

第 1 章 动态目标的三维测量

科学是从测量开始的,测量技术是科学发展的基石。相比一维、二维数据对测量目标的管窥蠡测,三维数据能够更全面、完整地描述待测目标。在目标探测技术急需用于工业制造、资源勘探、自动驾驶,智能机器人、空间在轨服务等实际场景中的今天,三维测量技术应运而生。如何快速准确地获取测量目标的三维信息,为下游科学技术研究提供数据支持,研究人员从硬件设备、成像系统、数据后处理技术等几个方面进行了改进。

一般来说,探测目标可以分为静态目标和动态目标两大类。静态目标是指空间位置姿态相对固定的目标,如桥梁、隧道、文物等;动态目标是指空间位置姿态不断变化的目标,如卫星、车辆、行人等。对于静态目标,探测的主要目的是描述其物理特征,比如形状、尺寸、质量等。对于动态目标,探测的目的不仅是测量其物理特征,还是通过测量了解其运动特征,比如速度、方向、距离等。

从探测方式来说,获取测量目标的三维结构可以大致分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量以其能够达到纳米级^[1]的精度成为小型刚体高精度测量的待选工具。然而,接触式测量需接触待测目标,测量效率低,测量区域有限,不适合测量大尺寸的复杂目标,更难以成为动态目标的实时测量工具。非接触式的三维测量并不需要接触测量目标的表面,随着成像技术的进步,其更加适用于复杂形貌、动态目标的三维测量。如何根据测量目标的物理特征、测量环境、精度要求等因素选择合适的测量设备及数据后处理技术是解决动态目标三维测量问题的关键。常见的动态目标测量技术可以分为基于多目视觉的动态三维测量,基于结构光的动态三维测量和基于激光测距的动态三维测量。

1.1 基于多目视觉的动态三维测量

基于多目视觉的动态三维测量属于被动式三维测量方法。它通过匹配同一时刻不同视角采集的多幅图像获得测量目标的三维数据。不像单目视

觉三维成像需要测量的先验知识^[2],该类方法对测量目标的物理特征和运动特征限制较少,被广泛地用于自动驾驶、工业制造、移动机器人及空间在轨服务等领域。

基于双目视觉的测量方式是该类三维测量最常见的方式。它通过两个相机从不同角度对同一目标进行拍摄,获取目标在不同视角下的图像;根据图像中目标像素的位置差异,计算目标在三维空间中的信息^[3]。具体地,在自动驾驶领域,通过搭建的双目视觉成像系统可以模拟人类的双眼^[4],运用目标跟踪技术对前方车辆、行人在连续帧内的位置变动进行监测,依据既定帧率(每秒图像采集频次)、视差原理、深度信息,计算活动目标相对于车辆的速度矢量^[5],从而及时调整车速和行驶方向,避免发生碰撞^[6]。

在工业生产的数控铣削方面,双目视觉测量技术通过主轴编码标志点坐标系和刀具坐标系之间的映射关系,以及相邻两帧图像之间的差异来获取刀具的运动速度、方向及与工件的相对位置关系,精准监测刀具切削路径、速度,将偏差或速度异常及时反馈给控制系统,保障加工质量^[7]。

在航天领域,基于双目视觉的测量系统在交会对接、近距离探测等任务中发挥着越来越重要的作用。它利用连续帧中特征点的运动规律与目标姿态运动的相关性,通过容积卡尔曼滤波算法实现了对空间非合作目标角速率与自旋轴方向的估计^[8]。同时,颜坤^[9]在该类测量系统下利用解耦畸变系数、内参数的相机标定法,通过对非合作目标进行立体匹配和PCA后处理得到空间目标的三维姿态。

类似于双目视觉测量的方式,研究者也通过多台(大于两台)相机在不同视角的协同观测,采用立体匹配与几何重建方法,实现了对目标三维空间信息的高精度重构。多目视觉测量在视场覆盖、数据冗余及测量精度方面有显著优势,能有效应对复杂环境下多个目标的测量需求^[10]。具体地,在生物行为研究领域,多目视觉测量能够实时监测动物在复杂环境中的动态行为,如捕食、迁徙和社群互动等。立体架构动物运动轨迹的三维模型,助力行为模式、生态特性的深入分析^[11]。在人体运动捕获方面,通过同步采集人体运动的多视角数据,结合三维重建技术,精准还原了人体骨骼及关节运动轨迹^[12]。同时,多目视觉测量系统在无人机群体协同作业中表现出色,能实时感知周围环境中的动态障碍物,优化飞行路径并实现智能自主规避^[13]。多目视觉测量不仅能够补偿视角遮挡的数据缺失,也能够降低运动模糊对测量精度的影响,确保三维数据的完整性和精确性,为虚拟现实、运

动科学研究、医学康复评估提供了技术支持。

基于多目视觉的三维测量技术测量成本相对较低,对测量目标的适用范围广,但测量精度不仅受到相机分辨率、基线长度、光照条件等因素的影响,也受限于相机的标定精度、算法的匹配精度等方面。对于测量目标三维重构精度要求高、运动估计精度要求准的实时测量情况,该类方法有待进一步升级测量硬件设备,减少测量精度和测量范围的冲突,同时改进特征点的提取及配准方式,采用高效的优化求解算法完成大型非合作动态目标的三维精密测量。

1.2 基于结构光的动态三维测量

基于结构光的动态三维测量属于主动式非接触三维测量方式。它通过投影设备向待测目标表面投射编码结构光图案,采用摄像机获取物体表面反射或散射的畸变结构光编码图案,经过对畸变图案进行解码,根据三角测距原理将光场信号转换为深度信息,从而获得测量目标的三维数据^[14]。该类测量技术利用标定好的投影设备与摄像机的内外参数,很好地解决了多目视觉测量系统对应点匹配难题,能够快速解算出测量目标的深度信息,且兼具测量精度高、测量成本低、非接触测量等优点,被应用于工业生产、轨道交通、航天在轨服务等方面。

在工业生产领域,基于结构光的动态三维测量技术能够代替人工实时监测生产线中移动的零部件,及时发现尺寸偏差、表面瑕疵等问题,提高生产效率^[15]。以汽车制造为例^[16],基于结构光的动态三维测量技术能够对车身部件、发动机零件等复杂形状的零部件实现生产线的自动检测。

在轨道交通领域,轮对不可避免地遭受摩擦、撞击及环境温度影响,对其进行不停车在线动态检测不仅能够提高轮对的使用寿命、减少维修开支,更重要的是能够保障铁路运行及旅客的安全。为解决传统人工的检测精度不高、效率低等问题,基于结构光的动态三维测量技术能够对裂纹、磨损等情况实现实时精准反馈,极大地降低了运营成本,保障了铁路运行安全^[17]。

在航天领域,对故障航天器的在轨服务通常由空间机器人完成。对这些空间非合作目标进行精确的位姿测量是燃料加注、维修、离轨等在轨服务的基础。除了多目视觉三维测量方式,基于结构光的动态三维测量也在该领域发挥了作用。文献[18]和文献[19]分别采用单线或复线结构的结构光技术,针对航天器的环特征,实现了近距离空间非合作目标的三维位姿测量。

基于结构光的动态三维测量技术能够在短时间内获取大量三维数据,满足动态目标实时高精度测量需求。然而,该类测量方式对目标表面的反射特性有一定要求,且和多目视觉测量一样对光照条件敏感。由于光源强度会在环境光中衰减,该方法并不适用于远距离目标的精准测量。如果是户外的动态目标,其三维测量精度更是难以保证。

1.3 基于激光测距的动态三维测量

激光测距是最直接易实现的主动式动态三维测量方式。不同于基于多目视觉和结构光的动态三维测量技术,该类测量方式具有强光源信号,可收束、可调制,受环境光影响较小、成像速度快、抗有源干扰能力强等优点,是远距离大型动态目标精密三维测量的理想测量方式^[20],被广泛用于地形测绘、航空航天、自动驾驶等领域。按照成像基元素可分为单点成像、线阵成像和面阵成像 3 种方式。

线阵扫描成像,顾名思义,是一种以线阵作为成像基元素的成像方式,每个时刻只能获取测量目标的一组线信息,通过组合这些线信息获取测量目标的整体三维数据^[24],具有比单点成像更快的成像速度。目前,该类成熟的扫描成像技术已经被用于自动驾驶、航空航天等领域。在自动驾驶领域,Velodyne 公司分别研发了以 16 线、32 线和 64 线的 360°水平周扫的成像方式实时探测周边环境,确保行驶安全。除了仅使用激光雷达测距,结合相机的多传感器融合探测技术也越加受到关注。该技术可以充分发挥视觉传感器的图像语义分析和激光传感器的精准测距的互补优势,减少无效测量,提高系统响应速度。如 AEye 公司研发的将 MEMS 微镜扫描和相机结合的方法,实现了行人、动物、车辆等动态目标物实时提取,满足了自动驾驶的应用需求^[25]。在航空航天领域,为满足快速成像、轻载荷需求,线阵式激光成像成为远距离大型目标探测的理想工具。如早在 1995 年,Fibertek 公司^[26]研发的以双楔形硅棱镜为主要组成部分的激光雷达系统(helicopter laser radar,HLR),就已经能够检测到长为 440m、外直径为 1cm 的电线,满足直升机的驾驶安全需求。同时,线阵激光雷达在非合作航天器的对接、检测及跟踪任务中也发挥了重要作用。其兼具成像速度快、测量精度高等优点。该类测量方法能够实时获取非合作空间目标的三维位姿并解算其运动参数^[27]。同时,结合光学和激光探测技术的设备也被用于空间目标跟踪观测任务^[28]。

相较于单点成像和线阵成像,面阵成像是最快的获取测量目标表面三维信息的方式^[29]。它不需要扫描装置,仅发射一次激光脉冲就可以获得探测目标表面的三维数据,被广泛应用在军事、国民经济建设、农林生态等领域^[30]。2003 年,麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)为探测隐藏的车辆、坦克等军事目标,研发了 32×32 GM-APD 探测器,在 150m 的飞行高度下获取了横向 5cm、纵深 40cm 分辨率的三维图像,实现了识别伪装目标的军事任务^[31-32]。为了获取更高分辨率的三维图像,成像阵列规模日益增大,从 4×4 、 8×8 、 32×32 到 256×256 ^[33]。另外,基于电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机的激光三维成像技术也是一种主流方法,采用时间步进法由近及远叠加重构不同距离上的图像,获得测量目标的重构三维图像^[34]。同时,该项技术也经历了强度相关激光和增强电荷耦合器件(intensified charge coupled device, ICCD)相机^[35]、线性增益调制和 ICCD 相机^[36]、指数增益调制和 ICCD 相机^[37]、偏振调制和电子倍增电荷耦合器件(electron-multiplying charge coupled device, EMCCD)相机^[38]的发展历程,现在已经能够满足高速运动目标的三维测量需求。值得说明的是,面阵式激光测量方法总会随着阵列规模的增加减少每个像元上的回波功率,降低测距精度,因此在相同发射总功率和接收口径条件下,成像分辨率和测距精度需要平衡,目前并不适用于远距离大型目标的精密测量。

第2章 线阵激光雷达下空间失稳目标的成像建模

为模拟不同平面分辨率线阵激光成像雷达对空间失稳目标的数据采集,本章将根据线阵激光成像雷达的成像机制及空间失稳目标的运动规律介绍一般性的空间失稳目标线阵激光成像建模方法。该成像建模技术能够为不同地面验证方案提供数据支持。同时,为优化雷达参数选取,本章还将介绍一种基于数据采集完整性评估的线阵激光成像雷达参数优化方法,并分析与成像分辨率相关的性能参数对多种运动形式空间失稳目标数据采集的完整性,以便将测量成本与测量精度最优化。

2.1 线阵激光雷达的成像机制

激光雷达是一种直接、快速、精确获取目标三维空间信息的主动式探测设备,在三维高精度成像测量方面有显著的技术优势^[39]。其成像本质上是通过测量信号往返于雷达和目标之间的飞行时间来获得距离信息,主要有单点扫描成像和面阵器件成像两种成像方式。相较于快速的面阵器件成像,单点激光测距与扫描装置结合具有测距分辨率高、测量视场角大等优点。进一步,为了提高成像速度,在单点扫描的基础上,还发展了线阵与扫描装置结合的方式^[40]。

激光雷达扫描成像中较为常用的方式是机械式扫描,包括转镜扫描^[41]、摆镜扫描^[42]、万向节扫描^[43]、双光楔扫描^[26]等。其中,微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)^[44]应用广泛,它兼具低成本和远距离3D环境感知的特点,是一种很有前途的激光测距技术。同时,以线阵为成像基元的线阵激光雷达成像兼具激光成像的测量精度高、受光照影响小、抗有源干扰能力强和线阵式测量具有的成像速度快、成像分辨率高、测量视场角大等优点,是空间目标三维位姿测量拟定的使用工具,适用于远距离大型空间目标的精密测量。

线阵激光成像雷达的硬件部分主要由激光发射单元、驱动控制单元、激

光探测单元、信息处理单元和电源 5 个部分组成。激光发射单元的激光器在激光驱动电路的控制下产生高重频激光脉冲,通过激光器整形单元准直、均衡和扩束,将其展开成线列激光光束并通过镜头投射到远处 $1 \times N$ 个被测点上,在驱动控制单元的控制下对目标区域进行测量。激光探测单元采用线阵探测器接收,通过信息处理单元,每次可获得一行(列)像素的距离和回波强度数据,直至完成所有数据的采集,工作原理如图 2.1 所示。

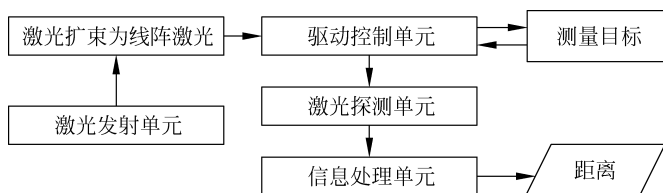


图 2.1 线阵激光成像雷达工作原理图

2.2 空间失稳目标的运动规律

空间失稳目标通常以自旋、进动和章动的复合运动状态存在。由于激光雷达采集数据时间较短,章动可忽略不计,仅考虑空间失稳目标的自旋和进动这两种运动形式,且自旋角速率 ω_s 和进动角速率 ω_p 都是匀速变化的,如图 2.2 所示。

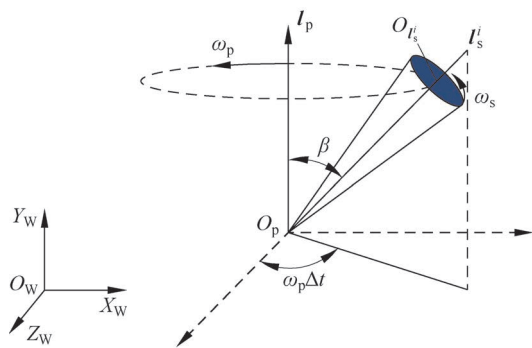


图 2.2 空间失稳目标运动示意图

一般地,测量运动目标上一点 $P(x, y, z)$ 经过 Δt 时刻后,该点的三维坐标 $P'(x', y', z')$ 可表示为

$$P' = RP + T \quad (2.1)$$

式中, $\mathbf{R}$ 为三阶实系数旋转矩阵, $\mathbf{T}$ 为三维平移向量, $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{T}$ 由测量目标的运动情况决定。根据空间失稳目标的运动规律, 其运动模型可具体地表示为

$$\mathbf{P}' = \mathbf{A}_s^i \mathbf{B}_{\omega_s} \mathbf{A}_s^{iT} (\mathbf{P} - \mathbf{O}_s^i) + \mathbf{O}_s^i \quad (2.2)$$

这里,

$$\mathbf{A}_s^i = \mathbf{A}(\mathbf{l}_s^i) = \begin{bmatrix} \frac{-n_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2}}} & \frac{-m_s^i p_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2}} \sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} & \frac{m_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} \\ \frac{m_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2}}} & \frac{-n_s^i p_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2}} \sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} & \frac{n_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} \\ 0 & \frac{m_s^{i2} + n_s^{i2}}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2}} \sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} & \frac{p_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{\omega_s} = \mathbf{B}(\omega_s) = \begin{bmatrix} \cos \omega_s \Delta t & -\sin \omega_s \Delta t & 0 \\ \sin \omega_s \Delta t & \cos \omega_s \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

是关于自旋轴 $\mathbf{l}_s^i = (m_s^i, n_s^i, p_s^i)$ 和自旋角速率 ω_s 的表达式; 空间位置 $\mathbf{O}_s^i$ 为自旋轴 $\mathbf{l}_s^i$ 的空间位置。由图 2.2 可知, 空间失稳目标在做自旋运动的同时, 其自旋轴也做锥面运动, 即其自旋轴 $\mathbf{l}_s^i$ 绕过点 $\mathbf{O}_p$, 方向为 $\mathbf{l}_p$ 的进动轴以角速率 ω_p 做旋转运动。自旋轴方向 $\mathbf{l}_s^i$ 和空间位置 $\mathbf{O}_s^i$ 在等时间间隔 Δt 下, 不断地更新为

$$\begin{cases} \mathbf{O}_s^i = \mathbf{A}_p \mathbf{B}_{\omega_p} \mathbf{A}_p^T (\mathbf{O}_s^i - \mathbf{O}_p) + \mathbf{O}_p \\ \mathbf{l}_s^{i+1} = \mathbf{A}_p \mathbf{B}_{\omega_p} \mathbf{A}_p^T (\mathbf{l}_s^i + \mathbf{O}_s^i - \mathbf{O}_p) + \mathbf{O}_p + \mathbf{O}_s^{i+1} \end{cases} \quad (2.3)$$

式中, $\mathbf{A}_p = \mathbf{A}(\mathbf{l}_p)$ 和 $\mathbf{B}_{\omega_p}$ 也相应是进动轴 $\mathbf{l}_p = (m_p, n_p, p_p)$ 和进动角速率 ω_p 的表达式, 可具体地写为

$$\mathbf{A}_p = \mathbf{A}(\mathbf{l}_p) = \begin{bmatrix} \frac{-n_p}{\sqrt{m_p^2 + n_p^2}} & \frac{-m_p p_p}{\sqrt{m_p^2 + n_p^2} \sqrt{m_p^2 + n_p^2 + p_p^2}} & \frac{m_p}{\sqrt{m_p^2 + n_p^2 + p_p^2}} \\ \frac{m_p}{\sqrt{m_p^2 + n_p^2}} & \frac{-n_p p_p}{\sqrt{m_p^2 + n_p^2} \sqrt{m_p^2 + n_p^2 + p_p^2}} & \frac{n_p}{\sqrt{m_p^2 + n_p^2 + p_p^2}} \\ 0 & \frac{m_p^2 + n_p^2}{\sqrt{m_p^2 + n_p^2} \sqrt{m_p^2 + n_p^2 + p_p^2}} & \frac{p_p}{\sqrt{m_p^2 + n_p^2 + p_p^2}} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{B}_{\omega_p} = \mathbf{B}(\omega_p) = \begin{bmatrix} \cos\omega_p \Delta t & -\sin\omega_p \Delta t & 0 \\ \sin\omega_p \Delta t & \cos\omega_p \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

空间位置 $\mathbf{O}_p$ 为进动轴 $\mathbf{l}_p$ 的空间位置。

自旋轴会绕着进动轴做锥面运动,这里仅估算初始自旋轴方向 $\mathbf{l}_s^0$ 即可,其他自旋轴方向 $\mathbf{l}_s^i$ 可以由式(2.3)解算出来。因此,需要解算的运动参数包括初始自旋轴方向 $\mathbf{l}_s^0 = (m_s^0, n_s^0, p_s^0)$ 、自旋角速率 ω_s 、进动轴方向 $\mathbf{l}_p = (m_p, n_p, p_p)$ 、进动角速率 ω_p 和进动轴空间位置 $\mathbf{O}_p$ 。值得说明的是,在无穷远处,所有自旋轴可以交为一点,令该点为需要解算的空间位置 $\mathbf{O}_p$,因此并不需要每个自旋轴都确定各自的空间位置 $\mathbf{O}_s^i$ 。

2.3 空间失稳目标的成像建模

根据上述线阵激光成像雷达的成像机制及空间失稳目标运动数学模型,本节提出了一般性的空间失稳目标线阵激光成像建模方法。针对不同运动形式,该方法首先根据运动数学模型获取世界目标系下运动点云数据,再通过建立的世界坐标系与雷达坐标系转换关系、可视点云判别方法及成像分辨率的确定对空间失稳目标进行成像建模^[45],具体建模流程如图 2.3 所示。

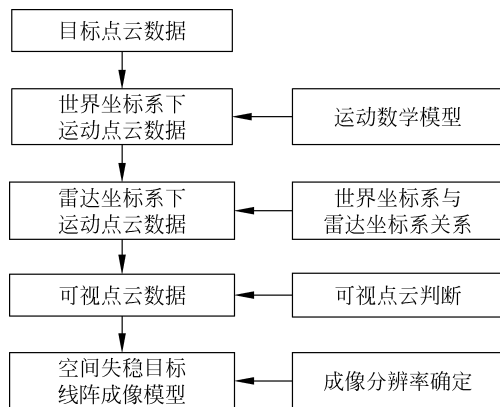


图 2.3 线阵激光成像建模流程图

2.3.1 世界坐标系下运动点云数据获取

空间失稳目标受地球磁力场影响产生绕轴 $\mathbf{l}_s^i$ 的自旋运动,当自旋轴与

总角动量向量不重合时将产生进动。在世界坐标系下,自旋可理解为空间目标绕过不断变化的空间位置 O_s^i 及 I_s^i 的自旋轴以角速率 ω_s 做自旋运动,同时,自旋轴 I_s^i 按照绕过点 O_p 和 I_p 的进动轴以角速率 ω_p 做旋转运动。空间失稳目标的运动可理解为自旋和进动的复合运动,其运动点云数据可由式(2.1)~式(2.3)获得,详见 2.2 节。

2.3.2 雷达坐标系下运动点云数据获取

线阵激光成像雷达的数据采集任务是在雷达坐标系下完成的,通常设定雷达坐标系平行于世界坐标系。雷达坐标系与世界坐标系相差一个平移量,当世界坐标系和雷达坐标系重合时,该平移量为 0。不失一般性,令数据采集方向为雷达坐标系 Y 轴正方向,YOZ 面前侧为可视部分,每组像元平行于 Z 轴,线阵激光雷达扫描成像示意图如图 2.4 所示。

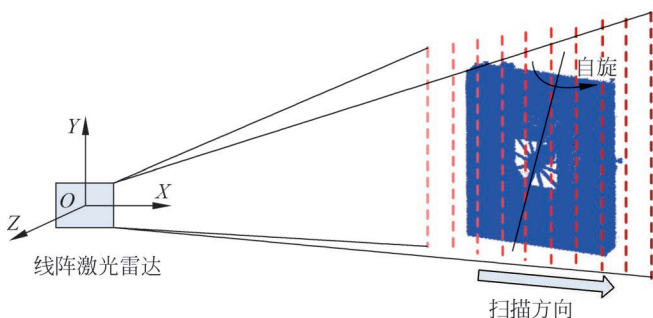


图 2.4 线阵激光雷达扫描成像示意图

线阵激光雷达扫描镜扫描运动与空间失稳目标由于相对运动引起测量误差(红点),如图 2.5 所示,某发动机喷管表面雷达扫描线不平行,因此雷达线阵数据仍按照平行排布时,得到目标畸变形貌数据。

2.3.3 可视点云数据获取

由于雷达坐标系下坐标面 YOZ 的前侧为可视面,为获取可视点云区域,本节提出了一种基于准线的可视点云判别方法。该方法以 X 轴负方向为视线方向,逐列构造准线,根据运动点云与准线的位置关系确定可视点云,具体步骤如下。

(1) 查找当前列运动点云 Z 轴方向的最大值点和最小值点,建立准线并计算其斜率 k ;