

基于 Unity3D 与 MEMS 惯性感知的运动监测系统*^{*}

徐豆豆 黄牧原 唐倩 丁晖 吴响 任鹏

(徐州医科大学医学信息与工程学院 徐州 221004)

〔摘要〕 目的/意义 构建人体模型,与实际人体运动数据绑定,实现对人体运动姿态的监测。方法/过程 设计一种基于 Unity3D 和 MEMS 惯性传感器的运动监测系统。利用 MEMS 惯性传感器获取人体的运动姿态数据,利用欧拉角进行姿态解算,通过蓝牙无线传输协议将数据发送到计算机系统,以驱动虚拟动画人物的运动,实现人体动作的 3D 姿态实时展现。结果/结论 经过实验测试,该模型能够准确监测和模拟人体的运动姿态,未来可为体育运动训练、肢体康复训练等应用领域提供有效的数据分析。

〔关键词〕 惯性动作捕捉;姿态解算;Unity3D 模型

〔中图分类号〕 R-058 〔文献标识码〕 A 〔DOI〕 10.3969/j.issn.1673-6036.2024.08.015

Design of Motion Monitoring System Based on Unity3D and MEMS Inertial Sensing

XU Doudou, HUANG Muyuan, TANG Qian, DING Hui, WU Xiang, REN Peng

School of Medical Information and Engineering, Xuzhou Medical University, Xuzhou 221004, China

〔Abstract〕 **Purpose/Significance** To construct a human body model, bind it with actual human motion data, and achieve monitoring of human motion postures. **Method/Process** The paper designs a motion monitoring system based on Unity3D and MEMS inertial sensors. It utilizes MEMS inertial sensors to obtain human motion posture data, uses Euler angles for posture calculation, and sends the data to the computer system via the Bluetooth wireless transmission protocol to drive the movement of a virtual animated character, thereby achieving real-time 3D posture presentation of human actions. **Result/Conclusion** After experimental testing, the model can accurately monitor and simulate human motion postures. In the future, it can provide effective data analysis for application areas such as sports training and limb rehabilitation training.

〔Keywords〕 inertial motion capture; attitude solving; Unity3D modeling

〔修回日期〕 2024-05-28

〔作者简介〕 徐豆豆,本科生;通信作者:丁晖,博士,讲师。

〔基金项目〕 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(项目编号:202310313084Y);徐州医科大学“揭榜挂帅”攻关项目(项目编号:JBGS202204)

1 引言

近年来,计算机图像技术、微型传感器技术和人工智能技术等取得迅猛发展,在各领域的应用日益广泛。人体运动姿态分析技术可应用于监测和纠正运动员不规范动作,提升运动训练效果^[1];在帕金森病治疗过程中,能够更准确地反

映人体运动的变化趋势，从而提高康复医疗效果^[2]；还可用于创建数字化的人体模型，在游戏、动画、电影等领域实现人机交互，提升用户体验。

动作捕捉是分析和模拟人体运动姿态的关键技术^[3]。目前，动作捕捉常用以下两种方法。一是光学捕捉系统，其定位精度高，例如“魔神”（MotionAnalysis）和“维康”（Vicon），均有丰富且高效的算法，可以实现变焦计算，但 Vicon 可以更好地进行噪点识别和过滤^[4]。同时，Qualisys 高精度光学三维运动捕捉系统选择拍摄速度达 10 000 Hz 的高速红外摄像机，能准确捕捉高速运动物体的轨迹^[1]。但光学捕捉价格昂贵，且难以保证人为挥动标定杆的均匀性，系统对标记点的提取容易受到影响^[5]。二是惯性动作捕捉系统，其经济高效，可以实时跟踪并采集人体运动，避免以照相机为基础的测量系统带来的局限性^[4]。目前，主流的惯性动作捕捉系统主要包括 Xsens、Perception Neuron 等。与光学系统不同，Xsens 系统使用多个微小的惯性传感器附着在人体特定关节点，不需要外部的相机和标记点捕捉动作，提供了更大的灵活性；Perception Neuron 则采用基于微电子机械系统（micro - electro - mechanical systems，MEMS）的惯性传感器捕捉人体运动，体积非常小巧，在室内外均可有效捕捉动作，非常适合需要高度移动性的使用场景。

本文采用基于 MEMS 的惯性动作捕捉设备，获取动作捕捉数据，相比于 Perception Neuron，能够实时追踪和预处理数据，提高使用效率；采用 Unity 设计一个 3D 姿态模型，为后期的实际人体运动监测应用提供数据分析平台。

2 硬件组成和总体设计

2.1 硬件组成

选用加速度计、陀螺仪、磁力计等多种传感器集成的 FOHEART · X 惯性动作捕捉系统，主要由数据采集设备、数据传输与接收设备、数据处理设备 3 部分组成，见图 1。

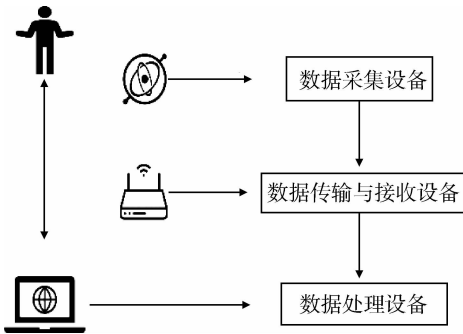


图 1 总体架构

2.2 总体设计

实际应用中，MEMS 惯性传感器可能受到传感器位置偏差和磁场干扰等因素影响，确保数据采集的准确性和稳定性是一大难点。本系统通过在人体 17 个主要关节点放置传感器，完整捕获执行者的全部运动信息，实现对人体运动姿态的准确监测，提高运动捕捉的全面性和准确性；并运用扩展卡尔曼滤波算法处理数据，实现迭代预测和更新^[6]。该系统采用线性化状态转移函数和测量模型的雅可比矩阵，以近似处理非线性系统，提升姿态估计的准确性，有效应对非线性传感器模型或姿态动力学问题，提升了系统的稳定性和可靠性。

数据传输设备（路由器）采用非隔离输出接口，通过 2.4GHz/5.8GHz 的无线双频将数据传输至上位机。上位机利用 MotionVenus 软件实时发送拟合的人体姿态传感器数据流至 Unity3D，驱动虚拟动画人物运动，实现人体关节三维模型的节点绑定和姿态再现，增强了系统的集成度和扩展性。

为保证人体运动模拟的实时性，优化穿戴方式确保传感器准确定位，进行磁场校准以减少干扰。同时，改进算法提高数据处理速度，降低系统响应时间，减小延时性，使 Unity3D 模型能够及时准确地反映人体姿态变化，体现系统的实时性和交互性。

3 软件设计

3.1 开发工具

一是 Unity 3D。可提供极度高效的可视化工作

流和多维度跨平台支持^[7]，与 MEMS 惯性感知的运动监测系统建立连接，实时数据转发。二是 Visual Studio。采用基于 C# 的 Visual Studio 作为编程开发和调试工具，使用静态类型设计具体人物模型。

3.2 3D 模型设计

设计一个完整的 3D 模型角色，包括两个主要组件：皮肤和骨骼^[8]。

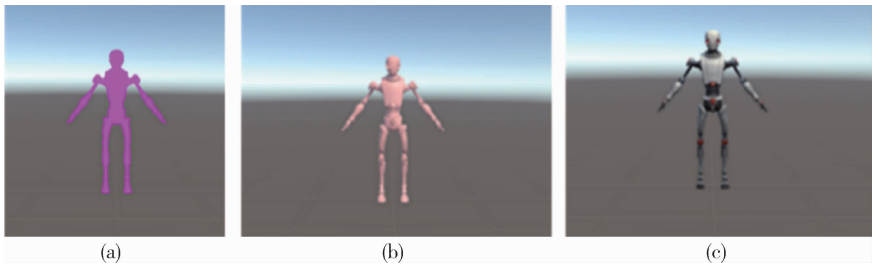


图2 模型显示

3.2.2 骨骼 (1) 骨骼绑定和驱动程序创建。首先将编写的 FoheartModel.cs 脚本作为组件附加到 3D 模型对象上。MotionVenus 将 23 段骨骼数据以 60fps 的速率转发到 Unity3D，将 3D 模型逐步分解为 23 段骨骼。绑定对应骨骼时需一一对应，避免骨骼绑定错误造成角度误差等问题。接着将 3D 模型的每一段骨骼对应附加到 transforms 组件，利用 initNameAndBone () 方法将接收到的数据附加到各个骨骼，即可实现动作的映射。驱动程序原理，见图 3，主要包括感知层、串口通信、逻辑层、应用层^[9]。感知层是由 17 个传感器组成的硬件系统，通过路由器与传感器无线连接，对实体运动参数进行实时采集并以 2.4GHz 的传输频率上传至 MotionVenus 软件。串口通信中传感器通过蓝牙无线传输，将数据实时传输至路由器，路由器通过 USB2.0 串口与电脑相连，利用逻辑层中的脚本建立 MotionVenus 软件与 Unity3D 平台的通信，实现实时数据转发。逻辑层通过骨骼绑定，结合系统转发的数据实现虚体对实体的实时映射。应用层在 Unity3D 平台内设计实时交互界面，监测实体状态。

3.2.1 模型预设 创建 3D 模型有两种方式，一是利用 3D 建模软件 MAYA 或 3DSMax 创建完成之后导入 Unity，二是用 Unity3D 游戏引擎自带的模型系统创建^[8]。本文利用 Unity 自带的资源商店，获得一个免费的具有骨架、扩散贴图的 3D 机器人。首先导入 Mesh 网格文件，即角色模型的“白模”，见图 2 (a)。其次将材质文件应用到 3D 模型，逐步显示贴图，见图 2 (b)、图 2 (c)。



图3 驱动程序原理

3.3 效果展现

由于人体的大部分骨骼是刚性的，在体现人体运动的 17 个主要关节点放置传感器，可以捕获人体运动全部信息，完整呈现人体的运动姿态。将获得的数据通过 Wi-Fi 无线传输到路由器，再通过路由器使用有线传输传到上位机中。该过程使用非隔离的输出接口，更加简洁和经济，没有额外的电气隔离电路，因此更便于设计和实现，且能提供良好的时钟信号传输性能。用户佩戴好传感器后，即可通过软件 MotionVenus 中的人体模型实时展现人

体运动姿态，见图 4（a）。为建立 MotionVenus 软件与 Unity3D 平台的通信，实现实时数据转发，在 Unity 编辑器中显示和操作 MotionVenus 软件中的人体模型。基于 C# 设计驱动程序脚本 FoheartModel.cs，关键代码：

```
if (GUILayout.Button (" Self - binding bones"))
{
    Debug.Log ( " load transforms references into bones list!");
    script.initNameAndBone ();
    EditorUtility.SetDirty (script);
    UnityEditor.SceneManagement.EditorSceneManager.
MarkAllScenesDirty ();
}
```

将脚本作为组件附加到 3D 模型对象上后，脚本负责接收来自 MotionVenus 的姿态数据，并将数据绑定到对应的骨骼上，实现动作映射。此时，即可观察 Unity3D 模型模拟效果，见图 4（b）。

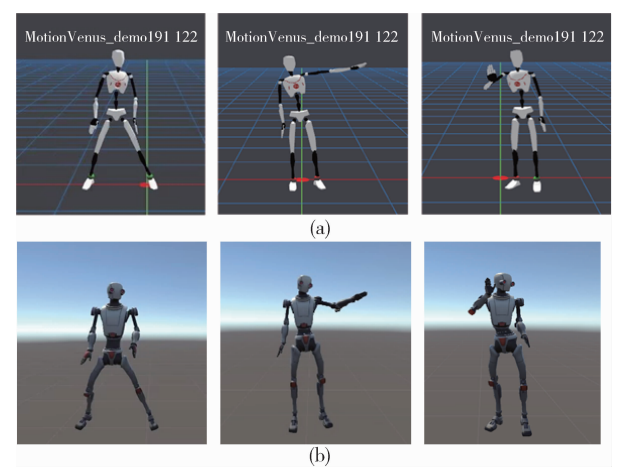


图 4 模型模拟效果

4 人体姿态解算

4.1 人体姿态描述

使用人体姿态角描述人体在空间中姿态的角度值。在人体姿态标定中，使用右手坐标系规定轴的指向。可在拍摄人体动作或姿势时，通过测量关节角度等数据，将其映射到大地坐标系中，以便对人

体的姿态和动作进行分析和追踪^[10]。

4.2 运动捕捉

4.2.1 初始化状态和协方差矩阵 通过姿态传感器获取人体姿态数据，通过欧拉角进行姿态解算。定义状态量，表示姿态角和角速度：

$$x = [roll, pitch, yaw, roll_rate, pitch_rate, yaw_rate]^T$$

(1)

其他变量，见表 1。

表 1 姿态估计变量定义

变量	定义/描述
F	状态转移矩阵，将前一时刻的姿态状态转移到当前时刻
P	协方差矩阵，表示状态的不确定性
Q	过程噪声协方差矩阵，表示加速度计和陀螺仪的噪声
H	测量模型矩阵，将传感器测量值映射到状态空间
R	测量噪声协方差矩阵，表示磁力计的噪声

4.2.2 依次处理新测量值 预测状态（x_prior）和协方差（P_prior）^[11]。更新数据，以加速度计测量数据为例，将加速度计测量值映射到状态空间得到观测向量，计算卡尔曼增益更新状态向量，更新协方差矩阵。陀螺仪数据与磁力计数据的更新与加速度计测量数据更新方式类似。

$$x_prior = F \times x$$

(2)

$$P_prior = F \times P \times F^T + Q$$

(3)

$$z = [AX, AY, AZ]^T$$

(4)

$$K = P_prior \times H^T \times (H \times P_prior \times H^T + R)^T - 1$$

(5)

$$x = x_prior + K \times (z - H \times x_prior)$$

(6)

$$P = (I - K \times H) \times P_prior$$

(7)

4.2.3 提取欧拉角结果 根据旋转矩阵与欧拉角的关系计算，见表 2。从最终的状态向量中提取所需的欧拉角数据。使用扩展卡尔曼滤波算法处理数据，通过在每个时间步骤中使用线性化的状态转移函数和测量模型的雅可比矩阵，近似处理非线性系统。扩展卡尔曼滤波算法是一种处理非线性动态系统的滤波算法，通过将非线性方程在估计点附近线性化，应用卡尔曼滤波的更新步骤估计状态变量的值。

表2 旋转矩阵与欧拉角转换

变量	计算方式	描述
roll	$\text{atan2}(R(3, 2), R(3, 3))$	根据给定的 y 和 x 值确定所在象限的角度值, 描述物体在水平面上的旋转角度
pitch	$\text{asin}(-R(3, 1))$	反正弦函数, 用于计算倾斜角, 描述物体在垂直面上的旋转角度
yaw	$\text{atan2}(R(2, 1), R(1, 1))$	计算旋转矩阵与欧拉角的关系, 描述物体在纵向上(即沿着其自身的轴线)的旋转角度

5 数据分析

对于运动监测系统的模拟主要依赖于角度的精确测量, 因此基于 Unity3D 构建的模型是否能准确地反映各段骨骼的旋转角度较为关键。以每秒 24 帧记录 Unity 中模型的动作参数变化值, 并与软件 MotionVenus 转发的数据对比, 分析误差。

5.1 读取转发数据

软件 MotionVenus 转发的数据以 .bvh 格式储存, 因此要获取转发的数据, 需要解析 .bvh 文件。 .bvh 文件数据以树形、人体骨架层次结构的形式存储^[12]。 .bvh 文件主要包含两部分, 一是骨架信息数据块, 以“HIERARCHY”开头, 按照层级关系将人体骨骼构成一个带有位置和旋转分量的层级结构, 见图 5。

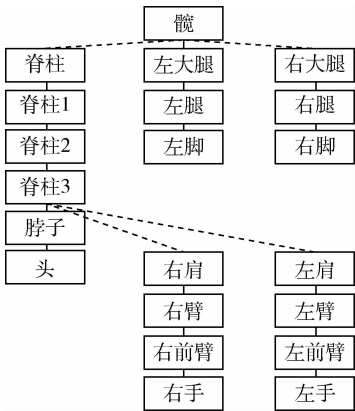


图5 人体骨架层次结构

二是运动关键帧数据块, 记录每帧中人体各关节的角度信息, 对应第一部分骨架层次结构信息数据。动作捕捉数据采用 .bvh 格式按帧记录, 以 24fps 的帧率共采集 250 帧, 涵盖 23 个骨骼的位置

和旋转信息。数据采集过程中, 人体根节点(髋关节)被设定为静止, 因此在程序读取时, 仅考虑相对于父节点的旋转数据^[13]。

5.2 读取模型数据

为快捷地获取数据, 在 Unity 中安装 Excel 插件, 通过 C#脚本自动记录各段骨骼的旋转角度数据参数变化值。主要包括人体四肢运动数据, 并将其划分为上半身运动^[14]和下半身运动两部分^[15]。对于上半身, 以左肩的运动模拟数据为例进行分析^[16]。同样, 对于下半身, 以左大腿的运动模拟数据为例, 采用相似的方法进行数据分析。

6 实验验证与分析

6.1 测试环境

为验证设计系统的运行效果和性能优势, 在室内保持良好电磁环境, 在 PC 端系统测试。系统运行硬件环境: CPU 为 3.20GHz, 内存为 16.0GB; 操作系统为 Windows 11。

6.2 测试结果分析

获取软件转发以及 Unity3D 模型的骨骼旋转角度数据后, 以左肩横滚角为例, 使用 Matlab 基于曲线拟合的方法绘制角度变化趋势图。通过呈现骨骼的旋转角度变化趋势对 3D 模型模拟的效果进行测试。Unity 和软件 MotionVenus 的左肩、左大腿横滚角变化趋势一致, 见图 6, 说明基于 Unity3D 设计的 3D 模型对于运动模拟的准确性较好, 能够较真实地反映人体的运动姿态, 提供更加逼真的模拟效果。

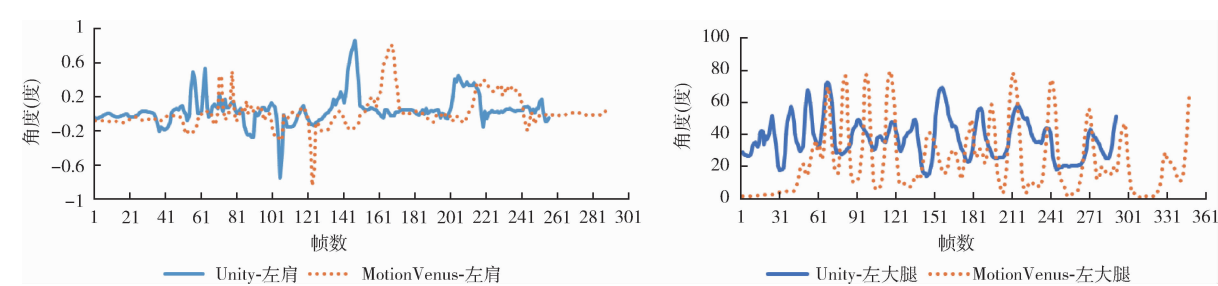


图 6 左肩、左大腿角度变化趋势对比

6.3 误差分析

为验证设计的运动监测系统对人体运动姿态的捕捉效果，实验环境，见图 7。实验结果，见图 8。通过计算模型与转发数据的均方根误差，衡量模型转发数据的准确度。由实验结果可知，基于 Unity3D 设计的模型运动模拟最大误差为 1.008 9，均方根误差为 0.388 5。使用扩展卡尔曼滤波算法，以优化姿态估计并大幅减少误差，提高姿态估计的准确性，为后续运动监测系统提供数据支撑。



图 7 实验环境



图 8 运动驱动效果

本实验设计的 3D 模型能够相对稳定地模拟由运动监测系统捕捉到的人体姿态变化，但存在一些不可避免的延时性。深入分析误差结果，将实验误

差的主要来源归结为两个可优化的方面：一是在实际穿戴过程中，由于传感器的佩戴位置难以达到完全精确，会对数据采集造成影响，在骨骼绑定时出现位置偏差；二是传感器内置的磁力计可能会受到地磁场和电磁场的干扰，即使预先磁场校准，也难以完全消除这种影响，导致 Unity3D 模型在展示时出现姿态偏移，产生误差。

7 结语

本文所提出的运动监测系统设计融合 MEMS 惯性传感器的实时数据采集能力和 Unity3D 的强大三维建模及仿真能力，设计了一种人体运动解析和展示方法，为后期的实际人体运动监测应用提供数据分析平台。本设计还存在诸多不足，如人体模型在逼真性方面存在延时，转体等动作过快时，模型会出现抖动；骨架模型不够细化，可改进，以更加精确地模拟人体运动姿态。随着技术发展，运动监测系统在三维动画设计中能提升角色动作真实感^[17]。该系统可以精确记录动作，有助于舞蹈训练信息化^[18]，并为医疗康复训练提供有效的康复评估数据支持，利于实时调控康复策略^[19]。

作者贡献：徐豆豆负责论文撰写、技术实现；黄牧原负责提供技术支持；唐倩负责文献调研；丁晖、吴响、任鹏负责提供指导。

利益声明：所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

1 丛晓丹, 刘晓曦, 马艳超. 基于光学动作捕捉的滑雪运动姿态运动学分析 [J]. 黑龙江科学, 2023, 14 (24): 48 - 50, 53.

2

赵子建. 基于步态分析的运动障碍疾病诊断恢复辅助系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.

3

张洪超. 基于惯性传感器的人体动作捕捉与识别方法研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.

4

赵杰. 动态捕捉五大技术种类及光学式运动捕捉数据的实用技巧 (上) [J]. 电视字幕 (特技与动画), 2009, 15 (2): 30-32.

5

吴文辉. 光学运动捕捉系统标定机器人的研究与设计 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.

6

冉冀. 基于惯性传感器的人体动作捕捉与控制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.

7

约瑟夫·霍金. Unity5 实战 使用 C#和 Unity 开发多平台游戏 [M]. 蔡俊鸿, 译. 北京: 清华大学出版社, 2016.

8

雷全智. 基于 UNITY 技术的三维课件开发与实现 [J]. 南昌师范学院学报, 2018, 39 (6): 25-28.

9

汤健, 欧长伟, 谢能刚, 等. 基于 Unity3D 康复机器人数字孪生模型的实时驱动 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2023, 40 (1): 65-69, 88.

10

张沛业. 基于多传感器信息融合的人体姿态解算算法研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.

11

芮国胜, 张洋, 史特, 等. 基于卡尔曼增益的 Duffing 系统状态预测算法 [J]. 宇航学报, 2012, 33 (8): 1144-1149.

12

戴欢, 赵卫华, 王威, 等. 基于惯性动作捕捉的人体运动姿态分析 [J]. 科技广场, 2014 (8): 13-18.

13

杨波. 基于 MEMS 惯性传感器动作捕捉系统与轨迹追踪的研究设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

14

YAN L, SIGAL L, BLACK M J. Realanad simulated upper body tracking with annealing particle filter and belief propagation for human - robot interaction [J]. International journal of humanoid robotics, 2011, 8 (1): 127-146.

15

CHAN K L. Video - based gait analysis by silhouette chamfer distance and kalman filter [J]. International journal of image and graphics, 2008, 8 (3): 383-418.

16

赵正旭, 戴欢, 赵文彬, 等. 基于惯性动作捕捉的人体运动姿态模拟 [J]. 计算机工程, 2012, 38 (5): 5-8.

17

柳金辉. 运动捕捉技术在三维动画设计中的应用及发展前景 [J]. 济宁学院学报, 2024, 45 (1): 90-95.

18

伍孝彬. 基于数字化的芭蕾基训教学演示系统研究 [J]. 大观 (论坛), 2024 (1): 149-151.

19

雷舒慧. 下肢康复运动生理参数动态检测系统设计 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.

(上接第 88 页)

2

“十四五”全民健康信息化规划 [EB/OL]. [2023-06-24]. <http://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/s3585u/202211/49eb570ca79a42f688f9efac42e3c0f1.shtml>.

3

魏明月, 陈敏, 胥婷, 等. 临床科研场景下医疗数据安全开放共享平台设计 [J]. 中国数字医学, 2021, 16 (7): 27-32.

4

李雪迎, 沙若琪, 姚晨, 等. 面向真实世界数据的临床研究数据治理模式选择 [J]. 中国循证医学杂志, 2020, 20 (10): 1150-1156.

5

张胜发, 罗葳, 马玉环, 等. 关于加快健康医疗大数据向科学数据转化的思考与建议 [J]. 医学信息学杂志, 2022, 43 (11): 8-13.

6

黄乙中. 浅谈数据治理建设方案 [J]. 轻工科技, 2020, 36 (1): 65-67.

7

孟群, 胡建平, 董方杰, 等. 我国健康医疗大数据资源目录体系建设研究 [J]. 中国卫生信息管理杂志, 2017, 14 (3): 387-391.

8

陈敏, 黄竹青, 秦健. 湖北省健康医疗大数据资源目录体系建设研究 [J]. 中国医院管理, 2018, 38 (12): 67-68.

9

李岳峰, 胡建平, 张学高. 中国健康医疗大数据资源目录体系与技术架构研究 [J]. 中国卫生信息管理杂志, 2019, 16 (3): 249-256.

10

张志刚, 杨栋枢, 吴红侠. 数据资产价值评估模型研究与应用 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (20): 44-47, 51.

11

王卓, 刘国伟, 王岩, 等. 数据脱敏技术发展现状及趋势研究 [J]. 信息通信技术与政策, 2020 (4): 18-22.

12

王俊. 基于安全沙箱的医院移动终端数据安全防护 [J]. 中国数字医学, 2018, 13 (3): 96-98.