

中图法分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)03-0480-08

论文索引信息: 刘圣军, 韩旭里, 金小刚. 空间采样点的隐式曲面表示与优化 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 480-487

空间采样点的隐式曲面表示与优化

刘圣军¹⁾, 韩旭里¹⁾, 金小刚²⁾

¹⁾(中南大学数学科学与计算技术学院, 长沙 410083) ²⁾(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 基于元球隐式曲面表示, 提出一个对给定 3 维物体表面采样数据进行自动曲面重建的方法。首先由空间采样点获取它们的球逼近表示; 然后使用这些球作为元球的初始估计, 构造出一张初始的元球隐式曲面; 最后通过一个能量优化过程调整每个元球的形状参数, 得到最终的隐式曲面。球的位置与形状的有效估计和局部支撑的元球核函数的使用极大地加速了曲面优化过程。实验结果表明该方法有效而实用的。

关键词: 元球; 隐式曲面; 球体逼近; 自动曲面重构

Implicit surface representation and optimization for 3D sample points

Liu Shengjun¹⁾, Han Xuli¹⁾, Jin Xiaogang²⁾

¹⁾(School of Mathematical Science and Computing Technology, Central South University, Changsha 410083 China)

²⁾(CAD&CG State Key Lab, Zhejiang University, Hangzhou 310058 China)

Abstract: Based on the metaball models, a practical method is presented for automatically reconstructing an implicit surface from given sample points on the surface of an object in \mathbf{R}^3 . Firstly, a spherical representation of the model from the samples can be obtained. Secondly, the spheres are utilized as initial metaballs—this greatly improves the robustness and efficiency of the metaball-based approximation, and the initial implicit surface is constructed. Lastly, the resulting implicit surface is created by adjusting every metaball parameter in an optimizing process. The optimal spheres and local supported field functions accelerate the surface optimization strongly. Experiments demonstrate the method's efficiency and robustness.

Keywords: metaball; implicit surface; sphere approximation; automatic surface reconstruction

0 引言

随着 3 维扫描技术的广泛应用, 扫描数据成为数字模型的主要来源。曲面重建是数据处理流水线的重要环节。它解决由曲面上的部分采样信息来恢复原始曲面的几何模型的问题。根据重建曲面的形式, 可分为函数型曲面重建和离散型曲面重建。隐式曲面是函数型曲面的一种。尽管已经有许多不同

的曲面重建方法提出来了, 但是依然缺少鲁棒的曲面重建的方法, 尤其是隐式曲面的重建方法, 为此提出一种基于元球技术的自动曲面重建算法。

隐式曲面广泛应用于计算机图形学许多领域, 如几何建模、3 维形变和碰撞检测等。一张隐式曲面 W 通常采用一个连续的标量函数 $f(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \mathbf{R}^3$ 来定义。 W 的几何形状通过满足函数 $f(\mathbf{x}) = 0$ 的点的位置来给定。有一种重要的隐式曲面被称为元球模型^[1-3]。这种曲面的隐式函数由一些径向对称函

收稿日期: 2010-08-04; 修回日期: 2010-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61003125, 60970097, 60933007); 浙江省科技计划项目(2009C33001); 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放课题基金项目(A0805)。

第一作者简介: 刘圣军(1979—), 男, 讲师。2007 年于浙江大学获计算机科学与技术专业工学博士学位, 主要研究方向为几何造型、形状逼近、计算机动画。E-mail: Shjliu_cg@gmail.com。

数的和构成,且这些函数的图形具有高斯函数的形状。它们形成的隐式曲面的函数的一般形式可以用下式表示

$$f(\mathbf{x}) = -t + \sum w_i f_i(\mathbf{x}) \quad (1 \leq i \leq n)$$

式中, t 是等值面 W 的阈值, n 是元球的个数, w_i 表示第 i 个元球的形状参数,函数 f_i 描述第 i 个中心为 $\mathbf{c}_i \in \mathbf{R}^3$ 和影响半径为 R_i 的元球的形状,在此称之为核函数。

对于简单的物体(例如球、豆类物体等),可以很容易获得它们的元球模型的表示。但是对于具有复杂形状模型,手工构造其对应的元球模型是一项困难的工作。因而,需要设计出自动的曲面重建方法。Muraki^[4]首先为形状重构提出了自动元球模型的生成算法。他的方法一次增加一个元球。因为选择每个元球时都要求解一个优化问题,所以这个方法速度比较慢。Tsingos等人^[5]提出了一个准自动的基于隐式曲面的形状重建方法。该方法通过使用基于局部骨架能量的选择准则提高了它的效率。Bittar等人^[6]提出了通过计算体数据的中轴来进行自动隐式曲面重建的方法。然而,这些方法适用于元球数较少的隐式曲面,但是元球个数较少将难以表示具有复杂几何形状的物体。另外,最后的逼近结果还依赖于用户能够选择适当的中轴分辨率来生成元球,选择不恰当的分辨率将导致很差的结果。Jin等人^[7]使用中轴球树逼近物体,并将生成的球作为初始元球,然后对每个元球的参数进行优化得到最终的元球隐式曲面。但是该方法使用的中轴球集合是模型的体包围球,对最终的隐式曲面逼近精度有一定的影响。还有许多关于使用隐式曲面进行曲面重建的研究,如自适应采样距离场^[8],变分隐式曲面^[9-10],MPU隐式曲面^[11],使用带约束的活动最小二乘公式的插值和逼近隐式曲面^[12]等。

本文提出一种新的有效的方法来对采样点集进行隐式曲面重建。首先,根据物体的空间采样点信息获取逼近模型形状的球体集。然后,定义恰当的元球基函数,将这些球体作为初始的元球近似确定元球系统中的各项参数。最后,设计能量函数对元球系统中的参数进行优化得到最终的元球隐式曲面。整个算法框架如图1所示。

相比于其他隐式曲面重构方法,本文方法有如下创新:1)利用模型的球逼近作为初始的重构曲

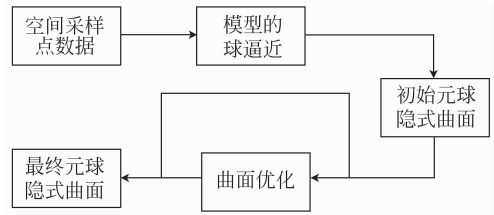


图1 空间采样点的元球隐式曲面重构算法框架

Fig.1 The framework of the metaball implicit surface reconstruction for 3D sample points

面,为曲面优化设置了一个非常好的初始值;2)采用多个策略实现对元球隐式曲面的快速优化。对于元球隐式曲面模型,每个元球有5个参数 (x_c, y_c, z_c, w, R) ,其中 (x_c, y_c, z_c) 是元球中心位置坐标, w 为元球的形状参数, R 为元球的影响半径。如果对整个曲面的所有 n 个元球同时进行优化,那么就有 $5n$ 个需要优化的参数。在优化过程中,同时优化的参数太多,整个优化过程的速度将会急速下降。本文采用3个策略来处理这个问题,一是使用的局部元球基函数,每次优化一个元球,这将优化过程由一次优化 n 个元球转化为执行 n 次优化一个元球的过程;二是由于生成了模型的球体逼近,取每个球的中心作为元球的中心,从而确定元球的位置参数;三是在元球的形状参数与影响半径之间建立一个映射关系。采用这3个措施,一次优化元球模型的过程简化为只需要优化一个参数。

1 模型的球逼近

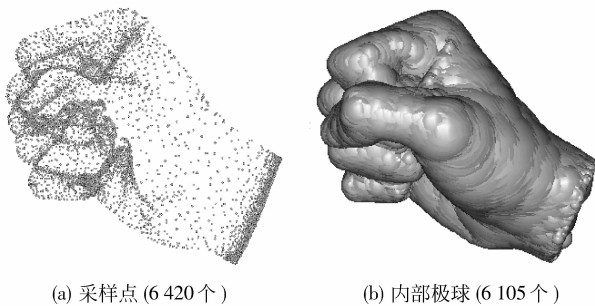
中轴变换可以将一个物体 O 表示成包含在它内部的最大球体集的并。一般这个集合是一个无限集合,通常可以用一个有限球体集合 B 去逼近。已有很多研究模型的球逼近及其应用的工作^[13-18],如用来表示可变形物体^[13-15]、加速碰撞检测^[16-17]和渲染中的阴影计算^[18]等,然而,由于在这些应用中使用的体包围球覆盖整个模型,引入了一定的误差,从而不适宜用来进行隐式曲面重构。

为得到重构的隐式曲面,首先需要得到初始的逼近模型形状的球体集。一般来讲,用于逼近模型的球体集 B 可以通过物体 O 表面 M 的一个密集采样点集 S 的Voronoi图得到。在本文方法中,使用Amenta等人提出的曲面重构算法(Power Crust)^[19]的中间结果——内部极球(Inner Polar Sphere)。文

献[19]证明了内部极球对原始物体逼近的几何准确性和拓扑结构正确性,因而它可以作为元球模型一个很好的初始估计。下面将简单介绍内部极球的获取过程。该方法的细节请参阅文献[19]。

所谓采样点 s 的极点是指它的 Voronoi 栅格中两个离点 s 最近的 Voronoi 点。它们分别处在物体表面的内外两侧。当点 c 是采样点 s 的一个极点,那么 Voronoi 球 $B_{c,\rho}$ 就是一个极球,这里 $\rho = d(c,s)$,表示点 c 与点 s 之间的欧氏距离, $B_{c,\rho}$ 表示中心在点 c 处半径为 ρ 的球。采样点 s 的两个极点可以通过下面的过程得到^[20]:首先选择一个离 s 最近的 Voronoi 点作为它的第 1 个极点 p_1 ;然后从点 s 的其他 Voronoi 点 v 中选出满足角度 $\angle vsp_1 > \pi/2$ 的所有点,再在所选择的点中选取离 s 最远的点就是它的第二个极点。根据曲面的方向可以判定内部极点和外部极点。内部极点对应的极球为内部极球。

相比于所有极点 P_v ,内部极点 P_i 实际上给出了物体 O 更好的逼近。假设 S 是在表面 M 上的一个足够密集的采样点集。文献[19]证明了中心点在 P_i 中的 Voronoi 球体集 B_i 的并的边界逼近于物体表面 M ,它的表面法向接近物体表面 M 上的法向,并且它同物体 O 是拓扑同胚的。使用 B_i 而不是全体 Voronoi 球体集 B_v ,更容易得到 3 维中轴更好的近似。随着采样密度增加,内部极点集合 P_i 将收敛于物体 O 的中轴,这对于 P_v 来说是不成立的。另外,获取 P_i 也比获取 P_v 更容易。为了获取 P_v ,需要对每个 Voronoi 点进行内外部测试。而对于内部极点,通过 Voronoi 图自身进行一些局部操作就可以很容易确认该 Voronoi 点是否是内部极点。我们使用内部极球逼近中轴球,从而得到模型的近似球表示,如图 2(b)所示。



(a) 采样点 (6 420 个) (b) 内部极球 (6 105 个)

图 2 手模型的采样点集及其内部极球集合

Fig. 2 The sample points and inner polar spheres of the hand model

2 隐式曲面重建与优化

构造了采样点集的内部极球,从而得到给定模型 O 的近似球表示。将所得球的中心作为骨架,定义恰当的场函数,可以由这些球构造出逼近于 O 的表面 M 的元球隐式曲面。通过优化元球的参数可以得到一个最优的逼近曲面。

2.1 核函数的定义

在元球隐式曲面中使用的核函数可以分成两类:全局支撑函数和局部支撑函数。全局函数如在文献[1,4]中使用的高斯函数,它们在无限远处函数值为零。如果曲面重构算法中使用全局函数,它们的场相互覆盖,当球体很多时计算消耗很大,这些因素将限制采用的元球数量。所以,在我们的元球模型中选择使用局部支撑的多项式核函数。局部核函数(如文献[2-3,5-7])也就是具有有限影响半径的函数。它在给定影响半径 R 距离处函数值递减为零。基于核函数的局部性,在计算中能够获得一个比较快的计算速度。另外,使用局部核函数可以在他们定义的隐式曲面上进行局部控制,这对于使用隐式曲面去逼近一个给定的网格模型曲面是非常重要的。在我们的方法中,这个性质也被应用于曲面优化过程之中。

模型的近似球表示能很好的逼近模型表面,只是球与球之间相交部分不光滑,如图 2(b)所示。因此基于球体集进行曲面重构就是重构出既能保持球体集对模型的良好逼近,又能使得整张曲面非常光滑的曲面,即曲面是 G^1 或 C^1 连续。曲面的连续性通过设计满足如下条件的核函数可以实现:

1) 多项式核函数 f_k 至少是 C^1 连续,则 $f(p) = -t + \sum w_k f_k(p)$ 是 C^1 连续,从而其所定义曲面是 C^1 连续的;

2) 对于任意给定点 p , 如果该点处于某一个球 B_i 表面上,而在其他所有球外部,则满足等式 $f(p) = -t + \sum w_k f_k(p) = -t + w_i f_i(p) = 0$ 。

考察函数^[23]

$$f_k(x) = \begin{cases} (1-x^2)^2 & 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

这个函数在区间 $[0, +\infty)$ 是 C^1 连续的。使用这个函数作为核函数,能满足函数连续性的条件 1)。

为了满足条件2),对函数式(1)做如下变形^[23]

$$f_k(\mathbf{p}) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r_k^2}{R_k^2}\right)^2 & 0 \leq r_k \leq R_k \\ 0 & r_k > R_k \end{cases} \quad (2)$$

式中, k 表示元球的序号, $r_k = \|\mathbf{p} - \mathbf{c}_k\|$ 是给定采样点 \mathbf{p} 到元球 \mathbf{c}_k 中心的欧氏距离, R_k 定义了第 k 个元球的有效影响半径。取

$$R_k = \sqrt{e_k^2(1 + \lambda_k^2)} \quad (3)$$

$$w_k = 1 + \frac{1}{\lambda_k^2}$$

式中 e_k 是第 k 个球的半径, $\lambda_k \neq 0$ 是形状参数, 通过改变它们的值可以调整函数 f_k 的形状。

在本文中,隐式曲面方程的阈值设置为 $t = 1.0$ 。采用这个设置,由式(2)(3)及元球模型曲面函数 $f(\mathbf{p}) = -t + \sum w_k f_k(\mathbf{p})$ 不难发现,当点 \mathbf{p} 处于某一个球 B_i 表面上,而在其他所有球的影响半径外时,即 $f_k(\mathbf{p}) = 0, k \neq i; w_k f_k(\mathbf{p}) = 1, r_i = e_i, k = i$, 可得 $f(\mathbf{p}) = -1 + \sum w_k f_k(\mathbf{p}) = -1 + f_i(\mathbf{p}) = 0$, 即点 \mathbf{p} 处于所重构的曲面上。那么对于式(2),可以得出如下结论,在球体集中任意一个不处于其他球影响范围内的球表面将形成重构曲面的一部分,这也就是条件2)的要求。当只有一个球的时候,元球定义的隐式曲面就是该球本身。当逼近模型中包含很多球,隐式曲面将紧紧覆盖在这些球的外表面。图3显示球和其定义的元球曲面的关系。

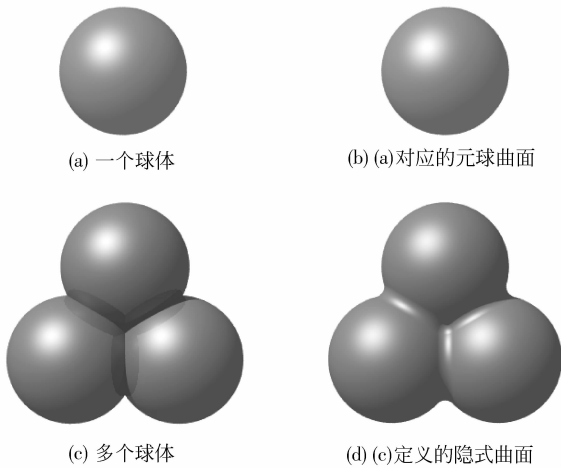


图3 球体及其定义的隐式曲面

Fig. 3 Spheres and the corresponding implicit surfaces

2.2 曲面优化

至此,我们已经可以获得一个3维点集的逼近

球体集,并为每个球设计了一个核函数。由这些逼近球体集及其核函数,当对每一个球的核函数的参数取定一个初始值,则可以获取给定3维数据的一张重构的隐式曲面。我们发现,直接使用内部极球作为元球生成的隐式曲面,尽管使用局部支撑函数避免了所有球场的叠加,但是局部区域还是有部分球会场重叠的,这样会导致对模型的局部形状逼近效果不佳,出现褶皱,不够光滑或者走样的情况。如图4(a)所示的重构隐式曲面,是直接使用图2(a)中的原始采样点得到的内部极球(图2(b)所示)作为初始元球而直接生成的。通过调节每个球的核函数的形状参数,能改善重构后的曲面形状,如图4(b)所示。然而,一般模型的逼近球体的个数较多,手动地调节形状参数的值,给每个核函数选取恰当的形状参数值是很困难的。因此迫切需要一个自动参数调节的方法。本文采取数值优化技术来确定核函数的参数值,进而获得最好的逼近曲面。

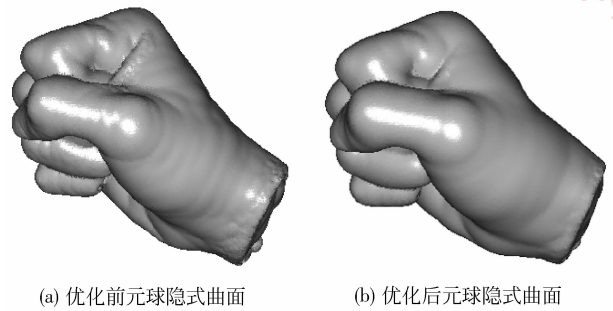


图4 由图2所示的球表示生成的隐式曲面,逼近图2(a)所示采样点集

Fig. 4 The implicit surface from the spheres in Fig. 2 which approximates the sample points shown in left sub-figure of Fig. 2

元球隐式曲面可以通过函数 $f(\mathbf{x})$ 定义得到,那么对模型表面 M 的一个好的逼近通过判断在 M 上的每一个点是否都能处在由函数 $f(\mathbf{x}) = 0$ 定义的曲面上来确定。即对曲面进行优化的位置约束。因而,为优化过程定义一个目标函数

$$E = \frac{1}{m} \sum_p (f(\mathbf{p}))^2 = \frac{1}{m} \sum_p \left(-t + \sum_{i=1}^n w_i f_i(\mathbf{p}) \right)^2 \quad (4)$$

这里 $\mathbf{p} \in S$ 是 M 上的采样点, m 是采样点的数目。式(4)定义了模型上所有点到逼近的隐式曲面的代数距离的平方和。整个优化过程是通过搜索元球核函数恰当的参数值,使得目标函数 E 最小,从而得

到逼近误差最小的光滑曲面。

元球模型中每一个元球的形状由 5 个参数(x_c, y_c, z_c, w, R)决定。通过 Voronoi 图计算得到的内部极球的个数 n 通常较多,这势必导致优化的工作量比较大。如果采用全局优化方法,一次优化需要优化 $5n$ 个参数,而且式(4)是一个非线性函数,这使得优化过程非常缓慢。为了改善优化过程的效率,曲面重构算法使用如下策略:

策略 1 设计一个特殊的核函数,其参数 w 和 R 可以通过一个关系式转换成另外两个参数(形状参数 λ 和球体半径 e)。也即参数表由(x_c, y_c, z_c, w, R)变成($x_c, y_c, z_c, e, \lambda$)。这为优化加速策略 2 做好准备。

策略 2 在曲面重构过程中,采用内部极球作为元球隐式曲面的初始元球。由于内部极球的中心可以作为模型的近似骨架,它们表面的并集能很好地逼近原模型的曲面^[19]。内部极球逼近原始物体的几何准确性和拓扑正确性在文献[19]中得以证明。对于每一个形成元球的球,其位置及半径已经具有比较好的估计值,那么参数(x_c, y_c, z_c, e)可以不进行优化。对于每个元球,还剩下一个形状参数 λ 需要优化。

然而,如果元球数量很多,要对所有元球的形状参数进行一个全局优化,依然很耗费时间。因为参数的数量将直接影响优化过程中的搜索空间的维数。维数越小,优化速度越快。因此,在重构过程中采用优化加速策略 3。

策略 3 利用元球核函数的局部支撑性质,当调节一个元球的参数时,在此元球影响范围外的其他元球所定义的曲面区域将不受影响。因而可以采用一个局部搜索的策略去最小化目标函数 E 。也就是说,优化过程一次优化一个元球,即一次优化一个参数。

由于最小化问题式(4)是一个非线性优化问题,可以采用数值求解方法——下山单纯形法^[21]得到优化问题的近似解。通过实验发现,如果对曲面进行优化,经过几次迭代(一般不需要超过 3 次),曲面 $f(\mathbf{x}) = 0$ 就是一个对 M 比较好的光滑逼近。图 4(b)所示为由图 2(b)所示的球体集生成的一个优化后的隐式曲面。

3 实验结果与讨论

本文的主要目的是提出一个对于 3 维采样点集进行快速隐式曲面重建的方法。我们用 Visual C++ 和 OpenGL 在标准配置(Intel Core Duo CPU T2450 2.0 GHz CPU + 1 G RAM)笔记本电脑上实现了这个基于 3 维采样点的曲面重建算法。使用不同的模型对本文提出的方法进行了测试,得到很好的结果。

图 5—7 给出了 3 个不同模型的测试结果,其时间统计数据在表 1 中列出。一般来说,3 维 Voronoi 图的计算是很耗时的。我们的方法其计算消耗主要集中在 Voronoi 图的计算和曲面优化上。其中 Voronoi 图的计算与模型采样规模有关,而曲面优化又与模型采样规模和初始球的个数有关系。采样太密将导致计算缓慢,而采样不足将会丢失物体细节特征。因而需要对模型进行恰当的采样。

图 5 是根据缠绕结模型的 1 280 个采样点,获取 419 个内部极球,然后利用这些极球生成隐式曲面;图 6 是一个 Venus 模型,采样 711 个点,内部极球的个数为 691;图 7 是一个脚模型,采样点的个数为 5 092,得到的内部极球的个数为 5 064。每个图中都有 4 张图片,分别是模型的采样点集,模型的球表示,优化前的元球隐式曲面和优化后的元球隐式曲面。在所有的例子中,取 λ_i 的初始值为 $\sqrt{2.5}$,阈

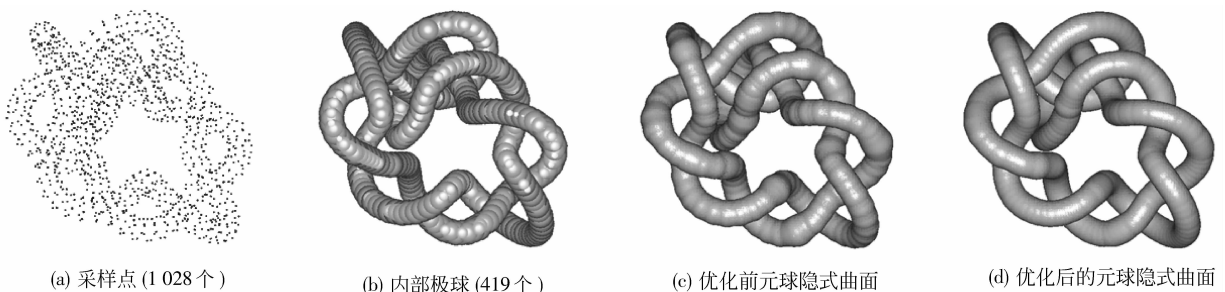


图 5 缠绕结模型

Fig. 5 The knot model

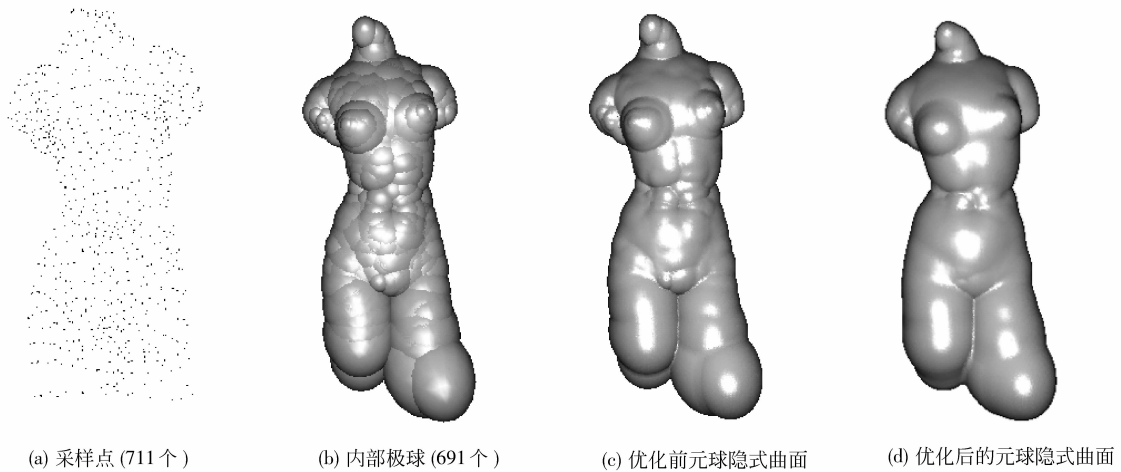


图 6 Venus 模型

Fig. 6 Venus model

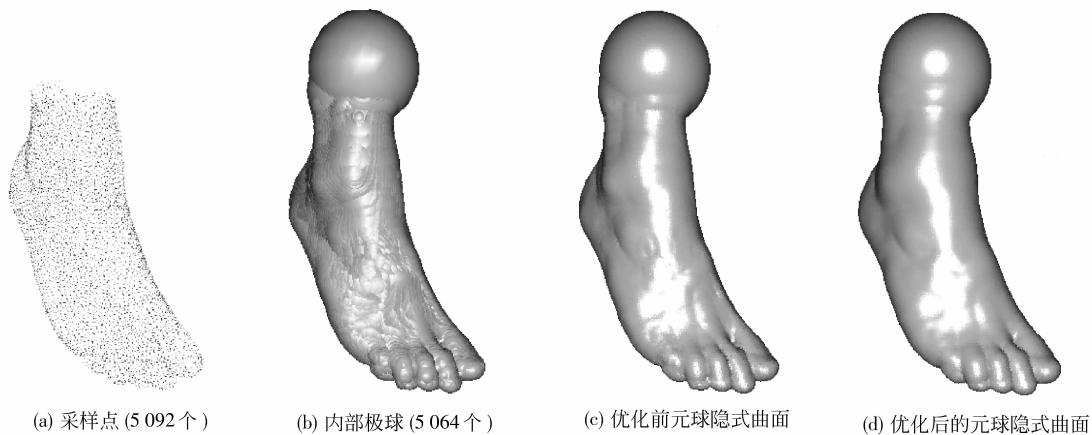


图 7 脚模型

Fig. 7 The foot model

值 t 为 1.0。采用下山单纯形法^[21]得到最小化问题式(4)的近似解。

表 1 给出了本文方法处理 4 个测试模型的统计数据,包括内部极球的生成时间,参数的优化时间,以及重构曲面对原始数据点的逼近误差。从表中数据可以看出,对于原始采样点较多的模型,需要较多

的球来逼近,从而需要更多的时间来生成球及进行参数优化。对于逼近误差的计算,首先计算所有原始数据到重构曲面的最近欧氏距离,然后选取最大的最近距离及计算出平均的最近距离来测量曲面的逼近误差。为了适应于不同大小的模型,取最大及平均最近距离相对于原始数据包围盒的主对角线

表 1 使用本文的方法对空间采样点的曲面重构统计数据

Tab. 1 The statistics of surface reconstruction from points with the method in this paper

模型	图	生成内部极球/s	参数优化/s	总时间/s	最大逼近误差	平均逼近误差
手	4	7.78	21.76	29.54	0.029	0.006 4
缠绕结	5	1.66	1.33	2.99	0.014	0.004 8
Venus	6	1.23	0.39	1.62	0.022	0.007 6
脚	7	12.38	15.53	27.91	0.013	0.004 8

的比例作为重构曲面对原始数据的逼近误差。

本文算法可以很好地逼近没有尖锐特征的物体(如人体,动物,器官等模型),而对于有尖锐特征的物体,那些特征将失去。这是由于元球模型不适合表示具有尖锐特征的物体。从这些例子可以看出,因为元球隐式曲面是一张封闭的曲面,如果原始模型是

封闭的,元球曲面能很好地逼近原曲面,而对于非封闭的模型,在开口处会有一些大的极球突出模型,因而在开口处隐式曲面会产生严重走样现象。这是由于在开口处,没有点数据对曲面的形状进行控制。使用基于径向基函数(RBFs)的曲面重构方法^[22]在开口处也会出现类似的形状走样,如图 8(c)(d)所示。

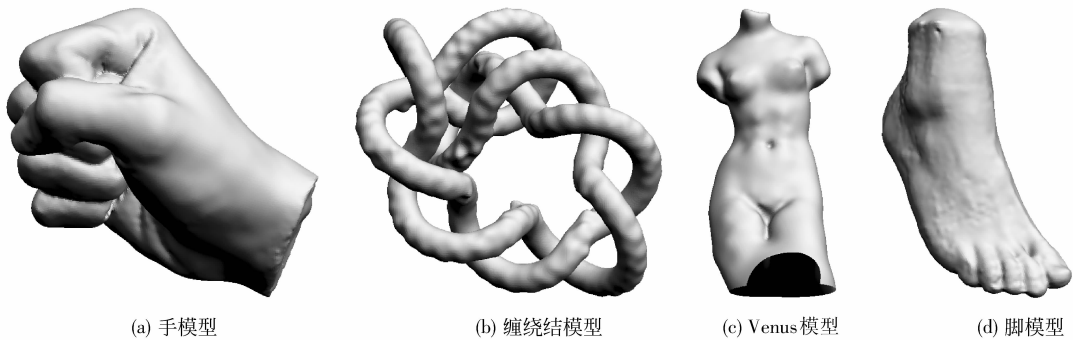


图 8 使用 RBFs 重构曲面的结果
Fig. 8 The reconstruction results with RBFs

图 8 所示为使用 RBFs 方法^[22]进行曲面重构的结果。图 8(a)(b)是封闭模型数据的重构曲面,图 8(c)(d)是对局部非封闭数据的重构结果。其中手模型的重构曲面具有相似的结果,脚模型由于非封闭区域较小,使用 RBFs 进行重构时向外凸出部分较小。而对于非封闭区域较大的模型,如 Venus 模型,其开口处的走样更严重。另外,对于缠绕结模型,该模型尽管拓扑结构复杂,但其几何形状较简单,为管状结构,使用我们的方法能重构出光滑的曲面,然而,对于基于 RBFs 的方法,由于数据较少,在部分区域出现较大的凸包形状,且整个重构曲面不光滑。与基于 RBFs 的曲面重构方法比较,使用基于元球隐式曲面的方法重构出的曲面还有一个非常好的特性——对于每一个元球,都能生成一张曲面,因此重构出的曲面能非常容易地实现变形,如文献[7]中所描述的一些特效,这对于 RBFs 曲面是难以做到的。

4 结 论

对于给定的一个 3 维空间采样点集,本文提出了一个基于元球造型技术进行自动快速隐式曲面重建的算法。首先采用 Power Crust 技术^[19]根据采样点集构造出它的内部极球集合。对于每个球构造一个元球,通过一个加速的能量优化过程得到一张光

滑的元球隐式曲面。由于该球集中的球其球心近似于模型的中轴位置,所有球的并能较好地逼近原始模型的形状,因此使用这些球作为元球的初始估计,极大地加速了后面的曲面优化过程。另外,对于每一个元球,定义了一个 C^1 连续的局部支撑核函数。由该核函数的局部支撑性和形状参数与影响半径之间的映射关系,进一步加速曲面优化的过程。我们的重构方法使用给定采样点集的内部极球作为元球的初始估计,大大提高基于元球模型的曲面逼近的鲁棒性和有效性。对具有复杂拓扑形状的物体,采用我们的方法也能得到逼近原始模型表面的隐式曲面。

然而,这个方法具有一定的局限性,对具有尖锐和扁平的特征的模型逼近会出现较大变形。对于非封闭模型,使用该方法生成的隐式曲面在开口处也会出现变形。改进这些局限是未来的工作方向之一。另外,我们发现使用内部极球作为元球的初始估计,这将使元球的个数太多,降低逼近效率。在保证较好地逼近模型形状的同时尽量减少元球的个数也是未来的工作内容。

参考文献 (References)

- [1] Blinn J F. A Generalisation of algebraic surface drawing [J].
ACM Transactions on Graphics, 1982, 1(3):135-256.

- [2] Nishimura H, Hirai M, Kawai T, et al. Object modelling by distribution function and a method of image generation [J]. The Transactions of the Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan, 1985, J68-D(4) : 718-725.
- [3] Wyvill G, McPheeters C, Wyvill B. Data structure for soft objects [J]. The Visual Computer, 1986, 2(4) : 227-234.
- [4] Muraki S. Volumetric shape description of range data using blobby model [J]. Computer Graphics, 1991, 25(4) : 227-235.
- [5] Tsingos N, Bittar E, Gascuel M P. Semi-automatic reconstruction of implicit surfaces for medical applications [C]// Proceedings of the 1995 Computer Graphics International Conference. Leeds, UK: Academic Press, 1995: 3-15.
- [6] Bittar E, Tsingos N, Gascuel M P. Automatic reconstruction of unstructured 3D data: combining a medial axis and implicit surfaces [J]. Computer Graphics Forum, 1995, 14(3) : 457-468.
- [7] Jin X G, Liu S J, Wang C C L, et al. Blob-based liquid morphing [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2005, 16(3-4) : 391-403.
- [8] Frisken S F, Perry R N, Rockwood A P, et al. Adaptively sampled distance fields: a general representation of shape for computer graphics [C]//Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, New York: ACM Press, 2000: 249-254.
- [9] Yngve G, Turk G. Robust creation of implicit surface from polygonal meshes [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2002, 8(4) : 346-359.
- [10] Turk G, O'Brien J F. Modelling with implicit surfaces that interpolate [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4) : 855-873.
- [11] Ohtake Y, Belyaev A, Alexa M, et al. Multi-level partition of unity implicits [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3) : 463-470.
- [12] Shen C, O'Brien J F, Shewchuk J R. Interpolating and approximating implicit surfaces from polygon soup [J]. ACM Transactions on Graphics 2004, 23(3) : 896-904.
- [13] Ranjan V, Fournier A. Matching and interpolation of shapes using unions of circles [J]. Computer Graphics Forum, 1996, 15(3) : 129-142.
- [14] Cheng S W, Edelsbrunner H, Fu P, et al. Design and analysis of planar shape deformation [J]. Computational Geometry: Theory and Application, 2001, 19(2/3) : 205-218.
- [15] Teichman M, Teller S. Assisted articulation of closed polygonal models [C]//Proceedings of the 9th Eurographics Workshop on Animation and Simulation, New York: ACM Press, 1998: 254-268.
- [16] Hubbard P. Approximating polyhedra with spheres for time-critical collision detection [J]. ACM Transactions on Graphics, 1996, 15(3) : 179-210.
- [17] Bradshaw G, O'Sullivan C. Adaptive medial-axis approximation for sphere-tree construction [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(1) : 1-26.
- [18] Wang R, Zhou K, Snyder J, et al. Variational sphere set approximation for solid objects [J]. The Visual Computer, 2006, 22(9) : 612-621.
- [19] Amenta N, Choi S, Kolluri R. The power crust, unions of balls, and the medial axis transform [J]. Computational Geometry: Theory and Applications, 2001, 19(2-3) : 127-153.
- [20] Amenta N, Bern M. Surface reconstruction by Voronoi filtering [J]. Discrete and Computational Geometry, 1999, 22(4) : 481-504.
- [21] Press W H, Flannery B P, Teukolsky S A, et al. Numerical Recipes in C [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988: 408-412.
- [22] Ohtake Y, Belyaev A, Seidel H P. 3D scattered data interpolation and approximation with multilevel compactly supported RBFs [J]. Graphical Models, 2005, 67(3) : 150-65.
- [23] Murakami S, Ichihara H. On a 3D display method by metaball technique [J]. Journal of the Electronics Communication, 1987, J70-D(8) : 1607-1615.