散乱点云数据的高阶平滑隐式曲面重建*

袁红星,吴少群,朱仁祥,诸葛霞 (宁波工程学院 电子与信息工程学院,浙江 宁波 315016)

摘 要: 针对三维扫描或三维重建获取的散乱点云数据曲面重建问题,提出基于拉普拉斯规则化的高阶平滑算法。首先,计算点云数据的包围盒并离散化得到体素空间;其次,在体素空间根据隐式曲面的梯度和点云位置、法向信息建立目标函数,并通过对目标函数的拉普拉斯规则化达到控制重建曲面光顺效果的目的;再次,根据最优化原理将重建问题转换为一个稀疏线性方程组求解问题;最后,通过步进立方体算法得到重建曲面的三角网格表示。定性和定量的实验结果表明,该方法重建曲面绘制效果和精确度优于常用的 Poisson 方法。 关键词:散乱点云;隐式曲面;步进立方体;曲面重建 中图分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2013)05-1593-03 doi;10.3969/j. issn. 1001-3695. 2013. 05. 082

High order smooth implicit surface reconstruction from scattered point cloud

YUAN Hong-xing, WU Shao-qun, ZHU Ren-xiang, ZHUGE Xia

(School of Electron & Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo Zhejiang 315016, China)

Abstract: This paper presented an algorithm for reconstructing implicit surface from acquired scattered point cloud with a 3D scanner or 3D reconstruction method. Firstly, it computed the bounding box for the point cloud and used a volume to partition the points into each voxel. Secondly, it established an objective function based on the implicit surface gradients, point position and normal, and added a Laplacian regularization term to the function so as to produce more smooth result. Thirdly, it transformed the surface reconstruction problem into solving a system of sparse equations by using optimum approximation. Finally, it extracted the triangular mesh model from the implicit surface using marching cubes algorithm. Experimental results show that this method is superior to the widely used Poisson method.

Key words: scattered point cloud; implicit surface; marching cubes; surface reconstruction

0 引言

随着光学扫描设备的发展和多目立体视觉算法性能的不 断提升,获取反映物体表面的散乱点云数据越来越便利。但是 点云数据只包含了物体表面的离散型空间位置信息,且数据量 巨大,不能直接在实际中应用^[1]。因而,从这些无组织的点云 数据中重建物体表面的三角网格模型是近年来的研究热 点^[2]。对散乱点云进行曲面重建的方法主要分为两大类,即 基于计算几何的方法和基于隐式曲面的方法。计算几何方法 的思路是根据 Voronoi 图直接对点云进行 Delaunay 三角化^[3], 代表性的算法有 tight Cocone^[4]和 power crust^[5]。这类方法的 缺点是对噪声敏感,难以获得封闭的重建曲面,且计算量偏大。 隐式曲面重建的思路是用一个隐式函数对点云进行拟合,并以 该函数的零水平集作为物体真实表面的逼近估计。这类方法 既能以较低的计算代价精确逼近复杂物体的表面,又便于对重 建曲面进行编辑,因而成为当前应用最为广泛的方法。隐式曲 面重建方法又可划分为全局性方法和局部性方法。全局隐式 曲面重建的代表性方法有基于径向基函数(radial base function, RBF)的曲面重建^[6-8]、基于泊松方程的曲面重建^[9]、基于

小波的方法^[10]、有限元方法^[11]等。RBF 方法的缺点是计算量 大,内存消耗多,重建曲面出现过平滑现象,难以保留曲面上棱 边、尖角等细节特征^[12]。局部隐式曲面重建的代表性方法有 基于几何样条曲面的移动最小二乘拟合(moving least square, MLS)^[13,14]、多层次剖分方法(multi-level partition of unity, MPU)^[15]。MLS 方法用一个流形曲面逼近真实物体的表面,并 根据数据的重采样结果来控制逼近误差,该方法的缺点是不能 直接输出网格模型。MPU 方法通过八叉树将点云数据划分成 若干个子区域,并利用分段二次曲面拟合每个子区域的点云数 据,最后拼接出全局光滑的重建曲面,该方法的缺点是对采样 密度和出格点敏感,难以处理大噪声情况。Nagai 等人^[16]在 MPU 方法基础上提出平滑剖分隐式曲面重建算法(smoothing partition of unity,SPU),在噪声鲁棒性方面得到提高。唐月红、 杨军等人^[17,18]也都在八叉树对点云划分的基础上,用局部形 状函数加权求和来逼近全局隐式函数。

隐式曲面重建目前存在的问题是如何在保持细节特征的 前提下获得光顺重建曲面。受 Lempitsky^[19]提出的高阶平滑 表面提取算法的启发,本文提出高阶平滑的隐式曲面重建方 法,在保留细节特征的同时获得光顺重建曲面。

收稿日期: 2012-08-30; 修回日期: 2012-10-09 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61071173);浙江省自然科学基金资助项目 (LY12F01001,Y1110086,Y1100253);宁波市自然科学基金资助项目(2012A610043)

作者简介:袁红星(1980-),男,安徽安庆人,高级工程师,博士,主要研究方向为信号与信息处理、3D视频信号处理(yuanhx@mail.ustc.edu. cn);吴少群(1981-),女,副教授,硕士,主要研究方向为数字信号处理;朱仁祥(1971-),男,副教授,博士,主要研究方向为通信信号处理;诸葛霞 (1979-),女,讲师,博士,主要研究方向为图像处理.

1 算法描述

本文算法的计算过程如图1所示。首先,根据空间散乱点 云数据计算包围盒;其次,将包围盒所在的体空间离散化;再 次,将本文提出的目标函数在体素空间离散化得到一个线性方 程组;然后求解该方程组得到点云数据的隐式曲面表示;最后, 利用步进立方体算法提取曲面的三角网格。



图1 算法计算过程

2 目标函数

将有向点云数据表示为 $D = \{(p_i, n_i)\}_{i \in [1,N]}, 其中 p_i \in \mathbb{R}^3, n_i \in \mathbb{R}^3$ 分别表示第 *i* 个点的空间位置和法向量。隐式曲面 重建的目的就是用一个隐式方程 f(p) = 0 来估计 D 表示的曲 面 S,其中 $f(p) = \sum w_i \Phi_i(p), w_i$ 为权重系数, $\Phi_i(p)$ 表示基函 数。为了用 f(p) = 0 估计 S,本文假设 D 为曲面上的采样点, 这就意味着:

$$f(p_i) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla f(p_i) = n_i \tag{2}$$

式(1)(2)只是表示点云所在曲面应该满足的条件。为了 得到平滑的重建结果,还需要对偏离点云的曲面进行约束。受 文献[19]启发,本文考虑下述拉普拉斯规则化:

$$\int (\Delta f)^2 dV \rightarrow \min$$
 (3)

综合考虑式(1)~(3),本文提出下述目标函数,用于求解 隐式曲面 *f*(*p*)。

$$\varphi(f) = k_1 \varphi_D(f) + k_2 \varphi_S(f) \tag{4}$$

其中: $\varphi_D(f)$ 表示数据项, $\varphi_S(f)$ 为规则化平滑项,它们的定义分别如式(5)和(6)所示。

$$\rho_D(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left[f^2(p_i) + \| \nabla f(p_i) - n_i \|^2 \right]$$
(5)

$$\varphi_{S}(f) = \frac{1}{\int_{V} dV} \int_{V} (\Delta f)^{2} dV$$
(6)

通过最小化式(4)可得到点云的隐式曲面表示。

3 离散域上目标函数

由点云数据计算一个包围盒,并对该包围盒进行离散化。 假设x,y,z方向上体素个数均为L,得到体素构成的 3D 空间用 $G = \{1,2,\dots,L\} \times \{1,2,\dots,L\} \times \{1,2,\dots,L\}$ 表示。其中某个 体素的表示如图 2 所示。若点p属于图 2 所示的体素,则f(p)用八个顶点处的隐式函数值进行三线性插值得到:

$$\begin{split} f(p) &= a_{ijk}f_{ijk} + a_{ij(k+1)}f_{ij(k+1)} + a_{i(j+1)k}f_{i(j+1)k} + \\ a_{i(j+1)(k+1)}f_{i(j+1)(k+1)} + a_{(i+1)jk}f_{(i+1)jk} + a_{(i+1)j(k+1)}f_{(i+1)j(k+1)} + \\ a_{(i+1)(j+1)k}f_{(i+1)(j+1)k} + a_{(i+1)(j+1)(k+1)}f_{(i+1)(j+1)(k+1)} \end{split}$$

其中: a_{ijk} 表示f(p)在顶点 V_{ijk} 处的三线性坐标, f_{ijk} 表示顶点 V_{ijk} 处的隐式函数值。



图2 离散化体空间的体素表示



$$\nabla f(p) \approx \frac{1}{4h}$$

 $\begin{pmatrix} f_{(i+1)jk} - f_{ijk} + f_{(i+1)j(k+1)} - f_{ij(k+1)} + f_{(i+1)(j+1)k} - f_{i(j+1)k} + f_{(i+1)(j+1)(k+1)} - f_{i(j+1)(k+1)} \\ f_{i(j+1)k} - f_{ijk} + f_{i(j+1)(k+1)} - f_{ij(k+1)} + f_{(i+1)(j+1)k} - f_{(i+1)jk} + f_{(i+1)(j+1)(k+1)} - f_{(i+1)j(k+1)} - f_{(i+1)j(k+1)} - f_{(i+1)(j+1)(k+1)} - f_{(i+1)(k+1)(k+1)} - f_{(i+1)(k+1)(k+1)} - f_{(i+1)(k+1)(k+1)} - f_{(i+1)(k+1)(k+1)} - f_{(i+1)(k+1)(k+1)} - f_{(i+1)(k+1)(k+1)} - f_{(i+1)(k+1)(k+1)(k+1)} - f_{(i+1)(k+1)(k+1)} - f_$

$$\begin{aligned} (\Delta f(p))^2 的有限差分估计为\\ (\Delta f(p))^2 &\approx \frac{1}{h^4} \left[(f_{(i+1)jk} + f_{(i-1)jk} - 2f_{ijk}) + (f_{i(j+1)k} + f_{i(j-1)k} - 2f_{ijk}) + (f_{ij(k+1)} + f_{ij(k-1)} - 2f_{ijk}) \right]^2 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\varphi(f) = \mathbf{F}^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \mathbf{F} - 2\mathbf{b}^{\mathrm{T}} \mathbf{F} + c \qquad (10)$$

(12)

其中:F表示隐式函数在体素顶点处函数值构成的列向量;Q由 $\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} [f^2(p_i) + || \nabla f(p_i) ||^2] + \frac{1}{\sum_{\mu} h^3} \sum_{\mu} (\Delta f)^2$ 经有限差分离 散化得到;列向量 b 由 $\sum n_i \nabla f(p_i)$ 经有限差分离散化得到;c对f 的求解没有任何贡献,这里不予考虑。将式(10)对F求导

对f的求解没有任何贡献,这里不予考虑。将式(10)对F求导并令其为0得到:

$$\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F} + \boldsymbol{Q}\boldsymbol{F} - 2\boldsymbol{b} = 0 \tag{11}$$

令 **A** = (**Q**^T + **Q**)/2,则式(11)可表示为 **4E** - b

通过对式(12)的求解,即可得到点云的隐式曲面表示。

4 实验与分析

本文算法使用 C++实现,利用预处理共轭梯度算法求解 式(12),并通过步进立方体算法提取重建的三角网格。实验 的硬件配置为 Intel Core2 Duo 2.20 GHz CPU,2 GB 内存;软件 配置为 Windows7 + Visual Studio 2008。实验中采用的点云数 据来自文献[20],如图3 所示。其中 Venus 左右采样密度之比 为400:1。本文同泊松曲面重建(Poisson)^[9]、平滑剖分隐式曲 面重建(SPU)^[16]和 D4 小波方法^[10]进行了比较。



4.1 计算时间与内存消耗比较

本文方法对不同点云数据进行曲面重建所需的时间和峰 值内存消耗如表1所示。实验中体素空间分辨率为256×256 ×256。表2是对 Angel 点云数据不同算法的计算时间和内存

消耗比较。其中 Poisson、SPU 和 D4 小波都采用了八叉树结 构,实验中深度均设为8。从表中可以看出本文方法计算时间 和 Poisson 方法相当,内存消耗低于 D4 小波,但高于 Poisson 方 法。这是因为本文方法和 Poisson 方法一样,都是解一个稀疏 线性方程组;不同的是 Poisson 方法采用了八叉树结构,故而内 存消耗相比较低。

表1 不同点云的曲面重建时间

	点云名称	点数	重建曲 三角面⁄	面 峰 个数	值内存 /MB	重建时间 /s	_
	Angel	31 940	80 41	9	31	35	_
	Zoe	27 883	74 09	1	30	35	
	Venus	72 545	67 43	0	32	36	
	表2	不同算	章法计算	时间和	内存消耗	比较	
算法名称	重建曲面 三角面个数	峰值内存 /MB	重建时间 /s	算法名称	重建曲面 三角面个数	峰值内存 /MB	重建时间 /s
Poisson	66 764	17	32	D4 小波	323 912	58	67
SPU	73 880	25	19	本文方法	80 419	31	35

4.2 重建曲面渲染效果比较

图4~6给出了不同算法重建曲面的渲染效果。图4中, 对于 Angel 点云数据, Poisson 和 SPU 方法重建曲面过于平滑, 嘴巴和手的细节信息都很模糊;D4 小波和本文方法重建曲面 细节信息都保持得较好,但 D4 小波重建曲面光顺效果较差。 图 5 中,只有本文方法对荷叶重建是完整的(图中虚线框处), 其他方法都存在空洞;同样,D4 小波和本文方法细节保持较 好;本文方法光顺效果与 Poisson 和 SPU 方法一致,但 D4 小波 重建曲面光顺效果较差。图6中,对于非均匀采样情况,D4小 波重建失败;从图6虚线框所示区域来看, Poisson 右侧重建结 果出现过平滑现象,与左侧过渡不自然;SPU 重建曲面细节特 征几乎都被平滑掉,已看不清头发的细节信息;只有本文方法 既保留了细节特征又得到了光顺重建结果。



4.3 精确度比较

根据文献[10],可通过在已知曲面上采样点,再由采样点 重建曲面,并计算重建曲面和原始曲面之间的 Hausdorff 距

离^[21]来判断算法的精确度。Hausdorff 距离越小表明重建结果 精度越高。为了利用 Hausdorff 距离比较算法的精确度,本文 利用隐式函数分别生成三个隐式曲面,即镂空立方体、圆环体 和千斤顶,如图7所示。从图7所示的隐式曲面上均匀采样空 间点形成点云数据,然后分别利用 Poisson、SPU、D4 小波和本 文方法进行重建,最后计算重建曲面与原始曲面之间的 Hausdorff 距离。表3给出了不同算法重建结果的 Hausdorff 距离, 其值越小表示重建曲面与原始曲面越接近。从表中可以看出, SPU 重建算法精确度最低,本文方法重建精确度最高。



	点云名称	算法名称					
		Poisson	SPU	D4 小波	本文方法		
	镂空立方体	0.138 2	3.107 0	0.078 6	0.060 5		
	圆环体	0.006 4	1.4597	0.017 1	0.006 0		
	千斤顶	0.092 9	3.829 3	0.077 1	0.045 8		

5 结束语

本文根据曲面梯度、点云位置和法向信息,以及拉普拉斯 平滑规则化建立一个目标函数;通过该函数的最优化求解将曲 面重建问题转换成一个稀疏线性方程组求解问题。实验结果 表明,本文方法重建精度高,在保留细节特征的同时能够得到 光顺重建结果。本文方法存在的问题是内存消耗较高,仅次于 D4小波算法,下一步笔者计划通过八叉树结构降低内存消耗。

参考文献:

- [1] 王树忠,张佑生.基于散乱点集的曲面重建[J]. 计算机科学, 2009,36(5):269-272.
- [2] 钱归平. 散乱点云网格重建及修补研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [3] 钱归平,童若锋,彭文,等.保持特征的点云自适应网格重建[J]. 中国图象图形学报,2009,14(1):148-154.
- [4] DEY T K, GOOSWAMI S. Tight Cocone: a water-tight surface reconstructor[C]//Proc of the 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. New York: ACM Press, 2003:127-134.
- [5] AMENTA N, CHOI S, KOLLURI R. The power crust [C]//Proc of the 6th ACM Symposium on Solid Modeling. New York: ACM Press, 2001.249-260.
- [6] CARR J C, BEATSON R K, CHERRIE J B, et al. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions [C]// Proc of ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2001:67-76.
- [7] 陈飞舟,陈志扬,丁展,等.基于径向基函数的残缺点云数据修复 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(9):1414-1419.
- [8] 李乐庆,康宝生. 基于 RBF 的散乱点曲面重构[J]. 西北大学学 报:自然科学版,2011,41(2):221-225.
- [9] KAZHDAN M, BOLITHO M, HOPPE H. Poisson surface reconstruction [C]//Proc of the 4th Eurographics Symposium on Geometry Processing. New York: ACM Press, 2006:61-70.
- [10] MANSON J, PETROVA G, SCHAEFER S. Streaming surface reconstruction using wavelets [J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27 (5):1411-1420. (下转第1600页)





5 结束语

本文提出了一种在 Chirp 编码激励提升信号信噪比的基础上,使用 RXSC 算法进一步提升图像质量的实现方法。实验结果表明该方法得到的超声弹性应变图像与传统方式相比, SNR。和 CNR。都得到了较大提高,噪声水平明显降低。理论上,使用更多的滤波器意味着得到更多的独立解相关信号,从 而更大程度地抑制噪声,但每个信号横向带宽也会相应减少。 为了尽可能不破坏信号横向的分辨率和轴向的相关性,须适中 地选择滤波器个数。实际上,使用3个滤波器足以得到较高的 图像品质。传统的基于发射端的复合方式需要使用多帧信号 合成一幅图像,增加了时间代价。基于滤波器的复合方法采用 接收端后处理的方式解决了这个问题,在不增加信号采集时间 和应变计算复杂度的情况下,达到了抑制斑点噪声的效果,保 证了成像实时性。该方法效果明显,有被用于临床徒手超声弹 性成像系统的潜能。

参考文献:

- [1] OPHIR J, CÉSPEDES I, PONNEKANTI H, et al. Elastography: a quantitative method for imaging the elasticity of biological tissues
 [J]. Ultrasonic Imaging, 1991, 13(3):111-134.
- [2] SZABO T L. Diagnostic ultrasound imaging: inside out [M]. [S. l.]: Elsevier Academic Press, 2004.
- [3] BERSON M, RONCIN A, POURCELOT L. Compound scanning with an electically steered beam [J]. Ultrasonic Imaging, 1981, 3(3): 303-308.
- [4] JESPERSEN S K, WILHJELM J E, SILLESEN H. Multiangle compound imgaing[J]. Ultraonic Imaging, 1998, 20(2):81-102.

- [11] SHARF A, LEWINER T, SHKLARSKI G, et al. Interactive topology-aware surface reconstruction [J]. ACM Trans on Graphics, 2007,26(3):431-439.
- [12] 苗兰芳,周廷方,彭群生. 稠密采样点模型的快速隐式曲面重建
 [J]. 工程图学学报,2010,31(2):84-91.
- [13] AMENTA N, KIL Y J. Defining point set surfaces [J]. ACM Trans on Graphics, 2004, 23(3):264-270.
- [14] OZTIRELI C, GUENNEBAUD G, GROSS M. Feature preserving point set surfaces based on non-linear kernel regression [J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(2):493-501.
- [15] OHTAKE Y, BELYAEV A, ALEXA M, et al. Multi-level partition of unity implicits [C]//Proc of SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2003:463-470.
- [16] NAGAI Y, OHTAKE Y, SUZUKI H. Smoothing of partition of unity implicit surfaces for noise robust surface reconstruction [C]//Proc of

- [5] MELTON H, MAGNIN P. A-mode speckle reduction with compound frequencies and compound bandwidth[J]. Ultrsonic Imaging, 1984, 6(2):159-173.
- [6] TECAVIPOO U, CHEN Q, VARHESE T, et al. Noise reduction using spatial-angular compounding for elastography [J]. IEEE Trans on Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control, 2005, 52(6): 961-970.
- [7] RAO M, VARGHESE T. Correlation analysis for angular compounding in strain imaging [J]. IEEE Trans on Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control, 2007, 54(9):1903-1907.
- [8] LIU Jie, MICHAEL F. Coded pulse excitation for ultrasonic strain imaging[J]. IEEE Trans on Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control, 2005, 52(2):231-240.
- [9] O'DONNELL M. Coded excitation system for improving the penetration of real-time phased-array imaging systems [J]. IEEE Trans on Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control, 1992, 39 (3): 341-351.
- [10] PESAVENTO, PERREY C, KRUEGER M, et al. A time efficient and accurate strain estimation concept for ultrasonic elastography using iterative phase zero estimation [J]. IEEE Trans on Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control, 1999, 46(5):1057-1067.
- [11] CÉSPEDES I, OPHIR J. Reduction of image noise in elastography[J]. Ultrasonic Imaging, 1993, 15(2):89-102.
- [12] LUO Jian-wei, BAI Jing, HE Ping, et al. Axial strain calculation using a low-pass digital differentiator in ultrasound elasography [J]. IEEE Trans on Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control, 2004, 51(9):1119-1127.
- [13] ZHANG Xu-dong. Modern signal processing [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University, 2002.
- [14] LIU P, LIU D C. Filter-based compounded delay estimation with application to strain imaging[J]. IEEE Trans on Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control,2011,58(10):2078-2095.
- [15] CHENG Yang-jie, CUI Shao-guo, LIU D C. Frequency compounding for ultrasound freehand elastography [C]//Proc of the 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. 2010:1-4.
- [16] CHEN X, ZOHDY M J, EMELIANOV S Y, et al. Lateral speckle tracking using synthetic lateral phase[J]. IEEE Trans on Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control, 2004, 51 (5):540-550.
- [17] JENSEN J A. Field; a program for simulating ultrasound systems
 [J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 1996, 34 (sl): 351-353.

Symposium on Geometry Processing. New York: ACM Press, 2009: 1339-1348.

- [17] 唐月红,李秀娟,程泽铭,等.隐式T样条实行封闭曲面重建[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(2):270-275.
- [18] 杨军,诸昌钤.带噪声的点云数据的隐式曲面重建算法[J].西南 交通大学学报,2008,43(1):29-34.
- [19] LEMPITSKY V. Surface extraction from binary volumes with higherorder smoothness [C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010:1197-1204.
- [20] BABAK T. Generation and optimization of local shape descriptors for point matching in 3D surfaces [D]. Kingston, Canada: Queen's University, 2009.
- [21] CIGNONI P, ROCCHINI C, SCOPIGNO R. Metro; measuring error on simplified surfaces[J]. Computer Graphics Forum, 1998, 17 (2): 167-174.

⁽上接第1595页)