

三维重建的格雷码-相移光编码技术研究

崔海华 廖文和 程筱胜 戴 宁 郭美社 李长春

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 提出一种基于格雷码-相移的组合光编码技术, 以格雷码技术自身的误差不累加性优点保证了光编解码的稳健性, 针对格雷码对视场解析的有限性缺陷, 提出将格雷码部分作为编码的整数部分, 综合使用相移编码作为小数部分, 实现了视场空间的无级细分, 提高了编码的分辨率, 对编码技术中常见的两种错误, 使用提出的编码校正算法有效的减少了编码错误及重建误差的产生。试验结果表明这种光信号编码方法在三维测量中的有很高的稳健性。

关键词 三维测量; 光编码; 格雷码; 相移

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s2.0007

Research on Integration of Gray Code and Phase-shifting Coding Algorithm for 3D Shape Reconstruction

Cui Haihua Liao Wenhe Cheng Xiaosheng Dai Ning Guo Meishe Li Changchun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, NanJing University of Aeronautics

& Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016)

Abstract A novel combined coding technology of Gray and phase-shifting is proposed. This coding algorithm combines advantages of Gray code and phase-shifting code. At first, Gray code is used to avoid the accumulation of error code. Then, the Gray code and phase-shifting code are combined, they are respective as integral and decimal part of the combination code, a infinite space segments of the view space is divided by this intergration and a high coding resolution is achieved. Moreover, a code compensation algorithm is developed to overcome the usual two coding errors for acquiring a correct code. At last, the experiments show that this optical coding algorithm is effective and robust to three-dimansional reconstruction.

Key words three-dimensional measurement; optical code; Gray code; phase-shifting

1 引 言

三维物体轮廓重建技术以其广泛的应用性在计算机视觉领域中占有重要的地位。它广泛应用于工业零件的质量控制, 逆向工程, 三维物体识别, 3D地图生成等^[1]。三维轮廓重构技术的实现方法很多, 主动式的结构光法以其非接触、易实现和精度高等优点成为使用最为广泛的方法。结构光系统中, 光模式被投射到物体表面上, 光模式中的每一个像素点都被唯一的编了码值, 那么相机内的图像

点通过编码值与投影装置内该像素点对应起来, 起到了匹配的作用。光编码种类较多, 根据码值本身性质, 大体上分为时间编码, 空间编码, 直接编码等^[1]。时间编码包括二进制编码^[2], 格雷码^[3]等, 空间编码包括栅格编码^[4], 彩色条纹编码^[5]等, 直接编码包括灰度序列编码^[6], 彩虹编码^[7]等。

本文对格雷码-相移的组合光编码技术进行了研究, 该编码模式能提高三维测量中光信号编码的稳定性 and 分辨率, 保证解码的高稳健性。解决由于

基金项目: 教育部博士点基金(20070287055), 江苏省高新技术研究计划项目(DG2006035)和江苏省科技攻关(BE2005014)资助课题。

作者简介: 崔海华(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事逆向工程, 三维测量及机器视觉方面的研究。

E-mail: cuihh@nuaa.edu.cn

导师简介: 廖文和(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事 CAD/CAM, 制造信息化方面的研究。E-mail: cnwho@nuaa.edu.cn

物体复杂型面产生的断裂、不连续相位等问题。

2 基于光编码的三维测量原理

基于光编码的测量基本原理是以三角测量法为基础,测量过程中由计算机控制的数字光投影仪 DLP 投射格雷码和正弦光栅条纹,把测量空间分为无数唯一的编码区域,反射过来的编码光经相机采集、处理,得到物体坐标编码点,在投影仪、相机和被测物体之间建立了一个三角关系,从而能获取被测物体的表面数据^[8]。系统模型原理图如图 1。

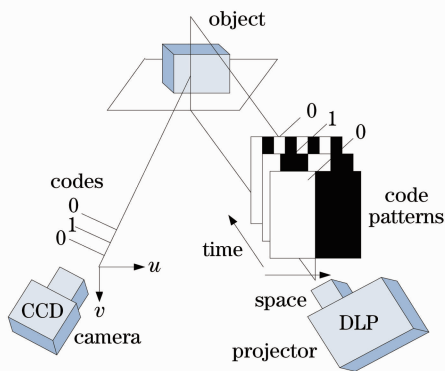


图 1 结构光测量系统模型

Fig. 1 Structured light measurement system

3 格雷码-相移组合光编码技术

3.1 格雷码编码

格雷码(Gray code),又叫循环二进制码或反射二进制码,是一种无权码,采用绝对编码方式,具有反射特性和循环特性的单步自补码,其中的所有相邻整数在它们的数字表示中只有一个数字不同。它在任意两个相邻的数之间转换时,只有一个数位发生变化,大大减少了由一个状态到下一个状态时逻辑的混淆。Inokuchi^[9]等最早提出采用格雷码代替自然二进制编码,以提高光栅编码和解码的稳棒性。如果用黑条纹表示逻辑值 0,白条纹表示逻辑值 1,则由 n 幅不同频率且灰度呈一定规律变化的黑白光栅图可获得 n 比特的格雷码。 n 比特格雷码编码图案可以划分出 $2n$ 个子区域,可实现大视场范围绝对编码。

本文研究的编码综合运用了格雷码和相移,采用 7 比特格雷码编码图案,如图 2 所示。 $G1 \sim G7$ 顺序投影,摄像机采集对应的变形条纹图,然后对各像素点的灰度选择适当的阈值二值化为逻辑值 0 或 1,并存储在相同大小的图像矩阵的对应位置。7 比特格雷码编码图案将被测区域划分成 128 个子区

域,每个区域的格雷码编码值唯一对应着 DLP 平面上一定范围的坐标值^[10]。

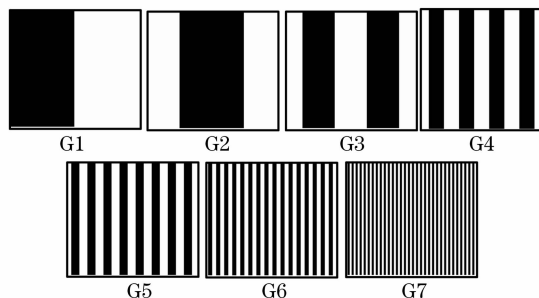


图 2 格雷码编码图案

Fig. 2 Gray code stripe patterns

3.2 相移编码

相移法^[11]是相位轮廓测量技术中的一种重要的编码方法,其基本原理是光波的干涉理论,由于其自身的联系性特点,可实现高分辨率的编码。投影系统将多周期正弦分布的灰度图象投影到被测物体表面,由于受到物面高度分布的调制,条纹发生形变。变形条纹灰度信息可表示为

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)] \quad (1)$$

式中 n 表示第 n 帧相移条纹图, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 。 $I_n(x, y)$ 和 $a(x, y)$ 分别为摄像机接收到的光强和物面背景光强, $b(x, y)$ 代表了调制振幅, $\Delta\varphi(x, y)$ 为相移步距。 $\varphi(x, y)$ 即为所要求出的相位函数,其中隐含了物体表面的高度信息。

本文研究的光学测量系统采用了目前较为成熟的四步相移算法,相位移动的增量是 $\pi/2$ 。图 3 为对应的四幅正弦光栅图案,由此可计算出相位函数

$$\varphi(x, y) = -\arctan\left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_3(x, y) - I_1(x, y)}\right] \quad (2)$$

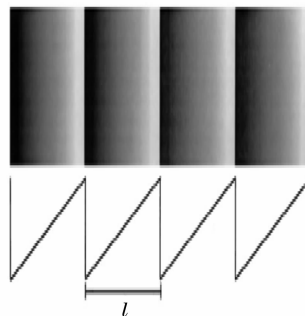


图 3 正弦条纹图

Fig. 3 Sinusoidal stripe patterns

3.3 混合编码

基于格雷码-相移组合编码技术综合了它们各自的优点,充分发挥两者的优势,弥补各自的不足

足,既可以测量突变和不连续表面,又可以获得表面的细微高度变化。本文采用7幅为格雷码图案,将测量范围划分成128个子区域,用 l_g 表示为

$$l_g(x,y) = f[L(x,y)] \quad (3)$$

格雷码技术实现了 CCD 平面上的像点和 LCD 投影光平面之间的粗匹配,为了获得更高的测量分辨率我们引入了相移技术。投射4幅灰度呈正弦分布的相移图像如图3所示。4幅相移图像的周期是最后一幅格雷码图像的一半。由4式计算出来的各点的相位分布介于 $-\pi \sim +\pi$ 之间,将相位 $\varphi(x,y)$ 归一化成范围在 $0 \sim 1$ 内的小数编码值,用 l_p 表示

$$l_p(x,y) = [\varphi(x,y) + \pi]/2\pi \quad (4)$$

将格雷码编码当作整数编码,形成阶梯函数如图4(a),相移技术实现了相位编码作为小数部分如图4(b),它将格雷码编码形成的小区域进一步划分,形成无限细分。当格雷码阶梯函数的边界与相位周期函数边界一致时,两者叠加即可形成连续单调函数,从而实现二者的组合编码。组合编码值用 l_t 表示

$$l_t(x,y) = l_g(x,y) + l_p(x,y) \quad (5)$$

格雷码-相移组合编码技术实现了对投影机投射的每一个光平面的标识,通过系统标定可以精确地匹配 CCD 平面上的像点与投影平面 π 。

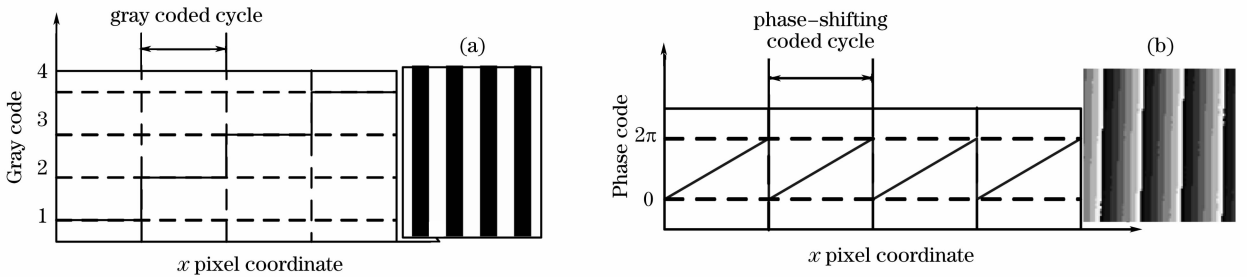


图4 混合编码示意图。(a)混合编码整数部分;(b)混合编码的小数部分

Fig. 4 Combination of gray code and phase-shifting code. (a) integral part of code;(b) decimal part of code

4 光编码校正

为了提高系统的稳定性和测量精度,减小测量误差,本文研究并实现了一种可靠的码值修正算法。

4.1 周期错位校正

由于图像噪声的干扰,格雷码解码过程中在条纹边界处会出现1~2 bit 码词错误,使得组合编码值产生 ± 1 或 ± 2 的偏差,如图5(a)所示。这导致了成像点与投影光平面 π 不能准确地对应,通过摄像机-投影仪模型计算出来的三维点云在条纹边界处产生跳动。

针对码值周期跳动,根据组合编码的线性分布

规律,对图像上每个解码点进行邻域分析,发现跳动的码值为格雷码和相移的交界处,会出现格雷码值相对临域码 ± 1 左右的跳动,对跳动出错的码值判断迭代修正,最终达到临域内滤波修正。以对平板编码为例,对它进行格雷码-相移编码与解码,理想情况下与条纹垂直的方向上各点码值应该是线性变化的,取条纹编码梯度方向上一行像素点的码值结果显示如下。图5(a)未经码值修正,在局部个别点处出现了码值跳跃,5(b)是采用该修正算法后的码值图,编码值较为明显地得到改善。

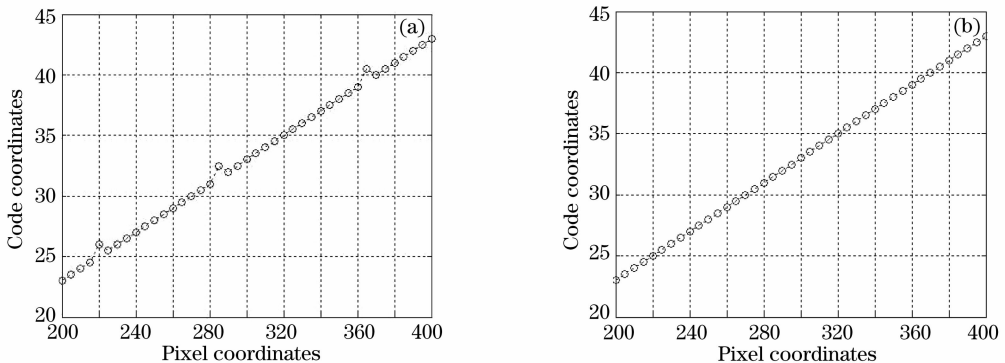


图5 混合编码跳动错误修正。(a)修正前;(b)修正后

Fig. 5 Correct the error of code word. (a) before correction;(b)after correction

4.2 非正弦性校正

相移法假设投影的光栅图案在其梯度方向上灰度值呈正弦变化。然而现有的数字投影技术如LCD、DLP等还无法实现非常精确的正弦光栅投影,因此获得的 $\varphi(x,y)$ 相位值也就存在着一定的误差。

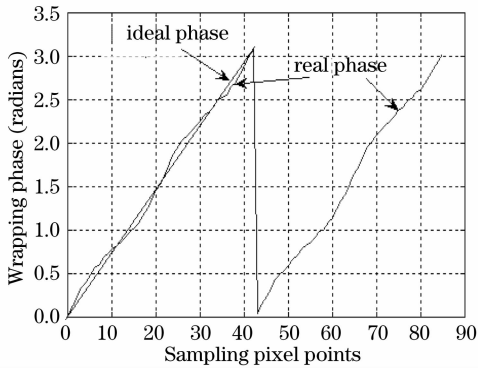


图6 编码非正弦性错误

Fig. 6 Non-sinusoidal error coding

投影机的非线性伽玛值是导致投影条纹的非正弦性的主要因素之一,从而导致解相误差使得测量重建物体表面出现条纹波动现象。一般对获得的相位值都要进行相位修正从而达到误差补偿,提高测量精度。误差对照表(LUT)算法^[12]在理论上能完全的消除投影机的非线性伽玛值引起的非正弦性误差(如图6所示),然而,在复杂的现实环境因素影响下,其周期性假设使得补偿结果仍然存在一定的残留误差,没有完全解决误差引起的问题。本文提出一种新的相位误差补偿方法,通过研究标准平面和规则曲面物体的相位分布规律,建立投影正弦光栅条纹的相位误差补偿对应函数,以类似于LUT的方法进行误差补偿,此方法是优于LUT算法的,因为建立的误差补偿对应函数是连续的,消除了LUT的离散缺点,达到了亚像素级的误差补偿,保证了测量的精度和系统的健壮性。修正结果显示如下,图7(a)是未修正重建的平板,呈现正弦性的条纹波动误差,经过算法修正消除了波动误差如图7(b)。

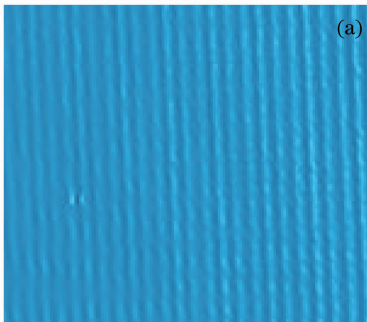


图7 非正弦性错误编码修正。(a)修正前;(b)修正后

Fig. 7 Correction the non-sinusoidal error code. (a) before correction;(b) after correction

5 结 论

本文提出了一种组合光信号编码方式,经过高效的编码校正算法保证了编码的正确性。组合编码中格雷码技术具有自身的误差不累加性优势,保证了正确解码的稳棒性,针对格雷码对视场解析的有限性缺陷,通过相移编码的融合,实现了测量空间的无限性细分,提高了整体编码的分辨率,同时解决了由于物体复杂型面产生的断裂、不连续编码问题,即使对不连续或孔洞的产生的复杂曲面也能获得正确的编码。另外针对编码技术中最常见的两种码词错误,提出了有效的编码校正算法,首先对码词大幅度跳动使用临域迭代修正方法,完成了编码的粗修正,然后对整体编码由于非正弦性影响产生的条纹波动,使用相位误差补偿对应函数进行精修

正,最终较大程度的减少了编码错误和测量误差的产生,提高了光信号正确编码的稳健性。

参 考 文 献

- 1 J. Pagess J. Salvi, R. Garcia *et al.*. Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling [C]. In: International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2003, 133~138
- 2 J. L. Posdamer, M. D. Altschuler. Surface measurement by space-encoded projected beam systems[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1982, **18**(1):1~17
- 3 R. J. Valkenburg, A. M. McIvor. Accurate 3d measurement using range finder[C]. In International Conference on Pattern Recognition, 1990, pages 309~313
- 4 M. Ito, A. Ishii. A three-level checkerboard pattern projection method for curved surface measurement [J]. *Pattern Recognition*, 1995, **28**(1): 27~40
- 5 C. Chen, Y. Hung, C. Chiang *et al.*. Range data acquisition using colors structured lighting and stereo vision[J]. *Image and*

- Vision Computing*, 1997, **15**: 445~456
- 6 D. C. D. Hung. 3d scene modelling by sinusoid encoded illumination[J]. *Image and Vision Computing*, 1993, **11**: 251~256
- 7 J. Tajima, M. Iwakawa. 3-D data acquisition by rainbow range finder[C]. In International conference on Pattern Recognition, 1990, pages 309~313
- 8 O. Faugeras. Three-dimensional computer vision. A geometric viewpoint, MIT Press, Cambridge MA (1993)
- 9 S. Inokuchi K. Sato, F. Matsuda. Range-imaging for 3-D object recognition[C]. Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition, 1984, 806~808
- 10 MingJune Tsai, ChuanCheng Hung. Development of a high-precision surface metrology system using structured light projection[J]. *Measurement*, 2005, (38): 236~247
- 11 Song Zhang, ShingTung Yau. High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(7): 2644~2649
- 12 S. Zhang, P. S. Huang. Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method [C]. *SPIE*, 6000, 2005, 133~142