# 利用快速医疗互操作性资源（FHIR）交换可穿戴惯性传感器数据：设计与开发研究

Gabriela Ciortuz[1,2], 理学硕士；Joshua Wiedekopf[2], 理学硕士；Hannes Ulrich[3], 自然科学博士；Hawzhin Hozhabr Pour[1], 工程学博士；Sebastian Fudickar[2,4], 自然科学博士（特许任教资格）

[1]医学信息学研究所，吕贝克大学，德国吕贝克

[2]临床研究信息技术科，医学生物统计与统计学研究所，吕贝克大学暨石勒苏益格-荷尔斯泰因大学医院，德国吕贝克

[3]医学信息学系，社区医学研究所，格赖夫斯瓦尔德大学医学中心，德国格赖夫斯瓦尔德

[4]弗劳恩霍夫个性化医疗技术与工程研究机构（IMTE），德国吕贝克

**通讯作者：**

Gabriela Ciortuz，理学硕士

医学信息学研究所

吕贝克大学

拉策堡大道 160 号

吕贝克，23562

德国

手机：+49 451 3101 5643

电子邮件：gabriela.ciortuz@uni-luebeck.de

# 摘要

**背景：** 使用可穿戴设备持续监测健康状况和运动情况，有助于改善对老年人疾病进展（包括衰弱和功能衰退）的评估，并帮助临床医生跟踪、诊断和治疗神经系统运动障碍。然而，原始传感器数据流，尤其是惯性测量单元（IMU）传感器数据，通常存储在专有文件中，难以与电子健康记录交换或被其解读。Health Level Seven（HL7）快速医疗互操作性资源（FHIR）标准规定了医疗保健领域设备与 IT 系统之间的通信方式，但现有的个人健康设备 FHIR 配置文件主要针对血压等点测量和短时波形，而不是包含记录背景和活动标签的纵向多通道运动记录。

**目的：** 本研究旨在开发 WHIR（可穿戴健康互操作记录），这是一种基于 FHIR R5 的信息模型和实施指南，用于记录通过可穿戴传感器采集的元数据和运动数据，并展示其在机器学习研究和居家临床评估中的适用性。

**方法：** 我们通过审阅 23 个已发表的人体活动识别数据集，归纳出元数据需求，并将其形式化为独立于 FHIR 的信息模型。随后，我们将该模型映射至 FHIR R5；使用 FHIR Shorthand 编写配置文件、扩展、代码系统和值集，并通过 SUSHI 构建。原始传感器信号保存在文件中，并通过文档引用资源进行引用，因此 FHIR 中保存的是元数据和活动标签。在可用的情况下，术语相关构件采用 SNOMED CT、LOINC 和 ISO/IEEE 11073 概念；仅当外部系统未涵盖某个概念时，才使用本地定义的代码。

**结果：** 所提出的实施指南定义了 9 个配置文件和 4 个扩展，以及 10 个代码系统和 15 个值集。所有配置文件、扩展和 67 个示例实例均通过官方 HL7 FHIR IG Publisher 的一致性检查，未出现错误。我们将两个用例——机器学习训练数据和居家自动化老年评估——实现为符合规范的示例实例。我们还讨论了在适用情况下，本模型与 HL7 个人健康设备（PHD）实施指南的对齐情况。

**结论：** WHIR 提供了符合 FHIR R5 的可穿戴 IMU 记录表示，以及相应的设备元数据、传感器放置位置和时间对齐的活动标签，并涵盖了 HL7 个人健康设备实施指南未涉及的概念。符合规范的示例实例证明了其对机器学习研究和居家老年评估的适用性；仍需使用完整数据集和独立实施的系统进行评估，以确立运行互操作性。该实施指南及其来源均可公开获取，以便复用和扩展。

# 关键词

可穿戴传感器；惯性测量单元；HL7 FHIR；互操作性；人体活动识别；健康数据标准；移动健康；老年医学评估；临床术语

# 1. 引言

为患者和研究参与者配备可穿戴传感器，可以持续了解他们在诊所外的生理和功能状态 [1]。与单次就诊时的临床评估不同，连续录音能够展现患者在数天或数周内的活动和功能情况[2]。因此，可穿戴设备在临床试验中的应用日益广泛，人们期望它们能比诊所就诊提供更频繁、更客观的测量结果 [3]。在医疗保健领域，可穿戴设备相比基于视频的监测具有诸多优势。它们能够更好地保护隐私，也更容易被用户接受，尤其是在集成到消费设备或附着于衣物的小型传感器中时；而且非常适合在日常生活中进行持续评估 [4]。智能手机和内置惯性测量单元（IMU）的穿戴式传感器已成为采集运动信息的常用工具。惯性测量单元结合了三轴加速度计和陀螺仪，有时还包括磁力计 [5]。

人体活动识别（HAR）通过从传感器信号中识别身体活动，将此类运动数据转化为有关一个人正在做什么的信息 [6]。人体活动识别通常被视为一个分类问题 [4]，，在身体不同部位组合使用多个传感器能够更全面地捕捉复杂活动，从而提高识别准确率 [7]。基于惯性测量单元数据训练的机器学习模型能够检测日常生活活动（ADL）[6] 以及功能能力测试的执行情况 [8,9]。对于在家独立生活的老年人而言，日常生活活动是衡量其功能状态的事实标准 [10]。自动检测日常生活活动，可以让临床医生在老年人下次就诊前很久就发现其日常活动规律的变化 [1]。

在技术支持的老年评估临床研究中，老年人在受控实验室环境下进行标准评估时，以及在日常生活中佩戴传感器腰带 1 周 [11]。研究旨在将评估精简为涵盖活动能力、力量和平衡的最少项目，让老年人无需监督即可在家完成这些项目 [9]。日常生活中的评估项目已经可以通过单个腰戴式惯性测量单元进行测量，例如作为下肢力量指标的爬楼梯功率 [8] ，以及步长等步态参数 [12]。

在家中，研究人员已使用惯性测量单元监测康复情况，例如利用单个传感器对肩部康复训练进行分类 [5]。步态不仅反映身体机能，也反映认知能力。对于轻度认知障碍患者，在同步认知任务中出现步态减慢与痴呆进展相关 [13]。

只有结合具体情境，才能解读一段 IMU记录：传感器佩戴在身体的哪个部位、如何配置并与其他传感器同步，以及该记录属于哪项评估。然而，可穿戴设备的记录及其元数据很少会进入电子健康记录（EHR）。这也是可穿戴传感器数据尚未纳入常规医疗的原因之一[14]。例如，在日常生活监测中，数据是在没有临床医生在场的情况下由个人设备记录的；要将数据传输到临床系统，发送设备和接收系统必须支持相同的互操作性标准 [15]。这类标准必须能够处理的不只是设备元数据：单次记录会话可能产生数小时的高频多通道采样值，而使记录可用于研究或评估的活动标签，则对应于记录中的特定时间间隔。

Health Level Seven（HL7）快速医疗互操作性资源（FHIR）已在医院网络内外得到采用，包括基于互联网的系统和居家护理系统 [16]。在德国，所谓的数字健康应用（DiGA）是可由法定医疗保险开具处方并报销的数字医疗器械。制造商若要将产品列入联邦药品和医疗器械研究所（BfArM）的 DiGA目录，必须满足互操作性要求，包括在公认的 FHIR注册库中免费发布适用的 FHIR 配置文件 [17]。对可穿戴设备提出类似要求，有助于将其整合到临床工作流程中 [16]。

HL7 FHIR 个人健康设备（PHD）实施指南（IG）是现有最合适的 FHIR 规范，它基于 ISO/IEEE 11073信息模型，定义了如何使用 FHIR 设备和观察资源表示来自个人健康设备的测量结果和设备信息，例如血糖仪、血压计和数字秤 [18]。

然而，PHD IG 面向的是遵循 ISO/IEEE 11073-10206 或蓝牙健康设备配置文件的个人健康设备 [18], ，而日益用于纵向运动与健康监测的消费级智能手表和智能手机通常采用不同的协议和专有格式 [16]。其数据仍保留在供应商平台中，很少进入临床工作流程或研究领域 [1]。因此，我们的方法不依赖 ISO/IEEE 11073 通信，但会在适用的情况下复用 ISO/IEEE 11073代码。

据我们所知，尚无 FHIR 规范能够同时表示纵向、连续的多轴 IMU 记录及其传感器放置位置、配置和活动标签。实际上，正如第 2.1 节所审查的 23 个数据集所示，每个数据集都以自己的文件布局和配置格式存储 IMU 数据。Seneviratne等人 [1] 也得出了相同结论，并呼吁针对连续传感器数据制定领域特定的 FHIR 配置文件和实施指南。

因此，我们提出 WHIR（可穿戴健康互操作记录），这是一份 FHIR R5 实施指南，用于表示时间序列运动数据、将活动标签与其标注的传感器数据流关联起来，并对传感器放置位置、采样频率和设备元数据进行编码 [19]。其首个版本涵盖可穿戴惯性测量单元——这是 HAR 数据集中最常见的传感器；但其结构（设备、已配置的测量能力、传感器放置位置、引用的原始记录和活动标签）旨在扩展至其他可穿戴传感器。由于 WHIR 使用标准 FHIR 资源而非专有模式来表示，活动识别

的输出原则上可以与其他临床数据一起存储在支持 R5 的 FHIR 服务器上，并进行查询。

本研究旨在开发并进行技术验证：建立一个基于 FHIR R5 的信息模型和实施指南，用于描述可穿戴 IMU 记录、设备及记录元数据，以及活动注释；并在机器学习和居家临床场景中展示其应用。本研究的主要贡献如下：

- 我们通过审查 23 个 HAR 数据集，推导出描述医疗保健用例中可穿戴 IMU 记录所需的数据和元数据需求。
- 我们提出了一种独立于 FHIR 的可穿戴 IMU 记录信息模型，并将其映射到 FHIR R5 资源和配置文件，同时考虑了 PHD IG 等现有规格。
- 我们以开放形式发布了 WHIR，这是一份 FHIR R5 实施指南；其中用于传感器放置位置、附件、设备特征和活动标签的配置文件、扩展、可复用代码系统和值集，均通过 HL7 FHIR IG Publisher 验证。
- 我们通过符合规范的示例实例，在两个医疗保健用例中展示 WHIR：用于基于机器学习的人体活动识别的训练数据，以及居家自动化老年评估。

因此，WHIR 支持 IMU 记录及解读这些记录所需元数据的标准化交换。如果得到采用，它可以让护理团队获取目前难以获得的运动数据，并使研究人员能够在不同研究中重复利用这些记录。

# 2. 方法

本节介绍基于已发表的 HAR 数据集和典型 IMU 记录开展的需求分析（第 2.1 节）、由此得出的信息模型及其与 FHIR R5 的映射（第 2.2 节），以及配置文件化、扩展和术语的规则（第 2.3 节）。

## 2.1 需求分析

为确定标准化格式必须表示哪些传感器配置和数据流，我们回顾了已发表的 HAR 数据集，并从每个数据集中提取了其惯性测量单元传感器的数量、类型和配置、在身体上的放置位置，以及需要分类的活动。

Shin 等人 [20] 系统地回顾了不同传感器模态的人体活动识别数据集，并汇总了使用最广泛的数据集。我们以此列表为起点，应用了三项纳入标准：（i）数据集至少使用一种穿戴式 IMU 传感器（加速度计、陀螺仪和/或磁力计）；（ii）出版物至少报告了每种传感器的类型和身体佩戴位置；（iii）识别的活动与医疗保健相关。因此，我们排除了旨在用于驾驶安全或装配线监测的数据集。我们还根据自身既有工作和相关文献，补充了其他面向医疗保健的人体活动识别数据集，仅保留符合上述标准的数据集。

应用纳入标准后，共纳入 23 个基于 IMU 的 HAR 数据集。这些数据集涵盖以下应用领域：日常生活活动和老年护理监测；跌倒和临床事件检测；锻炼和康复；以及包含医疗保健相关活动的通用人体活动识别基准数据集。表 S1（补充文件 1）列出了这些数据集的传感器数量和类型、采样率、传感器放置位置、应用领域以及完整的活动列表。

图 1 按应用领域总结了这 23 个数据集。活动类别数从 2 个（Daphnet）到 68 个（CogAge 2，包含 61 个原子活动和 7 个复合活动）不等；穿戴式 IMU 设备的数量从 1 台到 12 台（HHAR）不等；身体佩戴位置从 1 处到 9 处（REALDISP）不等；采样率则从 20 赫兹到 200 赫兹不等。TUD 的记录采样率约为 100 赫兹，但发布时已降采样至 2.5 赫兹。传感器放置位置因应用领域而异，因此需要第 3.3 节所述的位置值集和位置扩展。

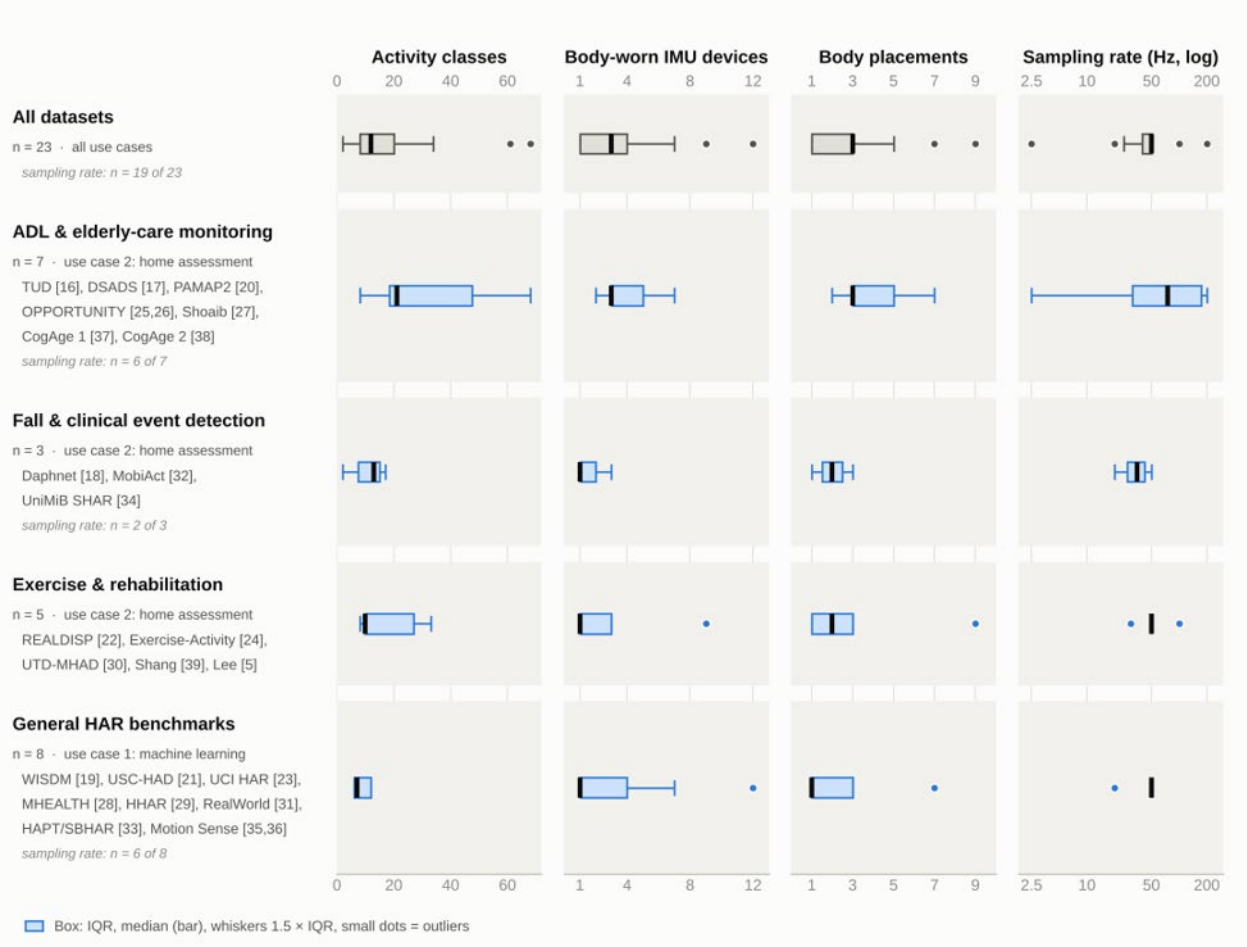


图 1. 按应用领域划分的 23 个经审阅的基于 IMU 的人体活动识别数据集特征：活动类别数、穿戴式 IMU 设备数、身体佩戴位置数和采样率（对数刻度）。箱体表示四分位距（IQR），中线表示中位数；须线延伸至 1.5 ×IQR；圆点表示离群值。未报告采样率的数据集未列入该列。

为了了解这些信息在实践中如何存储，我们将自有两台设备的记录与两个经审查的数据集的记录进行了比较（表 1）。采样率和单位可能出现在

配置文件、列标题、文件名中，或者仅出现在数据集文档中，而且这四种数据集都没有将传感器放置位置与数据一同存储。

表 1。四种活动标签的 Sensors、采样率、数据采集与输出以及存储方式
可穿戴式IMU设备：两种来自我们自身研究的设备，以及用于两个公开HAR
综述中数据集的设备。对于 PAMAP2 和 UCI HAR，输出描述的是已发表的数据集。

| 设备（来源） | 传感器、量程和采样 rate | 数据采集和输出 | 活动标签 |
|---|---|---|---|
| Humotion SmarTracks 传感器腰带 [21]（自有记录） | 三轴加速度计（±235 米/秒2）、陀螺仪（±2000 °/秒），和磁力计（±400 μT）；采样率可配置（250 赫兹（示例文件中如此，图 S1) | 记录于腰带上；一个包含所有通道的 CSV 文件以及一个 INI 配置文件包含速率和单位（图 S2) | 必须记录在外部文件中 |
| MbientLab MetaMotionS r1 [22]（自有记录） | 三轴加速度计（±2–16 g），陀螺仪（±125–2000 °/s），以及磁力计；气压，光照、温度；采样率可配置（示例文件中为 50赫兹）） | 记录在设备上，或通过蓝牙低功耗进行流式传输；每个传感器对应一个 CSV 文件，频率仅显示在文件名中，单位位于列标题中 | 必须记录在文档中在外部文件中 |
| Trivisio Colibri 无线，3个单位 (PAMAP2 [23]) | 三轴加速度计（±16 g 和 ±6 g），陀螺仪，磁力计，以及温度；100 赫兹（心率监测器 ~9 赫兹） | 通过无线方式传输（2.4 GHz）；每个受试者和会话发布为一个文件每位受试者和每次会话，速率和单位仅在自述文件 | 数据中的列 file |
| 三星 Galaxy S II（UCI HAR [24]） | 内置三轴加速度计和陀螺仪；50赫兹 | 由佩戴在手机上的设备记录腰部；发布为经过滤波的2.56秒窗口, one 每个信号和轴对应一个文件，频率和单位仅在自述文件中说明 | 单独的文件，每个窗口一个标签，根据视频进行标注 |

基于所审查的数据集，我们认为，一条 IMU记录可通过 10 个元数据项得到充分描述：(1) 起始和结束时间戳；(2) 传感器标识符；(3) 传感器类型；(4) 传感器在身体上的地点和方向；(5) 采样率；(6) 测量单位；(7) 校准信息；(8) 受试者信息；(9) 数据采集事件的详细信息；以及 (10) 原始IMU数据。表 2 将每个项目映射至 FHIR R5 资源及其元素。其中若干项目对于通过 FHIR [25] 交换可穿戴心电图数据也是必需的。此外，标注记录的活动标签必须与其所指向的原始数据时间间隔建立关联。

## 2.2 信息模型及其与 FHIR R5 的对齐

基于这些需求，我们首先独立于 FHIR 开发了一个可穿戴传感器记录的信息模型（图 2）。

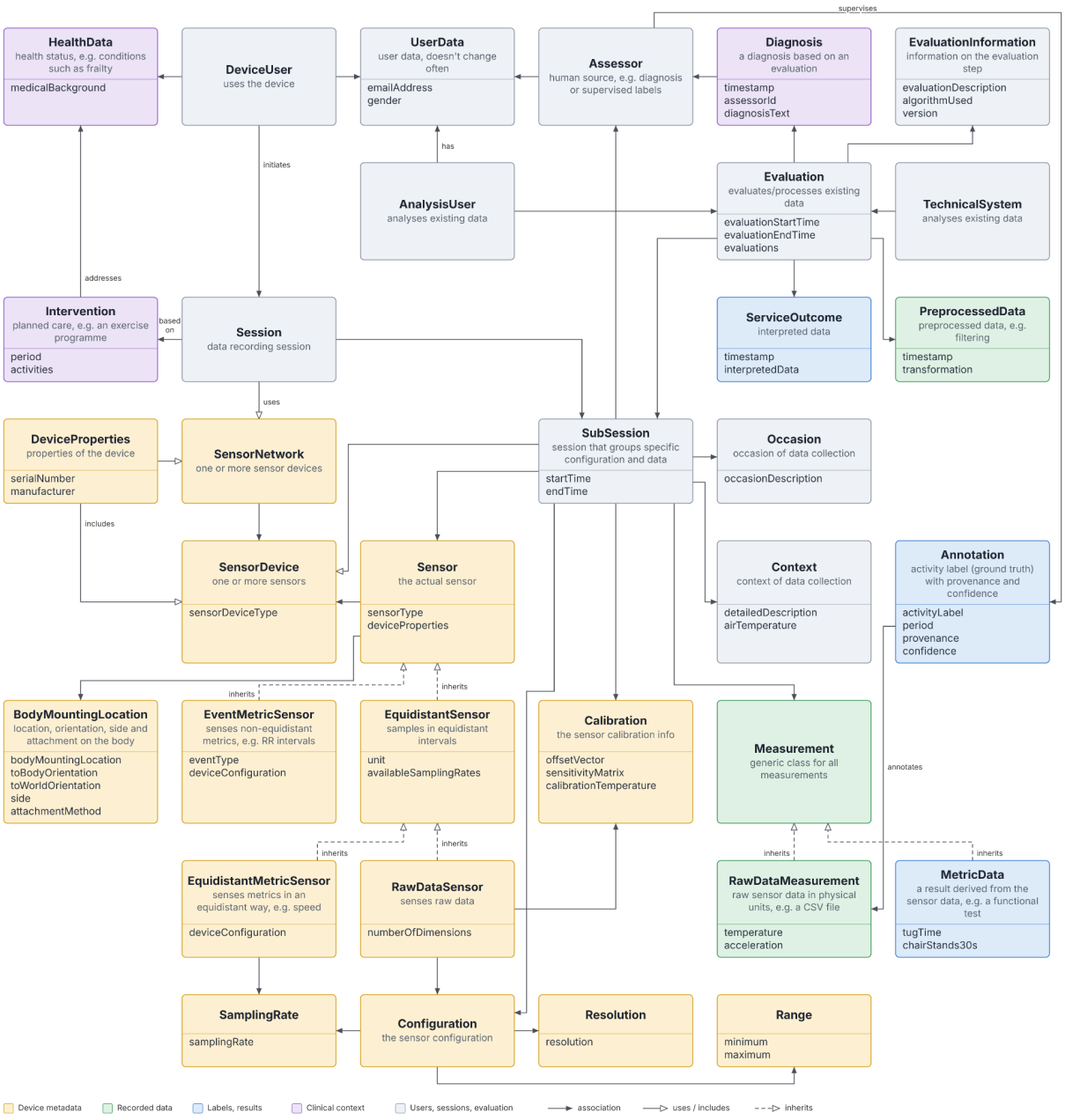


图 2. 可穿戴传感器数据的信息模型。

随后，我们将信息模型映射到于 2023 [26] 年 3 月发布的 FHIR R5；选择 R5 而非 R4 的原因将在第 4.3.3 节讨论。与我们领域最为接近的一组公开 FHIR 配置文件是 HL7 PHD 实施指南，它基于 FHIR R4（v2.0.0，试用标准 [STU] 2）。因此，我们没有据此派生配置文件，而是将生成的每个配置文件与其对应的 PHD 对应配置文件进行比较（如表 3 所示）。WHIR 未将 PHD 实施指南声明为软件包依赖项，因为依赖于 R4 软件包的 R5 指南会产生验证错误。我们改为在本地代码系统中定义了取自 PHD 实施指南的三种设备标识符类型，并沿用相同的代码（见表 S4）。

我们的 FHIR 映射遵循 FHIR R5 设备模型，该模型与 ISO/IEEE 11073 领域信息模型（DIM）相对应：医疗器械系统（设备）具有测量能力（设备指标），并由此产生观测（观察）。

对于周期性信号，PHD IG 定义了 *PhdRtsaObservation* 配置文件，其中将采样值嵌入 *Observation.valueSampledData*；自 STU 2 起，可将 x、y、z 轴加速度等多轴数据报告为交错采样值，且这些采样值共用一个单位和比例缩放 [18]。这种方式适用于持续时间较短的波形，例如心电图或肺功能测定曲线。对于连续设备数据流，商业 FHIR 转换服务会将采样数据按小时或按天分组，每组对应一个 观察 [27]。然而，基于可穿戴设备的人体活动识别记录通常会持续数小时或数天，采样率为 50-100 赫兹或更高，因此即使是每小时数据段，每轴也包含数十万个数值。因此，我们为长时间 IMU 记录开发了自己的观察配置文件。该配置文件通过 文档引用 引用外部文件中的原始数据，使 FHIR 资源仅保存元数据和活动标签。它还要求引用描述传感器配置的 设备指标，以及用于指明传感器放置位置的 身体结构 引用。

我们将每个活动标签表示为一个单独的观察，涵盖记录中的一个时间间隔，并引用其所注释的原始数据，以便能够分别查询各个标签。在我们的示例中，每条观察都有自己的标识符，而同一记录会话中的所有观察都引用同一个就诊，其标识符即为会话标识符。因此，数据集可以按会话拆分，例如拆分为训练集和测试集。

## 2.3 配置文件化、伸展和术语规则

将信息模型转换为 FHIR 构件时，我们采用了三条规则：

**配置文件化。** 只有在基础资源对于第 2.1 节或用例中确定的某项需求过于宽泛时，我们才创建配置文件，例如，将可选引用设为必需，或将选择元素限制为一种类型。否则，我们会直接重用基础资源，而不进行配置文件化。

**扩展。** 仅当没有 FHIR R5 核心元素能够表示该概念时，我们才添加扩展，并避免使用尚未成熟的 R5 资源。例如，设备关联可以记录设备穿戴的位置，但它在 R5 中的成熟度级别为 0，仍在开发中，因此我们改用 *Observation.bodyStructure* 和 身体结构上的扩展来记录放置位置。

**术语。** 值集和代码系统源自对第 2.1 节所述 23 个已发布人体活动识别数据集的同一项审查，以及我们的用例：对于每个需要编码值的特征（身体结构放置位置、附件机制、活动标签），我们记录了各数据集对其的描述方式；只要存在现成的 SNOMED CT、LOINC 或 ISO/IEEE 11073 概念，就予以复用；只有当没有外部系统涵盖数据中观察到的概念时，才定义本地代码。

应用这些规则后得到的各个配置文件、扩展和值集见表 2–5。我们使用 HL7 FHIR IG Publisher 验证了所有制品和示例实例，并通过 2 个用例展示了 WHIR（见第 3.4 节）。

# 3. 结果

## 3.1 需求到 FHIR R5 的映射

表 2 展示了第 2.1 节中确定的 10 个元数据项如何在 FHIR R5 中表示。传感器身份和类型由 *IMUSensorDevice* 配置文件承载；采样率、单位和校准状态由 *IMUDeviceMetric* 承载；传感器放置位置由 *BodyStructure* 资源表示；原始数据则由原始数据观察所引用的文件承载。受试者和就诊使用基础 *Patient* 和 *Encounter* 资源。目前，传感器方向只能描述为自由文本（见第 4.4 节）。

Ta表 2. IMU 记录元数据到 FHIR R5 资源及元素的映射 s.

| # | 元数据项 | FHIR 资源 | 元素 |
|---|---|---|---|
| 1 | 开始（和结束）<br>时间戳 | 观察 | 有效时段.*start* 和 有效时段.*end*<br>（原始数据文件的第一个和最后一个样本） |
| 2 | 传感器标识符 | 设备 | 标识符 |
| 3 | 传感器类型 | 设备 | 类型和*conformsTo.specification* |
| 4 | 传感器放置位置<br>在身体上以及<br>方向 | 身体结构 | 替代方案：*Observation.bodySite*。<br>方向：自由文本，位于<br>身体结构.*description*；尚无结构化<br>元素（见第 4.4 节） |
| 5 | 采样率 | 设备指标 | 测量频率 |
| 6 | 单位<br>测量 | 设备指标 | *unit* |
| 7 | 校准<br>信息 | 设备指标 | 校准类型, 校准状态, 和<br>校准时间 |
| 8 | 受试者信息 | 患者 | - |
| 9 | 数据采集<br>就诊详情 | 就诊 | 观察记录.就诊；就诊.标识符<br>保存会话标识符 |
| 10 | 惯性测量单元原始<br>数据 | 文档引用 / 附件，<br>引用自<br>*Observation.derivedFrom* | *Observation.code*表示传感器模态<br>和观察组件将每个轴映射<br>到一个文件列。其他方案： |

*Observation.valueSampledData* 或 *Observation.valueAttachment*（见第 4.3.2 节）。文件格式：实施指南中定义的最低要求为 CSV 格式（代码 whir-csv）。

## 3.2 基于 FHIR 的运动传感器数据模型

通过将信息模型（图 2）映射到 FHIR R5，我们得出了图 3 所示的模型。该模型区分了 5 组资源：静态设备元数据（设备、设备定义），这些元数据在不同记录之间不会发生变化；会话特定数据（原始数据观测、文档引用、就诊）；由机器学习或标注软件生成的观测；用于说明记录数据原因的临床背景（例如，护理计划、病情、诊断报告）；以及 WHIR 不作进一步约束的外部定义配置文件。

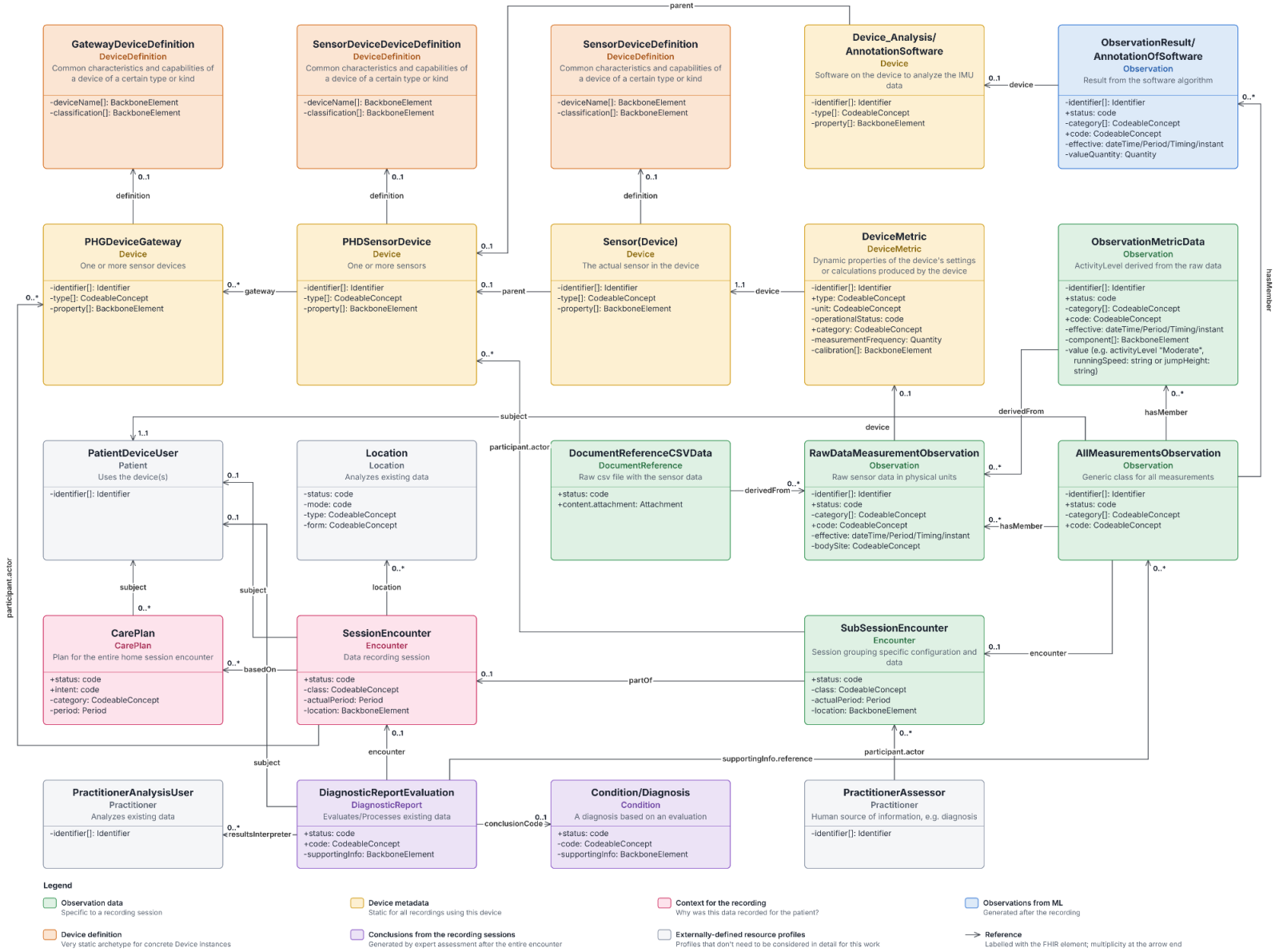


图 3. 基于 FHIR R5 的运动传感器数据模型。

## 3.3 配置文件、扩展和术语制品

第 3.2 节中的模型以公开的 FHIR R5 实施指南（WHIR，包 fudickar-lab.whir，使用 SUSHI/FSH 构建）[19] 的形式实现。该实施指南定义了 9 个配置文件和 4 个扩展（表 3、表 4），以及 10 个代码系统和 15 个值集（表 S4、补充文件 2）。图 4 展示了这些配置文件及其相互之间的参考关系。

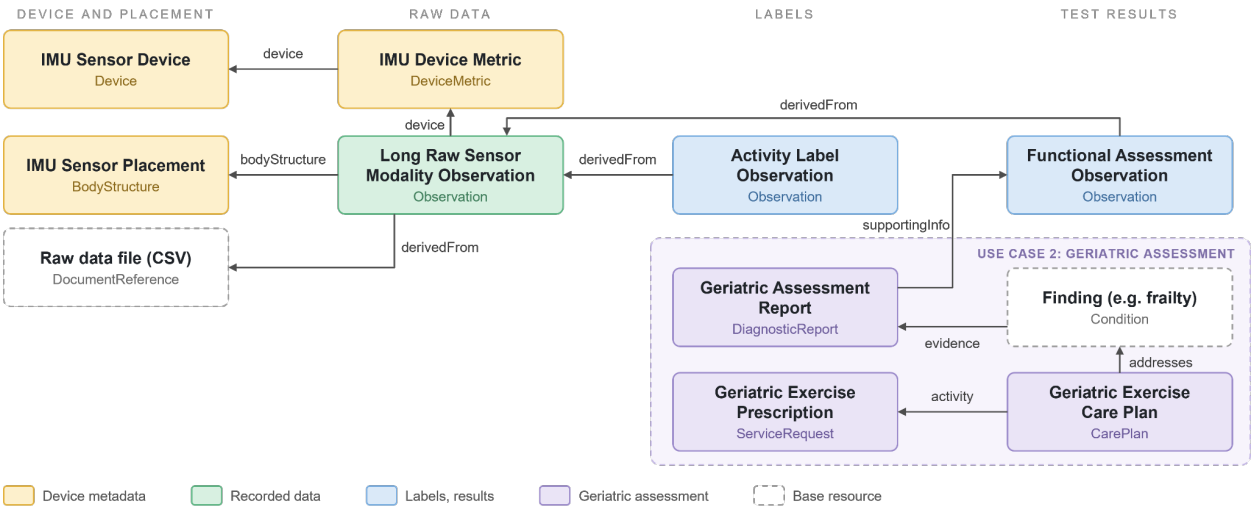


图 4　。WHIR 实施指南的配置文件及其相互之间的参考关系　.

每个 *LongRawSensorModalityObservation* 表示一个设备的一种传感器模态，例如传感器腰带的三轴加速度计。其 代码 给出该模态（SensorModality 值集），每个轴对应一个组件，用于指明原始数据文件中存储该轴数据的列（SensorAxis 值集）。该观察不包含值*[x]*：采样值存储在文件中，并通过*derivedFrom*引用该文件（一个文档引用，在我们的示例中内容类型为 text/csv）。采样率、单位和校准信息由所引用的*IMUDeviceMetric*给出，传感器放置位置则由身体结构引用指定。因此，配有加速度计、陀螺仪和磁力计的设备由三条观察记录表示，每条记录均引用其各自的设备指标。

原始数据观察的有效时段 从其文件中的第一个采样值延续到最后一个采样值。实施指南为此文件规定了最低格式要求：一个 UTF-8 CSV 文件，包含一行标题行，第一列为以毫秒为单位的 Unix 纪元时间戳，其余每列对应一个轴，列名与观察组件中的名称一致，单位则与设备指标的单位一致。属于某个标签的采样值，其时间戳须位于该标签的有效时段内；而该时段本身必须位于其所依据的原始数据观察的有效时段 内。

三个值集相互关联：活动标签整合了 HARActivityLabels、GeriatricAssessmentLabels 和 ADLLabels，使得 *ActivityLabelObservation.code* 可以绑定到单一值集。ADLLabels 保持独立，因为 *GeriatricExercisePrescription*仅绑定 GeriatricAssessmentLabels：运动计划可以规定坐站练习，但不能规定洗碗这类日常活动。AnnotationProvenance 绑定

到 *ObservationAnnotationProvenance*，且强度要求为必需，因为其 4 个代码（人类专家、人工审核、半自动化、算法生成）构成一个封闭列表。

我们使用伸展来记录这一信息，而不是使用 FHIR *Provenance* 资源，因为每个标签都对应一个 *Provenance* 资源会使资源数量翻倍，并且需要额外查询才能按标签的生成方式进行筛选。因此，*Provenance* 按处理运行而非按标签记录：一个*Provenance*资源会列出该次运行生成的观测、读取的原始数据观察、参与人员以及软件*Device*；其版本用于标识所用的软件和模型。将标签保留为独立的观察，也支持并行标注集（例如“专家标注”与“算法生成的标签”），可通过*Observation.code*或*Observation.category*加以区分：原始数据保持不变，而每个标签集都有各自的一组观察。

AttachmentMethod 的代码是通过检查表 S1（补充文件 1）所列 23 个数据集各自出版物中报告的附着机制得出的：13 个数据集为其所有传感器放置位置指定了值集涵盖的机制；3 个数据集（TUD [28],OPPORTUNITY [29,30], Shoaib [31]）为部分但并非全部传感器放置位置指定了机制；另有 7 个数据集（DSADS [32], Daphnet [33], PAMAP2 [23], REALDISP [34], UTD- MHAD [35], HAPT/SBHAR [36], Shang [37]）完全没有说明传感器是如何附着的。表 S3 列出了由此得到的代码，以及促成各代码制定的数据集。

表 3. 对我们提出的配置文件的描述，以及在适用情况下与最接近的 PHD IG 配置文件的比较。我们所有的配置文件均基于基础 FHIR R5 资源，而非 PHD IG 配置文件。

| WHIR 配置文件 | 最接近的 PHD 配置文件或基础资源 | 差异 | 注释 |
|---|---|---|---|
| *LongRawSensorModalityObservation* | *PhdRtsaObservation* | 表示一个周期性样本序列，例如 *PhdRtsaObservation*，但涵盖一个传感器的所有轴传感器模态，并引用存储在外部文件中的（*derivedFrom* → 文档引用）而不是将其嵌入*valueSampledData*中；采样频率、单位和校准由所引用的*IMUDeviceMetric*描述。新增必需的设备 （→ *DeviceMetric*）和身体结构参考。 | PHD 配置文件使用的身体部位元素我们的 PHD 配置文件已被替换。由互斥的 R5 配置文件身体结构引用。该被引用的身体结构包含用于附着方法和放置限定条件的扩展例如优势侧。 |
| *IMUSensorDevice* | *PhdDevice* | 我们的配置文件不需要 *PhdDevice* 特化伸展：在 FHIR R5 中，这由 conformsTo.specification 覆盖。它要求 *IMUSensorDevice* 的类型为以下之一：Simple MDS，智能手机或通用设备（物理对象）。 | FHIR R5 支持设备层次结构，通过 *Device.parent*，从而可以将不同的传感器模态表示为某个 IMU 设备或智能手机的组成部分。 |
| *IMUDeviceMetric* | *PhdDeviceMetric* | FHIR R4 已允许*Observation.device*引用一个设备指标 ，但 PHD IG 将其限制为 Reference(*PhdDevice*)，即硬件而非特定的已配置的测量能力。我们的 *LongRawSensorModalityObservation* 引用了 *IMUDeviceMetric*。在 R5 中 ，*DeviceMetric.source* 被重命名为 *DeviceMetric.device* ，我们的 *IMUDeviceMetric* 采用。 | |
| *IMUSensorPlacement* | 身体结构（基础资源；无 PHD 等效） | PHD IG 未在 身体结构 上定义任何配置文件，并且若有表达位置，则通过 *Observation.bodySite*。 | 将位置绑定到 HAR 身体部位值集（可扩展），并添加可选扩展 *BodyStructurePlacementQualifier* 和 *BodyStructureAttachmentMethod*。 |
| *ActivityLabelObservation* | 观察 （基础资源；没有 PHD 等效） | PHD IG 没有对应项：它定义的是设备测量，而非人体活动真实标签。 | 将 effective[x] 限定为时间段（一个标签始终覆盖一个时间跨度，绝非瞬时）；需要 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | derivedFrom，限定为 *LongRawSensorModalityObservation*，且 identifier（1..*）；将*code*绑定到活动标签（可扩展，第 3.3 节）；*device*用于指明标注员或标注软件。 |
| 功能评估观测 | *PhdNumericObservati on* | 记录标准化功能测试的结果（代码取自功能评估测试，例如以秒为单位的起立行走测试时间）。该结果由可穿戴传感器数据计算得出，或由评估员测量，而非由个人健康设备直接测得。 | 要求 derivedFrom（1..*），限定为 *LongRawSensorModalityObservation*，以及*encounter*、*effective[x]*, 和*value[x]*；数量值必须带有 UCUM 单位代码。有效时间段必须处于其派生所依据的原始数据观察的有效时间段内。*device*用于指明分析软件；标注来源和置信度扩展与*ActivityLabelObservation*相同。 |
| 老年医学评估报告 | 诊断报告（基础资源；没有对应的 PHD 资源） | PHD 实施指南中没有对应内容：它没有为一组相关测量定义报告/解释资源。 | 要求 *supportingInfo* （1..*）来引用其所解释的功能评估观测实例（例如计时起立-行走测试或30秒椅子起立测试结果），而不是引用 *result*，因为这些测量是在录音期间采集的，报告仅对其进行解释，而非生成这些测量结果。*conclusionCode* 仍为可编码概念，因为 R5诊断报告 没有引用病情的元素；链接方向相反，是通过 *Condition.evidence*建立的。 |
| 老年人运动护理计划 | 护理计划 （基础资源；没有对应的 PHD 资源） | PHD IG 中没有对应项。FHIR R5 移除了 *CarePlan.activity.detail* [38], 这一内联元素；在 R4 中，它用于直接在护理计划上对计划活动进行编码； | 要求每项活动都引用一个老年人运动处方，而不是对锻炼进行编码 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 计划活动的代码现在必须存放在 resource activity.plannedActivityReference 所指向的资源上。 | 护理计划本身；时间段 是必需的，因为该计划的持续时间在临床上具有重要意义（例如，进行为期 2 周的 Otago锻炼，或在家进行力量和平衡训练以预防跌倒 [39]）。 |
| 老年人运动处方 | 服务请求 (基础资源；PHD 中没有等效项) | PHD IG 中没有等效项。R5 护理计划可以不不再携带活动代码本身（见上文）；老年人运动护理计划.活动.计划活动参考 *nce* 指向它。 | 代码概念绑定到 *GeriatricAssessmentLabels*（可扩展），即用于标记记录的活动的同一套本地定义的 Otago/康复词汇，因此，处方内容和记录内容使用相同的代码；发生时间*[x]*（时间安排）可选地注明频率和持续时间，例如“每周 3 次，持续 2 周”。 |

表 4. 拟议模型定义的扩展。

| 扩展 | 资源 | 定义 | 注释 |
|---|---|---|---|
| 身体结构位置限定符 | 身体结构 | 可编码概念值 来源 位置限定符（可扩展） | 当引用未标明侧别的身体结构时，指明所指的结构。 |
| 身体结构附着方法 | 身体结构 | 可编码概念值 来自 附着方法（可扩展） | 记录设备固定在身体上的方式，位于此位置固定在身体上的方式。 |
| 观察标注来源 | 观察 | 可编码概念值 来源 AnnotationProvenance （必需） | 说明标签是如何生成的：由人工标注员生成，由人工审核或修正算法的输出，由组合工作流生成，或由算法单独生成。 |
| 观察注释置信度 | 观察 | *valueDecimal*，0.0–1.0 | 生成算法对标签的置信度；仅在与算法—生成或半自动化的结果一起使用时才有意义观察标注来源。 |

表5。填充放置限定符值集的代码，以及通过身体结构位置限定符伸展（表 4）绑定的、作为各代码依据的数据集放置位置。

| 放置限定符和<br>数据集 | 代码系统 | Code | 显示名称 | 注释 |
|---|---|---|---|---|
| 优势侧踝部，优势腿的踝<br>优势侧腿部的踝 [23] | http://snomed.info/sct | 262379005 | 优势侧<br>（限定值） | 传感器放置在参与者的<br>优势肢体或优势侧，例如<br>优势腕。 |
| — | http://snomed.info/sct | 262458006 | 非优势<br>侧（限定值<br>） | 非优势侧。传感器放置在<br>参与者的非优势肢体或<br>侧。 |
| 由受试者按<br>其首选方式放置 [24] | https://fudickar-<br>lab.github.io/WHIR/CodeSystem/place<br>ment-qualifier-cs | 首选 | 首选 | 参与者或方案自由选择了<br>此放置位置，且未依据解剖学<br>以优势侧为判定标准。无<br>对应的单概念 SNOMED CT 术语，<br>因此按本地定义。 |
| 受影响手臂的外侧<br>[5] | https://fudickar-<br>lab.github.io/WHIR/代码系统/place<br>ment-qualifier-cs | 受影响 | 受影响 | 传感器放置在临床上<br>受影响侧，例如卒中后或<br>术后。没有单一概念<br>与之等效的 SNOMED CT 概念，因此<br>在本地定<br>义。 |
| 对使用<br>左手或右手的执行<br>进行了区分，以便<br>标记佩戴<br>传感器的手臂<br>执行了活动：<br>仅左手<br>[40] | http://snomed.info/sct | 255208005 | 同侧<br>（限定值） | 传感器与<br>执行记录的活动的肢体位于同一侧，例如<br>传感器位于左臂，活动由<br>左手完成。 |
| — | http://snomed.info/sct | 255209002 | 对侧<br>（限定值） | 传感器位于与<br>执行所记录的<br>活动的肢体相反的一侧，例如传感器位于左<br>臂上，活动由右<br>手。 |

传感器放置位置对应的 SNOMED CT 身体结构概念，以及有关特异性和覆盖范围的说明，见表 S2（补充文件 2）。

## 3.4 验证

我们使用 SUSHI v3.20.1 构建 WHIR，并使用 HL7 FHIR IG Publisher v3.0.2，依据 FHIR R5（5.0.0）对全部 9 个配置文件、4 个扩展、10 个代码系统、15 个值集和 67 个示例实例（用例1 31 个，用例 2 36 个）进行了验证。IG Publisher 会依据 FHIR R5规范和 WHIR 配置文件检查每个构件和示例实例，使用 HL7 术语服务器检查编码值是否符合其绑定的值集，并将每个问题报告为错误、警告或信息。我们将构建结果中没有错误视为实施指南符合要求，并逐一审查了所有警告。构建结果显示没有错误、131 条警告和 146 条信息消息。没有任何警告涉及示例实例与 WHIR 配置文件的符合性；这些警告涉及出版物元数据（标记为实验性 的值集、缺少对象标识符以及 代码系统的 *caseSensitive* 元素）、最佳实践建议（例如每个 观察 都应具有 执行者），以及无法解析的示例 URL。此外，我们在 2 个对模型提出不同要求的用例中展示了 WHIR：使用多个设备进行监督式实验室记录，并将其作为机器学习的训练数据；以及在家中进行无监督评估，在这种情况下，传感器衍生测量值会进入临床文档。对于每个用例，我们编写了能够表示示例记录会话的 FHIR Shorthand 实例，内容涵盖患者、设备和设备指标，经由原始数据观察和所引用的原始数据文件，一直到活动标签或功能测试结果；对于用例 2，还包括由这些数据衍生的评估报告、病情和护理计划。

### 3.4.1 用例1：用于机器学习的 IMU 数据

在此用例中，在受控实验室环境下记录受试者的 IMU 数据，以开发用于人体活动识别、跌倒检测或老年医学评估自动化的机器学习模型。同时使用多个 IMU 设备，例如 MetaMotionS (MMS) 传感器 [22], 和智能手机，采集全面的传感器数据集，因此此用例重点关注不同惯性测量单元传感器的元数据、其定位方式以及用于监督式机器学习的活动标签。传感器放置位置采用表 S2（补充文件 2）中的值集进行编码：SNOMED CT 263301002“第三腰椎水平”，用于佩戴在腰带上的 MMS 传感器（附着方法：腰带）；SNOMED CT 37117007“右腹股沟区结构（身体结构）”，用于放在右侧裤袋中的智能手机（附着方法：口袋）。

临床医生（评估员）监督记录会话，以确保数据采集准确，并正确进行活动标注。评估员表示为 临床医生资源，并作为其监督标注的活动标签观察的执行者（观察.*performer*）被引用。若有需要，未来也可以使用 FHIR 对研究设计进行建模。

图5中的实例图展示了一个示例记录会话所生成的资源。

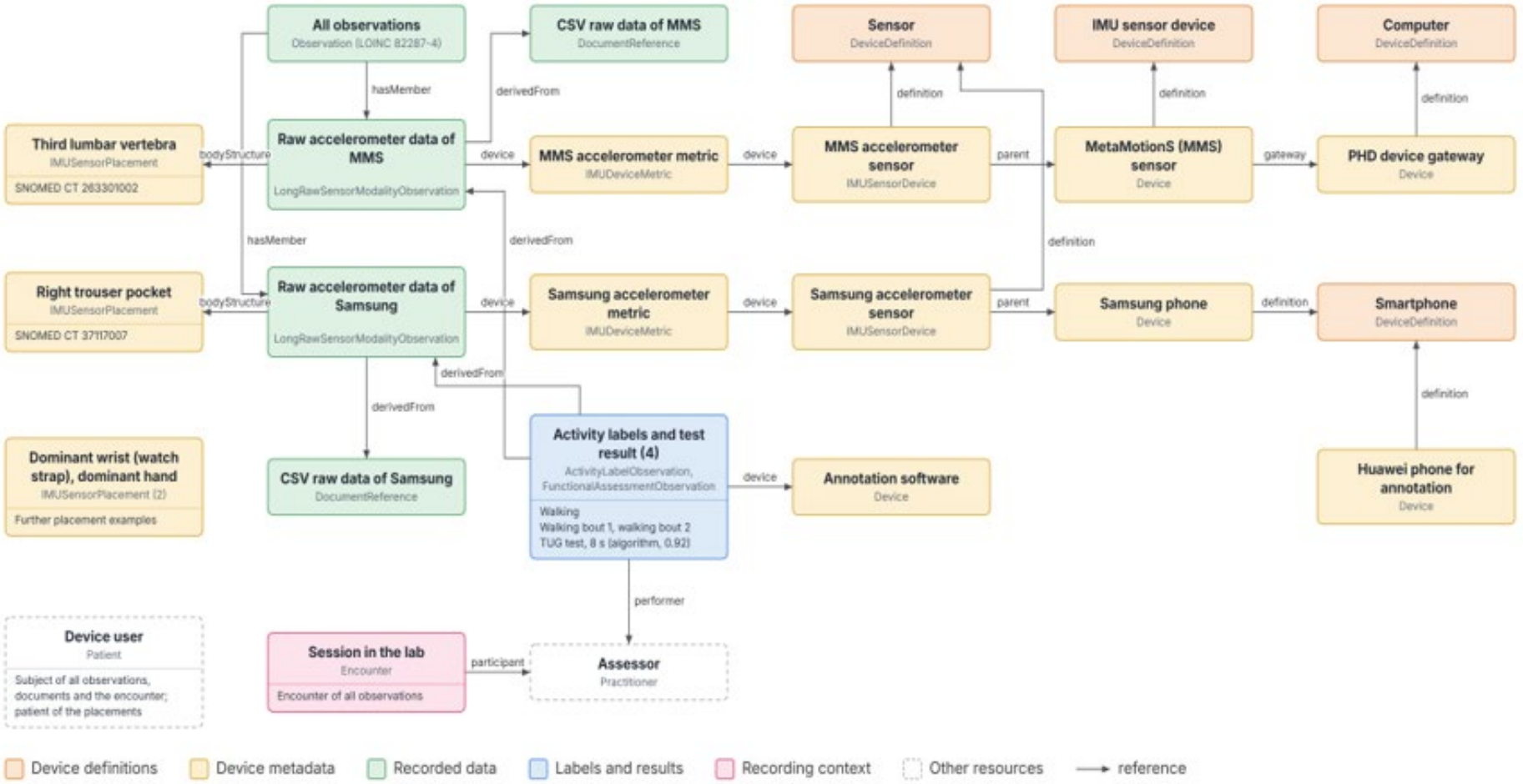


图5.用例1的实例图：设备、设备指标、患者、引用CSV文档的原始数据观察、身体结构和机器学习标签观测。

### 3.4.2 用例 2：家庭评估

在此场景中，自动化老年医学评估在家庭环境中进行：受试者佩戴一组最精简的传感器（例如，在第三腰椎水平佩戴一个 MMS 传感器），并使用移动应用程序自动生成评估结果。随后，采集的数据会传送给临床医生进行进一步分析，或直接上传至电子健康记录，以纳入受试者的病历。

记录会话中的原始加速度计数据流由软件进行分析，并计算 2 项标准化老年人活动能力测量，而非用例1中的活动标签：计时起立-行走测试结果（LOINC 89423-8，“从椅子上起身，步行 10 英尺后返回，并重新坐下所需的时间 [TUG]”，以秒为单位的数量）以及 30 秒椅子站立测试结果（LOINC 66247-8，“30 秒内从坐姿站起的频率”，以每 30 秒站起次数表示的数量）。对于无法完成起立行走测试的患者，吕贝克基本活动能力计时量表（tLSBM）提供了一种分级替代方案，可评定从躺卧到步行的基本活动能力，并记录转移所需的时间 [41]；其结果也可采用相同的 功能评估观测 模式表示。

这两个功能评估观测实例均作为*supportingInfo* 被老年医学评估报告引用；该报告是我们基于诊断报告构建的配置文件，编码为“老年医学门诊病程记录”（LOINC 100467-0），并由评估员进行解读，最终形成一个病情，用于记录老年医学结论（SNOMED CT 248279007“衰弱（所见）”，严重程度为“重度”）。该病情通过*Condition.evidence.reference*（在 R5 中，*Condition.evidence*是一个可编码引用，而不是 R4 中单独的*evidence.detail*）关联回报告，因为 FHIR R5 未为诊断报告提供可直接引用病情的元素。录音本身限定于一次居家医疗就诊（*Encounter.class* = HH），地点为患者家中（地点），依据是一份为期 2 周的老年人运动护理计划，内容为家庭运动计划。由于 FHIR R5 移除了*CarePlan.activity.detail*，每项计划中的锻炼都编码在单独的老年人运动处方中（这是我们基于服务请求构建的配置文件），而护理计划则通过*activity.plannedActivityReference*引用这些处方，遵循 R5护理计划规格 [38]。

图 6 中的实例图展示了一次家庭评估会话所产生的资源示例。

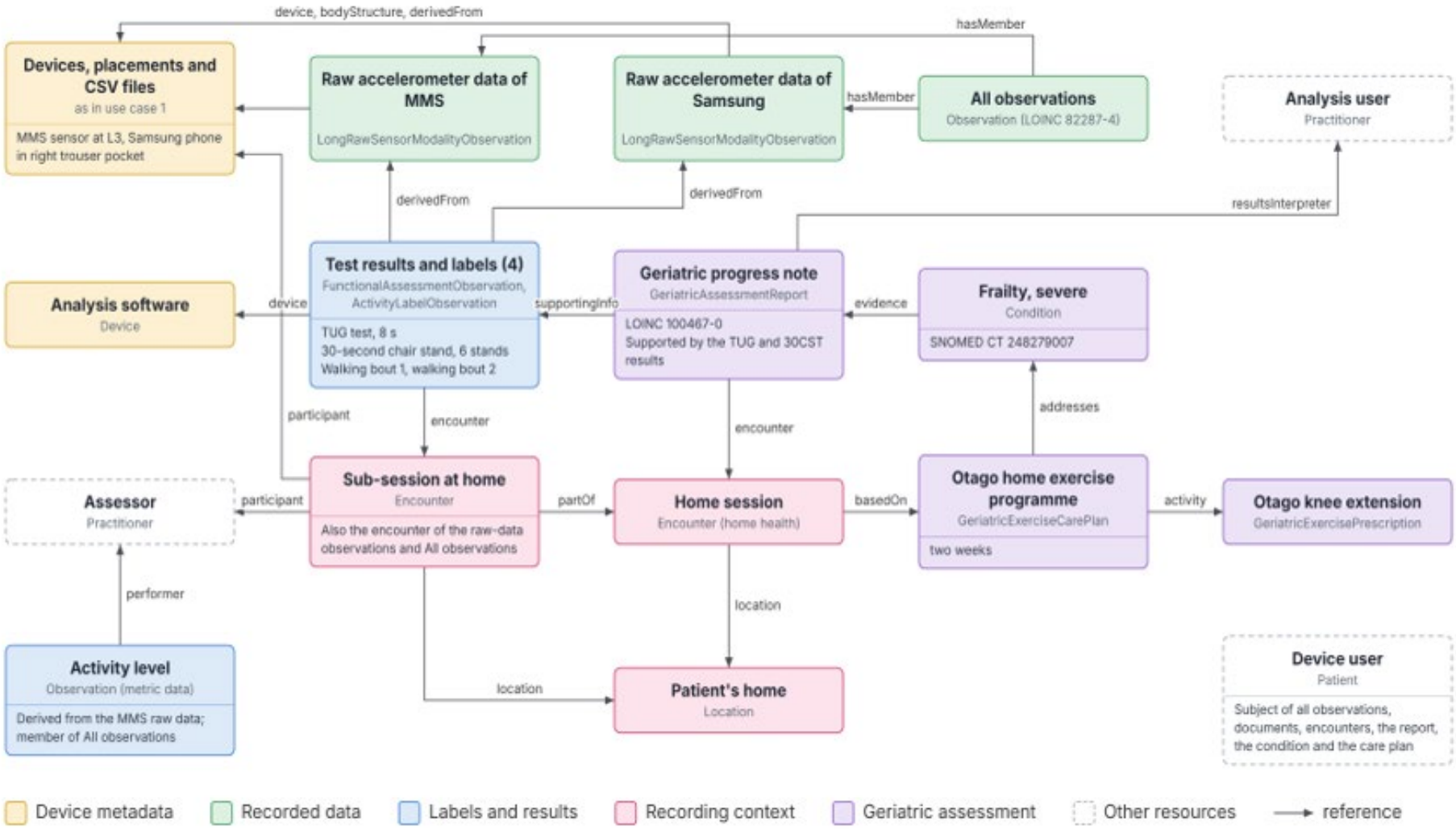


图 6. 用例 2 的实例图：家庭健康服务就诊、设备、原始数据观察、起立行走测试和 30 秒坐站测试功能评估观测实例（来自分析软件）、老年医学评估报告、 病情和 老年人运动护理计划。

# 4. 讨论

## 4.1 主要结果

本文提出了 WHIR，这是一种针对可穿戴 IMU 记录的 FHIR R5 信息模型和实施指南。该实施指南包含 9 个配置文件、4 个扩展、10 个代码系统和 15 个值集；其中 9 个配置文件中的 5 个涵盖了 PHD IG 中没有对应项的概念。使用 HL7 FHIR IG Publisher 对该实施指南和 67 个示例实例进行验证，结果表明它们符合 FHIR R5 和 WHIR 配置文件的技术要求，且无需修改 FHIR 核心规范。

两个用例表明 WHIR 在技术上可行：

在用例1中，针对涉及多台设备的受监督实验室会话，该表示提供了将记录用作机器学习训练数据所需的信息：哪台设备记录了哪些通道、采样率是多少、设备位于身体的哪个部位，以及哪些标签适用于哪些时间间隔。

在用例 2 中，针对居家无监督评估，同一原始数据观察配置文件与功能测试结果结合，这些结果用于生成诊断报告、病情和运动护理计划，从而将传感器衍生测量值与其应用的临床背景联系起来。

三项设计决策塑造了最终结果。信息模型独立于 FHIR 开发，之后才将其映射到 FHIR，这使模型对领域专家而言更易读，也使每项映射决策都明确可见。原始信号通过文档引用 进行引用，而不是嵌入*Observation.valueSampledData*，从而使元数据和注释能够作为 FHIR 资源继续访问，同时避免将大型信号文件嵌入观测中（见第 4.3.2 节）。在概念已有对应定义的情况下，术语复用了 SNOMED CT、LOINC 和 ISO/IEEE 11073；只有在没有外部代码系统涵盖相关概念时，才使用本地定义的代码。

## 4.2 与既有工作的比较

关于将 FHIR 用于可穿戴数据的既有工作可分为三类：应用特定适配器、活动摘要规格，以及 PHD IG。我们从三个维度将 WHIR 与它们进行比较：如何处理原始录音、如何描述其记录背景，以及如何将活动注释和派生的临床结果与其关联。

已有多项研究针对可穿戴数据构建了专用的 FHIR 适配器。Bartschke 等 [25]开发了一个基于 Swift 的解析器，用于将 Apple Watch 心电图数据转换为 FHIR 观察资源，以便传输至 EHR 系统。Gopinathan 等 [42] 扩展了 FHIR，以采集智能手机中的生活方式数据。Pfyffer 等 [43] 实现了一种标准化的、基于 FHIR 的

跌倒检测警报系统，使用 观察和 任务资源。Lee 等人 [5] 根据单个惯性测量单元对肩部康复练习进行分类，并将结果存储为 FHIR 观测。除设备适配器外，Leroux 等人 [44] 还将临床研究数据从 CDISC 运营数据模型映射到 FHIR，解决了语法互操作性和语义互操作性问题；Gay 和 Leijdekkers [45] 则展示了移动应用如何助力实现互联医疗的互操作性。这些研究表明，FHIR 可用于特定应用场景中的可穿戴设备衍生数据交换，但通常关注处理后的结果或事件，而非底层记录。与 WHIR 不同，此处讨论的方法未提供一种通用表示，无法同时整合连续惯性测量单元记录、传感器放置位置、配置以及与时间对齐的活动标签。

两项相关标准涉及活动摘要。HL7 FHIR 美国身体活动实施指南（STU 1）规范了每日活动日志、步数、心率测量值以及相关护理计划和目标的交换 [46]。然而，该指南明确排除原始设备数据，以及有关生成这些测量值的可穿戴传感器的信息。IEEE 1752.1（Open mHealth）通过一系列独立于 FHIR 的 JSON 模式，规范了单次睡眠和身体活动测量值（活动类型、持续时间、距离、强度和卡路里）。其设备和来源建模仅限于标头模式中的自由文本“source_name”字符串，以及一个二元“感测/自我报告”模态标志；它没有定义结构化的设备身份、传感器放置位置或配置元数据 [47]。因此，两项标准都侧重于活动测量值和摘要，而非底层的连续传感器记录。WHIR 对这些方法进行了补充，可表示原始惯性测量单元记录及相关元数据，这些数据可用于推导上述测量值。

PHD IG 是最接近的规格。其 *PhdRtsaObservation* 配置文件已能在一个 观察 中承载周期性样本序列，并且从 STU 2 起支持多轴数据；其设备模型与 WHIR 一样，将设备身份、测量能力和观察分开 [18]。不过，*PhdRtsaObservation* 将采样值嵌入 *Observation.valueSampledData*，这适用于持续时间有限的波形，却不适用于持续数小时或数天、采样率达到 100 赫兹或更高的可穿戴设备 HAR 记录。因此，WHIR 将原始数据保存在外部文件中，并通过 文档引用建立链接，使 FHIR 资源仅保存元数据和活动标签。PHD IG 不允许这种链接：在 STU 2 中，*Observation.derivedFrom* 仅限引用其他 PHD 观察。WHIR 还明确规定了如何在一个观察中表示某种传感器模态的所有轴：每个轴对应一个组件，用于标识原始数据文件中的相应列；而 PHD IG 仅将各轴表示为交错样本数组中的位置。每个原始数据观察都引用已配置的测量能力（设备指标）和结构化的传感器放置位置（包含附着方法和放置限定符的 身体结构）。活动标签以单独的观察表示，并链接到相应记录；PHD IG 未涉及这一概念，因为它侧重于设备测量，而非活动注释。表 3 对各个配置文件进行了比较。

另一个差异在于临床结果的表示方式。Smart Bear EU 项目的*TimedMobilityTestObservation* [48] 将起立行走测试结果表示为分类的可编码概念，而非原始时间值，因此无法保留原始

测量精度。用例 2 则将该测量表示为采用 LOINC 编码的数值型数量，从而保留测量值，以便在不同就诊期间进行纵向比较。

# 4.3 设计考量

## 4.3.1 网关架构

在 PHD IG 中，个人健康网关通常是用户的智能手机，它接收来自设备的 ISO/IEEE 11073 数据，将其转换为 FHIR 资源，并立即或在缓冲后上传到服务器 [18]。WHIR 有意不限定这一转换发生的位置，因为对于 IMU 记录，网关的任务在两个方面有所不同。首先，原始信号本身不会被转换：它仍然是一个文件，而网关只创建元数据资源（设备、设备指标、身体结构、原始数据 观察 及其文档引用）；这些信息在记录开始时便已明确，且在不同会话之间很少变化。其次，活动标签和功能测试结果由标注或分析软件生成，而这些软件可能运行在传感器、智能手机或服务器上，且通常在记录结束后才运行。因此，WHIR 支持两种部署模式。在边缘模式下，控制传感器的智能手机应用会创建 WHIR 资源并上传原始文件，因此，像用例 2 这样的家庭评估无需专用中间设备即可传入电子健康记录。在服务器端模式下，原始数据流被发送至处理服务器，由其对活动进行分类并创建标签观察；在先前的工作中，我们曾将加速度和陀螺仪数据从 Android应用流式传输到此类服务器，并实时对活动进行分类 [49], ，而且可以在该阶段加入 FHIR 转换，无需更改应用。在这两种模式下，注释溯源扩展（表 4）和用于注明标注软件的 *Observation.device*，都能让接收系统区分在流程不同阶段生成的标签。

## 4.3.2 存储原始数据与引用原始数据

对于可穿戴数据，一项重要的设计决策是选择将信号嵌入*Observation.valueSampledData*，还是引用外部文件。FHIR 通过 SampledData 支持定期采样的生理信号；原则上，这是一个合适的元素，因为它记录了间隔、间隔单位、下限 和上限，以及数据维度，这些都与纵向可穿戴信号有关。嵌入信号可使其保留在标准化的 FHIR 表示中，无需解析外部 CSV 文件，并简化完整记录的检索。这种方式适用于非常短的信号，例如跌倒事件或临床相关的短片段。然而，可穿戴设备的原始数据可能包含很长的记录：以 50赫兹采样的三轴加速度计连续记录 24 小时，每轴会产生 $50 \times 86,400 = 4$。3200 万个采样值，也就是约 1300 万个数值；仅一个*Observation.valueSampledData*元素就约占 100 MB。此外，FHIR存储库并未针对时间序列数据库进行优化。鉴于这些记录可能占用大量空间，且需要支持不同的存储方式，WHIR 选择引用原始数据，而不是将其嵌入其中。

可以通过*Observation.valueAttachment*引用外部文件，并将附件本身作为观察值。然而，由于*Observation.value[x]* 是一个选择元素，

同一观察无法同时携带采样数据的特征，因此会丢失有关维度、间隔和限值的信息。在我们的设计中，相关记录元数据则通过所引用的*IMUDeviceMetric*（采样频率、单位、校准）以及观察的组成部分来表示；这些组成部分将每个轴映射到原始数据文件中的一列。

WHIR 通过*Observation.derivedFrom*将每个原始数据观察关联到一个文档引用，使原始信号保留在外部文件中，同时将其元数据和注释表示为 FHIR 资源。原始文件也可以存储为 FHIR*Binary* 资源，并由文档引用的附件指向。FHIR 规范允许文档引用的目标是另一台服务器上的文档、FHIR *Binary*资源，或任何其他系统中的文件 [50]。采用这种方式时，发送方和接收方必须就文件格式达成一致；WHIR 仅规定最低要求为 CSV 格式。

引用原始数据可减少每段录音对应的 FHIR 资源数量，但活动标签仍以 FHIR 资源表示。根据录音和注释策略，一个 HAR 会话可能产生数十至数百个片段级标签，在一项研究中可能因此产生数千个*ActivityLabelObservation*实例。按受试者、就诊或*derivedFrom*限定范围的检索依赖标准的观察搜索参数，服务器通常会为这些参数建立索引，但我们尚未在当前设置中对此进行测量（见第 4.4 节）。对于队列级分析（例如汇总一项研究中的标签持续时间），基于数据库的方法可能比逐条执行 FHIR REST 查询更高效，已发表的基准测试也提出了这一点 [51,52]。服务器实现后，FHIR 的 Bulk Data Access API 支持队列规模导出 [53]。当大量标签需要进行术语验证时，本地术语缓存也可能提高数据摄取性能 [54]。

### 4.3.3 FHIR 版本：R5 与 R4

我们直接基于 FHIR R5 而非 R4 构建了 WHIR（见第 2.2 节），因为无需与任何现有的 R4 部署保持兼容。Löbe 等人 [55] 在为德国医学信息学倡议的基于 FHIR 的核心数据集开发扩展模块时，面临着不同的情况。尽管 R5 改进了临床研究建模，但他们的模块必须与现有的基于 R4 的模块保持兼容，因此需要将部分 R5 构件反向移植到 R4。WHIR 没有这一限制。

PHD IG 同样基于 FHIR R4。其当前版本 v2.0.0（STU 2）没有对应的 R5 版本。选择 R5 使 WHIR 能够使用较新的资源定义，而无需与现有的 R4 实现保持兼容，但这限制了对基于 R4 的配置文件（例如 PHD IG 中的配置文件）的直接复用。

## 4.4 局限性与未来工作

WHIR 目前仅使用说明性示例实例进行了测试。通过 IG Publisher 的检查，表明经验证的工件和示例实例符合 FHIR R5 和 WHIR 配置文件的技术要求，但并不能证明独立开发的系统之间具备互操作性、在真实数据量下的性能或临床实用性。我们尚未

将完整数据集映射到其中，也未测量服务器性能。有些概念没有对应的 SNOMED CT 或 LOINC 代码，因此我们定义了本地代码。最后，FHIR R5 的部署范围仍不及 R4 广泛，许多临床 FHIR 服务器和电子健康记录接口仅支持 R4，这可能会减缓其采用。WHIR 使用的大多数 R5 元素在 R4 中都有对应项（例如，使用 *DeviceMetric.source* 而非 *DeviceMetric.device*）；少数没有对应项的元素，例如 *Observation.bodyStructure* 和 *Device.conformsTo*，可通过 HL7 发布的跨版本扩展在 R4 中承载。如果实施者对此感兴趣，我们计划在后续工作中提供 R4 版本。

后续开发可将原始数据文件格式扩展到最低限度的 CSV 之外。本地代码可提交给 SNOMED International 和 LOINC，而 WHIR 本身则可提交给 HL7 设备工作组，供其投票表决是否将其列为试用标准。多模态记录是另一个发展方向。例如，在移动功能性近红外光谱（fNIRS）中，头戴式加速度计可测量会使脑信号产生失真的头部运动 [56]。此类记录需要各设备共享时间基准，而 WHIR 目前仅能部分支持这一点。

## 4.5 结论

本设计与开发研究介绍了 WHIR，这是一个用于可穿戴 IMU 记录的 FHIR R5 实施指南，包含 9 个配置文件、4 个扩展、10 个代码系统和 15 个值集。基于对 23 个 HAR 数据集的综述，WHIR 提供了一种标准化表示方式，可在 FHIR 中整合设备和传感器元数据、传感器放置位置、原始信号的引用以及时间对齐的活动注释。针对基于机器学习的人体活动识别和居家老年评估的符合规范示例实例，展示了这种表示方式在研究和临床场景中的技术适用性。下一步，我们将把完整数据集映射到 WHIR，并测试由独立实现的系统之间进行的数据交换。WHIR 的设计支持扩展至其他可穿戴传感器，且该实施指南已公开发布，供重复使用和扩展 [19]。

# 致谢

我们使用 OpenAI 的 ChatGPT 协助编辑稿件文本，并使用 Anthropic 的 Claude 协助完善稿件中所报告数据的呈现方式。

# 资金支持

本研究由德国联邦研究、技术和空间部资助（项目编号：01ZZ2007，以及 SV-NUKLEUS-NUM-MB和ENRICH中的项目编号：01KX2626）。除这项公共资助外，作者及其所属机构未因所提交工作的任何方面而从第三方获得报酬或服务。

# 利益冲突

作者已声明不存在利益冲突。在过去36个月内，作者及其所属机构未从第三方获得任何可能被认为会影响所提交工作，或造成其可能受到影响之印象的付款或服务。

# 数据可用性

WHIR 实施指南（包括其 FHIR Shorthand (FSH) 源文件和所有示例实例）可在 GitHub [19] 上公开获取。本文所述版本（版本 0.1.0）已存档于 Zenodo [68]。

# 作者贡献

概念化：GC（主要负责）、SF、JW（协助）、HU（协助）

经费获取：SF

调查：GC（主要贡献），HHP（协助贡献）

方法学：GC（主要贡献），JW（协助贡献），HU（协助贡献）

资源：HHP（同等贡献），SF（同等贡献）

软件：GC

监督：SF

验证：GC

可视化：GC（主要负责），HHP（协助）

撰写——初稿：GC

撰写——审阅与编辑：GC（主要负责），JW（协助），HU（协助），HHP（协助），SF（协助）

# 伦理批准

本研究未招募人类参与者、未实施干预措施，也未收集新的健康数据。需求源自对公开可用数据集的已发表描述，所有 FHIR 示例实例均包含合成数据。因此，无需获得伦理委员会批准或知情同意。研究已遵循所有相关伦理准则。

# 缩略语

**30CST:** 30 秒椅子站立测试**ADL:** 日常生活活动**API:** 应用程序编程接口**BfArM:** 联邦药品和医疗器械研究所（德国联邦药品研究所和医疗器械）**CDISC：** 临床数据交换标准协会**CSV：**逗号分隔值**DiGA：**数字健康应用**DIM：** 领域信息模型**ECG：**心电图**EHR：**电子健康记录**FHIR：**快速医疗互操作性资源**fNIRS：** 功能性近红外光谱**FSH：**FHIR Shorthand**HAR：**人体活动识别**HL7：**Health Level Seven**IEEE：**电气与电子工程师协会**IG：**实施指南**IMU：**惯性测量单元**IQR：**四分位距**ISO：**国际标准化组织**JSON：**JavaScript对象表示法**LOINC：**逻辑观察标识符名称与代码**MDS：**医疗器械系统 **ML：**机器学习 **MMS：**MetaMotionS**OID：**对象标识符**PHD：**个人健康设备**REST：** 表述性状态转移**STU：**试用标准**SUSHI：** SUSHI将简写输入还原为完整形式**tLSBM：**吕贝克基本活动能力计时量表**TUG：**计时起立-行走测试**UCUM：** 统一计量单位代码**WHIR：** 可穿戴健康互操作记录

# 补充材料

**补充文件 1**

已评述的基于惯性测量单元的人体活动识别数据集（表 S1），以及原始IMU数据和传感器配置文件示例（图S1和图S2）。

**补充文件 2**

SNOMED CT中用于传感器放置位置的身体结构概念（表 S2）、AttachmentMethod代码（表 S3），以及WHIR定义的代码系统和值集（表 S4）。

# 参考文献


1. Seneviratne MG, Connolly SB, Martin SS, Parakh K. 从沙粒到临床瑰宝：实现可穿戴数据的潜力。《美国医学杂志》。 2023;136(2):136-142. https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2022.10.006 2. Diraco G, Rescio G, Caroppo A, Manni A, Leone A. 智慧生活服务与应用中的人体动作识别：情境感知、数据可用性、个性化与隐私。《传感器》（巴塞尔）。 2023;23(13):6040. https://doi.org/10.3390/s23136040 3. Izmailova ES, Wagner JA, Perakslis ED. 临床试验中的可穿戴设备：炒作与假设。《临床药理学与治疗学》。 2018;104(1):42-52. https://doi.org/10.1002/cpt.966 4. Arshad MH, Bilal M, Gani A. 人体活动识别：综述、分类体系与开放挑战。《传感器》（巴塞尔）。 2022;22(17):6463. https://doi.org/10.3390/s22176463 5. Lee K, Kim JH, Hong H, 等. 使用惯性测量单元传感器对肩痛康复训练进行分类的深度学习模型。《神经工程与康复杂志》。 2024;21(1):42. https://doi.org/10.1186/s12984-024-01343-8 6. Augustinov G, Nisar MA, Li F, Tabatabaei A, Grzegorzek M, Sohrabi K, Fudickar S. 基于可穿戴传感器数据的日常生活活动识别：基于Transformer的方法。载于：第七届传感器活动识别与人工智能国际研讨会论文集（*iWOAR '22*）。 ACM；2022：1-8. https://doi.org/10.1145/3558884.3558895 7. Ciortuz G, Hozhabr Pour H, Irshad MT, Nisar MA, Huang X, Fudickar S. 基于可穿戴设备的人体活动识别机器学习模型：一项比较研究。*Neurocomputing*. 2025:130911. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2025.130911 8. Hellmers S, Kromke T, Dasenbrock L, 等. 通过惯性测量单元测量爬楼梯功率——迈向家庭环境中的力量无监督评估. 收录于：*BIOSTEC 2018*论文集 — *HEALTHINF.* SciTePress；2018:39-47. https://doi.org/10.5220/0006543900390047 9. Hellmers S, Steen EE, Dasenbrock L, 等. 迈向家庭环境中身体机能的精简无监督技术评估. 收录于：第*11*届*EAI*国际会议论文集

医疗保健普适计算技术（*PervasiveHealth '17*）。*ACM*；*2017:207-216*。 https://doi.org/10.1145/3154862.3154882 10. Katz S, Ford AB, Moskowitz RW, Jackson BA, Jaffe MW. 老年人疾病研究。日常生活活动指数：生物与心理社会功能的标准化测量。《美国医学会杂志》。1963年;185(12):914-919. https://doi.org/10.1001/jama.1963.03060120024016 11. Hellmers S, Fudickar S, Büse C, 等. 技术支持的老年评估 . 收录于：环境辅助生活：第 9 届 AAL 大会，德国法兰克福，2016 年 4 月 20日至21日. 先进技术与社会变迁. 施普林格；2017:85-100. https://doi.org/10.1007/978-3-319- 52322-4 6_12. Stenger R, Hozhabr Pour H, Teich J, Hein A, Fudickar S. 单个腰戴式惯性测量单元传感器的步态事件检测与步态参数估计. 《传感器》（巴塞尔）. 2025年;25(20):6463. https://doi.org/10.3390/s25206463 13. Montero-Odasso M, Sarquis-Adamson Y, Speechley M, 等. 轻度认知障碍患者的双任务步态与新发痴呆的关联：步态与大脑研究结果. 《美国医学会神经病学杂志》. 2017年;74(7):857-865. https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2017.0643 14. Kang HS, Exworthy M. 穿戴未来——可穿戴设备助力用户更积极地承担自身健康与护理责任：范围综述. *JMIR移动健康与泛在健康*。 2022年;10(7):e35684. https://doi.org/10.2196/35684 15. Famá F, Faria JN, Portugal D. 用于患者无线生物监测的基于物联网的互操作架构，采用传感器贴片. 物联网。 2022年; 19:100547. https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100547 16. Ciortuz G, Wiedekopf J, Fudickar S. 医疗保健中可穿戴设备的集成与数字生物标志物在诊断和治疗中的应用. 收录于：Henke V, Hülsken G, Schneider H, Varghese J, 编. 健康数据管理。施普林格·加布勒；2024. https://doi.org/10.1007/978-3-658-43236-2_3117. 联邦药品和医疗器械研究所（BfArM）。《依据SGB V第139e条适用于数字健康应用的快速通道程序》。BfArM；2022. https://www.bfarm.de/SharedDocs/Downloads/DE/Medizinprodukte/diga_leitfaden.pdf 18. HL7 International / 设备。HL7 FHIR个人健康设备实施指南，v2.0.0（试用标准2）。HL7 International；2026. https://hl7.org/fhir/uv/phd/STU2/ 19. Ciortuz G. WHIR（可穿戴健康互操作记录）实施指南，版本0.1.0。Fudickar实验室，吕贝克大学；2026. https://fudickar-lab.github.io/WHIR/[访问日期：2026-10-15]。源代码：https://github.com/fudickar-lab/WHIR 20. Shin J, Hassan N, Miah ASM, Nishimura S. 跨多种数据模态的人体活动识别综合方法学调查. 《传感器》（巴塞尔）。 2025年;25:4028. https://doi.org/10.3390/s25134028 21. Humotion. 传感器 – SmarTracks Run. https://smartracksrun.hypecreate.com/sensors/[访问日期：2026-11-03]。22. MbientLab. MetaMotionS（MMS）。https://mbientlab.com/metamotions/ [访问日期：2026-11-03]。23. Reiss A. PAMAP2身体活动监测[数据集]。UCI机器学习资料库；2012年. https://doi.org/10.24432/C5NW2H

24. Reyes-Ortiz J, Anguita D, Ghio A, Oneto L, Parra X. 使用智能手机进行的人类活动识别[数据集]。UCI机器学习资料库；2013年。https://doi.org/10.24432/C54S4K 25. Bartschke A, Börner Y, Thun S. 通过FHIR访问Apple Watch心电图数据并实现互操作性。《医疗信息学与技术研究》。IOS Press；2021年。https://doi.org/10.3233/shti210076 26. HL7 International. FHIR R5规范：版本。HL7 International；2023年。https://hl7.org/fhir/versions.html 27. 微软。MedTech服务FHIR目标映射概述。Microsoft Learn。
h
t
t
p
s://l
earn.microsoft.com/en-us/azure/healthcare-apis/iot/overview-of-fhir-destination-mapping[访问日期：2026-10-03]28. Huynh T, Fritz M, Schiele B. 使用主题模型发现活动模式。载于：第*10*届普适计算国际会议论文集（*UbiComp '08*）。ACM；2008年：10-19。https://doi.org/10.1145/1409635.1409638 29. Roggen D, Calatroni A, Nguyen-Dinh L, Chavarriaga R, Sagha H. OPPORTUNITY活动识别[数据集]。UCI机器学习资料库；2010年。https://doi.org/10.24432/C5M027 30. Chavarriaga R, Sagha H, Calatroni A, Digumarti ST, Tröster G, Millán JdR, Roggen D. Opportunity挑战赛：用于基于身体佩戴式传感器进行活动识别的基准数据库。《模式识别快报》。2013年；34(15)：2033-2042。https://doi.org/10.1016/j.patrec.2012.12.014 31. Shoaib M, Bosch S, Incel OD, Scholten H, Havinga PJM. 融合智能手机运动传感器以识别身体活动。《传感器》（巴塞尔）。2014年；14(6)：10146-10176。https://doi.org/10.3390/s140610146 32. Altun K, Barshan B, Tunçel O. 使用微型惯性传感器和磁传感器对人类活动进行分类的比较研究。《模式识别》。2010年；43(10)：3605-3620。https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.04.019 33. Roggen D, Plotnik M, Hausdorff J. Daphnet步态冻结数据集[数据集]。UCI机器学习资料库；2010年。https://doi.org/10.24432/C56K78 34. Baños O, Damas M, Pomares H, Rojas I, Tóth MA, Amft O. 用于评估活动识别中传感器位移的基准数据集。载于：*2012*年*ACM*普适计算会议论文集（*UbiComp '12*）。ACM；2012年：1026-1035。https://doi.org/10.1145/2370216.2370437 35. Chen C, Jafari R, Kehtarnavaz N. UTD-MHAD：利用深度相机和可穿戴惯性传感器进行人体动作识别的多模态数据集。载于：*IEEE*图像处理国际会议论文集（*ICIP*）。IEEE；2015年：168-172。https://doi.org/10.1109/ICIP.2015.7350781 36. Reyes-Ortiz JL, Oneto L, Samà A, Parra X, Anguita D. 基于智能手机的转换感知人类活动识别。《神经计算》。2016年；171：754-767。https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.07.085 37. Shang M, Dedeyne L, Dupont J, 等。采用单个IMU和分层机器学习模型监测老年人的Otago锻炼。《*IEEE*神经系统与康复工程汇刊》。2024年；32：462-471。https://doi.org/10.1109/TNSRE.2024.3355299 38. HL7 International. FHIR R5规范：护理计划。HL7 International；2023年。https://hl7.org/fhir/R5/careplan.html

39. Campbell AJ, Robertson MC, Gardner MM, Norton RN, Tilyard MW, Buchner DM. 一项随机对照试验：全科医疗机构开展居家运动计划以预防老年女性跌倒。BMJ。1997年；315(7115)：1065-1069。https://doi.org/10.1136/bmj.315.7115.1065 40. Li F, Shirahama K, Nisar MA, Huang X, Grzegorzek M. 基于传感器模态分类的时间序列数据深度迁移学习。《传感器》（巴塞尔）。2020年；20(15)：4271。https://doi.org/10.3390/s20154271 41. Krupp S, Müller J, Kasten M, Kasper J. 老年住院患者的吕贝克基本移动能力量表：LSBM和计时LSBM。《老年学与老年医学杂志》。2025年；58(8)。https://doi.org/10.1007/s00391-025-02484-8 42. Gopinathan K, Kaloumenos N, Ajmera K, Matei A, Williams I, Davis A. FHIR FLI：用于存储、共享和分析生活方式数据的开源平台。载于：*ICT4AWE 2018*论文集。SCITEPRESS；2018年：227-233。https://doi.org/10.5220/0006791302270233 43. Pfyffer M, Amrein J, Bürkle T. 用于跌倒检测和报告的医疗保健辅助机器人开发。《医疗信息学与技术研究》。2025年；325：23-26。https://doi.org/10.3233/SHTI250211 44. Leroux H, Metke-Jimenez A, Lawley. 利用FHIR实现临床研究数据的语义互操作性。《生物医学语义学杂志》。2017年；8。https://doi.org/10.1186/s13326-017- 0148-7 45. Gay V, Leijdekkers P. 汇聚健康与健身数据，促进互联医疗：作为互操作性推动者的移动应用。《医学互联网研究杂志》。2015年；17(11)：e260。https://doi.org/10.2196/jmir.5094 46. HL7患者照护工作组。HL7 FHIR美国体力活动实施指南，v1.0.0（试用标准 1）。HL7 International；2023年。https://hl7.org/fhir/us/physical-activity/STU1/ 47. IEEE医学与生物学工程学会（Open mHealth工作组）。IEEE开放移动健康数据标准——元数据、睡眠和体力活动测量的表示。IEEE标准1752.1-2021。IEEE；2021年。https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9540821 48. SMART BEAR联盟。Smart Bear实施指南，版本3.4。2026年。
h
t
t
ps://s
mart-bearv3-4.na.icar.cnr.it/StructureDefinition-TimedMobilityTestObservation.html[访问日期：2026-11-11]49. Hozhabr Pour H, Ciortuz G, Lüers A, Fudickar S. 基于可穿戴传感器数据的在线活动分类数据流处理系统性能分析。载于：*BIOSTEC 2025*论文集——*HEALTHINF*。SciTePress；2025年：571-578。https://doi.org/10.5220/0013166100003911 50. HL7 International. FHIR R5规范：文档引用。HL7 International；2023年。https://hl7.org/fhir/R5/documentreference.html 51. Gulden C, Kampf M, Kraska D, 等。基于快速医疗互操作性资源的分析基准测试：RESTful服务器查询和大数据引擎的定量研究。《*JMIR*医学信息学》。2026年；14：e82924。https://doi.org/10.2196/82924 52. Grimes J, Szul P, Metke-Jimenez A, Lawley M, Loi K. Pathling：基于FHIR的分析。《生物医学语义学杂志》。2022年；13(1)：23。https://doi.org/10.1186/s13326-022-00277-1

53. Mandl KD, Gottlieb D, Mandel JC, 等. 一键式人口健康：SMART/HL7 FHIR 批量数据访问应用程序编程接口。*NPJ Digit Med.* 2020年;3:151. https://doi.org/10.1038/s41746-020-00358-4 54. Wiedekopf J, Drenkhahn C, Ingenerf J. ETL 作业中 FHIR 术语操作的性能基准测试。载于：关爱即分享——挖掘数据在健康与创新领域的价值。 *Stud Health Technol Inform.* 2023年;302. https://doi.org/10.3233/SHTI230244 55. Löbe M, Bartow M, Bialke M, 等. 利用 HL7 FHIR 支持医学研究的互操作性与透明性。载于：*Stud Health Technol Inform*（MEDINFO 2025）。IOS Press；2025年。https://doi.org/10.3233/SHTI250798 56. Al-Omairi HR, Fudickar S, Hein A, Rieger JW. 结合小波与基于相关性的信号增强，改进功能性近红外光谱数据中的运动伪影校正。《传感器》（巴塞尔）。2023年;23(8):3979. https://doi.org/10.3390/s23083979 57. Kwapisz JR, Weiss GM, Moore SA. 使用手机加速度计进行活动识别。*SIGKDD Explor.* 2011;12(2):74-82. https://doi.org/10.1145/1964897.1964918 58. Zhang M, Sawchuk AA. USC-HAD：用于普适活动识别的可穿戴传感器日常活动数据集。载于：*2012*年 *ACM* 普适计算会议论文集（*UbiComp '12*）。 ACM；2012年:1036-1043. https://doi.org/10.1145/2370216.2370438 59. Cheng HT, Sun FT, Griss M, Davis P, Li J, You D. NuActiv：利用基于语义属性的学习识别未见过的新活动。载于：第 *11* 届 *ACM* 移动系统、应用与服务国际年会论文集（*MobiSys '13*）。 ACM；2013年:361-374. https://doi.org/10.1145/2462456.2464438 60. Banos O, Garcia R, Saez A. MHEALTH [数据集]. UCI机器学习资料库；2014年。https://doi.org/10.24432/C5TW22 61. Stisen A, Blunck H, Bhattacharya S, 等. 智能设备各不相同：评估并缓解移动感知异质性对活动识别的影响。载于：第 *13* 届 *ACM* 嵌入式网络传感系统会议论文集（*SenSys '15*）。 ACM；2015年:127-140. https://doi.org/10.1145/2809695.2809718 62. Sztyler T, Stuckenschmidt H. 可穿戴设备的体上定位：位置感知活动识别调查。载于：*IEEE* 普适计算与通信国际会议论文集（*PerCom*）。 IEEE；2016年:1-9. https://doi.org/10.1109/PERCOM.2016.7456521 63. Vavoulas G, Chatzaki C, Malliotakis T, Pediaditis M, Tsiknakis M. MobiAct 数据集：使用智能手机识别日常生活活动。载于：信息与通信技术促进健康老龄化与福祉国际会议论文集（*ICT4AWE*）。 SciTePress；2016年:143-151. https://doi.org/10.5220/0005792401430151 64. Micucci D, Mobilio M, Napoletano P. UniMiB SHAR：利用智能手机加速度数据进行人体活动识别的数据集。*Appl Sci.* 2017年;7(10):1101. https://doi.org/10.3390/app7101101 65. Malekzadeh M, Clegg RG, Cavallaro A, Haddadi H. 保护感知数据免受敏感推断。载于：第 *1* 届分布式系统隐私设计研讨会论文集（*W-P2DS'18*）。 ACM；2018年:文章 2. https://doi.org/10.1145/3195258.3195260 66. Malekzadeh M, Clegg RG, Cavallaro A, Haddadi H. 移动传感器数据匿名化。载于：物联网设计与实现国际会议论文集（*IoTDI '19*）。 ACM；2019年:49-58. https://doi.org/10.1145/3302505.3310068

67. Nisar MA, Shirahama K, Li F, Huang X, Grzegorzek M. 基于可穿戴传感器的日常生活活动识别的排序池化方法。《传感器》（巴塞尔）。2020年；20(12)：3463。https://doi.org/10.3390/s20123463 68. Ciortuz G. WHIR（可穿戴健康互操作记录）实施指南。版本 0.1.0。Zenodo；2026年。https://doi.org/10.5281/zenodo.24287589

# 补充材料

## 关于：利用快速医疗互操作性资源（FHIR）交换可穿戴惯性传感器数据：设计与开发研究

Gabriela Ciortuz[1,2], 理学硕士；Joshua Wiedekopf[2], 理学硕士；Hannes Ulrich[3], 自然科学博士；Hawzhin Hozhabr Pour[1], 工学博士；Sebastian Fudickar[2,4],自然科学博士（特许任教资格）

方括号中的参考文献编号指向主文稿的参考文献列表。

## 补充文件 1

表 S1. 第 2.1 节中审查的与医疗保健相关的基于IMU的人类活动识别数据集，包括完整的活动列表、传感器的数量和类型、采样率、传感器放置位置及应用领域。

| 数据集 | 活动（完整列表） | Sensors（数量 / 类型） | 采样率 | 佩戴位置（身体部位） | 应用领域 |
|---|---|---|---|---|---|
| TUD [28] | 坐着进行桌面活动、躺着阅读或使用电脑、吃晚餐、自由行走、驾驶汽车、吃午餐、在白板前讨论、参加演示、骑自行车、观看电影、站着打电话、手提物品行走其他、步行、取餐厅食物、坐着喝咖啡、排队、个人卫生、使用厕所，扇烤肉炉、洗碗、跪着做其他事情、坐着打电话、跪着生火烧烤，摆餐桌、站着喝咖啡、准备食物，吃早餐、刷牙、站着使用厕所，站着交谈、洗手、制作咖啡、跑步、擦白板 | 2 × Porcupine（三维加速度计、微控制器、时钟、9 二值倾斜开关、温度传感器、2 个光传感器） | ≈ 100 赫兹（原始数据）；已存储以 2.5 赫兹的频率已发表的 set | 右侧臀部口袋；惯用手（右手）腕部 | 老年护理常规识别；长期活动监测 |
| DSADS [32] | 坐姿、站立、仰卧、右侧卧、上楼梯下楼梯、站在静止电梯内、站在运行电梯内、在停车场行走、在跑步机上行走（4 公里/小时，平地）、在跑步机上行走（4 公里/小时，15° 坡度）、在跑步机上跑步（8 公里/小时）、踏步机锻炼、使用椭圆机锻炼、骑健身车（水平式）、骑健身车（立式）、划船、跳跃、打篮球 | 5 × Xsens MTx（每个：三轴加速度计 + 3 轴陀螺仪 + 3 轴磁力计） | 25赫兹 | 双膝（两侧），胸部、双腕 | 远程监测老年人、跌倒检测，居家康复，多模态生命体征整合 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Daphnet [33] | 直线行走期间的步态冻结（FoG）检测，FoG 转弯时的检测，日常生活活动任务（取咖啡、开门、在房间之间移动） | 3 × 加速度计（穿戴式） | –（设备特定c) | 髋部和腿部（一个髋部上的传感器，每条腿上有两个） | 帕金森病中的FoG检测 |
| WISDM [57] | 步行、慢跑、上楼梯、下楼梯、坐姿，站立 | 1 × 智能手机加速度计（≈ 20 采样值 / s) | ≈ 20 样本/秒 | 口袋（通常是前侧口袋） | 病疾病基于活动的手机个性化；健康档案生成；大规模活动监测 |
| PAMAP2 [23] | 躺卧、坐姿、站立、步行、跑步、骑自行车、北欧式步行、熨烫、吸尘、跳绳、上楼梯，下楼梯、看电视、使用电脑、驾驶汽车，踢足球 | 3 × 惯性测量单元（Colibri、Trivisio）+ 心率监测 | 100 赫兹 | 手腕（优势臂），胸部（中央）、脚踝（优势侧腿部） | 身体活动监测，用于老化人群；多模态传感器研究 |
| USC-HAD [58] | 12种低级日常生活活动（步行向前/向左/向右、上楼/下楼、跑步、跳跃、坐下，站立、睡眠、乘电梯上行/下行） | 1 × MotionNode（六自由度惯性测量单元） | –（设备特定c) | 右前侧髋部（小袋） | 用于算法比较；健身与老年护理 |
| REALDISP [34] | 33种健身动作（步行、慢跑、跑步、各种跳跃、躯干扭转、腰部弯曲、抬臂、划船、骑自行车，……） | 9 × 惯性测量单元（加速度计 + 陀螺仪 + 磁力计） | 50赫兹 | 躯干（背部），左/右上臂，左/右前臂，左/右大腿，左/右小腿 | 详细健身分析；多传感器人体活动识别研究 |
| UCI HAR [24] | 6 种日常生活活动（站立、坐姿、躺卧、步行、下楼、上楼） | 1 × 三星 Galaxy S II（加速度计 + 陀螺仪） | 50赫兹 | 腰部：腰带左侧（第一次试验）；位置由受试者选择（第二次试验） | 通用活动识别基线 |
| 锻炼-A 活动 [59] | 10种锻炼动作（凳上臂屈伸、深蹲、侧平举、肩部推举、弯举、肱三头肌伸展、胸部推举、俯卧撑、飞鸟、俯身row) | 1 × Nexus S 4G（加速度计 + 陀螺仪）+ 2 × MotoACTV（加速度计） | 30 赫兹 | 手臂（臂带）、手腕（手表），髋部（夹子） | 健康与健身监测；居家锻炼追踪 |
| OPPORTUNITY [29,30] | 17 种手势（打开/关闭抽屉、洗碗机、冰箱、门、杯子，桌子，……）+ 4 运动模式（站立、坐下、步行、躺卧）+ null | 72 个传感器（24 × 蓝牙低功耗加速度计/陀螺仪、Sun SPOTs，InertiaCube3、Ubisense，磁传感器） | –（混合） | 7 × 人体惯性测量单元（右/左前臂，右/左上臂，背部、右鞋、左鞋）+ 环境 Sensors | 医疗保健与辅助技术研究；基于手势的交互 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Shoaib [31] | 步行、跑步、坐姿、站立、慢跑、骑自行车、上楼梯，下楼梯 | 1 × 三星 Galaxy S II（加速度计、陀螺仪、磁力计，线性加速度计） | 50赫兹 | 右侧/左侧牛仔裤口袋；腰带（右腿侧）；右上臂；右手腕 | 医疗保健 & 辅助生活监测 |
| MHEALTH [60] | 12 种活动（站立、坐姿、躺卧、步行、上下楼梯、弯腰，抬臂、屈膝下蹲、骑自行车、慢跑、跑步、跳跃） | Shimmer2（加速度计 + 陀螺仪 + 磁力计）+ 胸部心电图 | 50赫兹 | 胸部、右手腕、左脚踝（弹性带） | 移动健康基准测试；多模态身体感知 |
| HHAR [61] | 骑自行车、坐姿、站立、步行、上楼梯、下楼梯 | 8 × 智能手机 + 4 × 智能手表 | –（设备特定c） | 腰部的手机小袋；智能手表每只手臂上 | 大规模活动识别基准测试上 |
| UTD-MHAD [35] | 27种动作（体育运动、手势、日常活动、训练练习） | RGB视频、深度视频，骨架、惯性传感器（50赫兹，±8 克，±1000 °/秒） | 50赫兹 | 右手腕、右大腿 | 多模态人类活动识别；体育运动与康复 |
| RealWorld [62] | 步行、慢跑、上下楼梯、跳跃、躺卧、站立、坐姿，跑步 | 智能手机（Galaxy S4）+ MotoACTV 智能手表 | 50赫兹 | 胸部、前臂、头部，胫部、大腿（口袋），上臂、腰部（各种口袋/臂带/腰带s） | 位置感知活动识别；体上定位 |
| Mobi-Act [63] | 9 种日常生活活动 + 4 跌倒类型（向前卧倒、向前跪倒、侧向卧倒、向后坐在椅子上） | 1 × 三星 Galaxy S3 加速度计 | 20 赫兹（5 秒时间窗口，80 %重叠） | 自由形式（任意口袋或腰带佩戴方向） | 健康老龄化与电子健康；跌倒检测 |
| HAPT / SBHAR [36] | 实时识别站立、步行、坐站转换、坐姿、上楼、坐卧转换等。 | 2 × 加速度计 + 1 × 陀螺仪 | 50赫兹 | 腰部的智能手机 | 实时健康监测 |
| UniMiB SHAR [64] | 9种日常生活活动 + 8 跌倒类型（不同方向、保护策略，晕厥） | 1 × 三星 Galaxy Nexus（加速度计） | 50赫兹 | 裤子前侧口袋（左/右） | 跌倒检测研究；日常生活活动监测 |
| 运动 Sense [65,66] | 下楼、上楼、步行、慢跑、坐姿、站立 | iPhone 6s（加速度计、重力、陀螺仪，姿态），通过 SensingKit 提供 12 个通道 SensingKit | 50赫兹 | 前袋 | 一般活动监测通过移动设备 |
| CogAge 1 [40] | 61 项原子活动（6 种姿态状态 + 55 行为动作） | 智能手机（加速度计、重力，陀螺仪、线性加速度计、磁力计 @ 200 赫兹) + Microsoft Band 2（加速度计、陀螺仪 @ 67 赫兹) + JINS MEME 眼镜（加速度计、陀螺仪 @ 20 赫兹，眨眼和眼球运动） | 200 赫兹（手机）/ 67 赫兹（手环）/ 20 赫兹（眼镜） | 智能手机前左侧口袋；左侧手环手臂；头上戴着眼镜 | 详细活动机器学习训练；老年医学评估 |
| CogAge 2 | 相同的原子活动集 + 7 复合活动（刷牙、清洁 | LG G5 智能手机（加速度计， | 200 赫兹 | 智能手机前左侧 | 扩展活动 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| [67] | 房间、处理药物、准备食物、整理头发、使用手机、洗手） | 重力、陀螺仪、线性加速度计、磁力计 @ 200 赫兹） + 华为手表（加速度计、陀螺仪 @ 100 赫兹） + JINS MEME 眼镜（加速度计 @ 20 赫兹） | （手机）/ 100 赫兹（手表）/ 20 赫兹（眼镜） | 口袋；手表戴在左臂上手臂；眼镜戴在头部上 | 设置为医疗保健与居家监测研究 |
| Lee 2024 [5] | 10种肩部康复训练（前屈、外展、外旋旋转、内旋、肩胛平面抬举、水平外展、水平内收、伸展、环转、静止） | 1 × 商用惯性测量单元（三轴加速度计 + 3轴陀螺仪），嵌入在智能手机或专用可穿戴设备 | 50赫兹 | 上臂（肱骨中段）带子 | 自动分类肩痛康复锻炼，用于居家物理治疗 |
| Shang 2024 [37] | 8项Otago锻炼（膝关节伸展、膝关节屈曲、髋关节外展，髋关节伸展、提踵、抬趾、坐站转换、步行） | 1 × 单体佩戴式惯性测量单元（三轴加速度计 + 3轴陀螺仪） | 100 赫兹（降-采样至 20 赫兹以进行深度学习） | 腰部（中线，正肚脐上方） | 居家跌倒预防与老年医学康复；自动依从性监测 |

来源：自有既有工作、CogAge 1 和 2；文献综述、Daphnet、REALDISP、Lee 2024 和 Shang 2024；所有其他数据集，Shin 等人 [20]。

| Time-Date | Acc-X | Acc-Y | Acc-Z | Gyro-X | Gyro-Y | Gyro-Z | Mag-X | Mag-Y | Mag-Z | Power-Voltage |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1697535964064,00 | -0,08 | 0,936 | 7,664 | -0,073 | 0,007 | 0,023 | -25,870 | -5,410 | 56,150 | 4,016 |
| 1697535964068,00 | -0,09 | 1,070 | 8,460 | -0,073 | 0,007 | 0,023 | -25,780 | -5,689 | 56,058 | 4,016 |
| 1697535964072,00 | -0,099 | 1,146 | 8,930 | -0,073 | 0,007 | 0,023 | -25,690 | -5,968 | 55,966 | 4,016 |
| 1697535964076,00 | -0,099 | 1,194 | 9,208 | -0,073 | 0,007 | 0,023 | -25,960 | -5,593 | 55,686 | 4,016 |
| 1697535964080,00 | -0,109 | 1,213 | 9,381 | -0,073 | 0,007 | 0,023 | -26,230 | -5,219 | 55,405 | 4,016 |
| 1697535964084,00 | -0,099 | 1,222 | 9,467 | -0,073 | 0,007 | 0,023 | -25,870 | -4,948 | 55,680 | 4,016 |
| 1697535964088,00 | -0,099 | 1,232 | 9,525 | -0,073 | 0,007 | 0,023 | -25,510 | -4,677 | 55,955 | 4,016 |
| 1697535964092,00 | -0,071 | 1,251 | 9,563 | -0,108 | 0,061 | -0,061 | -25,690 | -4,951 | 55,772 | 4,016 |
| 1697535964096,00 | -0,071 | 1,251 | 9,573 | -0,001 | 0,002 | -0,004 | -25,870 | -5,225 | 55,589 | 4,016 |
| 1697535964100,00 | -0,08 | 1,251 | 9,554 | 0,004 | 0,001 | -0,002 | -25,600 | -5,045 | 55,958 | 4,016 |
| 1697535964104,00 | -0,08 | 1,251 | 9,544 | 0,003 | 0,001 | -0,001 | -25,330 | -4,865 | 56,328 | 4,016 |
| 1697535964108,00 | -0,08 | 1,261 | 9,544 | 0,003 | 0,004 | -0,002 | -25,690 | -4,674 | 56,143 | 4,016 |
| 1697535964112,00 | -0,08 | 1,261 | 9,544 | 0,001 | 0,005 | -0,002 | -26,050 | -4,483 | 55,958 | 4,016 |
| 1697535964116,00 | -0,09 | 1,261 | 9,544 | 0,001 | 0,006 | -0,002 | -26,140 | -5,313 | 55,778 | 4,016 |
| 1697535964120,00 | -0,08 | 1,270 | 9,544 | 0,001 | 0,006 | -0,001 | -26,230 | -6,143 | 55,599 | 4,016 |
| 1697535964124,00 | -0,09 | 1,261 | 9,544 | 0 | 0,005 | -0,002 | -26,050 | -5,407 | 55,778 | 4,016 |
| 1697535964128,00 | -0,08 | 1,251 | 9,554 | 0,001 | 0,005 | -0,001 | -25,870 | -4,671 | 55,958 | 4,016 |
| 1697535964132,00 | -0,09 | 1,261 | 9,563 | 0 | 0,005 | -0,002 | -25,780 | -4,672 | 55,770 | 4,016 |
| 1697535964136,00 | -0,099 | 1,261 | 9,554 | 0,001 | 0,005 | -0,002 | -25,690 | -4,674 | 55,583 | 4,016 |
| 1697535964140,00 | -0,09 | 1,261 | 9,563 | 0,003 | 0,002 | -0,001 | -25,960 | -5,039 | 55,309 | 4,016 |
| 1697535964144,00 | -0,099 | 1,261 | 9,573 | 0,004 | 0 | -0,001 | -26,230 | -5,404 | 55,034 | 4,016 |
| 1697535964148,00 | -0,099 | 1,261 | 9,573 | 0,004 | 0,001 | -0,002 | -26,230 | -5,034 | 55,124 | 4,016 |
| 1697535964152,00 | -0,099 | 1,261 | 9,563 | 0,005 | 0 | -0,001 | -26,230 | -4,664 | 55,215 | 4,016 |
| 1697535964156,00 | -0,09 | 1,270 | 9,563 | 0,004 | -0,002 | 0 | -26,050 | -4,852 | 55,494 | 4,016 |
| 1697535964160,00 | -0,09 | 1,270 | 9,563 | 0,002 | 0,001 | -0,002 | -25,870 | -5,040 | 55,774 | 4,016 |
| 1697535964164,00 | -0,08 | 1,270 | 9,563 | 0,003 | 0 | -0,001 | -25,780 | -4,765 | 55,585 | 4,016 |

图 S1. Humotion SmarTracks 传感器腰带以 250 赫兹记录的 CSV 格式原始IMU数据示例：Unix 时间戳（毫秒）、三轴加速度计、陀螺仪、磁力计和供电电压。

```
[Chan.10]
Type=Mag
ChanName=Y
ID=165
Freq=250.0
Sign=1
Unit=uT
Max_Value=400.000000
Min_Value=-400.000000

[Chan.11]
Type=Mag
ChanName=Z
ID=166
Freq=250.0
Sign=1
Unit=uT
Max_Value=400.000000
Min_Value=-400.000000

[Chan.12]
Type=Power
ChanName=Voltage
ID=155
Freq=250.0
Sign=0
Unit=V
Max_Value=6.000000

[Measure]
Start=2023-10-17T:10:46:04:064
Stop=2023-10-17T:12:20:47:064
DurationInMS=2083636
Duration=2083
```

```
[Ini]
Version=1
FloatValues=1
CustomFormat=2

[Channels]
Count=12

[Compression]
FrameSize=45
RecordsPerSecond=250.0
SuperFrameCount=1

[SuperFrame.1]
Freqs=250.0

[Chan.1]
Type=Time
ChanName=Date
ID=260
SecondsFromStartFactor=1000

[Chan.2]
Type=Acc
ChanName=X
ID=121
Freq=250.0
Sign=1
Unit=m/s^2
Max_Value=235.359604
Min_Value=-235.359604
```

图 S2. 随附传感器配置文件的摘录：（a）文件头和通道定义；（b）更多通道定义和测量部分，其中列出了每个通道的采样频率、单位和数值范围。

# 补充文件 2

表 S2。所审查 HAR 数据集中报告的传感器放置位置对应的 SNOMED CT 身体结构概念，以及关于特异性和覆盖范围的注释。

| 定位和数据集 | 代码系统 | Code | 显示名称 | 注释 |
|---|---|---|---|---|
| 胸部（DSADS [32]），MHEALTH [60], RealWorld [62] | http://snomed.info/sct | 51185008 | 胸廓结构（身体结构） | 同义词：胸部 |
| 胸部中央 [23] | http://snomed.info/sct | 279233000 | 中央表面区域结构<br>胸部（身体结构）的体表区域 | 同义词：胸部中央表面区域；更多比前一个代码更具体，当数据集会说明传感器位于胸部（通常是 HAR 数据集)。 |
| 躯干（背部）（REALDISP [34]），背部（OPPORTUNITY [29,30]） | http://snomed.info/sct | 77568009 | 后部区域的结构<br>躯干（身体结构） | 同义词：背部 |
| 躯干（背部）（REALDISP [34]），背部（OPPORTUNITY [29,30]） | http://snomed.info/sct | 272612002 | 体表区域的结构<br>背部（身体结构） | 同义词：背部表面区域；比前一个代码更具体，因为它说明传感器位于背部表面，这是惯性测量单元传感器的情况。 |
| 安装在腰部左侧的腰带，由受试者根据自己的偏好[24], 腰部[37] | http://snomed.info/sct | 33673004 | 腰部结构（体表区域）（身体结构） | 同义词：腰部；未指明左侧腰部，用户可能会认为传感器应该位于腰部中央。 |
| 髋部 [29,30,33,59] | http://snomed.info/sct | 29836001 | 髋部区域结构（身体结构） | 同义词：髋部区域；未指定侧别。 |
| 右侧臀部口袋（TUD [28]）、右前髋部 [58] | http://snomed.info/sct | 287579007 | 右侧髋部区域结构（身体结构） | 同义词：右髋部 |
| 头部（用腰带固定，论文中的图片显示智能手机放置在左侧头部的左侧）（RealWorld [62]），眼镜放置在受试者的头部 [40], 佩戴的眼镜 [67] | http://snomed.info/sct | 69536005 | 头部结构（身体结构） | 同义词：头部；未明确指出具体位置在头部。 |
| 优势腕，优势臂的手腕 [23,28], 手表 [59] | http://snomed.info/sct | 8205005 | 腕部区域结构（身体结构） | 同义词：手腕；未指定侧别；优势侧侧别未涵盖。 |
| 优势腕，优势臂的手腕 [23,28], 手表 [59] | http://snomed.info/sct | 244002004 | 腕部区域表面结构<br>区域（身体结构） | 同义词：腕部表面区域；侧别未指定，比前一个代码更具体，因为它明确指出传感器位于手腕的体表，IMU 的情况也是如此传感器；未涵盖优势侧。 |
| 右手腕（DSADS [32], OPPORTUNITY [29,30], | http://snomed.info/ | 9736006 | 右腕区域的结构 | 同义词：右手腕；比.....更具体 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Shoaib [31], MHEALTH [60], UTD-MHAD [35]) | sct | | （身体结构） | 之前的代码，因为它指定了右侧手腕。 |
| 左腕部（DSADS [32], OPPORTUNITY [29,30], 左臂 [40,67] | http://snomed.info/sct | 5951000 | 左腕部区域结构（身体结构） | 同义词：左腕部；比以下内容更具体：之前的手腕代码，因为它明确指定了左腕部。 |
| 上臂（受影响手臂的外侧，与肱骨纵轴对齐） | http://snomed.info/sct | 34894009 | 上臂外侧表面结构（身体结构） | 同义词：上臂外侧表面；侧面为未指定；未涵盖受影响部位。 |
| 右上臂 (REALDISP [34], OPPORTUNITY [29,30], Shoaib [31], RealWorld [62], 右上臂_, 右上臂^ (OPPORTUNITY [29,30]) | http://snomed.info/sct | 368209003 | 右上臂结构 (身体结构） | 同义词：右上臂。 |
| 左上臂（REALDISP [34], OPPORTUNITY [29,30], 左上臂_，左上臂^（OPPORTUNITY [29,30]） | http://snomed.info/sct | 368208006 | 左上臂结构（身体结构） | 同义词：左上臂。 |
| 右下臂（REALDISP [34]），OPPORTUNITY [29,30] | http://snomed.info/sct | 64262003 | 右前臂结构（身体结构) | 同义词：右前臂；一些数据集使用“右下臂”这一术语。 |
| 前臂（RealWorld [62]），左下臂（REALDISP [34], OPPORTUNITY [29,30]） | http://snomed.info/sct | 66480008 | 左前臂的结构（身体结构） | 同义词：左前臂；某些数据集使用“左下臂”一词。 |
| 智能手机的放置位置可自由选择（Mobi-Act [63]） | http://snomed.info/sct | 68367000 | 大腿结构（身体结构） | 同义词：大腿；用作自由选择手机位置时最接近的身体部位<br>对于自由选择的手机位置；自由放置方式本身通过以下内容记录：附着方法代码 无约束携带（表 S3）。 |
| 右大腿（REALDISP [34], UTD-MHAD [35]） | http://snomed.info/sct | 11207009 | 右大腿结构（身体结构） | 同义词：右大腿。 |
| 左大腿（REALDISP [34]），大腿/裤袋（RealWorld [62]） | http://snomed.info/sct | 61396006 | 左大腿结构（身体结构） | 同义词：左大腿。 |
| 右小腿（REALDISP [34]） | http://snomed.info/sct | 722116009 | 右小腿小腿结构（身体结构） | |
| 左小腿（REALDISP [34]） | http://snomed.info/sct | 722115008 | 左下肢小腿的结构（身体结构） | |
| 胫部（RealWorld [62]） | http://snomed.info/sct | 78234002 | 胫部结构（身体结构） | 同义词：胫部 |
| 优势侧踝部，优势腿的踝 [23] | http://snomed.info/sct | 244019002 | 踝部表面区域结构脚踝（身体结构） | 同义词：踝部表面区域；未指定侧别；与优势侧放置限定符（表5）。 |
| 优势侧踝部，优势腿的踝 [23] | http://snomed.info/sct | 6685009 | 右踝结构（身体结构） | 同义词：右踝；仅在优势侧已知该侧为右侧；否则使用 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | 244019002，带有优势限定词。 |
| 左踝（MHEALTH [60]） | http://snomed.info/sct | 51636004 | 左踝结构（身体结构） | 同义词：左踝 |
| 右手 [29,30] | http://snomed.info/sct | 78791008 | 右手结构（身体结构） | 同义词：右手 |
| 左手 [29,30] | http://snomed.info/sct | 85151006 | 左手结构（身体结构） | 同义词：左手 |
| 在膝部两侧，右膝的右侧膝部（DSADS [32], 右膝^ （该图像的传感器的放置显示传感器用腰带固定，恰好位于膝部正上方），右膝部_ （膝部下方）[29,30] | http://snomed.info/sct | 6757004 | 右膝区域结构（身体结构） | 同义词：右膝；未指明膝部的侧别用户可能会认为传感器应置于膝部中央。 |
| 在膝部两侧，左膝的左侧（DSADS [32]），左膝^，左膝_ [29,30] | http://snomed.info/sct | 82169009 | 左膝区域结构（身体结构） | 同义词：左膝；未指明膝部的侧别用户可能会认为传感器应放置在膝部中央。 |
| 第三腰椎（UseCase1、UseCase2） | http://snomed.info/sct | 263301002 | 第三腰椎水平（身体结构） | |
| 右侧臀部口袋 [28], 口袋（WISDM（无线传感器数据挖掘）数据集 [57] ），右侧牛仔裤口袋（Shoaib [31], 前侧裤袋（UniMiB SHAR [64])、前袋（Motion Sense [65,66]）、（UseCase1、UseCase2） | http://snomed.info/sct | 37117007 | 右腹股沟区结构（身体结构） | 同义词：右腹股沟区 |
| 裤袋（RealWorld [62]），左侧牛仔裤口袋（Shoaib），前侧裤袋（UniMiB SHAR [64]），前袋（Motion Sense [65,66]），左侧口袋牛仔裤 [40], 左侧口袋 [67] | http://snomed.info/sct | 85119005 | 左腹股沟区结构（身体结构） | 同义词：左腹股沟区 |

表 S3 列出了填充由 *身体结构附着方法* 伸展（表 4）约束的 AttachmentMethod 值集的代码。只有一个概念可以从 SNOMED CT 重用，即通用的带子（48990009）；没有外部代码系统涵盖其余机制，且无法达到所审查数据集报告这些机制时的细致程度，因此在 AttachmentMethodCS 中本地定义了 12 个代码。其中两个代码——手表表带和弹性带——的定义范围有意窄于重用的 SNOMED CT 带子概念，因为不同数据集对手表式扣带、松紧带和普通带子之间的区别报告得足够一致，值得予以保留。

表 S3。构成 AttachmentMethod 值集的代码，以及促使纳入各代码的数据集附件机制；这些代码通过 身体结构附着方法 伸展（表 4）进行绑定。

| 附着方法和数据集 | 代码系统 | Code | 显示名称 | 定义 |
|---|---|---|---|---|
| 右侧臀部口袋 [28], 口袋 [57], 右侧/左侧牛仔裤口袋 [31], 前侧裤袋口袋 [64], 前袋 [65,66], 左侧口袋 [40,67] | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/CodeSystem/attachment-method-cs | 口袋 | 口袋 | 设备松散地放在衣物内口袋中，未以其他方式固定在身体上。 |
| 腰带 [31], 腰带 [24] | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/CodeSystem/attachment-method-cs | belt | Belt | 穿在腰带上或夹在腰带上的设备腰带上。 |
| 右前髋部腰包 [58], 腰包 [61] | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/CodeSystem/attachment-method-cs | 小袋 | 小袋 | 放在专用小袋中携带的设备佩戴在身体上，与衣物口袋不同。 |
| 髋部夹 [59] | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/CodeSystem/attachment-method-cs | clip | Clip | 直接固定在衣物上的设备，配有夹子直接固定在衣物上，无需使用口袋、小袋或腰带。 |
| JINS MEME 眼镜 [40,67] | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/CodeSystem/attachment-method-cs | 框架安装式 | 框架安装式 | 安装在眼戴设备的框架上。 |
| 右/左鞋 [29,30] | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/CodeSystem/attachment-method-cs | 鞋类安装式 | 鞋类-安装式 | 内置于鞋类或固定在鞋类上的设备。 |
| 臂带 [59,62], Microsoft Band 2 开启左臂 [40] | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/CodeSystem/attachment-method-cs | 臂带 | 臂带 | 用臂带固定在上臂上的设备臂带。 |
| MotoACTV 智能手表 [62], 智能手表 [61], 华为手表 [67] | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/CodeSystem/attachment-method-cs | 手表表带 | 手表表带 | 通过手表式带子佩戴在手腕上的设备，例如智能手表或腕戴式传感器，有别于重复使用的通用带子概念来自 SNOMED CT。 |
| 在审阅的语料中未观察到（表 S1）；纳入医用级粘性传感器贴片 | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/CodeSystem/attachment-method-cs | 粘合剂 | 粘合剂 | 直接固定在皮肤上的设备，具有人片在线观看医用级粘合膜或贴片，不使用任何带子、夹子或服装涉及。 |
| 在审查的语料库中未观察到（表 S1）；适用于缝制的传感器到服装中或与服装集成 | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/CodeSystem/attachment-method-cs | 服装集成 | 服装集成 | 内置于、缝入或以其他方式集成到服装中，使得服装本身承载传感器，而不是而不是拿着一个独立的、可拆卸的设备。 |
| 自由式口袋或腰带方向 [63] | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/CodeSystem/attachment-method-cs | 无约束携带 | 不受限制的携带 | 参与者携带的设备，未采用规定的佩戴方式或位置，例如随意放置的智能手机 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | 参与者在<br>录音期间选择的。明确记录下来，以便将<br>刻意不受约束的协议<br>与附着方法区分开来<br>，后者只是未知或<br>未报告。 |
| 弹性带 [60] | https://fudickar-lab.github.io/WHIR/<br>CodeSystem/attachment-method-cs | 弹性带 | 弹性带 | 通过弹性带佩戴在身体上的设备<br>带子，与通用型带子不同<br>沿用自 SNOMED 的带子概念<br>CT. |
| 上臂（肱骨中段）带子 [5] | http://snomed.info/sct | 48990009 | 带子 | 沿用的通用型带子概念<br>来自 SNOMED CT，适用于既非手表式也非弹性的<br>带子。 |

表 S4. 拟议模型定义的代码系统和值集，以及表 3 和表 4 中的配置文件级和扩展级制品。

| Name | Kind | 概念 / 来源 | 绑定 | 注释 |
|---|---|---|---|---|
| PlacementQualifierCS | Code<br>代码系统 | 2 个本地定义概念（首选、受影响） | — | 提供 PlacementQualifier 值集使用的本地代码<br>（表5） |
| AttachmentMethodCS | Code<br>代码系统 | 12 个本地定义概念 | — | 提供附件方法值集所使用的本地代码<br>（表 S3） |
| HARActivityLabelsCS | Code<br>代码系统 | 54 个本地定义概念 | — | 提供 HARActivityLabels 值集使用的代码 |
| 老年评估<br>标签CS | Code<br>代码系统 | 34 个本地定义概念 | — | 提供老年评估标签值集所用的代码<br>Set |
| ADLLabelsCS | Code<br>代码系统 | 42个本地定义的概念 | — | 提供 ADLLabels 值集所用的代码 |
| AnnotationProvenanceCS | Code<br>代码系统 | 4 个本地定义概念（人类专家、人类<br>审核、半自动化、算法生成） | — | 提供注释来源值集所使用的代码 |
| 传感器模态代码系统 | 代码系统<br>m | 6 个本地定义概念（加速度计、线性<br>加速度、重力、陀螺仪、磁力计、<br>姿态） | — | 提供 SensorModality 和<br>IMU设备度量类型值集 |
| 传感器轴代码系统 | 代码系统<br>m | 4 个本地定义概念（x、y、z、幅值） | — | 提供传感器轴值集所用的代码 |
| 设备标识符类型代码系统 | 代码系统<br>m | 3 个本地定义概念（SYSID、BTMAC、<br>ETHMAC) | — | 传感器设备和网关的设备标识符类型；相同<br>代码（与 PHD IG 中的 Continua设备标识符相同），在本地定义<br>因为该代码系统仅针对 FHIR R4 发布 |
| 原始数据文件格式代码系统 | 代码系统 | 1 个本地定义的概念（whir-csv） | — | 原始数据文件的格式代码，用于 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | m | | | 文档引用内容配置文件 |
| IMUSensorDevice 类别 | 值集 | 6 个 FHIR 设备类别代码 | 可扩展 | IMUSensorDevice 的设备类别 |
| IMU传感器类型 | 值集 | 2 个 SNOMED CT 概念和 1 个 ISO/IEEE 11073 概念 | 可扩展 | IMUSensorDevice 的传感器类型 |
| IMU 设备度量类型 | 值集 | ISO/IEEE 11073 通用测量仪及全部传感器模态代码系统概念 | 可扩展 | IMUDeviceMetric 的度量类型 |
| HAR 身体部位 | 值集 | 39 个 SNOMED CT 身体结构概念（章节 2.3) | 可扩展 | 表 S2（补充文件 2）列出了所使用的 33 个代码已审查的数据集 |
| 位置限定符 | 值集 | 4 个 SNOMED CT 概念（优势侧、非优势侧、同侧、对侧）加上 2 个本地定义的（首选、受影响） | 可扩展 | 表5中的完整代码 |
| 附着方法 | 值集 | 12种本地定义的机制，另有1种重复使用 SNOMED CT 概念（带子） | 可扩展 | 完整代码见表 S3 |
| HARActivityLabels | 值集 | 54 个本地定义概念 | 可扩展 | 通用 HAR 用例 |
| 老年评估标签 | 值集 | 34 个本地定义概念和来自 HARActivityLabelsCS | 可扩展 | 临床评估／康复／跌倒／行动能力转变方面的居家老年评估用例 |
| ADLLabels | 值集 | 42个本地定义的概念 | 可扩展 | 同一用例中被动观察的日常生活活动一侧用例（第 3.3 节） |
| 活动标签 | 值集 | 并集 HARActivityLabels、老年评估标签 ，和 ADLLabels | 可扩展 | ActivityLabelObservation.code 的总括绑定 |
| FunctionalAssessmentTests | 值集 | 2 个 LOINC 临床测试代码（TUG、30秒椅子起立测试） | 可扩展 | FunctionalAssessmentObservation.code；标准化功能测试的居家老年评估用例 |
| AnnotationProvenance | 值集 | 4 个本地定义概念 | 必需 | 穷举列出的概念，因此应绑定为必需，而非可扩展强度（第 3.3 节） |
| 传感器模态 | 值集 | 6 个本地定义概念 | 可扩展 | LongRawSensorModalityObservation.code 中的传感器模态 |
| SensorAxis | 值集 | 4 个本地定义概念 | 可扩展 | 轴到列的映射 LongRawSensorModalityObservation.component.code |
| IMU传感器单位 | 值集 | 6个UCUM单位 | 可扩展 | IMUDeviceMetric的单位 |