

# フォースプレートと慣性センサの計測に基づく片脚立位の動的なバランス評価

## Dynamic balance evaluation of single-leg standing using force platform and inertial sensors.

知能機械工学コース

動的デザイン研究室 1275018 高橋 涼介

### 1. 緒言

片脚立位のバランス評価が行われているが、片脚立位の継続時間を評価することが一般的で、感覚器の機能や制御の質を議論するには至っていない。

我々のこれまでの研究では、実用計測から得られるデータから力学的観点に基づいて両足立位のバランスを評価してきた<sup>(1)</sup>。実用的でより多くの情報が得られる計測方法として、フォースプレートと頭部慣性センサ (IMU) 計測から、上半身と下半身の剛体二重倒立振子モデルの運動方程式に基づく推定法を提案している。この方法では、直接計測できる重心加速度、頭部の水平加速度、角速度に加えて、重心変位、下半身の重心加速度、上半身の重心加速度を推定できる。さらに、下半身と上半身の重心加速度から関節戦略 (足関節戦略と股関節戦略) の貢献度を算出することができる。これらの推定値から導出した重心変位と頭部加速度の変化を表すバランス遷移指標を適用し、運動力学的視点から姿勢安定性に影響する身体的要因について議論した。

片脚立位においても同様の手法を適用し、バランス評価を行う場合、重心変位の推定方法を新たに考える必要がある。我々は、片脚立位の運動を、立脚、上半身と遊脚の大腿部、下腿部でそれぞれ構成される2つのモデルで表し、運動方程式に基づく重心推定法を提案している<sup>(2)</sup>。この方法は、フォースプレートと頭部 IMU に加えて、遊脚側大腿部、下腿部に取り付ける IMU が必要になるが、両足立位と同様に高い精度で重心を推定することができる。

本研究の目的は、力学的観点に基づいて、片脚立位のバランス制御を評価することである。フォースプレートと IMU 計測から得られる重心変位と頭部加速度の変化を表すバランス遷移指標を適用し、姿勢安定性に影響する身体的要因について議論する。

### 2. 片脚立位のバランス評価

#### 2.1 実験概要

バランス評価を行うために30名の20代健常者に対して片脚立位の実験を実施した。開眼、閉眼の片脚立位を左右それぞれの脚を立脚として、計4種類の実験を各3回行った。被験者は素足でフォースプレート上において40秒間片脚立位を行った。立脚の膝を伸ばし、両手を腰に当て、頭を正面に向けた姿勢で行った。

本実験では、フォースプレート (TF-3040, テック技販) と3つの IMU (IMS-WD, テック技販) を使用した。IMU は後頭部と遊脚の大腿部、遊脚の下腿部の外側側面に取り付けた。IMU の位置は理論的なセグメント重心高さに近くなるように取り付け、取り付け位置は定規で計測した。フォースプレートでは立脚の足裏に作用する3軸の力と力のモーメントを計測した。IMU では取り付け位置の3軸の加速度と角速度を計測し、これらは姿勢角推定に基づいて水平角の座標軸に変換した。この計測値を各セグメント (頭部、遊脚の大腿部、遊脚の下腿部) の重心加速度、角速度とみなした。フォースプレートと3つの IMU は時間同期されており、サンプリング周波数は100Hzに設定した。

部、遊脚の下腿部) の重心加速度、角速度とみなした。フォースプレートと3つの IMU は時間同期されており、サンプリング周波数は100Hzに設定した。

#### 2.2 評価方法

計測データから図1に示す3つの剛体モデルをベースに重心変位、重心加速度、立脚と上半身の重心加速度の摂動をそれぞれ矢状面と前額面で推定する。さらに、立脚と上半身の加速度から足関節戦略と股関節戦略に起因する頭部加速度を推定する。得られた物理変数に基づき重心制御と頭部加速度制御に関するバランス評価を行う。

本研究では人体をメインシステムとサブシステムの剛体モデルに分割した。メインシステムは、足部、立脚、上半身から構成される平面二重倒立振子モデルであり、矢状面 (図1(a)) と前額面 (図1(b)) で独立に定義した。サブシステム (図1(c)) は、遊脚の大腿部、遊脚の下腿部 (足部含む) で構成される3次元空間の2リンクモデルと定義した。メインシステムの運動は静止座標系  $O-XYZ$  で表される。 $X$  軸は水平前方向、 $Y$  軸は水平左方向、 $Z$  軸は鉛直上方向である。サブシステムの運動は、遊脚の股関節を原点とする並進座標系  $P-xyz$  で表され、並進座標系の向きは静止座標系の向きと等しく、原点位置のみ異なる。

サブシステムでは、遊脚の2つの IMU の計測値から逆動力学解析により、遊脚の股関節の力と力のモーメントを、剛体姿勢に基づきサブシステムの重心変位をそれぞれ推定する。メインシステムでは、頭部の IMU とフォースプレートの計測値から、遊脚の股関節の力と力のモーメントを考慮した二重倒立振子モデルの運動方程式に基づき、メインシステムの重心変位、立脚と上半身の重心加速度を矢状面と前額面で独立に推定する。全身の重心変位はメインシステムとサブシステムの重心を合成することで推定する。重心加速度はフォースプレートの水平力を体重で割ることで得られる。さらに、メインシステムにおける足関節戦略と股関節戦略を近似的に定義し、立脚と上半身の重心加速度から各戦略に起因す

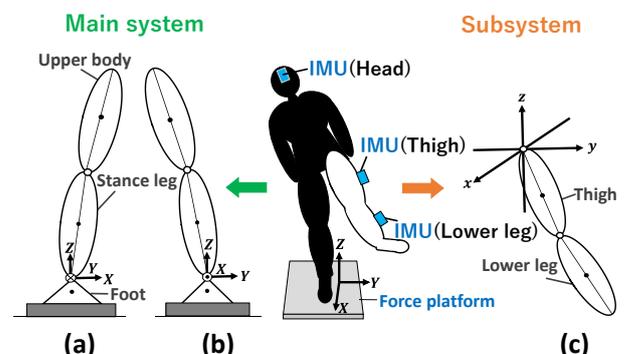


Fig. 1 Rigid body link models used in this study: (a) Main system in the sagittal plane, (b) Main system in the frontal plane, (c) Subsystem.

る頭部加速度を推定する。

得られた物理変数を用いて導出したバランス評価指標に基づき評価を行う。この評価指標は、揺れの大きさに関する指標、重心制御に関する指標、頭部加速度制御に関する指標の3つに大別される。添え字 AP は矢状面、ML は前額面の指標である。揺れの大きさに関する指標は、それぞれ重心変位 (RMSCM)、重心加速度 (RMSCMA)、頭部加速度 (RMSHA)、頭部角速度 (RMSHW) の RMS と、重心変位の 95% 信頼楕円面積 (S95CM)、重心軌跡速度 (VELCM)、頭部平均加速度 (AVGHA)、重心と頭部加速度の揺れの大きさの比 (SR) である。重心制御に関する指標は、重心変位を横軸、重心加速度を縦軸とした分布に対する近似直線の傾き (GRAD)、切片 (IC)、同近似直線を基準とした重心加速度の標準偏差 (SIG)、重心変位と重心加速度の相関係数 (CC) である。ここで、GRAD は重心動揺に対する復元の強さ、IC は復元の非対称性、SIG は制御力のばらつき、CC は重心フィードバックの貢献の強さとそれぞれ解釈して評価する。頭部加速度制御に関する指標は、それぞれ足関節戦略によって生じる頭部加速度 (RMSX11)、股関節戦略によって生じる頭部加速度 (RMSX12) の RMS と、足関節戦略によって生じる頭部加速度と股関節戦略によって生じる頭部加速度の比 (RXI) および相関係数 (CXI) である。

### 3. 結果

全体的に揺れの大きさを開眼から閉眼であまり変化がみられない被験者と閉眼で顕著な増加がみられる被験者の2種類のタイプが確認された。この違いの要因を調査するために揺れの要素を複数含む指標である重心軌跡速度 (VELCM) を基準に被験者のグループ分けを行い、その特徴を比較した。またその際に、著しくバランスが悪い被験者は、その要因を特定するのが困難であるため、本研究では 30 名の被験者を開眼から閉眼の変化量 (閉眼-開眼) が小さい順に 10 人ずつの 3 グループに分け、最も良いグループと中間のグループを評価対象とした。

図 2 に示すように、重心軌跡速度の開眼から閉眼の変化量が小さい順に最も良いグループを G1、中間のグループを G2 とし、両グループの各バランス評価指標の有意差を一元配置分散分析により調べた。統計的有意水準は 5% とした。図 3 に主要な評価指標の開眼・閉眼における各グループの平均と標準偏差を示す。揺れの大きさの指標では、前額面の重心加速度 ( $RMSCMA_{ML}$ )、矢状面と前額面の頭部加速度 ( $RMSHA_{AP}$ ,  $RMSHA_{ML}$ ) の開眼から閉眼の変化量が G2 は G1 と比較して有意に大きく、特に前額面での増加が大きい

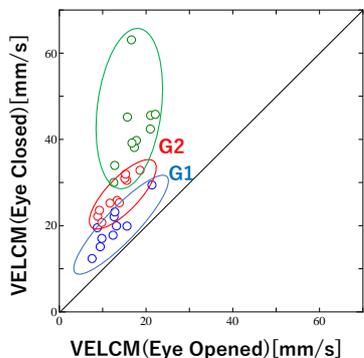


Fig. 2 Distribution of center of mass trajectory velocity (VELCM) for subjects with eye opened and eye closed.

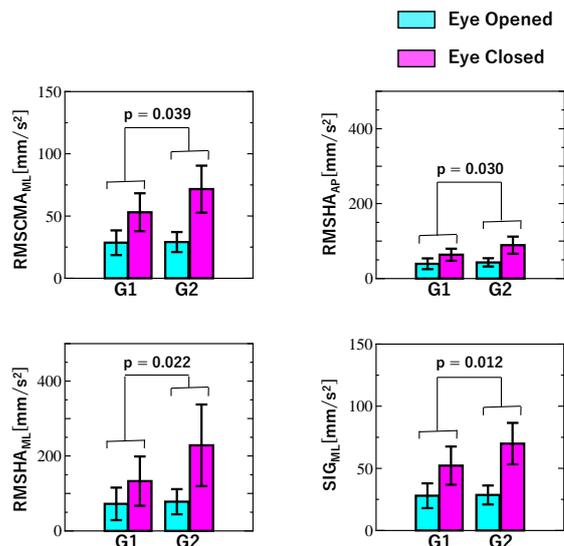


Fig. 3 The change in the balance evaluation indices from eye opened to eye closed at G1 and G2.

ことがわかる。G2 の顕著な前額面加速度の増加の要因として、前額面の制御力のばらつき ( $SIG_{ML}$ ) の増加が有意に大きいことが考えられる。

以上より、閉眼時に顕著にバランスが悪化する被験者は、特に前額面の重心加速度、頭部加速度に大幅な増大がみられ、その要因として前額面の制御力のばらつきの増大が大きく関係していると考えられる。先行研究より、安静立位における制御力のばらつきには前庭感覚の貢献が示唆されていることから<sup>(4)</sup>、開眼から閉眼でバランスにあまり変化がみられない被験者と閉眼で顕著にバランスが悪化する被験者の間で前庭機能の差が表れたと考えられ、後者は、視覚がなくなりより前庭機能に焦点が絞られる閉眼時に特に前額面の加速度制御が大きく悪化したと考えられる。

### 4. 結言

本研究では、フォースプレートと IMU 計測に基づいて、片脚立位の動的なバランス評価を行った。その結果、開眼から閉眼でバランスにあまり変化がみられない被験者と閉眼時のバランス安定性が大幅に低下する被験者が確認できた。これらの被験者間の違いとして、前庭機能の差が大きく関係していることが示唆され、片脚立位は前庭機能を重視した検査に適している可能性があり、前庭機能に問題のある患者のスクリーニングに貢献することが期待される。しかし、今回の評価では、前庭機能が影響している根拠には不十分なため、前庭介入による同一個人の変異の評価<sup>(1)</sup>も行い、その結果も踏まえて片脚立位が被験者間の前庭機能の差異の評価に適することを示したいと考える。

### 文献

- (1) 園部元康, 光武翼, “ノイズ前庭電気刺激が立位の姿勢制御戦略に及ぼす影響”, 日本機械学会 2024 年度年次大会講演論文集(2024).
- (2) Takahashi, R., and Sonobe, M., “Center of Mass Estimation During Single-Leg Standing Using a Force Platform and Inertial Sensors”, *Sensors*, Vol. 25, No. 3(2025), pp. 871.