足漕ぎ車いすでのペダリング運動における クランク角速度と関節角速度のばらつきの関係

○ 竹下 洋（岡山県立大学大学院） 山崎 大河（岡山県立大学）
田口 恵理（岡山県立大学大学院） 忻 欣（岡山県立大学）

Relationship Between Crank and Joint Angular Velocities

During a Pedaling Movement in a Cycling Wheelchair

Hiroshi TAKESHITA (Graduate School of Okayama Prefectural University)

Taiga YAMASAKI (Okayama Prefectural University)

Eri TAGUCHI (Graduate School of Okayama Prefectural University)

Xin XIN (Okayama Prefectural University)

1. 序論

下肢で駆動する足漕ぎ車いすは、健側下肢と同時に麻痺側下肢も補助的に動かすなどの理由から、そのリハビリテーション効果が期待されている。さらに、その神経制御機構を深く理解できれば、運動の質的な評価につながるはずである。

本研究では、ペダリング運動における神経系の働きの評価を目指し、クランク角速度と関節角速度のばらつきの関係に着目した解析を試みる。一定速度を意図したペダリングを行った際の関節角速度のばらつきを、クランク角速度に影響する成分と影響しない成分に分け、これらを比較する。Scholz と Schöner の手法¹⁾を拡張し、クランク角速度に影響するばらつきの割合が相対的に小さければ、クランク角速度を一定にしようとする神経制御系の働きが表れているという作業仮説をたて、これに基づき解析・考察する。

2. 運動計測

ローラー台の上に置いた足漕ぎ車いす (Profhand) における健常な男性2名のペダリングでの右下肢の運動を、光学式モーションキャプチャ (Optitrack, V100R2) を用いて計測した。クランクの目標回転速度を 40, 50 rpm とし、メトロノーム音で指定した。クランク角 ϕ 、関節角 $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T$ 、リンク長 $\mathbf{l} = [l_1, l_2, l_3]^T$ 、股関節位置 (x_0, y_0) 、ペダル位置 (x_p, y_p) 、クランク中心位置 (x_c, y_c) を計測した (図1)。1周期あたりのデータ数が100となるようリサンプリングを行い、各 ϕ ごとにそのばらつきを解析した。図2, 3 にそれぞれ計測値から求めたクランク角速度 $\dot{\phi}$ と関節角速度 $\dot{\mathbf{q}}$ を示す。

図1 下肢モデル

図2 クランク角速度

図3 関節角速度

3. クランク角速度と関節角速度の関係

ペダリング運動中のクランク角速度 $\dot{\phi}$ と関節角速度 $\dot{\mathbf{q}}$ の間には、

$$\dot{\phi} = J_{\phi}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (1)$$

の関係があり、また、ペダル位置 (x_p, y_p) に関する物理的制約から $\dot{\mathbf{q}}$ は

$$[X(\mathbf{q}), Y(\mathbf{q})]J(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (2)$$

を満たす必要がある。ただし、

$$J_\phi(\mathbf{q}) = \frac{1}{X(\mathbf{q})^2 + Y(\mathbf{q})^2} [Y(\mathbf{q}), -X(\mathbf{q})] J(\mathbf{q})$$

$$X(\mathbf{q}) = x_p(\mathbf{q}) - x_c$$

$$Y(\mathbf{q}) = y_p(\mathbf{q}) - y_c$$

$$x_p(\mathbf{q}) = x_0 + l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3)$$

$$y_p(\mathbf{q}) = y_0 + l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3)$$

である。\$J\$は関節角\$\mathbf{q}\$から\$(x_p, y_p)\$へのヤコビ行列である。

\$\phi\$と\$\mathbf{q}\$を固定すると、式(2)は\$\dot{\mathbf{q}}\$の3次元空間における平面を表し、さらに\$\dot{\phi}\$を固定すると式(1)も平面を表す。2つの平面の交わる直線上に\$\dot{\mathbf{q}}\$があれば、一定の\$\dot{\phi}\$が実現される。この直線はUCM (UnControlled Manifold) と呼ばれ¹⁾、この方向への\$\dot{\mathbf{q}}\$のばらつきは、\$\dot{\phi}\$を一定にする意味では制御する必要のないばらつきと解釈できる。

4. UCM解析

クランク角\$\phi\$における第\$i\$周目の関節角と関節角速度をそれぞれ\$\mathbf{q}(\phi, i)\$, \$\dot{\mathbf{q}}(\phi, i)\$とする。これらの\$\phi\$ごとの平均をそれぞれ\$\bar{\mathbf{q}}(\phi)\$, \$\bar{\dot{\mathbf{q}}}(\phi)\$とする。式(1)に着目して、\$\Delta\dot{\mathbf{q}}(\phi, i) = \dot{\mathbf{q}}(\phi, i) - \bar{\dot{\mathbf{q}}}(\phi)\$を\$\dot{\phi}\$に影響を与えない成分\$\Delta\dot{\mathbf{q}}_{\text{UCM}}(\phi, i)\$と、\$\dot{\phi}\$に影響を与える成分\$\Delta\dot{\mathbf{q}}_{\text{ORT}}(\phi, i)\$に分ける¹⁾。

$$\Delta\dot{\mathbf{q}}_{\text{UCM}}(\phi, i) = \sum_{k=1}^2 \varepsilon_k(\phi)^T \Delta\dot{\mathbf{q}}(\phi, i) \varepsilon_k(\phi) \quad (3)$$

$$\Delta\dot{\mathbf{q}}_{\text{ORT}}(\phi, i) = \Delta\dot{\mathbf{q}}(\phi, i) - \Delta\dot{\mathbf{q}}_{\text{UCM}}(\phi, i) \quad (4)$$

ここで、\$\varepsilon_1(\phi)\$, \$\varepsilon_2(\phi)\$は\$J_\phi(\bar{\mathbf{q}})\$のゼロ化空間の基底である。これらの自由度あたりの分散を

$$V_{\text{UCM}}(\phi) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\|\Delta\dot{\mathbf{q}}_{\text{UCM}}(\phi, i)\|^2}{2-1} \quad (5)$$

$$V_{\text{ORT}}(\phi) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\|\Delta\dot{\mathbf{q}}_{\text{ORT}}(\phi, i)\|^2}{1} \quad (6)$$

とする。ただし、\$n\$はクランク周数である。また、\$\Delta\dot{\mathbf{q}}_{\text{UCM}}\$は式(2)の制約のため、1自由度とみなしている。これらの相対値を\$w = (V_{\text{UCM}}(\phi) - V_{\text{ORT}}(\phi)) / (V_{\text{UCM}}(\phi) + V_{\text{ORT}}(\phi))\$によって評価する。\$\dot{\mathbf{q}}\$のばらつきがUCMの方向に偏っていれば、\$w\$の値が1に近づき、逆の場合は-1に近づく。なお、ヤコビ行列を計算する際に用いるリンク長、股関節位置および関節角度は、クランク角ごとの平均の値を用いて計算している。

図4に\$\phi = 104.4^\circ\$における\$\dot{\mathbf{q}}\$のばらつきの例を示す。この例では、\$\dot{\mathbf{q}}\$のばらつきがUCMの方向に偏っているため、\$w\$は1に近い値をとる。図5に\$w\$の変化を示す。どの被験者の場合も、ほとんどのクランク角において、\$w\$は高い値をとっている。このような結果の背景には、\$\dot{\phi}\$のばらつきを抑制するような\$\dot{\mathbf{q}}\$の制御があるとも言われている¹⁾。

一方、下肢の姿勢を各セグメントと鉛直軸のなす角度（セグメント角）により表現して同様の解析を行った場合、関節角を用いた場合に比べ、全体的に\$w\$の値が小さく、一部では負の値をとっていた。この結果の原因として、クランク角速度を制御するとき、神経系はセグメント角より関節角を重視している可能性も考えられるが、詳しくは今後の検討課題としたい。

図4 \$\dot{\mathbf{q}}\$の制約

図5 \$w\$の変化

5. まとめ

健康な被験者による足漕ぎ車いすでのペダリング運動において、クランク角速度と関節角速度の関係に着目して解析を行い、ほとんどのクランク角における関節角速度のばらつきには、クランク角速度のばらつきを抑制しようとする傾向が見られる可能性を示した。

謝辞

本研究の一部は科研費(課題番号 25330311)の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) J.P. Scholz and G. Schöner: "The uncontrolled manifold concept", identifying control variables for a functional task, *Exp. Brain Res.*, 126(3), 289-306, 1999.