

基于格雷码-相移的双目三维测量方法研究

林 焕,马志峰,姚春海,王 昊

(北京理工大学信息与电子学院,北京 100081)

摘 要: 本文采用格雷码-相移组合的结构光,结合双目立体视觉技术,研究了三维表面测量方法.三维测量精度主要取决于格雷码-相移的解码精度,由于物体表面反射率不一致,不同区域又会相互反射,一般的阈值分割无法得到准确的二值化条纹图.因此在投射格雷码条纹图案基础上,再投射一组格雷码反码条纹图案.针对格雷码-相移解码过程中的周期错位问题,提出一种新的校正方法.将文中三维测量方法应用在人眼石膏模型的表面测量实验中,重建结果验证该方法的准确性和可靠性.

关键词: 三维测量; 结构光; 格雷码; 相移

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)01-0024-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.01.005

3D Measurement Technology Based on Binocular Vision Using a Combination of Gray Code and Phase-Shift Structured Light

LIN Huan, MA Zhi-feng, YAO Chun-hai, WANG Hao

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: 3D surface measurement using binocular stereo vision technology and a coded structured light which combines Gray code with phase-shift is studied in this paper. The accuracy of 3D measurement mainly depends on the decoding of Gray code views and phase-shift views. However, it is difficult to threshold Gray code views because of the different albedos on regions of surface and interreflections on the surface. Therefore, after projecting Gray code patterns, their inverses are projected. A new method is proposed to solve the problem of period dislocation between Gray code and phase-shift in course of decoding. The experiment of the surface measurement of a human eye plaster model is used to test our 3D measurement method, and reconstruction results show the accuracy and reliability of our method.

Key words: 3D measurement; structured light; gray code; phase-shift

1 引言

在非接触三维测量技术中,结构光三维测量方法具有快速、准确、造价低等优点被广泛应用于逆向工程(RE)、文物保护等领域^[1].该测量方法通过向被测物体表面投射面编码图案,并由一个或多个摄像机获取经过物体表面高度调制后的图像.因为投射的编码图案是事先编码好的,对拍摄图像解码后可以很容易获得不同视角之间的匹配点.对匹配点进行经典的三角测量法计算,就可确定物体表面采样点的三维坐标.这种方法大大缩短了测量时间,提高了测量效率^[2].

目前生成编码图案的方法多种多样,Joquim Salvi^[3]等对目前存在的编码方法做了总结,主要有时间编码、空间编码、直接编码.在时间编码中,格雷码相邻码值之

间只有一位不同,最多产生一位误码,抗干扰能力比二进制码强,而且编码简单健壮、范围大.但格雷码图案的最细条纹不能过细,至少应大于8个像素,否则会造成格雷码解码困难,致使采用格雷码测量分辨率低^[4].相移法适合测量小范围内表面连续的物体,分辨率高,但解码过程复杂、容易出错. Bergman^[5]等提出了格雷码-相移组合编码技术,依次向被测物投射格雷码条纹图案和相移图案,其中格雷码条纹图案中每一条纹确定的码值作为周期次数值,周期次数值粗分物体表面,相移图案再细分每一个周期次数值确定的区域.该方法综合格雷码和相移法各自的优点,可获得较大的测量范围和较高的分辨率.由于 Bergman 所采用的方法是基于单目系统,需要额外的投影仪标定,而投影仪标定比摄像机标定复杂,并且精度低.文献[6]在 Bergman 方法的基础

上,采用双目系统,只需要找到 2 个摄像机之间的匹配点,省去的投影仪标定过程,但两者都没有解决格雷码精确阈值分割和周期错位问题. Daniel Scharsterin^[7]等在研究高精度视差图求解方法时,认为导致格雷码阈值分割不准确的原因是物体表面反射率不一致,不同区域又存在相互反射.因此在投射格雷码条纹图案基础上,再投射一组格雷码反码条纹图案.于晓洋^[8]等对周期错位现象采用了简单的校正方法,但只进行了 3dsMAX 环境下的仿真模型的重构实验,没有讨论实际场景下的应用.

作者综合前人的研究成果,采用格雷码-相移组合结构光,结合双目立体视觉技术,提出了一种新的周期错位校正方法.对人眼石膏模型进行了三维表面测量实验,三维表面重建结果验证了这种方法的可靠性和准确性.

2 格雷码-相移组合的编码方法

本文研究的三维表面测量方法基于格雷码和相移编码方法.

首先由 DLP 投影仪向被测物先投射 6 幅格雷码黑白条纹图案,如图 1(a)为 6 幅格雷码条纹图案,两个数字摄像机采集经过被测物体高度调制的变形条纹,图 2 左边图像序列显示了左边摄像头拍摄的图像.将黑色条纹覆盖的区域标记为 0,将白色条纹覆盖的区域标记为 1,共投射了 6 幅格雷码条纹图案,将测量范围标记为 000000 ~ 111111,为 2^6 个区段.格雷码解码后,每个区段可获得大小在 0 ~ 63 的周期次数值 k .

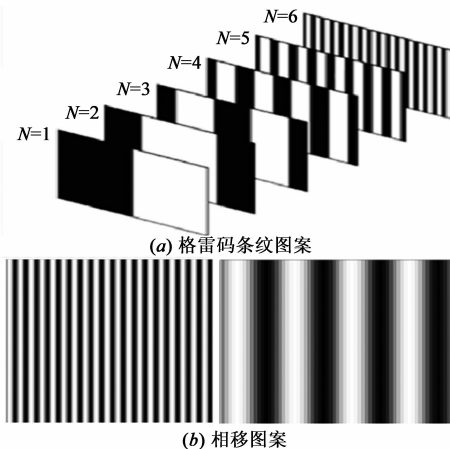


图 1

上述过程为格雷码编码方法,格雷码-相移组合编码方法在此基础上增加相移法.本文采用四步相移法^[9],即将投射的相移图案在与其垂直的方向上依次平移 1/4 周期.如图 1(b)左侧为其中一幅相移图案,图 1(b)右侧为相移图案的局部放大图,相移图像中每个条纹的灰度值按余弦变化.

由 DLP 投影仪逐次投射 4 幅相移图案,两个摄像机按顺序拍摄 4 幅经物体表面高度调制的图像,图 2 右边图像序列显示了其中左边摄像头拍摄的图像.相移图案的条纹格雷码图案最细条纹相同,在同一周期内格雷码图案的灰度值是相同的,相移图案的灰度值是连续按余弦变化,故相移图案能对格雷码分割的区段再细分.相移图像序列解码后,每个经格雷码图像序列标记的区段内的点可获得 $[-\pi, \pi]$ 区间内的相位主值.将周期次数值 k 和相位主值结合,被测范围内的每个点可由一个绝对相位值表示,这个过程称为解相位.

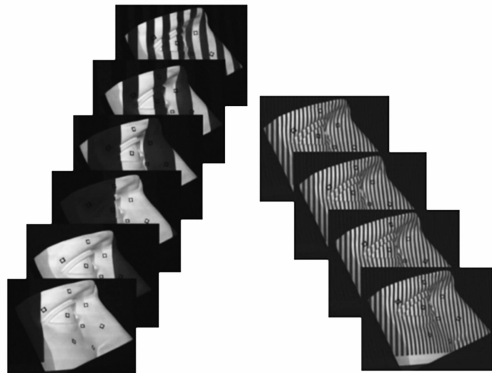


图 2 格雷码和相移图像序列

3 解相位

解相位过程分为:格雷码解码,获取物体表面采样点周期次数值 k ;相移图像序列解码,获取物体表面相位主值 θ .结合采样点的周期次数值 k 和相位主值 θ ,求得采样点的绝对相位 Ψ .

3.1 格雷码图像阈值分割

格雷码解码,即将被测物物体表面标记的格雷码转化为二进制码,然后转化为十进制编码,其中格雷码图像阈值分割是该过程的关键.常用的阈值分割方法有固定阈值分割,自适应阈值分割等.由于物体表面对结构光反射率不一致,不同区域又存在相互反射,无论采用哪种阈值分割方法,容易出现分割错误,特别是在格雷码变化的边界部分.

图 3(a)左侧为固定阈值分割其中一幅格雷码图像.图中圈‘1’部分为人眼石膏模型凹陷部分,被凸出部分的阴影覆盖,导致分割错误.图中圈‘2’部分为石膏模型表面黏贴的黑色方形中空标识物,受标识物本身颜色的影响,使得被标识物覆盖的区域无法解码.

结构光三维表面测量方法是建立上正确解码的基础上,如果格雷码图像阈值分割不准确,将导致求解的三维点坐标错误.本文采用 Daniel Scharsterin^[7]的方法,先向物体表面投射一组格雷码条纹图案,对这组格雷码取反,再次投射物体表面,结合两组格雷码图像序列,抵消因反射率不一致和不同区域相互反射的影响,

排除物体原有纹理色彩的干扰. Daniel Scharsterin 的方法采用双阈值分割方法. 本文简化 Daniel Scharsterin 的方法, 直接比较采样点在格雷码图像中的灰度值与其反码图像的灰度值. 设采样点 $P(x, y)$ 为物体表面 (x, y) 处的灰度值, $P_+(x, y)$ 为采样点在格雷码图像中的灰度值, $P_-(x, y)$ 为采样点在格雷码反码图像中的灰度值. 若 $P_+(x, y) > P_-(x, y)$, 则标识采样点为 1, 反之则为 0. 该方法分割其中一幅格雷码图像的效果图如图 (a) 右侧所示. 格雷码解码后的强度图如图 3 所示, 图 3(b) 为格雷码解码后的强度图, 图 3(c) 为图 3(b) 线型部分的放大图. 格雷码解码后能够得到准确的周期次数值 k , 但投射的条纹数量有限, 对于高精度测量, 需要获得更多的编码值.

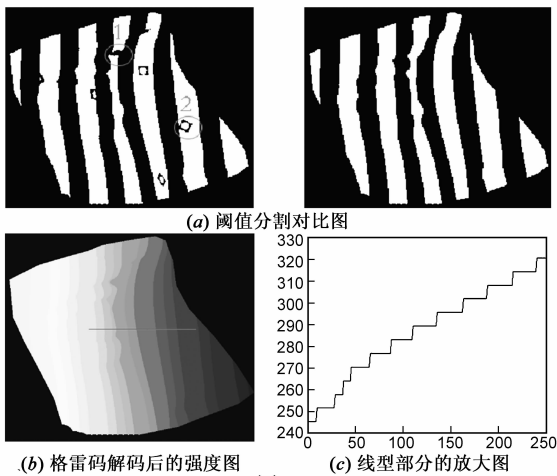


图3

3.2 相位主值求解

解相位的第二步是通过相移法公式获得条纹图的相位主值, 本文采用四步相移法^[9], 即将投射的相移图案在与其垂直的方向上依次平移 $1/4$ 周期. 图 1(b) 中的曲线变化表示了其中一幅相移图案灰度值的变化情况, 各图可表示为:

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\theta(x, y)] \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\theta(x, y) + \pi/2] \quad (2)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\theta(x, y) + \pi] \quad (3)$$

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\theta(x, y) + 3\pi/2] \quad (4)$$

式中, $I_i(x, y)$ 为第 i 幅相移图像的灰度值, $I'(x, y)$ 为条纹光强的背景值, $I''(x, y)$ 为调制强度, $\theta(x, y)$ 为待求主相位值.

由式(1)~(4)得

$$\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} = \frac{\sin[\theta(x, y)]}{\sin[\theta(x, y) + \pi/2]} = \tan[\theta(x, y)] \quad (5)$$

对式(5)取反正切函数, 可得到相位主值:

$$\theta(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} - \pi \leq \theta \leq \pi \quad (6)$$

主相位的求取过程是将图像采样点在 4 幅强度图像中对应的灰度值 I_1, I_2, I_3, I_4 代入相位式(6), 求取该采样点的主相位 θ , 根据强度图像中对应灰度值的变化规律和反正切函数性质知, θ 在 $[-\pi, \pi]$ 之间周期变化.

将得到主相位值 θ 与周期次数值 k 进行叠加, 最终获得每个采样点的独立相位值, 称为绝对相位, 式(7)为绝对相位的计算公式.

$$\Psi(x, y) = -2k\pi + \theta(x, y) \quad (7)$$

式中, $\Psi(x, y)$ 为绝对相位; k 为周期次数值; $\theta(x, y)$ 为主相位值.

解相位后但没有校正周期错位的强度图如图 4(a) 所示, 图 4(b) 为 (a) 中线型部分放大图.

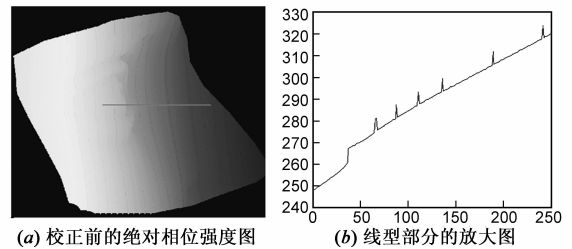


图4

3.3 周期错位的校正

理想条件下, 格雷码最细条纹和相移图案条纹宽度应保持一致, 周期次数值 k 的增加同相位主值 θ 的突变也相吻合, 绝对相位图应该是单调增加的. 但是, 由于图像的采集噪声、环境光、格雷码解码和求解相位主值时的误差, 使得周期次数值突变的地方同相位主值突变的地方会有一些的偏差. 例如, 相移法解得某一像素点 $P(x, y)$ 的相对相位为 π , 其临近点 $P(x+1, y)$ 的相对相位为 $-\pi$, 但是它们的周期次数值没有在此处增加 $k(x+1, y) - k(x, y) \neq 1$, 出现了超前或滞后的情况. 这样在主相位值和周期次数值相结合所得绝对相位, 就会出现突变现象, 如图 4(b) 的突起部分, 这种现象称为周期错位. 周期错位校正是格雷码-相移编码技术的一个关键点.

针对这个问题, 作者提出了一种新的周期错位校正方法. 由于投射了两组格雷码条纹图案, 可以精度将物体表面分割成若干区段 (如图 5(a)), 每个区段中的周期次数值 k 相同. 投射相移图案是在格雷码条纹图案分割的基础上再细分, 在每条最细格雷码条纹区域中, 主相位值在 $[-\pi, \pi]$ 范围内递增. 如图 5(b), S 点和 P 点分布在两个区段交界处两侧, 理想条件下 S 点到 P 点主相位值会发生突变, 若满足以下三个条件之一, $\theta_S(x, y) < \theta_P(x, y)$, $\theta_S(x, y) < 0$, $\theta_P(x, y) > 0$ 则认为出现周期错位, S 点的主相位值 $\theta_S(x, y)$ 由 S 点左侧点

主相位值插值求解, P 点的主相位值 $\theta_p(x, y)$ 由 P 点右侧点的主相位值插值求解.

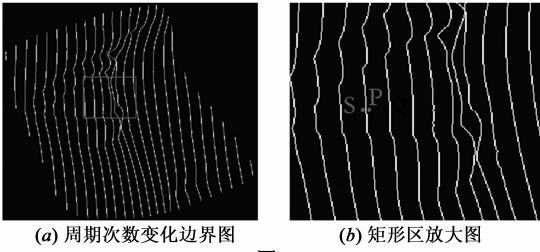


图5

如图 6(a) 为周期错位校正后的相位强度图, 图(b) 为(a)中线型部分的放大图.

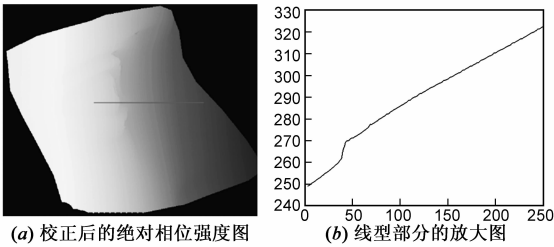


图6

4 求解三维坐标

求解采样点三维坐标点第一步为不同视角的点匹配. 如图 7(a) 为左摄像机拍摄的图像, 图 7(b) 为右摄像机拍摄的图像. P 点为(a)图中已知待匹配点, 根据双目视觉的极线约束条件, P 点的匹配点 Q 一定在另一幅图像中 P 点所对应的极线上, 即(b)图中直线 AB , 而且极线仅有一条. 经过上文的解相位步骤已知 P 的绝对相位和极线 AB 上各点的绝对相位. 由于极线 AB 上各点的绝对相位是单调增加的, 又匹配点的绝对相位相等, 采用二分查找法可快速确定匹配点 Q 的位置.

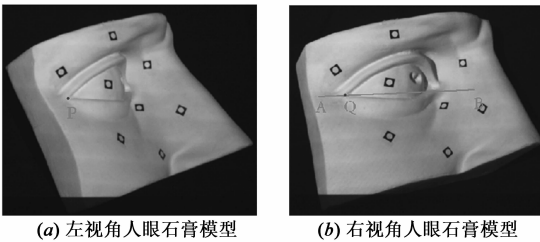


图7

求解三维坐标的第二步为三角测量法. 已知匹配点 P 和 Q 的二维像素坐标分别为 (u_1, v_1) 和 (u_2, v_2) , 左右摄像机的成像公式为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = s_1 \times \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \\ m_{41}^1 & m_{42}^1 & m_{43}^1 & m_{44}^1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = s_2 \times \begin{bmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 & m_{13}^2 & m_{14}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 & m_{23}^2 & m_{24}^2 \\ m_{31}^2 & m_{32}^2 & m_{33}^2 & m_{34}^2 \\ m_{41}^2 & m_{42}^2 & m_{43}^2 & m_{44}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, s_1, s_2 为比例因子, $m_{11}^1 \sim m_{44}^1$ 和 $m_{11}^2 \sim m_{44}^2$ 为两个摄像机成像变化矩阵.

在两个成像公式中分别消去 s_1 和 s_2 , 得到方程:

$$\begin{bmatrix} u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1 & u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1 & u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1 \\ v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1 & v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1 & v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1 \\ u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2 & u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2 & u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2 \\ v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2 & v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2 & v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

解方程可得 P 的空间三维坐标 (x_w, y_w, z_w) .

5 实验

为验证文中的三维测量方法, 作者搭建了格雷码-相移组合的结构光双目测量系统. 该系统由(a)标定板、(b)人眼石膏模型、(c)投影仪、(d)摄像机和(e)计算机, 如图 8 所示. 首先由两个摄像机拍摄包含标定板的图像, 完成摄像机标定过程. 然后由计算机控制投影仪投射格雷码-相移组合结构光图案, 同时控制两个摄像采集相应的图像序列. 最后用上述步骤处理这些图像序列, 输出被测物表面三维点云数据, 整个过程都由计算控制.

运用本文的方法对人眼石膏模型进行测量实验, 图 9(a) 和图 9(b) 是 $200 \times 250 \times 12 \text{mm}^3$ 石膏人眼模型的三维表面重建结果. 图 9(a) 为对 2 个不同视角的人眼石膏模型进行扫描拼接后 3D 点云, 以 WRL 文件形式输出, 图 9(b) 是将三维点云数据在 Geomagic 中三角化后得到的曲面模型.

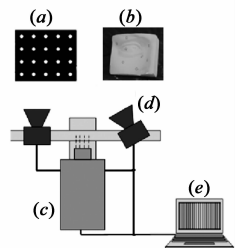


图8 系统结构图

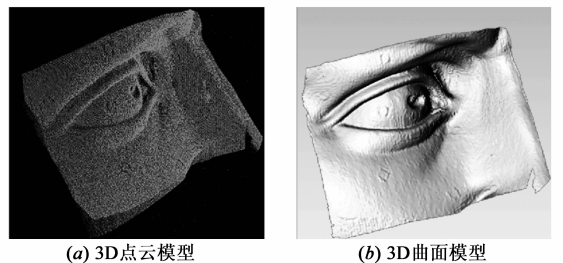


图9

如图 9 的重建结果所示,在石膏模型表面光照不均匀的地方如眼眶凹陷处,被黑色中空标识物覆盖的地方仍能够被重建,验证了格雷码图像阈值分割的准确性.重建模型的表面光滑,没有出现周期错位的情况.

6 结论

三维表面测量技术在逆向工程、文物保护等方面起着重要作用,基于结构光的非接触测量是实现该技术的重要手段之一.本文的方法在前人的研究基础上,采用双目立体视觉技术,选择格雷码-相移组合的结构光.通过向投射物体表面两组格雷码条纹图案,提高格雷码阈值分割精度,对周期错位现象,提出了一种新的校正方法.将文中三维测量方法应用到实际场景中,对人眼石膏模型进行测量,得到物体表面重建三维效果图.作者未来工作旨在进一步提高测量精度,完成表面纹理映射,和 CAD/CAM 系统互联.

参考文献

- [1] 邱兆文,张田文.文物三维重建关键技术[J].电子学报,2008,36(12):2424-2427.
QIU Zhao-wen, ZHANG Tian-wen. Key techniques on cultural relic 3D reconstruction [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12):2424-2427. (in Chinese)
- [2] Joaquim Salvi. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4):827-849.
- [3] J Pagès, J Salvi, R García, C. Matabosch. Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling[A]. International Conference on Robotic and Automation (ICRA) [C]. Rosten, VA, USA; IEEE, 2003. 133-138.
- [4] Ming-June Tsai, Chuan-Cheng Hung. Development of a high-precision surface metrology system using structured light projection[J]. Measurement, 2005, 38(3):236-247.
- [5] D Bergmann. New approach for automatic surface reconstruction with coded light[J]. Proc SPIE, 1995, 2572:2-9.

- [6] Lijun Li, Yingjie Ke, Kaiyong jing. Surface reconstruction based on computer stereo vision using structured light projection[A]. International Conference on Intelligent Human-Machine System and Cybernetics [C]. Rosten, VA, USA: IEEE, 2009. 451-454.
- [7] Daniel Scharstein, Richard Szeliski. High-accuracy stereo depth maps using structured Light [A]. IEEE Computer Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) [C]. Rosten, VA, USA: IEEE Press, 2003. 195-202.
- [8] 于晓洋,吴海滨,尹丽萍,杨明极.格雷码与相移结合的结构光三维测量技术[J].仪器仪表学报,2007,28(12):5-11.
YU Xiao-yang, WU Hai-bin, YIN Li-ping, YANG Ming-ji. 3D measurement technology based on structured light by combining Gray code with phase-shift [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2007, 28(12):5-11. (in Chinese)
- [9] Georg Wiora. High resolution measurement of phase shift amplitude and numeric object phase calculation [J]. Proc SPIE, 2000, 4117:289-299.

作者简介



林 焕 男,1988 年 12 月出生于浙江瑞安.北京理工大学电路工程系硕士研究生,2010 年毕业于北京理工大学机电工程系获工学学士学位.现主要从事立体视觉及三维表面测量技术研究.

E-mail: lin65505578@hotmail.com



马志峰 男,1973 年 3 月出生于山西省祁县.2005 年毕业于北京理工大学信息与电子学院信号处理专业获博士学位,讲师.主要研究方向为立体视觉及三维表面测量,主要有硬件电路设计、FPGA 设计、DSP 的硬件和软件的设计.

E-mail: mazhifeng@bit.edu.cn