

文章编号:1004-4213(2010)10-1825-5

基于互信息的高动态范围成像系统成像质量分析*

马俊,倪旭翔[†]

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室 国家光学仪器工程技术研究中心, 杭州 310027)

摘 要:为了优化高动态范围成像系统的设计,完善地评价系统性能,将信息论应用于高动态范围成像系统中,把高动态范围成像系统看作通信系统,采用端到端的互信息量来评价高动态范围成像系统的成像质量.在 COMS 采样成像模型的基础上引入空间光调制器反射式硅基液晶的影响,建立了基于互信息的高动态范围成像系统数学模型.利用该模型分析了反射式硅基液晶与 CMOS 阵列像素数比、像素开口率、相对平移、相对旋转对系统互信息量的影响及造成系统成像质量下降的原因.通过仿真计算,分别得到了像素数比例、像素开口率大小、相对平移量、相对旋转角度与互信息量的相互关系曲线,并定量分析了这些因素变化对系统互信息量的影响程度.仿真结果表明反射式硅基液晶和 CMOS 阵列的最佳匹配条件是:反射式硅基液晶和 CMOS 像素的占空比尽可能大,CMOS 像素尺寸尽可能小,避免相对平移和相对旋转,反射式硅基液晶像素数和 CMOS 像素数之比为 1:1.

关键词:互信息;高动态范围成像系统;反射式硅基液晶;莫尔条纹

中图分类号:O438.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103910.1825

0 引言

高动态范围成像(High Dynamic Range Imaging, HDRI)系统是用于获取高动态范围图像的成像系统.与传统图像获取系统相比,它能更好地重现真实场景,在摄影、遥感、监控、医学成像等领域有着广泛的应用^[1].HDRI 系统的基本工作原理是通过改变反射式硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)各像素的反射率来调制成像在 CMOS 工作面上的图像的各点光强,其核心是 CMOS 成像系统.通常采用调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)或系统传递函数(System Transfer Function, STF)评价成像系统的性能,但是 HDRI 系统是一种空间离散采样系统,它不满足线形空间不变的条件,所以采用 MTF 和 STF 不能准确评价 HDRI 系统的性能^[2].Rachel Alter-Gartenberg、迟学芬等将信息论应用于 CCD 采样成像系统,将互信息量作为评价其成像系统的指标^[3-4].徐建程、任秀云等利用互信息量来评价干涉成像采样系统和全息成像系统的性能并分析影响成像质量的因素^[5-6].本文在 Rachel Alter-Gartenberg 等人的工作基础上,建立了 HDRI 系统的成像数学模型,对空间光调制系统对 CMOS 采样成像系统成像质量的影响进行分析,得到两个空间离散器件 LCoS 阵列

和 CMOS 阵列的最佳匹配条件,为 HDRI 系统提供了基于信息论的性能评价方法.

1 HDRI 系统模型

1.1 HDRI 系统成像模型

图 1 描述了 HDRI 系统的工作原理:物平面上的目标经一组成像光学系统成像至 LCoS 的工作面上,位于成像光学系统与 LCoS 光路之间的 PBS 分光系统,用来分离入射到 LCoS 的光线和入射到 CMOS 图像传感器的光线. LCoS 工作面上的图像再经另一组成像光学系统成像于 CMOS 图像传感器的工作面.

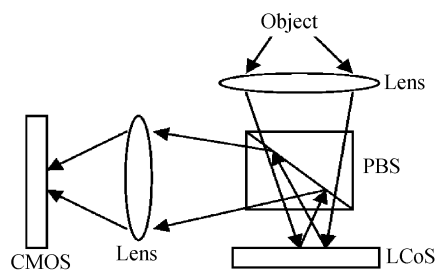


图 1 HDRI 系统

Fig. 1 Schematic diagram of HDRI system

在空域上,HDRI 系统的成像过程包括两个部分:一是 LCoS 的调制成像过程,二是 CMOS 的积分抽样过程.

LCoS 作为空间光调制器,可以视为由许多反射率可控的正方形反射镜构成的二维离散器件,其光响应特性为

* 浙江省科技厅面上科研项目(2007C21001)资助

[†] Tel:0571-87951962

Email:majun312@gmail.com

收稿日期:2010-04-22

修回日期:2010-08-10

$$t(x, y) = \begin{cases} G(n) & nd_1 - \frac{a_1}{2} < x, y < nd_1 + \frac{a_1}{2} \\ 0 & nd_1 + \frac{a_1}{2} < x, y < (n+1)d_1 - \frac{a_1}{2} \end{cases}$$

$$= G(n) \text{rect}(x/a_1, y/a_1) * \text{comb} \cdot (x/d_1, y/d_1) \quad (1)$$

式中 d_1 为 LCoS 像元中心间距, a_1 为 LCoS 像元宽度, G 为 LCoS 调制深度 ($0 < G < 1$). 在空域上, 输出信号可以表示为

$$I(x, y) = O(x, y) * h(x, y) \times t(x, y) \quad (2)$$

式中 $O(x, y)$ 、 $I(x, y)$ 分别表示输入、输出目标图像函数, $h(x, y)$ 表示光学成像系统的点扩展函数. 式(2)的傅里叶变换为

$$I(u, v) = G(n)O(u, v)H(u, v) * \sum_{\substack{n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ m=0, \pm 1, \pm 2, \dots}} \text{sinc}\left(\frac{a_1}{d_1}n\right) \delta\left(u - \frac{n}{d_1}, v - \frac{m}{d_1}\right) \quad (3)$$

假设光学镜头的点扩展函数为圆对称的高斯函数, 则 $H(u, v) = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{\xi_1^2}\right)$. 其中 ξ_1 为光学响应指数, 等于光学弥散圆直径的倒数, ξ_1 值表征光学成像镜头的截止频率大小^[7].

CMOS 的成像过程包括: 像元积分成像过程; 以像元中心距为采样间隔对连续图形目标的离散采样过程. 在频域上 CMOS 的采样方程可以表示为^[8]

$$I(u, v) = O(u, v) \times H(u, v) \times \text{sinc}(a_2 u, a_2 v) * \text{comb}(d_2 u, d_2 v) + N_p(u, v) \quad (4)$$

式中 d_2 为 CMOS 像元中心间距, a_2 为 CMOS 像元宽度, $H(u, v) = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{\xi_2^2}\right)$, ξ_2 为光学响应指数, $N_p(u, v)$ 表示 CMOS 传感器的噪声.

综合式(3)和(4), HDRI 系统在频域上成像过程可以表示为

$$I(u, v) = G(n)O(u, v) \times H(u, v) * \left[\sum_{\substack{n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ m=0, \pm 1, \pm 2, \dots}} \text{sinc}\left(\frac{a_1}{d_1}n\right) \delta\left(u - \frac{n}{d_1}, v - \frac{m}{d_1}\right) \right] * \text{comb}(d_2 u, d_2 v) + N_p(u, v) \quad (5)$$

式(5)中, 光学传递函数为

$$H(u, v) = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{\xi_1^2}\right) \times \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{\xi_2^2}\right) \times \text{sinc}(a_2 u, a_2 v).$$

1.2 HDRI 系统的互信息模型

根据信息论^[9], 把 HDRI 系统的输入图像 $O(u, v)$ 看作信源, CMOS 采集到的图像 $I(u, v)$ 看作信道的输出信号. $O(u, v)$ 、 $I(u, v)$ 之间的互信息量表征 CMOS 采集到的图像中包含多少输入图像的信息. 可以认为互信息量越大, HDRI 系统的成像质量越好. 互信息量可以表示为^[2,7]

$$I = \frac{1}{2} \iint \log \left[1 + \frac{\phi_0 |H(u, v)|^2}{\phi_n(u, v)} \right] dudv \quad (6)$$

式中 $\phi_0(u, v)$ 是输入信号 $O(u, v)$ 的功率谱密度, $\phi_n(u, v)$ 是噪声的功率谱密度.

2 LCoS 对成像质量的影响分析

如图 2, HDRI 系统中, LCoS 和 CMOS 这两个离散器件是物像共轭关系. 实际选用的 CMOS、LCoS 器件的像素大小, 开口率各有不同; 装配 HDRI 系统时由于存在对准误差, 两者之间可能会有相对空间位移, 相对旋转. 这些因素都会对 HDRI 系统的成像质量产生影响.

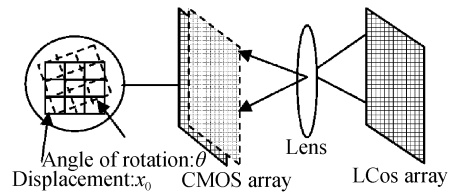


图 2 两离散器件之间的关系

Fig. 2 Relationship between two discrete devices

2.1 LCoS 与 CMOS 像素数量匹配的影响

在 x 方向上, 假设成像在 CMOS 上的 LCoS 像元中心距为 1, CMOS 的像元中心距为 w , 即每 w 个 LCoS 像素对应调制 1 个 CMOS 像素上的光强. 要使 LCoS 精确调制 CMOS 采集的图像, 则 $w \geq 1$. 假设 CMOS、LCoS 像元宽度分别为 x_1 、 x_2 , LCoS 各像素反射率均为 1. 由式(5)得到

$$I(u) = O(u)H(u) * \left[\delta(u) + \sum_{n \neq 0} \text{sinc}(x_2 n) \cdot \delta(u - n) \right] * \left[\delta(u) + \sum_{m \neq 0} \delta\left(u - \frac{m}{w}\right) \right] + N_p(u) \quad (7)$$

式中 $H(u) = \exp\left(-\frac{u^2}{\xi_1^2}\right) \exp\left(-\frac{u^2}{\xi_2^2}\right) \text{sinc}(x_1 u)$. 假设图像是一种平稳高斯信号, 则由式(7)得到信号和噪声的功率谱密度

$$\phi_s(u) = \phi_0(u) |H(u)|^2 \quad (8)$$

$$\phi_n(u) = \begin{cases} \phi_0(u) |H(u)|^2 * \sum_{m \neq 0} \delta\left(u - \frac{m}{w}\right) + \sigma_p^2 & (x_2 = 1 \text{ 或 } x_2 \neq 1, w \text{ 为正整数}) \\ \phi_0(u) |H(u)|^2 * \sum_{n \neq 0} \text{sinc}(x_2 n) \delta(u - n) + \phi_0(u) |H(u)|^2 * \sum_{m \neq 0} \delta\left(u - \frac{m}{w}\right) + \phi_0(u) |H(u)|^2 * \sum_{\substack{m \neq 0 \\ n \neq 0}} \text{sinc}\left[x_2\left(n + \frac{m}{w}\right)\right] \delta\left(u - n - \frac{m}{w}\right) + \sigma_p^2 & (x_2 \neq 1, w \text{ 不是正整数}) \end{cases} \quad (9)$$

式中 σ_p^2 为噪声的功率谱密度. 取成像质量分析中常用的自然功率谱, 即

$$\phi_0(u, v) = 1/(u^2 + v^2) \quad (10)$$

假设 LCoS、CMOS 对应的成像系统的光学响应指数分别为 ω 和 1, 开口率均为 1, 将式(8)~(10)代入式(6), 改变 ω 得到互信息量和 CMOS 像元中心距 w 的关系如图 3.

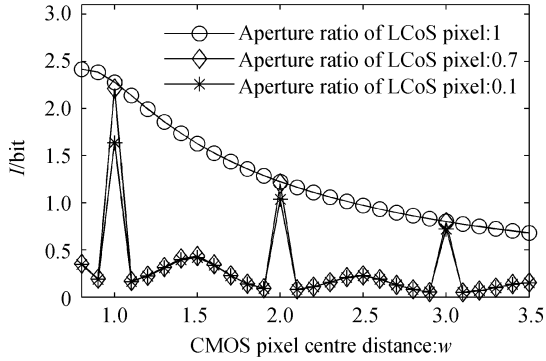


图 3 互信息与 CMOS 像素中心距的关系
Fig. 3 Relation between mutual information and CMOS pixel centre distance

由图 3 可知, 当 LCoS 像素开口率为 1 时, LCoS 相当于全反射镜; 当 LCoS 像素开口率不为 1 且 $w=N$ (N 为正整数) 时, 系统信息量随 w 的增大而减小, 这两种情况下, LCoS 对 CMOS 的成像质量没有影响; 互信息量变化是因为 CMOS 采样频率下降, 欠采样噪声增大, 造成成像质量的下降. 当 CMOS 像素开口率不为 1 且 $w \approx N$ 时, 系统信息量相对 $w=N$ 时急剧下降, 此时, LCoS 和 CMOS 的 N 倍采样频率间存在较小频率差, LCoS 和 CMOS 这两种周期性结构的叠加产生了莫尔条纹^[10], 影响系统成像质量.

2.2 像素开口率、相对位移、相对旋转的影响

对于 CMOS 阵列, CMOS 像元尺寸越小, 即采样频率越高, 它能传递的图像的空间频率越高. 在选择 HDRI 系统中使用的 CMOS 时尽可能选择尺寸小, 分辨率高的器件. 同时, 选择合适尺寸和分辨率的 LCoS 器件和成像镜头, 使 LCoS 像素与 CMOS 像素空间上一一对应, 此时系统互信息量最大, 即成像质量最好. 但是实际使用的 CMOS 和 LCoS 都有一定的开口率, CMOS 和 LCoS 像元尺寸在微米量级, 在匹配对准由于机械误差等因素的影响, LCoS 和 CMOS 之间会有一定的相对平移、旋转, 所以往往难以完美地实现像元的一一对应. 这些因素都会影响 HDRI 系统成像质量. 假设 CMOS 像素和成像在 CMOS 上的 LCoS 像素的中心距均为 1, LCoS 各像素调制比例为 1, CMOS 阵列在 x 方向上

共有 200 个像素, 由式(5)分别得到式(11)(开口率不同)、式(13)(相对平移)、式(15)(相对旋转)三种情况下信号和噪声的功率谱密度

$$\phi_s(u) = \phi_0(u) |H(u)|^2 \quad (11)$$

$$\phi_n(u) = [\phi_0(u) |H(u)|^2 * \sum_{m \neq 0} \delta(u-m)] + \sigma_p^2 \quad (12)$$

$$\phi_s(u) = \left[\text{rect} \left(\frac{x}{A} \right) + \text{rect} \left(\frac{x-1}{A} \right) \right] \cdot \text{rect} \left(\frac{x-x_0}{B} \right) \phi_0(u) |H(u)|^2 \quad (13)$$

$$\phi_n(u) = \left[\text{rect} \left(\frac{x}{A} \right) + \text{rect} \left(\frac{x-1}{A} \right) \right] \text{rect} \left(\frac{x-x_0}{B} \right) \cdot \phi_0(u) |H(u)|^2 * \sum_{n \neq 0} \delta(u-n) + \sigma_p^2 \quad (14)$$

式中, x_0 为 LCoS 相对 CMOS 在 x 方向上的平移量; A, B 分别为 LCoS 和 CMOS 的像素占空比.

$$\phi_s(u) = \phi_0(u) |H(u)|^2 \quad (15)$$

$$\phi_n(u) = \phi_0(u) |H(u)|^2 * \sum_{n \neq 0} \text{sinc}(x_2 n) \delta(u-n) + \phi_0(u) |H(u)|^2 * \sum_{m \neq 0} \delta \left(u - \frac{m}{\cos \theta} \right) + \phi_0(u) |H(u)|^2 * \sum_{n \neq 0} \text{sinc} \left[x_2 \left(n + \frac{m}{\cos \theta} \right) \right] \delta \left(u - n - \frac{m}{\cos \theta} \right) + \sigma_p^2 \quad (16)$$

式中, θ 为 LCoS 相对 CMOS 顺时针旋转的角度.

将式(11)~(16)分别代入式(9)可以分别得到 3 种条件下互信息量变化的仿真曲线, 见图 4~图 6.

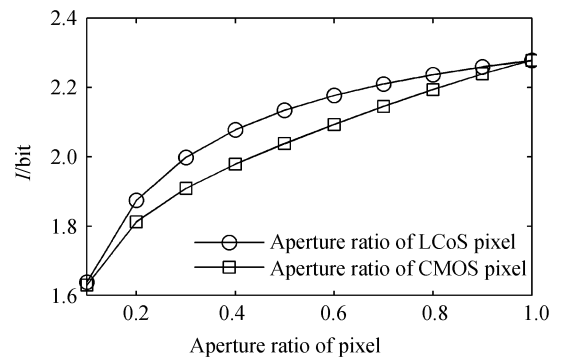
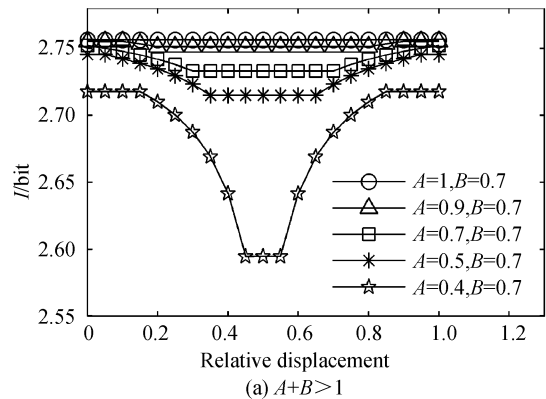


图 4 互信息与像素开口率的关系
Fig. 4 Relation between mutual information and aperture ratio of pixel



(a) $A+B>1$

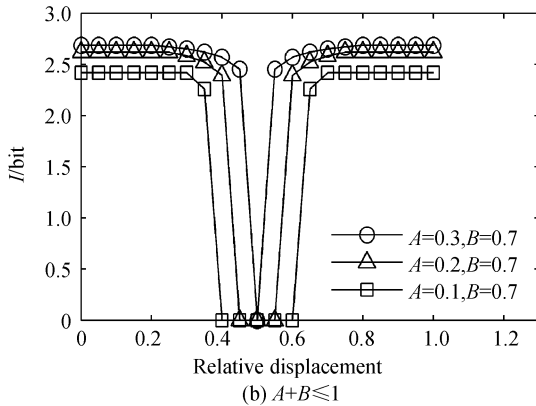


图5 互信息量与相对位移的关系

Fig. 5 Relation between mutual information and relative displacement

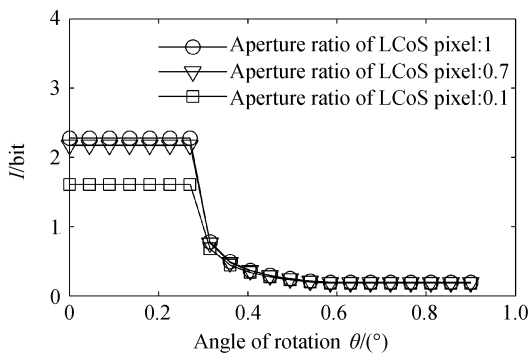


图6 互信息量与相对旋转角的关系

Fig. 6 Relation between mutual information and relative rotation angle

从仿真图可见: 1) LCoS、CMOS 开口率越高, 系统互信息量越大. CMOS 开口率的影响略大于 LCoS 开口率的影响; 2) 相对平移对成像质量的影响程度由 LCoS 和 CMOS 的像素开口率决定; 3) LCoS 相对 CMOS 旋转一定角度, LCoS 和 CMOS 的采样频率存在微小差别而产生莫尔条纹, 这将会严重影响系统的成像质量. 但旋转角小于 0.28° 时系统互信息量基本不变, 此时 CMOS 阵列的长度限制了莫尔条纹对成像质量的影响.

3 结论

本文将信息论应用到 HDRI 系统, 把互信息量作为评价系统成像质量的指标, 建立了基于互信息的 HDRI 系统成像模型, 通过仿真计算可以得到: 1) LCoS 与 CMOS 的最佳匹配条件: CMOS 像素尽可能小的前提下, 两者精确地一一对应; 2) 影响成像质量的因素有: LCoS 和 CMOS 的像素数比、像元开口率、相对位移量和相对旋转角度; 3) 以上因素对成像质量的影响程度: 像元对应比例不成整数比、相对旋转会在输出图像中引入莫尔条纹, 对成像质量的

影响较为严重; 像元开口率、相对平移影响成像质量的程度相对较轻, 所以实际安装 HDRI 系统时尽量优先避免像元对应比例不成整数比、相对旋转的问题. 本文得到的结论适用于 HDRI 系统的优化设计, 指导 HDRI 系统器材的选取和系统装配, 同时可以为分析其他有多个离散器件的系统的成像质量提供借鉴.

参考文献

- [1] XU Jin, CHEN Zhe-bo, NI Xu-xiang, *et al.* Research of HDRI system based on PID controller[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(4): 547-551.
徐进, 陈浙泊, 倪旭翔, 等. 基于 PID 控制器的 HDRI 系统的研究[J]. *光学技术*, 2008, **34**(4): 547-551.
- [2] XU Jian-cheng, XU Qiao, CHAI Li-qun. Performance analysis of interferometric imaging sampled system based on mutual information[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1608-1610.
徐建程, 许乔, 柴立群. 基于互信息的干涉成像采样系统性能分析[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1608-1610.
- [3] ALTER-GARTENBERG R. Information metric as a design tool for optoelectronic imaging systems[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(11): 1743-1760.
- [4] CHI Xue-fen, HAN Chang-yuan. Assessment of sampled imaging system based on information-theory[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(2): 207-211.
迟学芬, 韩昌元. 基于信息理论的采样成像系统评价方法[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(2): 207-211.
- [5] XU Jian-cheng, DENG Yan, CHAI Li-qun, *et al.* The effect of CCD on high spatial resolution interferometric optical test [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 793-796.
徐建程, 邓燕, 柴立群, 等. CCD 对高空间分辨率波前干涉检测的影响[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 793-796.
- [6] REN Xiu-yun, CHENG Xin, LIU Xuan, *et al.* Imaging properties of the computer-generated holograms based on a spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 110-113.
任秀云, 程欣, 刘轩, 等. 基于空间光调制器的计算全息成像特性[J]. *光子学报*, 2005, **34**(1): 110-113.
- [7] CHI Xue-fen, HAN Chang-yuan, YI Zhi-dong. Matching design methods based on information theory in sampled imaging systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **23**(3): 278-283.
迟学芬, 韩昌元, 易志栋. 基于信息理论的采样成像系统匹配设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 278-283.
- [8] ZHANG Xiao-hui, HAN Chang-yuan, PAN Yu-long, *et al.* Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCD camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 697-701.
张晓辉, 韩昌元, 潘玉龙, 等. 传输型 CCD 相机综合像质评价方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(4): 697-701.
- [9] 陶纯堪, 陶纯匡. *光学信息论*[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 27-39.
- [10] XU Jin, CHEN Zhe-bo, LI Yan, *et al.* A processing method for Moire fringe in programmable imaging systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 325-327.
徐进, 陈浙泊, 李燕, 等. 可编程成像系统中莫尔条纹处理方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 325-327.

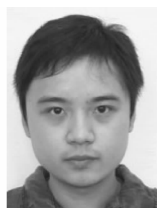
Image Quality Analysis of High Dynamic Range Imaging System Based on Mutual Information

MA Jun, NI Xu-xiang

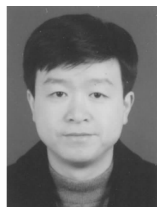
(State Key laboratory of Modern Optical Instrumentation, NERC for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: For optimizing design of the High Dynamic Range Imaging system and evaluating its performance perfectly, the information theory is applied to the High Dynamic Range Imaging system, the High Dynamic Range Imaging system is considered as a communication system, and the image quality of High Dynamic Range Imaging system is evaluated according to the end-to-end mutual information. Introducing the influence of LCoS as a spatial light modulator to CMOS sampling imaging model, mathematical model of the High Dynamic Range Imaging system based on mutual information is established. According to the model, the factors, such as the ratio of LCoS pixel number to CMOS pixel number, aperture ratio of LCoS and CMOS pixel, relative displacement and relative rotation angle, which affect the mutual information, and the reasons why the system image quality decline are analyzed. According to computer simulation, the relationships between the ratio of LCoS pixel number to CMOS pixel number and the mutual information, aperture ratio of LCoS and CMOS pixel and the mutual information, relative displacement and the mutual information, relative rotation angle and the mutual information are demonstrated, and the influence of these factors on the mutual information is analyzed. The simulation results show that the best matching condition between LCoS array and CMOS array is that one LCoS pixel corresponds to one CMOS pixel with smaller CMOS pixel, higher aperture of LCoS and CMOS pixel, no relative displacement and no relative rotation.

Key words: Mutual information; High Dynamic Range Imaging(HDRI) system; Liquid Crystal on Silicon (LCoS); Moire fringe



MA Jun was born in 1985. He is currently pursuing the M. S. degree at NERC for Optical Instrument, Zhejiang University. His research interests focus on opt-electronic detection and imaging processing.



NI Xu-xiang was born in 1970. He received the Ph. D. degree from Department of Optical Engineering, Zhejiang University. Now he is an associate professor at Zhejiang University, and his research interests focus on opt-electronic detection.