

基于条纹级次编码与调制的结构光相位展开算法

李杰^{1,2}, 陈彬^{1,2*}, 曾欣怡^{1,2}, 伍世虔^{1,2}

¹ 武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081;

² 武汉科技大学机器人与智能系统研究院, 湖北 武汉 430081

摘要 利用相位级次的编码和调制方法将相位级次信息叠加到相移图像中, 提出了一种直接利用相移图像进行相位解包裹的方法。在投影端, 提出了一种邻接不重复德布鲁因序列, 并用该序列对相位级次进行编码, 然后将该周期级次编码序列调制、叠加到多步相移图像中。相应地, 在解码阶段, 从拍摄到的相移图像中同时解调、分解出包裹相位和周期级次编码序列, 通过序列的匹配还原真实周期级次信息, 并最终准确地解包裹出绝对相位。以四步相移法为例, 本文方法相比传统的时间相位解包裹算法, 投影图片从 10 张(64 个相位周期)缩减到了 4 张, 提高了测量效率。

关键词 测量; 结构光; 相移法; 相位解包裹; 三维测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0912005

Phase Unwrapping Algorithm for Structured Light Based on Fringe-Order Encoding and Modulation

Li Jie^{1,2}, Chen Bin^{1,2*}, Zeng Xinyi^{1,2}, Wu Shiqian^{1,2}

¹ School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China;

² Institute of Robotics and Intelligent Systems, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China

Abstract This paper first uses the phase-order encoding and modulation methods to superimpose the phase-order information into the phase-shifting image, and then proposes a method to directly use the phase-shifting image to unwrap the phase. On the projection side, this paper firstly proposes an adjacent non-repetitive De Bruijn sequence, uses this sequence to encode the phase order, and then modulates and superimposes the periodic order code sequence into the multi-step phase shift image. Correspondingly, in the decoding stage, this paper demodulates and decomposes the wrapped phase and period order coding sequence from the captured phase-shifting image at the same time, then restores the true period order information through sequence matching, and finally unwraps the absolute phase accurately. We take the four-step phase shifting method as an example. Compared with the traditional temporal phase unwrapping algorithm, the method in this paper reduces the number of projection images from 10 (64 phase periods) to 4, which improves the measurement efficiency.

Key words measurement; structured light; phase shifting method; phase unwrapping; three-dimensional measurement

1 引言

三维(3D)形状测量现如今的应用非常广泛,包

括工业零件的质量检测、人脸识别、医学领域中的疾病诊断、智能机器人等^[1-3]。其中,基于结构光的相位轮廓测量术具有对传感器噪声、对物体表面反射

收稿日期: 2021-10-19; 修回日期: 2021-11-21; 录用日期: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(61775172)

通信作者: *chenbin@wust.edu.cn

率变化高鲁棒性的优点,因此在 3D 重建中的应用非常广泛^[4]。在过去的这些年中,依靠相位来还原物体表面 3D 信息的方法被大量提出,其中包括傅里叶变换方法^[5-6]、相移法^[7-9]等。相位的测量方法在求解相位时只能得到范围在 $-\pi \sim \pi$ 的不连续包裹相位,在计算被测物体表面的 3D 信息前,还需要将包裹相位转换为连续的未包裹相位,这一步骤常被称为相位的解包裹或相位展开。

时间相位解包裹是应用最为广泛的解包裹方法,其通过在时间上投影包含了条纹周期信息的编码图像,获得相位的周期级次信息。近些年,众多较为成熟的时间相位解包裹方法被提出并得到了广泛应用,如多频外差技术^[10]、格雷码加相移法方法^[11]、空间编码加相移法方法^[12]。以上时间相位解包裹方法虽然能够较为简便、精确地由包裹相位还原未包裹相位,但是时间相位方法需要投影额外的编码图像来找到包裹相位点所处的周期 k ,显然这会影响到 3D 重建的效率。

为了解决时间相位解包裹需要捕捉额外信息导致的测量效率较低的问题,本文提出了一种新的相位编码和解码方法,该方法结合信号调制理论,将条纹的周期级次信息调制/叠加到正弦波相位之上,即无需为了获取条纹的周期信息而投影额外的编码图片,而是从编码条纹的相位信息中直接解调/分离出条纹的周期信息,如此则可大幅提高测量效率。概括来说,本文所提出的结构光测量方法的编码过程如下。

本文算法首先选用 m 个编码码元,并利用德布鲁因序列原理构建一个长度与条纹总周期数 K 相同的码元序列,其中 $K > m$ 。根据德布鲁因序列的特点,依据序列中每个码元与其相邻码元之间的关系即可确定该码元所代表的条纹周期。接下来,本文构造了一个特殊函数 φ ,该函数的取值范围为 $[-\pi, \pi)$ 。本文利用函数 φ 的值所处的不同范围来分别表示 m 个不同的编码码元,并用该函数 φ 来表示上一步构造的码元序列。因此,解码时依据函数 φ 的值就可确定其所表示的码元值,然后依据上一步所述的方法确定条纹的周期。最后,本文将上一步用函数 φ 表示的码元序列作为经典四步或三步相移的相位,并生成结构光编码图像。

很明显地,通过以上所述的编码过程,本文仅需投影三幅(三步相移)或四幅(四步相移)编码图像即可达到时间相位解包裹算法的效果,提升了结构光测量效率。本文选取格雷码加相移法这一具有代表

性的时间相位解包裹算法进行简要介绍,并据此阐述时间相位解包裹算法存在的不足,进而引出本文算法的出发点;按编码过程分步骤详细阐述本文算法的原理,并对其细节进行详细分析;实验部分,将本文算法与多频外差和格雷码加相移法等算法进行对比分析,以说明本文算法的优势;最后,简要总结本文的工作,并对下一阶段的研究工作进行展望

2 相关工作

2.1 结构光相移算法

相比于傅里叶变换等条纹分析方法,相移算法具有测量精度高、鲁棒性强等特点。对于 N 步相移算法,其数学表达式为

$$I_i(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta_i], \quad (1)$$

式中: $I_i(x, y)$ 为相机成像后像素点 (x, y) 处的亮度, $i = 1, 2, \dots, N$; $I'(x, y)$ 为背景亮度; $I''(x, y)$ 为物体表面的反射系数; $\varphi(x, y)$ 为需要求解的相位; $\delta_i = (i-1)2\pi/N$ 为当前图像的第 i 步相移; N 为相移步数。相机完成 N 步相移图像的采集后,可根据式(2)求解包裹相位 $\varphi(x, y)$:

$$\varphi(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{i=1}^N I_i \sin \delta_i}{\sum_{i=1}^N I_i \cos \delta_i}. \quad (2)$$

在实际测量过程中, $I'(x, y)$ 以及 $I''(x, y)$ 在各点的值可能都不同。但是从式(2)可看出,在经过相移算法之后, $I'(x, y)$ 以及 $I''(x, y)$ 都会被消除,因此相移算法具有较强的抗噪性能。但是由于反正切函数的特点,从式(2)所解得的包裹相位范围为 $-\pi \sim \pi$, 具有 2π 不连续性,无法用于后续的 3D 重建。为了消除相位的 2π 不连续性,可结合每个像素点所处的周期级次信息,利用相位解包裹方法求出每个像素点的未包裹相位 φ_{abs} :

$$\varphi_{\text{abs}} = \varphi(x, y) + 2\pi k(x, y), \quad (3)$$

式中: $k(x, y)$ 为条纹的周期级次信息。为了确定每个像素点 (x, y) 的周期级次信息 $k(x, y)$, 最直接的方法是投影额外的周期级次编码图片,这就是时间相位解包裹的方法。其中,格雷码加相移法^[11]是时间相位解包裹方法中的代表。

2.2 格雷码加相移法

格雷码加相移法的基本原理是利用格雷码对每个像素点的周期级次信息进行编码,其编码过程如图 1 所示。两个相邻的格雷码只有一位二进制数不

同,属于可靠性编码的一种。相比于二进制码元,格雷码具有一定的检错功能。以四步相移加格雷码、64 个相位周期为例,投影仪需投影 10 幅编码图像,包括 4 幅相移编码图像[图 1(a)]和 6 幅二值格雷码编码图像[图 1(c)]。其中,第 i 幅格雷码编码图像中的像素值 $g_i(x, y)$ 表示像素点 (x, y) 处的格雷

码的第 i 位。因此,像素点 (x, y) 所对应的周期级次信息 $k(x, y)$ 可写为

$$k(x, y) = f \left[\sum_{i=0}^5 2^{5-i} g_i(x, y) \right], \quad (4)$$

式中: $f(\cdot)$ 表示格雷码“ \cdot ”对应的十进制自然码。

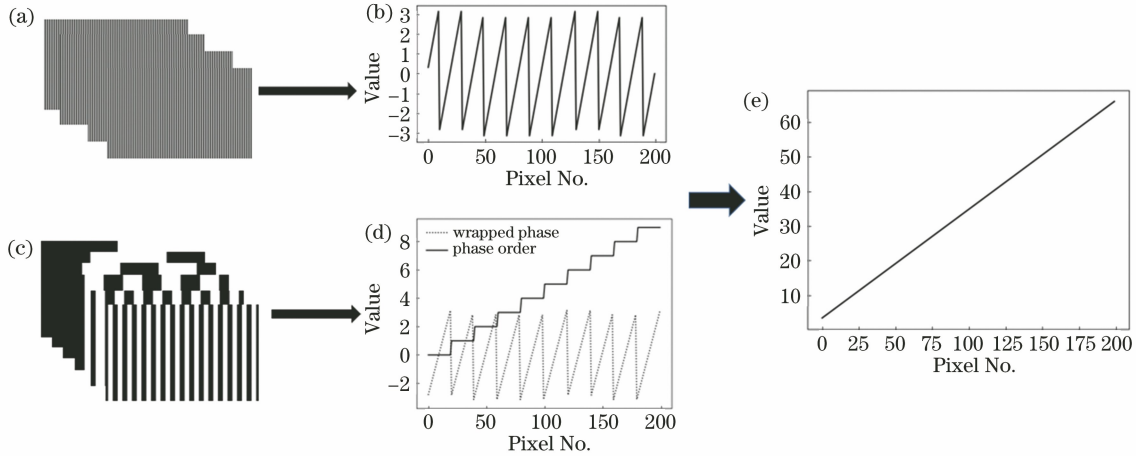


图 1 时间相位解包裹流程图。(a)相移图片;(b)包裹相位;(c)格雷码图片;(d)每周期的级次信息;(e)未包裹相位图

Fig. 1 Flow diagram of temporal phase unwrapped algorithm. (a) Phase shifting image; (b) wrapped phase; (c) Gray-code image; (d) order of each period; (e) unwrapped phase

近些年,在上文所述的经典格雷码方案基础上,众多学者也提出了相应的改进格雷码方法,如:Zhang 等^[13]于 2012 年提出了一种互补格雷码的方法,该方法通过将原始的格雷码向左移动半个周期,使得格雷码的跳变边沿位于相位周期中间以解决在解码过程中出现的格雷码周期与相位周期对齐不准的问题;然而,互补格雷码方法会在经典格雷码加相移法的基础上额外增加一张图片,这进一步降低了测量效率;Wu 等^[14-16]在互补格雷码的基础之上提出了循环互补格雷码、位移格雷码、分区间展开加时间复用格雷码,在保持互补格雷码优势的同时减少了投影格雷码的图片数量,以提高测量效率。即便如此,上述方法还是无法避免在相移编码图像以外投影级次编码图像。为了提高投影效率,本文考虑在生成相移编码图像之前,将像素点的周期级次信息 $k(x, y)$ 调制/叠加到相位 $\varphi(x, y)$ 上,以生成一个已调相位 $\varphi'(x, y)$,然后利用已调相位 $\varphi'(x, y)$ 生成相移编码图像。因此,按式(2)求解出的包裹相位中同时包含相位信息 $\varphi(x, y)$ 和周期级次信息 $k(x, y)$,这样可以在不增加编码图像的情况下,完成相位的解包裹操作,提高测量效率。

3 本文算法

本节在第 2 节对以格雷码为代表的时间相位解

包裹算法分析的基础上,详细描述本文的编码算法,并分析本文算法的特点。

3.1 邻接不重复的德布鲁因序列

对于一个含有 m 个码元的码元集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$,一个 n 阶 m 元德布鲁因序列 $D(m, n)$ 是一个由 m 个码元构成的长度为 m^n 的码元序列,所有的由码元集合 S 中的码元构成的长度为 n 的子序列在序列 $D(m, n)$ 中仅出现一次。正是因为德布鲁因序列的这一特点,许多离散结构光编码方法^[17]利用德布鲁因序列对投影条纹进行编码。在解码过程中,根据某一条纹及其邻近条纹即可确定该条纹在整个编码图像中的位置。利用德布鲁因序列对条纹进行编码可以提高条纹匹配的准确性,降低匹配过程的算法复杂度,提高匹配效率。因此,本文也将采用德布鲁因序列对相移图像的周期级次信息进行编码。

然而,利用德布鲁因序列对结构光编码图像进行编码时需要考虑序列中相邻码元相同这一问题,这是因为在解码阶段处理一连串相同码元时难以确定码元个数以及每个码元的起止位置。Zhang 等^[18]提出了一种预编码方法来消除德布鲁因序列中的重复码元,即

$$D'_i = D'_{i-1} \oplus D_i, \quad 1 \leq i \leq m^n, \quad (5)$$

式中: D_i 为德布鲁因序列 $D(m, n)$ 中的第 i 个元

素; D'_i 为第 i 个预编码序列; \oplus 表示按位异或运算。此外, 初始状态的预编码序列 $D'_0 \in S$ 。总之, 预编码方法的主要思想是在生成编码条纹前先将德布鲁因序列 $D(m, n)$ 按式(5)进行预编码, 然后依据整个预编码序列 D' 生成编码条纹, 以保证相邻条纹是不同的(无重复码元)。然而, 该方法产生的预编码序列 D' 不再是德布鲁因序列, 因此解码过程中的条纹匹配算法将无法利用德布鲁因序列子串不重复这一特性。正因如此, 文献[18]最终采用了多方向动态规划匹配算法以降低匹配效率。

本文采用一种编解码更为简单、直接的方法来解决德布鲁因序列相邻码元重复的问题。首先, 本文引入一个新的码元 b , 且该码元 b 不属于码元集合 S 。该码元 b 的作用是替换德布鲁因序列中的重复码元, 以破坏其邻接码元的重复性, 即破坏码元, 而插入破坏码元后的序列为邻接不重复德布鲁因序列, 记为 $D^*(m, n)$ 。破坏码元的插入规则为: 逐元素扫描德布鲁因序列 $D(m, n)$, 若当前码元等于序列中的前一码元, 则用破坏码元 b 替换当前码元, 如此重复直至序列 $D(m, n)$ 扫描结束, 其具体操作过程为算法 1, 即邻接不重复德布鲁因序列生成, 算法 1 的输入为德布鲁因序列 D 和破坏码元 b , 输出为

邻接不重复德布鲁因序列 D^* , 其代码为

1. $D' = D$;
2. for $i = 2$ to $\text{length}(D')$
3. if $D'_i = D'_{i-1}$ then
4. $D'_i = b$;
5. end if
6. end for
7. return D^* 。

本文最终的结构光编码方案采用了 64 个相位周期, 为此在对周期级次信息编码阶段取 $m = 3$ 与 $n = 4$, 即采用邻接不重复德布鲁因序列 $D^*(3, 4)$ 对周期级次信息进行编码。其中, 码元集合 $S = \{1, 2, 3\}$, 破坏码元 $b = 0$ 。需要说明的是, 序列 $D^*(3, 4)$ 的长度为 81, 本文最终选取了该邻接不重复德布鲁因序列一个长度为 64 的子串。在解码时, 将破坏码元 b 用它前一个码元替代即可, 恢复出原始的德布鲁因序列, 如此进行匹配, 则可利用德布鲁因序列子串不重复的特性简化匹配算法。

本文最终采用的编码码元序列如图 2 所示, 其中, k 为周期级次, D 为德布鲁因序列, D^* 为插入破坏码元后的邻接不重复德布鲁因序列。

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
D	1	2	3	1	2	3	2	3	1	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	2
D^*	1	2	3	1	2	3	2	3	1	3	1	2	1	2	3	0	1	2	0	3	1	0	2	1	3	1	3	2	3	2	1	2
k	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
D	1	1	2	2	1	2	2	2	3	2	2	3	3	2	3	3	3	1	3	3	1	1	3	1	1	1	3	2	1	3	2	2
D^*	1	0	2	0	1	2	0	2	3	2	0	3	0	2	3	0	3	1	3	0	1	0	3	1	0	1	3	2	1	3	2	0

图 2 本文采用的周期级次编码序列

Fig. 2 Period-order coding sequence used in this paper

3.2 相位调制

由式(1)、(2)表示的结构光相移法可知, 其包裹相位 $\varphi(x, y)$ 是一个取值范围为 $[-\pi, \pi)$ 的周期性函数, 因此它可以表示为

$$h(x) = \frac{2\pi}{T}x - \pi, \quad 0 \leq x < T, \quad (6)$$

$$\varphi(x, y) = \sum_{k=0}^{K-1} \varphi_k(x, y) = \sum_{k=0}^{K-1} h(x - kT), \quad (7)$$

式中: K 为最大周期数; $h(x, y)$ 为 $\varphi(x, y)$ 在主周期内的表达式; T 为包裹相位 $\varphi(x, y)$ 的周期; $\varphi_k(x, y)$ 为第 k 段包裹相位。从调制角度出发, 本文将包裹相位 $\varphi(x, y)$ 看作载波, 将经过邻接不重

复德布鲁因序列编码后的周期级次信息调制到该载波之上, 以提高测量效率。本文采用的调制策略较为简单、直接, 即将载波 $\varphi(x, y)$ 的取值范围 $[-\pi, \pi)$ 平均划分为若干相等的区间, 而每个区间代表一个码元。

具体而言, 若采用邻接不重复德布鲁因序列 $D^*(m, n)$ 对周期级次信息进行编码, 则编码序列中含有 $m + 1$ 个码元, 即编码序列为 $\{b, s_1, s_2, \dots, s_m\}$, 且能编码的最大周期数 $K = m^n$ 。为此, 需要将 $\varphi(x, y)$ 的取值范围 $[-\pi, \pi)$ 平均划分为 m 个区间, 则每个区间的长度 $\Delta = 2\pi/(m + 1)$ 。其中, 破坏码元 b

对应的区间为 $[-\pi, -\pi + \Delta)$, 而第 i 个码元 s_i 对应的区间为 $[-\pi + i\Delta, -\pi + (i+1)\Delta]$ 。根据上文所述, 第 k 个周期的已调相位 $\varphi'_k(x, y)$ 可表示为

$$\varphi'_k(x, y) = \Delta h(x - kT) + A_k, \quad (8)$$

其中

$$A_k = -\pi + \Delta D_k^* + \frac{\Delta}{2} = \Delta \left(D_k^* - \frac{m}{2} \right), \quad (9)$$

式中: D_k^* 为邻接不重复德布鲁因序列 $D^*(m, n)$ 的第 k 个码元, 即 k 个周期所对应的码元。如上文所

述, 本文最终采用码元集合 $S = \{1, 2, 3\}$, 破坏码元 $b=0$ 临界不重复德布鲁因序列以对周期级次进行编码, 则根据式(8)、(9)所示的相位调制方法, 其对应的已调相位如图 3 所示。

完成相位调制后, 接下来的步骤则是根据式(1)所示的结构光相移测量法生成对应的相移条纹图像。以四步相移为例, 图 4(a)~(d) 分别展示了四步相移对应的条纹图像。

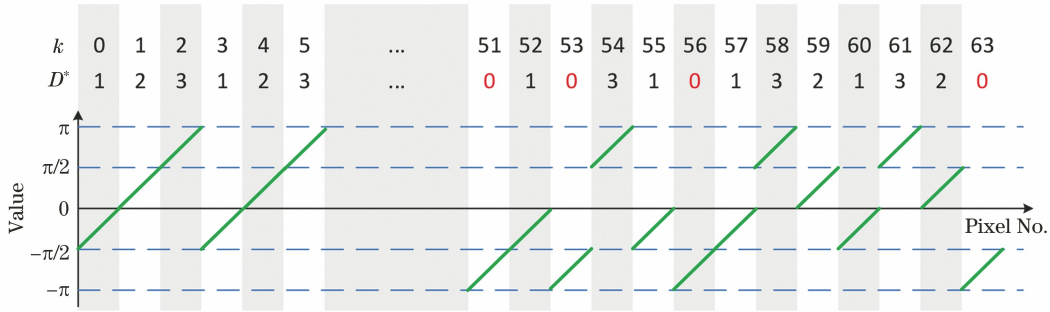


图 3 编码相位示意图

Fig. 3 Coding phase diagram

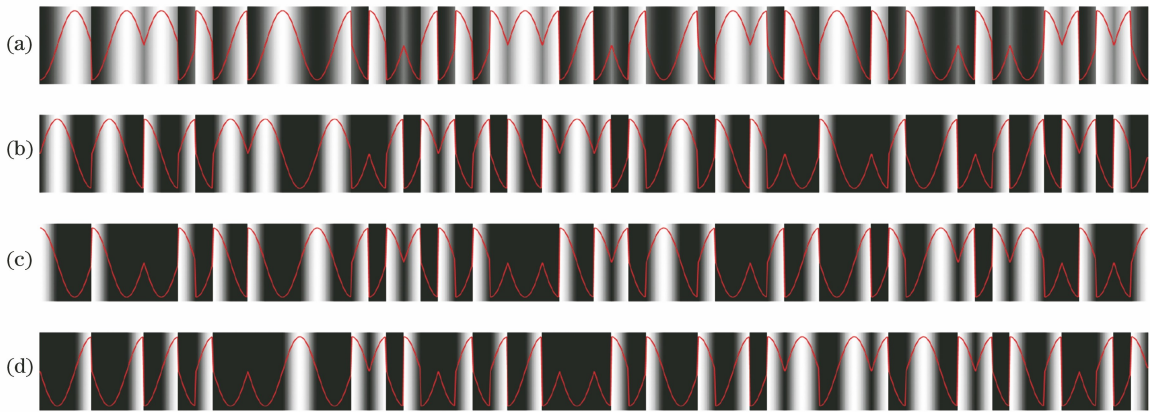


图 4 已调相位对应的四步相移条纹图像

Fig. 4 Four-step phase shift fringe images corresponding to adjusted phase

需要指出的是, 本文采用邻接不重复德布鲁因序列 $D^*(m, n)$ 对条纹周期进行编码时, 编码序列中将含有 $m+1$ 个码元, 最大可编码周期数为 m^n 。因此, 增大 m 或 n 都能增加序列的最大可编码的条纹周期数。相较于增大 n 的值, 增大 m 的值对本文编码方法的正确率影响较大。这是因为: 增大 m 的值, 即采用较多的码元, 会将包裹相位的取值范围划分为更多的区间, 如此每个区间的相位取值范围就会变小, 相应地, 每个区间对应的正弦条纹的取值范围也将变小。考虑到数字图像的离散性, 用于表示该区间条纹取值的像素值数量会变少, 这势必会降低相移法求解相位的精度。图 5 直观展示了相位求解误差随 m 值的增加(划分区间数增加)而增加的趋势。

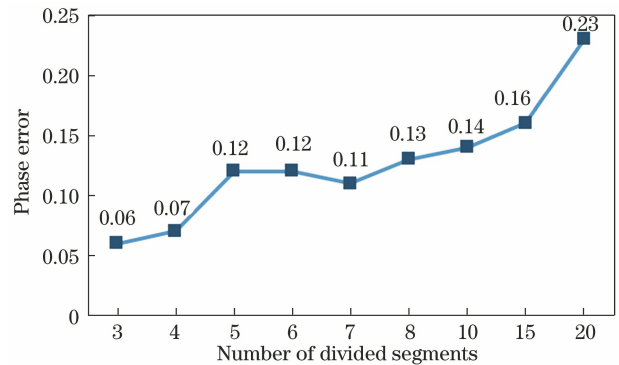


图 5 不同的划分段数下求得的相位误差

Fig. 5 Phase error for different number of divided segments

3.3 解码与相位解包裹

3.3.1 解码流程

根据上文所介绍的编码、调制过程,在实际测量

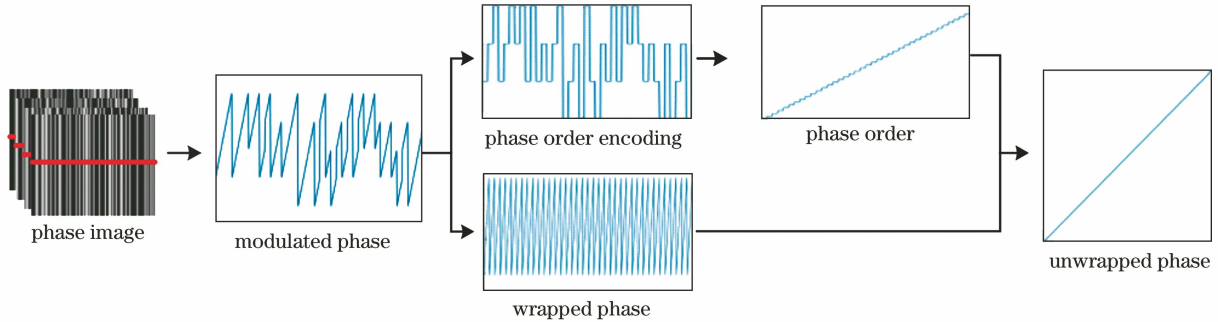


图 6 解码与相位解包裹流程

Fig. 6 Decoding and phase unwrapping process

首先,根据式(2)所示的相位求解方法从所拍摄到的相移图像中求解出相位,即求解出调制了周期级次编码信息的相位 φ' ;接下来,根据相位 φ' 所处的范围和式(8)所示的调制过程,解调出周期级次编码序列,与此同时也可获得包裹相位信息;利用德布鲁因序列的性质,进行解码序列与投影序列之间的匹配以确定每个像素所处的周期;最后利用式(3)从周期级次信息和包裹相位中恢复出未包裹相位 φ_{abs} 。通过计算得到未包裹相位后,则可根据结构光系统测量原理,利用实际光学系统(投影仪与相机)的内、外参数计算出待测物体表面的 3D 信息。由于实际测量过程中存在光路遮挡现象(图 7),因此由调制相位解调出的周期级次编码序列会与投影仪投影的编码序列(邻接不重复德布鲁因序列)存在差异,如何实现这两个序列之间的匹配是本文算法的关键。

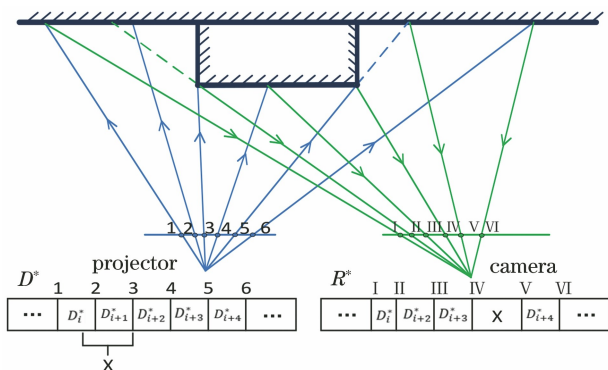


图 7 遮挡对解码的影响示意图

Fig. 7 Schematic diagram of influence of occlusion on decoding

对于每一行数据来说,假设投影仪投影的编码序列为邻接不重复德布鲁因序列 D^* ,相机接收的

阶段,相机拍摄到投影到待测物体表面的相移条纹图像后,对每一行数据的处理步骤如图 6 所示。

解调后的编码序列为 R^* ,图 7 简要展示了结构光测量系统的成像过程,其中点 1~6 分别为投影序列相邻码元的边界,而点 I~VI 分别表示接收序列相邻码元的边界。实际测量过程中的遮挡主要有两种类型:第一种是投影仪投射的码元序列经待测物体反射后因遮挡而不能被相机拍摄到,即相机光路被遮挡(图 7 中投影序列 D^* 中被符号 X 标识的区域);第二种是因为遮挡,某一区域不能被投影仪照射到,却能被相机拍摄到,即投影仪光路被遮挡(图 7 中接收序列 R^* 中被符号 X 标识的区域)。其中,投影仪光路被遮挡的情况可以在根据式(2)求解包裹相位时通过判断反正切函数的分子与分母是否同时为零加以检测,并在匹配前从序列 R^* 中剔除,从而不会影响接收序列与投影序列之间的匹配。然而,相机光路被遮挡这一情况却不能被稳定检测,这种遮挡的存在将会对接收序列产生两方面的影响:1)它会使接收序列中缺失部分码元,如图 7 中的 R^* 中缺失 D_{i+1}^* 码元;2)码元的缺失会导致破坏码元还原错误。例如,假设图 7 中码元 D_{i+2}^* 为破坏码元 b ,则根据破坏码元的插入规则,还原后的码元应为 D_{i+1}^* ,但由于遮挡,接收序列 R^* 中的 D_{i+2}^* 将会被还原为 D_i^* 。以上两种影响将会导致接收序列 R^* 与投影序列 D^* 之间的不一致,从而为两者之间的匹配,即确定每个周期的级次带来困难。

3.3.2 周期级次匹配

假设解调得到的序列 R^* 的长度为 L_{R^*} ,则解调序列 R^* 与投影序列 D^* 之间的匹配结果可以由一个长度为 L_{R^*} 的数组 C 来表示,即数组 C 的第 i 个元素 C_i 表示 R^* 与投影序列 D^* 中的元素 $D_{C_i}^*$ 相匹配。根据结构光测量原理(图 8),大多数情况下

认为解调序列 R^* 与投影序列 D^* 之间的匹配结果满足两个假设: 1) 连续匹配成功码元长度越长, 则这些码元的匹配结果置信度越高; 2) 匹配结果是单调递增的, 即如果 $j > i, C_j > C_i$ 成立。基于以上一种假设或两种假设, 可使用晶体生长算法^[19]或动态规划算法^[18]实现解调序列 R^* 与投影序列 D^* 之间的匹配。为了降低匹配过程的算法复杂度、提高匹配效率, 本文利用德布鲁因序列的特点将解调序列 R^* 与投影序列 D^* 之间的匹配过程分为两步: 连续码元匹配和优化。

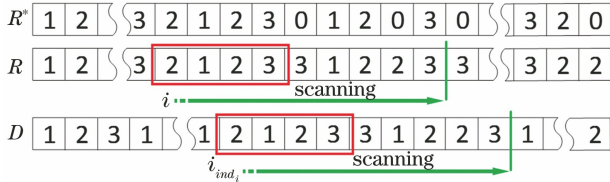


图 8 连续码元匹配

Fig. 8 Continuous symbol matching

所谓连续码元匹配是指查找解调序列 R^* 与投影序列 D^* 能连续匹配成功的子序列, 若该子序列的长度超过某一指定阈值 T 时, 则将该子序列中的每个码元的匹配值作为该码元的最终匹配结果。例如, 将解调序列 R^* 中第 i 个码元到第 $i+p$ 个码元的子序列记为 $R_{i:i+p}^*$, 若该子序列与 $D_{j:j+p}^*$ 相匹配, 且子序列 $R_{i:i+p}^*$ 的长度 $p+1$ 大于阈值 T , 则下一次查找操作从码元 R_{i+p+1}^* 开始, 并设置 $C_{i:i+p}(j, j+1, \dots, j+p)$, 否则下一次查找从 R_{i+1}^* 开始。由于一个长度为 n 的子序列在 n 阶德布鲁因序列中出现且仅出现一次, 所以本文首先将解调序列 R^* 按算法 1 的逆操作将序列 R^* 中的破坏码元 b 还原为原始码元, 得到序列 R ; 然后查找由当前待处理码元 R_i 与其后续的 $n-1$ 个码元构成的子序列 $R_{i:i+n-1}$ 在原始德布鲁因序列 D 中的位置 i_{ind_i} ; 最后, 从 i_{ind_i} 开始往后扫描以确定连续匹配的码元长度。连续码元匹配过程可由图 8 简要表示。

需要说明的是, 实际匹配过程中可以用 $0, 1, \dots, m^n-1$ 这 m^n 个整数作为由 m 个码元构成的长度为 n 的子序列的索引值, 那么利用哈希查找算法查找子序列 $R_{i:i+n-1}$ 在序列 D 中的位置 i_{ind_i} 的算法复杂度为 $o(1)$, 如此能大大提高匹配效率。

解调序列 R^* 中满足连续码元匹配条件的码元确定了投影序列 D^* 的匹配位置, 进一步确定因遮挡而不满足连续码元匹配条件的码元的匹配位置, 将该过程称为优化过程。假设序列 R^* 中从第 e 到第 $g=e+f-1$ 共 f 个码元的匹配位置未确定, 即

匹配结果中 $C_{e:g}$ 都为空。那么 R_{e-1}^* 为前一个连续匹配子序列的最后一个元素, R_{g+1}^* 为后一个连续匹配子序列的第一个元素, 且两者的匹配结果分别为 C_{e-1} 和 C_{g+1} 。依据匹配结果是单调递增的这一假设, 则与码元 R_q^* ($e \leq q \leq g$) 相匹配的码元则位于投影序列 D^* 中第 C_{e-1} 与第 C_{g+1} 个码元之间, 即 $C_{e-1} < C_q < C_{g+1}$ 。由于码元 R_q^* 可能与投影序列 D^* 中第 C_{e-1} 与第 C_{g+1} 之间多个码元相等, 因此匹配结果 $C_{e:g}$ 有多种可能, 即 $C_{e:g}$ 为子序列 $R_{e:g}^*$ 中每个码元所有可能匹配值的排列组合。本文定义了一种代价函数 $C_{Cost_{e \rightarrow g}}$ 用来衡量匹配结果 $C_{e:g}$ 的置信度:

$$C_{Cost_{e \rightarrow g}} = \sum_{q=e}^{g+1} d_{\text{dist}}(C_{q-1}, C_q), \quad (10)$$

式中: $d_{\text{dist}}(C_{q-1}, C_q)$ 表示当前码元 R_q^* 的匹配值为 C_q 、而前一码元 R_{q-1}^* 的匹配值为 C_{q-1} 时的代价。因此, 最优的匹配结果 $C_{e:g}^*$ 就是使代价函数 $C_{Cost_{e \rightarrow g}}$ 最小时的匹配结果, 即

$$C_{e:g}^* = \underset{C_{e:g}}{\operatorname{argmin}} C_{Cost_{e \rightarrow g}}. \quad (11)$$

此外, 为了保证匹配结果单调递增, 本文将相邻码元匹配值之间的代价 $d_{\text{dist}}(C_{q-1}, C_q)$ 定义为

$$d_{\text{dist}}(C_{q-1}, C_q) = \begin{cases} 0, & C_q - C_{q-1} = 1 \\ C_q - C_{q-1}, & C_q > C_{q-1} + 1. \\ \infty, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

类似 Zhang 等^[18]所提的方法, 本文采用动态规划方法来求解最优匹配结果。算法 2 为匹配结果的优化, 算法输入为解调序列 R^* 、投影序列 D^* 、解调序列匹配范围 e, g , 以及连续码元匹配结果 C , 输出为优化匹配结果 C^* , 算法代码为

1. $RS = R_{e-1:g+1}^*, DS = D_{C_{e:g}}^*$;
2. $len = g - e + 3, len_2 = C_{g+1} - C_{e-1} - 1$;
3. $Op_C = \text{ones}(len) .* \text{null}$;
4. $Op_C_1 = 0, Op_C_{g-e+3} = C_{g+1} - C_{e-1}$;
5. $Min_Cost = Opt_Cost(RS, DS, len, Op_C)$;
6. $C^* = C, C_{e:g}^* = Op_C_{2:g-e+2} + C_{e-1}$;
7. return C^* ;
8. Function $Opt_Cost(RS, DS, y, C)$;
9. $Cost = \text{ones}(\text{length}(DS)) .* \text{inf}$;
10. if $y == len - 1$ then
11. $mCost = \text{dist}(C_y, C_{y+1})$
12. return;
13. end if

```

14. for  $i=1$  to  $\text{length}(DS)$ ;
15. if  $RS_{y+1} == DS_i$  then
16.  $C_{y+1} = i + \text{len}_2 - \text{length}(DS)$ 
17.  $TS = DS(i+1:\text{end})$ 
18.  $Cost_i = Opt\_Cost(RS, TS, y+1, C) + \text{dist}$ 
 $(C_y, C_{y+1})$ ;
19. end if
20. end for
21.  $mCost, mInd = \text{min\_and\_index}(Cost)$ ;
22.  $C_{y+1} = mInd$ ;
23. return  $mCost$ ;
24. End Function.

```

上述代码中,操作符 length 为获取列表的长度, min_and_index 是返回列表中的最小元素及其索引值。利用算法 2 的优化操作分别对连续码元匹配后所有未确定匹配值的子序列 $R_{e;g}^*$ 进行优化,则可最终完成解码序列 R^* 与投影序列 D^* 之间的匹配。

4 实 验

为了验证本文提出的算法,使用一套完整的结

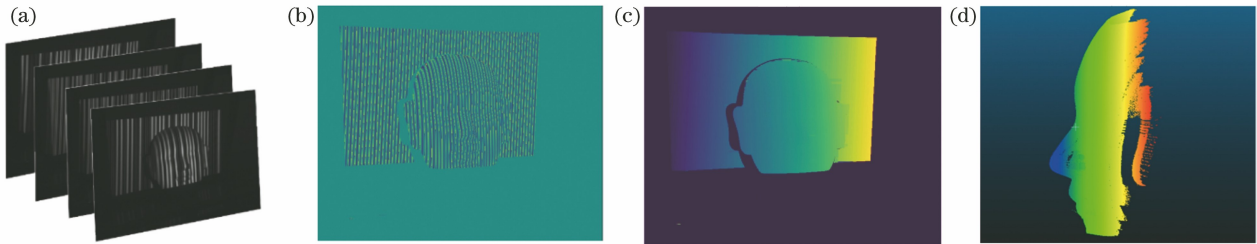


图 9 面具的重建过程。(a)相位级次编码图片;(b)根据四步相移法获得的包裹相位图片;(c)根据本文提出的解码算法计算得出的绝对相位图;(d)重建面具的侧面图

Fig. 9 Reconstruction process of facial mask. (a) Image of phase-level encoding; (b) wrapped phase obtained by four-step phase-shifting method; (c) absolute phase obtained by decoding algorithm proposed in this paper; (d) side view of reconstructed facial mask

图 10 所示。图 10(a)中两个工件平行摆放,为无遮挡场景;图 10(e)中两个工件重叠摆放,由于投射角度有限,投影仪无法投射到,因此 10(e)中交界处会出现黑色区域。图 10(b)和图 10(f)为图 10(a)和图 10(e)的相对相位图。图 10(f)中用方框标识的区域为遮挡区域导致的无效相位,可以通过黑白图进行掩膜去除,值得注意的是,这种遮挡现象不会影响相位在纵轴上的连续性。图 10(h)为解包裹之后的结果,由于遮挡的存在,未包裹的相位在时间上产生了平移,但是在纵轴上保持连续。

此外,从图 10(b)、(f)中可以看到由四步相移解得的包裹相位图中存在很多的离群点,出现这种

现象的原因包括:1)所提出的级次自编码信号为不连续信号,这种不连续的信号在经相机拍摄后,不连续区域会被模糊,调制值出现失真,经过四步相移求解相位后出现相位突变,从而在包裹相位上出现了离群点;2)相移法在重建过程中会受到非线性误差、外界噪声的影响,这些影响容易引起相位的突变,反映到包裹相位图上为在不连续处出现离群点。以上两种因素产生的离群点的值若超过相应的码元区间范围,就会引起码字的解码错误。因此,在进行周期级次解码前需要将这些离群点去除。

1) 标定相机,将投影仪作为逆相机完成标定,获取二者的内参和相对外参。相机标定误差为 0.06827 pixel,投影仪标定误差为 0.07277 pixel。

2) 相机接收投影仪投影的 4 张图片,以人脸面具为例,根据式(8),可以得到如图 9(a)所示的 4 张相移图片,图 9(b)为根据四步相移法得到的包裹相位图,之后根据本文提出的解码步骤完成解包裹的过程,如图 9(c)所示。

3) 根据前面所获得的标定参数,利用三角测量获得重建结果,图 9(d)所示为面具重建的侧面图。

为了进一步验证本文算法的可行性,本文用两个工件设置了遮挡和无遮挡两种场景进行对比,如

现象的原因包括:1)所提出的级次自编码信号为不连续信号,这种不连续的信号在经相机拍摄后,不连续区域会被模糊,调制值出现失真,经过四步相移求解相位后出现相位突变,从而在包裹相位上出现了离群点;2)相移法在重建过程中会受到非线性误差、外界噪声的影响,这些影响容易引起相位的突变,反映到包裹相位图上为在不连续处出现离群点。以上两种因素产生的离群点的值若超过相应的码元区间范围,就会引起码字的解码错误。因此,在进行周期级次解码前需要将这些离群点去除。

针对离群点的问题,本文简单采用周期中相位单调性及相邻像素的距离阈值进行区分。具体而

言,在每段周期内离群点的出现往往会影响一段周期内的单调性,同时离群点与相邻像素的间隔也比正常像素的间隔更大。因此可以通过分析这两个性质来判断是否为离群点。图 10(c)、(g)为去除相位离群点后的结果,绝对相位还原的实验显示离群点的去除可以将绝对相位还原误差从 0.072 减小到 0.033。图 11 展示了更多的实际测量与重建的结果。

为了验证本文的算法精度和重建效果,本文对平板进行了重建,重建结果如图 12 所示,分别为本文算法、多频外差法、格雷码加相移法 3 种重建方法。相比于另外两种方法,本文方法在精度上有所欠缺,这是由包裹相位中离群点导致,但是本文算法所需要投射的数量却大大减少,从 12 张、10 张图片降低到 4 张图片,这极大地提升了重建效率,如表 1 所示。

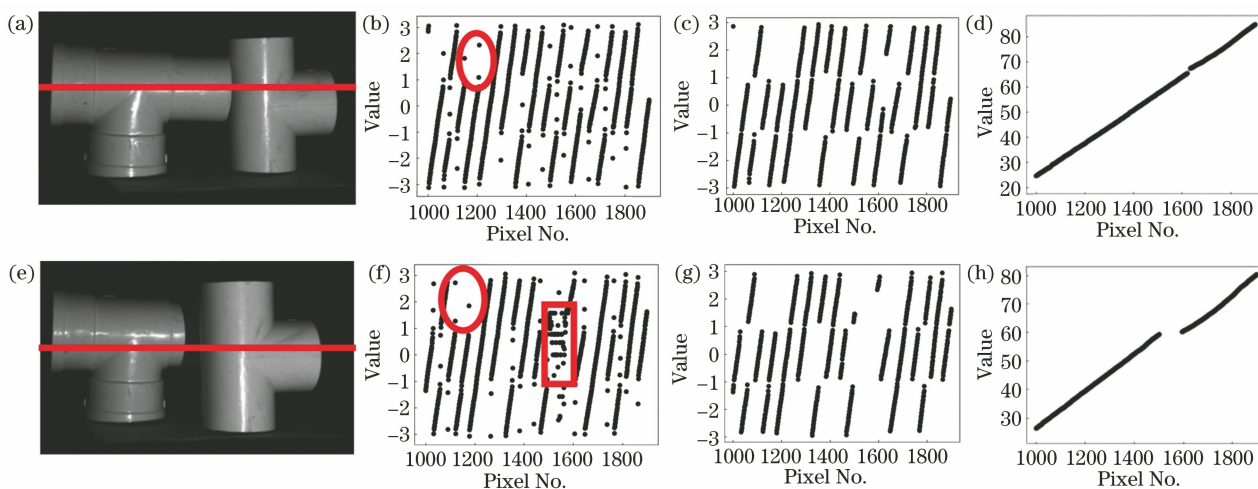


图 10 工件遮挡分析。(a)(e)两个摆放位置的工件;(b)(f)包裹相位图;(c)(g)去除相位离群点之后的包裹相位图;(d)(h)解包裹相位图

Fig. 10 Analysis of workpiece occlusion. (a)(e) Workpieces placed in two positions; (b)(f) wrapped phase; (c)(g) wrapped phase after removing phase outliers; (d)(h) unwrapping phase

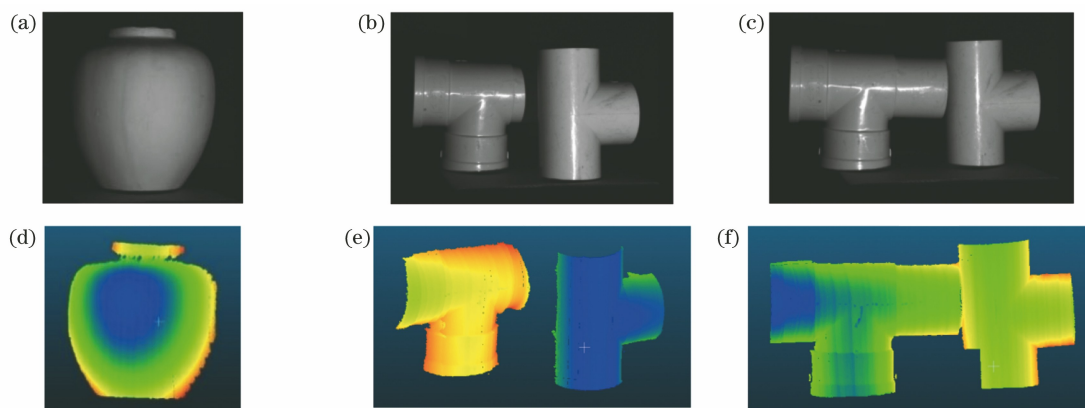


图 11 3D 物体重建实验。(a)~(c)待重建物体,分为陶罐以及两种不同摆放方式的工件;(d)~(f)重建结果

Fig. 11 Experiment of 3D object reconstruction. (a)–(c) Objects to be reconstructed, which can be divided into ceramic pot and workpieces placed in two different ways; (d)–(f) reconstruction results

表 1 3 种重建方法的对比结果

Table 1 Comparison of results of three reconstruction methods

Method	Proposed method	Multi-frequency heterodyne method	Gray-code plus phase-shifting method
Root-mean-square /mm	0.4637	0.2526	0.2473
Number of images	4	12	10

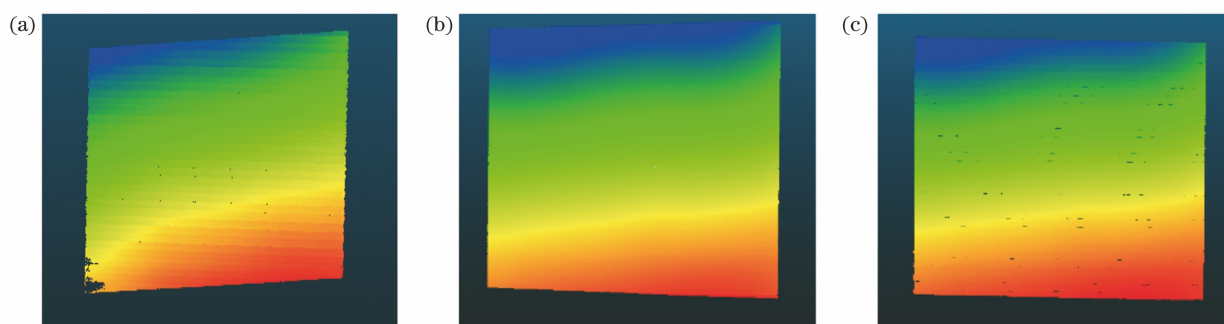


图 12 用 3 种方法重建的 3D 平板结果。(a)本文提出的算法;(b)多频外差方法;(c)格雷码加相移法

Fig. 12 Results of 3D plate reconstructed by three methods. (a) Proposed method; (b) multi-frequency heterodyne method; (c) gray-code plus phase-shifting method

5 结 论

提出了一种新的结构光系统编解码方法,通过对四步相移之后的相对相位进行编码,使其同时具有相位信息和周期信息,借此还原绝对相位。相比于传统的时间相位解包裹的方法,本文算法不需要额外投影大量的信息来进行相位解包裹,所需要的图片仅仅是四步相移图片。由于本文算法不需要额外投影编码信息,其投影效率大大提升。实验表明,在相同的实验条件之下,本文算法与如今最常用的两种方法即格雷码加相移法和多频外差方法具有近似的精度,但是所需投影图片从 12 张缩减到了 4 张。

参 考 文 献

- [1] Ford K R, Myer G D, Hewett T E. Reliability of landing 3D motion analysis: implications for longitudinal analyses [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2007, 39(11): 2021-2028.
- [2] Malamas E N, Petrakis E G M, Zervakis M, et al. A survey on industrial vision systems, applications and tools [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(2): 171-188.
- [3] 卢荣胜, 史艳琼, 胡海兵. 机器人视觉三维成像技术综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(4): 040001.
Lu R S, Shi Y Q, Hu H B. Review of three-dimensional imaging techniques for robotic vision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(4): 040001.
- [4] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- [5] Zhang H H, Zhang Q C, Li Y, et al. High speed 3D shape measurement with temporal Fourier transform profilometry [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(19): 4123.
- [6] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(1): 156-160.
- [7] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0800001.
Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0800001.
- [8] 浦婷婷, 吴周杰, 张启灿. 基于格雷码和相移算法的动态三维测量技术 [J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0512001.
Pu T T, Wu Z J, Zhang Q C. Dynamic three-dimensional measurement technology based on gray code and phase-shifting algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0512001.
- [9] Liu K, Hua W Q, Wei J H, et al. Divide and conquer: high-accuracy and real-time 3D reconstruction of static objects using multiple-phase-shifted structured light illumination [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6995-7007.
- [10] Reich C, Ritter R, Thesing J. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 224-231.
- [11] Sansoni G, Carocci M, Rodella R. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(31): 6565-6573.
- [12] Li Y, Jin H Z, Wang H. Three-dimensional shape measurement using binary Spatio-Temporal encoded illumination [J]. *Journal of Optics A: Pure and*

- Applied Optics, 2009, 11(7): 075502.
- [13] Zhang Q C, Su X Y, Xiang L Q, et al. 3-D shape measurement based on complementary Gray-code light[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(4): 574-579.
- [14] Wu Z J, Zuo C, Guo W B, et al. High-speed three-dimensional shape measurement based on cyclic complementary Gray-code light[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1283-1297.
- [15] Wu Z J, Guo W B, Zhang Q C. High-speed three-dimensional shape measurement based on shifting Gray-code light[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 22631-22644.
- [16] Wu Z J, Guo W B, Li Y Y, et al. High-speed and high-efficiency three-dimensional shape measurement based on Gray-coded light[J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 819-829.
- [17] Pages J, Salvi J, Forest J. A new optimised De Bruijn coding strategy for structured light patterns [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004, August 26, 2004, Cambridge, UK. New York: IEEE Press, 2004: 284-287.
- [18] Zhang L, Curless B, Seitz S M. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming [C]//Proceedings of First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, June 19-21, 2002, Padova, Italy. New York: IEEE Press, 2002: 24-36.
- [19] Boyer K L, Kak A C. Color-encoded structured light for rapid active ranging [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, PAMI-9(1): 14-28.