

高效的视觉事件消隐算法在三维识别中的应用

吴辰晔 马惠敏

(清华大学电子工程系, 北京, 100084, mhmpub@tsinghua.edu.cn)

摘要: 基于形态图 (Aspect Graph) 理论的视点空间划分在三维物体识别中正发挥着重要的作用, 当前, 形态图理论的应用瓶颈就是其高复杂度, 本文所提出的消隐算法就是针对模型中的三角形划分进行优化消隐。该算法通过判断三角形面片的空间位置情况, 为视点空间划分能够有效地避免了许多实际上不存在的 Edge-Vertex (EV) 和 Edge-Edge-Edge (EEE) 事件的计算, 奠定了坚实的基础。最后, 该算法对 EV 事件的实验结果很好地说明了其有效性: 相比于当前其他算法, EV 事件的数量平均减少了两个数量级。

关键词: 形态图; 视点空间划分; 消隐; 三维目标识别

Efficiently Pruning for Visual Events in 3D Object Recognition Application

Wu Chen-ye, Ma Hui-min

(Department of Electronic Engineering of Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: This paper presents a practical and efficient algorithm based on the triangulated polyhedra to reducing the complexity of pruning for visual events, that is EV and EEE events for 3D viewpoint space partition. This approach is especially effective when it comes to complex models which have more concaves on the surface. Hence, it contributes to avoid calculating many EV and EEE events which are not existent actually before space partition. Since this algorithm is efficient to reduce the calculation complexity enormously, it also makes real time disposal possible theoretical. In the end of this paper, we apply this method to the three kinds of objects for experiment. The result shows that it can effectively carry out calculation of EV and EEE events and space partition. Compared with our previous pruning methods, the representative viewpoints are placed all over viewpoints space evenly on this foundation while the number of EV events decreased by nearly two orders on average.

Keywords: aspect graph; viewpoint space partition; pruning; 3D object recognition

1 引言

视点空间的划分在当前基于形态图 (aspect graph)^{[1][2]} 的三维物体识别领域中发挥着巨大的作用。理论上最优的视点空间, 应该满足目标物体的投影视图在不同的视点空间内的拓扑结构是不同的, 而现有的基于 EV 和 EEE 事件的视点空间划分方法^[3] 的缺陷就在于对全空间搜索三角形面片进行划分, 这不可避免地增加了许多实际上对于三维物体识别没有贡献的视点空间。这些视点空间的来源就是本不可能发生的 EV 和 EEE 事件。

针对传统方法的弊端, 我们提出了一种改进的算法, 该算法在判断 EV 和 EEE 事件之前先对三角形面片在一个视觉事件中的可见性进行判断, 消隐掉容易引起误判的三角形面片, 改进算法在判别 EV 事件中应用的实验结果表明, 容易引起误判的三角形面片是大量存在的, 消隐后的三角形面片比消隐前的数量小了两个数量级, 从而使有效的 EV 事件的数量更接近理论最优值。

最后, 本文在对简单几何模型的 EV 事件的理论分析的基础上, 给出了此改进算法的有效性说明; 并对飞机、车辆等复杂三维模型进行了实验测试, 均得到了令人满意的结果。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60502013) 和国家“八六三”高技术项目 (No. 2006AA01Z115)

第一作者简介: 吴辰晔 (1987-), 男, 清华大学电子工程系在读本科生。从事图像识别、目标监测、数字图像处理、三维仿真的科研工作。

2 基于形态图的视点空间计算方法

视点空间划分就是利用突变论计算三维物体表面的视觉事件，对三维物体的视点空间进行划分。理论上可以得到一组可以重构物体表面的代表视点及与之对应的 2D 形态图，如图 1 所示，建立相应的模型库^[5]。从理论上对基于形态图的视点空间划分方法进行了综合分析^[8]，利用形态图理论即可实现三维物体识别。

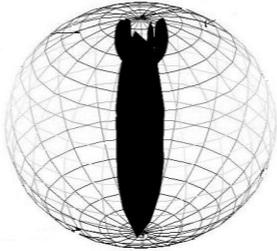
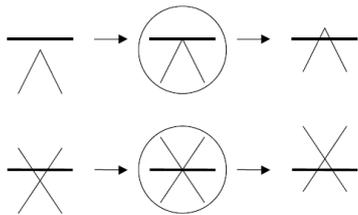


图 1 视点空间划分的一般方法

基于形态图的视点空间划分算法通常需要以下步骤^[4]:

- (1) 计算两种基本视觉事件 (如图 2 所示) 的空间分割曲面方程;
- (2) 求解分割曲面与视点空间 (高斯球面) 的交线, 得到视点空间分划线;
- (3) 将这些分划线首尾相连, 获得完整的闭环, 从而得到视点空间划分的子集;
- (4) 在每个划分子集寻找代表视点, 完成视点空间划分。



(上) EV 事件 (下) EEE 事件 (摘自 Ref. [5])

图 2 两种基本的视觉事件

EV 事件空间切割面为平面, 一般形式为^[6]:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

EEE 事件空间切割面为二次曲面, 一般形式如下^[6]:

$$a_0x^2 + a_1y^2 + a_2z^2 + b_0xy + b_1xz + b_2yz + c_0x + c_1y + c_2z + d = 0 \quad (2)$$

要求得曲面与视点空间 (高斯球) 的交线 (分划线), 只需将上述方程与高斯球方程联立即可, 设高斯球的半径为 R , 则可得到 (3) 式:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \quad (3)$$

在实际应用中通常求解上述联立方程数值

解, 作为视点空间的分划线。然后, 再沿分划线搜索, 得到分划线之间的连接关系, 找出所有用分划线划分出的闭环区域, 从而得到视点空间划分的子集。最后在每个子集中求取代表视点, 并对在代表视点处得到的特征视图进行在某种相似性度量下的聚类, 从而得到可用的视点空间划分结果。

不难看出现有视点空间划分算法在实现过程中主要存在以下缺点: 分划线不规则, 数据量大, 数据组织困难; 沿分划线寻找闭环的过程计算复杂度大。我们提出的改进的消隐算法, 正是针对这些主要缺点, 进行有效地降低计算复杂度, 使得数据组织和沿分划线寻找闭环的过程都能更有效地实现。

3 基于改进消隐算法的视点空间计算

3.1 消隐算法的现状和应用背景

消隐算法的提出是为了简化模型。形态图理论希望对于一个确定的视点, 只计算模型对于视点可见的部分。但是由于采用离散视点的邻接矩阵算法必须保证对于每一个视点, 符号序列的长度 (即需要将视点代入计算的平面方程数) 以及平面的顺序相同才能够进一步计算视点的邻接矩阵以及合并视点。这就将 EV 和 EEE 事件的判断限制在了同一个平面序列中进行。这直接导致现行算法不能够因为某些三角形在某些视点下本应被消隐而不去计算其 EV 方程的符号。

在实际模型中, 我们发现对于不在同一三角形内的 EV 事件, 可能会出现由两个三角形组成的虚拟“三角形”, 如图 3 所示, 这些三角形对视点空间的划分没有任何正贡献, 反而会徒增计算量。

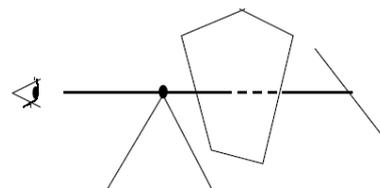


图 3 实际情况中不存在的 EV 事件 (摘自 Ref. [5])

该三角形属于一个物体的内部, 或者说此 EV 事件所形成的面和其他的面相交, 这个平面可能只是模型内部的一个面, 对于任何视点这个平面都不会发生 EV 临界事件。为了能够避免这样的三角形所引起的 EV 事件影响视点空间的划分, 现有

的消隐算法^[8]就主要是基于对这样的情况进行判断：即对非同一三角形内的 EV 事件进行判断，可见，消隐算法可以帮助排除那些实际上不可能存在的非同一三角形平面内的 EV 组合。

3.2 消隐算法的判断准则讨论

基于上述讨论，现有消隐算法已经减少了大量的 EV 事件数量，但仍有很大不足，主要体现在，现有消隐算法还不能完全的排除掉可能发生的 EV 事件，只是消除了三角形属于一个物体的内部的情况（如图 4 所示）。此时，发生 EV 事件的 E 边是两个面的交线，而 V 点沿箭头方向从遮挡部分出现，这时的 EV 事件是没有物理意义的。

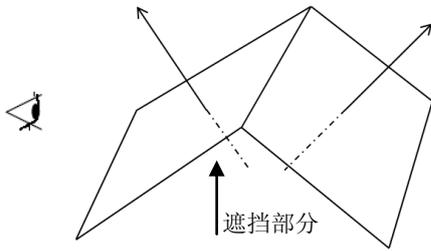


图 4 现有消隐算法有效的假 EV 事件

对于图 5 中的情况，用现有的消隐算法就很难准确的判断出来了。

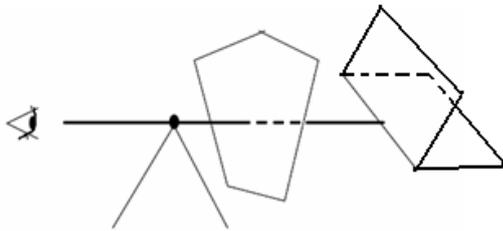


图 5 现有消隐算法无效的假 EV 事件

按照上面的方法 V 点在两个面组成的正半部分，本应该是能够发生的，但实际是 E 边和 V 点之间是有另外一个面遮挡住的，是需要消隐的。之所以会出现问题，是因为上面的算法只是考虑物体局部的形状，而没有办法预测空间整体情况，尤其是 E 边和 V 点之间的空间形状。

考虑到这些情况，本文提出了一个新的 EV 事件二次消隐判断准则，即：先对 EV 事件进行一次粗消隐，然后对于每一个已经提取出来的 EV 事件依次判断是否有平面出现在 V 点和 E 边之间，一旦找出有一个平面遮挡住了 V 点和 E 边，则这个 EV 事件是不可能发生的，应该消隐；如果遍历完所有的面都没有找到平面遮挡住 V 点和 E 边，那么此 EV 事件就是真正会发生的，应该保留下来。

判断一个三角形平面是否遮挡住了 V 点和 E 边只要判断 V 点和 E 边的两个端点是否被平面遮

挡，即把点和线消隐的问题转化为点和点消隐的问题，如果观察点和线段两个端点中的任意一个被平面遮挡，那么 V 点和 E 边就被该平面遮挡。

判断点与点之间是否有平面遮挡时，如果发生遮挡，则两点之间的连线与三角形所在的平面必然有交点，且该交点必然在三角形的内部，所以只用判断两点之间的连线与三角形所在的平面的交点同三角形面片的关系即可。

3.3 消隐算法的数学表达及算法实现

对于两个点（一个是观察点 V，一个是 E 边的端点 $edge_V$ ）和一个平面（由已知的三个点构成），判断两点是否被平面的遮挡方法如下：

1) 如果 V 点在平面内，则两个点没有被该平面所遮挡；

2) 如果端点 $edge_V$ 在平面内，则对于最终 V 点和 $edge_V$ 所在的边的结果完全取决于 V 点和 $edge$ 边的另一个点的结果，如果 $edge$ 边的两个端点都在平面内，则 EV 事件不应被消隐，如果两个点中有一个在平面内，另一个点被遮挡，则这种情况的 EV 事件是要消隐的。

3) 如果 V 点和 $edge_V$ 两个点都不在平面上，则判断两点是否在平面的同侧，如果在的话，则两点不会发生遮挡的情况，如果在平面的两侧的话，则进行下面的过程：

设两点的坐标分别为 $V = (x_1, y_1, z_1)$ 和 $edge_V = (x_2, y_2, z_2)$ ，则两点决定的向量的坐标为 $\vec{n}_v = (x_1 - x_2, y_1 - y_2, z_1 - z_2)$ ，记为 (n_{vx}, n_{vy}, n_{vz}) 。

接下来要求出这个向量所决定的直线与三角形三点所决定平面的交点坐标，设平面的法向量的坐标为 $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ ，设平面上的一定点坐标为 (px, py, pz) ，且交点的坐标为 (x, y, z) ，因为交点在直线上，所以满足直线方程：

$$\begin{cases} x = n_{vx}t + x_1 \\ y = n_{vy}t + y_1 \\ z = n_{vz}t + z_1 \end{cases} \quad (4)$$

又交点在平面上，满足空间平面方程：

$$(n_x, n_y, n_z) \cdot (x - px, y - py, z - pz) = 0 \quad (5)$$

将上面的方程联立之后可以得到交点的坐标中的参数 t 为：

$$t = \frac{n_x \cdot (px - x_1) + n_y \cdot (py - y_1) + n_z \cdot (pz - z_1)}{n_x \cdot n_{vx} + n_y \cdot n_{vy} + n_z \cdot n_{vz}} \quad (6)$$

下面需要判断的是点 (x, y, z) 在点 (p_{x1}, p_{y1}, p_{z1}) 、点 (p_{x2}, p_{y2}, p_{z2}) 和点 (p_{x3}, p_{y3}, p_{z3}) 所决定的三角形的内部还是外部，如果在内部或者是在三角形的边上的话，那么 V 点和 $edge_V$ 点就会被平面遮挡，如果交点在三角形外部的话，那么上面的两点就不会发生遮挡。

判断空间平面上的一点和该平面上的三角形的位置关系时，不难证明有如下结论成立：把该空间平面以及该点向空间直角坐标系做投影，如果在各个二维平面上都满足投影点在投影面的内部或边上，那么该点就在三角形内部；如果有一个面上不满足，那么该点就在三角形的外部。

判断二维平面上的点和三角形的关系时，不妨设平面三角形的三个顶点是 A 、 B 、 C ，我们可以通过计算它的有向面积来判断 A 、 B 、 C 三点在坐标系中的旋转关系。当然，在此之前我们必须先订立一套计算面积的规则。比如，在平面直角坐标系中，本文利用：

$$S = \frac{1}{2}((x_A - x_B)(y_A + y_B) + (x_B - x_C)(y_B + y_C) + (x_C - x_A)(y_C + y_B)) \quad (7)$$

来计算三角形的有向面积。

上式的物理意义是：从第一点开始，用前后两点的横坐标之差与两坐标之和的乘积求梯形面积，直到完成多边性的封闭，得到三角形的有向面积。此时，如果求出的值是正的 ($S > 0$)，则得出 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 为顺时针，否则为逆时针。

如图 6 所示，按照上面的算出来的三角形的面积为正值（实际上是三角形 ABC 的面积），所以 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 为逆时针方向的。

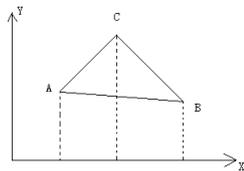


图 6 三角形有向面积判断图例

假设存在一个点 D ，若这个点在三角形的内部，则以该点为起点，和原多边形的任意两个连续的且遵照多边形组成方向的点（如 DAB 、 DBC 、 DCA ）组成的三角形将都是一个方向，如 DAB 、 DBC 和 DCA 都是逆时针方向（如图 7(a) 所示）。若这个点在三角形的外部，则会出现 DAB 、 DBC 、 DCA 三个三角形方向不一致的情形，即其中有一个不同于另外两个（如图 7(b) 所示）。

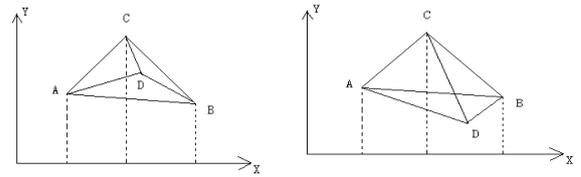


图 7 三角形有向面积的应用

如果出现三角形有向面积为 0 的情况，则表明 D 点在三角形的边上，本文中将此情况归为 D 点在三角形的内部。

4 实验及分析

4.1 消隐算法对简单模型的有效性验证

将原来经过一次现有消隐之后对剩下的 EV 事件再进行一次消隐，由于各个物体模型结构不同，二次消隐效果也不同。一般地，模型越复杂，表面凹面体比例越高，消隐的结果越好。下面通过两个简单的例子来证明算法的有效性：

4.1.1 简单立方体：

对简单立方体，二次消隐前后，我们得到的 EV 事件的个数都是 6 个，得到的空间视点划分如图 8 所示：（26 个划分）

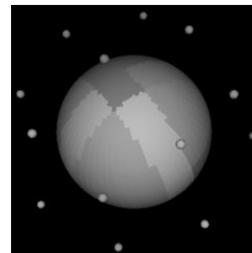


图 8 正方体的视点空间划分图

之所以加入二次消隐之后，划分结果没有变化，是因为对于简单立方体，不存在二次消隐消除的情况，不应该有变化。这就说明二次消隐算法不会把实际发生的 EV 事件给误消除掉。

4.1.2 特殊形状：

我们对图 9 所示形状进行基于 EV 事件的视点空间划分（ $ABCDE$ 在同一平面内，其中线段 FA 和 GD 均垂直于该平面， DG 的长度是 AF 长度的一半）

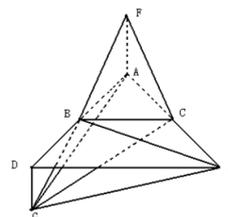
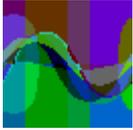


图 9 待分析 EV 事件的物体模型

二次消隐前后的 EV 数量比较见表 1。

表 1 二次消隐前后的 EV 数量对比

项目	原消隐算法	新消隐算法
EV 事件个数	34	9
划分结果		
	72 个划分	60 个划分

通过分析不难得出，真正应该发生的 EV 事件的个数是 9 个，其中同一平面内有 6 个，不同平面有 3 个。这说明二次消隐确实把所有不能发生的 EV 事件都消除了。上面两个例子可以表明二次消隐已经将 EV 事件的数量逼近了理论最小值。

4.2 消隐算法的对复杂模型高效性验证

我们将上述基于形态学理论的视点空间划分的消隐算法和经过改进之前的消隐算法应用于同一个三维物体模型上，对选取出的 EV 和 EEE 事件进行分析。

被测试物体选用普林斯顿库^[7]中四类共五种模型，分别是(结构示意图见图 10)：

- (1) 飞机: F4 F16
- (2) 车辆: camar
- (2) 骨骼: footbone
- (4) 导弹: generic

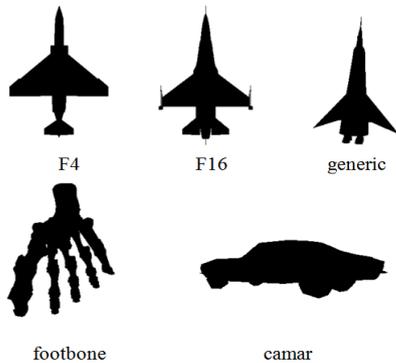


图 10 待识别物体的立体结构示意图

原始模型均为三角形网格数据，以顶点 (V) 和三角形面片 (T) 描述。全部实验在 Pentium D 双核，1G 内存计算机上，用 VC++.Net 平台编程实现。

表 2 显示了在我们的实验平台上，对面片消减后的被测试模型用两种算法计算得出的 EV 事件的数量。从表 2 的结果可以看出，通过二次消隐之后 EV 事件的数量大大减少，这说明没有经过二次消隐之前得到的 EV 事件中只有很少的一部分事件是真正发生，可以想象依据此时的结果得到的

视点空间划分结果与真实的结果是有很大的差距的，并且徒增了计算复杂度。

表 2 原算法与改进算法 EV 事件数量的比较

被测模型	原消隐算法	新消隐算法
F4	85430	3823
F16	62154	1060
camar	20981	271
footbone	56363	407
generic	28509	216

5. 结论和展望

本文系统地讨论了关于 EV 事件的消隐算法及其应用，并证实了其有效性。实验证明，改进算法为三维物体的视点空间进行有效划分奠定了坚实的基础，并且在运用于三维目标识别系统时，不仅能有效地降低了识别的时间，并且有效地提高系统的实时性能。

本篇文章并未深入地就 EEE 事件展开讨论研究，其原因在于 EEE 时间的分割曲面较为复杂，其消隐的直观性较差。事实上，EEE 事件同样具有很多实际的物理意义，并且能反映出大量 EV 事件不能反映出的物体的本质信息。因此，结合本文的结果来看，对于 EEE 事件的消隐研究，也将是十分有益的。

参考文献

- [1] Plantinga H. and Dyer C.R. Visibility, Occlusion, and the Aspect Graph[J], *International Journal of Computer Vision*, 5(2): 137 - 160, 1990
- [2] J.X. Zeng, Y.M. Lu, M. Li, J. Chu, A Representation Method Based on Aspect Graph for 3D Objects [J], *Journal of Image and Graphic*, 7(A)(9): 906-910, 2002
- [3] Yuan Luo, Huimin Ma and Fengting Li, An improved algorithm of viewpoint space partition in 3D object recognition application, *Proceedings of the Seventh IASTED International Conference on Signal and Image Processing*, SIP2006, Aug 14-16, Honolulu, Hawaii, USA :34-39, 2006
- [4] SU Miao, MA Huimin and LI Fengting, Catastrophe theory and clustering algorithm based viewpoint space partition algorithm, *Journal of Tsinghua University*, 4(18), 2008
- [5] Schifffenbauer R.D. A survey of aspect graphs. Technical Report, TR-CIS-2001-01. Department of Computer and Information Science, Polytechnic University, Brooklyn, Long Island, Westchester. 2001
- [6] Gigus Z., Canny J., Seidel R. Efficiently Computing and Representing Aspect Graphs of Polyhedral Objects[J], *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(6): 542-551, 1991.
- [7] P. Shilane, P. Min, M. Kazhdan and T. Funkhouser. The Princeton Shape Benchmark [J], *Shape Modeling Applications*. Proceedings, Page(s):167 - 178, 2004
- [8] Yuan-Luo, Huimin-ma, Fengting-Li, 3D object recognition technique based on multi-resolution aspect graph, *Neural Networks and Brain*. ICNN&B '05. International Conference 2: 1168 - 1172, 2005