

# 人間の姿勢制御時の感覚情報の変化に伴う筋活動のモデル化

○千葉 龍介(首都大学東京) 小川 広晃(東京大学) 高草木 薫(旭川医科大学)  
浅間 一(東京大学) 太田 順(東京大学)

## 1. 序論

人間は自身の姿勢を保つ際に、多種多様な感覚情報入力に基づき脳神経系を介して筋骨格系を適切に制御している。この機能の障害を有する疾患は多く存在し、治療、リハビリテーションの観点から姿勢制御にかかわる感覚系、筋骨格系を含む脳神経系機能の解明が待たれている。すなわち、感覚情報のバリエーションと制御性の関係を明らかにすること、更に多種感覚入力と筋骨格系出力を含む姿勢制御に関するモデルを構成することには大きな意味がある。

この分野における従来研究には Nashner らの研究[1]、Bottaro らの研究[2]等が存在する。しかしながらこれらの研究では、感覚情報のバリエーションによる制御性の相違については議論されていない。

このような観点から、本報では、人間の姿勢制御における多種感覚の影響のモデル化を目指す。具体的には[3]、(a)姿勢制御時に、ある感覚情報を遮断することで、筋活動量がどのように変化するかを実験的に検証する。(b)姿勢制御における各感覚情報の貢献度合いを定量的に把握する。(c)それらの関係を表す仮説的モデルを構築する。本報では多く存在する感覚のうち、主に姿勢制御に関係するものとして、視覚、平衡感覚、体性感覚の三種類を考慮する。

## 2. 実験計画

人間の筋活動を、姿勢保持のためその揺らぎを補正する活動と、感覚の組み合わせの相違にのみ依存する活動の和、で記述できると仮定する。これは、式(1)を仮定していることと等価である。

$$g_i(C_{condition-j}) = A_{activity\_ij} - f_i(C_{op\_j}) \quad (1)$$

ただし、

$i=1,...,n, j=1,...,m, n$ : 筋の数,  $m$ : 感覚の組み

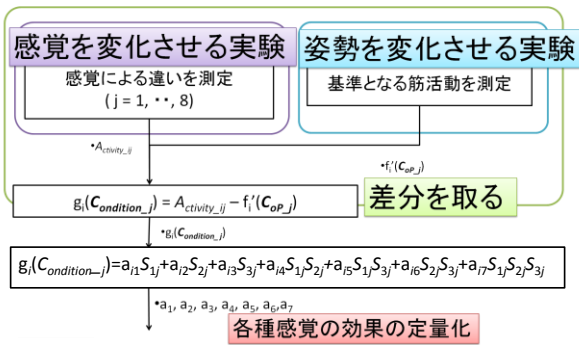


図1 実験の概要

合わせ数 (後述)

$C_{condition-j}$ :  $j$  番目の感覚の組み合わせ (後述)

$g_i(C_{condition-j})$ :  $j$  番目の感覚の組み合わせに依存して決まる  $i$  番目の筋の活動量

$A_{activity\_ij}$ :  $j$  番目の感覚の組み合わせの際の  $i$  番目の筋の活動量 (測定値)

$f_i(C_{op\_j})$ : 姿勢変位 (ここでは重心 Center of Pressure, COP の基準からのずれ) を補正するための  $i$  番目の筋の活動量 (測定値)

上記の仮定の基、図1に示す手順で実験を遂行する。

右上の「姿勢を変化させる実験」では、すべての感覚を通常状態としている中で体を前後左右に傾けて重心位置を変更した際の、筋活動を計測する。なお計測対象の筋としては、姿勢制御に主に用いられている大腿四頭筋、ハムストリング、前脛骨筋、ひらめ筋とする。これが  $f_i(C_{op\_j})$  に対応する。

左上の「感覚を変化させる実験」では、視覚、平衡感覚については、通常の場合と感覚を遮断した場合を人工的に作り出す。ここで視覚の遮断は閉眼により、平衡感覚の遮断はカロリックテスト[4]によって実現する。体性感覚は、通常の場合と、感覚を通常状態より賦活した場合(被験者の体の一部に触れるなどして特に皮膚感覚に刺激を与える状態)を作り出す。これより、感覚の組み合わせが合計8通り存在することになるが、それぞれの場合における筋活動度を測定する。これが  $A_{activity\_ij}$  に対応する。

上記の結果より、 $g_i(C_{condition-j})$ を導出し、以下の式(2)が  $a_{11} \sim a_{17}(i=1,...,n)$ を変数として得られるので、それを筋  $i$  毎に連立させて  $a_{11} \sim a_{17}$  を得ることにより、各種感覚の効果の定量化を図る。

$$g_i(C_{condition-j}) = a_{11}S_{1j} + a_{12}S_{2j} + a_{13}S_{3j} + a_{14}S_{1j}S_{2j} + a_{15}S_{1j}S_{3j} + a_{16}S_{2j}S_{3j} + a_{17}S_{1j}S_{2j}S_{3j} \quad (2)$$

$S$  の値は、感覚の組み合わせにおいて遮断、賦活する感覚を表しており、表1より与えられる。

表1 S の設定

| $J$              | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 視覚( $S_{1j}$ )   | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 平衡感覚( $S_{2j}$ ) | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 体性感覚( $S_{3j}$ ) | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |

また、 $a_{11} \sim a_{17}$  の意味は以下のように与えられる。  
 $a_{11}$ : 視覚の作用;  $a_{12}$ : 平衡感覚の作用;  $a_{13}$ : 体性感覚の

作用； $a_4$ :視覚と平衡感覚の交互作用； $a_5$ :視覚と体性感覚の交互作用； $a_6$ :平衡感覚と体性感覚の交互作用； $a_7$ :視覚と平衡感覚と体性感覚の交互作用。

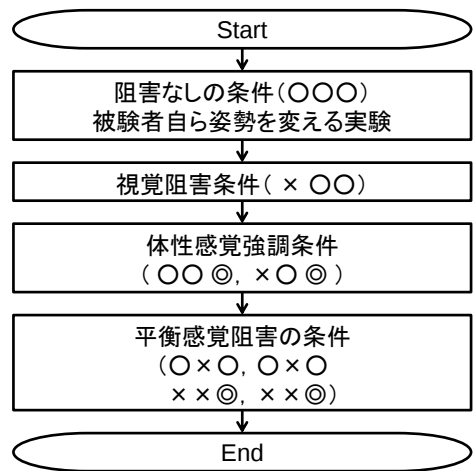
実験時の重心位置の計測には、体重計（4つ）を利用した。また、筋活動度の計測は誘発電位・筋電図検査装置を用いた表面筋電位計測により行った。

実験は、被験者延べ14名に対して行った。被験者毎の実験手順を図2に示す。一番上の長方形が「姿勢を変化させる実験」に、二番目以降の長方形が「感覚を変化させる実験」に、それぞれ対応する。

3. 結果と考察

得られた $a_1 \sim a_7 (i=1, \dots, n)$ を、すべての被験者、すべての筋について平均化したものを図3に示す。これより $a_4$ が他の $a$ と比較して非常に高いことがわかる。これは、以下のことを意味する。すなわち、人間は、視覚情報と平衡感覚情報の両方を遮断され、体性感覚情報が賦活された状況では、体を固くする（筋全体の活動度を上昇させる）ことで姿勢維持をする傾向がある、という意味である。三つの感覚のうち二つが遮断されると、身体が緊急状態であると判断し、体を固くすることで転倒を防ぐという対策を立てているのかもしれない。

この結果を説明するモデルについて考察する。多種感覚情報からの入力をモデル化した数少ない研究の一つであるPeterka[5]では、感覚情報を統合した姿勢制御モデルを提案しているが、そこでは、各感覚情報は重み付き線形和の形式で統合されている。しかしながら、本報における実験結果は、ある感覚情報が遮断されると、筋活動が非線形的に変化する（重みが大きく変わる）ことを示しており、Peterkaのモデルでは説明できない。我々は[5]と伊藤[6]で述べられているモデルを参考に図4のモデルを作成したが、



括弧内左：視覚      ○：通常，×：遮断  
括弧内中：平衡感覚    ○：通常，×：遮断  
括弧内右：体性感覚    ○：通常，⊙：賦活

図2 実験の手順

このモデルは実験で得られた現象を説明する一つの候補であると考えている。ここでは、姿勢制御をする上で、内力成分調整器の役割により、感覚の変化に応じて伸筋と屈筋における発生力を調整している。そして、伸筋と屈筋それぞれが発生する収縮力の差で駆動力を発生する。更に、それぞれの収縮力の和で筋の粘弾性に関するパラメータを上下させている、というものである。

4. 結論

本報では、姿勢制御時に、ある感覚を遮断、賦活することによる、筋活動量の変化量を計測した。視覚情報と平衡感覚情報の両方が遮断され、体性感覚が賦活された状態での姿勢の制御則は通常時のものと大きく異なっている可能性が示唆された。図4のモデルの妥当性の検証が今後の課題の一つである。

参考文献

[1] Nashner, L.M. et al., Stance posture control in select groups of children with cerebral palsy: Deficits in sensory organization and muscular coordination, Experimental Brain Research, 49(3), 393/409, 1983.  
[2] Bottaro, A. et al., Bounded stability of the quiet standing posture: An intermittent control model, Human Movement Science, 27(3), 473/495, 2008.  
[3] Chiba, R. et al., Muscle activities changing model by difference in sensory inputs on human posture control, Intelligent Autonomous Systems 12, 2012.  
[4] 日本平衡神経科学会, 平衡機能検査の実際, 南山堂, 1986.  
[5] Peterka, R. J., Sensorimotor integration in human postural control, Journal of Neurophysiology, 88(3), 1097/1118, 2002.  
[6] 伊藤 宏司, 身体知システム論, 共立出版, 2005.

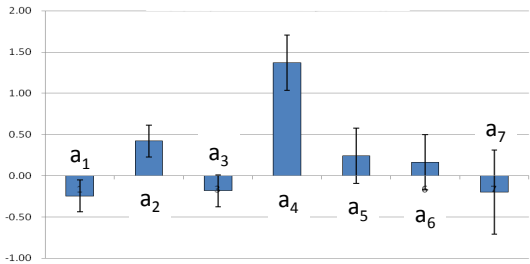


図3 感覚情報と筋活動との関係

