论 文

人体步行规律与仿人机器人步态规划

李敬^①, 黄强^{①②③*}, 余张国^{①②③}, 王化平^①, 张思^①, 马淦^①, 许威^①

① 北京理工大学机电学院智能机器人研究所, 北京 100081

② 北京理工大学仿生机器人与系统教育部重点实验室, 北京 100081

③ 北京理工大学复杂系统智能控制与决策重点实验室, 北京 100081

* 通信作者. E-mail: qhuang@bit.edu.cn

收稿日期: 2012-05-08; 接受日期: 2012-08-13

国家自然科学基金 (批准号: 60925014)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2008AA042601) 和高等学校学科创新引智计划 (批准号: B08043) 资助项目

摘要 从仿生学角度分析了人体的步行运动规律, 提出了一种基于人体运动规律的仿人机器人步态参数设定方法. 首先对人体步行运动数据进行捕捉并分析, 得出人体各步态参数间的函数关系, 以人体步行相似性作为评价指标, 提出仿人机器人步态参数的设定方法. 其次, 通过分析人体在步行过程中的补偿支撑脚偏航力矩的基本原理, 提出了基于双臂及腰关节协调运动的仿人机器人偏航力矩补偿算法, 以提高仿人行走的稳定性. 最后通过仿真及实验验证了所提出的步态规划方法的正确性及有效性.

关键词 双足移动 运动控制 移动机器人 机器人学 动力学分析

1 引言

仿人机器人作为多自由度的复杂多刚体系统, 对人类环境具有更好的适应性, 更易与人共处^[1]. 近年来, 各国学者在实现仿人机器人与人类交互, 提升其在复杂环境下的作业能力等方面取得了突破性的成果^[2,3]. 仿人机器人的运动规划一直是仿人机器人研究的重要方向^[4,5]. 为了使机器人能够像人一样稳定、灵活、优美地协调运动, 在保证其运动稳定性的同时提高其自主能力与机动性、节省能源、增强动作美感与协调性, 研究者们提出了多种步态规划方法^[6~8].

Takanishi 等^[9~13]提出的基于 ZMP 的步态规划方法预先设定理想的 ZMP 轨迹, 以此确定身体各关节运动, 是目前仿人机器人步态规划中的常用方法. 但是, 从理想 ZMP 轨迹出发不能唯一确定各关节的运动, 存在优化问题. 为了实现理想 ZMP 轨迹, 可能造成上体运动变化加剧及能量消耗的相应增加, 使步态规划过程中对上体运动稳定性和平滑性的要求变得更为严格. 为此, Yamaguchi 等^[14,15]采用快速 Fourier 变换、Nagasaka 等^[16]采用最优梯度法以达到对关节求解过程的优化. Huang 等^[17,18]提出了根据地面限制条件设定足部轨迹, 根据 ZMP 轨迹稳定裕度最大的原则确定最优腰部轨迹的方法, 这是一种不需预先设定 ZMP 轨迹的方法. 根据该方法为双足机器人设计了具有高度稳定性、平滑的步态. 然而, 上述运动规划方法仅针对部分步态参数进行了人为设定, 并不能像人类步行一样自然协调.

引用格式: 李敬, 黄强, 余张国, 等. 人体步行规律与仿人机器人步态规划. 中国科学: 信息科学, 2012, 42: 1067–1080, doi: 10.1360/112012-342

图 1 人体步行数据采集系统

Figure 1 Collecting system of human walking data. (a) Optical motion capture system; (b) foot yaw torque measurement system

另一方面, 基于 ZMP 准则的步态规划前提是假定足底与地面间不存在相对滑动. 然而, 在快速步行过程中, 由于摆动腿的快速运动造成支撑脚足底偏航力矩的急剧增大, 容易引起支撑脚的滑动而降低机器人稳定性. 因此, 许多研究者设计了不同的足部机构以增大机器人与地面间的摩擦系数. 为了能够有效补偿仿人机器人快速行走过程中的偏航力矩, 研究者对基于全身协调的运动规划展开了研究. Nima 等^[19,20]提出了使用手臂摆动补偿由于下肢摆动所造成的偏航力矩的方法. 研究者在此基础上提出了重力作用下的自由手臂摆动轨迹规划方法^[21,22]. 然而, 仿人机器人在步行过程中还未能实现像人类一样通过自然协调的全身运动来有效防止滑动.

人体步行是长期自然进化的结果, 在稳定性、适应性、协调性、能量效率等方面具有优良的特性. 因此, 本文的目标是: 从仿生学的角度出发, 研究人体步行运动, 寻找人体步行规律, 提出一种基于人体步行规律的仿人机器人步态规划方法. 该方法通过寻找人体步行参数之间的函数关系, 以人体步行相似性作为评价指标, 合理设定仿人机器人步态参数; 通过分析人体在步行过程中补偿支撑脚偏航力矩的基本原理, 优化仿人机器人上半身的运动轨迹, 降低仿人机器人行走过程中的偏航力矩. 该方法有效避开了物理量寻优带来的复杂计算及难以兼顾所有评价指标的缺陷.

2 人体步行协调运动分析

2.1 人体步行数据采集方案

采用美国 Motion Analysis 公司基于光学跟踪的运动捕捉系统对人体运动进行捕捉, 通过二维跟踪实现三维定位, 使用方便, 采样率高. 该系统由主控计算机、12 台红外照相机及集线器构成 (图 1(a)).

足部偏航力矩测量系统用于测量人体步行过程中足底与地面产生的实际偏航力矩. 如图 1(b) 所示, 六维力/力矩传感器被固定于上下底板之间, 采集数据由数据线传递至传感器卡进行处理.

为了对人体步行运动进行分析得出规律性结论, 分别对不同身高、性别、年龄的 3 名志愿者进行了实验, 志愿者身高为 160 ~ 178 cm, 体重为 55 ~ 75 kg, 步长为 35 ~ 75 cm, 步行周期为 0.5 ~ 1.0 s. 实验中, 对不同步长, 不同步行周期的步行运动进行了捕捉, 并对步行过程中的足底偏航力矩进行了采集. 运动捕捉过程中, 在志愿者重要的关节和肢体末端贴上标志点, 共计 38 个. 捕捉系统以每秒 100 帧的速率记录下标识点的三维位置, 精度可达到 0.2 mm.

图 2 速度与步行参数二维关系图

Figure 2 2D relationship between walking speed and walking parameters

实验在两种不同的测试条件下进行, 方案如下:

1) 3 名志愿者在不配备偏航力矩测量装置的情况下步行. 步行速度分别由 2 km/h 逐渐增至 4 km/h, 步行过程中身体自然摆动, 以采集不同步长及周期下的人体步行参数.

2) 3 名志愿者在配备足部偏航力矩测量装置的情况下步行. 首先, 志愿者在身体自然摆动的情况下, 步行速度由 2 km/h 逐渐增至 4 km/h, 以采集不同步行速度下的偏航力矩. 然后, 志愿者以不同的身体摆动方式, 保持 2 km/h 速度步行. 身体摆动方式分别为: 手臂及腰关节均保持静止, 手臂自然摆动而腰关节保持静止以及手臂保持静止而腰关节自然摆动. 以此, 采集身体在不同摆动状态下足底的偏航力矩.

2.2 人体步行运动规律

人体运动参数包括时间参数和空间参数, 其中时间参数主要包括: 步态周期、支撑时相、摆动时相等. 空间参数分为: 腰部运动轨迹参数与足部运动轨迹参数. 通过对人体步行过程中的数据采集及分析, 得到如下规律 (见图 2).

1) 步行过程中, 步长相同, 步行周期越长, 双脚支撑期占全周期的比例越大; 步行周期相同, 步长越长, 双腿负重期占全周期的比例越大.

2) 摆动腿足部轨迹: 行走时摆动腿抬脚高度, 即跨高, 与步长显著相关, 与步行周期无明显关系, 步长越长, 跨高越高; 步长相同时, 步行周期短, 离地与落地时摆动脚与地面倾角大; 步行周期相同时, 步长短, 离地与落地时摆动脚与地面倾角小.

3) 腰部前向运动位移: 步长相同时, 步行周期短, 双脚支撑期腰部前向运动位移占整个步态周期腰部前向运动位移的比例小. 步行周期相同时, 步长短, 双脚支撑期腰部前向运动位移占整个步态周期腰部前向运动位移的比例大.

4) 腰部横向运动位移: 步长相同时, 步行周期短, 腰部横向运动位移量小, 双脚支撑期腰部横向运动位移占整个横向位移比例小. 步行周期相同时, 步长短, 腰部横向运动位移量大, 双脚支撑期腰部横

图 3 偏航力矩与上体运动的关系

Figure 3 The relationship between yaw torques and upbody motion. (a) The relationship between yaw torque and arms motion; (b) the relationship between yaw torque and waist rotation

向运动位移占整个横向位移比例大。

5) 腰部竖直方向运动位移: 腰部竖直方向运动位移与步长显著相关, 步长越长, 腰部竖直方向运动位移幅度越大, 与步行周期无明显关系。

2.3 人体步行足底偏航力矩补偿分析

人体在步行过程中, 上体会随步行而自然运动, 整个步行过程平滑自然。手臂与腰部的摆动对补偿单脚支撑期足底偏航力矩, 提高机器人在快速行走过程中的稳定性有很大的作用。在第二阶段的实验中, 首先采集了上半身自然运动情况下, 步行速度由 2 km/h 增至 4 km/h 过程中的支撑脚偏航力矩。其次, 在步行速度为 4 km/h 时, 分别采集了手臂静止及腰部静止情况下的支撑脚偏航力矩。通过对行走参数的分析, 得到如下结论:

1) 摆动腿的运动分为加速阶段和减速阶段两部分, 最大偏航力矩分别出现在单脚支撑期的开始阶段与结束阶段;

2) 在上肢自然节律运动的前提下, 手臂摆幅随步长的增加而增大; 通过对行走过程中手臂静止及手臂自然摆动的实验数据分析, 发现手臂自然摆动提供了 40% ~ 60% 的偏航力矩补偿 (图 3(a));

3) 在上肢自然节律运动的前提下, 腰关节随人体步行过程而周期性来回摆动, 如图 3(b) 所示, 腰关节的运动轨迹为类正弦曲线的周期性运动; 通过对行走过程中腰部静止及腰部自然旋转的实验数据分析, 发现腰部自然旋转能够提供 20% ~ 30% 的偏航力矩补偿。

3 仿人机器人全身步态规划

通过对获取的人体步行运动数据的分析总结, 获得了各关键参数随步态变化的规律。将步态参数按照其对稳定性的影响程度, 分为非稳定参数和稳定参数。其中, 非稳定参数主要影响规划步态的协调、美观、运动速度、关节运动范围、能量消耗、地面冲击力等方面, 对步态的稳定性没有明显影响, 或不造成直接影响。它们与步行速度的关系主要为: 双脚支撑期时间长度与步行速度成反比; 摆动腿跨高与步行速度成正比; 摆动脚离地、着地倾角与步行速度成正比; 腰部纵向位移量与步行速度成正比。稳定参数对步态稳定性的影响直接而明显, 它们与步行速度的关系主要为: 腰部横向位移量与步行

速度成反比; 双脚支撑期腰部前向位移量与步行速度成反比; 单脚支撑期足部偏航力矩与步行速度成正比。

为使这些规律便于应用到仿人机器人步态规划中, 需要将这些规律通过各步态参数之间的函数关系表达出来。因此, 将步态参数的速度特性作为研究重点, 对非稳定参数进行三次样条插值, 以获得精确的函数关系。考虑到速度由步长和步态周期同时决定, 所有函数关系应以二维三次样条插值的形式给出。以此作为仿人机器人步态规划中参数设定的仿生基础与理论依据, 结合 ZMP 稳定性判据及全身协调运动的偏航力矩补偿即可规划出稳定、协调、连续、平滑的仿人行走步态。

在本文中, 我们首先规定仿人机器人前进方向为 y 方向, 左右方向为 x 方向, z 为竖直向上的方向。我们以 y, z 组成的平面内即机器人前进方向上的运动为例进行分析, 左右平面内的运动与之相似。 $y_a(t), z_a(t)$ 分别是 t 时刻踝关节在 y, z 方向上的坐标, $\theta_a(t)$ 为脚的角度, $y_h(t), z_h(t)$ 分别是 t 时刻腰关节在 y, z 方向上的坐标, $\theta_h(t)$ 为腰的角度。 $\theta_s(t)$ 表示的是肩关节俯仰方向上的角度位移。假设行走一步的周期为 T_c , 第 i 步的时间从 iT_c 到 $(i+1)T_c$, 其中, $i=1, 2, \dots, K$, K 是步数。各步态参数与步长 D_s , 步态周期 T_c 的函数关系用 f 表示。

3.1 双足非稳定参数设定

时间参数根据所需步行速度, 以人体步行运动规律为理论依据进行设定。双脚支撑期 T_d 约占全周期 T_c 的 20% ~ 45%, 且与步行速度成反比。

足部参数的设定需要综合考虑地面约束条件及步态的协调自然、节省能耗、控制关节速度及加速度、减少地面冲击力等因素。通过对人体运动规律分析, 可以设定摆动脚离地及着地角度, 以增加抬脚时的平滑度, 减小着地时的冲击力。由于脚底在离地及着地时刻与地面接触, 其约束条件由 (1) 式给出。其中, $q_s(i)$ 和 $q_\varepsilon(i)$ 为支撑脚面的倾角。离地时摆动脚与地面倾角 q_b 约为 0.20 ~ 0.30 rad, 落地时摆动脚与地面倾角 q_f 约为 0.25 ~ 0.40 rad。 T_d, q_b 和 q_f 参数值的具体设定, 可以通过其与步长 D_s 、步态周期 T_c 的函数关系, 采用二维三次样条插值分别得到, 如式 (2) ~ (4)。

$$\theta_a(t) = \begin{cases} q_s(i), & t = iT_c, \\ q_b, & t = iT_c + T_d, \\ q_f, & t = iT_c + T_c, \\ q_\varepsilon(i), & t = (i+1)T_c + T_d. \end{cases} \quad (1)$$

$$T_d = f_{T_d}(D_s, T_c), \quad (2)$$

$$q_b = f_{q_b}(D_s, T_c), \quad (3)$$

$$q_f = f_{q_f}(D_s, T_c). \quad (4)$$

同理, 根据运动约束条件, 可以给出足部位置约束条件及腰部上下移动约束条件。综合考虑仿人机器人行走过程中的地面约束与能量损耗, 通过其与步长 D_s , 步态周期 T_c 的函数关系可以得到对应的二维三次样条插值函数。

3.2 腰部稳定参数设定

腰部稳态参数的设定主要结合人体步行规律与 ZMP 稳定性准则。主要包括以下两个方面。1) 双脚支撑时相: 腰部前进方向位移 $y_{sd} + D_s - y_{\varepsilon d}$ (设 y_{sd} 和 $y_{\varepsilon d}$ 分别代表单脚支撑开始和结束时, 髋关节

到支撑脚的踝关节之间沿 y 轴的距离), 同理, 横向位移为 $x_{sd} - x_{\varepsilon d}$; 2) 整个步态周期: 腰部前进方向、横向位移的函数关系等. 与足部的运动规划方法不同, 腰部的运动需要在满足稳定性的前提下, 再结合人体步行运动规律来进行规划. 首先生成一系列平滑的 $y_h(t)$, 然后选择具有最大稳定裕度的 $y_h(t)$ 作为最后轨迹.

为了在运动过程中得到周期的平滑躯干轨迹, 腰部运动轨迹需满足 (5) 式的约束条件. 设 y_{sd} 和 $y_{\varepsilon d}$ 分别代表单脚支撑开始和结束时, 髋关节到支撑脚的踝关节之间沿 y 轴的距离, 则根据 (5) 式及腰部运动轨迹相对于 y_{sd} 和 $y_{\varepsilon d}$ 的参数方程, 通过三次样条插值即可获得以 y_{sd} 和 $y_{\varepsilon d}$ 为参变量的轨迹方程. 结合人体步行运动规律, y_{sd} 和 $y_{\varepsilon d}$ 在 (6) 式给定的范围内取值, 使用二维三次样条插值方法即可得到如 (7) 和 (8) 式相对于步长、周期的函数关系, 从而选取具有最大稳定裕度的腰部运动轨迹.

$$\begin{cases} \dot{y}_h(iT_c) = \dot{y}_h((i+1)T_c), \\ \ddot{y}_h(iT_c) = \ddot{y}_h((i+1)T_c). \end{cases} \quad (5)$$

$$y_{\varepsilon d \min} < y_{\varepsilon d} < y_{\varepsilon d \max}, \quad y_{sd \min} < y_{sd} < y_{sd \max}, \quad (6)$$

$$y_{\varepsilon d \min} = f_{y_{\varepsilon d \min}}(D_s, T_c), \quad y_{\varepsilon d \max} = f_{y_{\varepsilon d \max}}(D_s, T_c), \quad (7)$$

$$y_{sd \min} = f_{y_{sd \min}}(D_s, T_c), \quad y_{sd \max} = f_{y_{sd \max}}(D_s, T_c). \quad (8)$$

腰部在左右方向即 x 方向的运动轨迹 $x_h(t)$ 及稳态参数 x_{sd} , $x_{\varepsilon d}$ 可以按照同样的方法得到, 在进行稳定性计算的时候, 应该以 x 方向的稳定裕度最大为选择轨迹的标准之一.

3.3 上肢及腰关节补偿轨迹设计

为了能够减小仿人机器人在快速行走过程中由摆动腿产生的偏航力矩, 提高稳定性与全身协调性, 在对腰部参数设定的基础上还应该基于上肢自然节律运动对手臂摆动轨迹及腰关节旋转轨迹参数进行设定.

通过对人体足底偏航力矩机理分析, 最大偏航力矩分别出现在单脚支撑期的开始阶段与结束阶段. 为此, 为手臂肩关节设计了加速度补偿曲线, 其方向与偏航力矩始终相反. 假设机器人在单脚支撑期受到加加速度的作用, 则手臂肩关节加速度的表达式可以由 (9) 式给出. 其中, j 为关节驱动能力及机械结构决定的最大加加速度. $a_{\max}$ 为机器人运动过程中肩关节所允许的最大加速度. k 为与 $a_{\max}$ 相关的相关系数. T_1 为加速度变化的时间点, 可以通过 $T_1 = a_{\max}/j$ 获得, T_f 为整个补偿轨迹的规划时间. 加速度曲线如图 4 所示, 通过对 (9) 式的积分即可获得关节速度及位移曲线. 由此, 可以给出通过设计手臂补偿轨迹所能提供的最大偏航力矩如 (10) 式. 其中, m_{arm} 为手臂质量, L_{arm} 为臂长, W_{shoulder} 为肩宽.

$$\ddot{\theta}_s(t) = \begin{cases} kjt, & 0 \leq t \leq T_1, \\ ka_{\max}, & T_1 < t \leq \frac{T_f}{2} - T_1, \\ -kj\left(t - \frac{T_f}{2}\right), & \frac{T_f}{2} - T_1 < t \leq \frac{T_f}{2} + T_1, \\ -ka_{\max}, & \frac{T_f}{2} + T_1 < t \leq T_f - T_1, \\ kj(t - T_f), & T_f - T_1 < t \leq T_f, \end{cases} \quad (9)$$

$$M_{\text{arm.max}} \approx \frac{1}{2} km_{\text{arm}} a_{\max} L_{\text{arm}} W_{\text{shoulder}}. \quad (10)$$

图 4 肩关节加速度曲线

Figure 4 Curve of the angle acceleration

通过对人体步行规律的分析,发现手臂摆幅与步长显著相关,因此可以设定如 (11) 式的肩关节及肘关节角表达式.

$$s(T) = A_{\text{shoulder}} = A_{\text{elbow}} = pD_{\text{step}}, \quad T_{\text{shoulder}} = \alpha \cdot T_{\text{step}}, \quad T_{\text{elbow}} = T_{\text{step}}, \quad (11)$$

$$k = \min \left(k_{\text{elbow}}, k_{\text{shoulder}}, \frac{4a_{\text{max}}}{T_{\text{step}}} \right), \quad (12)$$

其中, A_{shoulder} 与 A_{elbow} 为肩部及肘部关节角, D_{step} 为步长, p 为与腿长相关的参数, T_{shoulder} 与 T_{elbow} 分别为肩部与肘部的摆动周期, T_{step} 为步长周期, α 为单脚支撑期所占的周期比例. 通过 (11) 式即可获得系数 k 的最终表达式 (12), 其中 a_{max} 为手臂机构限制下的最大关节加速度. 由此, 获得了基于人体运动规律的手臂偏航力矩补偿轨迹.

通过对人体步行规律分析,发现腰关节的旋转运动对足底偏航力矩也有明显的补偿作用,且其运动轨迹为类正弦轨迹. 所以,可以设定如 (13) 式的腰关节运动补偿轨迹.

$$\theta_h(t) = k_h v \sin\left(\frac{\pi t}{T_{\text{step}}}\right), \quad k_h v \leq \theta_{h\text{max}}, \quad (13)$$

其中, v 为机器人步行速度, k_h 为腰关节系数, T_{step} 为步行周期, $\theta_{h\text{max}}$ 为腰关节最大运动角度, 通过对关节角的二次微分即可获得对应的腰关节加速度 $\ddot{\theta}_h(t)$. 由此, 给出了通过设计腰关节补偿轨迹所能提供的最大偏航力矩如 (14) 式.

$$M_{\text{waist_max}} \approx I_{\text{body}} \cdot \left| \ddot{\theta}_h(t) \right| = I_{\text{body}} k_h v \left(\frac{\pi}{T_{\text{step}}} \right)^2. \quad (14)$$

通过对手臂及腰关节补偿轨迹的设计, 获得了基于全身协调的运动轨迹. 给出了如 (15) 式所示的仿人机器人摩擦力约束条件. 其中, $M_{\text{arm_max}}$ 和 $M_{\text{waist_max}}$ 代表手臂及腰关节所能提供的最大补偿力矩, $T_{f\text{max}}$ 为足底与地面间的最大静摩擦力.

$$M_{\text{arm_max}} + M_{\text{waist_max}} + T_{f\text{max}} \geq M_{\text{foot_max}}. \quad (15)$$

通过对步行参数及上身补偿轨迹的设计, 获得了基于全身协调的运动规划流程: 首先根据环境需要设定机器人步长、步行周期等参数, 通过二维三次样条插值计算确定出其他非稳定参数的合理取值; 对于稳定参数, 一方面根据人体步行运动规律确定腰部横向位移与前向位移的合理取值范围并根据这些参数采用插值法得到机器人腰部和足部的运动轨迹, 另一方面依据人体上身自然节律运动规律, 生

图 5 仿人机器人全身协调运动规划流程

Figure 5 Flow of coordination motion planning

成腰关节和手臂补偿运动轨迹; 然后, 通过逆运动学求出各时刻机器人各关节的运动; 再由机器人各关节的运动求得机器人各组成部分的运动速度、加速度等, 从而根据 ZMP 公式求得 ZMP 轨迹, 通过调节稳定性参数的合理取值, 筛选出稳定裕度最大的参数值作为最终值, 同时生成对应的全身协调自然步态, 具体的全身协调运动规划流程如图 5 所示。

4 仿真与实验

4.1 动力学仿真

为了进行仿真验证, 运用 LMS Virtual Lab 动力学仿真软件, 构建仿人机器人的三维仿真模型. 仿真模型包括头、躯干和四肢等部分, 全身上下共包括 32 个关节自由度, 质量为 65 kg, 其转动惯量为: 躯干 $I_{xx} = 0.219450400$, $I_{yy} = 0.219282400$, $I_{zz} = 0.078743300$; 大臂 $I_{xx} = 0.004864637$, $I_{yy} = 0.001685969$, $I_{zz} = 0.005318018$; 小臂 $I_{xx} = 0.002401345$, $I_{yy} = 0.001043471$, $I_{zz} = 0.002732030$; 大腿 $I_{xx} = 0.040366276$, $I_{yy} = 0.045689796$, $I_{zz} = 0.008445070$; 小腿 $I_{xx} = 0.049918431$, $I_{yy} = 0.053723529$, $I_{zz} = 0.007451425$.

仿真过程中使用了提出的基于人体步行规律的运动规划方法, 生成了全身协调步态. 图 6 为仿人机器人仿真模型在 2 km/h 步行速度下, 步长为 45 cm 时的 x 和 y 方向 ZMP 轨迹. 其中, ZMP 轨迹均以机器人髋关节连线中点作为原点, 以机器人左右方向为 x 方向, 以前进方向为 y 方向. 从图中

图 6 ZMP 稳定性分析

Figure 6 ZMP trajectory analysis. (a) ZMP in x direction; (b) ZMP in y direction

图 7 手臂及腰关节补偿运动仿真

Figure 7 Simulation of the walking process with LMS. (a) Simulation of the walking process with still upper body; (b) simulation of the walking process with upper body compensation

可以看到, 通过该方法获得的机器人 ZMP 轨迹几乎总是位于 ZMP 稳定区域的中间位置, 说明步态的稳定裕度很高.

另一方面, 对上身静止及上身按补偿轨迹运动的机器人步行过程进行了仿真, 仿真情况如图 7 所示, 步行速度仍为 2 km/h. 仿真结果显示, 虽然在两种情况下机器人都能保持稳定, 但在上身静止的情况下机器人在单脚支撑期会出现身体旋转而偏离直线. 步行过程中对单脚支撑期的右足偏航力矩进行了采集, 如图 8 所示, 手臂及腰关节的补偿运动将偏航力矩峰值由 -40 Nm 减弱至 -30 Nm. 所以, 在同样的地面摩擦系数下, 具有上体补偿运动的机器人所需地面提供的摩擦力矩明显降低, 说明手臂与腰关节的运动对偏航力矩有补偿作用, 能够有效提高稳定性.

4.2 仿人机器人步行实验

在仿人机器人 BHR 平台上进行实验验证 (见图 9), BHR 能够完成与人类相似的全身协调自然步

图 8 单脚支撑期足底偏航力矩对比

Figure 8 Comparison of yaw torque. (a) Torque measured when the arms and waist are still; (b) torque measured when the arms and waist track the compensation trajectory

图 9 仿人机器人 BHR 步行实验

Figure 9 Walking experiment on BHR

图 10 机器人 X, Y 方向上 ZMP 的轨迹

Figure 10 The XZMP and YZMP trajectories. (a) ZMP trajectory in x direction; (b) ZMP trajectory in y direction

态, 身高 1.65 m, 体重为 65 kg, 具有 32 个自由度, 采用 CAN 总线分布式控制系统, CPU 为 Intel T9400 2.53 GHz, 4 GB 内存, 操作系统为 RT-Linux, 关节伺服驱动器为 BSA-130.

通过在 BHR 平台上执行基于人体步行规律的全身自然步态, 发现机器人与人体步行运动的姿态、速度分布等十分相似, 而且动作平滑连续. 图 10 为 BHR 在步行速度为 1.5 km/h, 步长为 35 cm 时采集到的实际 ZMP 轨迹. 其中, ZMP 轨迹均以机器人髋关节连线的中点作为原点, 以机器人左右方向为 x 方向, 以前进方向为 y 方向. 可以看出通过全身协调步态规划, ZMP 实际轨迹始终位于 ZMP 稳定区域内, 机器人在行走过程中具有很高的稳定裕度.

图 11(a) 为步行过程中 BHR 右腿膝关节速度与传统步态规划方法下的关节速度之间的比较. 相同步行速度下, 采用基于人体步行规律的步态规划方法与传统方法相比能够有效降低关节速度. 图 11(b)

图 11 膝关节角速度与上身倾角用现有方法和传统方法的对比

Figure 11 The comparison of knee angular velocity and upper body angle using traditional method and present method. (a) The comparison of knee angular velocity; (b) the comparison of upper body inclination angle

图 12 1.5 km/h 足底偏航力矩比较

Figure 12 The comparison of Yaw torque in 1.5 km/h

为步行过程中通过 BHR 姿态传感器采集到的机器人上身倾角对比. 相同步行速度下, 采用现有步态规划方法能够有效降低机器人步行过程中上身的晃动, 提高步行稳定性. 最后, 通过对固定在机器人足底的六维力/力矩传感器数据的采集 (见图 12), 发现基于手臂及腰关节运动补偿的仿人机器人全身运动能够有效补偿足底偏航力矩, 提高机器人步行过程中的稳定性.

通过在仿人机器人 BHR 平台下对基于人体步行规律的步态规划方法进行实验, 发现现有方法以人体步行相似性作为评价指标, 与传统步态规划方法相比有如下优点:

- 1) 提高了仿人机器人运行效率. 步行过程中, 单脚支撑期足底最大偏航力矩减小了 40%; 相同步行速度下, 关节最大速度降低了 50%.
- 2) 提高了仿人机器人步行过程中的稳定性. 步行过程中, ZMP 稳定裕度提高了 30%; 相同步行速度下, 上身最大倾角由 3° 降低为 1° .

5 结论

从仿生学观点出发, 提出了基于人体步行规律的仿人机器人步态规划方法, 取得的主要研究成果为:

1) 构建了光学运动捕捉系统与足部偏航力矩测量系统, 分析了人体步行运动基本规律, 获得了人体步态参数间的函数关系, 以人体步行相似性作为评价指标, 提出仿人机器人步态参数的设定方法。

2) 通过对人体上身协调运动分析, 设计了仿人机器人基于手臂及腰关节运动的补偿轨迹, 对行走过程中支撑足的偏航力矩进行了有效补偿。

3) 在 BHR 实验平台上对基于人体步行规律的全身步态规划方法进行了实验验证。实验结果表明, 该方法能够使仿人机器人步态轨迹曲线更加平滑自然, 在快速行走过程中能够有效避免支撑脚底与地面之间的滑动, 提高了步行稳定性。

参考文献

- 1 Zhang X L, Zheng H J, Chen K, et al. Research on robotic bionics. *Robot*, 2002, 24: 188–192 [张秀丽, 郑浩峻, 陈恳, 等. 机器人仿生学研究综述. *机器人*, 2002, 24: 188–192]
- 2 Tang Q, Xiong R, Chu J. Tip over avoidance control for biped robot. *Robotica*, 2009, 27: 883–889
- 3 Liu L, Wang J S, Chen K, et al. The research on the biped humanoid robot THBIP-I. *Robot*, 2002, 24: 262–267 [刘莉, 汪劲松, 陈恳, 等. THBIP-I 拟人机器人研究进展. *机器人*, 2002, 24: 262–267]
- 4 Xie T, Xu J F, Zhang Y X, et al. History, current state, and prospect of study of humanoids. *Robot*, 2002, 24: 367–374 [谢涛, 徐建峰, 张学学, 等. 仿人机器人的研究历史、现状及展望. *机器人*, 2002, 24: 367–374]
- 5 Ma H X, Zhang P, Zhang L Q. Posture stability and posture control of biped dynamic walking. *Robot*, 1997, 19: 180–186 [马宏绪, 张彭, 张良起. 双足步行机器人动态步行姿态稳定性及姿态控制. *机器人*, 1997, 19: 180–186]
- 6 Liu Z Y, Dai S A, Pei R, et al. The relationship between ZMP and stability on dynamic locomotion of biped robots. *J Harbin Inst Technol*, 1994, 26: 38–41 [刘志远, 戴绍安, 裴润, 等. 零力矩点与两足机器人动态行走稳定性的关系. *哈尔滨工业大学学报*, 1994, 26: 38–41]
- 7 Dou R J, Ma P S, Xie L. Parameterized design and optimization of the gait of the biped robot. *Chin J Mech Eng*, 2002, 38: 36–39 [窦瑞军, 马培荪, 谢玲. 两足机器人步态的参数化设计及优化. *机械工程学报*, 2002, 38: 36–39]
- 8 Yang J, Huang Q, Lv S S, et al. Walking pattern generation for humanoid robot considering upper body motion. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, 2006. 2491–2496
- 9 Takanishi A, Tochizawa M, Karaki H, et al. Dynamic biped walking stabilized with optimal trunk and waist motion. In: *Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Robotics and Systems*, Tsukuba, 1989. 187–192
- 10 Yamaguchi J, Soga E, Inoue S, et al. Development of a biped humanoid robot control method of whole body cooperative dynamic biped walking. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, 1999. 368–374
- 11 Shih C L, Li Y Z, Chung S, et al. Trajectory synthesis and physical admissibility for a biped robot during the single support phase. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, 1999. 1646–1652
- 12 Hirai K, Hirose M, Haikawa Y, et al. The development of honda humanoid robot. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, 1998. 1321–1326
- 13 Dasgupta A, Nakamura Y. Making feasible walking motion of humanoid robots from human motion capture data. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, 1999. 1044–1049
- 14 Yamaguchi J, Inoue S. Development of a bipedal humanoid robot having antagonistic driven joints and three DOF trunk. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Victoria, 1998. 96–101
- 15 Yamaguchi J, Soga E. Development of a bipedal humanoid robot control method of whole body cooperative dynamic biped walking. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, 1999. 908–913

- 16 Nagasaka K, Inba M, Inoue H. Walking pattern generation for a humanoid robot based on optimal gradient method. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Tokyo, 1999. 908–913
- 17 Huang Q, Yokoi K, Kajita S, et al. Planning walking patterns for a biped robot. IEEE Trans Robotd Autom, 2001, 17: 280–289
- 18 Huang Q, Kajita S, Koyachi N, et al. A high stability, smooth walking pattern for a biped robot. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, 1999. 65–71
- 19 Nima S, Ali K, Abbas A, et al. An optimized gait generator based on Fourier series towards fast and robust biped locomotion involving arms swing. In: Proceedings of IEEE International Conference on Automation and Logistics, Shenyang, 2009. 2018–2023
- 20 Elftman H. The function of the arms in walking. Hum Biol, 1939, 11: 529–535
- 21 Ralston H J. Effect of immobilization of various body segment on the energy cost of human locomotion. In: Proceedings of 2nd International Enneagram Association Conference, Dortmund, 1965. 53–60
- 22 Kushida D, Nakamura M, Goto S, et al. Flexible motion of pull-out-work by articulated robot arm based on force free control. In: Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Nagoya, 2000. 1797–1802

Human walking mechanism and gait planning of humanoid robots

LI Jing¹, HUANG Qiang^{1,2,3*}, YU ZhangGuo^{1,2,3}, WANG HuaPing¹, ZHANG Si¹, MA Gan¹
& XU Wei¹

1 *Intelligent Robotics Institute, School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

2 *Key Laboratory of Biomimetic Robots and Systems, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

3 *Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex Systems, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

*E-mail: qhuang@bit.edu.cn

Abstract After years of evolution, human walking can be characterized as energy-efficient, stable, natural and coordinated. The humanoid robots have to possess such characteristics in order to adapt to the complicated environment and serve the humankind. This paper analyzes the human walking mechanism from the biomimetic viewpoint, and proposes a method of designing the gait pattern of humanoid robots based on this mechanism. Firstly, the human motion data were captured with the optical motion capture system and analyzed in order to obtain the relationship of the human gait pattern parameters and the determining method of these parameters was proposed with the evaluation index of walking similarity. Then the humanoid robot torque compensation strategy in the yaw direction based on coordinated motion of the arms and waist was proposed by analyzing the principle how a human being succeeded in canceling the yaw torque while walking. Finally, we tested and improved the method through dynamics simulation. The simulation and the actual experiments on the platform of “BHR” humanoid robot demonstrated that more smooth trajectories can be generated and the slip occurred in fast walking before can be avoided with this method. In the future, we will further our studies on the human walking mechanism and explore the methods for fast walking gait planning based on this mechanism.

Keywords bipied locomotion, motion control, mobile robots, robotics, dynamic analysis

the IEEE Robotics and Automation Society.

LI Jing was born in 1984. He received the B.S. degree in engineering and joined the Key Laboratory of Biomimetic Robots and Systems, Ministry of Education in 2008. Currently, he is a research student at Intelligent Robotics Institute, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology. His research interests include biped locomotion, motion planning. Dr. Li is a student member of

the IEEE Robotics and Automation Society.

HUANG Qiang was born in 1965. He received the Ph.D. degree in mechanical engineering from Waseda University, Tokyo, Japan, in 1996. In 1996, he joined the Mechanical Engineering Laboratory (MEL), Ministry of International Trade and Industry (AIST-MITI), Tsukuba, Japan, as a Research Fellow. He was a Researcher of Core Research for Evolutional Science and Technology (CREST) of the Japan Science and Technology Corporation

(JST) at the University of Tokyo from 1999 to 2000. Currently, he is a Professor at the Department of Mechatronics, Beijing Institute of Technology. His research interests include biped walking robots, humanoid and mobile manipulators. Dr. Huang is a member of the IEEE Robotics and Automation Society.

YU ZhangGuo was born in Anhui, China, in 1975. He received the Ph.D. degree in mechatronics engineering from Beijing Institute of Technology in 2009. Currently, he is an Associate Professor with School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology. His research interests include biped walking robot, human-machine interaction, and automatic control. Dr. Yu is a member of the IEEE Robotics and Automation Society.

WANG HuaPing was born in 1988. He received the B.S. degree in engineering from Beijing Institute of Technology in 2010. Currently, he is a research student at Intelligent Robotics Institute, School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology. His research area is robotic motion planning. Dr. Wang is also a member of Key Laboratory of Biomimetic Robots and Systems, Ministry of Education and a student member of the IEEE Robotics and Automation Society.