

微操作成像系统中体视显微镜的参数标定*

王跃宗 刘 冲 王立鼎 王晓东 宋 展
(大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

摘要: 体视显微镜具有工作空间大、实时性高以及不损坏样品表面等优点, 已用于微观对象三维立体信息的测量。建立了体视显微镜的成像模型, 研究了体视显微镜参数的标定问题。模型包含的方程数目小于参数的数目, 需要增加约束条件。结合体视显微镜子光路系统的对称性和微小的差异性, 提出了含近似相等条件的体视显微镜参数标定问题的解决方法, 试验分析了参数的鲁棒性、相关性和重复性, 利用成像模型重构了样板在纵向运动过程中的一组表面。

关键词: 微操作 体视显微镜 标定 重构

中图分类号: TP248 TP391

0 前言

随着微装配、微操作等微观领域科学技术的迅速崛起, 迫切需要微观对象三维立体信息测量理论和技术的发展。扫描电子显微镜在这一领域内的应用已非常广泛^[1], 相应的参数标定方法和成像模型^[2]的发展也较成熟。体视显微镜(Stereo light microscope, SLM)在该领域内的应用尚不多见, 与扫描电子显微镜相比, SLM 的工作空间大, 便于操作微观对象, 属于非接触式测量, 对样品表面没有任何损伤, 可以实时观察 SLM 物空间的动态场景^[3]。不过 SLM 也存在不足, SLM 的立体成像属于光学成像, 易引起图像畸变, 降低测量的准确性; 三维立体信息的获取通过图像匹配实现, 难度较大。最早使用 SLM 进行微观对象三维信息测量的是韩国人 Kim^[4], 他研究了细胞和微小零件三维立体形状的重构问题。后来瑞士的 Danuser^[5]把 SLM 引入微操作领域, 研究了物空间的高精度定位问题。德国的 Eckert^[6]和日本的 Vikramaditya^[7]使用 SLM 也开展过类似的工作。在国内, 长春光机所^[8]和大连理工大学^[9]基于 SLM 建立了微操作成像系统, 开展了微装配和微操作方面的研究。

微观对象三维立体信息测量要求微米甚至更高的精度, 对 SLM 参数标定的准确性提出了很高的要求。对 SLM 参数的标定问题进行了研究, 建立了 SLM 的成像模型, 提出了 SLM 参数标定的一种新方法, 解决了含近似相等条件的一类参数标定问题。

1 系统硬件结构

SLM 作为微操作系统的传感器部件, 用于实时观察物空间的动态场景, 能够产生立体视觉效果。这里使用的 G 型 SLM 的光路结构见图 1, 其分辨率为 $3\ \mu\text{m}$, 工作距离 D 为 $7.6\ \text{cm}$, 两子光路夹角 13° , 放大倍率范围 $0.75\sim 4.5$ 。数字图像通过 CCD 图像传感器采集, 使用的 CCD 分辨率 752×582 像素。SLM 选用环形光源照明, 这种光源可以尽量避免因光照不均匀引起的图像质量的下降。

SLM 参数的标定使用准确已知的物空间数据和图像空间数据估计参数。物空间数据用平面网络状标定样板提供, 样板中心的十字线用于左右图像对准, 十字线周围均匀分布黑色小方块, 长、宽均为 $0.1\ \text{mm}$, 中心间距 $0.2\ \text{mm}$, 标定样板采用光刻

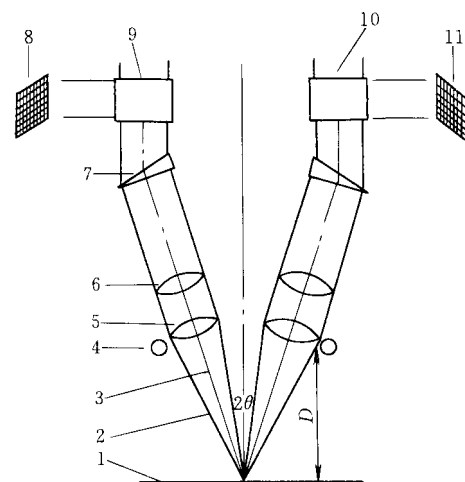


图 1 G 型 SLM 光学结构

- 1. 聚焦面 2. 光线 3. 左光轴 4. 光源 5. 物镜 6. 变倍系统
- 7. 棱镜 8. 左 CCD 9. 左目镜 10. 右目镜 11. 右 CCD

* 国家自然科学基金 (50275023) 和国家自然科学基金重点 (50135040) 资助项目。20020712 收到初稿, 20030328 收到修改稿

的方法制作,加工精度 $4\mu\text{m}$ 。使用图像中小方块的中心点(特征标定点)坐标作为图像空间数据,进一步把特征标定点划分为控制点和检测点,它们分别用于同一标定过程中主要参数和小数量级参数的计算。

特征标定点的获取不仅受物空间光源亮度、均匀程度的影响,还受物空间横向和纵向尺度扩展的影响,这两个因素以噪声的形式叠加在图像坐标上,容易使参数产生波动性和不稳定性。使用二维可动的样品台控制标定样板在物空间聚焦面位置平动,在不同位置处采集样板图像,同时处理多幅图像,获取一系列的特征标定点数据,取其平均值,可以最大程度上减小噪声对参数标定的负面影响。标定算法的流程框图如图 2 所示,算法中使用了 10 个立体图像对。SLM 的参数划分为主值参数和调节参数,主值参数使用控制点标定,调节参数使用检测点和成像模型的定位误差标定,后一步标定以前一步标定为基础,两步标定法在某种程度上提高了标定的准确性。

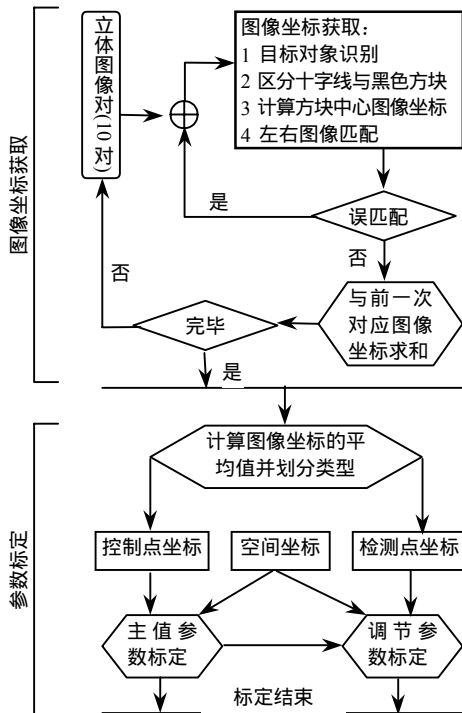


图 2 SLM 参数标定算法框图

2 SLM 成像模型和参数标定方法

2.1 SLM 成像模型

SLM 具有两套光学子系统,子系统具有类似的描述参数,用 $\xi_v = \{\beta_v, \Phi_v, \theta_v\}$ 表示参数序列集合,下标集合 $V = \{L, R\}$ 标识左右子系统的公有属

性, V 代表二维列矢量, β_v 、 Φ_v 和 θ_v 分别表示 SLM 左右子系统的放大倍率、焦距的负倒数、子系统主光轴与 SLM 中心线夹角。SLM 成像模型是联系二维左右 CCD 图像空间(w^v)和三维物空间(r)的纽带,从二维图像信息中可以恢复三维空间信息。物空间中任意物点在图像空间对应两个像点,像点与物点之间的光路曲线用弱非线性方程描述,物点坐标是左右光路对应方程的公共解。基于该原理,建立了下面的成像模型

$$r = r_0 + \frac{1}{\beta_L \beta_R} \Xi_w^v \frac{1}{1 - \eta} \quad (1)$$

式中 $r_0 = [0 \ 0 \ (\cos \theta_L) / \Phi_L]^T$

$$\Xi_w^v = \begin{bmatrix} \beta_R \Phi_R w_2^L w_1^R \sin \theta_L \sec \theta_R + \beta_L \Phi_L w_2^R w_1^L \sin \theta_R \sec \theta_L \\ \Phi_L w_2^L \sin \theta_R + \Phi_R w_2^R \sin \theta_L \\ (\beta_R \Phi_R \sin \theta_L + \beta_L \Phi_L \sin \theta_R) w_2^L w_2^R \\ \Phi_L w_2^L \sin \theta_R + \Phi_R w_2^R \sin \theta_L \\ (\beta_R \sin \theta_L + \beta_L \sin \theta_R) w_2^R \cos \theta_L \\ \Phi_L w_2^L \sin \theta_R + \Phi_R w_2^R \sin \theta_L \end{bmatrix}$$

$$\eta = \frac{\Phi_L \Phi_R (w_2^R w_1^L \sec \theta_L - w_2^L w_1^R \sec \theta_R)}{(\Phi_L w_2^L \sin \theta_R + \Phi_R w_2^R \sin \theta_L)}$$

在成像模型中, η 是左右图像横向坐标 w_1^L 和 w_1^R 的加权差,“权”是动态变化的,受两个纵向坐标 w_2^L 和 w_2^R 的调节,类似宏观立体视觉中的视差 $w_1^L - w_1^R$,但 η 值小于 1,是微观立体成像特有的现象,把 η 称为弱视差,便于和宏观视差区别。在成像模型中,物空间深度与弱视差存在弱的非线性关系,同时弱视差还适当的矫正了物空间横向坐标的深度依赖性。

2.2 SLM 参数标定方法

SLM 参数标定需要确定成像模型中的参数 ξ_v ,共 6 个参数,至少需要 6 个准确已知的方程,但成像模型只包含三个方程,所以必须增加三个约束条件。根据 SLM 左右子系统的对称性, $\phi_L \approx \phi_R$ 、 $\beta_L \approx \beta_R$ 和 $\theta_L \approx \theta_R$ 。三组参数大小接近,具有较小的差异性,但对于微细操作,忽略了对应参数的差异性会带来较大的定位误差。所以还必须考虑对应参数间的差异性,利用三个已知方程和三个近似相等条件确定参数序列 ξ_v 。

把 ξ_v 中的元素写成 $\xi_v = \xi + \xi_v^{\checkmark}$ 形式, ξ 是忽略 SLM 子系统差异性的中间参数,令 $\xi_L = \xi_R = \xi$, ξ 称为主值参数,在 ξ_v 中占较大比重,是左右参数序列的公共部分,体现 SLM 两子系统的对称性; ξ_v^{\checkmark} 是在主值参数基础上进一步调节,在 ξ_v 中占有较小比重,称为调节参数,体现子光路系统间的差异性。

标定分两步: ① 主值参数标定。把 $\xi_L = \xi_R = \xi$ 代入成像模型得主值模型, 利用最小二乘回归法确定主值参数的标定公式

$$\theta = \arccos \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{x_{k2}^{(0)} (w_{k2}^L)^{(0)} (w_{k1}^R)^{(0)} + (w_{k2}^R)^{(0)} (w_{k1}^L)^{(0)}}{2(w_{k2}^L)^{(0)} (w_{k2}^R)^{(0)}} \right]$$

$$\Phi = \frac{1}{N} \frac{\cos \theta}{x_3^{(0)}} \sum_{k=1}^N \left[1 - \frac{x_2^{(0)}}{(w_2^L)^{(0)}} \right]$$

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{2}{x_{k2}^{(0)}} \frac{(w_{k2}^L)^{(0)} (w_{k2}^R)^{(0)}}{(w_{k2}^L)^{(0)} + (w_{k2}^R)^{(0)}} \frac{1}{1 - \eta_k^{(0)}} \right]$$

$$\eta_k^{(0)} = \frac{2\Phi [(w_2^R)^{(0)} (w_1^L)^{(0)} - (w_2^L)^{(0)} (w_1^R)^{(0)}] \csc 2\theta}{(w_2^L)^{(0)} + (w_2^R)^{(0)}}$$

标定样板置于 SLM 物空间聚焦面处, 上标(0)标识聚焦面位置, N 表示控制点的数目, $x_3^{(0)}$ 是 SLM 坐标系原点到物空间聚焦面的距离, $r_k^{(0)} = [x_{k1}^{(0)}, x_{k2}^{(0)}, x_3^{(0)}]^T$ 是以样板十字架中心线为参考系的第 k 个控制点的坐标矢量, $(w_k^L)^{(0)} = [(w_{k1}^L)^{(0)}, (w_{k2}^L)^{(0)}]^T$ 和 $(w_k^R)^{(0)} = [(w_{k1}^R)^{(0)}, (w_{k2}^R)^{(0)}]^T$ 是左右图像中以十字架为参考系的第 k 个控制点的图像坐标矢量。② 左右调节参数标定。把成像模型(1)的三个分量在主值参数处做泰勒展开

$$x_k = x_k(0) + x_{k\beta}^L (\beta_L - \beta) + x_{k\Phi}^L (\Phi_L - \Phi) + x_{k\theta}^L (\theta_L - \theta) +$$

$$x_{k\beta}^R (\beta_R - \beta) + x_{k\Phi}^R (\Phi_R - \Phi) + x_{k\theta}^R (\theta_R - \theta) =$$

$$x_k(0) + x_{k\beta}^L \tilde{\beta}_L + x_{k\Phi}^L \tilde{\Phi}_L + x_{k\theta}^L \tilde{\theta}_L + x_{k\beta}^R \tilde{\beta}_R + x_{k\Phi}^R \tilde{\Phi}_R + x_{k\theta}^R \tilde{\theta}_R$$

$k=1, 2, 3$

式中 $x_k(0)$ ——主值模型的两个分量

$x_{k\beta}^L, x_{k\Phi}^L, x_{k\theta}^L$ —— x_k 对 $\beta_L, \Phi_L, \theta_L$ 的偏导数

$x_{k\beta}^R, x_{k\Phi}^R, x_{k\theta}^R$ —— x_k 对 $\beta_R, \Phi_R, \theta_R$ 的偏导数

由 SLM 的对称性, 左右调节参数序列对定位误差的矫正作用相同, 因此在标定左调节参数序列时, 令右调节参数序列等于主值参数序列, 标定右调节参数序列时, 令左调节参数序列等于主值参数序列, 左右调节参数序列分两次标定。把上式中 $x_k(0)$ 移到右侧后可得调节参数序列的最小二乘回归标定公式

$$\xi_V = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [(F_V)_i^{-1} \delta]$$

式中 $V = \{L, R\}$

下标 i ——第 i 次的测量结果

$$\xi_V = \begin{bmatrix} \tilde{\beta}_V \\ \tilde{\Phi}_V \\ \tilde{\theta}_V \end{bmatrix} F_V = \begin{bmatrix} x_{1\beta}^V & x_{1\Phi}^V & x_{1\theta}^V \\ x_{2\beta}^V & x_{2\Phi}^V & x_{2\theta}^V \\ x_{3\beta}^V & x_{3\Phi}^V & x_{3\theta}^V \end{bmatrix} \delta = \begin{bmatrix} x_1 - x_1(0) \\ x_2 - x_2(0) \\ x_3 - x_3(0) \end{bmatrix}$$

2.3 $x_3^{(0)}$ 的估计

推导 SLM 成像模型的过程中, 两子光路用独

立的主点和主面描述, 光线在主点主面间满足一定的成像规律。成像模型的输出结果以 SLM 坐标系作为参考系, 左右子光路的物空间主面与对应主光轴的交点连线作为 x_1 所属坐标轴, 与 SLM 中心轴线的交点作为原点, 纵轴为 SLM 的中心轴线, x_2 所属坐标轴垂直于以上两轴决定的平面。 $x_3^{(0)}$ 是 SLM 坐标系原点至聚焦面的距离, 由于主面是假设的平面, SLM 具体的光路结构也未知, $x_3^{(0)}$ 在固定 SLM 倍率下是常数, 需要结合试验确定。为了和 2.2 节中的主值参数有所区别, 用上标(0)表示聚焦面处的参数, 三个主值参数中, $\beta^{(0)}$ 和 $\theta^{(0)}$ 在 $x_3^{(0)}$ 未知的情况下利用样板图像也可标定; $\Phi^{(0)}$ 与 $x_3^{(0)}$ 相关, 需要使用 SLM 纵向不同位置处的样板图像之间的移动距离确定。使用三维可动的操作手(运动精度 $2 \mu\text{m}$)控制标定样板在 SLM 的纵向间隔移动, 在不同深度位置采集样板图像, 利用不同深度处同一控制点横向坐标 x_1 略有差别条件确定 $\Phi^{(0)}$, 最后把三个参数代入主值模型计算 $x_3^{(0)}$, 以后使用该值在聚焦面处直接标定。应该说明的是上面方法只能用于确定 $x_3^{(0)}$, 不能代替 2.2 中主值参数标定方法而作为主要标定方法, 因为这种做法需要在 SLM 纵向采集大量图像, 对操作手的精度要求高、实现困难、程序繁琐且准确度低, 所以标定仅选择在聚焦面位置进行, 还必须使用 2.2 节中的方法。

用上标(k)标识在 SLM 纵向移动后的样板面, $\Phi^{(k)}$ 的计算公式为

$$\Phi^{(0)} = \frac{f_1^{(0)} - f_1^{(k)}}{\lambda_1^{(k)} f_1^{(k)} - \lambda_1^{(0)} f_1^{(0)}}$$

$$\lambda_1^{(k)} = \frac{2[(w_2^R)^{(k)} (w_1^L)^{(k)} - (w_2^L)^{(k)} (w_1^R)^{(k)}] \csc 2\theta^{(0)}}{(w_2^L)^{(k)} + (w_2^R)^{(k)}}$$

$$f_1^{(k)} = \frac{[(w_2^L)^{(k)} (w_1^R)^{(k)} + (w_2^R)^{(k)} (w_1^L)^{(k)}] \sec \theta^{(0)}}{(w_2^L)^{(k)} + (w_2^R)^{(k)}}$$

只要把上面两式中的上标(k)替换成(0)就可以得到 $\lambda_1^{(0)}$ 和 $f_1^{(0)}$ 。 β_0 是 SLM 刻度盘上对应的物镜放大倍率, 估计了 0.75~1.5 倍范围内的 $x_3^{(0)}$ 值, 图 3 是试验得到的 $\Phi^{(0)}$ 与纵向位移 $\Delta x_3^{(k)}$ 的关系曲线, 在 $|\Delta x_3^{(k)}| < 20 \mu\text{m}$ 的范围内, $\Phi^{(0)}$ 波动较大, 这与图像采集系统的纵向分辨率和图像处理的精度(1个像素)有关, 当样板在纵向移动距离小于系统纵向分辨率时, 同一控制点在不同深度处的横向位移差很小, 近似等于 0, 计算的 $\Phi^{(0)}$ 呈现出随机性, 波动范围较大, $\Phi^{(0)}$ 的估计是不准确的。根据图 3, $\Delta x_3^{(k)}$ 的范围适于选择为 $20 \mu\text{m} < |\Delta x_3^{(k)}| < 150 \mu\text{m}$, 此时 $\Phi^{(0)}$ 的

估计稳定。不同倍率下 $x_3^{(0)}$ 及其均方差的计算结果见表 1。

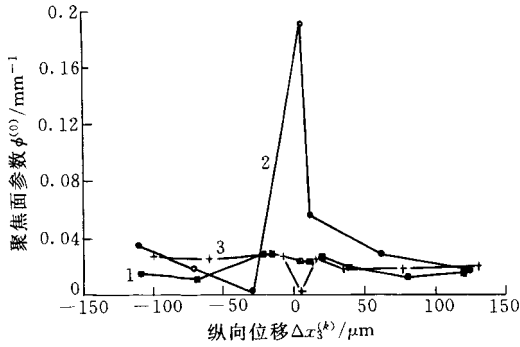


图 3 $\phi^{(0)}$ 与纵向位移 $\Delta x_3^{(k)}$ 的关系

1. $\beta_0=0.75$ 2. $\beta_0=1.00$ 3. $\beta_0=1.50$

表 1 0.75~1.5 倍范围内 $x_3^{(0)}$ 的估计结果

倍率 β_0	0.75	1.0	1.5
参量 $x_3^{(0)}/\text{mm}$	134.74	108.432	85.786
标准差 $\sigma(x_3^{(0)})/\text{mm}$	0.001	0.001	0.007

3 图像坐标获取算法

标定样板图像中的目标包括方块和十字线，要求算法从背景中识别出这两类对象，能够计算特征标定点图像坐标并匹配。在提取目标的过程中，很容易产生脏块，降低特征匹配的准确性，要求算法还具有滤除脏块的功能。

标定样板图像中目标与背景的颜色差别明显，使用单颜色通道法区分目标和背景简便易行，若像素的颜色小于某个阈值便为背景像素(置为白色)，否则便为目标像素(置为黑色)。经过这样的处理后，白色背景上黑色方块、十字线和脏块共存，采用了类似面积滤波的方式滤除脏块，同时可以区分黑色方块和十字线。使用横向扫描方式寻找第一个黑色像素，然后搜索 8 邻域。如果存在黑色像素便保存其坐标位置，并记录它们的数目，把单个黑色目标包含的所有像素遍历完毕后结束，再继续搜寻其他黑色目标。如果黑色目标包含的像素数小于某个阈值 T_0 ，识别为脏块象素，大于某个阈值 $T_1=K \times T_0$ 便为十字线像素，像素数介于 T_0 和 T_1 之间的黑色目标为黑色方块， T_0 一般取 40， K 一般取 10，可以根据样板中黑色方块的大小适当的调整参数的数值。滤除脏块后，计算出特征标定点图像坐标，提取十字线的中心线，以两条中心线为参考系，计算每个特征标定点横向和纵向的距离，根据左右图像中对应特征标定点在相应十字线坐标系中的坐标接近进行匹配，这种匹配方法几乎不存在误匹配的现象，尽管耗

时量较大，但准确性较高。

4 SLM 参数标定的性能分析

4.1 参数相关性

受硬件系统性能和人为因素的影响，参数经过多次的标定后，结果并不一定相同，为了观察标定的重复性，分别在 3 个倍率下标定，每次标定 100 次，统计的参数方均差见表 2。

表 2 标定参数和方均差表

放大倍率	β	$\sigma(\beta)$	Φ/mm^{-1}	$\sigma(\Phi)/\text{mm}^{-1}$	$\theta(^{\circ})$	$\sigma(\theta)/(^{\circ})$
0.75	-0.577	0.005	0.020	0.004	5.483	0.021
1.0	-0.761	0.026	0.021	0.005	7.026	0.029
1.5	-1.145	0.017	0.022	0.004	5.656	0.022
放大倍率	$\tilde{\beta}_L$	$\sigma(\tilde{\beta}_L)$	$\tilde{\Phi}_L/\text{mm}^{-1}$	$\sigma(\tilde{\Phi}_L)/\text{mm}^{-1}$	$\tilde{\theta}_L(^{\circ})$	$\sigma(\tilde{\theta}_L)/(^{\circ})$
0.75	0	0	-0.001	0	-0.259	0.002
1.0	0.028	0.009	0.004	0.002	0.096	0.011
1.5	0.010	0.005	0.001	0	0.106	0.036
放大倍率	$\tilde{\beta}_R$	$\sigma(\tilde{\beta}_R)$	$\tilde{\Phi}_R/\text{mm}^{-1}$	$\sigma(\tilde{\Phi}_R)/\text{mm}^{-1}$	$\tilde{\theta}_R(^{\circ})$	$\sigma(\tilde{\theta}_R)/(^{\circ})$
0.75	0.010	0	0	0	0.306	0.003
1.0	0	0	0.005	0.002	0.096	0.024
1.5	-0.003	0	0.001	0	0.129	0.018

参数之间的相关性体现了参数间的重叠性，在 SLM 放大倍率取 1.5 时分析了参数之间的相关性，成像模型参数间的相关系数见表 3。表 3 中最大的相关系数为-0.65，说明参数之间不存在强的相关性。

表 3 相关系数表

	Φ/mm^{-1}	$\theta(^{\circ})$	$\tilde{\beta}_L$	$\tilde{\Phi}_L/\text{mm}^{-1}$	$\tilde{\theta}_L(^{\circ})$	$\tilde{\beta}_R$	$\tilde{\Phi}_R/\text{mm}^{-1}$	$\tilde{\theta}_R(^{\circ})$
β	0.49	-0.19	0.16	0.08	-0.13	0.55	-0.15	0
Φ/mm^{-1}	×	0	0.04	0.07	-0.02	0.11	-0.08	0.02
$\theta(^{\circ})$	×	×	-0.50	-0.11	0.55	-0.25	0.45	0.54
$\tilde{\beta}_L$	×	×	×	0.05	-0.65	0.26	-0.34	-0.55
$\tilde{\Phi}_L/\text{mm}^{-1}$	×	×	×	×	0.02	-0.02	-0.13	-0.33
$\tilde{\theta}_L(^{\circ})$	×	×	×	×	×	-0.23	0.43	0.50
$\tilde{\beta}_R$	×	×	×	×	×	×	-0.14	-0.09
$\tilde{\Phi}_R/\text{mm}^{-1}$	×	×	×	×	×	×	×	0.34

4.2 成像模型定位

SLM 成像模型可用于微细操作中的高精度定位，微小对象的三维信息测量和三维形状的重构。使用成像模型测量了聚焦面处标定样板控制点在十字线坐标系中的坐标，结果见表 4 和表 5，从试验数据中看出 x_1 方向和 x_2 方向最小相对测量精度分别为 2.7%和 1.6%。以聚焦面为参考位置，用三维可动的操作手在纵向移动标定样板，选择适当位置采集图像，使用成像模型计算样板面相对参考面的纵向位移。6 次移动的计算结果见表 6，纵向最小和最大相对测量精度分别为 14.8%和 0.7%。随着被测距离的

增大, 测量的相对精度随着提高, 残差的变化却较小, 说明纵向测量误差主要是系统误差。

图 4 是利用成像模型重构的纵向不同位置(与表 6 对应)处样板的表面形状, 重构结果并不是严格意义上的平面, 而是存在凹凸不平, 主要是因为图像处理过程中噪声的影响所致。

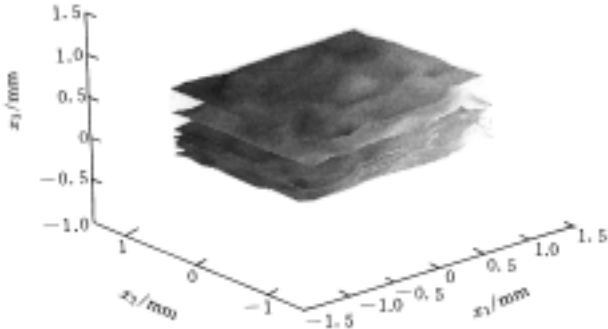


图 4 标定样板在不同纵向位置的形状重构

表 4 x_1 方向距离测量

实际距离 d_1/mm	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
测量距离 d_2/mm	0.205	0.408	0.608	0.806	1.004
残差 $\delta/\mu m$	5	8	8	6	4

表 5 x_2 方向距离测量

实际距离 d_1/mm	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
测量距离 d_2/mm	0.197	0.397	0.599	0.797	1.000
残差 $\delta/\mu m$	3	3	1	3	0

表 6 x_3 方向距离测量

实际距离 d_1/mm	-0.154	-0.052	0.056	0.157	0.357	0.661
测量距离 d_2/mm	-0.146	-0.045	0.064	0.164	0.350	0.666
残差 $\delta/\mu m$	8	7	8	7	7	5

4.3 参数的鲁棒性

标定样板在物空间的安放位置不同, 图像亮度就有所差异, 即使用同一方法获取图像坐标, 结果也不一样。这种差别是微小的, 且带有随机性, 可以视为高斯噪声, 需要对参数标定的鲁棒性进行分析。使用计算机设计一个随机数生成器, 提供的随机数满足正态分布的形式, 它们作为噪声叠加在特征控制点图像坐标上, 然后标定参数, 观察参数的鲁棒性。

使用随机数生成器生成 0.3~40.3 μm 的噪声, 在不同噪声值下标定, 参数及其方差与噪声的关系见图 5~图 7。从图中看出, 随着噪声的增大, 参数的波动性和不稳定性越大, θ_L 对噪声非常敏感, 变化范围较大, 其他参数在噪声值小于 10 μm 的范围内稳定性较好。因为 CCD 像素尺寸为 8.5 $\mu m \times 8.3 \mu m$, 图像处理的精度达到 1 个像素可以保证参数的稳定性。如果需要 θ_L 也具有较好的稳定性, 图像处理的精度应提高到 1/5 像素。

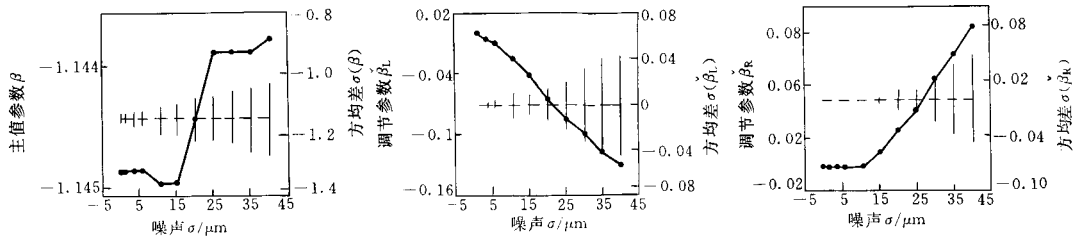


图 5 β 、 β_L 、 β_R 与噪声的关系

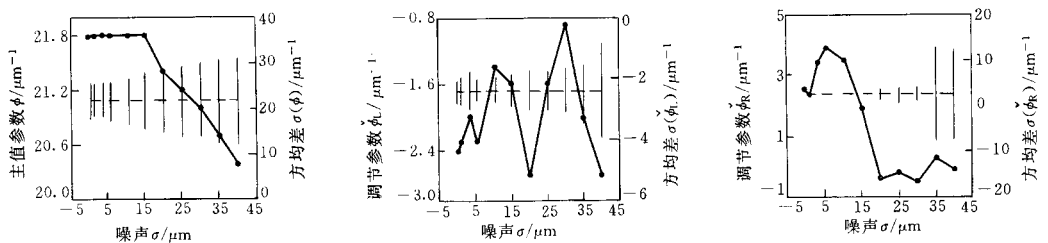


图 6 ϕ 、 ϕ_L 、 ϕ_R 与噪声的关系

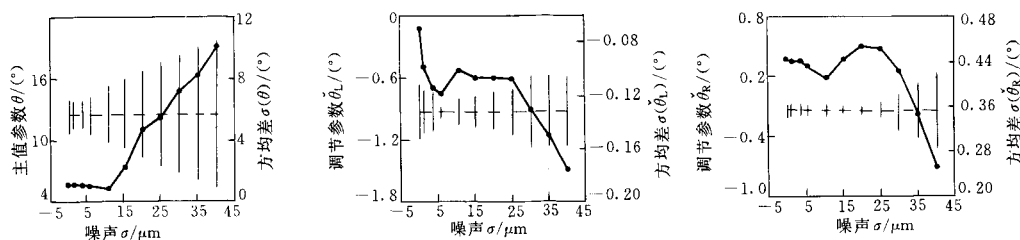


图 7 θ 、 θ_L 、 θ_R 与噪声的关系

5 结 论

(1) 成像模型中的弱视差是微观立体视觉中特有的属性, 是区别于宏观视差的重要特征。

(2) 根据 SLM 的子光路的对称性和微小的差异性, SLM 的参数划分为主值参数和调节参数, 两类参数分两步标定, 参数的划分解决了含约等条件的 SLM 参数标定问题。

(3) 标定样板的设计是 SLM 参数标定中的重要环节, 高精度的样板有助于提高参数标定的精度, 样板的加工精度提高到亚微米才能保证成像模型的微米级定位精度。

(4) 图像处理的精度为 1 像素, 使用亚像素处理技术提高图像坐标的获取精度是提高标定精度的重要因素。

(5) 定位试验中纵向位移的测量结果说明, 三维操作手提供的实际数据中带有系统误差, 为了保证测量的准确性, 应选用电感测微仪或激光干涉仪等更高精度的测量工具。

参 考 文 献

- 1 Boyde A. Quantitative photogrammetric and qualitative stereoscopic analysis of SEM images. *J. Microscopy*, 1973, 98: 452~471
- 2 Ghosh S K. *Electron microscopy: systems and applications*. American Society for Photo-grammetry and Remote Sensing, 1989, 187~201
- 3 Zimmer K P. Optical design for stereo-microscopes. In: *International Optical Design Conference*, SPIE, 1998, 3 482: 690~697
- 4 Kim H, Bovik C. Shape description of biological objects via stereo light microscopy. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1990, 20: 475~489
- 5 Danuser G. Photogrammetric calibration of a stereo light microscope. *Journal of Microscopy*, 1999, 193: 62~83
- 6 Eckert L, Grigat R R. Biologically motivated, precision and simple calibration and reconstruction using a stereo light

microscope. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2001: 94~101

- 7 Barmeshwar Vikramaditya, Nelson J. Visually servoed micro-positioning for robotic micro-manipulation. *Microcomputer Applications*, 1999, 18: 23~31
- 8 于波, 王力鼎. 一种双目分时显微立体成像系统的研制. *光学精密工程*, 1997, 5(4): 49~52
- 9 徐征, 刘冲, 王立鼎, 等. 实时显微立体成像系统中闪烁问题的分析和解决. *仪器仪表学报*, 2001, 22(4): 206~209

PARAMETER CALIBRATION OF STEREO LIGHT MICROSCOPE IN MICROMANIPULATION IMAGING SYSTEM

Wang Yuezong Liu Chong Wang Liding
Wang Xiaodong Song Zhan
(Dalian University of Technology)

Abstract: Stereo light microscope which possesses relatively large depth of field, good performance in real-time and no breaking surface of sample, is used in stereo three-dimensional information measurement. An imaging model for stereo light microscope is developed and its parameter calibration is discussed. Because the number of equation in imaging model is less than the number of parameter, constraint must be considered. A new calibration method combining the symmetry and small difference between light subsystems is developed to resolve stereo light microscope calibration with the approximate conditions. The robustness of parameter estimates, parameter correlations and repeatability are analyzed. At last, a series of calibration standards surfaces are reconstructed in its movement.

Key words: Micromanipulation Stereo light microscope
Calibration Reconstruction

作者简介: 王跃宗, 男, 1975 年出生, 博士研究生。主要研究方向为计算机立体视觉和图形图像处理。