

文章编号 1004-924X(2010)11-2497-08

彩色梯度相移与格雷码相结合的三维测量方法

单鹂娜,于晓洋,于 双,吴海滨,陈德运

(哈尔滨理工大学 测控技术与仪器黑龙江省高校重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:为了实现高分辨率快速非接触式三维测量,将彩色梯度相移法与格雷码相结合,提出了三维测量算法。将一幅彩色梯形三步相移图案和两幅彩色格雷码图案相结合,对测量空间进行编解码;通过两幅彩色格雷码图案将测量空间可靠地分成 64 个子空间,通过一幅重复彩色梯形三步相移图案将每个子空间分成 6 个区域,每个区域再通过强度比细分到像素级。给出了编码图案和解码公式,组建了彩色结构光三维测量系统,并分别采用彩色梯形相移法和本文提出的方法对深度为 700~950 nm 的平面进行了仿真和实际测量。理论分析、仿真与实际测量结果表明,得到的测量平均误差 <0.9 mm,测量标准差 <1.2 mm。最后,采用本文方法对石膏和人体进行了测量实验,结果显示该方法具有抗干扰能力强、运算速度快的优点。

关键词:彩色梯形相移;格雷码;强度比;三维测量

中图分类号:TP391;TB92 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101811.2497

Three dimensional measurement method combining color trapezoidal phase-shifting with color gray code

SHAN Li-na, YU Xiao-yang, YU Shuang, WU Hai-bin, CHEN De-yun

(Higher Educational Key Laboratory for Measuring & Control Technology and Instrumentation of Heilongjiang Province, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: By combining the color trapezoidal phase-shifting with the Gray code, a color structured light three-dimensional measurement method was presented to achieve a fast high-resolution non-contact 3D measurement. In the measurement, the measured space was encoded and decoded by combining a color trapezoidal three-step phase-shifting pattern with two color gray code patterns. The measured space was divided into 64 sub-spaces by two color gray code patterns. Then, the each sub-space was divided into 6 regions by a repeat color trapezoidal three-step phase-shifting pattern, and each region was subdivided into the pixel through the intensity ratio. The encoding patterns and the decoding formulas were provided, and the color structured-light three-dimensional measurement system was set up. Furthermore, the planes with the depth of 700~950 mm were measured by the proposed method and a color trapezoidal phase-shifting method, respectively. The theoretical analysis, simulation and actual measurement results indicate that the measurement average error of planes is less than 0.9 mm and the measurement standard deviation is less than 1.2 mm. Finally the proposed method was also

收稿日期:2010-02-10;修订日期:2010-05-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60572030);哈尔滨市重点科技攻关项目(No. 2005AA1CG152);哈尔滨理工大学优秀学科带头人资助项目

used in measuring the plaster face and a real hand, and the results show that this method has advantages in a strong anti-interference ability and fast computing speed.

Key words: color trapezoidal phase-shifting; gray code; intensity ratio; three-dimensional measurement

1 引言

结构光三维测量方法^[1-2]以其测量速度快、自动化程度高、造价较低等优点被广泛应用于 CAD、CAM、逆向工程(RE)、快速原形(RP)等领域。相比投射点、线光束的结构光扫描法,面结构光方法向被测物表面投射二维编码图案,无需扫描,因而大大提高了测量速度,简化了测量装置。

面结构光编码方法分为时间编码^[3]、空间编码^[4]和直接编码^[5]。其中,空间编码和直接编码虽然测量速度快但存在采样密度和测量准确度低的缺点;时间编码测量速度较低但采样密度和测量准确度较高。属于时间编码的传统正弦相移法^[6]具有分辨率高的优点,但其相位计算阶段涉及一个耗时的反正切函数,处理速度慢,且抗干扰能力差。

本文将彩色梯形相移法^[7]和彩色格雷码结合起来进行三维测量,前者通过算术运算替代正弦

相移法中的反正切函数运算来提高测量速度,同时具有正弦相移法分辨率高的优点,而且对图像离焦不敏感;后者将测量空间划分为多个周期,在每个周期重复采用彩色梯形相移法,显著地提高了抗干扰能力;另外,采用 $R, G, B3$ 个颜色通道形成三步相移图案和二灰度级格雷码图案,与采用灰度编码相比图像数量减少了 $2/3$, 具有更高的测量速度。

2 彩色梯形相移法

该方法首先向被测物投射一幅如图 1 所示的彩色梯形相移条纹图案,其中 $R, G, B3$ 个通道投射的垂直条纹在水平方向上相互差 $2\pi/3$ 。彩色梯形相移图案各行像素重复排列,其中任意一行的 $R, G, B3$ 个通道沿行方向的强度变化如图 2 所示, $R, G, B3$ 个通道强度信号 $I_R(x, y), I_G(x, y)$ 和 $I_B(x, y)$ 为同样的梯形,相差 $1/3$ 节距即 $2\pi/3$ 相位,其表达式如下:

$$I_R(x, y) = \begin{cases} I'(x, y) + I''(x, y)(6x/T) & x \in [0, T/6) \\ I'(x, y) + I''(x, y) & x \in [T/6, T/2) \\ I'(x, y) + I''(x, y)(4 - 6x/T) & x \in [T/2, 2T/3) \\ I'(x, y) & x \in [2T/3, T) \end{cases}, \quad (1)$$

$$I_G(x, y) = \begin{cases} I'(x, y) & x \in [0, T/3) \\ I'(x, y) + I''(x, y)(6x/T - 2) & x \in [T/3, T/2) \\ I'(x, y) + I''(x, y) & x \in [T/2, 5T/6) \\ I'(x, y)(6 - 6x/T) & x \in [5T/6, T) \end{cases}, \quad (2)$$

$$I_B(x, y) = \begin{cases} I'(x, y) + I''(x, y) & x \in [0, T/6) \\ I'(x, y) + I''(x, y)(2 - 6x/T) & x \in [T/6, T/3) \\ I'(x, y) & x \in [T/3, 2T/3) \\ I'(x, y) + I''(x, y)(6x/T - 4) & x \in [2T/3, 5T/6) \\ I'(x, y) + I''(x, y) & x \in [5T/6, T) \end{cases}. \quad (3)$$

式中 $I''(x, y) = I_0(x, y) - I'(x, y)$, $I'(x, y)$ 和 $I_0(x, y)$ 分别是梯形亦即点 (x, y) 处的最小强度和最大强度, T 是图案行方向的节距。

定义像素点 (x, y) 的区域强度比 $r_N(x, y)$ 如下

$$r_N(x, y) = \frac{I_i(x, y) - I_0(x, y)}{I'(x, y) - I_0(x, y)} \quad i=1, 2, 3, \quad (4)$$

式中 $I_i(x, y)$ 是 R, G, B 通道信号的强度中值,根据像素点 (x, y) 所在的区域, N 按公式(1)或(2)

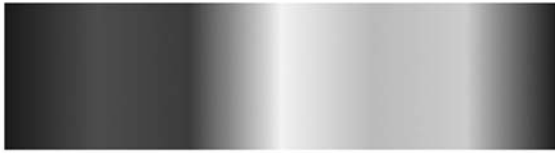


图 1 彩色梯形相移编码图案

Fig. 1 Color trapezoidal phase-shifting encoding pattern

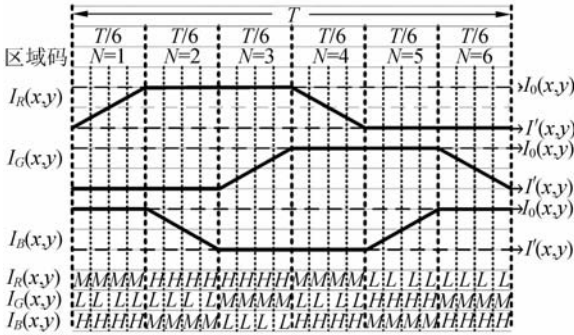


图 2 彩色梯形相移 R,G,B 强度曲线

Fig. 2 Color trapezoidal phase-shifting R,G,B intensity curves

或(3)中 $I_i(x, y)$ ($i=R, G, B$) 变化曲线进行计算,其波形如图 3 所示。

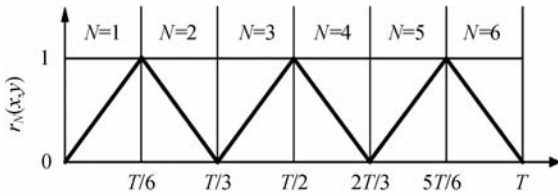


图 3 区域强度比曲线

Fig. 3 Curve of region intensity-ratio

显然,在每个 $T/6$ 的区域 N 内,区域强度比可以唯一地表征像素点 (x, y) 的位置,但对于同一个强度比需要区分其所在的区域 N 。根据图 2 所示,彩色梯形三步相移编码图案将节距 T 区域分为 6 个等距区域 $N(N=1, 2, 3, 4, 5, 6)$,每个像素的 R, G, B 强度均可分别获得高(H)、中(M)、低(L)3 个不同的数值,通过比较每个像素点在 3 个颜色通道的强度值按表 1 规则即可识别不同的区域 N 。根据上述原理,采用如下公式得到强度比

$$r(x, y) = 2 \times \text{round}\left(\frac{N-1}{2}\right) + (-1)^{N+1} \frac{I_i(x, y) - I_0(x, y)}{I'(x, y) - I_0(x, y)} \quad (5)$$

强度比 $r(x, y)$ 波形如图 4 所示,它唯一地表征了像素 (x, y) 在整个节距 T 中的位置。

表 1 区域 N 识别规则

Tab. 1 Recognition rule of region N

| | $N=1$ | $N=2$ | $N=3$ | $N=4$ | $N=5$ | $N=6$ |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $I_R(x, y)$ | M | H | H | M | L | L |
| $I_G(x, y)$ | L | L | M | L | H | M |
| $I_B(x, y)$ | H | M | L | H | M | H |

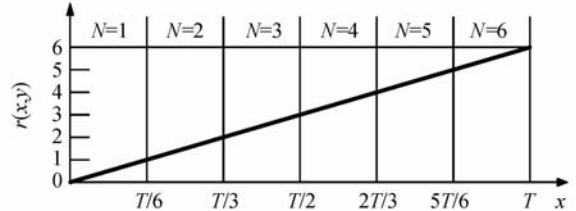


图 4 强度比曲线

Fig. 4 Curve of intensity-ratio

深度信息可从强度比中得到^[8]。首先,将强度比转换为编码图案中该像素位置在水平面上的投影相对水平面上投射器中心线的投射角。图 5 所示为采样点的强度比空间和投射角空间的对应关系,编码图案投射器的投射角为 $2\alpha_1$,投射器中心线与 x 轴的夹角为 α_0 ,一幅彩色梯形相移图案强度比的空间为 $0 \sim 6$,投射角的空间为 $(\alpha_0 + \alpha_1) \sim (\alpha_0 - \alpha_1)$ 。图 5 中, A, B, C, D, E, F, G 为编码图案中每个区域 N 垂直边界在水平面上的投影线, $AB=BC=CD=DE=EF=FG$ 。那么,将像素 (x, y) 强度比转换为其在水平面上投射角 $\alpha(x, y)$ 的公式为

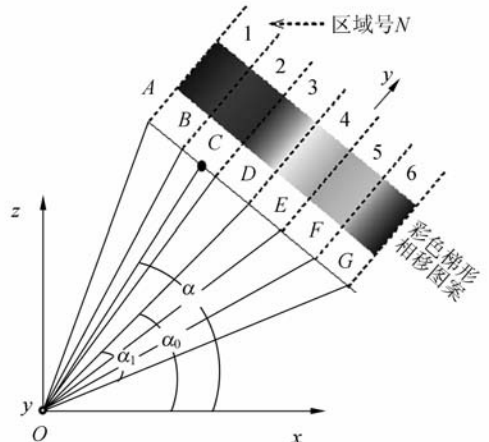


图 5 强度比与投射角的转换关系

Fig. 5 Transform between intensity-ratio and projecting angle

4 实验结果与分析

依据本文方法组成的测量系统及其工作原理如图 9 所示,其组成包括数字投影仪(MITSUBISHI XD300U)、3CCD 摄像机(HITACHIHF22)等。其工作原理是首先由投影仪按时间顺序向被测物投射一组编码图案,每投射一幅图案,都由摄像机拍摄图像,然后传入计算机进行处理,计算出被测物表面的三维坐标,进而用重构软件进行三维表面重构。图中省略了彩色格雷码图案及其图像与处理。

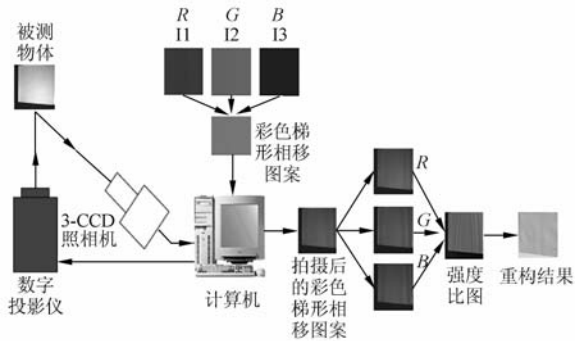


图 9 测量系统组成与工作原理

Fig. 9 Build-up of measuring system and its working principle

分别采用彩色梯形相移法(方法 I)和彩色梯度相移与格雷码相结合法(方法 II)对深度值为 700,750,800,850,900,950 mm 的平面进行了仿真测量和实际测量。实际测量系统如图 10 所示。

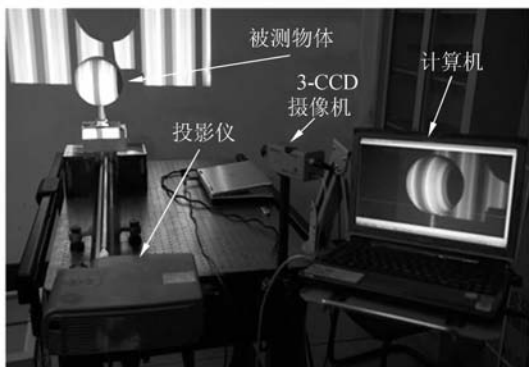


图 10 测量系统装置

Fig. 10 Measurement system

平面仿真测量实验结果如表 2,方法 II 的测量误差约为方法 I 测量误差的 1/3;采用方法 II 的平面实际测量实验结果如表 3,其测量平均误差 < 0.9 mm,而采用方法 I 的平面实际测量平均误差 > 5 mm,因为方法 I 实际测量时在识别区域 N 时就开始出现错误。

表 2 平面仿真测量结果 (mm)

Tab. 2 Results of plane emulation measurement

| 平面深度 | 方法 | 测量平均值 | 最大测量误差 |
|------|----|-----------|---------|
| 700 | I | 700.097 6 | 0.318 9 |
| | II | 699.902 2 | 0.050 7 |
| 750 | I | 750.127 3 | 0.490 3 |
| | II | 749.871 6 | 0.126 1 |
| 800 | I | 800.102 8 | 0.619 1 |
| | II | 799.836 1 | 0.176 7 |
| 850 | I | 850.202 2 | 0.611 0 |
| | II | 849.796 1 | 0.204 8 |
| 900 | I | 900.244 2 | 0.760 1 |
| | II | 899.754 8 | 0.370 1 |
| 950 | I | 950.289 9 | 0.823 9 |
| | II | 949.709 4 | 0.288 4 |

表 3 采用方法 II 的平面实际测量结果 (mm)

Tab. 3 Results of plane measurement with method II

| 平面深度 | 测量平均值 | 平均误差 | 测量标准差 |
|------|-----------|---------|---------|
| 700 | 699.529 8 | 0.393 2 | 0.493 2 |
| 750 | 749.875 4 | 0.453 8 | 0.569 9 |
| 800 | 799.913 4 | 0.500 8 | 0.610 3 |
| 850 | 849.964 5 | 0.631 7 | 0.776 4 |
| 900 | 900.581 4 | 0.823 1 | 1.015 9 |
| 950 | 950.376 5 | 0.872 7 | 1.114 7 |

通过实验分析,测量误差主要是由环境光以及投影仪的伽马曲线是非线性引起的。此外,彩色梯形相移法与传统正弦相移法的对比实验结果表明,前者利用反正切运算求取相位过程用时 3.468 s,后者利用算数运算求取强度比过程用时 0.375 s,本文方法运算速度明显优于传统正弦相移方法。

采用本文方法对石膏像和人体进行了测量实

验,人脸石膏像及其测量结果如图 11 所示,人手及其测量结果如图 12 所示。



(a) 人脸石膏像正面
(a) Positive face of plaster



(b) 正面测量结果
(b) Measurement result



(c) 人脸石膏像侧面
(c) Side face of plaster



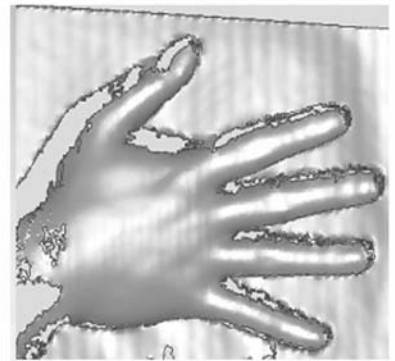
(d) 侧面测量结果
(d) Measurement result

图 11 人脸石膏像及其测量结果

Fig. 11 Face plaster and its measurement results



(a) 人手
(a) Hand



(b) 人手测量结果
(b) Measurement result

图 12 人手及其测量结果

Fig. 12 Hand and its measurement result

5 结 论

本文将彩色梯形相移法与彩色格雷码结合起来进行三维测量,组建了三维测量系统。理论分

析和仿真与实际测量实验结果表明:本文方法显著提高了彩色梯形相移法的抗干扰能力,其运算速度明显高于正弦相移法,深度为 700~950 mm 的平面测量平均误差 <0.9 mm,测量标准差 <1.2 mm,并能完成人脸等景物的三维测量。

参考文献:

- [1] SALV I J. Pattern codification strategies in structured light systems [J]. *Pattern Recognition*, 2004,37:827-849.
- [2] 于晓洋,赫佳峦,黄明,等. 应用彩色图像的结构光重构三维表面颜色渲染[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10):2561-2568.
YU X Y, HE J L, HUANG M, *et al.*. Colouring of 3D-reconstructed surfaces of structure light based on coloured images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(10):2561-2568. (in Chinese)
- [3] 吴海滨,于晓洋,关丛荣. 基于灰度曲线交点的结构光编码条纹边缘检测[J]. *光学学报*, 2008, 28(6): 1085-1090.
WU H B, YU X Y, GUAN C R. Structured light encoding stripe edge detect ion based on grey curve intersecting point[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008,28 (6):1085-1090. (in Chinese)
- [4] 刘晨,金施群,费业泰,等. 应用空间编码投影法测量三维大物体面形[J]. *光学精密工程*, 2008,16 (11):2268-2273.
LIU CH, JIN SH Q, FEI Y T, *et al.*. Shape measurement of 3D large object by space code projection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11): 2268-2273. (in Chinese)
- [5] ZHANG S. 3D surface data acquisition [D]. Department of Mechanical Engineering, SUNY at Stony Brook, 2003:2-5.
- [6] JIA P, JONATHAN K, CHAD E. Two-step triangular-pattern phase-shifting method for three-dimensional object-shape measurement [J]. *Optical Engineering*, 2007,46(8):083201.
- [7] HUANG P S, ZHANG S, CHIANG F P. Trapezoidal phase-shifting method for 3-D shape measurement two- and three-dimensional vision systems for inspection [J]. *Control, and Metrology II*, 2004: 142-152.
- [8] ZHANG S, YAU S T. High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase shifting method[J]. *Opt. Express*, 2006,14 (7):2644-2649. (in Chinese)
- [9] 李杰. 基于激光三角法检测轮胎表面形貌[D]. 长春:长春理工大学,2009:13-15.
LI J. *Detecting tire tread morphology based on laser triangulation*[D]. Changchun:Changchun University of Science and Technology, 2009:13-15. (in Chinese)
- [10] 冀然. 格雷码结构光 3D 视觉技术及其仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2006:12-13.
JI R. *Gray code structure light 3D vision technology and simulation*[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology, 2006:12-13. (in Chinese)

作者简介:



单鹂娜(1976—),女,山东淄博人,博士,副教授,1999年、2005年、2010年于哈尔滨理工大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事三维视觉检测的研究。E-mail: shanlina@ hrbust. edu. cn



于晓洋(1962—),男,黑龙江双城人,博士后,教授,博士生导师,1984年于哈尔滨电工学院获学士学位,1989年、1998年于哈尔滨工业大学分别获得硕士和博士学位,主要从事三维视觉检测和光电检测的研究。E-mail: yuxiaoyang@ hrbust. edu. cn



于 双(1984—),男,黑龙江双城人,硕士研究生,2007 年于哈尔滨理工大学获得学士学位,主要从事三维视觉检测及机器视觉检测的研究。E-mail: yushuang888888@yahoo.com.cn



陈德运(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,主要从事探测与成像技术,图像处理和检测技术与信号处理的研究。E-mail: chendeyun@hrbust.edu.cn



吴海滨(1977—),男,江苏南通人,博士,副教授,2000 年、2002 年于哈尔滨工业大学分别获得学士和硕士学位,2008 年于哈尔滨理工大学获得博士学位,主要研究方向为图像传感。E-mail: woo@hrbust.edu.cn

● 下期预告

采用区域分割的变尺寸样本块高效图像修复方法

刘 洋¹, 王昊京^{2,3}, 田小建¹, 阴玉梅²

(1. 吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

对于已有的基于样本块的图像修复算法,采用全局搜索最佳匹配样本块时效率低,而且易出现错误匹配块而致修复结果不理想的问题。本文分析了影响算法效率和质量的因素,提出采用在收缩的待修复图像中预分割出相似区域,结合变尺寸样本块进行图像修复的方法。首先采用双线性收缩的方法获得尺寸是待修复图像 0.02~0.25 倍的收缩图像,并在收缩图像中分割出预选区域作为源区域,使用自适应窗口尺寸调整规则确定修复窗口大小,然后在预选区域中搜索最佳匹配修复块对图像进行修复,对收缩图像中修复不完全的区域采用分割子图像的方法进行修复,最后将子图像填回到原始图像的修复区域,循环运行直到修复完毕。实验结果表明,使用区域分割预分割出相似区域,结合自适应窗口尺寸调整规则并采用子图像修复的方法,在效率上约为现有算法的 5~100 倍,有较好的修复效率和修复质量。