可行性.

关 键 词: 卫星; 图像匹配; 能量法

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)02-0171-05

Image matching algorithm based on feature point set for satellite attitude calculation

Cai Xiaodong

(Department of Integration Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Ye Peijian

(School of Computer Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Gray scale and geometry feature approaches were integrated. Feature point set was selected according to local texture energy distribution and geometry constraint of feature point set was utilized to construct templates describing the holistic feature of the image. A stepped refining image matching algorithm was introduced. Coarse searching was performed first by feature point set registration, thereafter fine searching and angle correction was processed so that the object translation and rotation in the real-time image can be obtained. Compared with traditional image registration methods, this algorithm can enhance the matching speed while maintaining high matching precision with rotation invariance and noise depression capability. The application of such algorithm is verified by simulated experiments.

Key words: satellite; image matching; energy method

近年来,图像匹配在巡航导弹、无人机的应用越来越广泛. 图像匹配是指将事先侦察得到的一系列地面图像预存于飞行器计算机中,当携带图像传感器的飞行器到达预定位置时,将获取的实时图与预存的已知地理位置关系的基准图进行图像匹配,以此确定飞行器的当前位置或偏离预定位置的纵向和横向偏差,从而完成飞行器的导航和制导功能[1]. 卫星利用可见光波段的 CCD (Charge-Coupled Device) 成像敏感器对地球上固定地物目标的成像信息,采用图像匹配技术,可得到实时图与基准图之间匹配点的偏移量,通过空间矢量转换以确定卫星的姿态,这种获取姿态信息的方法称作"陆标敏感器"[2].

目前已有许多可行的图像匹配算法,其中典型的算法包括基于灰度差值相关的匹配算法[3],基于角点等几何特征的匹配算法[4,5],这些算法

收稿日期: 2005-07-12

作者简介: 蔡晓东(1972-),男,湖北枝城人,博士生, caixiaodong@cast.cn.

是将灰度、几何信息分别进行处理. 在实际应用中,上述匹配算法或复杂,或计算量较大,不适合应用于实时性很强的卫星姿态信息的提取.

针对陆标敏感器的实际应用,本文提出了综合灰度与几何信息的特征点集匹配算法. 依据特征点能量分布选取特征点集,该特征点集既体现区域局部纹理能量,又反映各特征点间的几何约束关系,以此特征点集的灰度与几何信息为基础构建模板,然后利用特征点集进行粗匹配,得到图像匹配点之间粗略的平移旋转量;再利用 SVD (Singular Value Decomposition)[6] 提取目标局部区域的特征进行精匹配,可精确确定目标相对平移量,再根据空间矢量转换可计算卫星的滚动、俯仰角,通过目标校正可确定实时图相对基准图的转角,即卫星的偏航角.

该算法不仅计算量小,还具有良好的抗噪声、抗灰度变化的能力.

1 特征提取

图像匹配算法中最重要的是特征提取,特征提取直接关系到后续图像匹配的速度和精度,本文以特征点能量为基础,构建具有几何约束的特征点集模板.

1.1 特征点能量

特征点能量一般定义为图像特征点邻域相对灰度变化程度,它反映了特征点处图像的局部能量信息.

为得到图像中点(m,n)处的能量,先计算该特征点邻域的均值,然后基于 Laws 纹理能量方法,可以定义特征点(m,n)处的能量为$E(m,n)$,其数学特征描述为

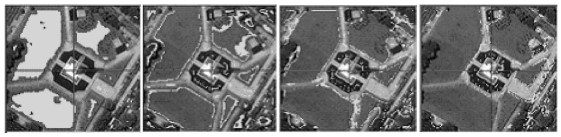
$$E(m,n)=\frac{\sum_{i=-N}^{N}\sum_{j=-N}^{N}\left|f(m+i,n+j)-\overline{f(m,n)}\right|}{(2N+1)\times(2N+1)} \tag{1}$$

其中,$f(m,n)$为点(m,n)的像素灰度值;$\overline{f(m,n)}$为特征点(m,n)的邻域灰度均值;$(2N+1)\times(2N+1)$为其邻域范围. 邻域大小的选取与实际处理过程有关,如果图像分辨率较大,可以适当扩大模板,反之则可减小模板的大小.

特征点能量具有以下几个特点:

1) 可表征图像的纹理特征. 特征点集能够代表该区域内不同的图像纹理特征,如图 1 所示,草坪、水面等平坦区域能量范围在[0,5],而接近图像边缘处的特征点能量较大.

2) 具有旋转无关性. 由于特征点能量描述了其所在邻域的特征,而不仅仅是单一点的灰度信息,因此特征点能量法对旋转不敏感,具有一定的旋转无关性.



a [0,5] b [8,12] c [18,22] d [28,32]

图 1 不同能量范围内特征点的分布实例图

3) 具有一定的抗噪声能力. 由于特征点能量采用邻域均值,可在一定程度上消除噪声影响.

1.2 特征点集模板的创建

模板创建时,先得到特征点的特征值在各范围内的分布情况,根据特征点能量将基准图的所有像素划分为若干能级,则第 k 能级所有点$P(m,n)$组成的集合 F^k 定义为

$$F^k=\left\{P(m,n)\,\middle|\,E^k_{\min}\leqslant E(m,n)<E^k_{\max}\right\} \tag{2}$$

其中 $E^k_{\min}$、$E^k_{\max}$分别为第 k 能级的下限和上限.

在不同能级中按照一定比例分别选取若干特征点,在 k 能级范围内选取 n_k 个特征点 p^i_k($p^i_k\in F^k, i=1,\cdots,n_k$),组成 k 能级特征点集,$P_k=\bigcup_i p^i_k$,最终构成特征点集模板 $M=\bigcup_k p_k$.

为使特征点集能够表达图像的总体信息,特征点集一般应包含 20~40 个特征点. 为提高特征点集的匹配精度和抗噪性能,对特征点集的分布应有一定要求. 特征点提取遵循以下两条原则:①均布性,即选取的特征点在图像中均匀分布,形成一定几何约束,以保证特征点集匹配的精度;②群集性,即在能级范围中特征点聚集的区域内选取接近其局部区域形心的特征点,而相对孤立的离散特征点则不予考虑.

若将不同能级特征点分别由不同形状标记表示,由图 2 可知这些特征点相互之间具有确定的几何关系. 由于特征点集在不同图像目标或背景下呈不同分布,因此由不同能量范围内特征点构成的特征点集既体现区域的局部纹理信息,又反映各个特征点之间的几何约束关系. 这种特征点集同时包含了目标图像本身的灰度和几何特征,较之灰度相关或角点等几何特征提取方法,可利用的信息更为全面.

特征点集模板包含三部分信息:

1) 模板中心点的特征点能量. 目的在于利用模板中心点进行初筛选,以提高匹配效率. 模板中心点可选用较为特殊的特征点,为便于说明本文

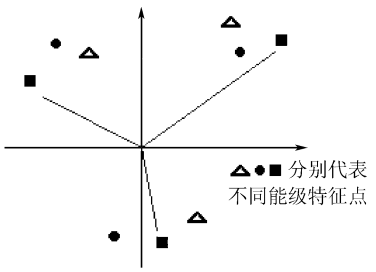


图 2　特征点集示意

采用模板的几何中心.

2）非中心点的特征点能量,以及特征点极径和极角. 在中心点匹配的基础上,对非中心的其他所有特征点集合进行匹配.

3）模板中两特定特征点间线段的斜率. 在目标定位后利用线段的斜率变化对目标旋转角度进行校正.

以下的图像匹配算法是针对所创建模板中具有特定能量分布的若干特征点在实时图像中进行点集匹配.

2　图像匹配算法

算法分为两步,首先进行粗匹配,根据特征点集匹配得到准目标区域;在此基础上进行精匹配,即在准目标区域中搜索与基准图像匹配度最高的位置. 匹配算法基本流程如图 3 所示,其中流程图左列部分为粗匹配阶段,右列部分为精匹配阶段.

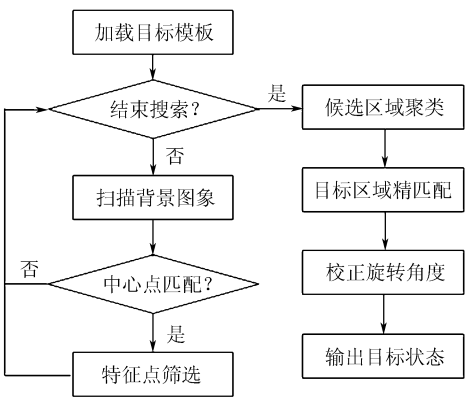


图 3　图像匹配的流程图

2.1　粗匹配阶段

粗匹配阶段主要进行特征点集匹配. 先根据中心点进行图像扫描,利用中心点的特征能量进行初步筛选. 如果扫描到的像素点与中心点的特征能量差别较大,就可以排除该像素点周围的区域;如果中心点的特征值与像素点的特征值在一定的阈值范围内),则得到候选匹配位置(x_0,y_0),以步长 $\Delta\theta$ 对基准图像进行旋转检测搜索,得到候选匹配角度 θ,其中 $\theta\in[\theta_{\min},\theta_{\max}]$. $\theta_{\min}$ 与 $\theta_{\max}$ 分别为设定的最小、最大旋转角,则实时图中同名特征点的理论坐标为

$$\left.\begin{aligned} x_i &= x_0 + \lambda\cos(\theta+\phi_i)\\ y_i &= y_0 + \lambda\sin(\theta+\phi_i)\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

其中,(x_0,y_0)为局部区域中心点的坐标;λ、ϕ_i 分别为基准图像中第 i 个特征点的极径、极角.

将公式(3)计算得到实时图像中理论同名点(x,y)的特征能量值与基准图像中提取的特征能量值进行比较,如果差别在设定的阈值之内,可以认为该特征点匹配成功;如果特征点集中特征点成功匹配数目达到阈值,则认为以此像素为中心的图像区域为候选区域. 保留当前像素点的坐标(x_0,y_0)及其相关的旋转角度 θ,并设定当前像素点为目标区域的中心点. 依上述步骤扫描整幅图像,最终可得到若干候选区域.

粗匹配阶段实质上利用特征点间的几何约束关系进行搜索,与图像灰度互相关匹配算法相比,由于仅比较图像中特征点集合的相似程度,而不必比较基准图像所有像素点,可大大减少计算量,因此该方法具有较好的快速性.

2.2　精匹配阶段

由于粗匹配阶段满足阈值要求的区域均设为候选区域,因此需要对候选区域进行精匹配. 精匹配阶段主要对这些候选区域进行整体特征匹配,进一步筛选候选区域,确定匹配点的最终位置. 本过程主要包括三个步骤:候选区域聚类分析、匹配点的最终定位、旋转角度校正.

1）候选区域聚类分析. 经过粗搜过程后,得到一系列候选区域. 一般情况下,在非目标区域,候选区域出现可能性较小,而目标区域可能出现多个候选区域,因此可通过候选区域聚类分析,删除个别孤立候选区域. C-均值聚类[7] 能够很好地将相近区域归结为一类,从而将所有候选区域归结为若干类. 如果较之其它类,某一类中的元素数量具有优势多数,那么聚类后该类将包含正确的目标位置.

2）匹配点的最终定位. 根据候选区域中心点的坐标,得到局部区域的 SVD 奇异值. 以此为依据判别候选区域是否为搜索目标.

3）旋转角度校正. 目的就是快速得到精确的目标旋转角度.

角度校正示意图如图 4 所示,其中 A 与 A',B 与 B'是同名特征点. A'、B'是特征点集模板中的特定点,根据几何关系易于证明,线段 AB 与线段 $A'B'$的夹角就是坐标系旋转的角度,即目标旋转

的角度. 假设 AB 的斜率为 k_1, $A'B'$ 的斜率为 k_2, 特征点 A' 和 B' 精确定位后, 可求出实时图与基准图之间的旋转角, 即卫星的偏航角.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 \times k_2}\right) \tag{4}$$

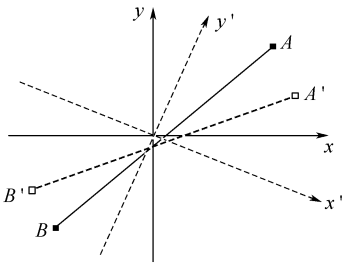


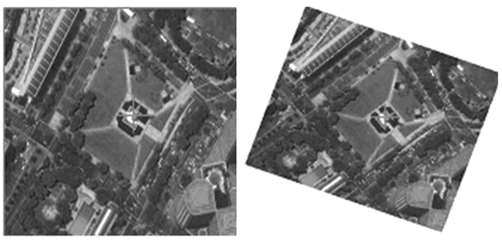
图4 角度校正示意图

3 仿真实验结果及分析

为验证本算法的可行性, 进行以下仿真实验.

3.1 加入噪声实验

在基准图像中分别加入高斯白噪声和椒盐噪声, 其中图5c为基准图像, 图5a、5b分别为经人工顺时针旋转0°和20°的加噪实时图像. 仿真实验表明该算法针对目标的平移匹配精度可达到一个像素; 针对目标的旋转, 经过角度校正后误差小于0.5°, 实验结果验证了本算法具有一定的抗噪声能力. 由文献[8]可知当匹配精度为1个像素时, 卫星滚动、俯仰方向的姿态测量精度优于1″, 即测量精度可以达到秒级.



a 旋转0°加噪实时图像 b 旋转20°加噪实时图像



c 基准图像

图5 图像平移与旋转匹配结果

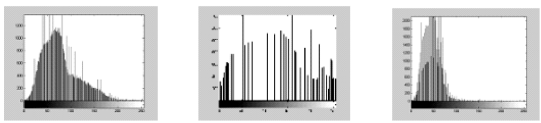
3.2 灰度分布调整仿真实验

由于卫星图像的灰度分布可能因季节、光照等因素发生较大变化, 在实验中对图像的灰度分布进行调整.

将实时图像灰度分别向灰度值高、低方向调整, 得到图6a、图6b, 其灰度直方图分别如图6d和图6e所示(灰度均值分别为200.8与48.4), 调整前直方图如图6c所示(灰度均值为78.9). 由图6可知调整后两幅图像灰度分布与原图差异较大. 对这两幅图像采用与3.1相同的基准图像进行匹配, 实验结果可知, 特征点集算法具有适应灰度变化的能力.



a 灰度调高实时图像 b 灰度调低实时图像



c 调整前直方图 d 灰度调高后直方图 e 灰度调低后直方图

图6 灰度分布调整实验

3.3 算法速度实验

利用本文算法与灰度相关算法及SSDA(Sequential Similarity Detection Algorithm)算法进行速度性能比较.

1) 实验环境为: Windows2000、P4 1.7G、512RAM, 三种算法均在VC++6.0下实现.

2) 实验方法: 选取同样大小的卫星图像, 模板大小分别为50×50和100×100, 分别利用本文算法、规一化灰度相关算法(NC算法)和序贯相似性算法[9](SSDA算法)搜索模板的位置, 其中针对前述两种大小的模板图像, 本文算法提取的特征点个数分别为10与20个. 三种算法搜索时间的比较见表1.

3) 结果分析: 由表1可知, 本文算法在时间性能上远优于其它两种算法. 在NC算法和SSDA算法中, 由于需要利用模板图像和实时图像计算两者的相关系数, 故针对大小一样的同一幅图像, 选择不同的模板大小, 很大程度上影响搜索的时间, 因此针对同一幅图像, 模板大小不同, 搜索时间差别很大; 而在本文算法中, 针对同一幅图像, 虽然选择的模板大小和特征点数目不同, 但是搜索时间主要消耗在计算实时图像的特征值上, 模板大小对此影响不大, 因此, 针对同一幅图像, 模板大小不同, 时间差别不大, 但是考虑到精匹配中精度的需要, 应当选择适当大小的模板.

表1 匹配算法的比较

图像大小	模板大小	NC算法时间/s	SSDA算法时间/s	本文算法时间/s

304×295	50×50	62.266	32.578	1.097
304×295	100×100	158.594	81.265	1.266
500×500	50×50	204.016	107.516	2.073
500×500	100×100	575.41	319.672	2.625

综上所述,仿真实验结果证明了本算法的可行性.

4　结 束 语

针对卫星实时 CCD 遥感图像,利用图像匹配技术来提取卫星姿态信息,这在国内航天器领域还是首次提出,因此研究一种实时性强的图像匹配算法是未来工程化的关键. 本文从卫星实际应用需求出发,设计了一种匹配速度和精度兼顾的匹配算法,该算法依据特征点能量分布,按照均布群集原则选取特征点集构成模板. 由于该特征点集既体现区域局部纹理能量,又反映各特征点间的几何约束关系,因此模板在大幅减小匹配计算量的同时,保持了基准图像的整体信息. 该算法具有旋转无关性的检测能力以及抗噪及抗灰度变化能力,能够在图像同时存在平移与旋转情况下实现匹配点的定位.

参考文献 (**References**)

[1] 孙仲康,陈辉煌. 定位导航与制导[M]. 北京:国防工业出版社,1987
Sun Zhongkang, Chen Huihuang. Position navigation and guidance[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1987 (in Chinese)

[2] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1998
Zhang Renwei. Satellite obrit&attitude dynamics and control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1998 (in Chinese)

[3] 孙　远,周刚慧,赵立初,等. 灰度图像匹配的快速算法[J]. 上海交通大学学报,2000,34(5):702 ~ 704
Sun Yuan, Zhou Ganghui, Zhao Lichu, *et al*. Fast template matching algorithm based on the projection [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34 (5): 702 ~ 704 (in Chinese)

[4] Miroslav Trajkocic, Mark Hedley. Fast corner detection[J]. Image and Vision Computing, 1998, 16(2):75 ~ 87

[5] Zhou Dongxiang, Liu Yunhui, Cai Xuanping. An efficient and robust corner detection algorithm[A]. In: Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation[C]. Hangzhou: IEEE, 2004. 5 ~ 10

[6] 任仙怡,张桂林,张天序,等. 基于奇异值分解的图像匹配方法[J]. 红外与激光,2001,31(4):200 ~ 202
Ren Xianyi, Zhang Guilin, Zhang Tianxu, *et al*. An image target tracking algorithm based on singular value decomposition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 31 (4): 200 ~ 202 (in Chinese)

[7] 边肇祺,张学工. 模式识别[M]. 北京:清华大学出版社,1999
Bian Zhaoqi, Zhang Xuegong. Patten recognition[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999 (in Chinese)

[8] 蔡晓东,叶培建. 卫星遥感图像信息作为姿态敏感器的应用研究[J]. 中国空间科学技术,2005,25(6):8 ~ 13
Cai Xiaodong, Ye Peijian. Research on satellite attitude sensor applying remote sensing image information[J]. China Science of Space Technology, 2005, 25(6): 8 ~ 13 (in Chinese)

[9] 王兴国,刘济林,顾唯康. 流场可视化中的运动矢量估计方法[J]. 电子学报,1999,27(2):99 ~ 102
Wang Xingguo, Liu Jilin, Gu Weikang. Motion vector estimation algorithm for digital particle image velocimetry[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(2): 99 ~ 102 (in Chinese)