

## 運動指令依存ノイズに着目した 確率的Broadcast Feedback制御の到達運動への適用

寺岡 宏敏<sup>†</sup> 池田 篤俊<sup>†</sup> 栗田 雄一<sup>†</sup> 上田 淳<sup>††</sup> 小笠原 司<sup>†</sup>

<sup>†</sup>奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 <sup>††</sup>Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology

### 1 はじめに

ヒトが図1のように手を開始点から目標点に動かす到達運動を行うとき、手先は緩やかに湾曲した軌道を描き、速度は時間に対してベル型の波形となる。このような運動を行う際に、脳は何らかの運動規範に基づいて最適軌道を計画していると考えられ、躍度最小、トルク変化最小等の規範が提案されてきた。それらの規範の一つに、Harrisらが提案した終点分散最少規範[1]という規範がある。これは、ヒトは繰り返し同じ動作を行っても手先の軌道は完全には一致せず、ばらつきが生じるという特徴に着目し、目標点に手先が到達してから一定時間の手先の分散が最も小さくなるような軌道を脳は計画していると仮定した規範である。しかし、Harrisは、運動指令に運動指令の大きさの“2乗”に比例した運動指令依存ノイズ(signal dependent noise:SDN)が発生するという仮定をしているが、生理実験によると、Harrisらの仮定の“2乗”とは異なる結果が出ている。

そこで、本論文では、運動指令依存ノイズの発生原因が、ヒトの筋肉の制御手法を参考に上田らが提案した確率的Broadcast Feedback制御[2]により生成される確率密度の分布特性であると考え、これに基づくノイズを終点分散最少規範に適用し、SDNと同様にヒトが描く軌道と同じ傾向が得られることを示す。

### 2 確率的Broadcast Feedback制御

筋肉細胞は、筋原線維で構成され、筋原線維は筋節が多数連なった構造をしており、この筋節が収縮することにより筋収縮が発生する。筋節はカルシウムイオンの濃度が上昇することで収縮を行うことが解っている。

そこで、上田らはこの筋肉の活動を参考に、多数のON-OFF制御ユニットから成るアクチュエータの制御手法として確率的Broadcast Feedback制御を

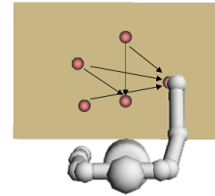


図 1: ヒト腕到達運動

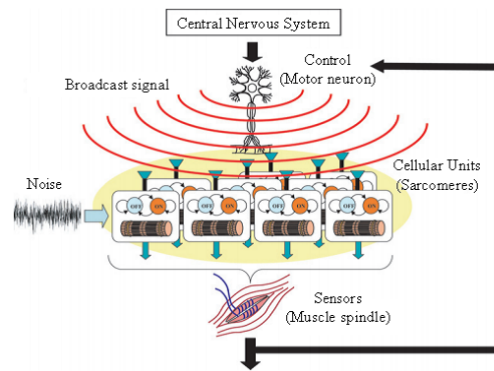


図 2: 確率的Broadcast Feedback制御 [2]

考案した(図2)。この制御手法は、各ユニットに制御信号を送るのではなく、一つの制御信号を全体に送り、各ユニットが確率的にON-OFFとなり、それらをまとめた全体の結果のみをフィードバックし制御するという手法である。この制御手法を用いると、時間 $t$ における出力 $y_t$ の分散 $Var_{[y_t|y_{t-1}=0]}$ は以下のようにおける。

$$Var_{[y_t|y_{t-1}=0]} = \frac{L^2}{N} p(1-p)$$

ここで、 $p$ は各々のユニットの遷移確率、 $N$ はユニットの数、 $L$ はアクチュエータの最大変位量をそれぞれ表す。SDNは運動指令が増大するに従って増大するのに対し、この分散は、 $p = 0.5$ の時に最大値となる上に凸な二次関数となっている。この分散が運動指令に依存するノイズであるとして考え、終点分散最少規範に用いる。以降この分散を二次関数ノイズと呼ぶこととする。

### 3 到達運動の最適計算シミュレーション

#### 3.1 最適化計算手法

最適軌道計算はモンテカルロ法で行い、初期軌道は躍度最小規範とトルク変化最小規範で求めた2

A study of reaching movement considering signal dependent noise generated from stochastic broadcast feedback control

<sup>†</sup> Hirotoshi TERAOKA, Atsutoshi IKEDA, Yuichi KURITA

<sup>††</sup> Jun UEDA

<sup>†</sup> Tsukasa OGASAWARA

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology (<sup>†</sup>)

Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology (<sup>††</sup>)

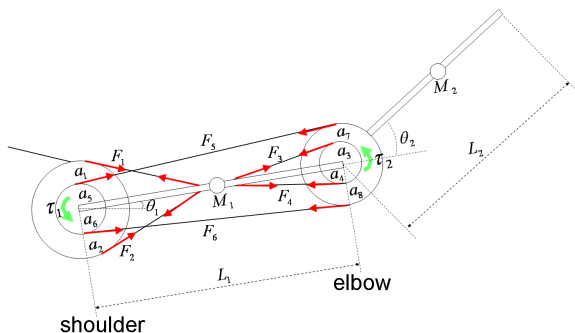


図 3: 二関節六筋腕モデル

つの軌道を用い、評価関数の値の小さい方を最適軌道とした。

評価関数は以下の式である。

$$J = \sum_k \int_{t_f}^{t_f+R} \{(x_{k,t} - \bar{x})^2 + (y_{k,t} - \bar{y})^2\} dt \rightarrow \min$$

$k$ は試行回数で500回に設定した。 $t_f$ は目標点に到達するまでの運動時間、 $R$ は到達後の停留時間で  $t_f = 0.5[s]$ ,  $R = 0.3[s]$ に設定した。 $x_{k,t}, y_{k,t}$ は  $k$ 回目の運動軌道の時刻  $t$ における手先座標、 $\bar{x}, \bar{y}$ は停留時間中の手先の平均座標である。

本研究では二次関数ノイズを用いるために腕のモデルとして二関節六筋腕モデル(図3)を用い、以下の式を用いた。

$$\begin{aligned} \tau &= R(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta, \dot{\theta}) \\ F_j &= A \cdot \tau_i \\ p &= \left( \frac{F}{F_{max}} - f_p(l) \right) \cdot \frac{1}{k(l) \cdot h(v)} \end{aligned}$$

$\tau_i$ は各関節  $i$  ( $i = 1, 2$ )のトルク、 $R$ は慣性項、 $B$ は遠心力や摩擦力等を表した項であり、 $F_j$ は各筋肉の発揮力、 $F_{max}$ は各筋肉  $j$  ( $j = 1, \dots, 6$ )の最大発揮力、 $A$ は各筋肉のモーメントアーム ( $A = (a_1, \dots, a_6)$ )、 $k(l)$ は時間  $t$ における筋肉の長さを筋肉の至適長で割った正規化長さ  $l$ の長さ - 力関係式、 $h(v)$ は時間  $t$ における筋肉の収縮速度を筋肉の最大収縮速度で割った正規化収縮速度  $v$ の速度 - 力関係式、 $f_p(l)$ は時間  $t$ における筋肉の正規化長さ  $l$ に依存した、筋肉の収縮要素に並列して配置される弾性要素が発揮する力関係式である。

また、二次関数ノイズを求めるために、筋節の数  $N$ と筋肉の最大変位量  $L$ を以下の式で与える。

$$\begin{aligned} N &= \frac{r}{l_s} \\ L &= L_{max} - L_{min} \end{aligned}$$

$r$ は肩の角度を  $45[deg]$ 、肘の角度を  $90[deg]$ としたときの筋肉の長さであり、 $l_s$ は筋節の至適長で  $2.8[\mu m]$ としている。 $L_{max}$ は筋肉の最大長、 $L_{min}$ は筋肉の最小長である。

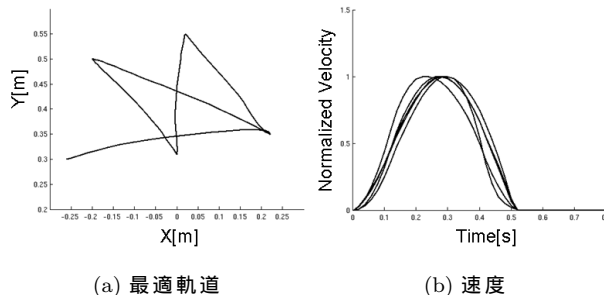


図 4: SDNを用いた最適化計算の結果

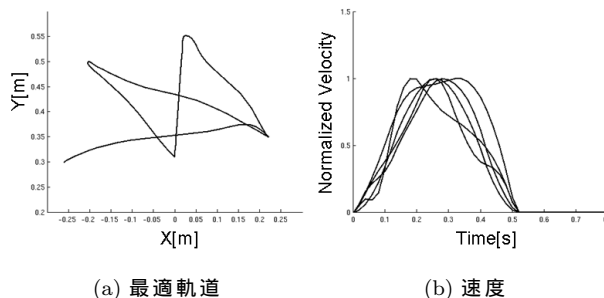


図 5: 二次関数ノイズを用いた最適化計算の結果

### 3.2 シミュレーション結果

比較のためにHarrisらが用いていたモデルにSDNを付加した最適化計算と、上で述べたモデルを用いて二次関数ノイズを付加した2種類で到達運動の最適化計算を行った。最適化計算した5つの軌道シミュレーション結果を図4, 5に示す。二次関数ノイズを用いて最適化計算した軌道は、SDNを用いて得られる軌道と同様に、手先は緩やかに外側に湾曲した軌道を描き、手先速度は時間に対してベル型の波形となる傾向を得ていることが確認できる。

### 4 まとめ

本論文では確率的Broadcast Feedback制御により生成される確率密度の分布特性を運動指令依存ノイズとして終点分散最少規範に適用してヒト腕到達運動の最適軌道を計算し、ヒトが描く軌道と同様の傾向となる軌道を描くことを示した。今後の課題として、現在は二次関数ノイズを求める際に、筋節の数や最大変位量をだまかに推定しているため、適切な値を与え、より正確なシミュレーションを行い、確率的Broadcast Feedback制御がヒトの筋肉の制御に使えるのかを検討していく必要がある。

### 参考文献

- [1] C.M.Harris et al.: "Signal-dependent noise determines motor planning", *Nature*, Vol.394, No.6695, pp.780-784, 1998.
- [2] J.Ueda et al.: "Broadcast Feedback of Stochastic Cellular Actuators Inspired by Biological Muscle Control", *IJRR*, Vol.26, No.11-12, pp.1251-1265, 2007.