

二维场的一个校正函数

王绍钧

(山东工业大学自动化工程系, 济南 250014)

关键词 微细加工、电子束曝光、束技术

由数字-模拟系统控制的二维偏转场的畸变校正, 是束(电子束、光子束等)微细加工的重要技术, 其关键问题是如烘给出一个近似的校正函数, 一般文献中多采用整式函数^[1, 2].

实际的偏转场, 不仅存在几烘象差引起的畸变、偏转系统的不对称性等原因, 会形成各种畸变的叠加, 所以需要校正的畸变往往是很复杂的^[3]. 虽然如此, 但由于畸变的总尺寸可以精确的测量, 因此, 本文用曲线坐标变换的原理描述畸变现象; 依据测量的结果, 用分离子场的数字校正法推演校正函数, 结果是分式线性函数, 较整式函数具有计算简单且运算误差小等优点.

1 畸变和校正的描述

给数字-模拟系统输入一个充满偏转域的 $M \times N$ 标准网格数据. 由于场有畸变, 束加工结果一般为一扭曲的网格. 当 M, N 适当大时, 可将每一扭曲的网孔代以四边形. 设正交网孔 Δ 对应四边形网孔 Σ , 如图 1.

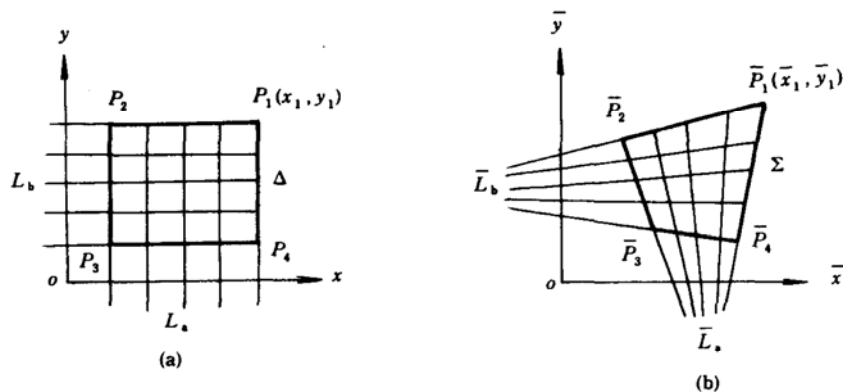


图 1

图 1 表明场中存在一个坐标变换 T , T 将直角坐标系中的域 Δ , 变换为某曲线坐标系中的域 Σ . 显然, 畸变校正关系是 $G = T^{-1}$. 由 T 和 G 可计算出畸变总量和校正总量.

就场校正而言, 我们关心的是如烘把 Σ 变换为 Δ , 即 Σ 中的点 $\bar{M}(\bar{x}, \bar{y})$ 到 Δ 中的点 $M(x, y)$ 的映射关系

$$M(x, y) = G[\bar{M}(\bar{x}, \bar{y})], \quad (1)$$

因为场校正为预处理过程,所以校正函数是

$$N(u, v) = G[M(x, y)], \quad (2)$$

其中点 M 的全体是 Δ , 点 N 的全体是对应于 Δ 的一个预校正图形.

2 校正函数的推演

设变换 T 连续, 光滑且对各变数单调增加及 Jacobi 式大于零 (在足够需要的范围内). 下面分两种情况进行推演:

(1) Σ 无平行对边时

取曲线坐标网如图 1(b), 其中 $\bar{L}_a, \bar{L}_b$ 是坐标线. $\bar{A}, \bar{B}$ 是 Σ 的对边交点 (由于畸变是微小的, $\bar{A}, \bar{B}$ 均远离 Σ), Σ 的边界在坐标线上. 于是, (1) 式应将中心直线束 $\bar{L}_a, \bar{L}_b$ 分别变换为平行直线束 L_a, L_b . 由此可建立起 Σ 中的点和 Δ 中的点的对应关系, 由 T 的性质可知, 这种关系是一一对应的.

中心束 $\bar{L}_a, \bar{L}_b$ 的方程为

$$\left. \begin{aligned} \bar{L}_a: x' &= \frac{\bar{x} - \bar{x}_a}{\bar{y} - \bar{y}_a} \\ \bar{L}_b: y' &= \frac{\bar{y} - \bar{y}_b}{\bar{x} - \bar{x}_b} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

其中 x', y' 是各束中直线的参数. x' 是 $\bar{L}_a$ 中直线对 $\bar{y}$ 轴的负斜率; y' 是 $\bar{L}_b$ 中直线对 $\bar{x}$ 轴的斜率. 因此, (3) 式将 $\bar{x}\bar{y}$ 平面上的中心束 $\bar{L}_a, \bar{L}_b$, 分别变换为 $x'y'$ 平面上的竖直平行束和水平平行束.

为使域 Σ 变换为域 Δ , 并保证点的对应关系的单调性, 设置增益及位置调整系数 a_1, a_2 及 b_1, b_2 . 由 (3) 式得

$$\left. \begin{aligned} x &= a_1 x' + b_1 \\ y &= a_2 y' + b_2 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

各系数可由方程

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & 1 & 0 & 0 \\ \beta_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_2 & 1 \\ 0 & 0 & \beta_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ a_2 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \\ y_2 \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

求出, 其中

$$\alpha_1 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_a}{\bar{y}_1 - \bar{y}_a}, \quad \beta_1 = \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_a}{\bar{y}_3 - \bar{y}_a}; \quad \alpha_2 = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_b}{\bar{x}_2 - \bar{x}_b}, \quad \beta_2 = \frac{\bar{y}_4 - \bar{y}_b}{\bar{x}_4 - \bar{x}_b}.$$

由 (2), (3) 及 (4) 式可得校正函数为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \frac{x - \bar{x}_a}{y - \bar{y}_a} + b_1 \\ a_2 \frac{y - \bar{y}_b}{x - \bar{x}_b} + b_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

(2) Σ 为平行四边形时

域 Σ 如图 2 所示, 取坐标线为平行束 $\bar{L}_a, \bar{L}_b$, 使 Σ 的边界在坐标线上. 平行束方程为

$$\left. \begin{aligned} \bar{L}_a: x' &= \bar{x} - e_1 \bar{y} \\ \bar{L}_b: y' &= \bar{y} - e_2 \bar{x} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

x' 及 y' 分别为各束中直线的参数. x' 是 $\bar{L}_a$ 中直线对 $\bar{x}$ 轴的截距; y' 是 $\bar{L}_b$ 中直线对 $\bar{y}$ 轴的截距.

$$e_1 = \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_2}{\bar{y}_3 - \bar{y}_2}, \quad e_2 = \frac{\bar{y}_4 - \bar{y}_3}{\bar{x}_4 - \bar{x}_3},$$

(7) 式将 $\bar{x}\bar{y}$ 平面上两平行束 $\bar{L}_a, \bar{L}_b$ 变为 $x'y'$ 平面上的竖直平行束和水平平行束. 设置增益及位置调整系数 a_3, a_4 及 b_3, b_4 , 以使域 Σ 变为域 Δ , 得

$$\left. \begin{aligned} x &= a_3 x' + b_3 \\ y &= a_4 y' + b_4 \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

各系数可由下面方程 (9) 求出

$$\begin{bmatrix} \alpha_3 & 1 & 0 & 0 \\ \beta_3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_4 & 1 \\ 0 & 0 & \beta_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3 \\ b_3 \\ a_4 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_4 \\ y_1 \\ y_3 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中 $\alpha_3 = \bar{x}_2 - e_1 \bar{y}_2$, $\beta_3 = \bar{x}_4 - e_1 \bar{y}_4$; $\alpha_4 = \bar{y}_1 - e_2 \bar{x}_1$, $\beta_4 = \bar{y}_3 - e_2 \bar{x}_3$.

由 (2), (7) 及 (8) 式可得校正函数为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_3(x - e_1 y) + b_3 \\ a_4(y - e_2 x) + b_4 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

由 (6) 和 (10) 式立即可得 Σ 仅有一对平行边时的校正函数为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \frac{x - \bar{x}_a}{y - \bar{y}_a} + b_1 \\ a_4(y - e_2 x) + b_4 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

或

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_3(x - e_1 y) + b_3 \\ a_2 \frac{y - \bar{y}_b}{x - \bar{x}_b} + b_2 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

3 计算结果及分析

将 4×4 标准网格及畸变网格的数据输入计算机, 用校正函数 (6), (10), (11) 及 (12) 式进行计算, 输出的部分数据如表 1, 表中列出对角线上各格点的畸变量和校正量.

图 3 是左上角及右下角两网孔的输出图形, 图中粗线是标准网孔, 细线和虚线分别为畸变网孔和预校正网孔.

表 1

标准格点坐标		畸变量 (μm)		校正量 (μm)	
x	y	Δx	Δy	Δx	Δy
0 0 0 0	0 0 0 0	0.0	0.0	0.0	0.0
0 6 2 5	0 6 2 5	0.0	0.0	0.0	0.0
1 2 5 0	1 2 5 0	-1.8	2.2	1.9	-2.3
1 8 7 5	1 8 7 5	0.2	3.5	0.0	-3.3
2 5 0 0	2 5 0 0	-0.1	-2.4	0.0	2.5
2 5 0 0	0 0 0 0	-5.0	-4.4	6.3	5.6
1 8 7 5	0 6 2 5	-1.4	-3.3	1.3	3.1
1 2 5 0	1 2 5 0	-1.8	2.2	1.9	-2.3
0 6 2 5	1 8 7 5	-2.5	-1.3	2.5	1.3
0 0 0 0	2 5 0 0	-16.3	-8.5	12.5	6.2

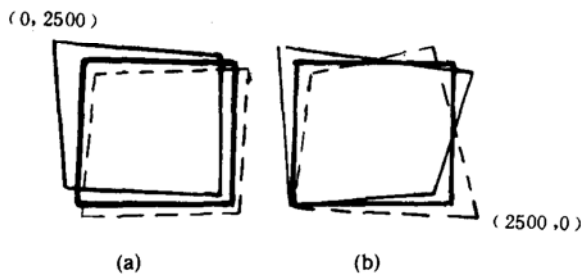


图 3

由表 1 可知,校正量和畸变量的符号是相反的,但模值有差异,当畸变较大时尤为明显.这是因为畸变不仅存在位移和旋转,而且存在伸展和压缩.场在一点的伸缩系数 γ 可由 T 的 Jacobi 式表示^[4]:

$$\gamma = \text{ABS} \left[\frac{\partial T(M)}{\partial M} \right]$$

在图 3(a) 中,点 (0, 2500) 处,场沿 x 负方向被拉伸,拉伸系数由左向右变小,所以校正量小于畸变量(指模值);类似的,在图 3(b) 中,场在点 (2500, 0) 处,沿 x 负方向被压缩,压缩系数由左向右变大,所以校正量大于畸变量.另外,计算结果还表明,当畸变图形是原图的单纯位移或旋转时,预校正图形则是一个距离或角度相同方向相反的位移或旋转.

4 结 束 语

校正位移(或旋转)和畸变位移(或旋转)的互逆性以及校正量和畸变量的符号互反性,均反映了校正过程和畸变过程的互逆关系,而校正量和畸变量的模值差异,则表现了对场延展的合理补偿.总之,对计算结果的定性定量分析,充分说明了校正函数的正确性.

参 考 文 献

- [1] Sugiyama, N. et al., *IEEE Transaction on Electron Devices*, 1979, **ED-26**(4): 677.
- [2] Takamoto, K. et al., *J. Vac. Science Technology*, 1986, **B4**(3): 676.
- [3] 邵健中, 电子离子光学仪器原理, 浙江大学出版社, 杭州, 1989, 175.
- [4] 格·马·菲赫金哥尔兹著(丁寿田译), 数学分析原理, 人民教育出版社, 北京, 1963, 295.