自転車でのペダリング運動における制御量の同定

○田口 恵理 (岡山県立大学大学院)

山崎 大河 (岡山県立大学)

忻 欣 (岡山県立大学)

Identification of controlled variables in bicycle pedaling

Eri TAGUCHI (Graduate School of Okayama Prefectural University),

Taiga YAMASAKI (Okayama Prefectural University)

Xin XIN (Okayama Prefectural University)

1. はじめに

ヒトの運動では、姿勢や力といった、様々なレベルの変数にばらつきがみられる。Scholz と Schöner¹⁾は、神経系が制御量としている変数のばらつきは、そうでない変数に比べて小さく抑えられているとの仮説に基づき、神経にとっての制御量を同定する Uncontrolled manifold (UCM) 解析を提案している。Yen ら²⁾は、関節角度と手先位置などの運動学的な変数の関係に着目した UCM 解析を、関節トルクと床反力という動力学的な変数の関係にも拡張し、ホッピング運動の解析を行っている。しかし、その他の運動に対する動力学的な UCM 解析の報告は少ない。

本研究では、ペダリング運動に着目する。ペダリング運動では、同量のペダル踏力を発生させる足関節、膝関節、股関節トルクの組合せが無数に存在する。本研究では、ペダリング運動中の神経系は、踏力を制御量としており、踏力に影響する関節トルクのばらつきを抑えるように制御している、という作業仮説をもとに、動力学的な UCM 解析²⁾を用いて、その検証を行う。

2. 方法

2.1 ペダリング運動の計測

被験者 (19~23 歳男性 5 名、サッカーボールを蹴りやすい側の意味の利き足は全員右) のエルゴメーター (Wattbike) でのペダリング運動に対して、光学式モーションキャプチャ装置 (Natural Point, Optitrack/Tracking Tools) を用いて運動を計測し、ペダルに設置した 6 軸力センサ (テック技販, M3D-FP-U) を用いて踏力を計測した。肋骨下部、大転子、膝関節、外果、クランク軸、ペダル (3 点) に設置したマーカーの座標から各関節角度を求めた。各被験者に対し、クランク軸からサドル面までの長さを股下長×

0.875 とし、床面からのハンドル高をサドル高と同一に設定し、目標クランク回転速度を 70rpm と指定し、約 130W の負荷で実験を行った。速度はメトロノームの音により指定した。実験では 30 秒間のペダリング運動を 2 セット行った。ただし、被験者 1 名については元データにおけるマーカーの入れ替わりが激しく、解析から除外した。

2.2 運動方程式

図 1 に示す矢状面内でのペダリングモデルにおける下肢部 (片側) の運動方程式は、次式で表される。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + J^T(\theta)F = \tau$$

ただし、 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ は鉛直軸からとったセグメント角、 $M(\theta)$ は慣性行列、 $h(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力とコリオリ力、 $G(\theta)$ は重力、 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ はセグメントトルク、 $J(\theta)$ はセグメント角から足部位置 (ペダル軸) へのヤコビ行列、 F は足部がペダルに及ぼす踏力ベクトルを示す。関節角を $q = [q_1, q_2, q_3]^T$ とし、関節トルクを $u = [u_1, u_2, u_3]^T$ とすると、これらは変換行列 A によって $q = A\theta$ 、 $\tau = A^T u$ と関係づけられる。

図 1 ペダリングモデル

2.3 UCM 解析

本研究では、神経系は踏力を制御量としてペダリング運動を行っており、関節トルク u は踏力

$\mathbf{F}$ のばらつきが小さくなるように制御されているという作業仮説をたてた。そして、その検証のため、トルクのばらつきに含まれる踏力に影響する成分と影響しない成分の大きさを比較した。

関節角 θ ，踏力 $\mathbf{F}$ の N 周期分の計測データをもとに逆動力計算により求めたトルク $\mathbf{u}$ のばらつきを、1 周を 100 等分したクランク角ごとに、次のように解析した。各クランク角における平均トルクを $\bar{\mathbf{u}}$ とし、 $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \bar{\mathbf{u}}$ とする。 $\mathbf{J}^T$ の動的に整合性のある一般化逆行列³⁾を、 $\bar{\mathbf{J}}^T = [\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T]^{-1}\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}$ とする。踏力 $\mathbf{F}$ に影響しないトルク $\mathbf{u}$ は、

$$\bar{\mathbf{J}}^T \boldsymbol{\tau} = \bar{\mathbf{J}}^T \mathbf{A}^T \mathbf{u} = \mathbf{0}$$

をみたすので、 $\bar{\mathbf{J}}^T \mathbf{A}^T$ のゼロ空間（ここでは 1 次元）の基底ベクトルを $\boldsymbol{\varepsilon}$ として、 $\Delta \mathbf{u}$ を $\boldsymbol{\varepsilon}$ に平行な成分 $\mathbf{d}_{\parallel} = \boldsymbol{\varepsilon}^T \Delta \mathbf{u} \boldsymbol{\varepsilon}$ と垂直な成分 $\mathbf{d}_{\perp} = \Delta \mathbf{u} - \mathbf{d}_{\parallel}$ に分ける。平行成分の自由度あたりの分散 V_{GEV} ，垂直成分の自由度あたりの分散 V_{NGEV} を、次のように定義する。

$$V_{GEV} = \sum_{i=1}^N \frac{\|\mathbf{d}_{\parallel,i}\|^2}{N \cdot (n-a)}$$

$$V_{NGEV} = \sum_{i=1}^N \frac{\|\mathbf{d}_{\perp,i}\|^2}{N \cdot a}$$

ここで a は仮定した制御量の次元、 n はモデルの自由度を表し、 $a = 2$ ， $n = 3$ である。これらの相対値 $w = (V_{GEV} - V_{NGEV}) / (V_{GEV} + V_{NGEV})$ を関節トルクの協調性の指標とする。踏力に影響する関節トルクのばらつきが相対的に小さい場合、 w は 1 に近づき、逆の場合は -1 に近づく。

3. 結果と考察

結果の例として、ある被験者の左右の下肢の V_{GEV} ， V_{NGEV} と w の値の変化を図 2，3 に示す。両図ともに横軸のクランク角度は右側のクランク角度を表している。図より、両下肢ともに、踏力に影響しないトルクのばらつき V_{GEV} は、影響するトルクのばらつき V_{NGEV} よりも大きく、 w も常に正の値をとっていることがわかる。また、解析の結果、4 名の被験者の w の平均値は 0.46 から 0.70 の間をとっており、踏力に影響するトルクのばらつきは相対的に低く抑えられていた。これらの結果は、ペダリング運動中の神経系が、踏力を制御量としている可能性があることを示唆している。

また、左右を比べるとすべての被験者で、 w の平均値は、利き足（右足）よりも非利き足（左

足）の方が高かった。この結果は、非利き足のほうが踏力をより正確に制御している可能性があることを示唆している。

図 2 右下肢の V_{GEV} ， V_{NGEV} と w の値の変化

図 3 左下肢の V_{GEV} ， V_{NGEV} と w の値の変化

4. まとめと今後の課題

ペダリング運動における関節トルクのばらつきを、踏力に影響する成分と、影響しない成分に分けて比較した。解析の結果、踏力に影響する関節トルクのばらつきは相対的に低く抑えられている傾向が見られ、神経系は踏力を制御量としている可能性が示唆された。ただし、制御量の候補は、この他にも、クランクに直交する踏力の成分など様々なものが考えられるため、今後は、それらについても解析を行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は科研費（課題番号 23700236，25330311）の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) J. P. Scholz, G. Schöner: “The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task”, Exp. Brain. Res., Vol. 126, pp. 289-306, 1999.
- 2) J. T. Yen, et al.: “Joint-level kinetic redundancy is exploited to control limb-level forces during human hopping”, Exp. Brain. Res., Vol. 196, pp. 439-451, 2009.
- 3) O. Khatib: “Motion/force redundancy of manipulators”, Proceedings of Japan-USA Symposium on Flexible Automation, pp. 337-342, 1990.