

文章编号 1004-924X(2011)04-0900-08

三维人脸表情动态采集系统的设计

王 涛,孙长库,杨国威

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘要:针对3D动画设计对人脸表情动态变化的三维数据信息的需求,设计了人脸表情动态采集系统。首先,采用标记光栅和空间映射法构建了人脸测量模型;设计了标记光栅图,并给出了利用相位图获取特征矩形的方法。然后,通过光栅上的特征矩形位置信息将测量得到的相对相位转化为绝对相位,再利用空间映射法获取三维坐标点信息。最后,进行了精度验证和人脸测量实验。测量了一个(220 ± 0.01) mm标准半球的直径,平均值为219.95 mm,5次直径拟合的均方差为0.48 mm;5次测量中,三维数据点同标准球面距离的均方差为0.28~0.46 mm。对一名实验人员面部表情进行了测量实验,仅用一幅带有特征矩形的变形光栅图即完成了对人脸表情的三维数据动态采集,所获得的三维造型真实,数据信息丰富,获取速度快。

关键词:人脸表情;动态测量;三维数据;数据采集;标记光栅

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111904.0900

Design for three-dimensional facial expression acquiring system

WANG Tao, SUN Chang-ku, YANG Guo-wei

(*State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: With the need of 3D animation design for the 3D facial expression data dynamically, a 3D facial expression acquiring system was designed. Firstly, a new model was constructed by using a feature grating pattern and a space mapping method. Then, a feature grating pattern was designed, and the extraction method of a feature rectangle was provided. Furthermore, the relative phase was translated into an absolute phase by using the information of feature rectangle, and the three-dimensional world coordinate information was obtained by the space mapping method. Finally, the tests on accuracy verification and facial measurement were performed. A standard hemispheroid with (220 ± 0.01) mm in diameter was measured five times, and the results show that the average of the fitting diameter is 219.95 mm, mean square error is 0.48 mm, and the mean square error of the distance between 3D points and spherical surface arrange is 0.28—0.46 mm. Moreover, the face with different expressions of a student was measured by the system, and the results indicate that the 3D data can be acquired by the system with only one fringe pattern and a vivid profile of the face is shown.

Key words: facial expression; dynamic measurement; 3D data; data acquiring; feature grating

收稿日期:2010-06-08;修订日期:2010-08-18.

基金项目:新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-06)

1 引言

目前,人脸的三维数据信息在生产生活中得到越来越广泛的应用,而且对获取速度的要求越来越高。例如,在人脸的3D动画设计中,为了细腻刻画虚拟人物的表情和肌肤纹理,常常需要人脸的三维动态数据。人脸表情涉及面部多个器官的协调运动,由于肌肉结构复杂,面部表情也非常丰富。采用传统的弹性网格变形法^[1-2]表征人的面部表情,缺乏肌肉连续变化的真实感和纹理特征,目前比较常用的方法是采用表演驱动^[3]的人脸动画技术来实现真实感三维人脸动画合成,将从连续视频图像序列中提取的信息作为动画系统的控制输入,跟踪表演者面部的各个特征点并将图像纹理映射到多边形模型上。具体做法是将反射球粘贴在人脸脸上跟踪人脸的运动,然而在人脸脸上做标记会让人产生不适,有时也不切实际,而且,对标记的依赖性限制了从标记位置获取几何信息的范围。采用视觉测量的方法可以避免与被测人的接触,而且可以提供更丰富的三维点信息。非接触式视觉测量中,速度较快的方法有双目视觉法^[4-5]、编码光栅法^[6]、多频光栅法、傅里叶变换轮廓术等。Zhou 等人在双目图像中手工定义一些相互对应的特征点^[7],并使用视觉技术恢复摄像机参数(位置、方向、焦距等)和特征点的坐标;然后,由这些特征点的坐标值计算出径向基插值函数的系数,并对一般网格进行变形,通过使用更多对应特征点,将一般网格微调到与真实人脸非常接近的形状。Pighin 等人用13个特征点来完成初始的变形,而在最后的调整中附加了99个特征点,此过程需要很多人机交互工作。编码光栅法和多频光栅法一般需要多幅光栅图,不利于表情的动态捕捉。傅里叶轮廓术能够快速获取相位,自 Taketa 等人提出该方法后,国内外学者进行了深入的研究,四川大学的苏显渝等人对系统结构进行了改进^[8],但仍然需要依靠一定的几何结构约束,Li W S 提出采用相位估算的方法^[9],该方法的估算相位受环境干扰比较大,精度不高。肖焱山^[10]等人提出了采用带有列方向上高频信息的标记条纹测量动态物体,由于是在频域上提取标记条纹,易出现定位不准的问题,另外,在标定和测量时依然需要参考平面的辅助。针对上述

问题和测量的需求,本文提出了绝对相位空间的概念,利用标记光栅上的特征矩形将相对相位转换为绝对相位,然后采用空间映射法将绝对相位转换为空间坐标点,只用一幅带有特征矩形的标记光栅,无需参考平面辅助即可完成对类似人脸表情的动态三维形貌的测量,为动画设计的表情模拟等工业应用提供了一种简易实用的视觉方法。

2 系统结构设计

系统结构示意图如图1所示,系统由投射装置和摄像机组成,保持一定角度固定在支撑柱上,调整投射器的位置,使标记光栅上的特征矩形能够水平投射,采集装置可以在支撑柱上垂直移动。测量前根据人脸的位置调整采集装置,使被测人的视线水平正对装置标记物,从而保证特征矩形能够投射到额头区域。

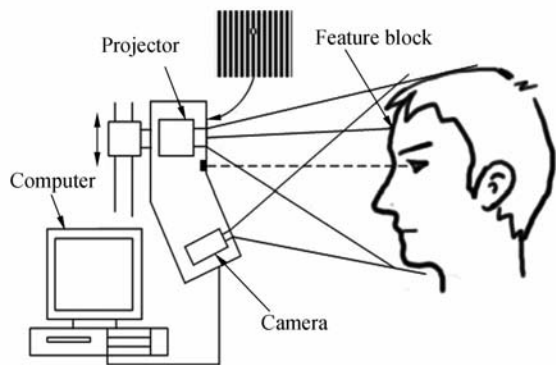


图1 系统结构示意图

Fig.1 System structure

3 标记光栅法校正相位的原理

测量系统原理图如图2所示,由于投射的光栅图是已知的,在投影仪射线方向上的点具有相同的相位,投影仪实际构造了一个锥形的绝对相位空间。

摄像机采集到的条纹仅为投影仪投射的部分条纹,根据这部分条纹求解的相位为相对相位,为了将相对相位(或自由相位)统一到绝对相位空间中,可以通过投射一条辅助参考光线或者参考点到被测物上,如图3所示,设投射光栅的边缘作为

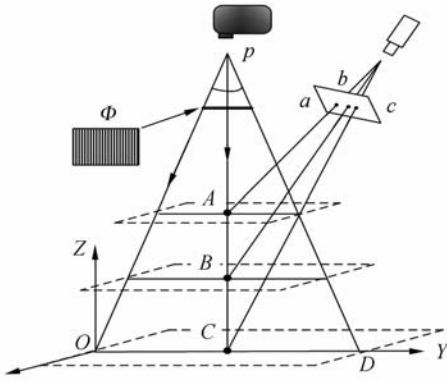


图 2 系统原理图

Fig. 2 Diagram of system principle

基准相位的起始点,其相位值记做 Φ_0 ,则辅助光线与基准相位之间的相位差如式(1):

$$\Delta\varphi = 2\pi(N_x/p) + \Phi_0, \quad (1)$$

式中 N_x 为投射光线在投射光栅上的 X 方向上的位置(光栅条纹为 Y 方向), p 代表投射光栅的像素周期。这样被测物相位在绝对相位空间中的值为:

$$\Phi(x, y) = \varphi(x, y) - \Delta\varphi. \quad (2)$$

如图 2 所示,在投影仪射线 PO 方向上, A, B, C 3 点具有相同相位值,在 CCD 上,形成不同位置 a, b, c 3 个成像点,可以说像素坐标反映的是空间点 Z 方向上的变化。反过来,摄像机中心和成像点的连线,和投影仪射线 PO 相交于空间 A 点,因此,在投射视场与摄像机视场相交的空间内,像素坐标 (u, v) 与其对应的相位值 p 将对应唯一的空间坐标点。

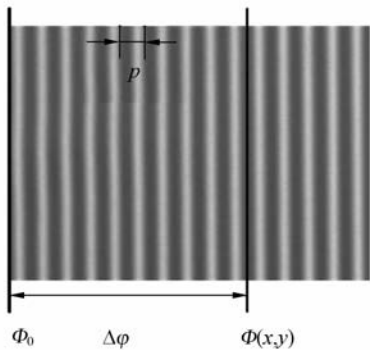


图 3 相位校正示意图

Fig. 3 Relative phase correction

利用空间映射法,可直接建立像素坐标和相位值到空间坐标的映射模型。这里采用 n 阶多项

式描述映射模型, (x_i, y_i, z_i) 与 $(u_i, v_i), \phi(u_i, v_i)$ 之间的关系采用矩阵表示为

$$\begin{pmatrix} p_0 & p_1 & \cdots & p_{m-1} \\ q_0 & q_1 & \cdots & q_{m-1} \\ r_0 & r_1 & \cdots & r_{m-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \phi \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} \sum_{k=0}^{n-i-j} u^i v^j \phi^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中 p_i, q_i 和 $r_i (i=0, 1, \dots, m-1)$ 是多项式的系数。式(4)可以简单表示为,

$$\mathbf{AX} = \mathbf{b}, \quad (5)$$

其中 \mathbf{A} 为物相转换矩阵,或称为标定矩阵。可借由大量已知数据即标定靶标对标定矩阵进行求解。

4 特征光栅设计

采用上述方法仍然需要采集一张特征参考图,通过上面的分析,考虑设计标记光栅,将特征点与光栅信息融合起来,从而使用一幅图像完成采集。标记光栅的设计应基于两点考虑,一是保证相位图信息完整,二是保证标记特征的准确提取。因此设计了如图 4 所示的特征光栅。

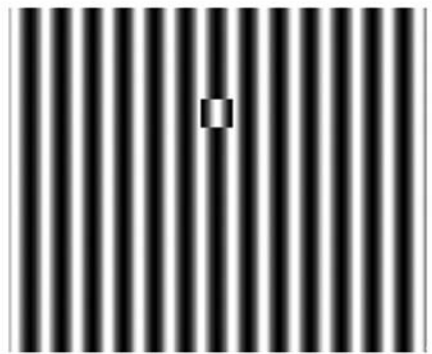


图 4 特征光栅图

Fig. 4 Feature grating pattern

在正弦分布的光栅图中,人为地加入一个周期的相位突变,称为特征矩形。特征矩形区域的相位会与周围的相位形成一个整体的相位差,由于这个矩形的相位是封闭的,在相位解缠绕时,将特征矩形的边缘设置为枝切线(Branch-cut)^[11],利用洪水(Flood-fill)解相算法绕开这个区域进行相位解包裹,展开相位不会在特征矩形的边缘发

生错误传播。进而,在得到的相位展开图的特征区域再填充特征矩形的相位即可获取整幅光栅图的完整相位。

5 标记特征的提取

由上述分析可知,特征矩形的提取是本方法的另一个重点,由于条纹光栅较密集,灰度变化剧烈,如果直接在条纹分布图上进行提取是比较困难的。然而标记特征在相位图的分布上则反映的非常明显。当光栅投射到被测物体表面上时,由 CCD 观察到的条纹将发生弯曲变形,其强度分布

$$G(f_x, f_y) = \frac{1}{2}B(f_x, f_y) * Q(f_x - f_{x_0}, f_y - f_{y_0}) + \frac{1}{2}B(f_x, f_y) * Q^*(-f_x - f_{x_0}, -f_y - f_{y_0}), \quad (8)$$

式中的大写字母表示其对应的小写字母的傅里叶变换。 Q^* 表示 Q 的共轭复数。用窗口滤波器从频谱中分离出一级谱成份 $\frac{1}{2}B(f_x, f_y)Q^*(f_x - f_{x_0}, f_y - f_{y_0})$, 把一级谱移动到频谱原点,再对它进行傅里叶反变换,可得到

$$I(x, y) = \frac{1}{2}b(x, y) \exp[2\pi i \varphi(x, y)]. \quad (9)$$

由 $I(x, y)$ 的实部和虚部,利用的 $\ln(\)$ 函数,可以获得包裹相位 $\varphi(x, y)$ 。

由于人脸的额头部分比较平坦,整个额头区域基本会位于同一包裹相位区域,特征矩形的变形会较小,且不会和其它特征混淆,因此选择将标记块投射到人脸的额头部分,如图 5 所示。通过公式(7)~(9)的处理,可以清楚地看到标记块在频移后的包裹相位图上的位置,为了便于提取特征矩形的的位置信息,将包裹相位图 6 以一定的相位梯度阈值进行二值化,得到图 7 所示效果。

为了准确提取特征矩形的信息,通过人脸识别的方法先定位到额头区域,再进行特征提取,采用 Adaboost^[12-13] 算法可以迅速定位人眼,实验中定位人眼的速度约为 40 ms,因此可以用于辅助提取特征块。如图 7 所示,首先定位人眼位置,然后根据人脸的比例,提取额头区域。在二值化包裹相位图上提取相应区域,对特征块进行提取。

在筛选后的额头区域,可能存在如图 7 中 1 所示杂点和 3 所示的相位截断线,为准确提取变形特征 2,采用如下步骤:

可表示为:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_{x_0} x + 2\pi f_{y_0} y + \varphi(x, y)], \quad (6)$$

$\varphi(x, y)$ 是被测物体形貌引起光栅条纹图变形而产生的调制相位。对于一幅连续的变换条纹图,其二维傅里叶变换可以表示为:

$$G(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \exp[-2\pi i(f_x x + f_y y)] dx dy, \quad (7)$$

式中, f_{x_0}, f_{y_0} 为参考面上投影光栅的基频的 2 个分量。设 $q(x, y) = \exp[2\pi i \varphi(x, y)]$, 对上式做二维傅里叶变换可得:



图 5 带有特征块的变形光栅

Fig. 5 Fringe pattern with feature rectangle

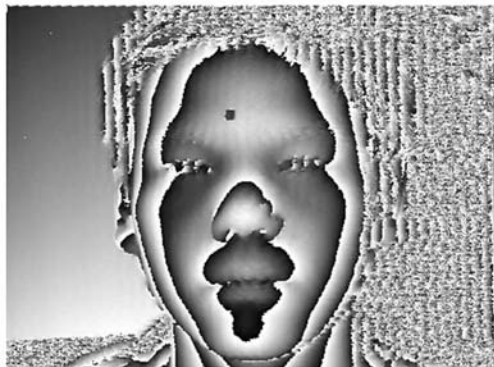


图 6 频移后的包裹相位图

Fig. 6 Wrapped phase after frequency-shift

(1) 在筛选后的额头区域提取边缘线,并为每个连续的边缘线建立点集序列;

(2) 由于特征矩形是闭合的,根据这个特征对

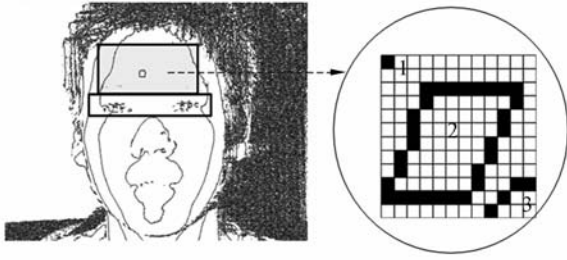


图 7 特征矩形的提取

Fig. 7 Feature rectangle extraction

各个点集序列进行闭合性检测。设每个点集序列共有 m 个点, 相邻像素点的 x, y 坐标值的差分别为 $\Delta x_i, \Delta y_i (i=1, 2 \dots, m)$, 如果是闭合曲线则有:

$$\sum_{i=1}^{m-1} \Delta x_i = 0, \sum_{i=1}^{m-1} \Delta y_i = 0. \quad (10)$$

(3) 通过对预定采集区域不同深度上的特征块的面积和像素周长值的采集, 确定周长和面积的阈值范围, 设面积的阈值为 A_T , 周长的阈值为 C_T , 检测到的闭合曲线点集的个数为 k , 其周长和面积分别为 A_k, C_k , 则相似度为:

$$F_S = (A_k - A_T)^2 + (C_k - C_T)^2. \quad (11)$$

设定 F_S 的阈值, 进一步滤除噪声, 从而确定特征块的位置信息。

提取特征矩形后, 由于特征矩形的左边(或右边)具有相同相位, 且由于是绘制在投影仪内存上, 其绝对相位值是已知的, 因此左边上任意一点都可以作为相位校正的标记点, 特征块投射到额头区域, 畸变不会太大, 可以认为特征块像素序列中位置最靠左的点必定位于左边上, 提取该点, 并作为相位校正的标记点。通过式(2)将测量得到的相对相位校正为绝对相位, 利用式(5)求得的标准系数, 将相位转化为空间坐标信息。

6 人脸测量实验及精度验证

在实验中, 采用 DLP 投影仪和 CCD 摄像机组成测量系统。为了验证测量精度, 对直径 $d = (220 \pm 0.01)$ mm 的标准半球进行 5 次测量。图 8 为被测半球的光栅分布图, 图 9 为测量所得的 3 维点云数据:

设测量得到球面的中心坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 则根据采集到的点集 (x_i, y_i, z_i) 可以建立如下目

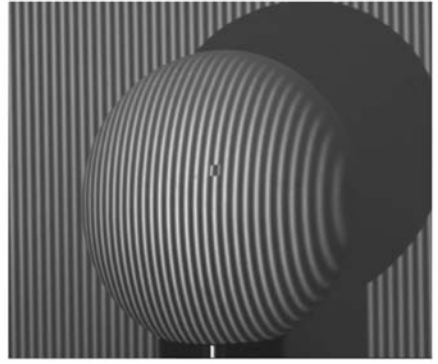


图 8 半球体的光栅条纹分布

Fig. 8 Fringe distribution on hemisphere

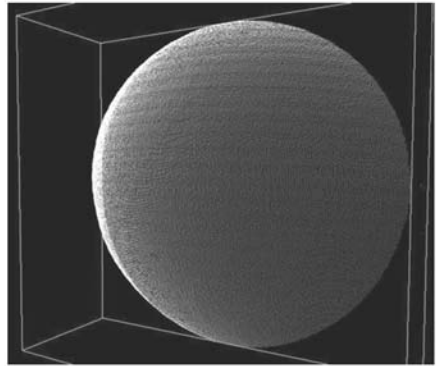


图 9 半球体三维点云数据

Fig. 9 3D point cloud of hemisphere

标函数:

$$F = \min \sum_{i=0}^n (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2, \quad (12)$$

采用 Levenberg-Marquard 最优化算法对球心坐标进行估计, 最后求得拟合直径。然后, 分别求取各个球面离散点距离标准球面的距离, 进行均方差统计得到表 1 所示数据:

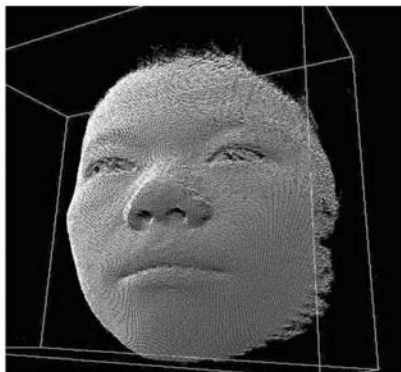
表 1 测量结果统计

Tab. 1 Statistics of measuring results

测量序号	拟合直径/mm	测量数据同标准球面距离的均方差/mm
1	220.20	0.41
2	220.19	0.33
3	220.50	0.46
4	219.48	0.35
5	219.40	0.28
平均值 (219.95)		
均方差 (0.48)		

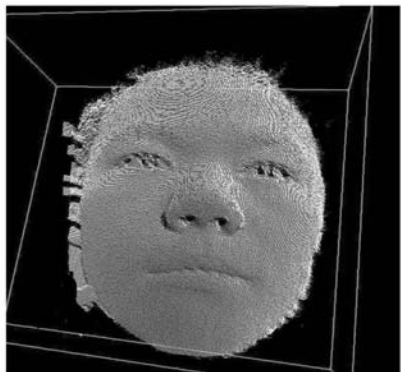
为了观测人脸测量实验效果,对一名实验人员不同表情进行了测量,得到如图10所示结果。

对标准球的测量实验结果表明,本测量系统所述方法准确有效。人脸三维点数据的造型信息显示,人物表情真实生动,细节信息细腻,数据点丰富,完全适合三维动画一类的工业需要。需要指出的是,由于人脸测量的特殊性,本文不能给出



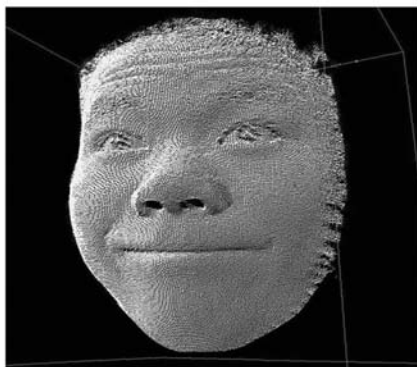
(a) 正常表情 1

(a) Normal expression 1



(b) 正常表情 2

(b) Normal expression 2



(c) 惊讶表情

(c) Amazing expression



(d) 微笑表情

(d) Smile expression

图10 不同表情测量效果

Fig. 10 3-D effects of different expressions

精确的对比数据,实际测量中,人脸的测量误差要比测量标准半球时大,这主要是因为人脸背景噪声的影响,由于本方法是基于傅立叶变换的方法,背景噪声会引起频谱混叠,对于这种误差的消除方法,众多学者进行了深入的研究^[14-18],本文也做了学习和借鉴。

7 结 论

本文采用标记光栅法,只用一幅调制光栅图对物体3D形貌进行测量,完成了对类似人脸表情变化的动态三维形貌的测量。设计的系统结构简单,易于搭建和标定,无需参考平面辅助,可直接完成测量。实验中,动态捕捉被测人的表情,表情较自然,而一般视觉方法中使用多帧采集时,会由于光源照射对眼睛的刺激导致被测人面部表情无法保持,从而造成采集帧之间数据的不一致。系统的测量结果具有较高的精度,对直径为 (220 ± 0.01) mm的标准半球测量实验表明,5次直径拟合的均方差为0.48 mm,平均值为219.95 mm,离散点云与标准球面距离的均方差为0.28~0.46 mm。在人脸表情动态实验中,得到的三维人物表情造型真实生动,细节信息细腻,数据点丰富。系统有着较为广泛的应用领域,除了人脸3D动画外,在安保系统,以及医学领域的美容,整形等方面均有很好的应用前景。不过,系统目前使用的光源依然为对人有较大刺激的投影仪荧光光源,在下步工作中有望采用冷光源或红外光源加以替代。

参考文献:

- [1] YUONG W L, JA L W, MING O. A three-dimensional muscle-based facial expression synthesizer for model-based image coding[C]. *Signal Processing: Image Communication* 8, 1996:353-363.
- [2] DING H, HONG Y. Modeling and animation of human expressions using NURBS curves based on facial anatomy [C]. *Signal Processing: Image Communication* 17, 2002:457-465.
- [3] FASEL B, JUERGEN L. Automatic facial expression analysis; a survey [J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36:259-275.
- [4] 郭永彩, 魏朋玉, 高潮. 采用多级动态规划实现立体匹配[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7):1745-1750.
GUO Y C, WEI P Y, GAO C. Stereo correspondence using multi-stage dynamic programming[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1745-1750. (in Chinese)
- [5] 孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目视觉传感器的现场标定[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3):633-640.
SUN J H, WU Z Y, LIU Q Z, *et al.*. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):633-640. (in Chinese)
- [6] SUN J H, ZHANG G J, WEI Z Z. Large 3D free surface measurement using a mobile coded light-based stereo vision system[J]. *Sensors and Actuators*. 2006, 132:460-471.
- [7] ZHOU H, MUDUR S P. 3D scan-based animation techniques for Chinese opera facial expression documentation[J]. *Computers & Graphics*, 2007, 31:788-799.
- [8] MAO X F, CHEN W J, SU X Y. Improved Fourier-transform profilometry [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(5):664-68.
- [9] Li W S, SU X Y, LIU Z B. Large-scale three-dimensional object measurement: a practical coordinate mapping and image data-patching method[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(20):3326-3333.
- [10] 肖焱山, 苏显渝, 张启灿, 等. 采用标记条纹跟踪的冲击过程三维轮廓术[J]. *光电工程*, 2007, 34(8):46-52.
XIAO Y S, SU X Y, ZHANG Q C, *et al.*. 3-D profilometry for the impact process with marked fringes tracking [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(8):46-52. (in Chinese)
- [11] GOLDSTERIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometer; Two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, 23(4):713-720.
- [12] 宋燕星, 袁峰, 丁振良, 等. 使用形态 Haar 小波法检测目标感兴趣区域[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7):1752-1757.
SONG Y X, YUAN F, DING Z L, *et al.*. Detection of region-of-interest by morphological Haar wavelet method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1752-1757. (in Chinese)
- [13] WANG P, JI Q. Multi-View face and eye detection using discriminant features [J]. *Computer Vision and Image Understanding*. 2007, 105:99-111.
- [14] 陈文静, 苏显渝, 曹益平, 等. 傅立叶变换轮廓术中抑制零频的新方法[J]. *中国激光*, 2004, 31(6):741-744.
CHEN W J, SU X Y, CAO Y P, *et al.*. New method to eliminate extension of zero component in FTP [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(6):741-744. (in Chinese)
- [15] 石春琴, 张丽艳, 韦虎, 等. 随机模式投影双目测量系统中的单目测量[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):257-265.
SHI C Q, ZHANG L Y, WEI H, *et al.*. Monocular measurement in binocular measurement system with instantaneous random illumination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):257-265. (in Chinese)
- [16] 张鹏飞, 赵宏, 周翔, 等. 采用立体视觉实现子孔径拼接测量的工件定位[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2):504-510.
ZHANG P F, ZHAO H, ZHOU X, *et al.*. Work-piece localization in sub-aperture stitching best based on stereo vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2):504-510. (in Chinese).
- [17] 李思坤, 陈文静, 苏显渝, 等. 傅里叶变换轮廓术中基于经验模态分解抑制零频的方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(3):654-669.
LI S K, CHEN W J, SU X Y, *et al.*. Empirical mode-decomposition method for eliminating extension of zero component in fourier transform profilometry [J]. *Acta optica sinica*, 2009, 29(3):654-669. (in Chinese)
- [18] 杨初平, 翁嘉文, 赵静, 等. 从变形光栅条纹提取基准光栅信息[J]. *光学学报*, 2009, 29(11):3079-3081.

YANG C P, WENG J W, ZHAO J, *et al.*. Extract original grating information from deformed grating

pattern[J]. *Acta optica sinica*, 2009, 29(11): 3079-3081. (in Chinese)

作者简介:



王涛(1980—),男,吉林磐石人,博士研究生,2001年、2006年于解放军军事交通学院分别获学士和硕士学位,主要从事机器视觉、检测技术、图像处理、模式识别等方面的研究。E-mail: wangtao301@gmail.com



杨国威(1988—),男,湖北襄樊人,2010年于天津大学精密仪器与光电子工程学院获学士学位,主要从事视觉检测、图像处理方面的研究。E-mail: yangguowei8828@163.com

导师简介:



孙长库(1967—),男,辽宁抚顺人,教授,博士生导师,1986年、1990年于哈尔滨工业大学分别获学士和硕士学位,1994年于俄罗斯圣彼得堡大学光学与精密机械学院获博士学位,主要从事激光测量、机器视觉、检测技术等方面的研究。E-mail: sunck@tju.edu.cn

●下期预告

差分法空间相机像移速度矢量计算

王运^{1,2}, 颜昌翔¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

精确的像移速度矢量计算是实现空间相机精密像移补偿的重要前提。为了实现空间相机精密像移补偿,提出了一种基于差分法的空间相机像移速度矢量计算模型。首先,应用坐标变换建立空间相机对地成像模型,分析了空间相机在垂直摄影、侧摆摄影和前后摆摄影时,目标像点与成像面之间的相对运动情况。然后,根据目标像点在成像面上的匀速运动规律,提出对像点位置坐标差分计算像移速度矢量的方法。最后,将该方法与基于坐标变换像移速度矢量计算方法进行了比较。结果表明,两种计算方法的相对误差在0.1%以内,验证了该方法的正确性。该方法更直观、且计算简单,适用于空间相机像移补偿技术。