

球面関節を有する空気圧人工筋ロボットアームの H_{∞} 制御

H_{∞} Control of Pneumatic Artificial Muscle Robot Arm with Spherical Joint

八重樫憲司* , 嵯峨宣彦**

Kenji YAEGASHI* , Norihiko SAGA**

*秋田県立大学大学院 , **秋田県立大学

*Akita Prefectural Univ. , **Akita Prefectural Univ.

キーワード : 球面関節 (Spherical Joint) , 空気圧人工筋 (Pneumatic Artificial Muscle) ,

連絡先 : 〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口 84-4

秋田県立大学 システム科学技術学部 機械知能システム学科 制御工学研究室
嵯峨宣彦 , Tel. : 0184-27-2114 , Fax. : 0184-27-2188 , E-mail : saga@akita-pu.ac.jp

1. はじめに

人と協調作業をし、運動を支援するロボットの必要性が高まっている。例えば、医療機関において介護士の作業を補助し、身体的な負担軽減を目指すロボットや人の作業をパワーアシストして大きな可搬重量を実現するウェアラブルロボットである。

人と共存するロボットに必要な条件は、第一に安全性である。空気圧人工筋は大部分がゴムチューブで構成されており、風船のように空気圧によって膨張し、その体積変化から機械的な運動を得る安全性の高いアクチュエータである。また、既存のアクチュエータの中でも出力/重量比が大きいため、機械システム全体を軽量かつ高出力に構成できる。

また、ロボットアームには人との突発的な衝突に対する安全性が求められる。そこで、アームの関節に球面軸受を利用してコンパクトかつ軽量な多自由度関節を構成し、機械的な柔軟性を活かして人との親和性向上と負担軽減を図る。

本研究では、人工筋と球面軸受を組み込んだロボットアームの有効性と制御性を検討する。球面関節を有する空気圧人工筋ロボットアームに対して H_{∞} 制御系を適用し、制御性の検討を行うことで実用に向けた有効性を示す。

2. 空気圧人工筋の収縮特性

Fig.1 に本研究で扱う空気圧人工筋を示す。人間の動作を補助するウェアラブルデバイスやロボットのアクチュエータの機械的特性は、柔軟で受動的といった生体筋と近いことが望ましい。

そのためには、可能な限りの軽量化、高い力重量比を持つアクチュエータが必要である¹⁾。

我々が開発した空気圧人工筋は、シリコンゴム製の薄膜円筒の軸方向に多数の高強度炭素繊維を内挿したものである^{1,2)}。Fig.1 に示した人工筋は、アルミ製のリングが中央に取り付けられている。図に示すように、このリングは人工筋の膨張が最大となる部分を抑制することで収縮率を向上させる効果がある。本研究における人工筋の特性評価は Fig.2 の装置を用いて行った。



Fig.1 Artificial muscle

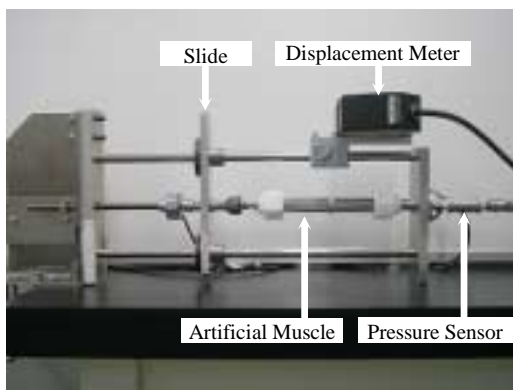


Fig.2 Experimental setup

Table.1 Specifications of an artificial muscle and experimental conditions

人工筋の長さ	100mm
人工筋の外径	13mm
人工筋の内径	9mm
人工筋の質量	42g
内挿された繊維の本数	10本
リング数	1個
サンプリング周期	5msec

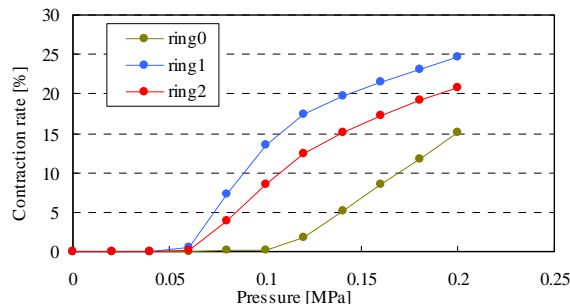


Fig.3 Fundamental characteristics of the muscle

人工筋のリング別の静特性および実験条件を Fig.3, Table.1 に示す。人工筋は低圧力の領域において収縮せず、圧力に対する収縮量の関係が非線形である。今回は、収縮量を大きく見積もれるリング1について考えることとし、使用する駆動圧力範囲を 0.1 MPa から 0.2 MPa 程度として線形化する。そうすることで、およそ 10mm 程度の範囲を安定化する制御系の構成が期待できる。

3. 球面関節アームの構成

3.1 球面関節について

ロボットアームの関節は、直動型や回転型、旋回型など 1 自由度のものが多い。それは、アクチュエータやそれに付随するセンサが 1 自由度であることが多く、それぞれセットにして組み合わせることで多自由度を構成するために重量が増す傾向にある。さらに、自由度を持たない方向への剛性が高いため、想定外の衝突に対する安全性が危惧される。それに対し、球面軸受を関節とすることで構造的にコンパクトであり、人との共存という点で安全性と親和性に優れている。Fig.4 に示す球面軸受は、ヒーハイト社の製品で x, y, z 軸に独立した自由度を持つ 3 自由度関節である。多自由度の関節を使用するので、コンパクトにロボットの関節を構成でき、機構的にも柔軟である。球面関節は、人間の関節で例えると肩関節や股関節と同等の運動をする。

人間の日常生活の運動では肩関節や股関節が大きな屈曲運動をすることは少なく、その先の肘や膝が比較的大きな運動を要求される。したがって、肩関節や股関節に要求される運動は、自由度の大きさを活かして肘や膝が作業しやすい姿勢を実現し、手先の運動をサポートすることである。

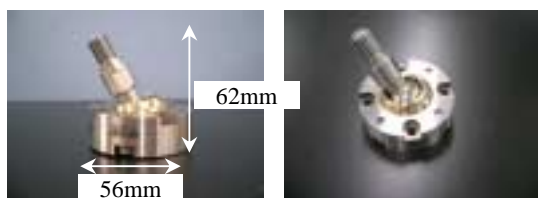


Fig.4 Spherical joint

3.2 アームの構成および実験概要

Fig.5, Fig.6, および Table.2 に球面軸受を関節とするアームの写真と構成仕様を示す。アームのアクチュエータとして、Table.1 に示した人工筋を2つ設置し、それぞれに対抗する形で引張ばねを配置した。また、Fig.6 に示すようにポテンシオメータをz軸まわりに12だけずらして配置した。人工筋に圧力を与えず、かつ無負荷状態の場合、球面関節は拘束されないのでアームは柔軟で外部との衝突に対しても安全である。

Table.2 Specifications of a spherical joint arm

アームの長さ (前腕・上腕)	各 300mm
アームに使用する人工筋の本数	2本
回転原点からの人工筋取付距離	各 100mm
ばね定数	0.98N/mm
アーム全質量	1.25kg
最大屈曲可能角度 (機構的)	90deg



Fig.5 Robot arm with a spherical joint

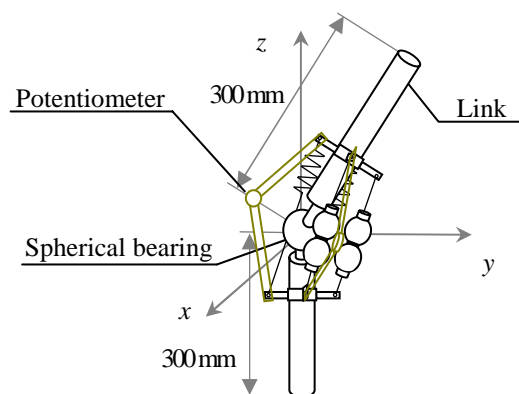


Fig.6 Overview of the robot arm

3.3 アームの屈曲特性

人工筋をアクチュエータとする球面関節アームの屈曲特性を Fig.7 に示す。使用した人工筋の仕様は Table.1-2 に示したものと同一である。人工筋と拮抗させた引張ばねのばね定数は0.98N/mmである。図に示すように、低圧力領域では Fig.3 で示した人工筋の特性を反映して角度出力が得られなかった。また、空気圧人工筋は空気の圧縮性や繰返し特性が影響して厳密なモデル化が困難である。そこで、以下では人工筋と球面関節アームに対して H_{∞} 制御系を適用し、制御性の向上を目指す。

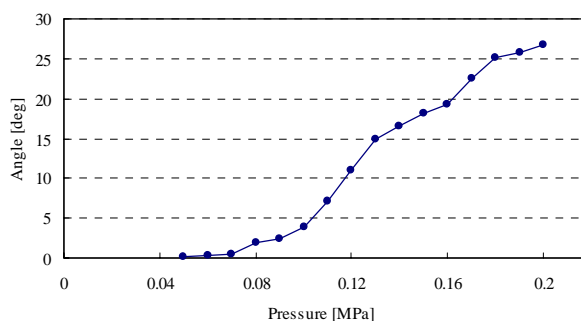


Fig.7 Relationship between pressure and angle characteristics of the robot arm with a spherical joint

4. H_∞ 制御系の適用

4.1 H_∞ 制御

H_∞ 制御は、周波数整形によって対象のもつ共振やモデル化誤差または外乱の影響を抑圧して制御性の改善を図る手法である。本研究では、人工筋と球面関節アームに対して H_∞ 制御系を適用し、両者の制御性能を評価する。また、モデル化誤差にロバストな制御系を構成すべく、混合感度問題に基づいたサーボ系 H_∞ 制御を設計する。

4.2 H_∞ 制御系の設計

人工筋の制御設計は略し、球面関節アームに対する H_∞ 制御系の設計について述べる。アームのモデル化には過渡応答法を用い、2次遅れ系のシステムとする。得られた伝達関数は次式として与えられる。

$$G_{AM} = \frac{227.0274}{s^2 + 8.7742s + 19.2545} \quad (1)$$

また、 G_{AM} を含む一般化プラントを次式に示す。

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、 w は制御系に入力される外部信号、 z は制御量を表す。また、 u および y は制御入力と観測出力である。これらを用いて G に対し、直結フィードバックを形成すると w から z までの閉ループ伝達関数は以下ようになる。

$$z = G_{zw} w \quad (3)$$

$$G_{zw} = G_{11} + G_{12} K (I - G_{22} K)^{-1} G_{21}$$

H_∞ 制御問題は、システムを内部安定化し、かつ、 $\|W G_{zw}\|_\infty < 1$ を満たす補償器を作成することである。本設計では、混合感度問題に基づいた H_∞ 制御系の制御構造について考える。混合感

度問題は、式(4)において s と T に関する恒等式のトレードオフを考えた設計であり、Fig8 の制御構造において感度最小化とロバスト安定化のバランスを決定する問題である。このとき、次式で表されるプラント集合に対して制御器は閉ループ系の安定性を維持できる。

$$\left\| \begin{bmatrix} W_S S \\ W_T T \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1 \quad (4)$$

Fig7 から、0.1-0.2MPa の範囲を線形とみなし、球面関節アームのモデルと設計した重み関数 w についてリカッチ不等式を解くことで以下の H_∞ 制御器を得た。これと同様の方法で人工筋についても制御器を作成した。

$$K = \frac{3.169e7s^3 + 6.243e11s^2 + 5.476e12s + 1.201e13}{s^4 + 4.769e4s^3 + 5.753e8s^2 + 4.742e11s + 4.742e6} \quad (5)$$

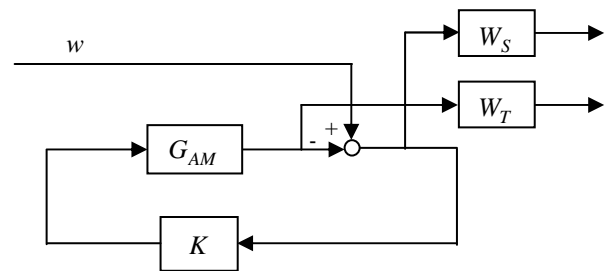


Fig.8 Mixed sensitivity problem

4.3 実験結果と考察

人と接する環境におけるロボットの運動は、緩やかで人に触れても接触力を小さくすることが望まれる。そこで、アームの運動性の評価方法を正弦波追従問題とする。

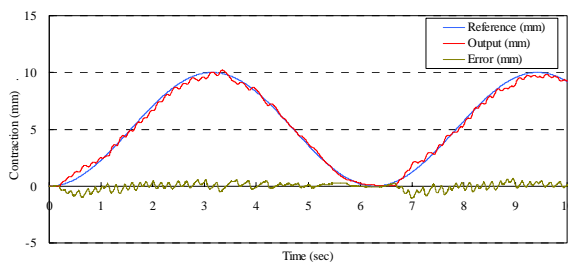
人工筋およびアームに対する正弦波追従制御実験の結果を Fig9 に示す。(a)は人工筋を Fig1 のように水平方向に設置して制御した応答であり、振動的ではあるが目標波形に対して精度よく追従できている。(b)は球面関節アームに取り付けた人工筋に 0.1MPa の予圧をかけ、制御した場合の応答である。(a)、(b)を比較すると、応答の立

ち上がりや波形の変化に対する追従性に関して (a)ほうが優れていることがわかる。(b)は人工筋単体と比べて重量が大きいので、多少の遅れを伴うものの、滑らかで人間と協調作業するロボットの精度としては十分な結果が得られたと考える。このとき、(b)の平均追従誤差は約 0.47degであった。

的に柔軟なので外部との衝突や接触に対して安全であることがわかった。

- ・球面関節アームに適用した H_∞ 制御系の正弦波追従制御実験において平均0.5deg以内の精度を実現できたことから、制御性の高さも確認できた。

(a) Pneumatic artificial muscle



(b) Robot arm with a spherical bearing

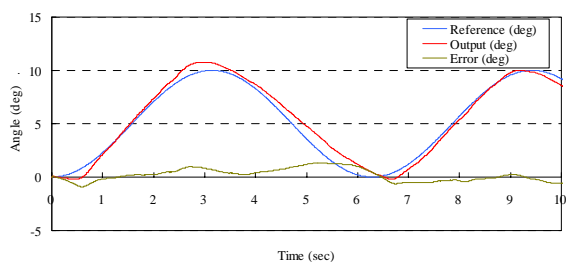


Fig.9 Tracking control of sine wave

5. まとめ

本研究では、球面軸受と空気圧人工筋を用いたロボットアームについて人と共存する環境における制御性、有効性を検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- ・人工筋は、自重が42gであり柔軟かつ衝撃に対して受動的性質を有することから、人間と共存する環境において安全性が高いことがわかった。
- ・本ロボットアームに用いた球面軸受は、コンパクトに多自由度関節を構成でき、構造

参考文献

- 1) T. Nakamura, N. Saga, K. Yaegashi, : Development of a Pneumatic Artificial Muscle based on Biomechanical Characteristics, ICIT Maribor, Slovenia, 2003, pp.729-734.
- 2) K. Yaegashi, T. Nakamura, N. Saga, : Study on Biological Characteristics of Pneumatic Artificial Muscle Reinforced by Fiber in the Axis Direction, SICE System Integration Division Annual Conference, 2003, pp.872-873.