

導電糸人工筋肉における非線形ダイナミクスー「考える糸」は可能か？

兵庫県立大学大学院工学研究科

多田 和也

1 研究の背景と目的

従来型の人工知能が膨大な計算量を必要とするため、適用できる範囲が比較的大きな計算資源と電力に容易にアクセスできる場面に限られることが明らかとなる中、非線形ダイナミクスを計算資源とする物理的リザーブコンピューティングの研究に近年注目が集まっている。

材料や物体に計算させるコンピューティング手法は「AI エレクトロニクス」として、国内外で立ち上がりつつある分野であり、申請者の直接知るところでも、応用物理学会でシンポジウムとフォーカストセッションが相次いで企画されるなど、大きな注目を集めているほか、

- 日経サイエンス 2018年8月号特集「AIの身体性」
- 人工知能学会誌 Vol. 33 (2018) No.5 特集「自然界に見出す数物構造を利用した知的情報処理」
- 電子情報通信学会誌 Vol.102(2019) No. 2 小特集「リザーブコンピューティング」
- 応用物理学会誌 基礎講座「応用物理と人工知能」 Vol. 88 (2019) ～

で取り上げられるなど、一般誌・学会誌でも注目を集めており、将来的に大きな発展が見込まれる。

研究代表者は、導電糸人工筋肉の研究を行う中で、これが電気ー熱ー機械系の複雑な非線形ダイナミクスを有することに気づいた。本研究では、このような非線形ダイナミクスを新たな計算資源として用いた非従来型コンピューティングの実現可能性について検討することを目的とした。

2 研究方法・研究内容

本研究で用いる人工筋肉は、図1に示すようにナイロン製の糸にひねりを加えることで誘発される自己コイル化現象により作製される。この人工筋肉は加熱により収縮するが、その原理はナイロン繊維に存在するゴム状組織が加熱により収縮するゴム弾性が幾何学的形状により増幅されたものであると考えられている。銀メッキが施された市販の導電糸を材料とすることで、通電により生じるジュール熱によって収縮する人工筋肉が簡単に作製できる。

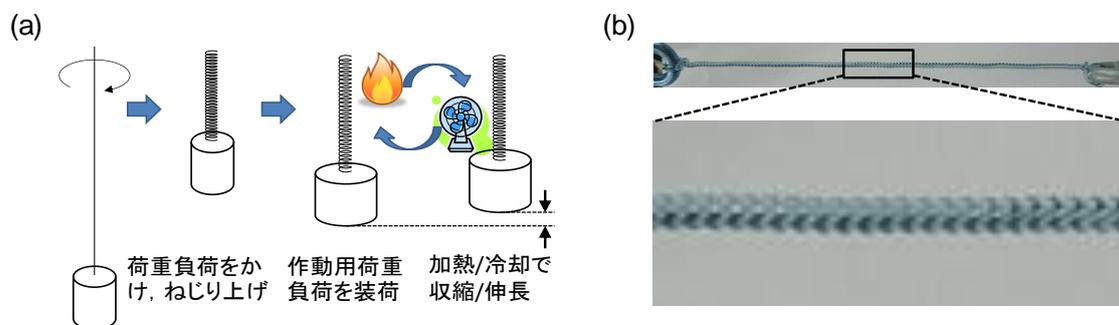


図1 (a) 自己コイル化現象による人工筋肉の作製と動作の模式図と (b) 人工筋肉の写真

従来行われてきた研究では、導電糸人工筋肉は定電圧を印加することで生じたジュール熱により収縮動作を行わせることが殆どであった。しかしながら、様々な長さや太さのアクチュエータに対して、単位長さあたりに加える熱量を一定にするという観点からは、定

電流で駆動することが望ましいのは電気電子工学に素養を持つものであれば誰でも思いつくところである。そこで定電流駆動を行ったところ、印加時間とともに電気抵抗が低下し、印加電圧が減少する現象が見いだされた。

この現象には、図2に示すような、導電糸人工筋肉の収縮に伴う隣接コイル間の接触状態の変化が大きく寄与していることを明らかとしている。本研究の大きな目標としては、この変化が交流インピーダンス成分に与える影響を種々の作製・駆動条件で調べることで、単一の導電糸人工筋肉における電気-熱-機械系の非線形ダイナミクスの解明とモデリングを行い、計算資源としての利用可能性について検討することである。

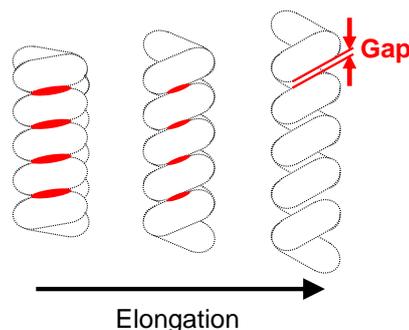


図2 変形に伴う隣接コイル間の接触の変化の模式図（伸長に伴い、接触面を通した筒状の導電経路が失われる）

本研究助成の支援の下で具体的には、①電気抵抗の変化に与える温度の影響の調査、②各種人工筋肉作製装置の構築、③交流成分を含めた電気-熱-機械系の非線形ダイナミクスを調べるための実験系の構築を行うことができた。

3 研究成果

①電気抵抗の変化に与える温度の影響の調査

直径 0.84 mm のナイロン製の釣り糸を用いて、長さ 4 cm の人工筋肉を作製し、それに伸縮性のある銀ペーストを塗布することで試料となる導電糸人工筋肉を作製した。この試料を恒温槽内に設置し、周囲温度を 10、30、50 °C と変化させながら、人工筋肉の長さを試料下部に吊り下げる荷重を変化させることで、電気抵抗の長さ依存性を調べた。その結果を図3に示す。

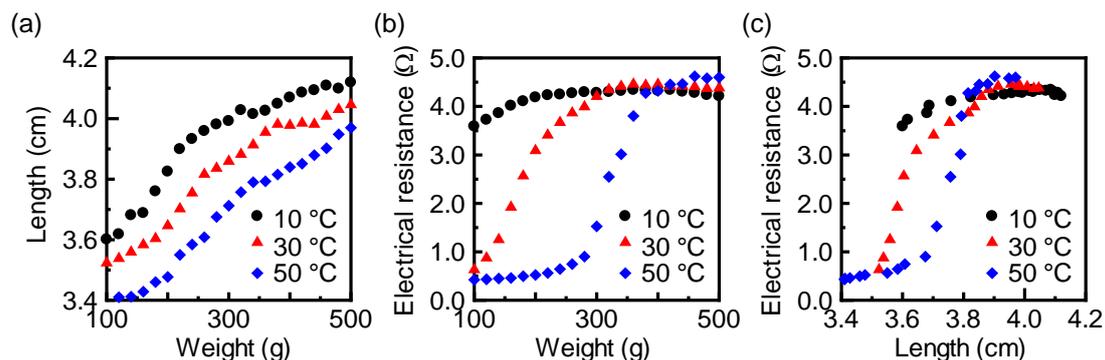


図3 種々の周囲温度における導電糸人工筋肉の(a)長さ—荷重、(b)電気抵抗—荷重、(c)電気抵抗—長さの関係

特に図3(c)に示すように、同一の長さで見た場合、温度が高いほど電気抵抗が低いことがわかった。この結果は、図4(a)に描いたように、導電糸人工筋肉の熱膨張によりコイル間の接触が良くなることとして解釈が可能である。また、どの周囲温度の場合にも、研究代表者が提案している電気抵抗—長さの関係の経験的な数式モデル

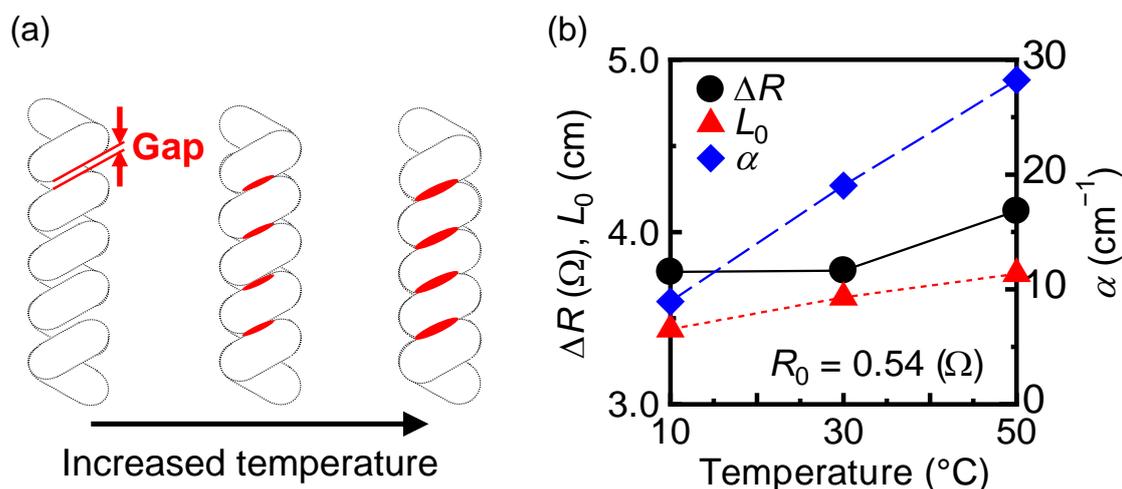


図4 (a) 昇温に伴う隣接コイル間の接触の変化の模式図 (昇温に伴い、接触領域が増加し電気抵抗が低下する) (b) フィッティングパラメータ (ΔR , L_0 , α) の温度依存性

$$R(L) = R_0 + \frac{\Delta R}{1 + \exp(-\alpha(L - L_0))}$$

うまくフィッティングできることがわかった。フィッティングパラメータの温度依存性を図4(b)に示す。電流を流して導電糸人工筋肉を駆動する最中には、当然のことながら導電糸人工筋肉の温度は変化する。このため、この結果は、その駆動時に見られる非線形的な電気抵抗の変化が温度上昇の過程にも依存することを示しており、電気-熱-機械系のダイナミクスがより多彩な非線形性を有していることを示唆するものである。

この結果については、次の研究報告を行った。(論文は印刷中)

【国際シンポジウム発表】

K. Tada and T. Yoshida

"Effect of temperature on electrical resistance-length characteristics of electroactive supercoiled polymer artificial muscle" (Oral4-3, Oral presentation) *11th International Symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME 2020)*, Aichi (On Zoom), Japan, 6-8 August, 2020.

【査読付き学術論文】

K. Tada and T. Yoshida

"Effect of temperature on electrical resistance-length characteristics of electroactive supercoiled polymer artificial muscle"

IEICE Transactions on Electronics, accepted. (2021年6月号掲載予定)

②人工筋肉作製装置の構築

導電糸人工筋肉のダイナミクスを調べるうえで、より広範な作製条件を適用できると、再現性を高めることが重要である。後者については、これまで研究代表者らが行ってきた試料の作製の過程では、属人的な微妙な調整に負うところが大きかった。具体的には例えば作製時の荷重の置き方(置く人)によって試料作製の成功率が変わるということを経験してきた。これは、自己コイル化という現象は座屈に近く、容易に破断に至るような状況において起こるものである、という事情によると考えている。



図5 新たに構築した人工筋肉作製装置の例

このような属人的な要素をなるべく排除したい、という観点から、本研究では3種類の人工筋肉作製装置を構築した。一例を図5に示す。この装置では、従来縦に配置していた糸を横に配置し、滑車を通して荷重を加えることで、作製時の荷重の置き方による影響を除くことを試みたものである。

③交流成分を含めた電気-熱-機械系の非線形ダイナミクスを調べるための実験系の構築

本研究では導電糸人工筋肉の収縮に伴う隣接コイル間の接触状態の変化が交流インピーダンス成分に与える影響を種々の作製・駆動条件で調べることができ、そのための実験系の構築を行った。まず、実際の駆動に必要な1 Aオーダーの駆動電流の印加のために、周波数を広範囲に変えた交流定電流動作が可能であるバイポーラ電源を導入した。さらに、これまでは人工筋肉に荷重を変えるために、おもりを手で載せたり除いたりしていたことから、図3に示すような離散的な荷重しか加えることができず、また思わぬ実験の失敗を引き起こすことがあった。本研究助成により導入したサーボスタンドを用いることにより、連続的な荷重を加え、変位とインピーダンスとの関係を従来よりも、より精緻に取得できる実験系を構築することが可能となった。

本実験系を用いた単一の導電糸人工筋肉における電気-熱-機械系の非線形ダイナミクスの解明については緒に就いたばかりであり、不十分な結果しか得られておらず、今後も検討を続けていく。

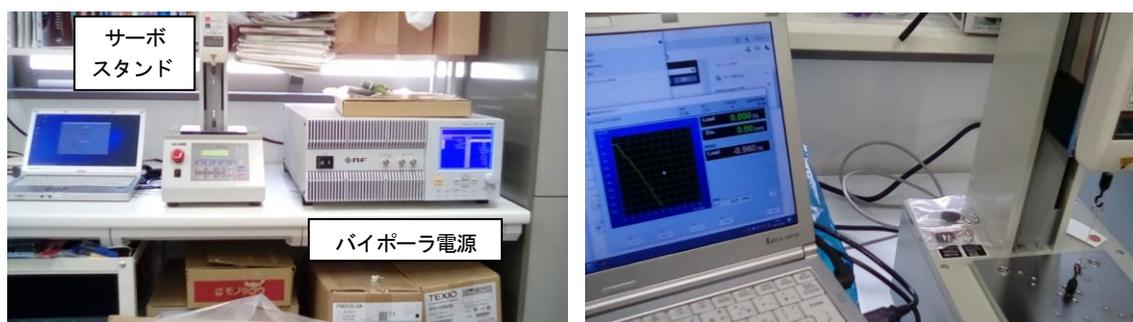


図6 導電糸人工筋肉の電気-熱-機械系の非線形ダイナミクスを調べるための実験系 (左) 導入したバイポーラ電源とサーボスタンド(右)サーボスタンドを用いて変位-荷重特性を記録している様子

4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究は導電糸人工筋肉が有する電気-熱-機械系の複雑な非線形ダイナミクスを新たな計算資源として用いた非従来型コンピューティング、すなわち「考える糸」の実現可能性について検討することを目的とした。このような非従来型計算資源は、ロボットなどの制御手法やエッジコンピューティングのデバイスとして将来我々の生活を支えるものとなる可能性がある。この目的の達成のためには、ダイナミクスについて精密な測定とモデリングを行う必要があり、満足いく結果を得るまでの道のりはまだ長いと言わざるを得ないが、本研究によって直実に進展したものとする。

また、計算資源としてではなく「動く」という人工筋肉そのものとしてみた場合にも、導電糸人工筋肉はナイロンなどのポリマー製であることから柔らかく、静かな駆動が可能であり、現在のロボットで普通に使われている、電気モータとギヤを組み合わせたような硬くてうるさいアクチュエータとは一線を画するものである。この特徴から、特に現在介護などの分野で注目を集めている癒し系ロボットなどに適しているものと考えられる。本研究により得られた成果は、この導電糸人工筋肉の電気抵抗が長さだけではなく駆動中の加熱による温度変化によっても変化することを初めて明らかとしており、その制御方法の精緻化にも貢献するものとする。

謝辞

本研究に研究助成をいただきました公益財団法人ひょうご科学技術協会に感謝申し上げます。また、研究成果の多くは大学院生、卒業研究生として研究代表者が担当する研究室に所属した学生諸氏の協力により得られたものであることを記し、感謝の意を表します。