

# 基于遗传算法的曲面匹配

王 坚 周来水 张丽艳 朱延娟

(南京航空航天大学 CAD/CAM 工程研究中心, 南京 210016)

**摘 要** 提出了一种基于遗传算法的曲面匹配算法。该算法构造曲面的有向深度图像,将问题由3维转化到2维,通过图像的比较来获得曲面的匹配误差。由匹配误差值得到适应度值,使用遗传算法对曲面的匹配位置在7维空间中进行寻优,得到最优匹配。该算法稳定、高效。

**关键词** 曲面匹配 遗传算法 有向深度图像

**中图分类号**: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)04-0695-05

## Surface Matching Based on Genetic Algorithm

WANG Jian, ZHOU Lai-shui, ZHANG Li-yan, ZHU Yan-juan

(Research Center of CAD/CAM Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** A surface matching algorithm based on genetic algorithm is proposed. By constructing the oriented depth images for each surface, a problem in 3D is transformed into a 2D problem. This algorithm calculates the matching error through image comparison, uses the genetic algorithm to optimize the matching error within the 7-dimension space, and obtains the optimal match. The algorithm is stable and efficient.

**Keywords** surface match, genetic algorithm, oriented depth image

## 1 引 言

曲面匹配是计算机视觉、模式识别、模型拼合中的基本问题,有着重要的理论价值和实践意义,国内外学术界对此展开了广泛的研究。综合而言,其大致可以分为3类。

### (1) 使用曲面的原始数据

原始数据没有经过计算提炼,根据原始数据计算曲面之间的最优匹配,最大限度和最大精度地利用了数据。迭代最近点(ICP)方法<sup>[1]</sup>,通过迭代找到曲面的最佳匹配,每次迭代中采用最小二乘法计算最优解,该方法具有单调收敛性,但易得到局部最优解。文献[2]分开处理旋转变换和平移变换,将3维旋转空间栅格化,对栅格点上的旋转变换进行得分计算,利用聚类分析求得最优旋转变换,继而得到

最优平移变换。文献[3]、[4]使用空间运动学的原理和平方距离函数对曲面的空间位置进行迭代优化,得到最佳匹配。

(2) 使用曲面的局部形状标签和几何哈希算法  
文献[5]使用网格点的平均曲率和法向量作为无向脚标和有向脚标,计算对应曲面间的匹配点对候选列表,使用几何哈希算法对列表进行投票,得到最优变换。文献[6]基于曲率分析的曲面片形状划分方法和几何哈希方法相结合,提出一种通用的空间曲面匹配算法。

(3) 使用曲面的整体形状标签和平面图像匹配算法

文献[7]采用最小能量化的协调映射得到3维曲面的平面图像作为整体的形状标签,将3维曲面的形状信息映射到图像上,利用平面图像的匹配算法计算最优匹配。文献[8]提出了一种3维考古碎片的拼合

基金项目:国家自然科学基金项目(60273097);高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划(2001)

收稿日期:2005-09-06;改回日期:2005-11-18

第一作者简介:王坚(1979~),男。现为南京航空航天大学航空宇航制造工程专业博士研究生。主要研究方向为模式识别和形状匹配。E-mail:wangjiannuaa@163.com

算法,使用了 Z-buffer 算法,采用模拟退火随机算法进行匹配位置寻优。文献[9]使用 Spin 图像作为曲面的形状标签,利用图像算法计算可匹配度,根据对应点的匹配误差,采用最小二乘法得到最优匹配。

本文采用遗传算法进行曲面匹配。匹配误差的计算使用整体形状标签,首先确定待匹配曲面的相对空间位置关系,也就是说建立 7 维空间,并将 7 维空间进行染色体编码。然后设置投影环境,构造两个曲面的有向深度图像,通过比较图像来计算曲面之间的匹配误差,将匹配误差映射到适应度。算法的核心是使用遗传算法进行在 7 维空间内匹配位置的寻优来得到最小匹配误差(即最大适应度值),完成曲面的最优匹配。

## 2 匹配误差的计算

### 2.1 有向深度图像

给定一个方向,将曲面的正面沿着该方向进行正投影到某个平面,各投影点的值为曲面上的点到平面的距离,这个曲面投影定义为曲面的有向深度图像,简称深度图像或图像。在具体的实现中,深度图像的值由投影参数决定,如图 1 所示。

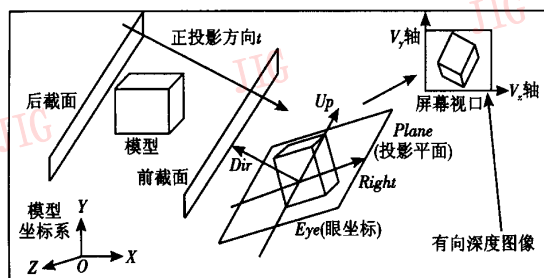


图 1 有向深度图像的投影设置

Fig. 1 Rejection set up for the oriented depth image

投影坐标系为眼坐标 Eye、坐标轴 Right, Up, Dir 构成的左手系。正投影方向  $t$  与 Dir 方向相反。投影窗口是位于投影平面 Plane 内的矩形窗口,曲面模型将被投影到该窗口内,使用窗口视口变换矩阵将投影窗口映射到屏幕视口成为深度图像。图像的各点值为深度值,深度值有个范围,一般为  $[0, 1]$ 。本文算法中深度图像的产生提取都使用 OpenGL<sup>[10]</sup> 实现。

### 2.2 匹配误差

匹配误差用来衡量两个曲面在当前相对位置下

的匹配程度,由两个深度图像上的对应点来计算。设视口宽  $w$ ,高  $h$ ,则相应的深度缓存矩阵  $d$  为  $w$  列, $h$  行,矩阵中的元素为  $d^k(i, j)$ ,  $(1 \leq i \leq w, 1 \leq j \leq h, k \in \{1, 2\})$ ,一次匹配误差的计算需要分别得到两个待匹配曲面的深度图像。在匹配的过程中,曲面处于面对面的状态,故深度图像的对应点应沿着轴  $V_x = w/2$ (也就是屏幕视口的垂直中线)对称。如图 2 所示为两个完全匹配图像的对应点关系。 $Q_1$  和  $P_1, Q_2$  和  $P_2, Q_3$  和  $P_3, Q_4$  和  $P_4$  是对应的匹配点。图 2(a)中坐标为  $(i, j)$  的点在图 2(b)中的对应点坐标为  $(w - i, j)$ 。

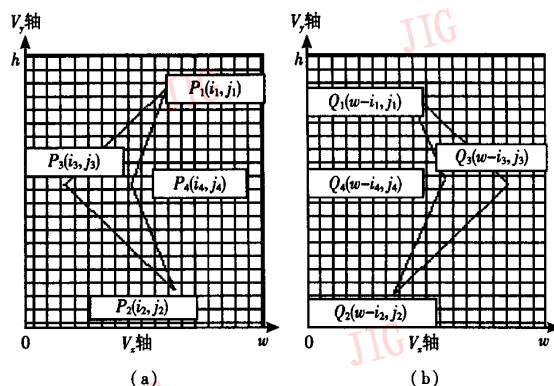


图 2 两个匹配图像的对应关系

Fig. 2 Correspondence of two image

匹配误差  $\varepsilon$  计算如下:

$$\varepsilon = \sum_{1 \leq i \leq w, 1 \leq j \leq h} \left[ |4d^1(i, j) - (d^1(i+1, j) + d^1(i-1, j) + d^1(i, j+1) + d^1(i, j-1))| + |4d^2(w-i, j) - (d^2(w-i-1, j) + d^2(w-i+1, j) + d^2(w-i, j+1) + d^2(w-i, j-1))| \right]$$

式(1)使用图像上某点的 4 邻域,计算二阶差分,该式与曲面到投影平面的距离无关,而与距离差有关,凸点的二阶差分为正,凹点的二阶差分为负。在完全匹配的情况下,两幅图像中所有对应点的二阶差分正负相抵,匹配误差为 0。

### 2.3 匹配寻优空间的建立

给定两个曲面模型  $Obj_1, Obj_2$ ,以各自的质心为原点建立局部坐标系  $[O_1; X_1, Y_1, Z_1], [O_2; X_2, Y_2, Z_2]$ 。曲面模型相对于各自的局部坐标各有 6 个自由度,然而为确定相对空间位置则仅需要 7 个自由度,它们分别是  $Obj_1$  绕局部坐标系中  $X_1, Y_1, Z_1$  轴的旋转自由度  $\theta_1, \varphi_1, \rho_1$ ,沿  $X_1, Y_1$  的平移自由度  $x_1, y_1, Obj_2$  绕局部坐标系中  $X_2, Y_2$  轴的旋转自由度  $\theta_2,$

$\varphi_2$ 。由这7个自由度张成一个7维空间  $S^7 \subset R^7$ ,  $S^7$  包含了  $Obj_1, Obj_2$  之间的所有相对空间位置,  $S^7$  中的点坐标标记为  $t = [\theta_1, \varphi_1, \rho_1, x_1, y_1, \theta_2, \varphi_2]$ 。于是, 对于  $Obj_1, Obj_2$  分别使用两个变换序列  $M_1, M_2$ 。

$$M_1 = T_{t'} R_{z, \rho_1} R_{x, \theta_1} R_{y, \varphi_1} \quad (2)$$

$$M_2 = R_{x, \theta_2} R_{y, \varphi_2} \quad (3)$$

其中变换顺序为自右向左依次进行, 也就是左边的变换最后进行。  $R_{y, \varphi_1}$  是绕局部  $Y_1$  轴旋转  $\varphi_1$  度,  $R_{x, \theta_1}$  是绕局部  $X_1$  轴旋转  $\theta_1$  度,  $R_{z, \rho_1}$  是绕局部  $Z_1$  轴旋转  $\rho_1$ ,  $T_{t'}$  是沿局部  $X_1, Y_1$  轴的平移矩阵, 平移向量为  $t'$ 。  $M_2$  的情况类似。图3为曲面空间位置关系。

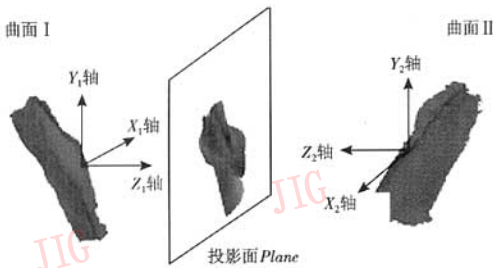


图3 曲面的相对位置关系  
Fig.3 The relation of two surface

### 3 匹配寻优

#### 3.1 遗传算法

##### 3.1.1 基本遗传算法

对2.3节中建立的7维空间进行寻优, 若采用穷举法, 则在有限的时间里只能搜索到部分空间。本文选择遗传算法来进行寻优。遗传算法<sup>[11]</sup>是基于自然选择和基因遗传学原理的一种群体寻优的搜索算法, 特别适合于处理传统搜索方法难于解决的复杂非线性问题, 获得全局最优解。采用的遗传算法基本流程如图4。

##### 3.1.2 编码和译码

用遗传算法解曲面匹配问题, 首先要进行染色体的编码和解码。采用定长染色体串对7维向量进行编码解码, 但各分量不是采用均长的染色体片断, 而是根据各自的搜索空间大小来设置长度。

表1中的  $R_{max}$  为两个曲面各自的包围球半径中的较大值。染色体在计算机中的具体实现以 bit 串的形式存在。本文的染色体共 54 比特, 使用 unsigned int 作为分配空间的单位, 54 比特共占用

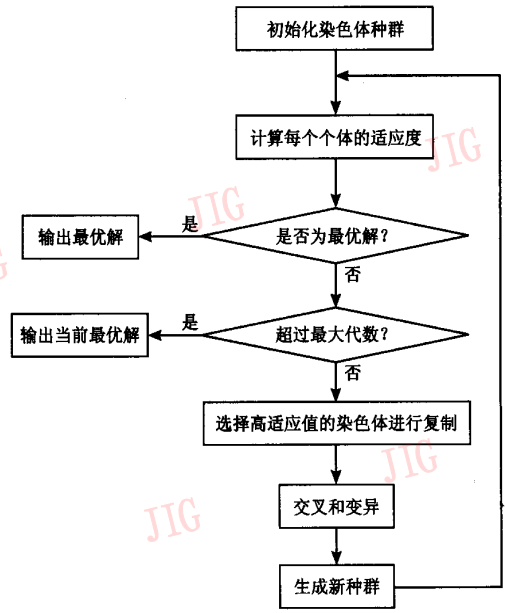


图4 遗传算法流程图  
Fig.4 Flow chart of genetic algorithm

$4[(54 + 8 \text{sizeof}(\text{unsigned int}) - 1) / 8 \text{sizeof}(\text{unsigned int})]$  个字节。变量  $U$  与染色体  $u$  的编码解码公式为

$$\text{编码: } u = \frac{U - \text{Min}}{\text{Max} - \text{Min}} \cdot (2^L - 1) \quad (4)$$

$$\text{解码: } U = \frac{u \cdot (\text{Max} - \text{Min})}{2^L - 1} + \text{Min} \quad (5)$$

表1 染色体的编码和解码

Tab.1 Encoding and Decoding of chromosome

分量	最大值 (Max)	最小值 (Min)	染色体(与最大值对应)	染色体(与最小值对应)	长度 $L$ (bit)
$\theta_1$	$5 \times \pi / 180$	$-5 \times \pi / 180$	111111	000000	6
$\varphi_1$	$5 \times \pi / 180$	$-5 \times \pi / 180$	111111	000000	6
$\rho_1$	$\pi$	$-\pi$	1111111111	000000	10
$x_1$	$R_{max} / 8$	$-R_{max} / 8$	1111111111	000000	10
$y_1$	$R_{max} / 8$	$-R_{max} / 8$	1111111111	000000	10
$\theta_2$	$5 \times \pi / 180$	$-5 \times \pi / 180$	111111	000000	6
$\varphi_2$	$5 \times \pi / 180$	$-5 \times \pi / 180$	111111	000000	6

##### 3.1.3 适应度的计算

适应度用来区分群体中个体的好坏, 适应度越大, 个体越好。匹配误差  $error$  越大, 适应度越小, 故本文采用  $fitness = 1/e (e \geq 0, fitness \geq 0)$  来计算适应度值。

### 3.1.4 遗传算子

遗传算子包括选择、杂交和变异。选择的目的是将优化的个体直接遗传到下一代或通过配对交换产生新的个体再遗传到下一代。本文使用赌轮法。该方法的基本原则是个体被选择的概率和其适应度成正比。杂交操作将两个个体进行配对,将某些基因进行交换,生成新的个体。本文采用两点交换法。变异操作使得遗传算法具有局部的随机搜索能力和维持群体的多样性。随机选择 7 个位置以一定的概率进行随机逆转变异。

### 3.2 曲面匹配

曲面匹配的具体算法过程如下:

(1) 局部坐标系的建立和对应的投影环境的设置。参见 2.1 节和 2.3 节。投影环境根据局部坐标系建立。曲面 I 投影环境中  $Up$  轴设为  $Y_1$  轴,  $Right$  轴设为  $X_1$  轴,  $Dir$  轴设为  $-Z_1$  轴,  $Eye$  坐标为  $O_1 + 1.3R_{max}Z_1$ 。曲面 II 投影环境中  $Up$  轴设为  $Y_2$  轴,  $Right$  轴设为  $X_2$  轴,  $Dir$  轴设为  $-Z_2$  轴,  $Eye$  坐标为  $O_2 + 1.3R_{max}Z_2$ 。前后截面距离投影平面  $Plane$  的距离分别为  $0.025$  和  $2.5R_{max}$ , 以保证曲面的整体在视立方体内。为了使两个物体在视平面上得到的图像分辨率一致, 投影平面  $Plane$  到两个待匹配曲面质心(局部坐标原点)的距离必须相等, 均为  $1.3R_{max}$ , 投影的窗口大小需要一致, 屏幕视口大小也需要一致。本文使用的屏幕视口分辨率为  $128 \times 128$ (深度图像分辨率与屏幕视口分辨率一致)。

(2) 遗传算法初始化。设置群体大小、最大代数、复制概率、杂交概率、变异概率等遗传算法控制参数。所有的初始个体随机设置, 个体染色体各比特位上 0 和 1 的设置概率各为 50%。

(3) 遗传算法寻优。基本过程参见图 4。得到最优染色体。

(4) 将最优染色体还原到 7 维向量  $t_{best}$ , 然后进行位置变换。 $t_{best}$  中的各分量分别作用于曲面 I、II 的原始位置,  $\theta_1, \varphi_1, \rho_1, x_1, y_1$  作用于曲面 I,  $\theta_2, \varphi_2$  作用于曲面 II。

(5) 使用坐标变换, 将曲面 I 的局部坐标系对齐于曲面 II 的局部坐标系。对齐后的曲面 I、II 的深度图像位置将以  $V_x = w/2$  轴对称, 如图 2 所示。

(6) 曲面 I 相对于对齐后的局部坐标系, 绕  $Y_2$  轴旋转  $180^\circ$  成匹配状态。由图 2 可知最优匹配的情况下, 曲面 I、II 相对于对齐后的坐标系  $Y_2$  轴对称。翻转  $180^\circ$  后两者处于匹配状态。

## 4 应用实例与分析

例 1 是待拼合的砖块的两个断面。例 2 是待拼合的陶瓷罐碎片的两个断面。例 1 和例 2 均是从实际测量的 3 维模型中提取而得的不规则曲面。图 5 是例 1 和例 2 的初始位置。图 6 和图 7 是最后得到的最优匹配, 因为叠合时渲染图不易看清匹配情况, 所以提供了轮廓线图。例 1 中的两个曲面比较宽大, 例 2 中的两个曲面比较狭长, 本文算法对这两种情况均得到了很好的匹配, 验证了算法的鲁棒性。

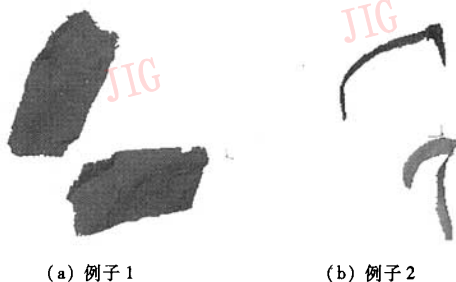


图 5 初始位置

Fig. 5 Initial pose

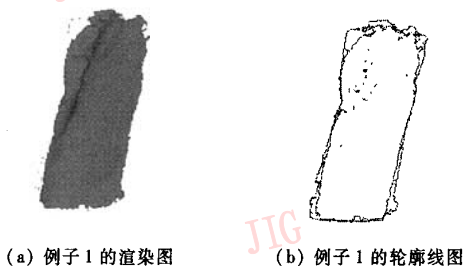


图 6 例子 1 的最优匹配位置

Fig. 6 The best matching pose for example 1

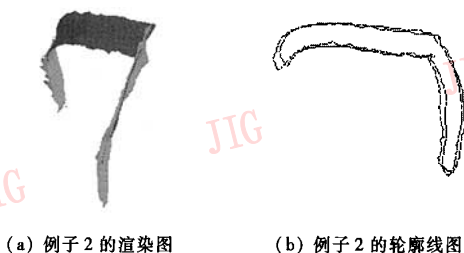


图 7 例 2 的最优匹配位置

Fig. 7 The best matching pose for example 2

实验的匹配性能分析如表 2 和图 8 所示。

表2 匹配性能分析1  
Tab.2 Performance analysis 1

实例点数	功率 (%)	最优 匹误差	收敛时间 (s)	
			本文算法	文献[5]算法
砖块断面 (3 034, 3 890)	97	0.003	9	23
陶瓷罐断面 (5 400, 4 501)	95	0.009	11	45

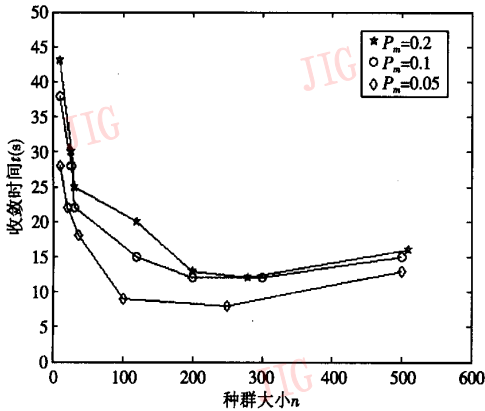


图8 匹配性能分析2  
Fig.8 Performance analysis 2

由表2可知,与文献[5]算法相比,本文的算法效率更佳。表2中选择的遗传算法的控制参数为种群200,代数10,复制概率0.7,交叉概率0.3,变异概率0.05。

遗传算法的控制参数对匹配性能具有影响。但是全部试验各种参数配置显然是不现实的。这里使用固定复制概率的方法来考察种群大小和变异概率的变化对于性能的影响。使用陶瓷罐断面进行实验,结果如图8。可见种群数  $n$  较大时性能较好,但是超过了某一阈值后性能反而下降,原因是种群数太大,需要的计算量增长速度超过了收敛速度。从图8也可看出变异概率  $p_m$  的增加会导致匹配性能的下降。

### 5 结 论

3 维曲面的匹配具有重要的理论价值和实际意义。本文提出用遗传算法进行3 维曲面的匹配。使用有向深度图像,将3 维曲面的匹配误差的计算问

题转化为2 维图像比较问题。算法中深度图像的计算利用了图形硬件的性能,速度较快。通过将7 维空间进行编码,使用遗传算法的寻优特性,进行7 维空间寻优,完成匹配误差的最小化,达到全局极值。算法稳定高效。

### 参考文献 (References)

- 1 Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239 ~ 256.
- 2 Helmut Potmann. Geometry and convergence analysis of registration for algorithms of 3D Shapes [R]. Institute of Geometry, Vienna University of Technology, 2004.
- 3 Helmut Pottmann, Stefan Leopoldsder, Michael Hofer. Registration without ICP[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004, 95(1): 54 ~ 71.
- 4 Barequet G, Sharir M. Partial surface and volume match in three dimension[J]. IEEE Transactions on Machine Intelligence, 1997, 19(9): 929 ~ 948.
- 5 Barequet G, Sharir M. Partial surface matching by using directed footprints [J]. Computational Geometry: Theory and Applications, 1999, 12(1-2): 45 ~ 62.
- 6 Pan Xiao-lin, Zhang Li-yan, Jie Yu-wen, et al. Algorithm for three-dimensional partial surface matching[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(5): 544 ~ 549. [潘小林, 张丽艳, 揭裕文等. 三维曲面部分匹配的算法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(5): 544 ~ 549.]
- 7 Zhang D M, Hebert M. Harmonic maps and their applications in surface matching[A]. In: IEEE Conference of Computer Vision and Pattern Recognition [C], New York, USA, 1999: 524 ~ 530.
- 8 Papaioannou G, Karabassi E A, Theoharis T. Reconstruction of three-dimensional objects through matching of their parts [J]. IEEE Transactions on PAMI, 2002, 24(1): 114 ~ 124.
- 9 Andrew Edie Johnson, Martial Hebert. Surface registration by matching oriented points [A]. In: Proceedings International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling [C], Ottawa, Canada, 1997: 121 ~ 128.
- 10 Dave S. OpenGL Reference Manul [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001. [Dave S 著. OpenGL 参考手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.]
- 11 Wang Xiao-ping, Cao Li-min. Genetic Algorithm-theory, application and software implementation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. [王小平, 曹立明著. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.]