

下肢助行外骨骼机器人稳定性分析与校正研究

钟凤琦^{1*}, 朱文琪¹, 郭旭东^{1#}, 肖建如², 许 炜², 周振华²

¹上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

²第二军医大学附属长征医院骨肿瘤科, 上海

收稿日期: 2023年6月14日; 录用日期: 2023年7月18日; 发布日期: 2023年7月25日

摘 要

为了保证助行下肢外骨骼的稳定运行, 构建一种实时检测机器人运转稳定性的控制系统。通过研究零力矩点理论, 建立下肢外骨骼的五连杆模型, 求取机器人动态零力矩点的理论移动轨迹。以薄膜压力传感器获取机器人运行过程的足底压力信息, 更新零力矩点计算公式并获得该点的实际运动轨迹。步态矫正算法调整实际零力矩点的稳定裕度, 输出角度调整量, 主控模块做角度的反馈控制。调整后轨迹相对于规划轨迹的均方根误差为0.04, 稳定裕度增加, 机器人稳定性得到提升。

关键词

下肢外骨骼, 零力矩点理论, 稳定性分析, 足底压力

Stability Analysis and Calibration Study of a Lower Limb Mobility-Assisted Exoskeleton Robot

Fengqi Zhong^{1*}, Wenqi Zhu¹, Xudong Guo^{1#}, Jianru Xiao², Wei Xu², Zhenhua Zhou²

¹School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Department of Bone Oncology, Changzheng Hospital, Second Military Medical University, Shanghai

Received: Jun. 14th, 2023; accepted: Jul. 18th, 2023; published: Jul. 25th, 2023

Abstract

To ensure the stable operation of lower limb exoskeleton for mobility assistance, a control system

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 钟凤琦, 朱文琪, 郭旭东, 肖建如, 许炜, 周振华. 下肢助行外骨骼机器人稳定性分析与校正研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(4): 3999-4006. DOI: 10.12677/mos.2023.124365

was built to detect the stability of robot's operation in real time. A five-link model of lower limb exoskeleton was developed by investigating zero moment point theory. Determine the theoretical moving trajectory of the dynamic zero moment point of the robot. Plantar pressure information during robot operation was acquired by thin-film pressure sensors. And it was used to update the formula for the zero moment point and to obtain the actual trajectory of the point. The gait correction algorithm adjusts the stability margin at the actual zero moment point. The angle adjustment amount was outputted. And the master control module made feedback control of this angle adjustment. The root mean square error of the adjusted trajectory relative to the planned trajectory is 0.04. Stability margin was increased. And stability of robot was improved.

Keywords

Lower Limb Exoskeleton, Zero Moment Point Theory, Stability Analysis, Plantar Pressure

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

下肢外骨骼机器人可对下肢功能并未完全丧失的患者做康复理疗, 帮助患者恢复部分甚至全部运动能力, 为患者的重新站立与行走缩短了治疗时间[1]。助行外骨骼机器人的研发, 加入了仿生学、智能控制与检测等前沿技术, 通过步态规划能够完成对机器人的控制, 实现康复训练, 然其运行过程的稳定性依旧是研究的热点[2]。谢哲东等人[3]基于零力矩点理论, 完成了正常行走过程中的稳定性仿真验证, 刘西侠等人[4]以零力矩点理论验证了四足机器人前进时的稳定性, 证明这一理论的可行性。在使用者穿戴助行外骨骼机器人行走的过程中, 行走环境或外力干扰等原因, 可能导致助行机器人的稳定性出现偏差[5][6]。美国 Ekso 公司的 Ekso 外骨骼[7]、电子科技大学研发的 AIDER 外骨骼机器人[8]等均需要配合拐杖以维持运动平衡, 刘昆[9]将零力矩点理论运用于机器人样机中, 独立完成了短距离行走的训练, 可见使用中的稳定性对于摆脱拐杖依赖, 实现外骨骼的自由便捷使用具有积极作用。

本文旨在研究一个监控稳定性的控制系统, 通过与控制模块联合, 控制助行外骨骼关节运动独立完成上楼梯的训练, 保证其在使用时的稳定性, 提高机器人的安全性能。零力矩点(Zero Moment Point, ZMP)作为判断助行外骨骼机器人稳定性的一个重要指标, 本文将检测 ZMP 点与安全行走范围间关系, 以此来判断机器人稳定性, 并依据 ZMP 判据调整机器人关节电机步态规划, 保证机器人安全平稳运行。

2. ZMP 理论与机器人模型建立

2.1. 稳定性分析

当机器人站立或行走时, 机器人足底将在竖直与水平方向上受到地面作用力[10][11][12]。将机器人足底所受合力和力矩等效到某一点, f_x 为该合力水平方向分力, f_z 为其竖直方向分力, M 为地面对机器人作用力矩, 如图 1 所示。若要保证机器人在当前力矩作用下不会倾倒, 则力矩 M 应当为 0。该地面反作用力的合力矩为零的点, 称为 ZMP 点[13][14]。

能够包含机器人与地面之间所有接触点的最小多边形区域被称为支撑多边形[15], 图 2 为机器人支撑多边形示意图。图 2(a)为机器人单脚支撑时稳定裕度即支撑腿足底面积。图 2(b)为机器人双腿支撑时的

稳定区域，包含两足与地面所有接触区域的最小多边形。在下肢外骨骼助行机器人的运动过程中，只要整个人机系统的 ZMP 点始终保持在支撑多边形内，助行机器人就能稳定地运动，否则机器人就可能倾倒。

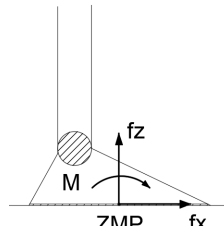


Figure 1. Schematic diagram of ZMP point

图 1. ZMP 点示意图

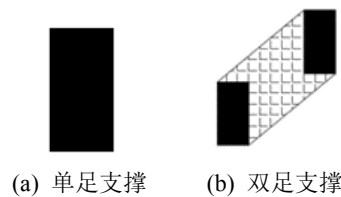


Figure 2. Schematic diagram of support polygon for the exoskeleton robot

图 2. 外骨骼机器人的支撑多边形示意图

建立下肢助行外骨骼五连杆模型如图 3， m_i 为机器人各杆件质量， (x_i, z_i) 为各杆件质心坐标， θ_i 为各杆件与竖直面之间的夹角。 $(i=1,2,3,4)$

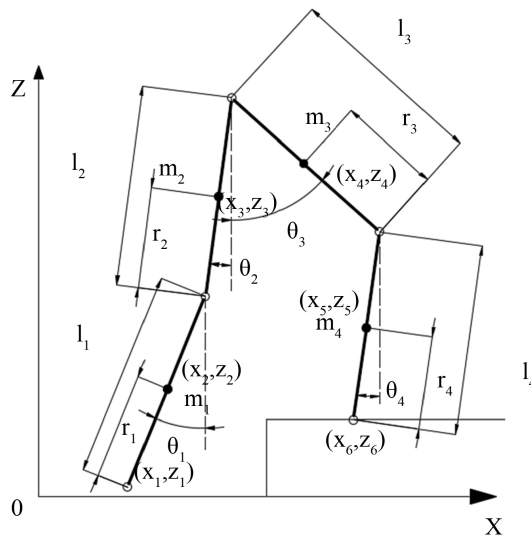


Figure 3. Five-link model of the lower limb exoskeleton

图 3. 下肢外骨骼五连杆模型

假设机器人各连杆质量均匀，各连杆长度为 l_i ，连杆质心到连杆一端的距离为 r_i ，计算模型各连杆质心坐标，依据五连杆模型与各杆件质心坐标，推导机器人 ZMP 点表达式。助行机器人所受重力和惯性力

合力 F 如(1)所示, 其中 (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) 为杆件 i 质心处加速度, g 为重力加速度, (F_x, F_y, F_z) 分别为合力 F 在 x 、 y 、 z 方向上的分力:

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = -\sum_{i=1}^4 m_i \begin{bmatrix} a_{xi} \\ a_{yi} \\ (a_{zi} + g) \end{bmatrix} \quad (1)$$

该合力的力矩 M 如下式所示, 其中 (M_x, M_y, M_z) 分别为合力矩 M 在 x 、 y 、 z 方向上的分力矩:

$$M = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = -\sum_{i=1}^4 m_i \begin{bmatrix} (a_{zi} + g)y_i - a_{yi}z_i \\ a_{xi}z_i - (a_{zi} + g)x_i \\ a_{yi}x_i + a_{xi}y_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

将合力 F 从坐标原点移动到 ZMP 点, 此时机器人所受合力矩在 x 轴和 y 轴上的分量均为 0。在实际使用过程中, 考虑因人机耦合而产生的不确定因素, 调整计算公式:

$$x_p = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i (a_{zi} + g)x_i - \sum_{i=1}^4 m_i a_{xi}z_i + m(a_z + g)x - ma_x z}{\sum_{i=1}^4 m_i (a_{zi} + g) + m(a_z + g)} \quad (3)$$

$$y_p = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i (a_{zi} + g)y_i - \sum_{i=1}^4 m_i a_{yi}z_i + m(a_z + g)y - ma_y z}{\sum_{i=1}^4 m_i (a_{zi} + g) + m(a_z + g)} \quad (4)$$

式中, $(x_p, y_p, 0)$ 为人机系统 ZMP 点坐标, m 为人体质量, (x, y, z) 为人体质心坐标, (a_x, a_y, a_z) 为人体质心加速度, m_i 为各杆件质量, (x_i, y_i, z_i) 为各杆件质心坐标, (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) 为杆件 i 质心处加速度。

2.2. 步态校正算法

机器人使用时实际 ZMP 点可通过足底压力信息实时获取, 依据机器人系统压力中心以及预先规划的轨迹, 可计算人体在系统运动过程中的质心位置, 由质心偏差结合雅可比矩阵可计算机器人各关节所需调整角度。

假设机器人系统步行楼梯时在竖直方向上为匀速运动, 速度 $v_z = 2h/T$, 其中 h 为单级楼梯高度, 单位为 m , T 为机器人步态周期, 单位为 s , 人体质心在竖直面内的加速度 $a_z = 0$ 。人体质心计算公式如下:

$$x_0 = \frac{A + m(a_z + g)x_p + ma_x z}{m(a_z + g)} \quad (5)$$

$$y_0 = \frac{A + m(a_z + g)y_p + ma_y z}{m(a_z + g)} \quad (6)$$

$$A = \sum_{i=1}^4 m_i (a_{zi} + g)(x_p - x_i) + \sum_{i=1}^4 m_i a_{xi}z_i \quad (7)$$

$$B = \sum_{i=1}^4 m_i (a_{zi} + g)(y_p - y_i) + \sum_{i=1}^4 m_i a_{yi}z_i \quad (8)$$

通过机器人预先规划的轨迹可以计算出人机系统该状态下的理论 ZMP 值和理论质心位置, 理论 ZMP 值可认为在助行机器人支撑多边形中心位置。将根据足底压力计算得到的压力中心数据作为实际 ZMP 值

代入，计算可得实际质心位置坐标。根据两个质心位置的误差 ΔX ，结合雅可比矩阵 J ，计算各关节需调整的角度。机器人质心位置误差和机器人各关节角度校正量 $\Delta\theta$ 满足下式：

$$\Delta X = J^{-1}\Delta\theta \quad (9)$$

3. 基于足底压力的 ZMP 实时获取

为实时检测计算机器人系统 ZMP 点位置，需要采集助行机器人各杆件瞬时加速度及质心坐标等难以实时获取的数据。双足机器人动态稳定时，其压力中心与 ZMP 点重合[16]。本研究将使用薄膜式压力传感器 FlexiForceA201，采集机器人实际使用中的足底压力信息。通过分析人体运动时的足底压力分布，人体足底的第二②和第五跖骨①区域以及脚后跟③处，为人体站立和行走时的主要受力区域，即为传感器放置位置，如图 4 所示。

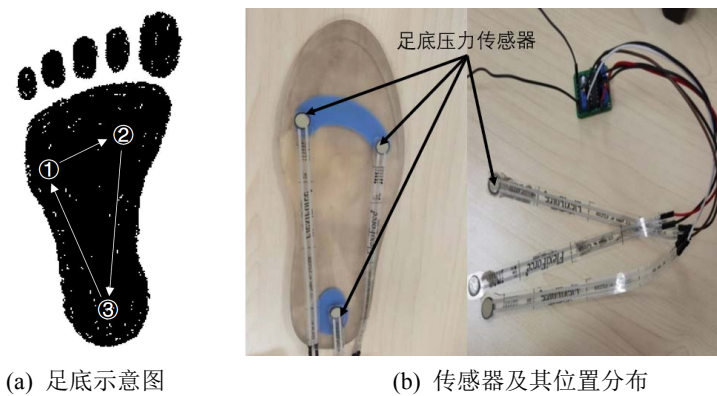


Figure 4. Plantar pressure sensors and their location
图 4. 足底压力传感器及其足底分布位置

机器人实际使用中的足底受力情况如图 5 所示， W_i 为薄膜式压力传感器的装置点， f_i 为各点在竖直方向上所受作用力。假设地面上一点 P 为当前 ZMP 点，则点 P 满足： $\tau_x = 0$ 且 $\tau_y = 0$ 。 τ_x 和 τ_y 分别为足底所受合力矩在 X 方向和 Y 方向上的分量。若点 P 始终落在机器人支撑多边形内，那么机器人运动过程就可以判断为稳定的。

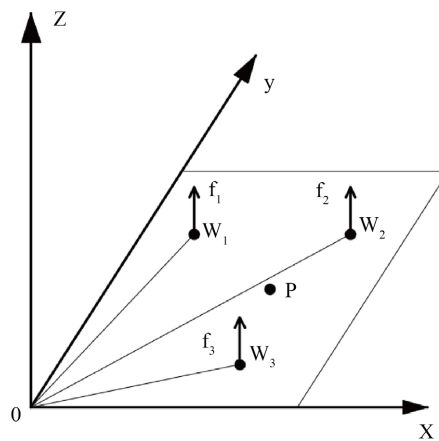


Figure 5. Schematic diagram of forces on the plantar plane of robot's foot
图 5. 机器人足底平面受力示意图

4. 仿真验证分析

为了检验依据 ZMP 实时调节机器人步态可行性及效果, 对其进行仿真验证分析。将运用改进 DMPs 预先规划的机器人运动步态代入, 计算各时刻的理论 ZMP 值与理论质心坐标。使用足底压力传感器采集的足底压力数据, 模拟实际 ZMP 轨迹曲线, 并计算实际质心坐标。由此计算机器人各关节所需调整角度, 对下肢助行机器人步态进行在线调整, 使得实时 ZMP 点尽可能接近理论 ZMP 值, 提高机器人系统的动态稳定性。

验证过程以机器人上楼梯为例, 在步态周期为 5 s、楼梯宽为 30 cm、高为 20 cm 条件下, 规划的机器人步态。图 6 为机器人理论与未校正实际 ZMP 曲线轨迹, 实际 ZMP 值与理论 ZMP 值有一定偏移量, 已经接近运行稳定域的边缘。图 7 为校正后 ZMP 轨迹图, 相较于调整前更接近于规划的理论 ZMP 轨迹。

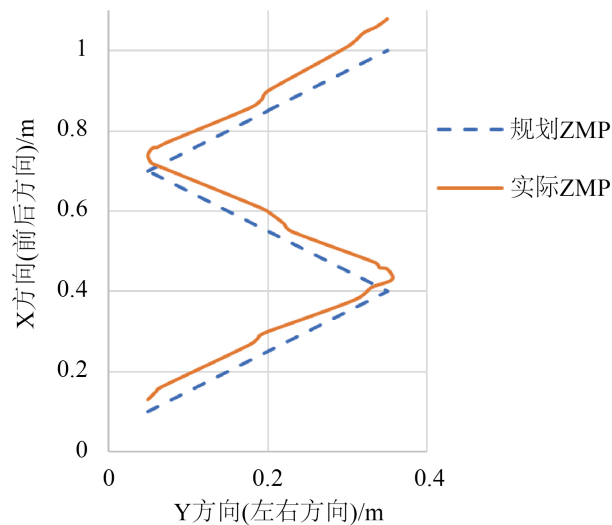


Figure 6. Actual ZMP point trajectory before planning and calibration

图 6. 规划及校正前的实际 ZMP 点轨迹

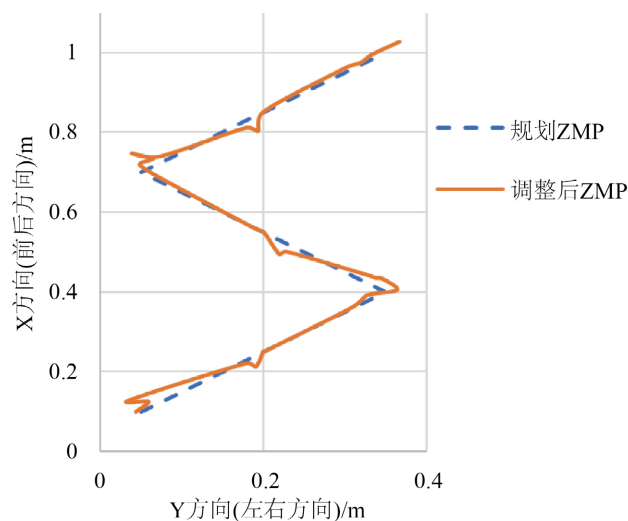


Figure 7. Corrected ZMP point trajectory

图 7. 校正后的 ZMP 点轨迹

对实时调整后的 ZMP 点曲线进行误差分析,分别计算调整后 ZMP 曲线相较于规划 ZMP 曲线的相对误差(Relative Error, RE)及均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE), 计算公式如下:

$$RE = \frac{x-a}{a} \times 100\% \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}{n}} \quad (11)$$

上式中, x_i 为测量值, 代表调整后的机器人系统 ZMP 点, a 为真值, 代表规划的理论 ZMP 值, n 为样本数量。

计算调整后 ZMP 曲线相较于规划 ZMP 曲线的相对误差,可以得到如下 ZMP 点相对误差饼图,如图 8 所示。根据误差分析,在 X 方向,即机器人前进方向上, x_p 相对误差平均值为 6.54%, 标准偏差为 6.80%, 其均方根误差为 0.04。Y 方向,即机器人左右方向上, ZMP 轨迹相对误差较大, y_p 相对误差平均值为 12.50%, 标准偏差为 13.37%, 其均方根误差为 0.02。依据数据分布,机器人处于单足支撑状态时, ZMP 点的相对误差较大。而机器人双足支撑时,由于支撑域面积大,即使实际 ZMP 值与理论 ZMP 值存在偏差,也不易倾倒,稳定性较高。

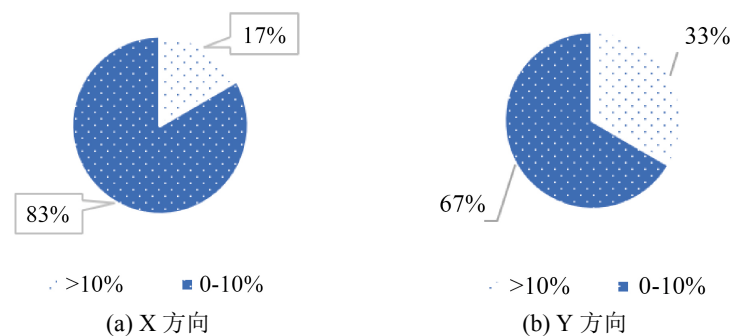


Figure 8. Pie chart of relative error at ZMP points after adjustment
图 8. 调整后 ZMP 点相对误差饼图

基于上述的仿真分析过程与结果,再对比调整后与规划的 ZMP 点轨迹,图 7 中可看出二者曲线接近。校正前的实际 ZMP 轨迹虽然与规划的轨迹存在较明显差异,但仍然在支撑稳定域内,不过部分时刻的步态下其 ZMP 点已经接近机器人稳定域的边缘,其稳定裕度很小,一旦系统运行过程中人体或外界产生干扰,易导致机器人系统的侧翻或倾倒。本文研究利用根据质心误差建立的步态校正算法,对机器人运动过程的步态进行调整,修正后机器人系统的 ZMP 点相较于调整前明显更靠近支撑域中心,机器人系统稳定裕度大幅提升,下肢外骨骼助行机器人系统的稳定性得到了保障。

5. 总结

本文依据零力矩点理论,研究助行下肢外骨骼机器人稳定性判据及运动步态校正算法,开发一个监控稳定性的控制系统。ZMP 稳定性判据理论分析与五连杆模型结合,通过压力传感器获取实时足底压力信息,更新了该机器人下 ZMP 点的求解。将设计的步态校正算法与控制模块联合,实时调整外骨骼上楼过程中电机角度控制量,保证其运转过程中各关节角度的稳定裕度,提高机器人的稳定与安全。仿真结果证明了该稳定性判断调控系统的可行性,为控制算法进一步应用提供可能。

基金项目

上海市产业协同创新项目(2021-cyxt1-kj07); 上海市“科技创新行动计划”(22S31902200)。

参考文献

- [1] Meng, W., Liu, Q., Zhou, Z., *et al.* (2015) Recent Development of Mechanisms and Control Strategies for Robot-Assisted Lower Limb Rehabilitation. *Mechatronics*, **31**, 132-145. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.04.005>
- [2] 韩稷钰, 王衍鸿, 万大千. 下肢外骨骼康复机器人的研究进展及发展趋势[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2022, 42(2): 241-246.
- [3] 谢哲东, 李斌, 陈晨, 等. 基于 ZMP 理论的下肢外骨骼机器人稳定性分析[J]. 机械工程师, 2022(5): 1-5.
- [4] 刘西侠, 王树海, 金毅, 等. 四足步行机器人稳定性分析[J]. 机械设计与制造, 2013(5): 189-191.
- [5] Vukobratović, M. and Borovac, B. (2004) Zero-Moment Point—Thirty Five Years of Its Life. *International Journal of Humanoid Robotics*, **1**, 157-173. <https://doi.org/10.1142/S0219843604000083>
- [6] 吴伟国, 高力扬. 使用零力矩点反馈的双足机器人惯性参数辨识[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(7): 20-26.
- [7] Swank, C., Sikka, S., Driver, S., Bennett, M. And Callender, L. (2020) Feasibility of Integrating Robotic Exoskeleton Gait Training in Inpatient Rehabilitation. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, **15**, 409-417. <https://doi.org/10.1080/17483107.2019.1587014>
- [8] Wang, Y., Cheng, H. and Hou, L. (2019) c² AIDER: Cognitive Cloud Exoskeleton System and Its Applications. *Cognitive Computation and Systems*, **1**, 33-39. <https://doi.org/10.1049/ccs.2018.0012>
- [9] 刘昆. 下肢外骨骼机器人行走稳定性研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2020.
- [10] Jatsun, S., Savin, S. and Yatsun, A. (2018) *New Trends in Medical and Service Robots*. Springer, Berlin, 305-317.
- [11] 丛明, 杨劲松, 张佳琦, 等. 基于质心校正的下肢外骨骼松软路面步态规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 41-46.
- [12] 于振中, 姚锦涛. 基于在线 ZMP 校正的下肢外骨骼上楼梯步态规划[J]. 机械传动, 2020, 44(1): 62-67.
- [13] 邹朝彬. 下肢康复外骨骼机器人步态建模与学习算法研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [14] Zhu, H., Luo, M. and Li, J. (2018) Optimization-Based Gait Planning and Control for Biped Robots Utilizing the Optimal Allowable ZMP Variation Region. *Industrial Robot*, **45**, 469-480. <https://doi.org/10.1108/IR-01-2018-0011>
- [15] Aphiratsakun, N., Parnichkun, M., Aphiratsakun, N., *et al.* (2009) Balancing Control of AIT Leg Exoskeleton Using ZMP based FLC. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **6**, 319-328. <https://doi.org/10.5772/7250>
- [16] Sardain, P. and Bessonnet, G. (2004) Forces Acting on a Biped Robot. Center of Pressure—Zero Moment Point. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, **34**, 630-637. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2004.832811>