

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2016.0451

基于三连杆动力学模型的仿人机器人站立平衡控制

朱秋国¹, 伍浩贤¹, 吴俊¹, 熊蓉^{1,2}

(1. 浙江大学工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省软体机器人与智能器件研究重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了解决仿人机器人抗扰动站立平衡控制问题, 提出了一种三连杆动力学模型作为仿人机器人的简化模型, 该模型充分考虑了机器人腿部、身体和手臂的连杆分布质量, 相比于传统的线性倒立摆模型或者飞轮倒立摆模型具有更高的精确性. 基于这种模型, 设计了仿人机器人的站立抗扰动平衡控制器. 首先将仿人机器人模型简化为三连杆动力学模型, 通过参数辨识方法获取结构化的参数, 并经过线性化处理, 将复杂的非线性动力学模型线性化. 然后采用线性二次调节器 (LQR) 设计机器人的平衡控制器. 实验在仿人机器人 KONG-II 上进行, 通过将机器人踝关节设置成具有一定阻尼特性的欠驱动状态, 来实现三连杆动力学模型的形式. 实验结果对比了机器人采用两连杆动力学模型和三连杆动力学模型时的抗外力扰动性能, 验证了本文方法的有效性和鲁棒性.

关键词: 仿人机器人; 站立平衡控制; 三连杆动力学模型; 线性二次调节器

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2016)-04-0451-07

Standing Balance Control of Humanoid Robot Based on Three-link Dynamic Model

ZHU Qiuguo¹, WU Haoxian¹, WU Jun¹, XIONG Rong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Key Laboratory of Soft Machines and Smart Devices of Zhejiang Province, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the anti-disturbance control problem for humanoid robot standing balance, a three-link dynamic model is proposed as the simplified model of humanoid robot, in which the distributed mass of the leg, body and arm on their links is considered. Thus, the model will be more accurate than the traditional linear inverted pendulum or the plus flywheel model. Based on this model, an anti-disturbance controller is designed for humanoid robot standing balance. Firstly, the humanoid is simplified as the three-link model, the structural parameters are obtained by parameter identification method, and the complex nonlinear dynamics model is linearized by linearization. Then, the balance controller is designed by using the linear quadratic regulator (LQR). The experiments are carried out on the humanoid robot KONG-II, and the ankle joint is set up as an under-actuated state with certain damping characteristics to match the three-link model. By comparing the anti-disturbance performance of the robots with double-link dynamic model and with three-link dynamic model, the effectiveness and robustness of the proposed method are verified.

Keywords: humanoid robot; standing balance control; three-link dynamic model; LQR (linear quadratic regulator)

1 引言 (Introduction)

平衡稳定性是仿人机器人站立、行走或其他活动的关键因素. 当机器人受到外界未知扰动时, 比如外部冲击、碰撞以及不平整的路面, 机器人很容易失去平衡而摔倒. 当这些无法预测的未知扰动发生时, 机器人应该采取相应的控制策略来维持身体平衡. 也即当处于稳定状态下的机器人受到外部扰动时, 其自身状态将发生改变, 如何恢复到机器人初始平衡状态是机器人平衡控制需要解决的关键问题.

研究人员针对上述问题进行了大量研究, 并提出了一些控制策略来保持机器人的稳定性, 主要有踝关节策略、髋关节策略和跨步策略等^[1-3]. 当未知扰动较小时, 机器人可以通过自身姿态的调整实现平衡控制, 而当未知扰动较大时机器人一般只能通过跨步和全身协调运动来保持平衡.

但是当机器人局部关节损坏时, 机器人也会轻易地摔倒, 不仅对机器人自身安全带来隐患, 还会造成严重的经济损失. 因此, 本文主要考虑当踝关节损坏或停止工作时如何通过髋关节的控制来保持机器人的平衡性. 由于踝关节变成了一个自由活动

关节, 因此机器人整体也变成了一个欠驱动系统.

2 相关研究 (Related works)

大部分仿人机器人主要采用倒立摆模型或线性倒立摆模型作为机器人的简化控制模型, 然后使用 ZMP (零力矩点) 作为机器人平衡的准则, 只要 ZMP 落在机器人的足部支撑域内就可以保持机器人稳定^[4], ASIMO、HRP3L-JSK、KHR-3 等机器人均采用这种方法, 该方法在位置控制型机器人上具有较多应用.

Pratt^[5-6] 认为传统的 ZMP 方法不太适用于高速动态的运动, 他认为压力中心和质心对机器人的平衡控制非常重要, 因此提出了一种线性倒立摆 + 飞轮的模型, 通过 CP (capture point) 和 CR (capture region) 系统性地分析了身体转动惯量和跨步对保持平衡的作用; Wight^[7] 和 Yun^[8] 等又在此基础上进行扩展. 除此之外, Stephens^[9] 提出了 CoP (center of press)、CMP (centroidal moment pivot) 和跨步策略, 实现了机器人在不同扰动下的平衡控制; Goswami^[10] 等人提出了控制质心角动量变化率的 3 种策略; Li^[11] 等人提出了物理柔性顺应控制来吸收和减少对站立机器人施加的瞬时冲击力的能量; Wang^[12] 等通过计算 CP 的位置来判断机器人受到扰动后的状态, 然后使用虚拟模型和柔顺控制方法得到期望的输出力矩, 实现了仿人机器人 KONG 的平衡控制. 以上提到的方法都是应用在完整机器人系统上的, 使得 ZMP 或 CoP 都落在机器人足部的支撑域内, 即可保证机器人的稳定性.

除此之外, 一些研究开展了通过髋关节实现对欠驱动机器人的平衡控制. Spong^[13-15] 采用了局部反馈线性化方法, 通过设计了 LQR 优化控制实现了 Acrobot 的平衡控制; Brown^[16] 等人分别采用经典控制方法、模糊控制和自适应模糊控制对 Acrobot 不平衡区域施加控制; Fantoni^[17] 基于系统能量对机器人施加前馈控制; Zhu^[18] 等人提出了基于两级动力学模型的仿人机器人平衡控制. 这些控制方法的主要对象是两连杆的欠驱动机器人. 而本文主要考虑在仿人机器人脚踝失去功能的情况下, 通过增加手臂运动, 实现基于三连杆动力学模型的欠驱动站立平衡控制.

3 三连杆动力学模型 (Three-link dynamic model)

本文使用三连杆倒立摆模型代替传统的线性倒立摆模型和飞轮倒立摆模型作为简化的仿人机器人

物理模型. 三连杆动力学模型如图 1 所示, 机器人由 3 个连杆和 3 个关节组成. 其中, 杆 1 表示机器人的下身, 杆 2 表示机器人的上身, 杆 3 表示机器人的手臂. 杆 1 和杆 2 之间是机器人的髋关节, 杆 2 和杆 3 之间是机器人的肩关节, 杆 1 和脚板之间是机器人的踝关节. 机器人上、下身和手臂的质量分布于各自整根杆上.

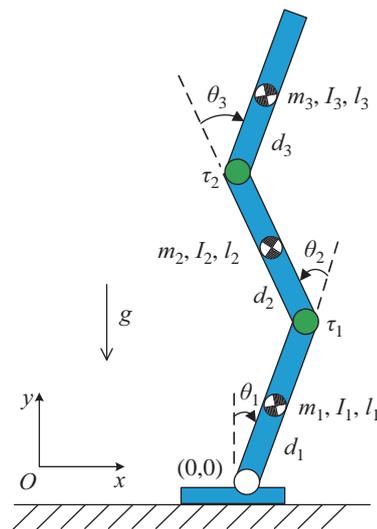


图 1 三连杆倒立摆模型

Fig.1 Three-link inverted pendulum model

图 1 中 m_i 为第 i 杆的质量 ($i=1,2,3$), l_i 为第 i 杆的长度 ($i=1,2,3$), d_i 为第 i 杆的质心到前一关节的长度 ($i=1,2,3$), I_i 为第 i 杆的转动惯量 ($i=1,2,3$), θ_1 为第 1 杆与竖直方向之间的夹角, θ_i 为与前一杆的角度 ($i=2,3$); τ_i 为第 i 杆上的关节的输出力矩 ($i=1,2$), g 为重力加速度.

由拉格朗日方程可得:

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial k}{\partial \dot{\theta}_i} \right\} - \frac{\partial k}{\partial \theta_i} + \frac{\partial u}{\partial \theta_i} = \tau_i, \quad i=1,2,3 \quad (1)$$

其中, k 表示系统的总动能, u 表示系统的总势能, θ_1 为第 1 杆与竖直方向之间的夹角, θ_i 为第 i 杆与前一杆的角度 ($i=2,3$), τ_i 为第 i 杆上的关节的输出力矩 ($i=1,2,3$).

根据图 1 机器人模型, 式 (1) 可以写成如下形式:

$$\begin{cases} M_{11}\ddot{\theta}_1 + M_{12}\ddot{\theta}_2 + M_{13}\ddot{\theta}_3 + H_1 + G_1 = \tau_1 \\ M_{21}\ddot{\theta}_1 + M_{22}\ddot{\theta}_2 + M_{23}\ddot{\theta}_3 + H_2 + G_2 = \tau_2 \\ M_{31}\ddot{\theta}_1 + M_{32}\ddot{\theta}_2 + M_{33}\ddot{\theta}_3 + H_3 + G_3 = \tau_3 \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} M_{11} = D_1 + 2D_4 \cos \theta_2 + 2D_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) + D_2 \\ \quad + 2D_6 \cos \theta_3 + D_3 \\ M_{12} = D_4 \cos \theta_2 + D_5 \cos(\theta_2 + \theta_3) + D_2 \\ \quad + 2D_6 \cos \theta_3 + D_3 \\ M_{13} = D_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) + D_6 \cos \theta_3 + D_3 \\ H_1 = -D_4(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 - D_5(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cdot \\ \quad (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) - D_6(2\dot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cdot \\ \quad \dot{\theta}_3 \sin \theta_3 \\ G(\theta) = -\beta_1 \sin \theta_1 - \beta_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - \\ \quad \beta_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{cases} D_1 = I_1 + m_1 d_1^2 + (m_2 + m_3) l_1^2 \\ D_2 = I_2 + m_2 d_2^2 + m_3 l_2^2 \\ D_3 = I_3 + m_3 d_3^2 \\ D_4 = m_2 l_1 d_2 + m_3 l_1 l_2 \\ D_5 = m_3 l_1 d_3 \\ D_6 = m_3 l_2 d_3 \\ \beta_1 = (m_1 d_1 + m_2 l_1 + m_3 l_1) g \\ \beta_2 = (m_2 d_2 + m_3 l_2) g \\ \beta_3 = m_3 d_3 g \end{cases} \quad (4)$$

本文假设踝关节在非工作状态下仍然存在一定的阻尼, 也即踝关节是被动带阻尼关节, 所以力矩满足:

$$\tau_0 = k \dot{\theta}_1 \quad (6)$$

其中 τ_0 是踝关节处不可控的力矩, 它由踝关节的角速度和阻尼系数决定, k 是踝关节的阻尼系数, $\dot{\theta}_1$ 是踝关节的角速度.

将式 (4) 代入式 (2) 的第 1 个式子中可得:

$$M_{11} \ddot{\theta}_1 + M_{12} \ddot{\theta}_2 + M_{13} \ddot{\theta}_3 + H_1 + G_1 = k \dot{\theta}_1 \quad (7)$$

根据式 (5) 可求得踝关节处的加速度为

$$\ddot{\theta}_1 = -\frac{M_{12}}{M_{11}} \ddot{\theta}_2 - \frac{M_{13}}{M_{11}} \ddot{\theta}_3 - \frac{H_1}{M_{11}} - \frac{G_1}{M_{11}} + \frac{k}{M_{11}} \dot{\theta}_1 \quad (8)$$

4 抗扰动站立平衡控制方法 (Anti-disturbance control method for standing balance)

由三连杆模型的动力学方程可知, 三连杆动力

学模型是一个非线性系统, 因此首先需要将其进行线性化处理以便使用线性控制方法来控制该系统. 为了提高系统控制的准确性, 本文采用了最小二乘法对系统关键的未知参数进行辨识, 最后展示了被动踝关节控制器的实现方法.

4.1 局部线性化

当三连杆机器人系统处在平衡位置附近时:

$$[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T = [0 \ 0 \ -\pi \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

假设机器人偏离初始位置的角度很小, 本文可以运用下式对系统进行局部线性化:

$$\begin{cases} \sin \theta_i = \theta_i \\ \cos \theta_i = 1 \\ \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k) = \theta_i + \theta_j + \theta_k \\ \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j = 0 \end{cases} \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (3) 进行线性化可得:

$$\begin{cases} \hat{M}_{11} = D_{11} + 2p_{12} - 2p_{13} + D_{22} - \\ \quad 2p_{23} + D_{33} \\ \hat{M}_{12} = p_{12} - p_{13} + D_{22} - 2p_{23} + D_{33} \\ \hat{M}_{13} = -p_{13} - p_{23} + D_{33} \\ \hat{H}_1 = 0 \\ \hat{G}(\theta) = -[(m_1 d_1 + m_2 l_1 + m_3 l_1) + \\ \quad (m_2 d_2 + m_3 l_2) - m_3 d_3] g \theta_1 + \\ \quad m_3 d_3 g \theta_3 - \\ \quad [(m_2 d_2 + m_3 l_2) - m_3 d_3] g \theta_2 \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} D_{11} = I_1 + m_1 d_1^2 + (m_2 + m_3) l_1^2 \\ D_{22} = I_2 + m_2 d_2^2 + m_3 l_2^2 \\ D_{33} = I_3 + m_3 d_3^2 \\ p_{12} = m_2 l_1 d_2 + m_3 l_1 l_2 \\ p_{13} = m_3 l_1 d_3 \\ p_{23} = m_3 l_2 d_3 \end{cases} \quad (11)$$

将式 (10) 代入式 (8) 可得:

$$\ddot{\theta}_1 = -\frac{\hat{M}_{12}}{\hat{M}_{11}} \ddot{\theta}_2 - \frac{\hat{M}_{13}}{\hat{M}_{11}} \ddot{\theta}_3 - \frac{\hat{H}_1}{\hat{M}_{11}} - \frac{\hat{G}_1}{\hat{M}_{11}} + \frac{k}{\hat{M}_{11}} \dot{\theta}_1 \quad (12)$$

定义下式:

$$\begin{cases} a_1 = -\frac{\hat{M}_{12}}{\hat{M}_{11}} \\ a_2 = -\frac{\hat{M}_{13}}{\hat{M}_{11}} \\ a_3 = \frac{[(m_1d_1 + m_2l_1 + m_3l_1) + (m_2d_2 + m_3l_2) - m_3d_3]g}{\hat{M}_{11}} \\ a_4 = \frac{[(m_2d_2 + m_3l_2) - m_3d_3]g}{\hat{M}_{11}} \\ a_5 = -\frac{m_3d_3g}{\hat{M}_{11}} \\ a_6 = -\frac{k}{\hat{M}_{11}} \end{cases} \quad (13)$$

因此式 (12) 可以写成以下形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ a_1 & a_2 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

设状态变量为 $\mathbf{x} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$, 输入变量 $\mathbf{u}(t) = [\ddot{\theta}_2 \ \ddot{\theta}_3]^T$, 可以得到平衡位置附近的状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (15)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ a_1 & a_2 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可以计算出状态空间系统 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 的可控性矩阵 $\mathbf{r} = [\mathbf{B} \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ \mathbf{A}^2\mathbf{B} \ \mathbf{A}^3\mathbf{B} \ \mathbf{A}^4\mathbf{B} \ \mathbf{A}^5\mathbf{B}]$ 是满秩的, 根据可控性定理可知系统 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 是完全能控的。

4.2 LQR 控制器

当系统处在平衡位置附近时, 可根据状态方程 (15) 设计 LQR 控制器, 根据下式的性能指标:

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{R} \mathbf{u}^2) dt \quad (16)$$

通过 Matlab 的 lqr 函数可以计算得到最优控制矩阵 \mathbf{K} .

4.3 参数辨识

参数辨识可以使得简化的物理模型更加接近实际系统. 参数估计是在模型结构已知确定的条件下, 通过实验方法取得数据来估计表征系统动力学模型的参数. 通过参数估计可以简便地估计未知的数据, 并能够使得估计得到的数据与实际数据之间的误差平方和最小, 有利于提高系统控制的准确性. 对于三连杆动力学模型机器人而言, 本文需要辨识参数 d_1, d_2, d_3 和 I_1, I_2, I_3 才能比较精确地施加控制.

机器人足底各安装了 6 维力/力矩传感器来测量足底的信息, 利用机器人上身和下身的重力矩的关系可以得到下式:

$$\begin{aligned} & (-l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin \theta_2 - d_3 \sin \theta_3) m_3 g + \\ & (-l_1 \sin \theta_1 - d_2 \sin \theta_2) m_2 g - m_1 g d_1 \sin \theta_1 = M \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 表示第 i 杆与竖直方向的夹角, l_1, l_2, l_3 表示第 i 杆的长度, m_1, m_2, m_3 表示第 i 杆的质量, d_1, d_2, d_3 表示第 i 杆的质心轴心距, 角度逆时针为正. 当机器人的踝关节、髌关节和肩关节角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 取不同数值时, 利用机器人足底 6 维力/力矩传感器可以测量出相应的力矩数值 M . 然后根据最小二乘法就可以估计出质心距 d_1, d_2, d_3 . 再根据转动惯量平行轴定理可以估算出转动惯量 I_1, I_2, I_3 , 详见文 [18].

4.4 被动踝关节实现

本文通过积分控制设置了一个阻尼系数可变的被动踝关节控制器. 积分控制器设计如下:

$$\theta_{\text{cur}} = \theta_{\text{pre}} + IM_y T \quad (18)$$

其中 θ_{pre} 和 θ_{cur} 表示踝关节上一个时刻角度值和当前时刻角度值. M_y 表示踝关节俯仰角度方向上的力矩数值, 此数值可以通过机器人足底力矩传感器测得, I 是控制器参数, T 是控制周期.

式 (18) 可以写成如下形式:

$$\frac{\theta_{\text{cur}} - \theta_{\text{pre}}}{T} = IM_y \quad (19)$$

踝关节处的角速度满足:

$$\dot{\theta} = \frac{\theta_{\text{cur}} - \theta_{\text{pre}}}{T} \quad (20)$$

将角速度计算公式代入式 (19) 得:

$$\frac{M_y}{\dot{\theta}} = \frac{1}{I} \quad (21)$$

结合式 (6) 和式 (21) 可得:

$$k = \frac{1}{I} \quad (22)$$

通过调节控制器的参数 I , 可以得到机器人踝关节的不同阻尼系数 k , 以测试不同阻尼系数下的表现.

5 实验结果 (Experimental results)

本文在仿人机器人 KONG-II 上面进行三连杆机器人抗扰动站立平衡控制实验来验证前文提出的简化模型和控制算法. 机器人 KONG-II 的质量为 55 kg, 身高 1.6 m, 全身共 30 个自由度, 包括腿部 12 自由度, 腰部 2 自由度, 头部 2 自由度, 以及手臂 14 自由度. 2 个 6 维力/力矩传感器装在脚板和踝关节之间用来测量足底力和力矩信息, 如图 2 所示. 它的主要结构参数如表 1 所示, 其中下标 1 代表下身, 2 代表身体, 3 代表手臂.

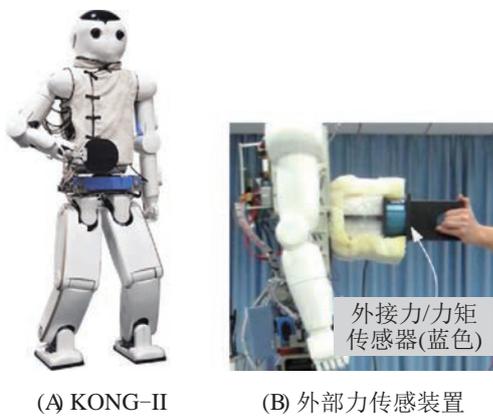


图 2 仿人机器人 KONG-II 和外部 6 维力/力矩传感装置
Fig.2 The humanoid robot KONG-II and the external force device with a 6 DOF force/torque sensor

表 1 仿人机器人 KONG-II 物理参数

Tab.1 Physical parameters of humanoid robot KONG-II						
参数	数值	参数	数值	参数	数值	单位
l_1	0.6	l_2	0.9	l_3	0.55	m
d_1	0.44	d_2	0.28	d_3	0.23	m
m_1	20	m_2	25.11	m_3	7.91	kg
I_1	0.99	I_2	2.38	I_3	0.21	kg · m ²

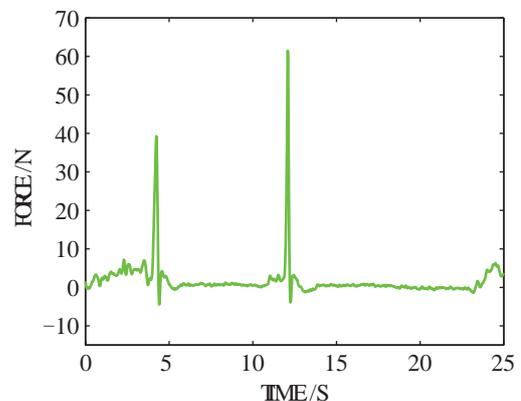
设置 LQR 控制器中的矩阵 Q 和 R 分别为 $Q = \text{diag}[150, 50, 120, 10, 50, 5]$ 和 $R = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$, 阻尼系数 $k = -200$. 最优控制矩阵为

$$K = \begin{bmatrix} 588.34 & 154.31 & -14.11 & 89.46 & 61.84 & -5.30 \\ -102.99 & -23.02 & 37.11 & -15.65 & -6.73 & 11.85 \end{bmatrix}$$

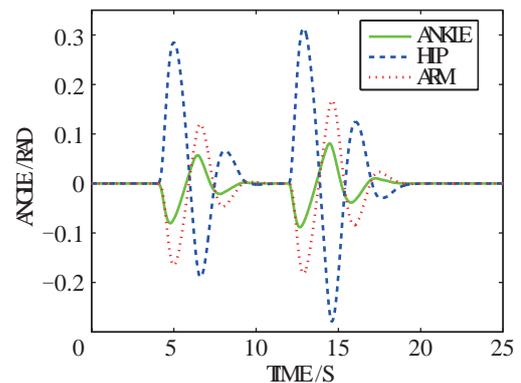
本文使用一个外部 6 维力/力矩传感器给机器人施加外部推力, 并通过该传感器测量外部推力的大小. 实验过程中机器人的控制周期为 10 ms.

为了保证机器人在平衡位置附近能够保持稳定, 本文采取了以下方法: 当机器人靠近平衡位置时, 踝关节处的力矩满足 $|M_y| \leq \epsilon$, 其中 ϵ 是一个很小的正整数, 设置其为死区参数范围. 当机器人踝关节进入死区时, 设置当前时刻的角度值等于上一时刻的角度值: $\theta_{\text{cur}} = \theta_{\text{pre}}$. 因此, 当机器人进入平衡位置附近区域时, 机器人踝关节角度就会和上一时刻相等, 保持不变, 就能保证机器人稳定在平衡位置上.

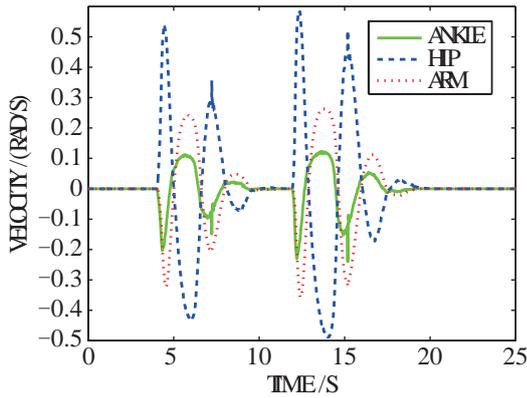
图 3 中展示了当三连杆被动机器人的踝关节阻尼系数为 200 时, 机器人受到不同幅度冲击力的平衡恢复实验数据. 图 3(a) 是机器人受到两次外界的冲击力值, 图 3(b) 是机器人受到冲击力之后各个关节角度的变化值, 图 3(c) 是机器人受到冲击力之后各个关节角速度的变化值, 图 3(d) 是机器人受到冲击力之后髋关节和肩关节期望加速度的变化曲线. 可以看到, 机器人在冲击力下通过髋关节和手臂的协调运动最终恢复到初始平衡位置. 通过实验数据可以看到, 机器人身体最大倾斜角度为 17.76°, 手臂的运动幅度最大为 10.31°, 机器人身体最大角速度为 0.6 rad/s, 手臂最大角速度为 0.35 rad/s. 在平衡恢复过程中机器人的手臂和身体都起到了明显的作用.



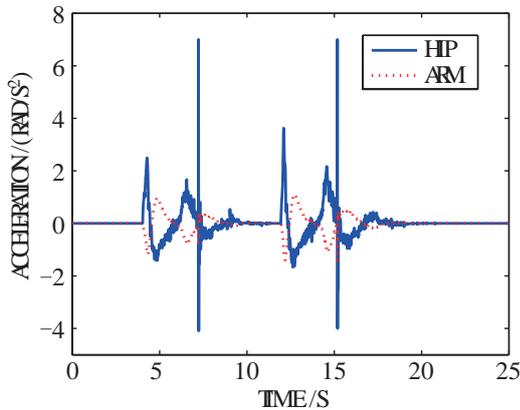
(a) 外部冲击力



(b) 各关节角度



(c) 各关节角速度

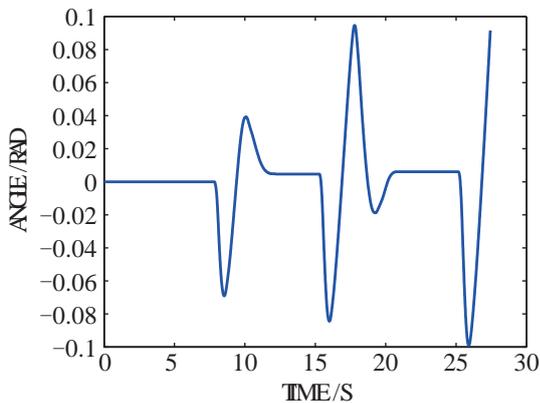


(d) 各关节角加速度

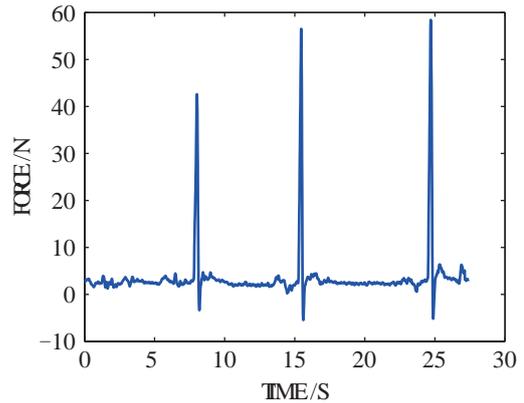
图3 仿人机器人抗扰动实验

Fig.3 Push recovery experiments of humanoid robot

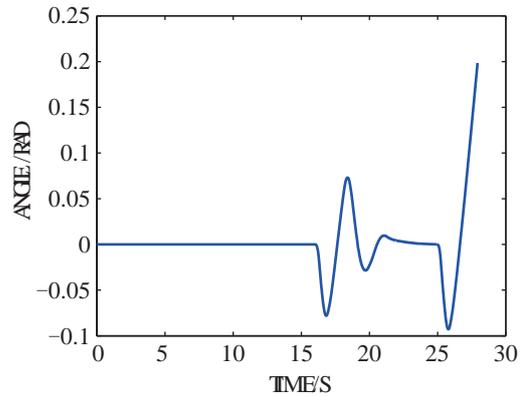
文 [18] 对两连杆机器人模型进行了抗扰动站立平衡控制实验. 本文将对两连杆机器人和三连杆机器人控制性能进行实验对比, 分别对两连杆和三连杆机器人施加不同的冲击力, 当冲击力到达一定数值时, 机器人就无法通过自身的控制算法恢复到平衡位置, 观测并采集当机器人失去恢复平衡能力时的踝关节角度值变化和冲击力的的大小, 所采集的数据如图 4 所示.



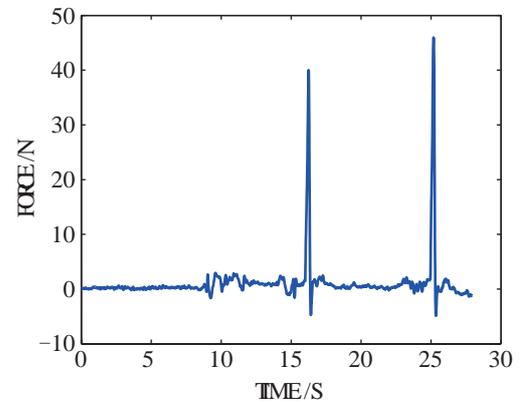
(a) 三连杆踝关节角度变化



(b) 三连杆机器人所受到的冲击力



(c) 两连杆踝关节角度变化



(d) 两连杆机器人所受到的冲击力

图4 两连杆和三连杆机器人抗外力扰动效果对比图

Fig.4 Comparison of push recovery between double-link and three-link models

从图 4 可以看出, 三连杆机器人受到的推力达到 56.52 N 时, 机器人依然能够恢复平衡, 但当推力达到 58.41 N 时, 机器人已不能恢复平衡了. 而两连杆机器人所受推力达到 45.96 N 时, 机器人已不能恢复平衡. 因此, 可以计算出机器人在三连杆动力学模型下站立平衡控制能力至少提升 22.98%.

从实验数据看出, 当机器人增加手臂运动之后, 通过机器人手臂的摆动改变了机器人上半身的整体转动惯量, 使得机器人在上半身转动时能够获

得更大的角动量来恢复平衡, 机器人抗扰动能力得到了明显的提高。

实验通过外力/力矩传感器对机器人胸部位置施加瞬时冲击力扰动. 图 5 展示了机器人平衡恢复的实验过程. 图片从左至右, 由上到下展示了机器人受外部冲击力到恢复平衡的全部过程, 从中可以看到本文所设计的站立平衡控制算法的有效性。

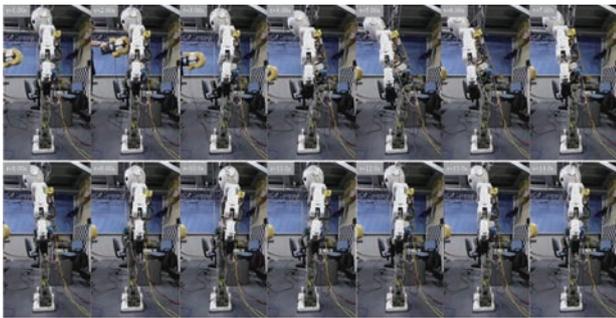


图 5 仿人机器人 KONG-II 抗外力扰动实验

Fig.5 Push recovery experiment on humanoid robot KONG-II

6 结论 (Conclusion)

本文首先构建了三连杆动力学模型作为仿人机器人的简化模型, 通过对动力学方程的线性化处理, 采用 LQR 优化算法对三连杆欠驱动机器人进行抗扰动站立平衡控制. 为了使得模型更加精确, 文中还介绍了仿人机器人的一些未知结构参数进行辨识, 并实现了对踝关节的被动零力矩控制, 以满足机器人欠驱动抗扰动实验的需求. 本文最后在仿人机器人 KONG-II 上开展了实验验证, 通过实验对比了两连杆动力学模型和三连杆动力学模型欠驱动机器人抗外界扰动的能力, 实验验证了当加入手臂运动之后, 机器人的平衡控制能力得到了一定的提升, 从而验证了本文提出的三连杆动力学模型能够提升仿人机器人平衡能力的假设. 该方法对仿人机器人抵抗侧向扰动, 单脚支撑时的平衡控制, 以及复杂路面下的动态步行都具有借鉴价值。

参考文献 (References)

- [1] Azevedo C, Espiau B, Amblard B, et al. Bipedal locomotion: Toward unified concepts in robotics and neuroscience[J]. *Biological Cybernetics*, 2007, 96(2): 209-228.
- [2] Runge C F, Shupert C L, Horak F B, et al. Ankle and hip postural strategies defined by joint torques[J]. *Gait and Posture*, 1999, 10(2): 161-170.
- [3] Horak F B, Nashner L M. Central programming of postural movements: Adaptation to altered support-surface configurations[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1986, 55(6): 1369-1381.
- [4] Vukobratovic M, Stepanenko J. On the stability of anthropomorphic systems[J]. *Mathematical Biosciences*, 1972, 15(1-2): 1-37.
- [5] Pratt J, Carff J, Drakunov S, et al. Capture point: A step toward humanoid push recovery[C]//6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 200-207.
- [6] Pratt J, Koolen T, de Boer T, et al. Capturability-based analysis and control of legged locomotion, Part 2: Application to M2V2, a lower-body humanoid[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2012, 31(10): 1117-1133.
- [7] Wight D L, Kubica E G, Wang D W L. Introduction of the foot placement estimator: A dynamic measure of balance for bipedal robotics[J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2008, 3(1): 82-93.
- [8] Yun S K, Goswami A. Momentum-based reactive stepping controller on level and non-level ground for humanoid robot push recovery[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 3943-3950.
- [9] Stephens B. Humanoid push recovery[C]//IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 589-595.
- [10] Goswami A, Kallem V. Rate of change of angular momentum and balance maintenance of biped robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 3785-3790.
- [11] Li Z B, Tsagarakis N G, Caldwell D G. A passivity based admittance control for stabilizing the compliant humanoid COMAN [C]//IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 43-49.
- [12] Wang Y L, Xiong R, Zhu Q G, et al. Compliance control for standing maintenance of humanoid robots under unknown external disturbance[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 2297-2304.
- [13] Spong M W. Partial feedback linearization of underactuated mechanical systems[C]//IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 1994: 314-321.
- [14] Spong M W. The swing up control problem for the acrobot[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1994, 15(1): 49-55.
- [15] Spong M W. Energy based control of a class of underactuated mechanical systems[C]//13th IFAC World Congress. Oxford, UK: Pergamon, 1996: 431-435.
- [16] Brown S C, Passino K. Intelligent control for an acrobot[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1997, 18(3): 209-248.
- [17] Fantoni I, Lozano R, Spong M W. Energy based control of the pendubot[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(4): 725-729.
- [18] Zhu Q G, Wu H X, Yi J, et al. Push recovery for humanoid robots with passive damped ankles[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1578-1583.

作者简介:

朱秋国 (1982 -), 男, 助理研究员. 研究领域: 仿人机器人, 机器人建模、运动规划和平衡控制。

伍浩贤 (1989 -), 男, 硕士生. 研究领域: 仿人机器人运动规划和平衡控制。

吴俊 (1967 -), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 仿人机器人, 机器人建模与运动规划, 线性鲁棒控制。