

文章编号 1004-924X(2010)02-0503-09

采用立体视觉实现子孔径拼接测量的工件定位

张鹏飞, 赵 宏, 周 翔, 李进军

(西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:为了实现大口径光学元件的子孔径拼接干涉测量,提出了采用立体视觉进行光学元件位姿测量的方法,建立了基于双目视觉的子孔径拼接测量系统。介绍了圆形子孔径拼接干涉测量的原理,基于齐次坐标变换分析了其对工件定位的要求;引入了立体视觉辅助测量系统,建立了通用测量模型,利用双目视觉获取不同子孔径测量时与工件刚性连接的特征点的三维全局坐标,在完成全部子孔径测量后利用四元数法求取各子孔径相对于全局坐标系的转换矩阵,然后利用优化拼接算法将各子孔径数据统一到全局坐标系下,完成大口径光学元件的全局测量。最后利用该系统实现了对口径为 150 mm 平面和 100 mm 球面的检测。实验结果证明,在本系统中,立体视觉系统平移定位精度优于 0.1 mm,转动测量精度优于 0.01° ,可为优化拼接算法提供一个有效的初始值,该方法能够快速给出各子孔径间的相对坐标变换且不产生误差累积方法简单且可靠。

关键词:立体视觉;大口径光学元件;子孔径拼接;工件定位

中图分类号:TP391;TB92 **文献标识码:**A

Work-piece localization in sub-aperture stitching test based on stereo vision

ZHANG Peng-fei, ZHAO Hong, ZHOU Xiang, LI Jin-jun

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to realize sub-aperture stitching measurement of a large-aperture optics, a work-piece localization method based on stereo vision is introduced, and a measurement system is set up. Firstly, the measuring principle of a sub-aperture stitching test is given, and its requirement for the work-piece localization is analyzed. Then, the stereo vision measurement system is introduced and its measuring model is established. After that, the marked points' 3D coordinates which are rigidly connected with the optics under test are obtained and the transformation matrix is solved out by the quaternion method. Then, the full-aperture phase map is synthesized by mathematically minimizing the mismatch among the overlapping areas of all sub-apertures. Finally, a 150 mm flat and a 100 mm convex sphere are tested using this method. Experimental results indicate that the translation precision and rotation precision of the system are better than 0.1 mm and 0.01° , respectively, which can provide an effective initial value for the stitching algorithm. Furthermore, the measurement error of the system

收稿日期:2009-08-05;修订日期:2009-09-08.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA04Z121)

does not accumulate with the motion in its view field, and can satisfy the system's precision requirements.

Key words: stereo vision; large-aperture optics; sub-aperture stitching; workpiece localization

1 引言

大口径光学元件在天文光学、空间光学、国防武器装备等各类现代光学测量系统中有着非常重要的应用,但是其面型的高精度测量非常困难,尤其是对大口径非球面光学元件。因此发展起了多种非球面测量方法^[1],子孔径拼接测量方法作为其中的一种,自从 20 世纪 80 年代被提出以来得到了越来越广泛的研究和应用。在国外,QED 技术公司于 2003 年成功研制了子孔径拼接干涉测量工作站^[2-3],它基于德国施奈德光学机械公司生产的精密运动控制平台^[4],在补偿了子孔径的平移、倾斜、离焦和参考波面误差后对子孔径数据进行拼接^[5];在国内,长春光学精密机械与物理研究所^[6-7]、国防科学技术大学^[8-9]、四川大学^[10]、中国科学院光电技术研究所^[11]等单位的科研工作者均对圆形子孔径拼接干涉测量技术进行了一定的研究。

事实上,子孔径拼接干涉测量可以看作是一类特殊的工件定位问题,如果能够精确地获得各个子孔径间的相对位姿信息,那么经过相应的坐标反变换就能直接将子孔径干涉数据拼接到一起来获得全口径面型,但是在干涉测量精度下,试图通过高精度的机械运动来保证拼接测量精度是不明智也是不现实的^[5],虽然基于各类优化方法的拼接算法对元件定位要求相对宽松^[5,8],但这是以牺牲拼接算法的效率为代价的;目前国内外对光学元件位姿测量均靠精密运动平台来实现,虽然从长远来看,测量过程自动化势在必行,但在实际测量中,由于每个子孔径在对准与调零过程中都需要在多个自由度上反复进行调整,这必然会带来由于反复运动而引起的误差累积;而子孔径对准与调零过程全部采用电动操作则会使得测量系统相对复杂且成本较高,如果手动进行调节,则无法给出元件比较准确的位姿参数,这会给拼接算法带来一些不利的影

响。因此,为了减小对运

2 系统构成及工作原理

2.1 系统构成

系统由 Fizeau 干涉测量系统和双目立体视觉测量系统两部分组成,其示意图如图 1 所示。系统主要包括一台口径为 12.7 cm (5 in) 的 Fizeau 干涉仪、一个 7 自由度运动平台和两个 CCD 相机。其中:干涉仪用来获取光学元件子孔径数据;运动平台用来夹持和调节被测元件,它包含 5 个电动运动(3 维平移和 2 维旋转)和 2 个手动运动(调节元件的倾斜和俯仰),其有效夹持口径可达 240 mm,平移精度 $5 \mu\text{m}$,转动精度 0.005° ,在平台的夹具上机械加工了若干标志点,它们与被测元件刚性连接,在子孔径测量坐标系下的 3 维坐标已知且始终保持不变,据射影变换理论^[12],其在空间坐标系下的坐标变换与光学元件相同;两个 CCD 相机组成双目立体视觉系统,相机有效分辨率为 $1\ 600 \text{ pixel} \times 1\ 200 \text{ pixel}$,镜头焦距 8 mm,有效视场可达 $800 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 。系统在进行子孔径测量的同时,双目立体视觉系统通过记录运动平台上的特征点的三维坐标,就可

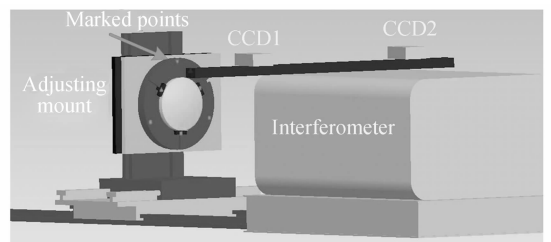


图 1 系统组成

Fig. 1 Setup of the measurement system

以计算出测量坐标系到全局坐标系的变换矩阵,那么在测量位置所得到的局部测量数据经过反变换就可以转换到全局坐标系下,将全部子孔径数据变换到全局坐标系下,对比其重叠区域的数据,并据此优化变换矩阵参数以使得重叠区域误差最小,即可完成干涉数据的拼接。

2.2 子孔径拼接干涉测量原理

子孔径拼接干涉测试是以小口径的干涉仪分时分块测量大口径的光学元件,以旋转对称凸面光学元件测量为例,一个典型的子孔径拼接干涉测试示意图如图2所示:

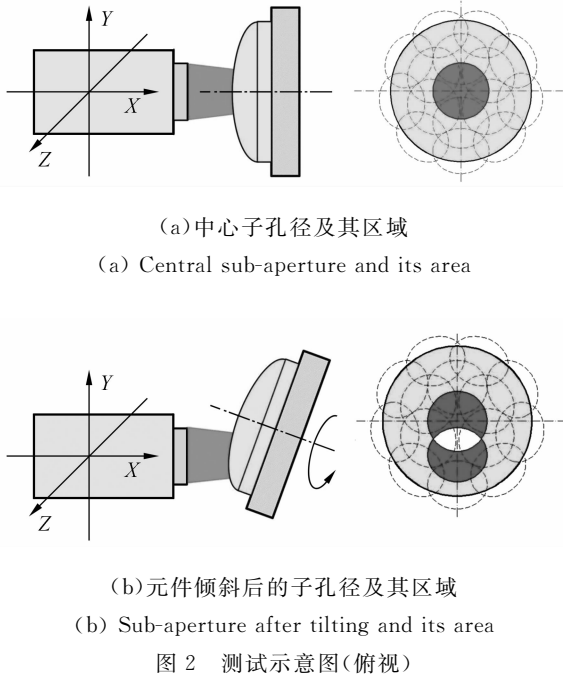


Fig. 2 Elaborate flow schematic diagram (top view)

其典型的测试流程如下:

- (1) 使干涉仪对准光学元件中心区域,测量并记录其相位数据;
- (2) 绕Z轴转动光学元件一定角度,使干涉仪对准中心区域以外某一部分元件表面,获取其相位数据;
- (3) 绕光学元件自转轴旋转一定角度,对准并调零,获取其相位数据;
- (4) 重复步骤(2)和(3)直到所有子孔径能够完整覆盖光学元件表面,值得注意的是在上述测量过程中必须保证相邻子孔径间有一定的重叠区域;
- (5) 最后,通过最小化重叠区域的误差来合

成全口径测量结果。

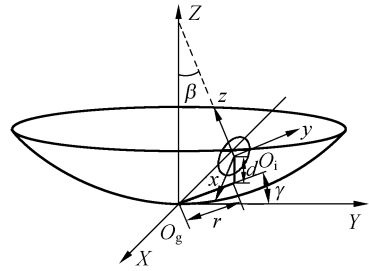


图3 测量模型

Fig. 3 Measurement model

其通用测量模型如图3所示,其中, β, γ, r, d 分别为需要测量的转动量和平移量, O_i 是子孔径测量坐标系, O_g 是全局坐标系,依文献[9], O_i 下测得的相位差数据与其在 O_g 下的三维坐标 (X, Y, Z) 有如下关系:

$$[X, Y, Z, 1]^T = \mathbf{g}_i^{-1} \cdot f(r_i, u, v, \varphi), \quad (1)$$

其中, \mathbf{g}_i^{-1} 为子孔径测量坐标系到全局坐标系的变换矩阵, r_i 为各子孔径测量时的最佳拟合球半径, (u, v, φ) 为CCD靶面上的像素坐标及其对应的相位数据。对平面镜和高精度的球面镜, r_i 的差异可以忽略,而对于较为粗糙的球面镜和非球面镜则需要考虑 r_i 的影响,并采用更为复杂的优化方法如交替优化^[9]等来进行拼接。

子孔径拼接的实质是使各子孔径的数据统一到同一坐标系下,变换矩阵 \mathbf{g}_i^{-1} 的获取和优化是关键,而不同子孔径间存在着六自由度的位姿变换,且子孔径测量过程中要反复调整各维运动,而且本实验中有部分调整运动是手动进行的,直接获取其变换矩阵较为困难,因此考虑引入立体视觉测量系统,测量与光学元件刚性连接的标志点在不同子孔径测量时的三维空间坐标,进而采用四元数法求取其空间变换矩阵。

2.3 立体视觉测量原理

立体视觉测量由于其实现简单、非接触、精度较高等优点在现代测量领域尤其是大范围立体测量领域获得了越来越广泛的应用,其测量示意图如图4所示。它由2台摄像机组成。利用空间点在左右两摄像机像平面上的透视成像点坐标来求取空间点的3D坐标。考虑透镜径向一阶畸变的小孔摄像机测量模型如图5所示。

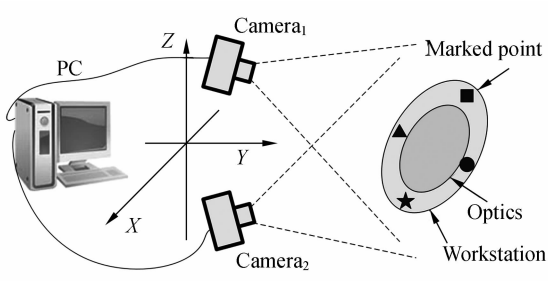


图 4 立体视觉测量示意图

Fig. 4 Measurement of the 3-D position of optics

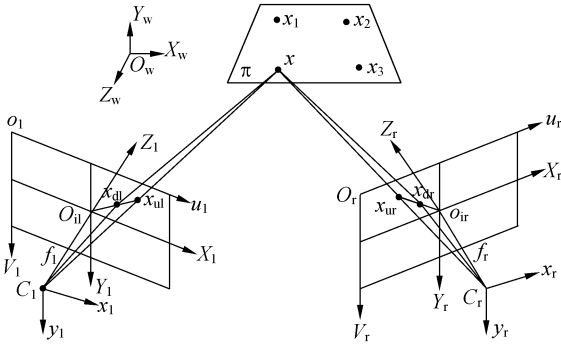


图 5 考虑一阶畸变的双目立体视觉系统模型

Fig. 5 Binoocular stereo vision system of cross optical axes

其中, 设 (X_w, Y_w, Z_w) 是三维世界坐标系中物体 X 点的三维坐标, (x_1, y_1, z_1) 和 (x_r, y_r, z_r) 分别为 X 点在摄像机坐标系 (光学中心分别为 C_1, C_r, z 轴与光轴重合) 中的三维坐标。 X_{ul}, X_{ur} 是在理想小孔摄像机模型下 X 点的像点, X_{dl}, X_{dr} 是由透镜变形引起的偏离理论像点的实际像点。 f_1, f_r 分别代表左右两个摄像机的有效焦距。

在理想的小孔模型下, 从相机坐标系到世界坐标系的投影关系可以描述为^[13]:

$$\begin{bmatrix} \lambda_c X_{uc} \\ \lambda_c \end{bmatrix} = P_c \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix} = K_c [R_c | T_c] \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

这里, λ_c 为比例因子, $c=1, r$, 分别代表了左右两个摄像机; P_c 是一个 3×3 的投影矩阵, R_c, T_c 分别是旋转矩阵和平移矩阵, K_c 是内参数矩阵, 其详细定义见文献[14]。

考虑理想小孔模型, 公式(2)可以表达成 $AX=0$ 的形式, 如下所示^[14]:

$$AX = \begin{bmatrix} x_{ul} p_{31}^T - p_{11}^T \\ y_{ul} p_{31}^T - p_{21}^T \\ x_{ur} p_{3r}^T - p_{1r}^T \\ y_{ur} p_{3r}^T - p_{2r}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = 0, \quad (3)$$

这里, p_{1c}, p_{2c}, p_{3c} ($c=1, r$) 分别为左右两个摄像机投影矩阵 p_c 第 1, 2, 3 列; 每一幅图包含了两个方程组, 两幅图有 4 个方程组, 3 个未知量, 因此这是一个超定方程组, 可以用最小二乘法求解。如果左右变换矩阵 P_l, P_r 和理想像点 X_{ul}, X_{ur} 的坐标已知, 那么就能够计算出对应点的三维坐标。为了获取它们以及相机的内外参数, 需要对相机进行标定。

对真实的镜头, 由于设计和制造的偏差, 等式(2)和(3)将不能成立。通常主要是径向的和切向的失真。理想投影点和实际投影点的对应点关系如公式(4)所示^[14]:

其中, $(x_u, y_u)^T$ 是在理想小孔摄像机模型下 X 点的图像坐标, $(x_d, y_d)^T$ 是由透镜变形引起的偏离 $(x_u, y_u)^T$ 的实际图像坐标, k_1, k_2 是第一个和第二个径向畸变系数, d_1, d_2 是切向畸变系数, $r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ 是从中心到实际图像坐标的距离。依等式(4), 用径向排列约束法(RAC)就能将理想的图像坐标 $(x_u, y_u)^T$ 和失真系数 k_1, k_2, d_1, d_2 计算出来。

$$\begin{bmatrix} x_d(x_d^2 + y_d^2) & x_d(x_d^2 + y_d^2)^2 & 3x_d^2 + y_d^2 & 2x_d y_d \\ y_d(x_d^2 + y_d^2) & y_d(x_d^2 + y_d^2)^2 & 2x_d y_d & x_d^2 + 3y_d^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d - x_u \\ y_d - y_u \end{bmatrix}. \quad (4)$$

因此, 立体视觉系统在使用前必须经过标定, 其标定精度直接决定立体视觉系统的性能, 本系

统中系统标定采用文献[13-14]提出的标定方法来完成。

2.4 空间变换矩阵获取

依据射影变换理论,三维射影变换是射影空间上的可逆齐次线性变换,由 4×4 的射影变换矩阵 H 来描述

$$X' = HX, \quad (5)$$

而三维射影变换具有将空间上的点(线、面)变换到点(线、面),并且保持点的共线(面)性、线的共面性等性质^[12]。因此如果可以求取与工件刚性连接且不共面的四个点在空间不同位置时的两组三维坐标值,那么其对应的两个子孔径间的转移矩阵 H_1 即可由下式获得^[15]:

$$H_1 = ((x_1^T)^{-1} x_2^T)^T. \quad (6)$$

其中, x_1, x_2 为由两个子孔径测量位置四个特征点的三维坐标组成的扩展矩阵。

通常在实验中为了提高测量精度和保证有足够的标记点进入视场以内,设置了一组标志点,这样在两个不同的位置时刻便有两组对应的三维坐标点集,通常可以用四元数法来进行求解^[16],直接获得两坐标系间的旋转矩阵和平移矢量。

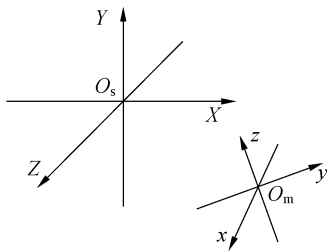


图 6 测量坐标系和全局坐标系

Fig. 6 Stereovision and local coordinate system

实际中,立体视觉测量子系统的坐标系 O_s 与全局坐标系 O_m 不重合,如图 6 所示,它们有如下关系:

$$X_m = H_1 X_s, \quad (7)$$

因此,我们首先应该标定出转换矩阵 H_1 ,即可将立体视觉系统中标志点的三维坐标(X_s, Y_s, Z_s)转换为全局坐标系下的坐标,进而求出不同子孔径在全局坐标系下的转换矩阵。

3 测量实验与结果

3.1 系统标定

3.1.1 立体视觉测量系统标定

立体视觉系统在使用前必须进行标定以确定其内外参数,其标定示意图如图 7。

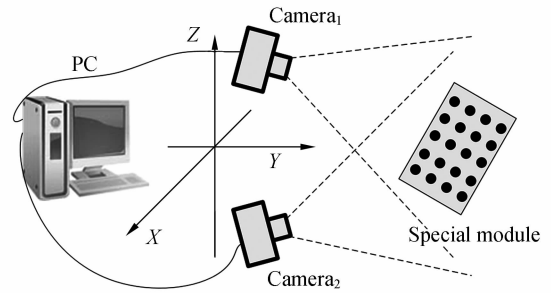


图 7 立体视觉系统标定

Fig. 7 Calibration of binocular stereo vision

实验中,我们采用共面的圆点阵列对其进行标定,即用光绘的方法在光学平板玻璃上精确加工一个 9×9 的圆形点阵,实验中,相邻点间距为 25 mm,然后抓取其在视场内任意 25 个位置时的图像。通过重心算法提取各光点在每幅图像上的像素坐标,其精度可达 0.1 pixel,本实验条件下其精度优于 $50 \mu\text{m}$ 。详细的标定方法参见文献^[14]。

3.1.2 转换矩阵 H_1 标定

实际中,全局坐标系 O_m 建立在光学元件中心顶点上,如图 8 所示,而立体视觉测量子系统的坐标系原点通常是左或者右摄像机的光学中心,两坐标系之间的关系如公式(7)所示。实验中,以垂直光学元件的方向为 Z 轴, X、Y 坐标系建立在平行于转盘的平面上,光学元件紧贴转盘放置,通过自定心卡爪卡紧,而各标志点 ($M_1, M_2 \dots M_N$) 相对于转盘中心的位置已知,通过高度游标卡尺可以测得光学元件中心点的高度,则可计算出各标志点在 O_m 坐标系下的三维坐标。同时,利用立体视觉系统获取该位置下各标志点的坐标值,由公式(7)即可得转换矩阵 H_1 。

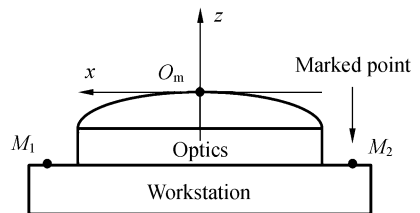


图 8 测量坐标系

Fig. 8 Measurement coordinate system

3.2 立体视觉系统性能实验

在对立体视觉系统进行了有效的标定后,针对系统在平移和转动测量上进行了实验,具体来说,一是利用高精度的运动平台移动标定用靶标,测试并记录其在不同位置时刻标记点的三维坐标,计算其移动距离并和实际移动距离做比较,其平移测量误差图如图 9 所示。

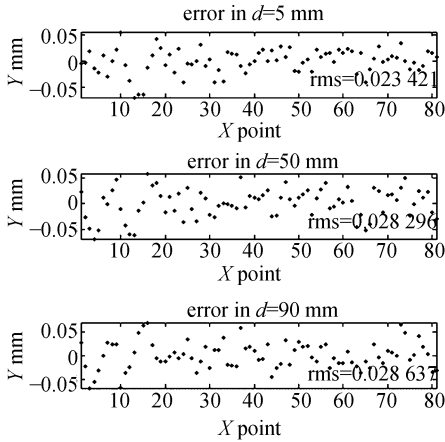


图 9 不同平移距离位置的测量误差
Fig.9 Error in different distances

二是利用高精度旋转平台旋转另一个靶标,并用立体视觉系统记录其对应位置的三维坐标,计算其旋转角度并和实际转动角度进行对比,其误差图如图 10 所示。

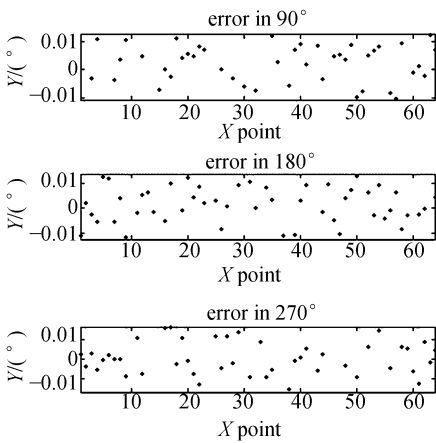
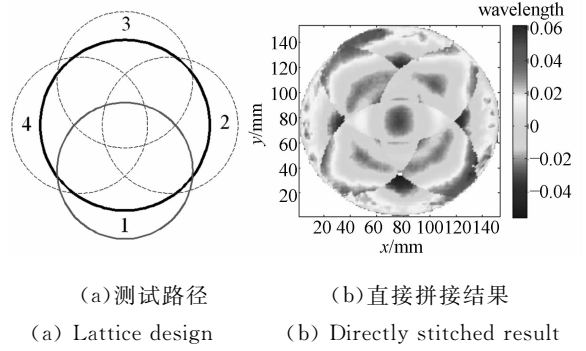


图 10 不同转动角度位置的测量误差
Fig.10 Error in different angles

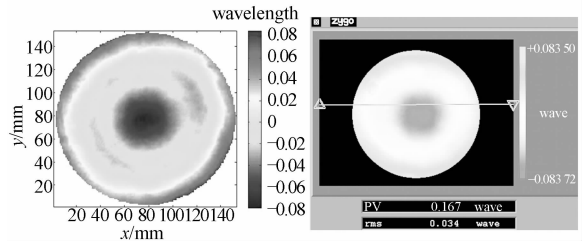
3.3 150 mm 平面测试实验结果

实验中,已知平面镜制造精度为 $\lambda/5$,其测试路径规划如图 11(a)所示,总共获取了 4 个子孔径,相邻子孔径间重叠区域约为 40%,图 11(b)为

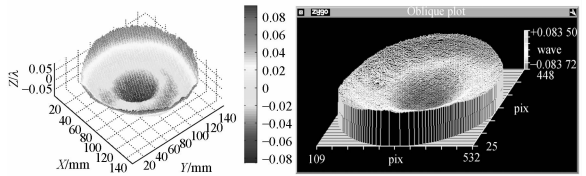
利用立体视觉系统获取的变换矩阵直接拼接子孔径数据所得的结果,图 11(c)为利用优化的位姿变换矩阵对各子孔径数据进行拼接的结果,其三



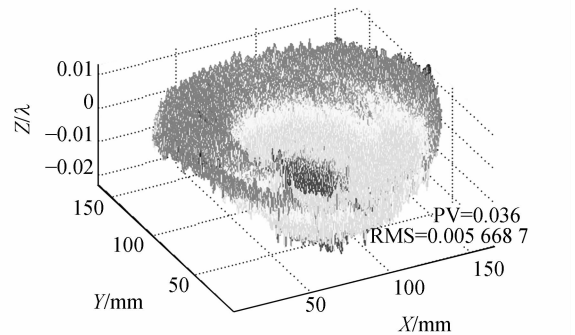
(a) 测试路径 (a) Lattice design (b) 直接拼接结果 (b) Directly stitched result



(c) 优化拼接结果 (c) Optimized stitched result (d) 全口径测试结果 (d) Full-aperture test result



(e) 优化拼接三维视图 (e) 3D view of (c) (f) 全口径测试三维视图 (f) 3D view of (d)



(g) 面形残差 (g) residual error between (c) and (d)

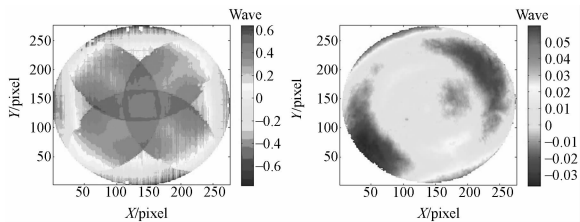
图 11 平面测试结果

Fig.11 Test results of a flat mirror

维视图见图 11(e),其 PV(峰谷)值误差为 0.1984λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$,为激光波长),RMS(均方根)误差为 0.0391λ 。另外,还利用口径为 $15.3\ \text{cm}$ ($6\ \text{in}$)的 Zygo 干涉仪对其进行了全口径测量,其测试结果及三维视图分别见图 11(d)和(f),其 PV 值误差为 0.167λ ,RMS 值误差为 0.034λ ;图 11(g)给出了优化拼接结果与全口径测试结果之间的面形残差,其 PV 值为 0.036λ ,RMS 值为 0.00567λ ,面形残差的 PV 值误差约为 $\lambda/30$,考虑到实验所用干涉仪标准镜头制造精度为优于 $\lambda/20$,与 Zygo 干涉仪存在一定差距,可见通过优化可以得到有效的拼接结果,说明立体视觉测量系统提供的初始值是合理而有效的。

3.4 100 mm 凸球面测试实验结果

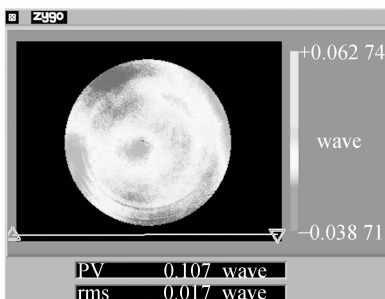
实验中,已知球面镜制造精度为 $\lambda/10$,曲率半径为 $425\ \text{mm}$,由于干涉仪所用球面镜头为 F 5.6,则其最大有效测量口径约为 $76\ \text{mm}$,故需用拼接法进行测量,其实验路径规划与平面镜的相同。直接拼接的结果如图 12(a)所示;利用优化过的参数进行拼接的结果如图 12(b)所示,其 PV 值测试结果为 0.0966λ ,RMS 测试结果为 0.0144λ ;同样,采用 Zygo 干涉仪对其进行了全口径测试,其测试结果见图 12(c),PV 值为 0.107λ ,RMS 测试结果为 0.017λ ;最终优化结果的面形残差如图 12(d),其 PV 值约为 0.0116λ ,RMS 值



(a)直接拼接结果

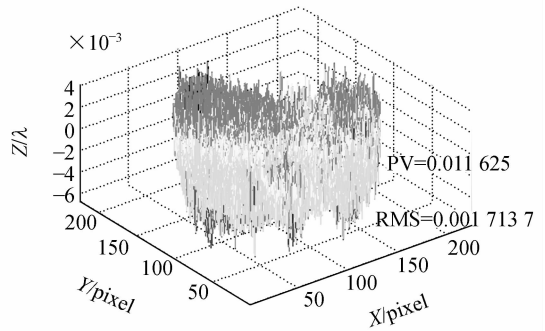
(b)优化拼接结果

(a) Directly stitched result (b) Optimized stitched result



(c)全口径测试结果

(c) Full-aperture test result



(d)面形残差

(d) residual error between (b) and (c)

图 12 球面测试结果

Fig. 12 Test results of a sphere mirror

约为 0.0017λ 。考虑到实验所用干涉仪标准镜头制造精度所引起的系统误差,此拼接结果在误差允许范围内,即说明在球面测试中立体视觉测量系统可以提供有效的初始值。

3.5 误差来源及分析

由上述拼接结果可以看出,虽然平面和球面子孔径拼接结果与全口径测量结果相差分别为 0.00567λ 和 0.0017 (RMS),但相对误差却都超过 10% ,误差也不小。

影响子孔径拼接干涉测试精度的误差来源非常多,包括干涉测量本身的误差以及由于拼接带来的特有误差两大类[5],前者主要包括干涉仪标准镜头引起的系统误差,振动、气流、温度等环境变化引起的测量噪声,压电陶瓷(PZT)校正误差,系统像差等;后者主要是包括拼接所需的各参数误差(如位姿变换参数误差、最佳拟合球半径误差、干涉仪透射球半径误差等)和拼接算法本身引入的误差等。而拼接算法主要补偿的是拼接所需各参数的误差,而无法补偿由于干涉测量本身引起的误差,因此若要提高拼接测试精度,除了改进拼接算法本身外,还需要对干涉测量本身的系统误差进行补偿,以获取更高精度的原始数据,降低干涉测量本身的误差对拼接测量的影响。

4 结论

本文针对大口径光学元件拼接测量中获取光学元件位姿参数的需求,提出了采用双目立体视觉进行光学元件定位的方法。介绍了系统的组

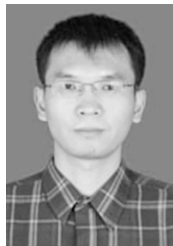
成与拼接测量原理,给出了立体视觉测量系统的测量原理、数学模型以及空间坐标变换矩阵的获取途径。该方法利用双目立体视觉进行标志点位置测量,降低了对多维调整机构功能的要求,通用性强、快速、成本低,且能有效避免因机械运动导致的误差积累;同时利用运动平台固有的特征点

作标记点,避免了粘贴标记点带来的局限性,空间坐标变换矩阵获取直观、简单、快速。实验结果证明:立体视觉系统平移测量精度优于 0.1 mm,转动测量精度优于 0.01°,可以满足拼接测量算法对工件定位的精度要求,能够为大口径光学元件测量提供了一种有效的工件定位方法。

参考文献:

- [1] DEVRIES G, KULAWIEC A. Approaches to aspheric metrology become more diverse [J]. *Laser Focus World*, 2008, 44(11): 67-69.
- [2] MURPHY P E, FLEIG J, FORBES G, et al.. High precision metrology of domes and aspheric optics [C]. *Proc. of SPIE, Orlando*, 2005: 112-121.
- [3] TRICARD M, DUMAS P, FORBES G. Sub-aperture approaches for asphere polishing and metrology [C]. *Proc. of SPIE, Beijing*, 2004: 284-299.
- [4] MURPHY P, FLEIG J, FORBES G. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres [C]. *Proc. of SPIE, San Diego*, 2006: 2930-2939.
- [5] 陈善勇. 非球面子孔径拼接干涉测量的几何方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
CHEN SH Y. *Geometrical Approach to Subaperture Stitching Interferometry for Aspheric Surfaces* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] WANG X, WANG L, ZHANG X. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 46(15): 192-198.
- [7] WANG X, WANG L, ZHENG L, et al.. Application of subaperture stitching technology to test of large and steep aspherical surface [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(7): 1144-1148.
- [8] 丁凌艳, 戴一帆, 陈善勇. 平面子孔径拼接测量研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 978-985.
DING L Y, DAI Y F, CHEN SH Y. Experiments of sub-aperture stitching interferometry for flat mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 978-985. (in Chinese)
- [9] CHEN S Y, LI S Y, DAI Y F, et al.. Experimental study on subaperture testing with iterative stitching algorithm [J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4760-4765.
- [10] 张蓉竹, 石琪凯, 蔡邦维, 等. 子孔径拼接干涉检测实验研究[J]. *光学技术*, 2004, 30(2): 173-175.
ZHANG R ZH, SHI Q K, CAI B W, et al.. Study on the experiments of the stitching interferometer [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(2): 173-175. (in Chinese)
- [11] 汪利华, 吴时彬, 侯溪, 等. 子孔径拼接干涉检测大口径平面波前[J]. *光电工程*, 2009, 36(06): 0126-0130.
WANG L H, WU SH B, HOU X, et al.. Measurement of Flat Wavefront by Sub-aperture Stitching Interferometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(6): 0126-0130. (in Chinese)
- [12] 吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
WU F CH. *Mathematical Methods in Computer Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [13] JINJUN L, HONG Z, TAO J, et al.. Development of a 3D high-precise positioning system based on a planar target and two CCD cameras [C]. *Proceedings First International Conference, Wuhan*, 2008: 475-484.
- [14] JINJUN L, HONG Z, QIANG F, et al.. New 3D high-accuracy optical coordinates measuring technique based on an infrared target and binocular stereo vision [C]. *Proc. of SPIE, Munich*, 2009: 738925.
- [15] PENGFEI Z, HONG Z, TAO J, et al.. New approach to workpiece localization in subaperture stitching interferometric testing [C]. *Proc. of SPIE, Munich*, 2009: 738927.
- [16] 韩建栋, 吕乃光, 王锋, 等. 采用光学定位跟踪技术的三维数据拼接方法[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 45-51.
HAN J D, LV N G, WANG F, et al.. 3D data registration method based on optical location tracking technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 45-51. (in Chinese)

作者简介:



张鹏飞(1982—),男,河南新乡人,博士研究生,2004年、2007年于西安交通分别获得学士和硕士学位,主要从事大口径非球面面型测量方面的研究。E-mail:zpf029@gmail.com



周翔(1978—),男,陕西西安人,博士,讲师,2009年于西安交通大学获得博士学位,主要从事光学条纹处理、三维测量方面的研究。E-mail:willam78@gmail.com



李进军(1975—),男,四川阆中人,博士,1998年、2005年分别于第二炮兵工程学院获得学士、硕士学位,主要研究方向为机器视觉及三维测量。E-mail:lixxy6228@sohu.com

导师简介:



赵宏(1964—),男,福建龙岩人,教授,博士生导师,1995年于西安交通大学获得博士学位,现为西安交通大学机械工程学院激光与红外应用研究所所长,机械制造系统工程国家重点实验室光电检测研究室学术带头人,主要从事智能化光电检测、实时在线测试以及机器人视觉技术,光纤生物信息检测、生物组织成像技术的研究。E-mail:zhaohong@mail.xjtu.edu.cn

(本栏目编辑:白雨虹)

●下期预告

微细电火花加工放电状态逐级映射检测

张玲瑄,贾振元,任小涛,郑新毅

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁大连116023)

在微细电火花加工中,对放电状态的准确检测是实现加工过程稳定控制的前提条件。为解决微细电火花加工过程中由于频繁出现的放电信号严重畸变、放电状态不稳定甚至突变等实际情况造成的放电状态难于准确检测的技术难点,本文在分析和研究传统的微细电火花加工放电状态检测方法的基础上,结合系统辨识和模糊逻辑理论,提出了微细电火花加工放电状态逐级映射检测原理和方法。对实时采集到的极间电压和电流信号,通过模糊运算判别采样点的放电状态,再将采样点放电状态值映射为放电状态矢量,并对该矢量进行统计得到“短路率”和“火花/电弧率”,经过模糊推理辨识出各分析周期的放电状态。实验表明,该检测方法准确性高、运算量低并且运算速度快,与平均电压法相比,效率提高了22.2%。检测结果可为微细电火花放电加工过程的实时控制提供系统放电状态的反馈输入,保证了加工控制系统的稳定性和准确性。