



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113160143 A

(43) 申请公布日 2021.07.23

(21) 申请号 202110316958.1

(22) 申请日 2021.03.23

(71) 申请人 中南大学

地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号

(72) 发明人 余伶俐 许泽中 阳春华 赵于前

(74) 专利代理机构 长沙正奇专利事务所有限责任公司 43113

代理人 马强 王娟

(51) Int. Cl.

G06T 7/00 (2017.01)

G06T 7/73 (2017.01)

G06T 17/20 (2006.01)

G06K 9/46 (2006.01)

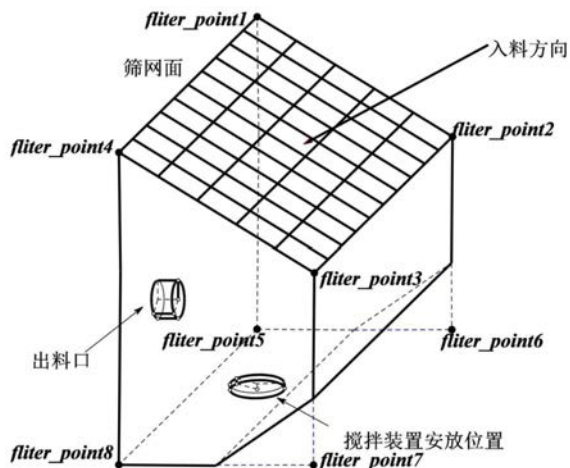
权利要求书3页 说明书11页 附图5页

(54) 发明名称

物料搅拌槽内物料液面高度测量方法及系统

(57) 摘要

本发明公开了一种物料搅拌槽内物料液面高度测量方法及系统,获取卸料至物料搅拌槽工况的原始三维点云数据并构建三维点云图;在激光雷达坐标系内对物料搅拌槽模型关键点进行标定,并依据物料搅拌槽模型的关键点位置范围,对原始三维点云数据进行第一次滤波,仅保留物料搅拌槽内的激光点;通过分割理想激光面并根据激光点的远近来筛选种子点;构建多个不规则三角网来提取新的特征点;根据当前数据帧之前和之后的两帧滤波后的点云数据对特征点进行修正、筛选;将特征点进行曲线拟合,通过采样并计算采样点到筛网面的距离取平均值的方式获取不同液面位置与筛网面的距离。本发明可提高物料搅拌槽内搅拌工作的效率与安全度。



1. 一种物料搅拌槽内物料液面高度测量方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、实时采集物料输送到物料搅拌槽内混合搅拌的工作过程中物料搅拌槽、物料液面以及周边工程设备在激光雷达坐标系下的空间位置信息,获取原始的激光雷达三维点云数据;

S2、在激光雷达坐标系内对物料搅拌槽模型关键点进行标定,并依据物料搅拌槽模型的关键点位置坐标,对原始的激光雷达三维点云数据进行第一次滤波,滤除物料搅拌槽外的所有点云数据,仅保留物料搅拌槽内的激光点;

S3、分割理想激光面并根据步骤S2处理后保留的激光点的远近筛选种子点,并对种子点的可靠性进行判断,确定物料液面种子点;

S4、根据所述物料液面种子点构建多个不规则三角网,提取新的特征点;

S5、并对所述特征点进行筛选和修正;

S6、对经步骤S5处理后得到的特征点进行曲线拟合,利用拟合后的曲线获取不同液面位置与筛网面的距离。

2. 根据权利要求1所述的物料搅拌槽内物料液面高度测量方法,其特征在于,步骤S2的具体实现过程包括:

1) 在激光雷达坐标系中对料斗模型的八个关键点进行标定,八个关键点记为:fliter\_point1( $x_1, y_1, z_1$ ), fliter\_point2( $x_2, y_2, z_2$ ), ..., fliter\_point8( $x_8, y_8, z_8$ );其中,fliter\_point1, fliter\_point2, fliter\_point3, fliter\_point4为矩形筛网的四个顶点,fliter\_point5, fliter\_point6, fliter\_point7, fliter\_point8为矩形筛网四个顶点在水平地面上的投影;

2) 逐一判断激光雷达三维点云数据中的激光点是否在该八个关键点所形成的空间多面体的内部,如果某个激光点不在所述空间多面体的内部,则将该激光点从当前三维点云数据中剔除,否则保留该激光点。

3. 根据权利要求1所述的物料搅拌槽内物料液面高度测量方法,其特征在于,步骤S3的具体实现过程包括:

a) 通过料斗与激光雷达的相对位置,以及每一线激光在垂直方向上的偏角,获取在当前激光雷达安装位置下,能够表征物料液面高度的激光雷达ID编号,得到一个有效的ID编号集合:valid\_id={valid\_id\_1, valid\_id\_2, ..., valid\_id\_n};valid\_id\_1, valid\_id\_2, ..., valid\_id\_n为第1个、第2个、.....第n个有效的ID编号;

b) 将经步骤S2处理后得到的三维点云数据依据不同的有效的ID编号进行分组,得到n个点云子数据集sub\_points\_1, sub\_points\_2, ..., sub\_points\_i, ..., sub\_points\_n;依据每个有效ID编号对应的激光垂直发射角度 $\gamma_i$ ,生成n个理论激光平面方程,

c) 由筛网面顶点的位置坐标fliter\_point1( $x_1, y_1, z_1$ ), fliter\_point2( $x_2, y_2, z_2$ ), fliter\_point3( $x_3, y_3, z_3$ )提取筛网平面方程;

d) 将n个点云子数据集中的激光点分别投影到相应的理论激光平面,并对理论激光平面进行分割处理,将平面沿坐标系x轴方向分割成若干个等大小的矩形;

e) 计算各分割区域内投影点与交线段的距离,根据距离值以及自适应控制率adj调整分割区域内种子点的数量,最终得到初始种子点集合;

f) 对每个初始种子点集合进行可靠性判断,滤除异常的离群点,得到最终的种子点集

合,即物料液面种子点集合。

4.根据权利要求3所述的物料搅拌槽内物料液面高度测量方法,其特征在于,步骤d)的具体实现过程包括:

i)空间中筛网平面方程与n个理论激光方程形成n条交线段,交线段记为line\_1,line\_2,...,line\_n;将line\_1,line\_2,...,line\_n等分为m份,每一段长度为 $\frac{L}{m}$ ;将数据集中的激光点投影至对应的理想激光平面上;

ii)在每个理论激光平面上,以每一个分割后的线段作为矩形的短边,矩形长边选取大于或等于 $V_{\max}$ 的任意值,由此将理论激光平面分割为m个矩形,其中, $V_{\max}$ 为投影到激光平面上的所有激光点到交线距离的最大值。

5.根据权利要求4所述的物料搅拌槽内物料液面高度测量方法,其特征在于,步骤e)的具体实现过程包括:

I)根据自适应控制律adj调整不同矩形区域内选择的初始种子点数量Q:

$$Q = 1 + \frac{w}{s}G;$$

其中,G为矩形区域内的激光点数量, $v_1, v_2, \dots, v_f$ 为激光平面上的f个激光投影点到交线的距离, $u_1, u_2, \dots, u_g$ 为分割后矩形区域中g个激光投影点到交线的距离; $w$ 为分割后矩形区域中满足 $|u_i - V_{\max}| \leq T$ 的激光投影点数量, $i=1, 2, \dots, g$ , $s$ 为整个平面上满足 $|v_j - V_{\max}| \leq T$ 的激光投影点数量, $j=1, 2, \dots, f$ , $T \in [0, 0.2]$ ;

II)在每个矩形区域内,按照自适应控制律adj选取分割区域内种子点的数量,选中的种子点满足以下条件:与所在理想激光平面和筛网面的交线的距离值小于T。

6.根据权利要求4所述的物料搅拌槽内物料液面高度测量方法,其特征在于,步骤f)的具体实现过程包括:

A)计算与矩形区域j相邻的8个矩形区域内选中的各种子点到交线的距离的平均值 $h_{j-4}, h_{j-3}, h_{j-2}, h_{j-1}, h_{j+1}, h_{j+2}, h_{j+3}, h_{j+4}$ ;

B)引入判别式: $\sum H = \frac{|h_{j-4}-h_j|+\dots+|h_{j-1}-h_j|+|h_{j+4}-h_j|+\dots+|h_{j+1}-h_j|}{8}$ ,设置阈值 $H_{\max}$ ,对于初选种子点 $P_j$ ,若 $\sum H$ 小于或等于阈值 $H_{\max}$ ,则该矩形区域j的初选种子点 $P_j$ 确定为物料液面种子点,若 $\sum H$ 大于阈值 $H_{\max}$ ,则将相邻8个矩形区域内种子点到交线line\_1的距离的平均值赋予点 $P_j$ ,以此确定该矩形区域j的物料液面种子点。

7.根据权利要求6所述的物料搅拌槽内物料液面高度测量方法,其特征在于,步骤S4中,根据所述物料液面种子点构建多个不规则三角网,提取新的特征点的具体实现过程包括:

A、根据步骤B)得到的物料液面种子点构建多个不规则三角形,在理想激光平面上沿着激光雷达坐标系x轴负方向依次选取不规则三角形的关键点,当前选取的三个关键点中x坐标最小的关键点作为下一个不规则三角形的第一个关键点,如果最后剩下的物料液面种子点不能构成一个不规则三角形,则沿x轴正方向构建最后一个不规则三角网;

B、由不规则三角形的关键点对应的原空间激光点与除去物料液面种子点外的其他点云数据构建不规则三角形网,对该不规则三角形网所在矩形区域内激光投影点所对应的原空间激光点进行判断,具体判断过程包括:对某个待判断点W,W到原空间中的不规则三角形

平面ABC的距离为 $fliter\_h$ ,直线WA、WB、WC与平面的夹角分别为 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\omega$ ,设置距离阈值为 $fliter\_h_{max}$ ,角度阈值为 $\theta_{max}$ ,若待检测点W满足到平面ABC的距离小于设定的距离阈值,即 $fliter\_h < fliter\_h_{max}$ ,且直线WA,WB,WC与平面ABC的最大夹角小于设定的角度阈值,即 $\max(\alpha, \beta, \omega) < \theta_{max}$ ,则该待判断点W成为新的特征点。

8. 根据权利要求6所述的物料搅拌槽内物料液面高度测量方法,其特征在于,步骤S4中,对所述特征点进行筛选和修正的具体实现过程包括:

S51、对当前帧原始激光雷达点云数据的前一帧原始激光雷达点云数据和后一帧原始激光雷达点云数据同样按照步骤S1~S4的方法进行处理,得到两个特征点数据集 $compare\_points\_before$ 和 $compare\_points\_after$ ;

S52、根据新的特征点集合,对当前获取的每一个特征点,以该特征点为圆心,设置搜索半径为Radius进行搜索,当该特征点在此半径内必须至少有特征点数据集 $compare\_points\_before$ 和 $compare\_points\_after$ 中的2个点时,该特征点才会被保留,否则删除该特征点;

S53、采用半径滤波算法对经步骤S52处理后保留的当前特征点进行修正,即以当前获取的每一个特征点为圆心,设置搜索半径为Radius,该特征点在此半径内有超过特征点数据集 $compare\_points\_before$ 和 $compare\_points\_after$ 中的5个数据点时,对该特征点进行修正,修正后特征点的坐标为该六个点坐标的平均值。

9. 根据权利要求1所述的物料搅拌槽内物料液面高度测量方法,其特征在于,步骤S6的具体实现过程包括:

利用修正后的特征点的y坐标与z坐标,分别采用最小二乘多项式对修正后的特征点的x坐标进行曲线拟合,即得到当前高度液位线 $cur$ ;在当前高度液位线 $cur$ 等距取k个关键点,对每一个关键点,用点面距离公式求得该关键点到筛网面的距离,对得到的k个距离求平均值,作为此处物料液位与筛网面之间的距离。

10. 一种物料搅拌槽内物料液面高度测量系统,其特征在于,包括计算机设备;所述计算机设备被配置或编程为用于执行权利要求1~9之一所述方法的步骤。

## 物料搅拌槽内物料液面高度测量方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及工业检测领域,特别是一种物料搅拌槽内物料液面高度测量方法及系统。

### 背景技术

[0002] 过滤和搅拌过程在我们的生产生活中,特别是在工业生产过程中发挥着重要的作用。许多的物料在进一步加工之前都需要经过过滤、搅拌过程,比如建筑工地对混凝土的搅拌、灌注过程,某些化工企业在产品提炼过程中就经常需要对原料进行过滤、搅拌过程,通常在加工过程中原料的输入、搅拌、输出过程是实时连续的,固液混合原料通过输送通道不断地向物料搅拌槽输送原料,原料经过筛网后进入物料搅拌槽进行搅拌,然后通过出口输出至下一个工作环节。由于搅拌前固液混合原料性质的复杂性与不均匀性,所以物料在搅拌槽内搅拌的时间往往是不确定的、具有很大的随机性,加工过程中需要工作人员通过目测物料搅拌槽内物料液面与搅拌槽筛网的距离,人工控制物料的输入速度。然而,这样的工况实际存在着一些问题:

[0003] (1) 物料搅拌槽内物料的搅拌过程中存在喷射现象,特别是在搅拌槽内物料量不足的时候(最远可达数十米),对工作人员有着一定程度的威胁;

[0004] (2) 工作人员由于注意力不集中或是由于视觉的误判,再加上控制不当等因素,会导致物料搅拌槽内的物料溢出;

[0005] (3) 专门聘请人员人为控制物料的输入的速度提高了工程成本。

[0006] 调研时发现为控制系统的设计提供物料搅拌槽内物料液面实时信息的传感器受实际工况的影响很大,接触式的音叉物位计、压力传感器、在固液混合原料不断翻滚的搅拌槽内工作寿命短、消耗量大,导致不易维护和成本增加。常用的非接触式传感器如红外传感器、超声传感器、深度相机等也因为物料搅拌槽内搅拌过程中物料的飞溅、现场环境的高频噪声以及筛网面下物料液面无特征点等原因无法达到良好的测量效果。所以选用非接触式传感器激光雷达对三维环境进行建模,解算物料液面到筛网面的距离,但由于搅拌过程中的液滴飞溅,会使激光雷达生成的点云中出現非表征物料液面的离群点,需要进行相应的滤波处理。

[0007] 现今常用的点云滤波方法有直通滤波算法、双边滤波算法、高斯滤波算法、条件滤波算法、基于随机采样一致性滤波算法等。但由于工况环境的复杂与多变,离散点随机性很大,且某些位置可能出现离散点数量远超真实点数量的情况,单一传统滤波方法无法达到理想的滤波效果,直通滤波算法只能滤除已知的离散点,无法作用于位置位置的点云数据;双边滤波算法通过取邻近采样点的加权平均来修正当前采样点的位置,从而达到滤波效果,但也会剔除与当前采样点“差异”太大的相邻采样点,导致有效数据的丢失;采用高斯滤波算法时,虽然点云数据有较好的平滑效果,能让曲面数据有更好的连续性,但是无法很好地适应恶劣工况下物料液面高度的突然波动;而随机采样一致性算法虽然可以从一组包含“局外点”的观测数据集中,通过迭代方式估计数学模型的参数,但是为了提高

概率 必须提高迭代次数,难以满足实际工程中的实时性要求。所以需要采取综合性的 滤波方法,如何综合传统滤波方法的优势并根据实际情况设计相应的自适应变换 机制成为解决该工程问题的关键。

## 发明内容

[0008] 本发明所要解决的技术问题是,针对现有技术不足,提供一种物料搅拌槽 内物料液面高度测量方法及系统,持续、稳定地对料斗内混凝土液面高度进行测 量。

[0009] 为解决上述技术问题,本发明所采用的技术方案是:一种物料搅拌槽内物 料液面高度测量方法,包括以下步骤:

[0010] S1、实时采集物料输送到物料搅拌槽内混合搅拌的工作过程中物料搅拌槽、物料液面以及周边工程设备在激光雷达坐标系下的空间位置信息,获取原始的激 光雷达三维点云数据;

[0011] S2、在激光雷达坐标系内对物料搅拌槽模型关键点进行标定,并依据物料 搅拌槽模型的关键点位置坐标,对原始的激光雷达三维点云数据进行第一次滤波, 滤除物料搅拌槽外的所有点云数据,仅保留物料搅拌槽内的激光点;

[0012] S3、分割理想激光面并根据步骤S2处理后保留的激光点的远近筛选种子点, 并对种子点的可靠性进行判断,确定物料液面种子点;

[0013] S4、根据所述物料液面种子点构建多个不规则三角网,提取新的特征点;

[0014] S5、并对所述特征点进行筛选和修正;

[0015] S6、对经步骤S5处理后得到的特征点进行曲线拟合,利用拟合后的曲线获 取不同液面位置与筛网面的距离。

[0016] 本发明通过对获取的激光雷达原始数据进行预处理,有效地减小了后期滤 波方法实现过程的数据运算量,提高了滤波算法的实时性;通过分割理想激光面 并根据激光点的远近筛选种子点,降低了滤波算法的复杂性,并获得了可信度高 的种子点;构建多个不规则三角网,提取新的特征点保证了数据的完整性和丰富 性,减小了过拟合的出现的可 能。依据前后帧的激光雷达数据对表征物料液面的 特征点进行修正,进一步地确保了特征 点的有效性,减小了随机离散点出现带来 的随机误差的可能。

[0017] 步骤S2的具体实现过程包括:

[0018] 1) 在激光雷达坐标系中对料斗模型的八个关键点进行标定,八个关键点记 为:  $fliter\_point1(x_1, y_1, z_1), fliter\_point2(x_2, y_2, z_2), \dots, fliter\_point8(x_8, y_8, z_8)$ ; 其中,  $fliter\_point1, fliter\_point2, fliter\_point3, fliter\_point4$ 为矩形筛 网的四个 顶点,  $fliter\_point5, fliter\_point6, fliter\_point7, fliter\_point8$ 为矩形筛 网四个 顶点在水平地面上的投影;

[0019] 2) 逐一判断激光雷达三维点云数据中的激光点是否在该八个关键点所 形成的空间多面体的内部,如果某个激光点不在所述空间多面体的 内部,则将该激光点从当前三维 点云数据中剔除,否则保留该激光 点。

[0020] 本发明通过预先对料斗模型的八个关键点进行标定,可以方便地获取的激光 雷达原始数据进行预处理,有效地减小了后期滤波方法实现过程的数据运算量, 提高了滤波 算法的实时性;同时,预先剔除部分无效数据,能够避免后期投影过 程中引入新的干扰,提

高了算法的鲁棒性。

[0021] 步骤S3的具体实现过程包括：

[0022] a) 通过料斗与激光雷达的相对位置,以及每一线激光在垂直方向上的偏角,获取在当前激光雷达安装位置下,能够表征混凝土液面高度的激光雷达ID编号,得到一个有效的ID编号集合:  $\text{valid\_id} = \{\text{valid\_id}_1, \text{valid\_id}_2, \dots, \text{valid\_id}_n\}$ ;  $\text{valid\_id}_1, \text{valid\_id}_2, \dots, \text{valid\_id}_n$ 为第1个、第2个、.....第n个有效的ID编号;

[0023] b) 将经步骤S2处理后得到的三维点云数据依据不同的有效的ID编号进行分组,得到n个点云子数据集  $\text{sub\_points}_1, \text{sub\_points}_2, \dots, \text{sub\_points}_i, \dots, \text{sub\_points}_n$ ;依据每个有效ID编号对应的激光垂直发射角度  $\gamma_i$ ,生成n个理论激光平面方程,

[0024] c) 由筛网面顶点的位置坐标  $\text{fliter\_point1}(x_1, y_1, z_1)$ ,  $\text{fliter\_point2}(x_2, y_2, z_2)$ ,  $\text{fliter\_point3}(x_3, y_3, z_3)$  提取筛网平面方程;

[0025] d) 将n个点云子数据集中的激光点分别投影到相应的理论激光平面,并对理论激光平面进行分割处理,将平面沿坐标系x轴方向分割成若干个等大小的矩形;

[0026] e) 计算各分割区域内投影点与交线段的距离,根据距离值以及自适应控制率adj调整分割区域内选取种子点的数量,最终得到初始种子点集合;

[0027] f) 对每个初始种子点集合进行可靠性判断,滤除异常的离群点,得到最终的种子点集合,即物料液面种子点集合。

[0028] 本发明根据激光垂直发射角度的不同,将激光雷达获取的点云数据进行分组,相较于直接对全体的点云数据进行处理的方法,分组处理能够更好地利用同一个编号的点云数据属于同一平面的特性,降低了滤波算法的复杂性,无需针对复杂的全体的点云数据设计一个整体的滤波算法,而是每个编号对应的点云数据共享一个滤波算法,提高了滤波算法的鲁棒性。

[0029] 步骤d)的具体实现过程包括:

[0030] i) 空间中筛网平面方程与n个理论激光方程形成n条交线段,交线段记为  $\text{line}_1, \text{line}_2, \dots, \text{line}_n$ ;将  $\text{line}_1, \text{line}_2, \dots, \text{line}_n$  等分为m份,每一段长度为  $\frac{L}{m}$ ;将数据集中的激光点投影至对应的理想激光平面上,得到同等数量的激光投影点;

[0031] ii) 在每个理论激光平面上,以每一个分割后的线段作为矩形的短边,矩形长边选取大于或等于  $V_{\max}$  的任意值,由此将理论激光平面分割为m个矩形,其中,  $V_{\max}$  为投影到激光平面上的所有激光点到交线距离的最大值。

[0032] 在选取种子点之前,本发明先对理想激光平面进行分割处理,能够保证在物料搅拌槽的水平各个方向上都选取到种子点,避免在以激光投影点到交线距离值为初始筛选种子点的单一标度的情况下造成有效数据丢失的情况,保证了数据的完整性和丰富性。

[0033] 步骤e)的具体实现过程包括:

[0034] I) 根据自适应控制律adj调整不同矩形区域内选择的初始种子点数量Q:

$$[0035] \quad Q = 1 + \frac{w}{s}G;$$

[0036] 其中,G为矩形区域内的激光点数量,  $v_1, v_2, \dots, v_f$  为激光平面上的f个激光投影点到交线的距离,  $u_1, u_2, \dots, u_g$  为分割后矩形区域中g个激光投影点到交线的距离;w为分

割后矩形区域中满足  $|u_i - V_{\max}| \leq T$  的激光投影点数量,  $i=1, 2, \dots, g, s$  为整个平面上满足  $|v_j - V_{\max}| \leq T$  的激光投影点数量,  $j=1, 2, \dots, f$ ,  $T \in [0, 0.2]$ ;

[0037] II) 在每个矩形区域内, 根据距离值以及自适应控制率  $adj$  调整分割区域内种子点的数量, 选中的种子点满足以下条件: 与所在理想激光平面和筛网面的交线的距离值小于  $T$ 。

[0038] 由于复杂工况下点云数据的分布具有很大的随机性, 在每个分割后的矩形区域内选取固定数量的种子点会导致有效数据的丢失并引入离群点的干扰, 因此本发明设计自适应控制律, 根据不同分区内满足激光投影点到交线的距离要求的数量, 动态调整不同矩形区域内选择的初始种子点数量, 提高了滤波算法的鲁棒性。步骤 f) 的具体实现过程包括:

[0039] A) 计算与矩形区域  $j$  相邻的 8 个矩形区域内各种子点到交线的距离的平均值  $h_{j-4}, h_{j-3}, h_{j-2}, h_{j-1}, h_{j+1}, h_{j+2}, h_{j+3}, h_{j+4}$ ;

[0040] B) 引入判别式:  $\Sigma H = \frac{|h_{j-4} - h_j| + \dots + |h_{j-1} - h_j| + |h_{j+4} - h_j| + \dots + |h_{j+1} - h_j|}{8}$ , 设置阈值  $H_{\max}$ , 对于初选种子点  $P_j$ , 若  $\Sigma H$  小于或等于阈值  $H_{\max}$ , 则该矩形区域  $j$  的初选种子点  $P_j$  确定为物料液面种子点, 若  $\Sigma H$  大于阈值  $H_{\max}$ , 则将相邻 8 个矩形区域内种子点到交线  $line\_1$  的距离的平均值赋予点  $P_j$ , 以此确定该矩形区域  $j$  的物料液面种子点。

[0041] 本发明利用物料液面具有连续性的特点, 用相邻的矩形分区的特征点来计算局部区域内特征点需要满足的距离阈值条件, 通过对不满足条件的种子点进行修正, 使数据更有连续性, 使之后拟合的曲线和曲面更加平滑。

[0042] 步骤 S4 中, 根据所述物料液面种子点构建多个不规则三角网, 提取新的特征点的具体实现过程包括:

[0043] A、根据步骤 B) 得到的物料液面种子点构建多个不规则三角形, 在理想激光平面上沿着激光雷达坐标系  $x$  轴负方向依次选取不规则三角形的关键点, 当前选取的三个关键点中  $x$  坐标最小的关键点作为下一个不规则三角形的第一个关键点, 如果最后剩下的物料液面种子点不能构成一个不规则三角形, 则沿  $x$  轴正方向构建最后一个不规则三角网;

[0044] B、由不规则三角形的关键点对应的原空间激光点与除去物料液面种子点外的其他点云数据构建不规则三角形网, 对该不规则三角形网所在矩形区域内激光投影点所对应的原空间激光点进行判断, 具体判断过程包括: 对某个待判断点  $W$ ,  $W$  到原空间中的不规则三角形平面  $ABC$  的距离为  $fliter\_h$ , 直线  $WA$ 、 $WB$ 、 $WC$  与平面的夹角分别为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\omega$ , 设置距离阈值为  $fliter\_h_{\max}$ , 角度阈值为  $\theta_{\max}$ , 若待检测点  $W$  满足到平面  $ABC$  的距离小于设定的距离阈值, 即  $fliter\_h < fliter\_h_{\max}$ , 且直线  $WA$ 、 $WB$ 、 $WC$  与平面  $ABC$  的最大夹角小于设定的角度阈值, 即  $\max(\alpha, \beta, \omega) < \theta_{\max}$ , 则该待判断点  $W$  成为新的特征点。

[0045] 本发明基于筛选出来的种子点构建不规则三角网, 通过对原始空间中的其他非种子点进行判断筛选, 得到能够表征物料液面的新特征点, 提高了有效数据的数量, 避免单纯依靠初始种子点进行距离解算、曲面拟合导致的过拟合问题。

[0046] 步骤 S4 中, 对所述特征点进行筛选和修正的具体实现过程包括:

[0047] S51、对当前帧原始激光雷达点云数据的前一帧原始激光雷达点云数据和后一帧原始激光雷达点云数据同样按照步骤 S1~S4 的方法进行处理, 得到两个特征点数据集



compare\_points\_before和compare\_points\_after;

[0048] S52、根新的特征点集合,对当前获取的每一个特征点,以该特征点为圆心,设置搜索半径为Radius进行搜索,当该特征点在此半径内必须至少有特征点数据集compare\_points\_before和compare\_points\_after中的2个点时,该特征点才会被保留,否则删除该特征点;

[0049] S53、采用半径滤波算法对经步骤S52处理后保留的当前特征点进行修正,即以当前获取的每一个特征点为圆心,设置搜索半径为Radius,该特征点在此半径内有超过特征点数据集compare\_points\_before和compare\_points\_after中的5个数据点时,对该特征点进行修正,修正后特征点的坐标为该六个点坐标的平均值。

[0050] 本发明利用激光雷达采样速率快,而物料液面瞬时变化往往较慢的特点,依据前后帧的激光雷达数据对表征物料液面的特征点进行修正,进一步地确保了特征点的有效性,让距离解算以及之后的曲线、曲面拟合更接近真实情况,同时减小了随机离散点出现带来的随机误差的可能。

[0051] 步骤S6的具体实现过程包括:利用修正后的特征点的y坐标与z坐标,分别采用最小二乘多项式对修正后的特征点的x坐标进行曲线拟合,即得到当前高度液位线cur;在当前高度液位线cur等距取k个关键点,对每一个关键点,用点面距离公式求得该关键点到筛网面的距离,对得到的k个距离求平均值,作为此处泥浆液位与筛网面之间的距离。

[0052] 本发明还提供了一种物料搅拌槽内物料液面高度测量系统,其包括计算机设备;所述计算机设备被配置或编程为用于执行上述方法的步骤。

[0053] 与现有技术相比,本发明所具有的有益效果为:

[0054] 1) 本发明克服了常用的接触式测量以及非接触式测量无法持续、稳定地对料斗内混泥土液面高度进行测量的难题,为后期设计搅拌车、泵车协同工作控制系统提供了技术基础;

[0055] 2) 通过分割激光平面并根据分割区域内投影点数量以及距离分布来提取初始种子点,通过与相邻种子点比对进行可靠性分析,保证率种子点的高质量筛选;

[0056] 3) 利用多个不规则三角网以及基于前后帧数据的半径滤波算法来获取表征混泥土液面的特征点的方法,保证了拟合液位曲线数据点的数量,同时避免了单帧数据的可靠性不高所带来的随机偏差。

## 附图说明

[0057] 图1为本发明检测对象物料搅拌槽的模型示意图;

[0058] 图2为本发明采用的velodyne16激光雷达的坐标系示意图;(a)激光雷达侧视图;(b)激光雷达俯视图;

[0059] 图3为本发明采用的velodyne16激光雷达不同ID编号的激光束发射方向示意图;

[0060] 图4为本发明应用环境的三维点云图;

[0061] 图5为第一次滤波时选取物料搅拌槽模型关键点的示意图;

[0062] 图6为仅保留物料搅拌槽内部点云的示意图;

[0063] 图7为对理想激光平面的分割示意图;

[0064] 图8为在种子点中选取构建不规则三角形关键点的示意图;

[0065] 图9为由不规则三角形和待判断特征点构建不规则三角网的示意图；

[0066] 图10为滤波后得到表征不同高度物料液位的特征点的示意图；

### 具体实施方式

[0067] 本发明实施例的物料搅拌槽内物料液面高度测量方法,包括以下步骤:

[0068] 步骤1、数据准备。本方法需要的数据包括:实时采集向物料搅拌槽内不断 输送物料的动态过程的激光雷达点云数据;由使用者输入滤波参数,参数的数值 根据点云实际情况、点云滤波精度需求、硬件环境等灵活确定。

[0069] 步骤2、在激光雷达坐标系内对物料搅拌槽的关键点进行标定,并依据物料 搅拌槽模型关键点位置坐标范围,对原始三维点云数据进行第一次滤波,滤除搅 拌槽模型以外的所有点云数据,仅保留搅拌槽模型内的点云数据;

[0070] 步骤3、通过分割理想激光面并根据激光点与筛网面的距离值来筛选种子点, 并对种子点进行可靠性判断;

[0071] 步骤4、构建多个不规则三角网来提取新的特征点;

[0072] 步骤5、取前一帧和后一帧的激光雷达原始数据,进行步骤1、2、3的同样 滤波处理,据此来对当前帧的特征点进行修正、筛选;

[0073] 步骤6、将特征点进行曲线拟合,通过采样并计算采样点到筛网面的距离取 平均值的方式获取不同物料液面位置与筛网面的距离,最后对表征多个液位高度 的液位线进行曲面拟合,得到完整的物料液面;

[0074] 步骤7、搭建实验平台对velodyne16线激光雷达的测量精度进行验证;

[0075] 各步骤细节如下:

[0076] 步骤1为获取实时采集的向物料搅拌槽内不断输送物料这一动态过程的激 光雷 达点云数据。

[0077] 步骤1.1、构建图1所示的物料搅拌槽工作模型,包括物料搅拌槽、筛网面、搅拌槽 内的机械装置(用于模拟搅拌机使物料液面翻滚)以及模拟物料液面的合 适原料,如类似 混凝土的固液混合原料;

[0078] 步骤1.2、将激光雷达与物料搅拌槽模型进行刚性连接,通过实时构建环境 三维 点云图来选择合适的安装角度与距离使得入射物料搅拌槽内的激光线数最 多, velodyne16线激光雷达的坐标轴方向如图2所示,激光雷达坐标系是指以激 光发射中心为 坐标系原点,垂直于激光雷达上表面向上为Z轴正方向,在激光 雷达水平对称平面上过坐 标原点背离雷达后端接口且平行于雷达下表面的方向 为Y轴正方向,X轴与Y、Z轴成右手 系。激光束编号与竖直发射角度的对应关 系如表1和图3所示;

[0079] 表1velodyne16激光雷达ID编号与垂直发射角度的对应关系

	Lasers ID	Vertical Angle
[0080]	0	-15°
	1	1°
	2	-13°
	3	-3°
	4	-11°
	5	5°
	6	-9°
	7	7°
	8	-7°
	9	9°
	10	-5°
	11	11°
[0081]	12	-3°
	13	13°
	14	-1°
	15	15°

[0082] 步骤1.3、让模型工作运转,通过数据抓取软件获取动态工作过程中的激光 雷达原始点云数据,在仿真环境中构建类似的三维点云模型如图4所示,其中标 识出了物料搅拌槽的筛网面、筛网面上方的物料倾倒槽以及筛网面下方的待筛选 点。

[0083] 步骤2、如图4所示,除了筛网下方的待处理点云数据以及表征筛网面的点 云数据之外,物料搅拌槽之外的点都是第一步需要进行滤除的离群点。在激光雷 达坐标系内对物料搅拌槽模型关键点进行标定,并依据物料搅拌槽模型的关键点 坐标范围,对原始三维点云数据进行第一次滤波,滤除料斗外的所有点云数据。

[0084] 步骤2.1、如图5所示,在激光雷达坐标系中对料斗模型的八个关键点进行 标定。八个关键点记为:

[0085]  $fliter\_point1(x_1, y_1, z_1), fliter\_point2(x_2, y_2, z_2), \dots, fliter\_point8(x_8, y_8, z_8)$ ;

[0086] 其中, $fliter\_point1, fliter\_point2, fliter\_point3, fliter\_point4$ 为矩形 筛网的四个顶点, $fliter\_point5, fliter\_point6, fliter\_point7, fliter\_point8$  为矩形筛网四个顶点在水平地面上的投影;

[0087] 步骤2.2、对步骤1.3中获得每一个点云数据的位置坐标逐一进行判断,判 断激光

点是否在该八个关键点所形成的空间多面体的内部。

[0088] 筛选的具体方法为:

[0089] ①判断选择的八个特征点在 $x, y, z$ 方向上的极大值和极小值:

[0090]  $\max_x = \max(x_1, x_2, \dots, x_8), \min_x = \min(x_1, x_2, \dots, x_8);$

[0091]  $\max_y = \max(y_1, y_2, \dots, y_8), \min_y = \min(y_1, y_2, \dots, y_8);$

[0092]  $\max_z = \max(z_1, z_2, \dots, z_8), \min_z = \min(z_1, z_2, \dots, z_8);$

[0093] ②在原始点云数据中选择待判断点 $P_w(x_w, y_w, z_w);$

[0094] ③判断 $P_w(x_w, y_w, z_w)$ 是否在模型空间范围内:若同时满足 $\min_x < x_w < \max_x, \min_y < y_w < \max_y, \min_z < z_w < \max_z$ ,则保留该点;若该点不在模型空间范围内,则剔除该点,转到步骤②

[0095] 如图6所示,仅保留下了在物料搅拌槽内的激光点。

[0096] 步骤3、通过分割理想激光面并根据激光点的远近来筛选种子点;

[0097] 步骤3.1、通过解析激光雷达点云数据并还原的环境三维点云图,提取在当前激光雷达安装位置下表征混泥土液面高度的激光雷达ID编号,即获取多线激光雷达发射激光束并打在物料搅拌槽内物料液面上的激光ID编号。

[0098] 如表1所示,每一个ID编号对应着一个特定的垂直发射角度,最后得到一个有效的ID编号集合:

[0099]  $\text{valid\_id} = \{\text{valid\_id}_1, \text{valid\_id}_2, \dots, \text{valid\_id}_n\}$

[0100] 步骤3.2、将一次滤波完成后得到的点云数据依据不同的有效的ID编号进行分离,得到 $n$ 个点云子数据集  $\text{sub\_points}_1, \text{sub\_points}_2, \dots, \text{sub\_points}_i, \dots, \text{sub\_points}_n;$

[0101] 步骤3.3、依据每个有效ID编号对应的激光垂直发射角度 $\gamma_i$ ,生成 $n$ 个理论激光平面方程:①在有效ID编号集合中选择一个有效ID编号 $\text{valid\_id}_i;$

[0102] ②根据ID编号与激光垂直发射角度 $\gamma_i$ 对应关系查询表获取该ID编号对应的激光垂直发射角度 $\gamma_i;$

[0103] ③根据 $\gamma_i$ 提取此ID编号激光束所在平面的平面方程:

[0104]  $\pi_i: a_i x + b_i y + c_i z + d_i = 0$

[0105] 由于激光束所在平面通过激光雷达坐标系原点和 $x$ 轴,所以有 $d_i = 0, a_i = 0$ 。由激光垂直发射角度 $\gamma_i$ 可求得该发射角度下的平面方程为:

[0106]  $z - y \cdot \tan \gamma_i = 0$

[0107] 若有效ID编号集合中所有有效ID编号对应的平面方程都已提取,则结束此程序,否则转入第①步。

[0108] 最终生成 $n$ 个理论激光平面方程:

[0109] 
$$\begin{cases} \pi_1: a_1 x + b_1 y + c_1 z + d_1 = 0 \\ \pi_2: a_2 x + b_2 y + c_2 z + d_2 = 0 \\ \dots \\ \pi_n: a_n x + b_n y + c_n z + d_n = 0 \end{cases}$$

[0110] 步骤3.4、由筛网面顶点的位置坐标 $\text{fliter\_point1}(x_1, y_1, z_1), \text{fliter\_point2}(x_2, y_2, z_2), \text{fliter\_point3}(x_3, y_3, z_3)$ 提取筛网平面方程:

[0111]  $\pi_s: a_s x + b_s y + c_s z + d_s = 0$

[0112] 步骤3.5、将n个点云子数据集中的激光点分别投影到相应的激光平面,并对激光平面解分割处理。

[0113] 步骤3.5.1、空间中筛网平面方程将与n个理论激光方程形成n条交线段,记为line\_1,line\_2,...,line\_n;

[0114] 步骤3.5.2、将交线段line\_1,line\_2,...,line\_n等分为m份,每一段长度为 $\frac{L}{m}$ ;

[0115] 步骤3.5.3、如图7所示,对n个理想激光平面进行矩形切割,其具体方法为:

[0116] ①在点云子数据集1~n中选择一个数据集,将数据集中的激光点投影至对应的理想激光平面上;

[0117] ②计算投影激光点到交线的距离,记投影到激光平面上的所有激光点到交线距离的最大值为 $V_{\max}$ ;

[0118] ③在每个理想激光平面上,以每一个分割后的线段作为矩形的短边,矩形长边可为任意值,但最小值必须大于投影到激光平面上的激光点到交线的最远距离,即切割矩形长边可选取大于等于 $V_{\max}$ 的任意值,由此将激光面分割为m个矩形;若n个平面均完成切割,则此过程结束,否则转到步骤①。

[0119] 步骤3.6、根据距离值以及自适应控制率adj调整分割区域内选取种子点的数量,最终得到初始种子点集合,具体步骤为:

[0120] ①提取n个理想激光平面中某一平面 $\pi_i$ 上投影点的数据集;

[0121] ②统计每个矩形分区内投影点的个数;

[0122] ③根据自适应控制律adj来调整不同矩形区域内选择的初始种子点数量:

[0123]  $Q = 1 + \frac{w}{s}G$ ;

[0124] 其中,G为矩形区域内的激光点数量, $v_1, v_2, \dots, v_f$ 为激光平面上的f个激光投影点到交线的距离, $u_1, u_2, \dots, u_g$ 为分割后矩形区域中g个激光投影点到交线的距离;w为分割后矩形区域中满足 $|u_i - V_{\max}| \leq T$ 的激光投影点数量, $i=1, 2, \dots, g$ ,s为整个平面上满足 $|v_j - V_{\max}| \leq T$ 的激光投影点数量, $j=1, 2, \dots, f$ ,  $T \in [0, 0.2]$ ;

[0125] ④每个矩形区域内根据距离值以及自适应控制率adj调整分割区域内选取种子点的数量,构成初始种子点集合,选中的种子点满足以下条件:与所在理想激光平面和筛网面的交线的距离值小于T;若所有点云子数据集均完成了初始种子点的选择,此过程结束,否则转入步骤①。

[0126] 步骤3.7、对每一个初始种子点集合进行可靠性判断,滤除一些异常的离群点,得到最终的种子点集合;

[0127] 步骤3.7.1、计算矩形分区j相邻的8个矩形区域内各种子点到交线的距离的平均值 $h_{j-4}, h_{j-3}, h_{j-2}, h_{j-1}, h_{j+1}, h_{j+2}, h_{j+3}, h_{j+4}$ ;

[0128] 步骤3.7.2、对种子点进行可靠性判断,引入判别式:

[0129] 
$$\sum H = \frac{|h_{j-4} - h_j| + \dots + |h_{j-1} - h_j| + |h_{j+4} - h_j| + \dots + |h_{j+1} - h_j|}{8}$$

[0130] 对初选种子点 $P_j$ 进行判定,设置阈值 $H_{\max}$ ,若小于等于阈值,则该矩形区域的初选种子点 $P_j$ 可以确定为混泥土面种子点,若 $\sum H$ 大于阈值,则将相邻8个矩形区域内种子点到交线line\_1的距离的平均值赋予点 $P_j$ ,以此来确定该矩形区域的种子点。最终可得到n个

表征不同物料液位高度的种子点集合。

[0131] 步骤4、构建多个不规则三角网来提取新的特征点；

[0132] 步骤4.1、在步骤3.7.2得到的n个表征不同物料液位高度的种子点集合中选择一个种子点集合来构建筛选该液位高度的更多特征点的不规则三角网；

[0133] 步骤4.2、在理想激光平面上选择构成不规则三角网的关键点，具体选取方法为：

[0134] 在理想激光平面上沿着激光雷达坐标系x轴负方向依次选取不规则三角网的关键点，当前选取的三个关键点中x坐标最小的关键点作为下一个不规则三角网的第一个关键点。如图8所示，在矩形分区1中选择E、F、G作为第一个不规则三角网的关键点，且x坐标最小的G点作为第二个不规则三角网的第一个关键点，如果最后剩下种子点不能构成一个不规则三角网，则从最后一个分区，沿x轴正方向构建最后一个不规则三角网。

[0135] 注意：这里构建不规则三角网所用的关键点并不是理想激光平面上的投影点，而是投影点对应的原空间的激光点。

[0136] 步骤4.3、如图9所示，分别对不规则三角形所在矩形区域的非种子点进行特征点判别，其具体方法为：

[0137] ①在步骤4.2中构造的若干个不规则三角形中选择一个，并提取不规则三角形所在矩形区域内所有的非种子点：

[0138] ②在非种子点中选择一个点构建不规则三角网；

[0139] ③计算该点到原空间中的不规则三角形平面的距离 $fliter\_h$ ；

[0140] ④计算该点与原空间中的不规则三角形平面顶点的连线与不规则三角形平面的夹角 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\omega$ ；

[0141] ⑤记 $fliter\_h_{max}$ 为距离阈值， $\theta_{max}$ 为角度阈值，如果待检测点W满足到平面ABC的距离小于设定阈值，即 $fliter\_h < fliter\_h_{max}$ ，而且直线WA、WB、WC与平面ABC的最大夹角小于设定阈值，即 $\max(\alpha, \beta, \omega) < \theta_{max}$ ，则该点成为新增特征点。若不规则三角形所在矩形区域内所有的非种子点都判断完成，则转到步骤①，若未判断完成，则转到步骤②。

[0142] 由此得到了标志n个液面高度位置的特征点集合。

[0143] 步骤5、根据当前数据帧之前和之后的两帧滤波后的点云数据对特征点进行修正、筛选，最终得到表征不同高度液位线的特征点，如图10所示；

[0144] 步骤5.1、对前一帧原始激光雷达点云数据和后一帧的原始激光雷达点云数据同样按照步骤1到4的方法进行处理，得到两个特征点数据集  $compare\_points\_before$  和  $compare\_points\_after$ ；

[0145] 步骤5.2、采用半径滤波算法对当前特征点进行筛选。

[0146] ①在步骤4.3中得到的标志n个液面高度位置的n个特征点集合中选择一个特征点集合g；

[0147] ②在 $compare\_points\_before$ 和 $compare\_points\_after$ 选择标志相同液面

[0148] 高度位置的特征点集合 $g_1, g_2$ ；

[0149] ③在特征点集合g选择一个特征点s进行判断：

[0150] ④以当前获取的特征点s为圆心，设置搜索半径为Radius，若在此半径内必须有特征点数据集 $g_1$ 和 $g_2$ 中的2个点时，此点才会被保留，否则删去该特征点。若该特征点集合中所有的特征点均完成判断，则此流程结束，否则转到步骤①。

[0151] 步骤5.3、采用半径滤波算法对当前特征点进行修正：

[0152] ①在步骤4.3中得到的标志n个液面高度位置的n个特征点集合中选择一个特征点集合g；

[0153] ②在compare\_points\_before和compare\_points\_after选择标志相同液面

[0154] 高度位置的特征点集合 $g_1, g_2$ ；

[0155] ③在特征点集合g选择一个特征点s进行判断：

[0156] ④以当前获取的特征点s为圆心，设置搜索半径为Radius，若在此半径内必须有超过特征点数据集 $g_1$ 和 $g_2$ 中的5个点时，对该特征点进行修正，修正后特征点的坐标为这六个点的平均值。若该特征点集合中所有的特征点均完成判断，则此流程结束，否则转到步骤①。

[0157] 由此可以得到最终用于拟合n条表征不同物料液位高度曲线的特征点数据集，如图10所示。

[0158] 步骤6、将特征点进行曲线拟合，通过采样并计算采样点到筛网面的距离取平均值的方式获取不同液面位置与筛网面的距离，其具体步骤为：

[0159] ①在步骤5.3中用半径滤波算法得到的最终标志n个液面高度位置的n个特征点集合中选择一个特征点集合u；

[0160] ②对特征点的y坐标与z坐标分别采用最小二乘多项式对x进行曲线拟合(例如阶数取5)，则当前高度液位线Cur可表示为：

$$[0161] \quad \begin{cases} y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 \\ z = f(x) = b_0 + b_1y + b_2y^2 + b_3y^3 + b_4y^4 + b_5y^5 \end{cases}$$

[0162] ③在曲线Cur取若等距取k个关键点，对每一个关键点用点面距公式求得该点到筛网面的距离，对得到的k个距离求平均值作为此处泥浆液位与筛网面之间的距离。若所有特征点集都已完成拟合，则此过程结束，否则转到步骤①。

[0163] 至此可得混凝土液面上n个不同位置的高度测量值(此高度测量值指的是混凝土液面某处与筛网面之间的距离，而不是距离水平地面的高度)。对表征n个不同位置的高度的液位进行曲面拟合还可进一步拟合得到整个物料液面模型。

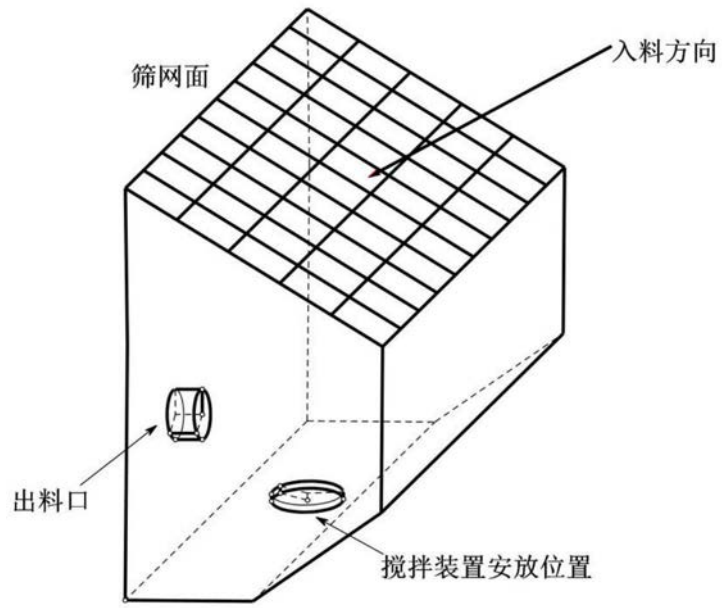


图1

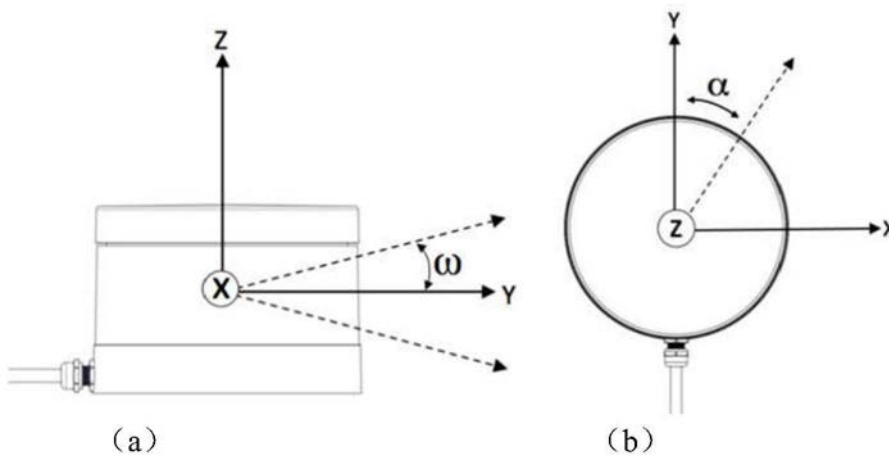


图2



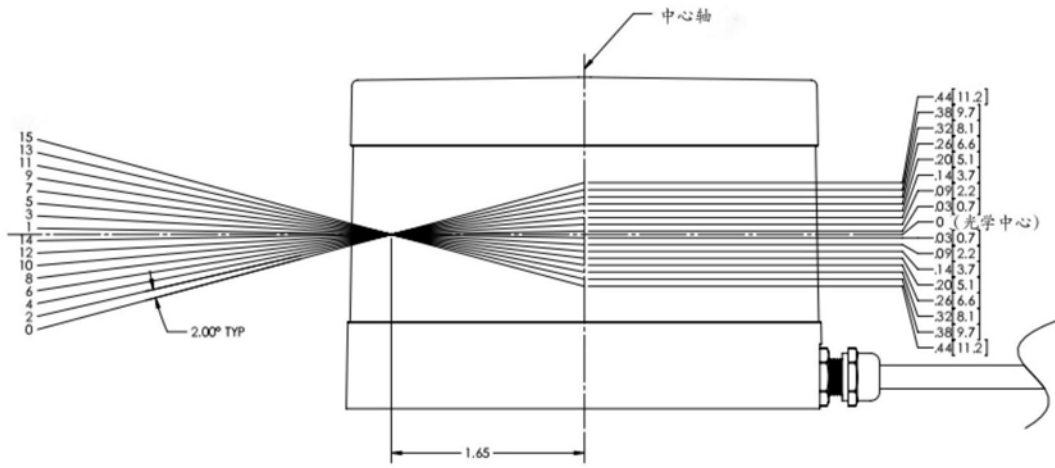


图3

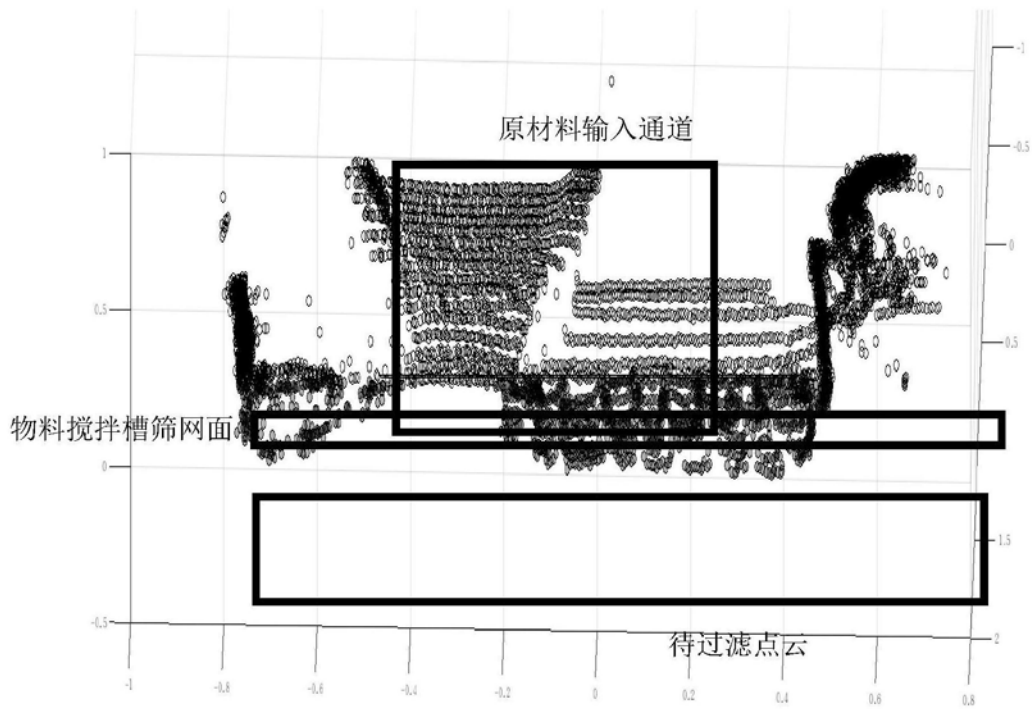


图4

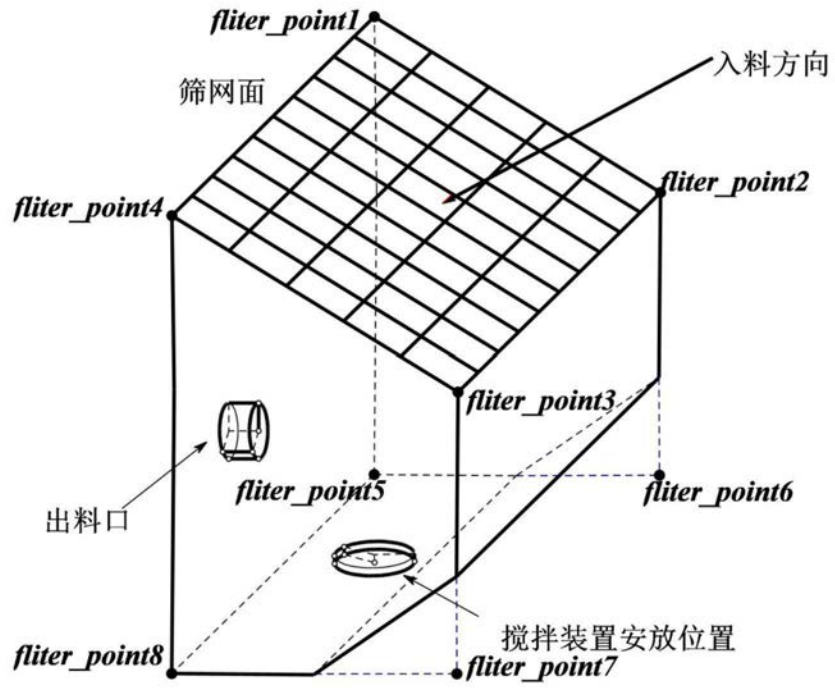


图5

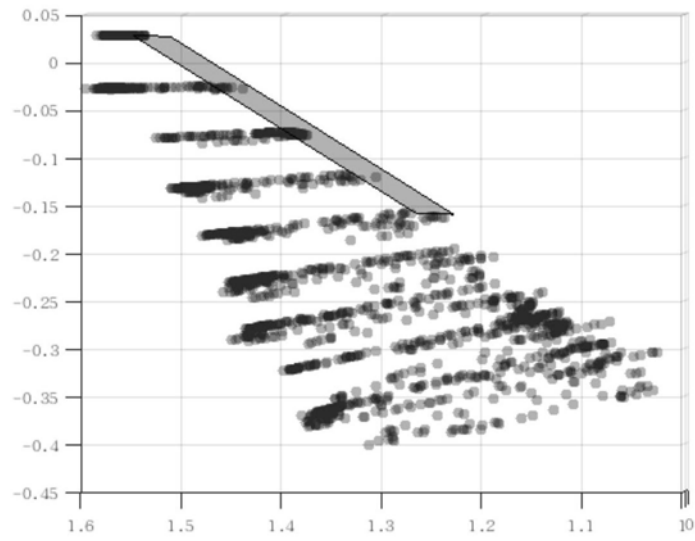


图6

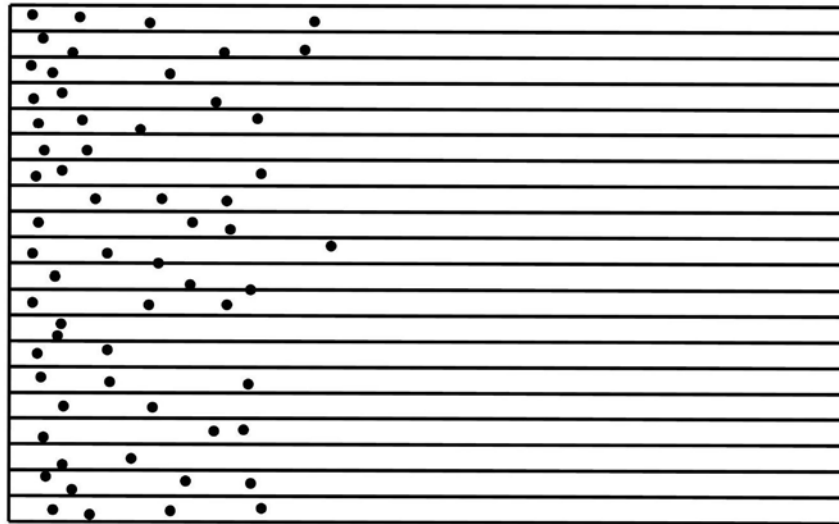


图7

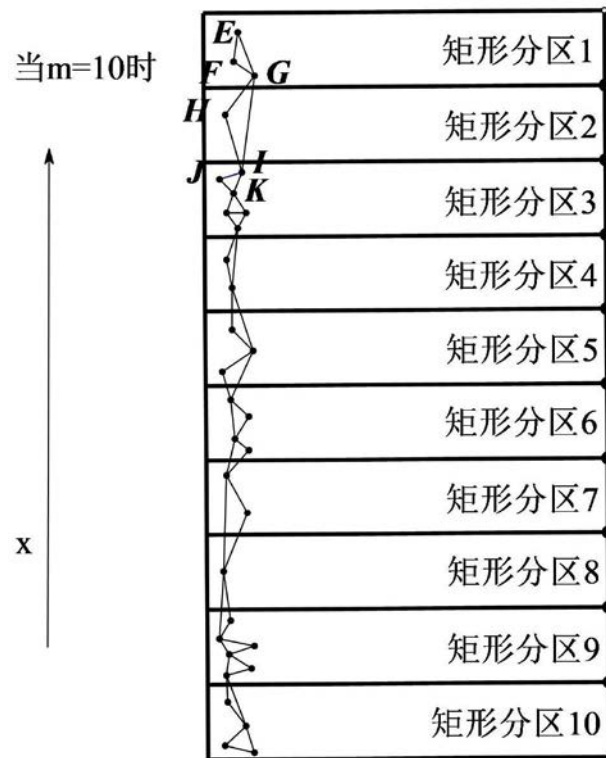


图8

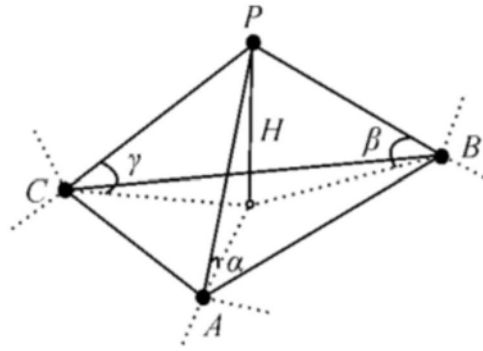


图9

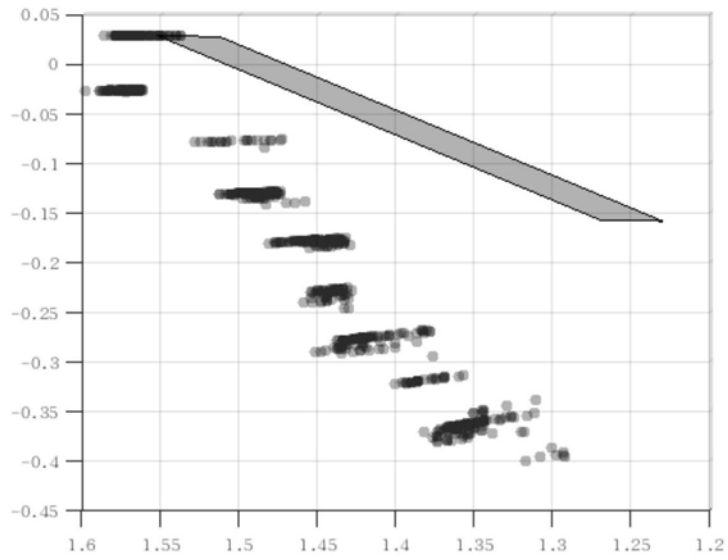


图10