

引用格式:

张锐, 赵锦钰, 王燕, 杨思妍, 黄津川, 范云飞, 李刚. 基于数字孪生技术的草场放牧系统[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(3): 101–107.

ZHANG R, ZHAO J Y, WANG Y, YANG S Y, HUANG J C, FAN Y F, LI G. Grassland grazing system based on digital twin technology[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(3): 101–107.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 基于数字孪生技术的草场放牧系统

张锐<sup>1</sup>, 赵锦钰<sup>1</sup>, 王燕<sup>2\*</sup>, 杨思妍<sup>1</sup>, 黄津川<sup>1</sup>, 范云飞<sup>1</sup>, 李刚<sup>3</sup>

(1.天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222; 2.天津城建大学计算机与信息工程学院, 天津 300384;  
3.内蒙古大学计算机学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

**摘要:** 运用数字孪生技术, 在对草场环境及牲畜状态进行感知的基础上建立草场放牧监测系统。该系统将虚拟仿真技术 Unity3D 应用于草场放牧场景的孪生三维模型, 为后续监测呈现可视化效果; 采用无线传输技术搭建采集网络, 实现草场及牲畜信息交互的功能, 并选用模糊综合评价方法对草场进行放牧强度划分。为了验证该系统的有效性, 以内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市毛登牧场的真实场景为例进行综合试验。结果表明: 与传统的放牧监测系统相比, 该系统运用数字孪生技术实现了数据共享和物理草场与孪生草场信息的同步, 有效解决了传统放牧监测中决策滞后的问题; 通过孪生草场能对物理草场的放牧场景进行仿真模拟, 不受客观条件限制, 能有效预测各种放牧情况, 实现草场环境及牲畜放牧状态精准监测, 在实际放牧中能及时应对突发情况, 提升草场放牧决策的自主性。

**关键词:** 草场放牧系统; 数字孪生技术; 虚拟现实; Unity3D; 模糊综合评价方法; 在线监测

中图分类号: S812.8; TP277

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)03-0101-07

## Grassland grazing system based on digital twin technology

ZHANG Rui<sup>1</sup>, ZHAO Jinyu<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2\*</sup>, YANG Siyan<sup>1</sup>, HUANG Jinchuan<sup>1</sup>, FAN Yunfei<sup>1</sup>, LI Gang<sup>3</sup>

(1.College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China; 2.School of Computer and Information Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3.College of Computer Science, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China)

**Abstract:** Using digital twin technology, grazing monitoring system was set up on the basis of sensing pasture environment and livestock status. In this system, the virtual simulation technology Unity3D was applied to the twin three-dimensional model of pasture grazing scene to present the visualization effect for follow-up monitoring. Wireless transmission technology was used to build a collection network to realize the function of information interaction between pasture and livestock, and fuzzy comprehensive evaluation method was used to classify grazing intensity of pasture. In order to verify the effectiveness of the system, the real scene of Maodeng Pasture in Xilinhot City, Xilin Gol League, Inner Mongolia was taken as a testing example. The results showed that compared with the traditional grazing monitoring system, the system used digital twin technology to realize data sharing and synchronization of physical pasture and twin pasture information, and effectively solved the problem of decision-making lag in the traditional grazing monitoring system. Through the twin pasture, the grazing scene of the physical pasture could be simulated, which was not restricted by objective conditions, and could effectively predict various grazing conditions, achieve accurate monitoring of the pasture environment and livestock grazing state, and timely respond to emergencies in actual grazing, improving the autonomy of grazing decision-making of the pasture.

收稿日期: 2023-03-09

修回日期: 2024-06-17

基金项目: 内蒙古自治区科技创新引导项目(2022CXYP001)

作者简介: 张锐(1979—), 男, 辽宁营口人, 博士, 副教授, 主要从事物联网应用、数字孪生技术研究, zhangrui@tust.edu.cn; \*通信作者, 王燕, 博士, 讲师, 主要从事信息处理技术研究, ellawangyan2016@outlook.com

**Keywords:** grassland grazing system; digital twin technology; virtual reality; Unity3D; fuzzy comprehensive evaluation method; online monitoring

草场资源在畜牧业的发展中起着举足轻重的作用,合理利用草场资源可以维持牧场的生态平衡<sup>[1-2]</sup>。中国在草场生态监测管理方面不够全面、科学<sup>[3-4]</sup>,缺乏及时高效的草场放牧监测管理系统,虽然可以依靠在草场上布置通信设备来获得草场环境和牲畜状态,但牧区大部分处于偏远地区,发展相对落后,加上草场环境不可控,牧民无法对草场的生态状况和牲畜的放牧状况进行有效监测。

为提高监测管理系统的有效性和科学性,相关领域的研究人员进行了大量的探索和研究。早期草场放牧规划与管理工作的,主要是由科研工作者手工收集和分析草场资料并根据经验进行研究<sup>[5]</sup>。这样做既费时又费力,且会造成大量的人为错误<sup>[6]</sup>。随着各类无线传感网络和云服务以及数字技术的不断发展,对草场放牧监测管理的研究技术和手段也发生了巨大改变,其中数字孪生作为一种理论与技术结合的体系<sup>[7]</sup>有着较为广泛的适用性,已有部分学者将数字孪生技术应用于畜牧业领域当中。JO 等<sup>[8]</sup>提出了一种利用数字孪生技术来改善动物福利的智能牧场的设计构想,利用数字孪生技术复制和模拟牧场,在虚拟世界中对于牲畜疾病进行仿真预测,并将结果应用于现实中的畜牧场。ALVES 等<sup>[9]</sup>利用智能感知技术和智能牧场管理平台建立了一个畜牧场的网络物理系统(CPS),便于更好了解畜牧场在资源和设备使用方面的状况。而国内对数字孪生技术的应用研究仍处于早期发展阶段,对数字孪生模型的建立尚无统一的标准,将数字孪生技术应用到畜牧业草场放牧方面的研究少见报道。将数字孪生技术应用于草场放牧中,草场生态健康的监测将不会受空间、时间和气候等客观条件限制,且通过对物理草场中传感器感知到的数据进行科学分析处理,能为今后草场资源的利用、建设和保护等工作提供更省时省力的途径<sup>[10]</sup>。基于此,笔者设计了基于数字孪生技术的草场放牧系统:首先提出物理草场和孪生草场之间的数据交互方案,实现物理草场与孪生草场之间的数据交互;其次,采用虚拟现实技术对草场放牧场景进行三维可视化建模,构建孪生草场;最后,为了验证草场放牧三维可视化

模型的可行性,采用 Unity3D 虚拟现实技术,以内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市毛登牧场为实验点,通过构建的草场放牧系统,实现对草场放牧过程的全面智能监测。

## 1 总体研究框架

传统的放牧对草场的使用非常粗放且不均衡,在非生长季节和放牧后期往往饲料短缺,容易造成草畜供需失衡,同时牧群如果为逐食优良牧草频繁奔走,体力消耗过多会使生产能力下降,还会造成牧群寄生性蠕虫病的传染<sup>[11-13]</sup>。

选用遥感技术来获取草场生物量数据,结合草场综合信息(生物量、草场温度、相对湿度、光照、风速、风向、气压、土温以及土壤 pH 等),对草场放牧强度区域进行划分。将孪生草场的三维可视化模型作为系统展示的结果,既要遵循客观规律,又要能真实地反映出物理草场中的各个组成要素的特性及行为;因此,设计时要遵循设定明确的建模层级关系,建立面向对象特性的模型和确立模型的客观特性。在此三维可视化建模要求基础上,以数字孪生五维模型<sup>[14-16]</sup>为参考架构,设计如图 1 所示的系统框架。

从图 1 可知,系统框架整体由 5 个部分组成,即物理草场、孪生草场、孪生数据、草场放牧应用服务系统和连接交互。物理草场,就是指实际的草场,由草场中的植被、牲畜、数据采集终端、环境等要素构成,在物理草场中搭建数据采集网络对所需的各种数据进行采集,同时实施对孪生草场和草场放牧应用服务系统的决策指令;孪生草场是通过虚拟仿真技术构建的物理草场的孪生模型,它可以生动逼真地反映物理草场放牧过程中的特征和行为,实现对草场放牧场景的模拟和监测草场生态健康;草场放牧应用服务系统的核心是通过提供各种服务来实现对物理草场的智能监测;孪生数据包括物理草场中实时采集的各种数据、孪生草场中实时产生的虚拟数据、草场放牧应用服务系统中的数据及对这些数据提取、融合处理后的数据;连接交互部分指的是通过选择相匹配的通信方式以及协议完成以上 4 个部分的连接互通,从而达到物理草场

和孪生草场以及草场放牧应用服务系统间的信息 同步交互的目的。

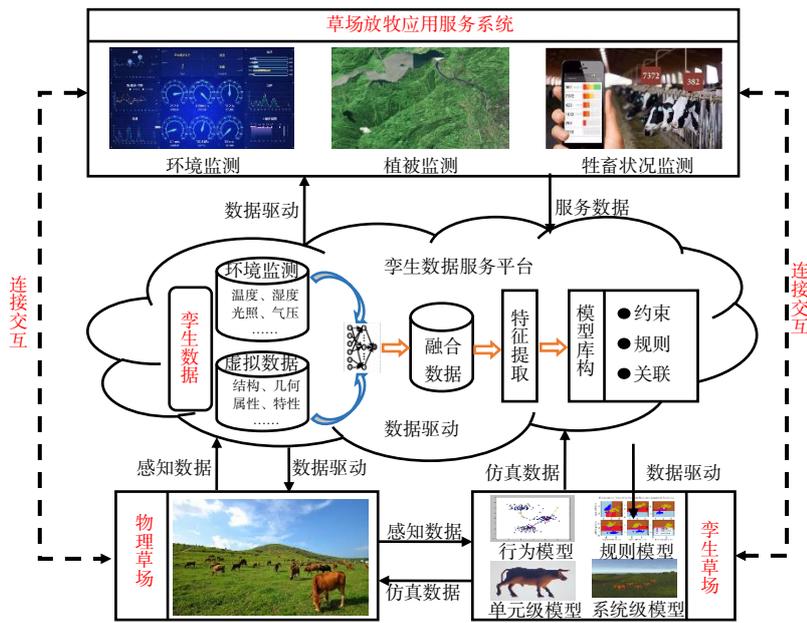


图 1 草场放牧监测系统框架

Fig.1 Grassland grazing monitoring system framework

## 2 草场放牧模型的构建方法

### 2.1 物理草场和孪生草场的数据交互设计

物理草场和孪生草场数据交互模型如图 2 所示。该模型主要包括物理草场中的数据采集终端、服务器、数据库、局域网和孪生草场中的孪生模型。数

据采集终端对物理草场中数据进行实时采集上报，服务器负责接收数据以及下发指令，数据库存储和处理各类数据，局域网为完成物理草场和孪生草场的实时通信提供一个稳定的通信网络，孪生模型用来逼真呈现物理草场中的组成要素。

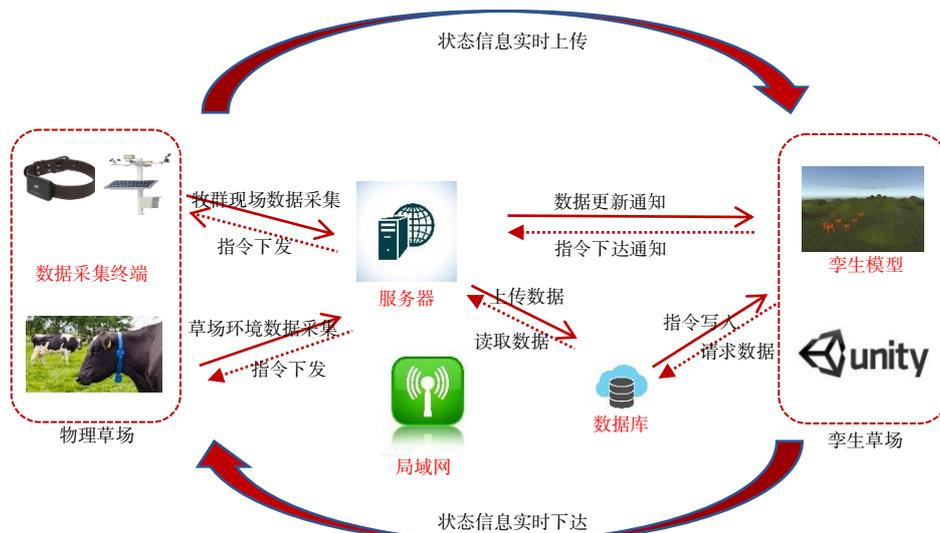


图 2 物理草场和孪生草场的数据交互模型

Fig.2 Data interaction model of physical grassland and twin grassland

实现物理草场中数据的实时采集上报的本质是构建一个草场放牧物联网，通常分为使用传感器等设备获取如草场土壤、植被、天气状况、牧群生

理状况信息和开发用于存储、分析、可视化数据的平台等两类应用。物理草场所需的数据共有 3 类，即植被数据、环境数据和牲畜状况数据。在物理草

场中, 选用遥感技术获取植被数据, 对草场遥感影像进行处理, 并将处理后生成的草场植被信息数据表上传至草场放牧孪生数据服务云平台, 同时存入数据库中。草场环境数据(温度、相对湿度、光照、风速、风向、气压、土温以及土壤 PH 等)以及牲畜状况数据(体温、心率、运动量等)通过配备了 NB-IoT 节点的草场环境数据采集终端和牲畜生理数据采集终端进行采集, 并对采集到的数据进行处理、封装后形成数据包, 上传至草场放牧孪生数据服务云平台, 将其存入数据库中。

为实现物理草场和孪生草场间的双向数据交互通信, 设计如图 3 所示的物理草场和孪生草场间的数据交互通信方案。服务器发出询问命令, NB-IoT 向服务器发送数据, 利用 TCP 的 Service 应用功能完成数据采集终端与草场放牧孪生数据服务器之间的通信, 并运用接收端的程序进行数据的存储; 当物理草场中布置的数据采集网络实时传输数据时, 服务器将数据存储到数据库中, 再运用 Socket 与孪生草场的 Socket 进行通信连接, 从实时数据库中获取当前的物理草场状况数据, 孪生草场利用这些数据来驱动数字模型或更新草场放牧系统中的面板信息; 当孪生草场下发决策时, 将指令发送给草场放牧孪生数据服务器, 既而完成物理草场和孪生草场之间的数据交互通信。

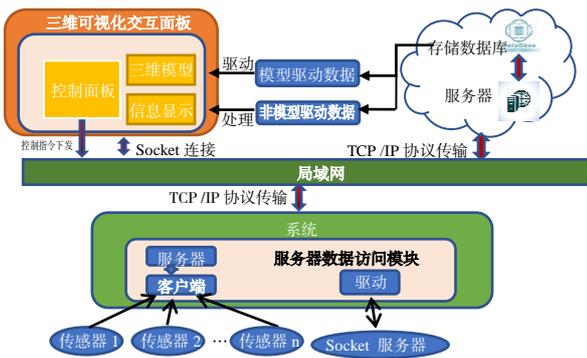


图 3 物理草场和孪生草场间的数据交互通信方案

Fig.3 Data interactive communication scheme between physical grassland and twin grassland

### 2.2 孪生草场三维可视化建模流程

选择 Unity3D<sup>[17]</sup>虚拟仿真引擎来建立孪生草场放牧场景, 孪生草场三维可视化建模流程如图 4 所示。主要包括建立孪生草场三维模型库、搭建孪生草场三维场景、设定孪生模型动作、驱动孪生模型

运动和 Design 可视化界面 5 个步骤。

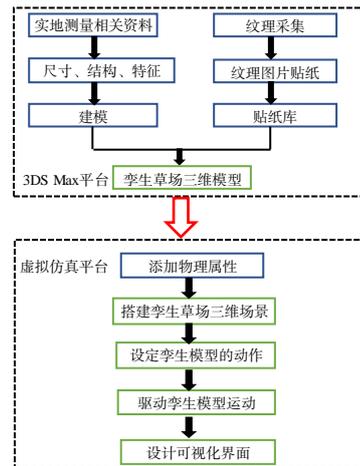


图 4 草场放牧场景三维可视化建模流程

Fig.4 3D visual modeling process of grassland grazing scene

### 2.3 孪生草场模型构建

对遥感采集的草场影像进行数字化处理, 提取出区域植被指数(NDVI), 作为判断草场生物量的指标。运用综合草场信息, 采用模糊综合评价方法对草场放牧区域进行划分, 完成孪生草场地图模型的构建。

#### 2.3.1 草场生物量估算

选取归一化 NDVI 值作为评价草场生物量的指标。运用 ENVI 遥感影像处理软件, 通过几何校正、大气校正、图像不规则剪裁、图像融合配准等操作, 对采集的草场遥感影像进行数字化处理。随后, 利用 ENVI 提取 NDVI 作为衡量草场生物量的指标。提取植被指数 NDVI 的过程(图 5): 利用 ENVI 从采集的遥感图像中抽取植物参数, 输入指数相关的波段, 并对输出的植物指标图像进行剪裁; 通过 ArcTool box 的空间分析功能, 对样本的植物指标属性进行提取, 将所获得的 NDVI 作为判断草场生物量的指标。最后, 通过综合草场信息, 采用模糊综合评价方法对草场放牧区域进行放牧强度划分, 进而完成草场孪生模型生物量的估算工作。

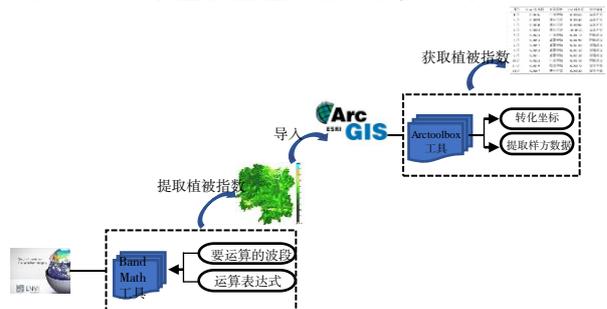


图 5 提取植被指数 NDVI 的流程

Fig.5 Flow chart of extracting vegetation index NDVI

### 2.3.2 草场放牧强度划分

在根据草场生物量对放牧强度进行划分时,选用模糊综合评价方法(FCEM),把界限模糊的定性问题转化为界限明显的定量问题<sup>[18]</sup>,并规定草场放牧强度可信度数值为 1.8~2.0 的区域为分类可信度高的区域,低于 1.8 的区域需进行重新判定。模糊评价的具体步骤如下。

1) 构建模糊综合评判指标。该指标的构建主要包括确定因子集和建立评估集合 2 个方面。因子集由影响判断对象的要素构成,本研究中选取草场信息中的温度( $T$ )、空气相对湿度( $H$ )、光照度( $L$ )、植被覆盖指数( $N$ )、土壤相对湿度( $M$ )和土壤酸碱度( $Y$ )等 6 个影响因素。评估集是由评估目标的最后评估结果组成的一组要素,本研究中评估集对应的草场放牧区域分成未放牧区域、轻度放牧区域、过度放牧区域和不可放牧区域等 4 种情况。

2) 构建隶属度矩阵。采用隶属函数描述因子判断矩阵,将各因子对各评估结果的从属函数值合并为一个矩阵,采用隶属度函数进行定量。

3) 确定因子权值。各因子权值反映它们对评价的重要程度,通过权值比对,对判定矩阵的各行进行累加,得到权向量。

4) 计算评价结果。将得到的权重向量与隶属度矩阵相乘,最终得到评价结果集合。

## 3 模型仿真分析

根据构建的草场放牧模型,以内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市毛登牧场放牧场景为例,开发实现基于数字孪生技术的草场放牧系统,并对系统功能进行测试。内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市毛登牧场地处锡林浩特市东北部,南北 20 km,东西 27 km,面积 344 km<sup>2</sup>。毛登牧场所处位置的气候为大陆性气候,春天天气干燥,风力大,多西北风,夏天气温较高,冬天较冷,且持续时间较长;年均降水量 200~350 mm,年均蒸发量 1 500~2 600 mm。研究区的地形由北向南呈增高趋势,西北地区地势低洼,多为平原,零星分布着一些低矮的山丘,属典型的草甸地区,优势地带性群落以旱生丛生禾草大针茅和旱生的半灌木为主。

## 3.1 数据采集网络搭建

### 3.1.1 草场植被数据采集

采用资源三号测绘卫星获取毛登牧场遥感影像数据;通过 ENVI 进行几何校正、大气校正、图像裁剪、图像融合配准处理等操作对遥感影像进行处理;提取遥感影像中的植被指数,提取完成后鼠标点击任意区域可显示所点击区域的经纬度信息及该区域的植被指数信息;依据草场植被数据对毛登牧场进行草场放牧强度划分。如果划分的毛登牧场放牧强度可信度值均高于 1.8,说明当日对毛登牧场的放牧强度划分准确。

### 3.1.2 草场环境数据采集

使用基于 STM32 主控模块、各传感器模块、NB-IoT 无线通信模块的数据采集终端采集草场环境数据。当数据采集终端与服务器建立了良好的连接之后,将数据采集终端接入到服务器中,在服务器中设定 TCP 服务的通信接口和数据库等参数,并将端口和无线通信模块设置为一个端口,数据库接收采集终端上传的数据,采集终端显示屏显示环境数据。

### 3.1.3 牲畜状况数据以及位置信息采集

采用课题组基于 ARM Cortex-M3 架构开发的牲畜信息监测项圈采集牲畜状况数据及位置信息。项圈模块由主控芯片、模块电源、传感器单元、无线通信模块 4 部分组成。传感器模块由体温传感器、心率传感器、加速度传感器 3 部分组成,所有传感器都与主控制芯片相连,进行数据的传输和接收。无线通信模块使用 USART 接口连接到主控制芯片,根据移动信号的强弱来选择合适的通信方式。

## 3.2 系统功能的实现

### 3.2.1 人机交互的实现

将毛登牧场地势图导入 Unity3D 引擎中,在生成的地势高程图上对草场地势图模型进行填充。通过观察牛群在毛登牧场放牧过程的行为特征建立站立模型、行走模型、奔跑模型、吃草模型和卧倒模型等,根据实际放牧的行为特征对模型添加相关物理属性及运动脚本,定义之后对模型状态转换的条件和时间进行设定,根据不同的控制对象对各自脚本进行依次调用。采用 Unity3D 自带的 GUI 系统

设计的用户交互界面如图6所示。



图6 数字孪生草场放牧系统人机交互界面

Fig.6 Digital twin grassland grazing system human-computer interactive interface

为了改善人机互动效果,增强使用者的沉浸感,采用 Easy Touch 插件,设计了一种可以选择以第一人称和第三人称的方式进行场景漫游的操作。用户通过选择漫游视觉切换区域的第一人称和第三人称来进行主视觉的切换,通过按住上、下、左、右按钮控制漫游视觉的前进、后退、左移动、右移动,同时通过移动鼠标可以实现俯视、仰视的视觉效果,方便用户近距离查看草场某一区域或者某一牲畜状况,实现多个视角监测草场放牧实时状况。

### 3.2.2 实时显示草场放牧状况与信息的实现

在交互界面上系统功能选择区域点击“草场环境监测”按钮,跳转至当前毛登牧场环境监测子界面,在此子界面中显示该区域的经纬度、当前区域放牧强度等级以及草场实时的温度、光照、相对湿度、风速、风向、气压、土温以及土壤 pH 等信息,如图7所示。



图7 毛登牧场的孪生草场环境监测界面

Fig.7 Twin grassland environment monitoring interface of Maodeng Pasture

在交互界面上系统功能选择区域点击“草场植被监测”按钮,会跳转到当前毛登牧场植被监测子

界面,在此子界面中会显示该区域经纬度、当前区域放牧强度等级、植被品种以及此区域植被的 NDVI 值,如图8所示。



图8 毛登牧场的孪生草场植被信息监测界面

Fig.8 Twin grassland vegetation information monitoring interface of Maodeng Pasture

在交互界面上系统功能选择区域点击“牲畜状况监测”按钮,会跳转到牲畜状况监测子界面,在此子界面中会显示当前监测牲畜所处地理位置的经纬度、对应牲畜的编号、体温、心率及运动量情况,如图9所示。



图9 毛登牧场的孪生牲畜状况监测界面

Fig.9 Twin livestock condition monitoring interface of Maodeng Pasture

## 4 结论

本研究中,笔者将数字孪生技术与草场放牧实际结合,建立了草场放牧监测系统:运用数字孪生技术完成数据驱动和连接,同时通过孪生草场实现对物理草场放牧场景的三维可视化数字仿真;采用模糊综合评价方法对草场放牧强度进行划分,精准掌握草场生物量,实现数据的共享以及物理草场、孪生草场的信息同步。该系统可避免因过度放牧导致草场资源大幅退化,为传统放牧监测中存在的决策滞后问题提供了较好的解决方案。通过配置相应的开发环境,在内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市毛登牧场进行了试验验证。该系统能全面监测草场的生

态与健康,同时孪生草场的放牧场景与物理草场放牧画面实时结合,使放牧过程同步呈现,此外人机交互功能支持相关人员以多角度切换、漫游的方式从多个角度监测草场放牧情况,验证了该系统具有较好的实用性和广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] CHEN Y X, LEE G, LEE P, et al. Model analysis of grazing effect on above-ground biomass and above-ground net primary production of a Mongolian grassland ecosystem[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(1): 155–164.
- [2] LI W J, ALI S H, ZHANG Q. Property rights and grassland degradation: a study of the Xilingol Pasture, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(2): 461–470.
- [3] HAN R, JIANG H L, CHE D S, et al. Effects of environmental temperature and dietary fat content on the performance and heat production and substrate oxidation in growing pigs[J]. *Protein & Peptide Letters*, 2017, 24(5): 425–431.
- [4] 李瑞. 现代养殖场智能监控系统研究与设计[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- [5] 汪诗平, 李永宏, 陈佐忠. 内蒙古典型草原草畜系统适宜放牧率的研究II. 以牧草地上现存量 and 净初级生产力为管理目标[J]. *草地学报*, 1999, 7(3): 192–197.
- [6] 王红艺, 梁爽, 李黎, 等. 因地制宜开展区域规划合理利用天然草地资源[J]. *中国牛业科学*, 2021, 47(2): 54–56.
- [7] LIM K Y H, ZHENG P, CHEN C H. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020, 31(6): 1313–1337.
- [8] JO S K, PARK D H, PARK H, et al. Smart livestock farms using digital twin: feasibility study[C]//2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence(ICTC). Jeju, Korea: IEEE, 2018: 1461–1463.
- [9] ALVES R G, SOUZA G, MAIA R F, et al. A digital twin for smart farming[C]. 2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). Seattle, USA: IEEE, 2019: 1–4.
- [10] 李晓波. 工业化思路推进现代畜牧业发展的思考[J]. *养殖与饲料*, 2018(3): 97–99.
- [11] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间: 一种未来车间运行新模式[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(1): 1–9.
- [12] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1–18.
- [13] CHENG Y, TAO F, ZHAO D M, et al. Modeling of manufacturing service supply-demand matching hypernetwork in service-oriented manufacturing systems[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 45: 59–72.
- [14] HOFFMAN M T. ‘Nature’s method of grazing’: Non-Selective Grazing(NSG) as a means of veld reclamation in South Africa[J]. *South African Journal of Botany*, 2003, 69(1): 92–98.
- [15] 王晓芳, 马红彬, 沈艳, 等. 不同轮牧方式对荒漠草原植物群落特征的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(4): 23–33.
- [16] ZHANG R Y, TIAN D S, CHEN H Y, et al. Biodiversity alleviates the decrease of grassland multifunctionality under grazing disturbance: a global meta-analysis[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2022, 31(1): 155–167.
- [17] 黄兆铭, 储颖. 基于 Unity3D 的换装系统插件设计[J]. *计算机系统应用*, 2021, 30(6): 61–67.
- [18] 张军涛, 李尚生, 王旭坤. 基于灰色关联-模糊综合评判的雷达抗干扰性能评估方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(6): 1557–1563.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正