

自动网格形状测试技术*

张 政 何世平 续伯钦

(中国科学技术大学力学和机械工程系)

摘要 采用网格投影和亚像素技术,成功地进行了自动网格法的三维形状自动测量.提出了一种新的网格点分割法——全场阈值函数法,加快了分割速度,提高了分割质量.并且还提出了一种利用网格相邻位置关系进行搜索编码的新方法,解决了大变形或含空缺点网格点阵的自动编码和匹配问题.通过对标准斜面和圆柱面进行的实测研究,验证了自动网格形状测试法可以快速自动地进行高精度测量.文中给出了部分实验结果.

关键词 自动网格法,亚像素,形状测量

中图法分类号 P 23

1 引言

自动网格法是近几年发展起来的一种光电技术.它是在传统网格法的基础上,利用现代电子技术(如高分辨率 CCD)、数字图象处理和分析技术而建立起来的一种自动检测法.它既保留了传统网格法原理简单、测试精度和灵敏度都很高(采用亚像素技术)的特点,又具有测试速度快、检测自动化等优点,在工程中有很大的应用前景. J. S. Sirkis 和 R. W. Fail 等人已成功地自动网格法应用到平面位移和变形的自动测量上^[1-3],但在形状测量方面的应用研究,至少少见报道.本文结合亚像素技术、投影网格法,将自动网格法成功地应用到三维形状的自动测量上;并用实验做了验证,给出了部分实验结果.

2 投影网格法测量原理和公式推导

如图 1 所示,网格点由投影仪经透镜中心点 $S(x_s, y_s, z_s)$ 投在物面上某一点 $A(x_0, y_0, z_0)$ 上,然后经 CCD 相机透镜中心点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 成象于 CCD 靶面上. CCD 对 $z=0$ 平面准确聚焦成象,且坐标原点 O 被成象于 CCD 靶面正中央(即图象中心),因此 $x_p = y_p = 0$. 由于 CCD 摄下的网格点是 $z=0$ 平面上的点,我们先求出 SA 、 PA 与 $z=0$ 平面的交点 $B(x_B, y_B, 0)$ 和 $B'(x'_B, y'_B, 0)$ 的坐标为:

$$x_B = x_0 - \frac{x_0 - x_s}{z_0 - z_s} z_0, \quad y_B = y_0 - \frac{y_0 - y_s}{z_0 - z_s} z_0 \quad (1)$$

$$x_B = x_0 - \frac{x_0 - x_p}{z_0 - z_p} z_0, \quad y'_B = y_0 - \frac{y_0 - y_p}{z_0 - z_p} z_0 \quad (2)$$

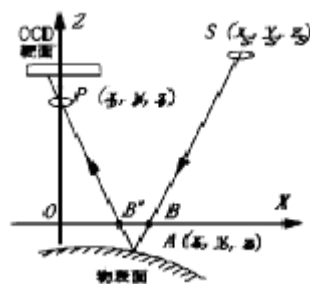


图 1 投影网格法

Fig. 1 Project grid method

设 $B_i(x_{B_i}, y_{B_i})$ 和 $B'_i(x'_{B_i}, y'_{B_i})$ 分别是 B 点和 B' 点在 CCD 靶面上的象点, 则有 $x_{B_i} = Mx_B$, $y_{B_i} = My_B$. 和 $x'_{B_i} = Mx'_B$, $y'_{B_i} = My'_B$, 其中, M 为放大倍数. 由图 1 可见, A 点和 B 点被同一束投影射线所照明, 但 B 点被成象于 B_i 点, 而 A 点却被成象于 B'_i 点. 显然, B_i 和 B'_i 点间的坐标差就是 A 点的高度 z_0 放引起的 A 点象在 CCD 靶面上的位置偏移量, 该偏移量含有 A 点的高度信息 z_0 . 根据公式(1)和(2), 可得

$$\begin{cases} \Delta x_i = x'_{B_i} - x_{B_i} = Mz_0 \left[\frac{x_0 - x_s}{z_0 - z_s} - \frac{x_0}{z_0 - z_p} \right] \\ \Delta y_i = y'_{B_i} - y_{B_i} = Mz_0 \left[\frac{y_0 - y_s}{z_0 - z_s} - \frac{y_0}{z_0 - z_p} \right] \end{cases} \quad (3)$$

从上式可以看出 Δx_i 和 Δy_i 只要知道一个, 即可求出 z_0 . 为了讨论方便, 下面假设 $x_s \geq y_s$, 用 Δx_i 来计算高度 z_0 . 由于很难精确地直接测量 $S(x_s, y_s, z_s)$ 和 $P(x_p, y_p, z_p)$ 的空间坐标值. 因此实际测量中, 常摆成平行光轴或交叉光轴系统^[4], 即取 $z_s = z_p = L$, $x_s = d$, 则(3)式中第一式可以化简为:

$$\Delta x_i = \frac{Md z_0}{L - z_0} \quad (4)$$

由该式可见, 若要精确测量出 z_0 , 必须精确知道 L 、 Md 两个参数(M 、 d 可看作是一个参数), 为此, 我们提出了一种简单而精确的标定方法, 将参考平板沿 z 轴方向平移, 获得平板上对应不同高度 z_0 的至少 3 幅网格图, 算出相应的网格点的 Δx_i 值, 用最小二乘法由(4)式精确地标定出 L 、 Md . 于是, 物面上任一点的高度 z_0 可用下式求出:

$$z_0 = \frac{\Delta x_i \cdot L}{\Delta x_i + Md} \quad (5)$$

然后由(2)式, 可得到该点坐标 x_0, y_0 为:

$$\begin{cases} x_0 = \left[1 - \frac{z_0}{L} \right] \frac{x'_{B_i}}{M} \\ y_0 = \left[1 - \frac{z_0}{L} \right] \frac{y'_{B_i}}{M} \end{cases} \quad (6)$$

这样, 由(5)和(6)式, 就可以求得物面上各个点的三维坐标 (x_0, y_0, z_0) , 从而可重构出整个物面的三维形状.

3 自动网格法(Automated Grid Methods)

前面分析了投影网格法的测量原理和计算公式, 下面研究整幅网格图的自动分析技术——自动网格法的实现. 自动网格法包括一系列数字图象处理和分析技术, 概括起来主要分为网格点阵的自动分割、网格中心位置的精确确定、网格点阵的自动识别和匹配三大步骤, 其中, 网格点阵的自动识别和匹配是网格法自动化的关键. R. W. Fail^[1]和 J. S. Sirkis^[3]等人正在进行平面位移和应变的自动测量时, 由于平面上的网格很规则, 故可利用网格平均间隔自动识别出各个网格点对应的行列序号, 从而进行自动编码和匹配. 但在进行形状测量时, 由于待测表面为曲面, 投上去的网格点阵已产生了很大变形, 网格平均间隔不再适用. 因此, 必须采用更可靠、适用范围更广的图象分析技术. 为此, 本文首次提出了利用网格相邻位置关系搜索编码方法, 成功地进行了大变形网格图的自动编码和匹配.

方法是首先在 $z = 0$ 平面上放一参考平板, 将正交网格点阵投影上去. 其中, 至少包含一个标志点(比如面积最大的点), 进行网格自动识别(即编码), 记下各个位置后, 再在参考平板

上放上待测物体, 并将投在其上的网格点阵进行自动编码, 记下各个位置. 最后, 根据各点编码号进行匹配, 得出各点位置偏移量 Δx_i , 再由公式(5)和(6)计算出各点三维空间的坐标值, 进而重构出物面三维形状.

3.1 图象分割

要进行网格点阵的自动识别, 一般先要进行网格点阵的分割和定位. 为了便于自动分割并提高网格点重心计算的精度, 我们选用斑点灰度分布为高斯分布的正交网格(可通过计算机生成后翻拍而获得)进行投影. 这时, 网格图的灰度统计直方图不再象台阶状斑点那样呈现双峰性质, 而是单峰, 但只要简单地将阈值取为光强平均值(或上下上下调节)即可顺利地分割出光斑点来. 由于待测表面为曲面, 图象背景不均匀, 因此, 阈值 T 是坐标的函数 $T(i, j)$.

图象分割的具体做法是: 先进行分区取阈值, 再进行全场拟合, 得到整幅图象的阈值函数 $T(i, j)$, 然后, 对图象上任一点 (i, j) , 如果其灰度大于 $T(i, j)$, 则认为该点属于光斑上的点而不改动它(假设光斑为亮斑), 否则将其灰度置为 0, 这样, 就可以将网格图分割成一个个孤立的亮点. 由于图象边缘上的网格点不完整, 故分割完后, 要沿着图象边缘搜索出那些点, 并加以剔除(即将对应象素点置为零).

3.2 网格点的亚象素定位——重心计算

经分割处理后, 对每个孤立的网格点, 可采用亚象素技术给它定位. 具体做法是: 首先对分割后的网格图象从上至下逐行进行扫描, 当遇到非零象素点时, 即说明扫描到一个可能的网格点, 然后就可以采用填充算法或边界跟踪算法, 确定出该网格点所在的区域, 同时可得出该网格点的面积. 如果该网格点面积小于某一阈值, 则认为该网格点是噪声点, 给予剔除. 否则, 就利用该网格点所在区域内象素点的灰度值, 采用重心算法, 计算出该网格点的重心坐标 (\bar{x}, \bar{y}) 来, 计算公式为:

$$\bar{x} = \frac{\sum \sum iI(i, j)}{\sum \sum I(i, j)}, \quad \bar{y} = \frac{\sum \sum jI(i, j)}{\sum \sum I(i, j)} \quad (7)$$

式中, 求和号 $\sum \sum$ 表示对所有该光斑上的象素点 (i, j) 求和, $I(i, j)$ 为象素点 (i, j) 处的灰度值, 且 $I(i, j) > 0$. 文献[2]指出, 其精度可达 0.02 象素.

在往下继续扫描的过程中, 为了避免重复扫描同一网格点, 我们可以将扫描到的网格点的面积和重心坐标记录下来, 即将该网格点抹去. 这样当所有网格点都抹掉以后, 各网格点就完成定位.

3 自动编码和匹配

投影在参考平板上的网格为规则的正交网格, 但当投影到待测物面上时, 由于物表面的不同形状, 会使网格发生平动、转动以及变形, 而且变形往往比较大, 因此, 自动确定参考平板上的网格点与物面上网格点的对应关系(即网格点匹配), 就成为自动网格法一个主要的任务.

为了正确地进行网格点匹配, 首先要给各网格点“命名”, 即编码. 编码方式可以根据具体情况来选取, 比如文献[1]测量平面运动时, 由于可控制所有网格点始终包含于图象中, 而且网格很规则, 变形很小, 因而可以从上至下, 从左至右给各光斑排序, 用它们的序号进行编码. 而进行形状测量时, 有的网格点可能投到物表面外边或图象外面去, 而且网格变形较大, 不能再根据网格平均距离来计算网格相对位置和序号. 这里, 我们提出的利用网格相邻位置关系搜索编码的方法, 可以成功地进行大变形网格点阵的自动编码和匹配.

首先,为了解决因网格点阵的整体平动和转动所带来的匹配上的难题,我们在网格点阵中

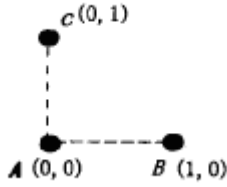


图 2 网格标志

Fig. 2 Marks of grids

特意做了一个标志. 它由三个最大的亮斑组成,如图 2 所示, A 点作为“坐标原点”(0, 0), B 点作为水平方向第一点,其“坐标”取(1, 0), C 点作为垂直方向第一点,其“坐标”取(0, 1). 然后给网格点阵编码时,我们赋予每个网格点一个相对于标志点 A 的行列序号,并作为其“坐标”. 例如图 2 中, B 点位于 A 点行向第一点(向右为正),与 A 点位于同一行,则 B 点“坐标”为(1, 0);而 C 点与 A 点在同一列,位于 A 点列向第一点(向上为正),则 C 点“坐标”为(0, 1),以此类推,可获得所有点的“坐标”. 这样,我们可以通过各点的“坐标”而识别出它们,匹配时只要取变形前后

“坐标”相同的点进行配对,计算两点间 Δx_i ,就得出物面上对应点的三维坐标值.

于是,网格点的编码归结为定出各点相对于标志点 A 的“坐标”. 由于大变形网格虽然整体变形很大,但局部相邻几点间变形相差并不太大,因此,我们可以从标志点开始,利用网格相邻位置关系,逐点向外搜索,从而定出各点“坐标”来. 具体实现方法如下:

(1) 首先,在记下各点重心位置的同时,给各点分配一个标记和 4 个索引值. 标记用来表示该点是否已被搜索过,索引值用来索引该点四个(上下左右)相邻的网格点,如果相应点不存在,则对应的索引值为空. 在搜索开始前,所有点的标记和所有索引值为空.

(2) 找到标志点 A 和 B, C 两点,并得到它们的“坐标”后,设置它们各自的标记和索引值. 由于三点都搜索到了,标志都设为 1. A 点右边索引为 B 点, B 点左边索引为 A 点; A 点上边索引为 C 点, C 点下边索引为 A 点.

(3) 首先沿 AB 或 AC 方向搜索 B 点右边第一点. 搜索中心为 AB 延长线上两倍 AB 距离的点,搜索半径为 AB 距离的二分之一,或更小一点. 如果没有搜索到任何点,则可以将搜索半径适当放大,但一般不要超过 AB 距离的三分之二,再继续搜索,如果再没有搜索到任何点,则认为该点空缺(包括网格点移出图象的情况),于是 B 点右边索引为空,搜索结束. 如果搜索到一个或几个点,则取距离搜索中心最近的点作为要搜索的点,设为 B_1 ,则将 B_1 标志设为 1, B_1 左边索引为 B, B 右边索引为 B_1 . 由于 B_1 为 B 点右边第一点,故 B_1 点“坐标”只要将 B 点“坐标”的列坐标加 1 即可(类似,如果在左边则将列坐标减 1,上边则将行坐标加 1,下边将行坐标减 1). 于是,我们又可沿 BB_1 方向继续向前搜索,直到搜索失败(遇到空缺点或图象边界)为止.

(4) 对 BA, AC, CA 三个方向也采用类似步骤(3)的做法进行搜索,于是,可搜索出“坐标轴”上的各点.

(5) 对于四个“象限”中的点,则从“原点”A 开始,按下述方法向外搜索. 见图 3 所示,我们将 B, C, A 三点当作平行四边形三个顶点,把另一顶点作为搜索中心,搜索半径取 $|AB|$ 和 $|AC|$ 的最小值的二分之一. 如果没有搜索到任何点,则将搜索半径扩大一点继续搜索,如果还是没有搜索到,则认为该点空缺,于是 C 点右边索引、B 点上边索引都为空,我们就应该跳过该空缺点继续搜索,比如根据 B_1 、A、C 三点搜索 D 点右边第一点 D_1 等.

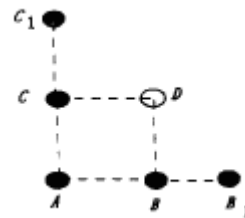


图 3 网格点搜索

Fig. 3 Search of grid spots

如果到了图象边界,则改变方向进行搜索. 如果根据 B、C、A 搜索到一点或几点后,仍取距离搜索中心最近的点,设为 D 点,如果 D 点已被搜索过(其标记为 1),则进行坐标和索引检验.

如果 D 点没有被搜索过, 则设置相应的标记和索引值, D 点“坐标”可以根据 B 点或 C 点推出. 然后, 再根据 D 、 B 、 B_1 三点或 D 、 C 、 C_1 三点继续向前搜索, 直至搜索都失败(比如图象边界)为止.

(6) 最后, 检查所有点的标记是否都已设置为 1, 并验证各点“坐标”与其相邻各点“坐标”是否正确(特别是空缺点的坐标). 确保无误后, 自动编码即告完成.

上述步骤可以全部由计算机自动完成.

这种利用标志点和网格相邻位置关系进行搜索编码的方法, 有以下主要的优点:

(1) 网格点阵可以有很大的刚体位移, 包括平动和转动. 由于标志点由三点组成, A 点可确定刚体平移量, AB 或 AC 的转角可确定刚体转动量.

(2) 网格点阵可以有大变形. 由于物表面一般是连续光滑的, 投影在其上面的网格点阵尽管整体上变形可能很大, 但局部相邻几点的变形并不大, 故可通过上述方法顺利进行自动编码.

(3) 网格点阵外围某些点可以移到图象外面去而不影响编码.

(4) 网格点阵中某些点由于某种原因空缺时, 也不影响编码. 因为上述方法可以通过网格相邻关系从其它方向绕过那些空缺点而继续完成各点编码.

4 验证实验和结果

为了验证上述自动网格法形状测试技术, 我们进行了实验测试研究. 试件是经过精密加工的斜面和圆柱面. 为了测量它们的形状, 我们先用一个精密加工平板作为参考面, 放在图 1 ($z_s = z_p = L$) 中 $z = 0$ 平面位置, CCD 对它进行聚焦, 拍下投在其上的参考网格图. 然后放上试件(斜面或圆柱面), 拍下投在试件上的网格图. 接着, 计算机就开始自动对上述两幅网格图分别进行分割、网格点定位和编码, 接着按两幅网格点阵图的编码号进行自动匹配, 并利用公式(5)、(6)得到各个网格点的三维坐标(x_0, y_0, z_0), 最后, 根据这些网格点数据, 重构出整个面的高度分布, 并画出三维轮廓图和等高线图.

实验结果见图 4~ 图 7. 图 4 为斜面上的网格点阵图, 其中, 图 4(a) 为分割前的网格图, 图 4(b) 为分割后的网格图. 图 5 为圆柱面上的分割前和分割后的网格点阵图. 图 6 和图 7 为自动网格法重构出的试件三维轮廓图和等高线图. 对斜面的测量结果, 计算机重构出的高度最大误差为 0.05mm , 均方根差为 0.04mm . 对标准圆柱面, 最大高度误差为 0.06mm (边界点除外), 均方根差为 0.05mm . 可见自动网格法对平滑表面的测试精度是很高的.

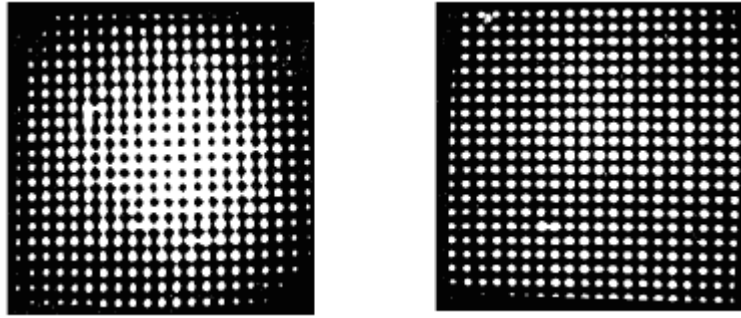
5 讨论和结论

成功地将自动网格法用于三维形状的自动检测中, 除了进行本文所做的标定性实验研究外, 还将该技术成功地用于飞机发动机叶片三维形状的自动检测. 在自动网格形状测试技术的研究中, 取得了如下的开拓性进展:

(1) 成功地实现了不均匀背景下网格点阵图的自动分割. 如图 5(a) 中圆柱面上的网格点阵图, 尽管背景亮度相差比较大, 我们仍实现了自动分割, 见图 5(b).

(2) 成功地实现了大变形网格点阵图的自动识别(编码).

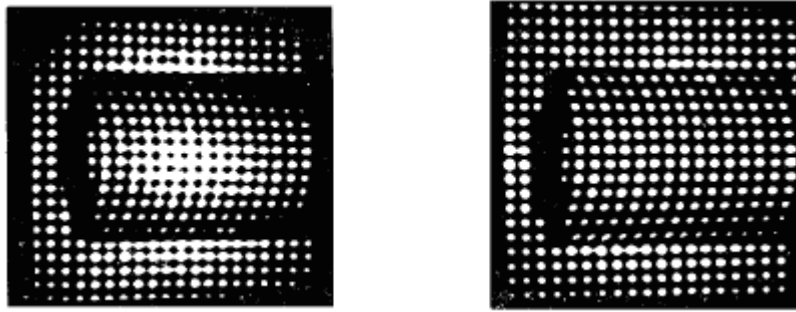
(3) 成功地实现了对带有缺陷的网格图的自动识别. 如图 5(a) 中有部分点被去掉时, 仍可以进行自动全场编码.



(a) 分割前 (b) 分割后
 (a) before segmentation (b) after segmentation

图 4 斜面上的网格图

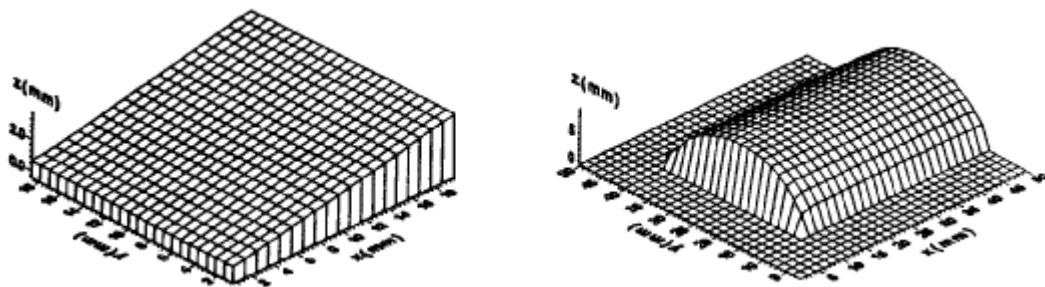
Fig. 4 Grid scheme on a inclined plane



(a) 分割前 (b) 分割后
 (a) before segmentation (b) after segmentation

图 5 圆柱面上的网格图

Fig. 5 Grid scheme on a cylindrical surface



(a) 斜面 (b) 圆柱面
 (a) inclined plane (b) cylindrical surface

图 6 试件三维轮廓图

Fig. 6 3-D profile diagram of specimen

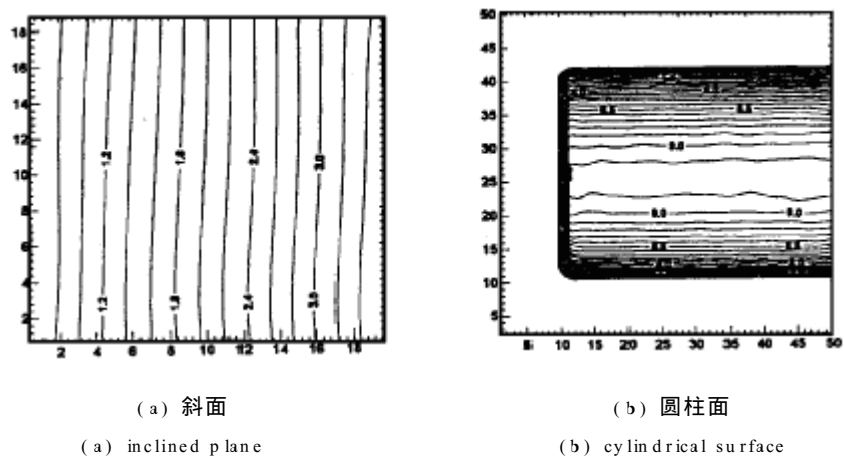


图 7 试件等高线图

Fig. 7 Contour chart of specimen

参 考 文 献

- [1] Fail R W, Taylor C E. An application of pattern mapping to plane motion. *Experimental Mechanics*, 1990, 12 : 404- 410.
- [2] Sirkis J S. System response to automated grid methods. *Optical Engineering*, 1990, 29(12): 1485-1493.
- [3] Sirkis J S. Displacement & strain measurement with automated grid methods. *Experimental Mechanics*, 1991, 12: 382- 388.
- [4] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977- 3982.

Automated Grid Method for Profilometry

Zhang Zheng He Shiping Xu Boqin
(Dept. of Mechanics & Mechanical Engineering, USTC)

Abstract Using the automated grid method with grids projection and sub-pixel techniques, automatic measurement of 3-D shape is successfully carried out. A new method for grids segmentation, Whole-field Threshold Function Method, which increases the segmenting speed and qualities of the segmented grids, is proposed. In order to automatically and successfully recognize the large-deformed or incomplete grids array, a new method, Neighboring-Grids Indexed Recognition, is presented. The automated grid method for profilometry is tested by experiments on standard flat and cylindrical surfaces and some of the results are presented in this paper.

Key words: automated grids method, sub-pixel, profilometry