

基于 Brox 光流估计的物体面形测量新方法

唐钰欣, 孙平*, 代晴, 范超, 类智方

山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014

摘要 提出了一种利用光流场原理测量物体面形的新方法。测量系统由投影仪、被测物体以及 CCD 摄像机组成。将光栅条纹以小角度投影到参考平面上, 分别采集被测物体加入前后的两幅条纹图像。对测量系统的空间几何结构进行分析, 以参考面为参照系, 建立了投影仪、摄像机、观测点三者的位移与物面高度的空间关系, 其中, 观测点的位移是基于 Brox 光流算法通过估计两帧图像间的光流分布得到的。针对测量系统导致的测量结果与实际形状不一致的问题, 结合球冠几何模型的数值模拟结果, 分析了误差产生的原因, 提出了修正方法。理论模拟结果和实际测量结果验证了所提方法的可行性。与傅里叶变换法进行了比较, 证实了所提方法仅用两帧图像即可精确地恢复物体的高度信息, 实验过程简单, 有效缩短了测量时间, 且适用于动态测量。

关键词 测量; 面形测量; 傅里叶变换; Brox 光流法; 误差修正

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1712004

New Method for Surface Shape Measurement Based on Brox Optical Flow Algorithm

Tang Yuxin, Sun Ping*, Dai Qing, Fan Chao, Lei Zhifang

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

Abstract A new technique for surface shape measurement is proposed, which is based on the Brox optical flow algorithm. The measurement system consists of a projector, a CCD camera and the measured object. First, one fringe pattern is projected onto a reference plane at a small angle and then two fringe images are recorded using the CCD camera before and after the measured object is added, respectively. Based on the analysis of the spatial geometry of the measurement system, the spatial relationship between the height of the object plane and the displacements of the observing point, the projector and the camera is established, in which the displacement of the observing point is obtained by estimating the optical flow distribution between two images based on the Brox optical flow algorithm. Aiming at the problem caused by the measurement system that the measurement result is not consistent with the actual shape, we analyze the cause of the error through the numerical simulation with the spherical crown geometrical model and propose a modified method. The theoretical simulation and the actual measurement verify the feasibility of the proposed method. By comparing with the Fourier transform method, it is proved that the proposed method can accurately restore the height information of the object with only two frames of images. The experimental process is simple, the measurement time is effectively shortened, and it is suitable for a dynamic measurement.

Key words measurement; surface shape measurement; Fourier transform; Brox optical flow algorithm; error correction

OCIS codes 120.6650; 120.2650; 120.4630

1 引 言

三维物体表面轮廓测量是获取物体形态特征的一种重要方法, 也是记录、比较、复制物体形态特征的基础。三维面形测量技术在文物保护、三维测量、计算机视觉、医疗诊断等领域中具有重要的意义和

广阔的应用前景^[1-4]。三维物体表面轮廓测量技术常采用投影栅线的方法, 该方法利用计算机产生灰度呈余弦分布的条纹图像, 并通过投影仪将条纹图像投影到被测物面上。投影栅线法具有方法简单、非接触以及精度较高的优点。投影在物面上的条纹由于物面的调制而发生变形, 摄像机采集变形前后

收稿日期: 2020-03-24; 修回日期: 2020-05-10; 录用日期: 2020-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61975099、11902317)、山东省自然科学基金(ZR201702090137)

* E-mail: sunpingmail@163.com

的条纹图像,通过条纹变形即可恢复出物体面形信息。常用的面形信息提取技术有傅里叶变换轮廓术(Fourier transform profilometry)、相位测量轮廓术(phase measurement profilometry)、小波变换轮廓术(wavelet transform profilometry)等^[5-8]。这些以面形相位为测量内容的测量技术,都需要通过相位-高度的转换才能够得到物体的面形分布。

与传统的相位测量技术相比,光流面形测量技术不需要测量相位,仅通过两帧图像间的光流,利用光流与高度间的几何关系,即可直接恢复物体的面形信息,测量精度与傅里叶变换方法相当^[9]。由于是逐点计算,因此光流法对噪声有较好的鲁棒性。已有多个关于光流估计算法的研究报道^[10-13],其中 Brox 光流算法^[14]不仅对图像噪声有较好的鲁棒性,还具有较宽的测量范围。在点光源照明条件下,投影仪投射到参考面上的条纹由于物体的放入而发生变形,从而产生条纹光流,该光流与物面高度密切相关。本文简单介绍了 Brox 光流算法的基本原理,分析了投影仪、摄像机和被测物面高度三者与光流之间的空间坐标关系,得到了新的光流与物面高度的关系式。采用 Brox 光流算法计算了由物面引起的光流,根据该关系式,利用变形前后的两幅条纹图像即可直接恢复物面的三维高度分布。

目前,光流法和其他面形测量方法都存在倾斜偏差问题,即与实际物体面形相比,测量结果存在倾斜误差。已有学者注意到该问题并提出了修正偏差的方法。其中,投影条纹相移校正的方法是利用四步移相法对投影的正弦条纹进行相位周期校正,再将校正后的条纹图样进行投影,则电荷耦合元件(CCD)相机采集到的即为空间周期均匀的条纹图像^[15]。该方法要求投影仪与 CCD 相机二者的光心处于同一水平线上,在测量大物体时效果较好。投影条纹相移校正的方法需要对投影条纹的分布进行预判,操作难度较大,且不同的实验光路需要不同的

修正。与投影条纹相移校正方法不同,广义条纹投影法^[16]则是基于垂直参考面上投影条纹均匀分布的特点,得到的高度-相位关系式包含了发散照明中的倾斜投影修正参数,通过已知的物体高度对关系式中的参数进行实验标定,较好地解决了投影条纹的非线性问题。本文采用小角度投影方式,因此倾斜投影误差对本文所提方法的影响较小。我们发现,测量结果中的倾斜误差不单单是由倾斜投影引起的,投影仪与 CCD 摄像机两者光心不在同一水平线上,同样会引起倾斜误差。由于光流面形测量能够直接得到高度分布,因此本文提出了一种适用于光流法面型测量技术的修正方案,解决了上述投影误差问题,并通过模拟仿真与实际测量,证明了该修正方法的有效性。

2 测量原理

2.1 Brox 光流估计算法原理

Brox 光流估计算法中的约束条件为亮度恒定和图像梯度恒定,且该算法假设光流场平滑,属于全局方法。令 t 时刻像面上的像素点 $A_i(x_i, y_i)$ 处的灰度值为 $I_i(x_i, y_i, t)$,在 $(t + \Delta t)$ 时刻该点运动到新的位置 $B_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i)$,对应的灰度值记为 $I'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, t + \Delta t)$,其中, Δt 为运动时间, $\Delta x_i, \Delta y_i$ 为 x, y 方向上的位移。根据图像一致性假设,有 $I_i(x_i, y_i, t) = I'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, t + \Delta t)$ 。将 $I'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, t + \Delta t)$ 进行泰勒展开,并忽略二阶以上的高次项,化简得

$$\frac{\partial I_i}{\partial x_i} \frac{\Delta x_i}{\Delta t} + \frac{\partial I_i}{\partial y_i} \frac{\Delta y_i}{\Delta t} + \frac{\partial I_i}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

(1)式称为光流基本方程,根据(1)式无法求出光流的唯一解,需要有其他的约束条件来确定光流的唯一解。Brox 光流估计算法通过构建能量函数对亮度恒定假设和梯度恒定假设的全局偏差进行测量,对应的能量泛函数为

$$E(u, v) = \int_{\Omega} [| I(x + u, y + v) - I(x, y) |^2 + \gamma | \nabla I(x + u, y + v) - \nabla I(x, y) |^2] dx dy + \alpha \int_{\Omega} (| \nabla u |^2 + | \nabla v |^2) dx dy, \quad (2)$$

式中: $I(\cdot)$ 为光强; ∇ 为梯度算子; $u(x, y), v(x, y)$ 为两帧图像之间的光流场; (x, y) 为图像内各点的坐标, $(x, y) \in \Omega$, Ω 为图像域; γ 为权重系数; α 为平滑因子。(2)式中第一积分项为数据项,第二积

分项为平滑项,其中数据项又分为灰度亮度恒定约束和梯度恒定约束。由于函数中有二次方项,因此离群值对估计的影响较大,故定义能量泛函为

$$E(u, v) = \int_{\Omega} \Psi[|I(x+u, y+v) - I(x, y)|^2 + \gamma |\nabla I(x+u, y+v) - \nabla I(x, y)|^2] dx dy + \alpha \int_{\Omega} \Psi(|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2) dx dy, \quad (3)$$

式中: $\Psi(x^2) = \sqrt{x^2 + \epsilon^2}$, ϵ 为一小量。由于 Brox 光流估计算法要求光流本身尽可能平滑, 因此需要利用变分法对(3)式求最小值, 得欧拉-拉格朗日方程为

$$\begin{cases} \Psi'(I_z^2) I_x I_z + \gamma \Psi'(I_{xz}^2 + I_{yz}^2) (I_{xx} I_{xz} + I_{xy} I_{yz}) - \alpha \operatorname{div}[\Psi'(u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2) (u_x \mathbf{e}_x + u_y \mathbf{e}_y)] = 0 \\ \Psi'(I_z^2) I_y I_z + \gamma \Psi'(I_{xz}^2 + I_{yz}^2) (I_{xy} I_{xz} + I_{yy} I_{yz}) - \alpha \operatorname{div}[\Psi'(u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2) (v_x \mathbf{e}_x + v_y \mathbf{e}_y)] = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $\operatorname{div}(\cdot)$ 为散度; $\Psi'(x^2) = \frac{1}{2\sqrt{x^2 + \epsilon^2}}$; $u_x = \frac{\partial u}{\partial x}$; $u_y = \frac{\partial u}{\partial y}$; $v_x = \frac{\partial v}{\partial x}$; $v_y = \frac{\partial v}{\partial y}$; $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$ 分别为 x, y 轴的单位向量; $I_x = \frac{\partial I(x+u, y+v)}{\partial x}$; $I_y = \frac{\partial I(x+u, y+v)}{\partial y}$; $I_z = I(x+u, y+v) - I(x, y)$; $I_{xx} = \frac{\partial^2 I(x+u, y+v)}{\partial x^2}$; $I_{xy} = \frac{\partial^2 I(x+u, y+v)}{\partial x \partial y}$; $I_{yy} = \frac{\partial^2 I(x+u, y+v)}{\partial y^2}$; $I_{xz} = \frac{\partial I(x+u, y+v)}{\partial x} - \frac{\partial I(x, y)}{\partial x}$; $I_{yz} = \frac{\partial I(x+u, y+v)}{\partial y} - \frac{\partial I(x, y)}{\partial y}$ 。(4)式迭代 $k+1$ 次后的表达式为

$$\begin{cases} \Psi'[(I_z^{k+1})^2] I_x^k I_z^{k+1} + \gamma \Psi'[(I_{xz}^{k+1})^2 + (I_{yz}^{k+1})^2] (I_{xx}^k I_{xz}^{k+1} + I_{xy}^k I_{yz}^{k+1}) - \\ \alpha \operatorname{div}\{\Psi'[(u_x^{k+1})^2 + (u_y^{k+1})^2 + (v_x^{k+1})^2 + (v_y^{k+1})^2] (u_x^{k+1} \mathbf{e}_x + u_y^{k+1} \mathbf{e}_y)\} = 0 \\ \Psi'[(I_z^{k+1})^2] I_y^k I_z^{k+1} + \gamma \Psi'[(I_{xz}^{k+1})^2 + (I_{yz}^{k+1})^2] (I_{xy}^k I_{xz}^{k+1} + I_{yy}^k I_{yz}^{k+1}) - \\ \alpha \operatorname{div}\{\Psi'[(u_x^{k+1})^2 + (u_y^{k+1})^2 + (v_x^{k+1})^2 + (v_y^{k+1})^2] (v_x^{k+1} \mathbf{e}_x + v_y^{k+1} \mathbf{e}_y)\} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $I_z^{k+1}, I_{xz}^{k+1}, I_{yz}^{k+1}, u_x^{k+1}, u_y^{k+1}, v_x^{k+1}, v_y^{k+1}$ 分别为 $I_z, I_{xz}, I_{yz}, u_x, u_y, v_x, v_y$ 的第 $k+1$ 次迭代结果, $I_x^k, I_y^k, I_{xx}^k, I_{xy}^k, I_{yy}^k$ 分别为 $I_x, I_y, I_{xx}, I_{xy}, I_{yy}$ 的第 k 次迭代结果。

对(5)式中的第 $k+1$ 次迭代项进行一阶泰勒展开, 得到

$$\begin{cases} I_z^{k+1} \approx I_z^k + I_x^k \Delta u^k + I_y^k \Delta v^k \\ I_{xz}^{k+1} \approx I_{xz}^k + I_{xx}^k \Delta u^k + I_{xy}^k \Delta v^k, \\ I_{yz}^{k+1} \approx I_{yz}^k + I_{xy}^k \Delta u^k + I_{yy}^k \Delta v^k \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $u^{k+1} = u^k + \Delta u^k = \hat{u}, v^{k+1} = v^k + \Delta v^k = \hat{v}$, 也就是将未知量 u^{k+1}, v^{k+1} 分解为上一次迭代结果 u^k, v^k 和前后两次迭代结果之间的增量 $\Delta u^k, \Delta v^k$ 。将(6)式代入(5)式, 得

$$\begin{cases} \frac{I_x^k (I_z^k + I_x^k \Delta u^k + I_y^k \Delta v^k)}{2\sqrt{(I_z^k + I_x^k \Delta u^k + I_y^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \times \\ \frac{I_{xx}^k (I_{xz}^k + I_{xx}^k \Delta u^k + I_{xy}^k \Delta v^k) + I_{xy}^k (I_{yz}^k + I_{xy}^k \Delta u^k + I_{yy}^k \Delta v^k)}{\sqrt{(I_{xz}^k + I_{xx}^k \Delta u^k + I_{xy}^k \Delta v^k)^2 + (I_{yz}^k + I_{xy}^k \Delta u^k + I_{yy}^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} - \frac{\alpha}{2} \operatorname{div}\left(\frac{\hat{u}_x \mathbf{e}_x + \hat{u}_y \mathbf{e}_y}{\sqrt{\hat{u}_x^2 + \hat{u}_y^2 + \hat{v}_x^2 + \hat{v}_y^2}}\right) = 0 \\ \frac{I_y^k (I_z^k + I_x^k \Delta u^k + I_y^k \Delta v^k)}{2\sqrt{(I_z^k + I_x^k \Delta u^k + I_y^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \times \\ \frac{I_{xy}^k (I_{xz}^k + I_{xx}^k \Delta u^k + I_{xy}^k \Delta v^k) + I_{yy}^k (I_{yz}^k + I_{xy}^k \Delta u^k + I_{yy}^k \Delta v^k)}{\sqrt{(I_{xz}^k + I_{xx}^k \Delta u^k + I_{xy}^k \Delta v^k)^2 + (I_{yz}^k + I_{xy}^k \Delta u^k + I_{yy}^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} - \frac{\alpha}{2} \operatorname{div}\left(\frac{\hat{v}_x \mathbf{e}_x + \hat{v}_y \mathbf{e}_y}{\sqrt{\hat{u}_x^2 + \hat{u}_y^2 + \hat{v}_x^2 + \hat{v}_y^2}}\right) = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: \hat{u}_x, \hat{u}_y 为 \hat{u} 在 x, y 方向的偏导; \hat{v}_x, \hat{v}_y 为 \hat{v} 在 x, y 方向的偏导。

将(7)式中的数据项拆开, 令

$$\begin{cases}
 a_{11} = \left[\frac{I_x^k I_x^k}{2\sqrt{(I_z^k + I_x^k \Delta u^k + I_y^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \times \frac{I_{xx}^k I_{xx}^k + I_{xy}^k I_{xy}^k}{\sqrt{(I_{xz}^k + I_{xx}^k \Delta u^k + I_{xy}^k \Delta v^k)^2 + (I_{yz}^k + I_{xy}^k \Delta u^k + I_{yy}^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} \right] \Delta u^k \\
 a_{12} = \left[\frac{I_x^k I_y^k}{2\sqrt{(I_z^k + I_x^k \Delta u^k + I_y^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \times \frac{I_{xx}^k I_{xy}^k + I_{xy}^k I_{yy}^k}{\sqrt{(I_{xz}^k + I_{xx}^k \Delta u^k + I_{xy}^k \Delta v^k)^2 + (I_{yz}^k + I_{xy}^k \Delta u^k + I_{yy}^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} \right] \Delta v^k \\
 b_1 = \frac{I_x^k I_z^k}{2\sqrt{(I_z^k + I_x^k \Delta u^k + I_y^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \times \frac{I_{xx}^k I_{xz}^k + I_{xy}^k I_{yz}^k}{\sqrt{(I_{xz}^k + I_{xx}^k \Delta u^k + I_{xy}^k \Delta v^k)^2 + (I_{yz}^k + I_{xy}^k \Delta u^k + I_{yy}^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} \\
 a_{21} = \left[\frac{I_x^k I_y^k}{2\sqrt{(I_z^k + I_x^k \Delta u^k + I_y^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \times \frac{I_{xx}^k I_{xy}^k + I_{xy}^k I_{yy}^k}{\sqrt{(I_{xz}^k + I_{xx}^k \Delta u^k + I_{xy}^k \Delta v^k)^2 + (I_{yz}^k + I_{xy}^k \Delta u^k + I_{yy}^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} \right] \Delta u^k \\
 a_{22} = \left[\frac{I_y^k I_y^k}{2\sqrt{(I_z^k + I_x^k \Delta u^k + I_y^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \times \frac{I_{xy}^k I_{xy}^k + I_{yy}^k I_{yy}^k}{\sqrt{(I_{xz}^k + I_{xx}^k \Delta u^k + I_{xy}^k \Delta v^k)^2 + (I_{yz}^k + I_{xy}^k \Delta u^k + I_{yy}^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} \right] \Delta v^k \\
 b_2 = \frac{I_y^k I_z^k}{2\sqrt{(I_z^k + I_x^k \Delta u^k + I_y^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \times \frac{I_{xy}^k I_{xz}^k + I_{yy}^k I_{yz}^k}{\sqrt{(I_{xz}^k + I_{xx}^k \Delta u^k + I_{xy}^k \Delta v^k)^2 + (I_{yz}^k + I_{xy}^k \Delta u^k + I_{yy}^k \Delta v^k)^2 + \epsilon^2}}
 \end{cases} \quad (8)$$

则根据数据项可以得到

$$\begin{cases}
 a_{11} \Delta u^k + a_{12} \Delta v^k = -b_1 \\
 a_{21} \Delta u^k + a_{22} \Delta v^k = -b_2
 \end{cases} \quad (9)$$

令 $\varphi(x, y) = \frac{\alpha/2}{\sqrt{\hat{u}_x^2 + \hat{u}_y^2 + \hat{v}_x^2 + \hat{v}_y^2}}$, 可将 b_1, b_2, a_{11}, a_{22} 变为 $b'_1, b'_2, a'_{11}, a'_{22}$, 即

$$\begin{cases}
 b'_1 = b_1 + \{ [u^k(x, y) - u^k(x-1, y)]\varphi(x-1, y) - [u^k(x+1, y) - u^k(x, y)]\varphi(x, y) + \\
 \quad [u^k(x, y) - u^k(x, y-1)]\varphi(x, y-1) - [u^k(x, y+1) - u^k(x, y)]\varphi(x, y) \} \\
 b'_2 = b_2 + \{ [v^k(x, y) - v^k(x-1, y)]\varphi(x-1, y) - [v^k(x+1, y) - v^k(x, y)]\varphi(x, y) + \\
 \quad [v^k(x, y) - v^k(x, y-1)]\varphi(x, y-1) - [v^k(x, y+1) - v^k(x, y)]\varphi(x, y) \} \\
 a'_{11} = a_{11} + \varphi(x-1, y) + 2\varphi(x, y) + \varphi(x, y-1) \\
 a'_{22} = a_{22} + \varphi(x-1, y) + 2\varphi(x, y) + \varphi(x, y-1)
 \end{cases} \quad (10)$$

利用逐次超松弛法得到 Brox 光流估计算法的最终形式为

$$\begin{cases}
 \Delta u^{k+1} = (1-\omega)\Delta u^k + \frac{\omega}{a_{11}} \{ b'_1 - a_{12}\Delta v^k + [\Delta u^k(x-1, y)\varphi(x-1, y) + \Delta u^k(x+1, y)\varphi(x, y) + \\
 \quad \Delta u^k(x, y-1)\varphi(x, y-1) + \Delta u^k(x, y+1)\varphi(x, y+1)] \} \\
 \Delta v^{k+1} = (1-\omega)\Delta v^k + \frac{\omega}{a_{22}} \{ b'_2 - a_{21}\Delta u^k + [\Delta v^k(x-1, y)\varphi(x-1, y) + \Delta v^k(x+1, y)\varphi(x, y) + \\
 \quad \Delta v^k(x, y-1)\varphi(x, y-1) + \Delta v^k(x, y+1)\varphi(x, y+1)] \}
 \end{cases} \quad (11)$$

式中: ω 为松弛因子。给定初始的 $u, v, \Delta u, \Delta v$, 从而得到 $a'_{11}, a'_{22}, a_{12}, b'_1, b'_2$, 利用(11)式进行迭代运算, 当前后两次的值之差接近于 0 时终止运算。

经过测试发现, Brox 光流估计算法的运行效率高, 可以估计较大的位移量, 并且对噪声有较好的鲁棒性。

2.2 面形测量原理

图 1 所示为光流法测量物体面形的光路设置。图 1 所示曲线为被测物体, 平面 N 为参考面, 点 $P(x_p, y_p, z_p), C(x_c, y_c, z_c)$ 分别为投影仪与 CCD 摄像机的光心位置。投影仪到参考面上投影光心 O

点的距离为投影距离, 即 $|OP| = L_p, \theta$ 为投影光轴与参考面法线间的夹角, 投影仪到参考面的垂直距离为 $|PP_\perp|, E_1$ 为观测点 D 在参考面上的垂点。则投影仪坐标 $x_p = L_p \sin \theta, z_p = L_p \cos \theta$ 。CCD 摄像机的光轴与参考面垂直, 垂点为 $C_\perp, CC_\perp \perp N$ 。 $|CC_\perp|$ 为 CCD 摄像机到参考面的距离, 是观察距离, 用 z_c 表示。通过对投影仪与摄像机进行标定, 即可得到摄像机位置 C 和投影仪位置 P 两点的坐标信息。

在放置物体之前, 参考面上条纹的光强分布可表示为

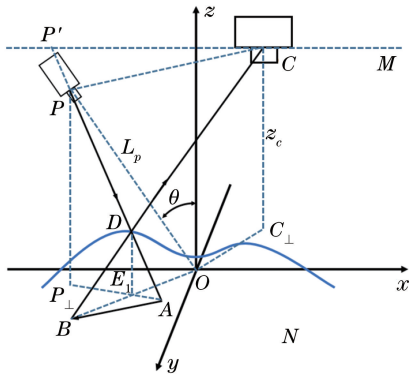


图 1 光流法面形测量光路图

Fig. 1 Optical path of surface shape measurement using optical flow method

$$I(x, y, t) = a + b \cos[2\pi(f_x x + f_y y)], \quad (12)$$

式中: a 为背景光强; b 为条纹对比度; f_x 和 f_y 为 (x, y) 处 x, y 方向的条纹频率。在 t 时刻, CCD 摄像机采集到的条纹图样的光强分布为

$$I_i(x_i, y_i, t) = a + b \cos[2\pi(f_{ix} x_i + f_{iy} y_i)], \quad (13)$$

式中: $f_{ix} = f_x / M_c$, $f_{iy} = f_y / M_c$ 为记录图像的条纹频率, M_c 为图像放大率。

放置物体后, 在 $t + \Delta t$ 时刻, 采集到的调制条纹图样的光强表达式为

$$I'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, t + \Delta t) = a + b \cos 2\pi[f_{ix}(x_i + \Delta x_i) + f_{iy}(y_i + \Delta y_i)]. \quad (14)$$

对于参考面上的任意观察点 $A(x, y)$, 放置物体前, 投影光线为 \vec{PA} ; 放置物体后, 该光线投射到物面上的 D 点, 对应的高度为 h 。由于物面的存在, 观察点 $A(x, y)$ 在 Δt 时间内往后移动到点 $B(x', y')$, x, y 方向上的位移量分别为 $\Delta x = x' - x$, $\Delta y = y' - y$ 。参考面上 $A(x, y)$ 和 $B(x', y')$ 对应 CCD 像面上的点 $A_i(x_i, y_i)$ 和 $B_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i)$, 像面上的变形量为 $\Delta x_i, \Delta y_i$ 。像面变形量与物面变形量的关系为 $\Delta x_i = M_c \Delta x$, $\Delta y_i = M_c \Delta y$ 。

条纹变形形成的光流即像面上观察点 $A_i(x_i, y_i)$ 移动的速度分量为

$$\begin{cases} u = \frac{\Delta x_i}{\Delta t} = M_c \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ v = \frac{\Delta y_i}{\Delta t} = M_c \frac{\Delta y}{\Delta t} \end{cases}, \quad (15)$$

由于对采集两幅图像的时间间隔没有要求, 为方便计算, 通常取 $\Delta t = 1$ 。

过 C 点作平面 $M // N$, 交 AP 或 AP 的延长线于点 P' , 由于 $P'CAB$ 四点共面, 故 $P'C // AB$ 。根据已知的各点坐标, 可以得出几条重要线段的长度:

$$\begin{cases} d_{AP} = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + z_p^2} \\ d_{BP} = \sqrt{(x' - x_p)^2 + (y' - y_p)^2 + z_p^2} \\ d_{AB} = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \\ d_{AC} = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + z_c^2} \\ d_{CP} = \sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2 + (z_p - z_c)^2} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $x' = x + \Delta x = x + \frac{u \cdot \Delta t}{M_c}$, $y' = y + \Delta y = y + \frac{v \cdot \Delta t}{M_c}$ 。由余弦定理可得

$$\begin{cases} \cos \angle CPA = \frac{d_{CP}^2 + d_{AP}^2 - d_{AC}^2}{2d_{CP} \cdot d_{AP}} \\ \cos \angle PAB = \frac{d_{AP}^2 + d_{AB}^2 - d_{BP}^2}{2d_{AP} \cdot d_{AB}} \end{cases}, \quad (17)$$

根据几何关系, 有

$$\begin{cases} \angle CPP' = \pi - \angle CPA \\ \angle CP'P = \angle PAB \end{cases}, \quad (18)$$

又由正弦定理可得

$$d_{CP'} = d_{CP} \frac{\sin \angle CPP'}{\sin \angle CP'P} = d_{CP} \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \angle CPP'}}{\sqrt{1 - \cos^2 \angle CP'P}}, \quad (19)$$

将(17)式和(18)式代入(19)式, 并结合图 1 中的几何关系, 可得出

$$h = \frac{d_{AB} \cdot z_c}{d_{CP'} + d_{AB}} = \frac{z_c \sqrt{d_{AB}^2 [2(d_{AP}^2 + d_{BP}^2) - d_{AB}^2] - (d_{AP}^2 - d_{BP}^2)^2}}{\sqrt{d_{AB}^2 [2(d_{AP}^2 + d_{BP}^2) - d_{AB}^2] - (d_{AP}^2 - d_{BP}^2)^2} + \sqrt{d_{AC}^2 [2(d_{AP}^2 + d_{CP}^2) - d_{AC}^2] - (d_{AP}^2 - d_{CP}^2)^2}}, \quad (20)$$

将(16)式中的线段长度代入(20)式中, 即可得到 D 点的高度 h 。在测量过程中, 通常点 C_{\perp} 与坐标原点

O 重合, 即投影中心与观察中心重合, 因此在数据模拟中, 可将摄像机光心 C 的横纵坐标 x_c, y_c 设置

为 0。

2.3 修正原理

图 1 所示的光路包含了投影仪与摄像机光心处于任意位置时的情况,在实际测量中,如果二者光心不在同一水平线上,将会导致测量结果与实际物体形状不一致,本节将讨论产生这一现象的原因,并提出了一种适用于光流法的修正方法。

为了便于分析,在二维坐标系下表示图 1,如图 2 所示。图 2 为投影仪与摄像机光心完全处于同一水平线时的情况。其中, P 、 C 分别表示投影仪与摄像机的光心位置,二者之间的距离为 d ,即 $d = |x_p - x_c|$;由于物体的置入,被测物体表面高度 h 处的两个不同位置点在参考面上会出现位移,该位移量大小记为 Δx_1 与 Δx_2 ; $\Delta x'_1, \Delta x'_2$ 表示 Δx_1 与 Δx_2 在像面上的对应位移量。

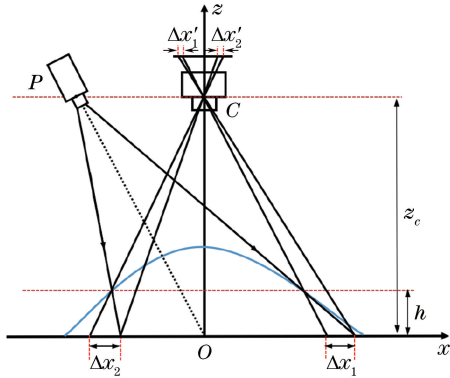


图 2 摄像机光心和投影仪光心处于同一高度时的光路设置
Fig. 2 Optical path setup when height of center of camera is at same height as that of projector

由图 2 中的几何关系容易得出

$$\frac{h}{z_c - h} = \frac{\Delta x_1}{d} = \frac{\Delta x_2}{d}, \quad (21)$$

即

$$\Delta x_1 = \Delta x_2. \quad (22)$$

由(22)式可知,两点在像面上的横向光流 u 也相等。但在实际操作过程中,投影仪与摄像机的光心很难完全处于同一水平线上。由图 2 容易看出,一旦 P 、 C 两点不在同一水平线上,光路中的相似结构将被破坏, Δx_1 与 Δx_2 不再相等,导致计算出的高度值与实际高度存在偏差,这也是测量结果与实际物体的形状不一致的原因。

修正光路如图 3 所示。由上述分析可知,当投影仪位于点 P' (点 P' 与 CCD 光心在同一水平线上)时,参考面上条纹的位移量将不产生误差,将 P' 移动到新的位置 P ,则在观察 D 点时,投影光线的入射角为 α ,投影光线与 CP' 的交点到投影仪的水

平距离为 Δp_x , 竖直距离为 Δp_z , 参考面上对应点的坐标为 x , 位移量 Δx 表示实际测量值, $\Delta x'$ 则为准确值,也就是修正之后的位移量。从图 3 容易看出,只要求出由投影仪移动引起的微小偏移量 δ , 即可得到修正后的位移量 $\Delta x'$ 。

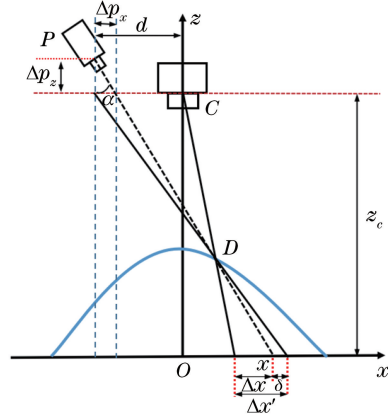


图 3 摄像机光心和投影仪光心不在同一水平线上的误差修正示意图
Fig. 3 Diagram of error correction when center of camera is not at same height as that of projector

由图 3 可知

$$\Delta p_x = \Delta p_z \cdot \tan \alpha = \Delta p_z \cdot \frac{x + d}{z_c}, \quad (23)$$

结合(16)式与图 3 中的几何关系易得

$$\delta = \frac{h \cdot \Delta p_z}{z_c - h} \cdot \frac{x + d}{z_c}, \quad (24)$$

则修正后的位移量可表示为

$$\Delta x' = \Delta x + \delta = \Delta x + \frac{h \cdot \Delta p_z}{z_c - h} \cdot \frac{x + d}{z_c}, \quad (25)$$

式中: $\Delta x = u \cdot \Delta t / M_c$ 。假设修正之后 D 点高度为 H , 由几何关系即可得出

$$H = \frac{\Delta x' \cdot z_c}{d + \Delta x'} = \frac{z_c [z_c (z_c - h) \Delta x + (x + d) h \Delta p_z]}{z_c (z_c - h) (\Delta x + d) + (x + d) h \Delta p_z}. \quad (26)$$

(26)式即为测量结果 h 的修正公式。在实验中,只要完成摄像机和投影仪二者光心位置的标定,结合本文提出的计算方法与修正方法,即可高精度地恢复物体面形信息,避免传统测量技术中测量结果与实际物体形状不一致的问题。

3 理论模拟

3.1 光流法面形测量数值模拟与分析

如图 4 所示,利用 MATLAB 模拟产生一个球冠并将其作为被测物面,物面大小为 $40 \text{ mm} \times$

40 mm,球冠半径为 20 mm,球冠最大高度 h_{\max} 为 10 mm,球冠高度表达式为

$$h(x,y) = -(R - h_{\max}) + \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}, \quad (27)$$

式中: R 为球冠半径。

如图 5(a)所示,根据(14)式模拟生成像素大小为 512×512 的平行条纹图样,将其作为参考面采集到的条纹图样,其中 $a = 128, b = 60, f_{ix} = 0.4 \text{ mm}^{-1}, f_{iy} = 0$ 。根据图 1 所示的几何模型,设置成像距离 $z_c = 2000 \text{ mm}$,投影距离 $L_p = 2000 \text{ mm}$,投影角度 $\theta = \pi/100$,图像放大率 $M_c = -12.8 \text{ pixel} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。由于投影角度很小,可以近似认为投影仪与摄像机处于同一高度。CCD 摄像机采集到的放置物体后的调制条纹如图 5(b)所示。

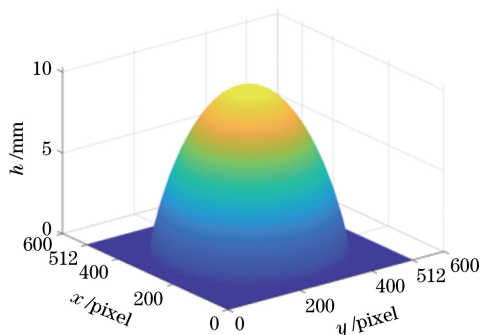


图 4 被测球冠的实际高度分布

Fig. 4 Actual height distribution of measured spherical crown

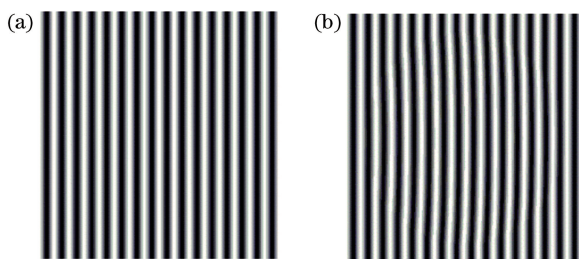


图 5 模拟的像面图样。(a)变形前条纹;(b)变形后条纹

Fig. 5 Simulated fringe patterns. (a) Fringe before deformation; (b) fringe after deformation

为了降低光流场的计算误差,学者分析了算法中权重系数 γ 与平滑因子 α 的取值对平均角度误差的影响,发现 $\gamma = 10, \alpha = 100$ 时 Brox 光流估计算法对噪声具有较好的鲁棒性。本文利用 Brox 光流算法估计了图 5 所示条纹之间的光流场 (u, v) ,结合(20)式即可得到物体的高度分布,计算结果如图 6(a)所示。取理论值(图 4 所示)与计算值[图 6(a)所示]在 $y = 256 \text{ pixel}$ 横截面处的高度数据进行对

比,结果如图 6(b)所示。可以看出, Brox 光流估计算法的计算结果与理论值吻合较好,说明利用该方法测量三维物体面形是可行的。图 6(c)为入射角分别为 $\pi/90, \pi/95, \pi/100$ 时 $y = 256 \text{ pixel}$ 截面上计算值的绝对误差,可以看出,随着入射角的减小,绝对误差减小。这是由于当入射角减小时,前后两帧图像之间的变形量也会相应减小,而光流场算法对变形量的大小非常敏感,因此应尽可能地减小入射角以有效地增加测量精度。在不引入噪声的情况下,当入射角小于 $\pi/100$ 时,绝对误差几乎为 0。但当入射角等于 0,即投影仪与摄像机光心的连线垂直于参考平面时,理论上在图像中心位置无法计算出光流,因此本文提出的方法要求入射角不为 0。当然,产生误差的因素除了入射角的大小之外,还应综合考虑被测物体的尺寸、投影距离、观察距离等其他检测条件,减小入射角只是缩小变形量的手段之一,适当地增大投影距离与观察距离,也可以减小测量误差。当入射角为 $\pi/100$ 且引入高斯噪声时测量值的绝对误差如图 6(d)所示,信噪比分别设置为 10 dB 与 20 dB 时,绝对误差均小于 0.4 mm,说明 Brox 光流估计算法对噪声有较好的鲁棒性。

在数值模拟过程中,需要输入投影距离 L_p ,观察距离 z_c 以及入射角 θ ,这些参数在数值模拟中均为定值,其中, $L_p = 2000 \text{ mm}, z_c = 2000 \text{ mm}$ 。但在实验过程中,这些参数需要利用光学方法进行标定,存在一定的误差。为了说明标定误差对计算结果产生的影响,在入射角均为 $\pi/100$ 的情况下,将观察距离 z_c 与投影距离 L_p 分别增加 5 mm,以这个增量作为标定误差,分别计算面形高度的绝对误差,并与不增加时的面形高度绝对误差进行对比,对比图线如图 7 所示。可以看出,无论改变 z_c 还是改变 L_p ,变化前后的两条曲线均基本重合,再结合图 6,不难看出,在 z_c, L_p 与 θ 这三个主要参量中, z_c 和 L_p 的轻微变化对面形计算结果产生的影响很小,而 θ 对计算结果产生较大的影响。因此,在实验中应尽量减小入射角度以降低测量误差。

3.2 误差修正模拟

3.1 节模拟了投影仪与摄像机处于同一高度时的情况,本节设置成像距离 $z_c = 2000 \text{ mm}$,投影距离 $L_p = 1800 \text{ mm}$,投影角度 $\theta = \pi/100$,则 $\Delta p_y \approx 200 \text{ mm}$ 。图 8 为修正后的球冠计算结果。从图 8(a)中可以看出,当投影仪与摄像机的光心处于不同高度时,计算结果出现了明显的倾斜现象。利用(26)式对图 8(a)的结果进行修正,修正结果如图

8(b)所示。图 8(c)为倾斜结果与理论结果在 $y = 256$ pixel 横截面处的数值对比,图 8(d)为修正后的结果与理论结果在 $y = 256$ pixel 横截面处的数值对比。模拟结果显示,修正之后的结果与理论值拟合

较好。如图 8(e)所示,在不考虑边缘效应的情况下,修正之后的结果的绝对误差不超过 0.12 mm,说明该修正方法可行。

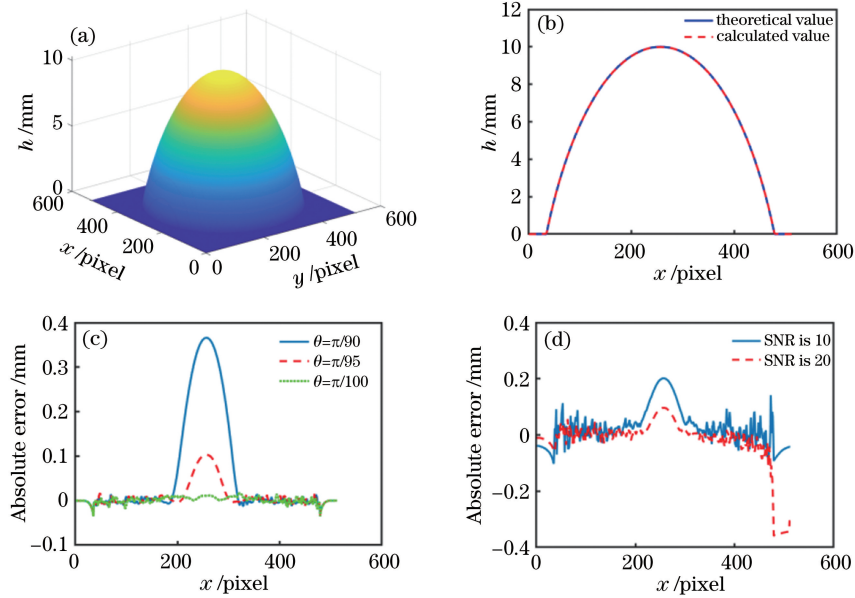


图 6 面形模拟计算结果。(a)球冠面形分布的计算值;(b)当入射角为 $\pi/100$ 时, $y = 256$ pixel 截面上的理论值与计算值的对比;(c)不同入射角下 $y = 256$ pixel 截面上的理论值与计算值的绝对误差;(d)分别加入 10 dB 与 20 dB 高斯噪声时计算值的绝对误差

Fig. 6 Simulated results of surface shape. (a) Calculated height distribution of spherical crown; (b) comparison between calculated value and true value at cross section of $y = 256$ pixel when incident angle is $\pi/100$; (c) absolute errors between calculated values and theoretical values at cross section of $y = 256$ pixel under different incident angles; (d) absolute errors of calculated values when Gaussian noises with 10 dB and 20 dB are added, respectively

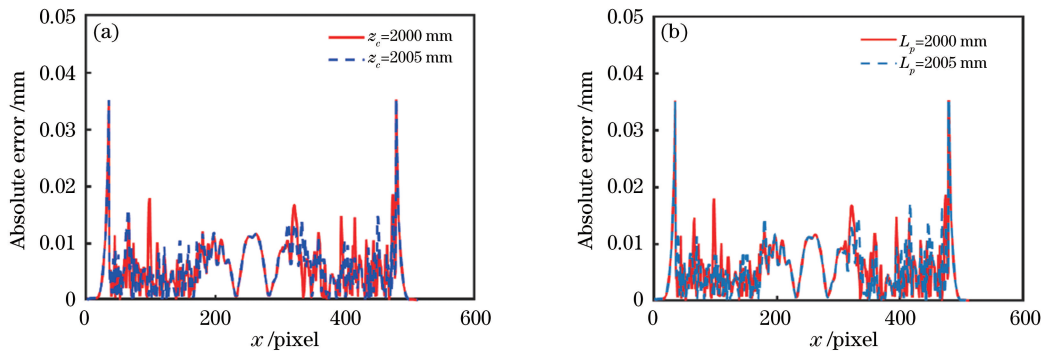


图 7 标定误差对计算结果的影响。(a) z_c 增加 5 mm 前后面形高度绝对误差的对比;
(b) L_p 增加 5 mm 前后面形高度绝对误差的对比

Fig. 7 Influence of calibration error on calculated results. (a) Comparison of absolute errors of surface height before and after z_c increased by 5 mm; (b) comparison of absolute errors of surface height before and after L_p increased by 5 mm

4 实验验证

根据光流场平滑条件可知,放入物体前后的投影条纹不能有闪烁点,并且被测物体与参考平面之间不宜有太大的色差,否则将会影响条纹变化前后

对应像素点的匹配,从而产生测量误差。要满足测量精度要求,条纹变形不能太大^[13],因此投影角度应尽可能小。小角度投影在保证条纹小变形的同时,也保证了光流朝一个方向,可使得光流光滑。如图 9 所示,该实验选用特征比较明显,左右对称且含

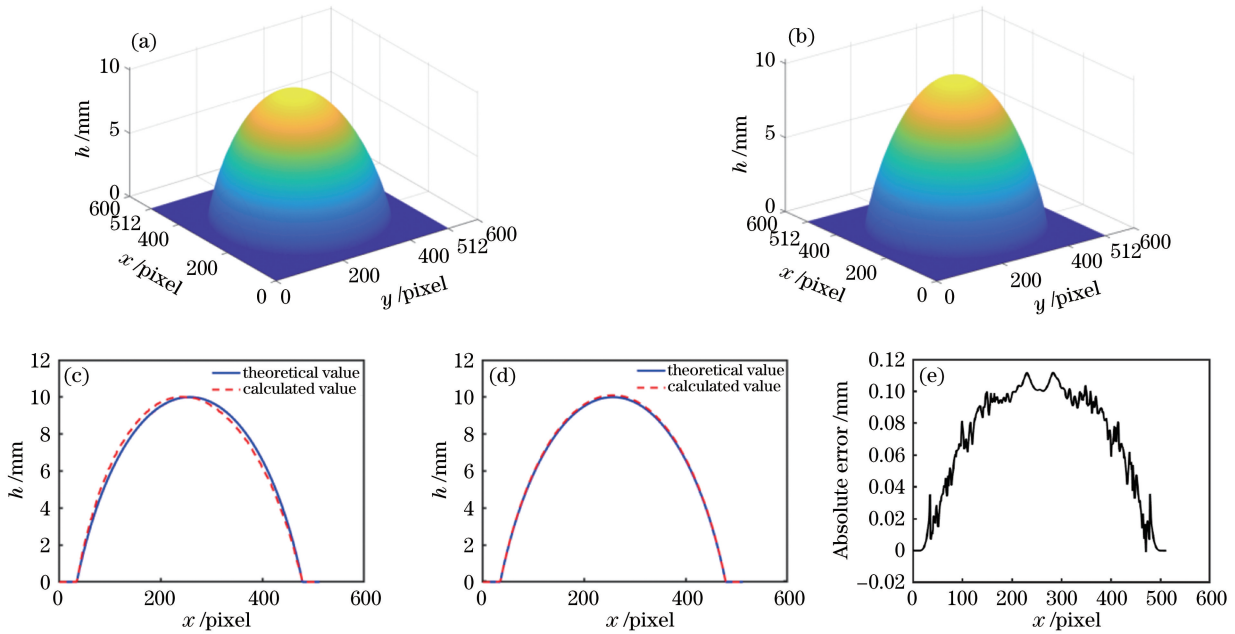


图 8 修正后的球冠计算结果。投影仪光心与摄像机光心处于不同高度时的(a)修正前和(b)修正后的球冠高度计算结果；(c)修正前和(d)修正后测量值与实际值在 $y=256$ pixel 截面上的数值对比；(e)修正结果的绝对误差
 Fig. 8 Calculated results of spherical crown after correction. Calculated results (a) before and (b) after correction when center of projector is not at same height as that of camera; comparison between calculated value and true value at cross section of $y=256$ pixel (c) before and (d) after correction; (e) absolute errors of results after correction

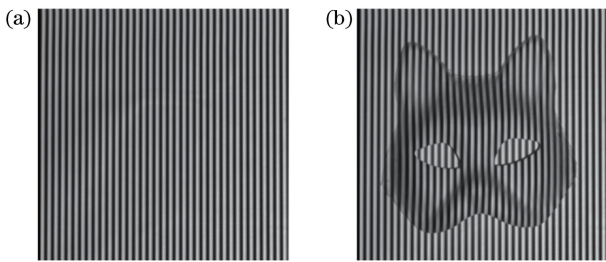


图 9 实验条纹图。(a)调制前;(b)调制后
 Fig. 9 Fringe patterns in experiment. (a) Before modulation; (b) after modulation

有空洞部分的面具作为被测物体,采集加入面具前后的两幅图像,分别使用傅里叶变换法和光流法计算面具的高度分布。通过与传统测量技术的实验结果进行对比,验证了光流法测量复杂面形的可行性和准确性。实验光路如图 1 所示,为了提高测量精度并实现第 3.2 节中对实验结果的修正,首先基于张正友标定法^[17-18],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,测得实验中投影距离为 1700 mm,成像距离为 1860 mm,CCD 摄像机与投影仪之间的水平距离为 75 mm,竖直距离为 180 mm,CCD 摄像机与投影仪的光心不在同一个高度上。

首先,利用傅里叶变换法对面具面形进行了测量,得到了面形相位分布。由于空洞边缘处容易引

入噪声,需要进行阈值滤波,滤波后面形相位分布转换成高度分布,图 10(a)为高度分布的二维表示。然后利用光流法根据(20)式计算得到高度分布,如图 10(b)所示。在两种方法所得的实验结果中,取 $y=300$ pixel 横截面(穿过面具眼睛的空洞区域)处的数据作对比,对比图线如图 10(c)所示,可以看出两者吻合较好。

再利用(26)式对光流法的实验结果进行修正,得到的修正结果如图 11 所示。在图 10(b)和图 11 所示的修正前后的实验结果中,取 $y=300$ pixel 横截面(穿过面具眼睛的空洞区域)处的数据作对比,对比结果如图 12 所示。可以看出,在修正处理之前,面具高度呈左高右低,利用本文提出的方法进行修正,即可有效地解决这一问题。但由于涉及横向光流场 u ,因此该方法仅适用于对光流法的结果进行修正。

5 结 论

提出了一种基于Brox光流计算的面形测量新方法以及适用于光流法测量结果的修正方法。该面形测量新方法操作简单,只需要两幅图像即可测得物体面形,测量精度较高。模拟结果表明,在小角度投影的情况下,可以保证测量的精确度,并且随着投

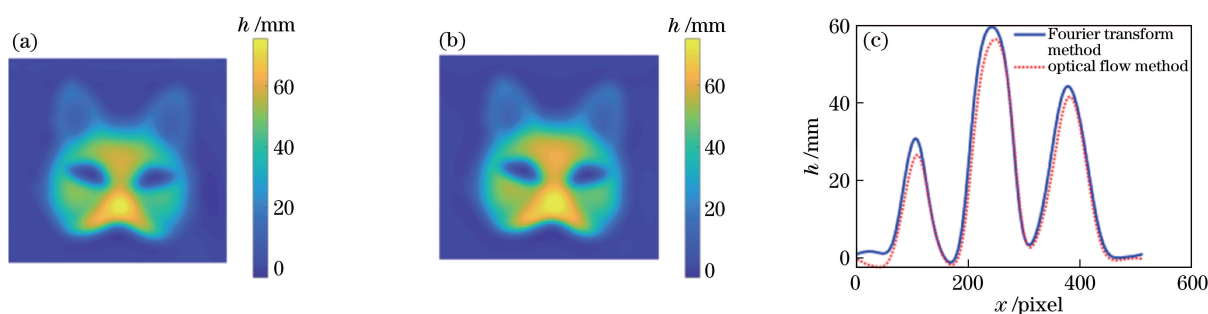


图 10 修正前面具测量结果。(a)傅里叶变换法和(b)光流法所得的高度二维分布;(c)相移法与光流法所得结果在 $y=300$ pixel 横截面处的数据对比

Fig. 10 Measured results of mask before correction. 2D height distributions obtained by (a) Fourier transform method and (b) optical flow method; (c) comparison of data obtained by phase shift method and optical flow method at cross section of $y=300$ pixel

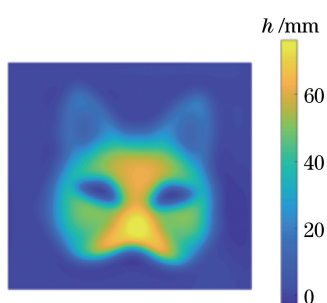


图 11 修正后光流法所得的高度二维分布

Fig. 11 2D height distribution of mask obtained by optical flow method after correction

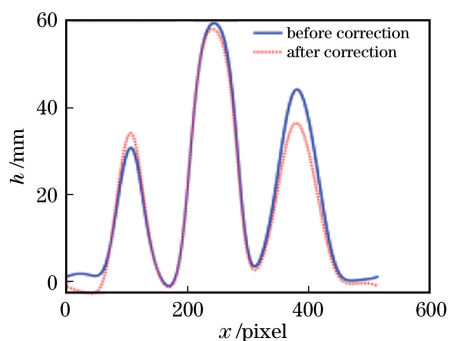


图 12 修正前后的测量结果在 $y=300$ pixel 截面处的数据对比

Fig. 12 Comparison of measured results at cross section of $y=300$ pixel before and after correction

影角的减小,相对误差降低。通过与傅里叶变换法进行对比,证明了该面形测量新方法的可行性。对于投影仪与摄像机的光心不在同一高度所引起的测量误差问题,所提出的修正方法能够有效解决。实验中两光心很难位于同一高度,因此提出的修正方法在一定程度上降低了实验难度。在实际应用中,结合所提出的计算方法与修正方法,可高精度地测量物体的面形高度分布。但光流面形测量技术也存

在一些问题,如背景光的影响、被测物体与背景颜色不一致等,将在日后的工作中进一步研究这些问题。

参 考 文 献

- [1] Godin G, Beraldin J A, Taylor J, et al. Active optical 3D imaging for heritage applications[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2002, 22(5): 24-36.
- [2] Mao C L, Lu R S, Dong J T, et al. Overview of the 3D profilometry of phase shifting fringe projection [J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(5): 628-640.
毛翠丽, 卢荣胜, 董敬涛, 等. 相移条纹投影三维形貌测量技术综述[J]. 计量学报, 2018, 39(5): 628-640.
- [3] Hung Y Y. Practical three-dimensional computer vision techniques for full-field surface measurement [J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 143.
- [4] Fitts J M. High-speed 3-D surface measurement surface inspection and reverse-CAD system: US5175601[P]. 1992-12-29.
- [5] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: Whither we are? [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 133-140.
- [6] Dai M L, Yang F J, Liu C, et al. A dual-frequency fringe projection three-dimensional shape measurement system using a DLP 3D projector[J]. Optics Communications, 2017, 382: 294-301.
- [7] Chen K, Xi J T, Yu Y G, et al. Three-dimensional measurement of object surfaces with complex shape and color distribution based on projection of color fringe patterns[J]. Applied Optics, 2013, 52(30): 7360-7366.
- [8] Zhong K, Li Z W, Shi Y S, et al. Fast phase measurement profilometry for arbitrary shape objects without phase unwrapping[J]. Optics and Lasers in

- Engineering, 2013, 51(11): 1213-1222.
- [9] Dai Q, Sun P, Lei Z F, 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.
- [10] Li X Z, Jia S M, Yin X L, et al. Review on optical flow vector fields estimation algorithm[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39 (11): 1638-1643.
- [11] Horn B K P, Schunck B G. Determining optical flow [J]. Artificial Intelligence, 1981, 17(1/2/3): 185-203.
- [12] Lucas B, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C]// Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, August 24-28, 1981, Vancouver, BC, Canada. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1981: 674-679.
- [13] Lei Z F, Sun P, Dai Q. 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力和测量范围 [J]. 光学学报, 2020, 40 (3): 0320001.
- [14] Brox T, Bruhn A, Papenber N, et al. High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping [M]//Pajdla T, Matas J. Computer vision—ECCV 2004. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 2004, 3024: 25-36.
- [15] Li B, Fu Y J, Zhang J C, et al. Period correction method of phase coding fringe [J]. Optical Review, 2015, 22(5): 717-723.
- [16] Wang Z Y, Du H, Bi H B. Out-of-plane shape determination in generalized fringe projection profilometry [J]. Optics Express, 2006, 14 (25): 12122-12133.
- [17] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330-1334.
- [18] Liu F C, Li A D, Ma Z Z. Method for calibration of structured-light vision based on projector and camera [J]. Computer Engineering and Applications, 2014 (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 (24): 168-172.