

三维物体的形态图表达方法

曾接贤¹⁾ 鲁宇明¹⁾ 黎明²⁾ 储珺¹⁾

¹⁾(南昌航空工业学院土木建筑系, 南昌 330034)

²⁾(南昌航空工业学院测试与控制工程系, 南昌 330034)

摘要 三维物体的表达方法是计算机视觉中的关键问题之一, 现有的各种三维物体表达方法虽然在各自的识别中得到应用, 但都存在各自的局限性. 用形态图表达三维物体是一种以视点为中心的表达方法, 由于它列举了一个物体所有可能的“定性”形象, 即可使用最少的二维投影线图(特征视图)来表达一个完整的三维物体, 因此使三维物体识别转化为2D与2D的匹配. 该文首先定义了二维线图拓扑结构等价的判别准则; 然后给出了构造透明物体形态图的方法; 最后根据拓扑结构等价准则来得到不透明物体的形态图和特征视图, 并用圆锥与圆柱相交的实例进行了验证.

关键词 三维物体识别 三维物体表达 形态图 特征视图

中图法分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)09-0906-05

A Representation Method Based on aspect Graph for 3D Objects

ZENG Jie-xian¹⁾, LU Yu-ming¹⁾, LI Ming²⁾, CHU Jun¹⁾

¹⁾(Department of Architecture and Civil Engineering Nanchang Institute of Aeronautical Engineering, Nanchang 330034)

²⁾(Department of Test & Control Engineering Nanchang Institute of Aeronautical Engineering, Nanchang 330034)

Abstract The 3D object representation method is a key problem on computer vision. The existent methods of 3D object representation have applied for 3D object recognition. But, they have themselves drawback. The 3D object representation method based on aspect graph is a kind of means on a center of the observant. It completely describes the 3D object by a finite set of 2D views of the object from different viewpoint. According to geometry structure of object, the set of viewpoint on the viewing space is partitioned into regions such that in each region the equivalent structure of the line drawing is consistent. An aspect is defined for the same of qualitative structure of topology of the line drawing. The 3D object representation method based on aspect graph makes 3D object recognition become problem on matching 2D image and 2D aspect. To begin with, The thesis defines a principle of equivalent structure of topology for the line drawing. In addition, it studies the partition theory and structure method of aspect graph for 3D object of transparent under perspective projection. At last, according to the principle of equivalent structure of topology, the aspect graph for 3D object of opaque and aspect are established. At the same time, it is proved for example of 3D object.

Keywords 3D object recognition, 3D object representation, Aspect graph, Aspect

0 引言

三维物体识别是计算机视觉的重要组成部分, 它的任务是识别出图象中有什么类型的物体, 并反映出物体在图象所反映的场景中的位置和方向. 如

果在识别过程中要利用有关物体的先验知识(model), 则称为基于模型的三维物体识别.

在基于模型的三维物体识别中, 一般要通过两个阶段的处理, 以完成对图象中3D物体的识别和定位^[1], 即首先通过传感器获取的场景输入数据来得到场景的表达; 然后将它与数据库中存储的物体表达相

匹配. 具体来说, 三维物体识别系统必须解决如下几个问题^[2]: (1) 获取原始数据的传感器类型; (2) 三维物体模型表达(构造)方法; (3) 描述原始数据和物体模型的工具; (4) 从输入数据获得的物体描述和物体模型描述之间的匹配方法. 其中, 传感器决定了输入数据的分辨率、准确性和类型; 而模型则提供了视觉系统的先验知识; 表达则用于描述采集的数据和物体模型, 它是计算机视觉中的一个关键问题.

一般说来, 识别系统的性能可由物体的颜色和纹理等来改善, 不过这往往使识别系统变得复杂和不稳定. 由于物体的几何表达(以顶点、棱线和外形线为表达要素)方法既表示了物体最重要的信息, 也使识别变得简单、可靠, 且在日常生活中, 人们就有从顶点、棱线和外形线识别出物体的能力, 因此, 物体的几何表达方法乃是目前三维物体识别中的主要手段, 但物体的几何表达须具备下述条件^[2]: (1) 明确性; (2) 唯一性; (3) 不敏感性; (4) 方便匹配和存储.

根据描述物体坐标系的不同, 可以将三维物体表达方法分成以物体为中心和以观察者为中心两个主要类别^[3]. 其中以物体为中心的表达方法侧重在物体本身坐标系中描述物体, 并使用与视点无关的本质特征来描述物体^[4]. 这方面的主要表达方法可以归为如下两大类: 一是基于表面的表达方法, 如基本表面特征表达法, 该方法是使用物体表面的一些基本几何特征来将物体表达成与视角无关的面、边和顶点, 但这种方法对获取数据中的噪声敏感, 并且其准确性要依赖于是否能够从输入图象来可靠地提取描述物体的特征, 又如表面不连续性表达法, 它是使用物体的屋脊和阶跃边缘来构造物体边缘连接图, 它虽然降低了存储需求, 但表达不完整, 还有拟合表面参数表达法, 它是将物体表面用参数方程拟合, 由于物体可见外观, 其所生成的多项式与物体全部外观生成的多项式可能不同, 因而它使遮挡成为难于解决的问题; 二是基于体的表达法, 这一类表达法是将物体分解成若干个基本几何体或单元, 再通过建立它们的隶属关系来进行表达, 如体素法、八叉树法、构造实体几何法、体基元法、扫描法等, 它们的共同特点是: 模型构造比较容易, 但表达一般不唯一, 并且表达是以物体为中心, 与摄像机拍摄物体(以视点为中心)的实际情况不相符, 而形态图^[5]的基本思想是先用拓扑结构等价的二维线图来将一个物体的投影空间划分为若干区域, 然后将每一个区域的一个视点和投影方向的投影作为一个特征视

图, 这样若干个特征视图就表达了这个三维物体. 由此可见, 形态图表达法是以观察者为中心(或者说以视点为中心)的表达方法, 这与三维物体识别中摄像机拍摄物体的实际情况是一致的.

1 拓扑结构等价的定义

人们在观察一个物体时, 若不考虑其表面纹理和颜色, 则由许多观察方向所看到的物体(投影线图或图象), 其点、边、面之间并没有变化, 而仅是某些方向的尺度发生了变化, 如图 1(a)与图 1(b)所示. 由于这些点、边、面之间没有变化的投影线图, 因此对表达一个三维物体或识别一个三维物体的作用是相同的. 为此, 对表达一个三维物体或识别一个三维物体起相同作用的投影线图给出了一个拓扑结构等价的定义, 即凡是同时满足下列条件的两个图形就为拓扑结构等价图形:

(1) 顶点数相同 顶点是指图形中两条或两条以上的线段在端点处相交, 且各线段在相交处导数不同或不存在的点;

(2) T 型节点数相同 T 型节点是指图形中一条线段把另一条线段分成可见与不可见两部分的点;

(3) 切点数相同 切点是指图形中两条线段的相交处, 其导数相同的点;

(4) 边数相同 边是指图形中以顶点、切点和 T 型节点为端点的线段, 边数又分为直线边数和曲线边数;

(5) 闭环数相同 闭环数是指图形中由若干条边组成的一个封闭回路;

(6) 对称度数相同 对称度数是指主体虽具有对称的图形, 但因某一结构位于对称图形的左右不同而定义的一个值(N_d). 若引起对称图形不对称的那部分结构位于对称轴右侧, 则 $N_d = 1$, 反之 $N_d = 0$, 如果物体没有对称性, 则 $N_d = -1$;

(7) 每个闭环的组成边数相同;

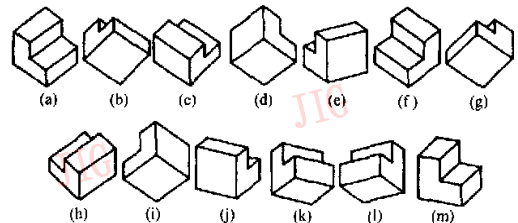


图 1 L 型多面体投影线图

(8) 每条边的度数相同 边的度数是指与该边相连接的边数.

2 三维物体的形态图

一个三维物体,若从三维空间中的不同方向和视点把它投影到二维平面上时,则可得到无穷多个二维投影线图,这无穷多个二维投影线图就表达了一个三维物体,但用无穷多个二维投影线图来表达一个三维物体是没有实用价值的.通过分析可知,由于由许多投影方向和视点投影所得的二维投影线图是拓扑结构等价的,即所看到的物体的顶点、棱线和外形线没有变化,如图1(a)与图1(m)就是如此,也就是说,这些拓扑结构等价的二维投影线图在表达这个三维物体时所起的作用是相同的,因此可以只取其中一个有代表性的图用来表达这个三维物体.这样若干个拓扑结构不同的二维投影线图就可完整地表达这个三维物体.当物体的形状和投影方法一旦确定,则它投影所具有不同拓扑结构的二维投影线图就产生了.

由此可见,形态图方法是一种找出物体不同所有拓扑结构的二维投影线图的有效手段.

2.1 视觉事件形成及其类型

大家知道,物体投影线图的形成过程是由 \mathbf{R}^3 到 \mathbf{R}^2 的映射,且每一个映射对应一个投影方向和一个投影线图.对于投影空间中的大多数视线,尽管物体投影线图的拓扑结构,关于投影方向是稳定的,然而,对于有些视线,投影方向的任何微小变动都会引起投影线图的拓扑结构改变,这种视线就是非稳定视线,而非稳定视线的映射就称为视觉事件^[6].

根据突变理论^[7]中的余维数概念,在投影线图中产生奇异性(视觉事件)可以归结为如图2所示的7种类型^[6,8].其中,前4种是多重视觉事件,由物体上点、棱线和外形线所产生;后3种是局部视觉事件,由物体中曲面片余维数等于1的奇异性所产生.

2.2 三维物体数学描述与投影模型

设物体上表面方程为

$$F_i = (x_i(u, v), y_i(u, v), z_i(u, v))^T, (i=1, 2, \dots, m)$$

棱线方程为

$$L_i = (x_i(u), y_i(u), z_i(u))^T, (i=1, 2, \dots, n)$$

顶点坐标为

$$P_i = (x_i, y_i, z_i)^T, (i=1, 2, \dots, k).$$

其中, m, n, k 分别表示物体上的表面数、棱线数和顶

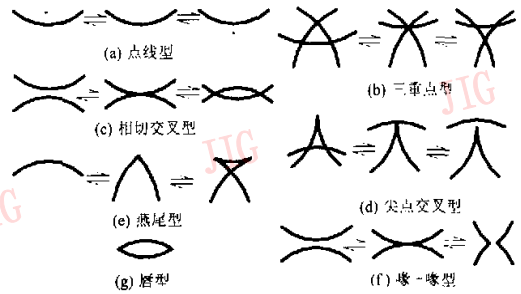


图2 视觉事件类型

点数.

众所周知,透视投影空间为三维空间,其投影模型可以是视点固定,也可以是物体固定^[8].且两种模型投影结果是一致的.现以物体固定为模型,设视点为三维空间中的任一点,其坐标为 (t_1, t_2, t_3) , 投影平面为 xoy 面.物体上的外形线为视线向量与物体表面上法向量垂直的点的轨迹.设 P_i 为外形线上的点,视线向量为 $V = (x_i - t_1, y_i - t_2, z_i - t_3)^T$, 则物体表面法向量为 $N = \frac{\partial F_i}{\partial u} \times \frac{\partial F_i}{\partial v}$. 依据 $V \cdot N = 0$, 可得物体表面上外形线方程.

2.3 三维物体视觉事件方程的建立

2.3.1 点线型视觉事件

当物体上顶点的投影落在外形线或棱线的投影线上时,即产生点线型视觉事件,如图2(a)所示.此时只要将顶点 $P_i(x, y, z)$ 的投影坐标代入棱线或外形线的投影方程 $l_i(x, y) = 0$, 即可得到点线型视觉事件所确定的分割面方程.

2.3.2 三重点型视觉事件

当3条线段(外形线或棱线)上3个不同的点投影重合于一点时,就产生三重点型视觉事件,如图2(b)所示.此时这一问题可归结为3条曲线的投影线相交于一点的问题.

$$l_i(x, y) = l_j(x, y) = l_k(x, y) \quad (i, j, k \text{ 不相同}) \quad (1)$$

2.3.3 相切交叉型视觉事件

当两条线段(外形线或棱线)的投影曲线相切时,则产生相切交叉型视觉事件,如图2(c)所示.此时这一问题可归结为两条曲线投影线的交点是否满足切线相同的条件问题.

$$\begin{cases} l_i(x, y) = l_j(x, y) \\ l_{ix}l_{jy} - l_{iy}l_{jx} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

2.3.4 尖点交叉型视觉事件

此类视觉事件是由于一条曲线投影出现尖点而

产生,如图 2(d)所示.此时可分为两类:

(1) 一条曲线自相交形成二重结点,并落在另一条曲线的投影线上

$$\begin{cases} l_i(x, y) = l_j(x, y) \\ \left(\frac{\partial l_i}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial l_i}{\partial y}\right)^2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

(2) 一条曲线投影形成多重结点

$$\begin{cases} l_i(x, y) = 0 \\ \left(\frac{\partial l_i}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial l_i}{\partial y}\right)^2 = 0 \\ \left(\frac{\partial l_i}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial l_i}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 l_i}{\partial x \partial y}\right)^2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

2.3.5 局部视觉事件

余维数等于 1 的局部视觉事件有燕尾型、喙型和唇型 3 种,它们分别对应物体中曲面片上渐近曲线的拐点和抛物点.物体中曲面片上的渐近线由下列方程给出:

$$Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2 = 0 \quad (5)$$

设

$$t = \frac{du}{dv} = \frac{-M \pm \sqrt{M^2 - LN}}{L} \quad (6)$$

表示渐近曲线的渐近方向,则视线 V 与渐近曲线的渐近方向一致的条件是

$$t = \lambda V \quad (7)$$

由于由式(6)可得 $u = u(v)$,因此曲面上渐近曲线方程又可写成

$$f(u(v), v) = [x(u(v), v), y(u(v), v), z(u(v), v)]^T \quad (8)$$

(1) 燕尾型视觉事件

在燕尾型视觉事件中,一条光滑曲线先是形成一个非常规性的奇异,然后被拆成两个尖点和一个 T 型节点,如图 2(e)所示.此时渐近曲线在它的拐点处将出现燕尾型视觉事件.产生燕尾型视觉事件的条件是

$$\begin{cases} t = \lambda V \\ f_v \times f_{vv} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

(2) 喙-喙型和唇型视觉事件

在喙-喙型视觉事件中,外形线中两个不同部分在某一点相切,此后又分成两个部分,如图 2(f)所示.在唇型视觉事件中,轮廓曲线中出现了个封闭曲线,并引入了两个尖点,如图 2(g)所示.产生喙-喙型和唇型视觉事件的条件是

$$\begin{cases} t = \lambda V \\ (f_v, f_{vv}, f_{vvv}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

2.4 三维物体的形态图

众所周知,轴测投影空间为二维空间^[6],透视投影

空间为三维空间^[8].一般二维空间可以很方便地用高斯球来表示,而三维空间则可用变半径的高斯球表示.

式(1)~式(4)和式(9)、式(10)为视觉事件的分割面方程,它们与高斯球面相交,将高斯球面分割(划分)成若干个连通域.如果每个连通域内的视点对物体进行投影,那么它们得到的二维投影线图就是拓扑结构等价的,而透视投影则应根据物体的形状来确定高斯球的最小半径和最大半径,因为当视点靠近物体或是在物体的包容球内部时,物体的投影将产生畸变;而当视点远离物体一定距离时,透视投影就接近于轴测投影(投影线图的拓扑结构没有变化).通常取 $D < R < 10D$ (D 为物体的包容球直径, R 为高斯球半径).

对透视投影空间的分割,在计算时,还可以采用简化方法,即取 $5R$ 为高斯球半径,分割时,首先计算出该高斯球面的视觉事件分割,然后以高斯球面上的视觉事件分割曲线为母线,再以高斯球球心为顶点作锥体,则该锥体被最小和最大高斯球面所截得的部分,即为视觉事件的分割空间(子空间).

有了视觉事件的分割空间,就可构造物体的形态图(Asspect graph).这种形态图是一个类似于分子结构式的图,如图 3 所示,其结点表示视觉事件分割的子空间和与之有关的物体的形态(投影线图,也叫特征视图),若两个子空间相邻,则用线段相连,它就对应着两个相邻子空间边界上的视觉事件.

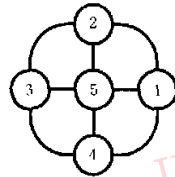


图 3 形态图

3 三维物体的形态图表示

上述处理是把物体看成透明体,但实际上绝大多数物体都是不透明的.当物体是不透明物体时,物体上有些顶点、棱线和外形线就可能完全不可见或部分不可见.用透明物体进行视觉事件计算,其所得的与投影空间分割所对应的投影线图,经消隐处理后的若干个投影线图,其中有些相同的拓扑结构.为此需采用本文第 1 节所定义的拓扑结构等价准则来对投影线图进行合并,再将与所有拓扑结构相同的投影线图对应的投影空间也合并成一个连通的区域

(投影子空间). 这样就得到了不透明物体的投影空间划分. 同样也可得到不透明物体的形态图. 如果在不透明物体的每个子空间中, 取一个二维投影线图作为表达该物体的特征视图. 那么若干个特征视图和它的形态图就表达了这个三维物体. 图4为圆柱与圆锥相交模型的部分特征视图.

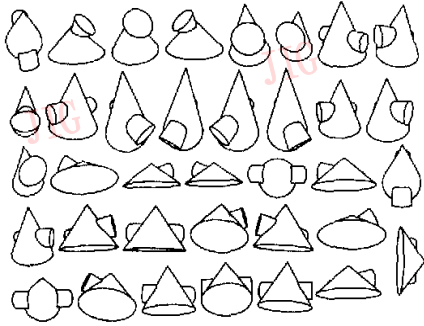


图4 圆柱与圆锥相交模型的部分特征视图

4 结 论

本文探讨了用形态图表示三维物体的方法, 该方法有如下一些特点: 首先, 形态图表示三维物体是一种以视点为中心的表达方法, 这与实际应用中摄像机拍摄物体的情况是一致的; 第二, 形态图表达了一个三维物体的全貌, 这既可避免因物体某一部分被遮挡而造成的不可识别, 又可通过多个位于不同位置的摄像机同时拍摄物体来解决这一问题; 第三, 用形态图表示三维物体是一种近似表达法, 它对物体的大小并不关注, 其表达的只是物体点、边和面的形貌, 可见, 这与人们识别物体的习惯是相同的.

当然, 用形态图表示三维物体也与其他表达方法一样, 也存在着如下一些局限性: (1) 由于三维物体的形态图表达法, 只表达了物体点、边、面的信息, 而没有表达物体表面的颜色和纹理, 因此对一般工业物体, 用形态图表达是合适的, 而对其他物体则不一定合适; (2) 形态图表达法对所表达的物体要求其表面能用数学方程描述, 因此这也限定了它只能表达一般工业物体; (3) 形态图表达法对模型物的形态图计算仍比较烦琐, 有待于进一步改进.

由于用形态图表达三维物体, 实质上是使三维物体识别转化为2D与2D的匹配, 因此用形态图表达三维物体的识别匹配方法, 可采用链码匹配法, 即将模型物体的特征视图转换成链码, 而形态图则用

邻接矩阵表示, 同时对摄像机摄得的真实物体图象进行轮廓提取, 并转换成链码. 识别匹配时, 只要匹配两个图形的链码即可, 该问题本文不作详细讨论.

参 考 文 献

- 1 Jain A K, Flynn P J (Eds). 3D object recognition systems [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1993.
- 2 Arman F, Aggarwal J K. Model-based object recognition in dense range images [J]. A review. ACM Computing Surveys, 1993, 25(1): 5~43.
- 3 Arie J B, Nandy D. A volumetric/iconic frequency domain representation for objects with application for pose invariant face recognition [J]. ITPAMI, 1998, 20(5): 449~457.
- 4 李庆, 周曼丽, 柳健. 三维物体识别研究进展 [J]. 中国图象图形学报, 2000, 5A(12): 985~993.
- 5 J. J. Koenderink and A. J. Van Doorn. The singularities of the visual mapping [J]. Biol. Cybern, 1976, 24, 51~59.
- 6 曾接贤, 高满屯, 李建军. 常见复杂物体轴测投影视觉事件及其计算 [J]. 工程图学报, 1998, 31, 71~78.
- 7 Arnold V I. Catastrophe Theory. 突变理论 [M], 周燕华译. 北京: 高等教育出版社. 1990年.
- 8 李建军, 高满屯, 曾接贤. 复杂物体透视形态图建立 [J]. 西北工业大学学报, 1999, 17, (3) 444~448.

曾接贤 1958年10月生, 1997年获西北工业大学工程图学专业硕士学位. 现为南昌航空工业学院副教授. 主要从事工程图学、计算机图形学和计算机视觉方面的研究. 近几年发表学术论文10余篇.



鲁宇明 1969年4月生, 2001年获西北工业大学机械学专业硕士学位. 现为南昌航空工业学院讲师. 主要从事工程图学、计算机图形学和计算机视觉方面的研究.



黎明 教授, 1985年获上海交通大学电子工程系学士学位, 1990年和1997年先后获南京航空航天大学自动控制系及测试工程系硕士和博士学位. 主要从事图象处理、模式识别、神经网络和遗传算法等方面的研究工作. 已发表学术论文50余篇.



储 璿 1967年生, 1992年毕业于南昌大学. 现为南昌航空工业学院讲师. 主要从事工程图学、计算机图形学、计算机视觉和图象处理方面的研究.

