

空気圧人工筋を用いた重量物ハンドリングパワーアシストアーム

Power Assist Arm for Handling Heavy Loads Using Large Pneumatic Muscles

小松 真弓* 岡崎 安直*
Mayumi Komatsu Yasunao Okazaki

空気圧人工筋を用いた重量物ハンドリング用のパワーアシストアームの開発を行った。非線形性の強い空気圧人工筋の数値モデルを構築して適用することにより、安定な制御が可能となった。その結果、軽量柔軟で、人に対して安全な操作性のよいアシストアームが実現した。また、本アシストアームは空気圧人工筋の柔軟性を生かし、人と協調した組み付け作業などにも応用可能である。

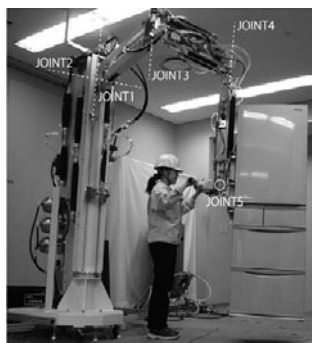
We have developed a new power assist arm for handling heavy loads using pneumatic muscles. We realized an assist arm which is lightweight, flexible, safe and has good manipulability by using pneumatic muscles and developing a method for stably controlling them. Moreover, by taking advantage of the pliability of pneumatic muscles, the new arm is applicable to assembly work etc.

1. 空気圧の力で動作する人工筋を用いた新パワーアシストアーム

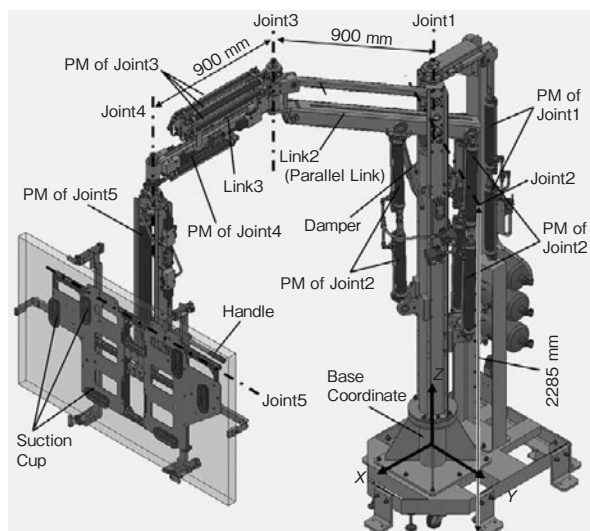
従来、パワーアシストアームには重力方向のみアシストするアシスト機やモータによるアシスト機があったが、それぞれ水平方向の操作性が悪い、重く危険などの課題があった。これら課題を克服する技術として空気圧人工筋を用いたパワーアシストが有望である。空気圧人工筋は柔軟軽量という特徴があるが制御が難しいという課題が有り、実用化されていなかった。

この課題に対しては、空気圧人工筋の特性を表す数値モデルを開発し、そのモデルを使用したトルク制御系を新たに構築することで解決した。その結果安定制御がもたらされ、実用的な作業が可能なパワーアシストアームが実現した[1]。

空気圧人工筋を用いたパワーアシストアーム（第1図、第2図）は柔軟軽量で人に安全であり、また水平方向へ



第1図 パワーアシストアームを用いた搬送例
Fig. 1 Example of conveyance using power assist arm



第2図 空気圧人工筋パワーアシストアーム
Fig. 2 Power assist arm using large pneumatic muscles

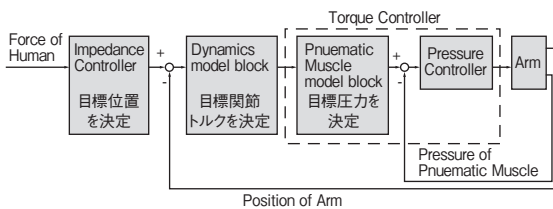
もアシストすることで操作性もよい。また、モータにはない柔軟な構造の特徴を生かし、接触を伴う作業への応用も可能である。

2. 空気圧人工筋パワーアシストアームを実現する制御技術

空気圧人工筋パワーアシストアーム（以下、PMPAAと記す）は、軽量な空気圧人工筋をアクチュエータとして用いることで、モータ方式比1/3の非常に軽量な構造を実現している。軽量であることから運動エネルギーが小さいため、衝突安全性が高く、人協調技術を用いたときの人への安全性が高い。また、機構が軽量であることは同じトルクでもより高い加速度を実現できるので、運動性の良さを実現し制御性を高めることにも貢献でき

* R&D本部 先端技術研究所
Advanced Technology Research Labs., R&D Div.

る。しかし、軽量化しても安定的に制御するためには搬送物体の質量も含めたダイナミクスは無視できない。また、空気圧人工筋は非線形な特性をもち、単純な線形制御では動作させることは難しい。そこで、筆者らは新たに空気圧人工筋のモデルを開発し、人工筋の長さおよび目標関節トルクから人工筋の目標内部圧力を決定することを可能とした。そのモデルを用いることによって、アーム・搬送物体のダイナミクス（運動方程式）を考慮した動的制御を行うためのトルク制御が実現し、PMPAAを安定的に動作させることに成功した。また、後述のインピーダンス制御を用いることで人協調動作も実現した（第3図）。



第3図 制御ブロック図

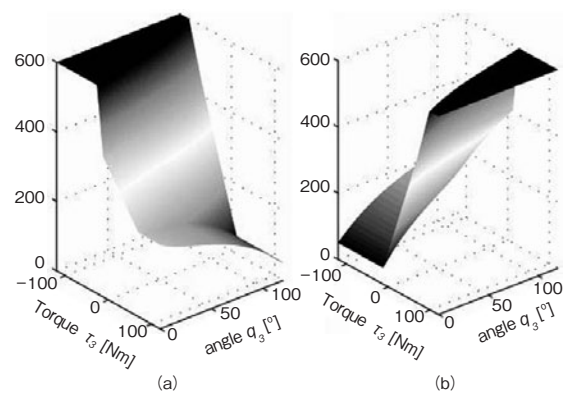
Fig. 3 Block diagram of PMPAA control

2.1 アーム・搬送物体のダイナミクスを考慮した動的制御[2]

アームおよび搬送物体の質量が大きいため、それらのダイナミクスを無視した線形サーボのみでは正確な位置制御は困難である。そこで、搬送物体を含むアームの運動方程式を用いて目標関節トルクを算出することにより制御を行う。その結果、運動に必要な正確なトルクが算出され目標通りのアーム動作の精度が向上する（第3図のDynamics model block）。

2.2 空気圧人工筋の非線形性を考慮したトルク制御

目標関節トルクを実際にアームの関節で実現することでアームの安定かつ正確な動作が実現する。関節に正確なトルクを発生させるには、非線形な特性のアクチュエータである空気圧人工筋を正確に動作させる必要がある。そこで、空気圧人工筋の特性を実験により解析し、3次元曲面により表現するモデルを構築した。このモデルにより目標関節トルクと関節角度から空気圧人工筋に与えるべき内部圧力が算出可能となり、圧力制御系と組み合わせることによりトルク制御が実現する。一例として示す第4図は、第2図のJoint3の空気圧人工筋モデルであり、(a)、(b)は拮抗（きっこう）駆動を行う2本の空気圧人工筋のおのおのの数値モデルである。目標トルク、



第4図 空気圧人工筋拮抗駆動逆モデル

Fig. 4 Inverse pneumatic muscle antagonistic drive model

目標関節角度に対し、人工筋の内部圧力の非線形性が大きく現れている。

本トルク制御系を構築することにより、空気圧人工筋の非線形性が補償され安定制御が実現する（第3図のTorque Controller部）。

2.3 優れた操作性の人協調動作を実現するインピーダンス制御

所望の弾性・慣性・粘性の値を設定することにより、人がかけた力に対して仮想的なバネマスダンパ系のように動作させる制御技術をインピーダンス制御という。この技術を用いることで、ハンドルにかけた力の方向にアームが動作するという人協調の直感的操作を実現でき、さらにパワーアシストの操作感もコントロール可能である。2.2節までで述べた制御技術により安定な制御が実現したことによって空気圧人工筋アームでインピーダンス制御が可能となった。

3. 空気圧人工筋パワーアシストアームのアシスト効果と実現可能な作業

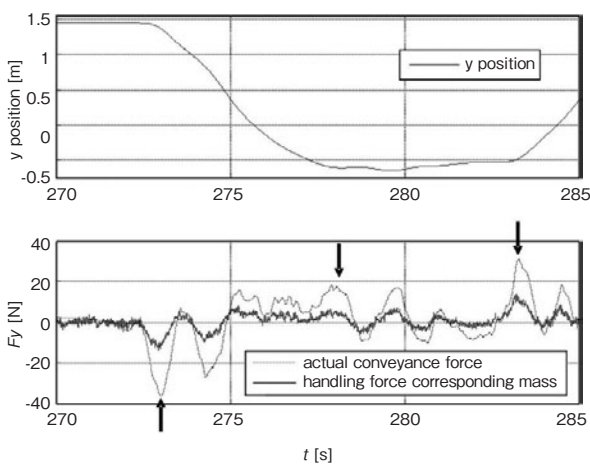
2章で述べた制御技術により安定制御が実現したことで、PMPAAは柔軟・軽量という特徴を生かしたアシストアームとして機能する。アシストアームとしての効果と作業応用例について解説する。

3.1 重量物の質量を1/3に補償する優れた操作性

インピーダンス制御は、設定した慣性や粘性を模擬した動作を実現するために目標軌道を生成する。搬送物体の慣性よりも小さな慣性を設定し、制御によってアームが目標軌道通りに動作することで、アームの慣性も補償したうえで搬送物体の慣性の影響を減少させるパワーアシストの機能が実現できる。現状、可搬重量60 kgの

PMPAAにおいて、インピーダンス制御の設定慣性15 kg程度までの安定制御が実現されている。この設定において負荷として44 kgのモックアップを把持し、人協調動作で水平搬送する実験にて慣性の減少効果を確認したところ、アームの慣性も補償したうえで搬送物体の慣性があたかも1/3に減少したかのように、1/3の操作力で物体を搬送することが可能であることを確認している（第5図および第1表）。

水平方向へのアシストのない従来のアシスト機では、水平方向の慣性は補償されず、さらにアシスト機本体の慣性も加算されるため、搬送物体の慣性低減効果はない。よって本アシストアームによる水平方向の操作性は大幅に向上したといえる。



第5図 搬送作業中のアーム位置および人の操作力

Fig. 5 Position and force of conveyance

第1表 必要な搬送力と人の操作力の比較

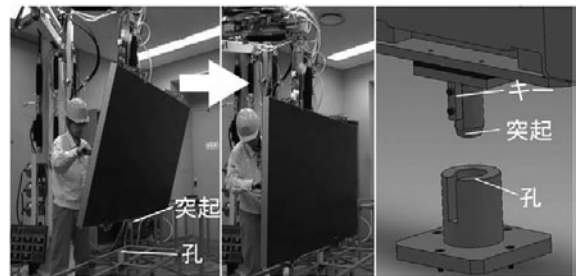
Table 1 Comparison of conveyance force

時間t [s]	273	278	283
本来必要な搬送力 [N]	-36.3	18.5	30.8
慣性分の人の操作力 [N]	-12.0	5.3	11.7

3.2 モータ方式にはない柔らかい機構の効果—重量物の組み付け作業への展開

空気圧人工筋のもつ柔軟性により、アーム自体も柔軟性をもつ。アームと外界環境の接触が発生したときにアームの柔軟性がバネのように働くため、接触部に過大な力が発生せず、ある程度物体同士が沿う効果がある。これにより、安全性が高いことと同時に接触を伴う作業にも適用が可能である。この特徴により、搬送物体の組み付け作業やはめ合い作業を安全に行うことができる。

現在PMPAAを用いて60 kg程度までの重量物の搬送に加え、組み付け作業、例えば第6図に示すキーのついた



第6図 PMPAAを用いた組み付け作業例

Fig. 6 Example of assembly using PMPAA

突起を下部にもつ物体を把持した状態で突起を孔に挿入する作業などが可能である。PMPAAを導入すれば、従来2人～3人の作業者が必要であった作業が作業員1人で可能となり、組み立て工程などにおける作業効率の大幅な向上が実現する。

4. 動向と展望

PMPAAは、柔軟軽量といった特長を生かし、安全に人協調作業を行うことができ、操作性がよく、搬送のみならず、組み付け作業にも応用可能である。今後は工場分野での実用化、さらには医療福祉分野への展開を検討していく。

参考文献

- [1] 小松真弓 他, “大容量空気圧人工筋を用いた重量物ハンドリングパワーアシストアームの開発,” 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会2012予稿集, 1A1-T06, 2012.
- [2] 岡崎安直 他, “空気圧人工筋による人に対して安全な多自由度ロボットアーム技術の開発,” 日本ロボット学会誌, vol.28, no. 3, pp.302-310, 2010.