论 文

基于创意拐点的计算机辅助草图设计技术

孙凌云, 王长路, 柴春雷*, 冯凯旋, 向为

浙江大学现代工业设计研究所, 杭州 310027

* 通信作者. E-mail: dishengchai@126.com

收稿日期: 2013-01-14; 接受日期: 2013-04-11

国家自然科学基金 (批准号: 61004116, 51005203) 和浙江省科技计划 (批准号: 2012C31G2010104) 资助项目

摘要 草图是设计师进行产品设计创新活动的重要载体. 草图设计是设计师的脑、眼和手三者互动, 设计思维和草图表达相互推进的过程; 草图设计过程可以抽象为创意拐点图. 为了对草图设计过程提供有效的支持, 本文提出了一种基于创意拐点的计算机辅助草图设计技术. 建立了基于草图行为识别的创意拐点规则推理模型, 基于该模型来识别草图设计过程中的创意拐点, 并通过对规则进行粗粒化来解决模型的过拟合问题. 在此基础上, 生成作为草图设计过程记录的创意拐点图, 以记录创意过程, 辅助设计师草图设计. 最后构建了基于创意拐点的计算机辅助草图设计原型系统 CASCP, 并通过实验初步验证了创意拐点识别方法的有效性, 给出应用 CASCP 完成的草图设计实例.

关键词 创意拐点 设计思维 草图设计 草图行为 计算机辅助草图设计

1 引言

草图是产品设计中最重要的活动之一, 对于概念定位、发展、表达、推演、形成都有着不可替代的地位和作用^[1], 草图设计过程和创造性密不可分, 草图设计阶段集中了最主要、最核心的产品创新内容.

计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 作为重要的设计手段被广泛应用于产品设计领域, 大大提高了设计效率, 但传统 CAD 重在绘制和建模而不是设计^[2], 侧重于设计过程的相对后期阶段, 在产品概念设计阶段发挥的作用十分有限, 不能很好地适应草图设计的需要; 与之相对应, 纸上手绘草图具有快速、灵活的特点, 可以促进设计师思维发展、提高概念设计的创新性^[3]. 但纸上手绘草图并不完美. 例如: 由于草图的随意性, 多次修改后, 方案往往会变得混乱不清; 随着设计的发展, 纸上草图往往难以修改, 也不能记下整个设计过程; 若需要较大的调整, 则需要重新绘图; 设计方案难以存储、组织整理、搜索和重用等等. 人们期望计算机能够对草图设计提供更好的支持, 从而提高草图设计效率, 甚至激发设计师的创新能力^[4].

目前对于计算机辅助草图设计 (computer aided sketch, CAS) 的研究多以在 CAD 系统中支持 SBIM (sketch-based interfaces for modeling) 交互而非传统的 WIMP (window, icon, menu, pointer) 交互为目标^[5], 如 Insitu^[6] 支持用草图界面制作建筑设计中建筑的环境, AIPaint^[7] 可以让设计师通过草图界面创作和编辑游戏的动作; 戴国忠等^[8] 对笔式用户界面进行了系统的研究, 开发了工艺草图系

引用格式: 孙凌云, 王长路, 柴春雷, 等. 基于创意拐点的计算机辅助草图设计技术. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 996-1011, doi: 10.1360/112013-24

图 1 典型草图设计方案

Figure 1 Typical sketching design

统、手绘草图概念设计系统等 CAS 系统; 还有研究人员用手绘线条进行三维模型重建^[9]、以二维手绘草图作为机械 CAD 系统的输入来获取可编辑的三维数据^[10]. 在草图协同设计方面, 出现了 Design TeamMate^[11]、SketchComm^[12] 等 CAS 系统, 为设计团队交流想法及协同创作提供支持. CAS 的一个重要发展方向是对设计创新提供帮助, Al-kazzaz 等人^[13] 采用形状文法对初始图形进行变形、替换和组合来生成新的设计方案; Cluzel 等人^[14] 将进化计算应用到汽车草图设计中去, 通过改变汽车的轮廓线生成满足需求的方案. 然而, 草图设计是设计师的脑、眼和手三者互动, 设计思维和草图表达互相推进的过程, 并不是单纯的已有方案的可视化^[15]; 上述 CAS 系统并没有对草图的设计过程提供支持, 特别是忽略了对设计思维的支持, 无法有效存储设计过程, 难以为草图发展、修改、迭代和重用提供帮助.

本文提出了创意拐点理论以描述草图设计过程, 并建立基于创意拐点的计算机辅助草图设计模式, 采用基于草图行为识别的创意拐点规则推理模型来识别草图设计过程中的创意拐点, 以创意拐点图的方式来抽象和记录草图设计过程, 从而在设计思维层面上辅助草图设计.

2 草图设计中的创意拐点

2.1 草图设计的基本特征

草图设计过程中, 设计师根据一定的设计问题激发设计思维, 在脑中产生创新想法, 并用手绘制草图加以表达, 形象直观的草图作为新的视觉刺激被感知, 进一步加强或者激发新的思维活动. 草图是一个包含大量联想、比较、选择和改进的设计过程^[16]. 设计师的脑、眼和手三者互动, 不断进行设计探索, 产生新的草图方案.

一个典型的草图设计方案如图 1 所示. 设计师以“公园中的座椅”为题, 在一张纸上探索了多个设计方案, 如从环境形态角度考虑的石头状的座椅, 从使用人群角度考虑的家庭多人座椅和从多功能角度考虑的可听音乐、可充电的座椅等. 采用计算机技术, 记录设计师的绘制过程, 可以得到所有草图

表 1 草图行为分类

Table 1 Sketching behavior classification

Category	Code	Explanation
Non-drawing	M—move	Move pen without drawing
	L—look	Look without drawing
Drawing	D—draw	Draw an object's shape
	E—emphasize	Overstrike an object's contour
	T—text	Write textual descriptions

图 2 草图设计过程中的创意单元

Figure 2 Creative unit in sketching process

绘制数据记录 (包括绘制的笔画、每一笔的绘制时间、相邻笔画的时间间隔及输入设备的使用状态); 分析该记录, 综合考虑设计师草图表达的特点及计算机对草图行为的识别能力, 草图中行为可分为两大类: 非绘制行为和绘制行为; 非绘制行为包括移动与停顿, 绘制行为包括绘图、描线加深与注释 (如表 1)。

2.2 创意拐点与草图设计过程

草图设计过程并不均衡, 设计师经过不断探索、酝酿, 脑海中会迸发出灵感。灵感产生后, 设计师迅速用草图进行表达并在表达过程中不断观察调整。经由设计思维、草图表达、视觉刺激三者相互作用, 形成阶段性的草图方案。从新灵感迸发到阶段性草图方案的完成, 可视为草图设计中的创意单元; 创意单元中的第一个草图行为, 可视为草图表达过程中的创意拐点, 记为 CP (Creative Point) (如图 2)。

如图 1“公园中的座椅”所示, 草图设计过程中, 设计师会探索各种可能的设计路线, 产生多个设计方案。设计师或继续已有设计路线; 或从其它角度开辟新的设计路线来发展设计方案。创意单元是设计路线中的关键部分, 作为阶段性的草图方案, 决定着设计路线的发展方向。多条设计路线形成一张基

图 3 创意拐点图

Figure 3 Creative point graph

于创意拐点的树形结构的图, 即创意拐点图. 创意拐点图是对草图设计过程的抽象表达. 图 1 所示草图设计过程可抽象为图 3 所示创意拐点图.

创意拐点标识了草图过程中的灵感产生阶段; 创意拐点图呈现了草图的设计路线. 识别出草图过程中的创意拐点, 组织创意拐点图, 即可了解设计师的思维发展过程, 更好地理解草图设计过程.

2.3 基于创意拐点的计算机辅助草图模式

草图设计过程中, 设计思维和草图表达相互影响, 密不可分. 设计思维的变化, 如灵感产生、发展, 直接影响草图表达层面上设计师的草图行为; 创意拐点是设计师灵感产生后进行表达的第一个草图行为, 可作为计算机捕捉设计师灵感的着力点. 通过观察创意拐点前后的草图行为, 可总结创意拐点的行为规律; 采用计算机技术, 记录设计师的绘制过程, 识别出相应的草图行为, 与创意拐点行为规律匹配, 可找出创意拐点.

在找出创意拐点后, 将创意拐点对应的草图按照时间顺序及设计路线组织成一个创意拐点图. 计算机生成的创意拐点图从设计思维的层面对草图过程进行描述, 提取出草图过程中的关键点, 理清草图设计思路, 存储创意. 不仅可以帮助设计师了解创意方案间的关系, 还可以刺激设计思维、启发新的创意, 进而为后期挖掘和利用草图设计过程中蕴藏的设计知识提供支持.

3 创意拐点的识别

创意拐点的识别是实现基于创意拐点的计算机辅助草图设计的核心问题. 本文提出基于草图行为识别的创意拐点规则推理模型: 首先, 建立创意拐点规则库; 然后识别出草图表达过程中的草图行为, 构建草图行为序列; 最后与规则库中规则进行匹配来识别创意拐点.

草图行为识别过程包括草图行为笔画集划分、草图行为类别判定及草图行为合并 3 个步骤. 其中, 草图行为类别判定包括草图行为特征提取和构建草图行为分类器, 是草图行为识别的核心.

此外, 为了建立创意拐点规则库, 需人工收集一定数量的创意拐点样本, 提取创意拐点处的草图行为序列作为规则; 还需对规则库中规则进行粗粒化以解决模型的过拟合问题.

3.1 草图行为识别

3.1.1 构建草图行为分类器

已有手绘草图识别的研究, 注重于对草图图形构成的理解, 目的是将设计师绘制的自由不规则草

表 2 绘制型行为特征

Table 2 Drawing behavior feature

Feature	Description	Category of the feature
f_1	The length of a curve	Stroke
f_2	The number of corners of a curve	Stroke
f_3	The angle between two curves	Stroke
f_4	The centroid distance between two curves	Stroke
f_5	The number of strokes intersected with themselves in a strokes collection	Strokes collection
f_6	The average length of strokes in a strokes collection	Strokes collection
f_7	The aspect ratio of the graph of a strokes collection	Strokes collection
f_8	The number of parallel lines in a strokes collection	Strokes collection
f_9	The centroid distance between two graphs of strokes collections	Strokes collection
f_{10}	The overlapping area of two graphs of strokes collections	Strokes collection

图图形映射成规则的几何图形; 而草图行为识别, 注重于对草图设计过程中设计师的所有操作数据的理解, 目的是从这些操作数据中抽象和提取出草图行为。

草图行为, 分为非绘制型行为和绘制型行为。对于非绘制型行为, 通过检测画笔 (鼠标) 的状态及停顿间隔时间即可识别。对于绘制型行为, 采用基于笔画特征的统计方法, 首先提取草图行为的特征, 然后构造一个多类线性分类器, 通过训练获得分类器各分量的权重值。

定义 1 草图行为笔画集指在草图设计过程中, 连续若干个笔画组成的一个表示某种绘制型行为的笔画集合, 记为 SC。

绘制型行为特征的选取应该符合以下原则: 1) 要结合草图行为所呈现的图元的几何 (空间结构) 特征和动态 (时间) 特征; 2) 不能过多刻画草图的具体内容信息; 3) 选取的特征的数量要确保能区分出所有草图行为, 同时计算复杂度较低。

绘制型行为特征有两种, 笔画的特征和草图行为笔画集的特征; 前者是描述笔画对应的曲线的特征, 后者是描述草图行为笔画集中所有笔画构成的图形的特征。本文共提取了 10 个绘制型行为特征 (见表 2)。描线加深行为, 表现为描线和加阴影, 在曲线的长度、曲线的转角数目、两曲线的夹角、两曲线的重心距离和连续平行的曲线数目等 5 个特征中具有显著性。注释行为, 表现为写文字, 在笔画集中与自身相交的笔画的数目、笔画集中笔画平均长度、笔画集图形的宽高比、笔画集图形的重心距离和笔画集图形的重叠面积等 5 个特征中具有显著性。绘图行为和草图的具体内容信息有很大关系, 特征不明显。将提取出的所有特征组成一个特征向量, 可以用这个向量来表示草图行为笔画集。

设提取的草图行为特征共有 n 个, 记为 $\{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$, 对每个特征进行归一化处理, 得到变换后的特征 $\{f'_1, f'_2, f'_3, \dots, f'_n\}$, 组成特征向量 f 。给定一个草图行为未知的笔画集, 可通过下式计算样本属于草图行为类别 c 的可能程度 v_c 。

$$v_c = w_{c0} + \sum_{i=1}^n w_{ci} f'_i, c \in \{E, T\}, \quad (1)$$

其中, $w_{ci} (1 \leq i \leq n)$ 为草图行为类别 c 的权重系数, 采用主成分分析 (principal components analysis, PCA) 法来确定 $w_{ci} (1 \leq i \leq n)$ 的值。

图 4 草图行为类别判别示意图

Figure 4 Sketching behavior discrimination diagram

基本思路是针对草图行为类别 c , 采集若干训练样本, 并计算样本的特征值, 然后对每个特征值做归一化处理, 得到 $f'_{ci} (1 \leq i \leq n)$, 再通过主成分分析确定每个特征的权重系数. 此外, 也可以通过主成分分析对草图行为类别 c 进行特征降维, 以降低计算复杂度; 权重 w_{c0} 的取值使用下式进行估计.

$$w_{c0} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_{ci} \bar{f}_{ci}, \quad (2)$$

其中 $\bar{f}_{ci} (1 \leq i \leq n)$ 为所有训练样本特征值 f_{ci} 的均值.

从 (1) 式可以得到草图行为笔画集是描线加深行为的可能程度 v_E 及是注释行为的可能程度 v_T . 采用图 4 所示判别方式对草图行为笔画集进行判别, 以确定表示的草图行为类别. 若 $v_E \leq 0, v_T \leq 0$, 则表示的是绘图行为 D ; 若 $v_E > 0, v_E - v_T \geq 0$, 则表示的是描线加深行为 E ; 若 $v_T > 0, v_E - v_T < 0$, 则表示的是注释行为 T .

3.1.2 草图行为识别过程

草图行为识别过程主要包括草图行为笔画集划分、草图行为识别及草图行为合并三部分.

(1) 草图行为笔画集划分.

将画布上的所有笔画根据时间和空间关系划分为若干个待识别的草图行为笔画集.

步骤 1 将画布上的每一个笔画看作只有一个草图行为笔画集, 并按照绘制时间顺序对笔画集进行编号, 形如 $SC_1, SC_2, \dots, SC_n$;

步骤 2 依次检查两相邻笔画集之间是否有停顿或移动行为, 若有则依据这两类行为对笔画集在时间上进行划分, 将处于两个停顿或移动行为之间的笔画集看作位于同一绘图时间段内;

步骤 3 检查处于同一绘图时间段内的相邻笔画集 SC_i, SC_{i+1}, SC_{i+2} . 如果 SC_i 与 SC_{i+1} 空间距离较近 (通过计算两笔画集中笔画的重心距离及重叠面积来度量空间距离), 则合并这两个笔画集为新的笔画集 SC'_i , 继续检查 SC'_i, SC_{i+2} ; 否则检查 SC_{i+1}, SC_{i+2} . 依上述方法对笔画集进行合并;

步骤 4 重复上述步骤, 最终得到若干个待识别的草图行为笔画集.

(2) 草图行为类别判定.

步骤 1 选择一个待识别的草图行为笔画集, 计算出表示的是描线加深行为的可能程度 v_E 及是注释行为的可能程度 v_T ;

步骤 2 根据 v_E 和 v_T 的值, 采用上文中草图行为判别方法对表示的类别进行判别;

图 5 草图行为识别实例

Figure 5 Examples of sketching behavior recognition. (a) Examples of behavior T; (b) examples of behavior E; (c) examples of behavior D

步骤 3 重复上述步骤, 最终得到若干个绘制型草图行为, 并将所有草图行为按照绘制时间顺序进行编号, 形如 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_m$.

(3) 草图行为合并.

上文中得到的草图行为判定结果会出现连续多个同类型的草图行为, 需对其进行合并. 根据草图行为的前后类型的差异及空间距离, 可以对判定结果做进一步修正, 以提高识别率.

步骤 1 检查相邻两个草图行为 s_i, s_{i+1} , 若它们类型相同, 则合并为一个草图行为;

步骤 2 检查相邻三个草图行为 s_i, s_{i+1}, s_{i+2} , 若 s_i 与 s_{i+2} 类型相同且与 s_{i+1} 类型不同, 则计算三者的草图行为笔画集的空间距离, 若距离较近则合并它们为一个草图行为, 类型与 s_i 相同;

步骤 3 重复上述步骤, 最终得到一系列能真实反映设计师草图设计过程的草图行为.

图 5 给出了注释、描线加深及绘图三种草图行为识别的一些实例, 将识别出的草图行为对应的笔画集中所有笔画用进行加粗标记, 图 5(a) 为注释行为的实例, 图 5(b) 为描线加深行为的实例, 图 5(c) 为绘图行为的实例.

3.2 基于草图行为识别的创意拐点规则推理模型

3.2.1 创意拐点规则推理模型的构建

定义 2 草图表达过程中识别出的 n 个连续的草图行为 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 组成一个序列, 称为草图行为序列, 记为 S ; 用 length 表示 S 的长度, 即是草图行为序列中草图行为的数目. 定义如下规则:

$$\text{IF } X \text{ IsMatching } S_i \text{ THEN } Y, \quad (3)$$

其中, X 为输入的草图行为序列; S_i 表示规则集中的一个草图行为序列, 长度为 n ; 若 S_i 包含创意拐点则 $Y = 1$, 若 S_i 不包含创意拐点则 $Y = 0$.

给定一个草图设计数据集, 其中包含若干创意拐点, 需从数据集中提取出若干条创意拐点规则, 以建立创意拐点规则库, 且规则库既能很好地逼近训练数据集, 又具有很好的推广能力. 首先, 由人工标

记草图设计过程中所有创意拐点, 接着将创意拐点前后, 包括创意拐点, 共 n 个草图行为组成草图行为序列 $S_i (1 \leq i \leq n)$. 若草图行为序列中草图行为的数目小于 n , 则用符号 $\emptyset$ 填充, 表示此位置不存在草图行为. 一条草图行为序列数据对应一条规则, 合并草图行为序列相同的规则, 最终得到 M 条规则, 设规则 $S_i (1 \leq i \leq M)$ 的频次为 $\#S_i$, 那么规则 S_i 的权重为

$$\frac{\#S_i}{N}. \quad (4)$$

给定一个草图行为序列, 将它与创意拐点规则库的中各规则的条件进行比较, 若二者相一致, 则规则匹配成功. 在匹配过程中, 按照规则权重从大到小的策略来选取规则. 若该草图行为序列与规则库中所有规则都不能成功匹配, 那么认为此草图行为序列中没有创意拐点出现.

3.2.2 规则粗粒化方法

上文得到的规则库虽然对训练数据具有很好的逼近能力, 但随着数据量的增加, 规则的数目也相应地增加, 从而导致搜索空间过大, 推理的计算变得复杂. 同时, 该规则推理模型存在过度拟合的问题, 有必要对规则进行粗粒化. 根据设计师设计思维的特点及创意拐点的产生过程, 创意拐点附近的草图行为具有共性特征, 可以对草图行为序列进行聚类分析, 以得到更好描述创意拐点附近的草图行为规则.

(1) 使用编辑距离描述草图行为序列的相似度. 为了能够对草图行为序列进行聚类分析, 对于草图行为序列 S , 使用草图行为序列对应的串来表示. 例如: $S = \emptyset s_1 s_2 s_3 s_4, s_1 s_2 s_3 s_4$ 的草图行为类别分别为 LDET, 那么 S 可以用串 $\emptyset$ LDET 来表示. 引入编辑距离来衡量串之间的距离, 计算草图行为序列间的相似度.

定义 3 给定草图行为序列 S_1 和 S_2 , 并用相应的串来表示, S_1 与 S_2 之间的编辑距离记为 $ed(S_1, S_2)$, 描述从 S_1 变到 S_2 所需的最少的基本操作步数. 这里的基本操作包括:

- 替换, S_1 中的一个字符被 S_2 中对应字符换掉;
- 插入, S_2 中一个字符插入到 S_1 中;
- 删除, S_1 中一个字符被删去.

例如, 对于串 $S_1 = \text{TLDEL}$, 串 $S_2 = \emptyset$ LDET, 则可以通过 1 次删除操作和 1 次替换操作, 将 S_1 变到 S_2 , $ed(S_1, S_2)$. 对于规则库中任意两个规则的条件 S_1, S_2 , 二者的编辑距离 $ed(S_1, S_2)$ 越小则表明这两条规则相似度越高, 反之相似度越低.

(2) 使用层次聚类算法对规则库进行聚类. 采用基于合并的层次聚类算法分别对规则库中规则进行聚类. 合并时, 先使规则库中每条规则各成一类, 形成规则类集合 R , 然后通过合并 R 中不同的类, 来减少类别数目. 设参数 number 为聚类完成后, 规则类集合期望得到的类别数目. 当规则集中的类数目之和达到 number 时, 聚类停止. 考虑聚类过程中, 规则类集合 R 中的两个不同类别 D_i, D_j , 它们包含的规则数目分别为 n_i, n_j , 定义下面这种距离度量来衡量不同类别间的相似性. 每次合并操作, 从规则类集合 R 中选择距离最近的两个规则类来进行合并.

$$d(D_i, D_j) = \frac{1}{n_i n_j} \sum_{S \in D_i} \sum_{S' \in D_j} ed(S, S'). \quad (5)$$

(3) 根据信息熵来提取新的规则. 通过对规则库进行聚类, 最终形成 number 个类别, 接下来需要从每个类别中学习出一条新规则. 新规则需要能很好地概括对应规则类的草图行为模式, 这里引入信息熵来定义新的规则学习方法.

定义 4 给定一个随机变量 X 值域为 $\{\emptyset, M, L, D, E, T\}$, 若一个系统中 X 存在 $n(1 \leq n \leq 6)$ 个取值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 定义系统的熵值 H_S ,

$$H_S = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_b p(x_i), \quad (6)$$

其中 b 取 2. 对于一个规则类 D , D 中有 n 条规则, 每条规则的权重为 $\#S$, 令规则的权重之和为 S_d , 定义规则类的临界熵

$$H_0 = - \left(\frac{\lceil S_d/2 \rceil}{S_d} \log_b \frac{\lceil S_d/2 \rceil}{S_d} + \frac{S_d - \lceil S_d/2 \rceil}{S_d} \log_b \frac{1}{S_d} \right), \quad (7)$$

并将每条规则的串 S 中处于相同位置的字符组成一个一维向量 v , 形如 $(\emptyset, L, D, E, T)$.

算法 1 基于信息熵的规则学习算法.

Algorithm 1. Rule learning algorithm based on comentropy

输入: n 条规则的规则类 D

输出: 一条新规则 S^*

1. for j in n
2. for j in n
3. put $S_j[i]$ in v
4. 对 v 中相同元素的权重值求和, 得到 $\#S'_i$
5. 计算 v 中元素的概率 p , 求出 v 的熵 H_v
6. if $H_v = 0$
7. put $v[i]$ in S^*
8. else if $H_v \leq H_0$
9. 找到 v 中权重最大的元素 v_m , put v_m in S^*
10. else
11. put '*' in S^* // * 为通配符
12. return S^*

根据算法 1, 可以从每一个规则类中学习生成一条新规则, 其权重即为 S_d . 若 S^* 包含通配符, 例如 $\emptyset LDT^*$, 那么草图行为序列 $\emptyset LDT\emptyset$ 、 $\emptyset LDTE$ 都可以匹配成功.

4 原型系统开发与验证

为对基于创意拐点的计算机辅助草图设计技术展开更深入的研究和应用验证, 本文开发实现了一个计算机辅助草图设计原型系统 CASCPC (computer-aided sketching based on creative point).

4.1 系统描述

原型系统 CASCPC 的总体结构图如图 6 所示. 其中, 人机交互模块包括草图绘制数据记录和通过系统生成的创意拐点图实现的辅助草图设计, 如草图设计过程查看、草图设计路线管理; 创意拐点识别模块包括草图行为识别和创意拐点的规则推理, 在线识别出草图设计过程中出现的创意拐点; 创意

图 6 原型系统 CASC 总体结构图

Figure 6 The structure of the prototype system CASC

拐点图生成模块将设计师草图过程中识别出的一系列创意拐点按照时间顺序及父子关系组织成创意拐点图。

系统通过人机交互模块记录设计师草图绘制数据; 通过创意拐点识别模块从绘制记录中实时识别出创意拐点; 通过创意拐点图生成模块生成创意拐点图; 并再次通过人机交互模块为设计师提供支持。设计师可查看创意拐点图、回顾设计过程、浏览各创意拐点对应的草图状态, 了解各创意方案之间的关系; 设计师还可根据创意拐点图进行设计路线管理, 在方案的不断发展优化过程中, 设计师可选择创意拐点图中的任意一个创意拐点, 在创意拐点对应草图表达的基础上, 启动新的设计路线来发展设计方案。

CASC 不仅使设计师可以很方便地查看设计过程、修改设计方案, 而且可以更好地辅助设计创意过程, 促进设计创新, 提高草图设计质量。

4.2 系统评估

为对原型系统 CASC 进行评估, 首先需要建立创意拐点规则库, 然后将规则库导入系统, 并进行创意拐点识别验证实验, 最后给出应用 CASC 进行草图设计的实例。

4.2.1 创意拐点规则库的构建

为构建创意拐点规则库, 本文选取了 21 名工业设计专业学生, 使用 CASC 进行草图设计, 使用 Wacom 影拓四代 PTK-640 绘图板作为输入设备。设计的要求为: 选择城市中的代表性场景 (如超市、公园、车站等), 为其设计新型的公共休息设施。测试时间为 40 分钟。草图设计全过程进行屏幕录像。

在用户完成测试后, 实验人员观看照屏幕录像, 并对用户进行访谈, 询问设计思路, 判定创意拐点, 并标定创意拐点的位置。实验一共得到 148 个创意拐点, 提取创意拐点处 7 个草图行为组成一个行为序列, 作为一条规则, 得到规则库如表 3 所示。在进行规则提取时, 可以调整草图行为序列的长度 length, 以得到不同的规则库。

接着将规则库导入到 CASC 中, 并对规则进行粗粒化, 取草图行为序列长度 length 为 6 及规则聚类数目 number 为 40 时, 得到的规则库如表 4 所示。如规则条件为 **DET 的规则, 草图行为序列 0LDET、MTDTE 都可以匹配成功。

4.2.2 创意拐点识别验证实验

为初步验证创意拐点识别方法的有效性, 本文选取了 6 名工业设计专业的学生, 使用 CASC 进

表 3 当 $\text{length} = 7$ 时创意拐点规则库部分规则
Table 3 Rules in the creative point rule base ($\text{length} = 7$)

Rule condition	Weight	Rule condition	Weight	Rule condition	Weight
$\emptyset\emptyset\emptyset\text{DE}\emptyset\emptyset$	11	$\emptyset\emptyset\text{LDEL}\emptyset$	2	$\emptyset\emptyset\text{MDE}\emptyset\emptyset$	2
$\emptyset\emptyset\emptyset\text{DT}\emptyset\emptyset$	10	$\emptyset\emptyset\text{LELD}$	2	$\text{LMTDE}\emptyset\emptyset$	2
$\emptyset\emptyset\emptyset\text{DED}\emptyset$	7	$\emptyset\emptyset\text{LDE}\emptyset\emptyset$	2	$\emptyset\emptyset\text{TDE}\emptyset\emptyset$	2
$\emptyset\emptyset\emptyset\text{DET}\emptyset$	4	$\emptyset\emptyset\emptyset\text{LDTE}\emptyset$	2	$\emptyset\text{LTDT}\emptyset\emptyset$	2
$\emptyset\emptyset\emptyset\text{DTE}\emptyset$	4	$\emptyset\emptyset\text{LDT}\emptyset\emptyset$	2	$\emptyset\emptyset\emptyset\text{DETD}$	2
$\emptyset\text{LMDE}\emptyset\emptyset$	3	$\emptyset\emptyset\text{LDE}\emptyset\emptyset$	2	$\emptyset\emptyset\emptyset\text{DTD}\emptyset$	2
$\emptyset\emptyset\text{LDED}\emptyset$	2	$\emptyset\emptyset\text{LDET}\emptyset$	2	...	...

表 4 当 $\text{length}=6, \text{number}=40$ 时进行粗粒化后的规则库部分规则
Table 4 Rules in the rule base after coarse graining ($\text{length}=6, \text{number}=40$)

Rule condition	Rule condition	Rule condition
$\text{MTDE}\emptyset$	$^*\text{MTED}$	$^{**}\text{D}\emptyset\emptyset$
$\emptyset\emptyset\text{D}\emptyset\emptyset$	$\emptyset\emptyset\text{TD}^*$	L^*DTD
$\emptyset\emptyset\text{TD}\emptyset$	$\emptyset\text{LT}^*\emptyset$	$^*\text{TDTM}$
$\emptyset\emptyset\text{DLE}$	$^{**}\text{DET}$	T^*DTE
LMDET	$\text{DMDE}\emptyset$	$\emptyset\text{TDT}^*$
$\emptyset\text{LDT}\emptyset$	$\emptyset^*\text{TET}$	$\emptyset\text{MDL}^*$
$^*\text{TDED}$	$\text{T}^*\text{T}^*\text{T}$	...

行草图设计, 设计要求为“公共大厅中的休息设施”, 测试时间为 30 分钟. 实验分为两个阶段, 第一阶段要求每位用户不使用系统的辅助功能, 设计 5 个有创意的方案, 时间不超过 15 分钟; 第二阶段用户可以使用系统的辅助功能, 可随时查看系统生成的创意拐点图进行方案的创作, 时间不超过 15 分钟.

在测试结束后, 实验人员对用户进行访谈, 寻找创意拐点, 并记录每个创意拐点对应的创意单元的开始时间点和结束时间点, 记为 t_1 和 t_2 . 接着统计 CASCAP 的创意拐点识别结果, 设识别出的创意拐点的时间点为 t'_1 , 若 $t_1 \leq t'_1 \leq t_2$, 则此创意拐点识别正确; 若存在多个创意拐点的时间点处于同一个 t_1 和 t_2 区间, 则时间点最接近 t_1 的那个创意拐点识别正确, 其他创意拐点识别错误. 创意拐点识别性能评价采用两个指标: 召回率和准确率. 设草图设计过程中创意拐点的实际数目为 N , 系统识别出的创意拐点总数为 M , 其中识别正确的创意拐点数目为 A .

定义召回率 $\text{Recall} = A/N$. 这个指标反映了系统发现创意拐点的能力, 召回率越高, 漏判的创意拐点就越少. 定义准确率 $\text{Precision} = A/M$. 这个指标反映了系统正确识别创意拐点的能力, 准确率越高, 误判的创意拐点就越少.

在用户进行测试时, 采用统一的规则库, 使得不同用户的识别结果具有可比性. 表 5 给出了草图行为序列长度为 6 及规则数目为 20 时, 6 名用户的创意拐点识别结果. 从表 5 可以看到, 不同用户的召回率和准确率会有差别, 除用户 6 的识别结果较差外, 其他用户召回率和准确率均大于等于 50%.

为了研究 CASCAP 创意拐点识别性能与规则库中草图行为序列的长度 length 及规则数目 number 的关系, 可改变规则库, 并计算使用不同规则库时 6 名用户创意拐点识别的召回率和准确率的平均值.

表 5 当 $\text{length} = 6$, $\text{number} = 20$ 时不同用户的创意拐点识别结果Table 5 The creative point recognition results for different users ($\text{length} = 6$, $\text{number} = 20$)

	User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	User 6
Recall	61.54%	50.00%	78.57%	80.00%	80.00%	41.67%
Precision	50.00%	50.00%	68.75%	57.14%	72.73%	31.25%

图 7 不同参数下系统识别性能的变化情况

Figure 7 The changes in performance of the system with different parameters. (a) The changes in recall; (b) the changes in precision

图 7 给出了在使用不同草图行为序列长度的规则库时, 调整粗粒化时规则数目, 召回率和准确率平均值的变化情况。

从图 7(a) 可以看出, 系统在不同草图行为序列长度下的召回率随规则数目的变化差异较大; 从图 7(b) 可以看出, 系统在不同草图行为序列长度下的准确率随规则数目的变化差异较小。从系统设计的角度而言, 通常是希望在维持准确率的前提下追求高召回率。在选取合适的行为序列长度及合适的规则数目时, 对规则库进行粗粒化可以使得准确率和召回率都大, 即使得系统的性能达到较高的水平, 如选择 $\text{length} = 6$, $\text{number} = 20$, 但是在草图行为序列长度选择不恰当的时候, 系统的召回率会处于一个较低的水平, 如选择 $\text{length} = 7$, 这是因为创意拐点的行为序列长度选取过大时, 提取出的规则推广能力较差, 当规则库规模较小时, 规则系统的规则便难以被匹配成功。

为评价创意拐点图对草图设计的辅助效果, 设用户从第一次查看创意拐点图到完成草图设计这一过程中, 产生的创意拐点总数为 Q , 其中通过查看创意拐点图, 在已有创意拐点基础上发展得到的新的创意拐点数为 C , 定义贡献率 $\text{Contribution} = C/Q$ 。这个指标反映了系统生成的创意拐点图辅助草图设计的能力, 贡献率越高, 辅助效果越好。

表 6 给出了草图行为序列长度为 5 及规则数目为 30 时, 6 名用户的创意拐点图贡献率。从表 6 中可以看到, 除用户 5 的创意拐点图贡献率较低外, 其他用户的创意拐点图贡献率均较高, 实验结果初步表明创意拐点图可以有效地辅助草图设计。

表 6 当 $\text{length} = 6$, $\text{number} = 30$ 时不同用户的创意拐点图贡献率Table 6 The contribution rates of creative point graph for different users ($\text{length} = 6$, $\text{number} = 30$)

	User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	User 6
Contribution	66.67%	80.00%	70%	100.00%	40.00%	83.33%

4.2.3 CASCPC 的应用实例

图 8 给出了应用 CASCPC 进行草图设计的实例, 设计的主题是“情感化的照明产品”。首先, 设计师设计了 4 个草图方案, 4 个草图方案分别为情侣约会时可感应心情的柱状灯、可传递爱意的心形灯、能够与手交互的 LED 灯和能够与手交互并能显示图案的 LED 灯; 在草图设计过程中, 系统实时识别出创意拐点、记录创意拐点对应的草图状态, 生成有 7 个创意拐点的创意拐点图, 其中, 草图方案 1 包含创意拐点 1 和 2, 草图方案 2 包含创意拐点 3, 草图方案 4 包含创意拐点 5、6 和 7, 如图 8(a) 所示。

在完成上述 4 个草图方案后, 设计师查看创意拐点图、回顾草图设计过程, 在浏览创意拐点 4 对应的“能够与手交互的 LED 灯”草图方案时, 产生了新灵感, 对原方案进行改进, 设计了“能够与脚交互的地毯式 LED 灯”, 系统识别出新的创意拐点 4-1 和 4-2, 同时在原有创意拐点图的基础上添加 1 个新分支; 相类似地, 在设计师完成草图设计时, 系统共识别出 12 个创意拐点, 并生成一个有 3 个分支的创意拐点图, 如图 8(b) 所示。实例初步表明, CASCPC 能够有效地生成创意拐点图, 实现在草图设计过程中对草图设计进行辅助。

5 结论与展望

5.1 结论

本文首先介绍了描述草图设计过程的创意拐点理论, 在此基础上提出了基于创意拐点的计算机辅助草图设计系统。建立了基于草图行为识别的创意拐点规则推理模型, 基于该模型来识别草图设计过程中的创意拐点, 并通过对规则进行粗粒化来解决模型的过拟合问题。在此基础上, 生成作为草图设计过程记录的创意拐点图, 以记录创意过程, 辅助设计师草图设计。最后构建了基于创意拐点的计算机辅助草图设计原型系统 CASCPC, 并通过实验初步验证了创意拐点识别方法的有效性, 给出应用 CASCPC 完成的草图设计实例。评估结果初步表明系统可以有效地识别创意拐点, 支持草图设计过程。

5.2 展望

创意拐点作为草图设计的重要特征, 在计算机辅助草图设计技术、草图思维、设计知识等领域都具有很大发展空间和研究价值, 值得进一步探索。本文提出的基于创意拐点的计算机辅助草图设计技术, 其核心是根据设计师的草图行为特征提取创意拐点规则来识别创意拐点; 在进行草图设计时, 不同设计师的草图行为、创意产生过程存在差异, 相应地创意拐点规则也存在差异, 采用规则库固定、推理策略固定的规则推理系统去识别创意拐点, 鲁棒性较低, 未来可考虑引入一种用户适应机制来提高规则推理系统的鲁棒性, 根据设计师对创意拐点识别结果的反馈来更新规则库中规则、调整规则推理策略, 进而提高创意拐点识别的召回率和准确率; 未来还可进一步在设计知识层面上对创意拐点产生的根源进行探索, 以便更有辅助草图设计过程, 提高草图设计质量。

图 8 CASCP 的应用实例

Figure 8 The application example of CASCP. (a) Creative point graph generated by CASCP in the sketching process; (b) creative point graph generated by CASCP after sketching completed

参考文献

- 1 Cross N. Designerly Ways of Knowing. London: Springer, 2006
- 2 Goel A K, Vattama S, Wiltgen B, et al. Cognitive, collaborative, conceptual and creative-four characteristics of the next generation of knowledge-based CAD systems: a study in biologically inspired design. *Comput-Aided Des*, 2012, 44: 879–900
- 3 Tanga H H, Leeb Y Y, Gero J S. Comparing collaborative co-located and distributed design processes in digital and traditional sketching environments: a protocol study using the function-behaviour-structure coding scheme. *Design Stud*, 2011, 32: 1–29
- 4 Pedro C, Manuel C, Peter V, et al. Computer-aided sketching as a tool to promote innovation in the new product development process. *Comput Ind*, 2009, 60: 592–603
- 5 Olsen L, Samavati F F, Sousa M C, et al. Sketch-based modeling: a survey. *Comput Graph*, 2009, 33: 85–103
- 6 Paczkowski P, Kim M H, Morvan Y, et al. Insitu: sketching architectural designs in context. *ACM Trans Graph*, 2011, 30: 182
- 7 Becroft D, Bassett J, Mejia A, et al. AIPaint: a sketch-based behavior tree authoring tool. In: *Proceedings of the Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment*. Palo Alto, 2011
- 8 Dai G Z, Tian F. Pen-Based User Interface. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009 [戴国忠, 田丰. 笔式用户界面. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009]
- 9 Xue T F, Liu J Z, Tang X O. Example-Based 3D Object Reconstruction from Line Drawings. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Providence, 2012. 302–309
- 10 Cheon S, Kim B C, Mun D, et al. A procedural method to exchange editable 3D data from a free-hand 2D sketch modeling system into 3D mechanical CAD systems. *Comput-Aided Des*, 2012, 44: 123–131
- 11 Martens J, Parthesius F, Atasoy B. Design TeamMate: a platform to support design activities of small teams. In: *Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI'10)*. Roma, 2010. 119–126
- 12 Li G, Cao X, Paolantonio S, et al. SketchComm: a tool to support rich and flexible asynchronous communication of early design ideas. In: *Proceedings of the ACM 2012 conference on Computer Supported Cooperative Work*. Seattle, 2012. 359–368
- 13 Al-kazzaz D A, Bridges A. A framework for adaptation in shape grammars. *Design Stud*, 2012, 33: 342–356
- 14 Cluzel F, Yannou B, Dihlmann M. Using evolutionary design to interactively sketch car silhouettes and stimulate designer's creativity. *Eng Appl Artif Intell*, 2012, 25: 1413–1424
- 15 Gross M D. Visual languages and visual thinking: sketch based interaction and modeling. In: *Proceedings of the 6th Eurographics Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling (SBIM'09)*. New Orleans, 2009. 7–11
- 16 Jin Y, Benami O. Creative patterns and stimulation in conceptual design. *Artif Intell Eng Des Anal Manuf*, 2010, 24: 191–209

A computer-aided design technology based on creative point

SUN LingYun, WANG ChangLu, CHAI ChunLei*, FENG KaiXuan & XIANG Wei

Modern Industrial Design Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

*E-mail: dishengchai@126.com

Abstract Sketch is an important creative tool for product design. In the sketching process design thinking and sketch expressing promote each other, involving the interaction between designer's actions of brain, hand and eye. The sketching process can be described as a Creative Point graph. This paper proposes a computer-aided design method based on Creative Point to support sketching process. This method recognizes sketching behaviors, and distinguished Creative Points by constructing a Creative Point rule base, and refines the rule base to avoid

overfitting. A Creative Point graph is also created to record the design process and support designers' sketching. Finally, a computer-aided sketch system prototype CASC is developed using the method, which proves effective in Creative Point recognition. A sketching case using CASC is also presented.

Keywords creative point, design thinking, sketching, sketching behavior analysis, computer-aided sketch

SUN LingYun was born in 1981. He received his Ph.D. degree in Zhejiang University. Currently, he is an associate professor at Industrial Design Department of Zhejiang University. His research interest includes industrial design, sketch and design cognition, interactive design, computer aided conceptual design and industrial design.

WANG ChangLu was born in 1989. He is currently working toward the master degree at the School of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou. His research interest includes human-computer interaction, interactive design, and industrial design.

Chai ChunLei was born in 1978. He received his Ph.D. degree in Zhejiang University. Currently, he is an associate professor at Industrial Design Department of Zhejiang University. His research interest includes industrial design, computer aided conceptual design and industrial design.