

文章编号: 0253-2239(2009)06-1570-07

基于相位追踪的水中物体三维面形测量

王庆丰 张启灿 刘元坤

(四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610065)

摘要 提出一种基于相位追踪和光线追迹算法测量水中物体三维形貌的新方法。该方法利用正弦面结构光来记录物体的三维面形数据, 首先由投影仪投出正弦条纹图来调制淹没于水中物体的三维信息, 摄像机拍摄获得物体表面的变形条纹图, 然后利用相位追踪算法确定投影条纹和变形条纹之间的对应点, 最后对相应的匹配点对进行光线追迹计算后, 可以恢复出物体的三维形貌。由于使用面结构光进行测量, 无需移动装置来实现对物体的一维或二维全场扫描, 这样既节约了经济成本又缩短了测量时间。利用该方法进行了实际测量, 得到了较好的重建结果, 证明了本方法的正确性和可行性。

关键词 三维面形测量; 正弦光栅; 水中物体; 相位追踪; 光线追迹

中图分类号 TM930.12⁺6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1570

Three-Dimensional Measurement of Object in Water by Tracking Phase Value

Wang Qingfeng Zhang Qican Liu Yuankun

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract A new method based on phase tracking algorithm and ray tracing algorithm is proposed for measuring the three-dimensional (3-D) shape of object in water. It uses digital sinusoidal fringe to record the information of object's 3-D shape. The phase tracking is taken to define the according points in the deformed pattern captured by the camera and the fringe pattern projected by the projector. Then the object's 3-D shape is calculated with ray tracing algorithm. This method uses 2-D patterned fringe to obtain the 3-D shape of object and the scanner is not needed, so the speed of reconstruction can be greatly increased and the cost of instruments will descend. An actual measurement is done, the perfect results of the reconstructed shapes prove its correctness and feasibility.

Key words three-dimensional shape measurement; sine patterned fringe; object in water; phase tracking; ray tracing

1 引言

光学主动式三维面形测量广泛应用于机器视觉、工业自动检测、生物医学、文物保护和虚拟现实等领域,它具有非接触,无损坏的优点。在某些领域中,可能需要在不同介质中完成对物体三维面形的测量,如在医学研究中可能需要测量某些浸放在福尔马林液中器官的三维面形,在文物数字博物馆工程中可能需要测量某些保存在特殊溶液中文物的三维面形等。在这种情况下,由于光线在经过不同介

质时传播方向会发生变化,从而一般的测量方法会产生较大的误差,例如利用精度较高的相移方法^[1]测量物体的三维面形,相应实验中可以透过液体获得一个相位分布,但由于光线传输过程中穿过了不同折射率的媒介,测量出来的物体三维数据在有液体浸泡时出现失真现象,重建物体已不能正确地反映物体的真实面形。鉴于以上原因,Atsushi Yamashita^[2,3],丁万山^[4]等提出了用点激光或线激光通过光线追迹的办法来测量物体的三维面形,很

收稿日期: 2008-09-10; **收到修改稿日期**: 2008-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(60807006)资助课题。

作者简介: 王庆丰(1982—),男,硕士研究生,主要从事三维测量和机器视觉方面的研究。E-mail: qfwanglz@163.com

导师简介: 张启灿(1974—),男,博士,副教授,主要从事光学三维传感、动态过程三维测量和相位展开方面的研究。

E-mail: zhqc@email.scu.edu.cn(通信联系人)

好地解决了在不同介质中物体三维面形测量的问题,但是由于实验用的是点或线光源,需要在二维或一维方向上进行扫描,这样无形中增加了测量的复杂度并使测量设备成本变高。本文利用正弦条纹图来作为三维信息的加载和传递工具,经过相关的处理,就可以计算出物体的三维面形数据,使得测量过程简单快捷。

2 测量原理

2.1 原理简介

根据双目视觉原理,如果知道物体上一点分别在两个摄像机图像中的对应点,就可以确定出此点的三维位置。如果将其中一个摄像机换为投影仪的话,则可以实现主动式的三维测量。本文方法就是利用这个原理,由投影仪投射正弦光栅到物体并由摄像机将物体表面的变形条纹记录下来,利用投影条纹和变形条纹的相位对应关系,确定物体上一点在投影仪像素坐标系和摄像机像素坐标系中的对应位置,然后利用光线追迹原理追踪光线在两种介质中的传播,就可以确定出每个点的三维空间位置,进而恢复出物体的三维面形。

2.2 测量模型

测量模型如图 1 所示。测量系统由投影仪和摄像机构成,其所处空间的介质为空气,物体所处空间的介质为水,其媒介界面如图所示。虽然实际中光线是从投影仪发出经过物体反射后进入到 CCD 相机的镜头中成像,但为光线追迹叙述方便,并依据光线可逆原理,假定 CCD 相机和投影仪都发出光线,相对应的光线交点就是待测的三维数据点。设 CCD 相机的光心 O 为测量中世界坐标系的原点, Z 轴与光轴同向,坐标系为右手系。图 1 中画出的是一条从投影仪发出的经过物体反射后被 CCD 相机接收的光线。按上面做的假定,设 $K(x_g, y_g, z_g)$ 是来自 CCD 相机视线方向的光线与折射面的交点, $M(x'_g, y'_g, z'_g)$ 是来自投影仪方向的光线与折射面的交点, $O'(x_0, y_0, z_0)$ 是投影仪中心点在以摄像机镜头为中心的世界坐标系中的坐标值, $Q(u_0, v_0)$ 是光线在 CCD 相机上成像后在像素坐标系中的值, i 和 r 分别为来自 CCD 相机的视线在折射面的入射角和折射角, i' 和 r' 分别是来自投影仪的光线在折射界面的入射角和折射角。

定义 $(\lambda, \mu, \nu)^T$ 为折射界面的单位法向量, h 为世界坐标系原点到介质面的距离, $(\alpha, \beta, \gamma)^T$ 和 $(\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$ 为来自 CCD 相机的视线的折射前后光线的

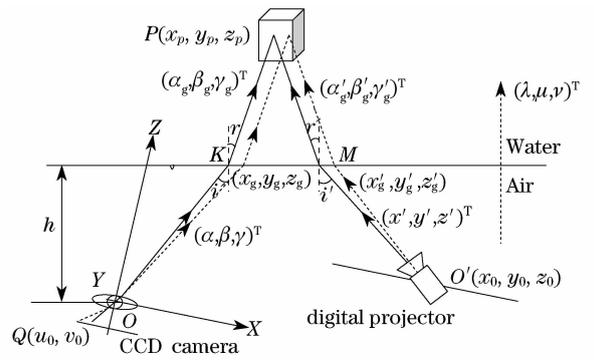


图 1 水中物体三维测量原理图

Fig. 1 Principle map of 3-D measurement for object in water

单位向量, $(\alpha', \beta', \gamma')^T$ 和 $(\alpha'_g, \beta'_g, \gamma'_g)^T$ 为来自投影仪的光线折射前后的单位向量。在经过对系统仪器的标定后测出 $(\lambda, \mu, \nu)^T, h$ 等必要的参数,就可以利用光线追迹的办法求出物体的三维面形。

2.3 相位追踪

本文方法中,通过相位追踪来确定投影条纹和变形条纹的相位对应关系,并进而确定物体上任一点在投影仪像素坐标系和摄像机像素坐标系中的位置对应点 (u_0, v_0) 和 (u, v) 。为获得较高精度,采用相移算法来精确测定相位。计算机生成的正弦条纹图可以表示为

$$I_0(u_0, v_0) = a_0(u_0, v_0) + b_0(u_0, v_0) \cdot \sin \Phi_0(u_0, v_0), \quad (1)$$

式中 $a_0(u_0, v_0)$ 为生成条纹的背景光强, $b_0(u_0, v_0)/a_0(u_0, v_0)$ 为条纹的对比, $\Phi_0(u_0, v_0)$ 表示投影条纹的相位分布。当此条纹被投影仪投射到物体上时,从摄像机获得的变形条纹可表示为

$$I(u, v) = r(u, v)[a(u, v) + b(u, v) \sin \Phi(u, v)], \quad (2)$$

式中 $r(u, v)$ 为物体表面的不均匀反射率,式中 $a(u, v)$ 为背景光强, $b(u, v)/a(u, v)$ 为条纹的对比, $\Phi(u, v)$ 表示变形条纹的相位分布。当投影的正弦光栅被移动其周期的 $1/N$ 时,条纹图的相位被移动 $2\pi/N$ 产生一个新的强度函数。使用三个或更多的对应不同相位移值的条纹图,相位 $\Phi(u, v)$ 就可以独立于 (2) 式中的其它参数而被解出。实验中使用的是四步相移,相移增量为 $\pi/2$, 相应的四帧条纹图为

$$\begin{aligned} I_1(u, v) &= r(u, v)[a(u, v) + b(u, v) \sin \Phi(u, v)] \\ I_2(u, v) &= r(u, v)\{a(u, v) + b(u, v) \cdot \sin[\Phi(u, v) + \pi/2]\} \\ I_3(u, v) &= r(u, v)\{a(u, v) + b(u, v) \cdot \sin[\Phi(u, v) + \pi]\} \end{aligned}$$

$$I_4(u, v) = r(u, v) \{a(u, v) + b(u, v) \cdot \sin[\Phi(u, v) + 3\pi/2]\}, \quad (3)$$

联立(3)式四个方程,可以计算出相位函数^[5~7]

$$\Phi(u, v) = \arctan[I_4(u, v) - I_2(u, v)] / [I_1(u, v) - I_3(u, v)], \quad (4)$$

$\Phi(u, v)$ 为变形条纹中像素坐标 (u, v) 对应的相位分布,由相位对应关系有

$$\Phi(u, v) = \Phi_0(u_0, v_0), \quad (5)$$

由此式可以求出物体上任一点在投影仪像素坐标系和摄像机像素坐标系中的位置对应点 (u_0, v_0) 和 (u, v) 。然后利用光线追迹就可以计算出此点的三维坐标值,进而计算出物体的三维面形信息。

2.4 光线追迹原理

2.4.1 来自 CCD 相机的光线追迹

CCD相机的成像原理采用 Heikkila 的畸变模型^[8],将拍摄图像的像素坐标系 $Q(u, v)$ 转变为摄像机坐标系中的归一化坐标

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 a_{ij} 为 CCD 相机的内参数。来自 CCD 相机视线方向的光线方向向量 $(\alpha, \beta, \gamma)^T$ 为

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (7)$$

从 CCD 相机视线来的光线与折射界面的交点 $K(x_g, y_g, z_g)$ 为

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \frac{h}{\lambda\alpha + \mu\beta + \nu\gamma} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}. \quad (8)$$

对于折射后的光线方向向量 $(\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$, 根据折射定律和相关数学知识,其可以表示为折射界面的单位法向量与折射前光线的方向向量的线性和^[2]

$$\begin{bmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + q \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中 p 和 q 为常数。由 $(\lambda, \mu, \nu)^T, (\alpha, \beta, \gamma)^T, (\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$ 并利用光学折射定律和相关的数学知识,可以求出折射后光线的方向向量为

$$\begin{bmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{bmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \left(\cos \gamma - \frac{n_1}{n_2} \cos i \right) \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为空气和水中的折射率。最后由以上所求可以确定 CCD 相机光线经过折射面后的光线在摄像机坐标系中的直线方程。

2.4.2 来自投影仪的光线追迹

投影仪的投影成像原理同样采用 Heikkila 的畸变模型^[8],将投影图像的像素坐标系 $Q(u_0, v_0)$ 转变为投影仪坐标系中的归一化坐标

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & a'_{13} \\ a'_{21} & a'_{22} & a'_{23} \\ a'_{31} & a'_{32} & a'_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_0 \\ v'_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 a'_{ij} 为投影仪的内参数。然后由标定出的摄像机和投影仪的关系将 $(x', y', z')^T$ 转换为摄像机坐标系下的坐标

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \left[\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} - \mathbf{T} \right], \quad (12)$$

\mathbf{R} 为摄像机坐标系和投影仪坐标系的转置矩阵, \mathbf{T} 为投影仪的坐标原点在摄像机坐标系中的坐标矩阵,两者由标定确定。来自投影仪视线方向的光线方向向量 $(\alpha', \beta', \gamma')^T$ 为

$$\begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}. \quad (13)$$

从投影仪视线来的光线与折射界面的交点 $M(x'_g, y'_g, z'_g)$ 为

$$\begin{bmatrix} x'_g \\ y'_g \\ z'_g \end{bmatrix} = \frac{h}{\lambda\alpha' + \mu\beta' + \nu\gamma'} \begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{bmatrix}. \quad (14)$$

对于折射后的光线方向向量 $(\alpha'_g, \beta'_g, \gamma'_g)^T$, 根据折射定律和相关数学知识,其可以表示为折射界面的单位法向量与折射前光线的方向向量的线性和^[2]

$$\begin{bmatrix} \alpha'_g \\ \beta'_g \\ \gamma'_g \end{bmatrix} = p' \begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{bmatrix} + q' \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中 p' 和 q' 为常数。由 $(\lambda, \mu, \nu)^T, (\alpha', \beta', \gamma')^T, (\alpha'_g, \beta'_g, \gamma'_g)^T$ 并利用光学折射定律和相关的数学知识,可以求出折射后光线的方向向量为

$$\begin{bmatrix} \alpha'_g \\ \beta'_g \\ \gamma'_g \end{bmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{bmatrix} + \left(\cos \gamma' - \frac{n_1}{n_2} \cos i' \right) \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为空气和水中的折射率。由以上所求可以确定投影仪光线经过折射面后在摄像机坐标系中的直线方程。

2.4.3 光线交点求解

分别追踪出摄像机和投影仪的光线在经过介质面后的直线方程式,理论上两条光线方程的交点就是物体上的一个三维点信息,不过实际中两条直线方程很少有交点。不失一般性,如图 2 所示,取两条直线最短距离处所对应的坐标点 P_1 和 P_2 的中点 P 为物体的三维坐标点

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_1 + x_2 \\ y_1 + y_2 \\ z_1 + z_2 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

两条光线的直线方程已经由上面求解得出,然后计算出两直线方程在最短距离处的坐标后按(17)式即可解出物体的三维点数据,进而计算出物体的三维面形。

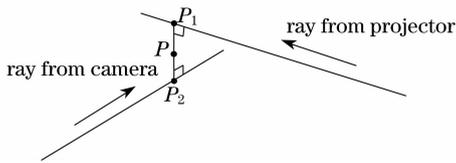


图 2 确定交点 P 的三维位置

Fig. 2 Determination of the 3-D position of point P

3 实验结果及分析

3.1 实际测量

为更好地验证本文方法,我们进行了实际测量。测量中使用的摄像机为佳能 E503 单反相机,投影仪为三洋液晶投影仪,空气折射率取 1,水折射率取 1.33,测量物体为一个半圆柱物体和一个真人手,测量物体放在一盛水的方型玻璃鱼缸中。实际测量中光线通过鱼缸侧壁照到物体上,所以此时光线要经过三种介质后才到达物体表面。鱼缸的实验用侧壁的玻璃厚度为 0.5 cm,玻璃折射率取 1.5,实际测量中光线通过三种介质,将 2.4 节光线追迹原理加以拓展,可以成功应用于此类情况。

3.2 系统标定

首先进行投影仪和摄像机的标定^[9~12]。考虑到镜头畸变的影响,在 Bouguet 介绍的 Matlab toolbox 工具箱(采用的是 Heikkila 的畸变模型^[8],其主要考虑了径向畸变和偏心畸变。)基础上进行了改进并用于实际标定中。标定摄像机和投影仪与标定双摄像机原理相同,不过由于投影仪的存在,标定方法以及标定的具体实现则与之相异。实验中采用二维平面的棋盘格进行标定。为便于相位的展开并确保展开相位的正确性,提出一种改进的棋盘格靶标,如图 3 所示。标定时在靶标上分别投影水平方向和竖

直方向的正弦条纹,利用投影正弦条纹的相位和坐标关系标定投影仪,进而标定出测量系统参数^[12]。利用此方法标出摄像机和投影仪各自的内参数以及两者之间的位置参数。

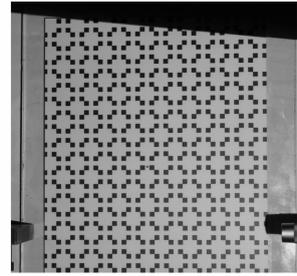


图 3 改进的靶标

fig. 3 Improved pattern on the calibration plane of a target

其次,标定介质面的平面方程。在完成摄像机和投影仪的标定后,投射一幅有多个规则排布的十字叉标记点的图像到介质表面,利用双目视觉原理求出标记点中心在摄像机坐标系中的三维坐标,然后由最小二乘法拟合出介质面的平面方程。

3.3 测量和结果分析

投射正弦编码条纹图到物体并获取图像。投射图像为 768 pixel × 1024 pixel 大小,条纹周期为 16 pixel。拍摄获得的图像为 1152 pixel × 1728 pixel 大小。实际测量中将被测物体在无水和有水两种情况下各测量一次,无水实验数据用双目视觉算法和光线追迹算法两种方法进行物体面形数据的恢复,有水的实验数据经光线追迹恢复出物体面形,这样可将不同情况下得出的面形数据之间做比较,以更好地验证本文方法的正确性。

图 4 为实际拍摄的图像,图 4(a)为条纹图,图 4(b)为无条纹物体图像。

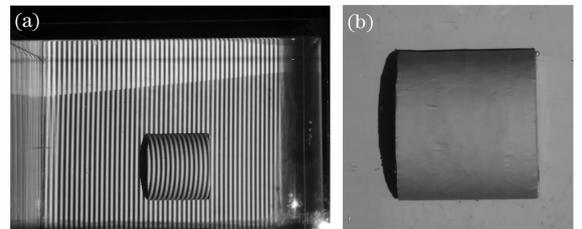


图 4 测量物体 (a)拍摄得到的图像(b)没有条纹的测量物体图像

Fig. 4 Measured object. (a) Captured image, (b) captured image without fringe

同一测量系统在相同系统参数下,三种测量情景下求解出的最终面形数据如下图所示。图 5 是无水时利用双目视觉方法恢复面形在两视角下的图

像。图 6 是无水时利用本文方法恢复面形在两视角下的图像。图 7 是有水时利用本文方法恢复面形在两视角下的图像。

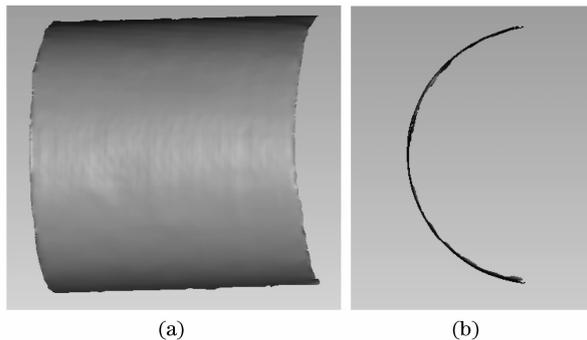


图 5 无水时双目视觉恢复物体三维面形
(a)正视图,(b)侧视图

Fig. 5 3-D shape of object calculated with binocular vision without water

(a) Elevation, (b) side view

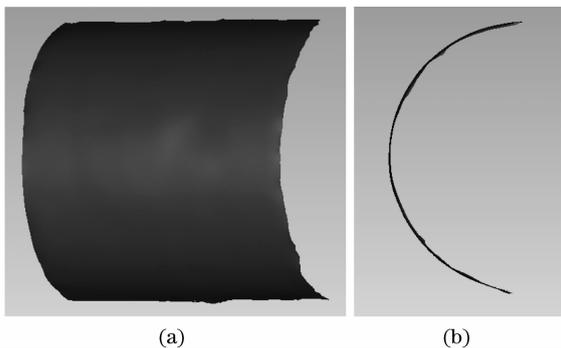


图 6 无水时光线追迹恢复物体三维面形
(a)正视图,(b)侧视图

Fig. 6 3-D shape of object calculated with ray tracing without water

(a) Elevation, (b) side view

表 1 三种情景恢复物体面形的直径和棱长测量值比较

Table 1 Comparison of the length of the object's diameter and arris in three cases

Times		1	2	3	4	5	Average
Binocular stereo vision without water	Diameter /mm	67.283	68.201	67.979	67.822	68.016	67.860
	Length of arris /mm	67.112	67.532	66.808	67.055	67.511	67.204
Ray tracing without water	Diameter /mm	67.013	67.788	67.176	67.986	67.868	67.566
	Length of arris /mm	66.494	67.421	66.456	66.435	66.531	66.667
Ray tracing with water	Diameter /mm	67.977	67.109	67.964	67.787	67.658	67.699
	Length of arris /mm	67.322	66.499	66.925	67.100	66.992	66.968

物体的棱和直径的实际值分别为 68.00 mm 和 68.55 mm。从图 8 比较结果和表 1 的测量数据可以看出在无水时由双目立体视觉和光线追迹方法重建物体的三维数据相差很小,而有水时恢复的面形数据与无水时的相比几乎没有差异,考虑到图像处

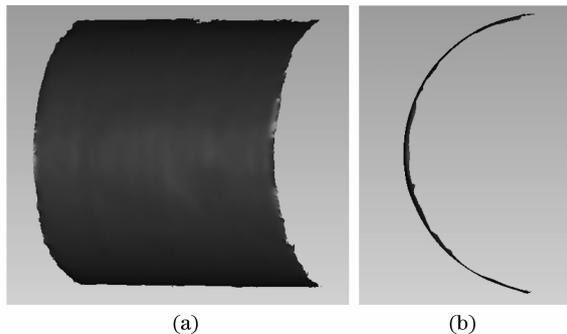


图 7 有水时光线追迹恢复物体三维面形
(a)正视图,(b)侧视图

Fig. 7 3-D shape of object calculated with ray tracing in water

(a) Elevation, (b) side view

最后,对三种情景下重建的物体面形分别取一条剖切线进行了比较,如图 8 所示,可以看到面形符合的很好。

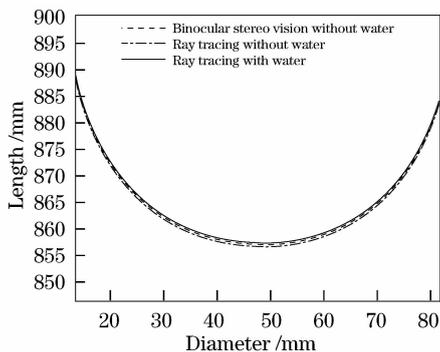


图 8 不同情景下重建物体面形横切线的比较

Fig. 8 Comparison of crosscut line of the reconstructed profiles in different scenes

对以上三种情况在多点位置测量了半圆柱体的直径及棱长,测量结果如表 1 所示。

理过程中对边缘的影响,与实际值相比,可以肯定本文方法较好地恢复出了物体的三维面形。图 9 为恢复出的人手面形。测量数据中物体恢复面形在边缘出误差较大,如图 5(a)、图 6(a)、图 7(a) 和图 9(c) 中所示,产生此现象的原因:首先,在物体的边缘部

分,由于阴影的影响,致使这些区域的相位值可靠度降低,进而使光线追迹产生错误。改进的方法是采用更稳健性的方法获取更为精准的相位信息。其次,由于水的波动或流动,影响到光线的正确传播。今后的工作可以考虑建立水的流动和波动模型,以

此来消除或减小水流扰动带来的测量误差。第三,用于水中含有一定量的气体,会在物体边缘处附着,形成体积较小的气泡,也会影响对物体边缘的准确测量,实际测量时可以通过其他手段消除这些气泡后再进行测量。

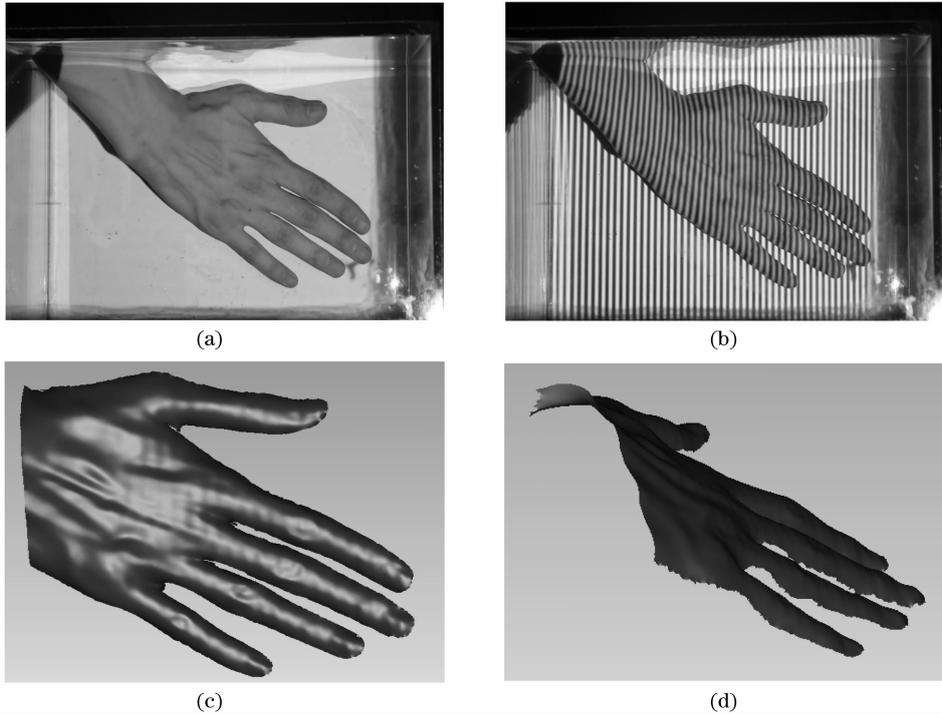


图9 人手的恢复面形。(a)实物图,(a)条纹图,(c)恢复面形的正视图,(d)另一角度的视图

Fig. 9 3-D shape of hand calculated with ray tracing in water.

(a) Measured hand, (b) hand projected fringe, (c) elevation, (d) side view of reconstructed shape

4 结 论

提出了一种基于相位跟踪的编码面结构光测量水中物体的新方法,该方法可大大加快测量速度并降低测量成本。进行了相应的实际测量,从实验的结果可以看出,本方法是正确可行的。测量中用投影仪做为光栅投影设备,实用中则可以用单色激光做光源透过光栅来投影条纹,这样即可消除波长不一的影响也可增强光的穿透力。

本文方法用正弦面结构光来记录物体的三维面形数据,无需扫描装置来实现对物体的面形测量,这样既节约了经济成本也缩短了测量时间,而且在进行一定的改进后,可以对慢速的动态物体进行三维面形测量。该方法在医学研究教学、水底文物数字化领域有很强的应用前景。

参 考 文 献

1 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):792~796

李万松,苏礼坤,苏显渝. 相位检测面形术在大尺寸三维测量中的应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6):792~796

2 Atsushi Yamashita, Hirokazu Higuchi, Toru Kaneko *et al.*. Three dimensional measurement of object's surface in water using the light stripe projection method[J]. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2004, **3**:2736~2741.

3 Yamashita Atsushi, Hayashimoto Etsukazu, Toru Kaneko. 3-D measurement of objects in a cylindrical glass water tank with a laser range finder[J]. *IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003, 1578~1583

4 Ding Wanshang, Liu Yan. Optical measurement of object's surface three-dimensional shape in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):58~62

丁万山,刘艳. 水中物体的光学三维形貌测量的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):58~62

5 Anand Asundi, Zhou Wensen. Fast phase-unwrapping algorithm based on a gray-scale mask and flood fill[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(23):5417~5420

6 Xu Lihua, Su Xianyu. Analysis on the Processing on Three classes of residuals for phase unwrapping [J]. *Journal of Optoelectronic · Laser*, 2001, **12**(12):1267~1270

徐利华,苏显渝. 相位展开中的3类极点处理和分析[J]. *光子·激光*, 2001, **12**(12):1267~1270

7 Kang Xin, He Xiaoyuan, Quan C. 3-D sensing using sinusoidal fringe projection and phase unwrapping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12):1444~1447

康新,何小元,Quan C. 基于正弦条纹投影的三维传感及其去

- 包裹处理[J]. 光学学报, 2001, **21**(12):1444~1447
- 8 Janne Heikkilä, Olli Silvén. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[J]. *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997, 1106~1112
- 9 Huang Hongqiang, Feng Huajun, Xu Zhihai. 3-D Imaging based on color-encoded structure light [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2001, **35**(6): 588~590
黄红强,冯华君,徐之海. 彩色结构光三维成像技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2001, **35**(6): 588~590
- 10 Ma Songde, Zhang Zhengyou. *Computer Vision* [M]. Beijing: Science Press 1999, 52~93
- 马颂德,张正友. 计算机视觉[M]. 北京:科学出版社, 1999, 52~93
- 11 Min Zhu, Yunjian Ge, Shangfeng Huang *et al.*. Stereo vision rectification based on epipolar lines match and three variables projective matrix [J]. *IEEE International Conference on integration*, 2007, 133~138
- 12 Liu Yuankun, Su Xianyu. New camera calibration technique based on phase measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(11):65~69
- 刘元坤,苏显渝. 基于相位测量的摄像机标定方法[J]. 光电工程, 2007, **34**(11):65~69