

文章编号: 1674—8247(2020)05—0031—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.05.006

# 浅谈三维激光扫描技术在复杂艰险山区铁路 全生命周期建设中的应用

周世明

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**为确保复杂艰险山区铁路的施工及运营安全,文章对三维激光扫描技术进行研究与创新,结合三维激光扫描精度指标研究提出复杂艰险山区铁路三维激光扫描标准差标准,探讨在复杂艰险山区铁路在施工及运营阶段如何利用高精度点云数据提取路基及隧道工程等构筑物三维坐标进行施工质量评价和变形监测评价,在运营阶段如何利用高精度云数据提取铁路轨道几何参数以及轨道沿线设施等为运营维护提供检测数据,研究成果可为复杂艰险山区铁路施工及运营维护快提供技术支撑。

**关键词:**三维激光扫描;高精度点云;标准差;变形监测;运营维护

中图分类号:P225

文献标志码:A

## Discussion on the Application of 3D Laser Scanning Technology in the Full-life-cycle Construction of Complex and Difficult Mountains Railway

ZHOU Shiming

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to ensure the safety of the construction and operation of the Construction of Complex and Difficult Mountains Railway, the 3D laser scanning technology is studied and some innovations are made in this paper; the standard deviation for the 3D laser scanning of the Construction of Complex and Difficult Mountains Railway is put forward on the basis of the research on the 3D laser scanning accuracy indexes; the method to use high-precision point cloud data to extract the 3D coordinates of structures such as subgrade and tunnels for construction quality evaluation and deformation monitoring evaluation, as well as the method to use high-precision cloud data to extract geometric parameters of railway tracks and facilities along the track for operation and maintenance are also discussed. The research results can provide technical support for the construction, operation and maintenance of the Construction of Complex and Difficult Mountains Railway.

**Key words:** 3D laser scanning; high-precision point cloud; standard deviation; deformation monitoring; operation and maintenance

某复杂艰难山区铁路整体穿越了我国最长、最宽、最典型的南北向山系横断山脉,高烈度地震、高地应力、高地温等工程病害频发,地质条件极其复杂,工程

建设颇具挑战,地质灾害前所未有<sup>[1]</sup>。在本项目的外业勘察过程中,很多地方测绘人员难以到达,部分隧道洞口存在无法近距离接触的高陡边坡危岩体,常规测

收稿日期:2020-07-09

作者简介:周世明(1968-)男,高级工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KSNQ202021)

引文格式:周世明. 浅谈三维激光扫描技术在复杂艰险山区铁路全生命周期建设中的应用[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5): 31-35.

ZHOU Shiming. Discussion on the Application of 3D Laser Scanning Technology in the Full-life-cycle Construction of Complex and Difficult Mountains Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 31-35.

量设备和测量手段不能满足测量要求。为解决该铁路前期勘测设计、中期施工建设以及后期运营维护的测量难题以及目前铁路工程测量规范中尚未明确规定三维激光扫描标准差的问题,本文通过对工程案例进行分析总结,提出了三维激光扫描标准差,并对三维激光扫描技术在复杂艰险山区铁路中的非接触式测量方法进行了探讨,结论可为该铁路全生命周期建设提供技术支撑。

## 1 三维激光扫描技术

### 1.1 三维激光扫描仪系统

三维激光扫描仪主要通过仪器自定义的扫描坐标系、工程坐标系、大地坐标系、相机坐标系完成扫描点三维坐标的相互转换,得到点云空间数据。点云空间数据主要包含三维坐标、空间属性等扫描点的集合,数据处理主要工作包括数据配准、数据拼接、数据去噪、杂波过滤、数据纠偏、数据分割以及数据分析等<sup>[2]</sup>。

三维激光扫描系统一般由三维激光扫描仪、数码相机、电源以及其他附属设备构成,并配备与扫描仪相配套的数据后处理软件。

### 1.2 三维激光扫描系统的特点

三维激光扫描系统具有自动化程度高、受天气影响小、数据生产周期短、精度高等特点,是目前最先进的能实时进行地形表面数据获取、地质灾害监测、铁路工程构筑物的变形监测、隧道净空断面检测等三维空间信息和影像获取的现代测量技术。

### 1.3 三维激光扫描技术应用前景

铁路工程三维信息对铁路既有线改造和铁路信息化管理非常重要,也是铁路GIS系统建立的基础。采用传统的测量手段获取轨道及周围环境的三维信息数据,在密度和效率上均无法满足铁路施工、运营维护及铁路GIS系统建设的需求。车载三维扫描测量系统特别适合铁路工程三维数据的快速采集,可直接用于铁路三维地形数据的采集与更新,在铁路既有线改造、运营维护和铁路GIS系统建设中发挥了重要作用。三维激光扫描在进行精准测量的同时,可获得高分辨率的三维可视化铁路数据,可用于建立数字铁路智能信息化管理系统。同时,数字铁路智能化、信息化将为铁路的施工及维护管理带来科学决策,有助于合理分配资源,优化施工及运营维护计划,降低管理成本,增强整个企业的综合竞争力,从而带来良好的经济效益和社会效益<sup>[3]</sup>。

## 2 三维激光扫描测量技术在复杂艰险山区铁路全生命周期建设中的应用

三维激光扫描技术是近年来国际上高效率空间数据获取方面的研究热点,它是一种通过位置、距离、角度、反射强度等观测数据直接获取对象表面点三维坐标,形成高精度点云数据,实现地表信息实时提取和准确重建三维场景的观测技术,同时还可通过扫描技术获取的高精度点云数据在地形测量、施工检测、运营维护测量阶段为铁路信息化管理提供基础数据。因此,探讨三维激光扫描技术在复杂艰险山区铁路勘测设计、施工、运营全生命周期中的应用十分必要<sup>[4]</sup>。

### 2.1 勘察设计阶段的应用

复杂艰险山区地形险峻,对铁路不良地质测绘区域必须进行1:500地形测量。传统地形测绘技术需人工“跑点”,危险系数高,工作效率低,而三维激光扫描是一种非接触性测绘技术,能够完全避免地形因素对测绘工作的影响。尤其是在一些危险区域(如险峻的高山、湍急的河流以及悬崖峭壁等)的测绘过程中,三维激光扫描技术能够在不接触测绘对象的情况下,实现对测绘对象的全面扫描,大大降低了危险区域地形测绘的难度和风险。在某车站及沿线不良地质区域1:500的地形测量中,采用三维激光扫描并三维建模进行地质灾害评价,取得了良好的经济效益<sup>[5]</sup>。

### 2.2 施工建设阶段的应用

传统测量以人工携带测量设备到施工现场或运营线路上进行测量为主,对施工及运营干扰大,安全隐患大,效率低,同时受制于测量人员的技术水平,测量结果存在差、错、漏现象,核查成本高,影响铁路施工检测、既有线运营维护的精准性。因此探讨三维激光扫描测量技术标准差及测量技术方案很有必要。

#### 2.2.1 三维激光扫描标准差

目前,在铁路施工及运营维护测量中,对三维激光扫描仪测量标准差的技术标准还没有相关规定,中铁二院工程集团有限责任公司完成的《基于惯导三维激光扫描移动测量系统在铁路既有线测量中的应用研究》科研项目,创建了在动态环境下将线路控制网CPⅡ、轨道控制网CPⅢ引入POS测量系统的联合解算方法,可实现铁路轨道快速、自动、高精度定位定姿测量,提高弱GNSS信号甚至无GNSS情况下绝对测量的精度。渝黔高速铁路娄山关隧道施工、贵阳地铁运营检测等项目的工程实践表明,该测量技术可作为高原、高寒、高海拔、复杂地质等条件下的主要检测测量

技术,因此制定其主要技术标准具有十分重要的意义<sup>[6]</sup>。渝黔高速铁路采用移动三维扫描的精度验证报告如表1所示。

表1 约束点精度验证表(m)

CPⅢ 点号	约束点三维坐标			验证点扫描提取三维坐标			残差		
	pX	pY	pZ	cX	cY	cZ	dX	dY	dZ
298334	502 568.000	3 010 933.324	885.593	502 567.994	3 010 933.313	885.593	-0.006	-0.011	0
298333	502 575.468	3 010 928.175	885.807	502 575.461	3 010 928.177	885.807	-0.008	0.002	0
299302	502 536.151	3 010 890.107	886.501	502 536.145	3 010 890.099	886.501	-0.006	-0.009	0
299304	502 497.102	3 010 837.686	887.603	502 497.093	3 010 837.679	887.602	-0.009	-0.008	-0.001
299303	502 504.233	3 010 831.982	887.824	502 504.223	3 010 831.983	887.824	-0.01	0.002	0
299306	502 457.626	3 010 785.687	888.748	502 457.619	3 010 785.681	888.749	-0.008	-0.006	0.001
299305	502 464.843	3 010 780.064	888.998	502 464.83	3 010 780.071	889.002	-0.012	0.007	0.004
299308	502 415.92	3 010 731.427	889.952	502 415.913	3 010 731.419	889.953	-0.007	-0.008	0
299307	502 423.165	3 010 725.818	890.151	502 423.157	3 010 725.825	890.15	-0.008	0.007	0
...	.....	.....	.....	.....	.....	.....	...	...	...
300318	501 598.602	3 009 814.99	908.534	501 598.598	3 009 814.98	908.535	-0.003	-0.01	0.001
300317	501 605.667	3 009 807.714	908.565	501 605.671	3 009 807.723	908.565	0.004	0.008	0
-						平均值	-0.006	-0.005	-0.002
-						标准差	0.007	0.007	0.003

根据表1数据分析可知,在测段范围内,基于既有约束点精度改善技术,在CPⅡ控制点约束下(CPⅡ点间距400~600 m),平面精度优于2 cm,高程精度优于1 cm;在CPⅢ控制点约束下(CPⅢ点间距60~150 m),平面精度优于1 cm,高程精度优于1 cm,完全满足铁路工程相关测量规范的技术要求<sup>[7]</sup>。三维激光扫描按照设置方式可分为固定式和移动式,三维激光扫描仪测量标准差限差如表2所示。

表2 三维激光扫描仪测量标准差限差

扫描 方式	约束点 间距/m	平面坐标标准差		高程标准 差/mm	速度 /(km/h)	基站间距 /km	备注
		X/mm	Y/mm				
固定式	60	10	10	10	-	-	-
轨检车	60~100	10	10	10	5	4	-
轨道车	400~600	20	20	20	30	10	汽车

2.2.2 路基工程及结构物施工数据检测

路基工程及结构物施工数据检测流程如下:

(1)在路基本体工程成型后,可采用汽车作为载体,将扫描设备固定在汽车上,以30 km/h行车速度对全线进行移动扫描,路基移动扫描测量示意图如图1所示。

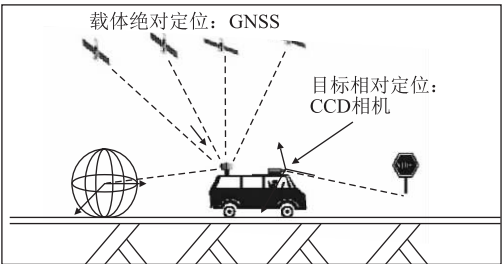


图1 路基移动扫描测量示意图

(2)根据扫描测量获取的高精度点云数据,提取施工路基、桥梁及隧道等的实时施工数据,检测路肩施工高程、桥面施工高程、隧道净空限界等施工数据是否满足设计要求。

(3)根据三维激光点云数据和高清晰360°全景影像数据,提取施工界面周边环境、路基面、结构物的三维坐标及全景影像进行施工管理及施工质量评价。

2.2.3 隧道变形监测

在隧道施工过程中,随着施工界面对周围环境的改变,各种工程构筑物或多或少都有一定的变形,为评价其变形量是否在设计允许范围内,需定期对其进行施工变形监测。

山区铁路隧道埋置较深,施工中随着隧道周围岩体应力的释放,易发生岩爆。因此,施工阶段对隧道工程的变形监测尤为重要,且可以预见,在复杂艰险山区铁路隧道施工中,因地质应力释放发生隧道变形的几率更大,其变形监测周期长,监测频率高,只有采用三维激光扫描技术,才能满足监测要求<sup>[8]</sup>。

2.2.4 竣工验收

铁路轨道铺设及控制网CPⅢ建立后,可采用以轨道车为载体的三维激光移动扫描技术,以4~6 km/h行车速度对全线进行移动扫描,建立铁路竣工后的基础数据库,作为运营期变形监测评价、运营安全评价、信息化管理的初始点云数据库<sup>[9]</sup>。

(1)数据采集

①利用轨道两侧沿线CPⅢ控制网进行靶标布设,按照60 m左右间隔在铁路两侧布设成对靶标,采用移动扫描方式进行数据采集,靶标可直接放置于控制点上,并采用CPⅢ同坐标及高程数据。

②在点云中提取靶标控制点,通过拟合确定其中心三维坐标,并由此引入测量 CPⅢ控制网三维坐标进行平差融合计算。

### (2) 质量评价

根据全线高精度点云数据库,结合施工图设计资料,提取全线设计中线、隧道净空限界断面等并与设计数据对比,对隧道工程、桥涵工程、路基工程、运营设施等进行施工质量评价。

## 2.3 运营维护阶段的应用

### 2.3.1 三维激光扫描数据采集

在铁路运营阶段测量以移动测量技术方式为主,其主要优势是能快速、高密度、高精度地获取三维坐标数据。铁路既有线扫描测量主要有两种移动扫描测量方式。

(1)对于以轨道平板车为载体的移动测量方案,平面坐标变换需沿铁路线每4 km设置1个控制点,高程需沿铁路线每2 km设置1个控制点。

(2)对于以轨道小车为载体的移动测量方案,平面和高程都通过沿线 CPⅢ控制网进行靶标布设。

(3)每个控制点需同时具有水准高程、WGS84坐标(或 CGCS2000 坐标)和独立工程坐标<sup>[10]</sup>。

### 2.3.2 轨道几何参数提取<sup>[11]</sup>

从原始扫描激光点云中分割轨道三维激光点云,根据三维激光扫描系统的轨迹数据,确定轨道概略中心线,并以此中心线进行数据处理。

(1)利用三维激光扫描系统融合生成的 POS 位置姿态信息数据,采用轨道动态测量结合设备自身标定好的结构信息参数,通过特殊算法自动分类出轨道面点云。

(2)利用分类的轨面激光点云,POS 姿态信息结合设备标定参数,构建任意里程处横断面轨面中心坐标系,将该轨面坐标系下轨顶处点云按平面3 cm、高程3 cm空间进行滤波处理,最终得到任意断面轨顶点数据。

(3)利用指定间距的轨顶点数据进行拟合,形成最终的精确轨道几何参数。

### 2.3.3 特征点提取

#### (1) 点状设施提取

基于大数据引擎技术,点云数据根据颜色、强度及几何形状信息辨识出铁路上的点状设施,并按照要求采集其关键点的三维坐标。

#### (2) 接触网及跨线设施自动分类提取

针对铁路沿线十分规律的既有线信息(如接触网及跨线物数据),利用激光点云自动分类,并在此基础上构建独立轨面坐标系,实现接触网或跨线物的里程、

高程分类统计<sup>[12]</sup>。

#### (3) 隧道断面线提取

利用输出的 POS 中心线信息,按指定里程提取隧道断面数据,并输出二维断面图<sup>[13]</sup>。

### 2.3.4 铁路既有线设备管理调查<sup>[14]</sup>

(1)采用三维激光移动扫描可快速获取钢轨高密度、高精度的三维点云坐标数据和连续的360°全景影像数据。

(2)分别将轨迹姿态数据与激光扫描数据、全景影像数据进行地理参考处理可得到铁路线路及沿线设施的三维激光点云数据。

(3)将带坐标的三维激光点云数据和带属性的360°全景影像数据相结合,充分发挥两种数据的特点和优势,可实现铁路既有线线路及设施的调查与测绘。

### 2.3.5 自动化检测

复杂艰险山区铁路以隧道工程为主,部分隧道属于高地热、软岩大变形隧道,在运营期需对隧道开展定期巡查与风险识别,快速、高效、精确地发现隧道结构的变形和病害,并便捷、准确地处理海量检测数据,便于进行安全评估和预报预警。同时,还需定期对隧道做“三维 CT 扫描”体检,及时发现结构变形和病害,以便及时进行风险控制,保障隧道结构安全<sup>[15]</sup>。如某铁路线路所经地区大部分属于高寒、缺氧地区,不适合人类长期居住及工作,运营维护难度极大,要解决上述问题,采用非接触式自动化检测技术势在必行,采用三维激光扫描技术结合 GNSS 连续运行参考站(CORS)网络技术可实现自动化检测。

#### (1) 基准站

结合铁路工程及地质条件建立铁路 GNSS 连续运行参考站(CORS)网络和精密高程基准面模型,以参考站作为基准,动态维持与提供高精度位置和高程的全天候空间位置服务<sup>[16]</sup>,参考站与轨检小车的工作示意如图2所示。

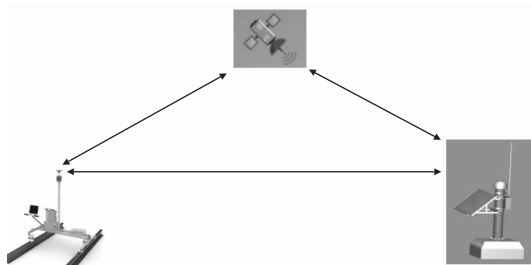


图2 参考站与轨检小车工作示意图

#### (2) 扫描测量

根据运营维护需求,对铁路开展分段扫描测量。移动检测速度为4~6 km/h,以100万点/s的高速采集覆盖隧道内壁的扫描点云信息,一次扫描可获取结

构变形、影像资料、净空断面等成果。

### (3) 检测评价

①每次运营维护扫描点云数据,与竣工阶段建立的“初始点云数据库”资料进行对比,评价隧道的变形量和变形趋势。

②利用高精度点云数据,提取轨道几何参数、三角坑、超高、欠超高等数据,评价轨道的平顺性。

③利用高精度点云数据,提取轨道周边管理设施,评价安全管理措施是否满足运营要求。

## 3 结论

复杂艰险山区铁路施工和运营难度极大,为应对复杂自然灾害对铁路运营的影响,提前做好测绘新技术的应用研究很有必要。本文对三维激光扫描技术在铁路勘测设计、施工及运营维护阶段的应用进行了探讨,研究成果可为复杂艰险山区铁路设计施工及运营维护提供技术支撑。

(1)本文提出的三维激光扫描仪测量标准差限差值可为铁路工程测量规范的修编提供技术支持。

(2)三维激光扫描技术形成的非接触快速测量技术,能解决复杂艰险山区铁路勘测设计阶段复杂地形区域的精细化测量,可应用于铁路的施工检测和运营维护检测等。

(3)川藏铁路 GNSS 连续运行参考站(CORS)网络拓展形成的三维激光移动扫描网络技术,可作为铁路运营阶段的自动化检测技术,对提高效率、保证成果质量及安全生产具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 中铁二院工程集团有限责任公司. 川藏铁路可行性研究报告[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2019.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Feasibility Study on Sichuan-Tibet railway [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2019.
- [2] 杨敏, 甘淑, 袁希平, 等. 复杂带状地形条件下的地面三维激光扫描点云数据采集与配准处理试验[J]. 测绘通报, 2018(5): 35-40.  
YANG Min, GAN Shu, YUAN Xiping, et al. Study on Data Acquisition and Registration Experiment of Terrestrial Laser Scanning Point Clouds under Complicated Banded Terrain Condition [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(5): 35-40.
- [3] 丁锐, 牛少儒. 三维激光扫描技术在工程测量中的应用前景分析[J]. 河南科技, 2014(7): 18.  
DING Rui, NIU Shaoru. Application Foreground Analysis of 3D Laser Scanning Technology in Engineering survey [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2014(7): 18.
- [4] 朱庆, 朱军, 黄华平, 等. 实景三维空间信息平台与数字孪生川藏铁路[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 46-53.  
ZHU Qing, ZHU Jun, HUANG Huaping, et al. Real 3D Spatial Information Platform and Digital Twin Sichuan-Tibet Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 46-53.
- [5] 陈治睿. 基于地面激光扫描的建筑物三维模型重建[D]. 抚州: 东华理工大学, 2012.  
CHEN Zhirui. Three-dimensional Building Model Reconstruction Based on Ground Laser Scanning. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2012.
- [6] 中铁二院工程集团有限责任公司. 基于惯导三维激光扫描移动测量系统在铁路既有线路测量中的应用研究报告[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2017.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Research on 3D Mobile Laser Scanning Technique with High Precision Inertial Navigation System (INS) or Existing Railway Surveying [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2017.
- [7] TB 10601-2009 高速铁路工程测量规范[S].  
TB 10601-2009 Code for Geology Investigation of Railway Engineering[S].
- [8] 托雷. 基于三维激光扫描数据的地铁隧道变形监测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.  
TUO Lei. Subway Tunnel Deformation Monitoring Based on Three-dimensional Laser Scanning Data [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [9] ZHOU Yuhui, WANG Shaohua, MEI Xi, et al. Railway Tunnel Clearance Inspection Method Based on 3D Point Cloud from Mobile Laser Scanning[J]. Sensors, 2017, 17(9): 2055.
- [10] 周玉辉. 三维激光扫描移动测量在铁路运营中的应用[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(1): 68-73.  
ZHOU Yuhui. Application of 3D Laser Scanning Mobile Surveying in Railway Operation [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(1): 68-73.
- [11] 周玉辉, 卢建康, 梅熙, 等. 一种利用三维激光点云自动提取既有线路顶高程方法: 中国, 201710802183.2[P]. 2019-01-04.  
Zhou Yuhui, Lu Jiankang, Mei xi, et al. A Method for Automatic Extraction of the Top Height of Existing Rail Lines by Using 3D Laser Point Cloud; China, 201710802183.2[P]. 2019-01-04.
- [12] 叶岚, 刘倩, 胡庆武. 基于LIDAR点云数据的电力线提取和拟合方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2010, 33(5): 30-34.  
YE Lan, LIU Qian, HU Qingwu. Research of Power Line Fitting and Extraction Techniques Based on LIDAR Point Cloud Data [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2010, 33(5): 30-34.
- [13] 石帅, 王睿, 文思思, 等. 基于机器视觉的隧道衬砌裂缝图像分割处理算法研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(1): 17-22.  
SHI Shuai, WANG Rui, WEN Sisi, et al. Research on Image Segmentation Algorithm of Tunnel Lining Based on Machine Vision [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 17-22.
- [14] 卢建康, 周玉辉, 周世明, 等. 一种三维激光全景的铁路线路调绘方法: 中国, 201710802182.8[P]. 2019-12-03.  
Lu Jiankang, Zhou Yuhui, Zhou Shiming, etc. A Three-Dimensional Laser Panorama Method for Drawing Railway Line; China, 201710802182.8[P]. 2019-12-03.
- [15] 杨赫. 高速铁路隧道限界及断面检测技术的研究[J]. 中国新技术新产品, 2012(10): 44-45.  
YANG He. Study on High-speed Railway Tunnel Clearance and Section Inspection Technology [J]. New Technologies and Products, 2012(10): 44-45.
- [16] 周义高, 胡玉芹. 连续运行参考站系统(CORS)应用技术研究[J]. 价值工程, 2012, 31(15): 201.  
ZHOU Yigao, HU Yuqin. Research on Application Technology of Continuous Operation Reference Station System (CORS) [J]. Value Engineering, 2012, 31(15): 201.