

DOI:10.12025/j.issn.1008-6358.2017.20161165

可穿戴传感装置对帕金森病患者上肢静止性震颤的量化评估价值

武文豪¹, 吴曦^{2*}, 沈林勇¹, 王家莉², 钱晋武^{1*}

1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072

2. 海军军医大学附属长海医院神经外科, 上海 200433

[摘要] **目的:** 评估采用可穿戴传感器量化评估帕金森病(Parkinson disease, PD)患者上肢静止性震颤的可行性。**方法:** 15例PD患者和8例健康受试者双手穿戴检测装置, 完成统一帕金森病评定量表(UPDRS)中的检测静止性震颤的标准动作。对采集到的上肢静止性震颤的加速度信号进行时域和频域分析, 并与UPDRS中的静止性震颤评分进行相关性分析。**结果:** 可穿戴设备可以良好地测定上肢静止性震颤的加速度均值、均方根值、峰值振幅和峰值功率的对数值; 震颤的加速度均值、均方根值、峰值振幅和峰值功率的对数值与UPDRS中静止性震颤的评分高度相关(r 分别为0.960、0.961、0.893、0.944)。**结论:** 可穿戴传感装置可准确、客观、量化地评估PD患者上肢的静止性震颤, 值得临床推广。

[关键词] 可穿戴系统; 静止性震颤; 帕金森病; 传感器

[中图分类号] R 742.5 **[文献标志码]** A

Quantitative assessment value of wearable sensor for rest tremor in Parkinson disease

WU Wen-hao¹, WU Xi^{2*}, SHEN Lin-yong¹, WANG Jia-li², QIAN Jin-wu^{1*}

1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

2. Department of Neurosurgery, Changhai Hospital, Navy Military Medical University, Shanghai 200433, China

[Abstract] **Objective:** To analyze the feasibility of wearable sensor for assessing the severity of tremor in patients with Parkinson disease (PD). **Methods:** Totally 15 PD subjects and 8 healthy subjects completed the standard action for detecting resting tremor in unified PD rating scale (UPDRS) with the detecting equipment on their hands. The time domain and frequency domain of acceleration signal collected during rest tremor were analyzed, and their correlations with rest tremor score in UPDRS were explored. **Results:** The logarithm of mean acceleration, root-mean-square roughness, peak amplitude and peak power were well assessed, which were all significantly correlated with rest tremor score in UPDRS ($r=0.960, 0.961, 0.893, 0.944$). **Conclusions:** The wearable tremor data acquisition device is accurate, objective and digital in evaluation of resting tremor in PD patients.

[Key Words] wearable system; resting tremor; Parkinson disease; sensor

帕金森病(Parkinson disease, PD)是一种常见的中枢神经系统退行性疾病, 主要以中脑黑质多巴胺能神经元变性或缺失和路易小体形成为病理特征。其发病率随着人群的年龄增大而升高, 严重影响患者的生活质量^[1]。

静止性震颤通常是PD患者或其家属发现的首个临床症状。特征为患者的手指在静止状态下搓丸样震颤^[2]。目前临床仍主要依赖主观评分量表来评估静止性震颤, 如统一帕金森病评分量表(unified

Parkinson disease rating scale, UPDRS)、帕金森病Webster评分量表等^[3], 评估结果主观性强, 存在明显的个体差异。因此, 本研究尝试采用传感装置评估震颤, 并探讨其可行性。

1 资料与方法

1.1 受试者选择 海军军医大学附属长海医院神经外科2016年4月至9月招募23例受试者, 分为PD组和对照组。对照组包括8例健康受试者, PD

[收稿日期] 2016-12-19

[接受日期] 2017-12-10

[基金项目] 国家自然科学基金(51275282), 教育部博士点基金(20123108110009), 国家重点研发计划“数字诊疗装备研发”试点专项课题(2016YFC0105900), Supported by National Natural Science Foundation of China(51275282), Doctoral Program of the Ministry of Education of China(20123108110009), and “Digital Equipment of Diagnosis and Treatment” Special Program of National Key Research and Development Plan(2016YFC0105900).

[作者简介] 武文豪, 硕士。E-mail: wuwenhao1991@qq.com

* 通信作者(Corresponding authors). Tel: 021-56331783, E-mail: jwqian@shu.edu.cn; Tel: 021-31161789, E-mail: wuxi_smmu@sina.com

组包括 15 例 PD 患者。两组一般资料差异无统计学意义(表 1)。所有受试者均神智清楚,能配合完成评估。PD 患者诊断符合英国脑库临床标准的原发性帕金森病,进行 UPDRS 双上肢震颤评分,确定 PD 患者的静止性震颤严重程度。本研究经海军军医大学附属长海医院伦理委员会批准,所有受试者知情同意并签署知情同意书。

表 1 受试者基线资料对比

| 项 目 | PD 组($n=15$) | 对照组($n=8$) |
|-----------------|----------------|--------------|
| 性别(男/女) | 7/8 | 4/4 |
| 平均年龄(岁) | 61.93±5.16 | 51.02±5.20 |
| 病程(年) | 10.33±3.45 | 0 |
| H&Y 评分 | 3.17±0.45 | 0 |
| UPDRS 左手静止性震颤评分 | 1.33±1.23 | 0 |
| UPDRS 右手静止性震颤评分 | 1.20±1.01 | 0 |

1.2 数据采集 主要通过 NORAXON 三维关节角度采集系统(Noraxon U. S. A. Inc., USA)采集数据,该仪器可以将获得的加速度数据通过无线传输保存到电脑中,其采样频率为 100 Hz。受试者将传感器通过手套固定在手背部,通过无线传输将数据传输到电脑中,采用 Matlab R2014a(MathWorks, USA)软件对数据进行处理。受试者需要完成 2008 版 UPDRS-III 中的第 21 项手部静止性震颤项目,即将双手放在大腿上,保持不动持续 15 s。

PD 患者不服用抗帕金森病药物 72 h 后,第 2 天早晨完成测量,以确保可以体现受试者服药前的症状,由同一名医师进行震颤评估,得到评分。健康受试者由于无震颤症状,因此评分默认为 0。

1.3 静止性震颤数据处理 针对 PD 患者的数据处理主要分为两部分:震颤检测和特征提取。首先判断受试者是否发生震颤,当震颤发生时,再提取震颤特征值,以量化患者症状的严重程度。对数据进行了时域、频域分析。

1.3.1 震颤检测 对 5 s 窗口中的数据进行分析,判断这 5 s 内是否发生震颤。震颤的频率多为 3~8 Hz^[4],因此需要对数据进行分析。采用离散傅里叶变换(DFT)对数据进行处理,经过 DFT 变换后,判断震颤发生的条件有 2 个,若 2 个条件都通过,说明该时间窗内发生震颤。条件 1:由于检测静止性震颤,手部没有其他运动,因此如果受试者有震颤,其频谱图中就会出现明显的峰值,只要 x 、 y 、 z 轴中有一轴上存在明显峰值,则条件 1 通过。幅频图中的第 1 大峰值 P_m 和第 2 大峰值 P_{m2} ,若

P_{m2} 小于 P_m 的 60%,则判断存在明显峰值。条件 2:若 P_m 所在的频率在 3~8 Hz($3 \text{ Hz} < f < 8 \text{ Hz}$),则条件 2 通过。

1.3.2 特征提取 当检测到震颤发生后,对数据进行特征提取,主要提取震颤时域、频域、谱域特征。由于得到的数据可能受到高频噪声干扰,因此采用 3~8 Hz 的带通滤波器将震颤信号分离出来。有限脉冲响应(FIR)数字滤波器是一种在数字信号处理领域中应用广泛的基础性滤波器,其在保证任意幅频特性的同时有严格的线性相频特性。FIR 滤波器截止频率为 3 Hz,上截止频率为 8 Hz,过渡带宽为 0.2 Hz,通带波动小于 0.1 dB。在时域、频域、谱域中计算震颤信号的特征值,由于每个 PD 患者的震颤方向均不同,因此特征的提取均是基于 x 、 y 、 z 三轴的合加速度 $a(i)$ 见公式 1。

$$\text{公式 1: } a(i) = \sqrt{a_x(i)^2 + a_y(i)^2 + a_z(i)^2}, i=0, 1, \dots, N-1$$

其中, N 表示该数据段的点数, i 表示第几个点, $a(i)$ 表示在 i 点的总加速度, $a_x(i)$ 、 $a_y(i)$ 、 $a_z(i)$ 分别表示 x 、 y 、 z 三轴在 i 点的加速度。

时域:均方根(RMS)是一种统计量,其计算公式如下。

$$\text{公式 2: } a_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} a(i)^2}{N}}$$

频域:由于震颤是以一种固定频率的抖动,因此对 x 、 y 、 z 三轴数据进行 DFT 变换,可以求出震颤主频率。震颤主频率是一种显示 PD 患者震颤特性的特征值。若三轴的主频率不同,取三轴中最大峰值的频率作为主频率 P_f 。震颤峰值 P_m 为三轴在 P_f 处的合加速度(公式 3)。

$$\text{公式 3: } P_m = \sqrt{a_x(P_f)^2 + a_y(P_f)^2 + a_z(P_f)^2}$$

功率谱:对于常见的随机信号,不可能用清楚的数学关系式来描述,但可以利用给定的 N 个样本数据估计一个信号的功率谱密度,称为功率谱估计(PSD)。由功率谱密度计算得出的峰值功率可以较好地反映信号的能量,与震颤的评分相关性较好^[4]。总的峰值功率为各个轴的加速度信号的峰值功率之和。各个轴的峰值功率为围绕主频率 $P_f \pm 4 \text{ Hz}$ 的评估功率。加速度信号某一轴的峰值功率见公式 4,三轴总的峰值功率见公式 5。

$$\text{公式 4: } P_{\text{Peak}}(k) = \int_{P_f-0.4}^{P_f+0.4} \frac{a_{\text{DFT}}^* \times a_{\text{DFT}}}{N} df, k=1, 2, 3$$

$$\text{公式 5: } P_{\text{Peak}} = \sum_{k=1}^3 P_{\text{Peak}}(k)$$

其中, P_{Peak} 表示总的峰值功率, a_{DFT} 表示加速度

信号 a 的 DFT 变换, a_{DFT}^* 表示 a_{DFT} 的复共轭, $k=1, 2, 3$ 分别表示 x 轴、 y 轴、 z 轴。

1.4 标准化的震颤严重模型 采用多元线性回归模型对静止性震颤的 UPDRS 分数进行评估。通过选取特征值中相关系数较高的特征值作为回归模型参数(公式 6)。

公式 6: $R_{ank} = a_1 \times \ln(F_1) + a_2 \times \ln(F_2) + b$

其中, a_1 、 a_2 、 b 分别回归系数, R_{ank} 为预测的震颤评分, F_1 和 F_2 分别为时域和频谱域相关系数最大的两个特征值。

2 结果

2.1 受试者时域分析 PD 患者震颤 UPDRS 平均评分左手为(1.33±1.23)分,右手为(1.20±1.01)分;左手或右手存在明显波形,频率快且幅度大,双手震颤差异明显(图 1A)。健康受试者双手 UPDRS 均为 0;左手或右手均未见明显波形,幅度微小(图 1B)。

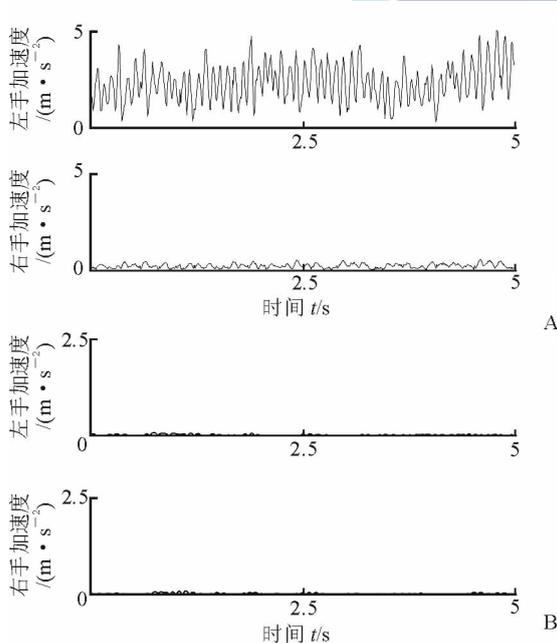


图 1 PD 患者(A)和健康受试者(B)手部波形图

2.2 受试者频域分析 经过 DFT 变化,对数据进行频域分析,可见 PD 患者震颤频率为 3~8 Hz 处有明显峰值,且幅度较大(图 2A);健康受试者没有明显的峰值,且幅度较小,较为平缓(图 2B)。所有受试者加速器采集的运动参数见表 2。相关性分析显示,加速度均值(MEAN)、均方根值(RMS)、峰值振幅(P_m)和峰值功率(P_{Peak})与上肢震颤 UPDRS-III

评分相关性较好(r 分别为 0.850、0.850、0.864、0.763);4 种特征值的对数值与 UPDRS-III 评分的相关性更好(r 分别为 0.960、0.961、0.893、0.944)。

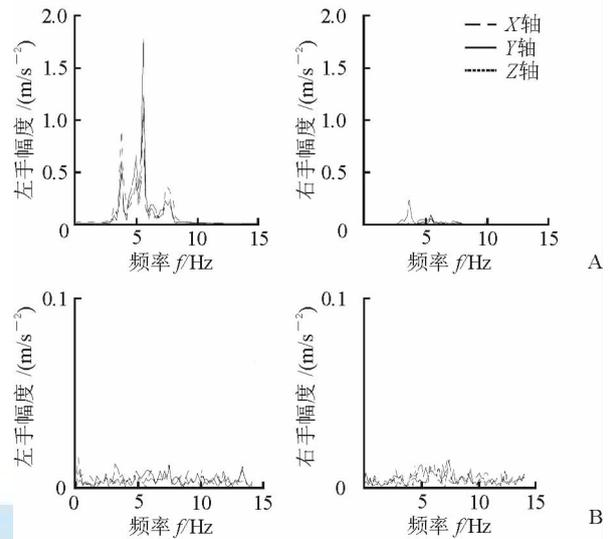


图 2 PD 患者(A)和健康受试者(B)手部震颤频域图

3 讨论

PD 患者的运动症状评估长久以来缺乏公认的客观量化指标,评估者对症状的评估费时且有主观差异,这不利于药物效果评估及手术效果评估。因此,越来越多的研究者探索并采用客观测量方法来评估帕金森病症状。由于 PD 运动症状非常复杂,因此目前将运动症状分解进行量化评估。其中,对于震颤的客观量化评估方法包括表面肌电信号(surface electromyogram, sEMG)^[5-8]、惯性传感器^[9-10]、手画线检测^[11-12]和光学传感器检测等^[13]。sEMG 采集过程较为复杂,不利于快速检测。光学传感器检测对周围环境的要求较高。以上两种方法设备都比较复杂,不适合长时间记录数据。惯性传感器是检测和测量加速度、倾斜、冲击、振动、旋转和多自由度运动的传感器,分为角速率陀螺和加速度传感器,其体积更小、精度更高,使用更方便,为长时间的震颤检测提供了新方法。Latt 等^[14]采用智能手机中的加速度软件和陀螺仪检测震颤,并对数据进行存储和计算,但手机的传感器精度不高,一些微弱的震颤信号无法检测。本研究采用的设备精度较高,并且是对加速度信号进行了分析,可以更好地反映震颤强度。

表2 加速器采集的运动参数特征值

| 受试者 | 部位 | 评分 | MEAN | Ln(MEAN) | RMS | Ln(RMS) | P _f | P _m | Ln(P _m) | P _{Peak} | Ln(P _{Peak}) | Rank |
|--------|----|----|-------|----------|-------|---------|----------------|----------------|---------------------|-------------------|------------------------|---------|
| PD患者1 | 左手 | 1 | 0.307 | -1.181 | 0.334 | -1.097 | 4.6 | 0.442 | -0.816 | 4.993 | 1.608 | 1.5 |
| | 右手 | 1 | 0.219 | -1.519 | 0.232 | -1.461 | 5 | 0.258 | -1.355 | 2.097 | 0.740 | 1.3 |
| PD患者2 | 左手 | 0 | 0.022 | -3.817 | 0.024 | -3.717 | 7.8 | 0.013 | -4.343 | 0.006 | -5.116 | 0(-0.2) |
| | 右手 | 0 | 0.024 | -3.747 | 0.026 | -3.654 | 4.6 | 0.012 | -4.415 | 0.008 | -4.867 | 0(-0.1) |
| PD患者3 | 左手 | 3 | 1.990 | 0.688 | 2.340 | 0.850 | 4.4 | 2.720 | 1.001 | 233.069 | 5.451 | 3.1 |
| | 右手 | 1 | 0.211 | -1.556 | 0.235 | -1.448 | 4.4 | 0.190 | -1.661 | 1.099 | 0.094 | 1.5 |
| PD患者4 | 左手 | 2 | 0.531 | -0.633 | 0.611 | -0.492 | 4.8 | 0.583 | -0.540 | 15.625 | 2.749 | 2.0 |
| | 右手 | 2 | 0.665 | -0.407 | 0.735 | -0.308 | 5.2 | 0.941 | -0.060 | 23.947 | 3.176 | 2.1 |
| PD患者5 | 左手 | 1 | 0.086 | -2.457 | 0.095 | -2.353 | 4.4 | 0.081 | -2.511 | 0.312 | -1.166 | 0.6 |
| | 右手 | 1 | 0.071 | -2.646 | 0.077 | -2.569 | 4.4 | 0.064 | -2.754 | 0.238 | -1.436 | 0.4 |
| PD患者6 | 左手 | 1 | 0.096 | -2.349 | 0.106 | -2.244 | 4.4 | 0.077 | -2.563 | 0.305 | -1.187 | 0.7 |
| | 右手 | 2 | 0.324 | -1.127 | 0.347 | -1.058 | 4.6 | 0.352 | -1.044 | 5.398 | 1.686 | 1.5 |
| PD患者7 | 左手 | 1 | 0.055 | -2.893 | 0.062 | -2.781 | 7 | 0.039 | -3.239 | 0.075 | -2.593 | 0.4 |
| | 右手 | 1 | 0.046 | -3.086 | 0.052 | -2.964 | 7.2 | 0.024 | -3.751 | 0.030 | -3.493 | 0.4 |
| PD患者8 | 左手 | 3 | 2.230 | 0.802 | 2.380 | 0.867 | 5.6 | 2.410 | 0.880 | 170.741 | 5.140 | 3.2 |
| | 右手 | 1 | 0.211 | -1.556 | 0.234 | -1.452 | 3.8 | 0.231 | -1.465 | 1.593 | 0.465 | 1.3 |
| PD患者9 | 左手 | 0 | 0.041 | -3.189 | 0.047 | -3.049 | 5.4 | 0.024 | -3.747 | 0.029 | -3.544 | 0.3 |
| | 右手 | 0 | 0.036 | -3.321 | 0.037 | -3.300 | 5.4 | 0.019 | -3.953 | 0.017 | -4.069 | 0.1 |
| PD患者10 | 左手 | 0 | 0.045 | -3.094 | 0.050 | -2.990 | 5 | 0.024 | -3.713 | 0.029 | -3.554 | 0.4 |
| | 右手 | 0 | 0.037 | -3.297 | 0.041 | -3.204 | 5 | 0.024 | -3.747 | 0.024 | -3.751 | 0.2 |
| PD患者11 | 左手 | 0 | 0.063 | -2.763 | 0.072 | -2.635 | 6 | 0.061 | -2.800 | 0.155 | -1.862 | 0.4 |
| | 右手 | 1 | 0.150 | -1.895 | 0.167 | -1.792 | 7 | 0.188 | -1.669 | 0.984 | -0.016 | 1.0 |
| PD患者12 | 左手 | 2 | 0.628 | -0.466 | 0.697 | -0.362 | 7.4 | 0.697 | -0.361 | 17.566 | 2.866 | 2.2 |
| | 右手 | 2 | 0.356 | -1.032 | 0.390 | -0.941 | 6.4 | 0.234 | -1.453 | 3.311 | 1.197 | 1.8 |
| PD患者13 | 左手 | 1 | 0.089 | -2.421 | 0.113 | -2.185 | 6 | 0.073 | -2.613 | 0.263 | -1.338 | 0.9 |
| | 右手 | 1 | 0.124 | -2.088 | 0.167 | -1.789 | 6.2 | 0.079 | -2.535 | 0.461 | -0.774 | 1.2 |
| PD患者14 | 左手 | 4 | 3.896 | 1.360 | 4.213 | 1.438 | 5 | 3.650 | 1.295 | 525.050 | 6.263 | 3.6 |
| | 右手 | 4 | 4.274 | 1.453 | 4.805 | 1.570 | 4.6 | 3.755 | 1.323 | 628.492 | 6.443 | 3.8 |
| PD患者15 | 左手 | 1 | 0.101 | -2.290 | 0.115 | -2.166 | 6.4 | 0.065 | -2.732 | 0.201 | -1.606 | 1.0 |
| | 右手 | 1 | 0.046 | -3.079 | 0.051 | -2.976 | 6.4 | 0.021 | -3.878 | 0.032 | -3.451 | 0.4 |
| 健康受试者1 | 左手 | 0 | 0.031 | -3.464 | 0.034 | -3.370 | 8 | 0.021 | -3.878 | 0.016 | -4.123 | 0.0 |
| | 右手 | 0 | 0.038 | -3.275 | 0.042 | -3.182 | 6.4 | 0.020 | -3.912 | 0.023 | -3.759 | 0.2 |
| 健康受试者2 | 左手 | 0 | 0.027 | -3.631 | 0.029 | -3.551 | 7.4 | 0.013 | -4.335 | 0.008 | -4.867 | 0.0 |
| | 右手 | 0 | 0.024 | -3.726 | 0.027 | -3.631 | 4.6 | 0.013 | -4.313 | 0.007 | -4.962 | 0(-0.1) |
| 健康受试者3 | 左手 | 0 | 0.038 | -3.260 | 0.043 | -3.144 | 4.2 | 0.023 | -3.794 | 0.039 | -3.257 | 0.1 |
| | 右手 | 0 | 0.041 | -3.192 | 0.048 | -3.047 | 4.2 | 0.034 | -3.384 | 0.055 | -2.899 | 0.1 |
| 健康受试者4 | 左手 | 0 | 0.029 | -3.551 | 0.032 | -3.455 | 3.8 | 0.013 | -4.366 | 0.012 | -4.440 | 0.0 |
| | 右手 | 0 | 0.030 | -3.517 | 0.033 | -3.423 | 3.8 | 0.015 | -4.180 | 0.014 | -4.298 | 0.0 |
| 健康受试者5 | 左手 | 0 | 0.032 | -3.442 | 0.035 | -3.352 | 7.8 | 0.054 | -2.919 | 0.024 | -3.747 | 0.0 |
| | 右手 | 0 | 0.037 | -3.286 | 0.041 | -3.197 | 7.8 | 0.101 | -2.293 | 0.024 | -3.734 | 0.2 |
| 健康受试者6 | 左手 | 0 | 0.027 | -3.612 | 0.030 | -3.523 | 6.6 | 0.012 | -4.440 | 0.010 | -4.566 | 0.0 |
| | 右手 | 0 | 0.026 | -3.669 | 0.029 | -3.558 | 6.4 | 0.012 | -4.431 | 0.008 | -4.816 | 0.0 |
| 健康受试者7 | 左手 | 0 | 0.039 | -3.255 | 0.043 | -3.156 | 4.4 | 0.257 | -1.359 | 0.041 | -3.194 | 0.1 |
| | 右手 | 0 | 0.042 | -3.168 | 0.048 | -3.037 | 4.2 | 0.029 | -3.558 | 0.055 | -2.908 | 0.1 |
| 健康受试者8 | 左手 | 0 | 0.034 | -3.396 | 0.038 | -3.262 | 4 | 0.018 | -4.034 | 0.017 | -4.069 | 0.2 |
| | 右手 | 0 | 0.035 | -3.350 | 0.041 | -3.189 | 3.4 | 0.020 | -3.927 | 0.024 | -3.713 | 0.2 |

MEAN: 加速度均值; RMS: 均方根值; P_f: 峰值频率; P_m: 峰值振幅; P_{Peak}: 峰值功率; Rank: 标准化的震颤严重模型所得评分

本研究中,健康受试者的加速度数据数值小且波动小,而PD患者在3~8 Hz存在明显波形,说明本研究采用的方法可以检测出静止性震颤信号,且可以分辨出PD患者和健康者。而3~8 Hz为PD手部震颤的特征性频率,如果患者的震颤频率不在

此范围,则需考虑其他类型的运动障碍疾病,有一定的鉴别诊断价值。本研究将震颤量化数据与UPDRS-III评分进行相关分析,显示相关系数达0.965,提示通过本研究方法可对上肢震颤作出客观准确的评价。

综上所述,本研究中设计的可穿戴震颤数据采集装置可以准确、客观、数字化评估PD患者上肢的静止性震颤。本研究的不足之处在于未对其他震颤类型评估进行研究。后续将基于本研究,对姿势性震颤和运动性震颤进行评估,并且进一步采用支持向量机、神经网络算法等更加智能的方式对其进行量化评分。

参考文献

- [1] CONNOLLY B S, LANG A E. Pharmacological treatment of Parkinson disease: a review [J]. JAMA, 2014, 311 (16): 1670-1683.
- [2] HURTADO J M, GRAY C M, TAMAS L B, et al. Dynamics of tremor-related oscillations in the human globus pallidus: a single case study[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1999, 96(4):1674-1679.
- [3] 罗毅. 帕金森病的诊断标准及其评分[J]. 中国实用内科学杂志, 1999, 19(6):325-328.
- [4] 艾玲梅, 黄力宇, 王珏. 震颤信号分析的研究现状及展望[J]. 生物医学工程学杂志, 2007, 24(6):1402-1405.
- [5] MAETZLER W, DOMINGOS J, SRULIJES K, et al. Quantitative wearable sensors for objective assessment of Parkinson's disease [J]. Mov Disord, 2013, 28 (12): 1628-1637.
- [6] RUONALA V, MEIGAL A, RISSANEN S M, et al. EMG signal morphology and kinematic parameters in essential tremor and Parkinson's disease patients[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2014, 24(2):300-306.
- [7] EFTAXIAS K, ENSHAEIFAR S, GEMAN O, et al. Detection of Parkinson's tremor from EMG signals; a singular spectrum analysis approach[C]//IEEE International Conference on Digital Signal Processing; 2015. Singapore: IEEE, 2015: 398-402.
- [8] RISSANEN S, KANKAANPÄÄ M, TARVAINEN M P, et al. Analysis of surface EMG signal morphology in Parkinson's disease[J]. Physiol Meas, 2007, 28(12):1507-1521.
- [9] PASCOALFARIA P, PATRÍCIO M, LEAL A, et al. Understanding tremor in rapid upper limb movements using 3D accelerometers data[J]. Neuroscience & Medicine, 2014, 5(5):205-213.
- [10] SHERRILL D M, HUGHES R, SALLES S S, et al. Advanced analysis of wearable sensor data to adjust medication intake in patients with Parkinson's disease[C]//Conference Proceedings. International IEEE Embs Conference on Neural Engineering; 2005. Arlington: IEEE, 2005:202-205.
- [11] SALARIAN A, RUSSMANN H, WIDER C, et al. Quantification of tremor and bradykinesia in Parkinson's disease using a novel ambulatory monitoring system [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2007, 54(2):313-22.
- [12] 周祖巍, 王坚, 成伟华, 等. 手绘直线、螺线的两个统计指标定量检测手震颤[J]. 中国临床神经科学, 2002, 10(2): 175-177.
- [13] RUDZIŃSKA M, IZWORSKI A, BANASZKIEWICZ K, et al. Quantitative tremor measurement with the computerized analysis of spiral drawing[J]. Neurol Neurochir Pol, 2007, 41(6):510-516.
- [14] LATT W T, TAN U X, SHEE C Y, et al. A compact handheld active physiological tremor compensation instrument [C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics; 2009. Singapore: IEEE, 2009: 711-716.

[本文编辑] 姬静芳