

基于分解动量的仿人机器人手臂高速运动实时平衡控制

张大松, 熊 蓉[†], 吴 俊, 褚 健

(浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 本文面向仿人机器人7自由度手臂高速动态作业运动需求, 提出了基于分解动量的仿人机器人实时平衡控制方法. 给出了作业臂运动用末端执行器速度向量表示下的机器人总动量计算公式, 分析了动量控制维度的择优选取原则, 给出了基于分解动量控制的辅助臂关节速度实时计算优化方法. 仿真实验表明, 经过改进优化的分解动量控制方法对于仿人机器人手臂高速作业运动下的平衡控制具有较高的可行性和实时性, 不仅所控制维度的分解动量完全达到了预期的效果, 而且其他维度的分解动量也有所降低或基本维持不变, 所生成辅助臂运动平滑且在关节运动性能上有较大裕度, 机器人总体具有优秀的零力矩点(zero-moment point, ZMP)稳定性.

关键词: 动量控制; 平衡控制; 实时平衡

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Resolved-momentum-based real-time balance control for high-speed arm manipulation of humanoid robot

ZHANG Da-song, XIONG Rong[†], WU Jun, CHU Jian

(National Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: To maintain the balance of a humanoid robot with one 7-DOF arm operating at a high speed, this paper proposes a resolved-momentum-based real-time control strategy. Using velocity vector of the end-effector to express the motion of the robotic arm, we obtain the total momentum formula for the robot. The principles of merit-based controlled momentum selection are discussed, and a real-time optimization method which calculates the joint velocities of the auxiliary arm on the basis of the resolved momentum control is introduced. Simulation results show that the proposed method is highly feasible and has a desired performance for maintaining humanoid robot in balance when its arm is performing the high-speed motion. Not only the controlled dimensions of the resolved momentums fully achieve the expected results, but the rest uncontrolled dimensions of the momentums reduce or maintain their values as well. The generated motion of the auxiliary arm is smooth and has a large joint motion margin. The entire robot also has a good zero-moment point (ZMP) stability.

Key words: momentum control; balance control; real-time balance

1 引言(Introduction)

仿人机器人是一个工程上少有的高阶、非线性、多自由度的不稳定系统, 因此其运动规划和平衡控制研究具有极大的挑战性. 通过多年的研究, 仿人机器人领域已经取得了长足进步, 成功研制了多个仿人机器人系统, 如Waseda大学的WABIAN^[1]、Honda公司的ASIMO^[2]、Sony公司的QRIO^[3]和AIST的HRP^[4]等著名仿人机器人. 这些机器人都实现了基本的稳定步行运动, 部分机器人实现了奔跑^[2]、爬楼梯^[2,4]等运动. 随着理论研究的深入和工程实践的推进, 仿人机器人正朝着实现更加复杂运动的方向发展. 手腿协作的推操作^[5-6]、手眼协作的抓取^[7]、双手协作的装配^[8]、人机协作的抬操作^[9]以及全身运动的舞蹈^[10]等动态作业运动模式层出不穷. 但是,

机器人施行这些动态作业运动时将对机器人本体带来时变的惯性冲击力/力矩, 因此仿人机器人在执行复杂动态作业时的平衡控制问题成为一个新的重要研究课题.

本文面向仿人机器人单个手臂高速作业情况, 研究基于辅助臂的实时平衡控制问题. 与工业机器人基座固定在地面上的情况不同, 仿人机器人仅仅依靠重力与地面压紧, 机器人手臂高速运动所产生的惯性冲击容易导致机器人产生倾倒、打滑、跳动等不稳定现象, 并进一步由于本体姿态的改变而使得作业臂末端位姿产生偏移, 导致作业失败. 笔者期望通过辅助臂的运动, 消除或者降低由于作业臂的高速运动对本体所带来的瞬时大惯性冲击, 确保仿人机器人精确稳定作业.

收稿日期: 2011-06-16; 收修改稿日期: 2012-10-22.

[†]通信作者. Tel.: +86 0571-87952750.

基金项目: 国家“863”课题资助项目(2008AA042602); 国家自然科学基金资助项目(61075078).

本文提出了基于分解动量控制的辅助臂协调平衡控制方法. 从动量控制的角度出发, 推导了作业臂高速运动下的总动量计算公式, 分析了动量控制维度的择优选取原则, 给出了基于分解动量控制的辅助臂关节速度实时计算方法. 仿真实验验证了算法的有效性, 算法速度测试表明所提算法可以实时运行.

2 相关工作(Related work)

早期的机器人稳定控制方法均采用基于重心投影的静态稳定控制思想. 而1972年南斯拉夫学者 Vukobratovic 博士提出的 ZMP (zero-moment point)^[11] 控制方法为机器人的动态稳定控制提供了基本的技术基础. 之后, ZMP 控制方法在机器人动态步行方面的应用取得了巨大的成功, 被应用于现今大部分机器人的步行稳定控制, 其中最著名的有仿人机器人 ASIMO 和 HRP. ASIMO 采用的是综合多种控制技术的模型 ZMP 步行稳定控制技术^[12], 而 HRP 则是采用带有步行稳定器的线性倒立摆 ZMP 步行稳定控制技术^[13].

进入21世纪后, 机器人手臂作业技术得到了快速的发展, 涌现出一系列针对手臂作业的运动规划和稳定控制技术. 在稳定控制方面依次出现了动力学过滤器^[14]、自动平衡器^[15]以及躯干轨迹补偿^[16]等技术, 其中动力学过滤器只见于仿真领域, 未见实际应用报道; 自动平衡器在仿人机器人 H6 上成功实现了手臂在桌底搜寻物体时躯体的重心投影稳定和惯性力矩约束^[15], 但其本质上是一种静态稳定, 无法应用于要求高速动态稳定的场合; 躯干轨迹补偿技术需要精确计算, 并不可避免的涉及到大量循环计算, 仿人机器人 WABIAN 一直致力于该技术的实现^[16].

为了实现更优越的平衡控制, 在大量前期研究成果和技术积累的基础上, 日本产业技术综合研究所 Shuuji Kajita 教授等于2003年提出了分解动量控制^[17]技术, 并用于仿人机器人 HRP-2 远程操作下的全身运动自治平衡稳定控制, 之后几年成功的实现了拾取地面物体的自治平衡^[18], 但是未见报道机器人手臂在高速作业运动下的自治平衡稳定控制. 本文面向仿人机器人7自由度手臂高速动态作业要求, 提出了基于分解动量的实时平衡控制方法.

3 仿人机器人辅助臂平衡控制(Humanoid robot balance maintenance by auxiliary arm)

3.1 仿人机器人总动量计算(The total momentum of the humanoid robot)

本文假定仿人机器人在执行作业运动过程中只有两手臂是运动的, 其他部位静止不动, 如腰部和腿部各关节都是锁死的. 因此, 仿人机器人的总动量即是两手臂的动量之和. 如图1所示, 选取参考坐标系原点为两脚板底面的中心点W, 参照分解动

量控制^[17-18], 机器人的总动量(包括线动量P和角动量L)计算如公式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} P \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{\text{jobarm}} \\ H_{\text{jobarm}} \end{bmatrix} \dot{\theta}_{\text{jobarm}} + \begin{bmatrix} M_{\text{aidarm}} \\ H_{\text{aidarm}} \end{bmatrix} \dot{\theta}_{\text{aidarm}}, \quad (1)$$

其中: $P = [P_x \ P_y \ P_z]^T$ 为机器人三维线动量, $L = [L_x \ L_y \ L_z]^T$ 为机器人三维角动量, M_{jobarm} 和 H_{jobarm} 为作业臂的惯性矩阵, $\dot{\theta}_{\text{jobarm}}$ 为作业臂的关节速度向量; M_{aidarm} 和 H_{aidarm} 为辅助臂的惯性矩阵, $\dot{\theta}_{\text{aidarm}}$ 为辅助臂的关节速度向量.

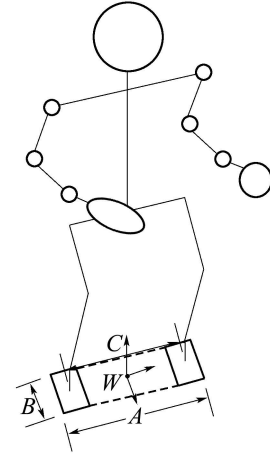


图1 仿人机器人模型

Fig. 1 Humanoid robot model

当给定作业臂的关节速度向量时, 作业臂末端执行器的速度(包括线速度 v_{jobhand} 和角速度 ω_{jobhand}) 可由下式求得:

$$\begin{bmatrix} v_{\text{jobhand}} \\ \omega_{\text{jobhand}} \end{bmatrix} = J_{\text{jobarm}} \dot{\theta}_{\text{jobarm}}, \quad (2)$$

其中: $v_{\text{jobhand}} = [v_x \ v_y \ v_z]^T$ 为末端执行器的三维线速度, $\omega_{\text{jobhand}} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ 为末端执行器的三维角速度, J_{jobarm} 为作业臂的雅克比矩阵.

但是, 在实际作业中一般都是给定作业臂末端执行器的位姿和速度, 此时作业臂关节速度向量计算如下:

$$\dot{\theta}_{\text{jobarm}} = J_{\text{jobarm}}^{-1} \begin{bmatrix} v_{\text{jobhand}} \\ \omega_{\text{jobhand}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 J_{jobarm}^{-1} 为作业臂雅克比逆矩阵. 当 J_{jobarm} 非方阵时, J_{jobarm}^{-1} 为广义逆矩阵. 因此, 当作业臂运动用末端执行器的速度向量表示时, 机器人总动量计算公式如下所示:

$$\begin{bmatrix} P \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{\text{jobarm}} \\ H_{\text{jobarm}} \end{bmatrix} J_{\text{jobarm}}^{-1} \begin{bmatrix} v_{\text{jobhand}} \\ \omega_{\text{jobhand}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{\text{aidarm}} \\ H_{\text{aidarm}} \end{bmatrix} \dot{\theta}_{\text{aidarm}}. \quad (4)$$

3.2 动量控制维度选取(The selection of the controlled momentum dimensions)

机器人的总动量包括线动量和角动量, 总共6维, 每一维动量都对应着不同的物理涵义, 下面按其对应机器人平衡稳定的重要性依次讨论分析:

1) P_z 表示机器人在铅垂线上的竖直动量分量. 当竖直动量分量增加时, 机器人将压紧地面产生超重现象, 一般情况下超重将有利于稳定机器人, 但是超重过大会使机器人结构受力和关节力矩都变大而产生不利影响; 当竖直动量分量减少时, 机器人对地面的压力将减少而产生失重现象, 当完全失重时, 机器人将完全脱离地面而失去控制, 因此机器人的完全失重现象要绝对地避免.

机器人对地压紧力与地面给机器人的支持力是一对相互作用力, 压紧力大小等于 $G + \frac{dP_z}{dt}$, 其中: G 为机器人自重, $\frac{dP_z}{dt}$ 为竖直动量分量对时间的微分. 当 $\frac{dP_z}{dt} > 0$ 时, 即竖直动量分量增加, 机器人超重而压紧地面, 此时机器人能提供更大的静摩擦力, 并能抵抗更大的倾倒力矩. 当 $\frac{dP_z}{dt} < 0$ 时, 即竖直动量分量减少, 机器人失重, 此时机器人对地面压紧力减少, 能提供的最大静摩擦力和能抵抗的倾倒力矩都会降低. 特别地, 当 $\frac{dP_z}{dt} = -G$ 时, 机器人将完全失重而脱离地面, 此时机器人处于完全失控状态.

2) L_x 和 L_y 分别表示机器人向左右和前后倾倒的倾倒动量分量. 当倾倒动量分量变化过于激烈时, 机器人将产生倾倒动作, 倾倒的程度与对应该方向的倾倒动量分量变化带来的倾倒力矩大小和沿该方向的支撑长度有关. 在实际运动中, 由于机器人结构和关节的柔性, 倾倒动量分量变化首先带来的是前后或左右方向的晃动, 当晃动增大到一定程度时机器人才产生实质的倾倒动作.

倾倒动量分量变化对机器人稳定性的影响可直接通过其对机器人ZMP点的扰动大小表现出来, 用公式描述如下:

$$\Delta ZMP_x = \frac{-\frac{dL_y}{dt}}{G + \frac{dP_z}{dt}},$$

$$\Delta ZMP_y = \frac{\frac{dL_x}{dt}}{G + \frac{dP_z}{dt}},$$

其中 ΔZMP_x 和 ΔZMP_y 为地面上ZMP点在倾倒动量分量变化下产生的变动量, 当变动量过大导致ZMP点不在地面支撑域之内时, 按ZMP稳定性原理机器人就处于不稳定状态^[11, 19]. 在实际中, ZMP点越靠近支撑域边界, 机器人稳定性就越低. 很明显, 倾倒动量分量变化激烈时将会导致ZMP点在支撑域内大幅移动, 此时机器人开始晃动, 晃动过大就会产

生实质倾倒动作.

3) P_x 和 P_y 表示机器人在地面上的水平动量分量. 当水平动量分量变化过于激烈时, 地面能提供的最大摩擦力将不足以支持机器人水平动量分量的变化, 此时机器人将产生沿水平方向上的平移滑动现象.

不产生平移滑动的严格条件用公式表示为

$$\left(\frac{dP_x}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dP_y}{dt}\right)^2 < \mu\left(G + \frac{dP_z}{dt}\right),$$

其中 $\frac{dP_x}{dt}$ 和 $\frac{dP_y}{dt}$ 分别为前后和左右方向动量分量对时间的微分, μ 为脚板与地面之间的摩擦系数. 当水平方向动量变化幅度超过这一条件时机器人本体就会产生平移滑动.

4) L_z 表示机器人绕铅垂线的转动动量分量. 当转动动量分量变化过于激烈时, 地面能提供的最大摩擦力矩将不足以支持机器人竖直转动动量分量的变化, 此时机器人将产生绕铅垂线的转动滑动现象.

地面能提供的最大静摩擦力矩的精确计算非常复杂, 工程上一般先将机器人两脚对地面的压紧力等效为作用在脚板中心的集中力, 据此计算出的最大静摩擦力矩为

$$\frac{\mu C}{2}\left(G + \frac{dP_z}{dt}\right).$$

不产生转动滑动的严格条件用公式表示为

$$\left|\frac{dL_z}{dt}\right| < \frac{\mu C}{2}\left(G + \frac{dP_z}{dt}\right),$$

其中: $\frac{dL_z}{dt}$ 为转动动量分量对时间的微分, C 为机器人两脚板中心距. 当转动动量分量变化幅度的绝对值超过这一条件时机器人本体就会产生转动滑动.

综上所述, 机器人最重要的3种不平衡现象是失重和超重引起的跳动、晃动过大引起的倾倒和摩擦不足导致的滑动.

当机器人刚开始失重时, 机器人在重力作用下对地面的压紧力开始变小, 而倾倒和滑动都与对地面的压紧力大小相关, 单方面的失重就可以加大机器人的倾倒和滑动的可能性; 当机器人完全失重时, 机器人将完全脱离地面而失控, 倾倒和滑动接踵而至. 因此, 控制机器人的失重程度, 也就是竖直动量分量的减少程度, 是保证机器人平衡的首要任务.

在实际应用中, 对于手臂作业机器人来说, 机器人自身重量通常足够大, 手臂作业引起的机器人失重和超重程度都在相对较小的范围内, 一般不大可能产生完全失重的情况, 机器人动力学仿真和实测数据都说明了这一点. 另一方面, 由于手臂相对身体位置较高, 手臂作业最容易导致机器人的晃动和倾倒, 尤其是在机器人前后方向的支撑长度最短的情况下, 机器人最有可能发生前后方向上的倾倒动作. 同时, 手臂作业也可能带来机器人本体的平移滑动和转动滑动, 尽管滑动也是机器人不平衡的一种表

现,但是相对于跳动和倾倒是机器人的危害程度已经是相对次要的了.因此,在实际中,对于手臂作业来说最重要的是控制 L_x 和 L_y 两个维度倾倒动量分量的大小变化.经过先验仿真验证,也发现最多只能控制两个维度的动量分量,否则会导致对辅助臂的关节速度要求很高.

综上所述,最终选择对 L_x 和 L_y 两个倾倒动量维度进行分解动量控制.

3.3 分解动量控制(The resolved momentum control)

当选择 L_x 和 L_y 两个维度进行分解动量控制时,选择矩阵 S 如下所示:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

将式(4)两边同时乘以选择矩阵 S ,就可以实现控制 L_x 和 L_y 两个维度的动量分量为零的目标.因此,由分解动量控制方法得到的辅助臂关节速度如下所示:

$$\dot{\theta}_{\text{armaid}} = -(S \begin{bmatrix} M_{\text{armaid}} \\ H_{\text{armaid}} \end{bmatrix})^{-1} S \cdot \begin{bmatrix} M_{\text{armhit}} \\ H_{\text{armhit}} \end{bmatrix} J_{\text{armhit}}^{-1} \begin{bmatrix} v_{\text{armhit}} \\ \omega_{\text{armhit}} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中第1个矩阵求逆是求广义逆.

为了达到最快的算法速度,采取了以下3项措施:

1) 缩短计算运动链,机器人的作业运动和平衡控制由两手臂分别完成,而且也能够完成,其他身体关节则不参与运动,因此只需计算两手臂的关节运动;

2) 算法数据结构采用数组结构,而不是树形结构,简单线性循环就可以完成一次遍历计算;

3) 彻底抛弃递归算法,采用非递归的循环算法,减小算法开销,提高计算速度.

基于以上措施,在配置为Intel(R) Core(TM)2 Duo 2.93 GHz CPU, 2 GB RAM, Windows XP操作系统的

计算机平台上测试了算法的有效性和实时性.每个采样点的实测计算速度在MATLAB R2008b下平均是2.6 ms,最大是3.2 ms,在Visual C++ 2008下最大不超过1 ms.因此,算法的计算速度完全能够达到实时要求.

4 仿真结果(Simulation results)

在MATLAB R2008b下以仿人机器人右臂执行高速作业运动为例进行仿真验证分析.仿真研究所用到的仿人机器人模型如图1所示,机器人重55 kg,高165 cm,具有30个自由度,其中:两手臂各7个自由度,分别为肩部3个自由度,肘1个自由度,腕3个自由度.两手臂模型结构如图2所示,其详细参数见表1,手臂关节运动参数见表2.

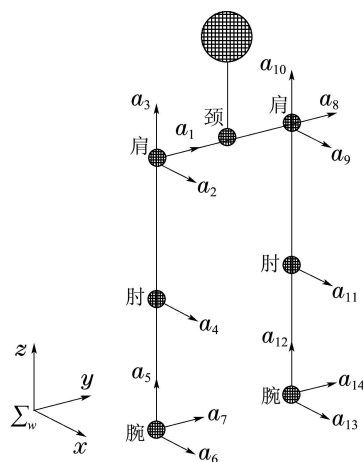


图2 手臂模型结构

Fig. 2 Arms model structure

表1 手臂详细参数

Table 1 Arm detailed parameters

手臂	长度/m	质量/kg	等效截面尺寸/m × m
上臂	0.25	3.5	0.1 × 0.1
前臂	0.25	2.5	0.08 × 0.08
手掌	0.20	0.5	0.05 × 0.05

表2 手臂关节运动参数

Table 2 Arm joint motion parameters

关节运动项目	关节角度运动范围/(°)		最大角速度/((°) × s ⁻¹)	最大角加速度/((°) × s ⁻²)
	最小	最大		
肩俯仰	-130	50	450	5630
肩滚动	-120	20	450	5630
肩偏摆	-160	90	600	5630
肘滚动	-30	120	600	5630
腕偏摆	-120	120	600	2765
腕滚动	-90	90	500	2765
腕俯仰	-70	70	500	2765

在仿真研究中,仿人机器人作业臂(右臂)的作业过程是:首先,机器人作业臂复位到如图3(a)所示的作业臂初始位姿;然后,作业臂由初始位姿运

动到如图3(b)所示的作业预备位姿,历时0.3 s;之后,作业臂处于等待作业任务状态,在本例中等待了0.3 s.一般作业任务是指作业臂末端在规定

的时间内由预备位姿运动到指定的目标位姿,并且达到指定的目标速度.在本例中作业任务规定时间是0.3s,指定目标位姿如图3(c)所示,指定目标速度包括线速度和角速度两部分,其中:线速度为 $[1.76 \ 0 \ 0.38]^T \text{m/s}$,角速度为 $[0 \ 0 \ 0]^T \text{rad/s}$,其合成线速度为1.8 m/s,合成角速度为0.作业臂末端要在短短的0.3s内加速到高达1.8 m/s的合成线速度不仅对作业臂关节角速度和角加速度性能要求很高,更重要的是将会对仿人机器人本体带来极大的瞬变惯性冲击,此时机器人的平衡控制将发挥最大作用.作业任务完成之后,作业臂在0.5s内由目标位姿返回到预备位姿等待下一次作业.整个作业过程中,机器人作业臂的详细运动情况可由图4和图5右臂的7个关节角速度和角度曲线得到,其中在图6中0s,0.3s和0.9s作业臂依次达到初始位姿、预备位姿和本例指定的目标位姿,同时机器人辅助臂的平衡控制同步实时的执行以保障机器人作业运动平衡.

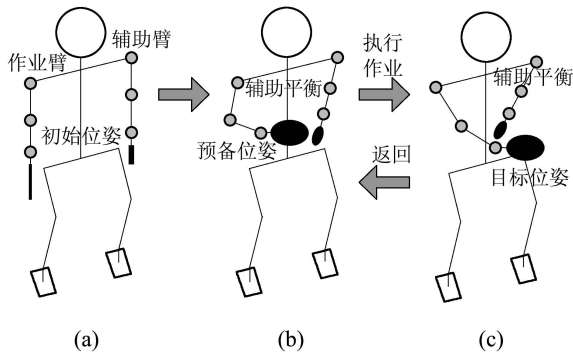
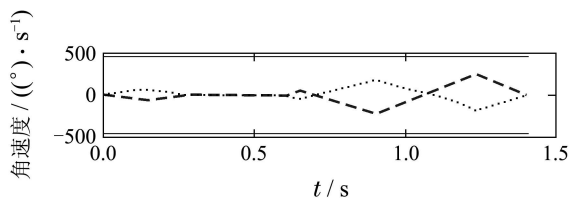


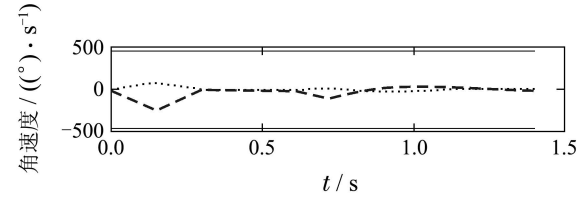
图3 仿人机器人作业运动及辅助平衡过程图

Fig. 3 The process diagram of humanoid robot operating motion and auxiliary balance

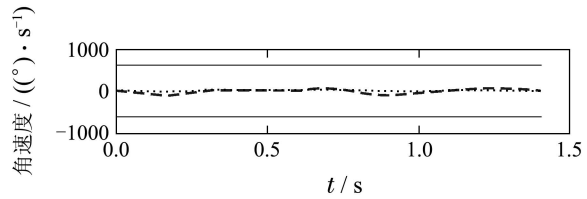
图4给出了两维分解动量控制得到的辅助臂关节角速度曲线和作业臂关节角速度曲线的对照图.可以看到,生成的辅助臂角速度曲线不仅比作业臂幅值小,而且也比作业臂平滑,这说明辅助臂的辅助运动对手臂的性能要求更低,且易于控制.同时还可以发现一个规律:由于只做了两维分解动量控制,因此辅助臂基本只有肩上两个关节在运动,而且这两个关节是正交的,这能说明两点:1) 尽管机器人总动量和关节运动是严重的非线性关系,但是分解动量控制维数和辅助臂关节运动个数还是存在一定的对应关系;2) 机器人肩关节参与运动的优先级比肘关节和腕关节的高.



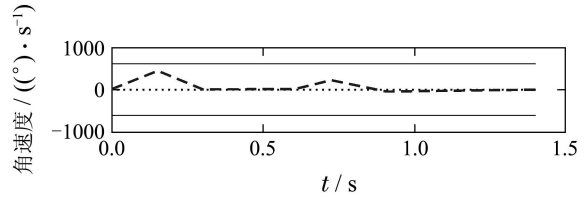
(a) 关节1



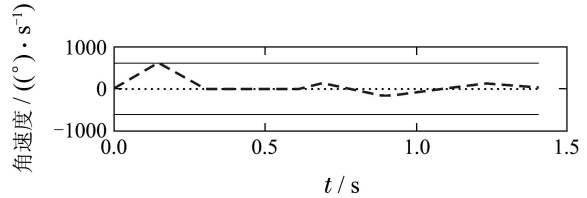
(b) 关节2



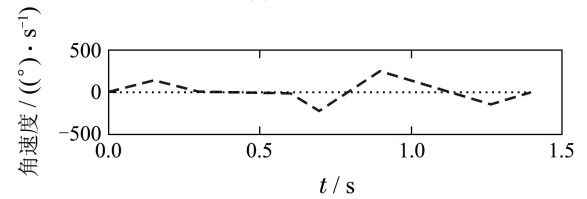
(c) 关节3



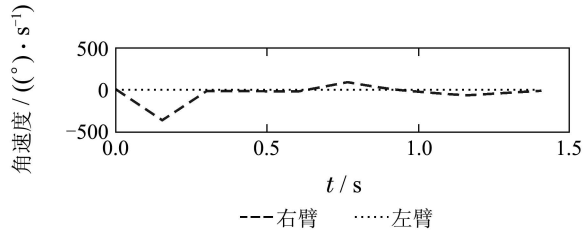
(d) 关节4



(e) 关节5



(f) 关节6



(g) 关节7

图4 机器人两手臂关节角速度曲线

Fig. 4 Robot arm joint angular velocity

图5给出了两维分解动量控制得到的辅助臂关节角度曲线和作业臂关节角度曲线的对照图.由于关节角度是由角速度积分得到的,因此两手臂关节角度曲线都很平滑,都在关节角度限幅范围之内,且有很大余量.与关节角速度曲线一样,辅助臂关节角度曲线也是只有肩上的两个同样的关节在变化,其他关节角度基本不变.

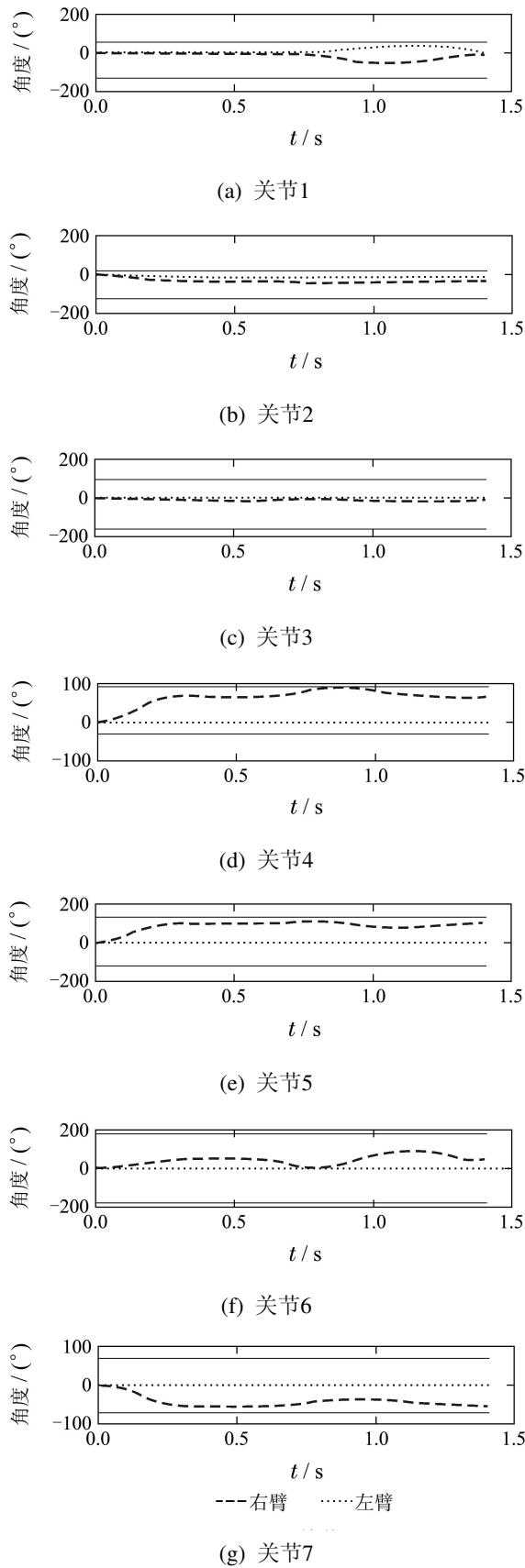
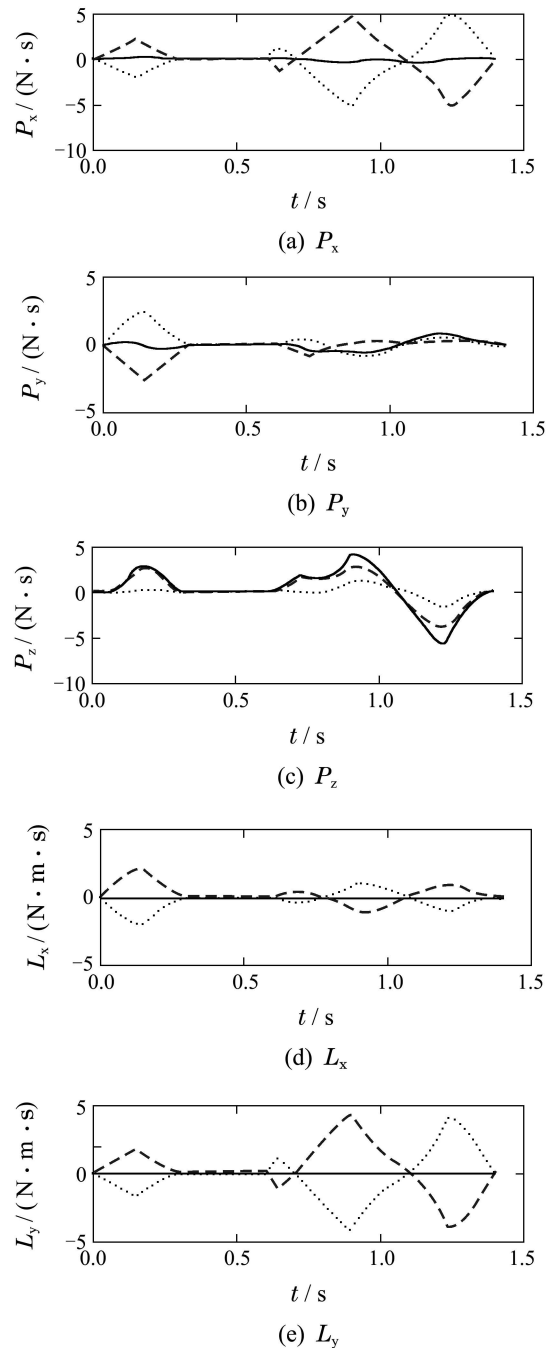


图5 机器人两手臂关节角度曲线

Fig. 5 Robot arm joint angles

图6给出了两维分解动量控制得到的仿人机器人作业臂动量、辅助臂动量以及总动量随时间变

化曲线. 可以清楚的看到, 在选定的 L_x 和 L_y 两个维度上, 机器人的总动量完全为零, 这说明在理论上机器人不会发生倾倒动作, 在实际中机器人的倾倒晃动也将会极大地降低. 而在其他维度上, 机器人的总动量要么也大幅降低(如 P_x), 要么基本保持不变(如 P_y 和 P_z), 只有 L_z 有些增大. 这些不为零的动量维度相对次要些(正如前面分析指出), 能依靠摩擦和重力平衡掉. 比如 L_z 增大导致对地面绕 z 轴转动动力矩增大, 最大峰值为31.70 Nm. 而当机器人两脚板中心距为0.4m, 脚板与地面摩擦系数为0.3时, 地面能提供的最大摩擦力矩为32.34 Nm, 大于 z 轴转动动力矩的最大峰值, 也就是说一般不会导致绕 z 轴的转动打滑. 因此, L_x 和 L_y 两个维度的分解动量控制完全达到了预期的效果.



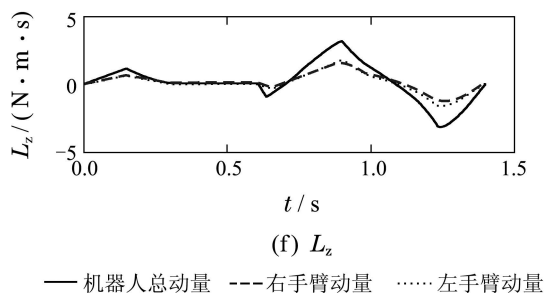


图6 机器人总动量和两手臂动量曲线

Fig. 6 Robot total momentum and two arm momentum

图7给出了施加两维分解动量控制前后仿人机器人执行相同作业任务时脚底ZMP曲线的对比图. 实线为不施加两维分解动量控制(也就是说只有作业臂的作业运动, 没有辅助臂的分解动量平衡控制)时机器人作业过程ZMP曲线. 由曲线可知, 此时机器人脚底ZMP变化范围较大. 考虑到实际机器人的柔性, 这意味着机器人有较大的晃动. 该曲线中甚至出现超出脚底支撑域的情况, 这意味着机器人有可能在超出的瞬间倒下. 虚线(因虚线太集中成了斑点)为施加两维分解动量控制时机器人作业过程的ZMP曲线. 显然, 此时机器人脚底ZMP变化范围极小, 大致处于脚底支撑域中心, 离脚底支撑域边界最远. 按ZMP稳定性原理^[11,19], 具有最佳的ZMP稳定性, 圆满达到机器人作业平衡控制的目的.

笔者挑选了10组典型的作业臂作业任务运动规划数据, 采用本文的两维分解动量控制进行作业运动平衡控制均取得了预期的效果. 这能说明3个问题:

首先, 不管是人还是仿人机器人, 其两手臂具有天然的结构对称性、运动对称性和性能对称性, 而分解动量控制本身就是利用动量守恒这一具有“对称性”的原理来实现的, 因此采用动量控制的方法在这种具有对称性结构的生物或机器人的运动平衡控制上具有普遍性和优越性. 一个典型的场景就是, 不管是采用分解动量控制的机器人还是乒乓球运动员, 当他们的右手臂在向前运动时, 仔细观察就能发现他们的左手臂就大致在向后运动, 也就是说为了保持躯体平衡, 两手臂运动具有反相的对称性, 显然无论是有意识的还是无意识的, 他们都利用了动量守恒的原理.

其次, 机器人作业的多样性是由作业臂7个关节共同决定的, 而作业的灵巧性主要由末端的腕关节完成的, 但是对机器人总动量贡献最大的是靠近躯体的肩关节, 特别是肩俯仰和肩滚动, 而末

端的腕关节则对动量贡献相当小, 也就是说从动量控制的角度来看, 作业臂其实只有靠近躯体的两个关节在运动, 同时辅助臂也只需和必须出动靠近躯体的两个关节就能保持机器人的作业平衡, 图5很好的说明了这一点.

最后, 在式(6)中求取辅助臂关节速度时, 第1个矩阵求逆是求广义逆, 这在无形中就已经对辅助臂关节速度进行了最佳最小二乘优化. 优化带来的好处是: 一方面, 辅助臂上对动量影响较小的肘关节和腕关节几乎不需运动; 另一方面, 辅助臂保持机器人作业平衡所耗费的运动量一般不会高于作业臂的运动量.

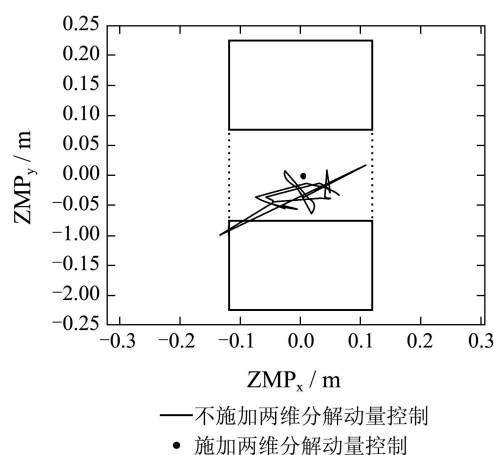


图7 机器人作业运动的脚底ZMP曲线

Fig. 7 The ZMP of robot operating motion

总之, 在具有对称双臂的仿人机器人上使用分解动量控制的方法, 辅助臂只需较少的关节和相对较少的运动代价就能相对轻松的完成作业平衡任务且具有普适性.

为了进一步测试在更高的作业臂末端作业速度下的平衡控制性能, 在机器人手臂实际性能参数范围内逐步提高作业臂末端在目标位姿时的线速度, 发现在线速度高达3.2 m/s时依旧能保持平衡, 而且首先出现的限制因素是作业臂的关节速度超限, 而不是辅助臂的关节速度超限, 这一点在前面已经说明, 辅助臂的平衡控制运动代价比作业臂的作业运动要少. 若能进一步扩大机器人手臂的实际性能参数, 则机器人能在更高的手臂末端速度下平衡作业.

5 结论(Conclusion)

本文首次将分解动量控制应用于仿人机器人手臂高速动态作业的平衡控制, 并为了达到高速动态作业的实时平衡控制, 针对手臂作业运动平衡对分解动量控制进行了量身剪裁: 首先给出了

只包括两手臂的机器人总动量计算式, 然后择优选取了两个最重要的动量维度进行动量控制; 之后推导了这两维的辅助臂分解动量控制公式; 最后, 为了达到实时性, 对具体算法进行了优化. 仿真结果验证了动量分解控制的有效性, 得到了平滑的辅助臂平衡运动, 同时具有优秀的动力学平衡性能, 可获得充裕的ZMP稳定性, 实际测试表明具有相当出色的实时性能. 今后将进一步研究在仿人机器人腰部和腿部各关节运动情况下的手臂高速作业运动的实时平衡控制问题.

参考文献(References):

- [1] OGURA Y, AIKAWA H, SHIMOMURA K. Development of a new humanoid robot WABIAN-2 [C] // *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Orlando, Florida: IEEE, 2006: 76 – 81.
- [2] SAKAGAMI Y, WATANABE R, AOYAMA C. The intelligent ASIMO: system overview and integration [C] // *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2002: 2478 – 2483.
- [3] ISHIDA T. Development of a small biped entertainment robot QRIO [C] // *Proceedings of the International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science*. Nagoya, Japan: IEEE, 2004: 23 – 28.
- [4] KANEKO K, HARADA K, KANEHIRO F. Humanoid robot HRP-3 [C] // *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Nice, France: IEEE, 2008: 2471 – 2478.
- [5] HUANG Q, CHEN X C, GAO J Y. Analysis of pushing manipulation by humanoid robot during dynamic walking [J]. *Information-an International Interdisciplinary Journal*, 2009, 12(1): 217 – 234.
- [6] TAKUBO T, INOUE K, ARAI T. Pushing an object considering the hand reflect forces by humanoid robot in dynamic walking [C] // *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain: IEEE, 2005: 1706 – 1711.
- [7] VAHRENKAMP N, WIELAND S, AZAD P. Visual servoing for humanoid grasping and manipulation tasks [C] // *Proceedings of the International Conference on Humanoid Robots*. Daejeon, South Korea: IEEE, 2008: 413 – 419.
- [8] OTT C, EIBERGER O, FRIEDL W. A humanoid two-arm system for dexterous manipulation [C] // *Proceedings of the International Conference on Humanoid Robots*. Genoa, Italy: IEEE, 2006: 276 – 283.
- [9] YOKOYAMA K, HANDA H, ISOZUMI T. Cooperative works by a human and a humanoid robot [C] // *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Taipei, Taiwan: IEEE, 2003: 2985 – 2991.
- [10] NAKAOKA S, NAKAZAWA A, KANEHIRO F. Learning from observation paradigm: Leg task models for enabling a biped humanoid robot to imitate human dances [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2007, 26(8): 829 – 844.
- [11] VUKOBRATOVIC M, STEPANENKO J. On the stability of anthropomorphic systems [J]. *Mathematical Biosciences*, 1972, 15(1/2): 1 – 37.
- [12] HIRAI K, HIROSE M, HAIKAWA Y. The development of Honda humanoid robot [C] // *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 1321 – 1326.
- [13] KAJITA S, MORISAWA M, MIURA K. Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking [C] // *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Taipei, Taiwan: IEEE, 2010: 4489 – 4496.
- [14] YAMANE K, NAKAMURA Y. Dynamics filter-concept and implementation of online motion generator for human figures [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(3): 421 – 432.
- [15] KAGAMI S, KANEHIRO F, TAMIYA Y. AutoBalancer: an online dynamic balance compensation scheme for humanoid robots [C] // *Proceedings of the International Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*. Hanover, New Hampshire: Springer, 2000: 329 – 339.
- [16] YAMAGUCHI J, SOGA E, INOUE S. Development of a bipedal humanoid robot—control method of whole body cooperative dynamic biped walking [C] // *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Detroit, Michigan: IEEE, 1999: 368 – 374.
- [17] KAJITA S, KANEHIRO F, KANEKO K. Resolved momentum control: humanoid motion planning based on the linear and angular momentum [C] // *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Las Vegas, Nevada: IEEE, 2003: 1644 – 1650.
- [18] NEO E S, YOKOI K, KAJITA S. Whole-body motion generation integrating operator's intention and robot's autonomy in controlling humanoid robots [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(4): 763 – 775.
- [19] VUKOBRATOVIC M, BOROVAC B. Zero-moment point—thirty five years of its life [J]. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2004, 1(1): 157 – 173.

作者简介:

张大松 (1985–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为仿人机器人运动平衡控制;

熊 蓉 (1972–), 女, 博士, 教授, 目前研究方向为仿人机器人、环境地图构建, E-mail: rxiong@iipc.zju.edu.cn;

吴 俊 (1967–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为数字控制器优化有限字长实现、混合优化控制、网络化控制、模型降阶等;

褚 健 (1964–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为自动控制理论及应用、自动化仪表及装置.