

マッキンベン型人工筋肉を用いた握手提示のための カセンシングに基づくフィードバック制御システムの基礎研究

宮田唯統^{†1} 鈴木敬太^{†1} 鎌田隆杜^{†1} 室山真徳^{†1}

概要：空気圧を利用したマッキンベン型人工筋肉アクチュエータは、これまでに触覚インタフェースにも広く使用されている。本研究では、力強い人工握手を提示するために人工筋肉を用いる。人の手の形状は様々であるため、力センサのセンシング結果を基に空気圧をフィードバック制御するシステムを構築するための基礎的なデータを収集した。

1. はじめに

これまでに様々な触覚インタフェースが提供されており、そのなかでマッキンベン型人工筋肉を用いた触覚インタフェースはその柔軟性と適応性に優れる特性を活かし、ユーザーに自然な触感を提供することが可能である。ここでの適応性とは、空気圧を制御して力を制御できること、様々な形状やサイズのものを作製できること、温度変動や振動への対応などに比較的強いこと、などを意味する。

マッキンベン型の人工筋肉の基本的な情報は文献[1]に記載されており、圧縮空気の特性と摩擦に起因する非線形性の動作に対応した制御が必要となる。

空気圧を利用した触感提示として、例えば以下のものがある。

文献[2]に記載されているのは、マッキンベン型人工筋肉（以降、人工筋肉と述べる）の空気圧制御による膨張と収縮を利用し、指に引っ張り力を提示する方法である。本技術は固定設置する必要がある、人が移動しながら触感を感じる用途には向かない。

文献[3]では、マイクロフルイディクスの技術を用いて小型の流路を複数個形成し、流路への圧縮空気の充填と排出により、皮膚表面に複雑な触感を提示できるが、力強い触感提示はできない。

文献[4]および[5]では、装着者のスーツに人工筋肉を複数個搭載し、圧縮空気を送り込むことで人工筋肉を膨張と収縮を起こし、胴体を圧迫させて触感を提示している。この研究はハグを提示することを目的としている。

本稿では、人工筋肉を利用した握手の提示に関する研究を行う。ハグと同様に握手も社交における相手への敬意や友好の意を示す手段として国際的に広く認知されている。しかし、衛生などの観点から現在は実際の握手が避けられることもある。力強い握手を VR 上で実現することで、これまでの文化的な継続性を保ちつつ、現実に近い心理的な親近感を示すことができる。

本稿の構成は次の通りである。第2章では、提案する握手表示システムを示す。第3章では、実験結果を示し、第

4章でまとめる。

2. 人工筋肉による握手提示システム

人工筋肉を用いた握手提示システムの構成を図1に示す。エアコンプレッサは圧縮空気を生成する。エアコンプレッサは、高圧空気を生成できるが、マニュアル調整により指定の圧力になるように空気を圧縮するため、空気圧の細かな制御には向かない。高速かつ高精度な空気圧制御を電圧制御で行うため、電空レギュレータを用いる。電空レギュレータはあらかじめエアコンプレッサに接続されており、エアコンプレッサからの圧縮空気以下の圧力を出力するように、空気圧制御の入力電圧を基に空気圧を制御する。電空レギュレータから出力される圧縮空気は人工筋肉に接続されており、人工筋肉を手配置したうえで、圧縮空気の充填と排出により握手感を提示する。このとき、手と人工筋肉との間に力センサを配置し、手にかかる力をリアルタイムにセンシングすることで、指定の力になるように圧縮空気圧を制御できる。この制御のため、マイコンに電空レギュレータ制御信号と力センサを接続させる。VR 応用のため、最終的にはこれらは携帯可能なサイズに収めることを予定している。

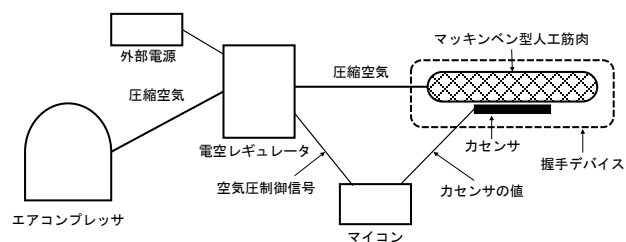


図1 提案するシステムの構成

3. 実験

3.1 握手提示システムの基本要素評価

前述のシステム構成を実現し、評価した。以下に今回利用した装置を示す。なお、人工筋肉は文献[6]を参考に自作

している。

エアコンプレッサは、SK11 社の SR-045 を用いた。電空レギュレータには、SMC 社の ITV1030-211L5 を用いている。力センサには FlexiForce 社のものを利用し、抵抗分圧にて電圧出力している。センサに力が集中するように突起構造をセンサ直上に設置した。これにより、人工筋肉接触時の力を計測しやすいようにしている。マイコンは Espressif 社の ESP32-WROOM-32D を利用した。図 2 には、実験装置の主要部分を示している。

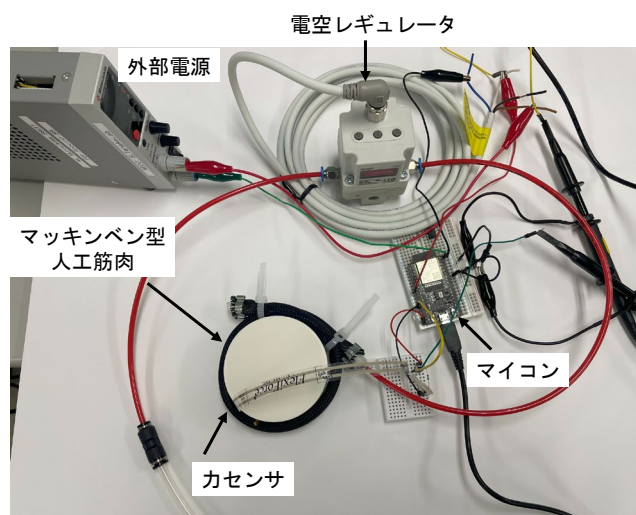


図 2 実験装置の外観

図 3 には、人工筋肉による握手提示の例を示している。実際の応用に際しては、握手グローブ等を作製し、そこに本人工筋肉に加え、力センサ等を設置する予定である。



図 3 人工筋肉による握手提示の例

手への人工筋肉設置については、その個数および設置場所や設置方法などが様々に考えられる。本研究では、図 3 のように、手を包み込むような配置を想定し、図 2 のような 3D プリンタで作製した円柱物（材料は ABS）を用意した。ここでは、個人ごとの手の形状、とくに手の径（円の直径）が異なることを想定し、円柱の直径が 65 mm, 70 mm, 75 mm のものの 3 種類を実験に用いた。

本実験では、電空レギュレータへの制御電圧をスワイプさせた場合と、ステップ状に変化させた場合とで与える圧

力がどのように変化するかを調査した。

本システムで用いた力センサの特性は図 4 のようになる。

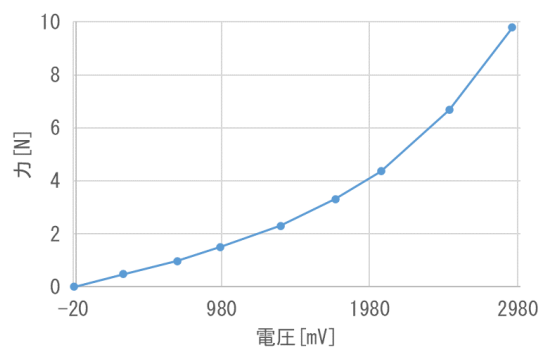
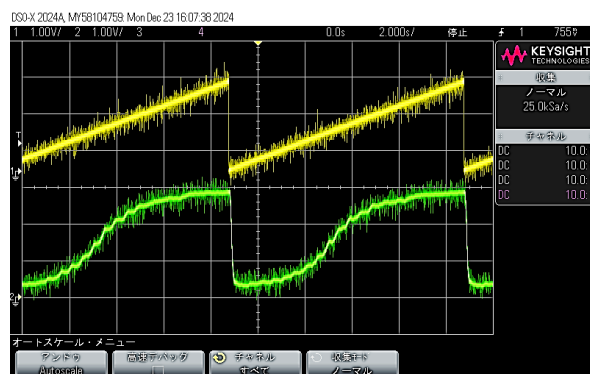
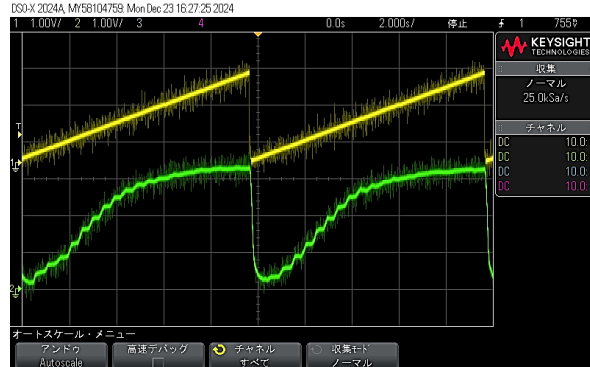


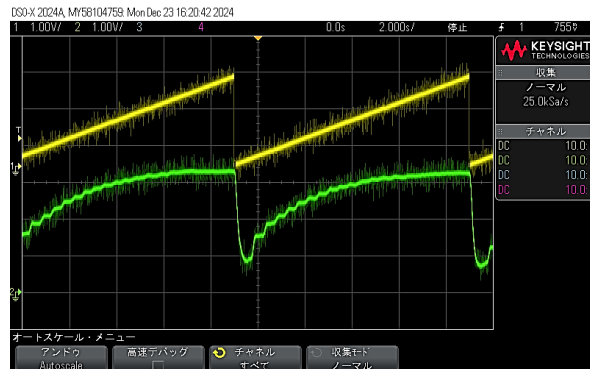
図 4 力センサの出力電圧と力の関係



(a) $\Phi 65\text{mm}$ の円柱への握手提示



(b) $\Phi 70\text{mm}$ の円柱への握手提示



(c) $\Phi 75\text{mm}$ の円柱への握手提示

図 5 各円柱に対しての電空レギュレータへの制御信号スワイプ（黄色の信号）と力センサ出力（緑色の信号）

図 5 には、電空レギュレータへの制御信号（スイープ信号）と、それに伴って人工筋肉が膨張し各円柱に力を印加した結果の力センサ出力（アナログ電圧出力、図 4 に対応）を示す。また、図 5 における力センサの出力を力の値にし、それぞれの円柱物における与える力の最小値および最大値を求め、表 1 にまとめた。

表 1 印加力の比較結果（スイープ）

直径 ϕ [mm]	最小印加力[N]	最大印加力[N]
65	0.26	2.98
70	0.14	3.54
75	0.64	3.66

この結果により、手の径が小さい場合に比べて大きい場合には、最大の印加力が大きくなることがわかる。また、特に人工筋肉の巻きの直径が手の径に近すぎると最初からある程度の力印加が加わってしまうことがわかる。ただし、手の径に対して、人工筋肉の巻きの直径を大きくしすぎると最大印加力が小さくなり、望む力を印加できない可能性がある。様々な手の形状を想定し、人工筋肉の径を調整できる仕組みが必要であることが明らかになった。

次に、ステップ状に電空レギュレータへの制御信号を加えた際の結果を図 6 および表 2 に示す。スイープ時と同様の結果が得られたが、直径 70 mm と 75 mm における差はほとんどなかった。

表 2 印加力の比較結果（ステップ）

直径 ϕ [mm]	最小印加力[N]	最大印加力[N]
65	0.21	6.83
70	-0.27	20.0
75	1.20	19.2

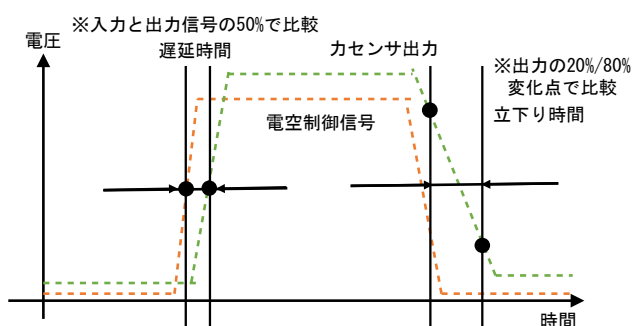
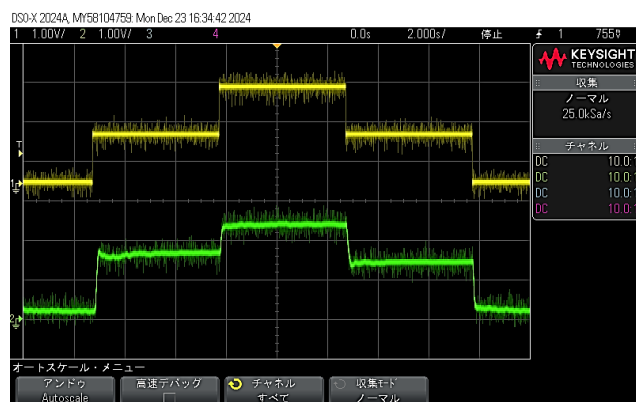


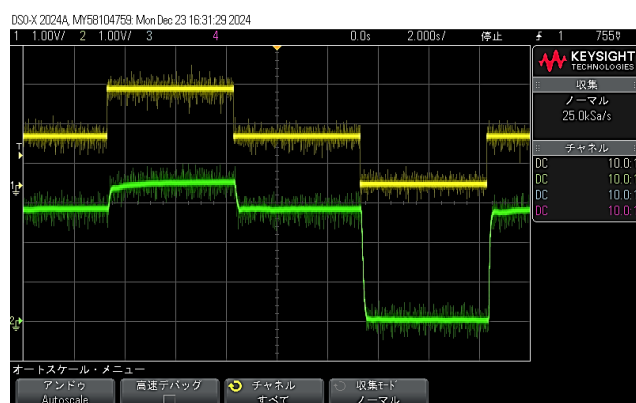
図 7 遅延時間と立上り／立下り時間の定義

表 3 応答速度の比較（ステップ）

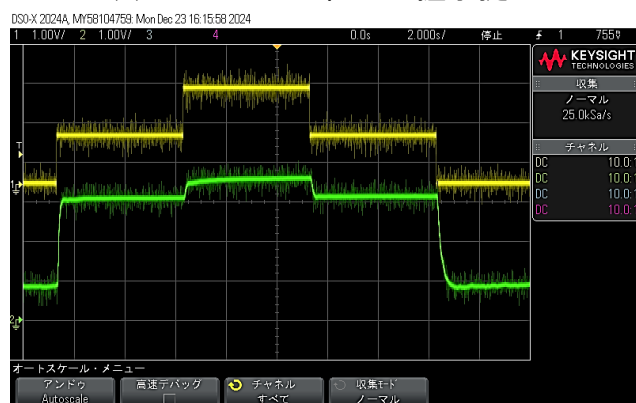
直径 ϕ [mm]	遅延時間[s]	立上り時間[s]	立下り時間[s]
65	0.15	0.080	0.10
70	0.03	0.070	0.10
75	0.11	0.070	0.20



(a) $\Phi 65\text{mm}$ の円柱への握手提示



(b) $\Phi 70\text{mm}$ の円柱への握手提示



(c) $\Phi 75\text{mm}$ の円柱への握手提示

図 6 各円柱に対しての電空レギュレータへの制御信ステップ（黄色の信号）とカセンサ出力（緑色の信号）

ステップの場合には、遅延時間と立上り／立下り時間についても比較した。ここで、図 7 にそれぞれの定義を示す。図の例では立下り時間を説明しているが、立上り時間についても同様に定義できる。なお、本研究では遅延は立上り時の入力と出力においてのみ計測した。結果を表 3 に示す。複数の信号を計測していないので、実際にはばらつきがある点に注意が必要である。今回は、遅延および立下り／立上り時間ともに 0.1～0.2 s 程度に収まっている。応用にもよるが、十分に高速な応答を実現できていると言える。

3.2 カフィードバック制御システムの開発

次に、フィードバック制御のシステムを構築し評価した。力センサの出力により、現在の力印加状況を把握し、目標の力を印加できるように空気圧を制御するシステムである。力センサの出力は電圧としてセンシングし、A/D コンバータを通じてデジタル変換される。また空気圧の制御は電圧により行う。

本稿では、力印加として、約 2 N の力を 2 秒間隔でオン／オフで切り替える触感提示フィードバックシステムを構築した。本フィードバックシステムを実現するため、制御プログラムには次の機能を搭載している。ひとつが時系列の目標力印加信号生成であり、もうひとつが PID 制御によるフィードバック調整である。

目標力印加信号生成については、0 N と 2 N に相当する電圧値である 0 V と 1.2 V (図 4) を 2 秒周期で交互に切り替えている。

PID 制御部について説明する。この部分は、現在の力センサからの電圧と目標電圧の誤差に基づき、空気圧を制御する電圧を調整する箇所である。

まず、力センサからの現在の値 (*SensorVoltage*) を取得し、目標値 (*TargetVoltage*) との差分 (*Error*) を計算する。

$$Error = TargetVoltage - SensorVoltage$$

この値を基に、PID の計算を以下のように行う。

- 比例制御 (Proportional Control) :

比例制御の目的は、現在の誤差に比例した出力を生成し、目標に迅速に近づくことである。適切な比例ゲイン (K_p) に対して、 P 項を計算する。

$$P = K_p \times Error$$

- 積分制御 (Integral Control) :

積分制御は、定常状態の誤差を減少させるのが目的である。適切な積分ゲイン (K_i) に対して、 I 項を計算する。ただし、積分値が過大にならないように -1~1 の間で制限をかける。

$$I = K_i \times \int Error \, dt$$

- 微分制御 (Derivative Control) :

誤差の変化率を計算し、急激な変化を抑制する。適切な微分ゲイン (K_d) に対して、 D 項を計算する。

$$D = K_d \times \frac{d(Error)}{dt}$$

上記のうち、微分値は $\Delta t = 0.01 \, s$ を用いて計算した。

- 出力制御 :

これまで得られた各種項を使用して総出力 *Output* を計算する。ただし、出力値が過剰に変化しないよう、変化分の上限值を設けた。

$$Output = P + I + D$$

実際の電空レギュレータへの制御信号は現在の値に総

出力を加えたものとなる。ここで、過剰な力印加と電空レギュレータへの負荷低減のため、制限を加えている。制御は 10 ms 周期で行うように設定した。

前述における各パラメータは実験を繰り返し行いながら調整した。実験結果を図 8,9 に示す。図 8 では $\phi 65\text{mm}$ の円柱に力センサを設置し、その周囲を人工筋肉で囲っている場合 (図 2) の結果である。図 9 は、円柱の代わりに著者の一人の手に力センサと人工筋肉を巻きつけた場合の結果である (図 3)。



図 8 $\phi 65\text{mm}$ の円柱に 2N 力印加のオンオフをしている際の電空レギュレータへの制御信ステップ (黄色の信号) と力センサ出力 (緑色の信号)

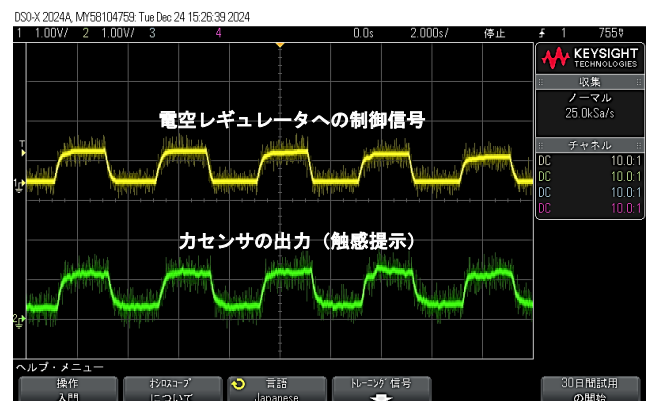


図 9 手に 2N 力印加のオンオフをしている際の電空レギュレータへの制御信ステップ (黄色の信号) と力センサ出力 (緑色の信号)

本結果より、比較的フィードバックシステムが正しく構築できていることがわかる。図 8 からは、シャープな制御の変化が見て取れる。しかし、オーバーシュートやリングング (不安定な挙動) が見られる場合もあり、さらなるフィードバックシステムの各種パラメータ等の調整が必要である。実際の手に装着した場合には、オーバーシュートやリングングが見られなかった。ただし、力変化はなまっており、立上り／立下り時間が悪化していることがわかる。

これは円柱が ABS で比較的剛性が高いのに対し、人の手が弾性体であり、高周波成分が吸収され減少していることに起因していると考えることができる。

4. おわりに

本研究では人工筋肉を用いた握手提示システムのための基礎研究を行った。力センシングによる圧縮空気の制御も行った。本実験の結果により、人の手の形状のばらつきを考慮して実験を行い、力フィードバックを適切に行う必要があることが判明した。ただし、人工筋肉の形状や配置の仕方を工夫しないと最初から強い力を印加してしまったり、逆に強い力を印加できなかつたりすることが起こりえることが判明した。今後は様々な人の手の形状に調整可能な握手提示システムについて考案する。

また、システムの応答速度についても計測し、現状は十分に速いことが実験によりわかった。ただし、1 つの人工筋肉のみであるため、今後複数本設置する場合については詳細な調査が必要となる。

さらに、PID 制御による力フィードバックシステムを実現した。今回は、フィードバックに関わるパラメータ調整は最適ではなかったが、所望の時系列の力変化を提示できる可能性を示すことができた。パラメータ調整も今後の課題であるが、力強い握手感を得ることができた。

空気制御による力印加のパターン生成により、握手の感覚がどのように変化するか、今後研究する予定である。

謝辞 本研究で用いたマッキンベン型人工筋肉作製にあたり、増田容一氏、浪花啓右氏、中西大輔氏、浦大介氏、杉本靖博氏のレシピを参考にさせて頂いた。謹んで感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Bertrand Tondou, and Pierre Lopez, Modeling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators, IEEE Control Systems Magazine, 2000, vol. 20, issue 2, p. 15-38.
- [2] Walter Franco, Daniela Maffiolo, Carlo De Benedictis, and Carlo Ferraresi, Use of McKibben Muscle in a Haptic Interface, Robotics, 2019, 8(1), 13, p. 1-12.
- [3] “haptx”. <https://haptx.com/>, (参照 2024-12-23).
- [4] “Sense-Roid”. <https://www.novriki.com/sense-roid/>, (参照 2024-12-23).
- [5] “東工大、「ハグ」再現スーツ開発 感触をデジタル記録・再生”. <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00524295>, (参照 2024-12-23).
- [6] “マッキンベン型人工筋肉のレシピ”. https://ishikawa-lab.sakura.ne.jp/yoichi/muscle_recipe, (参照 2024-12-23).