

## 博士学位論文概要

# ロボットスーツ HAL による脚のハイブリッドインピーダンス調整と 関節モーメントの適応的推定に関する研究

システム情報工学研究科

知能機能システム専攻 5 年

李秀雄

### 1. はじめに

重量物を扱う労働者の作業や筋力が弱った高齢者の動作等，人間のある運動に対する物理的な「アシスト」は社会の至る所で必要とされており，ロボット工学の分野ではこのアシストを目的とするシステムが様々な形で研究・開発されている．その中でも装着型のパワーアシストシステムは，ハードウェアのサイズ，汎用性，モーメント伝達時の感覚性等を考慮すると，人間の動作を支援する上で望ましい形態を持っており，今後，労働集約的な産業や医療・福祉分野等で大いに活躍すると期待される．特に労働者が作業現場で重量物を運搬する場合や筋力の弱った高齢者が生活空間で移動する場合を考慮すると，下肢用の装着型パワーアシストシステムの需要は高いと考えられる．そこで本研究室ではこれまでに下肢の運動機能の支援を目的とする外骨格型ロボットスーツ HAL (Hybrid Assistive Limb) の研究・開発を行ってきた．

HAL により装着者の下肢をアシストする上で考慮すべき点に，先ず外骨格系を含んだ脚の動力学的特性による影響の改善が挙げられる．特に歩行や階段昇降の遊脚運動等，床面からの拘束を受けない運動（脚の無拘束運動と定義する）の場合，装着者に対するアシストアシストの有無に関わらず，外骨格の慣性や摩擦等が脚の運動に影響を与える．これらの問題を解決するには，機械インピーダンスを適切に補償し無拘束運動における外骨格の動力学的な影響を最小限にする必要がある．また老化や筋疾患により筋力が極度に弱った方は，自身の脚さえ上げる事が困難であり，動作をアシストしても脚の慣性力を制御しきれない可能性がある．従って，外骨格のインピーダンスだけでなく装着者の脚固有のインピーダンスも調整する事が出来れば，高齢者や筋疾患患者に対しても HAL によって効果的な動作支援が可能であると考えられる．

HAL により下肢の動作をアシストする上で考慮すべきもう一つの点に効率的な動作意思の伝達が挙げられる．HAL の制御では指令信号として表面筋電位を利用しており，装着者の意思に従った予測的パワーアシストが可能である．しかし装着者個人の体型，筋力等によって関節モーメントのパターンは異なり，皮膚の状態や計測箇所によって表面筋電位の振幅や周波数も異なるので装着者の表面筋電位から HAL のアシストモーメントを一意的に決定することは困難である．従って装着者から計測した表面筋電位を用いてアシストを行

う為には、アシストの基準となる装着者の関節モーメントを、様々な条件にも適応させて一意的に推定する手法が必要である。

そこで本研究ではロボットスーツ HAL により、必要に応じて外骨格を含む脚の仮想インピーダンス（本研究ではハイブリッドインピーダンスと定義する）を調整する手法と関節回りの表面筋電位と運動情報から適応的に関節モーメント推定する手法を提案し、更に複数の被験者に対する実験によってその有効性を検証する事を目的とする。

## 2. HAL (Hybrid Assistive Limb)-3 のハードウェア構成

本研究で行われる実験には、下肢運動機能補助用ロボットスーツ HAL (Hybrid Assistive Limb)-3 を用いた。センサ系は、筋活動を計測する為の表面筋電位センサ、各関節の動作角度計測用のポテンショメータ、および外骨格と装着者間の相互作用力を計測する為の力センサ等から構成されている。センサから計測されたデータは計測・制御用小型コンピュータに取り込まれ処理される。HAL-3 はセンサ系、コントローラ、および電源等、動作のアシストに必要なハードウェアを全てウェアラブル化することで、外部の電源、計測、駆動装置に依存しないスタンドアローンオペレーションを実現している。外骨格には下肢の輪郭に合わせて製作した超々ジュラルミン製フレームと装着者の大腿と下腿部を支持・固定する為の合成樹脂モールドを採用することによって軽量化を図った。この外骨格フレームは床面に接触できる構造になっており、着床時にはハードウェアの重量による負荷を装着者に掛けず、地面に回避させることが出来る。アクチュエータは外骨格両腰-膝関節軸中心を基準に取り付けられており、DC サーボモータとギアを採用している。アクチュエータはバックドライブ可能で、電源がオフになっている状態でも装着者自らが各関節を運動させることが可能である。またアクチュエータには人の関節可動域を参考に設けた機械的リミッタにより、過大なモーメントが発生した場合でも装着者の関節を保護できる構造になっている。

## 3. 外骨格系と筋骨格系を含めた脚のモデリングおよび動力学パラメータの同定

### 3.1 外骨格と筋骨格を含めた脚のモデリング

外骨格系の動力的な補償や装着者の脚固有のインピーダンスを調整する為には、先ず HAL と装着者の脚をモデリングする必要がある。そこで、それぞれ違った動力学特性を有する HAL の外骨格系と装着者の下肢筋骨格系を一つにまとめ、矢状平面上の 2 リンクモデルで表した。この時、腰関節に関しては鉛直方向を、膝関節に関しては伸展状態を  $0[\text{rad}]$  とした。

### 3.2 外骨格と筋骨格を含めた脚の動力学パラメータの同定

次に外骨格系と筋骨格系を含んだ脚のモデルから慣性パラメータおよび摩擦パラメータ等の動力学パラメータを逐次最小二乗法により同定した。同定動作は、同定演算の精度や伝達系の機械共振を考慮し決定した周波数 0.2, 0.5, 1.0[Hz] の合成正弦波角度パターンに

従い、HAL のアクチュエータによる PD 制御で行った。また同定動作は、腰・膝関節それぞれ屈曲方向に  $0 \sim 0.5[\text{rad}]$  の範囲で行った。同定演算に使用する運動データにはポテンショメータから得られた腰・膝の関節角度と逐次最小自乗法により推定された角速度、角加速度および電流値から算出されたアクチュエータのトルクを用いた。実験を複数回行い、パラメータ同定の結果は平均値によって決定した。同様な条件と手順により HAL の外骨格だけの動力学パラメータ同定実験も行なった。

実験の結果、平均値に関しては予め脚の予想質量や形状に基づき算出したパラメータと近似した値を同定する事が出来た。また摩擦パラメータに比べ慣性パラメータでは個人差が比較的大きく表れた。

#### 4. 下肢のハイブリッドインピーダンス調整

##### 4.1 外骨格系のインピーダンス補償

下肢運動機能補助用 HAL の場合、歩行動作での支持脚運動等、床面から拘束を受ける運動（脚の拘束運動と定義する）では、床面と HAL-装着者の脚から構成されるリンクは閉じており、比較的安定な状態にある。また、この時アクチュエータ周りの摩擦は装着者の姿勢を維持する方向に働いており、ハードウェアの重量は外骨格の足首部を通じて床面に回避させているため装着者はその負担をほぼ受けない。しかし、歩行や階段昇降の遊脚運動等、床面からの拘束を受けない脚の無拘束運動の場合、脚によるリンクは開いた状態で不安定な状態にあり、かつ装着者に対してアシストが働いている状況でも外骨格の慣性や摩擦等が脚の運動に影響を与える。これらの問題を解決するには外骨格のインピーダンスを適切に補償し、無拘束運動における影響を最小限にする必要がある。

本節では前章で求められた外骨格系の動力学パラメータ同定結果を基に、無拘束運動での外骨格系のインピーダンス補償実験を行なった。この実験は外骨格のインピーダンス補償と無拘束運動における装着者の運動負荷との関係を示し、装着者の運動負荷を最小にするインピーダンスの調整指標の設定を目的として行なわれた。試行中には装着者に歩行の遊脚運動を  $1[\text{Hz}]$  周期で行う事を指示し、試行後、運動負荷の評価には外骨格に設けられた力センサおよび装着者の主観的な意見を用いた。力センサによる評価では、計測されたデータが装着者と外骨格間の相互作用力を示している為、その絶対値が小さいほど外骨格インピーダンスの影響が少ないと判断した。主観的な意見による評価には心理的な特性を正負の数値で表す SD(Semantic Difference)法を用い、外骨格が脚の運動に対して軽いか重いか（軽さと定義する）と意思通りに脚の運動が行われるか（操作性と定義する）の 2 項目に分けて判断した。膝関節回りの運動と腰と膝関節回りの運動に分け実験を行なった。

実験の結果から、無拘束運動における外骨格の動力学補償する為のインピーダンス設定基準を、慣性モーメントとクーロン摩擦は全補償、重力モーメントは無補償、粘性摩擦に関しては適切に補償する事と決定した。装着者の主観では、外骨格系の粘性摩擦補償レベルが増加すると共に軽さは軽く、操作性は悪く感じられた。

## 4.2 外骨格系 - 筋骨格系のハイブリッドインピーダンス調整

次に前章で求められた外骨格系と筋骨格系を含んだ動力学パラメータを用いて、仮想的に装着者の脚固有のインピーダンスを調整する実験を行なった。本研究ではこの調整の対象となる人間 - 機械系のインピーダンスをハイブリッドインピーダンスと呼ぶ。ハイブリッドインピーダンスを調整する事で、下肢関節周りの粘弾性を自由に加減する事が出来るほか、装着者の脚慣性パラメータ（慣性モーメント、重力モーメント）を仮想的に調整する事が可能である。本節ではアシストに有効であると考えられる慣性モーメントに着目し、ハイブリッドインピーダンスと装着者の運動負荷との関係を示す事によってその有効性を確認した。実験評価指標として、前節の力センサデータと装着者の主観的な意見の他に、ハイブリッド慣性モーメント調整が筋の活性度に及ぼす影響を判断する尺度として表面筋電位を追加した。

実験の結果、ハイブリッド慣性モーメントの補償レベルが増加するに従って表面筋電位の値は減少した。装着者の主観では、ハイブリッド慣性モーメント補償レベルが増加すると共に軽さは軽く、操作性の改善も確認できた。

## 5. 関節モーメントの適応的推定

### 5.1 表面筋電位を用いた HAL のパワーアシスト制御

従来のパワーアシストシステムでは、インターフェースとしてストレインゲージやロードセル等、加えられた力を電気信号に変換するセンサを採用していたが、この場合、構成された人間-機械系間の信号伝達に遅れが生じ、動的な動作においてはパワーアシストシステム自体が負荷となる可能性が大きく、また安定性など制御系の性能を劣化させる要因にもなりかねない。そこで HAL の制御では指令信号として表面筋電位を利用した。表面筋電位は筋収縮直前に発生する神経伝達信号であり、その大きさは筋張力と高い相関があるため、人間 - 機械系間の信号伝達遅れを解決する事が出来、HAL は装着者の意思に従って予測的にパワーアシストする事が可能である。

### 5.2 Artificial Neural Network に基づく筋骨格系の非線形モデル

等尺性収縮の場合、表面筋電位は関節モーメントとほぼ比例関係にあるが、伸縮しながら運動が行われる場合には筋骨格系の非線形粘弾性要素の影響が関節モーメントに現れる。また、装着者個人によって関節モーメントパターンは異なり、皮膚の状態等によって表面筋電位の振幅や周波数も異なる。従って装着者から計測した表面筋電位を用いてアシストを行うには、アシストの基準となる装着者の関節モーメントを、様々な条件にも適応し一意的に求める必要がある。

そこで本研究では Artificial Neural Network を用いて非線形な筋骨格系を表現し、表面筋電位と動作角度および角速度から関節モーメントを推定した。推定されたモーメントに基づいてアクチュエータを制御する事で筋の粘弾性を考慮した予測的なパワーアシストが可能であると考えられる。非線形筋骨格モデルは入力層、中間層、出力層の 3 層から構成

される階層型 **Artificial Neural Network** モデルを用い学習はバックプロパゲーションによって行う。この筋骨格モデルには筋の活性度と粘弾性を考慮し、表面筋電位、角度および角速度データを入力し、出力は推定関節モーメントとした。入力された表面筋電位は伸屈筋共にローパスフィルタで処理された後、それぞれ正規化した信号を減算により正負に変化する一つの信号として入力することで、学習時間を短縮し、学習精度を向上させた。学習係数には適応学習係数を用いて学習時間の短縮を図った。

### 5.3 逆モデルによる教師モーメント

従来の関節モーメント推定法では外部から静的あるいは動的な運動負荷を加えながら運動する事で、学習に必要な教師モーメントを計測する方法を採用していたが、この方法では自らの筋力により脚を上げる事ですら困難な方には適用不可能である。そこで本研究では、動力学パラメータの同定結果に基づいた下肢の逆モデルにより教師モーメントを算出した。この方法により、外部から負荷与えず、簡易な運動から関節モーメントの推定出来る。また、下肢の逆モデルを用いる事で、仮想慣性モーメント等のハイブリッドインピーダンス調整が可能となり、筋力の負担をより軽減させながらも関節モーメントの推定が可能であることを実験により示した。

実験の結果では単関節でのモーメント推定で学習時間約 2.7 秒、学習回数 250 回で、教師モーメントに対する自乗平均誤差を 0.3[Nm]以下に抑える事が出来た。またハイブリッド慣性モーメントの補償により、筋力の負担を軽減しながら同様の推定結果を得た。

### 5.4 Artificial Neural Network Controller を用いたパワーアシスト制御系の構成およびパワーアシスト実験

**Artificial Neural Network** による非線形筋骨格系モデルにより推定された関節モーメントを用いたパワーアシスト実験によりその有効性を確認した。パワーアシスト制御系は主に **Artificial Neural Network** の筋骨格系モデルとハイブリッドインピーダンス補償器によるフィードフォワード制御器により構成した。また、急激な相互作用力の変化やアシストモーメントと装着者の関節モーメントの相違が発生しない様に、力センサによる相互作用モーメントをフィードバックする機構を設けた。

実験結果では、推定された関節モーメントに基づきアクチュエータの出力を決定する事で、脚のアシストが可能である事を確認できた。また、推定関節モーメントに乗算されたゲインを加減する事で、アシストの調整する事が出来た。

## 6. おわりに

本研究では脚のハイブリッドインピーダンス調整を行う為に、まず、外骨格系と筋骨格系の脚を 2 リンクのモデルで表した。次に脚のモデルから動力学パラメータを同定した。求められたパラメータを基に、無拘束運動における外骨格インピーダンスの補償実験を行い、各インピーダンスの調整基準を決定した。また、外骨格だけでなく装着者の脚固有のインピーダンスを含むハイブリッドインピーダンスを調整する実験を行ない、脚の慣性モ

ーメントを仮想的に調整する事で、脚の無拘束運動における筋力の負担を軽減する事が確認できた。

また、表面筋電位と運動情報から関節モーメントを適応的に推定する為に、装着者の筋骨格系を **Artificial Neural Network** による非線形モデルで表した。次に同定された脚の動力学パラメータに基づき学習に必要な教師関節モーメントを算出する事で、より簡易な運動で関節モーメントを推定する事が出来た。この推定された関節モーメントに基づき、脚のパワーアシスト制御に関する実験を行った。実験では推定された関節モーメントに乗算されたゲインを加減する事で、アシストの調整が可能である事が確認できた。

これらの結果から外骨格を含んだ脚のハイブリッドインピーダンスを適切に調整する手法と関節回りの表面筋電位と運動情報から適応的にモーメントを推定する手法の有効性を検証することが出来た。