

主動筋と拮抗筋の同時収縮に関する考察

電気通信大学大学院 情報システム学研究科 和田 克己 阪口 豊

Functional Roles of Co-contraction of Antagonist Muscles

Katsumi WADA and Yutaka SAKAGUCHI

Graduate School of Information Systems, The University of Electro-Communications

Abstract: This paper proposes two working hypotheses about the functional roles of co-contraction in motor control. The first one argues that co-contraction enhances the feedback gain of spinal reflex loop, which results in increasing the viscosity of joints and stabilizing the motor control. The other claims that the brain utilizes co-contraction to improve force-generation property by mixing the forces generated by an antagonist pair of muscles.

1 はじめに

関節には、その関節を曲げる筋（屈筋）と伸ばす筋（伸筋）が対になって存在している。これらの筋は互いに反対の作用を生じるため、両者はまとめて拮抗筋とよばれる。関節を動かす際は、これらの筋のうち一方のみを収縮させるのが効率的と思われるが、実際には両者が同時に収縮する場合が広く観察される。筋の出す力の一部が相殺され、エネルギーが無駄に消費されることを考えると、同時収縮には脳が身体の動きを制御する上で、それらの損失を補う以上の何らかのメリットがあると考えられる。

同時収縮の役割を考える上では、

それが骨格系に及ぼす（力学的）効果

その効果と運動タスクとの関係

の二つを解明することが重要である。本稿では、筋肉の収縮特性や反射系の働きという観点から主にについて検討し、新たな仮説を提案する。

2 従来の研究

2.1 同時収縮が起こる状況と起こらない状況

Smith (1981)によれば、同時収縮は、

筋張力や関節角を正確に制御するとき

高速度や負荷の下で減速するとき

把持

```
prehension
```

するとき

に生じやすく、逆に、

外力と筋張力が釣合って筋が短縮しないとき

移動、咀嚼、呼吸といったリズムカルな運動時

負荷のない状態でのゆっくりとした運動時

に起こらないことが指摘されている。

2.2 同時収縮に関する従来の方

Hogan (1984) は、筋肉の内在的なスティフネスが

活性度とともに上昇することに着目し、同時収縮は関節のスティフネスを増加させて、姿勢を維持する際に好都合だと主張した。

また、Baratta et al. (1988) は、膝関節の同時収縮は靭帯が関節の安定化をするのを助け、関節面にかかる圧力を均等化すると述べている。

このほか、Gribble et al. (2003) は、リーチング運動の際の肩と肘の筋の同時収縮を調べ、運動の精度を向上させるために同時収縮が用いられることを示唆する結果を得た。彼らは、同時収縮によって関節のインピーダンスが上昇すると、インタラクショントルクや外乱に抗する作用が大きくなり、その結果運動の精度が向上すると主張している。

3 本研究で提案する仮説

3.1 筋紡錘ゲイン上昇仮説

本稿で提案する第一の仮説は、脳は、同時収縮を通じて脊髄内の反射回路のパラメータを調整し、関節の力学的特性を能動的に変化させているというものである。

骨格筋には、筋長やその変化を感知する器官としての筋紡錘があり、これは筋中に筋線維と平行に埋め込まれている。筋紡錘の感度は運動ニューロンによって調整されており、筋を収縮させる際は、筋を活性化する運動ニューロンだけでなく運動ニューロンも同時に活動して、筋の短縮による筋紡錘の感度低下（unloading 効果）を相殺している。これを - 連関という。

同時収縮の下では、拮抗する筋の張力が互いに打ち消しあって筋は短縮しないが、その場合でも、 - 連関によって、運動ニューロンの活動は生じる。

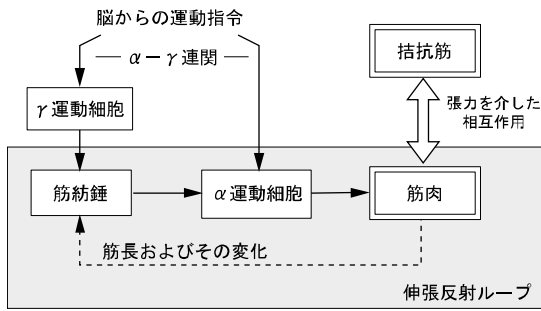


図1 - 連関と伸張反射回路

そのため、筋紡錘の感度は筋が短縮した際よりも上がり、伸張反射のゲインが上昇すると考えられる。

以上をまとめると、拮抗筋の同時収縮時には、unloading 効果が生じないため、筋紡錘の感度が上がり、伸張反射ループのゲインを上げる効果があると予想される。

筋紡錘が筋長の変化（つまり速度）に敏感に反応することと、伸張反射が変化に抗するように働くこと（負のフィードバック）を考慮すると、反射ループのゲインが上がることにより筋ひいては関節の粘性が上昇することが予想される。

正確な運動を行なうときに同時収縮が生じる（2節）のは、粘性を上昇させることで制御を容易にし、運動の精度を高めるためであると考えられる。このほか、運動を減速する際に同時収縮が生じる現象（2節）も、粘性を上昇させることでブレーキをかけていると解釈できる。

3.2 応答特性最適化仮説

本研究で提案する第二の仮説は、筋がもつ張力生成特性のもつ欠点を補うために、脳が同時収縮を利用しているという仮説である。

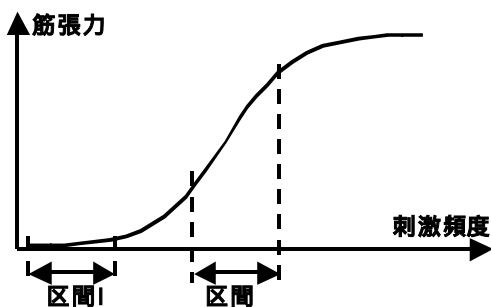


図2 刺激頻度と張力の関係
(Rack & Westbury (1969)より改変)

筋の刺激頻度と張力の関係をプロットすると、一般に図2のようなシグモイド様の関係が得られる。この図における区間Iと区間IIを比較すると、区間IIは区間Iよりも、

一定の刺激頻度変化に対する張力変化が大きい
線形性が高い

ことがわかる。さらに、グラフには示していないが、張力のばらつきが少ない

ことも報告されている。

そこで、区間IIに相当する弱い力を出すときでも、応答特性の良い区間IIで筋を駆動し、必要以上の張力は拮抗筋によって相殺して適切な張力を得ることにより、区間IIで筋を駆動した場合よりも速い応答や正確な制御が可能となることが期待できる。

4 まとめ

本稿では、同時収縮に関する従来の研究を紹介した上で、同時収縮が運動制御に及ぼす作用を従来とは異なる観点から考察し、新たな仮説を提案した。今後の課題として、筋電活動の計測などにより同時収縮の作用と運動タスクとの関係を明らかにし、提案した仮説の妥当性を検討することがあげられる。

参考文献

- Baratta, R., M. Solomonow, et al. (1988). "Muscular coactivation: The role of the antagonist musculature in maintaining knee stability." *The American Journal of Sports Medicine* **16**(2): 113-122.
- Gribble, P. L., L. I. Mullin, et al. (2003). "Role of cocontraction in arm movement accuracy." *Journal of Neurophysiology* **89**: 2396-2405.
- Hogan, N. (1984). "Adaptive control of mechanical impedance by coactivation of antagonist muscles." *IEEE Transactions on Automatic Control* **AC-29**(8): 681-690.
- Latash, M. L. (1998). *Neurophysiological Basis of Movement, Human Kinetics*.
- Rack, P. M. H. and D. R. Westbury (1969). "The effects of length and stimulus rate on tension in the isometric cat soleus muscle." *Journal of Physiology* **204**: 443-460.
- Rothwell, J. (1994). *Control of Human Voluntary Movement*. London, Chapman & Hall.
- Smith, A. (1981). "The coactivation of antagonist muscles." *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* **59**: 733-747.