

## 様式 C-19

# 科学研究費補助金研究成果報告書

平成21年 4月 1日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760104

研究課題名 (和文) マッキベン型人工筋肉の変形特性に関する理論解析

研究課題名 (英文) Theoretical study on deformation behavior of McKibben air muscle

研究代表者

尾崎 伸吾 (OZAKI SHINGO)

国立大学法人横浜国立大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：20408727

研究成果の概要：

本研究では、マッキベン型人工筋肉を対象に、エネルギーのつり合いに基づいてチューブの幾何形状と収縮率、ゴム膜内圧、引張り力（負荷）などの理論関係式の導出を試みた。具体的には、人工筋肉の仕事速度と内圧による膨張の仕事速度に加え、各種エネルギーの損失項目を付加した理論解析手法を新たに提案した。また、人工筋肉が有する周期境界に着目してユニットモデルを作成し、有限要素法を用いて効果的な数値シミュレーションを実施するとともに、実際のマッキベン型人工筋肉の収縮実験との比較を通して、理論解析手法の妥当性を検証した。さらに、提案した理論式を用いたパラメトリックスタディを行い、マッキベン型人工筋肉の各種設計変数の最適値を評価可能であることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	240,000	2,240,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：人工筋肉，空気アクチュエータ，編込み複合材料，有限要素法，エネルギーのつり合い，力学解析，最適設計，ウェアラブルロボット

### 1. 研究開始当初の背景

現在、我が国では高齢化社会への爆発的な移行に伴い、高齢者に対する介護・サポート不足の問題が懸念され始め、先端技術を生か

した介護・補助機器の開発への期待が高まっている。斯様な状況の下、例えば一体となって人間の行動を補助するウェアラブルロボットや歩行支援機を始め、数々の作業補助機

器の試作品が発表されている (図 1 参照). これらのロボットに積極的に使用されている“マッキベン(McKibben)型人工筋肉”は, 網状に編み込まれたナイロン製のスリーブの中にチューブが入っているだけのシンプルな構造を有しており, コンプレッサーによりチューブの中に空気を送ると, 人間の筋肉の様に径方向に膨らみ, 長さ方向に非常に強い力で収縮する.

マッキベン型人工筋肉は金属やモーターを必要とせず, 軽量・高出力・柔軟などの長所を有するため, 安全性の高いアクチュエータとして急速に需要が高まっている. しかし, 従来の設計・制御方法は, ほとんどが試行錯誤的な手法に基づいているうえに, 人工筋肉の挙動は強い非線形性を示すため, その制御には困難を伴う. したがって, 収縮率アップなどに関する最適設計, あるいは高精度制御の実現には, 網状複合材料の特性を有するマッキベン型人工筋肉の力学特性に関する理論式の導出が不可欠である.

## 2. 研究の目的

本研究では上述の問題を解決して, マッキベン型人工筋肉の力学設計の高度化, 制御の高精度化に寄与し得る理論体系および支援システムの確立を目的とする. まず, マッキベン型人工筋肉の収縮時におけるエネルギー損失を考慮した理論解析手法を確立する. 具体的には, 網状複合材料の特徴である周期境界を考慮したユニットモデルを作成するとともに, 変形時の各種エネルギーのつり合いに基づく理論解析方法を提案する. また, 有限要素法に基づく数値シミュレーション, 人工筋肉の収縮実験の詳細な観察結果との系統的な比較・検討を通して, マッキベン型人工筋肉の挙動について, 以下の基本的問題を解決する. すなわち, ゴムチューブ内に内圧を受けるマッキベン型人工筋肉に対して,

① 収縮率, ② 引張り力, ③網状スリーブの変形に及ぼす,

a) 形状因子 (人工筋肉の幾何形状), b) 材料因子 (ナイロンスリーブの弾性特性や摩擦特性)

などの影響を明らかにする. また, 実際の各種使用条件を模した解析・実験を行い, 収縮率, 引張り力, 網状スリーブの配置等に対する幾何および材料条件の関係を明らかにする. 特に網状スリーブの基準状態の幾何条件と負荷回数の関係, それに伴う糸のよれ具合など, 収縮前の糸配置状態の変化に起因した収縮効率の変化を重点的に検討し, 提案する理論解析法に反映させる.

具体的な設計・制御システムの確立法としては, 収縮率, 幾何形状, 内圧, 引張り力に関するマスターカーブおよび理論予測式の作成, 収縮効率増加のための力学的指針の提案を試みる.

## 3. 研究の方法

人工筋肉が負荷を受けながら収縮する際, スリーブを構成する糸の編込み角度が変化するため, 糸は引張り力を受けながら曲げ変形を生じる. したがって, マッキベン型人工筋肉の収縮効率に及ぼす各因子の影響の解明には, これらの厳密な理論解析が不可欠である. そこで先ず, 人工筋肉の仕事速度  $\dot{W}_{out}$  と内圧による膨張の仕事速度  $\dot{W}_{in}$  に加え, 重要でありながら既往の研究では考慮されていない次式の各エネルギーの損失項目を付加した理論解析手法を新たに提案する. 提案理論式は, 人工筋肉の幾何形状 (ゴム膜の径, 厚さ; 糸の長さ, 数, 断面形状, 編込み角度, 編込み方法) および材料条件 (弾性特性, 摩擦特性) の関数として表されるため, エネルギーのつり合いに基づく本理論解析法により, 収縮率・内圧・引張り力の経時変化の算出が可能となる. その後, 本理論式を用いて, 種々の形状・材料条件下での非線形挙動を系統的に検討する.

本研究で提案する理論解析手法の検証・是正のためには, 数値シミュレーションとの比較が有効である. しかし, 百数十本の糸束で構成される複雑な3次元形状を

有するマッキベン型人工筋肉の数値解析は計算効率的な問題を伴う。このため申請者は、人工筋肉が有する周期境界に着目してユニットモデルを作成し、有限要素法汎用解析ソフト MSC. Marc を用いて効果的な数値シミュレーションを実施する。

最終的に、不備な点については是正を重ねて、各条件下のマッキベン型人工筋肉の収縮率・内圧・引張り力を支配する理論式およびマスターカーブを作成する。

#### 4. 研究成果

本研究では、エネルギーのつり合いに基づいてチューブの幾何形状と収縮率、ゴム膜内圧、引張り力（負荷）などの理論関係式

$$\dot{W}_{in} = \dot{W}_{out} + \dot{E}_F + \dot{E}_D + \dot{E}_L$$

の導出に成功した。具体的には、人工筋肉の仕事速度と内圧による膨張の仕事速度に加え、各種エネルギーの損失項目を付加した理論解析手法を新たに提案した。これらの各項目は、人工筋肉の幾何形状および材料条件の関数として表されるため、エネルギーのつり合いに基づく本理論解析法により、収縮率・内圧・引張り力の経時変化の算出が可能となった。また、人工筋肉が有する周期境界に着目してユニットモデルを作成し、有限要素法を用いて効果的な数値シミュレーションを実施するとともに、実際のマッキベン型人工筋肉の収縮実験との比較を通して、理論解析手法の妥当性を検証した。さらに、提案した理論式を用いたパラメトリックスタディを行い、マッキベン型人工筋肉の各種設計変数の最適値を評価可能であることを示した。

他方、編み込み接触構造を有する人工筋肉において、摩擦挙動の精緻なモデル化は不可欠である。そこで、速度・状態依存性摩擦モデルを提案するとともに、具体的な境界値問題への適用をおこなった。その結果、様々な負荷条件下におけるすべり摩擦挙動の精緻な解析が可能となった。

以上のように、2年間の研究により、マッキベン型人工筋肉の収縮率アップなどに関する最適設計法の提案や編み込み構造の摩擦挙動のモデル化などの成果が得られた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Ozaki, S., Hashiguchi, K., Finite element analysis of unstable frictional interaction, Proceedings of Plasticity, pp. 250-252, 2009, 査読なし.
- ② Hashiguchi, K., Ozaki, S., Constitutive equation for friction with transition from static to kinetic friction and recovery of static friction, International Journal of Plasticity, Vol.24, pp.2102-2124, 2008, 査読有り.
- ③ Ozaki, S., Hashiguchi, K., Chen, D.H., Analysis of stick-slip motion by the rate-dependent friction model, Advanced Materials Research, Vols.33-37, pp.867-874, 2008, 査読有り.
- ④ 陳 ダイコウ, 小山陽平, 尾崎伸吾, McKibben 型アクチュエータの収縮に関する力学的検討, 日本機械学会論文集 A 編, 74 巻, pp.442-449, 2008 年, 査読有り.

[学会発表] (計3件)

- ① Ozaki, S., Hashiguchi, K., Finite element analysis of unstable frictional interaction, International Symposium on Plasticity and Its Current Application, St.Thomas, USA, 2009.1.4.
- ② 橋口 公一, 尾崎伸吾, Anisotropic constitutive equation for friction with transition from static to kinetic friction and vice versa, 第11回応用力学シンポジウム, 東北大学, 2008年9月9日.
- ③ 小山陽平, 陳 ダイコウ, 尾崎伸吾, 編み込み構造を有するエアマッスルの変形メカニズム, M&M2007 材料力学カンファレンス (日本機械学会), 東京大学, 2007年10月26日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 伸吾 (OZAKI SHINGO)

国立大学法人横浜国立大学・大学院工学研  
究院・助教

研究者番号：20408727

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者