# 在任务加速度和任务力空间中对类人机器人全身控制公式的实验比较

Sait Sovukluk<sup>1,†,\*</sup>, Grazia Zambella<sup>1,\*</sup>, Tobias Egle<sup>1</sup>, and Christian Ott<sup>1,2</sup>

Abstract—本文研究了针对类人机器人两种不同全身控制 公式的实验比较: 逆动力学全身控制 (ID-WBC)和基于无 功的全身控制 (PB-WBC)。这两种控制器的本质区别在于, 第一个是在任务加速度空间中制定的,而后者是在考虑无功的 任务力空间中制定的。尽管在闭环动力学的理想条件下,这两 种控制方法都预测了稳定性,但它们对关节摩擦、传感器噪声、 未建模的外部干扰和不完美接触条件的鲁棒性并不明显。因此, 我们在类人机器人平台上通过摆动脚的位置和方位控制、在有 无未建模的额外重量情况下的下蹲,以及跳跃,对这两种控制 器进行分析和实验比较。我们还将观察到的性能和特征差异与 控制器公式联系起来,并强调每个控制器的优缺点。

## I. 介绍

人形机器人是一种多用途的复杂系统,设计目的是模仿人类的外貌和行为 [1], [2]。它们被设计用来执行人类的劳动任务,例如搬运重物、操控环境、执行高风险任务,以及在环境中协助/支持人类。2015 年的 DARPA 机器人挑战赛总结了这类机器人的最佳使用 [3], [4]。该挑战要求人形机器人在危险的营救任务中替代人类。这个任务包括驾驶高尔夫球车;穿过门、崎岖/杂乱的地面和楼梯;使用电动工具,如钻孔机和切割机;以及操控环境,如开/关阀门、更换物品、插拔电源线和开门。

平均而言,每个机器人有超过 25 个自由度 (DoF), 仿 人机器人包含多个子系统 (手臂、腿、躯干和头部), 所 有这些都是动态和运动学上耦合的。仿人机器人被归类 为浮动 (非固定)基座系统,需要在其脚上主动保持平 衡,以便站立和四处移动。剩余的自由度,例如手臂,则 用于操作环境以执行有用的任务。

多任务能力要求为每个任务配备一个控制器,称为任 务控制器。任务可能包括保持质心 (CoM)在支撑多边形 内,保持躯干直立,通过一只手臂在任务空间中的某个 点施加特定的力,并使用另一只手臂携带物品。然后,所 有任务在一个称为全身控制 (WBC)的框架中结合,该 框架解决满足所有任务的最佳所需电机输入。这些任务 可以通过软优先级结合并一起解决,允许一个任务影响 其他任务,如果它们不是动态解耦的。在这种公式中,任 务优先级通过权重选择来实现,即权重较高的任务对成 本函数影响更大,并导致更高的优先级。而严格优先级 则涉及将低优先级任务投影到高优先级任务的零空间中, 以便低优先级任务不能干扰高优先级任务。在这种情况

<sup>†</sup>Corresponding author (sovukluk@acin.tuwien.ac.at)

\*Equal contribution in experiments and implementation.

 $^1\mathrm{Automation}$  and Control Inst. (ACIN), TU Wien, 1040 Vienna, Austria

 $^2 {\rm Institute}$  of Robotics and Mechatronics, German Aerospace Center (DLR), 82234 Weßling, Germany

This research has received funding from the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme (grant agreement No. 819358) and the Austrian Academy of Sciences (ÖAW) and the Austrian Science Fund (FWF) under the Disruptive Innovation - Early Career Seed Money funding program (project HiFliTE). 下,只有当零空间中有足够的自由度时,低优先级任务 才能得到满足。

文献中收集了多种全身控制框架,这些框架具有不同的任务空间和优先级方法。操作空间全身控制 [5],[6] 在任务力空间中通过严格的优先级制定全身控制。逆动力学全身控制 (ID-WBC) 是多个任务加速度空间控制器结合软 [7]-[9] 和严格 [10],[11] 优先级的组合。基于无源性的全身控制 (PB-WBC) 是将基于无源性的任务空间控制器与严格或软优先级 [12]-[14] 结合在任务力空间中的组合。

本研究比较了两种根本不同的全身控制器: 逆动力学 全身控制(ID-WBC)和基于耗散的全身控制(PB-WBC)。 ID-WBC 是在任务加速度空间中,因此包括每个任务定 义的惯性重塑。PB-WBC则是在任务力空间中定义的,并 不包括惯性重塑。在理想条件下,即没有任何干扰、建模误 差、传感器噪声和关节摩擦的情况下,这两种控制器都具 有稳定的闭环特性。然而,这些方法处理现实条件的能力 仍不确定。本研究设计了四种不同的实验场景。论文的内 容如下:本节提供了关于逆动力学全身控制公式的背景。 公式的详细信息将在讨论分析和实验比较及实现细节时 是相关且有用的。设q为一组配置变量, $\boldsymbol{\nu} = (\boldsymbol{\nu}_b, \boldsymbol{\nu}_j)$ 为广 义速度,其中  $\boldsymbol{\nu}_b = (\boldsymbol{v}_b, \boldsymbol{\omega}_b) \in \mathbb{R}^6$  是浮动基座的线性和角 速度,而 $\nu_i \in \mathbb{R}^n$ 是关节的广义速度。众所周知,浮动基 座机器人系统动力学导致其中,  $\{M, C\} \in \mathbb{R}^{(n+6) \times (n+6)}$ 是惯性和科里奥利矩阵;  $\tau_g \in \mathbb{R}^{n+6}$  是重力向量;  $\tau \in \mathbb{R}^n$ 是关节扭矩和力;  $f_c \in \mathbb{R}^{6n_c}$  是  $n_c$  个接触的接触力矩向 量;  $\tau_{ext} \in \mathbb{R}^n$  是所有关节级干扰的组合, 如摩擦和驱动 不确定性;  $f_{ext}$  是任何数量的任务级干扰和不确定性的 组合;  $J_{(.)}$  代表雅可比矩阵。最后,  $\tau_{dist}$  和  $\tau_{cont}$  分别是 干扰和控制项的组合。

A. 任务空间逆动力学控制

令  $J_i$  为在关节空间与  $i^{th}$  任务空间之间的雅可比映 射,使得任务空间速度  $\dot{x}_i$  对应于

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i = \boldsymbol{J}_i \boldsymbol{\nu}. \tag{1}$$

同样地,任务空间加速度表示为

$$\ddot{\boldsymbol{x}}_i = \boldsymbol{J}_i \dot{\boldsymbol{\nu}} + \dot{\boldsymbol{J}}_i \boldsymbol{\nu}. \tag{2}$$

令

$$\ddot{\boldsymbol{x}}_{i,d} = \ddot{\boldsymbol{x}}_{i,\text{ref}} + \boldsymbol{K}_{d,i} \underbrace{(\dot{\boldsymbol{x}}_{i,\text{ref}} - \dot{\boldsymbol{x}}_i)}_{c} + \boldsymbol{K}_{p,i} \underbrace{(\boldsymbol{x}_{i,\text{ref}} - \boldsymbol{x}_i)}_{c} \quad (3)$$

为期望的任务空间加速度,其中  $K_p$  和  $K_d$  为正定增益 矩阵。如果存在一组可行的控制参数  $\tau_{\text{cont}}$  使得  $\ddot{x}_{i,d} = \ddot{x}_i$ 和  $\tau_{\text{dist}} = 0$ ,则结果闭环动力学是指数稳定的。

$$\ddot{\boldsymbol{e}}_i + \boldsymbol{K}_{d,i} \dot{\boldsymbol{e}}_i + \boldsymbol{K}_{p,i} \boldsymbol{e} = \boldsymbol{0}.$$
(4)

# www.xueshuxiangzi.com

所有任务控制器的组合,例如平衡和操控,构成了整个 身体控制器。如果任务映射  $J = [J_1; J_2; ...]$  是方形且可 逆的,则控制系统定义良好且解是唯一的。如果约束不 足,则控制系统部分稳定。最后,如果约束过度,则整个 身体控制器根据层级或权重选择在不同任务之间进行妥 协。

### B. 全身控制公式

整个身体控制公式收集所有任务控制并在一个 QP (二 次问题)中结合它们:

$$\min_{\boldsymbol{\dot{\nu}},\boldsymbol{\tau},\boldsymbol{f}_c} \sum_i (\ddot{\boldsymbol{x}}_{i,d} - \ddot{\boldsymbol{x}}_i)^\top \boldsymbol{W}_i (\ddot{\boldsymbol{x}}_{i,d} - \ddot{\boldsymbol{x}}_i)$$
(5)

Such that:

$$M\dot{\nu} + C\nu + \tau_q = au_{
m cont}$$
 (5a)

$$\boldsymbol{J}_c \dot{\boldsymbol{\nu}} + \dot{\boldsymbol{J}}_c \boldsymbol{\nu} = 0 \tag{5b}$$

$$|f_{x,l}| \le \frac{\mu f_{z,l}}{\sqrt{2}}, \ |f_{y,l}| \le \frac{\mu f_{z,l}}{\sqrt{2}}, \ \text{and} \ f_z \ge 0 \ \forall l$$
 (5c)

$$\boldsymbol{\tau}_{\min} \leq \boldsymbol{\tau} \leq \boldsymbol{\tau}_{\max}$$
 (5d)

其中  $W_i$  是相应的权重矩阵,在软优先化形式中;(5b) 是接触约束;(5c) 是主动接触的摩擦约束; $\tau_{min}$ 和 $\tau_{max}$ 是输入扭矩和力的最小和最大限制。ID-WBC 的详细推 导在 [8],[10] 中给出,具有闭合运动链的系统在 [7] 中。

# II. PB-WBC 公式的背景

本节提供基于耗散性的整个身体控制的背景知识 [13], [15]。当讨论分析和实验比较以及实施细节时,公式的细节将是相关且有用的。在 PB-WBC 的情况下,平移基座位置和速度状态通过位于重心处并与惯性框对齐的重心框被重心的位置和速度状态所取代。因此,重新定义广义速度  $\nu$  为  $\nu_p = (\nu_c, \nu_j)$ ,其中  $\nu_c = (v_c, \omega_b) \in \mathbb{R}^6$ 是重心的线速度和浮动基座的角速度, $\nu_j \in \mathbb{R}^n$ 是关节的广义速度。同样地,重新定义惯性 M 和科里奧利 C 矩阵为 { $M_c, C_c$ },其中浮动基座的平移部分不是相对于基座框架而是重心框架。因此,引力向量  $\tau_g$ 采取一种特殊的形式

$$oldsymbol{ au}_g = egin{bmatrix} -oldsymbol{w}_g \ \mathbf{0}_{n imes 1} \end{bmatrix}, ext{ where } oldsymbol{w}_g = egin{bmatrix} m_c oldsymbol{g} \ \mathbf{0}_{3 imes 1} \end{bmatrix},$$

 $m_c \in \mathbb{R}$  是总质量,  $g \in \mathbb{R}^3$  是重力加速度向量。与 ID-WBC 不同, PB-WBC 假设一个定义良好的系统:任务 映射  $J = [J_1; J_2; ...]$  的组合是方形、可逆的,并涵盖所 有自由度。在腿部运动的上下文中,总的任务空间映射是 一些逻辑任务的组合 [13] :一个用于重心状态 ( $v_c \in \mathbb{R}^3$ )和身躯方向( $\omega_b \in \mathbb{R}^3$ )的六维跟踪任务;一个保持接 触点静止并生成结果相互作用和反作用力的接触约束任 务;一个用于不与地面或环境接触的其他自由度如手臂 和腿的阻抗跟踪任务的组合。因此,

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \boldsymbol{\nu}_c \\ \dot{\boldsymbol{x}}_{\text{grf}} \\ \dot{\boldsymbol{x}}_{\text{imp}} \end{bmatrix}}_{\dot{\boldsymbol{x}}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{6\times 6} & \boldsymbol{0}_{6\times n} \\ \boldsymbol{J}_{\text{grf,c}} & \boldsymbol{J}_{\text{grf,j}} \\ \boldsymbol{J}_{\text{imp,c}} & \boldsymbol{J}_{\text{imp,j}} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{J}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\nu}_c \\ \boldsymbol{\nu}_j \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 $\dot{x} \in \mathbb{R}^{n+6}$ 是广义任务速度的组合; $J \in \mathbb{R}^{(n+6)\times(n+6)}$ 是雅可比映射的组合;(·)<sub>grf</sub>是静止任务

框架的接触任务;(·)<sub>imp</sub>分别是其余自由度的阻抗任务。 期望的广义速度通过期望的任务空间速度相关联。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\nu}_{c,d} \\ \boldsymbol{\nu}_{j,d} \end{bmatrix} = \boldsymbol{J}^{-1} \dot{\boldsymbol{x}}_d. \tag{7}$$

对于  $\tilde{\boldsymbol{\nu}} = \boldsymbol{\nu}_d - \boldsymbol{\nu}$  的误差定义,期望的 PD+ 类似闭环动 态写作形式为

$$\boldsymbol{M}_{c}\begin{bmatrix}\dot{\tilde{\boldsymbol{\nu}}}_{c}\\\dot{\tilde{\boldsymbol{\nu}}}_{j}\end{bmatrix} + \boldsymbol{C}_{c}\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{\nu}}_{c}\\\tilde{\boldsymbol{\nu}}_{j}\end{bmatrix} = -\boldsymbol{J}^{\top}\begin{bmatrix}\boldsymbol{w}_{c}^{\mathrm{imp}}\\\boldsymbol{f}_{\mathrm{grf}}\\\boldsymbol{f}_{\mathrm{imp}}\end{bmatrix} - \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{dist}}, \quad (8)$$

,其中  $w_c^{imp} \in \mathbb{R}^6$  是 CoM 和身体方位状态所需的阻抗 扳手, $f_{grf}$  是接触框架上的接触力, $f_{imp}$  是其余自由度 [13] 所需的阻抗任务力。

将所需的闭环动力学(8)代入系统动力学得到

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_{c,1} \\ \boldsymbol{M}_{c,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\nu}}_{c,d} \\ \dot{\boldsymbol{\nu}}_{j,d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{c,1} \\ \boldsymbol{C}_{c,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\nu}_{c,d} \\ \boldsymbol{\nu}_{j,d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_g \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \boldsymbol{J}^\top \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_c^{\mathrm{imp}} \\ \boldsymbol{f}_{\mathrm{grf}} \\ \boldsymbol{f}_{\mathrm{imp}} \end{bmatrix} ,$$
(9)

,其中矩阵下标(·)1和(·)2分别表示前六行和最后 n 行。 地面反作用力的可行集合与输入扭矩相分离,因此,可 以通过(9)的前六行解决:

$$\min_{\boldsymbol{f}_{\text{grf}}} \left( \boldsymbol{\delta}_c^\top \boldsymbol{Q}_c \boldsymbol{\delta}_c + \boldsymbol{\delta}_f^\top \boldsymbol{Q}_f \boldsymbol{\delta}_f \right)$$
(10a)

# Such that:

$$\delta_{c} = \boldsymbol{J}_{\text{grf,c}}^{\top} \boldsymbol{f}_{\text{grf}} - \boldsymbol{M}_{1} \boldsymbol{\dot{\nu}}_{d} - \boldsymbol{C}_{1} \boldsymbol{\nu}_{d} + \boldsymbol{w}_{g} + \boldsymbol{w}_{c}^{\text{imp}} + \boldsymbol{J}_{\text{imp,c}}^{\top} \boldsymbol{f}_{\text{imp}}$$
(10b)  
$$\boldsymbol{\delta}_{c} = \boldsymbol{f}_{c} \quad \boldsymbol{c}_{1} = \boldsymbol{c}_{1} \quad \boldsymbol{c}_{1} \quad \boldsymbol{c}_{1} = \boldsymbol{c}_{1} \quad \boldsymbol{c}_{1} \quad \boldsymbol{c}_{1} = \boldsymbol{c}_{1} \quad \boldsymbol{c}_{1} = \boldsymbol{c}_{1} \quad \boldsymbol{c}_{1} \quad \boldsymbol{c}_{1} = \boldsymbol{c}_{1} \quad \boldsymbol{c}_{1} \quad \boldsymbol{c}_{1} = \boldsymbol{c}_{1} \quad \boldsymbol{c$$

$$\boldsymbol{\delta}_f = \boldsymbol{f}_{\rm grf,d} - \boldsymbol{f}_{\rm grf} \tag{10c}$$

feasibility constraints: friction, bounds, ... (10d)

,其中 (10b) 是 (9) 的前六行;  $f_{grf,d}$  是来自接触点的期 望反作用力的组合 (如果有);  $Q_c$  和  $Q_f$  是在 CoM 任 务和期望地面反作用力任务 (如果有) 之间软优先级形 式的权重矩阵。注意,零  $f_{grf,d}$  与正定的  $Q_f$  是对地面 反作用力的阻尼任务。然后通过 (9) 的最后 n 行计算出 关节控制扭矩和力的结果,

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{PBC}} = \boldsymbol{M}_2 \dot{\boldsymbol{\nu}}_d + \boldsymbol{C}_2 \boldsymbol{\nu}_d - \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_{\text{grf},j}^\top & \boldsymbol{J}_{\text{imp},j}^\top \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{\text{grf}} \\ \boldsymbol{f}_{\text{imp}} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

# III. 闭环动力学、控制增益和干扰出现分析

由于每个控制器在不同的任务空间中制定,PD(比例-微分)控制动作和通过这些控制增益的误差缩放导致 不同的行为。此外,外部关节和任务层面的扰动  $\tau_{dist}$  在 不同的任务空间中出现和缩放方式不同。本节分析了两 个控制系统在控制增益、误差缩放和外部扰动出现方面 的行为和特性差异。

## A. 身份白细胞计数

为实现期望的闭环动力学(4),所需的控制动作可以 通过将(??)代入(2)中的任何任务控制来计算,

$$\ddot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{\tau}_{\text{cont}} + \boldsymbol{\tau}_{\text{dist}} - \boldsymbol{h}) + \boldsymbol{J}\boldsymbol{\nu}.$$
 (12)

将控制动作设置为

$$\boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{\tau}_{\text{cont}} = \boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{h} - \dot{\boldsymbol{J}}\boldsymbol{\nu} + \ddot{\boldsymbol{x}}_d, \qquad (13)$$

,其中 $\ddot{x}_d$ 由(3)给出,并且在控制设计过程中将 $\tau_{dist}$ 视为未知,从而得到给定的闭环动态

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = -J M^{-1} \tau_{\text{dist}},$$
 (14)

,其中  $\tau_{dist}$  是任何扰动的组合,例如摩擦、非理想执行 器动态和任何来自环境的未建模外力,如 (??)所示。在 这种情况下  $\tau_{dist} = 0$ ,指数稳定性是显然的。

通过 (13) 和 (14) 可以得到两个重要的观察结果。第 一个从 (13) 中得出的观察结果是, $\ddot{x}_d$ 中的误差通过加 速度命令得到补偿,也就是说,设置  $K_p = K_d = I$ 时, 位置和速度的单位误差导致单位的额外加速度命令。所 需的扭矩和力根据惯性矩阵进行缩放。对于高惯性任务, 如身体位置和方向任务,结果力被放大,因为高惯性任 务的单位加速需要更多的力;对于低惯性任务,如脚踝 位置和方向任务则缩小。同样的缩放也适用于干扰抑制, 因为相同量的干扰,例如摩擦,根据惯性映射需要不同 的加速努力。从 (14) 得出的第二个观察结果是在方程式 的右侧出现了未建模的干扰,因为 (14) 形成了二阶线性 非齐次常微分方程。为了分析,假设 (14) 是一个具有恒 定质量、干扰和控制增益的 1 自由度模型。该系统的解,

$$e(t) = c_1 \exp\left(\frac{-k_d + \sqrt{k_d^2 - 4k_p}}{2}t\right) + c_2 \exp\left(\frac{-k_d - \sqrt{k_d^2 - 4k_p}}{2}t\right) - \frac{\tau_{\text{dist}}}{mk_p}, \quad (15)$$

指出了由  $\tau_{dist}/(mk_p)$  项决定的稳态误差。此外,由于给 定的稳态误差被质量的倒数缩放,保持  $K_p$ 和  $K_d$ 不变, 相同量的干扰,例如关节摩擦,对于不同的任务,由于惯 性不同导致不同量的稳态误差。高惯性任务,如质心和 身体方向控制,与低惯性任务,如脚踝位置和方向控制 相比,会产生较小的稳态误差。因此,在 ID-WBC 的情 况下,低惯性任务需要较高的控制增益,以抵御与高惯 性任务相同量的干扰。对于基于被动性的控制的相同分 析似乎更加直接,因为控制动作和误差定义是在相同的 空间中。设定控制动作

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{cont}} = \boldsymbol{M}_{c} \dot{\boldsymbol{\nu}}_{d} + \boldsymbol{C}_{c} \boldsymbol{\nu}_{d} + \begin{bmatrix} -\boldsymbol{w}_{g} \\ \boldsymbol{0}_{n \times 1} \end{bmatrix} + \boldsymbol{J}^{\top} \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_{c}^{\text{imp}} \\ \boldsymbol{f}_{\text{grf}} \\ \boldsymbol{f}_{\text{imp}} \end{bmatrix}$$
(16)

并将其代入系统动力学中,会得到给定的闭环动力学

$$\boldsymbol{M}_{c}\dot{\tilde{\boldsymbol{\nu}}} + \boldsymbol{C}_{c}\tilde{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{J}^{\top} \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_{c}^{\mathrm{imp}} \\ \boldsymbol{f}_{\mathrm{grf}} \\ \boldsymbol{f}_{\mathrm{imp}} \end{bmatrix} = -\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{dist}}.$$
 (17)

。ID-WBC 和 PB-WBC 之间的第一个区别出现在 (16) 中,因为在阻抗控制公式中出现的误差 (例如,对任何任 务来说的  $f_{imp} = K_d \tilde{v}_j + K_p \tilde{p}_j$ ) 在转化为动作之前并 没有被惯性矩阵缩放。这一特性消除了在不同任务中由 于惯性映射而产生的行为差异。类似的观察也对闭环动 力学 (17) 有效。同样,为了分析,假设一个1自由度系 统为 (17)。该系统的解,

$$e(t) = c_1 \exp\left(\frac{-k_d + \sqrt{k_d^2 - 4mk_p}}{2m}t\right) + c_2 \exp\left(\frac{-k_d - \sqrt{k_d^2 - 4mk_p}}{2m}t\right) - \frac{\tau_{\text{dist}}}{k_p}, \quad (18)$$

指出由  $\tau_{\text{dist}}/k_p$  项决定的稳态误差。与 ID-WBC 不同, 在 PB-WBC 的情况下,相同的控制增益和干扰量在所 有任务中产生相同的稳态误差,而不论其惯性。因此, PB-WBC 对于高惯性的任务需要更高的增益,而对于低 惯性的任务需要更低的增益,以实现与 ID-WBC 相同的 干扰拒绝能力。

#### IV. 实验结果与讨论

我们设计了四个实验场景来比较整个身体控制公式的 不同方面。这些是脚部控制、带和不带未建模重量的下 蹲,以及跳跃。我们使用袋鼠双足机器人作为测试平台, 采用 ProxQP [16] 来解决 (5) 和 (10) 中出现的 QPs,并 利用 Pinocchio [17] 来计算动力学。我们在没有任何额外 干扰的情况下,根据我们的知识对每个任务的控制增益 参数进行实验调优。在有额外未建模重量的情况下,我 们使用针对无干扰情况调优的相同参数。

#### A. 足部位置和方向控制

足部控制任务通过每条腿安装在鞋底上的足框架实现,同时机器人悬挂在起重机上(见图 1)。机器人被命令在保持高度不变且腿的方向与惯性框架对齐的情况下,前后摆动 15cm。在位置控制中,两个控制器都被调整到最低的稳态误差且没有振荡。

袋鼠机器人由于封闭运动链和远距离电机安置以保持 腿部轻量化而导致的建模误差和脚踝关节摩擦。在逆动 力学控制中,干扰与惯性逆相关,如公式(14)和(15) 所示,它需要较高的控制增益来针对扰动的低惯性系统。 然而,在 PB-WBC 的情况下,干扰没有被放缩,如公式 (17)和(18)所示,可以通过较低的增益来抵消低惯性系 统的干扰。两种控制器的响应如图2所示。图中显示了 两种控制器的控制性能相似,但 PB-WBC 在方向控制 方面略有优势。由于控制空间的不同,ID-WBC 的增益 在脚部方向控制中大约是 PB-WBC 的一百倍。增益的 进一步增加导致的主要原因是由于建模误差和回差而产 生的边际稳定性。PB-WBC 更具直观调节性,因为其增 益在几百左右,相比之下,ID-WBC 的增益在极低惯性 出现在脚踝关节的情况下为数万个。

## B. 深蹲控制

深蹲涉及多个高惯性任务,包括重心和躯干方向的控制。机器人执行深蹲的快照如图 3 所示,其期望轨迹为一个峰对峰 20cm 的正弦信号,频率为 0.4Hz 。两个控制器经过调整,以在没有任何振荡的情况下,达到位置的最小稳态误差。此外,凭借来自 (15) 和 (18) 的知识优势,我们将 ID-WBC 的重心高度控制增益按总质量 (41 kg)进行缩放,并在 PB-WBC 中使用它们,以便两个控制器在高度控制上相匹配。图 4 显示了两个控制



Fig. 1. 袋鼠在被吊车吊挂时跟随所需足部位置和方向轨迹的快照。



Fig. 2. ID-WBC 和 PB-WBC 对脚部位置和姿态控制任务的响应。 脚部被命令在惯性坐标系下以恒定的高度和姿态向前后移动。期望轨 迹是一个峰值为 30cm 的正弦信号,频率为 0.2Hz。

器对期望行为的响应。两个控制系统在峰值高度表现出 剩余误差。重心高度控制中预期的干扰,即通过 (15) 的 ID-WBC 的

$$\delta_{\text{dist,ID}} \approx \underbrace{(0.84 - 0.824)}_{\text{error}} \underbrace{(41)}_{m} \underbrace{(150)}_{k_p} = 98.4N$$

和通过 (18) 的 PB-WBC 的

$$\delta_{\text{dist,PB}} \approx \underbrace{(0.84 - 0.824)}_{\text{error}} \underbrace{(6100)}_{k_p} = 97.6N$$

,表明了对建模误差、摩擦和其他不确定性在此任务中 出现的干扰组合的近似 100N。两种方法的速度跟踪和



Fig. 3. 袋鼠做 20cm 次蹲下的快照。



Fig. 4. ID-WBC 和 PB-WBC 对蹲的反应。期望轨迹是一个从峰到峰的 20cm 正弦信号,频率为 0.4Hz。

躯干方向控制性能相似,差异可以忽略不计。

C. 带有额外未建模重量的深蹲控制

在有额外未建模的 5kg 的质量情况下进行深蹲(见图 5)时,使用与无干扰深蹲相同的控制增益和期望轨迹。该情况下 2.4 的 cm 在峰值高度的剩余误差与之前的观察一致,因为它与附加重量的增加量相同。两个控制器的响应(见图 6)显示出稳态误差如预期的增加。

#### D. 跳跃控制

跳跃动作是通过跳跃和着陆的两种轨迹生成的。首先, 生成一个六阶多项式用于跳跃。该多项式将在 0.5 秒内 把初始高度、速度和加速度状态连接到所需的跳跃高度、 速度和加速度状态。在着地瞬间,同样生成一个六阶多项 式用于在 0.5 秒内的着陆。在线轨迹生成考虑了跳跃和 着陆两种情况下的系统状态,结果是地面反作用力平稳 且连续。一旦质心高度超过了一个阈值且速度为正,并 且腿部力为零时,离地动作就会被触发。同样,着陆阶段 在质心速度为负、脚部高度为零及腿部力为正时被触发。 跳跃的快照如图 ?? 中所示。



Fig. 5. 袋鼠做 20cm 次深蹲, 负重 5kg 的照片。



Fig. 6. ID-WBC 和 PB-WBC 对额外 5 公斤未建模质量的下蹲响 应。期望的轨迹是一个峰值到峰值为 20 厘米、频率为 0.4Hz 的正弦信 号。

由于 PB-WBC 需要一个可逆的雅可比矩阵和 (6) 中的 完全状态控制,并且在飞行阶段无法控制身体状态,我们 在 (7) 中将期望的身体状态设置为当前测量值  $\nu_{c,d} = \nu_c$ 。此外,正如 [13] 中对 PB-WBC 的讨论,为了防止在 接触瞬间出现扭矩不连续现象,在支撑相中包含了一个 附加的阻尼因子,因此在 (11) 中的  $\tau_{PBC}$  被重写为

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{PBC, damped}} = \begin{cases} \boldsymbol{\tau}_{\text{PBC}} - \boldsymbol{J}_{\text{grf}}^{\top} \boldsymbol{D}_{\text{PBC}} \dot{\boldsymbol{x}}_{\text{grf}}, & \text{landing} \\ \boldsymbol{\tau}_{\text{PBC}}, & \text{jump \& flight} \end{cases}$$
(10)

,其中  $D_{\text{PBC}} \in \mathbb{R}^{(6n_c) \times (6n_c)}$  是针对每个接触点的正定 对角矩阵。只有在刚性接触假设被破坏并且足部未静止 在地面上时,此阻尼才适用。此外,在 QP 构造 (10) 中,  $Q_f$  被选为  $10^{-5}$ ,以便抑制横向地面反作用力中期望为 零的横向地面反作用力  $f_{\text{grf,d}}$ 。

通过调整 ID-WBC 的增益,获得 PB-WBC 的增益, 41 用于 CoM 任务,≈5.5 用于身体定向任务,以实现类 似于深蹲实验中的高度控制的闭环动态和干扰拒斥性能。 飞行阶段的腿部控制任务增益与悬挂实验保持不变。

我们首先进行一个小跳,如图 7 所示。两个控制器具



Fig. 7. ID-WBC 和 PB-WBC 对 1.3 cm 跳跃的响应。GRF 代表由 全身控制器估算的地面反作用力。竖虚线表示起跳和落地时刻。水平线 表示期望的跳跃高度。

有相同的站立高度,表示高度控制中的比例控制增益匹配。对于这个实验,我们为每一个接触设置了附加阻尼  $D_{PBC} = diag(20, 20, 30, 0, 0, 0)$ 。当应用相同的预期跳跃 行为时,我们观察到 PBC 的 1 mm 低于预期,而 IDC 的 2 mm 高于预期。第二次速度更高的跳跃如图 8 所 示。随着着陆速度的增加,我们将 PB-WBC 的附加阻尼 值更新为  $D_{PBC} = diag(20, 30, 40, 0, 0, 0)$ 。当应用相同 的预期跳跃行为时,我们观察到 PBC 的 4 mm 低于预 期,而 IDC 的 6 mm 高于预期。从运动捕捉系统的速度 估计中应用的低通滤波器中可以明显看出速度数据中的 相位偏移。

当检查图 7 和图 8 中的跳跃实验时,观察到速度和地 面反应响应存在小的差异。这些差异主要来自于应用于 PBC 的额外阻尼、整体系统调谐的不匹配以及闭环动力 学的差异,例如,科里奥利矩阵依然存在于 PBC 的闭环 动力学中,但在 IDC 中则没有。此外,由于腿传感器的 变形,导致腿力之间存在 70N 的力读数差异。腿传感器 的匹配不良导致系统更容易出现滚动振荡,以及在着陆 过程中左腿的弹跳和接触损失。在这项工作中,我们分 析并实验比较了两种用于类人机器人全身控制的不同公 式:逆动力学全身控制和基于被动性的全身控制。这两 个控制器的区别在于 ID-WBC 是在任务加速度空间中制 定的,而 PB-WBC 控制器是在任务力空间中。我们将比 较结论分为三个子主题:调谐、公式和冲击鲁棒性。由于



Fig. 8. ID-WBC 和 PB-WBC 对 3 cm 突变的响应。

ID-WBC 是在任务加速度空间中构建的,因此扰动和控制动作通过系统的惯性映射进行缩放,导致根据惯性值的不同在不同任务中表现出不同的行为。对于这个控制器,相同量的扰动会导致不同大小的误差,其大小与惯性成反比例关系。例如,关节摩擦在脚踝方向控制中导致较大的稳态误差,而在质心位置控制中误差较小,因为前者的任务惯性要小得多。在拒绝扰动的情况下,同样的效果也适用于 PD 控制增益动作。由于 PD 控制应用在加速度空间中,并且加速度命令会根据惯性进行缩放,低惯性任务控制必须继承比高惯性任务控制高得多的控制增益,才能克服相同量的扰动。脚位置控制的 P 控制增益高达4×10<sup>3</sup>,而质心高度控制任务仅需 150

。对于脚位置方向控制,同样的增益可以达到 21 × 10<sup>3</sup>,导致不同任务的参数变化较大。而 PB-WBC,则在同一 空间中构建误差和控制动作,导致在不同任务中表现出 更加统一的行为,与其惯性无关。尽管可以通过分析和 实验得到这两种控制器相似的性能,PB-WBC 显得更加 直观且更易于调节。ID-WBC 需要了解惯性,并且在不 同任务和扰动量之间表现出非常不同的缩放。最后,由 于 PB-WBC 是在任务力空间中构建的,因此对于具有 特定力或阻抗的交互任务来说,是一种更加自然的实现。

#### E. 公式化

ID-WBC 具有简单和模块化的形式。任务的形成以模 块化的方式收集在 QP 中,不需要任何雅可比可逆性条 件,因为它不需要从任务空间到关节空间的转换。因此, ID-WBC 可以独立处理任何一组任务,无论它们是欠定、 适定还是超定任务。另一方面,PB-WBC 在形式化和实 施上似乎更复杂。它需要将期望的任务空间状态映射回 关节空间,这对于欠定和定义良好的系统来说处理起来 比较容易,但对于超定系统来说并不简单。

#### F. 对着陆和撞击的鲁棒性

研究表明,存在一组控制增益,使得两个控制系统表现 相似。在跳跃的情况下,两个系统管理跳跃的高度相似, 只有小的区别,主要来源于闭环动态和整体调节的不同, 因为跳跃需要调整超过 40 个全身控制器参数。另一方 面,在跳跃中,脚上有剧烈的冲击时,PB-WBC 需要额 外的阻尼项来补偿刚性接触假设的违反,这在很大程度 上受到之前描述的腿部不均匀性影响。虽然两个控制系 统都遭受腿部力不均匀性的影响,我们观察到 PB-WBC 受影响相对较多。原因可能是 ID-C 中的干扰缩放,如 (14)所述。由于质心高度、躯干和腿部控制任务是高惯 性任务,干扰被惯性逆矩缩放,IDC 中不均匀性干扰显 得相对较少。补充视频显示两个控制系统在着陆时努力 稳定左腿。我们预测,如果腿部没有任何差异,PB-WBC 也不需要额外的阻尼,因为从视觉上看它似乎正常着陆。

#### References

- Y. Tong, H. Liu, and Z. Zhang, "Advancements in humanoid robots: A comprehensive review and future prospects," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 11, no. 2, pp. 301–328, 2024.
- [2] S. Saeedvand, M. Jafari, H. S. Aghdasi, and J. Baltes, "A comprehensive survey on humanoid robot development," *The Knowledge Engineering Review*, vol. 34, p. e20, 2019.
- [3] M. Johnson, B. Shrewsbury, S. Bertrand, T. Wu, D. Duran, M. Floyd, P. Abeles, D. Stephen, N. Mertins, A. Lesman et al., "Team ihmc's lessons learned from the darpa robotics challenge trials," *Journal of Field Robotics*, vol. 32, no. 2, pp. 192–208, 2015.
- [4] J. Lim, I. Lee, I. Shim, H. Jung, H. M. Joe, H. Bae, O. Sim, J. Oh, T. Jung, S. Shin *et al.*, "Robot system of drc-hubo+ and control strategy of team kaist in darpa robotics challenge finals," *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 802–829, 2017.
- [5] O. Khatib, M. Jorda, J. Park, L. Sentis, and S.-Y. Chung, "Constraint-consistent task-oriented whole-body robot formulation: Task, posture, constraints, multiple contacts, and balance," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 41, no. 13-14, pp. 1079–1098, 2022.
- [6] L. Sentis and O. Khatib, "Synthesis of whole-body behaviors through hierarchical control of behavioral primitives," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 2, no. 04, pp. 505–518, 2005.
- [7] S. Sovukluk, J. Englsberger, and C. Ott, "Whole body control formulation for humanoid robots with closed/parallel kinematic chains: Kangaroo case study," in 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2023, pp. 10390–10396, doi:10.1109/IROS55552.2023.10341391.
- [8] J. Englsberger, "Combining reduced dynamics models and whole-body control for agile humanoid locomotion," Ph.D. dissertation, Technische Universität München, 2016.
- [9] S. Sovukluk, J. Englsberger, and C. Ott, "Highly maneuverable humanoid running via 3d slip+foot dynamics," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 1131–1138, 2024, doi:10.1109/LRA.2023.3342668.
- [10] P. M. Wensing, Optimization and control of dynamic humanoid running and jumping. The Ohio State University, 2014.

- [11] A. Adu-Bredu, G. Gibson, and J. Grizzle, "Exploring kinodynamic fabrics for reactive whole-body control of underactuated humanoid robots," in 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2023, pp. 10397–10404.
- [12] J. Englsberger, A. Dietrich, G.-A. Mesesan, G. Garofalo, C. Ott, and A. O. Albu-Schäffer, "Mptc-modular passive tracking controller for stack of tasks based control frameworks," 16th Robotics: Science and Systems, RSS 2020, 2020.
- [13] G. Mesesan, J. Englsberger, G. Garofalo, C. Ott, and A. Albu-Schäffer, "Dynamic walking on compliant and uneven terrain using dcm and passivity-based whole-body control," in 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2019, pp. 25–32.
- [14] B. Henze, M. A. Roa, and C. Ott, "Passivity-based whole-body balancing for torque-controlled humanoid robots in multicontact scenarios," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 35, no. 12, pp. 1522–1543, 2016.
- [15] G. Zambella, R. Schuller, G. Mesesan, A. Bicchi, C. Ott, and J. Lee, "Agile and dynamic standing-up control for humanoids using 3d divergent component of motion in multi-contact scenario," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 8, no. 9, pp. 5624–5631, 2023.
- [16] A. Bambade, S. El-Kazdadi, A. Taylor, and J. Carpentier, "Prox-qp: Yet another quadratic programming solver for robotics and beyond," in RSS 2022-Robotics: Science and Systems, 2022.
- [17] J. Carpentier, G. Saurel, G. Buondonno, J. Mirabel, F. Lamiraux, O. Stasse, and N. Mansard, "The pinocchio c++ library – a fast and flexible implementation of rigid body dynamics algorithms and their analytical derivatives," in *IEEE International Symposium on System Integrations (SII)*, 2019.