

基于红外编码结构光的深度测量方法

贾 同,周忠选,高海红,王炳楠

(东北大学 信息科学与工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 视觉深度测量是计算机视觉领域的重要问题。提出了一种基于红外编码结构光的深度测量方法。首先,设计一种新的网格图案并提出一种顺序编解码算法,准确计算参考图像与目标图像之间对应点的偏移;然后,提出一种成像系统参数线性拟合算法,建立目标深度与光斑像素偏移之间的线性关系,并修正镜头畸变;最后,基于线性关系实现深度测量,并基于 Delaunay 三角剖分算法实现三维重建。在实验过程中,通过多组数据进行误差评估与校正,提高测量精度,降低系统误差。多组实验数据表明,该深度测量方法准确性较高,并具有较好的实用性与鲁棒性。

关键词: 深度测量; 红外结构光; 像素偏移; 线性拟合; 三维重建

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1628-05

Depth measurement based on infrared coded structured light

Jia Tong, Zhou Zhongxuan, Gao Haihong, Wang Bingnan

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Depth measurement is an important problem in computer vision field. Firstly, a new grid pattern was designed and a sequence coding and decoding algorithm for the pattern was proposed. Secondly, a linear fitting algorithm of system parameters for constructing the linear relationship between the object depth and the pixel shift was proposed, and the lens distortion was rectified. Thirdly, depth information of object was obtained based on this linear relationship. Moreover, 3D reconstruction was implemented based on Delaunay triangulation algorithm. Finally, the regularity of the error curves was utilized to correct the system errors and the measurement accuracy was improved. The experimental results show that the accuracy of depth measurement is related to the step length of moving object.

Key words: depth measurement; infrared structured light; pixel shift; curve fitting; 3D reconstruction

收稿日期:2014-09-10; 修订日期:2014-10-15

基金项目:国家自然科学基金(61273078);中央高校基础科研业务费(130404012);教育部博士点基金(20110042120030)

作者简介:贾同(1975-),男,副教授,博士,主要从事图像处理与分析、模式识别及计算机视觉方面的研究。

Email: jiatong@ise.neu.edu.cn

0 引言

获得周围场景的深度信息是计算机视觉领域的一个重要问题,可以应用于场景三维重建、远程遥感、视觉测量与工业自动化等多种领域^[1-2]。传统的深度测量方法主要有 Time-of-Flight, 立体视觉与结构光测量方法等^[3]。

Time-of-Flight(TOF)即飞行时间方法^[4],该方法基本原理为:首先传感器发出经调制的近红外光,投射到物体后反射;然后传感器通过计算光线发射和反射时间差或相位差,来换算被拍摄景物的距离,以产生深度信息。此类方法的不足之处在于所获得深度信息的分辨率不高而且价格较贵。立体视觉测量主要采用不同位置的两台或更多台的相机经过移动或旋转拍摄同一副场景,并通过计算空间点在不同图像中的视差,获得物体的三维坐标。此类方法的不足之处是配准计算量较大,因而降低了测量速度^[5]。

结构光测量是一种主动式光学测量方法,与立体视觉方法比较,用结构光投射器代替一个相机,向被测物体表面投射可控制的光点、光条或光面结构,并由图像传感器(如摄像机)获得图像,通过系统几何关系计算得到物体的三维坐标。结构光测量方法具有计算简单、体积小、价格低、便于安装和维护的特点^[6]。其中,噪声干扰与投射器标定是结构光测量中的关键问题。这是由于一方面结构光波长通常在可见光范围内,较易受到场景中环境光的干扰,易影响测量精度。另一方面,结构光投射器不能主动获得图像,因而很难完成它的标定工作^[7]。一些文献把结构光投射器作为“反向相机”,利用相机的标定方法进行反向标定^[8]。部分研究文献则聚焦于对投影到物体上“光斑图案”进行分析与评价^[9]。然而,这些方法在计算过程中都依赖于相机标定参数,由于目标深度信息与结构光斑偏移之间具有非线性关系,因而,成倍地增加了测量误差。

针对以上问题,文中所提出的深度测量方法主要具有以下特点:

(1) 充分利用主动视觉优势,设计了一种高效简洁的编解码结构光方案;

(2) 避免环境光干扰,采用激光二极管投射红外结构光,其波长范围不与可见光重合;

(3) 提高深度测量精度,不依赖于传统标定方法,不单独对相机或结构光投射器进行标定。

1 系统原理

图1所示为文中所构建成像系统的组成结构。系统由1个红外激光发射器及衍射光栅与1个CCD相机组成,分辨率为640×480。

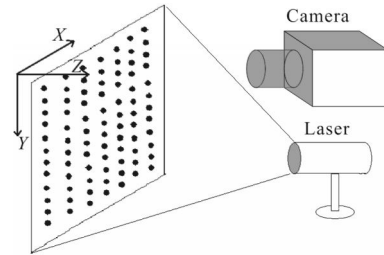


图1 成像系统组成结构

Fig.1 Structure of imaging system

首先,红外激光束被衍射光栅分解成网格结构光,并投射到目标上;然后,CCD相机捕捉到目标图像并与参考图像进行对比。参考图像来自一个已知的深度平面,并被存储到内存里。当目标面与参考面不共面时,光斑图案的位置会发生改变。因此,利用并测量这种改变,文中就可以根据以下方法获得物体的深度。

图2显示了目标深度与光斑偏移之间的关系。目标位于参考面上与成像系统的距离为 D_0 ,当它向成像系统靠近时,相机成像平面上光斑的位置在基线(baseline)方向会发生偏移。

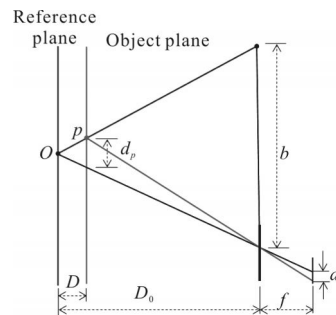


图2 成像原理

Fig.2 Imaging principle

这种偏移可以通过图像平面上像素点位置的变化(像素偏移)进行计算,其数学模型表示如下:

$$\frac{d_p}{b} = \frac{D}{D_0} \quad (1)$$

则

$$\frac{d_p}{d} = \frac{D_0 - D}{f} \tag{2}$$

式中： D 为目标点 p 与参考面的深度距离； f 为相机焦距； b 为基线长度； d_p 为点 p 在目标平面上的位移； d 为图像空间的像素偏移。把公式(2)中的 d_p 带入公式(1)，可得公式(3)如下所示：

$$D = \frac{D_0}{1 + \frac{f \cdot b}{D_0 \cdot d}} \tag{3}$$

其中 D_0, f 与 b 是成像系统参数。

2 深度测量

2.1 像素偏移计算

文中采用图像增强预处理方法降低原始图像噪声，在完成图像二值化后提取光斑质心。在此基础上，提出了一种顺序编解码算法，用于检测目标图像与参考图像之间的对应点。如图 3 所示，该算法步骤如下：

第 1 步，根据质心坐标的横坐标排序；

第 2 步，根据质心坐标的纵坐标排序；

第 3 步，分别对参考图像与目标图像进行编码，根据 1~2 步的坐标排序结果，所有的光斑被从左到右、从上到下进行存储；

第 4 步，分别对参考图像与目标图像进行解码，有同样 ID 的即为两个图像之间的对应点。

通过 1~4 步，目标图像与参考图像之间对应点的像素偏移可以被精确计算。

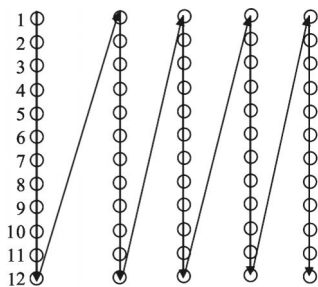


图 3 编码算法原理

Fig.3 Coding algorithm principle

2.2 成像系统参数线性拟合

文中把公式(3)转换成线性关系表达式，如公式(4)所示。

$$\xi = P_1 + P_2 \cdot \eta \tag{4}$$

其中， $\xi = \frac{1}{D}$, $\eta = \frac{1}{d}$, $P_1 = \frac{1}{D_0}$, $P_2 = \frac{f \cdot b}{D_0^2}$

P_1 与 P_2 为要被确定的参数。根据实验中多组目标深度与像素偏移实际数据进行拟合计算。但公式(4)仅仅描述了目标深度信息对于图像放大倍数的影响，没有考虑成像物镜畸变的作用。虽然前者影响较大，但后者的影响也不可忽视。因而，镜头畸变应该在成像系统参数线性拟合前被修正。

对于 η 文中采用了二次曲线评估算法， η 被改写为：

$$\eta = \frac{1}{d} + k \left(\frac{1}{d} \right)^2 \tag{5}$$

式中： k 为修正系数，使 $\eta = 1/d'$, d' 是修正 d 后的结果。在 k 远小于 d 的条件下，带入公式(4)，得到 $d' \approx d - 2k$ 。

2.3 深度测量与三维重建

当计算获得目标图像与参考图像之间的像素偏移值以后，可以基于公式(4)获得目标深度信息。在此基础上可以获得在目标图像上每个光斑的三维坐标，并基于 Delaunay 三角剖分算法实现三维重建。实验结果见下文。

3 实验结果

3.1 实验过程

该实验硬件系统采用了 1 个 KT&C 相机，1 个 50 mW 的红外激光发射器。实验共采集了 10 组测量数据，每组数据测量方法为：每隔步长 $\Delta s = 1 \text{ mm}$ 移动一次目标，并且计算相应的像素偏移值，目标一共移动 20 次。前 5 组数据作为训练数据，用于线性拟合以决定成像系统参数，另外 3 组作为误差校正数据，最后 2 组作为测试数据，用于测试文中方法的准确性。

3.2 误差评估与校正

文中记录了前 5 组深度测量数据的平均值，计算参数 $P_1 = 0.0157$, $P_2 = 0.4067$ 。在图 4 中，十字线描述了 d 与 D 之间的变化关系，直线描述了它们之间的标准线性关系。实验结果表明当 D 在较小的范围内， d 与 D 之间基本上呈现线性关系，随着 D 范围的增大逐渐表现出非线性关系。

根据参数计算结果，并把另 3 组修正数据带入公式(4)可以获得 d 与 D 之间的线性变化关系。误差

定义为 $\Delta D = D - D'$, D' 为标准深度。图 5 显示了修正数据的误差,其中 3 组数据的误差有相似的形状,表明除了随机误差外还存在系统误差。随机误差无规律,可以通过增加测量次数来降低。而针对系统误差问题,文中研究基于误差曲线的规律性来进一步降低系统误差。其具体方法为:将三组误差数据取平均后用最小二乘法拟合,得到误差 ΔD 与深度 D 的关系,被 ΔD 校正后的误差曲线如图 6 所示。

从图 6 中可以发现误差曲线已经没有规律性,表明系统误差被消除。

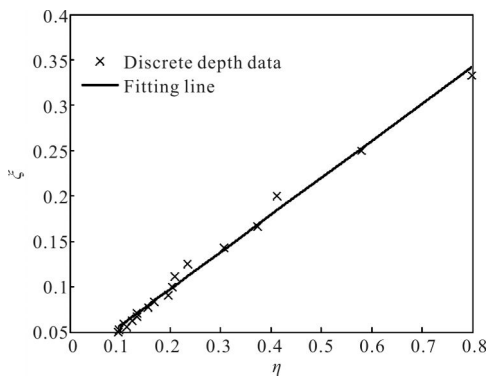


图 4 在 d 与 D 之间的变化关系曲线
Fig.4 Relationship curve between d and D

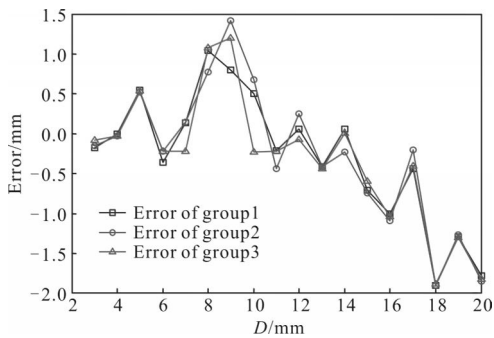


图 5 三组数据修正前误差曲线
Fig.5 Error curves of three groups of data before correction

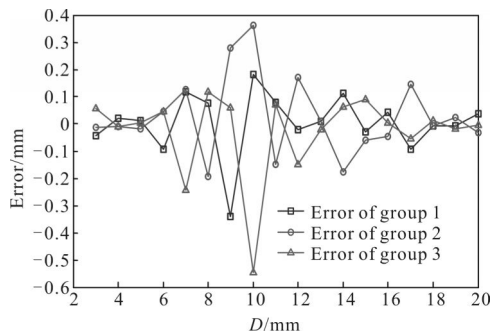


图 6 三组数据修正后误差曲线
Fig.6 Error curves of three groups of data after correction

3.3 准确性分析

文中采用最后 2 组数据作为测试数据以验证文中方法的准确性。测试结果如表 1 所示,其中最大误差为 0.2177 mm,平均误差为 0.1194 mm。根据测量结果分析,测试的准确性与目标移动步长密切相关,仅使用绝对误差来验证测量准确性是不充分的。因此,文中提出了深度测量误差定义公式,如下所示:

$$E = \frac{e}{\Delta s} \quad (6)$$

式中: e 表示绝对误差, Δs 为移动步长。在 e 保持不变的条件下,随着 Δs 的减小 E 会增加,在 $\Delta s = 1$ mm 的条件下,测量误差 E 约为 0.12。

表 1 深度测量结果

| Actual distance /mm | Object depth measurement/mm | |
|---------------------|-----------------------------|---------|
| | Depth measurement | Error |
| 3 | 3.118 7 | 0.118 7 |
| 5 | 5.105 4 | 0.105 4 |
| 7 | 7.063 6 | 0.063 6 |
| 9 | 8.873 7 | 0.126 3 |
| 11 | 11.139 5 | 0.139 5 |
| 13 | 13.217 7 | 0.217 7 |
| 15 | 15.073 4 | 0.073 4 |
| 17 | 17.079 2 | 0.079 2 |
| 19 | 19.151 2 | 0.151 2 |

3.4 实验结果

实验结果如图 7~9 所示。图 7 中,图(a)为目标的原始图像,图(b)为经过预处理后的二进制图像。根据图 7,文中基于顺序编解码算法获取参考图像与目标图像之间的对应点像素偏移。图 8 为深度点云彩色图,在颜色映射表中,从蓝到绿表示目标深度逐渐增加。图 9 为基于深度点云的三维重建结果,分别

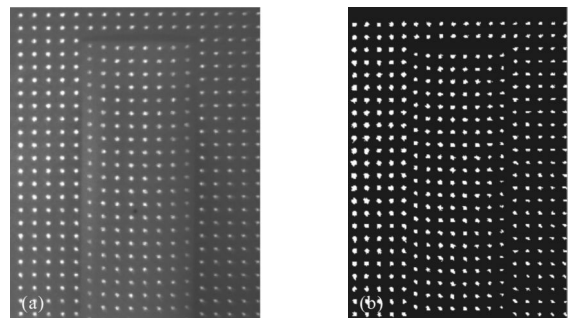


图 7 原始图像与二进制图像
Fig.7 Original image and binary image

为从两个不同角度进行了显示。

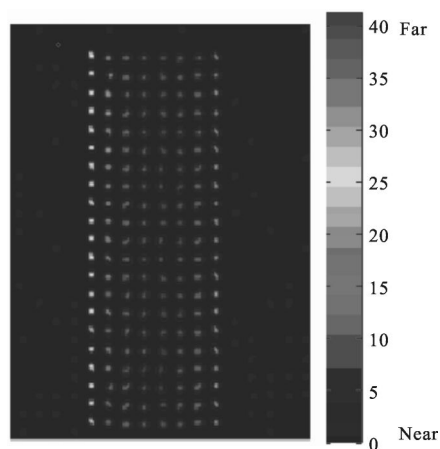


图8 深度点云彩色图

Fig.8 Color map of depth point cloud

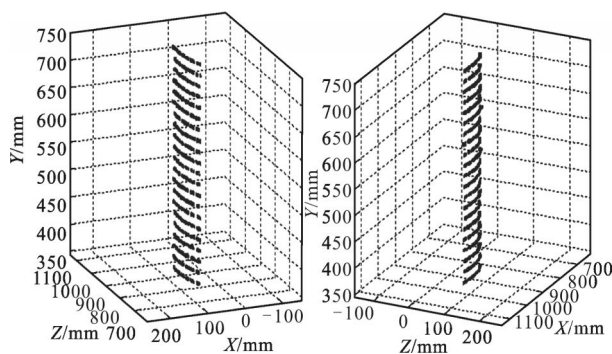


图9 三维重建结果,分别从两个角度进行显示

Fig.9 Three-dimensional reconstruction results, which is showed from two angles respectively

4 结论

文中针对结构光深度测量领域的关键问题,所设计的网格图案以及相应的顺序编解码算法具有较好的实时性、准确性与鲁棒性。提出一种成像系统参数拟合算法,准确的建立起目标深度与光斑像素偏移之间的线性关系,而且避免了对结构光投射器的单独标定。针对测量误差问题,在实验过程中通过增加测量次数降低了随机误差,并对系统误差进行了修正,进一步提高了测量精度。针对生成的目标深度点云,基于Delaunay三角剖分算法实现三维重建。通过多组数据的实验,深度测量的准确性与目标移动步长密切相关,在 $\Delta s=1\text{mm}$ 的条件下,测量误差 E

约为0.12。

参考文献:

- [1] Wu C, Sun Y, Chang C. Three-Dimensional modeling from endoscopic video using geometric constraints via feature positioning[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2007, 54(7): 1199-1211.
- [2] Li J, Guo Y, Zhu J, et al. Large depth-of-view portable three-dimensional laser scanner and its segmental calibration for robot vision [J]. *Optics and Lasers Engineering*, 2007, 45(11): 1077 - 1087.
- [3] Cheng-Hsiang Lin, Rock A Powell, Lan Jiang, et al. Real-time depth measurement for micro-holes drilled by lasers[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(2): 1-6.
- [4] Han Yuchong, Qin Jun, Ma Xingming, et al. Identification of fire flame based on variation rate of time-of-flight-depth-map method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 338-343. (in Chinese)
韩郁翀, 秦俊, 马兴鸣, 等. 基于飞行时间深度图像变化率的火焰识别方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 338-343.
- [5] Liu S, Zhao L, Lin J. The applications and summary of three dimensional reconstruction based on stereo vision[C]//IEEE International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, 2012: 620-623.
- [6] Wang Ying, Zhang Yuan. A calibration method for circle structure light based on coplanar reference object[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 174-178. (in Chinese)
王颖, 张圆. 一种基于平面靶标的圆结构光标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 174-178.
- [7] Luo Huafen, Gao Bingtuan, Xu Jing, et al. An approach for structured light system calibration [C]//IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, 2013: 428-433.
- [8] Cui H, Dai N, Yuan T, et al. Calibration algorithm for structured light 3d vision measuring system [J]. *IEEE Trans Image and Signal Processing*, 2008, 2(15): 324-328.
- [9] Wei Z, Cao L, Zhang G. A novel 1d target-based calibration method with unknown orientation for structured light vision sensor[J]. *Optics and Laser Technology*, 2010, 42(4): 570-574.