

基于 Delaunay 三角剖分的反向条纹生成方法

肖 朝¹ 陈 锋^{1*} 钟 敏¹ 苏显渝²

¹成都信息工程大学光电技术学院, 四川 成都 610225

²四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 为提高反向条纹生成的速度和精度,提出了一种基于 Delaunay 三角剖分的反向条纹生成方法。利用投影机坐标系与相机坐标系之间的正向映射关系,将相机坐标系上的相位点组成相位散乱点集合,并进行 Delaunay 三角剖分。将投影机坐标系上的相位点作为插值点,找出插值点所对应的 Delaunay 三角形并进行插值计算,插值后即得到预期反向条纹的垂直和水平方向的相位值,利用这些相位值可进一步生成反向条纹。计算机模拟实验和实物仿真实验表明,所提方法在反向条纹生成的速度和精度上均有改进,具有较高的应用价值。

关键词 测量; 反向条纹生成; Delaunay 三角剖分; 结构光投影

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0712001

Generation Method of Inverse Fringes Based on Delaunay Triangulation

Xiao Chao¹ Chen Feng¹ Zhong Min¹ Su Xianyu²

¹ College of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China

² College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract In order to improve the speed and accuracy of generating inverse fringes, a method of generating inverse fringes based on Delaunay triangulation is proposed. With this method, the forward mapping relation between projector coordinate and camera coordinate is used. The phase points on camera coordinate compose a set of scattered phase points, with which the Delaunay triangulation mesh is generated. Meanwhile, the phase points on projector coordinate are treated as interpolation points, which are used to find the corresponding Delaunay triangulation. After the interpolation operation is finished, the expected phase values of inverse fringes along vertical and horizontal directions are obtained. With these phase values, the inverse fringes can be further generated. The computer simulation and real object simulation experiments both demonstrate that the above method possesses advantages to improve the accuracy and speed of generating inverse fringes, which makes it has a high application value.

Key words measurement; inverse fringe generation; Delaunay triangulation; structured light projection

OCIS codes 120.6650; 120.2650; 120.5050; 100.5088

1 引 言

反向条纹投影技术^[1]除了具有传统条纹投影技术的非接触、高精度、高速度等优势外,还具有对微小形变异常敏感的特性,因此被广泛应用于工业生产流水线的产品检测、多投影机拼接校正^[2-3]等领域中。

反向条纹投影技术最早于 1997 年由 Schönleber 等^[4]提出,后来国内外许多学者对其进行了研究和发展^[5-10]。反向条纹生成方法大体上可分为两类:逆向映射法^[11-12]和正向映射法^[13-14]。前者将相机坐标系(对应变形条纹)上的像素点根据相位关系映射到投影机坐标系(对应标准条纹)上,然后根据不同的插值算法将该相位值分配到投影机坐标系的整数像素上;后者则是首先根据相位信息构建投影机坐标系与相机坐标系之间的亚像素级映射关系,然后利用上述映射关系将投影反向条纹后期望得到的条纹相位值直接赋值到相

收稿日期: 2016-02-22; **收到修改稿日期:** 2016-03-07

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ490879)、成都信息工程大学科研基金(KYTZ201516)

作者简介: 肖 朝(1982—),男,博士,讲师,主要从事信息光学和三维数字图像处理方面的研究。

E-mail: xiaochao@cuit.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: robinchan@cuit.edu.cn

机坐标系所对应的像素点上即可生成反向条纹。逆向映射法的优势是速度快,但精度相对较低;正向映射法的精度比较高,但条纹生成的速度较慢。

为了更好地兼顾反向条纹生成的速度和精度,本文提出一种基于 Delaunay 三角剖分的反向条纹生成方法。该方法首先得到投影机坐标系和相机坐标系上垂直与水平方向的展开条纹相位图,然后以垂直和水平方向的一维展开相位作为坐标轴建立平面直角坐标系,即线性相位坐标系,则相机坐标系中的像素点在该相位坐标系中形成相位散乱点。根据 Delaunay 三角剖分原理利用这些散乱点来构建 Delaunay 三角网,然后将投影机坐标系上的所有相位点在该 Delaunay 三角网中插值即可得到对应的反向条纹相位值。可以看出,该方法本质上是基于正向映射法的原理。计算机模拟实验和实物仿真实验表明,该方法能够在保证高精度的同时大幅提升反向条纹的生成速度。

2 基本原理

2.1 反向条纹投影技术

有别于传统条纹投影技术,反向条纹投影技术是将事先计算得到的反向条纹投射到待测物体上,该方法能够直观且高效地检测出物体上的微小形变。利用反向条纹投影技术进行测量时,为了在二维相位图中实现精确定位,通常需要垂直和水平方向上的两套结构光条纹。结构光条纹可以表示为

$$\begin{aligned} I_v(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi y/p) \\ I_h(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi x/p) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $I_v(x, y)$ 和 $I_h(x, y)$ 分别为垂直和水平方向上的结构光条纹光强, $a(x, y)$ 为条纹图的背景光强, $b(x, y)$ 为条纹图的调制光强, p 是以 pixel 为单位的条纹周期。

2.2 Delaunay 三角剖分

利用散乱点集合构建不规则的三角形网格称为三角剖分,而 Delaunay 三角剖分^[15]是一种特殊形式的三角剖分,在大规模场景渲染、地形可视化等领域具有非常广泛的应用。

如何构建 Delaunay 三角形网是一个关键的环节,国内外许多学者对这一问题进行了深入研究^[16-17]。目前 Delaunay 三角形网格的构建可以分为三角网生长法、逐点插入法和分治法,以及基于这三种方法的优化变种方法。

2.3 基于 Delaunay 三角剖分的反向条纹生成方法

基于 Delaunay 三角剖分的反向条纹生成方法主要由两部分组成:1) 利用相位关系构建 Delaunay 三角形网格;2) 通过 Delaunay 三角形网格插值得到反向条纹相位并生成反向条纹。图 1 所示为本文所提方法的原理流程图,其中图 1(a)所示为 Delaunay 三角形网格构建示意图,图 1(b)所示为基于 Delaunay 三角剖分进行插值并计算得到反向条纹的示意图。

2.3.1 Delaunay 三角网格构建

首先根据相位测量轮廓术中的 4 步相移技术生成垂直和水平方向的标准条纹,其强度为

$$\begin{aligned} I_{isv}(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos\left(2\pi y/p + \frac{\pi}{2} \times i\right), i = 0, 1, 2, 3 \\ I_{ish}(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos\left(2\pi x/p + \frac{\pi}{2} \times i\right), i = 0, 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (2)$$

由此得到两组各 4 帧标准相移条纹图,相邻的相移条纹图之间存在 $\pi/2$ 的相移。将生成的标准相移条纹图依次投射到物体上,被物体表面调制后的变形条纹图强度分布为

$$\begin{aligned} I_{idv}(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos\left[2\pi y/p + m(x, y) + \frac{\pi}{2} \times i\right], i = 0, 1, 2, 3 \\ I_{idh}(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos\left[2\pi x/p + m(x, y) + \frac{\pi}{2} \times i\right], i = 0, 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $m(x, y)$ 为物体表面引起的相位调制。为了方便计算,将条纹图的光强度信息转换为相位信息,即

$$\varphi(x, y) = \arctan\left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right] \quad (4)$$

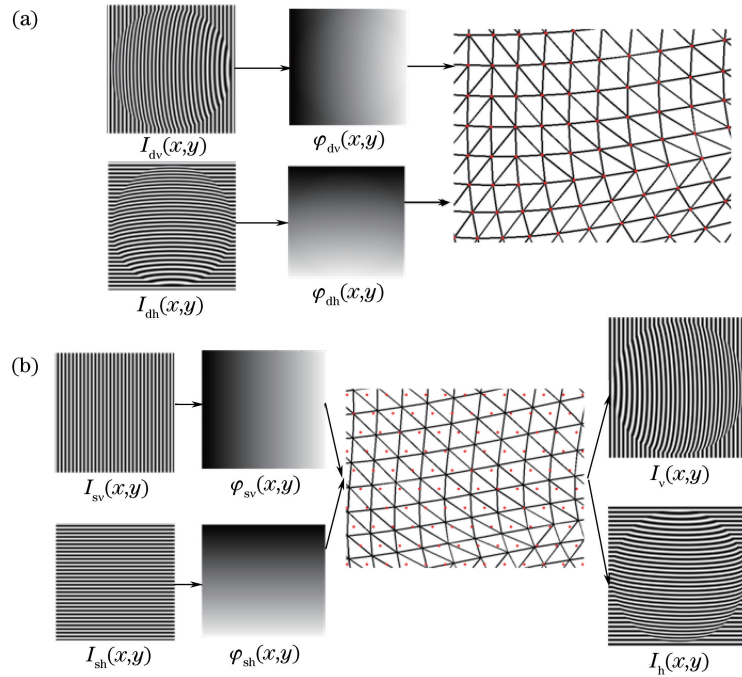


图 1 基于 Delaunay 三角剖分的反向条纹生成原理。(a) Delaunay 三角网格构建；(b) 反向条纹生成

Fig. 1 Generation principle of inverse fringes based on Delaunay triangulation.

(a) Delaunay triangulation construction; (b) generation of inverse fringes

式中 $\varphi(x, y) \in (-\pi, \pi)$, 称为截断相位, 需要进一步通过相位展开算法^[18-20]将其展开成连续的相位分布。图 1(a)所示为一幅垂直变形条纹和一幅水平变形条纹, 以及相位展开后垂直方向和水平方向变形条纹的连续相位分布 $\varphi_{dv}(x, y)$ 和 $\varphi_{dh}(x, y)$ 。

为了构建 Delaunay 三角形网格, 对 $\varphi_{dv}(x, y)$ 和 $\varphi_{dh}(x, y)$ 进行进一步处理。首先, 由于 $\varphi_{dv}(x, y)$ 和 $\varphi_{dh}(x, y)$ 是 $m \times n$ 的二维分布, 基于列优先或者行优先的原则将其转换为一维分布, 即

$$\begin{aligned} \varphi_{1dv}(X) &= \varphi_{1dv}[x + (y - 1) \times m] = \varphi_{dv}(x, y), x \in [1, m], y \in [1, n], X \in [1, m \times n] \\ \varphi_{1dh}(Y) &= \varphi_{1dh}[x + (y - 1) \times m] = \varphi_{dh}(x, y), x \in [1, m], y \in [1, n], Y \in [1, m \times n] \end{aligned} \quad (5)$$

然后将垂直方向的一维连续相位和水平方向的一维连续相位分别作为直角坐标系的两个坐标轴, 构成线性相位直角坐标系。由于在变形相位展开图中的每个像素点都有一个唯一的垂直相位值和水平相位值, 因此在线性相位直角坐标系中可以准确地确定其坐标位置。所有点的坐标位置确定后, 在相位直角坐标系中构成了变形相位散乱点集合, 如图 2 所示, 其中红色圆点为相位直角坐标系中的变形相位点集合。图 3 是在图 2 所示的相位散乱点基础上进行 Delaunay 三角剖分构建后的结果示意图, 其中红色的点为相位散乱点, 黑色三角形为构建后的 Delaunay 三角形。

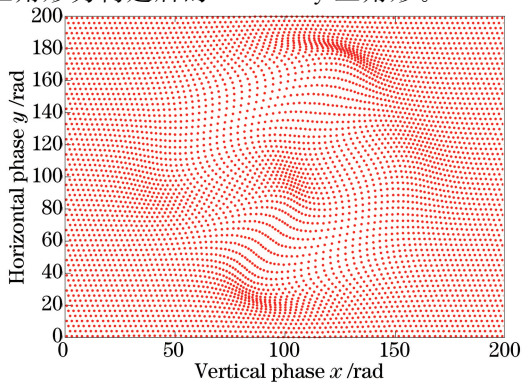


图 2 相位散乱点集合

Fig. 2 Scattered phase point set

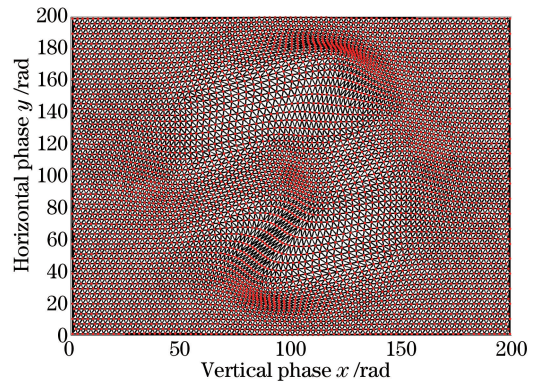


图 3 Delaunay 三角网格构建

Fig. 3 Construction of Delaunay triangulation

进行 Delaunay 三角网格构建时,对每一个生成的三角形进行编号(从 1 开始),并且按逆时针方向记录每个三角形的顶点排列顺序。对于一个具有 256×256 个相位散乱点的集合,进行 Delaunay 三角剖分后,一共生成了 131006 个 Delaunay 三角形。

2.3.2 反向条纹生成

Delaunay 三角网格构建完成后,可以通过三角插值算法生成反向条纹相位,进而生成反向条纹,具体步骤如下。

1) 获得相位展开后的垂直和水平方向的标准条纹连续相位分布 $\varphi_{sv}(x, y)$ 和 $\varphi_{sh}(x, y)$,并根据(5)式将二维相位分布转换为一维相位分布 $\varphi_{1sv}(X)$ 和 $\varphi_{1sh}(Y)$ 。由于在标准相位图中每个像素点同样具有唯一的垂直和水平相位值,因此在相位直角坐标系中可以唯一地确定其坐标位置,即在相位直角坐标系中可得到标准相位点的集合。

2) 将标准相位点作为待插值点,在变形相位散乱点所构建的 Delaunay 三角网格中进行插值计算。当 Delaunay 三角网中的每个网格点(图 3 中红点)被赋予对应的期望垂直相位时,插值得到的是垂直方向的反向条纹相位;而当三角网格点被赋予期望水平相位时,则插值得到的是水平方向的反向条纹相位。在插值时首先确定出插值点所在的 Delaunay 三角形,然后根据文献[11]提出的双三次多项式插值算法计算插值点所对应的反向相位值,即

$$\begin{aligned} V_v &= \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^{3-i} a_{ij} x^i y^j \\ V_h &= \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^{3-i} b_{ij} x^i y^j \end{aligned} \quad (6)$$

式中 a_{ij} 和 b_{ij} 为插值系数。将插值点的坐标代入(6)式即可得到对应的反向相位值。需要说明的是,在构建 Delaunay 三角网络和进行插值计算时,可以使用 Matlab 的内置函数,这些函数具有非常高的运算效率,相比已有算法^[13-14]中的逐点遍历方法,可以极大地节省时间。图 4 所示为局部的插值效果图,其中红色的正交网格点为待插值点,即标准相位点,通过计算可以得出这些点所对应的插值结果。

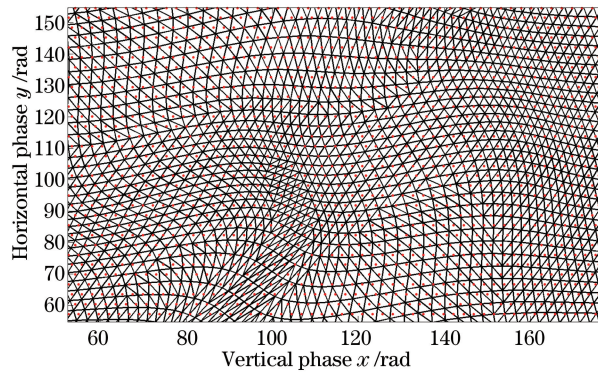


图 4 Delaunay 三角网格的局部插值效果

Fig. 4 Local interpolation of Delaunay triangulation mesh

3) 根据插值结果即垂直方向的反向条纹相位 $\varphi_{iv}(x, y)$ 和水平方向反向条纹相位 $\varphi_{ih}(x, y)$ 生成最终的两个方向的反向条纹

$$\begin{aligned} I_v(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi_{iv}(x, y)] \\ I_h(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi_{ih}(x, y)] \end{aligned} \quad (7)$$

3 实验与结果讨论

3.1 计算机模拟实验

实验平台为 64 位 Windows 7 操作系统,CPU 为 Core i5 4570,主频为 3.2 GHz,内存为 4 GB,在 Matlab 2014a 环境下编程实现,并与文献[11]中三次插值方法、文献[13]和[14]中提出的方法进行了对比。模拟物

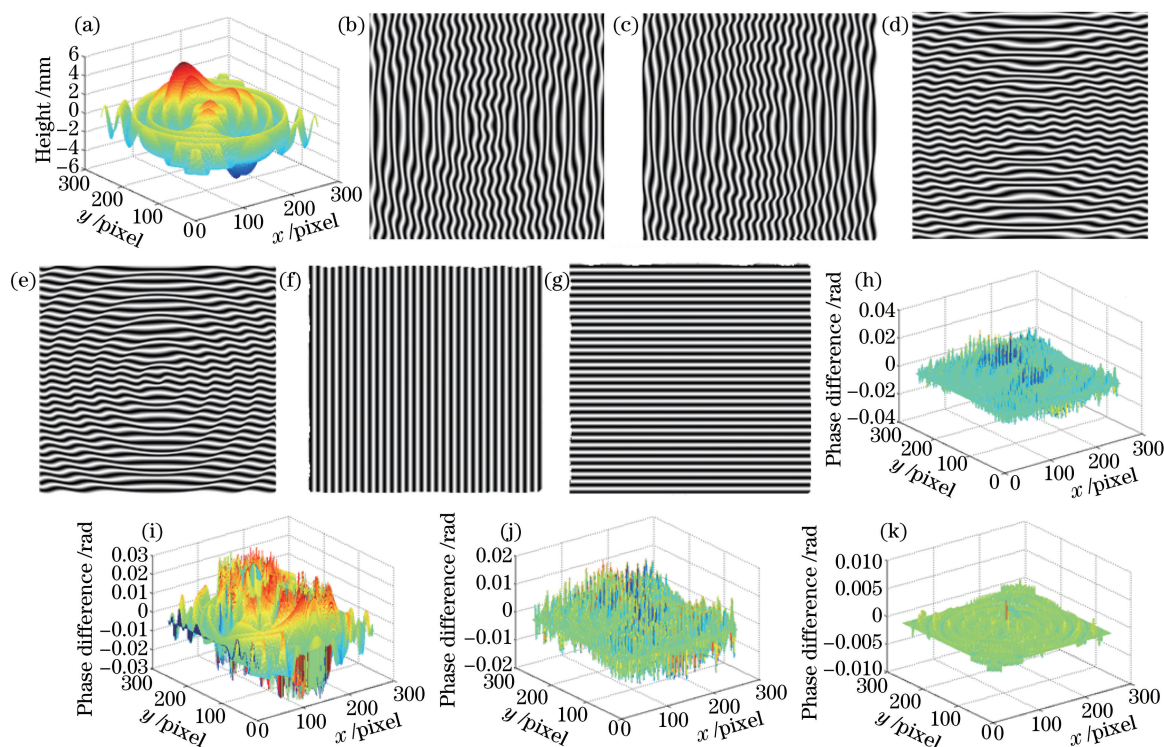


图5 计算机模拟实验结果。(a) 模拟物体；(b) 垂直变形条纹；(c) 垂直反向条纹；

(d) 水平变形条纹；(e) 水平反向条纹；(f) 投影垂直反向条纹后的直条纹；(g) 投影水平反向条纹后的直条纹；

(h) 文献[11]、(i) 文献[13]、(j) 文献[14]以及(k) 本文方法得到的相位差图

Fig. 5 Results of computer simulation. (a) Simulated object; (b) deformed vertical fringes; (c) vertical inverse fringes; (d) deformed horizontal fringes; (e) horizontal inverse fringes; (f) straight fringes after projecting vertical inverse fringes; (g) straight fringes after projecting horizontal inverse fringes; phase difference graphs proposed in (h) Ref. [11], (i) Ref. [13], (j) Ref. [14], and (k) this paper

体为周期性圆环函数与 Matlab 中 Peaks 函数的组合,分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。采用斜投影正拍摄的方式,条纹周期为 32 pixel ,图 5 所示为实验结果。

由于模拟的物体面形较复杂,因此生成的反向条纹的形变量较大。图 5(h)~(k)为本文方法、文献[11]方法、文献[12]方法以及文献[14]方法的重构相位误差对比。从图中可以看出,相比已有方法,本文方法的反向条纹生成精度更高。表 1 所示为文献[11]、[13]、[14]与本文方法生成反向条纹时的相位标准差与条纹生成所消耗时间的对比情况。

表 1 不同方法计算机模拟实验对比

Table 1 Comparison among results from computer simulation experiments with different methods

| | Standard deviation /rad | Time consumption /s |
|------------|-------------------------|---------------------|
| Ref. [11] | 5.248×10^{-3} | 1.32 |
| Ref. [13] | 3.493×10^{-3} | 17.80 |
| Ref. [14] | 7.287×10^{-4} | 14.69 |
| This paper | 4.063×10^{-4} | 1.81 |

从表 1 可以看出,文中所提方法与基于逆向映射法的三次插值方法^[11]相比,计算速度相仿,但前者精度更高;与基于正向映射法的两种方法^[13-14]相比,前者精度更高,计算所需时间更短。

3.2 实物仿真实验

测试物体为两个直径分别为 12 cm 和 9 cm 的泡沫半球,采用斜投影正拍摄的方式进行测量。投影机和拍摄相机的分辨率均为 $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$,在垂直和水平两个方向上均有 64 个条纹周期。图 6 所示为文中所提算法的实验结果。

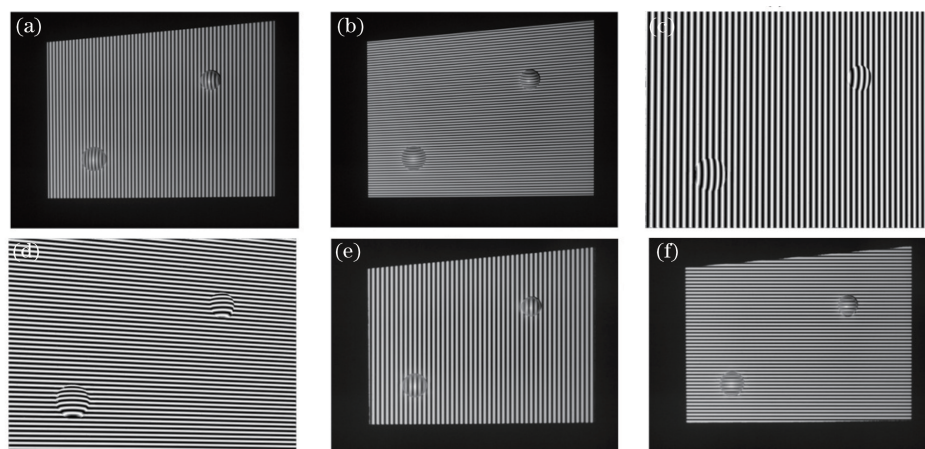


图 6 实物仿真实验结果。(a) 垂直变形条纹；(b) 水平变形条纹；(c) 垂直反向条纹；
(d) 水平反向条纹；(e)、(f) 投射反向条纹后得到的直条纹

Fig. 6 Simulation results of real object experiments. (a) Deformed vertical fringes; (b) deformed horizontal fringe;
(c) vertical inverse fringes; (d) horizontal inverse fringes; (e) (f) straight fringes after projecting inverse fringes

图 6(a)、(b)所示分别为拍摄的垂直和水平条纹图,可以看到,条纹在物体表面产生了形变。图 6(c)、(d)所示分别为计算生成的垂直反向条纹和水平反向条纹,将图 6(c)、(d)再次投射到物体上后得到图 6(e)、(f)。此时,在物体表面上条纹形变消失了,得到了期望的直条纹。表 2 所示为利用文中方法与文献[11]、[13]、[14]所提方法在实物仿真实验中生成反向条纹时的相位标准差与时间消耗的对比。

表 2 不同方法的实物仿真实验对比

Table 2 Comparison among results from real object simulation experiments with different methods

| | Standard deviation /rad | Time consumption /s |
|------------|-------------------------|---------------------|
| Ref. [11] | 0.0724 | 17.46 |
| Ref. [13] | 0.0429 | 418.61 |
| Ref. [14] | 0.0141 | 376.26 |
| This paper | 0.0073 | 12.89 |

从表 2 中可以看出,与计算机模拟实验类似,相比已有方法,在保证精度的前提下,文中提出的基于 Delaunay 三角剖分的反向条纹生成方法大幅提升了计算速度,并且由于时间复杂度低,随着投影图像条纹分辨率的提高,文中方法的优越性体现得愈加明显。

4 结 论

提出了一种基于 Delaunay 三角剖分的反向条纹生成方法。利用变形条纹相位散乱点构建 Delaunay 三角形,将标准条纹相位点作为插值点在 Delaunay 三角形中进行插值,计算得到反向条纹相位并最终生成反向条纹。该方法避免了逐点搜寻查找过程,计算速度有明显优势。同时基于 Delaunay 三角剖分的插值算法能够在最大程度上保证插值的精度。计算机模拟实验和实物仿真实验结果表明,与已有的反向条纹生成方法相比,文中提出的方法能够在改善反向条纹生成精度的同时大幅提高反向条纹的生成速度。

后续如需要进一步提升反向条纹的生成精度,可以选择如三次样条函数插值算法等精度更高的插值算法,也可根据需要选择线性插值等计算速度更快的算法来达到更理想的条纹生成速度。

参 考 文 献

- 1 An Dong, Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new model of three-dimensional shape measurement system based on fringe projection[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512004.
安 冬, 盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的基于条纹投影的三维轮廓测量系统模型[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512004.
- 2 Cai Yuanyuan, Su Xianyu. Inverse fringe projection technique using multi-projectors simultaneously[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1641-1646.

- 蔡元元, 苏显渝. 采用多投影器的反向条纹投影技术[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1641-1646.
- 3 Xiao Chao, Yang Hongyu, Liang Haijun, *et al.*. Geometric calibration for multi-projector display system based on structured light[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(6): 802-808.
肖 朝, 杨红雨, 梁海军, 等. 多投影显示系统结构光几何校正算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(6): 802-808.
- 4 Schönleber M, Tiziani H J. Fast and flexible shape control with adaptive LCD fringe masks[C]. SPIE, 1997, 3098: 35-42.
- 5 Michael K K, Wolfgang O, Werner J. Inverse projected fringe technique[C]. SPIE, 2001, 4317: 505-510.
- 6 Bothe T, Li W S, von Kopylow C, *et al.*. Object-adapted inverse pattern projection: generation, evaluation, and applications[C]. SPIE, 2003, 4933: 291-296.
- 7 Li W S, Bothe T, Kalms M, *et al.*. Applications for inverse pattern projection[C]. SPIE, 2003, 5144: 492-503.
- 8 Li W S, Bothe T, Osten W, *et al.*. Object adapted pattern projection - part I: Generation of inverse patterns[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(1): 31-50.
- 9 Cai Y, Su X. Inverse projected-fringe technique based on multi projectors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(10): 1028-1034.
- 10 Tang Tingyong, Su Xianyu. Inverse fringe projection and its application in the digital globe [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(4): 60-65.
唐廷勇, 苏显渝. 反向条纹投影技术及其在数字地球仪中的应用[J]. 光电工程, 2010, 37(4): 60-65.
- 11 Cai Yuanyuan, Su Xianyu, Li Yong, *et al.*. Inverse fringe projection technique based on the coordinate transformation using cubic interpolation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(5): 85-90.
蔡元元, 苏显渝, 李 勇, 等. 基于三次插值坐标变换的反向条纹投影技术[J]. 光电工程, 2006, 33(5): 85-90.
- 12 Chen Yunfu, Li Yong, Zhang Haihua, *et al.*. Inverse fringe solved with RBF neural network [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2010, 8(5): 37-40.
陈云富, 李 勇, 张海花, 等. 采用 RBF 神经网络求解反向条纹的研究[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(5): 37-40.
- 13 Xiao Chao, Su Xianyu, Jing Hailong. A new method for generation of inverse projected fringe[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2120-2124.
肖 朝, 苏显渝, 荆海龙. 一种新的反向投影条纹生成方法研究[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2120-2124.
- 14 Li Xue, Zhang Qican. Inverse fringe generation method based on pruning optimization algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1212003.
李 雪, 张启灿. 基于剪枝优化算法的反向条纹生成方法[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1212003.
- 15 Zhang Mingmin, Pan Zhigeng, Zheng Wenting, *et al.*. A distributed parallel algorithm for Delaunay triangulation of scattered data points[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2000, 12(7): 484-487.
张明敏, 潘志庚, 郑文庭, 等. 散乱点集 Delaunay 三角部分的分布并行算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(7): 484-487.
- 16 Barber C B, Dobkin D P, Huhdanpaa H. The quickhull algorithm for convex hulls [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 1996, 22(4): 469-483.
- 17 Yu Jie, Lü Pin, Zheng Changwen. A comparative research on methods of Delaunay triangulation[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(8): 1158-1167.
余 杰, 吕 品, 郑昌文. Delaunay 三角网构建方法比较研究[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(8): 1158-1167.
- 18 Yang Fengtao, Luo Jianglong, Liu Zhiqiang, *et al.*. Comparison of six phase unwrapping algorithm [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 323-326.
杨锋涛, 罗江龙, 刘志强, 等. 相位展开的 6 种算法比较[J]. 激光技术, 2008, 32(3): 323-326.
- 19 Liu Jian, Tian Ailing, Liu Bingcai, *et al.*. A phase extraction algorithm in wavelength tuning interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0312001.
刘 剑, 田爱玲, 刘丙才, 等. 一种变频相移干涉测量的相位提取算法[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0312001.
- 20 Guo Yuan, Wu Quan, Chen Xiaotian, *et al.*. Phase retrieval method of single interference fringe pattern based on shearing interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1208003.
郭 媛, 吴 全, 陈小天, 等. 基于剪切干涉的单幅干涉条纹相位恢复算法[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1208003.