

文章编号:1004-4213(2010)12-2163-5

二值时空编码照明三维测量中的冗余编码方法*

薛康^{1,2}, 李勇^{1,†}

(1 浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

(2 内蒙古医学院 物理教研室, 呼和浩特 010059)

摘要:在采用二值时空编码结构照明的三维测量中,由于遮挡、阴影及光学系统的低通滤波特性等原因导致被测物体部分区域解码错误或无法解码.为减轻这些因素对测量结果的影响,提出了一种采用冗余编码的二值时空编码照明三维测量方法.该方法在空间相邻区域设置相同编码,以时间坐标进行区别.解码时,根据编码的冗余性对结果进行校验、残缺编码恢复.与原有编码相比,在不增加投影模式数量的情况下,获得了更多的有效点数,提高了解码的可靠性,并为进一步的纠错提供了更多信息.

关键词:光学三维测量;时空分析;冗余编码;结构光照明

中图分类号:TN206

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103912.2163

0 引言

光学三维测量技术以其非接触、无损伤、准确度高、测量柔性好等优点^[1],被广泛应用于机器视觉^[2]、工业检测^[3]、自动化控制加工、产品质量控制、国防高技术、公安、实物仿形^[4]、生物医学^[5]、计算机三维动画制作等领域.在现有的众多光学三维测量方法中^[6-8],基于结构光编码照明的主动式测量方法,由于其系统构成相对简单、成本较低、测量速度较快,近年来受到越来越多的关注.结构光编码方案可分为时间编码方案,空间邻域编码方案和直接编码方案三类^[9].其中时间编码方案测量可靠性和准确度高,但测量时间长;空间邻域编码方案和直接编码方案测量速度快、密度高,但测量准确度和可靠性相对较低.二值时空编码照明方法结合了时间和空间编码方案,在相同测量密度和准确度下,采用的模式数比时间编码方案少,因而缩短了测量时间,并且可以同时得到物体的二维纹理^[10].然而采用原有编码方案,阴影、特别是遮挡和物体表面反射率突变区域附近存在较多解码错误或无法解码的情况.因此,有必要对原编码方案进行改进,提高测量的可靠性和数据密度.

本文根据二值时空编码方案的特点,将原来作为间隔单元的三个模式进行编码,码值与空间上右边编码单元的值相同,实现冗余编码.给出了编码原理和实验结果.实验结果显示,采用冗余编码方案后

得到了更好的结果,说明这种改进是可行的.

1 原理

1.1 系统构成

图 1 为二值时空编码照明三维测量系统结构示意图.它主要由投影仪和摄像机构成,由投影仪投出编码模式,摄像机在另一角度拍摄被物体表面高度调制的变形模式.利用计算机对变形模式解码,得到投影仪和摄像机像面之间的对应点对.根据三角测量原理,得到物体表面的三维信息^[11].

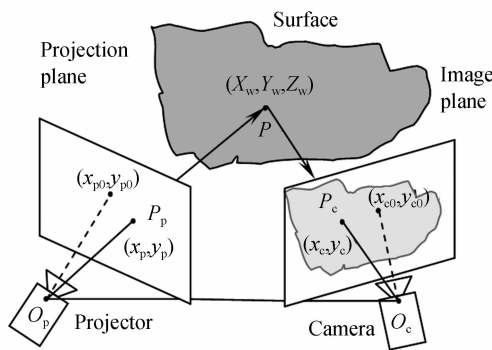


图 1 二值时空编码照明三维测量系统

Fig. 1 3-D measurement system based on binary spatio-temporal encoding illumination

1.2 时空二值编码原理

通常光栅投影三维测量技术只对投影仪像素一个方向的坐标编码,这里以对水平方向坐标编码为例说明时空二值编码原理,它同样适用于垂直坐标编码.为说明编码的构成方式,取投影平面上某一行相邻的 18 个投影仪像素所构成的三个编码区域为例.图 2 为编码原理示意图.图中每个码字占六个投影仪像素,在空间上按从左至右的顺序,前三个像素

* 国家自然科学基金(60702078)资助

† Tel: 0579-82298859

Email: liyong@zjnu.cn

收稿日期: 2010-07-08

修回日期: 2010-09-15

为间隔单元,后三个像素为编码单元,相邻单元用虚线隔开.

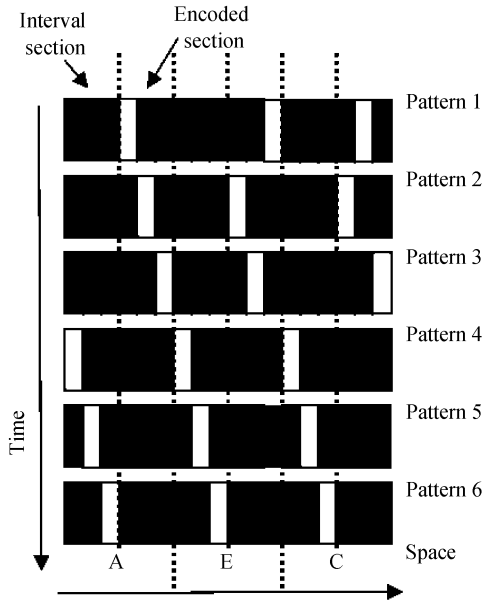


图2 时空二值编码示意图
Fig.2 Sketch of binary spatio-temporal coding

码值由编码单元的时空坐标构成. 代码构成的原则是:1)空间上,一个模式中,每个单元内有且只有一个像素是白色的,其它为黑;2)时间上,在同一个单元内,每个像素在且只在一个模式中为白色,其它为黑. 这样,亮条纹在编码单元中的空间相对位置表示为空间坐标,其所在模式的序号,表示为时间坐标;把时间和空间坐标组合就可以对区域编码. 如码字“E”可表示为时空坐标“ $\boxed{1} \ 2 \ \boxed{3} \ 1$ ”,加框部分表示相对空间坐标,未加框的表示时间坐标. 其中,“ $\boxed{1} \ 2$ ”表示在编码单元中,按从左到右的顺序,第一个像素在第二个模式中为“白色”,即其空间时间坐标为(1,2);以此类推,第二和第三像素的空间时间坐标为(2,3)和(3,1). 同理,可得到其它码字. 根据排列知识,可以得到 $3! = 6$ 个码字. 分别用字母“A”—“F”表示. 表1为不对间隔单元编码时,时空坐标与码字对照表. 表中将像素的时间坐标按其空间坐标顺序排列.

表1 原方法时空坐标码字对照表

Table 1 Spatio-temporal coordinates and codewords of original method

Interval section time coordinates	Encoded section time coordinates	Code words
4 5 6	1 2 3	A
4 5 6	1 3 2	B
4 5 6	2 1 3	C
4 5 6	3 1 2	D
4 5 6	2 3 1	E
4 5 6	3 2 1	F

采用这种编码方案进行对应点匹配时,间隔单元投影仪像素的码值依赖于编码单元投影仪像素的码值. 因此,如果编码单元投影仪像素的解码结果不正确会导致错误区域扩大. 从而,间隔单元处对应点匹配结果的可靠性降低,三维重构的有效点数就会减少. 在阴影、特别是遮挡和物体表面反射率突变区域附近存在的主要问题是条纹缺失和编码单元组合错误. 由于间隔单元没有独立编码,这种解码错误或无法解码的情况尤为突出. 图3为间隔单元不编码时的解码结果示意图,以两个相邻代码“E”、“C”为例说明. 图中小方格表示摄像机像素,虚线框表示投影仪像素. 从摄像机的角度看,在图像中投影仪像素一般要比摄像机像素宽,即同一虚线框中的多个摄像机像素值对应一个投影仪像素. 并且由于物体面型的调制造成条纹变形,在投影平面上宽度均匀的条纹,在摄像机像面上,宽度通常是不均匀的. 图3(a)是正确解码的结果. 图3(b)中,当构成代码“E”的编码单元有一个条纹(时间坐标为3)缺失后,虽然其对应的间隔单元完整,但是其余条纹无法构成代码,则整个区域码值无法恢复(用数字“0”表示),将导致在三维结果对应位置的数据点缺失. 图3(c)表示,如果有较多的条纹(时间坐标分别为3、1、4、5、6和2)缺失,两个相邻不同编码单元的残缺部分恰好构成一个可识别的代码,必将导致解码的错误;同时,对应间隔单元的编码也会随着错误,于是错误区域扩大. 如图中本来码值为“E”的编码区域被错误解码成“C”.

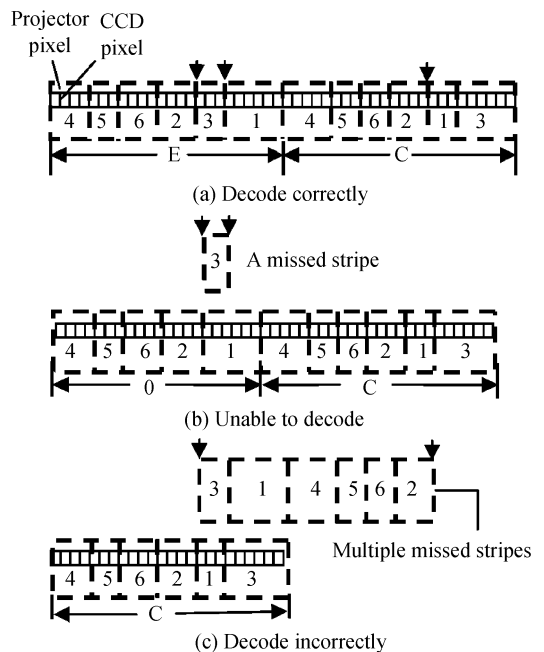


图3 原方法解码结果

Fig.3 Decoding results based on original method

1.3 冗余编码方案

为增加数据密度和解码可靠性,本文提出了冗余编码方案.它将作为间隔单元的投影仪像素进行编码,且其编码的构成方式与编码单元的构成方式相同,使间隔单元与编码单元的码值相同.图 4 表示冗余编码方案示意图,表 2 表示冗余编码方案中的时空坐标与码字对照表.

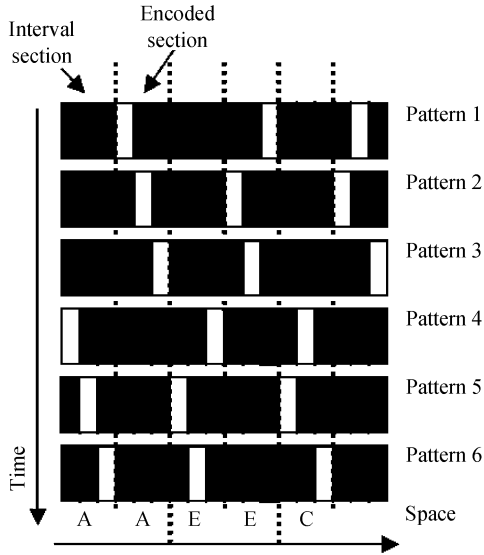


图 4 冗余编码示意图

Fig. 4 Sketch of redundancy encoding

表 2 冗余编码方法时空坐标码字对照表

Table 2 Spatio-temporal coordinates and codewords based on redundancy encoding method

Interval section time coordinates	Encoded section time coordinates	Code words
4 5 6	1 2 3	A
4 6 5	1 3 2	B
5 4 6	2 1 3	C
6 4 5	3 1 2	D
5 6 4	2 3 1	E
6 5 4	3 2 1	F

采用冗余编码后,同一码字中的间隔单元可以不依赖于与其相邻的编码单元而独立解码.因而,在两个单元中只要有一个单元是完整的,另一个单元即使不完整,其码值也是可以恢复的,这就使得解码的密度得以提高;并且,当间隔单元和编码单元中的某个单元被错误解码,错误不会扩散到另一单元.图 5(a)为正常解码情况,图 5(b)和图 5(c)为编码信息缺失情况.如图 5(b),条纹“3”缺失后,其残余部分可以被相邻完整单元恢复.其中条纹“5”、“6”、“4”对应码值“E”,表示完整单元解码;条纹“2”、“1”对应码值“E”,表示根据冗余编码规律恢复出的代码.图 5(c)表示多个条纹缺失后,两相邻不同代码的残余部分构成错码的情况.其中缺失条纹“3”、“1”属于原码“E”;“5”、“4”、“6”、“2”属于原码“C”.可看出,原码“E”的残余单元“2”被误解码为“C”,而其完整

单元“5”、“6”、“4”被正确解码为“E”,减少了原方法中的错误.当同码的间隔单元和编码单元都不完整时,原编码方法无法解出码值,但采用冗余编码方案还有可能恢复出码值,从而最大限度地利用了残余编码信息;可以部分弥补由于编码单元不完整造成的数据缺失.

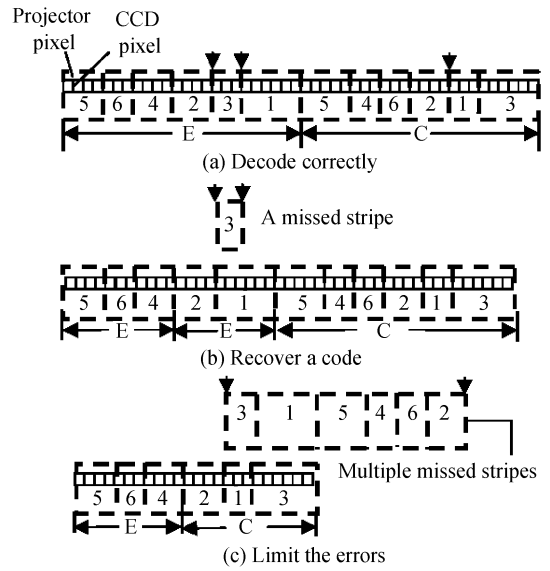


图 5 冗余编码方法解码结果示意图

Fig. 5 Decoding results based on redundancy encoding method

图 6 表示两个相邻同码单元中分别丢失一个条纹的情况.根据缺失条纹“4”和“2”可能出现的不同位置,从表 2 中可以分别得到两组可能的码值集合:(A,C,E),(E,F,D).由冗余编码方案可知,间隔单元和编码单元的码值必须是相等的.从而得出 $E = (A,C,E) \cap (E,F,D)$,为条纹缺失处的码值.如果得到的交集的码值数目大于 1 或是缺失的条纹较多,那么无法仅仅凭借编码的构成方式来判断其码值,但是可以结合相邻的编码情况等其他信息来恢复其码值.综上所述,采用冗余编码方案可以得到更多的有效数据点,数据可靠性较高,代码恢复的余地更大,可以为编码校验及纠错提供更多的信息.

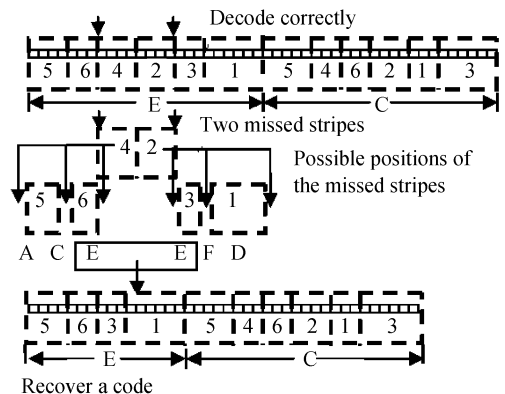


图 6 代码恢复示意

Fig. 6 Sketch of recovering code

2 实验及结果分析

实验中采用 DLP 投影仪(分辨率为 1024×768)、摄像机(型号为 RM6740GE)和 PC 搭建了测量系统. 研究了两种典型情况下测量的数据密度和可靠性. 首先测量了一个阴影和遮挡程度较大, 最大深度约为 100 mm 的石膏头像. 先后投出采用两种编码方案设计的两组编码图案, 分别得到两组实验结果. 图 7(a)是采用冗余编码方法投出第一个模式后采集的头像图. 图 7(b)和图 7(c)分别表示头像的非冗余和冗余编码方案的区域代码图(Region Code

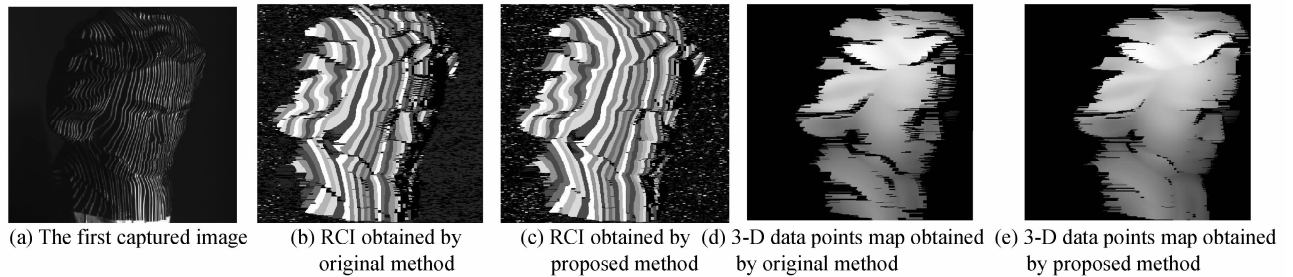


图 7 两种方法石膏像中间结果及三维数据图

Fig. 7 Intermediate results and 3-D data of the plaster model

表 3 为两种编码方案测量的三维数据点数和错误率比较. 可以看出, 在三维错误率相差不大的情况下采用冗余编码方案得到的有效点数增加了近 20%. 说明冗余编码方案在阴影和遮挡程度比较大的情况下可得到更好的三维恢复效果.

表 3 头像的实验结果

Table 3 Experimental results of the plaster model

Method	Points of correspondences map	Points of 3-D data points map	Erroneous points	Ratio of 3-D errors(%)
Original method	77 210	77 180	30	0.4
Proposed method	92 568	92 525	43	0.5

最后测量了一个面积为 A4 纸大小的棋盘格(其黑白块交界处表面反射率变化剧烈). 图 8(a)是采用冗余编码方法投出第一个模式后采集回来的棋盘格图像. 图 8(b)和图 8(c)表示用两种方案测量棋盘格的对应点图, 可以明显看出采用冗余编码方案

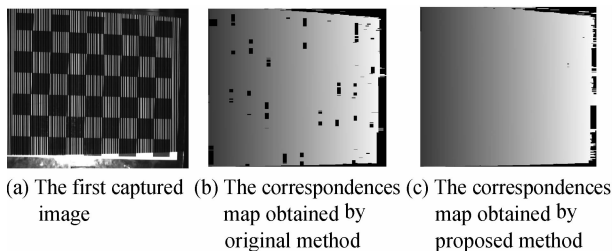


图 8 两种方法棋盘格对应点图

Fig. 8 Correspondences maps of the chessboard

Image, RCI). 从图中可以看到, 后者得到的代码数明显多于前者, 尤其是在图像纹理复杂的区域, 如头像鼻子和嘴的边缘. 另一方面, 采用冗余编码方式, 背景噪音点被解码的几率高于前者, 噪音点较多, 但是噪音点在对应点匹配过程中基本被消除. 图 7(d)和图 7(e)分别为用灰度表示的采用两种编码方案得到的三维数据, 可以看出采用冗余编码方案的三维重构结果空洞区域较前者大为减少, 得到的三维点数更多.

几乎没有空洞. 非冗余编码方案得到的有效数据点数为 248 577 个, 而冗余编码方案的有效数据点数为 263 868 个, 比前者增加 15 291 个. 通过数据对比可知, 冗余编码方案在表面反射率变化剧烈的情况下得到的结果也好于非冗余编码方案.

冗余编码方法程序平均运行时间约为原方法的 1.6 倍. 工作量增加的主要原因是由于: 1) 解码过程中, 需要对相邻两个同码单元分别运行解码程序; 2) 解码过程结束后, 需要根据编码冗余性对部分区域进行代码修复. 相对于可以得到具有较高数据密度和可靠性的测量结果而言, 解码工作量上的增加对三维测量速度的影响整体上是较小的, 因而该方法在实践中是可取的.

3 结论

本文在原有二值时空编码照明三维测量方法的基础上提出一种改进措施, 将原方法中用于间隔单元的投影仪像素用相同的编码规律进行编码. 实验结果表明, 冗余编码方法解码可靠性更高, 可以得到更多的有效数据点, 恢复后的三维形貌细节更好, 空洞区域被有效的减少; 对阴影、遮挡程度较大的物体和纹理复杂、表面反射率变化剧烈的物体都有较好的三维恢复效果. 由于冗余编码方法中相邻两个编码单元的码值相同, 所以其校验功能更强, 如果结合其他代码校验方法对解码结果进行校验和纠错, 可以得到更多的数据点, 三维形貌重构结果会更好.

参考文献

- [1] BLAIS F. Review of 20 years of range sensor development[J]. *J Elect Imag*, 2004, **13**(1): 231-240.
- [2] SONG Wan-zhong, SU Xian-yu. 3D object recognition based on structured light projection[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 1999, **10**(1): 59-62.
宋万忠, 苏显渝. 基于结构光投影的三维物体识别[J]. *光子学报*, 1999, **10**(1): 59-62.
- [3] ZHANG Qi-can, SU Xian-yu. High-speed optical measurement for the drumhead vibration[J]. *Opt Express*, 2005, **13**(8): 3110-3116.
- [4] WANG Hui, LI Yong, JIN Hong-zhen, *et al.* Visualization using computer-generated hologram (CGH) based on three-dimensional shape measurement data of object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 284-288.
王辉, 李勇, 金洪震, 等. 三维面形测量数据的计算全息可视化[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 284-288.
- [5] GAO Bo, WANG Jian, WANG Zhong-yi, *et al.* The curve-surface constructing method for tooth crown surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(6): 554-558.
高博, 王建, 王忠义, 等. 牙冠表面三维光学测量和重建方法[J]. *光子学报*, 2000, **29**(6): 554-558.
- [6] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt Eng*, 2000, **39**(1): 10-22.
- [7] WEI Yong-chao, SU Xian-yu. 3D object recognition based on vector angle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1862-1866.
魏永超, 苏显渝. 基于矢量夹角的三维物体识别[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 1862-1866.
- [8] DUAN Cun-li, CHEN Fang, QI Rui-li, *et al.* A new moiré stripe method of measuring 3-D object shapes [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1425-1428.
段存丽, 陈芳, 祁瑞利, 等. 利用莫尔条纹测量物体三维形貌新方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1425-1428.
- [9] 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.
- [10] LI Yong, CHEN Yun-fu, JIN Hong-zhen, *et al.* Binary Spatio-temporal encoded illumination for 3D imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 670-675.
李勇, 陈云富, 金洪震, 等. 三维成像中的二值时空编码照明方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 670-675.
- [11] LI Yong, SU Xian-yu, WU Qing-yang. Accurate phase-height mapping algorithm for PMP[J]. *J Mod Opt*, 2006, **53**(14): 1955 - 1964.

Redundancy Encoding Method for Three-dimensional Shape Measurement Based on Binary Spatio-temporal Encoded Illumination

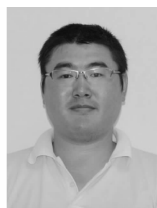
XUE Kang^{1,2}, LI Yong¹

(1 Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

(2 Department of Medical Physics, Inner Mongolia Medical College, Huhhot 010059, China)

Abstract: In three-dimensional shape measurement, some regions of the objects are unable to be decoded or decoded incorrectly, using binary spatio-temporal encoded illumination due to occlusion, shadow and low-pass filter characteristic of the optical systems etc. To mitigate the problem, a redundancy encoding method was proposed. Two adjacent sections were encoded with the same code and distinguished with their temporal coordinates. According to the redundancy encoding method, measurement results can be checked and some sections can be recovered from incomplete codewords during decoding. Compared with the original method, more valid points were obtained and the reliability of the decoding results were improved with proposed method, which presents more information for error correction.

Key words: Three-dimensional optical measurement; Spatio-temporal analysis; Redundancy encoding; Structured light illumination



XUE Kang was born in 1979. He is a M. S. degree candidate at Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, and his research interests focus on three-dimensional optical measurement.



LI Yong was born in 1972, and received the Ph. D. degree from Sichuan University in 2006. Now he is a professor and his research interests focus on optical information processing, optical 3D sensing and 3D display.