

主論文の要旨

**Biomechanical Reconstruction Using the Tacit
Learning System:
Intuitive Control of Prosthetic Hand Rotation**

〔 Tacit Learning System を利用した生体機構再建：
義手回内外の直感的操作 〕

名古屋大学大学院医学研究科 総合医学専攻
運動・形態外科学講座 手の外科学分野

(指導：平田 仁 教授)

大山 慎太郎

【緒言】

我々が身体運動機構の一部を失うという事は機能的アウトプットの消失のみならず知覚フィードバックの消失でもある。我々は中枢神経系で計算を行うと同時に、フィードバック予測の結果を加えて運動器に出力することで自然な運動を行う。すなわち、自然な運動機構を人工的に再建する為には正確な運動出力だけを目指すのではなく、良好な知覚フィードバックを内部処理系に含める必要があるといえる。しかしながら現在、最も進歩した技術においても高精度のフィードバックの再建は困難であり、また機械に処理を任せるとしても、未知の環境変化に対する臨機応変性を持ち合わせた人工知能は存在しなかった。

Alnajjar らの研究によれば、生の、複雑な知覚フィードバックよりも、適切に次元を下げた知覚フィードバックを提示されるほうが使用者にとって受け入れやすい事が示されている。下田らが開発した Tacit Learning System (以下 TLS)は惑星探査ローバーや 36 自由度の歩行ロボットのコントロールにて実証された未知の環境変化に適応し姿勢制御を行う事が出来る閉ループ制御システムであり、フィードバックの次元を下げて処理し状況に応じて適切な姿勢をとるよう自律的に制御することが可能なシステムである。

我々は筋電義手に TLS を取り入れ、前腕回内外運動を制御させることによって、次元を下げた知覚フィードバック及び臨機応変な運動出力を可能とし、使用者にとって負担が少なく、自然な運動を行うことができるのではないかと考えた。

【対象及び方法】

日常的に筋電義手を利用している 7 名の男性と 1 名の女性に TLS を組み込んだ義手を装着し、TLS を無効にした状態と、有効にした状態で図 1 のような樹脂製の棒を水平から垂直に、垂直から水平に置きなおすタスクを指示した。被検者はテーブルの前に座り、本タスクを行いながら TLS に運動を学習させ、これを補正が収束するまで繰り返した。その様子を近赤外線モーションキャプチャーシステム (Workstation5.2.4[®], VICON 社)及び複数のカメラで動きを解析した。最後に被検者はシステムの満足度と有効性についての自由記載式アンケートへの回答をした。

<義手の構成>

TLS 義手は図 2 のような 3 軸($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)を検出するひずみセンサーと回内外及び手の開閉を動かすモーターで構成されており、義手の開閉信号は従来通りソケットの筋電電極より比例制御回路を通じ、ひずみセンサーより入力された角度信号は TLS を通じ下式の処理が行われ回内外角度 θ_r として回内外モーターに出力される。

$$\theta_r = k\theta - \dot{\theta}_r \quad (1)$$

$$k = \int q dt \quad (2)$$

$$q = \begin{cases} \theta & |\theta| \geq \theta_t \\ 0 & |\theta| < \theta_t \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta = k_1\theta_1 + k_2\theta_2 + k_3\theta_3 \quad (4)$$

(4)式における上肢関節角の線形和である θ が(3)式において θ_t を超えると、(1),(2)式により θ_r が決定される。Berretらによると上肢運動の最適化はエネルギー消費量で規定されるとあり、これは関節角（本研究においては肩関節の線形結合角 θ ）と強く関連するため、我々は θ の最小化を本システムの制御則とした。また、初期値は事前実験より $\theta_t=1, k_1=0.1, k_2=0.1, k_3=0.5$ と設定した。

<データ収集及び処理>

被検者の体及び義手に付けられた 24 個のマーカーで収集されたモーションキャプチャーデータはソフトウェア(SIMM[®] Musculographics 社)上で体重、性別、身長で計算された平均筋骨格モデルに投影され逆動力学的演算でエネルギー消費量を算出した。試験前のエネルギー消費量を 1 と設定した。

【結果】

全ての被検者で特別なトレーニングを要さずタスクを問題なく終了することができた。20 回の学習の結果、肩の代償性回転角は全ての被検者において減少し（図 3）、推定エネルギー消費量は 6 名中 5 名で減少した（図 4）。2 名においてはキャプチャーマーカーの不具合で正確に測定することができなかった。図 5、6 に被検者 1 における実際の推定エネルギー消費量及び肩関節の線形結合角 θ の経時的变化を示す。学習後においてエネルギー消費量及び θ が全体的に減少していることが判る。8 名中 7 名においてアンケートにおける義手満足度が高い結果であった。

被検者 8 においては、さらに 2 種類の戸棚や電子レンジのダイヤルを回すタスクに挑戦することが可能であった。TLS はそれらのタスクを学習していないにもかかわらず、使用者と同調して適切に回内外をコントロールすることが可能であった。図 7 に追加タスク中の義手回内外角の推移を示す。

【考察】

これまで義手を人間の手に近づける様々な試みが行われてきた。筋電信号の解析技術の向上、神経再支配による信号源再建、ブレインインターフェース、末梢神経電極などが挙げられる。しかしながらいずれも侵襲性が高かったり一定期間の訓練の必要があったりと導入のハードルは高く、また低コスト、多機能性、直感的操作性といった相反する要求を同時に満たす方法は存在しなかった。

我々の手法は筋シナジーの再建に注目することでこれらの問題を解決しようとした。筋シナジーは我々の冗長な中枢神経系と運動器出力を結びつける神経的な出力機構の解釈として広く受け入れられた考え方であり、筋シナジーに注目した再建とはすなわち、個々の関節運動を高次元の出力から分離再建するのではなく、次元の低い運動器出力をうまく拡張し自然な運動器再建を目指すということである。

下田らは、人間の運動器出力はモデル論的手法で解釈するのは、その内在的な不安定性のため困難と述べている。実際、deep learning をはじめとする機械学習の手法や教師データを改善することで対応できるパターンを増やそうとする試みは行われて

きたが、未知の状況に臨機応変に対応するには学習速度と一般化のレベルという点で実用に耐える状況ではない。

TLS は従来の手法に対して学習速度、コスト、ロバスト性という点で従来の手法に勝っており、さらに知覚シナジーと呼ばれる、知覚フィードバックの次元削減にも寄与していると考えられる。この考え方を提唱した Alnajjar らによると、知覚シナジーは種々のモダリティの知覚入力を次の運動出力がしやすいようにとりまとめて、少ないモダリティで人間に示す事としており、TLS においてはひずみセンサーからの関節角入力を基に TLS 自身で算出した適切な角度が、義手の回内外運動となって出力され、同時に視覚フィードバックとなり操作者の次の運動に反映されていくという流れの中で機能していると考えられる。

従来の義手はこの一連の流れを意識されずに設計されており、個々の運動をどう出力するかは操作者のリソースが消費されてしまうため非生理的と感じるのではないだろうか。この点は本研究のタスクにおいて、被検者が TLS 義手を使用するに際し、適応の過程で特別な訓練を必要とせず、意識せずに生理的な回内外操作を実現できた事からも知覚シナジーの重要性が示唆される。

本研究における重要な制限事項として、TLS は限られた環境でしか検証されていないため、その実用性については立証されていない点が挙げられ、また内部パラメータの設定によっては TLS による制御が常に働くためモーターによる電力消費が問題となる可能性がある点が欠点といえる。この点については本義手を日常生活で使用してもらい、その有用性を検証する必要がある、また内部パラメータのうち特に閾値 θ_t を高め設定することで、バッテリー消費量を抑えることができるのではないかと考えている。

【結語】

新しい姿勢制御システム「Tacit Learning System」を義手に導入し、限られた環境内での評価であるが良好な回内外運動機能再建を行うことができ、その有用性を示した。

今後は日常での有効性評価及び消費電力の改善を行っていく必要がある。