

# 基于数字孪生的水下挖掘智能引导与作业质量控制方法

王子健,刘东海,黄涛,孙晨阳

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室)

**摘要:**为提高水下挖掘作业质量,提出了一种基于数字孪生的水下挖掘智能引导与作业质量控制方法。该方法通过研制挖掘机智能引导硬件设备并构建挖掘机各部件几何关系与运动方程,实现了铲尖位姿的高效解算;结合 Three.js 与 Unity 3D 建立了水下开挖形体建筑信息模型(BIM),并耦合实时传感数据构建了挖掘机数字孪生模型;根据铲尖与挖掘目标相对距离的实时解算,给出了挖掘作业智能引导与作业质量控制方法,并开发了相应的系统。实例验证结果表明,该方法能实现作业过程三维可视化与远程协同监控,智能引导操作手纠偏,保障水下挖掘质量。

**关键词:**水下挖掘;位姿感知;智能引导;质量控制;数字孪生

**Method for intelligent guidance and operational quality control of underwater excavation based on digital twin technology**//Wang Zijian, Liu Donghai, Huang Tao, Sun Chenyang (State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University)

**Abstract:** To improve the quality of underwater excavation operations, this paper proposes a digital twin-based method for intelligent guidance and operational quality control of underwater excavation. By developing intelligent guidance hardware for the excavator and establishing the geometric relationships and kinematic equations of its components, efficient calculation of the bucket tip pose is achieved. A building information model (BIM) of the underwater excavation profile is established using Three.js and Unity 3D, and a digital twin model of the excavator is constructed by integrating real-time sensor data. Finally, based on real-time calculation of the relative distance between the bucket tip and the target excavation surface, an intelligent guidance and operational quality control strategy for excavation operations is developed, and the corresponding system is implemented. Case study results demonstrate that this method enables three-dimensional visualization of the excavation process and remote collaborative monitoring, provides intelligent guidance for operators to correct deviations, and ensures the quality of underwater excavation.

**Key words:** underwater excavation; pose perception; intelligent guidance; quality control; digital twin

河道护坡、疏浚、防波堤及沟槽等工程建设常涉及大规模水下挖掘作业。由于作业面不可见,施工过程中缺乏直观视觉反馈,易引发超挖、欠挖等质量偏差,导致开挖精度与清淤效果难以保障,严重影响工程整体质量与进度。

为提升水下挖掘作业的精度与可控性,国内外学者在挖掘机位姿感知<sup>[1-2]</sup>与施工引导方面开展了一系列研究。现有研究方法主要可分为两类:①基于计算机视觉的位姿估计方法,如 Liu 等<sup>[3-6]</sup>通过图像处理与特征提取技术直接解析了挖掘机的空间位置与位姿;②基于惯性传感器的位姿解算方法,如 Lee 等<sup>[7-10]</sup>利用 IMU(惯性测量单元)采集了各构件的倾角数据,通过运动学模型计算了全身位姿。在

工程应用方面,邓波等<sup>[11]</sup>通过集成传感器实时解算铲斗坐标,以图形化界面引导操作;隗彦宏<sup>[12]</sup>采用徕卡智能引导系统实现了岸坡开挖的精准控制,有效提升了作业效率。这些研究为挖掘机的实时位姿感知与施工引导奠定了基础,但其应用场景多集中于陆上或水上可见环境,尚未有效解决水下不可见条件下的作业质量控制问题。

随着工业 4.0 与智能化建造的发展,数字孪生技术因其在集成设计、施工仿真与运维管理中的强大能力,逐渐成为工程建设数字化转型的核心驱动力<sup>[13-16]</sup>。在建筑工程领域,杜明芳<sup>[17]</sup>提出了基于数字孪生的全生命周期系统集成方法;在水利水电工程中,张宗亮等<sup>[18-20]</sup>率先将数字孪生技术应用于大

作者简介:王子健(2000—),男,硕士研究生,主要从事水工结构工程研究。E-mail:632865983@qq.com

通信作者:刘东海(1974—),男,教授,博士,主要从事大型工程智能建设、土石坝数字化施工与服役性态研究。E-mail:liudh@tju.edu.cn

坝、厂房等复杂结构,推动工程建造向安全、优质、高效方向发展。进一步地,吴都督等<sup>[21]</sup>在碾压混凝土坝施工中构建了“GIS+BIM+IoT”融合的智能建造平台,实现了全过程数字化管控;何绍波等<sup>[22]</sup>则依托 BIM 与物联网技术,实现了地下厂房洞室群施工的精细化与智能化管理。这些实践表明,数字孪生与多源信息融合技术已具备支撑复杂工程透明化、协同化管控的能力,为水下隐蔽工程施工提供了重要技术范式。

然而,将数字孪生与实时引导技术应用于水下挖掘这一特殊场景,仍面临诸多挑战:①水下环境感知手段受阻,声学、光学等传感器易受水体扰动与悬浮物干扰,导致位姿感知精度与稳定性下降;②现有水下作业机器人研究多聚焦于自主导航、轨迹跟踪与轻量操作<sup>[23]</sup>,缺乏与工程 BIM 模型的高精度实时耦合,亦未形成面向开挖质量(如超挖、欠挖)的闭环控制机制;③虽有多传感器融合定位技术可用于水下载具位姿估计<sup>[24]</sup>,但其运动模型多针对流线型航行器,难以直接移植至具有多关节、大惯量特性的液压挖掘机,且未能与施工工艺指标直接挂钩。Tanoli 等<sup>[25]</sup>在岸坡开挖中实现了参数化 BIM 建模与 3D 机械引导,Liu 等<sup>[26-29]</sup>在城市路面挖掘与装备数字孪生方面进行了探索,这些工作为本文提供了重要参考。

然而,当前鲜有针对水下挖掘作业质量控制的研究,且难以做到对水下挖掘作业过程中挖掘机位姿的高精度快速感应,开挖质量难以实时可视化地反馈给操作手,无法实现有效的远程协同监控。因此,本文基于数字孪生技术,结合水下挖掘作业特点,研究水下挖掘智能引导与作业质量控制方法,并开发相应系统,对挖掘作业情况进行三维可视化反馈,以期为提高水下岸坡挖掘作业的质量与效率提供技术支撑。

## 1 挖掘机智能引导硬件设备开发与位姿感知

### 1.1 挖掘机智能引导硬件设备开发

挖掘机智能引导硬件设备主要包括位姿采集装置、实时定位模块、数据传输模块以及车载显示屏,其安装位置如图 1 所示。位姿采集装置的 IMU 主要包括 1 个双轴倾角传感器和 3 个单轴倾角传感器,用于实时采集挖掘机作业位姿信息。实时定位模块由 2 个 GNSS(全球导航卫星系统)接收器和 GNSS 基准站组成,用于获得挖掘机任意时刻的工作位置及航向角。数据传输模块由多功能端口、数据控制器与数据无线传输模块组成,用于实现挖掘机位姿、挖掘任务等数据在车载端与服务器之间的

传输交互;其中数据控制器通过 DTU(数据传输单元)从服务器端读取挖掘任务等信息,并实时集成、传输位姿采集装置所采集的数据至平板终端,同时接收平板的计算结果数据,通过 DTU 实时传输回服务器,实现 Web 端开挖作业远程实时监测与质量控制。车载显示屏用于挖掘过程的三维可视化展示,辅助挖掘机操作手对挖掘机三维位姿进行估计以及实时判断相对距离,并展示水下挖掘过程中挖掘机位姿与水下岸坡开挖情况,智能引导操作手进行正确的水下挖掘操作。鉴于水下及临水作业环境复杂,所有暴露在外的传感器及车载终端均采用 IP67 及以上防护等级的工业级封装,并对关键线缆与接口进行了防水密封处理。

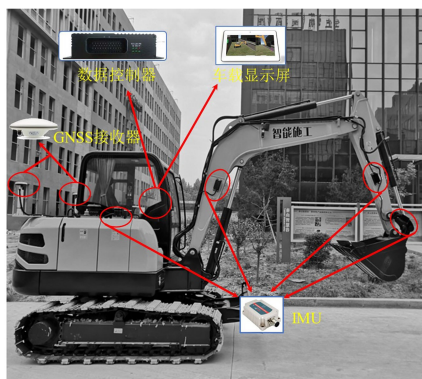


图 1 挖掘机硬件装置示意图

### 1.2 挖掘机作业位姿信息感知

为实时解算挖掘机铲尖坐标,需获取挖掘机的实时位姿信息及其固有机械结构尺寸。实时位姿信息通过安装在挖掘机上的传感器采集,具体包括:①大臂、小臂、铲斗与竖直方向的夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ (由单轴倾角传感器测量);②车身的横滚角  $\varphi$  与俯仰角  $\theta$ (由双轴倾角传感器测量);③WGS84 坐标系下主定位天线  $O$  的三维坐标  $(x_o, y_o, z_o)$  及挖掘机的航向角  $\psi$ 。

为进行挖掘机的位姿评估以及建立其动态孪生 BIM 模型,需通过激光全站仪采集挖掘机自身机械结构尺寸信息。关键参数包括:各铰接点在车身坐标系下的坐标、大臂长度  $L_{AB}$ 、小臂长度  $L_{BC}$ 、铲斗长度  $L_{CD}$ 、各连杆长度  $(L_{CE}, L_{EF}, L_{FG}, L_{CC})$ 、左右铲尖偏移长度  $L_{DM}$  与  $L_{DN}$ 、大臂偏转角  $\theta_1$  和铲斗偏移角  $\theta_2$  等。

为建立运动学模型并描述各构件之间的空间关系,定义如下坐标系(图 2):

a. 车身坐标系  $Oxyz$ 。以主天线  $O$  为原点,车身横向为  $x$  轴,纵向为  $y$  轴,竖向为  $z$  轴,符合右手定则。

b. 大臂坐标系  $Ax_1y_1z_1$ 。以大臂支点  $A$  为原点,

$x_1$  轴与车身  $x$  轴平行,  $z_1$  轴沿大臂轴线指向铰点  $B$ 。

c. 小臂坐标系  $Bx_2y_2z_2$ 。以小臂支点  $B$  为原点,  $x_2$  轴与车身  $x$  轴平行,  $z_2$  轴沿小臂轴线指向铰点  $C$ 。

d. 铲斗坐标系  $Cx_3y_3z_3$ 。以铲斗铰点  $C$  为原点,  $x_3$  轴与车身  $x$  轴平行,  $z_3$  轴沿铲斗轴线指向铲尖。

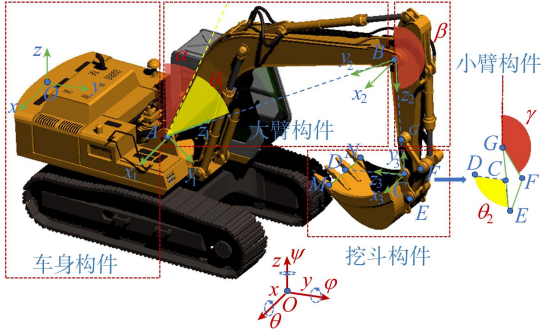


图2 挖掘机位姿几何关系示意图

各构件位姿采用  $z \rightarrow y \rightarrow x$  顺序的欧拉角描述, 即依次绕自身坐标系的  $z$ 、 $y$ 、 $x$  轴旋转航向角  $\psi$ 、横滚角  $\varphi$  与俯仰角  $\theta$ 。其旋转矩阵  $R(\psi, \varphi, \theta)$  为:

$$R(\psi, \varphi, \theta) = R_z(\psi)R_y(\varphi)R_x(\theta) \quad (1)$$

$$\text{其中 } R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}$$

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

式中:  $R_z(\psi)$ 、 $R_y(\varphi)$ 、 $R_x(\theta)$  分别为绕各轴的基本旋转矩阵。

对于本文研究的挖掘机, 车身、大臂、小臂和铲斗的航向角  $\psi$  与横滚角  $\varphi$  均与车身状态相同。各构件俯仰角确定如下: 车身俯仰角  $\theta_{\text{body}}$  直接由双轴倾角传感器测得; 大臂俯仰角  $\theta_{\text{boom}} = \alpha + \theta_1$ ; 小臂俯仰角  $\theta_{\text{arm}} = \beta$ ; 铲斗俯仰角  $\theta_{\text{bucket}}$  需通过其连杆机构的几何约束进行解算, 具体方法见 1.3 节。

### 1.3 基于欧拉角位姿转换的铲尖坐标计算

欧拉角作为一种直观的位姿表达方式, 仅需 3 个元素即可描述刚体位姿, 在航天、动画及人体位姿估计等领域已有广泛应用<sup>[30-33]</sup>。尽管该方法在俯仰角接近  $\pm 90^\circ$  时存在理论上的“万向锁”问题<sup>[34]</sup>, 但其完全适用于本研究的挖掘机作业场景, 因为挖掘机定点作业时, 运动以大臂、小臂和铲斗的俯仰为主, 机身航向与横滚角变化范围有限, 实际位

姿远离奇异点。同时, 欧拉角形式直观、与传感器输出直接对应, 便于实现高频率实时解算, 其精度基本满足工程厘米级控制需求。

#### 1.3.1 铲斗俯仰角的几何解算

铲斗的俯仰角无法直接测量, 需通过安装在铲斗上的倾角传感器度数, 结合小臂俯仰角及铲斗四连杆机构 ( $C-D-G-F$ ) 的尺寸进行解算:

$$\begin{cases} \theta_{FGC} = \beta - \gamma \\ L_{CF}^2 = L_{FG}^2 + L_{GC}^2 - 2L_{FG}L_{GC}\cos\theta_{FGC} \\ L_{FG}^2 = L_{CF}^2 + L_{GC}^2 - 2L_{CF}L_{GC}\cos\theta_{GCF} \\ L_{EF}^2 = L_{CF}^2 + L_{CE}^2 - 2L_{CF}L_{CE}\cos\theta_{FCE} \\ \theta_{\text{bucket}} = \beta + \theta_{GCF} + \theta_{FCE} + \theta_2 - \pi \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\theta_{FGC}$  为  $\triangle FGC$  的点  $G$  处夹角;  $L_{CF}$  为铰接点  $C$  与  $F$  之间的距离;  $\theta_{GCF}$  为  $\triangle GCF$  的点  $C$  处夹角;  $\theta_{FCE}$  为  $\triangle FCE$  的点  $C$  处夹角。

#### 1.3.2 构件控制点的坐标转换

已知某点  $P$  在自身构件坐标系下的坐标向量为  $P_{\text{local}}$ , 其所在构件原点在自身坐标系下的坐标向量为  $P_{\text{origin}}$ , 则该点的世界坐标向量  $P_{\text{world}}$  为:

$$P_{\text{world}} = P_{\text{origin}} + RP_{\text{local}} \quad (3)$$

式中:  $R$  为该构件的旋转矩阵。

#### 1.3.3 铲尖坐标的链式求解

车身坐标系原点  $O$  的世界坐标向量由 GNSS 直接获得, 从车身开始逐步计算后续构件原点坐标向量。

基于车身坐标系到大臂坐标系的旋转矩阵  $R_{\text{body}}$ , 结合大臂支点  $A$  在车身坐标系中的相对坐标向量  $p_A$ , 可得:

$$P_A = P_O + R_{\text{body}}p_A \quad (4)$$

其中  $P_O = (x_O, y_O, z_O)^T$   $P_A = (x_A, y_A, z_A)^T$  式中:  $P_O$  为车身原点  $O$  的世界坐标向量;  $P_A$  为大臂支点  $A$  的世界坐标向量。

大臂坐标系到小臂坐标系的变换仅包含沿大臂轴向的平移, 平移长度为大臂长度  $L_{AB}$ , 基于旋转矩阵  $R_{\text{boom}}$  可得:

$$P_B = P_A + R_{\text{boom}}(0, 0, L_{AB})^T \quad (5)$$

其中  $P_B = (x_B, y_B, z_B)^T$  式中:  $P_B$  为小臂支点  $B$  的世界坐标向量。

基于小臂坐标系到铲斗坐标系的旋转矩阵  $R_{\text{arm}}$ , 结合小臂长度  $L_{BC}$ , 可得:

$$P_C = P_B + R_{\text{arm}}(0, 0, L_{BC})^T \quad (6)$$

其中  $P_C = (x_C, y_C, z_C)^T$  式中:  $P_C$  为铲斗铰点  $C$  的世界坐标向量。

最后, 基于旋转矩阵  $R_{\text{bucket}}$  计算左右铲尖点  $N$  和  $M$  的世界坐标, 以左铲尖点  $N$  为例:

$$\mathbf{P}_N = \mathbf{P}_C + \mathbf{R}_{\text{bucket}} \mathbf{p}_N \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{p}_N$  为左铲尖点  $N$  在铲斗坐标系中的坐标向量;  $\mathbf{P}_N$  为左铲尖点  $N$  的世界坐标向量。

通过上述过程,即可实现挖掘机铲尖三维坐标的实时高精度解算。

## 2 挖掘机与水下开挖形体数字孪生建模

### 2.1 挖掘机数字孪生模型

根据挖掘机机械结构尺寸,建立挖掘机的数字孪生模型。如图3所示,挖掘机数字孪生模型被分为4个部分,分别是车身构件、大臂构件、小臂构件和铲斗构件,在车身及构件相应位置安装有定位天线与倾角传感器,用于实时采集机身位置及各构件姿态数据。挖掘机数字孪生模型实时接收由1.3节中方法解算出的各构件位姿数据,并更新模型相应构件三维位姿,实现挖掘机物理模型与信息模型的耦合,同时基于Unity 3D和Three.js实现挖掘机孪生模型在车载端与远程客户端的三维可视化,辅助操作手判断挖掘机铲尖与水下岸坡的空间关系,提高作业效率与质量。

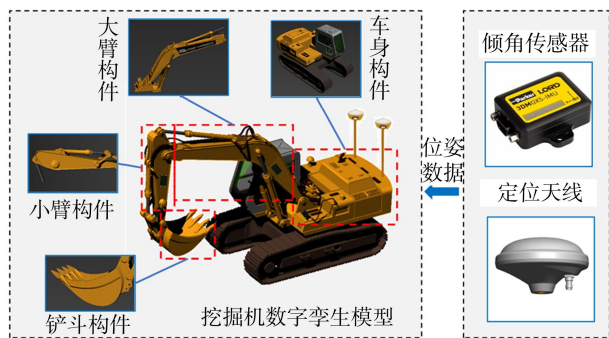


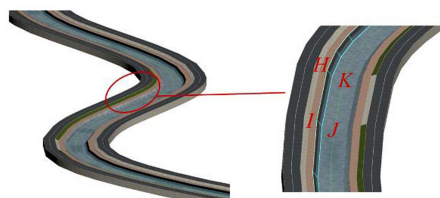
图3 挖掘机数字孪生模型

### 2.2 水下开挖形体 BIM 模型

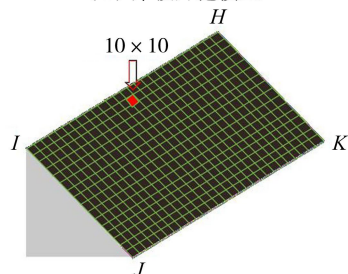
水下开挖形体 BIM 模型(以岸坡开挖为例)包括环境模型与岸坡开挖模型,如图4(a)所示。精细且合理的建模是实现水下挖掘作业智能引导与质量控制的基础。水下开挖岸坡的建模具体步骤如下:

**a. 岸坡模型网格化。** 每一段岸坡由4个顶点  $H, I, J, K$  唯一确定,对建立的岸坡开挖模型进行网格化分割,使每个位置处的开挖质量都可由该位置对应的网格特征唯一表示,本文按照  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  的精度对岸坡开挖模型进行分割,如图4(b)所示。

**b. 开挖检测面设定。** 水下岸坡挖掘作业分为欠挖、合格、超挖3种开挖状态,为实现在水下岸坡某个位置处开挖质量的精确显示,参考SL 631—2012《水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准—土石方工程》对边坡开挖允许偏差的常见要求,并结合工程实践,将检测面偏移量(即合格带宽



(a) 岸坡开挖模型



(b) 网格化模型(单位:cm)

图4 岸坡开挖模型及其网格化模型

度)  $10 \text{ cm}$  作为判断“欠挖”与“超挖”的阈值,将岸坡网格化模型分别向上和向下移动  $10 \text{ cm}$ ,形成合格检测面与超挖检测面,并赋予不同的颜色,如图5所示,后续可通过碰撞检测来实现开挖岸坡模型的变化,直观展示开挖质量。



图5 岸坡开挖模型检测面设定(单位:cm)

## 3 水下挖掘智能引导与作业质量控制方法

### 3.1 铲尖与开挖岸坡相对距离实时解算

利用上文铲尖实时定姿方法实时解算挖掘机铲尖控制点的三维坐标,由水下岸坡的建模过程可知,每一段岸坡对象由其4个顶点唯一确定,由开挖岸坡设计资料获取顶点坐标。假设其中一段开挖岸坡模型顶点坐标为  $H, I, J, K$ ,挖掘机铲尖控制点  $Q$  的坐标由本文1.3节方法确定。

定义点  $Q$  到四边形  $HIJK$  的有向距离为  $d$ 。当点  $Q$  位于设计开挖面外侧时,  $d > 0$ ,表示欠挖;当点  $Q$  位于设计开挖面内侧时,  $d < 0$ ,表示超挖。

选取平面上不共线的两个向量  $\mathbf{U}_{HI}$  和  $\mathbf{U}_{HJ}$ ,则该平面法向量  $\mathbf{n}$  为:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{U}_{HI} \times \mathbf{U}_{HJ}}{\|\mathbf{U}_{HI} \times \mathbf{U}_{HJ}\|} \quad (8)$$

点  $Q$  到四边形  $HIJK$  的有向距离  $d$  为:

$$d = \mathbf{U}_{HQ} \cdot \mathbf{n} \quad (9)$$

垂足  $q$  的坐标向量可表示为平面上点  $H$  沿基向量  $U_{HI}$  和  $U_{HJ}$  的线性组合:

$$P_q = P_H + sU_{HI} + tU_{HJ} \quad (10)$$

式中:  $s$  和  $t$  为标量参数, 可求解由垂线性质 ( $U_{Qq} \perp U_{HI}$  且  $U_{Qq} \perp U_{HJ}$ ) 建立的方程组得到:

$$\begin{cases} U_{HQ} \cdot U_{HI} = s(U_{HI} \cdot U_{HI}) + t(U_{HJ} \cdot U_{HI}) \\ U_{HQ} \cdot U_{HJ} = s(U_{HI} \cdot U_{HJ}) + t(U_{HJ} \cdot U_{HJ}) \end{cases} \quad (11)$$

求解方程组(11)得到  $s$  和  $t$  后, 代入式(10)得垂足坐标向量  $P_q$ 。

判断垂足  $q$  是否在四边形  $HIJK$  内部的条件为:

$$\begin{cases} 0 \leq s \leq 1 \\ 0 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

若满足该条件, 则点  $q$  在四边形内部(图 6(a)), 点  $Q$  到该段岸坡的相对距离即为点到平面的有向距离  $d$  (由式(9)求得); 若不满足该条件, 则点  $q$  在四边形外部(图 6(b)), 点  $Q$  与该段岸坡的相对距离由点  $Q$  到各边线 ( $HI, IJ, JK, KH$ ) 的最短距离确定。该结果可用于引导操作手作业。

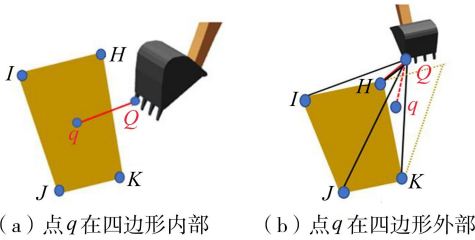


图 6 挖掘机铲尖与开挖岸坡相对距离计算

## 3.2 智能引导与作业质量控制系统开发与应用方法

### 3.2.1 系统开发

智能引导与作业质量控制系统采用分层分布式架构, 由车载端、服务器端、远程监控端及现场移动终端四部分构成(图 7), 通过无线网络实现数据交互与协同管控。

车载端负责从服务器端接收挖掘任务信息, 实时采集并解算挖掘机位姿数据, 通过内置算法实时

计算铲尖与开挖面的相对距离及开挖质量, 并基于 Unity 3D 引擎进行三维可视化展示, 同时将解算结果与关键过程数据实时上传至服务器。

服务器端负责接收、存储与管理来自车载端的所有数据, 提供数据转发、分析处理与历史数据查询服务, 为远程监控端和移动终端提供数据支撑。

远程监控端基于 Web 技术开发, 构建设备与开挖环境的 BIM 模型, 管理人员可以在此设定挖掘任务, 并实时接收服务器转发的现场数据, 实现开挖作业的远程、透明化协同监测与质量控制。任务完成后, 支持对开挖过程进行仿真回放、质量报表生成与多维度统计分析。

现场移动终端实时接收由服务器推送的报警信息及任务指令, 协助进行现场协调与应急管控, 形成管理闭环。

### 3.2.2 系统应用方法

基于距离解算结果和系统平台, 制定智能引导与作业质量控制方法。开挖岸坡模型依据设计开挖面和两层检测面, 将开挖区域划分为欠挖、合格和超挖三个空间区域。根据本文提出的挖掘机铲尖与开挖岸坡相对距离实时解算方法计算两者相对距离, 判断挖掘机铲尖所处的空间区域, 并对开挖岸坡模型网格进行变色处理。当  $d \geq 10$  cm 时, 表示挖掘机铲尖位于欠挖空间区域, 该位置开挖岸坡模型对应网格颜色为棕色, 操作手根据提示应对相应位置继续挖掘; 当  $-10$  cm  $< d < 10$  cm 时, 表示挖掘机铲尖位于合格空间区域, 该位置开挖岸坡模型对应网格颜色为绿色; 当  $d \leq -10$  cm 时, 表示挖掘机铲尖位于超挖空间区域, 该位置开挖岸坡模型对应网格颜色为红色, 并发出报警提醒, 挖掘机操作手应立即停止该位置的开挖作业并采取相应填补措施。同时, 系统实时统计并显示整体开挖进度与开挖合格率, 为作业效率与质量提供量化评估指标。

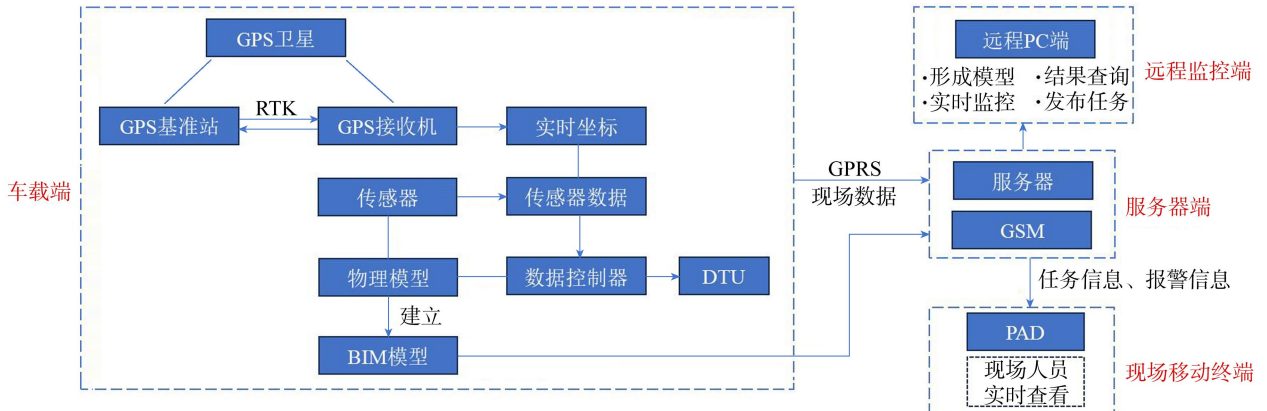


图 7 水下挖掘智能引导与作业质量控制系统架构

## 4 实例验证

### 4.1 三维位姿解算分析

为验证本文 1.3 节提出的铲尖坐标计算方法的精度,在挖掘机智能引导硬件装置安装完成后进行了现场测试。GNSS 接收机与倾角传感器以 20 Hz 频率采集位姿数据,同时采用精度为 1 mm 的激光全站仪对铲尖控制点的真实空间坐标进行同步测量,共获取 90 组有效样本数据。挖掘机关键机械结构尺寸经标定后如表 1 所示,铲尖坐标的实测值与解算值对比结果如图 8 所示。

表 1 挖掘机自身机械结构尺寸

参数	$x_1/\text{mm}$	$y_1/\text{mm}$	$z_1/\text{mm}$	$L_{AB}/\text{mm}$	$L_{BC}/\text{mm}$	$L_{CD}/\text{mm}$
初始值	-360	1030	-510	2992	1597	927
参数	$L_{CE}/\text{mm}$	$L_{EF}/\text{mm}$	$L_{FG}/\text{mm}$	$L_{GC}/\text{mm}$	$\theta_1/(\text{^\circ})$	$\theta_2/(\text{^\circ})$
初始值	260	317	351	241	35.6	104.87

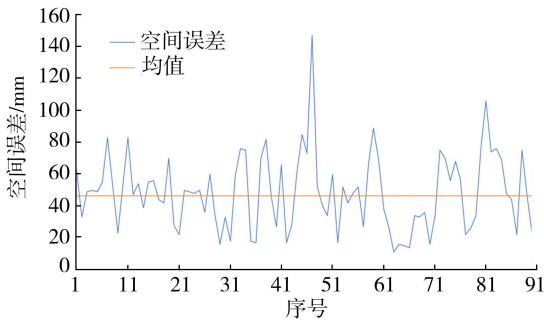


图 8 挖掘机铲尖坐标计算误差

由图 8 可知,误差均值为 4.63 cm。误差主要来源于传感器噪声、机械尺寸标定残余误差及坐标系转换累积误差。该精度完全满足水下开挖厘米级质量控制的工程需求,验证了本文铲尖坐标计算方法的正确性与实用性。

## 4.2 系统应用

### 4.2.1 车载端系统

车载端系统界面如图 9 所示。该系统基于 Unity 3D 引擎,集成了水下开挖形体 BIM 模型与挖掘机数字孪生模型。系统通过 C#脚本实时处理传感器数据,以 10 Hz 及以上频率同步更新数字孪生模型位姿,端到端延迟小于 200 ms,确保视觉反馈与物理设备状态高度实时一致。

该系统的核心功能是实时解算与可视化铲尖-岸坡空间关系。界面采用分屏双视角展示:左侧全景视角监控全局作业场景,右侧近景视角聚焦铲斗操作细节。基于实时解算的距离信息,系统实现了开挖状态的智能判断与可视化引导:岸坡模型网格根据铲尖距离动态变色(合格区绿色、欠挖区棕色、超挖区红色),并在超挖时触发声光报警。同时,系统实时统计并显示整体开挖进度与开挖合格率,为

过程量化管理提供直观依据。

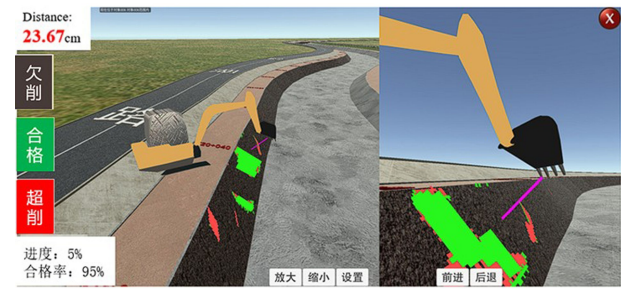


图 9 车载端系统界面

### 4.2.2 远程监控端软件系统

为支持施工过程的远程透明化管控,开发了基于 Web 技术的远程监控端系统,系统界面如图 10 所示。该系统通过与车载端共享服务器数据(网络传输平均延迟小于 100 ms,同步误差小于 50 ms),实现了施工状态信息的远程实时同步与可视化。管理人员可以在三维孪生场景中自由巡检,并结合左侧面板的实时数据(相对距离、开挖状态、进度与合格率)进行综合决策。

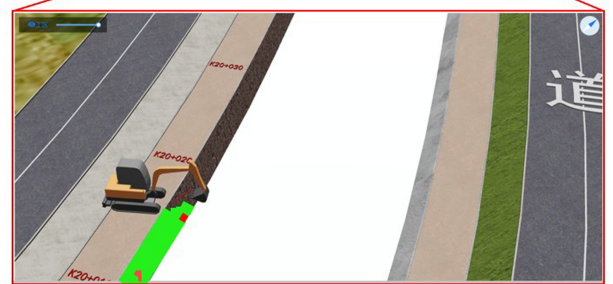


图 10 实时监控系统界面

此外,系统提供了强大的事后分析功能,岸坡开挖质量系统界面如图 11 所示。该系统支持开挖过程仿真回放、岸坡开挖质量色斑图生成、铲尖运动轨迹追溯及多维度报表自动输出。这些功能为复盘作业过程、分析报警根源、评估作业效率提供了有效工具,形成了“实时引导→过程监控→事后分析”的完整质量管理闭环。

## 5 结语

为解决常规水下挖掘作业中由于挖掘面不可见、开挖过程依赖于挖掘机操作手经验,使得开挖质



图 11 岸坡开挖质量系统界面

量难以控制而导致返工等问题,本文研发了水下挖掘智能引导与作业质量控制装置,并开发了相应系统,可在施工过程中通过车载端可视化智能引导和远程端协调监控,辅助操作手及时发现并纠正质量偏差,使得开挖质量始终处于受控状态,确保开挖面边坡高程与平整性符合设计要求,从而为可视性差的水下挖掘作业质量的管控提供有效的技术手段。

为将本系统应用于更广泛的工程实际,未来还需开展以下研究:在多机协同方面,应研发基于全局数字孪生模型的动态任务分配与冲突实时解算方法,构建低延迟通信的协同控制架构;针对沟槽、防波堤等复杂异形结构,需建立高精度参数化 BIM 建模与相应碰撞检测算法,并研究受限空间下的机械运动规划技术;为应对水流、泥沙等动态干扰,可探索多源信息融合定位方法,并引入基于环境动力学模型的扰动观测与补偿控制策略,以提升系统在真实水下复杂工况下的感知稳定性与引导可靠性。通过上述技术路径的突破,系统有望从当前的单机标准化作业平台,演进为适应多机协同、复杂结构与动态环境的下一代智能施工引导系统。

### 参考文献:

[ 1 ] Mahmood B, Han S, Seo J. Implementation experiments on convolutional neural network training using synthetic images for 3D pose estimation of an excavator on real images [ J ]. Automation in Construction, 2022, 133: 103996.

[ 2 ] Luo Han, Wang Mingzhu, Wong P K Y, et al. Full body pose estimation of construction equipment using computer vision and deep learning techniques [ J ]. Automation in Construction, 2020, 110: 103016.

[ 3 ] Liu Guangxu, Wang Qingfeng, Wang Tao, et al. Vision-based excavator pose estimation for automatic control [ J ]. Automation in Construction, 2024, 157: 105162.

[ 4 ] 倪佳敏, 马伟, 童欣, 等. 基于视觉的挖掘机位姿测量虚拟传感器研究 [ J ]. 电子测量技术, 2022, 45(9): 44-49. ( Ni Jiamin, Ma Wei, Tong Xin, et al. Vision-based virtual sensor research for excavator position measurement [ J ].

Electronic Measurement Technology, 2022, 45(9): 44-49. ( in Chinese ) )

[ 5 ] Tian Zehui, Yu Yong, Xu Feng, et al. Dynamic hazardous proximity zone design for excavator based on 3D mechanical arm pose estimation via computer vision [ J ]. Journal of Construction Engineering and Management, 2023, 149(7): 04023048.

[ 6 ] Li Jinguang, Liu Yu, Wang Linwei, et al. A vision-based end pose estimation method for excavator manipulator [ J ]. Multimedia Tools and Applications, 2024, 83(26): 68723-68741.

[ 7 ] Lee S, Park H, Chu B. Excavator posture estimation and position tracking system based on kinematics and sensor network to control mist-spraying robot [ J ]. IEEE Access, 2022, 10: 107949-107960.

[ 8 ] Tang Jingyuan, Luo Han, Chen Weiwei, et al. IMU-based full-body pose estimation for construction machines using kinematics modeling [ J ]. Automation in Construction, 2022, 138: 104217.

[ 9 ] Zhao Jiangying, Hu Yongbiao, Tian Mingrui. Pose estimation of excavator manipulator based on monocular vision marker system [ J ]. Sensors, 2021, 21(13): 4478.

[ 10 ] Sun D, Ji C, Jang S, et al. Analysis of the position recognition of the bucket tip according to the motion measurement method of excavator boom, stick and bucket [ J ]. Sensors, 2020, 20(10): 2881.

[ 11 ] 邓波, 郭灵华, 刘菠. 3D 挖掘子在护岸水下理坡中的应用 [ J ]. 中国水运 ( 下半月 ), 2015, 15(5): 266-267. ( Deng Bo, Guo Linghua, Liu Bo, et al. The application of 3D excavators in underwater slope management for bank protection [ J ]. China Water Transport, 2015, 15(5): 266-267. ( in Chinese ) )

[ 12 ] 魏彦宏. 徕卡测量系统挖掘机智能引导方案在河道施工中的应用 [ J ]. 测绘通报, 2013(10): 133-134. ( Wei Yanhong. Application of Leica measurement system's intelligent guidance scheme for excavators in river construction [ J ]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(10): 133-134. ( in Chinese ) )

[ 13 ] 陈云, 涂宇轩, 陈述, 等. 混凝土坝施工现场人-机-环多要素识别方法 [ J ]. 水力发电学报, 2024, 43(12): 13-22. ( Chen Yun, Tu Yuxuan, Chen Shu, et al. Recognition method for multi-elements in human-machine-environment scenarios of concrete dam construction [ J ]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(12): 13-22. ( in Chinese ) )

[ 14 ] 黄显峰, 王宁, 刘志佳, 等. 基于改进 NSGA- II 算法的梯级水库多目标优化调度 [ J ]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 51-58. ( Huang Xianfeng, Wang Ning, Liu Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA- II algorithm [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources,

- 2024,44(4):51-58. (in Chinese))
- [15] 程丹丹,钮月磊,刘创. 基于数字孪生的智慧水利系统的设计与应用[J]. 现代信息科技,2025,9(2):105-109. (Cheng Dandan, Niu Yuelei, Liu Chuang. Design and application of intelligent water conservancy system based on digital twin[J]. Modern Information Technology, 2025, 9(2):105-109. (in Chinese))
- [16] 张社荣,姜佩奇,吴正桥. 水电工程设计施工一体化精益建造技术研究进展:数字孪生应用模式探索[J]. 水力发电学报,2021,40(1):1-12. (Zhang Sherong, Jiang Peiqi, Wu Zhengqiao. Advances in research of lean construction technology of integrated design and construction for hydropower projects: exploration of digital twin application mode [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(1):1-12. (in Chinese))
- [17] 杜明芳. 基于数字孪生的智慧建筑系统集成研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12(6):44-48. (Du Mingfang. Intelligent building system integration research based on digital twin [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2020, 12(6):44-48. (in Chinese))
- [18] 张宗亮,杨宜文,张社荣,等. 黄登水电站特高碾压混凝土重力坝 BIM 技术应用[J]. 中国水利,2020(13):65-66. (Zhang Zongliang, Yang Yiwen, Zhang Sherong, et al. Application of BIM technology in super-high RCC gravity dam of Huangdeng Hydropower Station[J]. China Water Resources, 2020(13):65-66. (in Chinese))
- [19] 樊启祥,陆佑楣,周绍武,等. 金沙江水电工程智能建造技术体系研究与实践[J]. 水利学报,2019,50(3):294-304. (Fan Qixiang, Lu Youmei, Zhou Shaowu, et al. Research and practice on intelligent construction technology system of Jinsha River hydropower projects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3):294-304. (in Chinese))
- [20] 牛景太,周华,吴邦彬,等. 考虑多重共线性影响的特高拱坝时空监控模型[J]. 水利水电科技进展,2023,43(1):29-35. (Niu Jingtai, Zhou Hua, Wu Bangbin, et al. Spatio-temporal monitoring model for super-high arch dams considering multicollinearity effects[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1):29-35. (in Chinese))
- [21] 吴都督,李志,刘金山,等. 智能建造技术在碾压混凝土坝施工中的应用与创新[J]. 水利水电科技进展,2024,44(增刊1):66-70. (Wu Dudu, Li Zhi, Liu Jinshan, et al. Application and innovation of intelligent construction technology in construction of roller-compacted concrete dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(S1):66-70. (in Chinese))
- [22] 何绍波,何国锋,何金龙,等. 地下厂房洞室群施工关键技术研究[J]. 水利水电科技进展,2024,44(增刊1):28-33. (He Shaobo, He Guofeng, He Jinlong, et al. Research on key technologies for construction of underground powerhouse cavern group [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(S1):28-33. (in Chinese))
- [23] Dunbabin M, Marques L. Robots for environmental monitoring: significant advancements and applications[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012, 19(1):24-39.
- [24] Paull L, Saeedi S, Seto M, et al. AUV navigation and localization: a review [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(1):131-149.
- [25] Tanoli W A, Seo J W, Sharafat A, et al. 3D design modeling application in machine guidance system for earthwork operations [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(12):4779-4790.
- [26] Liu Donghai, Sun Chenyang, Chen Junjie, et al. Multisensory and BIM-integrated digital twin to improve urban excavation safety[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2023, 37(5):04023025.
- [27] Tanoli W A, Seo J W, Sharafat A, et al. 3D design modeling application in machine guidance system for earthwork operations [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(12):4779-4790.
- [28] Moon S, Seo J. Virtual graphic representation of construction equipment for developing a 3D earthwork BIM [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 23(8):977-984.
- [29] 宋学官,来孝楠,何西旺,等. 重大装备形性一体化数字孪生关键技术[J]. 机械工程学报,2022,58(10):298-325. (Song Xueguan, Lai Xiaonan, He Xiwang, et al. Key technologies of shape-performance integrated digital twin for major equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(10):298-325. (in Chinese))
- [30] Zeng Yuhang, Guo Hongwu. An euler angle calculation method for tailsitter UAV[C]//2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan:IEEE, 2017:814-819.
- [31] Perumal L. Euler angles: conversion of arbitrary rotation sequences to specific rotation sequence [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2014, 25(5/6):521-529.
- [32] Huang Suibin, Yang Kun, Xiao Hua, et al. A new head pose tracking method based on stereo visual SLAM[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2022, 82:103402.
- [33] Sun Jie, Lu Shengli. An improved single shot multibox for video-rate head pose prediction [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(20):12326-12333.
- [34] 黄雪樵. 克服欧拉方程奇异性的双欧法[J]. 飞行力学, 1994(4):28-37. (Huang Xueqiao. The dual Euler method for overcoming the singularity of Euler equation[J]. Flight Dynamics, 1994(4):28-37. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-09 编辑:俞云利)