

单幅彩色条纹投影的不连续物体表面三维形貌测量

戴美玲¹ 杨福俊¹ 耿 敏¹ 何小元¹ 康 新²

(¹东南大学江苏省工程力学分析重点实验室, 江苏 南京 210096)
²南京理工大学工程力学系, 江苏 南京 210094

摘要 提出了基于单幅彩色条纹投影的不连续物体及动态三维形貌的测量方法。该方法利用计算机产生一幅正弦条纹图和两幅单一强度图分别通过红蓝绿三个通道合成为一幅彩色条纹图,由液晶投影仪投影到被测物体表面,彩色 CCD 采集变形条纹图并保存在计算机中。通过三色分离,同时获得正弦条纹图和反映表面反射率分布及背景信息图,通过图像除法运算及亚像素精度归一化处理实现物体三维形貌的恢复。对于表面形貌不连续的物体,利用蓝色分量的灰度图像进行二值化处理定位阴影或暗背景,从而引导正确的相位求解。实验验证了该方法对不连续物体动态测量方面的可行性。

关键词 测量;三维形貌测量;彩色条纹投影;相位分析;亚像素灰度插值;不连续信息引导图

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0412005

Single Color Fringe Projection for Measuring Three-Dimensional Shapes with Discontinuities

Dai Meiling¹ Yang Fujun¹ Geng Min¹ He Xiaoyuan¹ Kang Xin²

(¹Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)
²Department of Engineering Mechanics, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract A novel fringe projection profilometry used for discontinuous shape measurement is proposed. One color fringe pattern generated by computer encoding with a sinusoidal fringe and two uniform intensity patterns is projected by a digital video projector and the deformed fringe pattern is recorded by a color CCD camera. The captured color fringe pattern is separated into its RGB components and division operation is applied to red and blue channels to reduce the variable reflection intensity. Shape information of tested object is decoded by applying an arcsine algorithm on the subpixel-scale normalized fringe pattern. To determine the shadow and dark background, the separated blue component is binarized and used to guide the phase extraction. The experimental results demonstrate the validity of the proposed method for discontinuous and dynamical shape measuring.

Key words measurement; three-dimensional shape measurement; color-fringe pattern projection; phase analysis; gray-value interpolation in sub-pixel; discontinuities-guide map

OCIS codes 120.6650; 120.5050; 110.6880

1 引 言

数字投影光栅技术由于测量系统简单、高精度和高分辨率等优点被广泛应用于三维形貌测

量^[1~15],在板壳等薄壁结构大变形测量,印刷电路板上电子元件封装焊点形貌检测;自动控制、形貌优化及医学诊断的表面形貌获取等领域中都受到很大

收稿日期: 2011-10-08; 收到修改稿日期: 2011-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(10727201,10972055)和江苏省高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 戴美玲(1985—),女,博士研究生,主要从事光测力学与图像处理等方面的研究。

E-mail: 220090809@seu.edu.cn

导师简介: 杨福俊(1968—),男,博士,教授,主要从事应用光学方法研究新型材料与结构及细胞的力学性能等方面的研究。E-mail: yang-fj@seu.edu.cn

的关注。近年来,国内外已推出了众多商品化的基于数字投影的三维测量系统,大多数是针对静态测量;在动态测量方面仍存在许多不足,其中不连续物体的形貌测量一直是该技术的研究热点。许多学者广泛采用空间多频结合傅里叶变换或时间相移技术研究解决表面不连续对相位解调影响的问题^[5~13]。对于在单色投影的情况一般需要采集多幅、多频条纹图,才能求解其绝对相位,即便采用高速投影与图像采集方法,仍算不上是真正意义上的动态测量。Zhang等^[11]通过将最优的3种不同频率正弦条纹、利用RGB通道将多频条纹合成一幅彩色条纹图进行单幅投影与采集,利用计算机颜色分离技术与傅里叶变换方法获得3种频率条纹的包裹相位,进而求绝对相位。原理上讲上述一幅彩色空间多频条纹投影技术可以解决表面不连续问题,然而不同色彩通道之间的“串音”仍是影响三色分离的主要难题。Su等^[12~14]提出将彩色编码条纹与灰度条纹相位相结合的彩色栅线空域编码,并基于傅里叶变换和彩色编码实现用一幅彩色条纹进行全场相位恢复,然而色彩编码以及对彩条判色的处理比较困难。

本文提出了一种简单的单幅彩色条纹投影与采集方法实现对表面不连续物体三维形貌的测量。该方法的单幅条纹图的条纹相位解调不用傅里叶变换技术,避免采用复杂的色彩编码测量含有不连续或阴影的物体形貌,而是采用本课题组^[16]介绍的计算方法进行条纹相位解调,仅用含有两种颜色单幅彩色条纹技术实现包含不连续或阴影的、以及多个孤立物体的形貌测量。

2 测量原理与方法

2.1 彩色单幅正弦条纹相位解调

当采用标准正弦栅线图投影,理想情况下相机采集的变形条纹图灰度 $g(x, y)$ 可表示为

$$g(x, y) = A(x, y) + R(x, y)\{1 + \sin[2\pi fx + \varphi(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中 $A(x, y)$ 为与测量周围光环境有关的背景项, $R(x, y)$ 为物体表面反射率, f 为参考平面上条纹的空间频率, $\varphi(x, y)$ 是包含物体高度信息的条纹相位。由于条纹投影测量大多在环境光很弱的实验室内进行, (1) 式中背景项 $A(x, y)$ 可以忽略, 因此 (1) 式可简化为

$$g(x, y) = R(x, y)[1 + \sin \Psi(x, y)], \quad (2)$$

式中 $\Psi(x, y) = 2\pi fx + \varphi(x, y)$ 。为了获得归一化的正弦条纹图, 与物体表面反射率有关的 $R(x, y)$ 必须消除。对于反射率分布比较均匀的情形, 可通过均值滤波的方式实现条纹强度的归一化; 但是在实际测量中被测物体表面反射率分布很不均匀。因此, 本文采用文献^[16]中提出的方法消除反射率的影响。由计算机生成一幅正弦条纹图和一幅强度均匀分布图样(灰度不为零)通过图像处理技术分别输给彩色图像的RGB通道中的RB两个通道合成一幅彩色条纹图, 而绿色通道的灰度设为0, 这里主要考虑的是多数彩色传感器绿色分量与红、蓝分量有“串音”耦合互扰现象。利用彩色CCD相机采集上述投影变形条纹图, 再由图像处理方法分解成RGB三色分量, 将其中红色条纹图与仅反映物体表面反射率的蓝色背景图相除即可消除物体表面不均匀反射率 $R(x, y)$ 的影响。对已消除 $R(x, y)$ 的条纹图进一步进行归一化处理就可得到正弦分布条纹为

$$G(x, y) = \sin \Psi(x, y), \quad (3)$$

由于正弦函数 $\sin x$ 在每个周期 $x \in (2k\pi - \pi, 2k\pi + \pi)$ (k 为整数) 内存在二义性, 即 $\sin x = \sin(\pi - x)$, 因此一般不用反正弦函数解调条纹相位。鉴于三角函数 $\sin x$ 的值在半周期 $(2k\pi - \pi/2, 2k\pi + \pi/2)$ 内单调递增, 而在另半周期 $(2k\pi + \pi/2, 2k\pi + 3\pi/2)$ 内单调递减的特性, 采用下式计算就能得到正确的条纹相位 $\Psi(x, y)$ 的“包裹”值:

$$\Psi(x, y) = \begin{cases} \arcsin G(x, y), & G(x, y) \in [-1, 1) \\ \pi + \arcsin[-G(x, y)], & G(x, y) \in [1, -1) \end{cases} \quad (4)$$

进一步利用解“包裹”算法可获得条纹的绝对相位, 从而重构出物体的三维形貌。

2.2 亚像素精度的条纹归一化方法

显然, 正弦条纹图归一化处理的精确程度影响着使用本文介绍的相位解调方法的准确性。以一维

条纹图像为例, 在整像素精度内对条纹图灰度进行归一化计算可得

$$G(x) = \frac{2[g(x) - \min_{t \in T} g(t)]}{\max_{t \in T} g(t) - \min_{t \in T} g(t)} - 1, \quad (5)$$

式中 T 表示图像中灰度值分布在两个相邻的极大

和极小值之间所有点的子集。然而,由于图像采集及数字化存储时受采样频率和离散化精度的影响,

整像素范围内的灰度最大(小)值,不一定是真正的灰度极值,如图1区域A所示。

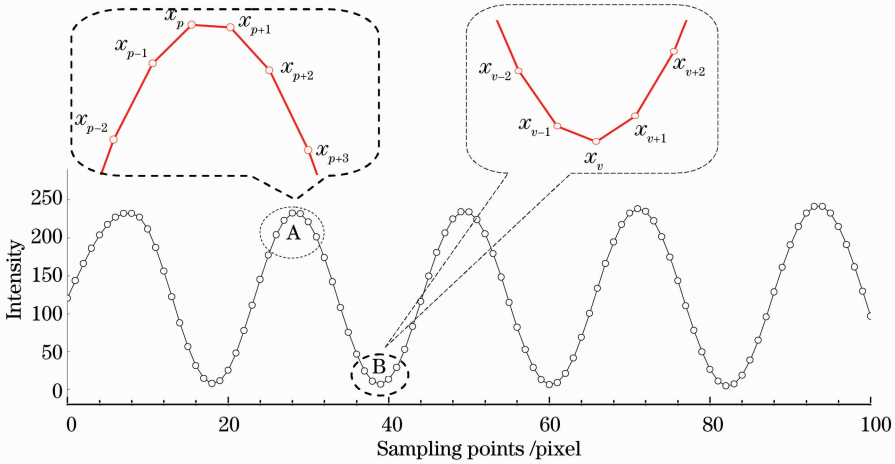


图1 一维正弦条纹强度离散分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 1-D discrete intensity distribution in sinusoidal fringe

为了实现亚像素精度内条纹灰度归一化处理,采用了Akima插值法^[17]对条纹灰度值进行亚像素插值。如果对于下式在每个区域 $[x_i, x_{i+1}]$ 上的两个端点处都存在函数值 g_i 和 g_{i+1} ,以及一阶导数值 g'_i 和 g'_{i+1} ,则在此区域 $[x_i, x_{i+1}]$ 内唯一存在函数 $g(x)$ 为

$$g(x) = a_0 + a_1(x - x_i) + a_2(x - x_i)^2 + a_3(x - x_i)^3, \quad x_i \leq x \leq x_{i+1} \quad (6)$$

这就是Akima插值算法。式中 $g(x)$ 是待求的亚像素位置 x 处的灰度值,注意 x 是个非整数。下标 i 为整数, x_i 和 x_{i+1} 表示整像素采样点的坐标。插值多项式系数 a_0, a_1, a_2 和 a_3 的具体计算方法可参考文献^[17]。Akima插值算法在本文中使用方法如下:找出整像素范围内条纹灰度极值的位置,如图1所示的那样先初步确定峰值位置 x_p ,即灰度值满足 $g(x_p) > g(x_{p-1})$ 和 $g(x_p) > g(x_{p+1})$;或波谷位置 x_v ,也就是灰度值满足 $g(x_v) < g(x_{v-1})$ 和 $g(x_v) < g(x_{v+1})$ 。取峰(谷)点两侧各两个点,利用Akima算法对由峰(谷)点在共5个点处的灰度值进行插值,在每个峰(谷)点处得到唯一的多项式 $g(x)$,这样利用下式就得到亚像素精度内条纹灰度的极值 $g_{\max}(x)$ 或 $g_{\min}(x)$ 。

$$\frac{dg(x)}{dx} = 0, \quad x_{p-1} \leq x \leq x_{p+1} \quad \text{or} \quad x_{v-1} \leq x \leq x_{v+1} \quad (7)$$

利用 $g_{\min}(x)$ 和 $g_{\max}(x)$ 代替(5)式中的 $\min_{t \in T} g(t)$ 和 $\max_{t \in T} g(t)$ 实现对条纹灰度分布的亚像素精度归一化处理。

2.3 消除不连续物体或阴影影响的方法

对于表面形貌局部坡度变化大或不连续的物体,投影条纹时将产生阴影或栅线断线,这对于傅里叶变换法或单频条纹投影的多步相移法来说都无法进行完整的相位去包裹处理,得到的相位阴影处存在毛刺、非正常跳跃现象。考虑到投影时采集的被测物体图像中对应于阴影部分的灰度值一般都很小,利用图像二值化处理技术很容易对阴影进行定位。然而仅利用黑白灰度条纹投影和黑白相机采集图像,图像的二值化处理后的条纹强度分布将不再是正弦分布,无法利用本文前述的相位解调方法计算相位。因此本文采取以下方法,实现利用单幅彩色条纹图消除不连续物体或阴影对条纹相位去包裹的影响。

2.3.1 阴影区域的确定

由本文2.1节中的彩色条纹投影和彩色相机的图像采集介绍可知,经图像处理方法分解RGB三色分量中的红色部分为条纹图,而蓝色部分则仅反映物体表面反射率分布和阴影信息,不含任何条纹信息。蓝色分量中对应于阴影部分的灰度值很小,易于利用图像二值化处理技术将被测物表面和阴影区分开来。如果用1表示被测物体表面,0表示阴影或暗背景,将得到用于正确计算相位的二值化引导图像。

2.3.2 基于二值图像引导的相位计算

首先按四步相移方法采集投影到标准参考平面的条纹图像,并由四步相移算法得到标准参考面的相位图,用于后面的相位匹配计算。利用计算机产

生单幅彩色条纹并由数字投影仪投影到被测物体上,彩色条纹的频率与四步相移投影条纹的频率相同。对彩色 CCD 采集的变形条纹进行色彩分离,得到一幅变形条纹图(红色分量)及反映物体表面反射率和表面不连续及暗背景信息的灰度图(蓝色分量)。利用 2.1 节介绍的算法由红色分量的变形条纹图得到被测物体的相位图;而由蓝色分量的图像得到的是二值化引导图。利用二值化引导图,将标准平面的相位图与被测物体的相位图进行匹配。即将被测物相位图中与二值化引导图灰度值为 1 相对应区域的相位保留,而被测物相位图中与二值化引导图灰度值为 0 的区域相对应的用与参考平面相对应区域的相位替换,从而得到有效消除阴影影响的相位图。

3 实验及结果

本实验的正弦光栅周期均为每条 20 pixel,均按文献[15]介绍的方法校正好。单幅彩色光栅是由均一灰度值赋给蓝色分量,条纹图信息赋给红色分

量,绿色分量为 0 合成而来。首先将 4 幅黑白相移条纹图投影到白色标准平板上,相移的步长为 90° ,图 2(a)为其中一幅标准平面条纹图,通过相移算法得到参考平面的相位图,如图 2(b)所示。用被测物体取代平板,将彩色光栅投影到被测物体表面,并用彩色 CCD 进行采集。采集的单幅彩色变形条纹如图 3(a)所示,将其色彩分离并去色后得到的条纹和背景灰度图图像分别为图 3(b)和图 3(c)所示。由图 3(b)和图 3(c)通过 2.1 节介绍的方法计算得到的相位如图 4(a)所示,被测物体的眼睛及其以外的背景部分由于没有条纹而出现了大量噪声。对蓝色分量的灰度图进行二值化处理,如图 4(b)所示,图中白色部分为所关注的测量区域,黑色区域对应于栅线不连续或阴影及暗背景部分。利用图 4(b)将图 4(a)中对应于阴影及背景位置的相位用图 2(b)参考平面的相应位置的相位替换,得到的相位如图 4(c)。图 5(a)为由图 4(c)消除参考平面相位后得到的相位三维显示,而图 5(b)为传统的四步相移实验方法得到的结果。

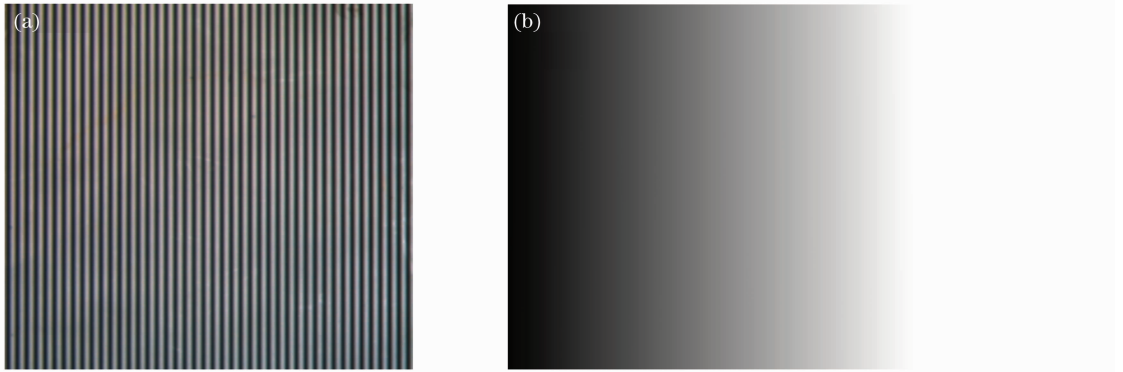


图 2 (a) 投到参考平面上的条纹图; (b) 由四步相移法得到的参考平面相位

Fig. 2 (a) One of four-step phase-shifting fringe patterns projected on a reference plane; (b) phase map of the reference plane resulting from four-step phase-shifting method

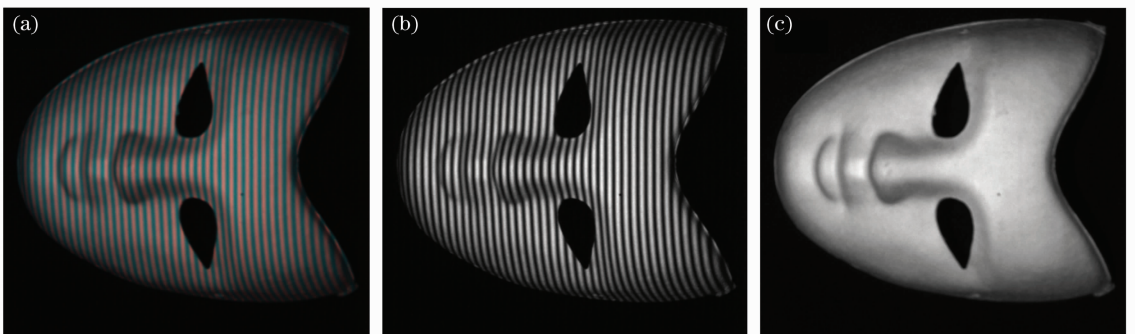


图 3 (a) 彩色相机采集的条纹图, (b) 和 (c) 为图 3(a) 经色彩分离处理得到的红色与蓝色通道灰度图像

Fig. 3 (a) Image fringe acquired by color camera; (b) gray image of red and (c) blue channels, color separated from Fig. 3(a)

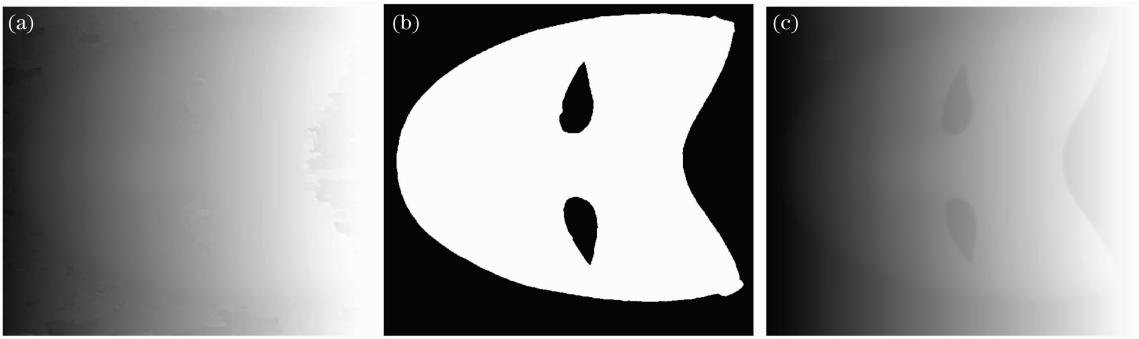


图 4 (a)用 2.1 节的相位解调方法处理图 3(b)的结果; (b)图 3(c)的二值化图像; (c)由 2.2 节介绍的方法获得图 3(b)的正确相位图

Fig. 4 (a) Unwrapped phase results from Fig. 3(b) using the method described in section 2.1; (b) binary image of that shown in Fig. 3(c); and (c) phase map of Fig. 3(b) obtained by the method described in section 2

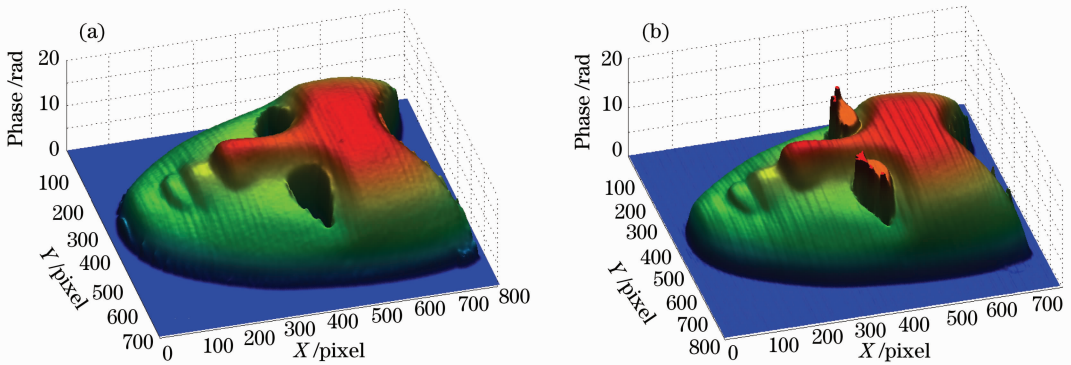


图 5 (a)应用本文介绍的方法和(b)四步相移法得到的被测试样的三维相位分布

Fig. 5 3-D phase distributions obtained by (a) the proposed and (b) 4-step phase-shifting methods, respectively

为了说明该方法适用于分立不连续物体及动态测量,本文对运动中的双手进行了测量,图 6 为用彩色相机采集的两幅连续图像,图像采集速率为 25 frame/s,图 7 为采用本文介绍的方法重构的三维形貌图。

需要说明的是:在初步消除反射影响后,一般需要对条纹图进行 3×3 或 5×5 的均值滤波,否则条

纹亚像素归一化处理前整像素极值定位较易出错。模拟实验结果表明使用亚像素条纹归一化处理,可使本文介绍的相位解调准确度提高近一个数量级,其相位误差为 ± 0.02 rad 左右^[18]。另外图 5(a)及图 7 所示的相位都采用文献[19]介绍的 3×5 相位滤波器滤波,这样可进一步消除随机噪声产生的误差。

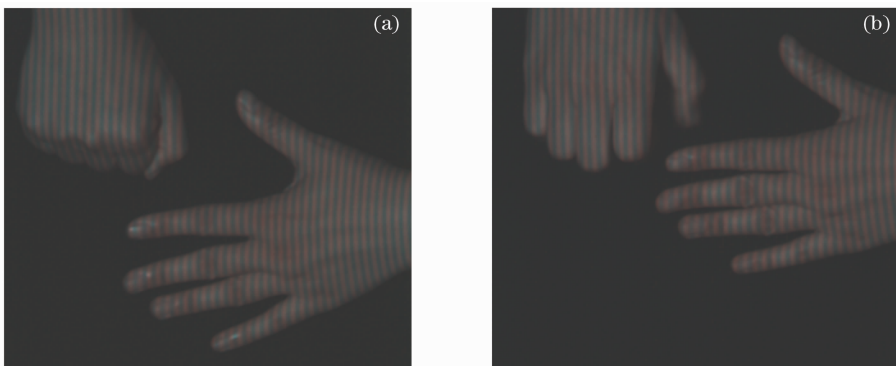


图 6 手的动态姿势

Fig. 6 Different gestures of moving human hands

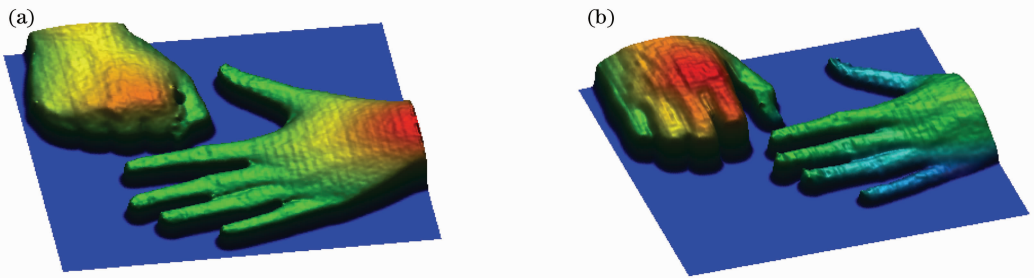


图 7 对应于图 6 手的三维姿态重构图像

Fig. 7 3-D gesture reconstructions of human hands; (a) and (b) corresponding to Fig. 6(a) and (b), respectively

另外还需说明的,图 5(a)是相位滤波处理的结果,而图 5(b)是直接由四步相移技术处理得到的,没有消除时间相移技术中的随机噪声。从作者前文基于同样原理测量类似试样的定量分析比较来看^[16,18],两者测量的结果很接近。

4 结 论

本文提出的相位处理方法是利用蓝色分量灰度图的二值化图判定物体的背景部分(包括阴影),以此进行相位匹配并经过适当的相位均值滤波平滑得到了满意的结果。从传统的四步相移实验方法得到的结果[图 5(b)]可见面具头顶及眼睛部分区域由于阴影的存在导致出现了许多毛刺并且眼睛部分的不连续导致相位解包裹时对条纹级数的误判从而出现了误差。由本文提出的方法得到的结果[图 5(a)及图 7]能有效消除阴影所带来的噪声及误差,通过对运动中手的姿态测量进一步说明该方法在动态不连续物体形貌测量方面的可行性。当然对表面色彩丰富的物体来说本文的方法仍有较大的误差,这也是其他使用彩色光栅投影形貌测量方法不可避免的问题。

参 考 文 献

- 1 X. Y. Su, Q. C. Zhang. Dynamic 3-D shape measurement method; a review[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 191~204
- 2 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 3 C. Quan, X. Y. He, C. F. Wang *et al.*. Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **189**(1-3): 21~29
- 4 H. O. Saldner, J. M. Huntley. Temporal phase unwrapping: application to surface profiling of discontinuous objects[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13): 2770~2775
- 5 M. Takeda, Q. Gu, M. Kinoshita *et al.*. Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: a single-shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(22): 5347~5354
- 6 J. L. Li, H. J. Su, X. Y. Su. Two-frequency grating used in phase-

- measuring profilometry[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1): 277~280
- 7 Z. Y. Wang, D. A. Nguyen, J. C. Barnes. Some practical considerations in fringe projection profilometry [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 218~225
- 8 C. E. Towers, D. P. Towers, J. D. C. Jones. Optimum frequency selection in multifrequency interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(11): 887~889
- 9 K. Liu, Y. C. Wang, D. L. Lau *et al.*. Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-D shape measurement [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 5229~5244
- 10 F. Chen, X. Y. Su, L. Q. Xiang. Analysis and identification of phase error in phase measuring profilometry[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(11): 11300~11307
- 11 Z. H. Zhang, E. Towers Catherine, P. Towers David. Snapshot color fringe projection for absolute three-dimensional metrology of video sequences [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(31): 5947~5953
- 12 W. H. Su. Color-encoded fringe projection for 3D shape measurements[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 13167~13181
- 13 Wei Zhengliang, Zhong Yuxian, Yuan Chaolong. Research on the technique of dynamic 3D measurement of structured light based on color grating[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(4): 569~574
- 韦争亮, 钟约先, 袁朝龙. 基于彩色栅线的结构光动态三维测量技术研究[J]. *光学技术*, 2009, **35**(4): 569~574
- 14 Wang Luyang, Da Feipeng. Three-dimensional shape measurement technique based on complementary color-encoded fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0612004
- 王露阳, 达飞鹏. 基于互补色编码条纹投影的三维形貌测量方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0612004
- 15 Mengtao Huang, Zhuangde Jiang, Bing Li *et al.*. Evaluation of absolute phase for 3D profile measurement using fringe projection [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6): 320~322
- 16 Dai Meiling, Yang Fujun, Du Xiaolei *et al.*. Three-dimensional shape measurement based on single-shot color fringe projection of sinusoidal grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0712002
- 戴美玲, 杨福俊, 杜晓磊 等. 基于单幅彩色正弦光栅投影的三维形貌测量[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0712002
- 17 Xu Shiliang. Numerical Recipes in C [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996. 121~125
- 徐士良. C 常用算法程序集 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 121~125
- 18 F. J. Yang, M. L. Dai, X. Y. He *et al.*. Single fringe projection profilometry based on sinusoidal intensity normalization and subpixel fitting [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2011, **49**(3): 465~472
- 19 H. A. Aebischer, S. Waldner. A simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **162**(4-6): 205~210