

## 基于腰关节力矩补偿的仿人机器人快速步行模式生成

蔚伟<sup>1</sup>, 包钢<sup>1</sup>, 王祖温<sup>1,2</sup>, 吴伟国<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 大连海事大学轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**为了有效地提高仿人机器人动步行能力, 利用基于预观控制的ZMP步态生成模式的优点并引入脚尖后跟与地面间的旋转关节, 生成了机器人的质心和踝关节轨迹。同时, 为了得到更快的步行速度, 提出了侧向质心摆动幅度递减和腰关节偏摆力矩补偿的方法。最后在虚拟物理环境下, 利用动力学仿真软件实现了虚拟3-D仿人机器人快速动步行。仿真结果证明了所采用方法的有效性。

**关键词:** 仿人机器人; 步态生成; 快速步行; 力矩补偿

中图分类号: TP241.3

文献标识码: A

### Fast Walking Pattern Generation for Humanoid Robot Using Waist Joint Moment Compensation

YU Wei<sup>1</sup>, BAO Gang<sup>1</sup>, WANG Zuwen<sup>1,2</sup>, WU Weiguo<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
2. Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** In order to effectively improve humanoid robot's dynamic walking capability, COM (center of mass) and ankle trajectories are generated by taking advantages of the gait generation method based on ZMP (zero moment point) preview control and introducing the rotation about the front & rear edges of the stance foot. Furthermore, gradual decrease in the COM lateral swing amplitude and waist joint yaw moment compensation are used to get faster speed. Finally, the fast and dynamic walking of 3-D virtual humanoid prototype is realized in virtual physical environment by kinetic simulation software. The effectiveness of the proposed method is illustrated by simulation results.

**Keywords:** humanoid robot; walking pattern generation; fast walking; moment compensation

### 1 引言 (Introduction)

仿人机器人是机器人领域的研究热点之一。近20年来, 国外许多著名的仿人机器人样机问世, 如ASIMO<sup>[1]</sup>、WABIAN-2R<sup>[2]</sup>、HRP-3<sup>[3]</sup>、HUBO<sup>[4]</sup>等, 他们都展示了非常可靠的双足步行能力。国内对仿人机器人的研究也取得了一定的进展, 如北京理工大学、哈尔滨工业大学、国防科技大学和清华大学等单位研制的仿人机器人。

移动能力是仿人机器人的重要指标之一, 人类期望其具有人的移动能力。能在人类所处的环境中工作首先要稳定步行, 即要保证零力矩点(ZMP)<sup>[5]</sup>始终在支撑脚稳定区域内。步行方式分静态步行和动态步行两种。在静态步行中, 机器人的质心在地面上的投影始终不超越支撑区域; 而在动态步行中, 质心的投影在某些时刻可以脱离支撑区域。步态模式生成与规划是稳定步行的基础及预备性工作, 按照

控制和步态生成的观点, 可以分为两大类<sup>[6]</sup>, 一类是基于机器人精确数学模型的步态生成与规划, 需要掌握机器人各连杆的质量、质心位置、转动惯量<sup>[7]</sup>。另一类是利用有限的机器人动力学信息, 如机器人总质量、总角动量等, 进行步态模式生成与规划。典型的步态生成模式方法包括三维倒立摆模型<sup>[6]</sup>、桌子一小车模型<sup>[8]</sup>和分析方法<sup>[9]</sup>等, 同时模糊逻辑<sup>[10]</sup>、小脑神经网络<sup>[11]</sup>等基于软计算的步态生成模式和基于仿生数据的步态生成模式也得到了应用。

在动态步行步态模式生成法的基础上, 为了实现更快、更稳定的行走, 有些学者提出了一些方法, 如黄强引入脚尖脚后跟与地面间的旋转关节来实现机器人更快、更稳的行走<sup>[7]</sup>。Kajita等提出了被动脚尖的概念并应用于HRP-2TJ, 将步行速度提高到1.5倍<sup>[12]</sup>。Kawamura等采用摆动手臂、旋转腰关节<sup>[13]</sup>和偏摆方向力矩补偿<sup>[14]</sup>方法来提高机器人的步行

速度。由于机器人上体需要完成其它作业，而且脚尖关节机构的复杂性也需要降低，因此本文引入脚尖脚后跟与地面间的旋转关节和预观控制<sup>[8]</sup>来实现快速步行步态生成模式，同时采用腰关节偏摆力矩补偿法来解决摆动腿运动所产生的支撑脚与地面之间的旋转打滑问题，从而有效地提高了机器人的步行速度。

## 2 步态模式生成 (Walking pattern generation)

### 2.1 机器人模型和步行周期

本文中仿人机器人关节配置如图 1 所示，步行周期  $T_c = T_s + T_d$ ，其中  $T_s$ 、 $T_d$  分别为单脚支撑期和双脚支撑期，详细参数如图 2 所示。

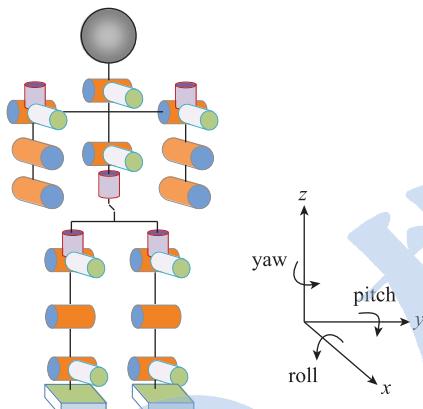


图 1 仿人机器人关节结构

Fig.1 Joint structure of humanoid robot

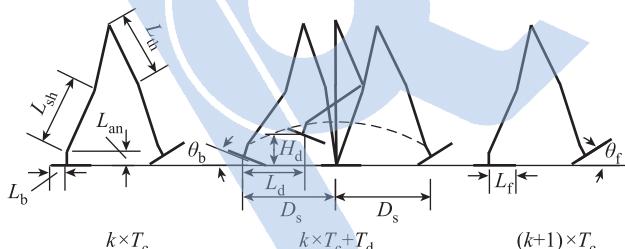


图 2 步行周期与参数

Fig.2 Walking cycle and parameters

### 2.2 期望 ZMP

简单起见，期望 ZMP 设定为期望的落脚点。第  $n$  个落脚点  $(P_x^{(n)}, P_y^{(n)})$  表示如下<sup>[15]</sup>：

$$\begin{bmatrix} P_x^{(n)} \\ P_y^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x^{(n-1)} + S_x^{(n)} \\ P_y^{(n-1)} - (-1)^n S_y^{(n)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $S_x^{(n)}$  和  $S_y^{(n)}$  分别为前进方向上的步长和左右方向上的步宽，上标  $n$  表示第  $n$  步， $(P_x^{(0)}, P_y^{(0)})$  是第一个支撑脚的位置，我们假定左脚先离开地面。

在快速步行中，质心侧向位移与机器人步行速度有直接关系<sup>[16]</sup>，本文通过渐进减小  $S_y^{(n)}$  值来提高机器人在快速步行下的稳定性，如式 (2) 所示。图 3 为采用渐进递减方法后的落脚点位置。

$$\text{if } S_y^{(n)} > W_L \text{ then } S_y^{(n)} = W_B e^{-\zeta n} \text{ else } S_y^{(n)} = W_L \quad (2)$$

其中  $W_L$  代表两脚之间距离， $W_B$  为髋关节距离， $\zeta$  为阻尼系数且有  $S_x^{(i)} = D_s$  为单步步长。

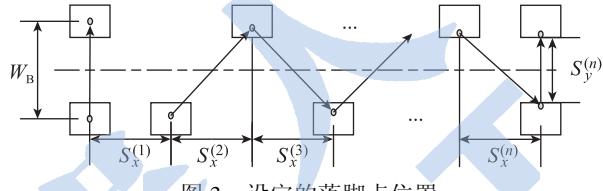


图 3 设定的落脚点位置

Fig.3 Setting the desired landing points

### 2.3 质心 (COM) 轨迹

本文基于预观控制生成质心轨迹，其核心点在于利用预观控制理论将步态模式生成看成一个 ZMP 伺服跟踪控制器。机器人的动态方程可由桌子一小车模型表示为<sup>[8]</sup>：

$$\mathbf{p} = \mathbf{r} - \frac{z_c}{g} \dot{\mathbf{r}} \quad (3)$$

其中  $\mathbf{p} = (p_x, p_y)^T$  为 ZMP 位置， $\mathbf{r} = (x, y)^T$  为水平方向的小车位置（等效为机器人的质心位置）， $z_c$  为质心高度并设定为常值， $g$  为重力加速度。定义新的变量  $\mathbf{u}$  为：

$$\mathbf{u} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (4)$$

对于状态  $\mathbf{X}(t) = (\mathbf{r}^T(t), \dot{\mathbf{r}}^T(t), \ddot{\mathbf{r}}^T(t))^T$ ，利用采样时间  $T$  对连续系统进行离散化后为：

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{p}(k) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} T^3/6 \\ T^2/2 \\ T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} =$$

$[1 \ 0 \ -\frac{z_c}{g}]$ 。为了提高控制的鲁棒性，增加控制增量  $\Delta\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)$  为状态变量，状态方程可写为：

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{X}}(k+1) = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{X}}(k) + \tilde{\mathbf{B}}\Delta\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{p}(k) = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{X}}(k) \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{其中: } \tilde{\mathbf{X}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{p}(k) \\ \mathbf{X}(k) - \mathbf{X}(k-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}(k) \\ \Delta\mathbf{X}(k) \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{A}} =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{CA} \\ 0 & \mathbf{A} \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{CB} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{C}} = [1 \ 0 \ 0 \ 0].$$

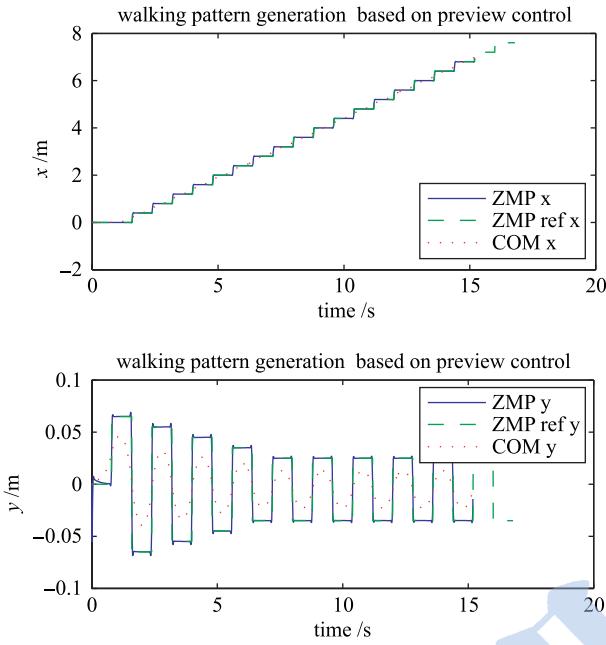
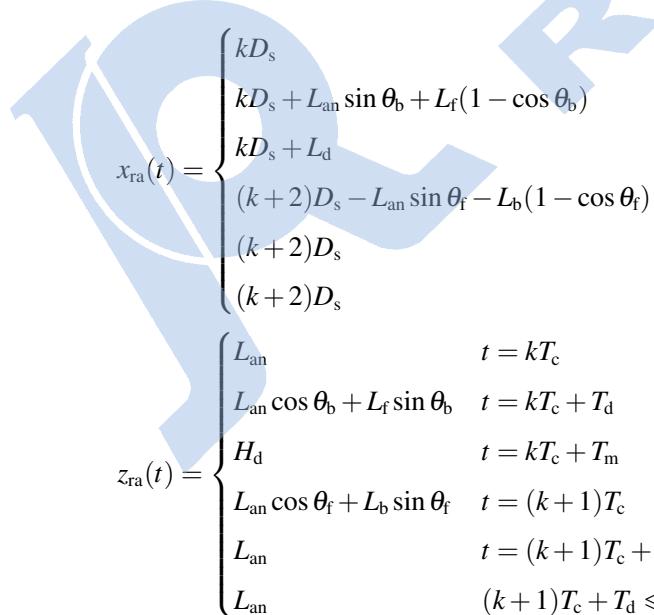


图4 ZMP 和 COM 轨迹

Fig.4 ZMP and COM trajectories

当参考 ZMP  $\mathbf{p}^{\text{ref}}(k)$  由 2.2 节给出后, 定义性能指标函数为:



$$x_{\text{ra}}(t) = \begin{cases} kD_s & t = kT_c \\ kD_s + L_{\text{an}} \sin \theta_b + L_f(1 - \cos \theta_b) & t = kT_c + T_d \\ kD_s + L_d & t = kT_c + T_m \\ (k+2)D_s - L_{\text{an}} \sin \theta_f - L_b(1 - \cos \theta_f) & t = (k+1)T_c \\ (k+2)D_s & t = (k+1)T_c + T_d \\ (k+2)D_s & (k+1)T_c + T_d \leq t \leq (k+2)T_c \end{cases}$$

$$z_{\text{ra}}(t) = \begin{cases} L_{\text{an}} & t = kT_c \\ L_{\text{an}} \cos \theta_b + L_f \sin \theta_b & t = kT_c + T_d \\ H_d & t = kT_c + T_m \\ L_{\text{an}} \cos \theta_f + L_b \sin \theta_f & t = (k+1)T_c \\ L_{\text{an}} & t = (k+1)T_c + T_d \\ L_{\text{an}} & (k+1)T_c + T_d \leq t \leq (k+2)T_c \end{cases}$$

$$\dot{\theta}_{\text{ra}}(t) = \begin{cases} 0 & t = kT_c \\ 0 & (k+1)T_c + T_d \leq t \leq (k+2)T_c \end{cases} \quad (12)$$

$$\dot{x}_{\text{ra}}(t) = \begin{cases} 0 & t = kT_c \\ 0 & (k+1)T_c + T_d \leq t \leq (k+2)T_c \end{cases} \quad (13)$$

$$J = \sum_{i=k}^{\infty} [\mathbf{Q}_e(\mathbf{p}(i) - \mathbf{p}^{\text{ref}}(i))^2 + \Delta \mathbf{X}^T(i) \mathbf{Q}_x \Delta \mathbf{X}(i) + R \Delta \mathbf{u}^2(i)] \quad (7)$$

其中  $R > 0$ ,  $\mathbf{Q}_e$  和  $\mathbf{Q}_x$  为  $3 \times 3$  对称正定加权矩阵. 通过求解离散黎卡提方程最小化  $J$ , 可得到:

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{K}_s \sum_{i=0}^k (\mathbf{p}(i) - \mathbf{p}^{\text{ref}}(i)) - \mathbf{K}_x \mathbf{X}(k) - \sum_{i=1}^N \mathbf{G}(i) \mathbf{p}^{\text{ref}}(k+i) \quad (8)$$

其中:  $N$  为目标参考值未来步数,  $\mathbf{K}_s$ 、 $\mathbf{K}_x$  和  $\mathbf{G}(i)$  可以通过求解离散最优控制问题得到. 图 4 为采用  $\mathbf{Q}_e = 1$ 、 $\mathbf{Q}_x = 0$  和  $R = 1 \times 10^{-6}$  后的 ZMP 和 COM 轨迹.

## 2.4 脚部轨迹生成

脚部轨迹可由脚的几何、物理约束确定. 为了简单, 只考虑左脚轨迹, 受以下条件约束<sup>[7]</sup>:

$$\theta_{\text{ra}}(t) = \begin{cases} 0 & t = kT_c \\ \theta_b & t = kT_c + T_d \\ \theta_f & t = (k+1)T_c \\ 0 & t = (k+1)T_c + T_d \\ 0 & (k+1)T_c + T_d \leq t \leq (k+2)T_c \end{cases} \quad (9)$$

$$t = kT_c \quad t = kT_c + T_d \quad t = kT_c + T_m \quad t = (k+1)T_c \quad t = (k+1)T_c + T_d \quad (k+1)T_c + T_d \leq t \leq (k+2)T_c \quad (10)$$

$$t = kT_c \quad t = kT_c + T_d \quad t = kT_c + T_m \quad t = (k+1)T_c \quad t = (k+1)T_c + T_d \quad (k+1)T_c + T_d \leq t \leq (k+2)T_c \quad (11)$$

$$\dot{z}_{\text{ra}}(t) = \begin{cases} 0 & t = kT_c \\ 0 & (k+1)T_c + T_d \leq t \leq (k+2)T_c \end{cases} \quad (14)$$

其中:  $(L_d, H_d)$  和  $T_m$  分别代表踝关节在最高点的位置和时间. 利用三次样条插值可以得到脚部的平滑轨迹.

## 2.5 关节角度计算

仿人机器人步态模式可以唯一地由双脚踝关节轨迹和髋关节轨迹表示，髋关节轨迹可以由质心轨迹近似代替，所以可以根据仿人机器人腿的几何关系推导逆运动学方程计算各关节角轨迹。

## 3 腰关节力矩补偿 (Compensation for the waist joint moment)

### 3.1 腰关节结构

腰关节结构如图 5 所示，包括 3 个自由度：滚动、俯仰和偏摆。

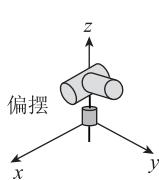


图 5 腰关节机构

Fig.5 Structure of the waist joint

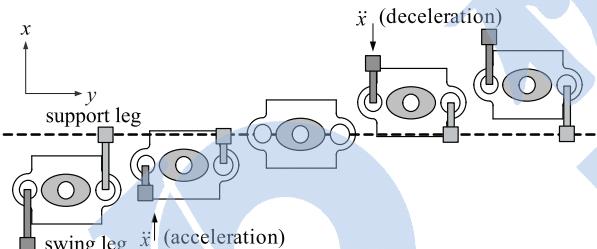


图 6 腰关节偏摆运动示意图

Fig.6 Yaw movement of the waist joint

### 3.2 腰关节偏摆力矩补偿

约束仿人机器人快速步行的一个重要因素就是围绕支撑腿的腰关节偏摆运动所产生的影响。机器人在快速行走中，腰关节由于摆动腿的加速和减速运动而产生旋转，随着步行速度提高，旋转运动增

大，当超过支撑脚和地面的摩擦力时，机器人支撑脚就会发生旋转和打滑，从而使机器人失去平衡而摔倒。腰关节偏摆运动如图 6 所示。

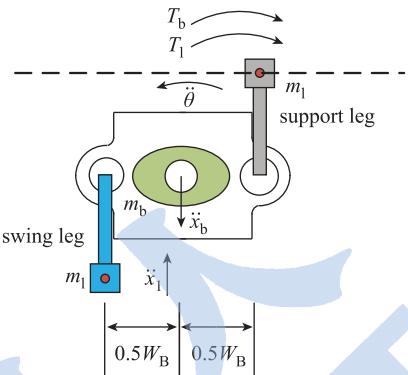


图 7 腰关节偏摆运动和旋转的动态关系

Fig.7 Dynamic relationship between yaw and rotation of the waist joint

分析腰关节偏摆运动和旋转的动态关系，如图 7 所示，把机器人近似为三连杆模型——腰部（上体）、摆动腿和支撑腿。

其中： $m_l$  和  $m_b$  分别为单腿和上体质量， $T_l$  为摆动腿产生的力矩， $T_b$  为偏摆角加速度  $\ddot{\theta}$  和上体加速度  $\ddot{x}_b$  产生的力矩（都围绕支撑点），支撑点为支撑脚脚底中心。则有：

$$T_l = m_l W_B \ddot{x}_l \quad (15)$$

$$T_b = -J_b \ddot{\theta} - 0.5 m_b W_B \ddot{x}_b \quad (16)$$

其中： $J_b$  为围绕腰关节的转动惯量。在快速步行中，我们希望围绕支撑点产生的合力矩  $T = T_l + T_b$  为 0，从而得到偏摆的角加速度为：

$$\ddot{\theta} = \frac{W_B}{J_b} (m_l \ddot{x}_l - 0.5 m_b \ddot{x}_b) \quad (17)$$

由于  $\ddot{x}_l \gg \ddot{x}_b$ ，忽略上体加速度  $\ddot{x}_b$ ，并积分得到腰关节偏摆角：

$$\theta(t) = \frac{m_l W_B}{J_b} x_l(t) \quad (18)$$

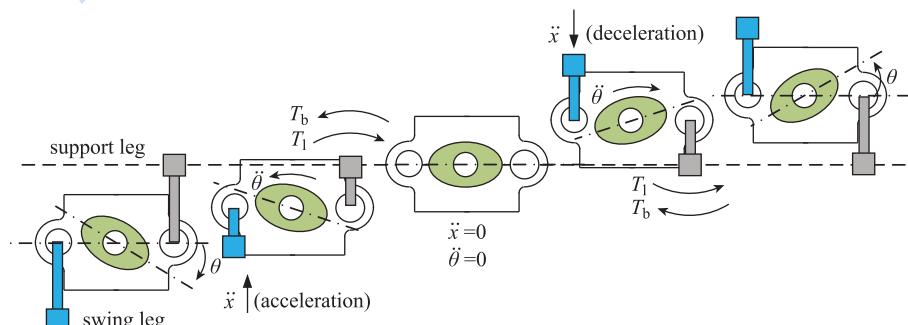


图 8 通过旋转腰关节实现偏摆力矩补偿

Fig.8 Compensating the yaw moment by rotating the waist joint

机器人在单脚支撑期基于摆动腿轨迹来补偿腰关节偏摆转角  $\theta$ , 其值可由上式计算。在满足边界条件的情况下, 双脚支撑期使用三次样条插值, 最终得到光滑的偏摆曲线, 图 8 为采用腰关节偏摆力矩的补偿示意图。

#### 4 仿真分析 (Simulation analysis)

我们采用的仿人机器人相关参数如表 1 所示, 考虑到与地面之间存在滑动, 定义接触力模型为:

$$F_c^n = \begin{cases} 0 & \text{if } y > 0 \\ \operatorname{sgn}\dot{x}\lambda_g(\lambda_c^n|y|\dot{y} - k_c^n|y|) - \mu_g\dot{x} & \text{if } y \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

其中:  $k_c^n$ 、 $\lambda_c^n$ 、 $\lambda_g$ 、 $\mu_g$  分别为脚与地面之间的刚度系数、最大粘滞阻尼系数、动态摩擦系数和切向粘性阻尼系数。

图 9 为左右脚踝关节在  $x$  方向上的轨迹, 图 10 为腿部各关节轨迹。

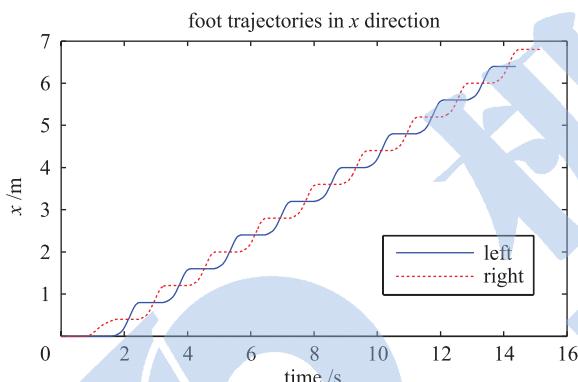


图 9 左右脚踝关节在  $x$  方向上轨迹

Fig.9 Right and left ankle trajectories in  $x$  direction

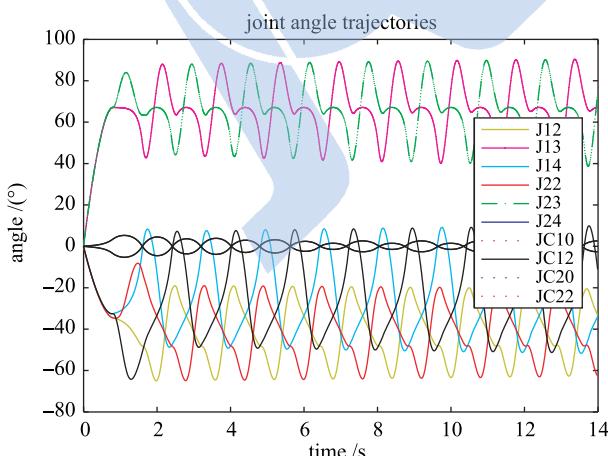


图 10 腿部各关节角度轨迹

Fig.10 Angle trajectories of each leg joint

采用腰关节偏摆力矩补偿前后的机器人质心轨迹如图 11 所示。由图可知, 在没有偏摆补偿情况下,

机器人在行走过程中发生侧移, 且侧移累积增大, 最终导致机器人摔倒。增加补偿后, 侧移明显消除, 有利于机器人提高步行速度和稳定性。图 12 为仿真截图, 图 13 为腰关节偏摆力矩补偿后的偏摆角度曲线。图 14 为补偿前后的腰关节偏摆方向力矩曲线。

表 1 仿人机器人和仿真参数设置

Tab.1 Specifications of humanoid robot and simulation condition

机器人参数			仿真参数		
名称	值	单位	名称	值	单位
$L_{th}$	0.3	m	$T_c$	0.8	s
$L_{sh}$	0.3	m	$T_s$	$0.8T_c$	s
$L_{an}$	0.145	m	$T_d$	$0.2T_c$	s
$L_b$	0.08	m	$D_s$	0.4	m
$L_f$	0.17	m	$\theta_b$	-0.2	rad
$W_B$	0.13	m	$\theta_f$	0.2	rad
$W_L$	0.042	m	$L_d$	$L_{an} + 0.08$	m
$Z_c$	0.768	m	$H_d$	$0.95D_s$	m
$m_l$	17	kg	$T_m$	$0.55T_c$	s
$m_b$	46	kg	$k_c^n$	$1.2 \times 10^5$	N/mm
$m$	70	kg	$\lambda_c^n$	20	N·s/mm <sup>2</sup>
			$\lambda_g$	0.7	
			$\mu_g$	0.3	N·s/mm

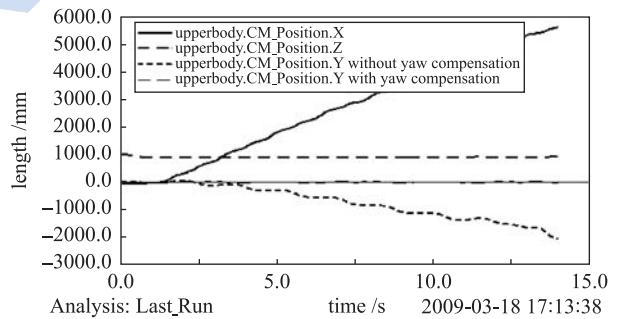


图 11 质心轨迹

Fig.11 COM trajectory

time=3.5336 frame=0460 time=3.7800 frame=0494 time=6.5205 frame=0843



图 12 仿人机器人 3 维动力学仿真截图

Fig.12 Snapshots of humanoid robot in 3D simulation

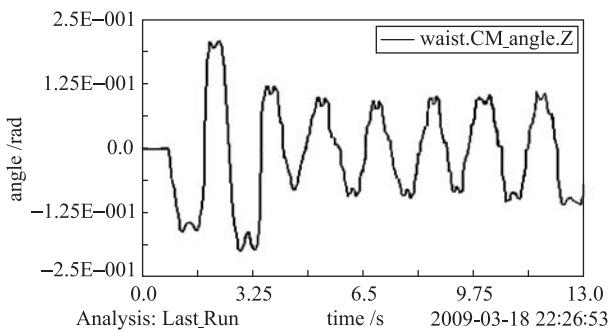


图 13 力矩补偿后的腰关节偏摆角度

Fig.13 Yaw angle of the waist joint after moment compensation

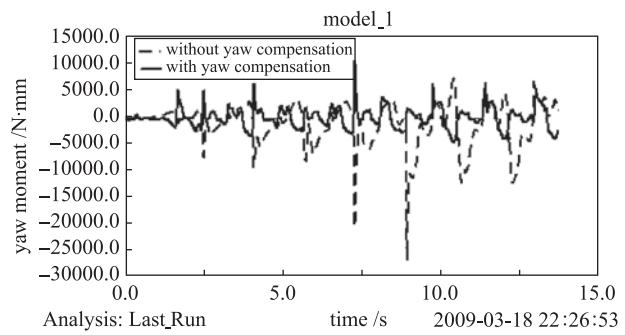


图 14 补偿前后的腰关节偏摆方向力矩

Fig.14 Yaw moments of the waist joint before and after compensation

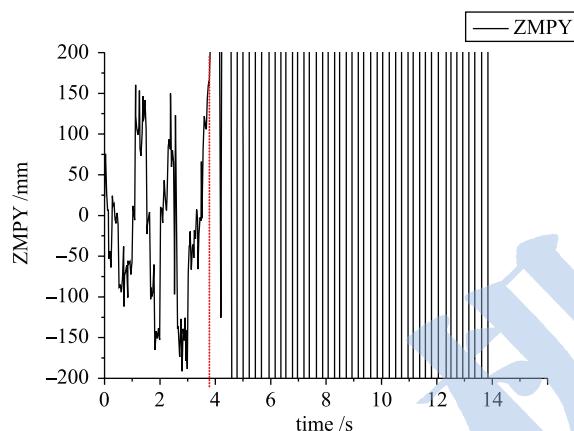


图 15 无腰关节力矩补偿时的 y 向 ZMP (2.88 km/h)

Fig.15 The ZMP trajectory in y direction without compensation for waist joint moment (2.88 km/h)

将仿真参数  $T_c$  设为 0.5 s, 即步行速度提高到 2.88 km/h 后, 采用腰关节力矩补偿前后的 ZMP 位置如图 15 和 16 所示。在没有力矩补偿时机器人在 3.78 s 后 ZMP 值脱离支撑脚稳定区域然后摔倒, 采用腰关节力矩补偿后, ZMP 值在仿真时间段内 (14 s) 一直处于支撑脚稳定区域内, 并有较好的裕值, 但由于速度太快, 行走过程中仍有一些侧偏。

## 5 结论 (Conclusion)

(1) 结合基于预观控制的 ZMP 步态生成模式的优点并引入脚尖脚后跟与地面间的旋转关节, 利用三次样条插值实现了平滑的质心和踝关节轨迹。

(2) 递减质心侧向摆动幅度, 减小质心侧向位移, 加速了仿人机器人在双脚支撑期的过渡。

(3) 通过分析摆动腿运动对腰关节产生的旋转运动, 提出了腰关节偏摆力矩补偿, 提高仿人机器人的稳定性和步行能力。

(4) 通过 3 维动力学仿真验证了方法的可行性, 在将步行速度提高到 2.88 km/h 后仍实现了稳定的

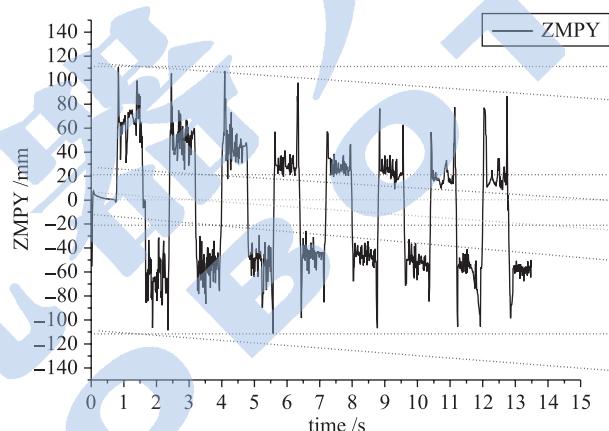


图 16 有腰关节力矩补偿时的 y 向 ZMP (2.88 km/h)

Fig.16 The ZMP trajectory in y direction with compensation for waist joint moment (2.88 km/h)

行走。

## 参考文献 (References)

- [1] Chestnutt J, Lau M, Cheung G, et al. Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 629-634.
- [2] Ogura Y, Aikawa H, Shimomura K, et al. Development of a new humanoid robot WABIAN-2[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 76-81.
- [3] Akachi K, Kaneko K, Kanehira N, et al. Development of humanoid robot HRP-3P[C]//IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 50-55.
- [4] Kim J-Y, Park I-W, Oh J-H. Walking control algorithm of biped humanoid robot on uneven and inclined floor[J]. Journal of Intelligent Robots and System, 2007, 48(4): 457-484.
- [5] Vukobratovic M, Juricic D. Contribution to the synthesis of biped gait[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1969, 16(1): 1-6.
- [6] Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, et al. A realtime pattern generator for biped walking[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 31-37.

- [7] Huang Q, Kajita S, Koyachi N, et al. A high stability, smooth walking pattern for a biped robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 65-71.
- [8] Kajita S, Kaneko F, Kaneko K, et al. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1620-1626.
- [9] Harada K, Kajita S, Kaneko K, et al. An analytical method on real-time gait planning for a humanoid robot[C]//IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 640-655.
- [10] Zhou C. Neuro-fuzzy gait synthesis with reinforcement learning for a biped walking robot[J]. Soft Computing, 2004, 4(4): 238-250.
- [11] Sabourin C, Bruneau O. Robustness of the dynamic walk of a biped robot subjected to disturbing external forces by using CMAC neural networks[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 51(2/3): 81-99.
- [12] Kajita S, Kaneko K, Morisawa M, et al. ZMP-based biped running enhanced by toe springs[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 3963-3969.
- [13] Kawayoke K, Kawamura A. The fast walking of biped robot with ROCOS (robot control simulator)[C]//Annual Conference of Robotics Society of Japan. Japan: 2000: 715-716.
- [14] Hanamiya D, Kawamura A. 3D fast walking simulation of biped robot by yaw axis moment compensation[C]//IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 403-407.
- [15] Kajita S, Hirukawa H, Yokoi K, et al. Humanoid robot[M]. Japan: Ohm-sha, Ltd., 2005.
- [16] Hirabayashi T, Ugurlu B, Kawamura A, et al. Yaw moment compensation of biped fast walking using 3D inverted pendulum[C]//International Workshop on Advanced Motion Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 296-300.

### 作者简介:

蔚 伟 (1981-), 男, 博士生. 研究领域: 仿人机器人控制.

包 钢 (1960-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 新型气动元件及气动伺服系统.

王祖温 (1955-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 气动元件, 气压传动与控制系统.