

基于 CV/CAD 的三维物体几何建模

邓世伟

袁保宗

(北京系统工程研究所, 北京 100101) (北方交通大学信息科学研究所, 北京 100044)

摘要 在虚拟现实等技术领域中, 都涉及到由现实世界中的实际景物建立对应的计算机描述的虚拟景物的问题, 为此提出了利用计算机视觉与 CAD 几何建模技术相结合的三维物体建模途径. 首先通过编码光栅方法获取三维物体的深度图象, 并采用数学形态学的方法加以分割, 然后利用代数曲面拟合手段对分割后的三维曲面片进行重建, 并使用 CAD 几何建模工具由重建的曲面片构成物体的几何模型. 该文给出了初步的试验结果, 证明所提出的技术途径基本可行.

关键词 计算机视觉 计算机辅助设计 几何建模

中图法分类号: TP391.72 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2001)04-0387-05

CV/CAD Based 3D Object Geometric Modeling

DENG Shi-wei

(Beijing Institute of System Engineering, Beijing 100101)

YUAN Bao-zong

(Institute of Information Science, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract In areas such as virtual reality, it is often needed to establish virtual scene in computer from actual scene in real world. In this paper, a technical approach for realizing geometric modeling of 3D object is proposed, which combines computer vision and CAD geometric modeling. The range images of 3D objects are obtained by using the encoded light stripe patterns, then are segmented by our range image segmentation method based on the basic operations of mathematical morphology. The meaningful regions obtained by range image segmentation correspond to the surface patches of 3D object. The 3D surface patches are then reconstructed by the algebraic surface fitting method, the surface parameters are estimated by solving generalized eigenvector problem. The geometric model of 3D object is constructed from reconstructed surface patches by using CAD geometric modeling tool GEOMOD. The primary experimental results of two mechanical parts are presented, which prove the proposed approach is feasible.

Keywords Computer vision, Computer aided design, Geometric modeling

0 引言

在计算机视觉、计算机图形学、虚拟现实、CAD/CAM 等领域中, 常常需要由实际景物来得到其计算机描述, 即由真实景物到虚拟景物的转换. 虽然从广义上讲, 这种转换应该完成对真实世界中物体和背景的完整描述, 但在涉及这类问题的众多领域中, 最为普遍的需求却是对物体表面形状的描述, 即完成三维物体的几何建模, 而且在基于模型的计算机视觉中, 视觉建模本质上就属于三维物体的几何建模

问题.

虽然人们对视觉建模已经进行了广泛的研究, 但仍无法快速有效地从实际的三维物体来生成模型, 因此如今这种模型通常仍是通过人工的方式来获得. 例如, Chen 和 Kak 就采用测量物体表面点并构造表面三角网格的方法来建立模型^[1], 在 ACRONYM 系统中, Brooks 使用了基于广义圆柱体的分级物体表示方法^[2], 但也是采用人工的构造方法; 另一种建模方法是首先从不同视角的图象中提取原型特征, 并利用这些原型特征, 再依据样本来构造模

型,例如,Fan 等就利用了多视图模型^[3],这些视图是根据物体的复杂程度用人工方法选择的,它能保证物体上最有意义的表面至少被包含在一个视图中;与此类似,Jain 和 Hoffman 则根据每个物体的 15 个样本视图构造差别模型^[4].

近年来,计算机视觉领域的学者把很多注意力放在用 CAD 模型来构造物体识别模型上.虽然 CAD 模型通常并不是为视觉目的而建立的,但是以物体为中心的 CAD 模型却提供了一种描述物体的自然方式,若加以适当处理,还可以作为识别所需信息的来源.Bolles 和 Horaud 的 3DPO 系统在 3D 物体的识别与定位中就使用了 CAD 模型^[5].Flynn 和 Jain 提出的建模方法^[6],是根据物体的 CAD 模型,用几何推理方法来获得物体的相关图表示,并保存在数据库中,供物体识别使用.他们的思想主要是将 CAD 表面表述能力同预先编入的以观察者为中心的信息结合起来,以产生相关的物体模型,再由商业 CAD 系统来生成 3D 物体描述.

在基于 CAD 模型的计算机视觉中,一个引人注意的研究方向是利用物体的 CAD 模型来制定针对特定物体的识别策略.如 Ikeuchi 就首先用网格将视球(Viewsphere)加以划分,再计算各网格中物体的外形和特征值范围,并将它们分组,以得到一些离散视图(Aspect),然后用这些视图及其预计的特征值来编制识别解释树^[7].

由此可见,在基于模型的计算机视觉中,视觉模型一般是用人工方法获得的,而在基于 CAD 模型的计算机视觉中,则基本上是利用三维物体的 CAD 模型来直接生成或间接构造视觉模型,或者仅是采用以三维物体的 CAD 模型作为上层知识生成的识别策略,而由实际的三维物体来构造其 CAD 模型仍采用人工的方法,因而这极大地限制了建模物体形状的复杂程度,同时也限制了模型库的规模和灵活性.

鉴于三维物体几何建模技术的现状,如今迫切需要研究有效的由实际物体到其虚拟描述模型的转化方法.根据计算机视觉(CV,computer vision)和计算机辅助设计(CAD,computer aided design)的技术特点,本文提出了基于 CV/CAD 的三维物体几何建模方法.由于计算机视觉的基本目的是物体识别和景物理解,虽在处理真实世界信息方面具有优势,但对物体和景物的表示能力较弱,而 CAD 几何建模的基本目的是对物体和景物在计算机中进行完整的几何表示,其虽适合于物体和景物在虚拟世界的建模,但

一般不具有对来自实际物体和景物的信息进行处理的能力,因此可以将二者的优势结合起来,实现由实际三维物体到其三维计算机描述模型的转化.本文依据以上思想,建立了基于 CV/CAD 的三维物体几何建模系统,其得到的模型经过进一步加工或扩展,可以用于计算机视觉、计算机图形学、虚拟现实、动画、CAD/CAM 等领域.

1 三维信息获取

实现三维物体的几何建模,首先要获取完整、准确的三维物体表面形状信息,而获取的该三维空间信息通常以深度图象(Range image)的形式表示.目前,获取物体深度图象的方法可分为被动式和主动式两类,后者具有代表性的方法为结构光法,而编码光栅法(ELSP,encoded light stripe patterns)是对结构光方法的改进,其最大特点是无需机械扫描系统,因此易于实现三维信息的快速获取.本文在对编码光栅法进行研究的基础上,建立了一个获取三维物体深度图象的实验系统.

编码光栅方法获取立体信息的原理如图 1 所示,由图上可见,投影仪把黑白相间的光栅模板投向空间,把空间划分为亮、暗相间的区域,其 N 个二值模板的组合结果即把空间划分为 2^N 个区域,这样,物体上的每一点都处于这 2^N 个平面中的某一个平面上或其附近,然后通过确定图象上某点的光平面号即可得到空间上对应点所处的空间平面,而摄像机的成像过程实际上则是把空间的三维物体做了一个透视变换,即将三维物体映射成为摄像机成像平面上的二维图象,通过透视变换就确定了与一个图象点对应的一条视线.如果已知空间点的直线方程,

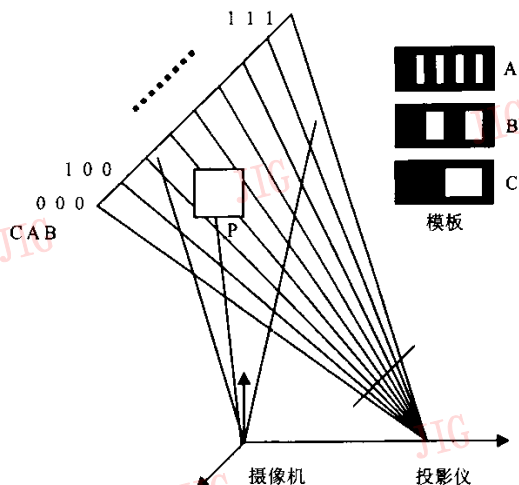


图 1 编码光源方法原理图

并得到空间点的平面约束方程,那么,由线、面条件即可获得三维空间点的精确位置信息.

根据以上的基本原理,要实现三维物体信息获取需要做3项工作,即定位、光平面号获取和三维空间信息计算.

1.1 定位

定位包括摄像机参数的确定(即 DLTLP 参数)和编码光平面参数的确定(LTPN 参数).关于摄像机参数的确定(DLTLP 参数),见参考文献[8],而编码光平面参数的确定(LTPN 参数)过程如下:制做一个小控制场,并将固定控制场在一个编码光平面上移动,通过确定这个平面上的不少于3个点的坐标,即可以确定此平面参数.在获得两个具有确定号数的精确光平面参数后,通过插值即可以确定所有光平面的参数.若采用8个模板,即可以产生256个光平面参数.

1.2 编码光平面信息的获取

首先对由 N 个不同的模板获得的条纹图象进行二值化,然后做加权运算,就可以获得图象点的光平面号.应当说明的是,为简单起见,图1中的模板采用的是二进制形式,而在实际使用中采用的是 GRAY 码的形式.

1.3 三维空间信息的计算

光平面空间参数已知后,就能够给出任意一个光平面的空间平面方程,再结合由透视变换确定的直线参数,即可获得物体表面点的三维空间坐标.

2 深度图象分割

尽管深度图象包含了物体表面点的三维位置信息,但是在一般情况下,三维物体的表面是由多个具有某种内部均匀特性的曲面片构成的,因而很难,甚至不可能用一个曲面来描述整个物体的表面,因此需要对深度图象进行分割,即将其划分成多个有意义的区域,并使每个区域中的深度数据属于同一个曲面片.

本文针对三维物体几何建模问题的特点,提出了基于数学形态学的深度图象分割方法.大家知道,一般的分割算法都是数值的方法,而数学形态学的方法则本质上是几何的方法,因而更适合用于几何建模的.另外,由实际物体获取的深度图象必然有噪

声的干扰,而数学形态学算子则具有一定的抗噪声性能,而且计算效率也较高.

在深度图象中,跳跃边界对应于深度不连续点,即所谓深度的突变,而尖顶边界则对应于方向不连续点,即所谓表面法向的突变.由此可见,跳跃边界和尖顶边界都是深度图象分割中需要检测的重要结构.分割时,首先用 3×3 的邻域平均滤波器来对输入的源深度图象进行平滑,然后用数学形态学边缘强度算子 $E_S(f)$ 来处理平滑后的深度图象, $E_S(f)$ 定义为

$$E_S(f) = \min[E_G(f), D_G(f)] \quad (1)$$

式中, $E_G(f)$ 和 $D_G(f)$ 是两个边缘增强算子,可以称之为腐蚀梯度和膨胀梯度

$$E_G(f) = f - (f \ominus w) \quad (2)$$

$$D_G(f) = (f \oplus w) - f \quad (3)$$

其中,算子 $f \ominus w$ 和 $f \oplus w$ 是用平面型结构元 w 来对图象分别进行腐蚀和膨胀,因此腐蚀和膨胀的定义分别为

$$(f \ominus w)(r, c) = \min_{i,j} (f(r+i, c+j) - u(i, j)) \quad (4)$$

$$(f \oplus w)(r, c) = \max_{i,j} (f(r-i, c-j) + u(i, j)) \quad (5)$$

经过 $E_S(f)$ 算子处理以后,深度图象在跳跃边界处形成凸脊,在尖顶边界处形成凹谷.

由于在跳跃边界和尖顶边界上各处的局部形状存在差别,而且这时得到的凸脊和凹谷,其各处的幅度大小不一,因此还不能用简单的门限方法把它们提取出来.本文是采用数学形态学凸脊检测算子 $P(f)$ 和凹谷检测算子 $V(f)$ 来把凸脊和凹谷检测出来

$$P(f) = f + (f \circ b) \quad (6)$$

$$V(f) = (f \bullet b) - f \quad (7)$$

其中, $f \circ b$ 和 $f \bullet b$ 是用球型结构元 b 对 f 进行开和闭运算

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b \quad (8)$$

$$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b \quad (9)$$

这样就形成了两个图象,即凸脊和凹谷图象.在凸脊图象中,跳跃边界处即产生了幅度均匀的凸脊,而在凹谷图象中,尖顶边界处产生了幅度均匀的凸脊.经过简单的门限处理,即可以分别从凸脊和凹谷图象中把凸脊从背景中分离出来.

从凸脊图象中分离出来的凸脊宽度一般不超过3个象素,因此用简单的细化就可以精确地得到跳跃边界,然后把从凹谷图象中分离出来的凸脊和已经得到的跳跃边界合并成一个二值图象,其中,把从

凹谷图象中分离出来的凸脊和所得到的跳跃边界上的点均标记为 1, 把背景则标记为 0. 这时, 从凹谷图象中分离出来的凸脊和已经得到的跳跃边界就共同把图象分割成了几个封闭的区域. 然后再用受控的区域生长方法从二值图象中提取出尖顶边界, 即利用跳跃边界限制区域生长的过程, 使区域生长的结果同已经得到的跳跃边界不发生冲突. 这样在提取出尖顶边界的同时, 也就完成了分割, 故不需要对这些边界再进行另外的连接过程.

3 三维曲面重建

在把深度图象分割成一些区域之后, 这些区域则分别对应于物体表面上的曲面块, 其每个区域中所有的点均在同一曲面块上, 本文采用代数曲面对这些深度数据点进行拟合. 下面是对其中一个曲面块进行拟合的原理介绍.

为了便于分析表示, 这里将三维空间中的一个点用矢量 x 表示, 设 f 为 d 次代数曲面函数, f 的零点集表示为 $Z(f)$, 即 $Z(f) = \{x: f(x) = 0\}$. 代数曲面函数 f 可表示为

$$f = FX \quad (10)$$

其中, $X = (X_1, \dots, X_r)^T$, $X_1(x), \dots, X_r(x)$ 为次数不高于 d 的单项式, 是一线性独立的平滑函数, $r = \binom{d+3}{3}$, F 是 $1 \times r$ 的实元素参数矩阵. 设 $D = \{p_1, \dots, p_q\}$ 是一个区域中的三维数据点集, 数据点的个数为 q . 这里用代数曲面 f 对数据进行拟合是以均方误差 $E(F)$ 最小化为基础的, 其中

$$E(F) = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \|f(p_i)\|^2 = \frac{1}{q} F M F^T \quad (11)$$

$$M = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q [X(p_i)X(p_i)^T] \quad (12)$$

M 是数据集 D 上 X 的协方差矩阵. 由于微分是线性运算, 因此有 $D_f = F[D_X]$, 其中 D_f 和 D_X 分别是 f 和 X 的雅可比矩阵. 可以证明, 若对 f 施加约束条件

$$I = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q D_f(p_i)D_f(p_i)^T = FNF^T \quad (13)$$

并不影响式 (11) 最小化后式 (10) 的零点集, 其中

$$N = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q [D_X(p_i)D_X(p_i)^T] \quad (14)$$

如果 N 也是正定的, 那么束 $M - \lambda N$ 就是对称正定的, 虽然大家都知道求解对称正定特征问题的算法, 但是在代数曲面情况下, N 是欠秩的, 因此可以将原问题转化为对称正定问题.

根据以上分析, 如果 N 是正定的, 且 F 是半正定束 $M - \lambda N$ 对应于最小特征值 $\lambda_1 \geq 0$ 的特征向量, 那么 $\hat{F}$ 是在约束条件式 (13) 下, 式 (11) 的最小解. 这样就得到了拟合数据集 D 的代数曲面隐函数 $\hat{f} = \hat{F}X$. 一般来说, 矩阵 N 是欠秩的, 但是可以转化成大小等于 N 的秩的等价正定问题.

因此, 对每一个分割后的区域, 代数曲面拟合的计算过程如下: 首先输入深度图象中待拟合区域内的全部深度数据 $D = \{p_i = (x_1, x_2, x_3)^T\}_{i=1}^q$, 设定代数曲面的次数 d , 再由次数不高于 d 的所有单项式 X_i 来构成 $X = (X_1, \dots, X_r)^T$, 其中 $r = \binom{d+3}{3}$; 然后由 D 根据式 (12) (14) 来计算矩阵 N, M , 由 N 计算 $L = [L_1 L_2]$, 并由 L 计算 L^{-1} , 计算 $H = L^{-1} M L^{-T}$, 再由 H 根据分块依次计算 H_1, H_2, H_3 , 求解正定束 $H_3 - \lambda I_h$ 的对应于广义最小特征值的广义特征向量 U_1 , 计算 $U_2 = -U_1 H_2, U = [U_1 U_2]$, 最后计算 $F = U L^{-1}$, 以得到拟合的代数曲面方程 $f = FX$. 计算重建均方误差, 如果误差过大, 可以增加代数曲面隐函数的次数, 重新进行拟合, 直到获得满意的拟合结果.

在以上拟合过程中, 计算 L_1, L_2, H_1, H_2, H_3 的方法如下, 因为 N 是非负定的, 所以利用修改的 Cholesky 分解即可以找到一个 $r \times h$ 矩阵 L_1 和一个 $r \times (r-h)$ 矩阵 L_2 , 使得 $N = L_1 L_1^T, N L_2 = 0$, 而且方阵 $L = [L_1 L_2]$ 是非奇异的. 矩阵 $H = L^{-1} M L^{-T}$ 可以按下式分解

$$H = \begin{bmatrix} H_3 + H_2 H_1 H_2^T & H_2 H_1 \\ H_1 H_2^T & H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_h & H_2 \\ 0 & I_{(r-h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_3 & 0 \\ 0 & H_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_h & H_2 \\ 0 & I_{(r-h)} \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

矩阵 H_1, H_2, H_3 按顺序由 H 的对应块求出.

4 CAD 几何建模

CAD 建模是采用 SDRC 公司 I-DEAS 系统的几何建模模块 GEOMOD, 首先把三维重建结果送入 I-DEAS, 并以此为基础进行 CAD 建模, 下面对 CAD 建模过程加以简要说明.

(1) 将三维重建结果转换成输入数据文件

对重建的代数曲面片均匀地采样, 以得到 32×32 的 3D 坐标点阵, 并生成描述曲面片的 Universal 格式的 CAD 数据文件.

(2) 生成 3D 曲面片

将描述各个曲面片的 Universal 数据文件全部输入 GEOMOD,并以包络点阵的形式存贮,定义平面片逼近的公差,生成包络面。包络面由两种表示方法共同描述,即用小平面对曲面的近似模型和采用有理 B 样条来构造曲面的精确模型。

(3) 构造物体的 CAD 模型

调用已经构造的表示各曲片面的包络面,并利用 GEOMOD 几何构造功能,通过布尔运算进行组合,构成物体的 B-Rep 描述。

(4) 构造扩充的三维物体 CAD 模型

由物体的 B-Rep 描述,生成其 IGES 格式数据文件,其中包含了三维物体 CAD 模型的全部数据,也是对原物体表面形状的完整描述。根据应用的需要,可以在模型中附加其他特征数据。

5 实验结果

根据上述技术途径,初步建立了一个基于 CV/CAD 的三维几何建模系统,这里给出两个结果实例。第一例是由一个机械零件实际的 2.5D 深度图象 PART 来建立其计算机模型,深度图象的深度分辨率为 8bit,大小为 128×128 pixel,由于该图象只有物体表面的 2.5D 部分数据,故只能得到其可见部分的 CAD 模型,而其他部分不能确定,如图 2(a)所示;第二例是由 3D 深度图象 CYLIND 来建立其计算机模型,3D 深度图象中以圆柱坐标系表示物体表面点的 3D 数据,其中,每个像素的横坐标表示物体点的 θ 坐标,纵坐标表示其 z 坐标,像素值表示其 y 坐标。该深度图象的深度分辨率为 8bit,大小为 128×128 pixel。由于 3D 深度图象中包含了物体完整的表面形状数据,故可得到其完整的 CAD 模型,如图 2(b)所示。

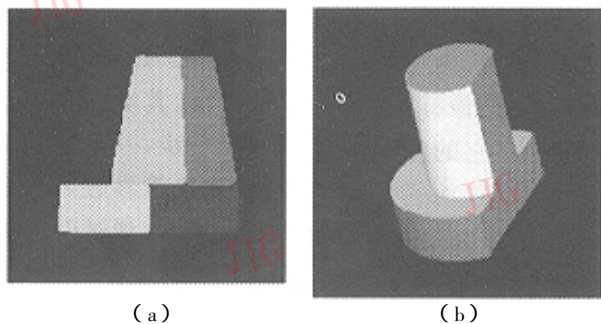


图2 三维物体几何建模结果

6 结束语

由实际的三维物体来建立其计算机模型是很多领域中均涉及到的困难而又重要的问题。例如,在计算机视觉的景物分析和物体识别中,这种三维物体的几何建模技术即为建立大规模模型库提供了手段。另外,在 CAD 应用中,还可以利用三维物体的几何建模技术对原型物体的复杂表面进行数字化描述。

尽管如此,由于三维物体的几何建模一直没有受到足够的重视,因此概念不统一,而且实现手段也相对落后。本文不仅对三维物体的几何建模问题进行了初步探讨,还提出了利用计算机视觉与 CAD 几何建模手段相结合的方法来实现三维物体几何建模的技术途径,今后还将作进一步的研究。

参考文献

- 1 Chen C H, Kak A C. A robot vision system for recognition 3-D objects in low-order polynomial time. IEEE Trans. Sys. Man Cybern., 1989, 19(6): 1535-1563.
- 2 Brooks R A. Model-based three-dimensional interpretation of two-dimensional images. IEEE Trans. Patt. Machine Intell., 1983, 5(2): 140-150.
- 3 Fan T, Medioni G, Nevatia R. Recognizing 3-D objects using surface descriptions. IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., 1989, 11(11): 1140-1157.
- 4 Jain A K, Hoffman R. Evidence-based recognition of 3-D objects. IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., 1988, 10(6): 783-801.
- 5 Bolles R C, Horaud P. 3DPO: A three-dimensional part orientation system. Int. J. Robotics Res., 1986, 3(3): 326.
- 6 Flynn P J, Jain A K. CAD-based computer vision: from CAD models to relational graphs. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 1991, 13(2): 114-132.
- 7 Ikeuchi K. Generating an interpretation tree from a CAD model for 3-D object recognition in bin-picking tasks. Int. J. Comput. Vision., 1987, 1(2): 123-130.
- 8 李锦成. 计算机立体视觉系统及物体三维信息获取、定位和识别的研究 [博士学位论文]. 北京: 北方交通大学信息科学研究所, 1988.

邓世伟 1966 年生,博士,副研究员,现主要研究领域为图象处理、计算机视觉、虚拟现实技术。

袁保宗 1932 年生,获原苏联副博士学位,教授,博士生导师,现主要研究领域为语音信号处理、图象处理、计算机视觉等。