

文章编号 1004-924X(2023)19-2867-17

并联式六维加速度感知机构的操作性能研究进展

尤晶晶*, 史浩飞, 张显著

(南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要:六维加速度感知在机器人、航空航天、超精密加工等领域均具有迫切的应用需求,已成为高端装备向“超精尖”发展的一项核心技术。并联式六维加速度传感器具有结构紧凑、动力学解耦精度高等突出优势,其测量性能与感知机构的操作性能有关。从工作机理的角度,阐述了并联式六维加速度感知机构与并联机器人、并联式六维力感知机构之间的差异。从数学和力学的角度,系统阐释了并联式六维加速度感知机构的静刚度、奇异性、基频共振和故障修复四项操作性能表征和优化方法,并剖析了现有方法尚不具备自适应性的原因。接着,阐明六维加速度标定平台的必要性和基本要求,并分析了四种原理方案的优缺点。最后,指出挖掘感知机构“性能-结构-激励”三者之间的内在联系,并突破几何/拓扑结构的重构、标定平台的设计和优化这些关键问题,有助于充分发挥并联式六维加速度感知机构的性能优势。

关键词:六维加速度传感器;并联机构;静刚度;奇异性;基频共振;故障修复

中图分类号:TH825 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233119.2867

Research process on operation performances of parallel type six-axis acceleration sensing mechanisms

YOU Jingjing*, SHI Haofei, ZHANG Xianzhu

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University,
Nanjing 210037, China)

* Corresponding author, E-mail: youjingjing251010@njfu.edu.cn

Abstract: Six-axis acceleration sensing has urgent application demands in the fields of robotics, aerospace, and ultra-precision machining, having become the core technology in the development of cutting-edge high-end equipment. Parallel-type six-axis accelerometers offer the salient advantages of compact structures and high decoupling precisions, and their measurement performance relates to the operation performance of sensing mechanisms. First, from the perspective of working mechanisms, this paper clarifies five differences between parallel-type six-axis acceleration sensing mechanisms, parallel robots, and parallel-type six-axis force sensing mechanisms. From mathematical and mechanical perspectives, it then systematically describes the characterization and optimization methods for operation performance factors, including static stiffness, singularity, fundamental resonance, and fault restoration, and analyzes reasons for the non-adaptive nature of existing methods. Subsequently, the necessity and basic requirements of six-dimensional acceleration calibration platforms are elucidated, and the advantages and disadvantages of four

收稿日期:2023-02-08;修订日期:2023-03-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51405237);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(No. KYCX22_1052)

principle schemes are analyzed. Finally, it is concluded that to fully leverage the performance advantages of parallel-type six-axis acceleration sensing mechanisms, it is necessary to further address key technical problems by exploring internal performance relationships, structures, and excitations; reconfiguring geometric and topological structures; and designing and optimizing calibration platforms.

Key words: six-axis accelerometer; parallel mechanism; static stiffness; singularity; fundamental resonance; fault restoration

1 引 言

随着科学技术的发展,三维空间内物体的六维运动(或称“螺旋运动”)探测越来越重要。例如,只有实时检测到机器人本体的空间六维运动信息,才能真正实现其动力学控制^[1]。超精密加工、无人驾驶、惯性导航、太空对接和生物医学等应用领域^[2]都涉及载体的六维运动。一般地,在所有的运动信息中,只有加速度测量时可以不从外界获取信号,也无需向外界传递信号。由此,“六维加速度传感器”的概念被提出^[3],它是一种能够同时测量空间三维线加速度和三维角加速度的惯性测量仪器。

然而,目前国内外市场上还没有一款真正成熟、完善的六维加速度传感器产品,仍然停留在实验室原理探索及论证阶段,涉及的很多关键基础理论问题尚未得到解决。由于多输入、多输出量之间存在强非线性耦合关系^[3],相比发展较为成熟的一维、三维(轴)加速度计,六维加速度传感器在理论和技术层面上有本质的区别,其实现机理和潜在的核心科学问题更加复杂。因此,六维加速度传感器逐渐成为一项热门的研究课题。

本文概述了六维加速度传感器的4种测量机理,阐释了并联式六维加速度感知机构操作性能的研究意义及必要性。接着,从性能表征和性能提升两个方面,系统介绍并剖析了并联式六维加速度感知机构静刚度、奇异性、基频共振、故障修复这4项操作性能及其标定平台的研究现状。最后,对上述4项操作性能的性能表征理论和优化,以及标定技术的发展进行了展望。

2 六维加速度传感器的测量机理

目前,六维加速度传感器的测量机理(也称原理方案)主要有4种。方案1^[4]是首先运用成熟

的六维力感知技术测量载体的六维输出力;然后,采用Newton-Euler等动力学方程将六维力换算成六维加速度,如图1所示。图中, $O-XYZ$ 为惯性坐标系, A 为线加速度, α 为角加速度。实际测量时,待测加速度作用在传感器的质量块上,而质量块与基座(外壳)之间允许的弹性变形量极小,因此该方案仅适用于待测体做微幅振动的场合。鉴于此,后三个原理方案中的加速度均作用在传感器的基座上,当基座受到基础激励时,由于惯性,质量块输出与之对应的六维伴随运动。

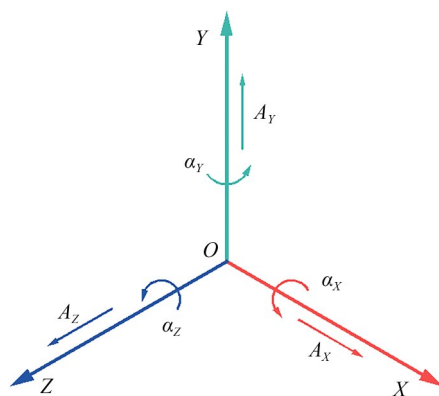


图1 六维加速度的分解

Fig. 1 Decomposition of six-axis acceleration

方案2^[5]是利用正交布置的3个线加速度计结合3个陀螺仪分别测量载体的三维线加速度和三维角速度;然后,通过数值微分运算,将角速度矢量换算成角加速度矢量。然而,陀螺仪在工作时不可避免地存在漂移,要么不能承受较高的线加速度冲击,要么受温度、磁场等环境因素的影响较严重。另外,陀螺仪的功耗是加速度计的20倍以上^[6]。

方案3^[7]是在基座上选取至少6个观测点安装线加速度计,测量沿安装轴线方向的线加速度

值;然后,采用 Schuler 方程将全部观测点的线加速度值换算成基座的六维加速度。在换算过程中,需要将具有一定物理尺寸的加速度计近似等效成理想的“点测量组件”;而且,系统的比力方程又严重依赖质量块的质心位置,因此,在加速度解耦算法中,必然会引入具有不确定性的内杆臂效应误差和横向灵敏度误差^[8]。

方案 4 是通过机械联接^[9-11]或静电悬浮^[12]等方式,将至少 6 个力或位移敏感元件安置于质量块和基座之间,构成单质量块的一体化结构(方案 2,3 均为多质量块的组合式结构),如图 2 所示。然后,通过构建动力学解耦算法,将全部敏感元件的测量值换算成基座的六维加速度。该方案中的质量块、基座和敏感元件分别对应并联机构中的动平台、静平台和运动副,故这一类传感器也称为“并联式六维加速度传感器”。

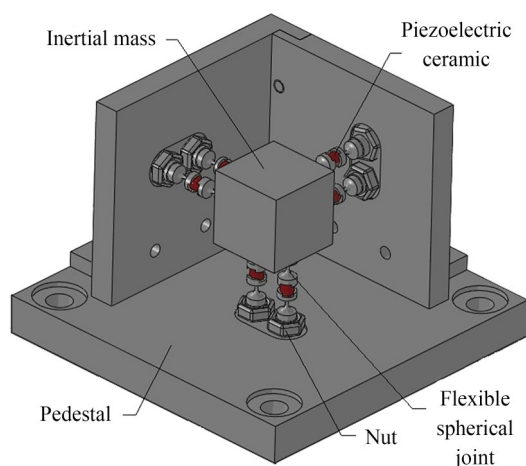


图2 并联式六维加速度传感器的原理样机^[11]

Fig.2 Prototype of a parallel type six-axis accelerometer^[11]

由于多个敏感元件共用同一个质量块,且不需要陀螺仪来测量载体的角速度,并联式六维加速度传感器在理论上能够避开前3种原理方案的不足,并且具有结构紧凑、灵敏度高、量程大、动态特性好等突出优势^[13],故具有很好的应用前景。Liu等^[14]研制了一款基于并联式六维加速度传感器的海洋波浪浮标(图3),一定程度上提高了波高、波周期和波向等波浪特征的观测精度。



图3 南京信息工程大学研制的海洋波浪浮标^[14]

Fig.3 Ocean wave buoy designed by Nanjing University of Information Science and Technology^[14]

3 并联式六维加速度感知机构操作性能的研究意义

传感器的实际应用场合是由其测量性能决定的。因此,在六维加速度传感器的理论论证和构型设计阶段,充分挖掘其潜在的测量性能具有重要的科学意义和实用价值。目前,并联式六维加速度传感器的关键测量性能主要包括解耦精度、量程、工作频带和容错性^[15]。结合国内外技术现状和笔者团队的研究经验可知,这4项测量性能的优劣程度主要由传感器的弹性体结构(也称为“并联式六维加速度感知机构”)的操作性能、敏感元件的基本特性(如线性度、迟滞、灵敏度、分辨率、漂移等),以及传感器机械零部件的材料属性、加工和装配工艺等因素共同决定^[3]。其中,感知机构操作性能的影响最为显著。

文献[13]从能够实现动力学完全解耦的机构学条件入手,得出若不计入局部自由度,并联式六维加速度感知机构的自由度一定等于6;若还需对支链实施有效预紧,则机构中支链的最少条数为7。这被称为并联式六维加速度感知机构的“拓扑构型条件”,为六维加速度传感器的构型设计指明了方向。文献[15]在兼顾上述条件以及传感器的结构力学合理性、结构紧凑性等设计准则后,发现含冗余支链的 Stewart 型并联机构适合于充当并联式六维加速度传感器的感知机构。

Stewart 型并联机构(以下简称并联机构)是传统 Stewart 平台机构的变体,属于变支链长度

的六自由度台体型空间并联机构^[15]。该类并联机构的命名方式有很多种,其中最常用的是“ a - b ”式(a 和 b 分别表示静、动平台上铰链点的数目)。

图4为基于Stewart型并联机构的三类多体系统。其中,支链条数 n 通常大于6,且每条支链均是“动球铰链 b_i -移动副 P_i -静球铰链 B_i ”的串联

结构。动平台上的所有铰链点允许不在同一平面内,静平台上的所有铰链点也允许不在同一平面内。需要特别指出的是,尽管并联式六维加速度感知机构(图4(a))与并联机器人^[16](图4(b))、并联式六维力感知机构^[17](图4(c))三者具有一些共性特征,但它们的工作模式、运行机理和应用环境却存在显著的差异。

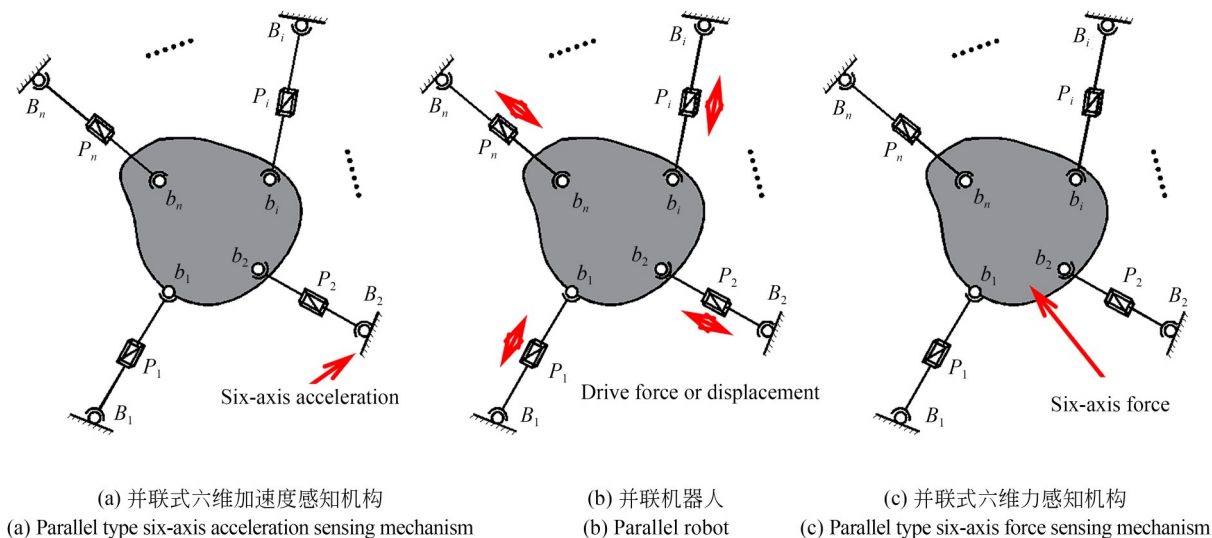


图4 基于Stewart型并联机构的三类多体系统

Fig. 4 Three types of multibody systems based on Stewart type parallel mechanisms

具体地,它们的区别主要体现在5个方面:

(1)外部激励的类型及作用部位不同。并联机器人的本质功能是输出运动或抵抗外载荷,比如,远程执行物料抓取操作的Stewart机械手^[18](图5),其外部激励为作用在运动副上的驱动位移/力。并联式六维力感知机构的本质功能是测量力,如为空间机械臂(图6)的柔性力控制提供反馈力信息^[19],其外部激励为作用在动平台上的六维力。然而,并联式六维加速度感知机构的本质功能是测量运动,其外部激励为作用在静平台上的六维加速度。

(2)静平台的运动状态不同。并联机器人和并联式六维力感知机构的静平台都是相对静止的,而并联式六维加速度感知机构在工作时其静平台一般是运动的,原理上相当于传统加速度计中的基座。这也是六维加速度感知机构动力学解耦模型比较复杂的主要原因之一。

(3)动平台的作用不同。并联机器人的动平

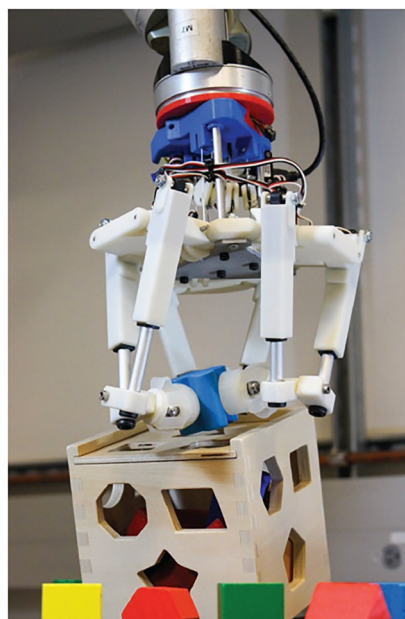


图5 哈佛大学研制的六自由度Stewart机械手^[18]

Fig. 5 Six-DOF Stewart hand designed by Harvard University^[18]

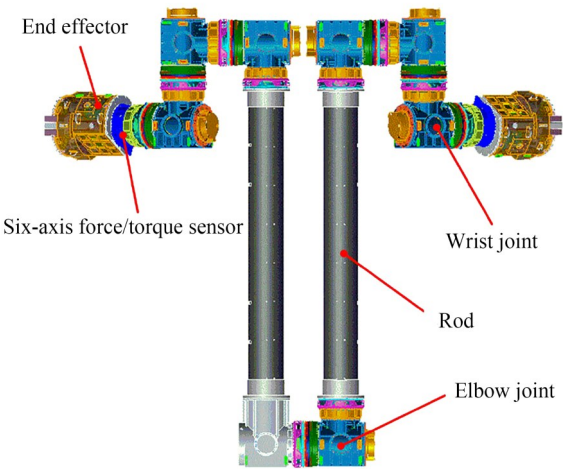


图 6 哈尔滨工业大学设计的空间机械臂^[19]
Fig. 6 Space robot designed by Harbin Institute of Technology^[19]

台是充当末端执行器,以执行操作任务;并联式六维力感知机构的动平台是外部六维力矢的作用部位。然而,并联式六维加速度感知机构的动平台则是将惯性力/力矩转变为对应的伴随运动,并最终将静平台受到的基础激励传递至支链中,原理上相当于传统加速度计中的质量块。

(4)运动副的工作模式不同。并联机器人中的运动副可能工作于主动副、被动副或锁合副中的任意一种模式^[15];而并联式六维加速度感知机构和并联式六维力感知机构中的移动副分别是由弹性(或光、电、超导等)敏感元件和粘贴有应变片的弹性杆件(或膜片)充当的,它们只工作于被动副模式。这正是超静定结构能够充当多维

力、加速度感知机构的根本原因^[17]。

(5)支链惯量所占的分量不同。并联机器人的每条支链中,一般都至少含有一个输入关节以实现运动/力的传递。支链内部均配置了驱动系统和机械传动系统,故机器人的支链惯量一般不能忽略。然而,并联式六维加速度感知机构和并联式六维力感知机构中,支链所起的作用仅仅是运动学/力学信息的测量,其内部不存在、也不需要这些机械装置,故在静力学、动力学建模时,可忽略支链惯量的影响^[20]。

鉴于以上区别,现有的关于并联机器人和并联式六维力感知机构操作性能的研究方法往往不适用于或不能直接运用于并联式六维加速度感知机构。因此,有必要专门针对并联式六维加速度感知机构的操作性能开展理论和实验研究,为六维加速度传感器的性能分析以及构型优化提供坚实的基础。

4 并联式六维加速度感知机构操作性能的表征及提升

并联式六维加速度传感器的4项测量性能与其感知机构的4项操作性能之间的关系如表1所示。因此,通过提升并联式六维加速度感知机构的操作性能,可优化六维加速度传感器的测量性能,以拓宽该类仪器的应用场合。性能表征是性能提升的前提和先决条件,故还需要确立各性能的评估指标,并建立其求解范式。

表 1 传感器测量性能与感知机构操作性能的关系				
Tab. 1 Correspondence between measurement performances of sensors and operation performances of sensing mechanisms				
Object	Decoupling precision	Decoupling reliability and stability		
		Measuring range	Working frequency band	Fault tolerance
Parallel type six-axis accelerometer	Static stiffness	Singularity	Fundamental resonance	Fault restoration
Parallel type six-axis acceleration sensing mechanism				

4.1 静刚度性能

解耦精度是衡量一切多输入、多输出测量系统的最关键指标。文献[21]研究发现:并联式六维加速度传感器解耦精度的主要决定性因素是其感知机构的静刚度。静刚度性能越优,正向、反向动力学方程的原理性解耦精度均越高。

Stewart 型并联机构的动平台同时具有 3 个移动自由度和 3 个转动自由度,故其静刚度性能的表征相比于少自由度并联机构要复杂得多。最早的表征指标是机构静刚度矩阵的迹^[22]。然而,该指标忽略了静刚度矩阵非对角线上的耦合项,由此获得的静刚度信息是不完整的。为了弥

补该不足, El-Khasawneh 等^[23]使用机构静刚度矩阵的条件数来表征静刚度性能。然而, 该指标存在两个缺陷: (1) 由于静刚度矩阵中各元素的量纲不一致, 无法区分矩阵的最大、最小奇异值, 故表征指标无明确的物理意义; (2) 指标值依赖于所选取的物理量单位和动平台参考点, 故无法形成统一的评价标准。若选取不同的长度单位, 静刚度矩阵的条件数会发生改变, 由此表征出的同一机构在同一位形下的静刚度性能不唯一。

为了解决静刚度矩阵元素量纲不统一的问题, Portman 等^[10]提出“最小共线刚度值”概念。然而, 该指标仅适用于动平台上外负载和微位移方向共线时的特殊情况。之后, 尤晶晶等^[15]通过剖析六自由度并联机构动平台移动微位移和转动微位移的构成成分, 推导出 Stewart 型并联机构的等效移动刚度矩阵和等效转动刚度矩阵, 将它们的最小特征值分别作为机构移动静刚度性能和转动静刚度性能的评价指标, 并将这两个指标值中的较小值作为机构综合静刚度性能的评价指标。该表征指标具有几何意义直观、物理意义明确的优势, 且易于清晰确定设计标准或界限。文献[21]计算了“12-6”(图 7)、“9-3”(图 8)两种 Stewart 型六维加速度感知机构的综合静刚度性能指标, 分别等于 $4k$ 和 $(3 - 3\sqrt{2}/2)k$, 其中 k 表示支链的刚度系数。然而, 静刚度指标值依赖于参考点选取的问题仍未解决。

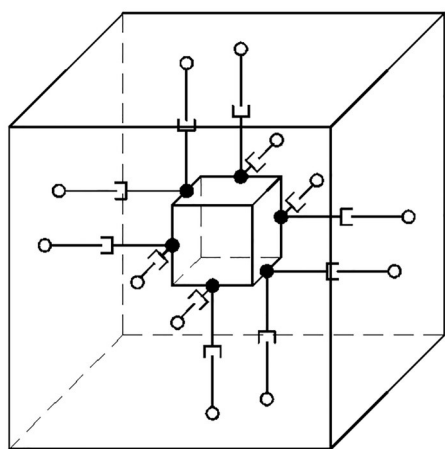


图 7 “12-6”Stewart 型并联机构

Fig. 7 Schematic of “12-6” Stewart-type parallel mechanism

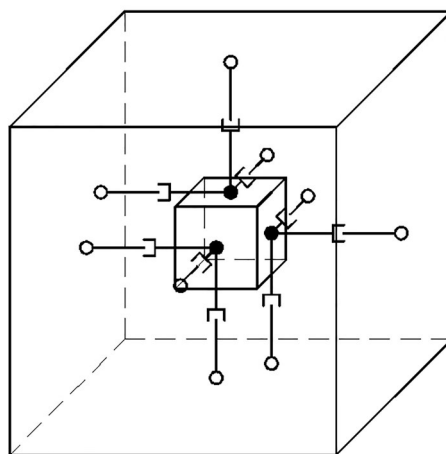


图 8 “9-3”Stewart 型并联机构

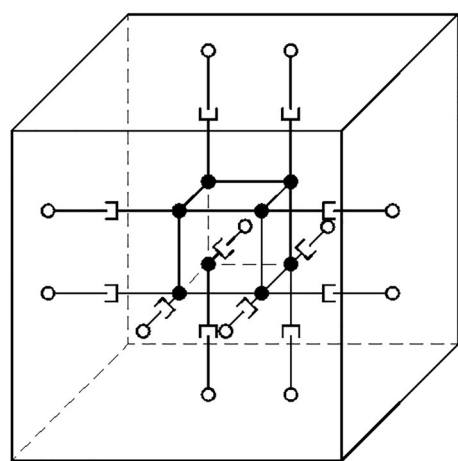
Fig. 8 Schematic of “9-3” Stewart-type parallel mechanism

目前, 提升 Stewart 型并联机构静刚度性能的方法主要有两种。第一种方法是“支链冗余”^[24], 即在原有静定结构的基础上额外添加若干条支链, 或者将原有机机构中的若干条被动支链替换成主动支链。这种方法的基本原理是利用更多条数的主动支链来平衡作用在动平台上的主动外负载或广义惯性力。然而, 支链条数越多, 感知机构的拓扑结构越复杂, 其运动学、动力学完全解耦越困难、解耦实时性越差、系统成本也越高^[25]。而且, 感知机构中的移动副始终工作于被动副模式。因此, 该方法并不能很好地提升并联式六维加速度感知机构的静刚度性能。第二种方法是增大机构中支链的刚度^[21], 但这会降低六维加速度传感器中敏感元件的灵敏度^[3]。

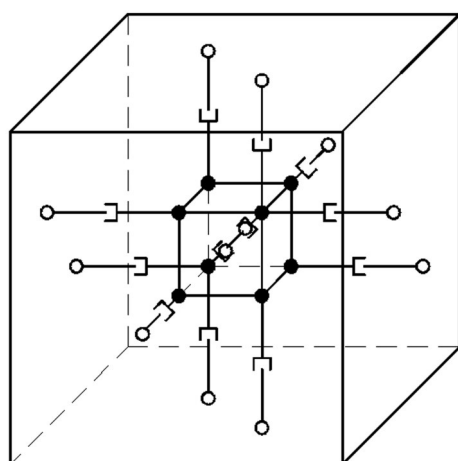
4.2 奇异性能

由于待测量的维数为 6, 且线加速度和角加速度之间存在不可公度性, 六维加速度传感器的量程性能至今尚无标准、规范的计算公式。但是, 量程的基本内涵是明朗的, 即系统能够持续、精确、稳定感知的六维加速度的区间集合^[3]。由并联式六维加速度传感器的正向动力学和正向运动学模型^[26]可知, 基础激励与感知机构位形之间存在一一对应的关系。根据机构学理论可知, 当机构位于或接近某些特殊位形时, 其运动和力传递/约束性能变得很差, 即机构发生奇异。如图 9 所示, 两种“12-8”Stewart 型并联机构分别处于一般线性丛奇异和 Hunt 奇异(从属于第一类

特殊线性丛奇异)^[25]。这样的拓扑构型显然不能充当并联式六维加速度感知机构。



(a) 一般线性丛奇异
(a) General-linear-complex singularity



(b) Hunt 奇异
(b) Hunt singularity

图 9 “12-8” Stewart 型并联机构

Fig. 9 Schematic of “12-8” Stewart-type parallel mechanism

因此,若不考虑零部件的材料属性和加工工艺,感知机构的奇异性能就决定了六维加速度传感器的量程,表现为感知机构的奇异位形越少且工作位形距离奇异位形越“远”,则六维加速度传感器的优质工作空间(即量程)就越大。

奇异性是机构的固有性质。串联机构的奇异位形一般出现在工作空间边界,而并联机构的奇异性显得更加复杂,出现位姿更加多变,且辨

识更加困难。目前,Stewart 型并联机构的奇异机理尚未完全厘清,其中一个重要原因是六自由度并联机构奇异性能的评价指标还不够完善。在现有的几个表征指标中,最简单的是机构 Jacobian 矩阵的秩^[27]。若秩小于 6,则机构处于奇异位形。如图 9 中两个拓扑构型的 Jacobian 矩阵的秩均等于 5^[27]。对于非冗余驱动的并联机构,也可以通过计算 Jacobian 矩阵的行列式是否为零来辨识机构的奇异位形^[28]。然而,这两个指标均不能表征并联机构所处位形距离奇异位形的远近程度。

并联式六维加速度感知机构处于奇异位形附近区域时,亦会表现出较差的运动/力传递性能^[21],故识别出感知机构的所有奇异类型并不是奇异性研究的最终目的。如何定义一个统一的评价标准来衡量不同构型 Stewart 并联机构距离各种奇异位形的远近,以及确定内部不包含奇异位形且远离奇异轨迹的“优质工作空间”,对于并联式六维加速度感知机构的设计和应用同样意义重大。

为量化并联机构的“优质工作空间”,有学者采用 Jacobian 矩阵的条件数(或其倒数)来表征机构所处位形距离奇异位形的远近程度^[29]。条件数越小,表明距离奇异位形越远,机构的运动和力传递/约束性能就越好。通过该表征指标,可以将并联机构的“奇异点”扩展至“奇异区域”,这是理论的一大突破。Wang 等^[30]在对一种空间三自由度并联机器人进行优化设计时,将“优质工作空间”和“劣质工作空间”的 Jacobian 矩阵条件数倒数的分界值设置为固定值 0.5。但是,Stewart 型并联机构优质工作空间临界值的研究尚未见过报道。

关于 Jacobian 矩阵条件数指标,目前还有 3 个未解决问题:(1)Jacobian 矩阵中各元素的量纲不一致,无法区分矩阵的最大、最小奇异值,故条件数要么无物理意义,要么与机构的实际性能不相符;(2)Jacobian 矩阵的条件数与参考点的选取有关^[15]; (3)对于不同几何结构或不同拓扑结构的并联机构,决定其奇异区域边界的 Jacobian 矩阵条件数的临界值也不相同,这不利于制定统一的设计标准。

目前,提升 Stewart 型并联机构奇异性能的

方法主要有三种。第一种方法是“驱动冗余”^[27],其数学原理是通过增加 Jacobian 矩阵的行数来弥补其秩的不足,但这样会增加拓扑结构的复杂度和系统的运行成本。第二种方法是“运动冗余”^[31],其数学原理是通过改变 Jacobian 矩阵的元素值来弥补其秩的不足。然而,被替换了的局部自由度反过来又会“诱导”出其他更多的奇异位形,甚至会减小机构的无奇异工作空间^[32]。第三种方法是“路径规划”^[29],其数学原理是统一 Jacobian 矩阵行列式值在规划路径上的正负号。然而,由于受到规划算法的限制,感知机构动平台无法跟踪任意指定的连续路径,反而会缩小传感器的量程。

4.3 基频共振性能

工作频带是衡量加速度传感器性能的重要指标之一,其下限取决于传感器前置放大电路(信号调理电路)的输入电阻,输入电阻越大,最小工作频率越小;上限取决于传感器感知机构的基频及其共振区域,基频越高且共振区域越窄,最大工作频率就越大^[20]。因此,可通过增大并联式六维加速度感知机构的系统基频并缩小基频共振区间,来拓宽六维加速度传感器的工作频带。

如果将静刚度和奇异性均视为感知机构的静态特性,那么基频共振就属于感知机构的动态特性。文献[33]运用线性叠加原理,通过推导输入、输出量的传递函数,研究了单维压电式加速度传感器的基频共振性能。研究发现,工作频带的上限介于系统基频的 $1/5 \sim 1/3$ 之间。但是,由于运动自由度和输入、输出量耦合特性的不同,该方法和结论并不适用于六维加速度传感器。目前,一般 Stewart 型并联机构的基频方程^[34]、幅频方程^[35]的解析解都已经被推导出来。但是,基频所对应的共振区域还不够明确,这不利于并联式六维加速度传感器工作频带性能的评估和优化。

文献[20]提出了一种基于实物样机实验的“四步激励法”,结合线性包络理论辨识出“9-3”(图 8)、“12-6”(图 7)两种 Stewart 型六维加速度感知机构的共振区域。它们的工作频带上限均介于系统基频的 $1/35 \sim 1/32$ 之间,且不确定度仅为 0.004 1。然而,尚未有研究建立一般 Stewart

型并联机构的基频共振区域与其几何、拓扑结构之间的解析/数值映射模型,故未能给出以缩小共振区域为目标的结构优化设计准则。该问题的主要难点在于“共振区域”与“正常区域”的分界是可变的,与周期性输出误差阈值有关,而该阈值由感知机构的结构以及基础激励的特性共同决定。

目前,提升 Stewart 型并联机构基频的方法主要有两种。第一种方法是增大支链的横截面积^[36],但为了避免支链之间发生干涉或碰撞^[37],这样可能会缩小六维加速度传感器的量程。第二种方法是减小动平台的质量和惯量^[34],但会降低六维加速度传感器输出信号的信噪比^[20]。另外,这两种方法都无法缩小系统的基频共振区域。因此,单纯地依靠优化固定拓扑构型感知机构的几何、物理特征,并不能从根本上拓宽六维加速度传感器的工作频带。

4.4 故障修复性能

六维加速度传感器在复杂、未知、多变的工作环境中很可能会出现多条支链同时出现故障的情况,表现为大输出扰动^[21],如信号滤波处理不彻底或者偏置电流、偏置电压引起的偏置故障,线路断裂引起的开路故障,元器件性能退化引起的漂移故障等。此时,现有的基于实验室条件下理想输出信号的解耦算法不再适用,由此反推出的基础激励也是无效的,甚至会造成不可估量的生命、财产损失。因此,保证六维加速度传感器在故障情况下还能够“带病”正常工作,是另一个亟待解决的关键问题。

传感器的“容错”能力主要由其感知机构的故障修复性能(同时兼备静态和动态特性)决定^[21]。并联式六维加速度感知机构故障修复性能的表征研究已经比较成熟,一般通过故障的修复率、修复精度、诊断误判率和诊断漏判率 4 个指标共同评价^[38]。目前,Stewart 型并联机构的故障诊断方法主要有三种。第一种方法是实时监控机构的可操作度^[39]、输入传递指标、输出传递指标和局部传递指标^[40]等一个或多个传递性能指标,当指标值超过预设的故障阈值时,则机构被诊断为“故障”。然而,这种方法并不能诊断出发生故障的具体支链。第二种方法是“传感冗余”^[41],其基本原理是对比不同传感组合下机构

正向运动学的求解结果,如果正解值出现了较大偏差,则机构被诊断为“故障”。然而,绝大多数 Stewart 型并联机构正向运动学的求解难度非常大并且计算实时性差,故该方法的可行性较弱。第三种方法是基于机构的冗余输出量与静定输出量之间的协调方程及其非齐次项阈值,构造“协调闭链”^[21],当监测到闭链断开时,则“断点”对应的支链被诊断为“故障”。然而,并不是所有 Stewart 型并联机构的协调方程都能够生成协调闭链,如图 10 所示“12-4”构型的协调闭链^[38]就无法构造。

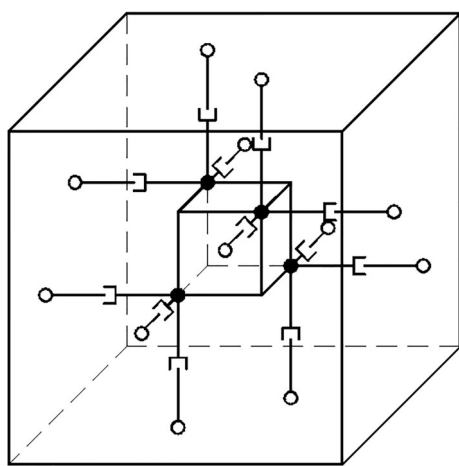


图 10 “12-4”Stewart 型并联机构

Fig. 10 Schematic of “12-4” Stewart-type parallel mechanism

提升 Stewart 型并联机构故障修复性能采用的基本方法是“输出冗余”,具体的技术方案有三种。第一种是建立正常工作支链输出量与机构输入量之间的解析映射关系^[42]。但是,该方案的前提条件是已知全部的故障支链,不适用于故障支链未知的情况。第二种方案是直接舍弃掉故障支链的输出量^[39],但由于机构的主动支链始终会对动平台贡献轴向力,故该方案仅适用于主动支链变为被动支链的故障情况。第三种方案是通过求解关于非独立输出量的协调方程组,获得故障输出量与正常输出量之间的解析映射函数^[21]。该方案的优点是不需要额外添加辅助测量设备,就能够依靠感知机构自身的固有尺度约束关系,快速、精准地修复故障输出量;缺点则是由于传统感知机构的构型固定

不变,故障自诊断率和自修复率偏低,即故障算法仅能修复一部分故障情况。如图 10,图 8 和图 7 所示,构型的最大故障自修复率分别为 73.0%^[38],6.5%^[43]和 89.0%^[26];此外,对它们进行故障诊断时,还存在较大概率的误判和漏判^[38]。也就是说,尽管这几种构型都满足并联式六维加速度感知机构的“拓扑构型条件”,但是它们的容错能力却不够理想。

5 并联式六维加速度感知机构操作性能的标定平台

并联式六维加速度感知机构操作性能的评价和优化理论体系的建立,均离不开样机实验研究。虽然虚拟样机实验在一定程度上能够检验性能模型的正确性和有效性^[44],但是由于仿真软件中的实验条件过于理想化,并不能反映感知机构的实际工况。另外,由于加工、装配等外界因素的影响,感知机构的实际结构参数与期望结构参数不完全一致,且存在较强的不确定性^[45]。因此,还需要对并联式六维加速度感知机构进行实物样机实验。实物样机实验中,一般会采用六维加速度标定平台,为待标定的感知机构提供六维基础激励及其标准参照信息^[46]。

5.1 基本要求

根据并联式六维加速度感知机构需要标定的操作性能及其相关的结构参数,六维加速度标定平台至少需要满足如下基本要求:

- (1)能够输出多种特征的运动,包括周期往复的纯线运动、纯角运动以及它们的合成运动;
- (2)输出运动加速度的大小和频率能够连续变化且可控,并且方向可调节;
- (3)能够方便安装标准传感器和待标定的感知机构,且保证它们始终感知到相同大小和相同(反)方向的线加速度、角加速度;
- (4)输出运动平稳、无抖动,并能够长时间稳定工作;
- (5)频繁的启、停对感知机构及平台自身所造成的影响和破坏程度尽可能地小;
- (6)平台与感知机构彼此之间的包括静电、磁场在内的干扰尽可能地小。

5.2 原理方案

六维加速度标定平台的原理方案主要有 4 种:方案 1 是采用高精度的激振器^[47]和三维旋转台^[48](图 11),分别标定六维加速度感知机构的移动操作性能和转动操作性能。但是,由于激振器和旋转台只能输出纯线运动或纯角运动,无法在旋转台上“背靠背”^[49]地安装标准传感器和待标定感知机构,因此,这样的标定平台不满足 5.1 节中提到的第 1 个和第 3 个要求。



图 11 弗莱堡大学(德国)研制的三维旋转台^[48]

Fig. 11 Three-dimensional rotation table designed by University of Freiburg^[48]

感知机构的整体操作性能并不是移动操作性能和转动操作性能的简单叠加^[45]。在纯线加速度激励和纯角加速度激励下,就不能模拟出并联式六维加速度感知机构的全部故障情况,由此标定出的感知机构的操作性能是片面的。

三维旋转台的三根转轴始终交于同一点,故无法在平台上找到第二个交叉点安装标准传感器。仅仅依靠旋转台自身的输入精度和结构的加工精度,并不能保证其输出精度,这会影响并联式六维加速度感知机构的性能标定效果。

方案 2 是采用一维旋转台配合姿态调整平台^[50],共同标定感知机构的操作性能。如图 12 所示,待标定的感知机构安装在姿态调整平台上,而姿态调整平台又安装在旋转台的任一偏心位

置。根据向心加速度原理可知,感知机构能够同时感知角加速度激励和线加速度激励;而且,通过改变调整平台的姿态角和安装位置,能够实现输出运动加速度大小和方向的调节。

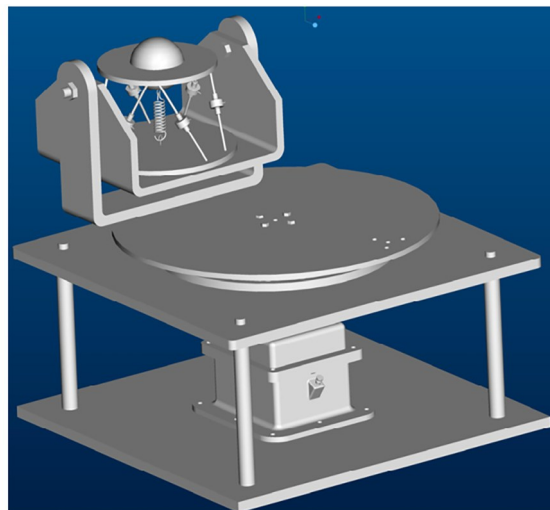


图 12 燕山大学设计的六维加速度标定平台^[50]

Fig. 12 Calibration platform for six-axis acceleration designed by Yanshan University^[50]

在姿态调整平台关于旋转台转轴对称的位置安装标准传感器,可以保证标准传感器与待标定感知机构感知到大小相同和方向相反的六维加速度激励。但是,由于旋转台一直处于转动的状态,该方案并不能输出纯线运动,因此,这样的标定平台不满足第 1 个基本要求。

方案 3 是基于 Stewart 平台机构设计的六自由度振动平台^[51],如图 13 所示。振动平台的驱动包括机械传动、电动控制和液压控制等多种方式。通过控制 6 条支链的伸、缩运动,动平台可输出纯线运动、纯角运动以及它们的复合运动,且输出运动加速度的大小、方向和频率能够连续变化且可控。

当动平台做非定轴的纯角运动或者线运动和角运动的合成运动时,根据空间相对运动学理论可知,在输出平台上一般不存在六维加速度始终相等或相反的两个位置点。因此,无法在动平台上“背靠背”地安装标准传感器和待标定的感知机构。此外,根据并联机构运动学理论可知,本振动平台欲输出周期往复的六维加速度,则支链的伸缩运动规律也必须是周期往复的。这样

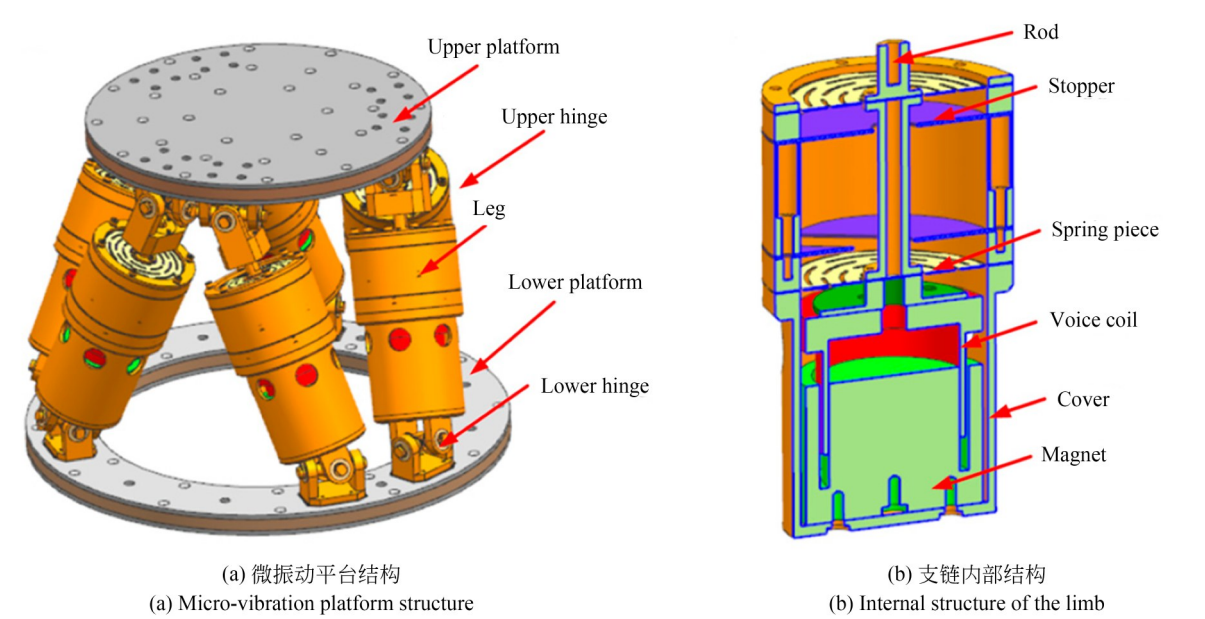


图 13 中国科学院大学研制的微振动平台结构^[51]
Fig. 13 Structure of micro-vibration platform designed by University of Chinese Academy of Sciences^[51]

长时间高频工作后,驱动器势必会持续发热并容易引起故障。综上,这样的标定平台不满足第 3 个和第 4 个基本要求。

方案 4 是基于齿轮齿条机构设计的六维加速度标定平台^[52]。如图 14 所示,标定平台上具有多对齿轮、齿条,通过切换它们的啮合和分离状态,可以将激振器产生的往复直线运动,转变为竖直方向上两根圆柱齿轮轴的周期往复纯线运动、纯角运动和复合运动。两根输出轴上齿轮的结构

参数完全相同,且与同一根齿条相啮合,这能够确保它们的运动参量(包括加速度的大小、方向和频率)完全一致。因此,可以在两根齿轮轴的上端面连接法兰,并分别安装标准传感器和待标定的感知机构。平台输出基础激励的大小和频率由激振器的输入运动和齿轮齿条机构的尺寸参数共同决定,且能够连续变化;方向则可通过改变输出轴上法兰的连接角度进行调节。具体的工作原理详见网页:<https://space.bilibili>.

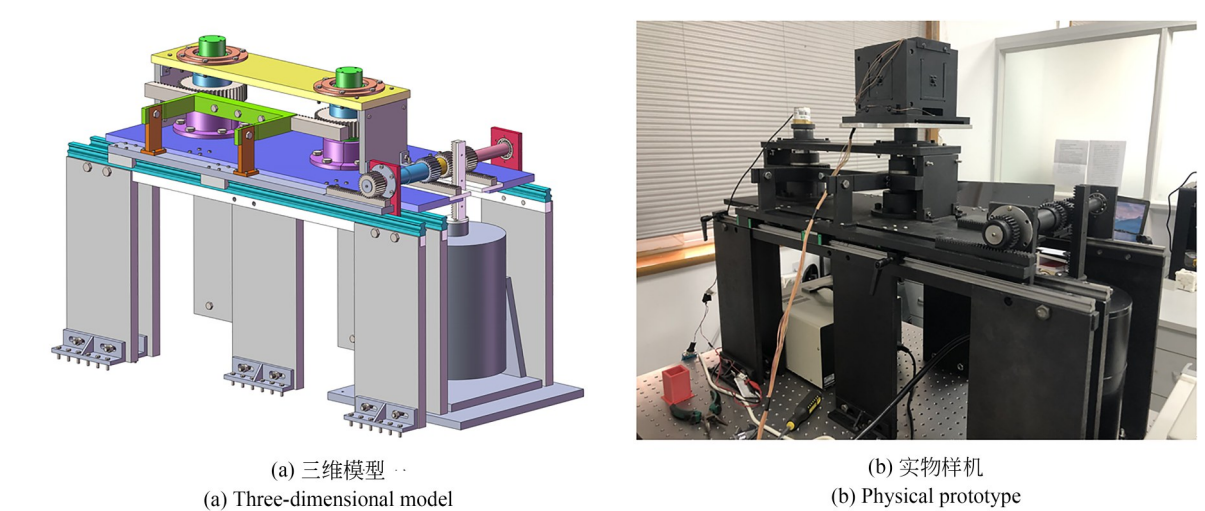


图 14 南京林业大学研制的六维加速度标定平台^[52]
Fig. 14 Six-axis acceleration calibration platform designed by Nanjing Forestry University^[52]

com/611599500?spm_id_from=333.788.b_765f7570696e666f.1。

本标定平台虽然能够同时满足 6 个基本要求,但是由于采用了齿轮高副传动的方案,且机械零部件的数量较多,较难输出高频的往复运动,也就无法标定具有大基频的并联式六维加速度感知机构。

6 结论与展望

6.1 结 论

目前,市面上还没有一款真正成熟、完善的六维加速度传感器产品,研究仍然停留在实验室原理论证阶段。其中,并联式六维加速度传感器原理的优越性最显著,且其解耦机理已经基本厘清。

并联式六维加速度传感器的关键测量性能包括解耦精度、量程、工作频带和容错性四项。它们的主要决定性因素分别为并联式六维加速度感知机构的静刚度、奇异性、基频共振和故障修复。

并联式六维加速度感知机构与并联机器人、并联式六维力感知机构的工作模式、运行机理和应用环境存在较大差异。因此,关于后两者操作性能的研究结论或方法往往不适用于或不能直接运用于并联式六维加速度感知机构。

并联式六维加速度感知机构四项操作性能评价的指标值依赖于预设标准量的选取/设定。静刚度矩阵的特征值依赖于动平台上力参考点的选取;运动 Jacobian 矩阵的条件数依赖于动平台上线运动参考点的选取,且奇异区域边界的确定依赖于该条件数阈值的设定;共振区域边界的确定依赖于周期性输出误差阈值的设定;支链故障的自诊断效果依赖于输出量协调方程中非齐次项阈值(即故障阈值)的设定。上述预设标准量与并联式六维加速度感知机构的几何/拓扑结构和基础激励均有关。因此,感知机构的操作性能对其结构和激励均有依赖性。

并联式六维加速度感知机构四项操作性能优化的基本思想及主要存在问题如下:通过支链冗余或增大支链刚度,提升静刚度性能,但它们会增大感知机构的结构复杂度以及运动学、动力学的解耦难度,降低传感器中敏感元件的灵敏

度;通过驱动冗余、运动冗余或路径规划能够提升奇异性,但它们会增大感知机构的结构复杂度,减小感知机构的无奇异工作空间,缩小传感器的量程;通过增大感知机构的基频可以提升基频共振性能,但这样可能会缩小传感器的量程或降低传感器输出信号的信噪比;通过输出冗余可以提升故障修复性能,但该方法要么仅适用于故障支链已知时的情况,要么仅适用于主动支链变为被动支链的故障情况,而且故障的自诊断率和自修复率偏低。

并联式六维加速度感知机构操作性能的标定平台原理方案主要有激振器与三维旋转台的组合标定方案、一维旋转台与姿态调整平台的组合标定方案、基于 Stewart 平台机构设计的六自由度振动平台方案,以及基于齿轮齿条机构设计的六维加速度标定平台方案。其中,前三个方案都不能完全满足六维加速度感知机构标定平台的 6 个基本要求,第四个方案仅适用于低、中频率基础激励下的性能标定。

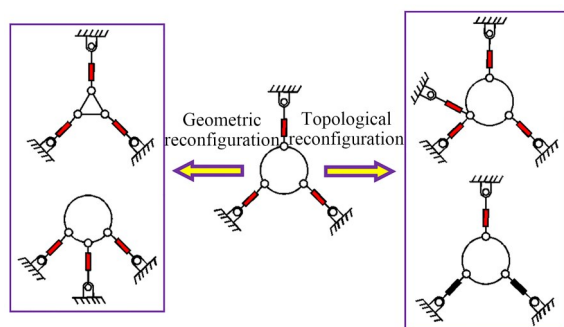
6.2 展 望

关于并联式六维加速度感知机构四项操作性能的提升,目前采取的方法都只是针对特定应用环境或特定基础激励下的特定几何/拓扑结构。然而,在超精密加工、人工智能、航空航天航海等超精尖领域,待测体的运动规律(基础激励)往往是未知且瞬息万变的,这就需要感知机构能够根据任务特点相应地改变性能。也就是说,在不确定的复杂、可变基础激励下,基于现有的性能提升方法,优化得到的“单尺度、单构型、单性能”的并联式六维加速度感知机构,不能适应“多任务”或同一任务“多阶段”的需求。

几何尺度和拓扑构型是并联机构性能的决定性因素。理论上,通过优化并联式六维加速度感知机构的几何结构和拓扑结构,可提升其操作性能。因此,本文建议感知机构应具有“变几何、变拓扑、变性能”的特性。为达到该目标,至少需要完成以下两项任务:

第一,实现并联式六维加速度感知机构的“变结构”功能,即设计可重构的感知机构。并联机构的重构分为几何重构和拓扑重构两种形式^[15]。其中,几何重构是指改变机构中构件的尺寸、形状或布置方位;拓扑重构是指改变机构中

运动副的类型、数目、工作模式及布置序列或构件的数目。为了能够更加直观地对比两类重构,这里以构型相对简单的 n -RPR(R 表示转动副,P 表示移动副)平面并联机构为例,绘制了两类重构的原理示意图,如图 15 所示(彩图见期刊电子版)。



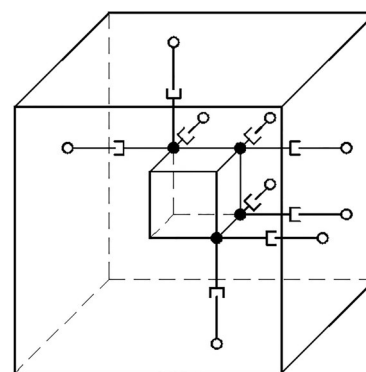
(Red rectangle stands for the actuated joint; Black rectangle stands for the locked joint)

图 15 并联机构几何重构与拓扑重构的原理示意图

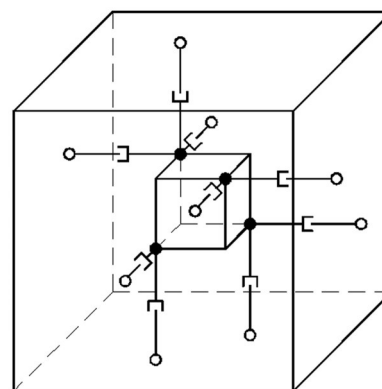
Fig. 15 Geometric reconfiguration and topological reconfiguration of parallel mechanism

目前,可重构并联机构的研究主要集中在变胞运动副^[53]、变胞构件^[54]的机械结构设计,以及机构自由度、输出运动模式的切换机理和数学表达^[55]等方面。然而,通过几何重构(如图 16 中两构态间的重组)或拓扑重构(如图 8 和图 10 中两构态间的重组)优化多维运动/力感知机构的操作性能,以适应复杂、多变环境的研究还很鲜见。由此取得的研究成果可能会引领多维传感器和多自由度并联机构的设计理念和设计方法的变革。

第二,挖掘并联式六维加速度感知机构“性能-结构-激励”三者之间的内在联系,如图 17 所示。这是因为感知机构的操作性能、几何/拓扑结构和基础激励三者之间并非完全独立,而是相互影响的。当基础激励发生变化时,感知机构的全局最小微位移量、奇异判定阈值、周期误差判定阈值及故障阈值等与性能计算相关的标准参数都会随之变化。揭示它们之间的关联,有益于揭示并联式六维加速度感知机构操作性能的机理,为性能表征、优化方法的改进或完善奠定理论基础,最终为遴选出满足实际测量需求的 Stewart 型并联式六维加速度感知机构的机型提供理论指导。



(a) 构态1
(a) Configuration 1



(b) 构态2
(b) Configuration 2

图 16 “9-4”Stewart 型并联机构

Fig. 16 Schematic of “9-4” Stewart-type parallel mechanism

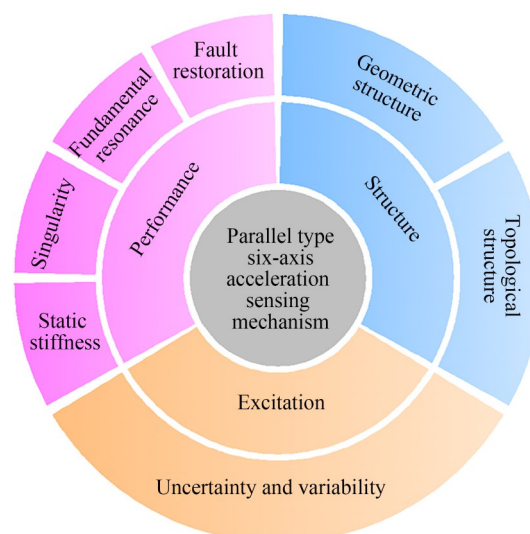


图 17 “性能-结构-激励”三位一体理论

Fig. 17 Trinity theory of ‘performance-structure-excitation’

关于并联式六维加速度感知机构操作性能的标定平台,可以设计基于平面低副(如转动副、移动副等)机构的六维加速度标定平台,这有助于增大标定平台自身的最大工作频率。除此之外,运用模态分析理论,通过优化传动机构的几

何结构和拓扑结构,改善标定平台自身的机械振动特性;借助于标准传感器的反馈信息,通过设计和优化先进控制算法,进一步提高标定平台自身的输出精度等,都是未来值得深入研究的课题。

参考文献:

- [1] 余龙煊, 邱志成, 张宪民. 基于加速度反馈的平面 3-RRR 柔性并联机器人自激振动控制[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 40-50.
YU L H, QIU ZH CH, ZHANG X M. Self-excited vibration control of the planar 3-RRR flexible parallel manipulator based on acceleration feedback[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(21): 40-50. (in Chinese)
- [2] WAHLSTRÖM J, SKOG I. Fifteen years of progress at zero velocity: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 1139-1151.
- [3] 尤晶晶, 李成刚, 左飞尧, 等. 六维加速度传感器的研究现状及发展趋势[J]. 振动与冲击, 2015, 34(11): 150-159, 172.
YOU J J, LI CH G, ZUO F Y, *et al.* Current studying status and developing trend of six-axis accelerometers[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(11): 150-159, 172. (in Chinese)
- [4] ZHANG D Z, LIU J, QIN L, *et al.* Multiparameter modeling of piezoelectric six-degree-of-freedom accelerometer about sensitivity characteristics [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(13): 7129-7137.
- [5] 程向红, 赵莹, 田芸. 一种自适应 H_∞ 滤波的运动学约束惯性导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(3): 295-300.
CHENG X H, ZHAO Y, TIAN Y. An adaptive H_∞ filtering approach for inertial navigation with motion constrained [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2019, 27(3): 295-300. (in Chinese)
- [6] SHEN X R, ZHANG H, XU Y, *et al.* Observation of alpha-stable noise in the laser gyroscope data [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(7): 1998-2003.
- [7] YANG P F, CHEN Y, CHEN Y L, *et al.* Gyro-free inertial measurement unit with unfettered accelerometer array distribution and for the object with position change in center of gravity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(7): 9423-9435.
- [8] WU Qi, LI K, SONG T. The calibration for inner and outer lever-arm errors based on velocity differences of two RINSs [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 160: 107868.
- [9] CHAPSKY V, PORTMAN V T, SANDLER B Z. Single-mass 6-DOF isotropic accelerometer with segmented PSD sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 135(2): 558-569.
- [10] PORTMAN V T, CHAPSKY V S, SHNEOR Y. Evaluation and optimization of dynamic stiffness values of the PKMs: Collinear stiffness value approach [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 74: 216-244.
- [11] 尤晶晶, 李成刚, 吴洪涛. 并联式六维加速度传感器的哈密顿动力学研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 9-17.
YOU J J, LI CH G, WU H T. Research on Hamiltonian dynamics of parallel type six-axis accelerometer [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(15): 9-17. (in Chinese)
- [12] XIAO Q J, CUI F, LUO Z H. System-level simulation and experiment for levitation control of micro-machined electrostatically suspended accelerometer [J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(12): 4895-4907.
- [13] 尤晶晶, 李成刚, 吴洪涛, 等. 预紧式并联六维加速度传感器的解耦算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1216-1225.
YOU J J, LI CH G, WU H T, *et al.* Research on the decoupling algorithm of pre-stressed parallel six-axis accelerometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(5): 1216-1225. (in Chinese)
- [14] LIU Y P, WANG X, YOU J J, *et al.* Ocean wave buoy based on parallel six-dimensional accelerometer [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 29627-29638.
- [15] YOU J, XI F, SHEN H, *et al.* A novel Stewart-type parallel mechanism with topological reconfiguration: design, kinematics and stiffness evaluation [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021,

- 162: 104329.
- [16] WU X, WANG K, WANG Y, *et al.* Kinematic design and analysis of a 6-DOF spatial five-Bar linkage[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 158: 104227.
- [17] 姚建涛, 阮豪奇, 蔡大军, 等. 冗余正交式六维力感知机构性能分析与实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(1): 162-169.
YAO J T, RUAN H Q, CAI D J, *et al.* Performance analysis and experimental study of redundant orthogonal six-axis force sensing mechanism[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(1): 162-169. (in Chinese)
- [18] MCCANN C, PATEL V, DOLLAR A. The Stewart hand: a highly dexterous, six-degrees-of-freedom manipulator based on the Stewart-Gough platform[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2021, 28(2): 23-36.
- [19] SUN Y J, LIU Y W, ZOU T, *et al.* Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor for space robot[J]. *Measurement*, 2015, 65: 135-148.
- [20] YOU J J, WANG L K, XI F F, *et al.* Decoupling algorithm and maximum operation frequency of a novel parallel type six-axis accelerometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(21): 12637-12651.
- [21] 尤晶晶, 王林康, 刘云平, 等. 基于并联机构的六维加速度传感器的反向动力学[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(6): 10-25.
YOU J J, WANG L K, LIU Y P, *et al.* Inverse dynamics of six-axis acceleration sensor based on parallel mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(6): 10-25. (in Chinese)
- [22] TIAN H B, MA H W, XIA J, *et al.* Stiffness analysis of a metamorphic parallel mechanism with three configurations[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 142: 103595.
- [23] EL-KHASAWNEH B S, FERREIRA P M. Computation of stiffness and stiffness bounds for parallel link manipulators[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, 39(2): 321-342.
- [24] GOSSELIN C, SCHREIBER L T. Redundancy in parallel mechanisms: a review[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2018, 70(1): 010802.
- [25] LUCES M, MILLS J K, BENHABIB B. A review of redundant parallel kinematic mechanisms[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 86(2): 175-198.
- [26] WANG L K, YOU J J, YANG X L, *et al.* Forward and inverse dynamics of a six-axis accelerometer based on a parallel mechanism[J]. *Sensors*, 2021, 21(1): 233.
- [27] 李瑞琴, 亢书华, 张启升, 等. 冗余驱动并联机构的性能特征及应用研究进展[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(5): 385-394, 407.
LI R Q, KANG S H H, ZHANG Q S H, *et al.* Research process on performance characteristics and application of redundantly actuated parallel mechanism[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2021, 42(5): 385-394, 407. (in Chinese)
- [28] BARON N, PHILIPPIDES A, ROJAS N. On the false positives and false negatives of the Jacobian matrix in kinematically redundant parallel mechanisms[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2020, 36(3): 951-958.
- [29] LI B K, WANG K, HAN Y G, *et al.* Singularity property and singularity-free path planning of the Gough-Stewart parallel mechanism[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017, 14(6): 172988141773497.
- [30] WANG J S, LIU X J, WU C. Optimal design of a new spatial 3-DOF parallel robot with respect to a frame-free index[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(4): 986-999.
- [31] LACOMBE J, GOSSELIN C. Singularity analysis of a kinematically redundant (6+2)-DOF parallel mechanism for zero-torsion configurations[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 170: 104682.
- [32] KARIMI A, MASOULEH M T, CARDOU P. Avoiding the singularities of 3-RPR parallel mechanisms via dimensional synthesis and self-reconfigurability[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 99: 189-206.
- [33] GHEMARI Z, SALAH S, BOURENANE R. Resonance effect decrease and accuracy increase of piezoelectric accelerometer measurement by appropriate choice of frequency range[J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018: 1-8.
- [34] 王林康, 尤晶晶, 李成刚, 等. Stewart衍生型六维加速度传感器的工作频带研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2021, 41(4): 701-709, 830.

- WANG L K, YOU J J, LI C H, *et al.* Study on working frequency band of Stewart derived six-axis acceleration sensor[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41 (4): 701-709, 830. (in Chinese)
- [35] ZHANG D Z, JING J M, QIN L, *et al.* Analytical mathematical model of piezoelectric 6-D accelerometer about amplitude-frequency characteristics [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-11.
- [36] JIANG H Z, HE J F, TONG Z Z. Characteristics analysis of joint space inverse mass matrix for the optimal design of a 6-DOF parallel manipulator [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45 (5): 722-739.
- [37] 王伟, 谢海波, 傅新, 等. 一种基于固有频率分析的液压 6 自由度并联机构参数优化方法[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(3): 77-82.
- WANG W, XIE H B, FU X, *et al.* Optimal method of structural parameters for hydraulic 6-dof parallel platform based on natural frequency [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(3): 77-82. (in Chinese)
- [38] 尤晶晶, 符周舟, 陈华鑫, 等. Stewart 型六维加速度传感器的双支链故障自修复[J]. *压电与声光*, 2021, 43(5): 715-719.
- YOU J J, FU ZH ZH, CHEN H X, *et al.* Fault self-restoration for double branches of Stewart-type six-axis accelerometers[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2021, 43(5): 715-719. (in Chinese)
- [39] YI Y, MCINROY J E, CHEN Y X. Fault tolerance of parallel manipulators using task space and kinematic redundancy [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(5): 1017-1021.
- [40] ISAKSSON M, MARLOW K, MACIEJEWSKI A, *et al.* Novel fault-tolerance indices for redundantly actuated parallel robots[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2017, 139(4): 042301.
- [41] NOTASH L, HUANG L. On the design of fault tolerant parallel manipulators[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2003, 38(1): 85-101.
- [42] 姚建涛, 崔朋肖, 朱佳龙, 等. 预紧式并联六维力传感器容错测量机理与标定测试研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(8): 58-66.
- YAO J T, CUI P X, ZHU J L, *et al.* Fault-tolerant measurement mechanism and calibration experimental study of pre-stressed parallel six-axis force sensor [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(8): 58-66. (in Chinese)
- [43] LI C G, WANG Y, CHEN J, *et al.* Fault diagnosis in a gyroscope-based six-axis accelerometer[J]. *Transactions of FAMENA*, 2018, 42 (3): 103-114.
- [44] DU C, TANG J, YU C, *et al.* Isotropy analysis of parallel six-axis accelerometer on circular hyperboloids[J]. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2020, 14: 222-231.
- [45] ZHANG D Z, LI M, QIN L, *et al.* Analytical modeling of piezoelectric 6-degree-of-freedom accelerometer about cross-coupling degree[J]. *Measurement*, 2021, 181: 109630.
- [46] 孔永芳, 黄海, 李琪. 基于 Stewart 平台的有效载荷低阶模态振动抑制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(11): 2507-2516.
- KONG Y F, HUANG H, LI Q. Vibration suppression for payload low-order modes using a Stewart platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28 (11): 2507-2516. (in Chinese)
- [47] 邱志成, 何成虎. 三耦合柔性梁振动的视觉检测与 H_∞ 控制[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(24): 3168-3177.
- QIU ZH CH, HE CH H. Visual detection and H_∞ vibration control of three coupled flexible beams [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(24): 3168-3177. (in Chinese)
- [48] SCHOPP P, GRAF H, BURGARD W, *et al.* Self-calibration of accelerometer arrays [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(8): 1913-1925.
- [49] 李峰, 万秋华, 刘萌萌, 等. 低轨光学卫星同轨立体成像姿态规划与控制方法[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(14): 1682-1693.
- LI F, WAN Q H, LIU M M, *et al.* Attitude planning and control method of low-orbit optical satellite along-track stereoscopic imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(14): 1682-1693. (in Chinese)
- [50] 丁冬生. 六维加速度传感器的结构与标定研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
- DING D SH. *Research on Structure and Calibration of Six-axis Acceleration Sensor* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010. (in Chinese)
- [51] ZHU H, HE S, XU Z B, *et al.* Iterative feedback control based on frequency response model for a six-

- degree-of-freedom micro-vibration platform [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2022, 28(13/14): 1727-1738.
- [52] 史浩飞, 尤晶晶, 王林康, 等. 六维加速度传感器标定平台的设计与仿真研究[J]. *传感器与微系统*, 2023, 42(1): 50-54.
- SHI H F, YOU J J, WANG L K, *et al.* Design and simulation study of calibration platform for six-axis acceleration sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2023, 42(1): 50-54. (in Chinese)
- [53] MOOSAVIAN A, XI F. Holonomic under-actuation of parallel robots with topological reconfiguration[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 96: 290-307.
- [54] ZHAO Y, XI F, TIAN Y, *et al.* Design of a planar hyper-redundant lockable mechanism for shape morphing using a centralized actuation method[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 165: 104439.
- [55] LAMBERT P, CRUZ L D, BERGELES C. Mobility of overconstrained parallel mechanisms with reconfigurable end-effectors [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 171: 104722.

作者简介:



尤晶晶(1985—),男,江苏南通人,博士,副教授,硕士生导师,2010年、2013年于南京航空航天大学分别获得硕士和博士学位,主要研究方向为六维加速度传感器和并联机器人。E-mail: youjingjing251010@njfu.edu.cn