Quantitative Assessment of Parkinson's Disease Using Gait Analysis

○岡本 剛 (九大) 正 中西 義孝 (九大) 飛松 省三 (九大) 牧之内 顕文 (久工大)

Tsuyoshi OKAMOTO, Yoshitaka NAKANISHI, Shozo TOBIMATSU,

Kyushu University, 3-1-1 Maidashi, Higashi-ku, Fukuoka

Akifumi MAKINOCHI, Kurume Institute of Technology

Key Words: Parkinson's Disease, Gait Analysis, Foot Pressure, Clinical Stratification

1. はじめに

パーキンソン病(Parkinson's Disease, PD)は、神経内科疾患のうち脳血管障害の次に発症数が多い難病である。わが国での患者数は7万人を超え、65歳以上では人口10万人あたりの患者数が100~150人にも達する。PDの克服は社会的な課題の一つとなっているが、PDは脳機能画像では通常診断できず、初期には三主徴(振戦、筋固縮、無動)が全て表れないため、専門医にも早期の診断は難しい。

従来、PDの重症度はホーエン・ヤールの重症度分類⁽¹⁾あるいは統一PD評価スケール(Unified Parkinson Disease Rating Scale, UPDRS)⁽²⁾を用いて分類されてきた。ホーエン・ヤールの重症度分類(表1)では詳細に症状を表すことはできない。UPDRSは全42項目を各5段階の点数で評価するため定量的に評価することはできるが、評価には相応の時間がかかる。何れの評価法においても医師および患者の主観が入り込むことに起因する曖昧さは排除できない。そこで本研究では非侵襲で低負担な歩行計測を行い、計測データを解析することで定量的かつ客観的にPDの重症度が評価できる新たな指標を作成することを目的とする。

2. 方法

2.1 歩行計測

本研究では足圧分布測定装置(ニッタ株式会社 BIGMAT1300, 440mm×480mm, 8枚使用)、筋電計(キッセイコムテック社 VitalRecorder)およびアクティブ赤外線方式モーションキャプチャーシステム(ASCENSION 社 ReActor)を同期させた歩行計測システムを構築し、被験者(健康者4名, PD患者4名; 表2)の歩行データを計測した(図1)。1回の計測に際し、被験者には計測装置をつけたまま足圧計上の約4mを往復してもらい、随意歩行およびメトロノームによるテンポ指定歩行(1分間に90拍)をそれぞれ3回ずつ計測した。

2.2 歩行解析

本研究では、2.1で述べた歩行計測システムのうち足圧分布データの解析を行い、PDの歩行障害を定量化する指標の作成を行った。1回の歩行計測における足圧分布データは384×44(pixel)×frame数(時間解像度は60fps)の行列からなる。具体的な解析手順を以下に示す。

まず、位置 (i, j) 、時刻 t における圧力値 $p(i, j, t)$ を片足ごとに分離した。

$$p_F(i, j, t) = \begin{cases} p(i, j, t), & p(i, j, t) \in F(t), \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

ここで $L(t)$ または $R(t)$ ($F=L, R$)は、時刻 t における左右それぞれの足に由来する圧力値の集合を表す。次に、各時刻、各足の圧力中心ベクトル $g_F(t)$ を以下のように求めた。

$$g_F(t) = \frac{1}{P(t)} \sum_i \sum_j p_F(i, j, t) \cdot (i \ j)^T, \quad (2)$$

$$P(t) = \sum_i \sum_j p_F(i, j, t). \quad (3)$$

Table 1 Hoehn and Yahr Staging of Parkinson's Disease

I	症状が片方の手足のみ
II	症状が両方の手足にみられる
III	姿勢反射や歩行の障害(小刻みな歩行, ゆっくりとした動作)が加わる
IV	起立, 歩行は可能だが, 非常に不安定で介助が必要
V	車椅子使用か, ほとんど寝たきり

Table 2 Profiles of the subjects

(N: normal, PD: PD patient, M: male, F: female)

Model	B	C	D	E	F	G	H	I
State	N	N	PD	PD	N	PD	N	PD
Height	157	171	151	157	175	168	171	154
Age	24	21	75	83	33	75	24	64
Sex	M	M	F	M	M	M	M	F

Figure 1 Experimental procedures.

Figure 2 Definition of coordinate axes.

ただし式(2)右肩の T は転置記号である(以下同じ)。さらに、踵接地時刻 t_{HS} の圧力中心座標 $\mathbf{g}_F(t_{HS})$ を原点とし、原点から爪先離地時刻 t_{TO} の圧力中心座標 $\mathbf{g}_F(t_{TO})$ に向かって x 軸を、原点から体の外側に向かって x 軸と直交するように y 軸をそれぞれ取るように座標変換を行い、足圧データを基準化した(図 2)。

$$\mathbf{h}_F(t) = \frac{R[\mathbf{g}_F(t) - \mathbf{g}_F(t_{HS})]}{\|\mathbf{g}_F(t_{TO}) - \mathbf{g}_F(t_{HS})\|}, \quad (4)$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\theta = -\arctan \left(\frac{g_{Fy}(t_{TO}) - g_{Fy}(t_{HS})}{g_{Fx}(t_{TO}) - g_{Fx}(t_{HS})} \right), \quad (6)$$

$$\mathbf{g}_F(t) = (g_{Fx}(t) \quad g_{Fy}(t))^T. \quad (7)$$

3. 結果

2.2 のデータ解析方法に基づき、各試行(1 往復)のうち往路の最初 4 歩分および復路の最初 4 歩分の圧力中心軌跡を計算した。歩行計測一試行(8 歩分)の圧力中心軌跡について、健常者および PD 患者の典型例を図 3 に示す。この結果より、健常者は歩行時足圧の圧力中心軌跡が単峰型で、足裏の中心と爪先との間にピークを持つように体の外側に向けて膨らむのに対し、PD 患者はピークの数も位置も不規則な傾向を示すことがわかった。

次に、この傾向を歩行指数として定量化するために、踵接地から爪先離地の中間領域における圧力中心軌跡の平均値を以下のように計算した。

$$\text{Gait Index} = \frac{1}{N(\tau)} \sum_{t \in \tau} h_{Fy}(t), \quad (8)$$

$$\mathbf{h}_F(t) = (h_{Fx}(t) \quad h_{Fy}(t))^T, \quad (9)$$

$$\tau = \{t | 0.25 \leq h_{Fx}(t) \leq 0.75\}. \quad (10)$$

ここで、 $N(\tau)$ は集合 τ の要素数を表す。この指標を健常者 4 名、PD 患者 4 名の随意歩行 3 試行およびテンポ指定歩行 3 試行それぞれについて求めた結果を図 4 に示す。図中の各プロットは、同一被験者の同一歩行タイプにおける歩行指数の平均を表す(誤差棒は $\pm 1SD$)。自由歩行時の歩行指数について、被験者タイプ(健常者または PD 患者)と被験者個人の 2 要因で二元配置分散分析を行った結果、健常者に対し PD 患者が有意に小さい歩行指数を示すことがわかった($p=4.3 \times 10^{-10}$)。また健常者あるいは PD 患者それぞれについて、歩行タイプ(自由歩行またはテンポ指定歩行)と被験者個人の 2 要因で二元配置分散分析を行った結果、健常者も PD 患者も自由歩行とテンポ指定歩行で歩行指数に有意差があった(健常者: $p=0.0047$, PD 患者: $p=0.041$)。ただし、テンポ指定歩行による歩行改善効果は健常者と PD 患者で全く逆の傾向を示し、テンポ指定により健常者が不自然な歩行になるのに対し、PD 患者は歩行が改善した。

4. 結論と展望

本研究では、歩行分析による PD の重症度評価指標の検討を、まず足圧分布データの圧力中心軌跡を解析することにより行った。その結果、圧力中心軌跡から定義した歩行指数によって、健常者と PD 患者を特徴づけられることを示した。また、メトロノームを用いたテンポ指定歩行の歩行改善効果について定量的に評価することが可能となった。

今後は足圧分布についてさらに検討を行う一方、同時計測している筋電データおよびモーションキャプチャーデータの解析を進め、歩行障害の程度から重症度を評価する解析手法を統合的に開発していく予定である。

Figure 3 Typical examples of center-of-pressure trajectory for normal controls and PD patients during voluntary gait.

Figure 4 Gait index obtained from the data of center of foot pressure.

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金・基盤研究(A)(課題番号 16200005)の援助を得た。

参考文献

- (1) Hoehn M, Yahr M. *Neurology* 17:427-42, 1967.
- (2) Fahn S et al., Recent Developments in Parkinson's Disease 2:153-163, 1987.