

塑造智慧变革



HEXAGON

海克斯康



北京
国家会议中心

2018年

9月10-12日

2018.hexagonchina.com.cn

三维激光扫描在地铁盾构隧道 变形监测中的应用

深圳市市政设计研究院有限公司 余海忠

日期：2018.9.12



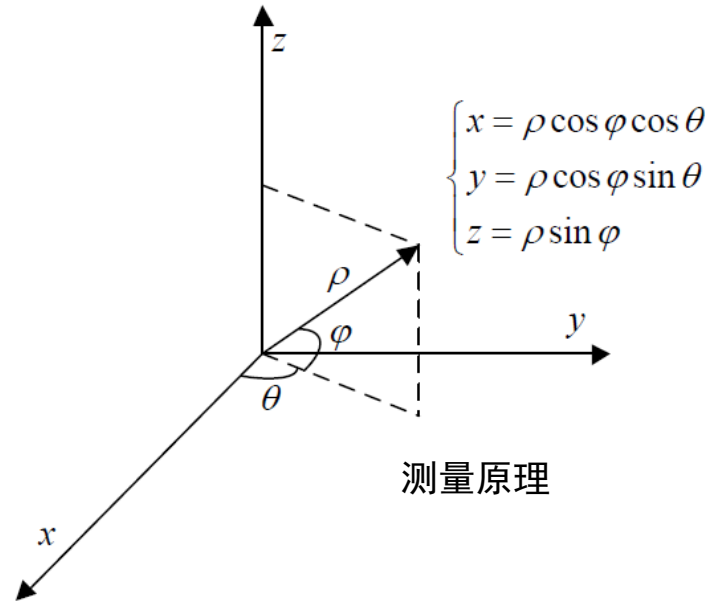
目录

1. 绪论
2. 技术分析
 - a) 精度分析
 - b) 数据预处理
 - c) 断面提取及变形分析
 - d) 分析结果
3. 工程实例
4. 结论

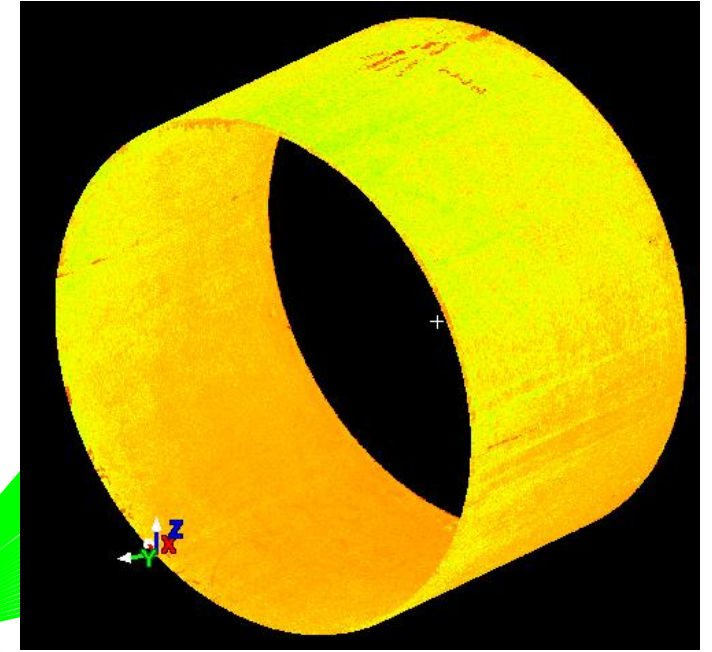
1、绪论

三维激光扫描技术

三维激光扫描技术又被称为实景复制技术。它是利用激光测距的原理，记录被测物体表面大量的密集的点三维坐标、反射率和纹理等信息。结合计算机视觉与图像处理技术，将其扫描结果直接显示为点云（pointcloud：无数的点以测量的规则在计算机里呈现物体的结果），可快速复建出被测目标的三维模型及线、面、体等各种图件数据。这样全面的信息能给人一种物体在电脑里真实再现的感觉。因此，三维扫描技术在测绘领域被誉为“继GPS技术之后的一次技术革命”。



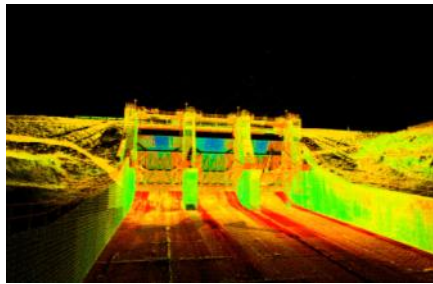
测量原理



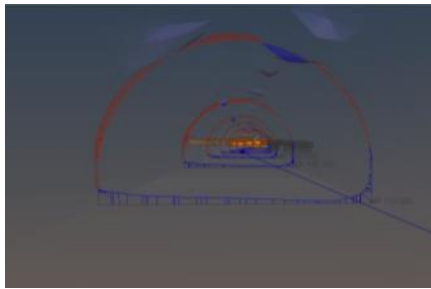
极其广泛的应用领域



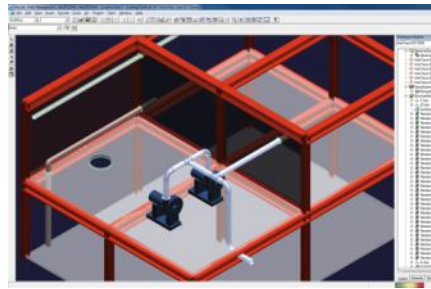
测绘



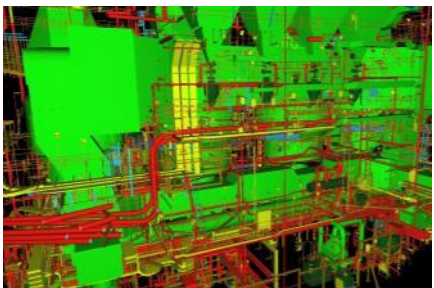
水利水电



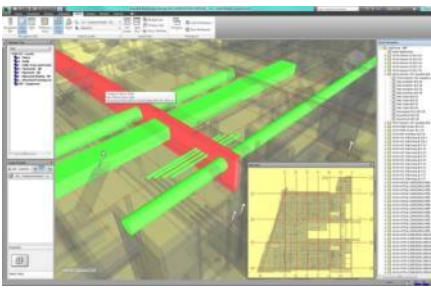
地铁隧道



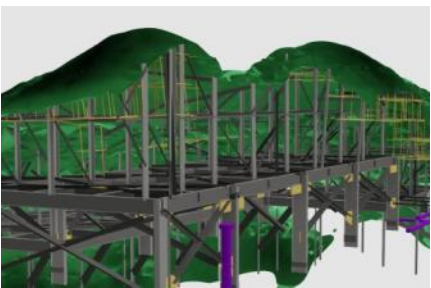
逆向工程



工厂数字化



安装工程



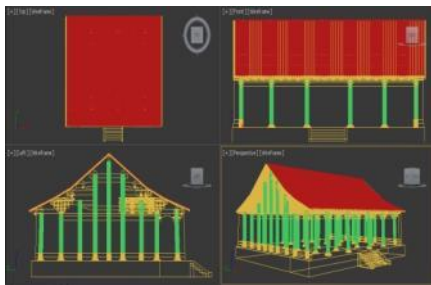
BIM



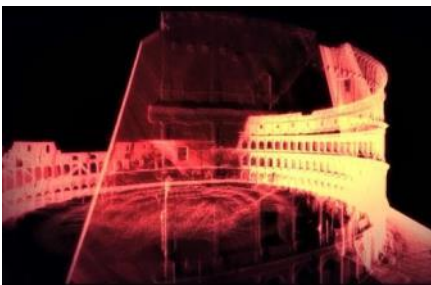
航空航天



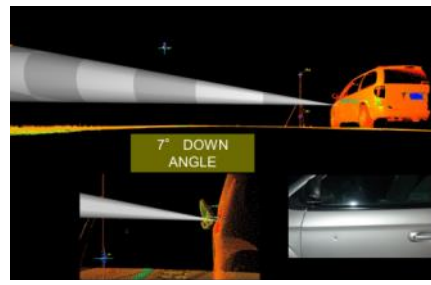
自然勘察



古建筑保护



文化遗产



警务法务



地铁监测

2、技术分析

以深圳轨道交通二号线长约130m的隧道监测区域为研究对象，该区域位于市中心繁忙的主干道下方，地面上高层建筑林立，容易发生隧道变形。经过隧道收敛监测发现，部分区间出现**道床沉降、水平位移、横向收敛变化量都较大**等现象；隧道现状调查结果发现，区间段部分隧道管片环纵缝接缝张开现象，隧道部分位置存在**渗漏水、掉块，隧道管片顶部贯穿裂缝数量较多**。

采用 Leica P40扫描仪对该段区间共扫描6站。数据处理软件为Cyclone9.0。



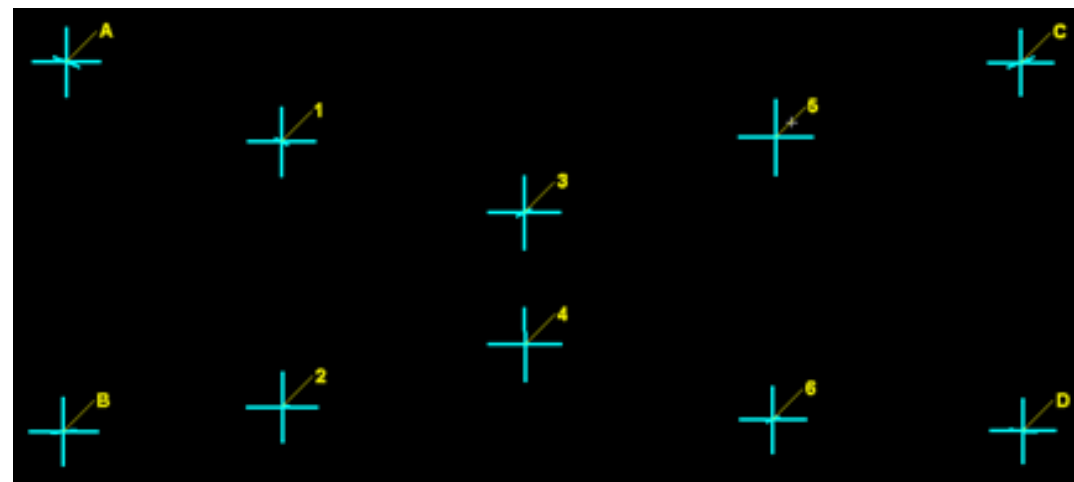
P40三维激光扫描仪



现场工作图

精度分析

为了测试三维激光扫描技术在隧道变形测量中的精度与可靠性，采用测角精度为 $\pm 0.5''$ 、测距精度为 $0.6\text{mm} \pm 1\text{ppm}$ 的Leica TS50高精度全站仪，在隧道内选取六个断面布设平面反射标靶，分别采用三维激光扫描仪与全站仪对各标靶进行扫描并提取中心点坐标，同时测量各标靶的中心点坐标，比较两者的精度，全站仪是传统的变形测量技术，其测量精度可作为基准参考。



黑白标靶及导入标靶的控制点坐标显示

点号	扫描坐标			全站仪坐标		
	x/m	y/m	z/m	x/m	y/m	z/m
A	6.9834	4.5077	0.4354	2114.4385	1007.2399	10.2803
B	6.9785	4.511	-0.5572	2114.4344	1007.2438	9.2879
C	4.4273	7.0581	0.4334	2111.8787	1009.7899	10.2777
D	4.4194	7.0621	-0.5775	2111.8801	1009.7912	9.267
1	6.2873	5.576	0.2467	2113.7408	1008.3054	10.0922
2	6.2905	5.571	-0.6731	2113.7449	1008.3060	9.1713
3	6.0019	5.8589	0.0666	2113.4542	1008.5941	9.9098
4	6.0091	5.8509	-0.4498	2113.4681	1008.5795	9.3934
5	5.5821	6.2757	0.2466	2113.0385	1009.0096	10.0926
6	5.5654	6.2907	-0.7171	2113.022	1009.0193	9.1272

选取A、B、C、D这4个平面靶标数据作为控制点，通过坐标转换式以及最小二乘间接平差原理计算出扫描仪坐标系转换至全站仪坐标系下的变换参数，将其余的6个靶标数据作为对比分析点，利用变换参数将其扫描坐标转换至全站仪坐标系下，并与全站仪实测坐标进行对比。

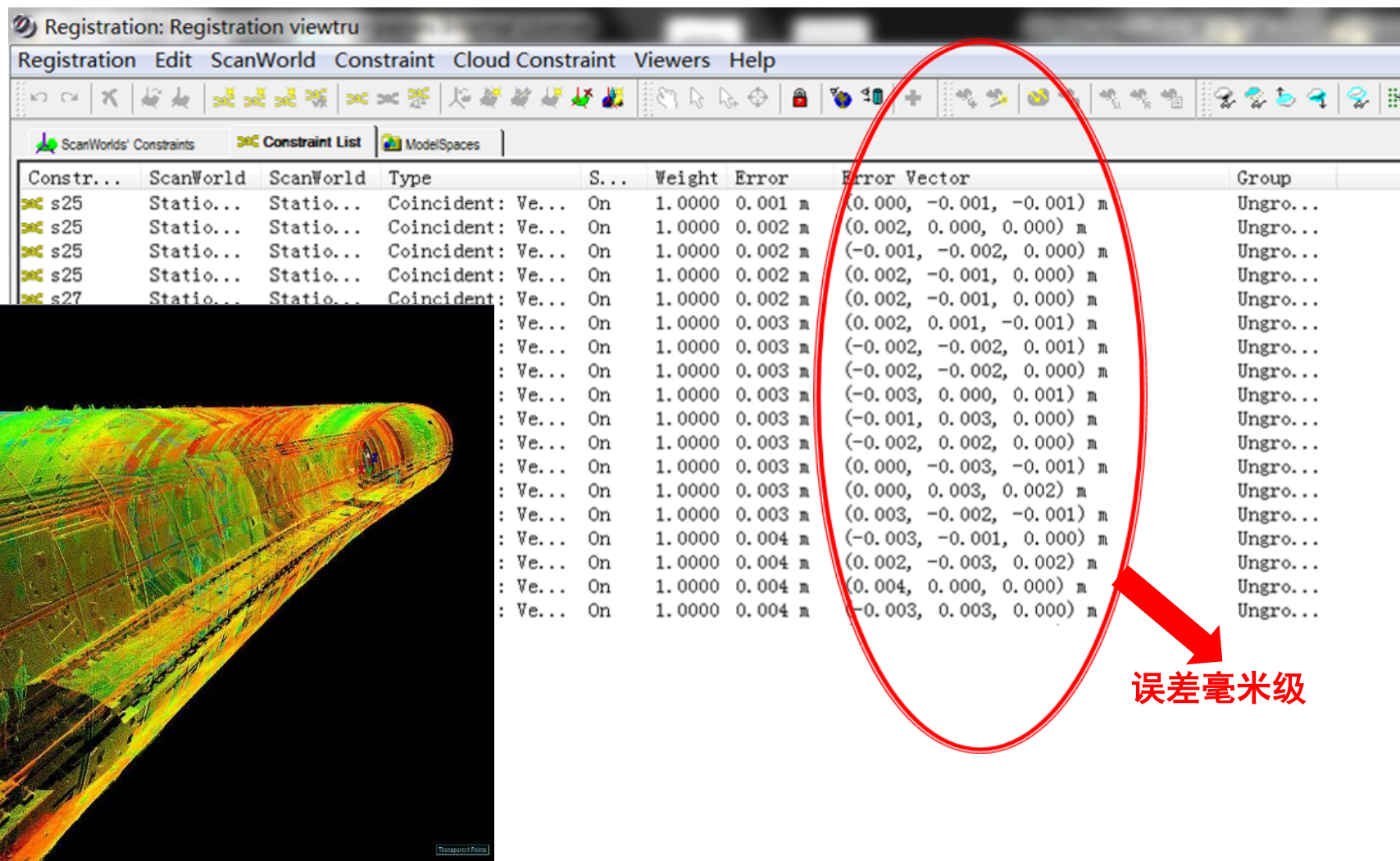
精度分析

转换后靶标的扫描坐标与全站仪实测坐标的差值

点号	转换后的扫描仪坐标/m			误差/m		
	x ¹	y ¹	z ¹			
1	2113.7436	1008.3086	10.0912	0.0028	0.0032	-0.001
2	2113.7468	1008.3036	9.1714	0.0019	-0.0024	0.0001
3	2113.4582	1008.5915	9.9111	0.0040	-0.0026	0.0013
4	2113.4654	1008.5835	9.3947	-0.0027	0.0040	0.0013
5	2113.0384	1009.0083	10.0911	-0.0001	-0.0013	-0.0015
6	2113.0217	1009.0233	9.1274	-0.0003	0.004	0.0002

由上表可以看出，三维激光扫描仪获取的坐标与全站仪测量坐标的差值最大不超过4mm，单站三维激光扫描数据的精度可以达到mm级，具有较高的性能和精度，满足《城市轨道交通工程测量规范》中变形监测Ⅱ级所要求的±3 mm 及±5 mm，Leica P40三维激光扫描仪的测量精度能够满足隧道结构变形监测的要求。

数据预处理



Registration: Registration viewtru

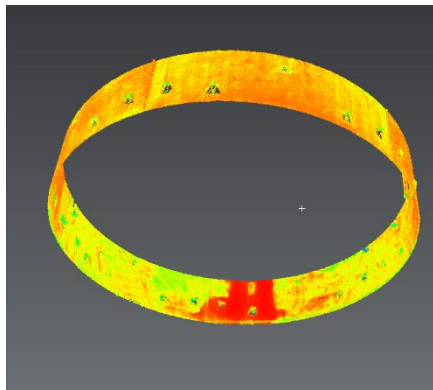
Registration Edit ScanWorld Constraint Cloud Constraint Viewers Help

ScanWorlds' Constraints Constraint List ModelSpaces

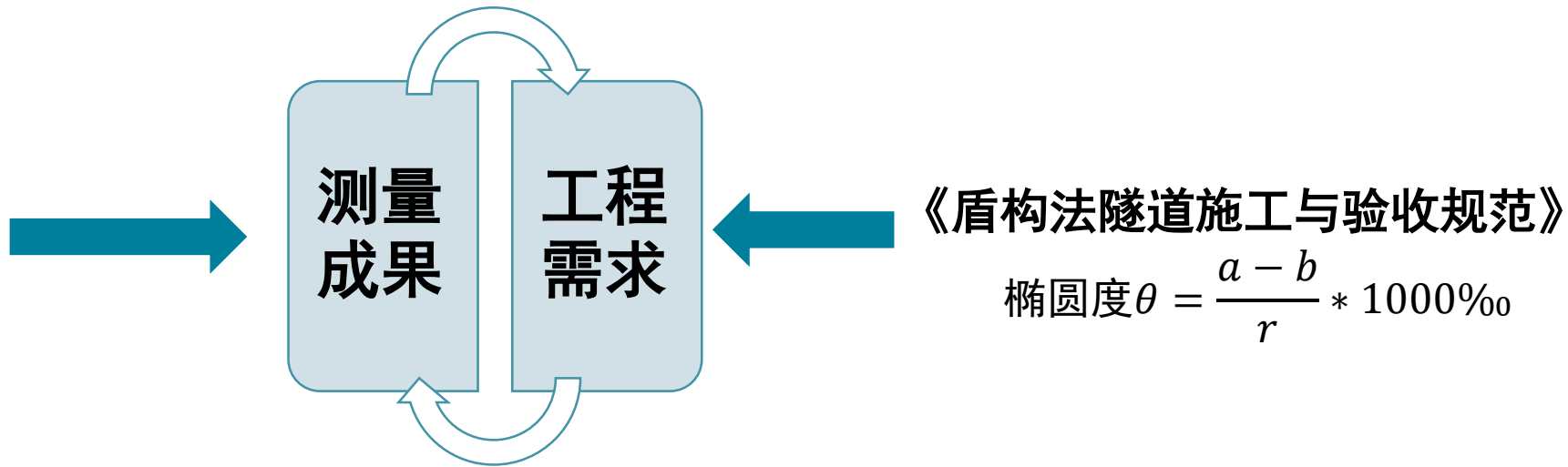
Constr...	ScanWorld	ScanWorld	Type	S...	Weight	Error	Error Vector	Group
s25	Statio...	Statio...	Coincident: Ve...	On	1.0000	0.001 m	(0.000, -0.001, -0.001) m	Ungro...
s25	Statio...	Statio...	Coincident: Ve...	On	1.0000	0.002 m	(0.002, 0.000, 0.000) m	Ungro...
s25	Statio...	Statio...	Coincident: Ve...	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, -0.002, 0.000) m	Ungro...
s25	Statio...	Statio...	Coincident: Ve...	On	1.0000	0.002 m	(0.002, -0.001, 0.000) m	Ungro...
s27	Statio...	Statio...	Coincident: Ve...	On	1.0000	0.002 m	(0.002, -0.001, 0.000) m	Ungro...
				On	1.0000	0.003 m	(0.002, 0.001, -0.001) m	Ungro...
				On	1.0000	0.003 m	(-0.002, -0.002, 0.001) m	Ungro...
				On	1.0000	0.003 m	(-0.002, -0.002, 0.000) m	Ungro...
				On	1.0000	0.003 m	(-0.003, 0.000, 0.001) m	Ungro...
				On	1.0000	0.003 m	(-0.001, 0.003, 0.000) m	Ungro...
				On	1.0000	0.003 m	(-0.002, 0.002, 0.000) m	Ungro...
				On	1.0000	0.003 m	(0.000, -0.003, -0.001) m	Ungro...
				On	1.0000	0.003 m	(0.000, 0.003, 0.002) m	Ungro...
				On	1.0000	0.003 m	(0.003, -0.002, -0.001) m	Ungro...
				On	1.0000	0.004 m	(-0.003, -0.001, 0.000) m	Ungro...
				On	1.0000	0.004 m	(0.002, -0.003, 0.002) m	Ungro...
				On	1.0000	0.004 m	(0.004, 0.000, 0.000) m	Ungro...
				On	1.0000	0.004 m	(-0.003, 0.003, 0.000) m	Ungro...

误差毫米级

断面提取及变形分析



原始隧道点云



管片拼装允许偏差和检验方法

项目	允许偏差 (mm)			检测方法	检查频率
	地铁隧道	公路隧道	水工隧道		
隧道轴线平面位置	±50	±75	±100	用经纬仪测中线	1点/环
隧道轴线高程	±50	±75	±100	用水准仪测中线	1点/环
衬砌环直径椭圆度	±5‰D	±6‰D	±8‰D	尺量后计算	4点/环
相邻管片的径向错台	5	6	8	用尺量	4点/环
相邻环片的径向错台	6	7	9	用尺量	1点/环

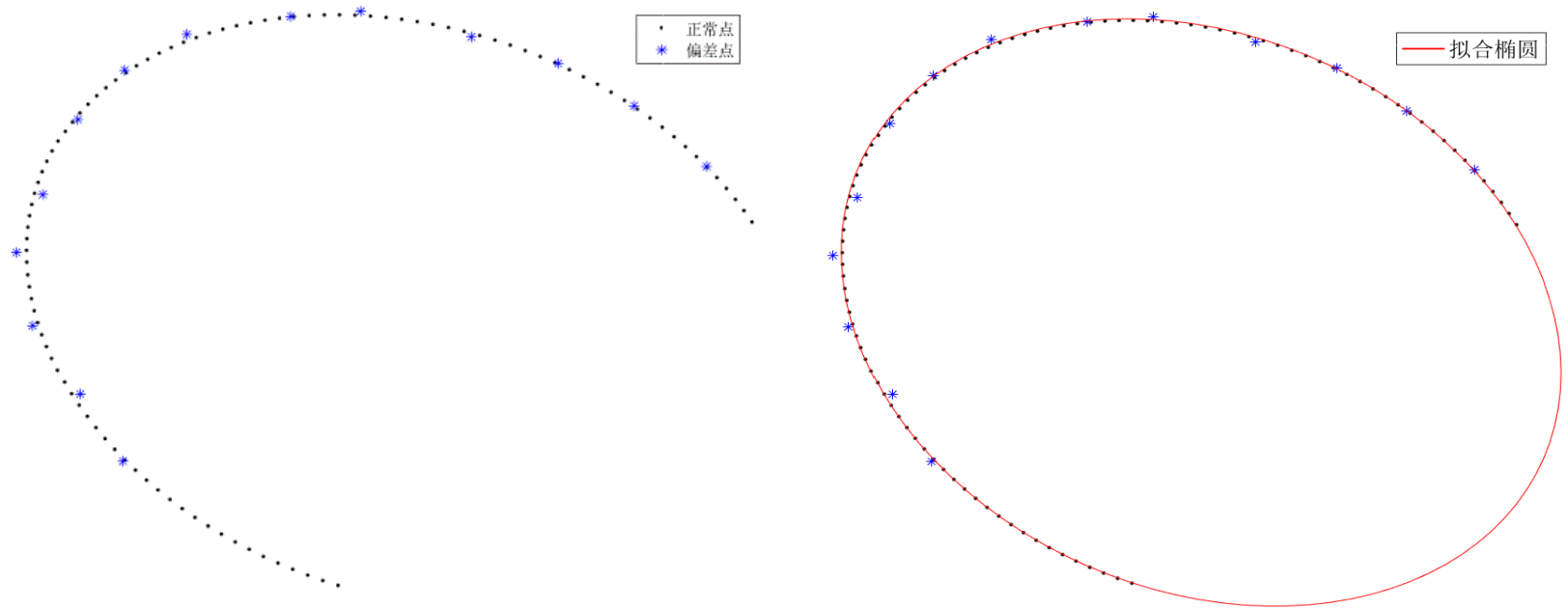
断面提取及变形分析

在实际扫描作业中，由于隧道障碍物遮挡等原因导致断面上并不是每个方向都要激光点云数据；此外，在外部荷载的作用下，设隧道最初由圆形截面随时间逐渐形变为一个离心率很小的椭圆，使用**椭圆拟合**断面轮廓表征隧道随时间的变形过程。

用平面二次曲线的一般方程可表示为：

$$P(m, n) = m \cdot n \\ = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$$

式中： $m = [a, b, c, d, e, f]^T$ ； $n_i = [x_i^2 \quad x_i y_i \quad y_i^2 \quad x_i \quad y_i \quad 1]$



断面原始点分布及椭圆拟合曲线图

断面提取及变形分析

国内对地铁隧道断面变形通常使用椭圆度来评价隧道质量的状况。根据《盾构法隧道施工与验收规范》GB504426-2008隧道断面的椭圆度小于5‰为合格。因此这里采用椭圆度来分析隧道断面变形。椭圆度计算公式：

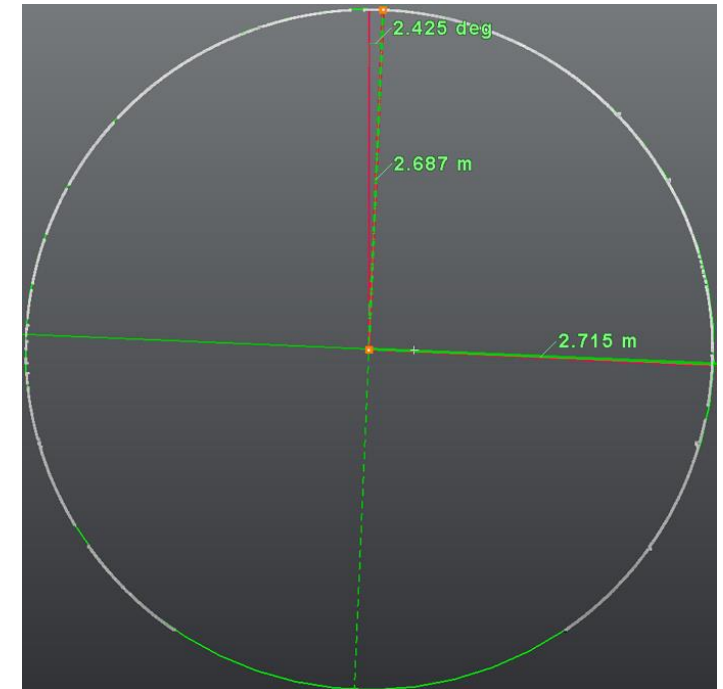
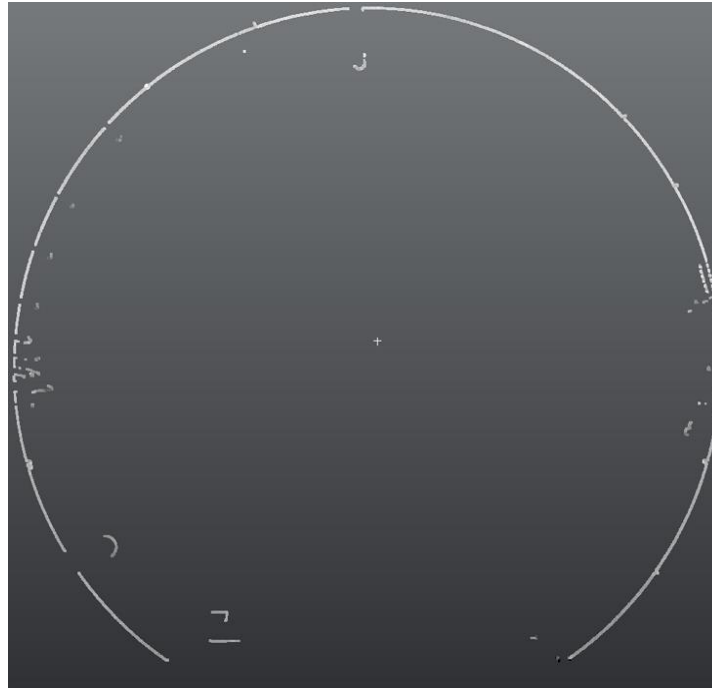
$$\theta = \frac{a - b}{r} * 1000\text{‰}$$

式中：

a — 椭圆的长半轴；

b — 椭圆的短半轴；

r — 标称半径，深圳地铁二号线盾构隧道的设计半径参考值2.70m，其中一个断面的拟合结果如图所示。



实测数据点和断面椭圆曲线图

分析结果

深圳地铁2号线隧道断面椭圆曲线参数

环号	长轴 a(mm)	短轴 b(mm)	偏转角 (度)	椭圆度 (‰D)	环号	长轴 a(mm)	短轴 b(mm)	椭圆度 (度)	椭圆度 (‰D)
1	5426	5385	4.6416	7.592592593	12	5461	5357	3.8504	19.17666667
2	5431	5372	-0.6874	11.01851852	13	5468	5357	6.352	20.46296296
3	5435	5373	-3.0531	11.38888889	14	5463	5348	2.9569	21.42592593
4	5437	5377	2.5058	11.14814815	15	5465	5346	-0.7463	22.12962963
5	5431	5381	4.0065	9.185185185	16	5456	5356	-4.0537	18.53703704
6	5432	5374	2.1527	10.77777778	17	5446	5360	2.4692	15.98148148
7	5430	5374	3.925	10.37037037	18	5443	5365	-0.1665	14.46296296
8	5443	5378	7.2939	11.94444444	19	5441	5363	5.5788	14.31481481
9	5458	5386	10.878	13.18518519	20	5440	5366	3.5377	13.64814815
10	5459	5377	7.5178	15.12962963	21	5442	5365	-0.3613	14.14814815
11	5456	5361	5.736	17.75925926	22	5446	5376	-5.0615	13

1、由表可以看到计算得到的22个断面中椭圆度最大为22.12962963，根据《盾构法隧道施工与验收规范》给出了地铁隧道的椭圆度限值： $\pm 5\% D$ 。结果表明，实验区段隧道断面椭圆度在 $5\% D$ 和 $25\% D$ 之间，说明区间内隧道整体变形较大。

2、分析结果表明，三维激光扫描仪的测量精度能够满足隧道结构变形监测的要求，可以准确、快速获取隧道空间数据，提高了作业效率。采用三维激光扫描技术进行变形监测，得到的结果与传统变形监测基本一致。同时，结合传统的监测手段，从局部和整体来进行变形监测分析可以取得更好的监测效果。

3、工程实例

我司自2016年引入Leica P40三维激光扫描仪以来，承接了很多在建和已运营地铁隧道自动化监测和隧道管片灾害防护项目，其中包括我们自己的自动化监测项目，也包括外单位委托项目，右表列举了其中一些项目。

三维激光扫描监测项目

项目	时间	工作内容	标准
深圳市地铁1号线鲤鱼门区间加固工程	2017	为隧道管片加固钢环提供参考数据	管片净空值（5470mm）和椭圆度
前海19-08-01号地块公共空间-冷站基坑支护工程	2018	竣工隧道采集初始值	盾构法隧道施工与验收规范 椭圆度
国际会展中心配套市政工程	2016	自动化监测配套施工项目	椭圆度
地铁10号线下穿4号线福福区间施工影响段	2018	配合地铁下穿项目实时监测	多期数据变化量和自动化监测数据
11号线后海红树湾南区区间抢险	2017	检测被击穿前后100m区域隧道管片变形情况	四方向净空测量值（与设计值对比）和椭圆度
基坑监测-桂湾四路-通道1工程基坑施工影响段	2017	基坑施工对周边隧道管片影响	管片净空值（5470mm）和椭圆度

3、工程实例

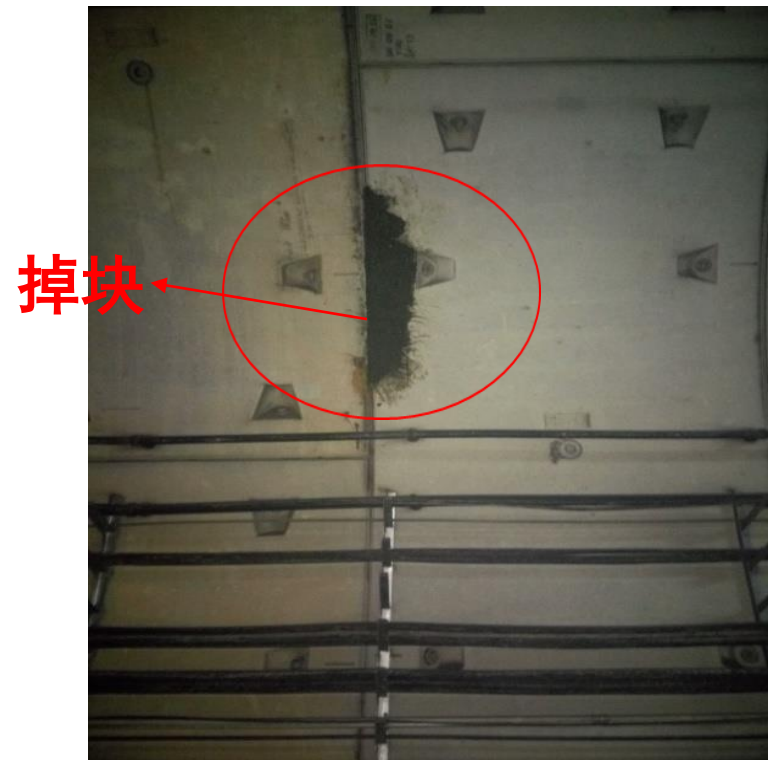
深圳地铁1号线前海湾鲤鱼门区间加固工程



扫描起因:

1、隧道第三方监测距离基坑较远的左线管片约3环径向位移超过7CM且拱顶有裂缝，以及相邻区段约15环的径向位移超过6CM，而距离基坑较近的右线径向位移基本上在合理范围内，后期配合运营对左线病害区段检查后发现该区段部分管片有不同程度的渗水、裂缝和错台等病害现象。

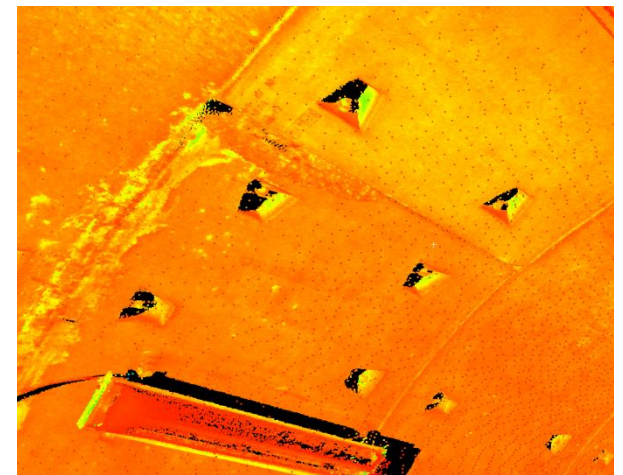
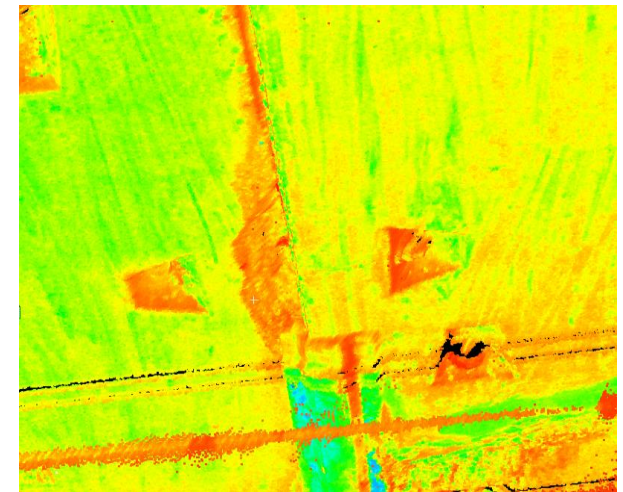
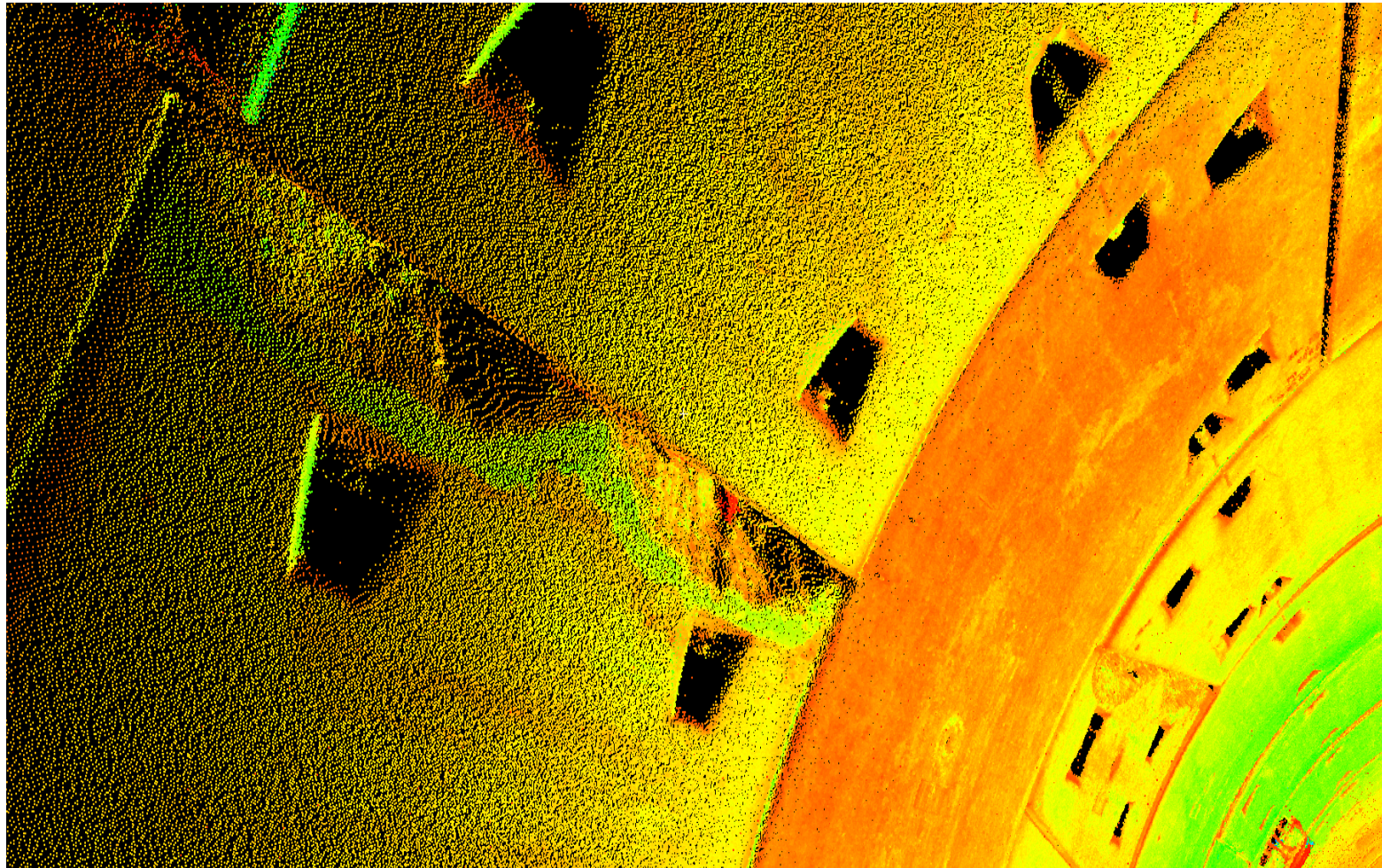
2、第一次三维扫描数据处理结果显示基坑影响段隧道部分管片的水平净空值超过5470mm，且椭圆度平均值为19.7‰，说明该区域整体变形较大。



扫描目的：复核隧道管片结构椭圆度偏差是否在合理范围内,以便于判断管片结构的完好程度以及后续隧道的抗变形能力。

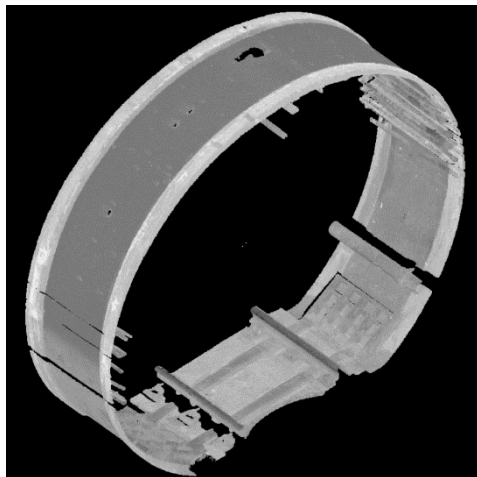
3、工程实例

深圳地铁1号线前海湾鲤鱼门区间加固工程



3、工程实例

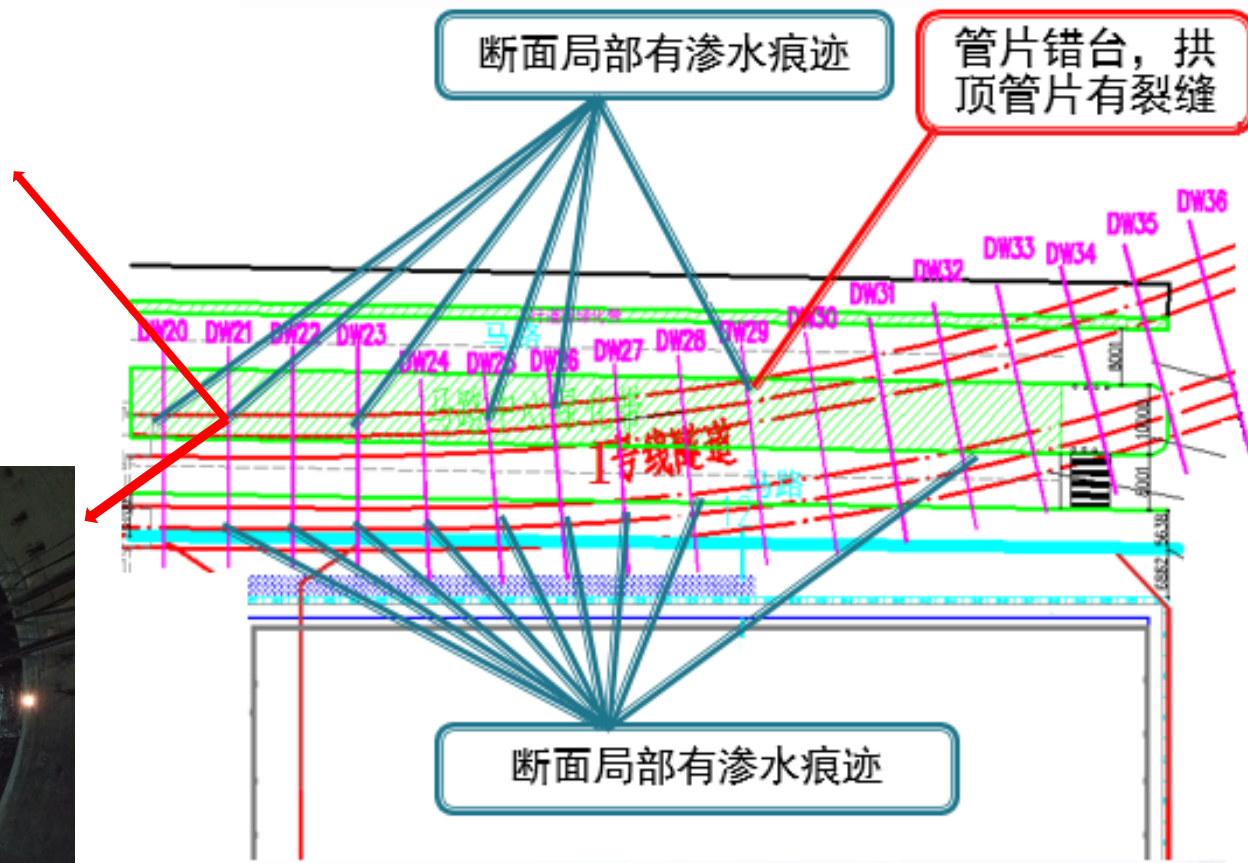
深圳地铁1号线前海湾鲤鱼门区间加固工程



加固刚环后单环点云图



加固后现场图



对比加固前后两次扫描结果发现：

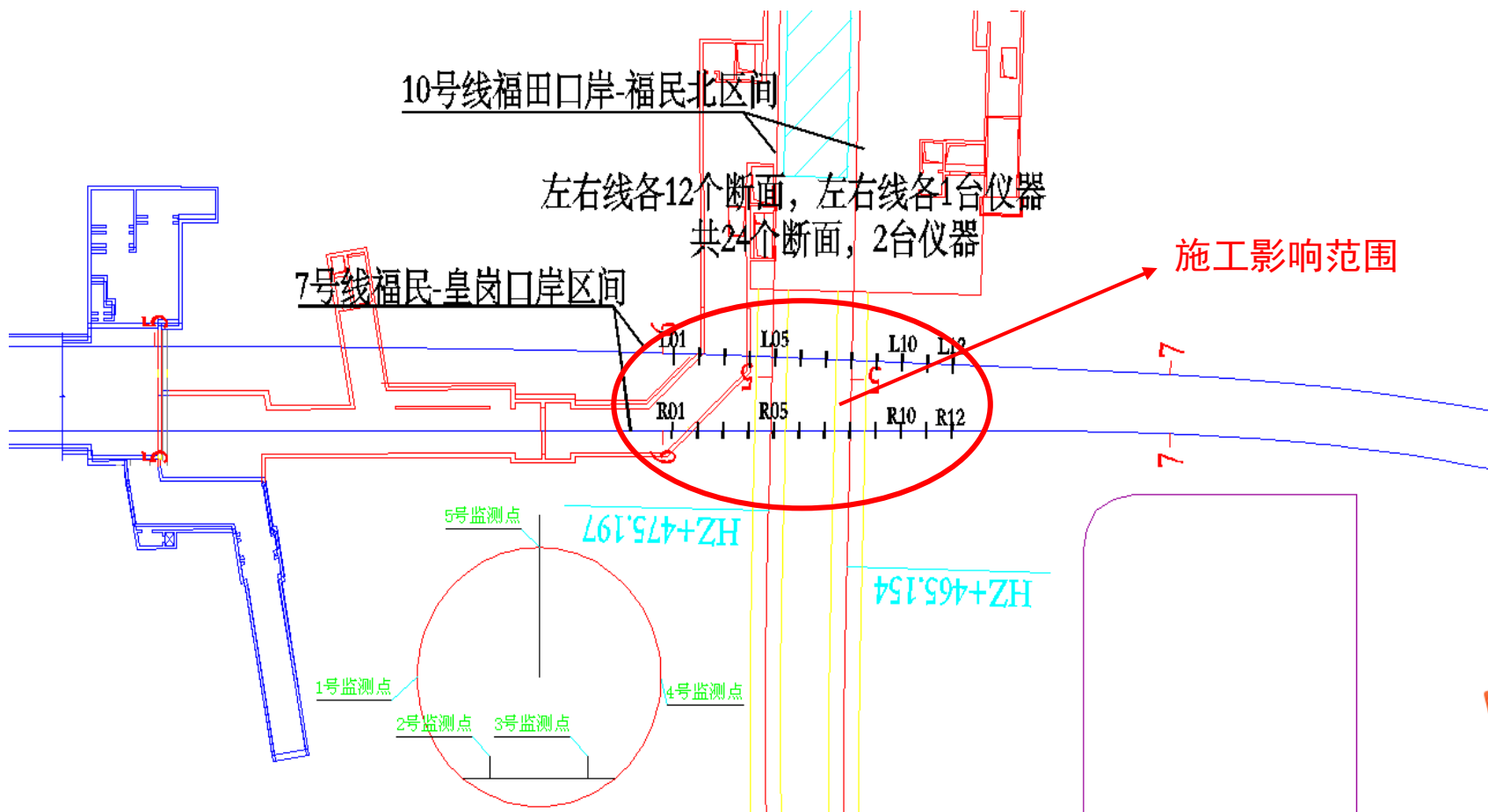
1、钢环加固后左、右线断面水平净空直径最大宽度的平均值分别为5410.03mm和5402.82mm，并未发现水平净空值超过5470mm的环号。

2、钢环加固后左、右线椭圆度平均值分别为7.96‰和6.85‰，说明加固钢环后，病害管片结构未发生较大变形，处于比较稳定状态。

3、工程实例

地铁7号线福民皇岗口岸区间受10号线福田口岸福民区间隧道施工影响段

地铁7号线福民-皇岗口岸区间监测断面分布图



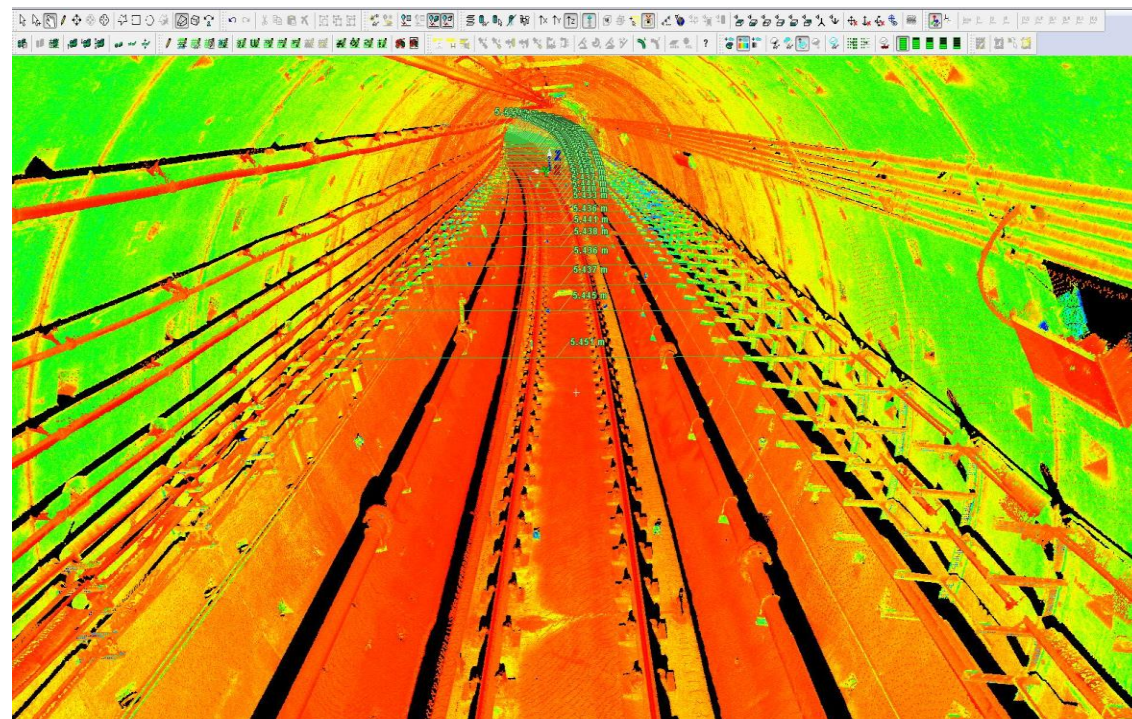
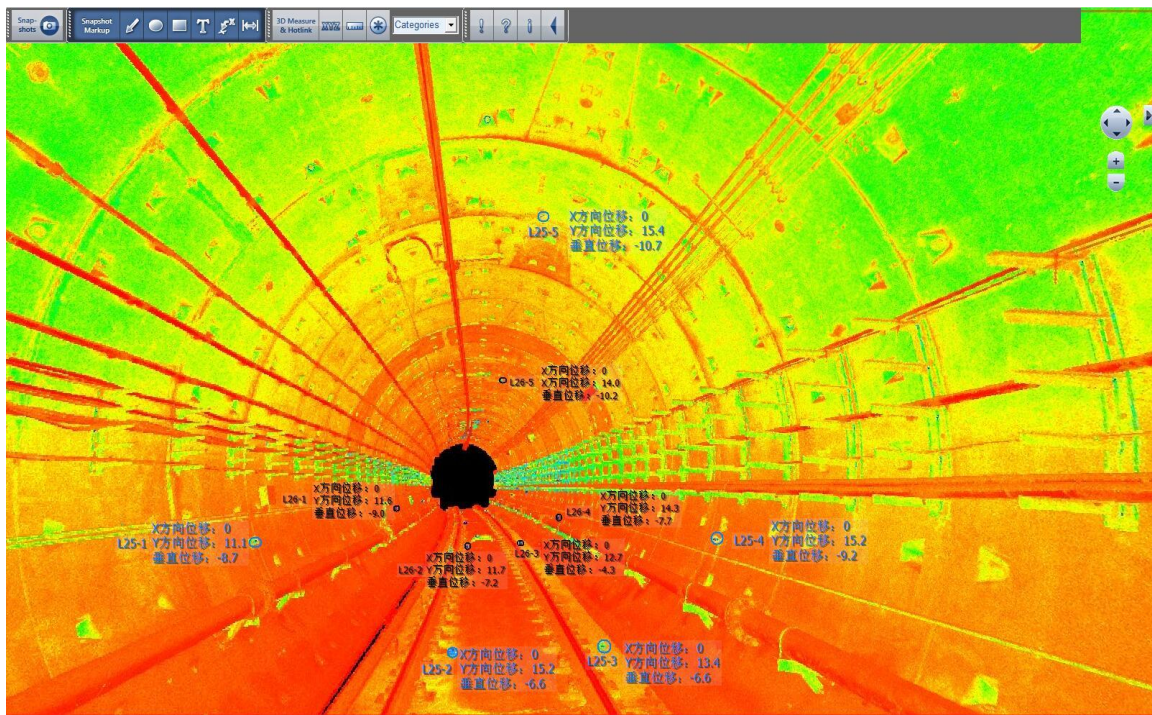
扫描起因:

隧道上跨或下穿均会对邻近隧道管片结构产生影响。以自动化监测为主，三维激光扫描为辅，全方位了解地铁10号线上跨7号线福民皇岗口岸区间影响段时，隧道管片整体变形情况，为上跨能顺利进行提供有效的建议。

扫描目的：通过对比上跨期间多期断面扫描数据在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 、 90° 方向、 $45^{\circ}\sim 225^{\circ}$ 和 $135^{\circ}\sim 315^{\circ}$ 这四个方向上的本次变化量和累计变化量，结合实时自动化监测数据，了解管片结构变形情况，指导现场施工作业。

3、工程实例

地铁7号线福民皇岗口岸区间受10号线福田口岸福民区间隧道施工影响段



3、工程实例

地铁7号线福民皇岗口岸区间受10号线福田口岸福民区间隧道施工影响段

7号线福皇区间左线断面净空直径统计表

环号	2018/05/17			90°方向 半径值 (m)	椭圆度 (%D)	90°方向本 次变化量 (mm)	90°方向累 计变化量 (mm)	椭圆度本 次变化量 (%D)	椭圆度累 计变化量 (%D)
	测量值 (mm)								
	0°-180°	45°-225°	135°-315°						
79	5410	5404	5403	2.7000	1.87	0.2	5	0.11	-0.22
80	5415	5404	5402	2.7004	2.65	0.9	6.36	0.04	-1.02
81	5411	5409	5408	2.7028	1.00	1	6.36	-0.19	-1.09
82	5420	5405	5405	2.6992	4.00	0.7	3.2	0.11	0.29
83	5411	5399	5404	2.6963	3.43	1.1	6.24	-0.22	-0.24
84	5413	5402	5404	2.6995	2.59	1	5.11	-0.37	-1.11
85	5405	5406	5402	2.6960	2.43	1.1	5.73	-0.41	0.71
86	5407	5403	5407	2.6982	1.96	1.2	5.43	-0.26	0.42
87	5420	5410	5408	2.7014	3.19	0.8	5.4	-0.11	0.04
88	5412	5407	5409	2.6961	3.69	1	2.21	-0.37	0.49
89	5409	5408	5403	2.6972	2.70	0.5	3.59	-0.19	0.24
90	5403	5406	5400	2.6921	3.48	0.4	6.48	-0.33	0.55
91	5407	5407	5407	2.6949	3.19	-0.2	1.7	0.07	1.47
92	5412	5406	5410	2.6966	3.48	0.4	7.59	0.04	1.29
93	5408	5408	5409	2.6988	1.93	0.5	4.41	0.00	-1.03
94	5407	5402	5405	2.6929	3.94	0.8	7.66	-0.30	1.38
95	5415	5400	5404	2.7002	2.70	0.7	7.58	-0.07	-0.26
96	5406	5400	5408	2.6967	2.35	0.9	3.88	-0.33	-0.02

(1) 隧道盾构区间ZDK18+526~ ZDK18+581和YDK18+525~ YDK18+580中未有超过隧道限界5470mm的环号。

(2) 对比七次扫描椭圆度结果，左线ZDK18+526~ ZDK18+581各环椭圆度平均累计变换量为+0.12‰；右线YDK18+525~ YDK18+580各环椭圆度平均累计变换量为+0.16‰，左、右线扫描范围内各环片压缩变形不大。

(3) 上跨期间，现场巡查并无渗漏水 and 管片破损现象。

(4) 上跨影响段内，各断面自动化监测数据稳定，并无明显异常出现。

4、结论

四十多次的工程实例证明，三维扫描仪系统作业简单、测量效率高、扫描细节丰富、测量精度高，无论是新线的竣工验收、上跨或下穿隧道对邻近运营隧道的影响还有地铁安保区内建筑施工对运营地铁的影响都有很好的应用。

—— 谢 谢 ——

