

基于体积分布特征匹配的三维实体网格模型检索

庞明勇¹, 戴文俊², 武港山², 张福炎²

(1. 南京师范大学教育技术系, 江苏 南京 210093; 2. 南京大学计算机科学与技术系, 江苏 南京 210093)



摘 要: 在分析三维网格数据结构的基础上, 提出一种基于特定轴向上体积分布特征的三维网格模型检索方法。该方法首先运用主元分析法确定模型的主轴方向, 并将模型旋转至特定势态, 再以一组等距的平行平面从三个主轴方向对模型进行剖分处理, 并计算相应截面多边形的面积, 进而得到模型沿不同轴向上的体积分布数据, 该数据描述了三维模型的几何特征。通过对模型体积分布特征数据进行建库和匹配, 可计算出任意两个模型的相似性度量, 从而实现了三维网格模型的数据库检索。实验表明, 该方法程序运行稳定、快速, 可以处理具有任意几何和拓扑复杂性的实体模型。

关键词: 数字几何处理; 三维检索; 体积特征; 网格模型

中图分类号: TP391.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2007) 01-0030-05

3D Model Retrieval Based on Matching Characters of Volume Distribution

PANG Ming-yong¹, DAI Wen-jun², WU Gang-shan², ZHANG Fu-yan²

(1. Department of Educational Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210093, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: A novel 3D retrieval method was proposed based on extracting geometric features of 3D mesh models with arbitrary topology according to their volume distributions. The method first searches three principal directions for mesh model by employing famous principal component analysis (PCA) method and rotates the model to align its principal directions to the axes of reference frame. Supported by half-edge data structure, the algorithm slices the model using three sets of parallel and equidistant planes along to the three principal directions respectively. Subsequently, *three character curves of the model can be obtained by calculating signed-areas of section-polygons on the planes. The curves give a geometric descriptor of the model and can be used to key the model in 3D mesh model library.* By comparing descriptors of two models, the method can compute measure of similarity of them. Experiences show that the method is rapid, stable and robust to deal with various mesh models with arbitrary geometric and topological complexity.

Key words: digital geometry processing; geometric retrieve; volumetric character; 3D mesh models

引 言

随着三维网格模型的大量涌现, 如何对模型数据进行分类、检索和管理, 成为日益突出的现实问题。对模型数据进行分类与检索的前提, 是对不同模型之间的相似性进行度量。其核心问题之一是如何提取模型的特征, 以便对网格模型的几何或拓扑特性进行量化的描述。

目前, 三维网格模型的特征描述大致可分为几何描述和拓扑描述两大类。前者通过分析网格模型的几何特征(如体积、表面积、曲率、法向等)在三维空间中的分布来确定模型的特征描述。文[1-3]等利用网格模型在其球形包围盒中的体积分布情况计算模型的体积分布直方图, 来描述模型的体积特征; 文[1]对各类直方图方法进行了系统的分析和比较。直方图反映的是三维模型中顶点和网格面的总体信息, 通常具有旋转不变性, 但却难以得到模型中顶点和网格面的局部细节信息。文[4]利用一组平行平面对模型剖切, 然后分别求

模型在各截平面上的轮廓线, 通过对轮廓线进行均匀重采样计算出采样点在平面上的特征分布, 从而确定模型在该截平面上的特征, 最后将所有截平面上的特征集合在一起, 作为模型的特征描述子(Descriptor)。该方法的不足之处是计算量大, 速度较慢; 文[5]利用一个定义在正二十面体上的相机系统对模型形状进行描述。该方法首先使用相机系统对模型“拍照”, 提取模型在不同相机视点下的外轮廓线, 而后将每条轮廓线转化为一条特征曲线。模型的所有特征曲线集构成了一个特征描述子。为了增加描述的准确性, 需要对相机系统进行确定角度的微幅旋转, 以便得到更多的描述子。该方法具有较高的形状描述能力, 但其计算量较^[4]更大, 故速度也更慢; 此外, 它的特征描述数据也较大。基于拓扑的方法通过分析模型的分支性、连通性和骨架形状等拓扑特征, 对模型进行特征描述。如文[6]和[7]利用 Morse 理论和 Reeb 图等描述网格模型的拓扑特征; 文[8]则进一步提出了 Reeb 图的多分辨率算法等。此外, 还有运用解析方法对模型进行特征提取的方法, 如基于傅立叶分析^[9]和球面调和函数^[10]的算法等。

本文给出一种基于模型体积轴向上分布特征匹配的三维模型检索方法。该方法借助网格模型在三个不同轴向上的体积分布曲线, 建立相应的几何特征描述, 并通过匹配上述特

收稿日期: 2005-10-14 修回日期: 2006-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(60503058)

作者简介: 庞明勇(1968-), 男, 安徽淮南人, 博士, 副研究员, 研究方向为数字几何处理; 戴文俊(1981-), 男, 江苏常州人, 硕士生, 研究方向为 Web 信息检索、多媒体信息处理; 武港山(1967-), 男, 江苏淮安人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为 Web 信息检索、多媒体信息处理。

征曲线, 实现了模型数据的快速检索。

1 实体网格模型及其数据表示结构

本文讨论的三维实体网格模型是指网格面在三维空间中围成有限体积区域的流形(Manifold)网格模型, 它满足以下条件: 1、网格上的每个面片都是平面凸多边形; 2、网格上的每条边由且仅由两个面片共有; 3、网格中共享任一顶点的各个面片所形成的曲面在该顶点处与单位圆拓扑同构。

目前, 最常用的网格数据表示方法是邻接表表示法, 该数据结构将网格中的顶点、面片和边之间的主要邻接关系置于顶点结构中。由于每个顶点所邻接的面片数(即顶点的度数)是变化的, 故该结构具有数据表示的非一致性(数据大小依顶点的度数变化), 给相关操作带了不便。通过比较, 本文采用半边数据结构^[11]表示网格模型数据。

如图 1 所示, 对于模型中的任意一条边 e , 将其分为两条有向半边 h_1 和 h_2 , 其中每条半边记录着 5 个表示邻接关系的指针: 1、指向该半边将到达顶点的指针; 2、指向属于同一面片的下一条半边的指针; 3、指向本条半边所从属的面片的指针; 4、指向属于同一条边的另一条半边的指针; 5、指向属于同一个面片的前一条半边的指针(可选)。另外, 还为每个顶点配备一个指向从它出发的任一条半边的指针; 6、为每个面片配备一个指向属于它的任一条半边的指针; 7、这样, 一旦建立了整个网格的半边结构关系, 就可以通过上述指针访问整个网格^[11]。使用半边结构的好处是, 除了使网格数据具有一致性的表示(大小固定)以外, 由于每条半边都具有自己的方向, 使得从外部观察模型时, 它的每个面上的半边都是依次按一致的旋转方向排列的(图 1、图 2a)。

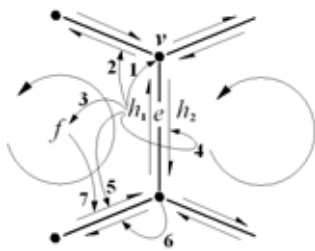


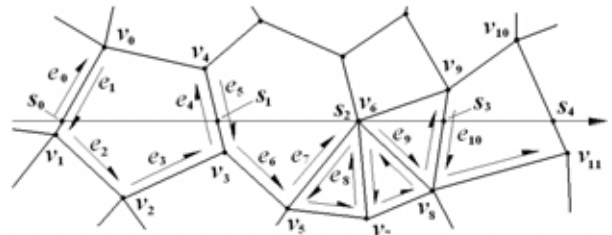
图 1 半边数据结构示意图

2 体积分布特征的提取

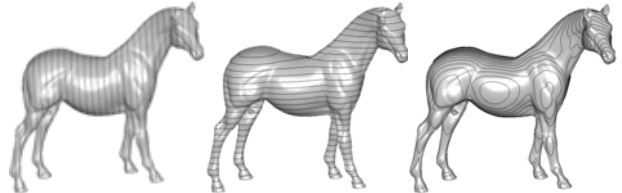
2.1 确定模型的主轴方向

为了对不同模型之间的体积分布特征进行比较, 需要首先确定模型的主轴方向。本文利用主元分析法(PCA, Principle Component Analysis)法^[12]确定模型的轴向。PCA 方法是一种常用的信号分析方法, 它通过对网格顶点数据进行正交矩阵变换, 将原始数据集合变换到主分量空间, 通过将单一数据样本的相关性降到最低求出数据的主分量方向。有关 PCA 方法的原理请参见文献[12]。

计算出模型的主轴方向后, 可通过旋转操作将网格模型的主轴旋转至与坐标轴 Z 轴方向一致。



(a) 求截面多边形



(b) Horse 模型在三个剖切方向上的截痕

图 2 提取截面多边形

2.2 模型剖切及截面多边形提取

不失一般性, 以下仅讨论采用水平平面(即平行于 XY 坐标面的平面)对模型进行剖切的情况。显然, 剖切平面的位置可由确定的 Z 坐标值 z_k 唯一确定, 这时称 Z 轴为剖切轴向, 并将相应的剖切平面记为 $P(z_k)$ 。根据模型拓扑复杂性的不同, 剖切截面很可能是由存在嵌套关系的一组平面简单多边形(称为截面多边形)组成(图 3)。

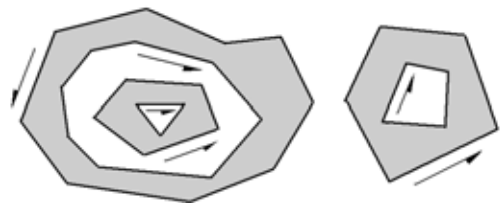


图 3 截面多边形及其方向

对于一组剖切平面, 为其中每个平面维护一个数据结构, 记录该剖切平面所横截的所有边的集合(记为 $S(z_k)$)。求各 $S(z_k)$ 的过程可通过对模型中边的一趟遍历来实现。求 $P(z_k)$ 上的截面多边形的过程为: 首先取 $S(z_k)$ 中的任意一条边, 并记其为 $e_0(z_k)$ 由 $e_0(z_k)$ 的两个端点 v_i 与 v_j 的 Z 坐标值与 z_k 的关系, 可以确定两者与截面 $P(z_k)$ 的位置关系, 并可简单地求出 $e_0(z_k)$ 与 $P(z_k)$ 的交点 s_0 。不妨设 v_i 在 $P(z_k)$ 的上侧, 则 v_j 在 $P(z_k)$ 的下侧。显然, 由 v_i 出发指向 v_j 的半边 h_0 是指向 $P(z_k)$ 下方的(如图 2a 中的半边 e_1)。令 h_0 的下一条半边为 h_n , 若 h_n 的出发顶点和到达顶点均在截面 $P(z_k)$ 的下侧, 进而取 h_n 的下一条半边, 并仍记为 h_n , 直到 h_n 的到达顶点在 $P(z_k)$ 的上侧为止。这时, 取 h_n 的相对半边为 h_1 , 显然, h_1 所对应的边便是第二条与 $P(z_k)$ 相交的边, 由此可以求出交点 s_1 。把 h_1 视为上述 h_0 , 并重复上述寻找过程, 可以得到交点序列 s_0, s_1, \dots 。当序列中出现重复交点时, 表明已形成了一个截面多边形。

上述过程中, 每条被访问过的半边所对应的边都被从

$S(z_k)$ 中剔除。在找到一个截面多边形后,若 $S(z_k)$ 非空,则重复前述过程可得到第二个截面多边形。如此反复,直到 $S(z_k)$ 变为空为止。这时可以得到 $P(z_k)$ 上的所有截面多边形。

需要特别处理的是,一条半边的出发顶点与到达顶点之一或两者均在 $P(z_k)$ 上的情况(如图 2a 中的 v_6),一般的处理原则是,若半边的出发顶点在 $P(z_k)$ 上,将其视为在 $P(z_k)$ 下侧;而它的到达顶点在 $P(z_k)$ 上时,则将其视为在 $P(z_k)$ 上侧。图 2b 为沿三个轴向对马模型进行剖切的切痕。

2.3 截面积计算

由于网格模型上每个面片的半边都是按逆时针方向排列的,故最终得到的截面多边形也都具有方向性。其方向定义为依次得到的各交点的排列方向。当俯视截面时可以发现,当沿着多边形边界按多边形方向行走时,实体的内部总是在其左侧(图 3)。从总体上看,实体的外轮廓多边形是逆时针走向的,而内轮廓多边形的方向恰好相反。

对于任意平面简单多边形 s_0, s_1, \dots, s_N , 令 $s_i=(x_i, y_i, z_k)$ ($i=0,1, \dots, N$), 则该多边形的带符号面积可以由如下公式求出:

$$S = \frac{1}{2} \left\{ \begin{vmatrix} x_0 & y_0 \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix} + \dots + \begin{vmatrix} x_k & y_k \\ x_0 & y_0 \end{vmatrix} \right\}$$

当多边形方向为俯视逆时针方向时,其面积为正,反之则为负。因此,最终的截面面积为所有截面多边形带符号面积的代数和(的绝对值)。

2.4 生成体积特征曲线

每个模型的特征由其在三个轴向上的体积分布曲线进行描述,其中每条特征曲线定义为平面曲线 $ratio=f(d)$ 。这里, d 在剖切轴向(即模型的三个主方向之一)上离散地取值。如图 4 所示, $d=t$ 处的值 $ratio=f(t)$ 为模型阴影部分的体积占其全部体积的比例,阴影部分的宽度为相邻的两个剖切平面间的距离。

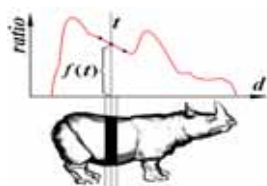


图 4 体积特征分布曲线的离散计算

设剖切层数为 n , 且最上和最下剖切平面分别为 $P(z_{max})$ 和 $P(z_{min})$, 其中 z_{max} 和 z_{min} 分别为模型中所有顶点 Z 坐标的最大和最小值。显然,各剖切层的宽度为 $(z_{max} - z_{min})/n$ 。这时,由下而上的第 i 个剖切平面为

$$P(z_i) = P \left(z_{min} + i \times \frac{z_{max} - z_{min}}{n} \right), (i = 0, 1, \dots, n)$$

由 2.3 小节可得各剖切平面上的模型截面面积依次为 S_0, S_2, \dots, S_n 。这时,模型的体积用下式近似求出:

$$V \approx \frac{z_{max} - z_{min}}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{S_i + \sqrt{S_i S_{i+1}} + S_{i+1}}{3} \quad (1)$$

当 n 足够大时,每两个相邻截面的面积近似相等,这时可将(1)式中的 S_i 和 S_{i+1} 同取为 $(S_i + S_{i+1})/2$, 由此可将(1)式进一步简化为

$$V \approx \frac{z_{max} - z_{min}}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{S_i + S_{i+1}}{2} \quad (2)$$

其中,第 $i(i=0,1, \dots, n-1)$ 个截段的体积为

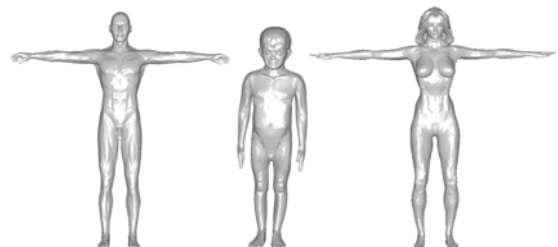
$$V_i \approx \frac{z_{max} - z_{min}}{n} \frac{S_i + S_{i+1}}{2} \quad (3)$$

我们注意到,式(2)和式(3)中消掉了式(1)中耗时的开方运算。

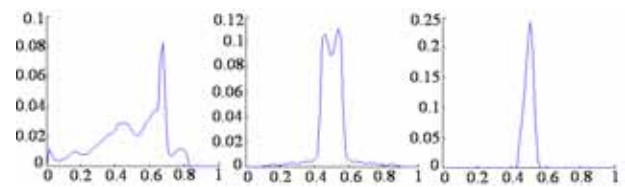
取 $d_i=(z_i+z_{i+1})/2$, 则有

$$ratio_i = f(d_i) = \frac{V_i}{V} = \frac{\frac{S_i + S_{i+1}}{2}}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{S_i + S_{i+1}}{2}} = \frac{S_i + S_{i+1}}{\sum_{i=1}^{n-1} (S_i + S_{i+1})}$$

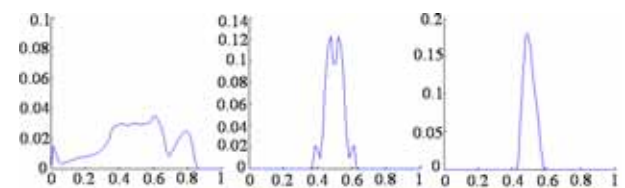
将上述离散点连接起来,便可得到模型的体积分布特征曲线。图 5 给出了三个人物模型的体积特征曲线。



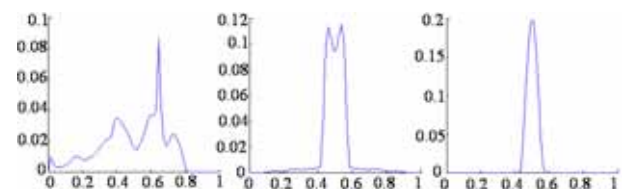
(a) 人体模型: Man、Child 和 Woman



(b) Man



(c) Child



(d) Woman

图 5 三个人物模型及其体积特征曲线

3 相似度计算

假设模型 M^0 和 M^1 的体积特征曲线分别由离散值

$R^0 = \{ratio_0^0, ratio_1^0, ratio_2^0\}$ 和 $R^1 = \{ratio_0^1, ratio_1^1, ratio_2^1\}$ (其中 $ratio_i^k = \{g_{i0}^k, g_{i1}^k, \dots, g_{i,n-1}^k\}$, $k = 0, 1; i = 0, 1, 2$) 确定。

本文采用 M^0 和 M^1 相应特征曲线之间的相异度来度量模型间的相似性(参见图 6), 该相异度是 Minkovski 距离^[13]在离散情形下的特例。其定义为:

$$diff(M^0, M^1) = \left(\sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^{n-1} (g_{ij}^0 - g_{ij}^1)^2 \cdot \Delta^i \right)^{1/2} \quad (4)$$

其中 $\Delta^i (i = 0, 1, 2)$ 为相邻剖切平面的间距。为了简化计算, 我们将模型沿剖切轴向作单位化处理, 这时式(4)可简化为:

$$diff(M^0, M^1) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^{n-1} (g_{ij}^0 - g_{ij}^1)^2 \quad (5)$$

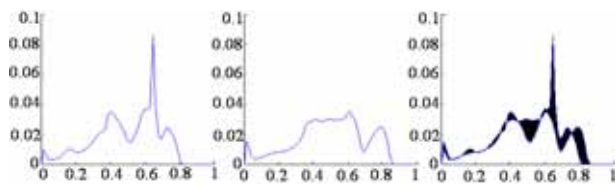


图 6 Woman 和 Child 的第一剖切轴向上的特征曲线的相异度计算, 最右子图中阴影部分的面积即为两曲线的相异度

值得提出的是: 由于 PCA 方法在确定剖切轴向时, M^0 和 M^1 的轴线正负方向可能会不一致, 所以在比较时需要把两种情况都考虑到, 并以最匹配的作为这两模型的相似度, 即在式(5)中取

$$\sum_{j=0}^{n-1} (g_{ij}^0 - g_{ij}^1)^2 = \min \left(\sum_{j=0}^{n-1} (g_{ij}^0 - g_{ij}^1)^2, \sum_{j=0}^{n-1} (g_{ij}^0 - g_{i,n-j-1}^1)^2 \right)$$

4 实验与结果

作者在 P4-2.8GHz (512M) PC 机上用 C++ 实现了基于前述理论的模型检索原型系统。该系统由模型入库模块(包括体积特征的抽取)和模型匹配模块两部分组成。其中, 模型入库模块可根据用户的要求调节剖分的层数; 匹配(检索)模块则可按照用户键入的关键词提交若干模型, 并以用户选定的模型作为“key”在模型库中搜索相似模型。

鉴于模型剖切层数越多检索越准确, 但同时涉及到的计算量也越大, 所以必须在检索准确性和计算时间两方面进行折衷。本文采用与文献[14]相同的模型数据集对系统的性能进行分析, 该数据集包含被人工分为 90 个子类的 1834 个三维网格模型。我们对每个模型分别进行 16/32/64/128 和 256 层的剖切, 相关实验数据如表 1 和图 7 所示。表 1 中, 特征提取时间为提取 1834 个模型体积分布特征的平均使用时间, 其中包含了从外存读入模型和向外存写出特征数据的时间; 模型比较时间是计算任两个模型之间相似度的计算时间。图 7 给出的是不同剖切层次下模型检索的准确率-召回率的关系图。对于给定的“key”模型, 在确定匹配精度下所检索出的模型全体称为检出集。准确率则是指检出集中那些符合用户检索要求的模型所占的比例; 召回率则是指检出集中符合用户要求的模型占数据库中应被检出的模型的比例。图中显示, 剖切 128 层的检索准确率与剖切 256 层的情

况已非常接近, 因此, 可以选择 128 层作为数据库中模型的统一剖切层数, 以提高算法速度。比照文献[14]可知, 本文的方法与该文评测的 12 种方法相比, 效率较高。

表 1 各种剖分层次实验结果

剖切层数	特征提取时间 (s)	模型比较时间 (ms)	特征数据大小 (k)
16	0.143	0.0083	1.05
32	0.156	0.0110	1.94
64	0.192	0.0159	3.72
128	0.258	0.0322	7.28
256	0.393	0.0893	14.4

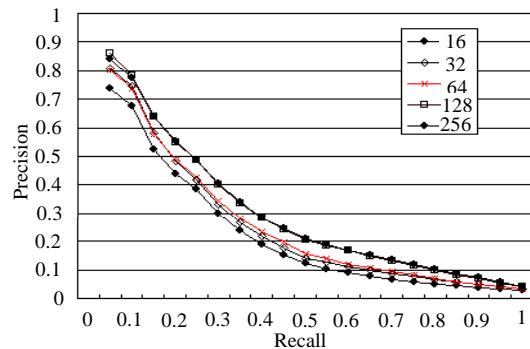


图 7 各种剖分层次的准确率-召回率图

图 8 给出了本文检索系统对总数据量为 3.20G、包含 10911 个模型的(无序)数据库的检索结果, 图中最左列是检索所使用的“key”模型, 相应地, 右边的模型是系统检索出的相似度最好的前 4 个模型。

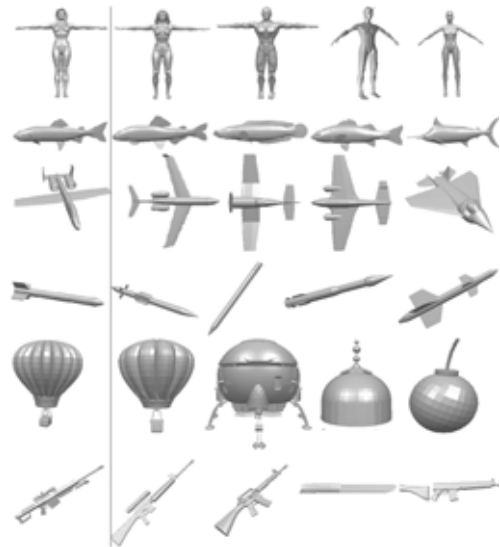


图 8 本文原型系统对无序数据库的检索结果(最左列为 Key 模型)

5 结论

本文提出一种基于体积分布特征的三维实体网格模型检索方案, 并实现了相应的原型系统。该系统以半边数据结构作为模型数据的内存表示结构, 运用 PCA 方法确定模型的轴向, 采用平面簇剖分方法提取模型在三个轴向上的体积分布曲线, 并利用体积分布数据定义不同模型间的相似度,

实现了模型数据的匹配和检索。实验结果表明,本文方法不仅具有较好的检索准确率和召回率,而且在模型入库和模型检索这两个环节均有较快的执行速度。此外,本文检索系统能够处理任意实体网格模型,可以区分传统模型匹配算法不能处理的一些情况,如基于轮廓线的匹配算法不能区分的实心球体和中空球体的相似性比较问题等。更进一步的工作主要包括两个方面,一是研究克服 PCA 方法在模型对准方面的局限性;二是设计更加友好的人机交互界面。

参考文献:

[1] Ankerst M, Kastenmuller G, Kriegel H. 3D shape histograms for similarity search and classification in spatial databases [C]// Proc. of 6th International Symposium on Large Spatial Databases, Hong Kong, China. 1999.

[2] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape distributions [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2002, 21(4): 807-832.

[3] Vandeborre J, Couillet V, Daoudi M. A practical approach for 3D model indexing by combining local and global invariants [C]// IEEE 3D Data Proc.: Visualization and Transmission, Padova, Italy. 2002.

[4] Pu J, Liu Y, Gu Y, et al. 3D model retrieval based on 2D slice similarity measurements [C]// Proc. of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, Thessaloniki, Greece. 2004.

[5] Chen D, Tian X, Shen Y, et al. On visual similarity based 3D model retrieval [J]. Computer Graphics Forum (S0167-7055), 2003, 22(3): 223-232.

[6] Shinagawa Y, Kunii T. Constructing a Reeb graph automatically from cross section [J]. IEEE Computer Graphics & Applications (S0272-1716), 1991, 11(6): 44-51.

[7] Xiao Y, Werghi N, Siebert P. A topological approach for segmenting human body shape [C]// 12th International Conference on Image Analysis and Processing, Mantova, Italy. 2003.

[8] Hilaga M, Shinagawa Y, Kohmura T, et al. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes [C]// ACM SIGGRAPH'2001. 2001.

[9] Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors [C]// ACM SIGGRAPH'2003. 2003.

[10] Vranic D V, Saupe D. Description of 3D-shape using a complex function on the sphere [C]// Proc. Of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo(ICME2002), Lausanne, Switzerland. 2002.

[11] Weiler K. Edge-based data structure for solid modeling in curved-surface environments [J]. IEEE Computer Graphics & Application (S0272-1716), 1985, 5(1): 21-40.

[12] Jolliffe I T. Principal component analysis [M]. New York: Springer, 2002.

[13] Puzicha J, Rubner Y, Tomasi C, et al. Empirical evaluation of dissimilarity measures for color and texture [C]// IEEE International Conference on Computer Vision. 1999.

[14] Min P, Kazhdan M, Funkhouser T. A comparison of text and shape matching for retrieval of online 3D models [C]// Proc. European Conference on Digital Libraries, Bath, UK. 2004.

(上接第 15 页)

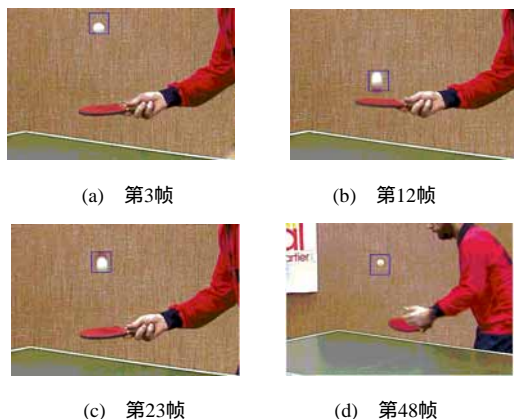


图3 乒乓球跟踪结果

5 结论

为了实现运动目标的实时跟踪,本文采用了BFGS拟牛顿方法进行运动目标的定位,从而建立了基于BFGS拟牛顿公式的运动目标跟踪方法,在定位的过程中还结合了逐层区域划分搜索策略。该方法的优越性主要表现在:首先BFGS拟牛顿方法的采用使得目标定位过程中的迭代次数减少,从而加速了算法的收敛;其次逐层区域划分搜索策略的应用实现了对目标的全局搜索,有效地避免了目标丢失现象的发生。实验结果表明该方法具有很好的实时性和有效性,可以广泛地应用于机器人视觉、智能监控等领域。如何运用不规

则的复杂概率密度函数精确的描述运动目标的特征分布状况,并运用BFGS拟牛顿方法进行目标的实时跟踪是我们下一步研究的重点。

参考文献:

[1] Yang Wang, Tele Tan, Kia-Fock Loe. Joint region tracking with switching hypothesized measurements [C]// In: Proc of Ninth IEEE International Conference on Computer Vision. Nice. 2003.

[2] Cheung G, Baker S, Kanade T. Shape-from-silhouette of articulated objects and its use for human body kinematics estimation and motion capture[C]// In: Proc of 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Madison Wisconsin. 2003.

[3] Kalafatic Z, Ribaric S, Stanisavljevic V. Real-time object tracking based on optical flow and active rays[C]// In: Proc of 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, Lemesos, Cyprus. 2000.

[4] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based object tracking [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0018-9340), 2003, 25(5): 564-577.

[5] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift [C]//In: Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Hilton Head Island, South Carolina. 2000.

[6] Tyng-Luh Liu, Hwann-Tzong Chen. Real-time tracking using trust-region methods [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0018-9340), 2004, 26(3): 397-402.

[7] Yang C, Ramani Duraiswami, DeMenthon D, Davis L. Mean-shift analysis using quasi-Newton methods [C]//In: Proc of International Conference on Image Processing. Barcelona, Spain. 2003.

[8] 陈宝林. 最优化理论与算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.