

基于数字微镜器件的自适应高动态范围成像方法及应用

冯维 张福民 王惟婧 曲兴华

Adaptive high-dynamic-range imaging method and its application based on digital micromirror device

Feng Wei Zhang Fu-Min Wang Wei-Jing Qu Xing-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 234201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.234201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Fresnel 波带片编码成像的高分辨重建

High-resolution reconstruction of Fresnel zone plate coded imaging

物理学报.2017, 66(5): 054203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.054203>

单像素探测频谱重构成像理论分析

Theoretical analysis of spectrum reconstruction imaging using single-pixel detection

物理学报.2017, 66(3): 034201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.034201>

基于激光散斑成像的零件表面粗糙度建模

Surface roughness modeling based on laser speckle imaging

物理学报.2015, 64(23): 234203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234203>

基于多相组重建的航空图像超分辨率算法

Super resolution of aerial image by means of polyphase components reconstruction

物理学报.2015, 64(11): 114208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114208>

编码孔径光谱成像仪光学简化彗差对图谱反演误差分析

Analysis on the simplified optic coma effect on spectral image inversion of coded aperture spectral imager

物理学报.2015, 64(5): 054205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054205>

基于数字微镜器件的自适应高动态范围 成像方法及应用*

冯维 张福民[†] 王惟婧 曲兴华

(天津大学, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

(2017年1月1日收到; 2017年6月5日收到修改稿)

在结构光三维扫描测量中, 强反射表面因编码结构光照射后易产生局部镜面反射的特性, 引起相机曝光饱和, 淹没了所要检测的表面几何特征信息. 为解决强反射表面的视觉成像难题, 基于数字微镜器件 (digital micromirror device, DMD) 具有调制入射光线空间信息的特性, 本文提出一种基于 DMD 的自适应高动态范围成像方法. 设计与搭建了一套新型可编程的计算成像系统, 建立其光学系统模型, 并实现了 DMD 微镜与 CMOS 像素的匹配与映射; 分析了基于逐像素编码曝光的高动态范围成像原理, 并设计了基于 DMD 的光强编码控制算法, 实现对入射光线强度的自适应精确调制, 从而使进入成像系统中的入射光强始终处于相机的合适曝光强度内. 实验表明: 该方法突破了普通数字相机的动态范围限制, 能够精确地控制被测强反射表面各个区域的入射光线强弱, 并实现了对强反射表面的局部过曝光区域的清晰成像. 该研究成果将为从根源上解决强反射表面因局部过曝光造成的三维点云缺失问题提供重要的解决方案.

关键词: 计算成像, 高动态范围, 编码曝光, 数字微镜器件**PACS:** 42.30.Va, 42.30.-d, 43.60.Gk, 42.79.-e**DOI:** 10.7498/aps.66.234201

1 引言

在数字图像中, 成像动态范围表示图像中包含“最暗”至“最亮”的范围. 相机的动态范围越大, 表示它能同时记录图像的明暗部细节越丰富. 而在结构光三维扫描测量中, 被测物的表面反射特性极大地影响测量效果, 被测强反射表面因编码结构光照射后易产生局部镜面反射的特性, 其反射光强动态范围远远超过普通 8 bit 工业数字相机的成像动态范围, 引起相机曝光饱和, 从而导致其图像中常伴有高亮光、眩光等光斑现象, 淹没了所要检测的表面几何特征信息, 引起测量失效或产生较大的测量误差, 其根本原因是光学成像动态范围带宽不够.

为提高成像系统的动态范围, 国内外学者开展了深入的研究. 多次曝光法是目前最常用的一种方法, 该方法需要数字相机对同一场景设置不同的曝光时间进行多次成像, 并将多幅不同曝光量的图像

运用图像处理算法融合成具有高动态范围的单幅图像^[1-3]. 然而, 多次曝光法仅适宜静态物体和稳定环境, 并不适用于复杂多变的工业现场. 一些学者提出采用多个图像传感器同时曝光融合, 以实现动态场景的高动态范围成像, 但这类方法需要多个探测器和精密的光学系统作为支撑, 导致其光学系统结构复杂且昂贵^[4,5]. 此外, 通过改变图像传感器的感光单元结构或尺寸等方法以提高原图像传感器探测高动态范围场景的能力, 然而这些硬件方法均需要设计复杂的光电结构与加工工艺, 大大增加了生产和制造的难度与成本^[6-8].

近年来, 新兴的计算成像技术进一步拓展了高动态范围成像的技术手段. 计算成像结合了计算机与相机的优势, 通过计算机控制不同类型的空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 以实现入射光线的精确调制, 从而获得更加理想的视觉图像^[9]. Mannami 等^[10] 和 Li 等^[11,12] 采用液晶类 SLM, 如液晶显示 (liquid crystal display, LCD) 和

* 国家自然科学基金 (批准号: 51775379, 51675380) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

硅基液晶 (liquid crystal on silicon, LCoS), 以调制入射光线的强度, 提高成像系统的动态范围. 这类方法的优势在于通过液晶类SLM实现对空间光线的调制, 使进入相机的入射光强始终处于相机合适的曝光强度内, 实现自适应的高动态范围成像. 然而, 由于液晶类SLM的光效率低、对比度较低等固有物理特性的限制, 影响了其在高动态范围成像技术中的进一步应用与发展.

与上述解决方法不同, 本文基于数字微镜器件 (digital micromirror device, DMD) 具有调制入射光线空间信息的特性, 借助DMD具有光效率高、对比度高等优势, 提出了一种基于DMD的自适应高动态范围成像方法, 以突破普通数字相机动态范围的限制: 设计与搭建了一套新型的可编程的计算成像系统, 并建立其光学系统模型; 详细论述了DMD微镜与CMOS像素的匹配与映射方法; 提出基于DMD的逐像素编码曝光理论与自适应光强编码控制算法, 以精确有效地调制入射光线强度. 实验表明, 本方法能够扩大成像系统的动态范围, 实现对强反射表面的局部过曝光区域的清晰成像.

2 系统构成及分析

2.1 成像系统的设计

DMD是一种空间光调制器, 它是由数百万个可独立控制位置状态的高速数字式微小平面镜阵列组成. 每个微镜都有三种可能的状态, 即“开”态、“平”态和“关”态, 分别对应 $+12^\circ$, 0° 及 -12° 的偏转角, 通过二进制脉宽调制技术能精确地实现对微镜状态的快速转换, 从而实现对入射光线的灰

度调制^[13]. DMD已经在数字全息、单像素成像、压缩感知等不同领域得到了广泛的应用^[14-20].

本文设计了一款新型的可编程的计算成像系统——DMD相机, 如图1(a)所示. 该成像系统主要由DMD、CMOS图像探测器、全内反射 (total internal reflection, TIR) 棱镜、透镜组1、透镜组2和处理器共六个部分组成. DMD作为精密的数字光学开关, 被放置于CMOS图像探测器的成像光路上. 当DMD微镜设置为“开”状态时, 从被测物表面反射的光线能顺利通过透镜组1和TIR棱镜将高动态场景成像在DMD表面; 经过DMD对入射光线编码调制后, 其反射光线以 24° 偏角再次进入TIR棱镜内, 反射光线因在TIR棱镜中发生内全反射而改变光线传播方向, 使该光线进入到透镜组2中, 经该成像物镜会聚后在CMOS图像探测器上成像. 反之, 当DMD微镜设置为“关”状态时, 被测物反射的光线则不能进入CMOS图像探测器. 此外, DMD、CMOS图像探测器、透镜组2和处理器构成了一个完整的光电反馈系统. 因此, DMD相机能够决定入射光线能否进入探测器内, 实现了在二维空间的可编程成像.

图1(b)是本实验中搭建的DMD相机的硬件原型. 为达到高速高分辨的成像目标, 选用Texas Instruments 0.65 inch DMD为空间光调制器, 其物理有效分辨率为 1920×1080 , 微镜尺寸为 $7.6 \mu\text{m}$, 并最高可达247帧8 bit灰度图像显示. CMOS图像探测器被固定在一个高精度六维位移台上, 能够实现 $xyz-\alpha\beta\theta$ 共六个方向的微调. TIR棱镜前置于DMD, 它能折叠光路, 使成像系统结构更加紧凑.

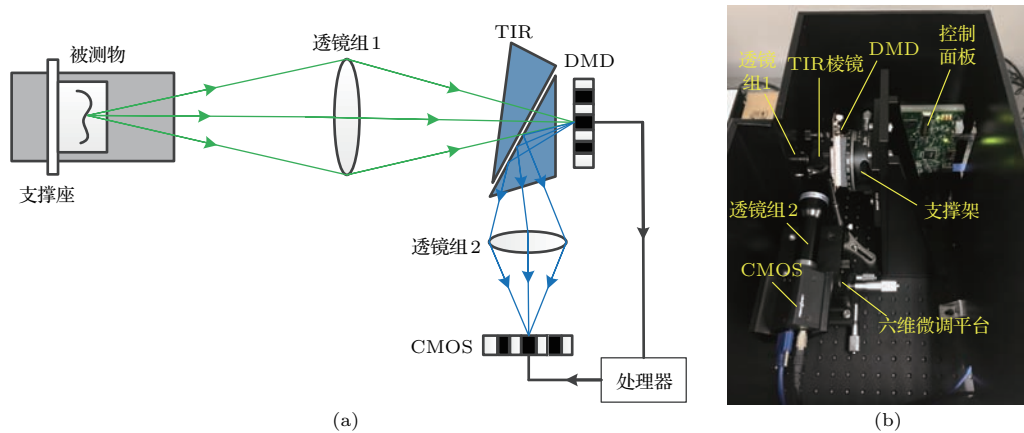


图1 基于DMD的计算成像系统 (a) 光学原理图; (b) 内部结构图

Fig. 1. Computational imaging system based on DMD: (a) Optical principle; (b) hardware prototype.

2.2 基于DMD的自适应高动态范围成像原理

基于DMD的自适应高动态范围成像过程如图2所示. 首先, 所有的DMD微镜被设置为“开”状态, 因而被测物的反射光线经DMD编码调制后可在数字相机中成像; 接着, 该原始图像被传输至计算机处理, 计算原图像中的亮度分布, 利用自适应阈值分割算法判别编码图像中是否存在过饱和区域并提取原图像中的过饱和区域; 然后, 根据DMD微镜与CMOS像素的匹配与映射关系, 设计自适应光强编码控制算法生成合适的DMD掩模以精确控制DMD各微镜的状态, 实现对相应区域入射光线的有效衰减. 依次迭代, 直至最终获得的编码图像完整清晰, 从而达到自适应高动态范围成像的目标.

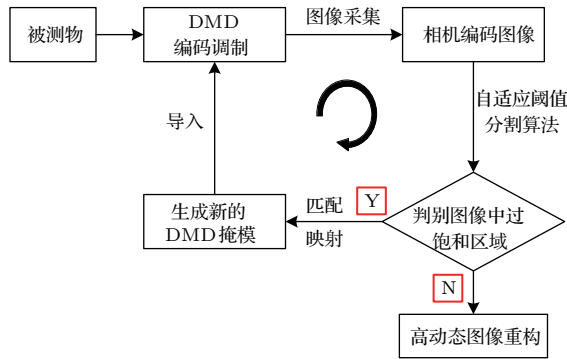


图2 基于DMD的自适应高动态范围成像过程

Fig. 2. The processing of adaptive high dynamic range imaging based on DMD.

在DMD相机中, 核心成像器件是固态图像传感器, 其动态范围通常被定义为

$$R_D = 20 \cdot \lg \left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \right), \quad (1)$$

其中, I_{\max} 和 I_{\min} 分别表示图像传感器能探测到的最大亮度值和最小亮度值. 对于普通8 bit的数字相机, 一般设定最小亮度值 $I_{\min} = 1$, 因此8 bit数字相机的动态范围为 $20 \cdot \lg 255 = 48.13$ dB.

DMD作为光学衰减器, 主要用于记录入射光的衰减值. 设 T_{\max} 和 T_{\min} 分别表示DMD微镜保持“开”状态的最长时间和最短时间, 则DMD相机的动态范围可以表示为

$$R_{D_{\text{sys}}} = 20 \cdot \lg \left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \cdot \frac{T_{\max}}{T_{\min}} \right). \quad (2)$$

当用8 bit图像作为掩模对DMD进行编码控制时, DMD相机的动态范围为 $20 \cdot \lg(255 \times 255) =$

96.26 dB. 因此, DMD相机的动态范围远大于8 bit的普通数字相机, 其性能相当于一个非常昂贵的16 bit的图像传感器的动态范围.

2.3 成像系统的光学模型

在由DMD与CMOS组成的线性空间不变的成像系统中, CMOS像平面的一个像点实际是由被测物的物平面上的多个物点叠加而成, 这种混合叠加的成像过程可以用数学积分来表达:

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(s, t) h(x, y; s, t) ds dt = f(s, t) \otimes h(x, y; s, t), \quad (3)$$

式中, (s, t) 和 (x, y) 分别表示物平面和像平面上二维空间坐标; $f(s, t)$ 表示被测物的图像; $g(x, y)$ 表示相机采集到的图像, 又称为降质图像; $h(x, y; s, t)$ 表示该DMD相机的光学传递函数 (PSF).

光强函数 $I(x, y)$ 可以表示为像函数 $g(x, y)$ 与其共轭像函数 $g^*(x, y)$ 的点积的时间平均值:

$$I(x, y) = \langle g(x, y) \cdot g^*(x, y) \rangle. \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式中, 光强函数 $I(x, y)$ 又可表示为

$$I(x, y) = \langle [f(s, t) \otimes h(x, y; s, t)] \times [f^*(s, t) \otimes h^*(x, y; s, t)] \rangle = |f(s, t)|^2 \otimes |h(x, y; s, t)|^2 \otimes \langle \text{Re}\{2f^*(s, t) \cdot h^*(x, y; s, t)\} \rangle. \quad (5)$$

由于从物体表面反射的光线可以看作是非相干平面波, 故(5)式可以进一步表示为

$$I(x, y) = |f(s, t)|^2 \otimes |h(x, y; s, t)|^2. \quad (6)$$

设 $I(x, y, t)$ 对应于 $M \times N$ 像素邻域内的时空卷积和相机积分时间; $M(x, y, t)$ 表示DMD与CMOS之间的调制函数; T 表示相机的曝光周期; (x, y) 表示DMD平面上的任意一点, 其与CMOS像平面上的某一点相对应. 因此, DMD相机的实际光强函数 $V(x, y)$ 可以表示为

$$V(x, y) = \sum_{t=0}^T M(x, y, t) \cdot I(x, y, t) = \sum_{t=0}^T M(x, y, t) [|f(s, t)|^2 \otimes |h(x, y; s, t)|^2], \quad 0 \leq V \leq 255, \quad (7)$$

(7)式中, $M(x, y, t) \in [0, 1]$. 当 $M(x, y, t) = 0$ 时, 所有的DMD微镜为“关”态, 没有光线可以进入数字相机的像面成像; 当 $M(x, y, t) = 1$ 时, 所有的DMD微镜为“开”态, 所有入射光线均可进入数字相机的像面成像. 对于普通数字相机, $M(x, y, t) = 1 \forall (x, y, t)$. 此外, 当微镜未偏转(即处于“平”态)时, 所有DMD微镜处于水平位置, 入射光线均因微镜反射而偏离数字相机的像面.

3 成像系统的匹配与映射

为了实现DMD对CMOS入射光线的像素级精确控制, 必须获得各DMD微镜与CMOS像素之间的匹配与映射关系.

3.1 成像系统的匹配

成像系统的匹配是指DMD微镜与CMOS像素之间的空间频率的一致性. 由于单个DMD微镜与CMOS像素都非常微小, 仅通过微调平台无法直接消除两者间的匹配偏差. 本文采用莫尔条纹法放大DMD与CMOS的匹配特征, 以实现DMD微镜与CMOS像素的像素级匹配^[21].

众所周知, 当两块光栅距相等的光栅以相对保持一个较小的夹角 θ 叠加时, 在它们的叠加区域会产生肉眼可见的莫尔条纹, 这样就能把微小的栅距位移变成清晰可见的条纹位移. 同理, 由于DMD与CMOS都是二维离散抽样结构, 当对它们的微镜与像素分别做等间隔采样时, 则它们均可被看作是二维光栅. 若它们的空间频率不一致时, 就会产生清晰可见的莫尔条纹. 基于此原理, 可先将DMD掩模设置成周期性条纹光栅图案, 如图3(a)所示. 该条纹图案在每个周期方向上由4列微镜组成, 且前两列为“开”状态, 后两列为“关”状态, 分别用于衡量 x, y 两轴向的空间频率一致性. 接着, CMOS相机采集DMD像面的图像, 并以每四列为一个周期进行1/4抽样, 而且每个周期内的第一列CMOS像素值被作为采样值复制给其同周期内的其他三列, 使同周期内的像素灰度值均相同. 当DMD微镜与CMOS像素没有完全一一对应时, 由于相邻周期的CMOS采样值不同, 在复制插值之后就会出现灰度渐进的周期性的莫尔条纹现象; 否则, CMOS图像探测器采集的图像中将不会显示有莫尔条纹. DMD相机初始匹配结果如图3(b)所示, 图中出现

了明暗相间的莫尔条纹, 说明DMD与CMOS之间未完全匹配.

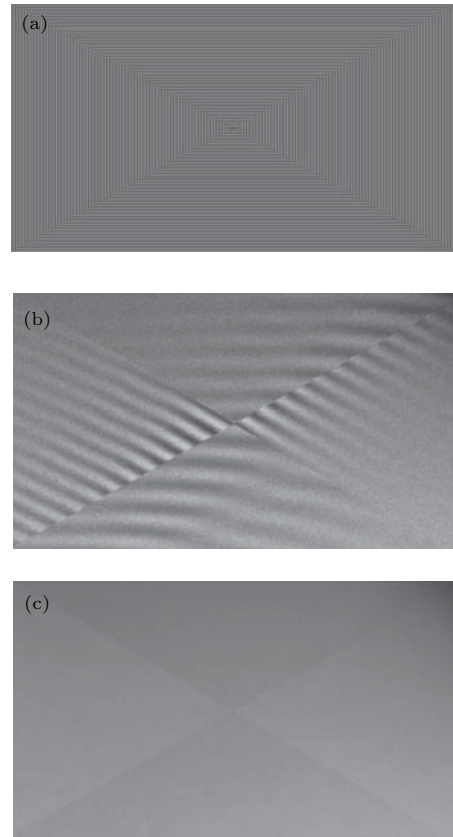


图3 DMD与CMOS的匹配结果 (a) DMD匹配掩模; (b) 未匹配; (c) 已匹配
Fig. 3. Result of matching between the DMD and the CMOS detector: (a) Matching mask taken by DMD camera; (b) not matched; (c) matched.

实验中可调整CMOS在 $xyz-\alpha\beta\theta$ 六维位移台上的位置来实现DMD微镜与CMOS像素的匹配, 实验结果如图3(c)所示, CMOS所采集的掩模图像中的四个区域均不存在莫尔条纹, 图案亮度较均匀. 因此, 该DMD相机中已实现了DMD微镜与CMOS像素的像素级匹配.

3.2 成像系统的映射

根据该成像系统的光路特征可得到其坐标映射等效示意图, 如图4所示. 可知DMD微镜阵列与CMOS像素阵列的对应关系实际上是一种空间映射关系, 两坐标系间可用三维投影变换矩阵表示. 因此, 从DMD像面到CMOS像面的像素映射关系可用如下等式:

$$U = R \cdot X, \tag{8}$$

其中, \mathbf{U} 和 \mathbf{X} 分别代表 DMD 像面和 CMOS 像面对应映射点的齐次坐标, \mathbf{R} 是一个 3×3 的非齐次单应矩阵, 它可表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

其中, r_{ij} 为矩阵 \mathbf{R} 的第 i 行与第 j 列相交的元素. 设 $P_d(u, v)$ 和 $P_c(x, y)$ 分别是 DMD 像面和 CMOS 像面上的任意一点, 则 (9) 式可以表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

因此, 当 $P_d(u, v)$ 和 $P_c(x, y)$ 坐标均已知时, 单应矩阵 \mathbf{R} 可采用直接线性变换 (DLT) 算法求解 [22].

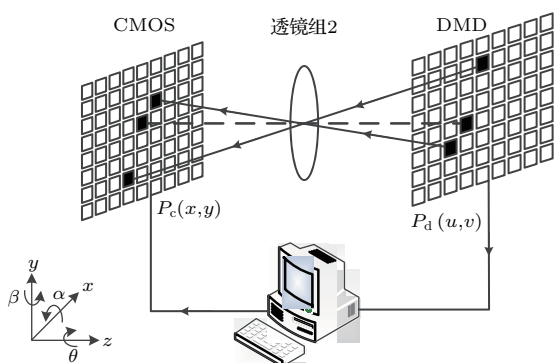


图4 DMD与CMOS相机坐标映射关系的等效示意图
Fig. 4. Equivalent schematic diagram of coordinate mapping between DMD and CMOS detector.

事实上, 根据本成像系统的特点, DMD 微镜与 CMOS 像素的标定方法如下.

步骤1 DMD 显示棋盘格标定图案. 为了简便计算, 设计一个如图 5(a) 所示的 4×6 的棋盘格阵列, 共存在 15 个角点, 且该棋盘格上各角点坐标 $P_d(u, v)$ 已知.

步骤2 CMOS 相机采集 DMD 像面的图像, 如图 5(b) 所示.

步骤3 运用 Harris 算法检测 CMOS 相机中所采集的图像中存在的角点坐标 $P_c(x, y)$, 检测结果如图 5(c) 所示.

步骤4 采用 DLT 算法, 由步骤 1 和步骤 3 的数据计算即可得到 DMD 相机的单应矩阵 \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1.0359 & -0.0754 & 73.2999 \\ -0.0020 & 1.0534 & 46.6156 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

当求解出单应矩阵 \mathbf{R} 后, 根据 CMOS 像面上的任意特征点 $P_c(x, y)$ 都可用表达式 (11) 式解出其对应于 DMD 像面中的微镜 $P_d(u, v)$:

$$\begin{aligned} u &= \frac{\frac{r_{11}}{r_{13}} \cdot x + \frac{r_{12}}{r_{13}} \cdot y + 1}{\frac{r_{21}}{r_{13}} \cdot x + \frac{r_{22}}{r_{13}} \cdot y + \frac{r_{23}}{r_{13}}}, \\ v &= \frac{\frac{r_{21}}{r_{23}} \cdot x + \frac{r_{22}}{r_{23}} \cdot y + 1}{\frac{r_{31}}{r_{23}} \cdot x + \frac{r_{32}}{r_{23}} \cdot y + \frac{r_{33}}{r_{23}}}. \end{aligned} \quad (11)$$

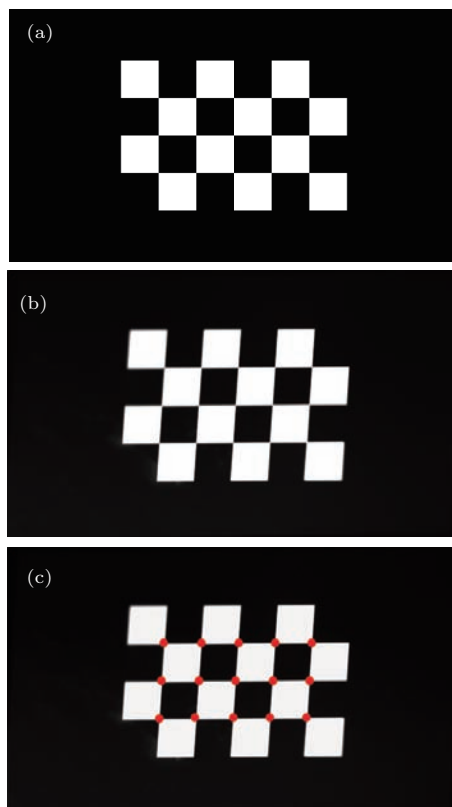


图5 DMD与CMOS的映射关系 (a) DMD 标定图案; (b) CMOS 相机采集的棋盘格图像; (c) 角点检测结果
Fig. 5. Mapping relationship between DMD and the CMOS detector: (a) DMD calibration pattern; (b) the calibration pattern captured by CMOS detector; (c) the result of corner detection.

4 自适应高动态范围成像方法

4.1 基于 DMD 的逐像素编码曝光理论

根据 DMD 的高速偏转特性, DMD 掩模能够在 CMOS 的一个曝光积分周期内完成多次状态转换. 假设 DMD 相机先后采集不同的场景, N 幅不同的 DMD 掩模 M_i 依次有序地曝光在一个 CMOS 相机曝光周期 T 内, 每个 DMD 掩模的曝光时间为 t_i , 如图 6 所示.

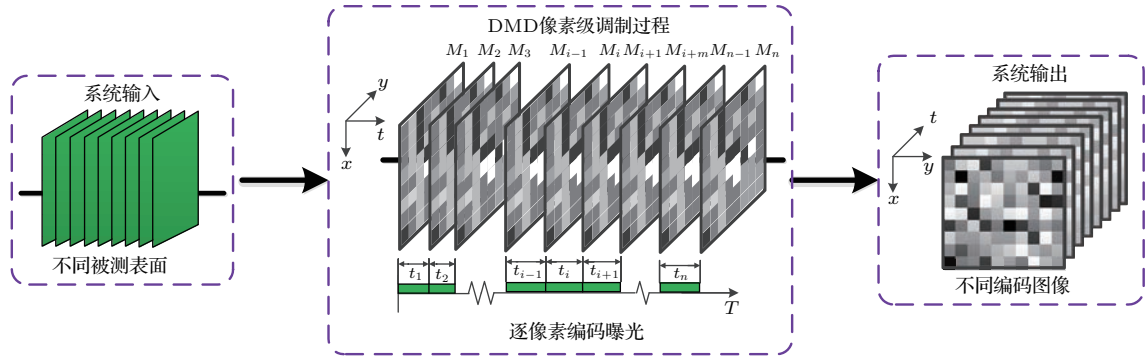


图6 基于DMD的逐像素编码曝光原理

Fig. 6. Principle of per-pixel coded exposure based on DMD.

设 $M_i(x, y, t)$ 表示DMD掩模函数, 逐像素编码曝光函数 $M(x, y, t)$ 能准确地揭示DMD对入射光线像素级调制过程, 其表达式可表示为

$$M(x, y, t) = \sum_{i=1}^N M_i(x, y, t) t_i, \quad (12)$$

$$T = \sum_{i=1}^N t_i.$$

此后, 一系列的编码曝光图像被作为系统输出而存储. 因此, 该编码曝光图像不仅保存了DMD相机的分辨率, 而且还记录了原始图像的时间和空间信息. 结合DMD相机的光学模型, 逐像素编码曝光图像的灰度值函数 $V'(x, y)$ 可以表示为

$$V'(x, y) = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^N M_i(x, y, t) t_i [|f(s, t)|^2 \otimes |h(x, y; s, t)|^2], \quad (13)$$

$$0 \leq V' \leq 255.$$

若在CMOS相机的一个曝光周期 T 内, 只有一幅DMD掩模被曝光, 那么此时DMD被用于调制入射光线的空间信息, 以实时衰减入射光线的强度. 此时, $N = 1$ 和 $t_i = T$. 因而由 (13) 式可进一步推导出逐像素编码曝光理论用于高动态范围成像中的表达式为

$$V_{\text{hdr}}(x, y) = M(x, y) \cdot I_{\text{hdr}}(x, y). \quad (14)$$

根据DMD的调制函数 $M(x, y)$, CMOS相机获取的图像灰度值 $V_{\text{hdr}}(x, y)$ 以及反射曲线 $D(x)$, 原始高动态场景的实际光强函数 $I_{\text{hdr}}(x, y)$ 可重构为

$$I_{\text{hdr}}(x, y) = \frac{V_{\text{hdr}}(x, y)}{D(M(x, y))}. \quad (15)$$

4.2 基于DMD的光强编码控制算法

设计自适应光强控制算法是为了有效地调制各DMD微镜处于“开”状态的时间, 使入射光强始终处于CMOS相机的最佳响应区域内, 从而避免图像过饱和现象的发生. 本文设计了一种自适应光强控制算法用于精确地调制入射光线的强度.

通常情况下, 实际场景的入射光强不可预知, 因此需要多次迭代以确保CMOS相机获得的图像没有出现过曝光现象. 结合2.2节的内容, 本文设计的自适应光强编码控制算法如下.

步骤1 初始化. 所有的DMD微镜打开, 即 $M(x, y) = 1$. 此时, CMOS相机获得场景的原始图像 $I_o(x, y)$.

步骤2 分割与判别. 对于8 bit的CMOS相机, 图像中的像素灰度值超过255意味着图像中存在过曝光现象. 但由于相机采集过程中噪声是不可避免的, 因此像素饱和值 V_s 应被设定为稍低于255, 且该像素饱和值 V_s 将被用作图像分割的阈值以判别图像中的过饱和区域. 如果图像中存在过曝光区域, 则进入步骤3; 否则, 进入步骤5.

步骤3 提取与映射. 经过图像分割后, 用Sobel算子来检测图像的边缘, 从而可以提取出图像中的过饱和区域 $O_c(x, y)$. 根据3.2节的方法, DMD掩模所对应的区域 $O_d(u, v)$ 可以表达为

$$O_d(u, v) = \mathbf{R} \cdot O_c(x, y). \quad (16)$$

步骤4 DMD掩模设计. 设DMD掩模的调制函数 $M_i(u, v)$ 与其对应的CMOS相机图像 $I_i(x, y)$ 的关系如下:

$$M_i(u, v) = C - \alpha \cdot I_i(x, y) - \beta \cdot \frac{V_c}{V_s} \cdot I_i(x, y). \quad (17)$$

其中, α 和 β 都是光强衰减因子, V_c 是已知较小的均匀亮度值, C 是常数且 $0 < C \leq 255$.

根据 (17) 式生成新的 DMD 掩模并导入到 DMD 中, 进入步骤 2.

步骤 5 结束.

因此, 所设计的基于 DMD 的光强编码控制算法的调制速度是由 DMD 光强调制函数 $M_i(u, v)$ 决定的, 迭代次数 Q 可表示为

$$Q = \text{num}[\alpha, \beta, I, V_c], \quad Q \in \mathbb{N}^+. \quad (18)$$

其中, Q 是正整数; $\text{num}[\]$ 是计数函数, I 是实际场景的光强值. 当 I 和 V_c 是固定值时, α 和 β 决定着光强调制函数的迭代次数. 在本实验中, $\alpha = 0.85$, $\beta = 0.1$ 和 $V_c = 2^6 = 64$, $C = 255$.

5 实验结果与对比分析

强反射表面的三维几何特征测量一直是光学三维测量研究的热点, 其难点在于被测强反射表面因编码结构光照射后易导致进入普通工业数字相

机的图像中常常出现局部过曝光现象, 影响强反射表面的三维几何参数测量精度, 导致该问题的原因是实际被测表面反射光的动态范围超过了普通工业数字相机的成像动态范围.

为解决强反射表面的视觉成像难题, 实验中选用金属铝制直角件作为被测对象, 且该被测物表面的部分区域经机加工研磨后已达到局部强反射表面的效果. 将不同的被测物放置于不同的光照环境下进行实验, 实验结果如图 7 所示. 左侧第一列图 7(a) 是 DMD 不参与调制时, DMD 相机采集的原始图像. 此时, DMD 微镜全部处于“开”状态, 即 $M(x, y, t) = 1$, 可以将 DMD 相机看作是传统的 8 bit 数字相机. 从图 7(a) 可以看出, 原始图像中存在明显的局部无规则过曝光区域, 淹没了部分原图像细节信息. 根据 4.2 节所述方法, 所得 DMD 最佳掩模如图 7(b) 所示. 图 7(c) 是经 DMD 调制后, DMD 相机采集的图像, 该图像中无明显的过曝光区域. 对比图 7(a) 和图 7(c), 原图像中的局部过曝光区域的光强经 DMD 精确调制后有效地衰减, 被测强反射表面的几何特征信息均清晰成像.

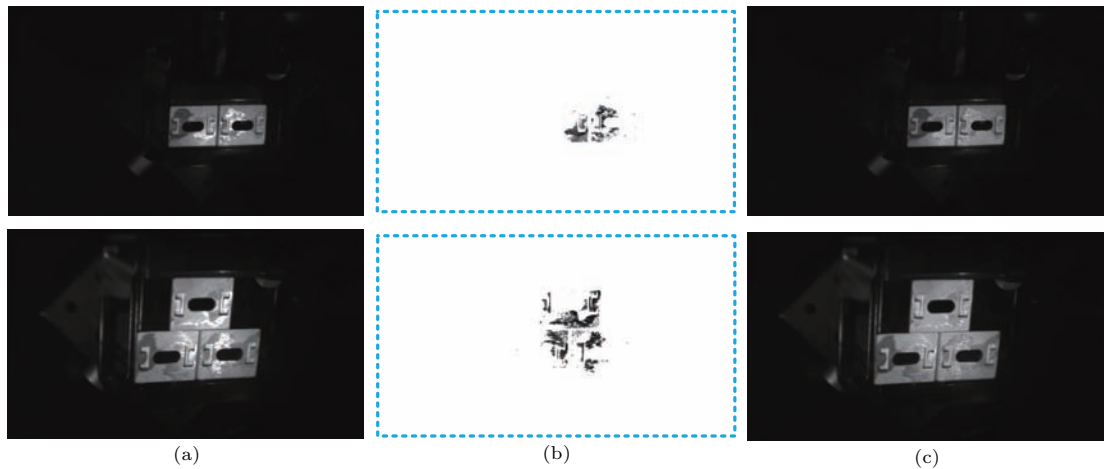


图 7 实验结果 (a) 无 DMD 调制时, DMD 相机采集的原始图像; (b) DMD 掩模; (c) 经 DMD 调制后, DMD 相机采集的图像

Fig. 7. Experimental results: (a) Different images captured by the DMD camera without DMD modulation; (b) DMD masks; (c) different images captured by the DMD camera with DMD modulation.

因灰度直方图能有效地反映图像中某种灰度出现的频率, 故可采用灰度直方图统计图像中过饱和像素点的分布情况. 由于原始场景中有较大范围的黑色背景, 为突出图像的局部细节特征, 仅提取图 7(a) 和图 7(c) 中灰度级为 50—255 之间的灰度直方图, 结果如图 8 所示. 图 8(a) 对应的是图 7(a) 的灰度直方图, 可以看出有较多像素点灰度级处于 200—255 区间内, 且有部分像素点灰度

值达到 CMOS 相机的饱和灰度值. 图 8(b) 对应的是图 7(c) 的灰度直方图, 可以看出灰度级处于 200—255 区间内的像素点大大减少, 且绝大部分像素点的灰度值都处于 CMOS 相机的最佳灰度响应区间 100—180 内. 因此, 该实验表明, 经 DMD 调制后, 原图像中存在的局部不规则过曝光区域的像素值均被调制到相机的理想灰度级区间内, 具有更好的图像质量.

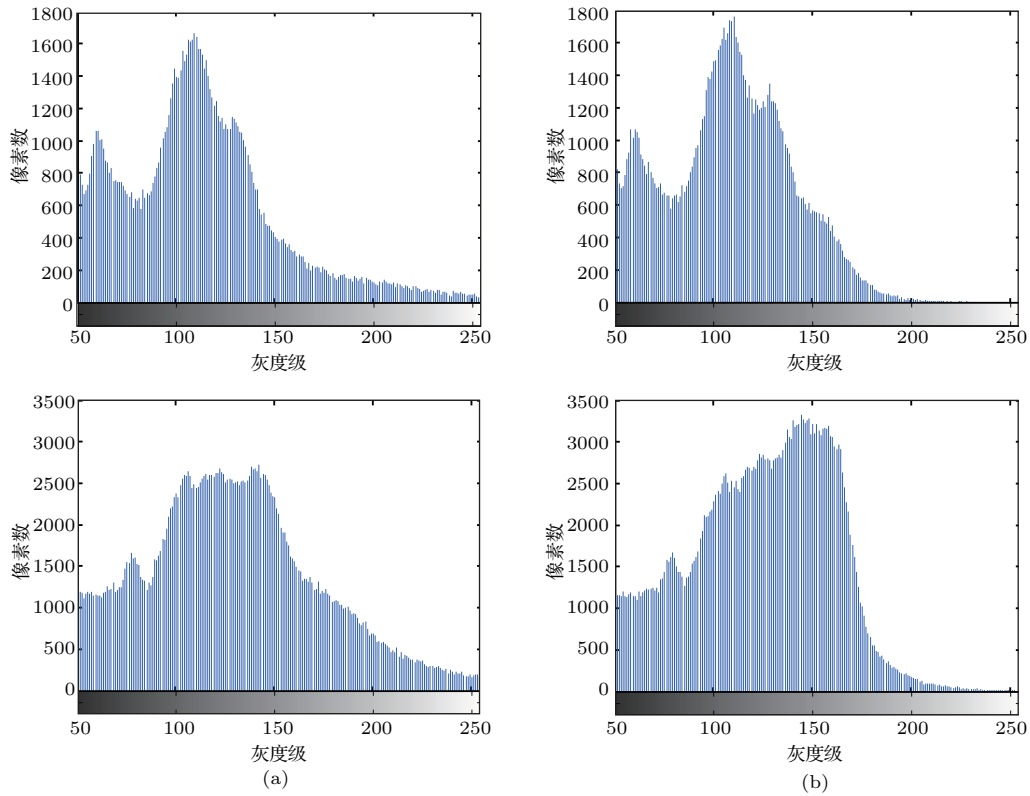


图8 灰度直方图对比结果 (a) 图7(a) 图像的灰度直方图; (b) 图7(c) 图像的灰度直方图

Fig. 8. Comparison results of gray histogram: (a) Gray histogram of the image in Fig. 7(a); (b) gray histogram of the image in Fig. 7(c).

6 结 论

因普通8 bit的数字相机动态范围有限,在结构光三维扫描测量中难以实现对局部强反射表面的有效成像而引起测量失效,提出一种基于DMD的自适应高动态范围成像方法.基于DMD具有调制入射光线空间信息的特性,研制了一套可编程的DMD相机,建立了该成像系统的光学模型,并系统地提出基于逐像素编码曝光的高动态范围成像理论.设计基于DMD的光强编码曝光算法,可准确有效控制被测表面各个区域的入射光线强弱,尤其是衰减强反射表面的高光区域的光强,扩大计算成像系统的动态范围,并自适应量化该高动态范围成像过程.

实验结果表明,本文所提方法可实现对局部强反射表面的高动态范围成像,有效地解决强反射表面的视觉成像难题.同时,对多个不同的被测物的实验表明,设计的成像系统和方法具有很好的稳定性和可靠性.本研究成果将为从根源上解决强反射表面因局部过曝光造成的三维点云缺失问题提供新的解决思路.

参考文献

- [1] Srikantha A, Sidibé D 2012 *Signal Process.* **27** 650
- [2] Wang C, Tu C 2014 *Int. J. Signal Process. Image Process. Pattern Recognit.* **7** 217
- [3] Gu B, Li W, Wong J, Zhu M, Wang M 2012 *J. Visual Commun. Image Represent.* **23** 604
- [4] Venkataraman K, Jabbi A S, Mullis R H 2015 *US Patent* 9 041 829 [2015-05-26]
- [5] Ward G J, Seetzen H, Heidrich W 2012 *US Patent* 8 242 426 [2012-08-14]
- [6] Brajovic V 2004 *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* Washington DC, USA, June 2 2004 p189
- [7] Lai L W, Lai C H, King Y C 2004 *IEEE Sens. J.* **4** 122
- [8] Ikebe M, Saito K 2007 *IEEE Sens. J.* **7** 897
- [9] Zhou C, Nayar S K 2011 *IEEE Trans. Image Proc.* **20** 3322
- [10] Mannami H, Sagawa R, Mukaigawa Y, Echigo T, Yagi Y 2007 *J. Visual Commun. Image Represent.* **18** 359
- [11] Li X, Sun C, Wang P 2015 *Opt. Lasers Eng.* **66** 41
- [12] Yang Z, Wang P, Li X, Sun C 2014 *Opt. Lasers Eng.* **54** 31
- [13] Dudley D, Duncan W M, Slaughter J 2003 *Proc. SPIE-The International Society for Optical Engineering* USA, January 20 2003 Vol. 4985
- [14] Zhang H, Cao L, Jin G 2017 *Appl. Opt.* **56** F138

- [15] Cheng J, Gu C, Zhang D, Wang D, Chen S C 2016 *Opt. Lett.* **41** 1451
- [16] Qiao Y, Xu X, Liu T, Pan Y 2015 *Appl. Opt.* **54** 60
- [17] Li M F, Mo X F, Zhao L J, Huo J, Yang R, Li K, Zhang A N 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 064201 (in Chinese) [李明飞, 莫小范, 赵连洁, 霍娟, 杨然, 李凯, 张安宁 2016 物理学报 **65** 064201]
- [18] Feng W, Zhang F, Wang W, Xing W, Qu X 2017 *Appl. Opt.* **56** 3831
- [19] Li L Z, Yao X R, Liu X F, Yu W K, Zhai G J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 224201
- [20] Feng W, Zhang F, Qu X, Zheng S 2016 *Sensors* **16** 331
- [21] Ri S, Fujigaki M, Matui T, Morimoto Y 2006 *Appl. Opt.* **45** 6940
- [22] Mackie C J, Candian A, Huang X, Lee T J, Tielens A 2015 *J. Chem. Phys.* **142** 244107

Adaptive high-dynamic-range imaging method and its application based on digital micromirror device*

Feng Wei Zhang Fu-Min[†] Wang Wei-Jing Qu Xing-Hua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 1 January 2017; revised manuscript received 5 June 2017)

Abstract

In the three-dimensional (3D) scanning measurement based on structured light techniques, the strong reflection surface is easy to produce local specular reflection due to the illumination of the structured light, which will cause the camera to be over-exposed, and therefore the geometry information of strong reflection surface cannot be detected. Since the digital micromirror device (DMD) has the modulating characteristics of the spatial information of incident light, an adaptive high-dynamic-range imaging method based on DMD is proposed to solve the problem of visual imaging of strong reflection surface. Firstly, a novel and computational imaging system is designed and built, and its optical model is also established. Then, the matching and mapping methods between DMD micromirrors and CMOS pixels are described in detail and realized. Meanwhile, we analyze the theory of the high-dynamic-range imaging based on per-pixel coded exposure, and design a coding control algorithm of light intensity to achieve the adaptive precision modulation of the intensity of incident light, so that the incident light in the imaging system is always in appropriate exposure intensity. The experiments show that the method can break through the limited dynamic range of the ordinary digital camera, and accurately control the intensity of incident light in each region of the measured strong reflection surfaces, and thus it can obtain the high-quality images of the local over-exposure area of the strong reflection surface. More importantly, the research will provide a new solution to the problem of 3D point cloud loss caused by local over-exposure of the strong reflection surface.

Keywords: computational imaging, high dynamic range, coded exposure, digital micromirror device

PACS: 42.30.Va, 42.30.-d, 43.60.Gk, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.66.234201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51775379, 51675380).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn