

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.003

基于姿态估计的输电线路带电作业的人体数字孪生研究

马爱清, 张成武, 徐进帅, 汪 威

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 带电作业是保证电网安全可靠运行的重要内容,而带电作业又充满危险。为了能够对人体面临的风险进行评估,可以将数字孪生理念引入输电线路带电作业中,构建人体数字孪生体对人体进行风险评估,在虚拟空间中完成对现实世界的映射。采用姿态估计、模型重构和模拟仿真构建高压输电线路带电作业人体数字孪生体,能够对危险状况进行预警,评估人身安全。首先运用POSIT算法得到现实世界和图像坐标系的转换矩阵,结合二维三维转换技术将后续的二维坐标点转换为三维坐标点,即能得到人体的姿态数据。然后利用人体姿态数据进行人体的模型重构论述和现场仿真进行风险评估,并且通过实时工作指南规则进行人员的潜在风险评估。该研究实现了三维模型随着姿态数据的改变而模型重构,继而随着人体模型的改变,系统将在仿真中自动计算电场,并利用风险评估显示危险。此技术能够为现场作业人员安全评估提供一种新的思路,为数字化电网发展提供基础。

关键词: 数字孪生; 输电线路; 姿态估计; 姿态数据; 模型重构; 带电作业; 场景验证; 风险评估

Research on Human Digital Twins for Live Working on Transmission Lines Based on Attitude Estimation

MA Aiqing, ZHANG Chengwu, XU Jinshuai, WANG Wei

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Live working is an important part of ensuring safe and reliable operation of power grid. However, the live working is full of danger. In order to assess the risks faced by the human body, the concept of digital twins can be introduced into live working on transmission lines, and a human digital twin can be constructed to conduct risk assessment on the human body, completing the mapping of the real world in virtual space. The attitude estimation, model reconstruction and simulation are used to construct a digital twin of the human body for live working on high-voltage transmission lines, which can provide early warning of dangerous situations and assess personal safety. Firstly, the POSIT algorithm is used to obtain the transformation matrix between the real world and image coordinate systems. Combined with two-dimensional and three-dimensional transformation technology, the subsequent two-dimensional coordinate points are converted into three-dimensional coordinate points, which can obtain the posture data of the human body. Then, the human posture data is used for model reconstruction and on-site simulation for risk assessment, and potential risk assessment of personnel is performed through real-time work guidelines and rules. This research achieves model reconstruction of three-dimensional models with variation in posture data, and then with variation in the human body model, the system will automatically calculate the electric field in simulation and use risk assessment to display hazards. This technology can provide a new idea for safety assessment of on-site workers and lay the foundation for the development of digital power grid.

Key words: digital twin; transmission lines; attitude estimation; attitude data; model reconstruction; live working; scenario validation; risk assessment

收稿日期:2024-05-04; 修回日期:2024-07-26

基金项目:上海市自然科学基金资助项目(19ZR1420600);上海绿色能源并网工程技术研究中心科技项目(13DZ2251900)。

Project Supported by Shanghai Natural Science Foundation(19ZR1420600), Shanghai Green Energy Grid Connection Engineering Technology Research Center Science and Technology Project(13DZ2251900).

0 引言

随着中国加快构建新型电力系统、助力实现“碳达峰、碳中和”战略的实施,全行业对电网的数字化转型和安全运行提出了更高要求。带电作业技术可以灵活安排检修计划,不改变系统运行方式和及时消除缺陷或隐患,可以显著降低线路维护成本,因此带电作业已成为确保超/特高压电网长周期安全稳定可靠运行的重要技术手段。

然而,传统的带电作业安全分析一般取某个特定时刻或者特殊姿势进行数值模拟分析,属于理想化静态模拟,数值模型的几何参数和边界条件、实际操作条件无法和作业现场同步,无法实现实时感知,因而在作业过程人员安全状态实时评估、检修过程动态跟踪方面落后于实际需求。即使已经存在成熟的作业指导要求,但是不能利用人体姿态变化而实时计算体表电场,同时对不按规定要求的工作人员也不能提供安全预警。

随着计算机光学动作捕捉技术的发展,面向国家“十四五”明确提出加快推进能源数字化智能化发展的实际需求,基于数字孪生技术实现输电线路带电作业过程的全面感知和智能分析,确保作业人员安全和提高输电线路运检效率是非常必要的。线路带电作业过程实现数字孪生,即在虚拟空间中构建出与原场景和人员一一对应的虚拟场景,对虚拟场景的人员安全性分析及时反映到现实中人体的状态,利用与实际场景几乎无延迟的展现,弥补传统静态仿真过程和现实场景实时联系脱节的问题,以此评估在实际带电作业过程中人员状态,纠正可能发生的潜在危险。在高压输电线路带电作业数字孪生构架中,基于计算机视觉和投影技术,运用人体姿态估计技术,进行现场人体姿态实时估计,重构人体姿态的数字孪生体,是实现输电线路带电作业现场作业并进行人员风险评估的关键步骤。

国内外对数字孪生的研究重点在具体设备或者系统数字孪生的构建过程,文[1]通过局部模型训练与全局模型整合实现配电网孪生。文[2]模拟空间内即将发生的工作状态,提前预判换流站空间内能量转换以及电子器件的工作状态。文[3]详细阐述了电力设备状态智能感知、电力设备物联网平台等电力设备数字化关键技术的研究现状和存在的问题。文[4]重点讨论了虚拟孪生系统的基本特性、支撑理论、技术体系、建设流程及其案例分析等。文[5]提出了智能制造与数字化标准一体化融合应用的体系架构、功能规格、技术体系、实施策略以及

实施流程。文[6]设计了调制密集连接模块和预加权图卷积模块,并基于这两个模块提出了预加权调制密集图卷积网络的三维人体姿态估计方法。文[7]利用卷积神经网络在姿态估计结果的基础之上进行动作识别,使用知识蒸馏的方法建立更为统一且鲁棒的特征空间。文[8]利用虚拟现实动作捕捉技术采集人体重要位置处的数据,将所得大量实时传感器数据通过人工智能技术进行数据分类、筛选、约简与计算处理得到所需要的关键数据。文[9]利用将 Open Pose 模型转换为芯片所需模型,拷贝至芯片,并在其 NNA 加速核模块上成功运行,得到模型推理结果并上传至上位机进行后处理,得到人体姿态检测结果,但是深度学习方法通常需要大量标记的训练数据来获得良好的性能,需要大规模的神经网络进行训练和大量的参数调整,实现比较复杂,计算效率低,计算速度慢,在此论文中计算的快速性是最为重要的,因此深度学习方法暂不考虑。文[5]尝试开发一种软件库,可以覆盖人体姿态估计问题的整个开发流程,为数据获取、样本生成等每个方面提供了相应的组件,使得整个人体姿态估计软件的开发流程更加便利。文[10]详细地阐述了输变电设备数字孪生实现过程中所涉及的关键技术。文[11]对数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用进行了分析,阐述了包括状态感知、数据治理、模型构建和应用在内的数字孪生技术的具体应用。文[12]详细阐述了数字电网的技术内涵与技术特征,构建了包含传感量测、边缘计算等的数字电网技术架构。文[13]提出电力物联网体系架构和安全防御机制,研究“端—边—管—云—智”等多层级的关键支撑技术。文[14]描述了数字孪生技术在智能设计、智能制造、供应链动态管理及运维管理等方面的典型应用场景。国内外对于人体姿态估计的研究较为成熟,但是有些借助传感器的不适宜用在高电压高磁场高干扰的输电线路路上,而数字孪生的研究主要集中在整体理论框架的研究过程,构建各种场景各种设备的数字孪生体,因此文中将姿态估计和数字孪生结合起来更具有现实意义。

文中主要重点在于人体的姿态估计过程,将拍摄到的人体工作场景图片,利用计算机图形学中的坐标系转换及其求解转换矩阵,将二维点转化为世界坐标系中的三维点,进而得到人体的姿态数据,随后利用此数据进行模型重构、数值模拟和风险评估一系列应用技术。推进数字孪生体在现实工作场景中的研究应用,将有助于改善复杂工作场景中的现场工作水平,并确保现场工作者的安全。

1 输电线路带电作业数字孪生总体框架

根据数字孪生的不同功能进行分类,并结合文中输电线路带电作业实现数字孪生,其总体架构见图1,数字孪生分为物理层、采集分析层、数据层、模型层和应用层:物理层模型为现实世界中的人体带电工作场景的实体模型;采集分析层将得到的物理模型进行分析得到后续可用的数据;数据层是利用人体姿态估计得到的有关可以表征物理模型数学状态的相关数据集;模型层是利用数据层中的数据集合通过模型重构和有限元仿真技术;应用层是利用模型层得到的重构和仿真结果对带电作业人员的风险评估。

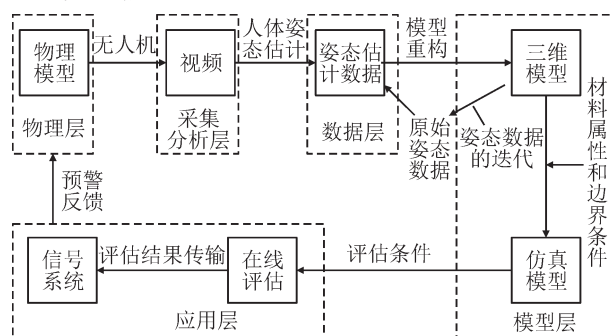


图1 数字孪生总体架构

Fig. 1 Digital twin overall architecture

2 人体现场工作场景下的姿态估计

现场工作人员模型重构的关键是通过姿态估计获取人体姿态数据。传统的声学、电磁和惯性动作捕捉在高压输电线路路上可能会受到高压输电线路上的电场、电磁超、声波等影响。随着现代科技的进步,无人机技术蓬勃发展,对各种电磁和声波干扰最小,更为简单和方便,基本不受天气情况的影响,因此相较于其他方法,使用光学人体姿态估计能够尽可能的减少电磁和天气等外界影响,保证姿态估计的精准性,更准确的构建数字孪生体。

文中利用不断迭代的POSIT算法作为求取姿态数据的其中一步。POSIT算法由D. F. De Menthof和L. S. Davis于1995年提出,该算法是一种快速精确的用于计算物体姿态的迭代算法,即运用几组物体特征点的对应关系进行对物体的位姿估计。它的基本原理是在获得物体4组非共面的特征点的三维坐标和与之对应的二维坐标后,使用正交投影和尺度变换等数学模型初步估算物体的位姿参数。然后利用初步估算得到的位姿参数对物体进行二次投影,重新定义位姿参数的初始值,并计算相

关误差。通过迭代运算,不断更新位姿参数值,以满足实验要求。POSIT算法可在姿态估计中表现出稳定性,尤其是在相对较理想的条件下。尽管可能受到噪声、遮挡、光照变化等环境因素的影响,通过适当的参数调整,POSIT算法在实际应用中仍然能够展现相对高的稳定性。POSIT算法在一般情况下具有很高准确性,特别是在相机标定良好、特征点选择合适、场景较为简单的情况下。

POSIT算法相对Open Pose等深度学习法相比较计算速度快,收敛迅速,计算效率高,对数据需求相对较小,部署相对简单,不需要大规模的神经网络进行训练和大量的参数调整。对于数据的需求相对较小,这使得POSIT算法在计算资源有限或对实时性要求高的情况下可能更具优势。相比之下,深度学习方法通常需要大量标记的训练数据来获得良好的性能。然而,POSIT算法也有一些限制和缺点,例如对于非线性畸变的敏感性较高,可能在处理复杂场景或非常规相机设置时表现不佳。POSIT算法对于初始估计敏感,可能需要一个较好的初始估计以确保算法的收敛性。POSIT算法适用于特定情境,特定情境将在下文中说明相机位置和高度,其他情况其性能可能不如深度学习方法。

文中运用POSIT算法和二维到三维转换技术求取人体 n 时刻到 $n+1$ 时刻的姿态数据。POSIT算法可以提前得出相机坐标系和世界坐标系的转换矩阵,二维三维转换技术将现实场景中拍摄的特征关节点的二维坐标转换为三维世界坐标。

完整的姿态估计过程为:①在带电作业前无人机和工作人员就位,进行转换矩阵的获取。任意选取4组不共面的人体手部的节点,已知它们的三维坐标,并利用图片坐标提取技术将与三维坐标点相对应的无人机拍摄图片的二维坐标点提取出来,运用POSIT技术计算出两个坐标系的转换矩阵,以此进行图片坐标系和世界坐标系的坐标转换,获得转换矩阵。②在工作过程中,利用无人机进行实时摄像,无人机获取的录像信息通过图传系统信号采集传输单元实时快速的发送计算机,使用支持实时通信的网络协议和架构,确保传输过程具有低延迟。云端计算机间隔很短一段时间截取一张图,利用POSIT算法得到现实坐标系和图片坐标系的转换矩阵 R 和 T ,运用二维三维转换技术将二维坐标转换成三维坐标,得到的坐标利用当前时刻与下一时刻的坐标差,就可求得人体的姿态数据。转换矩阵获取工作和二维三维转换工作流程图见图2。

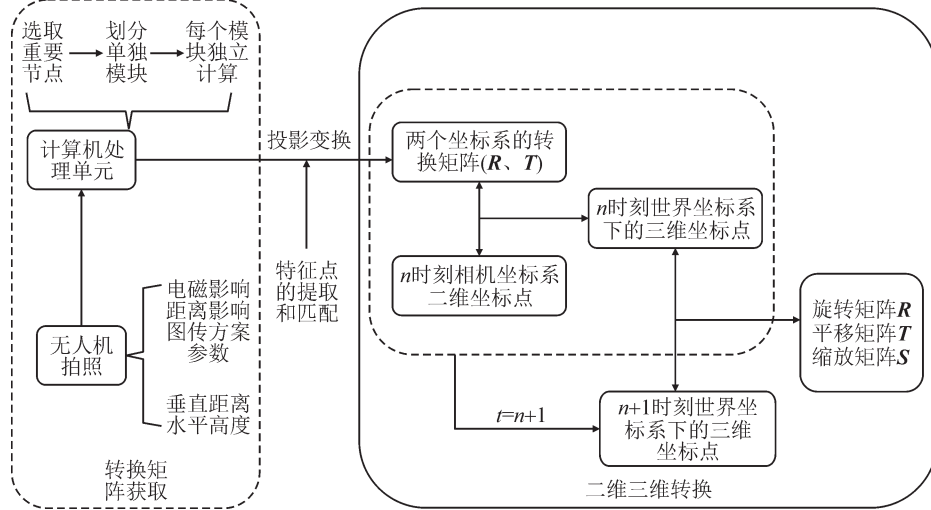


图2 姿态估计流程图

Fig. 2 Attitude estimation flowchart

人体姿态数据运用POSIT算法,而此算法的能够正常工作的前提是关节在 Z 轴上的移动量远远小于人体的平均深度。人体在带电作业时在水平高度上的移动最大部位为手部,经过查阅文献得知竖直运动有0.3 m。物理上定义相差一百倍为远远小于,因此图像能拍摄的高度需要有30 m。因此无人机位置和数据计算见图3。

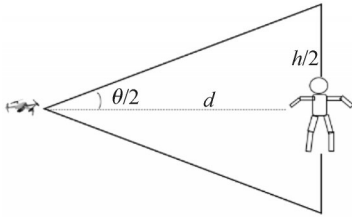


图3 无人机位置和距离

Fig. 3 Drone position and distance

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{h/2}{d} \quad (1)$$

式(1)中: h 为无人机能在竖直方向上拍摄到的海拔高度; d 为无人机到现场工作人员的水平距离; θ 为前视视角(FOV), $\theta=71^\circ$ 。

计算可得 $d=21.03$,因此可以将无人机悬停在垂直绝缘子方向并且与人体在同一水平线上距离21 m远处。

2.1 坐标系转换过程

2.1.1 坐标系的转换矩阵获取原理

利用已知的POSIT算法,运用缩放的正交投影近似透视变换,得到相机坐标系和世界坐标系之间的转换关系。文中以选取的任意关节节点为例,描述转换矩阵的得到过程。首先利用人体姿态估计技术选取任意关节点,求解二维图像坐标和三维坐标之间的转换矩阵,包括转换矩阵 R_X 和 T_X :

$$R_X = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^T \\ R_2^T \\ R_3^T \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_X = [T_X \quad T_Y \quad T_Z]^T \quad (3)$$

式(2)、(3)中: R_{ij} 分别表示对应的行的相机坐标系中第 i 个坐标轴方向的单位向量在世界坐标系中的坐标和对应列的世界坐标系中的第 j 个坐标轴方向的单位向量在相机坐标系中的坐标,也就是坐标系分别围绕 X 、 Y 、 Z 轴的旋转角度; T 为平移向量,表示世界坐标系原点在相机坐标系中的坐标; T_Z 表示世界坐标系的原点在相机坐标系中的深度^[15]。

作基本的透视投影变换将三维点 $a = (X_w, Y_w, Z_w)$ 透视投影到图像平得到齐次坐标 $m = [wX, wY, w]^T$,其中

$$w = \frac{R_3 \times a}{T_Z} + 1 \quad (4)$$

POSIT算法至少需要4个不共面的二维三维点对,通过已知的点对和最小二乘法,可得 R_1 、 R_2 、 T_X 、 T_Y ,可以得到 $R_3 = R_1 \times R_2$,并且将 R_1 、 R_2 、 R_3 归一化为单位向量。

随后不断更新 w ,对不同二维三维点对 S 为

$$S = \frac{f}{T_Z} \quad (5)$$

式(5)中:焦距 f 是无人机的已知参数; T_Z 也是已知的定值参数,可以看作是所有的三维点 Z 坐标的平均值,所以 S 是一个固定值。不同的三维点坐标不同,所以 w 的值不同,通过投影变换二维点变为 $(wX, wY)^T$ 。重复做透视投影变换,将求出的物体的旋转矩阵和平移向量的估计值作为初始值,进行弱透

视投影,不断重复这就是POSIT算法的具体过程^[16]。

2.1.2 实例分析

在文中,选取人体手部关键节点进行相机坐标系和世界坐标系转换矩阵的求解,任意选取4组点,见图4。

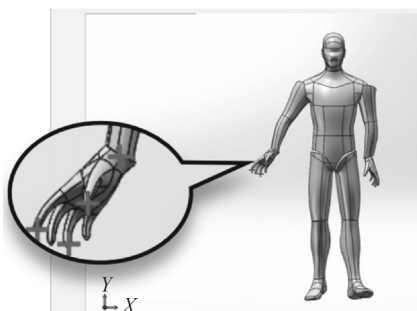


图4 任选的4组点

Fig. 4 Optional four sets of points

首先这4组点的三维坐标见表1。

表1 选取的手部4组三维点

Table 1 Four sets of 3D points selected for the hand

点	X	Y	Z
$P_1(x)$	-0.582 95	-0.373 76	0.660 27
$P_2(x)$	-0.521 45	-0.399 81	0.622 68
$P_3(x)$	-0.486 93	-0.326 40	0.695 75
$P_4(x)$	-0.431 23	-0.245 77	0.614 08

利用坐标提取技术得到的二维坐标见表2。

表2 手部4组三维点所提取的二维点

Table 2 2D points extracted from four sets of 3D points on the hand

点	X	Y
$P_1(s)$	0.438	0.412
$P_2(s)$	0.461	0.423
$P_3(s)$	0.475	0.394
$P_4(s)$	0.497	0.362

利用POSIT算法得到的相机坐标系和世界坐标系的转换矩阵 R 为

$$\begin{bmatrix} 0.724 3 & 0.087 0 & 0.684 0 \\ 0.344 9 & -0.904 7 & -0.250 1 \\ 0.597 0 & 0.417 0 & -0.685 3 \end{bmatrix}$$

转换矩阵 T 为

$$[0.970 9 \quad 0.914 4 \quad 53.201 6]^T$$

2.2 从二维到三维坐标的转换

2.2.1 从二维到三维坐标转换原理

由二维坐标点转换成三维坐标点可运用二维三维转换技术,其基本数学推导如下。

图片坐标系和无人机之间的相机坐标系为

$$Z_c \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中: X_c 、 Y_c 、 Z_c 是无人机的相机坐标系中的位置, X_c 、 Y_c 可以直接求取, Z_c 的值为上述转换矩阵求解过程最终迭代值 p 与 T_z 的乘积; f 是无人机的焦距,取值为24 mm。

通过上一步可求得姿态数据在相机坐标系中的位置,而相机坐标系和世界真实坐标系之间存在的关系为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T \quad (7)$$

通过数学公式变换可得

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = R^{-1} \left(\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} - T \right) \quad (8)$$

可以求得 n 时刻的三维坐标 $O_n(X_w, Y_w, Z_w)$,将此时的数据与 $n+1$ 时刻的三维坐标点 O_{n+1} 与 n 时刻的坐标点可以通过刚体变换矩阵求得:

$$R = R_x R_y R_z \quad (9)$$

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(9)–(12)中, α 、 β 、 γ 分别是坐标系围绕 X 、 Y 、 Z 轴的旋转角度。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)中, X 、 Y 、 Z 表示坐标系之间的相对偏移。

$$S = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(14)中, s_x 、 s_y 、 s_z 分别是 X 、 Y 、 Z 轴的缩放比例。

2.2.2 验证计算

现对上述公式进行验证和计算,选取多组二维

点,利用上述转换矩阵将二维坐标推导出三维坐标,即为预测三维坐标点,与实际三维坐标点进行对比分析见图5。

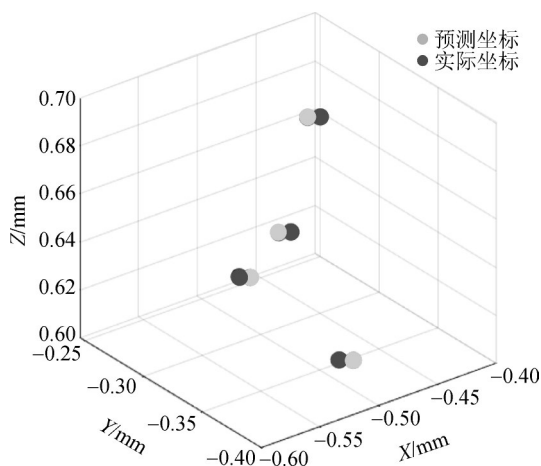


图5 预测点和实际点之间的对比

Fig. 5 Comparison between predicted and actual points

从图5及其数据中可以看到特征点的预测坐标和实际坐标分布比较接近,通过计算得到3点的坐标的欧几里德距离小于实际坐标点到原点距离的3%,一点为小于5%,总体可信。接下来需要二维到三维的实际应用的转换,选取的二维坐标点见图6的标点A。



图6 选取的A点

Fig. 6 Selected point A

2.2.3 实例分析

由二维坐标提取技术可以得到其二维坐标为(0.421 0, 0.356 5)。

利用转换矩阵推算出的三维坐标点(X_w , Y_w , Z_w)为(-0.660 2, -0.267 2, 0.441 5)。

提取下一时刻($n+1$ 时刻)此处的三维坐标点为(-0.583 0, -0.373 8, 0.660 3),因此从 n 时刻到 $n+1$ 时刻的姿态数据 R 、 T 、 S 为:

$$R = \begin{bmatrix} -0.3024 & 0.4177 & -0.8568 & 0 \\ -0.4177 & 0.7499 & 0.5130 & 0 \\ 0.8568 & 0.5130 & -0.0523 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0 & 0 & -0.5830 \\ 0 & 1.0000 & 0 & -0.3738 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0.6603 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0.2553 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2553 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2553 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (17)$$

3 人体模型的重构

利用求得的旋转矩阵 R 、 T 、 S ,计算得出具体关节的姿态矩阵 M 为

$$M = T \cdot R \cdot S \quad (18)$$

转换矩阵 M 为该关节此时的转换矩阵,包括了关节的平移旋转和缩放,为下一步的人体模型的重构准备了条件。

人体有些关节的运动状态不仅和自身相关,还与与之相连的关节相关。因此,定义对下一关节有影响的关节为父关节,被父关节影响的关节为子关节。父关节能影响子关节,但子关节对父关节不产生影响。选取全身关节中移动和旋转最少的腰部关节为父关节,其他相应的关节均为它的子关节。人体的姿态可以视为关节相对于父关节所在坐标系的位移与旋转,因此子关节的转换矩阵为自身的转换矩阵乘以父关节的。人体主要活动关节见图7。

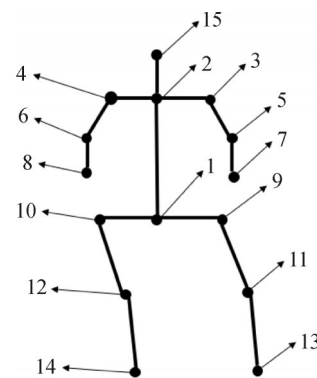


图7 人体骨架及其相应的连接关系

Fig. 7 The human skeleton and its corresponding connections

父子关节的相应的数据变换定义见表3。

任意时刻姿态数据与上一时刻姿势数据信息相关联,数学公式可以描述为

$$V_{i+1} = V_i * M_{i+1} \quad (19)$$

式(19)中: V_{i+1} 是人体第 $i+1$ 步的姿态数据; V_i 是第 i 步的姿态数据; M_{i+1} 为人体第 $i+1$ 步的姿态转换矩阵; i 为整数, $i \geq 1$ 。

将父关节和子关节进行联合,得到了联合运动信息,并且关节运动的信息将与几何人体骨架模型相结合,以获得现场工作者的几何姿势。

3.1 人体的组成部位的建模

提前建模几何模型的可移动部分,如腿部和胳膊

表3 父关节和子关节的转换矩阵结果

Table 3 Conversion matrix results for parent and child joints

序号	名称	转换矩阵
1	腕部	M_1
2	脖子	$M_2、M_1$
3	左肩膀	$M_3、M_2、M_1$
4	右肩膀	$M_4、M_2、M_1$
5	左肘关节	$M_5、M_3、M_2、M_1$
6	右肘关节	$M_6、M_4、M_2、M_1$
7	左手	$M_7、M_5、M_3、M_2、M_1$
8	右手	$M_8、M_6、M_4、M_2、M_1$
9	左上腿	$M_9、M_1$
10	右上腿	$M_{10}、M_1$
11	左膝关节	$M_{11}、M_9、M_1$
12	右膝关节	$M_{12}、M_{10}、M_1$
13	左脚	$M_{13}、M_{11}、M_9、M_1$
14	右脚	$M_{14}、M_{12}、M_{10}、M_1$
15	头	$M_{15}、M_2、M_1$

膊可旋转,关节之间通过球体进行装配连接。建立一个带有主要可移动关节的三维人体模型是为了促进与获取人体姿势信息的相互作用实现几何重建,利于模型重构。各肢体骨骼之间以同心圆的方式进行关节球体连接,分别建立肢体模型,再使用骨架作为装配的基准进行装配,容易达到模型重构的目的^[17]。各部分见图8。

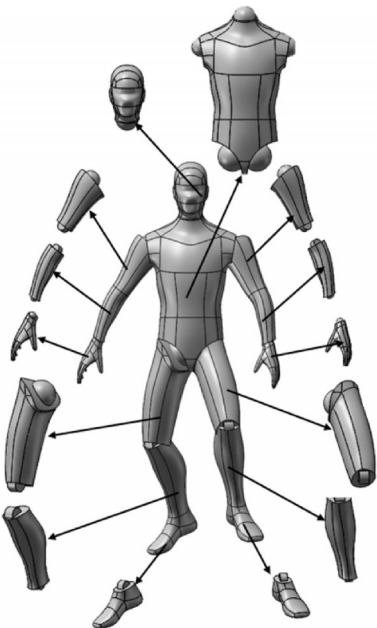


图8 三维人体实体模型结构图

Fig. 8 Structure diagram of three-dimensional human body solid model

3.2 三维人体模型重构方案

人体高度设置为1.75 m,依据人体尺寸数据库,将三维人体模型的主要关节躯干提前建模成型。由于这些人体关节可活动范围是有限的,各个关节所能达到的最大旋转角角度范围在一定范围内,因此应用三维建模软件中的方程式约束功能可建立各肢体模块中尺寸和位置间的约束关系。

关节的具体姿态则需要利用前文所得的姿态数据。将肢体模块通过旋转矩阵 R 中的XYZ轴旋转角度的余弦值逆变换成相应的角度,平移向量提取XYZ方向上的移动量,利用缩放矩阵进行整体的缩放操作,进而通过约束方程式和 $R、T、S$ 参数化来实现人体实时动态模型变化的意图。通过三维建模软件的API二次开发接口调用人体原型模型,并对人体模型驱动尺寸的重新赋值和模型重建^[18]。获取的模型的参数信息将与初始人体三维模型姿势的信息进行互动,利用姿态数据进行可视化展示,以实现人体几何模型的重建。在三维建模软件中按如图9拓扑结构图中的顺序以球体的方式进行“装配”,最终形成三维人体模型。

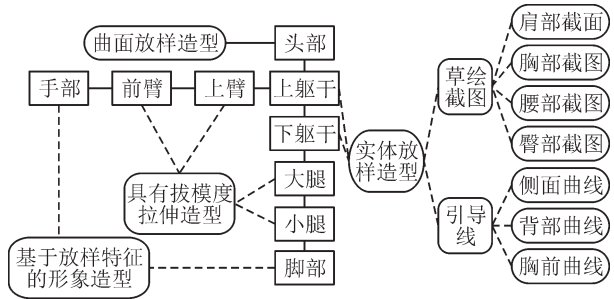


图9 三维人体模型结构划分的拓扑结构图

Fig. 9 Topological structure diagram for structural partition of 3D human model

总体建模步骤见图10。

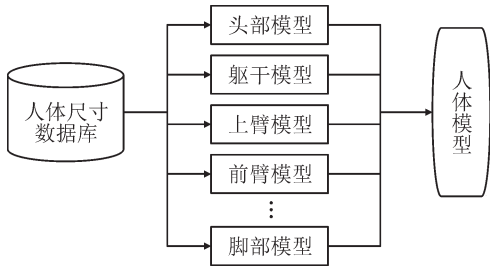


图10 三维人体模型建模步骤

Fig. 10 Steps for modeling a 3D human body model

4 人体数字孪生在输电线路上的实现

4.1 实现过程

Pro/TOOLKIT 和 Comsol API 是用于实现 Pro/ENGINEER 和 Comsol Multiphysics 之间脚本交互的

接口。要在 Pro/ENGINEER 和 Comsol 之间实现脚本交互,通常借助 MATLAB 脚本,使用 Pro/TOOLKIT 修改 Pro/ENGINEER 模型,导出修改后的模型为中间格式(如 STEP 文件),然后使用 Comsol API 导入和处理这个文件进行仿真。在这个过程中,需要确保两个软件之间的坐标系和单位的一致性。

通过软件接口连接三维建模软件和有限元仿真软件,将前一步骤得到的人体重构后的模型通过接口导入有限元软件。选取诸多动态人体姿态中的4个,将不同姿态的人体模型装配到绝缘子串上进行分析。不同于传统的电场仿真的只能选取静态姿势仿真,文中选取的人体姿势只是从动态带电作业过程中得到的人体数字孪生体中的4个例子,不代表所有,实现了随着姿态数据改变的人体动态建模后,可以在仿真中,随着人体姿势的改变,系统将自动计算电场,并利用风险评估显示危险。

这4种姿态是现场工作人员最为常见的可能有风险姿势,也是利用此后的风险评估技术最为典型的姿势,可以更加方便来验证人体数字孪生体构建完成后的风险评估的安全性和可靠性。构建在带电作业中人体更换绝缘子过程中的数字孪生模型,对作业人员体表电场分析并进行风险评估。作业姿势场景见表4。

表4 输电线路更换绝缘子串时人员作业场景

Table 4 Personnel operation scenarios when replacing insulator strings on transmission lines

序号	作业场景
场景1	跨坐双手前伸
场景2	跨坐伸开双手时
场景3	骑坐双手自然放下
场景4	骑坐双手前伸

数字孪生系统部署在云平台上,云平台提供强大的计算资源和灵活的服务,并能够根据需求灵活扩展计算能力。这样的部署方式使得数字孪生系统具有高度的灵活性和可访问性,可以随时随地通过互联网进行访问。

文中以新余—赣州 500 kV 超高压输电线路实际情况作为研究对象,输电线路为四分裂导线,耐张绝缘子为双联,每联绝缘子为 28 串,总长度 4 760 mm,架设铁塔 271 基,其中双回路塔 206 基,单回路塔 65 基。

带电作业过程中人体模型见图 11。采用有限元法对带电作业人员作业场域进行静电场分析,计算场域见图 12。有限元计算中相关材料的相对介电常数分别取值为:屏蔽服为 1.1,绝缘子为 7.0,金具为 1×10^4 ,空气为 1.0。

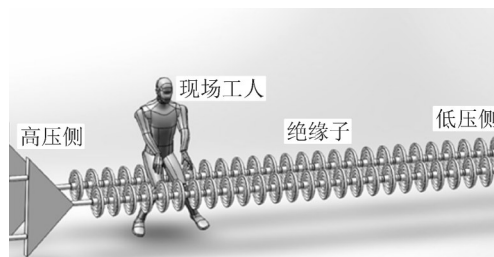


图 11 带电作业人员作业场景

Fig. 11 Live working personnel working scenarios

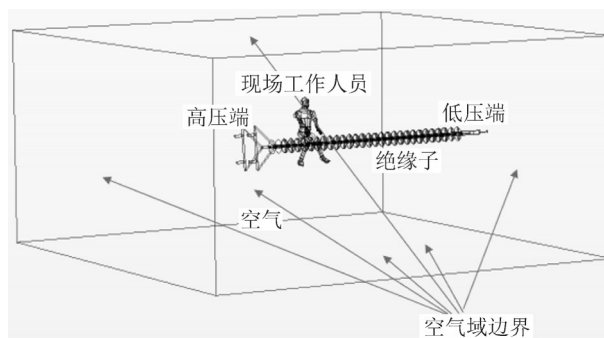


图 12 静电场计算区域

Fig. 12 Electrostatic field calculation area

通过人体模型重构能够得到在实际作业过程中的场景图,通过电场分析可获得不同现场工作场景下人体表面的虚拟电场分布,为分析方便,忽略其他相导线对人体体表电场的影响。选择表4中的典型作业场景,基于人体姿态估计的输电线路带电作业更换绝缘子串数字孪生的实现流程见图 13。

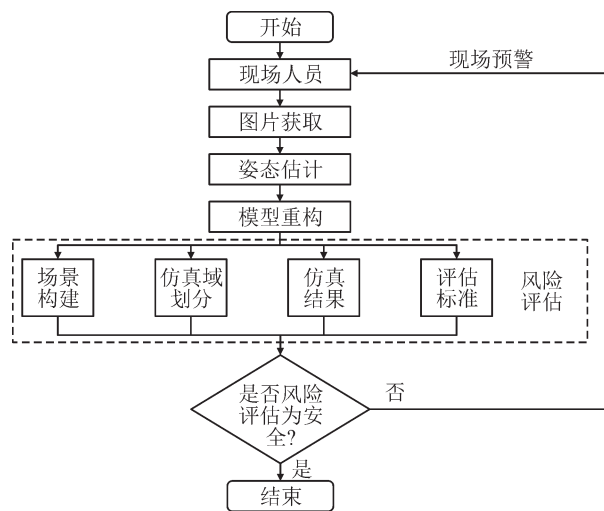


图 13 输电线路带电作业人员数字孪生实现

Fig. 13 Implementation of digital twins for live working personnel on transmission lines

数字孪生体与人的交互能力在于其对环境对人体行为的实时感知和分析。通过设定最小组合间隙等阈值或规则,系统可以实现对特定情境下的人体活动进行监测,并在达到一定条件时触发报警。这一机制旨在提高系统的感知精度、准确性和实时性,以更有效地应对潜在的危險或异常情况。

根据 GB 26859—2011《国家电网公司安全工作规程》中所规定的现场工作人员带电作业最小组间距离,风险评估主要依据作业人员作业过程中间隙安全距离确定为 $4.0\text{ m}^{[19]}$ 。带电工作场景中复杂间隙长度的计算见图14。假设在任意时刻 t ,工人工作边界与高压边界的法线距离为 $d_1(t)$,工作边界与接地边界的法线距离为 $d_2(t)$ 。复杂间隙长度 $D(t)$ 可以表示为

$$D(t) = d_1(t) + d_2(t) \quad (20)$$

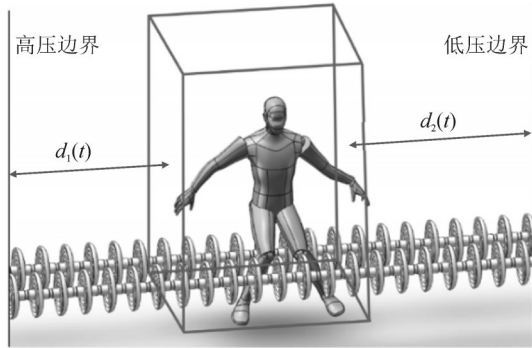


图14 工作场景复杂间隙长度的计算

Fig. 14 Calculation of complex gap length in work scenarios

设计如下报警系统,为了保证实时性,能够在检测到潜在风险或异常情况时立即发出警报,结合实时数据分析,通过设定最小组间距离等阈值或规则来触发报警。使用人体姿态估计获取人体的相对位置和姿势变换,将复杂间隙的长度与法规要求的最小复杂间隙进行比较,通过式(21)进行操作安全风险评估,其中 D 是操作规程要求的最小组间距离。

$$\text{sign}(t, \sigma) = \begin{cases} 1 & D(t) < D \\ 0 & D(t) > D \end{cases} \quad (21)$$

带电作业时,随时将在虚拟现实环境中计算出的组合间隙 D 与带电作业规定中规定的最小组间距离 D 进行比较。当函数值为1时,表示当前带电作业存在安全风险。此时数字孪生体应该立刻反馈给现场工作人员警告可能会有危险的情况发生;当函数值为0时,表示当前带电作业不存在安全隐患^[20]。

4.2 不同场景分析

在数字孪生应用的过程中对复杂间隙长度、作业人员作业边界、带电作业时人体电场分布进行全过程实时计算,实时进行带电作业人员作业行为的安全风险评估。

4.2.1 人员跨坐

1)场景1。场景1见图15,图15(a)、(b)、(c)、(d)依次为能得到的骨架模型、人体三维模型、虚拟工作场景和体表电场仿真结果。根据带电工作规定,500 kV带电工作所需的最小复杂间隙距离为4.0 m。在此操作场景下,最小复杂间隙距离为4.46 m,满足

500 kV带电作业4.0 m复杂间隙距离的要求,因此被评估为安全操作。

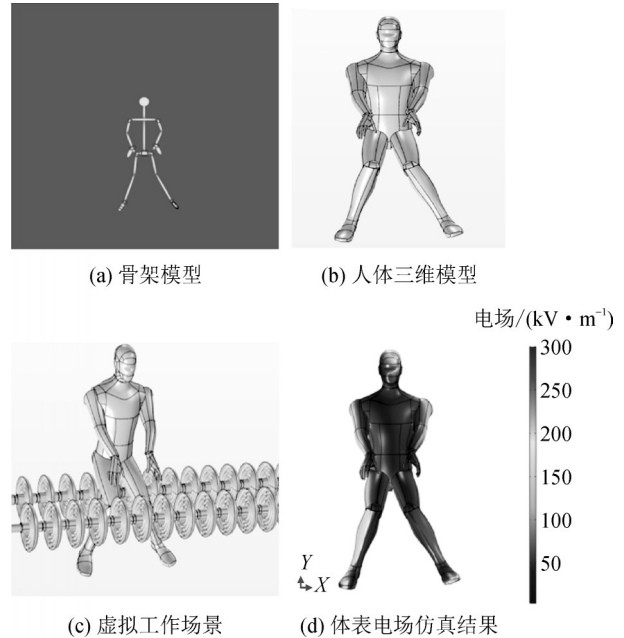


图15 场景1下的人体模型构建及分析

Fig. 15 Construction and analysis of human body models in scenarios 1

2)场景2。场景2见图16,在此操作场景下,最小复杂间隙距离为3.82 m,不满足500 kV复杂间隙距离4.0 m的现场工作要求,因此此处它被评估为有潜在风险的操作。

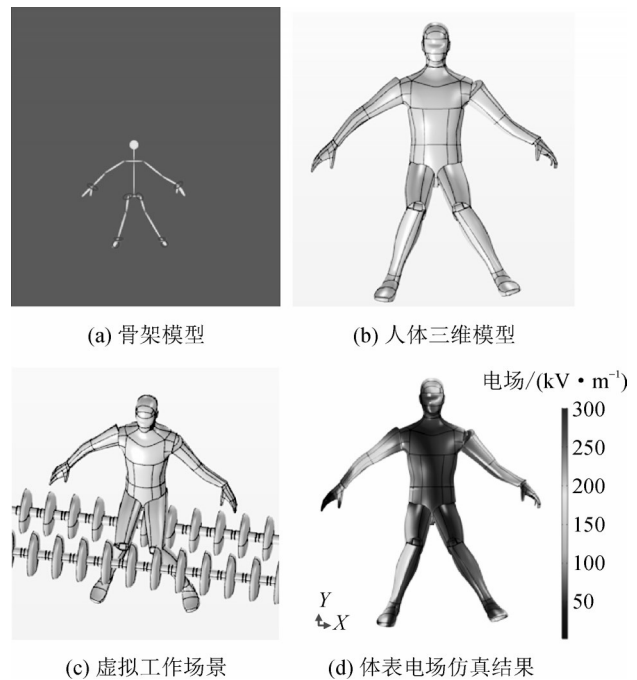


图16 场景2下的人体模型构建及分析

Fig. 16 Construction and analysis of human body model in scenario 2

人体两种姿势下各部位的体表电场和比较分析见图17。

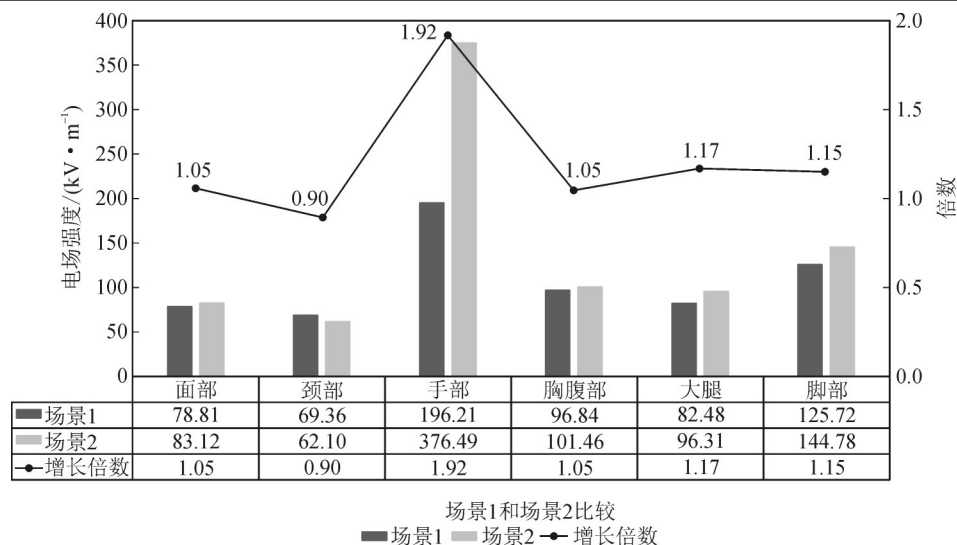


图17 不同姿势不同部位的电场强度大小

Fig. 17 Electric field intensity in different postures and parts

由图17可以看出,手部的电场强度有电场集中,因为这些部位曲率半径小,会对电场产生尖端效应,此时的仿真结果得知最大场强是标准操作的1.92倍。

4.2.2 人员骑坐

1)场景3。场景3见图18,最小复杂间隙距离为4.0 m。在图示的操作场景下,最小复杂间隙距离为4.45 m,满足500 kV带电作业4.0 m复杂间隙距离的要求,因此被评估为安全操作。

2)场景4。场景4见图19,此时最小复杂间隙距离为3.82 m,不满足500 kV复杂间隙距离4.0 m的现场工作要求,因此此处它将被评估为有潜在风险的操作。

人体两种姿势下各部位的体表电场和比较分析见图20。

人体两种姿势下各部位的体表电场和比较分析如所示,可以看出手部的电场强度较其他地方还是大很多,此时的最大场强是标准操作的1.54倍。

5 结论

文中进行了人体在进行输电线路带电作业过程中的数字孪生场景的整体构建,重点在于人体的现场姿态数据的获取过程及其方法。

数字孪生体基本上都与现实世界存在一定时间延迟,这是数字孪生构建过程中的固有挑战,我们能做的只有去尽量缩小延迟。在理想状态下的场景构建的总时间包括算法的计算时间、信号的传输时间以及云计算时间,估算可得总时间不超过2 s,因此可以推断数字孪生体在理想条件下相对于现

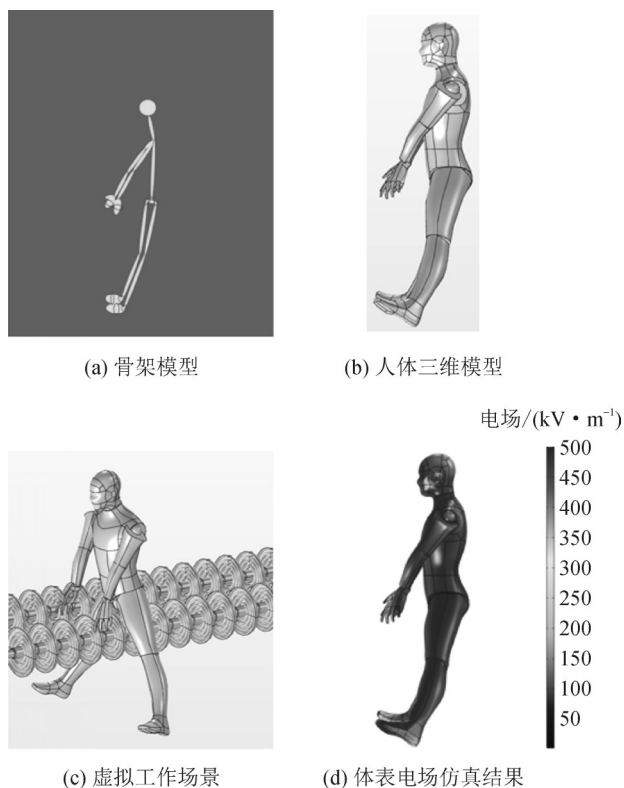


图18 场景3下的人体模型构建及分析

Fig. 18 Construction and analysis of human body model in scenario 3

实世界存在最多2 s的延迟。然而相较于人体在现场工作时的缓慢而受限的移动,2 s内现场人员姿态不会经历急剧而显著的变化,因此对现场的风险评估技术不会造成重大影响,因此数字孪生体较现实世界2 s的延迟可以被忽略。

论文中存在的不足之处在于POSIT算法的稳定性受遮挡的影响,揭示了其在某些现实场景下可能面临的挑战。遮挡问题对于姿态估计具有一定

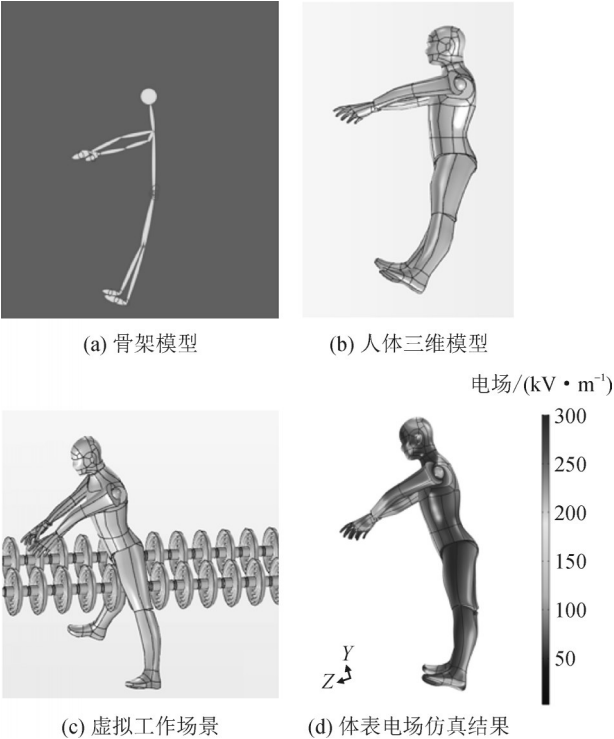


图 19 场景 4 下的人体模型构建及分析

Fig. 19 Construction and analysis of human body model in scenario 4

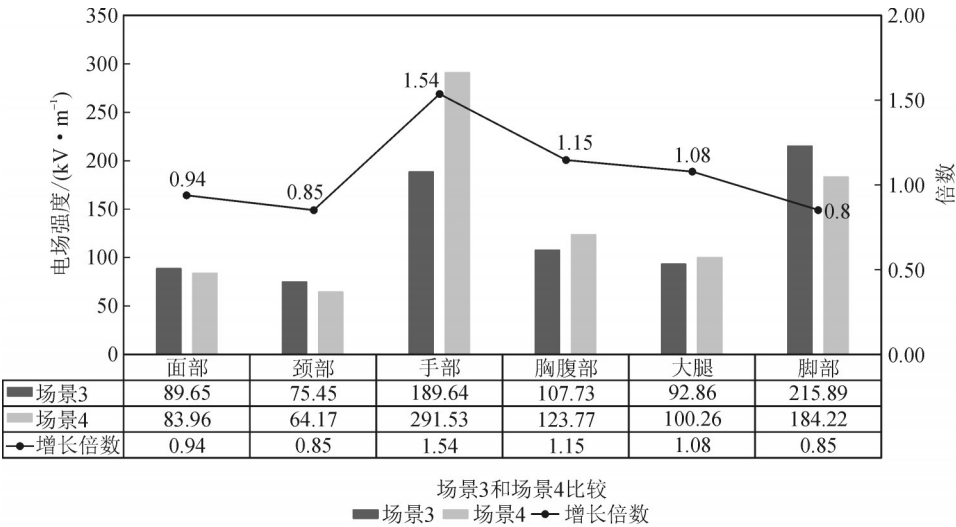


图 20 不同姿势不同部位的电场强度大小

Fig. 20 Electric field intensity in different postures and parts

2)利用人体姿态估计技术,包括转换矩阵的获取和二维点到三维点转换的方法,能够在一定程度上进行运动中人体的姿态估计,得出各个关节的姿态数据,以此来进行人体的模型重构。

3)根据带电作业规定,对带电作业人员在不同工作场景下的安全进行风险评估,得到的结果可以反馈给现场人员,实现了从真实世界到数字虚拟环境的实时投映。

的影响,因为它可能导致关键特征点的缺失或匹配的困难,从而降低了算法的稳定性。另一个不足之处在于方法论问题,POSIT算法存在一些局限性,虽然该算法在处理速度上表现出色,具有足够的快速性,但在准确性上具有一定局限性。

未来的研究方向为一方面着重于探索针对遮挡情况的改进策略,以提高 POSIT 算法在复杂环境中的鲁棒性。另一方面是通过优化算法和处理流程,有效地减少算法的计算负担,以在实时性要求较高的场景中取得更快的响应速度,减少时间的延迟。对传感器数据融合和多模态信息的综合利用也是未来研究的一个重要方向,结合视觉信息、惯性传感器数据等多源信息,可以提高对复杂场景下姿态的鲁棒性和准确性。

从这项工作中可以得出以下结论:

1)构造了人体在输电线路带电作业过程中的数字孪生场景,可以实时反映移动的人体的体表电场和最小组合间隙,此场景可对现实工作场景进行风险评估。

文中为电力工作人员进行虚拟培训、风险评估、提高操作水平提供了一种新思路。

参考文献:

[1] 杨 阳,陈亚鹏,舒乙凌,等. 面向配电网数字孪生模型构建的边缘协作方法[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1053-1061.
YANG Yang, CHEN Yapeng, SHU Yiling, et al. Edge collaboration method for constructing digital twin models of distribution networks[J]. Power System Technology, 2024,

- 48(3):1053-1061.
- [2] 刘云鹏,刘一瑾,刘刚,等. 电力变压器智能运维的数字孪生体构想[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8636-8651.
- LIU Yunpeng, LIU Yijin, LIU Gang, et al. Digital twin conception of intelligent operation and maintenance of power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22):8636-8651.
- [3] 贺兴,潘美琪,唐跃中,等. 基于数字孪生与元宇宙的能源互联网认知系统论(二):面向复杂系统涌现现象的虚拟仿真推演框架[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4311-4322.
- HE Xing, PAN Meiqi, TANG Yuezhong, et al. Energy internet cognitive systems theory based on digital twins and metaverse(II): A virtual simulation inference framework for complex system emergence phenomenon[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11):4311-4322.
- [4] 盛戈铮,钱勇,罗林根,等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术, 2023, 49(5):1765-1778.
- SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Linggen, et al. Key technologies and development trends of digital power equipment for new power systems[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5):1765-1778.
- [5] WOODS T L, RANA A Z. Modelling sign language with encoder-only transformers and human pose estimation key-point data[J]. Mathematics, 2023, 11(9):11092129.
- [6] WANG Ye, XU Kai, DU Yunlong, et al. Research on digital twin technology of large-scale offshore wind power flexible direct transmission system[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2450(1):1-7.
- [7] SIDDIQUI H U R, YOUNAS F, RUSTAM F, et al. Enhancing cricket performance analysis with human pose estimation and machine learning[J]. Sensors, 2023, 23(15):6839.
- [8] HASSAN M T, BEN HAMZA A. Regular splitting graph network for 3D human pose estimation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2023(32):4212-4222.
- [9] 毛晓琦,林广栋,黄光红,等. 基于人工智能芯片与OpenPose模型的人体姿态估计方法[J]. 电子技术与软件工程, 2022(19):138-142.
- MAO Xiaoqi, LIN Guangdong, HUANG Guanghong, et al. Human pose estimation method based on artificial intelligence chips and OpenPose model[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2022(19):138-142.
- [10] 刘云鹏,刘一瑾,律方成,等. 数字孪生技术在输变电设备中的应用前景与关键技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(5):1621-1633.
- LIU Yunpeng, LIU Yijin, LYU Fangcheng, et al. The application prospects and key technologies of digital twin technology in transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5):1621-1633.
- [11] 齐波,张鹏,张书琦,等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5):1522-1538.
- QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5):1522-1538.
- [12] 李鹏,习伟,蔡田田,等. 数字电网的理念、架构与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14):5002-5017.
- LI Peng, XI Wei, CAI Tiantian, et al. The concept, architecture, and key technologies of digital power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14):5002-5017.
- [13] 赵鹏,蒲天骄,王新迎,等. 面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2):447-457.
- ZHAO Peng, PU Tianjiao, WANG Xinying, et al. Key technologies and perspectives of power internet of things facing with digital twins of the energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2):447-457.
- [14] 刘亚东,陈思,丛子涵,等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5):1539-1554.
- LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5):1539-1554.
- [15] 韩曦,孙常浩,王立军. 面向摄像机的一种基于POSIT算法的位姿估计技术[J]. 信息通信, 2020(11):56-58.
- HAN Xi, SUN Changhao, WANG Lijun. A pose estimation technique based on POSIT algorithm for cameras[J]. Information Communication, 2020(11):56-58.
- [16] 王粟,朱飞. 采用POSIT算法的中餐宴会台面的测距方法[J]. 现代电子技术, 2019, 42(19):139-143.
- WANG Su, ZHU Fei. Distance measurement method for Chinese banquet countertops using POSIT algorithm[J]. Modern Electronic Technology, 2019, 42(19):139-143.
- [17] 李忠海,孙天泽,张警,等. 人体数字孪生构建方法及其在骨骼分析中的应用[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2022, 15(2):111-116.
- LI Zhonghai, SUN Tianze, ZHANG Jing, et al. Method for constructing human digital twins and its application in bone analysis[J]. Chinese Journal of Orthopedic and Joint Surgery, 2022, 15(2):111-116.
- [18] 黄璐,杨岳,彭波. 面向座椅舒适性分析的三维人体参数化建模[J]. 工程图学学报, 2011, 32(1):10-15.
- HUANG Lu, YANG Yue, PENG Bo. Three dimensional human parametric modeling for seat comfort analysis[J].

(下转第53页)

- Apparatus, 2023, 59(7): 12-19.
- [6] TORRES L M A, LOPES L A C, MORÁN T L A, et al. Self-Tuning virtual synchronous machine: A control strategy for energy storage systems to support dynamic frequency control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 833-840.
- [7] LI Dongdong, ZHU Qianwei, LIN Shunfu, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 397-398.
- [8] 兰 征, 龙 阳, 曾进辉, 等. 引入暂态电磁功率补偿的VSG控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1421-1429.
LAN Zheng, LONG Yang, ZENG Jinhui, et al. VSG control strategy with transient electromagnetic power compensation [J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1421-1429.
- [9] SHUAI Zhikang, HUANG Wen, SHEN Z J, et al. Active power oscillation and suppression techniques between two parallel synchronverters during load fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4127 - 4142.
- [10] YU Y, AGUNDIS T G D, CHAUDHARY S K, et al. A comparison of fixed parameter active power oscillation damping solutions for virtual synchronous generators[C]// 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Canada: IEEE, 2021: 1-6.
- [11] YU Yun, CHAUDHARY S K, TINAJERO G D A, et al. A reference-feedforward-based damping method for virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 7566-7571.
- [12] 徐海珍, 张 兴, 刘 芳, 等. 基于微分补偿环节虚拟惯性的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 96-102.
- XU Haizhen, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on differential compensation virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 96-102.
- [13] LI Mingxuan, YU Peng, HU Weihao, et al. Phase feedforward damping control method for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9790-9806.
- [14] MOHAMED Y A R I, EL-SAADANY E F. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 2806-2816.
- [15] DONG Shuan, CHEN C. A method to directly compute synchronverter parameters for desired dynamic response[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 814-825.
- [16] MENG Xin, LIU Jinjun, LIU Zeng. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.
- [17] BOLLEN M, HASSAN F. Integration of distributed generation in the power system[M]. USA: Wiley - IEEE Press, 2011.
- 杨桂兴(1985—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行、分析与控制以及新能源运行与控制(E-mail: 448776957@qq.com)。
- 王 杨(1990—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为新能源电力系统宽频振荡、电能质量及其控制技术(E-mail: fwang@scu.edu.cn)。

(上接第32页)

- Journal of Engineering Graphics, 2011, 32(1): 10-15.
- [19] 南方电网公司电力安全工作规程: Q/CSG 510001—2015 [S]. 2015.
Power safety work regulations of China southern power grid corporation: Q/CSG 510001—2015 [S]. 2015.
- [20] GUO Jianlong, WU Qinghua, GUO Ke, et al. Study on the construction and application of digital twins on high voltage transmission line live working scenes[J]. IEEE Access, 2021(9): 111587-111594.
- 马爱清(1975—), 女, 博士, 教授, 主要从事高压交/直流输电线路电晕特性及抑制措施研究(E-mail: 731568342@qq.com)。