

研究の課題名

油空圧を利用した水力学的骨格による柔軟な機械システムの構築

東京工業大学大学院 理工学研究科 機械制御システム専攻 博士課程後期学生

報告者 丸山 大輔

報告日 2010年（平成22年）3月19日

1. 本研究の意義・特色

現在使用されている機械システムのほとんどは金属などの硬い素材とモータなどのアクチュエータによって構成されている。それらの機械システムでは、構成素材が硬いため、人との衝突やシステム同士の衝突などが起こった場合に非常に危険であり、また、卵などの柔らかい対象物を把持するには高度な制御が必要である。さらに、システムの柔らかさの実現においても高度な制御が必要のため、機械システムに予期せぬ外力が働いた場合に柔軟に対応することが難しく、システムが破損してしまうことも起こり得る。しかし、本研究が提案する水力学的骨格を用いた機械システムでは、構造素材とアクチュエータに柔らかい素材を用いることで、システム自体とシステムの動作の双方に柔らかさを与えることが可能だと考えられる。構造と動作が柔軟であるため、衝突しても壊れない、壊さない機械システムが実現でき、大まかな制御でも対象物を把持し、緩衝材のように対象物を保護しながら移動可能な機械システムが実現できる。

2. 実施した研究の具体的内容、結果

本研究が提案する機械システムは、図1のように、構造を成す一定量の流体を封入した構造骨格と、内部の加減圧によって駆動力を発生する駆動骨格と定義した2種類の袋状構造により構成される。駆動骨格は、減圧時の折れ曲がった状態から加圧した際に発生する水力学的骨格特有の形状回復力を駆動力として利用する。これは、加圧した際の長手方向の収縮を力として利用する人工筋肉のような空気式アクチュエータなどとは駆動力発生の方法が大きく異なるものである。本方式は人工筋肉などと比べ、非常に大きな駆動範囲を実現できる特徴がある。提案する機械システムについて、駆動骨格の発生する駆動力と構造骨格の機械的特性を解析と実験の双方から明らかにし、システムの設計理論を確立することが本研究の目的である。

そこで、非線形解析を得意とする有限要素解析ソフトウェア”ABAQUS”を用い、陰解法と陽解法を問題に応じて使い分けることで対象とする柔軟な機構の変形や応力状態などの解析を行った。材料特性には、ウレタンゴムの単軸引張試験結果と、その結果を1.4倍した二軸均等引張試験の近似を併せた3次のOgdenモデルを用いている。

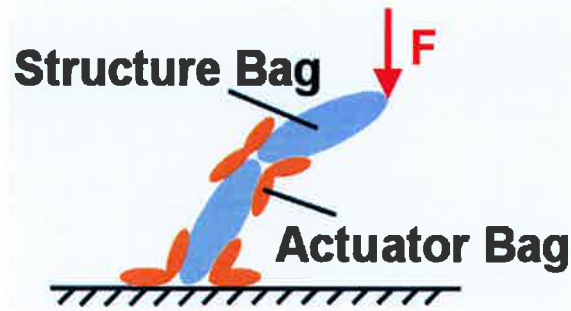


図1 提案する機械システムの例

まず、構造骨格の変形について解析を行った。構造骨格は、機械システムの形状を決定するのみではなく、システム全体の重量やシステムに負荷される荷重を支える役割も担っている。そのため、構造骨格の変形量を把握することは重要な設計指針であると言える。本研究では、主に図2に示すような円筒の両端を円錐形状とした構造骨格を使用している。この構造骨格は、0.3 mm 厚のウレタンゴムシートを使用しており、円筒部分の長さが 200 mm、半径 50 mm、円錐部分の高さが 50 mm である。この構造骨格について、基礎的な強度評価として、円筒部分の荷重によるたわみ量を求めた。解析条件を図3に示す。ここで、中央下部での境界条件については荷重方向のみ 10 mm の範囲で固定しており、荷重はそれぞれ中央から 100 mm の部分を中心に 10 mm の範囲で線荷重として与えている。また、荷重を中心に集めた解析を行い、結果の差分を取ることで固定部分での局所的な変形の影響を少なくする。モデルにはシェル要素を用い、陰解法を用いて計算している。与える荷重と内圧を変えた場合の構造骨格の端部でのたわみ量を図4に示す。

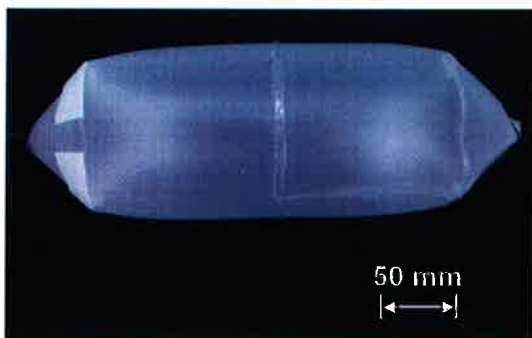


図2 代表的な構造骨格

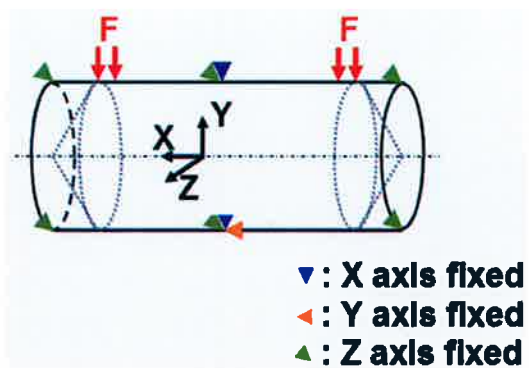


図3 構造骨格の解析条件

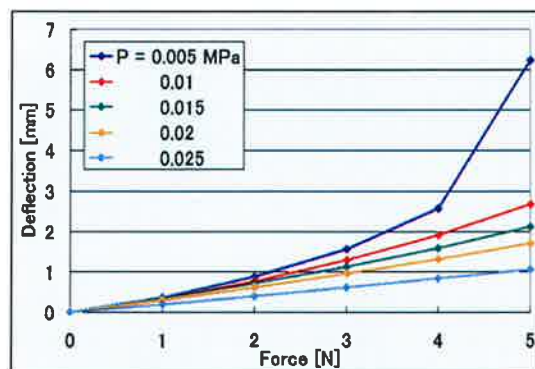


図4 構造骨格の端部でのたわみ量

解析結果から、たわみ量は一部を除いて荷重に対してほぼ線形に増加すること、内圧が高くなるにつれてたわみ量が減少することが伺える。また、荷重とたわみ量の関係から、長さ 300 mm、半径 50 mm の構造骨格に与える内圧は、0.3 mm のウレタンゴムシートを用いる場合、0.01 MPa から 0.02MPa までが妥当であると考えられる。これは実験でも同様の傾向が得られるため、たわみ量が荷重と内圧にほぼ線形に比例することと併せて、構造骨格の設計指針の基礎とできる。

次に、駆動骨格の発生する駆動力について解析を行った。駆動力解析は、構造骨格の解析と比較して大変形を伴っており、また、折れ曲がった状態のモデルとなるため、解析による評価は一般的に難しい。本研究では、膜要素と陽解法を用いて解析を行い、解析結果をフィルタによって平滑化することで駆動力の評価を実現した。解析条件を図 5 に示す。折れ曲がっている部分の両端で駆動骨格の膨張を阻害しないように 2 方向で固定し、長手方向の 1/4 と 3/4 の部分において駆動力を求めるため固定し拘束反力を得ている。駆動骨格の幅 w [m]と内圧 p [Pa]の影響について折れ曲がり角度 θ [deg]を変えながら、内圧を徐々に増加させた場合の形状変形過程のシミュレーションを行う。シミュレーションの対象時間は 20 秒間とし、内圧は始めの 10 秒間に滑らかに増加し、その後は一定に保つという条件に設定している。駆動骨格は中央で折れ曲がった形状を基本形状とし、長さは 200 mm とする。また、素材は厚さ 0.3 mm のウレタンゴムシートである。図 6 は解析した駆動骨格の変形の例である。駆動力は駆動骨格の折れ曲がり部分でのトルクであるため、内圧を変えた場合と幅を変えた場合の解析結果を、折れ曲がり角度と発生トルクの関係として図 7 と図 8 に示す。

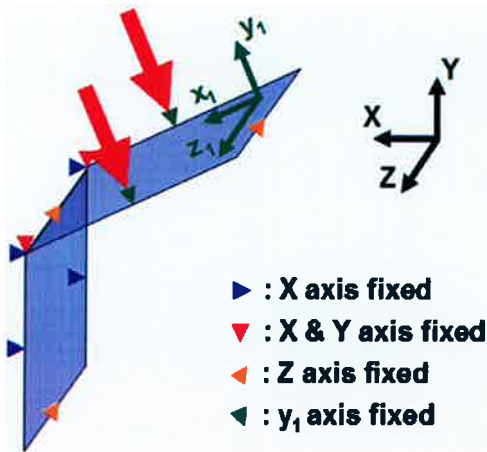


図5 駆動骨格の解析条件

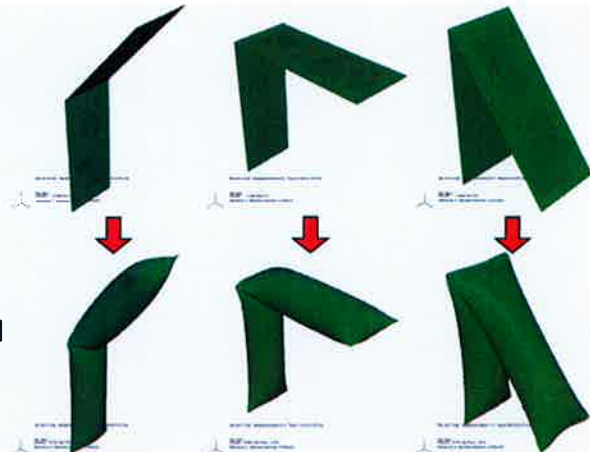


図6 駆動骨格の変形 (左から $\theta = 40, 90, 140$ deg)

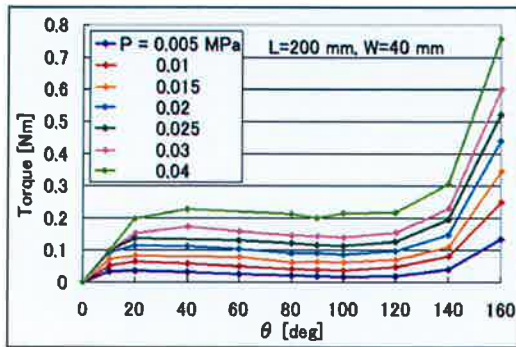


図7 内圧を変えた場合の解析結果

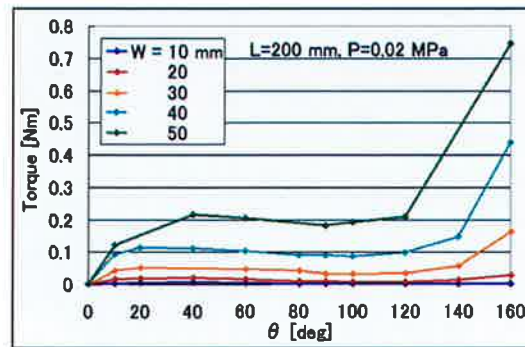


図8 幅を変えた場合の解析結果

図7から、内圧 p の増加に対して発生トルク T が比例して増加することが伺える。つまり、基準となる発生トルクを長さ 200 mm、幅 40 mm、圧力 0.02 MPa の解析結果とすると、解析結果は圧力について比例定数 k_1 で比例していると言える。それぞれの解析値を対応する圧力の値と基準となる発生トルクで除し、その平均を取ることによって圧力と発生トルクの比例定数 k_1 は 52 と決まる。

また、図8から、幅の増加に対して発生トルクが幅 w の累乗に近い傾向で増加することが伺える。ここで、発生トルクに寄与する体積は幅の 3 乗に比例していると考えられるため、その比例定数を k_2 とする。それぞれの解析値を対応する幅の 3 乗と基準となる発生トルクで除し、その平均を取ることによって幅と発生トルクの比例定数 k_2 は 1.6×10^5 と求められる。この時、基準となる発生トルクの値は圧力の効果の場合と同様に長さ 200 mm、幅 40 mm、圧力 0.02 MPa の解析結果としている。

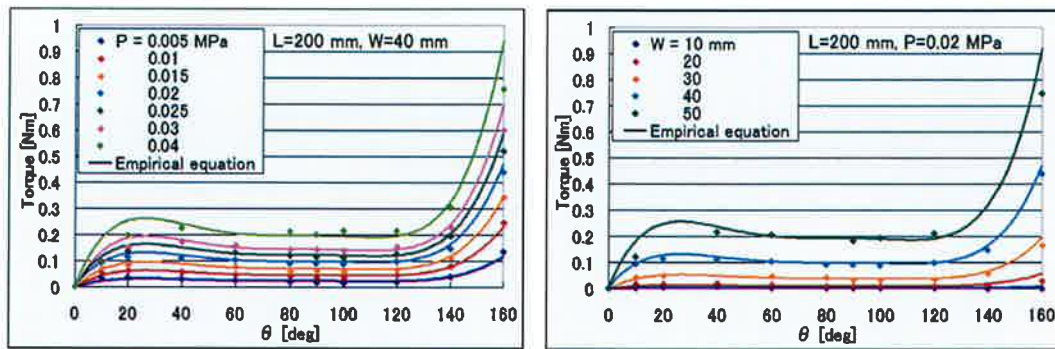
次に、基準となる発生トルクとした長さ 200 mm、幅 40 mm、圧力 0.02 MPa の駆動骨格について、折れ曲がり角度に対する発生トルクの形状の経験式 $T_s(\theta)$ を求める。

$$T_s(\theta) = 1.255 \times 10^{-10} \times \theta^5 - 4.735 \times 10^{-8} \times \theta^4 + 6.748 \times 10^{-6} \times \theta^3 - 4.420 \times 10^{-4} \times \theta^2 + 1.243 \times 10^{-2} \times \theta. \quad (1)$$

以上のことから、圧力 p [MPa]、幅 w [mm] の駆動骨格の発生トルク $T(\theta)$ [Nm] は次のように書くことができる。

$$T(p, w, \theta) = k_1 k_2 p w^3 T_s(\theta). \quad (2)$$

式(2)から求められる発生トルクと解析によって求められた発生トルクを比較すると、圧力と幅の変化それぞれ図 9 のようになる。つまり、式(2)の経験式は圧力と幅をパラメータとして発生トルクの特性を算出できる。また、駆動力測定実験によって実験値と経験式からの推定値の比較を行い、経験式の妥当性を確認した。以上により、解析から得られた駆動力の経験式は機械システムのアクチュエータを決定する上で設計指針として非常に有用と考えられる。



(a) 内圧を変えた場合

(b) 幅を変えた場合

図 9 解析結果と経験式からの推定結果の比較

3. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名
 氏名 丸山 大輔
 所属 東京工業大学大学院 理工学研究科 機械制御システム専攻
 博士課程後期学生

4. 研究実施時期
 2009年(平成21年)3月1日から 2010年(平成22年)2月28日

5. 本研究に関連して発表した主な論文等

学術雑誌

- [1] 丸山大輔, 木村仁, 小関道彦, 伊能教夫: “水力学的骨格を利用した柔軟な機械システム -非線形有限要素解析に基づいた応力集中の回避と駆動力特性の比較-“, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.41, No.3, 2010 (掲載決定)
- [2] Daisuke Maruyama, Hitoshi Kimura, Michihiko Koseki, Norio Inou: “Driving force and structural strength evaluation of a flexible mechanical system with a hydrostatic skeleton”, Journal of Zhejiang University SCIENCE A, Vol.11, No.4, 2010 (掲載決定)

査読付き国際会議

- [1] Daisuke Maruyama, Hitoshi Kimura, Michihiko Koseki, Norio Inou: “A flexible mechanical system using a hydrostatic skeleton (Evaluation of driving force and structural strength of the system based on nonlinear FEA)”, Proceedings of the IFToMM/ISRM International Symposium on Robotic and Mechatronics, 25, 2009
- [2] Daisuke Maruyama, Shotaro Suzuki, Hitoshi Kimura, Norio Inou: “Flexible robotic arm with hydrostatic skeleton driving mechanism”, Proceedings of the IASTED/RA International Conference on Robotics and Applications, 664-037, 2009

その他の学術講演

- [1] 丸山大輔, 木村仁, 小関道彦, 伊能教夫: “水力学的骨格を用いた機械システム -非線形有限要素解析に基づいた駆動力特性の比較-“, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2A1-07, 2009
- [2] 鈴木章太郎, 丸山大輔, 木村仁, 伊能教夫: “水力学的骨格を利用した柔軟なロボットアームの開発”, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 3M2-08, 2009

6. 内外における関連研究の状況

現在, 柔軟な素材を用いたアクチュエータとして, マッキベン式人工筋肉など, 素材の伸びを利用した研究が成されている. しかしながら, 本研究で提案するアクチュエータは折れ曲がった状態から駆動するものであり, 他のアクチュエータとは異なる駆動様式を持っている. また, 提案する全体が柔らかい機械システムの応用例として, ロボットアーム, 繊毛移動アクチュエータ, 狭隘地形探査ロボットの開発を行っている.

7. 今後の発展に対する希望

今後, 材料特性を含めた駆動力の推定手法の導出や, 構造骨格の詳細な設計指針の確立, 駆動骨格と構造骨格の接触面の影響などを求め, 今回得られた設計指針と併せて柔軟な機械システムの設計手法の確立を目指す予定である. また, 設計指針を用いた機械システムの応用例の開発も行いたい.