

遗传算法在建筑概念设计中的应用*

刘 弘⁺, 李 焱

(山东师范大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250014)

Application of Genetic Algorithm in Architectural Conceptual Design

LIU Hong⁺, LI Yan

(School of Information Science and Technology, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-531-86180514, Fax: +86-531-86180514, E-mail: hongliu@sdu.edu.cn

Liu H, Li Y. Application of genetic algorithm in architectural conceptual design. *Journal of Software*, 2006,17 (Suppl.):161-168. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/s161.htm>

Abstract: A genetic algorithm for supporting architectural conceptual design is presented in this paper. The algorithm adopts mathematical expression binary tree based coded approach, corresponding crossover and mutation operations, and the combination of objective function and interaction with designers for getting fitness values to generate simple curves. The selected shapes are dealt with via 3D visualizing technology to form entities. These generative 3D entities are put together with components designed by designers, then are classified and saved in a component database. The complex configuration design is implemented via combination of different components that come from component base while the combinational scheme is formed by binary coded genetic algorithm. The process of algorithm is illustrated by an architectural design example.

Key words: CAD; genetic algorithm; conceptual design; creative design

摘 要: 介绍了一种可以应用于建筑概念设计的遗传算法.该算法采用基于数学表示二叉树结构的编码方法,以及相应的交叉、变异操作,目标函数及人机交互相结合的适应度值确定方法,生成简单的曲线.选定的曲线经过三维可视化处理形成实体.这些生成的三维实体与人工设计的构件一起被分类,然后统一保存到构件库中.通过采用二进制编码的遗传算法,生成组合方案,组合构件库的构件,形成比较复杂的外观造型.以一个建筑外观设计为例,介绍了算法的执行过程.

关键词: 计算机辅助设计;遗传算法;概念设计;创新设计

随着信息技术的发展,世界经济格局发生了巨大变化,逐步形成了一个统一的一体化市场,市场竞争日趋激烈,社会的消费观念也不断发生变化,产品的功能已不再是消费者决定购买的最主要因素.产品的创新性、外观造型、宜人性、环保性等因素愈来愈受到重视,在竞争中占据突出地位.

这种趋势促使企业在着手进行新产品开发的同时把面向产品的创新性、外观造型、人机工程等的设计也

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.69975010, 60374054 (国家自然科学基金); the Research Fellow Matching Fund Scheme of the Hong Kong Polytechnic University under Grant No.G.Y.Y.35 (香港理工大学研究员基金项目); the Natural Science Foundation of Shandong Province of China under Grant Nos.Y2003G01, Z2004G02 (山东省自然科学基金)

Received 2006-04-15; Accepted 2006-09-11

提到一个新的高度,从而迫切要求对工业设计的研究能有进一步的突破,以提高企业形象、产品设计水平和市场竞争力.创新是工业设计的灵魂.以知识为基础的产品创新竞争是 21 世纪初全球制造业竞争的核心^[1].

概念设计是产品设计过程中体现人的智能并决定产品性能和成本的重要阶段.在概念设计阶段,由于对设计人员的约束相对较少,具有较大的创新空间.传统的 CAD 系统虽能产生复杂、精确和完整的三维造型,但由于其本身并不是为概念设计而开发的,同时缺乏设计方法学的支持,没有体现概念设计的创造性过程,因而基本上是在设计方案基本定型之后的概念化(草图化)绘图工具,而非辅助设计工具.

创新设计是一个产生设计解的认知过程,产生的解必须是新颖的,非常规的,同时又必须满足一定的限制.产品创新中,时间是竞争优势的最终资源,而仅仅依靠人来进行设计,很难满足快速发展的市场需求.因此,探索一种发挥计算机的优势,为设计人员建立一个支持创新设计的环境,已成为社会发展的需要.

本文介绍了一种用进化计算及可视化技术支持建筑概念设计的新方法,该方法已经用于支持创新概念设计的协同设计系统中,系统在山东省及济南市建筑设计研究院进行了应用.实践证明:利用现有的计算方法和环境生成草图及图像,以支持特定领域的创新概念设计,是可以实现的,而且是行之有效的.

1 相关的研究工作

国内外专家学者从不同侧面进行了该领域的研究,并取得了很大进展.

美国密歇根大学的 John Holland 教授在 1975 年出版的经典著作“Adaptation in Natural and Artificial System”^[2]中,首次提出了遗传算法.

牛津大学公共科学院院长 Richard Dawkins 教授致力于生物进化理论的研究,有很多专著^[3,4],其中,在 1986 年出版的“The Blind Watchmaker”^[3]一书中,展示了首个计算机进化设计程序“Blinder Watchmaker”,第一次将计算机界的遗传算法应用于生物形态的进化模拟实验之中.

香港理工大学设计学院院长,英国剑桥大学教授 John Frazer 是计算机辅助建筑设计领域的著名教授,其研究成果对计算机辅助建筑设计的发展起了很大的导向作用.在他的众多成果中^[5,6],”An Evolutionary Architecture. Architectural Association”^[4]成为计算机辅助进化建筑设计的经典读物.主要工作有:

(1) 针对建筑师的人机互动界面设计,建筑师可以直接使用小立方体,像玩积木那样构建形态,其结果会直接反映在计算机的虚拟模型上,然后由计算机进行评估.

(2) 首次提出建筑构件的进化设计.将塔斯干柱式参数化,并基于不同的场合由建筑师来进化出适宜的变形塔斯干柱,这一研究直接引发出后来对于帕拉迪奥母题,典型意大利住宅、中国楼阁式塔等历史建筑构形规律的研究.

(3) 首次将加州自动细胞机应用于建筑形态的有机生长,以最简单的元素立方体,通过赋予生长法则,得到复杂的巨构形态.

澳大利亚悉尼大学设计计算与认知研究中心的 John Gero 教授和他的同事一起,进行了用遗传算法生成建筑平面图的研究,新颖的建筑平面图可以满足多个模糊的限制和目标管理.他们还展示了进化如何通过对着名的建筑风格学习,生成新的建筑物^[7,8].

意大利米兰工艺学院的 Celestino Soddu 教授,自 1985 年以来就致力于生成设计的研究工作,利用计算机模拟技术生成艺术品,如台灯、雕刻等^[9],他在意大利米兰成功地组织了 8 届生成艺术国际会议,对进化计算在建筑设计、工业设计、艺术设计的理论研究及应用方面作了深入的探讨.

伦敦大学的 Peter Bentley 主要研究进化设计与其他应用设计领域的结合问题,有很多成果.其中,“Evolutionary Design by Computers”^[10]首次将世界范围内的计算机辅助进化设计学者的研究成果加以分类总结,较为系统的构建了计算机辅助进化设计的研究框架,并将其划分为四大类,成为该学术领域走向成熟的一个里程碑.

国内也有很多计算机辅助创新设计的研究.浙江大学的潘云鹤校长及他的博士生在创新原理、创新过程的描述模型和计算模型方面做了很多探索性的工作^[11,12].山东师范大学通过与香港理工大学 7 年多的合作研究,

在 John Frazer 教授及唐明晰博士的指导下,在支持创新设计的多 Agent 协同设计环境方面进行了很有意义的研究.开发的原型系统已经结合遗传算法及机器学习技术,生成了各种不同形状的手机、台灯及建筑外观造型^[13-15].

本文研究与该领域已有研究的主要区别是,在遗传算法对计算机辅助建筑设计应用的研究中,采用了一种基于数学表示二叉树结构的遗传算法编码方法,并定义了相应的交叉、变异、选择操作.这种树结构的遗传算法,除了用于数学表示二叉树,以生成二维草图以外,还作用于产品树,以生成装配布局.复杂建筑体通过组装简单实体而形成,这在很大程度上解决了遗传算法生成的实体过于简单的问题.

2 基于树结构的遗传算法

2.1 遗传算法的形式化描述

设 H_L^N 是种群空间,通过选择算子作用于当前种群为 $\vec{X}(t)$,生成 M 个新个体. S 表示选择算子,为从 H_L^N 到 H_L^M 的一个随机映射, E 表示繁殖算子,为从 H_L^M 到 H_L^N 的一个随机映射,则一个一般的进化计算可表示为

$$\vec{X}(t+1) = E \cdot S \vec{X}(t) \quad t=0,1,2,\dots$$

遗传算法(GA):

设 $S1: H_L^N \rightarrow H_L^M$ (选择母体操作)

$C: H_L^M \rightarrow H_L^M$ (交叉操作)

$M: H_L^M \rightarrow H_L^M$ (变异操作)

$S2: H_L^M \rightarrow H_L^N$ (选择操作)

则 GA 可表示为

$$\vec{X}(t+1) = S2 \cdot M \cdot C \cdot S \vec{X}(t) \quad t=0,1,2,\dots$$

2.2 遗传算法在设计领域中应用的关键问题及解决方法

2.2.1 初始种群的产生和选择

初始种群的产生和选择($S1: H_L^N \rightarrow H_L^M$)对遗传算法实现的效率有很大影响.目前多数作法是采用计算机随机生成的方法,这样做的缺点是候选群体过大.本研究采用将设计师的经验与随机生成相结合的方法建立初始种群.候选种群按一定概率引入成功的设计实例作为种群,另一部分是随机生成.成功的设计实例可以起到一定的引导作用.具体作法包括:

(1) 通过扫描仪对已有成功设计的产品图纸中选定部分进行扫描,识别后产生数学函数;或者直接由设计者利用设计工具进行设计;

(2) 在理想解空间中通过限制选出可行解,对随机生成的数学函数进行限制检查,选出满足限制条件的种子.

2.2.2 遗传算法编码问题

编码是解决问题的先决条件.

设 $H_L = \{A = a_1 a_2 \dots a_L | a_i \in \Gamma, i=1,2,\dots,L\}$ 是个体空间, $\Omega = \{X = (x_1, x_2, \dots, x_n) | x_i \in R_n, i=1,2,\dots,n\}$ 是问题的可行解空间.

编码 e 是从 H_L 到 Ω 的一个映射,它使得对任何 $A \in H_L$, 存在唯一的 $X = e^{-1}(A) \in \Omega$ 与之对应, X 称为是 A 的解码.

遗传算法常用的二进制编码方式、实数编码方式以及符号编码方式已经成功地解决了很多问题.但是,对表示设计中的问题,还不够灵活.例如,数学表达式的长度是任意的,不同产品对象的构件及特征数是不一样的.因此,用上述 3 种方式表示它们很不方便,并且受到领域的限制.本系统根据不同的设计阶段,采用不同的编码方案.遗传算法用于两个设计阶段:构件设计阶段及构件组装阶段.

第 1 个阶段采用数学函数二叉树及实数编码的方法表示设计实体.树结构编码的方法有两个优点:一是容易描述具有分层结构的设计对象,二是容易修改.

定义 2.1. 一棵数学表示二叉树是一个数学操作数及二元数学操作符的组成的有限节集,该集是空集或者是由根及两棵互不相交的称为左、右子树的二叉树组成.二叉树的中序遍历序列是一个合法的数学表达式.

树的节点可以是终端节点(操作数)或者是中间节点(操作符).操作数可以是变量也可以是常量,操作符包括基本运算符 $+$, $-$, $*$, $/$, \wedge ,基本数学函数等.

定义 2.2. 特征 Fi 是一个三元组 $(FiID,ti,vi)$,其中 $FiID$ 是特征标示符, ti 是特征类型, vi 是特征值.这里的特征是广义的,可以是数字、字符串、数组、函数、表达式或文件等.

定义 2.3. 构件树定义为 $CT=(FD,FR)$,其中 FD 是特征节点集, FR 是特征节点之间的限制和关系集.

定义 2.4. 产品树定义为 $PT=(CD,CR)$,其中 CD 是构件节点集, CR 是节点之间的关系和限制集.

第 2 阶段采用多叉产品树的编码方法表示产品.

产品树的基本元素是构件.遗传算法产生满足约束条件的构件及其特征的新组合.当不同的特征节点被选为交叉点时,交换父辈的相应特征产生后代,如颜色、形状、位置等.变异操作通过从一些成功的设计选取构件、特征,然后以随机选择的个体作为父辈,并适当地选择变异点作变异操作产生后代.该操作可以吸取成功的设计经验及重用设计结果,改良进化的群体.

2.2.3 遗传算法中适应度的确定问题

适应度是生物学家在研究自然界中生物的遗传和进化现象时用度量某个物种对其生存环境适应程度的一个术语.设 H_L 是个体空间, $A \in H_L$,存在唯一的 $X = e^{-1}(A) \in \Omega$ 与之对应, H_L 上的一个适应度是一个映射 $J: H_L \rightarrow R_0^+$.

适应度的确定反映应用者对个体的评价标准.对于设计人员来说,用人机交互的方式来建立适应度函数值,可以反映设计人员的主观意愿,引导进化设计向设计人员所希望的方向发展.但是这样做的一个很大缺陷是过于麻烦,另外,还可能漏掉一些具有创意的解.

本系统采用由设计人员根据经验给出适应度值及采用适应度函数计算相结合的方法.对于常规性设计,先根据目标函数来确定一个适应度函数,然后根据适应度函数的值来选择新的群体.一般来说,一个产品有多个特征,假设有 N 个特征表示 $s_i(i=1,2,\dots,N)$, g_i 是期望解的特征值,则适应度函数可以用期望的特征值与实际设计的特征值之间的距离来表示(见公式(1)).其中, α_i 是 s_i 的权值,表示该特征的重要性,由公式(1)计算所得的具有最小值 d 的设计即为系统所需要的设计.

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^N \alpha_i (s_i - g_i)^2} \quad (1)$$

在进行常规设计时,可以从用户那里得到需求,并将其转换为目标函数.对于有创意的设计,由于没有一个形成目标函数的统一标准,上述公式已不适应.采用了一种通过与设计人员交互产生适应度值的方法,适应度的取值范围为 $0 \sim 1$.在算法执行过程中,设计者给出的适应度值作为知识被存储到知识库中.如果再遇到类似的情况,设计 Agent 将直接从知识库中取出适应度值重用.

结合上述方法及多目标评价与偏序理论,采用拓扑排序的方法,在选择新的种群时,将待选种群按设计人员的侧重点,按不同目标排序.新种群根据用户的侧重点及对应的序列产生,可以较好地解决创新设计中新种群选择的问题.

3 建筑设计实例

3.1 概念设计方案形成的总体结构

形成创新概念设计方案由 3 部分组成:基于进化技术的构件生成模块、三维模型数据库、基于进化技术的组装方案生成模块.框架结构如图 1 所示.

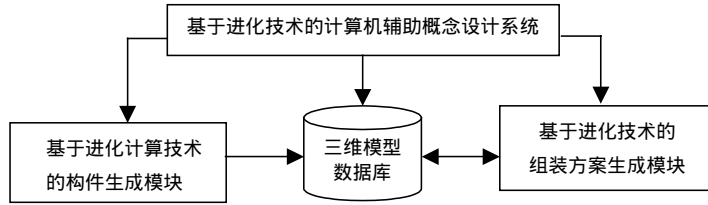


Fig.1 The framework of design scheme generation

图 1 设计方案形成的框架

构件的生成是由基于进化技术的构件创新模块完成的,该模块利用基于数学表达二叉树的遗传算法生成曲线,设计人员可以对曲线进行编辑,也可以选择扫掠、旋转等操作使曲线形成三维构件,存为.sat 文件,然后用三维设计工具软件对其完善.

三维模型数据库中存放的模型包括构件和组装方案.其中,构件既可以是生成的,也可以是设计师用设计软件制作的,这保证了常规设计的原创性及设计人员聪明才智的发挥,同时也解决了有些复杂构件由系统难以生成的问题.设计组装方案是由方案生成模块生成的.

3.2 构件生成

本节介绍怎样用基于树结构的遗传算法来生成建筑构件的二维草图和三维图像.

Step 1. 初始化种群.种群通过随机地在操作数和操作符集中选择形成的数学表达式来生成.我们用堆栈及数据结构中相应的算法检查产生的数学表达式是否是一个有效的数学表达式及表达式中的括号是否平衡,然后,把生成的表达式作为字符串,根据运算顺序,用解析(parsing)算法构造数学表示二叉树.

Step 2. 通过与设计人员交互,得到初始种群中个体的适应度值.设计人员可以选择他们感兴趣的二维草图,查看其三维图像,然后再修改适应度值.

Step 3. 根据种子的适应度值,形成新的种群.

Step 4. 对种群执行交叉和变异操作.

(1) 交叉操作

分别在父辈树上随机选择一个交叉点,并交换以交叉点为根的两棵子树,产生两个后代.如果新产生的树不能映射为合法的数学表达式,或者无法用计算机显示生成的形状,则被淘汰.图 2 为两棵有一个交叉点的数学表示二叉树.

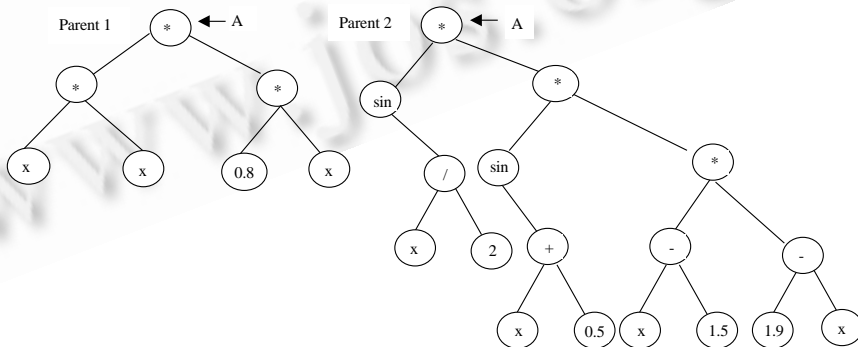


Fig.2 Two binary mathematical expression trees one crossover node

图2 两棵有一个交叉点的数学表示二叉树

以图 2 中的两棵树作为父辈树,交叉点'A'实施交叉操作,其双亲和后代形状如图 3 所示.

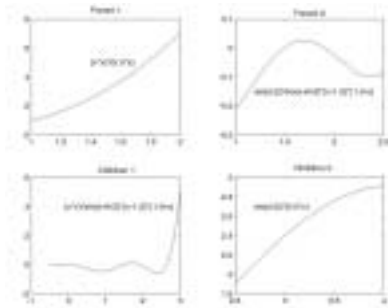


Fig.3 The curves before and after crossover

图 3 交叉操作前后的图形



Fig.4 The top component generated by curves in Fig.3

图 4 图 3 中曲线产生的楼顶构件

(2) 变异操作

在单父辈树上随机选择一个变异点,然后用一棵随机产生的子树替换以变异点为根的子树.如果产生的后代树不能映射为合法的数学表达式,或者无法用计算机显示生成的形状,则被淘汰.

Step 5. 如果设计人员不选择退出,则转 Step 2.

该选择、交叉及变异运算过程一直进行到被设计人员终止时为止.生成的构件由设计人员选择并修改后,存储到构件库中.

3.3 构件组装

系统为设计人员提供了两种构件组装方式.

(1) 人工组装

设计师可以从构件库中选择构件,形成不同的设计方案,这种组装的优点在于设计师可以根据经验,对要形成的设计方案提前有一个直观认识,在组装过程中可以不断调整,比较适合传统的设计方式.

(2) 自动组装

设计师指定组装选项及一些限制、参数,系统会根据设计师的选择从指定的构件库中依据特定的选择方式选择要进行组装的构件,然后通过执行算法,生成各种组装方案,以三维形式在屏幕上显示,供用户选择.

组装方案通过对构件编码,然后运行遗传算法产生.初始群体中的个体是由构件构成的,构件都被存放在构件库中.系统采用简单的二进制编码方式对构件进行编码.一般的建筑设计分为 3 部分:楼顶,楼体,楼底,根据构件原型实例库中的各种构件数量来确定编码的位数,目前构件库中各种构件的数量只有几百个,所以,每种构件对应 9 位二进制编码,27 位二进制编码的字符串表示一个建筑体的组装方案.

组装方案对应楼顶、楼体和楼底的不同组合.采用单点交叉和基本位变异的方法,执行遗传操作,由工艺设计师指定 0~1 之间的数作为适应度值,产生各种组合设计方案(如图 5 所示).图 6 为设计人员对图 5 的方案细化、渲染后的效果图.

设计方案的选择问题,主要是采用了文献[13]中的方法,即人工选择与 Agent 技术相结合的方式,系统在开始运行时,由设计人员给出适应度值,与设计人员交互较多,但随着系统的运行,保存了设计人员对方案给出的适应度函数值,人机交互会逐渐减少.

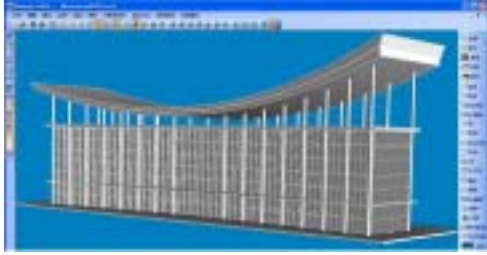


Fig.5 One assemble scheme with top generated by parent 1 in Fig.3

图5 采用图3中双亲1作为楼顶构件的一个组装方案图



Fig.6 The result after rendering Fig.5

图6 对图5渲染后的建筑效果图

4 结束语

计算机支持的创新设计是一门多学科交叉的研究课题,综合人工智能技术的研究,充分发挥计算机的计算及三维模拟的能力,生成的图形及图像会更有创意.我们在这方面所做的工作还是初步的,但是其应用前景非常广阔,该研究对推动思维科学、艺术创作和计算机模拟技术的发展有着重要的作用.

本文提出的方法是面向建筑设计领域的,主要适用于比较简单的外观造型,还有很多问题需要进一步解决,例如:生成的实体有很大的局限性,方案选择过多地依赖于人工交互,没有很完善的评价函数.进一步的工作是继续完善该方法,扩充应用范围.

References:

- [1] Pan YH, Sun SQ, Bao EW. The current developing situation and trend of computer aided industrial design technology. *Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics*, 1999,11(3):248-252 (in Chinese with English abstract).
- [2] Holland J. *Adaptation in Natural and Artificial System*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [3] Dawkins R. *The Blind Watchmaker: Why the Evidence of Evolution Reveals a Universe without Design*. PenguinBooks, 1986.
- [4] Dawkins R. *The Ancestor's Tale: A Pilgrimage to the Dawn of Life*. Weidenfeld and Nicholson, 2004.
- [5] Frazer J. *An Evolutionary Architecture*. London: Architectural Association Publications, 1995.
- [6] Frazer J, *et al*. Generative and evolutionary techniques for building envelope design. In: *Proc. of the 5th Int'l Conf. GA2002*. Milan, 2002.
- [7] Gero JS, Kazakov V. An exploration-based evolutionary model of a generative design process, *Microcomputers in Civil Engineering*, 1996,11:209-216.
- [8] Gero JS, Maher ML. *Computational and cognitive models of creative design VI*. Key Centre of Design Computing and Cognition, University of Sydney, 2005.
- [9] Bentley PJ. *Evolutionary Design by Computers*. Morgan Kaufmann Publishers, 1999.
- [10] Soddu C. Genclities in a visionary world. In: *Proc. of the 8th Int'l Conf. on Generative Art*. Milan, 2005.
- [11] Sun SQ, Bao EW, Pan YH. Creative design based on combination principle for conceptual design. *Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics*, 1999,11(3):262-265 (in Chinese with English abstract).
- [12] Chai CL, Huang Q, Dong ZX, Sun SQ. Home appliance-oriented ergonomics analysis and evaluation system. *Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics*, 2006,18(4):580-584 (in Chinese with English abstract).
- [13] Liu H, Tang MX. Evolutionary design in a multi-Agent design environment. *Applied Soft Computing Journal*, 2006,6(2):207-220.
- [14] Liu H, Tang MX, Frazer J. Supporting evolution in a multi-Agent cooperative design environment. *Advances in Engineering Software*, 2002,33(6):319-328.
- [15] Liu H, Tang MX, Frazer J. Supporting creative design in a visual evolutionary computing environment. *Int'l Journal of Advantages in Engineering Software*, 2004,35(5):261-271.

附中文参考文献:

- [1] 潘云鹤,孙守迁,包恩伟.计算机辅助工业设计技术发展状况与趋势.计算机辅助设计与图形学学报,1999,11(3):248-252.
- [11] 孙守迁,包恩伟,潘云鹤.基于组合原理的概念创新设计.计算机辅助设计与图形学学报,1999,11(3):262-265.
- [12] 柴春雷,黄琦,董占勋,孙守迁.面向家电产品的人机工程分析与评价系统.计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(4):580-584.



刘弘(1955 -),女,山东泰安人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为 CSCW,多 Agent 系统,进化计算.



李焱(1980 -),男,硕士生,主要研究领域为进化计算及在计算机辅助设计中的应用.