

文章编号:1002-2082(2017)02-0270-07

基于体视显微镜的三维显微表面测量系统

李 慧^{1,2}, 左 超^{1,2}, 胡 岩^{1,2}, 张敏亮^{1,2}

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

2. 南京理工大学 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘 要:将条纹投影轮廓测量术和体视显微镜相结合,搭建了一套能够对微小器件的表面三维形貌进行测量的系统。该系统由一台 Greenough 型的体视显微镜,一台 DMD 投影仪,一个 CCD 相机和一个机械平移台组成。在利用相移算法和降级去包裹算法得到被表面形貌调制过的无歧义相位后,通过相位和高度的映射关系,得到高度值,从而能够对微小器件的表面形貌进行重建。在标定时,通过精密的机械平移台将陶瓷标定板置于不同的高度,对其进行相位测量,得到多组相对应的相位和高度值,再对每个像素点进行多项式拟合来确定相位和高度的映射关系。实验测量了标定的最后一个平面以及微型的球栅阵列,平面测量结果显示测量误差在 10 μm 以内,从微型球栅阵列的三维重建结果可以清晰地看到排列的球形结构。实验结果证明了该系统对于平面和复杂的三维结构都能够进行精确的测量。

关键词:三维测量;显微测量系统;条纹投影轮廓测量术;体视显微镜

中图分类号:TN206

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201738.0203004

Three dimensional micro surface measurement system based on stereomicroscope

Li Hui^{1,2}, Zuo Chao^{1,2}, Hu Yan^{1,2}, Zhang Minliang^{1,2}

(1. Institute of Electronic Engineering and Optoelectronics, Nanjing University of Science and Technology,

Nanjing 210094, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligent Sense,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Combining fringe projection profilometry and stereomicroscope, a system is setup which can measure three-dimensional topography of micro devices. This system consists of Greenough-type stereomicroscope, projector, CCD camera and mechanical translation table. After unambiguous phase is obtained by using phase shift algorithm and descrambling method, which is modulated by surface topography, height value is obtained by phase and height mapping relationship, so that surface morphology of micro devices can be reconstructed. At the time of calibration, ceramic calibration plate is set at different heights by means of a precision mechanical translation table, and several groups of corresponding phase and height values are obtained. Then polynomial fitting of each pixel is performed to determine phase-height mapping. Last calibrated plane and micro ball grid array are measured. Results show that measurement error is within 10 μm , and spherical structure is clearly seen from three-dimensional reconstruction of micro-ball grid array. It is proved that system can accurately measure both pla-

收稿日期:2016-09-19; 修回日期:2017-01-03

基金项目:国家自然科学基金项目(11574152, 61505081);总装“十三五”装备预研项目;江苏省“六大高峰”人才项目(2015-DZXX-009);江苏省“333 工程”科研项目资助计划(BRA2016407, BRA2015294)

作者简介:李慧(1993-),女,浙江嘉兴人,硕士研究生,主要从事条纹投影显微三维测量方面的研究。

E-mail:lihuiffiff@163.com

nar and complex three-dimensional structures.

Key words: 3D measurement; microscopic measurement system; fringe projection profilometry; stereomicroscope

引言

人们在生活生产中越来越多地用到微型器件,如果能够得到微型器件的表面三维信息,我们就可以更好地了解器件的性能。条纹投影轮廓测量术,在近几年得到了快速的发展,由于其具有分辨率高,非接触性,实用性强等优点,在宏观物体三维测量方面已经得到广泛应用^[1-5]。同时,利用体视显微镜能够对微小尺寸的物体进行真正的双目视觉观察^[6]。Greenough 类型的体视显微镜有两条完全分离的光路,即利用 2 个物镜,分别通过 2 条光路进入 2 个目镜成像,因此可以把其中一条作为条纹投影轮廓测量系统中投影仪的投影光路。由此,将体视显微镜和条纹投影轮廓测量术结合起来就可以实现对微小物体表面三维信息的测量^[7-10]。针对难以解决的标定问题,首先利用 N 步相移算法和降级解包裹算法得到去包裹后的相位^[11],通过采集一系列垂直于 z 轴的平面所对应的高度信息和相位信息,利用多项式拟合的方法,可以得到相位和高度之间的映射关系^[12]。进行测量的时候,通过同样的方法得到被测量物体表面高度调制后的相位信息,再利用标定得到的相位和高度之间的映射关系,求出物体的相对高度,从而可以对微小器件的表面信息进行三维重构。对标定时的最后一个平面和微型球栅阵列的实验测量结果证明了这套三维显微测量系统对于平面以及复杂的三维结构都能进行精确的测量。

1 测量原理

1.1 Greenough 类型体视显微镜的基本性质

在本系统中,最基本的装置是一台 Greenough 类型的体视显微镜,如图 1 所示。Greenough 类型的体视显微镜有两条分离的光路,它的镜头结构为轴对称式,入射光线基本在物镜傍轴区域。这一特性使得 Greenough 类型的体视显微镜很容易标定,甚至不用考虑畸变。投影仪投出的条纹通过体视显微镜的其中一条光路投影到物体上,然后经过物体反射后被相机记录。

系统中的体视显微镜配备了变焦系统,从而

可以调节放大率。视场(FOV)与放大率成反比,当测量对象的尺寸不同时,该变焦系统可用于改变视场的大小。景深(DOF)是体视显微镜的另一个重要参数,它与放大率的平方成反比,因此在测量微小物体需要较大的放大率时,景深会变小。体视显微镜用于测量的景深范围一般为 5 mm 到 15 mm。同时系统中的体视显微镜还配备了一个接口用来安装相机,采集图像,这个可调节的接口使得相机调焦和角度调节都非常方便。

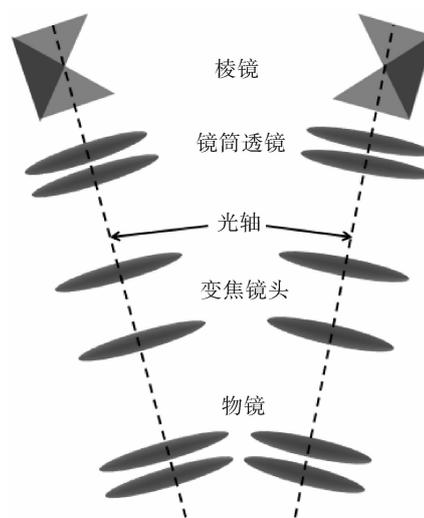


图 1 Greenough 类型体视显微镜光路示意图

Fig. 1 Optical path diagram of Greenough-type stereomicroscope

1.2 条纹投影轮廓测量术原理

传统的条纹投影轮廓测量术的光路原理图如图 2 所示。P 点为投影仪中心,C 点为相机中心,正弦条纹从投影仪投出,投射到物体的表面,相机采集到因为物体表面高度而产生形变的条纹。通过相移算法得到包裹的相位信息,通过去包裹算法得到无歧义相位,再根据标定得到的相位和高度的映射关系,算出高度,就可以得到物体表面的三维信息,从而对其进行重建。

在这套三维显微测量系统中,每次用投影仪向被测物体投影 12 幅正弦条纹,其中两幅周期为 1,两幅周期为 8,8 幅周期为 50.667。采用周期数比较多的条纹可以使得条纹形变更明显,有利于提高测量结果的精确性。先通过 8 步相移算法

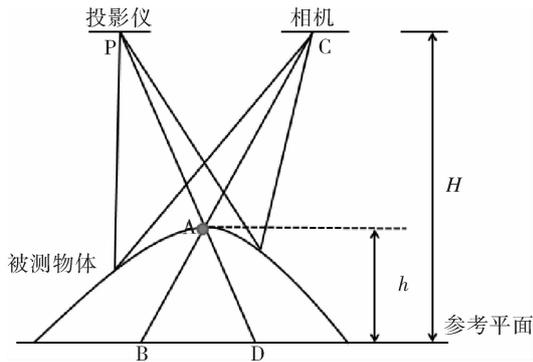


图 2 条纹投影轮廓测量法的光路原理图

Fig. 2 Optical path principle of projected fringe profilometry

得到周期数最多的条纹所对应的相位。每步相移为 $2\pi/N$ 的条纹的强度可以用以下公式表达:

$$I_n(u, v) = A(u, v) + B(u, v) \cos[\phi(u, v) + 2\pi n/N] \quad (1)$$

式中: n 代表了相移的序号; N 代表总的相移步数, 这里采用了 8 步相移, 所以 N 为 8; (u, v) 是像素点的坐标。计算相位 ϕ 的公式为

$$\phi = -\arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n \cos(2\pi n/N)} \quad (2)$$

计算平均光强 A 的公式为

$$A = \frac{\sum_{n=1}^N I_n}{N} \quad (3)$$

然后, 利用 $2+1$ 步相移算法, 可以得到另外两种周期的条纹所对应的相位值。单周期正弦条纹可以用下面的公式表示, 由于前面有 8 幅条纹, 所以用 $I_9(u, v), I_{10}(u, v)$ 表示单周期条纹:

$$\begin{cases} I_9(u, v) = A(u, v) + B(u, v) \sin(\Phi_1) \\ I_{10}(u, v) = A(u, v) + B(u, v) \cos(\Phi_1) \end{cases} \quad (4)$$

结合(3)式所求的平均光强 A , 可以计算出单周期相位为

$$\Phi_1 = \arctan \frac{I_9 - A}{I_{10} - A} \quad (5)$$

以此类推, 将公式(5)中的单周期条纹替换为 8 周期条纹, 就能得到 8 周期条纹对应的相位。另外, 调制度 B 的计算公式为

$$B = \frac{2}{N} \left(\left[\sum_{n=1}^N I_n \sin(2\pi n/N) \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^N I_n \cos(2\pi n/N) \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

在三维重建的过程中, 利用调制度 B 可以排除错误的点。某个像素对应的调制度没有达到事先设定的阈值, 该像素点对应的高度值就会被设为无效, 不会被重建, 从而提高最后三维重建结果

的精确度。

通过公式(2)和公式(5)得到的相位值范围为 $(-\pi, \pi]$ 。除了单周期正弦条纹对应的相位值外, 另外两组相位值都是有歧义的, 所以必须要去除相位的歧义性从而得到连续的相位。该测量系统中采用了时域降级去包裹算法来消除相位的歧义性。这里一共有 3 个周期的条纹, 所以要解 2 次包裹。连续的相位值可以用下面的公式表示:

$$\Phi_i = \phi_i + 2\pi N_i \quad (7)$$

式中: Φ_i 和 ϕ_i 对应于第 i 级条纹的连续相位和包裹相位; N_i 代表连续相位和包裹相位之间相差的 2π 倍数。只要得到 N_i , 就可以将包裹相位展开。而 N_i 可以通过下式得到:

$$N_i = \text{round}[(K_i \Phi_{i-1} - \phi_i) / 2\pi] \quad (8)$$

式中 Φ_{i-1} 表示比所求条纹级数低一级的条纹所对应的去包裹后的相位。对于单周期条纹来说, 通过相移算法求得的相位本来就是无歧义的, 利用单周期条纹对应的相位来对 8 周期条纹对应的相位解包裹。 ϕ_i 表示要解包裹的条纹级数对应的包裹相位, $\text{round}()$ 函数用来得到最接近的整数, K_i 是这两级条纹的的周期比。通过 2 次解包裹, 就可以得到最密的条纹所对应的连续相位。只要得到了连续相位, 通过相位和高度之间的映射关系, 就可以得到被测量物体的表面高度分布。

2 标定原理

该系统中的体视显微镜有 2 条完全分离的光路, 如图 1 所示。相机光路包括物镜、变焦镜头和管透镜。这些透镜在管中是同轴相连配置的, 所以标定起来很简单。投影仪光路不但包含体视显微镜的光路部分, 而且还包含投影仪自身的透镜。由于投影仪的光轴和体视显微镜不是严格匹配的, 这就使得传统的方法即通过几个通用参数来标定失去了意义。不过在相机的每个像素点测量得到的相位值和物体的高度仍然存在着几何对应关系, 也就是相位和高度的映射关系。通过标定找到这种对应关系就能完成相位到高度之间的转换。

如图 3 所示, 对于一个不考虑畸变的投影仪, 投影出的正弦条纹在每一列的相位是相等的, 所以会在投影仪空间产生一组等相位面^[12]。这组等相位面投影到被测物体上被相机采集到, 计算得

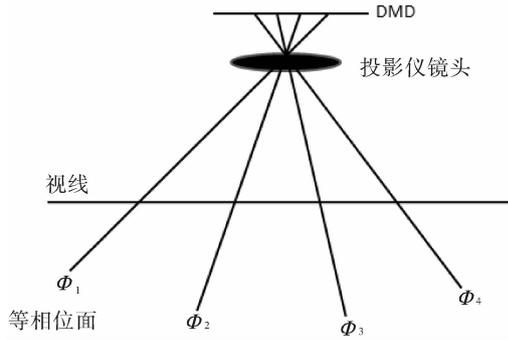


图3 视线与投影仪形成的等相位面相交示意图

Fig. 3 Schematic diagram of intersection of line of sight and equal phase plane of projector

到的相位值肯定也是沿着一定方向单调变化。对于相位 Φ 而言,它所对应的高度值决定于视线和等相位面相交的那一点的 z 坐标。等相位面的方程可以由它们穿过对应的等相位线和投影仪的光轴轴心这个特性来得到。对于一条对应于相位 Φ 的等相位线 L 而言,光栅平面可以表示为

$$x_G = \frac{\Phi}{K} \quad (9)$$

$$z_G = 0 \quad (10)$$

式中: K 表示正弦条纹的波数; x_G 和 z_G 表示等相位面上坐标点的 x 坐标和 z 坐标。在投影仪的参考系中,有:

$$\begin{cases} r_{11}^{PG} x_P + r_{12}^{PG} y_P + r_{13}^{PG} z_P + t_x^{PG} = \frac{\Phi}{K} \\ r_{31}^{PG} x_P + r_{32}^{PG} y_P + r_{33}^{PG} z_P + t_z^{PG} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: (x_P, y_P, z_P) 表示投影仪坐标中点的坐标值; $r_{ij}^{PG} (i=1,3; j=1,2,3), t_x^{PG}, t_z^{PG}$ 分别是系数。由等相位线 L 产生的等相位平面可以由下式表示:

$$(d_1 x_P + d_2 y_P + d_3 z_P) \Phi = e_1 x_P + e_2 y_P + e_3 z_P \quad (12)$$

式中: $d_i = \frac{r_{3i}^{PG}}{K}; e_i = r_{1i}^{PG} t_z^{PG} - r_{3i}^{PG} t_x^{PG} (i=1,2,3)$ 。

在世界坐标系中,像素点坐标为 (x, y, z) , 对应于像素点的视线表示为

$$\begin{aligned} x &= a_1 z + a_0 \\ y &= b_1 z + b_0 \end{aligned} \quad (13)$$

转换到投影仪坐标系中写成:

$$\begin{aligned} x_P &= a'_1 z + a'_0 \\ y_P &= b'_1 z + b'_0 \\ z_P &= c'_1 z + c'_0 \end{aligned} \quad (14)$$

把(14)式代入(12)式,就能得到理想的相位和高度的映射关系:

$$z = \frac{m_1 \Phi + m_0}{n_1 \Phi + n_0} \quad (15)$$

其中,

$$\begin{aligned} m_0 &= a'_0 e_1 + b'_0 e_2 + c'_0 e_3 \\ m_1 &= -a'_0 d_1 - b'_0 d_2 - c'_0 d_3 \\ n_0 &= -a'_1 e_1 - b'_1 e_2 - c'_1 e_3 \\ n_1 &= a'_1 d_1 + b'_1 d_2 + c'_1 d_3 \end{aligned} \quad (16)$$

公式(15)可以化简为

$$z = a + \frac{b}{c\Phi + d} \quad (17)$$

式中: $a = \frac{m_1}{n_1}; b = m_0 - \frac{n_0}{n_1} m_1; c = n_1; d = n_0$ 。由泰勒展开原理可知,(17)式可以用无穷阶数的多项式来表示。通过实验对比,发现3阶多项式可以较好地作为拟合函数,过多的阶数会增加计算量,对于结果精度的提高没有很明显的作

$$z = k_3 \Phi^3 + k_2 \Phi^2 + k_1 \Phi + k_0 \quad (18)$$

在实验的标定过程中采集了21组高度和相位的对应值,并且用三阶多项式进行拟合。值得注意的是, m_0, m_1, n_0, n_1 都和像素点的坐标有关,相应的 k_3, k_2, k_1, k_0 也都和像素点的坐标有关,所以拟合就是对每个像素点的相位和高度进行拟合。

3 实验结果和讨论

本文研发的三维显微测量系统采用 Greenough 类型的体视显微镜,美国德州仪器公司生产的 DLP LightCrafter,分辨率为 $608 \text{ pixel} \times 684 \text{ pixel}$,以及德国 Basler 公司生产的 acA640-750 μm 型相机,分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。图4是系统的实物图。投影到物体表面的正弦条纹先下载到 LightCrafter 中,通过软件控制投影的频率和曝光时间。在 LightCrafter 和体视显微镜中间放置了一个可以连续调节的衰减器用来调节条纹的亮度。

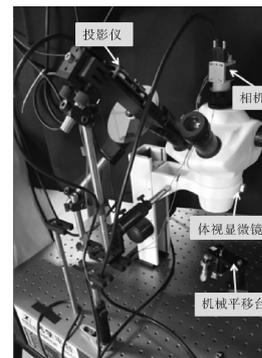


图4 三维显微测量系统

Fig. 4 3D micro measurement system

通过测量标定时的最后一个平面和微小的球栅阵列来验证系统测量结果的准确性。首先,对标定时的最后一个平面进行测量,得到相位值后利用标定时拟合得到的相位和高度之间的三阶多项式重新计算出高度值。其

次,在标定时第一个平面设为高度值为 0,利用机械平移台每次平移 $50\ \mu\text{m}$,一共移动 20 次,得到 21 组相位和高度的对应信息;最后一个平面理想的高度值为 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 。实验结果如图 5 所示。

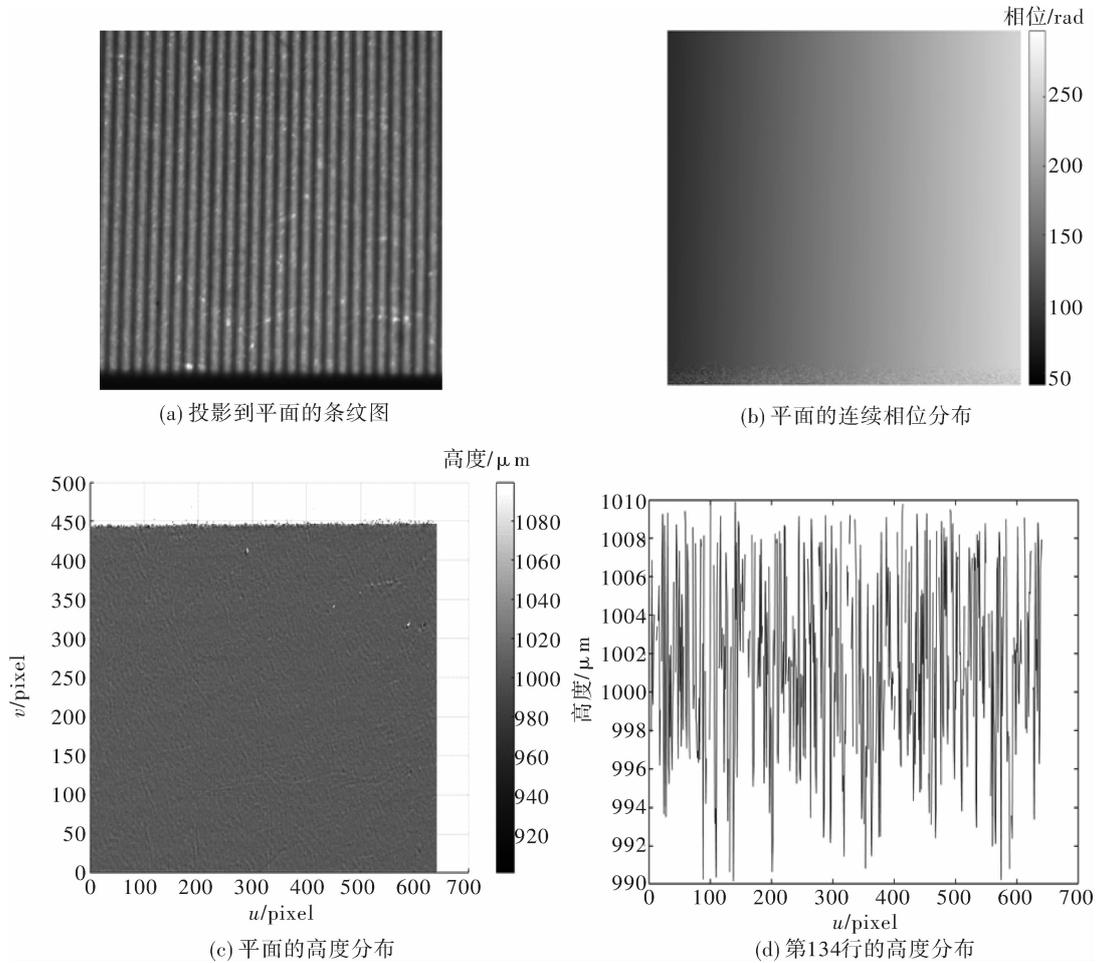


图 5 平面的测量结果

Fig. 5 Measurement results of plane

图 5 中(a)是最高周期条纹投影到平面上被相机采集到的图像,(b)是通过相移算法和解包裹算法得到的连续相位分布图,(c)是经过相位和高度的映射计算得到的高度值,可以看到绝大部分点的高度值为 $1\ 000\ \mu\text{m}$,(d)是第 134 行的高度值,可以看到高度值上下浮动不超过 $10\ \mu\text{m}$,证明了这套三维显微系统测量结果的准确性。

我们还测量了一个微小的球栅阵列,对其表面形貌进行重构,结果如图 6 所示。图 6 中(a)为经过微小球形光栅表面高度调制的最高周期条纹图,(b)为解完包裹后的连续相位图,(c)为通过相位和高度映射关系计算得到的高度图,(d)为最后的三维测量结果,可以看到阵列上的小球轮廓非

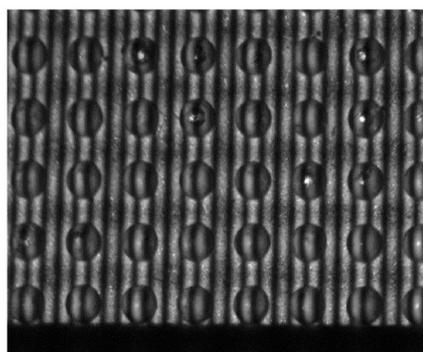
常清晰。图 6 说明可以通过该系统重建被测物体的表面三维形貌。

4 结论

本文研制的三维显微测量系统将传统的条纹投影轮廓测量术与 Greenough 类型的体视显微镜相结合,从而能够对微小器件的表面形貌进行测量。通过体视显微镜的其中一条光路将下载到投影仪的正弦条纹投影到被测物体上,然后通过 CCD 相机采集因为物体表面高度不同而产生的形变条纹图。为了使测量结果更精确,投影了 3 种周期的条纹,最密集条纹的周期数为 50.667。通过相移算法得到被器件表面三维形貌调制过的包裹

相位,再利用降维解包裹算法解出无歧义相位。最后通过相位和高度的映射关系来计算出每个像素点对应的高度值,从而得到微小器件的表面高度,完成测量。标定时,通过采集多组相对应的相

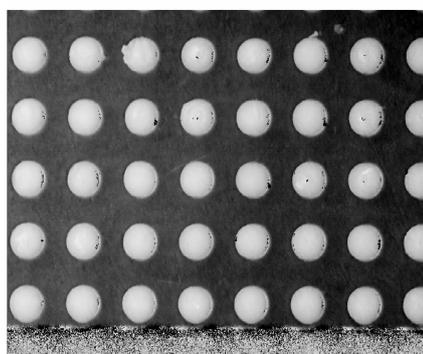
位和高度,将其进行多项式拟合,得到相位和高度的映射关系。对标定时的最后一个平面以及微型球形光栅的实验测量结果证明了这套系统的准确性。



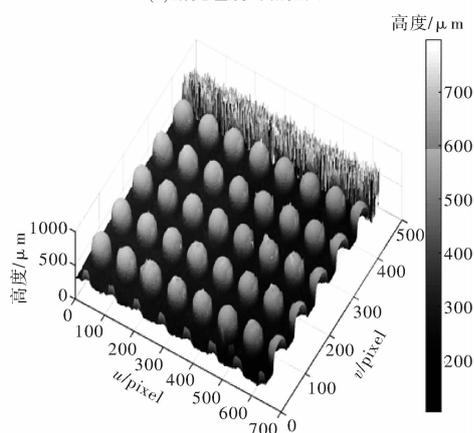
(a) 投影到微小球形光栅表面的条纹图



(b) 解完包裹的相位图



(c) 拟合的高度结果



(d) 最后的三维重建结果

图 6 微型球栅阵列的测量结果

Fig. 6 Measurement results of micro ball grid array

参考文献:

- [1] Zhang Q, Su X. High-speed optical measurement for the drumhead vibration[J]. Optics Express, 2005, 13(8): 3110-3116.
- [2] Zhu Tong-jing, Zhou Ping, Liu Xinran, et al. Crucial algorithms for structural light 3D measurement system calibration[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5): 848-852.
朱统晶, 周平, 刘欣冉, 等. 结构光三维测量系统标定的关键算法研究[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 848-852.
- [3] Zuo C, Chen Q, Gu G, et al. High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using bi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(8): 953-960.
- [4] Wang Luyang, Da Feipeng. Rapid 3D shape measurement based on color-encoded fringe projection[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(2): 276-281.
王露阳, 达飞鹏. 基于彩色光栅投影的快速三维测量方法[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 276-281.
- [5] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 149-158.
- [6] Schreier H W, Garcia D, Sutton M A. Advances in light microscope stereo vision[J]. Experimental Mechanics, 2004, 44(3): 278-288.
- [7] Chen Z, Liao H, Zhang X. Telecentric stereo micro-vision system; Calibration method and experiments[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 57(6): 82-92.
- [8] Yin Y, Wang M, Gao B Z, et al. Fringe projection 3D microscopy with the general imaging model[J].

- Optics Express, 2015, 23(5): 6846-6857.
- [9] Li A, Peng X, Yin Y, et al. Fringe projection based quantitative 3D microscopy [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(21): 5052-5056.
- [10] Zhang C, Huang P S, Chiang F P. Microscopic phase-shifting profilometry based on digital micromirror device technology [J]. Applied Optics, 2002, 41(28): 5896-5904.
- [11] Kim E H, Hahn J, Kim H, et al. Profilometry without phase unwrapping using multi-frequency and four-step phase-shift sinusoidal fringe projection [J]. Optics Express, 2009, 17(10): 7818-7830.
- [12] Liu H, Su W H, Reichard K, et al. Calibration-based phase-shifting projected fringe profilometry for accurate absolute 3D surface profile measurement [J]. Optics Communications, 2003, 216(1): 65-80.