

# Bizzi, et al.(1984) の再検討：彼らの結果から何が結論できるのか？ What can we conclude from the findings by Bizzi, et al. (1984)?

阪口 豊<sup>†</sup>, 石田文彦<sup>†</sup>, 宮下英三<sup>‡</sup>

Yutaka Sakaguchi, Fumihiko Ishida and Eizo Miyashita

<sup>†</sup> 電気通信大学大学院情報システム学研究所 <sup>‡</sup> 東京工業大学大学院総合理工学研究科

sakaguchi@is.uec.ac.jp

**Abstract**— The authors re-examined the work by Bizzi, et al.(1984) through a numerical experiment using a single joint musculoskeletal model. The result suggests that their experimental data does not necessarily support the existence of virtual or target trajectory.

**Keywords**— virtual trajectory hypothesis, end-point control hypothesis, co-activation

## 1 はじめに

Bizzi ら [1] は、運動を始めようとしているサルの腕に運動をアシストする外力を加えると腕がいったん逆方向に動いたのち再び目標に向かって動くことを示した。この報告は、脳が運動中の腕の軌道を指定していることを示唆する知見として今日まで頻りに引用されてきた。

本稿では、この報告内容を再検討するとともに、筋モデルを土台とする運動制御モデルがそれらを再現できるかどうかを数値実験により調べた結果を報告する。

## 2 Bizzi らの実験の概要とその解釈

彼らの実験では、アカゲサルが水平面内の肘単関節運動を行なった。サルの課題は、手先が目標を指示するように肘関節を屈曲あるいは伸張させ、その姿勢を 1 秒間保持することである。彼らは、この課題を遂行しているサルの肘関節にマニピュランダムを介して外力トルクを与える 3 種類の実験を行なった [1]。

実験 1 は、目標提示後一定時間外力により腕を始点位置に維持し、外力を取り除いた後の関節角加速度を計測する実験である。結果は、腕を始点に維持する時間と角加速度のあいだに直線の関係があることを示した。実験 2 では、健常サルの腕に主動筋の活動開始と同時に運動をアシストする方向に外力を与えたときの軌道、実験 3 では、背側根切除サルの腕を目標提示前に外力により目標まで運び主動筋の活動開始と同時に外力を取り除いたときの軌道をそれぞれ調べている。これらの実験ではいずれも、腕がいったん始点方向に戻った後目標に向かって動くことが明らかになった。Bizzi らは、筋力の平衡点が運動中に目標に向かって連続的に移動しているとすれば三つの実験結果が説明できると述べて仮想軌道仮説を提案し、終点制御仮説を否定した。

以上の知見はその後も目標軌道の存在を支持する知見

として参照されてきたが、意外なことにこの現象そのものを再現する試みはなされていない。実際、運動指令を正味の関節トルクで記述する限り、逆ダイナミクスモデル仮説や最適フィードバック制御仮説は原理的に実験 3 の結果を再現できない。このため、この知見は筋の力学的特性を考慮したモデルを用いて検証する必要がある。

## 3 実験

### 3.1 モデルの構造

図 1 のように、肘関節と 1 対の単関節筋（屈筋、伸筋）からなる筋骨格系モデルを考える。筋モデルは Hill 型のもので、筋張力が発する関節トルクは、次式のように筋長、筋収縮速度、筋指令に依存して定まる [2]。

$$T(x, v; q) = a \cdot F_{\max} \cdot (q \cdot k(x) \cdot h(v) + f_p(x))$$

ここで、 $a$  はモーメントアーム長、 $F_{\max}$  は最大収縮力、 $q$  は筋指令、 $k(x)$  は筋の正規化長さ  $x$  (=筋長/至適長) への依存性を表す関数、 $h(v)$  は筋の正規化収縮速度  $v$  (=収縮速度/最大収縮速度) への依存性を表す関数、 $f_p(x)$  は収縮要素に並列した弾性要素が発する力である。筋長の変化量は関節角の変化量に比例するとした。その他、筋や骨格のパラメータはヒトのデータに準じて定めた。

### 3.2 方法

文献 [1] にあわせ、関節角 60 度から 120 度への屈曲運動を課題として上述の実験に対応した内容の数値実験を行なった。実験 1 では、運動開始後  $H(0 \leq H \leq 0.5)$  s だけ腕を始点位置に維持したときのその後の腕軌道を記録した。実験 2 では、運動開始と同時に運動をアシストする方向に時間幅 150 ms の矩形波状外力を加えたときの軌道を記録した。実験 3 では、運動開始時刻まで腕を目標位置に維持したときの軌道を記録した。

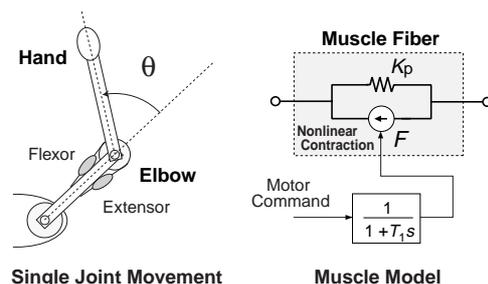


図 1：筋骨格系モデルの構造

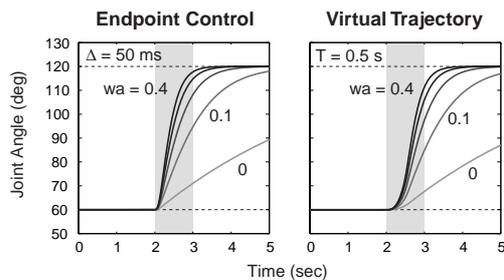


図 2：外力が働かないときの軌道

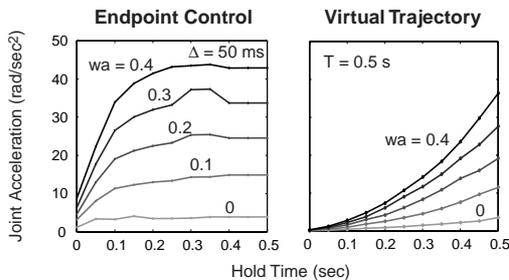


図 3：実験 1 の結果

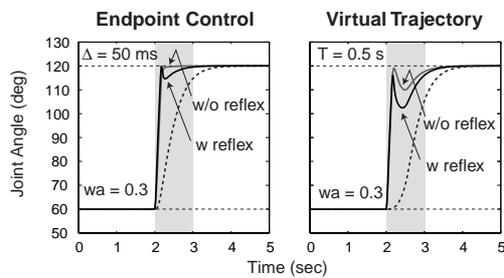


図 4：実験 2 の結果

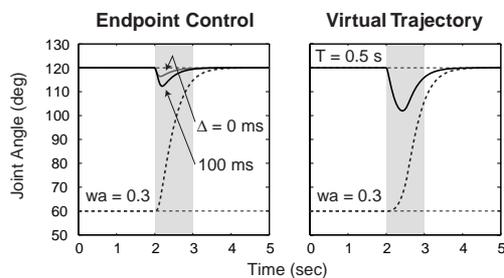


図 5：実験 3 の結果

筋指令は、終点制御仮説、仮想軌道仮説モデルに基づいて次のようにして定めた。終点制御仮説では、始点と終点での平衡を実現する筋指令対を運動開始時刻に切り替えることで筋指令を定めた。一方、仮想軌道仮説では、運動時間  $T$  s の等角速度軌道を生成し、この軌道上で 10 ms 間隔で平衡点を移動させることにより筋指令対を生成した。いずれの場合も、平衡を実現する筋指令対は同時活性度に応じて無数に存在するので、実験では、筋指令が小さい方の指令値 (wasted activity: wa) を 0 から 0.4 まで 0.1 刻みで 5 段階設定して筋指令を定めた。実験は基本的に感覚フィードバックがない (背側根切除サルに対応する) 条件で行なったが、文献 [1] の実験 2 では主動筋に unloading による反射の影響が見られるので、この実験のみ反射の効果 (主動筋の指令を弱

め、拮抗筋の指令を強める) を加えた。また、文献 [1] の実験 3 の結果には主動筋に比べて拮抗筋の活動変化が遅れる傾向が見られるため、終点制御仮説ではその遅れ ( $\Delta$ ) が 50–100 ms である条件でも実験を行なった。

### 3.3 結果

外力を加えない条件では、二つの仮説のいずれの下でも滑らかな軌道が得られたが、運動時間は同時活性度 (wa) の違いによって大きく変化した (図 2)。なお、仮想軌道仮説の下では、同時活性度を高めても計画した運動時間 (図では  $T = 0.5$  s) では運動は終了しなかった。

図 3 に実験 1 の結果 (停止時間  $H$  と運動開始後 10ms の平均角加速度との関係) を示す。図からわかるように、いずれの仮説の下でも角加速度は停止時間とともに増加したが、その様相は二つの仮説間で大きく相違した。

実験 2 では、仮想軌道仮説の下では反射の有無によらず腕の逆行現象が容易に再現できたが、終点制御仮説の下では反射の効果がある条件でのみ再現できた (図 4)。なお、文献 [1] はこの条件での背側根切除サルの行動について言及していないため、反射のない条件で逆行現象が生じるかどうかは不明である。また、健常サルの実験についても、拮抗筋の活動データがなく伸張反射の影響が明らかでない。しかし、筋の急激な弛緩、伸展により反射が生じるのは間違いなく、実験 2 の逆行現象において反射系が相応に寄与している可能性は十分にある。

最後に、実験 3 の結果を図 5 に示す。腕の逆行現象は仮想軌道仮説の下で容易に再現できた。一方、終点制御仮説の下で生じる逆行現象の振幅は、拮抗筋の指令変化の遅れ ( $\Delta$ ) にも依存するが、相対的に小さかった。

## 4 考察と結論

仮想軌道仮説の下で実験 2, 3 の結果が容易に再現できたのは、Bizzi らの主張どおり平衡点がゆっくりと移動するためであるが、その裏返しとして、計画時間どおりに運動が終了しない、実験 1 で加速度の増加が遅いなどの問題が生じる。一方、終点制御仮説は計画運動時間が非常に短い仮想軌道仮説とみなせるので、仮想軌道仮説がもつこれらの長所、短所は終点制御仮説では逆に短所、長所となる。したがって、Bizzi らの知見は二つの仮説いずれをも支持するものではない。

加えて、上述したように文献 [1] のデータには筋活動のタイミング、反射系の関与などについて不明な点が多い。その解釈をめぐる論争に決着をつけるには現代の実験制御技術の下で再検証することが望まれる。

### 参考文献

- [1] E. Bizzi, N. Accornero, W. Chapple and N. Hogan (1984) "Posture control and trajectory formation during arm movement." *J. Neurosci.*, 4, 2738–2744.
- [2] H. Hatze (1977) "A myocybernetic control model of skeletal muscle." *Biol. Cybern.*, 25, 103–119.