

基于深度图的可视外壳凹面优化

陈国军, 韦鑫

(中国石油大学(华东) 计算机与通信工程学院, 青岛 266580)

摘要: 传统基于 RGB 图像的可视外壳能恢复物体的外围轮廓却无法还原物体的凹面部分, 而基于深度图像的可视外壳虽然可以还原凹面域, 但其结果的边缘粗糙, 轮廓不明晰。深度图像与 RGB 图像的可视外壳融合的计算方法, 是为解决单一方式的可视外壳不足而提出的, 它基于体素分割的思想, 根据深度图和 RGB 图像分别构建可视外壳, 根据两种可视外壳的计算结果进行凹面分析和可视外壳融合, 利用 CUDA 基于 GPU 实现并行加速。实验表明: 融合算法能够还原出具有复杂凹面域物体的可视外壳, 并且有良好的精度及实时性。

关键词: 深度图; 可视外壳; 凹面还原; 三维重建

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 10-2508-06

DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.10.042

Optimize Visual Hull with Concave Based on Depth Map

Chen Guojun, Wei Xin

(College of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Traditional method based on color image can recover the boundary of an object, but it can't recover the concave part. Although reconstruction based on depth image can revert the concave part, but the result has bad boundary which means that the edge information lost seriously. The method that fused the depth and RGB image was proposed to solve the individual shortcomings. Based on space subdivision the origin visual hull was computed based RGB image and depth image individually. In the following step, the two type visual hulls were combined for analyzing concave area and then fused into one. A parallel scheme under the CUDA platform based on GPU was implemented to accelerate processing speed. The results indicate that the proposed method can recover the visual hull for an object with complicated concave area and performs well in the part of speed and quality.

Keywords: depth image; visual hull; concave revert; 3D reconstruction

引言

利用深度设备三维重建是近年来计算机图形学及虚拟现实等领域的研究热点。传统基于 RGB 图像的可视外壳^[1]只能恢复物体的外围轮廓, 而

无法还原物体的凹面部分。深度图像的引入为凹面物体的三维重建带来了新的角度。凹面重建的相关研究主要有两种方法, 一种是基于 RGB 图像的方法, 为了借助 RGB 图像还原凹面, Feng 等^[2]提出了“负侧影轮廓”的概念, 把凹面域上方提取的侧影轮廓作为“负侧影轮廓”输入后进行负判定。但是, 这种方法只能恢复无内容物的规则凹面。另一种是借助深度图的方法, Jang 等^[3]借助对凹面域捕获的深度图应用变形算法对凹面进行还原, 实现了不规则凹面的重建。但是算法实时性较



收稿日期: 2015-05-14 修回日期: 2015-07-31;
基金项目: 虚拟现实技术与系统国家重点实验室开放基金(BUAA-VR-15KF-13);
作者简介: 陈国军(1968-), 男, 江苏如东, 博士, 副教授, 研究方向为图形图像处理, 虚拟现实; 韦鑫(1988-), 女, 山东东营, 硕士, 研究方向为图形图像处理。

http: www.china-simulation.com

• 2508 •

差, 只能用作静态建模。

基于体素剖分的思想, 提出一种基于 RGB 图像及深度图像融合的可视外壳计算方法, 它汲取了基于 RGB 图像的可视外壳及基于深度图像的可视外壳的优点, 既能保留完整的物体轮廓, 同时还还原了物体的凹面信息。由于体素剖分法具有良好的并行特性, 为了进一步提高实时性, 利用 CUDA 架构的并行计算技术^[4], 实现了融合算法的并行加速。

1 基于深度图的可视外壳构建方法

基于深度图像的可视外壳三维重建, 在采用体素预剖分方法时, Kim^[5], 王聪^[6]等是通过搜寻距离差接近 0 的体素点来定位物体表面。但是, 这种方法存在一个问题, 它假设体素点与该体素点附近的实际物体点投影到相同的图像位置, 并通过对剖分的小体素的边长(设定为深度相机的空间分辨率)做限定来减小这种近似产生的影响。为了打破这种限定, 本文通过设置主深度相机及非主深度相机的方式讨论一种新的融合方法提取物体表面。

1.1 相机设置与剖分

如图 1 所示, 在世界坐标系 $O-XYZ$ 中设置有三台深度摄像机 C_1, C_2, C_3 。

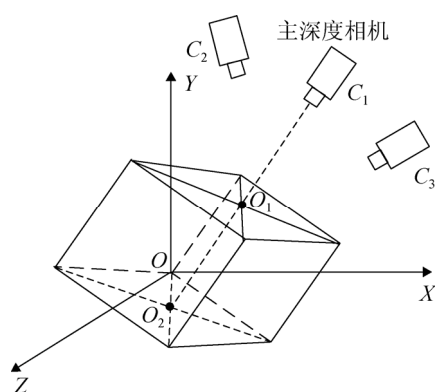


图 1 主深度相机设置

假设选定 C_1 作为主深度摄像机, 则体素剖分空间需要设定在主深度摄像机 C_1 的方向向量 O_1O_2 的垂直正下方, 如图 1 中立方体空间所示。另外两

台深度摄像机则称为非主深度相机, 也就是说, 不在体素剖分空间正上方的深度相机为非主深度相机。为了方便计算, 通常选定方向向量与 Y 轴平行的相机为主深度相机。

1.2 基于单角度深度图的可视外壳计算

假设在主深度摄像机下有一剖分的体素空间, 任意体素点 P_x 投影后的图像坐标为 (u_x, v_x) , 记以相机位置 C 为起点的向量 $P_xC=a$, 设相机的方向向量为 d , 则点 P_x 与相机间的距离有: $D_x=a \cdot d / |a| \cdot |d|$; 空间剖分后的单个体素的边长为 l 。设主相机捕获的深度图对应的函数为 $f(u, v)$, 则主相机的体素点状态可分为四种:

$$\text{点的状态} \begin{cases} \text{物体外} & f(u_x, v_x) \neq 0 \text{ 且 } D_x \leq f(u_x, v_x) \\ \text{空白} & f(u_x, v_x) = 0 \\ \text{物体内部} & f(u_x, v_x) \neq 0 \text{ 且 } 0 < D_x - f(u_x, v_x) \leq l \\ \text{不可见} & f(u_x, v_x) \neq 0 \text{ 且 } D_x - f(u_x, v_x) > l \end{cases}$$

如图 2, Camera 为主深度摄像机, 该深度相机捕获了一副深度图, 设一个曲面穿过图中体素, 与竖边的交点分别为 A, B, C, D , 可求得: 体素点 P_1 和点 P_2 与相机位置在方向向量上的距离分别为 D_1 和 D_2 。根据投影原理可知点 P_1, B, P_2 在图像上的投影坐标都为同一点, 设为 (u_0, v_0) ; 记深度图上 (u_0, v_0) 处的深度值 $f(u_0, v_0)=D_0$ 。则点 P_1 和点 P_2 的状态有: (1) $D_2 > D_0$, P_2 为物体内部点。(2) $D_1 < D_0$, P_1 为物体外部点。于是可以得出一个推论: 当方向向量与一个体素边平行时, 如果该边的两个端点判定为一个为物体外部点一个为物体内部点, 那么一定存在一个物体点在该体素边上。或者说, 具有这样判断结果的体素属于物体的边界。把所有边界体素提取出来就可以组成当前角度看到的物体轮廓, 即为基于单角度深度图的可视外壳。

如图 3, Camera 为非主深度摄像机。 P_1P_0 点的投影位置为 A , 其对应的实际物体点为 P_0 。 P_2P_3 投影位置为 B , 其对应的实际物体点为 P_2 。可见, 实际物体点 P_0P_2 并不在体素边 P_1P_3 上。所以, 在非主相机下不能界定物体内部点。

设体素点 P 与相机位置在方向向量上的距离为 D , 其投影在深度图处对应的深度值为 D_x , 则非主相机的点状态可分为三种: 当 $D < D_x$ 时为物体外, 当投影在图像外时为空白态, 当 $D > D_x$ 时为不可见态。由于无法界定物体内的状态, 所以非主相机无法判定出边界体素, 但是其判定的外部点状态在多角度融合中可以发挥作用。

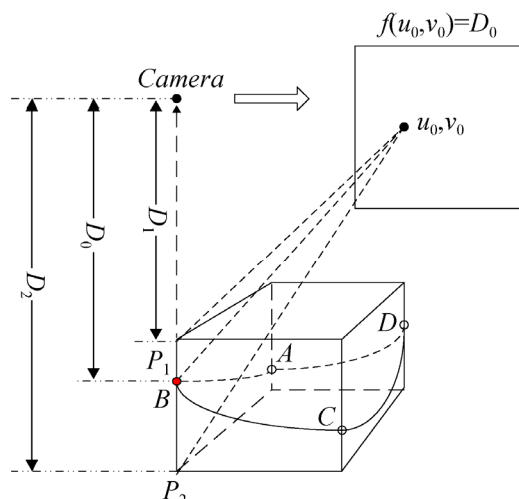


图 2 基于单角度深度图的体素点状态判定

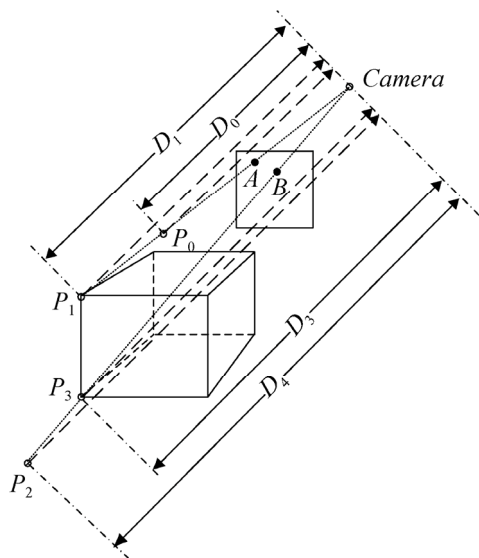


图 3 基于非主相机深度图的体素点状态判定

1.3 基于多角度深度图的可视外壳计算

为了提高深度图可视外壳的凹面精度, 采用多个深度相机, 基于多角度深度图的可视外壳计算过程是: 首先根据多个角度的深度图分别判定体素点

状态, 之后对各点的状态结果进行融合, 根据融合结果确定边界体素, 最后提取属于物体边界的体素形成基于多角度深度图的可视外壳。

在进行点融合时, 首先判定体素点在主深度相机下的状态, 分为空白态, 物体内部, 物体外部, 不可见态。如果体素点在主深度相机下判定为不可见态, 则进一步判定点在非主深度相机下的状态, 分为空白态, 物体外部, 不可见态。继而实现体素点状态的融合。

如图 4 所示, P 点为实际物体点位置, 对体素各点状态判断后对其相应状态进行赋值, 物体外部和空白态的点赋值为 0, 物体内部为赋值为 1, 不可见态(如最底层体素的左前方所示的两点)赋值为 1 后进行进一步判定, 若被其他相机判定为外则更新值为 0。于是, 点融合后这两个 1 变为 0, 边界体素由上 1 个变为上 2 个, 并剔除了下 1 个属于外部的体素(体素的 8 个点全为物体外部, 则称为外部体素)。可见, 点融合后会还原主深度相机不可见而其他角度可见的物体细节。

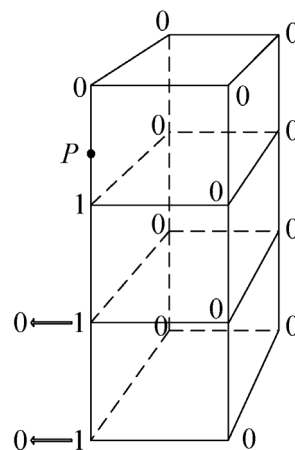


图 4 非主深度相机对体素点状态的影响

2 凹面物体的可视外壳计算

基于 RGB 图像的可视外壳算法是一种借助多角度相机捕获的侧影轮廓图像来计算物体可视外壳的方案。但是, 基于彩色图像只能还原出物体的外围轮廓, 而在凹面区域会形成冗余。基于深度图像的可视外壳计算方法, 虽然可以还原物体的凹

面信息,但在边缘处存在冗余并且外围轮廓信息不完整。本文通过两者之间的互补实现基于 RGB 图像及深度图像的可视外壳融合。

2.1 基于 RGB 图像的可视外壳冗余去除

传统的基于 RGB 图像的可视外壳方法在还原凹面物体时,凹面区域会以连接凸面区域的形式呈现,造成冗余。某模型基于 RGB 图像的可视外壳如图 5 所示,可以看出,在原始物体凹面区域出现的连接平面并不属于原始物体,这就是可视外壳冗余体。

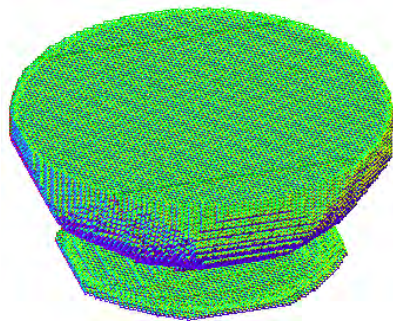


图 5 基于 RGB 图像的可视外壳

由于侧影轮廓信息无法反映物体的凹面域信息,所以凹面部分的体素点状态不能得到正确的判定结果,从而导致了基于 RGB 图像的可视外壳冗余。而深度图以距离信息的形式体现了物体的凹面,所以基于 RGB 图像的可视外壳体素集可以基于深度图重新判定点状态以剔除冗余体素。另外,为了最大限度的保留物体的轮廓构成,再判定过程只作用于冗余发生方向的最上层体素。

对于任意体素 $V(ix, iy, iz)$, RGB 相机判定的体素状态记为 $VOS_{(ix, iy, iz)}$, 设体素状态 $VOS_{(ix, iy, iz)}=0$ 为基于 RGB 图像的可视外壳,可记为集合 $A=\{(ix, iy, iz) | VOS_{(ix, iy, iz)}=0\}$ 。设冗余发生方向在体素第二维度 iy 所在方向。将集合 A 分解成若干子集 A_0, A_1, \dots, A_n , 对于任意子集 A_i 中的每一个元素 (ix, iy, iz) 都有相同的 (ix, iz) , 也就说子集中的元素只有 iy 维度值各异。计算子集 A_i 中 iy 维度值最大的元素 $a_i=\{a | iy \text{ 最大}, a \in A_i\}$, 定义集合 $B=\{a_0, a_1, \dots, a_n\}$ 。

对体素集合 $\{V_m | m \in B\}$ 基于深度图进行体素点状态的再判定,若有深度相机判定其为物体外,则该体素即为待剔除的冗余体素。图 5 所示基于 RGB 图像的可视外壳冗余去除后的结果如图 6 所示。

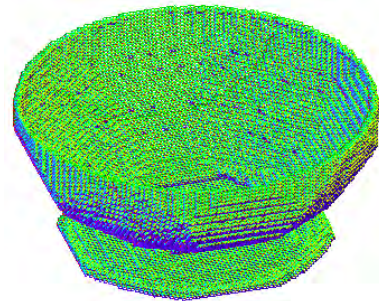


图 6 冗余去除后的基于 RGB 图像的可视外壳

2.2 基于深度图像的可视外壳冗余去除

基于深度图像的可视外壳冗余体主要是由多角度深度相机的判定结果融合引起的。主深度相机判定为不可见态的点在融合后,一部分被其他深度相机判定为物体外,它们跟另一部分融合后依旧不可见的点组合形成边界体素,从而造成冗余。如图 7 所示,显示了某模型基于多深度图像的融合可视外壳。

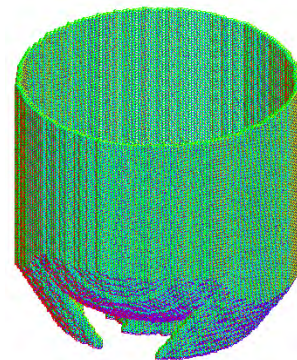


图 7 基于多深度图像的融合可视外壳

基于 RGB 图像的可视外壳方法虽然无法恢复物体的凹面区域,但恢复的物体轮廓属于包含原始物体的最小凸面包围盒,限定了物体的外围轮廓。在基于深度图像的可视外壳进行冗余去除时,可以通过判断其是否位于最小凸面包围盒之外将冗余体素去除。对于任意体素 V_m , 深度相机判定的体

素状态记为 VOS'_m , 设体素状态 $VOS'_m=0$ 为基于深度图像的可视外壳, 记为体素集合 α 。基于 RGB 图像重新判断体素集合 α 的状态, 如果被判定为物体外则将其剔除。图 7 所示基于多深度图像的融合可视外壳冗余去除后的结果如图 8 所示。

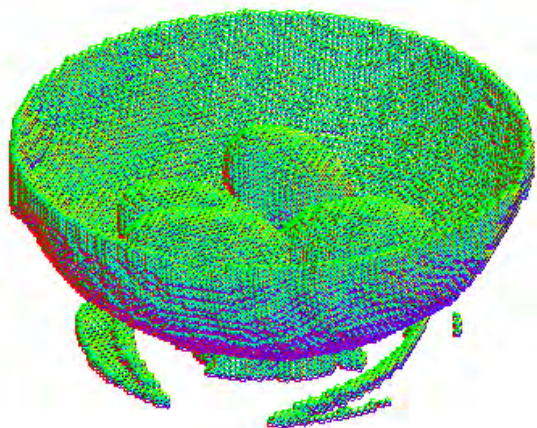


图 8 去冗余后的基于深度图像的可视外壳

2.3 可视外壳融合

基于深度图像的可视外壳及基于 RGB 图像的可视外壳在去冗余后, 两者不可避免的还存在交集, 在两者进行融合时, 还要进行重复体素的剔除。由于深度图一般噪音较大, 优先保留基于 RGB 图像判定的体素结果。于是, 基于 RGB 图像与深度图像的可视外壳融合算法流程可归结为: (1) 分别计算基于 RGB 图像及深度图像的可视外壳。(2) 基于深度图的可视外壳对基于 RGB 图像的可视外壳去余。(3) 基于 RGB 图像的可视外壳对基于深度图的可视外壳去余。(4) 重复体素剔除。(5) 实现融合算法并行加速。

如图 9 所示, 显示了两种类型可视外壳的融合结果。融合后的可视外壳, 保留了两者各自的优点, 具有完整的物体轮廓, 并且还原了物体的凹面信息。

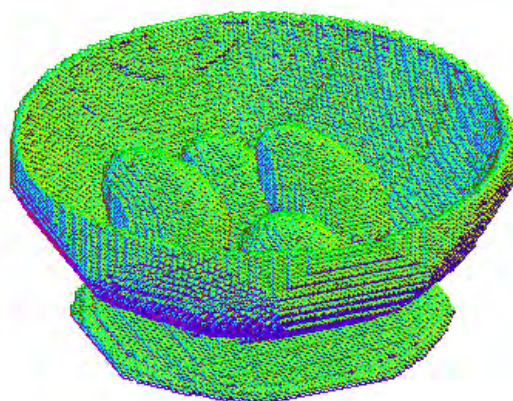


图 9 融合可视外壳

3 实验结果及分析

本文的实验测试平台组成为主频 2.10GHz 的英特尔 Xeon(至强) E5-2620 v2 六核 CPU、32.00 GB 内存; 显卡为主频的 0.74GHz NVIDIA Tesla K40c, 具有 2880 个 CUDA Cores。实验仿真平台使用 9 个 RGB 相机(1024×768)和 3 个深度相机(320×240)。

本文对有内容物的不规则凹面模型进行实验, 其 144×144×144 剖分后的建模结果如表 1 所示, 采用 MC 算法进行三角化。

表 1 凹面模型建模结果

序号	原图	三角化	纹理
1			
2			
3			
4			

如图 10 所示, 显示了模型在不同剖分下的结

果三角形个数, 从中可知, 空间剖分的越细, 结果三角形个数就会越多。如图 11 所示, 显示了模型在不同剖分下的串并行主计算总时间, 可以看出, 在各剖分下并行主计算要比串行计算快的多, 并且剖分数目越大并行时间收益越大。模型的建模总时间及结果三角形如表 2 所示(建模总时间包括数据输入时间, 主计算时间, 数据输出时间以及绘制时间)。从实验结果可以看出, 并行后建模总时间要比串行时间少的多, 且用时都在 200 ms 以下, 这要比 Jang^[3]150s 建 8400 个边的效率要高很多。

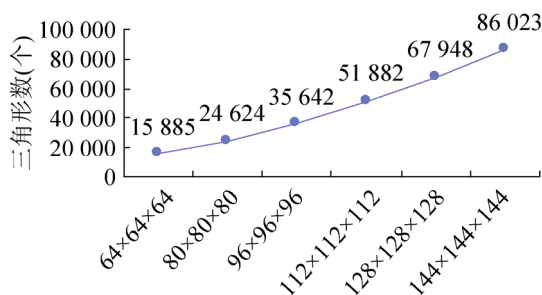


图 10 不同剖分下结果三角形个数

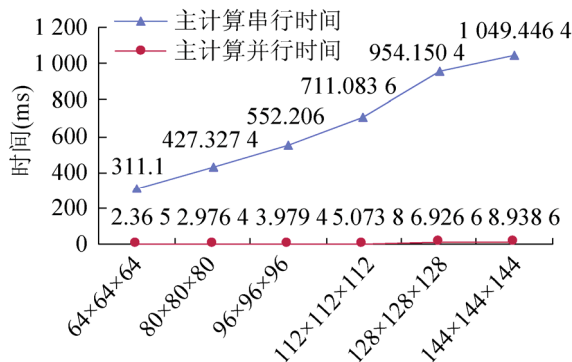


图 11 串并行主计算时间对比

表 2 串并行下建模总时间

剖分	串总时间/ms	并总时间/ms
64×64×64	352.0048	66.9117
80×80×80	480.9504	70.0859
96×96×96	611.0936	82.0314
112×112×112	779.4652	89.2568
128×128×128	1036.0068	116.7287
144×144×144	1130.143	166.2446

4 结论

为了重建出的凹面物体具有明晰的边缘及外部轮廓, 基于体素剖分的思想, 结合两种可视外壳各自的优点, 提出了基于深度图与彩色图融合的可视外壳计算方法。该方法解决了传统彩色图像可视外壳不能还原凹面的问题, 可实现带有深凹域物体的快速三维重建。为了加快计算速度, 针对深度图像与彩色图像的融合计算方法, 提出了一种融合可视外壳并行加速方案, 利用 CUDA 实现了基于 GPU 的并行计算。进一步可开展面向真实相机环境的三维实时重建的工作, 需要解决多角度深度图获取及噪声处理等问题。

参考文献:

- [1] Laurentini A. The Visual Hull Concept for Silhouette based Image Understanding [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 1994, 16(2): 150-162.
- [2] Feng J, Song B, Zhou B. Bottom and concave surface rendering in image-based visual hull [J]. The International Journal of Virtual Reality (S1081-1451), 2009, 8(2): 39-44.
- [3] Jang I Y, Park M K, Lee K H. Hybrid optical system for three-dimensional shape acquisition [J]. Applied Optics (S1559-128X), 2013, 52(16): 3680-3688.
- [4] 冯晓萌, 吴玲达, 杨超, 等. 基于 CUDA 架构的复杂电磁环境空间数据实时体绘制技术 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(7): 1549-1553.
- [5] Kim Y M, Theobalt C, Diebel J, et al. Multi-view image and TOF sensor fusion for dense 3D reconstruction [C]// Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Washington, USA: IEEE Computer Society, 2009: 1542-1549.
- [6] 王聪, 周忠, 吴威. 利用飞行时间相机优化可视外壳的实时三维重建算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(4): 11-13.