

文章编号: 0253-2239(2006)08-1156-6

广义条纹图序列编码的相位重建*

彭翔^{1,2} 韦林彬¹ 邱文杰¹ 田劲东²

(¹ 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072
² 深圳大学光电子学研究所 教育部光电子器件与系统重点实验室, 深圳 518060)

摘要: 为解决拓扑复杂物体三维数字化过程中的绝对相位测量及相位重建问题, 提出了一种广义变频条纹图序列的相位展开算法。简要综述了现有的各种时间维相位展开算法并指出这些算法存在的问题, 在此基础上, 详细分析比较提出方法与正指数条纹序列算法的噪声免疫力和时间复杂度, 证明该方法有更高的噪声免疫力和更低的时间复杂度。特别是, 当相邻编码条纹图的条纹数之比不等于2时, 正指数条纹序列算法出现严重噪声, 而提出的方法依然能够正常工作。此外, 该算法还能够根据实际情况决定需要投影的条纹频率, 从而能够使用相对较少的条纹编码图像进行有效的相位展开, 进而提高系统的实时性。理论分析和实验结果都证明了提出算法的有效性。

关键词: 信息光学; 三维形貌测量; 条纹自动分析; 相位重建; 变频编码

中图分类号: TN863 文献标识码: A

Phase Reconstruction Based on Generalized Fringe Pattern Sequence Encoding

Peng Xiang^{1,2} Wei Linbin¹ Qiu Wenjie¹ Tian Jindong²

(¹ State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrumentation, Tianjin University, 300072 Tianjin
² Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems, Ministry of Education, Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract: A phase unwrapping algorithm with generalized fringe pattern sequence is proposed for absolute phase measurement and phase reconstruction of three-dimensional digital object surfaces with complex topography. Firstly, various phase reconstruction techniques based on temporal phase unwrapping are reviewed and the problems existing in these techniques are pointed out. On the basis of such analysis, the detailed comparison between the fringe sequence algorithm based on positive exponent and the algorithm proposed is made in terms of the noise immunity and computational complexity. It is shown that the proposed approach has better performance. In particular, the fringe sequence algorithm based on positive exponent shows severe noise in the case that the ratio of number of fringes of successive patterns does not equal to 2, whereas the proposed approach is able to work well as usual. Furthermore, the proposed approach can determine the number of projection desired fringes according to practical situation, leading to less encoded fringe patterns required for phase unwrapping and decreased processing time. The theoretical analysis and experimental results show the validity of the proposed algorithm.

Key words: information optics; three-dimensional shape measurement; automatic fringe analysis; phase reconstruction; variable frequency encoding

1 引 言

传统的基于二维空间的相位重建过程都是在一

幅折叠相位图内, 沿着某一个特定的路径, 通过比较相邻两个像素之间相位值的关系, 决定是否存在跳

* 国家自然科学基金(60275012)、广东省普通高校自然科学研究重点项目(04Z010)、广东省自然科学基金(031804)和深圳市科技计划(200341)资助课题。

作者简介: 彭翔(1955~), 男, 湖北仙桃人, 教授, 博士生导师, 主要从事三维数字成像及造型、光学信息安全、现代光学测试技术的研究。E-mail: xpeng@szu.edu.cn

收稿日期: 2005-11-10; 收到修改稿日期: 2005-12-30

变需要进行 $\pm 2\pi$ 操作。这类算法容易造成误差传播,影响整幅图像的相位展开。对具有大梯度的物体或者视场中存在多个独立物体的情况,传统的相位展开算法无法正常进行^[1~5]。近年发展的基于时间维相位重建算法能够有效地解决这个问题^[6~9]。基于时间维的相位重建算法在时间域上,采用足够高的抽样频率对不同条纹频率编码的物体进行数据采集。然后,经过相位提取得到不同分辨率的折叠相位图。在相位重建过程中,每个像素单元独立地沿着时间轴进行相位展开操作,这样每个像素的相位展开与其他像素无关。因此,如果某个像素对应的相位存在误差,则该误差能够被限制在该像素本身,从而避免了误差在 $x-y$ 平面内的传播。基于时间维的相位重建算法能够处理具有大梯度的复杂物体表面或者视场中有多个独立物体的相位重建问题。目前报道的基于时间维相位重建算法主要有:线性条纹序列算法^[6,7],正指数条纹序列算法^[7],负指数条纹序列算法^[8],以及改进负指数条纹序列算法^[10]。本文在分析上述相关工作的基础上,提出一种广义变频条纹图序列的相位展开算法。

2 经典时间维相位重建算法的基本思想

一个典型的基于结构光的三维数字成像系统如图 1 所示,系统主要由结构光投影装置和图像采集装置组成。利用该系统测量时,某个像素点的相位值与条纹频率满足线性关系: $\phi(t) = \omega t$ 。其中, t 既表示时间尺度,同时在数值上又表示无量纲的条纹数目^[6]。

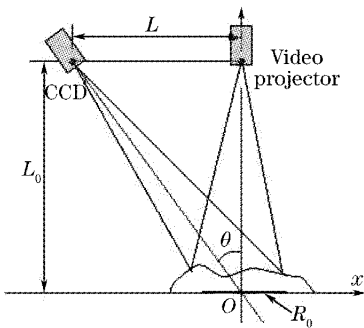


图 1 基于数字视频投影的三维数字成像系统
Fig. 1 Setup for 3D digital imaging system with digital video projector

Huntley 等^[6]在 1993 年提出了基于时间维相位重建算法,该算法采用视场中投影条纹数按照线性增长的条纹序列对物体表面进行编码。如图 2 所示,采用视场内条纹数从 1 开始,依次增加 1 的条纹

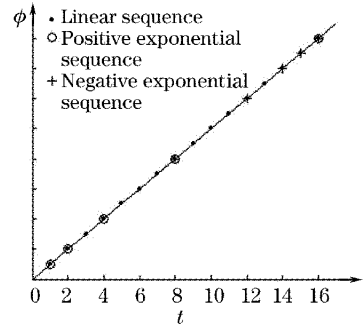


图 2 给定像素的相位值与视场内条纹数成线性关系
Fig. 2 Linear relation of the phase for a given pixel and the number of fringes in the field of view

序列对物体表面进行编码从而得到相应的编码条纹图中,由相位值与条纹频率为线性关系可知,视场内条纹数目差值仅为 1 时,能够保证两个相邻条纹编码得到的相位的差值没有折叠,因此随条纹数目增加的相位改变量就被无折叠地记录在两个相邻的相位图中。在相位重建时,分别计算相邻两个折叠相位图之间的相位差(视场内条纹数为 1 与 0 的差值即条纹数为 1 的相位值),将这些差值求和即可得到最终分辨力的展开相位。

2.1 正指数条纹序列算法

线性条纹序列算法要求严格控制相邻的两个条纹编码图的条纹数目之差小于等于 1。更为突出的问题是,利用线性条纹序列算法需要采集大量的图像,当视场内最高条纹数目为 s 时,需要 s 幅折叠相位图,如果按照参考文献^[6]采用四步相移算法计算折叠相位,则每一个条纹频率需要采集 4 幅条纹编码图,那么整个重建过程需要 $4s$ 幅条纹编码图。因此,该算法应用于整个三维重建过程将是很耗时的。为了能够使用更少的条纹编码图,提高算法的时间效率,Zhao 等^[11]提出采用两种频率的条纹编码图进行相位展开:采用条纹数仅为 1 的条纹编码图对另一个高条纹数的编码条纹的折叠相位图进行相位重建。该算法在环境比较理想的情况下被证明是有效的。但在实际情况中,条纹频率仅为 1 的相位图非常容易受到各种实际测量因素的影响而产生极大的噪声,这种噪声在对高条纹数目编码折叠相位图进行展开时会导致严重的错误。随后, Huntley 等^[7]又提出采用视场内条纹数按指数增长的条纹序列对物体进行编码,如图 2 中圆圈表示,这样能够大大减少需要的条纹编码图像数,折叠相位图的数目从 s 减少到 $\log_2 s + 1$ 。于是,使用比较少的条纹编码图就可得到高分辨的展开相位图。算法过程如下:

$$\Delta\phi_u(2t, t) = U[\Delta\phi_w(2t, t), \Delta\phi_u(t, 0)],$$

$$t = 1, 2, 3, 4, \dots, \text{lbs}$$

$$U[\phi_1, \phi_2] = \phi_1 - 2\pi \times \text{NINT}\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2\pi}\right),$$

$$\Delta\phi_u(2t, 0) = \Delta\phi_u(2t, t) + \Delta\phi_u(t, 0),$$

其中 t 表示视场内条纹数目, $\Delta\phi_w(2t, t) = W[\phi_w(2t) - \phi_w(t)]$, 表示相邻两条纹编码图折叠相位差值, NINT 表示四舍五入操作。

2.2 负指数条纹序列算法

前述算法进行相位重建后得到的相位值仅由最高分辨率的相位值决定, 即除了最高频率条纹编码得到的相位值以外, 其他分辨层次较低的仅作为重建的中间媒介, 而不参与计算最后物体表面的高度值。这样分辨层次较低的相位信息完全丢失, 获取的信息没有得到充分的利用, 由最高条纹频率得到的折叠相位值存在误差的地方将得到错误的高度值。如果能够通过所有得到的展开相位值信息估计图 2 中相位值随频率变化曲线的斜率值 ω , 则有可能补偿由于仅使用一种条纹编码图而出现的误差, 提高测量精度。Huntley 给出了采用线性序列算法时的斜率值估计公式^[8]:

$$\Delta\phi_u(s - t_i, s - t_{i+1}) = U_L[\Delta\phi_w(s - t_i, s - t_{i+1}), \Delta\phi_u(s, s - t_i)],$$

$$\Delta\phi_u(s, s - t_{i+1}) = \Delta\phi_u(s, s - t_i) + \Delta\phi_u(s - t_i, s - t_{i+1}),$$

$$U_L[\phi(t_1), \phi(t_2)] = \phi(t_1) - 2\pi \times \text{NINT}\left[\frac{\phi(t_1) - T\phi(t_2)}{2\pi}\right]$$

其中 $T = (t_2 - t_1)/t_1$, $\Delta\phi_w(s - t_i, s - t_{i+1})$ 的计算和前文提到的方法一致。

当 $T = 1$ 时, Kinell-Sjodahl 算法退化成 Huntley 提出的负指数条纹算法。基于最小二乘法的斜率估计如下:

$$\omega' = \frac{s\phi_u(s) + \sum_{i=1}^{m-1} [s - t(i)]\phi_u[s - t(i)]}{s^2 + \sum_{i=1}^{m-1} [s - t(i)]^2},$$

负指数条纹算法的初始条件是

$$\Delta\phi_u(s, s - t_0) = W[\Delta\phi_w(s, s - t_0)],$$

为了保证该式成立, 要求 $s - (s - t_0) = t_0 < 1$ (一般取 $t_0 = 2^0 = 1$)。如果 $t_0 > 1$ 将无法正确进行相位展开。负指数条纹序列算法相对于正指数条纹序列算法, 对系统有更高的要求。因为正指数条纹算法仅要求视场内条纹数按指数增长即可, 而成一定比例的条纹比由原始光栅条纹频率决定, 与系统参量无关。

$$\omega' = \sum_{t=1}^s Q(t) \Delta\phi_u(t, t-1), \quad [\text{权重 } Q(t) = 1/s].$$

采用正指数条纹序列算法时, 也可以参考上式计算斜率值^[8]。从图 2 中可以看出, 正指数条纹序列算法采样点都集中在相位-条纹数函数曲线上低条纹数的地方。在这种情况下, 估计出的斜率值可能会存在比较大的偏差。负指数条纹序列算法依次投影在物体表面上的条纹数目为 $s, s - 2^0, s - 2^1, \dots, s/2$ (如图 2, 视场内的最高条纹数目为 16, 需要采集到的相位值在图中用叉线表示), 这样能够使采样点集中在高条纹数区域, 因此能够避免正指数条纹序列算法的问题, 比较精确地估计曲线斜率值。Kinell 和 Sjodahl 对负指数条纹序列算法做了进一步的改进^[10]。经过改进以后的负指数条纹算法, 最少可以仅使用两个折叠相位图就可以进行相位展开, 而且提出利用最小二乘法计算斜率估计值。设向量 $t = [2^{k-1}, s]$, 其中 k 属于序列 $[1, 2, \dots, g]$ ($g \leq \text{lbs}$), 投影在视场内条纹数为 $s, s - t_i$ (设 t_i 为向量 t 中的元素, $i = 1, 2, \dots, m-1, m$ 为元素总数), 采用这样的条纹序列对物体表面进行编码, 经过计算序列条纹图的折叠相位, 相位展开过程如下:

因此, 系统参量的调整对条纹数比例不产生任何影响; 而负指数条纹算法对视场内条纹数有精确要求, 系统参量的调整都可以改变视场内条纹数。因此, 对于负指数条纹算法, 一定的结构光结构只能适用于固定的三维成像系统, 对整体系统的调整有很高的要求。这些因素限制了负指数条纹序列算法的应用。

3 广义变频条纹图序列的相位展开算法

为了进一步降低计算复杂度、提高计算效率, 利用 Peng^[12] 最近提出的时间维相位重建算法初始条件, 本文提出一种广义变频条纹图序列的相位展开算法。算法思想是利用关系: $\omega = \phi_u(t_1)/t_1 = \phi_u(t_2)/t_2$, 即 $\phi_u(t_2) = k \cdot \phi_u(t_1)$, $k = t_2/t_1$, 所以可以采用 $k \cdot \phi_u(t_1)$ 对条纹数为 t_2 编码条纹图得到的折叠相位进行展开:

设 $\phi_u(t_2) = \varphi + 2n\pi$ ($-\pi \leq \varphi < \pi, n$ 为整数), 和为
 则 $\phi_w(t_2) = \varphi$ 。所以,

$$\begin{aligned} \phi_w(t_2) - 2\pi \times \text{NINT}\left[\frac{\phi_w(t_2) - k\phi_u(t_1)}{2\pi}\right] = \\ \varphi - 2\pi \times \text{NINT}\left[\frac{\varphi - (\varphi + 2n\pi)}{2\pi}\right] = \\ \varphi + 2n\pi, \end{aligned} \quad (1)$$

从上式可见, 可以利用已经得到的结果 $\phi_u(t_1)$ 对 $\phi_w(t_2)$ 进行相位展开, 即

$$\begin{aligned} \phi_u(t_2) = \phi_w(t_2) - 2\pi \times \text{NINT}\left[\frac{\phi_w(t_2) - \phi_u(t_1) \cdot k}{2\pi}\right], \\ (k = t_2/t_1) \end{aligned} \quad (2)$$

本算法的条纹序列等效为 Huntley 提出的正指数条纹序列。因此, 本算法可以看成是广义变频条纹图序列的相位展开算法。

根据公式(2)的递推关系, 经过迭代可以获得到各个条纹数编码的条纹图的展开相位。然后, 再采用最小二乘法通过拟合获得相位-条纹数的函数关系曲线。设所有投影的条纹数集合为 $[t_0, t_1, t_2, \dots, t_m]$ 经过最小二乘拟合求得的相位-条纹数曲线斜率值为 ω' , 则实际计算得到的展开相位值与拟合值的偏差平方

$$E = \sum_{i=0}^m [\omega' t_i - \phi_u(t_i)]^2, \quad (3)$$

(3) 式表示误差能量。为了使误差能量 E 达到最小,

(3) 式对 ω' 的偏导数应该为 0, 即

$$\frac{\partial E}{\partial \omega'} = \sum_{i=0}^m 2t_i [\omega' t_i - \phi_u(t_i)] = 0,$$

由此求得最小二乘法估计的曲线斜率值 ω' 为

$$\omega' = \frac{\sum_{i=0}^m t_i \phi_u(t_i)}{\sum_{i=0}^m t_i^2}. \quad (4)$$

4 算法噪声免疫能力和时间复杂度分析

4.1 正指数条纹序列算法噪声免疫能力分析

设较高阶展开相位为 $\Delta\phi_u(2t, 0) = \varphi + 2n\pi$ ($-\pi \leq \varphi < \pi$), 折叠相位 $\phi_w(2t) = \varphi$, 并设较高阶的相位不存在噪声, 与它相邻的低阶展开相位存在大小为 $|\epsilon| < \pi$ 的噪声, 即

$$\Delta\phi'_u(t, 0) = \frac{\Delta\phi_u(2t, 0)}{2} + \epsilon = \frac{\varphi}{2} + n\pi + \epsilon, \quad (5)$$

则根据算符 W 的定义^[6], 有如下证明:

$$\phi'_w(t) = W(\varphi/2 + n\pi + \epsilon) = W[n\pi + p\pi + (\varphi/2 + \epsilon - p\pi)] = \varphi/2 + \epsilon - p\pi, \quad (6)$$

其中 p 是一个整数, 保证 $(n+p)$ 为偶数, 同时使得 $(\varphi/2 + \epsilon - p\pi) \in [-\pi, +\pi]$

$$\Delta\phi'_w(2t, t) = W[\phi_w(2t) - \phi'_w(t)] = W(\varphi/2 - \epsilon + p\pi) = \varphi/2 - \epsilon + p\pi - 2q\pi, \quad (7)$$

其中 q 是一个整数, 保证 $(\varphi/2 - \epsilon + p\pi - 2q\pi) \in [-\pi, +\pi]$ 。因为 $(n+p)$ 为偶数, 所以 $(n-p)$ 也是偶数, 因此:

$$\begin{aligned} \Delta\phi'_u(2t, t) = U[\Delta' \phi_w(2t, t), \Delta\phi'_u(t, 0)] = \\ (\varphi/2 - \epsilon - p\pi - 2q\pi) - 2\pi \times \text{NINT}\left[\frac{(\varphi/2 - \epsilon + p\pi - 2q\pi) - (\varphi/2 + n\pi + \epsilon)}{2\pi}\right] = \\ (\varphi/2 - \epsilon + p\pi - 2q\pi) - 2\pi \times \text{NINT}\left[\frac{-(n-p)\pi - 2q\pi - 2\epsilon}{2\pi}\right] = \\ \varphi/2 - \epsilon + n\pi + 2\pi \times \text{NINT}[\epsilon/\pi], \end{aligned}$$

因此展开的结果为

$$\begin{aligned} \Delta\phi'_u(2t, 0) = \Delta\phi'_u(2t, t) + \Delta\phi'_u(t, 0) = (\varphi/2 - \epsilon + n\pi + 2\pi \times \text{NINT}[\epsilon/\pi]) + (\varphi/2 + n\pi + \epsilon) = \\ \varphi + 2n\pi + 2\pi \times \text{NINT}[\epsilon/\pi]. \end{aligned} \quad (8)$$

为了使噪声对相位展开不产生影响, $\Delta\phi'_u(2t, 0) = \Delta\phi_u(2t, 0)$, 则必须 $|\epsilon/\pi| < 1/2$, 即 $|\epsilon| < \pi/2$ 。可以看出该算法在每一步相位展开中, 噪声免疫能力是恒定的。

4.2 本文算法噪声免疫能力分析

设需要展开的高频率展开相位为 $\phi_u(t_2) = \varphi + 2n\pi$, ($-\pi \leq \varphi < \pi$), $\phi_w(t_2) = \varphi$, 假设得到的低阶已经展开相位存在大小为 ϵ 的噪声, 即 $\phi'_u(t_1) = \phi_u(t_1) + \epsilon$, 将其代入相位展开公式(2)中, 并由 $\phi_u(t_2) = k \cdot \phi_u(t_1)$:

$$\begin{aligned} \phi'_u(t_2) = \phi_w(t_2) - 2\pi \times \text{NINT}\left[\frac{\phi_w(t_2) - \phi'_u(t_1) \cdot k}{2\pi}\right] = \\ \phi_w(t_2) - 2\pi \times \text{NINT}\left\{\frac{\phi_w(t_2) - [\phi_u(t_1) + \epsilon] \cdot k}{2\pi}\right\} = \varphi + 2n\pi - 2\pi \times \text{NINT}\left[\frac{k\epsilon}{2\pi}\right], \end{aligned} \quad (9)$$

为了使噪声对相位展开不产生影响,则要求最大噪声必须保证 $\text{NINT}\left[\frac{k\varepsilon}{2\pi}\right]=0$, 所以

$$\left|\frac{k\varepsilon}{2\pi}\right| < \frac{1}{2}, \quad \text{即 } |\varepsilon| < \frac{\pi}{k}. \quad (10)$$

如果用 $|\varepsilon|$ 评价噪声免疫力,由(10)式可见:当 $k=2$ 时,本文方法和正指数条纹序列方法的噪声免疫力相同。当 $k < 2$ 时,本文算法比正指数条纹序列算法有更好的噪声免疫力。这意味着,如果相位信息噪

声大于 $\pi/2$,正指数条纹序列算法将无法正确进行相位重建,而本文算法可以采用 $k < 2$ 的条纹序列进行相位重建。此外,本文方法还可以在噪声小于的情况下,采用 $k > 2$ 的条纹序列进行重建,即采用较少的条纹编码图就可以达到较高的分辨率[参见图 3(f)]。对于 $k \neq 2$ 的情况,正指数条纹序列算法的噪声免疫力会很快下降,甚至无法进行正确的相位重建[参见图 3(e)]。由此证明本文算法具有更好的鲁棒性。

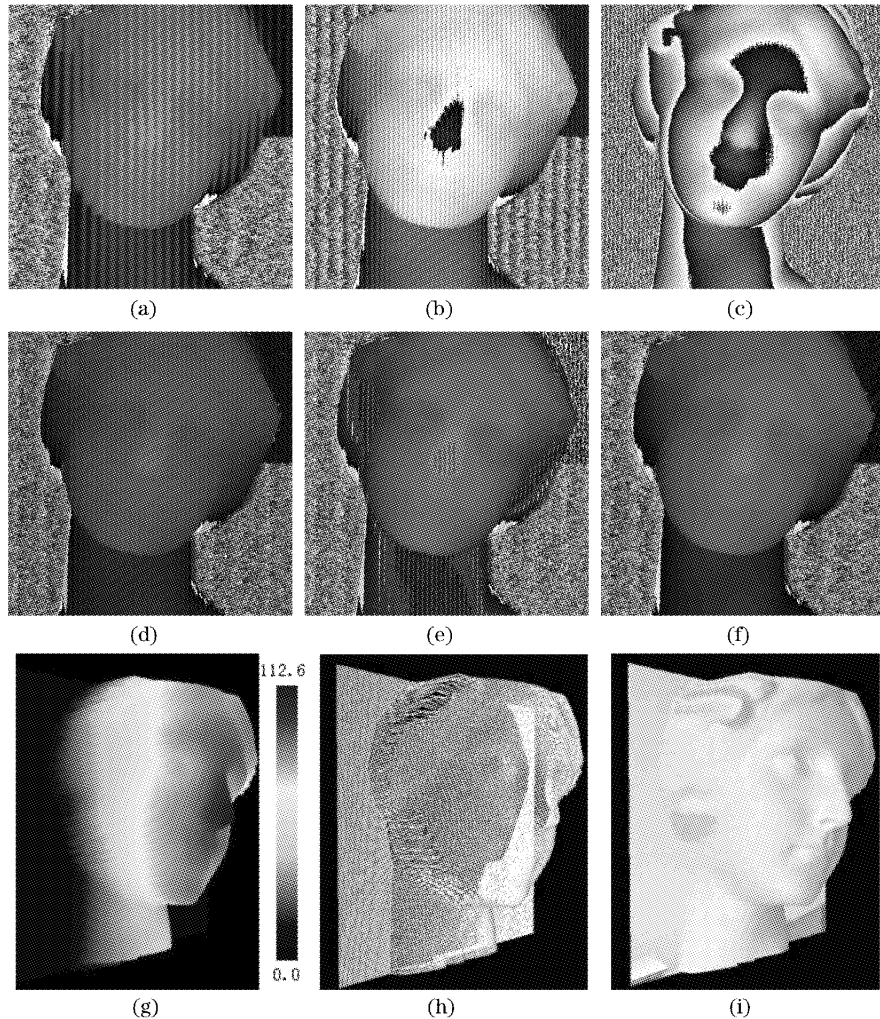


图 3 实验结果。(a) $t=10$, (b) $t=20$, (c) $t=68$ 时的折叠相位图, (d) $t=20$, (e) $t=68$ 时正指数条纹序列, (f) $t=68$ 时本文的方法获得的展开相位图, (g) 3D 彩色编码图, (h) 3D 网格图, (i) 纹理图

Fig. 3 Experimental results. The wrapped phase map at $t=10$ (a), $t=20$ (b), $t=68$ (c). The unwrapped phase map at $t=20$ (d), $t=68$ (e) with positive exponential sequence, $t=68$ (f) with the proposed approach, (g) Color coded 3D image, (h) 3D mesh, (i) 3D textured image

4.3 时间复杂度分析

在获得各阶次编码条纹图的折叠相位分布后,正指数条纹序列算法获得相邻折叠相位差需要进行 5 次运算,进行展开共需要 6 次运算,所以正指数条纹序列算法进行一次相位展开需要进行 11 次运算。

所以如果进行 n 次相位展开运算,正指数条纹序列算法的时间复杂度为 $\bar{T} = O(11n)$ 。使用本文算法相位每一步展开运算过程仅需要 6 次计算,所以如果进行 n 次展开,本算法的时间复杂度为 $\bar{T} = O(6n)$ 。在时间复杂度上,本文算法要比正指数条纹

序列算法简单一些。如果考虑到采用 Peng^[12] 提出的计算初始条件算法确定使用的初始条纹 t_0 , 那么可以根据物体实际高度采用不同的初始投影在物体表面的条纹数, 进一步减少图像采集和运算时间。这样, 整个三维相位重建过程时间复杂度将进一步降低。因此, 本文提出的算法具有更高的计算效率。

5 算法实验结果

本实验系统的结构图如图 1, 其中条纹结构光通过数字投影系统产生, 实验系统使用 BenQ 公司生产的 PB2125 投影仪, 该投影仪参量为: 光亮度为 1300 lm, 标准分辨率为 800 pixel×600 pixel。CCD 摄像机选用 JVC 品牌 TK-C1481BEC 的彩色 CCD。计算机采用的 CPU 为奔腾 4, 主频为 2.80 GHz。成像系统中心到投影系统中心的距离为 150 mm, 参考平面到成像系统中心的距离为 1380 mm, x 方向和 y 方向的视场大小均为 233 mm。

在实验中, 以石膏头像作为被测物体, 经过估算视场内条纹数为 10 时, 相位图没有产生折叠, 以此为初始条件。采用的另外两个视场内条纹数分别为 20 和 68, 分别对应 $t=2$ 和 $t=3.4$, 经过三步相移算法得到的编码条纹的叠相位图如图 3(a)~图 3(c) 所示。正指数条纹序列算法和本文算法对同样一幅 512×512 折叠相位图进行相位展开平均使用的时间分别为 18.53 ms 和 10.70 ms。利用条纹数为 10 的相位图对条纹数为 20 的折叠相位图 $t=2$ 进行展开时, 采用正指数条纹序列算法和本文算法结果是一样的, 如图 3(d); 而利用条纹数为 20 的展开相位结果对比较高的条纹数 68 的折叠相位进行展开时, 正指数条纹序列算法展开没有成功, 如图 3(e); 而本文方法依然能够正确展开, 如图 3(f)。最终三维重建结果如图 3(g)~图 3(i), 分别为 3D 彩色编码图、3D 网格图和纹理图。

6 结 论

本文提出了一种广义变频条纹图序列的相位展开算法。当相邻阶次的条纹数之比等于 2 时, 本文算法就简并成 Huntley 提出的正指数条纹序列算

法。对提出算法的噪声免疫力和时间复杂度进行了详细的分析, 指出与正指数条纹序列相位展开算法相比, 该算法具有更好的噪声免疫力和更低的算法复杂度以及更大的灵活性。本文方法可以根据实际的环境情况和精度要求决定投影条纹的频率, 从而减少所需采集的图像数目, 提高系统的实时性。理论分析和实验结果都证明了该算法的有效性。

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 Zhang Zonghua, Peng Xiang, Hu Xiaotang. A new color 3-D optical imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 994~998 (in Chinese)
张宗华, 彭翔, 胡小唐. 一种新型彩色三维光学成像系统[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 994~998
- 3 Tian Jingdong, Peng Xiang. Approach for 3-D digital imaging via position-shift point array projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1319~1323 (in Chinese)
田劲东, 彭翔. 位错点阵投影的三维数字成像[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1319~1323
- 4 Chen Wenjing, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. New method to eliminate extension of zero component in FTP[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(6): 740~744 (in Chinese)
陈文静, 苏显渝, 曹益平等. 傅里叶变换轮廓术中抑制零频的新方法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 740~744
- 5 D. C. Ghiglia, M. D. Pritt. *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998. Chapter2~Chapter6: 31~309
- 6 J. M. Huntley, H. Saldner. Temporal phase unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(17): 3047~3052
- 7 J. M. Huntley, H. Saldner. Shape measurement by temporal phase unwrapping: comparison of unwrapping algorithms[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**(9): 986~992
- 8 J. M. Huntley, C. R. Coggrave. Progress in phase unwrapping [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3407**: 86~93
- 9 Peng Xiang, Qiu Wenjie, Wei Linbin *et al.*. Phase decoding based on temporal-spatial phase unwrapping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 43~48 (in Chinese)
彭翔, 邱文杰, 韦林彬等. 相位解码的时-空重建算法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 43~48
- 10 Lars Kinell, Mikael Sjö Dahl. Robustness of reduced temporal phase unwrapping in the measurement of shape[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(17): 2297~2303
- 11 Hong Zhao, Wenyi Chen, Yushan Tan. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(20): 4497~5000
- 12 Xiang Peng, Zhaoliang Yang, Hanben Niu. Multi-resolution reconstruction of 3-D image with modified temporal unwrapping algorithm[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **224**(1~3): 35~44