

亿,通过反复调整乐队中各乐器的音调,最终达到一个美妙的和声状态。和声搜索算法已经成功应用于结构设计^[6]、环境参数校正^[7]、交通路径^[8]、配水问题^[9]、管道敷设和旅行商问题等组合优化问题中。算法基本思想是将乐器类比于优化问题中的解分量,各乐器声调的和声类比于优化问题的解向量,评价类比于目标函数。

2.2 自适应微调扰动和声搜索算法

和声搜索算法能够处理过约束和欠约束的问题,并具有算法设计简单、收敛迅速等优点,但作为一种启发算法,当解空间过大时很容易陷入局部最优解。由于解几何约束问题要求求解速度快,求解值与全局最优解充分接近,本文提出了一种自适应微调扰动和声搜索拉斯维加斯算法。自适应微调扰动和声搜索算法的流程如图 1 所示。

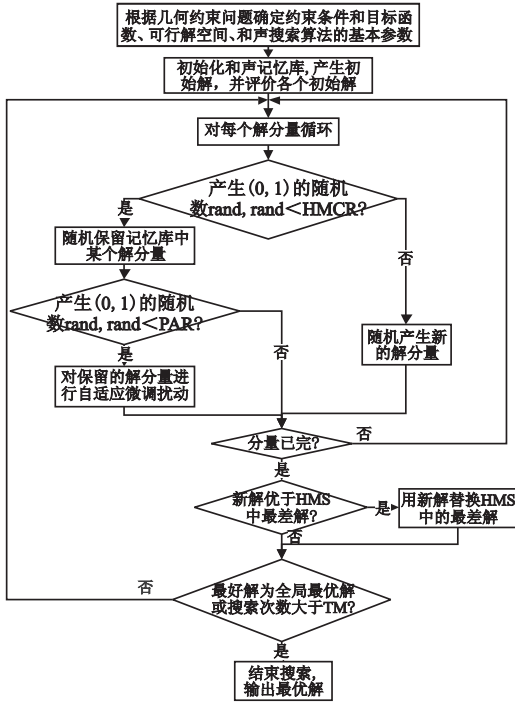


图 1 自适应和声搜索算法流程图

自适应微调扰动和声搜索算法的具体步骤如下:

a) 优化问题初始化。首先根据几何约束问题确定约束条件和目标函数,并确定每个解分量的可行解空间,然后确定和声搜索算法的基本参数:(a)和声记忆库大小(HMS),即和声记忆库中解的个数;(b)和声记忆保留概率(HMCR),即在产生新解时从和声记忆库中保留解分量 x_i 的概率大小;(c)记忆扰动概率(PAR),即每次对部分解分量进行一定的微调扰动的概率大小;(d)最大迭代次数(TM),即搜索的最大次数,作为搜索的终止条件。

b) 和声记忆库初始化。随机产生 HMS 个几何约束问题初始解,并存储到和声记忆库中,计算各个解的评价值。解矩阵如式(3)所示。其中: x_i^m 为第 m 解向量 x^m 的第 i 个解分量, $f(x^m)$ 为目标函数, x^{HMS} 用于存储新解。

$$\begin{bmatrix} x_0^0 & x_1^0 & \cdots & x_{n-1}^0 & f(x^0) \\ x_0^1 & x_1^1 & \cdots & x_{n-1}^1 & f(x^1) \\ \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots \\ x_0^{HMS} & x_1^{HMS} & \cdots & x_{n-1}^{HMS} & f(x^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

c) 产生新解。每一次产生一个新解 x^{HMS} ,其中 x_i^{HMS} 的解

分量主要通过以下步骤产生:

(a) 保留记忆库中的解分量。以一定的概率(HMCR)对和声记忆库中的解分量进行保留,即解 x^{HMS} 的分量来源于记忆库中解向量的分量。

$$x_i^{HMS} \leftarrow x_i^{HMS} \in \{x_i^0, x_i^1, \dots, x_i^{HMS-1}\} \text{ 概率为 HMCR} \quad (4)$$

(b) 自适应微调扰动。首先根据和声库中的最好解 x_{Best} 确定微调扰动幅度 $s = \sqrt{f(x_{Best})}$ 。对于步骤(a)保留下来的解分量按照一定的概率(PAR)进行扰动。扰动的原则是把被选中解分量加上一个绝对值小于 s 的随机数 r 即

$$x_i^{HMS} \leftarrow x_i^{HMS} + r \text{ 的概率为 HMCR} \times \text{PAR} \quad (5)$$

微调扰动幅度 s 具有自我调节、自我适应性。随着搜索次数的增加, x_{Best} 会越来越接近全局最优解,其评价值和微调扰动幅度 s 也会越来越小,全局最优解的搜索范围也会随之收缩,全局最优解的搜索速度也会越来越快。

(c) 随机产生新解分量。从可行解空间以概率 $1 - \text{HMCR}$ 随机选择产生新解 x^{HMS} 分量。

$$x_i^{HMS} \leftarrow x_i^{HMS} \in [L_i^l, L_i^u] \text{ 概率为 } 1 - \text{HMCR} \quad (6)$$

d) 利用目标函数评价新解。如果新解 $x^{HMS} = \{x_0^{HMS}, x_1^{HMS}, \dots, x_{n-1}^{HMS}\}$ 的评价值和和声记忆库中最差的评价值好,则用新解替换最差解,得到新的和声记忆库。

e) 重复步骤 c) d) 直到和声库中的最好解满足全局最优解的要求或达到最大搜索次数,结束循环,退出搜索,输出最优解。

2.3 和声搜索的拉斯维加斯算法

自适应微调扰动和声搜索算法不能保证一定能搜到全局最优解,可能会收敛于局部最优解,但由于搜索到全局最优解的概率比较高,可采用拉斯维加斯算法搜索多次调用自适应微调扰动和声搜索算法直至搜索到全局最优解。拉斯维加斯算法是一种概率算法,其特点是不会得到不正确解,但有时拉斯维加斯算法找不到解,找到正确解的概率随着其计算时间的增加而提高。和声搜索的拉斯维加斯算法 LVHS 描述如下:

```
void LVHS()
do { HS(); }
while( 最优解不是全局最优解 )
输出全局最优解;
```

2.4 和声库的解的使用

如果几何约束问题是良约束或过约束有解的,则选择最好解;如果几何约束问题是欠约束的,则和声库中符合精度的所有解都可以用做几何约束问题的解。

3 实例分析

3.1 问题描述

在基于特征造型系统的 CAD 中,相切约束比较常见,因此本文以求三角形的内切圆为例进行实例分析。对于三角形内切圆问题的几何约束(E, C)可以描述为 $E = \{ \text{triangle}_1, \text{circle}_1 \}$,而圆 circle_1 的参数可以描述为 $X = \{ x_i \mid x_i \in [0, 1000], 0 \leq i \leq 2 \}$ 。其中 x_0 为圆的横坐标, x_1 为圆的纵坐标, x_2 为圆的半径。设三角形 triangle_1 的顶点为 A、B、C,顶点坐标分别为 $(x_A, y_A), (x_B, y_B), (x_C, y_C)$ 为已知条件,则三角形内切圆的代数方程组为: $d_{AB} = d_{BC} = d_{CA} = x_2$ 。其中 d_{AB}, d_{BC}, d_{CA} 为圆心

(x_0, x_1) 到三边的距离。于是 E 上的几何约束 C 可以描述为:
 $C = \{d_{AB} - x_2 = 0; d_{BC} - x_2 = 0; d_{CA} - x_2 = 0\}$ 。圆心 (x_0, x_1) 到 AB 边的距离可由公式 $d_{AB} = |k(x_0 - x_A) - x_1 + y_A| / \sqrt{1 + k^2}$ 求得,其中 $k = (y_B - y_A) / (x_B - x_A)$ 。同理可以求得 d_{BC} 、 d_{CA} 。目标函数可以描述为

$$f(X) = (d_{AB} - x_2)^2 + (d_{BC} - x_2)^2 + (d_{CA} - x_2)^2 \quad (7)$$

3.2 实验分析

3.2.1 和声搜索算法基本参数和微扰扰动方法对和声搜索算法性能影响分析

和声搜索算法新解分量的产生有三种方式,即保留和声库中的解分量、随机从可行解空间产生和对从和声库中保留的解分量进行微扰扰动,能够改变的分量产生方式只有微扰扰动。微扰扰动方法的好坏直接关系到和声搜索算法的性能。本文将自适应微扰扰动与变异微扰扰动的和声搜索算法的性能相比较,可以看到微扰扰动方法的重要性。变异微扰扰动是对保留下来的解分量以一定概率 PAR 加上一个绝对值小于某一数值(本例取可行解空间的 1%)的随机数 r 。 $x_i^{HMS} \leftarrow x_i^{HMS} + r$ 的概率为 $HMCN \times PAR$ 。

1) 和声库大小对和声搜索算法的影响

和声库的大小改变时,对自适应微扰扰动和变异微扰扰动的和声搜索算法的一致性收敛(即和声库中的所有解收敛于同一个解)搜索次数的均值和方差如图 2 和 3 所示。很明显,和声搜索算法一致性收敛于全局最优解的搜索次数与 HMS 成正比,即 HMS 越大,搜索次数越多,自适应微扰扰动要比变异微扰扰动的和声搜索的一致收敛速度快得多。

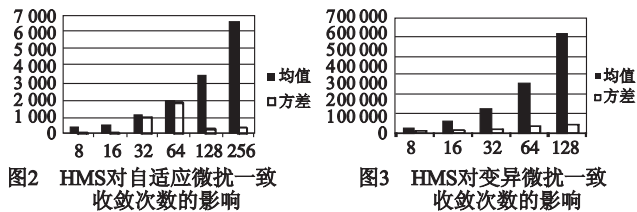


图2 HMS对自适应微扰一致收敛次数的影响

图3 HMS对变异微扰一致收敛次数的影响

和声库的大小对陷入局部最优解的概率影响如图 4 所示。显然,陷入局部最优解的概率与 HMS 大小成反比,即 HMS 越大,收敛于局部最优解而非全局最优解的概率越小。自适应微扰扰动的和声搜索算法跳出局部最优解的能力要强于变异微扰扰动的和声搜索算法。

局部最优解的存在是几何约束本身的问题,与评价函数有关,而与和声搜索算法无关,解决收敛于局部最优解问题可采取以下方法:

- a) 精确设置解分量的可行解空间,避免包含局部最优解。例如,本例在用户交互操作过程中,充分发挥用户的能动性,通过鼠标的区域选择操作确定圆心坐标的取值范围,通过鼠标拉伸操作确定圆的半径取值范围。
- b) 选择合适的微扰扰动方法启发搜索,自适应微扰扰动跳出局部最优解的能力要强于变异微扰扰动。
- c) 增大和声库的大小。增大 HMS 能够有效提高搜索到全局最优解的概率,但不能确保一定得到全局最优解。增大 HMS 会增加程序运行时间,因为在和声搜索算法中每次搜索都要查找最差解,虽然可以对和声库中解向量的游标构造跳跃表使查找的时间复杂度变为 $O(\log HMS)$ 级,但算法设计复杂。
- d) 采用拉斯维加斯算法。和声搜索算法一定能够搜索到

最优解,但搜索到的最优解不一定是全局最优解,由于搜索到全局最优解的概率很高,可采用拉斯维加斯算法多次调用和声搜索算法,直至搜索到问题的全局最优解。

2) 变异微扰扰动和自适应微扰扰动和声搜索算法后程搜索能力的比较

表 1 为变异微扰扰动和自适应微扰扰动的和声搜索算法分别运行 5 次后程搜索的次数,参数为($HMS = 8, HMCN = 0.7, PCR = 0.3$)。可以看出,变异微扰扰动和自适应微扰扰动和声搜索算法在评价值为 100 时相差不大,而变异微扰扰动和声搜索后程次数增加很快,尤其评价值 0 是评价值 4 时次数的 6 倍。自适应微扰扰动和声搜索后程次数增加不显著。

表 1 和声搜索后程搜索能力的比较

搜索方法	评价值	1	2	3	4	5	平均值
变异微扰扰动的和声搜索	100	147	137	49	172	322	165
	25	150	138	120	197	348	190
	9	382	478	457	198	349	372
	4	798	1 030	789	246	768	726
	0	808	1 031	6 477	7 546	5 261	4 224
自适应微扰扰动和声搜索	100	137	129	98	85	100	109
	25	142	136	120	114	155	133
	9	143	146	135	128	207	155
	4	154	147	136	168	208	162
	0	285	201	137	213	302	227

3) HMCN 和 PAR 对自适应微扰扰动和声搜索的影响

图 5 为和声库大小为 $HMS = 8, HMCN$ 和 PAR 改变时自适应微扰扰动和声搜索算法搜索到全局最优解搜索次数的均值与方差。可以看出, $HMCN$ 和 PAR 选择对自适应微扰扰动和声搜索算法影响不显著。

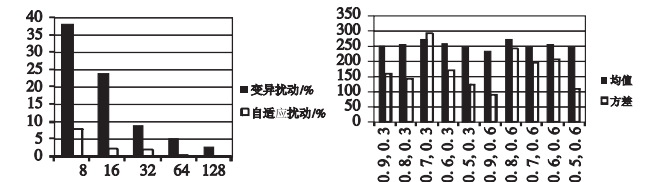


图 4 HMS对陷入局部最优解概率的影响

图5 HMCN和PAR对和声搜索的影响

3.2.2 欠约束问题处理

如果将三角形内切圆问题改为与 AB, BC 两直线相切问题,则问题就变成了欠约束问题。该问题几何约束可描述为 $C = \{d_{AB} - x_2 = 0; d_{BC} - x_2 = 0\}$ 。表 2 为一次自适应微扰扰动和声搜索算法和声库中的数据,和声搜索参数为(16, 0.7, 0.3)。其中 x_0, x_1, x_2, x_3 分别为相切圆的横、纵坐标、半径和评价值。和声库中满足精度要求的解都可以作为问题的解。

表 2 和声库中的数据

序号	x_0	x_1	x_2	x_3	序号	x_0	x_1	x_2	x_3
1	547	403	193	0	9	544	402	195	0
2	536	399	199	0	10	559	407	185	0
3	530	397	204	0	11	549	404	191	0
4	536	400	199	0	12	550	404	190	0
5	545	402	194	0	13	550	404	191	0
6	544	402	194	0	14	559	406	185	0
7	558	406	185	0	15	544	401	194	1
8	558	406	185	0	16	552	405	190	1

4 结束语

本文将和声搜索算法应用到几何约束求解中,提出了一种自适应微扰扰动和声搜索拉斯维加斯算法, (下转第 2779 页)

本方法在孔洞填充领域具有通用性,可填充各种形态孔洞。图 7 给出本方法对其他形态孔洞填充的效果图。

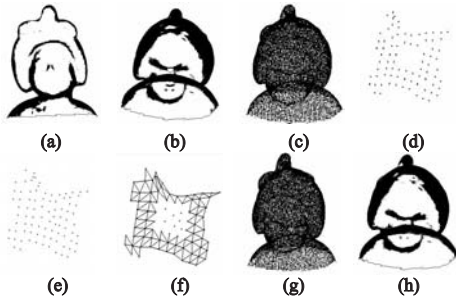


图5 实验效果图

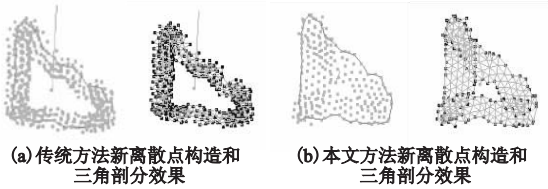


图6 实验2填充效果对比图

表 1 层间联系法与传统方法数据对比

方法	区域内顶点个数	三角片个数	锐角三角片个数	优品率/%
传统填充	372	476	387	81.3
层间联系填充	216	281	249	88.6



图7 本文方法解决其他形态孔洞效果图

本文实验设计的算法及效果显示由 VC6.0 调用 OpenGL 图形库实现。

3 结束语

本文针对三维文物扫描中遇到的绝对盲区问题,提出一种基于层间联系的填充方法。该方法对传统的边界点提取方法、离散点插入方法和三角剖分方法进行了适应性改进。从表 1 中数据可以得出,与传统方法相比,该方法在高效性、准确性、健壮性方面有所提高。

(上接第 2775 页)使和声搜索算法的性能有很大的改进,效果良好。通过实验分析可以看出,和声搜索算法是一种高效的启发式全局搜索算法,该算法能够搜索到最优解,但小概率的会陷入局部最优解。增大和声库的大小能有效地增大搜索到全局最优解的概率,但会降低求解速度;改进微调扰动方法既能增大搜索到全局最优解的概率,又能提高求解速度。

参考文献:

[1] 高小山,蒋鲲.几何约束求解研究综述[J].计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(4):385-396.
 [2] 曹春红,张斌,李文辉.基于牛顿—遗传混合算法的几何约束问题的求解[J].系统仿真学报,2007,19(16):3650-3652.
 [3] 欧阳应秀,唐敏,刘生礼,等.几何约束求解的BFGS-混沌混合算法[J].浙江大学学报:工学版,2005,39(9):1334-1338.
 [4] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. Simulation, 2001, 76(2):

高效性方面,本文采用双向循环链表组织区域内边界点,提高了边界点的查询、添加、删除效率;保存层与层之间的拓扑关系,并利用此关系,减少了区域内顶点个数和三角片个数,并将构造新顶点、三角剖分和三角片优化调整同步进行,一次完成,与分步执行相比,减少了插入点的查询次数。

准确性方面,本文在进行三角剖分的同时对新增三角面片的品质进行改善。根据三角网格的综合改善法^[10],取长补短,结合最小内角最大化和最小权法,在孔洞填充同时进行三角网格的优化调整。以实验 2 为例,本方法优品率率与传统方法相比提高了 7%。

健壮性方面,本文给出的方法是以待填充区域当前最内层为边界构造离散点,在满足层与层的约束条件下进行三角剖分,对于任何形态的孔洞都能修复。从图 7 得出,本方法对于工程应用中出现的同类问题具有适应性。

参考文献:

[1] 张浩,岳玮宁,王楠,等.三角网格模型的各向异性孔洞修补算法[J].计算机辅助设计与图形学报,2007,19(7):893-897.
 [2] 杜估,张丽艳,王宏涛,等.基于径向基函数的三角网格曲面空洞修补算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(9):1976-1980.
 [3] PEREZ E, SALAMAUCA S, MERCHAN P. A robust method for filling holes in 3D meshes based on image restoration[C]//Proc of the 10th International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS). [S. l.]:Springer-Verlag, 2008:742-751.
 [4] LI Gen, ZI Xiu, YUAN San. An algorithm for filling holes complex holes in reverse engineering[J]. Engineering with Computers, 2008,24(2):119-125.
 [5] 成欣.三维曲面破洞技术研究[D].西安:西北大学,2006.
 [6] 刘燕武,耿国华,周成全.轮廓对称轴法在缺损颅骨修复中的应用[J].计算机工程与应用,2010,46(8):156-159.
 [7] 李磊.基于CT断层的颅骨破洞修复技术研究[D].西安:西北大学,2008.
 [8] 陈宏明,周久兵,刘胜兰.基于曲率的三角网格孔洞修补算法的研究[J].淮阴工学院学报,2004,13(5):32-34.
 [9] 王勇,马立元,王忠强.四元数法在计算机图形中的应用[J].军械工程学院学报,2001,13(2):48-50.
 [10] 王群,李爱平,马淑梅.局部网格狭长三角形的品质改善及其实现[J].同济大学学报:自然科学版,2004,32(11):1508-1511.
 [5] 刘生礼,唐敏,董金祥.两种空间约束求解算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(8):1011-1029.
 [6] SAKA M P. Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm[J]. Journal of Constructional Steel Research,2009,65(1):36-43.
 [7] KIM J H, GEEM Z W E S. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using harmony search[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001,37(5):1131-1138.
 [8] CELYAN H, HALDENBILEN H S, BASKAN O. Transport energy modeling with meta-heuristic harmony search algorithm, an application to Turkey[J]. Energy Policy,2008, 36(7):2527-2535.
 [9] AYZAZ M T. Application of harmony search algorithm to the solution of groundwater management models[J]. Advances in Water Resources,2009,32(6):916-924.