

带约束条件的特征与最小二乘影像匹配

陈 鹰 李铁军 熊兴华

(西安测绘研究所, 西安 710054)

摘 要 讨论了一种新的边缘检测方法和用链码描述的线矩数学模型, 给出了基于不变线矩匹配的约束条件, 并采用基于特征与最小二乘结合实现了精确的子像素匹配。

关键词 边缘特征, 链码, 线矩, 匹配

1 引 言

在实时影像匹配中, 速度和精度是人们所关心的问题, 而特征匹配与最小二乘景象匹配相结合, 是解决这一问题的有效途径, 前者可以在大范围的搜索过程中提供可靠的初值, 后者能够实现精确的子像素匹配。在特征匹配中, 特征提取与检测的可靠性是关键之一, 为此, 我们提出了快速而有效的梯度方向断面检测法。

实时景象匹配中的另一个问题是, 实时景象与基准景象之间可能存在较大的旋角, 因此我们采用了与旋转无关的不变线矩特征匹配, 并给出了约束条件, 从而实现了特征与最小二乘景象匹配相结合的子像素匹配。

2 特征提取与边缘检测

人们所熟悉的 LOG 算子(即 Marr 算子)是一种有效的组合型边缘检测算子, 然而其可靠性与尺度参数 σ 的选择密切相关: σ 越大, 滤波范围越大, 噪声小, 但零交叉的移位偏差增大, 因此在实际应用中是很难选择的, 我们提出了梯度方向断面检测法可以克服这一缺陷。

2.1 梯度图(g-map)及方向图(d-map)的建立

很明显, 图象的边缘特征不一定是灰度值极大

处, 而一定是灰度“变化”剧烈的地方, 也就是梯度值局部最大处, 因此, 梯度图可以作为特征提取的基本出发点。设连续图象 $f(x, y)$ 在点 (x, y) 处的梯度向量定义为:

$$\vec{g}(f(x, y)) = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \quad \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T = [f_x, f_y]$$

图象灰度为

$$f(x, y) = c_1x + c_2y + c_3$$

现取窗口中心为原点, 按

$$\epsilon = \sum_{(x,y) \in S} [f(x, y) - c_1x - c_2y - c_3]^2 \Rightarrow \min$$

求得 c_1, c_2 和梯度的幅值、辐角 g, θ ,

$$\left. \begin{aligned} g &= \sqrt{c_1^2 + c_2^2} \\ \theta &= \arctan\left(\frac{c_2}{c_1}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

按式(1), 可以得到图象梯度图和方向图, 以此作为边缘提取的基本依据。

2.2 边缘检测

边缘检测就是要沿梯度方向找到具有梯度极大值的点^[1], 正是基于这一点 Haralick^[2]曾提出用个正交多项式对图象进行拟合, 并以沿梯度方向求导(或求二阶导数的零交叉)来确定极大值作为边缘检测的准则。现在, 我们将问题简化为一维的处理, 充分利用方向图, 在与边缘正交的方向断面上确定图象局部变化最大处, 这就是梯度方向断面检测法的特点之一, 过程如图1所示。

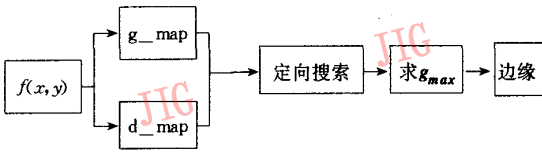


图1 特征检测过程

Fig. 1 Feature Detection Procedure

在方向图所指示的方向(2n+1)维的线性空间用下述函数来拟合梯度幅值

$$g(r) = k_0 + k_1r + k_2r^2 \quad (2)$$

式中: r 表示在梯度方向上像素的间隔,用最小二乘法解得 k₁, k₂, 在原点(r=0), 极大值条件可归结为:

$$k_2 < 0 \text{ 和 } r = -\frac{k_1}{2k_2} \quad (3)$$

由上式之 r 可以在与边缘正交的方向求得特征点的精确位置,且不会产生伪边缘,并能达到子像素精度;由于在“粗匹配”阶段,只需要一个像素的精度足以,所以当 ABS(r) ≤ 0.5 时,即认为图象窗口中心为边缘特征点。

为了提高边缘检测的效率与可靠性,在检测之前,需要对梯度图进行预处理,其目的是要将大量的非特征信息滤除,为此在文献[3]中采用了曲率阈值法,但其阈值需人为确定,这是十分困难的,为此我们首先求得梯度直方图,然后按下式自动确定一个滤波门限 T

$$\sum_{i=0}^T h_i \leq Nf \quad (4)$$

式中 i 是梯度, h_i 是直方图元素, N 是图象总点数, f 是滤波百分比,这是一个容易给定的值,特别是对于特征初匹配来说,只需要原始影像信息的 30%~50% 就足够了,于是按式(4)求得一个滤波阈值 T。

3 边缘跟踪与描述

3.1 边缘跟踪与链码

同一边缘上的点不一定具有相同的梯度,但它们一定具有最接近的梯度方向,因此,梯度方向图就成为边缘跟踪的依据,并保证在一维方向上进行检测,这是梯度方向断面检测法特点之二。采用顺序跟踪方式与 Freeman 8 连通方向链码^[4],于是可以将一个有向线段表达为 {c₁c₂c₃...c_n}, c_i, 表示本点对前一点的方向链码,其方向为 c_i × 45°(以反时针为正)。

3.2 边缘特征的线矩描述

根据文献[5],可以写出一条边缘线的原点矩 $m_{p,q} = \int_c x^p y^q \rho(x,y) dl$ 式中: ρ(x,y) 为线密度,恒为 1。

对于按 n 个结点构成的边缘曲线 c, 引入 (x_i, y_i) 与 (x_{i-1}, y_{i-1}) 两点式参量方程,于是上式可以改化为:

$$m_{p,q} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l_i}{\Delta l_i} \int_{t_{i-1}}^{t_i} x_i^p(t) y_i^q(t) dt \quad (5)$$

按曲线 c 的链码表达,并根据式(6)

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\int_c x dl}{\int_c dl} = \frac{m_{1,0}}{l} \\ \bar{y} = \frac{\int_c y dl}{\int_c dl} = \frac{m_{0,1}}{l} \end{cases} \quad (6)$$

可导出下列描述边缘曲线特性的曲线长和重心坐标。

$$l = m_{0,0} = \int_c dl = n_e + \sqrt{2} n_o$$

n_e 和 n_o 分别表示链码为偶数和奇数的像素数。式(6)中各元素可按下列递推公式求得:

$$\begin{cases} m_{1,0} = \sum_{i=1}^n \Delta l_i (x_i - \frac{1}{2} \Delta x_i) = \sum_{i=1}^n \Delta l_i (x_{i-1} + \frac{1}{2} \Delta x_i) \\ m_{0,1} = \sum_{i=1}^n \Delta l_i (y_i - \frac{1}{2} \Delta y_i) = \sum_{i=1}^n \Delta l_i (y_{i-1} + \frac{1}{2} \Delta y_i) \end{cases} \quad (7)$$

式中 Δx, Δy 可由链码求得。

同理可以写出下列边缘特征中心矩,下式中 x, y 均表示 (x- \bar{x}) 和 (y- \bar{y}), μ_{1,0}, μ_{0,1} 与式(7)形式相同。

$$\begin{cases} \mu_{1,1} = \sum_{i=1}^n \Delta l_i ((x_{i-1} + \Delta x_i)(y_{i-1} + \frac{1}{2} \Delta y_i) - \Delta x_i (\frac{1}{2} y_{i-1} + \frac{1}{6} \Delta y_i)) \\ \mu_{2,0} = \sum_{i=1}^n \Delta l_i ((x_{i-1} + \Delta x_i)x_{i-1} + \frac{1}{3} \Delta x_i^2) \\ \mu_{0,2} = \sum_{i=1}^n \Delta l_i ((y_{i-1} + \Delta y_i)y_{i-1} + \frac{1}{3} \Delta y_i^2) \end{cases} \quad (8)$$

经过规一化后的尺度不变矩为:

即

$$\eta_{p,q} = \frac{\mu_{p,q}}{l_{p,q}^2 + 1}$$

$$\eta_{p,q} = \frac{\mu_{p,q}}{l_{p,q}^2 + 1}$$

于是,可以导出下列尺度与旋转不变线矩:

$$\begin{cases} \phi_1 = \eta_{2,0} + \eta_{0,2} \\ \phi_2 = (\eta_{2,0} + \eta_{0,2})^2 + 4\eta_{1,1}^2 \end{cases} \quad (9)$$

Wei Wen 和 A. Lozzi 还提出了两个重要的不变矩^[5],可以作为匹配基元,考虑到尺度不变并改化成:

$$\begin{cases} \phi_{\max} = \frac{\phi_1}{2} + \frac{\sqrt{\phi_2}}{2} \\ \phi_{\min} = \frac{\phi_1}{2} - \frac{\sqrt{\phi_2}}{2} \end{cases} \quad (10)$$

4 影像匹配

4.1 特征匹配

为了确定实时景象图 R 上的特征在基准图 B 上的特征候选位置,我们选用下列矢量空间距离,并以这些矢量空间距离的总合小于规定的阈值作为度量准则

$$\sum_{k=1}^n D_k(i, j) < T \quad (11)$$

$$\begin{cases} D_1(i, j) = \frac{|\phi_2^b(i) - \phi_2^r(j)|}{|\phi_2^b(i) + \phi_2^r(j)|} \\ D_2(i, j) = \frac{|\phi_{\max}^b(i) - \phi_{\max}^r(j)|}{|\phi_{\max}^b(i) + \phi_{\max}^r(j)|} \\ D_3(i, j) = \frac{|\phi_{\min}^b(i) - \phi_{\min}^r(j)|}{|\phi_{\min}^b(i) + \phi_{\min}^r(j)|} \end{cases} \quad (12)$$

式中, b, r 分别表示基准图象与实时图象; i, j 分别表示基准图象第 i 条边缘和基准图象第 j 条边缘, T 为阈值。很显然,当实现了正确匹配时 D_k 应为零,因此空间距离总和小于一个阈值,可以作为确定边缘匹配的后选准则。

我们可以看到,在式(11)中,没有将不变矩 ϕ 作为一个独立的度量,因为 ϕ 具有某种不稳定性,这一点在文献[5]中已经得到证明。

4.2 链码改正与特征匹配约束

由式(7)~(9)可以清楚地看到,用线矩作为基元的特征匹配,不仅具有旋转与尺度不变,而且具有镜像不变的性质,对于实时景象与基准景象处在地

表同一侧的匹配条件,镜像不变会导致误匹配,必须加以约束,链码相关是一个有效的约束手段。从链码的性质可知,链码均值是链码在空间的方向^[6],然而在 3.1 节中的链码具有明显的畸变,不能反映这一性质,例如,链码{0 0 7 7}的方向为-22.5度,但计算结果为 157.5 度,必须进行改正,要将链码{ $a_1 a_2 a_3 \dots a_n$ }改正为{ $b_1 b_2 b_3 \dots b_n$ },须满足以下条件:

$$\begin{cases} b_1 = a_1 \\ (b_i - a_i) \bmod 8 = 0 \\ |b_i - b_{i-1}| = \min \end{cases} \quad (13)$$

按上式,方向链{0 0 7 7}可变为{0 0 -1 -1}。这一变换的结果,既不改变链码原有的奇偶性质,也准确地反映了 2 个旋转图形的相似性,从而可以利用链码的这些性质构成约束条件。现将约束条件表达如下:

$$\begin{cases} c_{br} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \cos\left(\frac{\pi}{4} |a_j - avg_a)\right) - \\ (b_j - avg_b) | \Rightarrow \max \\ 0 < |davg| < T_a \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} c_{br} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \cos\left(\frac{\pi}{4} |a_{n-1-j} - avg_a)\right) - \\ (b_{n-1-j} - avg_b) | \Rightarrow \max \\ (T_a - 4) < |davg| < T_a + 4 \end{cases} \quad (15)$$

式中, avg_a, avg_b 和 $davg$ 是特征链 a, b 的方向(即改正链码的均值)和它们之间的旋转角, T_a 是旋转角的限值,一般不超过 22.5 度(0.5); \cos 是为了使相关度量 c_{br} 小于 1。式(14)表明,当实时影像与基准景象上特征起始点到终点方向相同,若 c_{br} 达最大,则得正确匹配;当 $davg$ 接近 4 时,两个特征可能有接近 180 度的旋转,也可能起始点到终点方向相反,则用式(15)可以避免误匹配,只要是对应的特征,即使始点到终点方向相反,也能获得正确匹配。

4.3 最小二乘影像匹配

当完成了上述初匹配后,即可得一串对应边缘的重心坐标 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 和 (\bar{x}_j, \bar{y}_j) , 由此可以得出实时影像与基准影像之对应关系,从而为最小二乘影像匹配提供了足够精确的初始值。同时,实时景象与基准影像之间的旋转角可按下式确定

$$k = \overline{avg_b} - \overline{avg_a} \quad (16)$$

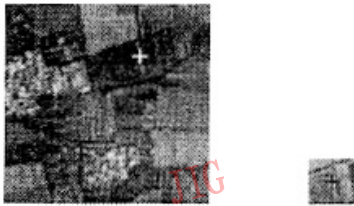
根据这一旋转关系,可以对实时景象进行预处理,使之与基准影像具有一致的坐标系,从而不需要考虑两影像之间的旋转而进行最小二乘匹配^[7],误差方程及估值为

$$\left\{ \begin{array}{l} V = AX - L \quad p \\ A = \left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial g_x^b}{\partial x} & \frac{\partial g_x^b}{\partial x} x_0^b & \frac{\partial g_y^b}{\partial y} & \frac{\partial g_y^b}{\partial y} y_0^b \end{array} \right] \\ X = [dx^b \quad df_x^b \quad dy^b \quad df_y^b]^T \end{array} \right\} \quad (17)$$

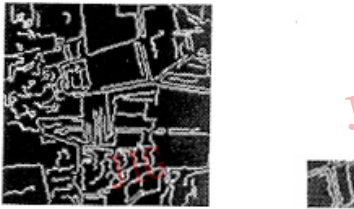
$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (18)$$

5 试验结果与分析

文中使用了多幅 SPOT 数字图象与低空 CCD 图象进行匹配试验,均取得了良好的效果,图 2 是其中的一个实例。



SPOT 图象 CCD 图象
(a) 原始图象



SPOT 图象 CCD 图象
(b) 特征提取的结果



SPOT 图象 CCD 图象
(c) 匹配结果

图 2 边缘特征提取与匹配实验结果

Fig. 2 Result of Edge Feature Extraction and Matching

(1) 边缘方向断面检测法,充分利用了方向图,可以唯一地确定边缘点,无须细化(如图 2b)。同时克服了常用的 LOG 算子随尺度常数 σ 增加而产生移位误差的缺陷。

(2) 如前所述,在实时景象匹配中,速度是一个重要的制约因素,为了提高速度,我们曾采取“金字塔”分层匹配,但由于“实时景象”很小,在金字塔顶层几乎无明显特征可提取,因此不能实现“匹配”。本算法利用全部影像信息,但仅利用线矩特征参数进行匹配,同样可以达到很快的速度,并提高了匹配的可靠性,同时与最小二乘影像匹配相结合,最终获得了子像素匹配的精度。

(3) “线矩”所描述的对象,适合于线特征比较丰富的地区,例如,包含了道路、机场、河流、农田、地类界或其它人造成地物的区域,利用上述地域的影像采用本文提出的方法进行匹配,均取得了良好效果。这表明,本文所提出的算法特别适合于平坦地区。

参考文献

- 1 JAIN ANIL K. Fundamentals of Digital Image Processing, 1989.
- 2 Haralick R. Digital Step Edges from Zero Crossing of Second Directional Derivatives. IEEE Trans. PAMI, 1984, 6(1): 58~68.
- 3 WANG JINFEI. LINDA-A System for Automated Linear Feature Detection and Analysis. CANADIAN Journal of Remote Sensing, 1993.
- 4 吴立德. 计算机视觉, 上海: 复旦大学出版社, 1993 年.
- 5 Wen W, Lozzi A. Recognition and Inspection of Manufactured Parts Using Line Moment of Their Rounders, PR. 1993, 26(10): 1461~1471.
- 6 Huili, Manjunath B S, Mitra S K. A Contour-Based Approach to Multisensor Image Registration. IEEE Trans. on Image Processing, 1995, 4(3): 3.
- 7 陈鹰, 张宝印, 邵永社. 用于生成 DEM 的双重约束最小二乘影像匹配. 测绘科技, 1995, (2).

陈鹰, 生于 1941 年, 1964 年毕业于武汉测绘科技大学, 并任职于中国测绘研究院, 1970 年至今, 任职于西安测绘研究所。教授、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、遥感图象处理及计算机视觉的研究, 先后获得全国科技大会奖, 军队科技进步 3 等奖、2 等奖, 国家科技进步一等奖等多项奖励, 在中外刊物发表论文 28 篇。





李铁军,男,1969年生,1991年毕业于中国人民解放军测绘学院,现为西安测绘研究所助理研究员、硕士研究生,从事数字摄影测量与影像信息工程研究,发表论文6篇,先后获军队科技进步二等奖,三等奖各一项。



熊兴华,男,1965年3月生,1988年毕业于中国人民解放军测绘学院,现为西安测绘研究所助理研究员,博士研究生,从事数字摄影测量与遥感研究,发表论文11篇,先后获军队科技进步二等奖2项,三等奖1项。

A Feature-based and Least Square Image Matching with Constraints

Chen Ying, Li Tiejun, Xiong Xinhua

(Xi'an Research Institute of Surveying & Mapping, Xi'an 710054)

Abstract A new edge detection method and mathematical model of line moment described by chain code are discussed in this paper. The constraints of line moment invariant-based matching are presented, and exact sub-pixel matching is realized by feature-based and least square method.

Keywords Edge feature, Chain code, Line moment, Matching

康柏任命黄剑雄为中国区代理部总监

康柏电脑公司近日宣布,任命黄剑雄先生为康柏中国区代理部总监,全权负责并管理康柏中国区的代理商队伍。

1998年是康柏的战略转折年,康柏将在中国区实施“全面合作伙伴”新策略。其中,代理工作的全面调整将是康柏98年的工作重心之一。

黄剑雄总监到任后,将进一步发展新的代理商,建立并完善康柏的销售渠道。未来康柏中国区代理部将高度重视与代理商建立真正的、长期的合作伙伴关系,把代理视为亲密伙伴。通过帮助代理建立一套完整的、科学的销售和管理体制,加强对代理的培训,为代理提供良好的成长环境,使其增强竞争优势。力求康柏和代理在互信、互利、互尊的基础上,共同努力,最终达到“共赢”的目的。

黄先生在IT行业有着20年的丰富经验,在加盟康柏前,曾任Burroughs(Unisys的前身)公司客户经理、Sun Microsystems香港公司董事总经理、Digital大中国区董事总经理助理、Centura公司亚洲董事总经理等多项高级职务,并有不俗业绩。尤其

是在1985至1988年,任中国惠普增值部销售经理期间,他不仅将四通和联想发展成为代理,还将代理部的销售量提高了300%。

黄剑雄先生加盟康柏,主要是看重了康柏在全球的持续发展,以及在中国的大规模投入。亚洲经济增长最快的市场是中国,而康柏非常重视中国,不断地加强对中国市场的投资和支持,使黄先生对康柏很有信心。

黄剑雄出生于香港,毕业于香港理工大学,并于1995年在香港科技大学获得MBA学位,在研修MBA时,其毕业论文题为“国有企业的发展与改造”,他表示,现在加盟康柏中国区代理部,以中国的代理商为工作对象,即希望把以前的所学扩充放大,学有所用,投入其中。

在多年的工作中,黄先生始终将“共赢”作为其座右铭,注重与部下建立起开放、互尊、互信的关系。他将与代理部的全体职工尊循“严谨、完美、要做就做最好的”工作准则,携手共创康柏代理大业。