

DOI:10.16136/j.joel.2018.08.0347

# 基于条纹投影的双目结构光成像系统

于瑾, 陈超, 高楠\*, 张宗华

(河北工业大学机械工程学院, 天津 300130)

**摘要:**研究了一种基于条纹投影的双目三维成像方法, 实现对表面有大梯度或非连续等复杂形貌物体的测量。计算机软件产生的正弦条纹经 DLP 投影仪投射到被测物体表面, 左右两个 CCD 相机同时拍摄经被测物体表面调制的变形条纹图。通过四步相移和最佳条纹选择方法分别计算得到折叠相位图和展开相位图。建立绝对相位与深度之间的关系, 得到两组不同坐标系下的三维点云数据。提出一种改进的最近点迭代 (ICP) 算法, 在每一次迭代过程中剔除不可见点和噪声点, 将两组点云数据转换到同一坐标系中。三维形貌测量实验证明了所研制成像系统的可行性和准确性。视场范围内的最大测量误差为 0.072 mm。

**关键词:**条纹投影; 成像系统; 点云数据; 最近点迭代; 三维形貌测量

**中图分类号:** TH741 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2018)08-0844-08

## Dual-camera structured light imaging system based on fringe projection

YU Jin, CHEN Chao, GAO Nan\*, ZHANG Zong-hua

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** A dual-camera three-dimensional (3D) imaging system is established by using the fringe projection technique to measure objects with large slopes and/or discontinuous surface. A DLP projector projects the generated sinusoidal fringe pattern images onto the measured objects surface. The fringe patterns are deformed with regard to object surface and captured by two color cameras from different views. The absolute phase of each pixel can be calculated from the captured fringe patterns by using the optimum three-fringe numbers selection method. The relationship between the absolute phase and depth is established, so two point cloud data from different coordinate systems are obtained. An improved iterative closest point (ICP) algorithm is proposed, and the obtained point cloud data can be transformed into the same coordinate system by rejecting noises and invisible data automatically at each iterative step. Experimental results on measuring 3D shape of objects show the accuracy and availability of the developed 3D imaging system. The maximum measurement error is 0.072 mm in measurement range.

**Key words:** fringe projection; imaging system; point cloud data; iterative closest point; three-dimensional shape measurement

## 1 引言

随着光学、图像处理和计算机技术的发展, 光学非接触三维形貌测量得到广泛的应用。其中以数字条纹投影为代表的三维形貌测量技术由于其

高精度、非接触和数据获取速度快等优点<sup>[1~3]</sup>而被广泛应用。对复杂形貌物体的测量, 国内外的许多专家学者开展了大量深入的研究。Da F P 等<sup>[4]</sup>搭建的基于条纹投影的三维测量系统是使用

\* E-mail: ngao@hebut.edu.cn

收稿日期: 2017-11-23 修订日期: 2018-02-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFF0106404)、国家自然科学基金 (51675160)、河北省应用基础研究计划重点基础研究资助项目 (15961701D)、河北省高层次人才资助项目 (GCC2014049) 和河北省人才工程培养经费资助项目 (A201500503) 资助项目

单目实现,即用一个相机从一个方向对物体进行三维形貌的恢复。由于测量视场有限或被测表面相互遮挡等原因,无法得到物体表面的完整三维信息。并且在获得折叠相位信息后使用了空间相位展开的方法,不适用于大梯度或非连续表面等复杂形貌物体的测量。Wang J 和 Blake R 等<sup>[5,6]</sup>使用双目立体视觉来测量物体的三维形貌。因为双目立体视觉是建立在对对应点的视差基础之上,因此左右图像中各点的匹配关系仍然存在许多问题。并且测量视场的范围也会受限。Dai J F 等<sup>[7]</sup>在获得折叠相位信息时,使用三步相移的方法。因为三步相移存在高次谐波,因此会影响测量的精度。熊胜军和余乐文等<sup>[8,9]</sup>搭建了一套基于线结构光的单目三维测量系统,能否精确提取线激光条纹中心的位置信息直接影响到最后的测量精度。与面结构光相比测量时间较长。因此,由一个相机和一个投影仪组成的结构光系统受到测量视场范围的限制,会产生视觉盲区。并且不同的相位计算方法直接影响复杂形貌物体的测量精度。

由双相机和投影仪组成的三维测量系统可以很好的解决复杂形貌物体测量的问题。如何匹配不同视角下获得的三维点云数据成为此项技术的首要难题。最常用的拼接方法为 ICP 算法<sup>[10,11]</sup>,但噪声点和不可见点使 ICP 算法在对应点确定上面临很大困难。因此,国内外许多专家学者提出了许多改进的 ICP 算法。Grant 等<sup>[12]</sup>使用点到面的距离作为度量的标准,与点到点的 ICP 算法相比大大减少了计算量和迭代次数,但是该方法的鲁棒性不是很好。Lv 等<sup>[13]</sup>在经典的 ICP 算法上使用前后两次均方根误差来判断迭代是否收敛,并没有剔除不可见点和噪声点,可能导致迭代收敛到局部而非全局的最优解。Zhu 等<sup>[14]</sup>使用 TrICP(trimmed ICP)算法来匹配有部分重叠区域的两个数据集,把重叠率引入到最小二乘函数中来剔除噪声点,该算法需要不断的计算所有可能的重叠率,计算量十分庞大。尽管现存的匹配方法改善了 ICP 算法的收敛性,但是受噪声点和不可见点的影响,改进的 ICP 算法依然存在较低的鲁棒性。

因此,本文研制了一种基于条纹投影,双目测量复杂形貌物体的方法,系统由一台计算机、一台 DLP 投影仪和两台 CCD 相机组成,扩大了测量视场的范围和相机的空间分辨率,解决了被测物体表面相互遮挡的问题。使用圆环标定板标定测量系统<sup>[15,16]</sup>,建立绝对相位和深度之间的关系。一次测量即可同时获得被测物体在左右两个相机坐

标系下的三维点云数据,提出一种改进的最近点迭代(ICP)算法,匹配两组点云数据。原始的 ICP 算法受到噪声点和不可见点的影响,在对应点确定上面临很大困难。因此,提出一种改进的 ICP 算法,每进行一次迭代就剔除一次不可见点和噪声点,将不同视角下计算出的点云数据融合到相同的坐标系下,提高了鲁棒性,对于复杂形貌物体的测量具有很好的应用前景。

## 2 原 理

### 2.1 系统描述

经典的结构光系统由一个相机和一个投影仪组成。这类系统的主要缺点是相机测量视场范围受限,产生视觉盲区。如图 1 所示,投影仪投射的光能够完全覆盖被测物体表面,但是相机只能看到被测物体的部分区域即左相机不能看到 B 区域,右相机不能看 A 区域。因此,研制了一套基于条纹投影的双相机结构光系统。该系统扩大了测量视场的范围和相机的空间分辨率,解决了被测物体表面相互遮挡的问题。

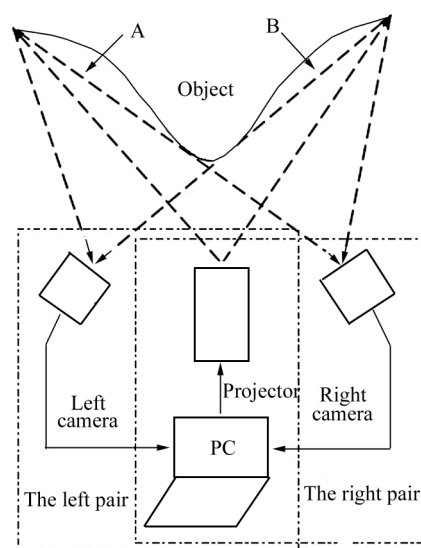


图 1 影像测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of imaging measurement system

该系统由两个子系统组成:左相机和投影仪组成左结构光系统,右相机和投影仪组成右结构光系统。计算机软件产生的正弦条纹经 DLP(Digital Light Procession)投影仪投射到被测物体表面,左右两个 CCD(Charge Coupled Device)相机同时拍摄经被测物体表面调制的变形条纹图。通过四步相移和最佳条纹选择方法<sup>[17,18]</sup>分别计算得到折叠相位图和展开相位图。使用相同的系统标定方法分别标定

左、右结构光系统,建立绝对相位和深度的关系,得到两个相机坐标系的两组点云数据。提出一种改进的 ICP 算法将两组点云数据转换到同一坐标系中,ICP 算法的初始矩阵通过标定两个相机的位置关系得到。

## 2.2 子系统标定原理

双相机结构光系统的标定分为左结构光系统的标定和右结构光系统的标定。左右两个子结构光系统的标定方法相同。系统标定分为深度  $Z$  方向的标定和横向  $XY$  方向的标定。横向  $XY$  方向的标定是建立空间坐标和像素坐标之间的关系,深度  $Z$  方向的标定是建立相位和深度的关系。在进行系统标定前需要得到相机的内部参数,即相机标定<sup>[19]</sup>。如图 2 所示,使用黑白棋盘格标定相机,使用圆环标定板标定系统。

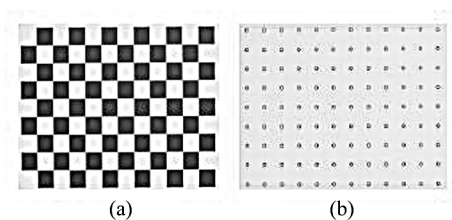


图 2 实验所用标定板:(a)  $9 \times 12$  个黑白相间的棋盘格,每个方格的边长为

$15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ; (b) 表面带有  $9 \times 12$  个黑色圆环标识的白板,相邻标识的行距和列距为  $15 \text{ mm}$

Fig. 2 The calibration plate used in experiment:

(a)  $9 \times 12$  black and white checkerboards with each size of  $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ; (b) a white board with  $9 \times 12$  black rings on the surface with the row spacing of adjacent marks and column spacing of  $15 \text{ mm}$

### 2.2.1 深度 $Z$ 方向标定原理

就拿单侧子结构光系统来说,它由一个相机和一个投影仪组成,在投影仪投射条纹到垂直成像光轴参考面这一过程中,由于受到交叉光轴的影响,使得原本由投影仪投射出的等间距均匀条纹变形,变成非等间距条纹,且距离投影仪近的一侧条纹间距小,距离越远条纹间距越大。因此,相位和深度数据之间的关系受像素坐标  $x, y$  影响,其关系式可以表示为<sup>[20]</sup>

$$z = \frac{L_0}{\frac{2\pi L_0^2 \cos\theta}{P_0 \Delta\phi(x, y) (L_0 + x \cos\theta \sin\theta)^2} - \frac{L \cos\theta \sin\theta}{L_0 + x \cos\theta \sin\theta} + 1} \quad (1)$$

这里  $L$  表示投影出瞳以及成像入瞳之间的距离,  $L_0$  表示视场中与成像光轴垂直的参考面和成像入瞳之间的距离,  $\theta$  表示成像光轴以及投影光轴之间相差的角度,  $P_0$  表示投影到与投影光轴垂直的参考面上的条纹间距。在实际实验操作过程中,很难保证将相机和投影仪的入瞳以及光轴保持在同一水平面上这一理想情况,所以根据上式计算系统参数工作量大且系统精度问题得不到一定的保障,基于这个问题,我们可以将(1)式替换成一个多项式形式的方程,用隐函数的形式表示为<sup>[21]</sup>

$$z(x, y) = \sum_{n=0}^N a_n(x, y) \Delta\phi(x, y)^n \quad (2)$$

这一形式确保了精度,即使 CCD 相机与 DLP 投影仪不能精确共面。其中系统的结构参数可以用  $a_n, a_{n-1} \dots a_1, a_0$  表示,因为像素点位置  $(x, y)$  是互不影响的,所以任何一个像素位置的  $x, y$  坐标都不相同,这就需要将各个像素点位置的系数都记录在一个查找表中,最终的目的是获得精确的三维形貌。

将带有等间距黑色圆环标识点的白色标定板在相机视场范围内任意摆放几个位置,选择中间某个位置的标定板所在平面作为参考面,通过计算每个位置的深度值相对于参考面的差值,即求得每个位置的相对深度值,就可以计算出各个像素点的多项式系数  $a_n, a_{n-1} \dots a_1, a_0$ 。具体流程如下:第一步利用普通相机的标定方法可以获得相机的内部参数,根据标定板上已知的标识点间距,即世界坐标已知,便可计算得到相机的外部参数,外参包括旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$ ,  $R$  代表了平板相对于相机的位置,  $T$  包括  $T_x, T_y, T_z$  三个参数,其中  $T_z$  即为平板上每一个像素点的深度值。第二步根据四步相移还有最佳条纹选择的方法计算每一个像素点的绝对相位值。第三步通过已得到的所有像素点的深度值以及所有像素点的绝对相位值利用隐式函数计算得到多项式系数,并记录在查找表中,以标定深度  $Z$  方向。

### 2.2.2 横向 $XY$ 方向标定原理

若在理想情况下,空间坐标和像素坐标之间建立的函数成线性关系,但在实际操作过程中,投影仪和相机镜头存在畸变的现象是不可避免的,这就导致以上关系成非线性,其表达式如下:

$$\begin{cases} x_r = a_0(u, v) z_r^2 + b_0(u, v) z_r + c_0 \\ y_r = a_1(u, v) z_r^2 + b_1(u, v) z_r + c_1 \end{cases} \quad (3)$$

上式中,  $a_0, b_0, c_0, a_1, b_1, c_1$  为每个像素点的多项式系数,包括系统参数,  $x_r, y_r, z_r$  是标定板上所有像素点的参考坐标。与深度方向标定大致相同,需要首先

选择参考面,并将此参考面作为 XOY 面,再将其余位置上所有像素点在世界坐标系下的坐标转换到此参考面的坐标系中,获得所有像素点的 X、Y 坐标。通过已得到的所有像素点的像素坐标以及参考坐标,利用公式(3)计算得到多项式参数,并记录在查找表中,以精准标定横向 X、Y 方向。

### 2.3 数据匹配

一次测量可同时获得两个相机坐标系下的三维点云数据。只要得到两相机坐标系之间的相对位置关系就可以将两组点云数据自动的匹配在一起。由于测量或标定过程中误差的影响,两组数据不能很好的匹配在一起。解决此问题最常用的方法是 ICP 算法。它有两个主要步骤:查找最优的对应点和计算两数据集之间最优的转换关系。但 ICP 算法受噪声点和不可见点的影响,在对应点确定上面临很大困难,最终导致两点云数据集之间对应关系的扭曲。针对上述问题提出四条剔除错误对应点的准则并结合改进的 ICP 算法找到最优的坐标转换关系,具体方法如下。

ICP 算法受到噪声点和不可见点的影响,在对应点确定上面临很大困难。因此,提出一种改进的 ICP 算法,在每一次迭代过程中剔除不可见点和噪声点,将两组点云数据转换到同一坐标系中。

一个正确的对应点对,应该满足以下四条准则。假设  $p_{1,i}$  是视图 1 上的点,  $p_{2,i}$  是位于视图 2 上和  $p_{1,i}$  对应的点:

1) 点  $p_{1,i}$  和点  $p_{2,i}$  应该对应曲面上相同的位置,即两点的欧式距离在理论上应该为零。由于迭代是一个无限逼近的过程,两点的距离越小,越接近相同的位置。设置两点的距离为采样点之间距离的 2.5 倍。

2) 点  $p_{1,i}$  和点  $p_{2,i}$  相对两个位置的相机均可见。假设在视图 2 中的可见点,由于遮挡的原因,在视图 1 中可能是不可见的点。因此,点对中若有一个点不可见,则剔除此点对。

3) 点  $p_{1,i}$  和点  $p_{2,i}$  有相同方向的法向量。如果两个点法线之间的夹角大于  $45^\circ$ ,则剔除此点对。

4)  $p_{1,i}$  是视图 1 中位于重叠区域内的一个点,则在视图 2 的重叠区域内应该有且只有一个对应点  $p_{2,i}$ 。

在 ICP 算法的每一次迭代过程中,应用上述 4 条准则来剔除错误的对应点,以剩余的点对计算两视图之间的转换参数。重复上述过程,直到对应点对之间的距离均方根方差小于事先给定的阈值为

止,则得到两个视图之间的最优转换参数。完整的匹配过程如图 3 所示,对应点对之间的距离方差为  $ME$ ,  $T$  为事先给定的阈值。

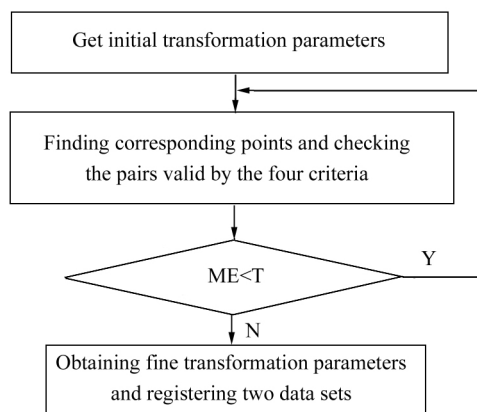


图 3 匹配流程图

Fig. 3 Matching flow chart

## 3 实验及测量结果

### 3.1 实验系统

一套完整的实验系统由一台计算机、两台 CCD 相机以及一台 DLP 投影仪组成,实验系统的搭建如图 4 所示。投影仪选择 LightCrafter4500 型号,它产自美国德州仪器公司,物理分辨率是  $912 \times 1140$  pixels。该投影仪的芯片产自同一家公司生产的 DLP 0.45 WVGA,因其具有速度快、可靠性强等优点,被用于投影。相机的选择是 eco655CVGE 型号,它产自 SVS 公司,其分辨率为  $2448 \times 2050$  pixels。该相机具备可以实现高速传输以及信噪比高等优点,并且从外观来说,该相机精致可操作性强方便用于安装和实验。

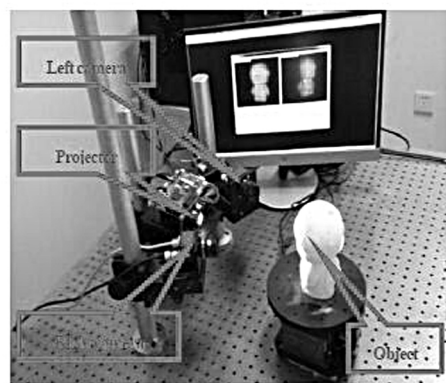


图 4 研制的双相机结构光系统

Fig. 4 Developed dual-camera structured light system

### 3.2 系统标定及评价

为了标定相机,将图 2(a)所示棋盘格标定板在

相机景深范围内不同深度、不同方向任意摆放几个位置,并采集各个位置的图像。使用 matlab 相机标定工具箱<sup>[22]</sup> 求出相机的内部参数和两个相机的相对位置关系,结果如下。内参结果如表 1 所示。

两相机之间的相对位置关系如下:

$$R_0 = \begin{bmatrix} 0.7781 & -0.0042 & 0.6281 \\ -0.0021 & 0.9999 & 0.0092 \\ -0.6282 & -0.0086 & 0.7781 \end{bmatrix},$$

$$T_0 = [-447.0339 \quad -7.0347 \quad 184.0076]^T$$

双目结构光成像系统由两部分组成,一侧为左结构光系统,一侧为右结构光系统,其左右两部分的标定过程和方法基本一致,通过带有等间距黑色圆环标识点的白色标定板来进行系统的标定,从而建立绝对相位图和三维数据之间的对应关系。将图 2(b)所示的圆环标定板在相机景深范围内任意摆放一个位置,用投影仪投射条纹到被测物体表面,并用相机拍摄下来在这个位置变形的条纹图,接下来,将标定板在景深范围内做一系列平移的变化,将其移动到其它各个位置,重复上述步骤。通过计算可以得到相位值以及空间坐标,进而完成深度和横向的标定,即系统标定。

为了评价已标定的双目结构光系统,一个已知相对距离的台阶被测量。左、右两个结构光系统分别获得两组点云数据后使用改进的 ICP 算法将两组点云数据统一到同一坐标系中。每一个台阶表面上的拟合平面。相邻台阶之间的真实距离、测量距离、绝对误差和标准差显示在表 2 中。从表中可看出,该系统的最大误差为 0.072 mm,说明该系统可以精确得到物体的三维形貌数据。

表 1 相机内参标定结果

Tab. 1 Calibration results of camera internal parameters

Parameters	Value	
	Left camera	Right camera
$u_0$	1266.468	1282.763
$v_0$	1003.006	1019.832
$f_u$	8489.932	8461.419
$f_v$	8494.687	8466.586
$k_1$	0.043	0.034
$k_2$	0.008	0.004
$p_1$	-0.003	0.005
$p_2$	-0.004	0.001

Unit: pixel for  $u_0, v_0, f_u, f_v$ .

表 2 相邻台阶测量距离(mm)

Tab. 2 Measuring distance of adjacent steps (mm)

Step distance	Measured distance	Absolute error	Standard deviation
18.212	18.203	0.009	0.031
13.258	13.186	0.072	0.003
18.422	18.354	0.068	0.023
17.603	17.569	0.034	0.015

### 3.3 测量结果

利用研制的双相机结构光三维成像系统,对具有大梯度以及不连续表面的物体进行了实际的测量实验,如图 5 所示。通过比较红、绿、蓝三颜色通道中条纹剖面图,发现绿色通道中的条纹给出最好的条纹对比度。所以,在测量中通过投射绿色条纹测量物体表面的三维形貌。投影仪投射绿色正弦条纹到被测物体表面,左右两个相机同时采集到经过被测物体表面调制的变形条纹图。通过相位计算,得到两幅展开相位图。建立相位和深度之间的关系后,将相位信息映射到深度信息,得到两组点云数据。利用改进的 ICP 算法将两个相机坐标系下的三维点云数据统一到同一坐标系下。

图 5(a)是左相机拍摄到的投射到被测物体上的变形条纹图。利用所研究的方法对采集的条纹图进行处理,得到图 5(b)所示的展开相位图。利用所标定相位和深度间的关系,得到物体在左相机下的三维点云图,如图 5(c)所示。图 5(d)、(e)、(f)是右相机获得的条纹图、展开相位图以及三维点云图。改进的 ICP 算法,最终将左右相机获得的点云图转换到同一坐标系中。如图 5(g)所示。

图 5(a)、(d)中的红色区域是存在遮挡和大梯度的地方。图 6 将红色区域的三维数据进行局部放大。图 6(a)是左相机获得的三维点云局部放大图。图 6(b)是右相机获得的三维点云局部放大图。图 6(c)是合成后的三维点云局部放大图。由此可以看出,研制的基于条纹投影的双目三维成像方法,从两个方向上得到物体的三维形貌。使用两幅图像相互补偿的方法,不但能获得大量精度较高的三维数据点,得到目标更精确的三维形貌,而且能够有效避免遮挡问题,减少相位噪声的影响,还能增大测量视场范围,实现对复杂形貌物体的测量。

图 7 给出了改进 ICP 算法的收敛曲线。横坐标为迭代的次数,纵坐标为每一次迭代中匹配点集的均方根误差。显然,改进的 ICP 算法收敛并且收敛到很小的均方根误差。

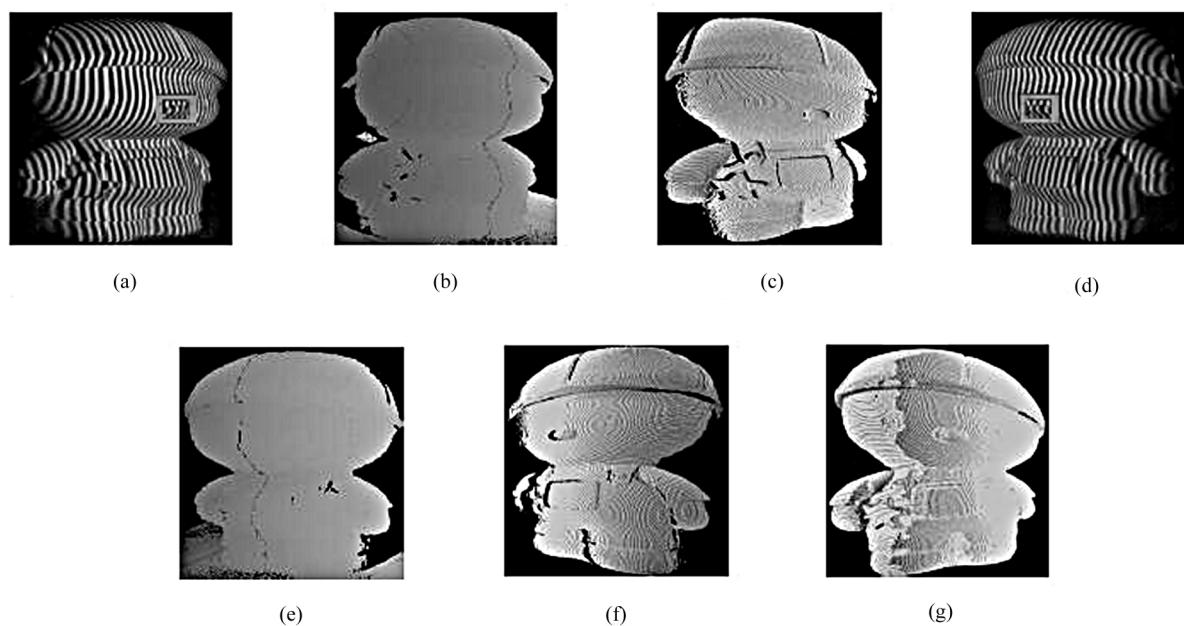


图5 小猫模型实验结果图:(a)左相机拍摄到的投射到被测物体上的变形条纹图;  
(b)与图(a)对应的绝对相位图;(c)左相机获得的三维点云图;  
(d)右相机拍摄到的投射到被测物体上的变形条纹图;  
(e)与图(d)对应的绝对相位图;(f)右相机获得的三维点云图;(g)合成后的三维点云图

Fig. 5 The experimental results of kitten model: (a) a deformed fringe pattern projected on a measured object by the left camera;  
(b) an absolute phase map corresponding to (a); (c) the three-dimensional point cloud obtained by the left camera;  
(d) a deformed fringe pattern projected on a measured object by the right camera;  
(e) an absolute phase map corresponding to (d); (f) the three-dimensional point cloud obtained by the right camera;  
(g) the synthesized three-dimensional point cloud

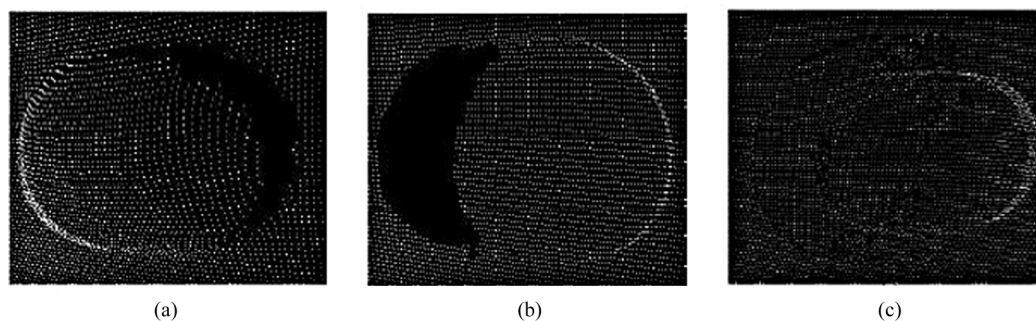


图6 小猫模型局部放大图:(a)左相机获得的三维点云局部放大图;  
(b)右相机获得的三维点云局部放大图;(c)合成后的三维点云局部放大图

Fig. 6 A partial enlarged view of a kitten model: (a) A magnified view of the 3D point cloud obtained by the left camera;  
(b) A magnified view of the 3D point cloud obtained by the right camera;  
(c) A magnified view of the synthesized 3D point cloud

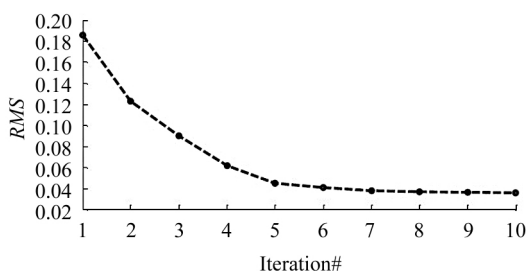


图 7 改进的 ICP 算法收敛曲线

Fig. 7 Convergence curve of improved ICP algorithm

## 4 结 论

研制了一套基于条纹投影的双相机结构光成像系统,测量复杂形貌物体。使用相同的标定方法分别标定左、右结构光系统,建立绝对相位和深度的关系;一次测量同时获得两个不同视角下的两组点云数据;提出一种改进的 ICP 算法,在每一次迭代过程中剔除不可见点和噪声点,将两组点云数据转换到同一坐标系中。ICP 算法的初始矩阵通过标定两个相机的位置关系得到。系统扩大了测量视场的范围和相机的空间分辨率,解决了被测物体表面相互遮挡的问题。利用所研发的三维成像系统测量了小猫的石膏像,实验结果证明了所研制的三维成像系统能够精确获取物体的三维形貌数据。

## 参考文献:

- [1] MAO Jia-hong, LOU Xiao-ping, LI Wei-xian, et al. Binocular 3D volume measurement system based on line-structured light[J]. Optical Technique, 2016, **42**(1): 10-15.  
毛佳红, 娄小平, 李伟仙, 等. 基于线结构光的双目三维体积测量系统[J]. 光学技术, 2016, **42**(1): 10-15.
- [2] GUO Bu-yu, YU Jia, WANG Jiao-jiao, et al. Stereo vision for measuring the size of fish[J]. Optical Technique, 2017, **43**(2): 153-157.  
郭卜瑜, 于佳, 王姣姣, 等. 双目视觉用于鱼苗尺寸测量[J]. 光学技术, 2017, **43**(2): 153-157.
- [3] LI A-meng, PENG Xiang, YIN Yong-kai, et al. Optical 3D digitizer for photorealistic imaging of movable cultural heritage[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, **42**(12): 1421-1429.  
李阿蒙, 彭翔, 殷永凯, 等. 用于可移动文物真实感成像的光学三维数字化仪[J]. 光子学报, 2013, **42**(12): 1421-1429.

- [4] DA F P, HUANG H. A novel color fringe projection based Fourier transform 3D shape measurement method[J]. Optik, 2013, **123**(24): 2233-2237.
- [5] BLAKE R, WILSON H. Binocular vision[J]. Vision Research, 2011, **51**(7): 754-770.
- [6] WANG J, WANG X J, LIU F, et al. Modeling of binocular stereo vision for remote coordinate measurement and fast calibration[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, **54**(1): 269-274.
- [7] DAI J F, LI B W, ZHANG S. High-quality fringe pattern generation using binary pattern optimization through symmetry and periodicity[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, **52**(1): 195-200.
- [8] XIONG Sheng-jun, ZHAO Fei, ZHAO Heng, et al. Three-dimensional shape measurement system based on auto-synchronous scanners with line structured light[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, **43**(11): 141-152.  
熊胜军, 赵飞, 赵恒, 等. 线结构光自同步扫描三维形貌测量系统[J]. 光子学报, 2014, **43**(11): 141-152.
- [9] YU Le-wen, ZHANG Da, ZHANG Yuan-sheng. Research on key technologies of three-dimensional Measurement system based on line structured light[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2016, **27**(2): 156-161.  
余乐文, 张达, 张元生. 基于线结构光的三维测量系统关键技术研究[J]. 光电子·激光, 2016, **27**(2): 156-161.
- [10] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, **14**(2): 239-256.
- [11] LIU Fan-ming, QU Hao. Robustness improvement of ICP algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, **25**(S1): 603-605.  
刘黎明, 屈昊. ICP 算法的鲁棒性改进[J]. 仪器仪表学报, 2004, **25**(s1): 603-605.
- [12] Grant D, Bethel J, Crawdord M. Point-to-plane registration of terrestrial laser scans[J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, **72**(6): 16-26.
- [13] LV D, SUN J, LI Q, et al. Fully automatic registration of structured objects based on laser radar range images[J]. Optik, 2015, **126**(23): 4698-4703.
- [14] ZHU J H, LI Z, LI Z Y, et al. Automatic multi-view registration of unordered ranges scans without feature extraction[J]. Neurocomputing, 2016, **171**(C): 1444-1453.
- [15] CHEN Hui, MI Bao-xiu, GAO Zhi-qiang. Modeling of three-

dimensional structured light measurement system based on distortion[J]. Acta Optica Sinica, 2013, **33**(12): 162-170.

陈会, 密保秀, 高志强. 基于畸变规律的三维结构光测量系统标定[J]. 光学学报, 2013, **33**(12): 162-170.

- [16] YANG Jing-hao, LIU Wei, LIU Yang, et al. Calibration of binocular stereo vision measuring system[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, **24**(2): 300-308.

杨景豪, 刘巍, 刘阳, 等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(2): 300-308.

- [17] Zhang Z H, Towers C E, Towers D P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency interferometry[J]. Optics Express, 2006, **14**(14): 6444-6455.

- [18] HUANG S J, LIU Y, BAI X F, et al. Pixel-to-pixel correspondence alignment method of a 2CCD camera by using absolute phase map[J]. Optical Engineering, 2015, **54**(6): 064101.

- [19] ZOU Peng-peng, WANG Ping, WANG Qi-yue. Calibration of binocular camera based on collinear vectors and plane

homography[J]. Acta Optica Sinica, 2017, **37**(11): 236-244.

邹朋朋, 王平, 汪启跃. 基于共线向量与平面单应性的双目相机标定方法[J]. 光学学报, 2017, **37**(11): 236-244.

- [20] Zhang Z H, Zhang D P, Peng X, et al. Performance analysis of a 3D full-field sensor based on fringe projection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, **42**(3): 341-353.

- [21] ZHANG Z H, HUANG S J, MENG S S, et al. A simple, flexible and automatic 3D calibration method for a phase calculation-based fringe projection imaging system[J]. Optics Express, 2013, **21**(10): 12218-12227.

- [22] BOUGUET J Y. Camera calibration toolbox for matlab, [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/).

#### 作者简介:

高楠 (1982—), 男, 天津人, 博士研究生, 讲师, 主要从事光学测量与光谱检测方面的研究.