

研究テーマ インテリジェント FES システム基盤技術の開発
(筋骨格系モデリングとフィードバック制御、身体装着型安定評価システムの開発、計算論的アプローチによる F E S 制御方式の開発)
計算論的アプローチによる F E S 制御方式の開発

研究員 二見亮弘 東北大学大学院工学研究科 客員研究員
大庭茂男 財団法人みやぎ産業振興機構 派遣研究員

1 フェーズ

(1) 研究の概要

F E S による麻痺肢制御では、制御対象の神経筋系が異常な反応性や定常的な収縮を呈する痙性の存在が大きな問題となる。この発生メカニズムを特定してそれを消失させるため、脊髄を介した伸長反射に注目し、求心性の Ia 線維から脊髄運動ニューロンへの結合を減弱させるための Ia 線維へのパルス電気刺激について実験的に検討した。その刺激周波数を適切に選ぶことで、脊髄運動ニューロンへのシナプス結合強度を減弱あるいは増強させ得る場合があることを H 波計測によって確認した。

上肢や下肢の F E S 制御においてはこれまで、多チャンネルの刺激時系列を適切に決定することが困難であった。これは例えば手先の到達運動を制御する場合、与えられた初期姿勢と最終姿勢から、手先の運動軌道、姿勢、各関節トルク、筋張力、電気刺激の振幅という時系列を順に決定していく必要があり、その多くが不良設定問題であるためである。本研究では、制御対象の順モデルと一般的な最適化アルゴリズムを用いた新しい刺激時系列決定方法を提案した。

(2) 研究の目標

関節角度や位置に関する目標軌道を前向き制御で実現する電気刺激を計算するために、どのような意味を持つ処理を行うかという計算論的観点から、制御目標軌道の決定、制御対象の理解とモデル表現、前向き制御の実現に必要な基礎的検討を行う。具体的には、脳卒中や脊髄損傷患者の F E S 制御において問題となる痙性の発生メカニズムを理解し、それを低減させる手法を開発するための基礎的検討と、上下肢の運動機能を再建する多チャンネルの刺激時系列の決定に関して、脳における運動制御についての知見を元にした合理的な計算手法を開発することを目標とする。

(3) 実施内容

痙性の低減に関しては、健常人の脛骨神経を皮膚表面電極で電気刺激し、それに対するヒラメ筋の H 反射を別の表面電極で計測する実験を行った。電気刺激は、H 反射の振幅を見るための 30 秒ごとのテスト刺激と、シナプス結合の強度を変えるための 600 個、周期 200 ~ 800ms の刺激とした。電気刺激の振幅は、運動神経と感覚神

経の閾値の違いを利用して、感覚神経のみが刺激されるように設定した。

刺激時系列の決定法については、上下肢の制御にあたって存在する不良設定問題を解決するため、川人・宇野・和田・Jordanらの研究を調査し、ジャーク最小規範、トルク変化最小規範、意図したトルクの変化最小規範、運動指令変化最小規範などをF E S制御に適用することを検討した。

(4) 結果

痙性の低減に関しては、Ia線維へのパルス電気刺激の周波数を適切に選ぶことで、脊髄運動ニューロンへのシナプス結合強度を減弱あるいは増強させ得る場合があることを、健常人での皮膚電気刺激・H波計測によって確認した。シナプスの長期減弱を起こさせる刺激周波数としては、2.5Hz程度が最良であった。

また、新しい刺激時系列決定方法として、制御対象の初期姿勢と最終姿勢および必要なら経由点に関する条件を制約条件として用い、刺激振幅変化速度の2乗積分値を最小化するという最適化の規範を提案した。この方法は、脳における運動制御規範として川人・宇野らが最近提案している運動指令変化最小規範と計算論的に対応しており、最適化の初期値を小さな刺激振幅の時系列にしておくことで筋疲労の最小化が図れるだけでなく、いくつかの不良設定問題を自然に回避して妥当な解を

2 フェーズ

(1) 研究の概要

運動に関連する筋・骨格系のモデリング、それに基づく望ましいF E S制御方式の開発、および患者での実用的な制御方式の開発を行った。同様な制御方式を適用可能で、より扱いやすい上肢運動についても、モデリングと制御方式開発の対象とした。制御方式としては、フィードバック制御とフィードフォワード制御の利点を併せ持つフィードバック誤差学習の導入などを進め、制御遅れの低減、精度や頑健性の向上、刺激調整時間の短縮などを目指した。さらに、これらの成果を患者の起立・歩行制御に適用して、センサ情報を利用した制御方式の試験を行い、実用的な制御結果が得られることを確認した。臨床F E Sに直接寄与する成果としては、開ループ制御と閉ループ制御の比較検討、姿勢計測用傾斜角度センサシステムの開発、不全片麻痺患者の適応的F E S歩行制御方式の開発などがあげられる。

(2) 研究の目標

対麻痺患者等で起立・立位保持・数歩の歩行のより良い運動機能再建をフィードバック制御の導入によって可能にすることを期間内の目標として、その実現に必要な制御対象のモデリング、モデルによる制御方式の比較検討、実用的なセンサシステムの構築、および、提案する制御方式の臨床評価を目指した。

(3) 実施内容

シナプス長期減弱により痙性を低減するための脛骨神経刺激、多チャネルの刺激時

系列の決定に関する最適化規範の検討、非周期的電気刺激パルスに対する筋・神経系の応答の検討、F E Sによる完全対麻痺患者の立位保持制御、足関節角度のF E S帰還制御、上肢モデルによる開ループ制御と閉ループ制御の比較検討、姿勢計測用傾斜角度センサシステムの開発、不全片麻痺患者のF E S歩行制御方式の開発、フィードバック誤差学習法による制御の遅れの改善について、詳細を後述するような方法で研究を実施した。

(4) 結果

各研究項目について、後述のような成果が得られた。

3 フェーズ の取組み予定

起立・歩行制御について、これまでに対象としてきた脳卒中不全片麻痺患者と頸髄損傷不全四肢麻痺患者に加えて、脊損完全下肢麻痺患者に対しても適用可能な制御方式と制御システムの開発を進める。また、そのために必要な制御系モデルの構築と、その理論的解析を進める。

シナプス長期減弱により痙性を低減するための脛骨神経刺激

FESによる麻痺肢制御においては、制御対象の神経筋系が異常な反応性や、脊髄でのフィードバックによる定常的な収縮を呈しているために、適切な制御が困難であることが大きな問題となり、FESの適用可能な患者の範囲を制限していることが多い。このような問題を解決するためには、そのような反応性の発生メカニズムを特定して理解するとともに、それを消失させるための手法を開発し、さらには制御可能となった神経筋系をどのように刺激すべきかを明らかにしていく必要がある。

さて上記のような痙性の発生には、過剰な伸長反射も関係していると考えられるので、求心性の Ia 線維から脊髄運動ニューロンへの結合を何らかの方法で減弱させれば痙性を低減できる可能性がある。我々は、Ia 線維へのパルス電気刺激の周波数を適切に選ぶことで、脊髄運動ニューロンへのシナプス結合強度を減弱あるいは増強させ得る場合があることを、健常人での皮膚電気刺激・H波計測によって確認した。

脳卒中や脊髄損傷によって生じる痙性の発生メカニズムを理解し、それを減弱あるいは消失させるための手法を開発して、FES制御の対象である神経筋系についての理解を深めることを目標として、健常人の脛骨神経を皮膚表面電極で電気刺激し、それに対するヒラメ筋のH反射を別の表面電極で計測した。電気刺激は、H反射の振幅を見るための30秒ごとのテスト刺激と、シナプス結合の強度を変えるための600個、周期200~800msの刺激とした。電気刺激の振幅は、運動神経と感覚神経の閾値の違いを利用して、感覚神経のみが刺激されるように設定した。

Ia 線維へのパルス電気刺激の周波数を適切に選ぶことで、脊髄運動ニューロンへのシナプス結合強度を減弱あるいは増強させ得る場合があることを、健常人での皮膚電気刺激・H波計測によって確認した。シナプスの長期減弱を起こさせる刺激周波数としては、2.5Hz程度が最良であった。

運動単位が有する Catch-like effect などの強い時変特性と疲労特性、脊髄の神経回路と感覚情報のフィードバックによる局所的な反射、複数の運動単位の動的リクルートメントによる筋張力の制御などがどのように絡み合っていて、バラツキはあるものの実用的には殆ど支障のない末梢レベルの筋運動制御が、生体においてどのように実現されているかについて、さらに調べていく必要がある。

文献：

G.H.Otazu, T.Watanabe, R.Futami and N.Hoshimiya: "The effect of low frequency stimulation in the monosynaptic reflex studied using the H-reflex", Proc. of the International Workshop on FES Supported by Joint-Research Project for Regional Intensive in Miyagi, pp.22-23, August 22, 2000

G.H.Otazu, R.Futami and N.Hoshimiya: "A Muscle Activation Model of Variable Stimulation Frequency Response and Stimulation History, Based on Positive Feedback in Calcium Dynamics", Biological Cybernetics, Vol.84, pp.193-206 (2001-03)

多チャンネルの刺激時系列の決定に関する最適化規範の検討

上肢や下肢のFES制御においてはこれまで、多チャンネルの刺激時系列を適切に決定することが困難であった。これは例えば手先の到達運動を制御する場合、与えられた初期姿勢と最終姿勢から、手先の運動軌道、姿勢、各関節トルク、筋張力、電気刺激の振幅という時系列を順に決定していく必要があり、その多くが不良設定問題であるためである。本研究では、制御対象の順モデルと一般的な最適化アルゴリズムを用いた新しい刺激時系列決定方法を提案した。

関節角度や位置に関する目標軌道を前向き制御で実現する電気刺激を計算するために、どのような意味を持つ処理を行うかという計算論的観点から、制御目標軌道の決定、制御対象の理解とモデル表現、前向き制御の実現に必要な基礎的検討を行った。具体的には、上下肢の運動機能を再建する多チャンネルの刺激時系列の決定に関して、脳における運動制御についての知見を元にした合理的な計算手法を開発することを目標として、上下肢の制御にあたって存在する不良設定問題を解決するため、ジャーク最小規範、トルク変化最小規範、意図したトルクの変化最小規範、運動指令変化最小規範などをFES制御に適用することを検討し、新しい刺激時系列決定方法として、制御対象の初期姿勢と最終姿勢および必要なら経由点に関する条件を制約条件として用い、刺激振幅変化速度の2乗積分値を最小化するという最適化の規範を提案した。この方法は、脳における運動制御規範として川人・宇野らが最近提案している運動指令変化最小規範と計算論的に対応しており、最適化の初期値を小さな刺激振幅の時系列にしておくことで筋疲労の最小化が図れるだけでなく、いくつかの不良設定問題を自然に回避して妥当な解を得られるという理論的特徴を有している。

文献：

L.Zhao、 R.Futami and N.Hoshimiya: "Stimulation Patterns for Arm Reaching Movement"、 医用電子と生体工学、第 39 巻特別号、p.655 (2001)

非周期的電気刺激パルスに対する筋・神経系の応答の検討

FES 制御における刺激パターン決定において利用可能な、筋骨格系の実用的なモデルを作成するために、筋モデルに取り込む必要のある強化現象と疲労の効果について調べた。強化現象は一定周波数の電気刺激に対する張力応答が徐々に増大する効果、疲労現象は逆に張力応答が徐々に減少する効果であるが、両者の時定数は異なっている。数値計算による解析により、そのような特性をもつ筋張力積分値を最大にする刺激パルス列は、2つの時定数に応じて、周期的パルス列の場合と周期的バーストパルスの場合があることが示された。これは、今まで用いてきた周期的刺激パルスを見直す必要を示唆している。

実用的な筋モデルを作成するために、神経細胞のシナプスにおける情報伝達や、筋張力の発生メカニズムに共通して内在する強化（促通）と疲労の効果を取り入れたモデルを作

成し、それらのダイナミクスによってどのような入出力特性が生じるのかを明らかにし、筋張力の積分値やリップル幅などの最適化を可能にする刺激時系列を求める方法を明らかにすることを目標とし、生体興奮膜のHHモデルの電氣的等価回路にEPSPとIPSPを発生させるための電流チャンネルを付加し、これらPSPの振幅が促通因子と(1-疲労因子)の積で表されるというモデルを構成し、数値計算で評価を行った。促通因子は入力パルスによって増大し、時定数fで初期値に復帰するものとしたものとした。疲労因子は出力パルスによって増大し、時定数dで初期値に復帰するものとした。入力は周期的バーストパルスとし、バースト内パルス間隔を調整して周期的バーストから周期的パルスまでを連続的に選べるようにした。

バースト内パルス間隔(IFI)と平均出力パルス頻度の関係を調べたところ、dが大きくfが小さいという条件下では、ある中間的なIFIにおいて最大の出力が得られることが分かった。すなわち、この系への最適刺激は周期的パルス列ではなく、ある種の周期的バーストパルスであった。この数値計算はニューロンの発火現象を対象としたものであるが、筋収縮においても同様なダイナミクスが含まれている。また、2つのパルス間隔を適切な関数で変換して得られる空間では、同じ筋収縮応答を生じさせるパルス間隔の組み合わせが直線状の領域を作ることが明らかになり、直観的な刺激設計の可能性が示された。また、強化因子と疲労因子の大きさがつくる空間での図式的な解析により、周期的な刺激パルス列では到達できない動作領域が存在することが明確に示せるようになった。

今後、刺激周波数に応じた筋張力の変動の幅を最適化するような刺激についても検討が必要である。また、モデル解析で予測された効果を実際の電気刺激実験で検証し、実用的なモデルを構成する必要がある。

文献：

G.H.Otazu、 T.Watanabe、 R.Futami and N.Hoshimiya: Non-regularity in muscle fiber stimulation pulses creates higher levels of force: A simulation study. 第16回生体・生理工学シンポジウム論文集、pp.365-368 (2001-08)

小池、二見、中谷、Otazu、星宮： "運動単位の動的機能配分を実現する神経・筋モデル"、電子情報通信学会技術研究報告、MBE2001-166 (2002-03)

FESによる完全対麻痺患者の立位保持制御

患者1名に対する立位保持FESの実験を行い、センサシステムの動作とフィードバック制御の実現可能性の評価を行った。目標は、フィードバック制御による起立・立位保持・歩行の再建に関する制御方式を確定すること、および、姿勢と足底圧を計測してフィードバック制御に用いるための予備実験を行い、それらの情報を安定かつ正確に計測可能かどうかを確認することであった。

医師の経験による試行錯誤的な方法で、上肢の補助がある状況での立位保持刺激パターンを決定し、この刺激パターンに±20%の刺激包絡線変動をステップ状に各1秒間印加し、

刺激中の姿勢と足底圧を計測した。患者は並行棒を両手で握って自由に安定性を維持してよいものとした。姿勢計測には光ゴニオメータ6セットを用い、股関節伸展/屈曲、膝関節伸展/屈曲、足関節背屈/底屈を、左右の下肢についてそれぞれ計測した。足底圧については、左足と靴底の間に歪みゲージ型圧力センサ2個を装着し、計測した。刺激発生システムとしては、DAコンバータ32チャンネルと、ADコンバータ8チャンネルを有するパーソナルコンピュータ、および、 $\pm 15V$ の範囲内で任意の刺激電圧を発生可能な、アイソレータ内蔵の刺激装置を用いた。

結果として、実験に参加した患者では、右下肢の伸展を大殿筋と大腿四頭筋で制御し、左下肢の伸展を大殿筋と大腿四頭筋と内側広筋と外側広筋で制御すれば立位保持を行うことができたが、安定な立位を維持するための刺激は、股関節と膝関節の十分な伸展を実現するものであるため、それらの刺激の振幅変動は股関節と膝関節の角度変化(姿勢変化)という形では計測できないことが多かった。上記の姿勢変化を計測可能にするには、刺激電圧を下げて股関節と膝関節の伸展を弱くすることが必要であり、それは筋疲労の軽減を可能にするが、同時に、外力や筋疲労などに対する姿勢変化を大きくしてしまうという問題点も作り出すことが予想された。また関節角度センサとしての光ゴニオメータには、実験中に装着位置がずれてしまうという問題があった。足底圧計測の結果は、刺激変動に対する応答よりも上肢が発生する力の変動による応答のほうが極めて大きかった。このことから、上肢の補助がある立位保持におけるフィードバック制御の困難さを改めて確認することとなった。衣服の上から関節を挟んだ2箇所にもベルトを巻き、それに角度センサの両端を固定する方法をとったが、センサ両端の回転を許しながら長軸方向には移動しないような装着方法と、ベルトを強く締めずに移動を低減する方法の考案が必要であると考えられた。上肢の発生する力とFESが作り出す関節トルクは共通の制御目標を実現する方向に作用するという仮定を置くのが現実的と思われるが、その場合には足底圧の値から上肢が出している力を近似的に推定できる可能性がある。その推定方法についてもさらに検討が必要である。

足関節角度のFES帰還制御

下肢完全対麻痺患者1名に対して実験を行った。目標は、帰還制御による起立・立位保持・歩行の再建に関する制御方式を確定すること、および、姿勢と足底圧を計測データから、帰還制御に必要な情報が十分に得られるかどうかを確認することであった。電極32チャンネルを埋め込んでいる下肢完全対麻痺患者1名で、左右の下肢の大殿筋、大腿四頭筋、内側広筋、外側広筋、総腓骨神経、脛骨神経を電気刺激し、起立と立位保持の動作の補助を行なった。

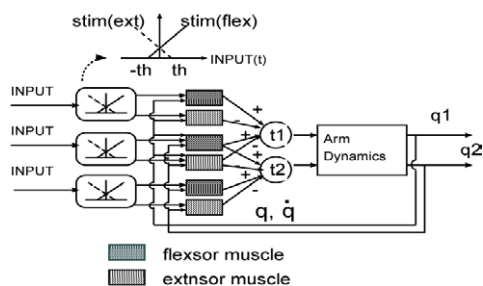
患者は平行棒内で動作を行ない両手で姿勢の維持を自由に行なった。刺激中、姿勢計測には光ゴニオメータ4セットを用いて膝関節伸展/屈曲、足関節背屈/底屈を計測し、足底圧については、足と靴底の間に歪みゲージ型圧力センサ群を装着して計測した。帰還制御実験は、足関節角度についての局所的なものとし、関節角度の目標値からのずれの符号と大きさに応じて足関節の屈曲と伸展に関する刺激量を増減する機械的インピーダンス制御を行なった。結果として、患者が椅子に座った状態で足関節を単独に帰還制御した時に

ほぼ期待した角度制御結果が得られたが、関節角度センサ（光ゴニオメータ）の光路がねじれるような運動が生じると、正帰還制御になる場合もあった。F E Sと上肢の補助による立位状態で足関節角度制御を行った時には、患者から「上体が少し楽かも知れない」との報告があったが、効果の定量的な判定が困難であるという問題が残った。被験者の上肢の発生する力が上体と下肢の姿勢を大きく左右するため、帰還制御の効果を定量的に評価する方法に問題が残されている。立位保持や歩行において、同じ姿勢変化の軌道を実現する際の帰還制御の有無に応じて、上肢の出した力がどのように変化したかを計測して比較するなどの方法が考えられるが、再現性の点で課題が残ると思われる。

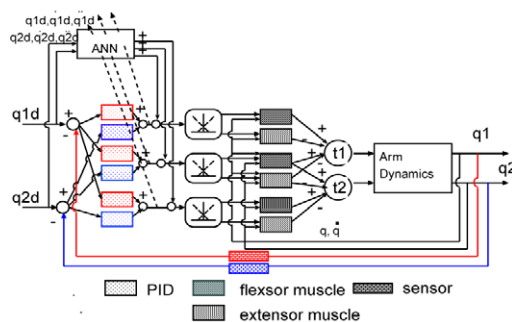
上肢モデルによる開ループ制御と閉ループ制御の比較検討

上肢の水平面内2関節6筋モデルを対象として、遺伝的アルゴリズムなどの最適化法で刺激時系列を決定する場合と、角度センサを用いた帰還制御を行なう場合について、モデル特性やセンサ特性に誤差が生じた場合の制御誤差の評価を行なった。その結果、この制御対象に関しては必ずしも帰還制御が有利ではなく、モデル誤差を考慮に入れて刺激時系列を最適化した前向き制御のほうが、制御誤差を小さく押えられる場合があることが明らかになった。この結果は、下肢の制御においても帰還制御だけに頼るのではなく、前向き制御を最適化するほうが患者の日常的なF E S使用のために有利であることを示している。

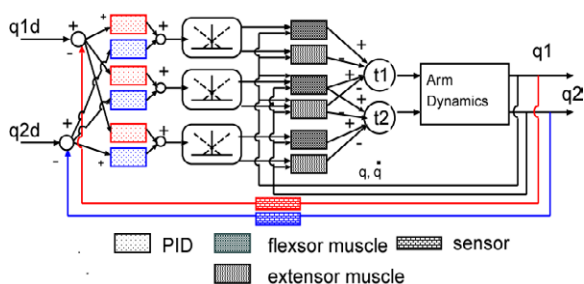
フィードフォワード(F F)制御



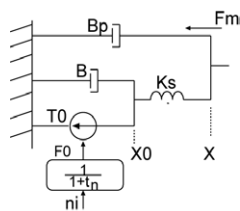
フィードバック誤差学習 (F E L)



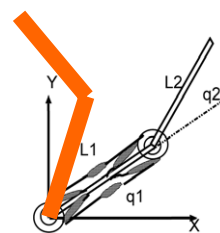
フィードバック(F B)制御



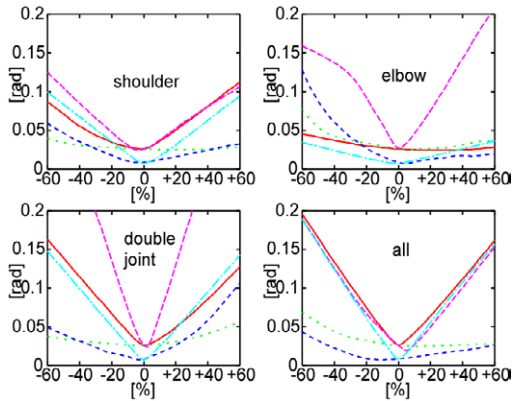
筋モデル



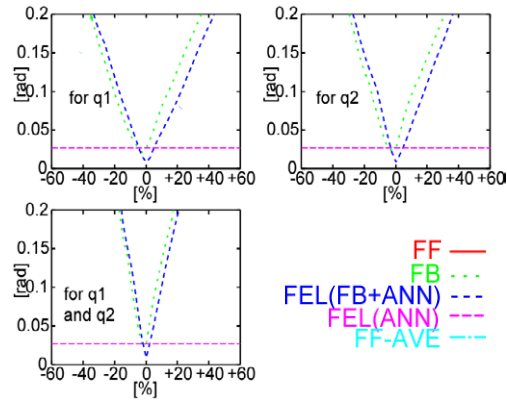
制御対象



モデル化誤差の影響



センサ誤差の影響 (深刻)



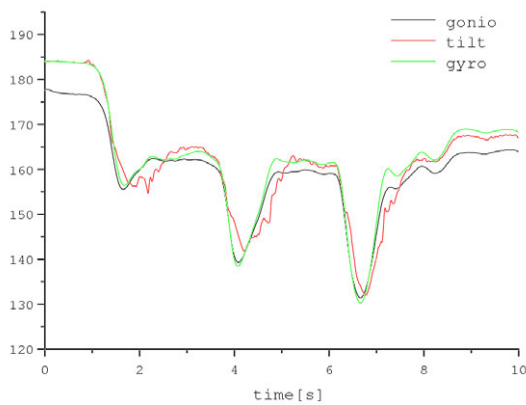
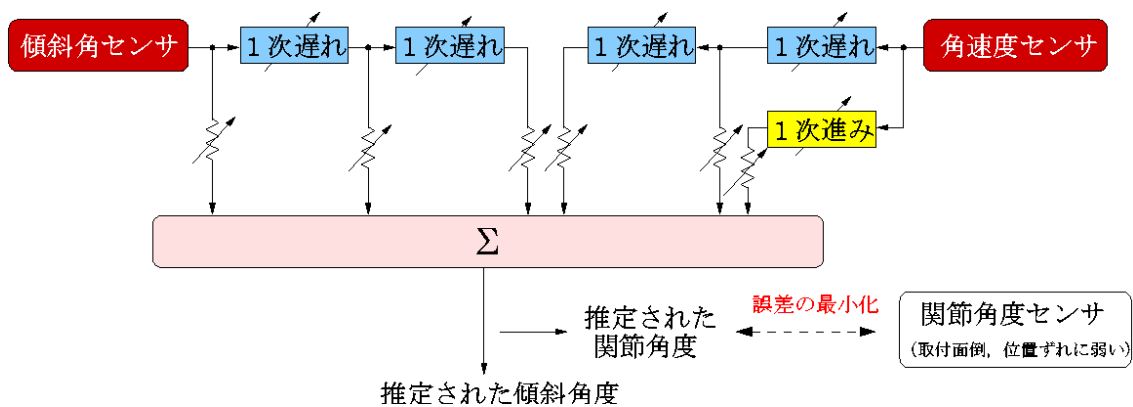
文献：

佐藤、二見、星宮： 機能的電気刺激の制御方式に関する検討 制御対象とセンサに時変性がある場合について、電子情報通信学会技術研究報告 MBE2002-145 (2003-03)

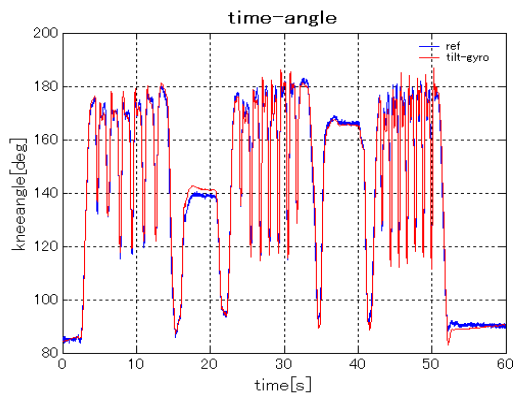
姿勢計測用傾斜角度センサシステムの開発

起立・歩行のフィードバック F E S 制御では、関節角度などを身体装着型センサで計測することが不可欠である。ゴニオメータを使った関節角度計測には、患者の日常において装着が容易ではない、使用中に位置ずれが生じて誤差が増大するなどの問題があった。この問題は腿や脛などに装着する傾斜角度センサを用いることでほぼ解決できるが、通常の傾斜角度センサは応答が遅く、センサの平行移動方向の速度や加速度に感度を持っており、足が接地する時の衝撃などの際の大きな誤差の原因になっていた。一方、角速度センサ(ジャイロ)の出力を積分して傾斜角度を求める方法の場合、誤差が蓄積していくために正確な値への定期的なリセットが必要であった。また磁気を用いた方式には、近くに金属物を置けない、サンプリング周期を高くできないなどの問題があった。

これらの問題を解決して実用的な姿勢計測を可能にするために、我々はマイクロマシーニング技術で作製された比較的遅れの小さい市販の傾斜角度センサと、市販の角速度センサ(ジャイロ)を用い、それぞれの出力信号とそれらに1次遅れや1次進みの伝達関数を数回かけた信号の線形和で傾斜角度を推定する方式を開発した。線形和の結合荷重は、推定された傾斜角度から計算される関節角度と、別途ゴニオメータで計測された関節角度の間の2乗誤差を最小化するように、最適化アルゴリズム(シンプレックス法)を用いて決定した。その結果、健常人が速く歩行した時のデータを使って決定した結合荷重パラメータを用いて、同人が普通の速さで歩行した時の関節角度の時系列を推定したところ、誤差の実効値は1.84度程度となり、実用上十分な精度が得られることが分かった。この方法では抵抗とコンデンサと演算増幅器だけで作れる伝達要素を使っているため、電子回路化が容易であり、回路とセンサをタバコの箱程度の大きさにパッケージングできる。



単一センサでの膝関節角度計測結果



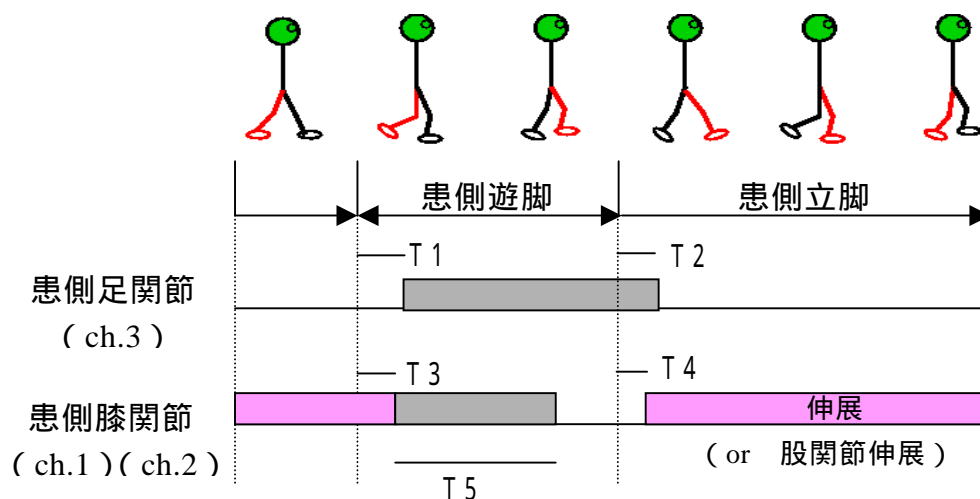
提案方式による膝関節角度計測結果

不全片麻痺患者のFES歩行制御方式の開発

足底圧センサによる踵接地情報を使った“Rule-Base”制御により、片麻痺歩行のFES制御が行われてきたが、多くのパラメータを患者が自分の意志で調節することが困難であるという問題があった。この問題を軽減することを目的として、我々は調整すべきパラメータを各チャンネルについての一定刺激振幅、刺激開始時刻、刺激継続時間だけに絞って調整を単純化し、それらを医師が調節することを容易にする方法を試みた。患者にこの方法を適用して歩行制御を行ったところ、簡単なパラメータ調整のあとで歩幅と歩行速度の改善がみられ、患者による評価も高かった。表面電極でFES制御した運動は、患側の足関節屈曲、膝関節屈曲、股関節伸展の3つである。

次に、調整すべきパラメータを少しずつランダムに変更して患者が制御の善し悪しをスイッチで答えるという探索アルゴリズムを適用して学習型の歩行制御を行った。その結果、患者のスイッチ押し操作には信頼性（再現性）が乏しく、またパラメータ変更に対する相

対評価と現パラメータによる制御への絶対評価のどちらで答えるかがはっきりしないという問題があった。また、探索を開始する初期パラメータセットによっては、偽の最適状態（局所的最適状態）に収束してしまい、望ましい制御に到達しない場合が多いという結果が得られ、提案する探索方式の限界が確認された。

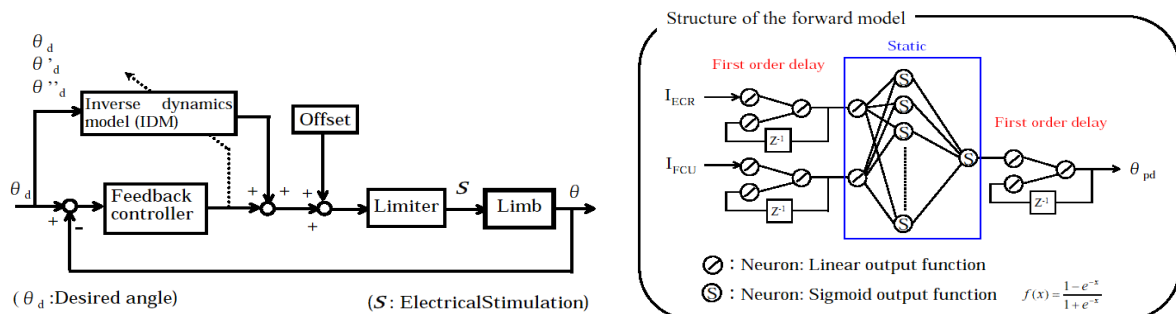


フィードバック誤差学習法による制御の遅れの改善

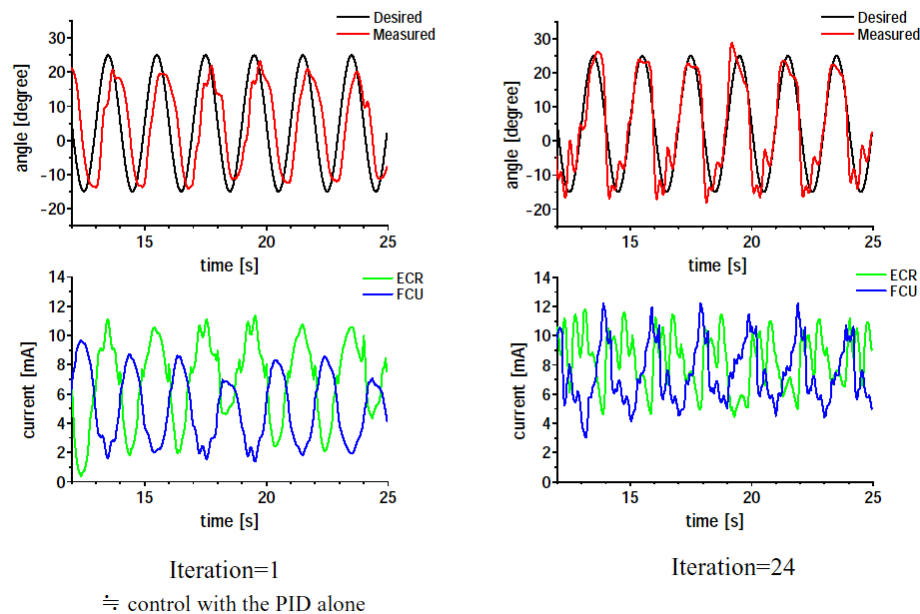
これまでに多くの FES 制御器が提案され、実験が行われてきた。それらは大きく開ループ型、閉ループ型、両者を組み合わせたハイブリッド型、並びに Rule-Based 制御に分類できる。このうち閉ループ型は制御の精度が良く、制御対象の変動にも対応可能であるというメリットがある。しかし、速い目標軌道に対しては筋・骨格系の応答の遅れにより遅延が大きくなり、誤差が増加する傾向があった。

我々は、この問題を解決するために、フィードバック誤差学習法を用いた FES 制御器について検討した。制御システムは、前向きの制御器 (IDM) とフィードバック制御器を併用

したハイブリッド制御器からなる。両者の出力の和を制御出力とするだけでなく、フィードバック制御器の出力を誤差信号として前向き制御器をリアルタイムに学習させていく。前向きの制御器として4層ニューラルネットワーク、フィードバック制御器としてPID制御器を用いたFES制御システムを構築し、手関節の掌背屈方向1自由度往復運動を2筋(ECRL/ECRB, FCU)刺激により制御するシミュレーション実験、並びに健常被験者を用いた刺激実験を行った。その結果、現実的な繰り返し回数で前向き制御器が学習でき、周期2sの速い目標軌道に対して遅れ量の少ない良好な制御結果が得られることを確認した。シミュレーションによりあらかじめ学習した順モデルとIDMを用いることが学習回数の低減に有効であった。



Experimental Results (Stimulation)



文献：

K.Kurosawa、 R.Futami、 T.Watanabe and N.Hoshimiya: "Feedback Error Learning for Controlling 1-DOF Joint Angle: Model Simulation and Experiment"、 Proceedings of IFESS2003、 pp.65-68 (2003)