

三维动作捕捉仪在服装工效学评价中的应用

田苗^{1,2}, 李俊^{*1,2,3}

(1. 东华大学 服装·艺术设计学院, 上海 200051; 2. 东华大学 功能防护服装研究中心, 上海 200051; 3. 东华大学 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051)

摘要:从发展过程、应用领域和不同产品优缺点的角度出发,对三维动作捕捉仪进行回顾和分析。结合目前服装工效学评价的一般方法,剖析了现有方法存在的问题及使用三维动作捕捉仪的优势;通过对现有研究的回顾,预测了三维动作捕捉仪在服装工效学评价领域的发展趋势。结合步态分析和行走模式等生物力学和运动学理论,可以从提高穿着者作业效率、减少职业伤害等角度,为服装及装备的设计提供更为科学合理的意见和建议;将三维动作捕捉仪与可穿戴设备理念相结合,可以促进服装在健康监控及职业防护等方向的发展。

关键词:动作捕捉;工效学评价;服装;肢体活动范围

中图分类号:TS 941.73 文献标志码:A 文章编号:2096-1928(2016)01-0030-05

Application of 3D Motion Capture on Ergonomic Evaluation of the Clothing

TIAN Miao^{1,2}, LI Jun^{*1,2,3}

(1. College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Protective Clothing Research Center, Donghua University, Shanghai 200051, China; 3. Key Laboratory of Clothing Design and Technology, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: The status of 3D motion capture was reviewed and analyzed from the aspects of development process, application fields and the merit and demerit of the products. As for the general method of ergonomic evaluation of clothing, the problems of currently existing methods were concluded and the advantages of the 3D motion capture were proposed. According to the literature review, the application of 3D motion capture on ergonomic assessment of the clothing was predicted. Considering the theories of gait analysis and walking pattern from biomechanics and sports science, more scientific and reasonable recommendations could be presented for the design of clothing and related equipment, from the aspects of improving work efficiency and decreasing occupational injuries. Besides, the combination of the 3D motion capture and the concept of wearable technology might contribute to the development of the health monitor and occupational protection.

Key words: motion capture, ergonomic evaluation, clothing, ROM

三维动作捕捉仪作为动画、游戏及电影辅助产品的用途广为人知^[1-2],而其开发的最初目的是分析临床病人的肢体动作和步态,从而完善治疗方案^[3]。目前,其应用范围不断扩展为与人体运动健康,医疗复健,甚至海军设备水下测试^[4]相关的各个领域。服装作为人体与环境之间的主要介质,是

影响人体运动舒适性的主要原因。对于需要穿着特种服装执行任务的人群(如消防员或军人),服装对人体动作的限制会直接影响其作业效率,导致肌肉疲劳,甚至危及其生命安全^[5]。近年来,一些国外学者将三维动作捕捉仪应用到服装及特种服装装备的工效学评价中,通过科学和全面的分析,促

收稿日期:2015-08-20; 修订日期:2015-10-26。

基金项目:国家自然科学基金项目(51576038);人因工程国家重点实验室开放课题项目(SYFD150051812K);中央高校基本科研业务费专项基金项目(15D110735/36)。

作者简介:田苗(1989—),女,博士研究生。

*通信作者:李俊(1970—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为功能防护服装。Email:lijun@dhu.edu.cn

进服装及装备的设计与改良^[6]。

文中从发展历程,主要应用领域及不同原理的优缺点分析出发,回顾并总结了三维动作捕捉仪的现状。通过对服装工效学一般研究方法的梳理,剖析目前方法存在的问题,及三维动作捕捉仪应对这些问题的优势。

1 三维动作捕捉仪

1.1 发展过程及现状

1.1.1 三维动作捕捉仪的开发 早期进行动作捕捉相关研究的学者主要来自于医院及人体运动科学领域,研究的主要目的是评估人体的运动能力,从而判断手术、假肢等治疗方案的有效性^[7]。三维动作捕捉系统常与测力平台(Force platform)及EMG(Electromyography)遥测系统相结合,作为临床步态分析的主要手段^[8]。在三维动作捕捉仪(3D motion capture)之前,具有相似功能的仪器一般被称为三维分析(3D analysis)或动作分析(Motion analysis)系统^[4]。利用该系统,可以进行人体关节运动学,肌肉骨骼功能及步态分析等方面的研究。

动作分析系统早期主要应用于下肢的动作跟踪^[9],随着定位点捕捉技术的发展,上肢及头部等其他人体部位也逐渐被作为研究对象。除了捕捉范围的扩大,三维动作捕捉仪的开发也更加追求精确性和时效性。

1.1.2 三维动作捕捉仪的构成 根据动作跟踪原理,目前用于人体动作分析的三维动作捕捉仪主要分为光学运动捕捉系统^[10]和基于惯性传感技术的运动捕捉系统^[11]。基于光学的动作捕捉系统主要由人体标记点,用于捕捉标记点信息的摄像机以及进行数据记录 and 处理的计算机系统组成。基于惯性传感技术的捕捉系统则主要由位置跟踪传感器和计算机系统组成。

在进行动作捕捉之前,首先需要对人体的不同区段进行定位。以下肢为例,定位点主要在盆骨、大腿、小腿及脚部^[12]。为了精确捕捉下肢各区段的动作,光学动作捕捉系统需要将红外发光二极管或具有反光功能的标记点固定在下肢各个定位点处,然后通过围绕在人体周围的摄像机对标记点的运动进行记录。随着技术的发展以及测量精度的提高,摄像机的数量逐渐从 5 个^[3]发展到 6 个^[13]、9 个^[14]等。基于惯性传感技术的动作捕捉系统,则需要定位点放置位置跟踪传感器。该传感器主要由 3 部分组成:用于测量地磁场的三维磁力仪,用于测量包括重力加速度在内加速度的三维线性加

速计,以及用于测量角速度的三维速率陀螺仪^[15]。

标记点或位置传感器对于各个点的记录是分离的,为更好地再现肢体动作及获得某区段或关节的活动角度或运动速度,需建立人体力学模型对测量的标记点进行整合,即人体动作的三维重建和动态模型的获得^[7]。在目前的商业软件中,已经可以实现测量和人体力学模型运动的实时观察。另外,除了三维肢体活动角度之外,软件通过设计人体力学模型内部算法,还可以计算出各个传感器的速度,加速度及人体质心的位移等。因此,不仅可以对捕捉到的动作信息进行回放和分析,并且可以将数据导出,在 Microsoft Excel,3ds Max,MATLAB 等软件中进行后期处理^[15]。

1.2 应用领域

三维动作捕捉仪的应用范围非常广泛,包括生物力学、运动学、工效学等研究领域,以及虚拟现实、电影制作等应用领域。

在生物力学和运动学领域,三维动作捕捉仪主要用于不同负重或身体状态下的行走模式,动作分析及身体平衡的判定,及不同身体截面方向特定关节(如脚踝、膝盖等)的运动学特征分析^[16-18]。在三维动作分析中,一般将人体分为 3 个截面,分别为冠状面(Frontal plane),矢状面(Sagittal plane)和水平面(Transverse plane)^[19]。通过测量随时间变化的各个截面方向的肢体活动,可以计算出臀部、膝盖、脚踝等处 3 个方向的肢体活动范围(Range of Motion,ROM),以及角速度的变化等指标,其中矢状面的运动学参数对于步态的分析具有更为重要的作用^[20]。

生物力学和运动学领域的相关研究结合关节处的力矩等特征,对可能造成的肌肉或骨骼伤害作出预测。LaFiandra 等^[9]利用动作捕捉仪获得了在不同负重条件下盆骨及胸部在水平面上的角加速度,结合所获得的力矩参数,提出降低潜在风险的策略。另外,LaFiandra 等^[21]还对关节处角度的变化和步态参数的关系进行了分析。如非负重状态下,盆骨的旋转角度较大,因此可以产生较大的步幅;反之在负重状态下,盆骨的旋转角度较小,因此产生的步幅较小。Smith 等^[16]对大学女生采用不同背包方式状态下盆骨的倾斜和旋转进行研究,并发现当背包时,盆骨的倾斜和旋转的角度范围都有所减小。另外,对于不同的行走状态,Protopapadaki 等^[18]利用三维动作捕捉仪研究了上下楼梯时臀部、膝盖和脚踝处的运动学参数,并发现与下楼梯相比,上楼梯对于人体生物力学的要求更高。

三维动作捕捉仪还大量用于负重对军人下肢活动性影响的研究^[13]。其中 Birrell 等^[22]发现负重 32 kg 时,人体的膝部在矢状面的 ROM 及盆骨旋转 ROM 都有显著下降。Park 等^[23]结合不同负重条件(0.06,9,18 和 27 kg)进行防弹背心相关研究,结果表明随着负重质量的增加,盆骨旋转会显著减小,从而限制下肢对前行运动的控制。而由于负重所导致的身体前倾以及盆骨前倾则会增加背部骨骼肌肉受伤的风险。研究发现不同的负重分布(如左右平衡,或单侧负重)同样会影响下肢的 ROM,且相对平衡的负重方式可以减少慢性腰痛等疾病的发生。此类研究有助于进行军人负重系统设计,从而减少对军人行动的限制及产生骨骼肌肉伤害的风险^[13]。

另外,三维动作捕捉仪还广泛应用于流水线工人的动作分析,运动员的动作分析和伤害预测以及通过监测微小动作进行测谎等方面^[24]。

1.3 不同动作捕捉仪的优缺点分析

基于不同原理的动作捕捉仪具有不同的特性,但都主要依靠位于人体表面不同区段的标记点或位置传感器记录位置的变化。然而,动作捕捉的根本目的是获取骨骼或关节处的角度或位置随时间的变化情况。因此,在人体活动时,附着于人体表面的标记点与骨骼之间相对位置的偏移决定了标记点移动轨迹重建的不确定性,即动作捕捉的误差^[12]。Cappozzo^[7]对测试方法中使用仪器导致的误差进行分析,并认为在测量时应考虑其对精确度的影响。

目前,市场上大部分动作捕捉仪为光学捕捉系统。科研人员对该系统的研究起步较早,技术相对成熟。但在测试时,需要使用红外发光二极管或有反光效果的标记点,并将其固定在皮肤或服装表面。在受试者活动时,标记点存在脱落的可能性,从而导致数据缺失^[14,25]。另外,当受试者需要穿着厚重服装时,标记点是否可以保持与骨骼点相对应的位置也是值得考虑的问题。

对于基于惯性传感技术的动作捕捉系统,位置信息通过无线信号进行收集,并且可以通过计算机实时观测到虚拟人体的运动状态,无需任何附加设备(如摄像机)。因此,具有更好的灵活性,不存在避免标记点被遮挡或脱落的问题。但该系统易受外界磁场干扰,在磁场较强的环境难以进行传感器的校正^[15]。因此,基于惯性传感技术的动作捕捉系统对操作环境要求较高。

2 服装工效学的一般研究方法

2.1 主要测试指标-ROM

服装工效学研究的主要目的是对着装后人体的活动灵活性进行评价,评价指标一般为静态动作时肩部、腋下、裆部、腰部等部位的 ROM^[26]。通过比较着装前后的 ROM,对服装的活动灵活性进行判断。在目前服装工效学评价中,ROM 一般不会细分为 3 个截面方向的变化,而是选取认为穿着服装可能会显著影响的部位,如肩部在冠状面和矢状面的 ROM,臀部在冠状面的 ROM 等,因此对于不同服装,或不同批次实验所选择的测试动作并不完全一致。

2.2 ROM 的来源及测试方法

ROM 早期用于临床测量,主要目的是研究各个关节(尤其是下肢臀部、膝部关节等)的 ROM 与年龄的相关性等,因为 ROM 是判断肢体灵活度的重要标准^[27-28]。大量调查表明,随着年龄的增长,关节的灵活性会逐渐降低。如老年人活动时臀部和膝部的平均 ROM 比年轻人低 20%^[29]。另外,ROM 也是评价肌肉拉伸等治疗手段对病人肢体或关节活动性改善的重要指标,因此,在临床医学中被广泛应用^[30]。

角度计是测量 ROM 的主要技术手段,测量时需要两位受过训练的测量者配合操作,其中一位操作角度计,另外一位进行数据记录。虽然角度计是测量 ROM 的常用手段,但其准确度和可靠性存在一些争议。Gajdosik 等^[27]针对其可靠性进行了研究并认为使用角度计存在一定局限性,临床医生应该采用更加标准化的方法进行测试,而测量工具不应该成为影响 ROM 的因素。

2.3 ROM 在服装工效学中的应用

在评价防护服装系统对人体动作限制时,Huck^[26]借鉴了人体运动学和临床领域所采用的人体坐标系统,选取肩部屈曲/伸展(矢状面),肩部内收/外展(冠状面),肘部屈曲/伸展(矢状面),臀部屈曲/伸展(矢状面)等 9 组动作,分别测量人体着装时所能达到的最大角度,并分别计算 ROM。在测量肢体角度时,一般采用角度计,即通过肢体方向与铅垂方向的角度差确定肢体角度,及一组肢体活动的 ROM。在评价穿着高温防护服^[31]、油罐清洁服^[32]等防护服装对肢体活动灵活度的影响时,测量 ROM 的方法被广泛使用。

这种测试方法简单易行,但同时存在测量准确性的问题。另外,肢体最大角度的测量只能针对特

定动作,一方面某些极限动作在实际作业情况下并不会发生,另一方面这种测试方法不能实时监测多部位的角度变化。因此,对于服装工效学的评价需要更加全面和专业的方法和工具。三维动作捕捉仪不但可以测量任何状态下肢体在3个维度的活动角度,而且能以一定的时间间隔进行连续测量,准确便捷,故可成为替代角度计的测量手段。

3 动作捕捉仪与服装工效学的结合

3.1 研究现状

三维动作捕捉仪在服装领域的应用报道较少。在国外学者进行的相关研究中,三维动作捕捉仪多用于厚重的防护性服装装备或军队装备中^[13,22]。在测试时,尽可能模拟服装装备所使用的实际情况,如正常行走、跨越障碍物、躲避障碍物和快速折返跑等^[33]。在完成这些任务的同时进行动作捕捉,然后对所获得的数据进行处理。Park等^[6]利用三维动作捕捉仪研究了消防员在穿着消防服、消防靴,并佩戴自给式呼吸器(Self-Contained Breathing Apparatus, SCBA)时下肢的肢体活动范围。研究发现佩戴SCBA时会显著影响下肢各关节在矢状面及水平面的ROM;另外,穿着不同材料的消防靴也会对脚踝和跖骨球的ROM产生显著影响。针对军人穿着战术背心的相关研究表明,着战术背心会显著增大膝盖屈曲和盆骨前倾,增加能量消耗并导致肌肉的快速疲劳,从而影响军人的战斗力并增加受伤的风险^[34]。另外,在利用三维动作捕捉仪进行肢体活动范围测量时,国外学者还会结合EMG或脚底压力测试系统,对肌肉功能和行走模式进行分析,从而比较不同装备的影响。

3.2 发展趋势

虽然三维动作捕捉仪在服装工效学中的应用仍有一些限制,如,在比较两种或多种较为宽松服装的肢体活动范围时,效果并不明显。但该问题在使用角度计时同样存在。三维动作捕捉仪的应用可以覆盖角度计的所有功能,并且在精确度、全面性等方面具有不可替代的作用。结合步态分析和行走模式等生物力学和运动学理论,可以将服装的工效学评价提升到更为科学的分析高度,从提高穿着者作业效率、减少职业伤害等以人为本的理念出发,为服装及装备的设计提供更为科学合理的意见和建议。

随着国民对身体健康重视程度的提升,运动健身逐渐成为大家关注的热点,各种具有监测心率、计步、记录能量消耗等健康监测功能的设备热销。

作为可以监测肢体活动的三维动作捕捉仪,可与运动服装相结合,一方面通过工效学评价,不断改善功能和结构设计;另一方面可以开发具有动作监测功能的智能服装^[35],指导健康的运动方式,减少运动伤害。

对于防护服装或职业工装,在利用三维动作捕捉仪对其进行工效学评价,指导服装的设计和改良的同时,也可以将其与服装相结合,监测作业人员在执行任务时的肢体动作,通过动作分析,更好地进行服装的功能性设计,科学指导作业方法,减少职业伤害。

4 结 语

无论是在科学研究领域,还是市场应用方面,三维动作捕捉仪都发挥着积极的作用。文中从发展过程,应用领域以及不同产品优缺点出发,对三维动作捕捉仪进行了回顾和分析。结合服装领域进行工效学评价的一般方法,发现其与动作捕捉仪应用领域所存在的交叉点。三维动作捕捉仪在服装工效学方向应用的现有研究表明,与原有的角度计相比,三维动作捕捉仪具有测量效率高,测量范围广且精确便捷的优势。结合步态分析和行走模式等生物力学和运动学等理论,可以将服装的工效学评价提升到更为科学的分析层次,从提高穿着者作业效率,减少职业伤害等角度,为服装及装备的设计提供更为科学合理的意见和建议。另外,将三维动作捕捉仪与可穿戴设备的理念相结合,从大众应用方面,可以扩大健康监控的范围。从职业工作方面,可以科学的指导作业任务,充分发挥三维动作捕捉仪的应用价值。

参考文献:

- [1] 俞晓妮. 论影视动画创作的过程中运动捕捉技术的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2013(22): 99.
YU Xiaoni. The application of motion capture on the artistic process of film animation [J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2013(22): 99. (in Chinese)
- [2] Robin C. Brigham young university-owned [EB/OL]. [2015-08-17]. <https://www.xsens.com/customer-cases/brigham-young-university-owned>.
- [3] Whittle M W. Clinical gait analysis: a review[J]. Human Movement Science, 1996, 15(3): 369-387.
- [4] Jorn J. Norwegian marine technology research institute-MARINTEK-performs research, development and research-based advisory services in the maritime sector for companies in the field of marine technology [EB/OL].

- [2015-08-17]. <http://www.qualisys.com/applications/customer-cases/marine-at-marintek>.
- [5] Konitzer L N, Fargo M V, Brininger T L, et al. Association between back, neck, and upper extremity musculoskeletal pain and the individual body armor[J]. *Journal of Hand Therapy*, 2008, 21(2): 143-149.
- [6] Park H, Trejo H, Miles M, et al. Impact of firefighter gear on lower body range of motion[J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2015, 27(2): 315-334.
- [7] Cappozzo A. Three-dimensional analysis of human walking: experimental methods and associated artifacts [J]. *Human Movement Science*, 1991, 10(5): 589-602.
- [8] Novacheck T F. The biomechanics of running[J]. *Gait and Posture*, 1998, 7(1): 77-95.
- [9] Lafiandra M, Holt K G, Wagenaar R C, et al. Transverse plane kinetics during treadmill walking with and without a load[J]. *Clinical Biomechanics*, 2002, 17(2): 116-122.
- [10] Imogen M. Vicon [EB/OL]. [2015-08-17]. <http://www.vicon.com/#>.
- [11] Casper P. Xsens [EB/OL]. [2015-08-17]. <https://www.xsens.com>.
- [12] Cappozzo A. Gait analysis methodology [J]. *Human Movement Science*, 1984, 3(1): 27-50.
- [13] Majumdar D, Pal M S, Majumdar D. Effects of military load carriage on kinematics of gait[J]. *Ergonomics*, 2010, 53(6): 782-791.
- [14] Mullins A K, Annett L E, Drain J R, et al. Lower limb kinematics and physiological responses to prolonged load carriage in untrained individuals[J]. *Ergonomics*, 2015, 58(5): 770-780.
- [15] Casper P. Mvn Biomech [EB/OL]. [2015-08-17]. <http://www.xsens.com/products/mvn-biomech>.
- [16] Smith B, Ashton K M, Bohl D, et al. Influence of carrying a backpack on pelvic tilt, rotation, and obliquity in female college students [J]. *Gait and Posture*, 2006, 23(3): 263-267.
- [17] Costigan P A, Deluzio K J, Wyss U P. Knee and hip kinetics during normal stair climbing [J]. *Gait and Posture*, 2002, 16(1): 31-37.
- [18] Protopapadaki A, Drechsler W I, Cramp M C, et al. Hip, knee, ankle kinematics and kinetics during stair ascent and descent in healthy young individuals [J]. *Clinical Biomechanics*, 2007, 22(2): 203-210.
- [19] Nadeau S, Mcfadyen B J, Malouin F. Frontal and sagittal plane analyses of the stair climbing task in healthy adults aged over 40 years: what are the challenges compared to level walking? [J]. *Clinical Biomechanics*, 2003, 18(10): 950-959.
- [20] Eng J J, Winter D A. Kinetic analysis of the lower limbs during walking: what information can be gained from a three-dimensional model? [J]. *Journal of Biomechanics*, 1995, 28(6): 753-758.
- [21] Lafiandra M, Wagenaar R C, Holt K G, et al. How do load carriage and walking speed influence trunk coordination and stride parameters? [J]. *Journal of Biomechanics*, 2003, 36(1): 87-95.
- [22] Birrell S A, Haslam R A. The effect of military load carriage on 3-D lower limb kinematics and spatiotemporal parameters[J]. *Ergonomics*, 2009, 52(10): 1298-1304.
- [23] Park H, Branson D, Petrova A, et al. Effects of body armor and load carriage on lower limb joint movement [J]. *Journal of Human Performance in Extreme Environments*, 2014, 10(2): 3.
- [24] Casper P. Customer cases [EB/OL]. [2015-08-17]. <http://www.xsens.com/customer-cases>.
- [25] Borghese N A, Bianchi L, Lacquaniti F. Kinematic determinants of human locomotion [J]. *The Journal of Physiology*, 1996, 494(3): 863-879.
- [26] Huck J. Protective clothing systems: a technique for evaluating restriction of wearer mobility [J]. *Applied Ergonomics*, 1988, 19(3): 185-190.
- [27] Gajdosik R L, Bohannon R W. Clinical measurement of range of motion review of goniometry emphasizing reliability and validity [J]. *Physical Therapy*, 1987, 67(12): 1867-1872.
- [28] Mecagni C, Smith J P, Roberts K E, et al. Balance and ankle range of motion in community-dwelling women aged 64 to 87 years: a correlational study [J]. *Physical Therapy*, 2000, 80(10): 1004-1011.
- [29] Roach K E, Miles T P. Normal hip and knee active range of motion: the relationship to age [J]. *Physical Therapy*, 1991, 71(9): 656-665.
- [30] Bandy W D, Irion J M, Briggler M. The effect of static stretch and dynamic range of motion training on the flexibility of the hamstring muscles [J]. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 1998, 27(4): 295-300.
- [31] 田苗, 王云仪, 张向辉, 等. 高温防护服的舒适工效性评价与优化对策[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2013, 39(6): 754-759.
- TIAN Miao, WANG Yuyi, ZHANG Xianghui, et al. Comfort-ergonomics evaluation and optimization of thermal protective clothing [J]. *Journal of Donghua University (Nature Science)*, 2013, 39(6): 754-759. (in Chinese)
- [32] 张龙女, 王云仪, 李亿光. 油罐清洁连体作业服的开发和工效学评价[J]. *纺织学报*, 2013, 34(8): 105-109.
- ZHANG Longnü, WANG Yuyi, LI Yiguang. Development and ergonomic evaluation of overall for oil tank cleaners [J]. *Journal of Textile Research*, 2013, 39(6): 754-759. (in Chinese)

sampling[J]. Statistics and Consulting. 2009(4):43. (in Chinese)

[9] 黄乘珉. 关于圣维南原理的一点注释[J]. 力学学报, 1981(1):101-104.
HUANG Chenggui. A note on the Saint Venant principle[J]. Journal of Mechanics, 1981(1):101-104. (in Chinese)

[10] 姚家琪. 人体动脉解剖模式图谱: 正常及变异[M]. 2 版. 北京:人民卫生出版社, 1998:134.

[11] 高秀华, 张小江, 王欢, 等. 有限单元法原理及应用简明教程[M]. 北京:化学工业出版社, 2008:138.

[12] Bosboom E M, Hesselink M K, Oomens C W, et al. Passive transverse mechanical properties of skeletal muscle under in vivo compression[J]. Journal of Biomechanics, 2001, 34(10):1365-1368.

[13] 柳世考, 刘兴堂, 张文. 利用相似度对仿真系统可信度进行定量评估[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(2):143-145.
LIU Shikao, LIU Xingtang, ZHANG Wen. Quantitative assessment of the reliability of simulation system by using the similarity[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(2):143-145. (in Chinese)

[14] LI Jin, LIU Hao, WANG Yuxiu, et al. Development of a low cost portable pressure measurement system using for garment design[J]. Measurement, 2012, 45:2114-2120.

[15] Naokazu Miyamoto, Yasuo Kawakami. Effect of pressure intensity of compression short-tight on fatigue of thigh muscles[J]. The American College of Sports Medicine, 2014:2168-2171.

(责任编辑:邢宝妹)

(上接第 34 页)

[33] Peoples G, Silk A, Notley S, et al. The effect of a tiered body armour system on soldier physical mobility[R]. Australia:University of Wollongong, 2010.

[34] Park H, Nolli G, Branson D, et al. Impact of wearing body armor on lower body mobility[J]. Clothing and Textiles Research Journal, 2011, 29(3):232-247.

[35] 田苗, 李俊. 智能服装的设计模式与发展趋势[J]. 纺织学报, 2014, 35(2):109-115.
TIAN Miao, LI Jun. Design pattern and development tendency of smart clothing[J]. Clothing and Textiles Research Journal, 2011, 29(3):232-247. (in Chinese)

(责任编辑:邢宝妹)