



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Rail Transit—Review

新型 400 km·h⁻¹ 级架空接触网监测技术

Chul Jin Cho^a, Young Park^{b,*}

^a Korea University, Seoul 02841, Korea

^b Korea Railroad Research Institute, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 July 2016

Revised form 19 August 2016

Accepted 8 September 2016

Available online 21 September 2016

关键词

高速铁路

架空接触网

状态监测

基于图像处理的测量方式

摘要

近年来, 高速铁路各项技术不断发展, 列车运行速度从 300 km·h⁻¹ 提高到 400 km·h⁻¹。本文介绍了由韩国研究者开发和论证的技术, 即 400 km·h⁻¹ 级集电性能评估方法。此外, 本文还详细解释了基于视频图像的监测技术, 其不需要直接接触供电系统的任何部件, 这项技术被应用于检测以时速 400 km 运行的高铁上架空接触网组件的稳定性。与常规使用激光传感器或者线相机 (line camera) 来监控架空接触网的系统不同, 开发的新型系统通过视频数据来测量其处于活动状态的参数。根据在商业线路上实地测量的结果, 这种系统能有效地测量架空接触网的各项参数。

© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

在现代电力铁路中, 许多国家都致力于提高商业线路的速度上限。由于车载、轨道、电力和信号技术的快速发展, 在商业运行前对列车及其基础设施的性能进行评估和检测尤为必要。换言之, 为了确保乘客的安全, 必须适当地对时速达到 400 km 的列车评估其影响。因此, 有效的监测技术引起了大家的关注, 其可以克服由复杂结构和长时间操作间隔引起的人力限制[1,2]。

在高速电力铁路的众多部件中, 架空接触网(OCL)是不断地向运行的列车供电的一个接口。然而, 由于 OCL 的物理结构属性, 系统受到机电效应的影响[3]。这些影响代表了集电的质量, 可以被归纳为几个主要参

数, 如接触力、受电弓、接触不良率、电弧百分比和接触线的上升力[4,5]。

最近, 韩国铁路研究所(KRRI)在商业线路(Honam 快线, 长 56 km)上成功开发了一个时速 400 km 的铁路车辆及其基础设施[6]。然而, 由于受电弓和接触线之间的相互作用导致了剧烈的振动和波传播与反射的快速变化, 因此必须严格地对 OCL 所有方面的性能进行评估, 以便保证 OCL 功率稳定, 正常供电给列车。本文介绍了应用于检测新型时速 400 km 级 OCL[2,6] 的性能技术, 即通过物理测量系统验证核心部件的规格, 还介绍了一种间接接触线的动态拉出值/高度测量系统, 该系统由一个简单的电荷耦合器件(CCD)相机来实现[7]。

本文中的其他内容如下: 第 2 部分介绍了已建立的现场测试场地的详细规格, 第 3 部分介绍了基于视频图

* Corresponding author.

E-mail address: ypark@krri.re.kr

像的非接触式测量系统的细节，最后论述了所得出的结果和结论。

2. 材料和方法

如上文所述，为了保证商业运营的安全性，必须仔细配置OCL各项参数。因此，测试现场的核心组件配置根据以前的研究结果来确定[2,6]。表1是由KRRRI开发的时速400 km级OCL的设计参数。测试现场由一类简易的接触网构成，其包含众多超高张力接触线。由于接触线的张力和重量是影响高效集电性的最大因素，接触网由规格为34 kN、150 mm²的改良过的轻质铜镁合金接触线和规格为23 kN、116 mm²的绞合铜镁合金接触线构成。

通过利用HEMU-430X(代表高速电动多单元时速430 km实验)[1]，从时速60 km递增到时速410 km，从而实现对时速400 km级OCL组件进行性能评估。图1是OCL组件以及在测试现场拍摄的图片。

表1 韩国Honam快线400 km·h⁻¹级OCL的设计参数[2,6]

| Parameter | Value |
|---------------------------|---------|
| Tension of contact wire | 34 kN |
| Tension of messenger wire | 23 kN |
| Standard span length | 50/55 m |
| Pre-sag | N/A |
| System height | 1400 mm |
| Contact wire height | 5.1 m |

如表2中所示，通过监测受电弓的接触力、接触不良率、接触线的动态拉出值/高度、拉力、张力和电流等参数，可以评估时速400 km级OCL核心部件的性能。这些参数可以通过轨道测试获得，测试要求测量车辆通过目标地点的时刻。如果表2中的所有参数都满足测试运行和速度的允许范围，则确定OCL是安全可靠的。

3. 理论

以下介绍基于视频图像的动态拉出值/高度测量系统。需要注意的是本文中的一些细节是总结以前研究中所包含的内容模块。与其他性能评估措施不同，动态拉出值和高度只能通过观察接触线位置相对于受电弓中心的位移来测量。因此，如图2所示，动态拉出值和高度只能通过非接触式接口捕捉受电弓和接触线的图像测量得出。动态拉出值/高度测量系统与基于电弧传感器的接触不良率测量系统共享接口，该系统能够检测可见波长范围之外的电子波。

图3显示了安装在HEMU-430X上的基于视频图像的测量系统。HEMU-430X是用于评估时速400 km级列车基础设施的测试车辆，如图3所示，视频采集系统安装在受电弓的方向上，以便同时记录OCL的图像。

通过图2和图3所示的视频采集接口，可以获得动态位移值(即从受电弓的中心到接触面的距离)。获得动态拉出值和高度的过程如图4所示[2,7,8]。由于动态位移值是通过从受电弓中心到接触面的距离来计算的，所以

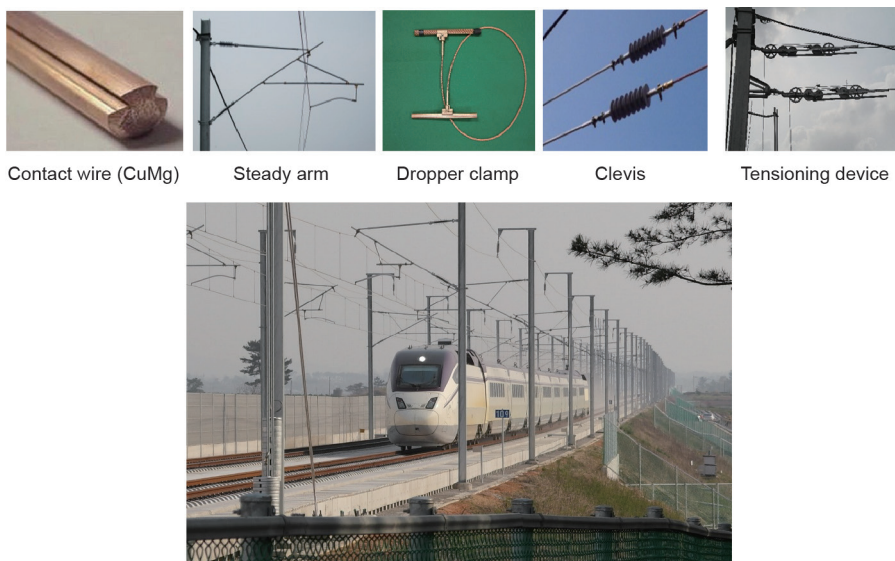


图1. 在时速400 km级测试场地OCL的部件和安装。

表2 400 km·h⁻¹级OCL的核心规格

| Component | Specification | Value |
|--------------------------|--|--------------------------|
| Contact wire | Tensile strength | ≥ 541 MPa |
| | Microwaves on longitudinal axis of wire | 0.1 mm |
| | Electrical conductivity | ≥ 70% IACS |
| Dropper clamp | Max. force on the dropper fatigue test | 300 N (EN 50119) |
| Tensioning device | Tensioning variation | ≤ 3% |
| | Breaking load | ≥ 120 kN |
| Steady arm | Breaking load | ≥ 7.5 kN |
| | Fatigue test under the tension and stagger | ≥ 2 × 10 ⁶ |
| Clevis termination clamp | Breaking load (proof tensile load) | 80 kN |
| | Breaking load | 130 kN |
| Arc sensor | Output range | -5 V to +5 V |
| | Sampling | 10 μs |
| CCD camera | Resolution | 720 × 480 |
| | Max. frame | 32 fps (full resolution) |

IACS: International Annealed Copper Standard; CCD: charge-coupled device. Permitted loss-of-contact rate is > 1% of measured data.

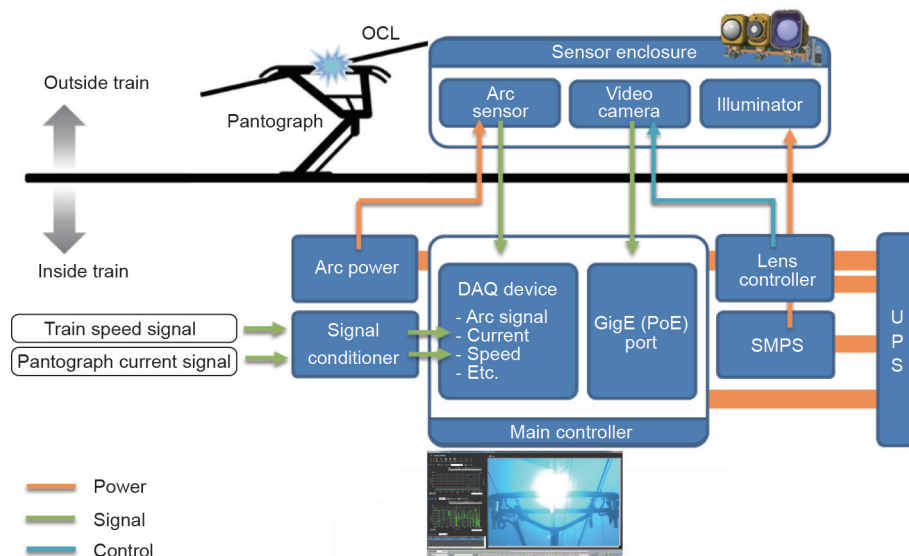


图2. 测试接触不良率和动态拉出值/高度系统的结构。OCL: 架空接触网; DAQ: 数据采集; GigE: 千兆以太网; PoE: 以太网供电; SMPS: 开关模式供电; UPS: 不间断电源供应。

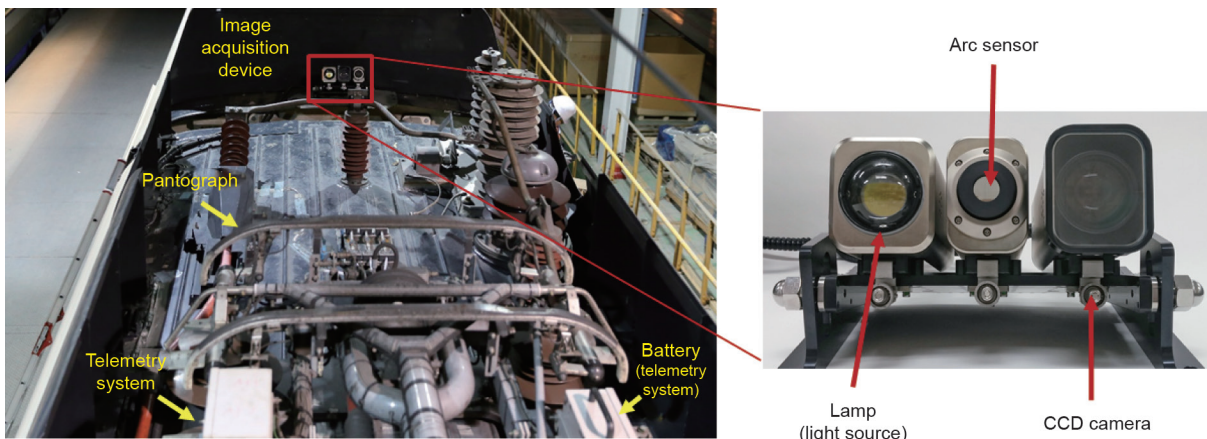


图3. 在HEMU-430X顶上安装的基于视频图像的测量系统。

有必要找到受电弓以及接触线的精确位置。因此，根据所获取的图像序列，首先获得受电弓的位置及其中心。然后假设接触带与照相机的角度可能不垂直，于是以直线的形式检测接触带。类似地，应用线检测方法检测接触线。最后，找到受电弓和接触线的交叉点，并且转换成动态拉出值和高度。

利用大容量的存储设备对数据进行记录，从而可以离线测量OCL的动态拉出值和高度。然而，在实际情况下必须考虑到附加程序可能会降低性能。如图5所示[2,7]，实际动态拉出值/高度测量系统可以总结为四个步骤。

图5显示了实际的误差来源。第一个实际误差的来源是OCL部件之间的相似性，即这些部件不能凭借单张图片来自动区分。第二个实际误差的来源是快速变化的

背景和由太阳照射引起的光线变化，这可能会频繁地改变检测受电弓的适当参数。比如在横截面部分，可以观察到一个或多个接触线，其可能是误差的来源。接触位置的快速移动是由低采样率引起的，也限制了高速工业CCD相机的拍摄。最后，在隧道以及山区或火车站等复杂场地，必须对参数进行调整。以下是具体的操作步骤。

第一步涉及环境识别，确定用于搜索受电弓的条件和参数。在常见的系统中，环境大致分为三种不同类型：正常、有背景干扰和隧道。如图6[9]中右侧所示的几种类型，每种类型下对收集图像的固定区域所提供的照明值不同。例如，与隧道类相比，正常类在区域1中具有较亮的值。类似地，区域2也具有不同的亮度值。通过收集多个图像的平均强度值，可以设置边界以识别合适的类型，这个边界称为“线性分类器”。

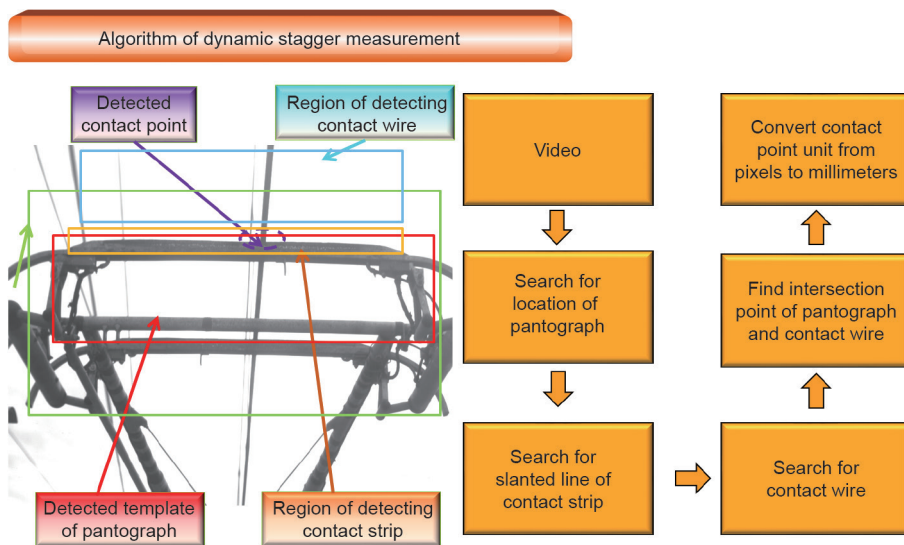


图4. 测量OCL动态拉出值/高度的过程。

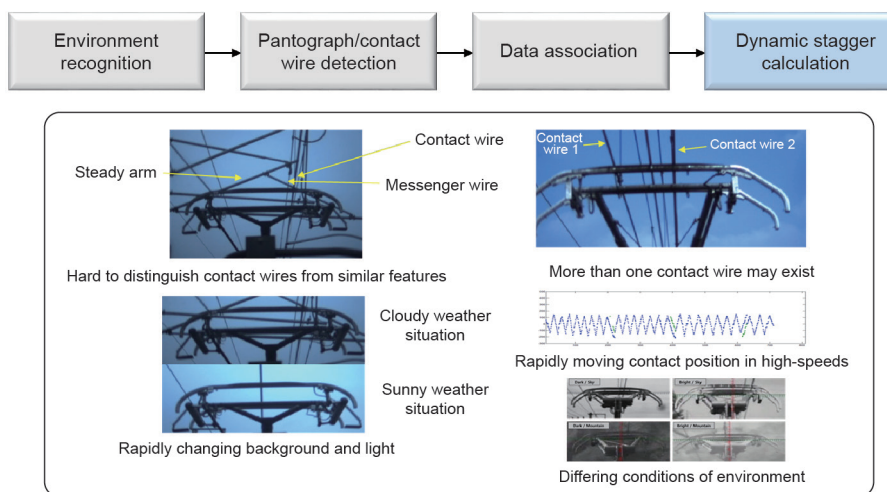


图5. 实际测量动态拉出值/高度的过程。

第二步对受电弓和接触线进行检测,如图7所示。先前步骤中所选的环境类型进展至检测步骤。第二步的目的是找到受电弓最合适的位置,该位置由搜索到的具有最高相似值的位置所决定。

第三步进行数据关联,从而滤除在实际情况下获得的不准确的测量数据(图8)。在图像序列之间,由于图像样本之间和接触线位置之间的关系,接触线只有有限的移动范围。该有限范围被定义为验证区域,而不考虑区域外的检测结果干扰。

4. 结果

表3显示了安装在HEMU-430X的Honam快线上视频检测系统的结果。结果包括与实验条件相关的参数,

如测量间值、最大速度、持续时间和样品数量。注意,每个结果都是从单独测试中得出的,测试范围仅在最小测量速度到最大测量速度间变化。

5. 讨论

图9展示了实现的动态拉出值/高度测量系统的软件平台。图中左侧显示了用于电弧测量的运行系统,而右侧展示了基于图像的测量系统。如图9所示,测量系统能够同时检测OCL的电弧和测量动态位移。根据上文中所采取的测量方式,可以得出所有测试样本中动态拉出值都在250 mm的范围之内。正如预期,在运行速度为 $400 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时受电弓和接触线之间接触的影响,受电弓的上升力增加,可以观察到高度的变化也增加。虽然,

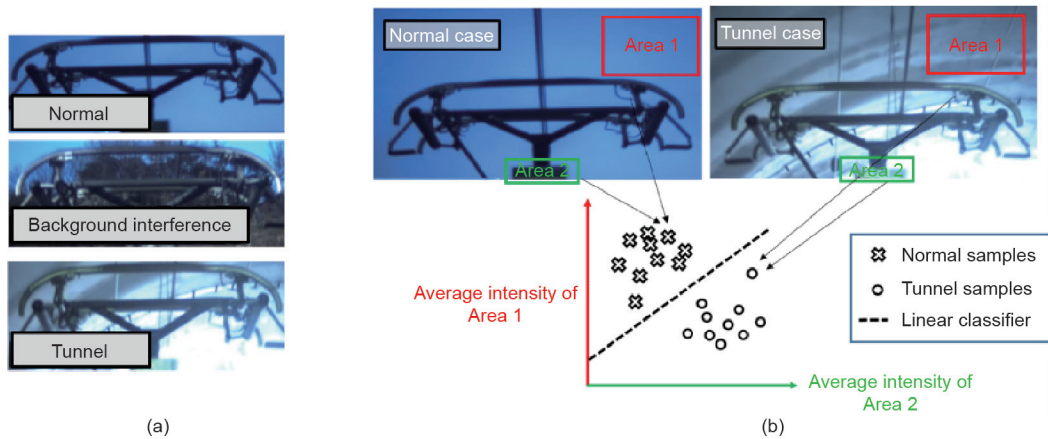


图6. 环境识别过程[9]。(a)周围环境的不同类型;(b)图像的特征向量。

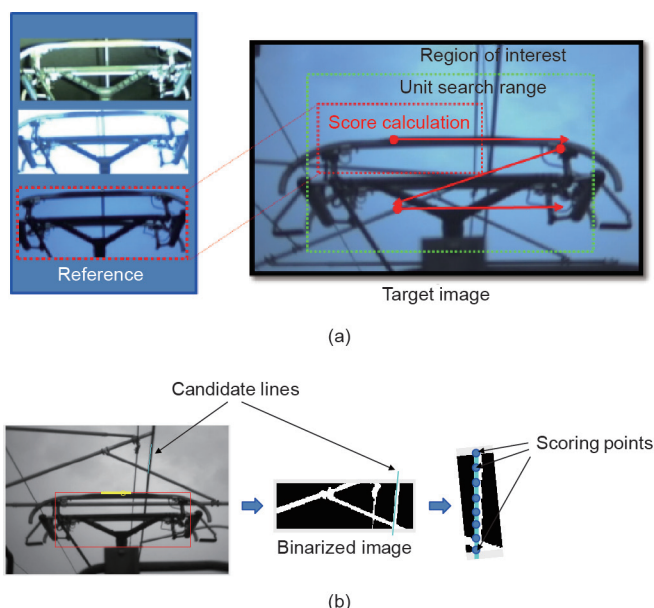


图7. 图像检测受电弓(a)和接触线(b)的过程。

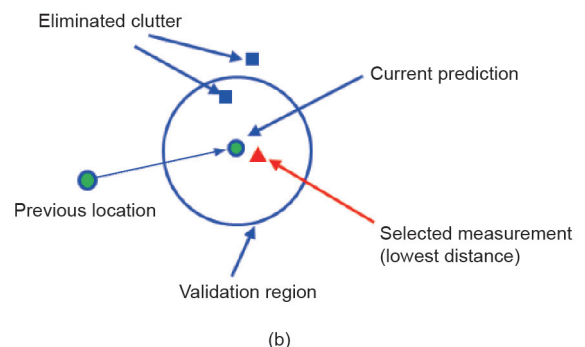
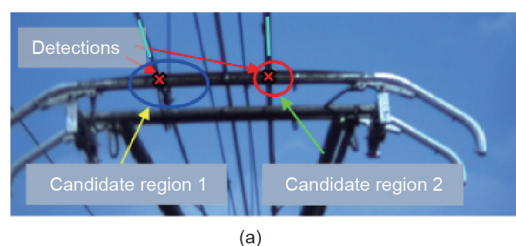


图8. 数据关联的过程。(a)横截面的接触线检测;(b)数据关联的应用。

表3 从370 km·h⁻¹到400 km·h⁻¹的动态拉出值的测量结果

| Components | Minimum measurement speed | | |
|--|---------------------------|------------------------|------------------------|
| | 370 km·h ⁻¹ | 390 km·h ⁻¹ | 400 km·h ⁻¹ |
| Measurement interval (km) | 18.73 | 5.79 | 3.07 |
| Maximum speed (km·h ⁻¹) | 394.4 | 394.4 | 404.0 |
| Experiment duration (s) | 175 | 56 | 28 |
| Experiment samples (frames) | 4214 | 1280 | 711 |
| Average dynamic stagger (mm) | -15.41 | -4.86 | -6.47 |
| Standard deviation of dynamic stagger (mm) | 80.38 | 74.81 | 93.11 |
| Dynamic stagger range | Within ±250 mm | Within ±250 mm | Within ±250 mm |

图9. (a)HEMU-430X 400 km·h⁻¹级上的电弧测量结果; (b)HEMU-430X 400 km·h⁻¹级上动态拉出值/高度的测量结果。

常规的不接触受电弓来测量接触线静态位置的方式是不能监测运行中的列车的,但基于视频图像的监测方法可以有效地测量OCL的动态。

如在系统配置的描述中所提到的,图像合集是从韩国开发的时速400 km级HEMU-430X顶上安装的图像采集装置获得的。为了评估相应的系统性能,从三天的三次测试运行中选择300帧图像进行评估。评估结果如表4所示。由表4可得,系统误差大约为8 mm,误差大小就像720×480图像上的四个像素点一样。由于采集硬件的限制,图像之间在以非常高的速度快速变化时可能发生模糊,这种模糊造成了系统误差。因此,希望可以采用更好规格的硬件系统来减少误差。

6. 结论

本文介绍了在KRRI开发的时速400 km级高速铁路运行前,已经应用于评估OCL性能的一项监测技术。评估集电性能结果的指标为受电弓的接触面、接触不良率和接触线的上升力。观察到的测量结果是在部件规格限制范围内的。开发基于视频图像的监测系统的目的是改进常规需要人力的监测技术,以便在动态拉出值和高度方面对集电性能进行非接触式评估。基于广泛进行的性能评估,其相应技术表明,即使在时速400 km运行的情况下,也可能分析OCL的状态。因此可以预测,

表4 性能测试结果

| Dataset | Resolution | Number of frames | Average error (mm) | Average error (pixels) |
|---------|------------|------------------|--------------------|------------------------|
| Set 1 | 720 × 480 | 100 | 7.0 | 3.48 |
| Set 2 | 720 × 480 | 100 | 8.4 | 4.17 |
| Set 3 | 720 × 480 | 100 | 8.6 | 4.27 |
| Average | — | — | 8.0 | 3.97 |

本文提出的监测方法的组合可以对OCL性能进行定量描述。

(翻译:程晨)

致谢

本研究由韩国铁路研究所研发计划资助。

Compliance with ethics guidelines

Chul Jin Cho and Young Park declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Kwon SY, Park CM, Park Y, Lee K, Cho YH, Eum KT, et al. Comparative review of the current collection quality parameters between catenary and pantograph by measuring the contact force and arcs simultaneously during new Korean

- high speed train trial runs. In: Proceedings of the 10th World Congress on Railway Research; 2013 Nov 25–28; Sydney, Australia; 2013.
- [2] Cho YH, Kwon YJ, Lee K, Park Y, Park CM, Ryoo H. Innovative high-speed overhead contact line by adopting an ultra-high strength contact wire. In: Proceedings of the 11th World Congress on Railway Research; 2016 May 29–Jun 22; Milan, Italy; 2016.
- [3] Borromeo S, Aparicio JL. Automatic system for wear measurement of contact wire in railways. In: Proceedings of the 2002 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Volume 4/4; 2002 Nov 5–8; Sevilla, Spain. Piscataway: IEEE; 2002. p. 2700–5.
- [4] Park Y, Lee K, Park SY, Park JY, Choi WS. Implement of multi-functional type condition monitoring system for railway catenary system. *Trans Korean Inst Electr Eng* 2015;64(9):1406–10. Korean.
- [5] Koyama T, Ikeda M, Nakamura K, Tabayashi S, Niwakawa M. Measuring the contact force of a pantograph by image processing technology. In: Brebbia CA, Tomii N, Mera JM, Ning B, Tzieropoulos P, editors Proceedings of the Thirteenth International Conference on Design and Operation in Railway Engineering; 2012 Sep 11–13; New Forest, UK. Billerica: WIT Press; 2012. p. 189–98.
- [6] Cho YH, Ryoo HB, Kang SH, Jung HS, Cho HR, Lee KS, et al. Final project report on the development of overhead contact line system for speed enhancement. Gyeonggi-do: Korea Railroad Research Institute; 2015. Korean.
- [7] Cho CJ, Cho YH, Kwon SY, Lee K, Jang S, Ryoo H. Development of an image processing based method for dynamic stagger extraction of pantograph-overhead contact line system. *J Korean Soc Rail* 2011;(5):1336–41. Korean.
- [8] Cho CJ, Ko H. Video-based dynamic stagger measurement of railway overhead power lines using rotation-invariant feature matching. *IEEE Trans Intell Transport Syst* 2015;16(3):1294–1304.
- [9] Cho CJ, Park Y, Ku B, Ko H. An implementation of environment recognition for enhancement of advanced video based railway inspection car detection modules. *Sci Adv Mater*. In press.
- [8] Cho CJ, Ko H. Video-based dynamic stagger measurement of railway overhead power lines using rotation-invariant feature matching. *IEEE Trans Intell Transport Syst* 2015;16(3):1294–1304.
- [9] Cho CJ, Park Y, Ku B, Ko H. An implementation of environment recognition for enhancement of advanced video based railway inspection car detection modules. *Sci Adv Mater*. In press.