人の動的バランス制御能力の評価

正 清水 昌幸(静岡大), ○ 前田 晋平(静岡大院), 正 鳥居 孝夫(静岡大)

Assessment of Dynamic Balance Ability of Human

Masayuki SHIMIZU, Shimpei MAEDA and Takao TORII

Shizuoka Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Johoku 3-5-1, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561 Japan

This paper investigates the relation between the dynamic balance ability and the age of human. The purpose of this research is quantification of dynamic balance ability of human by identification of the model parameters of the human balance control model. First, subjects of various age were measured to examine the relation between the dynamic balance ability and the age. Subjects controlled balance on a seesaw. Second, the dynamic balance ability was quantified by identification of the model parameters. Third, experimental results showed that the relations between model parameters and the age were not significant. Finally, the relation between the fitting error and the age was examined, and the fitting error increases with age.

Key Words : Biomechanics, Posture, Motion Control, Balance, Seesaw

1. 緒 言

人間は加齢に伴い運動能力が低下していく。中でもバランス制御能力の低下は転倒による怪我の危険がある。そこで、バランス制御能力を定量化することでその低下を客観的に知ることができ、転倒の防止に役立てることが可能である。

バランス制御能力の定量化に対して様々な研究がされている。我々はシーソー上における人間の動的バランス制御モデルを構築してきた⁽¹⁾。また、kimuraらは直立静止状態における人間の静的バランス制御モデルを構築した⁽²⁾。

本稿では、シーソー上の動的バランス制御能力と年齢の相関を調べる。測定値を我々が提案している動的バランス制御モデルで定量化し、モデルパラメータと年齢の相関を検討する。被験者は18歳から64歳の健康な男女35名を対象に測定を行う。

以下では初めに、バランス制御能力の測定方法を述べる。次に、我々が提案している動的バランス制御モデルおよびモデルパラメータの同定方法を述べる。そして、被験者から得られたモデルパラメータと年齢の相関を検討し、結果について述べる。

2. バランス制御能力の測定

測定に用いるシーソーを図1に示す。シーソーは幅700[mm]の板の中央に回転軸がある構造になっている。シーソーの両端には、ばね定数54.9[N/m]の補助用ばねがそれぞれ10本ずつ取り付けられている。シーソーの最大傾斜角は12[deg]である。この装置はシーソーの角度とシーソーに加わるトルクを測定する。角度はロータリエンコーダ、トルクは四隅のロードセルにより測定する。

被験者はシーソーに足を肩幅に開いた直立静止状態で乗ってバランスを取る。測定データのサンプリング周波数は100[Hz]、測定時間は15[s]である。

Fig 1 Seesaw

3. バランス制御モデルおよびモデルパラメータの同定

3.1 バランス制御モデル

我々が提案しているバランス制御モデルを図2に示す⁽¹⁾。被験者はシーソーの角度を第一に制御するのではなく、まずシーソーの動きを止めようと制御するものと仮定している。そのため、制御対象をシーソーの角度ではなく角速度としたフィードバックモデルとなる。

Fig 2 Block diagram of dynamic balance control

図2のブロック線図は次の式で表される。

$$\tau = K_1(\theta_d - \theta) + K_2(-\dot{\theta}) + K_3(-\ddot{\theta}) \quad (1)$$

ここで、 τ はシーソーに作用するトルク、 K_1 、 K_2 、 K_3 はそれぞれシーソーの角度、角速度、角加速度に対するフィードバックゲイン、 θ_d はシーソーの角度の仮想的な目標値を表す。

3.2 モデルパラメータの同定

バランス制御モデルのモデルパラメータ K_1 、 K_2 、 K_3 、 θ_d を最小二乗法を用いて求める。時刻 t_i におけるシーソーに作用するトルク τ_i とモデルから求められるトルクの誤差 e_i を次のように定義する。

$$e_i = \tau_i - \{K_1(\theta_d - \theta_i) + K_2(-\dot{\theta}_i) + K_3(-\ddot{\theta}_i)\} \quad (2)$$

式(2)において $K_1\theta_d = \tau_d$ とし、測定値を代入した時の誤差の n 次ベクトル $\mathbf{e}$ は次のように表される。ここで、 n はデータ数である。

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\theta_1 & -\dot{\theta}_1 & -\ddot{\theta}_1 & 1 \\ -\theta_2 & -\dot{\theta}_2 & -\ddot{\theta}_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\theta_n & -\dot{\theta}_n & -\ddot{\theta}_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ \tau_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

e の二乗和 $S=e^T e$ について、 S が最小値を取るパラメータを求める。その条件式は次のようになる。

$$\begin{aligned}\frac{\partial S}{\partial K_1} &= 0 \\ \frac{\partial S}{\partial K_2} &= 0 \\ \frac{\partial S}{\partial K_3} &= 0 \\ \frac{\partial S}{\partial \tau_d} &= 0\end{aligned}\quad (4)$$

式 (4) を満たすパラメータは次の式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ \tau_d \end{bmatrix} = (\mathcal{Q}^T \mathcal{Q})^{-1} \mathcal{Q}^T \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_n \end{bmatrix} \quad \mathcal{Q} = \begin{bmatrix} -\theta_1 & -\dot{\theta}_1 & -\ddot{\theta}_1 & 1 \\ -\theta_2 & -\dot{\theta}_2 & -\ddot{\theta}_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\theta_n & -\dot{\theta}_n & -\ddot{\theta}_n & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3・3 モデルパラメータの同定結果

若年者と高齢者から得られたシーソーの角度とトルクの時間変化を図 3, 図 4 に示す。また、モデルパラメータを同定した結果を表 1 に示す。

Fig 3 Angle and torque data of young subject

Fig 4 Angle and torque data of old subject

Table 1 Model parameters

Subject	Young	Old
K_1 [Nm/rad]	-136.6	-130.5
K_2 [Nm/(rad/s)]	1.938	2.586
K_3 [Nm/(rad/s) ²]	-0.0725	-0.0794
θ_d [Nm/rad]	-0.0047	-0.0140

4. バランス制御能力と年齢の相関

4・1 モデルパラメータと年齢の相関

モデルパラメータと年齢の相関を図5に示す。図5において、赤印は各被験者のモデルパラメータを表し、青印および青線は各年代のモデルパラメータの平均および標準偏差によるエラーバーを表す。図5 (a), (b), (c) および (d) はそれぞれ角度ゲイン、角速度ゲイン、角加速度ゲインおよび角度の仮想的な目標値である。また、各年代のモデルパラメータの平均および標準偏差を表2に示す。

Fig 5 Differences in model parameters by age

Table 2 Average and standard deviation of model parameters

Age	20's		30's		40's		50's		60's	
	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.
K_1 [Nm/rad]	-128.3	5.74	-119.1	4.18	-124.5	6.42	-121.7	4.15	-129.9	0.60
K_2 [Nm/(rad/s)]	2.679	1.311	3.204	1.540	1.515	1.013	3.483	0.913	2.281	1.568
K_3 [Nm/(rad/s) ²]	-0.0597	0.0168	-0.0756	0.0277	-0.0828	0.0307	-0.0897	0.0238	-0.1103	0.0221
θ_d [Nm/rad]	-0.0057	0.0080	-0.0145	0.0054	-0.0068	0.0096	-0.0131	0.0091	-0.0163	0.0016

図 5 (a) より, K_1 は年齢の相関がほとんど見られず, -110~-150[Nm/rad]程度に収まっている. 図 5 (b) より, K_2 はばらつきが大きく, 年齢の相関は見られない. 図 5 (c) より, K_3 は加齢と共に減少する傾向が見られる. 図 5 (d) より, θ_d は年齢の相関が見られない.

フィードバックゲインはシーソーの傾きに対する応答を表す. K_1 は値が他に比べて大きく支配的である. 一方, K_3 は値が他に比べて小さく, 全体から見て影響が小さい. θ_d はシーソーの仮想的な目標値であり, 年齢による変化は無いと考えられる. 以上より, 結果からは動的バランス制御能力と年齢の間に有意な相関は見られないと言える.

4・2 当てはめ誤差と年齢の相関

バランス制御モデルのモデルパラメータからは動的バランス制御能力と年齢の間に有意な相関は見られなかった. しかし, バランス制御能力は加齢に伴って衰え, 年齢と相関を持つ^{(2) (3)}. そこで, 現在のバランス制御モデルに含まれていない外乱の影響を考える. 外乱はシーソーにトルクを加える時と, シーソーの角度や角速度等の外部情報を得る時に発生すると考えられる. シーソーにトルクを加える時の外乱の影響を検討するために, 式 (2) で示される当てはめ誤差を調べる. 外乱の影響が大きくなると当てはめ誤差も増加する. 当てはめ誤差の二乗平均平方根 (RMS) E_s と年齢の相関を図 6 に示す. 図 6 において, 赤印は各被験者のRMSを表し, 青印および青線は各年代のRMSの平均および標準偏差によるエラーバーを表す. また, 各年代のRMSの平均および標準偏差を表 3 に示す.

Fig 6 Differences in fitting error by age

Table 3 Average and standard deviation of fitting error

Age	20's		30's		40's		50's		60's	
	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.
E_s [Nm]	0.493	0.131	0.552	0.138	0.685	0.153	0.760	0.150	0.751	0.072

図 6 より，加齢に伴って当てはめ誤差が増加する傾向が見られる．つまり，シーソーにトルクを加える時に外乱が発生し，加齢と共に増加すると考えられる．これは，Maurerらが静的バランス制御においても報告している⁽³⁾．現在のバランス制御モデルに外乱を考慮した要素が必要と言える．

5. 結 言

本稿では，人間の動的バランス制御能力と年齢の相関を調べた．様々な年齢の被験者を測定し，動的バランス制御モデルを用いて動的バランス制御能力を定量化することで，モデルパラメータに対する加齢の影響を検討した．定量化した結果，角加速度ゲインが加齢と共に減少傾向を持ったが，値の小ささからモデルパラメータと年齢の間に有意な相関が無いと考察した．また，トルクの測定値とモデルによる値の当てはめ誤差と年齢の相関を調べた．結果，加齢によって当てはめ誤差が大きくなる傾向を示し，現在のバランス制御モデルに含まれない外乱の影響が年齢と相関があると考察した．

参考文献

- (1) 清水昌幸，齋藤辰弥，鳥居孝夫 “人のバランス制御系のモデルに関する研究”，日本機械学会東海支部第 59 期総会講演会講演論文集，No. 103-1 (2010), pp. 71-72.
- (2) H.Kimura, and Y.Jiang, “A PID Model of Human Balance Keeping”, *IEEE Control Systems Magazine* (2006), pp. 18-23.
- (3) C.Maurer, and R.J.Peterka, “A New Interpretation of Spontaneous Sway Measures Based on a Simple Model of Human Postural Control”, *J.Neurophysiology*, vol.93 (2005), pp. 189-200.