

# 三维重建效果评价技术综述

王学宁, 韦 群

(装备学院 信息装备系, 北京 怀柔 101416)

**摘 要:** 三维重建技术快速发展, 并且在各个领域得到广泛应用。为比较各种重建方法的评价效果的优劣, 现将其中一些方法进行比较分析, 期望能够对该领域的发展状况全面了解, 并且明确未来的研究方向。

**关键词:** 三维重建; 重建模型; 效果评估; 综述

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-6970.2016.08.028

**本文著录格式:** 王学宁, 韦群. 三维重建效果评价技术综述[J]. 软件, 2016, 37 (8): 129-132

## Overview on Evaluation of 3D Reconstruction

WANG Xue-ning, WEI Qun

(Department of Information Equipment, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

**【Abstract】:** As a developing technology, 3D reconstruction has been used in many fields. Overviewed the some kinds of evaluation methods of different 3D reconstruction, and analyzed the advantages and disadvantages of these methods, hope to get a general understanding of this field and indicate the study orientations in the future.

**【Key words】:** 3D reconstruction; Evaluation methods; Reconstruction model; Overview

## 0 引言

三维重建是运用图像处理等相关技术, 使二维数据还原出三维信息, 形成三维立体表面的先进技术, 并且随着计算机技术广泛应用于生产生活的方方面面<sup>[1]</sup>, 高效建立物体三维几何模型的需求更加旺盛。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>[2-3]</sup>、运动图像序列法<sup>[4]</sup>、光度立体学<sup>[5]</sup>等, 当前出现了基于单张照片重构三维模型<sup>[6]</sup>、实时三维重建<sup>[7]</sup>等先进技术。三维重建的目标是在计算机对输入信息进行处理、操作和分析的基础上, 形成一个比较完整的表面模型。理想情况下, 三维模型应与真实模型形状、尺寸等一致。但在实际操作过程中, 由于数据源、构建方法等问题<sup>[8]</sup>, 不可避免地会出现一定的误差<sup>[9-10]</sup>。要对比使用不同重建方法形成的重建模型的效果, 仅仅通过视觉比较是不够充分的, 主观评价方法容易受到环境、观察者的状态等各种因素的影响, 这就需要客观的定量的评价方式。

近年来, 世界各国学者对三维重建效果评价进

行了广泛深入的研究, 但早期的研究人员评价方式是不全面的, 这不能满足各类应用对真实三维信息的具体要求。三维重建效果评价技术是将重建后的模型通过运用各种客观的方法, 将重建模型与真实模型进行对比, 来验证重建算法是否达成其预期的效果。本文根据是否需要一个完整的真实模型将现有的评价方法分为两类: 无真实模型评价的方法和有真实模型的评价方法。完整的真实模型是作为评价的参照模型, 是重建工作的期望效果。

## 1 无真实模型的评价方法

若不存在或者不需要一个完整的真实模型, 评价往往是集中在重建之后与输入数据集的一致程度的估计。

### 1.1 重建误差法、积分误差法

由 P. Alliez、L. Saboret 等人提出来的计算重建误差(reconstruction error)法<sup>[11]</sup>, 是通过计算输入点到重建表面点的平均欧式距离来评价重建结果。得到的重建误差越小, 重建效果越好; 通常, 重建

误差会随点的增加而减少。

由 H. Zhou、Y. Li 等人提出来的计算积分误差 (integration error) 法<sup>[12]</sup>, 是通过计算最终重建表面上点和它们输入数据源中最近距离点距离<sup>[13]</sup>的平均值来评估模型的质量。积分误差越小, 重建效果越好。类似的, 文献[14]中通过计算深度数据到重建表面的平均距离量化重建正确性。

这种单纯计算误差的方式不与参照模型作对比, 考虑因素单一, 而且会出现造成局部细节丢失的情况。因此, 即便得到较小的误差, 也不能让人信服。

## 1.2 三维基尼系数法<sup>[15-16]</sup>

这种方法是根据洛伦兹曲线形成的。洛伦兹曲线是在经济学和社会学中广泛应用的统计离差方法, 它主要用于测量分布的不平等。三维洛伦兹表面的概念是根据洛伦兹曲线提出来的, 是洛伦兹曲线的在三维空间上的延伸, 是两个转换曲率联合概率的累积分布函数。R. Martin、P. Rosin 等人将基尼系数方法运用于三维重建的评价的关键步骤是, 构造出一个参数化的与表面模型相对应的联合概率分布。这样, 就可以使用基尼系数来检测分布的不同, 得到重建模型与参照模型的差距。

该方法是假设不存在完整的真实模型, 将输入数据集看作是一系列的部分真实模型的组成, 具体实施步骤可分为 3 步: 检测重叠区域、三维洛伦兹表面估计、计算三维基尼系数 G。得到的 G 越小, 重建效果越好。

这种方法将重建结果与输入数据作对比, 虽然没有和真实模型做比较, 但也能间接得出重建结果的完整性。

## 2 存在真实模型的评价方法

若存在完整的真实模型, 可以把重建模型与真实模型对比, 根据两者之间的相似程度对进行重建效果进行评价。

### 2.1 形状误差法

形状误差 (shape error) 计算要评价的表面和真实情况之间的对称差分的体积与真实模型的体积比。形状误差越小, 重建效果越好。H. Jin、S. Soatto 等人根据对不同模型的结果做比较<sup>[17]</sup>, 发现计算时的邻域大小对结果有比较大的影响: 邻域较小时, 对噪声点敏感, 邻域较大, 不能物体表面的形状特征; 邻域大小选取欠当, 能够降低形状误差。文献[18]用不同重建的均方差和已知的真实模型做比

较; 文献[19]计算在不同噪声下的重建与真实模型的标准偏差。

形状误差法对真实模型的数据精度要求较高, 成本高, 效率低, 并且不适合大型场景重建的评价。

### 2.2 分解法

分解法是将三维模型分解到基元点、线和面<sup>[20]</sup>, 以局部精度评估整体质量。

#### (1) 基元点评价

点是三维模型最基础的单元, 其精度直接反映三维模型精度。以输入数据中的角点坐标作为真值, 与重建模型对应的点一一进行比对, 获得基元点的精度。根据真实模型的复杂程度, 随机选取  $n$  个角点, 得到模型的角点坐标串, 并根据与之相对应的真值角点坐标串计算得到点与点之间的距离差值, 求取重建模型和真值之间的距离偏移的均值  $a$ , 即为三维模型基元点的精度值。

#### (2) 基元线评价

线的种类多样, 如样条曲线等。对可由两个端点确定的最基本的直线段, 评价参数有长度差值、距离偏移和角度偏移等。

#### (3) 基元面评价

仅考虑用控制点坐标即可表示的平面, 不包括需要用曲率、弧度等来描述的特殊曲面。基于面的评价参数分为边数累积差值、面积差值、量量距离和两面夹角等。

若实际情况中, 基元面的评价需精确到边或点, 可进行分解, 参照基元点与基元线的评价方法。

分解法考虑了较多的评价角度, 但是也会出现一些偏差。比如, 出现点的数据缺失情况, 线段的排列不规则等都会对评价结果产生影响。

### 2.3 相位矩不变量法

目标在不同视角获得的投影图像中的形状可能有很大差别, 为了准确地进行形状匹配, 需要保证所提取的形状特征不受图像平移、旋转、透视等几何变换的影响, 即提取形状不变特征, 也称为几何不变量。矩不变量可以表示为由中心矩 (或者规范化矩) 构成的多项式形式, 不变量常与变换群联系在一起, 称某个量为不变量必然是指在某个变换群下的不变量, 如旋转不变量、仿射不变量等基于直角坐标系的中心矩的定义, 然后利用代数不变量理论, 推导出 7 个具有相似变换 (即平移、缩放和旋转) 不变性的二维矩不变量<sup>[21-23]</sup>。

相位矩不变量法是一种基于图像相位信息和矩

不变量的评价方法。该方法无需得到待重建物体高精度的三维数据，而是对相近视点下真实物体图像与三维重建物体的二维投影图像分别计算由相位矩不变量构成的特征向量，利用特征向量的相似性来评价重建结果的质量。该方法从整体视觉真实感的角度评价物体重建结果，强调三维重建方法对物体特征信息的重建能力。

该方法能够选择多个视点进行评价，并根据相机标定的内参和外参得到投影矩阵，而且通过提取边缘照片减少数据量，提高计算效率。但是也存在高阶运算不稳定导致不变量的使用数量受到了限制以及对噪声点比较敏感等问题。

2.4 多指标评价法

多指标评价方法也有其他的分类方法。在文献[24]研究中，I. Sargent、J. Harding 等人对三维模型的评价时将重要的因素分成：几何保真度、相对位置正确性和绝对位置正确性等 3 类；而且他们不仅考虑上面所说的内在质量，也充分考虑到了外在质量——是否满足客户的需求；文献[25]中根据 6 个基本性能区分不同方法：场景视图、图像一致、模型可见性、形状优先性、重建算法和初始化要求并且提出了分别从准确性和完整性两个方面对重建效果进行量化评价，通过度量重建模型上的点与真实模型上最近点之间的有向距离来检验重建是不足还是过度，定义一个距离临界值，90%的误差都是在这

个真实模型距离临界值内。

3 比较与分析

不同重建算法实现时所要求的假设条件、使用范围不尽相同，它们的重建效果也各具特色，但是评价重建效果的标准是相同的，即与真实模型的相似程度。根据是否需要完整真实模型这一分类原则，需要完整真实模型的方法都有重建模型同真实模型相比较的过程，整体上比单纯考虑重建模型本身的方法更有可信度。对比结果如表 1 所示：

目前三维重建的评价方法存在着一定的缺陷：

(1) 大多数评价方法过多注重整体正确性而忽略了局部正确性。整体正确性只是给了我们一个大体上重建的感知即对于真实形状是过度重建或者重建不足，并且重建模型本身还要具有连贯性。而局部正确性则更加注重于局部表面重建效果的连续性和与真实形状的一致性。

(2) 评价方法中引入的计算方法计算复杂度较高，运算量增加，需要占用更多系统资源，降低了运行速度。

(3) 不同评价方法反映出对噪声点的不同的敏感程度，有些方法会因噪声点产生较大的误差。

(4) 不同评价方法选取的评价角度各不相同，但是每一个评价角度总是包含一些前提，限制了适用范围。

表 1 不同评价方法的对比表

评价方法	优点	缺点
重建误差法	计算方法简单，易于实现	只考虑到点的偏移程度，评价尺度单一
积分误差法	计算方法考虑到对应点之间的多种可能性，计算一个点与多个对应点间的平均距离，计算较简单。	评价尺度依旧单一，即便得到较小的误差但是其中含有算法优化的原因；会出现局部细节丢失的情况，降低了评价的可靠性。
三维基尼系数法	根据局部表面的描述元通过计算联合概率分布获得整体的重建情况，将局部正确性和整体正确性紧密结合起来。	计算过程中提出来的转换曲率容易受到全局噪声点的影响，结果会因全局噪声点不成比例地增大；对面描述元的研究比较少，选取一种可能会不具有代表性。
形状误差法	通过与真实三维数据的对比，以准确性和完整性为指标的量化评价方法。	要求获得真实模型高精度三维数据，成本高，效率低，并且不适用于大型的物体或者大规模的场景。
分解法	将三维模型的基础单元：点、线、面等分别从距离偏移、角度偏移等多个角度进行评价，用随机采样的方法，以局部估计整体。	容易出现点的数据缺失情况，尤其是高程值比较大的角点；排列不规则的线段不能保证精度；只考虑了用控制点即可表示的平面，不包括用曲率、弧度等来描述的特殊曲面。
相位矩不变量法	基于图像的整体量化评价方法，能反映人眼对于三维重建模型相似性的辨别能力；将正交变换和矩不变量相结合，改进的构建相位矩不变量能够保持缩放和旋转不变性	增加了计算量，影响了运算速度；高阶计算虽然有更好的区分能力，但是不稳定，导致不变量的使用数量受到了限制；对噪声敏感
多指标评价法	分别从多个角度对重建效果进行量化评价，不同角度的评价算法通过大量采样，提高了可信程度	对于点指标，并不是所有模型存在着足够多的角点来进行评价，对评价模型有要求

## 4 结束语

量化的评价方法能够评价出重建模型各个部分的重建效果的好坏,对三维重建具有一定指导意义。评价结果作为参考依据,可以将效果不好的部分通过添加相应的输入数据并再次进行重建以达到期望效果。

三维重建评价方法选取的评价尺度不尽相同,评价技术也不够成熟,未来的工作应该注重整体正确性和局部正确性的联系与结合以及提高评价方法的适应性等方面。

## 参考文献

- [1] 吴彤,傅中力. 三维重建技术及其军事应用[J]. 国防科技, 2015, 36(1): 31-34.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Ma Q, Zou C. 3D Shape Reconstruction from a Single Image[C]// Internet Technology and Applications (iTap), 2011 International Conference on. IEEE, 2011: 1-4.
- [7] Haala N, Kada M. An update on automatic 3D building reconstruction[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2010, 65(6): 570-580.
- [8] 李敏宁, 张巧, 赵劫. 视觉注意机制下的三维重建技术的改进[J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 05期: 192-196.
- [9] 孙丽娟. 基于序列图像的三维重建算法研究及误差分析[D]. 青岛科技大学, 2012.
- [10] 王海彬, 陈华华, 顾伟康, 等. 基于视觉导航的三维重建算法误差分析及补偿[J]. 传感技术学报, 2004, 04期(4): 556-559.
- [11] [http://www.cgal.org/Manual/3.5/doc\\_html/cgal\\_manual/Surface\\_reconstruction\\_points\\_3/Chapter\\_main.html](http://www.cgal.org/Manual/3.5/doc_html/cgal_manual/Surface_reconstruction_points_3/Chapter_main.html), CGAL.
- [12] Zhou H, Liu Y. Accurate integration of multi-view range images using k-means clustering[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(1): 152-175.
- [13] J. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras. Multi-view stereo reconstruction and scene flow estimation with a global imagebased matching score. IJCV, 72(2): 179-193, 2007.
- [14] Yemez Y, Wetherilt C J. A volumetric fusion technique for surface reconstruction from silhouettes and range data[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2007, 105(1): 30-41.
- [15] Song R, Liu Y, Zhao Y, et al. An Evaluation Method for Multiview Surface Reconstruction[J]. IEEE, 2012: 387-394.
- [16] Taubin G. Estimating The Tensor Of Curvature Of A Surface From A Polyhedral Approximation[C]// Iccv. 1995: 902-907.
- [17] H.Jin, S. Soatto, and A. Yezzi. Multi-view stereo reconstruction of dense shape and complex appearance. IJCV, 63(3): 175-189, 2005.
- [18] G.Vogiatzis, P. Torr, S. Seitz, R. Cipolla. Reconstructingreliefsurfaces. Image and Vision Computing, 26(3): 397-404, 2005.
- [19] Huang Q X, Adams B, Wand M. Bayesian surface reconstruction via iterative scan alignment to an optimized prototype[C]// Proceedings of the fifth Eurographics symposium on Geometry processing. Eurographics Association, 2007: 213-223.
- [20] 张雯, 程亮, 张群, 等. 三维模型几何质量评价方法[J]. 测绘通报, 2014, 第7期(7): 44-47.
- [21] 李洪波. 共形几何代数与几何不变量的代数运算[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(7): 902-911. DOI: 10.3321/j.issn:1003-9775.2006.07.002.
- [22] 刁麓弘, 章森, 刘磊, 等. 相位矩不变量[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(5): 645-651.
- [23] 公明, 葛娟, 曹伟国, 等. 相位矩不变量用于评价基于图像的三维重建结果[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(9): 1384-1391. DOI: 10.3969/j.issn.1003-9775.2013.09.016.
- [24] I. Sargent, J. Harding, and M. Freeman, "Data quality in 3D: Gauging quality measures from users' requirement," in Proc. Int. Archives Photogramm., Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 2007, vol. 36, no. 2, pp. 1-8.
- [25] Seitz S M, Curless B, Diebel J, et al. A Comparison and Evaluation of Multi-view stereo reconstruction algorithms [C]. IEEE Computer Society, 2006: 519-528.