

帕金森病对步态对称性的影响

廖福元, 王 珏

(西安交通大学生物医学信息工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为定量描述帕金森病(PD)对步态对称性的影响,分别将受试者的左、右腿支撑期时间和跨步时间组成序列对,用序列对的相似性来评价步态的对称性.因序列是非平稳的且含有噪声,故问题转化为考察原序列对在多尺度上逼近序列对的相似性,由定义的相似度定量描述了步态的对称性.结果表明,PD患者的左、右腿支撑期时间在较小的尺度上明显不对称,左、右腿跨步时间在所有尺度上都明显不对称.该方法和结果可为评估PD病情以及临床疗效提供新的思路.

关键词: 帕金森病;步态;多尺度

中图分类号: R318 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)02-0228-03

Effect of Parkinson's Disease on Gait Symmetry

Liao Fuyuan, Wang Jue

(Key Laboratory of Biomedical Information Engineering of Education of Ministry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To quantify the effect of Parkinson's disease (PD) on gait symmetry, the similarities between left stance time sequence and right stance time sequence, also left stride time sequence and right stride time sequence, usually nonstationary and noisy, are evaluated respectively. The similarities between two corresponding approximate sequences transformed from the original ones on multiscale are alternately investigated, and the similarities according to a defined distance measurement are quantified. Obvious asymmetry between left stance time sequence and right stance time sequence on slight scales, and between left stride time sequence and right stride time sequence on all scales is observed from PD patients. The method is expected to provide a new way for estimating the state of PD and curative effect.

Keywords: Parkinson's disease; gait; multiscale

帕金森病(PD)是一种神经退化性疾病,发病的基础是黑质输入到纹状体的神经递质——多巴胺的减少,使得一个通过基底神经节的神经环路受到阻碍,该环路运动的发起和调控有关^[1]. PD的主要症状之一是平衡障碍,而平衡障碍主要表现为步态的不对称性,对它的定量描述可以为评估PD病情以及临床疗效提供客观依据.目前,对于步态的对称性,缺乏既具有坚实理论基础又具有实际可操作性的评价标准.一般认为,若行走时下肢两侧运动状态的量化参数值在统计意义上无差异,则认为步态是对称的^[2].目前,用到的步态参数有运动学参数和动

力学参数.文献[3]用两足在竖直方向上受到的地面反力(VGRF)计算步态的对称性指标.力学参数也可以是两足所受的三维反力,还可以是下肢某些关节的力矩.文献[4]通过比较左、右腿腓肠肌等3块肌肉的表面肌电(EMG)的波形和肌肉的反应时间来考察老年人和PD患者的步态对称性.文献[5]用左、右腿支撑期时间(左、右足部分或完全接触地面的时间),摇摆时间(该足悬空的时间),步长及VGRF计算步态的对称性指标,其结论表明,用VGRF和用时域参数考察步态的对称性基本上是等效的.因步态参数的变化是非平稳的^[6],所以考察

步态对称性要求的数据应该是数十个或数百个甚至上千个步态周期内的参数值,这就限制了某些只能在实验室测量的参数,如力矩、肌电等的应用.用步态周期、支撑期时间、摇摆期时间等时域参数或用 VGRF 评价步态对称性的优点是,可以用佩戴式装置长时间地采集数据.

现有的多数文献都基于步态参数的变化是平稳的这一假设,用参数在整个测试过程中的均值来计算步态对称性指标.实际上,步态参数的变化是非平稳的^[6],难以确定分析它们的最佳尺度.因此,我们提出,将肢体两侧同一步态参数的观测值组成序列对,通过求它在多个尺度上逼近序列对的相似度量来量化步态的对称性.

1 步态数据

为使研究结果真实、可靠,我们采用 <http://www.physionet.org> 提供的 7 个正常人(男性 2 人,女性 5 人)和 10 名 PD 患者(男性 6 人,女性 4 人)的步态数据.正常人和 PD 患者的平均年龄分别为 63 岁(58~71 岁)和 67 岁(63~72 岁),身高分别为 (1.82 ± 0.02) m 和 (1.84 ± 0.04) m,体重分别为 (65.7 ± 2.3) kg 和 (67.1 ± 4.5) kg.数据采集过程如下:受试者以习惯的步幅行走 5 min,用压力敏感鞋垫测量两足在竖直方向上受到的地面反力,采样频率为 300 Hz,12 位模数转换,然后计算每个步态周期内两足的开始触地时间和终止触地时间,得到以下序列对:

- (1)左、右腿支撑期时间;
- (2)左、右腿跨步时间(左、右腿支撑期时间与左(右)腿摇摆时间之和).

2 数据处理方法

设所给序列对为 L 和 R ,先去除它们的孤立点,再分别对它们进行 K 层小波分解,然后用每层的低频系数重构 L 的逼近序列 L_k 和 R 的逼近序列 R_k , $k=1,2,\dots,K$.这样,求 L 和 R 的相似度就转化为求逼近序列对 L_k 和 R_k 的相似度.

记 $\{\tilde{L}_k(n)\}$ 为 L 在第 k 层的低频系数(把 L 看作第 0 层的低频系数,即 $L=\tilde{L}_0$),那么

$$\tilde{L}_{k+1}(j) = \sum_n h(n-2j)\tilde{L}_k(n) \quad (1)$$

式中: $\{h(n)\}$ 是以 $\varphi(t)$ 为尺度函数的滤波器系数,即

$$h(n) = \frac{1}{2^{1/2}} \langle \varphi\left(\frac{t}{2}\right), \phi(t-n) \rangle$$

设 $\{h(n)\}$ 的长为 $2N$,由式(1)可知,第 $k+1$ 层的一个低频系数为第 k 层的 $2N$ 个低频系数的加权平均(在某些情况下,第 $k+1$ 层两端的低频系数由第 k 层的少于 $2N$ 个低频系数构成,类似情况不再注明).注意到构成 $\tilde{L}_{k+1}(j)$ 和构成 $\tilde{L}_{k+1}(j+1)$ 的第 k 层的低频系数中有 $2N-2$ 个是相同的,再由逼近序列的重构式

$$L_{k+1}(i) = \sum_m h(i-2m)\tilde{L}_{k+1}(m)$$

知第 $k+1$ 层上逼近序列的一个点是第 $k+1$ 层的 N 个低频系数的加权平均.因此,第 $k+1$ 层上逼近序列的一个点是第 k 层的 $4N-2$ 个低频系数的加权平均.设 L_k 的一个点为 L 的 M 个点的加权平均,则对于不同的小波, M 略有不同.例如,对于 Haar 小波, $M=2^k N$,对于 db2 小波, $M=2^{k+1} N-2$.粗略地看, L_k 的一个点是 L 中 $2^{k\lambda}$ 个点的加权平均(λ 取决于滤波器的长度).因此, L_k 不含 L 在尺度 2^k 上不能分辨的高频细节,同时保留了可分辨的主要特征,且有效地降低了噪声.

求 L 和 R 相似程度的步骤如下.

(1)预处理.由于受试者的主观因素或路况因素,序列中可能存在孤立点.用矩法对 L 和 R 的正态性进行检验,结果表明它们都服从正态分布.我们认为孤立点就是 95% 的置信区间外的点.为使两序列中序号相同的两个点始终属于同一步态周期,若要去掉孤立点 $L(n)$,也去掉 $R(n)$;同理,若要去掉孤立点 $R(m)$,也去掉 $L(m)$.这里, $1 \leq n, m \leq l$, l 为 L 和 R 的长度.正常人的支撑期时间、跨步时间序列对,PD 患者的支撑期时间、跨步时间序列对,经预处理去掉的点数依次平均占 l 的 3%、2.9%、3.3%、3.4% (去掉的点数占 l 的百分比范围为 1.6%~5.8%).经预处理后的序列仍记为 L 和 R ,长度仍记为 l .

(2)将 L 和 R 进行 K 层小波分解,用 L 的第 k 层低频系数重构逼近序列 L_k , $k=1,2,\dots,K$.同理,重构 R_k .

(3)为消除下肢一侧可能占优势的影响,定义

$$d_k(n) = R_k(n) - L_k(n) - [\bar{R}_k - \bar{L}_k] \quad (2)$$

$$n = 1, 2, \dots, l_k$$

式中: l_k 为 L_k 的长度; $\bar{R}_k^{(i)}$ 和 $\bar{L}_k^{(i)}$ 分别为 L_k 和 R_k 的均值.

(4)对于每个正常人的 $d_k(n)$,用矩法检验其分布的正态性,均有 $\alpha < 0.05$.设 $d_k(n)$ 的 95% 置信区间的上下界分别为 d_k^H 和 d_k^L ,则 $d_k^L = -d_k^H$,定义阈

值

$$T_k = \max\{d_k^H(i)\} \quad (3)$$

式中: $d_k^H(i)$ 为关于第 i 个正常人的 d_k^H .

(5) 对于由步骤(2)得到的逼近序列 L_k 和 R_k , 定义其相似度

$$S_k = 1 - \frac{1}{l_k} \sum_{n=1}^{l_k} d(L_k(n), R_k(n)) \quad (4)$$

式中

$$d(L_k(n), R_k(n)) = \begin{cases} 1 & \text{if } |d_k(n)| > T_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

3 结果

在算法第(2)步选 sym4 小波基, 分解层数 $K=5$ (小波基和分解层数的选择见讨论), 依次记正常人和 PD 患者的支撑期时间、跨步时间序列对在第 k 层上逼近序列对的相似度为 $S_{k,1}(i)$ 、 $S_{k,2}(i)$ 、 $\tilde{S}_{k,1}(j)$ 、 $\tilde{S}_{k,2}(j)$, $k=1, 2, \dots, 5$, $i=1, 2, \dots, 7$, $j=1, 2, \dots, 10$, 它们关于 i 或 j 的均值依次记为 $S_{k,1}$ 、 $S_{k,2}$ 、 $\tilde{S}_{k,1}$ 、 $\tilde{S}_{k,2}$, 标准差依次记为 $\sigma_{k,1}$ 、 $\sigma_{k,2}$ 、 $\tilde{\sigma}_{k,1}$ 、 $\tilde{\sigma}_{k,2}$, 计算结果列于表 1 和表 2 中.

把 $S_{k,1}(i)$ 和 $\tilde{S}_{k,1}(j)$ 作为两组独立的样本, 对 $\tilde{S}_{k,1}(j) < S_{k,1}(i)$ 进行 Wilcoxon 检验, 结果列为表 3, 对 $\tilde{S}_{k,2}(j) < S_{k,2}(i)$ 进行 Wilcoxon 检验的结果列为表 4.

由表 1 可看出, PD 患者的支撑期时间序列对尺度较小时, 逼近序列对的相似度也较小, 随着尺度增大, 相似度趋近于 1. 例如, 当尺度最小时 ($k=1$), $\tilde{S}_{k,1}$ 约为 0.89; 当尺度较大时 ($k=3, 4, 5$), $\tilde{S}_{k,1}$ 接近 1. 这表示当观察尺度为十几个步态周期时, 左、右腿支撑期时间的不对称性很明显; 当观察尺度大于几十个步态周期时, 它们是接近对称的. 在所有尺度上, $\tilde{\sigma}_{k,1}$ 约为 $\sigma_{k,1}$ 的 4~6 倍, 说明 PD 患者的左、右腿的支撑期时间的不对称性个体差异大. 表 2 中 $\tilde{S}_{k,2}$ 稳定在 0.88 左右, 说明不论观察尺度多大, PD 患者的左、右腿跨步时间都明显不对称, 而且 $\tilde{\sigma}_{k,2}$ 约为 $\sigma_{k,2}$ 的 5~10 倍, 这表示相对支撑期时间、跨步时间的不对称性个体差异更大. 表 3 和表 4 说明, 与正常人相比, PD 患者的左、右腿支撑期时间和跨步时间的对称性都较差.

4 讨论

表 1~表 4 是算法第(2)步选 sym4 小波基 (滤波器长度为 8)、分解层数 $K=5$ 的结果. 一般地, 选定了小波基后 (滤波器长度确定), 分解层数要根据

所需的最大观测尺度选择. 例如, 本文所用的步态参数序列长为 220~260, 因滤波器长度为 8, 要使最大观测尺度与序列长度相当, 则分解层数应选 5. 若选 sym2、db2 (滤波器长度为 4) 小波基时, 分解层数应选 6; 若选 sym8、db8 (滤波器长度为 16) 小波基时, 分解层数应选 4. 当依次选 sym8、sym4、sym2 小波基, k (k 为逼近序列所在层次) 对应取 1、2、3 时, 逼近序列对的相似度基本不变. 实际上, 逼近序列对的相似度只与分析它的尺度大小有关. 因此, 对给定的观测尺度, 受试者关于某个步态参数的对称性量化值是稳定的.

表 1 支撑期时间序列对在第 k 层上逼近序列对相似度的均值和标准差

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $S_{k,1}$ | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| $\sigma_{k,1}$ | 0.017 | 0.024 | 0.019 | 0.027 | 0.023 |
| $\tilde{S}_{k,1}$ | 0.88 | 0.91 | 0.95 | 0.96 | 0.98 |
| $\tilde{\sigma}_{k,1}$ | 0.100 | 0.101 | 0.088 | 0.062 | 0.040 |

表 2 跨步时间序列对在第 k 层上逼近序列对相似度的均值和标准差

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $S_{k,2}$ | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 |
| $\sigma_{k,2}$ | 0.019 | 0.017 | 0.023 | 0.021 | 0.015 |
| $\tilde{S}_{k,2}$ | 0.87 | 0.88 | 0.88 | 0.87 | 0.88 |
| $\tilde{\sigma}_{k,2}$ | 0.093 | 0.109 | 0.122 | 0.156 | 0.188 |

表 3 $\tilde{S}_{k,1}(j) < S_{k,1}(i)$ 的 Wilcoxon 检验结果

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----|--------|-------|------|------|------|
| p | <0.001 | 0.001 | 0.04 | 0.10 | 0.17 |

注: p 为概率水平.

表 4 $\tilde{S}_{k,2}(j) < S_{k,2}(i)$ 的 Wilcoxon 检验结果

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----|--------|-------|-------|-------|-------|
| p | <0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.001 |

若 PD 主要影响肢体的一侧, 则会使该侧的步态参数变化更具有随机性, 但不同于观测噪声 (一般认为是完全随机的). 因此, 根据 L_k 和 R_k 的标准差 σ_k^L 和 σ_k^R 随 k 增大的相对变化, 可区分 PD 的影响主要在左侧还是在右侧, 或者两侧都受影响. 考察 $r =$

(下转第 238 页)

$4\text{H}_2\text{O}$ 为原料,在 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 、常压条件下,采用有机溶剂回流法,经过二次热处理并在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 退火,制备出平均粒径为 55 nm 的立方闪锌矿 InP 晶体.产物粒度较均匀,结晶性好,有很好的应用前景.

参考文献:

- [1] 栾野梅,安茂忠. 半导体纳米材料的性质及化学法制备[J]. 半导体光电,2003,24(6):382-385.
- [2] Richard L W, Mark F S, Andrew T M, et al. Synthesis, characterization and thermal decomposition of $[\text{Cl}_2\text{GaP}(\text{SiMe}_3)_2]_2$, a potential precursor to gallium phosphide[J]. Organometallics, 1993, 12(7): 2832-2834.
- [3] Steven R A, Andrew T M, Richard L W, et al. Preparation, characterization and facile thermolysis of $[\text{X}_2\text{GaP}(\text{SiMe}_3)_2]_2$ ($\text{X} = \text{Br}, \text{I}$) and $(\text{Cl}_3\text{Ga}_2\text{P})_n$: new precursors to nanocrystalline gallium phosphide[J]. Chem Mater, 1994, 6(1): 82-86.

- [4] Xie Yi, Wang Wenzhong, Qian Yitai, et al. Hydrothermal preparation of nanocrystalline indium phosphide in non-aqueous system[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(23): 1964-1968.
- [5] 信春雨,高善民,崔得良,等. 苯热条件下 GaP 纳米晶的稳定性[J]. 物理化学学报, 1999, 15(2): 105-109.
- [6] 潘教青,崔得良,黄柏标,等. 磷化物半导体纳米材料的合成和表面性质[J]. 中国科学(A 辑), 2001, 31(9): 823-827.
- [7] 周智华,莫红兵,曾冬铭. 高纯无水三氯化铟的制备[J]. 稀有金属, 2003, 27(4): 470-473.
- [8] 吴万国,丁音琴,黄清明. 纳米材料晶粒鉴定方法的研究[J]. 福州大学学报, 2003, 31(1): 49-51.
- [9] 沈学础. 半导体光谱和光学性质[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2002.
- [10] 方容川. 固体光谱学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 230 页)

σ_k^R/σ_k^L 随 k 增大而变化的趋势和幅度,若 r 以较大幅度增大(减小),可认为影响主要在左侧(右侧),若 r 的变化趋势不稳定或变化幅度较小,则可认为两侧都受影响.其中的难点是不好界定 r 的变化幅度的大小,这需要对大量的病例进行研究.

参考文献:

- [1] Bear M F, Connors B W, Paradiso M A. Neuroscience: exploring the brain[M]. Philadelphia: Lippincott Williams & Ilkins, 2001.
- [2] Heydar S, Paul A, Francois P, et al. Symmetry and limb dominance in able-bodied gait: a review [J]. Gait and Posture, 2000, 12 (1): 34-45.
- [3] Lee N, Andrzej W, Krzysztof D, et al. Adjustment in gait symmetry with walking speed in trans-femora and trans-tibial amputees [J]. Gait and Posture, 2003, 17

(2): 142-151.

- [4] Miller R A, Thaut M H, McIntosh G C. Components of EMG symmetry and variability in Parkinsonian and health elderly gait [J]. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 1996, 101(1): 1-7.
- [5] Kim C M, Eng J J. Symmetry in vertical ground reaction force is accompanied by symmetry temporal but not distance variables of gait in persons with stroke [J]. Gait and Posture, 2003, 18(1): 23-28.
- [6] Hausdorff J M, Lertratanakul A, Cudkovicz M E. Dynamic markers of altered gait rhythm in amyotrophic lateral sclerosis [J]. Appl Physiol, 2000, 88(16): 2045-2053.

(编辑 杜秀杰)