

# 基于单幅图像的三维重建技术综述

孙宇阳

(北方工业大学图像处理与模式识别研究所, 100144 北京)

**摘 要** 三维重建是计算机图形学、图像处理和计算机视觉研究中的一个重要课题, 其包括基于三维点云的重建和基于图像的重建。基于图像的三维重建又包括多幅图像和单幅图像重建。本文侧重于单幅图像重建技术, 在对大量有关单幅图像三维重建技术的文献理解和综合基础上, 归纳介绍了3种重建技术并给出相应的应用实例, 从而提出了单幅图像三维重建技术的一些展望。

**关键词** 三维重建; 统计学习方法; 形状恢复技术; 几何投影

**分类号** TP391.41

三维重建是利用二维投影恢复物体三维信息(形状等)的数学过程和计算机技术。它根据真实场景的数据重建出具有准确几何信息和照片真实感的三维模型。这些精确的三维模型, 不仅能够提供场景可视化和虚拟漫游方面的功能, 更可以满足数据的存档、测量和分析等更高层次的需求, 尤其适用于数字文物、数字古建、数字博物馆、城市规划、医学研究、航天、造船、司法、考古、工业测量、电子商务等一系列领域, 因此有着广阔的应用前景和广泛的应用领域。

最初关于三维重建的研究是基于几何信息方法的, 如点云等。近些年基于图像的三维重建技术兴起, 它使用直接拍摄到的照片进行重建, 克服了传统的基于几何重建技术中的标定问题, 其具有很大的优越性, 因而基于图像的三维重建技术成为众多学者研究的重要课题。目前大部分研究是针对两幅或多幅(序列)图像的三维重建, 其重建方法有立体视觉法<sup>[1-2]</sup>、运动图像序列法<sup>[3]</sup>、光度立体学<sup>[4]</sup>等, 详细方法的总结见文献[5]。现在最新的研究成果是基于图割的能量最小化算法的序列图像三维场景重建<sup>[6]</sup>, 其优点是能达到全局最优, 实验效果较好, 但也

存在不足, 如能量函数条件限制多<sup>[7]</sup>、难寻觅, 且最小化计算量很大。总之, 多幅图重建技术上需要先对每幅图像进行繁杂的预处理, 寻找图像间用于匹配的特征点, 而特征点匹配又是图像处理中的难点, 因此利用多幅图像进行三维重建操作上存在重建成本高、操作复杂、计算量大, 不适用于动态场景重建等问题。

单幅图像三维重建的主要思想是通过单张数码影像提取目标的颜色、形状、共面性等二维、三维几何信息, 从而利用少量已知条件获取该目标的空间三维信息。单幅图像三维重建操作上避免了多幅图像重建的麻烦, 它重建过程简单、速度快, 只需拍摄一张角度合适的数码相片即可获得该目标的三维几何信息, 它投入少, 不需要多个摄像机或投影仪进行标定, 大大减少了人力、物力的投资; 而且技术上只对一幅图像进行预处理, 无需多幅图像的匹配, 避开了多幅图像重建的难点, 大大节约了时间, 提高了效率。因此, 用单幅图像进行三维重建越来越多地得到人们的重视。

近年来, 国内外众多学者做了很多基于单幅图像的三维重建研究。本文在对目前有关单

幅图像三维重建技术文献进行理解和综合的基础上,重点介绍了 3 种单幅图像重建技术,并对这 3 种技术及其应用和可能的发展空间进行概述。

## 1 单幅图像重建技术

### 1.1 基于特征统计学习方法

这种方法建立在大型的目标数据库基础上,如人脸数据库、场景数据库。首先通过学的方法,对数据库中的每个目标进行特征提取(包括亮度、深度、纹理、几何形状);然后对重建目标的亮度、深度、纹理、几何形状等特征各自建立概率函数;最后将重建目标与数据库中相似目标的相似程度表示为概率的大小,取概率最大的目标深度为重建目标深度,再结合纹理映射或插值方法进行三维重建。目前已用的概率模型有马尔科夫模型<sup>[8-10]</sup>、隐马尔科夫模型<sup>[11]</sup>(HMMs, Hidden Markov Model)和 PHMMs 模型<sup>[14]</sup>(Pseudo 2-D Hidden Markov Model),代表全局目标候选深度的概率函数模型<sup>[15]</sup>,凡能代表全局目标的概率函数都可以用来尝试,如基于图割优化的马尔科夫概率函数模型。

目前这种研究方法可以对大型场景(斯坦福大学的 A. Saxena, M. Sun and A. Y. Ng 团队<sup>[8-10]</sup>)、人脸<sup>[11-13]</sup>及人体<sup>[14-15]</sup>进行重建,并将其应用到了场景重建<sup>[8]</sup>、视频检索<sup>[16]</sup>、识别系统<sup>[17]</sup>中。

这种技术的优势在于只要数据库足够完备,任何和数据库目标一致的对象都能进行三维重建,并且重建质量和效率都很高,很少需要人工交互。缺点是和数据库目标不一致的重建对象就很难得到理想的重建结果,甚至与理想目标差别甚远。因此,这种重建技术最大的困难是建立完备的数据库。此外,如果能在深度预测上有更精确的估计,重建效果会更精确。

### 1.2 基于形状恢复技术

根据 2-D 图像中的 3-D 线索进行物体三维形貌恢复的技术统称为形状恢复技术(Shape from X, 简记为 SFX),其中 X 代表立体光、阴影、轮廓、纹理、运动等。大多数形状恢复技术的

基础是物理学中的理想模型,即朗伯体反射图方程:

$$I(x, y) = R(p, q), p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y}.$$

它对成像条件、光学特征都做了理想假设。研究学者将此技术应用到单幅图像三维重建上,得到三维形貌模型。其基本原理是:利用 SFX 的计算结果,对灰度、亮度或边界等做出约束限制,得到关于物体成像改造过的的反射图方程,然后利用相应的方法对反射图方程逆求解得到物体的三维高度信息,结合优化的图像轮廓提取技术,考虑自遮掩影响,进行数字化处理得到图像的数字化模型,进而得到物体的三维形貌。

目前国内学者利用这项技术对二值图像和灰度图像进行重建<sup>[18-23]</sup>。相关研究结果可应用到军事目标定位、化学实验分析、古文物恢复、模型制造、牙齿矫正、人脸识别、文字识别等多个领域进行三维缺陷检测<sup>[24]</sup>。

这种技术的优点是方便快捷,重构效率较高,适用非常广泛。但这种方法对光线和灰度要求较高,因此需要对图像的光度和灰度做预处理,并且图像分辨率高低和前景背景灰度差别会影响恢复的质量;而且此项技术若没有其它约束条件,对形如凸面和凹面等曲面物体不能实现唯一重建<sup>[25]</sup>,这有待进一步改进。

### 1.3 基于图像中的几何投影信息

利用几何投影信息对单幅图像进行三维重建是一种既广泛又实用的做法。其重建的基本原理是:利用图像中含有的大量平行线、平行面、垂直线、垂直面、消失点、消失线等多种几何属性的约束进行相机或平面标定,从而估计相机参数、焦距和尺度向量;然后结合目标的几何形状测量或计算目标高度来估计目标深度;最后利用几何先验或透视投影、贝叶斯模型等对图像进行数字化,建立数字化模型,得到单幅图像的三维重建结果。

对此种重建技术国内外研究都较多,研究对象也很广泛,如未校准图像<sup>[26]</sup>、已知几何形状的校准图像<sup>[27]</sup>、全景图<sup>[28]</sup>、卫星图像<sup>[29]</sup>、含有重复目标的图像<sup>[30]</sup>、室内图像<sup>[31-32]</sup>、建筑物<sup>[33]</sup>、直棱柱<sup>[34]</sup>和六面体<sup>[35-36]</sup>、抛物柱面<sup>[37]</sup>及人为多面体<sup>[38]</sup>;可以对场景图像重建、几何体

识别、数字城市、虚拟现实、机器人导航或机器人伺服等多方面应用。

该种重建技术优点是可以利用有限的已知条件实现对物体的三维信息的测量,简单、经济实用;另外由于图像中不同几何体有不同的参数模型,因此我们可以扩充更多的几何体图像进行重建,但由于拍摄角度、相机内参估计误差、测量误差及误差累积等原因造成重建精度低的问题,并且由于平行性质、垂直性质等几何信息约束限制了其应用范围。

## 2 技术展望

随着工业化、现代化步伐的加快,用三维虚拟现实手段对城市建设进行统一规划、决策将是最有效的手段之一;高精度的自动化缺陷检测技术替代传统的人工缺陷检测也是高度工业化的一个必然趋势;古物重建、机器人导航等多方面应用的需求也促进了单幅图像三维重建技术的进一步发展。

虽然目前的单幅图像三维重建技术在理论与实际应用中都已取得了一定的成果,但它还存在着不足,有待进一步改进。

1)基于特征统计学习方法的单幅图像三维重建虽然取得了较好的重建效果,但当重建图像与目标数据库不一致时,重建效果不够理想,甚至完全背离。其原因是:图像受到亮度和距离的影响较大;建立的概率函数模型计算得到的概率值偏小,不能得到满意的重建结果。因此,可考虑包含亮度、距离、方位等各因素建立更完备的目标数据库。如建立的人脸图像数据库及其三维重建都是基于正面的、中性表情的人脸,对有姿态变化的人脸适应性较小,需要进一步

改进,或寻找更优化的概率模型,这是有待进一步研究的问题。

2)基于形状恢复技术,即 Shape From X 的单幅图像三维重建技术能快速、便捷地重建物体表面是三维缺陷检测的一项重要技术,但对目标的深度估计很粗糙,如何提高深度估计的精确度是这项技术有待进一步研究的问题。

3)基于几何投影信息的单幅图像三维重建技术对含有几何结构的目标图像取得了较理想的重建效果,但是测量误差累积,人工参与较多,因此,利用几何投影自动重建单幅图像是值得研究的问题。

除此之外,还有其它的重建方法,如 Hu Zhengzhou 等<sup>[39]</sup>用一种彩色编码结构光技术从单幅图像中重建目标形状,这种方法也是我们研究的方向。

利用单幅图像进行三维重建的优势明显,但同时单幅图像信息不全,如图像中有遮挡;利用单幅图像进行三维重建得不到完整的三维场景,因此利用单幅图像进行三维重建的最大问题是精确度不高。目前的研究方法中,基于统计学习技术的单幅图像三维重建效果较好,但精确度也只有 64.9%,因此如何快速有效地提高重建的精确度是单幅图像三维重建的迫切问题。此外,三维重建的重点问题是深度估计,如果能提高重建目标的深度估计精确度,也会有效地改善重建的效果。

总之,目前单幅图像三维重建技术取得的成功不仅大大拓宽了传统三维重建技术的应用领域,而且这项技术的应用发展必将反馈出新的技术问题,从而进一步丰富三维重建的内容和推动相关领域的发展。

## 参 考 文 献

- [1] 李玲. 基于双目立体视觉的计算机三维重建方法研究[D]. 湖北: 武汉大学, 2005
- [2] 段华. 基于双目视觉的计算机三维重建[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2003
- [3] 庄越挺, 刘小明, 潘云鹤, 等. 运动图像序列的人体

三维运动骨架重建[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(4): 245-250

- [4] 陈宇峰, 谭文静, 王海涛, 等. 光度立体三维重建算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(11): 2408-2414

- [ 5 ] 刘海英, 李贻斌, 田新诚, 等. 三维重建综述[ C ] . 第 3 届中华文化遗产数字化及保护国际研讨会, 2005: 170-174
- [ 6 ] Sormann M, Zach C, Karner K. Graph cut based multiple view segmentation for 3D reconstruction [ C ] . 3D Data Processing, Visualization and Transmission, Third International Symposium, 2006: 1085-1092
- [ 7 ] Kolmogorov V, Zabih R. What energy functions can be minimized via graph cuts? [ J ] . IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2004, 2(26): 147-159
- [ 8 ] Saxena A, Sun M, Ng A Y. Make3D: Learning 3-D Scene Structure from a Single Still Image[ J ] . Proc. IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence, 2009, 5(31): 824-840
- [ 9 ] Saxena A, Sun M, Ng A Y. Learning 3-D Scene Structure from a Single Still Image[ M ] . Proc. ICCV Workshop 3D Representation for Recognition, 2007: 1-8
- [ 10 ] Saxena A, Sun M, Ng A Y. 3-D Reconstruction from Sparse Views Using Monocular Vision[ M ] . Proc. ICCV Workshop Virtual Representations and Modeling of Large-Scale Environments, 2007: 1-8
- [ 11 ] Nagai T, Naruse T, Ikehara M, et al. HMM-Based Surface Reconstruction from Single Images [ J ] . Proc. IEEE Int'l Conf. Image Processing, 2002(2): 561-564
- [ 12 ] Hassner T, Basri R. Example Based 3D Reconstruction from Single 2D Images[ M ] . CVPR Workshop Beyond Patches, 2006: 15-15
- [ 13 ] Gong X, Wang GY, Xiong LL. Single 2D Image-based 3D Face Reconstruction and Its Application in Pose Estimation[ J ] . Fundamenta Informaticae, 2009, 94(2): 179-195
- [ 14 ] Kaori Y, PHideo S, Masaaki M. Reconstruction of 3D Face Model from Single Shading Image Based on Anatomical Databases[ J ] . Proceedings of the 18th International Conference Pattern Recognition, 2006(8): 350-353
- [ 15 ] Baek S Y, Kim B Y, Lee K. 3D face model reconstruction from single 2D frontal image[ C ] . Proceedings of the 8th International Conference. Virtual Reality Continuum and its Applications in Industry, 2009(12): 95-101
- [ 16 ] Ewerth R, Schwalb M, Freisleben B. Using depth features to retrieve monocular video shots [ C ] . Conference on Image and Video Retrieval, 2007: 9-11
- [ 17 ] Yuankui Hu, Ying Zheng, Zengfu Wang. Reconstruction of 3D face from a single 2D image for face recognition[ J ] . Visual Surveillance and Performance Evaluation of Tracing Surveillance 2005: 217-222
- [ 18 ] 何联想, 牛连强. 基于 SFS 方法的单幅图像三维重构技术研究[ J ] . 科技信息: 学术研究, 2008(34): 105-107
- [ 19 ] 高月芳, 罗飞, 曹建忠. 由单幅二维灰度图像重构物体表面形状[ J ] . 计算机应用研究, 2007, 8(24): 195-197
- [ 20 ] 赵冬斌, 陈强, 陈善本, 等. 由单幅图像恢复物体三维形状的应用研究[ J ] . 光学技术, 2001, 4(27): 195-197
- [ 21 ] 孙林丽, 李言, 郑建明. 单幅图像三维表面重建的算法研究与实现[ J ] . 计算机应用, 2009, 2(29): 433-436
- [ 22 ] 吴凤和, 张晓峰, 施法中. 基于单幅图像数据的三维重构方法研究[ J ] . 中国机械工程, 2007(17): 2071-2075
- [ 23 ] 范桂杰. 基于单幅图像的三维形貌恢复研究[ D ] . 青岛: 山东科技大学, 2005
- [ 24 ] 宋丽梅, 周兴林, 徐可欣, 等. 基于单幅测量图像的三维缺陷监测技术[ J ] . 光学学报, 2005, 9(25): 1195-1200
- [ 25 ] Duro Jean Denis, Piau Didier. Ambiguous shape from shading with critical points[ J ] . Journal of Mathematical Imaging and vision, 2000, 12(2): 99-108
- [ 26 ] Wilczniak, Boyer, Sturm. Camera Calibration and 3D Reconstruction from Single images Using Parallelepipeds[ J ] . Computer Vision, 2001(1): 142-148
- [ 27 ] Upright C, Cobzas Jagersand D M. Wavelet-based light reconstruction from a single image[ J ] . Computer and Robot Vision, 2007: 305-312
- [ 28 ] Sturm P. A Method for 3D reconstruction of piecewise planar objects from single panoramic image[ J ] . Omnidirectional Vision, 2000: 119-126
- [ 29 ] Xiaojing Huang, Leong Keong Kwoh. 3D building reconstruction and visualization for single high resolution satellite image[ C ] . Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007: 5009-5012

- [ 30] Sharma, Chaudhury, Srivastava. On Exploiting Affine Repetitions for 3D Reconstruction from a Single Image[ J] . Computer Vision Graphics & Image Processing, 2008(12): 489-496
- [ 31] Lin L, Zeng K, Wang Y, et al. 3D structure inference by integrating segmentation and reconstruction from a single image[ J] . IET Computer Vision, 2007: 15-22
- [ 32] Jingyuan Huang, Cowan, B. Simple 3D Reconstruction of Single Indoor Image with Perspective Cues[ C] . Canadian Conference on Computer and Robot Vision, 2009: 140-147
- [ 33] 丁伟利, 朱枫, 郝英明. 基于单幅建筑物图像的三维信息提取[ J] . 仪器仪表学报, 2008, 9(29): 1965-1971
- [ 34] 李波, 王祥凤, 李本山. 基于单幅图像的三维重建技术[ J] . 信息与电子工程, 2006, 2(4): 129-133
- [ 35] Wilczkowiak M, Boyer E, Sturm P. Camera calibration and 3D reconstruction from single images using parallelepipeds[ J] . Computer Vision, 2001 (1): 142-148
- [ 36] Fong C. K, Cham, W. K. 3D Object reconstruction from single perspective distorted line drawing image using vanishing points[ J] . International Signal Processing and Communication Systems, 2005: 53-56
- [ 37] Sturm P. A Method for 3D Reconstruction of Piecewise Planar Objects from Single Panoramic Image[ J] . Omnidirectional Vision, 2000: 119-126
- [ 38] Lin L, Zeng K, Wang Y, et al. 3D structure inference by integrating segmentation and reconstruction from a single image[ J] . IET Computer, 2008, 1(2): 15-22
- [ 39] Zhengzhou Hu, Qiu Guan, Sheng Liu, et al. Robust 3D Shape Reconstruction from a Single Image Based on Color Structured Light[ C] . International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009: 168-172

## A Survey of 3D Reconstruction Based on Single Image

Sun Yuyang

(Institute of Image Processing and Pattern Recognition, North China Univ. of Tech., 100144, Beijing, China)

**Abstract** Three-dimensional reconstruction has always been an important research project in computer graphics, image processing and computer vision. There are two classes of 3-D reconstruction, based respectively on 3-D point clouds and images. The latter includes multi-images reconstruction and single image reconstruction. This paper focuses on single image reconstruction. Based on the reading and synthesis of large amount of literature, this article introduces three reconstruction technologies with their corresponding applications, and looks to the prospect of the development of 3D single image reconstruction.

**Key Words** 3D reconstruction; statistical learning method; Shape from X; geometric projection