

# 基于多平面镜的单相机三维采集方法

杨 业, 李宏宁

云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500

**摘要** 展示了所构建的基于四平面镜的单相机三维(3D)采集系统,介绍了系统所采用的三维扫描的几何光路,分析了从图像解析出高度的3D采集算法、空间分辨率与图像分辨率的关系,也讨论了算法的优化以及3D再现技术。从实验结果可以看出,与采用激光扫描的3D采集系统相比,基于镜像视差的3D采集系统,结构更简单,而且可以同时采集出物体的空间结构和表面纹理颜色,是一种有效的3D采集手段。

**关键词** 成像系统; 三维采集和重构; 多平面镜; 单相机; 视差

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.021101

## Three-Dimensional Acquisition Based on a Single Camera of Multi-Planar Mirrors

Yang Ye, Li Hongning

*School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China*

**Abstract** A three-dimensional (3D) scanning system based on a single camera of four planar mirrors is presented. The 3D scanning geometric path of the system is introduced. The 3D height acquisition algorithm, the relationship between spatial resolution and image resolution are analyzed. The techniques of algorithm optimization and 3D reproduction are also discussed. The result shows that, compared with those 3D scanning methods using laser scanning, this proposed system based on mirror parallax is an effective 3D acquisition method because it can capture the spatial structure and color texture of a surface simultaneously, and the structure is simple.

**Key words** imaging systems; 3D acquisition and reconstruction; multi-planar mirror; single camera; parallax

**OCIS codes** 110.6880; 100.3005

## 1 引言

从不同角度观察,物体通过镜面的反射,物体与其镜像间必然存在视差。通过分析物体与其镜像之间的关系,理论上可以重构出物体表面的空间几何结构。基于该原理,用相机同时记录物体与其像的图像,可以从成像角度得到单相机的三维(3D)采集系统。

Nene等<sup>[1]</sup>从理论和实验上分析了采用一个相机与镜子结合立体采集系统,指出其在系统参数、校正难度、视场大小和造价等上存在优势。2006年,Kuthirummal等<sup>[2]</sup>展示了所设计的基于椎体和柱体镜面的3D采集系统,能够实时地采集动态立体信息。胡春海等<sup>[3]</sup>采用带有正八边形标记点的平面镜和单目CCD相机,对空间物体进行3D重构,验证了该方法的可行性。曹煜等<sup>[4-6]</sup>则提出了一种基于单幅图像的侧影轮廓线可见外壳重建方法,实现目标物体的3D重建。李公羽<sup>[7]</sup>通过使用平面镜辅助图像采集的方法,对碎石颗粒进行分类。张恒康等<sup>[8]</sup>在CCD相机前放置两面成一定夹角的平面镜,并对物体进行动态测量。另外,也有利用单摄像机进行3D重构方法<sup>[9-15]</sup>,结合先验场景几何约束和摄像机配置,实现场景某些性质的度量。

**收稿日期:** 2016-10-08; **收到修改稿日期:** 2016-10-24

**基金项目:** 国家自然科学基金仪器专项(2127013)、云南省自然科学基金(2011FZ079)

**作者简介:** 杨 业(1991—),男,硕士研究生,主要从事三维成像、图像处理等方面的研究。E-mail: 1012114362@qq.com

**导师简介:** 李宏宁(1975—),男,博士,副教授,主要从事计算机视觉方面的研究。

E-mail: lihongning\_ynnu@yahoo.com.cn(通信联系人)

由于几何局限性,单个镜面只能对目标的局部或片段进行重构,如何结合多个镜子进行更全面重构,并提高重建精度仍然是需要考虑的问题。本文将展示所设计构建的基于四平面镜的单相机 3D 采集系统,介绍系统所采用的 3D 扫描的几何光路,分析从图像解析出高度的 3D 采集算法、空间分辨率与图像分辨率的关系、算法的优化以及 3D 再现技术。

## 2 算 法

### 2.1 3D 采集算法

基于镜面的 3D 采集方法的基本原理如图 1 所示。在平台上竖直放置平面镜,镜子位于平台  $X_M$  的位置;相机位于平台原点  $O$  的正上方,与平台的距离为  $h_0$ ;物体的表面为  $S$ ,其镜像为  $S'$ ,物体表面上任意一点  $A$  与平台的距离为  $h_A$ ,其虚像为  $A'$ 。物点  $A$  和像点  $A'$  对透视原点  $O'$  在  $X$  面上的投影分别为  $X_A$  和  $X_{A'}$ 。

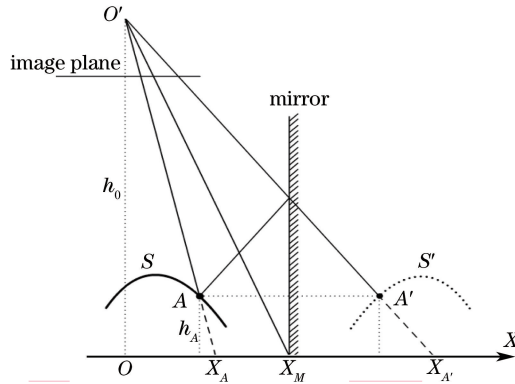


图 1 基于镜面的 3D 采集原理

Fig. 1 Principle of 3D acquisition based on mirror surface

分析以上几何成像关系,可以得到物点  $A$  离平台  $X$  的高度满足

$$h_A = h_0 \left( 1 - \frac{2X_M}{X_A + X_{A'}} \right). \quad (1)$$

由(1)式可以看出,由于  $h_0$  固定,由物点、像点相对于平面镜的位置可以得出物体的高度。当物体离平台很小时,由于镜面成像的对称性,可知  $X_A + X_{A'} = 2X_M$ ,直接导致(1)式高度为 0。当物体高度不为 0 时,由  $X_A + X_{A'}$  与  $2X_M$  的差异可以算出物体的高度。

当相机的高度  $OO'$  比物体高度  $h_A$  大很多时,图 1 中的线段  $AX_A$  与  $h_A$  几乎重合,这时可以用  $X_A$  作为物体  $A$  的横坐标位置,由(1)式计算物体  $A$  的高度,求得物体表面的空间位置。以上仅分析了  $X$  方向计算高度的方法, $Y$  方向的计算方法与其类似。

根据以上原理设计出基于镜面的图像采集和 3D 重建的基本步骤:1) 用相机拍摄物体及像同时存在的二维图片;2) 确定相机的高度  $h_0$  和原点  $O$  在图像中的位置,确定镜面在图像上的位置  $X_M$ ;3) 分析图像,确定物点  $X_A$  在镜像中的位置  $X_{A'}$ ;4) 根据(1)式,代入参数计算出物点的高度;5) 逐像素计算整个物体  $S$  的表面形状。

由于几何局限性,物体与其在镜面中的像不是一一对应的,导致单镜面只能对目标的局部或片段进行重构。在系统中采用了 4 个镜子构成一个柱形结构,可以从不同角度反射成像。这样处理,可以避免找不到对应点的情况;另外,如果存在多个对应点,可以采用算法提高重建的精度。

### 2.2 系统的空间分辨率

从 2.1 节可以看出,基于镜面的 3D 采集方法是一种通过分析图像上物体及其在镜面中图像的差异来计算立体结构的方法。由于目前的成像系统基本上都能输出数字图像,且对数字图像进行处理也很方便,因此目前绝大部分该类系统都采用数字相机进行数据采集。

由于数字图像的是按像素进行数据保存的,导致基于镜面的 3D 采集方法的空间分辨率在水平方向上与相机的分辨率是一致的。也就是说,相机的分辨率决定了 3D 重构的水平分辨率。

在竖直方向上,从(1)式可知,对于数字图像,假设  $X_A$  与  $X_{A'}$  在位置匹配上的误差为 1,则在靠近平台(高度为接近 0)的位置上,可以得到其高度误差为

$$\frac{\Delta h_A}{h_0} = \frac{1}{2X_M + 1} \approx \frac{1}{2X_M} \quad (2)$$

由(2)式可以看出,位置坐标  $X_M$  决定了纵向分辨率  $\Delta h_A$ 。为了提高系统的采集精度,需要相机的分辨率高一些,才能提高纵向分辨率。

### 2.3 基于图像的点匹配算法

与直接用激光扫描物体表面的 3D 扫描方法不同,基于镜像的方法需要计算物体与其像的视差关系而得出物体表面的 3D 结构。为了计算视差,需要先确定物体上任意一点在像上的位置,需要采用基于图像的点匹配算法。通常,由于物点与像点具有很大相似性,可以通过计算两个点的相似度和判断两个点是否是物像对应关系。相似度比较的方法比较多,采用基于角度的相似度计算,实验上可以有较高的匹配成功率。

所采集图像中,对于物点  $B$  及其周围的 8 个像素,将  $B$  的灰度与周围 8 个像素的灰度相减,可以构建出一个 8 维的矢量  $\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_8)$ ; 对于像点  $B'$  及其周围的 8 个像素,相同方法也可以构建出一个矢量  $\mathbf{B}' = (b'_1, b'_2, \dots, b'_8)$ ,比较  $B$  与  $B'$  是否相似,可采用余弦定律进行判别,即

$$\cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^8 b_i \cdot b'_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^8 b_i^2 \cdot \sum_{i=1}^8 b'^2_i}} \quad (3)$$

若  $\cos \theta = 1$ ,说明两者夹角为零,可判断为相同;若  $\cos \theta = 0$ ,说明两者正交,差异较大。具体操作中,通过实验设定一个阈值,比较  $\cos \theta$  与阈值的大小来判断两者是否相似。

采用余弦定律进行匹配判断,可较好地处理能量经镜面反射衰减造成的像比物暗的问题。通过与周围像素构建多维矢量再进行比较,相当于引入了像素与周围像素的关系,提高了匹配判别的成功率。根据具体实验,也可以参考和选择更多、非紧邻的像素进行矢量构建。

### 2.4 算法的加速和优化

基于镜像的 3D 采集方法中运算量最大的地方是物像点的匹配查找计算过程。如果不考虑优化,对于任意物点,需要遍历所有镜像面中的像素,找到最为接近的像点。很明显,这是一个平方关系, $N$  个像素匹配,需要  $N^2$  次查找,非常耗时。结合成像的几何关系,可以从以下两个方面提高匹配查找的效率。

1) 由于物与像成对称关系,物点与像点的连线一定垂直于镜面。对于图 1 的成像情况,可知物点与像点必定位于与镜面垂直的直线上。这在基于镜像的 3D 采集中称为成像的极线约束条件<sup>[3-6,9]</sup>。利用该性质,可以将匹配查找区域由二维降低到一维直线,减小匹配空间从而缩短匹配计算时间。

2) 由镜面成像的对称关系,可以估计像点应该是位于与物点呈几何对称的点附近,从该点开始查找。再考虑物体放置于观测台上,其高度一定大于零,可以确定在极线上的查找方向;再利用物体的最大高度和最小高度的限制,确定在极线上查找的范围。这几个因素可以使查找计算量进一步降低。

### 2.5 3D 模型数据结构及其再现

通过以上几个步骤,可以计算出图像上任意像素的高度值  $z$ ,像素位置可以作为其水平位置  $(x, y)$ ,物体表面  $S$  的空间信息也就确定了。进一步,因为所采集到的图像可以是彩色的,因此物体表面上任意一点像素的颜色也是确定的,这相当于物体的纹理信息也可同步获得。空间坐标信息有三个维度  $(x, y, z)$ ,颜色信息也有三个维度  $(r, g, b)$ ,一共 6 个维度表示一个空间点。将物体的空间坐标和颜色信息按照一定的格式记录,形成物体的 3D 模型文件。

## 3 实验结果和分析

### 3.1 成像结构及其校准

采用在亚克力板材贴高反膜而成反射镜面,4 面镜子的尺寸都是 6.0 cm × 20.0 cm,将 4 面镜子连接成为一个口字的结构,镜面向内,如图 2(a)所示,经过 4 面镜子的反射,物体可从 5 个不同方向上被观察到。

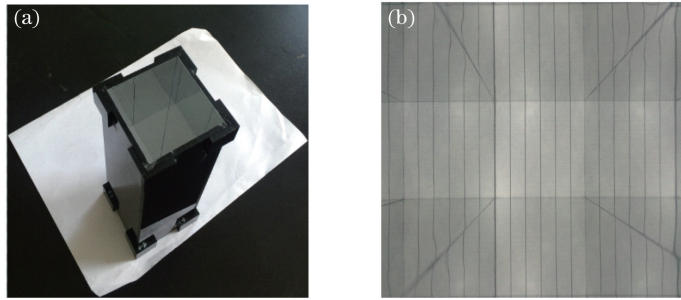


图 2 4面柱形反射镜及其成像结果

Fig. 2 Four sides cylindrical mirror and its imaging results

被测物放置于该结构的底部,从正上方拍照。相机为 Iphone 5s 手机相机,置于支架上进行拍照,图像大小为  $2448 \text{ pixel} \times 3264 \text{ pixel}$ 。

为减少计算误差,相对的镜子与镜子之间应该相互平行,相邻的镜子之间应该相互垂直,镜子与桌面之间也应该相互垂直。设计了一个装调方案,以提高手工组装的精度。方法如下:绘制一张有均匀分布线条的白纸,将镜子放置于该白纸上,从上观察,可以看到如图 2(b)所示的结果;仔细调整镜子的位置和方向,尽量保证白纸上的直线与像中的直线形成一条连续的直线,且不发生弯折。通过该方法校正过的镜子,基本能满足实验的精度要求。

如果镜子精度还有误差,可以进一步通过图像的几何校正来改进。因为 4 面镜子的结构是对称的,因此 4 个角点在镜子里的位置是可知的,通过图像的拉伸或斜切,将图像中的角点调整到理想位置,也可以校正镜子的误差。

3D 重建的算法采用 C# 语言实现,图像读取用 .NET 的 GDI+ 库,3D 模型的重现和显示采用 OpenGL 库的绘图函数来实现。

### 3.2 3D 重建结果

图 3 和 4 是采用以上系统进行 3D 采集和重建的两个例子,图 3 为一个立方体的 3D 重构结果,图 4 为一个半球体的成像结果。图 3 和 4 中,(a)为相机所拍摄到的原始图片,(b)为从侧面观察时物体的部分外观轮廓,(c)为利用双目立体视觉的点重建方法<sup>[16]</sup>,并采用点状粒子系统显示的 3D 模型。

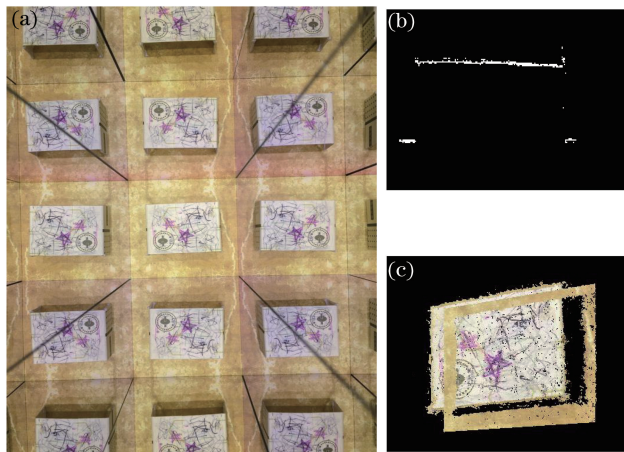


图 3 3D 重构示例一

Fig. 3 3D reconstruction example 1

使用 4 面镜子与一面镜子相比匹配率提高了很多,物体重建的精度也会相应地得到提高。从采集的图像中可以看出,在中间像上找到一点,周围 4 个像中(与中间像相邻的 4 个镜像)至少能找到一个对应点(排除物体凹陷等特殊形状)。假设中间像上一点在周围每面镜子上能够匹配正确的概率都为  $a$  ( $a > 60\%$ ),那么在 4 个镜像中至少能匹配一个点的概率为  $p = 1 - (1 - a)^4$  ( $p > 97.44\%$ )。经计算在物体表面连续的地方,由实验数据得到示例一和示例二的重建误差分别为 0.053 和 0.062。

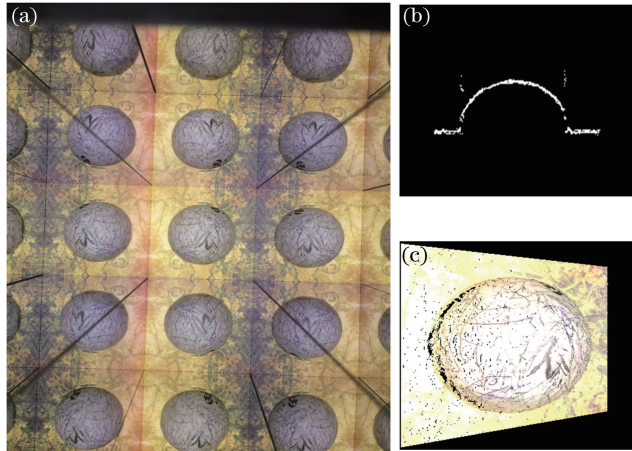


图 4 3D 重构示例二

Fig. 4 3D reconstruction example 2

从重建结果可看出,重建的 3D 模型能体现出被测物体的基本形状,从侧视图上看,模型的形状与被测物体是相似的,说明所采用的方法基本有效。与激光扫描的 3D 重构方法不同,该方法因为同步地采集了物点的空间坐标位置和颜色信息,再现显示时更为真实。

基于镜像的 3D 采集方法所得的 3D 模型是基于点结构,而不是基于三角面结构。以点为单位保存 3D 模型,点与点的关系基本上是独立的,更利于以流方式进行数据处理和传输,因此该方法更适合应用于 3D 视频传输和通信领域。

从图 3(b)和 4(b)中可以看出,在表面出现间断的地方,点匹配错误更严重,导致这些区域的重建结果比较糟糕。出现这种情况的原因主要是视差的存在和镜子的不理想,导致物像点匹配错误,这种情况在间断表面特别严重。匹配错误导致了高度计算错误,出现了图中那些离散点。这验证了 2.2 节中的论述,同时也说明物像点匹配算法还应该进一步改进。

## 4 结 论

展示了所构建的基于四平面镜的单相机 3D 采集系统,分析了 3D 扫描的几何光路、基于图像的高度解析算法,讨论了空间分辨率与图像分辨率的关系、算法的优化以及 3D 再现技术。从实验结果可以看出,与常见的基于激光扫描的 3D 扫描系统相比,基于镜像视差的 3D 采集系统,结构更简单,可同时采集物体的空间信息和表面纹理颜色,是一种可行的 3D 采集手段。

## 参 考 文 献

- [1] Nene S A, Nayar S K. Stereo with mirrors[C]. Proceedings of the Sixth International Conference on Computers, 1998: 1087-1094.
- [2] Kuthirummal S, Nayar S K. Multiview radial catadioptric imaging for scene capture[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 916-923.
- [3] Hu Chunhai, Liu Bin. Three-dimensional reconstruction method using single CCD based on geometric constraint of bilateral symmetry[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2576-2581.  
胡春海, 刘 斌. 基于镜像几何约束的单摄像机三维重构[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2576-2581.
- [4] Cao Yu, Chen Xiuhong. 3D reconstruction method based on image silhouette [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(6): 205-208.  
曹 煜, 陈秀宏. 基于图像轮廓的三维重建方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(6): 205-208.
- [5] Cao Yu. 3D reconstruction method based on silhouettes[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.  
曹 煜. 基于轮廓的三维重建方法及实现[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- [6] Cao Yu, Chen Xiuhong. Image 3D reconstruction method based on silhouette outline[J]. Computer Engineering, 2012, 38(5): 224-226.

- 曹煜, 陈秀宏. 基于侧影轮廓的图像三维重建方法[J]. 计算机工程, 2012, 38(5): 224-226.
- [7] Li Gongyu. Research of railway ballast geometric characteristics based on 3D model reconstruction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.  
李公羽. 基于三维模型重建的铁路道砟几何特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [8] Zhang Hengkang, He Yuming, Zhang Gengeng, *et al.* A new method binoculars stereo vision with single camera[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(10): 171-176.  
张恒康, 何玉明, 张耿耿, 等. 一种单相机测量三维运动轨迹的方法[J]. 固体力学学报, 2010, 31(10): 171-176.
- [9] Shen Yehu, Liu Jilin, Du Xin. Simultaneous three-dimensional environment reconstruction and localization based on monocular vision[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 907-914.  
沈晔湖, 刘济林, 杜歆. 单目视觉的同时三维场景构建和定位算法[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 907-914.
- [10] Sun Wei, He Xiaoyuan, Zheng Xiang. Three-dimensional displacement measurement based on single CCD camera[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 29(9): 1723-1729.  
孙伟, 何小元, 郑翔. 基于单摄像机的三维位移测试方法[J]. 光学学报, 2008, 29(9): 1723-1729.
- [11] Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1338-1342.  
雷彦章, 赵慧洁, 姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. 光学学报, 2008, 28(7): 1338-1342.
- [12] He Dong, Liu Xiaoli, Yin Yongkai, *et al.* Three-dimensional imaging based on combination fringe and pseudorandom pattern projection[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209021.  
何懂, 刘晓利, 殷永凯, 等. 结合条纹和伪随机结构光投影的三维成像[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209021.
- [13] Jia Songmin, Wang Ke, Li Xiuzhi, *et al.* Monocular camera three dimensional reconstruction based on variation model[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0415002.  
贾松敏, 王可, 李秀智, 等. 基于差分模型的单目视觉三维重建方法[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0415002.
- [14] Zhu Jigui, Li Yanjun, Ye Shenghua, *et al.* Study on single camera simulating stereo vision measurement technology[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(7): 943-948.  
郑继贵, 李艳军, 叶声华, 等. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J]. 光学学报, 2005, 25(7): 943-948.
- [15] Zhang Dazhi, Wang Yongtao, Tian Jinwen, *et al.* Efficient 3D reconstruction using monocular vision[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 289-294.  
张大志, 王勇涛, 田金文, 等. 基于单目视觉系统的远距离场景重建算法研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 289-294.
- [16] Bartoli A, Lapresté J T. Triangulation for points on lines[J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(2): 189-200.