(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 116033998 B
(45)授权公告日 2025.06.13

(21)申请号 202180055850.X
(22)申请日 2021.06.10
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 116033998 A
(43)申请公布日 2023.04.28
(30)优先权数据
102020115517.4 2020.06.10 DE
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2023.02.09
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2021/065699 2021.06.10
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2021/250201 DE 2021.12.16

(73)专利权人 德国航空太空中心
地址 德国波恩
(72)发明人 约翰尼斯·英格斯伯格
詹卢卡·加洛法洛
乔治·阿德里安·梅森
(74)专利代理机构 北京弘权知识产权代理有限公司 11363
专利代理师 许伟群 李少丹

(51)Int.Cl.
B25J 9/16(2006.01)
(56)对比文件
CN 101947787 A,2011.01.19
审查员 薛蕾

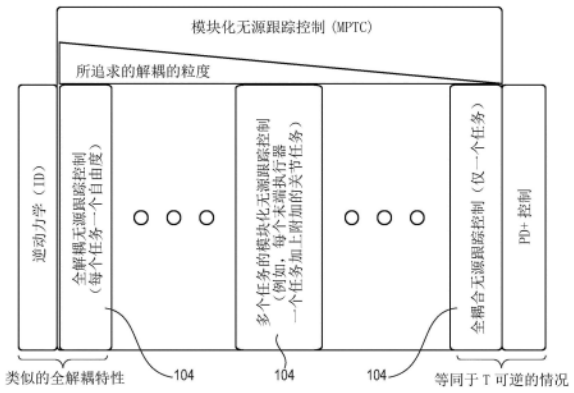
权利要求书1页 说明书23页 附图4页

(54)发明名称

用于控制机器人的方法和计算机程序产品

(57)摘要

用于控制运动学冗余机器人(100)以完成多个任务的方法,其中使用基于无源性的至少一个第一控制器模块(102),为所述至少一个第一控制器模块(102)计算至少一个任务目标描述和至少一个相关联的任务映射,为所述任务计算至少一个权重,并且使用所述至少一个权重将所述至少一个第一控制器模块(102)集成到总控制器(104)中,以及计算机程序产品,包括指令,当借助于至少一个处理器执行该程序时,所述指令促使所述至少一个处理器执行根据这种方法。



CN 116033998 B

1.一种用于控制运动学冗余机器人(100)以完成多个任务的方法,其中,使用基于无源性的至少一个第一控制器模块(102),为所述至少一个第一控制器模块(102)计算至少一个任务目标描述和至少一个相关联的任务映射,为所述任务计算呈特定于任务的对称的矩阵$\mathbf{W_k = \Psi_k M_k^{-1}}$形式的至少一个权重,其中,矩阵$W_k$由任务惯量矩阵$M_k$的逆矩阵和用于对不同任务进行独立加权的加权标量$\Psi_k$组成,其中,$M_k = (J_k M^{-1} J_k^T)^{-1}$,$J_k$是任务雅可比矩阵,以及M是机器人的动态模型的惯量矩阵,并且在使用至少一个任务加权矩阵W_k的情况下将所述至少一个第一控制器模块(102)集成到总控制器(104)中,所述至少一个任务加权矩阵以子矩阵的形式合并成对称的并且分块对角的总体加权矩阵W。

2.根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述至少一个任务目标描述和所述至少一个相关联的任务映射按照以下方式加以计算,即所述至少一个第一控制器模块(102)的标称特性相应于弹簧质量阻尼器系统的特性。

3.根据权利要求1或2所述的方法,其特征在于,所述至少一个任务目标描述和所述至少一个相关联的任务映射基于自然的机器人惯量来加以计算。

4.根据权利要求1或2所述的方法,其特征在于,所述至少一个任务目标描述和所述至少一个相关联的任务映射按照以下方式加以计算,即特定于任务的科里奥利和离心效应保持不变,同时补偿所有其余的科里奥利和离心效应。

5.根据权利要求1或2所述的方法,其特征在于,将所述至少一个任务目标描述计算为任务向量,和/或将所述至少一个相关联的任务映射计算为任务映射矩阵。

6.根据权利要求1或2所述的方法,其特征在于,将至少一个另外的控制器模块集成到所述总控制器(104)中。

7.根据权利要求1或2所述的方法,其特征在于,将制定为约束的至少一个另外的控制器模块集成到所述总控制器(104)中。

8.根据权利要求6所述的方法,其特征在于,对所述至少一个另外的控制器模块加权。

9.根据权利要求6所述的方法,其特征在于,所述至少一个第一控制器模块和/或所述至少一个另外的控制器模块按照以下方式被加权,即在超定控制问题的情况下,所述总控制器(104)也具有至少近似无源的特性。

10.根据权利要求6所述的方法,其特征在于,所述至少一个第一控制器模块(102)和/或所述至少一个另外的控制器模块借助于至少一个伪逆和/或至少一个逆来加以优化。

11.根据权利要求6所述的方法,其特征在于,所述至少一个第一控制器模块(102)和/或所述至少一个另外的控制器模块被二次优化。

12.根据权利要求1或2所述的方法,其特征在于,将所述第一控制器模块(102)中的至少一个实施为跟踪控制器。

13.根据权利要求1或2所述的方法,其特征在于,将所述第一控制器模块(102)中的至少一个实施为调整控制器。

14.根据权利要求1或2所述的方法,其特征在于,向每个可控的自由度分配单独的控制器模块。

15.一种计算机程序产品,包括指令,当借助于至少一个处理器执行程序时,所述指令促使所述至少一个处理器执行根据权利要求1至14中任一项所述的方法。

用于控制机器人的方法和计算机程序产品

技术领域

[0001] 本发明涉及一种控制运动学冗余机器人以执行多个任务的方法。本发明还涉及一种用于执行这种方法的计算机程序产品。

背景技术

[0002] 同时控制多个任务,即所谓的“Task”,是机器人控制领域的重要研究课题。早期的工作是针对运动学冗余机器人观察唯一任务和对应零空间、即剩余的机器人自由度的控制的较简单情况,而今天存在多种既定的方法使得可以处理有优先级和无优先级的多个任务。本文献将首先在运动学层面解决任务协调问题的工作与直接在动力学层面处理控制问题的工作区分开来。另一种重要的分类可能性在于划分为通过分层控制器强制严格任务优先级的方法和通过任务加权产生软优先级的其他方法。

[0003] 在运动学层面,出版物Y.Nakamura、H.Hanafusa和T.Yoshi Kawa的Taskpriority based redundancy control of robot manipulators(The International Journal of Robotics Research,6(2):3-15,1987.doi:10.1177/027836498700600201)和G.Antonelli的Stability Analysis for Prioritized closedloop inverse kinematic algorithms for redundant robotic systems(IEEE Transactions on Robotics,25(5):985-994,2009)提出了基于零空间投影并保证严格任务层次结构的分层控制器。为了解决可能的任务奇异性问题,出版物F.Kanehiro、H.Hirukawa和S.Kajita.Openhrp的Open Architecture Humanoid Robotics Platform(The International Journal of Robotics Research,23(2):155-165,2004.doi:10.1177/0278364904041324)提出了奇异性鲁棒的逆运动学方法。然而,通过这种奇异性鲁棒的逆运动学,失去了严格的任务层次结构,因为由此最终会在各个任务之间产生权重。

[0004] 其他方法在动力学层面同时处理多个任务。进一步开发了“操作空间”方法,以实现人形机器人的控制。为此参考出版物L.Sentis和O.Khatib的Synthesis of Whole-Body behaviors through hierarchical control of behavioral primitives,International Journal of Humanoid Robotics,2(4):505-518,2005和L.Sentis、J.Park和O.Khatib的Compliant Control of multicontact and center-of-mass behaviors in humanoid robots,IEEE Transactions on Robotics,26(3):483-501,2010。基于“逆动力学”(ID)的其他方法使用分层二次规划(QP)。为此参考出版物J.Peters、M.Mistry、F.Udwadia、J.Nakanishi和S.Schaal的A unifying framework for robot control with redundant dofs.Autonomous Robots,24:1-12,2008,doi:10.1007/s10514-007-9051-x.,Adrien Escande、Nicolas Mansard和Pierre-Brice Wieber的Hierarchical quadratic programming:fast online humanoid-robot motion generation,The International Journal of Robotics Research,33(7):1006-1028,2014,doi:10.1177/0278364914521306以及K.Bouyarmane和A.Kheddar的On Weight-Prioritized multitask control of humanoid robots,IEEE Transactions on Automatic Control,63(6):1632-

1647,June 2018.ISSN 2334-3303,doi:10.1109/TAC.2017.2752085。提到的大多数方法都是针对严格的任务解耦。由此例如至少在理论上确保了不同的任务不会相互影响,并且各个任务在干扰后的相应瞬态特性也完全与其他任务坐标无关。

[0005] 这里介绍的方法受到基于逆动力学的跟踪控制器系列的启发,这些控制器通过使用唯一的加权二次规划(QP)力求在一系列任务之间实现软折衷。为此参考出版物M.A.Hopkins、D.W.Hong和A.Leonessa的Compliant locomotion using whole-body control and divergent component of motion tracking,In IEEE Int.Conf.on Robotics and Automation(ICRA),5726-5733页,2015年5月,doi:10.1109/ICRA.2015.7140001.,T.Koolen、S.Bertrand、G.Thomas、T.de Boer、T.Wu、J.Smith、J.Englsberger和J.Pratt的Design of a Momentum-Based Control Framework and application to the humanoid robot atlas,International Journal of Humanoid Robotics,13(01):1650007,2016,doi:10.1142/S0219843616500079以及J.Englsberger、G.Mesesan、A.Werner和C.Ott.Torque-Based Dynamic Walking的a long way from simulation to experiment,In IEEE Int.Conf.on Robotics and Automation(ICRA),440-447页,2018。这种控制器非常容易实现,并且具有高度灵活性的特点。然而,与根据出版物B.Paden和B.Riedle的APositive-Real Modification of a class of nonlinear controllers for robot manipulators,在1988年American Control Conference,1782-1785页中,1988年6月doi:10.23919/ACC.1988.4790015.,A.Dietrich的Whole-Body Impedance Control of Wheeled Humanoid Robots,116卷,Springer International Publishing,2016,ISBN 978-3-319-40557-5.,B.Henze、M.A.Roa和Ch.Ott的Passivity-based whole-body balancing for torque-controlled humanoid robots in multi-contact scenarios,The International Journal of Robotics Research,35(12):1522-1543,2016,doi:10.1177/0278364916653815.,G.Mesesan、J.Englsberger、G.Garofalo、C.Ott和15:4710.06.2020的A.Albu-**Schäffer.**Dynamic walking on compliant and uneven terrain using dcm and passivity-based wholebody control,In IEEE-RAS19th Int.Conf.on Humanoid Robots(Humanoids),25-32页,2019以及A.Dietrich和C.Ott的Hierarchical Impedance-Based tracking control of kinematically redundant robots,IEEE Transactions on Robotics,36(1):204-221,2020,ISSN 1941-0468,doi:10.1109/TRO.2019.2945876的基于无源型的方法相比,基于逆动力学的控制器在模型误差和接触不确定性方面的鲁棒性较差,因此在实际使用中会出现诸如振动的问题,而这些问题又必须借助于启发式方法来处理。

[0006] 此外,所提出的方法既受到出版物K.Bouyarmane和A.Kheddar的On Weight-Prioritized multitask control of humanoid robots,IEEE Transactions on Automatic Control,63(6):1632-1647,2018年6月.ISSN 2334-3303,doi:10.1109/TAC.2017.2752085的基于权重的多任务控制器的启发,又受到出版物A.Dietrich和C.Ott的Hierarchical Impedance-Based tracking control of kinematically redundant robots,IEEE Transactions on Robotics,36(1):204-221,2020,ISSN 1941-0468,doi:10.1109/TRO.2019.2945876的基于无源性的严格分层的控制器的启发。类似于出版物K.Bouyarmane和A.Kheddar的On Weight-Prioritized multitask control of humanoid

robots.IEEE Transactions on Automatic Control,63(6):1632-1647,2018年6月,ISSN 2334-3303,doi:10.1109/TAC.2017.2752085,所提出的方法使用二次规划(QP)来统一各个任务的控制目标或将它们相互权衡。然而,在此情况下,在出版物K.Bouyarmane和A.Kheddar的On Weight-Prioritized multitask control of humanoid robots.IEEE Transactions on Automatic Control,63(6):1632-1647,2018年6月,ISSN 2334-3303,doi:10.1109/TAC.2017.2752085中,与各个任务相关联的每个控制器都是基于逆动力学计算的,其中使用单位矩阵作为期望的惯性,这对应于反馈线性化。与此相反,所提出的方法基于无源性概念计算与各个任务相关联的控制器,并使用机器人的自然惯性,从而实现类似于PD+控制器的特性。与出版物A.Dietrich和C.Ott的Hierarchical Impedance-Based tracking control of kinematically redundant robots,IEEE Transactions on Robotics,36(1):204-221,2020,ISSN 1941-0468,doi:10.1109/TRO.2019.2945876公开的方法相反——该方法也基于对控制方案的自然惯性的使用,所提出的方法使用加权的QP公式,即软优先级,由此可以组合任意数量的不同任务,其中该方法也在特定状况下(例如在出现任务奇异性时)导致攻击行为减少。

[0007] 公开文件“CISNEROS RAFAEL ET AL:“QP-based task-space hybrid/parallel control for multi-contact motion in a torque-controlled humanoid robot”,2019IEEE-RAS19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANOID ROBOTS(HUMANOIDS),IEEE,2019年10月15日(2019-10-15),第663-670页,XP033740754,DOI:10.1109/HUMANOIDS43949.2019.9035038”讨论了对于扭矩控制的仿人机器人的多接触运动进行的基于QP的任务空间混合/并行控制,并且扩展了早期基于QP的用于鲁棒的扭矩控制的系统,以实现无需总扭矩反馈的力控制。所述控制仅依靠末端效应器上的力/力矩传感器、关节编码器和用于运动学反馈的IMU。此外,它还与QP求解器的内部状态保持一致。

[0008] 公开文件“CISNEROS RAFAEL ET AL:“Robust Humanoid Control Using a QP Solver with Integral Gains”,2018IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS(IROS),IEEE,2018年10月1日(2018-10-01),第7472-7479页,XP033490715,DOI:10.1109/IROS.2018.8593417”讨论了通过使用具有积分增益的QP求解器对人形机器人进行鲁棒控制。提出了用于扭矩控制的仿人机器人的控制框架,该框架能在二次编程(QP)中有效地最小化跟踪误差,二次编程被表述为带约束条件的加权的多目的任务。结果产生了一个最优的、可动态实现的参考系,在存在未建模的扭矩失真和低频的受限的干扰的情况下,无需总扭矩反馈,就能以指数收敛的方式进行鲁棒跟踪。这是通过在Lyapunov稳定扭矩控制中引入积分增益来实现的,积分增益利用了机器人动态模型的被动特性及其对QP求解器的动态限制的影响。

[0009] 由文献WO 2021/123057 A1已知了一种可模块化配置的机器人。

发明内容

[0010] 本发明所基于的任务是改进开头提到的方法。此外,本发明所基于的任务是提供一种开头所述的计算机程序产品。

[0011] 该任务通过下面的方法来解决。该任务还通过具有下面提及的特征的计算机程序产品来解决。

[0012] 该方法可以用于在以反馈控制技术来控制机器人。例如,该方法可以用于服务机器人、医疗机器人、工业4.0、宇航员机器人辅助领域。原则上,只要可以使用具有运动学冗余的由力/扭矩控制的机器人,并且既期望高精度又期望灵活的人机交互或环境机器人交互,就可以使用该方法。

[0013] 运动学冗余机器人可以具有如此多的自由度,使得可以同时执行多个任务。这些任务可以相互独立。这些任务可以至少部分地同时执行。机器人可以由力控制和/或由扭矩控制。基于无源性的控制器模块可以是基于阻抗的控制器模块。术语“无源性”在当前情况下特别是用于限制“活动”,其中在系统中出现不期望的能量增加。

[0014] 术语“任务目标描述”在当前情况下特别是描述了以下变量,该变量由对应于相应任务的实际目标的项与对应的预控制或补偿项的组合产生。该任务的对应目标可以例如由参考轨迹的标称跟踪和/或有利地同时灵活的阻抗特性(例如在与环境、对象或人交互的情况下)组成。所述预控制和/或补偿项可以例如完全或部分地补偿重力效应以及科里奥利效应和/或离心效应,以产生实际的期望特性和/或实际的期望动态性。

[0015] 在当前情况下,术语“任务映射”特别是描述以下变量,该变量建立给定的操纵变量和/或控制输入与相应的上述任务目标描述之间的关系。所述操纵变量和/或控制输入可以例如由机器人关节中的可调扭矩以及在自由浮动机器人(例如类人机器人)的情况下还由接触力组成,所述接触力在特定前提条件下由关节扭矩和给定的末端执行器加速度(即例如机器人脚加速度)之间的约束得出。

[0016] 至少一个任务目标描述和至少一个相关联的任务映射可以按照以下方式加以计算,即至少一个第一控制器模块的标称特性对应于弹簧质量阻尼器系统的特性。

[0017] 所述至少一个任务目标描述和所述至少一个相关联的任务可以基于自然机器人惯性来加以计算。

[0018] 所述至少一个任务目标描述和所述至少一个相关联的任务映射可以按照以下方式加以计算,即特定于任务的科里奥利和离心效应保持不变,同时补偿所有其余科里奥利和离心效应。

[0019] 可以将所述至少一个任务目标描述计算为任务向量。所述任务向量可以说明力、力方向、力矩和/或力矩方向。等式(17)中的期望任务力$f_{k,des}$表示这样的任务向量。此外,各个任务向量可以有利地组合成组合的任务向量。等式(21)中描述的“所有期望任务力的组合”f_{des}表示这种组合的任务向量的示例。

[0020] 可以将所述至少一个相关联的任务映射计算为任务映射矩阵。所述任务映射矩阵也可以称为映射矩阵(T)或映射矩阵(U)。等式(12)中描述的矩阵T_k可以称为任务雅可比矩阵J_k的转置的“动态一致伪逆”,该矩阵是这种任务映射矩阵的示例。各个任务映射矩阵也可以有利地组合在统一的任务映射矩阵T中,如等式(22)中所描述的。

[0021] 至少一个另外的控制器模块可以集成到总控制器中。制定为约束的至少一个另外的控制器模块可以集成到总控制器中。

[0022] 所述至少一个第一控制器模块得到加权。所述至少一个另外的控制器模块可以得到加权。为了加权使用加权矩阵。所述加权矩阵也可以称为加权矩阵(W)。

[0023] 所述至少一个第一控制器模块和/或所述至少一个另外的控制器模块可以按照以下方式得到加权,即在超定控制问题的情况下,总控制器也具有至少近似无源特性。

[0024] 所述至少一个第一控制器模块和/或所述至少一个另外的控制器模块可以借助于至少一个伪逆和/或至少一个逆来加以优化。

[0025] 所述至少一个第一控制器模块和/或所述至少一个另外的控制器模块可以借助于至少一个优化变量来加以优化。所述至少一个第一控制器模块和/或所述至少一个另外的控制器模块可以被二次(quadratisch)优化。所述二次优化可以由单个实例(Instanz)或多个实例执行。

[0026] 控制器模块中的至少一个可以实施为跟踪控制器。控制器模块中的至少一个可以实施为调整控制器。可以向每个可控的自由度分配单独的控制器模块。

[0027] 计算机程序产品可以存在于计算机可读存储介质上、计算机可读数据载体上或作为数据载体信号。

[0028] 该方法可以具有以下步骤:a)为所有无源跟踪控制器模块计算期望的任务力和相关联的任务映射矩阵,其中所述无源跟踪控制器模块的标称特性(nominelle Verhalten)相应于弹簧质量阻尼器系统的标称特性,其中还获得机器人的自然惯性,以及其中还保持特定于任务的科里奥利和离心效应不变,同时补偿所有其余的科里奥利和离心效应;b)为所有任务计算专用的保证无源性或促进无源性的权重矩阵,c)在使用专用的保证无源性或促进无源性的权重矩阵的情况下通过优化将各个无源跟踪控制器模块集成和组合为总控制器。

[0029] 在方法步骤c)中,除了无源跟踪控制器模块之外,还可以集成其他控制器或控制器模块。在方法步骤c)中,除了加权的任务之外,还可以将一个或多个任务制定为约束并通过优化对应地集成到总控制器中。在方法步骤c)中,可以使用伪逆来进行所述优化。在方法步骤c)中,所述优化可以基于二次优化或“二次规划”(QP)的概念。

[0030] 本发明可以涉及用于控制基于扭矩的机器人的控制器模块。所述控制器模块可以具有任务映射矩阵和期望的任务向量,其中所述控制器模块的标称特性可以对应于弹簧-质量-阻尼器系统。

[0031] 机器人的自然质量或者惯性的相应质量或惯量(必要时被投影到对应的任务空间中)可以称为顺从特性,即阻抗特性,其基于自然机器人质量或自然机器人惯性并且因此省去了所谓的惯性整形。

[0032] 特定于任务的科里奥利和离心效应可以保持不受影响,而所有其余的科里奥利和离心效应都得到补偿,由此可以实现控制器模块的无源性。

[0033] 所述控制器模块可以实施为跟踪控制器。所述控制器模块可以实施为调整控制器,因此省去了预控制。

[0034] 可以将任意数量的这种控制器模块组合为总控制器。可以将任何数量的这种控制器模块和任何数量的其他控制器或控制器模块组合为总控制器。

[0035] 本发明可以涉及这样的总控制器,其中可以对应于所述控制器模块借助于对任务加权来进行温和的或软的优先级排序。

[0036] 可以将与控制器模块相对应的任务的加权设计为,使得保证总控制器的无源性,或者产生总控制器的尽可能接近无源特性的特性,即使各个任务目标相互矛盾并且因此存在超定控制问题。

[0037] 此外,可以将一个或多个任务制定为硬约束,而所有其余任务都基于这种控制器

模块,并通过温和的加权来加以考虑或集成到总控制器中。

[0038] 为了解决控制问题可以使用二次优化,这既可以由用于二次优化的唯一实例来实施,又可以由用于二次优化的多个实例来实施。

[0039] 为了解决控制问题可以使用一个或多个伪逆或逆。

[0040] 可以向每个可控制的自由度分配单独的控制器模块,由此实现各个任务控制器的最大粒度或最大可能解耦。

[0041] 总而言之,换句话说,通过本发明因此尤其是得到用于力/力矩控制的机器人的模块化无源跟踪控制器。

[0042] 根据本发明的控制器允许对冗余机器人系统进行精确且同时灵活及鲁棒的控制。这是通过使用基于无源性的控制器模块实现的,这些控制器模块借助于各种优化方法(取决于当前存在的问题)组合成总控制器。通过对各种任务使用专用权重,可以保证或至少促进该总控制器的无源性,这同样取决于当前存在的问题。这种专用加权是基于以下事实,即针对各个任务将相应的逆任务惯性矩阵乘以标量任务权重数用作权重。控制器的设计和分析基于无源性或李雅普诺夫(Lyapunov)理论的概念,由此实现了控制的高鲁棒性。

[0043] 本方法被证明对奇异性具有鲁棒性,对建模误差和测量噪声具有鲁棒性,使用非常灵活(可以很容易地对控制器结构在线进行更改,很容易与其他控制器方法组合),并且在与环境接触时非常鲁棒。真实实验或真实应用中的调整耗费非常低。任意数量的任务可以相互组合;每项任务对应于其权重对整体结果做出贡献。

[0044] 因此,本方法结合了现有技术中描述的用于控制冗余的转矩控制的机器人系统的所有方法的最重要优点,同时避免了所有缺点。

[0045] 当前的方法几乎涵盖了基于逆动力学的控制器和非常鲁棒的、所谓的基于PD+的控制器之间的整个范围。可以自由选择期望解耦的粒度或各个子控制器的模块化。

[0046] 本发明特别针对的技术领域是控制冗余的、扭矩控制的机器人系统。在此情况下,多任务任务的解决是一个难题,特别是在总控制器的稳定性和无源性、期望参考轨迹的精确跟踪、对模型不准确和传感器噪声的鲁棒性、对奇异性的鲁棒性、实施的灵活性和不同子控制器的可组合性以及接触稳定性方面。

[0047] 现有技术基本上包括部分解决该任务的两种不同方法:一方面是基于逆动力学的方法,另一方面是基于无源性或阻抗的方法。现有技术中包含的两种解决方案都具有某些迄今为止尚未克服的缺点:

[0048] 逆动力学不是无源的,从而在真实使用场景中可能出现严重的稳定性问题。此外,逆动力学对于模型不准确和传感器噪声不鲁棒,并且也容易受到奇异性的影响。通过基于逆动力学的控制方法也无法始终保证接触稳定性。

[0049] 现有技术中已知的基于无源性或基于阻抗的方法通常大多要么对期望参考轨迹的跟踪很差,要么容易受到奇异性的影响。此外,对应的控制器实现大多不灵活,并且不提供不同子控制器或控制器类型的组合。

[0050] 本发明基于一种用于控制冗余的扭矩控制的机器人系统的方法,其中无源或基于阻抗的跟踪控制器模块通过优化相互组合。在此情况下,通过专门类型的加权确保整个系统的无源性不会因各个控制器模块的组合/合成而丢失,或者不会因对应的组合/合成而导致活动,即系统中对应的不期望的能量增加。由此实现了所有上述优点并绕过了对应的缺

点。特别地,本发明所基于的方法确保了整个系统的稳定性和无源性,或者在整个系统的稳定或钝化在技术上不可能的情况下促进整个系统的稳定性和无源性,该方法实现了对期望参考轨迹的精确跟踪,如果所述参考轨迹没有不一致并且因此在技术上可以实现的话,该方法对奇异性、模型不准确和传感器噪声具有鲁棒性,该方法的特点是良好的接触稳定性,并且该方法使得灵活实现成为可能,其中尤其是还可以将不同类型的控制器彼此组合。因此,本发明所基于的方法完全解决了这里提出的所有问题。

附图说明

[0051] 下面参考附图更详细地描述本发明的实施例,在此以示例和示意性的方式:

[0052] 图1示出了MPTC涵盖逆动力学(ID)和PD+控制之间的整个范围,

[0053] 图2示出了完全确定的非矛盾任务设置的阶跃响应。左:关节角度和参考。右:所有的和特定于任务的李雅普诺夫函数值,

[0054] 图3示出了超定(并且因此矛盾的)任务设置的阶跃响应,

[0055] 图4示出了人形机器人TORO在OpenHRP仿真中行走(单双支持时间:TSS=0.8s,TDS=0.12s)。在2.5秒之后,左脚在x方向被-60N的外力干扰0.3s,

[0056] 图5示出了TORO在实验中行走(单双支持时间:TSS=0.9s,TDS=0.3s,步长0.15m),以及

[0057] 图6示出了根据本发明的方法的可能应用。

具体实施方式

[0058] 描述了将模块化无源跟踪控制器(MPTC)用于基于“任务堆栈”的控制器框架的实施方式。

[0059] 摘要

[0060] 本工作介绍了所谓的模块化无源跟踪控制器(MPTC),即通用的基于无源性的控制器,其旨在独立完成若干子任务目标。这些子任务目标组合为任务堆栈(SoT),用作综合整个系统控制器的基础,对应的分析和控制器设计基于李雅普诺夫理论。这项工作的一个重要贡献是设计了专用的优化权重矩阵,其确保了超定的并且因此冲突的任务设置的无源性。所提出的框架通过针对固定和自由浮动的机器人的仿真和实验验证。

[0061] I.引言

[0062] 多个任务的同时控制已成为机器人控制中的重要研究课题。虽然最初的工作针对运动学冗余机器人考虑单个任务及其零空间的较简单的情况,但是如今存在用于处理具有优先级和无优先级的多个任务的若干已确立的框架。在本文献中,可以将首先在运动学层面解决任务协调问题的工作与直接针对动力学制定控制的工作区分开来。与通过任务加权来应用软优先级的控制器相比,另一种重要的分类可以基于通过分层控制器来使用严格任务优先级而完成。

[0063] 在运动学层面,已经提出了基于连续或增广零空间投影的分层控制器,以确保严格的任务层次结构[18,2]。为了处理任务奇异性(singularity),已经提出了奇异性鲁棒的逆运动学[4]。然而,这种奇异性鲁棒的逆破坏了严格的任务层次结构,并最终在不同任务之间产生了加权。

[0064] 其他框架在动力学层面处理多个任务。操作空间方法使用在人形机器人中的应用在这个方向上得到了扩展[22,23]。其他基于逆动力学(ID)的控制器使用分层(hierarchal)二次规划(QP)[20,11,3]。这些工作中的大部分以严格的任务解耦为目标。

[0065] 本工作受到基于逆动力学的跟踪控制器系列的启发,这些跟踪控制器通过单个加权QP软平衡一组任务(收集在任务堆栈(SoT)中)[13,15,10]。这种控制器易于编写并且由于其高度灵活性而引人注目。然而,与诸如[19,5,12,16,6]的基于无源性的方法相比,这些控制器在建模误差和接触不确定性方面的鲁棒性较差[10,6]。这导致诸如振动的真实系统问题,这些问题通常通过启发式方法来解决[13,10]。

[0066] 此外,[3]中的基于加权的多目标控制器和[6]中的严格分层的基于无源性的控制器为这项工作提供了灵感。与[3]类似,我们使用QP来组合来自不同任务空间控制器的各个控制动作。然而,在[3]中,每个单独的控制动作都是基于逆动力学(ID)计算的,将单位矩阵作为期望的惯量(反馈线性化)。相比之下,这里提出的各个任务控制器使用无源的概念并避免惯性成形,也就是说,我们的目标是将类似PD+的闭环特性用于每个任务[19]。与也保持自然惯性(natural inertia)的[6]相比,我们使用加权QP公式(软优先级),它允许我们将任意数量的不同任务组合在一起,并且在特定状况下(例如,当单个任务变为奇异时)导致攻击行为减少。

[0067] 在本工作中,我们推导出一种基于标称的无源子任务控制器的控制架构,即所谓的模块化无源跟踪控制器(MPTC)。通过任务堆栈将这些控制器组合并相互权衡,该任务堆栈分别通过单个加权伪逆或QP求解。控制框架组合了逆动力学控制器以及基于无源性的控制器二者的优点,即:容易实现和使用、支持任务空间跟踪、无源性和接触鲁棒性以及自然冗余处理。对应的稳定性分析基于李雅普诺夫理论。对于非冲突的情况,发现整个控制器是渐近稳定和无源的。所提出的工作的一个重要贡献是推导了专用优化权重,即使在超定(即冲突)的情况下,专用优化权重也保持无源性。对于竞争任务和对应的不一致任务参考,多个仿真和实验显示了MPTC即使在跟踪情况下的稳定性和鲁棒性的证据,尽管仍然缺少正式的稳定性证明。

[0068] 本文组织如下:第II节在任务层面推导模块化无源跟踪控制器(MPTC),而第III节则提供整个闭环分析和控制器推导。第IV节将MPTC与逆动力学(ID)和基于PD+的控制器进行了比较,并提出了很多可能的解耦层面(decoupling level)。第V节提供了固定机器人和自由浮动机器人的仿真和实验结果,而第VI节总结了本文。

[0069] II.模块化无源跟踪控制(MPTC)的推导

[0070] 这项工作考虑了n_T个任务,每个任务有其自己的目标。为了满足单任务的目标,本节推导了模块化无源跟踪控制器(MPTC),在第三节中将这些控制器组合成不同的整体控制器。

[0071] A.通用机器人模型

[0072] 通用的机器人运动方程可以写成

[0073] $$M(q)\,\ddot{q} + C(q,\dot{q})\,\dot{q} + \tau_g(q) = \tau \quad (1)$$

[0074] 其中$q \in R^n$表示广义坐标[1],M(q)、$C(q,\dot{q})$和$\tau_g(q)$分别是惯量矩阵、科里奥利及离心矩阵和重力扭矩[2],并且

[0075] $$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{S}^T\left(\boldsymbol{\tau}_j + \boldsymbol{\tau}_{int}\right) + \underbrace{\boldsymbol{L}_{all}^T \boldsymbol{w}_{all}}_{\boldsymbol{\tau}_{ext}} \qquad (2)$$

[0076] 表示广义力。这些由关节电机扭矩τ_j和作用在机器人关节中的内部扰动扭矩τ_{int}(例如关节摩擦)组成,这两者都通过关节选择矩阵S映射为τ^3,并且其由外部扭矩τ_{ext}组成。后者由作用在n_L个机器人链接上的所有旋力$\boldsymbol{w}_{all} = [\boldsymbol{w}_1^T, \ldots, \boldsymbol{w}_{n_L}^T]^T$组成,这些旋力通过链接雅可比矩阵$\boldsymbol{L}_{all} = [\boldsymbol{L}_1^T, \ldots, \boldsymbol{L}_{n_L}^T]^T$的堆栈映射为$\tau$。虽然在III-E节中将使用(2)的单个元素,但在下文中我们将简单地使用τ来代表任意广义力。

[0077] 通过对广义加速度$\ddot{\boldsymbol{q}}$进行求解(1)得到

[0078] $$\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{M}^{-1}\left(\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{C}\,\dot{\boldsymbol{q}} - \boldsymbol{\tau}_g\right) \quad . \qquad (3)$$

[0079] B.任务空间参量

[0080] 1)任务空间速度和加速度:在机器人控制中,可以将典型任务空间[4]的任务速度向量表示为

[0081] $$\dot{\boldsymbol{x}}_k = \boldsymbol{J}_k\,\dot{\boldsymbol{q}} \qquad (4)\ 。$$

[0082] 索引k表示对于所有n_T个任务都存在这样的映射,即$k \in \{1, \ldots, n_T\}$。这里,$\boldsymbol{J}_k \in \mathbb{R}^{n_{T,k} \times n}$表示对应的任务雅可比矩阵,具有第k个任务的维度$n_{T,k}$。通过将(4)相对于时间进行微分并代入(3),我们得到任务空间加速度

[0083] $$\ddot{\boldsymbol{x}}_k = \dot{\boldsymbol{J}}_k\,\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{J}_k\,\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}_k\,\boldsymbol{M}^{-1}\left(\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_g\right) - \boldsymbol{Q}_k\,\dot{\boldsymbol{q}} \ , \ (5)$$

[0084] 其中

[0085] $$\boldsymbol{Q}_k = \boldsymbol{J}_k\,\boldsymbol{M}^{-1}\,\boldsymbol{C} - \dot{\boldsymbol{J}}_k \quad . \qquad (6)$$

[0086] 对于跟踪控制法则的设计(参见第II-C节),对应的任务速度误差

[0087] $$\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k = \dot{\boldsymbol{x}}_{k,ref} - \underbrace{\boldsymbol{J}_k\,\dot{\boldsymbol{q}}}_{\dot{\boldsymbol{x}}_k} \qquad (7)$$

[0088] 和任务加速度误差

[0089] $$\ddot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k = \ddot{\boldsymbol{x}}_{k,ref} - \underbrace{\left(\boldsymbol{J}_k\,\boldsymbol{M}^{-1}\left(\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_g\right) - \boldsymbol{Q}_k\,\dot{\boldsymbol{q}}\right)}_{\ddot{\boldsymbol{x}}_k} \qquad (8)$$

[0090] 是特别令人感兴趣的。这里,$\dot{\boldsymbol{x}}_{k,ref}$和$\ddot{\boldsymbol{x}}_{k,ref}$分别表示任务参考速度和任务参考加速度。2)任务空间惯量及其导数:使用J_k,惯量矩阵M可以投影到任务空间[17]:

[0091] $$\boldsymbol{M}_k = \left(\boldsymbol{J}_k\ \boldsymbol{M}^{-1}\ \boldsymbol{J}_k^T\right)^{-1} \quad . \qquad (9)$$

[0092] 对(9)进行微分得到

[0093]
$$\dot{\boldsymbol{M}}_k = -\boldsymbol{M}_k \left(\dot{\boldsymbol{J}}_k \boldsymbol{M}^{-1} \boldsymbol{J}_k^T - \boldsymbol{J}_k \boldsymbol{M}^{-1} \overbrace{\dot{\boldsymbol{M}}}^{\boldsymbol{C}+\boldsymbol{C}^T} \boldsymbol{M}^{-1} \boldsymbol{J}_k^T + \boldsymbol{J}_k \boldsymbol{M}^{-1} \dot{\boldsymbol{J}}_k^T \right) \boldsymbol{M}_k = \boldsymbol{C}_k + \boldsymbol{C}_k^T \ , \tag{10}$$

[0094] 其中任务空间科里奥利及离心矩阵为

[0095]
$$\boldsymbol{C}_k = \boldsymbol{M}_k \boldsymbol{Q}_k \boldsymbol{T}_k^T \ . \tag{11}$$

[0096] 矩阵

[0097] $T_k = M_k J_k M^{-1}$ (12)

[0098] 是$\boldsymbol{J}_k^T$的动态一致性伪逆。

[0099] [1]在固定机器人的情况下,这些仅是关节坐标q_j(即$q = q_j$),而在自由浮动机器人(例如类人机器人)的情况下还包含机器人基座坐标x_b(即$\boldsymbol{q} = [\boldsymbol{x}_b^T, \boldsymbol{q}_j^T]^T$)。

[0100] [2]注意:下文将忽略q和$\dot{\boldsymbol{q}}$的依赖关系。

[0101] [3]注意:对于固定机器人,S是单位矩阵,而对于自由浮动机器人,$\boldsymbol{S} = [\boldsymbol{0}_{n_{act} \times 6}, \boldsymbol{I}_{n_{act} \times n_{act}}]$,其中$n_{act}$表示驱动的机器人关节的数量。

[0102] [4]典型的任务是关节层面控制、笛卡尔末端执行器控制等。

[0103] C.模块化无源跟踪控制器(MPTC)

[0104] 本节推导所提出的模块化无源跟踪控制器(MPTC)。它是以通用形式编写的,用作用于任意专用控制器(例如笛卡尔或联合控制器)的模板。对于n_T个任务中的每个任务,使用基于与任务相关的相对动能$E_{kin,k}$和相对势能$E_{pot,k}$的单独的李雅普诺夫函数:

[0105]
$$V_k = \underbrace{\frac{1}{2} \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k^T \boldsymbol{M}_k \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k}_{E_{kin,k}} + \underbrace{\frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{x}}_k^T \boldsymbol{K}_k \tilde{\boldsymbol{x}}_k}_{E_{pot,k}} \ , \tag{13}$$

[0106] 其中正定对称矩阵K_k表示任务刚度。这个李雅普诺夫函数对于任务位置误差$\tilde{\boldsymbol{x}}_k$和任务速度误差$\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k$是正定的。

[0107] 现在对(13)进行微分并代入(8),得到:

[0108]
$$\dot{V}_k = \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k^T \left(\boldsymbol{M}_k \ddot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k + \frac{\dot{\boldsymbol{M}}_k}{2} \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k + \boldsymbol{K}_k \tilde{\boldsymbol{x}}_k \right) \tag{14}$$
$$= \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k^T \left(\underbrace{\boldsymbol{M}_k \boldsymbol{J}_k \boldsymbol{M}^{-1}}_{\boldsymbol{T}_k} (\boldsymbol{\tau}_g - \boldsymbol{\tau}) + \boldsymbol{M}_k \boldsymbol{Q}_k \dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{M}_k \ddot{\boldsymbol{x}}_{k,ref} + \boldsymbol{C}_k \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k + \boldsymbol{K}_k \tilde{\boldsymbol{x}}_k \right) .$$

[0109] 这里,使用了等式

[0110] $$\frac{\dot{M}_k}{2}=\frac{C_k^T+C_k}{2}=\underbrace{\frac{C_k^T-C_k}{2}}_{\text{斜对称}}+C_k\ , \tag{15}$$

[0111] 该等式允许我们将$\dot{\tilde{x}}_k^T\ \frac{\dot{M}_k}{2}\ \dot{\tilde{x}}_k$重写为$\dot{\tilde{x}}_k^T\ C_k\ \dot{\tilde{x}}_k$,因为斜对称项消去。

[0112] 我们现在将(实际)任务力[5]f_k定义为:

[0113] $f_k=T_k\tau$ (16)

[0114] 通过将期望的任务力[6]$f_{k,des}$选择为

[0115] $$f_{k,des}=T_k\tau_g+M_kQ_k\dot{q}+M_k\ddot{x}_{k,ref}+(C_k+D_k)\dot{\tilde{x}}_k+K_k\tilde{x}_k \tag{17}$$

[0116] 并将$T_k\tau$重写为

[0117] $$T_k\tau=f_k=f_{k,des}-\underbrace{(f_{k,des}-f_k)}_{\tilde{f}_k}\ , \tag{18}$$

[0118] 来自(14)的单个任务李雅普诺夫速率(rate)变为

[0119] $$\dot{V}_k=\underbrace{-\dot{\tilde{x}}_k^T\ D_k\ \dot{\tilde{x}}_k}_{\dot{V}_{k,des},\ \text{纯耗散}}+\underbrace{\dot{\tilde{x}}_k^T\ \tilde{f}_k}_{\dot{\tilde{V}}_k}\ . \tag{19}$$

[0120] 注意,受控系统(在任务层面)相对于输入$\tilde{f}_k$、输出$\dot{\tilde{x}}_k$和来自(13)的存储函数V_k是无源的。虽然期望的李雅普诺夫速率$\dot{V}_{k,des}$对于正定阻尼矩阵D_k是纯耗散的,但$\dot{\tilde{V}}_k$项可以不为零,这取决于包括未知扰动、欠驱动和其他驱动限制、任务不一致和优先级排序在内的因素。最后,我们将(8)预乘以M_k,代入(18)和(17),化简和重新定序以获得以下形式的任务动态特性

[0121] $$M_k\ddot{\tilde{x}}_k+\left(C_k+D_k\right)\dot{\tilde{x}}_k+K_k\tilde{x}_k=\tilde{f}_k \tag{20}$$

[0122] 注意,与任务相关的科里奥利项(即$C_k\dot{\tilde{x}}_k$)未被消去,这是无源性的前提。如果达到期望的任务力(即,$\tilde{f}_k=0$),则方程(20)对应于任务k的弹簧-质量-阻尼器动态特性。对于非冲突的任务,一个就可以显示所有轨迹的渐近稳定性。这可以例如通过调用ε方法[17]获得具有负定时间导数的强李雅普诺夫函数来实现,类似于[6]。

[0123] 否则,例如在欠驱动或其他驱动限制、意外外部扰动或任务不一致的情况下,(20)对应于顺应[7]特性[7]。对于这些情况,可能需要进一步分析。在本工作中,我们关注任务不一致的问题,这将在后续章节中阐述。

[0124] [5]注意:取决于任务,任务力可以包含线性力、扭矩、旋力等。

[0125] [6]注意:这个期望的任务力$f_{k,des}$将在第III节中用作特定于任务的控制器目标。另请注意:在第IV-B节中,我们提供了替代的(但等效的)控制器公式(55),该公式更好地揭示

了该控制器与PD+公式的相似性。

[0126] [7]提醒:顺应意味着具有自然惯量(无惯量整形)的阻抗特性。

[0127] III.总体闭环分析和控制

[0128] 在本节中,我们推导用于子任务控制器的总体系统,即用于来自(17)的期望任务力$f_{k,des}$,$k\in\{1,\ldots,n_T\}$的整个集合的控制器,并且通过应用李雅普诺夫理论分析其闭环特性。

[0129] A.不同任务力误差的定义

[0130] 堆叠来自(17)的所有期望任务力$f_{k,des}$,$k\in\{1,\ldots,n_T\}$,得到

[0131] $$\boldsymbol{f}_{des}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{f}_{1,des}\\ \vdots\\ \boldsymbol{f}_{n_T,des}\end{bmatrix}. \tag{21}$$

[0132] 类似地,针对$k\in\{1,\ldots,n_T\}$堆叠(16),获得

[0133] $$\underbrace{\begin{bmatrix}\boldsymbol{f}_1\\ \vdots\\ \boldsymbol{f}_{n_T}\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{f}}=\underbrace{\begin{bmatrix}\boldsymbol{T}_1\\ \vdots\\ \boldsymbol{T}_{n_T}\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{\tau}\quad. \tag{22}$$

[0134] 这是通过对应的集合在一起的任务映射矩阵$\boldsymbol{T}\in\mathbb{R}^{n_{T,all}\times n}$将实际广义力τ映射为实际任务力f的堆栈,其中所有子任务维度的总和通过$n_{T,all}=\sum_{k=1}^{n_T}n_{T,k}$表示。

[0135] 现在我们定义实际任务力误差的堆栈

[0136] $$\tilde{\boldsymbol{f}}=\boldsymbol{f}_{des}-\boldsymbol{f}=\boldsymbol{f}_{des}-\boldsymbol{T}\boldsymbol{\tau} \tag{23}$$

[0137] 接下来,为了简化关于所命令的(commanded)任务力和对应误差的讨论,我们针对来自一些控制器[8]的所命令的广义力τ_{cmd}进行评估(22),得到:

[0138] $$\boldsymbol{f}_{cmd}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{f}_{1,cmd}\\ \vdots\\ \boldsymbol{f}_{n_T,cmd}\end{bmatrix}=\boldsymbol{T}\ \boldsymbol{\tau}_{cmd}=\underbrace{\boldsymbol{T}\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{T}_u}\boldsymbol{u}_{cmd}\quad, \tag{24}$$

[0139] 其中,f_{cmd}表示所命令的任务力的堆栈。对于某些控制问题(例如欠驱动,参见第III-E节),τ_{cmd}可以从给定的优化变量u_{cmd}得出,这些优化变量通过驱动映射矩阵U映射为对应的广义力,即$\tau_{cmd}=U\ u_{cmd}$。

[0140] 最后,通过从(21)减去(24),我们获得对应的任务力命令误差的堆栈:

[0141] $$\tilde{\boldsymbol{f}}_{cmd}=\boldsymbol{f}_{des}-\boldsymbol{f}_{cmd}=\boldsymbol{f}_{des}-\boldsymbol{T}\boldsymbol{\tau}_{cmd}=\boldsymbol{f}_{des}-\boldsymbol{T}_u\boldsymbol{u}_{cmd} \tag{25}$$

[0142] B.总体系统李雅普诺夫函数的定义及其实际和所命令的导数

[0143] 在本节中,我们将分析模块化任务空间控制器的整个集合的稳定性和无源性(因此,如果所有的机器人DOF都被任务坐标的集合覆盖,则分析完整的机器人系统动态特性的稳定性)。为此,我们合并所有单个任务李雅普诺夫函数(13)来构建以下总体李雅普诺夫函数

[0144] $$V = \sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k V_k \right) \quad , \qquad (26)$$

[0145] 该函数对于正标量权重[9]$\psi_k > 0$是正定的(就像它的输入元素V_k一样)。对应地,通过合并来自(19)的单个任务李雅普诺夫函数的导数$\dot{V}_k$来获得总体李雅普诺夫函数的导数$\dot{V}$:

[0146] $$\dot{V} = \sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k \dot{V}_k \right) = \underbrace{\sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k \dot{V}_{k,des} \right)}_{\dot{V}_{des}} + \underbrace{\sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k \dot{\tilde{V}}_k \right)}_{\dot{\tilde{V}}} \quad . \qquad (27)$$

[0147] 如果所有$\psi_k > 0$,则项$\dot{V}_{des}$是半负定的,因为所有期望的任务李雅普诺夫速率$\dot{V}_{k,des}$都是半负定的。实际的总体李雅普诺夫速率误差可以写成:

[0148] $$\dot{\tilde{V}} = \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}^T \underbrace{\begin{bmatrix} \psi_1 \boldsymbol{I} & \cdots & \boldsymbol{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{0} & \cdots & \psi_{n_T} \boldsymbol{I} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\Psi}} \tilde{\boldsymbol{f}} \quad , \qquad (28)$$

[0149] 其中$\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}^T = \left[\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_1^T, \ldots, \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_{n_T}^T \right]$。注意,$\dot{\tilde{V}}$是$\tilde{\boldsymbol{f}}$的函数,因此也是实际广义力$\tau$的函数。

[0150] 我们现在还将检查所命令的任务力误差$\tilde{\boldsymbol{f}}_{\boldsymbol{cmd}}$的堆栈的影响。通过对应地适配(28),我们得到所命令的总体李雅普诺夫速率误差

[0151] $$\dot{\tilde{V}}_{cmd} = \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}^T \boldsymbol{\Psi} \tilde{\boldsymbol{f}}_{cmd} \qquad (29)$$

[0152] 其对应于以下所命令的总体李雅普诺夫速率

[0153] $$\dot{V}_{cmd} = \dot{V}_{des} + \underbrace{\sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k \dot{\tilde{V}}_{k,cmd} \right)}_{\dot{\tilde{V}}_{cmd}} \quad , \qquad (30)$$

[0154] 其中$\dot{\tilde{V}}_{k,cmd} = \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k^T \tilde{\boldsymbol{f}}_{k,cmd}$。最后,我们将(28)改写为

$$\dot{\tilde{V}} = \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}^T \boldsymbol{\Psi} \left(\overbrace{\boldsymbol{f}_{des} - \boldsymbol{f}}^{\tilde{\boldsymbol{f}}} \right) \tag{31}$$

[0155]
$$= \underbrace{\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}^T \boldsymbol{\Psi} \left(\overbrace{\boldsymbol{f}_{des} - \boldsymbol{f}_{cmd}}^{\tilde{\boldsymbol{f}}_{cmd}} \right)}_{\dot{\tilde{V}}_{cmd}} + \underbrace{\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}^T \boldsymbol{\Psi} \left(\overbrace{\boldsymbol{f}_{cmd} - \boldsymbol{f}}^{\tilde{\boldsymbol{f}}_{real}} \right)}_{\dot{\tilde{V}}_{real}} ,$$

[0156] 其对应于总体实际李雅普诺夫导数

[0157] $$\dot{V} = \dot{V}_{des} + \dot{\tilde{V}}_{cmd} + \dot{\tilde{V}}_{real} \tag{32}$$

[0158] 该导数涉及真实的系统特性。这里，

[0159] $$\dot{\tilde{V}}_{real} = \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}^T \boldsymbol{\Psi} \left(\overbrace{\boldsymbol{f}_{cmd} - \boldsymbol{f}}^{\tilde{\boldsymbol{f}}_{real}} \right) \tag{33}$$

[0160] 表示李雅普诺夫速率误差的分量，该分量对应于所命令的任务力f_{cmd}与实际任务力f的偏差$\tilde{\boldsymbol{f}}_{real}$。

[0161] [8]例如，可能的控制器可以如(36)中一样地将基于伪逆的优化用于无约束控制问题或基于二次规划(QP)的优化(参见第III-E节)来处理不等式约束。

[0162] [9]注意：这些正标量权重ψ_k等同于(34)、(41)中使用的优化权重。

[0163] C.总体代价函数

[0164] 基于来自(25)的$\tilde{\boldsymbol{f}}_{cmd}$，我们用公式将总体代价函数表示为

$$G = \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{f}}_{cmd}^T \boldsymbol{W} \tilde{\boldsymbol{f}}_{cmd} \tag{34}$$

[0165]
$$= \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau}_{cmd}^T \boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{T} \boldsymbol{\tau}_{cmd} - \boldsymbol{f}_{des}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{T} \boldsymbol{\tau}_{cmd} + \frac{1}{2} \boldsymbol{f}_{des}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{f}_{des}$$
$$= \frac{1}{2} \boldsymbol{u}_{cmd}^T \boldsymbol{T}_u^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{T}_u \boldsymbol{u}_{cmd} - \boldsymbol{f}_{des}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{T}_u \boldsymbol{u}_{cmd} + \frac{1}{2} \boldsymbol{f}_{des}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{f}_{des} .$$

[0166] 这里，W表示任意对称且正定的加权矩阵。该代价函数G将由第III-D节和第III-E节中介绍的不同控制器最小化。

[0167] D.无约束和完全驱动的情况

[0168] 1)基于伪逆的通用分析优化：

[0169] 本节考虑完全驱动、无约束和潜在冲突的情况。不等式约束的缺少促进了通过加权伪逆得到解析解，而完全驱动保证了可控性并允许直接使用所命令的广义力τ_{cmd}作为优化变量。在这种情况下，为了优化代价函数(34,第二行)，我们将G相对于τ_{cmd}进行微分：

[0170] $$\frac{dG}{d\boldsymbol{\tau}_{cmd}} = \boldsymbol{\tau}_{cmd}^T \boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{T} - \boldsymbol{f}_{des}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{T} . \tag{35}$$

[0171] 通过将(35)设置为零并求解控制器扭矩τ_{cmd}来最小化代价函数(34)：

[0172] $$\boldsymbol{\tau}_{cmd} = \left(\boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W}\, \boldsymbol{T}\right)^{-1} \boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W}\, \boldsymbol{f}_{des} \quad , \qquad (36)$$

[0173] ,所述扭矩是针对所陈述的给定问题的最优扭矩命令。将(36)代入(25)得到

[0174] $$\tilde{\boldsymbol{f}}_{cmd} = \underbrace{\left(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{T}\left(\boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W}\, \boldsymbol{T}\right)^{-1} \boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W}\right)}_{\boldsymbol{E}_T} \boldsymbol{f}_{des} \quad , \qquad (37)$$

[0175] 其中E_T表示任务力平衡矩阵。

[0176] 2)非冲突情况:如果T是二次(square)可逆的(即所有子任务相互独立且因此不冲突),则来自(37)的平衡矩阵变为$E_T=0$,并且任务力命令误差变为$\tilde{\boldsymbol{f}}_{cmd} = \boldsymbol{0}$。在这种情况下,来自(29)的$\dot{\tilde{V}}_{cmd}$也为零,因此来自(32)的$\dot{V}$变为

[0177] $$\dot{V} = \dot{V}_{des} + \dot{\tilde{V}}_{real} \quad (38)$$

[0178] 3)冲突的情况:相反,如果T不可逆(例如在超定控制器设置中),则平衡矩阵E_T为非零。将(37)代入(29),我们得到对应的所命令的总体李雅普诺夫速率误差

[0179] $$\dot{\tilde{V}}_{cmd} = \left(\dot{\boldsymbol{x}}_{ref}^T - \dot{\boldsymbol{q}}^T \boldsymbol{J}^T\right) \boldsymbol{\Psi}\, \boldsymbol{E}_T\, \boldsymbol{f}_{des} \quad (39)$$

[0180] 这里,$\boldsymbol{J} = [\boldsymbol{J}_1^T, \ldots, \boldsymbol{J}_{n_T}^T]^T$是单个任务雅可比矩阵的堆栈。

[0181] 首先考虑冲突调整(regulation)情况(即$\dot{\boldsymbol{x}}_{ref} = \boldsymbol{0}$),我们检查(39)中出现的矩阵$\breve{\boldsymbol{J}}^T \breve{\boldsymbol{\Psi}}\, \boldsymbol{E}_T$：

[0182] $$\begin{aligned} \boldsymbol{J}^T\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{E}_T &= \boldsymbol{J}^T\boldsymbol{\Psi}\left(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{T}\left(\boldsymbol{T}^T\boldsymbol{W}\boldsymbol{T}\right)^{-1}\boldsymbol{T}^T\boldsymbol{W}\right) \qquad (40)\\ &= \boldsymbol{J}^T\boldsymbol{\Psi}\left(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{J}\left(\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{W}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{J}\right)^{-1}\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{W}\right). \end{aligned}$$

[0183] 这里,我们代入了$T=\Lambda J M^{-1}$,其中Λ是块对角矩阵,将任务空间惯量矩阵$\{\boldsymbol{M}_1, \ldots, \boldsymbol{M}_{n_T}\}$作为其对角子矩阵。对于W的任意选择[10],(40)都是非零矩阵,使得来自(39)的$\dot{\tilde{V}}_{cmd}$为非零,即使在调整情况下也是如此。然而,对于选择

[0184] $W=\Lambda^{-1}\Psi$ (41)

[0185] 等式(40)变为

[0186] $$\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{E}_T = \boldsymbol{J}^T\boldsymbol{\Psi} - \underbrace{\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{J}\left(\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{J}\right)^{-1}}_{\boldsymbol{I}}\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{\Psi} = \boldsymbol{0} \quad (42)$$

[0187] 这意味着(与当前的广义速度$\dot{\boldsymbol{q}}$和期望的任务力f_{des}无关)对于选择(41),在调整

情况下($\dot{\boldsymbol{x}}_{ref}=\mathbf{0}$),来自(39)的所指示的李雅普诺夫速率$\dot{\tilde{V}}_{cmd}$变为

[0188] $$\dot{\tilde{V}}_{cmd}=0 \qquad (43)$$

[0189] 而来自(32)的$\dot{V}$变为

[0190] $$\dot{V}=\dot{V}_{des}+\dot{\tilde{V}}_{real} \quad \textbf{(44)}。$$

[0191] 查看(44)的元素,我们发现受控的总体系统相对于输入$\boldsymbol{\Psi}\tilde{\boldsymbol{f}}_{real}$、输出$\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}$(这两个是$\dot{\tilde{V}}_{real}$的元素)和来自(26)的正定存储函数V是无源的。因此,我们可以断定总体系统在这里检查的冲突调整情况中的无源性。对于超定/冲突任务设置(调整情况)的总体系统闭环动态特性,(41)充当无源性保证优化权重(PWOW)。注意:(43)并不意味着单个任务李雅普诺夫速率误差$\dot{\tilde{V}}_{k,cmd}$为零(仅意味着它们的总和为零)。

[0192] 来自(41)的总体加权矩阵$W=\Lambda^{-1}\Psi$是对称和分块对角矩阵。它的对称特性源于其对角子矩阵(45)的对称性,

[0193] $$\boldsymbol{W}_k=\psi_k\boldsymbol{M}_k^{-1} \quad \textbf{(45)}$$

[0194] 所述对角子矩阵是ψ_k和(对称)任务惯量矩阵M_k的逆的函数。查看(45)可以清楚地看到,每个任务仍然可以通过其对应的加权标量ψ_k(相对于其他任务)独立加权。

[0195] 现在我们考虑冲突跟踪情况。对于$\dot{\boldsymbol{x}}_{ref}\neq\mathbf{0}$并且仍然应用(41),(39)变为

[0196] $$\dot{\tilde{V}}_{cmd}=\dot{\boldsymbol{x}}_{ref}^{T}\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{E}_T\boldsymbol{f}_{des} \quad \textbf{(46)},$$

[0197] 对于(46),等式(32)变为

[0198] $$\dot{V}=\dot{V}_{des}+\underbrace{\dot{\boldsymbol{x}}_{ref}^{T}\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{E}_T\boldsymbol{f}_{des}}_{\dot{\tilde{V}}_{cmd}}+\dot{\tilde{V}}_{real} \quad \textbf{(47)}。$$

[0199] 对于不一致的任务参考速度,$\dot{\tilde{V}}_{cmd}$通常将不为零,这使得跟踪情况的正式无源性证明更加困难(超出了本文的范围)。

[0200] [10]即使选择为对角形式,如在逆动力学(ID)相关文献中经常发现的那样。

[0201] E.处理欠驱动和其他驱动约束

[0202] 上一节中介绍的解析解专用于假定完全驱动的机器人的控制问题,这些机器人的驱动限制(或其他约束)不相关。本节将处理欠驱动和驱动约束的情况,并在MPTC的背景下提出这些控制问题的解决方案。

[0203] 1)欠驱动:与固定机器人相比,不驱动自由浮动机器人(例如类人机器人)的机器人基座。相反,为了获得一定程度的可控性,自由浮动机器人需要使用其末端执行器来创建接触旋力,所述接触旋力补偿直接基座驱动的不足。来自第III-A节的对应的驱动映射矩阵U具有以下形式:

[0204] $$\boldsymbol{U}=[\boldsymbol{S}^T,\boldsymbol{L}_{EE}^T] \quad \textbf{(48)}$$

[0205] 相关的驱动DOF/优化变量是

[0206] $$\boldsymbol{u}_{cmd}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\tau}_{j,cmd}\\ \boldsymbol{w}_{EE,cmd}\end{bmatrix} \quad (49)$$

[0207] 其中$\tau_{j,cmd}$表示所命令的关节扭矩,$w_{EE,cmd}$是所命令的末端执行器旋力。等式(48)和(49)基于等式(2)的元素。但是要注意,在这里我们将所有链接雅可比L_{all}和链接旋力w_{all}的集合替换为对应于接触末端执行器("EE")的选择结果,即替换为L_{EE}和$w_{EE,cmd}$。

[0208] 2)接触和驱动约束:刚刚介绍的所命令的末端执行器旋力$w_{EE,cmd}$通常受到不等式约束(所谓的"接触约束")。例如,在与行走相关的应用中(参见第V-B节),这些接触约束通常用单边性和摩擦锥约束的形式来表示。省略这样的接触约束可能会导致机器人故障。此外,由于机器人的物理限制,约束所指示的关节扭矩$\tau_{j,cmd}$通常也是有意义的。通过这种方式,可以避免致动器饱和。

[0209] 3)通过二次规划(QP)的解:一种可以允许我们处理欠驱动、驱动限制和接触约束的上述问题的流行方法是按以下形式[11]设置二次规划(QP)

[0210] $$\underset{\boldsymbol{u}_{cmd}}{\text{最小化}}\ G_{QP}=\frac{1}{2}\boldsymbol{u}_{cmd}^{T}\boldsymbol{T}_{u}^{T}\boldsymbol{W}\boldsymbol{T}_{u}\boldsymbol{u}_{cmd}-\boldsymbol{f}_{des}^{T}\boldsymbol{W}\boldsymbol{T}_{u}\boldsymbol{u}_{cmd}\ , \quad (50)$$

[0211] ,其受接触和关节扭矩约束限制。

[0212] 这里,(34)的第三行针对QP代价函数G_{QP}的公式进行了适配。众所周知,只要约束未激活,QP就提供与基于加权伪逆的优化相同的解。我们建议使用与在第III-D节中用于解析优化(即$W=\Lambda^{-1}\Psi$)的那个完全相同的无源性保证优化权重(PWOW)。但是请注意,一旦约束激活,就不可以再保证无源性;即使在调整情况下。

[0213] [11]可以在[21,15,10]中找到更明确的QP约束公式。

[0214] IV.相关控制器类型中的布局和定向解耦的粒度

[0215] A.逆动力学(ID)和MPTC的比较

[0216] 在本节中,我们将基于逆动力学(ID)的控制器的目标与基于MPTC的控制器的目标进行了比较,并展示了重要的相似之处。

[0217] 逆动力学(ID):

[0218] 基于逆动力学(ID)的控制器通常实现以下形式的稳定的二阶动态特性

[0219] $$\ddot{\boldsymbol{x}}_{k}=\ddot{\boldsymbol{x}}_{k,ref}+\hat{\boldsymbol{D}}_{ID,k}\underbrace{(\dot{\boldsymbol{x}}_{k,ref}-\dot{\boldsymbol{x}}_{k})}_{\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_{k}}+\hat{\boldsymbol{P}}_{ID,k}\underbrace{(\boldsymbol{x}_{k,ref}-\boldsymbol{x}_{k})}_{\tilde{\boldsymbol{x}}_{k}} \quad (51)$$

[0220] 其能够针对正定比例矩阵$\hat{\boldsymbol{P}}_{ID,k}$和导数增益矩阵$\hat{\boldsymbol{D}}_{ID,k}$而跟踪参考运动$x_{k,ref}$、$\dot{\boldsymbol{x}}_{k,ref}$、$\ddot{\boldsymbol{x}}_{k,ref}$。这两个增益矩阵通常被设计为对角矩阵,以获得完全解耦的线性动态特性。通常,使用极点布局[1]来实现临界阻尼瞬态响应。将来自(5)的任务空间加速度$\ddot{\boldsymbol{x}}_{k}$代入(51),以及求解与广义力$\tau$有关的项,得到:

[0221] $$\boldsymbol{J}_{k}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{J}_{k}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{\tau}_{g}+\boldsymbol{Q}_{k}\dot{\boldsymbol{q}}+\ddot{\boldsymbol{x}}_{k,ref}+\hat{\boldsymbol{D}}_{ID,k}\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_{k}+\hat{\boldsymbol{P}}_{ID,k}\tilde{\boldsymbol{x}}_{k} \quad (52)$$

[0222] 请注意,我们在这里不直接求解τ,因为根据所选择的控制器设置,J_k可能不可逆。

[0223] 模块化无源跟踪控制(MPTC)：

[0224] 通过将(17)中的$f_{k,des}$替换为$f_k=T_k\tau$(来自(16))，将结果预乘以M_k^{-1}并重新排序，我们发现以下期望的任务控制动作：

[0225] $$J_kM^{-1}\tau = J_kM^{-1}\tau_g + Q_k\dot{q} + \ddot{x}_{k,ref} + \underbrace{M_k^{-1}(C_k+D_k)}_{\hat{D}_{MPTC,k}}\dot{\tilde{x}}_k + \underbrace{M_k^{-1}K_k}_{\hat{P}_{MPTC,k}}\tilde{x}_k \quad (53)$$

[0226] 在将(53)与(52)比较时，我们发现所介绍的模块化无源跟踪控制器(MPTC)的基本结构与基于逆动力学(ID)的控制器是相同的。它们的区别仅在于所选择的比例和微分增益矩阵。对于基于ID的控制器，$\hat{P}_{ID,k}$和$\hat{D}_{ID,k}$被设计为常数，而在MPTC的情况下，$\hat{P}_{MPTC,k}$和$\hat{D}_{MPTC,k}$是当前任务惯量M_k的函数。此外，$\hat{D}_{MPTC,k}$约束任务科里奥利矩阵C_k，使得与任务相关的科里奥利项不消去，这是无源性的前提，并且提高了鲁棒性[12]。

[0227] 很重要的是应当注意：(52)和(53)在任务加速度空间中表示，我们在该空间中发现了用于ID的常数增益矩阵，这些矩阵对应于常数系统/任务特征值，而MPTC的局部特征值是取决于配置的。相反，如果通过将(52)和(53)预乘以M_k而将它们转移到任务力空间，则我们发现，在MPTC的情况下感知到的阻尼和刚度是恒定的，而对于ID则是取决于配置的。

[0228] 备注：(52)和(53)之间的高度相似性对于可能将现有的基于ID的控制器框架移植到MPTC方法可能是有利的。

[0229] [12]这是由于反馈通道的数量减少，这可能导致与传感器噪声和建模误差相关的问题。

[0230] B.与PD+控制/无源性WBC的比较

[0231] 通过对子任务控制器目标(17)中与科里奥利效应和离心效应(以下简称“CC”)相关的项重新排序，我们得到以下等式：

[0232] $$C_k\dot{\tilde{x}}_k + M_kQ_k\dot{q} = C_k\dot{x}_{k,ref} + \underbrace{M_kQ_k\left(\underbrace{I - T_k^TJ_k}_{N_k}\right)}_{B_k}\dot{q} \quad (54)$$

[0233] 这里N_k表示零空间投影算子，其消去了$\dot{q}$中的会对任务空间速度$\dot{x}_k$有影响的所有分量，并且矩阵B_k收集了对应的CC相关的反馈项。将(54)代入(17)，我们发现替代(但等效)的子任务控制器公式：

[0234] $$f_{k,des} = T_k\tau_g + B_k\dot{q} + M_k\ddot{x}_{k,ref} + C_k\dot{x}_{k,ref} + D_k\dot{\tilde{x}}_k + K_k\tilde{x}_k \quad (55)$$

[0235] 与来自(17)的原始子任务控制器公式相比，该公式能够更直接地了解MPTC控制器的CC项消去策略：MPTC消去所有与任务无关的CC反馈项(与[7]中的非对角项相比)，并提供任务相关的前馈项$C_k\dot{x}_{k,ref}$，而不消去/利用与任务相关的CC反馈项。与任务相关的CC反馈项也可以通过回顾名义上的子任务闭环特性(20)来验证，在所述子任务闭环特性中与任务相关的CC项保持不变。保留与任务相关的CC项是无源性的前提，并且导致与基于逆动力学的

控制器相比更高的抵抗建模误差的鲁棒性。基于逆动力学的控制器完全消去所有CC影响(基于可能不准确的机器人模型),而基于MPTC的控制器仅消去与任务无关的CC项。

[0236] 一种有趣的特殊情况是只考虑一个任务时(通过堆叠对应的子任务雅可比矩阵将所有子任务组合为一个总体任务)并且任务雅可比矩阵J_k是二次可逆的。这需要子任务是不冲突的。在这种特定情况下,$B_k=0$,因此(55)等效于经典PD+控制器[19](参见图1)或(在不等式约束的情况下)等效于刚才介绍的无源性全身控制器(WBC)[12,16]。

[0237] C.定向解耦的粒度

[0238] MPTC是一种通用控制器设计工具,无论是在子控制器类型的选择(例如笛卡尔相对于联合控制)方面还是在定向解耦[13]的“粒度”方面。当谈论子任务时,我们从来没有指定它们各自的维度,即每个任务覆盖的DOF的数量。这意味着存在大量可以想象的控制器配置。将不同的控制目标(例如笛卡尔末端执行器跟踪目标和联合控制末端执行器跟踪目标)收集在单个任务堆栈(SoT)中,以下问题仍然存在,即SoT的哪些部分应当分配给哪些MPTC相关的子任务。作为示例:六DOF笛卡尔任务可以被定义为两个解耦(线性和角度)控制器子任务,或者替代地定义为单个六DOF任务。在第一种情况下,线性和角度误差动态特性会相互解耦,而在第二种情况下它们将耦合。

[0239] 人们也可以决定将所有控制目标组合成单个任务(导致完全耦合无源跟踪控制器(FC-PTC)),该单个任务在某些情况下等价于PD+控制器(参见第IV-B节和图1)。替代地,人们可以定义多个自然任务的集合(例如,一个任务用于左足,一个任务用于右足),这些任务可以由标准MPTC框架处理。最后,人们可以决定设计最大粒度的控制器设置,其中SoT的每一行形成单个任务。我们将这种特定类型的控制器设置称为完全解耦无源跟踪控制器(FD-PTC)。在所有可能的MPTC设置中,FD-PTC是最类似于逆动力学控制器的一个;两者都基于单个DOF解耦任务动态特性(参见图1)。然而,可以预计FD-PTC表现更高的鲁棒性,因为没有惯量整形并且消去了更少的CC项。

[0240] 记住每个任务只有一个单加权标量ψ_k,其允许将任务相对于彼此(软)设定优先级。这减少了必要的调谐工作。然而,应该注意的是,为了独立地增加某个任务分量的优先级(例如,相比笛卡尔任务的x和y分量偏向于z方向),需要为该任务分量分配自己的任务和适当的权重(例如ψ_z)。

[0241] [13]注意:我们在这里谈论的是“定向解耦”。在任务一致的情况下,MPTC会导致严格解耦的误差动态特性。然而在不一致的情况下,相应任务误差动态特性之间的耦合是不可避免的(至少对于软任务优先级设定而言)。

[0242] V.仿真和实验

[0243] 为了验证我们提出的MPTC框架的性能,我们进行了多次仿真和实验:一方面,使用计算出的控制器扭矩作为输入的基于(3)的前向积分的简单仿真,另一方面,用全尺寸人形机器人TORO[8]进行仿真和实验(使用OpenHRP[14]作为仿真环境)。

[0244] A.固定基座机器人仿真

[0245] 介绍的第一个仿真被设计为检查针对完全驱动、完全确定且因此无冲突的任务设置的调整情况。为此,将固定基座机器人臂的六个关节(其运动学和惯量特性对应于TORO的一条腿)分配给两个不同的关节任务A和B(每个任务覆盖三个关节,参见图2)。将对应的关节任务刚度和阻尼增益[14]分别选择为$K_A=300I_{3\times3}$,$D_A=\mathrm{diag}([40,20,10])$,$K_B=40I_{3\times3}$以及

$D_B=2I_{3\times3}$。注意,标量任务权重ψ_k(这里全部设置为1)没有影响,因为由于没有冲突,所有任务无论如何都完美完成。必须注意的是,控制器不需要任何额外的调谐。选择呈现的参数以提高图2的教育价值。在仿真的开始,所有关节迅速收敛到初始设定点。一秒后,A组的关节经历了速度改变,导致对应的任务误差导数中的跃变。注意,当A组重新收敛时,B组由于任务解耦而完全不受影响。两秒后,B组的设定点改变。同样,对应的关节坐标收敛,而A组现在完全不受影响。注意:这里观察到的完美任务解耦仅仅由于两个关节任务一致才能实现。最后,在3秒后,首先应用扭矩偏移$\tau_{ext}=[20,20,20,5,5,5]$Nm,然后在4秒后移除该扭矩偏移。观察到的控制器特性仍然很好,符合期望。使用该仿真,我们可以验证总体李雅普诺夫函数值V始终减小,但在扰动和设定点改变的情况下除外(参见图2(右))。

[0246] 呈现的第二个仿真评估了针对冲突任务设置的控制器性能,同样针对调整情况。这一次,将刚度为$K_{cart}=diag([2000,2000,2000,100,100,100])$且阻尼为$D_{cart}=diag([500,500,500,20,20,20])$的六DOF笛卡尔末端执行器任务添加到前面描述的关节任务A和B。标量任务权重ψ_k设置为1。启动控制器后,机器人会收敛到平衡位置。注意,总体李雅普诺夫函数值V单调递减,而加权的子任务李雅普诺夫函数值也可以增加(例如图3中的$\psi_{j_8}\cdot V_{j_8}$)。

[0247] [14]注意:为了简洁起见,这里省略了刚度的单位(线性:$\frac{N}{m}$,角度:$\frac{Nm}{rad}$)和阻尼的单位(线性:$\frac{Ns}{m}$,角度:$\frac{Nms}{rad}$)

[0248] B.人形机器人仿真与实验

[0249] 我们执行了基于以下混合WBC设置的人形机器人TORO的步行仿真(见图4):基于逆动力学的躯干定向和总体姿势任务、一项用于运动的发散分量(DCM)[9]控制和角动量正则化的任务以及笛卡尔(6DOF)基于MPTC的足部跟踪控制器被混合[15]。实现了足部参考轨迹的精确跟踪。2.5秒后,左足在x方向上受到-60N的力的扰动,持续0.3秒,导致51mm的最大足位置误差和45mm的最大DCM误差。去除扰动后,足部足够快地收敛到继续成功步行。

[0250] 为了评估MPTC在真实世界的性能,我们使用TORO进行了多项实验,包括推动恢复(在站立期间)、人机交互和步行(可在https://youtu.be/WdF9UQK8aIo找到视频)。在这里,我们介绍了TORO向前走六步的步行实验(详见图5)。单独的基于MPTC的控制器用于控制足(六DOF笛卡尔跟踪)、躯干(三DOF旋转跟踪)、腿关节、腰关节和上身关节(后三个用于总体姿势控制和正则化任务)。对于这些仿真,还应用了基于DCM的控制器和角动量正则化控制器。步行性能总体上鲁棒。然而,可以观察到跟踪误差,我们认为这是由扭矩偏移和关节摩擦引起的。与基于ID的控制器[10]相比,调谐工作量较小,这证明了MPTC在真实世界设置中的鲁棒性。

[0251] [15]注意:由于MPTC的模块化,基于ID和基于MPTC的任务可以组合在同一个总体控制设置中。

[0252] VI.结论和将来的工作

[0253] 这项工作介绍了所谓的模块化无源跟踪控制器(MPTC)。在第一阶段,这个通用控制器旨在独立完成几个子任务目标。然后将这些主要独立的子任务控制器合并为总体控制器。控制器设计与分析基于李雅普诺夫理论,这促进了关于稳定性和无源性的陈述。本文的主要贡献之一是设计了优化权重矩阵,该矩阵针对完全驱动的机器人,保证了冲突子任务

的整个集合的无源性。所提出的控制框架已经在固定和自由浮动机器人的几个仿真和实验中得到了验证。

[0254] 在我们未来的研究中,我们旨在广泛比较逆动力学(ID)、所提出的模块化无源跟踪控制(MPTC)和其他无源控制器(例如PD+控制器)的控制概念。这种广泛比较将基于理论分析、仿真和硬件实验。

[0255] 参考文献

[0256] [1]J.Ackermann.Parameter space design of robust control Systems.IEEE Transactions on Automatic Control,25(6):1058—1072,1980年12月.ISSN 2334-3303.doi:10.1109/TAC.1980.1102505.

[0257] [2]G.Antonelli.Stability Analysis for Prioritized closed-loop inverse kinematic algorithms for redundant robotic Systems.IEEE Transactions on Robotics,25(5):985-994,2009.

[0258] [3]K.Bouyarmane和A.Kheddar.On Weight-Prioritized multitask control of humanoid robots.IEEE Transactions on Automatic Control,63(6):1632-1647,2018年6月.ISSN 2334-3303.doi:10.1109/TAC.2017.2752085.

[0259] [4]S.Chiaverini.Singularity-robust task-priority redundancy resolution for real-time kinematic control of robot manipulators.IEEE Transactions on Robotics and Automation,13(3):398—410,1997年6月.ISSN 2374-958X.doi:10.1109/70.585902.

[0260] [5]A.Dietrich.Whole-Body Impedance Control of Wheeled Humanoid Robots,第116卷.Springer International Publishing,2016.ISBN 978-3-319-40557-5.

[0261] [6]A.Dietrich和C.Ott.Hierarchical Impedance-Based tracking control of kinematically redundant robots.IEEE Transactions on Robotics,36(1):204-221,2020.ISSN 1941-0468.doi:10.1109/TRO.2019.2945876.

[0262] [7]A.Dietrich,C.Ott和A.Albu-**Schäffer.**Multi-objective compliance control of redundant manipulators:hierarchy,control,and stability.In IEEE/RSJ Int.Conf.on Intelligent Robots and Systems,第3043-3050页,2013年11月.doi:10.1109/IROS.2013.6696787.

[0263] [8]J.Englsberger,A.Werner,C.Ott,B.Henze,M.A.Roa,G.Garofalo,R.Burger,A.Beyer,O.Eiberger,K.Schmid和A.Albu-**Schäffer.**OverView of the torque-controlled humanoid robot TORO.In IEEE-RAS Int.Conf.on Humanoid Robots,第916-923页,2014年11月.doi:10.1109/HUMANOIDS.2014.7041473.

[0264] [9]J.Englsberger,C.Ott和A.Albu-**Schäffer.**Three-Dimensional Bipedal Walking Control Based on divergent component of motion.IEEE Transactions on Robotics,31(2):355—368,2015年4月.ISSN 1941-0468.doi:10.1109/TRO.2015.2405592.

[0265] [10]J.Englsberger,G.Mesesan,A.Werner和C.Ott.Torque-Based Dynamic Walking-a long way from Simulation to experiment.In IEEE Int.Conf.on Robotics and Automation(ICRA),第440-447页,2018.

[0266] [11]Adrien Escande,Nicolas Mansard和Pierre-Brice Wieber.Hierarchical quadratic programming:fast online humanoid-robot motion generation.The International Journal of Robotics Research,33(7):1006—1028,2014.doi:10.1177/0278364914521306.

[0267] [12]B.Henze,M.A.Roa和Ch.Ott.Passivity-based whole-body balancing for torque-controlled humanoid robots in multi-contact scenarios.The International Journal of Robotics Research,35(12):1522-1543,2016.doi:10.1177/0278364916653815.

[0268] [13]M,A.Hopkins,D.W.Hong和A.Leonessa.Compliant locomotion using whole-body control and divergent component of motion tracking.In IEEE Int.Conf.on Robotics and Automation(ICRA),第5726-5733页,2015年5月.doi:10.1109/ICRA.2015.7140001.

[0269] [14]F.Kanehiro,H.Hirkawa和S.Kajita.Openhrp:Open Architecturc Humanoid Robotics Platform.The International Journal of Robotics Research,23(2):155-165,2004.doi:10.1177/0278364904041324.

[0270] [15]T.Koolen,S.Bertrand,G.Thomas,T.de Boer,T.Wu,J.Smith,J.Englsberger和J.Pratt.Design of a Momentum-Based Control Framework and application to the humanoid robot atlas.International Journal of Humanoid Robotics,13(01):1650007,2016.doi:10.1142/S0219843616500079.

[0271] [16]G.Mesesan,J.Englsberger,G.Garofalo,C.Ott和A.Albu-**Schäffer.**Dynamic walking on compliant and uneven terrain using dem and passivity-based whole-body control.ln IEEE-RAS19th Int.Conf.on Humanoid Robots(Humanoids),第25-32页,2019.

[0272] [17]R.M.Murray.A mathematical introduction to robotic manipulation.CRC press,2017.

[0273] [18]Y.Nakamura,H.Hanafusa和T.Yoshikawa.Task-priority based redundancy control of robot manipulators.The International Journal of Robotics Research,6(2):3-15,1987.doi:10.1177/027836498700600201.

[0274] [19]B.Paden和B.Riedle.A Positive-Real Modification of a class of nonlinear controllers for robot manipulators.In 1988American Control Conference,1782-1785,1988年6月.doi:10.23919/ACC.1988.4790015.

[0275] [20]J.Peters,M.Mistry,F.Udwadia,J.Nakanishi和S.Schaal.A unifying framework for robot control with redundant dofs.Autonomous Robots,24:1-12,2008.doi:10.1007/s10514-007-9051-x.

[0276] [21]L.Righetti,J.Buchli,M.Mistry和S.Schaal.Inverse dynamics control of floating-base robots with external constraints:A unified view.In IEEE Int.Conf.on Robotics and Automation,第1085-1090页,2011年5月.doi:10.1109/ICRA.2011.5980156.

[0277] [22]L.Sentis和O.Khatib.Synthesis of Wliole-Body behaviors through

hierarchical control of behavioral primitives.International Journal of Humanoid Robotics,2(4):505—518,2005.

[0278] [23]L.Sentis,J.Park和O.Khatib.Compliant Control of multicontact and center-of-mass behaviors in humanoid robots.IEEE Transactions on Robotics,26(3):483-501,2010.

[0279] 图6示例性地示出了根据本发明的方法的可能应用。在此情况下,多个基于阻抗的控制器模块102(模块化无源跟踪控制器)通过根据本发明的方法集成到总控制器104中。在所示示例中,每个控制器模块102的表示包括参考轨迹和质量,它们经由弹簧-阻尼器系统彼此连接,其中具有名称A和C的控制器模块102分别表示笛卡尔控制任务,而具有名称B和D的控制器模块102被制定为关节控制器。如图6所示,分别由任务映射矩阵和任务向量组成的各种控制器模块102可以组合为由统一的任务映射矩阵106和组合的任务向量110组成的任务堆栈。通过合适的优化方法,例如借助于优化变量108,可以将由任务堆栈表示的控制器模块融合为总控制器104。在此,从各种子控制器目标实现最佳折衷,其中特别是以最佳可能方式实现所得到的总控制器104的无源性。

[0280] 附图标记列表

[0281] 100 机器人

[0282] 102 控制器模块

[0283] 104 总控制器

[0284] 106 任务映射矩阵

[0285] 108 优化变量

[0286] 110 任务向量。

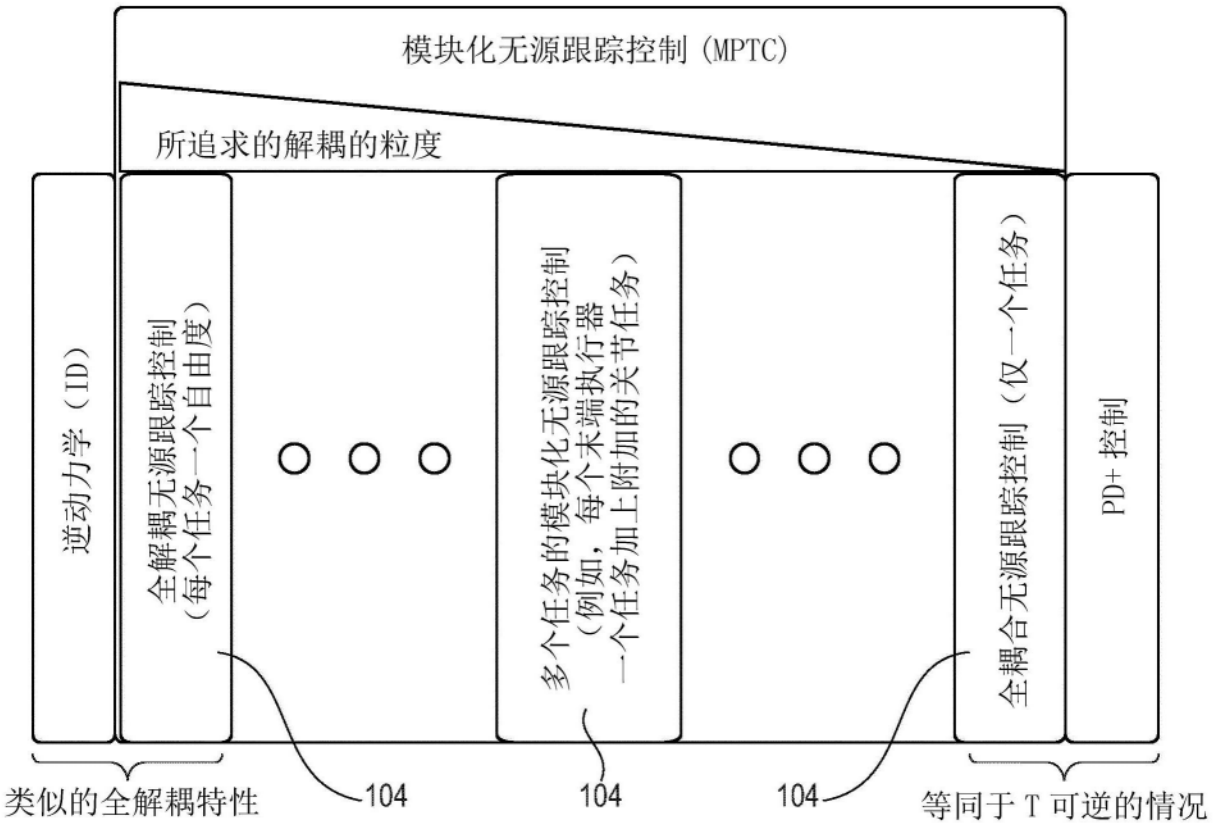

模块化无源跟踪控制（MPTC）
所追求的解耦的粒度
逆动力学（ID）
全解耦无源跟踪控制
（每个任务一个自由度）
多个任务的模块化无源跟踪控制
（例如，每个末端执行器
一个任务加上附加的关节任务）
全耦合无源跟踪控制（仅一个任务）
PD+控制
类似的全解耦特性
104
104
104
等同于T可逆的情况

图1

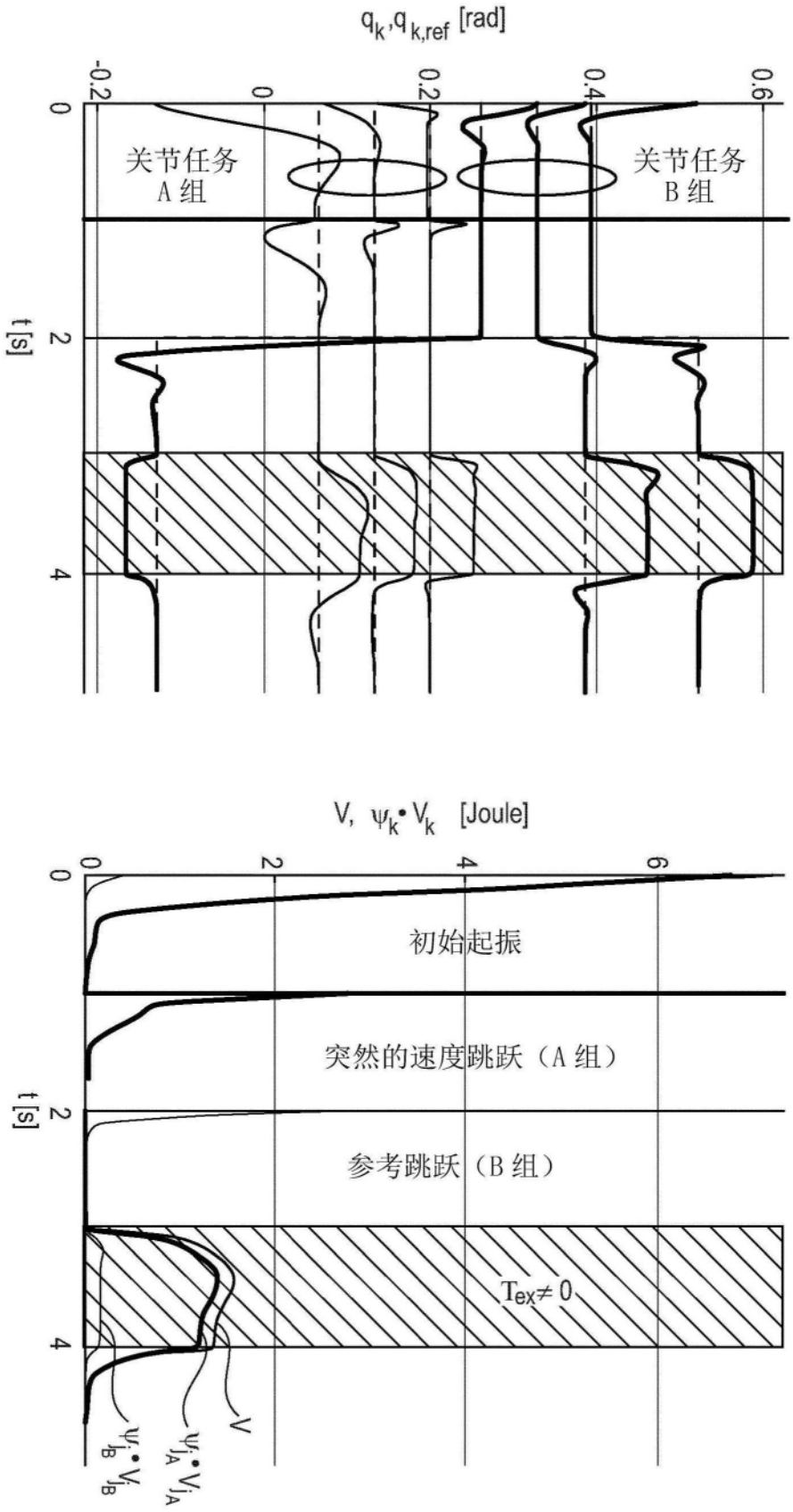

$q_k, q_{k,ref}$ [rad]
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
关节任务
A 组
关节任务
B 组
t [s]
0
2
4
V, $\psi_k \bullet V_k$ [Joule]
0
2
4
6
初始起振
突然的速度跳跃（A 组）
参考跳跃（B 组）
$T_{ex} \neq 0$
t [s]
0
2
4
V
$\psi_{j_A} \bullet V_{j_A}$
$\psi_{j_B} \bullet V_{j_B}$

图2

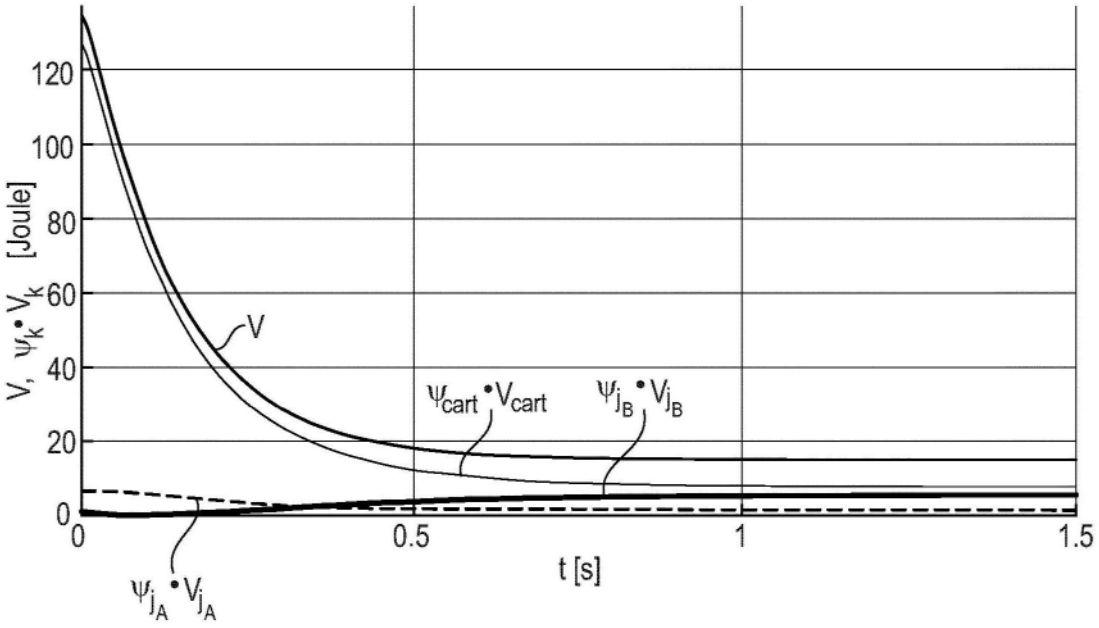

120
100
80
60
40
20
0
V, ψk•Vk [Joule]
V
ψcart•Vcart
ψjB•VjB
ψjA•VjA
0
0.5
1
1.5
t [s]

图3

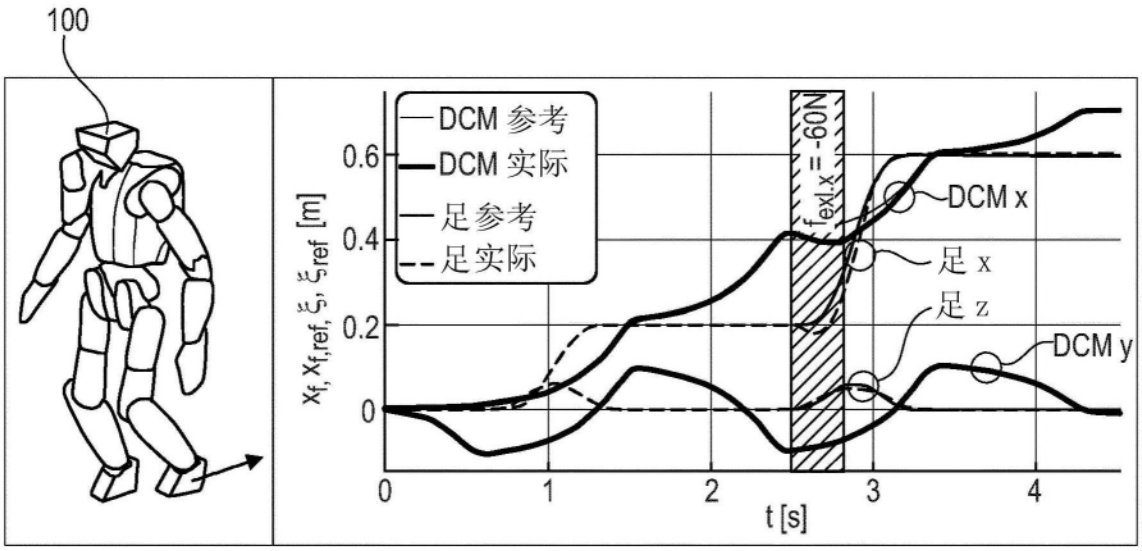

100
DCM 参考
DCM 实际
足参考
足实际
0.6
0.4
0.2
0
xf, xf,ref, ξ, ξref [m]
fext,x = -60N
DCM x
足 x
足 z
DCM y
0
1
2
3
4
t [s]

图4

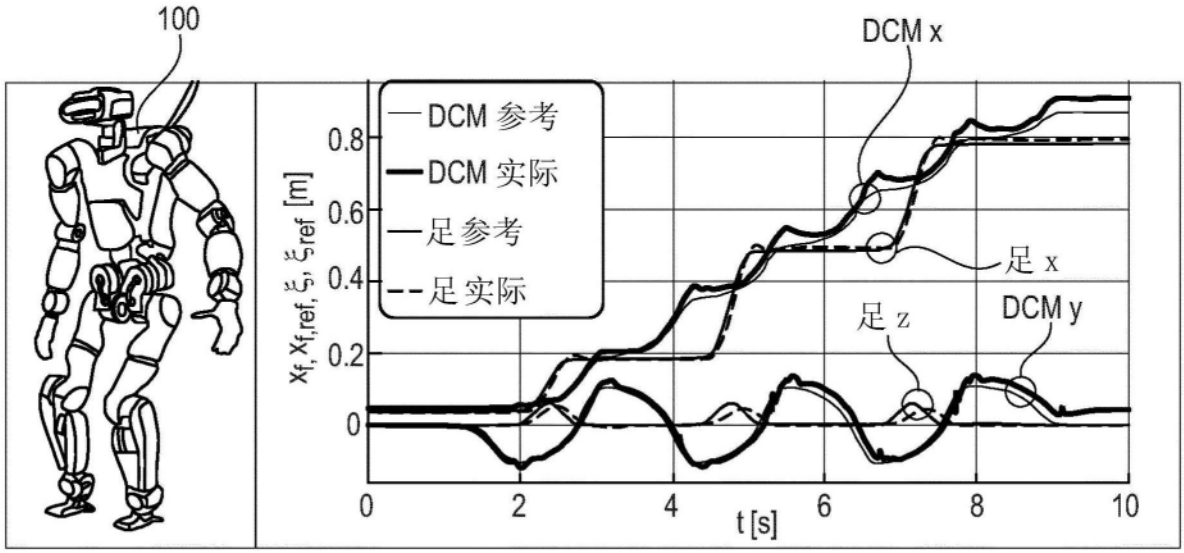

100
DCM x
DCM 参考
DCM 实际
足 参考
足 实际
足 x
足 z
DCM y
$x_f, x_{f,ref}, \xi, \xi_{ref}$ [m]
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
2
4
6
8
10
t [s]

图5

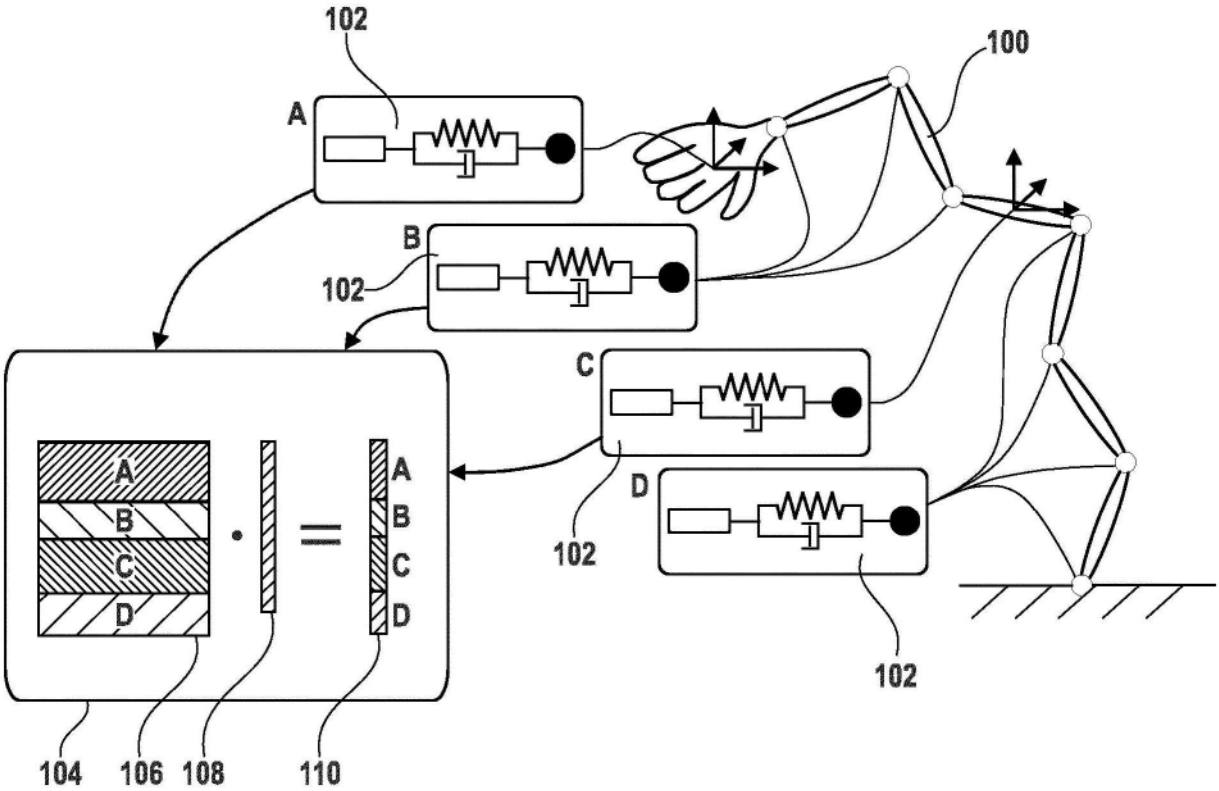

102
A
100
B
102
C
D
102
102
A
B
C
D
A
B
C
D
104
106
108
110

图6