

文章编号: 0253-2239(2010)11-3203-06

# 基于摄像测量原理的轨道几何参数测量系统

伏思华 于起峰 王明志 江和平 徐博泓

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 利用摄像测量原理设计出一种新型的轨道几何参数测量系统,该系统由测量主车和测量靶车两部分组成。测量过程中,靶车沿轨道向主车运动;主车上的摄像机实时采集靶车上红外合作标志的序列运动图像;主车工控机中的软件系统实时提取合作标志在图像中的亚像素位置,根据合作标志之间的距离和图像清晰度驱动调节摄像机的电动镜头,使测量过程中摄像机的视场大小基本不变、合作标志成像清晰,根据相应的模型合成轨道几何参数。静态实验与外场实验结果表明,该摄像测量系统完全能够满足轨道几何参数高精度测量的需求。

**关键词** 机器视觉;轨道几何参数;图像处理;红外合作标志;电动镜头

**中图分类号** TN247; TP317.4; TP319 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3203

## Railway Geometric Parameters Measurement System Based on Videometrics

Fu Sihua Yu Qifeng Wang Mingzhi Jiang Heping Xu Bohong

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** A railway geometry parameters measurement system on the basis of the videometrics theory is designed. The system consists of two components – a measurement bogie and a target bogie. When the measurement procedure is preceded, the target bogie moves towards the measurement bogie along a rail. The camera on the measurement bogie grabs the motion image sequences of the infrared cooperative markers on the target bogie in a real-time manner. At the same time, the software installed in the industrial computer on the measurement bogie locates the sub-pixel positions that the cooperative markers project into the image sequences, and it drives the motorized lens to the correct imaging state according to the distance between the markers and the image definition. Consequently, the viewing field of the camera holds the line and the images of the markers remain definite. Finally, the railway geometric parameters are synthesized from the positions of the markers on the basis of corresponding mathematical model. Both the static and the field experimental results prove that this videometrics measurement system can satisfy the requirement of the high-precision measurement for the rail geometric parameters.

**Key words** machine vision; railway geometric parameters; image processing; infrared cooperative markers; motorized lens

## 1 引 言

轨道几何参数<sup>[1~3]</sup>的测量对确保列车安全行驶、改进轨道部件设计、改善轨道及机车车辆相互作用和影响以及延长轨道部件和机车车辆使用寿命等都有重要的指导作用。因此,在铁路铺设过程中及在列车长时间运行和自然条件的作用下,都需要对

轨道几何参数进行高精度测量<sup>[4]</sup>。

国内外已有的轨道几何参数测量方法及设备主要包括:1)轨道综合检测列车。可在100~300 km/h速度范围内对接触网、通信信号和轨道等进行综合检测<sup>[5]</sup>,比较典型的有日本的“East-i”和意大利的“阿基米德”等,国内则有GJ-3, GJ-4和GJ-5等三种类型。

收稿日期: 2009-12-30; 收到修改稿日期: 2010-05-06

基金项目: 国家863计划(2007AA12Z121)资助课题。

作者简介: 伏思华(1978—),男,博士,讲师,主要从事精密光测图像技术方面的研究。

E-mail: fusihua2002cn@yahoo.com.cn

2) 轨检小车。一种便携式轨道几何参数测量设备,国内最具代表性的是江西日月明公司的 GJY-H-5 轨道检查仪等,国外比较著名的有瑞士安伯格公司生产的 GRP1000 轨道检查仪和德国 GEDO 轨道测量系统<sup>[5]</sup>。3) 弦线测量方法<sup>[6]</sup>。主要见于奥地利的 PLASSER 公司的 D08-32 型起拨道抄平捣固车。该方法测量结构复杂,往往由于弦线拉不紧引起很大的测量误差,且由于弦线长度只有 21.1 m,只能用来测量轨道的短波不平顺。4) 激光准直测量系统<sup>[6]</sup>。主要见于 PLASSER 公司的 D08-32 型起拨道抄平捣固车和 EM-SAT 120 轨道作业检测车,可以测量轨道百米以上的长波不平顺,但也存在激光束调整技术难度大、经常脱离接收器靶面等问题,且无法对弯道进行测量。

随着以计算机、摄像机和图像处理<sup>[7~9]</sup>等为核心的信息处理技术的飞速发展,利用摄像测量技术<sup>[10~13]</sup>对目标进行测量的手段得到了越来越广泛的应用。将摄像测量技术应用于轨道几何参数测量,其主要原理是用摄像机记录沿轨道运动的合作标志位置的变化,通过图像处理检测到这一变化,从而计算合成轨道几何参数,既克服了现有方法存在的问题,又提高了轨道几何参数测量的精度。本文的目的就是综合国内外同类检测设备的研究现状,成功开发“轨道几何参数摄像测量系统”,利用目前先进的摄像测量技术,提高轨道几何参数的测量精度和检测速度。

## 2 系统工作原理

### 2.1 系统功能及设计指标

“轨道几何参数摄像测量系统”可以实时测量的轨道几何参数<sup>[14]</sup>主要包括以下 4 项:1) 轨距,轨道同一横断面内两钢轨内侧之间的距离,控制轨距对减小机车车轮与钢轨之间的摩擦有十分重要的意义。2) 水平,轨道同一横断面内两钢轨顶面之高差,控制水平误差的目的是使两股钢轨受力均匀,并保证车辆平稳行驶。3) 左右高低,左右钢轨顶面纵向起伏变化量,控制高低误差对降低轮轨间的动力作用,减小机车对轨道的破坏十分重要。4) 轨向,左右钢轨内侧面轨距点沿轨道纵向水平位置的变化量。控制轨向的误差对行车的安全和平稳具有特别重要的意义。在无缝线路地段,若轨道方向不良,到了高温季节,还可能会引起胀轨跑道,严重威胁行车安全。

左右高低、左右轨向通常用 10 m 弦测量,其中

轨向还常用 20 m 弦测量,称为正矢。由以上参数可进一步推算出 2.4 m、6.25 m 延长 18 m 内的三角坑<sup>[14]</sup>。同时,由于靶车轮子在轨面上作纯滚动,因此可以记录与轮子轴线成固联的编码器的旋转脉冲数来推算出里程。

系统设计指标如下:轨距测量误差 $\pm 0.5$  mm;水平测量误差 $\pm 0.5$  mm;高低测量误差 $\pm 1.0$  mm;连续测量距离 300 m;系统工作温度 $-10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ;电池续航能力 8 h;系统自重小于 55 kg。

### 2.2 系统的整体结构

该系统整体布局和各部分的组成如图 1 所示(俯视图)。

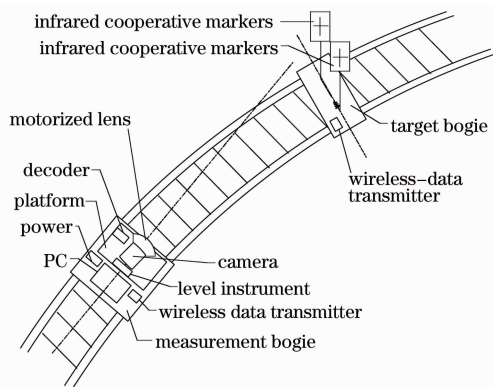


图 1 轨道几何参数摄像测量系统结构图

Fig. 1 Structure of the railway geometry parameters measurement system

待测轨道上放置一台靶车,其上安装红外合作标志和数据无线收发系统;距靶车约 300 m 的轨道上固定放置一台测量主车,其上放置摄像机、电动镜头、工控机、解码器、无线收发装置和电源等;测量开始后,靶车沿轨道向主车运动,由于靶车的车轮紧贴轨道,固定于靶车上的合作标志的运动能够反映出轨道几何参数的变化;摄像机实时采集红外合作标志运动的序列图像;主车工控机中的软件系统实时提取合作标志在图像中的亚像素位置,根据合作标志之间的距离和图像清晰度驱动调节摄像机的电动镜头,使测量过程中摄像机的视场大小基本不变、合作标志成像清晰,最后根据相应的模型合成轨道几何参数。

为了能将测量结果与轨道测量点对应起来,测量开始时,靶车和主车上的无线收发装置同时启动,靶车上的无线收发装置将靶车的运动里程实时编码后发出,主车上的无线收发装置实时接收靶车里程编码并传入工控机,工控机中的测量软件将里程解码后与轨道几何参数对应起来。

该系统采用红外 LED 密排焊接的十字型合作标志；摄像机选择的是加拿大 Point Grey Research 公司生产的 GRAS-50S5M, 其分辨率最大为  $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ , 满分辨率帧率为  $15 \text{ frame/s}$ ; 电动镜头选择的是日本富士能 C22  $\times$  17A-M41 电动三可变镜头, 焦距调节范围为  $17 \sim 374 \text{ mm}$ ; 系统的运算平台选择的是高性能、低功耗的 NICE3100P2 型工控机。主车部分硬件联接如图 2 所示。

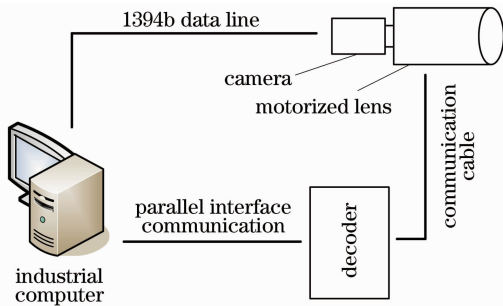


图 2 系统硬件联接图

Fig. 2 Coupling of system hardware

### 2.3 轨道几何参数的合成

对合作标志运动的序列图像进行定位, 得到每帧图像中合作标志的中心坐标, 如果以第一帧图像为基准, 则可得出合作标志在运动过程中相对于初始位置的偏差, 该偏差表征了该位置的轨道几何参数, 通过轨道几何参数的定义可合成轨道几何参数。测量结果单位均为像素, 要得到以毫米为单位的测量结果, 还需要标定出每帧图像的放大倍数, 即图像中每一像素代表的实际物理距离。只需通过事先精确测量合作标志之间的实际物理距离即可。

简化的两个合作标志的轨道几何参数合成方案如图 3 所示, 两个合作标志  $A, B$  分别位于两股钢轨上, 初始位置如图 3 所示, 经过一段时间, 它们的位置分别变为  $C, D$ , 则该位置相对于初始位置的轨道

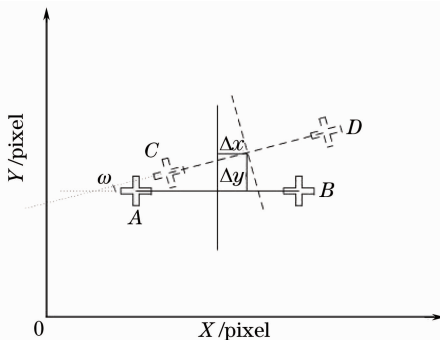


图 3 轨道几何参数合成原理图

Fig. 3 Principle for synthesizing railway geometric parameters

几何参数可以表示为轨距为  $|CD|$ ; 水平距离为  $|CD| \sin \omega$ ; 左轨高低为  $(C_y - A_y)$ , 其中  $C_y, A_y$  分别为  $C, A$  两点在竖直方向的高度; 右轨高低为  $(D_y - B_y)$ , 其中  $D_y, B_y$  分别为  $D, B$  两点在竖直方向的高度。轨向需要根据轨距中心点的连续变化来评判, 从两帧图像来计算的意義不大。

实际的方案中合作标志不止两个, 其轨道几何参数的合成方案也比上面的复杂, 这里给出的只是一个原理性的说明。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 静态精度验证实验

为了验证系统的测量精度, 首先设计了静态的精度验证实验。实验系统如图 4 所示, 合作标志由 4 个单独的红外 LED 十字丝标志组成, 它们之间的物理距离已知, 所以可以标定出图像的横向放大倍数和纵向放大倍数, 以便将系统测量的以图像像素为单位的位移量转化成实际的物理位移量。实验中要得到该标志的位移量, 即可以由某一个单独的红外 LED 十字丝标志得到, 也可以由 4 个标志计算其中心点位移量给出, 由于具有平均的作用, 后一种方法精度更高, 这里即是采用后一种方法。测量系统对图像中的十字丝标志采用十字丝模板相关定位方法, 在室内条件下, 该方法定位精度一般可以达到  $0.01 \sim 0.1 \text{ pixel}^{[15]}$ 。为了能够将系统测得的位移量与真实位移量作对比, 实验中将上述合作标志固定于精密二维平移台上, 如图 4 所示, 该精密二维平移台的两方向位移精度均可达到  $0.01 \text{ mm}$ 。

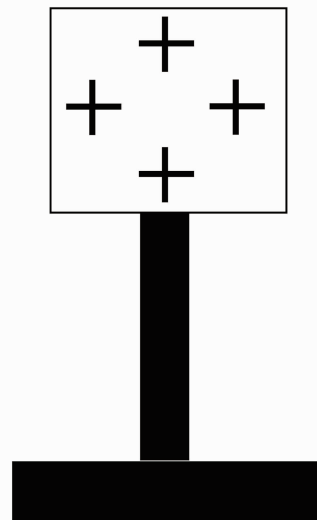


图 4 静态精度验证实验系统

Fig. 4 Static experimental system for verifying the precision

实验中,将该精密二维平移台及合作标志放置于稳定平台上,摄像机则通过三角架在距其约 10 m 处。调节电动镜头的焦距使摄像机视场约为  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ , 调节聚焦及光圈使合作标志在摄像机中成像清晰。首先保持精密二维平移台不动,此时系统测量的合作标志偏移数据应该为 0, 然后分别以不同的步长在  $X$  和  $Y$  两方向 9 次移动合作标志的位置,同时记录下系统测量的偏移量和真实的偏移量。合作标志在竖直方向上的实验结果如表 1 所示,水平方向上的实验结果和竖直方向上的实验结果相似,不再列出。

表 1 系统测量精度实验结果

Table 1 Experimental result of the system measurement precision

Displacement /mm	Measurement results /mm	Error /mm
0.10	0.14	0.04
0.20	0.23	0.03
0.30	0.29	-0.01
0.50	0.47	-0.03
1.00	0.96	-0.04
2.00	2.03	0.03
3.00	2.94	-0.06
5.00	5.05	0.05
10.00	10.03	0.03

由表 1 的系统静态测量结果可以看出,该测量结果的最大误差为 0.06 mm, 标准差误差为 0.04 mm。在摄像机距离合作标志 20 m 和 30 m 时重复了以上实验,和上述结果相比,其误差稍大,但最大误差也 0.1 mm 以内。以上结果初步证明了系统测量方案的可行性,该系统能够达到预期的测量技术指标要求。

### 3.2 外场试验

“轨道几何参数摄像测量系统”原型样机开发完成后,于 2008 年 7 月 4 在一段废弃的轨道上进行了外场试验。天气状况为:阴天、小雨,气温  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,一、二级风。

试验开始后,受轨道长度所限在距测量主车约 42 m 的位置推动靶车向测量主车方向运动,电动镜头自动调焦系统保证红外十字丝标志在摄像机中始终成像清晰,摄像机将图像连续采集进工控机,工控机中的轨道几何参数测量软件实时解算出测量结果:轨距、水平、左、右轨向(10 m 弦)和左、右高低(10 m 弦)。为了考察系统的重复性,试验重复 2 次。

本文从两方面来评价“轨道几何参数摄像测量系统”的可靠性和精度:自身测量结果重复性和与标

准数据对比。其中,为了将测量结果与标准数据作对比,在用“轨道几何参数摄像测量系统”对轨道几何参数测量的同时,还用 GJY-T-4 型轨检小车对同一段轨道进行测量,并将其测量结果看作标准数据。

GJY-T-4 轨检小车是目前铁路系统正在使用的一种轨道参数测量仪器,由成都四方瑞邦测控科技有限公司研制开发,其轨道轨距和水平的测量误差均为  $\pm 1\text{ mm}$ , 高低、轨向(10 m 弦)的测量误差均为  $\pm 1\text{ mm}$ 。为方便对比,以下结果曲线中将轨检小车的结果直接记为 GJY-T-4, 而将我们的结果记为 GJY-VM(Videometrics)。需要注意的是,由于该段轨道扣件丢失严重,所以其轨道几何参数可能比较异常。

图 5 所示为用 GJY-VM 两次测到的轨距结果。可以看出,图中两条曲线几乎重合在一起,重复性非常好。两曲线差值的标准差为 0.16 mm, 最大值为 0.56 mm。图 6 所示为 GJY-VM 与 GJY-T-4 的轨距测量结果,两曲线差值的标准差为 0.53 mm, 最大值为 1.27 mm。和重复性相比其结果稍差,可能是以下原因:1) GJY-T-4 本身也存在测量误差;2) 由于该段轨道扣件丢失严重,在用 GJY-T-4 与

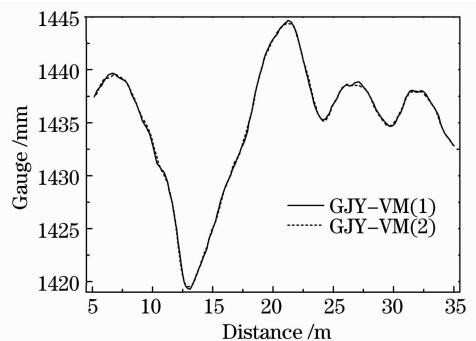


图 5 GJY-VM 的轨距重复性

Fig. 5 Gauge repeatability of GJY-VM

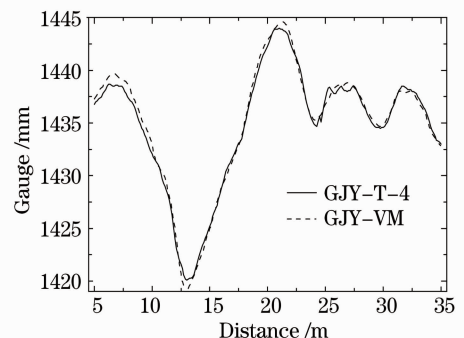


图 6 GJY-T-4 与 GJY-VM 轨距结果对比

Fig. 6 Comparison of gauge measurement results between GJY-T-4 and GJY-VM



GJY-VM 分别测量时,由于期间相隔了一段时间,轨道本身参数已经发生了稍许改变。

图 7 所示为用 GJY-VM 两次测量的水平结果,5~15 m 范围内重复性稍差,其余重复性非常好。两曲线之差的标准差 0.25 mm,最大值为 0.81 mm。图 8 所示为 GJY-T-4 与 GJY-VM 水平结果对比情况,两曲线差值的标准差为 0.45 mm,最大值为 1.24 mm。结果也较重复性稍差,可能原因和对轨距的分析一致。

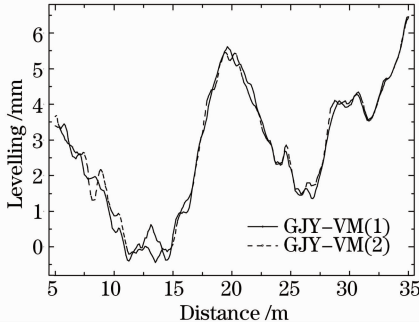


图 7 GJY-VM 的水平重复性

Fig. 7 Levelling repeatability of GJY-VM

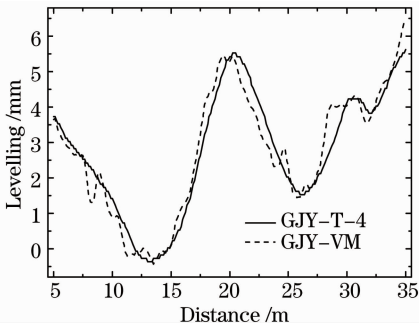


图 8 GJY-T-4 与 GJY-VM 水平结果对比

Fig. 8 Comparison of levelling measurement results between GJY-T-4 and GJY-VM

通过图 5~8 的分析可以看出,GJY-VM 原型系统在 42 m 以内的轨距、水平测量结果完全能够满足系统设计指标的要求。

图 9 所示为三次测量的左轨高低值对比情况,两次由 GJY-VM 得到,一次由 GJY-T-4 得到。其中两次 GJY-VM 结果之间的差值最大值为 0.76 mm,标准差为 0.28 mm,而 GJY-VM(1)与 GJY-T-4 差值的最大值为 0.86 mm、标准差为 0.24 mm。图 10 所示为 GJY-VM(1)与 GJY-T-4 之间的差值。

图 11 所示为分三次测量的左轨轨向值对比情况,GJY-VM 所测两次之间的差值的最大值为 0.68 mm,标准差为 0.23 mm。图 12 所示为 GJY-VM(2)与 GJY-T-4 的差值曲线,其差值最大值为 1.64 mm,标准差为 0.79 mm。对比图 11,12,当轨

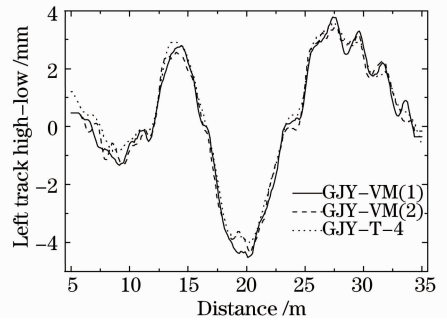


图 9 GJY-T-4 与 GJY-VM 左轨高低值对比

Fig. 9 Comparison of left track high-low value measured by GJY-T-4 and GJY-VM

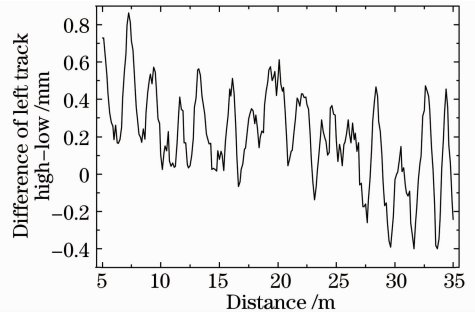


图 10 GJY-T-4 与 GJY-VM(1)之间的差值曲线

Fig. 10 Difference measured by GJY-T-4 and GJY-VM (1)

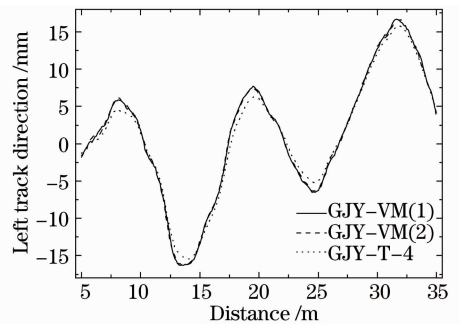


图 11 GJY-T-4 与 GJY-VM 左轨轨向值对比

Fig. 11 Comparison of left track direction measured by GJY-T-4 and GJY-VM

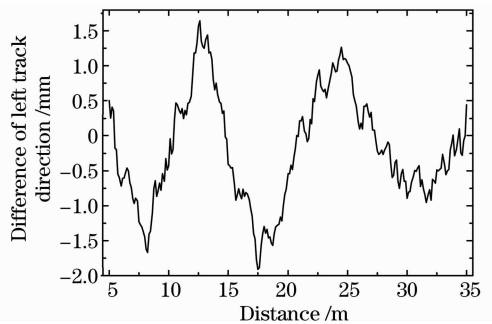


图 12 GJY-T-4 与 GJY-VM(2)之间的差值曲线

Fig. 12 Curve of difference measured by GJY-T-4 and GJY-VM(2)

向值为峰值或谷值时,GJY-VM(2)与 GJY-T-4 的差值就为谷值或峰值,这可能与 GJY-T-4 的后期数据处理方法有关,如对数据采取低通滤波则其高频信息会损失,峰值和谷值均会减小。

通过图 9~12 的分析可以看出,GJY-VM 原型系统在 42 m 以内的左轨轨向、左轨高低测量结果完全能够满足系统设计指标的要求。对于右轨轨向和右轨高低有相同的测量结果,这里不再重复给出。

以上试验结果有力证明了“轨道几何参数摄像测量系统”测量方案、计算模型的正确性,达到了系统的设计指标要求。

## 4 结 论

设计与研制了一种“轨道几何参数摄像测量系统”,室内静态实验结果及轨道外场试验结果都证明了系统的有效性。和传统的轨道几何参数测量方法相比,该系统有以下优点:

1) 测量量程大。已有的测量方法一般都有较为严格的测量范围限制,例如许多轨检小车的轨距测量范围都在 1410~1470 mm 之间,而“轨道几何参数摄像测量系统”没有此类限制。

2) 系统成本低。按现有硬件价格计算,“轨道几何参数摄像测量系统”的成本可以控制在 6 万元以内,而轨检小车由于要用到两个光纤陀螺,其成本要远高于此。

3) 若是在测量过程中将摄像机光轴调水平(误差在  $0.001^\circ$  以内),则可以在测量轨道几何参数的同时,测出轨道高程。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Zhenguo, Tong Xiyan. Rail measuring system design [J]. *J. Shanghai Institute of Technology*, 2005, **5**(1): 20~24  
张振国, 佟喜彦. 轨道测量系统设计[J]. 上海应用技术学院学报, 2005, **5**(1): 20~24
- 2 Ma Xiaojian, Zhu Hongtao, Xiong Ruiwen *et al.*. Factors which effect track alignment irregularity detecting precision [J]. *J. Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2005, **27**(1): 12~16  
马小建, 朱洪涛, 熊瑞文等. 影响轨向不平顺检测精度的几个因素[J]. 南昌大学学报(工科版), 2005, **27**(1): 12~16
- 3 An Xin, Feng Qibo, Li Yonghuai. Study on data processing method of an automatic measurement system for track parameters

- [J]. *J. Beijing Jiaotong University*, 2005, **29**(6): 58~61  
安 鑫, 冯其波, 李永怀. 线路参数自动检测系统数据的处理方法[J]. 北京交通大学学报, 2005, **29**(6): 58~61
- 4 Cesare Alippi, Ettore Casagrande, Fabio Scotti *et al.*. Composite real-time image processing for railways track profile measurement [J]. *IEEE T. Instrum. Meas.*, 2000, **49**(3): 559~564
- 5 Gao Chunlei, Wang Fadeng. Inspection of long-wave non-smoothness for the railway track using the laser alignment technology [J]. *Railway Engineering*, 2009, **15**(1): 81~85  
高春雷, 王发灯. 利用激光准直技术检测线路的长波不平顺[J]. 铁道建筑, 2009, **15**(1): 81~85
- 6 Han Zhiqing, Tang Dingquan. Lifting, Lining and Leveling Tamping Coach [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1997. 168~174  
韩志青, 唐定全. 抄平起拨道捣固车[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997. 168~174
- 7 Yin Sumin, Cheng Chang, Feng Aixin *et al.*. Testing method of the laser scratching based on image acquisition system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 947~951  
殷苏民, 程 昌, 冯爱新等. 界面结合强度的激光划痕综合检测装置的设计[J]. 中国激光, 2008, **35**(6): 947~951
- 8 Ming Ying, Jiang Jingjue. Background modeling and moving-objects detection based on Cauchy distribution for video sequence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 587~592  
明 英, 蒋晶珏. 基于柯西分布的视频图像序列背景建模和运动目标检测[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 587~592
- 9 Yepeng Guan. A stereo matching algorithm using multi-peak candidate matches and geometric constraints [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 465~468
- 10 Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and Researches [M]. Beijing: Science Press, 2009. 150~151  
于起峰, 尚 洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 150~151
- 11 Li Lichun, Zhang Xiaohu, Liu Xiaochun *et al.*. Videometric research on the digital photos of South China tiger [J]. *Science & Technology Review*, 2008, **26**(1): 59~67  
李立春, 张小虎, 刘晓春等. “华南虎”照片的摄像测量研究[J]. 科技导报, 2008, **26**(1): 59~67
- 12 Yu Qifeng, Lei Zhihui, Liu Xiaochun *et al.*. Target matching based on biological vision and its developed experiment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(6): 1092~1094  
于起峰, 雷志辉, 刘晓春等. 基于生物视觉的目标匹配原理与实验进展[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(6): 1092~1094
- 13 Yu Qifeng, Shang Yang. Introduction and prospect of videometrics [J]. *Science & Technology Review*, 2008, **26**(24): 84~88  
于起峰, 尚 洋. 摄像测量学简介与展望[J]. 科技导报, 2008, **26**(24): 84~88
- 14 Hao Ying. Railway Engineering [M]. Beijing: Chinese Railway Press, 2005. 48~51  
郝 瀛. 铁道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005. 48~51
- 15 Yu Qifeng, Lu Hongwei, Liu Xiaolin. Image-Based Precision Measurement and Motion Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2002. 147~152  
于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 147~152