

文章编号: 1002-0446(2008)01-0041-06

面向仿人机器人自然步态规划的人体步行实验分析*

夏泽洋, 陈恳, 刘莉, 熊璟

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要: 自然步态规划方法是实现仿人机器人步态柔顺和能量优化的可行方法, 该方法要求对人体步行及其平衡策略进行定量研究. 本文分析自然步态规划方法的原理, 建立了一套快捷有效的人体步态测试系统, 并通过实验建立了人体步行的参数化数据库. 实验结果揭示了人体步行的参数化特征及其平衡策略, 对于仿人机器人的自然步态规划及控制提供了理论指导. 结论特别指出, 仅仅通过规划的方式实现仿人机器人的自然步态是不完备的, 自然步态的实现必须同仿生控制策略相结合. 同时实验结论对于仿人机器人的本体优化设计也提供了参考.

关键词: 仿人机器人; 步态规划; 自然步态; 人体步态测试

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Experimental Analysis on Human Locomotion for Natural Gait Planning of Humanoid Robots

XIA Ze-yang, CHEN Ken, LIU Li, XIONG Jing

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Natural gait planning is a feasible method for energy optimization and gait compliance of humanoid robots. It demands quantitative analysis on the human locomotion and its balance strategy. Consequently the principle of natural gait planning is analyzed. An effectual experimental testing system is proposed and a parametric database of human gaits is constructed via experiments. The experimental result reveals the parametric characteristics of human gaits and its balance strategies which offer theoretical references for natural gait planning and control for humanoid robots. The conclusion specially indicates that the successful natural gait for humanoid robots can not be achieved only by planning, viz., the planning should be combined with the bionic control strategy. In addition, the experimental results are good references for design optimization of humanoid robot prototypes.

Keywords: humanoid robot; gait planning; natural gait; human gait testing

1 引言 (Introduction)

从 1973 年世界第一台双足步行机器人 Wabot-1 诞生到近几年最为杰出的 Asimo 和 QRIO 系列的发布, 仿人机器人已经经历了三十多年的快速发展^[1]. 在运动模式方面, 多个仿人机器人样机实现了智能、实时、灵活的行走, 如: 2000 年 Asimod^[2] 通过运动预测控制实现了行走过程中平滑自然的改变行走方向和速度; 2004 年 QRIO^[3] 在世界上首次实现了搭载控制和电源系统的跑动, 达到了跳跃时双脚同时离地 40 ms 奔跑时同时离地 20 ms 的状态, 并同时实现了多模式的此类运动. 这些成就汇聚了机器人学的最新

及广泛的科技成果. 然而, 目前仿人机器人所实现的这些运动模式在步行速度、步态柔顺性以及能量消耗方面仍然没法和人类自然步态相比. 目前, Asimo 的以上指标在数值上同人类自然步态相比存在量级的差别^[4]. 康奈尔大学曾致力于使他们的机器人模仿人类的运动和行走, 达到减少能量消耗的目的. 由于这种行走模式只需要能量往前推动机器人, 同时尽量少地控制机器人的关节, 使其自由摆动, 所以该机器人的能量消耗为 Asimo 的 1/10^[4], 但是从步态综合性能来看, 它和人类自然步态还有较大的差别.

因此有效地借鉴人类自然步态模式一直被认为

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2006AA04Z253); 国家自然科学基金资助项目 (50575119)

收稿日期: 2007-03-21

是实现仿人机器人步态柔顺和能量优化的突破口之一。由于在自然步态规划中需要定量地分析人类自然步态的运动学和力学参数,所以需要建立一个基于图像分析和力检测的人类自然步态分析系统。只有对人体步态及平衡策略进行深入研究,总结人体丰富的动力学特性和平衡策略,了解其真正机理,才能为仿人机器人的自然步态规划提供良好的理论指导。

2 自然步态规划方法 (Natural gait planning method)

仿人机器人的自然步态规划方法首先通过检测记录人体的步行图像,通过图像分析得到人体关键关节的运动轨迹(包括角度、角速度、角加速度)以及身体加速度和姿态等参数。然后通过多参数的初等函数来描述以上步态,通常描述这些步态的参数有步幅、步行周期、抬腿高度等。得到参数化的步态描述函数之后,在机器人的运动学及动力学模型的约束下使用基于步态规划评价标准的优化准则对这些步态参数进行优化,得到有效可控的自然步态。

自然步态规划方法的研究是从 Honda 开始的,被用于指导其早期 P 系列仿人机器人的步态规划^[5]。Dasgupta 等^[6]使用 Vicot370 测试人体运动信息,并据此应用 ZMP (Zero Moment Point) 稳定性理论^[7]规划出了一个基于完全非线性的逆动力学控制模型的自然步态,但实验效果不令人满意。Kwon 等^[8]利用隐马尔可夫模型 (Hidden Markov Model) 将人体步行参数应用在机器人步态规划上,实现了近似自然步态的行走。完全自然步态的实现仍然有很多问题需要解决。虽然人体和仿人机器人本体在物理模型上都是欠驱动系统,即地面和脚底之间没有驱动力,但是他们的动态性能和控制模型存在着根本差异。因此,自然步态的成功实验应用,有待于对于人体自然步态的动态性能和控制机理的进一步研究。

3 人体步态测试系统 (Testing system on human gait)

目前人体步态测试大部分针对于生物医学、运动力学等领域的研究^[9~12],常用的测试系统有角度测量系统、磁传感器光学测量系统、基于标记的光学测量系统和新出现的肌电测量系统等。但是以上系统应用于仿人机器人自然步态规划这种人体步态测试时,存在实验规模庞大、系统标定过程复杂、实验

分析周期长等问题。因此,我们研究开发了一套快捷有效的面向自然步态规划这一专用目的的人体步态测试系统。

3.1 测试系统原理与组成

本系统由运动图像分析子系统和三维测力子系统组成。运动图像分析子系统可获得人体步态的各个运动学参数、时间参数以及步幅等;三维测力子系统测量地面反力数据。系统组成及实验现场如图 1、2 所示。

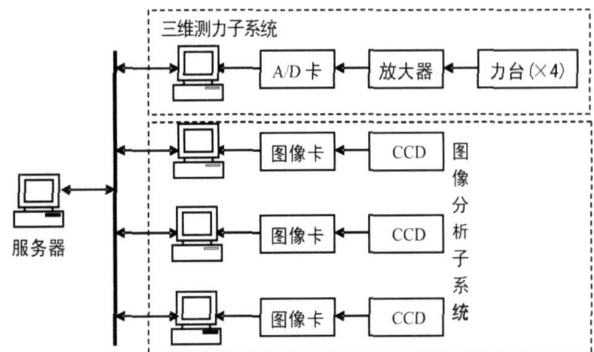


图 1 系统组成示意图

Fig 1 System structure

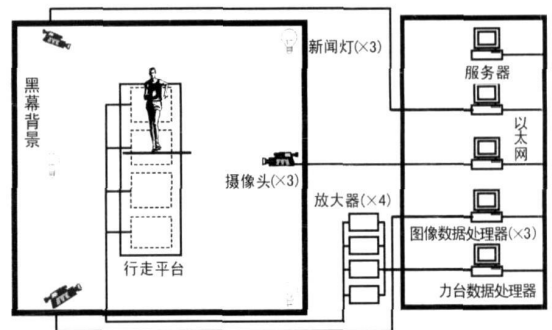


图 2 实验现场示意图

Fig 2 Sketch of experiment scene

3.2 实验方案设计

实验的受试者为无神经、肌肉、骨骼病史并有正常质量、体形比的健康青年。实验中,受试者穿黑色紧身衣和黑色皮鞋。5 个白色圆形标志点分别粘贴于受试者右侧面的肩关节、髋关节、膝关节、踝关节、第五个趾骨头部。实验中力台、步道及背景中其他设备覆盖着黑色布幔,以便于图像分析系统对于标志点进行识别。步行实验前,受试者双手背在身后,双足平行地自然直立于步道前。实验开始时,受试者根据实验指令,跨出右脚,迈步前进,行至步道末端后站立。实验过程中受试者保持手臂姿态不变,如图 3 所

示.

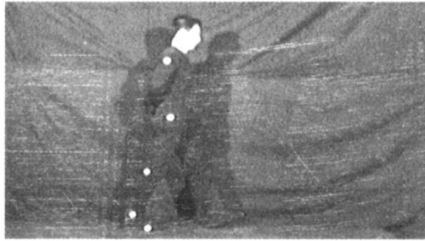


图 3 步行实验现场图
Fig 3 A scene in walking experiment

3.3 系统数据处理

运动图像数据分析的目的是通过数字图像处理, 实现标志点的自动识别与跟踪, 从而获取关节坐标以及相关的运动学数据. 针对本论文研究的实际需要, 仅需使用受试者行进平面的图像. 运动图像数据分析主要过程有: (1) 图像预处理: 通过消除图像中的噪声和畸变, 使各标志点成为一定面积的连续封闭区域. (2) 标志点识别与跟踪: 对各标志点封闭区域进行识别搜索, 将其分别映射成各个关节点. (3) 运动学数据后处理: 在获得关节点映射序列后, 由标定板获得摄像平面和运动平面的尺度比例系数, 根据该系数计算出实际的关节相对位置^[13]. 然后进行差分获得关节角速度及角加速度, 同时根据杆

件模型获得质心位置等步态规划所需要的参数.

三维测力子系统数据处理的主要内容有: (1) 误差融合: 通过软件补偿及四阶 Butterworth 零时滞低通滤波器滤波来减少系统误差并消除高频噪音. (2) 解算三维反力及垂直方向力矩, 分析反力特征. (3) 计算 CoP (Center of Pressure, 压力中心)^[14] 位置.

4 实验结果及分析 (Experimental results and analysis)

考虑到与仿人机器人样机物理参数的可类比性, 选择的 10 名测试对象年龄为 $25.2 (\pm 3.5)$ 岁, 身高 $170.3 (\pm 1.2)$ cm, 体重 $60.2 (\pm 2.6)$ kg 符合成年健康男性的身体指标^[15]. 测试以正交实验方案进行, 不同测试对象在不同负重及不同步速下行走. 一共获取了 90 组步行数据, 建立了基于以上各因子各水平的参数化数据库. 测试中, 以对于自然步态规划最具有参考价值的零负重状态正常步速步行为例进行分析, 并与集中负重状态下的步行做对比分析.

图 4~6 为测试对象 1 在零负重状态下以正常步速步行在矢状面的运动截图、运动棍图和关节轨迹图; 图 7 为该测试对象零负重和 5 kg 负重状态下在矢状面的关节运动学参数曲线对比图; 图 8 为零负重正常步速步行过程各力台地面反力及其叠加曲线; 图 9 为零负重正常步速步行过程的 CoP 曲线.

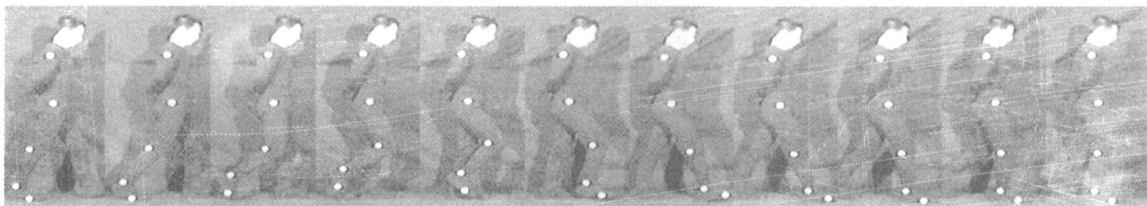


图 4 零负重情况下正常步速步行过程的运动截图
Fig 4 Snapshots of walking with zero load and normal velocity

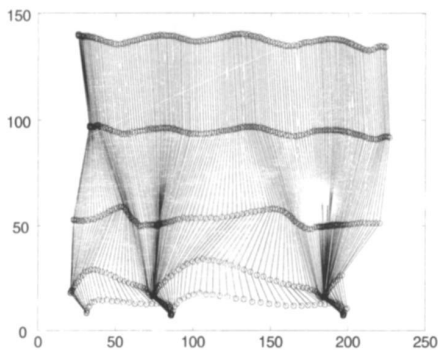


图 5 零负重情况下正常步速步行过程的运动棍图
Fig 5 Stick figure of walking with zero load and normal velocity

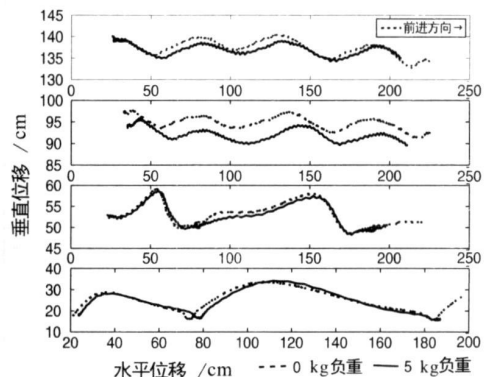


图 6 零负重 / 5 kg 负重情况下正常步速步行过程的关节轨迹图
Fig 6 Joint trajectories of walking with zero or 5 kg load and normal velocity

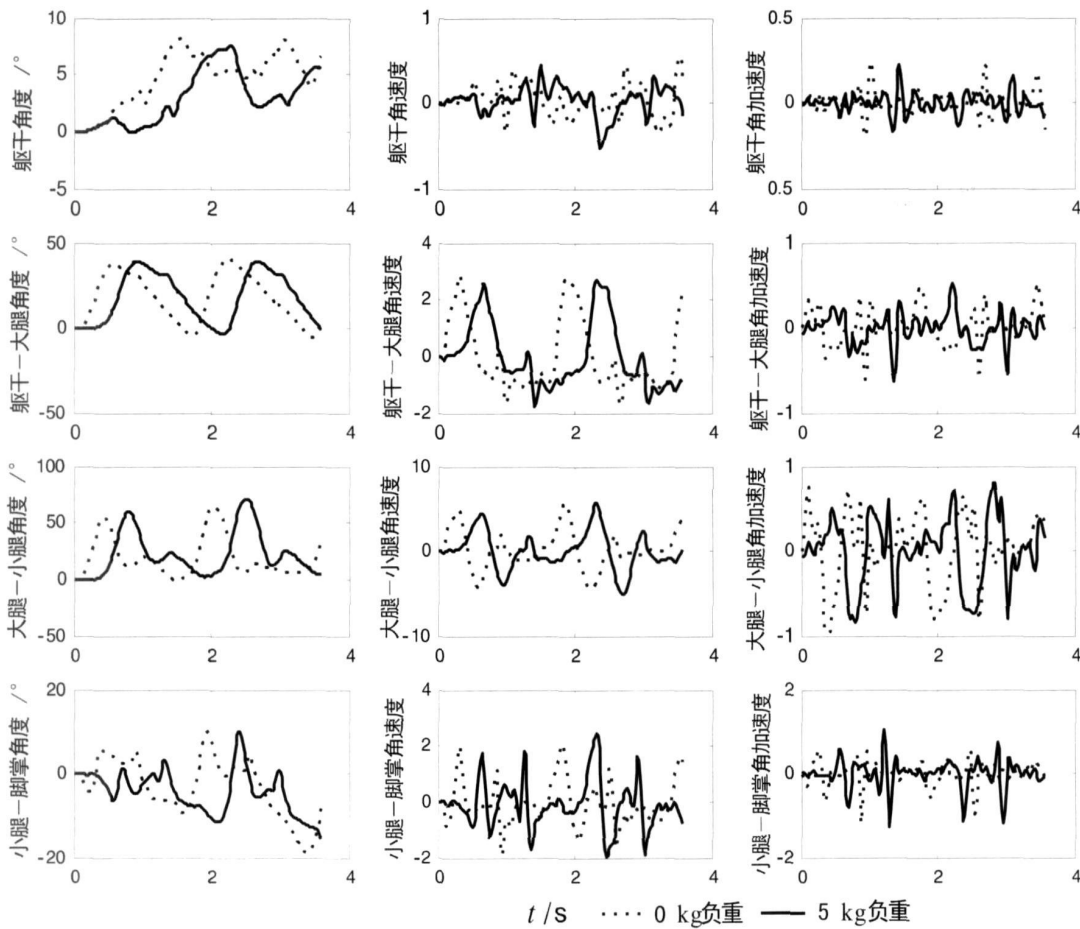


图7 零负重/5 kg负重情况下步行过程关节运动学曲线
 Fig 7 Joint kinematics data of walking with zero or 5 kg load and normal velocity

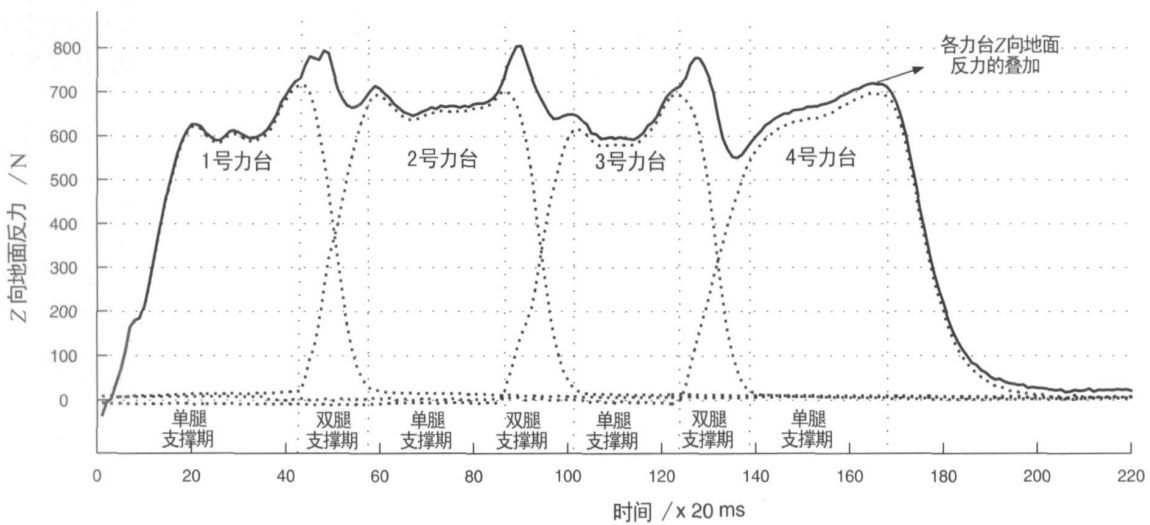


图8 零负重情况下正常步速步行过程地面反力曲线
 Fig 8 Ground reaction forces of walking with zero load and normal velocity

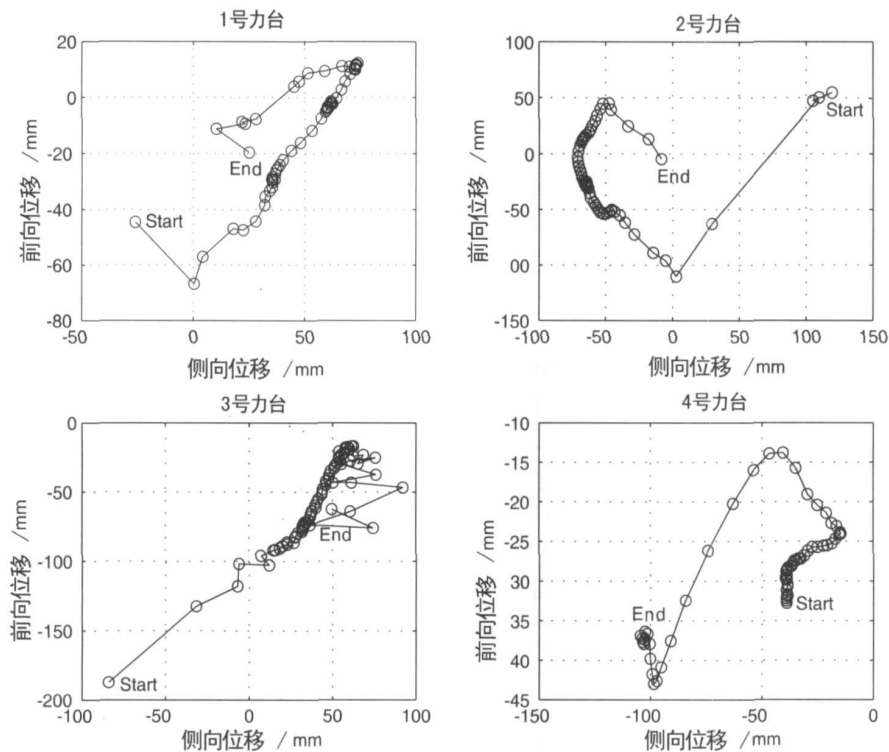


图 9 零负重情况下正常步速步行过程地面压力中心曲线

Fig 9 Ground CoP curve of walking with zero load and normal velocity

分析以上典型步态数据及数据库中其他各组步态, 可以总结出人体步行对于仿人机器人自然步态规划及控制具有很好的理论参考价值。

(1) 在正常行走过程中, 人体的肩关节、髋关节和质心轨迹均接近正弦波动曲线, 在不同负重及步速状态下没有显性差异. 这个可视为自然步态中关节轨迹优化的收敛方向之一。

(2) 负重状态下步速显性降低, 躯干角度变化明显, 步长没有显性变化. 同时步速越快, 摆动腿踝关节轨迹越接近正弦波动曲线, 踝关节的这种抬脚姿势有利于快速步行, 同时能够起到与地面缓冲的作用. 这对于基于消振目的的踝关节姿态优化具有很好的参考价值。

(3) 在正常步速行走过程中, 双腿支撑期约占一个步行周期时间的 28% (比相关文献中的 25% 略高^[16]), 在负重状态下该比例有所上升, 达到 33% 左右, 从而限制了步速的提高. 可见, 提高机器人步行速度, 仅仅从步态规划角度出发是不完备的, 必须着眼于快速步行中足底混杂接触模型的建立, 才能实现机器人的高比例单腿支撑期行走甚至近似完全单腿支撑的行走。

(4) 在双腿支撑期开始时刻, 总地面反力/体重比达到最大, 约为 1.3 比机器人样机 THBIP- 步行时的 $1.8 \sim 2.1$ ^[17], 其原因在于人体脚面与地面接触特性较好. 同时此时段地面反力变化幅度最大, 因此在机器人的步态控制策略中, 可以设计变阻抗的踝关节控制器, 在双腿支撑期开始时刻减小踝关节刚度, 避免因为地面反力大幅度变化引起系统振动使得机器人失稳。

(5) 在相同的负重集中于躯干和分布于身体各部分的两种情况下, 负重集中的步行中其质心竖直方向跳跃幅度小, 因此该方向质心加速度小而且变化小, 所以地面反力较小且稳定. 由于各关节角速度同负重分布时没有显性差别, 所以负重集中时其驱动力矩小, 更节省能量. 这个结论已经应用于多个机器人本体集成设计的载荷分布问题。

(6) 步行中第二步对起步过程的驱动力贡献最大, 地面反力也最大, 因此在规划完整步态时需对此时刻关节驱动力进行补偿, 以获得正常的稳定步行。

(7) 单腿支撑期步行时人体质心投影并不在支撑区域内, 而是沿着足内侧边缘向前移动, 这也是人体快速动态步行的特征之一。

(8)在 各 组 测 试 中, COP 曲 线 跳 跃 均 很 大, 其 大 幅 度 跳 跃 常 常 发 生 在 身 体 关 节 角 加 速 度 大 的 时 刻. 可 见, 人 体 步 行 平 衡 是 一 种 动 态 的 震 荡 性 平 衡, 除 了 能 自 动 维 持 运 动 平 衡 不 被 破 坏 之 外, 还 能 在 平 衡 受 到 破 坏 时 通 过 关 节 运 动 补 偿 来 恢 复 平 衡. 这 说 明, 要 规 划 真 正 的 快 速 自 然 步 态, 必 须 摆 脱 静 态 行 走 时 的 ZMP 稳 定 区 域 约 束, 仿 生 控 制 机 理 是 实 现 自 然 仿 生 步 态 的 必 要 条 件.

5 结 论 与 展 望 (Conclusion and future work)

要 实 现 仿 人 机 器 人 的 步 态 柔 顺 和 能 量 优 化, 必 须 全 面 研 究 人 体 自 然 步 态 及 其 平 衡 策 略, 因 此 本 文 提 出 了 一 套 快 捷 有 效 的 人 体 步 行 测 试 系 统. 通 过 对 人 体 步 行 运 动 学 及 力 学 参 数 的 定 量 分 析 研 究, 建 立 了 人 体 步 行 的 参 数 化 数 据 库 并 分 析 获 取 了 各 种 运 动 指 标 下 的 参 数 化 特 征. 实 验 结 果 定 量 地 解 析 了 人 体 自 然 步 态 的 运 动 学 特 征 和 平 衡 策 略, 对 于 仿 人 机 器 人 的 自 然 步 态 规 划 的 轨 迹 柔 顺 和 能 量 优 化 提 供 了 良 好 的 理 论 指 导, 同 时 实 验 结 果 对 于 仿 人 机 器 人 的 步 态 控 制 及 机 器 人 的 本 体 优 化 设 计 也 提 供 了 理 论 指 导.

部 分 实 验 结 论 已 经 应 用 于 清 华 大 学 仿 人 机 器 人 THBP-1 的 本 体 设 计 和 步 态 规 划. 目 前 正 在 复 杂 环 境 及 复 杂 运 动 指 标 下 对 更 多 测 试 对 象 进 行 步 行 实 验, 该 数 据 库 将 得 到 进 一 步 的 完 善, 同 时 该 数 据 库 已 经 同 部 分 康 复 工 程 研 究 项 目 进 行 共 享. 足 趾 关 节 在 人 体 步 行 平 衡 中 的 作 用 机 理 是 本 研 究 的 下 一 个 关 注 点.

6 致 谢 (Acknowledgment)

本 研 究 得 到 了 清 华 大 学 精 密 仪 器 与 机 械 学 系 康 复 工 程 研 究 室 的 协 助, 特 致 以 谢 意.

参 考 文 献 (References)

- [1] 谢 涛, 徐 建 峰, 张 永 学, 等. 仿 人 机 器 人 的 研 究 历 史、现 状 及 展 望 [J]. 机 器 人, 2002, 24(4): 367—374
- [2] Sakagami Y, Watanabe R, Aoyama C, et al. The intelligent ASLMQ System overview and integration [A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Piscataway NJ USA: IEEE, 2002, 2478—2483
- [3] Kuroki Y, Fujita M, Ishida T, et al. A small biped entertainment

- robot exploring attractive applications [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway NJ USA: IEEE, 2003, 471—476
- [4] 汤 哲. 人 形 机 器 人 的 步 态 研 究 [D]. 北 京: 清 华 大 学, 2006
- [5] Hirai K, Hirose M, Haikawa Y, et al. The development of Honda humanoid robot [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway NJ USA: IEEE, 1998, 1321—1326
- [6] Dasgupta A, Nakamura Y. Making feasible walking motion of humanoid robots from human motion capture data [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway NJ USA: IEEE, 1999, 1044—1049
- [7] Vukobratovic M, Borovac B, Sturdilovic D. Zero-moment point—proper interpretation and new applications [A]. Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots [C]. Piscataway NJ USA: IEEE, 2001, 237—244
- [8] Kwon J, Park F C. Using hidden Markov models to generate natural humanoid movement [A]. Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Piscataway NJ USA: IEEE, 2006, 1990—1995
- [9] Harris G F, Smith P A. Human Motion Analysis: Current Applications and Future Directions [M]. New York, NY, USA: IEEE, 1996
- [10] Zanchi V, Papic V, Cecic M. Quantitative human gait analysis [J]. Simulation Practice and Theory, 2000, 8(1—2): 127—139
- [11] 石 俊, 姜 寿 山, 张 欣, 等. 人 体 步 态 研 究 与 仿 真 的 现 状 和 展 望 [J]. 系 统 仿 真 学 报, 2006, 18(10): 2703—2708, 2711
- [12] Allread P, Capozzo A, Lundberg A, et al. Three-Dimensional Analysis of Human Locomotion [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 1998
- [13] 林 玎 玎. 仿 人 机 器 人 步 行 信 息 检 测 技 术 及 系 统 的 研 究 [D]. 北 京: 清 华 大 学, 2004
- [14] 林 玎 玎, 刘 莉, 陈 恩, 等. 双 足 步 行 机 器 人 的 ZMP-COP 检 测 及 研 究 [J]. 机 器 人, 2004, 26(4): 368—372, 379
- [15] GB/T 10000—1988 中 国 成 年 人 人 体 尺 寸 [S].
- [16] Sutherland D H, Olsen R A, Biden E N, et al. The Development of Mature Walking [M]. Oxford: MacKeith Press, 1988
- [17] 汪 劲 松, 陈 强, 陈 恩, 等. 拟 人 机 器 人 技 术 及 其 系 统 研 究 [R]. 北 京: 清 华 大 学, 2003

作 者 简 介:

夏 泽 洋 (1980-) 男, 博 士 生. 研 究 领 域: 仿 人 机 器 人 系 统 设 计, 仿 人 机 器 人 步 态 规 划、运 动 规 划 与 控 制.

陈 恩 (1954-) 男, 教 授, 博 士 生 导 师. 研 究 领 域: 机 器 人 与 仿 生 学, 特 种 机 器 人 及 应 用, 机 电 自 动 化 及 系 统 集 成.