引文格式：罗军华,李威,赵卫权,等. 国内无人机领域算法研究进展知识图谱分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(1): 8-12. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.01.002

国内无人机领域算法研究进展知识图谱分析

罗军华[1]，李　威[1*]，赵卫权[1]，孙小琼[1]，何秋叶[2]
（1. 贵州省山地资源研究所，贵州 贵阳 550001；2. 贵阳市城乡规划设计研究院，贵州 贵阳 550001）

摘　要：借助CiteSpace软件，以CNKI核心文献库为数据源，从发文数量、发文作者、关键词和研究前沿等角度出发，回顾与总结了该领域的整体发展历程。结果表明，发展至今硕士与博士学位论文数量分别占总发文量的59.5%与5.1%，表明该领域高层次人才较多；该领域研究主要分为4个核心作者群，但各团队之间的学术联系并不紧密；整体而言，该领域发展可分为基础算法开发期、行业应用拓展期、人工智能发展和物联网展望4个阶段。研究结果可为该领域的后续理论发展提供参考依据。

关键词：CiteSpace；无人机；算法；知识图谱；计量分析
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）01-0008-05

Knowledge Graph Analysis of Algorithm Research Progress in Domestic UAV Field

LUO Junhua[1], LI Wei[1], ZHAO Weiquan[1], SUN Xiaoqiong[1], HE Qiuye[2]
(1. Guizhou Mountain Resources Research Institute, Guiyang 550001, China;
2. Guiyang Urban Planning & Designing Institute, Guiyang 550001, China)

Abstract: Taking CiteSpace software and CNKI core literature database as the data source, we reviewed and summarized the overall development process of this field from the perspectives of article number, authors, keywords and research frontiers. The results show that so far, the numbers of master's and doctoral dissertations account for 59.5% and 5.1% of the total published papers respectively, indicating that there are many high-level talents in this field. The domestic research in this field is mainly divided into four core authors, the academic contact of each team is weak, and the academic connection is not close. Overall, development process in this field can be divided into basic algorithm development period, industry application development period, artificial intelligence development stage and IoT prospect stage. The research results can provide a reference for the subsequent theoretical development of this field.

Key words: CiteSpace, UAV, algorithm, knowledge graph, quantitative analysis

无人机是一种通过无线电远程遥控或自备程序控制操纵的不载人飞机，集无线通信、飞行控制、卫星导航等技术于一体[1]，自20世纪初应军事需求问世以来，应用领域逐步扩大至航拍、测量、植保、救援等民用领域。无人机执行任务的实质是软件算法与硬件协同工作的典型体现，算法主要涉及航迹规划、智能避障、飞控等方面，且随着行业的发展，算法开发内容一直处于快速更新迭代中，是行业内的研究重点。20世纪50年代我国开始正式研制无人机，历经数十载，已积累图像传输[2-4]、飞行控制[5-6]、航迹规划[7-9]等大量研究成果；但算法复杂且形式多样，目前国内还没有归纳与总结整个无人机算法研究历程的学术成果。针对海量文献目标，传统文献计量方法则会暴露效率低、不够客观等缺点；而科学知识图谱是现代文献计量学中较出色的分析方法之一，兼有“图”与“谱”的双重特性，可直接、客观地显示知识网络群体之间的交叉、演化或派生等复杂关系[10]。基于CiteSpace与CNKI中文数据库，马子涵[11]等梳理归纳了我国军备保障效能领域的研究成果；陈磊[12]等对我国煤矿安全评价领域的发展态势进行了归纳、总结与可视化表达。鉴于此，为理清国内无人机算法的发展趋势、历史研究热点与迭代方向，以CNKI数据库中无人机算法相关文献为数据源，借助CiteSpace可视化软件，从发文类型与数量、发文作者、关键词、研究前沿等角度出发，绘制了无人机算法领域知识图谱，并梳理了整体发展脉络，分析了历年研究热

收稿日期：2022-08-09。
项目来源：贵州省科技支撑资助项目（黔科合支撑[2022]一般253号、黔科合支撑[2023]一般202号）；贵州科学院省级科研资助项目（黔科院科专合字[2021]03号）。
第一作者简介：罗军华（1995—），硕士，研究实习员，主要研究方向为区域灾害情景模拟、贝叶斯建模及无人机倾斜摄影测量等，E-mail：674914258@qq.com。
通信作者：李威（1986—），硕士，副研究员，主要研究方向为资源环境遥感与3S技术应用，E-mail：892525771@qq.com。

点，归纳了整体历史走向，以期为后续研究提供参考依据。

1　数据来源与研究方法

1.1　数据来源

在CNKI的高级检索功能中，以“SU=‘无人机*算法’”为检索式，期刊来源选择SCI、EI、核心期刊、CSSCI、CSCD六类，其余文献类型选择硕、博士学位论文与会议论文3类，获得有效检索结果9 410条，检索时间为2022-05-28。

1.2　研究方法与工具

基于已部署的本地JDK运行环境，在CiteSpace V5.8.R3操作界面中，时间序列设置为1996—2022年，时间切片设置为1 a，节点类型分别选择为作者、关键词和突现主题词汇等，进行全方位的知识图谱共现分析与聚类分析。

2　研究结果与分析

2.1　发文数量时间分布特征

发文数量随时间的变化趋势可在一定程度上反映学术研究的整体发展历程。1996—2021年该领域整体发文数量的变化情况见图1（其中2022-01-01—2022-05-28的209篇文献未统计），可以看出，核心期刊占比为32.9%，硕士、博士学位论文占比分别为59.5%、5.1%，学术期刊的统计发文量低于硕士学位论文是由于文献检索时未考虑普刊、论坛汇报等杂志；1996—2003年发文量较少，且1997年、2000年等无相关研究成果，该阶段是国内无人机算法研究的萌芽时期，无人机刚进入民用行业，如何结合行业需求进行二次开发与生产应用，是该阶段民众与研究人员主要考虑的问题；2004—2016年发文量明显增加，2016年硕士学位论文数量达到324篇，表明无人机算法的开发内容开始明确，行业应用需求逐步确定，该阶段是国内研究的起步探索期；2017—2021年发文量快速增加，2020年硕士学位论文数量达到峰值（1 071篇），该阶段是国内研究的快速发展期。

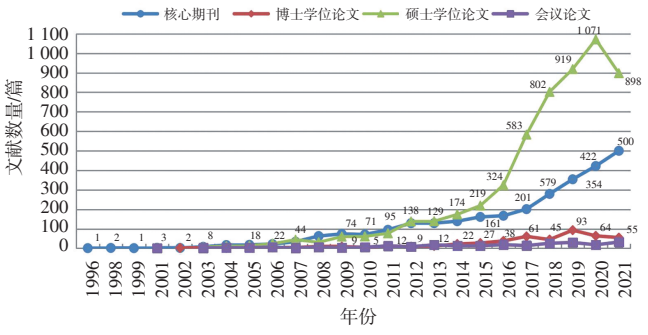


图1　1996—2021年无人机算法研究发文数量随时间变化趋势图

2.2　发文作者共现分析

利用CiteSpace对发文作者进行共现分析，可识别出发文数量较多的核心作者与研究人员之间的相互合作关系。在软件操作界面，节点类型选择作者，剪枝网络方式选择最小生成树，阈值设置为40，最终生成作者共引知识图谱（图2）与作者发文频次排名表（表1），可以看出，图谱中共有网络节点589个，网络连接边504条，网络密度为0.002 9，图中节点的大小与作者出现的频率成正比，年轮不同的轮廓颜色表示不同的引用年份，参考色带由浅灰色向红色递进表示时间由远至近，而节点之间连接线条数量与粗细程度反映了作者之间的相互合作关系与合作强度，线条越细，数量越少，则表明节点之间的合作关系越弱；发文频次最多的3位作者分别为金国栋、谭力宁和代冀阳，发文量50篇以上的作者共计16位。基于修剪合并网络算法优化合作网络，主要可分为4大核心作者群，即火箭军工程大学的金国栋、谭立宁、薛远亮等，南昌航空大学的代冀阳、应进、王宁等，陆军工程大学的李艾静、王海等，南京航空航天大学的王磊、仲志伟、张俊杰等；图谱中还存在部分节点频次不高、连接较简单的合作网络以及分散的独立作者。整体看来，各大研究团体之间的连线都比较稀疏、节点相互独立，表明团队之间的学术互引关系较弱、强度较低，学科知识与研究成果的共享程度较差，不利于国内无人机算法领域的可持续发展。

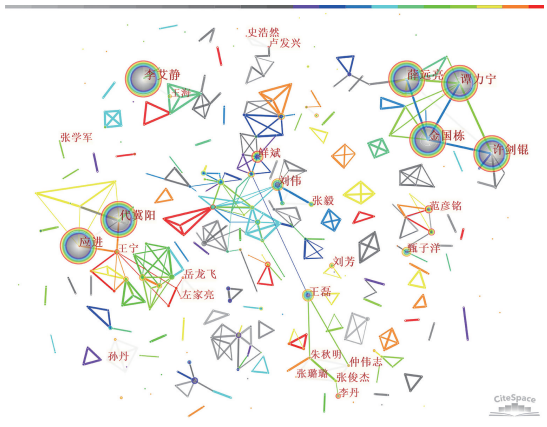


图2　国内无人机算法领域1996—2022年发文作者共引知识图谱

由表1可知，火箭军工程大学学术团队总发文量占排名前20位作者总发文量的26.1%，南昌航空大学学术团队占13.05%，陆军工程大学学术团队占

表1 1996—2022年发文数排名前20位的作者及其机构名称

序号	发文量	作者	机构名称	序号	发文量	作者	机构名称
1	88	金国栋	中国人民解放军火箭军工程大学	11	59	鲜斌	天津大学
2	86	谭力宁	中国人民解放军火箭军工程大学	12	55	仲志伟	南京航空航天大学
3	85	代冀阳	南昌航空大学	13	52	张俊杰	南京航空航天大学
4	84	应进	南昌航空大学	14	52	张毅	中国人民解放军海军航空大学
5	84	李艾静	中国人民解放军陆军工程大学	15	51	岳龙飞	中国人民解放军空军工程大学
6	82	薛远亮	中国人民解放军火箭军工程大学	16	51	甄子洋	南京航空航天大学
7	82	许剑锟	中国人民解放军火箭军工程大学	17	49	张学军	北京航空航天大学
8	71	刘伟	南京航空航天大学	18	48	范彦铭	中航工业沈阳飞机设计研究所
9	62	王磊	南京航空航天大学	19	47	卢发兴	中国人民解放军海军工程大学
10	60	刘芳	北京工业大学	20	47	史浩然	中国人民解放军海军工程大学

6.49%，南京航空航天大学学术团队占22.47%，合计68.11%，表明除主要研究团队外，国内该领域分散作者同样较多，研究成果丰富、层次鲜明、角度多样；但核心作者的研究成果奠定了学科基础，初次开展无人机算法研究的外部学者可着重关注4大作者群的研究成果，进行系统性学习。

2.3 关键词共现分析

本文将节点类型设置为关键词，网络优化方式设置为寻径算法，节点阈值设置为100，计算历年关键词网络节点的中心度，获取关键词共引知识图谱（图3）与中心度大于0.05的历年关键词排序表（表2），可以看出，图谱中共有网络节点774个，连接边1 996条，网络密度为0.006 7，节点之间连接紧密，网络密度较高，具有明显的主题演化路径；图谱中除出现“无人机”“UAV”“四旋翼”等飞行器词条外，还有“航迹规划”“航路规划”“路径规划”“任务规划”等一系列用于实现飞行器自主导航、自主作业、运动控制的核心算法词汇，以及“三维重建”“数据融合”“图像拼接”“特征提取”等无人机数据采集后处理的关键技术名词；网络节点中心度常用于衡量与该节点直接联系的个体数目，中心度越大，表明该节点在共现网络中的受关注程度越高[13]，在整个无人机算法发展历程中，中心度在0.15以上的除“遗传算法”“路径规划”“航迹规划”等涉及无人机飞行方案、模式的词条外，还有“三维重建”“协同控制”“特征匹配”“图像分割”“遥感”等有关无人机数据采集后处理的重要内容。从研究内容与应用成果的角度出发，1996—2007年无人机是以飞控、航迹与路径规划等基础算法开发为主要研究内容，如pid控制算法、滑模控制（二阶pid）等都是无人机飞控开发中的常见算法，而BP神经网络被用于协助pid算法对无人机动力装置进行控制、牵引，dsp架构被学者引入无人机领域作为飞控系统设计的基础框架，遗传算法则被用于无人机各类航迹、航路、任务规划中；2008—2014年无人机在基础航飞与航路执行等功能得到保障后，国内研究重点开始转向行业应用，并针对部分特定功能展开进一步算法研究，如“三维建模”“摄影测量”“编队控制”“图像拼接”“集群”等，同时“避障”词条的出现表明学者开始进行无人机避障功能的算法研发；2015—2019年学者开始将无人机算法开发与人工智能技术相结合，如“图像分割”“机器学习”“变化检测”“语义分割”“视觉检测”等都属于人工智能的技术范畴，在该研究阶段无人机技术结合智能识别算法已实际运用于电网的巡检工作中；随着5G通信、光通信技术的发展推广，2020—2022年出现了“物联网”“智能检测”“巡检”等词条，表明在快速、高效通信技术的加持下，学者正逐步考虑将无人机纳入物联网系统中，利用无人机灵活性高、响应速度快、活动范围广等优势，实现无人机的分布式监控与全自主无人化飞行管理等。综上所述，可将无人机算法领域的研究历程分为基础算法开发期（1996—2007年）、行业应用拓展期（2008—2014年）、人工智能发展阶段（2015—2019年）和物联网展望阶段（2020—2022年）。

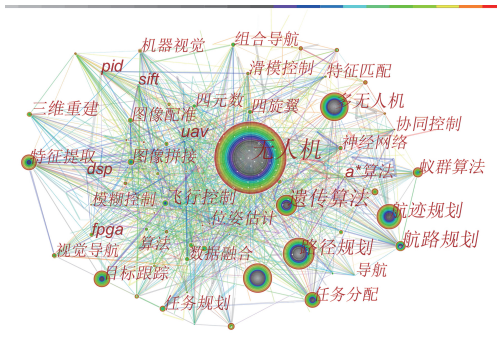


图3 国内无人机算法领域1996—2022年关键词共引知识图谱

表2　1996—2022年各年份关键词中心度排序表

年份	关键词（中心度）	年份	关键词（中心度）	年份	关键词（中心度）
1996–2002	无人机（0.64）、遗传算法（0.29）、路径规划（0.18）、航迹规划（0.15）、任务规划（0.11）、目标跟踪（0.08）	2009	协同控制（0.15）、组合导航（0.13）、SIFT特征匹配（0.11）、资源分配（0.09）、影像匹配（0.06）、姿态估计（0.05）、自主着陆（0.05）	2015	图像分割（0.15）、粒子滤波（0.1）、光流（0.07）、控制算法（0.07）、抗干扰（0.05）
2003	航路规划（0.16）、飞行控制（0.12）、优化算子（0.09）、作战效能（0.05）	2010	目标识别（0.16）、编队控制（0.12）、航线规划（0.07）、图像配准（0.05）	2016	遥感（0.15）、SLAM算法（0.13）、输电线路（0.11）、电力巡检（0.08）、自主避障（0.07）、博弈论（0.05）
2004	数据融合（0.13）、图像均衡（0.08）、算法（0.05）	2011	特征匹配（0.17）、图像融合（0.12）、影像拼接（0.11）、数据采集（0.07）、姿态测量（0.06）、边缘检测（0.05）	2017	机器学习（0.15）、激光雷达（0.12）、变化检测（0.09）、室内定位（0.07）、点云（0.06）、图像增强（0.05）
2005	信息熵（0.09）、BP网络（0.05）			2018	语义分割（0.16）、视觉检测（0.11）、点云滤波（0.06）
2006	神经网络（0.12）、pid控制（0.09）、DSP架构（0.06）、目标定位（0.05）	2012	四元数（0.12）、模糊控制（0.12）、稳定性（0.1）、虚拟现实（0.06）	2019	凸优化（0.11）、迁移学习（0.1）、空洞卷积（0.08）、协同定位（0.07）、轨迹预测（0.07）、视觉伺服（0.05）
2007	UAV（0.17）、视觉导航（0.13）、目标分配（0.09）、滑模控制（0.09）、协同搜索（0.06）、惯性导航（0.05）	2013	轨迹规划（0.15）、定位（0.12）、面向对象（0.11）、飞控系统（0.09）、多尺度（0.07）、集群（0.06）、视觉导航（0.05）	2020	物联网（0.13）、孪生网络（0.12）、群体智能（0.09）、5G（0.05）、智能检测（0.05）
2008	三维重建（0.16）、a*算法（0.15）、轨迹优化（0.1）、图像拼接（0.08）、避障（0.06）	2014	姿态解算（0.15）、三维建模（0.12）、摄影测量（0.07）	2021	数据增强（0.06）、应急（0.05）
				2022	光通信（0.06）、巡检（0.05）

2.4　关键词聚类分析

基于关键词可视化分析结果开展进一步的聚类计算，聚类算法选择LLR，主题数量设置为10，最终生成关键词聚类图谱（图4）与关键词时区分布图谱（图5）。通过图谱可获知该领域排名前10位的研究主题，并通过查阅各聚类节点的详细信息，找出各词条引用数量最多的关键文献（表3）；还可剖析各主题的详细发展路径。以“图像拼接”为例，该主题的子词条首次出现于2007—2010年，包含“广逆性”“鲁棒性”“SIFT”等以概念性为主的内容，并于2010—2013年涌现“图像融合”“图像配准”“影像匹配”等

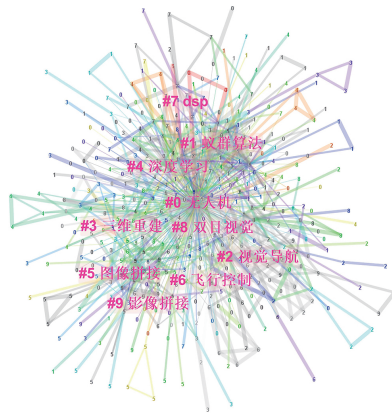


图4　国内无人机算法研究领域关键词聚类知识图谱

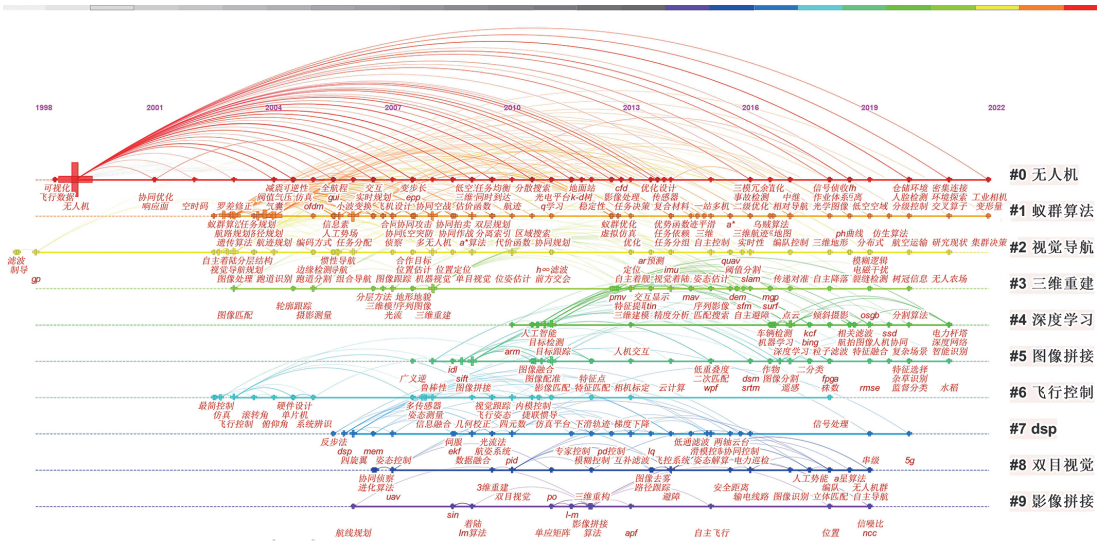


图5　国内无人机算法研究领域关键词时区分布图谱

表3 LLR聚类算法下各研究主题引用数量最多的关键文献

序号	主题名称	文献名称
1	蚁群算法	柳长安.无人机航路规划方法研究
2	视觉导航	张广军，等.基于双圆特征的无人机着陆位置姿态视觉测量方法
3	三维重建	郭复胜，等.基于辅助信息的无人机图像批处理三维重建方法
4	深度学习	王万国，等.基于RCNN无人机巡检图像电力小部件识别研究
5	图像拼接	谢涛，等.基于无人机遥感技术的环境监测研究进展
6	飞行控制	李德仁，等.无人机遥感系统的研究进展与应用前景
7	dsp	刘晓杰.基于视觉的微小型四旋翼飞行器位姿估计研究与实现
8	双目视觉	张博翰，等.电动VTOL飞行器双目立体视觉导航方法
9	影像拼接	何敬，等.基于SIFT特征点的无人机影像拼接方法研究

大量技术名词，在后续发展进程中，“云计算”“作物遥感”“监督分类”“水稻”等词汇的出现，也表明“图像拼接”主题的研究内容开始转向数据计算、遥感应用等方向。

2.5 阶段性研究前沿突现分析

将聚类词的类型设置为突发聚类，对研究领域历年的研究热点进行突现分析，并将发文量较少的年限（1996—2002年）合并为1个时间单元，获得排名前10位的突发关键词统计结果（表4）。研究前沿是指学科领域中正在探索和研究，并即将发生的代表性科学问题。国内突现度最高的关键词为“无人机”，突现年限为1996—2007年，突现度为25.936 1，表明该时段内无人机兴起并被国内学者广泛提及，为该学科的研究前沿。相同词条出现在关键词表中的时间要早于突发聚类词表，表明新研究前沿的出现，研究人员通常需经过一段时间的探索后才能成为下个阶段的重点研究对象。

表4 国内1996—2022年无人机算法研究领域前10突发聚类关键词

关键词	突现度	起始年份	终止年份
无人机	25.936 1	1996	2007
航路规划	24.678 5	2003	2007
遗传算法	20.602 1	2004	2009
dsp架构	17.041 7	2007	2010
视觉导航	15.991 3	2008	2014
三维重建	13.102 3	2009	2015
影像拼接	11.914 3	2012	2015
深度学习	8.378 9	2016	2020
遥感	5.209 1	2017	2021
5G	3.310 9	2021	2022

3 结 语

本文以CNKI核心文献数据库为基础数据源，基于CiteSpace V5.8.R3可视化软件与Excel统计工具，结合文献计量法与知识图谱分析法，从发文数量、发文作者、历年关键词、关键词聚类和研究前沿等角度出发，回顾与总结了国内无人机算法领域的发展历程。

1）国内有关无人机算法的重要研究最早可追溯至1996年，在近25年的研究历程中，硕士与博士学位论文的发文数量较多，占比分别为59.5%和5.1%。根据发文数量，可将该领域的发展进程划分为无人机算法研究的萌芽时期（1996—2003年）、起步探索时期（2004—2016年）和快速发展期（2017—2021年）。

2）国内该领域研究主要分为火箭军工程大学、南昌航空大学、陆军工程大学和南京航空航天大学4个核心作者群。各学术团队之间的连线较稀疏，表明团队之间的学术互引关系较弱、强度较低，学科知识与研究成果的共享程度较差，不利于国内无人机算法领域的全面发展。

3）从历年研究热点的角度来看，该领域的发展历程可分为基础算法开发期（1996—2007年）、行业应用拓展期（2008—2014年）、人工智能发展阶段（2015—2019年）和物联网展望阶段（2020—2022年）。

4）在文献数据的预处理阶段，无论基于何种检索方法都会存在数据搜集不全或数据冗余的情况，导致可视化结果存在一定的偏差与误判，这是知识图谱研究的难点，也是未来重点的突破方向。

参考文献

[1] Colomina I, Molina P. Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92(2):79-97

[2] 裴慧坤,颜源,林国安,等. 基于生成对抗网络的无人机图像去模糊方法[J]. 地理空间信息,2019,17(12):4-9

[3] 高珍,邓甲昊,孙骥,等. 微型无人机图像无线传输系统方案与关键技术[J]. 北京理工大学学报,2008,28(12):1 078-1 082

[4] 王佩,荣昶,贾斐,等. 基于无人机的无线图像传输系统构建研究[J]. 实验技术与管理,2017,34(4):94-98

[5] 符俊鹏,刘智华. 丘陵地区无人机1∶2 000测图与控制点关系研究[J]. 地理空间信息,2018,16(10):42-43

（下转第32页）