

智能三维电梯井道建图



Christian Studer



Raphael Bitzi



Philipp Zimmerli

摘要

激光和摄像机扫描以及建图解决方案越来越多地用于建筑环境的精确三维模型建模。本文介绍了一种用于电梯井道自动扫描和建图的智能摄像系统原型机。其目的是评估电梯井道建设是否在允许的公差范围内。该系统的工作分为四步。第一步，通过小型钢丝绳绞车或无人机在井道内提升一部 360 度视角的时间同步摄像机。第二步，根据摄像机图像得出建成的电梯井道的精确数字三维模型。第三步，通过计算机分析，在三维模型中确定层门开口的位置。第四步，根据层门开口的位置，将数字电梯 CAD 模型放入真实井道三维模型。利用这套系统，可在物理安装开始前对电梯进行数字化安装。

关键词：建筑，数字孪生，影像

作者

Christian Studer，博士，新技术负责人

Raphael Bitzi，新技术团队成员

Philipp Zimmerli，新技术团队成员

迅达电梯有限公司

Zugerstrasse 13

6030 Ebikon

Switzerland

电话：+41 414454830

传真：+41 414454830

电子邮件：christian.studer@schindler.com；

raphael.bitzi@schindler.com；

philipp.zimmerli@schindler.com

Christian Studer 研学土木工程，拥有瑞士苏黎世联邦理工学院 (ETH) 多体动力学博士学位。他曾在迅达的创新团队中担任多个职位，包括 Solar Impulse 任务的技术专家；该任务首次以太阳能飞机进行了环球飞行。如今，他是迅达新技术部门的负责人，该部门致力于为垂直运输行业开发突破性创新。

Raphael Bitzi 拥有瑞士苏黎世联邦理工学院 (ETH) 机器人技术硕士学位。自 2011 年以来，他一直在迅达新技术团队工作，负责机器人安装系统和基于摄像机的测量及定位设备的开发和产业化。

Philipp Zimmerli 曾在 FHNW Windisch 学习机械工程。2013 年进入迅达新技术部门之前，他曾在多家工程咨询公司工作多年。凭借自己的深厚机械技术背景，他为团队的多个项目提供支持。

介绍

电梯井道是建筑物中的关键结构，实质上构成了一个从建筑物地下室延伸到顶部的空间。电梯的安装施工必须与建筑物的整体搭建紧密结合。尽管电梯井道尺寸大、建设施工时间长，但它仍然需要保持在严密的几何公差范围内，如此方能保证电梯的正常安装。

首先，电梯井道必须笔直，这样才能保证良好的电梯运行性能。电梯导轨上由于井道偏离铅垂线而造成的任何扭曲或弯曲，都会导致电梯轿厢沿导轨高速运行时产生摆动。井道笔直程度上的公差要求，还包括电梯井道层门开口的位置必须全部彼此对正。

其次，电梯井道的横截面在整个井道长度上都必须符合允许的公差，如此才能保证电梯与井道的装配契合度。这一点尤为关键，因为现在的电梯系统最大程度地利用了电梯井道的空间，仅留有少量余地来适应不规则的空间。

如果在电梯安装过程中发现电梯井道存在公差问题，需要在施工现场采取纠正措施，即订购新的井道材料或拆除部分混凝土（见图 1）。为防止施工现场出现代价高昂的延误和干扰，必须事先了解是否需要安排以及在哪里安排纠正措施。

建筑单位将电梯井道移交给电梯公司时，更需要特别注意。现在的常见做法是电梯公司在井道内用铅垂线进行粗略的人工测量，并测量每层的墙壁和层门相对于铅垂线的距离。这项工作容易出错并且十分耗时，因此只能在井道中进行抽样检查，而不是全面测量。本文介绍了如何获得整个已建成电梯井道的精确三维模型，以及如何在物理安装之前对电梯模型进行数字化安装，从而检测任何几何公差问题的最新研究。



图 1. 由于井道壁超出公差，在电梯井道支架处采取纠正措施。



图 2. 摄像单元由四台摄像机、LED 照明系统和一台用于数据处理的计算机组成。

技术发展最新水平

如今，对建筑物进行三维激光扫描是一种代表着技术发展最新水平的实践。市面上有众多此类扫描仪，但相当昂贵。将扫描仪放在一个空间中，就可以输出建成几何形状的高精度三维模型，公差只有几毫米。然而，由于电梯井道横向窄，纵向长，在电梯井道中使用这些扫描仪非常麻烦。具体而言，如果只将三维激光扫描仪放在电梯底坑中，那么随着井道高度的增加，激光束在井道壁上的反射角会变得太小，导致无法得到准确结果。因此，需要每隔几米就对井道进行一次激光扫描，然后将这些扫描数据拼接起来。此外，激光扫描仪在扫描过程中需要一个坚实的底座，也就是说，井道内每隔几米就需要安装脚手架；由于如今先进的电梯安装技术不再采用脚手架，因此这种做法已不现实。

无人机景观建图是另一项先进的实景成像技术。将从无人机中提取的图像拼接到一起，转化为模型，并根据全球定位系统 (GPS) 的信息创建三维景观。然而，这种技术无法轻松沿用到电梯井道上，因为在建筑物之中无法提供 GPS 位置，必须通过其他方式获得无人机和相关摄像机的位置。

目前，同步定位与建图 (SLAM) 算法应用广泛，比如基于智能手机的空间测量应用、自主车辆导航以及机器人应用。然而，大多数依赖消费类硬件的 SLAM 定位系统往往不足以提供电梯井道建图所需的位置精度。因此，必须特别根据应用用例对 SLAM 进行微调，才能达到合适的测量精度。

电梯井道扫描

下文概要介绍了一种处于原型机阶段的新式电梯井道摄像机测量系统。该系统的应用包括以下步骤：

1. 多摄像机系统借助无人机或绞盘沿电梯井道移动，同时连续拍摄图像。
2. 将摄像机图像转化为电梯井道的三维点云模型。
3. 算法自动检测三维模型中的电梯层门开口，并创建虚拟参考线。
4. 根据虚拟参考线，将电梯导轨和支架虚拟地放置在井道内。通过这种方式，可以自动检查所有支架和层门是否能在给定的公差范围内安装。

下面对每个步骤做进一步的详细说明。

第 1 步：井道的摄像机成像

该系统由四台时间同步的摄像机组成，能够以 10 Hz 帧率拍摄分辨率 160 万像素的图像。此外，该系统还有一个机载惯性测量单元 (IMU)，可测量线性加速度及角速度。该摄像系统如图 2 所示。摄像系统通过小型绞盘和钢丝绳在井道内上下移动，同时连续拍摄图像。

系统的运行示意图见图 3。原则上，也可以将系统安装在无人机上，在井道中上下飞行。图像本身连带位置信息，可在之后构建基于真实世界的精确三维井道模型。示例的图解请见图 4。

图像位置通过 SLAM 技术获得。时间 t1 与 t2 之间，摄像机在井道中移动，在 t1 时拍摄一组图像，在 t2 时拍摄另一组图像。结合 IMU 的加速度计和陀螺仪数据，可以量化摄像机在时间 t1 和 t2 之间的相对移动。

该算法还能检测出所谓的“自然特征”，比如在 t1 拍摄时图像中墙体独特的光学结构，这些特征又能在 t2 时拍摄的图像中找到。

通过比较 t1 和 t2 时拍摄的图像中这些特征的位置，算法可以计算出摄像机在 t1 和 t2 之间的相对移动距离，见图 5。必须强调的是，这一程序要求电梯井道壁上有一些细微纹理作为参考点，也就是说，具有明显混凝土结构的原始井道优于刷成白色的井道。此外，还须注意应提供适当照明，最好与摄像机的动作同步。为提高 SLAM 的精度，硬件上必须保证 IMU 和摄像机之间正确同步。使用一种针对电梯井道建图做过精细调整的高级优化方法，可将来自 IMU 和摄像机的相对运动信息结合在一起。

的井道。此外，还须注意应提供适当照明，最好与摄像机的动作同步。为提高 SLAM 的精度，硬件上必须保证 IMU 和摄像机之间正确同步。使用一种针对电梯井道建图做过精细调整的高级优化方法，可将来自 IMU 和摄像机的相对运动信息结合在一起。



图 3. 正在井道中使用的摄像机单元。

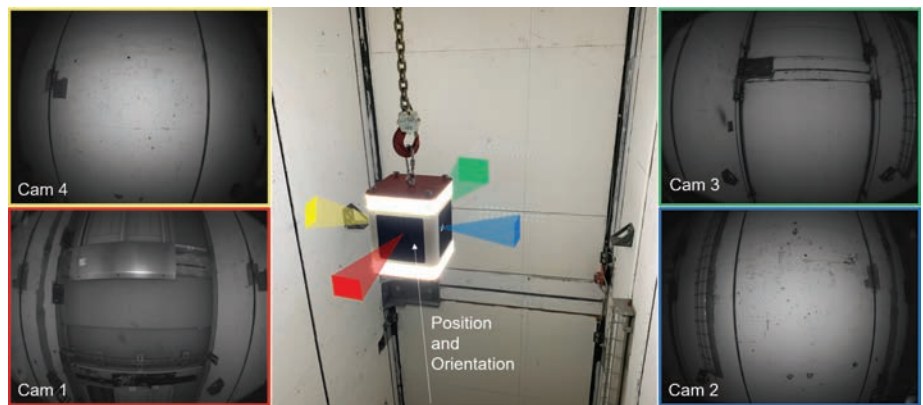


图 4. 摄像机拍摄的图像示例，包括摄像机的定位。

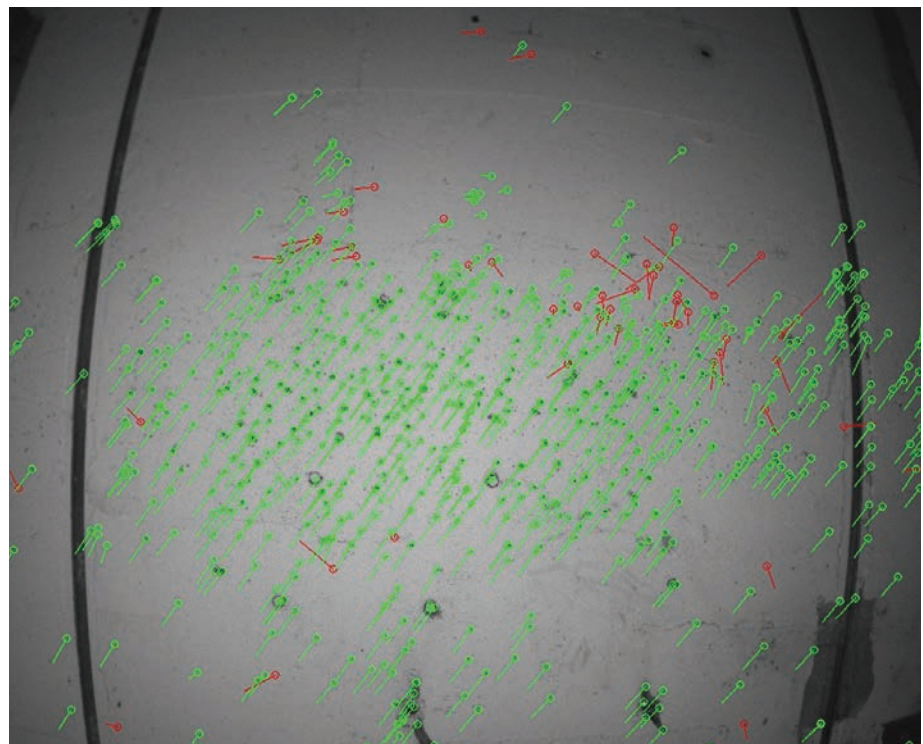


图 5. 摄像机制作的图像，包括特征（绿色：已跟踪特征；红色：放弃跟踪的特征；线条：从前一幅图像跟踪到的特征）。

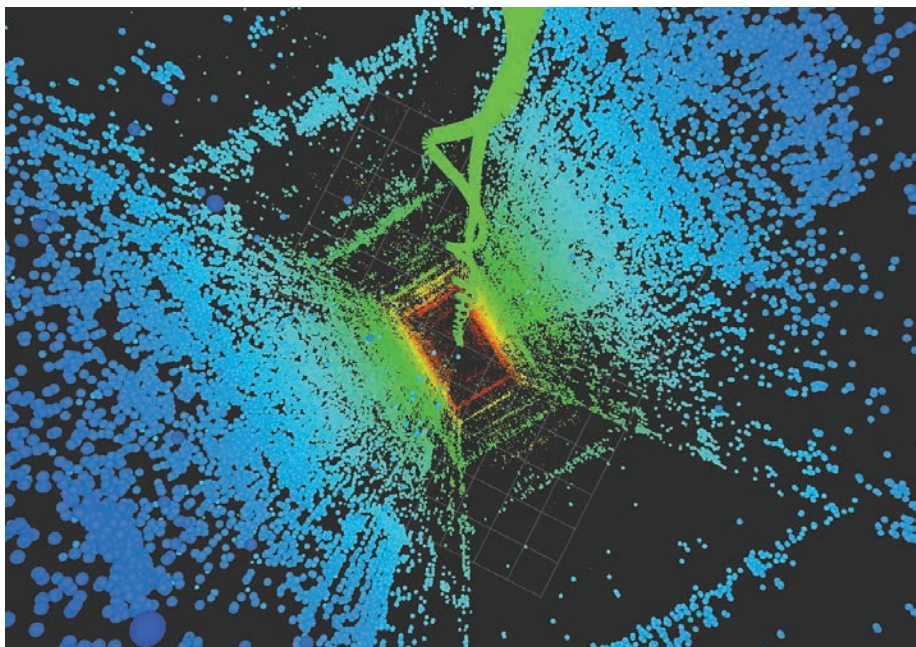


图 6. 电梯井道的三维点云，包括摄像机轨迹（绿色）。



图 7. 数字测绘系统检测到的两个层门开口。

采用所述措施，SLAM 仍然会受光束漂移的影响，在垂直测量方向上尤其如此。但是，将摄像机从井道底坑地面上升起，然后再沿井道降回，就可减少这种情况，即测量结束时摄像机处于同一垂直位置。对井道的同一部位重新成像，可以识别上下测量结果的整体垂直漂移，为算法提供信息以便修正漂移。硬件传感器设置和后处理软件均由迅达与初创公司 Sevensense Robotics AG 共同开发。

第 2 步：基于图像对电梯井道进行三维重建

现在，可以将第 1 步中获得的包含坐标在内的图像拼接在一起，形成电梯井道的完整三维点云。不同于基于三维平面的三维 CAD 模型，三维点云是由数百万个点组成的集合，每个点都有一个三维坐标，因此其精度高出很多个数量级。为了获得这种三维点云，可以利用现有无人机景观建图中常用的算法。在这一具体应用中，使用 Pix4D 软件，输入参考图像，可以得出完整的三维点云。用此方法得到的电梯井道点云示例见图 6。

第 3 步：识别电梯门并放置虚拟参考线

现在，将第 2 步中得到的三维点云输入到一个算法中，以检测电梯层门的开口。该算法会将直线平面拟合到四面井道壁上，检测出开口，从而得出层门开口四个角的位置（见图 7）。得到这些角后，算法通过角拟合两条垂线，作为电梯安装的参考。对这些垂线进行反复拟合，使所有电梯门都能安装在相应的层门开口，同时不超出允许的调整范围。该算法还能提示是否有无法拟合的状况，并指明在哪些电梯层门开口需要进行修正措施（见图 8）。

第 4 步：电梯的虚拟安装

根据第 3 步得到的虚拟参考线，可以将虚拟的电梯导轨以及导轨固定支架插入三维点云。电梯导轨的放置非常直观，按照虚拟参考线不断移动即可，而导轨支架的放置则比较复杂。支架的一部分与导轨连接，一部分根据需要突出到井道壁上，以补偿井道建造施工中造成的任何差异，确保最佳安装效果。下一步检查支架的可调整范围是否已达标。这样就可以在安装电梯前评估每个支架是否适合嵌入电梯井道。

“这一程序要求电梯井道壁上有一些细微纹理作为参考点，也就是说，具有明显混凝土结构的原始井道优于刷成白色的井道。”

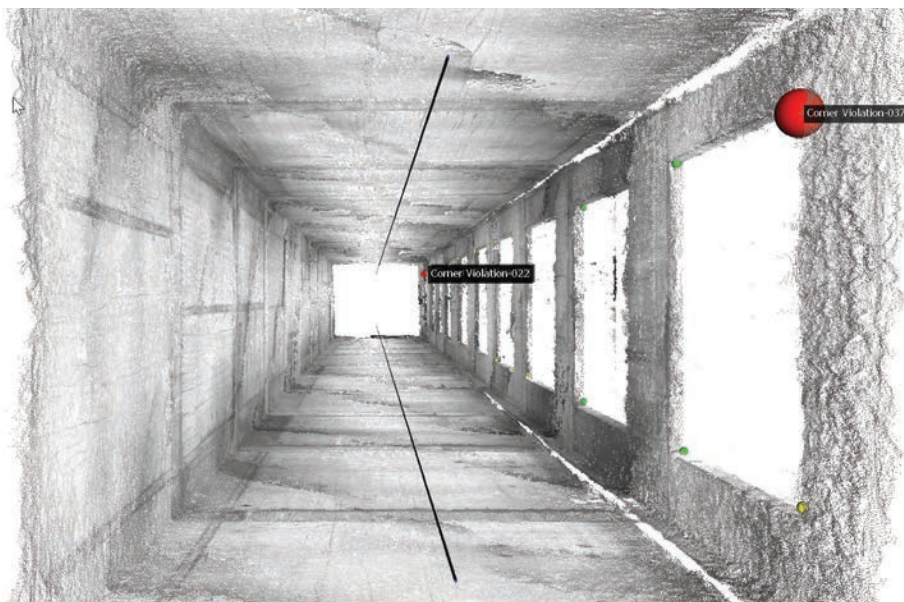


图 8. 井道俯视图，带有虚拟参考线。红点表示与放置门有关的公差问题。

可以在井道底坑中和顶部放置摄像机能够识别的增强现实 (AR) 标记 (见图 9)，这样系统就可以指示安装技工应在何处安装铅垂线，以便准备实际电梯安装。图 10 显示了虚拟安装在电梯井道内的电梯。图 11 显示了一个公差有问题的支架细节。

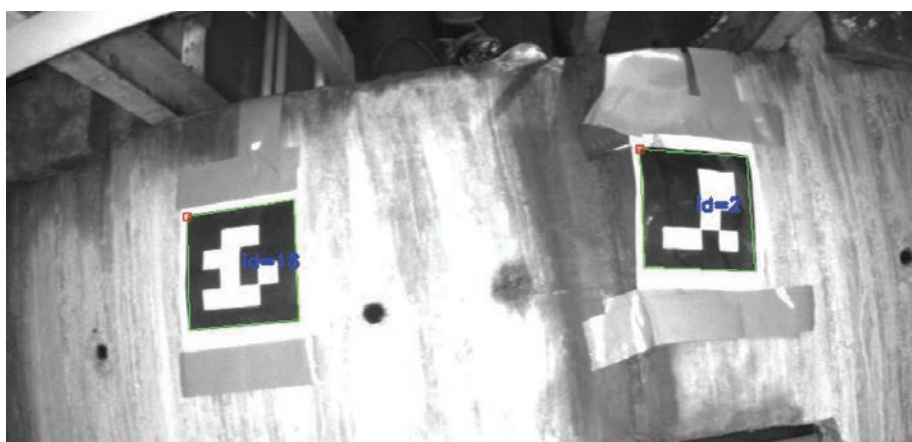


图 9. 扫描设备检测到的两个 AR 标记。



图 10. 完整安装虚拟电梯后的井道。支架呈红色的部分，表示存在公差问题。

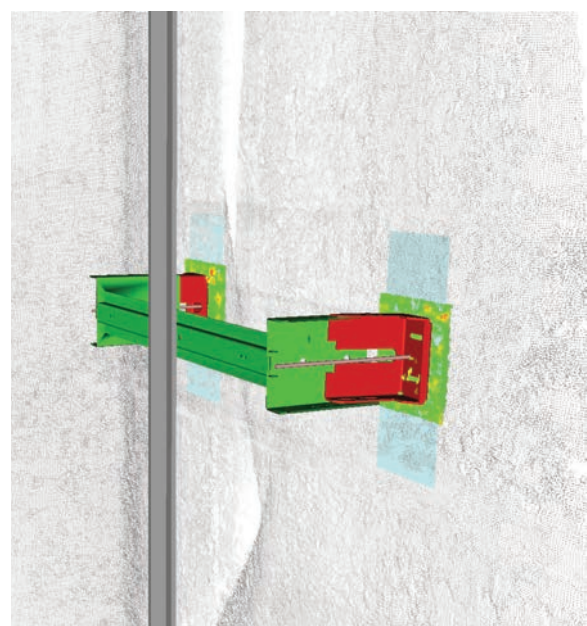


图 11. 支架的详细视图。可以看到支架的调节范围不足

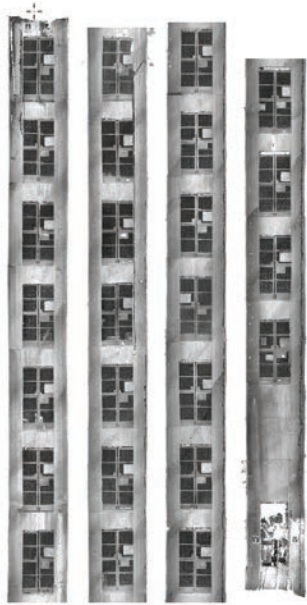


图 12. 80 米井道的点云（分成了四部分）。

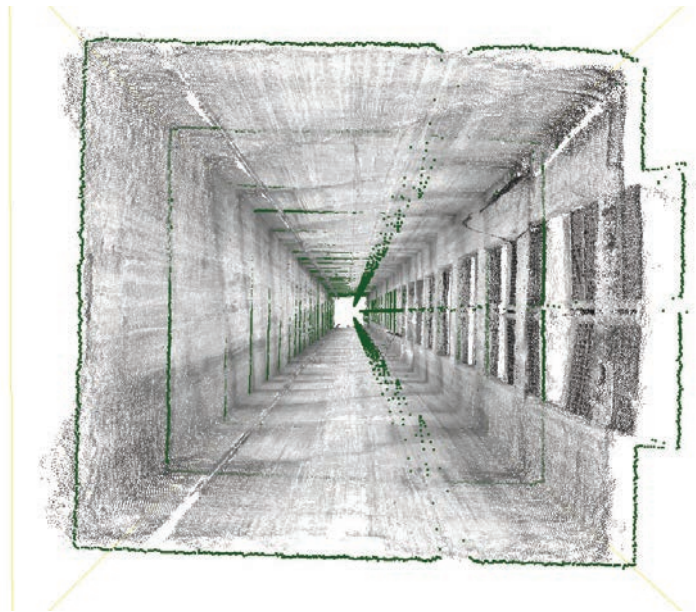


图 13. 井道的点云扫描结果与二维激光扫描结果叠放。

放置 AR 标记的益处不仅体现在可以指示铅垂线定位，还包括以下两种情形。首先，如果一个梯组中有几部电梯必须相互对正，或者与外部参照物（如建筑轴线）对正，AR 标记就可以作为电梯放置的参考点。在这种情况下，测量人员可以在电梯井道的特定层门开口中放置标记，随后系统可以将虚拟参考系统与这些标记对齐。其次，AR 标记可以用来拼接包含多部电梯的井道的点云，而出于精度考虑，多井道应用中的每一个井道都是单独测量的。

案例研究

摄像系统原型机曾在中国香港一处高 85 米、共 26 层的电梯井道中接受过测试。井道的三维重建请参见图 12。井道内还进行了人工测量，各楼层也进行了二维激光扫描，以提供参考数据；二者均以安装的铅垂线为参考。此外，采用一套高精度位置跟踪系统对摄像机测量系统的位置进行验证。图 13 和 14 显示的是二维激光测量结果与摄像机测得点云的比较。局部井道横截面测量结果达到的精度在 1 厘米范围内。

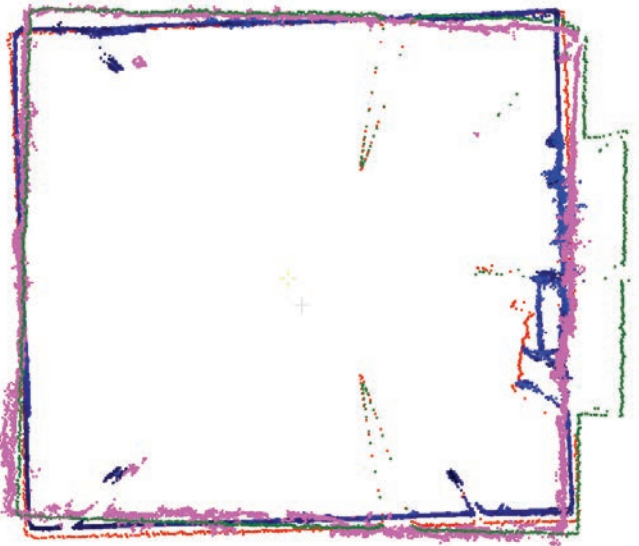


图 14. 点云与二维激光测量结果对比。蓝线和红线分别表示摄像机和二维激光在底坑中的测量结果。紫线和绿线分别表示摄像机和二维激光在井道顶部的测量结果。可以看到井道有轻微扭转。

传感器在整个井道长度上的位置精度如表 1 和图 15 所示。通过比较来自 SLAM 的摄像机位置和来自位置跟踪系统的地面真实数据获得该测量数据。水平定位误差平均低于 1 厘米，最大误差为 2.5 厘米。摄像机在井道中移动速度的影响非常明显：摄像系统缓慢移动得到的结果远远优于快速移动。总之，首次测量的结果显示，这种摄像系统具有很大潜力：可以进一步验证、微调摄像系统，以获得更精确的测量结果。

前景展望

数字电梯井道建图可以建立准确的建筑物三维模型，为未来的电梯安装方式开辟了新的视野。例如，可以使用具有 AR 功能的眼镜指导电梯安装，实现超高精度。不久的将来，机器人有可能被用来安装电梯，而对建筑物和所有系统运用数字孪生则可以让后台了解现场的实际情况。这一展望超越了前文讨论的井道公差验证用例，概括说明了作为愿景的用例。

电梯安装的未来

如今，完全数字化地规划电梯数据已成常态。但在安装之时，仍要在现场进行大量人工测量，才能将数字化规划变成现实。上文所述的井道建图流程可用来准确指示真实环境中（而非理论上的计算机模型中）每个轨道支架的位置和每个孔的钻孔位置，以及所有相关的公差。此外，基于摄像机的测量在对井道进行三维重建的同时，还可以创建井道壁上所有光学结构图案的所谓“特征图”。以此作为参考点，摄像机可以时刻定位自身在井道中的位置。这会为未来的电梯安装带来很多影响。

数据集	垂直误差		水平误差	
	平均值 (m)	最大值 (m)	平均值 (m)	最大值 (m)
0844	0.07032	0.16929	0.00612	0.02547
0908	0.06523	0.14120	0.00724	0.02532
0959	0.17554	0.32746	0.01032	0.04168
1014	0.06640	0.11494	0.01017	0.03282

表 1. 全站仪读数对比，显示水平和垂直扫描误差。

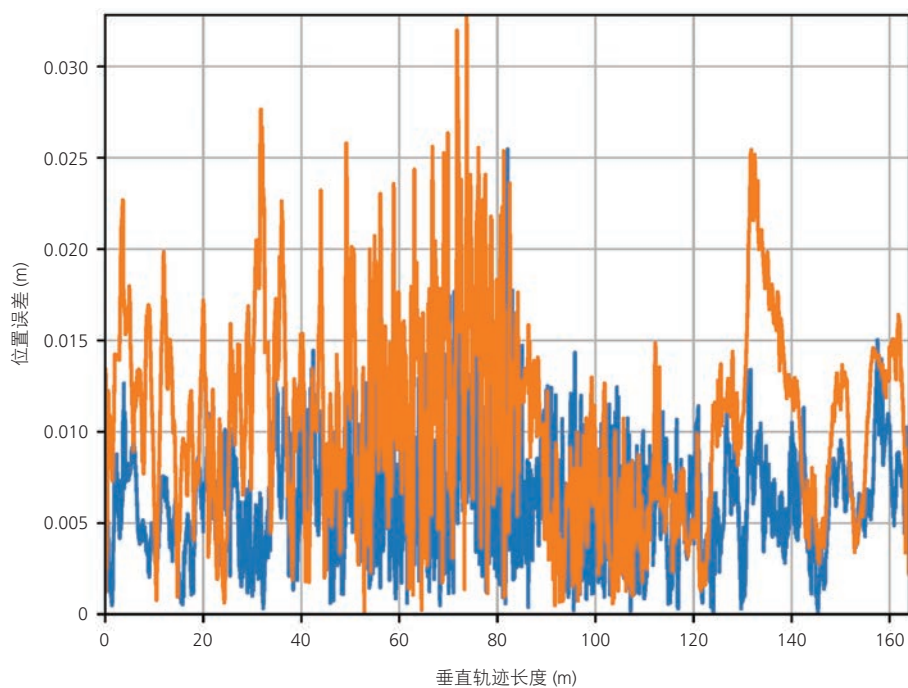


图 15. 所有全站仪读数对比。将水平误差比对垂直轨迹长度标绘成图，对比慢速和快速记录环节。

例如，设想为摄像机额外配备激光指示器。可以通过摄像机得知激光指示器在井道中的位置，以及数字井道模型，得出准确的钻孔位置。激光指示器可以精准导向，以向安装技工指示钻孔位置。安装技工无需参考任何图纸和相关的人工测量，即可直接进行安装。由此，可以减少错误，提高质量并增进效率。

激光引导安装只是迈向基于 AR 的安装的第一步。AR 眼镜可以指导整个安装过程，不仅能显示钻孔位置，还可以显示支架应该如何安装、如何调整以及导轨需被放在何处。这样可以直接利用数字模型中的数据来指导人类安装人员，缩小了建筑工地数字规划和执行之间的数字化差距。

数字井道测量还与一项机器人电梯安装的创新举措密切相关。作者所在公司开创了自攀升机器人电梯安装系统（迅达 Schindler R.I.S.E），该系统可在电梯井道上移动，准确钻孔并安装膨胀螺栓，在安全、健康、质量、效率方面均表现出诸多效益，并且可与数字规划联动。目前，机器人系统仍然使用贯穿整个井道的参考铅垂线进行定位，同时结合激光扫描仪作为定位辅助。结合本文所述的数字井道建图系统，可以直接将钻孔坐标发送给机器人，大大简化机器人安装。图 16 所示即为迅达的安装机器人。



图 16. 自攀升机器人电梯安装系统（迅达 Schindler R.I.S.E.）集成数字建图设备技术，引导电梯系统的自动安装。

实建数字孪生

本文重点介绍数字电梯井道扫描和电梯部件的数字化放置，不过，这种方法可以在建筑业内广泛应用。建筑物的无人机建图越来越多地被用于记录建筑进度，以及验证建筑物是否已被正确建造。先进的激光扫描仪可以测量空间大小，还可以利用反射镜指示目标点。包括 Leica 和 Faro 在内的许多公司都使用这些技术作为建筑信息建模 (BIM) 实建解决方案的构成要素，也有许多公司和初创公司正在建筑物数字孪生领域进行创新，包括迅达旗下的初创公司 BuildingMinds。

基于摄像机的成像和后续建模尤其适用于必须正确测量和绘制现有建筑部件的现代化项目。点云模型可以非常精确地记录前所未有的细节层次。在更新改造项目中，建筑师和规划师可以从现有建筑的点云与

相关的三维模型入手，随后将其转化为数字空间内的新建筑。随着本文所述建图和建模程序的发展，显然有望在远超电梯的现实环境点云模型中进行建筑部件的数字化预装。

这种方法也适用于对安装精度的水平有不同要求的应用场合，例如，外墙或窗户安装、悬挂式吊顶或地板。机械、电气和管道 (MEP) 安装可能与电梯安装最为相似，上述方法可用于预检在建建筑物中的管道是否正确。其他应用还可能包括预制建筑构件，特别是与建筑物的原有建成部分连接的部件，如地板、楼梯或墙体构件等。随着木结构建筑物不断普及，在标准的大规模建筑施工和预制木构件的相互作用中，这类应用的作用愈发明显。

最后但同样重要的是，房地产行业也越来越多地使用激光扫描和建图来获得准确的建筑物模型，例如，可使租户在入住前对房间进行虚拟装修，初步了解实际布局，还能便于规划。■

除非另有说明，本文所有图片版权均归迅达所有。