

基于微分不变量和区域增长法的深度图分割

张梅^{1,2}, 张祖勋¹

(1. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079; 2. 贵州财经学院信息学院, 贵阳 550004)

摘要: 用深度图(点云)直接对曲面物体进行识别, 将会加大曲面物体的数学表示的难度。该文提出一种对深度图进行自动分割的方法, 基于微分不变量进行初始分割, 得到初始的核区域, 用区域增长法进行曲面片增长, 将深度图分割成多个区域。该算法原理简单、易于理解和编程。通过一个米老鼠头部深度图实例证明了该方法的有效性。

关键词: 深度图像; 微分不变量; 区域增长; 自动分割; 物体识别

Segmentation for Range Image Based on Differential Invariant and Region Increase Method

ZHANG Mei^{1,2}, ZHANG Zu-xun¹

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079;

2. Information Institute, Guizhou Financial Institute, Guiyang 550004)

【Abstract】 An actual surface object consists of many surface patches. If surface object is directly recognized with range image, it is more difficult to represent the surface object. This paper proposes a method for automatic region segmentation algorithm of range image. The first original segmentation is made by differential invariant, and the range image is divided into many regions with region increase method. The algorithm is simple, and it is easy to understand and program. An example with range image of Mickey Mouse's head proves the validity of the method.

【Key words】 range image; differential invariant; region increase; automatic segmentation; object recognition

1 概述

三维曲面物体的建模与识别一直是计算机视觉领域的研究重点和难点, 区域分割是其中最关键的环节之一。目前针对灰度图像常用的有3种分割算法^[1]:

(1)四叉树法: 首先将整个曲面看成一个整体, 拟合一个单一曲面, 然后检验误差是否满足要求, 若不满足, 将曲面分为4个, 最后对每一部分重复上述过程, 直至每个子曲面都能满足精度要求。

(2)阈值分割法: 是一种简单有效的图像分割方法, 对物体与背景有较强对比的图像的分割特别有效, 所有灰度大于或等于阈值的像素被判断为属于物体, 否则, 这些像素点被判断为属于背景。

(3)边缘检测法: 边缘是图像上灰度变化最剧烈的地方, 该方法利用这个特点, 对图像各个像素点进行微分或求二阶微分以确定边缘像素点。

高精度深度传感器的出现使深度图像(点云数据)分析引起了科学工作者的广泛兴趣。深度图像与灰度图像相比, 由于没有光照产生的阴影问题, 而且物体同一光滑面也不会因为不同颜色区域、材质等产生“纹理”问题, 因此几何特征较易提取^[2], 且精度较高。

国内外许多学者对深度图的区域分割方法进行了研究, 主要有基于面和基于边的方法, 其中, 基于边的方法首先根据点的局部几何特性在点的集合中检测边界点(如曲率阶跃点、曲率局部极值点、曲率过零点和深度不连续点), 然后进行边界点的连接、拟合^[3], 在实际图像处理中, 噪声的影响导致用该方法提取出的边界质量不太好。

本文针对人造3D曲面物体(玩具米老鼠头部)的深度图分割问题, 提出了一种基于微分不变量和区域增长法的分割方法。该方法基于以下前提: 在同一区域内, 特征(高斯曲率、平均曲率和主曲率等)的变化是平缓的, 两相邻区域边界两侧的特征变化是剧烈的。该方法可分为2步:

(1)基于高斯曲率和平均曲率等微分不变量进行初始分割, 得到初始的核区域, 并用二元变量多项式拟合。

(2)用区域增长法进行曲面片增长, 将点云数据分割成多个区域。深度图像中的每个区域对应三维曲面物体上的一个有限曲面(平面可看成一特殊曲面), 分割完成后, 可由相应的深度数据计算该有限曲面的几何矢量, 并对分割后的曲面片以及它们的拓扑关系用特征关系图描述, 最后根据这些特征矢量基于特征关系图匹配进行识别。

本文的方法已在 Pentium 4 PC 上用 Visual C++6.0 和 Matlab7.0 进行了模拟, 并得到了较好的分割结果。

2 深度图分割

广泛使用的高斯曲率和平均曲率符号(简称 KH 符号)是一种微分不变量, 它为表面基元(曲面片)提供了与视角无关的定性性质, 可将表面基元分为如下8类: 峰面, 脊面, 鞍脊面, 平面, 最小面, 凹面, 谷面, 鞍谷面, 如表1所示, 这些曲面类型可用于构造核区域。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40571136)

作者简介: 张梅(1974-), 女, 副教授、在职博士研究生, 主研方向: 计算机视觉, 图像处理; 张祖勋, 教授、博士生导师、中国工程院院士

收稿日期: 2007-12-01 **E-mail:** zm_gy@sina.com

表 1 由表面曲率符号确定的表面类型

	$K[i,j]>0$	$K[i,j]=0$	$K[i,j]<0$
$H[i,j]>0$	$T[i,j]=1$, 峰面	$T[i,j]=2$, 脊面	$T[i,j]=3$, 鞍脊面
$H[i,j]=0$	$T[i,j]=4$, 无	$T[i,j]=5$, 平面	$T[i,j]=6$, 最小面
$H[i,j]<0$	$T[i,j]=7$, 凹面	$T[i,j]=8$, 谷面	$T[i,j]=9$, 鞍谷面

2.1 初始分割

分析微分几何学可知,空间曲面上任一点的曲率是曲面的固有特征,它不随曲面的位置、方向变化而变化,也与曲线的参数化方法无关,在3D空间 R^3 中,一个离散参数曲面可表示为如下的Monge曲面^[4]:

$$r(u,v)=[u \ v \ h(u,v)]^T$$

其中, $u=1,2,\dots,m; v=1,2,\dots,n$ 。

$U-V$ 平面可看成3D空间 R^3 的参考平面,这时 $h(u,v)$ 表示离散曲面到参考平面点 (u,v) 的距离。曲面在点 $r(u,v)$ 的切平面平行于 r_u 与 r_v 张成的向量平面,则曲面 $r(u,v)$ 的单位法线方向为

$$n = \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|}$$

$r(u,v)$ 可表示为2种基本形式,第1种基本形式表示曲面的内在性质^[4]:

$$I(du,dv) = dr \cdot dr = (r_u du + r_v dv) \cdot (r_u du + r_v dv) = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2$$

其中, E,F,G 为第1种基本形式参数,并且有

$$E = r_u \cdot r_u$$

$$F = r_u \cdot r_v$$

$$G = r_v \cdot r_v$$

其中, r_u 是 r 对 u 的偏微商(其余类同)。

第2种基本形式表示曲面的外在性质^[4]:

$$II(du,dv) = -dr \cdot dn = (r_{uu} du^2 + 2r_{uv} dudv + r_{vv} dv^2) \cdot n = Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2$$

其中, r_{uu} 是 r 对 u 的二阶偏微商(其余类同)。

L,M,N 为第2种基本形式参数,并且有

$$L = r_{uu} \cdot n$$

$$M = r_{uv} \cdot n$$

$$N = r_{vv} \cdot n$$

由此可见,由 E,F,G,L,M,N 这6个参数唯一确定了曲面的2种基本形式,而高斯曲率 K 、平均曲率 H 以及主曲率 k_1, k_2 也可用这些参数表示^[5]:

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}$$

$$H = \frac{EN + GL - 2FM}{2(EG - F^2)}$$

$$k_1 = H + \sqrt{H^2 - K}$$

$$k_2 = H - \sqrt{H^2 - K}$$

高斯曲率 K 、平均曲率 H 以及最大、最小主曲率 k_1, k_2 由此包含了曲面的形状信息。为了方便表述,用 h 表示 $h(u,v)$,用 r 表示 $r(u,v)$,则参数曲面 r 的一阶和二阶微商分别表示为

$$r_u = [1 \ 0 \ h_u]^T$$

$$r_v = [0 \ 1 \ h_v]^T$$

$$r_{uu} = [0 \ 0 \ h_{uu}]^T$$

$$r_{uv} = [0 \ 0 \ h_{uv}]^T$$

$$r_{vv} = [0 \ 0 \ h_{vv}]^T$$

其中,

$$h_u = \frac{\partial h}{\partial u}$$

$$h_v = \frac{\partial h}{\partial v}$$

$$h_{uu} = \frac{\partial^2 h}{\partial u^2}$$

$$h_{vv} = \frac{\partial^2 h}{\partial v^2}$$

$$h_{uv} = h_{vu} = \frac{\partial^2 h}{\partial u \partial v}$$

分别是距离函数 h 的一阶和二阶微商。而 K, H, k_1, k_2 可由曲面函数的微商表示为

$$K[i,j] = \frac{h_{uu}[i,j]h_{vv}[i,j] - h_{uv}^2[i,j]}{(1+h_u^2[i,j]+h_v^2[i,j])}$$

$$H[i,j] = ((1+h_u^2[i,j])h_{uv}[i,j] + (1+h_v^2[i,j])h_{uv}[i,j] -$$

$$2h_u[i,j]h_v[i,j]h_{uv}[i,j]) \div 2(1+h_u^2[i,j]+h_v^2[i,j])^{3/2}$$

$$k_1[i,j] = H[i,j] \neq 0 + \sqrt{H^2[i,j] - K[i,j]}$$

$$k_2[i,j] = H[i,j] - \sqrt{H^2[i,j] - K[i,j]}$$

对于数字深度图像表面,假设距离函数分布在均匀网格上,可采用局部多项式拟合的方法求其微商值的近似值,即可分离滤波器与距离函数进行卷积以估计深度图像的一阶和二阶微商,常选用 $N \times N$ 窗口算子与原深度图像卷积实现。

$$\begin{cases} h_u = D_u * S * h \\ h_v = D_v * S * h \\ h_{uu} = D_{uu} * S * h \\ h_{vv} = D_{vv} * S * h \\ h_{uv} = D_{uv} * S * h \end{cases}$$

其中,*表示卷积运算; $D_u, D_v, D_{uu}, D_{uv}, D_{vv}, S$ 为 $N \times N$ 算子。

当 $N=7$ 时,可推出^[6]

$$\begin{cases} S = ss^T \\ D_u = d_0 d_1^T \\ D_v = d_1 d_0^T \\ D_{uu} = d_0 d_2^T \\ D_{vv} = d_2 d_0^T \\ D_{uv} = d_1 d_1^T \end{cases}$$

$$\begin{cases} s = \frac{1}{64}[1 \ 6 \ 15 \ 20 \ 15 \ 6 \ 1]^T \\ d_0 = \frac{1}{7}[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \\ d_1 = \frac{1}{28}[-3 \ -2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3]^T \\ d_2 = \frac{1}{84}[5 \ 0 \ -3 \ -4 \ -3 \ 0 \ 5]^T \end{cases}$$

其中, s, d_0, d_1, d_2 是计算微商窗口算子的列矢量。

2.2 区域连通

当计算出深度图像上所有像素的高斯曲率 K 和平均曲率 H 后,可用 H 和 K 正负号编码公式计算整数标记 $T^{[7]}$:

$$T[i,j] = 1 + 3(1 + \text{sgn}(H[i,j])) + (1 - \text{sgn}(K[i,j]))$$

其中, $\text{sgn}\{\cdot\} \in \{1, -1, 0\}$ 分别表示+,-,0,表面类型及曲率符号关系见表1。然后使用序贯连通成份算法(算法1)将具有相同符号的标记组成一个连通区域,由此得到初始核区域。

算法 1 序贯连通成份算法

Step1 从左至右、从上到下扫描深度图像。

Step2 如果 $T[i, j] \neq 0$, 则:

- (1)如果上面点和左面点有一个标记, 则复制这一标记。
- (2)如果两点有相同的标记, 复制这一标记。
- (3)如果两点有不同的标记, 则复制上点的标记, 并将

2 个标记输入等价表中作为等价标记。

(4)否则给该像素点分配一个新的标记并将其输入等价表。

Step3 在等价表的每个等价集中找到最低的标记。

Step4 扫描深度图像, 用等价表中的最低标记取代每个标记。

2.3 区域增长法

深度图像中每一个初始核区域都可以用二元变量多项式有效地拟合^[7], 接下来进行核区域扩展, 以便覆盖核区域更多相似的邻近点, 即把那些没有标记的距离像素通过增长添加到相应的核区域中去。

用于深度图像分割的区域增长算法如下:

算法 2 深度图像分割算法

Step1 用可分离滤波器计算距离图一阶和二阶偏导数。

Step2 计算图像每一个像素位置的平均曲率和高斯曲率。

Step3 标记每个像素的曲面类型。

Step4 收缩区域以消除靠近区域边界的错误标记。

Step5 使用序贯连通成份算法识别核区域。

Step6 去掉太小的核区域。

Step7 用双变量多项式拟合每一个核区域。

Step8 从某一核区域开始, 将满足相似性准则的核区域邻近点标记为该区域候选点。

Step9 重新用双变量多项式同时拟合核区域和区域候选点, 如果拟合结果满足相似性准则, 则核区域和候选点共同构成新区域, 否则, 放弃区域候选点。

Step10 对未进行过增长的核区域重复 Step8 和 Step9, 直到没有能够再增长的核区域为止。

3 实验结果

下面的例子就是采用本文方法完成的局部近似、初始分割、序贯连通以及区域分割。图 1 为米老鼠头部的“点云”数据, 含有 38 431 个数据点。图 2 为米老鼠头部深度图像, 像素大小为 480×640 , 灰度级为 256(8 bit)。图 3 是深度图的最后分割结果。

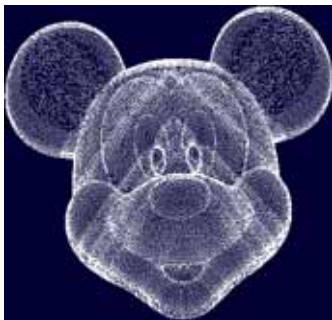


图 1 “米老鼠”点云数据

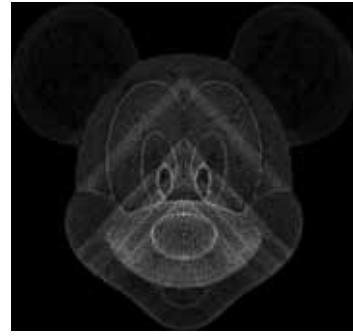


图 2 “米老鼠”深度图

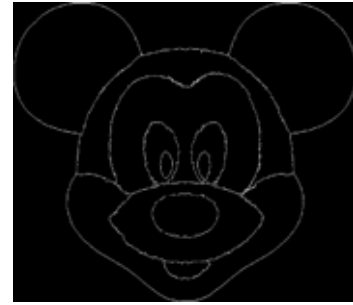


图 3 区域分割图

4 结束语

对用激光扫描测量得到的点云数据进行分割处理是曲面建模与识别的关键环节之一。本文针对“规则离散点云”数据, 从深度图像中提取景物几何特征从而得到初始分割核区域, 再通过区域增长迭代最终求得物体表面分割区域。本方法为后续基于特征关系图匹配的曲面景物识别奠定了基础。

上述方法已在 PC 上进行了模拟, 结果表明, 深度图用曲率等几何特征和区域增长法进行分割是有效的, 且有较好的分割结果, 模拟程序运行稳定可靠, 实验的重复性较好。应用实例表明本文算法可以满足工业应用要求, 应用前景广阔。

参考文献

- [1] Huang Jiangbing, Hsiang M C. Automatic Data Segmentation for Geometric Feature Extraction from Unorganized 3-D Coordinate Points[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(3): 268-279.
- [2] 吕震, 贾明, 柯映林. 三角曲面数字样品的特征提取与再现技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(8): 768-771.
- [3] Woo H K E, Wang Senyung. A New Segmentation Method for Point Cloud Data[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(2): 167-178.
- [4] 王申怀, 刘继志. 微分几何[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1990.
- [5] 孙龙祥, 程义民, 王以孝, 等. 深度图像分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 1996.
- [6] Bae S H, Choi B K. NURBS: Surface Fitting Using or Orthogonal Coordinate Transform for Rapid Product Development[J]. Computer Aided Design, 2002, 34(8): 683-690.
- [7] 林学闯, 王宏. 计算机视觉: 一种现代方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.