

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	バイオメカニクスと獣医整形外科のためのイヌ後脚筋骨格ロボットプラットフォームの試作
Title(English)	Prototype of a canine hindlimb musculoskeletal robotic platform for biomechanics and veterinary orthopedics
著者(和文)	羅基嫻, 難波江裕之, 原田恭治, 鈴森康一
Authors(English)	Gihyeok Na, Hiroyuki Nabae, Yasuji Harada, Koichi Suzumori
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2024講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2024, 5

# バイオメカニクスと獣医整形外科のためのイヌ後脚筋骨格ロボットプラットフォームの試作

Prototype of a canine hindlimb musculoskeletal robotic platform for biomechanics and veterinary orthopedics

○正 羅基嫻 (東工大) 正 難波江裕之 (東工大)  
原田恭治 (日獣) 正 鈴森康一 (東工大)

Gihyeok NA, Tokyo Institute of Technology, na.g.ab@m.titech.ac.jp  
Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology  
Yasuji HARADA, Nippon Veterinary and Life Science University  
Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology

The intricate interplay within the musculoskeletal system is crucial in biomechanics and orthopedics, particularly in animal locomotion. Conventional musculoskeletal models often oversimplify muscles as mere connections between skeletal points, disregarding radial variations during muscle contraction or relaxation that impact the surrounding tissues. Furthermore, animal movement is driven not solely by skeletal and muscular elements but also by complex, nonlinear attributes of soft tissues such as superficial fascia. These intricacies pose challenges for conventional models. A freely operable musculoskeletal robot employing Pneumatic Artificial Muscles (PAMs) was developed as a physical simulator, replicating the canine hindlimb structure and unveiling the effect of fascia in movement to address this issue. This robot's potential applications extend to enhance the treatment of orthopedic disorders.

**Key Words:** Biomimetics, Soft robots, Musculoskeletal robots

## 1 緒言

### 1.1 動物バイオメカニクス

動物バイオメカニクスは、動物の生体システムにおける力の複雑な相互作用を解明しようとするものである。これは、獣医学において整形外科疾患の診断と治療に不可欠であり、生体模倣ロボット工学の発展においても重要な役割を果たす。[1, 2] 動物の運動は、骨、筋肉、腱、靭帯、関節からなる筋骨格系内の複雑な相互作用によってもたらされる。犬の動きのバイオメカニクスを理解することは、膝蓋骨内方脱臼 (Medial Patellar Luxation, MPL) のような整形外科疾患の獣医学的治療に役立つ。[3, 4, 5]

動物バイオメカニクスの複雑さを解明するために多くの努力が払われているが、その特有の複雑さのために様々な課題が残っている。この複雑さは、多数の自由度と、皮膚、軟骨、脂肪、靭帯、筋膜などの軟組織の複雑な相互作用によって特徴付けられる。さらに、生きた動物で実験を行うことにはかなりの制約がある。

生きた動物を用いる実験における変数の制御と分離は本質的に困難である。というのも、動物は人間の被験者と同じように統制された方法でタスクを実行するよう指示できないからである。動物が望ましい動作を一貫して行わない可能性もあり、特定のバイオメカニクス解析に十分かつ関連性のあるデータを収集することが難しくなる。このような限界は、体系的な研究を妨げる一因となっている。

### 1.2 コンピューター筋骨格モデル

近年のコンピューターシミュレーションの発展により、動物の筋骨格系の理解は著しく進み、様々な科学的・実用的応用に不可欠な運動力学に関する知見が得られている [6, 7, 8]。このようなモデルは非常に貴重ではあるが、多くの場合、複雑な筋骨格系の構造を単純化している。しかし、このような単純化のしすぎは、軟組織間の複雑な相互作用や筋の活性化の正確なメカニズムを説明することができず、モデルの有効性を制限する可能性がある。

### 1.3 物理的な実験のためのロボット

動物の運動やバイオメカニクスを再現して研究するために設計されたロボットシステムは、コンピューターモデルを補完するのに適している。様々な生物の身体的特性や動きを模倣できるこれらのロボットは、生きた動物では困難であった仮説を検証する

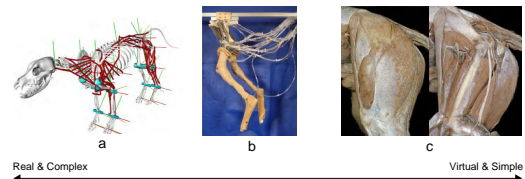


Fig.1 Conceptual illustration of the musculoskeletal robot as a physical biomechanics simulator. (a) Computational musculoskeletal models; (b) The robotic platform; (c) Actual animals.

ためなどの実験を行ったりするための統制された環境を提供する。このようなバイオミメティック・ロボットを通じて、複雑な環境における動物の運動について洞察が得られ、生体システムとロボットシステムの両方にまたがる原理を探求できる。このアプローチは、バイオメカニクスの理解を前進させることができると期待できる [9]。

### 1.4 筋骨格ロボット

筋骨格ロボットは、動物や人間の複雑な筋骨格系を模倣するように設計されている [10, 11]。これは高度な自由度とコンプライアンスを可能にする人工筋肉を備えているため、従来のロボットよりも自然な動きを模倣できる。筋骨格ロボットは、動物の動きを再現するなど、バイオメカニクスの研究に利用できる。筋肉に該当するアクチュエーターとしてモーターと腱 [12] を用いる方式と、空圧人工筋肉を用いる方式に分かれる [11]。図 1 は本研究で試作した「物理的な生体シミュレーター」としてのロボティクスプラットフォームの概念を示す。

## 2 ロボット的设计

### 2.1 実際の臨床症例の模擬

この研究では、重度の MPL を患うトイ・プードル (図 2(a)) に基づいた筋骨格ロボットを試作した。この疾患は、膝蓋骨が正

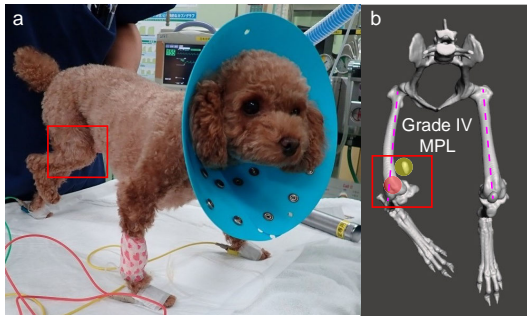


Fig.2 (a) A toy poodle with severe MPL on its right leg (the red box), serving as the model for the developed robot; (b) 3D Skeletal Models Derived from CT Data.

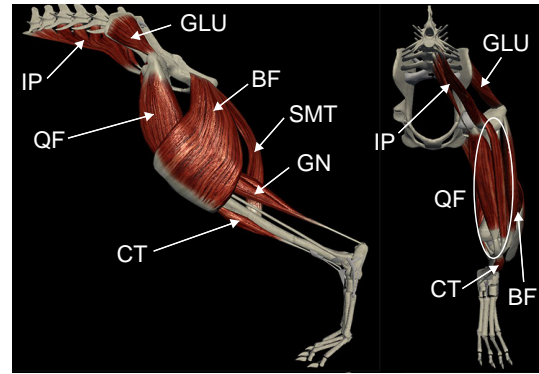


Fig.3 3D Representation of major flexors and extensors replicated in the robot.

常な位置から離れてしまい、痛み、異常な歩行、活動性の低下を引き起こす。この病態はIからIVまで段階的に評価される。膝蓋骨が永久的に脱臼し、犬の運動能力に大きな影響を与え、外科的介入を必要とするグレードIVの場合の症例をロボットのモデルとした。

試作したロボットは、右脚の大幅な骨格の変形、特にずれた大腿骨を含む、グレードIVのMPL症例の解剖学的な特性を模倣している。膝から下の部分がねじれ、適切な接地と正常な脚の機能が困難である。特徴的な症状は、大腿四頭筋が、MPLのために意図しない屈曲を引き起こし、小股関節を伸展させるのではなく、大腿四頭筋に与える影響を示していることである。

このロボットは、臨床症例を再現することで、獣医整形外科研究のための貴重なツールとして機能し、犬の同様の症状に対する理解と治療への応用の可能性を提示する。

## 2.2 筋骨格系

ロボット試作の前段階として、骨の3Dモデル(図2(b))を作成することが必要である。骨格は、脊椎、骨盤、大腿骨、膝蓋骨、脛骨、趾骨の6種類の骨で構成されている。特に、背骨と足趾のいくつかの関節は、実用性を考慮して無視した。その結果、ロボットの自由度は、股関節が6自由度(股関節1つにつき3自由度を2つ掛け合わせたもの)、膝関節が4自由度(膝1つにつき2自由度を2つ掛け合わせたもの)、足根関節が2自由度(距骨1つにつき1自由度を2つ掛け合わせたもの)の計12自由度となった。

3Dモデルはその後、実用性と製作の容易さを考慮して実際の犬の2.5倍の大きさに拡大された。トイプードルという犬種におけるサイズのばらつきを考慮すると、このスケールリングはまだ現実的な範囲内である。例えば、モデル犬種であるトイプードルの肩の高さは、一般的に22cm以下である[13]。これに対し、最も大型の犬種であるスタンダード・プードルの肩の高さは、通常、45cm-62cmである[13]。

十字靭帯や距腿関節の靭帯など、距腿関節の主要な靭帯はロボットの骨格系に再現されている。しかし、股関節に関連する靭帯など、いくつかの細かい靭帯は省かれている。さらに、ロボットの設計では、趾自体が1つの部品に統合されているため、趾の多数の靭帯は再現されていない。さらに、半月板などのすべての軟骨は、模倣しないことにした。

本研究では、イヌの後肢の主要な伸筋と屈筋を選らんで模倣した。模倣された筋肉は、腸腰筋(Iliopsoas, IP)中殿筋(Gluteus medius, GLU)、大腿二頭筋(Biceps femoris, BF)、半腱様筋(Semitendinosus, SMT)、大腿四頭筋(Quadriceps femoris, QF)、腓腹筋(Gastrocnemius, GN)、前脛骨筋(Cranial tibial, CT)である。図3は列挙した筋肉を3D解剖学教育ソフトウェア(3D Dog Anatomy v2.01, Biospehra)で示したものである。

## 3 ロボットの製作

### 3.1 骨格系

試作したロボットの骨格形態は犬の骨構造を正確に反映しており、簡略化した骨格モデルを用いることが多い他の筋骨格系ロ

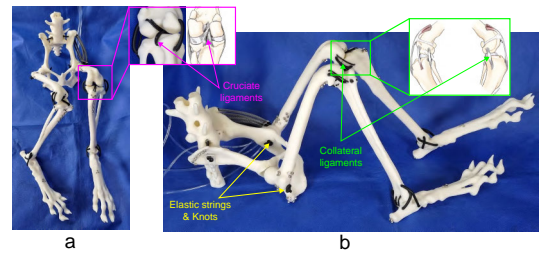


Fig.4 Overview of the robot's skeleton and joints.

ットとは差別化される。このように詳細に再現することで、バイオメカニクスシミュレーターとしてのロボットの有用性が高まり、より信憑性を持たせることができる。骨格の製作には3Dプリンターを用いて複雑な骨の形態を正確に再現した。

ロボットの脚には、股関節、膝関節、足根関節の3つの関節がある。膝関節においては、ほとんどの脚ロボットに見られる標準的な1自由度ではなく、実際の膝の解剖学的な構造を模倣して2自由度を持つ。足根関節に関しては、1自由度に簡略化して製作した。

弾性糸は靭帯として機能し、骨と骨をつないで関節を形成する。この特徴的な機能により、靭帯のような要素を持たないひたすら機械的な関節に依存する他の筋骨格ロボットとは区別される。

図4はロボットの骨格及び関節を示す上に、膝関節の解剖学的な構造との比較を示す。

### 3.2 筋肉系

ロボットのアクチュエーターとして採択された細径McKibben型空圧人工筋肉は、従来のものと比べて様々な利点を持つ。これには軽量、小型という特徴だけでなく、加圧時曲がることのできる特徴がある[14, 15, 16]。このような特性は、より動物の筋肉の特性に近い、ロボットの再現性を向上させる要因となる。図5は細径McKibben型空圧人工筋肉を示す。

章2.2で紹介した主要な骨格筋を人工筋肉を用いて製作し、骨格に付着した様子を図6に示す。各筋肉を構成する人工筋肉の本数は、実際の筋肉の大きさを参考にして決定された。

そして、細径McKibben型人工筋肉を複数使うことにより、

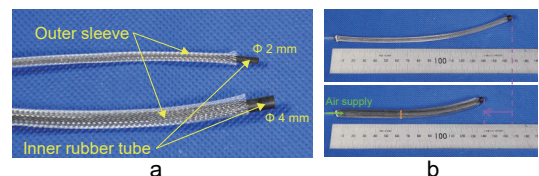


Fig.5 (a) Components of thin McKibben pneumatic artificial muscles; (b) Deflated state (top) and inflated state (bottom).

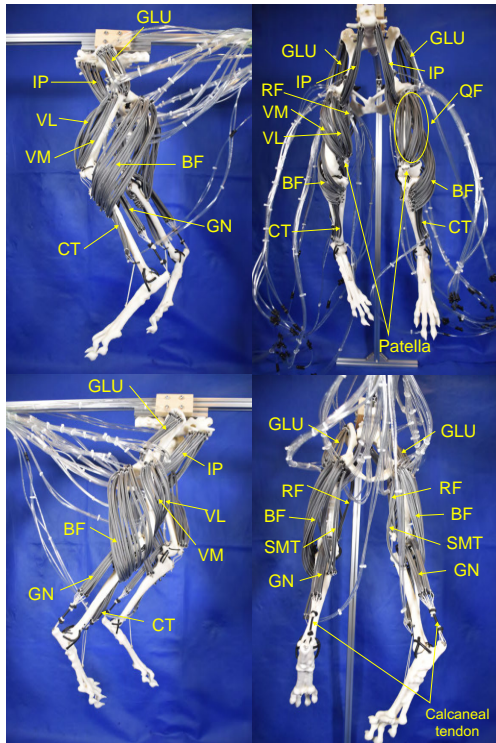


Fig.6 Comprehensive view of the robot with emulated muscle.

骨における筋肉の付着点が点状ではなく、面状にできる。これは章 1.2 で照会したコンピューター-筋骨格モデルと従来の多くの筋骨格ロボットと区別される点である。このような要素は試作したロボットがより近く動物の解剖学的な特性を模擬できるようにする。

表層筋膜が脚の動きに与える影響を調べるために、筋骨格系ロボットに疑似筋膜を組み込んだもので、バイオミメティック・ロボティクスにおける新しい試みを行った。表層筋膜は重要な結合組織であり、筋の相互作用を調整し、力学的な拘束を与える。この試みは、表層筋膜の機能を模倣し、バイオメカニクスにおける筋膜の役割についての理解を深めることを目的としている。ストッキングと圧迫包帯の素材を用いて表層筋膜の拘束特性を模倣した物を図 7 に示す。

#### 4 ロボットを用いたバイオメカニクス実験

##### 4.1 実験設定

ロボットを用いた実験では、ロボットの各筋肉の独立した自由な動きを可能にすることで、従来の動物ベースの研究の補完になる。この実験は、個々の筋群が関節の動きにどのような影響を与えるかを分析することに重点を置いている。

疑似筋膜を持つロボットと持たないロボットを、同じ筋活動条件下で比較分析することで、脚の動きにおける筋膜による拘束を究明する。それによって、筋膜の影響を著しく受ける筋肉を特定し、筋膜の生体力学的意義の理解を深めることが期待される。

関節角度を定量的に測定するため、ロボットにマーカーを付着し、同じ空気圧の条件下 (0.4 MPa) で各筋肉群を動かすビデオ撮影した。どんな筋肉も動いていない状態を初期状態とし、撮影されたビデオから各筋肉群が動いた時の書く関節の角度をこの状態と比較した。これは、疑似筋膜を持つロボットと持たないロボットの両方に一様に適用された。図 8 は付着されたマーカーの位置と測定される関節角をしめす。

背骨と骨盤がフレーム上に固定されていることを考えると、骨盤上の基準点は固定されたままである。この固定点は、各筋肉の収縮に対応する位置変化の比較を容易にする。各関節を表す添え字は、股関節 (hip)、脛腓関節 (stf)、足根関節 (tlc) であり、初期状態は '0' である。

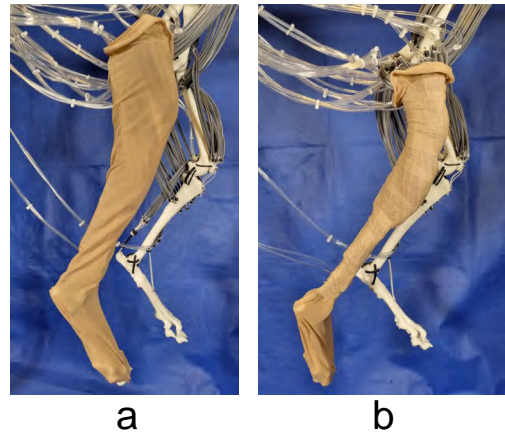


Fig.7 (a) The entire leg is wrapped in stockings, shaped to fit; (b) Afterward, a compression bandage was used to apply full restraint.

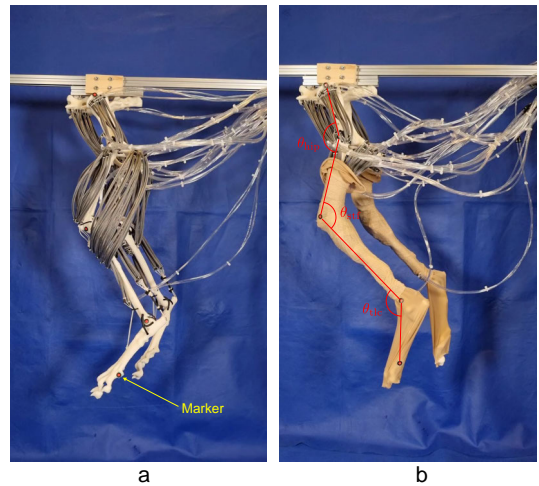


Fig.8 (a) Depiction of markers attached to the robot at key reference points for joint measurement. (b) Detailed illustration of each joint with markers in place.

特定の筋または筋群が関節に与える影響は、以下の指標を用いて定量化される。

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 \quad (1)$$

この式において、負の値 ( $-\Delta\theta$ ) は屈曲を表し、正の値 ( $+\Delta\theta$ ) は伸展を表す。

##### 4.2 実験結果

左脚とは異なり、右脚 (MPL) の大腿四頭筋 (QF) はその典型的な機能とは逆に、距腿関節の屈曲に寄与する。この機能の逆転は重症の MPL の特徴であり、章 2.1 で既に議論されている。この症状は、疑似筋膜がある場合とない場合の両方の構成で一貫して観察された。この一貫性は、開発した筋骨格ロボットが MPL の症状を正確に再現していることを示唆しており、バイオメカニクス研究における有用性を検証するものである。

図 9 と図 10 は、様々な条件下での関節角度差の比較を示している。丸印は偽筋膜のない測定値、三角印は偽筋膜のある測定値を示す。0 以上は関節伸展、0 以下は関節屈曲を示す。

左脚では、疑似筋膜の有無にかかわらず、特定の筋による特定の関節の屈曲・伸展は一貫している。しかしほとんどの場合、疑似筋膜のない構成では、拘束が少ないため関節角度の差が大きくなります。注目すべきは、筋膜がない場合、大腿二頭筋 (BF) は膝関節を屈曲させるが、筋膜がある場合は伸展させることであ

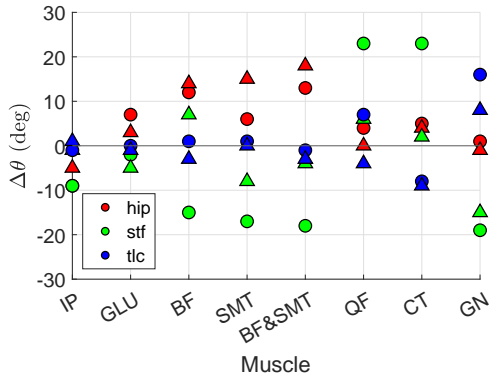


Fig.9 Comparison of joint angle differences for each muscle contraction of the left leg in normal condition.

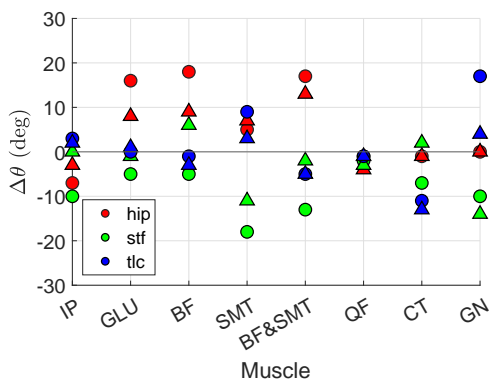


Fig.10 Comparison of joint angle differences for each muscle contraction of the right leg in MPL condition.

る。さらに、擬似筋膜があると、BFは股関節をさらに伸展させる。また、擬似筋膜があると、半腱様筋(SMT)とハムストリングス群(BFとSMT)は股関節をより大きく伸展させる。

一方、右脚では、左脚の場合と同様、筋膜があるために可動域が狭くなる。仮性筋膜の存在は、BFによる $\Delta\theta_{stf}$ の符号を変化させ、SMTによる $\Delta\theta_{hip}$ を増加させ、左脚の所見と類似する。前述したように、擬似筋膜の有無にかかわらず、QFは膝関節を屈曲させるのではなく伸展させる。

## 5 結論

本研究では、バイオメカニクス研究のために設計された筋骨格系ロボットプラットフォームを試作した。実際の骨格構造を組み込み、擬似筋膜を導入することなどの新たな試みが行われた。これにより、臨床症状の再現が可能となり、整形外科疾患と手術の発展にも寄与できると期待される。このロボットは、筋群の動き、特に関節の屈曲と伸展における表層筋膜の拘束高価を究明、従来のモデルでは頻りに無視した軟組織の相互作用の重要性を示唆した。

しかし、ロボットの設計で多くの解剖学的要素を排除されており、関節可動域も限られているため、実際のモデルの解剖学的構造との間に食い違いがある。現在、このロボティックプラットフォームの用途は、主に関節角度の測定と幾何学的特性の調査であり、接地状態は考慮されていない。このロボットを通じてバイオメカニクスの理解を深めるためには、力解析や歩行のような複雑な動きの再現を含む今後の研究が必要となる。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 23H05445 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 羅基燾, 難波江裕之, 原田恭治, 鈴木康一, “人工筋を用いた犬の後肢の筋骨格系模倣,” ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022, pp. 2A1-F12, JSME, 12 2022.
- [2] 伊藤春那, 難波江裕之, 原田恭治, 鈴木康一, “犬前肢の筋骨格模倣による力学的特性の考察,” 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, pp. 2E1-02, SI, 12 2023.
- [3] T.-W. Lu and C.-F. Chang, “Biomechanics of human movement and its clinical applications,” *The Kaohsiung journal of medical sciences*, vol. 28, pp. S13-S25, 2012.
- [4] G. Y. Lee and C. T. Lim, “Biomechanics approaches to studying human diseases,” *Trends in biotechnology*, vol. 25, no. 3, pp. 111-118, 2007.
- [5] J. L. Cook, “Cranial cruciate ligament disease in dogs: biology versus biomechanics,” *Veterinary Surgery*, vol. 39, no. 3, pp. 270-277, 2010.
- [6] H. Stark, M. S. Fischer, A. Hunt, F. Young, R. Quinn, and E. Andrada, “A three-dimensional musculoskeletal model of the dog,” *Scientific reports*, vol. 11, no. 1, p. 11335, 2021.
- [7] J. A. Reinbolt, A. Seth, and S. L. Delp, “Simulation of human movement: applications using opensim,” *Procedia Iutam*, vol. 2, pp. 186-198, 2011.
- [8] A. Seth, J. L. Hicks, T. K. Uchida, A. Habib, C. L. Dembia, J. J. Dunne, C. F. Ong, M. S. DeMers, A. Rajagopal, M. Millard, et al., “Opensim: Simulating musculoskeletal dynamics and neuromuscular control to study human and animal movement,” *PLoS computational biology*, vol. 14, no. 7, p. e1006223, 2018.
- [9] J. Aguilar, T. Zhang, F. Qian, M. Kingsbury, B. McInroe, N. Mazouchova, C. Li, R. Maladen, C. Gong, M. Travers, et al., “A review on locomotion robotics: the study of movement at the intersection of robotics, soft matter and dynamical systems,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 79, no. 11, p. 110001, 2016.
- [10] F. J. Valero-Cuevas, “Applying principles of robotics to understand the biomechanics, neuromuscular control and clinical rehabilitation of human digits,” in *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)*, vol. 1, pp. 270-275, IEEE, 2000.
- [11] S. Kurumaya, K. Suzumori, H. Nabae, and S. Wakimoto, “Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles,” *Robomech Journal*, vol. 3, pp. 1-15, 2016.
- [12] Y. Nakanishi, Y. Asano, T. Kozuki, H. Mizoguchi, Y. Motegi, M. Osada, T. Shirai, J. Urata, K. Okada, and M. Inaba, “Design concept of detail musculoskeletal humanoid “kenshiro”-toward a real human body musculoskeletal simulator,” in *2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*, pp. 1-6, IEEE, 2012.
- [13] H.-P. Guler, K. Binz, E. Eigenmann, S. Jäggi, D. Zimmermann, J. Zapf, and E. R. Froesch, “Small stature and insulin-like growth factors: Prolonged treatment of mini-poodles with recombinant human insulin-like growth factor i,” *European Journal of Endocrinology*, vol. 121, no. 3, pp. 456-464, 1989.
- [14] S. Krishnan, T. Nagarajan, A. M. A. Rani, and T. Rao, “Silk pneumatic artificial muscle (spam) construction for biomedical engineering application,” in *2012 IEEE Business, Engineering & Industrial Applications Colloquium (BEIAC)*, pp. 302-306, IEEE, 2012.
- [15] M. A. Meller, M. Bryant, and E. Garcia, “Reconsidering the mckibben muscle: Energetics, operating fluid, and bladder material,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 25, no. 18, pp. 2276-2293, 2014.
- [16] S. Kurumaya, H. Nabae, G. Endo, and K. Suzumori, “Design of thin mckibben muscle and multifilament structure,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 261, pp. 66-74, 2017.