

文章编号:1001-9081(2010)04-0914-03

## 基于轮廓特征点的三维模型相似性匹配算法

冯立颖<sup>1</sup>,赵静<sup>2</sup>,杨莹<sup>2</sup>

(1.燕山大学图书馆,河北秦皇岛066004; 2.燕山大学里仁学院,河北秦皇岛066004)

(fly@ysu.edu.cn)

**摘要:**针对Heczko算法容易丢失一些表示三维模型轮廓的重要信息,从而降低匹配准确性这一问题,研究了一种基于轮廓特征点的三维模型相似性匹配算法。通过函数投影提取三维模型的轮廓,再提取每一个轮廓上的角点,把角点作为特征点,用特征点的曲率值构成一个点集,最后计算点集之间的Hausdorff距离,进行相似性匹配。实验结果表明该算法提高了三维模型的检索准确性。

**关键词:**三维模型检索;函数投影;角点;Hausdorff距离;相似性匹配

**中图分类号:**TP391.41 **文献标志码:**A

### 3D model similarity matching algorithm based on outline characteristic point

FENG Li-ying<sup>1</sup>, ZHAO Jing<sup>2</sup>, YANG Ying<sup>2</sup>

(1. Library, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China;

2. College of Liren, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

**Abstract:** Heczko algorithm is easy to lose some important information of three-dimensional model outline, thus the matching accuracy is reduced. In view of this question, three-dimensional model similarity matching algorithm based on outline characteristic point was proposed. Through the function projection, the outline of three-dimensional model was extracted, and then the vertex of each outline that was taken as the characteristic point was withdrawn. A set of points was constituted by the characteristic point curvature value. The similarity matching was carried out by calculating the Hausdorff distance of the set of points. The experiment results indicate the retrieval accuracy of the three-dimensional model is improved.

**Key words:** three-dimensional model retrieval; function projection; vertex; Hausdorff distance; similar match

## 0 引言

三维模型在各个领域的应用已经越来越广泛,而三维模型库的不断增大、数量不断增多,使得如何高效地检索出需要的模型成为一个迫切需要解决的问题,相应的三维模型检索技术也越来越受人关注。三维模型检索的一个关键问题是如何快速、准确地找到所需要的三维模型。

三维模型检索技术的一种思路就是将三维模型转化成二维图像,借助成熟的二维图像检索技术进行三维模型检索。美国普林斯顿大学的Min等人提出了一种基于三维模型的二维轮廓图的比较方法,该方法将三维模型从多个不同视点投影 $m$ 个二维投影,与用户绘制的 $n$ 张二维草图进行基于Euclidean距离的相似性匹配( $m > n$ ),然后用这些距离值与一组同心圆的交集确定一组函数,基于这组函数,求取其傅里叶变换系数的幅值作为三维形状特征,但计算比较复杂<sup>[1-2]</sup>。文献[3-5]中提出一种基于外表投影视图的特征,每隔 $5^\circ$ 计算出一个具有代表性的视图作为特征,该方法可以较为准确地识别具有任意角度的三维模型,但对特征的索引和相似性匹配则较难实现。文献[6]中首先使用主元分析(Principal Component Analysis, PCA)和缩放变换把三维模型规范化到单位立方体中,然后将三维模型在三个平面上进行投影获得不同的二维轮廓信息,对每个轮廓进行采样,从轮廓中心向轮廓发出等角度射线,其距离作为采样值,再进行傅里

叶变换。该方法的缺点是由于在进行函数投影时需要进行不同的条件约束,容易丢失一些表示三维模型轮廓的重要信息。

本文在文献[6]中提出的算法基础上,提出一种基于轮廓特征点的三维模型相似性匹配算法,通过提取角点,把角点作为轮廓上的特征点,从而保证轮廓上的重要信息,提高匹配的准确性。

## 1 模型预处理

为提取三维模型的投影轮廓,必须保证模型具有针对平移、旋转、尺度以及方位变换的不变性和鲁棒性,需要对模型进行预处理。为保证平移不变性,需要将模型的质心平移至坐标原点的位置;为保证旋转不变性,采用PCA变换方法,在一个标准坐标平面对齐模型<sup>[3,7]</sup>;为保证方位不变性,需要进行翻转变换;为保证尺度大小不变性,将旋转后的三维模型归一化到标准单元大小。因此,一个完整的坐标模型标准化过程可以表示为如下的几何变换:

$$\tau(I) = S^{-1} \cdot F \cdot R \cdot (I - c) \quad (1)$$

其中: $S$ 是缩放系数, $F$ 是一个对角阵形式的翻转矩阵, $R$ 为对应于PCA变换的旋转矩阵, $I$ 是原始模型坐标, $c$ 是坐标原点。图1为采用PCA方法对飞机模型进行变换的结果。

## 2 特征提取

### 2.1 轮廓提取

文献[6]算法只是在提取轮廓后,等角度从轮廓中心向

收稿日期:2009-10-25;修回日期:2009-12-14。

基金项目:国家863计划项目(2007AA701505);国家自然科学基金资助项目(50675189);河北省自然科学基金资助项目(F2006000267)。

作者简介:冯立颖(1982-),男,河北卢龙人,硕士研究生,主要研究方向:虚拟现实、计算机网络;赵静(1981-),女,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向:计算机图形学、计算机网络;杨莹(1982-),女,河北抚宁人,硕士研究生,主要研究方向:虚拟现实技术、图形图像。

轮廓发出射线。本文在此基础上,再提取轮廓上的特征点。首先采用三视图法对三维模型进行正平行投影,获得在XY、XZ和YZ平面上的二维轮廓图。但是在提取的过程中难免会受到噪声的影响,结果如图2所示。

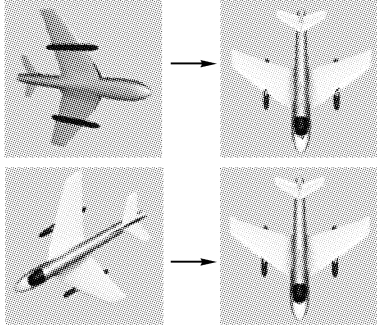


图1 PCA变换结果



图2 三维模型轮廓

## 2.2 特征点提取

设轮廓上任意一点  $p(i)$  为中心,以  $r$  为半径的支撑区域计算曲率角,以进一步减小噪声的影响。考查轮廓上任一点  $p(i)$  与前后半径为  $r$  的点构成的支撑区域:

$$s(i) = \{p(i) = [x(i), y(i)] \mid j = i-r, i-r+1, \dots, i, \dots, i+r-1, i+r\}$$

设  $p(i)$  前后两个区域的几何中心点  $a(i)$ 、 $b(i)$  分别为:

$$a(i) = [x_a(i), y_a(i)] = \left[ \frac{\sum_{j=i-r}^{i-1} x(j)}{r}, \frac{\sum_{j=i-r}^{i-1} y(j)}{r} \right] \quad (2)$$

$$b(i) = [x_b(i), y_b(i)] = \left[ \frac{\sum_{j=i+1}^{i+r} x(j)}{r}, \frac{\sum_{j=i+1}^{i+r} y(j)}{r} \right] \quad (3)$$

设  $a(i)$  与  $p(i)$  及  $b(i)$  与  $p(i)$  构成的直线的倾斜角分别为:

$$\theta_a(i) = \arctan \left[ \frac{y(i) - y_a(i)}{x(i) - x_a(i)} \right] \quad (4)$$

$$\theta_b(i) = \arctan \left[ \frac{y(i) - y_b(i)}{x(i) - x_b(i)} \right] \quad (5)$$

利用式(3)与(4)的  $\theta_a(i)$  和  $\theta_b(i)$  定义曲率角为:

$$\theta(i) = \theta_a(i) - \theta_b(i) \quad (6)$$

如图3所示,直线  $K$  与  $L$  的夹角即曲率角  $\theta(i)$ ,设定角度  $T_1$  作为一个阈值,当满足  $\theta(i) > T_1$  时,将  $p(i)$  标志为候选角点。若将轮廓点近似看作是两直线的交点,则  $\theta(i)$  即为两直线的夹角。由式(5)可以得到一系列候选角点,通过非极小抑制可筛选出真正的角点,即只有当  $|\theta(i)| = \max |\theta(j)|$  成立时,候选角点  $p(i)$  就是角点。

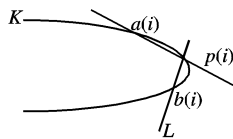


图3 曲率角计算

采用支撑区域的几何中心来计算曲率角,减少了噪声带来的误差。采用改进算法提取的轮廓的特征点,如图4、5所示。

## 2.3 曲率计算

三维模型在三个平面上的投影,可以由封闭的二维轮廓线全面、准确地描述,而曲率可以唯一确定一条曲线。由于轮

廓提取的过程中,不可避免地带有噪声,所以先采用卷积积分对离散的轮廓线进行去噪。设离散的轮廓线为  $r = (x(t), y(t))$ ,  $t$  为任意参数。将轮廓上每点的横坐标  $x(t)$ 、纵坐标  $y(t)$  分别与高斯函数  $G(t, \sigma)$  作卷积得到:

$$r_\sigma = (x(t, \sigma), y(t, \sigma)) \quad (7)$$

$$x(t, \sigma) = x(t) * G(t, \sigma) \quad (8)$$

$$y(t, \sigma) = y(t) * G(t, \sigma) \quad (9)$$

对轮廓曲线去除噪声后的曲率为:

$$K(t, \sigma) = \frac{x_t(t, \sigma)y_{tt}(t, \sigma) - x_{tt}(t, \sigma)y_t(t, \sigma)}{[x_t(t, \sigma)^2 + y_t(t, \sigma)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (10)$$

当高斯函数的标准差  $\sigma$  取不同数值时,就可以在不同的尺度空间对轮廓线进行去噪和曲率计算,即可在多尺度下对轮廓加以描述。当  $\sigma$  由小到大取值时,轮廓上保留的节点也相应地逐渐减少。当标准差  $\sigma$  取最优值时,即尺度最佳,便能够在去除噪声的同时保留轮廓上较小尺寸的细节。

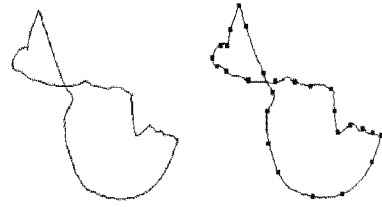


图4 轮廓特征点提取

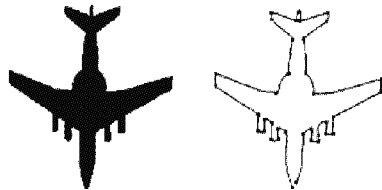


图5 飞机模型轮廓特征点提取

## 3 相似性匹配

### 3.1 Hausdorff 距离定义

Hausdorff 距离是一种定义于两个点集上的最大—最小 (max-min) 距离,它主要测量两个点集之间的匹配程度<sup>[8]</sup>。给定两个有限点集  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ,  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ , 则  $A$ 、 $B$  之间的 Hausdorff 距离定义为:

$$H(A, B) = \max \{h(A, B), h(B, A)\}$$

其中  $h(A, B)$  为从点集  $A$  到  $B$  的有向 Hausdorff 距离,  $h(B, A)$  可以类推。

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (11)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (12)$$

在式(12)中,  $\|\cdot\|$  为定义在点集合上的某种距离范数,这里采用  $L_2$ -范数,即欧式距离。Hausdorff 距离取  $h(A, B)$  和  $h(B, A)$  的最大值,通过计算得到最大值,获得两个点集之间的匹配程度。将轮廓线分成若干特征段,每个特征段由特征点及两侧的点构成点集,点集中各点的值就是该点的曲率。通过计算各个特征段之间的 Hausdorff 距离来表示它们之间的相似程度。在理想状态下,两个可匹配的轮廓线应该完全一样,即 Hausdorff 距离为0。但是由于数据采集过程中产生的噪声,即使是可匹配的轮廓线,其 Hausdorff 距离也不会是0,而是在一定的容差  $\varepsilon$  范围之内。

### 3.2 轮廓线匹配

设有两轮廓线  $F_1$  和  $F_2$ ,  $c_1$  和  $c_2$  分别是轮廓线的某一特征段,根据轮廓线上每一点的曲率,用下面的方法进行比较:

1) 取目标轮廓和采样轮廓线上的某一个特征段  $c_1$  和  $c_2$ , 令  $c_1 = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}, c_2 = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$

2) 计算  $h(c_1, c_2) = \max_{k_i \in c_1} \min_{K_j \in c_2} \|k_i - K_j\|, i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

欧式距离:

$$h(c_1, c_2) = \max_{k_i \in c_1} \min_{K_j \in c_2} (|k_i - K_j|) \quad (13)$$

3) 计算  $c_1$  和  $c_2$  之间的有向 Hausdorff 距离:

$$H(c_1, c_2) = \max\{h(c_1, c_2), h(c_2, c_1)\} = \max_{k_i \in c_1} \min_{K_j \in c_2} (|k_i - K_j|) \quad (14)$$

4) 进行判断, 选取适当的容差  $\varepsilon$ , 当  $H(c_1, c_2)$  满足  $H(c_1, c_2) \leq \varepsilon$ , 则说明两个轮廓上的  $c_1$  和  $c_2$  特征段是可以匹配的。

## 4 实验结果与分析

通过设计实验对本文算法与文献[6]算法进行了比较, 测试改进效果。三维模型数据库采用普林斯顿大学形状分析小组提供的标准测试数据库, 数据库中共含有 907 个模型。依据模型的功能和形状, 将模型数据库人工分类成 35 类, 然后再进一步细分成 92 个小类。采用 precision-recall 曲线来分别度量本文算法与 Heczko 算法的检索性能, 其中:

$$\text{precision} =$$

$$\frac{\text{结果中正确模型的个数}}{\text{结果中正确模型的个数} + \text{结果中错误模型的个数}}$$

$$\text{recall} =$$

$$\frac{\text{结果中正确模型的个数}}{\text{结果中正确模型的个数} + \text{结果中遗漏模型的个数}}$$

实验选取目标轮廓的某一个特征段, 其中该特征段有 10 个特征点, 同时选取 5 个采样轮廓的同一个特征段上的 10 个点, 每个点的曲率值如表 1 所示。

表 1 各点曲率值

| 目标轮廓  | 轮廓 1  | 轮廓 2  | 轮廓 3  | 轮廓 4  | 轮廓 5  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.823 | 0.812 | 0.836 | 0.709 | 0.634 | 0.778 |
| 0.768 | 0.763 | 0.648 | 0.823 | 0.596 | 0.806 |
| 0.801 | 0.799 | 0.699 | 0.689 | 0.735 | 0.669 |
| 0.689 | 0.674 | 0.543 | 0.426 | 0.552 | 0.774 |
| 0.452 | 0.468 | 0.236 | 0.323 | 0.419 | 0.539 |
| 0.361 | 0.299 | 0.446 | 0.409 | 0.218 | 0.423 |
| 0.638 | 0.627 | 0.368 | 0.668 | 0.516 | 0.598 |
| 0.536 | 0.549 | 0.785 | 0.554 | 0.632 | 0.338 |
| 0.698 | 0.713 | 0.458 | 0.803 | 0.651 | 0.732 |
| 0.841 | 0.802 | 0.703 | 0.774 | 0.769 | 0.701 |

实验选取的容差值  $\varepsilon$  在 (0, 0.05) 内, 采样轮廓与目标轮廓的 Hausdorff 距离如表 2 所示。

表 2 Hausdorff 距离

| 目标轮廓 | Hausdorff 距离 |
|------|--------------|
| 轮廓 1 | 0.016        |
| 轮廓 2 | 0.091        |
| 轮廓 3 | 0.055        |
| 轮廓 4 | 0.088        |
| 轮廓 5 | 0.087        |

从表 2 可知, 在这个特征段里采样轮廓 1 与目标轮廓的误差在规定的范围之内, 那么在这个特征段上, 采样轮廓与目标轮廓是可以匹配的。

在 Windows 平台上利用 VC++ 6.0 语言经过多次实验,

获得本文算法和文献[6]算法的相似性匹配时间(如表 3 所示)以及 precision-recall 曲线(如图 6 所示)。

从表 3 可以看出, 尽管总的匹配时间增加了 0.37 s, 但是平均匹配时间仅增加了 0.004 s, 对于这种较小的差异用户是很难察觉的。

表 3 相似性匹配时间比较 s

| 算法        | 总匹配时间 | 平均匹配时间 |
|-----------|-------|--------|
| Heczko 算法 | 13.76 | 0.148  |
| 本文算法      | 14.13 | 0.152  |

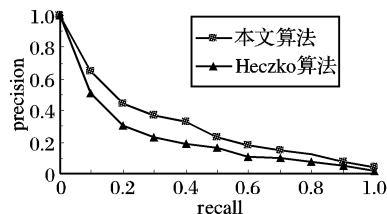


图 6 两种方法的 precision-recall 曲线

从图 6 可以看出, 本文算法的性能指标略高于文献[6]算法, 匹配的精度以及准确性有了一定的提高。

## 5 结语

本文针对 Heczko 算法易丢失表示三维模型轮廓的某些信息从而降低匹配准确性这一缺点, 研究一种基于轮廓特征点的三维模型相似性匹配算法。通过提取三维模型轮廓上的角点作为特征点, 计算这些点集之间的 Hausdorff 距离来进行相似性匹配, 并通过实验对本文算法的检索性能、匹配时间进行测试。实验结果表明: 虽然本文方法与文献[6]算法相比在算法复杂度上有所增加, 因此需要更多的匹配时间; 但这种时间的差异很小, 不会被用户察觉, 总体来说, 该算法提高了匹配的精度, 可以得到较好的检索性能。随着计算机软硬件的飞速发展, 通过增加部分时间和空间复杂度来提高算法的检索精度是下一步的研究方向。

### 参考文献:

- [1] 崔晨昉. 三维模型检索中关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [2] MIN P, HALDERMAN A, KAZHDAN M, et al. Early experiences with a 3D model search engine[C]// Proceedings of the Eighth International Conference on 3D Web Technology. New York: ACM, 2003: 7-18.
- [3] 杨育彬, 林琨, 朱庆. 基于内容的三维模型检索综述[J]. 计算机学报, 2004, 27(10): 1297-1310.
- [4] 刘玉杰. 基于形状的三维模型检索若干关键技术的研究[D]. 北京: 中国科学院计算技术研究所, 2006.
- [5] CYR C, KIMIA B. 3D object recognition using shape similarity-based aspect graph[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. Vancouver: IEEE, 2001: 254-261.
- [6] HECZKO M, KEIM D, SAUPE D, et al. A method for similarity search of 3D objects[C]// Proceedings of German Database Conference (BTW). Oldenburg: [s. n.], 2001: 384-401.
- [7] 崔晨昉, 石教英. 三维模型检索中的特征提取技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(7): 882-889.
- [8] 朱延娟, 周来水, 张丽艳, 等. 基于 Hausdorff 距离的多尺度轮廓匹配算法[J]. 中国机械工程, 2004, 15(17): 1553-1556, 1561.