

氏名 (本籍)	斯 琴 (中華人民共和国)
学位の種類	博士 (医学)
学位授与番号	甲第 696 号
学位授与日付	平成 19 年 3 月 25 日
学位授与用件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	立位姿勢時の身体動揺制御および視覚の影響について
審査委員	(主査) 教授 松 岡 敏 男 (副査) 教授 清 水 克 時 教授 森 田 啓 之

## 論文内容の要旨

### 背景と目的

ヒトの脳機能の発達、特に中枢神経の運動制御機能の進化により立位時の身体の平衡維持が可能となり、内耳の平衡感覚、筋関節の固有感覚および視覚が立位姿勢の維持に重要な役割を果たしていることが明らかにされている。自然立位姿勢時の平衡維持は主にフィードバック制御によって行い、フィードバック制御モデルではヒトの身体を一リンクの倒立振子と見なし、その入力はほとんど動揺角度となっている。較正トルクはその角度と比例するか(比例制御, Proportional control), 角速度と比例するか(微分制御, Derivative control), あるいは角度の累積と比例するか(積分制御, Integral control)に分かれ、それをPID制御と称する。

本研究では立位時の身体動揺の測定を行い、立位時の身体モデルの構築により、PID制御モデルのパラメーターを同定し、さらに身体動揺のシミュレーションによりモデルの正当性を検証する。また、異なる視覚刺激パターンを用いてPID制御モデルにおける視覚の影響を検討することを目的とした。

### 方法

#### A) 身体動揺の測定:

- 1) 被験者: 被験者は10名の健常成人(男性4名, 女性6名, 平均年齢は $37.7 \pm 7.21$ 歳)で、脳神経と筋肉に関わる既往歴は認められなかった。
- 2) 測定装置と測定方法: 立位姿勢時の身体動揺の測定は、CCDビデオカメラとノートパソコンから構成された測定システムによって行われた。実験前に、被験者に測定のためのフィットする服を選び装着し、その服の背部第4胸椎レベルにマーカー(黒いボール, 半径1.5cm)を貼付し、マーカーの動きと胴体の動きを一致するようにした。その時の身体動揺の軌跡と身体動揺の平均角速度(Trunk sway speed: TSS)を一台のコンピューターによって分析を行った。
- 3) 視覚刺激: a) 視覚の刺激部位は中心視野(左右, 上下の視角範囲が $10^\circ$ 以内)を選んだ。被験者にはA, B, C, D四つの視覚刺激パターンを与え、Aは49個の $4.5\text{cm} \times 4.5\text{cm}$ 四角のブロックから構成した正方形で、Bは大きさが $4.5\text{cm} \times 4.5\text{cm}$ の「×」標識で行った。Cはワイドスクリーンの上に標識を付けないものであり、Dは閉眼で行った。b) 各パターンは被験者の1.0メートル先に立てたワイドスクリーンの上に張り、中心部にマークし、中心の高さを被験者の平行視線の高さと一致させ、被験者の視線は図案の中心に集中させた。c) 被験者一人につき、裸足で四つの視覚刺激パターンを、それぞれ10回ずつ提示し、1回の測定時間は30秒に設定し、測定の間隔時間を2分とし合計40回の測定を行った。

#### B) 立位時の身体の身体機構モデル:

立位姿勢時の足関節と腰関節の回転はほぼ同じ振幅、逆位相で運動することから立位姿勢の多リンク系倒立振子身体機構モデルを構築した。

#### C) 立位姿勢のPID制御モデルのパラメーターの同定:

立位姿勢時のPID制御モデルは身体動揺の角度を誤差信号と見なし、中枢神経はPID制御方式で

平衡維持に関連する筋群を制御し、較正トルクを作り出す。それをブロック線図で示し、PID制御アルゴリズムの元で最小二乗法を用いて各被験者のパラメーター ( $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$ ) として求める。

## 結果

- A) 身体動揺の平均角速度 (TSS)：被験者ごとに、視覚刺激における身体前額面の TSS 値の変化が A, B, C, D 視覚刺激順に身体動揺の角速度は増加の傾向を示し、A と B との間は有意差がみられなかったが、A と C, D との間は有意な差が見られた ( $p < 0.0001$ )。さらに、B と C, C と D 間にも有意な差が見られた ( $p < 0.0001$ )。
- B) PID 制御モデルのパラメーター：各被験者の  $K_d$  値の変化は A, B, C, D 視覚刺激順に減少する傾向を示している。A と B 間には有意差が無かった ( $p=0.057$ ) が、A と C, D ( $p < 0.001$ ) ならびに B と C, C と D 間には有意差が見られた ( $p < 0.001$ )。各被験者の  $K_p$  と  $K_i$  値は A, B, C, D の提示による  $K_p$  値の変化はなかった ( $p > 0.05$ )、 $K_i$  値にも変化は見られなかった。
- C) PID 制御モデルによる身体動揺のシミュレーション：立位時の体の構造モデルと神経系の制御モデルの正当性を検証するために身体動揺のシミュレーションを行った。開眼時の身体動揺の周波数は 0.09 Hz で、閉眼時の身体動揺の周波数は 0.15 Hz であった。閉眼により身体動揺の周波数は高くなることが示された。

## 考察・結語

立位時の姿勢制御に対する視覚の働きに関する研究はまだ少ない、中心視野の視覚刺激が立位姿勢制御にもたらす影響についての研究もまだ報告されていない。本研究では四つの異なる視覚刺激の条件下でヒト立位時の身体動揺を計測し中枢神経の身体動揺に関する制御を PID 制御方式で検討した。

1) 視覚刺激の作用について：閉眼と比べ開眼時の身体動揺は小さく、10 人の被験者に対して閉眼時の TSS 値は有意に増加したことを明らかにし、開眼時の中心視野の視覚刺激内容によっても立位姿勢の制御に影響していることが判明した。また、中心視野にイメージを有する刺激は明らかに立位時の姿勢制御において重要な役割を果たしていることを示した。

2) 視覚のメカニズムについて：視覚による立位姿勢を安定させる効果のメカニズムについては二つの説が存在する。一つは外眼筋の筋感覚の入力による、一つは視覚イメージ像と網膜間に生じる微小な偏移 (retinal slip 説) のフィードバック効果である、本研究の結果は retinal slip 説を支持した。

3) 身体動揺の周波数解析について：開眼時と閉眼時の身体重心動揺の周波数特徴に関して一般的に、視覚に関連している周波数成分は 0.03-0.3 Hz であることが知られている。本研究で身体動揺をシミュレーションした結果、実際測定した結果とほぼ一致した。

本研究はヒトの立位姿勢を一つの制御システムと見なし、PID 制御モデルを用い制御機構を分析し、身体動揺をシミュレーションすることが出来た。その応用についてはこれからの研究課題であろう。

## 論文審査の結果要旨

申請者 斯琴 は、ヒトの立位姿勢時の平衡維持における視覚、平衡感覚と固有感覚のフィードバック制御を PID 制御で検討することができ、新たな平衡機能評価の手段として確立したと考えられる。本研究の成果はスポーツ医科学の進歩に少なからず寄与するものと認められる。

---

[主論文公表雑誌]

立位姿勢時の身体動揺制御および視覚の影響について  
体力科学 55(5), 447-446 (2006).