

步态模式对人体髌膝踝关节运动协调关系的影响*

马绍兴^{1,2} 王人成^{2,3} 沈 强²

摘要

目的:分析不同步态模式下髌膝踝关节的运动协调关系,为下肢智能假肢和助行外骨骼控制系统的运动规划提供依据。

方法:利用红外光点运动捕捉系统,采集10名20—35岁健康青年志愿者进行平地行走、上楼梯和下楼梯三种步态的运动轨迹,采用运动循环图对髌膝踝关节运动角度参数进行统计分析。

结果:不同步态模式的髌膝踝关节运动循环图存在显著的差异。

结论:步态模式对髌膝踝关节的运动协调关系有显著影响,下肢假肢和外骨骼可以借鉴相应的运动协调模式降低机械结构和控制系统的复杂性。

关键词 步态分析;运动循环图;关节协调模式;上下楼梯

中图分类号:R496 献标识码:A 文章编号:1001-1242(2015)-12-1257-05

Effects of different kind of gaits on the discipline of joint coupling among hip, knee and ankle/MA Sha-oxing, WANG Rencheng, SHEN Qiang//Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2015, 30(12): 1257—1261

Abstract

Objective: To analyze the discipline of joint coupling among hip, knee and ankle in different gait conditions, and to offer the basic-consideration for the motion planning of the motion control systems. The systems would be applied in the lower intelligent prostheses and the exoskeletons.

Method: A total of 10 healthy young volunteers with the ages between 20 and 35 were chosen for the gait experiments. The experimental data of normal walking, stair ascent and stair descent was collected by the motion capture system with PSD infrared camera. , and the parameters of joint angles were achieved by Cyclogram and analyzed statistically.

Result: In different gait condition, there was a conspicuous difference in the discipline of joint coupling.

Conclusion: The discipline of joint coupling was is the theoretical base of joint movement coordination mechanism. The related research could be used to direct the design and control of prosthetic or exoskeleton joint, which can simplify the mechanical structure and improve the control system of the prostheses and exoskeletons.

Author's address Institute of Machinery Manufacture Technology, CAEP, Mianyang, 621900

Key word gait analysis; cyclogram; joint coupling; stair ascend and descent

随着机器人技术的发展,外动力下肢假肢和外骨骼等康复机器人技术也日趋成熟,开始逐渐走出实验室,在临床上推广应用,如Power Knee和Proprio Foot动力膝和动力假脚可以主动屈伸,使截肢

者更好地适应上下楼梯等复杂路况^[1-2]; Lokomat、Rewalk、Rex、Esko等下肢外骨骼产品已上市销售,使得截瘫患者穿戴外骨骼可以进行步态训练^[3],社区行走,甚至上下楼梯。

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2015.12.012

*基金项目:国家自然科学基金(51175289);国家科技支撑计划(2009BAI71B04)

1 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所,绵阳,621900; 2 清华大学机械工程设计工程研究所; 3 通讯作者

作者简介:马绍兴,男,硕士研究生;收稿日期:2014-07-02

行走是人体节律性很强的运动,人体是一个复杂的生命系统,具有强大的自我组织能力,自我协调能力和环境自适应能力,行走是一种典型的生物运动协调现象^[4]。近年来,随着动力假肢和外骨骼技术的发展,学者从通过研究单一关节运动控制转向研究多关节的动协调控制。

Grieve等^[5]采用周期循环图描述膝髌角度关系,即角度循环图。Charteris等^[6]将其拓展到不同生物运动的研究。Milner等^[7]通过角度循环图研究正常人和假肢步态的区别。Tepavac等^[8]用链编码法定

量描述协调关系。Goswami等^[9]通过研究角度循环图的周长和面积定量分析不同坡道对膝髌协调关系的影响。本文在Goswami等基础上,比较分析平地行走,上下楼梯步态下,髌膝踝的协调关系,研究步态对人体髌膝踝关节协调模式的影响。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

选取10名20—35岁健康且无异常步态的志愿者参与实验,基本信息见表1。

表1 试验志愿者的基本信息

($\bar{x} \pm s$)

性别	例数	体重(kg)	身高(mm)	腿长(mm)	膝宽(mm)	踝宽(mm)
男		68.00±13.51	1750.00±30.82	998.00±34.21	105.00±10.00	75.00±7.07
女		53.00±3.00	1606.67±11.55	920.00±50.00	96.67±5.77	65.00±5.00

1.2 实验方法

实验设备和环境:实验数据由配备6个高速红外摄像头的Vicon MX三维运动采集分析系统和若干反光标识点获得。实验环境为开阔平坦,无障碍,无遮挡的生物力学实验室。

实验步骤:校正Vicon系统,并在志愿者下肢特定位置粘贴标识点^[13],并进行静态标定。标定过后,每个志愿者每类实验采集数据20组备用,并进行数据截取和统计分析。

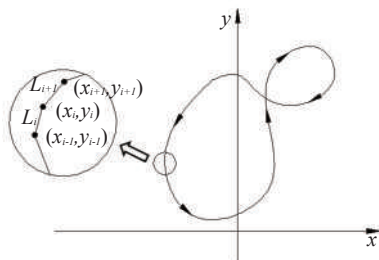
1.3 分析方法

相对于单个关节角度时空关系图(time-space plot),通过两个或更多关节的运动协调研究(coupled evolution)更能够准确的分析肢体之间的密切协调性关系。图1为平面周期循环曲线,由若干离散点生成构成的不规则多边形。

曲线周长定义如式(1)所示:

$$L = \sum_{i=1}^n L_i = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (1)$$

图1 一般情况下的平面周期循环曲线



若 x, y 分别为与时间相关的变量,则 L_i 也可以表示为:

$$L_i = \Delta t_i \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (2)$$

其中 Δt_i 为相邻数据点的时间间隔, Δx 和 Δy 为变分,若 x, y 表示关节角度,则 Δx 和 Δy 表示关节角速度。故, Δx 和 Δy 越大,关节角度变化量越大。

曲线包络面积的定义如式(3)所示,包络面积可以用于定义两关节的协调运动范围。

$$A = \sum_{i=1}^n a_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} x_i & y_i \\ x_{i+1} & y_{i+1} \end{vmatrix} \quad (3)$$

定义 γ 为协调相关紧密性系数。 γ 可以表示为:

$$\gamma = \frac{P^2}{4\pi A} \quad \text{其中 } P \text{ 为周长, } A \text{ 为包络面积} \quad (4)$$

$\gamma_{\text{圆}}$, $\gamma_{\text{正方形}}$ 和 $\gamma_{\text{等边三角形}}$ 分别1, $\frac{4}{\pi}$ 和 $\frac{3\sqrt{3}}{\pi}$ 。即 γ 值越小,曲线越圆滑,循环性越好,关节协调情况越好。

2 结果

10名健康成年人进行常速平地行走,上楼梯和常速下楼梯实验,三种步态直观上具有显著差异性。每一类步态分别采集20组数据,并对20组数据进行筛选和处理。

2.1 各关节运动的时空关系图

一个步态周期中支撑期为60%步态周期,即摆动期为40%(表2)。图2为关节角度时空关系图,可

直观读取不同步态各关节角度实时变化情况,虽能实时反映关节在时间轴上的变化情况,但是很难描述两个或三个关节之间的运动协调关系,而“角度-角度”周期循环图可定量分析关节间的协调规律,以研究关节间的运动协调关系。

2.2 关节间的运动学协调关系

2.2.1 “角度-角度”关系循环图:图3—5为三种步态下肢关节间角度协调关系图。从曲线形状可看出,三种步态存在明显不同的运动协调关系。由于踝关节和髌关节的角度关系式由膝关节与髌关节的

角度关系以及踝关节与膝关节的角度关系间接产生的,因此对此不作详细分析。

以平地行走为例,对关节之间的角度循环图进行分析如下:

图3a为膝髌角度循环图。步态伊始,脚跟触地(hs)。从脚跟触地(hs)到对侧腿的脚尖离地((c)to),髌前伸角减小,膝屈曲角增大。从对侧腿脚尖离地到支撑期末期脚跟离地(hr),膝伸,髌前伸角减小,并逐步往后伸展。从脚跟离地(hr)到对侧腿脚跟触地((c)hs),髌继续后伸至角度最大,膝重新屈

图2 下肢典型运动“髌膝踝”关节的角度的时空关系

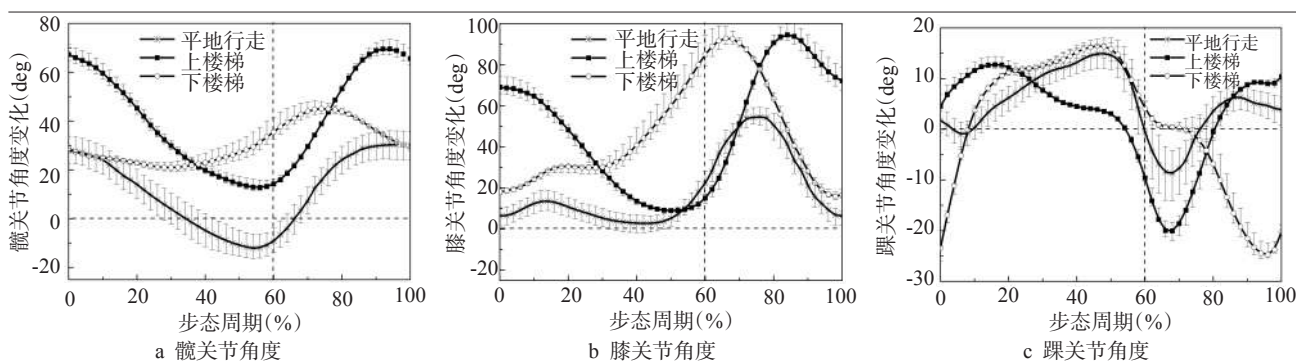
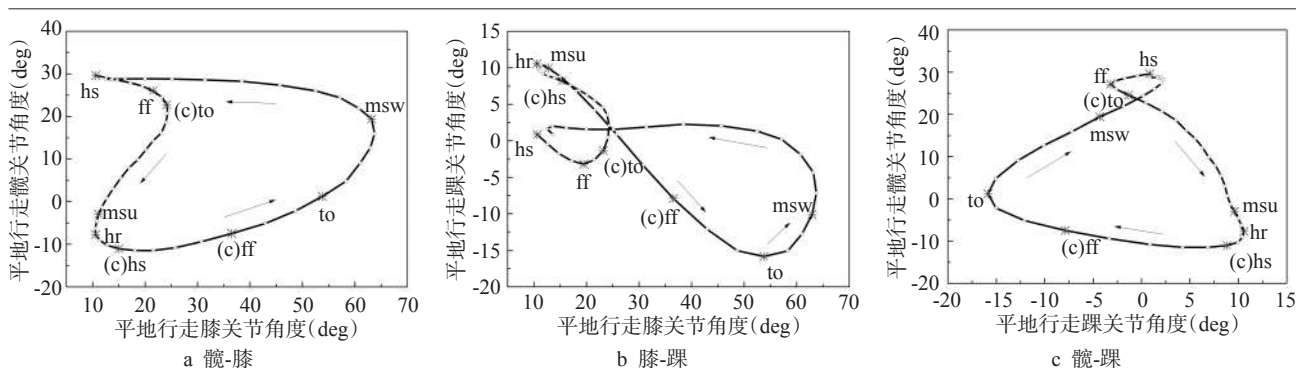
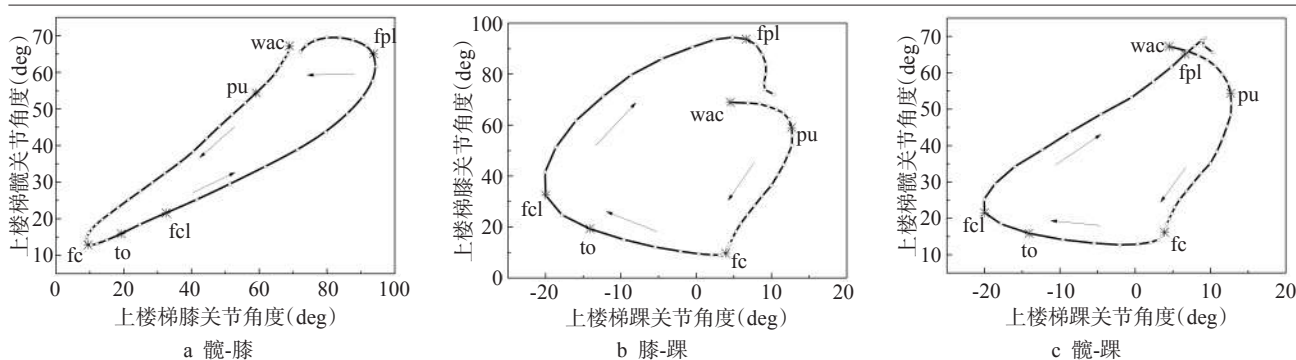


图3 平地行走关节“角度-角度”运动循环图



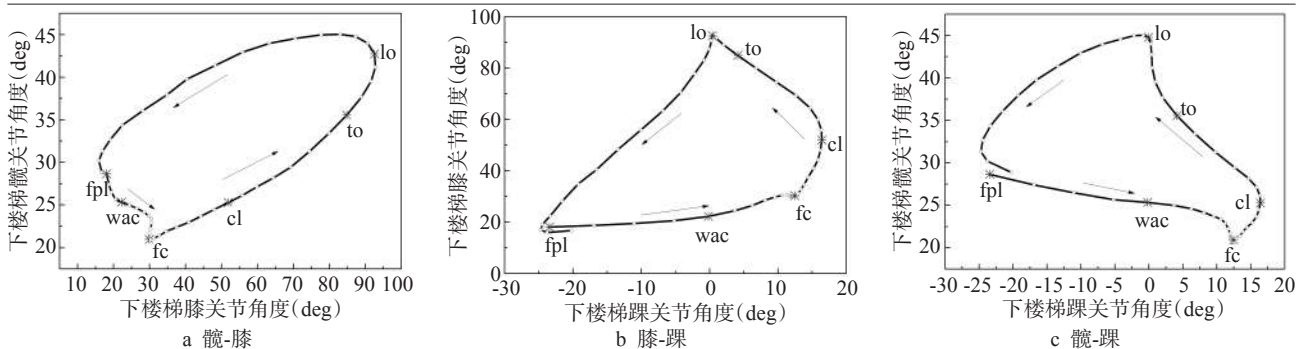
hs:脚跟触地;ff:足放平

图4 上楼梯关节“角度-角度”运动循环图



wac:体重支撑;pu:身体举升

图5 下楼梯关节“角度-角度”运动循环图



wac:体重支撑;fc:重心前移

表2 不同步态试验的平均时间参数 ($\bar{x} \pm s, \%$)

步态名称	步态周期 持续时间	支撑期 持续时间	双足支撑期 持续时间
平地行走	1.18±0.1	61.1±1.7	11.1±1.7
上楼梯	1.42±0.1	63.6±1.8	13.4±1.9
下楼梯	1.19±0.1	61.4±2.3	11.5±2.2

曲。支撑末期到摆动期(to),膝屈曲角增大,髋前伸,腿与地面距离增大,直到摆动中期(msw),髋继续前伸,小腿前摆,膝屈曲角减小,直到下一个步态周期起始端。

图3b为膝踝角度循环图。从脚跟触地(hs)到对侧脚尖离地((c)to),膝屈曲角逐渐变大,踝趾屈角变大。从对侧脚尖离地((c)to)到脚跟离地(hr),膝屈曲角变小,两腿间夹角变小,踝背屈角增大,直至最大背屈。支撑末期(hr)到脚尖离地(to),膝屈曲角增大,为脚离开地面做准备,踝趾屈,至趾屈角最大。脚尖离地后,膝屈曲角继续增大,踝背屈,使得脚面与地面的距离尽可能增大。直至摆动中期(msw)。摆动中期(msw)后,腿向前伸展,膝关节屈曲角减小,实现迈步。

上楼梯和下楼梯步态中,各个关节运动协调关系的分析与平地行走的分析方法类似,本文将不做详细介绍。

2.2.2 步态对协调模式的影响:图6为三种步态不同角度循环图周长,面积和 γ 系数对比。可知平地行走“髋-膝”角度循环图和“膝-髋”角度循环图的周长均比上下楼梯长。说明,虽然上下楼梯膝和髋角度变化范围大,但关节间运动协调范围却不如平地行走。即平地行走时髋膝踝间的相对运动量比上下楼

梯大,角速度变化最大。

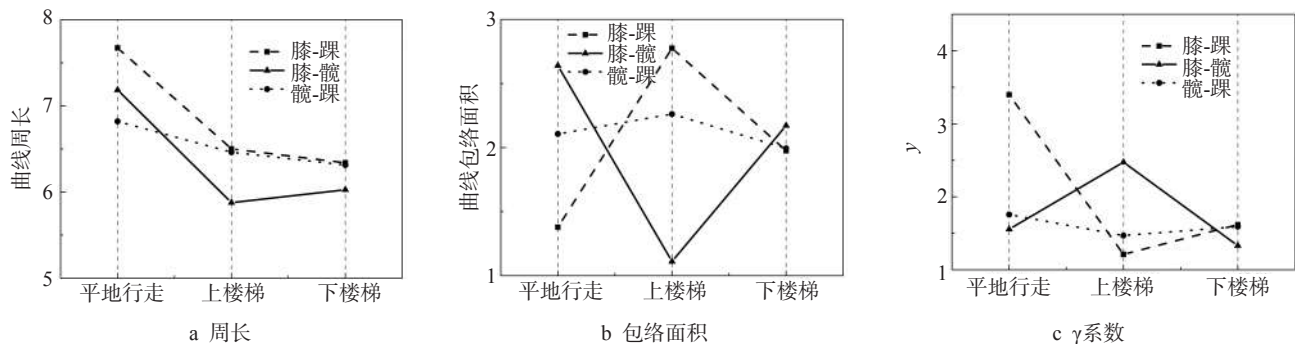
不同步态中,“膝-踝” γ 系数差异最大,平地行走为最大值。对应图3b可知,其原因为,平地行走支撑期,膝角度变化较小,而踝运动却从背屈到趾屈再到背屈,周长增大,包络面积无明显增加。而在上下楼梯中,由于膝屈曲运动角度较大,而踝以趾屈为主,且无明显的脚跟触地环节,故曲线更平滑。

不同步态中,“髋-膝” γ 系数差异较大。通过对比可知,上楼梯曲线最狭长,下楼梯较狭长,而平地行走最扁圆。故 $\gamma_{上楼梯}$ 最大, $\gamma_{平地}$ 最小。即上下楼梯,关节变化速率较快,曲线更陡峭,交替上下楼梯需要关节摆动的速度快,以保持运动的动态平衡。

不同步态中“髋-踝” γ 系数差异不大,说明髋踝在三种步态中的运动协调关系最统一,主要功能是保持人体的平衡和运动稳定性。

3 讨论

不同步态下,人体髋膝踝关节的协调模式通过角度循环图表现出显著差异。平地行走:膝髋协同运动控制大小腿步态位姿,控制运动灵活性,保持稳定性;膝踝协同运动控制小腿和足的步态位姿,减少脚地冲击,摆动期保证脚面不予地面碰撞。上楼梯过程中髋膝协同运动,控制重心前移和举升,髋运动幅度较大,对重心举升有至关重要作用;髋膝协同运动,可防止身体发生不稳定后倾。膝踝协同运动,支撑期类似倒立摆,以保持身体平衡;摆动期最大限度的举升摆动腿,防止脚地碰撞;踏上台阶过程,无明显脚尖触地过程,背屈角较小,可获得最大支撑面积,以保持身体平衡。下楼梯过程中髋膝协同运动,

图6 三种步态“角度-角度”图周长,面积和 γ 的比较

控制重心后移和下降,重心最大程度后移和降低,膝自锁,防止前倾;踏上较低台阶时,摆动腿保持伸直使脚面平稳踏上较低台阶。踏上台阶过程,与上楼梯类似,无明显的脚跟触地过程,以保持身体平衡。

4 结论

本文采用运动循环图对平地行走,上下楼梯步态中,髌膝踝关节之间的运动协调关系进行定量的分析和对比,分析步态对下肢各关节运动协调模式的影响,为分析不同步态情况下,髌膝踝关节的运动协调机制提供了理论基础。

同时,本文对下肢关节运动协调机制的研究,可以进一步应用于动力假肢和助行外骨骼关节机构设计和控制系统的运动规划。

总之,在不同步态模式时,人体髌膝踝关节的协调模式具有显著的差异,并可以通过协调关系曲线的周长、面积等定量反映其特性。该方法也可应用于关节角度与关节力矩的协调分析、关节角度相图,以及关节角速度与关节角速度之间的协调分析等研究。

参考文献

- [1] 耿艳利,杨鹏,刘作军,陈玲玲.大腿截肢者步速识别系统设计[J]. 中国康复医学杂志,2012,27(7):651—653.
- [2] 吴志彬,蒋宛凌,舒彬.步态分析在下肢假肢装配中的应用[J]. 中国康复医学杂志, 2013, 12: 1171—1174.
- [3] 张立勋,李长胜,刘富强.多模式下肢康复训练机器人的设计与实验分析[J]. 中国康复医学杂志,2011,26(5):464—466.
- [4] 瞿晓娜,张腾宇,王喜太,等.行走速度对步态参数影响的实验研究[J]. 中国康复医学杂志, 2012, 27(3):257—259.
- [5] Grieve DW. Gait patterns and the speed of walking[J]. Biomedical Engineering, 1968, 3(3):119—122.
- [6] Charteris J, Leach D, Taves C. Comparative kinematic analysis of bipedal and quadrupedal locomotion: a cyclographic technique[J]. Journal of Anatomy, 1979, 128(Pt 4):803.
- [7] Miller RH, Meardon SA, Derrick TR, et al. Continuous relative phase variability during an exhaustive run in runners with a history of iliotibial band syndrome[J]. J Appl Biomech, 2008, 24(3): 262—270.
- [8] Tepavac D, Field-Fote EC. Vector coding: a technique for quantification of intersegmental coupling in multicyclic behaviors[J]. Journal of Applied Biomechanics, 2001, 17(3): 259—270.
- [9] Goswami A. A new gait parameterization technique by means of cyclogram moments: Application to human slope walking[J]. Gait & Posture, 1998, 8(1): 15—36.