

文章编号: 2095-4980(2015)05-0810-06

无人地面车辆的环境感知技术

刘严岩^a, 王 进^b, 冒 蓉^b

(北方信息控制集团有限公司 a.装甲指控工程部; b.北斗事业部, 江苏 南京 211153)

摘 要: 环境感知能力是地面无人车辆(UGV)自主、安全、可靠行驶的前提和基础。无人地面车辆的环境感知系统利用各种主动、被动传感器获取周围环境的信息, 对传感器数据进行处理、融合、理解, 实现无人车辆对行驶环境中的道路、障碍物的检测以及地形分类等, 给车辆的自主导航和路径规划提供依据。本文描述了无人地面车辆环境感知系统的组成, 研究了结构化和非结构化道路上的道路和障碍检测方法, 分析了各种检测方法的检测效果, 对环境感知系统当前面临的问题以及未来的发展趋势进行了总结和展望。

关键词: 无人地面车辆; 环境感知; 道路检测; 障碍检测

中图分类号: TN919.5; TJ02

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201505.0810

Environment perception technology of Unmanned Ground Vehicles

LIU Yanyan^a, WANG Jin^b, MAO Rong^b

(a.Engineering Department for Command & Control on Armored Vehicles; b.Beidou Department, North Information Control Group Limited Company, Nanjing Jiangsu 211153, China)

Abstract: The ability to perceive the vehicle's local environment is one of the main challenges in the field of Unmanned Ground Vehicles(UGV). Many kinds of positive-negative sensors are used to obtain the information of the vehicle's local environment. The environment perception system is in charge of processing, fusing and understanding the information. The system also realizes the detection of road and obstacles and the classification of terrains. Autonomous navigation and path planning of UGV are based on the process results of perception system. In this paper, the architecture of environment perception system is introduced. The methods of road detection and obstacles detection are discussed, and then the detection results of these methods are analyzed. The existing problems and the future development trends of the environmental perception system are summarized and prospected at last.

Key words: Unmanned Ground Vehicles; environment perception; road detection; obstacles detection

无人地面车辆是指能够依靠自身携带的传感器感知理解外界环境, 根据任务需要实时决策, 以自主/半自主方式进行作业, 在已知/未知地面环境中具有一定自我学习和适应能力的智能设备^[1]。无人地面车辆的环境感知系统通过各种传感器来感知环境, 对传感器数据进行标定、处理、融合、理解得到车辆行驶环境中的车道、道路标志、障碍物以及地形等信息, 给车辆的自主导航和路径规划提供依据, 保证车辆能够自主、安全、可靠地行驶。道路与障碍检测是环境感知系统的重要任务, 早期研究主要针对结构化良好的道路^[2], 如高速公路, 随着研究的不断深入和无人地面车辆应用领域的不断扩展, 当前研究的焦点主要集中在非结构化道路环境的感知, 非结构化道路主要包括城市道路^[3]和野外^[4]以及地形条件恶劣的地区。本文介绍了环境感知系统的组成, 回顾了结构化道路、城市环境以及野外环境中道路检测和障碍检测的方法, 总结了当前该领域存在的问题, 对未来的发展进行了展望。

1 环境感知系统组成

单一传感器难以满足各种光照和天气条件下的环境感知的需求, 多传感器融合能够将空间和时间上的互补与冗余信息依据某种优化准则结合起来, 提炼和产生对观测环境的一致性解释或描述, 为无人地面平台自适应

路径规划和自主导航提供必要、可靠信息。大部分无人车系统都采用多传感器融合技术，如视觉传感器具有良好的角分辨力，但不能获取距离信息，而雷达等角分辨力差的距离测量设备能获取精确的距离信息及深度信息。

环境感知系统一般包括传感器、传感器数据处理以及多传感器数据融合 3 个子系统^[5]。传感器系统通常采用摄像机、激光雷达、超声传感器、微波雷达、全球定位系统(Global Position System, GPS)、里程计以及磁罗盘等多种车载传感器来感知环境。视觉传感器包括单目和立体彩色摄像机，距离探测设备包括声纳、雷达和激光雷达等。激光雷达和雷达能够测得目标的相对速度，里程计和惯性传感器能够估计车辆的运动。

文献[6]中一辆无人自主车，其环境感知系统的传感器包括双目摄像机和激光雷达，如图 1 所示。图 2 给出了激光扫描仪的有效作用范围。

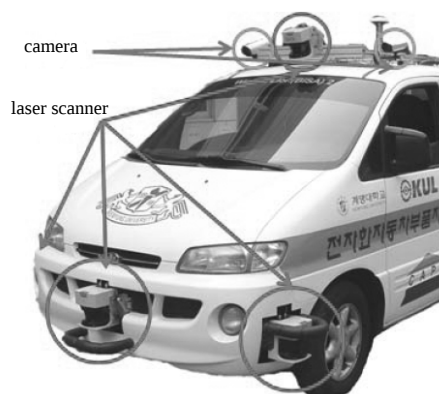


Fig.1 Mount position of laser scanner and camera
图 1 激光扫描仪和摄像头在无人车上的位置

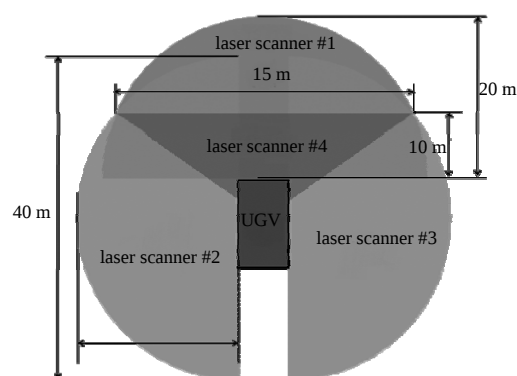


Fig.2 Obstacle detecting range of laser scanner
图 2 激光扫描仪的观测范围

2 道路检测

无人地面车辆行驶的道路主要分为结构化道路和非结构化道路 2 种。结构化道路一般是指高速公路和部分结构化较好的公路，这类道路具有清晰的车道线和道路边界，车道线一般为白色或黄色的连续线或短划线。非结构化道路一般指结构化程度较低的道路，如城市交通道路、乡村道路以及越野环境中的道路等。

2.1 结构化道路检测

结构化道路的检测方法一般以边缘检测为基础，通过对车道线或边缘的识别，辅以霍夫变换、模型匹配等，得出道路的几何描述。其中模型匹配的基本思想是根据道路的先验知识，利用二维或三维的曲线进行道路建模，结合视觉模型和图像特征估计出道路模型参数。目前，这方面的算法已经比较成熟。

文献[7]采用霍夫变换与反透视映射相结合的方法取得了检测道路/车道边界很好的效果，如图 3 所示。由于霍夫变换法不能检测连续弯道，通常用于弯道检测的模型包括回旋曲线模型、抛物线模型、多项式模型、样条曲线模型和双曲线模型等。文献[8]给出了利用 B 样条模型实现弯道检测的结果，如图 4 所示。

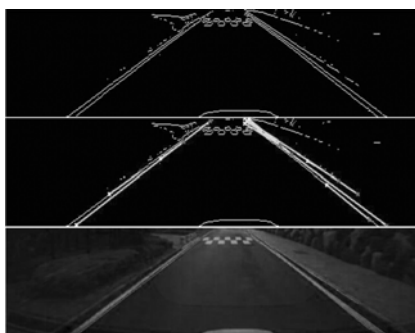


Fig.3 Result of path detection based on Hough transform
图3 基于霍夫变换的道路检测



Fig.4 Lane tracking on marked highway utilizing a B-spline lane model
图4 基于B样条模型的弯曲道路检测

2.2 非结构化道路检测

非结构化道路没有明确的道路边界线，且路面特征和周围环境区别较小，基于结构化道路的道路识别技术在非结构化路面上已不再适用。由于野外环境下非结构化道路很不规则，很难用一个或几个通用的模型表示，因此非结构化道路检测的算法主要基于特征的识别方法或是将基于模型的方法与图像特征相结合的检测方法。

2.2.1 基于特征的非结构化道路检测

基于特征的道路检测方法的基本思想是利用道路边界与天空、草地及其他图像背景在图像特征上的差异进行道路检测,包括形状、颜色、灰度、纹理、对比度和不连续性等。

1) 基于颜色和纹理特征的道路检测

文献[9]中无人地面车辆 TerraMax 利用三目摄像机获取环境的立体图像,采用了基于道路纹理和颜色特征的检测方法,检测结果如图 5 所示,阴影区域中的浅色区表示道路,图像右上角的圆点表示当前的处理为直路检测,其他具有标志的区域表明道路的转弯。

2) 基于消失点特征的道路检测

消失点是一种有效的非结构化道路全局特征,是图像中主要直线的交点,不受光线、道路环境等因素影响,是比较稳健的特征。文献[10]中利用多帧单目图像,首先估计单帧图像中消失点的位置,在多帧序列图像中使用粒子滤波器跟踪初始消失点估计值,得到更加可靠的结果,检测结果如图 6 所示。



Fig.5 Result of path detection based on features

图 5 基于特征的道路检测

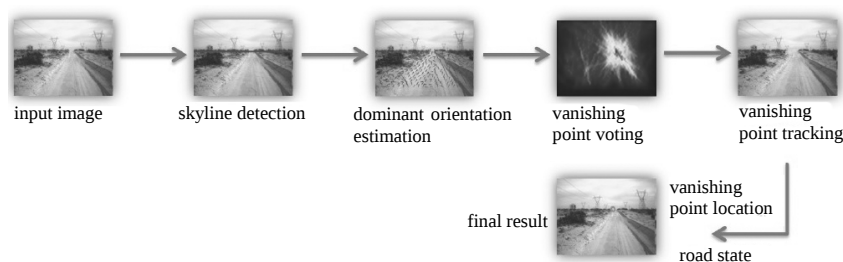


Fig.6 Path detection based on vanishing point

图 6 基于消失点特征的道路检测

2.2.2 与道路特征相结合的基于模型的检测方法

文献[11]给出了一种图像特征与分布模型相结合的道路检测方法,图中有 6 幅不同光照、天气和观察视角条件下的图像,道路检测结果如图 7 所示。

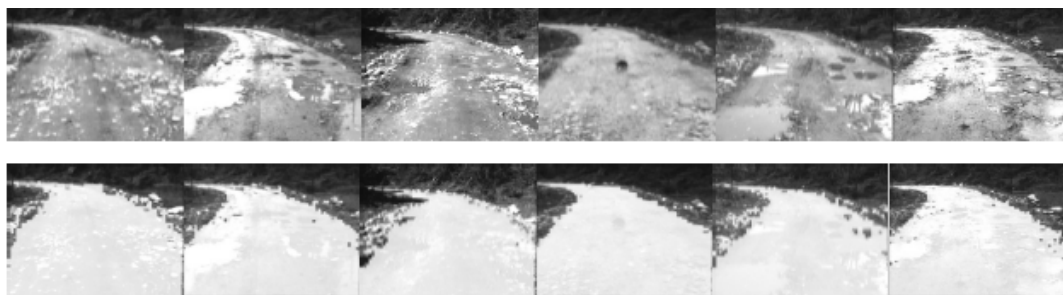


Fig.7 Road detection results of the same scene in different lighting conditions, weather conditions and viewpoints

图 7 在不同光照、天气条件下同一道路的检测结果

3 障碍物检测

障碍物的种类分为静止障碍物和动障碍物。静止障碍物又可以分为凸障碍物和凹障碍物,凹障碍物是指沟壑、沟渠等。用于障碍检测的传感器一般有视觉传感器、激光雷达、微波雷达、激光、声纳等。常用的障碍检测方法为基于运动信息、基于立体视觉、基于激光雷达以及基于多传感器融合的障碍物检测技术。

3.1 基于运动信息的障碍物检测技术

基于运动的方法使用来自同一摄像机的一组图像序列,通过计算运动场从而检测环境中运动和静止的物体,如帧间差分法和光流法^[12]。帧间差分法是直接根据帧间变化进行检测,快捷简单,实时性好,适合于运动快且形变较大的运动障碍物目标,对于有全局运动的场景,如道路不平坦或弯路较多的情况



Fig.8 Detection using optical flow vectors

图8 基于光流矢量法的动目标检测

则不太适用。基于光流场^[13]的障碍物检测技术是使用单个电荷耦合元件(Charge Coupled Device, CCD)摄像机在不同时刻拍摄周围环境信息,通过序列图像估计光流,处理结果如图 8 所示。光流场方法的缺点是对过于复杂、快速或速度过小的运动目标效果不好。

3.2 基于立体视觉的障碍物检测技术

基于立体视觉的方法使用 2 个或多个参数性能相同的摄像机从不同视角同时获取道路场景图像,通过立体匹配法得到图像间的视差,根据障碍物在图中的位置、视差以及摄像机标定得到的内外参数计算出障碍物的实际距离。无人车 TerraMax 利用 V 视差法实现了障碍检测^[14],如图 9 所示,图中,树干上不同的灰度表示不同的距离。立体视觉面临 2 个难点:对应点的匹配精确度以及匹配算法的实时性。

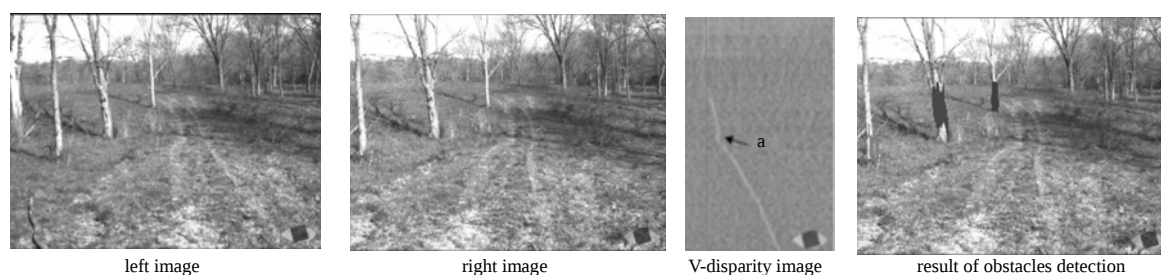


Fig.9 Obstacles detection based on V-disparity analysis

图9 基于V视差法的障碍检测

3.3 基于激光雷达的障碍物检测技术

基于激光雷达的障碍物检测,是通过车载激光雷达来实现障碍物检测的功能。激光雷达在获取前方障碍物距离测量、相对速度和方位角信息等方面发挥着重要作用。基于激光雷达的障碍检测方法取得了良好的效果,但它也存在一些问题,由于缺乏图像信息,在处理复杂环境时,对障碍物类别的识别准确度不高。

慕尼黑国防军大学采用 64 线激光雷达实现了城市交通中运动目标跟踪及障碍检测^[14],将稳定的航迹根据运动状态分为小轿车、卡车、自行车、行人。图 10 中黑色的点表示激光雷达在地面上测量到的点,白色的点为高于地面的点,盒子表示被跟踪的车辆,箭头表示运动的方向,被圈起来的是交叉路口。

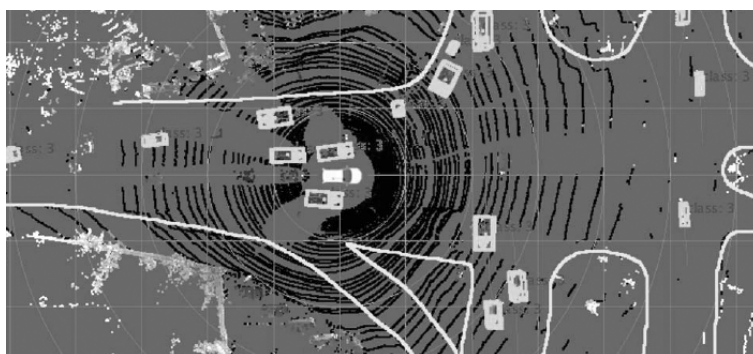


Fig.10 Results of LIDAR-based object tracking

图10 基于激光雷达的障碍检测

3.4 基于多传感器融合的障碍物检测技术

用于障碍检测的多传感器融合以多个雷达/激光雷达之间的融合以及机器视觉和激光雷达之间的融合为主,已经广泛应用于参与各类挑战赛的智能车辆上。如 2004 年在美国国防部先进研究项目局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)举办的无人车挑战赛中参赛的无人车沙暴(Sandstorm)采用彩色相机和激光雷达;2005 年的无人车挑战赛冠军斯坦利(Stanley)使用了 5 个激光雷达和 1 个长距离雷达,保障其在沙漠和山路上的安全行驶;2007 年城市挑战赛中夺冠的无人车老板(Boss)使用了多个单线雷达和 1 个四线雷达,可以在城市行驶^[15]。

多传感器数据融合可以在不同的层次上实施:第一层次是融合传感器的原始数据;第二层次是特征层融合,如基于激光雷达的 3-D 测量数据和摄像机的图像特征融合;第三层次的融合是目标层融合,如雷达和激光雷达测量的目标航迹融合。

俄亥俄州立大学研制的智能野外行驶(Intelligent Off-road Navigator, ION)无人车的环境感知系统包括雷达、激光雷达、立体相机以及超声波传感器等^[16],如图 11 所示,在车辆穿过通道的处理结果图(图 11(c))中,左上角为传感器地图,图中小方块代表车辆,右上角为激光雷达和视觉系统获取的原始数据,下方为行驶区域的图像。

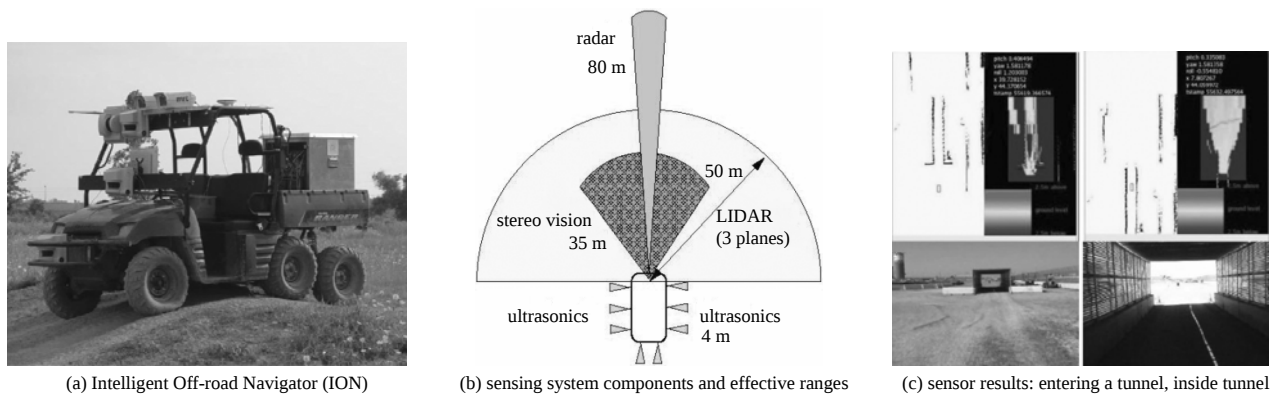


Fig.11 Environment perception system based on multi-sensors and the result of obstacles detection

图11 多传感器环境感知系统及其障碍检测结果

4 亟待解决的问题

近年来无人地面车辆的环境感知系统在道路检测、障碍识别等方面取得了显著进步，尤其是在结构化道路环境中，很多从无人地面车辆发展出来的辅助驾驶系统已经应用于有人驾驶车辆，如车道保持辅助系统。但在城市道路、非结构化道路、野外环境，以及恶劣天气等情况下，无人地面车辆的感知系统还面临很多问题。

1) 城市环境

在城市道路中，道路交叉口检测、道路标志和交通信号识别^[17]以及行人识别^[18]等问题是环境感知系统面临的挑战。受复杂背景、光照变化、拍摄角度等因素的影响，很难实现准确和实时的路标检测与识别。行人以及骑车人的避让检测和跟踪也非常困难，有很多人的杂乱场景更是如此。

2) 野外环境

在城市环境中通过几何描述能够说明道路的可通过性，但在野外环境中必须对地形进行分析，包括描述三维地形几何特征、地形覆盖、检测及对可能是障碍的地形分类(如，崎岖或泥泞地形、陡坡、不流动的水、岩石、树木和沟壑等)，并评估各种地形的可穿越性。复杂野外环境中各种类型的水障碍作为野外环境中最常见的障碍类型之一，对无人车自主导航造成了很高的威胁^[19]。野外水障碍由于表面特殊反射等原因使检测难度很大，确定水障碍的可通过性是水障碍检测的焦点问题，如区分被水覆盖的道路和湖泊。在障碍检测方面，凹障碍检测也是一个难点^[20]，需要检测沟壑等凹障碍的宽度和深度，凹障碍检测受几何条件的限制，传感器高度决定了检测性能的上限。

3) 各种天气和光照条件下的环境感知

全天候、夜间条件下的环境感知还存在很多问题。理论上讲，激光雷达和雷达不受天气和光照条件的影响，前视红外雷达也具有良好的夜间性能。但作为环境感知系统重要组成部分的视觉系统在雾天等特殊的天气条件以及夜间性能不佳。在这些情况下对环境的理解还需要进一步的研究^[21]。

5 结论

传感器性能在不断提高，在此基础上，未来的环境感知系统需要在各层次进行更加深入的多传感器融合，进一步提高环境感知的可靠性。除了车辆本身的环境感知系统的性能提高之外，未来的无人地面车辆可以实现车辆间(Car-to-Car, C2C)以及车辆与基础设施之间(Car-to-Infrastructure, C2I)的信息共享，进一步获取更全面的环境信息。当前的环境感知系统的信息处理能力远未达到人类大脑的信息处理能力，要保证无人地面车辆能够安全参与真实的城市交通并在野外可靠行驶，还有很多工作要做。

参考文献:

- [1] 阎岩,唐振民. UGV 协同系统研究进展[J]. 计算机应用研究, 2011,28(10):3624-3628. (YAN Yan,TANG Zhenmin. Advances in unmanned ground vehicles coordination system[J]. Application Research of Computers, 2011,28(10):3624-3628.)
- [2] Calderón J,Obando A,Jaimes D. Road detection algorithm for an autonomous UGV based on monocular vision[C]// Proceeding of Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. Mexico:IEEE, 2007:253-258.

- [3] Broggi A,Caraffi C,Ghidoni S. TerraMax vision at the urban challenge 2007[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010,11(1):194–204.
- [4] Seetharaman G,Lakhotia A,Blasch E P. Unmanned vehicles come of age:the DARPA grand challenge[J]. IEEE Computer Society, 2006,39(12):26–28.
- [5] 田瑞娟. 环境感知视觉信息处理技术在无人地面平台中的应用[J]. 兵工自动化, 2012,31(4):51–55. (TIAN Ruijuan. Application of environment perception vision process in unmanned ground platform[J]. Ordnance Industry Automation, 2012,31(4):51–55.)
- [6] Hee Chang Moon,Jae Cheon Lee,Jung Ha Kim. Development of unmanned ground vehicles available of urban drive[C]// International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Singapore:IEEE, 2009:786–790.
- [7] Hee Chang Moon,Kyoung Moo Min,Jung Ha Kim. Vision system of unmanned ground vehicle[C]// International Conference on Control, Automation and Systems. Seoul,Korea:IEEE, 2008:599–603.
- [8] Loose H,Franke U. B-spline-based road model for 3D lane recognition[C]// Proceeding of IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Funchal:IEEE, 2010:91–98.
- [9] Braid D,Broggi A,Schmiedel G. The TerraMax autonomous vehicle concludes the 2005 DARPA grand challenge[C]// Intelligent Vehicles Symposium 2006. Tokyo:IEEE, 2006:534–539.
- [10] Moghadam P,Jun Feng Don. Road direction detection based on vanishing-point tracking[C]// 2012 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Portugal:IEEE, 2012:1553–1560.
- [11] SHANG E,AN Xiangjing,WANG Yan. Robustly unstructured road detection based on road distribution model[C]// 2012 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology. Changchun,China:IEEE, 2012:20–24.
- [12] Klappstein J,Stein F,Franke U. Monocular motion detection using spatial constraints in a unified manner[C]// Proceeding of IEEE Intelligent Vehicle Symposium. Tokyo:IEEE, 2006:261–267.
- [13] Luettel T,Himmelsbach M,Wuensche H J. Autonomous ground vehicles concepts and a path to the future[J]. Proceedings of the IEEE, 2012,100:1831–1839.
- [14] Caraffi C,Cattani S,Grisleri P. Off-road path and obstacle detection using decision networks and stereo vision[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2007,8(4):607–618.
- [15] Darms M S,Rybski P E,Baker C. Obstacle detection and tracking for the urban challenge[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2009,10(3):475–485.
- [16] Redmill K A,Martin J I,Ozguiner U. Sensing and sensor fusion for the 2005 desert buckeyes DARPA grand challenge off-road autonomous vehicle[C]// Intelligent Vehicles Symposium. Tokyo:IEEE, 2006:528–533.
- [17] Kyung In Min,Jin Beom Jeong,Jae Saek Oh. Research of vision system for perception in UGV[C]// 2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems(ICCAS 2013). Gwangju,Korea:IEEE, 2013:1351–1355
- [18] Kondo T. A moving object extraction method using accumulative intensity and texture differences[C]// Proceeding of Communications and Information Technologies(ISCIT). Tokyo,Japan:IEEE, 2010:1002–1006.
- [19] Rankin A,Matthies L. Daytime water detection based on color variation[C]// The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei,China:IEEE, 2010:215–221.
- [20] Larson J,Trivedi M. Lidar based off-road negative obstacle detection and analysis[C]// 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Washington DC,USA:IEEE, 2011:192–197.
- [21] 陆军无人地面车辆技术委员会. 军用无人车辆技术的发展[M]. 付梦印,王美玲,译. 北京:国防工业出版社, 2009. (National Research Council of the National Academies. Technology development for army unmanned ground vehicles[M]. Translated by FU Mengyin,WANG Meilin. Beijing:National Defense Industry Press, 2009.)

作者简介：



刘严岩(1978–), 女, 安徽省亳州市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为数据融合、信息处理.email:22377069@qq.com.

王 进(1978–), 男, 湖北省浠水县人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为基于位置的服务、大数据挖掘.

冒 蓉(1983–), 女, 江苏省宿迁市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为北斗技术应用研究、嵌入式系统开发.