

DOI: 10.7652/xjtuxb201612010

应用扩展零力矩点预观控制和分解动量控制的仿人机器人全身运动规划方法

周雪峰¹, 孙广彬², 刘晓光¹, 黄丹¹, 蒋晓明¹, 朱富贵¹

(1. 广东省科学院广东省智能制造研究所, 510070, 广州; 2. 南洋理工大学机器人研究中心, 639798, 新加坡)

摘要: 针对简化动力学模型对运动规划造成较大误差的问题, 提出一种仿人机器人全身运动生成方法, 它结合扩展零力矩点(extended zero moment point, EZMP)的预观控制和分解动量控制, 实现了含多种约束的高效运动规划。该方法给出了非线性 EZMP 方程在三维空间中的封闭形式, 使得机器人稳定步态生成更加方便, 同时将之前文献中忽略的角动量等因素也考虑在内, 另外可以对 EZMP、四肢运动和角动量等自由添加约束。仿真结果表明, 该方法将 EZMP 平均误差减小到单一预观控制方法的 2/5, 并可以方便地实现含复杂约束的运动规划, 为仿人机器人提供了一种形式简单且灵活、高效的运动规划方法。

关键词: 仿人机器人; 扩展零力矩点; 全身运动规划; 角动量

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)12-0058-06

A Whole-Body Motion Planner for Humanoid Robots Using EZMP Preview Control and Resolved Momentum Control

ZHOU Xuefeng¹, SUN Guangbin², LIU Xiaoguang¹, HUANG Dan¹,
JIANG Xiaoming¹, ZHU Fugui¹

(1. Guangdong Institute of Intelligent Manufacturing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China;
2. Robotics Research Centre, Nanyang Technological University, 639798, Singapore)

Abstract: A whole-body motion planning method for humanoid robots is proposed to tackle motion planning errors caused by simplified dynamic model. The method combines the EZMP (extended zero moment point) control and the resolved momentum control to realize high efficiency motion planning with multiple constraints. A close form of the nonlinear EZMP equation in 3D space is presented to facilitate the stable motion pattern generation of humanoid robots. The angular momentum neglected in most previous literatures is also taken into account. Furthermore, some constraints such as EZMP, limb motion and angular momentum can be added. Simulation results show that the proposed method reduces the average EZMP error to around 2/5 of that using preview control alone and is able to realize motion planning with complex constraints. Therefore, the method provides a compact-formed, flexible and efficient motion planning solution for humanoid robots.

Keywords: humanoid robot; extended zero moment point; whole-body motion planning; angular momentum

仿人机器人的一个基本问题是如何在保持动态平衡的同时完成其他实际的任务,很多文献对足式行走问题进行了研究^[1-3]。为了处理零力矩点(ZMP)无法用于非水平地面的缺点,Sun 等提出了扩展零力矩点(extended zero moment point, EZMP)^[4]的概念,该方法将质心和角动量进行解耦,得到了一个三维线性模型,并在 3 个运动方向上同时应用预观控制^[5]生成稳定的运动步态,而不需要单独规划竖直方向运动,但是该方法仍然存在一些缺点:忽略了绕质心的转动动力学以及难以施加基于任务的约束,使得其很难用于执行除行走之外的实际任务。Park 等将水平角动量的二阶微分和加速度变化率作为系统输入,可以同时控制角动量和 ZMP^[6],但并没有考虑竖直方向运动规划,而且文献并未说明如何实现目标角动量。另外,还有文献使用线性模型预测控制(linear model predictive control, LMPC)来生成参考运动^[7-8],这些方法可以很方便地添加各种约束,但是基本上用于比较简单的模型。Feng 等应用二次规划(quadratic programming, QP)方法和微分动态规划(differential dynamic programming, DDP)生成三维运动轨迹^[9],但基于非线性最优化方法的求解比较耗时间,且最优性难以保证。Kajita 等提出了分解动量控制(resolved momentum control, RMC)方法,该方法给定双足及双手的轨迹,可以计算实现目标角动量的上身运动轨迹^[10]。本文主要基于 Sun 等关于 EZMP 的工作以及 Kajita 等的分解动量控制,给出了 EZMP 的非线性表达式,并结合预观控制和分解动量控制来生成稳定的运动模式。该方法同时生成了质心三维运动轨迹并可用于任意路面;考虑了机器人的完全动力学;可以添加角动量以及四肢的运动轨迹等基于任务的约束。

1 问题描述

本节主要给出了 EZMP 的完整表达式并指出了基于线性模型的运动规划的弊端。

1.1 EZMP 的非线性方程

Sun 等提出 EZMP 的概念,将经典 ZMP 推广到任意路面^[4],但没有给出 EZMP 的完整表达式,本文在此给出了 EZMP 的非线性表达式。EZMP 定义为虚拟接触平面(virtual contact plane, VCP)上一点,在该点处,地面反作用力矩垂直于 VCP,如图 1 所示。

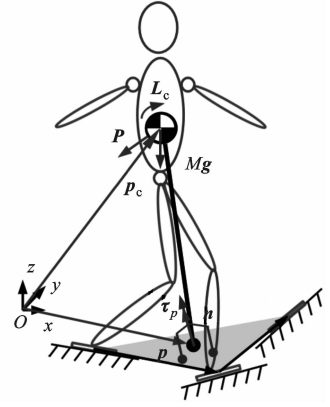


图 1 EZMP 示意图

为 VCP 平面的法矢量以及在 EZMP 点 p 处的地面反作用力矩。 O 表示以 O 为原点的世界坐标系,根据 EZMP 定义,易得 n 和 τ_p 在同一直线上

$$\tau = n \times \tau_p = 0 \quad (1)$$

相应动力学方程表示为

$$\tau_p = \dot{L} - p_c \times Mg + (\dot{P} - Mg) \times p \quad (2)$$

式中: $L = (L_x, L_y, L_z)^T$ 为相对于世界坐标系原点 O 的角动量, $P = (P_x, P_y, P_z)^T$ 为机器人的动量; $p_c = (x, y, z)^T$ 为质心坐标; p 为 EZMP 坐标; g 为重力加速度(下文中 g , 其值为 g)。

令 $L_c = (L_{cx}, L_{cy}, L_{cz})^T$ 为绕质心 p_c 的角动量。绕质心 p_c 和原点 O 的角动量微分的关系可表示为

$$\dot{L} = \dot{L}_c + \begin{bmatrix} y\dot{p}_z - z\dot{p}_y \\ z\dot{p}_x - x\dot{p}_z \\ x\dot{p}_y - y\dot{p}_x \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),再将式(2)代入式(1),得

$$\tau = \begin{bmatrix} -C_x - n_z \dot{p}_x (z - p_z) + n_z (\dot{p}_z + Mg)(x - p_x) \\ C_y - n_z \dot{p}_y (z - p_z) + n_z (\dot{p}_z + Mg)(y - p_y) \\ C_z \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} C_x &= n_z \dot{L}_{cy} - n_y \dot{L}_{cz} - n_y \dot{p}_y (x - p_x) + n_y \dot{p}_x (y - p_y) \\ C_y &= n_z \dot{L}_{cx} - n_x \dot{L}_{cz} - n_x \dot{p}_y (x - p_x) + n_x \dot{p}_x (y - p_y) \\ C_z &= -n_y (\dot{L}_{cx} + (\dot{p}_z + Mg)(y - p_y) - \dot{p}_y (z - p_z)) + \\ &\quad n_x (\dot{L}_{cy} - (\dot{p}_z + Mg)(x - p_x) + \dot{p}_x (z - p_z)) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

通过求解方程式(4),可求得水平分量 p_x 和 p_y

$$p_x = x - \frac{z - p_z}{z + g} \ddot{x} + H_x + n_y H \quad (6a)$$

$$p_y = y - \frac{z - p_z}{z + g} \ddot{y} + H_y + n_x H \quad (6b)$$

式中

令 $n = (n_x, n_y, n_z)^T$ 和 $\tau_p = (\tau_{px}, \tau_{py}, \tau_{pz})^T$ 分别

$$H_x = -\frac{\dot{L}_{cy}}{M(\dot{z} + g)} \quad (7a)$$

$$H_y = -\frac{\dot{L}_{cx}}{M(\dot{z} + g)} \quad (7b)$$

$$H = \frac{\dot{L}_{cx}\ddot{x} + \dot{L}_{cy}\ddot{y} + \dot{L}_{cz}(\dot{z} + g)}{n_x\ddot{x} + n_y\ddot{y} + n_z(\dot{z} + g)} \quad (7c)$$

1.2 EZMP 方程的线性化及预观控制

1.2.1 EZMP 方程的线性化 设 $\dot{\mathbf{L}}_c = \mathbf{0}$, 则式(6)变为

$$p_x = x - c\ddot{x} \quad (8a)$$

$$p_y = y - c\ddot{y} \quad (8b)$$

$$p_z^{\text{aux}} = z - c\ddot{z} \quad (8c)$$

式中: $p_z^{\text{aux}} = p_z + cg$, $c = (z - p_z)/(\dot{z} + g)$ 。

该模型在各方向具有对称的结构。假设 c 为常数, 则可应用线性控制器来生成三维运动轨迹。

1.2.2 预观控制 以 x 方向为例, 方程式(8)经状态空间化和离散化后可得

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{r}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中

$$\mathbf{x}(k) = (x(kT); \dot{x}(kT), \ddot{x}(kT))^T$$

$$\mathbf{u}(k) = x(kT); \mathbf{r}(k) = p_x(kT)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{T^3}{6} \\ \frac{T^2}{2} \\ T \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -c \end{bmatrix}^T$$

其中 T 为采样时间。

最优控制的目标函数为

$$J = \sum_{i=k}^{\infty} \left\{ \mathbf{Q}_e (r^{\text{ref}}(i) - r(i))^2 + (\Delta \mathbf{x}(i))^T \mathbf{Q}_x \Delta \mathbf{x}(i) + \mathbf{R}(\Delta \mathbf{u}(i))^2 \right\} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{Q}_e$ 、 $\mathbf{Q}_x$ 和 $\mathbf{R}$ 为非负定权值矩阵。 $\Delta \mathbf{x}(i) = \mathbf{x}(i) - \mathbf{x}(i-1)$ 为状态变量增量, $\Delta \mathbf{u}(i) = \mathbf{u}(i) - \mathbf{u}(i-1)$ 为控制输入增量。

根据预观控制理论, 可得最优控制如下^[6,10]

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{k}_e \sum_{i=0}^k (r(i) - r^{\text{ref}}(i)) - \mathbf{k}_x \mathbf{x}(k) - \sum_{i=1}^{n_p} \mathbf{k}_f(i) r^{\text{ref}}(k+i) \quad (11)$$

式中: n_p 为预观时间长度; $\mathbf{k}_e$ 、 $\mathbf{k}_x$ 和 $\mathbf{k}_f$ 为控制器增益, 可以从权值矩阵 $\mathbf{Q}_e$ 、 $\mathbf{Q}_x$ 和 $\mathbf{R}$ 计算得出; r^{ref} 为式(9)中输出 r 的目标参考值。用同样的方法可以设计 y 和 z 方向的预观控制器。但是, 在 z 方向目标轨迹为 $p_z^{\text{aux}} = p_z + cg$, 而非 p_z 。只要 p_z^{aux} 跟踪误差

足够小, 就可以保证满足约束式(8c)。这样, 就可以实时高效地生成质心在三维空间的运动轨迹。

1.2.3 基于线性模型及预观控制进行运动规划的缺点 尽管上述方法可以高效地生成运动质心轨迹, 但是机器人的真实角动量变化率并不是我们假设的恒定值, 在执行高速或复杂运动时, 采用恒定的角动量变化率会导致较大 EZMP 误差, 影响机器人动态平衡。另外, 预观控制是基于线性二次控制理论设计的, 而且难于施加基于任务的约束条件, 由此限制了机器人执行任务的能力。

2 基于 EZMP 预观控制和分解动量控制的全身运动生成

针对线性模型的预观控制方法存在的缺点, 结合预观控制和分解动量控制生成了满足目标 ZMP 及角动量的全身运动模式, 该方法可以保证动态平衡且同时满足四肢运动约束, 便于执行稳定行走之外的其他有用任务。所提方案主要包括基于预观控制的质心运动生成器和基于分解动量的控制器。预观控制用于 EZMP 的线性化模型, 生成质心的速度轨迹; 分解动量控制根据质心规划器生成的线性运动来计算满足运动约束的基座位姿轨迹, 并由雅可比矩阵映射到机器人关节空间。设计时, 本文将目标角动量(绕质心)设为零, 并且模仿人在站立、行走、奔跑等自然运动时对角动量的近零调节。

2.1 应用分解动量控制

在 EZMP 的非线性方程中, 质心和角动量的运动是互相耦合的。规划关节角度轨迹时, 机器人的质心运动和绕质心的旋转运动需要同时考虑。相对基于线性模型的运动生成方法, 考虑了机器人 EZMP 的完整动力学方程生成的运动轨迹具有更小的目标跟踪误差。

分解角动量控制是将机器人的动量/角动量以及关节空间运动结合在一起^[10], 可以生成满足目标动量或角动量的全身运动, 且考虑了环境或任务对机器人足或手的约束, 控制比较灵活。下面将使用该方法来实现目标动量和角动量的控制。动量 $\mathbf{P}$ 和绕质心角动量 $\mathbf{L}_c$ 可以用机器人基座和关节空间速度表示为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{L}_c \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^5 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{oi}^v & \mathbf{M}_{oi}^w \\ \mathbf{H}_{oi}^v & \mathbf{H}_{oi}^w \end{bmatrix} \xi_B + \sum_{i=1}^5 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{qi} \\ \mathbf{H}_{qi} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_i \quad (12)$$

式中: 上标 v 和 w 分别表示速度和角速度; $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别表示动量和角动量; $\dot{\mathbf{q}}_i$ ($i=1, 2, \dots, 5$) 代表左

臂、头部、右臂、左腿、右腿的关节角速度向量; ξ_B 为基座空间速度,定义如下

$$\xi_B = \begin{bmatrix} v_B \\ \omega_B \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: v_B 为机器人基座的速度; ω_B 为空间角速度。

给定基座空间速度 ξ_B 和肢体末端速度 ξ_i , 可以通过雅可比矩阵得出关节空间角速度为

$$\dot{q}_i = J_i^{-1} \xi_i^{\text{ref}} - J_i^{-1} \begin{pmatrix} E & -\hat{r}_{B-i} \\ 0 & E \end{pmatrix} \xi_B \quad (14)$$

式中: J_i 为对应某肢体的雅可比矩阵; r_{B-i} 为从基座原点指向某肢体 i 的向量;上标“ref”表示给定的参考值或根据参考值计算得到; $\hat{r}_{B-i}$ 为对应 r_{B-i} 又乘运算的矩阵。

假设目标角动量和各肢体末端速度已经给定,目标动量已由预观控制计算得出,将式(14)代入式(12),基座速度 ξ_B 可以通过分解动量控制得出

$$\xi_B = A_B^+ y \quad (15)$$

式中

$$A_B = \sum_{i=1}^5 \left[\begin{pmatrix} M_{oi}^v & M_{oi}^w \\ H_{oi}^v & H_{oi}^w \end{pmatrix} - \sum_{i=1}^5 \left[\begin{pmatrix} M_{q_i} \\ H_{q_i} \end{pmatrix} J_i^{-1} \begin{pmatrix} E & -\hat{r}_{B-i} \\ 0 & E \end{pmatrix} \right] \right]$$

$$y = \begin{bmatrix} P^{\text{ref}} \\ L_c^{\text{ref}} \end{bmatrix} - \sum_{i=1}^5 \left[\begin{pmatrix} M_{q_i} \\ H_{q_i} \end{pmatrix} J_i^{-1} \xi_i^{\text{ref}} \right] \quad (16)$$

上标“+”表示伪逆操作符。

2.2 设定动量和角动量的参考轨迹

设绕质心角动量为零,此时 EZMP 方程式为式(8)。给定 EZMP 参考值,质心轨迹由预观控制计算得出,故可以计算机器人动量和角动量轨迹如下

$$\begin{pmatrix} P^{\text{ref}} \\ L_c^{\text{ref}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M\dot{x}^{\text{ref}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$\dot{x}^{\text{ref}}$ 可由式(9)~式(11)得到。式(17)的第一个等式设定目标动量,该目标值依赖于目标 EZMP;第二个等式满足模型式(8)的零动量假设。该情况下,式(8)等价于(精确的)非线性模型。

2.3 全身运动规划方法

运动规划方法包含线性动量生成和全身运动生产两个部分。在线性动量生成部分,应用预观控制来生成满足目标 EZMP 的质心运动并计算对应的(线性)动量。在全身运动生成部分,角动量设为零,应用分解动量控制来实现目标角动量以及(由目标 EZMP 得到的)目标动量,并通过雅可比矩阵将机器人的集总参数形式的运动映射到每个关节空间。给定机器人的空间行走参数(步长、步宽、步高、摆腿高

度,步高此处定义为落脚点高度变化)以及时间行走参数(步行周期、双足支撑期或摆腿期的占时比);落脚点位置和时间可以由相应计算得到;目标 EZMP 通过落脚点和步行参数进行插值计算得到;质心运动以及(线)动量由预观控制生成;给定角动量和肢体末端运动目标轨迹,通过分解动量控制计算基座运动轨迹,并由雅可比矩阵将其映射到关节空间。这样,所生成的运动同时满足动态平衡和其他运动约束。

3 仿真实验和结果分析

所提出的方法通过在 Webots 软件中的 Atlas 机器人模型进行仿真验证,如图 2 所示。控制器通过 Matlab 进行设计,通过软件之间的接口传输控制指令。脚底的压力传感器以及各关节的力矩和位置传感器用来感知脚底力的分布(每个足底 4 个传感器位于四角位置),进而可计算 EZMP 测量值^[4]。运动学和惯性参数按照机器人的真实参数来配置^[11]。

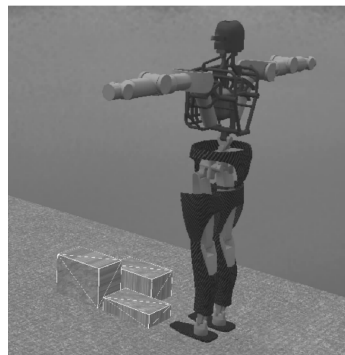


图 2 Atlas 机器人模型

3.1 仿真实验准备

为了使机器人在如图 2 所示的台阶上行走,规划如图 3 所示的目标 EZMP 轨迹(Z 型粗折线)。图 3 中灰色的平面为 VCP 平面,六边形或四边形为虚拟支撑多边形(virtual support polygon, VSP),倒 T 型线为落脚点位置。图中符号 1, 2, ..., 6 表示步行

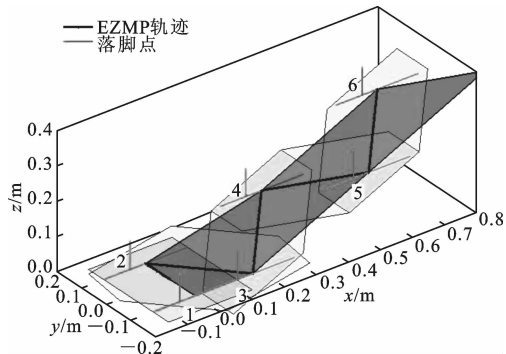


图 3 目标 EZMP 轨迹

周期编号。不失一般性,假设双臂和头部与基座之间没有相对运动,即通过 $\dot{\boldsymbol{q}}_{1,2,3}=\mathbf{0}$ 来设定。这样算法会生成满足肢体运动约束以及零角动量约束的运动模式。机器人会像人一样,自然、自动地调整上身(基座、双臂和头部),调节绕质心的角动量。

将式(16)写成下式

$$\mathbf{A}_B = \sum_{i=1}^5 \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{oi}^v & \mathbf{M}_{oi}^{\omega} \\ \mathbf{H}_{oi}^v & \mathbf{H}_{oi}^{\omega} \end{pmatrix} - \sum_{i=1}^5 \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{qi}^c \\ \mathbf{H}_{qi}^c \end{pmatrix} \mathbf{J}_i^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{E} & -\hat{\mathbf{r}}_{B-i} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{pmatrix}$$
$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}^{\text{ref}} \\ \mathbf{L}_c^{\text{ref}} \end{pmatrix} - \sum_{i=1}^3 \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{qi}^c \\ \mathbf{H}_{qi}^c \end{pmatrix} \dot{\mathbf{q}}_i - \sum_{i=4}^5 \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{qi}^c \\ \mathbf{H}_{qi}^c \end{pmatrix} \mathbf{J}_i^{-1} \boldsymbol{\xi}_i^{\text{ref}}$$

(18)

用式(18)代替式(16)、分解动量控制归结为求解式(15)来获得基座的空间速度 $\boldsymbol{\xi}_B$ 。式(18)中动量 $\mathbf{P}^{\text{ref}}$ 已通过预观控制求出,角动量 $\mathbf{L}_c^{\text{ref}}=\mathbf{0}$ 。

所有算法及控制器设计通过 Matlab 编程实现,硬件配置为: Intel core i7@2.67 GHz,8 GB 内存。

3.2 仿真结果

设置一个对照组来验证本文方法的有效性,即忽略角动量(预观控制)和考虑角动量(预观结合分解动量控制)两种情况。预观控制基于线性化模型生成质心轨迹,由于忽略了角动量信息,所以会造成一定的 EZMP 误差。从图 4a 可以看出,预观控制所导致的残余(绕质心)角动量是很大的,所以不应该忽略这一部分,尤其是在执行快速运动时,这一点通过图 4b 中对 EZMP 的预测结果进一步得到了证实,即图 4b 中角动量的缺失导致线性模型和非线性(精确)模型预测产生较大误差。

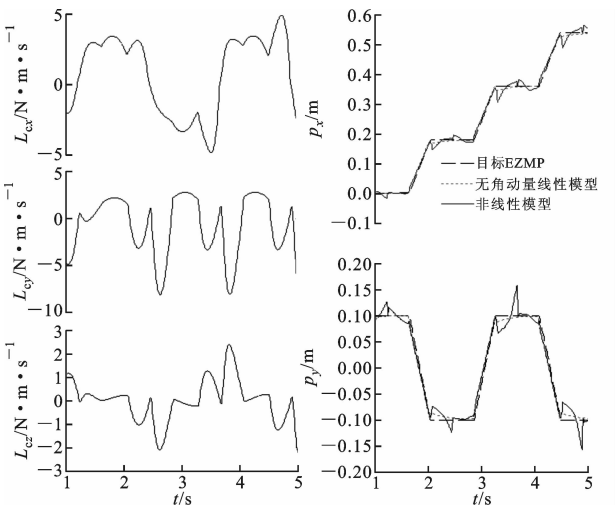


图 4 预观控制产生的残余角动量及对 EZMP 的影响

从图 5a 可以看出,(绕质心)角动量调控在很小的幅度以内,这时预观控制所使用的线性模型式(8)等价于非线性模型式(6)。考虑到分解动量控制使用的是完整的动力学模型,在这种情况下,本文提出的框架是对机器人动力学行为的精确描述。

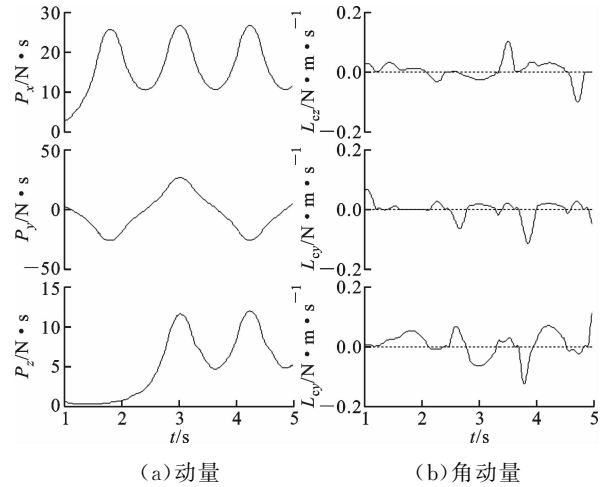


图 5 分解动量控制生成的动量和角动量

从图 6 可以看出,通过引入分解动量控制,并将目标角动量设为零,EZMP 的跟踪误差(见图 6b)相比单纯线性方法(见图 6a)有了较大的改善,平均误差减小至原来的 2/5 左右(约 0.18 cm)。

图 7 展示了机器人可以很稳定地实现爬楼梯任务,同时上身像人类一样自发产生摆动运动(调控绕质心角动量)。

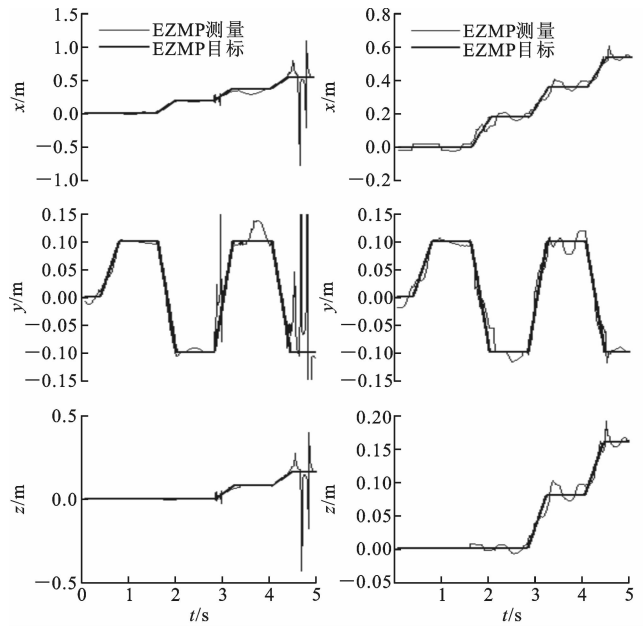


图 6 预观控制和预观结合分解动量控制的 EZMP 轨迹跟踪

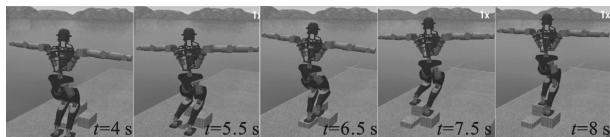


图 7 Atlas 机器人爬楼梯运动仿真

4 结 论

本文引入分解动量控制,对基于 EZMP 的运动规划方法进行了改进,它可以同时规划质心轨迹和绕质心的角动量轨迹,并实现全身运动模式规划,该方法可以很灵活地处理角动量及其他基于任务的运动约束。通过仿真展示了机器人爬楼梯过程,机器人可以调节全身运动以实现目标(零)角动量。在下一步工作中,我们将尝试利用身体的冗余自由度补偿外界扰动。

参考文献:

- [1] NISHIWAKI K, CHESTNUTT J, KAGAMI S. Planning and control of a humanoid robot for navigation on uneven multi-scale terrain [J]. *Experimental Robotics*, 2014, 79: 401-415.
- [2] 刘冠初,熊静琪,乔林,等. 四足机器人自由步态规划建模与算法实现 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(6): 84-89.
LIU Guanchu, XIONG Jingqi, QIAO Lin, et al. Modelling and algorithm realization of free gait regulation for quadruped robots [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(6): 84-89.
- [3] MIURA K, KANEHIRO F, KANEKO K, et al. Quick slip-turn of HRP-4C on its toes [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 3527-3528.
- [4] SUN G, WANG H, LU Z. A novel biped pattern generator based on extended ZMP and extended cart-table

model [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015, 12: 94.

- [5] KAJITA S, KANEHIRO F, KANEKO K, et al. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1620-1626.
- [6] PARK J, YOUM Y. General ZMP preview control for bipedal walking [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 2682-2687.
- [7] HERDT A, DIEDAM H, WIEBER P, et al. Online walking motion generation with automatic footstep placement [J]. *Advanced Robotics*, 2010, 24(5/6): 719-737.
- [8] DIMITROV D, WIEBER P, STASSE O, et al. An optimized linear model predictive control solver for on-line walking motion generation [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1171-1176.
- [9] FENG S, XINJILEFU X, HUANG W, et al. 3D walking based on online optimization [C]//*Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1-7.
- [10] KAJITA S, KANEHIRO F, KANEKO K, et al. Resolved momentum control: humanoid motion planning based on the linear and angular momentum [C]//*Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1644-1650.
- [11] HSU J. Bitbucket repository for DRCSim [EB/OL]. (2013-01-18) [2016-04-01]. https://bitbucket.org/osrf/drccsim/src/c69ecab26a55/ros/atlas_description/urdf/.

(编辑 武红江)