

姚连璧¹ 陈军² 秦一² 范先锋² 孙盼盼² 刘昊¹ 阮东旭¹

基于模板匹配的铁路中心线提取方法研究

摘要

随着铁路设施的老化以及对运力需求的增加,需要对既有铁路线路进行改建,因此需要在不影响正常运营的情况下对既有线进行勘测。目前铁路既有线勘测的手段多采用传统人工测量方法,存在测量效率低、任务重、工序繁琐、反复上线等不足。针对上述不足,本文基于轨道移动激光扫描系统获取的绝对三维点云数据,采用基于最小二乘的二维模板点云匹配算法,联合迭代计算出钢轨轨面中心点位置,获得轨道中心线和轨距等相关参数。通过轨道试验场地的试验和结果分析表明,本文算法可有效提取轨道中心线,为既有线勘测提供准确的中线数据。

关键词

移动激光扫描;轨道中心线;传感器集成

中图分类号 U452

文献标志码 A

收稿日期 2022-06-01

资助项目 中国铁建股份有限公司科技重大专项(2019A02)

作者简介

姚连璧,男,博士,教授,主要研究方向为移动激光扫描与应用.86095@tongji.edu.cn

陈军(通信作者),男,正高级工程师,主要研究方向为工程测量.cjun@sty.sh.cn

¹ 同济大学 测绘与地理信息学院,上海,200092

² 中铁上海设计院集团有限公司,上海,200070

0 引言

目前我国仍然有大量的既有铁路线需要改建以提高运营速度和能力,在既有线路改造测量中,现有的轨道中心线测量是铁路勘测设计的重要要素之一,也是铁路安全运营维护的重要任务^[1-5]。目前的测量方法多采用全站仪配合轨道检测小车上安装的棱镜利用矢距法或偏角法进行接触式的轨道线路逐点测量,此类方法虽然精度较高,但成果单一且测量效率低,难以满足在轨道运营线空窗期内短时间完成测量的需求。

随着研究的不断深入,非接触测量作为一种新型综合测量技术,逐步应用于铁路轨道中心线的提取。文献[6-8]利用高速铁路的近景影像,采用边缘提取算法和霍夫变换提取铁路轨道的内边缘线,利用特征提取算法匹配轨道表面的同名点,再通过精确匹配获得轨道边缘特征。文献[9-10]将机载雷达数据与影像数据相结合,提出一种面向对象的轨道提取算法,通过数学形态学降低相关因素的影响,分割出轨道区域的点云数据,再根据轨道的高度特征提取轨道并利用最小二乘的方法进行拟合。文献[11]利用轨道的几何特征和反射率特性实现轨道点云自动提取,但由于轨道几何形状的复杂性、道岔的存在等原因,在轨道的分叉节点时,易出现错误分类的情况。以上方法虽然能够实现钢轨点云的自动提取和轨道中心线的计算,但想要满足高效率和高精度的双重要求,还存在较多的问题和研究空间。

在分析铁路特性、轨道中心线点云提取需求的基础上,本文采用一套多传感器集成的轨道移动激光扫描系统,采用模板点云匹配算法迭代计算出钢轨轨面中心点位置,获得轨道中心线和轨距等相关参数,利用三次样条函数拟合得到轨道中心线方程,并在试验场地进行实验和采集数据,验证中心线提取算法的可行性。

1 轨道移动激光扫描系统

结合轨道的结构特征,研制了一套轨道移动激光扫描系统,将二维断面激光扫描仪、组合导航系统集成到了研制的轨检小车上,如图1所示。该系统通过电动检测车实现对轨道及周围环境的三维激光扫描,有效提高了外业检测的工作效率。

本系统适用于地铁或铁路轨道(标准轨距1435 mm轨道),匀速运动速率可设定范围0~5.4 km/h,轨距测量精度0.2 mm。采用德国

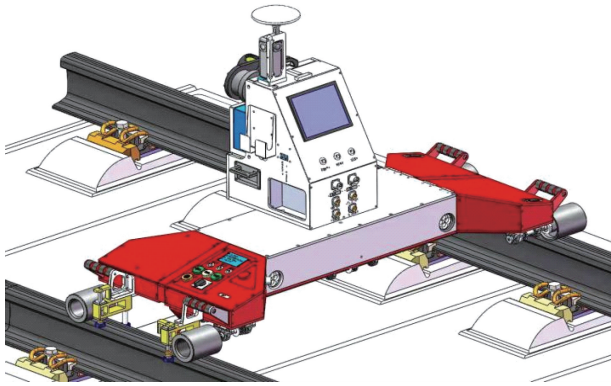


图1 移动激光扫描系统
Fig. 1 Mobile laser scanning system

Z+F 9012 二维激光扫描仪进行点云数据采集,最高扫描频率为 200 Hz,每秒可采集 101.6 万个点,且通过同步接口,扫描仪可以接收到卫星时间信息与 PPS 秒脉冲信息,使存储的扫描数据中含有时间信息。抱轨机构通过两组轴承结构卡在轨道内外侧,通过机械机构保证基准轨一侧与轨道贴合。箱体内集成惯导和工控机,并支持备用电池的热插拔使用,增加外业工作的续航时间。

2 轨道中心线提取与方程拟合

2.1 模板点云适应性密度重构

依据铁路钢轨的断面标准设计图,在 AutoCAD 中采用“定距等分”功能将轨道工字钢断面 CAD 图中的直线段和圆弧段转化为间隔为 1 mm 的点集,再使用“数据提取”工具提取点云坐标,制成轨道工字钢断面的模板点云文件。

在实际扫描的轨道钢轨断面点云数据中,因扫描仪位置处于两条钢轨之间且扫描仪的扫描线为等角分布,导致扫描出的轨道钢轨断面点云密度会随着位置分布而出现不均匀的现象。因此本文采用一种基于模板点云的适应性密度重构方法,主要利用匹配参数平移和旋转后的模板点集,经距离最小化的原则,重构成分布密度与轨道钢轨断面扫描点云最为相近的点集,可有效提高模板点云匹配的精度。

由于左、右钢轨扫描范围的限制,采集的钢轨断面扫描点云在竖向方向上会比轨道断面模型点集少一部分点云。为了提高匹配的效率,本文通过计算钢轨断面扫描点云的竖向高度,以此为约束条件,对轨道断面模型点集进行修正裁剪,如图 2 所示。

为实现基于距离最小化原则的模板点云适应性密度重构,首先需要将模板点云基于初始平移参数

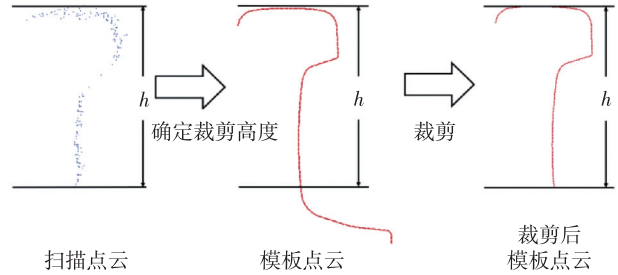


图2 模板点云裁剪示意

Fig. 2 Template point cloud clipping

平移到扫描点云附近,本文通过采用计算扫描点云和模板点云的质心差异的方式得到初始平移参数。在钢轨模板点集中,计算离钢轨断面扫描点云中与每一个扫描点距离最近的模板点,重构模型点集,得到模板适应性密度重构点云。

由于点云分布密度的差异,采用基于最小二乘的二维 ICP 算法和模板点云的适应性密度重构算法联合迭代的方法,计算钢轨断面模板点云和扫描点云的最佳匹配参数^[12-13]。基于最小二乘的二维 ICP 算法原理如下:设定参考数据集和目标数据集;对目标数据集中的每个点,在参考数据集中寻找一个与之对应的最短距离的点;建立匹配目标函数,对目标函数进行优化,求出目标函数最优解,得到新的匹配参数。

在迭代计算中,随着钢轨断面的模板点云和扫描点云之间的匹配参数不断优化,其模板点云的适应性密度重构结果更加接近于钢轨真实扫描点云密度分布状况,且钢轨断面模板点云与扫描点云的匹配效果不断得到优化,如图 3 所示。

2.2 模板点云匹配的精度评估

实际模板点云匹配的计算过程中,受到系统中扫描仪的视角限制导致的钢轨断面扫描点云部分缺失、仪器本身的精度以及轨检小车的振动影响,在扫描数据中部分钢轨断面点云的匹配效果较差,需要进行匹配效果的精度评估。本文通过计算最终适应性密度重构后的模板点云与扫描点云之间对应点的距离平均值来表示模板点云匹配的精度 ε ,其计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2}}{n}, \quad (1)$$

其中, (x_i, y_i) 为扫描点云中的任一点坐标,其在模板点云中对应点的坐标为 (x'_i, y'_i) , n 为匹配的扫描点云总点数。

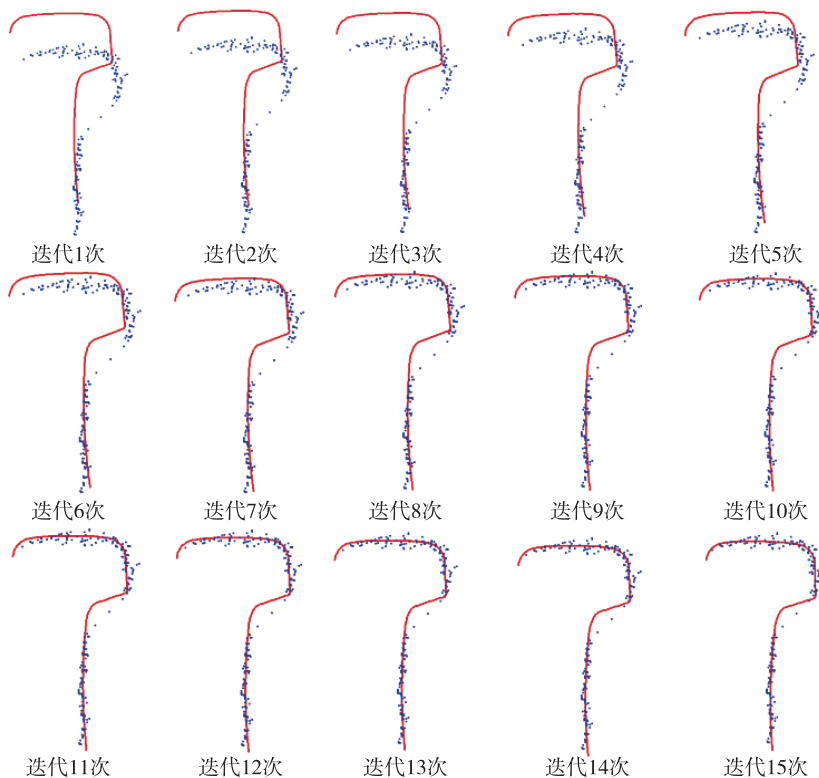


图3 钢轨扫描点云和模板点云的匹配优化

Fig.3 Optimisation of matching between rail scan point clouds and template point clouds

当模板匹配精度较差时,其匹配结果会直接影响到轨道中心线提取的精度,因此采用统计匹配精度的2倍中误差作为阈值,剔除模板点云匹配中精度较差的结果。

2.3 轨道中心线提取

钢轨断面模板点云的轨面中心点坐标为(0,0),所以得到的匹配参数中平移参数就是在扫描仪断面坐标系中钢轨扫描点云的轨面中心点坐标.通过模板匹配得到的扫描左、右钢轨轨面中心点坐标,可以计算该断面的轨道中心点坐标:

$$\begin{cases} x_{中} = (x_{左} + x_{右})/2, \\ y_{中} = (y_{左} + y_{右})/2, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $(x_{左}, y_{左})$, $(x_{右}, y_{右})$ 为同一断面中左、右轨面中心点。

得到断面中轨道中心点坐标后,可将基于扫描仪坐标系下的轨道中心点坐标转为基于绝对坐标系下的铁路轨道中心点坐标.在整个实验线路中,通过对每一个断面的处理和模板点云匹配,可以得到基于绝对坐标系下的整个铁路轨道中心线点集。

2.4 铁路轨道中心线方程拟合

为了准确拟合提取的轨道中心线点集,本文采

用三次样条函数来分段拟合轨道中心线^[14].通过拟合精度的限制条件,将提取的轨道中心线点集有序点分为 m 段区间,在每个区间内都含有一定数量的点,对于第 i 个子区间,现利用三次样条函数来拟合实际的曲线:

$$f_i(x) = a_{i,0} + a_{i,1}(x - x_{i-1}) + a_{i,2}(x - x_{i-1})^2 + a_{i,3}(x - x_{i-1})^3, \quad (3)$$

式中, $a_{i,0}, a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}$ 为待定系数。

为了保证整体拟合曲线没有断点,即相邻拟合曲线衔接处的函数值相等,分段曲线拟合需满足以下约束条件:每一个区间段的三次样条曲线必须经过区间段首尾端点,则有:

$$\begin{cases} f_i(x_{i-1}) = a_{i,0} + a_{i,1}(x_{i-1} - x_{i-1}) + a_{i,2}(x_{i-1} - x_{i-1})^2 + a_{i,3}(x_{i-1} - x_{i-1})^3 = a_{i,0}, \\ f_i(x_i) = a_{i,0} + a_{i,1}(x_i - x_{i-1}) + a_{i,2}(x_i - x_{i-1})^2 + a_{i,3}(x_i - x_{i-1})^3. \end{cases} \quad (4)$$

采用基于最小二乘原理的附有限制条件的间接平差来解算拟合效果最佳的区间方程待定系数.通过基于模板点云匹配方法提取的轨道中心线由一系列已知绝对坐标的点组成.为了拟合最佳三次样条

曲线,在一个区间内的点其 x_i 坐标、 y_i 坐标为相互独立的等精度观测值.在求解出区间内 x 坐标和 y 坐标的三次样条拟合函数后,通过使用第一型曲线积分,可以获得轨道中心线点集中各点对应的里程值,再以里程值为自变量, x 和 y 坐标为因变量,使用三次样条函数拟合进行方程计算,可以得到每个区间内的轨道中心线方程.

为合理地处理包含少量粗差的测量数据,引入 Huber 稳健估计方法.其权函数如下所示:

$$(v) = \begin{cases} 1, & |v| \leq a, \\ \frac{a}{|v|}, & a < |v| \leq b, \\ \frac{a(c - |v|)}{(c - b)|v|}, & b < |v| \leq c, \\ 0, & |v| > c, \end{cases} \quad (5)$$

其中, a, b, c 的取值一般分别为 $a = 1.7\sigma, b = 3.4\sigma, c = 8.5\sigma$.

利用附有限制条件的间接平差对三次样条函数拟合的误差方程进行迭代计算,可以使参与计算的所有数据中粗差数据的权较正常数据的权很小或者接近为 0,从而实现利用稳健估计降低粗差数据对轨道中心线方程拟合精度影响的目的.

3 实验结果与分析

3.1 实验概述

为验证轨道移动激光扫描系统生成点云的精度和铁路中心线提取方法的可行性,在轨道交通实验场进行了数据采集实验,如图 4 所示.



图 4 数据采集场景

Fig. 4 Data collection scenarios

在数据采集实验过程中,首先在实验场进行传感器的安装,并在开阔的区域架设基站,用于后续与

组合导航系统数据联合差分解算.差分解算数据中包含北斗卫星导航数据,进一步提高了移动测量系统的可靠性及精度.

实验过程中采集并记录扫描仪的扫描数据和组合导航系统的测量数据,通过 Inertial Explorer (IE) 软件解算实验中车体的轨迹和姿态角信息,利用时间同步和系统的标定参数完成传感器之间的数据融合,生成实验扫描区域的基于绝对坐标系下的三维点云数据,如图 5 所示.最后,基于轨道移动激光扫描系统采集的数据,利用本文中所提出的方法提取轨道的中心线,并进行中心线方程拟合.

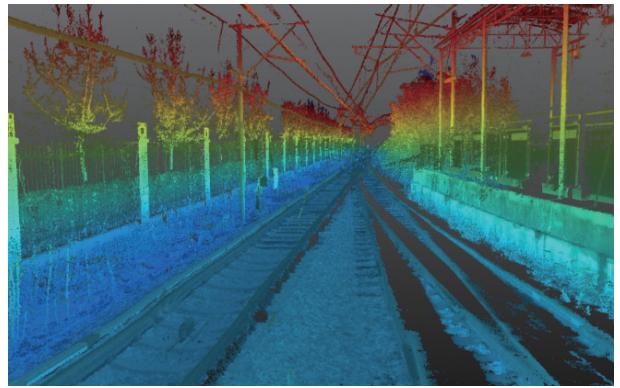


图 5 轨道三维点云数据

Fig. 5 3D point cloud of track

3.2 中心线提取实验结果与分析

利用式(1)中的模板匹配精度评估,计算轨道钢轨扫描点云与重构后的模板点云之间对应点的距离平均值来表示模板匹配的精度,并以 2 倍中误差作为阈值进行粗差剔除.模板点云匹配的精度平均值为 1.8 mm,中误差为 1.0 mm,轨道实验区间模板点云匹配精度如图 6(同济大学嘉定校区轨道实验区间模板点云匹配剔除粗差后精度统计)所示.

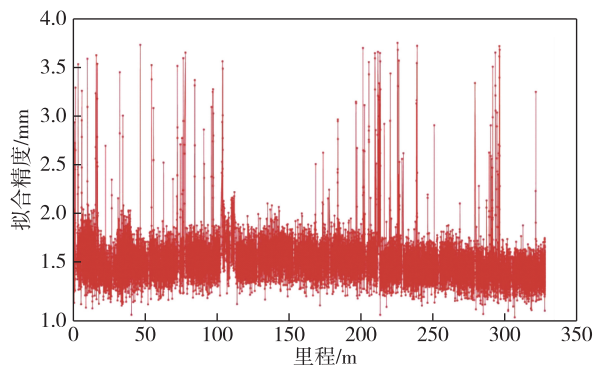


图 6 模板点云匹配的精度

Fig. 6 Accuracy statistics of template point cloud matching

轨道实验线路为直线段,使用三次样条函数拟合效果较佳.首先对提取的轨道中心线点集以东坐标为自变量,北坐标为因变量进行方程拟合.拟合完成后,以提取的轨道中心线起始点作为线路里程为0的位置,通过对已经计算出的坐标拟合方程进行第一型曲线积分计算,得到轨道中心线点集中各点对应的里程值,最后以轨道中心线点集中各点的里程 t 为自变量,东坐标 x 和北坐标 y 分别为因变量再次进行三次样条拟合,得到轨道中心线方程.拟合的轨道中心线方程为

$$\begin{aligned} x &= 472\,068.812 + 0.999\,318t - \\ &\quad 6.105\,4 \times 10^{-8} t^2 - 1.816\,4 \times 10^{-12} t^3, \\ y &= 3\,463\,535.567 - 0.036\,921t - \\ &\quad 1.661\,4 \times 10^{-6} t^2 + 5.978\,0 \times 10^{-9} t^3. \end{aligned}$$

该段拟合轨道中心线方程中,里程 t 与北坐标 y 拟合方程误差平均值为0.148 cm,拟合误差中误差为0.660 cm,满足《铁路车载移动测量技术规程》提到的中线数据处理平面中误差应为10 mm以内的技术要求.

4 结束语

本文利用基于距离最小化原则的模板点云密度重构算法和基于最小二乘的迭代最近点算法,对扫描点云与模板点云进行匹配,获取轨道左、右钢轨断面的轨面中心和轨道中心,并利用附有限制条件的间接平差方法,对轨道中心点集进行分段三次样条拟合.通过对试验研究区采集的数据进行处理与分析,验证了该方法的有效性和适应性.结果表明,移动扫描系统能够弥补传统既有线测量技术的诸多不足,为铁路既有线勘测奠定了坚实的数据基础.

参考文献

References

- [1] 陈光金,柳世辉,周安荔,等.铁路既有线测量及设计一体化模式研究[J].铁道勘察,2011,37(6):1-5,8
CHEN Guangjin, LIU Shihui, ZHOU Anli, et al. Study on integrated survey and design modes for existing railway lines[J]. Railway Investigation and Surveying, 2011, 37(6):1-5,8
- [2] 段晓峰,韩峰,李建强.基于点云信息的既有线整正方法研究[J].铁道标准设计,2013,57(8):15-18
DUAN Xiaofeng, HAN Feng, LI Jianqiang. Method study on curve realignment of existing railway based on point cloud data[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(8):15-18
- [3] 汤建风.基于车载激光雷达的铁路既有线复测技术研究[J].铁道工程学报,2016,33(12):43-47

- TANG Jianfeng. Research on the technology of existing railway lines retesting based on vehicle laser radar measurement[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(12):43-47
- [4] 全志强,杨育林.既有铁路曲线整正测量[J].测绘科学,2015,40(4):147-150
QUAN Zhiqiang, YANG Yulin. The curve adjustment survey of existing railway[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(4):147-150
- [5] 陈强,沈鑫,赵晶晶,等.高速铁路近景影像轨道边缘提取与匹配方法[J].铁道学报,2017,39(8):122-128
CHEN Qiang, SHEN Xin, ZHAO Jingjing, et al. Method of track edge extraction and matching for close-range images of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8):122-128
- [6] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6):679-698
- [7] 沈鑫.基于近景摄影测量的铁路轨道边缘自动提取与检测方法[D].成都:西南交通大学,2018
SHEN Xin. Automatic extraction and inspection of railway track edge based on close range photogrammetry[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018
- [8] 罗玲,于海洋,牛峰明,等.基于机载LiDAR的铁路轨道提取方法研究[J].河南城建学院学报,2016,25(4):79-85
LUO Ling, YU Haiyang, NIU Fengming, et al. On extraction of railway tracks based on airborne LiDAR data[J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2016, 25(4):79-85
- [9] 于海洋,牛峰明,罗玲,等.一种综合机载LiDAR与高分辨率航空影像的铁路轨道提取方法[J].测绘工程,2016,25(5):42-46
YU Haiyang, NIU Fengming, LUO Ling, et al. Rail extraction from airborne LiDAR and high resolution aerial image[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(5):42-46
- [10] Yang B S, Fang L N. Automated extraction of 3-D railway tracks from mobile laser scanning point clouds[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(12):4750-4761
- [11] Martínez J L, González J, Morales J, et al. Mobile robot motion estimation by 2D scan matching with genetic and iterative closest point algorithms[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(1):21-34
- [12] Lee Y J, Song J B. Three-dimensional iterative closest point-based outdoor SLAM using terrain classification[J]. Intelligent Service Robotics, 2011, 4(2):147-158
- [13] Shen L Y, Yuan C M, Gao X S. Certified approximation of parametric space curves with cubic B-spline curves[J]. Computer Aided Geometric Design, 2012, 29(8):648-663
- [14] 李圆.基于点云数据的既有线复测轨道中心线提取及平面线形拟合方法研究[D].成都:西南交通大学,2020
LI Yuan. Research on extracting railway centerline and plane linear fitting method for re-surveying of the existing railway based on point cloud data[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020

Railway centre line extraction based on template point cloud matching

YAO Lianbi¹ CHEN Jun² QIN Yi² FAN Xianzheng² SUN Panpan² LIU Hao¹ RUAN Dongxu¹

1 College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092

2 China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited, Shanghai 200070

Abstract The existing railway lines need to be updated with the ageing of railways and the demand for capacity increase, thus the surveying of railway lines is necessary without affecting its routine operations. However, the surveying of most of the existing railway lines still relies on traditional manual methods, which are characterized by low efficiency, heavy task, complex procedures, and repeated online. To address these problems, this paper uses a least squares based 2D template point cloud matching approach to jointly and repeatedly calculate the rail track surface centre point position and then obtain the track centre line, track gauge and other related parameters based on absolute 3D point cloud data obtained by the track mobile laser scanning system. The test and result analysis at the track test site show that the proposed approach can effectively extract the track centre line and provide accurate centre line data for the existing line survey.

Key words mobile laser scanning; railway centre line; sensor integration