

快速离焦投影三维测量技术*

马孟超, 邓华夏, 张进, 钟翔, 于连栋

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)

摘要:随着数字投影技术的发展,基于投影的三维面型测量技术在多种场合得到广泛应用。基于相移的结构光投影测量技术以其算法简便精度较高得到较快发展。但投影仪为非线性仪器,会影响强度变化,进而影响相位测量精度;此外由于投影仪工作原理的投影速度受到限制。离焦投影技术的出现为高速测量和高精度测量提供了新的方法。总结了目前国内外对离焦投影技术的研究现状;从投影工作原理、相移算法、解包裹算法、误差补偿、条纹调制、标定技术及离焦投影技术的相关技术细节进行全面介绍,为数字离焦投影三维测量工作的研究提供参考。

关键词: 投影技术; 三维测量; 离焦投影; 高速测量; 高精度测量

中图分类号: TN206 TP391 TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

High speed 3-D shape measurement using projector defocusing

Ma Mengchao, Deng Huaxia, Zhang Jin, Zhong Xiang, Yu Liandong

(School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: With the rapid growth of DLP projection technology in the late years, DLP projection technology has been gradually applied to numerous disciplines. Phase-shifting method often works with DLP projection technology due to its flexibility and high precision. As a non-linear instrument, the projector could hardly project ideal fringe patterns, and could hardly achieve high projection speed. The binary defocusing provides a new solution for high speed and high precision measurement. This paper analyses the current status and development trend of 3-D shape measurement by using projector defocusing at home and abroad. A survey is presented for the working principle of DMD, phase-shifting algorithms, unwrapping-algorithms, error compensation methods, the modulating methods for fringe pattern, the calibration methods and some of the details about projector defocusing further. This work can provide references for the researchers engaged in 3-D shape measurement by using projector defocusing.

Keywords: projection technology; 3-D shape measurement; projector defocusing; high speed measurement; high precision measurement

0 引言

三维测量在逆向工程^[1],医学成像^[2],质量检测^[3],娱乐应用^[4]等领域具有重要的应用。三维测量技术依据是否直接接触物体可分为接触式测量以及非接触式测量。接触式测量主要代表为三坐标测量机^[5]及关节臂式测量^[6],其测量精度高但速度慢,且可能因为探头的刚性接触破坏物体表面结构。非接触测量分为被动测量及主动测量。

被动测量需要借助外界光照明,依据物体表面纹理信息对物体进行重建,代表方法有 Depth from Defocus^[7]及立

体视觉测量^[8]等。被动测量计算消耗大,在弱纹理条件下无法获取测量结果。立体视觉测量方法中可以通过粘帖标志点^[9-10]或通过数字图像相关(digital image correlation, DIC)增强匹配^[11-12];粘帖标识点能获取稀疏重建信息, DIC能获取精度较高的测量但是计算消耗相对较大。

主动测量法需要向被测物体表面投射光,主要方法有飞行时间法、激光三角法及结构光测量法。飞行时间法^[13]的优点是测量无死角,现已应用于商业用途^[4]。激光三角法^[14]采用点对点的三角关系进行测量,分辨率高但速度受限。随着液晶显示器(liquid crystal display, LCD)、硅基液晶(liquid crystal on silicon, LCoS)、数字

微器件(digital micro-mirror device, DMD)等技术的不断发展,基于数字投影技术的结构光测量因其运算速度快、体积小、结构简单^[15-17]、价格低廉等优点,引起了较为广泛的关注,并逐渐应用于多领域的表面型测量^[18-20]。结构光技术根据重建的疏密程度,可分为稀疏重建与稠密重建。稀疏重建典型方法有基于 De Bruijn 的技术、非正式编码技术^[21]、M-arrays 技术^[22]、二值码技术^[23]及 n-ary 码^[24]技术等^[25];稀疏重建法利用相位的空间或时间性质对物体表面进行编码;稀疏重建的相位面积远大于像素点,分辨率较低。稠密重建的典型方法有相移法及多频^[26-28]方法等;相移算法简便快捷,具备较高的精度与稳定性,近几年常与数字投影技术配合^[29-30]进行测量;基于相移算法的结构光技术也称为条纹投影技术。投影仪是非线性仪器,为产生便于人眼观察的图像;在图像出射之前,投影仪将对图像进行强度域的指数变换,该变换效应称为伽马效应^[31],伽马效应将会影响相移条纹质量。许多文献提出了一系列主动^[32]或者被动^[33]的伽马补偿算法,并取得一定的补偿效果。但因投影仪的投射光强会随着时间发生不断的变化并且不同类型的投影仪的伽马值互不相同^[31];故伽马补偿算法不具备方便性及普遍适用性。苏显渝课题组利用离焦系统的低通滤波性质对 Ronchi 光栅进行离焦^[33]产生类正弦条纹,这种方法能够有效地避免系统的非线性;受到该方法的启发 Lei S 等人^[35]将该思想应用于数字投影技术当中,该技术也称为数字离焦投影技术。

数字离焦投影技术除了可以有效避免系统的非线性^[36];又因高速投影设备^[37]的二值图像投射速度远大于多位图像投射速度^[36],因此只使用二值条纹样式的数字离焦投影技术能够进行数千赫兹的超高速投影测量^[39]。数字离焦投影技术与传统数字条纹投影技术之间存在许多不同,因此存在传统数字条纹投影技术不存在的问题^[36]:1)较大程度离焦使得图像易受外界噪声的干扰;2)较大程度离焦减小了可测量深度范围;3)同离焦度下不同频率的条纹无法同时取得较高的条纹质量;4)二值条纹在不同离焦度下难以保证相位质量的一致稳定;5)离焦投影模型不同于传统投影模型,很难对整个系统进行标定;6)高速投影时将出现邻域耦合。

针对上述这些问题,国外的 Zhang S 课题组、Ayubi 课题组;国内的左超课题组、吴剑峰^[40]、张万祯^[41]、杨允鑫^[42]、高鹏等人^[43]应用多学科领域知识对离焦投影技术进行优化并进行相关多领域的应用,并取得了一定的效果。本文将从投影仪工作原理、系统构建、相关技术实施细节对数字离焦投影技术进行较为全面的介绍;为数字离焦投影三维测量工作的研究提供一定的参考。

1 系统构建及工作流程

数字离焦投影技术的基本构建和条纹投影技术相

同;由投影单元、图像捕捉单元及数据分析处理单元组成。具体的三维测量流程如下:

- 1) 将条纹投影到被测物体表面,依据所投条纹样式对投影单元的镜头进行相应离焦;
- 2) 图像捕捉单元采集经过物体表面形貌调制后的变形条纹图像;
- 3) 对投影单元及图像采集单元进行标定;
- 4) 采集得到的图像送入数据分析处理单元分析,获取三维重建结果。

2 系统构建及工作流程

数字离焦投影技术主要使用数字光处理技术(digital light processing, DLP)的投影仪进行条纹投影;DLP 技术核心部件为 DMD 芯片,DMD 芯片由置于 CMOS 存储单元上的数字微镜阵列组成。

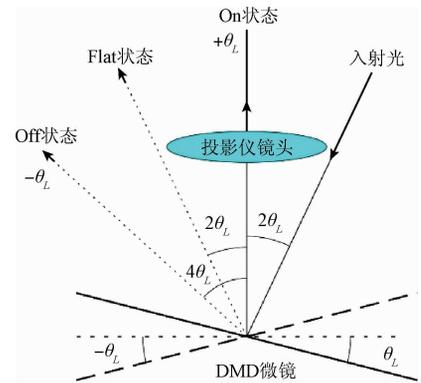


图1 DMD工作原理

Fig. 1 DMD Work principle

相互独立的 CMOS 存储单元通过电信号控制每个数字微镜的旋转角度,进而对反射光进行调制;每个 DMD 微镜的旋转范围为 $\pm 12^\circ$ 。DMD 微镜为双稳态器件,但有 3 个工作状态:开状态、关状态及 Flat 状态^[44]。处于开状态时,微镜通过反射将光线从投影镜头处出射;处于关状态时,反射光线将远离投影镜头的方向。图像的灰度级通过控制 DMD 开关状态的时间占空比进行模拟:整个投影周期内都处于开状态时投影图像灰度值为 255;整个投影周期内都处于关状态时,投影图像灰度值为 0;当投影图像灰度值为 128 时,半个投影周期处于开状态^[45]。二值图像只有开关两个状态,因而在高速投影中,二值图像的投影速度显著高于灰度图像的投影速度。

2.1 伽马效应

为产生适应人眼的图像,图像在出射前,投影仪对图像进行强度域的非线性调制,该调制效应也称伽马效应^[46]。

$$I_o = a(I_i)^\gamma + b \quad (1)$$

2.2 高速投影特性

DMD 微镜为电控机械零件。高速投影时, DMD 微镜没有足够的翻转时间, 因此 DMD 反射产生的图像将不满足实际图像灰度值, 相邻像素将相互混合; 该现象也被称为耦合效应^[47]。可通过改变投影时序进行缓解: 静态测量时, 降低测量速度增加投影周期时间内的照明时间或者减少投影仪照明时间增加投影速度; 对物体进行动态测量可在提高投影仪投影速度的同时减少投影仪周期时间内的照明时间。

3 离焦投影技术

3.1 离焦投影理论

2π 周期标准化方波傅里叶级数展开式为:

$$y(x) = 0.5 + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2}{(2k+1)\pi} [\sin(2k+1)\pi] \quad (2)$$

经过低通滤波, 可转换为正弦信号^[48]。因离焦系统^[49]近似为低通滤波, 故可将离焦技术应用于数字投影测量^[35]。

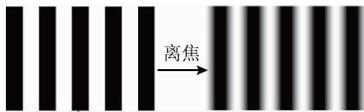


图2 二值方波条纹通过离焦得到正弦条纹
Fig.2 Sine fringe with square fringe defocusing

3.2 离焦投影优缺点

离焦投影技术与传统的条纹投影不同, 具有区别于

传统条纹投影技术的优缺点^[50]。

优点如下:

1) 离焦投影图像为二值图像; 投影仪的非线性效应对条纹样式无影响;

2) 极大提高投影测量速度。使用 TI 公司的 LightCrafter、LightCommander 等投影套件^[45,51]进行二值图像投影速度可达 kHz 至几十 kHz;

缺点如下:

1) 如果直接通过对二值条纹进行离焦产生正弦条纹, 则需进行较大程度的离焦产生; 但过度离焦将使投影图像对比度下降, 易受外界噪声干扰。

2) 仅通过离焦, 很难将宽度较大的二值条纹转化为正弦条纹; 此外若采用多频方法进行测量, 需要对多种频率条纹进行投影和解包, 很难保证在同一个离焦程度下多种频率条纹都能够获得较高质量的正弦条纹。

3) 离焦投影系统不同于在焦投影系统, 传统数字投影标定技术无法对离焦投影仪进行标定。

3.3 相移谐波敏感及谐波分析

对谐波进行分析, 可以了解影响测量的相关因素。可将标准正弦条纹每次与标准正弦条纹与一种谐波成分相合成的合成样式各自获得的相位值进行比对, 由比对结果可知:

1) 仅通过观察正弦波形来判断最终精度存在不合理性^[52]。

2) 不同阶数的谐波具备不同的相移步数敏感性。具体如表 1 所示, 由表 1 得知 N 步相移对 $(n+1)N \pm 1$ 阶谐波敏感^[53]。

表 1 不同相移步数的谐波敏感性

Table 1 Harmonic sensitivity with different phase shifting steps

| 步数 | 谐波阶数 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
| 3 | √ | | √ | √ | | √ | √ | | √ | √ | | √ | √ | | √ | √ | | |
| 4 | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | |
| 5 | | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | |
| 6 | | | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | |
| 7 | | | | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | |
| 8 | | | | | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | |
| 9 | | | | | | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | |

3.4 提升离焦投影成像质量方案

离焦投影技术的成像易受未完全离焦消除的谐波以及因离焦引入的外界噪声干扰。通过分析离焦技术的误差性质或者改变条纹样式可消除谐波影响或者减少形成正弦条纹样式所需的离焦度。

4 相移算法及解包运算

相移条纹具有较强的抗干扰性, 因此常与结构光系统配合测量, 但直接解相只能获得不连续相位; 若采用覆

盖全场的相移条纹,则因相移条纹强度变化缓慢导致相移条纹容易受到噪声影响;因此采用解包避免采用全场单周期相移条纹的使用。

4.1 相移算法

在条纹投影的发展过程中产生了多种步数相移算法:三步相移^[44]、四步相移、多步相移^[54-55]、2+1相移^[56]及相移组合^[57]等。

3步相移法采用3幅图像进行相移^[44],相邻相移间隔为 $\frac{2\pi}{3}$,由式(6)可以解出相对相位值。

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos(\phi(x, y)) \quad (3)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos\left(\phi(x, y) - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos\left(\phi(x, y) + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5)$$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{(2I_2 - I_1 - I_3)} \right] \quad (6)$$

4.2 解包运算

解包运算将 $(0, 2\pi)$ 范围内的相对相位值变换为连续的绝对相位值;离焦投影中的解包运算可划分为空域解包和时域解包。

4.2.1 空域解包

依据包裹相位的梯度生成质量图后,根据多等级阈值^[58]进行相位解包。空域解包总投射条纹数目少,可应用于对表面梯度变化小的物体的高速测量^[37-59]。

4.2.2 时域解包

时域的解包算法采用多组投影条纹,适用于面型梯度变化大的测量。

1) 二进制码解包

控制条纹宽度,使得二进制码中最窄条纹易离焦为正弦曲线,选取最窄条纹为相移条纹^[60]。每个周期的相移条纹对应不同的相位,通过相位组合进行解包。条纹在获取相位之前需要首先进行标准化,降低因离焦产生在相位跳动处的误差。

2) 多波长法

多波长法^[50-54]采用多组相移条纹投射。频率最低的条纹覆盖全场: $\phi^l(x, y) = \phi(x, y)$;高频条纹 $\phi^h(x, y)$ 为低频包裹相位提供参考,组数越多精度越高。假设只有两组条纹:低频条纹 $\phi^l(x, y)$ 和低频条纹 $\phi^h(x, y)$,则:

$$\phi(x, y) = (\lambda_l/\lambda_h)\phi^h(x, y) \quad (7)$$

3) 多频外差

多频外差也称多频相移(multi frequency phase shifting, MFPS)法^[61],绝对相位和深度之间关系为:

$$\phi(x, y) = \left[C \cdot \frac{h(x, y)}{\lambda} \right] \cdot 2\pi \quad (8)$$

相差为:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \left[C \cdot \frac{h(x, y)}{\lambda_{12}^{eq}} \right] \cdot 2\pi \quad (9)$$

若 λ_{12}^{eq} 覆盖全场,则无需进行解包;组数越多,测量越精确;(普遍采用3组9幅)条纹图像对包裹相位值进行解包。

4) 基于数论解包

在两个质数的最小公倍数为两个质数乘积的基础上将整数可分性应用于相位解包:使两组低频条纹的波长的最小公倍数能够覆盖全场;这种方法极大地拓展了测量范围和波长选择自由度。通过建立等式及查找表(look up table, LUT),在2+1算法的帮助下可使用5幅图对全场进行解包^[56]。

$$\frac{p_1\phi_2 - p_2\phi_1}{2\pi} = k_2p_1 - k_1p_2 \quad (10)$$

5 误差消除算法

误差消除算法通过分析误差性质对相位结果进行补偿:1)通过查找表或者拟合多项式补偿;2)结合谐波成分与相移步数的敏感性,对谐波误差进行消除。

5.1 相位误差补偿算法

直接离焦二值方波条纹产生正弦条纹会严重影响测量范围:过于靠近焦平面,出现明显的二值结构,相位误差巨大;远离焦平面时,容易受外界噪声影响。采用对误差进行记录量化并补偿可有效减少相位误差:将参考板置于投影仪前,以微量数值为基本移动单元靠近投影系统;将离焦二值条纹所得相位值与经过伽马校正后的标准正弦条纹所得相位比对并求差,将差值存储于查找表中,依据查找表进行补偿^[62]。

5.2 谐波消除算法

由傅里叶展开式及解相位方程可知3步相移法不存在3倍数次谐波以及偶次谐波;因此,需要消除的谐波次数为5,7,11,13,⋯阶次;又因为离焦可以将高阶谐波成分滤除,故13阶以上谐波可忽略不计。双组相移(dual three-step phase-shifting, DPS)和二次相移(quadratic three-step phase-shifting, QPS)算法采用不同组的组间相移消除谐波^[63]。

5.2.1 DPS

DPS采用2组3步相移条纹。第2组3步相移条纹在第1组3步相移条纹的整体基础上相移 $T/12$ 。两组相移条纹的6X谐波成分相互抵消,因此DPS可有效消除6X阶谐波。

5.2.2 QPS

QPS采用两组DPS;第2组DPS在第1组DPS的基础上相移 $T/24$,12X谐波成分相互抵消。若需消除更高阶数谐波可进行相应迭代。

6 条纹样式调制

对条纹样式进行调制是另一类对离焦投影性能进行增强的方法。该方法可在保证条纹质量的同时,有效减少所需离焦度。根据条纹样式的调制维度,条纹样式调制分为一维条纹调制和二维条纹调制。一维条纹调制在脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)基础上进行一系列变形,因此也可称为 PWM 系列调制。二维条纹调制在两个方向上对条纹进行调制,衍生方式较多;二维条纹调制可进一步分为区域调制及抖动调制。

6.1 一维条纹调制

一维条纹调制有正弦 PWM (sinusoidal PWM, SPWM) 调制,最优 PWM (optimal PWM, OPWM) 调制,基于准则优化的 4 步相移 SPWM 调制和三极型 PWM (tripolar PWM, TPWM) 调制等。

6.1.1 SPWM 调制

采用频率远高于所需正弦波频率的高频三角波 f_c 对所需正弦波 f_0 进行强度调制:若三角波强度低于正弦波强度,SPWM 对应强度值为 1,否则强度值为 0。SPWM 调制可将所需消除的谐波信号转移至高频 f_c 及 $f_c \pm 2f_0$ [64]。

6.1.2 OPWM 调制

方波信号只存在奇次谐波,故方波信号的傅里叶展开只存在 b_k 成分; b_k 具有半周期对称性,可由式(11)表示。OPWM 通过条纹调制将所希望消除的谐波成分预置 0 进行消除:将方波信号每半周期切 n 次;设置 b_1 为所需强度值,其他需消除的谐波强度为 0,将相应 b_k 值带入解超越方程(12),可求得对应角度解及 OPWM 条纹样式 [65]。

$$b_k = \frac{4}{\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} f(\theta) \sin(k\theta) d\theta \quad (11)$$

$$b_k = \frac{4}{\pi} \int_0^{\alpha_1} \sin(k\theta) d\theta - \frac{4}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin(k\theta) d\theta +$$

$$\frac{4}{\pi} \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} \sin(k\theta) d\theta + \dots + \frac{4}{\pi} \int_{\alpha_n}^{\pi/2} \sin(k\theta) d\theta \quad (12)$$

6.2 二维条纹调制

二维条纹调制能够充分利用条纹的几何性质;通过两种方法可以衍生出较为理想的正弦条纹样式:其中一种借鉴于 Xian T 等人 [66] 对物理光栅区域编码将条纹划分为相应小区域进行灰度模拟而衍生出仿三角波调制;另一种借鉴于数字图像处理中印刷领域的抖动技术 [67-71] 对条纹样式进行相关一系列优化。

数字印刷领域采用抖动技术通过调制二值点的分布对连续灰度的图像进行恢复;抖动技术主要分为拜尔抖动技术和误差扩散抖动技术。拜尔抖动技术 [67] 将需调制图像与拜尔核进行比较,并进行二值化,拜尔抖动的主

要原理是将噪声成分转移到高频从而易于消除;误差扩散抖动技术通过 [68-69] 将误差传递到邻域将连续灰度图像复原 [72-75]。

7 离焦投影系统标定方法

标定是三维重建过程中至关重要的一步,但是离焦投影模型 [76] 和传统投影模型 [77-78] 不同,很难采用传统的投影标定技术 [79] 标定。传统的基于相位的条纹投影均投射水平方向或者竖直方向的条纹,但水平和垂直方向条纹的相位变化均可能不是最敏感值;将优化角度与标定结合可提升测量质量 [80]。

离焦投影系统的标定方法有基于参考平面的标定法和与优化条纹角度结合的基于多视几何标定法。

1) 基于参考平面的标定法

该方法分为两个标定过程: z 轴标定和 x 、 y 轴标定。将标定板沿着水平滑台进行移动,使用多项式对移动距离 z 和绝对相位进行多项式拟合;获取 z 方向深度信息后,将 z 带入由相机标定得出的内外参数矩阵即可反求 x 、 y 坐标信息 [81]。

2) 结合优化条纹角度的多视几何标定法

该方法将整个系统等价为一个双目立体视觉 [83] 系统,将投影仪视为反向相机;投影仪投射相互交叉垂直的相移图像于标定板上,通过提取标定板圆心的相位值可以求取投影仪内外参矩阵 [49]。求取条纹优化角后,可令两组条纹的角度分别为 $\alpha_{opt} + \pi/4$ 和 $\alpha_{opt} - \pi/4$ 这种方法能够最大程度地增加相敏感度提升测量质量 [83]。

8 应用

得益于数字投影技术的高速高精度,离焦投影技术可应用于多种场合的测量。如采用 Discovery 开发板对二值方波信号进行离焦,借助三步相移法与空域解包算法可实现 667 Hz 的测量速度,对振动梁进行三维重建 [59]。

使用普通投影仪对单纯二值方波信号离焦,并与傅里叶方法相结合以获取 4 000 Hz 的旋转风扇面型重建测量速度 [38];采用 OPWM 条纹与抖动条纹结合可以对兔子心脏进行测量 [51]。

采用 TPWM 条纹可对旋转风扇叶片 [53] 进行重建等等。

9 结论

基于相移的结构光投影测量技术发展迅速,但目前以下方面存在着困难和挑战:1) 对于反光、透明物体的

三维测量;2)在室外强光下的测量问题;3)提高系统的有效测量距离;4)实时的三维数据获取与处理^[84-85]等。

离焦二值投影技术可以有效地避免传统投影技术所存在的非线性及低速限制问题,具备较高的发展潜力;但是相较于传统投影技术,离焦投影技术标定困难以及条纹质量难以保证;除此之外,高速测量还会受到硬件限制,相邻像素会出现耦合。为进一步提升离焦投影技术的测量精度,相关团队从分析条纹质量及谐波分析入手提出了一系列相关解决方案。PWM调制适用于非太窄及非太宽的条纹;抖动调制适用于较宽范围的条纹;二值条纹及基于灰度区域模拟的条纹样式适用于较窄的条纹。现阶段的调制方法尽管取得了很大成果但仍然受限于调制算法复杂、消耗时间多、不具备不同离焦程度通用性等等问题。离焦投影技术可以从提升条纹质量、离焦度量化、降低图像数量、降低算法复杂度及多领域应用进行进一步的研究。

参考文献

- [1] 金涛,陈建良,童水光. 逆向工程技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2002, 13(16):1430-1436.
JIN T, CHEN J L, TONG SH G. Research progress of reverse engineering technology [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(16):1430-1436.
- [2] 董海霞,程传明,张彩云,等. 上颌埋伏牙的螺旋CT扫描和三维重建[J]. 中国临床医学影像杂志, 2001, 12(3):209-209.
DONG H X, CHENG CH M, ZHANG C Y, et al. Value of CT scan and three-dimension reconstruction in maxillary impacted tooth [J]. Journal of China Clinic Medical Imaging, 2001, 12(3):209-209.
- [3] 鲁光泉,李一兵,黄山. 变形车辆自标定三维重建的建模研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(2):128-131.
LU G Q, LI Y B, HUANG SH. A study on the modeling for three-dimension reconstruction of crushed vehicle with self-calibration technique [J]. Automotive Engineering, 2007, 29(2):128-131.
- [4] KHOSHELHAM K, ELBERINK S O. Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications[J]. Sensors, 2012, 12(2):1437.
- [5] 张国雄. 三坐标测量机的发展趋势[J]. 中国机械工程, 2000, 11(2):222-226.
ZHANG G X. Development trend of three coordinate measuring machine [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(2):222-226.
- [6] 李明富,马建华,张玉彦. 基于机器人的空间坐标测量技术研究现状及发展趋势[J]. 机械科学与技术, 2014,33(12):1818-1825.
LI M F, MA J H, ZHANG YY. The state and development tendency of the space coordinate measuring technology via robots [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(12):1818-1825.
- [7] BEN-ARI R, RAVEH G. Variational depth from defocus in real-time [C] IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, 2011, 21(5):522-529.
- [8] 隋婧,金伟其. 双目立体视觉技术的实现及其进展[J]. 电子技术应用, 2004, 30(10):4-6.
SUI J, JIN W Q. Realization and development of binocular stereo vision technology [J]. Application of Electronic Technique, 2004, 30(10):4-6.
- [9] ZHANG J, YU L. Vibration studies of simply supported beam based on binocular stereo vision[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2015, 9446:94463M-94463M-9.
- [10] ZHANG P, ZHANG J, DENG H X, et al. 3D Reconstruction for sinusoidal motion based on different feature detection algorithms [C]. Proceedings of SPIE-Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, 2015, 9446: 94463L-1-94463L-8.
- [11] PAN B, XIE H, WANG Z, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns[J]. Optics Express, 2008, 16(10):7037-7048.
- [12] 戴鲜强,盖绍彦,达飞鹏. 基于相位信息辅助的散斑匹配三维测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12):2792-2800.
DAI X Q, GAI SH Y, DA F P. Three-dimensional shape measurement method based on speckle pattern with prior phase information [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(12):2792-2800.
- [13] 潘华东,王其聪,谢斌,等. 飞行时间法三维成像摄像机数据处理方法研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2010, 44(6):1049-1056.
PAN H D, WANG Q C, XIE B, et al. Data processing method of time-of-flight 3D imaging camera [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(6):1049-1056.
- [14] 王晓嘉,高隽,王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(增刊3):601-604.
WANG X J, GAO J, WANG L. Survey on the laser triangulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(Suppl.3):601-604.
- [15] GONG C, LI B, HARDING K G, et al. Comparing digital-light-processing (DLP) and liquid-crystal-on-silicon (LCoS) technologies for high-quality 3D shape

- measurement [C] Sensing Technology & Applications, 2014; 911004-911004-9.
- [16] PENG W, CHEN G H, CENTER T. Comparing digital-light-processing (DLP) and liquid-crystal-display (LCD) projection technologies for high-quality 3D shape measurement [C] Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2014:92760Q-92760Q-8.
- [17] LEI S. A comparison study of digital sinusoidal fringe generation technique: Defocusing binary patterns VS focusing sinusoidal patterns [D]. Iowa State University, 2010.
- [18] BERRYMAN F, PYNSENT P, FAIRBANK J, et al. A new system for measuring three-dimensional back shape in scoliosis [J]. European Spine Journal, 2008, 17(5): 663-672.
- [19] CHEN L C, HUANG C C. Miniaturized 3D surface profilometer using digital fringe projection [J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(5): 1061.
- [20] GENOVESE K, PAPPALETTERE C. Whole 3D shape reconstruction of vascular segments under pressure via fringe projection techniques [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(12): 1311-1323.
- [21] BOYER K L, KAK A C. Color-encoded structured light for rapid active ranging [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(1): 14-28.
- [22] ETZION T. Constructions for perfect maps and pseudorandom arrays [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1988, 34(5): 1308-1316.
- [23] POSDAMER J L, ALTSCHULER M D. Surface measurement by space-encoded projected beam systems [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1982, 18(1): 1-17.
- [24] CASPI D, KIRYATI N, SHAMIR J. Range imaging with adaptive color structured light [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1998, 20(5): 470-480.
- [25] 唐苏明, 张旭, 屠大维. 伪随机编码结构光系统的标定 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1354-1362.
TANG S M, ZHANG X, TU D W. Calibration of structured light system using pseudo-random coding [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1354-1362.
- [26] CHEN W, BU P, ZHENG S, et al. Study on Fourier transforms profilometry based on bi-color projecting [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(4): 821 - 827.
- [27] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [28] ZHANG Q, CHEN W, TANG Y. Method of choosing the adaptive level of discrete wavelet decomposition to eliminate zero component [J]. Optics Communications, 2009, 282(5): 778-785.
- [29] MENG X F, PENG X, CAI L Z, et al. Wavefront reconstruction and three-dimensional shape measurement by two-step dc-term-suppressed phase-shifted intensities [J]. Optics Letters, 2009, 34(8): 1210-1212.
- [30] ZHANG S. High-resolution 3D profilometry with binary phase-shifting methods [J]. Applied Optics, 2011, 50(12): 1753-1757.
- [31] GUO H, HE H, CHEN M. Gamma correction for digital fringe projection profilometry [J]. Applied Optics, 2004, 43(14): 2906-2914.
- [32] HUANG P S, ZHANG C, CHIANG F P. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection [J]. Optical Engineering, 2003, 42(1): 163-168.
- [33] ZHANG S, HUANG P S. Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method [C] 2005, : 60000E-1.
- [34] 陈泽先, 苏显渝. 采用准正弦投影光场的三维面形测量系统 [J]. 仪器仪表学报, 1989, 10(4): 409-415.
CHEN Z X, SU X Y. A three dimensional shape measurement system using quasi sinusoidal projection light field [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, , 1989, 10(4): 409-415.
- [35] LEI S, ZHANG S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing [J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [36] LEI S, ZHANG S. Digital sinusoidal fringe pattern generation: Defocusing binary patterns VS focusing sinusoidal patterns [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(5): 561-569.
- [37] WANG Y, ZHANG S, OLIVER J H. 3D shape measurement technique for multiple rapidly moving objects [J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8539-8545.
- [38] GONG Y, ZHANG S. Ultrafast 3-D shape measurement with an off-the-shelf DLP projector [J]. Optics Express, 2010, 18(19): 19743-19754.
- [39] LEI S, ZHANG S. Digital sinusoidal fringe pattern generation: Defocusing binary patterns VS focusing sinusoidal patterns [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(5): 561-569.
- [40] 吴剑峰. 基于二进制条纹离焦投影的三维测量技术的研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.

- WU J F. Research of 3-D shape measurement technology based on binary fringe defocused projection [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013.
- [41] 张万祯. 数字投影结构光三维测量方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- ZHANG W ZH. Structured-light three dimensional measurement method based on digital projector [D]. Hangzhou: ZheJiang University, 2015.
- [42] 杨允鑫. 基于数字投影的动态三维形貌测量算法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- YANG Y X. Research on dynamic 3-D profilometry technology based on digital grating projection [D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [43] 高鹏,李勇,涂颜帅,. 离焦条纹投影三维测量中正弦光栅的二值化方法研究[J]. 光子学报,2014,43(5): 168-174.
- GAO P, LI Y, TU Y SH, et al. Binarization methods of sinusoidal grating in 3D measurement base on defocused fringe projection [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5):168-174.
- [44] LI B, WANG Y, DAI J, et al. Some recent advances on superfast 3D shape measurement with digital binary defocusing techniques [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 54(1):236-246.
- [45] BELL T, ZHANG S. Toward superfast three-dimensional optical metrology with digital micromirror device platforms[J]. Optical Engineering, 2014, 53(11): 139-152.
- [46] ZHANG S. Comparative study on passive and active projector nonlinear gamma calibration [J]. Applied Optics, 2015, 54(13):3834-3841.
- [47] WANG Y, BHATTACHARYA B, WINER E H, et al. Digital micromirror transient response influence on superfast 3D shape measurement[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 58(4):19-26.
- [48] SU X Y, ZHOU W S, BALLY G V, et al. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating[J]. Optics Communications, 1992, 94(6):561-573.
- [49] ELLENBERGER S L. Influence of defocus on measurements in microscope images [J]. Applied Sciences, 2000, 15.
- [50] WANG Y. Superfast three-dimensional (3D) shape measurement with binary defocusing techniques and its applications [D]. Ames Iowa State University, 2013.
- [51] WANG Y, LAUGHNER J I, EFIMOV I R, et al. 3D absolute shape measurement of live rabbit hearts with a superfast two-frequency phase-shifting technique [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5822-5832.
- [52] WANG Y, ZHANG S. Comparison of the squared binary, sinusoidal pulse width modulation, and optimal pulse width modulation methods for three-dimensional shape measurement with projector defocusing [J]. Applied Optics, 2012, 51(7): 861-872.
- [53] ZUO C, CHEN Q, FENG S, et al. Optimized pulse width modulation pattern strategy for three-dimensional profilometry with projector defocusing [J]. Applied Optics, 2012, 51(19):4477-90.
- [54] EKSTRAND L, ZHANG S. Three-dimensional profilometry with nearly focused binary phase-shifting algorithms[J]. Optics Letters, 2011, 36(23):4518.
- [55] WANG Y, ZHANG S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns [J]. Applied Optics, 2012, 51(27):6631-6636.
- [56] ZUO C, CHEN Q, GU G, et al. High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using bi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2013, 51(8):953-960.
- [57] ZHANG S. High-speed three-dimensional shape measurement system using a modified two-plus-one phase-shifting algorithm [J]. Optical Engineering, 2007, 46(11):113603-113603-6.
- [58] ZHANG S, LI X, YAU S T. Multilevel quality-guided phase unwrapping algorithm for real-time three-dimensional shape reconstruction. [J]. Applied Optics, 2007, 46(1):50-57.
- [59] ZHANG S, VAN D W D, OLIVER J. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement [J]. Optics Express, 2010, 18(9):9684-9689.
- [60] LEI S, ZHANG S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing. [J]. Optics Letters, 2009, 34(20):3080-3082.
- [61] WANG Y, ZHANG S. Superfast multifrequency phase-shifting technique with optimal pulse width modulation[J]. Optics Express, 2011, 19(6):5149-55.
- [62] DAI J, EKSTRAND L, ZHANG S, et al. Phase error compensation for three-dimensional shape measurement with projector defocusing [J]. Applied Optics, 2011, 50(17):2572-2581.
- [63] ZHANG S. High-resolution 3D profilometry with binary phase-shifting methods [J]. Applied Optics, 2011, 50(12):1753-1757.
- [64] AYUBI G A, AYUBI J A, MARTINO J M D, et al. Pulse-width modulation in defocused three-dimensional fringe projection [J]. Optics Letters, 2010, 35(21):

- 3682-3684.
- [65] WANG Y, ZHANG S. Optimal pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing[J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4121-4123.
- [66] XIAN T, SU X. Area modulation grating for sinusoidal structure illumination on phase-measuring profilometry[J]. Applied Optics, 2001, 40(8): 1201-1206.
- [67] BAYER B E. An optimum method for two-level rendition of continuous-tone pictures [C]. IEEE International Conference on Communications, 1973.
- [68] FLOYD R W. An adaptive algorithm for spatial grayscale[C]. Proc Sid International Symposium Digest of Technical Papers 1975:75-77.
- [69] STUCKI P. MECCA: A Multiple-error correcting computation algorithm for bilevel hardcopy reproduction [R]. Technical Report, 1981.
- [70] LOHRY W, ZHANG S. Genetic method to optimize binary dithering technique for high-quality fringe generation[J]. Optics Letters, 2013, 38(4):540.
- [71] LOHRY W, ZHANG S. 3D shape measurement with 2D area modulated binary patterns[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50(7):917-921.
- [72] DAI J, ZHANG S. Phase-optimized dithering technique for high-quality 3D shape measurement [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2013, 51(6):790795.
- [73] DAI J, LI B, ZHANG S. Intensity-optimized dithering technique for three-dimensional shape measurement with projector defocusing [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 53(2):79-85.
- [74] DAI J, LI B, ZHANG S. High-quality fringe pattern generation using binary pattern optimization through symmetry and periodicity [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 52(1):195-200.
- [75] SUN J S, ZUO CH, FENG SH J, et al. Improved intensity-optimized dithering technique for 3D shape measurement[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2015, 66:158-164.
- [76] LI B, KARPINSKY N, ZHANG S. Novel calibration method for structured-light system with an out-of-focus projector[J]. Applied Optics, 2014, 53(16):3415.
- [77] ZHANG S, HUANG P S. Novel method for structured light system calibration[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8):083601.
- [78] LEGARDASÁENZ R, BOTHE T, JÜPTNER W P O. Accurate procedure for the calibration of a structured light system [J]. Optical Engineering, 2004, 43(2): 464-471.
- [79] DU H, WANG Z. Three-dimensional shape measurement with an arbitrarily arranged fringe projection profilometry system[J]. Optics Letters, 2007, 32(16):2438-40.
- [80] WANG Y, ZHANG S. Optimal fringe angle selection for digital fringe projection technique. [J]. Applied Optics, 2013, 52(29):7094.
- [81] MERNER L, WANG Y, ZHANG S. Accurate calibration for 3D shape measurement system using a binary defocusing technique [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2013, 51(5):514-519.
- [82] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
- [83] LI B, ZHANG S. Structured light system calibration method with optimal fringe angle [J]. Applied Optics, 2014, 53(33):7942-7950.
- [84] DENG H, DENG J, MA M, et al. 3D information detection with novel five composite fringe patterns [J]. Modern Physics Letters B, 2017:1740088.
- [85] DENG H, DENG J, MA M, et al. Direction-determined phase unwrapping using geometric constraint of the structured light system: The establishment of minimum phase map [J]. Optics Communications, 2017, 402: 14-19.

作者简介



马孟超,2014年于中国科学技术大学获得学士硕士博士学位,现为合肥工业大学讲师,主要研究方向为三维测量、仿生复眼等。
E-mail:mmchao@hfut.edu.cn

Mengchao received his Ph. D. degree from USTC in 2014. Now he is a lecturer in HFUT. His main research interests include three-dimensional measurement, artificial compound eye, etc.