



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104567708 B

(45)授权公告日 2018.03.16

(21)申请号 201510005918.X

(22)申请日 2015.01.06

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104567708 A

(43)申请公布日 2015.04.29

(73)专利权人 浙江工业大学
地址 310014 浙江省杭州市下城区潮王路
18号

(72)发明人 汤一平 陈麒 胡克钢 周伟敏
吴挺 鲁少辉 韩旺明 王伟羊
韩国栋

(74)专利代理机构 杭州天勤知识产权代理有限
公司 33224
代理人 胡红娟

(51)Int.Cl.
G01B 11/16(2006.01)

(56)对比文件

CN 101408410 A,2009.04.15,
CN 101943577 A,2011.01.12,
CN 102564335 A,2012.07.11,
CN 102679959 A,2012.09.19,
CN 103438823 A,2013.12.11,
CN 103852025 A,2014.06.11,
CN 202782968 U,2013.03.13,
DE 19513116 A1,1996.10.10,
谢雄耀等.基于地面三维激光扫描技术的隧
道全断面变形测量方法.《岩石力学与工程学
报》.2013,第32卷(第11期),第2214-2224页.
徐海涛等.基于ASODVS的全景点云数据获取
技术的研究.《计算机测量与控制》.2014,第22卷
(第7期),第2284-2287页.

审查员 祝慧宇

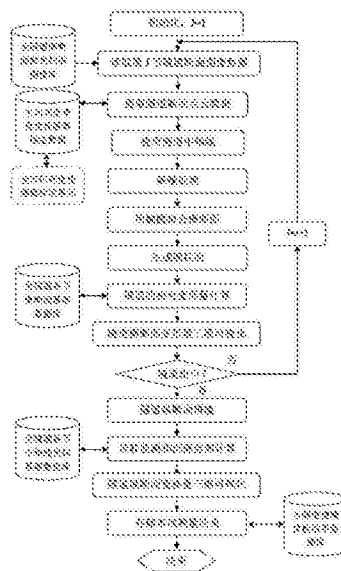
权利要求书5页 说明书15页 附图8页

(54)发明名称

基于主动式全景视觉的隧道全断面高速动
态健康检测装置与方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于主动式全景视觉的
隧道全断面高速动态健康检测装置,其硬件包
括:隧道检测车、主动式全景视觉传感器、RFID读
取器和处理器;系统软件包括:全方位激光信
息解析及点云数据获取单元、隧道中轴线提取
单元、降噪及平差处理单元、三维建模及变形
分析单元、全隧道各节横断面基准数据库、全
隧道纵断面拼接单元、位移监测和沉降监测
单元、全隧道健康体检结果数据库和隧道纵
断面变形量三维可视化单元;通过对隧道内
壁激光扫描断面切片图像进行机器视觉处理
分析和识别隧道的横向和纵向形变。本发
明还提供了一种基于主动式全景视觉的隧
道全断面高速动态健康检测方法,为地铁和
高铁的隧道日常维护提供了有效的技术支
撑。



CN 104567708 B

1. 一种基于主动式全景视觉的隧道全断面高速动态健康检测装置,包括隧道检测车和处理器,其特征在于,所述的隧道检测车包括在隧道轨道上行走的检测车本体,安装在检测车本体上的主动式全景视觉传感器、RFID读取器和测距轮;

所述的主动式全景视觉传感器包括同轴固定的全景激光投射光源和全方位视觉传感器,所述的全景激光投射光源用于为隧道内壁提供隧道断截面全景扫描光,所述的全方位视觉传感器用于采集隧道内壁的全景图像;

所述的全景激光投射光源包括底座,固定在底座上的圆圈形激光发射器,和用于反射圆圈形激光发射器发射出来的圆圈激光为隧道内壁提供隧道断截面全景扫描光的圆锥形镜面;

所述的RFID读取器,用于读取固定在隧道内壁上RFID内存储的隧道基准数据;

所述的测距轮,用于计算隧道检测车的行走距离;

所述的处理器,用于从所述的全景图像中解析出隧道横断面上的三维点云数据,并结合隧道检测车的行走距离重构出全隧道内壁三维模型,再将构建的全隧道内壁三维模型与初始的全隧道内壁三维模型进行对比,分析隧道形变量;

所述的处理器包括:

全方位视觉传感器标定单元,用于确定三维空间点和摄像机成像平面上的二维图像点之间映射关系的参数;

第J节隧道断面图像数据读取单元,用于将全隧道横断面激光扫描图像分段按顺序读取并进行分析;

全方位面激光信息解析及点云数据获取单元,用于对J节内所有的移动距离 Z_i 的隧道横断面激光扫描图像进行处理,得到隧道内壁边缘点云数据;

隧道中轴线提取单元,用于根据隧道轴线绘制隧道纵向变形图,以便进行三维建模;

降噪及平差处理单元,用于进一步对所述的隧道轴线提取模块处理得到的隧道点云数据进行降噪及平差处理;

三维建模及变形分析单元,用于隧道变形可视化处理;

全隧道纵断面拼接单元,用于将全隧道的分段三维重构结果进行拼接;

位移监测和沉降监测单元,用于对隧道的整体位移和沉降有量化的度量;

隧道纵断面变移量三维可视化单元,用于对隧道的整体位移和沉降有量化的且可视化的表达。

2. 一种基于权利要求1所述的隧道全断面高速动态健康检测装置的隧道全断面高速动态健康检测方法,其特征在于,包括步骤:

1) 控制隧道检测车在隧道轨道上行走,采用全景激光投射光源为隧道内壁提供隧道断截面全景扫描光,并通过全方位视觉传感器采集隧道横断面激光扫描图像,同时利用RFID读取器读取固定在隧道内壁上RFID内存储的隧道基准数据;

2) 估算出隧道检测车的行车距离,并将隧道横断面激光扫描图像与行车距离关联储存;

3) 从隧道横断面激光扫描图像中解析出隧道横断面上全景激光投射点的空间坐标位置值,即隧道横断面上的三维点云数据;

4) 根据所述的行车距离和对应的三维点云数据,重构出全隧道内壁三维模型;

5) 将构建的全隧道内壁三维模型与最初构建的全隧道内壁三维模型进行对比, 分析隧道形变量。

3. 如权利要求2所述的隧道全断面高速动态健康检测方法, 其特征在于, 将全隧道分为若干节, 用 $h(j)$ 作为节的变量, $h(j)$ 与隧道检测车沿隧道纵向方向上的移动距离 Z_i 之间的关系用公式(16)表示,

$$h(j) = \text{INT}(Z_i/10) + 1 \quad (16)$$

在选取了某一节 $h(j)$ 后, 根据公式(16)得到该节中所包含的移动距离 Z_i , 然后以该节中所有的移动距离 Z_i 作为文件名从所述的全隧道横断面激光扫描图像库中读取隧道横断面激光扫描图像。

4. 如权利要求3所述的隧道全断面高速动态健康检测方法, 其特征在于, 用于对 $h(j)$ 节内所有的移动距离 Z_i 的隧道横断面激光扫描图像进行处理, 得到隧道内壁边缘点云数据; 具体实现算法是:

Step1: 设置初始方位角 $\beta=0$;

Step2: 在激光扫描全景图像上以方位角 β 从激光扫描全景图像的中心点开始检索激光投射点, 对于方位角 β 上存在着若干个连续的激光投射的像素, 选择HIS颜色空间中的I分量, 即亮度值接近最高值的三个连续像素通过高斯近似方法来估算激光投射线的中心位置; 具体计算方法由公式(7)给出,

$$d = \frac{\ln(f(i-1)) - \ln(f(i+1))}{2 \times [\ln(f(i-1)) - 2\ln(f(i)) + \ln(f(i+1))]} \quad (7)$$

式中, $f(i-1)$ 、 $f(i)$ 和 $f(i+1)$ 分别为三个相邻像素接近最高亮度值的亮度值, d 为修正值, i 表示从图像中心点开始的第 i 个像素点; 因此估算得到的激光投射线的中心位置为 $(i+d)$;

Step3: 计算出该激光投射点的入射角 α_β , 并根据隧道检测车沿隧道纵向方向上的移动距离 Z_i , 计算出隧道检测车沿隧道纵向方向上的移动距离 Z_i 和方位角 $\beta' = \beta$ 情况下在隧道内壁上的激光投射点到主动式全景视觉传感器的中心轴线之间的距离 $d_{(z,\beta)}$; 最后用公式(8)计算该激光投射点的空间坐标位置值;

$$\begin{cases} z = Z_i - H \\ y = d_{(z,\beta)} \times \sin \beta \\ x = d_{(z,\beta)} \times \cos \beta \end{cases} \quad (8)$$

式中, Z_i 为隧道检测车沿隧道纵向方向上的移动距离, H 全景扫描光线到全方位视觉传感器的单视点 O_m 的直线距离, $d_{(z,\beta)}$ 为沿隧道纵向方向上的位置 Z_i 和方位角 $\beta' = \beta$ 情况下在隧道内壁上的激光投射点到主动式全景视觉传感器的中心轴线之间的距离, x, y, z 分别为激光投射点相对于以全方位视觉传感器的单视点 O_m 的坐标值, β 为方位角;

Step4: 改变方位角继续检索激光投射点, 即 $\beta = \beta + \Delta\beta$, $\Delta\beta = 1$;

Step5: 判断方位角 $\beta = 360$, 如果成立, 检索结束; 反之转到Step2。

5. 如权利要求4所述的隧道全断面高速动态健康检测方法, 其特征在于, 在构建三维模型时, 根据隧道轴线绘制隧道纵向变形图, 提取轴线的方法是对分割后的隧道点云进行圆柱面拟合, 圆柱面拟合算法的步骤如下:

STEP1: 读取全方位面激光信息解析及点云数据获取单元处理后得到的沿隧道轴线方向连续的若干个截面的点云数据, 形成三维坐标矩阵 $P = (X, Y, Z)$;

STEP2: 选取有代表性的点云, 形成三维坐标矩阵 $P^{(1)} = (X^{(1)}, Y^{(1)}, Z^{(1)})$;

STEP3: 以 $\mathbf{u}^{(0)} = (X^{(1)}, Y^{(1)}, \pi, 0)$ 为初始值, 根据公式 (9)、(10)、(11) 进行求解得到 $\mathbf{u}^{(1)} = (u_1^{(1)}, u_2^{(1)}, u_3^{(1)}, u_4^{(1)})$;

$$\min f(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^n (e_i - R_{(h(i), \beta)})^2 \quad (9)$$

式中, $R_{(h(i), \beta)}$ 为拟合圆柱面的半径, e_i 为隧道内壁边缘点云到中轴线间的距离;

$$\text{约束条件} \begin{cases} g_1(\mathbf{u}) = \mathbf{u} - \{\min(x_i), \min(y_i), 0, -\frac{\pi}{2}\}^T \geq 0 \\ g_2(\mathbf{u}) = \{\max(x_i), \max(y_i), 0, \frac{\pi}{2}\}^T - \mathbf{u} \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\mathbf{u} = (x_0, y_0, \lambda, \phi)^T \quad (11)$$

式中, x_0, y_0 为待求隧道中轴线上一个固定点上的 X 坐标和 Y 坐标值, λ 为待求隧道中轴线在 XOZ 平面的投影线与 Z 轴之间的夹角, ϕ 为待求隧道中轴线与 XOZ 平面之间的夹角;

STEP4: 适当增加点云数据, 形成三维坐标矩阵 $P^{(2)} = (X^{(2)}, Y^{(2)}, Z^{(2)})$;

STEP5: 以 $\mathbf{u}^{(1)} = (u_1^{(1)}, u_2^{(1)}, u_3^{(1)}, u_4^{(1)})$ 为初始值, 根据公式 (9)、(10)、(11) 进行求解得到 $\mathbf{u}^{(2)} = (u_1^{(2)}, u_2^{(2)}, u_3^{(2)}, u_4^{(2)})$;

STEP6: 令:

$$P_i = (X^{(2)}, Y^{(2)}, Z^{(2)}),$$

$$\mathbf{c} = (u_1^{(2)}, u_2^{(2)}, \overline{Z^{(2)}}),$$

$$\vec{a} = (\cos u_3^{(2)} \cos u_4^{(2)}, \sin u_3^{(2)} \cos u_4^{(2)}, \sin u_4^{(2)})^T,$$

利用公式 (12) 计算 e_i ;

$$e_i = \|(p_i - c) \times \vec{a}\| \quad (12)$$

式中: $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ 为原始点云中任意一个测量点坐标, $c = (x_0, y_0, z_0)$ 为圆柱面轴线上一个固定点坐标, $\vec{a} = (\cos \lambda \cos \phi, \sin \lambda \cos \phi, \sin \phi)^T$ 为圆柱面的轴线方向单位向量;

STEP7: 删除 e_i 大于某个临界值的点, 形成三维坐标矩阵 $P^{(3)} = (X^{(3)}, Y^{(3)}, Z^{(3)})$;

STEP8: 以 $\mathbf{u}^{(2)} = (u_1^{(2)}, u_2^{(2)}, u_3^{(2)}, u_4^{(2)})$ 为初始值, 根据公式 (9)、(10)、(11) 进行求解得到 $\mathbf{u}^{(3)} = (u_1^{(3)}, u_2^{(3)}, u_3^{(3)}, u_4^{(3)})$;

STEP9: 计算圆柱面轴线上一个固定点的坐标和轴线的方向向量:

$$\mathbf{c} = (u_1^{(3)}, u_2^{(3)}, \overline{Z^{(3)}}), \vec{a} = (\cos u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_4^{(3)})^T;$$

上述计算中, 圆柱面轴线就是隧道中轴线, $u_1^{(i)}$ 为隧道中轴线上对应于 X 坐标在中轴线提取过程中的逼近值, $u_2^{(i)}$ 为隧道中轴线上对应于 Y 坐标在中轴线提取过程中的逼近值, $u_3^{(i)}$ 为隧道中轴线在 XOZ 平面的投影线与 Z 轴之间的夹角 λ 在中轴线的逼近值, $u_4^{(i)}$ 为隧道中轴线与 XOZ 平面之间的夹角 ϕ 在中轴线的逼近值, i 为中轴线提取过程中的逼近计算的次数。

6. 如权利要求5所述的隧道全断面高速动态健康检测方法,其特征在于,在步骤5)中,隧道中相同位置上的形变量的算法如下:

STEP1: 导入用柱坐标系表示的三维点云坐标矩阵 $P^* = (Z^{(cs2)}, \beta^*, \rho^*)$, 初始化处理, $j = 1$;

STEP2: 读取第j节三维点云数据,采用椭圆拟合算法EFA,将二维的隧道轮廓线点云拟合成椭圆:

$$(\beta^e, \rho^e) = \text{EFA}(\beta^*, \rho^*) \quad (14)$$

STEP3: 以 (β^e, ρ^e) 为准线,平行Z轴的线段为母线,生成长度为 $h(j)$ 的椭圆柱面, $h(j) = 1000\text{mm}$:

$$\begin{cases} EX^{(cs2)} = \rho^e \cos \beta^e \\ EY^{(cs2)} = \rho^e \sin \beta^e \\ EZ^{(cs2)} = \{z | z \in [0, h(j)]\} \end{cases} \quad (15)$$

STEP4: 把椭圆柱面各点的径向位移 $\rho^e - R_{(h(j), \beta)}$ 作为变形量,生成三维的径向位移云图;其中, ρ^e 用公式(14)计算得到, $R_{(h(j), \beta)}$ 为首次测量的全隧道横断面时用公式(14)计算得到的,在计算 $\rho^e - R_{(h(j), \beta)}$ 时以 $h(j)$ 和方位角 β 作为索引得到 $R_{(h(j), \beta)}$;对RGB颜色空间来讲,将GB颜色分量设置为零,R分量从0~255对径向位移正形变数据进行映射,对应于0~10mm的正形变;将RG颜色分量设置为零,G分量从0~255对径向位移负形变数据进行映射,对应于0~-10mm的负形变。

7. 如权利要求6所述的隧道全断面高速动态健康检测方法,其特征在于,将全隧道的分段三维重构结果进行拼接;由于全隧道变形监测时将整个隧道分割成了若干个节,每个节的长度为 $h(j)$;在隧道轴线提取单元处理中得到了第j节隧道的中心坐标 $c = (u_1^{(3)}, u_2^{(3)}, \overline{Z^{(3)}})$,即隧道的中轴线上的某一点和方向向量 $\vec{a} = (\cos u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_4^{(3)})^T$;针对隧道的狭长结构特点,用第j节隧道的中心坐标和法向量估算第j+1节隧道的中心坐标,然后用第j+1节隧道的中心坐标和法向量估算第j+2节隧道的中心坐标,以此类推完成全隧道的中轴线的拼接。

8. 如权利要求7所述的隧道全断面高速动态健康检测方法,其特征在于,所述的方法还包括对隧道的整体位移和沉降有量化的度量;作为隧道的整体位移和沉降主要反映在隧道的中心轴线移位变形上,根据在隧道轴线提取单元处理中得到了第j节隧道的中心坐标和方向向量 $\vec{a} = (\cos u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_4^{(3)})^T$;用第j节隧道的中心坐标和法向量估算第j+1节隧道的中心坐标,然后用第j+1节隧道的中心坐标和法向量估算第j+2节隧道的中心坐标,依次计算得到了本次全隧道中轴线的各坐标值 $P'_{h(j)}(x', y', z')$;位移监测主要反映在X轴方向,沉降监测主要反映在Y轴方向;用第j节隧道的中心坐标的基准值 $P_{h(j)}(x, y, z)$ 中的 x 与本次测量获得的第j节隧道的

中心坐标 $P'_{h(j)}(x', y', z')$ 中的 x' 比较,得到 $\Delta x_{h(j)} = x' - x$, $\Delta x_{h(j)}$ 就是第j节隧道的位移偏移量;用第j节隧道的中心坐标的基准值 $P_{h(j)}(x, y, z)$ 中的 y 与本次测量获得的第j节隧道的中心坐标 $P'_{h(j)}(x', y', z')$ 中的 y' 比较,得到 $\Delta y_{h(j)} = y' - y$, $\Delta y_{h(j)}$ 就是第j节隧道的沉降偏移量;通过上述计算得到全隧道中心轴线上每个节的移位变形;最后将每个节的移位变形 $\Delta x_{h(j)}$ 和 $\Delta y_{h(j)}$ 保存在检测数据库中;通过上述计算得到的是隧道纵断面的相对位移

和沉降数据量。

基于主动式全景视觉的隧道全断面高速动态健康检测装置与方法

技术领域

[0001] 本发明涉及全景激光光源、全方位视觉传感器、数字图像处理、三维重构技术以及计算机视觉技术在隧道的自动检测和三维建模方面的应用,尤其涉及一种基于主动式全景视觉的隧道全断面高速动态健康检测装置与方法,主要应用于地铁和高铁隧道运营期间的自动健康监测。

背景技术

[0002] 地铁和高铁隧道的健康监测可分为两个阶段:施工阶段和运营阶段。在铁路隧道的运营过程中,隧道的安全问题主要受到以下几个方面的影响:一是列车运营过程中长期振动荷载引起的道床整体沉降;二是由于大多数长大隧道处于复杂的地质条件中,列车荷载引起的线路沿轴线方向的不均匀沉降;最后就是隧道周边建筑物的影响。而这些影响会造成隧道轮廓的开裂,变形,漏水甚至脱落等一系列安全问题。

[0003] 目前,国内外针对隧道施工阶段的监测技术已比较成熟,但是对隧道运营期间的监测重视程度远远不够。事实上,运营阶段因时间跨度大、影响因素复杂、灾害社会影响大,对地铁和高铁隧道的健康监测更应该得到充分的重视。隧道轮廓的检测能方便的掌握隧道净空,监测隧道的变形,因此隧道结构检测在铁路运输过程中占有重要的地位。

[0004] 在隧道的运维阶段,为了不影响线路运营,只能利用“开天窗”时间,而“开天窗”时间是一定的,这就需要快速地进行检测,传统的点站式测量断面变形的的方式显然不能满足要求。根据高铁和城市地铁发展的需求,对隧道全断面进行高速动态健康监测,并要求监测过程能与列车运行同步,便于管理人员实时、连续、快速地掌握隧道变化,及时消除影响运输安全的隐患。在此过程中要求完成断面检测数据的采集、分析、处理、传输,并快速给出相应的断面轮廓及隧道的三维模型,乃至实时监测和分析出各种安全隐患。

[0005] 隧道检测具有隧道变形的渐变性和长期性、测点多、线路长、动态数据量大、数据分析复杂等特点。非接触式车载隧道断面检测已成为主流检测技术。目前,非接触式车载隧道断面检测方案主要采用了激光技术和计算机图像处理技术等。而且普遍应用于国内外先进的轨道检测车上,检测效率得到了很大的提升。比较典型的有:法国2005年投入使用的用以改善高速线路维护的基础设施高速检测列车MGV,运用摄影测量的方式能够在300km的速度下对接触网、轨道等进行检测;德国的GeoRail-Xpress综合检测车能对线路上的可见和不可见部分进行全数字化测量、采集和分析;其上搭载有由4维轨道环境照相机构成的线路和环境检测装置,由6个激光传感器和2架数码行扫描照相机构成的轨道检测装置,检测速度为100km/h;日本轨道综合检测车以2002年3月投入使用的East-I型最具代表性,该列车采用700系电动车组,6辆编组,可以实施88项检测项目,其中应用列车顶部的摄像装置采用图像处理技术测量道床及周边结构物的情况,最高运行速度275km/h;奥地利的Plasser公司时速为250km/h的EM250型高速轨检车,意大利“阿基米德”号综合检测车等都搭载有运用摄影测量技术或激光辅助图像处理技术的高速隧道检测设备。

[0006] 综上所述,关于激光技术和计算机图像处理技术在车载隧道断面检测的主要优点是:激光扫描测量不受外界光线干扰,但由于受扫描光点发散效应的限制,测量复杂断面时的精度低,问题是扫描测距方式受机械旋转部件的制约在行进过程中扫描光点呈螺旋形前进,扫描频率不容易做得太高,而且高速行进过程中所测得的点位置不处于一个横截面内,这属于原理性误差,必须通过多次往复测量提高测量精度,不利于对长距离隧道的测量。同时由于多次往复动态测量对定位精度要求极高,实施也较为困难。因此,有些研究者提出了采用间隔 30° 安装9个激光扫描仪同时对隧道断面进行扫描,这也无疑提高了投入和运维成本,而且这样的扫描也仅仅限于几个点,无法实现全断面的实时扫描。

[0007] 计算机图像三角形摄影测量虽然具有较高的动态测量精度,但测量时易受阳光、隧道内灯光等外界光线干扰而产生偏差,严重时甚至失效。因此必须采用复杂的图像处理算法进行一定程度的弥补,例如通过二维滤波和模式识别技术,滤除灯光影像,识别隧道洞壁上的激光光带位置等。而且通常的动态测量要求每秒几百甚至上千帧的采样速率,目前技术难以实现全部图像数据的实时存储,如果借助图像处理技术提取和存储激光光带位置,则图像处理步骤又会大大增加处理时间,制约系统采样速度,影响系统的实时性,不适合于高速行进过程中的安全监测。

[0008] 因此,如何在高速动态测量条件下同时保证高测量精度、高采样速率及快速三维建模是地铁和高铁隧道自动监测重要课题。

[0009] 中国发明专利申请号为87101789公开了一种用激光量测建筑物或洞穴轮廓断面,它在测角装置中采用了音叉狭缝振子、在传动系统中采用三级光电盘脉冲计数和复位电路,测量精度达到了 $\pm 2.5\%$,在测量同时经微机处理能立即取得断面的极坐标参数,最大净高和净宽、断面净面积等数值。这种技术主要存在的问题是不适合于高速行进过程中的监测。

[0010] 中国发明专利申请号为201410121950.X公开了一种隧道安全检修车与检测方法,检修系统包括控制柜、显示屏、前距离传感器、后距离传感器、旋转轴承机构和检测装置;信息采集系统包括万向旋转支架、3D全息扫描仪和信息储存模块。该发明称能够自动和快速的检测隧道内表面出现裂缝或者表层脱落等问题的区域,实现了快速维修的同时,对隧道进行区域性的3D信息采集,为后期提供依据,从而提升检修的效率以及信息采集与检修的效果。但是这种技术扫描点十分有限,对3D全息扫描结果没有进行任何处理,仍然需要人工观察全息扫描图像来进行识别。

[0011] 中国发明专利申请号为201410009353.8公开了一种铁路隧道智能巡检装置及其使用方法,巡检装置包括控制主板、机箱、辅助光源、数码相机和报警器;控制主板中安装专用软件;专用软件对数码相机拍摄的数码照片进行分析、处理和保存;当处理结果超出设定范围时,报警器工作;但是该专利中并无对数码相机所拍摄的图像进行自动分析处理的内容和对隧道全断面进行三维测量。

[0012] 隧道健康监测包括隧道结构侵蚀监测、结构变形监测、结构内力监测和环境情况监测,其中尤其是结构变形监测非常重要,其监测内容主要为隧道的纵向沉降(纵轴线变形)、横向位移和断面的收敛变形。

[0013] 隧道全断面高速动态健康检测方法的几个性能要求:①图像采集速度的要求;系统安装于隧道检测车上,在120km/h的检测速度下,采集频率要满足至少每0.1m采集一个综

合断面；②测量精度的要求；对断面的空间的静态测量误差须小于5mm；③可靠性的要求；所选用的硬件设备必须稳定性高，系统必须能满足长时间连续稳定运行的要求；④自动化健康诊断评估的要求；自动分析隧道发生的形变，建立隧道变形三维动态模型，并形成相应的预警机制；⑤操作和维护简单化要求；对隧道全断面进行高速动态健康监测，数据的采集、分析、处理、传输均为自动完成，不需要人工的干预。

发明内容

[0014] 为了克服已有的隧道健康检测方法的自动化和智能化水平低、难以实现对隧道进行高精度测量、高采样速率及快速三维建模等不足，本发明提供一种用于对隧道全断面进行高速动态健康监测，能够提高隧道健康检测自动化和智能化水平，对隧道的结构变形进行高精度的自动分析和评估，实现隧道变形三维动态建模。

[0015] 要实现上述发明内容，必须要解决五个核心问题：(1) 实现一种全景激光光源；(2) 实现一种能快速高精度获得实际物体深度信息的主动式全景视觉传感器；(3) 准确估算出轨道方向的纵向里程坐标；(4) 采用计算机视觉技术对隧道内的三维重建方法；(5) 建立空间数据库存储发布隧道形变信息，建立隧道变形三维动态模型，并形成预警机制。

[0016] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是：

[0017] 一种基于主动式全景视觉的隧道全断面高速动态健康检测装置与方法，其硬件包括：隧道检测车、主动式全景视觉传感器、RFID读取器、无线接发送单元、控制器、站级通信系统或中央监控中心服务器；所述的中央监控中心服务器通过所述的站级通信系统构成全隧道安全检测网，所述的站级通信系统接收从所述的隧道检测车上配置的无线接发送单元发送过来的隧道横断面激光扫描图像，并将隧道横断面激光扫描图像及时地通过全隧道安全检测网传送给所述的中央监控中心服务器。

[0018] 所述的隧道检测车上配置有主动式全景视觉传感器、RFID读取器、测距轮、无线接发送单元和控制器，所述的主动式全景视觉传感器安装在所述的隧道检测车的前方中央，所述的RFID读取器读取配置在隧道内壁上安置的RFID信息，所述的隧道检测车的底部安装一个测距轮，所述的控制器读取测距轮中光电编码器的脉冲当量并估算所述的隧道检测车的行走距离 Z_i ；所述的控制器读取主动式全景视觉传感器所获取的隧道横断面激光扫描图像并以所述的隧道检测车的行走距离 Z_i 和现在时刻为文件名保存在所述的控制器的存储单元中；当所述的隧道检测车达到下一个站点时，所述的控制器通过所述的无线接发送单元将所述的控制器的存储单元中的隧道横断面激光扫描图像发送给所述的站级通信系统。

[0019] 所述的主动式全景视觉传感器，其硬件主要包括：全方位视觉传感器、全景激光投射光源；所述的全方位视觉传感器与所述的全景激光投射光源进行同轴固定连接。

[0020] 所述全方位视觉传感器包括双曲面镜面、上盖、透明半圆形外罩、下固定座、摄像单元固定座、摄像单元、连接单元和上罩；所述的双曲面镜面固定在所述的上盖上，所述的连接单元将所述的下固定座和透明半圆形外罩连接成一体，所述的透明半圆形外罩与所述的上盖以及所述的上罩固定在一起，所述的摄像单元固定在所述的摄像单元固定座上，所述的摄像单元固定座固定在所述的下固定座上，所述的全方位视觉传感器中的所述的摄像单元的输出通过千兆网数据接口与所述的控制器连接。

[0021] 所述的全景激光投射光源包括光源上盖、圆锥形镜面、透明外罩、圆圈形激光发射

器和底座；圆圈形激光发射器固定在底座上，圆圈形激光发射器的发射光轴心线与底座轴心线一致，圆锥形镜面固定在光源上盖用于反射圆圈形激光发射器发射出来的圆圈激光为隧道内壁提供隧道断面全景扫描光，圆锥形镜面的轴心线与光源上盖轴心线一致，透明外罩将固定了圆圈形激光发射器的底座和固定了圆锥形镜面的光源上盖集成为全景激光投射光源；圆圈形激光发射器的中心轴和圆锥形镜面的中心轴重合。

[0022] 所述的主动式全景视觉传感器装配时，将所述的圆圈形激光发射器的中心轴、所述的圆锥形镜面的中心轴、所述的双曲面镜面的中心轴和所述的摄像单元的中心轴配置在同一轴心线上。

[0023] 隧道检测车即将进入隧道前，定位系统会提供隧道检测车的位置信息，当隧道检测车位置与隧道洞口里程在10米范围内时，控制机启动测量系统，主动式全景视觉传感器进入采集信息状态，同时系统时钟同步系统启动，记录每一位置信息相对应的时间信息。在隧道进洞口、洞内和出洞口间隔一定距离安装电子标签，利用RFID辅助修正里程定位完成断面的精确定位。

[0024] 隧道检测车在一个检测区段里行驶时，除了需要得到隧道断面相对于测量系统的X,Y坐标外，还应获得沿轨道方向的纵向里程坐标Z，用来确定隧道内每一测量断面的位置，即该断面距测量起始位置的精确距离。为此需要对隧道检测车的实时走行距离进行检测。

[0025] 在隧道检测车底部安装测距轮，前进时测距轮在轨道面上做纯滚动，小轮的轮轴上装有光电编码器，根据编码器可读出小轮在轨面上走过的距离。

[0026] 所述的中央监控中心服务器通过全隧道安全检测网接收到隧道检测车的隧道横断面激光扫描图像后，首先读取所述的隧道检测车的行走距离 Z_i 和现在时刻为文件名的隧道横断面激光扫描图像；然后从隧道横断面激光扫描图像中解析出隧道横断面上全景激光投射点的空间坐标位置值，即隧道横断面上的三维点云数据；接着以隧道检测车的行走距离 Z_i 的隧道横断面上的三维点云数据重构出全隧道内壁三维模型；最后根据最新构建的全隧道内壁三维模型与最初构建的全隧道内壁三维模型进行对比，分析隧道形变量。

[0027] 隧道断面点云数据的获取，隧道数据的采集方式是以主动式全景视觉传感器的视点为中心，解析出隧道检测车的行走距离 Z_i 的隧道横断面上的隧道面上目标点的(x,y)平面二维坐标，然后根据行走距离 Z_i 计算出隧道面上所有点云的(x,y,z)三维坐标。

[0028] 全方位视觉传感器标定模块，用于确定三维空间点和摄像机成像平面上的二维图像点之间映射关系的参数，标定后的参数存放在所述的存储单元中。

[0029] 全方位面激光信息解析及点云数据获取单元，用于对激光扫描全景图像数据进行处理，在激光扫描全景图像上解析出激光投影信息并计算出空间位置信息，最终得到隧道内壁边缘点云数据。

[0030] 隧道轴线提取单元，用于根据隧道轴线绘制隧道纵向变形图，以便进行三维建模；这里将沿隧道轴线方向连续的10个扫描截面作为一节，在前面的激光扫描中每个相邻扫描截面间隔为100mm，这样就将一节内1000mm的点云数据单元来提取轴线，提取轴线的方法是对分割后的隧道点云进行圆柱面拟合。

[0031] 降噪及平差处理单元，用于进一步对所述的隧道轴线提取模块处理得到的长度为1000mm隧道点云数据进行降噪及平差处理。

[0032] 三维建模及变形分析单元，用于隧道变形可视化处理；主要通过比较隧道中相同

位置上的形变量,以反映隧道局部或某一区段内的收敛变形情况。

[0033] 全隧道纵断面拼接单元,用于将全隧道的分段三维重构结果进行拼接。

[0034] 位移监测和沉降监测单元,对隧道的整体位移和沉降有量化的度量。

[0035] 隧道纵断面变移量三维可视化单元,用于对隧道的整体位移和沉降有量化的、可视化的表达;三维可视化处理把测量获得的数值、变形量信息变为直观的、以图形图像信息表示的、随时间和空间变化的物理量呈现给隧道安全监控人员;这里用红色表示正形变,用蓝色表示负形变,颜色越深表示形变越大;对RGB颜色空间来讲,将GB颜色分量设置为零,R分量从0~255对正形变数据进行映射,对应于0~255mm的正形变;将RG颜色分量设置为零,G分量从0~255对负形变数据进行映射,对应于0~-255mm的负形变;然后对全隧道中心轴线上每个节的纵断面形变量所对应的颜色标志在隧道所对应的节上;最后根据全隧道中心轴线上坐标值将中心轴线上每个节用折线方式连接起来,用可视化方式显示整个隧道纵断面的形变情况。

[0036] 本发明的有益效果主要表现在:

[0037] 1) 提供了一种全新的自动化隧道健康体检方式;

[0038] 2) 在给地下隧道做体检的过程中及时采集隧道的三维空间信息,为城市地下隧道三维建模提供原始地下空间基础数据;

[0039] 3) 自动的检测判断隧道内存在的各种缺陷,为地下隧道的维护、竣工验收提供了有效的技术支撑。

附图说明

[0040] 图1为一种全方位视觉传感器的结构图;

[0041] 图2为单视点折反射全方位视觉传感器成像模型,图2(a)透视成像过程,图2(b)传感器平面,图2(c)图像平面;

[0042] 图3为主动全景视觉传感器进行隧道内壁距离测量的示意图;

[0043] 图4为全景激光投射光源的结构图;

[0044] 图5为一种主动式全景视觉传感器的结构图;

[0045] 图6为采用主动全景视觉传感器对隧道内壁进行激光扫描检测的示意图;

[0046] 图7为一种采用主动全景视觉传感器地下隧道检测的总体宏观示意图;

[0047] 图8为隧道内壁中的一节在全方位视觉传感器的某一个方位角情况下,径向变形量与点云数据的分布关系图;

[0048] 图9为隧道纵向形变示意图;

[0049] 图10为隧道横向形变示意图;

[0050] 图11为用点云重构的隧道三维图;

[0051] 图12为隧道检测车进行隧道健康体检的处理流程图;

[0052] 图13为从隧道采集的点云数据重构拼接后的一段隧道图;

[0053] 图14为隧道内壁表面的几个重要几何变量示意图;

[0054] 图15为隧道横截面轮廓图;

[0055] 图16为中央监控中心服务器中分析处理隧道形变处理流程图。

具体实施方式

[0056] 实施例1

[0057] 参照图1~16,一种基于主动式全景视觉的隧道全断面高速动态健康检测装置与方法,其硬件包括:隧道检测车、主动式全景视觉传感器、RFID读取器、无线接发送单元、控制器、站级通信系统或中央监控中心服务器。中央监控中心服务器通过站级通信系统构成全隧道安全检测网,站级通信系统接收从隧道检测车上配置的无线接发送单元发送过来的隧道横断面激光扫描图像,并将隧道横断面激光扫描图像及时地通过全隧道安全检测网传送给中央监控中心服务器。

[0058] 隧道检测车上配置有主动式全景视觉传感器、RFID读取器、测距轮、无线接发送单元和控制器,主动式全景视觉传感器安装在隧道检测车的前方中央,RFID读取器读取配置在隧道内壁上安置的RFID信息,隧道检测车的底部安装一个测距轮,控制器读取测距轮中光电编码器的脉冲当量并估算隧道检测车的行走距离 Z_i ;控制器读取主动式全景视觉传感器所获取的隧道横断面激光扫描图像并以隧道检测车的行走距离 Z_i 和现在时刻为文件名保存在控制器的存储单元中;当隧道检测车达到下一个站点时,控制器通过无线接发送单元将控制器的存储单元中的隧道横断面激光扫描图像发送给站级通信系统。

[0059] 主动式全景视觉传感器,其硬件主要包括:全方位视觉传感器、全景激光投射光源;全方位视觉传感器与全景激光投射光源进行同轴固定连接。

[0060] 全方位视觉传感器,如附图1所示,包括双曲面镜面2、上盖1、透明半圆形外罩3、下固定座4、摄像单元固定座5、摄像单元6、连接单元7和上罩8。双曲面镜面2固定在上盖1上,连接单元7将下固定座4和透明半圆形外罩3连接成一体,透明半圆形外罩3与上盖1以及上罩8通过螺钉固定在一起,摄像单元6用螺钉固定在摄像单元固定座5上,摄像单元固定座5用螺钉固定在下固定座4上,全方位视觉传感器中的摄像单元的输出通过千兆网数据接口与控制器连接。

[0061] 摄像单元的采样频率需要在120km/h的检测速度下,采集频率要满足至少每0.1m采集一个隧道横断面,计算得到采样频率满足大于333.3fps条件。摄像单元的采样分辨率,根据测量精度的要求,对断面的空间的静态测量误差须小于5mm;全方位视觉传感器的检测成像中心离隧道边缘的最长距离为3m,对应于摄像机的成像芯片中短轴的一半范围,若不考虑插值提高分辨率的话,摄像单元的采样分辨率需要1200个像素以上。综合上述情况,摄像单元选择CR3000×2高速摄像机,分辨率为1696×1710,采样频率540fps,高速内存16GB。

[0062] 全景激光投射光源包括光源上盖、圆锥形镜面、透明外罩、圆圈形激光发射器和底座。圆圈形激光发射器固定在底座上,圆圈形激光发射器的发射光轴心线与底座轴心线一致,圆锥形镜面固定在光源上盖用于反射圆圈形激光发射器发射出来的圆圈激光为隧道内壁提供隧道断面全景扫描光,圆锥形镜面的轴心线与光源上盖轴心线一致,透明外罩将固定了圆圈形激光发射器的底座和固定了圆锥形镜面的光源上盖集成为全景激光投射光源,圆圈形激光发射器的中心轴和圆锥形镜面的中心轴重合。主动式全景视觉传感器装配时,将圆圈形激光发射器的中心轴、圆锥形镜面的中心轴、双曲面镜面的中心轴和摄像单元的中心轴配置在同一轴心线上。

[0063] 隧道检测车即将进入隧道前,定位系统会提供隧道检测车的位置信息,当隧道检

测车位置与隧道洞口里程在10米范围内时,控制机启动测量系统,主动式全景视觉传感器进入采集信息状态,同时系统时钟同步系统启动,记录每一位置信息相对应的信息。在隧道进洞口、洞内和出洞口间隔一定距离安装电子标签,即RFID,利用RFID辅助修正里程定位完成断面的精确定位。

[0064] RFID固定在隧道进洞口、洞内和出洞口间隔一定距离上,这里将固定RFID处的隧道断面与隧道中轴线的交点作为测量的基准点,为隧道建立统一坐标基准 $B_i(x, y, z)$; RFID的存储单元中存储了隧道固定点的空间位置信息 $B_i(x, y, z)$;隧道固定点的空间位置信息 $B_i(x, y, z)$ 是隧道建成后经定点高精度测量所得到的;隧道固定点的空间位置信息 $B_i(x, y, z)$ 在隧道运营过程中需要定期维护,以保证这些空间位置信息 $B_i(x, y, z)$ 能作为隧道的绝对坐标基准。

[0065] 控制器包括: RFID数据读取单元,用于读取固定在隧道壁上RFID所存储的空间位置信息;行车距离估算单元,通过读取光电编码器的脉冲数并利用公式(3)估算出隧道检测车的行车距离;隧道横断面激光扫描图像读取、存储单元,用于读取主动式全景视觉传感器所获取的隧道横断面激光扫描图像,并以隧道检测车的行走距离 Z_i 和现在时刻为文件名保存在控制器的存储单元中;隧道横断面激光扫描图像数据传输单元,用于将控制器的存储单元中的隧道横断面激光扫描图像发送给站级通信系统;附图12为控制器进行隧道健康体检的处理流程图。

[0066] 隧道检测车在一个检测区段里行驶时,除了需要得到隧道断面相对于测量系统的 X, Y 坐标外,还应获得沿轨道方向的纵向里程坐标 Z ,用来确定隧道内每一测量断面的位置,即该断面距测量起始位置的精确距离,为此需要对隧道检测车的实时走行距离进行检测。

[0067] 隧道检测车的动态定位主要依靠光电编码器,在隧道检测车的底部安装一个测距轮,结合轨道电路信号确定隧道检测车起始位置以及消除纵向累计误差。光电编码器可以输出1000~2000个脉冲/转,根据采集到的脉冲数量和测距轮轮直径可以计算出车辆行走的距离,实际应用中可采用FT法、防空转打滑算法、多传感器融合算法等多种算法来提高定位的精度。同时,里程定位系统还能够根据轨道电路信号校准隧道检测车初始位置、定点清除动态测量过程中的累计误差。

[0068] 在隧道检测车底部安装测距轮,前进时测距轮在轨道面上做纯滚动,小轮的轮轴上装有光电编码器,根据编码器可读出小轮在轨面上走过的距离。设小轮的直径为 D ,装于其上的光电编码器的分划选为 P ,通过公式(1)计算出编码器的脉冲当量(每个脉冲相当于小轮走过的直线距离) δ ,

$$[0069] \quad \delta = \frac{\pi D}{P} \quad (1)$$

[0070] 测距轮的直径为 $\Phi 58$,测距轮上的光电编码器分划为2000,编码器的脉冲当量用公式(2)进行计算,

$$[0071] \quad \delta = \frac{58\pi}{2000} = 0.0911mm \quad (2)$$

[0072] 隧道检测车的行走距离 Z_i 用光电编码器发出 Z 个脉冲进行计算,计算方法如公式(3)所示,

$$[0073] \quad Z_i = Z\delta = 0.0911Z \quad (3)$$

[0074] 为了让安装在隧道检测车上的主动式全景视觉传感器所获取的隧道横断面激光扫描图像与所拍摄图像时的空间位置进行关联,这里采用以隧道检测车的行走距离 Z_i 为文件名保存隧道横断面激光扫描图像数据;当隧道检测车经过隧道内的站级时通过无线方式将隧道横断面激光扫描图像数据经站级通信系统发送给中央监控中心服务器。

[0075] 隧道检测车的隧道健康检测流程如附图12所示,隧道检测车即将进入隧道前,隧道检测车上的控制机读取固定在隧道壁上RFID所存储的空间位置信息,控制机启动测量系统,主动式全景视觉传感器进入采集信息状态,同时系统时钟同步系统启动,记录每一位置信息相对应的的时间信息并校准隧道检测车的初始位置;控制器读取测距轮中光电编码器的脉冲当量并估算隧道检测车的行走距离 Z_i ;控制器读取主动式全景视觉传感器所获取的隧道横断面激光扫描图像并以隧道检测车的行走距离 Z_i 和现在时刻为文件名保存在控制器的存储单元中;当隧道检测车达到下一个站点时,控制器通过无线接发送单元将控制器的存储单元中的隧道横断面激光扫描图像发送给站级通信系统;随着隧道检测车以120km/h的速度前行,控制器不断读取主动式全景视觉传感器所获取的隧道横断面激光扫描图像和读取测距轮中光电编码器的脉冲当量并估算隧道检测车的行走距离 Z_i ,并以隧道检测车的行走距离 Z_i 和现在时刻为文件名保存在控制器的存储单元中,直至当隧道检测车上的控制机读取固定在隧道壁上RFID中的信息为隧道出口;此时,控制器停止向主动式全景视觉传感器获取图像数据,关闭主动式全景视觉传感器中的全景激光投射光源,并将隧道出口处固定在隧道壁上RFID所存储的空间位置信息和存储单元中的隧道横断面激光扫描图像发送给站级通信系统;这样隧道检测车对隧道的健康体检扫描结束,隧道的健康体检扫描过程中所获得的横断面激光扫描图像经站级通信系统发送给中央监控中心服务器中的全隧道横断面激光扫描图像库中。

[0076] 中央监控中心服务器通过全隧道安全检测网接收到隧道检测车的隧道横断面激光扫描图像后,首先读取隧道检测车的行走距离 Z_i 和现在时刻为文件名的隧道横断面激光扫描图像;然后从隧道横断面激光扫描图像中解析出隧道横断面上全景激光投射点的空间坐标位置值,即隧道横断面上的三维点云数据;接着以隧道检测车的行走距离 Z_i 的隧道横断面上的三维点云数据重构出全隧道内壁三维模型;最后根据最新构建的全隧道内壁三维模型与最初构建的全隧道内壁三维模型进行对比,分析隧道形变量。

[0077] 中央监控中心服务器中主要包括:全方位视觉传感器标定单元、主动式全景视觉传感器标定数据库、第J节隧道断面图像数据读取单元、全隧道横断面激光扫描图像库、全方位面激光信息解析及点云数据获取单元、隧道中轴线提取单元、降噪及平差处理单元、三维建模及变形分析单元、全隧道各节横断面基准数据库、全隧道纵断面拼接单元、位移监测和沉降监测单元、全隧道各节中轴线坐标基准数据库、全隧道健康体检结果数据库和隧道纵断面变移量三维可视化单元;处理流程如附图16所示。

[0078] 全方位视觉传感器标定单元,用于确定三维空间点和摄像机成像平面上的二维图像点之间映射关系的参数,本发明中采用了单视点的全方位视觉传感器,由双曲面折反射镜面成像原理构成的全方位视觉传感器具有单视点成像特性;其成像原理如图3所示。为了建立三维空间点与成像平面图像点上的映射关系,这里采用Micusik的透视投影成像模型,如图2所示,在该成像模型中,考虑两个不同的参考平面,图像平面(u', v')和传感器平面(u'', v''),图像平面和摄像机的CCD相关,用像素坐标系来表示。传感器平面是一个假设的和

镜面光轴正交的平面,其中心原点是光轴和该平面的交点;以双曲面镜面的焦点,即单视点 O_m 为原点建立坐标系, z'' 轴和镜面光轴对齐;设 $X=[X,Y,Z]^T$ 为空间中一点, $u''=[u'',v'']^T$ 是 X 在传感器平面的投影, $u'=[u',v']^T$ 是其对应的图像平面的像素点;空间坐标点 X 先通过射影变换矩阵投射到镜面上 A 点处, A 点由镜面反射聚焦于摄像机光学中心点 C ,并交传感器平面上 $u''=[u'',v'']^T$ 点, u'' 点通过仿射变换到图像平面上点 $u'=[u',v']^T$;整个单视点折反射摄像机成像模型描述的是由空间点到折反射镜面点,折反射镜面点到成像平面上的点,成像平面上的点再到图像平面点形成图像中的像素点的过程。

[0079] 折反射镜面到传感器平面之间的转换用公式(17)表示:

$$[0080] \quad \lambda \mathbf{p}'' = \lambda \begin{pmatrix} \mathbf{x}''^T \\ \mathbf{z}'' \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} h(\|\mathbf{u}''\|) \mathbf{u}'' \\ g\|\mathbf{u}''\| \end{pmatrix} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{X}, \lambda > 0 \quad (17)$$

[0081] 式中, $X \in R^4$ 表示空间点 X 的次坐标, $P=[R|T] \in R^{3 \times 4}$ 为射影变换矩阵, $R \in R^{3 \times 3}$ 为空间点到折反射镜面点的旋转矩阵, $T \in R^{3 \times 1}$ 为空间点到折反射镜面点的平移矩阵。

[0082] 由传感器平面到图像平面之间的转换用公式(18)表示:

$$[0083] \quad u'' = Au' + t \quad (18)$$

[0084] 式中, $A \in R^{2 \times 2}$, $t \in R^{2 \times 1}$ 。

[0085] Scaramuzza在Micusik透视投影模型的基础上,用一个函数 $f=g/h$ 来代替公式(17)中的函数 g,h ,即用函数 f 来表征三维空间点和二维平面点之间的关系,得到公式(19),

$$[0086] \quad \lambda \mathbf{p}'' = \lambda \begin{bmatrix} \mathbf{u}'' \\ f(\|\mathbf{u}''\|) \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \mathbf{A}u' + \mathbf{t} \\ f(\|\mathbf{A}u' + \mathbf{t}\|) \end{bmatrix} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{X}, \lambda > 0 \quad (19)$$

[0087] 由于双曲面的旋转对称性,Scaramuzza用Taylor展开多项式来描述函数 f ,用公式(20)表示:

$$[0088] \quad f(\|\mathbf{u}''\|) = a_0 + a_1 \|\mathbf{u}''\| + a_2 \|\mathbf{u}''\|^2 + \dots + a_n \|\mathbf{u}''\|^n \quad (20)$$

[0089] 式中, $\|\mathbf{u}''\|$ 为成像平面上的点到该平面中心点的距离。

[0090] Scaramuzza和Micusik的模型的前提都是理想折反射摄像机模型,由于在实际加工组装全方位视觉传感器时会引入一些误差;这里假设标定的全方位视觉传感器满足理想模型,将存在一定的误差的非理想模型代入Scaramuzza提出的简化模型转换公式,得到公式(21);

$$[0091] \quad \lambda \mathbf{p}'' = \lambda \begin{bmatrix} \mathbf{u}'' \\ f(\|\mathbf{u}''\|) \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \mathbf{A}u' + \mathbf{t} \\ f(\|\mathbf{A}u' + \mathbf{t}\|) \end{bmatrix} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}, \lambda > 0 \quad (21)$$

[0092] 具体标定过程是将标定板绕全方位视觉传感器一周,拍摄若干组全景图像,建立空间点和成像平面中像素点的若干等式,使用最优化算法求出最优解,计算结果如表1所示,即为本发明中使用的全方位视觉传感器的标定参数;

[0093] 表1 ODVS的标定结果

标定参数	a_0	a_1	a_2 a_3	A	t	中心点	标定精度
[0094] ODVS	-75.12	0.0027	0	1.005 -6.65E-05 -3.77E-05 1	4.7466 -1.372	325.3466 237.7285	0.5502

[0095] 标定出全方位视觉传感器的内外参数后,就能建立一个成像平面的像点与入射光线,即入射角之间的对应关系,如公式(5)表示;

$$[0096] \quad \tan \alpha_{\beta} = \frac{\|u''\|}{f(\|u''\|)} = \frac{\|u''\|}{a_0 + a_1 \|u''\| + a_2 \|u''\|^2 + \dots + a_N \|u''\|^N} \quad (5)$$

[0097] 式中, α_{β} 表示隧道内壁某一点的入射角, $\|u''\|$ 为在成像平面上的该点到图像平面中心点的距离, a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_N 为标定的全方位视觉传感器的内外参数,通过公式(5)建立一张成像平面任一像素点与入射角之间的对应关系表;关于标定公式的具体推导和实现方法见参考文献,Yi-ping Tang,QingWang,Ming-li Zong,Jun Jiang,and Yi-hua Zhu,Design of Vertically Aligned Binocular Omnistereo Vision Sensor,EURASIP Journal on Image and Video Processing,2010,P1~24;标定后的结果可以建立图像坐标和空间位置之间的映射关系,如附图3所示;标定结果存储在主动式全景视觉传感器标定数据库中。

[0098] 第J节隧道断面图像数据读取单元,用于将全隧道横断面激光扫描图像进行分段分析;从隧道的入口开始到出口为止,将全隧道分为若干节,用h(j)作为节的变量,h(j)与隧道检测车沿隧道纵向方向上的移动距离 Z_i 之间的关系用公式(16)表示,

$$[0099] \quad h(j) = \text{INT}(Z_i/10) + 1 \quad (16)$$

[0100] 在选取了某一节h(j)后,根据公式(16)得到该节中所包含的移动距离 Z_i ,然后以该节中所有的移动距离 Z_i 作为文件名从全隧道横断面激光扫描图像库中读取隧道横断面激光扫描图像。

[0101] 全方位面激光信息解析及点云数据获取单元,用于对h(j)节内所有的移动距离 Z_i 的隧道横断面激光扫描图像进行处理,得到隧道内壁边缘点云数据;解析在激光扫描全景图像上的红色激光投射点的方法是根据红色激光投射点的像素的亮度要大于成像平面上的平均亮度,首先是将全景图的RGB颜色空间转化成HIS颜色空间,然后将成像平面上的平均亮度的1.2倍作为提取红色激光投射点的阈值,为了得到激光投射线的准确位置,本发明采用高斯近似方法来抽取出激光投射线的中心位置,具体实现算法是:

[0102] Step1:设置初始方位角 $\beta=0$;

[0103] Step2:在激光扫描全景图像上以方位角 β 从激光扫描全景图像的中心点开始检索红色激光投射点,对于方位角 β 上存在着若干个连续的红色激光投射的像素,这里选择HIS颜色空间中的I分量,即亮度值接近最高值的三个连续像素通过高斯近似方法来估算激光投射线的中心位置;具体计算方法由公式(7)给出,

$$[0104] \quad d = \frac{\ln(f(i-1)) - \ln(f(i+1))}{2 \times [\ln(f(i-1)) - 2\ln(f(i)) + \ln(f(i+1))]} \quad (7)$$

[0105] 式中, $f(i-1)$ 、 $f(i)$ 和 $f(i+1)$ 分别为三个相邻像素接近最高亮度值的亮度值,d为修正值,i表示从图像中心点开始的第i个像素点;因此估算得到的激光投射线的中心位置为(i+d),该值对应于公式(5)中的 $\|u''\|$;

[0106] Step3:用公式(5)计算出该激光投射点的入射角 α_β ,并根据激光扫描全景图像数据的文件名的信息,即以移动距离 Z_i 为文件名的形式,得到隧道检测车沿隧道纵向方向上的移动距离 Z_i ,然后用公式(4)计算出隧道检测车沿隧道纵向方向上的移动距离 Z_i 和方位角 $\beta' = \beta$ 情况下在隧道内壁上的激光投射点到主动式全景视觉传感器的中心轴线之间的距离 $d_{(z,\beta)}$;最后用公式(8)计算该激光投射点的空间坐标位置值;

$$[0107] \quad \begin{cases} z = Z_i - H \\ y = d_{(z,\beta)} \times \sin \beta \\ x = d_{(z,\beta)} \times \cos \beta \end{cases} \quad (8)$$

[0108] 式中, Z_i 为隧道检测车沿隧道纵向方向上的移动距离, H 全景扫描光线到全方位视觉传感器的单视点 O_m 的直线距离, $d_{(z,\beta)}$ 为沿隧道纵向方向上的位置 Z_i 和方位角 $\beta' = \beta$ 情况下在隧道内壁上的激光投射点到主动式全景视觉传感器的中心轴线之间的距离, x, y, z 分别为激光投射点相对于以全方位视觉传感器的单视点 O_m 的坐标值, β 为方位角;

[0109] Step4:改变方位角继续检索激光投射点,即 $\beta = \beta + \Delta\beta$, $\Delta\beta = 1$;

[0110] Step5:判断方位角 $\beta = 360$,如果成立,检索结束;反之转到Step2。

[0111] 通过上述处理得到了隧道横向截面的轮廓边缘点云数据。

[0112] 隧道中轴线提取单元,用于根据隧道轴线绘制隧道纵向变形图,以便进行三维建模;这里将沿隧道轴线方向连续的10个扫描截面作为一节,在前面的激光扫描中每个相邻扫描截面间隔为100mm,这样就将一节内1000mm的点云数据单元来提取轴线,提取轴线的办法是对分割后的隧道点云进行圆柱面拟合,圆柱面拟合算法的步骤如下:

[0113] STEP1:读取全方位面激光信息解析及点云数据获取单元处理后得到的沿隧道轴线方向连续的10个截面的点云数据,形成三维坐标矩阵 $P = (X, Y, Z)$;

[0114] STEP2:选取有代表性的点云130个点,如附图11和附图15中的点所示,形成三维坐标矩阵 $P^{(1)} = (X^{(1)}, Y^{(1)}, Z^{(1)})$;

[0115] STEP3:以 $u^{(0)} = (X^{(1)}, Y^{(1)}, \pi, 0)$ 为初始值,根据公式(9)、(10)、(11)进行求解得到 $u^{(1)} = (u_1^{(1)}, u_2^{(1)}, u_3^{(1)}, u_4^{(1)})$;

$$[0116] \quad \min f(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^n (e_i - R_{(h(i),\beta)})^2 \quad (9)$$

[0117] 式中, $R_{(h(i),\beta)}$ 为拟合圆柱面的半径, e_i 为隧道内壁边缘点云到中轴线间的距离;

$$[0118] \quad \text{约束条件} \begin{cases} g_1(\mathbf{u}) = \mathbf{u} - \{\min(x_i), \min(y_i), 0, -\frac{\pi}{2}\}^T \geq 0 \\ g_2(\mathbf{u}) = \{\max(x_i), \max(y_i), 0, \frac{\pi}{2}\}^T - \mathbf{u} \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$[0119] \quad \mathbf{u} = (x_0, y_0, \lambda, \phi)^T \quad (11)$$

[0120] 式中, x_0, y_0 为待求隧道中轴线上一个固定点上的X坐标和Y坐标值, λ 为待求隧道中轴线在XOZ平面的投影线与Z轴之间的夹角, ϕ 为待求隧道中轴线与XOZ平面之间的夹角;式中各变量之间的关系如附图14所示;

[0121] STEP4:适当增加点云数据到13000个点,形成三维坐标矩阵 $P^{(2)} = (X^{(2)}, Y^{(2)}, Z^{(2)})$;

[0122] STEP5:以 $\mathbf{u}^{(1)} = (u_1^{(1)}, u_2^{(1)}, u_3^{(1)}, u_4^{(1)})$ 为初始值,根据公式 (9)、(10)、(11) 进行求解得到 $\mathbf{u}^{(2)} = (u_1^{(2)}, u_2^{(2)}, u_3^{(2)}, u_4^{(2)})$;

[0123] STEP6:令:

[0124] $P_i = (X^{(2)}, Y^{(2)}, Z^{(2)})$,

[0125] $\mathbf{c} = (u_1^{(2)}, u_2^{(2)}, \overline{Z^{(2)}})$,

[0126] $\vec{a} = (\cos u_3^{(2)} \cos u_4^{(2)}, \sin u_3^{(2)} \cos u_4^{(2)}, \sin u_4^{(2)})^T$,

[0127] 利用公式 (12) 计算 e_i ;

[0128]
$$e_i = \left\| (p_i - c) \times \vec{a} \right\| \quad (12)$$

[0129] 式中: $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ 为原始点云中任意一个测量点坐标, $c = (x_0, y_0, z_0)$ 为圆柱面轴线上一个固定点坐标, $\vec{a} = (\cos \lambda \cos \phi, \sin \lambda \cos \phi, \sin \phi)^T$ 为圆柱面的轴线方向单位向量。

[0130] STEP7:删除 e_i 大于某个临界值的点,形成三维坐标矩阵 $P^{(3)} = (X^{(3)}, Y^{(3)}, Z^{(3)})$;

[0131] STEP8:以 $\mathbf{u}^{(2)} = (u_1^{(2)}, u_2^{(2)}, u_3^{(2)}, u_4^{(2)})$ 为初始值,根据公式 (9)、(10)、(11) 进行求解得到 $\mathbf{u}^{(3)} = (u_1^{(3)}, u_2^{(3)}, u_3^{(3)}, u_4^{(3)})$;

[0132] STEP9:计算圆柱面轴线上一个固定点的坐标和轴线的方向向量:

[0133] $\mathbf{c} = (u_1^{(3)}, u_2^{(3)}, \overline{Z^{(3)}})$ 、 $\vec{a} = (\cos u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_4^{(3)})^T$ 。

[0134] 上述计算中,圆柱面轴线就是隧道中轴线, $u_1^{(i)}$ 为隧道中轴线上对应于X坐标在中轴线提取过程中的逼近值, $u_2^{(i)}$ 为隧道中轴线上对应于Y坐标在中轴线提取过程中的逼近值, $u_3^{(i)}$ 为隧道中轴线在XOZ平面的投影线与Z轴之间的夹角 λ 在中轴线的逼近值, $u_4^{(i)}$ 为隧道中轴线与XOZ平面之间的夹角 ϕ 在中轴线的逼近值, i 为中轴线提取过程中的逼近计算的次数,如附图14所示。通过上述算法处理得到了长度为1000mm隧道的中心轴线上一个点及其方向向量。

[0135] 降噪及平差处理单元,用于进一步对隧道轴线提取模块处理得到的长度为1000mm隧道点云数据进行降噪及平差处理;根据平面应变条件,理论上点云在同一角度处,即对于全方位视觉传感器来说是方位角 β ,在同一方位角 β 情况下隧道的半径坐标相等;根据测量学的误差分布规律,由于测量的偶然误差,同一方位角 β 的隧道半径坐标将呈正态分布,即当 $I = \{i | \beta_i^{(cs2)} = \beta_0\}$ 时,有以下关系式:

[0136]
$$\rho_i^{(cs2)} \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (13)$$

[0137] 将点云分成360组,即令 $\beta_0 = \{0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, \dots, 359^\circ\}$,统计半径坐标与点云数量的关系;为了方便计算和观察,附图8中以径向位移 $\rho^{(cs2)} - R$ 作为横坐标,将其分割成若干1mm宽的区间,纵坐标表示每个区间的点云数量;径向位移偏离平均值超过3倍标准差的点为粗差点,将其删除;遍历所有方位角 β 的各组点云按照这个方法进行降噪。

[0138] 降噪后同一方位角 β 的半径坐标仍不相等,为提高椭圆柱面的拟合精度需要进行平差,把同一方位角 β 的半径坐标的测量值调整为平均值,即得到同一方位角 β 的半径坐标

的平均值 ρ^* ;平差后重新形成三维坐标矩阵,用柱坐标系 $P^* = (Z^{(cs2)}, \beta^*, \rho^*)$ 表示;这里 $\beta^* = \beta$, $Z^{(cs2)} = \overline{Z^{(3)}}$ 。

[0139] 三维建模及变形分析单元,用于隧道变形可视化处理;主要通过比较隧道中相同位置上的形变量,以反映隧道局部或某一区段内的收敛变形情况;如附图10所示,其算法主要处理如下:

[0140] STEP1:导入用柱坐标系表示的三维点云坐标矩阵 $P^* = (Z^{(cs2)}, \beta^*, \rho^*)$,初始化处理, $j=1$;

[0141] STEP2:读取第j节三维点云数据,采用椭圆拟合算法EFA,将二维的隧道轮廓线点云拟合成椭圆:

[0142] $(\beta^e, \rho^e) = \text{EFA}(\beta^*, \rho^*)$ (14)

[0143] 关于椭圆拟合算法EFA的实现参见论文DELALOYE D. Development of a new methodology for measuring deformation in tunnels and shafts with terrestrial laser scanning (LIDAR) using elliptical fitting algorithms [M.S.Thesis] [D]. Kingston: Queen's University, 2012;

[0144] STEP3:以 (β^e, ρ^e) 为准线,平行Z轴的线段为母线,生成长度为 $h(j)$ 的椭圆柱面(此处 $h(j) = 1000\text{mm}$):

$$[0145] \begin{cases} EX^{(cs2)} = \rho^e \cos \beta^e \\ EY^{(cs2)} = \rho^e \sin \beta^e \\ EZ^{(cs2)} = \{z | z \in [0, h(j)]\} \end{cases} \quad (15)$$

[0146] STEP4:把椭圆柱面各点的径向位移 $\rho^e - R_{(h(j), \beta)}$ 作为形变量,生成三维的径向位移云图;其中, ρ^e 用公式(14)计算得到, $R_{(h(j), \beta)}$ 为首次测量的全隧道横断面时用公式(14)计算得到的,保存在全隧道各节横断面基准数据库中;在计算 $\rho^e - R_{(h(j), \beta)}$ 时以 $h(j)$ 和方位角 β 作为索引得到 $R_{(h(j), \beta)}$;这里用红色表示正形变,用蓝色表示负形变,颜色越深表示形变越大;对RGB颜色空间来讲,将GB颜色分量设置为零,R分量从0~255对径向位移正形变数据进行映射,对应于0~10mm的正形变;将RG颜色分量设置为零,G分量从0~255对径向位移负形变数据进行映射,对应于0~-10mm的负形变。

[0147] 在首次测量的全隧道横断面时,执行隧道轴线提取单元、降噪及平差处理单元,然后利用公式(14)椭圆拟合算法EFA计算得到 (β^e, ρ^e) ,将 $R_{(h(j), \beta)} = \rho^e$,其中: $h(j)$ 为第j节隧道, β 为方位角,这个 $R_{(h(j), \beta)}$ 值作为测量的基准保存在全隧道各节横断面基准数据库中;同时将圆柱面拟合算法执行结果,轴线上一个固定点的坐标 $c = (u_1^{(3)}, u_2^{(3)}, \overline{Z^{(3)}})$, $x = u_1^{(3)}$, $y = u_2^{(3)}$, $z = \overline{Z^{(3)}}$ 作为截面中心坐标基准 $P_{h(j)}(x, y, z)$ 保存在全隧道各节中轴线坐标基准数据库中。

[0148] 全隧道纵断面拼接单元,用于将全隧道的分段三维重构结果进行拼接;就同一隧道断面而言,它在绝对坐标系下的截面方程与其在相对坐标系下的截面方程只有中心横坐标和中心纵坐标不同;隧道中轴线的作用能表达隧道的姿态和走势信息,正常情况下第j节隧道的中轴线和第j+1节隧道的中轴线是连续的,另一方面,本发明在隧道轮廓边缘点云数据采集过程也是连续的;由于全隧道变形监测时将整个隧道分割成了若干个节,每个节的

长度为 $h(j)$;在隧道轴线提取单元处理中得到了第 j 节隧道的中心坐标 $c = (u_1^{(3)}, u_2^{(3)}, \overline{Z^{(3)}})$,即隧道的中轴线上的某一点,和方向向量 $\vec{a} = (\cos u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_4^{(3)})^T$;针对隧道的狭长结构特点,这里用第 j 节隧道的中心坐标和法向量估算第 $j+1$ 节隧道的中心坐标,然后用第 $j+1$ 节隧道的中心坐标和法向量估算第 $j+2$ 节隧道的中心坐标,……,这样完成了全隧道的中轴线的拼接;在首次测量的全隧道纵断面时,在数据库中保存全隧道中轴线的各坐标值 $P_{h(j)}(x, y, z)$,作为后续隧道纵向变形测量中作为比较的基准数据;附图13为若干节隧道拼接后的效果图。

[0149] 位移监测和沉降监测单元,对隧道的整体位移和沉降有量化的度量;作为隧道的整体位移和沉降主要反映在隧道的中心轴线移位变形上,根据在隧道轴线提取单元处理中得到了第 j 节隧道的中心坐标和方向向量 $\vec{a} = (\cos u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_3^{(3)} \cos u_4^{(3)}, \sin u_4^{(3)})^T$;用第 j 节隧道的中心坐标和法向量估算第 $j+1$ 节隧道的中心坐标,……,然后用第 $j+1$ 节隧道的中心坐标和法向量估算第 $j+2$ 节隧道的中心坐标,……,依次计算得到了本次全隧道中轴线的各坐标值 $P'_{h(j)}(x', y', z')$;位移监测主要反映在X轴方向,沉降监测主要反映在Y轴方向,如附图9所示;用第 j 节隧道的中心坐标的基准值 $P_{h(j)}(x, y, z)$ 中的 x 与本次测量获得的第 j 节隧道的中心坐标 $P'_{h(j)}(x', y', z')$ 中的 x' 比较,得到 $\Delta x_{h(j)} = x' - x$, $\Delta x_{h(j)}$ 就是第 j 节隧道的位移偏移量;用第 j 节隧道的中心坐标的基准值 $P_{h(j)}(x, y, z)$ 中的 y 与本次测量获得的第 j 节隧道的中心坐标 $P'_{h(j)}(x', y', z')$ 中的 y' 比较,得到 $\Delta y_{h(j)} = y' - y$, $\Delta y_{h(j)}$ 就是第 j 节隧道的沉降偏移量;通过上述计算得到全隧道中心轴线上每个节的移位变形;最后将每个节的移位变形 $\Delta x_{h(j)}$ 和 $\Delta y_{h(j)}$ 保存在检测数据库中;通过上述计算得到的是隧道纵断面的相对位移和沉降数据量;利用读取固定在隧道壁上RFID所存储的空间位置信息,并以此作为绝对坐标基准得到隧道纵断面的绝对位移和沉降数据量。

[0150] 隧道纵断面变移量三维可视化单元,用于对隧道的整体位移和沉降有量化的、可视化的表达;三维可视化处理把测量获得的数值、变形量信息变为直观的、以图形图像信息表示的、随时间和空间变化的物理量呈现给隧道安全监控人员;这里用红色表示正形变,用蓝色表示负形变,颜色越深表示形变越大;对RGB颜色空间来讲,将GB颜色分量设置为零,R分量从0~255对正形变数据进行映射,对应于0~255mm的正形变;将RG颜色分量设置为零,G分量从0~255对负形变数据进行映射,对应于0~-255mm的负形变;然后对全隧道中心轴线上每个节的纵断面形变量所对应的颜色标志在隧道所对应的节上;最后根据全隧道中心轴线上的坐标值将中心轴线上每个节用折线方式连接起来,用可视化方式显示整个隧道纵断面的形变情况。

[0151] 实施例2

[0152] 本实施例中,其余实现方式类同,所不同的是隧道检测车上的控制器上增加存储容量,当隧道检测车检测结束后将隧道扫描图像通过网络一起发送给中央监控中心服务器。

[0153] 实施例3

[0154] 本实施例中,其余实现方式类同,所不同的是根据隧道横断面不同,在隧道中轴线提取单元中采用对隧道横断面求质心的方法,将各横断面的质心连线作为隧道的中轴线,

用隧道内壁边缘点到中轴线的距离作为隧道形变检测参数。

[0155] 实施例4

[0156] 本实施例中,其余实现方式类同,所不同的是隧道检测车的检测速度不同,对于比实施例1更慢速或者更快速的检测速度,采用与其相适应的拍摄速度相机。

[0157] 实施例5

[0158] 本实施例中,其余实现方式类同,所不同的是隧道检测车上安装主动式全景视觉传感器的位置,主动式全景视觉传感器配置在隧道检测车尾部。

[0159] 实施例6

[0160] 本实施例中,其余实现方式类同,所不同的是在正常运行的地铁列车和高速列车上配置主动式全景视觉传感器、RFID读取器、测距轮、无线接发送单元和控制器。

[0161] 实施例7

[0162] 本实施例中,其余实现方式类同,所不同的是全方位面激光信息解析及点云数据获取单元配置在隧道检测车上的控制器内,控制器对隧道横断面激光扫描图像进行在线处理,然后将隧道横向截面的轮廓边缘点云数据通过网络发送给中央监控中心服务器;为了在控制器中能对隧道横断面激光扫描图像进行处理,需要将主动式全景视觉传感器标定数据库配置在控制器的存储单元中;另外在中央监控中心服务器中就直接对隧道的点云数据进行处理,避免了海量图像数据的传输。

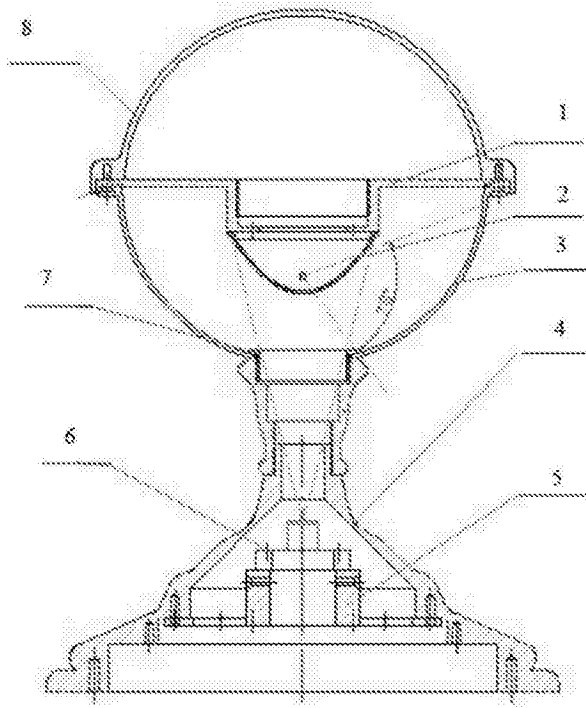


图1

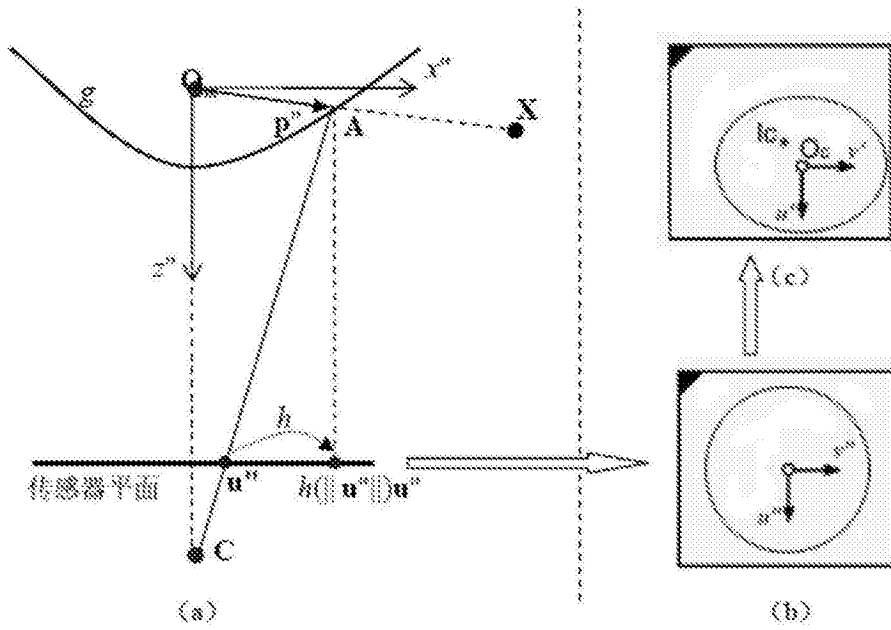


图2

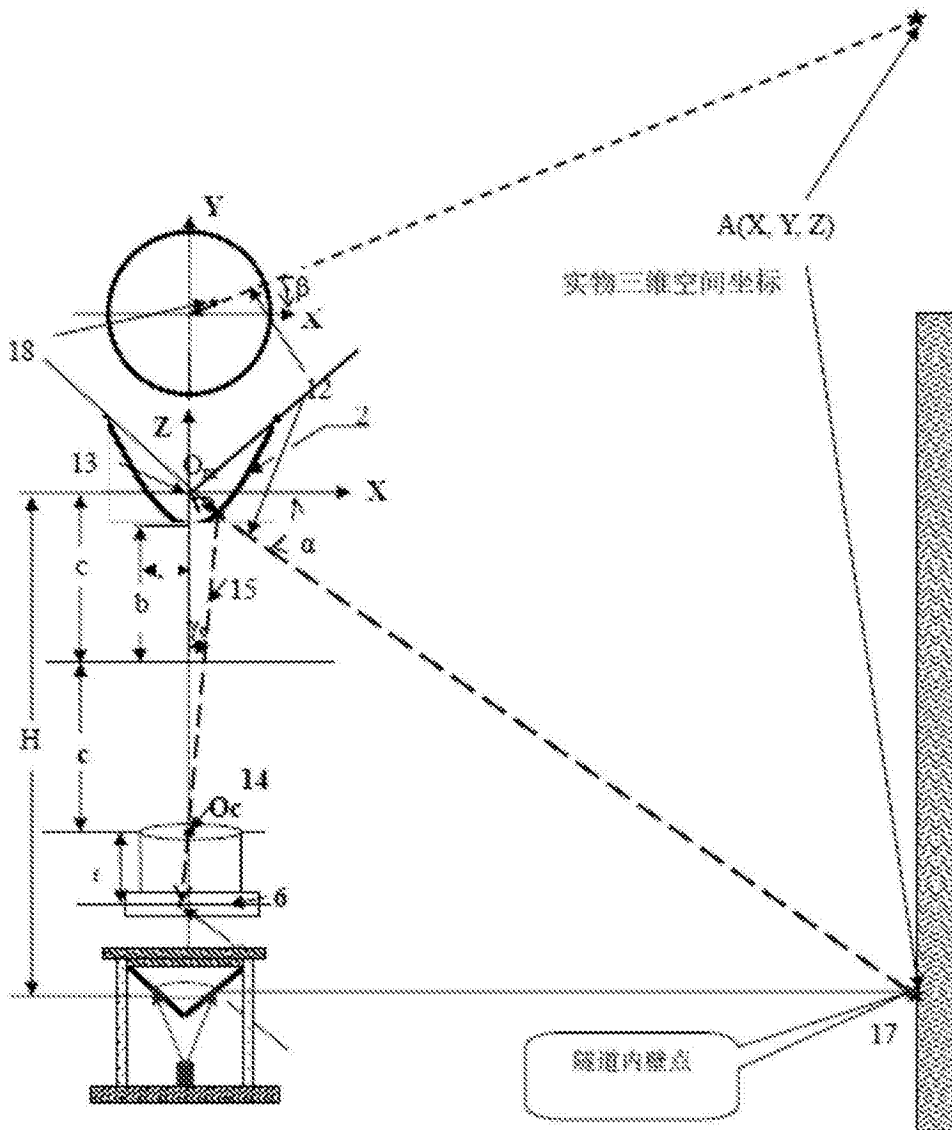


图3

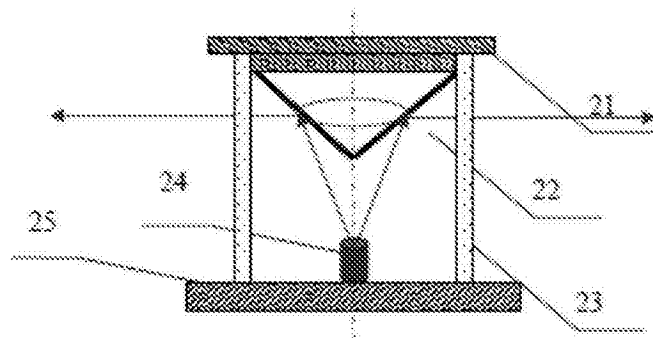


图4

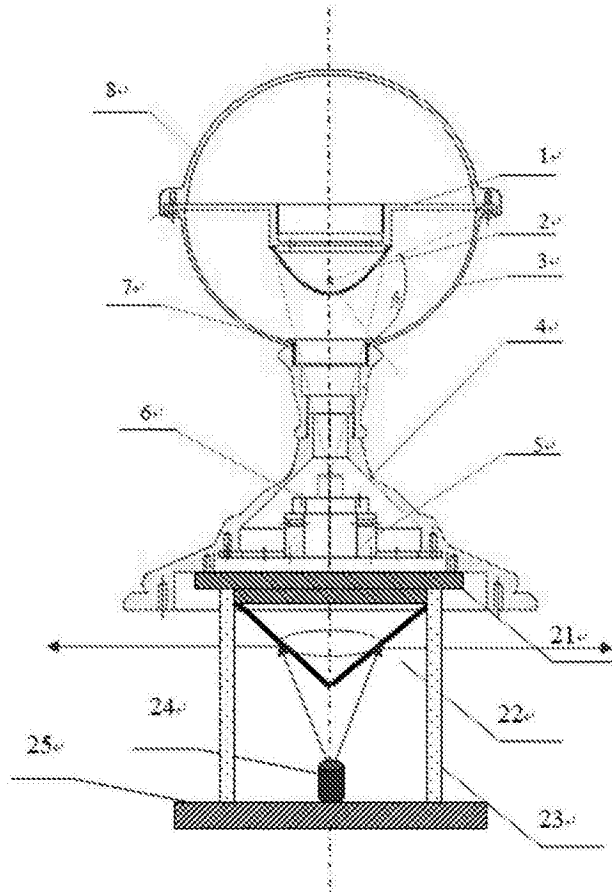


图5

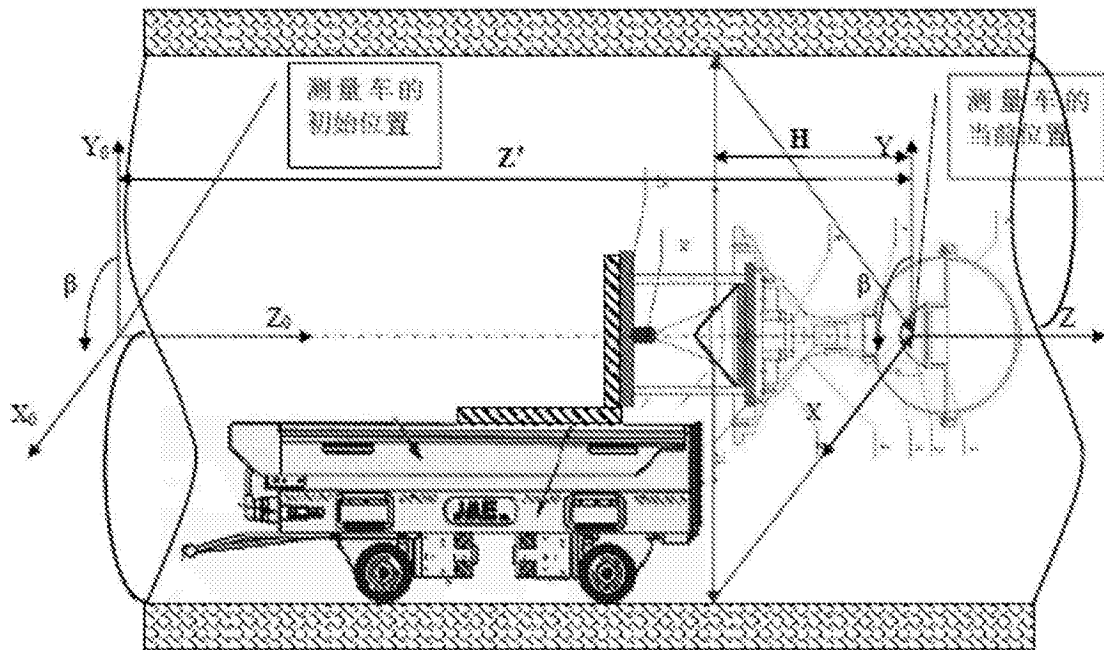


图6

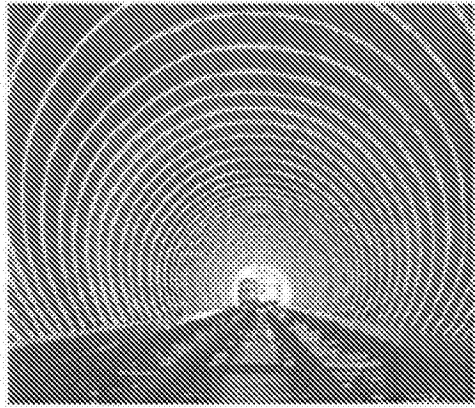


图7

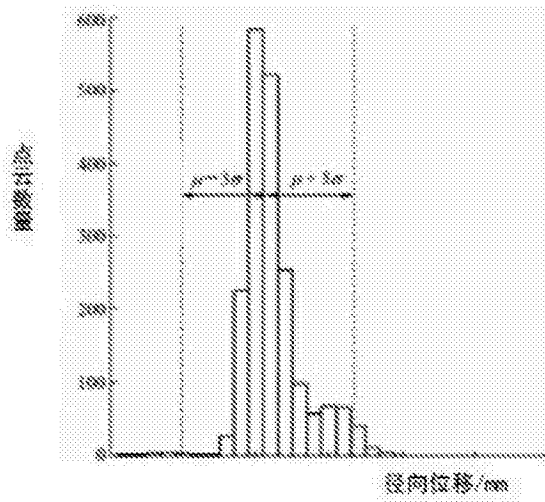


图8

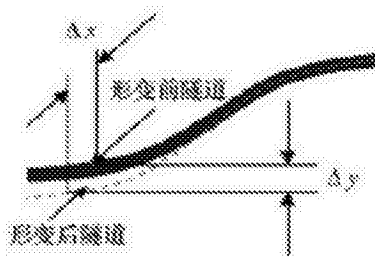


图9

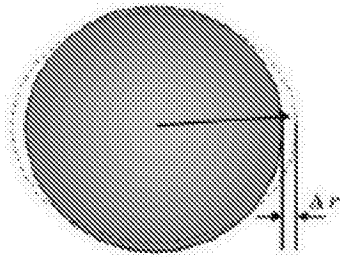


图10

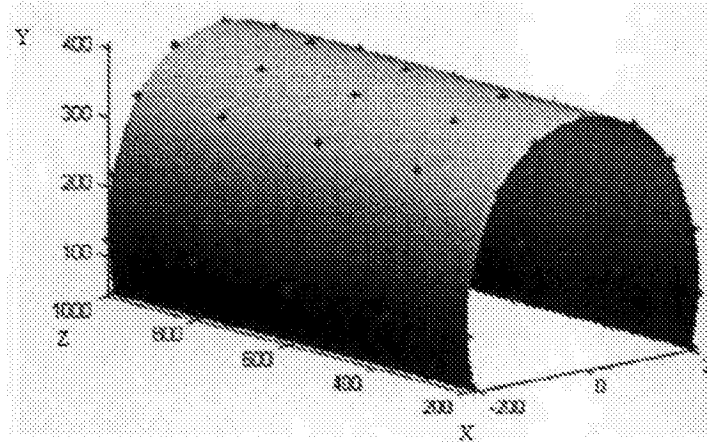


图11

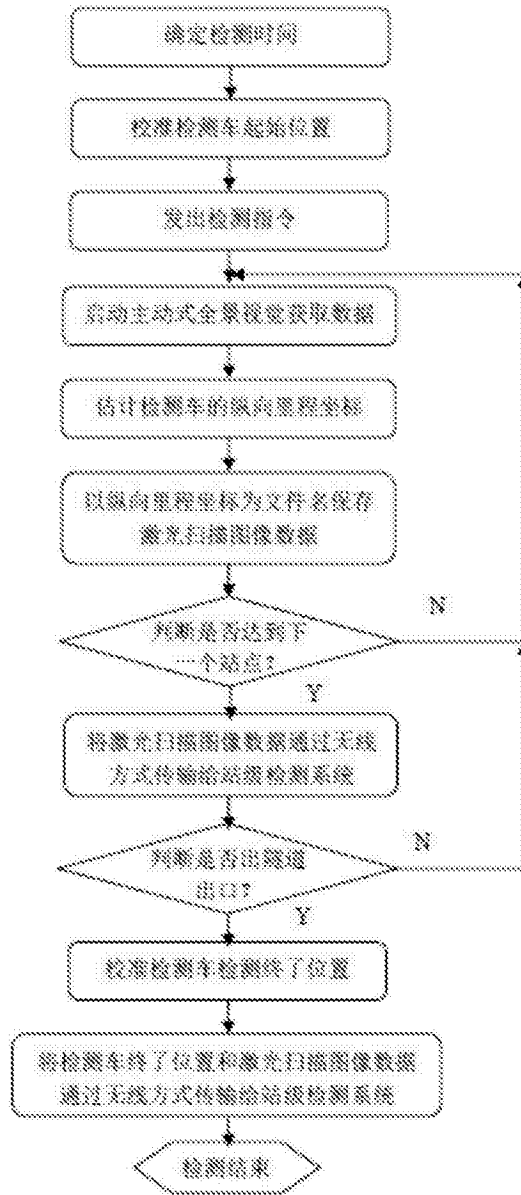


图12



图13

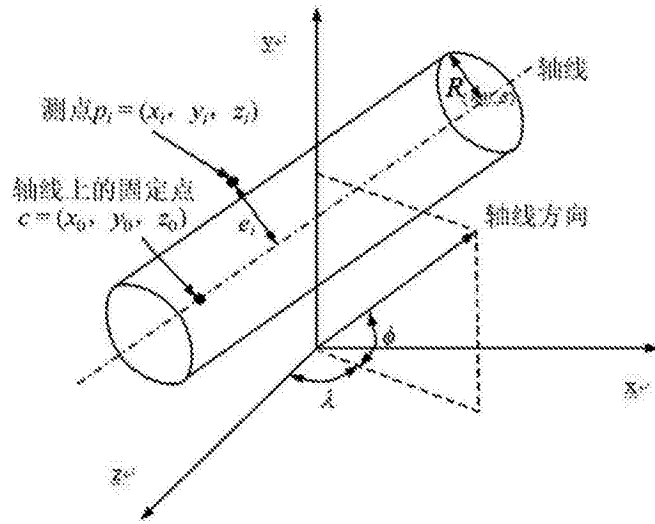


图14

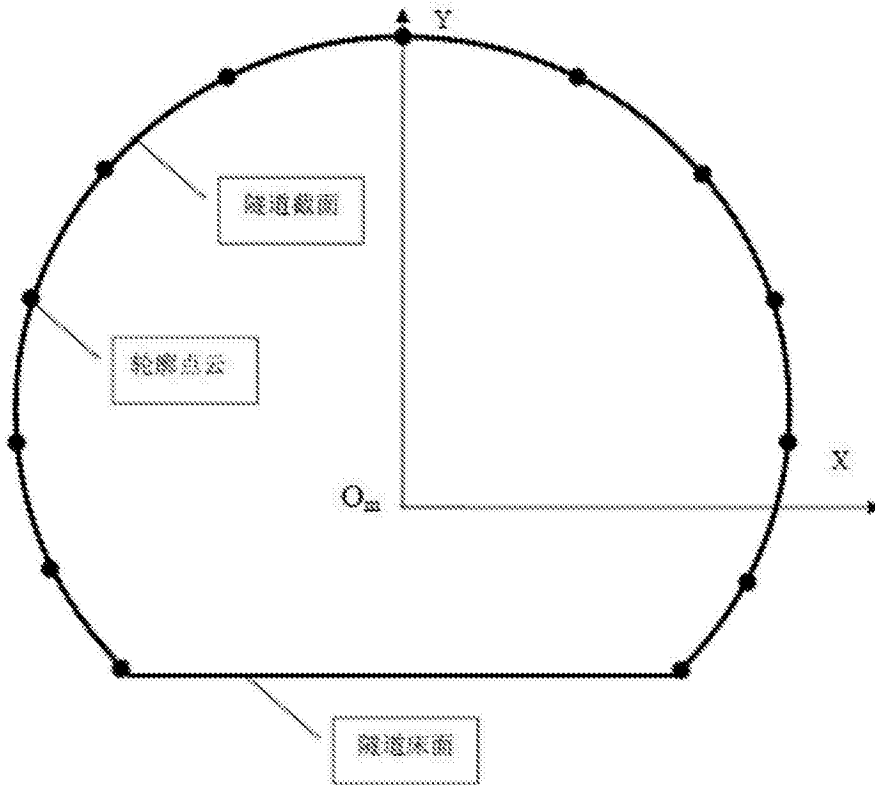


图15

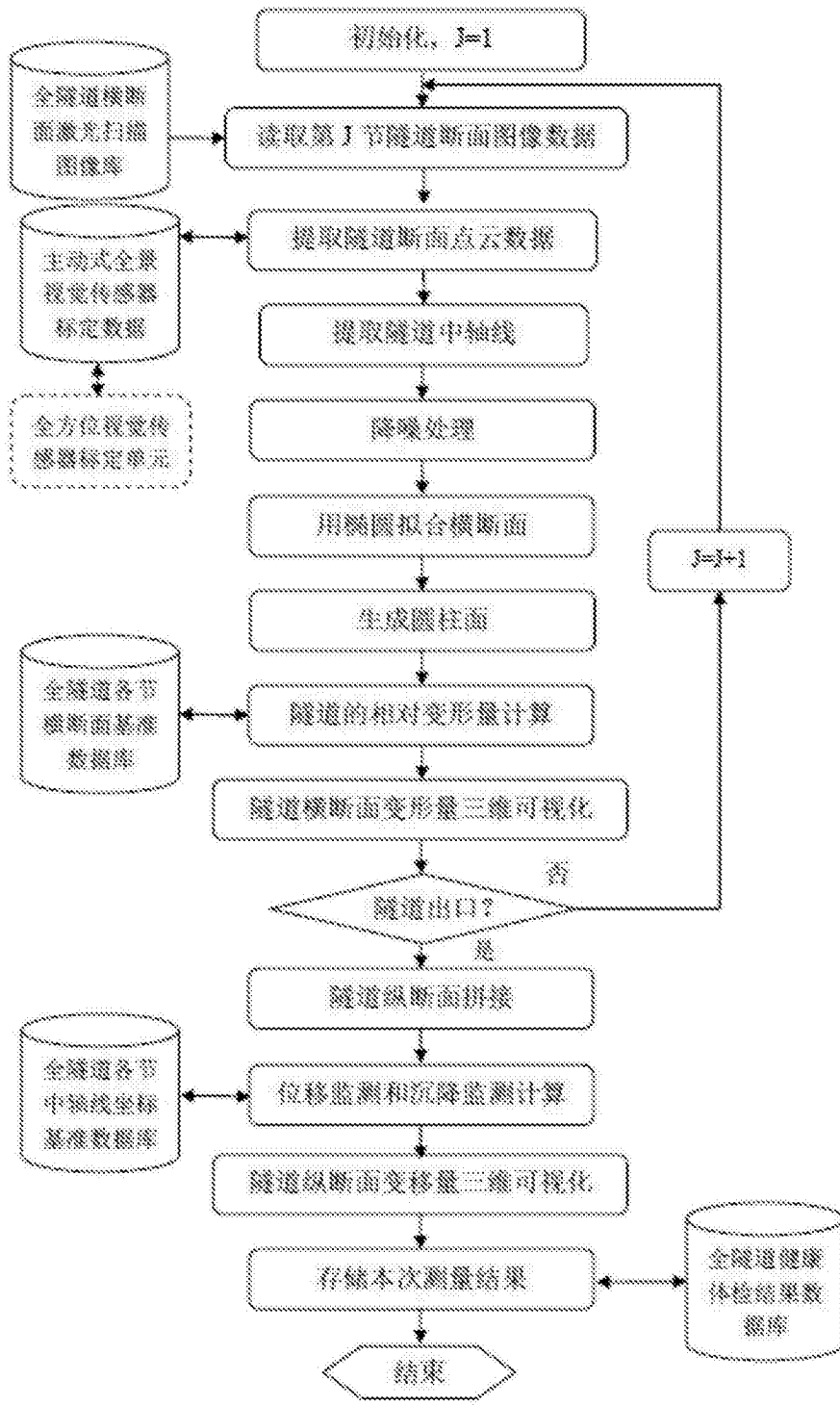


图16