

文章编号: 1001-3806(2008)05-0493-03

遥感图像的亚像元匹配方法研究

李洪均^{1,2}, 徐抒岩^{1*}, 闫得杰^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了在一定亚像元匹配精度下提高亚像元匹配速度, 研究传统的模板匹配亚像元方法, 提出将图像重采样法和曲面拟合法结合起来用于亚像元匹配。先利用序贯相似性检测法, 找到像元级的最佳匹配点, 然后对模板 n 倍重采样, 计算每个子模板与最佳匹配点的归一化相似性度量值, 并计算当归一化相似性度量值最大时所对应的子模板在图像中的位置, 再在绝对误差值最小的 3×3 区域内应用曲面拟合法, 从而得到亚像元定位坐标。结果表明, 采用图像重采样法和曲面拟合法相结合的新方法, 在 10 倍重采样的前提下, 匹配精度高于 0.04 像元的亚像元精度。

关键词: 信息光学; 亚像元; 重采样; 遥感图像; 曲面拟合

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A

Research of remote sensing image matching with sub-pixel accuracy

LI Hong-jun^{1,2}, XU Shu-yan¹, YAN De-jie^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. School of Graduate, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To increase sub-pixel matching speed with a certain sub-pixel accuracy, the conventional algorithms to obtain sub-pixel accuracy in template matching was discussed, a new algorithm was proposed to combine the resampling and surface fitting methods. At first, it should use the sequential similarity detection algorithm to find the best match point, then only the model was need to be resampled n -times, next the normalization correlations among each sub-template and the image in the best match point was calculated, and the position of the sub-template which was corresponded to the maximum normalization correlation in the image was calculated. At last the method of curve fitting in the 3×3 area of that position was applied to obtain the absolute coordinates of the positioning with sub-pixel accuracy. The experiment shows that the accuracy obtained by the new method base on 10 times resampling is less than 0.04 pixel.

Key words: information optics; sub-pixel; resampling; remote sensing image; curve fitting

引 言

图像匹配是计算机视觉研究领域中的一个热点问题, 被大量应用在航天、航空、工业检测及工业自动化等领域的定位中。在航天航空像移补偿方面^[1-2], 用同一目标在面阵 CCD 器件上形成的遥感图像序列, 通过图像处理技术可实现对像移速度矢量的精确估计。由于要求测量误差为亚像元, 所以, 亚像元匹配方法的研究具有重要意义。

传统的亚像元精度匹配方法主要有 4 种^[3-4]: 图像重采样法、曲面拟合法、微分法和相位法。图像重采样法能得到所要求的匹配精度, 但由于插值过程和匹配次数的增加消耗大量的运算时间, 实时性差。曲面拟合法

虽然能达到的精度有限, 但运算速度快。作者把图像重采样法和曲面拟合法结合起来, 取长补短, 使其既能达到所要求的匹配精度, 又减少所需要的运算时间。

1 图像重采样法

重采样能重建高分辨力图像, 在亚像元精度的匹配中重采样方法占有重要地位^[5]。传统的图像重采样方法是对模板、基图同时 n 倍重采样, 然后对重采样后的模板、基图进行匹配。由于对模板、基图同时采样, 并且一般基图较大, 此方法计算量大, 实时性差。作者对传统的重采样方法进行改进, 只对模板进行 n 倍重采样, 对采样后的子模板和基图进行匹配。由于只对模板进行重采样, 所以可以节省大量的运算时间。对模板 n 倍重采样后, 重采样后的图像变为原模板的 n 倍, 并且相邻像素间间距为原来的 $1/n$, 保持像素间间隔和原来不变, 产生 $n \times n$ 个子模板, 相邻子模板间的偏移量为 $1/n$, 根据子模板与模板的偏移量, 可以计算子模板与像素级匹配点的偏移量, 即可得到 $1/n$ 精

作者简介: 李洪均 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究工作是遥感成像及图像处理。

* 通讯联系人。E-mail: xusy@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2007-06-04; 收到修改稿日期: 2007-09-11

度的亚像元匹配值^[6]:

$$x = x_0 + \alpha \frac{1}{n}, y = y_0 + \beta \frac{1}{n} \quad (1)$$

式中, (x, y) 为图像重采样后匹配点的坐标值; (x_0, y_0) 图像重采样前像元级匹配点的坐标值; α, β 为匹配中归一化相似性度量值最大时对应的子模板在模板中分别沿 x, y 方向的偏移数。

重采样中常见的插值方法有最近邻点插值法、B样条插值法、双线性内插法^[7-9]。最近邻插值法具有0.5像素偏移,在亚像元定位中不应考虑。B样条插值法与双线性内插法相比计算复杂,并且精度未提高。在航空航天成像方面,胶片成像向 CCD 成像转变,CCD 其输出信号与所接受的光能量的大小成正比,其响应是线性的,为了更好地反映 CCD 的成像规律,本文中选用双线性内插法。双线性内插法根据周围 4 点的灰度级在两个方向上进行内插。双线性内插法的示意图如图 1 所示。

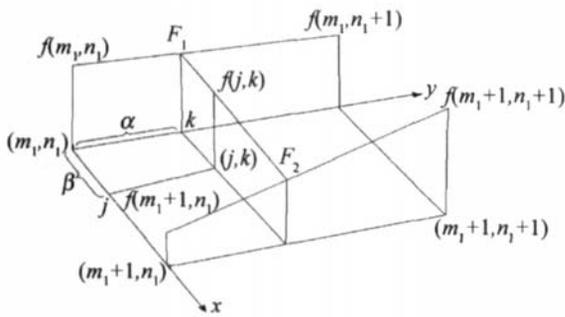


Fig 1 The application of bilinear interpolation technique

首先用 $f(m_1, n_1)$ 和 $f(m_1, n_1 + 1)$ 对 F_1 , $f(m_1 + 1, n_1)$ 和 $f(m_1 + 1, n_1 + 1)$ 对 F_2 进行线性内插得:

$$F_1 = (1 - \beta)f(m_1, n_1) + \beta f(m_1, n_1 + 1) \quad (2)$$

$$F_2 = (1 - \beta)f(m_1 + 1, n_1) + \beta f(m_1 + 1, n_1 + 1) \quad (3)$$

最后,用 F_1 和 F_2 对 $f(j, k)$ 进行线性内插得:

$$f(j, k) = (1 - \alpha)F_1 + \alpha F_2 \quad (4)$$

将 (2)式和 (3)式代入 (4)式整理后变成:

$$f(j, k) = (1 - \alpha)(1 - \beta)f(m_1, n_1) + \alpha(1 - \beta)f(m_1 + 1, n_1) + (1 - \alpha)\beta f(m_1, n_1 + 1) + \alpha\beta f(m_1 + 1, n_1 + 1) \quad (5)$$

根据 (2)式, (3)式, (4)式或 (5)式就可以计算被插值点的像素值。

2 曲面拟合法

曲面拟合法是以像素级上的最佳像素点为中心按相似性度量进行曲面拟合,然后据数学方法得到极值点的精确位置。曲面拟合法中影响定位精度的因素主要有:(1)相似性度量方法的选取;(2)拟合函数的选取。

相似性度量是计算模板与基图之间的误差。作者

选用归一化相似性作为度量方法,此方法由相似性度量方法改进而来,它计算值直接反映模板与基图之间的误差,运算时间比相似性度量快:

$$P(x, y) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m, n) \times T(m, n)]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m, n)]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T(m, n)^2}} \quad (6)$$

拟合函数要能够很好地描述最优匹配点与其相邻点的相似性度量关系。一般都选用双二次曲线拟合法^[10-11]:

$$P(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (7)$$

式中, $P(x, y)$ 为对应于位置 (x, y) 的相位相关值; a, b, c, d, e, f 为拟合函数的系数。上述函数可以写成如下形式: $AX = B$, 其中,

$$A = \begin{bmatrix} x_0^2 & y_0^2 & x_0 y_0 & x_0 & y_0 & 1 \\ x_1^2 & y_1^2 & x_1 y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_8^2 & y_8^2 & x_8 y_8 & x_8 & y_8 & 1 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \vdots \\ P_8 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由曲面拟合法获得亚像元定位,拟合函数系数的估计是一个关键步骤。常见的方法有 3 种:求偏导计算法、最小二乘回归法和伪逆矩阵法。作者从计算精度考虑,选取伪逆矩阵法,公式左右两边分别乘以 A^T (矩阵 A 的转置矩阵),则 $A^T A x = A^T b$ 。此时 $A^T A$ 不是奇异矩阵,而是方阵,则可以通过矩阵求逆运算求得系数向量 X ,即:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (9)$$

求得拟合函数的系数之后,可以根据以下公式求得亚像元匹配的精确定值:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial x} = 2ax + cy + d = 0 \\ \frac{\partial C}{\partial y} = 2by + cx + e = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{2db - ce}{c^2 - 4ab} \\ y = \frac{2ae - dc}{c^2 - 4ab} \end{cases} \quad (10)$$

式中, C 为相似性度量值。

3 图像重采样和曲面拟合相结合的亚像元匹配方法

在实际应用中,如想通过图像重采样法达到 0.1 像元的精度,则需 10 倍重采样,产生 100 幅子模板,并且插值重采样计算量大,此方法实时性差。曲面拟合法是根据 3×3 的区域拟合曲面再求导计算最佳匹配点,此方法计算速度快,但受最佳匹配点相邻区域的归一化相似性度量值影响,计算精度有限。把这两种方

法结合起来,可以取长补短,保留重采样法的高精度,又有曲面拟合法快速的特点。

作者把图像重采样和曲面拟合结合起来计算亚像元匹配运用在像移速度矢的精确估计中,由于矢量估计的精度是关键,直接影响成像质量,所以作者运用 10 倍重采样,并且采样大模板 (128 × 128) 匹配,在匹配精度优于 0.1 像元的基础上运用曲面拟合法。

图像重采样和曲面拟合相结合的亚像元匹配方法的步骤为: (1) 利用序贯相似性检测法匹配得到像元级的最佳匹配点; (2) 对模板进行 10 倍重采样,根据像素间距保持一致性原则产生 100 个子模板,每个模板都和图像进行匹配计算归一化相似性度量值,计算最大归一化相似性度量值对应的子模板; (3) 找到此子模板为中心的 3 × 3 窗口的 9 个子模板,并计算出这 9 个子模板在图像的坐标 ((1) 式); (4) 计算这 9 个模板在最佳匹配点的相似性度量值,并利用曲面拟合法 (6) 式 ~ (10) 式计算亚像元匹配的精确值。

为了验证方法的有效性,按上面所述步骤用 VISUAL C++ 6.0 编程进行仿真。图 2 为两幅实际拍摄图像,理论上只要求两图之间有固定的偏移量、没有缩放与旋转。图 3 是从图 2b 中提取出的 10 幅模板。匹配

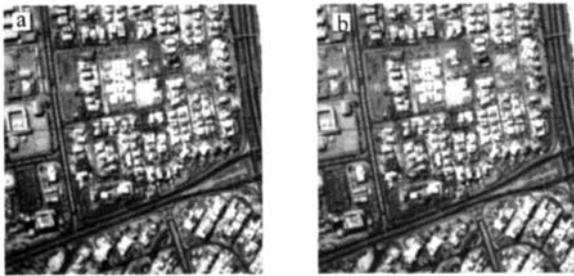


Fig. 2 Remote sensing image

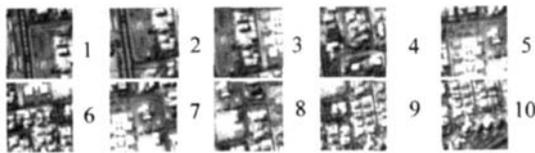


Fig. 3 10 different templates

计算模板在图 2a 中的坐标。理论上,模板在图 2a 中的亚像元的偏移量是固定的,根据偏移量,可以分析重采样和曲面拟合相结合的亚像元匹配方法的精度。

根据多次测量求均值原理,把 x 方向的平均偏移量 Δx 作为 x 方向偏移量的精确值,把 y 方向的平均偏移量 Δy 作为 y 方向偏移量的精确值,再根据精确值分析 x, y 方向的测量误差,得到匹配精度 Δ 。

匹配精度计算为: $\Delta = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = \sqrt{0.0205436^2 + 0.0346189^2} = 0.040256$ 。试验数据分析表明:采用图像重采样和曲面拟合相结合的新方法,在 10 倍重采样的前提下,匹配精度高于 0.04 像元的亚像元精度。由于仿真试验前提要求图 2a 和图 2b 之间只能有固定偏移而没有旋转与缩放,但拍摄中可能存在误差,所以对匹配精度有一定的影响。

4 结 论

在研究模板匹配亚像元定位方法的基础上,将图像重采样和曲面拟合结合起来运用于遥感图像模板匹配。这样,既可以克服图像重采样法计算量大、曲面拟合法精度低的缺点,同时改进的图像重采样法中仅对模板重采样,大大提高了运算速度。试验证明该算法有效。

参 考 文 献

- [1] KLAUS J, VALERIT, SERGEID. Design concept for a secondary payload earth observation camera [J]. Proc SPIE, 1999, 3870: 78-86.
- [2] JANSCHKE K, TCGERNYKH V. Optical correlator for image motion compensation in focal plane of a satellite camera [C] // 15th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace Bologna, Italy: International Federation of Automatic Control, 2001: 378-382.
- [3] CASTRO E D E, MORANDI C. Registration of translated and rotated image using finite Fourier transforms [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9 (5): 700-703.
- [4] LU D M, SHEN J Y, WANG L J. Application of the wavelet transform to pattern correlation recognition [J]. Laser Technology, 2004, 28 (6): 641-644 (in Chinese).
- [5] LI Sh Y, TANG P, ZHU Ch G. Single frame image resolution improvement method based on optimal interpolation [J]. Computer Engineering, 2007, 33 (2): 31-33 (in Chinese).
- [6] ZHAO L Ch, SHIP F, YU Y. A new algorithm with sub-pixel accuracy in image/model matching [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1999, 8 (5): 407-414 (in Chinese).
- [7] LU H Ch, YANG X Q, FENG Y. Interpolation method for sub-pixel dynamic imaging system based on B-spline curve [J]. Opto-electronic Engineering, 2006, 33 (2): 90-93 (in Chinese).
- [8] ALDROUBIM A. A multiresolution image registration procedure using spline pyramids [J]. SPIE, 1993, 2034: 160-170.
- [9] LU D. The foundation of mathematics and algorithm of computer image processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 21-44 (in Chinese).
- [10] GLEASON S S, HUNTM A, JATKO W B. Subpixel measurement of image features based on paraboloid surface fit [J]. SPIE, 1990, 1386: 135-144.
- [11] JIANG J Y, HU X D, XU K X, et al. Repetitive positioning technology based on correlation matching of palmprint image [J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36 (3): 301-303 (in Chinese).