

引用格式: SUN Ping, FAN Chao, DAI Qing, *et al.* A L-K Local Optical-flow-based Coordinate Profilometry by Using the Capture Line in Space[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(9):0912003

孙平, 范超, 代晴, 等. 基于 L-K 局域光流的空间视线坐标法面形测量技术[J]. *光子学报*, 2020, **49**(9):0912003

基于 L-K 局域光流的空间视线坐标法面形测量技术

孙平, 范超, 代晴, 唐钰欣, 类智方, 胡春华

(山东师范大学 物理与电子科学学院, 济南 250014)

摘 要:提出了一种基于 L-K 局域光流的空间视线面形测量技术. 测量系统由一个投影仪和一个 CCD 摄像机组成, 采用小投影角度的投影方式. 通过投影光线与视线(观测光线)的交点坐标, 直接计算得出被测物体三维面形高度分布, 其中条纹图中观察位置的变化由 L-K 光流算法计算得到. 建立了在点光源投影条件下投影光线与视线交点坐标、光流与被测物体面形高度之间的关系. 模拟与实验结果证明该方法能够准确恢复被测物体高度. 与传统面形测量方法不同, 视线光流面形测量技术不需要采集多幅条纹图像, 也无需计算条纹频率和物体相位值, 只需两幅条纹图即可恢复物体面形高度分布.

关键词:面形测量; 光流; 视线; 投影线; 坐标法

中图分类号: O438

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204909.0912003

A L-K Local Optical-flow-based Coordinate Profilometry by Using the Capture Line in Space

SUN Ping, FAN Chao, DAI Qing, TANG Yu-xin, LEI Zhi-fang, HU Chun-hua

(School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: A technique based on L-K local optical flow algorithm for retrieving the height distribution of a measured surface is proposed by the calculation of the coordinates between the capture line and projection line in space. The measuring system is composed of a CCD camera and a projector which project a grating pattern with a small angle. The height distribution of a measured surface can be calculated directly by using the intersection coordinates of the projected line and the captured line, where the changes of the observation position between two fringe patterns caused by the measured surface can be calculated by L-K optical flow algorithm. The theoretical relationship between the optical flow and the height of the measured object at the intersection of the projected light and the line of sight under the projection condition of the point source is established. Simulation and experimental results show that the proposed method can retrieve the height of the measured object surface accurately. Different from traditional shape measurement methods, the proposed surface shape measurement technique using captured line and optical flow does not need to collect multiple fringe images, nor need to calculate the fringe frequency and the phase distribution, but only needs two fringe images to retrieve the height distribution of the measured surface.

Key words: Surface shape measurement; Optical flow; Captured line; Projection line; Coordinate method

OCIS Codes: 120.6650; 120.2650; 120.4630

0 引言

三维面形测量技术在计算机视觉、工业监控、实物复制、生物医学等领域有着广阔的应用前景^[1-4]. 常用

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61975099, 11902317), 山东省自然科学基金(No.ZR201702090137)

第一作者: 孙平(1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学精密检测技术. Email: sunpingmail@163.com

收稿日期: 2020-04-30; 录用日期: 2020-06-08

<http://www.photon.ac.cn>

的三维面形测量系统为结构光照明系统,具有硬件配置简单、测量精度高、点剪度高、速度快、成本低等优点^[5].基于结构光照明的三维形状测量系统通常由一个投影单元和一个或多个摄像机组成^[6-8].在测量过程中,将已知结构的光图样投射到被测物体上,摄像机采集物体在光线投影时的图像.利用相机与投影仪之间的三角剖分关系和预先标定的测量系统几何参数,由采集到的图像重建出物体的三维形状.三维面形测量技术常用的方法有傅里叶变换轮廓术^[9-11]和相移轮廓术^[12,13].傅里叶变换轮廓术一般需采集变形前后二幅条纹图恢复物体相位,所需图像数量少,测量速度快,但在后续图像处理过程中需要从频谱中滤出基频分量,存在频谱重叠或泄露等问题,从而影响面形相位的提取.相移轮廓术一般需要采集多幅条纹图像来重建物体面形相位分布,测量剪度高,但测量时间较长,实时测量困难较大.傅里叶变换轮廓术和相移轮廓术得到的均是面形的相位分布,需要经过相位-高度的转换,才能够得到面形高度分布^[14].不同于传统的面形测量技术,光流法面形测量技术仅需要二帧图像就可直接恢复高度分布或相位分布,具有测量剪度高,适合动态测量的优点^[15].该方法采用近似垂直的小角度投影,从而避免了阴影和遮挡问题.

GIBSON JJ 等基于运动结构重建原理(Structure From Motion, SFM)提出了光流(Optical Flow)的概念^[16]:在随时间变化的二维图像序列中,运动的三维场景由于亮度模式的变化而产生的流动即为光流.比较经典的光流算法有 L-K 局域光流算法^[17]和 H-S 全局光流算法^[18].此后,国内外学者陆续提出了不同的光流算法,使其在精度、鲁棒性和实时性等多方面均取得了重大突破.

光流场本质上是三维目标运动时在观测成像面上的二维运动的投影.因此,通过提取图像序列中的光流信息,能够进行运动分析^[19].光流信息是指前后两帧图像间的速度矢量场.若采集的图像是条纹图像,则组成条纹的像素点在像面内的平面运动即为条纹光流.通过条纹移动形成的光流,可进行变形测量和面形测量.1997年,国内研究人员提出可以将光流场分析法引入光学干涉计量当中^[20],为光干涉动态测量提供了新的思路,但是其并未做深入的探讨.2011年,VARGAS J 等开始应用光流处理干涉条纹,将光流纳入到相移技术中,通过与 SPT 算符的结合成功提取了单幅图像相位^[21].2015年,赵冉等将光流用于变形场的测量,实现了光流对干涉条纹的定量分析,开辟了条纹光流位移测量新领域^[22].此后,类智方等分析了经典的 H-S 光流算法和 L-K 光流算法在条纹处理中的精度、分辨率和测量范围,证明了条纹光流位移测量的高精度和高分辨率^[23].利用光流能够精确测量面内位移的属性,代晴等实现了光流的面形测量^[15].

基于传统三角测量的面形测量原理,文献^[15]提出的光流法面形测量技术,不是通过变形前后的条纹图像求解面形的相位,而是采用 H-S 光流算法计算了调制条纹的变形量,从而直接得到面形的高度分布.本文提出了一种基于光流的视线面形测量方法,通过求解投影光线与摄像机视线(采集光线)的交点坐标,直接得出物体三维面形高度分布.该方法同样仅需采集放置物体前后两幅条纹图样.视线位置的变化通过 L-K 局域光流方法^[17]计算得到.与 H-S 全局光流方法相比,L-K 局域光流方法具有抗剪性好,计算结果更准确的优点^[24-25].对于条纹移动形成的光流,L-K 局域光流方法能够测量的条纹的变形相位可大于 $\pi/2$ ^[23],方便设置实验.本文给出了光流和空间交点坐标与物体高度之间的关系,进行了模拟与实验验证.与传统轮廓术相比,该方法不需要计算物面相位分布,不需要计算条纹频率,也不需要相位-高度转换运算,只需输入投影仪的位置坐标和计算物体调制前后两幅条纹图的光流,即可恢复面形高度分布.与文献^[15]提出的光流法面形测量技术相比,原理简单,测量剪度更高.

1 原理

图 1 所示为投影栅线面形测量的常用光路.取 CCD 摄像机光心 O 点为坐标原点,建立摄像机坐标系.取 $x-y$ 平面为参考平面,则摄像机光轴与参考面的交点为 $O_R(0,0,-z_0)$,其中 z_0 为摄像机光心到参考面的垂直距离,即成像距离.采用点光源照明,投影仪的空间位置坐标为 $P(x_p, y_p, z_p)$,投影仪光轴 PE 与参考面交于 E 点,与参考面的法线成 θ 角.

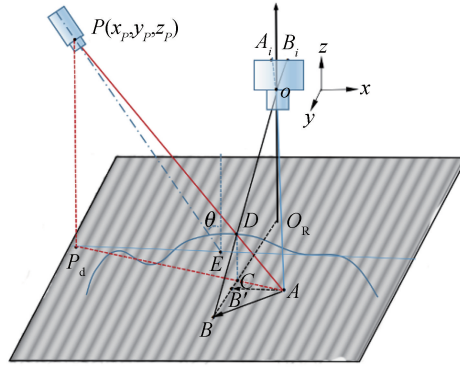


图1 投影栅线法三维面形测量典型光路

Fig.1 A typical optical setup for 3-D surface measurement using fringe-projection

任取参考面上一点 $A(x, y, -z_0)$ 为观察点, 投影线为 \overrightarrow{PA} , 摄像机观察该点, 视线为 \overrightarrow{OA} . 观察点 A 对应的像点为 $A_i(x_i, y_i, f'_c)$, 其中 f'_c 为摄像机物镜的像方焦距, 下标 i 表示摄像机像面上的物理量. 摄像机记录像点 A_i 的光强度, 设 t 时刻记录的光强为 $I_i(x_i, y_i, t)$.

被测物体放置在参考面上, 为 $t + \Delta t$ 时刻, 摄像机记录的光强为 $I'_i(x'_i, y'_i, t + \Delta t)$. 由于物面的调制, 投射到参考面上 A 点的光线落在物面的 D 点. 则 CCD 摄像机所观察到的 $D(x_D, y_D, z_D)$ 点, 对应于参考面的 $B(x', y', -z_0)$ 点. 也就是, CCD 摄像机的视线 \overrightarrow{OA} 转变为视线 \overrightarrow{OB} , 其中 $x' = x + \Delta x$, $y' = y + \Delta y$, Δx 和 Δy 为观察点 A 在 x 和 y 方向上的位移分量. 像面上对应的像点由 $A_i(x_i, y_i)$ 移动到 $B_i(x'_i, y'_i)$, 其中, $x'_i = x_i + \Delta x_i$, $y'_i = y_i + \Delta y_i$, Δx_i 和 Δy_i 为像点 A_i 在 x 和 y 方向上的位移分量. 像面位移和物面位移的关系为 $\Delta x_i / \Delta x = \Delta y_i / \Delta y = M_c$, $M_c = -f'_c / z_0$ 为 CCD 摄像机的横向放大率, f'_c 为摄像机的像方焦距.

根据光流图像一致性假设, 即图像沿着运动轨迹亮度保持不变, 可以得到光流基本等式^[15, 17, 22-24]

$$I_{ix}u + I_{iy}v + I_{it} = 0 \quad (1)$$

式中, $u = \Delta x_i / \Delta t$, $v = \Delta y_i / \Delta t$ 分别为像面 $A_i(x_i, y_i)$ 点在 x 和 y 方向上的光流分量. I_{ix} , I_{iy} 和 I_{it} 为图像 $I_i(x_i, y_i, t)$ 分别对于 x_i, y_i, t 的偏导数, 它们的值可以用图像序列中相邻图像目标像素点的一阶差分估计得到. Δx_i 和 Δy_i 为像点 $A_i(x_i, y_i)$ 在 Δt 时间内的位移分量. 由于只有一个方程, 需要加入约束条件才能求解速度矢量. 对应不同的约束条件, 有不同的光流场计算方法, 其中局域光流 L-K 算法具有抗噪性好, 计算结果更准确的优点^[24, 25].

L-K 光流算法引入约束条件的基本思想是在满足光流基本方程条件下假设在一个小的空间窗口内光流 (u, v) 为常数^[17, 23]. 若窗口大小为 $w \times w$, 像素数为 $n (n = w \times w)$, 可得到 n 行方程组, 其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} \\ I_{x2} & I_{y2} \\ \vdots & \vdots \\ I_{xn} & I_{yn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} I_{t1} \\ I_{t2} \\ \vdots \\ I_{tn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

运用最小二乘法求解方程式(2), 得到

$$\mathbf{V} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T (-\mathbf{b}) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} \\ I_{x2} & I_{y2} \\ \vdots & \vdots \\ I_{xn} & I_{yn} \end{bmatrix}$, $\mathbf{V} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$, $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} I_{t1} \\ I_{t2} \\ \vdots \\ I_{tn} \end{bmatrix}$. \mathbf{V} 就是所要求的光流矢量. 利用式(3)计算得到像点 A_i 的光流

$\mathbf{V}(u, v)$ 后, 可得到该点的位移分量 $\Delta x_i = u \Delta t$, $\Delta y_i = v \Delta t$, 进而得到像点 A_i 变化后的位置 $B_i(x'_i, y'_i)$. 对应参考面上观察点 $A(x, y)$ 位置变化为 $\Delta x = \Delta x_i / M_c = u \Delta t / M_c$, $\Delta y = \Delta y_i / M_c = v \Delta t / M_c$, 可确定其变化后的位置 $B(x', y')$. 根据投影光线 \overrightarrow{PA} 和摄像机的视线 \overrightarrow{OB} 的空间直线方程, 可计算两直线的空间交点 D 的坐标. D 点的坐标为

$$\begin{aligned} x_D &= \frac{(xz_P + x_P z_0)(x + \Delta x)}{xz_P + x_P z_0 + \Delta x(z_P + z_0)} \\ y_D &= \frac{(xz_P + x_P z_0)y}{xz_P + x_P z_0 + \Delta x(z_P + z_0)} \\ z_D &= \frac{-z_0(xz_P + x_P z_0)}{x'(z_P + z_0) + z_0(x_P - x)} \end{aligned} \quad (4)$$

$D(x_D, y_D, z_D)$ 点的坐标是在摄像机坐标系中得到的,通过简单换算,可得世界坐标系下的物体高度表达式,即以参考面为基准面的 D 点的高度分布,表达式为

$$h(x_D, y_D) = z_0 + z_D = \frac{z_0(z_P + z_0)\Delta x}{xz_P + x_P z_0 + \Delta x(z_P + z_0)} \quad (5)$$

式中, $\Delta x = u\Delta t/M_c$, $\Delta y = v\Delta t/M_c$. 由于对采集的两幅图像在时间上没有限制,因此可令 $\Delta t = 1$. 由式(5)可见,只要输入投影仪空间坐标 (x_P, y_P, z_P) 和 CCD 摄像机的位置坐标 (z_0) , 计算采集到的两帧图像间的光流分量 u , 即可直接获得物面的高度分布.

2 模拟验证与讨论

由式(5)可以看出,所提出的视线坐标法对投影中心 E 与摄像机的观察中心 O_R 二者是否重合没有要求,对所投影的图像也没有限定为条纹图像. 为方便起见,本文采用正弦分布的灰度投影条纹验证所提出方法的可行性. 投影仪将正弦分布的灰度条纹投影到参考面上,令条纹方向平行于 y 轴,则投影仪的 y 轴坐标 y_P 对投影结果没有影响,故可令 $y_P = 0$. 当投影中心 E 与观察中心 O_R 二者不重合时,与二者重合相比,由于投影条纹平行于 y 轴,条纹强度表达式存在 x 坐标的平移,为简单起见,本文讨论二者重合的情况. 此时,投影角度 θ 容易确定,参考面上的投影条纹呈非线性分布,摄像机采集的条纹表达式为^[26]

$$I_i(x_i, t) = a + b \cos \left[2\pi f_{0x} x_i \cos \theta \left(1 - \frac{2x_i \sin^2 \theta}{x_P} \right) \right] \quad (6)$$

式中, f_{0x} 为与投影光轴垂直并通过 O_R 点的光栅空间频率. 倾斜投影测量导致投影条纹成非线性分布,从而引起测量误差. 利用 Matlab 根据式(6)模拟生成 512×512 像素大小的条纹图像,作为 t 时刻未放置物体时所采集的第一幅条纹图样,其中 $a = 128, b = 60, f_{0x} = 0.4 \text{ mm}^{-1}$. 被测物面为乒乓球球冠,其高度分布表达式为

$$h(x, y) = -(R - h_{\max}) + \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \quad (7)$$

式中, R 为球半径, h_{\max} 为球冠高度. 令 $R = 20 \text{ mm}$, $h_{\max} = 10 \text{ mm}$, 则待测的理论高度分布如图 2 所示.

设置 CCD 摄像机观察距离 z_0 为 1800 mm , 则观察中心 O_R 的坐标为 $(0, 0, -1800 \text{ mm})$. 投影仪位置坐标为 $(-25 \text{ mm}, 0, 0)$, $\theta = a \tan[x_P / (z_P + z_0)]$. 将被测物放置在参考平面上,则投影条纹由于物面的调制发生变形. 采集变形后图像作为 $t + \Delta t$ 时刻的第二帧图像. 被测物放置前后采集到的条纹图样如图 3(a)和图 3(b)所示. 可以看出,图 3(b)所示条纹的变形量很小,最大变形量为 1.8 像素.

由于图 3(a)所示条纹是平行于 y 轴条纹,故可仅做 x 轴方向像素点的差分运算. 取 5×5 像素窗口做一阶差分估计,得到一组 I_{ix} . 将图 3(b)与图 3(a)相减,得到一组 Δt 时间内灰度变化 I_{it} . 根据 L-K 算法假设,该窗口内所有像素点速度相同,运用最小二乘法求解该方程组(详见参考文献[17]). 令时间间隔 $\Delta t = 1$, 根据式(3)计算光流分量 (u, v) , 再根据式(5)计算球冠三维高度分布,计算结果如图 4 所示. 分别对球冠高度分布

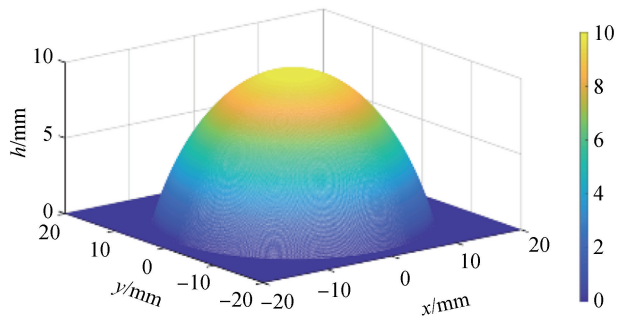


图 2 被测球冠高度分布
Fig.2 The measured height distribution of the spherical crown

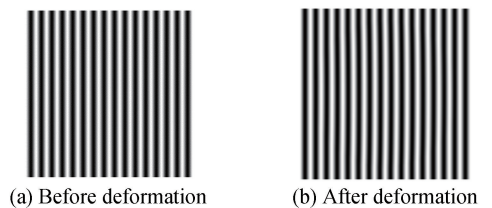


图 3 实验条纹图
Fig.3 The fringe pattern in experiment captured

的理论值(图 3 所示)和计算值(图 4 所示)取 $y=0$ mm 横截面上的数据进行对比,对比结果如图 5 所示.可以看出,在 $y=0$ mm 横截面上物面高度理论值与计算值吻合的很好,相对误差小于 1.2%.说明基于光流的空间坐标方法能够精确恢复物面高度分布,所用计算时间很短,使用通用计算机获得高度分布和完成误差分析总用时小于 2 s.

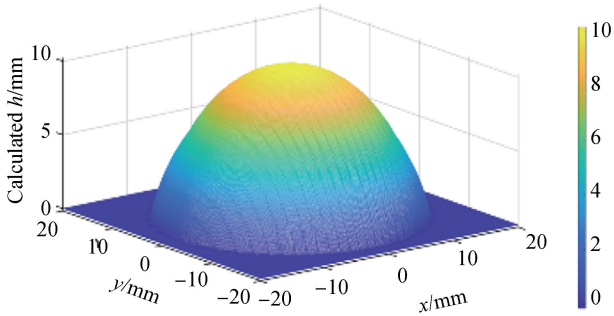


图 4 被测球冠高度分布计算值

Fig.4 The calculated height distribution of the spherical crown

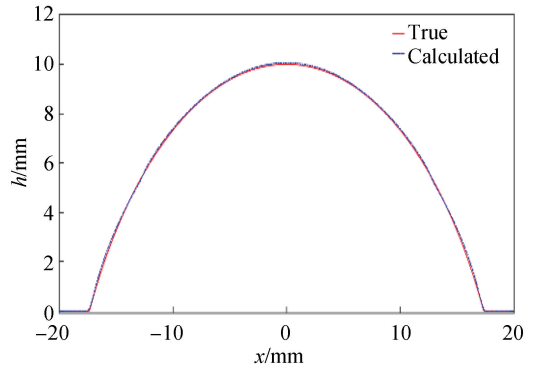


图 5 计算值与理论值在 $y=0$ mm 横截面数据的比较

Fig.5 The comparison of the cross section data between the calculated and its true value at $y=0$ mm in x direction

由于条纹灵敏度方向与条纹垂直,所以投影图样为条纹图样时,不能求出观察点 $A(x, y)$ 变化后的位置 $B(x', y')$,而是在垂直于条纹方向上的 $B'(x', y)$.故在式(5)中采用 x 方向坐标.

式(5)中需要输入的参量有成像距离 z_0 、投影仪的位置坐标 x_p 和 z_p .这些参量在以上的模拟计算中均采用定值,分别为 1 800 mm、-25 mm 和 0 mm.但在实际测量中,这些参量需要光学方法标定,存在误差.为了说明输入参量的误差对测量结果的影响,将这些参量分别增加 5 mm,设置为 1 805 mm、-30 mm 和 5 mm,分别得到面形高度分布.取面形高度计算值在 $y=0$ mm 横截面上的数据,分别与理论值进行对比,求其绝对误差分布.

当投影仪坐标 $x_p = -25$ mm 和 $z_p = 0$ mm,成像距离 z_0 分别为 1 800 mm 和 1 805 mm 时,面形高度计算值的绝对误差分布,如图 6 所示.可以看出, $z_0 = 1 805$ mm 时的高度误差曲线基本与 $z_0 = 1 800$ mm 时的重合,成像距离 5 mm 的差值仅在球面顶点处有 0.1% mm 的差别.

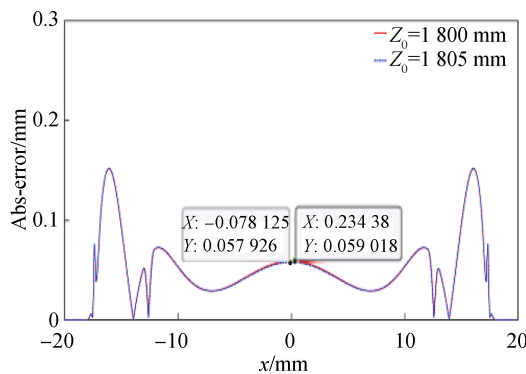


图 6 投影仪坐标 $x_p = -25$ mm, $z_p = 0$ mm,成像距离 z_0 分别为 1 800 mm 和 1 805 mm 时,球冠高度测量值的绝对误差分布对比

Fig.6 The comparison of the absolute error distribution of the measured crown height when the projector coordinates x_p and z_p are set as -25 mm and 0 mm respectively, the imaging distance z_0 is 1 805 mm with that of 1 800 mm

当成像距离 z_0 为 1 800 mm,投影仪位置坐标 $z_p = 0$ mm,即摄像机与投影仪在同一水平位置时,令投影仪水平坐标 x_p 分别为 -25 mm 和 -30 mm,同样分别计算球面高度,然后分别将球面高度的测量值与理论值相减取模,得到绝对误差分布曲线,如图 7 所示.可以看出,投影仪横向坐标 x_p 为 -30 mm 时,球面顶点 $x=0$ 处的绝对误差达到 0.24 mm,比 x_p 为 -25 mm 时的误差值 0.06 增加了 0.18 mm.可见,测量误差对投

影仪横向坐标 x_p 值有较强的敏感性.这是因为 $|x_p|$ 值越大,投影角度也越大,在参考面上的条纹由于放入被测物而发生的变形量也越大.而光流法对小的变形量有高的精确度,对大的变形则误差比较大^[23].

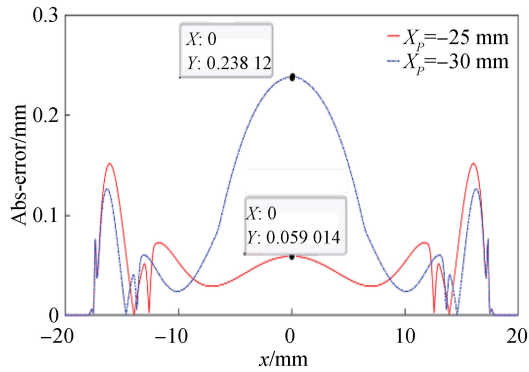


图7 $z_0 = -1800$ mm, $z_p = 0$ mm, x_p 分别为 -25 mm 和 -30 mm 时,球冠高度测量值的绝对误差分布对比
Fig.7 The comparison of the absolute error distribution of the measured crown height when z_0 and z_p are set as -1800 mm and 0 mm respectively, x_p is -30 mm with that of -25 mm

当成像距离 z_0 为 1800 mm、投影仪水平坐标 x_p 为 -25 mm,纵坐标 z_p 分别取 0 和 5 mm,得到如图8所示高度测量值的绝对误差分布曲线.可以看出,两曲线基本重合,说明投影仪纵坐标 $z_p = 5$ mm 的误差对测量结果影响不大.

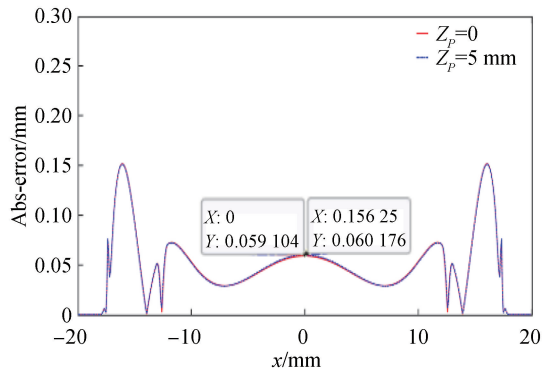


图8 当 $z_0 = 1800$ mm, $x_p = -25$ mm, z_p 分别为 0 和 5 mm 时的球冠高度测量值的绝对误差分布对比
Fig.8 The comparison of the absolute error distribution of the measured crown height when z_0 and x_p are set as 1800 mm and -25 mm respectively, z_p is 5 mm with that of 0 mm

3 实验验证

为了进一步验证所提方法的可行性,采用图1所示实验光路对实际物体面形进行了测量.实验中采用小角度投影.按照文献^[23]关于 L-K 光流位移测量的结论,所谓小角度是指放入物体后条纹的最大调制变形相位小于 $\pi/2$,以保证测量相对误差小于 2% .选择漫反射比较好的面具作为被测物体,使用游标卡尺测量其最高点高度为 73.00 mm.首先基于张正友标定法^[27,28],对投影仪和摄像机的光心位置进行标定.通过对光心位置的标定,测得 CCD 摄像机与参考平面的距离为 $z_0 = -1975$ mm,投影仪位置坐标为 $(-135$ mm, $0, -268$ mm).放置物体前后采集到的条纹图样如图9(a)和9(b)所示.

计算图9(a)和图9(b)之间的光流,得到光流的速度分量 u .利用式(5)计算出面形高度分布,如图10所示.可以看出,基于光流的视线空间坐标法能够直接恢复三维面形高度分布,证明该方法是可行

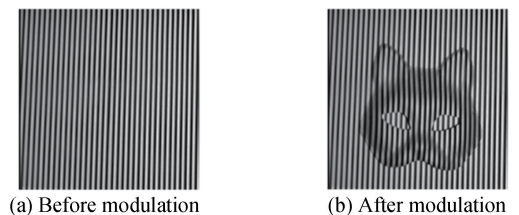


图9 实验条纹图

Fig.9 The fringe patterns in experiment captured

的.图 10 中显示,测量所得面具最高点高度值为 71.12 mm,与实际高度值的相对误差小于 2.6%,优于 H-S 光流面形测量方法 3.5% 的测量精度^[15].该误差比模拟得到的误差要大,这是因为实验图像包含了各种可能因素的误差,例如光流的计算误差、摄像机噪声误差、测量环境的振动,特别是放置物体前后背景光强变化引起的误差和摄像机位置的标定误差,对测量结果影响较大.

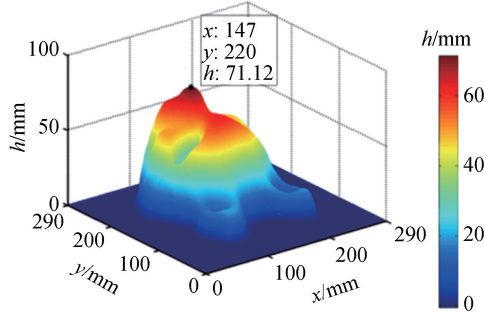


图 10 面具三维高度分布

Fig.10 The calculated height distribution of the mask surface

4 结论

提出了一种基于 L-K 局域光流的视线空间坐标面形测量方法.该方法利用投影仪的投影光线和 CCD 摄像机的观测视线之间的交点坐标,直接恢复面形高度分布,而观察点的位移由光流法计算得到.该方法无需采集多幅条纹图样,也无需计算物体相位值,仅需放置物体前后两幅条纹图样就可恢复面形分布,计算简单.模拟和实验表明,所提出的视线光流面形测量方法能够直接得到面形高度分布,计算用时短.模拟实验显示,该方法对投影仪横向坐标值敏感,要求准确确定标投影仪的横向坐标.另外,该方法在被测物边缘的误差较大.直径 20 mm、高 10 mm 球冠面形模拟实验显示,高度测量的绝对误差小于 0.15 mm,相对误差小于 1.2%,实物测量相对误差为 2.6%,具有较高的测量精度.与其他测量技术一样,视线光流法面形技术本身也存在一些问题,譬如背景光的影响、被测物体与背景颜色不一致导致测量误差等,将在日后的工作中进一步研究.

参考文献

- [1] SHI Tu, YANG Yong-ying, ZHANG Lei, *et al.* Surface testing methods of aspheric optical elements[J]. *Chinese Optics*, 2014, **7**(1): 26-46.
师途,杨甬英,张磊,等.非球面光学元件的面形检测技术[J].*中国光学*,2014,**7**(1):26-46.
- [2] WANG Yue-min, ZHANG Zong-hua, GAO Nan. Review on three-dimensional surface measurements of specular objects based on full-field fringe reflection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(5): 1014-1027.
王月敏,张宗华,高楠.基于全场条纹反射的镜面物体三维面形测量综述[J].*光学精密工程*,2018,**26**(5):1014-1027.
- [3] LU Ming-teng, SU Xian-yu, CAO Yi-ping, *et al.* 3D shape reconstruction algorithms for modulation measuring profilometry with synchronous scanning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(3): 206-216.
卢明腾,苏显渝,曹益平,等.同步扫描的调制测量轮廓术三维面形重建算法[J].*中国激光*,2016,**43**(3):206-216.
- [4] CHEN Hai-ping, XIONG Zhao, CAO Ting-fen, *et al.* Research on surface measure device for process of large aperture mirror assembly[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(2): 92-98.
陈海平,熊召,曹庭分,等.大口径反射镜组件面形检测系统及方法研究[J].*光学学报*,2016,**36**(2):92-98.
- [5] VANDER J S, DIRCKX J J. Real-time structured light profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, **87**:18-31.
- [6] GUAN Yin, WANG Xiang-jun, YIN Lei, *et al.* Monocular position and pose measurement method based on surface topography of object[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(1): 43-50.
关印,王向军,阴雷,等.基于物体表面形貌的单相机视觉位姿测量方法[J].*光电工程*,2018,**45**(1):43-50.
- [7] GUO Wen-bo, WU Zhou-jie, XU Ren-chao, *et al.* A fast reconstruction method for three-dimensional shape measurement using dual-frequency grating projection and phase-to-height lookup table[J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, **112**: 269-77.
- [8] HUANG Lin, DA Fei-peng, GAI Shao-yan. Research on multi-camera calibration and point cloud correction method based on three-dimensional calibration object[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, **115**: 32-41.
- [9] SONG Ke-chen, HU Shao-peng, WEN Xin, *et al.* Fast 3D shape measurement using Fourier transform profilometry without phase unwrapping[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, **8**(4): 74-81.
- [10] ZUO Cao, TAO Tian-yang, FENG Shi-jie, *et al.* Micro Fourier Transform Profilometry (mu FTP): 3D shape

- measurement at 10,000 frames per second[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, **10**(02): 70-91.
- [11] LI Bei-wen, AN Ya-tong, ZHANG Song. Single-shot absolute 3D shape measurement with fourier transform profilometry[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(19): 5219-25.
- [12] HUANG Ting-ting, LI Xiu-ming, FU Xiao, *et al.* Arbitrary phase shifting method for fiber-optic fringe projection profilometry based on temporal sinusoidal phase modulation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, **121**: 300-06.
- [13] XING Shuo, GUO Hong-wei. Directly recognizing and removing the projector nonlinearity errors from a phase map in phase-shifting fringe projection profilometry[J]. *Optics Communications*, 2019, **43**(5): 212-220.
- [14] ZUO Chao, FENG Shi-jie, HUANG Lei, *et al.* Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, **109**: 23-59.
- [15] DAI Qing, SUN Ping, LEI Zhi-fang, *et al.* Surface shape measurement technique using fringe-based optical flow[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(11): 1112004.
代晴,孙平,类智方,等. 基于条纹光流的物体面形测量技术[J]. 光学学报,2019,**39**(11):1112004.
- [16] GIBSON J J. The perception of the visual world[M]. Oxford: Houghton Mifflin,1950.
- [17] LUCAS B, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C]. 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, August 24-28, Vancouver British Columbia Canada, New York: IEEE, 1981: 674-679.
- [18] HORN B K P, SCHUNCK B G. Determining opticalflow[J]. *Artificial Intelligence*, 1981, **17**(1-3): 185-203.
- [19] SONG S, YANG J, WANG Y T. Technology and prospect of global opticalflow[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, **26**(5): 841-850.
宋爽,杨健,王涌天. 全局光流场估计技术及展望[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2014,**26**(5):841-850.
- [20] WAN Hai-feng. Optical flow analyses on speckle patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(4): 434-441.
万海峰. 激光散斑图样的光流场分析研究[J]. 光学学报, 1997, **17**(4): 434-441.
- [21] VARGAS J, QUIROGA J A, SORZANO C O S, *et al.* Two-step interferometry by a regularized optical flow algorithm [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(17): 3485-3487.
- [22] RAN Zhao, QIAO Jian-ping, XIAO Fei, *et al.* A new method for phase measurement of deformation by optical flow analysis[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, **26**(10): 1974-1979.
赵冉,乔建苹,肖飞,等. 基于光流场理论测量物体变形相位的新方法[J]. 光电子·激光,2015,**26**(10):1974-1979.
- [23] LEI Zhi-fang, SUN Ping, DAI Qing. Discussion on resolution and measuring range of typical optical flow algorithm in fringe displacement measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(3): 0320001.
类智方,孙平,代晴. 典型光流算法在条纹位移测量中的分辨率和测量范围[J]. 光学学报,2020,**40**(3):0320001.
- [24] GAUTAMA T, VAN HULLE M A. A phase-based approach to the estimation of the optical flow field using spatial filtering[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2002, **13**(5): 1127-36.
- [25] BARRON J L, FLEET D J, BEAUCHEMIN S S. Performance of optical flow techniques[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, **12**(1): 43-77.
- [26] BUSCA G, ZAPPA E. Sensitivity analysis applied to an improved Fourier-transform profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, **49**(2): 210-221.
- [27] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.
- [28] LIU Feng-cai, LI Ai-di, MA Ze-zhong. Method for calibration of structured-light vision based on projector and camera [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, **50**(24): 168-172.
刘俸材,李爱迪,马泽忠. 基于投影仪和摄像机的结构光视觉标定方法[J]. 计算机工程与应用,2014,**50**(24):168-172.