

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

相移光栅轮廓术用便携式三维测量系统

陈新禹*, 孙非, 傅莉, 张太宁, 朱琳琳
(沈阳航空航天大学自动化学院, 辽宁沈阳110136)

摘要:为了实现自由曲面对象的三维形貌测量,搭建了便携式三维视觉测量系统。采用双目立体视觉与相移光栅相结合的方式实现了完整三维轮廓数据测量并对系统涉及的主要算法进行了分析。首先,结合双目立体视觉、相位测量术和多频外差法计算出单视局部数据点;然后,使用辅助靶标实现多视数据的初始拼接;最后,对测量数据进行噪声滤除、优化拼接和冗余点滤除等操作,从而获得完整测量数据。通过实验验证了系统的可行性和测量精度,结果表明:系统的测量精度约为0.04 mm,单视测量和计算时间约为10 s,两邻视间的数据处理与完整拼接耗时约为20 s。实验显示该系统能够较快速、完整、高精度地获取物体的三维数据,基本满足一般测量对象的应用需求。

关键词:相移光栅轮廓术;三维测量系统;光栅测量;自由曲面测量;多视拼接;数据融合

中图分类号: O436.1; TB92 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0000

Phase shifting fringe profilometry based portable 3D measurement system

CHEN Xin-yu*, SUN Fei, FU Li, ZHANG Tai-ning, ZHU Lin-lin

(Automation School, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

* Corresponding author, E-mail: chensavy@163.com

Abstract: A portable 3D visual measurement system based on stereo vision and a phase-shift grating was established to implement global 3D profile measurement for a free-form surface object and some corresponding algorithms were analyzed. Firstly, the local data were calculated by using the stereo vision principles, phase shifting profilometry and a multi-frequency heterodyne method. Then, multi-view registrations were achieved by using a target plane. Finally, global measurements were achieved through noise filtering, optimized registration and redundancy filtering for measurement data and complete data were obtained. The experiments were performed to verify the feasibility and accuracy of the system. Experimental results show that the measurement accuracy is about 0.04 mm; single view measurement costs are approximately 10 s; data processing and registration of two neighbor views consume almost 20 s. It indicates that the system can rapidly and completely acquire 3-D surface data of an object with high precision and it can satisfy the application requirements of general objects.

Key words: phase-shifting fringe profilometry; 3D measurement system; fringe projection measurement; free-form surface measurement; multi-view registration; data fusion

收稿日期:2015-06-03;修订日期:2015-06-30.

基金项目:沈阳航空航天大学青年博士启动基金资助项目(No. 15YB11);国家自然科学基金资助项目(No. 61074090);沈阳市科技计划资助项目(No. F13-095-2-00)

1 序言

基于光栅投影条纹的三维轮廓测量术因具有非接触、精度高以及速度快等优点,而在视觉测量、质量检测、实物数字化、文物保护等领域中得到越来越广泛的应用^[1-2]。该技术将光栅条纹投影到三维物体表面,然后通过相位解析算法求解被物体表面调制后条纹的主值相位。常见的测量方法包括相位测量轮廓术(PMP)^[3-5]、傅里叶变换轮廓术(FTP)^[6]等。其中,相位测量轮廓术因为其计算简单且效率较高而得到了广泛的应用,主要的相位测量轮廓术有三步相移法、四步相移法和N步相移法。计算出主值相位后利用相位解包技术将主值相位恢复为全场唯一的相位场,常见的相位解包技术包括空域解相法和时域解相法。空域法,如枝切法、基于统计滤波法等只需要投射基本光栅即可,但是由于没有充分的辅助信息,因此在测量表面复杂的物体时容易出现误解包的情况。时域法,如复合编码法、双频相位解包法等通过投射辅助条纹图像来确定全场相位。该类方法虽然需要投射更多的条纹图像,但其实用性强,对复杂物体表面的相位解包更准确。

针对静态物体测量过程中的难点问题,本文提出了一种基于相位光栅的双目自由曲面测量系统。该系统采用四步相移法和三频外差结合的方式确定被物体表面调制后条纹的空间相位场,然后利用立体视觉相关理论计算物体表面点在摄像机坐标系下的三维坐标。虽然相位光栅的单视即可获取密集的点云数据,但是受相机视场范围的限制以及被测物体自身遮挡的影响,需要从不同角度对物体进行局部测量。本文改进了文献[7]提出的拼接方法,进一步提高了拼接精度。由于该类系统的特点,经过数据拼接后必然会在图像重叠区域出现大量冗余数据,而冗余点的存在会对曲面重建的正确性和精度造成一定的影响,因此本文又提出了一种滤除三维冗余数据点的实用方法。上述方法可以获得高精度的完整三维数据。

2 系统结构

便携式相移光栅轮廓测量系统主要由三维视觉传感器、辅助靶标和上位机软件系统等部分组成。其中,三维视觉传感器是测量系统的核心部

分,主要由2个CCD摄像机和1个DLP数字投影单元组成。数字投影单元向被测物体投射相位光栅图像,并由左右相机同步采集条纹图像,交由上位机系统计算相位图,同时以相同相位和极限约束为限制条件寻找空间中一点在左右图像上的像点(对应点)。最后,基于已知的视觉模型参数计算该点在摄像机坐标系下的三维坐标。上位机系统软件包括系统标定、传感器控制、数据传输、图像处理、三维重构和数据后处理等模块。

3 传感器原理

系统工作之前使用文献[8]的方法标定出相机的内外参数。

3.1 PMP测量原理

假设条纹图像符合标准正弦波,其光强分布函数为:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \delta), \quad (1)$$

其中: $I(x, y)$ 为物体在 (x, y) 点的光强, $A(x, y)$ 为物体在 (x, y) 点处未投射光条时的亮度, $B(x, y)$ 为图像的光波振幅, $\varphi(x, y)$ 为待计算的主值相位(或称相对相位)。相移法因具有计算简单和精度高等优点而得到了广泛的应用。常见的相移法包括三步相移法、四步相移法和N步相移法。其中四步相移法因为光栅图像相减的操作可以消除拍摄过程中引入的固定噪声,因此,本文选用标准的四步相移法来计算光栅的主值相位,各步光强函数如下:

$$\begin{cases} I_1 = A(x, y) + B(x, y) \cos(\varphi(x, y)) \\ I_2 = A(x, y) + B(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \pi/2) \\ I_3 = A(x, y) + B(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \pi) \\ I_4 = A(x, y) + B(x, y) \cos(\varphi(x, y) + 3\pi/2) \end{cases}, \quad (2)$$

由式(2)可以确定主值相位为:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right). \quad (3)$$

由式(3)可知,主值相位在 $0 \sim 2\pi$ (有些文献却是 $-\pi \sim \pi$,它们的本质是相同的,这里为了后续算法的处理而进行了调整)呈周期性变换,所以还需要对它进行解包操作。

3.2 时间相位展开

本文选用基于三频外差原理的解包方法。首先直接给出双频外差解包裹公式,推导过程与文献[9]类似,但本文给出的公式更简单。

$$\begin{cases} \Phi_1 = 2\pi \times \text{floor} \left[\frac{p_2(m_{12} + a + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2\pi})}{p_2 - p_1} \right] + \varphi_1 \\ \Phi_2 = 2\pi \times \text{floor} \left[\frac{p_1(m_{12} + a + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2\pi})}{p_2 - p_1} \right] + \varphi_2 \end{cases}, \quad (4)$$

其中: $\text{floor}(\cdot)$ 表示向下取整操作, Φ_i 表示绝对相位, φ_i 为已计算出的主值相位, p_i 为莫尔条纹的节距, $i \in \{1, 2\}$ 表示不同频率的图像序列,

$$m_{12} = \begin{cases} \text{floor} \left[\frac{p_{23}(1 + \Delta m_{12} - \Delta m_{23})}{p_{23} - p_{12}} - \Delta m_{12} + 0.5 \right], & \Delta m_{23} > \Delta m_{12} \\ \text{floor} \left[\frac{p_{23}(\Delta m_{12} - \Delta m_{23})}{p_{23} - p_{12}} - \Delta m_{12} + 0.5 \right], & \Delta m_{23} \leq \Delta m_{12} \end{cases}, \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} p_{12} &= \frac{p_1 \times p_2}{p_2 - p_1}, p_{23} = \frac{p_3 \times p_2}{p_3 - p_2}, \\ \Delta m_{12} &= \begin{cases} \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2\pi} + 1, & \varphi_2 > \varphi_1 \\ \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2\pi}, & \varphi_2 \leq \varphi_1 \end{cases}, \\ \Delta m_{23} &= \begin{cases} \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2\pi} + 1, & \varphi_3 > \varphi_2 \\ \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2\pi}, & \varphi_3 \leq \varphi_2 \end{cases}. \end{aligned}$$

将式(5)代入式(4)即可计算图像的绝对相位。

4 多视拼接

由于相机的视场范围限制或物体的遮挡原因,需要从不同角度对物体进行局部测量。常用的方法包括将被测物体放置在辅助平台上^[12],通过辅助平台的平移或旋转来实现被测物体的完整测量。该方法具有较高的拼接精度,但是高精度的运动平台增加了设备的成本,从而带来扫描设备不便于携带的问题。另外一种方法为黏性标记点法^[13],通过在相邻视点的公共区域黏贴至少3个非共线标记点实现邻视拼接。由于该方法需要在被测对象上粘贴标记点,因此不适用于测量一些软质或珍贵的物品。文献[7]提出了一种利用平面靶标作为辅助对象,通过靶标上特征点求解传感器位姿变换矩阵从而实现数据拼接的方法。该方法弥补了以上两种方法的缺点,同时操作上

m_{12} 为由两幅莫尔条纹叠加时形成的新条纹整数级数,且新条纹的节距满足 $p_1 p_2 / (p_2 - p_1)$ 。当 $\varphi_2 > \varphi_1$ 时, $a = 1$; 当 $\varphi_2 \leq \varphi_1$ 时, $a = 0$ 。为了避免计算 m_{12} ,一般通过选择合适的 p_1 和 p_2 ,使得 $p_1 p_2 / (p_2 - p_1)$ 覆盖整个视场。双频外差要求主值相位的求解精度非常高,否则将不能正确展开相位^[5],因此本文采用三频外差法实现相位展开^[10-11]。出于篇幅的限制这里直接给出公式,具体的推导过程与双频外差类似。

也较简单。

但是仅利用辅助靶标很难实现高精度的拼接,本文在文献[7]的基础上提出了一种改进方法。将平面靶标置于两邻视的公共视野范围之内,分别求出位置一相对平面靶标的旋转矩阵 R_1 和平移向量 t_1 ,以及位置二相对靶标的旋转矩阵 R_2 和平移向量 t_2 ,于是得到:

$$\begin{cases} x_i = R_1 x_1 + t_1 \\ x_i = R_2 x_2 + t_2 \end{cases}, \quad (6)$$

其中: x_i 表示靶标坐标系下特征点的三维坐标, x_1 和 x_2 分别表示位置一和二处摄像机坐标系下特征点的三维坐标。整理式(6)得:

$$x_1 = R_2^1 x_2 + t_2^1, \quad (7)$$

其中: $R_2^1 = R_1 R_2^{-1}$, $t_2^1 = -R_1 R_2^{-1} t_2 + t_1$ 。同理即可实现所有邻视数据的初始拼接。然后利用改进的迭代最近点 (Iterative Closest Point, ICP) 算法实现邻视数据的高精度拼接^[14]。由于利用辅助靶标已经实现了邻视数据的初始拼接,在使用 ICP 进一步拼接时只有距离小于设定阈值的点对参与迭代运算,从而实现了快速高精度收敛。

5 数据融合

数据融合是由多视数据点创建单一型面数据的过程。该类设备的数据点是通过图像计算的,数据点与图像像素具有一一对应的关系,可为数据冗余点的滤除和融合提供有利的辅助信息。

5.1 相邻帧数据转换

式(8)表示在第 i 视下数据点在摄像机坐标

系下的三维坐标 $\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ 与它在图像上的像素坐标 $\mathbf{u}_i = [u_i \ v_i \ 1]^T$ 的关系, \mathbf{A} 为摄像机的内参数矩阵, s 为比例因子。式(9)为第 $i+1$ 视与第 i 视的转换关系, 其中 $\mathbf{p}_{i+1} = [x_{i+1} \ y_{i+1} \ z_{i+1} \ 1]^T$ 为第 $i+1$ 视下数据点的三维坐标, $\mathbf{p}_{i+1}^i = [x_{i+1}^i \ y_{i+1}^i \ z_{i+1}^i]^T$ 表示第 $i+1$ 视数据点转换到第 i 视下的坐标, \mathbf{R}_{i+1}^i 和 \mathbf{t}_{i+1}^i 表示两视间的旋转矩阵和平移向量(在数据拼接过程中计算得到)。

$$s \mathbf{u}_i = \mathbf{A} \mathbf{p}_i, \quad (8)$$

$$\mathbf{p}_{i+1}^i = [\mathbf{R}_{i+1}^i \ \mathbf{t}_{i+1}^i] \mathbf{p}_{i+1}. \quad (9)$$

5.2 冗余点判断

本文中冗余点指的是表示物体同一部位的数据且呈现重叠或分层的现象。利用式(9)将第 $i+1$ 视下的数据点转换到第 i 视下, 并依次寻找转换后的每一个点 \mathbf{p}_{i+1}^i 在原始第 i 视数据点中的最近点 \mathbf{p}_i 。如果其满足式(10)则说明该两点为冗余点, 应进行滤除操作; 否则跳过该点并对下一个点作同样的判断。

$$\begin{cases} d(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_{i+1}^i) < \delta \\ d(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_{i+1}^i) < \gamma \end{cases}, \quad (10)$$

其中: $d(\cdot)$ 表示相应维度的欧式距离; δ 为空间距离阈值; γ 为图像距离阈值; $\langle \mathbf{u}_i \ \mathbf{p}_i \rangle$ 为第 i 视数据点的三维坐标和图像坐标的点对, 可在三维重构过程中确定; $\langle \mathbf{u}_{i+1}^i \ \mathbf{p}_{i+1}^i \rangle$ 表示第 $i+1$ 视数据点在第 i 视坐标系下的三维坐标和图像坐标的点对, 可由式(8)和式(9)计算得到。

5.3 冗余点滤除

判断出两数据点为冗余点后, 需要根据一定的准则将其滤除或利用两点的信息生成一个理想点代替这两点。由于处于不同位置的数据点的计算误差不同, 而正视的数据点往往具有较小的误差, 本文按照公式(11)计算理想点 $\tilde{\mathbf{p}}$ 。

$$\tilde{\mathbf{p}} = \frac{\omega_i}{\omega_i + \omega_{i+1}} \mathbf{p}_i + \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i + \omega_{i+1}} \mathbf{p}_{i+1}^i, \quad (11)$$

其中: $\omega = [n_x \ n_y \ n_z] \cdot [x \ y \ z]^T$, $\omega \in [0, 1]$ 表示该点的法向量(法向量通过数据点的局部拟合计算或者取包含该点所有三角面片的法向量的平均值)与由摄像机光心到该点构成的向量的点乘, 称为该点的权重。将 \mathbf{p}_i 赋值为 $\tilde{\mathbf{p}}$ 并删除 \mathbf{p}_{i+1}^i , 从而完成冗余点的滤除。

6 实验验证

实验测量系统由2个 Point Grey 摄像机(1280 × 960)、12 mm 定焦 Computar 镜头、NEC NP200 + DLP 投影仪和一台笔记本电脑构成。两相机间夹角约为 50°, 距离约为 300 mm, 传感器的测量范围约为 600 mm × 300 mm × 250 mm。实验用 PC 机的配置为: 处理器 Intel Core i5 CPU, 主频 3.19 GHz, 内存 2.00 GB。

6.1 单视测量实验

由于相移光栅测量系统对环境光不敏感, 具有一定的抗噪能力, 因此本文实验是在自然光环境下进行的。实验中使用的莫尔光栅图像大小为 1024 × 768, 3 组莫尔图像的频率分别为 1/70, 1/64 和 1/59。实验中投射光栅图像耗时约 1.8 s, 计算相位与三维重构共耗时约 8 s。图 1 为待测量的石膏人脸模型, 图 2 是重构的单视模型效果图。从图中可以看出, 本系统测量数据平滑光滑, 同时对细节部位的刻画十分细腻。



图1 石膏模型图像

Fig. 1 Image of human statue



(a)原始扫描结果
(a)Original result

(b)眉毛处局部放大
(b)Local zoom at eyebrow

(c)嘴角处局部放大
(c)Local zoom at mouth

6.2 多视融合实验

对石膏模型进行多视扫描,以对本文提出的多视拼接与数据处理算法进行可行性分析和精度验证。首先从合适位置开始第一视扫描,当扫描完一视后将靶标置于左目相机视野范围内拍摄一幅图像并计算传感器相对靶标的旋转矩阵 R_1 和平移向量 t_1 。保持靶标不动,移动传感器再拍摄一幅靶标图像并求出该位置传感器相对靶标的 R_2 和 t_2 ,然后根据式(7)计算两视间的转换矩阵 R_1^2 和平移向量 t_1^2 ,再以 R_1^2 和 t_1^2 为初始条件,利用 ICP 算法进一步匹配。实验中,ICP 的最大迭代次数设为 100,退出条件设为两次计算结果的差值小于 1×10^{-4} ,另外只有距离小于 0.15 mm 的点参与迭代运算,两邻视的数据处理和完整拼接耗时约 20 s。以邻视间对应点的距离作为匹配的误差指标,RMS 误差约为 0.108 mm。图 3(a)为 3 次扫描的单视数据,图 3(b)为相邻 3 视的初始匹配结果。从图中可以看出,初始匹配结果存在明显的分层现象,将会严重影响最终的测量精度。图 3(c)为利用 ICP 算法进行优化处理的效果,可以看出各视点云非常好地拼接在一起,由此说明本文算法是有效的。

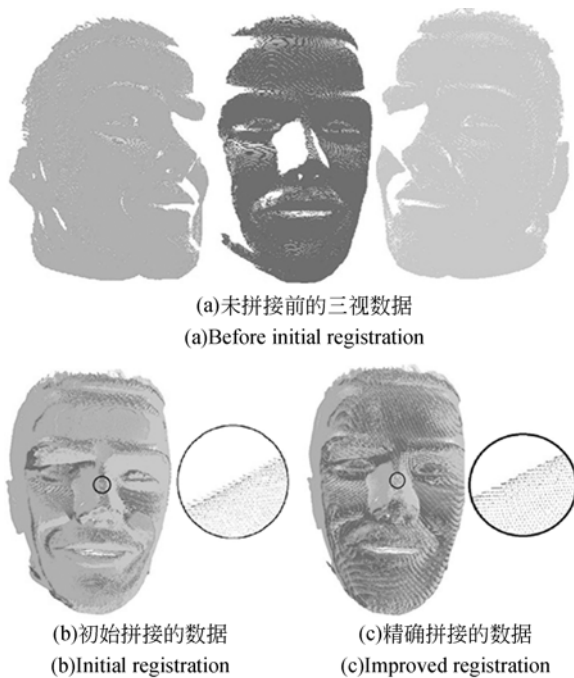


图 3 多视点云数据的拼接

Fig. 3 Registration with multi-view points

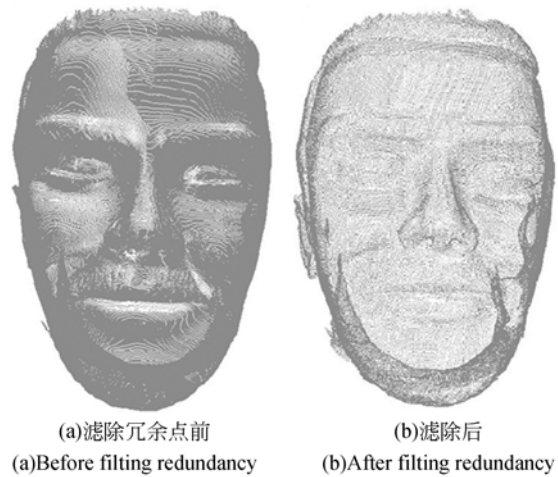


图 4 冗余点滤除前后对比

Fig. 4 Comparison of image quality before and after filtering redundancy

利用式(10)和(11)对拼接后的数据点进行滤除冗余点操作。根据测量范围与点云密度分析,实验中将 δ 设为 0.3 mm, γ 设为 0.2 pixel。滤除前后的图像效果如图 4 所示,处理前包含 715 486 个数据点,处理后包含 465 414 个数据点。滤除冗余点不仅可以精简点云数据,降低内存占用,同时也删除了干扰点,为曲面重构提供了良好的数据源。图 5 为对滤除冗余点后的整体数据进行曲面重构的效果,图中分别显示了模型的左视、前视和右视图。从图中可以看出,重构结果没有出现缝隙、褶皱或断层的现象,并且多视的重构结果与单视结果没有明显的差异,这说明本文提出的数据处理算法不仅可行,而且具有较高的精度。



图 5 不同视角下的多视曲面重构效果

Fig. 5 Surface reconstruction from multi-view scanning

6.3 精度评定实验

为了更进一步评定系统的测量精度,这里利

用阶梯形标准工件对测量结果进行了验证。用扫描结果中每个阶梯上的数据点拟合平面,共拟合

出9个平面,以最低平面为参考计算其余平面的相对高度,计算结果如表1所示。最大误差约为0.08 mm,均值误差约为0.04 mm。

表1 测量精度验证结果

Tab.1 Results of scanning precision test

Plane no.	True height /mm	Measurement height /mm	Absolute deviation /mm
Ref.	0	-	-
1(left)	2.0	2.039	0.039
2(left)	4.0	4.016	0.016
3(left)	6.0	6.002	0.002
4(left)	8.0	8.001	0.001
1(right)	2.0	2.041	0.041
2(right)	4.0	4.059	0.059
3(right)	6.0	6.066	0.066
4(right)	8.0	8.072	0.072
Average	-	-	0.037

7 结 论

本文提出了一种基于相位光栅和双目立体视觉的自由曲面测量系统,针对便携式测量系统的特点提出了一整套数据处理方法(包括噪声滤除、邻视拼接、冗余点滤除等)。该套数据处理方法实现简单,运算效率高。实验结果显示:系统的测量误差约为0.04 mm,单视测量速度约为10 s,两邻视间的数据处理与完整拼接约耗时20 s,由此表明该系统能够较完整、高精度地测量出物体的三维形貌。

参考文献:

- [1] 陈晓荣,蔡萍,施文康. 光学非接触三维形貌测量技术新进展[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5): 528-532.
CHEN X R, CAI P, SHI W K. The latest development of optical non-contact 3D profile measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5): 528-532. (in Chinese)
- [2] WANG P, XIAO X, ZHANG Z M, *et al.*. Study on the position and orientation measurement method with monocular vision system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, 8(1): 55-58.
- [3] WANG ZH Y, DUNG A N, JOHN C B. Some practical considerations in fringe projection profilometry [J]. *Opt. & Laser in Eng.*, 2010, 48(2): 218-225.
- [4] SONG L M, DONG X X, XI J T, *et al.*. A new phase unwrapping algorithm based on three wavelength phase shift profilometry method [J]. *Opt. & Laser Tech.*, 2013, 45(2): 319-329.
- [5] TOWERS C E, TOWERS D P, JONES J D C. Absolute Fringe order calculation using optimised multi-frequency selection in full-field profilometry [J]. *Opt. & Laser in Eng.*, 2005, 43(7): 788-800.
- [6] 王涛,孙长库,杨国威. 三维人脸表情动态采集系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 900-907.
WANG T, SUN CH K, YANG G W. Design for three-dimensional facial expression acquiring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 900-907. (in Chinese)
- [7] 孙军华,张广军,魏振忠,等. 大型自由曲面移动式三维视觉测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1688-1691.
SUN J H, ZHANG G J, WEI ZH ZH, *et al.*. Mobile 3D vision measurement system for large-scale free form surface [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(12): 1688-1691. (in Chinese)
- [8] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE TPAMI*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [9] 雷志辉,李健兵. 基于双频投影条纹的全自动相位解包裹方法[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 39-42.
LEI ZH H, LI J B. Full automatic phase unwrapping method based on projected double spatial frequency fringes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(1): 39-42. (in Chinese)
- [10] REICH C, RITTER R, THESING J. White light heterodyne principle for 3D-measurement [J]. *SPIE*, 1997, 3100: 236-344.
- [11] REICH C, RITTER R, THESING J. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection [J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39(1): 224-231.
- [12] 陈新禹,马孜,陈天飞,等. 线结构光视觉测量系统运动轴线的简易标定方法[J]. 中国激光,

2012, 39(11): 1108014.

CHEN X Y, MA Z, CHEN T F, *et al.*. Novel calibration method for axes in line structured light vision measurement system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 1108014. (in Chinese)

- [13] 吴斌. 大型物体三维形貌数字化测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.

WU B. *Study on the Key Technologies of 3D Digital Measurement of Large-Scale Objects* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2002. (in Chinese)

- [14] LOW K L. Linear least-squares optimization for point-to-plane ICP surface registration [R]. *Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill*, 2009.

作者简介:



陈新禹(1986-),男,辽宁海城人,博士,讲师,2009,2011,2014年于大连海事大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事机器视觉、视觉测量等方面的研究。E-mail: chensavy@163.com



孙非(1989-),男,辽宁大连人,硕士研究生,2012年于东北大学获得学士学位,主要从事自动控制、机器视觉等方面的研究。E-mail: feixiang006@yeah.net