

## 2020年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	早稲田大学 次世代ロボット研究機構
職位または役職	客員次席研究員(研究院講師)
氏名	長濱 峻介

### 1. 研究題目

分散・協調的な駆動機構を有するソフトアクチュエータシステムの開発

### 2. 研究目的

人間のアクチュエータである筋肉は「**分散的に高密度に配置された動力が協調的に動作するシステム**」と工学的には解釈することができ、これにより体積的に限られた身体の中に高密度にアクチュエータを配置することを可能としている。これらの特徴を有するアクチュエータシステムを構築するために、本研究では**ねじれ紐式アクチュエータ(Twisted String Actuator, TSA)**に着目した。このアクチュエータでは、電動モータの回転が紐をねじることで直線運動が取り出せる。さらに、減速機構も兼ねた動力伝達により機構の省スペース化が実現でき、ねじった紐が一定の柔軟性や弾性を持つという特徴も有する。本研究では、**複数のねじれ紐式アクチュエータを分散的に配置し、協調的に動作させる**ことで人間が有する分散性と協調性を備えた分散協調駆動ソフトアクチュエータシステム(Distributed Cooperative Driven Soft-Actuator System, **DCD-SAS**)を実現する。本年度は、**人間の筋肉のモデルを組み込んだ協調制御機構**を開発する。

通常の TSA を用いた際、DCD-SAS の各 TSA にかかる荷重には偏りが生じることが確認できている。その偏りの結果として、1つの TSA に荷重が集中し、TSA の破壊が生じうる。一方で、人間の筋肉の通常時の運動では、筋破断等によるアクチュエータシステムの破壊が生じず、駆動する筋線維全てが仕事を行い、筋肉の協調的な運動を生成している。本研究では、アクチュエータシステムの破壊が生じず、全てのアクチュエータが仕事を行いシステム全体の運動に関与することで初めて協調的な運動ができていると考え、その運動を実現するための協調制御機構の開発を目指した。機構の開発において、特に人間の筋肉の柔軟要素に着目し、柔軟要素を組み込んだ TSA を DCD-SAS に適用し、DCD-SAS の運動に与える影響の評価を行った。

3. 研究内容及び成果

筋肉の分散性を模倣した DCD-SAS では、筋線維に見立てた TSA を密に分散的に配置するため、紐の長さが異なる TSA が混在する状態が生じる。この DCD-SAS において TSA を同時に駆動させると特定の TSA に過度に外荷重の分力が集中して紐が破断し、協調的な運動とならない。これは、紐の長さが異なることによって、収縮長さやけん引力等の出力特性が異なる TSA が相互に干渉し、特定の TSA のみが DCD-SAS の運動に関与したためであると考えられる。しかしながら、速筋線維や遅筋線維のように性質が異なる筋線維を有する人間の筋肉では協調的な運動を実現している。このことから、人間の筋肉では速筋線維や遅筋線維等の収縮力などの出力特性が異なる筋線維の相互干渉が筋肉の機械的特性や制御則によって低減され、協調的な運動を獲得していると考えられる。我々は筋肉の機械的特性の1つである腱の柔軟要素に着目し、柔軟要素の有無が協調制御機構における TSA の相互干渉に与える影響を評価した。

図 1(a)は異なる紐の長さの TSA において、柔軟要素が無い状態を表し、図 1(b)は異なる紐の長さの TSA において柔軟要素が有る状態を表している。柔軟要素が無い状態では、各 TSA の収縮長さが異なることによって、各 TSA の相互干渉が大きくなり、荷重が集中した特定の TSA のみが仕事を行い、協調的な運動とはならないと考えられる。一方、柔軟要素が有る状態では、TSA の収縮によって柔軟要素の弾性力が生じ、各 TSA の相互干渉が小さくなり、全ての TSA が仕事を行う協調的な運動となると考えられる。

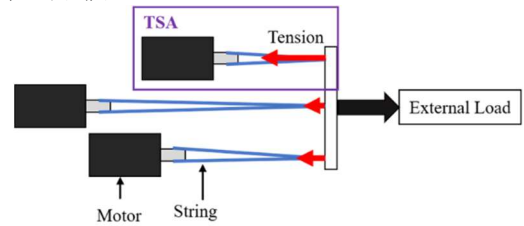
本研究では、各 TSA に加わる外荷重の分力の割合である荷重分散比率を評価指標とした。荷重分散比率の計算方法は、図 2 のような場合において、 $TSA_x(x=1,2,3)$  の荷重分散比率は式(1)で表される。

$$Fx/(F1 + F2 + F3) \times 100 [\%] \quad (1)$$

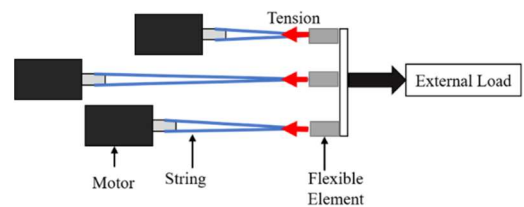
DCD-SAS の構造上、各 TSA の一端が固定された状態となるため、各 TSA の収縮長さは同じ値となる。そのため、荷重分散比率の大小関係が各 TSA の仕事の大小関係を表し、DCD-SAS 全体の運動への貢献を表すことができる。図 1(a)の各 TSA の相互干渉が大きく、特定の TSA のみが仕事を行う場合、荷重分散比率の偏りが大きくなる。他方、図 1(b)の各 TSA の相互干渉が小さく、全ての TSA が仕事を行う場合、荷重分散比率の偏りが小さくなる。

実験では、紐の太さが全て同じで紐の長さがそれぞれ 100, 150, 200 mm と異なる状態(同径異長状態)の紐で、回転軸半径、回転角度も全て等しい3つの TSA において柔軟要素の有無が荷重分散比率に与

える影響を調査した。実験方法としては、収縮速度が遅い順に駆動する、筋肉の制御則の一つのサイズの原理を模倣し、紐の長さが 200, 150, 100 mm の順に手動で回転させ、一定の外荷重をけん引し、その際のロードセル値を測定して荷重分散比率を求めた。結果を表 1 に示す。表 1 より、柔軟要素が無い場合は 100 mm の紐の長さの TSA に多くの分力が加わり、荷重分散比率の偏りが大きい。一方で、柔軟要素を加えることで、100 mm の紐の長さの TSA に加わる分力が減少し、150, 200 mm の紐の長さの TSA に加わる分力が増加し、荷重分散比率の偏りが小さくなることを確認した。この結果から、DCD-SAS に柔軟要素を加えることで、出力特性が異なる TSA の相互干渉を低減し、協調した運動を実現できたと考えられる。また、従来考えられていた腱の役割である、筋肉と骨の接合や筋張力の測定、跳躍などの瞬発的な動作のためのエネルギーの貯蔵等だけでなく、腱には異なる筋線維の相互干渉を低減させる役割があるという知見が得られた。



(a)柔軟要素が無い状態の概念図



(b)柔軟要素が有る状態の概念図

図 1 柔軟要素の有無による違いの概念図

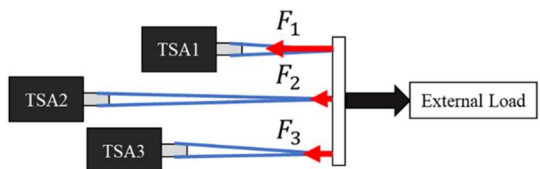


図 2 荷重分散比率の例

表 1 柔軟要素の有無による荷重分散比率の違い

紐の長さ [mm]	100	150	200
柔軟要素無し	96.3	2.95	0.742
柔軟要素有り	64.0	27.3	8.76

#### 4. 今後の研究の見通し

---

今年度の研究では、筋肉の機械的特性である柔軟要素のみに着目し、人間の筋肉の協調性を DCD-SAS で模倣することを試みた。しかしながら、人間の筋肉は機械的特性の他に、筋肉の制御則による協調制御機構によって協調的な運動を実現していると考えられる。今後の研究としては、筋肉の制御則として、駆動順の機序の一つであるサイズの原理等の制御則を DCD-SAS に組み込み、筋肉の制御則が DCD-SAS の運動に与える影響を、荷重分散比率を指標として今後は調査する。

また、サイズの原理とは、遅筋線維、速筋線維の順に筋肉が駆動するという制御則である。遅筋線維は、収縮速度が遅く、けん引力が小さく、持久力が大きい。一方で、速筋線維は、収縮速度が速く、けん引力が大きく、持久力が小さい。サイズの原理は、生物の進化の過程において得られた機序であり、筋肉というシステムを協調的に動かすことに寄与していると考えている。そのため、先行研究として DCD-SAS においてサイズの原理を模倣する研究を行っていたが、柔軟要素が無い場合の同径異長状態の TSA を用いた DCD-SAS では、TSA の駆動順によって荷重分散比率が変化してしまった。その結果、実験の再現性が低く、また特定の TSA に過度に荷重が加わることで紐が破断してしまい、安定して実験データを取得することが難しく、サイズの原理の効果が検証できなかった。今年度の研究で、TSA に柔軟要素を加えることにより荷重分散比率の偏りが小さくなるという知見が得られたため、駆動順を変化させた際の荷重分散比率の変化の実験の再現性が向上し、さらに荷重の集中による破断を抑制できることが期待できる。これにより、DCD-SAS におけるサイズの原理の模倣の効果の検証が容易になったため、今後はサイズの原理の効果の検証を行っていきたい。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

---

##### 【国内会議（査読無）】

1. 佐藤充希, 長濱峻介, ズヤーリッチ和樹, 菅野重樹, “ねじれ紐式アクチュエータを用いた分散協調駆動における荷重分散比率の評価,” 2F3-11, SI2020
2. 佐藤充希, 長濱峻介, 菅野重樹, “分散協調駆動機構における各 TSA の駆動タイミングに応じた動作の滑らかさの評価,” 2P3-I03, ROBOMECH2021, 2021
3. 佐藤充希, 長濱峻介, 菅野重樹, “分散協調駆動機構を用いた異なる性質を有する筋線維の相互干渉の工学的評価,” C6-3, SOBIM2021, 2021

##### 【解説記事】

4. 長濱峻介, 菅野重樹, “ねじれ紐式アクチュエータと分散協調駆動機構,” 日本ロボット学会誌, No. 39, Vol. 9, pp. 799-802, 2021, doi: 10.7210/jrsj.39.799.