文章编号 1004-924X(2021)06-1420-10

结构光编码测量技术在火星高分相机中的应用

曹智睿*,董吉洪

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间三部,吉林长春130000)

摘要:为了提高测量精度和测量效率,在火星高分相机部分工件三维形貌的测量过程中采用了结构光编码测量技术。传统的结构光编码测量技术采用正弦相移对称结合格雷码的方法,极易产生周期错位误差,严重影响测量精度。为了从原理上消除周期错位误差,提出了非对称结构光编码测量技术。首先,提出对四步正弦相移进行区域编码的概念和方法; 然后,将正弦相移与格雷码进行非对称组合,通过格雷码和区域码的双重约束,将周期错位误差由一个格雷码周期的减 小至一个像元。3ds Max 仿真测试结果和实物测试结果表明:与传统测量技术相比较,非对称结构光编码测量技术的最 大测量误差相对减小了一个数量级,均方测量误差相对减小了70%。非对称式结构光编码测量技术有效消除了周期错 位误差,大幅提高了三维测量精度。

关键 词:三维测量;结构光编码;非对称组合;周期错位误差
中图分类号:O436 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20212906.1420

Application of structured light coding measurement technology in Mars high-resolution camera

CAO Zhi-rui*, DONG Ji-hong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China) * Corresponding author, E-mail: caozhirui_0503@163. com

Abstract: Structured light coding measurement technology is typically adopted in the measurement of the three-dimensional topographies of components of the Mars high-resolution camera. Conventional structured light coding measurement technology employs the method of sine phase shift symmetry in combination with the Gray code, which easily produces periodic dislocation errors, significantly affecting the measurement accuracy. To eliminate the periodic dislocation error in principle, in this study, we propose an asymmetric structured light coding measurement technology. First, the concept of region encoding for four-step sinusoidal phase-shifting is proposed. Then, the sinusoidal phase-shifting is combined with cyclic code asymmetrically. Given that the cyclic code and region code vary with time, the cyclic dislocation error is reduced from one cycle to one pixel owing to the dual constraint of the cyclic code and region code. The simulation measurement results of the 3ds Max and the physical measurement results indicate that in comparison with the conventional measurement technology is relatively reduced by an order of magnitude, and

收稿日期:2020-09-18;修订日期:2020-11-16.

基金项目: 吉林省自然科学基金(No. 20200201008JC)

the mean square measurement error is relatively reduced by 70%. The asymmetric structured light coding measurement technology effectively eliminates periodic misalignment errors and substantially improves the three-dimensional measurement accuracy.

Key words: 3D measurement; encoding of structured light; asymmetric combination; cycle dislocation errors

1引言

在首次火星探测任务高分辨率相机的研制 过程中,加工了许多具有精密三维形貌要求的结 构件用于高精度的标定、测试和试验等工作。为 了检测这些结构件的加工精度,通常使用三坐标 测量设备,以接触测量的方式获取若干采样点的 空间位置信息,并进一步拟合待测表面的三维形 貌。受待测表面三维形貌特点和测量效率等因 素的制约,通过三坐标测量三维形貌时的采样点 密度难以大幅度提高,从而制约了复杂三维形貌 的测量精度;另外,通过有限采样点拟合得到的 三维形貌无法有效反应待测表面局部位置的凸 点、凹点等加工误差,而这些加工误差将严重影 响火星高分辨率相机的标定、测试和试验精度, 甚至破坏相机精密的光机结构位置关系。结构 光编码测量技术具有非接触、高密度和高效率等 优点,被广泛应用在工业测量、模具制造、医学影 像、文物重建等领域[14],可有效解决三坐标测量 设备存在的上述技术问题。

结构光的编码方法是结构光编码测量技术 的重要基础,随着 DLP 数字投影技术的发展,结 构光编码的灵活性和多样性大大增加,现有的结 构光编码方法主要包括格雷码^[5-6]、正弦相移^[7-9]、 梯形相移^[10-12]、三角相移^[13-14]以及格雷码与相移 结合^[15-18]等。其中,格雷码与正弦相移结合的编 码方法因其高采样密度和易于相位展开等优点 应用最为广泛。传统的格雷码与正弦相移的结 合方式为对称式结合,该编码方法要求正弦相移 周期与格雷码最小编码周期相等,且边界对齐。 在实际应用过程中,受被测物体形状、表面材质、 测试环境照明和格雷码二值化阈值等因素的影 响,格雷码和正弦相移周期边界产生周期错位, 从而导致周期边界位置的绝对相位解算误差。 为了解决这个问题,研究人员提出了多种不同的

方法。第一类方法的核心思想是通过优化滤波 算法、自动阈值设置方法、亚像素边界定位算法 和非线性误差校正算法等方法提高格雷码和正 弦相移周期边界的定位精度[19-23],从而一定程度 地减小了周期错位误差产生的范围和概率,但是 此类方法并不能彻底消除周期错位误差。第二 类方法的核心思想是通过相邻像素的比较来识 别格雷码或正弦相移绝对相位的变异点,然后根 据具体情况确定周期错位误差的校正方案[24],此 类方法复杂且具有一定的局限性。例如,当周期 错位误差的范围超过一个像素时,某些位置的解 码错误无法得到纠正;当被测物体表面形貌变化 剧烈时,一些正常的相位突变可能被误判为周期 错位误差,从而导致错误的校正。第三类方法的 核心思想是通过改进编码方法从原理上消除周 期错位误差。例如,FuX和YuX等人提出的梯 形相移非对称结合格雷码的方法[25],通过格雷码 与梯形相移区域码的双重约束减小周期错位误 差,但是梯形相移在采样密度和测量精度上的固 有缺陷使其无法取代格雷码结合正弦相移的重 要地位;ZhangQ提出了一种格雷码与正弦相移 的互补编码方法[26],通过投射额外的格雷码图像 (正弦周期与附加格雷码周期相同,但边界对应关 系发生偏置),获取两个互补的绝对相位值来消除 周期错位误差,但是投影额外的格雷码会在一定 程度上降低测量效率,难以适用于高精度动态三 维测量等应用场景。

本文提出对四步正弦相移进行区域编码的 概念和方法,并将具有区域编码的正弦相移与格 雷码进行非对称结合,通过格雷码和区域码的双 重约束,从原理上消除了格雷码结合正弦相移的 周期错位现象。本文提出的方法与梯形相移非 对称结合格雷码的方法相比较,具有更好的采样 密度;与Zhang Q提出的互补编码方法相比较, 不需要增加额外的格雷码投影数量,有利于提高 投影测量效率。

2 基本原理

2.1 正弦相移区域编码与相对相位编码

在以往的应用中,正弦相移只存在相位编码,不存在区域编码。本文提出了正弦相移区域 编码的概念和四步正弦相移区域编码的方法,目 的是将具有区域编码的正弦相移与格雷码进行 非对称结合,通过格雷码码值和正弦区域码的双 重约束最大限度地减小周期边界处的解码误差。

四步正弦相移的间隔为1/4正弦周期,每个 正弦相移周期均可划分为四个区域,区域编码N 分别取值0,1,2,3,如图1所示。



Fig. 1 Block diagram of image measuring system

四步正弦相移区域编码的规则如表1所示, 表中*I*₁~*I*₄分别代表第1幅至第4幅正弦编码图案 中特定像元位置的灰度值。

四步正弦相移相对相位 φ 的解码方法如公式(1)所示,式中 fix 表示向下取整运算,例如:

$$fix\left(\frac{1}{2}\right) = 0, fix\left(\frac{3}{2}\right) = 1_{\circ}$$

表1 四步正弦相移区域码编码规则

Tab. 1 Region encoding rules of the four step sinusoidal phase-shifting

| 区域码 | 规则 |
|-----|-----------------------------------|
| N=0 | $I_4 - I_2 \ge 0, I_1 - I_3 > 0$ |
| N=1 | $I_4 - I_2 > 0, I_1 - I_3 \leq 0$ |
| N=2 | $I_4 - I_2 \leq 0, I_1 - I_3 < 0$ |
| N=3 | $L - I_2 < 0, I_1 - I_2 \ge 0$ |

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) + fix\left(\frac{N+1}{2}\right) \times \pi\\ \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{0}\right) = -\frac{\pi}{2} \end{cases}$$
(1)

2.2 格雷码非对称结合正弦相移

格雷码非对称结合正弦相移编码方法改变 了格雷码最小编码周期与正弦相移周期之间的 周期对应关系和位置对应关系。在新的编码方 法中,正弦相移周期大于格雷码最小编码周期, 且格雷码最小编码周期边界分别位于正弦相移 两个区域的中间位置。该方法的核心思想是避 免格雷码码值*k*与正弦相移区域码码值*N*同时变 化,即使一个编码的判读产生了误差,仍可通过 另一个不变的编码抑制周期错位误差的产生。

格雷码与四步正弦相移非对称结合的具体 方法如下:首先,设置正弦相移周期占据4m像元 位置(数字4代表四步正弦相移所划分的4个区 域),格雷码最小编码周期占据4n像元位置;为了 保证格雷码最小编码周期边界分别位于正弦相 移两个区域的中间位置,则m和n应满足公式(2) 所示的数学关系。

$$4m - 4n = \frac{m}{2} \times 2. \tag{2}$$

为了便于下文的讨论,在满足公式(2)的条件下对m和n进行任意赋值,本文取m=8,n=6,即格雷码图像的最小编码周期占24个像元,而正弦相移周期占32个像元,此时,格雷码与正弦相移的非对称结合关系如图2所示。图中,所有格雷码周期边界与正弦相移区域边界之间存在±4个像元的周期错位容错范围,用于避免格雷码码值与正弦相移区域码码值同时变化。需要指出的是,由于正弦相移和格雷码的非对称结合关系,k=0的格雷码周期边界并未与Pixel0对齐,

而是对应于N=0的正弦区域中间位置。

图 2 展示了 *k*=0~3的格雷码周期与正弦相移的非对称结合关系。*k*≥4时,格雷码周期与正

弦相移的非对称结合关系依此循环。格雷码周 期边界与正弦相移区域码的对应关系如表 2 所示。





图 2 格雷码与正弦相移的非对称结合关系 Fig. 2 Asymmetric combination of Gray code and sinusoidal phase-shift

表2 格雷码周期边界与正弦相移区域码的对应关系

Tab. 2 Correspondence between the cyclic code boundaries and the region codes

| k | Cyclic-code boundary | N |
|---|----------------------|---|
| 0 | Left boundary | 0 |
| | Right boundary | 3 |
| 1 | Left boundary | 3 |
| | Right boundary | 2 |
| 2 | Left boundary | 2 |
| | Right boundary | 1 |
| 3 | Left boundary | 1 |
| | Right boundary | 0 |
| 4 | | |

格雷码非对称结合四步正弦相移绝对相位 Φ的解码需要考虑两者之间的非对称关系,解码 方法如公式(3)所示,式中,k为格雷码码值,k= 0,1,2···..31,N为正弦相移区域码,N=0,1,2, 3,fix表示向下取整运算。

$$\Phi = 2\pi \times \left[k - fix\left(\frac{k+N+0.5}{4}\right) \right] + \varphi. \quad (3)$$

3 误差分析

3.1 ΔN 和 $\Delta \varphi$ 的关系

本文提出了正弦相移区域编码的概念和方 法,并给出了与区域码N相关的相对相位的计算 公式,我们将以图2(a)所示的编码为例,定量分 析区域码误差 ΔN 与相对相位误差 $\Delta \varphi$ 的关系,可 能出现的误差情况如表3所示。对于经过辐射校 正的测量系统,通过表1所示的编码规则判别正 弦相移的区域边界时,判别误差通常可控制在一 个像元,即正弦相移的区域码解码误差仅发生在 区域边界的相邻像元之间。表3中,N代表区域 码真值,N'代表带有误差的区域码测量值,N=0 $\rightarrow N'=1$ 代表区域码真值为0的边界像元被误判 为区域码为1, φ 代表相对相位的真值, φ' 代表带 有误差的相对相位测量值, $\Delta \varphi$ 代表相对相位的 测量误差。

由以上分析可知,正弦相移的区域码产生一 个码值的误差仅导致相对相位π/16的误差,对应 编码图像中一个像元位置。

3.2 Δk 、 ΔN 和 $\Delta \varphi$ 的关系

由公式(3)可知,在格雷码周期边界附近,格 雷码码值k和正弦相移区域码码值N的判读误差 都将导致绝对相位Φ的展开误差。对于经过辐 射校正的测量系统,正弦区域码边界和格雷码边 界的判别误差通常可控制在一个像元,由于格雷

| $arphi=rctaniggl(rac{I_4-I_2}{I_1-I_3}iggr)+	ext{fix}iggl(rac{N+1}{2}iggr)	imes\pi$, $rctaniggl(rac{I_4-I_2}{0}iggr)=-rac{\pi}{2}$ | | |
|---|-------------------------------------|--|
| 误差位置 | ΔN | $\Delta arphi$ |
| 0-1区域边界 左侧1个像元 | $N=0 \rightarrow N'=1$ | $\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{32} = \frac{7\pi}{16}, \varphi' = -\frac{\pi}{2} + fix\left(\frac{1+1}{2}\right) \times \pi = \frac{\pi}{2}$ |
| | | $\Delta \varphi = \frac{16}{16}$ |
| 0-1区域边界 | $N=1 \rightarrow N'=0$ | $\varphi = \frac{\pi}{2}, \varphi' = \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{32} + fix(\frac{0+1}{2}) \times \pi = \frac{7\pi}{16}$ |
| | | $\Delta \varphi = \frac{\pi}{16}$ |
| 1-2区域边界 | $N=1 \rightarrow N'=2$ | $\varphi = \pi - \frac{2\pi}{32} = \frac{15\pi}{16}, \varphi' = 0 + fix\left(\frac{2+1}{2}\right) \times \pi = \pi$ |
| 左侧1个像元 | | $\Delta \varphi = \frac{-\pi}{16}$ |
| 1-2区域边界 N= | $N=2 \rightarrow N'=1$ | $\varphi = \pi, \varphi' = 0 - \frac{2\pi}{32} + fix \left(\frac{1+1}{2}\right) \times \pi = \frac{15\pi}{16}$ |
| | | $\Delta \varphi = \frac{\pi}{16}$ |
| 2-3区域边界 N 左侧1个像元 N | | $\varphi = \frac{3\pi}{2} - \frac{2\pi}{32} = \frac{23\pi}{16}, \varphi' = -\frac{\pi}{2} + fix\left(\frac{3+1}{2}\right) \times \pi = \frac{3\pi}{2}$ |
| | $N \equiv 2 \rightarrow N \equiv 3$ | $\Delta \varphi = \frac{-\pi}{16}$ |
| 2-3区域边界 | $N = 2 \times N' = 2$ | $\varphi = \frac{3\pi}{2}, \varphi' = \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{32} + fix(\frac{2+1}{2}) \times \pi = \frac{23\pi}{16}$ |
| | $N=3 \rightarrow N=2$ | $\Delta \varphi = \frac{\pi}{16}$ |

表3 $\triangle N$ 和 $\triangle \varphi$ 的关系 Tab.3 Relationship between $\land N$ and $\land \varphi$

码周期边界与正弦相移区域边界之间预留了±4 个像元的容差范围,因此可认为格雷码码值与正 弦相移的区域码码值不会同时出现判读误差。 此时,可能存在的误差情况如表4所示,表中,k, N和Φ分别代表格雷码、区域码和绝对相位的真 值,k',N'和Φ'分别代表带有误差的格雷码值、区 域码值和绝对相位值。

在各种可能的误差情况下,绝对相位的解算 误差均等于相对相位的解算误差,由此可见,正 弦相移非对称结合格雷码的编解码方法从原理 上完全消除了周期错位误差的产生。

4 仿真验证

为了排除随机误差因素的干扰,在相同实验 条件下准确地比较不同编码方法在周期错位误 差抑制方面的性能差异,本文选择了仿真实验进 行验证,仿真实验平台为3ds Max和MATLAB。 仿真测量系统由摄像机、投影仪和被测物体组 成。仿真摄像机模拟 Nikon D850 相机与 105 mm 焦距微距镜头的组合,其中相机CMOS传感器有 效感光尺寸设置为35.9 mm×23.9 mm,传感器 有效分辨率设置为8256×5504,105mm 焦距微 距镜头的视场角度设置为23°20′;仿真投影 仪模拟 BenQ W7000 DLP 投影仪,分辨率设 置为1920×1080,投影区域设置为100mm× 56.25mm,投影编码分别为传统格雷码结合正弦 相移和格雷码非对称结合正弦相移,其中传统编 码的最小周期占24像元,非对称结合编码的格雷 码最小周期占24像元,正弦相移周期占32像元; 摄影物镜和投影物镜位于被测表面同一侧,投影 物镜光轴沿坐标系 Y轴,投影中心距离坐标系原 点O的距离为450mm;摄影物镜光轴平行X-Y 平面,与投影物镜光轴相交于坐标系原点O,呈

1425

| Tab. 4 Relationship between $	riangle k$, $	riangle N$ and $	riangle \Phi$ | | |
|---|---|---|
| 误差位置 | riangle k and $	riangle N$ | $	riangle \Phi$ |
| 格雷码左边界 | $k=0 \rightarrow k'=1$ $N=3 \rightarrow N'=3$ | $\Phi = 2\pi \times \left[0 - fix\left(\frac{0+3+0.5}{4}\right) \right] + \varphi, \Phi' = 2\pi \times \left[1 - fix\left(\frac{1+3+0.5}{4}\right) \right] + \varphi'$ $ \Delta \Phi = \Delta \varphi $ |
| | $k=0 \rightarrow k'=0$ $N=3 \rightarrow N'=2$ | $\Phi = 2\pi \times \left[0 - fix\left(\frac{0+3+0.5}{4}\right) \right] + \varphi, \Phi' = 2\pi \times \left[0 - fix\left(\frac{0+2+0.5}{4}\right) \right] + \varphi'$ $ \Delta \Phi = \Delta \varphi $ |
| 故雪码左边界 | $k=1 \rightarrow k'=2$ $N=2 \rightarrow N'=2$ | $\Phi = 2\pi \times \left[1 - fix\left(\frac{1+2+0.5}{4}\right)\right] + \varphi, \Phi' = 2\pi \times \left[2 - fix\left(\frac{2+2+0.5}{4}\right)\right] + \varphi'$ $ \Delta \Phi = \Delta \varphi $ |
| 格宙屿右辺券 | $k=1 \rightarrow k'=1$ $N=2 \rightarrow N'=1$ | $\Phi = 2\pi \times \left[1 - fix\left(\frac{1+2+0.5}{4}\right)\right] + \varphi, \Phi' = 2\pi \times \left[1 - fix\left(\frac{1+1+0.5}{4}\right)\right] + \varphi'$ $ \Delta \Phi = \Delta \varphi $ |

表4 $\triangle k$ 、 $\triangle N$ 和 $\triangle \Phi$ 的关系

15°夹角。

设置被测物体为一个理想平面,尺寸为 100 mm×50 mm,表面反射特性为漫反射,被测 平面沿X-Z平面放置,表面几何中心与坐标原点 O重合,如图3所示。



理想平面的仿真测试 图 3 Fig. 3 Simulation measurement of ideal plane

分别应用对称结合编码配合周期误差校正 的方法和非对称结合编码方法,对仿真环境下的 理想平面进行测量,得到重构平面及其测量误差 分别如图4和图5所示。

应用上述两种方法得到的平面测量数据如 表5所示。从测量结果可以看出,应用传统对称 结合编码方法配合周期错位误差校正算法的最 大测量误差与均方误差相差巨大,说明部分像元 位置的周期错位误差没有得到校正,或出现了校



- 图4 应用对称结合编码配合周期误差校正方法的测量 结果
- Simulation measurement results of plane with sym-Fig. 4 metrically combined encoding and periodic dislocation error correction





正错误;而应用非对称结合编码方法的最大测量 误差与均方误差极其接近,说明周期错位误差已 从原理上消除。

表5 对理想平面的仿真测量结果

Tab. 5 Simulation measurement results of the ideal plane

| | | (mm) |
|---------|-------|-------|
| 方法 | 最大误差 | 均方误差 |
| 对称组合编码 | 0.305 | 0.056 |
| 非对称组合编码 | 0.034 | 0.015 |

为了进一步验证格雷码非对称结合正弦相 移编解码方法的可行性,本文对曲面进行了方针 测试实验。设置被测物体为一个理想球体,球体 半径为50 mm,表面反射特性为漫反射。球体几 何中心与投影中心、摄影中心同高,且与O点重 合,如图6所示。



图 6 理想球面的仿真测试 Fig. 6 Simulation measurement of ideal sphere

分别应用对称结合编码配合周期误差校正 的方法和非对称结合编码方法,对仿真环境下的 理想球面进行测量,得到重构球面及其测量误差 分别如图7和图8所示。

应用上述两种方法得到的球面测量数据如



图 7 应用对称结合编码配合周期误差校正方法的测量 结果

Fig. 7 Simulation measurement results of sphere with symmetrically combined encoding and periodic dislocation error correction



Fig. 8 Simulation measurement results of sphere with asymmetrically combined encoding

表6所示。从测量结果可以看出,应用传统对称 结合编码方法配合周期错位误差校正算法的测 量结果仍然存在显著的周期错位误差,且最大误 差和较大误差的数量均较平面测量明显增加,这 是因为在球面边缘位置,周期错位校正算法将部 分正确的码值突变当做周期错位进行了错误的 校正,导致了更多更大的解码误差;而应用非对 称结合编码方法的最大测量误差和均方误差较 为接近,说明非对称结合编码方法对周期错位误 差的抑制效果仍然显著有效。

表6 对理想球面的仿真测量结果

Tab. 6 Simulation measurement results of ideal sphere (mm)

| | | (11111) |
|---------|--------|---------|
| 方法 | 最大误差 | 均方误差 |
| 对称组合编码 | 0.649 | 0.102 |
| 非对称组合编码 | 0.0101 | 0.034 |

5 实验验证

为了进一步验证研究内容的正确性,以火星 高分相机研制过程中加工的某精密平板作为测 量对象,开展了实验验证工作。之所以选择最简 单的平面物体作为实验验证对象,是因为相对于 其他复杂表面,平面的精加工难度相对较低, 加工保障的精度最高,便于定量比对和评价新 技术的测量精度。待测平板尺寸为150 mm× 100 mm×10 mm,其中一个150 mm×100 mm的 表面进行了精密研磨,三坐标测量系统和粗糙度 测试仪的测量结果显示:研磨后的表面粗糙度优 于 0.005 mm,平面度优于 0.01 mm。使用 BenQ W7000 DLP 投影仪、Nikon D850 相机与105 mm 焦距微距镜头组建了测试系统,投影仪、相机和 被测铝板之间的相对位置关系大体参照了第4章 仿真实验的布局,但是并没有进行严格的约束, 因此本文所采用的三维解算方法对测试设备的 相对位置关系并没有严格的要求^[27]。

应用本文提出的非对称组合结构光编码技 术进行被测表面的重构,重构表面如图9(a)所 示,将重构表面和拟合标准平面做差,得到测量 误差如图9(b)、9和表7所示。我们可以发现,测 试的最大误差和均方根误差大约为仿真结果的2 倍,需要指出的是该误差既包含了测试系统的测 试误差,也包含了被测表面的加工误差。可以确 定是,测试过程中并没有产生类似图4(b)所示的 周期错位误差,这表明本文提出的非对称组合结 构光编码技术是正确有效的。

6 结 论

本文提出了正弦相移区域编解码的概念和 方法,以及格雷码与正弦相移的非对称组合方 法。3ds Max的仿真实验结果和实测实验结果显 示,格雷码与正弦相移的非对称组合的编码方法

参考文献:

- [1] SONG Z , JIANG H, et al. A high dynamic range structured light means for the 3D measurement of specular surface [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017,95: 8-16.
- [2] SUN C, ZHANG X, et al. Real-time subtractionbased calibration methods for deformation measurement using structured light techniques [J]. Applied Optics, 2019,58(28):7727-7732.
- [3] XU M, LU X, et al. Dual surface structured light vision system based on multidimensional parameter coding [J]. Applied Optics, 2019, 58 (26) : 7212-7221.
- [4] XU M, LU X, et al. Dual surface structured light vision system based on multidimensional parameter coding: publisher's note [J]. Applied Optics, 2020, 59(18):5631-5631.
- [5] ZHENG D, QIAN K, et al. Ternary gray codebased phase unwrapping for 3d measurement using binary patterns with projector defocusing [J]. Applied Optics, 2017, 56(13): 3660-3665.



Fig. 9 Physical measurement results of plane with asymmetrically combined encoding

表7 对平面的测试结果

| Tab. 7 | Measurement res | ults of plane | (mm) |
|--------|-----------------|---------------|------|
|--------|-----------------|---------------|------|

| 方法 | 最大误差 | 均方误差 |
|---------|-------|-------|
| 非对称组合编码 | 0.061 | 0.028 |

有效地消除了周期位错误差,使最大测量误差减 少了一个数量级,平均测量误差减少了70%,该 方法比现有方法具有更高的测量精度、更高的测 量密度和更高的测量效率,特别适用于高精度动 态三维测量的应用场景。

- [6] ZHOU H, GAO J, *et al.* Fast phase-measuring profilometry through composite color-coding method[J]. *Optics Communications*, 2019,440:220-228.
- [7] SILVAADRIANA, FLORESJORGE L., et al. Three-dimensional shape profiling by out-of-focus projection of colored pulse width modulation fringe patterns [J]. Applied Optics, 2017, 56 (18): 5198-5203.
- [8] FENG S, CHEN Q, et al. Motion-oriented high speed 3-D measurements by binocular fringe projection using binary aperiodic patterns [J]. Optics Express, 2017,25(2):540-559.
- [9] CHEN K, XI J, et al. Three-dimensional measurement of object surfaces with complex shape and color distribution based on projection of color fringe patterns [J]. Applied Optics, 2013, 52 (30): 7360-7366.
- [10] KE F, XIE J, et al. A fast and accurate calibration method for the structured light system based on trapezoidal phase-shifting pattern[J]. Optik, 2014, 125(18):5249-5253.

- [11] PÉREZ OSCAR, FLORES JORGE, et al. Gray coded trapezoidal fringes for 3-D surface-shape measurement[J]. SPIE, 2014, 9219:92190M.
- [12] PEISEN S. HUANG, ZHANG S, et al. Trapezoidal phase-shifting method for three-dimensional shape measurement, SPIE, 2005, 44:123601.
- [13] ZHAO H, DIAO X, et al. High-speed triangular pattern phase-shifting 3D measurement based on the motion blur method[J]. Optics Express, 2017, 25(8):9171-9185.
- [14] FLORES JORGE L., TORALES GARCÍA, et al. Binary coded triangular fringes for 3-D surfaceshape measurement [J]. Applied Optics, 2013, 52 (15):3576-3582.
- [15] WU Z, ZUO C, et al. High-speed three-dimensional shape measurement based on cyclic complementary Gray-code light [J]. Optics Express, 2019,27(2):1283-1297.
- [16] WU Z, GUO W, et al. High-speed three-dimensional shape measurement based on shifting Graycode light [J]. Optics Express, 2019, 27 (16), 22631-22644.
- [17] YUE H, YU Y, et al. Accurate three dimensional body scanning system based on structured light[J]. Optics Express, 2018,26(22):28544-28559.
- [18] WANG Y, LIU L, et al. Enhanced phase-coding method for three-dimensional shape measurement with half-period codeword [J]. Applied Optics, 2019,58(27):7359-7366.
- [19] ZHANG D, DA F, et al. Phase-shifting profilometry combined with Gray-code patterns projection: unwrapping error removal by an adaptive median filter[J]. Optics Express ,2017,25(5):4700-4713.
- [20] LUF, WUC, et al. High-speed 3D shape mea-

surement using Fourier transform and stereo vision [J]. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2018, 14(22):1-11.

- [21] SANSONI G, et al. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phaseshift light projection: analysis and compensation of the systematic errors[J]. Applied Optics, 1999, 38 (31): 6565-6573.
- [22] LEI Z, WANG C, et al. Multi-frequency inversephase fringe projection profilometry for nonlinear phase error compensation [J]. OpticsandLasersinEngineering, 2015, 66: 249-257.
- [23] ZHANG C, ZHAO H, et al. Full-field phase error detection and compensation method for digital phase-shifting fringe projection profilometry [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26 (3):035201-035205.
- [24] TSAI MING-IUNE, HUNG CHUAN-CHENG. Development of a high-precision surface metrology system using structured light projection [J]. *Mea-surement Science and Technology*, 2005, 38 (3) : 236-247.
- [25] SHAN L, YU X, et al. Asymmetric Combined Cycle-Encoding Light 3D Measurement Technique
 [J]. Information Technology Journal, 2010, 9: 583-586.
- [26] ZHANG Q, SU X, et al. 3-D shape measurement based on complementary Gray-code light, Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50 (4), 574-579.
- [27] HUANG J, WU Q, et al. A new reconstruction method based on fringe projection of three-dimensional measuring system, Optics and Lasers in Engineering, 2014, 52(1):115-122.



董吉洪(1972-),男,吉林长春人,学 士,研究员,1995年于中国科技大学获 得学士学位,现为中国科学院长春光 机所空间三部主任,主要从事空间光 学遥感器光机设计技术的研究。Email: dongjihong2002@sohu.com

作者简介:



曹智睿(1983-),男,吉林长春人,博 士,副研究员,2007年于吉林大学获得 硕士学位,2018年于长春理工大学获 得博士学位,现在中国科学院长春光 机所空间三部工作,主要从事光学精 密测试技术的研究。E-mail: caozhirui_0503@163.com