

基于连接点的3D多角弧匹配

茹少峰 王晓强 周明全

(西北大学计算机科学系, 西安 710069)

摘要 为了满足实际应用的要求, 快速地进行多角弧匹配是必要的, 因此, 提出了一种快速的3D多角弧表示和匹配的方法。该方法是在分析多角弧几何形状基础上, 引入连接点的概念, 同时, 通过在连接点处建立局部直角坐标系来得到每一连接点处的球面坐标。并用连接点的球面坐标集表示多角弧, 因这一表示在旋转和平移变换下是不变的, 所以可取该球面坐标集作为多角弧匹配的特征集, 用该特征集可保持多角弧的几何属性和拓扑结构。这样3D多角弧匹配就降为1D数值串匹配, 从而使匹配变得简单快速。其测量函数为对应连接点间的均方差。实验结果表明, 该匹配算法效果良好, 并且对于数值污染具有健壮性。

关键词 计算机视觉 多角弧 连接点 特征集 多角弧表示 多角弧匹配

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2004)05-0584-05

Matching 3D Polygonal Arcs Based on Junctions

RU Shao-feng, WANG Xiao-qiang, ZHOU Ming-quan

(Department of Computer Science, Northwest University, Xi'an 710069)

Abstract For realistic application, near real time matching 3D polygonal arcs is required. The method for representing and matching 3D polygonal arcs is presented. In this paper. The polygonal arcs junction is defined. 3D polygonal arcs are represented by Spherical coordinates sets that are obtained by defined local Cartesian coordinates system of each junction. This representation is invariant to translation and rotation transformation. The set is views as feature sets. The benefits of using this feature sets include attribute of geometry and structure of topology of polygon. The 3D polygonal arcs matching task is reduce into a 1D numerical string-matching problem so that the matching is easy and the processing time is greatly saved. The objection function is defined as the mean square errors between the feature sets. Experiments with different classes polygonal arcs and real images show that the matching algorithm produces sufficiently reliable and is robust to digitization errors and noise effects.

Keywords computer vision, polygonal arcs, junction, feature sets, representation, matching

1 引言

多角弧的匹配问题是计算机视觉、图像分析、模式识别中的基本问题。该问题可表述为: 对于给定的两个多角弧的匹配就是找它们共同的最大的子多角弧, 即定位它们具有共同形状的部分。由于该问题在计算机视觉、物体识别等领域有广泛的应用, 因此, 关于这一问题, 许多学者做了大量深入的研究, 如 Douglass 和 Prabir 将一个向量 $q = q_1i + q_2j + q_3k + q_4l$,

表示成一个四元数 $q = (q_1, q_2, q_3, q_4)^T$, 这样多角弧上所有向量就形成了一个四元数的子集, 由于同时定义了向量的加法和乘法运算, 从而构成了一个四元数的子群, 用这样的子群进行多角弧的匹配, 即可得到最小距离的闭形式解, 其最小距离为一个 2×2 矩阵的特征值^[1]。该方法最大优点是2D和3D的多角弧匹配问题给出了统一的方法。黄良明等提出了在利用几何代数的同时, 通过进行线段模型的匹配和运动估计^[2]来将匹配和运动估计转化为求矩阵奇异值分解的方法, 该方法最大优点是匹配和运

基金项目: 国家自然科学基金项目(60372072); 陕西省教育厅专项基金项目(03JK155)

收稿日期: 2003-09-08; 改回日期: 2003-12-19

动估计问题同时解决。Parsi 提出了用最小二乘法匹配多角弧的算法, 其最小距离是多角弧之间对应点的距离和方向^[3]。以上这些研究所选取的多角弧特征都是每条线段的长度、方向向量。而 Theodosios Pavlidis 则利用语法形状研究了围线匹配, 并首先将围线用多角弧逼近, 然后进行多角弧的匹配, 其采用的方法是形状分析法, 所选取的特征是多角弧的属性(尺寸、类型、方向)^[4]。此外, Ross 又给出了线段模型与图像线段匹配的局部搜索算法^[5]。Zhang Zheng-you 首次将直线段作为视觉信息中的重要特征用于运动与结构的估计^[6]。然而由于以上方法选取特征的复杂性, 因而使得匹配的算法时间复杂度是所涉及问题的选取特征数目的指数级。

本文提出以连接点为特征集来进行多角弧表示和匹配的方法^[7], 即在多角弧中一个连接点是由两条线段和一个角组成, 由于连接点是多角弧的本质参数, 因此, 连接点形成的特征集就唯一决定了一个多角弧。该方法所选特征集具有以下特点: 特征集在旋转和平移下是不变的, 且具有稳定性, 即多角弧微小的扰动只对特征集产生较小的影响, 而且, 通过特征集可以重构多角弧。这样在两个多角弧匹配时, 就将 3D 多角弧匹配问题转化为 1D 的字符串匹配问题, 即先应用字符串的匹配技术来找最大的共同的子串^[8,9]; 然后再返回到对应的多角弧匹配; 最后即可很容易地得到匹配的多角弧的旋转和平移变换。

2 特征集和多角弧的表示

定义 1 一个多角弧定义为一个点集 $\{P_i\} i=0, 1, \dots, n+1, P_i \in E^3$ 称为顶点 (E^3 为三维欧氏空间), 且顺序两点之间线段相连, 该线段称为边, 如果是封闭的, 则令 $P_{n+1}=P_0$ 。

定义 2 连接点定义为顶点和与该顶点相连的两条边(如图 1 所示), 闭形式的多角弧定义的连接

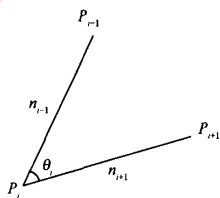


图 1 连接点

点为: Q_0, Q_1, \dots, Q_n , 其中, P_i 与 Q_i 对应; 开形式的多角弧定义的连接点为: $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$, 其中, Q_i 与 P_i 对应, P_0 与 P_{n+1} 点不是连接点, 即开形式的多角弧两端点不是连接点。

定义 3 连接点的局部直角坐标系和球面坐标定义为

设 $l_{i+1} = \|P_{i+1} - P_i\|$, 其中 $\|\cdot\|$ 为向量的模, $N_{i+1} = (P_{i+1} - P_i) / l_{i+1} (i=0, 1, \dots, n)$, 则取 $X_{i+2} = N_{i+2}$, $Z_{i+2} = N_{i+2} \times N_{i+1}, Y_{i+2} = Z_{i+2} \times X_{i+2} (i=0, 1, \dots, n)$, 并令 $T_{i+2} = \{P_{i+2}, X_{i+2}, Y_{i+2}, Z_{i+2} (i=0, 1, \dots, n)$, 其中, 当 T_i, P_i 的下标 i 超过 $n+1$ 时, 则进行取模运算, 并称 T_{i+2} 为 P_{i+2} 处的局部直角坐标系(如图 2 所示)。

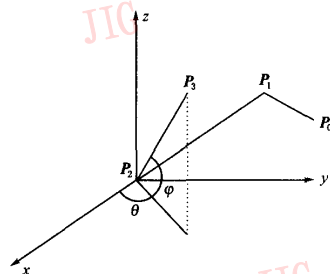


图 2 球面坐标系

这样就在每一个连接点处都建立了一个局部直角坐标系, 记连接点 Q_{i+1} 在局部直角坐标系 T_i 中的球面坐标为 $Q_{i+1}(l_{i+1}, \theta_{i+1}, \varphi_{i+1}), 0 < \theta_i \leq 2\pi, 0 \leq \varphi_i \leq \pi (i=0, 1, \dots, n)$, 其中 l_i, θ_i, φ_i 是多角弧的本质参数。当 $Q_{i+1}(l_{i+1}, \theta_{i+1}, \varphi_{i+1})$ 的下标超过 $n+1$ 时, 则进行取模运算。

定义 4 根据定义 2, 对于闭形式的多角弧特征集定义如下:

$$\Gamma = \{Q_0(l_0, \theta_0, \varphi_0), Q_1(l_1, \theta_1, \varphi_1), \dots, Q_i(l_i, \theta_i, \varphi_i), \dots, Q_n(l_n, \theta_n, \varphi_n)\}$$

按照闭形式多角弧的特征集定义, 只需连接开形式多角弧的首末端点, 即可将开形式的多角弧转化为闭形式的多角弧。这样按照闭形式多角弧的特征集定义, 就可以定义开形式的多角弧的特征集。

由于上述定义的特征集已完全刻画了 3D 空间多角弧的几何形状, 因此, 对于给定的多角弧, 由以上定义就可确定唯一的特征集, 反之, 具有相同如上定义的特征集, 就可确定相同几何形状的多角弧, 其差异仅是一刚体运动, 这一运动可由匹配的连接点确定^[10]。

3 多角弧的匹配

对于给定的两个多角弧 C 和 D,若已建立了一个连接点处的局部直角坐标系,并计算了其本质参数,则 C 和 D 可分别用以下特征集表示:

$$\Gamma_C = \{S_0, S_1, \dots, S_n\}, \Gamma_D = \{T_0, T_1, \dots, T_m\}$$

其中, $S_0, S_1, \dots, S_n, T_0, T_1, \dots, T_m$ 分别为两个多角弧的连接点。

进行匹配时,就要比较 Γ_C, Γ_D 中连接点 S_i 与 T_j 的对应各分量的值,由于只有对应各分量的值完全相等时,对应的两个连接点才能匹配上,因此,对于 S_i 与 T_j 只要有一个对应分量的值不相等,则匹配失败。由此可见,只要比较一个分量的值就足以确定匹配失败的情形,但是对于匹配成功的情形,就必须比较对应的 3 个分量。由于完全相等仅是一个理想状态,而实际的数值往往有污染,因此,应给出容许差,并修改匹配算法,以使得算法更健壮。为了进行匹配失败和匹配成功两种情形的判断,可用下面两个均方差作为测量函数:

$$MSE_1(S_i, T_j) = (S_i^{(\lambda)} - T_{j+k}^{(\lambda)})^2 \quad (1)$$

$$MSE_2(S, T) = \frac{1}{l+1} \sum_{k=0}^l \sum_{\lambda=1}^3 (S_{i+k}^{(\lambda)} - T_{j+k}^{(\lambda)})^2 \quad (2)$$

其中, $S_i^{(\lambda)}$ 为 S_i 的第 λ 个分量, $T_j^{(\lambda)}$ 为 T_j 的第 λ 个分量, $\lambda=1, 2, 3, l=\min\{m, n\}; k=0, 1, \dots, l$ 。

当 $MSE_1(S_i, T_j)$ 大于给定的阈值时,表示比较的两对应多角弧 $S_{i+k}, T_{j+k} (k=0, 1, \dots, l)$ 匹配失败;当 $MSE_2(S, T)$ 小于给定的阈值时,表示比较的两对应多角弧 $S_{i+k}, T_{j+k} (k=0, 1, \dots, l)$ 匹配成功。

由于多角弧的匹配是按照连接点的顺序进行的,因此,连接点选取的顺序不同,其匹配的结果不同。对于二维情形,可以通过按照逆时针或顺时针方向选取,以保证匹配的一致性。对于三维情形,则可以将其中一个多角弧的特征集和另一个多角弧的特征集按照逆序和顺序进行两次匹配。

在对给定的两个多角弧进行匹配时,其计算的局部直角坐标系的时间复杂度为 $O(n)$,其计算的连接点的球面坐标的时间复杂度为 $O(n)$,设 n 为多角弧的连接点数,如果两个多角弧的连接点数皆为 n ,则匹配的时间复杂度为 $O(n^2)$,如果一个多角弧的连接点数为 n ,另一个多角弧的连接点数为 m ,则匹配的时间复杂度为 $O(n \times m)$,但是,如果 S_i 匹配到 T_j ,则 S 与 T 的匹配只需检查 S_{i+k} 与 $T_{j+k} (k=0, 1,$

$\dots, l)$ 是否匹配 ($i+k = (i+k) \bmod (n+1), j+k = (j+k) \bmod (m+1)$)。在这种情形下,匹配时间复杂度与问题的规模呈线性。

4 算法实现

算法步骤如下:

- (1) 输入给定的两个多角弧;
- (2) 对每一个多角弧上的每一个连接点建立局部直角坐标系;
- (3) 对每一个连接点,按以下步骤求其在对应局部直角坐标系中的球面坐标:
 - ① 求连接点在对应局部直角坐标系中的直角坐标,
 - ② 把直角坐标转化成球面坐标;
- (4) 计算匹配均方差 $MSE_1(S_i, T_j)$ 和 $MSE_2(S, T)$, 然后判断其匹配与否;
- (5) 如果匹配,则再计算旋转和平移变换;
- (6) 输出匹配的对对应连接点和旋转、平移变换结果。

5 试验结果

对于上面给出的匹配算法,已在 PC 机上利用 Visual C++ 编程作了模拟数据测试。在测试中,阈值取为 0.01,并作了两个多角弧完全匹配的试验,给定一个闭的多角弧(如图 3(a)所示),其顶点数据如下:

$$S = \{(-13.1, -10.1, -7.1), (-10, -5.5, -15), (3.1, 3.1, -8.1), (7.5, 6.1, -4.1), (13.1, 10.1, 6.1), (1.1, 1.1, 3.1), (2.1, -6.1, 7.1), (5.1, -7.9, 1.1), (12.1, -6.1, 13.1), (20.1, 9.9, 6.7)\}$$

对于上述给定的多角弧绕 y 轴旋转 90° 后平移

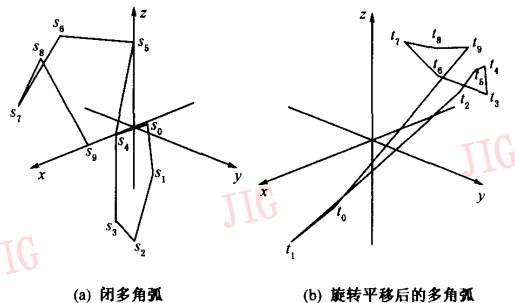


图 3 完全匹配的多角弧

(如图 3(b)所示),对顶点坐标值作微小扰动后的顶点数据如下:

$$T = \{(-0.7, -6.6, -11), (7.2, -1.9, -7.9), (0.3, 6.7, 5.2), (-3.7, 9.7, 9.6), (-13.9, 13.7, 15.2), (-10.9, 4.7, 3.2), (-14.9, -2.5, 4.2), (-8.9, -4.3, 7.2), (-20.9, -2.5, 14.2), (-14.5, 13.5, 22.2)\}$$

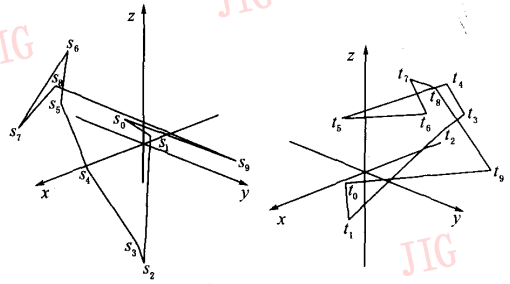
应用匹配算法对以上两个多角弧进行匹配计算,计算得到的 $MSE_2(S_i, T_j)$ 为 0.004 831,表明 S 与 T 完全匹配,算法输出的对应匹配连接点对为 $(s_0, t_0), (s_1, t_1), (s_2, t_2), (s_3, t_3), (s_4, t_4), (s_5, t_5), (s_6, t_6), (s_7, t_7), (s_8, t_8), (s_9, t_9)$ 。

在实验中,对 S 又由旋转平移公式计算得到了精确的 T 中的数据值,其调用匹配算法得到的测量函数值为 0,表明上述算法有一定的抗干扰能力。

对于一个多角弧和另一个多角弧的局部匹配本文也做了试验。给定的开多角弧如图 4 所示,其顶点序列为

$$S = \{(-8.3, -12.1, -2.4), (-10, -8.6, -5), (3.1, 3.1, -8.1), (6.5, 6.1, -4.1), (23.1, 10.1, 6.1), (1.1, -21.1, 3.1), (2.1, -6.1, 7.1), (5.4, -5.7, 1.1), (14.1, -2.1, 13.1), (2.1, 19.9, 4.7)\}$$

$$T = \{(-5.4, -8.5, -6.2), (-2.8, -5, -7.9), (0.3, 6.7, 5.2), (-3.7, 9.7, 8.6), (-13.9, 13.7, 25.2), (-10.9, -17.5, 3.2), (-14.9, -2.5, 4.2), (-8.9, -1.3, 7.5), (-20.9, -1.5, 16.2), (-12.5, 23.5, 4.2)\}$$

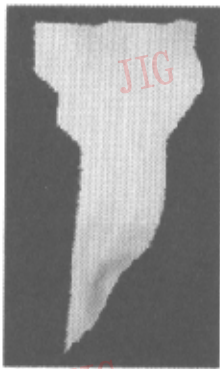


(a) 开的多角弧 (b) 开的多角弧

图 4 部分匹配的开多角弧

调用上面的匹配算法,计算可得 7 个连接点对, $MSE_2(S_i, T_j)$ 为 0.002 1,而算法输出的对应匹配连接点对为 $(s_0, t_0), (s_1, t_1), (s_2, t_2), (s_3, t_3), (s_4, t_4), (s_5, t_5), (s_6, t_6)$ 。

本文算法已进一步已应用到八六三高技术研究发展计划项目“计算机文物复原技术研究”中,在图 5(a)和图 5(b)是用来验证本算法的两幅三维图像。



(a) 部分头部图像



(b) 部分头部图像



(c) 匹配拼接结果

图 5 人头部图像三维匹配的实验结果

匹配时,首先,通过三维输入设备得到匹配曲面的离散数据,并检测得到轮廓线上的数据,然后应用数字曲线的线性拟合方法,对所得的轮廓线数据进行压缩,以提取特征点,并得到轮廓线的多角弧表示。对以多角弧表示的图 5(a)(共有 21 个数据)和图 5(b)(共有 51 个数据)用本文所提算法进行匹配

(在匹配中,采用了缩放因子)。其匹配结果如图 5(c)所示,从其匹配结果可以看出,效果较好。

6 结 论

本文在分析多角弧的几何形状基础上,提出了

连接点的概念,并以连接点作为多角弧的特征集,这样就将两个多角弧的匹配问题转换为两个字符串的匹配问题,由于减少了计算的复杂度,从而使得多角弧的匹配问题变得简单、快速。由于任何曲线都可以用多角弧近似,所以本方法可以用来进行围线问题的匹配,但在图像处理、模式识别和科学计算可视化中,由于得到的是数字曲线,因此,为了使本方法具有实际应用价值,必须将具有最少直线段的最优多角弧逼近到数字曲线,这将是下一步开展的工作。

参 考 文 献

- 1 Douglas R Heisterkamp, Prabir Bhattacharya. Matching 2D polygonal arcs by using a subgroup of the unit quaternion[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 69(2): 246~249.
- 2 黄良明,彭立中,程明德. 利用几何代数进行线段模型匹配和运动估计[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6A(3): 270~274.
- 3 Parsi B, Margalit A, Rosenfeld A. Matching general polygonal arcs[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, Image Understanding, 1991, 53(2): 227~234.
- 4 Theodosios Pavlidis. The use of a syntactic shape analyzer for contour matching[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1979, 1(3): 307~310.
- 5 Ross Beveridge J, Riseman Edward M. How easy is matching 2D line models using local search? [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(6): 564~579.
- 6 Zhan Zheng-you. Estimating motion and Structure from Correspondences of line Segments between two perspective Image[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(12): 1129~1139.
- 7 Shen Xin-quan, Palme Philr. Uncertainty propagation and the matching of junction as feature groupings[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(12): 1381~1395.
- 8 Eyal Kishon, Trevor Hastie, Haim Wolfson. 3-Dcurve matching using splines[J]. Journal of Robotic Systems, 1991, 8(6): 723~743.
- 9 Mather A, Farhad Kamangar. Planar curve representation and matching [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 6(2): 167~174.
- 10 Wang Guo-jin, Wang Guo-zhao. Computer aided geometric design [M]. Beijing: China Higher Education press, Verlag Berlin Heidelberg; Springer press, 2001.



茹少峰 1962年生,1985年获西北大学数学系理学学士学位,1992年获西北大学数学系理学硕士学位,现为西北大学计算机系博士研究生,副教授。主要研究方向为数字图像处理和科学计算可视化。



王晓强 1977年生,2000年获西北大学数学系理学学士学位,现为西北大学计算机系硕士研究生。主要研究方向为计算机图形学和计算机辅助设计。



周明全 1954年生,教授,博士生导师。主要研究方向为计算机图形学、数字图像处理、科学计算可视化。