



(21) 申请号 202210650755.0

(22) 申请日 2022.06.09

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 115059476 A

(43) 申请公布日 2022.09.16

(73) 专利权人 上海同岩土木工程科技股份有限公司  
地址 200092 上海市杨浦区四平路1388号  
同济联合广场C座408室

(72) 发明人 刘学增 刘新根 陈莹莹 秦祯秋  
王哲成

(74) 专利代理机构 上海浦东良风专利代理有限公司  
责任公司 31113  
专利代理师 张劲风

(51) Int.Cl.

E21D 9/12 (2006.01)

E21D 9/00 (2006.01)

E21F 17/18 (2006.01)

E21F 17/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 111780671 A, 2020.10.16

CN 114485391 A, 2022.05.13

审查员 洪爽

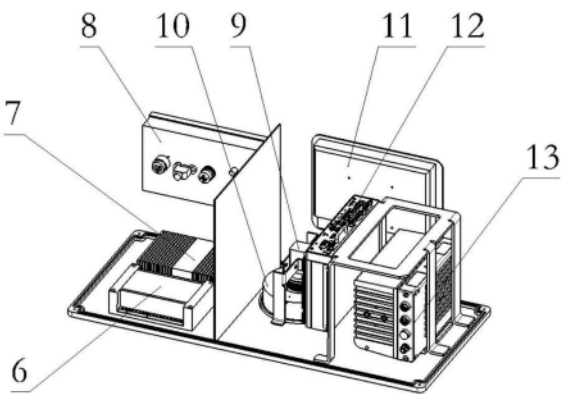
权利要求书3页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种盾构机排土量智能识别系统与方法

(57) 摘要

本发明涉及一种盾构机排土量智能识别系统与方法。主要解决现有方法测量误差较大、计算不太稳定、受环境影响较大等技术问题。本发明盾构机排土量智能识别系统主要由激光系统、相机系统、微型工控机和一体化控制盒组成；本发明识别方法包括：1) 激光断面扫描点坐标系构建；2) 扫描噪点数据剔除；3) 离散扫描点空间克里金插值体对象及体对象体积计算；4) 基于机器学习的土体类型自动识别；5) 盾构出土质量计算；方法融合了激光扫描、图像AI (Artificial Intelligence, 人工智能) 识别及地层三维重构技术, 通过空间克里金插值算法, 可以对盾构机出土体进行三维精细化建模测量, 精度更高。



1.一种盾构机排土量智能识别系统的识别方法,其特征在于:所述盾构机排土量智能识别系统包括激光断面扫描仪、相机系统、微型工控机和一体化控制盒;所述激光断面扫描仪、相机系统、微型工控机和一体化控制盒间隔安装在集成底板上,激光断面扫描仪、相机系统通过数据线与微型工控机相连,相机系统包括工业相机及补光灯;微型工控机内安装有测量采集软件及数据处理分析软件,用于数据处理和传输,对激光扫描仪、工业相机进行操作控制,微型工控机带有工业显示器,微型工控机分析结果经路由器通过无线或有线方式发送至后台控制中心;一体化控制盒包括电压转换模块、继电器控制器、交换机和控制面板,电压转换模块将交流市电转换为设备所需直流电,为所有设备供电,继电器控制器通过网线连接至交换机,与工控之间建立通讯,工控机轮询各采集设备及通信系统的工作状态,并连接控制继电器控制器的开关量输出,以实现控制面板上的指示灯进行运行状态指示;一体化控制盒为包括激光断面扫描仪、相机系统、微型工控机提供电力、运行控制、状态显示;识别方法包括以下步骤:

S1、激光断面扫描仪的采集频率F由盾构机出土履带运行速度V和测量断面距离间隔L两个因素确定,计算方法如下:

$$F=V/L \quad (1)$$

其中,V的单位为m/s,L的单位为m,F的单位Hz;

进一步,激光断面扫描仪安装于盾构机出土履带中心的正上方,即激光断面扫描仪的扫描中心与出土履带中心点连线与履带平面垂直,激光断面扫描仪的安装高度H由盾构机出土履带宽度W和激光断面扫描仪扫描角度 $\theta$ 两个因素确定,计算方法如下:

$$H=0.5W/\tan(\theta/2) \quad (2)$$

其中,H和W的单位为m, $\theta$ 的单位为弧度;

S2、为减少数据采集量及与激光断面扫描仪采集数据相匹配,相机采集采用外界程序控制触发,采集触发间隔主要由相机拍摄物体长度L确定,触发方式有两种:

(1) 定时触发:采集触发间隔由相机拍摄物体长度L和履带运动速度V确定,触发时间间隔T计算方法:

$$T=V/L \quad (3)$$

其中,L的单位为m,T的单位为秒;

(2) 定距离触发:履带每运动距离长度为L时触发,当履带运动速度V为匀速时,其触发等效于定时触发;

S3、后续识别方法包括以下步骤:

S3.1激光断面扫描点坐标系构建:以激光断面扫描仪中心点为坐标系原点,以扫描面的中线为y轴,逆时针旋转 $90^\circ$ 为x轴构建激光扫描点整体直角坐标系,而激光断面扫描仪自身设备坐标为极坐标系,需将激光断面扫描仪的极坐标系转换成直角坐标系,转换方法:

$$\begin{cases} x_i = D_i \sin \theta_i \\ y_i = D_i \cos \theta_i \end{cases} \quad (4)$$

其中, $D_i$ 为第i个激光扫描点的测量距离值, $\theta_i$ 为第i个激光扫描点与Y轴间的角度,  $(x_i, y_i)$  为第i个激光扫描点在直角坐标系中的坐标点;单个横断面的激光扫描点集记为P;

S3.2激光断面扫描仪横断面扫描数据处理:提取单个横断面的激光扫描点集P,经过式(4)对点集P进行坐标转换,转换后的点集记为 $P_0$ ,由于盾构出土的复杂环境干扰,会导致点

集 $P_0$ 存在部分噪点,需要对噪点进行剔除,通过基于3倍标准差 $\sigma_k$ 的统计滤波方法对噪点进行剔除,经剔除后的激光扫描点集,记为 $P'$ ;

S3.3依次提取N组激光扫描点集 $P'$ ,通过空间克里金插值方法,对N组点集组成的区域进行空间插值拟合,可得到该区域的土体表面至整体直角坐标系XOZ平面间的空间体,记为 $B_c$ ,出土履带初始状态时,履带表面至整体直角坐标系XOZ平面间的初始空间体,记为 $B_0$ ;

S3.4由于空间体对象表面由三角形网格表达,可通过单纯形法求得该对象的体积,

通过上述方法,空间体 $B_c$ 和 $B_0$ 的体积分别记为 $V_c$ 和 $V_0$ ,对于固定的测量装置, $V_0$ 是一定值,则由N组点集 $P'$ 组成的土体体积为 $V_0 - V_c$ ,记为 $V_{oc}$ ;

S3.5基于机器学习的土体类型自动识别:

(1) 将采集的图像数据,依据不同的土层类型分为N个类别,作为训练集;

(2) 利用训练集训练Inceptionv3模型,实现土层类别的分类;

(3) 输入检测图像,进行土层类别的判定;

S3.6土体质量计算及修正:依据基于机器学习方法识别的土体类型,可获得相对应的土体密度 $\rho$ ,则该区域土体的质量G计算方法:

$$G = \alpha \rho V \quad (7)$$

式中, $\alpha$ 为土体质量修正系数;

S3.7通过步骤S3.2、S3.3、S3.4、S3.5、S3.6的循环,可实时地测量出该时段内盾构机出土的体积与质量。

2. 根据权利要求1所述的一种盾构机排土量智能识别系统的识别方法,其特征在于:所述补光灯为环形光源。

3. 根据权利要求1所述的一种盾构机排土量智能识别系统的识别方法,其特征在于:所述步骤S3.3中空间克里金插值方法具体为:

(1) 确定空间插值底面区域,即为N组点集组成的履带表面在整体直角坐标系XOZ平面上的投影区域,该平面区域记为F;

(2) 以点集 $P'$ 为约束点,对平面区域F进行三角形约束网格剖分,得到平面区域F的基础网格,记为 $M_0$ ,网格 $M_0$ 的点集记为N,点集N均位于XOZ平面内,即点集N的Y坐标值均为零;

(3) 确定变异函数 $\gamma(h)$ ,以点集 $P'$ 作为已知样本点,对网格点集N的其他未知点进行空间克里金插值,即可计算出未知点的Y坐标值;

克里金法的估计公式为:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (5)$$

其中, $Z^*(x_0)$ 是在位置 $x_0$ 的估计值, $Z(x_i)$ 是位置的测量值, $\lambda_i$ 是分配给 $Z(x_i)$ 的残差的权重, $n$ 是用于估计过程的测量值的个数;

变异函数 $\gamma(h)$ 用来表征随机变量的空间变异结构或空间连续性,它是地质统计学的基础,选用高斯模型

$$\gamma(h) = C_0 + C_1[1 - e^{(-h/a)^2}] \quad (6)$$

其中, $C_0$ 为块金值,表征了变异函数在很短的距离内的变化值,通常是由样本误差和短距离的变异性决定的; $C_0 + C_1$ 为基台值, $a$ 为变差距离或相关尺度,表明了当样本大于这一距离时样本的空间相关性可以被忽略,而认为样本之间变得完全独立;

(4) 待未知点空间插值完毕后,即可生成一张新的空间曲面三角形网格,记为 $M_k$ ,

(5) 基础网格 $M_0$ 和插值网格 $M_k$ 的节点在Y轴方向是一一对应,通过对网格 $M_0$ 和 $M_k$ 的四周进行网格缝合,可形成一个由三角面片表达的中空闭合体对象,该空间体对象记为B,对象B的三角形网格采用半边数据结构表达,并确保各三角形面片的法向按右手坐标系朝外。

## 一种盾构机排土量智能识别系统与方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种盾构机出土测量系统,特别是公开一种盾构机排土量智能识别系统与方法,应用于盾构隧道工程领域。

### 背景技术

[0002] 在地铁建设过程中,广泛采用土压平衡盾构施工法,在掘进过程中,出土量控制不当易造成地表隆起或沉降塌陷,因此控制好出土量对盾构施工安全和效率起至关重要的作用。但目前常见的方法测量误差较大,计算也不够稳定,容易受到环境影响,如何实现出土量的准确测量是关键。

[0003] 基于激光扫描、机器视觉等传感技术的快速发展,市面上存在较多的方法。专利CN112211672A公开了一种盾构机的出土量测量方法,通过接收传输渣土的皮带机的皮带速度、渣土的密度、断面面积、当前渣土的温度以及挖掘行程,实现出土量的计算,并对超欠挖进行监控报警。CN202011604888.1公开一种利用激光扫描的盾构施工出土量监测装置,在皮带机上端安装激光扫描仪及整平机构,计算渣土在单位时间内排出量。专利CN102720510B在盾构机螺旋输送机出土口处安装针轮装置,安装在垂直与渣土速度方向的平面内,计算出土量体积,适用于盾构机穿越潮湿、有一定粘度的土层。但其装置复杂、安装设备多,所需传感器种类多,基于二维的参数计算难以准确的计算出土量。

[0004] 综上,迫切需要一种高精度出土量进行高精度建模与计算的系统与方法,实现出土量实时准确计算。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的设计一种盾构机排土量智能识别系统与方法,主要解决现有测量误差较大、计算不太稳定、受环境影响较大等技术问题。

[0006] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:一种盾构机排土量智能识别系统,包括激光断面扫描仪、相机系统、微型工控机和一体化控制盒;所述激光断面扫描仪、相机系统、微型工控机和一体化控制盒间隔安装在集成底板上,其中激光断面扫描仪,IP防护等级不低于IP65,系统距离测量精度不低于1mm;相机系统包括工业相机及补光灯;所述补光灯为环形光源;微型工控机主要用于数据处理和传输,微型工控机内安装有测量采集软件及数据处理分析软件,微型工控机带有工业显示器,微型工控机分析结果经路由器通过无线或有线方式发送至后台控制中心;一体化控制盒包括电压转换模块、继电器控制器、交换机和控制面板,电压转换模块将交流市电转换为设备所需直流电,为所有设备供电,继电器控制器通过网线连接至交换机,与工控之间建立通讯,工控机轮询各采集设备及通信系统的工作状态,并连接控制继电器控制器的开关量输出,以实现控制面板上的指示灯进行运行状态指示;一体化控制盒为包括激光断面扫描仪、相机系统、微型工控机提供电力供应、运行控制、状态显示等。

[0007] 进一步,激光断面扫描仪、相机系统通过数据线与微型工控机相连,微型工控机通

过内置软件对激光扫描仪、相机进行操作控制。

[0008] 进一步,盾构出土量实时测量装置的触发、停止操作信号经一体化控制盒与盾构机出土系统相连,动作保持一致。

[0009] 一种盾构机排土量智能识别系统的识别方法,包括以下步骤:

[0010] S1、激光断面扫描仪的采集频率F由盾构机出土履带运行速度V和测量断面距离间隔L两个因素确定,计算方法如下:

$$[0011] \quad F = V/L \quad (1)$$

[0012] 其中,V的单位为m/s,L的单位为m,F的单位Hz,为确保土体测量精度,L一般可设为0.01m,即10mm;

[0013] 进一步,激光断面扫描仪安装于盾构机出土履带中心的正上方,即激光断面扫描仪的扫描中心与出土履带中心点连线与履带平面垂直,激光断面扫描仪的安装高度H由盾构机出土履带宽度W和激光断面扫描仪扫描角度 $\theta$ 两个因素确定,计算方法如下:

$$[0014] \quad H = 0.5W / \tan(\theta/2) \quad (2)$$

[0015] 其中,H和W的单位为m, $\theta$ 的单位为弧度;

[0016] S2、为减少数据采集量及与激光断面扫描仪采集数据相匹配,相机采集采用外界程序控制触发,采集触发间隔主要由相机拍摄物体长度(履带运动方向)L确定,触发方式有两种:

[0017] (1) 定时触发:采集触发间隔由相机拍摄物体长度(履带运动方向)L和履带运动速度V确定,触发时间间隔T计算方法:

$$[0018] \quad T = V/L \quad (3)$$

[0019] 其中,L的单位为m,T的单位为秒;

[0020] (2) 定距离触发:履带每运动距离长度为L时触发,当履带运动速度V为匀速时,其触发等效于定时触发。

[0021] S3、后续识别方法包括以下步骤:

[0022] S3.1激光断面扫描点坐标系构建:以激光断面扫描仪中心点为坐标系原点,以扫描面的中线为y轴,逆时针旋转 $90^\circ$ 为x轴构建激光扫描点整体直角坐标系,而激光断面扫描仪自身设备坐标为极坐标系,需将激光断面扫描仪的极坐标系转换成直角坐标系,转换方法:

$$[0023] \quad \begin{cases} x_i = D_i \sin \theta_i \\ y_i = D_i \cos \theta_i \end{cases} \quad (4)$$

[0024] 其中, $D_i$ 为第i个激光扫描点的测量距离值, $\theta_i$ 为第i个激光扫描点与Y轴间的角度, $(x_i, y_i)$ 为第i个激光扫描点在直角坐标系中的坐标点;单个横断面的激光扫描点集记为P。

[0025] S3.2激光断面扫描仪横断面扫描数据处理:提取单个横断面的激光扫描点集P,经过式(4)对点集P进行坐标转换,转换后的点集记为 $P_0$ ,由于盾构出土的复杂环境干扰,会导致点集 $P_0$ 存在部分噪点,需要对噪点进行剔除,通过基于3倍标准差 $\sigma_k$ 的统计滤波方法对噪点进行剔除,经剔除后的激光扫描点集,记为 $P'$ ;

[0026] S3.3依次提取N组激光扫描点集 $P'$ ,通过空间克里金插值方法,对N组点集组成的区域进行空间插值拟合,可得到该区域的土体表面至整体直角坐标系XOZ平面间的空间体,记为 $B_c$ ,出土履带初始状态(未运土)时,履带表面至整体直角坐标系XOZ平面间的初始空间

体,记为 $B_0$ ;

[0027] 基于离散点集的空间克里金插值方法的步骤:

[0028] (1) 确定空间插值底面区域,即为N组点集组成的履带表面在整体直角坐标系XOZ平面上的投影区域,该平面区域记为F;

[0029] (2) 以点集P'为约束点,对平面区域F进行三角形约束网格剖分,得到平面区域F的基础网格,记为 $M_0$ ,网格 $M_0$ 的点集记为N,点集N均位于XOZ平面内,即点集N的Y坐标值均为零;

[0030] (3) 确定变异函数 $\gamma(h)$ ,以点集P'作为已知样本点,对网格点集N的其他未知点进行空间克里金插值,即可计算出未知点的Y坐标值;

[0031] 克里金法的估计公式为:

$$[0032] \quad Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (5)$$

[0033] 其中, $Z^*(x_0)$ 是在位置 $x_0$ 的估计值, $Z(x_i)$ 是位置的测量值, $\lambda_i$ 是分配给 $Z(x_i)$ 的残差的权重,n是用于估计过程的测量值的个数。

[0034] 变异函数 $\gamma(h)$ 用来表征随机变量的空间变异结构或空间连续性,它是地质统计学的基础,选用高斯模型

$$[0035] \quad \gamma(h) = C_0 + C_1[1 - e^{(-h/a)^2}] \quad (6)$$

[0036] 其中, $C_0$ 为块金值,表征了变异函数在很短的距离内的变化值,通常是由样本误差和短距离的变异性决定的; $C_0+C_1$ 为基台值,a为变差距离(变程)或相关尺度,表明了当样本大于这一距离时样本的空间相关性可以被忽略,而认为样本之间变得完全独立;

[0037] (4) 待未知点空间插值完毕后,即可生成一张新的空间曲面三角形网格,记为 $M_k$ ,

[0038] (5) 基础网格 $M_0$ 和插值网格 $M_k$ 的节点在Y轴方向是一一对应,通过对网格 $M_0$ 和 $M_k$ 的四周进行网格缝合,可形成一个由三角面片表达的中空闭合物体对象,该空间体对象记为B,对象B的三角形网格采用半边数据结构表达,并确保各三角形面片的法向按右手坐标系朝外;

[0039] S3.4由于空间体对象表面由三角形网格表达,可通过单纯形法求得该体对象的体积,

[0040] 通过上述方法,空间体 $B_c$ 和 $B_0$ 的体积分别记为 $V_c$ 和 $V_0$ ,对于固定的测量装置, $V_0$ 是一定值,则由N组点集P'组成的土体体积为 $V_0-V_c$ ,记为 $V_{oc}$ 。

[0041] S3.5基于机器学习的土体类型自动识别:

[0042] (1) 将采集的图像数据,依据不同的土层类型分为N个类别,作为训练集;

[0043] (2) 利用训练集训练Inceptionv3模型,实现土层类别的分类;

[0044] (3) 输入检测图像,进行土层类别的判定。

[0045] S3.6土体质量计算及修正:依据基于机器学习方法识别的土体类型,可获得相对应的土体密度 $\rho$ ,则该区域土体的质量G计算方法:

$$[0046] \quad G = \alpha \rho V \quad (7)$$

[0047] 式中, $\alpha$ 为土体质量修正系数,默认值为1.0,具体值可由工程现场对比试验确定。

[0048] S3.7通过步骤S3.2、S3.3、S3.4、S3.5、S3.6的循环,可实时地测量出该时段内盾构机出土的体积与质量。

[0049] 本发明的有益效果是:

- [0050] (1) 本发明可以实现盾构机出土量自动化、数字化的实时测量；
- [0051] (2) 本发明融合了激光扫描、图像AI识别及地层三维重构技术,通过空间克里金插值算法,可以对盾构机出土体进行精细化三维重构,测量精度更高；
- [0052] (3) 本发明技术方案采集系统相对简单,具有良好的防护能力,算法易编程实现,应用场景适用性强。

## 附图说明

- [0053] 图1是本发明实施例的系统架构图示意图。
- [0054] 图2是本发明实施例的设备布局图。
- [0055] 图3是本发明实施例的激光扫描系统直角坐标示意图。
- [0056] 图4是本发明实施例的极坐标与直角坐标转换示意图。
- [0057] 图5是本发明实施例的出土量测量布局示意图。
- [0058] 图6是本发明实施例的体对象单纯形法体积计算三角面片法向示意图。
- [0059] 图7是本发明实施例的变异函数模型示意图。
- [0060] 图中:1-盾构机出土履带,2-测量系统安装支架,3-出土测量装置,4-相机拍摄范围,5-激光测量线,6-继电器控制器,7-交换机,8-控制面板,9-工业相机,10-环形光源,11-工业显示器,12-微型工控机,13-激光断面扫描仪。

## 具体实施方式

- [0061] 下面结合附图和具体实施例对本发明作详细说明。
- [0062] 如图1、图2所示,一种盾构机排土量智能识别系统,包括激光断面扫描仪、相机系统、微型工控机和一体化控制盒;所述激光断面扫描仪、相机系统、微型工控机和一体化控制盒间隔安装在集成底板上,其中激光断面扫描仪,IP防护等级不低于IP65,系统距离测量精度不低于1mm;相机系统包括工业相机及补光灯;所述补光灯为环形光源;微型工控机主要用于数据处理和传输系,微型工控机内安装有测量采集软件及数据处理分析软件,微型工控机带有工业显示器,微型工控机分析结果经路由器通过无线或有线方式发送至后台控制中心;一体化控制盒包括电压转换模块、继电器控制器、交换机和控制面板,电压转换模块将交流市电转换为设备所需直流电,为所有设备供电。继电器控制器通过网线连接至交换机,与工控之间建立通讯。工控机轮询各采集设备及通信系统的工作状态,并连接控制继电器控制器的开关量输出,以实现控制面板上的指示灯进行运行状态指示;一体化控制盒为包括激光断面扫描仪、相机系统、微型工控机提供电力供应、运行控制、状态显示等。
- [0063] 进一步,激光断面扫描仪、相机通过数据线与微型工控机相连,通过测量采集软件对激光扫描仪、相机进行操作控制。
- [0064] 进一步,盾构出土量实时测量装置的触发、停止操作信号经一体化控制盒与盾构机出土系统相连,动作保持一致。
- [0065] 所述激光断面扫描仪、相机、微型工控机均可采用市购件,
- [0066] 激光断面扫描仪:可采用Sick的LMS4121R线激光扫描仪,扫描角度70°,单点激光距离测量精度为1mm,扫描点数841个,扫描频率600Hz;
- [0067] 相机:可选用BASLER品牌的acA1600-20um/uc,相机分辨率1626×1236(H×V像

素),帧速率20,外壳尺寸(长×宽×高):29.3mm×29mm×29mm,通过硬件触发、软件触发或自动运行同步控制;

[0068] 微型工控机:可选用研华ARK-1551无风扇嵌入式工控机,使用八代酷睿i5系列CPU,最高32GB DDR4 2400MHz内存,具备双路千兆网口。外壳尺寸(长×宽×高)195mm×55mm×140mm,可工作在-20~55℃环境下,抗振动冲击能力强。

[0069] 一体化控制盒:选用同岩科技TY-ICB01一体化控制盒,集成电力供应、运行控制、状态显示等功能,支持触屏操作。外壳尺寸(长×宽×高)360mm×280mm×220mm,线缆接头采用航空插头,具备IP65防护等级,环境适应性强。

[0070] 如图3、图4、图5、图6、图7所示:一种盾构机排土量智能识别系统的识别方法,包括以下步骤:

[0071] S1、激光断面扫描仪的采集频率F由盾构机出土履带运行速度V和测量断面距离间隔L两个因素确定,计算方法如下:

$$[0072] \quad F=V/L \quad (1)$$

[0073] 其中,V的单位为m/s,L的单位为m,F的单位Hz,为确保土体测量精度,L一般可设为0.01m,即10mm;

[0074] 例如,盾构机出土履带运行速度V为3.0m/s,测量断面距离间隔L为0.01m,则采集频率为300Hz,Sick的LMS4121R线激光扫描仪可满足要求;

[0075] 进一步,激光断面扫描仪安装于盾构机出土履带中心的正上方,即激光断面扫描仪的扫描中心与出土履带中心点连线与履带平面垂直,激光断面扫描仪的安装高度H由盾构机出土履带宽度W和激光断面扫描仪扫描角度 $\theta$ 两个因素确定,计算方法如下:

$$[0076] \quad H=0.5W/\tan(\theta/2) \quad (2)$$

[0077] 其中,H和W的单位为m, $\theta$ 的单位为弧度;

[0078] 例如,盾构机出土履带的宽度W为0.8m,激光断面扫描仪扫描角度 $\theta$ 为70°,则激光断面扫描仪的安装高度H为 $H=0.5*0.8/\tan(35^\circ)=0.57m$ ;

[0079] S2、为减少数据采集量及与激光断面扫描仪采集数据相匹配,相机采集采用外界程序控制触发,采集触发间隔主要由相机拍摄物体长度(履带运动方向)L确定,触发方式有两种:

[0080] (1) 定时触发:采集触发间隔由相机拍摄物体长度(履带运动方向)L和履带运动速度V确定,触发时间间隔T计算方法:

$$[0081] \quad T=L/V \quad (3)$$

[0082] 其中,L的单位为m,T的单位为秒;

[0083] (2) 定距离触发:履带每运动距离长度为L时触发,当履带运动速度V为匀速时,其触发等效于定时触发。

[0084] 例如,如果盾构机出土履带运行速度V为3.0m/s,测量断面距离间隔L为0.01m,则1秒扫描的长度为3m,取相机的拍摄范围为0.6\*0.8,其中履带运动方向为0.6m,取采用定时触发时,相机的采集频率可设为5Hz,如果采用定距触发时,可设定为0.6m,测距可选用市购测距轮测量触发;

[0085] S3、后续识别方法包括以下步骤:

[0086] S3.1激光断面扫描点坐标系构建:以激光断面扫描仪中心点为坐标系原点,以扫

描面的中线为y轴,逆时针旋转90°为x轴构建激光扫描点整体直角坐标系,而激光断面扫描仪自身设备坐标为极坐标系,需将激光断面扫描仪的极坐标系转换成直角坐标系,转换方法:

$$[0087] \quad \begin{cases} x_i = D_i \sin \theta_i \\ y_i = D_i \cos \theta_i \end{cases} \quad (4)$$

[0088] 其中, $D_i$ 为第*i*个激光扫描点的测量距离值, $\theta_i$ 为第*i*个激光扫描点与Y轴间的角度, $(x_i, y_i)$ 为第*i*个激光扫描点在直角坐标系中的坐标点;单个横断面的激光扫描点集记为P。

[0089] S3.2激光断面扫描仪横断面扫描数据处理:提取单个横断面的激光扫描点集P,经过式(4)对点集P进行坐标转换,转换后的点集记为 $P_0$ ,由于盾构出土的复杂环境干扰,会导致点集 $P_0$ 存在部分噪点,需要对噪点进行剔除,通过基于3倍标准差 $\sigma_k$ 的统计滤波方法对噪点进行剔除,经剔除后的激光扫描点集,记为 $P'$ ;

[0090] 基于统计滤波的激光扫描噪点剔除方法:首先对每个点 $P_i \in P$ ,先计算出其k近邻域的平均距离 $d$ ,然后,对在 $P_i$ 点k近邻域内的整体点云P的方差 $U_k$ 和标准差 $\sigma_k$ 进行估计,其目的是保持点 $P_i$ 的平均距离 $d$ 与最接近的k个近邻和该点的其余部分是类似的,有效点云 $P^*$ 的限制条件:

$$[0091] \quad P^* = \{P_i^* \in P | (u_k - \alpha \times \sigma_k) \leq \bar{d}^* (u_k + \alpha \times \sigma_k)\} \quad (5)$$

[0092] 其中, $\alpha$ 为限制性因素,可取3.0, $\bar{d}^*$ 为每个特征点到激光扫描仪中心点的距离值。

[0093] S3.3依次提取N组激光扫描点集 $P'$ ,通过空间克里金插值方法,对N组点集组成的区域进行空间插值拟合,可得到该区域的土体表面至整体直角坐标系XOZ平面间的空间体,记为 $B_c$ ,出土履带初始状态(未运土)时,履带表面至整体直角坐标系XOZ平面间的初始空间体,记为 $B_0$ ;

[0094] 基于离散点集的空间克里金插值方法的步骤:

[0095] (1) 确定空间插值底面区域,即为N组点集组成的履带表面在整体直角坐标系XOZ平面上的投影区域,该平面区域记为F;

[0096] (2) 以点集 $P'$ 为约束点,对平面区域F进行三角形约束网格剖分,得到平面区域F的基础网格,记为 $M_0$ ,网格 $M_0$ 的点集记为N,点集N均位于XOZ平面内,即点集N的Y坐标值均为零;

[0097] (3) 确定变异函数 $\gamma(h)$ ,以点集 $P'$ 作为已知样本点,对网格点集N的其他未知点进行空间克里金插值,即可计算出未知点的Y坐标值;

[0098] 克里金法的估计公式为:

$$[0099] \quad Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (6)$$

[0100] 其中, $Z^*(x_0)$ 是在位置 $x_0$ 的估计值, $Z(x_i)$ 是位置的测量值, $\lambda_i$ 是分配给 $Z(x_i)$ 的残差的权重,n是用于估计过程的测量值的个数。

[0101] 变异函数 $\gamma(h)$ 用来表征随机变量的空间变异结构或空间连续性,它是地质统计学的基础,选用高斯模型

$$[0102] \quad \gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - e^{(-h/a)^2}] \quad (7)$$

[0103] 其中, $C_0$ 为块金值,表征了变异函数在很短的距离内的变化值,通常是由样本误差

和短距离的变异性决定的; $C_0+C_1$ 为基台值, $a$ 为变差距离(变程)或相关尺度,表明了当样本大于这一距离时样本的空间相关性可以被忽略,而认为样本之间变得完全独立;

[0104] (4) 待未知点空间插值完毕后,即可生成一张新的空间曲面三角形网格,记为 $M_k$ ,

[0105] (5) 基础网格 $M_0$ 和插值网格 $M_k$ 的节点在Y轴方向是一一对应,通过对网格 $M_0$ 和 $M_k$ 的四周进行网格缝合,可形成一个由三角面片表达的中空闭合体对象,该空间体对象记为B,对象B的三角形网格采用半边数据结构表达,并确保各三角形面片的法向按右手坐标系朝外;

[0106] S3.4由于空间体对象表面由三角形网格表达,可通过单纯形法求得该对象的体积,

[0107] 通过上述方法,空间体 $B_c$ 和 $B_o$ 的体积分别记为 $V_c$ 和 $V_o$ ,对于固定的测量装置, $V_o$ 是一定值,则由N组点集P'组成的土体体积为 $V_o-V_c$ ,记为 $V_{oc}$ 。

[0108] 单纯形法求空间体对象体积的方法:

[0109] (1) 首先确保块体所有三角面片的面法向是一致的,如均朝外或朝内;

[0110] (2) 选定一个基准点C,为了计算方便,一般选原点(0,0,0);

[0111] (3) 依次遍历体的三角面片 $\Delta_i$ ,计算每个三角面片 $\Delta_i$ 与基准点C连接而成的四面体体积 $V_i$ ;

$$[0112] \quad V_i = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_c & y_c & z_c \\ 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \end{vmatrix} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \end{vmatrix} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_i & y_i & y_i \\ x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \end{vmatrix} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{6} (x_i y_j z_k + x_k y_i z_j + x_j y_k z_i - x_k y_j z_i - x_i y_k z_j - x_j y_i z_k)$$

[0113] (4) 块体的体积为:  $V = \sum_i^n V_i$ , 其中n为块体表面三角面片的个数。

[0114] S3.5基于机器学习的土体类型自动识别:

[0115] (1) 将采集的图像数据,依据不同的土层类型分为15个类别,分别为填土、淤泥、粘土、砂土、淤泥质粘土、淤泥质粉质粘土、粉质粘土、粉质砂土、粉质砂土、粉砂、粉细砂、粘质粉土、砂质粉土、强风化岩、弱风化岩、微风化岩,作为训练集;

[0116] (2) 利用训练集训练Inceptionv3模型,实现土层类别的分类;

[0117] (3) 输入检测图像,进行土层类别的判定。

[0118] Inceptionv3超参数主要设置如下:

[0119] training\_steps:12000

[0120] learning\_rate:0.06

[0121] testing\_percentage:10%

[0122] validation\_percentage:10%

[0123] train\_batch\_size:300

[0124] test\_batch\_size:-1

[0125] validation\_batch\_size:300

[0126] S3.6土体质量计算及修正:依据基于机器学习方法识别的土体类型,可获得相对

应的土体密度 $\rho$ ,则该区域土体的质量 $G$ 计算方法:

$$[0127] \quad G = \alpha \rho V \quad (9)$$

[0128] 式中, $\alpha$ 为土体质量修正系数,默认值为1.0,具体值可由工程现场对比试验确定。

[0129] S3.7通过步骤S3.2、S3.3、S3.4、S3.5、S3.6的循环,可实时地测量出该时段内盾构机出土的体积与质量。

[0130] 以上详细描述了本发明的较佳具体实施例。应当理解,本领域的普通技术人员无需创造性劳动就可以根据本发明的构思作出诸多修改和变化。因此,凡本技术领域技术人员依本发明的构思在现有技术的基础上通过逻辑分析、推理或者有限的实验可以得到的技术方案,皆应在由本发明的权利要求书所要求的保护范围内。

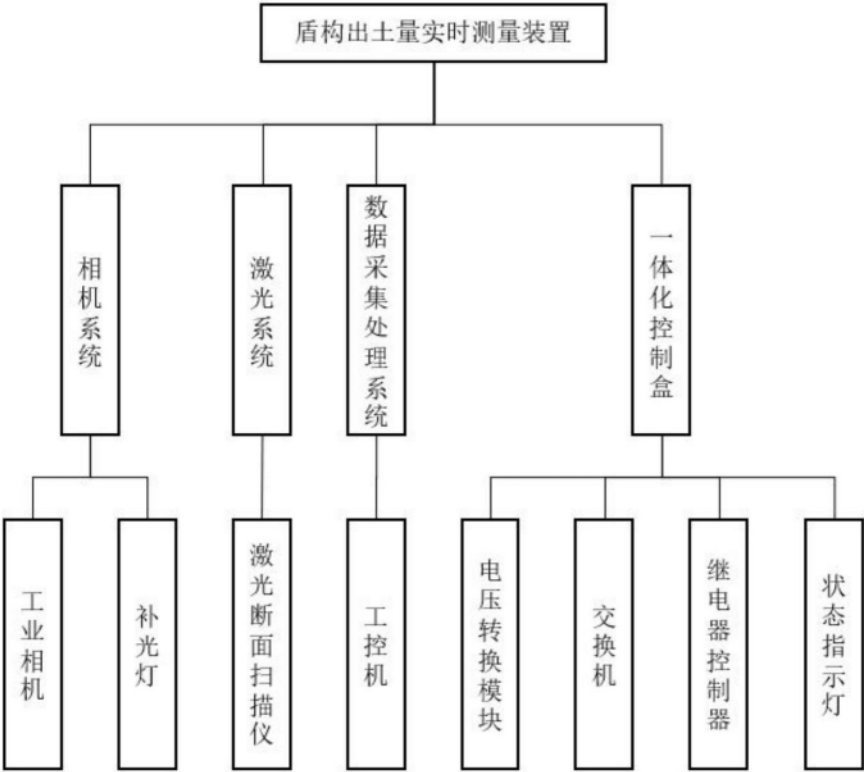


图1

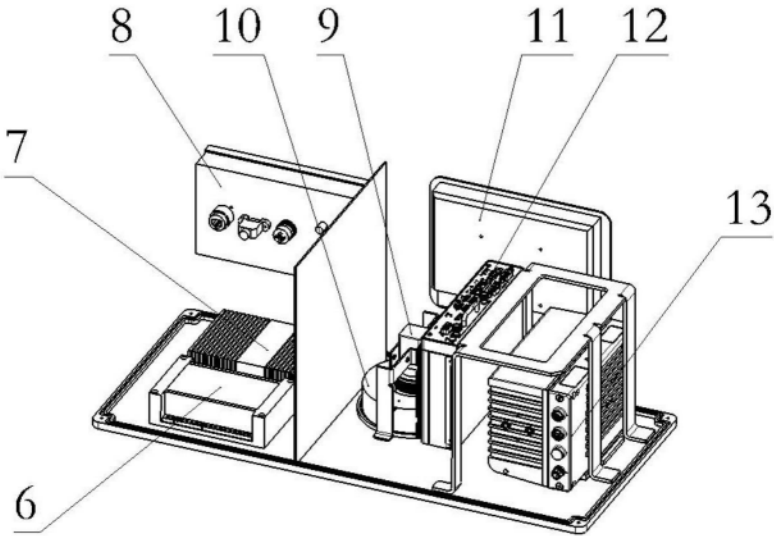


图2

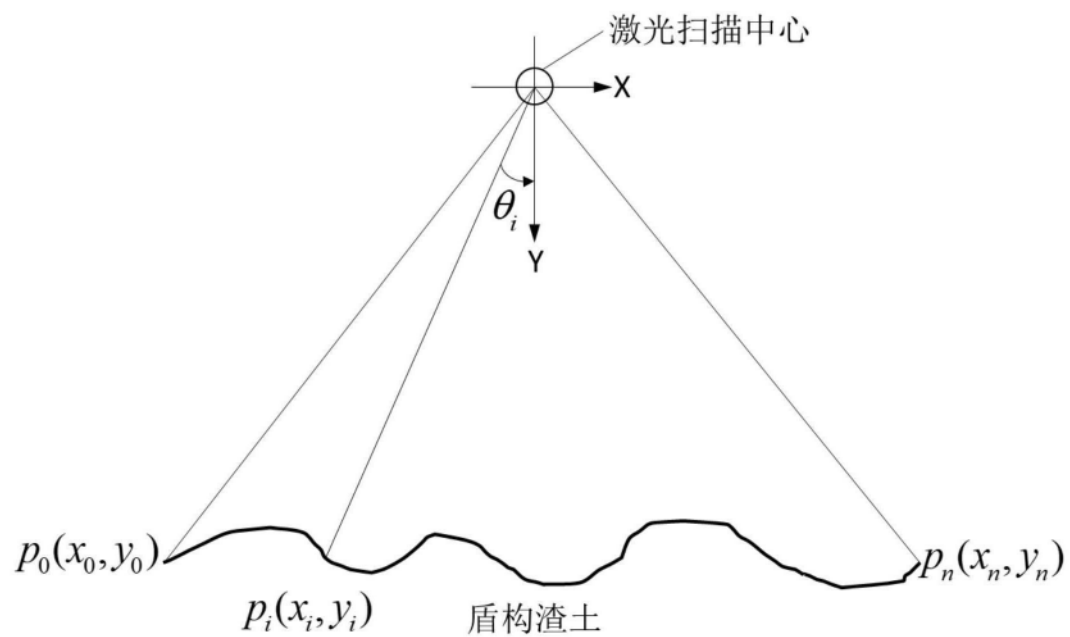


图3

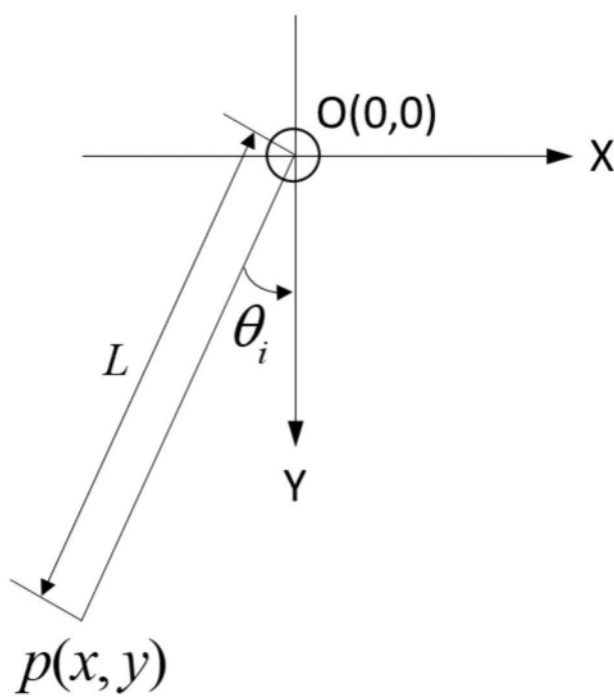


图4

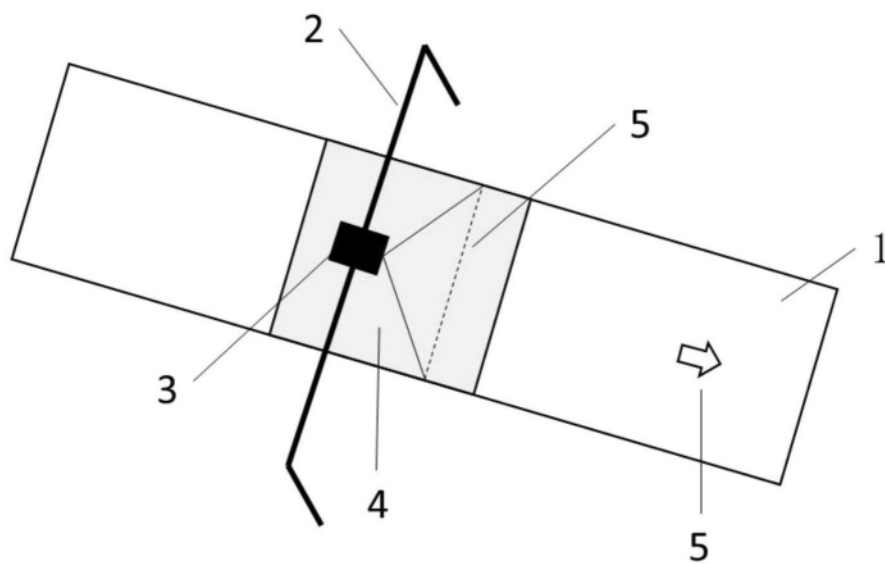


图5

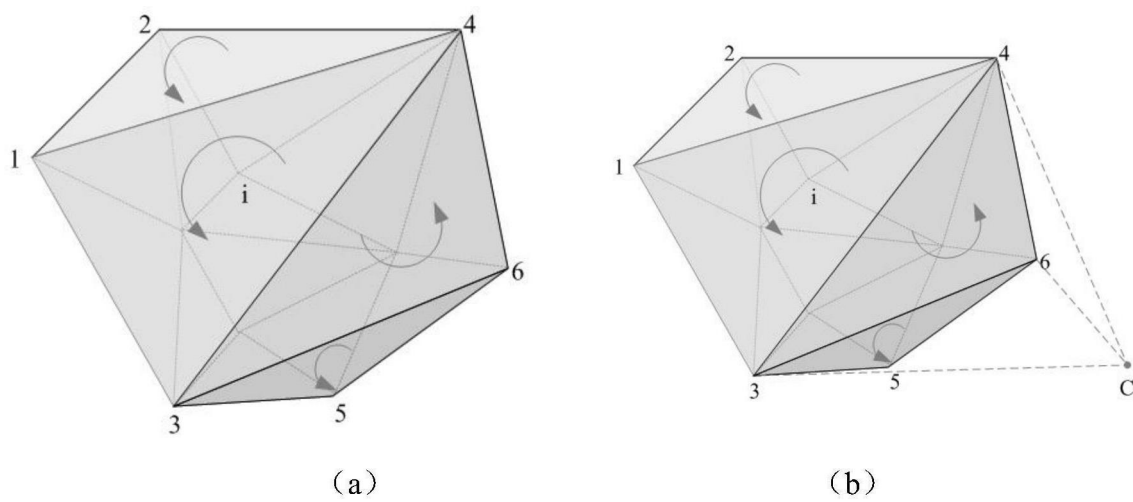


图6

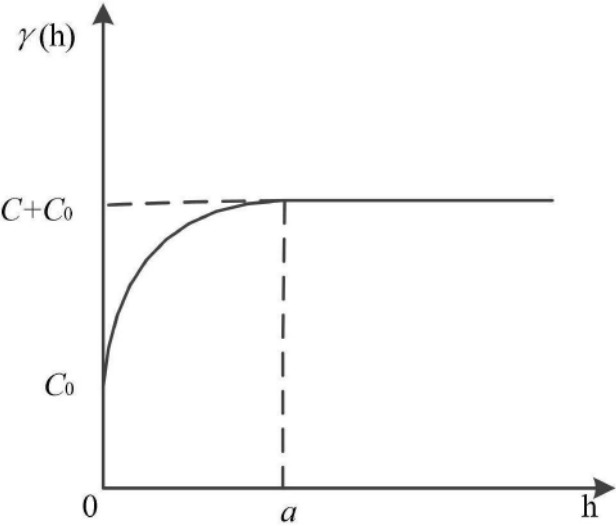


图7