

# 基于数位笔压感的汽车三维手绘系统研究\*

龚永坚<sup>1</sup> 宣翠仙<sup>1</sup> 楼建忠<sup>1</sup> 李强<sup>2</sup>

(1. 金华职业技术学院信息工程学院, 金华 321017; 2. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130025)

**摘要:** 在分析当前三维手绘系统问题的基础上,通过对数位笔压感信息的分析,提出了一种基于数位笔压力感应的三维手绘曲线生成方法,据此开发了基于数位笔压力感应的汽车三维手绘系统原型,并在汽车三维手绘造型 AutoSketch 系统中进行了集成应用测试。测试结果表明,所开发的原型系统能够很好地融合到 AutoSketch 系统中,并且操作命令识别效率高、计算时间短。

**关键词:** 汽车造型 三维手绘 数位笔 压感 笔触

**中图分类号:** TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0314-05

## 3D Automotive Sketching System Based on Pressure-sensitivity of Digital Pen

Gong Yongjian<sup>1</sup> Xuan Cuixian<sup>1</sup> Lou Jianzhong<sup>1</sup> Li Qiang<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Jinhua Polytechnic, Jinhua 321017, China

2. School of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** As far as current 3D sketching system is concerned, two main problems are obvious. One is few applications on automotive engineering, the other is that pressure-sensitive information is seldom used to create the third direction curve, though both methods of projection and surface intersection are usually used. Based on analysis of current pressure-sensitive technology of digital pen, a system structure of 3D automotive sketching system based on pressure-sensitivity of digital pen was proposed. Then, detailed software surrounding and hardware surrounding on developing the 3D automotive sketching system were proposed. Realization methods of 3D sketching system based on digital pen's pressure sensing were important and discussed in detail. There were four steps in the realization methods, which were creating reference plane, extracting pressure-sensitive information, creating and editing 3D curve, creating and editing 3D surface. During creating a 3D curve, the focus was on drawing original curve, dealing with the single stroke and parameterization of stroke, and fitting two curves. Finally, the system was integrated with AutoSketch system and tested, and a prototype for 3D automotive sketching based on pressure-sensitivity of digital pen was completed. The test results showed that the prototype system matched the AutoSketch system well. It was good at high recognition efficiency of operation command and short computation time. However, during the test, it was found that when fitting a single stroke, the beginning and end of the curve could not accurately pass the beginning and end tip of the given data points. The fitting method which is good at clamping might be suggested and adopted.

**Key words:** Automotive styling 3D sketching Digital pen Pressure-sensitivity Stroke

### 引言

在手绘汽车设计方式中,运用计算机进行辅助

造型设计成为主流发展趋势。从造型生成的视觉效果看,CAD 主要方法包括基于平面表达的二维软件设计、基于立体表达的三维软件设计等<sup>[1-2]</sup>。用符

合设计师工作习惯的“绘画”形式直接建立汽车三维模型,能更快速便捷地完成造型设计,从而缩短设计周期。而从人与计算机的交互技术角度看,人机交互输入方法主要包括基于 LCD 电子数字笔的输入、基于数位笔和数位屏的输入等<sup>[3-4]</sup>。基于数位笔和数位屏的输入方法运用二维输入模式对二维笔触进行捕捉,再通过立体视屏将二维笔触转换成三维笔触,手势操作更接近自然绘图习惯。

纵观国内外 CAD 领域基于手绘草图的三维建模系统,以光纤为传感输入的 Shape tape 系统, Gesture 3D 系统,空间曲线绘制系统 Digital tape drawing,都是基于 LCD 电子数字笔进行手绘笔触数据的输入,再通过数据的识别与整合,在具有空间透视效果的三维视觉显示器中显示<sup>[3-6]</sup>。由于这类系统的笔触数据输入方式基于二维平面,故难以实现车身形面信息的无损映射。随着数位笔、数位板、数位屏技术的不断发展,以及其操作类似传统纸笔手绘的特点,基于这种交互技术进行笔触输入的手绘三维系统不断涌现<sup>[7-9]</sup>。Google 公司的 SketchUp 系统能快速进行三维场景的设计,主要运用在建筑领域<sup>[10]</sup>。日本东京大学的 TEDDY 系统,用户通过数位笔在数位屏上绘制出二维轮廓线条,系统则自动构建一个三维多面体,且能使用拉伸、删除等手绘命令。但因系统采用挤出方式生成三维形体,导致构建的模型不够精确,仅适用于卡通玩具造型<sup>[11]</sup>。浙江大学丁展等基于手绘草图的三维 CAD 系统 Pencil,基本实现了语义草图表达和获取框架等功能,在基于笔势界面的三维创建方面作了改进<sup>[12]</sup>。赵鹏等提出了融合熵和势能的手绘草图特征描述方法,缪永伟等将三维手绘方法融入雕刻中<sup>[13-14]</sup>。张开兴等、杨云志等用投影方法于作物重建中,但上述三维建模系统多用于机械、玩具、农业等领域,不是专为汽车造型设计服务的<sup>[15-19]</sup>。

在汽车造型设计领域,吉林大学李强等开发了一种 AutoSketch 系统,该系统通过曲面相贯、投影等方法生成三维手绘曲线,进而在几何造型引擎 ThinkDesign 平台上完成汽车三维手绘系统<sup>[5-9,20]</sup>,是三维手绘在汽车领域的新尝试。但这两种生成方法均侧重于二维草图获取后的三维曲线生成方法研究。而在实际绘图中,草图生成前数位笔的压力、角度信息变换对笔触粗细、深浅等信息会造成直接影响<sup>[12,20-21]</sup>。为克服上述方法的不足,本文基于对数位笔压力感应的研究,将压感信息融入语义草图表达中,开发基于数位笔压力感应的汽车三维手绘系统原型,并在 AutoSketch 系统中进行集成。

## 1 手绘感应设备——数位笔/数位板/数位屏

数位笔是手绘输入的设备,是具有压力感应能力的压感笔,一般与数位板/屏配套销售。压感笔通过在数位板/屏上绘制,结合电脑绘图软件,生成并在屏幕上显示各种笔触。比较著名的生产公司有 Wacom、汉王、友基等。

从数位板/屏的感应技术发展情况看,当前专业绘图领域中数位板/屏的感应主要采用电磁感应技术。数位板/屏中由内部线圈产生磁场,笔的位置通过数位笔在空间移动感应磁场变化来判断,最后处理生成坐标值。1987 年,Wacom 研究团队首次生产有压力感应的数位笔,这种压感数位笔能感应用户在空间从笔尖施加的压力,并能真实反应笔触中深浅不一的变化<sup>[11]</sup>。至 2010 年,Wacom 产生的高端数位板已经能提供 1 024 级压力感应,并配有符合人体工程学设计的无线无源数位笔,可方便地实现手绘。近年来生产的汉王笔和 Wacom 九位,还具有感应角度变化的能力。当笔倾斜时,数位板通过测算笔远近两侧的磁力线差异判断笔的倾斜程度,在软件中形成一个向一侧喷溅的笔迹<sup>[5-8]</sup>。基于数位笔压力和角度倾斜空间技术的数位板/屏,是未来发展的主要趋势<sup>[10]</sup>。纵观当前手绘领域,数位笔主要用于生成二维图形,尚未将压力和角度信息有效利用用于三维曲线的直接生成。

## 2 系统开发环境

本研究开发的汽车三维手绘系统,采用 Wacom 公司生产的数位笔和数位板等交互设备作为输入设备,以 CAD 几何造型引擎 ThinkDesign 作为基础平台,利用 ThinkDesign 的 API 接口进行二次开发。系统开发以 Microsoft Visual Studio 2008 作为语言运行环境,C++ 语言作为编程工具,继承 AutoSketch 原型的部分组件,并采用 Windows XP 以上操作系统。计算机主机选用当前主流配置,系统最小内存容量 2 GB,虚拟内存 3 GB 或以上,处理器最低要求 Intel Pentium,硬盘空间最低要求 1 GB,显卡应具有 128 MB OpenGL ES 2.0 及以上图形加速器。系统硬、软件开发环境如图 1 所示。

## 3 基于数位笔压感的汽车三维手绘系统实现方法

所开发的基于数位笔压感的手绘系统的主要功能包括:手绘曲线、手绘命令操纵、识别标准图形、曲线创建与编辑、曲面生成与编辑等。该系统利用 ThinkDesign 的 API 二次开发应用接口及 AutoSketch

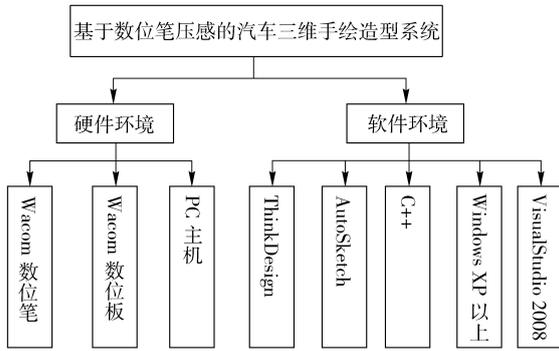


图1 基于数位笔压感的汽车三维手绘系统开发环境

Fig.1 Development environment of pressure-sensitivity based 3D automotive sketching system

原型的部分组件生成三维手绘原型系统,其实质是ThinkDesign的一个插件。

### 3.1 参考面的确立

在三维手绘系统中,确定参考面是绘图的重要基础。本系统中的参考基准面以车身坐标为原点,并在系统启动时与系统原点重合。它主要是利用了ThinkDesign中的车轮生成功能函数Wheel、网格生成函数Hatches和API函数AddPlane生成通过车轮4个中心点的水平基准面、中垂基准面以及通过前轮轴心的竖起基准面。三维参考系统如图2所示。

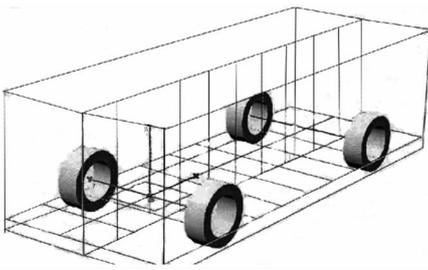


图2 三维手绘参考系统

Fig.2 Reference system for 3D sketching

### 3.2 数位笔压感信息获取

Wacom数位板/笔自带驱动程序中提供了感应数位笔压力和角度信息的接口,因此当设计人员通过数位笔在数位板上绘制时,笔的压力信息随运动轨迹坐标实时被输送到空间的工作平面。笔的运动轨迹通过手绘笔触的采样点序列数组来表示,压力信息通过旋转变换与笔触的二维坐标建立映射关系,并确定为第三维坐标值(如深度),而笔触数据点被统一存储于动态数据中。对于单笔触数据,运用单笔触结构体记录笔触在动态数据中的起点、终点位置及所包含数据点总数。对于多笔触数据,记录输入笔触的总数和笔触输入先后顺序,以为多笔触融合提供良好的数据基础。另外,压力信息也被转换成颜色的深浅以及笔触的宽度或作用范围,在笔触修改时可以通过压力来影响笔触被修改的趋势大小,如图3所示。

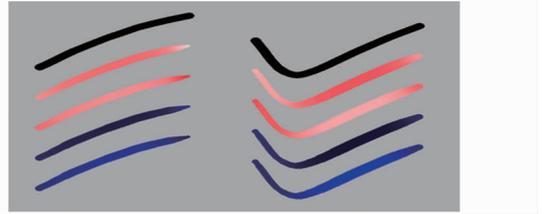


图3 压力转换为笔触的宽度和颜色

Fig.3 Pressure converted to width and color of strokes

## 3.3 三维曲线创建与编辑

### 3.3.1 原始曲线的绘制

在原始曲线绘制时,通过数位笔的事件响应获取二维线的位置及压力信息;通过坐标点的转换,运用OpenGL的图形绘制管道功能,将二维坐标转换为三维坐标并投影到当前工作面上,给定数组存储所有点,并调用创建曲线的功能函数进行曲线创建。

### 3.3.2 单笔触处理与参数化

对于包含压力信息的多笔触,选用参数多项式最小二乘法进行拟合,即让逼近曲线上具有参数值的点与数据点的距离的平方和达到最小,来拟合获取理想的数据点和笔触趋势。为此,逼近曲线的多项式基选择幂基,相应的参数多项式曲线方程为

$$p(\mu) = \sum_{i=1}^n a_i \mu_i, \text{ 其中 } a_i \text{ 为待定的系数矢量。在参数化坐标系中,对参数 } \mu \text{ 进行分割,给 } n+1 \text{ 个数据点 } p_i (i=0, 1, \dots, n) \text{ 赋予相应的参数 } \mu_i, \text{ 形成有序数据点,从而确定一条插值于 } n+1 \text{ 个数据点 } p_i \text{ 的参数曲线,每个参数值称为节点。在对数据点进行参数化过程中,选用积累弦长参数化方法对数据点进行参数化,即 } \mu_i = \mu_{i-1} + |\Delta p_{i-1}| \text{。这种方法克服了数据点按弦长分布不均匀时采用均匀参数化所出现的问题,从而使所插值的曲线具有较好光顺性。分散数据点的拟合效果如图4所示。}$$

这种参数化方法对数据点进行参数化,即  $\mu_i = \mu_{i-1} + |\Delta p_{i-1}|$ 。这种方法克服了数据点按弦长分布不均匀时采用均匀参数化所出现的问题,从而使所插值的曲线具有较好光顺性。分散数据点的拟合效果如图4所示。

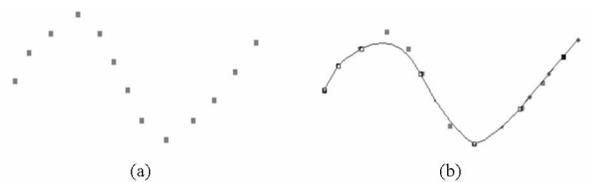


图4 分散数据点拟合效果

Fig.4 Distributed data and fitted curve

(a) 输入的分散数据点 (b) 拟合后的曲线与数据点

### 3.3.3 2条曲线的拟合

对于2条曲线的拟合,如果当前原始曲线是第一笔,则对该曲线上的点通过Douglas算法,稀释点集个数后重新绘制曲线。若不是第一笔,则对当前曲线和上一次拟合的曲线进行拟合,输出新曲线点集,再通过Douglas算法稀释后绘制新的拟合曲线,从而将2条原始曲线拟合优化为光顺的曲线。

### 3.4 三维曲面生成与编辑

曲面的生成主要包括曲面填充、旋转、拉伸等方法。曲面填充舍弃对内部曲线的参考,将约束条件简化为边界曲线的选择和封闭性的判断,调用 ThinkDesign 中的 API 函数 AddLoftStretched,用 primaryCry 表示 TDCurve 或者 TDPArCv 类型的边界曲线,曲线数量为 1 条、3 条或 4 条。旋转曲面的创建主要通过调用 ThinkDesign 中的 API 函数 AddRevolution,将剖面线轴向量旋转扫描生成曲线。曲面拉伸通过线性路径扫描曲线进行曲面生成,先选择基础曲线,并将工作面移到该曲线上,根据拉伸方向和长度生成拉伸曲面。

在整车曲面生成过程中,为了使曲线挺拔饱满,通常会故意延长,这样会导致曲面超出实际需要的范围,因而需要进行裁剪。基于手绘方式的分割曲面方法是:首先选择被分割的曲面,然后用数位笔手绘分割曲线,同时系统自动将曲线投影至曲面上,曲面被分割,最后再用“删除”的手绘命令删除曲面。运用上述方法实现的基于数位笔压感信息的汽车前 3/4 透视车曲线与曲面模型如图 5 所示。

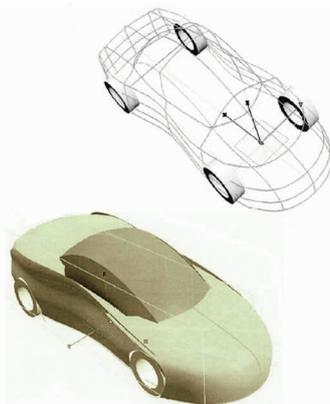


图 5 汽车前 3/4 透视曲线与曲面模型

Fig.5 3/4 automotive perspective curve and surface model

## 4 集成测试

本研究最终将基于数位笔压感的汽车三维手绘功能与 AutoSketch 进行集成。集成后的系统主要功能包括基于数位笔压感手绘的三维曲线创建及编辑、图形规整、笔触融合、三维曲面生成与编辑等。集成于 AutoSketch 系统后,根据手绘命令进行系统功能与操作实时性的测试。左手按键与数位笔配合的主要手绘命令、功能如表 1 所示。

表 1 系统主要手绘命令

Tab.1 Part of sketching command of system

编号	功能	显示图标和说明	光标	左手按键					右手笔					
				Ctrl	Shift	Alt	Tab	PgUp	PgDn	笔尖	中键	右键		
1	主功能切换	缩放			●								●	
		手绘		当前光标		●								
		操纵		当前光标		●								
		修改		当前光标		●								
2	手绘命令	None 无效命令,图标不亮			●									●
		原点			●									●
		确认			●									●
		撤销			●									●
		重做		问号笔	●									●
		删除			●									●
		连接			●									●
		打断			●									●
		延展			●									●
3	手绘多笔触	切换封闭模式:0—自然相交;1—三点曲率连续;2—切点连续				●								●
		拟合成一个单一笔触												●
4	多笔触拟合结束	拟合成一个单一笔触												●
		切换工作平面		手绘选择	●									●
5	切换工作平面	按键切换		手绘命令										●
				当前光标				●						
6	曲面上手绘曲线	先选择曲面若干,绘制曲线,投影到曲面上		手绘笔										●

在与 AutoSketch 系统的集成测试中,通过 5 位资深造型师对表 1 中的主要手绘命令进行了用户测评,如表 2 所示。测试结果表明,融入压力信息后的

手绘命令识别效果较好,所需时间较短,准确率高。在测试中也发现,对于单笔触的拟合,当数据点密集时,参数多项式逼近的方法处理后的曲线笔触光滑

度较好。但由于缺少固支条件,曲线头尾不能准确通过所给数据点的头尾端点。

表2 系统主要手绘命令用户测评

Tab.2 User evaluation for partial sketching command of system

命令	用户分数					最小值	最大值	平均值
	1	2	3	4	5			
圆点	93	98	95	96	94	93	98	95.2
确认	94	93	98	95	94	93	98	94.8
撤销	96	95	97	94	96	94	97	95.6
重做	94	95	98	96	95	94	98	95.6
删除	95	98	96	95	98	95	98	96.4
连接	96	90	98	96	98	90	98	95.6
打断	97	97	98	96	89	89	98	95.4
延展	92	95	98	96	98	92	98	95.8

## 5 结束语

基于数位笔压感信息的汽车三维手绘系统,以ThinkDesign作为二次开发平台,在继承原有AutoSketch原型系统的笔触编辑等基本功能的基础上,融入了数位笔的压力感应信息,形成能根据数位笔的压力感应变换生成相应三维曲线和汽车曲面造型。经过集成测试,结果表明新增的压力感应信息获取功能可以很好地融合到AutoSketch系统中,实时性较好,计算时间短,笔压信息比较方便地表现出真实的笔触效果。但对于笔触的拟合,对固支条件和参数的精确度要求较高。基于数位笔压感的手绘方式在汽车造型设计中的应用,为汽车造型CAD提供了新的设计模式。

## 参 考 文 献

- Bae S H, Balakrishnan R, Singh K. Everybody loves sketch: 3D sketching for a broader audience[C]//UIST 2009, 2009:59-68.
- Bae S H, Balakrishnan R, Singh K. I love sketch: as natural as possible sketching system for creating 3D curve models[C]//UIST 2008, 2008:151-160.
- Tovi Grossman, Ravin Balakrishnan, Gordon Kurtenbach, et al. Creating principal 3D curves with digital tape drawing[D]. Toronto: University of Toronto, 2012.
- Xu H Y, Fang X, Tam H, et al. A second-order algorithm for curve orthogonal projection onto parametric surface[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2012, 89(1): 98-111.
- Xuan C X, Gong Y J, Li Q. Research progress of 3D style design based on sketching[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 423-426:1819-1822.
- Li Q, Qi N, Gong Y J. An algorithm of multi-stroke combination in the automotive styling[C]//2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2011, 1: 417-420.
- Li Q, Zhang X F, Zhang C F. 3D sketching in autosketch[C]//2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2011:433-436.
- Li Q, Wang X, Qi N, et al. Surface matching by using the simple strategy in the application of automotive styling[C]//2010 International Conference of Information Science and Management Engineering, 2011: 253-256.
- Xuan C X, Gong Y J, Li Q, et al. Study on 3D freehand stroke creation[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(5):1-13.
- Kara L B, Shimada K. Construction and modification of 3D geometry using a sketch-based interface[C]//Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling, 2006:59-66.
- Igarashi T, Matsuoka S, Tanaka H. Teddy: a sketching interface for 3D freeform design[C]//Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series(SIGGRAPH'07), 2007:21.
- 丁展, 胡华强, 彭维, 等. 三维手绘CAD系统的设计与表达[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2005, 17(10):2359-2366.
- Ding Z, Hu H Q, Peng W, et al. Designing and expression in sketch-based 3D CAD system[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(10):2359-2366. (in Chinese)
- 赵鹏, 朱伟伟, 吴献文, 等. 融合熵和势能的手绘草图特征描述方法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2014, 42(5): 122-127.
- Zhao P, Zhu W W, Wu X W, et al. Feature description method for freehand sketch by combining entropy and potential energy[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(5):122-127. (in Chinese)
- 缪永伟, 王洪军, 张旭东. 基于手绘线条的三维模型雕刻[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2014, 26(2):263-271.
- Miao Y W, Wang H J, Zhang X D. Sketch curves based sculpture on 3D models[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(2):263-271. (in Chinese)
- 张开兴, 张树生, 刘贤喜. 三维CAD模型检索技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7):256-263.
- Zhang K X, Zhang S S, Liu X X. Current research and future development of 3D CAD model retrieval[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 256-263. (in Chinese)
- 刘刚, 司永胜, 冯娟. 农林作物三维重建方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6):38-46.
- Liu G, Si Y S, Feng J. 3D reconstruction of agriculture and forestry crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 38-46. (in Chinese)
- 刘晓平, 吴正, 李琳. 手绘二维曲线自动生成三维模型研究[J]. 工程图学学报, 2011, 32(3):17-22.
- Liu X P, Wu Z, Li L. Automatic generation of 3D model based on sketch[J]. Journal of Engineering Graphics, 2011, 32(3): 17-22. (in Chinese)

- 7 苏占胜,秦其明,陈晓光,等. GIS技术在宁夏枸杞气候区划中的应用[J]. 资源科学,2006,28(6):68-72.  
Su Zhansheng, Qin Qiming, Chen Xiaoguang, et al. Application of GIS for climate mapping of Chinese wolfberry in Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Resources Science, 2006, 28(6): 68-72. (in Chinese)
- 8 赵子征,彭高军,辛本胜. 我国西北地区节能型日光温室蔬菜生产气候区划[J]. 农机化研究,2006(5):87-90.  
Zhao Zizheng, Peng Gaojun, Xin Bensheng. The climatic regionalization for vegetable production in energy-saving solar greenhouse in northwest of China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(5): 87-90. (in Chinese)
- 9 赵辉,米鸿涛,杜子璇. 基于AHP的模糊综合评判在茶叶气候种植区划中的应用[J]. 气象科技,2013,41(6):1134-1137.  
Zhao Hui, Mi Hongtao, Du Zixuan. Application of AHP-based fuzzy comprehensive evaluation in climate regionalization for tea planting[J]. Meteorological Science and Technology, 2013, 41(6): 1134-1137. (in Chinese)
- 10 何奇瑾,周广胜. 我国夏玉米潜在种植分布区的气候适宜性研究[J]. 地理学报,2011,66(11):1443-1450.  
He Qijin, Zhou Guangsheng. Climatic suitability of potential summer maize planting zones in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(11): 1443-1450. (in Chinese)
- 11 Wang Hu, Zhang Xiaodong, Li Shaoming, et al. Spatial clustering and outlier analysis for the regionalization of maize cultivation in China[J]. WSEAS Transactions on Information Science and Applications, 2010, 7(6): 850-859.
- 12 张晓煜,李红英,陈卫平,等. 宁夏酿酒葡萄品种生态区划[J]. 生态学杂志,2014,33(11):3112-3119.  
Zhang Xiaoyu, Li Hongying, Chen Weiping, et al. Ecological regionalization of wine grape varieties in Ningxia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(11): 3112-3119. (in Chinese)
- 13 张建军,马晓群,许莹. 安徽省一季稻生长气候适宜性评价指标的建立与试用[J]. 气象,2013,39(1):88-93.  
Zhang Jianjun, Ma Xiaoqun, Xu Ying. Establishment and application of growing climatic suitability indicator of single cropping rice in Anhui Province[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(1): 88-93. (in Chinese)
- 14 何亚娟,潘学标,裴志远,等. 县域尺度玉米产量信息空间变异性研究[J]. 农业机械学报,2013,44(2):214-217,231  
He Yajuan, Pan Xuebiao, Pei Zhiyuan, et al. Spatial variability of corn yield at county-scale[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 214-217, 231. (in Chinese)
- 15 龙志长,段盛荣,龙晖,等. 湖南省春玉米生育气候条件分析及种植区划[J]. 作物研究,2005,19(2):83-86.
- 16 高桂芹,郭丽霞. 2005年唐山市夏播玉米空秆、畸形穗气象因素分析[J]. 玉米科学,2006,14(增刊1):119-120,122.  
Gao Guiqin, Guo Lixia. Analysis of the cause of meteorological formation of barren stem, crooked fringe on summer maize of Tangshan in 2005[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(Supp. 1): 119-120, 122. (in Chinese)
- 17 刘天增,曹卫东. 玉米倒伏的气象指标与防御技术[J]. 河南农业,2008(17):17.
- 18 徐丽丽,朱德海,张晓东,等. 基于SuperMap Objects的玉米县域种植环境信息分析及应用[J]. 安徽农业科学,2008,36(24):10612-10614  
Xu Lili, Zhu Dehai, Zhang Xiaodong, et al. Analysis and application of corn county planting environmental information based on SuperMap Objects[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(24): 10612-10614. (in Chinese)
- 19 GB/T 28591—2012 风力等级[S]. 2012.
- 20 宋朝玉,张继余,张清霞,等. 玉米倒伏的类型、原因及预防、治理措施[J]. 作物杂志,2006(1):36-38.
- 21 徐秀德,刘志恒. 玉米病虫害原色图鉴[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2009.
- 22 郭厚文. 玉米大斑病发病规律及防治技术[J]. 河北农业科学,2007,11(4):62,64.  
Guo Houwen. The occurrence of maize spot disease and controlling methods[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2007, 11(4): 62, 64. (in Chinese)
- 23 王晓梅,刘国宁,田宇光,等. 长春地区玉米大斑病流行指数增长长期的病情增长研究[J]. 玉米科学,2007,15(5):133-135,138.  
Wang Xiaomei, Liu Guoning, Tian Yuguang, et al. The studies on the increase of disease of *Exserohilum turcicum* in the exponential stage in Changchun region[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(5): 133-135, 138. (in Chinese)
- 24 张洋. 玉米大斑病的发生与防治[J]. 杂粮作物,2008,28(2):116-117.
- 25 吴格娥,张家卫,石群. 几个玉米新品种的丰产性及对大斑病的抗性比较试验[J]. 黔东南民族职业技术学院学报:综合版,2007,3(1):16-18.
- 26 黄志敏. 带约束条件的交互式空间聚类算法研究[D]. 北京:中国农业大学,2007.  
Huang Zhimin. Interactive constrained spatial clustering algorithm [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 27 河北农业科技编辑部. 秀青73-1(国审玉2005019号)介绍[J]. 河北农业科技,2006(11):35.

(上接第318页)

- 18 宋沫飞,孙正兴,张尧焯,等. 用单幅草图的正交多面体模型生成方法[J]. 计算机辅助设计与图形学报,2012,24(1):50-59.  
Song M F, Sun Z X, Zhang Y Y, et al. Rectangular polyhedron reconstruction from single sketchy drawing[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(1): 50-59. (in Chinese)
- 19 杨云志,王小平,张维中. 基于投影法的过渡曲面构造方法[J]. 中国机械工程,2014,25(6):780-785.  
Yang Y Z, Wang X P, Zhang W Z. Constructing transition surface based on curve projection [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(6): 780-785. (in Chinese)
- 20 桑涛,汤艳萍. 手绘系统中三维标准几何图形的绘制[J]. 东北师大学报:自然科学版,2013,44(3):69-75.  
Sang T, Tang Y P. Recognition algorithm for 3D graphics[J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 2013, 44(3): 69-75. (in Chinese)
- 21 Eitz M, Hays J, Alexa M. How do humans sketch objects? [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 1-44.