 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i8.11458

Research on Three-Dimensional Standard Shipbody Material Scanning and Modeling Technology Based on a Ship Loading Machine

Huaijin Li Huansheng Huang Yuancai Liu

Guoneng Zhuhai Port Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong, 519000, China

Abstract

In port bulk cargo loading operations, existing measurement methods largely rely on manual observation or specialized scanning equipment, which are decoupled from the actual loading process, making it difficult to obtain real-time information about the material distribution within the cargo hold during operation. To address this issue, this paper utilizes the loading crane's own motion mechanism as a scanning platform, integrates laser ranging data with the crane's kinematic parameters, and enables three-dimensional reconstruction of the material surface inside the cargo hold under the prior constraints imposed by the standard ship hull structure, thereby providing a reliable data foundation and technical support for intelligent loading operations at bulk cargo terminals.

Keywords

loading crane; 3D point cloud; material modeling; kinematic model

一种基于装船机的三维标准船体物料扫描及建模技术研究

李怀瑾 黄焕晟 刘元才

国能珠海港务有限公司，中国·广东 珠海 519000

摘 要

港口散货装船作业中，现有测量手段多依赖人工瞭望或专用扫描设备，与装船作业流程分离，难以在作业进程中实时获取舱内物料形态。对此，本文利用装船机自身运动机构作为扫描载体，将激光测距数据与机构运动学参数相融合，在标准船体结构先验约束下实现舱内物料表面的三维重建，为散货码头装船智能化提供可靠的数据基础与技术支撑。

关键词

装船机；三维点云；物料建模；运动学模型

1 引言

港口散货装船是码头核心作业，舱内物料三维分布对配载优化、船舶稳性及卸船预规划具有关键支撑作用[1]。现有物料形态获取依赖人工瞭望或独立式扫描设备，与装船流程分离，难以在作业进程中实时反馈堆积状态，导致装船决策缺乏动态数据支撑，进而制约了散货码头智能化升级，对此亟需探索与装船作业深度融合的物料三维扫描与建模方法。

2 系统总体设计

2.1 系统架构

系统核心设计目标为在不改动装船机现有机械结构、不改变原有装船作业流程的前提下，搭建一套可与装船作业同步运行的船舱物料三维信息轻量化感知系统。系统采用分层模块化架构设计，整体分为物理层、采集层、处理层与应用层，通过标准化数据接口实现跨层级、多源数据的稳定传输与有序交互（如图 1）。

2.2 装船机运动学模型

运动学模型的核心作用是实现激光扫描仪局部极坐标测距数据向统一世界坐标系的精准转换，通过构建完整的坐标变换体系，解决扫描数据空间定位问题。门座式装船机的机械结构可抽象为串联连杆机构，整体机构链依次为：固定基座、大车行走机构、门架回转机构、臂架俯仰机构、溜筒伸缩机构、扫描仪安装法兰[2]。接着，采用 Denavit-Hartenberg（D-H）参数法完成各连杆坐标系的建立与参数解算，构建整机运动学模型。其中从大地坐标系 到扫描仪坐标系 $\{O_0\}$ 到扫描仪坐标系 $\{O_4\}$ 的总齐次变换矩阵为：

$$T_{04}=T_{01}(d_1)\cdot T_{12}(\theta_2)\cdot T_{23}(\theta_3)\cdot T_{34}(d_4)\cdot T_{offset}$$

式中：d_1 为装船机大车行走位移量；θ_2 为门架回转角度；

【作者简介】李怀瑾（1995–），男，中国河南三门峡人，本科，从事电气工程及其自动化研究。

θ_3 为臂架俯仰角度；d_4 为溜筒伸缩位移量；T_{offset} 为扫描仪安装位置的固定偏差变换矩阵。在此基础上，激光扫描仪输出的原始测距数据为极坐标形式（ρ，α，β），通过坐标解算可得到扫描仪局部笛卡尔坐标 P_s，计算公式为：

$$P_s=[\rho\cos\beta\sin\alpha,\rho\cos\beta\cos\alpha,\rho\sin\beta]^T$$

随后，将扫描仪局部坐标通过总齐次变换矩阵映射至大地世界坐标系，可得到扫描点的全局坐标 P_w，变换公式为：

$$P_w=T_{04}\cdot P_s$$

模型中各运动轴的位移、角度参数均由设备原生编码器实时采集，且信号采集频率与激光扫描帧率保持严格匹配，保障位姿数据与点云数据的实时性同步。



图 1 系统架构图

3 点云数据获取与预处理

3.1 扫描策略与路径规划

为保障坐标变换过程中参数插值的精度，需依据装船机作业阶段划分扫描触发模式，精准控制大车行走位移 d1、门架回转角度 θ2、臂架俯仰角度 θ3、溜筒伸缩量 d4 等核心机构参数的变化速率。移舱阶段大车行走与臂架回转速度低且运动方向单一，宜采用移动扫描模式获取舱壁与舱底的结构点云；装料阶段溜筒位置相对固定，宜采用定点扫描模式对物料堆表面进行多帧连续采集 [3]。两种模式以核心运动轴速度为切换判据，当 $\dot{d}1 < 0.05$m/s 且 $\dot{\theta}2 < 0.01$rad/s 时系统自动切换为定点模式，不满足该条件时保持移动模式。路径规划应依据舱口尺寸在舱口长度方向设置 3~5 个大车停靠站位，每个站位匹配两个对称方向的臂架回转角度序列，相邻站位扫描区域重叠率控制在 15%~20% 以消除舱口围板遮挡造成的盲区，规划结果以各站位对应的 d1、θ2、θ3、d4 目标值序列输出至采集层，为坐标变换提供标准化的参数依据。

3.2 多源数据融合与点云生成

完成扫描站位规划与扫描模式配置后，需对激光测距点的极坐标测量数据与对应时刻的装船机机构运动参数开展时空配准，将多源异构数据统一转换至世界坐标系下，生成完整的舱体原始三维点云。首先开展极坐标至笛卡尔坐标的转换，将激光扫描仪采集的各测距点极坐标（ρ，α，β）转换为扫描仪局部坐标系下的三维坐标 P_s，转换公式如下：

$$P_s=\begin{bmatrix}\rho\cos\beta\sin\alpha\\ \rho\cos\beta\cos\alpha\\ \rho\sin\beta\end{bmatrix}$$

式中：ρ 为激光测距值；α 为激光水平扫描角；β 为激光竖直扫描角。将局部坐标 P_s 扩展为齐次坐标后，与全局齐次变换矩阵 $T_{04}(d_1,\theta_2,\theta_3,d_4)$ 进行矩阵运算，实现局部坐标向世界坐标的转换，得到测距点最终世界坐标 P_w，计算公式为：

$$P_w=T_{04}\cdot P_s$$

式中：d_1 为大车行走位移量；θ_2 为门架回转角度；θ_3 为臂架俯仰角度；d_4 为溜筒伸缩位移量。此外，时空配准采用同步脉冲机制实现数据时序对齐。扫描仪每帧起始时输出 TTL 脉冲信号，工控机捕获后即时锁存各编码器与角度传感器读数。帧内各测距点以固定扫描周期为基准等间距推算时间戳，对编码器采样序列做线性插值获取每个点对应的实时机构参数。扫描仪安装偏角经舱口围板角点标定后代入固定安装变换矩阵，以补偿安装误差带来的坐标偏移。

3.3 点云预处理

通过扫描融合得到的原始点云存在大量无效干扰数据，严重影响后续曲面重建、界面分割等建模算法的精度与效率。因此需通过多级滤波剔除无效点云，同时通过降采样精简高密度点云数据，将数据规模优化至建模算法的高效处理区间。

针对作业过程中粉尘散射产生的离散离群噪声点，采用统计离群点滤波算法进行剔除。遍历点云中的每个目标点

p_i，搜索其邻域内 50 个最近邻点并计算邻域点平均距离 $\bar{d}_i$；统计全点云所有邻域平均距离的均值 μ 与标准差 σ，设定噪声判定阈值。当某点满足 $\bar{d}_i > \mu+2.5\sigma$ 时，判定该点为粉尘散射离群噪声点并予以剔除。

针对装船机自身结构产生的遮挡干扰点，采用空间掩膜剔除方法。以溜筒末端法兰中心为基准，构建半径 0.8m、高度 2m 的溜筒圆柱包络体，结合缆绳摆动形成的锥体空间区域，将该区域内的所有点云判定为设备结构干扰点并批量剔除；同时以舱口围板上沿为高程阈值，滤除高程超出阈值的舱外背景点云，完成场景冗余数据清洗。

完成噪声滤波后，采用体素栅格降采样算法实现点云精简，具体设置立方体栅格边长 l=0.05m，以该尺寸的三维栅格对全域点云空间进行均匀划分，对每个非空栅格内的所有原始点，通过质心替代法完成点云精简，栅格质心坐标计算公式为：

$$P_{voxel}=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} P_j$$

式中：n 为单个栅格内包含的原始点云数量；P_j 为栅格内各原始点的世界坐标向量；栅格边长 l 匹配后续建模的目标分辨率。降采样处理后，重点校验舱壁棱线、物料堆坡脚、舱口边角等关键几何特征的完整性，避免精简过度导致的特征丢失。

4 三维建模技术

预处理后的点云保留了舱内结构表面与物料表面的空间信息，但两类点云在空间上相互混杂，且物料表面存在数据稀疏区域，无法直接用于体积计算。对此提出“先验约束构建—界面分割—曲面重建—体积计算”的技术路径，将原始点云转化为可量化的三维数字模型。

4.1 舱体结构先验建模

散货船舱室几何结构具备强规则性特征，舱壁为竖直或微倾斜平面，舱底为标准水平面。基于舱体的规整几何特性，可对舱内各壁面进行参数化建模，统一构建平面方程：

$$n_x x+n_y y+n_z z=d$$

式中，(n_x, n_y, n_z) 为舱壁壁面的单位法向量，d 为坐标原点至对应壁面的垂直距离，所有参数均可由舱长、舱宽、舱深等船舶设计基准参数解算确定。舱口围板上沿四角特征点的世界坐标为点云标定环节的核心控制基准，其设计值已参与扫描仪安装偏角的辨识，故该先验模型与点云数据处于统一空间基准之下。

4.2 舱壁 – 物料界面识别

舱壁 - 物料界面识别的核心目标是对预处理后的舱室点云完成精准分割，将原始点云划分为纯净舱壁点云与物料表面点云两类子集，其中分割判别依据依托构建的舱体先验几何模型实现。

对于点云中任意采样点 $P_k=(x_k,y_k,z_k)$，分别计算该点到舱体五个壁面的垂直距离，距离计算公式如下：

$$d_i=\left|n_{i,x}x_k+n_{i,y}y_k+n_{i,z}z_k-d_i\right|,i=1,2,3,4,5$$

求取五个距离值中的最小值 d_{min}，并匹配其对应的目标壁面索引。同时，设置 0.05m 为距离判别阈值，若 $d_{min}<0.05m$，判定该采样点为舱壁点；反之则判定为物料表面点。针对物料紧贴舱壁堆积的特殊情况，纯几何距离判据失效，应引入局部法向量方向作为辅助判据：舱壁点云的邻域法向量应与对应壁面法向量方向一致，而物料点云的法向量由物料休止角决定，与壁面法向量存在可区分夹角。

4.3 物料表面重建

为获取连续、光滑、贴合实际工况的物料表面形态，基于分割后的物料点云，采用径向基函数隐式曲面重建算法，构建物料表面三维三角网格模型。算法核心原理为：构建带约束的径向基函数插值方程，对离散物料点云进行连续曲面拟合。定义物料点云集合为 $\{P_j\}$，并为不同类型点云赋予对应函数值：纯物料表面点函数值 $f_j=0$，舱壁边界约束点函数值 $f_j=1$，最终构建的插值方程如下：

$$f(P)=\sum_{j=1}^{N}\lambda_j\phi(\|P-P_j\|)+\psi(P)$$

式中，$\phi(r)=r^3$ 为三次径向基核函数，保障曲面拟合的光滑性；λ_j 为待求解的权重系数；$\psi(P)$ 为一次多项式，用于保障曲面拟合的线性精度；N 为参与计算的物料点云总数量。

求解上述插值方程后，提取零等值面 f(P)=0，即为拟合完成的物料连续表面。为保证重建曲面与舱体边界高度贴合，依托舱体先验模型设置硬性边界约束：沿舱底与四周舱壁的交线，以 0.1m 等间距布设虚拟约束点，并统一赋值 $f_j=1$，强制重建曲面在舱壁边界处精准收敛。针对标记的边界待定点云集合，将其设置为软约束点并赋予低权重参与迭代计算，依托径向基函数的全局插值与平滑特性，合理推演贴壁区域的物料堆积形态，弥补边界点云分割模糊的缺陷。

4.4 体积计算与模型输出

基于重建的物料表面三角网格模型，以舱底平面为基准面，采用基于散度定理的体积计算方法，将复杂的空间体积分转换为网格表面面积分，实现舱内物料堆积体积的精准求解。体积计算公式如下：

$$V=\frac{1}{3}\sum_{t=1}^{M}(\vec{n}_t\cdot\vec{c}_t)A_t$$

式中，M 为三角网格模型的三角形面片总数量；$\vec{n}_t$ 为第 t 个三角面片的单位外法向量；$\vec{c}_t$ 为三角面片的重心坐标向量；A_t 为单个三角面片的表面积。计算过程中，需剔除舱底平面下方的无效点云区域，避免基底结构对物料体积计算结果造成干扰。

体积计算完成后，系统实现多维度数据输出：一方面

以 OBJ、PLY 等通用三维模型格式，输出高精度物料表面三角网格模型；另一方面输出物料总堆积体积、各舱段物料空间分布等量化统计数据，生成标准化报表。

5 实验验证

为验证该方法在实际装船作业场景中的测量精度与环境适应性，开展实船对比测试。实验设备选用额定装船能力为 2500t/h 的门座式装船机，测试对象选取 7 万吨级散货船的单个标准货舱。实验以地面高精度三维激光扫描仪测量结果与人工盘煤实测数据作为真值基准，将得到的各舱段物料体积测量结果与基准数据进行比对分析。结果如表 1 所示。

六个舱段体积测量平均相对误差为 1.24%，最大误差不超过 ±1.5%，满足散货装船作业对舱容分配的工程精度要求。

表 1：实验结果

舱段编号	基准体积 /m³	本文方法测量值 /m³	相对误差 /%
1 号舱段	186.4	183.7	-1.45
2 号舱段	201.2	203.8	+1.29
3 号舱段	178.9	176.5	-1.34
4 号舱段	194.6	196.9	+1.18
5 号舱段	165.3	163.1	-1.33
6 号舱段	173.7	175.2	+0.86

6 结论

本文利用装船机搭载激光扫描，融合运动学参数与船体先验约束，实现舱内物料三维重建与体积计算。该方法为装船计划优化与稳性控制提供实时数据支撑，未来可融合自适应扫描与多机协同，推动散货码头向全流程无人化升级。

参考文献

[1] 陈杨. 固定式装船机物料输送系统[J].起重运输机械,2025,(8):64-69.

[2] 王延高,散料码头堆料机、装船机物料甩带及粉尘治理关键技术研究及应用.河北省,秦皇岛港股份有限公司,2022-05-06.

[3] 周保华,何佳博. 基于OPC技术的装船机智能三维监管系统[J].港口科技,2025,(1):1-7.