# １.同类项目国内外研究现状和水平

进入21世纪后，国家对发展农业机械装备的智能化和自动化水平非常重视，在“十二五”发展规划智能化制造试点的十大领域中也已包括了农业机械，同时也启动了“智能化农机技术与装备”国家863重大项目，主要包括施肥、播种、灌溉等农机具的智能化使用以及智能化的管理系统。

农机的自动导航技术是实现农业机械智能化和自动化的重要保障，农机自动导航技术是现代智能农业机械装备的一项重要技术，是实施定位处方农作和定位信息采集的有效支持技术，对开展精细农业的实践具有重要作用。农机的自动导航技术能够将将驾驶农机者从长时间枯燥的驾驶任务中解放，避免因为疲劳驾驶造成的安全问题，同时有效的提高整体作业过程中的精度，提高工作的效率，这对我国现代农业的发展也有巨大的推动作用。

农机自动导航技术涉及到多个领域，包括计算机应用、电子电气、现代控制、液压电机等，主要功能是根据各种导航传感器信息，引导农田作业机械按照预定的作业路线精确跟踪行走。主要由四个具体任务组成：首先农机对农机高精度定位，并得到高精度位姿，位姿包括农机当前的位置、航向角、速度等信息；其次是根据预定义路径实时计算的路径完成农机的路径跟踪，使农机与计划路径间的横向误差与航向偏角趋向于零，并沿期望路径持续行驶，常用的路径跟踪策略有PID控制、纯追踪模型、模糊控制和人工神经网络；并能根据计算得到的期望前轮转角和角度传感器得到的当前前轮转角控制控制农机自动转向；如果是无人农机还应实现路径上的实时障碍物判断并做出实际的响应。 下需分别就其过程中的主要关键技术的发展现状分别加以论述。

## 1.1高精度农机定位及位姿测定技术研究现状

农机的高精度定位及位姿测定技术通常采用GNSS技术或GNSS与其它技术相融合的方案。

GNSS技术(GPS,GLONASS，北斗)….(JH)

后面再等等材料

全球定位系统(GPS)自从建立以来，已得到了非常广泛的应用。影响GPS定位精度的主要因素主要有接收机共同的误差，包括卫星钟差和星历误差； GPS信号的延迟误差，包括电离层误差、对流层误差；接收机自身的误差，包括本身的噪音和多路径误差。The desired application accuracy in agriculture ranges from 12 – 40 cm for tillage to 2 – 4 cm for planting.单GPS系统提供的定位精度不能满足农机导航的基本需求，厘米级精度的实时动态载波相位差分技术又称RTK（Real Time Kinematic）技术在军事改造、城市规划、地形勘测、水利勘测、海洋建设、农业工程等领域都得到了广泛应用。

而在农业领域，国外的应用已相对成熟，国内仍有一定的差距。Cariou等利用RTK-GPS作为车辆导航唯一的传感器，并设计了基于卡尔曼滤波重构和非线性速度控制的控制算法进行农机的自动导航，田间实验证明可行；Connor等将高精度RTK-GPS用于农机导航中，利用四天线RTK-GPS系统为John Deere 7800 拖拉机提供位姿信息，当田间行驶速度为3.25km/h 时，航向误差不大于0.1°，直线跟踪标准差不大于2.5cm；Cordesses和Thuilot等人分别在2001年和2002年证明了RTK-GPS不仅适用于直线路径，曲线路径能实现较高精度的路径跟踪（约10cm）；Thuilot等人首先在2003年通过实验证明RTK-GPS是实现农机高精度自动导航的很合适的传感器，并指出了农机在颠簸路面行驶时出现侧倾情况对导航精度的影响，并于2006年进一步研究，通过比较农机实际运动状态与理想运动状态得到侧倾情况下的相关参数，建立扩展的运动学模型，并将模型预测控制方法用于自动导航中，设计了一套基于链式系统理论的农机非线性导航系统，该系统对于侧倾参数变化缓慢的情况具有误差约为15cm的导航精度，但在侧倾参数变化快的情况下效果较差。随着RTK导航技术的发展，学者开始将其用于农作物田间精细化管理，Ehsani等将RTK-GPS安装在播种机上，在播种过程中绘制种子的分布图（高精度的种子分布图可以用于杂草控制和作物管理，从而提高收获量），第二年的田间结果显示，实际作物生长的位置与种子图上的位置偏差在30至38mm范围内；为保证甘蔗采摘期间产量最大化，Ruxton等人开发了基于RTK-GPS的自动导航和定位系统，保证运输车与收割机的同步运行，其下一步的目标是优化收割机的速度，从而以最适合的速度最大限度提高甘蔗的收获量；Nagasaka等将RTK-GPS安装在SPU650六行插秧机上，并与惯性导航结合进行水田实验，12次直线导航的结果显示运动过程中横向偏差小于0.04 m，航向角误差小于3.6°；Sun等人和Perezruit等人分别使用安装RTK-GPS的农机在番茄种植期间绘制了田间种植图，结果显示实际位置与地图显示位置的平均误差分别为2cm与2.67cm，95%的番茄地图显示位置位于其实际生长范围5-6cm的圆内；Ortiz等将基于RTK-GPS的自动导航系统应用于花生收获时的精确定位，减少花生从地里挖出来时因为没有将装置准确定位在花生列上而造成的损伤，结果表明与传统的手工驾驶相比，采用基于RTK-GPS自动导航的采摘系统能够显著的减小产量损失、提高纯收益。

目前国外学者对于RTK-GPS在农业上的应用的研究主要集中在如何保证误差最小化的情况下降低系统的成本，较为有效的做法就是将RTK-GPS与其他模块相结合进行组合导航。Ospina等将惯性测量单元（IMU）和RTK-GPS相结合评估车身的侧滑角，得到了轮胎侧向力与滑动角的关系以及轮胎的侧偏刚度，对实验结果分别用几何学模型和动力学模型预测，验证了该方法建立非线性数学模型的潜力；Ball等人设计了能自动导航和避障的农用机器人，为了降低系统的成本，选用价格较低但精度也相对较低的RTK-GPS，结合机器视觉（田间定位）和立体视觉系统（障碍检测和规避），对该套系统进行多次田间试验（包括白天和晚上）的结果显示在成本降低的情况下系统仍能精准的工作。

相比于国外，国内RTK-GPS在农业领域的应用尚处于探索阶段。刘学等介绍了RTK-GPS在智能农业机械装备上的应用,包括CASE 2366 轴流谷物联合收割机产量监测及成图系统、变量施肥播种机、变量喷雾机，使用了RTK-GPS该的机械装备系统能根据小区处方图实施变量作业，优化作物生产，提高农业物料的科学利用率，但该文仅仅是介绍了几种应用，并没有对相应算法和精度进行进一步的研究；杨雪介绍了黑龙江胜利农场交接了凯斯RTK基准站后，6台凯斯拖拉机的田间作业精度达到了2.54cm，对实现高标准的精细农业具有重大意义；罗锡文等在东方红X-804 拖拉机上开发了基于RTK-GPS 的自动导航控制系统，将拖拉机的横向跟踪误差作为模型的输入，期望的拖拉机转向轮偏角作为输出，PID控制作为模型的控制器，在拖拉机行进速度为0.8 m/s 时，直线跟踪的最大误差小于0.15 m，平均跟踪误差小于0.03 m；周建军等在改装的四轮电瓶车上采用Trimble RTK-GPS 4700作为位置传感器，结合电子罗盘和角度传感器，利用模糊控制方法实现了农机的直线和曲线路径追踪，当速度为1m/s 直线路径跟踪最大偏差为0.19m，当速度为0.8m/s, 曲线路径跟踪最大偏差为0.26m；刘兆辉等提出一种基于遗传算法的自适应模糊控制算法,以RTK-DGPS为传感器,构建拖拉机自动导航系统,并进行田间试验，结果表明,该方法可迅速消除跟踪误差,稳态跟踪误差不超过10cm；高雷等采用模块化设计思想，基于嵌入式和CAN总线技术，开发了具有较强通用性的农机自动导航控制系统，将系统安装在联合收获机上进行了道路实验验证了系统的可用性，但在此基础上仍需要对路径规划算法、传感器数据融合算法、导航控制算法以及转向控制算法进行进一步研究；伟利国等以XDN2630插秧机为平台，根据RTK-GPS与车载传感器获得的车辆姿态信息，采用PID 控制方法,实现自动对行导航及地头转向,插秧机田间导航跟踪试验结果显示，在车辆行进速度不大于0.6 m/s 时,跟踪最大误差小于10cm，但在地头转弯处出现的误差较大；为了实现农业车辆的精确导航，张美娜等提出了一种RTK-DGPS融合惯性传感器的导航参数计算方法，利用惯性传感器采集的姿态角经几何变换补偿系统存在俯仰和侧倾时出现的横向偏差，实验结果证明该方法平均补偿了0.08m的横向误差，此外利用最小二乘法拟合仅使用RTK-DGPS时的车辆行驶轨迹，结果显示在直线、圆周和任意曲线行驶时，惯性传感器与RTK-DGPS计算的航向偏差的平均值分别为0.9636°、3.6418°与 2.7562°，说明了RTK-DGPS定位方法计算航向偏差的可行性。

目前，国内农业领域使用的RTK-GPS模块多引自国外，成本较低的也要几万元，且存在定位精度低、传输距离短的问题，同时基于RTK-GPS的导航系统的研究多停留在理论阶段或实验模拟阶段，能够实际投入田间作业的实物较少，因此国内这方面的应用还处于起步阶段，如何设计低成本高精度易操作的RTK-GPS自动导航系统很有必要。

## 1.2机器视觉行间导航研究现状（陈海）

However, many agricultural applications require the machine to follow existing crop rows. In these cases, machine localization using relative positioning sensors has advantages.

然而，很多农业应用中要求农机沿着已有作物行作业，这时，利用相对定位传感器的农机定位能起到巨大作用。

国外从上世纪末开始就有了有关视觉导航的研究，总体实现了低速下（1m/s左右）在一定路程内导航横向偏差达到厘米级（小于10厘米）。在2001年英国Hague T [1]介绍了一种在图像序列中定位作物的方法，在指导冬小麦除草的过程中(速度为1.6m/s)显示出RMS位置误差为15.6mm。2002年瑞典Astrand B[2]等人设计了一种作物行识别系统，利用一组而不是一根平行线进行导航，显示出0.6-1.2cm的标准偏差。2004年美国Han S, Zhang Q[3]等人利用在同一帧图像中选取多窗口提取多条导航线进行融合，提高鲁棒性，在大豆田中实验平均误差为1cm，玉米地中实验误差为2.4cm；2016年澳大利亚的Ball, D.; Upcroft, B.; Wyeth, G等人[4][5]设计了一个基于视觉的障碍检测和导航系统，机器人能够继续在5分钟的GPS中断，通过视觉跟踪作物行。实验误差在小麦行，高粱茬、夜晚高粱茬、鹰嘴豆的误差分别为(m):0.034、0.060、0.100、0.048。2016年西班牙的Bengochea-Guevara, J. M.; Conesa-Munoz, J.; Andujar, D.等人[6]等人设计了视觉与GPS融合导航系统，设计并开发了两个模糊控制器，实现了视觉导航。速度在0.3m/s左右位置偏差小于2cm，角度小于2°。为开发对杂草和阴影不敏感、不同类型作物；不同生长期作物；直线和曲线作物；不同数量和间距的作物皆可适用的导航线提取算法，2016年Vidovic, I.; Cupec, R.; Hocenski, Z.[7] 利用动态规划技术将图像证据与先验知识相结合的有效的作物行检测方法。

总结来说，视觉导航可作为GPS导航辅助导航，且能在GPS导航失效一段时间内起到独立起到导航作用。

近年来国内中国农业大学、华南农业大学、华南理工大学、江苏大学、等高校都对视觉导航及GPS与视觉导航融合相关技术进行了研究。2007年张志斌;罗锡文等[8] 运用像素子集的良序性结合垄宽先验知识得到垄行轨迹中心，试验结果表明:航向角和位置参数平均误差分别约为1°和1 mm。2016年华南农业大学庄晓霖[9]研究了基于机器视觉的路径识别及避障导航系统，在校内道路进行了实验，利用多区域霍夫变换提高图像处理效率。2009年中国农业大学陈艳等人[10]研究了基于卡尔曼滤波将RTDGPS与视觉信息进行融合，证明视觉可以提高RTDGPS精度。2017年翟志强研究了基于虚拟现实的拖拉机双目视觉导航[11]，在虚拟环境下进行实验，得到结果，在非地头环境下,作物行中心线的正确识别率不小于92.11%,平均偏差角度的绝对值不大于1.07°,偏差角度的标准差不大于2.52°;图像处理时间的平均值不大于202.90 ms、标准差不大于17.75 ms。通过比较作物行中心线与拖拉机行驶方位的相对位置规划导航路径,能够保证拖拉机稳定跟踪同一条目标作物行,目标路径规划的正确率为97.33%;导航路径规划时间的平均值为0.017 ms,标准差为 0.017 ms。2017年杨玲香; 王田田;[12]等人研究了基于随机抽样一致性算法(RANSAC)的农作物行提取，结果表明,该算法能够在缺株、有杂草、地膜覆盖等复杂背景下,自动剔除伪定位点,有效检测出作物行。2017年赵腾[13] 研究了基于激光扫描的联合收割机自动导航方法，田间静态试验将基于Otsu算法检测的作物边缘线与实际作物边缘线进行对比,最大偏差为8.3 cm,平均偏差为5.4 cm,标准差为3 cm。

总结来说典型的视觉导航中导航线提取一般包括以下几个步骤颜色特征提取、图像分割、定位点选取、直线拟合四个步骤，研究结果表明各步骤的处理速度能满足作业要求，对复杂情况下作物行线提取都有了较为成熟的方法，可去除杂草、阴影、光照等影响，误差能够达到厘米级（10cm内）。与GPS的融合研究也表明且视觉导航能对GPS导航起到辅助作用。

但国内大多文献限于模拟环境下，没有在真实农田环境中进行作业实验研究，尤其是水田环境作业机械，未见实验案例，而少数拖拉机有进行真实作业实验，其误差多为RTK-GPS来评判，除RTK-GPS来衡量误差外，其余误差多为图像本身提取参数与实际参数（人为选取）进行比较，可见在水田环境下作业的视觉导航机械仍有待研究。

## 1.3农机自动避障碍研究现状（JH原有的+部分刘老师的）

真实的农田环境是复杂的非结构化环境，在智能农业车辆或机器人行进路线上不可避免的存在大量障碍物，包括高土堆或坑、树桩或较大的树杈、灌木丛、电线杆、人工放置的农具以及人、家畜和其他行驶的农机等，如果不通过传感器实时感知并及时避开，会造成严重的安全问题。目前世界上用于障碍物检测的传感器主要为超声波传感器、激光雷达和视觉传感器，但大多数的研究集中在室内或者已知结构的简单室外环境，对于田间的研究相对较少。

**超声波**是一种频率高于人耳听觉上限的声波，其方向性好、穿透能力强、易于获得集中的声能，在农业、化工、医学、军事等领域得到了广泛的应用，超声波距离检测的基本原理是通过传感器发出超声波，遇物体反射后，传感器计算超声波的飞行时间（Time of Fly , TOF）从而确定物体的大致位置；超声波传感器无需接触、操作简单、探测速度快（一个测量周期仅需几十毫秒），并且在一定条件下可以检测到处于黑暗、灰尘、烟雾、电磁干扰、有毒等恶劣环境中的被测障碍物，但缺点在于空间检测的准确性较低、受噪音的影响大以及检测效果受物体表面类型影响大。**激光雷达**（Light detection and ranging, LIDAR），是激光与现代光电探测技术结合的探测方式，集激光、全球定位系统（Global positioning system ,GPS）和惯性导航系统（Inertial Navigation System, INS）三种技术于一体，通过发射器向目标发射激光束，将接收到的反射信号与发射信号比较，处理后得到目标的相关信息，如目标距离、方向、速度、形状参数等，基本原理与超声波测距类似，但该技术依据光速计算距离，而光的传播速度基本不受环境温度的影响；激光雷达具有分辨率高、抗有源干扰能力强、光束窄的优点，已经被广泛应用于军事、大气监测、无人机遥感、道路检测、自动避障等方面。根据扫描机构的不同，激光雷达可分为二维扫描和三维扫描两种，其中三维激光雷达检测效果更好但成本太高且无法检测低于地表的障碍物（如土坑）。**机器视觉**就是指用视觉传感器代替人眼来做测量和判断，目前常用的视觉传感器主要有单目相机、双目相机和多目相机；单目相机结构简单，在已知障碍物类型的特定环境中可以用来进行障碍物检测，但是在非特定环境中只能得到二维信息；多目相机需要用到3个及以上的相机，构造复杂，价格相对昂贵，对计算机处理器的运算速度要求很高；相比较而言，双目相机更有利于研究和使用，尤其是在障碍物检测方面，得到了国内外学者的重视，但其缺点在于受环境因素影响严重，且在数据处理上相对复杂，若要提高处理的速度需在检测范围或精度标准上相应降低。

农田环境是非结构化环境，相比于如室内这种结构化环境，更为复杂和未知，障碍物种类更多且环境因素更不可控，因此需要障碍物检测系统具有更高的精确性、更远的检测距离、更好的实时性和更强的环境适应性。而单一的传感器检测技术虽各有优点，但同时也存在局限性，如表2所示。

表2 单一传感器检测技术的优缺点

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 技术  Technology | 优点 Advantages | 缺点 Disadvantages |
| 超声波检测 Ultrasonic measurement | 1）操作简单  2）探测速度快，数据处理速度快  3）成本相对较低且技术较为成熟  4）黑暗、强光、烟尘条件下工作 | 1）方向性差（空间位置准确性在10-50 cm）  2）环境噪音或多传感器间干扰的影响大  3）空气温度的影响较大  4）超声波对于不同表面种类的障碍物检测效果不同 |
| 激光雷达检测 Laser radar measurement | 1）对严苛环境（灰、雨、雪、黑暗）的适应性强  2）探测距离远  3）受有源信号的干扰弱 | 1）二维激光雷达视角太小，且要求颠簸不能太大  2）三维激光雷达成本太高，且无法检测低于地表障碍物  3）改装二维激光雷达获得三维数据：目前还无法得到与三维一样的检测效果 |
| 视觉相机检测  （双目）  Binocular vision measurement | 1）不对外发射信号，相互之间不会干扰  2）可以检测更宽广视角下的障碍物而无需进行扫描  3）价格相对便宜且图像中包含的信息更全面  4）可以检测到低于地表的障碍物 | 1）受环境光、环境中灰尘的影响较大  2）数据处理时算法耗时长且对计算机要求高，部分算法实时性无法保证，同时背景太过复杂时，没有较好的算法用于分割  3）立体匹配的准确性随着检测距离增加而降低 |

**显然，只靠单一传感器搭建的系统无法满足农机的农田作业要求，随着多传感器融合技术的出现和应用，将两种或多种单传感器检测技术结合运用到系统中可以互相弥补单一传感器检测存在的缺点。**如将视觉技术与激光雷达技术相结合一方面能通过激光雷达弥补视觉相机检测距离短的问题，另一方面能通过相机弥补二维激光雷达检测视角小的缺点，能有效地提高系统的鲁棒性和准确性，同时避免了使用三维激光雷达的高成本问题；利用单目相机获得的图像确定障碍物的大小和大致范围，并通过低成本超声波探头确定障碍物的距离，这种融合方法一方面进一步降低了系统的成本，另一方面解决了单独使用超声波技术时方向性差以及单独使用双目相机时立体匹配过程耗时长的问题，提升了系统的实时性。近几年来随着技术的不断发展，多传感器融合技术在智能化农业车辆（包括农业机器人）上的研究逐渐开始有了进展。Liu等设计了基于多传感器融合算法的避障系统用于农业机器人上，该系统中GPS进行定位，超声波传感器、红外热成像传感器、二维激光扫描仪测得到的障碍物信息进行融合后通过聚类模糊找到障碍物的大致区域。Ding等研究的避障算法可用于较接近于农田环境的森林环境中，具体做法是用二维激光扫描仪和红外热像仪采集林区障碍物信息，从中分别提取障碍物的特征（包括温度、颜色、长宽比、多边形特点），利用融合后的数据训练支持向量机进行障碍物的识别；试验设置的障碍物包括人、树木、石头，平均识别准确率为91%，可以考虑将其用于障碍物较少的农田环境中使用。Yang等在专利中设计了用于山地区域的农业机器人避障系统，包括视觉传感器模块、超声波传感器模块、红外传感器模块和数据融合模块。Benet等将激光雷达获得的三维数据融入到普通相机获得的彩色图像中，在葡萄园环境中进行试验，结果显示识别农机前方不同离地高度的杂草或实体障碍物（如树杈）有较好的效果，且受光照条件的影响较小。

总而言之，将2种或多种单传感器检测技术结合运用到系统中已经成为室外环境障碍物检测的趋势。但目前这些研究大多仍处于起步阶段或室内模拟试验阶段，距离产品化及实际田间使用还有大量问题亟待解决，如产品的成本、环境变化时系统的稳定性等。

## 1.4农机自动导航执行机构及其控制的研究现状（WY改写）

*前言：概述田间装备的控制方式*

1. *田间装备的控制方式研究现状（机电式，液压式）*
2. *成功的农机自动导航产品优点及问题*

*插秧机是一种将稻苗植入稻田的农业机械，在水稻种植领域被广泛应用。目前，插秧机均是由人工驾驶插秧，并不具备自动控制的硬件和软件装备，*

农机控制执行单元包括：离合、刹车、油门、换挡控制执行器，转向、悬挂液压控制系统等。农机控制执行单元将传感器信号反馈给集成控制电子单元，并接受集成控制电子单元发送的离合、刹车、油门、换挡、转向、悬挂等自动控制信号。

辅助测量传感器包括：转向传感器，轮速传感器，悬挂加装的力和位移传感器[65-66]。在转向控制策略中，通过比较转向控制模式1（采用转向传感器作为内闭环反馈的控制模式[67-68]）和转向控制模式2（仅采用姿态角信号作为转向控制反馈的控制模式[69-70]）的控制效果，尽量减少传感器数量。四个轮速传感器用于模型降阶研究，车辆动力学模型可以表达为具有车身6 自由度、底盘悬架4 自由度、四轮转速4 自由度等的多自由度模型，需要根据农机控制特点进行降阶，轮速传感器用于建模分析和模型降阶研究，最终自主控制策略可以不需要轮速反馈。

。。。。。。

美国伊利诺伊州立大学Dickson MA 等以John Deere GATOR 型农用车为平台； 建立了2 自由度的线性动力学模型，RTK-DGPS、光纤陀螺FOG（fiber optic gyroscop）和IMU(inertial measurement unit)结合应用于农机作业路线跟踪导航；提出预瞄策略的动态路径搜索算法；通过WLAN 与基站GIS 数据相比校正，农机前进速度为3.5 m/s时，最大跟踪误差±10 cm[23]。这套智能农机实现方案融合了多项技术，对中国智能农机的发展具有启发意义。Eaton 等[5]将Back stepping 控制方法应用到农机路径跟踪控制中，并且在控制方法的设计过程中考虑了转向系动力学特性的影响，取得了较好的试验效果。Payne 等[6]在大量辨识试验的基础上提出了一种航向率动力学模型，并基于该模型设计了LQR 路径跟踪控制方法，解决了农机在高速行驶时的导航控制问。

在国内，罗锡文等[14-16]在东方红X-804 拖拉机上开发了基于RTK-DGPS 的导航控制系统。李逃昌等[17-19]针对运动学模型中的近似条件对模型控制方法曲线路径跟踪精度的影响，提出了一种农机导航自校正模型控制方法。该方法采用模型控制方法设计控制律，并采用模糊控制方法自适应地在线调节模型控制律的控制量。前进速度为1.0 m/s 时，直线跟踪最大横向偏差小于0.0649 m，曲线跟踪横向最大偏差小于0.1857 m。

基于农机作业动力学特性设计控制策略，通过导航控制偏差预测，以未来控制偏差目标函数最小为目标，在线优化控制律参数，始终以最佳控制参数控制农机完成轨迹跟踪。控制策略采用位置、姿态角及其导数作为状态反馈来提高农机控制的稳定性，引入前馈控制提高机动性[60]。基于导航控制偏差预测优化控制律参数，超前调整控制律参数

## 1.5导航软件平台

**参考文献**

[1] Hague T, Tillett N D. A bandpass filter-based approach to crop row location and tracking[J]. MECHATRONICS. 2001, 11(1): 1-12.

[2] Astrand B, Baerveldt A J. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control[J]. AUTONOMOUS ROBOTS. 2002, 13(1): 21-35.

[3] Han S, Zhang Q, Ni B, et al. A guidance directrix approach to vision-based vehicle guidance systems.[J]. Computers and Electronics in Agriculture. 2004, 43(2004): 179-195.

[4] English A, Ross P, Ball D, et al. Vision Based Guidance for Robot Navigation in Agriculture[M]. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA, 2014, 1693-1698.

[5] Ball D, Upcroft B, Wyeth G, et al. Vision-based Obstacle Detection and Navigation for an Agricultural Robot[J]. JOURNAL OF FIELD ROBOTICS. 2016, 33(8): 1107-1130.

[6] Bengochea-Guevara J, Conesa-Muñoz J, Andújar D, et al. Merge Fuzzy Visual Servoing and GPS-Based Planning to Obtain a Proper Navigation Behavior for a Small Crop-Inspection Robot[J]. Sensors. 2016, 16(3): 276.

[7] Vidovic I, Cupec R, Hocenski Z. Crop row detection by global energy minimization[J]. PATTERN RECOGNITION. 2016, 55: 68-86.

[8] 张志斌，罗锡文，李庆，等. 基于良序集和垄行结构的农机视觉导航参数提取算法[J]. 农业工程学报. 2007(07): 122-126.

[9] 庄晓霖. 基于机器视觉的路径识别及避障导航系统[D]. 华南农业大学, 2016.

[10] 陈艳，张漫，刘兆祥，等. 基于Kalman滤波器的机器视觉自动导航定位算法研究: 纪念中国农业工程学会成立三十周年暨中国农业工程学会2009年学术年会（CSAE 2009）[Z]. 中国山西太谷: 20095.

[11] 翟志强. 基于虚拟现实的拖拉机双目视觉导航试验方法研究[D]. 中国农业大学, 2017.

[12] 杨玲香，王田田，何旭. 基于随机抽样一致性算法(RANSAC)的农作物行提取[J]. 江苏农业科学. 2017(02): 195-197.

[13] 赵腾. 基于激光扫描的联合收割机自动导航方法研究[D]. 西北农林科技大学, 2017.