

· 临床研究 ·

三维运动分析系统在平衡功能测试中的可行性研究

朱奕 王彤 孟殿怀 林枫

【摘要】目的 采用三维运动分析系统身体节段法进行平衡功能测试,探讨其在平衡功能测试中的可行性。**方法** 共选取 10 名身心健康志愿者参加本实验,采用三维运动分析系统采集数据,按照身体节段法的要求,在身体表面放置定标点,要求患者采用单足支撑姿势,分别进行睁眼和闭眼状态下各 30 s 的测试,每个状态重复测试 2 次,然后计算出重心平均摆动幅度(MSA)和平均摆动路径(SP)。采用相关性分析比较两次测试的信度,并采用配对 *t* 检验比较睁、闭眼状态下重心 MSA 和 SP 间的差异。**结果** 受试者在睁眼、闭眼状态下重心 MSA 两次评测的相关系数分别为 0.623($P < 0.01$)和 -0.018($P > 0.05$),重心 SP 在 2 次测试时的相关系数分别为 0.936($P < 0.01$)和 0.654($P < 0.05$)。在睁眼及闭眼状态下,受试者重心 MSA 在水平、前后及垂直(即 X、Y、Z 轴)方向上的差异均具有统计学意义($P < 0.05$);重心 SP 在睁眼、闭眼时差异也有统计学意义($P < 0.05$)。**结论** 三维运动分析系统身体节段法测试重心 MSA 及 SP 的信度前者在睁眼情况下较重,在闭眼情况下稍差,后者在睁眼、闭眼状态下均较佳,灵敏度亦较高,该系统可用于国人平衡功能的实验室评测。

【关键词】 身体节段法; 信度; 灵敏度; 三维运动分析系统; 平衡功能

The feasibility of segmental method in testing human balance control with a three dimensional motion analysis system ZHU Yi, WANG Tong, MENG Dian-huai, LIN Feng. Department of Rehabilitation, the 1st Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China

Corresponding author: WANG Tong, Email: wangtong60621@yahoo.com.cn

【Abstract】 Objective To investigate the reliability and sensitivity of a three dimensional motion analysis system by using the segmental method. **Methods** Ten healthy young men participated in this study. They were asked to stand with one leg and with their eyes open and closed, respectively, each lasted for 30 seconds and was repeated twice. According to the 12-segment rigid body model of the human body, twenty-one infrared light emitting diode (IRED) markers were placed over the bony prominences on the proximal and distal ends of each segment, the motion track of the IRED markers was recorded by the three dimensional motion analysis system. The mean sway amplitude (MSA) and the sway path (SP) of the center of gravity (COG) were calculated. Correlation analysis was used to determine the reliability between the two repetitions. Paired sample *t*-test was used to determine the sensitivity between the eyes open and closed conditions. **Results** The correlation coefficients of the MSA of the COG in the eyes open and closed conditions were 0.623 and 0.018, respectively, and the correlation coefficients of the SP of the COG were 0.936 and 0.654, respectively. It was also shown that significant differences existed among the three directions of the MSA of the COG and the SP of the COG. **Conclusion** Besides the weak reliability of the MSA of COG in the eyes closed condition, the high reliability and sensitivity of the MSA and SP of the COG are found. The segmental method can be used in the scientific study of human balance control.

【Key words】 Segmental method; Reliability; Sensitivity; Three dimensional motion analysis system; Human balance control

随着人们对平衡功能的逐渐关注及相关研究的迅猛发展,国际上出现了许多临床与实验室评估平衡功能障碍的手段及技术。目前国外用于实验室研究的平衡功能评估方法主要有两种,一种是压力板(force platform)法^[1-5],另一种则是身体节段法(segmental method 或 kinematic method,国内又称之为人体环节

法)^[6,7]。我国在平衡功能方面的研究起步相对较晚,除使用目测法、量表评估法外^[8-10],还经常采用平衡功能检测仪,这是一种压力板测试法,其在临床使用中的效果及可行性还有待进一步观察^[1,11];而采用三维运动分析系统进行身体节段法的测试并用于精细评测人体平衡功能目前在国内鲜见报道。本研究通过采用三维运动分析系统及身体节段法进行重心测试,探讨其在平衡功能测试中的可行性,为国内进行平衡功能精确评定开辟新的途径。现报道如下。

作者单位:210029 南京,江苏省人民医院康复医学科

通讯作者:王彤,Email: wangtong60621@yahoo.com.cn

资料与方法

一、研究对象

共有 10 例健康志愿者参与本研究,男、女各 5 例,年龄 23~26 岁,平均(24.7±0.67)岁;身高为 156~180 cm,平均(170.4±7.81)cm;体重为 46~80 kg,平均(63.2±12.12)kg。所有志愿者均为身心健康者,无肌肉骨骼损伤,无眩晕史,无耳部疾患,无严重视力缺损,矫正视力>1.0,无神经系统损伤,本体感觉功能检查正常,初步平衡能力评估证明所有入选者均无平衡功能障碍。

二、实验装置及操作方法

本研究采用的三维运动分析系统(Eagle digital system, motion analysis corporation, USA)系美国运动分析公司开发的主要用于工业及生物医学领域的三维光学运动捕捉系统,该系统主要由三个部分组成,包括 6 台红外数码摄像机(Eagle digital camera)、工作站(eaglehub)和运动图像采集软件(EvaRT 4.1 版),其它配套设备还包括视频处理器、高速电脑、数十枚红外反光标志点(reflective marker, 直径 5 mm)、建模软件 SIMM 以及普通高像素数码摄像机等。

受试者站于实验室中央处,背向计算机台,注视面前白色墙壁。按照图 1 定标点位置各摆放一枚红外线反射标记球,用来记录实验中各点的位移信息。受试者采用右腿单足支撑姿势站立,左脚自然屈膝 30~60°,双手手臂外展 30°左右(图 2)。开始试验前,向受试者说明试验过程,并于正式试验前先练习 2 次,于练习后 24 h 内开始试验。试验中每项测试持续时间为 30 s,分别在睁眼(vision, V)及闭眼(darkness, D)状态下进行,每个状态均测试 2 遍,如果受试者不能坚持 30 s,不重新进行测试。每项测试中间休息 2~3 min。

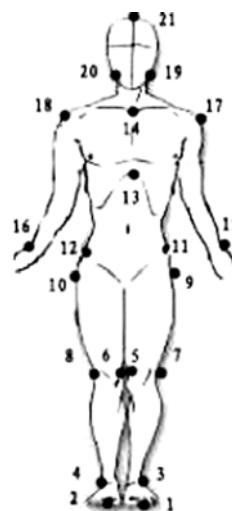
三、数据采集与分析

1. 一般资料:包括受试者的性别、年龄、身高、体重、视力、矫正后视力、上下肢感觉功能(本体感觉、两点辨别觉)及平衡功能检测结果等。

2. 平衡相关数据采集:根据身体节段法将受试者身体分为 12 个节段,包括 2 只足、两侧小腿、两侧大腿、骨盆、下躯干、上躯干、头部及两侧上肢。在每个节段的起始端和终端端放置反光球(marker)进行标记(图 1),包括双颅骨顶点、双侧下颌角、肩峰、桡骨茎突、髂前上棘、膝关节中心(取股骨内上髁和外上髁之中点)、股骨大转子、外踝、第二足趾尖、胸骨柄最上端和剑突。采用三维步态分析系统分别记录受试者在睁眼和闭眼两种状态下各标记点的摆动路径,并将其作为计算重心时的原始数据。

3. 数据分析:参考 Lafond 等^[12]使用的质心(center

of mass, COM)计算方法以及他们改良的 Zatsiorsky-Seluyanov 参数标准,将身体分为 12 个节段(segment),采用下列公式首先计算各节段中心 COM_i,并以此来推算身体的质心,其位置等同于重心(center of gravity, COG), $X_{COMi} = (X_D)(\%COM) + (X_P)(1 - \%COM) = (X_P) + (\%COM)(X_D - X_P)$,其中 X_{COMi} 为节段中心 X 方向位置, Y、Z 计算方法同上, X_P 为肢体近端定标点位置, X_D 为肢体远端定标点位置, %COM 为 COM 的位置百分率,是每个身体节段的固定参数,对称身体节段该参数相同,如男性左侧大腿和右侧大腿的 %COM 均为 0.405,男女因体型不同,故该参数不一致,具体参见 Lafond 等^[12]介绍的参数表,最后计算出重心空间位置,即 $COM = 1/N \sum COM_i \times m_i$,其中 M 是体重, m_i 是身体节段的重量, COM_i 是相应节段的中心位置, N 是节段数。定标点具体安放位置参见图 1。



注:将身体分为 12 个节段,各体表定标点位置都以数字标明,其中 1,2 代表第二脚趾尖;3,4 代表外踝;5,6 与 7,8 分别代表股骨内上髁和外上髁,中点为膝关节中心;9,10 代表股骨大转子;11,12 代表髂前上棘;17,18 代表肩峰;15,16 代表桡骨茎突;14 代表胸骨柄最上端;13 代表剑突;19,20 代表下颌角;21 代表颅骨顶点

图 1 人体体表定标点图



图 2 实验中受试者姿势示意图

四、身体重心摆动指标计算方法

1. 平均摆动幅度(mean sway amplitude, MSA)的计

算:MSA 是各定标点在各个时刻的位置与平均位置差的绝对值的平均值。根据上述方法计算出受试者在各状态下 30 s 内身体重心摆动的平均值,考虑到刚开始测试时受试者调整姿势需要一定时间,故取测试开始后 3 ~ 30 s (共 27 s)间的数据进行分析;如果受试者在 30 s 内不能完成相关测试,则不再进行重新测试,取其测试开始后 3 s 至结束时的数据进行分析,并计算出 MSA。

2. 重心平均摆动路径 (sway path, SP) 的计算:根据重心各点在三维空间中的坐标计算摆动路径,相当于身体摆动时各定标点每一个时刻与前一时刻距离的平均值。

3. 分析重心参数的信度及灵敏度:采用相关性分析分别对睁眼及闭眼状态下的重心 MSA 和 SP 在 2 次重复测试中的数据进行分析,明确其检测信度;同时采用配对 *t* 检验分别对重心 MSA 在 X、Y、Z 轴三个方向上的参数以及 SP 在睁眼和闭眼状态下的差异进行统计学分析,以明确其检测的灵敏度。

五、统计学分析

本研究所得数据均以 ($\bar{x} \pm s$) 表示,采用 SPSS 12.0 版统计学软件包进行比较, $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。

结 果

一、信度分析

分析重复 2 次测量 MSA 结果的相关性,发现在睁眼时相关系数为 0.623 ($P < 0.01$),闭眼时相关系数为 -0.018 ($P > 0.05$);重心 SP 在睁眼时相关系数为 0.936 ($P < 0.01$),闭眼时相关系数为 0.654 ($P < 0.05$),说明 MSA 测量在睁眼情况下信度极好,闭眼情况下信度欠佳;而 SP 测量不管是在睁眼、还是闭眼状态下其信度均较佳。

二、灵敏度分析

对受试者在睁眼、闭眼状态下的数据进行比较,发现重心 MSA 在左右方向 (X 轴)、前后方向 (Y 轴) 及垂直方向 (Z 轴) 间的差异均有统计学意义 ($P < 0.05$),表明该系统灵敏度较高;重心 SP 在睁眼、闭眼状态下的差异也有统计学意义 ($P < 0.05$),进一步证明该三维分析系统具有较高的灵敏度,具体数据详见表 1。

表 1 在睁眼、闭眼状态下重心 MSA 与 SP 灵敏度比较 ($\bar{x} \pm s$)

检测时 状态	例数	平均摆动幅度 (MSA, mm)			平均 摆动路径 (SP, mm/s)
		水平方向 (X 轴)	前后方向 (Y 轴)	垂直方向 (Z 轴)	
睁眼	10	0.3234 ± 0.1400 ^a	0.3852 ± 0.1190 ^b	0.1269 ± 0.0493 ^a	0.0142 ± 0.0029 ^a
闭眼	10	0.2802 ± 0.1379	0.3413 ± 0.1711	0.1346 ± 0.0824	0.0373 ± 0.0189

注:与闭眼状态时比较,^a $P < 0.05$,^b $P < 0.01$

讨 论

一、压力板法和身体节段法比较

压力板法就是让患者站立于压力板上,根据压力板测出的压力中心 (center of pressure, COP) 相关参数来衡量受试者的平衡功能,它实际上测定的是压力板所接受人体对地面压力的反作用力的变化情况,其优点为能够直接获取数据,较为简便易行。相关研究也证实了其灵敏度和信度,在国外实验室平衡功能检测中应用的比较广泛^[2-5]。压力板法主要反映了人体平衡参数在水平方向的变化,而对于垂直方向参数则无法检测;同时,因为压力板面积比较小,范围比较局限,故受试者只能在站位下进行平衡功能检测。

身体节段法的计算公式直接来源于质心的定义,该方法需要在受试者身体各节段近端和远端放置定标点,记录数据并最后计算出重心位置。这里的质心位置也相当于重心位置。该方法使用起来比较繁琐,但其灵敏度和信度较好,在国外平衡、步行等姿势研究中使用较多,其特点在于它能测试较长时间段内的平衡功能参数,并且结果比压力板法精确^[6,7]。

二、节段参数和模型的选择

涉及 COG 的任何计算方法都只能得到一个尽量接近真实情况的结果,由于不同人体存在体型、人种等多方面的差异,故对节段参数的选择非常重要,关系到重心计算值与 COG 真实位置间的误差。目前有多种节段参数尚在使用中,其中较常用的参数包括前苏联 Zatsiorsky (扎齐奥尔斯基) 的节段参数、日本松井秀治等使用的参数以及国内郑秀瑗等学者研究的参数^[13]。吕维加等采用合成人体总重心与实测相比较的方法证实了前苏联 Zatsiorsky 所提供的人体模型较其它外国人体模型更适于中国人的观点^[14]。闫红光等^[13]研究发现,在人体重心及合成躯干重心方面,扎齐奥尔斯基参数所测得 Y 值垂直方向变化幅度大于松井秀治参数所测得 Y 值的变化幅度,这可能是由于扎齐奥尔斯基参数把躯干分为三个部分,较松井秀治参数所规定的一整块躯干的灵活性大,所以前者对屈体动作更加敏感。从这里可以看出,扎齐奥尔斯基在测量屈体动作时较松井秀治参数更有意义。李世明等^[15]研究发现,郑秀瑗等研究的参数从总体上要优于国外参数,建议在对我国运动员动作技术进行影像解析时,应当尽可能多采用国内相关参数。综合上述研究成果,考虑到本研究进行的是正常普通人体平衡功能测试,实验中受试对象单足站立增加了平衡不稳定性,可能因其身体摆动幅度较大而出现屈体动作,同时国外已有学者采用扎齐奥尔斯基参数进行了身体节段平衡功能 (三维运动分析系统) 研究^[12],因此本课题也选用扎齐奥尔斯基参数进行检测。

身体节段法所分身体节段数量越多,其计算所得的重心位置就越接近实际重心位置;但如果节段选择过多,会增加数据采集和分析时的难度。国外目前普遍认为,如身体分段数量大于 11,则计算所得的重心位置精确度较高^[12],因此综合其精确性和可行性,本研究采用 12 个身体节段法进行重心计算及分析。

三、三维运动分析系统用于实验室平衡功能检测的可行性分析

早期国内体育界多采用身体节段法对运动员身体进行研究,通过拍摄运动过程、图像采集及按人体关节点对图像进行数字化处理,再经过计算机分析后获得重心位置,该方法也称为录像解析法,但此法检测周期长、误差大,采用不同人体模型所测得的重心位置差别较大。目前国外针对身体节段法已较多地采用由计算机控制的运动分析系统,其中 Samer^[6] 和 Lafond 等^[12] 使用带有 2 个远红外相机的 WATSMARTTM 系统(加拿大产),通过计算机处理后能够获得每个定标点的三维位置信息。Rabuletti 等^[16] 采用装配有 4 个相机的 ELITE opto-electronic system(BTS, Corsico, Italia)采集数据,结合 Kistler 测力台数据可以同时得到 COP 和计算出 COM 数据。本研究采用的三维运动分析系统是美国 Motion Analysis Corporation 公司生产的装配有 6 台远红外相机、两块压力板的运动分析系统,其采样频率高达 60 Hz,能够实时记录定标点的位置数据,为实验室检测平衡功能提供了很好的设备保证。

四、身体节段法的信度与灵敏度

国内目前尚鲜见采用三维运动分析系统采集身体节段数据进行平衡功能评测的相关报道,本研究结果表明,采用该方法得到的重心参数 MSA 和 SP 灵敏度均较高,其中 SP 的信度在睁眼、闭眼时都较佳,而 MSA 的信度在睁眼评测时较好,在闭眼评测时则较差,可能与闭眼时身体摆动幅度明显加剧导致采集数据变异较大有关,通过增加重复评测的次数或者增大样本数量能否改善 MSA 在闭眼评测时的信度,还有待于今后研究进一步证实。

五、本研究存在的问题

本研究旨在掌握三维运动分析系统检测时所用到的身体节段法,并验证其用于实验室评估平衡功能的信度和灵敏度。由于相关设备的限制,本研究没能将该方法与目前使用较普遍的平衡测试仪进行效度比较,由于数据分析方法的限制,没有将该方法所得数据与同时采集到的压力板数据进行对比,以进一步比较压力板法与身体节段法的优劣;另外,本研究结果表明,MSA 在闭眼状态评测时的信度较差,还有待于更进一步的研究验证。

六、身体节段法用于实验室评估平衡功能的意义

实验室对平衡功能评测的灵敏度、精确性要求较高,目前临床上使用的量表评估和某些精确性较差的平衡测试仪不能满足该要求。开展关于人体平衡功能的研究,对加深人体生理结构的了解以及对平衡功能障碍性疾病的诊治均具有重要意义。三维运动分析系统的身体节段法是一种较为精确的实验室研究方法,能够对研究对象平衡功能进行精确评估,为进一步研究平衡机制创造新的途径;另外,该方法还能用于步态分析、体育运动研究以及姿势转换模型开发等多个领域中,有着极其广阔的应用空间,对深入开展平衡功能研究具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 燕铁斌. 重视国人平衡功能的研究. 中国康复医学杂志, 2003, 28:452-453.
- [2] Franck B, Paul A, Kevin G, et al. Estimation of the 3-D center of mass excursion from force-plate data during standing. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2003, 11:31-37.
- [3] Carrie A, Laughton, Mary Slavin. Aging, muscle activity, and balance control: physiologic changes associated with balance impairment. Gait Posture, 2003, 18:101-108.
- [4] Tanaka H, Uetake T, Kuriki S, et al. Changes in center-of-pressure dynamics during upright standing related to decreased balance control in young adults: fractional Brownian motion analysis. J Hum Ergol (Tokyo), 2002, 31:1-11.
- [5] Annica K, Thomas P. The ankle strategy for postural control-a comparison between a model-based and a marker-based method. Comp Met Prog Biomed, 1997, 52:165-173.
- [6] Samer SH, Deborah W, Robin DC, et al. Simultaneous measurement of body center of pressure and center of gravity during upright stance. Part I: Methods. Gait Posture, 1996, 4:1-10.
- [7] Samer SH, Deborah W, Robin DC, et al. Simultaneous measurement of body center of pressure and center of gravity during upright stance. Part II: amplitude and frequency data. Gait Posture, 1996, 4:11-20.
- [8] 伍少玲, 燕铁斌, 马超, 等. 三种量表评定脑卒中急性期患者姿势控制能力的分析研究. 中华物理医学与康复杂志, 2006, 28:39-40.
- [9] 伍少玲, 燕铁斌, 刘琦. 脑卒中患者姿势评定量表的效度及信度研究. 中国康复医学杂志, 2004, 19:177-179.
- [10] 金冬梅, 燕铁斌, 曾海辉. Berg 平衡量表的效度和信度研究. 中国康复医学杂志, 2003, 18:25-27.
- [11] 金冬梅, 燕铁斌, 谭杰文. 平衡测试仪的信度研究. 中华物理医学与康复杂志, 2002, 24:203-205.
- [12] Lafond D, Duarte M, Prince F. Comparison of three methods to estimate the center of mass during balance assessment. J Biomech, 2004, 37:1421-1426.
- [13] 闫红光, 冯宁. 应用松井秀治和扎齐奥斯基模型所测人体环节质心、重心参数的误差比较研究. 沈阳体育学院学报, 2005, 24:63-66.
- [14] 吕维加, 苏品, 洪友廉. 国外五种人体惯性参数的实测研究. 北京:人民体育出版社, 1999:185-201.
- [15] 李世明. 对国内外人体环节质量参数适用性的比较研究. 成都体育学院学报, 2004, 30:68-70.
- [16] Rabuletti M, Baroni G. Validation protocol of models for centre of mass estimation. J Biomech, 1999, 32:609-613.

(修回日期:2007-07-12)

(本文编辑:易 浩)