

筋音図を用いたフィードバック制御機構に基づく バランス能力の評価法の開発

東京大学大学院 神 崎 素 樹
(共同研究者) トロント大学 政 二 慶
早稲田大学 福 永 哲 夫

Development of Appraisal System for Human Balance Based on Feedback Control Mechanism Revealed by Mechanomyography

by

Motoki Kouzaki

Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

Kei Masani

Institute of Biomaterials and Biomedical Engineering,

University of Toronto

Tetsuo Fukunaga

Faculty of Sport Sciences, Waseda University

ABSTRACT

Human bipedal balance is controlled by feedback mechanism, which is appropriate activity of plantar flexors (PF) in response to center of mass (CoM) velocity (CoMvel). Based on the neurophysiological point of view, human equilibrium is able to be evaluated by the result obtained from cross-correlation function (CCF) from CoMvel to muscle activity of medial gastrocnemius (MG). The purpose of present study was to establish the assessment system for human balance on the basis of feedback control mechanism by using mechanomyogram (MMG). During the quiet stance in young ($n = 20$) subjects for 60-s, CoM, CoMvel, electromyogram (EMG) of MG and soleus (SOL), and MMG of PF were measured. Cross-spectral analysis from MMG to CoM,

and EMGs indicated that MMG was coherent with CoM, EMG of MG, and EMG of SOL in frequency range from 0 to 1Hz, from 2 to 4Hz, and from 8 to 12Hz, respectively. Low-pass filtered MMG (cutoff frequency = 1Hz) was significantly related to the CoM, indicating that low-frequency component of MMG reflects the CoM fluctuation. Furthermore, time differentiation of filtered MMG ($d\text{MMG}/dt$) was strongly correlated with CoMvel. From cross-spectral analysis, variable from low-pass filtered MMG (cutoff frequency = 4Hz) to low-pass filtered MMG (cutoff frequency = 1Hz) would represent the muscle activities of MG. We compared the CCF results from two different assessments. As a result, the positive peak value from CCF between CoMvel and EMG of MG was significantly correlated with that from CCF between low-pass filtered MMG and variable from MMG signals. To evaluate the balance with aging by using MMG, the positive peak value of CCF from MMG analyses was compared between young and elderly subjects. The positive peak value was significantly higher in young than in elderly subjects, suggesting that the postural control based on the neurophysiological view in the elderly is inferior to that in the young adults. These results lead us to conclude that an appropriate analysis of MMG is able to assess the human balance controlled by feedback mechanism on the basis of neurophysiological point of view.

要 旨

床反力計を用いた従来のバランス能力検査法の神経生理学的意味合いは薄い。立位バランスは、身体重心速度の検知とそれに応じた適切な足関節底屈筋群の活動を基にしたフィードバック制御機構により調節されている。本研究は、筋音図法によりフィードバック制御機構によるバランス能力の検査法を開発することを目的とした。静止立位60秒間に、身体重心動揺、内側腓腹筋とヒラメ筋の筋電図、および筋音図信号を取得した。筋音図信号が身体重心動揺および筋電図の変動を反映するか否かを定量評価するために、変数間のコヒーレンスを算出した。その結果、筋音図と身体動揺との間には2Hz未満にコヒーレンスが有意水準を上回った。また、筋音図と内側腓腹筋およびヒラメ筋の筋電図系列との間には、それぞれ2-4Hz

および8-12Hzにコヒーレンスが有意であった。筋音図の低周波成分と身体重心および筋音図の低周波成分の一階時間微分系列と身体重心速度との間には強い正の相関が観察された。この結果より、筋音図の非定常な低周波成分は身体重心を反映することが明らかとなった。クロススペクトル解析の結果から、4Hz未満の筋音図系列と1Hz未満の筋音図系列の偏差は内側腓腹筋の筋活動を反映する。したがって、筋音図の低周波成分の一階時間微分系列と4Hz未満と1Hz未満の筋音図信号の偏差系列は、身体重心速度と内側腓腹筋の筋活動をそれぞれ表す。前者と後者と相互相関関数の正のピーク値を20名の被検者ごとに求めたところ、有意な正の相関が認められた。この結果は、筋音図法によりフィードバック制御機構によるバランス能力を評価できることを意味している。さらに、この評価値を用い高齢者と若齢者のバランス能力

の差違を抽出することができた。筋音図の適切な時系列解析により、簡便かつ神経生理学的意味合いを含んだフィードバック制御機構によるバランス能力を正確に評価できることが明らかになった。

緒言

高齢者転倒は、外的環境因子のほか、バランス能力、歩容の変化、筋力低下、反射の衰弱、視力低下、痴呆の進行などが挙げられている³³⁾。特に平衡機能障害が危険因子として指摘されている⁶⁾。したがって、バランス能力のスクリーニング検査は、高齢者の転倒予防対策として有意義である。バランス能力のスクリーニング検査として数多くのテストが提案されている^{21, 37)}。そのうち、計測機器が普及していること³⁷⁾、保険診療適用の検査となり方法が標準化されていること²⁷⁾、評価値がどの施設で実施された検査でも同じ基準で評価できること³⁴⁾から、足圧中心 (CoP ; center of pressure) 動揺の計測が広く用いられている。CoP動揺の計測は、被検者の負担が少ないこと³⁴⁾から、高齢者を含む幅広い年齢層に対して用いるのに適している。

一般的なバランス能力の検査は、静止立位時にどの程度揺れたかを定量化するものである。その測定出力はCoP動揺の要約統計量（振幅、標準偏差、面積、軌跡長）が主である。この要約統計量からバランス能力の指標として加齢変化^{12, 20, 29)}、疾患の識別^{23, 30)}などが検討されている。しかしながら、必ずしもこれら要約統計量は加齢変化やバランス疾患を的確に捉えていないことが指摘されている^{10, 21)}。これは、CoP動揺が非定常な系列であり²⁾、複雑で捉え難い変動であることに起因している^{10, 21)}。この検査法の最も重要な問題点は、CoP動揺が足関節トルクの変動を表しているにすぎず^{22, 25)}、この評価値のバランス能力に関する神経生理学的意味合いが薄いことである¹⁰⁾。

立位バランスは、前庭系、視覚系、固有感覚系

情報を統合した³⁾身体重心 (CoM ; center of mass) 速度の検知とその情報に応じた的確な主働筋の活動を基にしたフィードバック制御により調節されている^{10, 22)}。それ故、従来のCoP動揺の要約統計量ではなく、神経生理学的観点によるフィードバック制御機構に基づいたバランス能力のスクリーニング検査の開発が必要である。しかしながら、この検査法には、大規模な実験設備が必要であること、被検者の負担が大きいことから、高齢者を含めた幅広い対象者に対してバランス能力を常にモニターおよびその結果を基にした処方とは不可能である。

フィードバック制御機構に基づくバランス能力の評価は、身体重心速度と静止立位時の主働筋である足関節底屈筋群の筋活動の変動を正確に捉える必要がある。筋音図は、皮膚表面上の微細振動から筋の機械的活動を評価するために用いられている²⁸⁾。筋音図法の問題点は体動の影響を多大に受けるため、この手法による筋活動様式の取得には静的活動にのみ限定されてきた^{15, 28, 32)}。本研究は、筋音図法が筋の活動のみならず体動を捉えることができることに着目した。この手法により身体動揺の挙動と筋活動の両変数を同時に取得でき、ひいてはフィードバック制御機構に基づくバランス能力を評価することが可能と考えられる。そこで本研究は、筋音図法を用い、身体重心速度の検知とそれに応じた適切な足関節底屈筋群の活動によるフィードバック制御機構に基づくバランス能力の評価法を開発することを目的とした。