

学 位 論 文 題 名

操作性向上のための上腕筋骨格モデルを用いた
パワーアシストバルブの制御

(A Control of Power Assist Valve Based On Musculoskeletal Models of
Upper Arm For Improving Its Maneuverability)

学位論文内容の要旨

近年、筋特性および筋骨格モデルを取り入れたロボット研究がいくつもなされている。それらの研究は操作性解析や人間の特性を調べるためのものが主である。筋収縮の数値モデルや、人間の手先速度に関するモデルは過去に研究されて来たが、それらは積極的に人間機械系へと応用されてはこなかった。しかしながら近年になり二つの関節に跨り機能する二関節筋への注目が高まってきている。なぜならば、二関節筋によって四肢先端の安定的かつ平滑な運動が実現できることが明らかになったからである。熊本らは二関節筋を含む筋骨格モデルを提唱し、そのモデルにより筋特性を考慮した四肢先端の出力特性を明らかにした。人間の四肢先端やロボットのエンドエフェクタの出力特性は性能評価等を目的として研究されてきたが、従来の研究では四肢先端の出力特性に筋特性が考慮されておらず、ロボットマニピュレータと同じ扱いがされていた。しかし、筋特性を考慮したことで出力特性にはロボットと人間で大きな差があることが明らかになった。

これらに対し我々は人間機械協調系として人間の筋収縮特性および筋骨格特性を制御則の中に組み込む事を目的としている。これらの特性を人間機械系に盛り込むことで、より人間の動作特性に適したシステムを構築することが出来る。二関節筋モデルを元に考えると、人間が対象物を操作する際の筋負担に関する問題が浮き彫りになる。ある対象物に人間が上腕で一定の力を加えるとした場合、その上腕姿勢に応じて三対六筋の負担が変化する。これは姿勢によって大きな筋負担を強いられることを意味している。

従来の一般的なパワーアシストとは、機械と人間との接点に発生する力を増力するものであったが人間の姿勢を考慮していないことで、アルゴリズムの中で想定した負担軽減率が得られていないと考えられる。我々はこの問題点に注目し、姿勢によらず手先力に対する筋負担を一定にする手法、姿勢考慮補償を提案し、一例として消防車用放水バルブへの応用を行った。

我々は生物の筋が運動開始時に瞬発的に力を発揮する際の特性から最適な固有角周波数および減衰係数を推定し自動調整する手法を提案し、従来手法と比較し高速なインピーダンスマッチングを実現した。本手法は操作者が操作対象物に力を加える際、そのトルク曲線が筋特性数値モデルで表現されることに着目している。操作者がどれだけ急激にトルクを加えたかをトルク勾配と定義し、その勾配がバルブの開作業にかかる時間と相関があることを明らかにした。これにより初動時のトルクの様子からバルブの開時間を予測する事を可能にし、この開時間に最適なインピーダンスパラメータを調整している。

さらに、人間の手先速度が躍度最小モデルに従うことに着目し、リアルタイムにインピーダンスパラメータを調整する手法を提案した。これは逐次バルブの回転速度を計測し、躍度最小となる軌道とマッチングさせることにより開時間を予測している。

姿勢によらず手先力に対する筋負担を一定にする手法、姿勢考慮補償を提案した。第一に、我々

は上腕筋骨格シミュレータにより操作者の腕の姿勢をリアルタイムに計測した。第二に、手先力が姿勢によってどれだけ低下したかを出力レベルとして定量的に表現した。最後に、最大出力レベルで正規化することによって補償量を決定した。本研究ではパワーアシストシステムを組み込む対象として、放水用バルブを用いるが、これは刻々と変化する上腕の姿勢によっては、バルブレバーに対して力を出しづらい状態になることが考えられる。我々は姿勢に応じて先に述べたトルク勾配が変化することを突き止め、それを定量評価した。腕が伸びるほどバルブを開ける際のスピードが早くなる。これは A.V.Hill の提唱した筋収縮力・速度の関係に基づいている。この関係性からどの程度筋収縮スピードが上腕姿勢によって変化するかのモデルを構築した。パワーアシストでは広く用いられているインピーダンス制御に、姿勢考慮補償を施した場合と施さない場合とで比較実験を行った。

本研究では従来特性の解析が主であった筋肉モデルおよび筋骨格モデルをパワーアシストシステムへ応用させることで、各筋肉の負担まで考慮したことにその新規性がある。人間が対象物を操作する際、その動きに必要な手先力は一意的に求めることが可能であるが、上腕の姿勢に応じて各筋の発揮する力には差が生じてしまう事を明らかにしている。また、筋肉の負担が異なれば手先特性が変化してしまうことも実験的に証明した。これはパワーアシストシステムの増力比を単純に大きくすることでは解決できない。我々は筋の発揮力が上腕姿勢によらず常に一定になるよう姿勢を考慮した補償を行う手法を提案した。

本研究で提案したパワーアシスト手法は単に操作力を軽減するだけではなく、人間の特性に即したアシストを実現して操作性向上を図っているところにその有効性がある。本研究で提案手法の応用対象の一例として使用している消防車用放水バルブは、その開閉作業に伴い上腕姿勢が大きく変化する。その操作性を向上させるには操作力の低減だけでは不十分である。上腕姿勢が大きく変化する動作では手先特性の変化に伴い操作性も変化する。本研究で注目したトルク勾配も操作性を評価する一つの指標であり、それを姿勢によらず一定に出来たことで操作性を保つことに有効であることが証明された。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 田 中 孝 之
副 査 教 授 金 子 俊 一
副 査 教 授 小野里 雅 彦

学 位 論 文 題 名

操作性向上のための上腕筋骨格モデルを用いた パワーアシストバルブの制御

(A Control of Power Assist Valve Based On Musculoskeletal Models of
Upper Arm For Improving Its Maneuverability)

近年、筋特性および筋骨格モデルを取り入れたロボット研究がいくつもなされている。それらの研究は操作性解析や人間の特性を調べるためのものが主である。筋収縮の数値モデルや、人間の手先速度に関するモデルは過去に研究されて来たが、それらは積極的に人間機械系へと応用されてはこなかった。しかしながら近年になり二つの関節に跨り機能する二関節筋への注目が高まってきている。なぜならば、二関節筋によって四肢先端の安定的かつ平滑な運動が実現できることが明らかになったからである。

本研究では従来特性の解析が主であった筋肉モデルおよび筋骨格モデルをパワーアシストシステムへ応用させることで、各筋肉の負担まで考慮したことにその新規性がある。人間が対象物を操作する際、その動きに必要な手先力は一意的に求めることが可能であるが、上腕の姿勢に応じて各筋の発揮する力には差が生じてしまう事を明らかにしている。また、筋肉の負担が異なれば手先特性が変化してしまうことも実験的に証明した。これはパワーアシストシステムの増力比を単純に大きくすることでは解決できない。我々は筋の発揮力が上腕姿勢によらず常に一定になるよう姿勢を考慮した補償を行う手法を提案した。

本研究で提案したパワーアシスト手法は単に操作力を軽減するだけではなく、人間の特性に即したアシストを実現して操作性向上を図っているところにその有効性がある。従来の一般的なパワーアシストとは、機械と人間との接点に発生する力を増力するものであったが人間の姿勢を考慮していないことで、アルゴリズムの中で想定した負担軽減率が得られていないという課題があると考えられる。また従来のパワーアシスト研究における問題点として、あくまで手先力のアシストに留まることがあげられる。人間機械協調系において、人間の骨格シミュレータや筋電位計測装置等を用いなければ、人間からの操作力の印加を力センサ等で計測する以外方法が無い。あくまでその操作力が軽減されたか、操作性が改善されたかが評価対象であった。しかしながら人間を動かしているのは筋肉であり、その筋負担が想定通り軽減されているかどうかは別の話である。確かにパーセント MVC 等を用いて筋負担の軽減が評価されるものも多いが、あくまで評価用の計測が主である。これは機械が人間機械協調系において「人間の手先しか見えていない」と言い換えることが出来ると考えられる。人間にとって使いやすい協調系を目指すのであれば、最低限操作に寄与する人間の部位を見渡せるシステムを構築するべきである。

我々はこの問題点に注目し、これまでの研究をさらに発展させた、姿勢によらず手先力に対する筋

負担を一定にする手法である姿勢考慮補償を提案する。ここでは一例として省力化が求められる消防車用放水バルブへの応用を行った。本研究で提案手法の応用対象の一例として使用している消防車用放水バルブは、その開閉作業に伴い上腕姿勢が大きく変化する。その操作性を向上させるには操作力の低減だけでは不十分である。上腕姿勢が大きく変化する動作では手先特性の変化に伴い操作性も変化する。本研究で注目したトルク勾配も操作性を評価する一つの指標であり、それを姿勢によらず一定に出来たことで操作性を保つことに有効であることが証明された。これにより、人間の筋収縮の特性および筋骨格モデルを導入することがパワーアシストシステムを構築する上で、より人間の動きに即したものにすることを実現できた。

以上を要するに、著者は、筋骨格モデルをパワーアシストに応用し操作性を高めるための新知見を得たものであり、人間機械協調系分野に対しより人間の特性に沿わせる研究の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。