

文章编号:1004-7220(2010)04-0257-05

## 面向逆向动力学仿真驱动和验证的 半蹲式跳伞着陆实验研究

王 旻, 牛文鑫, 何 艳, 裴葆青, 樊瑜波

(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)

**摘要:**目的 半蹲式跳伞着陆模拟实验的设计和相数据测量,为逆向动力学软件 AnyBody Modeling System 模型的建立、驱动和验证提供数据。**方法** 根据逆向动力学分析数据驱动和验证的需要,受试者从 0.32 m 高的平台跳落,模拟半蹲式跳伞着陆。对受试者下肢关节运动学参数、地面反力以及下肢 4 块主要肌肉的肌电图进行测量。**结果** 受试者在与地面接触前后 1 s 内,髋、膝、踝关节角度随时间的变化、右脚地面反力以及压力中心轨迹用来驱动模型;肌电活动性测量数据用来验证模型。**结论** 实验设计可以满足肌骨模型分析的要求,并可用于对半蹲式跳伞着陆的进一步研究。

**关键词:** 跳伞; 着陆; 肌骨模型; 逆向动力学分析; 动力学仿真

**中图分类号:** R318.01, R857, R873 **文献标志码:** A

### Experimental study on the half-squat parachute landing for driving and validating the inverse dynamic simulation

WANG Yang, NIU Wen-xin, HE Yan, PEI Bao-qing, FAN Yu-bo (Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract: Objective** To provide data for establishing, driving and validating the inverse dynamics model of AnyBody Modeling System, the simulated half-squat parachute landing experiment was designed and relevant data were collected. **Method** The subject was required to jump from a 0.32 m high platform to simulate the half-squat parachute landing. The kinematic parameter of lower extremity joint, the ground reaction force and the surface electromyogram (SEMG) of four main muscles in the lower extremity joint were measured simultaneously. **Results** The angle changes of hip, knee and ankle along with time in three anatomical planes, the ground reaction force of right foot and the trajectory of the center of pressure were collected within 1 second just before and after the subject landing. These data would be used to drive the musculoskeletal model, while the data for measuring electromyogram activity would be used to validate the model. **Conclusions** The experiment meets the requirement of musculoskeletal model analysis, which can be used for further study of half-squat parachute landing.

**Key words:** Parachutes; Landing; Musculoskeletal model; Inverse dynamic analysis; Dynamic simulation

跳伞损伤在伞兵平时和战时的伞降训练、飞行员弹射逃生以及非军事的跳伞运动中普遍存在,对

跳伞者的健康造成很大威胁。谢雄等<sup>[1]</sup>对我国 1 759 例伞兵跳伞伤致伤原因进行了研究,发现

收稿日期:2010-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10925208),国家重点实验室开放基金,中央高校基本科研业务费专项。

作者简介:王旻(1987-),女,硕士研究生,研究方向:航空航天生物医学工程,运动生物力学。

通讯作者:樊瑜波(1965-),男,教授,博士研究生导师,Tel:(010)82339428;E-mail:yubofan@buaa.edu.cn。

69.9%的跳伞损伤为着陆损伤。跳伞着陆造成的损伤种类很多,包括踝、膝关节的扭伤,胫骨、跟骨的骨折,以及脊柱的骨折、脱位等。据 Ekeland<sup>[2]</sup>对4 449例跳伞损伤的研究报告,下肢损伤达到全部跳伞伤的80%。因此,对于跳伞着陆损伤尤其是下肢损伤的机理研究十分重要。

国内外对于跳伞着陆的研究,主要集中于对志愿者测试的方法。在 Kasturi 等<sup>[3]</sup>的实验研究中,志愿者从不同高度的平台跳落模拟跳伞着陆过程。国内对于半蹲式跳伞着陆的研究也是通过平台跳落的志愿者测试来模拟<sup>[4,6]</sup>。但是,志愿者测试方法存在一定的局限性。首先,志愿者存在个体差异性,往往需要大量的实验数据才能得到可靠的实验结果;其次,出于对志愿者安全的考虑,实验无法模拟真实的高速着陆速度,也无法得到着陆损伤的相关动作;再次,测量过程难以涉及到关节压力、肌肉作用力等重要指标。应用数值模拟的方法,可得到较好的结果,重复性和比较性都优于志愿者测试。美国军方对跳伞着陆的有限元模型进行了分析<sup>[3,7]</sup>,但是他们的模型并非基于解剖结构,对骨骼、韧带和肌肉的分析能力显得不足。虽然根据医学断层影像可以建立基于解剖的三维有限元模型<sup>[8]</sup>,但是这种模型计算量大,对软件和计算机硬件的要求都比较高,现阶段更适宜对人体局部进行分析。

为了更好地研究跳伞着陆过程中运动损伤及其防护机制,应用逆向动力学分析方法,将人体简化为几个主要节段的多刚体,根据如参考点的运动轨迹、模型的速度、加速度等相关运动学的数据,反推出引起特定运动的力学参数。AnyBody Modeling System (AnyBody Technology Inc, Aalborg, Denmark) 则是针对于肌骨系统的逆向动力学分析软件<sup>[9]</sup>。AnyBody Modeling System 有其自己的编写语言 Any-script,可以分类编写人体肌骨系统的各个节段;软件根据这些数据和内部的算法,可以计算出各个关节和肌肉的作用力以及其他一些必要参数。但是软件的建模、驱动和验证需要完整的实验数据支持,本文将对面向 AnyBody 软件建模仿真的跳伞着陆实验设计和实验结果进行详细描述,该模型将针对性地用于对跳伞着陆损伤影响因素的研究。

## 1 材料与方法

实验受试者自愿参加本实验,受试者为女性,身体健康,对半蹲式跳伞着陆动作要领有较好的理解,受试者在近一年内下肢未受外伤和神经功能障碍。受试者身高 1.6 m,体重 57 kg,同时对受试者的大腿、小腿和足的长度进行测量,其他参数按照 Aalborg 大学开发的肌骨系统的参数设置为准,作为模型参数建立 AnyBody 受试者肌骨模型。原始肌骨模型来源于 AnyScript Model Repository,该模型由 AnyBody Technology 公司按照 Damsgaard 等<sup>[9]</sup>的描述开发。

在典型的人体逆向动力学分析中,肌骨系统都有肌肉冗余的问题,即驱动关节运动所必须的肌肉数量要小于实际建立的肌肉模型数量,在人体中是由神经系统来决定各个肌肉的受力分配。AnyBody 则提供了几种优化分配的方案,使得目标函数  $G(f^{(M)})$  最小,其中  $Cf = d, 0 \leq f_i^{(M)} \leq N_i, i \in \{1, 2, \dots, n^{(M)}\}$ 。  $d$  为所有已知的加载,  $C$  为系数矩阵,  $f^{(M)}$  为肌肉力,只可承受拉力,  $N_i$  为肌肉强度。AnyBody 主要的优化标准有:

$$G(f^{(M)}) = \sum_{i=1}^{n^{(M)}} \left( \frac{f_i^{(M)}}{N_i} \right)^p$$

该优化标准以 Hill 模型<sup>[10]</sup>为基础。经过相关文献调研和参考,主要下肢肌肉模型将选用以 Hill 模型为基础的模型,即多项式型的肌肉模型,  $p$  值选为 3, 有效地增大肌肉的协同性。

在最近的研究中发现使用右侧下肢实验数据来进行针对损伤预防的研究,其结论具有保守性<sup>[5]</sup>,所以建立的 AnyBody 模型主要关注受试者右侧下肢,模型建立如图 1 所示。按照我国标准半蹲式跳伞着陆姿势三紧一平的要求,对受试者进行培训,即要做到两腿弯曲,将膝、踝关节、前脚掌内侧靠齐夹紧,脚掌与地面保持平行。受试者从高度为 0.32 m 的平台跳落,仅右脚落于测力台上,以便于逆向动力学的分析。

为实现对 AnyBody 模型的驱动,需要对肌骨模型的运动进行定义,需要地面反力和压力中心轨迹。利用三维运动捕捉系统来获得标志点的三维运动轨迹,受试者身体上固定装有标志点的刚体板,由 NDI Optotrak Certus (NDI公司,加拿大)检测标志点的三

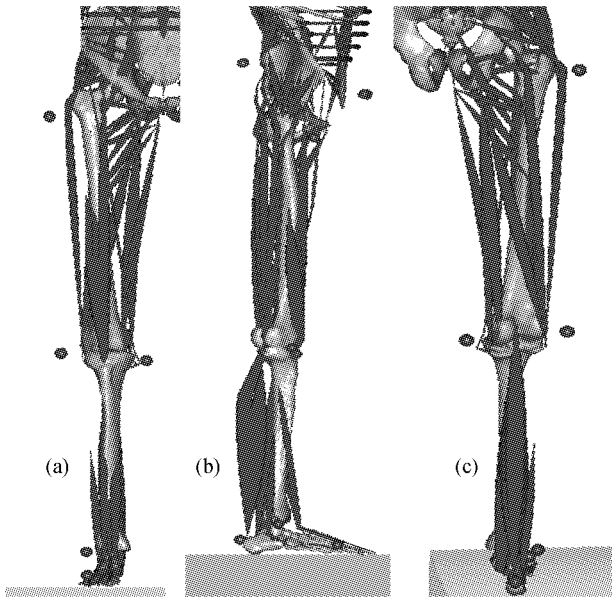


图1 AnyBody Modeling System 模型示意图 (a) 前面观, (b) 侧面观, (c) 后面观

Fig.1 Model in AnyBody Modeling System (a) anterior view, (b) lateral view, (c) posterior view

维坐标, 并利用刚体板定义的虚拟点——髌骨、大转子、股骨侧骨节、胫骨侧骨节、侧踝、跟骨和第5跖骨的三维轨迹, 使用V3D配套处理软件, 简单建模计

算出各个关节活动的角度变化, 从而便于在 Any-Body Modeling System 中驱动模型的运动(利用虚拟点的三维轨迹同样可以驱动模型)。利用测力台 Bertec FP4060-08-100 (Bertec 公司, 美国) 记录地面反力, 并记录压力中心随时间的变化轨迹。

另外, 受试者通过粘贴银/氯化银一次性电极, 连接肌电测量便携式单元, 将肌电信号经由放大器输送到 Bertec AMT-8 表面肌电仪进行测量。肌电信号的测量中, 主要关注于 4 块肌肉: 胫骨前肌 (Tibialis anterior muscle, TA)、外侧腓肠肌 (Lateral gastrocnemius, LG)、股直肌 (Rectus femoris, RF)、股二头肌 (Biceps femoris, BF)。这些实际测量的肌电信号主要用来与未来模型计算出的肌肉活动度、肌肉作用力进行比较。所有的运动学数据、地面反力和肌电信号实现同步测量。

## 2 结果

受试者完成半蹲式跳伞着陆过程, 记录各个虚拟点的三维坐标轨迹, 可计算出下肢主要关节的角度随时间的变化, 同时可记录作用于右脚的地面反力以及压力中心轨迹, 从而作为 AnyBody 志愿者模型的驱动条件。

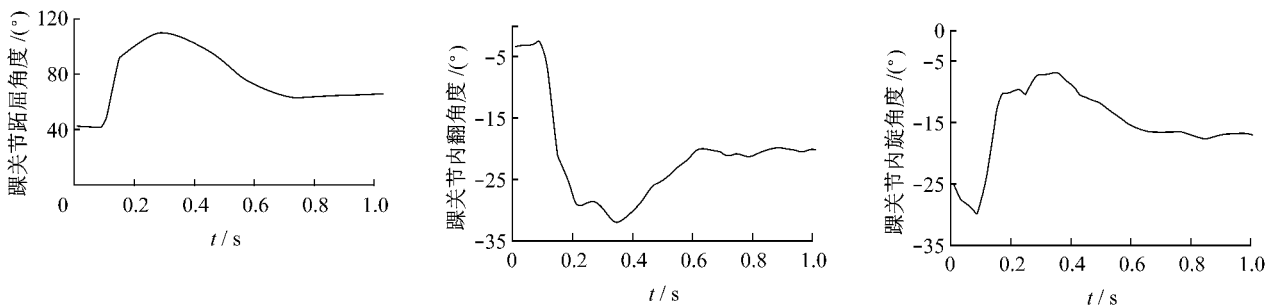


图2 踝关节 3 个方向角度随时间的变化

Fig.2 The histories of the ankle angles in three anatomical planes

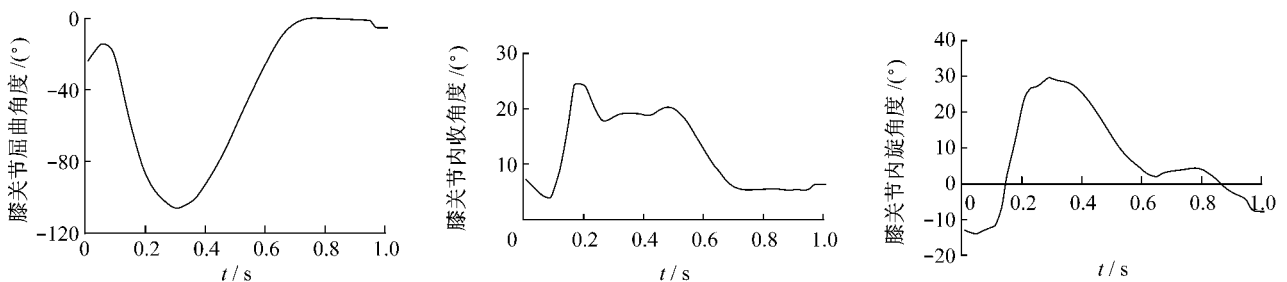


图3 膝关节 3 个方向角度随时间的变化

Fig.3 The histories of the knee angles in three anatomical planes

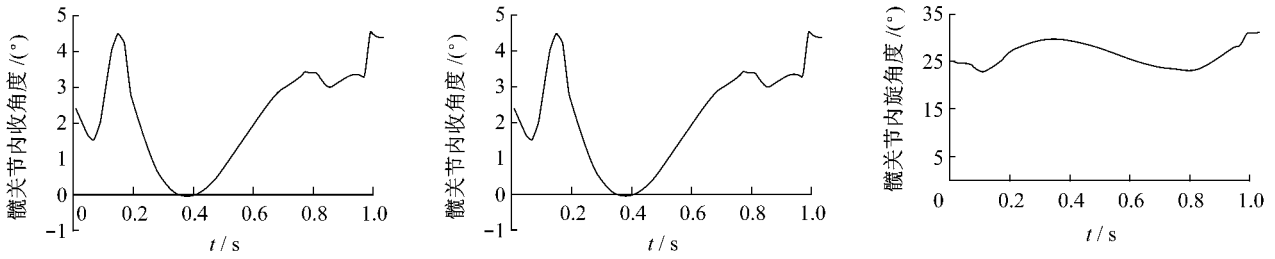


图4 髋关节3个方向角度随时间的变化  
Fig.4 The histories of the hip angles in three anatomical planes

实验选取着陆触地时刻前后的1s进行分析记录,可以看到各关节角度均在着陆时刻后约0.2s达到最大值,而完成半蹲式着陆过程约为0.5s,之后各参数值趋于稳定。图2~4分别为踝关节、膝关节和髋关节3个方向角度随时间的变化图。这些参数将很好地定义 AnyBody 模型的运动变化。

实际测量值与体重的比(BWR)表示。水平方向地面反力较小,垂直方向地面反力大于体重的3倍,是造成下肢损伤的重要因素<sup>[11]</sup>。图6显示了着陆后压力中心的变化轨迹,是 AnyBody 软件进行逆向动力学分析的主要信息之一。图7为下肢4块主要肌肉的表面肌电图,肌电信号图都经过了归一化处理。

图5为受试者右脚所受的地面反力,地面反力以

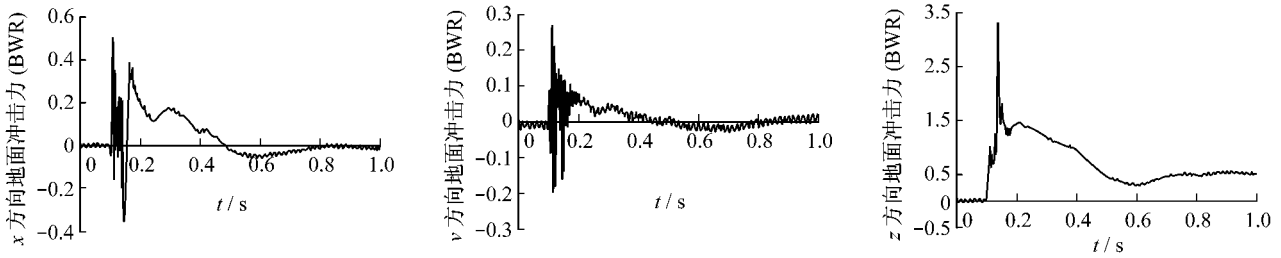


图5 3个方向的地面反力(BWR)  
Fig.5 The impact force in three perpendicular directions (BWR)

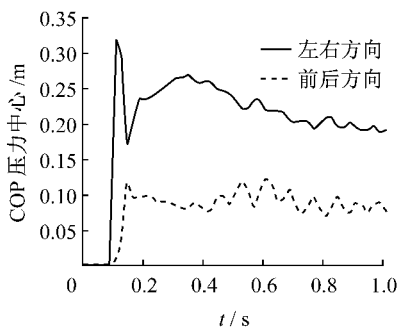


图6 压力中心轨迹  
Fig.6 Trajectories of COP in the anterior-posterior and medial-lateral L-R directions

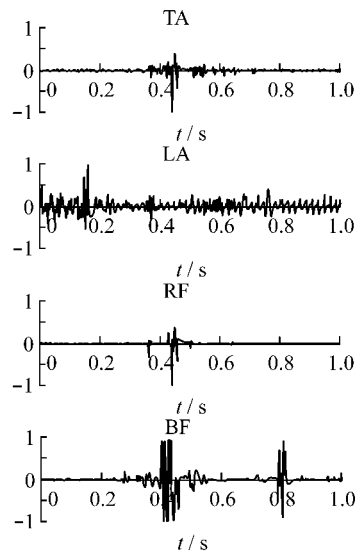


图7 下肢四块主要肌肉经归一化后的肌电图  
Fig.7 Normalized sEMG of four main muscles in right lower limb

### 3 讨论

本实验以 AnyBody Modeling System 模型的建模和逆向动力学分析为中心进行设计,对其建模及分析所需要的参数进行测量。实验得到了受试者身体参数以及运动学和动力学的相关数据,提供了足够的模型建立和分析条件。从受试者关节角度随时间的变化图上可以看到,在受试者右脚与地面接触后约 0.2 s 内各关节活动度都会达到最大,关节角度的最大值是整个着陆过程中关节活动的极限值,也是关节韧带、肌肉损伤的重要原因<sup>[3]</sup>。Whitting 等<sup>[11]</sup>的研究表明,垂直地面反力随着速度的增加而显著性增加,是造成下肢损伤的重要因素。

Kong 等<sup>[7]</sup>用有限元模型验证了着陆地面硬度和倾斜程度对着陆的影响,跳伞人员不同负重对着陆的影响以及着陆速度大小对着陆的影响。然而这些因素的影响最终可归结于跳伞者关节受力、关节活动角度以及关节相关肌肉、韧带受力情况的影响,同时跳伞者着陆损伤的直接原因也是骨骼、肌肉受力以及关节活动角度超过了理论极限值所造成的。而 AnyBody 模型的进一步分析则能提供这些相关数据依据,使得对半蹲式跳伞着陆损伤的影响因素有更深层的认识和理解。

在 AnyBody Modeling System 建模过程中,可供选取的肌肉模型不但包括本实验中应用的多项式模型,也包括肌肉活动度最大/最小模型,

$$G(f^{(M)}) = \max\left(\frac{f_i^{(M)}}{N_i}\right)$$

该模型的最大优点在于,基于这种假设肌肉的疲劳与其活动度有很大相关性,最大肌肉活动度模型就是基于最小肌肉疲劳的假设产生的<sup>[9,12]</sup>。模型长时间的受力或者相关人体工效学的研究可用此模型;在本研究中模型瞬时受力,不宜取用这种肌肉受力优化标准。

另外实验设计中要对下肢 4 块主要肌肉的肌电信号进行测量,这些数据对 AnyBody 的逆向动力学分析来说不是很重要,但是考虑到对模型的验证,肌电信号的测量却十分关键。肌电信号包含了肌肉活动的丰富信息,表面肌电与肌肉受力的关系探讨也是很多研究关注的焦点<sup>[13]</sup>,可以通过对表面肌电的测量与 AnyBody 逆向动力学的分析结果进行对比

来验证模型。在 Damsgaard 等<sup>[9]</sup>的研究中,使用步态实验测量的肌肉电信号的归一化处理结果与 AnyBody 中计算的肌肉活动度进行比较,有一定的相关性。事实上表面肌电与肌肉受力并没有非常确定的关系,只能通过表面肌电来对肌肉的受力进行预测,其中的影响因素也较多,如表面肌电电极粘贴位置等,需要进一步的研究。另外,肌肉受力的在体测量非常困难,此类型的实验验证存在较大难度。但是,通过对表面肌电活动性的测量来定性验证模型肌肉力计算结果依然有重要的意义。

该实验设计能有效地为 AnyBody 逆向动力学分析软件的建模提供数据支持,然而也存在一定的局限性。首先本实验选用的受试者并非实际跳伞者,主要由于我国女性伞兵或飞行员人数较少,很难实际接触到,为此对受试者进行了严格的培训和筛选;其次,本实验受试者达到的着陆速度比实际跳伞着陆速度小,难以对着陆损伤情况进行研究。然而出于对受试者安全的考虑,高速着陆的实验研究不宜进行;对于较低着陆速度的模型建立和分析也是有意义的,他能为高速的模拟提供依据和验证;高速着陆速度的逆向动力学分析,可以使用相关影像提供的运动学数据进行研究。

### 参考文献:

- [1] 谢雄,安晓忠,田迎军. 1759 例跳伞伤致伤因素分析[J]. 解放军预防医学杂志,2004(4):114-115.
- [2] Ekeland A. Injuries in military parachuting: a prospective study of 4499 jumps[J]. Injury, 1997, 28(3): 219-222.
- [3] Kasturi K, Kwok P, Lee C. Design and evaluation of protective devices for injury prevention during paratrooper landing [C]. 18th AIAA-Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Munich, Germany, 2005; AIAA 2005-1632.
- [4] 冯文树,刘铁汉,何扬举,等. 平台跳伞训练中着陆冲击力在人体上的分布[J]. 生物医学工程杂志. 1986,3(2):94-98.
- [5] 牛文鑫,樊瑜波,王畅,等. 半蹲式跳伞着陆运动生物力学双侧下肢对称性研究[J]. 医用生物力学, 2009, 24(增): 138.
- [6] 王畅,樊瑜波,牛文鑫,等. 女性半蹲式跳伞着陆运动中韧带和护踝对下肢防护的生物力学作用[J]. 医用生物力学, 2009, 24(增): 83-84.
- [7] Kong W, Kasturi K, Lee C. Biomechanical modeling of

(下转第 272 页)