

基于小波变换的实时影像匹配

陈 鹰 简剑峰 林 怡

(西安测绘研究所, 西安 710054)

摘 要 讨论了一种基于小波变换的实时影像匹配方法。在多尺度特征提取的过程中, 采用了局域正则性指数作为约束条件, 保证了特征提取的可靠性; 利用小波正交分解与重建实现了分层匹配; 同时, 采用特征与影像叠加进行了亚像素匹配。经过试验证明, 上述方法是行之有效的。

关键词 小波, 分解与重建, 多尺度特征提取, 匹配

1 引 言

实时影像匹配的基本任务是在空中飞行的条件下, 利用实时获取的地面影像, 与预先提供的基准影像进行匹配, 从而达到确定飞行器瞬时空间位置并进行导航的目的。在这种情况下, 由于飞行器惯导系统的误差, 匹配必须在大范围内搜索才能完成, 这就使得速度与可靠性成为匹配定位的关键。

为了提高速度, 传统的方法是利用低通滤波构成金字塔影像, 进行由粗到精的分层匹配, 其缺点是使影像边缘变得模糊, 而且不能还原成下一级(高分辨率)影像。在本文中, 采用二进小波分解与重建, 可以克服上述缺点; 为了保证可靠性, 一般采用边缘特征或特征参数匹配^[1,2], 在一定条件下, 能够取得好的结果。现在我们面临的问题是: 低空实时影像与高空基准影像进行匹配, 比例尺有很大的差异, 同时由于摄影时间、天气以及地面景观的变化, 使得两者在时域和空域特性方面也有很大差别, 因此所提取的特征差异甚大, 用一般的特征匹配方法很难奏效。在这种情况下, 正确匹配的关键在于特征提取的可靠性, 为了做到这一点, 文中采用多尺度二维二进小波变换, 同时利用局域正则性因子来抑制噪声, 并采用方向断面检测法^[2]提取边缘; 同时, 为了充分利用全部影像纹理信息, 使得被提取的特征信息与影像叠

加, 形成新的实时影像与基准影像, 通过分层匹配而获得可靠的匹配结果。由于实时影像与基准影像之间比例与旋转的差异, 上述匹配结果可能存在微小的误差(1到2个像素), 最后, 在这一范围内进行最小二乘影像匹配即可得到精确的亚像素匹配结果。

2 影像的正交小波分解

首先, 从一维信号的分解出发, 然后推广到二维影像的小波分解。

设定在一个可测度的平方可积一维空间 $L^2(\mathbb{R})$ 中, 子空间序列 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$, 它和尺度函数 $\varphi(x) \in V_0$ 构成一个正交多尺度分析(MRA), W_{j+1} 是 V_{j+1} 在 V_j 上的正交补空间, 小波函数 $\psi(x) \in W_0$, 根据MRA的性质^[3], 则有

$$V_j = V_{j+1} + W_{j+1}$$

$$V_j \perp W_j$$

同时以 $\{\varphi_{j,n} = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}x - n); j, n \in \mathbb{Z}\}$ 和 $\{\psi_{j,n} = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}x - n); j, n \in \mathbb{Z}\}$ 分别表示 V_j 的标准正交基和 W_j 的标准正交小波基, 假定一组具有有限分辨率的信号 $c^0 = (c_n^0)_{n \in \mathbb{Z}} \in l^2(\mathbb{Z})$, 于是可以构造函数

$$f(x) = \sum_n c_n^0 \varphi_{0,n} = \sum_n c_n^0 \varphi(x - n) \quad (1)$$

根据上述性质, 它可用 V_1 中的一组正交基 $\{\varphi_{1,k}, k \in \mathbb{Z}\}$ 和 W_1 中的一组正交基 $\{\psi_{1,k}, k \in \mathbb{Z}\}$ 之和来表达

$$\sum_n c_n^0 \varphi_{0,n} = \sum_n c_k^1 \varphi_{1,k} + \sum_n d_k^1 \psi_{1,k} \quad (2)$$

上式表明, 一组具有有限分辨率的信号可以分解成两部分: 近似部分与差异部分, 将式(2)两边乘以 $\varphi_{1,k}$ 得

$$c_k^1 = \sum_n c_n^0 (\varphi_{1,k}, \varphi_{0,n}) = \sum_n c_n^0 2^{-1/2} \int \varphi(\frac{x}{2} - k) \varphi(x - n) dx$$

即 $c_k^1 = 2^{-1/2} \sum_n h_{n-2k} c_n^0 \quad (3)$

其中 $h_{n-2k} = \int \varphi(\frac{x}{2}) \varphi(x - (n - 2k)) dx$

同理 $d_k^1 = 2^{-1/2} \sum_n g_{n-2k} c_n^0 \quad (4)$

$$g_{n-2k} = \int \psi(\frac{x}{2}) \varphi(x - (n - 2k)) dx$$

在式(3)和(4)中引入 H 和 G 算子

$$(H\alpha)_k = 2^{-1/2} \sum_n h_{n-2k} \alpha_n$$

$$(G\alpha)_k = 2^{-1/2} \sum_n g_{n-2k} \alpha_n$$

上述分解是一个迭代过程, 于是可以写成

$$\left. \begin{aligned} c^j &= Hc^{j-1} \\ d^j &= Gc^{j-1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式(2)得重建过程为^[4]

$$c^{j-1} = \bar{H}c^j + \bar{G}d^j \quad (6)$$

其中, \bar{H} 和 \bar{G} 分别是 H 和 G 的对偶算子

$$(\bar{H}\alpha)_n = 2^{-1/2} \sum_k h_{n-2k} \alpha_k$$

$$(\bar{G}\alpha)_n = 2^{-1/2} \sum_k g_{n-2k} \alpha_k$$

由以上分析, 扩展到二维, 得到影像 $f(x, y)$ 分解与重建的公式

$$\left. \begin{aligned} f^j &= H_c H_r f^{j-1} \\ d^{j,h} &= G_c H_r f^{j-1} \\ d^{j,v} &= H_c G_r f^{j-1} \\ d^{j,a} &= G_c G_r f^{j-1} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$f^{j-1} = \bar{H}_c \bar{H}_r f^j + \bar{G}_c \bar{H}_r d^{j,h} + \bar{H}_c \bar{G}_r d^{j,v} + \bar{G}_c \bar{G}_r d^{j,a} \quad (8)$$

式中 $d^{j,h}$, $d^{j,v}$ 和 $d^{j,a}$ 分别是影像在水平、垂直和对角线方向的特征; 下标 r 和 c 表示沿行和列方向进行滤波运算。

图1是按式(7)和(8), 并使用 Haar 小波对一幅 SPOT 影像进行分解与重建的例子。

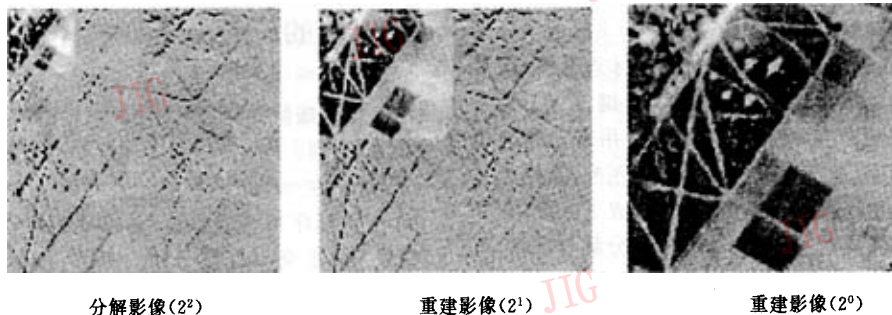


图1 影像的小波分解与重建

3 影像的多尺度特征提取

在一个二维空间, 当 $\psi(x, y)$ 满足条件

$$\iint_{R^2} \psi(x, y) dx dy = 0$$

则称 $\psi(x, y)$ 是一个小波函数, 可见小波函数是一个振荡函数, 它可由积分为非零值的二维平滑函数 $\theta(x, y)$ 的一阶导数构成^[5]

$$\left. \begin{aligned} \psi^1(x, y) &= \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} \\ \psi^2(x, y) &= \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在二进尺度空间 2^j 中, 对任何函数 $f(x, y) \in L^2(R^2)$ 它的二维二进小波变换为

$$Wf = \{W_{2^j}^1 f(x, y), W_{2^j}^2 f(x, y)\}_{j \in \mathbb{Z}}$$

$$\begin{bmatrix} W_{2^j}^1 f(x, y) \\ W_{2^j}^2 f(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f * \psi_{2^j}^1(x, y) \\ f * \psi_{2^j}^2(x, y) \end{bmatrix} \quad (10)$$

且

$$\left. \begin{aligned} \psi_{2^j}^1(x,y) &= \frac{1}{2^{2j}}\psi^1\left(\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j}\right) \\ \psi_{2^j}^2(x,y) &= \frac{1}{2^{2j}}\psi^2\left(\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j}\right) \end{aligned} \right\}$$

很明显,对一个影像函数 $f(x,y)$ 来说,序列函数 Wf 是它的多尺度描述, $\psi_{2^j}^1(x,y)$ 和 $\psi_{2^j}^2(x,y)$ 分别是 $f(x,y)$ 的水平方向和垂直方向的特征。因此可得特征梯度的幅值与幅角的表达式

$$\left. \begin{aligned} M_{2^j}f(x,y) &= \sqrt{|W_{2^j}^1f(x,y)|^2 + |W_{2^j}^2f(x,y)|^2} \\ A_{2^j}f(x,y) &= \arctan(W_{2^j}^2f(x,y)/W_{2^j}^1f(x,y)) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

根据式(11),并按方向断面检测法^[2],严格地在梯度最大模值的垂直方向提取边缘特征。在提取特征的过程中,采用了局域正则性指数,即 Lipschits 指数来表示边缘的奇异程度, Mallat 证明^[5],如果函数 $f(x,y)$ Lipschits 指数为 α ,则它的小波变换最大模值应满足

$$M_{2^j}f(x,y) \leq A(2^j)^\alpha$$

即

$$\log_2(M_{2^j}f(x,y)) \leq j\alpha + \log_2(A) \quad (12)$$

按式(12),只要有3个不同尺度下同一边缘点的模的极大值,即可估出其 Lipschits 指数 α 。上式还表明,当 $\alpha=0$,表明特征不连续;当 $\alpha<0$,则随着尺度的增大,模值反而减小,在该点上的特征实际上是噪声,应予删除;只有当 $\alpha>0$ 时,特征模值随着尺度的增大而增大,可以根据实际需要设置阈值 T ,当 $\alpha>T$ 时,才是应当保留的特征。

上述多尺度特征提取的过程,利用 Lipschits 指数 α 的约束,能够有效地抑制噪声,有助于特征提取的可靠性。

4 影像匹配

影像匹配的过程可以表述为:来自传感器的实时影像首先被预处理,进行幅射校正和比例与旋转改正;然后对实时影像 R 与基准影像 B 进行小波分解,构成金字塔影像,并逐层施行小波变换构成特征影像。第1步在金字塔顶层进行特征匹配,这时要在整个基准影像的范围内进行搜索,确定若干个候选点;第2步在次一级金字塔进行特征与影像迭加的匹配,这要在候选点的引导下在局部范围内完成,其结果是得前次到误差小于2个像素的匹配点;最后,以前次匹配结果为引导,在小范围内完成亚像素匹配。

在粗匹配时,在线性特征较为丰富的地域,可以采用文献[2]中线特征匹配

$$\left. \begin{aligned} \sum_k^3 D_k(i,j) &< T \\ D_1(i,j) &= \frac{|\varphi_{2^j}^b(i) - \varphi_{2^j}^r(j)|}{|\varphi_{2^j}^b(i) + \varphi_{2^j}^r(j)|} \\ D_2(i,j) &= \frac{|\varphi_{\max}^b(i) - \varphi_{\max}^r(j)|}{|\varphi_{\max}^b(i) + \varphi_{\max}^r(j)|} \\ D_3(i,j) &= \frac{|\varphi_{\min}^b(i) - \varphi_{\min}^r(j)|}{|\varphi_{\min}^b(i) + \varphi_{\min}^r(j)|} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

在线特征不很丰富的区域以及第2级匹配时,可以采用相关度量

$$C_{r,b} = \frac{\sum \sum (r-r_c)(b-b_c)}{(\sum \sum (r-r_c)^2 \sum \sum (b-b_c)^2)} \rightarrow \max \quad (14)$$

经过粗匹配后,得到误差为1—2个像素的匹配结果,经过小波重建,得到原始影像,按文献[2]进行最小二乘法匹配

$$\left. \begin{aligned} V &= AX - L \quad p \\ A &= \begin{bmatrix} \frac{\partial g_x^b}{\partial x} & \frac{\partial g_x^b}{\partial x} x_0^b & \frac{\partial g_y^b}{\partial y} & \frac{\partial g_y^b}{\partial y} y_0^b \end{bmatrix} \\ X &= [dx^b \quad df_x^b \quad dy^b \quad df_y^b]^T \\ \hat{X} &= (A^T P A)^{-1} (A^T P L) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

5 试验结果与分析

我们使用了多幅 SPOT 卫星数字影像与低空 CCD 影像进行了小波分解与重建、特征提取,最后进行了匹配。在分解与重建中,采用了 Daubechies^[4]具有紧致集的四系数正交小波滤波器,在特征提取中,采用了二次样条小波函数进行多尺度特征提取,并进行了外景试验,获得了满意的结果。图2是其中的一个实例。

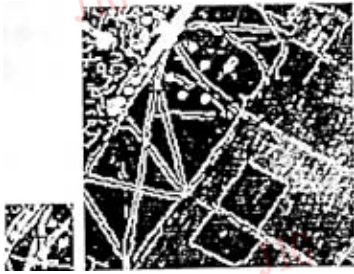
图中的 CCD 影像比 SPOT 影像的比例尺大得多,获取时间相差2年,在匹配之前已进行一致性处理,尽管如此,CCD 影像轮廓清晰得多,而且与 SPOT 影像之间约有7度的旋转角,地面景观也有了明显的变化,但利用本文的方法仍然获得了正确的匹配。这一结果表明:

(1)利用小波分解与重建进行分层匹配是行之有效的,一幅 36×36 的实时影像与一幅 200×200 的基准影像进行匹配,0.5秒即可完成。这一结果与 LOG 算子边沿匹配算法^[6]和单纯的最小二乘影像匹配^[2]相比速度有了明显提高,保证了使用要求。

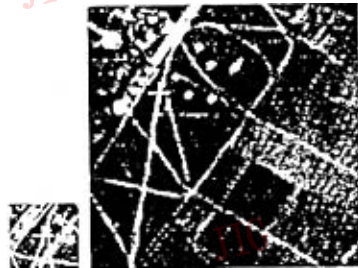
(2)利用小波变换并充分考虑了其局域性特征进行特征提取,与一般的无约束特征提取方法相比,

保证了边缘特征的可靠性。

亚像素精度。



(a) CCD与SPOT影像加特征匹配



(b) CCD与SPOT分层与重建影像匹配

图2 匹配实验结果

(3)利用小波提取的特征与重建的影像信息叠加,在两种影像差异较大时,能够避免误匹配;同时,在很小的搜索区内,又能够利用全部影像信息进行最小二乘影像匹配、并引入比例与旋转改正,保证了

参考文献

- 1 Huili, Manjunath B S, Mitra S K. A Contour-Based Approach to Multisensor Image Registration. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995, 4(3):3.
- 2 陈 鹰. 带约束条件的特征与最小二乘影像匹配. *中国图象图形学报*, 1998, 3(4).
- 3 崔锦泰. *小波分析导论*. 西安:西安交通大学出版社, 1995, 1.
- 4 秦前清, 扬宗凯. *实用小波分析*. 西安:西安电子科技大学出版社, 1994, 1.
- 5 Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelet. *IEEE Trans. On Information Theory*, 1992, 38(2):617~643.
- 6 陈 鹰, 熊兴华, 李铁军. 改进型 LOG 算子与基于边沿的线矩匹配. *中国第十届遥感会议文集*, 1997.
- 7 李世雄, 刘家琦. *小波变换和反演数学基础*. 北京:地质出版社, 1994, 5.



陈 鹰 1964年毕业于武汉测绘科技大学, 现任职于同济大学. 研究员, 博士生导师, 中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会委员. 长期从事数字摄影测量、图象信息工程及计算机视觉的研究. 在中外刊物发表论文34篇。



林 怡 1992年毕业于解放军测绘学院, 现任西安测绘研究所助理研究员, 从事数字摄影测量、遥感图象处理的研究, 发表论文4篇。



简剑峰 1990年毕业于第二炮兵工程学院, 1996年获工学硕士学位, 现为西安测绘研究所助理研究员, 主要从事图象信息工程、遥感图象处理及三维仿真技术的研究, 先后发表论文6余篇。

A Real Time Image Matching Based on Wavelet

Chen Ying, Jian Jianfeng, Lin Yi

(Xian research Institute of Surveying and Mapping, Xian 710054)

Abstract A real time image matching based on wavelet transform are discussed in this paper. Lipschith regularity exponent is introduced as the constraints during multiresolution feature extraction in order to ensure the reliability. A hierarchical matching is realized using orthogonal wavelet decomposition and reconstruction. Sub-pixel matching is carried out by superposing edge feature on image. The experimental results demonstrate that above method is significant.

Keywords Wavelet, Decomposition and reconstruction, Multiresolution feature extraction, Matching