

外乱に対する姿勢安定性を決定する制御要素

藤井 瑛藏[†] 西井 淳^{††}

[†] 山口大学大学院理工学研究科 ^{††} 山口大学大学院理工学研究科

1 はじめに

外乱を受けた際の姿勢安定性の向上は、怪我の防止やスポーツ技能の向上において重要である。本研究では立位時の外乱に対する最初の筋応答時間や外乱を受けた際のフィードバック (FB) 制御特性に注目し、どのような要素が姿勢安定性に寄与しているかを明らかにすることを目的とした。

2 実験手法

被験者は 20 代の健全な男性 9 名である。被験者には踵を揃え、胸の前で腕を組んで立つように指示し、左右どちらかに引く外乱を、タイミングと方向は被験者にわからないように与える試行を 6 回行った。各試行中に、全員の床反力と 4 名の左右の腹直筋、胸部傍脊柱筋の他、下肢の 12 筋の表面筋電位を計測した。外乱を受けた時刻 t_0 は床反力の左右水平成分の大きさが 10N を超えた時刻の 0.1 秒前と判定した。姿勢安定性の指標は t_0 からの 2 秒間における床反力水平成分の微分値の 2 乗の積分値とした。

3 解析手法

3.1 筋活動の応答時間の解析手法

各試行における上体筋 (腹直筋・胸部傍脊柱筋)、膝上筋 (大殿筋・内転筋)、膝下筋 (長腓骨筋・内側腓腹筋) の筋電位の時間推移に注目し、外乱前 0.15 秒から外乱後 2 秒までの間の最大値の 50 % を超えた最初の極大値の時刻を筋活動の応答時間とした。

3.2 FB 制御の特性の解析手法

FB 制御の特性は、外乱後 2 秒間の床反力の水平動揺を Stabiogram Diffusion Analysis (SDA) 解析 [1] することで推定した。SDA とは足圧中心位置の時間間隔 Δt 間の平均 2 乗変位 $\langle \Delta r^2 \rangle_{\Delta t}$ と Δt との関係から FB 制御の特性を推定する方法である (図 1)。両者の関係は異なる 2 本の直線で特徴づけることができ、その交点が FB 遅れ時間 t_{FB} 、交点以前の時間間隔での直線の傾きが FB 前動揺度 $D1$ 、交点以降の直線の傾きが FB 後動揺度 $D2$ となる。

4 結果・考察

上体筋、膝上筋、膝下筋のそれぞれで、外乱に対する筋活動の応答時間を予測期 (外乱直前 0.15 秒から外乱後 0.01 秒)、反射期 (外乱後 0.01 秒から 0.15 秒)、随意期 (外乱後 0.15 秒から 2 秒) の 3 つの期間に分け、姿勢安定指標の全被験者間平均を求めた (図 2)。どの筋活動においても、予測期に回答があった場合の姿勢安定指標が小さく、膝下筋の予測期での回答では、随意期での回答に比べ姿勢

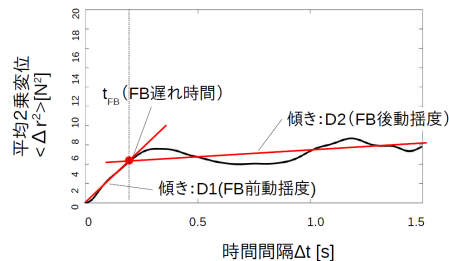


図 1: 外乱後 2 秒間における床反力の水平動揺の $\langle \Delta r^2 \rangle_{\Delta t}$ と Δt の関係。

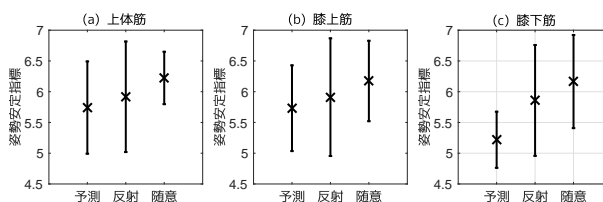


図 2: 筋の応答期間ごとの姿勢安定指標の全被験者間平均。(a) 上体筋, (b) 膝上筋, (c) 膝下筋の結果である。

安定指標が有意に小さかった ($p < 0.01$)。FB 遅れ時間 t_{FB} と FB 後の動揺度 $D2$ は姿勢安定指標との相関が弱かった (相関係数 $r=0.0875, 0.3430$)。一方で、FB 前の動揺度 $D1$ と姿勢安定指標には強い相関が認められた ($r=0.9445$)。外乱方向を予測できれば、足の外反や内反に關する筋を予測期に回答させ、重心位置を外乱方向と逆方向へ動かし、方向を予測出来ない場合には外乱直前に筋の同時収縮により関節周りの剛性を高めておくことで外乱に対応できる可能性がある。また、予測期における筋回答があれば FB 前の動揺度も小さくなることがわかった。つまり、外乱時の姿勢安定性の向上を図るには、予測期に筋 (特に膝下筋) を回答させることで FB 制御の効かない短時間領域での姿勢動揺を抑えることが重要といえる。例えば、柔道で相手の技 (外乱) に耐える場合には、相手の技を予測し、外乱の向きに応じた準備体勢をとったり、下肢の剛性を高めておく必要がある。そのためには、予測からスムーズな筋応答を促す実践的の反復練習が有効と考えられる。

参考文献

- [1] Collins, JJ and De Luca, CJ, "Open-loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories", Exp. Brain Res, no.2, pp. 308-318, 1993.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K12128 の助成を受けたものです。