

文章编号: 0253-2239(2006)04-0551-6

# 双摄像机相位测量轮廓术系统标定与数据融合\*

李 勇 苏显渝 吴庆阳

(四川大学电子信息学院光电科学技术系, 成都 610065)

**摘要:** 在将两个摄像机对同一坐标系(全局坐标系)标定的基础上,提出了距离数据及纹理的融合方法。以调制度为模板确定摄像机视线重叠区和数据空洞,在全局坐标中摄像机视线重叠区内根据单位面积采样点数字号最接近原则选取一定尺寸的区域作为数据拼接区。并且考虑在重叠区内一方数据有空洞时的补洞方法,将空洞边界相似放大后,新边界和原边界构成的重叠区域作为数据拼接区。在数据拼接区内将两边的数据以到拼接区中心线距离为权重进行加权平均,实现了数据平滑过渡。实验表明该方法是有用的,为数据融合提供了新途径。

**关键词:** 信息光学; 三维面形测量; 相位测量轮廓术; 相位-高度映射; 摄像机标定; 纹理融合

中图分类号: TN206 文献标识码: A

## Calibration and Data Merging of Two-Camera Phase Measuring Profilometry System

Li Yong Su Xianyu Wu Qingyang

(*Opto-Electronics Department, Sichuan University, Chengdu 610065*)

**Abstract:** A new method for merge of range data and texture based on calibrating two cameras in a world coordinate system is proposed. The overlapped zones and holes of data of the cameras are detected by use of modulation as mask. The part with specified size in the overlapped zones is used for data integration, according to the nearest sequence number of samples in unit area. The method for merging regions where there are holes in one side and none in the another side is also introduced. Integrated region is constructed with the overlapped zones by enlarging the edge of the hole. The data in all integrated zones are averaged with distance to their center line as weight number. Thus, the data transition of each side is smooth. The experimental results reveal this method is reliable and accurate.

**Key words:** information optics; measurement of 3-D object shapes; phase measuring profilometry; phase-height mapping; camera calibration; merge of texture

### 1 引 言

基于结构照明的光学三维传感已广泛用于工业检测、质量控制、机器视觉、影视特技和生物医学等领域<sup>[1]</sup>。其中相位测量轮廓术(PMP)具有可以实现全场同时测量,精度高,测量速度快等优点,是研究的热点之一<sup>[2~5]</sup>。相位测量轮廓术的基本结构由一套相移条纹投影系统和光电图像传感器组成,在测量复杂物体时由于视线遮挡造成测量盲区。为此,本文采用了两个图像传感器来避免由传感器视线遮挡造成的测量盲区,而且传感器与投影系统的夹角可以进一步增加,系统的测量精度也得到了提高。由于测量系统

中有两个传感器,在测量中需要对两个传感器获取的距离数据和纹理信息进行融合。多传感器信息融合通常先进行数据的配准<sup>[6,7]</sup>,然后按一定的方法进行整合。测量数据通常根据对象特征或在被测物上做标记进行配准,特征或标记点的识别误差会引起数据配准误差。本文根据双摄像机相位测量轮廓术系统的特点,提出在双摄像机对全局坐标系标定的基础上,距离数据及纹理数据的融合方法。这种方法不需要额外的数据配准,因此不存在配准误差。其要点是以调制度为模板确定摄像机视线重叠区和数据空洞,在双摄像机视线重叠区内根据单位面积采样点数接

\* 国家自然科学基金(10376018)资助课题。

作者简介: 李 勇(1972~),男,浙江台州人,浙江师范大学信息光学研究所高级工程师,四川大学博士研究生,主要从事光学三维传感、三维显示技术的研究。E-mail: liyong@zjnu.cn

收稿日期: 2005-07-07; 收到修改稿日期: 2005-09-16

近原则选取数据拼接区。并且提出在重叠区内一方数据有空洞时的补洞方法,实现了数据平滑过渡。本文给出了测量系统的结构、参量标定原理及数据拼接的方法。

## 2 测量系统原理与标定

### 2.1 测量系统原理

双摄像机相位测量轮廓术三维测量系统结构如图 1 所示。它主要由一套投影系统和两套对称分布

的摄像系统构成。由投影仪投射相移光栅到被测物体表面,采用标准  $N$  帧相移(等间距满周期)算法时,每个摄像机接收到的变形条纹图可表示为

$$I_n(u, v) = A(u, v) + B(u, v) \cos[\phi(u, v) + \delta_n], \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中  $\delta_n$  为第  $n$  帧条纹图的相移,  $\delta_n = 2\pi n/N, n = 1, 2, \dots, N$ 。则截断的相位  $\phi_w(u, v)$  及调制度  $M_{\text{mod}}$  可以表示为

$$\phi_w(u, v) = -\arctan \left[ \frac{\sum_{n=1}^N I_n(u, v) \sin \delta_n}{\sum_{n=1}^N I_n(u, v) \cos \delta_n} \right], \quad (2)$$

$$M_{\text{mod}}(x, y) = \sqrt{\left[ \sum_{n=1}^N I_n(u, v) \sin \delta_n \right]^2 + \left[ \sum_{n=1}^N I_n(u, v) \cos \delta_n \right]^2}. \quad (3)$$

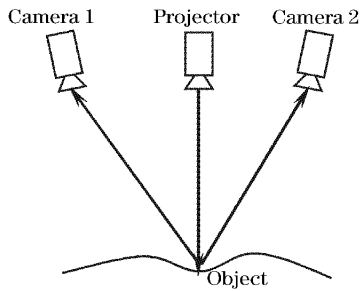


图 1 测量系统结构

Fig. 1 Structure of the measurement system

由(2)式计算出截断相位后,通过相位展开算法恢复出变形条纹的相位分布,然后再根据相位与高度之间的映射关系及像素坐标与全局坐标的映射关系即可恢复出物体的三维面形信息<sup>[8,9]</sup>。(3)式的调制度分布可以用来指导相位展开<sup>[10]</sup>及检测摄像机视线重叠区和测量数据的有效范围。

### 2.2 系统标定

采用的测量系统标定方法包含两个方面内容:相位-高度映射关系和面内坐标的标定。为了提高后期数据融合的精度及简化标定和融合过程,将两个传感器在全局坐标系中标定,得到各个参量。采用的坐标系如图 2 所示,投影仪及两个摄像机的光轴在  $XZ$  平面上。

确定相位与高度的映射关系通常有结构参量法和查表法。由于确定系统的结构参量实际操作中存在困难,所以采用查表法来确定相位与高度的映射关系。通过分析发现物体表面与参考平面之间的相位差和高度差之间存在以下关系<sup>[11]</sup>:

$$\frac{1}{\Delta h(u, v)} = a(u, v) + \frac{b(u, v)}{\Delta \phi(u, v)} + \frac{c(u, v)}{\Delta \phi^2(u, v)}, \quad (4)$$

求解(4)式中的  $a, b, c$  三个参量至少需要包括参考平面的四个平行平面上的相位分布和高度值。标定时,参考平面位于  $XY$  平面内,另外三个平面在有效测量体积内均匀分布。

在确定相位-高度映射关系后,只要测出物体表面相位与参考平面的相位差就可以求出摄像机上每一点对应的  $Z$  坐标。接下来还要根据  $Z$  坐标值将像素坐标映射到全局坐标系中去。对于无畸变的针孔模型,摄像机的标定就是确定摄像机坐标系到全局坐标系的旋转、平移、比例参量。根据机器视觉理论,可以用下式来表示两个坐标系之间的转换关系:

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $u, v$  为像素坐标,  $\mathbf{M}$  为  $3 \times 4$  矩阵,  $X_w, Y_w, Z_w$  为空间点的全局坐标。求解  $\mathbf{M}$  矩阵至少需要 6 个空间点的全局坐标和像素坐标。

实际的摄像机由于制造和工艺原因,存在多种

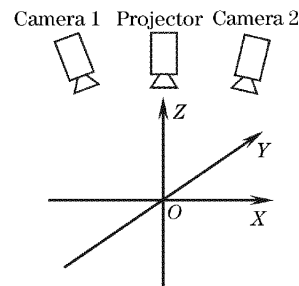


图 2 坐标系规定

Fig. 2 Coordinates system

几何畸变。在进行面内标定时应该考虑主要的畸变因素。摄像机的几何畸变主要有三类：径向畸变、偏心畸变和薄棱镜畸变。不考虑高阶畸变因子，摄像机的畸变可以表示为

$$\begin{cases} u = u_d + k_1 u_d(u_d^2 + v_d^2) + 2p_2 u_d v_d + \\ \quad p_1 u_d(3u_d^2 + v_d^2) + s_1(u_d^2 + v_d^2), \\ v = v_d + k_2 v_d(u_d^2 + v_d^2) + 2p_1 v_d u_d + \\ \quad p_2 u_d(u_d^2 + 3v_d^2) + s_2(u_d^2 + v_d^2), \end{cases} \quad (6)$$

式中  $u_d, v_d$  为畸变后的像素坐标。求解上述畸变参量至少需要知道摄像机上三个像点的理想坐标和畸变后的坐标。

在考虑摄像机畸变因素后，需要标定 17 个参量。根据摄像机靠近光轴部分几乎无畸变这一特点，采用两步法标定这些参量。先用摄像机靠近中心的特征点用最小二乘法标定出  $M$  矩阵，然后通过标定后的  $M$  矩阵计算出靠近摄像机边缘的特征点在摄像机上的理想像素坐标，代入到(6)式中用最小二乘法求出 6 个畸变参量。这样避免了求解非线性方程，同时具有较高的精度。

### 3 数据融合

#### 3.1 点云数据的拼接

测量系统经过上述标定后，每个摄像机的测量结果都是全局坐标系中的物体表面坐标，不用再进行坐标变换就可以拼接数据。图 3 为根据调制度模板检测出的摄像机有效测量区域。虚线和点划线包含的区域分别表示全局坐标中两个摄像机测量的物体区域，它们包含的共同区域就是摄像机的视线重叠区。A 和 B 表示非重叠区域，C 表示拼接区，D 表示在视线重叠区域内右边有数据，左边是空洞的区域。如果只是简单地把两个摄像机的数据叠在一起实现数据拼接，由于测量误差往往效果不好，需要进行适当处理。我们提出的数据点云的拼接方法主要分两大部分：一是在视线重叠区内确定整体的拼接区域，并进

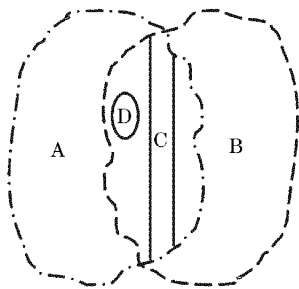


图 3 摄像机有效测量区域  
Fig. 3 Available measurement regions

行数据平滑；二是在视线重叠区局部空洞检测及补充时数据的平滑问题。首先讨论整体数据拼接区域的选择问题。由系统的结构可知，物体表面与测量系统位置关系中对两个摄像机测量精度影响有差异的是物体表面面元的  $X$  轴坐标和面元的朝向。

由于两个摄像机是对称的，以其中一个摄像机为例进行讨论。图 4 是平行于  $X$  轴的直线上点  $I$  的成像关系。 $O$  是摄像机镜头光心， $BC$  垂直  $AB$ ， $BC$  平行于  $I'A$ 。 $A$  为像面坐标原点， $B$  为  $X$  轴原点。设  $I'A = u, BI = x, OA = f$ 。由  $\triangle OBC$  和  $\triangle OAI'$  相似及正弦定理，在  $\triangle CBI$  中有

$$x = \frac{ku \sin \alpha}{\sin(\pi - \alpha - \theta)} = \frac{ku \sin \alpha}{\sin(\alpha + \theta)}, \quad (7)$$

式中  $k$  为常数。在  $\triangle OAI'$  中有

$$\sin \alpha = f / \sqrt{f^2 + u^2}, \quad (8)$$

(8)式代入(7)式化简得

$$x = \frac{fku}{f \cos \theta - u \sin \theta} = \frac{au}{b - cu}. \quad (9)$$

对(9)式微分可得考虑 CCD 像素尺寸时，像素点对应的物体表面区域  $X$  方向大小与坐标的关系：

$$\Delta x = \frac{ab}{(b - cu)^2} \Delta u = \frac{(a + cx)^2}{ab} \Delta u. \quad (10)$$

从(10)式可以看出，在重叠区内随  $x$  的减小，像素对应的区域变小，测量的精度提高，同时摄像机对物体表面的采样增加。对于另一个摄像机，情况类似。在拼接时要选择双方测量精度、采样点密集程度相当的重叠区域作为拼接区。

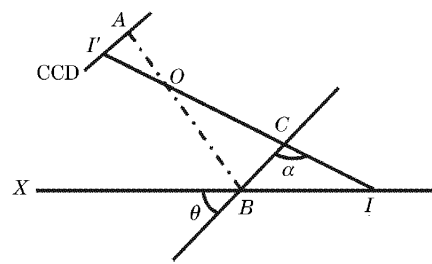


图 4 X 方向透视关系

Fig. 4 Perspective in axis X

图 5 为与  $BE$  有一角度  $\beta$  的一条直线上点的成像情况。设  $I'I'' = \Delta u$  表示像素行方向尺寸， $IE = \Delta x$ ，由于  $\Delta u$  很小可以近似认为  $\angle BFE \approx \angle BCI = \alpha$ 。在  $\triangle EID$  中，由正弦定理可得像素对应的线段  $ID$  的长度  $\Delta x'$  为：

$$\Delta x' = \frac{\Delta x \sin(\alpha + \beta)}{\sin(\pi - \alpha - \theta - \beta)} = \frac{(a + cx)^2 \sin(\alpha + \theta)}{ab \sin(\alpha + \theta + \beta)} \Delta u, \quad (11)$$

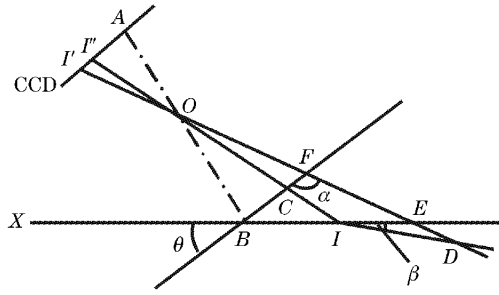


图 5 表面朝向对精度的影响

Fig. 5 Effecton of direction of surface accuracy

由(11)式及图5中几何关系可以看出,当表面位置不变,表面朝向决定的角度 $\beta$ 增加时像素对应的区域增加,测量精度降低,同时摄像机对物体表面的采样减少。

从上面的分析可以发现,物体表面与测量系统的位置关系对测量精度的影响都与单位面积内物体样点数有关。可以把它作为测量精度的衡量标准之一。调制度对精度的影响比较小,这里主要考虑位置关系的影响。数据拼接的步骤为:1) 在全局坐标中,根据调制度模板检测出数据重叠的区域,及重叠区域内空洞;

2) 规定拼接区的尺寸,以此作为窗口在两边数据的重叠区内以一定步长在 X 方向上扫描,分别计算区域内单位面积采样点数,并排序;

3) 选择序号最接近的重叠区作为拼接区;

4) 在拼接区内作数据平滑;

5) 空洞的补充和平滑。

下面讨论数据的平滑问题,首先是拼接区的平滑。图6是数据融合示意图,虚线为融合后结果。在拼接区内,以平均调制度为标准选一个摄像机的数据 X, Y 坐标作为标准,在另一个摄像机中通过线性插值或曲面拟合获得该点的 Z 坐标。将这两个  $Z_w$  值按下式进行加权平均:

$$Z_w = \left( \frac{X_{wc} - X_w}{W} + \frac{1}{2} \right) \cdot Z_{w1} + \left( \frac{X_w - X_{wc}}{W} + \frac{1}{2} \right) \cdot Z_{w2}, \quad (12)$$

式中 W 表示拼接区 X 方向宽度;  $X_{wc}$  表示拼接区中点的 X 坐标;  $X_w$  表示待处理数据点的 X 坐标,由摄像机 1 向摄像机 2 方向增加;  $Z_{w1}$ 、 $Z_{w2}$  分别表示摄像机 1 和 2 测得物体表面  $(X_w, Y_w)$  点的 Z 坐标。

对于重叠区中的空洞部分,以空洞边界为起点,向外扩展一定尺寸,即将边界线往外作相似扩大,如图7所示。这样,空洞周围在新边界与原边界之间有一圈双方数据的重叠区。在拼接区内的数据以有

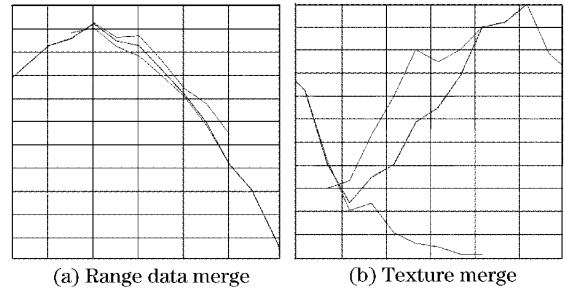


图 6 距离数据及纹理的融合

Fig. 6 Range data and texture merge

空洞一方的数据为标准,按与前面拼接区数据处理类似的方法进行数据平滑,此时的权重值为在空洞边界的法线方向上,数据点到拼接区中心线的距离与区域宽度的比值。对于跨越重叠区边界的空洞只对重叠区中部分进行数据平滑。

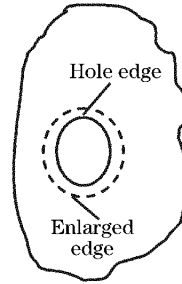


图 7 空洞融合

Fig. 7 Merge of hole

### 3.2 纹理数据的融合

由相位测量轮廓术系统特点,测量获得物体表面距离数据的同时也获得了纹理,纹理与距离数据是一一对应关系。纹理数据的拼接可以在点云数据的拼接过程中同步进行。但纹理数据有它自身的特点,需要预处理后才能进行拼接操作。实验中发现,由于摄像机本身原因及物体表面与测量系统位置关系不同,两个摄像机测得物体上同一点的光强不同。简单进行加权拼接,拼接后纹理图的一致性差。采用下面的方法对纹理数据进行了预处理。

对每个摄像机在选定后的拼接区域内,将测得的光强求平均,然后计算这两个平均值的比

$$R_{12} = \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2}, \quad (13)$$

计算出光强比后,摄像机 1 的光强保持不变,摄像机 2 的光强用下式计算:

$$I'_2(X, Y) = I_2(X, Y) \cdot R_{12}, \quad (14)$$

这样两个摄像机在拼接区附近的光强得到的校正基本相同。预处理后,同样在拼接区对两个摄像机的光强按类似 Z 坐标处理的方法进行加权平均,对于

空洞处纹理的处理方法类似。

## 4 实验结果

我们搭建了由两个 CCD 摄像机(JAI A50 型)、LCD 投影仪(SANYO PLC-XU50)和计算机构成的双探测器相位测量轮廓术三维测量系统,标定后对一个人头模型进行了测量。系统参量为:标定体积  $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ,摄像机与投影仪光轴夹角约  $20^\circ$ ,投影仪分辨率为  $1024 \times 768$ ,投影条纹数为 100,采用 5 帧法测量相位。面内标定用的标记点为十字形,用激光打印机打印在 A4 纸上,每隔  $20\text{ mm}$  一个,贴在平板玻璃上。标定时将标记板装到步进电机控制的电移台上,标记中心尽量沿投影仪光轴移动。标定的结果如下:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 2.1572 & 0.0177 & -1.8298 & 501.1831 \\ -0.2115 & 2.7939 & -0.4368 & 278.9024 \\ -0.0008 & 0.0001 & -0.0016 & 1.0000 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 2.8022 & 0.0113 & 0.6552 & 238.7417 \\ 0.2691 & 2.8080 & -0.4942 & 282.6422 \\ 0.0009 & 0.0000 & -0.0016 & 1.0000 \end{bmatrix}.$$

摄像机 1:

$$k_1 = 1.27 \times 10^{-7}, \quad k_2 = 1.22 \times 10^{-7},$$

$$p_1 = -0.02 \times 10^{-7}, \quad p_2 = -0.03 \times 10^{-7},$$

$$s_1 = -6.13 \times 10^{-7}, \quad s_2 = -5.91 \times 10^{-6},$$

摄像机 2:

$$k_1 = 1.34 \times 10^{-7}, \quad k_2 = 1.20 \times 10^{-7},$$

$$p_1 = -0.01 \times 10^{-7}, \quad p_2 = 0.06 \times 10^{-7},$$

$$s_1 = -1.63 \times 10^{-5}, \quad s_2 = 1.58 \times 10^{-6}.$$

本系统的测量误差主要由以下几个方面引起:

1) 投影仪及摄像机的分辨率;2) 标定时电移台的移动误差及面内标记点的识别误差;3) 摄像机的畸变模型。标定后系统的测量精度为:Z 方向  $0.05\text{ mm}$ , X 方向  $0.2\text{ mm}$ , Y 方向  $0.1\text{ mm}$ 。

图 8 是两个摄像机获取的 1 帧变形条纹和纹理图。实验中,模特的拼接区域选在鼻子中线附近,宽度为  $3\text{ mm}$ 。图 9(a)是拼接后,以三角形网格表示的三维面形,图 9(b)是融合了纹理数据后,三维显示的屏幕截图,图 9(c)是鼻子部分三角形网格的放大图。从图中已无法看出数据拼接的痕迹,两边的纹理比较一致,说明数据融合有较高的精度。

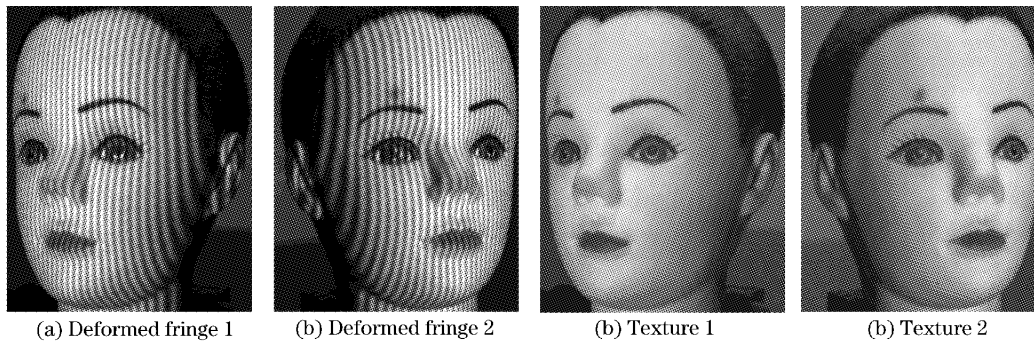


图 8 变形条纹及纹理

Fig. 8 Deformed fringe and texture

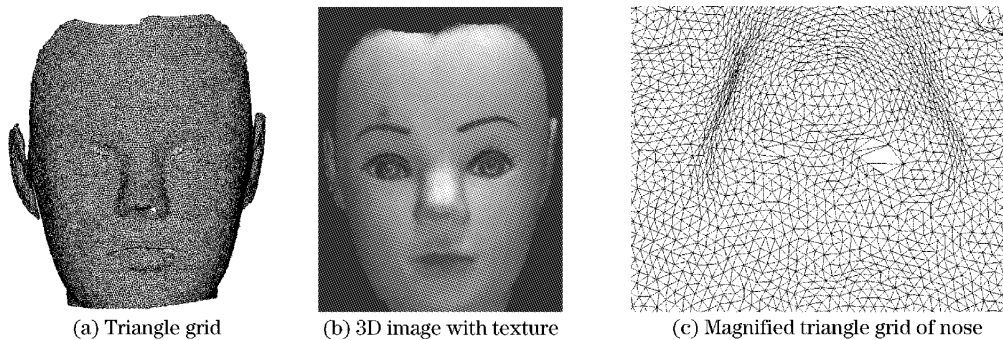


图 9 实验结果

Fig. 9 Experimental results

## 5 结 论

对于采用双摄像机的相位测量轮廓术三维测量系统数据融合问题,根据系统特点将两个摄像机在同一个坐标系中标定,获得系统参量。这样简化了两个摄像机测量数据的融合难度,同时具有更高的精度。对于整体数据融合,根据测量精度特点在摄像机视线重叠区内选择一定尺寸的区域作为数据拼接区,然后在拼接区内以其中一个摄像机数据的 X, Y 坐标为标准,将另一个摄像机的数据采用插值的方法得到其在对应位置的高度,以到拼接区中心线的 X 方向距离为权重,对两个高度值进行加权平均使数据平滑过渡。对于视线重叠区内空洞的补充,将空洞边界相似放大后构成数据拼接区,后续的处理方法与整体融合相似,主要区别是补洞数据平滑在边界法线方向上加权平均。纹理的拼接采用与高度拼接相同的方法,但要对纹理数据进行预处理,使两边纹理有较好的一致性。预处理方法是,以一个摄像机为标准,另一个摄像机获得的纹理数据乘以拼接区内两个摄像机纹理平均值之比。实验表明,本文提出的数据融合方法具有较高的精度,可以满足测量的需要。

## 参 考 文 献

- 1 Frank Chen, Gordon M. Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse object[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- 3 Xian-Yu Su, G. von Bally, D. Vukicevic. Phase stepping grating profilometry: Utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation[J]. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1): 141~150
- 4 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Nonlinear excess fraction method and its applications to profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1518~1522 (in Chinese)  
郝煜栋,赵洋,李达成. 非线性小数重合法及其在轮廓测量中的应用[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1518~1522
- 5 Zhao Hong, Chen Wenyi, Tan Yusha. A novel phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7): 898~901 (in Chinese)  
赵宏,陈文艺,谭玉山. 一种新的相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 1995, **15**(7): 898~901
- 6 Zhang Shunde, Lu Bingheng, Ding Yucheng. Study on data registration of subdivided shapes in optical 3-D profilometry[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(6): 533~536 (in Chinese)  
张舜德,卢秉恒,丁玉成. 光学三维形面分区域测量数据的拼接研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6): 533~536
- 7 Wu Dezhu, Chen Mingyi. Factors influencing on accuracy of 3-D shape measurement using the fringe-pattern connection method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(11): 1576~1581 (in Chinese)  
吴德柱,陈明仪. 影响条纹图形拼接法测量精度的主要误差因素[J]. *光学学报*, 1998, **18**(11): 1576~1581
- 8 Xianyu Su, Wanzhong Song, Yiping Cao *et al.*. Phase-height mapping and coordinate calibration simultaneously in phase-measuring profilometry[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(3): 708~712
- 9 Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. A new method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 272~277 (in Chinese)  
宋万忠,苏显渝,曹益平等. 相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 272~277
- 10 Jie-Lin Li, Xian-Yu Su, Ji-Tao Li. Phase unwrapping algorithm based on reliability and edge detection[J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(6): 1685~1690
- 11 W.-S. Zhou, X.-Y. Su. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry[J]. *J. Modern Optics*, 1994, **41**(1): 89~94