

光学学报

基于邻接跳变德布鲁因序列的结构光编解码算法

梁正林^{1,2}, 陈彬^{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 德布鲁因序列常被用于结构光条纹的编码,但是序列中相邻的相同码元会导致在相同颜色区域内难以确定码元个数以及每个码元的确切编码范围。为了解决这一问题,提出一种邻接跳变德布鲁因序列,该序列在保留子序列唯一性的基础上保证了相邻码元的相异性。首先,证明了所提出序列的存在性,并给出了其生成方式。然后,将该序列用于相位周期级次编码,结合正弦相移条纹设计了一种彩色条纹编码方法。在解码阶段,按颜色通道分别提取、计算得到包裹相位和相位周期级次,最终获得展开相位。实验结果表明,所提方法与传统相移法有相似的测量精度,且仅需要4幅投影图像即可完成三维测量,显著提高了测量效率。

关键词 测量; 德布鲁因序列; 结构光; 相移测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231652

1 引言

随着现代信息技术的高速发展,三维形貌测量技术^[1]日渐成熟。如今,该技术已经被广泛应用,包括但不限于目标识别、制造检测、生物医学、文物保护和人机交互等领域^[2-4]。结构光视觉测量是一种基于主动视觉的三维测量技术,具有非接触、精度高和速度快等优点,是应用广泛且最为可靠的三维测量技术之一^[5]。

德布鲁因序列^[6]是由一指定码元集合中的码元构成的一种特殊序列,其中任意一个固定长度的子序列在整个序列中仅出现一次,这被称为德布鲁因序列的子序列唯一性。德布鲁因序列的这一特性使得它的匹配过程较为简单且效率很高,因此在结构光离散条纹编码领域得到了广泛应用^[7]。然而,离散型编码方法获得的点云密度与条纹宽度有关,为了获得与相机分辨率相当的精细点云密度,多采用连续型结构光编码方法,其中,相移轮廓测量法是应用最为广泛的连续型编码方法之一。为了有效解决相移测量法中相位展开多义性这一难题,众多学者尝试利用离散型编码^[8-11]或多频外差^[12]等方法实现对相位周期级次进行直接或间接编码,以提高相位展开的准确性。这些相位展开方法往往需要在投影相移图像之外投影若干额外的编码图像,用于相位周期级次编码,因此增加了投影图像的数量,降低了测量效率。考虑到德布鲁因序列的特点,仅投影一幅图像即可实现条纹编码(如采用颜色编码

方式^[7]),结合德布鲁因序列与相移测量法的结构光编码方法得到研究与发展^[8-9]。

在实际应用中,德布鲁因序列中存在相邻的相同码元(相同颜色),这会导致基于德布鲁因序列的结构光编码方法在解码过程中无法正确地分割这些相同的邻接码元。一种简单的解决方案是通过在相邻条纹之间插入黑色狭缝来区分相邻条纹^[13],然而,该方法在测量光路出现遮挡的情况下鲁棒性较差,且因条纹间存在间隙而不适用于对相位周期级次进行编码。Zhang等^[14]针对原始德布鲁因序列的码元,使用递归二进制异或运算生成一个邻接跳变的序列,解决了相邻码元的分割问题。然而,经过异或运算生成的新序列丧失了子序列的唯一性,不再是德布鲁因序列,最终只能采用动态规划算法进行序列匹配,导致匹配效率降低。李杰等^[8]在原始德布鲁因序列的基础上引入一种特殊码元,即破坏码元,用于替换相同的邻接码元,进而在保持子序列唯一性的基础上实现了邻接码元不同,但是这种引入特殊码元的方法增加了编码码元的数量,在实际应用中受到诸多限制。

针对以上问题,本文首先结合德布鲁因序列基本原理与图论相关理论,提出一种邻接跳变德布鲁因序列及其构造方法。该序列在不增加编码码元数量的前提下,确保了编码序列相邻码元的相异性,同时保留了原始德布鲁因序列的子序列唯一性,为后续正确解码和高效率匹配提供了保障。然后,利用该邻接跳变德布鲁因序列对周期级次进行编码,并将正弦相移条纹

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2024-01-18; 录用日期: 2024-01-22; 网络首发日期: 2024-02-20

通信作者: *chenbin@wust.edu.cn

和周期级次信息融合为彩色条纹编码图像。最后,针对以上的编码方法,设计了一套完整的结构光解码流程。实验结果表明,所提出的结构光编解码方法在获得与传统相移测量法相当的测量精度的同时,其相位展开更为简单、便捷,鲁棒性更高。此外,相较于传统的时间相位展开方法,所提方法不需要投影额外的相位编码图像,具有更高的测量效率。

2 本文算法

2.1 邻接跳变德布鲁因序列

德布鲁因序列 $B(m, n)$ 是一个由 m 种码元 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 构成的长度为 m^n 的循环序列,其中,任意长度为 n 的子序列在 $B(m, n)$ 中仅出现一次。基于这一特点,在对投影序列和解码序列进行匹配时,一些高效的匹配算法实现了 $O(1)$ 的算法复杂度^[15-16]。通过 Hierholzer 算法^[17] 遍历一个 m 元 n 阶德布鲁因图上的欧拉回路可生成德布鲁因序列 $B(m, n)$,即每一条欧拉回路对应一个德布鲁因序列^[18]。

本文根据 m 元 n 阶德布鲁因图的特点,构建了一种特殊的有向图 $\mathbf{G}_{mn} = (V, \mathbf{E})$,其中 $m \geq 2, n \geq 2, V$ 表示所有节点的集合, \mathbf{E} 表示所有边的集合。并且,有向图 \mathbf{G}_{mn} 满足:

1) $V = \{v_1 v_2 \dots v_p \dots v_{n-1} | \forall p \in [1, n-1], (v_p \neq v_{p+1} \wedge v_p \in S)\}$;

2) $\mathbf{E} = \{(u, v) | u, v \in V\}$,其中 (u, v) 表示从节点 $u = \{u_1 u_2 \dots u_{n-1}\}$ 指向节点 $v = \{v_1 v_2 \dots v_{n-1}\}$ 的一条有向边,可记为 e 。此外,当 $2 \leq q \leq n-1$ 时,满足 $u_q = v_{q-1}$ 。

由以上定义可知,有向图 \mathbf{G}_{mn} 中任意节点的相邻码元都不同,且从节点 u 到节点 v 存在一条有向边的充分必要条件是节点 u 的 $n-2$ 个后缀码元与节点 v 的 $n-2$ 个前缀码元一一对应。若有向图 \mathbf{G}_{mn} 上存在欧拉回路,则根据德布鲁因序列构建方法,可以利用该欧拉回路生成一个序列,该序列满足子序列唯一特性且相邻码元是不相同的,本文称之为邻接跳变德布鲁因序列,记为 $H(m, n)$ 。图 1 为由码元集 $S = \{0, 1, 2\}$ 构成的有向图 \mathbf{G}_{33} ,其中的红色有向虚线代表一条欧拉回路。通过遍历此欧拉回路,可以生成邻接跳变德布鲁因序列 $H(3, 3) = \{021202012101\}$,该序列中所有长度为 3 的子序列仅出现一次,且所有相邻的码元都不相同。

根据有向图 \mathbf{G}_{mn} 的定义,对于任意节点 v ,它的入度和出度都等于 $m-1$ (m 为码元的个数),即有向图 \mathbf{G}_{mn} 是平衡的。此外,对于 V 中任意两个节点 $u = \{u_1 u_2 \dots u_{n-1}\}$ 和 $v = \{v_1 v_2 \dots v_{n-1}\}$ 是否连通,可分以下两种情况加以讨论:

1) 当 $u_{n-1} = v_1 = w$, 即 $u = \{u_1 u_2 \dots w\}, u = \{w u_2 \dots$

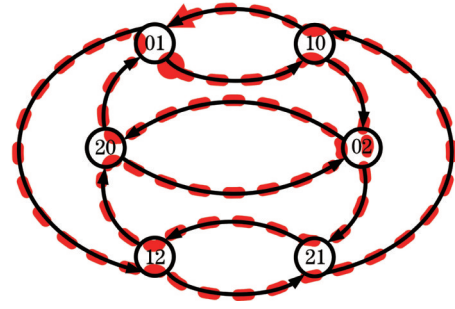


图 1 由码元集 $S = \{0, 1, 2\}$ 构成的有向图 \mathbf{G}_{33} ,红色有向虚线为一条欧拉回路

Fig. 1 Directed graph \mathbf{G}_{33} on $S = \{0, 1, 2\}$, the path demonstrated by a red directed dotted line is an Eulerian tour

$u_{n-1}\}$ 时,从 u 到 v 一定存在长度为 $n-2$ 的路径:

$$\{u_1 u_2 \dots w\} \xrightarrow{e_1} \{u_2 \dots w v_2\} \xrightarrow{e_2} \{u_3 \dots w v_2 v_3\} \longrightarrow \dots \longrightarrow \{u_{n-2} w v_2 \dots v_{n-2}\} \xrightarrow{e_{n-2}} \{w v_2 \dots v_{n-1}\};$$

2) 当 $u_{n-1} \neq v_1$ 时,从 u 到 v 一定存在长度为 $n-1$ 的路径:

$$\{u_1 u_2 \dots u_{n-1}\} \xrightarrow{e_1} \{u_2 \dots u_{n-1} v_1\} \xrightarrow{e_2} \{u_3 \dots u_{n-1} v_1 v_2\} \longrightarrow \dots \longrightarrow \{u_{n-1} v_1 \dots v_{n-2}\} \xrightarrow{e_{n-1}} \{v_1 v_2 \dots v_{n-1}\}.$$

综合上述两种情况可知,从节点 u 出发,总存在一条长度为 $n-2$ 或 $n-1$ 的路径到达节点 v ,即有向图 \mathbf{G}_{mn} 是一个连通图。由于有向图 \mathbf{G}_{mn} 是一个平衡且连通的有向图,故 \mathbf{G}_{mn} 上一定存在欧拉回路,即邻接跳变德布鲁因序列 $H(m, n)$ 是存在的。

对于给定的 m 和 n ($m \geq 2, n \geq 2$),可计算得出有向图 \mathbf{G}_{mn} 的节点集合 V 中共有 $m(m-1)^{n-2}$ 个节点,又因为每一个节点的出度为 $m-1$,则边集 \mathbf{E} 中共有 $m(m-1)^{n-1}$ 条边,即有向图 \mathbf{G}_{mn} 中欧拉回路的长度为 $m(m-1)^{n-1}$ 。因此,生成的邻接跳变德布鲁因序列 $H(m, n)$ 的长度为 $m(m-1)^{n-1}$ 。在实际应用中,可根据待编码序列的长度合理选择 m, n 值,或从一个较长的邻接跳变德布鲁因序列中截取相应长度的子串作为编码序列。

2.2 彩色条纹编码

仅使用邻接跳变德布鲁因序列对条纹进行编码,本质上还是属于离散编码的范畴,只能获取到稀疏的点云。为获得更为稠密的点云,本文选择将邻接跳变德布鲁因序列与相移法相结合,提出一种彩色条纹编码方案,即将相移条纹嵌入到编码图像的 R 通道,邻接跳变德布鲁因序列用于标记相位周期级次,并被嵌入编码图像的 G、B 通道。在实际测量过程中通常会引入相位跳变误差,即包裹相位的周期与编码条纹周期之间产生错位,对测量精度有较大影响。本文采用邻接跳变德布鲁因序列与相移条纹不等周期移位组合的方式来消除相位跳变误差。

以四步相移为例, R 通道中的第 i 步相移投影图像的归一化亮度 $L_i^R(x, y)$ 可表示为

$$L_i^R(x, y) = \alpha + \beta \cos \left[\phi(x, y) + \frac{2\pi i}{4} \right], \quad i = 0, 1, 2, 3, \quad (1)$$

式中: (x, y) 为像素坐标; α 和 β 分别表示调制均值和调制度, 且满足 $0 < \beta < \alpha < \alpha + \beta < 1$ 。

本文共使用 50 个相位周期, 设置正弦相移条纹的周期为 T_1 。使用邻接跳变德布鲁因序列对周期进行编码时, 并非直接对相位周期级次 k 进行编码, 而是对序列级次 k' 进行编码, 编码条纹的周期为 $T_2 = T_1/2$, 其相较于相移条纹的左移周期 $T_0 = T_1/4$, 故需要长度为 101 的编码序列。根据 2.1 节关于邻接跳变德布鲁因序列的理论, 取 $m = 4, n = 4$, 且码元集 $S = \{0, 1, 2, 3\}$, 则可构造出一个长度为 108 的邻接跳变德布鲁因序列 $H(4, 4)$: $H(4, 4) = \{010102010301201210123013020203021021202130303101310230231031203131212131320132103202320321231232132303232313\}$ 。

本文截取 $H(4, 4)$ 后 101 位子序列并记为编码序列 C , 用于编码序列级次 k' 。编码序列级次 k' 可按照式(2)转换为相位周期级次 k :

$$k = k' + 1 - \text{floor} \left[\frac{k' + \text{floor}(2\phi/T_1 + 1)}{2} \right], \quad (2)$$

k'	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	...	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101
C	1	0	3	0	1	2	0	1	2	1	...	...	2	3	0	3	2	3	2	3	1	3
G	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	...	...	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
B	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	...	...	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1
color	blue	black	cyan	black	blue	green	black	blue	green	blue	...	...	green	cyan	black	cyan	green	cyan	green	cyan	blue	black

图 3 本文采用的周期级次编码序列

Fig. 3 Encoded period order sequences in this paper

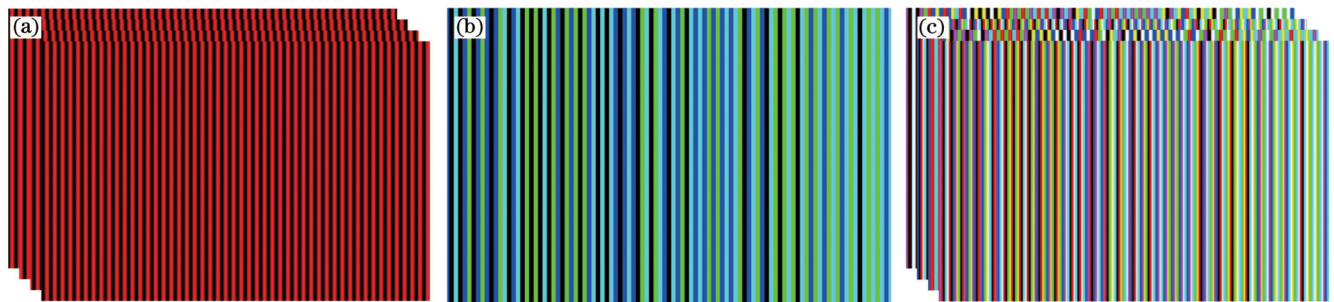


图 4 彩色条纹图像生成。(a) 4 幅相移条纹; (b) 周期级次编码条纹; (c) 4 幅彩色相移编码条纹

Fig. 4 Generation of color fringe patterns. (a) Four phase-shifting patterns; (b) phase order encoded fringes; (c) four color phase-shifting encoded fringes

式中: $\text{floor}(\bullet)$ 表示向下取整。四步相移、编码序列级次 k' 和相位周期级次 k 的相对位置关系如图 2 所示。

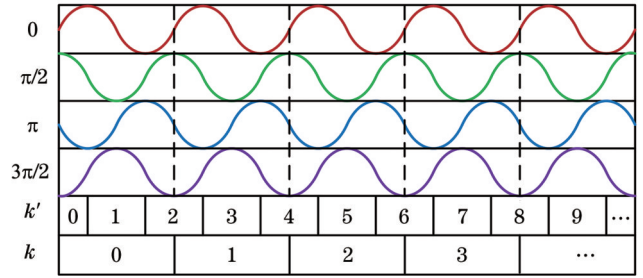


图 2 四步相移的波形、编码序列级次 k' 和相位周期级次 k 的相对位置关系

Fig. 2 Relationship between four-step phase-shifting waveform, encoding sequence orders k' , and phase orders k

在对序列级次 k' 进行编码时, 将 G、B 两个分量的 4 种不同组合 (4 种不同颜色) 表示 4 个不同的码元, 即 (0, 0) 表示 0, (0, 1) 表示 1, (1, 0) 表示 2, (1, 1) 表示 3。对序列 C 进行彩色编码的过程如图 3 所示。最后, 将与序列 C 对应的条纹图像融合到 4 幅编码图像的 G、B 分量, 即 4 幅彩色相移编码图像的 R 分量分别为 4 幅相移条纹 L_i^R , 而 G、B 分量都为相同的周期级次编码条纹 (L^G, L^B)。以上融合了周期级次信息的彩色相移编码图像的编码过程如图 4 所示。

2.3 编码序列的解码

按照上文所述的编码方式,周期级次的解码过程主要分为两步:第一步,利用相机捕获的条纹图像的G通道分量与B通道分量解码得到解码序列 D ;第二步,根据解码序列 D 与编码序列 C 之间的匹配结果确定每个像素对应的 k' 值,进而根据式(2)求解其所在的周期

$$I_i^R(x, y) = r(x, y)L_i^R(x, y) + b(x, y) = [ar(x, y) + b(x, y)] + \beta r(x, y)\cos\left[\phi(x, y) + \frac{2\pi i}{4}\right] = A(x, y) + R(x, y)\cos\left[\phi(x, y) + \frac{2\pi i}{4}\right], \quad (3)$$

式中: $r(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 分别表示相机像素 (x, y) 处的反射系数和背景亮度; $A(x, y) = ar(x, y) + b(x, y)$; $R(x, y) = \beta r(x, y)$ 。包裹相位 $\phi(x, y)$ 可表示为

$$\phi(x, y) = \arctan\left[\frac{I_3^R(x, y) - I_1^R(x, y)}{I_0^R(x, y) - I_2^R(x, y)}\right]. \quad (4)$$

随后,引入符号 \tilde{I}_i 表示第 i 幅图像 I_i 分离R通道后的图像,即 \tilde{I}_i 的R分量 \tilde{I}_i^R 为0,而G与B分量 \tilde{I}_i^G 和 \tilde{I}_i^B 分别为 I_i 的G与B分量(I_i^G 和 I_i^B)。由于4幅彩色相移编码图像的G、B分量相同,原理上利用4幅彩色相移编码图像中的一幅即可完成解码。在实际测量过程中,受噪声、颜色串扰等因素的影响,4幅彩色图像的G通道和B通道会有所变化,本文采用对 \tilde{I}_i 取均值的方式来提高解码的稳定性,即

$$\tilde{I} = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 \tilde{I}_i. \quad (5)$$

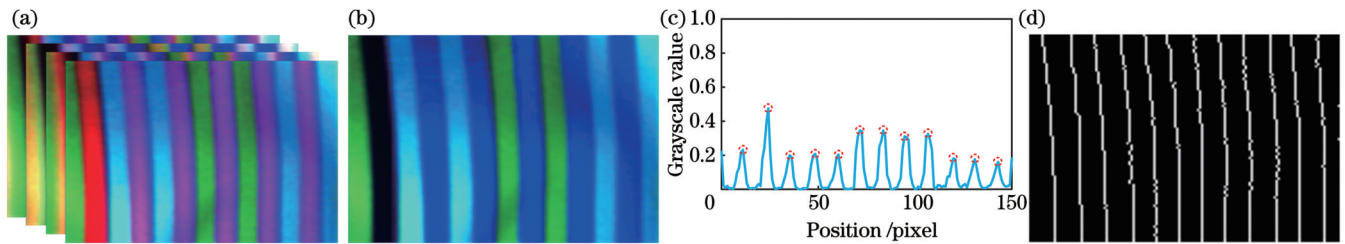


图5 条纹边界提取。(a)捕获的4幅彩色条纹图;(b)平均灰度图 \tilde{I} ;(c) \tilde{I} 中某一行的组合梯度曲线;(d)条纹边界

Fig. 5 Fringe borders extraction. (a) Four captured color images; (b) average grayscale image \tilde{I} ; (c) combined gradient curve of a specific scanline in \tilde{I} ; (d) fringe borders

确定 \tilde{I} 中每个条纹的颜色,即确定图像 \tilde{I} 的G通道(\tilde{I}^G)与B通道(\tilde{I}^B)的值等于0或1。以G通道为例, \tilde{I}^G 的亮度可用类似于式(3)的形式加以表示:

$$\tilde{I}^G(x, y) = \begin{cases} r(x, y) + b(x, y), & L^G(x, y) = 1 \\ b(x, y), & L^G(x, y) = 0 \end{cases}. \quad (7)$$

若式(3)中的变量 $A(x, y)$ 与 $R(x, y)$ 已知,则不难求得:

级次 k 。

设相机拍摄到的彩色条纹图像为 $I_i(i=0, 1, 2, 3)$,其中,4幅捕获图像的R分量 I_i^R 被用于包裹相位计算。经物体表面反射的正弦条纹被相机捕获后,R通道亮度 $I_i^R(x, y)$ 表示为

图5(a)所示为相机捕获的彩色条纹图像块,图5(b)所示为4幅分离了R通道的均值 \tilde{I} 。

为了从图像 \tilde{I} 中还原出解码序列 D ,有两个问题需要解决:其一,确定 \tilde{I} 中条纹的准确边界;其二,确定 \tilde{I} 中每个条纹的颜色(即确定条纹对应的码元)。为了准确地定位周期级次编码条纹的边界,本文定义了一种组合梯度函数 ∇ :

$$\nabla(x, y) = \left| \tilde{I}^G(x+1, y) - \tilde{I}^G(x, y) \right| + \left| \tilde{I}^B(x+1, y) - \tilde{I}^B(x, y) \right|. \quad (6)$$

该函数综合了图像 \tilde{I} 的G和B通道(\tilde{I}^G 和 \tilde{I}^B)的灰度变化情况,通过逐行计算该组合梯度函数,并取其局部极大值作为条纹边界,即可得到唯一的条纹边界。图5(c)展示了图5(b)所示的 \tilde{I} 中某一行的组合梯度函数曲线,图5(d)则展示了根据上述方法提取到的彩色条纹的边界。

$$\tilde{L}^G(x, y) = \frac{\tilde{I}^G(x, y) - A(x, y)}{R(x, y)} = \begin{cases} \frac{1-\alpha}{\beta}, & L^G(x, y) = 1 \\ -\frac{\alpha}{\beta}, & L^G(x, y) = 0 \end{cases}. \quad (8)$$

因此,在得到 $\tilde{L}^G(x, y)$ 后,可以计算出二值化的最佳判决门限 τ :

$$\tau = \frac{\left[(1-\alpha)/\beta + (-\alpha/\beta) \right]}{2} = \frac{1-2\alpha}{2\beta}, \quad (9)$$

式中: α 和 β 为已知的预设参数。例如: 当 α 和 β 同时取 0.5 时, 最佳判决门限 $\tau = 0$ 。与此同时, 将 I_i^R 代入式(3), 则 $A(x, y)$ 与 $R(x, y)$ 可分别表示为

$$A(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 I_i^R(x, y), \quad (10)$$

$$R(x, y) =$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{\left[I_0^R(x, y) - I_2^R(x, y) \right]^2 + \left[I_1^R(x, y) - I_3^R(x, y) \right]^2}. \quad (11)$$

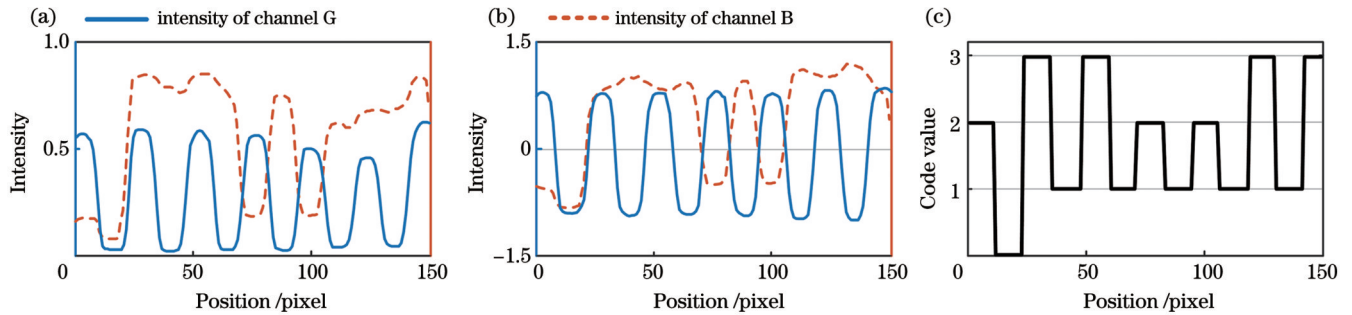


图 6 解码过程。(a) \bar{I}^G 和 \bar{I}^B 中某一行的灰度分布; (b) 图 6(a) 中曲线经式(8)计算得到的灰度曲线; (c) 解码结果

Fig. 6 Decoding process. (a) Grayscale distribution in a specific scanline of \bar{I}^G and \bar{I}^B ; (b) grayscale curves calculated by Eq. (8) from the curve in Fig. 6(a); (c) decoded results

2.4 序列匹配

通过逐行扫描捕获图像并解码获得对应的解码序列 D 后, 将解码序列 D 与编码序列 C 进行匹配, 即可获得匹配结果 k' , 进而结合式(2)计算各个像素点的周期级次 k 。动态规划的思想常被用于两个序列之间匹配, 如: Smith 等^[19]提出 Smith-Waterman 算法并用于两个序列之间的匹配; Zhang 等^[14]提出多通道动态规划算法并用于异或后邻接跳变序列的匹配。由于本文构造的编码序列满足德布鲁因序列的子序列唯一性特点, 因此可利用其实现解码序列 D 与编码序列 C 之间的高效匹配。例如, 以邻接跳变序列 $H(4, 4)$ 为编码序列, 可利用一个长度为 4 的滑动窗口, 依次截取解码序列 D 中长度为 4 的子序列, 随后在编码序列 C 中查找该子序列的位置。重复此步骤, 直至滑动窗口移动到解码序列 D 的尾部停止。其中, 在编码序列 C 中查找子序列的操作可使用哈希查找算法^[15], 其查找时间复杂度为 $O(1)$ 。

在实际测量中, 被测物体可能会遮挡相机的光路, 使得相机无法拍摄到投影仪投射出的部分条纹, 即最终解码出的序列 D 中可能出现部分码元缺失的情况。在此情况下, 上述匹配过程可能会造成部分码元的匹配结果有误, 最终导致周期级次计算错误, 直接影响三维测量结果。为此, 将实际匹配过程分为两步: 首先,

根据上述分析, 以同一行中两个相邻的条纹边界 [图 5(d)] 的中心点作为采样点, 对 $\bar{L}^G(x, y)$ 中的同一位置像素点进行采样, 然后根据最佳判决门限 τ 对该采样点进行二值化, 并以该采样点的二值化结果为该条纹所对应的 G 通道的解码结果, 而 B 通道的解码结果可采用类似的方法加以处理。在对整行像素完成上述操作后, 即可确定该行中每个条纹所对应的码元, 即得到解码序列 D 。图 5(b) 中 G 通道 (\bar{I}^G) 与 B 通道 (\bar{I}^B) 在某一行的灰度分布如图 6(a) 所示, 通过式(8)计算得到图 6(b) 所示的灰度分布, 结合条纹边界 [图 5(d)], 并以 $\tau = 0$ 为最佳判决门限, 解得该行对应的解码序列 D [图 6(c)]。

利用德布鲁因序列的子序列唯一性进行粗匹配; 然后, 对错误匹配的码元进行优化, 对其匹配结果进行校正。

对错误匹配码元的优化可参考李杰等^[8]的方法: 若解码序列 D 中第 e 到第 $g = e + f - 1$ 共 f 个码元发生了误匹配, 设 D_{e-1} 和 D_{g+1} 分别为前一个已匹配的码元和后一个已匹配的码元, 且二者的匹配结果分别为 k'_{e-1} 和 k'_{g+1} ; 若将解码序列 D 中第 e 到第 g 个码元中的每个码元与编码序列 C 中第 k'_{e-1} 与第 k'_{g+1} 之间的码元依次对比匹配, 可能会得出多种匹配结果 $k'_{e,g}$ 。当实际匹配结果满足递增原则, 即 $e \leq i < j \leq g$ 时, 匹配结果满足 $k'_{e-1} < k'_i < k'_j < k'_{g+1}$, 因此可定义一个表示相邻码元匹配值之间的代价函数:

$$\text{dist}(k'_{i-1}, k'_i) = \begin{cases} 0, & k'_i - k'_{i-1} = 1 \\ k'_i - k'_{i-1}, & k'_i > k'_{i-1} + 1. \\ \infty, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

最后, 根据动态规划算法优化式(13), 即可获得最终的匹配结果, 并可根式(2)求解出正确的周期级次 k :

$$k'_{e,g} = \arg \min_{k'_{e,g}} \sum_{i=e}^{g+1} \text{dist}(k'_{i-1}, k'_i). \quad (13)$$

3 实 验

使用一套由一台 CCD 相机 (型号: Manta G-125, 分辨率: 1292 pixel × 964 pixel) 和一台 DLP 投影仪 (型

号: Acer K137i, 分辨率: 1280 pixel×800 pixel) 组成的结构光三维测量系统来实现所提出的彩色条纹编码方法。调整待测物体和结构光系统的相对位置、相机与投影仪的相对位置以及各自的参数, 保证相机能够捕获到清晰的彩色条纹图像。在确定好系统后, 先使用张正友标定法^[20]来标定结构光系统的内外部参数, 再由投影仪将彩色条纹编码图像投影至被测物体表面, 同时由相机捕获经被测物体表面调制的条纹图像, 完成周期级次解码以及相位解包裹的流程, 最后结合标定参数完成展开相位到高度的映射。

3.1 颜色串扰补偿

根据所提出的编解码策略, 要解开包裹的相位, 需要独立分析每个颜色通道。为了保证三维测量结果的准确性, 在对捕获的彩色条纹图像进行上述处理前, 需要补偿颜色串扰现象。实验首先对结构光测量系统的

光学器件进行颜色标定, 得到光学系统的颜色耦合矩阵 M_A :

$$M_A = \begin{bmatrix} 0.638789 & 0.046276 & 0.025157 \\ 0.112725 & 0.416436 & 0.188296 \\ 0.037344 & 0.077019 & 0.750966 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

然后, 根据 Caspi 模型^[21]对拍摄的图像进行颜色串扰补偿。图 7(a)、(b) 所示分别为颜色串扰补偿前后的图像, 通过直观的对比如可以发现, 彩色条纹之间的区分度得到提升。图 7(c)~(e) 中的红色虚线和绿色实线分别表示在颜色串扰补偿前后 R、G 和 B 通道中某一行的灰度分布。在补偿前, R 通道中的正弦条纹的灰度值受到干扰, 且 G 通道和 B 通道中的相位周期编码条纹在不同周期中的灰度值更加接近, 这将更容易导致解码误差。在补偿后, 三通道的灰度分布更接近于投影图像的三通道灰度分布, 三通道间的颜色串扰现象得到改善。

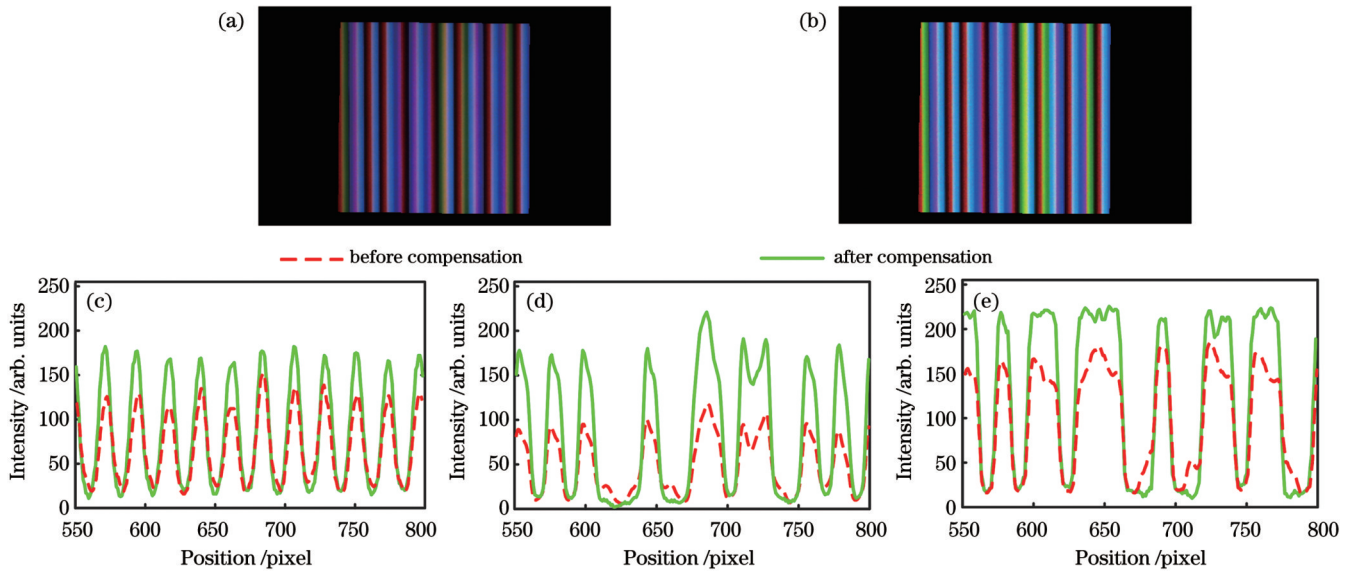


图 7 颜色串扰补偿结果。(a) 串扰补偿前图像; (b) 串扰补偿后图像; (c) R 通道、(d) G 通道、(e) B 通道某一扫描线补偿前后的灰度值
Fig. 7 Results of color crosstalk compensation. (a) Image before compensation; (b) image after compensation; grayscale values of (c) R channel, (d) G channel, and (e) B channel before and after compensation in a specific scanline

3.2 三维测量

对比所提出的邻接跳变德布鲁因序列编码方法与其他 3 种基于原始德布鲁因序列编码方法在条纹编码时的性能。其中, 两种德布鲁因序列均采用 4 元 4 阶序列, 即 $H(4, 4)$ 与 $B(4, 4)$ 。邻接跳变德布鲁因序列 $H(4, 4)$ 利用 $(0, 0, 0)$ 、 $(0, 0, 1)$ 、 $(0, 1, 0)$ 、 $(0, 1, 1)$ 4 种颜色分别表示码元 0、1、2、3 [图 8(a)], 原始德布鲁因序列 $B(4, 4)$ 则利用 $(1, 0, 0)$ 、 $(0, 1, 0)$ 、 $(0, 0, 1)$ 、 $(0, 1, 1)$ 分别表示上述 4 种码元 [图 8(b)]。图 8(c)、(d) 所示分别为在图 8(b) 表示的 $B(4, 4)$ 编码条纹之间插入黑色狭缝^[13]和对 $B(4, 4)$ 进行递归二进制异或运算生成的编码条纹 (Zhang 的方法^[14])。将上述 4 幅编码图像分别投影到平板上, 由相机拍摄得到的图像如

图 8(e)~(h) 所示。由于原始德布鲁因序列中存在邻接码元相同的情况, 因此解码阶段不能确定相同码元的个数以及每个码元的起始位置 [图 8(j) 椭圆所示]。相应地, 得益于所提方法能确保不会出现相邻码元相同的情况, 因此解码时能准确地分割每个码元 [图 8(i)]。插入黑色狭缝 [图 8(k)] 的确有助于确定、分割每个码元, 但是码元之间存在的间隙致使其不易与相移法相结合, 用于周期级次编码。图 8(l) 所示为使用递归二进制异或运算生成的条纹解码结果, 该方法也能确保邻接码元的不同。然而, 对 $B(4, 4)$ 进行递归二进制异或运算后的序列不再是德布鲁因序列, 失去了子序列的唯一性, 故匹配效率较低。若采用文献 [13] 的动态规划匹配算法, 图 8(h) 所示图像的解码过程耗时约为 931 ms, 而采用本文方法对图 8(e) 所示

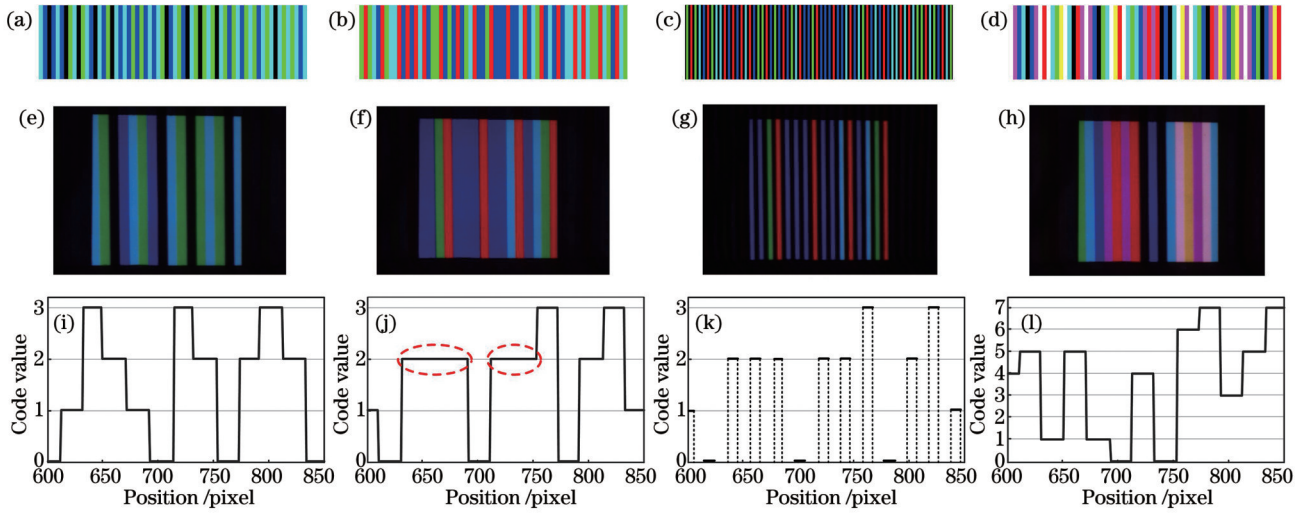


图 8 4 种编码方法的解码结果。(a)邻接跳变德布鲁因序列编码图像;(b)德布鲁因序列编码图像;(c)带黑色狭缝的德布鲁因序列编码图像;(d)Zhang 的方法^[14]的编码图像;(e)~(h)4 幅由相机捕获的图像及(i)~(l)相应图像的某一行的解码结果
Fig. 8 Decoded results of four methods. (a) Adjacency-hopping de Bruijn sequence encoded pattern; (b) de Bruijn sequence encoded pattern; (c) de Bruijn sequence encoded pattern with black slits; (d) encoded pattern of Zhang's method^[14]; (e)~(h) images captured by camera and (i)~(l) decoded results of a scanline

的图像进行解码,仅需 27 ms。实验结果表明,所提出的邻接跳变德布鲁因序列在保留德布鲁因序列高匹配效率的同时,确保了解码阶段能准确分割每个码元,既能应用于离散条纹编码,又能与相移法相结合,对周期级次进行编码。

接下来,设置了一组工件相互遮挡的实验,用于说明光路遮挡对仅利用子序列唯一性进行匹配的影响,进而阐明采用粗匹配与优化的两步匹配法的必要性和有效性。工件如图 9(a)所示摆放,其中,实线矩形区域表示投影仪光路被遮挡,虚线矩形区域表示相

机光路被遮挡,前者可在匹配前被检出并剔除,后者则不能被稳定地检出,从而影响编码序列和解码序列之间的匹配。采用本文方法,利用邻接跳变德布鲁因序列 $H(4, 4)$ 对相移周期级次进行编码,若仅使用哈希匹配(粗匹配)解码得到的周期级次信息,在相机光路被遮挡的情况下将会出现错误[图 9(b)],该错误可通过匹配结果单调递增这一原则检出。结合李杰等^[8]提出的动态规划算法进行优化后,可得到正确的匹配结果,从而计算出正确的相移周期级次[图 9(c)]。

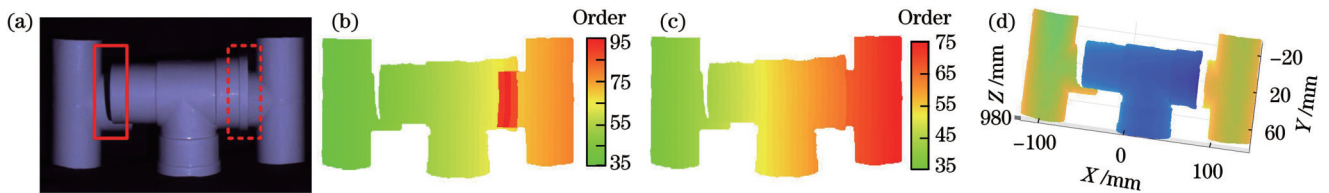


图 9 阻挡工件测量实验。(a)相互遮挡的工件;(b)粗匹配结果;(c)优化的匹配结果;(d)三维测量结果
Fig. 9 Measurement of occluded workpieces. (a) Occluded workpiece; (b) rough matching result; (c) corrected result; (d) 3D measurement result

为了初步验证本文方法的实际测量效果以及关键步骤的处理流程,对表面平滑的狐狸面具进行了测量。首先,将 4 幅彩色条纹编码图像依次投影至被测物体表面并由相机捕获到 4 幅彩色图像[图 10(a)]。按颜色通道分离彩色图像,分别解出包裹相位 ϕ 如图 10(b)所示,以及编码序列级次 k' ,并将 k' 按照式(2)转换为图 10(c)所示的周期级次 k 。图 10(d)所示的图像某一行的包裹相位 ϕ 和周期级次 k 的分布情况表明,所提出的编码方法消除了相位跳变误差,获得了图 10(e)所示的平滑展开相位 Φ 。结合系统标定参数获得

图 10(f)所示的狐狸面具三维点云。
然后,对图 11(a)所示的表面结构更为复杂的石膏像进行测量,其展开相位 Φ 和三维测量结果分别如图 11(b)、(c)所示。实验结果表明,对于表面结构较为复杂的待测目标,所提出的编解码方法依旧具有较好的稳定性,有效地完成三维测量。

最后,使用本文方法、经典的互补格雷码方法以及多频外差方法对一块平板进行测量并进行平面拟合,从而得到三维测量误差。本文方法需要 4 幅投影图像,平面拟合均方根误差为 0.15 mm;互补格雷码方法

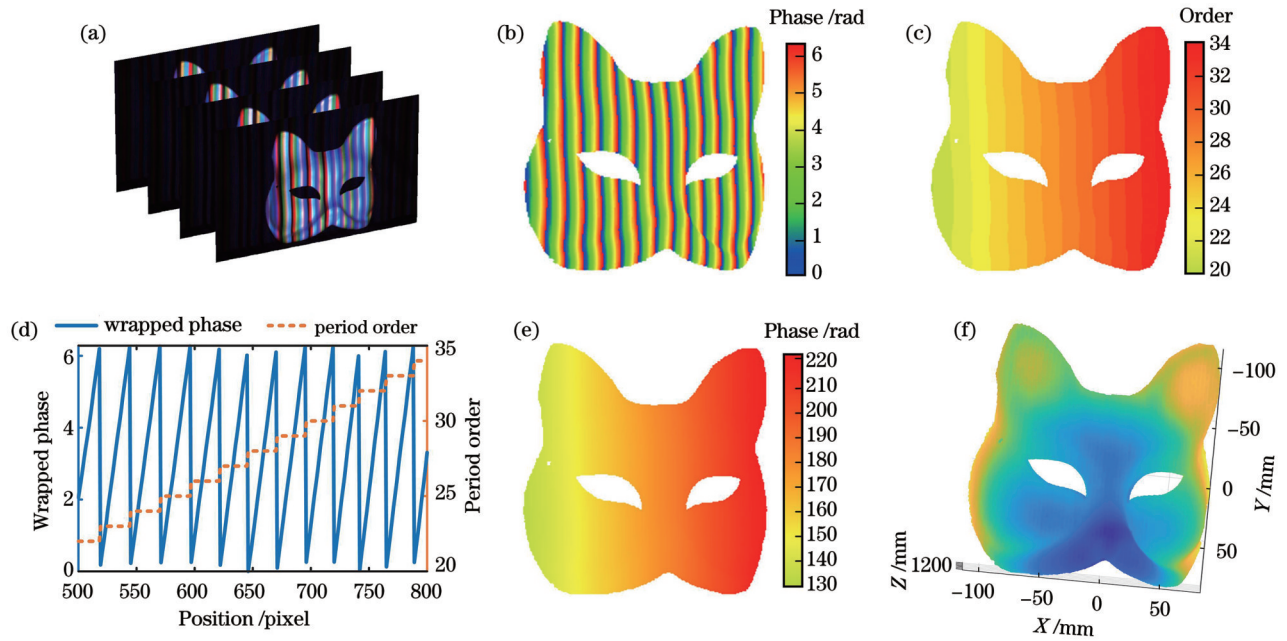


图 10 狐狸面具的三维测量结果。(a)相机捕获的彩色条纹图像;(b)包裹相位 ϕ ;(c)周期级次 k ;(d)图像中心行的包裹相位 ϕ 和周期级次 k ;(e)展开相位 Φ ;(f)狐狸面具的三维测量结果

Fig. 10 Measurement results of a fox mask. (a) Color fringe images captured by camera; (b) wrapped phase ϕ ; (c) period orders k ; (d) wrapped phase ϕ and period orders k in a specific scanline; (e) unwrapped phase Φ ; (f) 3D measurement result

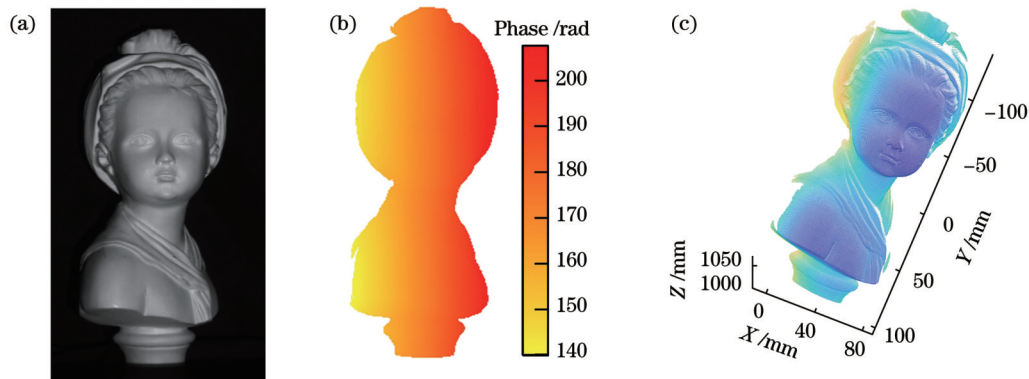


图 11 石膏像测量实验结果。(a)待测石膏像;(b)展开相位图 Φ ;(c)石膏像三维测量结果

Fig. 11 Measurement results of a plaster model. (a) Plaster model to be measured; (b) unwrapped phase Φ ; (c) 3D measurement result

和多频外差方法所需的投影图像分别为 11 幅和 12 幅,平面拟合均方根误差分别为 0.13 mm 和 0.14 mm。实验结果表明,本文方法与经典的互补格雷码方法以及多频外差方法具有相近的测量精度,但本文方法大幅减少了所需的投影图像数量,从而提升了三维测量的效率。

4 结 论

提出一种邻接跳变德布鲁因序列,并给出其存在性证明和生成方式。该序列保留了原始德布鲁因序列的子序列唯一性,同时保证了相邻码元的相异性。在此基础上,将提出的序列用于相位级次的编码,并与正弦相移条纹一同嵌入到彩色图像中,提出一种彩色条

纹编码方法。在投影端,减少了投影图像的数量,提高了投影效率;在解码端,既解决了原始德布鲁因序列相邻的相同码元难以分割的问题,又保留了高效率匹配的优势。实验结果表明,本文方法的测量精度与经典的互补格雷码加相移法和多频外差方法相近,但所需投影的图像数量从 12 幅缩减到 4 幅。

参 考 文 献

- [1] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are?[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 133-140.
- [2] Salvi J, Fernandez S, Pribanic T, et al. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(8): 2666-2680.
- [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] 任婧荣, 傅相达, 王孟瑞, 等. 快速宽场三维显微技术研究进展[J]. *中国激光*, 2023, 50(3): 0307104.
- Ren J R, Fu X D, Wang M R, et al. Advances in rapid three-dimensional wide field microscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(3): 0307104.
- [5] Weinmann M, Schwartz C, Ruiters R, et al. A multi-camera, multi-projector super-resolution framework for structured light [C]//2011 International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission, May 16–19, 2011, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2011: 397-404.
- [6] de Bruijn N G. A combinatorial problem[J]. *Proceedings of the Section of Sciences of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen te Amsterdam*, 1946, 49(7): 758-764.
- [7] Pagès J, Salvi J, Collewet C, et al. Optimised de Bruijn patterns for one-shot shape acquisition[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(8): 707-720.
- [8] 李杰, 陈彬, 曾欣怡, 等. 基于条纹级次编码与调制的结构光相位展开算法[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0912005.
- Li J, Chen B, Zeng X Y, et al. Phase unwrapping algorithm for structured light based on fringe-order encoding and modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0912005.
- [9] 曾欣怡, 伍世虔, 陈彬. 基于混合编码结构光的相移轮廓测量法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 1312002.
- Zeng X Y, Wu S Q, Chen B. Hybrid-coded phase-shifting profilometry for structured light measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(13): 1312002.
- [10] 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.
- [11] 汪俊霖, 张启灿, 吴周杰. 基于分段阶梯相位编码的三维形貌测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(14): 1415012.
- Wang J L, Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional shape measurement based on piecewise step phase coding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(14): 1415012.
- [12] 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.
- [13] Petkovic T, Pribanic T, Donlic M. Single-shot dense 3D reconstruction using self-equalizing de bruijn sequence[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(11): 5131-5144.
- [14] 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.
- [15] Chikhi R, Rizk G. Space-efficient and exact de Bruijn graph representation based on a Bloom filter[J]. *Algorithms for Molecular Biology*, 2013, 8(1): 22.
- [16] Zhang P D, Oi D K L, Lowndes D, et al. Timing and synchronisation for high-loss free-space quantum communication with Hybrid de Bruijn Codes[J]. *IET Quantum Communication*, 2021, 2(3): 80-89.
- [17] Özcan M, Yaman U. A continuous path planning approach on Voronoi diagrams for robotics and manufacturing applications[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 38: 1-8.
- [18] de Bruijn N G, van Aardenne-Ehrenfest T. Circuits and trees in oriented linear graphs[J]. *Simon Stevin*, 1951, 28: 203-217.
- [19] Smith T F, Waterman M S. Identification of common molecular subsequences[J]. *Journal of Molecular Biology*, 1981, 147(1): 195-197.
- [20] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [21] Caspi D, Kiryati N, Shamir J. Range imaging with adaptive color structured light[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(5): 470-480.

Structured Light Encoding and Decoding Algorithm Based on Adjacency-Hopping de Bruijn Sequences

Liang Zhenglin^{1,2}, Chen Bin^{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

Objective The rapid advancement of modern information technology has led to the increasing maturation of three-dimensional (3D) shape measurement technologies. At present, this technology has been applied to biomedicine, cultural relic protection, man-machine interaction, and so on. Structured light measurement emerges as a prominent 3D measurement technology, distinguished by its non-contact, high precision, and rapid speed. It stands as one of the most extensively utilized and reliable 3D measurement technologies. The de Bruijn sequence, noted for the uniqueness of any fixed length subsequence within the entire sequence, is widely employed in structured light coding. In discrete sequence coding, only one projection pattern coded by a de Bruijn sequence is required to measure the 3D information of an object, ensuring high measurement efficiency. In continuous phase-shifting coding, the de Bruijn sequence is applied to code the

phase order to assist in the phase unwrapping process. However, the presence of identical consecutive codes in a de Bruijn sequence makes it challenging to precisely determine fringe numbers and positions within uniform color areas in captured images. In this paper, to solve this problem, a new type of de Bruijn sequence named adjacency-hopping de Bruijn sequence is proposed. Such sequences guarantee that all neighboring codes are different while holding the uniqueness of the subsequences. These two properties lay the foundation for accurate decoding and efficient matching. Meanwhile, an efficient and complete structured light coding and decoding process is devised by combining the adjacency-hopping de Bruijn sequence with the phase-shifting method to complete the 3D measurement task.

Methods According to graph theory, generating a de Bruijn sequence can be accomplished by systematically traversing an Eulerian tour on a de Bruijn graph. In this paper, we redefine the vertex and edge sets of the de Bruijn graph to construct a specialized oriented graph. This oriented graph ensures that adjacent codes of each vertex are different. As a result, a unique type of de Bruijn sequence called an adjacency-hopping sequence, where all neighboring codes are guaranteed to be different, can be generated by traversing an Eulerian tour on the oriented graph. This specialized sequence is then employed to encode phase orders of the phase-shifting fringes. Specifically, the phase-shifting images are embedded into the red channel, while the phase order-encoded images via the proposed adjacency-hopping sequence are embedded into the green and blue channels. In the decoding process, color images captured by the camera are separated to calculate the wrapping phase and decode the phase order respectively. Subsequently, the Hash lookup algorithm is utilized for sequence matching, facilitating the determination of the phase order. Ultimately, 3D information is achieved.

Results and Discussions Initially, a comparative experiment is devised to compare classic de Bruijn sequence-based coding approaches (*e.g.* the original de Bruijn sequence, the multi-slit de Bruijn sequence, and the recursive binary XOR sequence) with the proposed adjacency-hopping de Bruijn sequence coding method, showcasing the advantages of the proposed sequence in discrete coding. The experimental results illustrate that similar to the improved de Bruijn sequence-based approaches (*i.e.*, the multi-slit de Bruijn sequence and the recursive binary XOR sequence), the proposed method effectively addresses the fringe separation problem encountered in the original de Bruijn sequence. Furthermore, compared with the aforementioned improved methods, the proposed adjacency-hopping de Bruijn sequence coding method demonstrates higher matching efficiency and is more suitable for integration with phase-shifting measurements. Subsequently, a series of practical measurement experiments are designed to further illustrate the processing flow of the proposed method and evaluate its performances, such as stability, measurement efficiency, and accuracy. The experimental results demonstrate that the coding and decoding method presented in this paper exhibits good robustness in scenarios involving optical path occlusions. Hence, it can be applied to measure objects with complex surface structures. Moreover, the proposed coding and decoding method achieves measurement accuracy comparable to the selected comparative phase-shifting approaches while significantly reducing the number of projected patterns, resulting in improved measurement efficiency.

Conclusions We introduce a special de Bruijn sequence named the adjacency-hopping de Bruijn sequence. We theoretically prove the existence of such sequences and elucidate their generation method. The proposed sequence guarantees that all neighboring codes are different while preserving the uniqueness of subsequences. Then, the proposed sequence is employed to encode phase orders, and a novel phase-shifting-based coding method is finally introduced. On the projection side, the proposed method leads to a significant reduction in the number of projected patterns, thereby improving the projection efficiency. On the decoding side, each phase order-coded fringe can be separated accurately while guaranteeing efficient matching. The experimental results demonstrate that compared with the classical complementary Gray-code plus phase-shifting method and the multi-frequency heterodyne method, the proposed method achieves comparable measurement accuracy while reducing the number of projection patterns from 11 or 12 to 4.

Key words measurements; de Bruijn sequences; structured light; phase-shifting measurement