

一种基于最大 Lyapunov 指数的平衡站立能力评价方法^{*}

刘 琨^{1△} 王洪瑞^{1,2} 肖金壮² 赵 青³

1 (燕山大学 电气工程学院, 秦皇岛 066004)

2 (河北大学 电子信息工程学院, 保定 071000)

3 (保定市第一中心医院 中医骨科, 保定 071000)

摘 要: 为了科学评价人体站立平衡能力, 本文基于混沌系统非线性分析理论, 提出了一种新的评价方法。该方法利用运动平台对受试者足底施加前后方向正弦式运动刺激, 采用三个加速度传感器固定于受试者肩、髋、膝, 采集人体平衡调节的动态数据。通过重构系统的相空间, 计算得到受试者不同体段动态数据的最大 Lyapunov 指数 (LLE), 用 LLE 的差值平方和 (SSDLLE) 作为平衡能力的评价指标。最后用该方法计算了 20 位受试者的平衡指标, 并与传统评价方法的结果进行对比, 结果表明 SSDLLE 较为符合受试者的平衡表现, 可以在一定程度上用于评测人体的平衡能力。此外, 结果还表明人体各个关节的协调能力决定了平衡能力的优劣; 各体段的混沌特性的差异与个体的站立平衡能力是存在相关性的。

关键词: 站立平衡; 最大 Lyapunov 指数; 评价指标; 混沌; 加速度传感器

中图分类号 R496; R318.04 **文献标志码** A **DOI** 10.7507/1001-5515.20150215

A Standing Balance Evaluation Method Based on Largest Lyapunov Exponent

LIU Kun^{1△} WANG Hongrui^{1,2} XIAO Jinzhuang² ZHAO Qing³

1 (School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

2 (College of Electronic and Information Engineering, Hebei University, Baoding 071000, China)

3 (The Traditional Chinese Medical Orthopaedic, Baoding NO.1 Central Hospital, Baoding 071000, China)

Abstract: In order to evaluate the ability of human standing balance scientifically, we in this study proposed a new evaluation method based on the chaos nonlinear analysis theory. In this method, a sinusoidal acceleration stimulus in forward/backward direction was forced under the subjects' feet, which was supplied by a motion platform. In addition, three acceleration sensors, which were fixed to the shoulder, hip and knee of each subject, were applied to capture the balance adjustment dynamic data. Through reconstructing the system phase space, we calculated the largest Lyapunov exponent (LLE) of the dynamic data of subjects' different segments, then used the sum of the squares of the difference between each LLE (SSDLLE) as the balance capabilities evaluation index. Finally, 20 subjects' indexes were calculated, and compared with evaluation results of existing methods. The results showed that the SSDLLE were more in line with the subjects' performance during the experiment, and it could measure the body's balance ability to some extent. Moreover, the results also illustrated that balance level was determined by the coordinate ability of various joints, and there might be more balance control strategy in the process of maintaining balance.

Key words: standing balance; largest Lyapunov exponent; evaluation index; chaos; acceleration sensor

引言

平衡站立是指能够控制身体构建直立姿态, 并在一定时间内保持该姿态稳定的人体功能, 由脑、前

庭、骨骼、肌肉和神经等多种器官协调作用而实现, 是人的重要功能之一。生活中, 存在许多由于意外伤残、脑卒中后遗症、中枢神经病变等造成的站立平衡障碍患者, 所以人体站立平衡功能的定量评价对于疾病诊断和康复治疗具有重要的意义^[1]。

混沌理论分析方法在脑电图、心电图、神经电生

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (61074175)

[△]通信作者。E-mail: liukun518@ysu.edu.cn

理信号等研究中已有广泛应用^[2]。在人体站立平衡的生理信号分析方面,Yamada^[3]于1995年将人体静止站立的压力中心(center of pressure, COP)晃动数据进行相空间重构,并计算最大 Lyapunov 指数(largest Lyapunov exponent, LLE),结果均大于且接近0,说明人体的平衡站立系统是一种弱混沌系统。文献[4]对足底加入平动脉冲式激励,提高了人体平衡调节数据的信噪比,研究显示不同年龄受试者 COP 时间序列的 LLE 差异更加明显。但因为采用 COP 一维时间序列数据的方式丢失了大量的人体运动信息,所以目前基于 LLE 的人体站立平衡评价方法仍存在不足,文献[5]的结果即表明基于符号动力学系统的特征量很难准确区分帕金森综合征患者和正常人的 COP 动态数据。此外,采用足底随机运动激励方法,使人体处于长时间应激状态,受到生理和心理因素的影响,不利于获得客观的平衡调节数据。

本研究为了探索更加精确客观的人体平衡站立能力评价方法,应用连续正弦波加速度水平运动方式,对人体的足底施加外力,试验过程中发现,合理地选择运动平台正弦波的运动幅度和频率,可以使受试者自我调节重心跟踪平台运动,这种激励方式减小了突然加速度对人体造成心理紧张的影响;另一方面,采用多个加速度传感器,从而得到人体平衡调节过程的多维加速度时间序列,对于复杂系统,多变量时间序列比单变量时间序列更能详细地表征系统特征。最后,本文综合分析多维时间序列的 LLE,可以得到一个评估受试者平衡能力的指数。通过对比试验过程中的实际反映,证明此估计指数与实际受试者的表现存在一定的对应关系,人体站立平衡系统时间序列的吸引子特征量可描述人体站立平衡系统性质,并且可以较准确地对不同平衡能力的特征量进行有效区分。

1 实验设计

1.1 受试者

受试者为20名健康在校学生(10女,编号依次为f1~f10;10男,编号依次为m1~m10),年龄(25.7 ± 3.1)岁,身高(169.6 ± 6.3)cm,体重(61.6 ± 8.9)kg。受试者没有肌肉或神经运动障碍病史,并进行了相关临床检测^[6-7]。

1.2 实验设备

1.2.1 运动平台 运动平台如图1所示,可进行空间6自由度运动,6台伺服电机提供运动动力,以3-

2-1方式构建,采用加拿大 Quander 公司的 Q8 运动控制板控制伺服驱动器。

1.2.2 传感器 运动捕捉传感器:测量受试者的身体信息,将人体分为上段(包括躯干、手臂和头部)、中段(大腿)、下段(小腿)三个体段^[6]。各个体段的动态数据由三个加速度陀螺仪传感器(MMA7361L)采集,分别固定在肩部、髋关节、膝关节,如图1所示。采样频率为50 Hz。

测力平台:人体重心压力坐标采集板(HBU-FPS-V.1.1),包括三个拉压力传感器,量程-50~50 kg,固定在运动平台之上,试验时作为受试者的站立支撑面。

数据存储模块:PC-104,利用该模块的6路16位精度差分A/D转换器,可将人体的晃动数据实时存储到硬盘。

1.3 实验方法

受试者填写个人基本资料,测量身高、体段、体重等基本信息后,在身体规定位置,安装加速度传感器。受试者赤脚站立在运动平台上,双手自然下垂,放于身体两侧,双脚分开与肩部等宽,如图1所示。此外,测试时要求受试者闭上双眼,脚不可以抬起,手臂不可以摆动,仅依靠身体的主要关节来调整平衡姿态。



图1 受试者的站立位置和姿态

Fig. 1 Position and posture of the subject

受试者按要求于运动平台上站好。确认无误并提示受试者后,启动平台,开始施加运动刺激。平台的运动方式为前后方向正弦波式往返水平运动;幅度为单峰25 mm,频率分别为0、0.8、1.4 Hz。平台

运动 20 s, 确认受试者无不适反映, 开启采集设备电源, 进行数据采集; 采集 100 s 后, 关闭数据采集系统, 输入平台停止运动指令, 待平台停止运动过后, 令受试者离开平台, 取下身体上固定的传感器组。数据编号后存入硬盘。

试验进行时, 操作员对不同受试者的实际表现进行记录。本研究中, 定义“稳定”: 足底大部分未离开运动平台, 或仅为脚跟轻微抬起; 定义“不稳定”: 脚部出现了足底大部分离开运动平台, 如迈步或摔倒等。

2 数据处理

站立平衡能力评估采用试验所得数据进行。在较低刺激条件下, 平衡能力不同的个体同样表现出自身特殊的运动特征, 激励条件越剧烈, 人体的动力特征就会越明显。本文以 0.8 Hz 激励条件下的人体运动数据提炼平衡能力评价指标, 一方面此激励不会使人体产生迈步和大幅晃动, 对特征分析造成影响, 另一方面, 此激励足够大, 可以有效提高人体的运动的特征; 然后以 1.4 Hz 条件下的人体站立表现为该指标的验证依据。

2.1 相空间重构

计算 LLE 首先要合理地重构系统的相空间, 目前广泛使用的坐标延时法通过对一维离散时间序列嵌入延时变量^[8], 其关键是求得合理的嵌入延时 τ 和嵌入维数 m 。本研究采用 C-C 算法, 该方法简单而易于实现, 算法的计算量比较小, 因而处理速度较快, 对小数据组也有较高的可靠性, 并且具有较强的抗噪声能力, 能同时计算出时间延时和嵌入维数^[9]。经过对 20 位受试者的数据求解, 可以得到平均的嵌入延时 $\tau=30$, 嵌入维数 $m=4$ 。

2.2 LLE 数值计算

Lyapunov 指数定量表示奇异吸引子的这种运动状态。若指数大于零, 则意味着相邻点最终要分离, 吸引子轨道的局部不稳定。指数越大, 说明混沌特性越明显。Lyapunov 指数作为吸引子的不变量之一, 是量化对初始轨道指数发散的特征量, 它从整体上反映了动力系统的混沌量水平。LLE 公式如下^[10]:

$$LLE(r, m, \tau, x_n) = \left\langle \ln \left(\frac{1}{|u_n|} \right) \sum_{x_{n'} \in u_n} |x_{n+\tau} - x_{n'+\tau}| \right\rangle_n \quad (1)$$

其中, τ 为嵌入延时, 数值为 30; m 为嵌入维数, 数值为 4; u_n 是 x_n 的一个 r 邻近相关系数。

2.3 评价指标的计算

人体结构存在复杂的耦合关系, 平衡能力的优劣就是人体的中枢神经系统对各个体段的协调控制能力, 这种能力不容易被直接测得的加速度数据体现。这里将多身段的协调能力的评价指标定义为 LLE 差值平方和 (the sum of the squares of the difference each LLE, SSDLLE), 计算公式:

$$SSDLLE = (LLE_{\text{肩}} - LLE_{\text{髌}})^2 + (LLE_{\text{肩}} - LLE_{\text{膝}})^2 + (LLE_{\text{膝}} - LLE_{\text{髌}})^2 \quad (2)$$

其中, $LLE_{\text{肩}}$ 、 $LLE_{\text{髌}}$ 、 $LLE_{\text{膝}}$ 分别为肩、髌、膝运动时间序列的 LLE。SSDLLE 通过数值的形式, 表现了人体在平衡调节过程中不同身体部位运动特征的差异。在本文的结果与分析部分, 将进一步阐述该指标用于评价人体平衡能力的情况。

3 结果与分析

3.1 结果

全部 20 位受试者都可以在 0~0.8 Hz 的频率范围内保持平衡站立, 而在 1.4 Hz 时, 部分受试者出现了不稳定情况。因此, 本文根据受试者在频率 1.4 Hz 时的平衡表现, 将受试者分为“稳定”和“不稳定”两组, 以分析其平衡能力: 稳定组: m1, m3, m4, m5, m6, m7, m8, m9, m10, f1, f2, f4, f7, f9, f10; 不稳定组: f3, f5, f6, f8, m2。

其中, 受试者样本数字编号为随机排列, 顺序无其他含义。

对试验所得数据进行处理, 编程环境为 MATLAB® 2010b。经过初步的数据处理和截止频率为 5 Hz 的低通数字滤波, 可以得到清晰的人体标志位的加速度信号和 COP 信号的原始数据。图 2 所示为一位典型样本 (m1) 的肩、髌、膝部三个加速度信号数据。

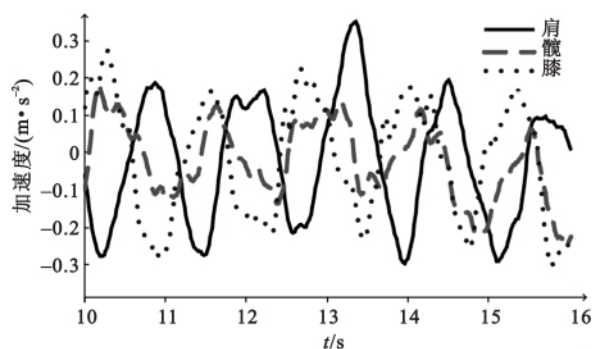


图 2 受试者 m1 的运动数据

Fig. 2 Motive data of subject m1

通过公式(1),求解所有样本数据时间序列的 LLE 值, $LLE_{肩}$ 、 $LLE_{髌}$ 、 $LLE_{膝}$ 分别为肩、髌、膝运动时间序列的 LLE。分析人体不同部位的关系,以肩、髌、膝的 LLE 三者值为总和,求 $LLE_{肩}$ 、 $LLE_{髌}$ 、 $LLE_{膝}$ 分别所占百分比作图,对比不同被试样本的 LLE 值,如图 3 所示。

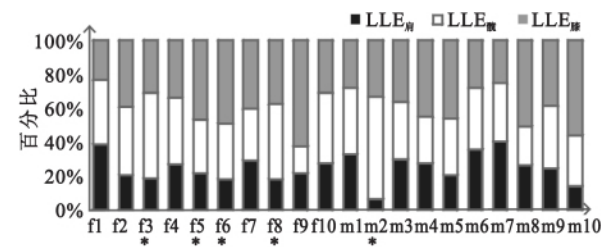


图 3 各部位 LLE 占三部位之和的百分比
* 表示属于不稳定组的样本
Fig. 3 Percentage of LLE of each part in the sum of three parts
* denote the subjects in unstable group

如图 3 所示,横坐标为个体样本的序号;纵坐标为指标 $LLE_{肩}$ 、 $LLE_{髌}$ 、 $LLE_{膝}$ 所占的百分比。图中不稳定组样本在 LLE 比例上并无明显特征,其中样本 m2 的 $LLE_{髌}$ 具有超过 60% 的比例,表示其运动存在一定的特殊性,髌关节的平衡调节作用显得较为明显,即该受试者习惯采用髌关节为主的身体姿态调节方式来保持平衡,但是这在其他不稳定样本中不典型。

LLE_{COP} 表示人体 COP 运动轨迹前后方向分量的 LLE 数值,该指标是研究者常采用的数据分析指标^[3,5,7],可通过公式(1)计算。再通过公式(2)计算 SSDLLE,并与 LLE_{COP} 对比,如图 4 所示。

图 4 中,横坐标为个体样本的序号;纵坐标为指标的数值;黑色条为 LLE_{COP} ;白色条为 SSDLLE;样本按照 SSDLLE 数值大小升序排列。

进一步比较各个指标对不同稳定组的区分效果,本文采用 ANOVA 统计学方法分析稳定组和不稳定组各指标的数值差异显著水平,如表 1 所示。设定显著差异水准 $\alpha=0.05$ 。

表 1 中,各列 $LLE_{髌}$ 、 $LLE_{肩}$ 、 $LLE_{膝}$ 、SSDLLE 和

LLE_{COP} 分别表示对应不同平衡组的均数±标准差;行变量中 P 值为稳定组和不稳定组单因素方差分析结果。

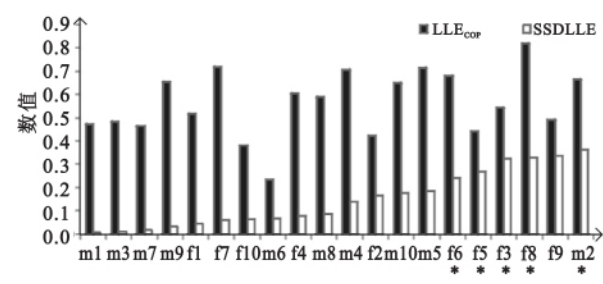


图 4 SSDLLE 与 LLE_{COP} 对比
* 表示属于不稳定组的样本
Fig. 4 Comparison between SSDLLE and LLE_{COP}
* denote the subjects in unstable group

3.2 分析

图 3 中,可以观察到受试者 $LLE_{髌}$ 、 $LLE_{肩}$ 和 $LLE_{膝}$ 数值百分比存在较大的差异,稳定组和不稳定组的样本难以通过这些数值得到区分。根据相空间重构的嵌入延时定理,一般认为只要嵌入维数足够大,单变量就可以重构原动力学系统^[8]。这说明了在现实中单一的系统变量数据不足以表征系统整体的动态特征。文献^[11]和^[12]认为由于实际的采集过程存在着不确定噪声或者各变量增益不同的原因,当一个复杂的混沌系统存在多个变量时,某个变量表征其他变量的能力存在局限,对系统动力学特征的刻画也会有一定的局限性。此外,lorenz 混沌系统的 z 坐标测量时间序列同样不能分辨 $x-y$ 坐标的不对称,也在一定程度上说明单一变量数据不足以刻画整体的动态特征。

图 4 中可以明显观察到以样本 f6 为界,右侧 SSDLLE 较大,处于不稳定,左侧为稳定区。而 COP 数据对样本的平衡能力并没有表现出明显的规律。5 位出现迈步和摔倒的受试者中,均具有较高的 SSDLLE,而其余的 14 位受试者具有较低的 SSDLLE。值得注意的是,样本 f9 虽然具有较大的 SSDLLE 值,但属于稳定组,这说明个体的平衡调节方式可能存在着复杂的差异,使得该指标的评估能

表 1 各组 LLE 的均值和 P 值
Tab. 1 Average LLE values and the P-value of each group

组别	$LLE_{肩}$	$LLE_{髌}$	$LLE_{膝}$	SSDLLE	LLE_{COP}
稳定组($n=15$)	0.33 ± 0.19	0.42 ± 0.20	0.47 ± 0.18	0.10 ± 0.09	0.54 ± 0.14
不稳定组($n=5$)	0.25 ± 0.12	0.60 ± 0.15	0.56 ± 0.18	0.30 ± 0.05	0.63 ± 0.14
P 值	0.355	0.092	0.350	0.120×10^{-3}	0.235

力存在一定的局限性。此外,不稳定组中存在 4 位女性受试者,而男性仅有 1 位,排序靠左的 5 个样本也以男性受试者为主,这在一定程度上说明男性受试者的平衡能力会优于女性。但是这个结论仅统计了 20 个样本的结果,仍然存在不确定性,在今后的研究中我们将增加样本量,深入地分析男女平衡能力的差异。

表 1 的结果显示稳定组和不稳定组样本的 $LLE_{腕}$ 、 $LLE_{肩}$ 、 $LLE_{膝}$ 和 LLE_{COP} 的均数值相近,并且 $P > \alpha$,说明通过这些指标所评价的稳定组和不稳定组不存在显著差异。 $SSDLLE$ 对应的两组样本统计学差异显著 $P = 0.120 \times 10^{-3}$,说明稳定组和不稳定组的样本可以通过 $SSDLLE$ 进行有效的区分。

图 3、图 4 以及表 1 的结果均说明单独的 $LLE_{腕}$ 、 $LLE_{肩}$ 、 $LLE_{膝}$ 和 LLE_{COP} 均难以有效表现受试者的平衡能力,但是各样本的 $SSDLLE$ 可以与平衡能力表现出较高的一致性。不稳定组受试者的 $SSDLLE$ 大于稳定组的受试者。

4 结论

目前研究者采用混沌系统特征量作为人体站立能力评价指标的方法存在着评价指标不准确、单维时间序列的信息不全面、实验过程中随机性较大和静态站立过程中信噪比较低等多方面问题。本文针对这些问题提出了三方面改进办法:①应用连续正弦波加速度水平运动方式,对人体的足底施加正弦波形式的刺激,提高了试验数据的信噪比,使人体运动的特征更加显著;②通过人体多部位固定加速度传感器,得到多变量的数据时间序列,较单变量更能详细地表征系统特征;③将多维时间序列的 LLE 综合,得到一个评价受试者平衡能力的指数。将数值按照试验过程中的平衡表现分类,通过条状图和 ANOVA 统计学方法分析了单维和多维评价指标的结果,证明 $SSDLLE$ 数值能够较准确地区别不稳定组样本,可以作为平衡能力的判断依据。随着研究的深入,采用混沌系统的特征量分析多维度生物信

号的方法,将会在特征提取、评价方法或者医疗诊断领域具有更广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 纪树荣. 实用偏瘫康复训练技术图解[M]. 第 2 版. 北京:人民军医出版社,2009:162-165.
- [2] 刘心东. 混沌及其在生物医学工程中的应用[J]. 国外医学生物医学工程分册,1993,16(2):63-70.
- [3] YAMADA N. Chaotic swaying of the upright posture [J]. Hum Mov Sci, 1995, 14(6): 711-726.
- [4] ACHARYA U R, GOH S C, IJIMA K, et al. Analysis of body responses to an accelerating platform by the largest-Lyapunov-exponent method [J]. Proc Inst Mech Eng H, 2009, 223(H1): 111-120.
- [5] PASCOLO P, BARAZZA F, CARNIEL R. Considerations on the application of the chaos paradigm to describe the postural sway [J]. Chaos Solitons Fractals, 2006, 27(5): 1339-1346.
- [6] ALEXANDROV A V, FROLOV A A, MASSION J. Biomechanical analysis of movement strategies in human forward trunk bending. II. Experimental study [J]. Biol Cybern, 2001, 84(6): 435-443.
- [7] STERGIOU N, DECKER L M. Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: is there a connection? [J]. Hum Mov Sci, 2011, 30(5): 869-888.
- [8] TAKENS F. Detecting strange attractors in turbulence [M]. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981: 366-381.
- [9] KIM H S, EYKHOLT R, SALAS J D. Nonlinear dynamics, delay times, and embedding Windows [J]. Physica D, 1999, 127(1-2): 48-60.
- [10] WOLF A, SWIFT J B, SWINNEY H L, et al. Determining lyapunov exponents from a time series [J]. Physica D, 1985, 16(3): 285-317.
- [11] 张春涛,马千里,彭宏,等. 基于条件熵扩展的多变量混沌时间序列相空间重构[J]. 物理学报,2011,60(2):112-119.
- [12] BOCCALETTI S, VALLADARES D L, PECORA L M, et al. Reconstructing embedding spaces of coupled dynamical systems from multivariate data [J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2002, 65(3 Pt 2A): 035204.

(收稿:2014-03-17 修回:2014-12-06)