

基于光栅投影法的3D扫描技术研究

刘李旭, 戴鑫志, 侯振宇, 王宏强, 李彦鹏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院空间电子技术研究所,长沙 410073)

摘要: 光栅投影技术作为3D扫描中最有发展前途的技术之一而备受关注。利用普通的投影仪、照相机和计算机构建了一个简单的3D扫描系统。采用投影仪投射光栅,利用照相机采集图像,输入到计算机中进行处理,采用所提出的三维信息重构算法重建目标物体的三维轮廓。该三维信息重构算法使用格雷码编码的结构光完成信息处理,构建的3D扫描系统工作原理简单,易于实现。实验结果表明,该系统能够快速有效地重建目标物体的三维轮廓,在扫描速度、分辨率以及重建精度与速度等技术指标上优势明显,有利于在机器人视觉和虚拟现实等领域中推广与应用。

关键词: 3D扫描; 光栅投影法; 信息重构算法; 格雷码

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)06-0101-05

3D Scanning Technique Based on Grating Projection Method

LIU Li-xu, DAI Xin-zhi, HOU Zhen-yu, WANG Hong-qiang, LI Yan-peng

(Institute of Space Electronic Technology, School of Electronic Science and

Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: 3D measurement technique is the core of the 3D scanner, and grating projection technique is one of the most promising 3D measurement techniques. In this paper, a simple 3D scanning system was built up with a projector, a camera and a computer. The projector projected grating, and the camera collected the images and transferred them to the computer. After data analysis and processing, the 3D profile of the target object was finally rebuilt by means of the 3D information reconstruction algorithm we proposed. The 3D information reconstruction algorithm took advantage of structured light with Gray coding, and the work principle of the designed 3D scanning system was simple and realizable. The experimental results show that the system is able to quickly and efficiently rebuild the 3D profile of the target object, and has obvious advantages on such technical indexes as scanning speed, resolution, reconstruction speed and accuracy. It is applicable in robot vision, virtual reality and other fields.

Key words: 3D scanning; grating projection method; information reconstruction algorithm; Gray code

0 引言

3D扫描技术起源于20世纪80年代,集光、机、电和计算机技术于一体,主要用于对物体空间外形和结构色彩进行扫描,以获得物体表面的空间坐标^[1],科技发达国家对其研究起步早,技术成熟。

美国最先研制出基于视觉的3D扫描仪,扫描速度快,扫描精度达到5 mm。美国微软公司研制的深度相机Kinect,因成本低、体积小、可用性高而备受关注^[2]。德国研制的流动式光学扫描仪,采用直接相位测量原

理,利用视觉测量定位技术和物理光栅进行投影,精度可达0.02 mm,并且可实现不同视角点云数据的自动拼接^[3]。法国研制的人体三维扫描系统,能够在30 s内完成对人体的三维重建^[4]。

国内相关研究起步相对较晚,研究成果大都处于实验阶段,少有成熟的商用系统问世。某公司研发的人体3D扫描系统具有代表性,系统采用照相式面扫描方式,扫描时间在5 s内,扫描精度达到0.5 mm^[4]。某大学自主研发的XJTUOM光学立体实时测量系统,采用先进的外差式多频相移技术,可用于不同规则的复杂型面测量以及逆向工程设计。

总体来说,现有的基于结构光技术的3D扫描系统具有扫描速度快、重建精度高等优点,但系统体积庞大、结构复杂、难以操作等缺点制约其推广应用。

收稿日期:2016-06-01

修回日期:2017-04-20

作者简介:刘李旭(1993—),男,湖南益阳人,硕士生,研究方向为太赫兹雷达成像技术。

在光学三维测量中,根据其工作原理的不同,测量方法被分成很多类,包括摄影测量法、飞行时间法、三角法、光栅投影法、成像面定位法、干涉测量法和隧道显微镜法等^[5-6]。在以宏观物体为测量对象的方法中,光栅投影法是最常用的、最有发展前途的方法,这便是本文选择该方法的基本依据。

结构光包括点结构光、线结构光、多线结构光和编码结构光等。其中,编码结构光既具有多线结构光的优点,也能解决线条匹配的问题,而且使用投影仪很容易产生编码结构光^[7]。使用编码结构光需要考虑结构光的编码方式,为了得到较高的精度与较低的差错率,考虑使用格雷码编码的结构光。

1 基于光栅投影法的3D扫描模型与三维信息重构算法

模型基本工作原理如下:首先将光栅图样投影到目标表面,光栅场受目标三维形状的调制而发生变形,然后据此解调出代表物体深度的相位信息,最后经过系统定标获得目标的三维几何信息。

1.1 3D扫描系统架构

基于3D扫描技术的基本要求,光栅投影法的实现过程都是相近的,系统基本工作模式如图1所示。

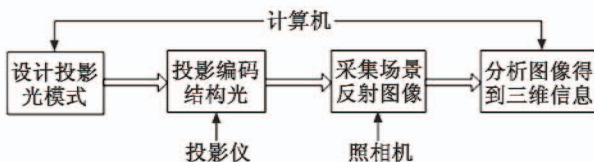


图1 系统基本工作模式

Fig.1 Basic working mode of the system

利用一些常见设备设计一个简单的3D扫描系统,其硬件构成主要包括普通投影仪、家用照相机、个人计算机以及目标物体。系统硬件构成如图2所示。

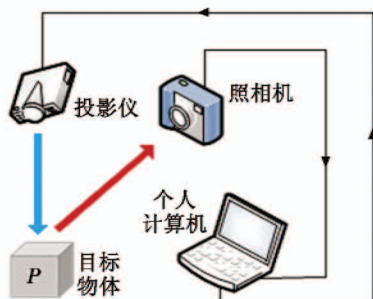


图2 3D扫描系统的硬件构成

Fig.2 Hardware structure of the 3D scanning system

首先,连接计算机的投影仪放映制作的幻灯片,将随时间等距移动的平行光栅投射到固定位置 P 上,实现对物体表面的编码调制,用照相机拍摄到各个时刻的光栅图样;然后,将目标放置于固定位置 P ,投影仪

重新放映幻灯片,用照相机在相应的放映时刻拍摄到第二组光栅图样;最后,将两组光栅图样数据导入计算机分析处理,获得最终实验结果^[8-9]。需要强调的是,在整个数据采集过程中,投影仪和照相机的位置始终保持不变^[10]。

1.2 光栅投影成像的基本原理

光栅的定义为:制有按一定要求或规律排列的刻槽或线条的透光或不透光(反射)的光学元件。

如图3所示,光栅 $P_i(i=1, \dots, n)$ 产生一束细光投影到空间物体上,在物体表面上形成一道光切口。在单缝光栅条件下,如图3a所示,光栅沿与投影平面垂直的方向(x 轴)匀速平移,在物体表面形成移动的光切口的集合,就构成了空间物体的表面图像。在多缝光栅条件下,如图3b所示,一束细光则变为一组平行光线,相应地在物体表面形成一组平行光切口。当投影光覆盖整个物体时,这些光切口的集合就构成了空间物体的表面图像。本文采用多缝光栅投影的方法。

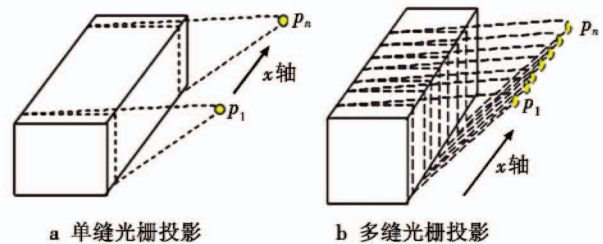


图3 光栅投影示意图

Fig.3 Sketch of grating projection

1.3 投影图像的编码

通过编码来解决投射的光条和所拍摄图像上形变的光条一一对应的问题。鉴于格雷码具有良好的编码效率、可靠性与抗干扰性,采用其进行编码设计。格雷码是一种循环码,其编码方式并不唯一,这里采用一种简单的编码方式,介绍如下。

产生 n 位格雷码的方法为:先将 $n-1$ 位格雷码的 $2n-1$ 个编码全部列出来;然后以相反的顺序再列一次,形成一个 $2 \times (2n-1)$ 的序列,即 $2n$ 个序列;再将前半部分 $2n-1$ 个编码的前面补一个0,后半部分 $2n-1$ 个编码的前面补一个1,此时就完成了 n 位格雷码的编码;最后将每个格雷码的第 x 位按照从高到低的顺序组成一个二进制序列,并且序列中的值若为0则置为黑色,为1则置为白色,此时便得到了 n 幅 n 位的格雷码编码图案。

1.4 三维信息重构算法

采用基于结构光投影法的三维信息重构算法,其流程与原理如下所述。

首先测量光栅在投影墙面的长 X 和宽 Y 。采用8位的格雷码编码方法,产生的条带数为256,每个条带

的宽度为 $X/256$ 。自左向右以第1条黑色条带与白色条带的边界作为横坐标 X 为0的边,即 y 轴,这样很容易就能得出每个条带在横轴上占有的区间。假设同一条带内的像素点具有相同的横坐标,根据像素点所在的条带编码就能得出其相应的横坐标值 X 。

由于照相机在拍摄时相对投影墙面有一定的倾斜,因此在照片上矩形的投影区域将会变形。如图4所示。

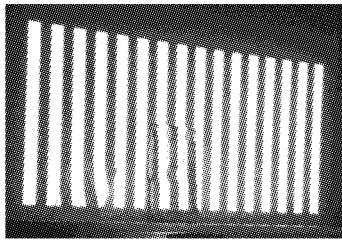


图4 光栅投影图

Fig.4 Photograph of grating projection

不考虑在 y 方向上的倾斜,并且认为 y 方向上条带的形变是线性的。首先找出每个条带的最高点和最低点,那么该条带中任意点的纵坐标可以由一个简单的比例关系求出,即

$$Y = \frac{L}{l} \lambda \quad (1)$$

式中: Y 表示像素点纵坐标值; L 表示原始条带的长度; l 表示条带形变后的长度; λ 表示形变后的条带中像素点到最下方点的距离。这样就得到了像素点的纵坐标值 y ,下面再计算像素点的高度值 Z 。

光源发射的光照射到参考面上,利用多个相同的光条透视投射。当目标物体轮廓高度发生变化时,像素点在光敏面的位置相应地发生变化,即三维面型结构体对结构光束产生的空间调制改变了成像光束的角度,也就改变了像素点在检测器阵列上的位置。通过系统光路的几何参数标定和对像素点位置的确定,计算出相应的物体高度。

如图5所示, O_p 和 O_c 分别表示投影仪和照相机的光心,两者的距离为 l ,并且两者连线与参考平面平行,参考平面即为参考坐标系中的 $X-Y$ 平面。照相机光心到参考平面的距离为 d 。

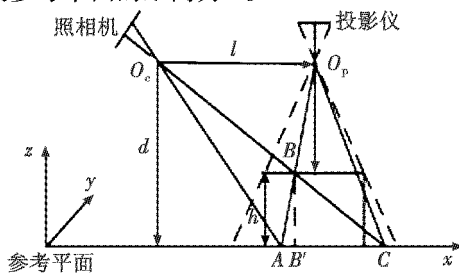


图5 三角法测量原理图

Fig.5 Schematic of trigonometry measurement

当目标物体放置在参考平面时,投射到 A 点的光线被物体上的 B 点遮挡, B' 点为 B 点在参考平面上的投影点。经过 BO_c 的光线,相当于没有放置目标物体时,从 C 点反射的光线。根据相似三角形的知识, $\triangle ABC$ 和 $\triangle O_p BO_c$ 相似,因此存在以下比例关系,即

$$\frac{h}{d-h} = \frac{s}{l} \quad (2)$$

式中: h 表示物体的高度; s 表示 A 点和 C 点间的距离。由式(2)能够得出物体的高度的表达式为

$$h = \frac{d \cdot s}{l + s} \quad (3)$$

在式(3)中,两光心的距离 l 和照相机光心到投影平面的距离 d 可以直接测量,而 s 需要间接测量。具体方法是为每一道光栅编码,这样在相同光带内的像素点就有相同的编码值。对于图片上同一个坐标处的像素点,如果放置目标物体前后其编码值发生变化,说明该点处的光栅发生了移动,那么利用前后两次的编码就很容易找到该点处光栅移动的距离 s 。通过上面的计算,最终得到物体的高度 h ,即在参考坐标系下的 z 坐标。

至此,就得到了物体上任意投影点的三维坐标值。

1.5 扫描成像技术指标分析

1.5.1 分辨率

假设投影仪光心到投影墙面之间的距离为 d ,投影仪光心到照相机光心的距离为 m ,放上物体后光栅移动的距离为 s ,如图5所示,则物体上像素点的深度即 Z 坐标为

$$Z = \frac{d \cdot s}{m + s} \quad (4)$$

由于实际得到的 s 是一个离散量,因此对应的 Z 值会产生跳变,这就反映了 Z 的测量精度,即分辨率。由式(4),对 s 求偏导,即得到分辨率

$$\frac{\partial Z}{\partial s} = \frac{d \cdot m}{(m + s)^2} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,分辨率 $\frac{\partial Z}{\partial s}$ 是关于 d 的一次函数,因此 d 越大则分辨率越小,性能也越好。

由式(4),两边同时对 m 求二阶偏导可得

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial s \partial m} = \frac{d \cdot (s - m)}{(m + s)^3} \quad (6)$$

由式(6)可知,当 $m = s$ 时,取得唯一极大值,故系统的分辨率随距离 m 的增大而增大。

1.5.2 扫描区域的尺寸限制

由于系统采用结构光重建的方法,因而能够一次性重建物体在照相机视野中的一个面(除去阴影区域),如图6所示(俯视图)。

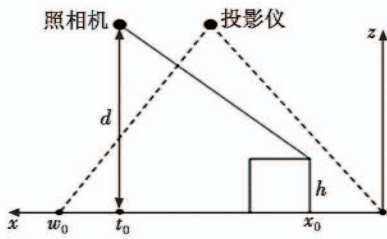


图6 扫描区域示意图

Fig.6 Sketch of scanning region

假设投影仪的投影区域为原点到 w_0 , 照相机到投影墙面的距离为 d , 照相机在墙面的投影点到光栅原点的距离为 t_0 , 目标物体上一点的横坐标为 x_0 , 且该点在照片上的像素点恰好位于光栅边界, 那么可以得到物体高度 h 和位置 x_0 的关系为

$$h = \frac{x_0}{t_0} d \quad (7)$$

由式(7)可知, 对于在照相机右侧横坐标为 x_0 的某点, 如果其高度超过 h , 则它的右侧部分将成为盲区, 无法进行三维重构。同样地, 也可以计算出目标物体位于左侧时高度 h 的限制, 这与照相机在墙面上的投影位置和光栅的左边界有关, 其原理与上述原理相似, 此处不再赘述。

2 3D 扫描成像模型的实验验证

2.1 实验场景布置

按照 1.1 节的设计布置实验场景, 其中, 目标物体光栅投影如图 7 所示。实验中所用投影仪的型号为 SONY EX291, 照相机用智能手机代替, 型号为 HUAWEI GRA-UL00。



图7 目标物体光栅投影

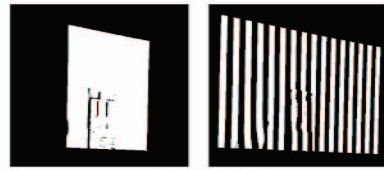
Fig.7 Grating projection on target object

2.2 投影图像采集

为了方便, 使用手机代替照相机进行投影图像的采集, 分别采集了无目标物体时和有目标物体时的光栅投影图像各 8 幅, 图 8 为其中的各 1 幅。



a 无目标物体时



b 有目标物体时

图8 光栅投影图像

Fig.8 Grating projection image

由图对比可知, 当多条条纹照射到目标物体上时, 光栅投影图案发生了形变, 这些形变即包含了物体表面的轮廓信息。

2.3 像素点编码

选取 8 位格雷码对像素点进行编码, 得到 8 幅编码图案, 图 9 为其中的前 4 幅。

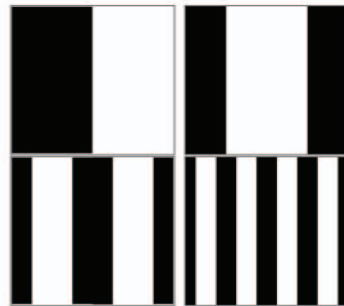
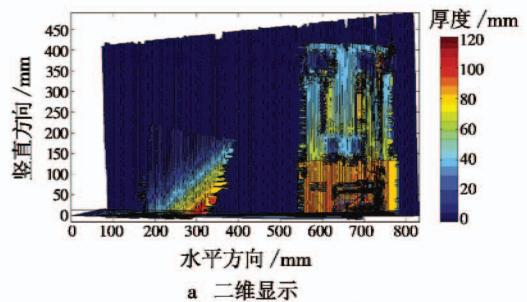


图9 8 位格雷码编码的前 4 幅编码图案

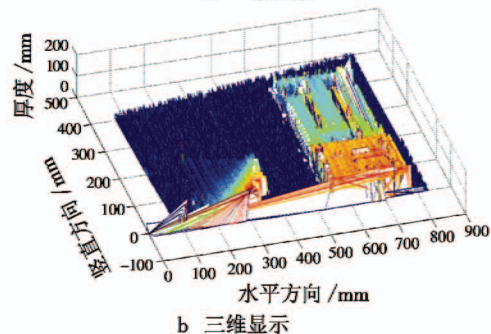
Fig.9 The first four patterns of 8-bit Gray coding

2.4 三维信息重构

在 Matlab 2014 的平台上, 依据 1.4 节中设计的重构算法, 通过编程实现目标物体三维信息的重构, 实验结果如图 10 所示。



a 二维显示



b 三维显示

图10 三维信息重构结果图

Fig.10 Result picture of 3D information reconstruction

观察图 10 可知,目标物体的三维重构效果良好,能够较好地反映出物体的三维视觉信息。

2.5 技术指标计算

本实验基于如下假设:忽略环境光的影响;投影墙面和光栅均垂直水平面向上;照相机成像符合标准的针孔模型,忽略镜片变形等误差影响。

通过测量可得,本系统中投影仪光心到投影墙面之间的距离 $d = 2240 \text{ mm}$,投影仪光心与照相机光心之间的距离 $m = 521 \text{ mm}$,放上物体之后光栅移动的距离 s 的最小值为一个光栅的宽度,即 $s = 5.7 \text{ mm}$,代入式

$$(5) \text{ 可求得系统的分辨率 } \frac{\partial Z}{\partial s} \approx 4 \text{ mm}。$$

标定好投影仪和照相机的位置后,系统扫描时间主要耗费在不同编码光栅图像的切换和拍摄上。计算机成像的时间则相对很短,可以忽略。由于采用了 8 位格雷码,因此一共需要拍摄 16 张照片,扫描大约用时 24 s,系统的扫描范围为 1480 mm,从而可计算出等效扫描速度为 62 mm/s。

由此可见,该系统在分辨率和扫描时间上性能优越。

3 结束语

本文基于光栅投影法建立了 3D 扫描成像模型,并利用普通的照相机、投影仪和计算机等设备搭建系统进行了实验,实现了高速度高分辨 3D 扫描成像,同时体现了系统低成本、易操作的特点。实际上,该模型在某些方面还存在拓展与改进的空间,例如在单目扫描系统的基础上构建多目扫描系统,使用多个照相机从各个方向对目标物体进行拍照,通过图像拼接生成更加完整的 3D 图像;探索更好的编码方式,使得对运

动物体也能进行 3D 扫描成像。

参考文献

- [1] 侯风芝. 格雷码结合相移的编码结构光三维重建技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [2] TONG J, ZHOU J, LIU L G, et al. Scanning 3D full human bodies using Kinects [J]. Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(4) :643-650.
- [3] 吕乃光,孙鹏,姜小平,等. 结构光三维视觉测量关键技术的研究[J]. 北京信息科技大学学报, 2010, 25(1) :1-5.
- [4] 朱江涛. 基于 Kinect 的人体三维重建与尺寸测量[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2015.
- [5] 冯丰. 相机标定和三维重建中球体的应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [6] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1) :10-22.
- [7] 陈彦军. 基于编码结构光的三维重建关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [8] 李托拓,胡锋,耿征. 基于结构光的三维成像技术[J]. 网络新媒体技术,2012,1(1) :22-33.
- [9] 王中任,张明,梅顺齐. 基于结构光的反光工件在机三维重构[J]. 制造业自动化,2015, 37(10) :9-12.
- [10] MORENO D, TAUBIN G. Simple, accurate, and robust projector-camera calibration [C]//International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission, 2012:464-471.

(上接第 95 页)

- [13] 赵宝玮,相里斌,吕群波,等. 机械快门对大面阵滤光片型多光谱相机成像的影响及改进[J]. 光谱学与光谱分析,2013, 33(7) :1982-1986.
- [14] 矫英祺,任国全,李冬伟. 光电系统图像质量评价方法

综述[J]. 激光与红外,2014,44(9) :966-971.

- [15] 张勇,金伟其. 夜视融合图像质量客观评价方法[J]. 红外与激光工程,2013, 42(5) :1360-1365.
- [16] 陈一超,胡文刚,武东生,等. 三波段微光彩色夜视方法研究[J]. 应用光学,2015, 36(3) :430-434.

