

文章编号:1004-7220(2011)05-0460-05

测量并分析上楼梯过程中下肢关节角变化

唐刚^{1,2}, 魏高峰¹, 周海², 刘石磊², 季文婷², 王冬梅², 王成焘²

(1. 上海海事大学 物流工程学院, 上海 200135; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 目的 获取上楼梯运动过程中国人下肢关节活动范围的统计学数据, 从而为大屈曲度人工关节设计提供依据。方法 设计常规楼梯实验装置, 利用运动捕捉系统(Optotrak Certus, NDI)和三维测力台(AMTI, Bertec), 建立系统地测量上楼梯过程中下肢运动的方法, 并应用此方法对40例样本进行测量。结果 计算获得了40例样本在上楼梯过程中, 髋关节、膝关节及踝关节在1个运动周期内沿各方向上关节角的变化规律及活动范围, 其中髋、膝、踝关节在矢状面上活动范围分别是 $-1.6^{\circ} \sim 66.7^{\circ}$, $0^{\circ} \sim 91.4^{\circ}$, $-20.8^{\circ} \sim 22.4^{\circ}$ 。结论 上楼梯运动过程中, 髋、膝、踝关节在矢状面上活动度最大, 且髋关节和膝关节屈曲度最大。与水平路面上正常行走和慢跑运动中关节运动范围比较, 上楼梯运动中, 髋关节和膝关节在矢状面上运动范围均较大。

关键词: 下肢; 关节角; 运动学; 楼梯; 运动范围

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Measurement and analysis of the joint angle in lower limb during stair ascent

TANG Gang^{1,2}, WEI Gao-feng², ZHOU Hai², LIU Shi-lei², JI Wen-ting², WANG Dong-mei², WANG Cheng-tao² (1. Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Objective To obtain the statistical data from the range of motion in lower limb of the Chinese people during their stair ascent so as to provide references for the design of artificial joints with large range flexion. **Methods** Common staircase as an experimental device was designed, and motion capture system(Optotrak Certus, NDI) and 3D force plate(AMTI, Bertec) were used to establish a systematic method to measure the lower limb motion from 40 subjects during stair ascent. **Results** The variation of joint angle and range of motion in hip, knee and ankle joints for the 40 subjects in different directions within one cycle were obtained and calculated. The range of motion in hip, knee and ankle joints at the sagittal plane were $-1.6^{\circ} \sim 66.7^{\circ}$, $0^{\circ} \sim 91.4^{\circ}$, $-20.8^{\circ} \sim 22.4^{\circ}$, respectively. **Conclusions** During the movement of stair ascent, the range of motion at the sagittal plane in hip, knee and ankle joints reached the maximum, with the most flexion in hip and knee. Compared with the movement during walking and jogging on flat road, the range of motion in joints both in hip and knee at the sagittal plane were larger during stair ascent.

Key words: Lower limb; Joint angle; Kinematics; Stairs; Range of motion

上楼梯是日常生活中人类的常见行为动作。不管是在高档住宅的个人家庭、各类住宅小区, 还是在

商场、宾馆、办公大楼等公共设施中, 楼梯都和我们的生活密切相关。研究上楼梯过程中人体下肢的活

收稿日期: 2011-02-01; 修回日期: 2011-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30810103908), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB711005), 天津市应用基础及前沿技术研究计划(11JCZDJC16900)。

通讯作者: 王成焘, 教授, 博士研究生导师, Tel: (021)34206847; E-mail: trib@sjtu.edu.cn。

动范围,可以为下肢人工关节设计及分析人体运动机理提供帮助。与正常步态研究相比,对正常人上楼梯的研究相对较少。张瑞红等^[1]对上楼梯时的步态特征进行过研究,采集了多个健康人行走时的运动学数据,并计算了髌、膝、踝关节所需力矩。刘建华等^[2]对不同上、下台阶方法的差异进行比较分析,发现不同方法上、下台阶时膝关节力矩有差异,而膝关节屈曲角度未见明显不同。国外一些学者也先后对上楼梯时下肢各关节的运动进行了分析^[3-7]。本文重点研究和分析上楼梯过程中对下肢关节角的影响。

1 方法

1.1 样本

测量样本是从大学校园中招募的志愿者,对于有以下情况者予以排除:近6个月下肢有受伤史,有过任何种类的下肢手术、背部及骨盆有疾病、神经性肌肉疾病及有平衡问题等。最终选取了40名健康志愿者(其中男性20名,女性20名,年龄 (24.6 ± 2.4) 岁,身高 (167.5 ± 6.9) cm,体重 (57.4 ± 8.1) kg)参加了此次测量。

1.2 实验设备与方案

实验中采用Optotrak Certus(NDI,加拿大)运动捕捉系统,共3台位置传感器,采样频率为128 Hz。足底力测量仪器为2台AMTI(Bertec,美国)三维测力台,每块测力台的长度为600 mm,宽度为400 mm,采样频率为512 Hz,该仪器可与运动捕捉系统同步测量。楼梯依据居民建筑中楼梯的标准尺寸设计,台阶高度为160 mm,共4步台阶,并在第1和第3步添加三维测力台(见图1)。本实验仅测量右下肢的运动参数,故将3台位置传感器置于楼梯的同侧,以便更有效地采集数据。

在进行运动学参数测量中,假设人体是由很多刚体构成的多自由度的机构^[8],这样可以方便地建立针对不同研究对象的统一的测量方法。依据国内学者所给出的推荐使用的标准的人体各部位局部坐标系定义方法^[9]对研究对象下肢运动坐标系进行定义。定义关节局部坐标系首先需要定义在人体表面容易提取的解剖学特征点,这些解剖学特征点将作为测量时的虚拟标记点。由于运动过程中,在人体表面解剖学特征点上直接标记坐标受皮肤运动的

影响比较大,为避免测量误差一般采用虚拟标记点的测量方法^[10],即通过测量足、小腿、大腿及腰上实际标记点所标记的刚体(每个刚体由4个实际标记点构成,其中任意3个实际标记点就可以确定刚体坐标系)坐标来获得人体表面解剖学特征点的运动坐标^[11]。

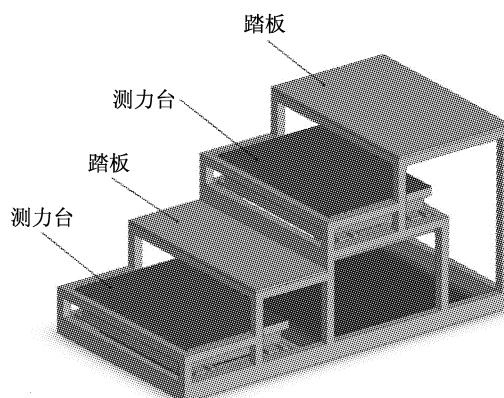


图1 楼梯三维模型
Fig.1 3D model of the stair

1.3 事件与周期定义

本文主要依据两块测力平台的足底反力Z轴方向曲线的极值点划分运动事件。文中所有周期和事件的定义均以右下肢为例,包含髌关节、膝关节和踝关节。实验对象的身高和体重不相同,即使运动速度相同,步形参数也会存在差异。为了减小个体间步形参数的差异,通常用人体测量参数值对步形参数进行规格化处理;其中,步长和步宽均表示成腿长的百分比^[12]。

上楼梯的事件定义与步态过程有所区别,上楼梯中规定了3个基本事件和2个相(摆动相和支撑相)。从图2可以看出,上楼梯过程的支撑相时间明显长于步态和慢跑过程中的支撑相时间,由于摆动相中足底反力没有明显特征,故不设置基本事件。如图2所示,足趾刚离开第1块测力台,即足底反力刚消失时对应足趾离地事件(toe off,周期约为0的位置),足跟刚触上第2块测力台,而使其产生足底反力时对应足跟着地事件(heel strike,周期约为31%的位置),第2块测力台Z轴方向足底反力局部极小值点(第1个波谷)对应支撑中位(周期约为60%的位置),足趾刚离开第2块测力台,即足底反力刚消失时对应足趾离地事件(周期约为100%的

位置)。1个完整的步态周期介于同侧足连续2个相同的步态事件之间。考虑到楼梯共4步台阶,第1和第3阶梯安装测力板,第1步踏上测力板需要短暂的适应时间,故本文上楼梯周期以右足趾离地事件为开始和结束的标志。

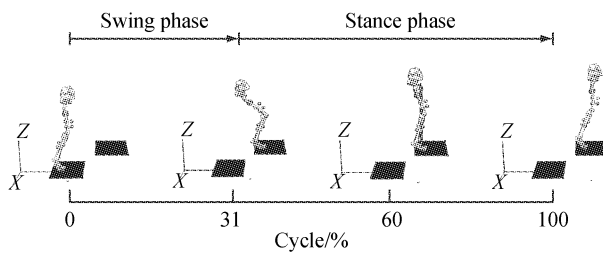


图2 上楼梯示意图
Fig.2 Sketch map of stair ascent

2 结果

2.1 下肢各关节的关节角度变化与分析

图3所示为上楼梯时下肢髋、膝、踝3关节在各个方向关节角的变化。其中,纵坐标上的X、Y、Z中的正值分别代表髋、膝关节上的屈曲、内收和内旋;代表踝关节上的跖屈、内收和旋后。黑实线表示样本均值,灰色带表示样本方差。横坐标表示所定义的1个完整的运动周期。从图3可以看出,3个关

节在矢状面上的变化较其他两个面上的变化值大。在上楼梯的支撑相阶段(周期中0%~60%阶段),初始当1只脚(左脚)刚着地(第1节楼梯)时,髋关节、膝关节均有1个较大的屈曲角度,随着身体往上一节楼梯移动,髋关节和膝关节逐渐伸展,屈曲角度逐渐减小;而踝关节在开始一段时间内随着重心前移先逐渐背屈,之后随重心上移,逐渐向跖屈方向变化,背屈角度变小,而当第2次双脚支撑(另1只脚刚接触第2节楼梯)时,踝关节背屈角又变大,之后踝关节角逐渐向跖屈方向变化。而髋关节、膝关节的屈曲最大值及踝关节的跖屈最大值均出现在摆动相阶段,首先由于足部要离地,踝关节跖屈渐渐达到最大值,接着小腿往上登楼梯(第3节楼梯)而膝关节达到最大屈曲,随后髋关节屈曲达到最高值。

2.2 下肢各关节的活动范围

本文将关节的活动范围用上限、下限及活动度(即上限与下限的差值)来表达。对所有测试者上楼梯运动时的下肢关节角进行统计,得到表1所列出的下肢3关节在3个方向运动的上限、下限及活动度。其中对应髋关节和膝关节正方向上的屈曲、内收和内旋运动,负值分别表示伸展、外展和外旋运动。而对应踝关节正方向上的跖屈、内收和旋后运动,负值分别表示背屈、外展和旋前运动。

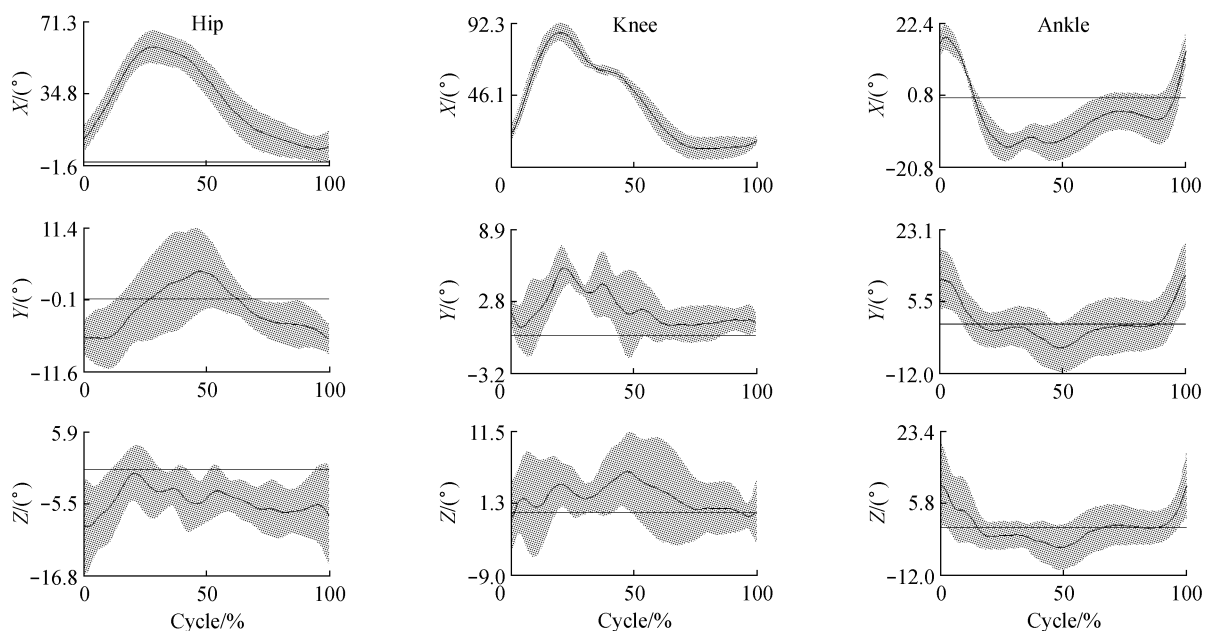


图3 上楼梯时髋、膝、踝关节角度变化图

Fig.3 Schematic diagram of changes in hip, knee and ankle joints during stair ascent

表1 典型行为动作下髋、膝、踝各关节3个方向的活动范围
Tab.1 The range of motion for hip, knee and ankle joints in three directions

下肢关节	正方向	下限/ (°)	上限/ (°)	活动度/ (°)
髋关节	屈曲	-1.6	66.7	68.3
	内收	-11.6	10.2	21.8
	内旋	-16.8	5.9	22.7
膝关节	屈曲	0	91.4	91.4
	内收	-3.2	8.9	12.1
	内旋	-9	11.5	20.5
踝关节	跖屈	-20.8	22.4	43.2
	内收	-12	23.1	35.1
	旋后	-11.7	23.4	35.1

从表1可以看出,上楼梯运动过程中髋关节屈曲角极值是沿所有方向角度中的最大值,为66.7°,而伸展角极值是沿所有方向角度中的最小值,为1.6°。髋关节矢状面上活动度最大,为68.3°,髋关节上内收和外展角度极值差别不大。膝关节屈曲角极值是沿所有方向角度中的最大值,为91.4°;其次是外旋,仅为11.5°。膝关节矢状面上活动度最大,为91.4°。踝关节上背屈、外展和旋前运动的极值非常相近,最大值是旋前角,为23.4°。踝关节上跖屈角和背屈角极值相差不大。同样,踝关节在矢状面上活动度最大,为43.2°,但是踝关节在矢状面、横断面和冠状面上的活动度的差别不是很大,尤其是在横断面和冠状面上的活动度完全相同,且数值均较髋、膝关节在这两个面上的活动度偏大。

3 讨论

本文对上楼梯过程中下肢的运动参数进行了全面的测量,并通过三维测力平台系统的划分运动周期;同时对下肢髋、膝、踝3个关节沿3个方向运动的关节角变化规律及活动范围进行了全面的分析。

张瑞红等^[1]的研究中,样本共14人,其中:男性8名,身高(171±6)cm;女性6名,身高(159±5)cm。其关节角变化规律为:当足尖通过最低点后,膝关节屈曲角逐渐增大直到大小腿伸直;而髋关节角度则是由最大向最小发展,直至摆动期末,达到最小值。这与本文研究数据一致(见图3)。Living-

ston等^[4]曾报道指出身高较低的志愿者(身高(155.9±2.1)cm)与身高较高的志愿者(身高(171.6±2.1)cm)相比,上楼梯时需要较大的膝关节平均最大屈曲角度,前者为92°~105°,而后者仅为83°~93°;本文所测志愿者(身高(167.5±6.9)cm)的膝关节最大屈曲角度为91.4°,与Livingston等研究数据基本一致。Riener等^[7]比较了在不同尺寸楼梯(坡度分别为24°、30°、42°)上完成上楼梯动作时下肢的运动情况,指出关节运动角度的大小与楼梯坡度有着显著关系,随着楼梯坡度的增高,髋、膝、踝关节的最大屈曲角度增大。故上楼梯时各关节的运动角度与测试者的身高、楼梯的尺寸等有联系,对于不同情况,其数值会变大或变小。

分析表明,上楼梯运动过程中,髋、膝、踝关节在矢状面上运动范围最大,且髋关节和膝关节屈曲运动范围最大。与水平路面上的正常行走^[13]和慢跑运动^[11]中关节运动范围比较,上楼梯运动中,髋关节和膝关节在矢状面上运动范围均较大;3种运动过程中,踝关节在矢状面上运动范围相近。

参考文献:

- [1] 张瑞红,金德闻. 不同路况下正常步态特征研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(8): 77-80.
- [2] 刘建华,丸山仁司,胜平纯司. 上下台阶方法的生物力学研究[J]. 中国康复理论与实践, 2003, 9(10): 604-605.
- [3] Andriacchi T, Andersson G, Fermier R, *et al.* A study of lower-limb mechanics during stair-climbing [J]. J Bone Joint Surg, 1980, 62(5): 749-757.
- [4] Livingston L, Stevenson J, Olney S. Stairclimbing kinematics on stairs of differing dimensions [J]. Arch Phys Med Rehabil, 1991, 72(6): 398-402.
- [5] Mian O, Thom J, Narici M, *et al.* Kinematics of stair descent in young and older adults and the impact of exercise training [J]. Gait Posture, 2007, 25(1): 9-17.
- [6] Protopadaki A, Drechsler W, Cramp M, *et al.* Hip, knee, ankle kinematics and kinetics during stair ascent and descent in healthy young individuals [J]. Clin Biomech, 2007, 22(2): 203-210.
- [7] Riener R, Rabuffetti M, Frigo C. Stair ascent and descent at different inclinations [J]. Gait Posture, 2002, 15(1): 32-44.
- [8] Tang G, Zhang XA, Zhang LL, *et al.* A technical method using musculoskeletal model to analyze dynamic properties

- of muscles during human movement [J]. *Comput Method Biomech Biomed Eng*, 2011, in press.
- [9] 唐刚, 魏高峰, 聂文忠, 等. 人体下肢关节坐标系的一种简单定义方法[J]. *北京生物医学工程*, 2009, 28(6): 606-609.
- [10] Schmidt R, Disselhorst-Klug C, Silny J, *et al.* A marker-based measurement procedure for unconstrained wrist and elbow motions [J]. *J Biomech*, 1999, 32(6): 615-621.
- [11] 唐刚, 周海, 张希安, 等. 慢跑的速度对青年女性下肢关节及肌肉的影响[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(5): 357-362.
Tang G, Zhou H, Zhang XA, *et al.* Influence of jogging speed on lower limb joints and muscles of young women [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(5): 357-362.
- [12] Hof AL. Scaling gait data to body size [J]. *Gait & Posture*, 1996, 4(3): 222-223.
- [13] 唐刚, 张希安, 季文婷, 等. 坡面步行中青年女性下肢关节角及肌肉激活度研究[J]. *医用生物力学*, 2011, 26(2): 158-162.
Tang G, Zhang XA, Ji WT, *et al.* Joint angles muscle activations in the lower limb of young women during slope walking [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(2): 158-162.
-

(上接第 459 页)

- [12] Goertzen DJ, Lane C, Oxland TR. Neutral zone and range of motion in the spine are greater with stepwise loading than with a continuous loading protocol. An in vitro porcine investigation [J]. *J Biomech*, 2004, 37(2): 257-261.
- [13] Stokes IA, Gardenr-Morse M, Churchill D, *et al.* Measurement of a spinal motion segment stiffness matrix [J]. *J Biomech*, 2002, 35(4): 517-521.
- [14] 邓国勇, 田联房, 陈艺, 等. 基于关节机器人的人体脊柱生物力学试验装置设计[J]. *医用生物力学*, 2008, 23(6): 446-453.
Deng GY, Tian LF, Chen Y, *et al.* Joint-robotics-based design of biomechanics testing device on human spine [J]. *J Med Biomech*, 2008, 23(6): 446-453.