

文章编号:1004-7220(2011)02-0133-04

组间波形相似度及在中医推拿揉法 垂直作用力信号分析中的应用

章丹颂¹, 吕杰¹, 方磊², 许世雄¹, 房敏²

(1. 复旦大学 力学与工程科学系, 上海 200433; 2. 上海中医药大学 附属岳阳中西医结合医院, 上海 200437)

摘要:目的 研究表征同类信号不同组间波形相似程度的定量指标,并应用于中医推拿揉法垂直作用力信号分析。**方法** 对两列同类周期信号序列归一化和波形误差分析后,定义表征同类信号不同组间波形相似程度的组间波形相似度。实测著名推拿医师、已学习中医揉法一段时间的研究生和揉法初学者3组操作者的揉法垂直作用力信号,计算3组信号的组间波形相似度,分析他们的相似程度。**结果** 数位推拿医师之间的揉法垂直作用力信号组间波形相似度较高,可作为其他揉法垂直作用力信号与之比较的模板,研究生和医师之间的相似度次之,初学者与医师之间的相似度最低,三者有显著性差异。**结论** 本文提出的组间波形相似度可以作为评判中医推拿揉法垂直作用力信号不同组间波形相似程度的定量指标,也可应用于其他近周期信号组间波形的相似程度评判。

关键词: 波形相似度; 揉法; 垂直作用力; 信号分析; 力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Waveform similarity and its application to the vertical force signals analysis on rolling manipulation

ZHANG Dan-song¹, LÜ Jie¹, FANG Lei², XU Shi-xiong¹, FANG Min² (1. *Department of Mechanics and Engineering Science, Fudan University, Shanghai 200433, China*; 2. *Yueyang Hospital of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 200437, China*)

Abstract: Objective To raise a quantitative indicator for the waveform similarity between different signals of the same kind and apply it to the analysis on the vertical force signals from the rolling manipulation. **Method** After two signals of the same kind were normalized and their waveform errors were analyzed, the waveform similarity, which was to be utilized to describe the extent to which two signals were similar to each other, was defined. Then, the vertical force signals of the rolling manipulation operated by several experts, graduates who have learned the manipulation for some time and beginners were measured, respectively. Subsequently, the values of the waveform similarity between the three different groups of signals were calculated. **Results** The similarity between the experts' signals was relatively high, so it was reasonable to be used as a template for other operators' signals to be compared with. Further calculation revealed that the waveform similarity between the experts' signals and the graduates' was generally lower than that between the experts', and the similarity between the experts' and the beginners' was the lowest. There was significant difference between the three groups. **Conclusions** The waveform similarity raised in this paper could serve as a quantitative indicator for the similarity between different vertical force signals from the rolling manipulation, and this method was also applicable to the similarity evaluation between other approximate periodic signals.

Key words: Waveform similarity; Rolling manipulation; Vertical force; Signal analysis; Mechanics

收稿日期:2010-11-04; 修回日期:2011-01-04

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2007CB512700),上海市重点学科建设项目(B112)。

通讯作者:许世雄,教授,博士研究生导师,E-mail:xusx_fd@yahoo.com.cn。

手法研究是中医推拿研究中基础领域之一。不同的手法动作形式及其技能的优劣,决定了手法特异作用的性质与疗效的水平,而手法技术的功力与质量,会直接影响临床疗效。因此,手法规范化研究的重要性不言而喻^[1]。但由于推拿研究目前尚基本处于定性阶段,手法量化不足,缺乏规范描述,且多局限于单纯的文字描述,会给不同的人在理解上造成歧义^[2]。推拿手法量化是推拿学科发展的必由之路,如何从流派众多、风格迥异的推拿手法中提出一些量化的标准,对推拿学科的研究、教学以及临床实践均具有很强的指导意义。

在推拿手法的研究和教学中,常常需要评判一个操作者手法是否符合该手法的规范以及符合程度。但目前这种评估主要限于定性的分析以及医生的目测,缺乏定量的评价指标。本文考虑引入一种信号间的波形相似度指标,从一定程度上评判某位手法实施者的操作与标准信号的接近程度。这种信号间的相似度计算已在许多文献中被提及,并已有广泛的应用。例如朱凌云等^[3]利用正常心电信号QRS波群作为模板,与待测QRS波群进行相似度分析,以此作为心电图信号快速分类的重要特征参量。张琳等^[4]基于心电信号波形形态间的相似性分析所得信息,提出心电相关序列的分析方法,用于研究载人航天条件下的心肌电活动情况。庄力等^[5]计算中医药症相似度,然后采用Biclustering分析方法获得中医临床诊疗中的重要药物配伍信息。李宏等^[6]在地震信号去噪研究中,通过引入波形相似度的概念解决了用ICA进行信号盲源分离的两个固有不确定性问题。李霞等^[7]利用地震集中区不同地震在不同台站得到的零频观测谱值定义了体波谱振幅相关系数,作为两次震中位置相近事件在不同方位的零频谱值分量分布的相似性量度,并以此作为判断震源机制异同的依据。但这些相似度的定量分析多用于工程信号以及部分常见生理信号的评估,在具体应用时均从各自的学科特点出发,不适合直接应用于推拿擦法的垂直力信号分析。在推拿力信号的定量研究中,谢志勇等^[8]对擦法力信号和微分后的力信号作了傅里叶变换,并在不同操作者间作了定性比较。吕杰等^[9]通过引入相似度的定义定量研究了擦法力信号的均匀程度,获得了衡量操作者自身施力均匀程度的量化指标。但这些文献均

未涉及针对在不同操作者间进行擦法力信号波形相似度比较的研究。

本文以推拿擦法的垂直作用力信号为研究对象,结合该信号的近似周期性特点,定义了不同操作者垂直作用力信号的波形相似度指标及其算法。用该方法计算几位权威推拿医师的擦法垂直作用力信号的相似度,结果相似程度较高。然后以他们的信号作为一个标准模板,不同水平的学生参与擦法测试测得的垂直作用力信号与模板对比,计算相似度。结果表明,本文提出的波形相似度指标能够用于评判推拿擦法操作者在施力时是否在一定程度上符合规范。

1 波形相似度

记两列同类周期信号序列为 $\{a\} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 和 $\{b\} = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$,自行确定一种周期分割规则将这两列信号各自分割成许多个相似的子信号(如以中医擦法为例,手完全收回来时刻作为上一个周期的结束点和下一个周期的起始点)。如图1所示,按既定的周期分割规则,序列 $\{a\}$ 被分割成了 m 个子信号序列 $\{c^1\}, \{c^2\}, \dots, \{c^m\}$ 。同理, $\{b\}$ 亦被分割成了 m 个子信号序列 $\{d^1\}, \{d^2\}, \dots, \{d^m\}$,其中序列 $\{c^i\} = \{c_1^i, c_2^i, \dots, c_{k_i}^i, \dots, c_{m_i}^i\}$, $\{d^j\} = \{d_1^j, d_2^j, \dots, d_{l_j}^j, \dots, d_{n_j}^j\}$, $i, j = 1, 2, \dots, m$ 。

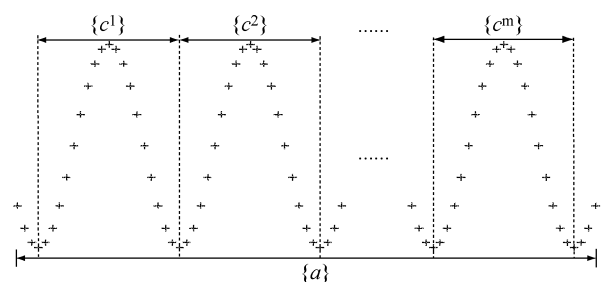


图1 序列 $\{a\}$ 按周期分割

Fig.1 The dividing of the sequence $\{a\}$ according to its period

1 信号值的归一化

为了避免绝对值大小不同对波形相似度计算的影响,对这两族序列分别进行归一化处理。记 C 为序列 $\{c^1\}, \dots, \{c^m\}$ 中所有元素的集合, D 为序列 $\{d^1\}, \dots, \{d^m\}$ 中所有元素的集合。对 $\{c^1\}, \{c^2\},$

..., $\{c^m\}$ 中任意一个元素 $c_{k_i}^i$, 归一化处理后的该元素值记为

$$C_{k_i}^{i'} = \frac{c_{k_i}^i - \min\{C\}}{\max\{C\} - \min\{C\}} \quad (1)$$

式中: $\max\{C\}$ 和 $\min\{C\}$ 分别表示集合 C 中元素的最大值和最小值, 同理

$$d_{l_j}^{j'} = \frac{d_{l_j}^j - \min\{D\}}{\max\{D\} - \min\{D\}} \quad (2)$$

为方便起见, 将归一化后的 $c_{k_i}^{i'}$, $d_{l_j}^{j'}$, 仍记作 $c_{k_i}^i$, $d_{l_j}^j$, 归一化所得序列仍记作 $\{c^1\}$, $\{c^2\}$, ..., $\{c^m\}$ 和 $\{d^1\}$, $\{d^2\}$, ..., $\{d^m\}$ 。显然, 他们的值均在 $[0, 1]$ 区间。

1.2 子序列 $\{c^i\}$ 和 $\{d^j\}$ 的波形误差

两个子序列 $\{c^i\} = \{C_1^i, C_2^i, \dots, C_{m_i}^i\}$, $\{d^j\} = \{d_1^j, d_2^j, \dots, d_{n_j}^j\}$, 设 $m_i > n_j$, 如图 2 所示。首先压缩序列 $\{c^i\} = \{c_1^i, c_2^i, \dots, c_{m_i}^i\}$ 的长度。 $\{c^i\}$ 在时刻 1, 2, ..., m_i 有对应的信号值 $c_1^i, c_2^i, \dots, c_{m_i}^i$, 将该序列时间总长度压缩为原来的 $(n_j - 1)/(m_i - 1)$ 之后, $\{c^i\}$ 的时间长度就和 $\{d^j\}$ 一致了。这时对应信号值 $c_1^i, c_2^i, \dots, c_{m_i}^i$ 的时刻是 $1, \frac{n_j - 1}{m_i - 1} + 1, \dots, \frac{n_j - 1}{m_i - 1} \times k + 1, \dots, \frac{n_j - 1}{m_i - 1} \times (m_i - 2) + 1, n_j$ 。然后 $\{c^i\}$ 在时刻 1, 2, ..., n_j 的信号值根据原采样点的信号值 $c_1^i, c_2^i, \dots, c_{m_i}^i$ 线性插值得到, 现在的子序列 $\{c^i\}$ 已和原来的不一样了。

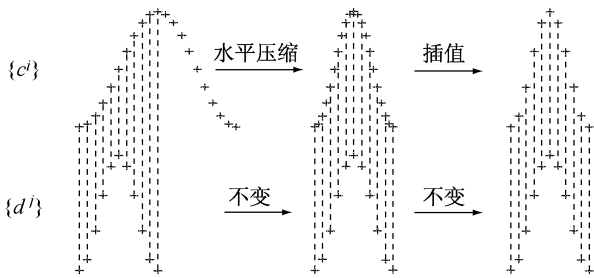


图 2 子序列 $\{c^i\}$ 和 $\{d^j\}$ 预处理流程 (为了便于观察, 此处特意加大了两序列的周期长度的差别)

Fig. 2 The pre-processing of subsequences $\{c^i\}$ and $\{d^j\}$ (The difference between the period length of these two sequences has been amplified deliberately in order to facilitate observation)

经过这样的处理之后, 下面可以对 $\{c^i\}$ 和 $\{d^j\}$ 在时刻 1, 2, ..., n_j 的信号值进行比较。定义 $\{c^i\}$ 与 $\{d^j\}$ 的波形误差如下:

$$e_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n_j} |c_k^i - d_k^j|^2} / \left(\sqrt{\sum_{k=1}^{n_j} c_k^i{}^2} + \sqrt{\sum_{k=1}^{n_j} d_k^j{}^2} \right) \quad (3)$$

所有 $\{c^i\}$ 、 $\{d^j\}$ 子序列的波形误差构成了一个波形误差矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} e_{1,1} & e_{1,2} & \dots & e_{1,m} \\ e_{2,1} & e_{2,2} & \dots & e_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m,1} & e_{m,2} & \dots & e_{m,m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.3 信号组间波形相似度

定义信号序列 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 和 $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ 之间的波形相似度:

$$S = 1 - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{\min_{i=1, \dots, m} \{e_{i,k}\} + \min_{j=1, \dots, m} \{e_{k,j}\}}{2} \quad (5)$$

从波形相似度的定义可以看出, 任意的两列序列之间的波形相似度必然落在 $[0, 1]$ 区间内。子序列之间的波形误差越小, 则原序列的波形相似度就越大, 即波形越接近。若是两列完全相同的序列, 则波形相似度为 1。

2 中医擦法垂直作用力信号的组间波形相似度分析

2.1 实验设备、对象及信号采集

邀请推拿擦法的创始人丁季峰先生的弟子, 现今推拿界著名专家严隽陶、沈国权和是有康, 以及 6 位已学习擦法推拿一段时间的研究生、6 位擦法的初学者参与测试。参与测试的擦法操作者要求近期无明显的上肢损伤史, 测试前 24 h 未从事过上肢剧烈运动。力信号采集设备采用复旦大学和上海中医药大学研制的 FZ-I 型推拿手法测定仪。其技术参数为: 垂直正压力满量程 100 N, 精度 1%, 分辨率 0.30 N; 水平力满量程 30 N, 精度 1%, 分辨率 0.15 N^[10]。测试前, 所有擦法操作人员静息 15 min, 避免心理因素干扰。手法的操作严格按照推拿手法操作标准的要求进行。测试开始, 操作者面向推拿手法测定仪近侧以右手实施擦法推拿, 由推拿手法测定仪实时采集垂直作用力信号, 采样频率为 208 Hz。每人测试 1 次。测试结束后, 利用自编软件, 截取每位操作者擦法动作较为稳定时期的 1 000 个力信号数据进行组间相似度分析。

2.2 相似度分析结果

经过计算, 3 位专家两两之间的波形相似度为

91.51%, 93.72%, 93.65%, 均在90%以上,这说明他们的揉法垂直力信号波形较为接近,可以作为标准信号。然后以这3位专家的力信号为模板,分别与6位研究生的信号和6位初学者的信号进行波形相似度计算。计算结果如表1所示。

表1 研究生、初学者分别与专家比较的揉法垂直力信号相似度
Tab.1 The similarity of the vertical force signals from the rolling manipulation operated by the graduates and beginners with the signals of the experts as templates

	专家1	专家2	专家3	平均值
研究生1	87.27	90.59	90.47	89.44
研究生2	77.90	82.65	80.54	80.36
研究生3	80.26	84.29	82.20	82.25
研究生4	86.26	90.54	87.58	88.13
研究生5	83.00	87.64	84.90	85.18
研究生6	89.41	91.65	91.80	90.95
初学者1	73.71	78.85	74.30	75.62
初学者2	77.58	83.18	79.69	80.15
初学者3	70.18	73.15	70.61	71.31
初学者4	70.26	74.61	71.10	71.99
初学者5	72.40	76.97	73.33	74.23
初学者6	63.31	66.99	63.90	64.73

现将3位专家两两之间的波形相似度数据91.51%, 93.72%, 93.65%归为数组1,表1中6位研究生平均值归为数组2,6位初学者平均值归为数组3。这3组数据的 t 检验结果如表2所示。

表2 数组1,2,3两两 t 检验结果
Tab.2 The results of t -test among array 1,2 and 3

	数组1与 数组2	数组1与 数组3	数组2与 数组3
P 值	0.015 0	0.000 2	0.000 3

表2中所有 t 检验结果 $P < 0.05$,因此可以判定专家和专家之间的相似度、专家和研究生之间的相似度、专家和初学者之间相似度三者有显著差异。专家间相似度最高,专家和研究生间相似度次之,专家和初学者间相似度最低。这说明,研究生和初学者的手法和专家相比是有差距的,初学者的手法较之研究生的手法差距更大,这是符合实际情况的。

3 结论与讨论

本文根据近周期性信号的特点,提出了一种评价两组信号之间的波形相似程度的量化指标——波形相似度,并应用于中医揉法操作者的垂直作用力信号相似度分析。结果发现,推拿专家间的波形相似程度存在较高的一致性。以专家信号为标准,与已学习揉法一段时间的研究生和初学者的力信号进行比较,结果证明了该相似度指标能够反映揉法操作者的水平差异。由于这3位专家的较高的权威性,基于他们彼此之间的相似度数据为91.51%、93.72%和93.65%,可以考虑把和这3位专家的波形相似度达到91.5%作为衡量一个揉法实施者是否基本达到操作要求的一个定量参考指标,因而本方法对推拿手法的教学研究而言具有指导意义。

本文仅对揉法的垂直作用力信号进行了组间相似度研究,还可以用同样的方法研究操作者在施行揉法时其他类型的信号与相应标准信号的相似度,如手上关键点的三维坐标信号等,与垂直作用力信号一起全面描述该操作者与权威专家的水平差异。如果某一类信号与专家的相似度较低,则应指导他在这一方面做出相应的纠正,以期更加接近或达到标准要求。由于其他众多推拿手法和其他生理信号也具有与揉法力信号类似的特点,可尝试利用本文提出的组间波形相似度算法来分析这些信号,进而提出一些相应的量化标准供教学、临床和研究参考。

参考文献:

- [1] 罗建,温伯平,丰芬. 近年来推拿手法规范化研究进展与思考[J]. 中医研究, 2006, 19(4):7-9.
- [2] 严晓慧,严隽陶. 浅谈中医推拿手法规范化重要性[J]. 河南中医, 2009, 29(3):242-243.
- [3] 朱凌云,王正国,吴宝明,等. 移动心电信号QRS波形相似度指标的选择方法[J]. 中国临床康复, 2006, 10(21):119-121.
- [4] 张琳,严洪. 心电信号形态相关性分析[J]. 航天医学与医学工程, 2008, 21(3):287-290.
- [5] 庄力,周雪忠,贾彩燕,等. 基于Biclustering的中医药症关系分析[J]. 计算机工程, 2010, 36(11):241-243.
- [6] 李宏,林义刚,张冬生,等. ICA在地震信号处理中的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(9):2057-2060.

(下转第149页)