

博士論文（要約）

筋骨格ロボットによる棒高跳び実現のための
姿勢・ポール弾性特性活用戦略

西川 鋭

要約公表について

本博士論文は東京大学が認める「やむを得ない事由」にある、「博士論文の全部または一部が、単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定」に該当するため、「東京大学学術機関リポジトリへの提供論文利用許諾要件」にしたがって、「博士論文の内容を要約したもの」のみ公表する。3章の一部、4, 5, 6, 7章は未発表の内容から構成されるため、本要約には含めない。本論文の未発表部分は5年以内に出版予定である。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
第 2 章	身体運動に寄与する筋骨格系と弾性要素の活用	3
2.1	棒高跳び	3
2.2	筋骨格系とそれを活用したロボット	6
2.2.1	筋骨格系の運動への貢献	6
2.2.2	筋骨格ロボット	7
2.3	弾性要素の活用	10
2.3.1	エネルギー効率の向上	10
2.3.2	運動性能の向上	10
2.3.3	引き込みによる安定化	10
2.3.4	剛性変化による運動への適応	11
2.3.5	棒高跳びにおける弾性活用	11
2.4	本研究におけるアプローチ	12
第 3 章	筋関節複合機構の特性が跳躍性能に与える効果	13
3.1	筋関節複合機構	14
3.2	関節角度依存モーメントアーム機構	15
3.3	二脚ロボットによる浅いしゃがみからの跳躍	18
3.3.1	ロボットモデル	19
3.3.2	複数状態からの跳躍シミュレーション	21

3.3.3	実ロボットにおける最適姿勢のシフト	26
3.3.4	まとめ	30
付録 A	業績一覧	31
	謝辞	37
	参考文献	39

目次

2.1	World record progression in men's pole vault.	4
3.1	ADMA mechanism.	15
3.2	Angle-dependent moment arm and constant moment arm.	16
3.3	Parameters of McKibben-type PAM.	16
3.4	Tension-length relation of McKibben-type PAM.	17
3.5	Change of the torque-angle relation by each parameter.	18
3.6	Layout of muscles.	19
3.7	Torque-angle relations of ADMA model, CMA model	21
3.8	Generation of jumping motion.	22
3.9	Counter movement jump.	23
3.10	Initial squatting conditions.	23
3.11	Maximum H_{\max} to each posture [44].	24
3.12	Counter movement.	25
3.13	Simulation of a counter-movement jump.	25
3.14	Range of motion during squat jumping.	26
3.15	Musculoskeletal bipedal robot.	28
3.16	Robotic foot design (right foot).	28
3.17	Photographs of the highest jumping of the robot.	29
3.18	Shift of the optimal posture using ADMA.	29

表目次

3.1	Physical parameters of the robot.	19
3.2	Parameters of muscles and moment arm.	20
3.3	Specifications of the robot.	27

第 1 章

序論

1.1 背景

動物は高所への跳び乗り，高所からの跳び降り，障害物の跳び越え，枝から枝への跳び移りなどを駆使して，素早く環境中を移動することができる．走行や跳躍といったダイナミック運動は，SLIP モデル（Spring Loaded Inverted Pendulum model）と呼ばれるバネ質点モデルで近似されるように，弾性体的な挙動を示すことが知られている [54]．こうしたダイナミック運動においては，ヒトや動物は身体内の弾性体である筋や腱の活用により，効率，パフォーマンスを向上させる [13]．これに倣い，ロボットにおいても弾性体を活用することで効率良い運動が実現されてきた [67]．ヒトや動物は，身体内の弾性要素の活用に加え，身体外部の機構の活用により運動パフォーマンスを向上させることができる [35]．例えば，オランウータンは枝の弾性を活用して枝渡りを行う [59]．義足のランナーは湾曲したカーボン製の板バネを用いて高速に走行ができる [45]．体操競技の跳馬で用いられる踏み板や棒高跳びの柔軟ポールなどの身体外の大きな弾性要素を活用することで運動機能を向上させる．特に，棒高跳びは，身体の何倍もの長さの弾性ポールを扱うことで飛躍的に跳躍高さを向上させる興味深いタスクである．棒高跳びにおいては，バーを跳び越える際の競技者の力学的エネルギーは，踏切時に持つ運動エネルギーの 120% ほどである [11]．これは，棒高跳びにおいては，ポールの受動的な活用による水平速度の垂直高さへの変換のみならず，ポール弾性の能動的活用が行われていることを示す．しかし，棒高跳びでは，身体外の大きな弾性要素により身体が大きく動かされ，自由に身体運動を行えないた

め、弾性体を活用して運動性能の向上を図るのは容易ではない。さらに、運動中の身体-ポール双方の姿勢変化も激しい。こうした大きな姿勢変化を伴う運動における身体外の大きな弾性要素の活用法が明らかになることで、ダイナミック運動の理解、ロボットの運動性能の向上に役立つことが期待される。

姿勢の変化により、身体の出力量は大きく変化する。腕の姿勢が関節の剛性よりも手先の安定性に寄与するという知見がある [34]。筋骨格系の拘束により、姿勢によって、手先剛性の調節幅が異なるという知見もある [18]。また、尾形、國吉は古武術の押し動作における特殊な手の握りが手先剛性を高めることを示している [77]。筆者らも美容師の肩を外転させる特徴的な姿勢に着目し、その姿勢が作業中の手先安定性を下げることが示唆してきた [76]。スポーツにおいても、スケートのスピンド腕を縮めることにより、慣性モーメントを小さくすることで角速度を高めるといような、姿勢の変化を活用した運動が見られる [75]。こうした姿勢による身体の出力量の変化は、棒高跳びのような大きく姿勢変化を伴いながらポールに働きかける運動に大きな影響を及ぼすと考えられる。また、弾性体は振動的な振る舞いをするところから、力を加えるタイミングによって振動の増幅、減衰が変化する。そのため、棒高跳びにおける弾性体の効果的な活用には、姿勢や弾性体の特性に基づく力発揮タイミングが重要な役割を果たすと考えられる。

1.2 目的

本研究では、大きな弾性要素の特性を活用するダイナミック運動として棒高跳びに着目し、ロボットによって棒高跳びを実現することを目的とする。そのために、姿勢特性、能動的なポール操作による弾性特性の活用に着目する。

動物の身体構造である筋骨格系には、二関節筋や粘弾性要素による運動調節能力があることが知られている [61, 14, 48]。こうした身体がもたらす素早い運動調節能力は神経系を介す反射より早いことから *preflex* と呼ばれる [6]。棒高跳びのような、外部とエネルギーをやりとりし、予測外の力を受ける可能性の高い運動においてはこの運動調節能力は有用であることが期待される。そこで、本研究で用いるロボットとしては生体の筋骨格系を模した筋骨格ロボットを用いる。

第2章

身体運動に寄与する筋骨格系と 弾性要素の活用

本章では、本研究で扱うタスクである棒高跳び、ロボットプラットフォームである筋骨格ロボット、弾性体活用について先行研究をまとめ、本研究のアプローチについて述べる。2.1節では、本研究で扱うタスクである棒高跳びについて、これまでの知見についてまとめ、本研究で取り扱う範囲について述べる。2.2節では、筋骨格系の運動寄与についての知見をまとめた後、これまで開発されてきた筋骨格ロボットについて紹介し、本研究で用いるロボットの位置づけを明らかにする。2.3節では、弾性体の活用に関する先行研究を分類し、本研究の位置づけを示す。以上を踏まえ、2.4節では、本研究で扱うタスクである棒高跳びの特徴を挙げ、その実現に向けた本研究のアプローチについて述べる。

2.1 棒高跳び

棒高跳びは、長いポールを用いることで、高所のバーを跳び越える競技である。用いるポールについては自由度が大きいため、ポールの素材や形状について研究がなされてきた [9]。ポールの素材は、木、竹、金属と変化してきたが、柔軟なグラスファイバーを使用したポールの普及によって、飛躍的に記録が向上した (Fig.2.1)。こうした柔軟ポールを使うことで、助走による速度の水平成分を一度ポールに蓄えることができるようになり、効率の良い運動方向の変換ができる [29]。

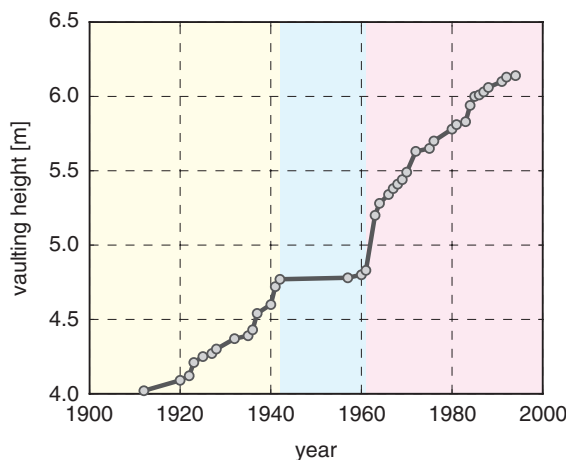


Fig.2.1 World record progression in men's pole vault [78]. Yellow section shows the records with bamboo pole. Blue section shows the records with metal pole. Red section shows the records with glass fiber pole.

棒高跳びは複数のフェーズに分けることで解析が行われてきたが、以下に示すようにその分け方は変化してきた [12].

伝統的なコーチングでは、(i) 走行, (ii) 最後の3歩における腕の拳上, (iii) ポール挿入を含む踏切, (iv) スウィング, (v) ロックバック, (vi) 倒立, (vii) バー越えの7フェーズに分けているが、著者によって分け方が異なることがある。以下に、解析に用いられるフェーズ分けを紹介する。

Hay は4つの高さによって棒高跳びをモデル化している [15]。離地時の重心高さである H_1 、ポール最大伸展時の重心高さ H_2 、ポール解放時の重心高さ H_3 、バーに対する最大重心高さ H_4 の4つである。このモデルによる解析では、競技者の速度やポール湾曲などの運動学的変数の解析に限定される。

Angulo-Kinzler は、4つのフェーズに分け、各フェーズで変数を定義することで解析している [1]。1つ目のフェーズは走行フェーズで全ての着地 (TD, touchdown) と離地 (TO, take off) を含む。2つ目のフェーズは踏切フェーズで、最後の着地 (TD1, last touch down), ポール挿入 (PP, pole plant), 最後の離地 (TO1, last take off) を含む。3つ目のフェーズはポール支持期で、ポール最大湾曲 (MPB, maximum pole bend), ポール最大伸展 (PS, pole straight), ポール解放 (PR, pole release) を含む。4つ目のフェーズは自由落下フェーズで、PR以降からバー越えまでの最大重心高さ

(HP, peak height) を含む。

近年では，ポールと競技者の間のエネルギーのやりとりを含むモデルが提案されている [2]。このモデルでは，ポール支持期のエネルギーのやりとりに基づき，TD1 から MPB までを 1 つ目のフェーズ，MPB から HP までを 2 つ目のフェーズとしている。

これらのモデルをもとにして，Frère は次のフェーズ分けを提案している [12]。

1. 走行フェーズ：最後の 1 歩を除く走行のフェーズ。このフェーズでは水平方向の速度の増加による運動エネルギー増加を目指す。
2. 踏切フェーズ：TD1, PP, TO1 を含む最後の一步。
3. ポール湾曲フェーズ：TO1 から MPB までのフェーズ。競技者の運動エネルギーからポールの歪みエネルギーへの変換が起こる。
4. ポール伸展フェーズ：MPB から PS, PR を経て HP までのフェーズ。ポールの歪みエネルギーが競技者の位置エネルギーに変換される。

本研究では，大きな弾性体の扱いに着目するため，後半の 2 フェーズであるポール湾曲フェーズ，ポール伸展フェーズを扱う。これまでに，走行に関する研究は，バイオメカニクス，ロボット双方で盛んになされてきた [8, 74, 58]。ポールを倒しながら進むという特殊な要素はあるものの，最初の走行フェーズに関してはこれらの知見の転用が比較的容易であると考えられる。また，それに続く踏切フェーズは走行フェーズからの流れが重要であると考えられるため，走行と一体で扱うことが望ましい。

これまで，ポール湾曲フェーズ，ポール伸展フェーズについては，棒高跳びを行うヒトの計測がなされてきた。モーションキャプチャとポール挿入台のフォースプレートを用いることで，競技者とポール間のエネルギーのやりとりが分析された [2]。その結果，競技者のエネルギーの減少量よりも，ポールへの歪みエネルギーの増加が大きいことが明らかになった。このエネルギー増加は競技者がポールに働きかけることで生じたと考えられた。競技者がどのようにポールに力を加えているのか，ということも調べられてきた。競技者の各関節の発揮トルクが逆動力学を計算することで求められた [32]。また，筋電の計測によって，動作中の筋活動も調べられている [11]。これらの知見から，ヒトはポールに対して前半，後半で逆方向に曲げモーメントを加えていることがわかってきた。

しかし，これらの運動は実際の競技者が経験や指導を通じて獲得したものであり，

必ずしも最適なものとは限らない。これらの運動が跳躍高さにどのようにつながるのかというメカニズムを明らかにすることは、棒高跳びの技術に対して新しい示唆を与えうる。さらに、その技術をロボットに応用可能な形で抽出するためにもメカニズムの解明は重要である。棒高跳びはダイナミックな運動であることに加え、ポールの変形、ポールの挿入台への衝突、ポールを挿入台に挿し込むことで保持するなど不安定な要素を含むため、完全にモデル化するのは難しい運動である。よって、シミュレーションに加え、実世界での現象の確認のために実世界で運動を行えるロボットを併用するアプローチをとることが、棒高跳びにおける身体運動がもたらす効果の理解のために有効であると考えられる。

2.2 筋骨格系とそれを活用したロボット

棒高跳びはポールから大きな力を受け、湾曲したポールのみで地面と接する不安定なタスクである。そこで、ロボットの身体構造として、運動調節能力があると知られている筋骨格系に着目する。本節では、筋骨格系が運動に与える効果についてのこれまでの知見と、筋骨格ロボットの先行研究についてまとめる。

2.2.1 筋骨格系の運動への貢献

二関節筋

二関節筋は跳躍などの運動の連鎖に有効であると言われている。跳躍において、股関節屈曲と膝関節伸展を担う大腿直筋は、上体の起き上がりに伴い伸ばされ、結果として膝を伸ばす。さらに、膝関節屈曲と足関節伸展を担う腓腹筋は、膝の伸展により伸ばされ、足関節の伸展を助ける [60]。このように、遠位の関節に力を伝えると同時に、近位の関節の伸展を妨げ、関節限界への衝突を弱める効果もある [60]。

また、関節トルクのみで制御する場合に比べて、制御性が向上すると言われている。二関節で考えた場合、関節トルクのみだと四角形の出力分布を示すのに対し、3対6筋モデルで考えた場合は六角形の出力分布を示す [47]。また、剛性制御の観点からも二関節筋を備えたリンク機構の方が外乱に対して安定性が高い [28]。こうした知見をもとに、抗重力筋であり力発揮を担当する単関節筋と制御を主に受け持つ二関節筋という役割分担がなされているという考えがある [72]。寝たきりになった場合に単

関節筋はすぐに衰えるが、二関節筋はなかなか衰えないという話もこれを支持する傍証である [72].

筋腱複合体

筋腱複合体も運動への寄与が多く調べられている要素である。腱に一度エネルギーを蓄えてから放出する伸張-短縮サイクル (Stretch-Shortening Cycle, SSC) が反動をつけた跳躍やドロップジャンプ、走行などにおいて、跳躍高さの向上やエネルギー効率の向上に寄与している [7, 13]. 動物においてもカンガルーの長いアキレス腱が効率の良い移動を可能としていることが示されている [10].

筋は速度の増加に伴い発揮張力が減少するが、こうした特性を活かす腱の働きも指摘されている。反動跳躍において、筋腱複合体の長さは大きく変化するが、腱が長さ変化の大きな部分を担い、筋はあまり長さが変化しないことが確認されている [13]. 腱が速い速度を、筋が大きな力を担うという役割分担をすることで、パフォーマンスを向上させているといえる。

筋特性

筋は粘弾性を備えたアクチュエータであり、その特性が運動に与える影響は大きい。ホッピングの安定化について、筋の粘弾性に着目して解析した研究がある [14]. この研究では、筋特性のみで得られる安定性を調べるため、筋単体のホッピングを考え、一回のホッピングで戻ってくる高さを調べている。結果、粘性を持ったものが安定性が高いことを示している。

羽状筋と呼ばれる筋においては、筋の収縮方向とは異なる羽状角をもって筋線維は配置されており、この働きについて調べた研究がある [3]. この角度が筋の収縮度合によって変化することから、羽状筋は可変減速比を備えているといえる。この研究では、羽状角の回転による収縮速度の増加を示し、力が小さい時ほど大きな回転が起きていたことから、力に応じた減速比の自動調整が起こっていると主張している。

2.2.2 筋骨格ロボット

身体による計算という観点から、運動における身体の重要性が指摘されている [51]. 身体の機構が運動生成をする最たる例として、アクチュエータなしで歩行動

作を行う受動歩行が挙げられる [31]. また, 神経振動子 (Central Pattern Generator, CPG) と反射により身体と環境のカップリングを起こすことで歩行運動が生成可能であることが示されてきた [57, 27]. こうした研究の取り組みの1つとして, 2.2.1 節の筋骨格系の利点をロボットに応用する試みが行われている.

ここでは, 従来のロボットを, 複雑な筋骨格系の機構を可能な限り再現したロボット, 筋骨格系の要素を抽出することで性能向上を図ったロボットに分け, 各々について紹介する.

精緻な筋骨格系を備えたロボット

筋骨格系の冗長性に着目して, その複雑な機構をできるだけ再現する試みがなされてきた. 冗長な筋骨格系は, その身体設計, 身体制御の観点から従来のロボットとは大きく異なるため, こうしたロボットを扱うことはロボットの新たな展開につながると期待される. このように, 筋骨格ロボットを知能ロボットフロンティアとして捉え, 筋骨格系の様々な特徴をロボットに取り入れる研究がなされてきた [69].

脊椎の多自由度を始めとして, 全身の筋骨格系の精緻な再現を行っているロボットとして, 腱太から始まる筋骨格ヒューマノイドのシリーズがある [38]. これを発展させ, 小太郎 [37], 小次郎 [36] が開発されたさらに, 腱臓では, 剛性可変機構が導入されている [41]. 腱志郎では, 骨格形状もヒトのものを模倣しており, 外観のリアルさも増している [40].

Ecce シリーズのロボットも複雑な筋腱構造を模倣したロボットである [65]. このロボットは体幹部から腕にかけての精緻な構造を再現している.

こうしたロボットは, 冗長な筋骨格系の働き, 制御法の理解のために有効なプラットフォームとなることが期待される. しかし, 機構が複雑であり, 全身のダイナミック運動を扱うのは困難である.

筋骨格系の要素調査・活用のためのロボット

一方, 複雑な筋骨格系の中から運動機能の向上に寄与することが期待される要素を抽出してロボットに実装することで, ロボットの運動性能を向上させる試みも行われてきた. 生物の原理を応用して高い機能性を持たせる生物規範ロボットはこれまで多く開発されており [22, 66], 筋骨格系の要素を取り入れたロボットはその一種であると言える. また, 動物の要素を模したロボットを, 実際に環境内でロボットを動かす

ことによって、動物の適応性創出の原理を示すことを目指す発見的バイオロボティクスという考えがある [73]。このアプローチにおいても、環境内でダイナミックに運動できる程度に簡略化した生体模倣システムは有効と考えられる。

二関節筋を関節間にバネやワイヤを張ることで簡易的に模し、これらの機構の働きを調べる、ロボットの運動性能を向上させる試みがなされてきた。四脚動物の後肢をモデル化したロボットである **Kenken** は腓腹筋に相当するバネを備えたロボットである [20]。このロボットは股関節、膝関節の駆動のみで、足首関節にアクチュエータを持たないにも関わらず、ホッピングを可能とした。このようなバネによる関節間の力伝達を二脚ロボットの歩行、走行に適用した例もある [21]。このロボットは、二関節筋としてハムストリングス、大腿直筋、腓腹筋、単関節筋として前脛骨筋のバネを備え、股関節の駆動のみで運動を行う。得られた運動はヒトの歩行、走行と近い特徴を備えていることが示されている。また、四脚ロボットの跳躍において、腓腹筋に相当するワイヤを配置することで、床反力の方向が重心に向くようになり、安定した跳躍が得られることが示されている [48]。

バイオメカニクスへの応用を目指して、電磁モータと直列バネによる駆動方式である **Series Elastic Actuator (SEA)** を用いた二脚ロボットが開発された [30]。このロボットは二関節筋を含むヒト下肢の筋配置を模倣し、ホッピング動作を行っている。

さらに、筋型アクチュエータを用いることで生体筋の柔軟性の利点をロボットに活かす研究もなされてきた。

1960年代にゴム人工筋を用いた歩行機械が作られて以降 [70]、空気圧人工筋を使うロボットは多く開発されてきた。脚に3対の単関節筋を備えたロボットである **Lucy** は **ZMP** 規範の制御による二脚の2次元静歩行を実現している [64]。このロボットは、適応的な歩行を目指し、拮抗駆動による剛性制御ができることが特徴である。このロボットに用いられている空気圧人工筋は **Pleated Pneumatic Artificial Muscle** と呼ばれる横に大きく膨らむ人工筋である。

空気圧人工筋は軽量であるため、ダイナミック運動を行うロボットに用いられることがある。このアクチュエータを用いて、適切に筋配置をすることで高い跳躍を行うロボットが開発された [42]。一脚の跳躍ロボットを用いて、二関節筋による関節間協調を実証している研究もある [17]。また、二脚の筋骨格ロボットによる走行も実現されている [43]。

本研究では、ダイナミック運動を扱うため、本小節で取り上げたロボットに倣い、

適度に簡易化された筋骨格系を備えたロボットを用いる。

2.3 弾性要素の活用

弾性要素を活用することで、ロボットのダイナミック運動の効率、性能を向上させる試みはこれまでも多くなされてきた [67]。本節では、ロボットによる弾性要素の活用について分類することで本研究の弾性要素活用における位置づけを示す。

2.3.1 エネルギー効率の向上

生体の腱を活用した効率良いロコモーションを模して、弾性要素によるエネルギー回生を活用する試みは広くなされている。Raibert のホッピングロボットは脚に空気バネを用いている [52]。このバネによりエネルギー回生を行い、失われたエネルギー分だけエネルギーを加えることで、ホッピング動作を実現している。軽量の板バネを活用することで、高い効率のホッピングを行うロボットも開発されている [5]。このロボットでは空中期でのバネへのエネルギーの蓄積も行っている。上述の走行する二脚の筋骨格ロボットも下腿部に競技用の板バネ義足を用いており、走行中のエネルギー効率の向上を目指したものと言える [43]。

2.3.2 運動性能の向上

弾性要素に事前にエネルギーを蓄えておき、一度に放出することで瞬発的な運動が実現できる。また、弾性要素は適切な位相で入力を与えると共振現象を起こす。こうしたエネルギー解放、増幅機能を活用する試みもなされてきた。エネルギーを事前にバネに蓄えることで 91 G の加速度を発揮するボールキャッチロボットが開発されている [25]。また、直列弾性要素を備えたロボットの共振によるエネルギー増加に基づく駆動法が提案され、投擲動作に適用されている [16]。

2.3.3 引き込みによる安定化

弾性要素は自然周波数に引き込まれる性質があることから、身体と環境の相互作用で運動を生成するロボットに使用されてきた。Kimura et al. は脚にバネを備えた四脚

ロボットによって、神経振動子（Central Pattern Generator, CPG）と反射により身体と環境のカップリングを起こすことで歩行運動を生成した [27]. Owaki et al. は足部に弾性を備えた 2 脚ロボットを CPG で動かすことで、安定した歩行を生成した [49]. また、同様に CPG を用いた運動生成で、四脚ロボットにおいて身体特性の変化による歩容の変化も見られている [50]. 昆虫の自己安定機能に着目した六脚の高速移動ロボットも開発されている [26]. このロボットはオープンループの制御によって 2.3 m/s 以上の速度の走行を実現している.

2.3.4 剛性変化による運動への適応

弾性要素を用いたロボットにおいては、脚や胴体の剛性を変化させることで、運動の効率や性能を向上させる取り組みがなされてきた. Hurst et al. は Series Elastic Actuator (SEA) の一種である Actuator with Mechanically Adjustable Series Compliance (AMASC) を用いて BiMASC というロボットを開発した [19]. このロボットは剛性可変の脚を有し、SEA によるエネルギー回生を行っている. Sreenath は Hybrid zero dynamics に基づく制御を用いることで脚の剛性を制御し、バネを含んだロボット MABEL の 3.06 m/s の走行を実現している [56]. 動作のフェーズに応じて体幹の剛性を変化させることでブラキエーション動作を行うロボットも開発されている [68]. 上述の筋骨格ロボット Lucy [64] もここに分類される.

2.3.5 棒高跳びにおける弾性活用

棒高跳びは、水平方向から垂直方向へのエネルギー変換を行うことから 2.3.1 節のような効率の良いエネルギー変換を行うタスクと見ることもできる. しかし、ポール支持期のエネルギー増加が見られるため、2.3.2 節に見られる弾性体の増幅機能の活用も同時に実現するタスクであるとも言える. こうした、棒高跳びにおける増幅機能を活用するためには、2.3.4 節のような系全体の剛性変化という概念が重要になると考えられる. よって棒高跳びは弾性体の活用における多様な側面を含むタスクである.

これまでに、棒高跳びをするロボットも開発されてきた. 河村らは 2 リンクのロボットによって棒高跳びを実現した [71]. しかし、このロボットではヒト計測によるトルク算出により運動生成をしており、各動作がもたらす効果についての検討は行っ

ていない。本堂らはポール接地時の状態が跳躍方向に与える効果について、理論的に解析を行い、ロボット実機においても検証を行った [79]。しかし、この研究では踏切後の運動は考慮していない。本研究では、踏切後のポールにぶら下がった期間における運動を扱うことで、大きな弾性要素を備えたポールを活かす身体運動について調べる。

2.4 本研究におけるアプローチ

本研究で題材として扱う棒高跳びは従来の弾性利用に対して以下の特徴を持つ。

1. 大きな弾性容量を持つポールを扱う。
2. ダイナミックに大きくポールの形状が変化し、エージェントの身体運動に大きな影響を及ぼす。

1つ目の特徴はこのタスクにおいて弾性要素が大きな役割を果たすことを意味する。また、ポールの弾性要素は線形バネとは異なる特性を持つため、線形バネの理論をそのまま適用することはできない。2つ目の特徴により、棒高跳びは単純な弾性要素へのエネルギー蓄積、解放のタスクに留まらない。棒高跳びにおけるヒト-ポールを合わせた系は、身体の運動がポールに与える効果、ポールの挙動が身体運動に与える効果が複雑に絡み合った系であるため、解析的にその挙動を明らかにするのは困難である。本研究では、棒高跳びの運動を様々変化させ、弾性力による効果、身体運動による効果に着目することで、そのパフォーマンスを決定する要因を抽出するアプローチにより、このタスクの実現につなげていく。シミュレーションとしては、基本的に、解析の容易性を考慮して、可能な限り単純なモデルを用いる。複雑なモデルを用いた場合には、結果の解釈が困難になることに加え、未知パラメータの設定によって結果が変わる恐れもある。一方、単純なモデルを用いることによって、実世界上の現象とは異なる恐れがある。そのため、実ロボットによる検証も並行して進めることで、実世界での妥当性の担保、あるいは相違点の抽出を行う。

第 3 章

筋関節複合機構の特性が 跳躍性能に与える効果

ダイナミック運動においては最大性能を発揮するためには、アクチュエータの出力限界に近い出力発揮が求められる。そのため、アクチュエータの出力限界はタスクパフォーマンスに大きく関わる。筋骨格系において、関節トルクは、筋張力とモーメントアームの積である。そのため、筋の特性は関節に与える出力特性の観点で考慮することが運動への影響を測る上で適切であると考えられる。本研究では、筋アクチュエータと関節への取り付けを含んだ機構を筋関節複合機構と呼び、その特性と運動の関係に着目する。本章では、棒高跳び実現に向けて筋骨格ロボットの運動性能向上を図る。ダイナミック運動の代表例として垂直跳びに着目し、筋関節複合機構の特性が跳躍に与える効果について調べる。本章の 3.3 節までの内容は学術雑誌に掲載された内容をまとめたものである [44]。3.1 節では筋関節複合機構の先行研究をまとめる。3.2 節では、筋関節複合機構の 1 つである角度依存モーメントアーム機構を取り上げ、その特性について調べる。3.3 節では、角度依存モーメントアーム機構が有用な例を示す。浅いしゃがみからの跳躍を含む様々な姿勢からの跳躍への角度依存モーメントアーム機構の効果を調べる。

3.1 筋関節複合機構

筋骨格系において、筋張力はモーメントアームを介して関節トルクとなる。そのため、モーメントアームは筋骨格系の重要な要素であり、生体筋骨格系においてその働きが調べられてきた。

比較生物学において運動特性に基づくモーメントアームの違いが指摘されている。例えば、フクロテナガザルのモーメントアームは枝渡りに適しているという知見がある [33]。この研究では、枝渡りをしないマカクザル、ヒト、チンパンジーとの比較によって、肩の内転、内旋、肘の屈曲の筋は力の出力に適しており、肩の外転、屈曲、外旋は速度と方向転換に適していることを示している。また、枝渡りしない種に比べ、肘と手首の屈筋がモーメントの発生で傑出していることも示している。また、こうした研究と関連して、化石からモーメントアームを推定することで、現存しない動物の運動能力を推定するという試みもなされている。モーメントアームを考慮することによって、ティラノサウルスがそれほど速く走れないこと、従来考えられていたよりも直立に近い姿勢が適していたという主張がなされている [23]。

モーメントアームを筋特性と合わせて考える研究も行われてきた。生体筋の力-速度関係は速度向上と共に力が減少する形であるため、120deg./s 以上の大きな底屈速度においては長いモーメントアームでは小さな関節トルク、関節パワー、関節仕事しか発揮できないことが示されている [39]。アスリートのアキレス腱のモーメントアームが競技レベルによって異なることが示唆されている。短距離走者のアキレス腱のモーメントアームは一般に比べ小さいという知見がある [4]。この研究では筋特性を考慮したシミュレーションによって小さいモーメントアームが大きな仕事を発揮できるという結果を得ている。

ロボットの機構に角度依存のモーメントアームを実装した例がある。直列弾性アクチュエータ (Series Elastic Actuator, SEA) の一種である MACCEPA という駆動機構ではプロファイルディスクを用いて剛性-角度特性を調節している [62]。これを用いたロボットによる跳躍では、ヒトの歩行時と似たトルク-角度特性が出現することが確かめられているが、跳躍性能に関する評価はなされていない。

空気圧人工筋においてもモーメントアームを角度依存にした例もある。非線形な出力特性を持つひだ状の空気圧人工筋を用いたロボットで pull-rod and lever 型の駆動

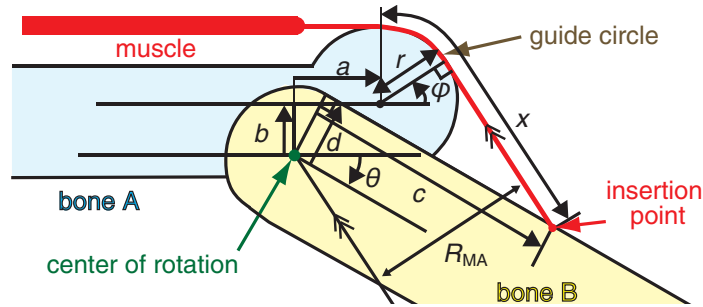


Fig.3.1 ADMA mechanism [44]. The lengths of a , b , c , d , and r are constant values; θ is the joint angle, and ϕ and x are functions of θ . R_{MA} represents moment arm of muscle.

方式で出力特性を変化させた例がある [63]. ここでは出力特性が線形に近くなり制御性が上がると主張している. Shin et al. は, 非円形の滑車を用いることで広い領域で力を発揮できるような出力特性を実現している [55]. この研究では, 提案機構を用いた結果, 角度制御をした場合の追従性能が向上することが示されている. これらに関しては, 制御性能ということに重点をおいて評価がなされている.

一方, 跳躍性能に着目した研究としては, 非円形歯車を用いることで跳躍の最適化を行っているものがある [46]. しかし, この研究で扱っている自由度は, 股関節 1 自由度のみである. これに対し, 本研究では多関節自由度を用いた跳躍における筋関節複合機構の特性の効果を調べる.

3.2 関節角度依存モーメントアーム機構

本研究では, 筋関節複合機構として, 角度依存モーメントアーム機構を取り上げる. 角度依存モーメントアーム機構は関節の回転中心から筋を沿わせる滑車の中心をずらした機構である (Fig.3.1). この機構は筋モーメントアームが角度によって変化する (Fig.3.2). Fig.3.1 に示したパラメータを用いて, モーメントアーム R_{MA} と筋長 L は以下のように求められる. まず, 幾何学的に変数の関係式を求める.

$$d \sin \theta + c \cos \theta = a + r \cos \phi + (x - r(\pi/2 - \phi)) \sin \phi. \quad (3.1)$$

$$d \cos \theta - c \sin \theta = b + r \sin \phi - (x - r(\pi/2 - \phi)) \cos \phi. \quad (3.2)$$

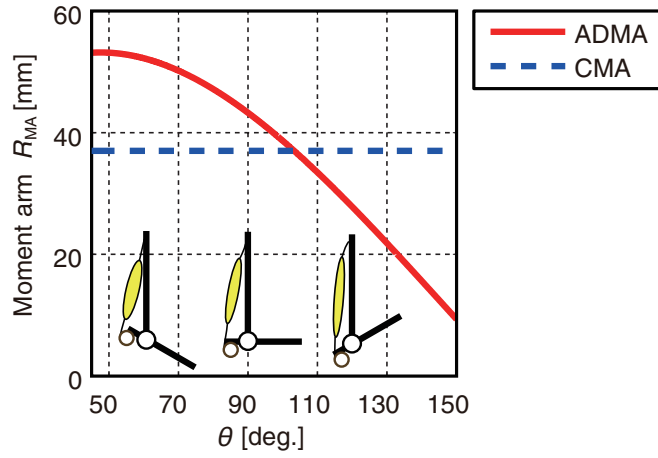


Fig.3.2 Angle-dependent moment arm and constant moment arm [44].

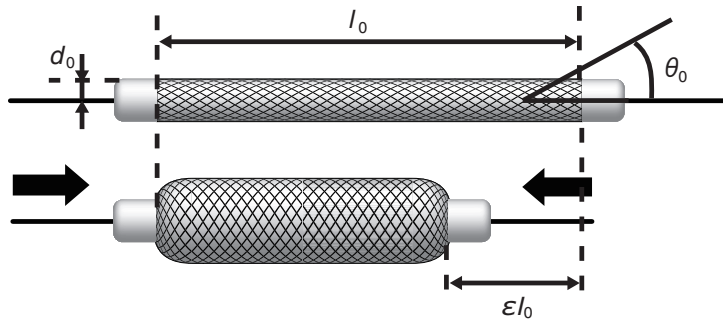


Fig.3.3 Parameters of McKibben-type PAM [44]. d_0 , θ_0 and ϵ respectively denote the initial diameter, initial angle of the braid, and the contraction ratio.

これらの式を解いて、モーメントアーム R_{MA} は次のように求められる。

$$R_{MA}(\theta) = b \sin \phi + a \cos \phi + r, \quad (3.3)$$

where $\phi = \arccos\left(\frac{r}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right) - \arctan(B/A)$,

$$A = -a + d \sin \theta + c \cos \theta, \quad B = b - d \cos \theta + c \sin \theta.$$

筋が i 番目の関節にかかる単関節筋の場合、筋長は以下のように求められる。

$$L(\theta_i) = L(\theta_{i,0}) + x(\theta_i) - x(\theta_{i,0}). \quad (3.4)$$

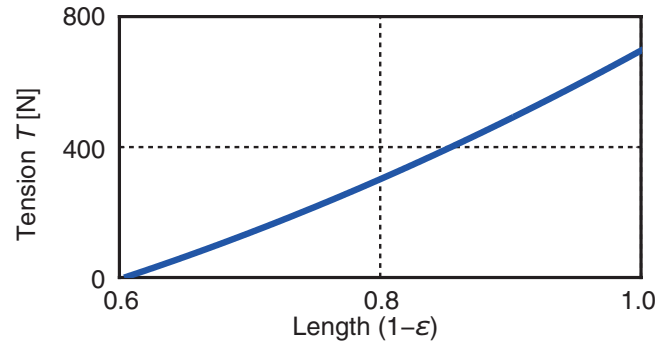


Fig.3.4 Tension-length relation of McKibben-type PAM [44]. $d_0 = 0.008$ [m], $\theta_0 = 0.28$ [rad], $p = 0.6$ [MPa].

筋が i 番目と j 番目の関節にかかる二関節筋の場合は以下となる.

$$L(\theta_i, \theta_j) = L(\theta_{i,0}, \theta_{j,0}) + (x(\theta_i) - x(\theta_{i,0})) + (x(\theta_j) - x(\theta_{j,0})). \quad (3.5)$$

ここで, θ_i と θ_j はそれぞれ i 番目と j 番目の関節角度, $\theta_{i,0}, \theta_{j,0}$ は基準の角度である. 変数 x は次の式で求められる.

$$x(\theta) = r(\pi/2 - \phi) + (b + c \sin \theta - d \cos \theta + r \sin \phi) / \cos \phi. \quad (3.6)$$

筋張力 T は筋長を理論式 [53] に代入することで求めた.

$$T = p(C(1 - \epsilon)^2 - D), \quad (3.7)$$

where $C = 3/4\pi d_0^2 \cot^2(\theta_0)$, $D = 1/4\pi d_0^2 \csc^2(\theta_0)$.

ここで, d_0 は筋の初期直径, θ_0 は初期線維角度, ϵ は収縮率, p は内圧である (Fig.3.3, 3.4). 最後にトルク τ は次のように計算できる.

$$\tau = R_{MA} T. \quad (3.8)$$

上記の式は, $r = 0$ の時にてこの式の筋取り付けを表し, $a = b = 0$ の時にモーメントアーム一定の時と等しくなる.

パラメータ決定の指針を得るために, パラメータ変化の影響について調べた (Fig.3.5). ここで, 筋の関節出力の能力を揃えるために, r は以下の等式を満たすように主なパラメータである a と b を変化させた.

$$\int \tau d\theta = C_0. \quad (3.9)$$

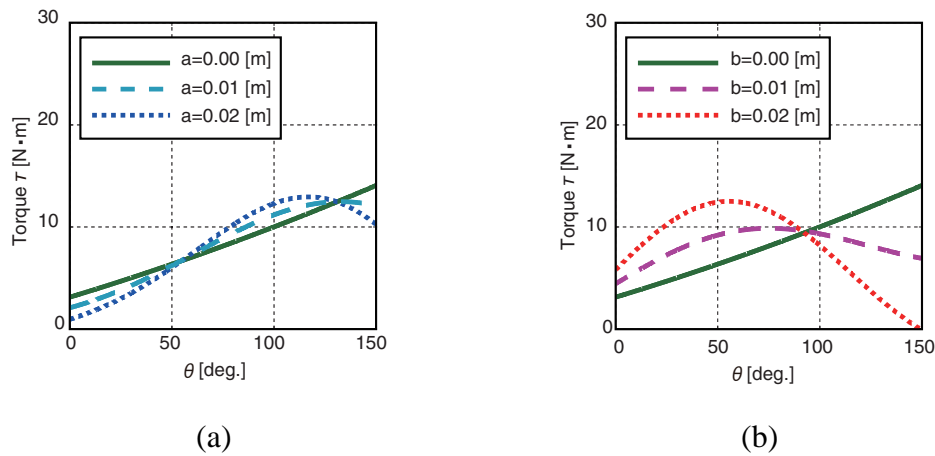


Fig.3.5 Change of the torque–angle relation by each parameter [44]. We set $d_0 = 0.008$ m, $\theta_0 = \text{rad}$, $p = 0.6$ MPa, $c = 0.25$ m, and $d = 0.00$ m. r is calculated to satisfy Eq. (3.9). (a) Change of the relation by a . b is set to 0.00 m. (b) Change of the relation by b . a is set to 0.00 m.

ここで C_0 は定数である。結果を見ると、 a と b は異なる角度の特性に影響していることが分かる。この場合、大きい θ にピークを設定する時は a を増やすのが効果的で、小さい θ にピークを設定する時は b を増やすのが効果的である。

3.3 二脚ロボットによる浅いしゃがみからの跳躍

本研究のロボットで用いる McKibben 型空気圧人工筋は長さが短い時の発揮力が急激に減少することから、モーメントアーム一定の場合、脚が比較的伸展した状態から開始されるような跳躍には適さないと考えられる。これに対処する手段として脚が伸展した状態で人工筋を長く張るということも考えられるが、その場合には、屈曲側の可動域を制限してしまう。そこで、本節では ADMA 機構を用いて、モーメントアームを調整することで可動域を制限せずにこうした跳躍での跳躍性能を高めることを試みる。

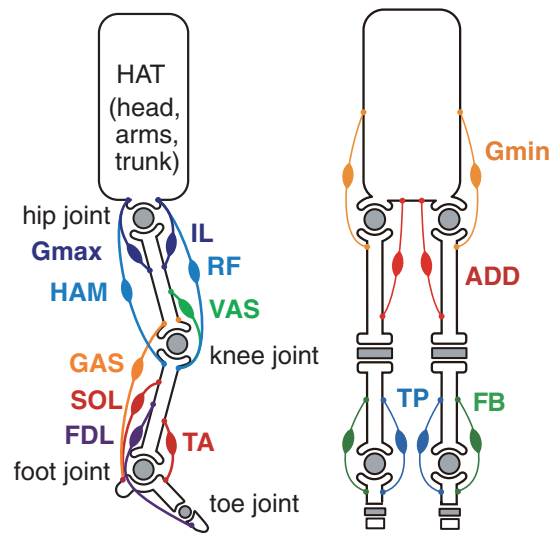


Fig.3.6 Layout of muscles [44]. Related abbreviations are Gmin, gluteus minimus; ADD, adductor; FB, fibularis brevis; TP, tibialis posterior; Gmax, gluteus maximus; IL, iliopsoas; HAM, hamstrings; RF, rectus femoris; VAS, vastus; GAS, gastrocnemius; SOL, soleus; TA, anterior tibialis; FDL, flexor digitorum longus.

Table3.1 Physical parameters of the robot.

	Robot	Trunk	Thigh	Shank	Foot	Toe
Length [m]	1.05	0.45	0.30	0.28	0.10	0.05
Mass [kg]	13.5	9.050	1.240	0.456	0.354	0.106

3.3.1 ロボットモデル

本研究では、筋骨格二脚ロボットのモデルを用いる (Fig.3.6, Table3.1). ロボットモデルの筋骨格系はヒトの下肢の筋骨格系を模倣して設計した (Fig.3.6). アクチュエータとしては McKibben 型の空気圧人工筋を用いた. 跳躍のための大きな抗重力筋, 二関節筋を備えた筋配置とした. 二関節筋は関節協調に有効と考えられている [60, 48, 17].

Table3.2 Parameters of muscles and moment arm [44]. Parameter θ_{init} represents the angle of the joint when the muscle is lengthened most. The angle definition of θ_{init} is shown in Fig.3.1. The parameter r_{const} indicates the corresponding value of constant moment arm to satisfy Eq. (3.9). The lower value of moment arm of RF inserting to the knee and VAS are limited to 25.0 mm because of mechanical constraints.

Muscle	Max. length [mm]	Diameter [mm]	No.	Insertion	θ_{init} [rad]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	r [mm]	r_{const} [mm]
Gmax	280.0	8.0	6	hip	$\pi/2$	17.9	55.2	34.6	20.0	11.0	32.3
IL	260.0	8.0	2	hip	$\pi/6$	-43.7	43.8	29.8	20.0	11.0	28.6
HAM	180.0	8.0	2	hip	$\pi/2$	40.0	33.2	260.0	28.0	0.0	39.9
RF	200.0	8.0	1	knee	$-\pi/6$	0.0	0.0	29.5	4.8	28.0	28.0
			1	hip	0	0.0	0.0	25.0	8.4	25.0	25.0
VAS	180.0	8.0	2	knee	$\pi/2$	-9.8	35.0	31.0	28.0	4.0	27.7
			2	knee	$2\pi/3$	-9.8	35.0	31.0	28.0	4.0	26.9
GAS	180.0	8.0	1	knee	0	0.0	0.0	25.0	1.0	25.0	25.0
SOL	180.0	8.0	1	ankle	$\pi/2$	36.0	22.0	280.0	25.0	11.0	38.3
			1	ankle	$5\pi/6$	36.0	22.0	250.0	5.7	11.0	37.0
TA	180.0	8.0	1	ankle	$-\pi/4$	-32.5	10.0	220.0	-27.3	0.0	28.8
FDL	160.0	8.0	1	ankle	$5\pi/6$	36.0	22.0	221.1	25.0	4.0	32.3
			1	toe	$\pi/3$	0.0	0.0	136.2	4.0	14.0	14.0
ADD	180.0	8.0	1	hip	$\pi/4$	4.0	66.0	514.0	-10.0	0.0	59.4
Gmin	260.0	8.0	1	hip	$\pi/4$	0.0	49.0	285.0	28.0	0.0	43.1
TP	180.0	6.0	1	ankle	$\pi/6$	36.0	22.0	250.0	5.7	11.0	23.2
FB	180.0	6.0	1	ankle	$\pi/6$	-32.5	10.0	220.0	-27.3	0.0	21.5

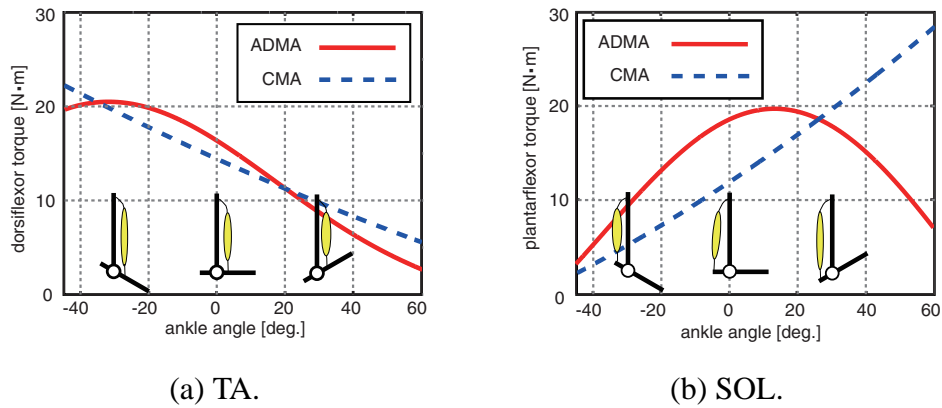


Fig.3.7 Torque–angle relations of ADMA model, CMA model [44].

高いトルクの領域を広げるために、ADMAのパラメータを式-を用いて決定した (Table3.2)。この時、 $\theta_0 = 0.28$ [rad]、 $p = 0.6$ [MPa] を用いた。本節の実験で用いるシミュレーションモデルは2種類である。角度依存モーメントアーム (ADMA) を使ったモデルである ADMA モデル、モーメントアーム一定の CMA モデルである。CMA では R_{MA} を Table3.2 の r_{const} に設定した。これらの2つのモデルは式 (3.9) を満たす。ADMA モデルは CMA に対して広い高トルク領域を持つ。ADMA のトルクのピークは関節限界からずれたものとなっている (Fig.3.7)。

3.3.2 複数状態からの跳躍シミュレーション

シミュレーション設定

ADMA の跳躍に対する有効性を評価するために、動力学シミュレータ OpenHRP3 [24] を用いて実験した。ロボットの物理パラメータと形状は 3D CAD ソフトの Pro/Engineer で設計したモデルから計算した。ロボットの跳躍性能の評価としては、ロボットの重心位置の最高高さ H_{max} を用いた。跳躍運動は股関節、膝関節の伸展フェーズと全ての関節の伸展フェーズの2つのフェーズにより生成した (Fig.3.8)。それぞれのフェーズの人工筋の内圧は 0.6 MPa の一定値とした。最初のフェーズの期間 T_{sw} は跳躍高さが最大になるように探索した。この運動表現を用いた理由は、単純であるものの股関節と膝関節の伸展フェーズの時間 T_{sw} を調節することで様々な方向

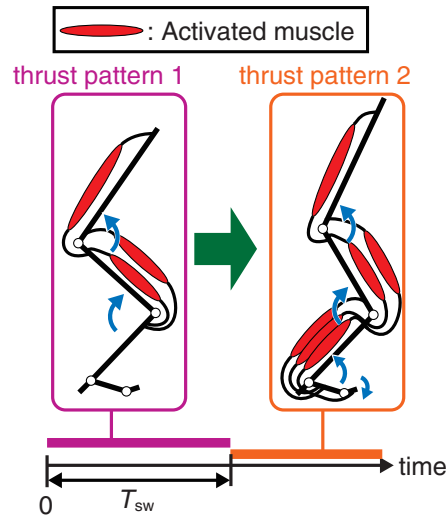


Fig.3.8 Generation of jumping motion [44].

に跳躍可能であるためである。2つの種類の跳躍実験を行った。1つは複数のしゃがみ深さからの反動無し跳躍である。もう1つは反動跳躍 (counter movement jump) である (Fig.3.9)。反動無し跳躍は異なる姿勢の効果のみを調べるために行った。反動跳躍は、走行からの跳躍などの一連の運動で見られる姿勢、速度、加速度が異なる状態の効果調べるために行った。

複数姿勢からの反動無し跳躍シミュレーション

ロボットの跳躍の姿勢特性に ADMA が与える効果を調べるために、複数のしゃがみ深さからの跳躍シミュレーションを行った。2つの極端な姿勢の間を等分した 10 個の姿勢を初期姿勢とした。これらの初期姿勢は最も脚が伸展したのものから 1-10 と番号を振った (Fig.3.10)。第一フェーズの時間 T_{sw} は 0 s から 0.2 s の間を 0.001 s 刻みで各初期姿勢からの跳躍に対して探索した。

各々の姿勢からの H_{max} の最大値の比較により、ADMA モデルは CMA モデルに対して浅いしゃがみからの跳躍では高い値を示した (Fig.3.11)。CMA モデルの跳躍高さのピーク値を示す姿勢は最も深くしゃがんだ姿勢であった。しかし、ADMA モデルではピーク値を示す姿勢は中間のしゃがみ姿勢となり、最大跳躍を可能とする姿勢の変化が見て取れた。跳躍高さは ADMA モデルでは 1.129 ± 0.049 m、CMA モデ

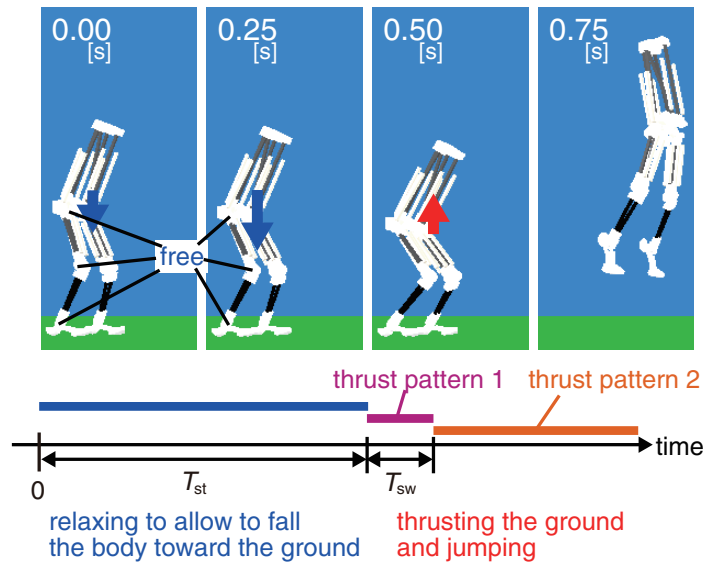


Fig.3.9 Counter movement jump [44].

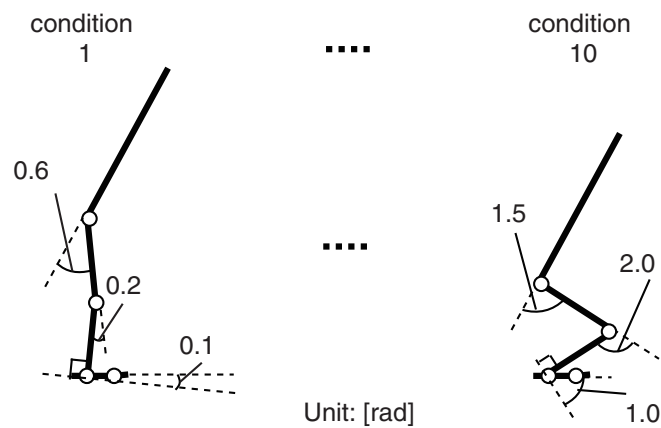


Fig.3.10 Initial squatting conditions [44].

ルでは 1.072 ± 0.087 m (平均 \pm 標準偏差) となり, ADMA モデルでは初期姿勢がばらついても最大跳躍高さの変化が少ないことがわかる. この結果は ADMA は複数姿勢からの運動の適応性を向上させる可能性があることを示している.

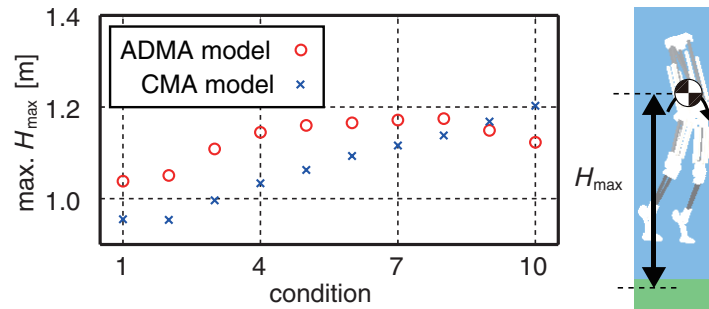


Fig.3.11 Maximum H_{\max} to each posture.

複数状態からの跳躍シミュレーション

連続的なダイナミック運動に対する ADMA の有効性を検討するために、反動跳躍の実験を行った。運動は、まず、 T_{st} の時間、関節トルクをゼロとして重力に任せて関節を屈曲させる (Fig.3.12)。続いて、ロボットモデルは跳躍動作を始める。 T_{st} は 0 s から 0.69 s の間を 0.01 s 刻みで、 T_{sw} は各 T_{st} 毎に 0 s から 0.20 s の間を 0.01 s 刻みで全探索した。最大の跳躍高さ H_{\max} を実現する T_{st} と T_{sw} をそれぞれ \hat{T}_{st} and \hat{T}_{sw} と定義する。

結果、2 つのモデル間で \hat{T}_{sw} と \hat{T}_{st} のシフトが見られた。ADMA モデルでは $\hat{T}_{sw} = 0.07$ [s], $\hat{T}_{st} = 0.30$ [s], CMA モデルでは $\hat{T}_{sw} = 0.10$ [s] and $\hat{T}_{st} = 0.56$ [s] であった。 \hat{T}_{sw} のシフトが起こった要因として関節間協調の変化が考えられる。CMA モデルの \hat{T}_{st} は ADMA モデルのものより大きかったが、これはこれらのモデルの姿勢特性に一致する。跳躍性能に対するタイミングの影響を調べるため、 $T_{sw} = \hat{T}_{sw}$ の条件下での 2 つのモデルの T_{st} に対する H_{\max} を比較した (Fig.3.13)。

グラフを見ると、ADMA モデルは広い時間幅で CMA モデルよりも高い跳躍性能を示していることが分かる。この傾向は 3.3.2 項の結果と対応し、ADMA が連続的な跳躍に有効であることを示唆するものである。

加えて、ADMA モデルは CMA モデルよりもピーク付近でなだらかである。 $\hat{T}_{st} - 0.10$ [s] < T_{st} < $\hat{T}_{st} + 0.10$ [s] の範囲での跳躍高さを比較すると、CMA モデルでは 1.082 ± 0.025 m であるのに対し ADMA モデルでは 1.147 ± 0.003 m であった (平均 \pm 標準偏差)。この結果は、ADMA モデルは運動開始のタイミングが正確でなく

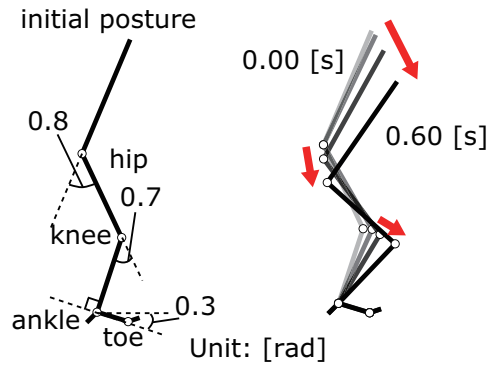
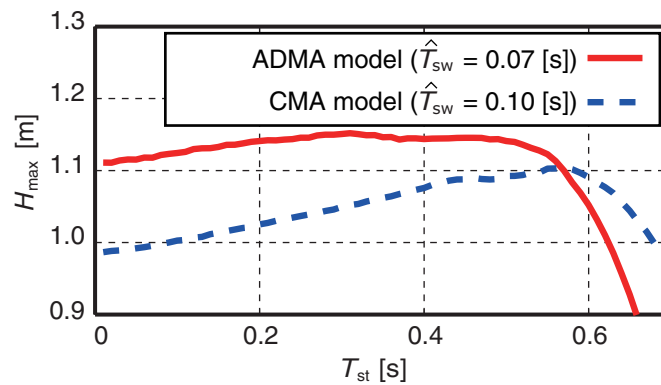


Fig.3.12 Counter movement [44].

Fig.3.13 Simulation of a counter-movement jump [44]. H_{\max} to T_{st} with constant T_{sw} .

ともほとんど同じ高さまで跳躍することが可能であることを示す。つまり、ADMAモデルは運動開始のずれに対して頑健であるといえる。この要因としては、姿勢特性に加え、以下の2つが考えられる。1つ目は、跳躍のピークを示すタイミングが早いADMAモデルでは動作の不安定性をもたらすと考えられる関節限界から遠いことである。2つ目は、しゃがみ深さの増加とともに少しずつ向上する発揮力が下向き速度の増加を打ち消したことである。

最適姿勢のシフトの効果

跳躍性能の向上と姿勢に対する頑健性の向上の要因を調べるために、運動中の関節の動作範囲に着目する。例として腓腹筋を挙げる。3.3.2項の跳躍における足首周り

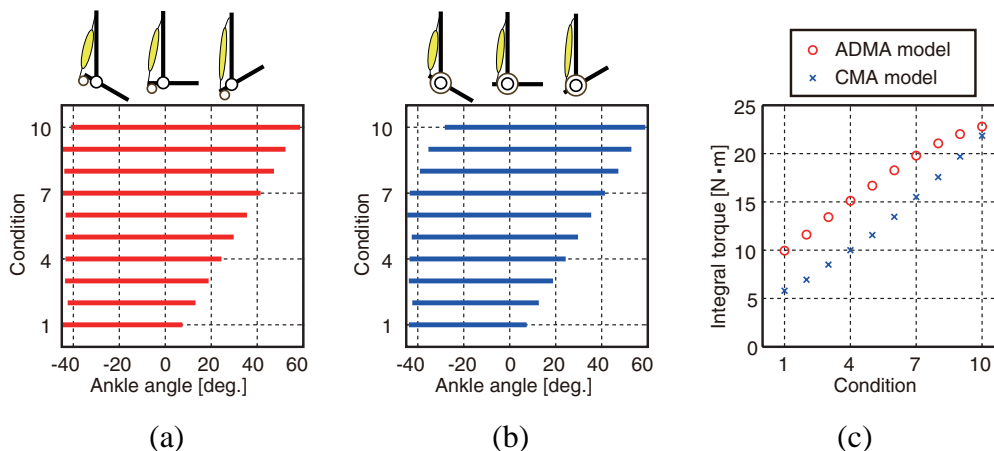


Fig.3.14 Range of motion during squat jumping [44]. (a) ADMA model. (b) CMA model. (c) The integral torque in range of each condition (SOL).

の動作範囲を調べる。動作範囲は接地中に最大屈曲と最大伸展の角度幅と定義する。ほとんどの跳躍において離地時に足首は最大伸展（底屈）であった (Fig.3.14(a)(b))。その結果、ADMA の中間姿勢での高いトルク領域はどの姿勢からの跳躍でも使い、CMA では最大屈曲付近の高いトルク領域を最もしゃがんだ姿勢でのみ使う (Fig.3.14(c))。動作範囲内の足首トルク積分値の平均は ADMA が $17.07 \pm 4.47 \text{ N}\cdot\text{m}$ であり、CMA の $13.09 \pm 5.47 \text{ N}\cdot\text{m}$ よりも大きかった。この傾向は跳躍高さの結果と一致する。以上の議論は最適姿勢のシフトがパフォーマンスと姿勢頑健性の向上をもたらすことを裏付ける。

3.3.3 実ロボットにおける最適姿勢のシフト

ロボットの製作

角度依存モーメントアーム機構が実世界の跳躍においても最適姿勢のシフトをもたらすかを確認するために、実ロボットを使った実験を行った。そのためにアスリートロボット [43] をもとにシミュレーションの ADMA モデルと同じパラメータを備えた筋骨格 2 脚ロボットを製作した (Fig.3.6, 3.15, Table3.1, 3.2, 3.3)。元のアスリートロボット [43] からの大きな改良点は膝下の機構である (Fig.3.16)。競技用の義足の代わりにロール、ピッチの 2 自由度の足首関節、ピッチの 1 自由度の足先関節を備えた

Table3.3 Specifications of the robot [44].

Actuators	Pneumatic artificial muscles (McKibben type)
Valves	Pressure regulating valves (tecno basic; Hoerbiger), pilot valves (EXA-C8-02C-3; CKD Corp.)
Air compressor	Anest Iwata, SLP-221EBD (external)
Air buffer	Six 10-l tanks (external), eight 0.5-l tanks (on board)
Sensors	Pressure sensors (XFGM-6001MPGSR; Fujikura Corp.), posture sensor (3DM-GX3; Microstrain)
CPU board	CPU (Leprechaun; General Robotix Inc.), OS (linux-2.6.21.1-ARTLinux)
Materials	Nylon, CFRP pipes, Silicone rubber (Engravings, Prosilicone rubber RTV-S40/360III)

筋骨格脚を実装した。衝撃吸収と滑り防止のために足底はシリコンゴムで覆った。

実験設定

ロボットの運動性能を評価するために跳躍実験を行った。モーションキャプチャシステム (120 Hz sampling rate, Vicon 624; Vicon Motion Systems) によって身体部位の運動を計測した。股関節から 0.12 m 離れた体幹の位置を仮想身体重心点とし、仮想身体重心点の最大高さを跳躍高さ H_{\max} とした。ロボットにはロープが付けてあるがこれは転倒時の破損を防ぐためであり、運動中はたるませることで運動の障害を抑えた。

ロボットによる最適跳躍姿勢のシフトの確認実験

ロボットによる最適跳躍姿勢のシフトの確認のために、複数初期姿勢からの跳躍実験を行った (Fig.3.17)。天井のクレーンから吊るす高さを変化させることでロボットに異なる初期姿勢を取らせた。実験者がロボットをクレーンから離れた 0.10 s 後にロボットは跳躍高さを開始した。跳躍運動は膝関節の伸展、股関節と膝関節の伸展、全関節の伸展の 3 つのフェーズにより構成される。各々の時間は 0.05 s, 0.05 s, 0.50 s である。初期姿勢は仮想重心点と両足先関節の中間点との距離 L_{pos} で定義することでしゃがみ具合を表した (Fig.3.18(a))。

結果として得られた H_{\max} - L_{pos} 関係をプロットした (Fig.3.18(b))。上外挿線から 0.05 m 以内の点を有効試技とし、他を失敗跳躍として除去した。シミュレーションの

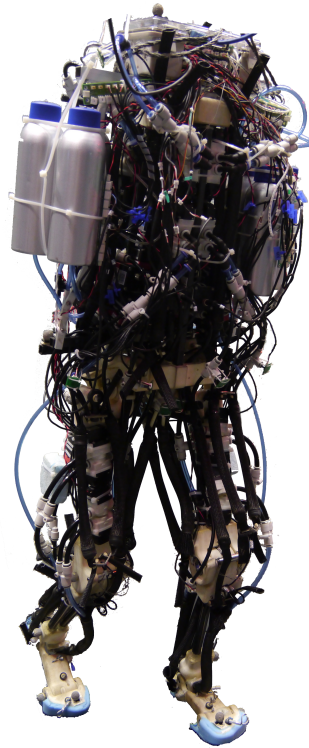


Fig.3.15 Musculoskeletal bipedal robot.

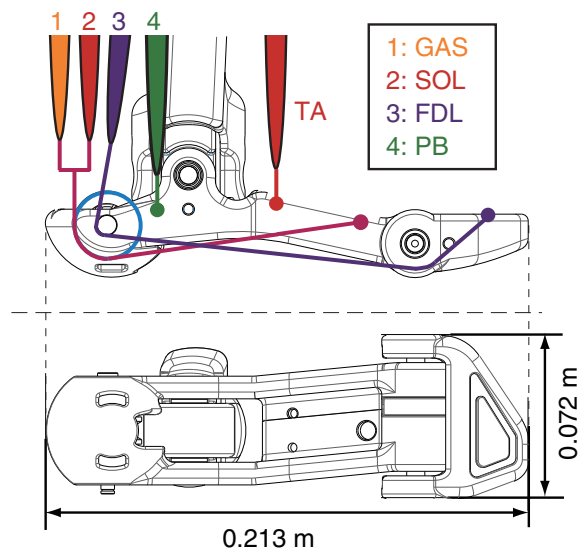


Fig.3.16 Robotic foot design (right foot) [44].

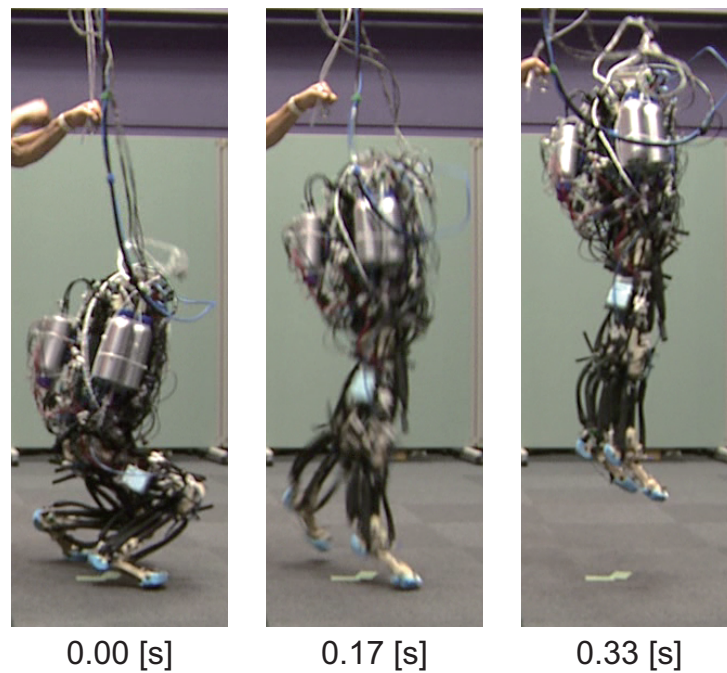


Fig.3.17 Photographs of the highest jumping of the robot [44].

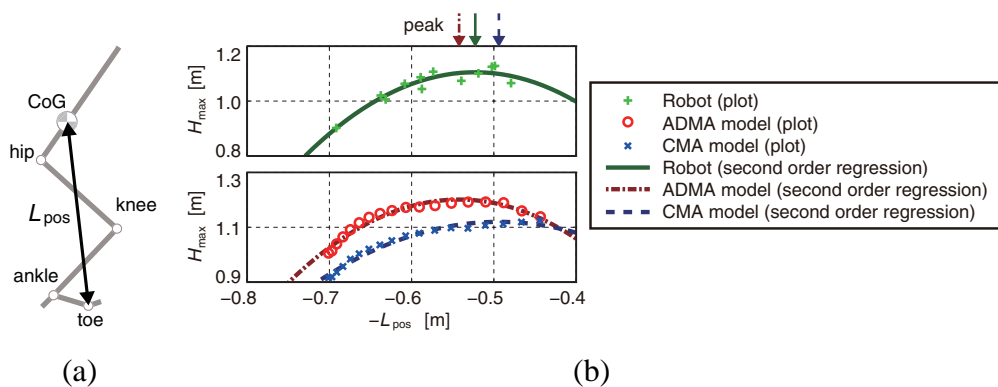


Fig.3.18 (a) Definition of L_{pos} . (b) Shift of the optimal posture using ADMA [44]. $H_{\text{max}}-L_{\text{pos}}$ relations. Curves represent second order regressions of each case. Second-order regression of each is $H_{\text{max}} = -7.13L_{\text{pos}}^2 + 7.46L_{\text{pos}} - 0.84$ ($R^2 = 0.850$) in the robot data, $H_{\text{max}} = -7.04L_{\text{pos}}^2 + 7.63L_{\text{pos}} - 0.87$ ($R^2 = 0.951$) in ADMA model, and $H_{\text{max}} = -4.50L_{\text{pos}}^2 + 4.44L_{\text{pos}} - 0.02$ ($R^2 = 0.973$) in the CMA model. Arrows indicate the peaks of curves.

ADMA モデルと CMA モデルにおける関係もプロットした。2次近似曲線を比較すると ADMA モデルでは CMA モデルに対して脚伸展姿勢側にシフトしているのが見て取れる。ロボット実験においては CMA モデルよりも脚伸展姿勢側の ADMA モデルに近い位置に極大値が見られた。この結果は ADMA を用いて設計したロボットは可動域の中間に最適姿勢がシフトすることを示している。この特性は走行からの跳躍などの高い姿勢からの跳躍にとって望ましい特性である。この実験において跳躍高さはシミュレーションに対して低い結果となった。これは摩擦、粘性要素による減衰、人工筋の取り付け誤差などが要因として考えられる。

3.3.4 まとめ

本節では、角度依存モーメントアーム機構が有用な一例として、浅いしゃがみからの跳躍を含む複数姿勢からの跳躍を取り上げ、評価を行った。出力トルクのピーク位置を関節限界からずらすことが、広い範囲の姿勢からの跳躍性能を向上させることを示した。加えて、広い範囲で跳躍性能を保つことにより姿勢が変化していく反動跳躍において跳躍開始タイミングのばらつきによる跳躍高さの変動を抑えられることを示した。これらは、大きく偏った出力特性を持つ空気圧人工筋のようなアクチュエータを用いた場合でも、モーメントアームを調節することで姿勢による運動のばらつきを抑えられることを示したものである。

付録 A

業績一覧

学術論文誌

1. Satoshi Nishikawa, Kazutoshi Tanaka, Kazuya Shida, Toshihiko Fukushima, Ryuma Niiyama and Yasuo Kuniyoshi, “A Musculoskeletal Bipedal Robot Designed with Angle-Dependent Moment Arm for Dynamic Motion from Multiple States,” *Advanced Robotics*, Vol. 28, No. 7, pp. 487–496, 2014.
2. Ryuma Niiyama, Satoshi Nishikawa and Yasuo Kuniyoshi, “A Biomechanical Approach to Open-loop Bipedal Running with a Musculoskeletal Athlete Robot,” *Advanced Robotics*, Vol. 26, No. 3, pp. 383–398, 2012.

国際会議における発表 (査読あり口頭発表)

3. Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa and Yasuo Kuniyoshi, “Adjustment of Pressure in Antagonistic Joints with Pneumatic Artificial Muscles for Rapid Reacting Motions,” In *Proceedings of 17th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2014)*, pp. 183–190, Poznan, Poland, Jul. 2014.
4. Toshihiko Fukushima, Satoshi Nishikawa and Yasuo Kuniyoshi, “Active Bending Motion of Pole Vault Robot to Improve Reachable Height,” In *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*, pp. 4208–4214 (TuD13.2), Hong Kong, China, Jun. 2014.

5. Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa and Yasuo Kuniyoshi, “Effect of Preliminary Motions on Agile Motions,” In *Proceedings of 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2013)*, Montevideo, Uruguay, Nov. 2013.
6. Satoshi Nishikawa, Toshihiko Fukushima and Yasuo Kuniyoshi, “Effective Timing of Swing Up Motion by Pole Vaulting Robot,” In *Proceedings of 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2013)*, Montevideo, Uruguay, Nov. 2013.
7. Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa and Yasuo Kuniyoshi, “Improvement of Energy Consumption by Movement of Center of Rotation of Joint,” In *Proceedings of 16th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2013)*, pp. 272–280, Sydney, Australia, Jul. 2013.
8. Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama and Yasuo Kuniyoshi, “Running Motion in a Musculoskeletal Bipedal Robot using Muscle Activation Pattern Control Based on a Human Electromyogram,” In *Proceedings of 5th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM 2011)*, pp. 15–16, Hyogo, Japan, Oct. 2011.
9. Yasunori Yamada, Satoshi Nishikawa, Kazuya Shida, Ryuma Niiyama and Yasuo Kuniyoshi, “Neural-Body Coupling for Emergent Locomotion: a Musculoskeletal Quadruped Robot with Spinobulbar Model,” In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2011)*, pp. 1499–1506 (TuBT8.7), San Francisco CA, USA, Sep. 2011.
10. Yasunori Yamada, Satoshi Nishikawa, Kazuya Shida and Yasuo Kuniyoshi, “Emergent Locomotion Patterns from a Quadruped Pneumatic Musculoskeletal Robot with Spinobulbar Model,” In *Proceedings of International Workshop on Bio-inspired Robots*, P-48, Nantes, France, Apr. 2011.

国際会議における発表 (査読ありポスター発表)

11. Kazuya Shida, Satoshi Nishikawa and Yasuo Kuniyoshi, “Design and Test of Torque-Angle Relationship Control System,” In *Proceedings of 6th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM 2013)*, P-30,

- Darmstadt, Germany, Mar. 2013.
12. Satoshi Nishikawa, Kazutoshi Tanaka, Kazuya Shida, Ryuma Niiyama and Yasuo Kuniyoshi, “Angle-Dependent Moment Arm with Biased Pivot for Jumping from Various Squatting Positions,” In *Proceedings of 6th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM 2013)*, P-24, Darmstadt, Germany, Mar. 2013.
 13. Toshihiko Fukushima, Satoshi Nishikawa, Kazutoshi Tanaka and Yasuo Kuniyoshi, “Transitional Buckling Model for Active Bending Effect in Pole Vault,” In *Proceedings of 6th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM 2013)*, P-8, Darmstadt, Germany, Mar. 2013.
 14. Satoshi Nishikawa, Yasunori Yamada, Kazuya Shida and Yasuo Kuniyoshi, “Dynamic Motions by a Quadruped Musculoskeletal Robot with Angle-Dependent Moment Arms,” In *Proceedings of International Workshop on Bio-inspired Robots*, P-47, Nantes, France, Apr. 2011.
 15. Ryuma Niiyama, Satoshi Nishikawa and Yasuo Kuniyoshi, “Athlete Robot with Applied Human Muscle Activation Patterns for Bipedal Running,” In *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, P-47, pp. 498–503, Nashville TN, USA, Dec. 2010.

国内学会における発表 (査読なし口頭発表)

16. 西川鋭, 田中一敏, 國吉康夫, “立位での巧緻動作における支持腕の肩外転角度が手先の停止安定性に与える影響,” 第 23 回 日本バイオメカニクス学会大会 (JSB 2014), O2-A4, 東京, Sep. 2014.
17. 田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫, “準備局面の拮抗的筋活動が踏み出しリーチングに与える効果,” 第 32 回 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2014), 3B1-02, 福岡, Sep. 2014.
18. 田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫, “敏捷動作に先立つ構えの効果検討,” 第 31 回 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2013), 3K3-02, 東京, Sep. 2013.
19. 三浦拳, 西川鋭, 國吉康夫, “CPG の調整により故障時の身体の物理的変化に即応する四足歩行ロボットの開発,” 第 31 回 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ

- 2013), 2N2-02, 東京, Sep. 2013.
20. 福島俊彦, 西川鋭, 國吉康夫, “棒高跳びロボットのポール曲げ動作による跳躍高さ向上,” 第 31 回 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2013), 2F2-08, 東京, Sep. 2013.
 21. 西川鋭, 福島俊彦, 國吉康夫, “棒高跳びにおけるスイング動作タイミングがポールの挙動に与える効果のロボットによる検討,” 第 31 回 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2013), 2G1-04, 東京, Sep. 2013.
 22. 西川鋭, 志田和也, 新山龍馬, 國吉康夫, “筋骨格系駆動のヒト規範足部を備えたロボットによる跳躍,” 第 30 回 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2012), 2C2-3, 北海道, Sep. 2012.
 23. 新山龍馬, 西川鋭, 國吉康夫, “床反力制御による筋骨格ヒト型ロボットの走行”. 第 28 回 日本ロボット学会学術講演会,” 第 28 回 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2010), 1P1-6, 愛知, Sep. 2010.

国内学会における発表 (査読なしポスター発表)

24. 田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫, “確率的目標状態への遷移時間を最小化する準備動作,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech 2014), 富山, Jun. 2014.
25. 西川鋭, 福島俊彦, 國吉康夫, “二関節バネダンパ機構が外乱下の棒高跳びに与える効果,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech 2014), 富山, Jun. 2014.
26. 松下光次郎, 成岡健一, 西川鋭, 築地原里樹, 安部祐一, 安田, 大脇大, “若手研究者によるブレインストーミングと実践から垣間見る表面筋電信号計測解析システムの応用可能性 –第 19 回創発システムシンポジウムワークショップにおける成果–,” 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 (SSI 2013), SS5-9, 滋賀, Nov. 2013.
27. 西川鋭, 福島俊彦, 國吉康夫, “棒高跳びにおける跳躍パフォーマンス向上のための溜め動作,” 第 7 回 Motor Control 研究会, B-40, 東京, Sep. 2013.
28. 福島俊彦, 西川鋭, 國吉康夫, “ポール曲げ効果から観る棒高跳びにおける身体-ポール協調動作,” 第 7 回 Motor Control 研究会, A-15, 東京, Sep. 2013.

-
29. 西川鋭, 志田和也, 國吉康夫, “可変な関節トルク分配比を備えた筋骨格四脚ロボット,” 第 19 回 創発システムシンポジウム, P-15, 大阪, Aug. 2013.
 30. 田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫., “敏捷動作生成に先立つ構え生成手法の検証,” 第 19 回 創発システムシンポジウム, P-9, 大阪, Aug. 2013.
 31. 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫, “少数筋群からなるフェーズ分けによる運動学習,” 第 6 回 Motor Control 研究会, P-34, 愛知, Jun. 2012.
 32. 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫, “筋骨格ロボットによる走行実現のための筋賦活パターン制御,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech 2010), 1A2-A07, 北海道, Jun. 2010.

謝辞

本研究は、東京大学大学院情報理工学系研究科國吉康夫教授の御指導のもとで行われました。國吉教授には学部4年の時から6年間本当にお世話になりました。自由な研究環境を与えて頂き、様々なことに取り組むことが出来ました。そのおかげで貴重な体験をたくさんすることができました。本当に感謝しております。ありがとうございました。新山龍馬講師には学部4年の時の先輩として様々お世話になりました。空気圧人工筋のロボットの技術を教えて頂いたことはもちろんのこと、整理された研究資料、美しい発表資料など、研究室にいない間でも参考にさせてもらうことは多く、とても勉強になりました。ありがとうございました。大村吉幸助教には、同じ部屋で6年間本当にお世話になりました。高い技術力、一度熱中すると夢中で取り組む姿など見習うべきことが多かったです。ことあるごとにアドバイスも頂きました。ありがとうございました。原田達也教授には博士課程1年次まで同じ研究室の先生としてお世話になりました。研究会では鋭いご指摘を頂きました。ATRに連れて行って下さるなどでもお世話になりました。ありがとうございました。

秘書の都丸美緒子さん、技官の永井おりがさんには研究費や旅費、その他諸々の手続きでお世話になりました。ありがとうございました。

博士課程の研究では、共同研究という形で研究室の後輩達に助けられました。修士課程学生であった福島俊彦君は、この論文の4章の大部分を主体となって進めてくれました。共同での実験、学会投稿などで議論することも多く、研究を進める上でとても助かりました。話の整理や発表の上手さ、図のきれいさなどへのこだわり、学ばされることが本当に多かったです。本当に感謝しています。

修士課程2年の小林智裕君は、共同で筋骨格系を介した知覚の研究に取り組み、棒高跳び実験を共同で行ってくれました。5章のシミュレーションを進める時も相談に乗ってくれました。ありがとうございました。

博士課程2年の田中一敏君は、近い分野に取り組む後輩として、また、共同研究者としてよく議論を行いました。近い分野に取り組み、相談できる相手がいることはとても心強かったです。ありがとうございました。

修士課程学生であった志田和也君は、初めての研究分野に近い後輩でした。相談相手になってもらったり、実験を手伝ってもらうことも多く、とても助けられました。ありがとうございました。

同期の山田康智君は、とても研究能力が高く、学ぶことが多かったです。共同研究をしたり、学会に共に行ったり、本当にお世話になりました。ありがとうございました。

その他、先輩方や社会人になった同期の方々、研究室のメンバー、研究室在籍中に研究室の一員だった皆様、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Angulo-Kinzler, R. M., Kinzler, S. B., Balius, X., Turro, C., Caubet, J. M., Escoda, J., and Prat, J. A., “Biomechanical analysis of the pole vault event,” *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 10, no. 2, pp. 147–165, 1994.
- [2] Arampatzis, A., Schade, F., and Brüggemann, G.-P., “Effect of the pole–human body interaction on pole vaulting performance,” *Journal of biomechanics*, vol. 37, no. 9, pp. 1353–1360, 2004.
- [3] Azizi, E., Brainerd, E. L., and Roberts, T. J., “Variable gearing in pennate muscles,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 5, pp. 1745–1750, 2008.
- [4] Baxter, J. R., Novack, T. A., Werkhoven, H. V., Pennell, D. R., and Piazza, S. J., “Ankle joint mechanics and foot proportions differ between human sprinters and non-sprinters.” *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 279, no. 1735, pp. 2018–2024, 2012.
- [5] Brown, B. and Zeglin, G., “The bow leg hopping robot,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998, pp. 781–786.
- [6] Brown, I. E. and Loeb, G. E., “A reductionist approach to creating and using neuromusculoskeletal models,” in *Biomechanics and neural control of posture and movement*. Springer, 2000, pp. 148–163.
- [7] Cavagna, G. A., Heglund, N. C., and Taylor, C. R., “Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure,” *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, vol. 233, no. 5, pp. 243–261, 1977.
- [8] Cavagna, G. A., Komarek, L., and Mazzoleni, S., “The mechanics of sprint run-

- ning,” *The Journal of Physiology*, vol. 217, no. 3, pp. 709–721, Sep. 1971.
- [9] Davis, C., Kukureka, S., Hubbard, M., Mehta, R., and Pallis, J., “Effect of materials and manufacturing on the bending stiffness of vaulting poles,” *The engineering of sport*, vol. 5, pp. 245–252, 2004.
- [10] Dawson, T. J. and Taylor, C. R., “Energetic cost of locomotion in kangaroos,” *Nature*, vol. 246, no. 5431, pp. 313–314, 1973.
- [11] Frère, J., Göpfert, B., Slawinski, J., and Tourny-Chollet, C., “Effect of the upper limbs muscles activity on the mechanical energy gain in pole vaulting.” *Journal of electromyography and kinesiology*, vol. 22, no. 2, pp. 207–214, 2012.
- [12] Frère, J., L’hermette, M., Slawinski, J., and Tourny-Chollet, C., “Mechanics of pole vaulting: a review.” *Sports biomechanics*, vol. 9, no. 2, pp. 123–38, 2010.
- [13] Fukashiro, S., Hay, D. C., and Nagano, A., “Biomechanical behavior of muscle-tendon complex during dynamic human movements.” *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 22, no. 2, pp. 131–147, 2006.
- [14] Haeufle, D. F. B., Grimmer, S., and Seyfarth, A., “The role of intrinsic muscle properties for stable hopping—stability is achieved by the force-velocity relation.” *Bioinspiration & biomimetics*, vol. 5, no. 1, p. 16004, 2010.
- [15] Hay, J. G., *The biomechanics of sports techniques*. Prentice-Hall, 1973.
- [16] Hondo, T. and Mizuuchi, I., “Design and modal analysis of feedback excitation control system for vertical series elastic manipulator,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, pp. 2888–2893.
- [17] Hosoda, K., Sakaguchi, Y., Takayama, H., and Takuma, T., “Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure,” *Autonomous Robots*, vol. 28, no. 3, pp. 307–316, 2010.
- [18] Hu, X., Murray, W. M., and Perreault, E. J., “Biomechanical constraints on the feedforward regulation of endpoint stiffness,” *Journal of neurophysiology*, vol. 108, no. 8, pp. 2083–2091, 2012.
- [19] Hurst, J. W., Chestnutt, J. E., and Rizzi, A. A., “Design and philosophy of the bimasc, a highly dynamic biped,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 1863–1868.
- [20] Hyon, S. H., “Development of a biologically inspired hopping robot-Kenken,” in

-
- IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, May 2002, pp. 3984–3991.
- [21] Iida, F., Rummel, J., and Seyfarth, A., “Bipedal walking and running with spring-like biarticular muscles.” *Journal of Biomechanics*, vol. 41, no. 3, pp. 656–667, Jan. 2008.
- [22] Ijspeert, A. J., “Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review.” *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*, vol. 21, no. 4, pp. 642–53, 2008.
- [23] John R. Hutchinson, S. S. B. and Delp, S. L., “Analysis of hindlimb muscle moment arms in *Tyrannosaurus rex* using a three-dimensional musculoskeletal computer model: implications for stance, gait, and speed.,” *Paleobiology*, vol. 31, no. 4, pp. 676–701, Dec. 2005.
- [24] Kanehiro, F., Hirukawa, H., and Kajita, S., “OpenHRP: Open architecture humanoid robotics platform,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 2, pp. 155–165, 2004.
- [25] Kaneko, M., Higashimori, M., Takenaka, R., Namiki, A., and Ishikawa, M., “The 100 G capturing robot-too fast to see,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 8, no. 1, pp. 37–44, 2003.
- [26] Kim, S., Clark, J. E., and Cutkosky, M. R., “isprawl: Design and tuning for high-speed autonomous open-loop running,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 9, pp. 903–912, 2006.
- [27] Kimura, H., Fukuoka, Y., and Cohen, A. H., “Biologically inspired adaptive walking of a quadruped robot.” *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, vol. 365, no. 1850, pp. 153–70, 2007.
- [28] Kumamoto, M., Oshima, T., and Yamamoto, T., “Control properties induced by the existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles - mechanical engineering model analyses,” *Human Movement Science*, vol. 13, no. 5, pp. 611–634, 1994.
- [29] Linthorne, N. P., “Energy loss in the pole vault take-off and the advantage of the flexible pole,” *Sports Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 205–218, 2000.
- [30] Maufroy, C., Maus, H., Radkhah, K., Scholz, D., von Stryk, O., and Seyfarth, A., “Dynamic leg function of the BioBiped humanoid robot,” in *5th International*

- Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, 2011, pp. 33–34.
- [31] McGeer, T., “Passive dynamic walking,” *The International Journal of Robotic Research*, vol. 9, no. 2, pp. 62–82, 1990.
- [32] McGinnis, P. M. and Bergman, L. A., “An inverse dynamic analysis of the pole vault,” *International Journal of Sport Biomechanics*, vol. 2, no. 3, pp. 186–201, 1987.
- [33] Michilsens, F., Vereecke, E. E., D’Août, K., and Aerts, P., “Muscle moment arms and function of the siamang forelimb during brachiation,” *Journal of anatomy*, vol. 217, no. 5, pp. 521–535, 2010.
- [34] Milner, T. E., “Contribution of geometry and joint stiffness to mechanical stability of the human arm,” *Experimental brain research*, vol. 143, no. 4, pp. 515–519, 2002.
- [35] Minetti, A. E., “Passive tools for enhancing muscle-driven motion and locomotion,” *Journal of experimental biology*, vol. 207, no. 8, pp. 1265–1272, 2004.
- [36] Mizuuchi, I., Nakanishi, Y., Sodeyama, Y., Namiki, Y., Nishino, T., Muramatsu, N., Urata, J., Hongo, K., Yoshikai, T., and Inaba, M., “An advanced musculoskeletal humanoid kojiro,” in *7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Dec. 2007, pp. 294–299.
- [37] Mizuuchi, I., Yoshikai, T., Nakanishi, Y., Sodeyama, Y., Yamamoto, T., Miyadera, A., Niemela, T., Hayashi, M., Urata, J., and Inaba, M., “Development of muscle-driven flexible-spine humanoids,” in *5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Dec. 2005, pp. 339–344.
- [38] Mizuuchi, I., Tajima, R., Yoshikai, T., Sato, D., Nagashima, K., Inaba, M., Kuniyoshi, Y., and Inoue, H., “The design and control of the flexible spine of a fully tendon-driven humanoid” kenta”,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, 2002, pp. 2527–2532.
- [39] Nagano, A. and Komura, T., “Longer moment arm results in smaller joint moment development, power and work outputs in fast motions,” *Journal of Biomechanics*, vol. 36, no. 11, pp. 1675–1681, 2003.
- [40] Nakanishi, Y., Asano, Y., Kozuki, T., Mizoguchi, H., Motegi, Y., Osada, M., Shirai, T., Urata, J., Okada, K., and Inaba, M., “Design concept of detail musculoskeletal

- humanoid “kenshiro” -toward a real human body musculoskeletal simulator,” in *12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2012, pp. 1–6.
- [41] Nakanishi, Y., Izawa, T., Osada, M., Ito, N., Ohta, S., Urata, J., and Inaba, M., “Development of musculoskeletal humanoid kenzoh with mechanical compliance changeable tendons by nonlinear spring unit,” in *International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2011, pp. 2384–2389.
- [42] Niiyama, R., Nagakubo, A., and Kuniyoshi, Y., “Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system,” in *International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 2546–2551.
- [43] Niiyama, R., Nishikawa, S., and Kuniyoshi, Y., “A biomechanical approach for open-loop bipedal running with a musculoskeletal athlete robot,” *Advanced Robotics*, vol. 26, no. 3–4, pp. 383–398, 2012.
- [44] Nishikawa, S., Tanaka, K., Shida, K., Fukushima, T., Niiyama, R., and Kuniyoshi, Y., “A musculoskeletal bipedal robot designed with angle-dependent moment arm for dynamic motion from multiple states,” *Advanced Robotics*, vol. 28, no. 7, pp. 487–496, 2014.
- [45] Nolan, L., “Carbon fibre prostheses and running in amputees: a review,” *Foot and ankle surgery*, vol. 14, no. 3, pp. 125–129, 2008.
- [46] Okada, M. and Takeda, Y., “Optimal design of nonlinear profile of gear ratio using non-circular gear for jumping robot,” in *International Conference on Robotics and Automation*, 2012, pp. 1958–1963.
- [47] Oshima, T., Fujikawa, T., Kameyama, O., and Kumamoto, M., “Robotic analyses of output force distribution developed by human limbs,” in *International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Osaka, Japan, 2000, pp. 229–234.
- [48] Oshima, T., Momose, N., Koyanagi, K., Matsuno, T., and Fujikawa, T., “Jumping mechanism imitating vertebrate by the mechanical function of bi-articular muscle,” in *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2007, pp. 1920–1925.
- [49] Owaki, D., Fukuda, H., and Ishiguro, A., “Adaptive bipedal walking through sensory-motor coordination yielded from soft deformable feet,” in *International*

- Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012, pp. 4257–4263.
- [50] Owaki, D., Morikawa, L., and Ishiguro, A., “Listen to body’s message: Quadruped robot that fully exploits physical interaction between legs,” in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012, pp. 1950–1955.
- [51] Pfeifer, R., Iida, F., and Gomez, G., “Morphological computation for adaptive behavior and cognition,” *International Congress Series*, vol. 1291, pp. 22–29, 2006.
- [52] Raibert, M. H., *Legged Robots That Balance*. The MIT Press, 1986.
- [53] Schulte, H. F., Adamski, D. F., and Pearson, J. R., “Characteristics of the braided fluid actuator,” The University of Michigan Medical School Department of Physical Medicine and Rehabilitation Orthotics Research Project, Tech. Rep. 5, 1961.
- [54] Seyfarth, A., Geyer, H., and Herr, H., “Swing-leg retraction: a simple control model for stable running,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 206, no. 15, pp. 2547–2555, 2003.
- [55] Shin, D., Yeh, X., and Khatib, O., “Variable radius pulley design methodology for pneumatic artificial muscle-based antagonistic actuation systems,” in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 1830–1835.
- [56] Sreenath, K., Park, H. W., Poulakakis, I., and Grizzle, J. W., “Embedding active force control within the compliant hybrid zero dynamics to achieve stable, fast running on mabel,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 32, no. 3, pp. 324–345, 2013.
- [57] Taga, G., Yamaguchi, Y., and Shimizu, H., “Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment,” *Biological Cybernetics*, no. 65, pp. 147–159, 1991.
- [58] Takenaka, T., Matsumoto, T., Yoshiike, T., and Shirokura, S., “Real time motion generation and control for biped robot - 2nd report: Running gait pattern generation,” in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, USA, 2009, pp. 1092–1099.
- [59] Thorpe, S. K., Holder, R., and Crompton, R. H., “Orangutans employ unique strategies to control branch flexibility,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, no. 31, pp. 12 646–12 651, 2009.
- [60] van Ingen Schenau, G. J., Bobbert, M. F., and Rozendal, R. H., “The unique action

- of bi-articular muscles in complex movements.” *Journal of Anatomy*, vol. 155, pp. 1–5, 1987.
- [61] van Soest, A. J. and Bobbert, M. F., “The contribution of muscle properties in the control of explosive movements,” *Biological Cybernetics*, vol. 69, no. 3, pp. 195–204, 1993.
- [62] Vanderborght, B., Tsagarakis, N. G., Ham, R. V., Thorson, I., and Caldwell, D. G., “MACCEPA 2.0: compliant actuator used for energy efficient hopping robot Chobino1D,” *Autonomous Robots*, vol. 31, no. 1, pp. 55–65, 2011.
- [63] Vanderborght, B., Verrelst, B., Ham, R., Damme, M., Beyl, P., and Lefeber, D., “Development of a compliance controller to reduce energy consumption for bipedal robots,” *Autonomous Robots*, vol. 24, no. 4, pp. 419–434, 2008.
- [64] Verrelst, B., Ham, R. V., Vanderborght, B., Daerden, F., Lefeber, D., and Vermeulen, J., “The pneumatic biped “Lucy” actuated with pleated pneumatic artificial muscles,” *Autonomous Robots*, vol. 18, no. 2, pp. 201–213, 2005.
- [65] Wittmeier, S., Alessandro, C., Bascarevic, N., Dalamagkidis, K., Devereux, D., Diamond, A., Jäntschi, M., Jovanovic, K., Knight, R., Marques, H. G., *et al.*, “Toward anthropomimetic robotics: development, simulation, and control of a musculoskeletal torso,” *Artificial life*, vol. 19, no. 1, pp. 171–193, 2013.
- [66] Wood, R., “The First Takeoff of a Biologically Inspired At-Scale Robotic Insect,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 2, pp. 341–347, 2008.
- [67] Zhou, X. and Bi, S., “A survey of bio-inspired compliant legged robot designs,” *Bioinspiration & biomimetics*, vol. 7, no. 4, p. 041001, 2012.
- [68] 稲葉雅幸, “脊椎を持つ全身型メカトロニック行動体,” *日本ロボット学会誌*, vol. 19, no. 7, pp. 822–825, 2001.
- [69] 稲葉雅幸, “知能ロボットフロンティアとしての筋骨格ヒューマノイド,” *日本ロボット学会誌*, vol. 28, no. 6, pp. 666–671, 2010.
- [70] 加藤一郎, 石田豊彦, 森善郎, 山本敏博, “ゴム人工筋を用いた 2 足歩行機械,” in *バイオメカニズム, 人工の手研究会*, Ed. 東京大学出版会, 1972, pp. 267–274.
- [71] 河村隆, 中沢賢, 古柳幸夫, 大沢淳平, “棒高跳びロボットに関する研究,” in *日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 2P1-21-003, 東京, June 1999.
- [72] 熊本水頼, *ヒューマノイド工学: 生物進化から学ぶ 2 関節筋ロボット機構*. 東京

- 電機大学出版局, 2006.
- [73] 細田耕, “発見的バイオリボティクスアプローチと適応的2足歩行,” 日本ロボット学会誌, vol. 28, no. 4, pp. 479–484, 2010.
- [74] 小林寛道, 走る科学. 大修館書店, 1990.
- [75] 深代千之, 川本竜史, 石毛勇介, 若山章信, スポーツ動作の科学: バイオメカニクスで読み解く. 東京大学出版会, 2010.
- [76] 西川鋭, 田中一敏, 國吉康夫, “立位での巧緻動作における支持腕の肩外転角度が手先の停止安定性に与える影響,” in 日本バイオメカニクス学会大会, O2-04, 東京, 9月2014.
- [77] 尾形邦裕, 國吉康夫, “押し動作における自他身体誘導スキルの計測と解析,” 日本ロボット学会誌, vol. 31, no. 4, pp. 72–82, 2013.
- [78] 福島俊彦, “棒高跳びロボットの跳躍高さ向上のための能動的ポール曲げ動作,” Master’s thesis, 東京大学, 2014.
- [79] 本堂貴敏, 水内郁夫, “1質点棒高跳びモデルの助走速度・棒接地角・跳躍方向解析に基づく棒高跳び運動における最適剛性の検証,” in 日本ロボット学会学術講演会, AC2F1-6, 2012.