

变量施肥处方图识别与位置滞后修正方法*

孟志军¹ 赵春江¹ 付卫强¹ 冀永祥² 武广伟¹

(1. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097; 2. 商丘市农机化技术推广鉴定站, 商丘 476000)

【摘要】 处方图变量施肥作业系统的技术关键在于根据处方图精确一致地“按图作业”。基于面向对象方法,设计并实现了变量施肥作业系统控制软件,提出基于作业机械位置的实时处方图识别算法,测试结果表明,单位处方识别时间不超过 100 ms,能够满足实际系统作业的需要。在分析位置滞后原因的基础上,建立了变量施肥作业系统的位置滞后模型,通过田间实测试验,施肥时间延迟为 1.84 s。

关键词: 变量施肥 处方图 位置滞后 修正

中图分类号: TP242.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0204-06

Prescription Map Identification and Position Lag Calibration
Method for Variable Rate Application of Fertilizer

Meng Zhijun¹ Zhao Chunjiang¹ Fu Weiqiang¹ Ji Yongxiang² Wu Guangwei¹

(1. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. Agriculture Machinery Technology Testing Appraisal and Extension Station of Shangqiu, Shangqiu 476000, China)

Abstract

The key technology for map-based variable rate application of fertilizer lies in fertilizer should be applied precisely at each location within the field according to prescription map. Software for variable rate application control was developed based on object-oriented programming approach. A kind of algorithm for real-time application map identifying relying on machine location was designed and successfully implemented. Field test showed that prescription map cell was identified less than 100 ms, which could meet the requirements of actual field application. A model to determine positional lag was developed for map-based variable rate application system by analysis of factors causing position lag. In addition, field tests were conducted and result showed that delay time was about 1.84 s.

Key words Variable rate applications of fertilizer, Prescription map, Position lag, Calibration

引言

变量施肥过程是指作业机械按照变量施肥处方图或实时传感器计算得出的施肥量,在一定农田区域范围内施用肥料。它是精准农业信息采集、分析决策等工作的后续,更是体现精准农业技术思想的关键步骤^[1~5]。根据系统工作原理不同,变量施肥分为基于处方图变量施肥作业系统和基于实时传感器的变量施肥作业系统。

处方图变量施肥作业系统包括 GPS 定位系统、嵌入式车载控制计算机、测速模块、阀控液压马达排肥控制模块、作业导航指示控制模块等组成。系统的基本原理是根据制定的作业处方,通常以嵌入式车载控制终端变量施肥作业软件中的 GIS 图层方式存储显示,同时实时获取 GPS 定位数据并得出某一具体时刻施肥量数据。施肥控制器将数字量形式的施肥量数据转换为模拟控制量,驱动施肥执行机构调整施肥量按期望值进行施肥作业。仅就处方图变

收稿日期: 2011-04-17 修回日期: 2011-05-15

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAB38B06,2009BADB5B03-2)和农业部“948”重点项目(2011-G32)

作者简介: 孟志军,副研究员,博士,主要从事农业智能装备与导航技术研究,E-mail: mengzj@nercita.org.cn

通讯作者: 赵春江,研究员,博士生导师,主要从事农业信息技术与精准农业技术研究,E-mail: zhaocj@nercita.org.cn

量施肥作业系统本身而言,其技术关键在于根据处方图精确一致地“按图作业”,要求系统如同“打印机”一样将处方图定义的施肥目标按位按量准确实施^[6]。本文在已有研究^[7]基础上设计面向对象的变量施肥作业系统控制软件,提出实时处方图识别方法和施肥位置滞后修正方法。

1 变量施肥作业系统控制软件的设计

基于机载作业控制终端的变量施肥作业软件是整个分布式变量施肥作业系统的核心,主要包括以下功能:①作业参数设置:包括作业地块、作业方向线和作业机械幅宽等参数定义。②处方图数据的导入、显示和存储。③处方图识别与变量作业控制:实时接收 GPS 定位信息并识别作业处方信息,并将施肥量数据发送到变量施肥控制器。④总线通信:协调总线上不同 ECU 模块进行协同工作,执行信息采集和发送控制指令。⑤实际作业数据记录:记录 GPS 位置、作业速度、目标施肥量、实际施肥量、时间等作业信息,供作业数据后处理分析使用。

1.1 基于作业工程的数据管理模式

由于变量施肥作业涉及控制、操作、作业对象和

数据较多,因此按照作业工程管理模式,将变量施肥作业的处方分析计算、田间变量实施和导航控制、作业数据后处理等过程有机地组织为一个完整的业务流程。一个作业工程记录了一次变量作业过程中所涉及到的所有数据和事件操作,包括:作业日志文件、作业地块文件、作业方向线(AB Line)、作业导航线、理论作业轨迹线、实际作业轨迹线、目标作业处方图、实际作业处方图、作业机械对象。

1.2 面向对象的程序设计方法

按照面向对象的设计思想,将作业工程中涉及到的数据和作业对象抽象为不同的类来表示,如图 1 所示。作业工程类管理所有数据和作业对象,在开始一次变量作业工程时,系统自动创建一个变量作业工程对象(CWorkSpace),该作业工程对象负责组织管理整个作业流程,创建相应的作业元素对象,如作业地块对象(CWorkField)、作业机械对象(CMachine)和作业日志对象(CWorkLog)等。作业地块对象负责创建并管理作业方向线(CABLine)、平行作业导航线(CNavigationLine)、作业轨迹线(CTrackLine)和作业处方图(CPrescriptionMap)等对象。作业机械对象负责管理实际施肥作业机械的所有位置和运动参数。

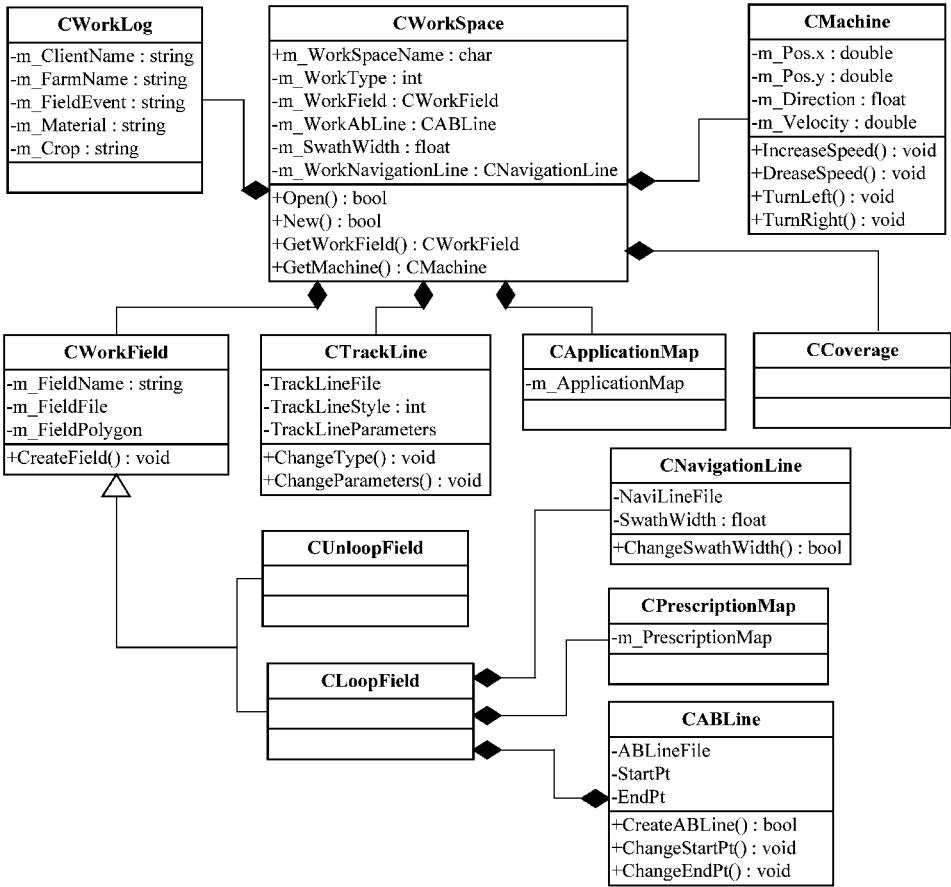


图 1 软件系统 UML 类图结构

Fig. 1 UML class diagram of software system

2 实时处方图识别算法设计

基于处方图的变量作业系统控制软件设计的关键算法之一就是处方图的实时识别。在 GIS 中,目标处方图体现为由多个不规则多边形区域组成的面状图层,不同的多边形区域具有各自的目标施肥量属性值。系统运行过程中,变量作业机械抽象为一个矢量点,由 DGPS 设备为其提供坐标值,要想确定作业机械当前的目标施肥量,必须实时判定它所处的多边形区域。因此,寻找一种简单、高效、快速的判定点在多边形内的算法,是变量施肥作业系统处方图实时识别的关键。

2.1 处方图识别算法设计

一些研究人员提出了点在多边形内的判断算法^[8~10]。在已有算法基础上,考虑处方图识别对实时性和识别速度的要求,借助嵌入式 GIS 组件的空间数据分析功能,设计了如下实时处方图识别算法,如图 2 所示。

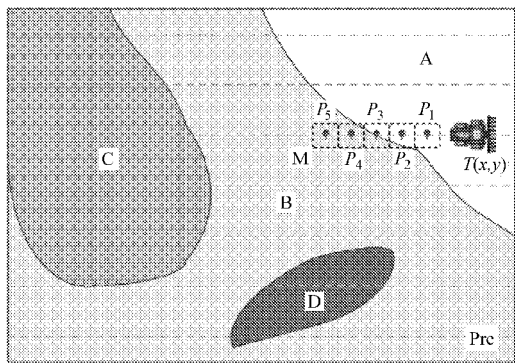


图 2 实时处方识别算法示意图

Fig. 2 Scheme of real-time application map identifying algorithm

假设施肥处方图是一个由 4 个简单多边形 A、B、C、D 组成的矢量图层 Pre, $T(x,y)$ 代表任意一刻均具有确定位置坐标的作业机械。 $T(x,y)$ 在从多边形 A 到多边形 B 的运动轨迹为 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5$, 其中 P_1 和 P_2 位于多边形 A 内, P_3 位于多边形 A 与多边形 B 的交界线上, P_4 和 P_5 位于多边形 B 内。

以 $T(x,y)$ 为中心, 生成一个边长为 2δ 的正方形 M, 满足 $2\delta \leq v_t$ 。其中 v_t 为作业机械的行走速度 (m/s), 由分布式变量施肥作业系统中的速度信号采集单元实时获取。

以 M 为查询边界, 利用 GIS 矢量数据集对象的边界查询方法, 查询图层 Pre 与 M 相交的多边形。因此有:

(1) $T(x,y)$ 运动到 P_1 处, 查询结果为多边形 A。

(2) $T(x,y)$ 运动到 P_2 处, 查询结果为多边形 A、B。再利用 GIS 中的点与四边形关系判断方法确认在 A 中。

(3) $T(x,y)$ 运动到 P_3 处, 查询结果为多边形 A、B, 同样利用点与四边形关系判断方法确认即在于多边形 A 中, 也在多边形 B 中。对于这种情况, 实际操作中可以给当前位置一个微小偏移 δ ($|\delta| \leq v_t$), 并重新判断, 直至得到一个确定的结果。

(4) $T(x,y)$ 运动到 P_4 处, 查询结果为多边形 A、B, 利用点与四边形关系判断方法确认在多边形 B 中。

(5) $T(x,y)$ 运动到 P_5 处, 利用点与四边形关系判断方法确认仍在多边形 B 中。

2.2 试验测试分析

利用上述算法编写处方图实时识别程序并进行测试。作业机械位置采样频率取 1 Hz, 设计包含 100×100 个多边形矢量处方图, 其中单位处方边长等于作业幅宽 (3.6 m)。测试结果表明识别处方归属的时间不超过 100 ms, 由于实际作业处方图层中多边形的数量远远小于 10 000 个, 因此该算法能很好地满足实际系统作业的需要。图 3 为变量施肥作业控制系统界面。图 4 为利用该系统进行冬小麦变量施肥作业使用的目标处方图和按照处方图作业后的实际施肥量空间分布图。作业地块长 48 m, 宽 192 m, 位于北京市昌平区小汤山国家精准农业示范基地。

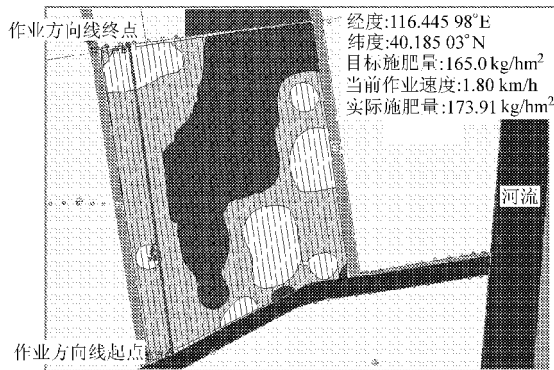


图 3 变量施肥作业控制系统界面

Fig. 3 Interface of variable rate application controlling software

3 施肥位置滞后修正方法

变量施肥作业系统各个组成部分在运行过程中都会产生误差, 影响整个系统的作业效果和精度。例如, GPS 在运动过程中的响应延迟所产生的影响^[11~13]。但是, 整个变量施肥机械的施肥位置滞后是影响作业精度的重要因素。

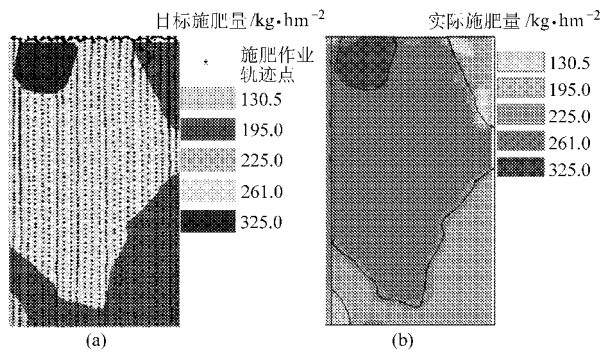


图 4 田间变量施肥作业效果

Fig. 4 Actual application results for variable rate application test

(a) 目标施肥处方图及作业轨迹点分布图
(b) 实际施肥量空间分布图

3.1 位置滞后模型

变量施肥作业系统位置滞后模型如图 5 所示, H_1 表示排肥槽轮底部至排肥口出口处的垂直距离, H_2 表示排肥口出口处到地面的垂直距离。施肥机的施肥位置滞后由 GPS 天线到肥箱中心距离 L_1 、肥箱中心至排肥出口距离 L_2 、肥料离开排肥口落到地面的距离 L_3 、排肥控制执行机构响应时间及肥料在排肥管内滑落到排肥口并最后抛撒到地面这段时间内作业机械前进的距离 L_4 等几个因素共同决定,即

$$L = L_1 + L_2 + L_3 - L_4 \tag{1}$$

式中, L_1 是 GPS 天线与肥箱中心线间距, 由施肥机组结构设计和安装尺寸决定, L_2 为肥箱中心到排肥出口在水平方向的投影距离, 由机器设计的机构尺寸决定, 排肥软管的长度为 d , 排肥管与垂直方向的夹角为 α , 则

$$L_2 = d \sin \alpha \tag{2}$$

L_3 为肥料离开排肥出口到落到地面按抛物线运动在水平方向上的距离, 由肥料颗粒离开排肥口的运动速度、方向、排肥口离地面的高度决定。

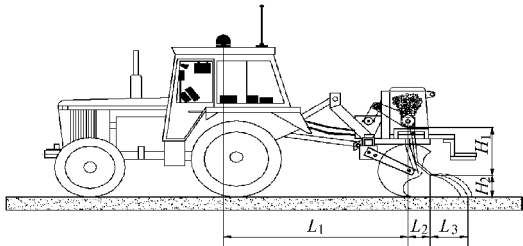


图 5 变量施肥作业系统位置滞后模型

Fig. 5 Scheme of position lag model for variable rate application of fertilizer system

假设肥料颗粒随强制层在带动层中排出时速度为零, 沿排肥管向下流出到排肥口出口这一段可以看作沿斜坡下滑过程, 到排肥口出口的速度为 v_0 , 则有

$$v_0 = \sqrt{2gH_1} \tag{3}$$

肥料颗粒离开排肥口作平抛运动, 假设肥料颗粒从排肥口到下落到地面所用时间为 t , 在水平方向上运动的距离为 L_3 , 则

$$L_3 = v_0 t \sin \alpha \tag{4}$$

$$H_2 = v_0 t \cos \alpha + \frac{1}{2} g t^2 \tag{5}$$

联立式(3)、(4)、(5)求解, 可以得出 L_3 。

L_4 主要由作业机械行驶速度和作业机械控制、液压和执行机构响应时间及肥料颗粒滑落和抛撒时间等参数综合决定

$$L_4 = v_i (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) \tag{6}$$

在式(6)中, v_i 表示当前作业机械的行走速度, t_1 包括机载控制终端运行的施肥控制程序解析 GPS 位置并在处方图上识别出施肥量的时间、将施肥量控制指令通过 CAN 总线发送到施肥控制器的时间以及施肥控制器的计算响应并发送模拟控制信号至电液比例阀的时间。上文中处方图识别算法和施肥处方图数据量的大小是影响 t_1 的主要因素; t_2 主要由电液比例阀控马达液压系统和槽轮排肥机构的响应时间决定; t_3 是肥料颗粒沿倾斜的排肥管下滑的时间, 计算公式为

$$t_3 = \frac{1}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{2H_1}{g}} \tag{7}$$

t_4 为肥料颗粒从离开排肥口到下落到地面的时间, 关系式为

$$H_2 = v_0 t_4 \cos \alpha + \frac{1}{2} g t_4^2 \tag{8}$$

综合式(2)、(4)、(6)可得基于处方图的变量施肥作业系统的总体位置滞后 L 。可以将上述施肥位置滞后转换为时间延迟并作为机载控制终端变量施肥控制程序调整的依据。系统的时间延迟计算公式为

$$t_{\text{delay}} = \frac{L}{v_i} \tag{9}$$

为了修正系统的施肥时间延迟, 在变量施肥控制程序中将这个延迟时间作为提前量 (Look-ahead) 对系统进行校准。

3.2 试验测试分析

为了测试系统施肥滞后距离和延迟时间, 设计了施肥量为 $0 \sim 375 \text{ kg/hm}^2$ 的变量施肥试验。通过在施肥量变化的交界线两边布置接肥托盘的方式来捕捉施肥量的变化过程。试验中, 施肥机行走方向上第 17 排接肥托盘开始有肥料颗粒出现, 将第 17 排接肥盘开始的肥料样品称量求平均, 并绘制沿行走方向上实际施肥量的变化图 (图 6)。施肥滞后距

离从施肥量开始变化的 10 m 交界线处算起,考虑试验环境引起的肥料样品取样误差,取实际施肥量达到目标施肥量的 95% 处为施肥滞后距离的结束点,此点在施肥机行走方向的 13.57 m 处。因此,可以估算出系统施肥滞后的实际距离约为 3.57 m。根据机载作业控制终端记录的此区段行走速度(表 1)计算平均作业速度为 6.99 km/h,由此可以计算出

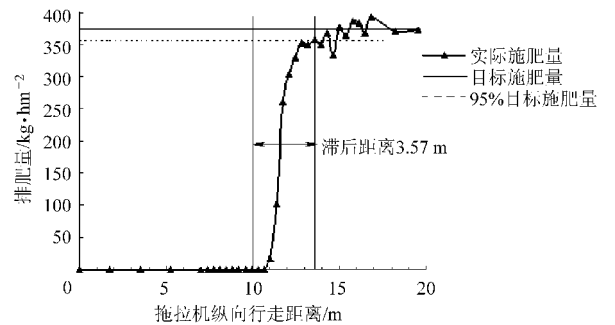


图 6 0~375 kg/hm² 施肥量变化过程的位置滞后

Fig. 6 Position lag for rate change process of 0~375 kg/hm²

表 1 0~375 kg/hm² 施肥量变化过程速度值

Tab.1 Velocity value for rate change of 0~375 kg/hm²

经度/(°)	纬度/(°)	速度/km·h ⁻¹
116.443 480 6	40.180 938 9	7.11
116.443 480 6	40.180 958 3	6.84
116.443 483 3	40.180 975 0	6.66
116.443 483 3	40.180 994 4	7.02
116.443 483 3	40.181 013 9	6.75
116.443 483 3	40.181 030 6	7.11
116.443 483 3	40.181 050 0	7.11
116.443 483 3	40.181 066 7	7.11
116.443 483 3	40.181 086 1	7.02
116.443 483 3	40.181 105 6	7.20

系统施肥时间延迟约为 1.84 s。

根据前述的位置滞后模型算法,系统的施肥延迟时间受作业机械的行驶速度、机械结构参数的影响,是一个变化的值。由此模型估算的当前作业机械施肥时间延迟为 1~3 s。实际施肥时间延迟为 1.84 s,由此可见,变量施肥位置滞后模型能够较好地估算时间延迟。对于不同的施肥机在进行变量施肥作业之前,在终端界面上,支持用户输入必要的施肥系统结构尺寸参数,使得控制程序能实时计算施肥时间延迟并进行动态修正,从而减少系统施肥误差。

4 结束语

结合分布式变量施肥作业控制系统的需求,按照面向对象的设计思想,基于作业工程的数据管理模式,开发了变量施肥作业系统控制软件。田间变量施肥作业试验表明,输入系统的目标施肥处方图和实际施肥量分布图具有较好的空间一致性。通过构造以变量作业机械当前位置为中心的查询正方形,利用 GIS 矢量数据集对象的边界查询方法及点与四边形关系判断方法,识别当前位置所属的目标施肥量多边形区域,实现实时处方图识别。处方识别实时性较好,测试结果表明,处方识别时间不超过 100 ms,能够很好地满足实际系统作业的需要。分析建立变量施肥作业系统的位置滞后模型,将施肥位置滞后转换为时间延迟作为系统修正量,并通过田间实测试验测试施肥时间延迟为 1.84 s,为变量处方施肥控制系统设计和作业过程中修正施肥位置滞后提供了理论依据。

参 考 文 献

1 刘成良,苑进,刘建政,等. 基于 ARM 和 DSP 的双变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊): 233~238.

Liu Chengliang, Yuan Jin, Liu Jianzheng, et al. ARM and DSP-based bivariable fertilizing control system design and implementation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(Supp.): 233~238. (in Chinese)

2 刘阳春,张小超,伟利国,等. 一种变量施肥技术的实现及其台架试验[J]. 农业机械学报,2010,41(9):159~162.

Liu Yangchun, Zhang Xiaochao, Wei Ligu, et al. Design and experiment of a variable rate fertilization control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9):159~162. (in Chinese)

3 梁春英,衣淑娟,王熙,等. 变量施肥控制系统 PID 控制策略[J]. 农业机械学报,2010,41(7):157~162.

Liang Chunying, Yi Shujuan, Wang Xi, et al. PID control strategy of the variable rate fertilization control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):157~162. (in Chinese)

4 于英杰,张书慧,齐江涛,等. 基于传感器的变量施肥机定位方法[J]. 农业机械学报,2009,40(10):165~168.

Yu Yingjie, Zhang Shuhui, Qi Jiangtao, et al. Positioning method of variable rate fertilizer applicator based on sensors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(10):165~168. (in Chinese)

5 齐江涛,张书慧,于英杰,等. 基于蓝牙技术的变量施肥机速度采集系统设计[J]. 农业机械学报,2009,40(12):200~204.

- Qi Jiangtao, Zhang Shuhui, Yu Yingjie, et al. Development of a ground speed collecting system for the variable rate fertilizer machine based on bluetooth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 200 ~ 204. (in Chinese)
- 6 赵春江. 精准农业研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 7 孟志军, 赵春江, 刘卉, 等. 基于处方图的变量施肥作业系统设计与实现[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 338 ~ 342.
- Meng Zhijun, Zhao Chunjiang, Liu Hui, et al. Development and performance assessment of map-based variable rate granular application system[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(4): 338 ~ 342. (in Chinese)
- 8 陈瑞卿, 周健, 虞烈. 一种判断点与多边形关系的快速算法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 59 ~ 63.
- Chen Ruiqing, Zhou Jian, Yu Lie. Fast method to determine spatial relationship between point and polygon[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1): 59 ~ 63. (in Chinese)
- 9 王润科, 张彦丽. 判断点与多边形位置关系的算法综述[J]. 甘肃联合大学学报: 自然科学版, 2006, 20(5): 32 ~ 36.
- Wang Runke, Zhang Yanli. The summarize of algorithm for judgment of relations between polygons and points[J]. Journal of Gansu Lianhe University: Natural Science Edition, 2006, 20(5): 32 ~ 36. (in Chinese)
- 10 周铁军. 平面多边形内外点判定算法评估[J]. 微计算机信息, 2006, 22(2 ~ 3): 231 ~ 233.
- Zhou Tiejun. The evaluation of point inclusion test for planar polygon[J]. Control and Automation Publication Group, 2006, 22(2 ~ 3): 231 ~ 233. (in Chinese)
- 11 Cerri D G P, Balastreire L A, Amaral J R. Development of a variable rate lime application system[C] // Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, 2002: 238 ~ 243.
- 12 Anglund E A, Ayers P D. Field evaluation of response times for a variable rate (pressure-based and injection) liquid chemical applicator[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(2): 273 ~ 282.
- 13 Fulton J P, Shearer S A, Higgins S F, et al. Rate response assessment from various granular VRT applicators[J]. Transactions of the ASABE, 2005, 48(6): 2 095 ~ 2 103.

(上接第 203 页)

- 2 Wagner W, Ullrich A, Melzer T, et al. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges [C] // Proceedings of the 20th ISPRS Congress, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, 2004, 35(B3): 201 ~ 205.
- 3 Popescu S C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne LiDAR [J]. Biomass and Bioenergy, 2007, 31(9): 646 ~ 655.
- 4 庞勇, 赵峰, 李增元, 等. 机载激光雷达平均树高提取研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(1): 152 ~ 158.
- 5 赵峰, 庞勇, 李增元, 等. 机载激光雷达和航空数码影像单株木树高提取[J]. 林业科学, 2009, 45(10): 81 ~ 87.
- 6 刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 83 ~ 90.
- 7 Rritberger J, Scnorr Cl, Krzystek P, et al. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(6): 561 ~ 574.
- 8 Chauve A, Mallet C, Bretar F, et al. Processing full waveform LiDAR data: modeling raw signals [C] // Proceedings of the ISPRS Workshop "Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Espoo, Finland, 2007, 36(3/W52): 102 ~ 107.
- 9 Wagner W, Ullrich A, Ducic V. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full waveform digitizing airborne laser scanner [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(2): 100 ~ 112.
- 10 Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data [C] // Proceedings of the 19th ISPRS Congress, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, Amsterdam, Netherlands, 2000, 33(B3): 935 ~ 942.
- 11 刘峰, 杨志高. 基于对象的激光点云数据城区树木识别方法[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(7): 73 ~ 77.