

## 亚像素图像处理技术及其在网格法中的应用\*

雷志辉 于起峰

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

**摘要** 图象分辨率大大低于胶片是数字图像处理系统的一大弱点,此弱点极大地限制了数字图像处理技术在精密测量等领域的应用。亚像素软件处理技术能弥补硬件这一缺点。本文介绍了常用的亚像素图像处理技术,并将其应用于网格测量方法;提出了处理大曲率网格线的新方法——线跟踪算子,并实现了大曲率网格的亚像素处理。

**关键词** 亚像素, 网格法, 相关算子

**分类号** TP751.1

## Subpixel Techniques and Its Application in Grid Method

Lei Zhihui Yu Qifeng

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** The fault that the picture resolution of digital image system is much worse than film greatly limits the application of digital image processing techniques in measurements. Subpixel techniques can mend this fault. In this paper, we introduce the common subpixel techniques and use them in grid measurement. A new filter—the line search algorithm is given to process the strongly curved grid line and the subpixel result-square obtained.

**Key words** subpixel, grid, correlation filter

随着计算机软、硬件的高速发展和数字图像处理技术的广泛应用,数字图像处理系统在许多领域已经或正在取代传统的照相机——胶片系统。但目前的数字图像处理系统却有一个很大的弱点,即分辨率的急速下降,从胶片的100000:1下降到2000:1。这在许多领域限制了其应用。有两个途径可以提高图像系统的分辨率:一是提高硬件分辨能力,另一条途径则是引进亚像素技术。前者是人们早已熟悉的,系统分辨率从 $256 \times 256$

\* 1996年5月26日收稿

到  $512 \times 512$ ，甚至  $1024 \times 1024$ 。而亚像素技术则是试图用软件技术来弥补硬件的不足。有资料称，其精度最高可达 0.01 像素。根据笔者的经验，大多数情况下，精度达到 0.1 像素并不是特别困难。0.1 像素的精度意味着普通图像处理系统的分辨率可从  $512 \times 512$  上升为  $5120 \times 5120$ 。

## 1 亚像素技术概述<sup>[1]</sup>

一幅数字图像是对原始连续图像进行某种规定形式的采样而得到的。通常只利用采样点的信息，而对于采样点之间的信息，却极少考虑。因此，一般认为数字图像处理系统的分辨率为一个像素。事实上，由于图像连续性，可以借助某些数学工具实现用采样点信息来表达非采样点信息。经典的双线性插值技术就是一种较早的亚像素技术。双线性插值可以表达为：

$$g(x, y) = (1 - \alpha)(1 - \beta)g(i, j) + \alpha(1 - \beta)g(i + 1, j) + (1 - \alpha)\beta g(i, j + 1) + \alpha\beta g(i + 1, j + 1) \quad (1)$$

其中：  $i < x < i + 1, j < y < j + 1$

$$\alpha = x - i, \beta = y - j \quad (2)$$

### 1.1 形心法

在许多情况下，处理的目标是一个点团，例如天文学测量中的星体，点状网格中的网格点。许多数学变换，也可得到一些点团。如 Hough 变换，二维 FFT 变换，其频谱空间也经常出现点团。

由于在点团附近，灰度的分布大致相同，因此可以用点团的形心来代替目标中心。其精度通常可达 0.1 像素。为了提高精度，有人还提出了加权形心法<sup>[2]</sup>和带门限值的形心法<sup>[3]</sup>。在网格法中常用的是后者，对黑点团其表达式可以写为：

$$\bar{x} = \frac{\sum \sum i * (T - g_{ij})}{\sum \sum (T - g_{ij})} \quad \bar{y} = \frac{\sum \sum j * (T - g_{ij})}{\sum \sum (T - g_{ij})} \quad (3)$$

其中  $S$  为处理窗口， $\bar{x}, \bar{y}$  分别为点团形心坐标， $T$  为门限值， $g_{ij}$  为  $(i, j)$  的点的灰度值。文献 [3] 指出，其精度可达 0.02 像素。

### 1.2 拟合法

拟合方法（包括插值法）是图像处理中用得更多的一种数学方法。然而，通常的多项式拟合一般较难得到很高的亚像素精度。拟合法比较成功的应用主要集中在对物理量的分布基本清楚的情形，例如边界形状。另一个成功的例子是对点状网格中心点的拟合<sup>[4]</sup>。用 Gaussian 分布进行拟合，在最好的情况下，其精度可达 0.006。

### 1.3 相关算子法

相关算子一般是利用一个与待测目标灰度分布相近的母板在目标点附近进行运算，并对运算结果作二次曲面拟合，再取该曲面的最大值点作为目标点<sup>[5]</sup>。由于相关算子可取一定尺寸的运算窗口，故它具有较强的抗噪声能力。相关算子还可以用于测量目标的运动，如平移，转动及放大<sup>[6]</sup>。

## 2 亚像素技术在网格法中的应用

网格法是最古老的光力学测量法之一。其优点在于方法简单、测量范围大，但公认的缺点是精度不高。亚像素技术的引入，使这个古老的方法焕发了新的活力，成为应变测量的一个有力工具，并在照像测量学上起着重要的作用。按网格形状的不同，网格法可分为点状网格(Spot-grid)、线网格(Line-grid)和正交网格(Cross-grid)。它们需要使用不同的亚像素技术。

对点状网格使用形心法。比较几种形心计算公式的结果后，发现在使用门限值 $T$ 后，对窗口尺寸及目标初始点的位置要求较低，结果比较稳定。故用(3)式计算形心坐标。而线网格可以作为正交网格的一个特例。

### 2.1 正交相关算子处理法<sup>[5]</sup>

由两个臂函数取极大值而得到，其形状如图1。其表达式可以写为：

$$G(x,y) = \max(f_x, f_y) \quad (4)$$

$$f_x = \exp[-(k_1x)^m * \exp[-(k_2y)^n]] \quad (5)$$

(4)式中 $f_x$ 、 $f_y$ 分别为两个臂函数，它们的形状相同，但方向不同，可由(5)式进行旋转变换而得到。

(5)式是臂函数的一般表达式。其中 $x$ 为网格线的方向， $y$ 为其垂直方向。 $k_1$ 和 $k_2$ 分别控制算子两个方向的尺寸，而 $m$ 和 $n$ 则

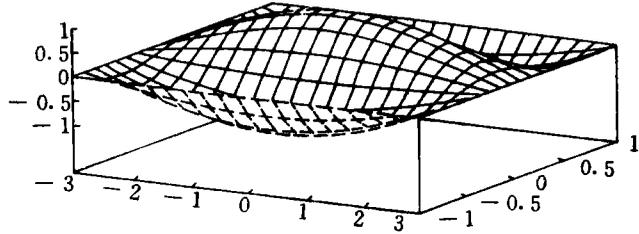


图1 线跟踪算子

用来确定算子的斜率。通常它们应与网络线上的灰度斜率相同。该方法的精度可达0.01~0.02像素。需要指出的是：图1中相关算子的两个臂是相互垂直的，而在实际使用时，它们的夹角应与网格线的夹角相等。而对比较规则的正交网格，其方向基本上没有什么变化。因此，可以将它们当作常数来处理。

### 2.2 线跟踪算子处理法

正交相关算子法具有很高的精度，但它只适合于小曲率网格线的处理。在大变形情形下，每个网格点附近的网格方向、宽度和间距都是变化的。要得到它们，是一件相当困难的工作。因此，对大曲率网格提出了线跟踪算子处理法。

线跟踪算子的思想是找出每条网格线的中心，分别得到两族网格线。进行spline拟合后，再求得两族网格线的交点坐标，并以此作为网格点的坐标。

线跟踪算子的表达式为：

$$G(x,y) = G_x(x)G_y(y)W_y(y) = \cos(\pi x/2A)\cos(3\pi y/2B)\cos(\pi y/2B) \quad (6)$$

其中， $x$ 为待测曲线方向， $y$ 为其垂直方向， $2A$ 、 $2B$ 分别为椭圆的两个主轴，即算子尺寸，其形状见图1。

(5)式中 $A/B$ 一般取为3。 $G_x(x)$ 中较大的 $A$ 可以强调待跟踪网格线的特性，增大其抗干扰能力。而 $G_y(y)$ 有意取中间为正值，两端为负值。实验证明：它能有效地抑制与其

相交的另一条网格栅线的影响,使算子能顺利穿过网格线交叉点。当 $y$ 与网格线垂直时, $G_x(y)$ 在网格线中心取极大值。窗口函数 $W_x(y)$ 主要用来光滑算子结果。数据模拟实验表明, $B$ 的大小对结果影响不大,但当 $2B$ 是网格线宽度的3倍时,其精度相对最高。

曲线中心的确定是这样进行的:首先确定待测曲线方向,然后将算子旋转至该方向。再在 $y$ 方向上取5或7个点,分别计算线跟踪算子的响应,并进行二次曲线拟合,取拟合函数极值点作为网格线中心。曲线方向可以通过两个一阶旋转不变量而得到<sup>[6]</sup>,也可以用二阶曲线进行拟合。尝试用Hough变换确定曲线方向,精度稍差。实验表明:当方向角误差不超过5度时,线跟踪算子确定曲线中心的精度仍能达到0.1像素。

图2和图3分别为两种大曲率网格的处理结果。

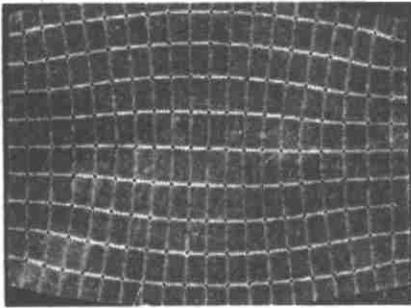


图2 大曲率网格中心线的确定

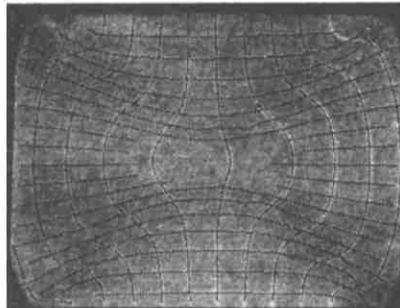


图3 大曲率网格点的确定

本文的主要工作是作者在德国布伦瑞克大学作访问学者时,在Dr. Andreson指导下完成的。对Dr. Andreson提供的方便和给予的帮助,笔者在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- 1 West G A. A survey and examination of subpixel Measurement techniques. SPIE,1990
- 2 Trinder J C. Precision of digital target location. Photogrammetric engineering and remote sensing, 1989,55(6),883~886
- 3 Sirkis J S. System response to automated grid methods. Opt. Eng. 1990,29(12),1485~1493
- 4 Sirkis J S, Lim T L. Displacement and strain measurement with automatic grid method. Exp. Mech, 1991,31,382~388
- 5 Andresen K, Hubner B. Calculation of strain from an object grating on a rescou film. Exp, Mech, 1992,32 : 96~101
- 6 Oulamara A, et al. Subpixel speckle displacement measurement using a digital processing technique. J. of modern optics,1988,35(7) : 1200~1211

(责任编辑 石少平)