© 2022 电气电子工程师学会。允许个人使用本材料。其他所有用途均须获得电气电子工程师学会的许可，包括为广告或宣传目的重印或再版本材料、收集新的作品集以供转售或重新分发至服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品中受版权保护的任何部分。本作品已提交给电气电子工程师学会，供其考虑发表。版权可能会在不另行通知的情况下转让，届时此版本可能不再可供访问。

请引用较新的已录用版本，其 DOI 如下：数字对象唯一标识符 10.1109/LRA.2023.3302616

arXiv:2303.01397v2 [cs.RO] 9 Aug 2023

高接触任务中物理人-机器人-环境交互的基于非线性子系统的自适应阻抗控制

Mahdi Hejrati, Jouni Mattila

摘要——触觉上肢外骨骼是一种机器人，可在任务执行过程中辅助人类操作员，同时能够呈现虚拟或远程环境。因此，确保此类机器人在物理人-机器人-环境交互（pHREI）中的稳定性至关重要。较宽的Z宽度也很重要，它表示触觉显示器可被动呈现阻抗的范围，有助于呈现广泛的虚拟环境。为解决这些问题，本研究设计了基于子系统的自适应阻抗控制，以实现7自由度触觉外骨骼的稳定物理人-机器人-环境交互。所提出的控制器将整个系统分解为多个子系统，并在子系统层级设计控制器。通过采用虚拟稳定性的概念，证明了控制器在与虚拟环境接触且受到人类手臂施力时的稳定性。此外，本文利用实验数据展示了7自由度触觉外骨骼的Z宽度，并通过采用可变虚拟质量元件对其加以改进。实验结果用于展示控制器的性能。控制结果还与最先进的控制方法进行了比较，凸显了所设计控制器的优越性。

索引词—物理人机交互、柔顺与阻抗控制、自适应控制、触觉与触觉接口

I. 引言

随着ITH第四次工业革命相关技术不断进步，机器人正越来越多地应用于工业领域，以减轻工人的工作负担；也应用于医疗保健领域，以提升人类生活质量，这体现了人机交互（HRI）的重要性。人机交互可分为三类：人机共存、人机合作以及人机协作，或物理人机交互（pHRI） [1]。与前两类不同，在物理人机交互场景中，人和机器人共同执行同一项任务，同时彼此产生物理作用。上肢外骨骼（ULE）就是这类交互的一个例子 [2]。另一方面，触觉上肢外骨骼（HULE） [3] 融合了触觉显示技术，可呈现虚拟或远程环境，并提供上肢外骨骼辅助功能。触觉上肢外骨骼既可作为主机器人，用于能够显示远程环境的双边遥操作控制，也可在高接触协同操作过程中辅助人（图1）。因此，触觉上肢外骨骼会受到人体上肢动力学以及与虚拟或物理环境接触的影响。因此，在执行高接触任务时，确保触觉上肢外骨骼中的物理人-机器人-环境交互（pHREI）稳定性至关重要。pHREI 控制可通过阻抗控制方案 [4] 实现，该方案能使机器人在与人和环境交互的整个过程中保持安全、稳健的顺应行为。此外，对于触觉显示器而言，Z宽度是一个关键特性，它表示可呈现的被动阻抗的动态范围。Z宽度越大，触觉上肢外骨骼能够呈现的虚拟或远程环境范围就越大，感受也越真实 [5]。因此，Z宽度是触觉显示器的一项重要考量，增大Z宽度是理想的目标。



图1. 用于上肢外骨骼的 pHREI：a）作为双边遥操作中的主机器人；b）作为协同操作的辅助设备

稿件收到日期：2023年3月2日；修订日期：2023年5月10日；录用日期：2023年7月22日。经副编辑和审稿人意见评估后，编辑 Jaydev P. Desai 推荐本文发表。TITAN项目由芬兰技术工业百年基金会和 Jane and Aatos Erkko基金会Future Makers计划资助，资助期限为2020—2023年。（通讯作者：Mahdi Hejrati。）作者现供职于芬兰坦佩雷大学工程与自然科学系，地址：芬兰坦佩雷 7320；电子邮箱：mahdi.hejrati@tuni.fi；Jouni.Mattila@tuni.fi。数字对象唯一标识符（DOI）：10.1109/LRA.2023.3302616

II. 相关工作

A. 物理人机交互中的阻抗控制

在整个 pHREI 过程中，HULE 的目标是完成任务（可以是协同操作或辅助），尽管受到人体上肢动力学以及与环境接触的影响。阻抗控制在机器人学领域得到了广泛应用 [6], [7], , 能够赋予 HULE 这种能力。文献[8]设计了一种多点阻抗控制，用于控制二自由度机器人的 pHREI。文献 [9], 设计了一种自适应阻抗控制，用于控制 ULE ； 该控制器的阻抗参数通过表面肌电图和人体上肢肌肉骨骼模型进行调节。文献 [10], 为 ULE 控制设计了一种自适应阻抗控制

该控制基于用于人体意图估计的肌肉周长传感器。该研究旨在利用具有 5 个被动自由度和 2 个主动自由度的 7自由度穿戴式触觉显示器，辅助人携带物体。文献 [11] 针对采用 7自由度穿戴式触觉显示器的康复应用，提出了自适应反步阻抗控制。此外，文献 [12] 提出了迭代学习阻抗控制，用于控制由串联弹性执行器驱动的 1 自由度 ULE，并通过控制器的迭代过程实现了期望阻抗。阻抗控制也已用于控制触觉显示器。文献 [13], 提出了非线性模型参考自适应阻抗控制，用于控制 5 自由度触觉显示器。文献 [14]为二自由度触觉设备的 pHREI 控制设计了加权导纳-阻抗控制。文献 [15]采用时域无源性方法（TDPA），通过无源性控制器和无源性观测器稳定触觉界面。上述研究考察的对象均为 ULE 或低自由度触觉设备，而本研究中的 HULE 是一款 7 自由度穿戴式触觉显示器（图 2(a) 展示了与环境接触的 HULE，图 2(b) 展示了其关节构型）。因此，在考虑系统复杂性的同时，确保控制器在人和环境影响下的稳定性与性能至关重要，从而保障 HULE 使用者的人身安全。

B. Z宽度

通常，环境可以由一个二阶质量-弹簧-阻尼器阻抗模型表示，

$$Z(s) = Ms + B + \frac{K}{s} \tag{1}$$

其中，M、B 和 K 分别为环境的质量、阻尼和刚度系数。由于虚拟墙使我们能够考察触觉显示器和阻抗控制在高阻抗（与虚拟墙接触）和低阻抗（自由运动）两种情形下的性能，因此本研究将环境视为单侧约束（墙）。Z宽度越大，触觉显示器能够呈现的虚拟墙刚度范围就越宽。因此，HULE 具备较大的 Z宽度十分重要。许多研究通过考察各种问题，尝试提升触觉显示器的 Z宽度。在[16], [17], 中，研究者分析了提高采样率的影响。文献 [18]提出了一种双速率采样方法。然而，正如文献 [19]所述，在触觉设备中加入虚拟耦合，是扩大 Z宽度范围的一种重要方法。多项研究提出采用虚拟阻尼来提升 Z宽度 [15], [20]。不过，文献 [21]，表明，与采用虚拟阻尼相比，采用虚拟惯性能够更大幅度地扩大一自由度触觉设备的 Z宽度。以往研究仅针对不可穿戴的低自由度触觉设备分析 Z宽度，以评估其性能。相比之下，对于高自由度非线性触觉外骨骼（图 2(a)），必须确保在考虑人体影响时所实现的 Z宽度具有被动性，并且能够用于实际应用。

C. 目标与贡献

基于上述文献综述，本研究旨在开发一种高性能 HULE，使其在存在人类手臂动力学的情况下，仍能与虚拟环境稳定交互。本文的贡献如下。首先，设计了一种基于子系统的自适应阻抗方案，用于在高接触任务中控制 7 自由度 HULE 的末端执行器位姿。所提出的控制器将整个系统分解为多个子系统，使我们能够在子系统层级设计控制器，而无需处理耦合的刚体-执行器非线性，同时在整体控制律中考虑这些非线性。控制器中采用自然自适应律（NAL），仅需一个自适应增益[22]即可估计 HULE 的未知参数。NAL 还确保估计参数满足物理一致性条件。通过实验并将仿真结果与其他方法进行比较，评估了该控制器的性能。其次，在考虑 7 自由度 HULE 的所有非线性的情况下，通过实验绘制了存在人类手臂动力学和阻抗控制器时 HULE 的 Z宽度，从而使得所推导出的可实现 Z宽度在实际应用中更加可靠。此外，采用可变虚拟质量元件作为一种新型阻尼元件，以提升 HULE 的 Z宽度。

本文的组织结构如下。第三节介绍该方法的数学基础并对问题进行 formulat。第四节介绍所提出的基于子系统的阻抗控制，第五节详细说明 Z宽度的改进。第六节给出实验结果，并在第七节中总结结论。

III. 基于子系统的控制方案

A. 虚拟分解控制

虚拟分解控制（VDC） [23] 是一种适用于高度非线性系统的基于模型的控制方法。为设计控制作用，VDC采用虚拟切割点（VCP）概念。VCP是一种独立接口，本质上将连杆切开。由VCP形成的分离部分保持相同的位置和姿态，所施加的力/力矩大小相同但方向相反（图2(c)）。此外，VCP将整个系统的控制目标分配为包含刚体和执行器部分的子系统的局部控制目标。随后，针对给定的所需速度，VDC基于牛顿-欧拉迭代法计算完成各局部控制目标所需的力和力矩。所需速度是VDC中的设计变量，必须根据给定任务进行设计。每个子系统的稳定性在局部子系统层面得到证明，并通过采用称为虚拟功率流（VPF）的标量项和虚拟稳定性方案，将其扩展至整个复杂系统的稳定性。因此，无论机器人系统多么复杂，VDC都如图 2(c)所示分别处理各个子系统，并为每个子系统设计控制器，而无需处理耦合的非线性。由此，VDC专门用于控制复杂系统，例如7 自由度 HULE的pHREI 控制。近年来，VDC方案已被应用于

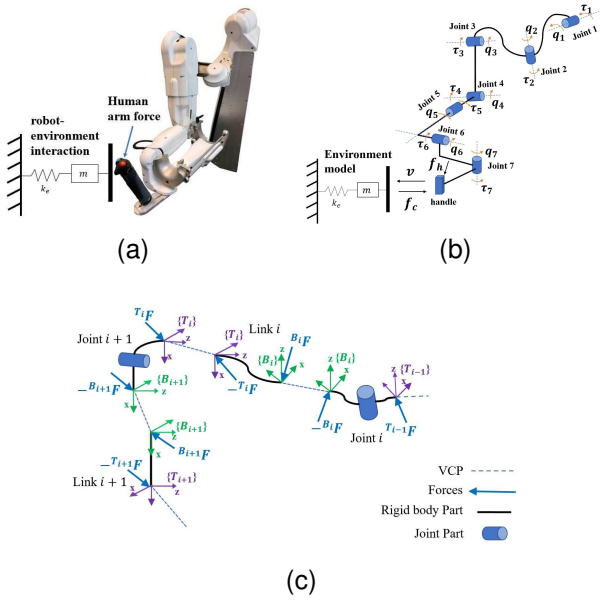


图2. a) 与虚拟墙接触的 HULE，b) 关节构型，c) HULE 按第 i 个连杆和执行器进行分解的示意图

各种领域，例如液压机械臂的遥操作 [24], 阻抗控制 [25], 以及ULE控制 [22]。

B. VDC 数学预备知识

定义1. [23] 对于 VCP 处的给定坐标系 $\{B_i\}$ （图2(c)），VPF 定义为：

$$p_{B_i} = ({}^{B_i}\mathcal{V}_r - {}^{B_i}\mathcal{V})^T({}^{B_i}F_r - {}^{B_i}F). \tag{2}$$

定义2. [23] 从复杂机器人中虚拟分解得到的子系统，若其关联向量 $\mathcal{X}(t)$ 和 $y(t)$ 为虚拟函数，当且仅当存在一个非负伴随函数时，则称该子系统虚拟稳定

$$\nu(t) \geq \frac{1}{2}\mathcal{X}(t)^T P \mathcal{X}(t) \tag{3}$$

使得：

$$\dot{\nu}(t) \leq -y(t)^T Q\, y(t) + p_A - p_C \tag{4}$$

其中，P 和 Q 是两个分块对角正定矩阵，p_A 和 p_C 表示定义 1 中的 VPF，分别位于坐标系 {A}（设置在受动虚拟切割点处）和坐标系 {C}（设置在主动虚拟切割点处）。

定理 1. [23] 考虑一个在虚拟意义上分解为多个子系统的复杂机器人。若所有分解出的子系统按照定义 1 的含义均为虚拟稳定，则整个系统稳定。

定理 1 是 VDC 中最重要的定理。它确立了每个子系统的虚拟稳定性与整个复杂机器人的稳定性之间的等价关系。

引理 1. [22] 对于任意惯性参数向量 ϕ_A，存在一个一一线性映射 $f: \Re^{10} \to S(4)$，使得：

$$f(\phi_A) = \mathcal{L}_A = \begin{bmatrix} 0.5tr(\bar{I}).\mathbf{1} - \bar{I} & h \\ h^T & m \end{bmatrix}$$

$$f^{-1}(\phi_A) = \phi_A(m, h, tr(\Sigma).\mathbf{1} - \Sigma)$$

其中 $\Sigma = 0.5tr(I) - I$，且 m、h 和 I 分别为质量、一阶质量矩和转动惯量矩阵，其中 $\phi_A = [m, h, vecI]$ 其中 $vecI = [I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{yz}, I_{xz}]$。此外，$tr(.)$ 是矩阵的迹算子。于是，NAL 自适应律可写为：

$$\dot{\hat{\mathcal{L}}}_A = \frac{1}{\gamma}\hat{\mathcal{L}}_A\, \mathcal{S}_A\, \hat{\mathcal{L}}_A$$

其中，$\mathcal{L}_A$ 是 $\mathcal{L}_A$的估计值，γ 是自适应增益，$\mathcal{S}_A$ 是唯一的对称矩阵。

引理 2. [22] 对于引理 1 中定义的 $\mathcal{L}_A$，基于对数行列式函数的 Bregman 散度可定义为：

$$\mathcal{D}_F(\mathcal{L}_A \| \hat{\mathcal{L}}_A) = log\frac{|\hat{\mathcal{L}}_A|}{|\mathcal{L}_A|} + tr(\hat{\mathcal{L}}_A^{-1}\mathcal{L}_A) - 4.$$

其时间导数为：

$$\dot{\mathcal{D}}_F(\mathcal{L}_A \| \hat{\mathcal{L}}_A) = tr([\hat{\mathcal{L}}_A^{-1}\dot{\hat{\mathcal{L}}}_A\, \hat{\mathcal{L}}_A^{-1}]\, \tilde{\mathcal{L}}_A)$$

其中 $\tilde{\mathcal{L}}_A = \mathcal{L}_A - \hat{\mathcal{L}}_A$。

C. VDC 控制设计

设 $\{B_i\}$ 和 $\{T_i\}$ 为附着于i^{th} 刚体的坐标系。则，6D 线速度/角速度向量${}^{B_i}\mathcal{V} \in \Re^6$ 和力/力矩向量 ${}^{B_i}\mathcal{F} \in \Re^6$ 可表示如下 [23]:

$${}^{B_i}\mathcal{V} = [{}^{B_i}v,\, {}^{B_i}\omega]^T, \quad {}^{B_i}\mathcal{F} = [{}^{B_i}f,\, {}^{B_i}m]^T$$

其中，${}^{B_i}v \in \Re^3$ 和 ${}^{B_i}\omega \in \Re^3$ 分别是坐标系 $\{B_i\}$的线速度和角速度，而 ${}^{B_i}f \in \Re^3$ 和 ${}^{B_i}m \in \Re^3$ 分别是以坐标系 $\{B_i\}$表示的力和力矩。用于在坐标系 $\{B_i\}$ 和 $\{T_i\}$ 之间变换力/力矩向量与速度向量的变换矩阵为 [23],

$${}^{B_i}U_{T_i} = \begin{bmatrix} {}^{B_i}R_{T_i} & \mathbf{0}_{3\times3} \\ ({}^{B_i}r_{B_iT_i}\times)\,{}^{B_i}R_{T_i} & {}^{B_i}R_{T_i} \end{bmatrix} \tag{5}$$

其中，${}^{B_i}R_{T_i} \in \Re^{3\times3}$ 是坐标系 $\{B_i\}$与 $\{T_i\}$之间的旋转矩阵，而 $({}^{B_i}r_{B_iT_i}\times)$ 是在 [23]中定义的反对称矩阵算子。根据 ${}^{B_i}U_{T_i}$，力/力矩向量和速度向量可在坐标系之间进行变换，如下所示 [23],

$${}^{T_i}\mathcal{V} = {}^{B_i}U_{T_i}^T\, {}^{B_i}\mathcal{V}, \quad i = 1...7 \tag{6}$$

$${}^{B_i}\mathcal{V} = \kappa_i\dot{q}_i + {}^{T_{i-1}}U_{B_i}^T\, {}^{T_{i-1}}\mathcal{V}, \quad i = 1...7 \tag{7}$$

$${}^{B_i}F = {}^{B_i}F^* + {}^{B_i}U_{T_i}\, {}^{T_i}F, \quad i = 7...1 \tag{8}$$

其中，${}^{T_{i-1}}F = {}^{T_{i-1}}U_{B_i}\, {}^{B_i}F$对应 $i = 7...1$，q_i和 $\dot{q}_i$分别为关节角度和角速度；$\kappa_i = z_\tau$对应 $i = 1$、2、3、4、6，$\kappa_i = y_\tau$ 对应 $i = 7$，$\kappa_i = x_\tau$ 对应 $i = 5$，其中 $z_\tau = [0,0,0,0,0,1]^T$、$y_\tau = [0,0,0,0,1,0]^T$、$x_\tau = [0,0,0,1,0,0]^T$和 $(.)^T$ 为转置算子。此外，对于 $i = 1$，有${}^{T_0}\mathcal{V} = {}^{G}\mathcal{V} = \mathbf{0}_{6\times1}$和 ${}^{T_0}F = \mathbf{0}_{6\times1}$；对于 $i = 7$，有 ${}^{T_7}F = f$，其中 f为交互力，稍后将对其进行定义。${}^{B_i}F^*$是作用于 i^{th}刚体的合力，定义如下：

$$M_{B_i}\frac{d}{dt}({}^{B_i}\mathcal{V}) + C_{B_i}({}^{B_i}\mathcal{V}) + G_{B_i} = {}^{B_i}F^* \tag{9}$$

其中，$M_{B_i} \in \Re^{6\times6}$、$C_{B_i} \in \Re^{6\times6}$和 $G_{B_i} \in \Re^6$ 分别是质量、离心力与科里奥利力以及重力矩阵，其定义为

在 [22], 中。刚体部分的局部控制目标是达到给定的所需线速度/角速度${}^{B_i}\mathcal{V}_r$，其将在后文定义。因此，为实现局部控制目标而必须施加到 i^{th} 刚体上的所需力/力矩向量可设计为：

$$ {}^{B_i}F_r = {}^{B_i}F_r^* + {}^{B_i}U_{T_i}\,{}^{T_i}F_r. \tag{10}$$

其局部控制律为，

$$ {}^{B_i}F_r^* = {}^{B_i}W\hat{\phi}_{B_i} + K_{Di}\,{}^{B_i}e_{\mathcal{V}} + K_{Ii}\int_0^t {}^{B_i}e_{\mathcal{V}}dt \tag{11}$$

其中，${}^{B_i}e_{\mathcal{V}} = {}^{B_i}\mathcal{V}_r - {}^{B_i}\mathcal{V}$、$K_{Di}$和 K_{Ii}为对角正定控制增益，${}^{B_i}W \in \Re^{6\times 10}$ 为回归矩阵，$\hat{}\,\phi_{B_i} \in \Re^{10}$ 为惯性参数向量 $\phi_{B_i} \in \Re^{10}$ [22] 的估计值，其定义为，

$$ {}^{B_i}W\phi_{B_i} = M_{B_i}\frac{d}{dt}({}^{B_i}\mathcal{V}_r) + C_{B_i}({}^{B_i}\mathcal{V}_r) + G_{B_i} \tag{12}$$

在不存在摩擦的情况下，电动机的关节执行器动力学可表示为，

$$ I_{mi}\ddot{q}_i = \tau_i^* = \tau_i - \tau_{ai} \tag{13}$$

其中，I_{mi} 表示关节的转动惯量。方程（13）与方程（10）具有完全相同的含义，其中，τ_i^*为施加于关节的合力矩，τ_i 表示控制力矩，且 $\tau_{ai} = z_\tau^{T}\,{}^{B_i}F$。为实现这两个局部控制目标，可将自适应VDC控制律设计为，

$$ \tau_i = \tau_{ir}^* + \tau_{air} \tag{14}$$

其中，τ_{ir}^* 为确保关节期望角度跟踪的局部控制律，定义为，

$$ \tau_{ir}^* = W_{ai}\hat{\phi}_{ai} + k_{di}e_{ai} + k_{Ii}\int_0^t e_{ai} \tag{15}$$

其中，$W_{ai} \in \Re^{1\times 10}$ 为回归矩阵，$\hat{}\,\phi_{ai} \in \Re^{10}$为惯性参数向量 $\phi_{ai} \in \Re^{10}$ in 的估计值，

$$ W_{ai}\phi_{ai} = I_{mi}\ddot{q}_{ri}. \tag{16}$$

此外，$e_{ai} = \dot{q}_{ir} - \dot{q}_i$、$\dot{q}_{ir}$ 为所需的角速度，k_{di}和 k_{Ii} 为正控制增益。此外，$\tau_{air} = z_\tau^{T}\,{}^{B_i}F_r$表示完成刚体部件的局部控制目标，其中 ${}^{B_i}F_r$ 由（10）计算得到。在（11）和（15）中，对惯性参数向量 ϕ_{B_i} 和 ϕ_{ai} 的$\hat{}\,\hat{}$估计，可以通过利用 NAL，按照引理 1 的方式，将 {A}替换为 $\{B_i\}$ 和 $\{a_i\}$来计算。引理 1 中的自适应律仅用于估计（11）和（15）中的机器人及人类手臂模型的惯性参数。由引理1可知，对于未知参数的估计，只需调整一个增益。此外，要使估计参数满足物理一致性条件，唯一需要满足的条件是 $\mathcal{L}_A$(0)具有物理一致性[22]。

所需的线速度/角速度 ${}^{B_i}\mathcal{V}_r$ 可计算为：

$$ {}^{B_i}\mathcal{V}_r = \kappa_i\dot{q}_{ri} + {}^{T_{i-1}}U_{B_i}^{T}\,{}^{T_{i-1}}\mathcal{V}_r, \quad i = 1...7 \tag{17}$$

其中，${}^{T_{i-1}}\mathcal{V}_r$ 是$(i-1)^{th}$ 刚体上 VCP 所需的速度（对于 $i=1$, 有 ${}^{T_0}\mathcal{V}_r = {}^{G}\mathcal{V}_r = \mathbf{0}_{6\times 1}$），并且

$\dot{q}_{ri}$ 是设计变量，应根据预定义任务进行设计。根据式（7）和式（17），如果 $\dot{q}_i \to \dot{q}_{ir}$，则${}^{B_i}\mathcal{V} \to {}^{B_i}\mathcal{V}_r$，从而满足两个局部控制目标。式（14）中的控制律旨在实现这一目标。基于目前的说明，推导 VDC 控制律（14）最重要的部分是设计 $\dot{q}_{ir}$。本文关注的是 7 自由度 HULE 的任务空间问题，因此 $\dot{q}_{ri}$ 可定义为：

$$ \dot{q}_{ri} = J^T(JJ^T)^{-1}\dot{X}_r \tag{18}$$

其中，$\dot{X}_r$ 为任务空间设计变量，$J \in \Re^{6\times 7}$ 为雅可比矩阵。下一节将设计 X_r，以实现阻抗控制目标。

IV. 阻抗控制设计

阻抗控制使机器人能够完成自由运动和高接触任务。忽略 [4], 中的惯性后，机器人的期望阻抗模型可表示为：

$$ -B_d(\dot{X}_d - \dot{X}) - K_d(X_d - X) = f_d - f \tag{19}$$

其中，$B_d \in \Re^{6\times 6}$ 和 $K_d \in \Re^{6\times 6}$ 是对角正定矩阵，分别表示期望阻尼和刚度。f 是外部施加于 HULE 的力，f_d 是期望接触力，X_d和 X 分别是末端执行器的期望位置和实际位置。此外，$e = X_d - X = [e_p, e_o]$，其中 e_p 是位置误差，e_o 是利用末端执行器的四元数 [22] 表示的姿态误差。作为一种触觉外骨骼，HULE 在执行任务期间会受到人类手臂施加的力 f_h，并在发生接触时受到虚拟环境力 f_c。因此，在 PHREI 过程中施加于机器人的外力有所不同，可表示为：

$$ f = \begin{cases} -f_h & : assisting(\textit{pHRI}) \\ -f_h + f_c & : contact(\textit{pHREI}). \end{cases} \tag{20}$$

描述人类手臂动力学的动态方程可表示为：

$$ M_h\ddot{X}_h + B_h\dot{X}_h + K_h(X_h - X) = f_h \tag{21}$$

其中，$M_h \in \Re^{6\times 6}$、$B_h \in \Re^{6\times 6}$ 和 $K_h \in \Re^{6\times 6}$ 为对角正定矩阵，分别表示人类手臂的惯性、阻尼和刚度矩阵，X_h 为人手位置。需要指出的是，人体外源力被忽略了。f_c 将在后文定义。

如前所述，式（18）中的所需任务空间速度是实现期望目标的控制设计变量。下面的定理总结了基于子系统的阻抗控制律。

定理 2. 对于由式 (9) 和 (13) 表示、具有式 (20) 中交互力的分解系统，若式 (18) 中定义的设计变量为，

$$ \dot{X}_r = \dot{X}_d + \Gamma_x(X_d - X) + \Gamma_f(f_d - f) \tag{22}$$

其中 $\Gamma_x \in \Re^{6\times6}$ 和 $\Gamma_f \in \Re^{6\times6}$ 为定义如下的正定对角矩阵，

$$\Gamma_f = B_d^{-1}, \qquad \Gamma_x = K_d\, B_d^{-1}. \tag{23}$$

必须指出，B_d 和 K_d 应从机器人可实现的动态范围内选取。

证明。附录 A。

以下定理保证了整个系统满足定理1和定义2意义下的稳定性。

定理 3. 对于一个由刚体和执行器动力学 (9) 和 (13) 描述、控制作用为 (14)、按照引理 1 的意义采用自适应律，且 X_r 定义如 (22) 的分解式 7 自由度 HULE（图 2(c)），可将非负伴随函数定义为：

$$\begin{aligned}\nu_i(t) = \sum_{i=1}^{7}[&\frac{1}{2}(\int_0^t {}^{B_i}e_{\mathcal{V}}dt)^T K_{Ii}(\int_0^t {}^{B_i}e_{\mathcal{V}}dt)\\ &+\frac{1}{2}k_{Ii}(\int_0^t e_{ai}dt)^2 + \frac{1}{2}\,{}^{B_i}e_{\mathcal{V}}^T M_{B_i}\,{}^{B_i}e_{\mathcal{V}} + \frac{1}{2}I_{mi}\,e_{ai}^2\\ &+\gamma\mathcal{D}_F(\mathcal{L}_{B_i}\|\hat{\mathcal{L}}_{B_i}) + \mathcal{D}_F(\mathcal{L}_{ai}\|\hat{\mathcal{L}}_{ai})]\end{aligned} \tag{24}$$

其中，$\mathcal{D}_F(\mathcal{L}\|\hat{\mathcal{L}})$定义见引理 2。对 (24) 求时间导数，可得：

$$\dot{\nu}_i(t) = \sum_{i=1}^{7}(-\,{}^{B_i}e_{\mathcal{V}}^T K_{Di}\,{}^{B_i}e_{\mathcal{V}} - k_{di}e_{ai}^2). \tag{25}$$

根据定理 1 和定义2，可以证明整个系统的渐近稳定性。

证明见附录 B。

注1。式（14）中的控制律包含两项。式（14）右侧的第二项用于补偿运动和重力产生的刚体力。另一方面，第一项着重于实现式（18）中定义的所需速度，从而确保机器人实现式（19）中定义的期望阻抗模型。因此，通过实现局部目标即可达到期望阻抗。

V. HULE 的 Z宽度

对于触觉显示器，Z宽度是虚拟墙刚度范围的指标，该范围内的虚拟墙能够被动呈现。对于接触产生的力为 $f_c(t)$、触觉末端执行器速度为 v(t) 的情况，无源性条件定义如下：

$$E_c(t) = \int_0^t f_c(\sigma)\, v(\sigma)\, d\sigma \geq 0. \qquad \forall t \geq 0 \tag{26}$$

对于刚度较大的虚拟墙，弹簧力可计算如下：

$$f_s(t) = k_e(z_e - z) \tag{27}$$

其中，k_e 是虚拟墙的渲染刚度，z_e 是虚拟墙的位置，z 是 HULE 末端执行器的位置。从（27）可以看出，增大虚拟墙的刚度会产生更大的接触力，导致接触不稳定。因此，这限制了 Z宽度的范围。要获得更宽的 Z宽度（能够被动渲染更大的 k_e），一种替代方法是添加耗能项至

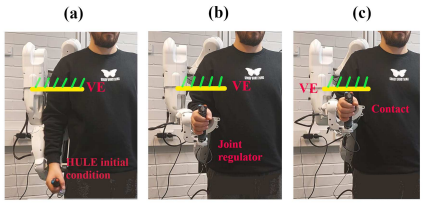


图3. Z宽度绘图的实验步骤：a) HULE 的初始配置，b) VDC调节器校准关节角度，c) 阻抗控制使机器人运动并发生接触。（VE：虚拟环境）

虚拟墙。为此，我们采用了可变虚拟质量元件。HULE 末端执行器与虚拟环境接触后，与虚拟阻尼不同，当环境中的动能绝对值增加时，可变虚拟质量就会被激活。随后，它会耗散与加速度相当的能量。基于上述说明，可将可变虚拟质量定义为：

$$m_e = \begin{cases} m_d & if\ a.v \geq 0, \\ 0 & else \end{cases} \tag{28}$$

其中，m_e 是接触方向上感受到的虚拟质量，m_d是必须呈现的期望虚拟质量，a 和 v 分别是 HULE 末端执行器在接触方向上的加速度和速度。虚拟元件的阻尼力可计算为：

$$f_{damp} = \begin{cases} m_e a & \text{for} \quad n=1 \\ b_e v & \text{for} \quad n=2 \end{cases} \tag{29}$$

其中，b_e 为虚拟阻尼系数。最后，接触力可计算为：

$$f_c(t) = f_s(t) + f_{damp}(t). \tag{30}$$

将式（29）和式（30）代入式（26），可得：

$$E_c(t) = \begin{cases} \int_0^t (k_e(z_e - z) + m_e a)\, v(\sigma)\, d\sigma \geq 0 & \text{for} \quad n=1 \\ \int_0^t (k_e(z_e - z) + b_e v)\, v(\sigma)\, d\sigma \geq 0 & \text{for} \quad n=2 \end{cases} \tag{31}$$

其中，$n=1$ 和 $n=2$ 分别表示变化的虚拟质量和虚拟阻尼。对于给定的阻尼元件类型以及接触时末端执行器的速度和加速度，可通过求解式（31）推导出可被动呈现的刚度区域。然而，本文通过实验提取无源区域，以避免求解式（31）。还需指出，对于单自由度触觉接口，含虚拟阻尼的式（31）可表示为紧凑的数学表达式，见 [26]，；而对于 7 自由度 HULE，由于其动力学具有极强的非线性耦合特性，不存在紧凑的表达式。在结果部分，通过式（31）对采用变化的虚拟质量和虚拟阻尼时产生的能量进行了实验验证，并考察了它们对接触稳定性的影响。结果表明，在式（28）中采用变化的虚拟质量有助于实现更大的 Z宽度。

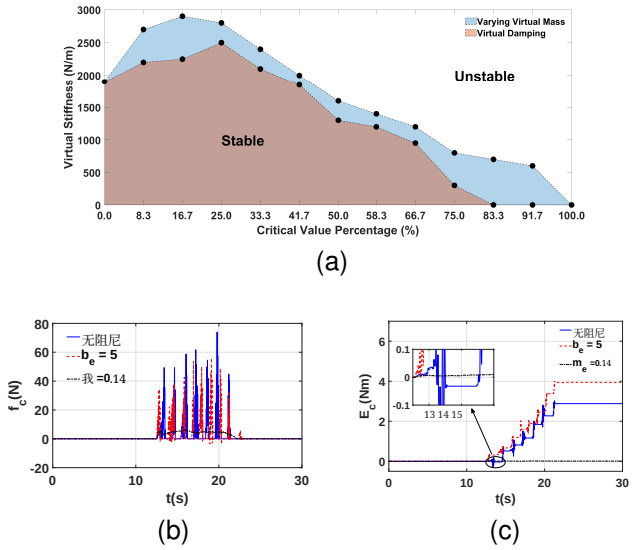


图 4. (a) HULE 在 $K_d = 100\,N/m$ 和 $B_d = 40\,Ns/m$ 条件下、采用 $t_f = 5\,s$时的 Z宽度图。浅蓝色区域表示虚拟质量变化时的 Z宽度，浅棕色区域表示虚拟阻尼变化时的 Z宽度。曲线下方的区域为无源区域。(b) 接触力图；(c) 在 $k_e = 2500\,N/m$ 和 $t_f = 5\,s$环境中，接触时有无阻尼元件的能量生成图。

VI. 结果与讨论

A. Z宽度结果

本节绘制了同时采用虚拟阻尼和变化的虚拟质量时 HULE 的 Z宽度。图3展示了绘制 Z宽度的实验装置和步骤。当操作员握住手柄（图3(a)）时，HULE 在关节角度的随机初始条件下启动。为便于在相同起始点下进行比较，采用基于VDC的关节控制器（图3(b)）来调节关节角度。随后，在笛卡尔空间中生成一条 5^{th} 阶平滑加速度轨迹，并指定时间t_f [27]。 t_f越小，轨迹越快，反之亦然。最后，所提出的阻抗控制使 HULE 跟随期望路径（图3(c)）。式（19）中机器人的期望阻抗固定为 $K_d = 100\,diag$（$[2,2,1,1,1,1]$） N/m和 $B_d = 40\,diag$（$[1,1,1,1,1,1]$） Ns/m。

对于从 0 变化到 $60\ Ns/m$ 、间隔步长为 $5\ Ns/m$ 的虚拟阻尼 (b_e)，以及从 0 变化到 1.68 kg 、间隔为 0.14 kg 的虚拟质量 (m_d)，图4(a)展示了能够以无源方式呈现的最大虚拟刚度。临界值表示使呈现刚度为零的各阻尼元件对应的数值。使用这一术语有助于直观理解：将各阻尼元件从零调至可应用的最大值时，能够呈现多大的刚度。如图4(a)所示，采用变化的虚拟质量可拓宽 HULE 的 Z宽度。此外，为了展示加入变化的虚拟质量所产生的效果，图4(b)和4(c)展示了与具有 $k_e = 2500\,N/m$ 的虚拟墙接触时的结果。图4(b)和4(c)表明，在没有阻尼元件以及采用虚拟阻尼 $b_e = 5\,Ns/m$ 时，接触是不稳定的；而采用变化的虚拟质量 $m_d = 0.14\,kg$ 时，则满足式 (31) 的无源性条件。综合上述所有因素以及

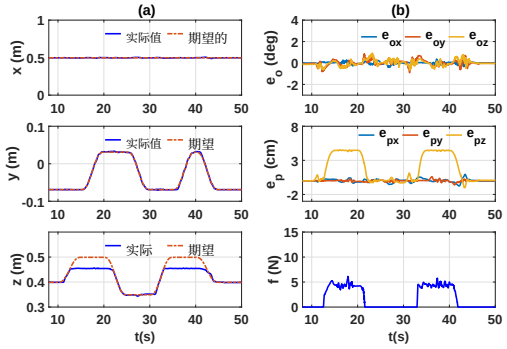


图5. 使用 $k_e = 1000\,N/m$、$m_d = 0.14\,kg$ $t_f = 5\,s$ z 并沿该方向接触时，设计的控制器的实验结果。a）位置跟踪；b）姿态误差、位置误差和接触力

不确定性和非线性，图4(a)所示的 Z宽度更加可靠，也更适用于实际应用。

B. 设计的控制器的实验结果 *ller*

本节检验设计的控制器的性能。HULE 的控制目标是在 $y-z$ 平面内沿期望的方形路径跟踪，同时保持期望姿态、承载人类手臂，并与沿 z 方向设置的虚拟墙保持稳定接触。生成了两条不同的路径，分别对应 $t_f = 2s$（快速轨迹）和 $t_f = 5s$ （慢速轨迹），并对控制器的性能进行分析。控制参数选取如下： $\gamma = 10$、$K_{Di} = 0.5$、K_{Ii} =7、$k_{di} = 0.05$、$k_{Ii} = 7$。HULE 机器人是由 Haption 制造的 ABLE 机器人 [3], 。控制信号通过 SIMULINK 和 Haption 接口与机器人双向传输，采样时间为 $1\,ms$。

图5展示了设计的控制器对慢速轨迹的控制性能。图5(a)显示了沿 $x-y-z$ 方向的期望轨迹跟踪，而图5(b)显示了位置和姿态的跟踪误差以及接触力。可以看出，姿态误差保持在小于 $1\,deg$的范围内。此外，$x-y$方向的位置跟踪误差小于 $1\,cm$，同时确保了沿 z 方向与环境的稳定接触。图6展示了快速轨迹的结果。从图6可以得出，尽管末端执行器在接触点处的速度有所增加，接触仍然保持稳定，并且位置和姿态的跟踪误差分别小于 $1\,cm$ 和 $2\,deg$。

为展示控制器的性能，图7检验了与具有 $k_e = 1500\,N/m$ 和 $t_f = 2\,s$的虚拟墙的交互。环境的刚度随着接触速度的增加而增大，这可能导致不稳定。从图7可以看出，接触不仅保持稳定，而且控制器在将跟踪误差保持在较低水平方面也表现良好。所进行的分析表明，设计的控制器确保了不同场景下pHREI的目标。

为获得更好的性能评估，将设计的控制器与当前最先进的方法进行了比较，例如神经自适应反步阻抗控制（NABIC）

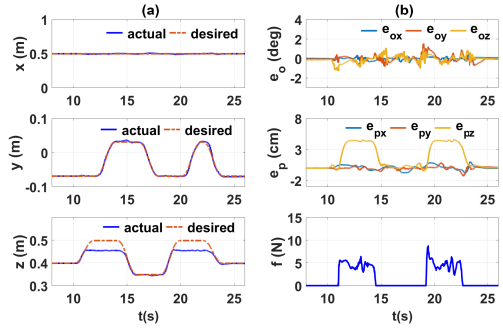


图6. 设计的控制器在 $k_e = 1000\,N/m$、$m_d = 0.14\,kg$ $t_f = 2\,s$ z 以及接触方向上的实验结果。a）位置跟踪；b）姿态误差、位置误差和接触力

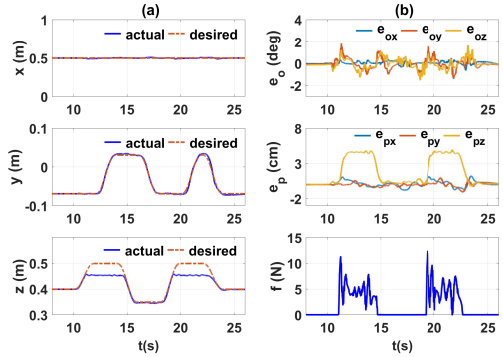


图7. 设计的控制器在 $k_e = 1500\,N/m$、$m_d = 0.14\,kg$ $t_f = 2\,s$ z 以及接触方向上的实验结果。a）位置跟踪；b）姿态误差、位置误差和接触力

[28] 和无模型自适应阻抗（MFAI）控制 [29]。对每个控制器的控制参数进行调节，以获得最佳性能。控制目标与图 6 中的相同。表 I 给出了位置误差在 z 方向（e_{p_z}）和 xy 方向（$e_{p_{xy}}$）上的仿真结果均方根（RMS）值、 mm中的姿态误差 e_o 、 deg中的控制作用，以及最大接触力。可以看出，在控制作用大致相同的情况下，与其他方法相比，所提出的控制器表现出优异的性能。如注1所述，所提出控制器的出色性能可归因于其基于子系统的方法，该方法使控制器能够分别专注于刚体部分和执行器部分。

C. 讨论

必须阐明 [15] 中提出的 TDPA 与 VDC 之间的区别。TDPA 是一种非基于模型的方法，它通过向系统的通用控制器添加虚拟阻尼来确保系统的无源性；而 VDC 是一种基于模型的方法，通过设计控制器来实现控制目标。此外，VDC 无需任何虚拟阻尼即可稳定接触。本文采用的阻尼元件仅用于扩展 HULE 的 Z宽度，该宽度体现了环境的可实现阻抗。与 TDPA 不同，TDPA 中的无源性项

表I 控制方法比较

控制器	e_{p_z}	$e_{p_{xy}}$	e_o	F_{max}	tau
MFAI [29]	29.21	3.5	1.18	6.55	2.45
NABIC [28]	29.88	3.65	1.02	4.7	2.34
提出	23.39	1.49	0.25	5.02	2.51

（无源性观测器）是确保无源性的关键项，而 VDC 无需阻尼元件即可在有限的 Z宽度范围内稳定接触。扩展 Z宽度只是有助于扩大 VDC 的稳定范围。此外，VDC 中的 VPF 在定义方式上可能与 TDPA 中的无源性观测器（PO）相似。然而，PO 用于在 TDPA 中调整控制作用，而 VPF 仅用于稳定性分析，不会影响控制作用。

VII. 结论

本研究针对 7 自由度 HULE 的 pHREI 控制设计了一种基于子系统的自适应阻抗控制方法。VDC 控制器将复杂系统划分为多个子系统，并基于 VDC 阻抗定律 (22)，设计了式 (14) 中的控制律，以实现式 (19) 中的期望阻抗。绘制了 7 自由度 HULE 的 Z宽度图，并表明采用可变虚拟质量能够增强触觉显示器可呈现的阻抗。此外，通过开展一些实验并与先进的控制方法进行比较，检验了所设计控制器的性能。第六节表明，采用所提出控制器的 HULE 表现更佳，能够完美跟踪期望路径，并能承受人类手臂和虚拟墙力。

附录 A 定理 2 的证明

将（23）和（19）代入（22），可得:

$$\begin{aligned}\dot{X}_r &= \dot{X}_d + \Gamma_x(X_d - X) - B_d^{-1}(B_d(\dot{X}_d - \dot{X}) \\ &\quad + K_d(X_d - X)) = \dot{X}_d + \Gamma_x(X_d - X) \\ &\quad - B_d^{-1}B_d(\dot{X}_d - \dot{X}) - B_d^{-1}K_d(X_d - X) \\ &= \Gamma_x(X_d - X) + \dot{X} - \Gamma_x(X_d - X) = \dot{X}\end{aligned} \tag{A.1}$$

现在，利用（A.1）在（22）中的结果，可以得到:

$$\begin{aligned}f_d - f &= -\Gamma_f^{-1}(\dot{X}_d - \dot{X}_r) - \Gamma_f^{-1}\Gamma_x(X_d - X) \\ &= -B_d(\dot{X}_d - \dot{X}) - K_d(X_d - X)\end{aligned} \tag{A.2}$$

这表明，（19）中的期望阻抗得以实现。

附录 B 定理 3 的证明

将 (11) 从 (9) 中相减、将 (15) 从 (13) 中相减，并结合 (12) 和 (16)，可得，

$$\begin{aligned}M_{B_i}\frac{d}{dt}{}^{B_i}e_{\mathcal{V}} &= ({}^{B_i}F_r^* - {}^{B_i}F^*) - {}^{B_i}W\tilde{\phi}_{B_i} - C_{B_i}{}^{B_i}e_{\mathcal{V}} \\ &\quad - K_{Di}{}^{B_i}e_{\mathcal{V}} - K_{Ii}\int_0^t {}^{B_i}e_{\mathcal{V}}dt\end{aligned} \tag{B.1}$$

$$I_{mi}\frac{d}{dt}e_{ai} = (\tau_{ir}^{*} - \tau_{i}^{*}) - W_{ai}\tilde{\phi}_{ai} - k_{di}\,e_{ai} - k_{Ii}\int_{0}^{t} e_{ai}dt \tag{B.2}$$

~ ^~^，其中 $\phi_{B_i} = \phi_{B_i} - \phi_{B_i}$ 和 $\phi_{ai} = \phi_{ai} - \phi_{ai}$。对 (24) 求时间导数，并使用引理 2、(B.1)、(B.2) 进行数学运算，可得，

$$\begin{aligned}\dot{\nu}_i(t) = \sum_{i=1}^{7}[\,&{}^{B_i}e_{\mathcal{V}}^{T}\,({}^{B_i}F_{r}^{*} - {}^{B_i}F^{*}) - \tilde{\phi}_{B_i}^{T}\,s_{B_i}\\ &- {}^{B_i}e_{\mathcal{V}}^{T}\,K_{Di}\,{}^{B_i}e_{\mathcal{V}} + e_{ai}\,(\tau_{ir}^{*} - \tau_{i}^{*}) - \tilde{\phi}_{ai}^{T}\,s_{ai}\\ &- k_{di}e_{ai}^{2} + tr([\hat{\mathcal{L}}_{B_i}^{-1}\dot{\hat{\mathcal{L}}}_{B_i}\,\hat{\mathcal{L}}_{B_i}^{-1}]\,\tilde{\mathcal{L}}_{B_i})\\ &+ tr([\hat{\mathcal{L}}_{ai}^{-1}\dot{\hat{\mathcal{L}}}_{ai}\,\hat{\mathcal{L}}_{ai}^{-1}]\,\tilde{\mathcal{L}}_{ai})]\end{aligned} \tag{B.3}$$

其中 $s_{B_i} = W_{B_i}^{T}\,{}^{B_i}e_{\mathcal{V}}$和 $s_{ai} = W_{ai}^{T}\,e_{ai}$。利用 $\tilde{\phi}_{B_i}^{T}\,s_{B_i} = tr(\tilde{\mathcal{L}}_{B_i}\mathcal{S}_{B_i})$ 和 $\tilde{\phi}_{ai}^{T}\,s_{ai} = tr(\tilde{\mathcal{L}}_{ai}\mathcal{S}_{ai})$ 重写 (B.3)，并应用引理 1，可得

$$\begin{aligned}\dot{\nu}_i(t) = \sum_{i=1}^{7}[\,&{}^{B_i}e_{\mathcal{V}}^{T}\,({}^{B_i}F_{r}^{*} - {}^{B_i}F^{*}) + e_{ai}\,(\tau_{ir}^{*} - \tau_{i}^{*})\\ &- {}^{B_i}e_{\mathcal{V}}^{T}\,K_{Di}\,{}^{B_i}e_{\mathcal{V}} - k_{di}e_{ai}^{2}].\end{aligned} \tag{B.4}$$

(B.4) 右侧的前两项是与刚体部分和执行器部分相关的 VPF。可以证明， [23],

$${}^{B_i}e_{\mathcal{V}}^{T}\,({}^{B_i}F_{r}^{*} - {}^{B_i}F^{*}) = p_{B_i} - p_{T_i} \tag{B.5}$$

$$e_{ai}\,(\tau_{ir}^{*} - \tau_{i}^{*}) = -p_{B_i} + p_{T_{i-1}} \tag{B.6}$$

其中 $p_{T_0} = 0$ ，因为地面没有速度。将 (B.5) 和 (B.6) 代入 (B.4)，可以得出，除表示与环境接触的 VPF 外，所有 VPF 在虚拟切割点处相互抵消，

$$\dot{\nu}_i(t) = \sum_{i=1}^{7}[-\,{}^{B_i}e_{\mathcal{V}}^{T}\,K_{Di}\,{}^{B_i}e_{\mathcal{V}} - k_{di}e_{ai}^{2}] - p_{T_7}. \tag{B.7}$$

从 (B.7) 显然可知，若 p_{T_7} 消失，则整个系统渐近稳定。由于 T_7 坐标系固定在机器人的末端执行器上，其速度和力分别是笛卡尔空间中表示的速度和力。因此，利用 (2) 中 VPF 的定义、 ${}^{T_7}V_r = \dot{X}_r$、${}^{T_7}F_r = f_d$、(19)、(22) 和 (23)，可得，

$$\begin{aligned}&p_{T_7} = (\dot{X}_d - \dot{X})^{T}\,(B_d\,B_d^{-1}\,B_d - B_d)\,(\dot{X}_d - \dot{X}) +\\ &(\dot{X}_d - \dot{X})^{T}\,(2B_d^{-1}\,K_d\,B_d - K_d - B_d^{-1}\,K_d\,B_d)(X_d - X)\\ &+ (X_d - X)^{T}\,(K_d\,B_d^{-1}\,K_d - K_d\,B_d^{-1}\,K_d)\,(X_d - X) = 0.\end{aligned} \tag{B.8}$$

最后，将式（B.8）的结果代入式（B.7），即可确保整个系统满足定理1意义下的稳定性。

参考文献

[1] Jahanmahin, R. 等。“制造业中的人机交互：人类行为建模综述。”《机器人与计算机集成制造》78（2022）：102404。[2] Li, G.、Li, Z.、Kan, Z. “机器人外骨骼用于物理人机交互的同化控制。”《电气电子工程师学会机器人与自动化快报》7.2（2022）：2977-2984。[3] Garrec, P. 等。“ABLE：一种用于上肢的创新型透明外骨骼。”《电气电子工程师学会/电气电子工程师学会与日本机器人学会智能机器人与系统国际会议论文集》。电气电子工程师学会，2008。

[4] Hogan, N. “阻抗控制：一种面向操作的方法。”《美国控制会议论文集》。电气电子工程师学会，1984。[5] Weir, D. W.、Colgate, J. E.、Peshkin, M. A. “通过主动电阻尼测量并增大Z宽度。”《触觉接口、虚拟环境与遥操作系统研讨会论文集》。电气电子工程师学会，2008。[6] Shahriari, E.、Baradaran Birjandi, S. A.、Haddadin, S. “基于无源性的模块化多手物体操作自适应力阻抗控制。”《电气电子工程师学会机器人与自动化快报》7.2（2022）：2194-2201。[7] Michel, Y. 等。“面向接触任务的自适应阻抗控制双边遥操作。”《电气电子工程师学会机器人与自动化快报》6.3（2021）：5429-5436。[8] Li, Y.、Ge, S. S.、Yang, C. “多点人机交互的阻抗控制。”《第八届亚洲控制会议论文集（ASCC）》。电气电子工程师学会，2011。[9] Li, Z. 等。“利用生物信号对上肢机器人外骨骼进行自适应阻抗控制。”《电气电子工程师学会工业电子学汇刊》64.2（2016）：1664-1674。[10] Khan, A. M. 等。“上肢助力外骨骼的自适应阻抗控制。”《电气电子工程师学会机器人与自动化国际会议论文集（ICRA）》。电气电子工程师学会，2015。[11] Brahmi, B. 等。“采用非线性时滞扰动观测器的康复外骨骼机器人新型自适应阻抗控制。”《ISA汇刊》108（2021）：381-392。[12] Li, X.、Liu, Y. H.、Yu, H. “串联弹性执行器驱动的康复机器人的迭代学习阻抗控制。”《自动化学报》90（2018）：1-7。[13] Sharifi, M.、Behzadipour, S.、Vossoughi, G. “人机交互的非线性模型参考自适应阻抗控制。”《控制工程实践》32（2014）：9-27。[14] Kim, H. 等。“基于人类意图的刚度估计的加权混合导纳-阻抗人机交互控制。”《电气电子工程师学会/电气电子工程师学会与日本机器人学会机器人与自动化国际会议论文集（IROS）》。电气电子工程师学会，2018。[15] Hannaford, B.、Ryu, J. H. “触觉接口的时域无源性控制。”《电气电子工程师学会机器人与自动化汇刊》18.1（2002）：1-10。[16] Chawda, V.、Celik, O.、O’Malley, M. K. “Levant微分器在触觉接口速度估计和增大Z宽度中的应用。”《电气电子工程师学会世界触觉会议论文集》。电气电子工程师学会，2011。[17] Lee, K.、Lee, D. Y. “用于稳定性和高保真度的触觉接口多速率控制。”《电气电子工程师学会系统、人类与控制论国际会议论文集（SMC）》。电气电子工程师学会，2004。[18] Koul, M. H.、Manivannan, M.、Saha, S. K. “通过双速率采样增强触觉接口的Z宽度。”《机器人学进展会议论文集》。2013。[19] Adams, R. J.、Hannaford, B. “与虚拟环境的稳定触觉交互。”《电气电子工程师学会机器人与自动化汇刊》15.3（1999）：465-474。[20] Tiwari, A. R.、Saha, S. K.、Kumar, S. “带额外虚拟阻尼器的改进型双触觉控制器，用于Z宽度增强。”《第三届智能计算、仪器与控制技术国际会议论文集（ICICICT）》。电气电子工程师学会，2022。[21] Choi, H. 等。“虚拟惯性作为触觉接口的能量耗散元件。”《电气电子工程师学会机器人与自动化快报》7.2（2022）：2708-2715。[22] Hejrati, M.、Mattila, J. “具有自然自适应律的冗余上肢外骨骼分散式非线性控制。”《电气电子工程师学会-机器人与自动化学会第二十一届人形机器人国际会议论文集（Humanoids）》。电气电子工程师学会，2022。[23] Zhu, W.-H. 《虚拟分解控制：迈向超自由度机器人》。Springer，2010。[24] Lampinen, S. 等。“具有任意缩放的异构主从系统无力传感器双边遥操作控制。”《电气电子工程师学会控制系统技术汇刊》30.3（2021）：1037-1051。[25] Koivum¨aki, J.、Mattila, J. “液压机器人操作臂的稳定性保证阻抗控制。”《电气电子工程师学会/美国机械工程师学会机电一体化汇刊》22.2（2016）：601-612。[26] Colgate, J. E.、Schenkel, G. G. “一类采样数据系统的无源性：在触觉接口中的应用。”《机器人系统学报》14.1（1997）：37-47。[27] Lampinen, S. 等。“利用实时三维视觉感知系统进行自主机器人破岩。”《野外机器人学报》38.7（2021）：980-1006。[28] He, W.、Dong, Y.、Sun, C. “具有输入饱和的机器人操作臂自适应神经阻抗控制。”《电气电子工程师学会系统、人类与控制论系统汇刊》46.3（2015）：334-344。[29] Huo, Y. 等。“自主机器人打磨的无模型自适应阻抗控制。”《电气电子工程师学会自动化科学与工程汇刊》19.4（2021）：3601-3611。