

文章编号:1004-7220(2016)06-0501-05

## 下肢不等长对步态影响的实验分析

宋亮<sup>1,2</sup>, 邢阳辉<sup>2</sup>, 康婷<sup>2</sup>, 樊瑜波<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191;

2. 国家康复辅具研究中心 民政部人体运动分析与康复技术重点实验室, 北京 100176)

**摘要:** **目的** 采用正常人体单侧增高模拟下肢不等长, 分析下肢不等长步态特征, 研究下肢不等长对步态的影响, 为下肢假肢穿戴者因下肢不等长引起的慢性疾病提供理论依据。 **方法** 通过单侧穿鞋增高人为制造下肢不等长, 利用三维动态捕捉系统和地面反力采集设备采集受试者在正常步态和下肢不等长步态下的时空参数、地面反力和关节角度, 并进行对比分析。 **结果** 下肢不等长步态与正常步态在步长、步长时间和单侧支撑期存在显著差异。下肢不等长步态左右腿足跟着地期垂直方向地面反力均大于正常步态, 髋、膝、踝角度存在明显变化。 **结论** 下肢不等长是造成行走步态异常的重要原因, 可能是下肢假肢穿戴者产生腿部关节疾病的原因。

**关键词:** 下肢不等长; 步态分析; 下肢截肢者; 假肢; 运动分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2016.06.501

## Effects of leg length discrepancy on gait: An experimental study

SONG Liang<sup>1,2</sup>, XING Yang-hui<sup>2</sup>, KANG Ting<sup>2</sup>, FAN Yu-bo<sup>1,2</sup> (1. Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Key Laboratory of Human Motion Analysis and Rehabilitation Technology of the Ministry of Civil Affairs, National Research Center for Rehabilitation Technical Aids, Beijing 100176, China)

**Abstract:** **Objective** To simulate leg length discrepancy by unilateral increase in lower limb of normal person, analyze gait features in the case of leg length discrepancy and its effect on walking gait, so as to provide theoretical proofs for chronic musculoskeletal diseases in lower limb amputees due to leg length discrepancy. **Methods** Leg length discrepancy was simulated by subjects wearing shoes to increase the unilateral height of one leg. The time-space parameters, ground reaction forces and joint angles of the subjects during normal walking gait and leg length discrepancy gait were obtained via the 3D motion capture system and the reaction force platform to make comparative analysis. **Results** Significant differences were found between leg length discrepancy gait and normal gait in terms of step length, stride time and single supporting period. In the case of leg length discrepancy gait, the ground reaction force of both feet significantly increased at heel-strike phase compared with normal gait, and obvious changes were observed in angles of hip, knee and ankle joints. **Conclusions** Leg length discrepancy is an important cause leading to gait abnormalities, and maybe a cause of leg joint diseases for trans-tibial amputees wearing prosthesis.

**Key words:** Leg length discrepancy; Gait analysis; Lower limb amputee; Prosthesis; Motion analysis

收稿日期:2016-11-04; 修回日期:2016-11-25

基金项目:科技部研发专项(2016YFB1101101, 2016YFB1101105)。

通信作者:樊瑜波,教授,博士研究生导师, E-mail: yubofan@buaa.edu.cn。

下肢不等长指双下肢长度不一致,是一种常见的肢体疾病,分为结构性和功能性<sup>[1]</sup>。结构性下肢不等长会造成步态异常、骨关节炎、腰背疼痛和脊柱侧凸等疾病,对此通常采用矫形或手术等方法进行治疗<sup>[2-6]</sup>。对于下肢假肢穿戴者的功能性下肢不等长,大多是由于下肢假肢穿戴者穿戴假肢的不适配、姿势不正确等原因造成。这种不等长同样会导致下肢假肢穿戴者产生上述慢性疾病<sup>[7-10]</sup>。研究下肢不等长对步态的影响,将有助于解释这些疾病的发病机制,帮助下肢假肢穿戴者更好地适配假肢、改进假肢零部件,纠正行走中的不正确姿势,提高下肢假肢穿戴者的生活质量。

目前下肢不等长对身体的影响没有一致结论<sup>[11]</sup>。研究者针对腿部、骨盆、脊柱和肌肉等各种不同身体功能段分别进行了研究。Betsch 等<sup>[12]</sup>认为,下肢不等长大于 20 mm 将导致健康实验者脊柱显著的改变。Raczowski 等<sup>[13]</sup>也认为这是评估脊柱侧凸的界限。Gong 等<sup>[3]</sup>认为,骨盆的调节将有助于减缓功能性下肢不等长。研究发现,通过增加鞋底高度的方法能够减缓下肢不等长造成的背疼<sup>[14-15]</sup>。Morgenroth 等<sup>[16]</sup>讨论了动态下肢不等长对造成下肢假肢穿戴者背部疼痛的影响,但没有得出有意义的结论。目前,也有研究针对正常人或下肢假肢穿戴者进行步态分析<sup>[17-21]</sup>。其中, Lloyd 等<sup>[17]</sup>虽然进行了下肢假肢穿戴者的地面反力和关节不对称分析,但是没有关注到下肢不等长。Kakushima 等<sup>[19]</sup>首先使用了人为不等长模型,但是他们更关注脊柱的变化。Resende 等<sup>[21]</sup>进行了人为模拟不等长分析,关注步态支撑期关节的改变。

本文采用正常人体单侧增高模拟下肢不等长,对下肢不等长状态行走中的整个步态周期的时空参数、地面反力和关节角度进行研究。研究结果表明,下肢不等长步态与正常步态在步长、步长时间和单侧支撑期存在显著差异。下肢不等长步态下左、右腿足跟着地期垂直方向地面反力均大于正常步态,髋、膝、踝关节角度与正常步态存在明显不同。

## 1 对象和方法

### 1.1 受试者

9名健康志愿者,7男2女,年龄(30±4)岁,身高(173±8)cm,体重(66±8)kg,身体质量指数

(BMI)19~25,双腿等长。没有任何脊柱、腿部、足部的骨骼病史和神经病史,在1年内无躯干和腿部骨折或扭伤,右脚为主动脚。所有受试者均签署知情同意书,并取得国家康复辅具研究中心审查委员会的批准。在数据收集之前,所有人都强制性地熟悉设备并进行了练习。

### 1.2 实验用装备

如图1所示,受试者穿着鞋跟高为3cm不同号码的运动鞋(迪卡侬,上海,中国)。在模拟下肢不等长的实验中,运动鞋统一穿着在右脚,右侧为长肢体侧。

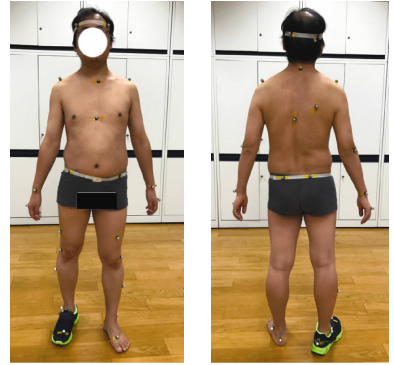


图1 受试者标记点位置及实验状态

Fig. 1 Marker location on the volunteer body and simulated experiment circumstance

### 1.3 实验方案

采用 VICON 三维动态捕捉系统(Oxford Metrics 公司,英国)实时追踪受试者关键解剖位上的荧光标记球。数据采集前,测量人体身高、体重和身体各运动段长度。根据 VICON 系统 Plug-in-Gait Full-Body 模型分别在头部、躯干、上肢、骨盆和下肢表贴荧光标记球(直径 15 mm)。VICON 系统的采集频率为 100 Hz。两块测力板(OR-65, AMTI 公司,美国)在志愿者行走途中记录地面反力数据。测力板的采样频率为 1.5 kHz。

实验在 10 m 的平地空间内进行,进入采集区域前有预走区域。受试者听到开始指令后,在规定的步态采集区域内按其自然行走速度行走。第 1 组为正常步态行走,两腿等长。第 2 组为右侧穿鞋行走,双腿不等长。下肢不等长行走前有休息,并在穿鞋后进行适应性行走。

### 1.4 数据分析

使用 NEXON 1.85 软件根据地面反力对采集数据进行步态周期的划分,计算步频、步速、步长、步长时间、跨步长、跨步长时间、单侧支撑期和双侧支撑期参数。

以右脚脚跟着地为步态周期的起点,右脚脚跟再次着地为步态周期的结束。根据 VICON 输出结果用 MATLAB R2014b 对步态周期髋、膝、踝角度进行步态周期和角度的标准化处理,根据所有人平均值对比正常步态与下肢不等长步态的差异<sup>[22]</sup>。并对地面反力数据采用 4 阶巴特沃斯滤波器滤波,截止频率为 6 Hz。对每组步态周期的地面反力进行体重和时间的标准化处理,对比正常步态与下肢不等长步态的差异<sup>[23]</sup>。

表 1 下肢不等长步态与正常步态时空参数对比

Tab.1 Comparison of time-space parameters between normal walking gait and leg length discrepancy gait

步态参数	正常步态		下肢不等长步态	
	左脚	右脚	左脚	右脚
步频/(步数·min <sup>-1</sup> )	112.35 ± 8.67	114.58 ± 8.97	109.75 ± 9.16	111.72 ± 11.32
步速/(m·s <sup>-1</sup> )	1.06 ± 0.13	1.09 ± 0.13	1.05 ± 0.15	1.08 ± 0.16
跨步长/m	1.14 ± 0.15	1.14 ± 0.14	1.15 ± 0.17	1.16 ± 0.16
跨步时间/s	1.07 ± 0.08	1.05 ± 0.08	1.10 ± 0.09	1.08 ± 0.10
步长/m	0.58 ± 0.08	0.58 ± 0.08	0.56 ± 0.10	0.62 ± 0.08*
步长时间/s	0.54 ± 0.05	0.53 ± 0.04	0.60 ± 0.05*	0.49 ± 0.04*
单侧支撑期/s	0.43 ± 0.03	0.43 ± 0.03	0.40 ± 0.04*	0.48 ± 0.06*
双侧支撑期/s	0.20 ± 0.04	0.20 ± 0.04	0.21 ± 0.05	0.20 ± 0.05

注: \* 表示与正常步态时有显著差异, P < 0.05

### 2.2 垂直方向地面反力差异

如图 2 所示,右腿着地为步态周期起点。根据地面反力将以右脚着地为开始的步态周期划分为支撑早期(0% ~ 15% 步态周期)、单侧支撑期(15% ~ 45% 步态周期)、预摆期(45% ~ 60% 步态周期)和摆动期(60% ~ 100% 步态周期)。下肢不等长组左右两侧在同一步态周期脚跟着地时垂直方向地面反力均大于正常步态。下肢不等长组右侧足尖蹬离时,垂直方向地面反力与正常步态基本相同,但是左侧则小于正常步态。

### 2.3 关节角度差异

在采集的正常步态周期中,右脚先进入支撑期,

使用 SPSS 20.0 软件对志愿者正常步态和下肢不等长步态参数进行配对 t 检验,显著性检验标准为 P < 0.05。

## 2 结果

### 2.1 时空参数差异

如表 1 所示,正常步态与下肢不等长步态对比,下肢不等长步态步频、步速均小于双侧正常步态时,跨步时间增大。同时,右脚步长增大,步长时间减小,右腿单侧支撑期增大,左腿单侧支撑期减小。下肢不等长步态左右双侧脚步长、步长时间、单侧支撑期明显不同。统计结果表明,下肢不等长步态时左脚步长时间、单侧支撑期以及右脚步长、步长时间和单侧支撑期,与正常步态存在明显差异(P < 0.05)。

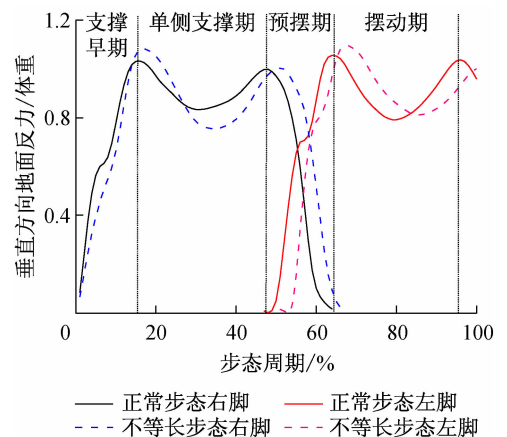


图 2 下肢不等长步态与正常步态在垂直方向地面反力的对比  
 Fig.2 Comparison of ground reaction forces in vertical direction between normal walking gait and leg length discrepancy gait

约在步态周期 60% 后进入摆动期。左脚先进入摆动期,约在步态周期 40% 后进入支撑期。

**2.3.1 髋关节** 下肢不等长组左腿髋关节在步态周期的摆动期关节角度小于正常步态,在支撑期关节角度大于正常步态。右腿髋关节角度在摆动期大于正常步态,支撑期前期小于正常步态,预摆期大于正常步态[见图 3(a)]。

**2.3.2 膝关节** 下肢不等长组左腿在步态预摆期膝关节屈曲角度小于正常步态,且滞后于正常步态。

随后在摆动期大于正常步态。但进入支撑期后先小于而后大于正常步态。右腿则在整个支撑期大于正常步态,从支撑期中的蹬离开始小于正常步态,但进入摆动期后大于正常步态[见图 3(b)]。

**2.3.3 踝关节** 下肢不等长组左腿踝关节在其摆动期和支撑前期角度远小于正常步态。右腿踝关节从脚跟着地开始的支撑期都远小于正常步态,直到预摆期开始大于正常步态,最终当其摆动时小于正常步态[见图 3(c)]。

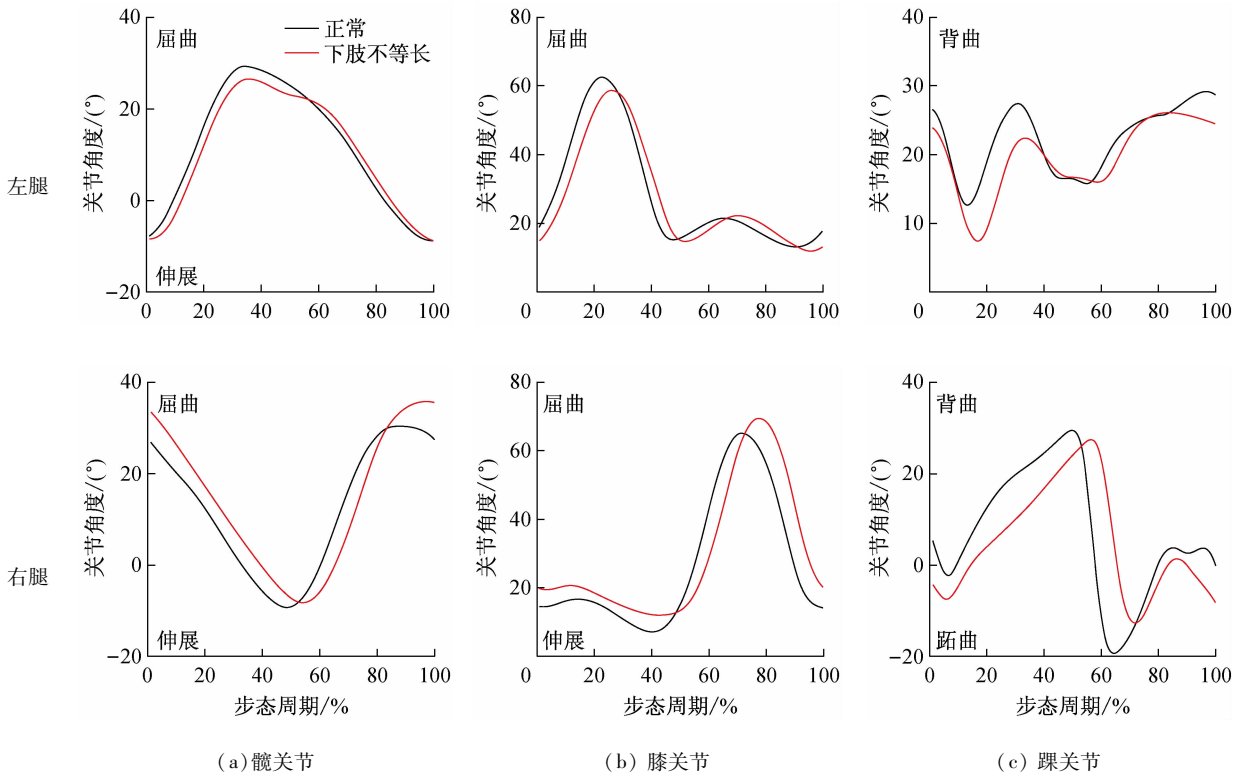


图3 下肢不等长步态与正常步态髋、膝、踝角度对比

Fig.3 Comparison of the angles in hip, knee and ankle joints between normal walking gait and leg length discrepancy gait (a) Hip joints, (b) Knee joints, (c) Ankel joints

## 3 讨论

### 3.1 时空参数

受下肢不等长影响,下肢不等长步态步频、步速都减小,且跨步时间大于正常步态。左右腿单侧支撑期、步长时间的改变是为了缓解肢体不对称引起的身体重心的改变,在步态中稳定身体重心,从而也带来了步长的改变。右腿即长下肢侧单侧支撑期增大,将增加右腿的用腿时间,如果考虑慢性积累右腿

更有可能导致关节和骨的慢性疾病,这与 Friberg 等<sup>[24]</sup>下肢假肢穿戴者坐骨神经痛和髋关节慢性疼痛总是发生在长肢体侧的结论一致。

### 3.2 垂直方向地面反力

根据结果显示两侧在步态的足跟着地期垂直方向地面反力均有明显增加,这表明下肢不等长状态将比正常人体行走下肢骨和关节将承受地面更大的冲击力。下肢不等长步态中左腿支撑期的足跟着地和足尖蹬离都比正常步态时垂直地面反力高,这种

冲击力的积累可能对下肢髌、膝、踝关节产生慢性影响,引起下肢骨关节炎。左腿相当于单侧下肢截肢者的健侧。这与 Morgenroth 等<sup>[25]</sup>发现单侧下肢假肢穿戴者健侧更容易患膝关节炎的结果一致。

### 3.3 关节角度

在以右腿着地开始的下肢不等长步态周期中的支撑期,身体左腿髌关节减小屈曲,右腿髌关节增加屈曲以调整身体的平衡适应不等长步态。摆动期与之相反。右侧膝关节则是在支撑期增大屈曲,在摆动初期减小屈曲,摆动后期增大屈曲来对抗不等长产生的影响。左右两侧膝关节增大减小屈曲角度相反。右侧踝关节在支撑期的跖屈和背曲减小用以稳定身体平衡。目前,单一的角度分析并不能彻底分析下肢不等长状态对身体的影响,应进一步与重心和身体运动段力矩联合分析。

## 4 结语

下肢不等长是造成行走步态异常的重要原因。目前推测下肢不等长可能是产生慢性骨或关节疾病的原因,但需要进一步实验探索髌、膝、踝的关节疾病与步态支撑时间与地面反力之间的关系。并且现阶段实验是正常人模拟下肢不等长的实验,进一步的实验受试者应拓展到下肢假肢穿戴者。

### 参考文献:

[1] RUSH WA, STEINER HA. A study of lower extremity length inequality [J]. *Am J Roentgenol Rad Ther*, 1946, 56(5): 616-623.

[2] HARVEY WF, YANG M, COOKE TDV, et al. Association of leg-length inequality with knee osteoarthritis: A cohort study [J]. *Ann Intern Med*, 2010, 152(5): 287-292.

[3] GONG W, RO H, PARK G, et al. The Influence of pelvic adjustment on functional leg length inequality and foot pressure [J]. *J Phys Ther Sci*, 2011, 23(1): 17-19.

[4] BRANTINGHAM J W, LEE GILBERT J, SHAIK J, et al. Sagittal plane blockage of the foot, ankle and hallux and foot alignment-prevalence and association with low back pain [J]. *J Chiropr Med*, 2006, 5(4): 123-127.

[5] GURNEY B. Leg length discrepancy [J]. *Gait Posture*, 2002, 15(2): 195-206.

[6] 所罗门,著. 康庆林,张长青,柴益民,译. Ilizarov 技术基本原理及应用 [M]. 北京:人民军医出版社,2012.

[7] FRIBERG O. Clinical symptoms and biomechanics of lum-

bar spine and hip joint in leg length inequality [J]. *Spine*, 1983, 8(6): 643-651.

[8] MORGENROTH DC, GELLHORN AC, SURI P. Osteoarthritis in the disabled population: A Mechanical Perspective [J]. *Pm&R*, 2012, 4(5): S20-S7.

[9] BURKE M J, ROMAN V, WRIGHT V. Bone and joint changes in lower limb amputees [J]. *Ann Rheum Dis*, 1978, 37(3): 252-354.

[10] HURLEY GRB, MCKENNEY R, ROBINSON M, et al. The role of the contralateral limb in below-knee amputee gait [J]. *Prosthet Orthot Int*, 1990, 14(1): 33-42.

[11] BRADY R J, DEAN JB, SKINNER TM, et al. Limb length inequality: Clinical implications for assessment and intervention [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2003, 33(5): 221-34.

[12] BETSCH M, RAPP W, PRZIBYLLA A, et al. Determination of the amount of leg length inequality that alters spinal posture in healthy subjects using rasterstereography [J]. *Euro Spine J*, 2013, 22(6): 1354-1361.

[13] RACZKOWSKI JW, DANISZEWSKA B, ZOLYNSKI K. Functional scoliosis caused by leg length discrepancy [J]. *Arch Med Sci*, 2010, 6(3): 393-398.

[14] GILES LG, TAYLOR JR. Low-back pain associated with leg length inequality [J]. *Spine*, 1981, 6(5): 510-521.

[15] GOLIGHTLY YM, TATE JJ, BURNS CB, et al. Changes in pain and disability secondary to shoe lift intervention in subjects with limb length inequality and chronic low back pain: A preliminary report [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2007, 37(7): 380-388.

[16] MORGENROTH DC, SHAKIR A, ORENDURFF MS, et al. Low-back pain in transfemoral amputees is there a correlation with static or dynamic leg-length discrepancy? [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2009, 88(2): 108-113.

[17] LLOYD CH, STANHOPE SJ, DAVIS IS, et al. Strength asymmetry and osteoarthritis risk factors in unilateral trans-tibial, amputee gait [J]. *Gait Posture*, 2010, 32(3): 296-300.

[18] WALSH M, CONNOLLY P, JENKINSON A, et al. Leg length discrepancy: An experimental study of compensatory changes in three dimensions using gait analysis [J]. *Gait Posture*, 2000, 12(2): 156-161.

[19] KAKUSHIMA M, MIYAMOTO K, SHIMIZU K. The effect of leg length discrepancy on spinal motion during gait: Three-dimensional analysis in healthy volunteers [J]. *Spine*, 2003, 28(21): 2472-2476.

[20] GILES LG. Lumbosacral facet joint angles associated with leg length inequality [J]. *Rheumatol Rehabil*, 1981, 20(4): 233-238.