

附件 3

兵工民品行业计量技术规范项目建议书

项目名称	机器人光学动捕运动参数测量装置校准规范		
制定或修订	☒ 制定 ☐ 修订	被修订计量技术规范号	
计量技术规范性质	☐ 检定规程 ☒ 校准规范	计量技术规范类别	☐ 重点 ☒ 基础
主要起草单位	杭州智元研究院有限公司		
联系人	唐波	联系电话	13777848027
任务年限	1 年	申请经费	5 万
参加单位	浙江省质量科学研究院、中国计量大学、安徽省长江计量所（九一〇所）		
目的、意义和必要性	1、目的、意义，解决行业、产业的问题和必要性、迫切性 机器人光学动捕运动参数测量装置是基于多目视觉三维重建原理的高精度运动参数测量装置，由多台红外相机环绕布置，通过采集被测目标表面反光标记球图像，经三角交会算法实时解算标记点三维位置及刚体姿态角，是支撑机器人运动学标定与性能测试（关节角度验证、步态分析、轨迹评估）的基础测量装备。光学动捕系统是机器视觉技术在动态三维运动测量领域的典型应用形态。当前，在具身智能机器人产业带动下，光学动作捕捉市场需求快速增长，据高工产业研究院统计，2024 年我国机器视觉市场规模为 181.47 亿元（不含自动化集成设备），预计 2028 年将超过 385 亿元，2024—2028 年复合增长率约 20%。在产业供给端，国内已培育出凌云光（元客视界，FZMotion 帧率最高 500 fps、绝对位置精度 0.1 mm）、青瞳视觉（K 系列相机延迟低至 2.8 ms）、Nokov 度量科技、瑞立视（Realis，RTS 系列相机延迟低至 2.9 ms）等一批企业，部分指标已达到国际先进水平，与 Vicon、OptiTrack、Qualisys 等国外知名品牌形成有力竞争，产品广泛应用于具身智能机器人研发测试与数据采集、运动医学与康复评估、影视动画与虚拟制作等产业。本规范旨在解决当前光学动作捕捉系统量值溯源体系缺失、动态跟踪与时间响应特性校准方法不统一、现有产品测试标准不含标准器及不确定度等计量特性要求等问题，通过制定面向机器人运动学标定与性能测试场景的通用计量校准要求，建立统一、科学的校准方法体系。 2、先进性和亮点、社会效益和推广应用前景 一是创新按测量空间密度分区设定精度指标。针对机器人近场精细操作与远场大范围运动等不同测试场景，按可见相机数与交会角将测量空间划分为高、中、低密度区，差异化设定静态定位精度与静态点位测量重复性指标，克服指标精度要求与机器人测试场景脱节的问题。二是创新毫秒级数据输出延迟计量方法。以高速 LED 闪光事件作为同步信号，将延迟测量扩展不确定度控制在 0.5 ms 以内，实现装置时间响应特性的精准溯源。三是创新覆盖宽速度范围的动态跟踪精度组合校准方		

	法。针对机器人步行、跑动、快速操作等场景运动速度跨度大的特点，提出“绝对参考法+刚体杆长约束法”组合校准方法，该组合方法兼顾量值溯源的准确可靠与现场校准的工程可行性。 本规范的制定将统一机器人运动参数测量的量值标尺，提高具身智能机器人研发测试与训练数据的准确性、一致性和可比性，降低因测量装置标定不充分导致的控制偏差和安全风险，保障人机交互及复杂作业的可靠性，具有较高的社会效益。同时，本规范为光学动作捕捉系统制造、集成与应用上中下游企业提供明确的性能指标导向、可靠的出厂校准工具和标准化的定期复校程序，可支撑人形机器人训练场、机器人检测认证机构等新型基础设施建设的量值统一，并向医疗康复器械检测等领域拓展，具有广阔的产业化应用前景。 3、查新结果 经全面查新：（1）计量校准规范方面，JJF 1242—2010《激光跟踪三维坐标测量系统校准规范》的校准对象为单站球坐标激光跟踪仪，不包含刚体姿态角解算及数据输出延迟等校准项目。（2）产品标准与测试方法方面，国家标准计划 20250652-T-469《动作捕捉系统性能测试方法》（当前处于审查阶段）为产品性能测试方法标准，不含标准器配置、量值溯源、校准结果表达与不确定度评定等计量要素；ASTM E2919-22 规定了静态六自由度位姿测量系统性能测试方法，ASTM E3124-17（2025）规定了光学跟踪系统延迟性能测试方法，ISO/IEC 18305:2016 规定了实时定位系统测试与评估方法，均不涉及动态跟踪性能；VDI/VDE 2634 系列指南为光学三维测量系统性能评价方法，未覆盖动作捕捉装置的动态计量要求。上述规范均为产品试验/检测方法标准，不含计量特性要求，不能满足机器人光学动作捕捉系统的计量校准需求。目前，机器人光学动捕运动参数测量装置计量校准规范在国内外尚属空白。
产业链应用	1、重点产业链方向 仪器仪表产业链（精密光学测量仪器），并向医药工业产业链（医疗机器人、康复器械检测评价）延伸支撑。 2、对本行业重点产业链的支撑作用 本校准规范面向仪器仪表产业链中精密光学测量仪器方向，在产业链上中下游之间起到承上启下的关键支撑作用，形成“以测促产、以标提质”的良性循环。对上游核心器件与算法环节（红外相机模组、近红外LED光源、反光标记球、图像处理与三维重建算法），本规范提供统一的空间位姿测量计量基准和分级精度评价框架，为相机模组成像一致性设计、标记球几何精度制造、多目交会重建算法性能评价提供可溯源的验证基准。对中游整机制造与系统集成环节，本规范提供一套标准化的入厂检验和出厂校准工具，支撑产品运动性能测试的标准化实施，促进不同品牌系统间测量结果的互认，降低调试成本与贸易技术壁垒。对下游应用环节（人形机器人与外骨骼机器人研发测试、机器人训练场数据采集、康复医疗效果评估、第三方检测认证），本规范构建统一的使用前校验和定期复校程序，支撑机器人运动安全性评估与全生命周期性能监控，保障人机交互及复杂作业场景的可靠性，并为医药工业中康复机器人、手术机器人等产品的运动性能检测评价提供计量技术基础。

范围和主要 计量特性	1、适用范围 本规范适用于基于主动式或被动式光学标记点进行三维运动重建的机器人光学动捕运动参数测量装置的首次校准、后续校准和使用中检查。本规范不适用于惯性式动作捕捉系统及无标记点视觉动作捕捉系统的校准。 2、主要计量特性的技术指标 (1) 静态定位精度，是指装置对静止标记点三维空间位置的测量精度，测量误差用实测坐标值与标准坐标值之差的欧氏距离表征，静态定位精度的技术指标用最大允许误差（Maximum Permissible Error，以下简称 MPE）描述。MPE 指标：$\pm 0.20\text{ mm}$（高密度区，≥ 6 台、交会角 $\geq 45^\circ$），$\pm 0.50\text{ mm}$（中密度区，≥ 4 台、交会角 $\geq 25^\circ$），$\pm 2.0\text{ mm}$（低密度区）。 (2) 动态跟踪精度，是指装置对运动标记点三维空间位置的跟踪精度，测量误差用运动过程中实测坐标值与标准坐标值轨迹点之差的欧式距离表征。MPE 指标：$\pm 0.50\text{ mm}$（速度 $0\sim 2\text{ m/s}$），$\pm 1.0\text{ mm}$（速度 $2\sim 5\text{ m/s}$），$\pm 2.0\text{ mm}$（速度 $5\sim 10\text{ m/s}$）。 (3) 姿态角测量误差，是指装置解算的刚体姿态角（俯仰角、偏航角、横滚角）与角度标准值之差。各方向 MPE 指标：$\pm 0.20^\circ$（基线长度 $\geq 300\text{ mm}$）。 (4) 数据输出延迟，是指从被测物体物理运动状态发生变化的时刻到装置输出对应数据帧的时刻之间的时间间隔。技术指标（MPE）：延迟量不大于 5 ms（采样频率不低于 240 fps 的高速型装置），不大于 10 ms（采样频率低于 240 fps 的通用型装置）。 (5) 静态点位测量重复性，是指在相同测量条件下装置对同一静止标记点多次连续测量所得结果的一致性，技术指标用实验标准偏差 s 来描述。重复性与静态定位精度受相同误差源（像点定位噪声、交会几何条件）影响，其量值随空间密度区同步变化，故按相同分区设定。技术指标：$s \leq 0.10\text{ mm}$（高密度区，≥ 6 台、交会角 $\geq 45^\circ$），$s \leq 0.30\text{ mm}$（中密度区，≥ 4 台、交会角 $\geq 25^\circ$），$s \leq 1.0\text{ mm}$（低密度区）。 3、主要测量标准的技术指标 (1) 静态定位精度校准，采用激光干涉仪、标准量块组或激光跟踪仪作为长度标准器。其中，激光干涉仪位移测量不确定度 $U=0.5\text{ }\mu\text{m}$（$k=2$），量程 $\geq 1\text{ m}$，依据 JJG 739—2005 检定；标准量块组（K 级/0 级，依据 JJG 146—2011 检定）长度不确定度 $U=0.3\text{ }\mu\text{m}$（$k=2$），标称尺寸覆盖 100 mm、300 mm、500 mm、1000 mm 系列；激光跟踪仪不确定度 $U=(10\text{ }\mu\text{m}+5\text{ }\mu\text{m/m})$（$k=2$），依据 JJF 1242—2010 校准。 (2) 动态跟踪精度校准，采用高速转台，覆盖 $0\sim 10\text{ m/s}$ 全速度范围。高速转台最大转速不小于 2000 r/min，轴向跳动 $\leq 10\text{ }\mu\text{m}$，径向跳动 $\leq 10\text{ }\mu\text{m}$，末端线速度 $\geq 45\text{ m/s}$；采样时标由时间间隔测量系统同步记录，不确定度 $U=0.1\text{ ms}$（$k=2$）。另配标准刚体杆（杆长 $0.5\text{ m}\sim 2\text{ m}$，杆长校准不确定度 $U=0.05\text{ mm}$，$k=2$），用于全测量空间动态一致性检验。 (3) 姿态角测量误差校准，采用多齿分度台或高精度伺服转台作为角度标准器。多齿分度台（0 级，依据 JJG 472—2007 检定）角度不确
---------------	--

	定度 $U=0.5''$ ($k=2$); 高精度伺服转台角度定位不确定度 $U=5''$ ($k=2$), 角位置由圆光栅编码器 (0 级) 或自准直仪溯源。 (4) 数据输出延迟校准, 采用 LED 闪光同步信号发生器配合时间间隔测量系统。信号发生器时间分辨力 $\leq 0.1 \mu s$; 时间间隔测量系统不确定度 $U=0.1 ms$ ($k=2$)。 (5) 静态点位测量重复性, 采用激光干涉仪或激光跟踪仪配合标准基线尺。激光干涉仪位移测量不确定度 $U=0.5 \mu m$ ($k=2$), 量程 $\geq 1 m$; 激光跟踪仪不确定度 $U=(10 \mu m+5 \mu m/m)$ ($k=2$); 标准基线尺长度校准值不确定度 $U=0.05 mm$ ($k=2$)。 4、主要计量项目的技术原理 (1) 静态定位精度 采用激光干涉仪或由标准量块组建立的长度标准器, 将被校装置与标准器对同一标记点三维空间位置进行同步测量比较。其中装置通过红外相机对空间中标记点进行交会摄影测量, 重建标记点三维坐标 (X、Y、Z), 标准坐标由激光干涉仪或标准量块确定。静态定位精度按欧氏距离计算。 (2) 动态跟踪精度 动态跟踪误差包含静态位置误差分量和运动附加误差分量 (运动模糊导致的图像拖尾、采样时钟抖动导致的时间戳偏差、帧间标记点匹配算法引入的关联误差等)。动态跟踪精度校准以绝对参考法为主方法, 以刚体杆长约束法为补充方法。 绝对参考法采用高速转台回转参考法, 适用于 $0\sim 10 m/s$ 全速度范围。将标记点固定于高速转台, 转台由伺服系统驱动作匀速回转, 通过调节转速与回转半径覆盖各校准速度点, 标准位置由半径、角位移与采样时标计算获得, 与被校系统实测值比较确定动态跟踪误差; 回转参考法通过半径与角位移双通道独立溯源, 圆周运动连续、行程不受限、速度稳定性好, 克服直线运动平台行程受限、高速段速度稳定性不足的问题, 以单一标准器实现全速度范围覆盖。动态跟踪误差的计量判定以绝对参考法结果为准。 补充方法采用刚体杆长约束法, 采用两端固定标记点的标准刚体杆 (杆长经静态长度校准), 在测量空间内作任意三维运动, 利用刚体上标记点间距离保持不变的物理约束, 将动态测得的杆长值与静态标准杆长比较, 评价全测量空间动态跟踪性能的一致性。适用于全场一致性评价与校准周期内的使用中检查, 其结果不单独作为合格判定依据。 (3) 姿态角测量误差 采用多齿分度台 (0 级, JJG 472—2007) 或高精度伺服转台作为角度标准器。将被测刚体 (带有三个以上非共线标记点) 固定于转台上, 转台旋转至标准角度位置 (由多齿分度台齿槽定位或编码器反馈), 光学动作捕捉系统通过 2D-3D 投影变换算法解算刚体姿态角 (横滚角、俯仰角、偏航角), 获得实测值, 将实测值与标准值比较确定误差。 (4) 数据输出延迟 采用 LED 闪光同步法。LED 闪光同步信号发生器产生窄脉冲光信号 (脉宽 $< 1 \mu s$), 该光信号同时被光电二极管和光学动作捕捉系统捕获。光电二极管检测闪光物理发生时刻 t_0, 光学动作捕捉系统输出帧中
--	---

	检测到闪光标记点的时刻 t_1，延迟 $\tau=t_1-t_0$。时间间隔测量系统基于恒温晶振（频率稳定度$\leq 1\times 10^{-9}/\text{日}$）或 GPS 驯服时钟计数，时间分辨力 $0.1\text{ }\mu\text{s}$。至少重复测量 10 次，以各次结果的算术平均值为数据输出延迟。 （5）静态位置重复性 采用激光干涉仪或激光跟踪仪配合标准基线尺作为静态位置标准值，令被校光学动作捕捉系统对固定标记点以系统最高采样频率连续采集 n 组三维坐标值，按贝塞尔公式计算实验标准差：$s=\sqrt{[\Sigma(p_i-\bar{p})^2/(n-1)]}$，其中 p_i 为第 i 帧位置矢量。				
水平	☐ 国际先进 ☒ 国内先进				
国内外情况 简要说明	目前国内没有机器人光学动捕运动参数测量装置的校准规范，有用于同类几何量测量仪器校准的规范 JJF 1242—2010《激光跟踪三维坐标测量系统校准规范》，规定了激光跟踪仪长度测量的校准指标与量值溯源方法，本规范在编制过程中参考了其激光干涉仪、标准量块等长度标准器的配置与溯源路径；但是，刚体姿态角测量误差、动态跟踪精度、数据输出延迟等光学动作捕捉系统特有的计量特性，没有发现有相关规范可以依据进行校准，因此急需编制机器人光学动捕运动参数测量装置校准规范。 国际上，ASTM E2919-22、ASTM E3124-17（2025）分别规定了静态六自由度位姿测量与光学跟踪系统延迟性能的测试方法，均为产品性能测试方法，未形成面向机器人场景的计量校准方法与量值溯源要求；国家标准计划 20250652-T-469《动作捕捉系统性能测试方法》（审查阶段）为产品测试标准，非计量校准规范。经检索分析，本规范的编制没有涉及知识产权或专利的问题：所采用的校准方法均基于激光干涉测长、精密角度分度、刚体几何约束等通用计量学原理，所用标准器均为市场通用的计量标准设备，不涉及对第三方专利技术的实施。本项目技术水平为国内先进，部分指标达到国际先进水平。				
推荐意见	机器人光学动捕运动参数测量装置校准规范的制定将统一机器人运动参数测量的量值标尺，提高具身智能机器人研发测试与训练数据的准确性、一致性和可比性，降低因测量装置标定不充分导致的控制偏差和安全风险，保障人机交互及复杂作业的可靠性，具有较高的社会效益 建议上报《机器人光学动捕运动参数测量装置校准规范》。				
主要 起草单位	（签字、 盖公章） 年 月 日	技 术 委 员 会	（盖公章） 年 月 日	部委托 支撑 单位	（盖公章） 年 月 日