

文章编号 1004-924X(2014)08-1985-10

显微立体视觉小尺度测量系统的标定

胡 浩*, 梁 晋, 唐正宗, 任茂栋, 李磊刚
(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:结合透视投影模型、非参数化的光学畸变模型以及光束平差算法,提出并实现了一种标定显微立体视觉系统光路的方法。首先,通过光刻方法制作了用于显微立体视觉系统标定的标定参考物,并利用待标定系统采集标定参考物不同方位的图像。然后,基于非参数化的光学畸变模型,采用样条曲面计算得到显微立体视觉系统的畸变校正场,并结合透视投影模型建立显微立体视觉系统的完整成像模型。最后,利用光束平差算法对所建立的成像模型进行标定计算和优化调整。搭建了显微立体视觉小尺度测量装置,验证了提出的标定方法的可行性。通过标定获得了测量装置两个光路的焦距和相对方位等参数,并借助于高精度四轴位移台对标定结果进行了精度验证。结果表明,采用本文方法标定后位移测量的精度优于 1%,能够满足微胀形实验中三维变形测量的要求。该标定方法也可用于其他显微视觉检测领域。

关键词:显微立体视觉;成像畸变;非参数化模型;光束平差;光路标定

中图分类号:TH742.2;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.1985

Calibration of stereo microscope measurement systems

HU Hao*, LIANG Jin, TANG Zheng-zong, REN Mao-dong, LI Lei-gang

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail: huhaol36@163.com

Abstract: An accurate calibration method for stereo microscope measurement systems was proposed based on a projection model, a non-parametric distortion model and the bundle adjustment algorithm. The key technologies involved were investigated. Firstly, a calibration target was designed by using the lithography method, and the images of the target were recorded from different orientations by using two cameras. Then, the distortion correction fields were calculated by using the spline surface and the non-parametric distortion model, and a complete micro-vision imaging model was established based on a perspective projective model. Finally, the calibration calculation and optimization for the imaging model were performed by using the bundle adjustment algorithm. To validate the performance of the proposed method, a stereo microscope setup was developed for small-scale deformation measurement. By using an electronically controlled displacement setup, experiments for microscopic calibration and displacement measurement were conducted. Experimental results demonstrate that the focal length and the relative orientation parameters of the internal optics of the setup is obtained, and the displacement measurement accuracy is better than 1%. It concludes that the proposed method satisfies the accuracy requirement of the 3D deformation measurement during bulging processes and is

收稿日期:2013-10-16;修订日期:2013-12-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51275378, No. 51275389);江苏省科技创新项目(No. SBC201210069)

also suitable for other microscopic vision measuring fields.

Key words: stereo microscope; imaging distortion; non-parametric model; bundle adjustment; optical path calibration

1 引言

随着现代制造技术在微型机械领域的迅速发展,微机械量、微几何量的检测,以及微结构件力学性能的测试,如微小结构件在外力作用下的变形检测和分析^[1]等的精度要求愈来愈高。光学测量方法以其非接触、高精度、高灵敏度等独特优势,在实验力学领域发挥着越来越重要的作用,特别是近年来快速发展的数字图像相关法,已被广泛用于宏观二维、三维变形的全场测量^[2]。体视显微镜又称“实体显微镜”,是一种具有正像立体感的目视仪器。它作为一种将微小物体或者是物体的微小部分进行放大以便观察的光学仪器,可以很好地满足微小领域的光学测量需求。目前,将光测方法与显微镜技术融合已成为研究热点^[3-5],如将双目视觉与体视显微镜技术相结合组成的显微立体视觉测量系统,已被广泛用于微机电系统(MEMS)和生化等领域。

显微立体视觉测量系统由两个独立的光路组成,每个光路由一个 CCD 相机和多组透镜构成。标定是显微立体视觉测量系统的关键,其目的是为了获得两个独立光路的成像参数和相对方位参数。现有的标定方法大多针对的是宏观摄像机的标定,如径向排列约束法(RAC)^[6]以及二维平面标定法^[7]等。然而,由于显微成像系统由多个透镜组构成,每个透镜组本身和透镜组之间都存在着光学畸变,因此,现有的用于宏观摄像机标定的光学畸变模型不再适用。针对这一问题,Gaudenz Danuser^[8]在 1996 年提出了一种光学显微视觉系统的标定方法,然而该方法的计算过于繁琐,在一定程度上影响了它的推广和应用。

本文针对显微立体视觉系统光路标定问题及实际使用需求,将透视投影模型、非参数化的光学畸变模型及光束平差算法相结合,建立了显微立体视觉的完整成像模型,提出了一种显微立体视觉系统的光路标定方法。根据所用体视显微镜的变焦范围和系统的测量范围,设计并制备了相应幅面的标定参考物。为了验证所述方法的可行

性,研制了用于微小尺度变形测量的显微立体视觉测量装置。实验结果表明,本文方法可以快速、有效地实现显微立体视觉系统的精确标定。

2 显微立体视觉

显微立体视觉系统的光路比较复杂,经过同一物镜有两个独立的光路,每个光路由多个棱镜和透镜等光学元件组成,如图 1 所示。尽管这些光学元件都经过了很好的设计和加工,但在实际使用时仍不可避免地存在一定的光学畸变。因此,很难通过传统的光学畸变模型来表示显微立体视觉的成像模型。

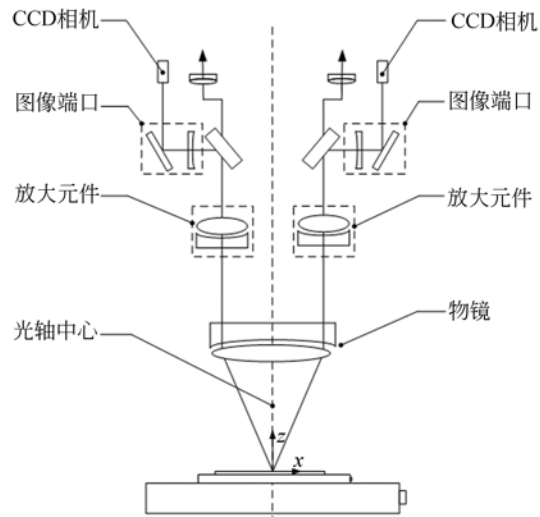


图 1 显微立体视觉系统光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of internal optics in stereo microscope system

一般采用参数化的畸变校正模型标定宏观视觉测量系统,通过一个参数化的畸变函数表示光学元件的畸变误差,如陈刚等^[9]提出的基于移动靶标的双目视觉相机标定方法,本课题组^[10]提出的基于光束平差原理的相机自标定方法都是基于参数化的畸变模型对待标定相机进行畸变校正的。针对显微立体视觉光路复杂、难于标定的问题,本文提出并实现了一种新的显微立体视觉系统的标定方法,涉及的关键算法后续将进行阐述。

3 光路标定

3.1 标定参考物设计

本文设计并通过光刻方法制作了用于显微立体视觉系统标定的标定参考物(以下简称“标定板”),如图 2 所示。标定板表面刻制有环形的编码特征点和圆点形的非编码特征点,特征点之间的距离已知,制作精度优于 $1 \mu\text{m}$ 。标定板可在透射光和正射光下使用。同时,为了实现不同倍率下显微视觉系统的灵活标定,将不同幅面的标定板刻到同一片透明玻璃上。

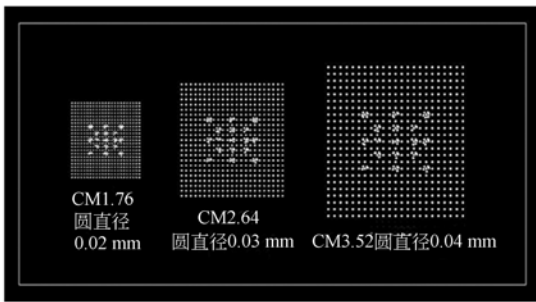


图 2 显微标定板设计图

Fig. 2 Schematic diagram of calibration target

3.2 投影模型

物体点经摄影后成像到像平面上,理想的投影成像模型为几何光学中的透视投影模型,它映射了空间三维点及其对应的二维图像点之间的几何变换^[11]。如图 3 所示,世界坐标系中一物体点 M 在像平面上的二维成像为 m , f 为焦距, S 为成像系统投影中心,三维点 M 经过旋转、平移等变

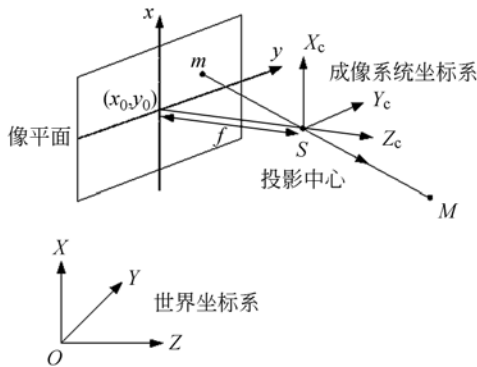


图 3 透视投影模型

Fig. 3 Perspective projection model

换为像平面坐标系的点 m ,即:

$$m = \mathbf{K} \mathbf{T} \mathbf{M}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & f_y & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, 为成像系统的内参

数矩阵; $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$, 为成像系统的外参数矩阵。

其中, f_x 和 f_y 分别为水平和垂直方向的焦距长度, x_0 和 y_0 分别是光轴与像平面交点在水平和垂直方向的坐标, \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{t} 为平移向量。

3.3 畸变模型

对于成像系统光学畸变的校正,传统的研究一般采用参数化的畸变模型^[12-15]。体视显微镜成像时,由于成像中心位置的畸变较小,所以也有一些研究通过统计分析标定板的成像畸变来获得特征点图像坐标在水平和竖直方向的畸变误差: $\delta_x(x_i, y_i)$ 和 $\delta_y(x_i, y_i)$, 从而建立参数化的畸变函数:

$$\begin{cases} \delta_x(x_i, y_i) = A_0 + A_1 r + A_2 r^2 + A_3 r^3 + A_3 r^4 + A_3 r^5 \\ \delta_y(x_i, y_i) = B_0 + B_1 r + B_2 r^2 + B_3 r^3 + B_3 r^4 + B_3 r^5 \end{cases}, \quad (2)$$

其中: $r^2 = x_i^2 + y_i^2$, x_i 和 y_i 是标定板第 i 个特征点的图像坐标; A_j 和 B_j 为待求解的 10 个未知系数,用以构成 10 参数畸变模型。然而,参数化的畸变模型却不太适合描述显微成像系统复杂的光学畸变,除非采用更加复杂的函数,但这样会不可避免地增加标定计算量,且很难保证标定结果的有效性。

因此,本文采用非参数化的畸变模型^[16],提出一种新的基于样条函数的畸变校正方法。首先不考虑光学畸变误差,直接采用标定板基于理想的透视投影模型标定显微光学系统;然后,根据标定结果求解标定板上所有标志点的重投影误差;最后,利用样条曲面函数拟合标定的重投影误差,从而建立显微成像的畸变校正场。与传统的参数化畸变校正方法相比,样条函数可以表示更加复杂的光学畸变,能够满足显微成像系统光学元件畸变特别复杂的特点。畸变样条曲面通过两条 B-样条曲线表示为:

$$D_s(x, y) = \left(\sum_{i=0}^{n_i} \sum_{j=0}^{n_j} \alpha_{i,j} N_{i,\rho}(x) N_{j,\rho}(y), \sum_{i=0}^{n_i} \sum_{j=0}^{n_j} \beta_{i,j} N_{i,\rho}(x) N_{j,\rho}(y) \right)^T, \quad (3)$$

其中: $n_i = m_i - p - 1$, $n_j = m_j - p - 1$, $m_i + 1$ 和 $m_j + 1$ 分别是 x 和 y 方向的样条节点数, p 为 B-样条的次数, $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$ 为样条曲面 $(n_i + 1) \times (n_j + 1)$ 个样条系数, $N_{i,p}$ 和 $N_{j,p}$ 分别为样条曲面 x 和 y 方向的基础函数。

实际应用时显微成像系统不可避免地受到各种光学畸变的影响,令 d 表示畸变模型函数,则实际的投影像点 m 为:

$$m = \mathbf{D}(m) . \quad (4)$$

将投影模型和畸变模型相结合,建立显微立

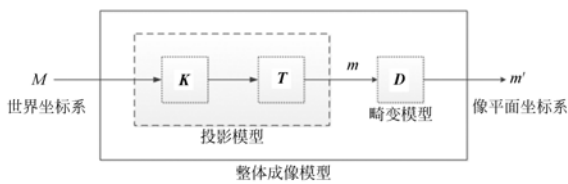


图 4 显微系统成像模型示意图

Fig. 4 Schematic of complete imaging model

体视觉完整的成像模型(见图 4),其数学表达式为:

$$m = \mathbf{D}(\mathbf{K}\mathbf{T}\mathbf{M}) . \quad (5)$$

3.4 光束平差优化

利用光束平差算法标定上述显微系统成像模型,即求解 \mathbf{K} , \mathbf{T} 和 \mathbf{D} 。求解过程就是针对所有重投影误差的非线性优化过程。由式(4)、式(5)可知, $\mathbf{K}\mathbf{T}\mathbf{M} = \mathbf{D}^{-1}(m)$, 则优化目标为:

$$\min_{M_i, \mathbf{K}, \mathbf{T}, \mathbf{D}} \sum_i \sum_j \|\epsilon_i^j\|_2^2 , \quad (6)$$

其中: $\epsilon_i^j = \mathbf{K}\mathbf{T}^j M_i - \mathbf{D}^{-1}(m_i^j)$, 表示将标定板第 i 个标志点投影到第 j 个像平面上得到的重投影误差。由于标定板上标志点的三维坐标 M_i 的精度受制作工艺的影响很大,并非固定值,所以实际优化过程中将它一起绑定调整。

式(6)可以通过最小二乘算法来求解。这一过程属于多参数非线性优化,所有的内参数(包括光路畸变)、外方参数以及物体点的三维坐标被不断地优化直到达到合适的精度。首先,需要得到标定板上标志点的三维坐标 M 及其对应的二维图像实测坐标 m' , 并将所有标志点的三维坐标投影到所有标定图像上求解其重投影误差。另外,为了保证最小二乘求解的收敛性,将靠近标定板

中心的 5 个编码标志点的三维坐标固定,以增加迭代计算的约束条件。

3.5 标定步骤

为实现上述标定,本文采用如下操作步骤:

第一步,采集标定板图像。调整待标定的显微立体视觉测量装置,在某一固定放大倍数下,将相应幅面标定板放置于体视显微镜的视场内,使图像尽可能清晰,然后借助四轴位移台来采集标定板不同方位的图像(一般为 16~24 组)。

第二步,检测标定板图像上的特征点。对采集的标定板图像进行高斯滤波、灰度二值化、边缘检测、中心定位、编码识别等处理后,得到图像上特征点的中心坐标。

第三步,计算标定板特征点的三维坐标。将世界坐标系原点设在标定板的中心,令每个特征点 Z 方向的坐标值为零,由于已知相邻特征点间的距离,因此每个特征点的 X 和 Y 方向的坐标可以由其所阵列的位置和特征点间距确定。

第四步,建立畸变模型。不考虑光学畸变误差,直接采用理想的透视投影模型和标定板对显微立体视觉系统进行标定。然后,根据标定结果反求标定板上所有特征点的重投影误差,并利用样条曲面函数拟合这些重投影误差,得到畸变校正场,从而建立完整的显微成像模型。

第五步,光束平差优化。根据成像模型对显微系统所有参数进行一次性解算。参与优化的参数包括标定板上特征点的三维坐标、显微成像系统的内外参数和畸变模型参数等,并对标定结果进行温度补偿,使它能够适应环境温度的变化。

4 实验结果与分析

为验证所述标定方法的可行性和精度,本文研制了如图 5 所示的显微立体视觉实验装置。该装置主要由 2 个 CCD 相机、1 台体视显微镜、1 台计算机、1 个高精度四轴平移台和 1 个相机同步控制器组成。其中,体视显微镜为 NOVEL NSZ-806 光学体视显微镜; CCD 相机为德国 Basler scA1600-gm 型相机,分辨率为 $1\ 624\ \text{pixel} \times 1\ 236\ \text{pixel}$,使用时被固定在体视显微镜的两个图

像接口上;高精度平移台主要用于微调标定图像和验证分析标定精度;同步控制器用于同步触发两 CCD 相机采集图像。另外,实验装置的光路标定采用图 6 所示的标定板。

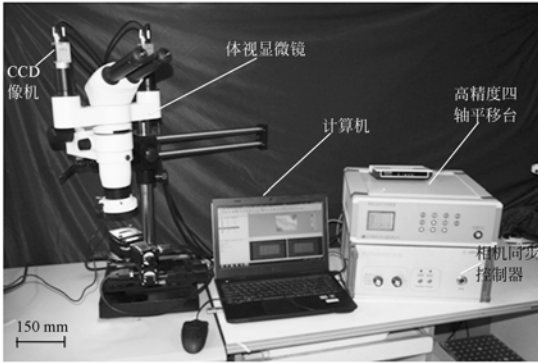


图 5 显微立体视觉测量装置
Fig. 5 Stereo microscope setup

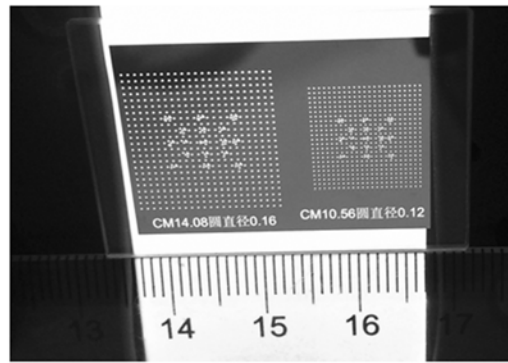


图 6 显微标定板实物图
Fig. 6 Calibration target

4.1 显微标定实验

将体视显微镜物镜调至 2 倍,选取 CM10.56 幅面的标定板,微调至编码点和非编码点清晰后,根据 2.5 节所述标定步骤对研制的显微立体视觉

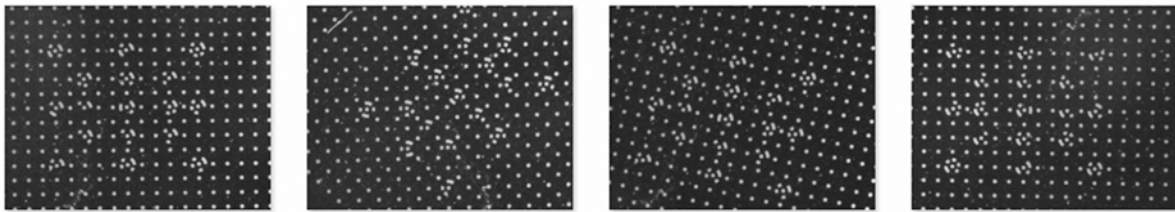
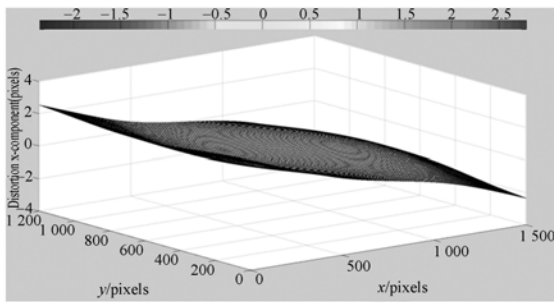
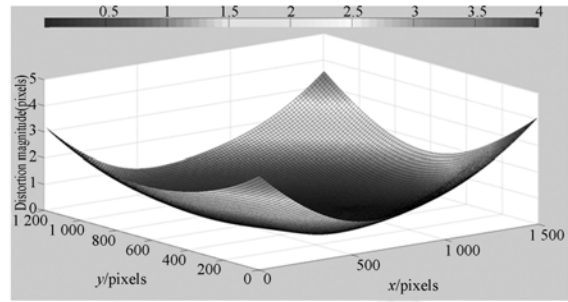


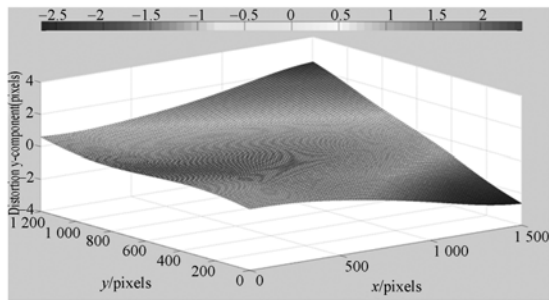
图 7 采集的 4 幅标定图像
Fig. 7 Four images of calibration target



(a) x 方向畸变
(a) Distortion of x -component



(c) 畸变大小
(c) Distortion magnitude



(b) y 方向畸变
(b) Distortion of y -component

图 8 显微视觉系统光路畸变场

图 8 Distortion correction fields of stereo microscopy system

测量装置进行光路标定。实验共采集 24 组标定图像(部分图像见图 7)。通过样条曲面函数拟合得到系统的畸变校正场,如图 8 所示。其中,水平方向畸变的变化为(-3,3)像素,垂直方向畸变的变化为(-3,3)像素,图像中心位置的畸变最小,

而四个边角处的畸变最大,最大值可达 4 个像素。
最终得到系统两个光路的焦距分别为:

$$f_x = 250.448, f_y = 248.028.$$

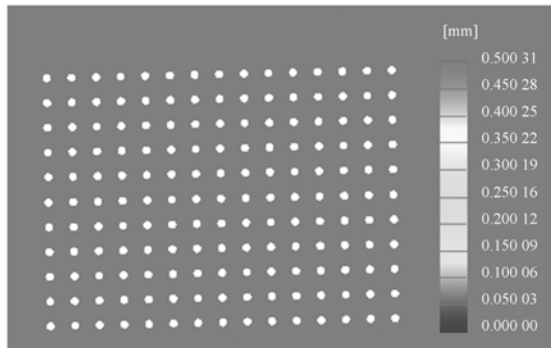
两个光路之间的相对旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T} 分别为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9974 & -0.0348 & -0.0618 \\ 0.0353 & 0.9993 & 0.0059 \\ 0.0616 & -0.0081 & 0.9981 \end{bmatrix},$$

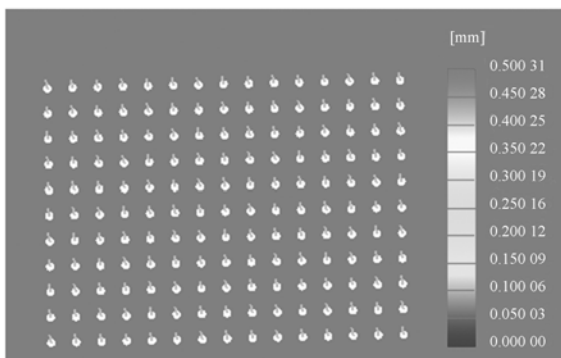
$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -72.3179 \\ -8.8525 \\ 3.1058 \end{bmatrix}.$$

4.2 位移测量实验

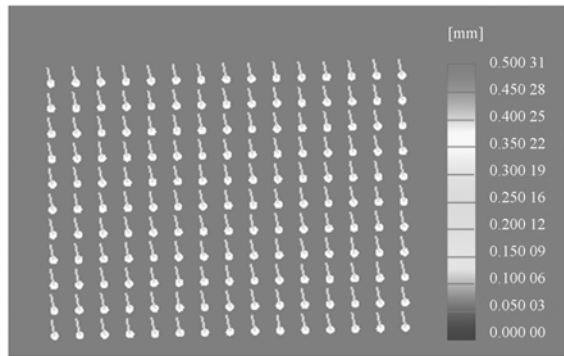
将标定后的显微立体视觉装置用于测量玻璃平板的表面位移量,并与高精度平移台进行精度对比验证。实验采用北京微纳光科自动化设备有限公司提供的 WN208ZA 型高精度(误差为 0.0005 mm/0.1 mm)四轴平移台。首先,在玻璃平板表面制备随机的黑白相间图案,以作为后续数字图像相关法^[13]计算位移的散斑特征。然后,将玻璃平板置于体式显微镜的视场中通过平移台沿同一方向进行平移,每次平移 0.1 mm,依



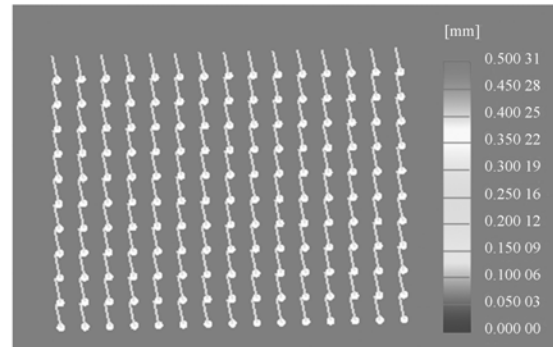
(a) 参考位置
(a) Reference



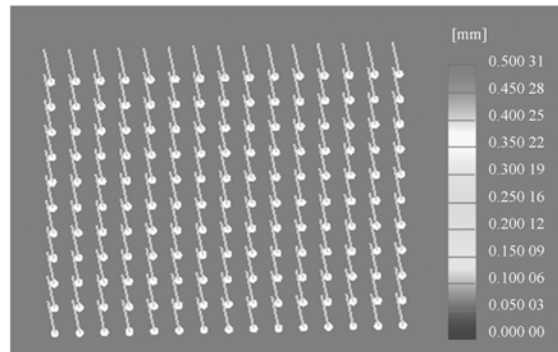
(b) 0.1 mm



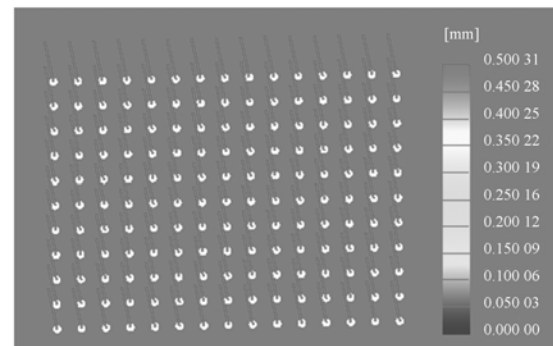
(c) 0.2 mm



(d) 0.3 mm



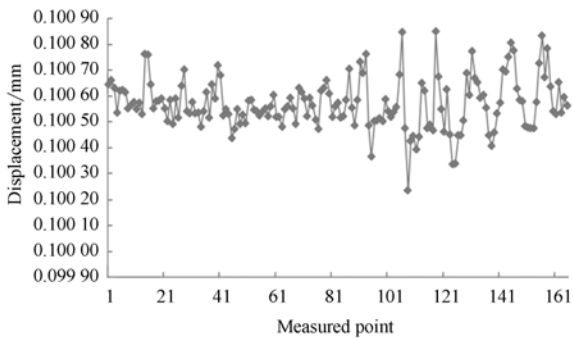
(e) 0.4 mm



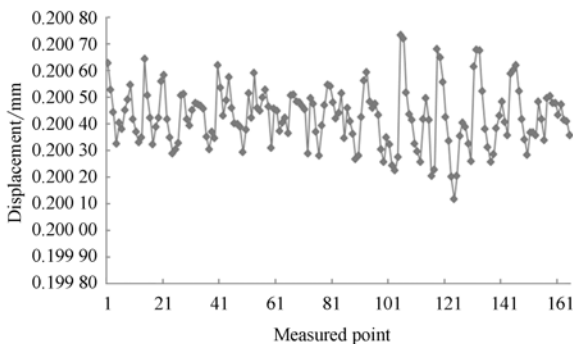
(f) 0.5 mm

图 9 被测玻璃板不同位置的表面三维坐标和位移向量
Fig. 9 3D coordinates and displacement vectors of measured glass plate in different positions

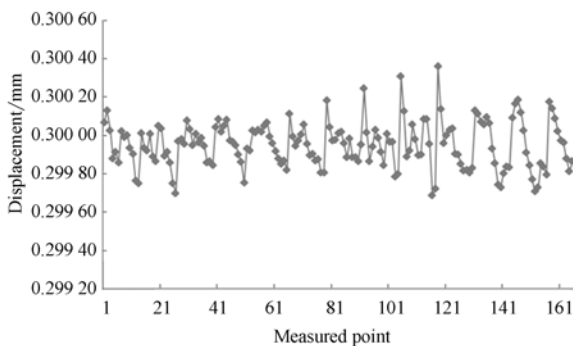
次平移到 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5 mm 的位置。最后,利用标定好的显微视觉装置拍摄玻璃平板不同平移位置的图像并利用数字图像相关算法进行位移计算。实验共进行了 5 次平移测量,以参考位置为基准,在每个平移位置获得了 165 个点的三维坐标和位移量,如图 9 所示。这些点的位移变化曲线如图 10 所示。计算每个平移位置上被测玻璃板表面 165 个点的位移均值,得到 5 组计算结果,如表 1 所示。与每次平移台的标准值 (0.1 mm) 进行对比,单次测量的最大误差为 0.95×10^{-3} mm, 5 次测量的平均误差为 0.36×10^{-3} mm。因此,所研制装置位移测量的相对精度(平均误差与标准值的比值)为 0.36%。



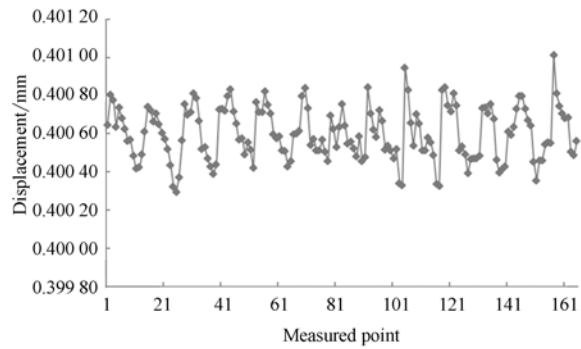
(a) 0.1 mm



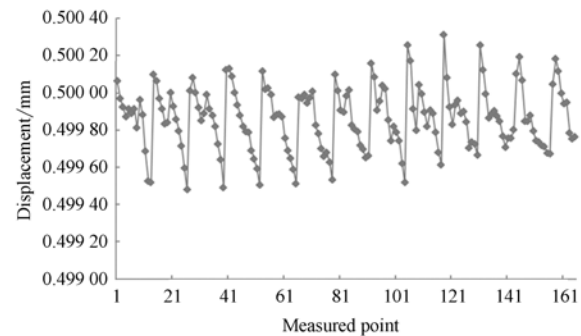
(b) 0.2 mm



(c) 0.3 mm



(d) 0.4 mm



(e) 0.5 mm

图 10 位移变化曲线

Fig. 10 Curves of displacement magnitude

表 1 位移测量实验结果

Tab. 1 Experimental results of displacement measurement

序号	单次测量		标准值	5 次测量
	最大误差	平均误差		平均误差
1	0.84	0.56		
2	0.73	0.42		
3	0.05	0.36	100.00	0.36
4	0.95	0.61		
5	0.31	0.14		

分析实验结果可知,采用本文方法标定后,显微立体视觉装置位移测量的相对精度为 0.36%, 优于平移台的定位精度 0.5% ($(0.0005 \text{ mm}/0.1 \text{ mm}) \times 100\%$)。根据概率统计原理,可认为位移测量的精度优于 1%。误差产生的原因可能包括:(1) 光学体视显微镜自身的误差,畸变校正不可能完全消除畸变。(2) 受光线的影响,同一组标定图像亮度有可能差别较大,从而直接影响标定板上特征点的识别与定位,进而影响标定结果。(3) 散斑特征制备质量的影响,特别是对微小尺度的测量,需要制备更加细密的散斑颗粒。

4.3 微胀形实验

为进一步验证所提方法的可行性及它在深度测量方面的有效性,本文借助于液压微胀形试验机,利用所研制的显微视觉测量装置进行了显微小尺度胀形实验。实验采用北京实达同创测控技术公司制造的 STDC YL8003 液压胀破实验系统(见图 11),最大液压值为 55 MPa。不锈钢材料制备的试件如图 12 所示,试件直径为 9 mm,实验前在其表面喷涂随机的散斑图案,作为图像处理的特征;体视显微镜的视场调节为 $1.2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,与实验系统胀形观察口的尺寸基本一致。试验中为了防止体式显微镜的物镜被胀形试验机的油压破坏,而无法将试件胀破,最终计算得到被测件在微胀形过程中的顶部三维形貌、三维位移及应变场数据分别如图 13、图 14 和图 15 所示。测量结果直观显示,试件胀形后拱顶突起,测得的深度方向的最大位移量约为 0.3 mm。实验表明,本文方法能够有效检测微胀形三维变形,对于一定景深范围的深度测量是可行的,而超出这一范围则图像模糊,测量失败。



图 11 微胀形试验机

Fig. 11 Micro-bulging test machine

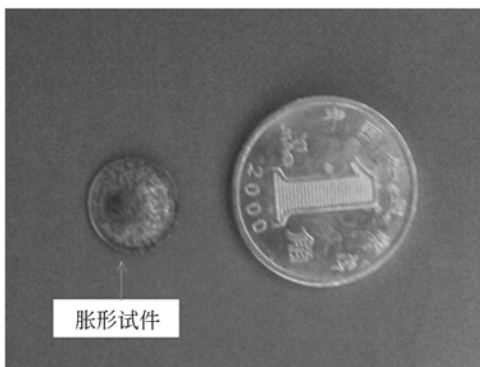


图 12 试件的形状和尺寸

Fig. 12 Shape and size of specimen

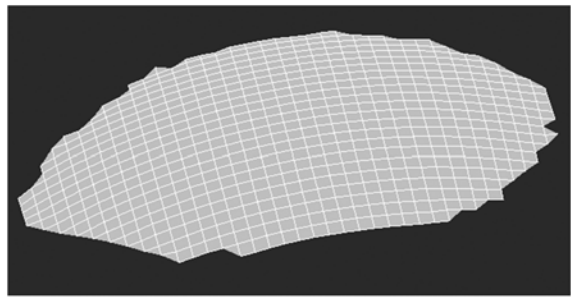


图 13 试件表面三维形貌的重建

Fig. 13 Three-dimensional surface morphology of specimen

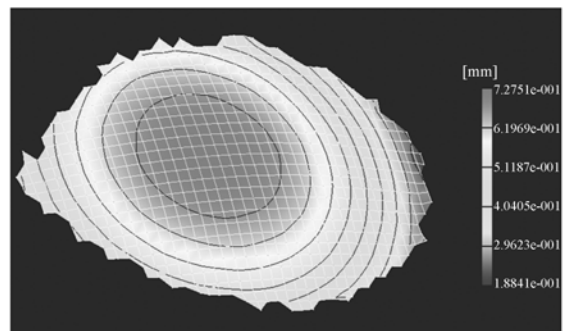


图 14 某一变形状态的位移场色温图

Fig. 14 Three-dimensional surface displacement of specimen

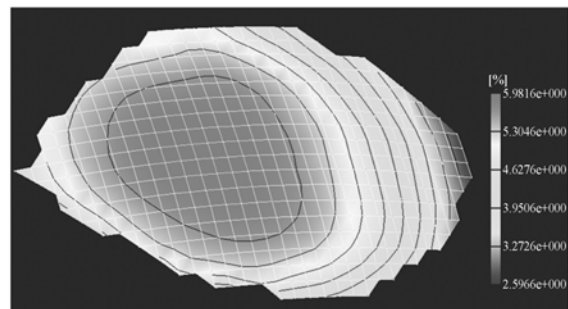


图 15 某一变形状态的最大主应变色谱图

Fig. 15 Three-dimensional full-field strain of specimen

5 结 论

本文提出并实现了一种用于显微立体视觉系统的光路标定方法。该方法采用自制的高精度光刻显微标定板,基于非参数化光学畸变模型,利用光束平差优化算法计算得到显微立体视觉系统的

光路成像参数。实验结果表明,引入显微成像的非参数化畸变模型,显微立体视觉系统能够得到较为满意的标定结果,标定后系统位移测量的精

度优于1%,且能够满足微胀形实验中三维变形测量的要求。随着微型制造技术的发展,该标定方法也可用于其他显微视觉检测领域。

参考文献:

- [1] 王向军,王峰. 显微精密成像与微型机械尺寸检测技术[J]. 光学精密工程, 2001, 9(6): 511-513.
WANG X J, WANG F. Study of micro mechanical size inspection technology by microscope precision digital image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(6): 511-513. (in Chinese)
- [2] 孙伟,何小元,郑翔. 基于数字图像相关的三维刚体位移测量方法[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 894-901.
SUN W, HE X Y, ZHENG X, et al.. Three-dimensional rigid body displacement measurement based on digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 895-901. (in Chinese)
- [3] 朱猛,黄战华,王小军,等. 显微动态散斑法测量压电陶瓷位移特征曲线[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 844-849.
ZHU M, HUANG ZH H, WANG X J, et al.. Measurement of piezoelectric displacement characteristic curves using dynamic speckle correlation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 844-849. (in Chinese)
- [4] 李君兰,张大卫,王以忠,等. 面向IC封装的显微视觉定位系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 965-972.
LI J L, ZHANG D W, WANG Y ZH, et al.. Microvision positioning systems for IC packaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 965-972. (in Chinese)
- [5] 郑汉卿,王伯雄,赵余,等. 基于自动调焦显微视觉的MEMS运动测量技术[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2007, 47(2): 177-180.
ZHENG H Q, WANG B X, YU CH, et al.. Motion measurement technique for MEMS devices based on autofocus and microvision[J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci & Tech)*, 2007, 47(2): 177-180. (in Chinese)
- [6] 高立志,方勇,林志航. 立体视觉测量中摄像机标定的新技术[J]. 电子学报, 1999, 27(2): 12-14.
GAO L ZH, FANG Y, LIN ZH H. A new camera calibration technique for 3D machine vision metrology[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(2): 12-14. (in Chinese)
- [7] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] DANSER G. Stereo light microscope calibration for 3D submicron vision[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, 1(12): 101-108.
- [9] 陈刚,车仁生,叶东,等. 一种基于立体模板的双目视觉传感器现场标定方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 626-631.
CHEN G, CHE R SH, YE D, et al.. Stereo vision sensor field calibration method based on volume template [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 626-631. (in Chinese)
- [10] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 大视场多相机视频测量系统的全局标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 369-378.
HU H, LIANG J, TANG ZH Z, et al.. Global calibration for muti-camera videogrammetric system with large-scale field-of-view[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 369-378. (in Chinese)
- [11] 马颂德,张正友. 计算机视觉-计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
MA S D, ZHANG ZH Y. *Computer Vision-Theories and Algorithms*[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [12] 潘兵,谢惠民,陈鹏万,等. 数字图像相关测量中镜头成像畸变的估计和校正[J]. 计量学报, 2009, 30(1): 62-67.
PAN B, XIE H M, CHEN P W, et al.. Assessment and correction of lens distortion for digital image correlation [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2009, 30(1): 62-67. (in Chinese)
- [13] 唐正宗,梁晋,肖振中,等. 用于三维变形测量的

- 数字图像相关系统[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(10): 2244-2253.
- TANG ZH Z, LIANG J, XIAO ZH ZH, *et al.*. Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2244-2253. (in Chinese)
- [14] BOUGUET J Y. Camera calibration toolbox for matlab [Z/OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, 2010.
- [15] XIAO Z, JIN L, YU D, *et al.*. A cross-target-based accurate calibration method of binocular stereo systems with large-scale field-of-view[J]. *Measurement*, 2010, 43 (6): 747-754.
- [16] SCHREIER D G H, SUTTON M. Advances in light microscope stereo vision[J]. *Exp. Mech.*, 2004, 44: 278-288.

作者简介:



胡 浩(1985—),男,安徽阜阳人,博士研究生,2010年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事三维光学测量方面的研究。E-mail: huhao136@163.com

导师简介:



梁 晋(1968—),男,河南郑州人,博士,教授,博士生导师,主要从事机电控制、机器视觉等方面的研究。E-mail: liangjin@mail.xjtu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)