

生物の二関節間筋腱複合体を 規範とした脚ロボットの開発

佐藤 隆紀

電気通信大学大学院情報理工学研究科
博士（工学）の学位申請論文

2020年3月

生物の二関節間筋腱複合体を 規範とした脚ロボットの開発

博士論文審査委員会

主査： 明 愛国 教授

委員： 横井 浩史 教授

委員： 田中 一男 教授

委員： 内田 雅文 教授

委員： 田中 基康 准教授

著作権所有者

佐藤 隆紀

2020

Development of Legged Robot Inspired by Bi-articular Muscle-tendon Complexes of Animals

Ryuki Sato

Abstract

It is one of the challenging topics to realize agile motions such as running and jumping with legged robots. Animals' advanced performances are achieved using their flexible musculoskeletal systems which can store and reuse energy effectively. The muscle-tendon complex, which is composed of an active muscle and a passive tendon, has energy storage and release capacity. During dynamic motions, it is known that a part of the kinetic energy can be stored in the elastic elements of the muscle-tendon complex, and can be used in their kicking phases. Thanks to this function, animals can realize the agile movement while saving energy. In addition, the muscle-tendon complex which is placed across two joints allows the power transfer between two joints. This kind of bi-articular muscle-tendon complex helps to generate the larger kicking output by transferring the large power from the trunk to the end of the leg.

On the other hand, the conventional legged robots are composed of a rigid body and joints driven by actuators with high reduction ratio gearboxes in order to simplify the design and prevent the complication of the control. This structure itself impedes the realization of the agile motions.

In this thesis, the leg mechanism inspired by the musculoskeletal structure of an animal is

proposed. In addition, the motion control method for the vertical jumping motion which is a typical agile motion of an animal has been proposed.

First, the leg mechanism inspired by the lower leg structure of a feline animal has been developed. One important bi-articular muscle-tendon complex is replaced with the elastic linkage and it realizes storing and reusing the energy during motion. In order to utilize the effect of the proposed mechanism for robot motions, the motion planning method using a nonlinear optimization is proposed. The motion trajectory has been optimized to maximize the jumping height, and the jumping experiments have been performed based on the planned motion trajectory.

Then, focusing on the upper leg structure of an animal, one of the important complexes has been introduced to the robot leg. This mechanism is composed of the cable-pulley mechanism and one tension spring, and it allows to transfer part of the power generated by the hip actuator to the knee joint. The jumping motion trajectory has been generated using the proposed motion planning method, and the results show that the jumping height can be improved by utilizing the mechanism.

Finally, both lower and upper leg mechanisms have been introduced to the robot model. Since the property of the elastic mechanisms strongly affects its motion, several models are developed and the motion planning method is applied to each model. By comparing the jumping height, the best model is selected and the effectiveness of the mechanisms is confirmed.

概要

脚式ロボットにおいて生物のような俊敏な運動を実現することは挑戦的な課題である。生物の高度な運動技能は、進化の中で最適化された身体の筋骨格構造の持つ柔軟性と、それらを協調的に利用する運動制御によって成し遂げられる。生物の筋骨格系の構成要素である筋腱複合体は、能動要素である筋と受動要素である腱が直列に接続され、関節を駆動するだけでなく、運動中にエネルギーの蓄積と放出を行う能力を持つ。走行や跳躍といった運動において、生物はその運動エネルギーを筋腱複合体の持つ弾性要素に弾性エネルギーを蓄積し、蹴り出しなどの高出力が要求される際に適切に放出して、俊敏かつ高効率な運動を実現していることが示唆されている。また、二関節にまたがるように配置された筋腱複合体は、大きな駆動源を持つ体幹から手足の先端へのエネルギーの伝達を可能にする。この機能は体幹から末梢につれて細く軽量になる生物のスマートな構造を形成するために重要であり、俊敏な動作の実現に大きく貢献する。

一方で、これまでに開発された脚式移動ロボットは、制御の煩雑化を防ぎ、また設計を単純化するために、剛体のボディと高減速比のアクチュエータで駆動される関節で構成されており、その構造自体が俊敏な運動の実現を阻害するような設計がなされていた。

そこで本研究では、生物の脚部の筋骨格構造を規範として、特に瞬発的な運動への貢献が大きな筋腱複合体を導入したロボットの脚機構を開発し、俊敏な運動の一例として垂直跳躍運動を取り上げて、生物規範機構の効果を活用するための運動制御手法を提案する。試作機を用いた実験を通して、提案した機構の運動への影響を検証する。

本論文は全5章から構成され、その内容の要旨は以下の通りである。

第1章 序論

第1章では、本研究の研究背景と関連研究、目的について述べる。まず、社会的な背景を考慮して、脚式移動ロボットに要求する運動能力について説明し、従来の脚式移動ロボットの限界について説明する。次に、生物の高度な運動技能のメカニズムについて、生物の脚部に備わる筋腱複合体が弾性要素として機能し、生物の俊敏な運動に重要な働きを示すことを説明する。これらの生物工学の知見から、動物界でも特に優れた運動能力を持つネコ科の生物の脚部の筋骨格構造を参考に、脚式ロボットに生物の構造を規範とした機構を導入する利点について説明する。その後、生物規範機構を脚ロボットに導入した関連研究について、関節構成や機構などの項目で分類し、本研究の立ち位置について言及したうえで、本研究

の目的を述べる．最後に，生物の脚部の筋骨格構造でも重要な２つの筋腱複合体を取り上げ，生物規範脚機構の開発を軸とした本論文の構成を示す．

第２章 下腿部の筋腱複合体を規範とした脚機構の開発

第２章では，ネコ科の生物の後肢下腿に備わる筋腱複合体を規範とした脚機構を提案する．対象とする筋腱複合体は，膝関節と足関節にまたがって二関節に作用するものであり，動的な運動においてエネルギーの蓄積と放出が行われている．この複合体の特に弾性要素としての機能に着目した脚機構について説明する．次に，この機構を搭載した一脚ロボットのモデルを構築し，このモデルを用いた垂直跳躍運動の軌道生成手法について説明する．最後に，生成された軌道に基づいて開発した試作機を用いて跳躍実験を行い，機構の効果について考察する．

第３章 大腿部の筋腱複合体を規範とした脚機構の開発

第３章では，ネコ科の生物の後肢上腿に備わる筋腱複合体を規範とした脚機構を提案する．対象とする筋腱複合体は，股関節と膝関節にまたがって二関節に作用するものであり，脚の伸展運動への寄与が高いとされていることから，ワイヤ・プーリ駆動機構と弾性体を用いた生物規範機構を提案する．新たにモデルを構築し，第２章で提案した軌道生成手法を用いて垂直跳躍運動軌道を生成する．最後に，生成された軌道に基づいて，開発した試作機を用いて跳躍実験を行い，機構の効果について考察する．

第４章 大腿と下腿に生物規範機構を有する脚機構の開発

第４章では，第２章，第３章で導入した機構を併せ持つ生物規範型脚ロボットの設計と運動制御について述べる．２つの受動機構を有する本モデルでは，それぞれの機構の弾性特性の組み合わせがロボットの運動性能に大きく影響を及ぼす可能性が考えられる．そこで，異なる弾性特性の組み合わせを有する複数のモデルを用いて，第２章で提案した軌道生成手法を用いて垂直跳躍運動軌道を生成し，運動への機構の効果について検証する．これら２つの生物規範機構を搭載した脚ロボットを試作し，軌道生成の結果に基づいて垂直跳躍実験を行い，それぞれの機構の効果について考察する．

第５章 結論と今後の展望

第５章では，本研究の成果をまとめ，今後の課題や展望について議論する．

目次

1	序論	1
1.1	背景	1
1.1.1	従来のロボットの設計と制御	1
1.1.2	生物の筋骨格構造	3
1.1.3	関連研究	5
1.2	研究目的	10
1.3	論文構成	10
2	下腿部の筋腱複合体を規範とした脚機構の開発	13
2.1	概要	13
2.2	四足哺乳生物の後肢下腿の筋骨格構造	13
2.3	下腿の二関節間筋腱複合体を規範とした脚機構のモデル	15
2.4	弾性四節リンク機構を有する脚ロボットの試作	17
2.4.1	アクチュエータ	17
2.4.2	弾性四節リンク脚機構の試作	22
2.5	弾性四節リンク脚機構の垂直跳躍運動の軌道生成	25
2.5.1	軌道生成の課題	25
2.5.2	ロボットの動力学モデルの概要	27
2.5.3	ロボットモデルの運動学	29
2.5.4	運動方程式の導出	32
2.5.5	動力学シミュレーションモデルの作成	35
2.5.6	非線形最適化を用いた運動軌道の生成手法	37
2.5.7	跳躍軌道生成の結果	41
2.6	垂直跳躍実験	45

2.6.1	実験環境	45
2.6.2	実験結果	48
2.7	本章のまとめ	51
3	大腿部の筋腱複合体を規範とした脚機構の開発	53
3.1	概要	53
3.2	四足哺乳生物の後肢大腿部の筋骨格構造	53
3.3	大腿部の二関節間筋腱複合体を規範とした脚機構のモデル	54
3.4	大腿部機構を有する脚ロボットの試作	58
3.5	大腿部脚機構の静力学解析	62
3.5.1	ロボットモデルの運動学	62
3.5.2	モータ消費電力の計算	65
3.5.3	解析結果	67
3.6	大腿部機構を有する脚ロボットの垂直跳躍運動の軌道生成	69
3.6.1	運動方程式の導出	69
3.6.2	順動力学による軌道の計算	70
3.6.3	運動軌道の生成手法	71
3.6.4	跳躍軌道生成の結果	74
3.7	実機実験	77
3.8	本章のまとめ	80
4	大腿と下腿に生物規範機構を有する脚機構の開発	81
4.1	概要	81
4.2	動力学モデルの作成	81
4.3	垂直跳躍運動の軌道生成と比較	83
4.3.1	初期姿勢を変更した検証	84
4.3.2	弾性特性の組み合わせを変更した検証	86
4.4	大腿部・下腿部の機構を搭載した脚ロボットの試作	88
4.4.1	2つの機構を搭載したロボットの開発	88
4.4.2	実験環境の改善	92
4.5	垂直跳躍運動の軌道生成	93

4.5.1	軌道生成シミュレーションの設定	93
4.5.2	軌道生成の結果	94
4.6	跳躍実験	98
4.6.1	実験環境	98
4.6.2	実験結果	98
4.7	本章のまとめ	102
5	結論と今後の展望	103
5.1	本研究による成果	103
5.2	今後の展望	105
5.2.1	他動作への展開	105
5.2.2	着地まで考慮した運動制御	105
5.2.3	生物規範脚機構を有する四脚ロボットの開発	106
	謝辞	107
A	制御システム	119
A.1	システムの構成	119
A.2	メインコンピュータ	120
A.3	モータドライバ	122
A.4	ロータリエンコーダ	124
A.5	足先圧力センサ	126
A.6	中継ボード	126
B	ロボットの特性	129
B.1	関節の摩擦トルクと粘性摩擦係数の同定	129
B.1.1	静止摩擦トルクの同定	129
B.1.2	粘性摩擦係数の同定	132
B.1.3	バックラッシの測定	134
B.2	モータのトルク定数の同定	136

目 次

1.1	Structure of the hindlimb of a cat	5
1.2	Composition of this thesis	11
2.1	Structure of the lower limb of a cat	14
2.2	Leg mechanism with the elastic four-bar linkage mechanism inspired by bi-articular muscle tendon complex of cat	16
2.3	Output torque vs rotational speed of an electromagnetic motor	19
2.4	Motor selection: (a) Torque density, (b) Response speed. The specification of these motors are available from manufacturer's websites ^[75, 76, 77, 78, 79]	20
2.5	3DCAD model of the motor housing design (Motor: RoboDrive ILM38x06)	22
2.6	3DCAD model of the left leg with EFLM	23
2.7	Prototype of the robot leg with EFLM	24
2.8	Schematics of the robot leg simulation model	28
2.9	Simulation scheme for vertical jump motion generation	38
2.10	Generated vertical jumping motion (EFLM model)	42
2.11	Generated vertical jumping motion (RFLM model)	43
2.12	Simulation results (EFLM model)	44
2.13	Experimental setup and control system	46
2.14	Control system configuration	47
2.15	Block diagram of the robot controller	48
2.16	Snapshots of the vertical jumping experiment	49
2.17	Experimental results	50
3.1	Structure of the upper limb of a cat	55
3.2	Proposed upper leg mechanism	56

3.3	Appearance of the prototype of one legged robot with upper leg mechanism . . .	58
3.4	3DCAD model of the actuator housing design (Motor: Parker K044050-8Y) . . .	59
3.5	Definition of the model parameters	63
3.6	Power consumption	67
3.7	Motor torque	68
3.8	Electromagnetic motor model	72
3.9	Simulation scheme for vertical jump motion generation	73
3.10	Generated vertical jumping motion	75
3.11	Simulation results	76
3.12	Snapshots of the vertical jumping experiment	78
3.13	Experimental results	79
4.1	Proposed bio-inspired leg mechanism	82
4.2	Vertical jumping motion	85
4.3	Appearance of the prototype of one legged robot with lower and upper leg mechanism	89
4.4	Schematics of the simulation model of the robot leg with the lower and the upper leg mechanism	91
4.5	The new experimental setup	92
4.6	Generated vertical jumping motion (Model C)	95
4.7	Generated vertical jumping motion (Model F)	96
4.8	Simulation results (Model C)	97
4.9	Snapshots of the vertical jumping experiment	99
4.10	Experimental results (Joint angle, drive torque and body orientation)	100
4.11	Experimental results (Displacement of the springs)	101
B.1	Experimental setup for friction identification	130
B.2	Results of the joint static torque measurement (hip)	131
B.3	Results of the joint static torque measurement (knee)	131
B.4	Results of the joint viscous friction torque measurement (hip)	133
B.5	Results of the joint viscous friction torque measurement (knee)	133

B.6	Measured results (Angular frequency: π [rad/s],Amplitude:10[deg])	135
B.7	Relationship between motor and joint angle (Angular frequency: π [rad/s], Am- plitude: 10[deg])	135
B.8	Experimental setup for the torque measurement	137
B.9	Measured results	137

表 目 次

2.1	Specification of RoboDrive ILM38x06	21
2.2	Specifications of the prototype	25
2.3	Parameters of the prototype	31
2.4	CoM positions of each linkage	32
2.5	Comparison of the jumping height	41
3.1	Specifications of the prototype	59
3.2	Specification of K044050-8Y	60
3.3	Characteristics of AWF10-60	61
3.4	Characteristics of SC-75	61
3.5	Parameters of the prototype	64
3.6	CoM positions of each linkage	65
3.7	Comparison of the jumping height	74
4.1	Initial posture for comparison	84
4.2	Simulation results	86
4.3	Characteristics of tension spring for comparison	87
4.4	Simulation results	87
4.5	Specifications of the prototype	90
4.6	Parameters of the prototype	90
4.7	CoM positions of each linkage	91
4.8	Comparison of the results	96
4.9	Results of simulation and experiment (Model C)	99
A.1	Specification of the computer PM-PV-D5251-R11	121

A.2	Specification of the can interface module PCM-3680/I	122
A.3	Specification of the servo driver G-TWI 10/100 SE	123
A.4	Specification of the absolute encoder RMB20SC12BC10	125
A.5	Specification of the force sensor FSR400	127
A.6	Specification of the microcontroller STM32f103CBT6	128
B.1	Measured results	136

記号の説明

(x, z)	絶対座標系におけるロボット全体の重心座標
(x_i, z_i)	絶対座標系におけるロボットのリンク i の重心座標
L_i	リンク i の長さ
m_i	リンク i の質量
I_i	リンク i の慣性モーメント
r_i	リンク i の重心周りの角速度
(x_{gi}, z_{gi})	リンク i の近位関節に固定された直交座標系における リンク i の重心座標
L_{gi}	リンク i の近位関節から重心座標までの距離
ψ_{gi}	リンク i と近位関節から重心座標を 結ぶ直線のなす角
(x_{hip}, z_{hip})	絶対座標系における股関節座標
(x_{knee}, z_{knee})	絶対座標系における膝関節座標
(x_{ankle}, z_{ankle})	絶対座標系における足根関節座標
(x_{toe}, z_{toe})	絶対座標系におけるつま先座標
ϕ	胴体と地面とがなす角度
$\theta_h, \theta_k, \theta_a$	股関節，膝関節，足根関節の角度
$\theta_{i,ref}$	関節 i の目標角度
$\dot{\theta}_{i,ref}$	関節 i の目標角速度
l_{ls}	下腿部機構の弾性リンク長さ
l_{us}	大腿部機構の引張ばねの長さ
l_{ls0}	下腿部機構の弾性リンクの自然長
l_{us0}	大腿部機構の引張ばねの自然長
k_{ls}	下腿部機構の弾性リンクのばね定数
k_{us}	大腿部機構の引張ばねのばね定数
f_{pre-ls}	下腿部機構の弾性リンクの初張力
f_{pre-us}	大腿部機構の引張ばねの初張力
f_{ls}	下腿部の弾性リンクの張力

f_{us}	大腿部の引張ばねの張力
g	重力加速度
q	一般化座標
$M(q)$	慣性行列
$H(q, \dot{q})$	遠心力・コリオリ力に関する項
$G(q)$	重力項
τ	関節駆動トルク
f	系に加わる外力
f_x	床反力水平成分
f_z	床反力鉛直成分
f_{guide}	拘束用リニアレールから受ける水平反力
μ_s	最大静止摩擦力
μ_d	動摩擦力
τ_M	モータトルク
γ_h	股関節アクチュエータの減速比
γ_k	膝関節アクチュエータの減速比
$\tau_{M,max}$	モータの最大出力トルク
ω	モータの出力角速度
ω_s	最大トルクを出力できる最大角速度
ω_n	無負荷時の角速度
e	モータ印加電圧
R	モータの端子間抵抗
K_t	モータトルク定数
K_e	モータ逆起電力定数
m_{motor}	モータの質量
J_{rot}	モータのロータの慣性モーメント
i_p	モータのピーク電流
d_m	モータのトルク密度
Ω_{cm}	モータの応答速度

K_p	フィードバック制御の比例ゲイン
K_d	フィードバック制御の微分ゲイン
n	Bスプライン曲線の次数
t	Bスプライン曲線のノットベクトル
\mathbf{P}_i	関節 i の軌道を表すBスプライン曲線の制御点ベクトル
T_{end}	軌道生成する時間

注意事項：

1. 太字は行列であることを意味する（例： \mathbf{q} ）。
2. ドット記法に基づき，記号の上部のドットが1つ付いたものは時間に関する1階微分であることを意味する（例： $\dot{\theta}$ ）。ドットが2つ付いたものは時間に関する2階微分であることを意味する（例： $\ddot{\theta}$ ）。
3. 上記では章にまたがって用いられる記号を説明した。その他の記号については本文中で説明する。

第1章

序論

1.1 背景

近年のロボット技術の発展は著しく、様々な分野でロボットが活用されている。特に移動機構を有するロボットの需要は高まっており、産業分野、医療・介護分野、災害救助分野で利用できるロボットの研究開発が世界中で進められている。移動ロボットの中で脚を移動形態としたロボットは、足先の接地位置を離散的に任意に選択できるため、凹凸の激しい地形の踏破性は高く、災害現場や人間の複雑な居住空間での利用が期待できる。このような環境でのロボットの利用を考えると、ある運動能力に特化させたロボットは好ましくない。災害現場を例にとると、人間の立ち入れない、あるいは立ち入るには危険な場面において、脚式移動ロボットは瓦礫を潜り、よじ登り、あるいは掻き分けるなどして目的地へ侵入することが要求される。また、人が生活する住居や施設などでは、歩行という移動方式を採用する人間に合わせて整備されていることが多く、他の移動形態に比べて脚式移動が有利である。脚式移動ロボットの活躍が期待されるこれらの状況において、安定して歩行できるのみならず、より迅速に目的地へ移動するための高速移動能力や、より大きな障害を超えられる跳躍能力などをロボットに付与することができれば、脚式移動ロボットの活動範囲をさらに拡張することができると考えられる。このような運動の実現には、ロボットに俊敏性が要求される。

1.1.1 従来のロボットの設計と制御

脚式移動の利点を活かしたロボットの開発のため、あるいは人間やその他の生物の運動メカニズムの解明などを動機として、古くから今日に至るま

で，二足歩行ロボット^[1, 2, 3, 4]や多脚ロボット^[5, 6]の研究・開発が多く行われている．これらは，安定した歩行や，段差の昇降，多脚ロボットにおいては不整地上での移動を実現しているものもある．

ここでは関節アクチュエータとして電磁モータを採用しているものを例に挙げた．電磁モータは制御性が良好で，小型のものも入手可能であるという観点から，多くのロボットに利用されている．ここで挙げたロボットを含む電磁モータを用いた従来の脚式移動ロボットは，多くが安定した移動を重視し，機構設計の単純化のために，あるいは制御の煩雑化を防ぐために，剛体のリンクと高減速比のアクチュエータで駆動される関節で構成されている．電磁モータは一般に質量に対して出力トルクが小さいため，多くの場合で高減速比の減速機構を併用する必要があるが，減速機に内在する摩擦抵抗や電磁モータのロータの慣性による抵抗などが原因で，バックドライバビリティは著しく低下する．関節のバックドライバビリティが低いと，関節間の動学的な干渉が生じにくくなり，ロボットを簡単に制御する上で好都合であった．あるいは，従来のロボットでは，各関節間が干渉しないように制御するのが一般的であった．一方で，ロボット全体の運動が関節の出力に支配されることになり，瞬発的な運動を実現するのは困難となる．より高速，高加速度の運動の実現のためには，先端リンクに加わる外力や，先端リンクが運動することによる慣性を運動に積極的に用いることが望ましい．また脚式移動においては，足先と地面との接触状態が間欠的であり，歩容の最中に繰り返し地面との衝突を伴うが，バックドライバビリティが低いと予期せぬ地形の凹凸などへ適応的に対応するのは難しい．歩容の際に受ける床反力は，移動速度の大きさに従って大きくなるのが生物の走行時の床反力を測定した研究からわかる^[7, 8]．他にも，跳躍後の着地動作などにおいてはさらに大きな衝撃が加わることが想像できる．従来の剛体のリンクと高減速比のアクチュエータで構成された脚システムの場合は，このような大きな衝撃力が瞬間的に足先に加わってもその衝撃を吸収できず，ロボットの破損につながる．

1.1.2 生物の筋骨格構造

一方で生物の中には，不整地でも高速で移動したり，容易に段差を乗り越えるものもある．生物は，長年の進化の過程で優れた知能と身体を獲得した．ヒトは哺乳類に属する脊椎動物の 1 種であり，言語を使ってコミュニケーションをとったり，四肢を使って高度な作業を行うことができる．哺乳動物の運動能力を見てみると，陸地で生活する生物に限定しても，ヒトよりも遥かに高い能力を有する種は多く存在する．チータやヒョウに代表されるネコ科の動物には，陸上で生活する生物の中でも非常に優れた運動能力を有しており，時速 100km/h を超える高速な走行や，自身の体高の数倍の高さまで到達する跳躍など，極めて俊敏な運動を行うことができるものがある^[9]．それだけでなく，高所から飛び降りても静かに着地できたり，凹凸の激しい地形でも安定して移動できるなど，非常に柔軟で頑強な振る舞いも見せる．これらの運動は，従来のロボット設計では実現するのが難しく，脚式移動ロボットにおいて挑戦的な課題である．これらの高度な運動技能は，生活環境や生態系の中での立ち位置に応じて発達・退化を重ねて最適化された筋骨格配置と，それらの協調的な活用を可能にする運動制御によって成し遂げられていると推察する．

生物の脚の形状に注目すると，胴体に近い部位は太くて大きく，先端に近づくにつれて小さくて細く，すなわち軽量になっているように見える．実際，肢の根元周辺の筋の体積や骨は大きいのに対して，肢の先端では非常に細く，軽量である^[10]．生物は走行の際，肢を前後に振るが，このように先端が軽量の質量分布の場合，肢の根元周りの慣性モーメントが小さくなり，従って脚振りの加減速に必要なトルクが小さくなる．このことは，より高速な脚振りを可能にし，高速な走行につながると考えられる．

哺乳動物の身体は，その体を形成する骨格と，その骨格の周りに関節を駆動するための多数の骨格筋が備わっている．筋は力の発生だけでなく，筋を覆う筋膜などの受動的な粘弾性の性質も持ち，筋の活動レベルに応じてそれらの特性は変化する．生物工学の観点では，筋は直動アクチュエータとばねとダンパを並列に接続したモデルで置き換えられる．その骨格筋は，腱

や腱膜などの腱組織を介して骨格に付着する．腱は弾性特性を有し，しばしばばねに置き換えられる．この筋組織と腱組織が直列に接続されたものは筋腱複合体と呼ばれる．生物の筋は緊張することで収縮方向のみに張力を発生し，弛緩による伸展で力を発生させることはできない．関節を駆動する骨格筋の多くは，伸筋と屈筋の2つで1つの対をなし，それらが拮抗することで関節に双方向への回転トルクが発生する．このような対の筋を拮抗筋と呼び，対の筋の活性度合いによって関節剛性を変化させることができる．また，筋単体ではそれほど大きな力を発揮できないが，1つの関節の周辺に複数の筋腱複合体が付着して作用することで，1つの筋以上の発生力を得ることができる．

脊椎動物の，特に高速な走行や瞬発的な跳躍運動などの俊敏な運動は，全身の筋組織や腱組織に備わる粘弾性的な特性を利用して，一連の運動の中でエネルギーの吸収・蓄積と再利用が行われている可能性があることが，バイオメカニクスの様々な文献で報告されている^[11, 12]．脚部の筋・腱では，着地時に伸長して衝撃を蓄積し，次の蹴り出し時にそれを放出しており^[13]，その効果の大きさは体の大きさや運動の強度にも依存することが示唆されている^[14]．

ここで，文献^[10, 12, 15]を参考にして作成したネコ科の生物の後肢の筋骨格構造の概略図を図1.1に示す．ただし，筋（腱）の付着する位置はおよそのものであり，種差，個体差があり，厳密に関節と付着位置との距離を表したものではない．筋骨格を形成する骨格筋は，1つの関節にのみ作用する単関節筋と，2つ以上の関節をまたいで複数の関節に作用する多関節筋に区別することができる．脚部の二関節筋には，1)多関節間の運動協調機能と，2)多関節間でのエネルギー伝達機能があることが指摘されており^[16, 17]，二関節筋の存在が足先での力の出力の方向や大きさに影響を与えることが，筋配置を考慮したモデルを用いた解析結果により示された^[18]．二関節筋の存在は，胴体付近の大きな筋による発生力の先端への伝達を可能にするため，先述のような先端が細く軽量の肢の形成を助けるものである．以上の知見より，二関節間にまたがる筋腱複合体は走行や跳躍運動において重要な役割を果たすと考えられる．これらのような生物の筋骨格構造に備わる機能

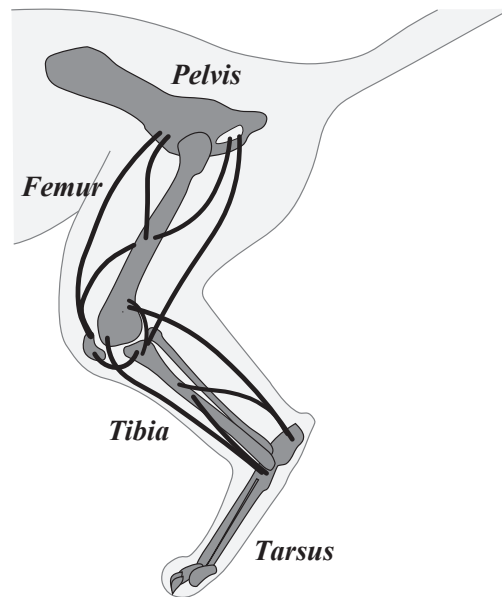


Fig. 1.1: Structure of the hindlimb of a cat

をロボットに導入することでできれば，脚ロボットの運動性能の向上が期待できる．

1.1.3 関連研究

生物のような俊敏な運動の実現をロボットで実現するのは難しい課題である．脚ロボットでの走行や跳躍運動の実現を目指した研究・開発は国内外でこれまでも行われている^[19, 20]．文献^[21]や^[22]で述べられていることを参考にすると，俊敏な動作が可能な脚ロボットの設計について以下の要求が考えられる．

- ・ 運動中に力学的エネルギーの蓄積・再利用が可能な機構
- ・ 高トルクかつ軽量，高バックドライバビリティなアクチュエータの利用
- ・ 胴体に比べて足先が軽量の構造（低慣性モーメントな脚構造）

ロボットの関節駆動に利用されるアクチュエータを駆動源で大別すると，先に述べた電磁モータのような電動アクチュエータのほかに，空気圧アク

チュエータや油圧アクチュエータがあり，出力の大きさや柔軟性などの利点から脚式移動ロボットでも利用された例がある．

空気圧アクチュエータは，空気の圧縮性を利用して力を発生させるため，それ自体に粘弾性のような特性を有する．1980年代の初頭にMITのLeg Laboratoryで開発された2D平面をホッピング移動可能な一脚ロボット^[23]には空気圧シリンダが用いられた．これらのロボットは生物の複数の回転関節で構成される構造ではなく，脚の根元の回転と脚長方向の直動伸縮に置き換えたモデルであった．脚の伸長方向に用いたシリンダを弾性要素として利用し，着地時の衝撃エネルギーをホッピングの蹴り出しに使えることを示している．なおこれらのロボットの開発者らは，その後のロボット開発では主に油圧アクチュエータを採用している．

空気圧シリンダのロッドに換えてケーブルを利用した空気圧ケーブルシリンダを用いた二脚ロボット^[24]や四脚ロボット^[25]もあり，高い跳躍を実現した．また空気圧アクチュエータの中でも空気圧ゴム人工筋はアクチュエータ自体が柔軟素材で構成されるため，柔軟性に富み，金属製の部品が使用される空気圧シリンダに比べえても出力対重量比は良い．生体筋との類似性から脚式移動ロボットに利用される例も多く^[26]，跳躍・着地^[27, 28, 29]や走行^[30, 31, 32]などを実現したロボットが開発された．

空気圧アクチュエータは高出力と柔軟性を有するが，空気の圧縮性に伴う非線形性とヒステリシスによる制御性の悪さ^[33]や応答性の低さは脚式移動ロボットにおいて問題となる．空気圧ゴム人工筋においては収縮方向にしか能動的な駆動ができないため，回転関節では対をなした拮抗構造を構成しなければならず，設置スペースの確保が必要となる．また，これらのアクチュエータの駆動のための空気圧源や電磁弁の搭載に伴うロボットの大型化・重量増加は，俊敏な動作を目標とした脚移動ロボットにとって好ましくない．

油圧アクチュエータは，応答性が良好で，質量に対して出力が大きいことから，脚式移動ロボットに利用される例が増えている．先に述べたMITの研究室でRaibertらによって1980年代後半以降に開発された走行・ホッピングロボット^[23, 34]では油圧アクチュエータが用いられ，二脚や四脚のロボットで

走行やホッピング、宙返りなどのパフォーマンスを実現した。その後、Raibertが設立したBoston Dynamics社で2005年に開発された四脚ロボットBigDog^[35]は、不整地でも安定して歩行したり、胴体に外部から衝撃を加えられても転倒することなく姿勢を復帰したり、雪道では足を取られながらも歩行を続けたりするといった動画で注目を集めた。また同機関からは他にも油圧アクチュエータを利用したロボットとして、2013年に走行速度32km/hでの走行が可能な四脚ロボットWildCat^[36]、段差の昇降や不整地走行などを行うヒューマノイドロボットAtlas^[37]、2015年には屋内外での活動を想定し電動で油圧駆動する四脚ロボットSpot^[38]の動画が公開され、それぞれ話題を呼んだ。

その他に、Hyon *et al.* はRaibertらのホッピングロボットとは異なり回転関節を採用し、動物の脚構造を規範とした脚機構にばねを導入した油圧駆動一脚ホッピングロボットKenken^[39]を開発し、1.5m/sでのホッピングを達成した。その後、Hyonらは油圧駆動でトルク制御を用いた四脚ロボットRL-A1^[40]やヒューマノイドロボットTaeMu^[41]を開発している。Semini *et al.* が開発したHyQ^[42]は油圧アクチュエータと電動アクチュエータとを併用した四脚ロボットで、トロット歩容や不整地歩行、また高出力であることを活かした跳躍を実現した。

これらのロボットに使用される油圧アクチュエータは高速性、高応答性、高出力重量比など、脚式移動ロボットの関節駆動に用いるアクチュエータに好適な特性を有するが、動力源である油圧ポンプの作動には内燃機関などの大きな動力源を要するため、空気圧アクチュエータと同様にロボットの小型・軽量化には適さない。またオイルの温度や純度などが出力に大きく影響するため、管理・保守の面でも配慮が必要であることや、内部漏れなどによるエネルギー効率の低下などの問題もある。

電動アクチュエータの中でも、電磁モータは制御性が良好で大型の動力源を必要としない。一方で先に述べたように、電磁モータは一般には出力トルクが小さく、高減速比の減速機を用いる必要があるため、バックドライバビリティの低下が問題となる。

Asada *et al.* ^[43] は減速機を用いないダイレクトドライブのロボットアームを提案したが、ダイレクトドライブモータはそれ自体が重く、大型であるため、脚式移動ロボットにおいては不利になる。MIT Cheetah^[44, 45, 46]は独自で設

計した電磁モータと低減速比(< 10)の減速機構で駆動される四脚ロボットである。低減速比であるためバックドライバビリティは高く、軽量の脚の設計と高トルク密度アクチュエータにより、トロット・バウンス歩容や体高の半分程度の高さの跳躍に成功した。他にも、電磁モータと低減速比の減速機構を関節駆動に用いた脚機構で、高い跳躍運動が実現されている [47, 48, 49]。

本研究では、生物の筋骨格構造のもつ柔軟性やエネルギーの蓄積・再利用の機能にも注目する。このような機能を脚機構に適用するために、弾性要素を機構内に導入する方法は明解である。これまでに、電磁モータをアクチュエータとし、弾性体を導入した脚機構は開発されている。しかしその多くは、脚にコンプライアンスを持たせ、不整地への適応歩行や着地時の衝撃緩和を目的としたものであり [50, 51, 52]、着地の運動エネルギーを本質的に運動に利用しようとしたものではない。

EPFL Jumper^[53], GRILLO^[54], Salto^[55, 56]などは小型の跳躍ロボットである。これらのロボットでは、モータでばねをたわませて事前に弾性エネルギーを蓄え、それを一気に解放して脚を伸展して跳躍するが、脚伸展運動に特化した跳躍専用機械と言わざるを得ない。本研究では、将来的に二脚または四脚ロボットとして歩行、走行、跳躍などの様々な運動が可能な脚ロボットを開発することを目指し、これらのように跳躍などのある特定の運動に特化するような機構設計はしない。

Avik *et al.* が開発した Penn Jerboa^[57] は二脚ロボットであり、先端におもりを持つ尻尾を振って姿勢を補正しながらホッピングを行う。その脚機構は、脚を前後に振るための1つの股関節モータと、対角上に搭載された圧縮ばねで受動的に伸屈する四節リンク機構で構成される。ホッピング中、着地時に床反力によって四節リンクが変形することで対角上の圧縮ばねが圧縮され、その復元力によって脚が伸展して跳躍する。この機構はエネルギーの蓄積と再利用を上手く行っているが、能動的に脚を屈伸することはできず、任意に足先位置を制御することはできない。

Cheetah-cub^[58] や Oncilla^[59] は EPFL の A. Spröwitz *et al.* によって開発された小型四脚ロボットであり、2013年に Cheetah-cub は 1.42m/s でのトロット走行を実現した [60]。これらのロボットは Advanced Spring Loaded Pantograph(ASLP) Leg という脚機

構を搭載している．ASLP機構は，膝関節と足関節がパンタグラフ機構で接続され，その対角線上に圧縮ばねが搭載されており，足関節軸からつながるワイヤを胴体に搭載されたRCサーボモータで巻き取ることで屈曲することができる．さらにパンタグラフの一边を引張ばねに置き換え，脚のコンプライアンス性を良くした脚機構である．この引張ばねは生物の下腿に備わる二関節間の筋腱複合体と同じ場所に配置されており，歩容時の消費エネルギーの低減に貢献したことが示された．この脚機構では，能動的な屈曲は可能なものの，伸展は対角上の圧縮ばねの復元力に委ねられ，またその速度はサーボモータによるワイヤの繰り出し速度によって制限される可能性があり，俊敏な動作の妨げとなる．また最近では，膝関節には弾性体とカム機構による受動関節を用い，下肢にはASLP機構で利用された二関節間の弾性要素を用いた一脚ロボットを開発し，高エネルギー効率のホッピング運動を実現した^[61]．しかし同じく脚の伸展は能動的には行えず，運動が限定されてしまう．

KAISTのJ. Park *et al.*が開発した二脚ロボット^[62]は，生物の走行を参考に決定した足先軌道を1つのモータ駆動のみで描くように設計されたクランク機構と，生物の下腿の二関節間筋腱複合体と同じ場所に配置された引張ばねが特徴的である．実験では，引張ばねの効果も利用して0.75m/sでの走行を実現したが，機構的な拘束により足先軌道が限定されてしまうため，走行以外の運動には適さない．

M. Hutter *et al.*によって開発が進められている四脚ロボットは，関節に直列弾性アクチュエータを用いることでコンプライアンス性を持たせ，また力センサを用いずに関節トルク制御を可能としている^[63, 64]．四脚ロボットでの不整地歩行や作業などを実現しているが，ダイナミックな運動の実現には至っていない．直列弾性機構は，外力に対するコンプライアンスが高く，脚ロボットに用いられることが多くなっている．また，弾性要素の変位を測定することで，エンドエフェクタの発生力を推定できることから，力制御に用いられることも多い．一方で，力制御の帯域幅は用いる弾性要素の剛性によって決まり，コンプライアンス性を高めようとするとも力制御の帯域は低くなるという点が知られている．

IITのNikos G. Tsagarakisら^[65, 66]の研究グループで開発された脚機構は、関節駆動に直列弾性アクチュエータと並列弾性アクチュエータを併用して関節剛性を調節可能にし、高効率駆動を目指したものである。この機構はピークトルクや電力消費の低減を目的として設計パラメータ最適化が行われ、エネルギー効率の向上が示された。1つの関節に複数のモータを利用するのは、ロボットの体積や重量の点で不利になり、好ましくない。

先に述べたような生物の二関節筋や筋腱複合体の持つ主要な機能を、工学的にロボットに上手く導入することができれば、脚ロボットの運動性能の向上が期待できる。

1.2 研究目的

本研究では、脚ロボットの運動性能の向上のために、生物界でも抜群の運動能力を発揮するネコ科の生物の筋骨格構造を規範とした脚機構を開発することを目的とする。特にダイナミックな運動に大きく貢献する二関節間の筋腱複合体について、高バックドライバビリティの電磁モータと弾性体を用いて置き換えた生物規範型脚機構を提案する。また、ダイナミックな運動の制御について、その機構の特性を考慮した運動軌道生成手法を用いて、特に動的な運動の1つである垂直跳躍運動を生成しロボットに実装して、生物規範機構の有用性を検証する。

1.3 論文構成

本論文は、生物規範型の脚機構の開発を主軸として、以下の全5章で構成される。本論文の構成を、図1.2にまとめる。

まず本章では、序論として従来の脚式移動ロボットの設計上の問題点と、生物の筋骨格構造の形態と機能について説明した上でロボットの設計への適用の利点を示し、関連研究について説明し、最後に本研究の目的を述べた。

第2章では、ネコ科の生物の後肢下腿に備わり、動的な運動においてエネルギーの蓄積と放出を可能とする二関節間の筋腱複合体を規範とした脚機

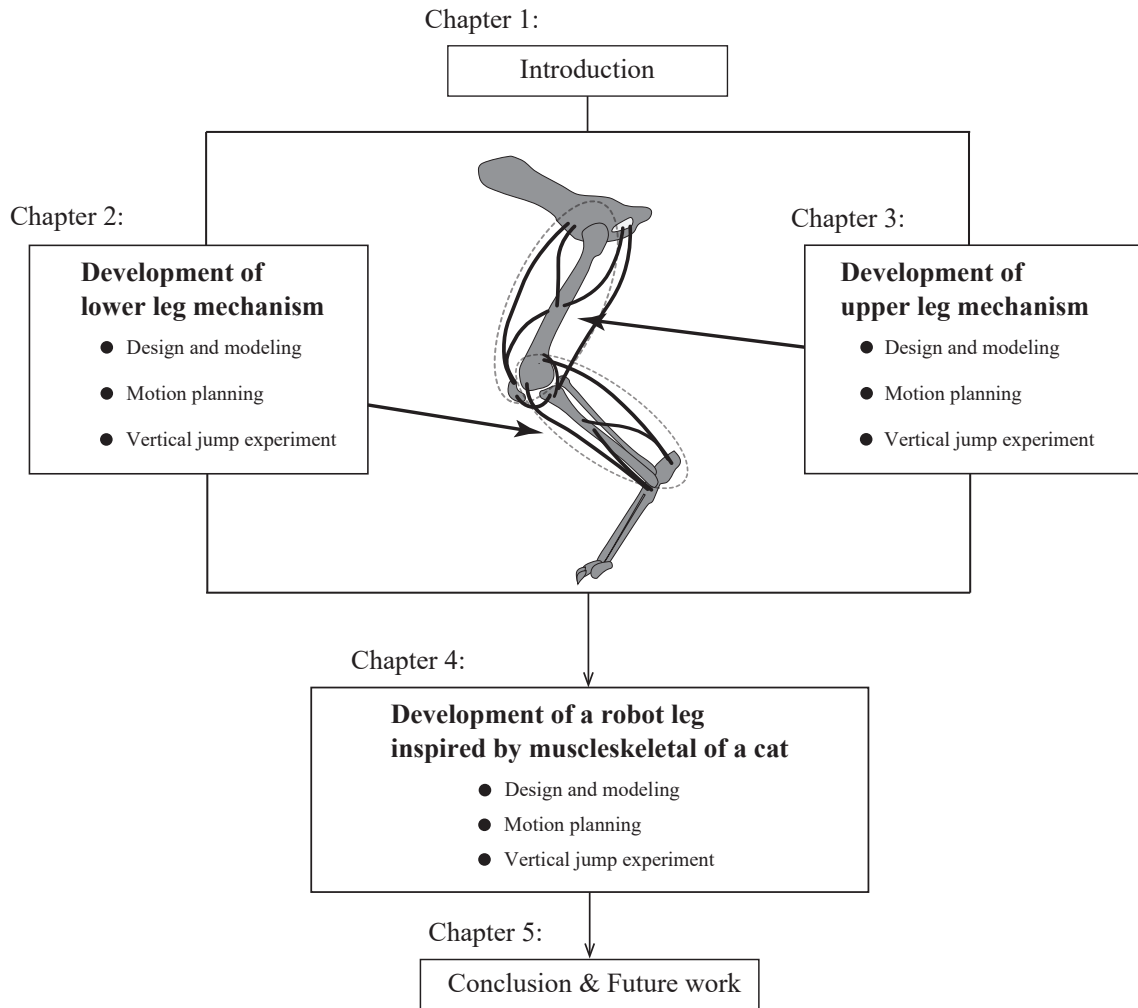


Fig. 1.2: Composition of this thesis

構を開発し，その機構の効果を活用した運動制御手法と軌道の生成および実験結果について述べる．

第3章では，後肢上腿に備わり，脚の伸展運動への寄与が高い二関節間の筋腱複合体を規範とした脚機構を開発し，第2章と同様の手法を用いた運動生成および実験結果について述べる．

第4章では，第2章，第3章で導入した機構を併せ持つ生物規範型脚ロボットの設計と運動軌道の生成および実験結果について述べる．

第5章では，本研究の成果をまとめ，今後の課題や展望について議論する．

第2章

下腿部の筋腱複合体を規範とした脚機構の開発

2.1 概要

本章では，ネコ科の生物の下腿に備わる筋腱複合体を規範とした脚機構の開発について説明する．まず，ネコ科の生物の膝関節以下の筋骨格構造について説明し，その中でも運動への寄与が大きいとされる筋腱複体の役割について述べる．その筋腱複体の役割を電磁モータと弾性体で置き換えた弾性四節リンク脚機構を搭載した脚機構の設計を行い，その効果を検証する．また移動運動の中でも特に動的なものとして垂直跳躍運動を取り上げて，試作機の垂直跳躍運動の軌道生成を行う．最後に，試作した脚機構を用いて，生成された軌道に基づく垂直跳躍実験を行い，機構の効果を検証する．

2.2 四足哺乳生物の後肢下腿の筋骨格構造

模倣対象とする四足哺乳生物の後肢下腿の筋骨格構造の概略図を図2.1に示す．後肢の解剖学的な所見^[10]と，走行や跳躍などの動的な運動の観察結果^[67]より，哺乳動物の後肢下腿の筋骨格構造の次のような特徴に注目する．

1. アキレス腱は非常に強靱な腱であり，運動の中にエネルギーの蓄積と放出を行う．
2. 走行や跳躍において大腿骨と足根骨は運動中に連動している．

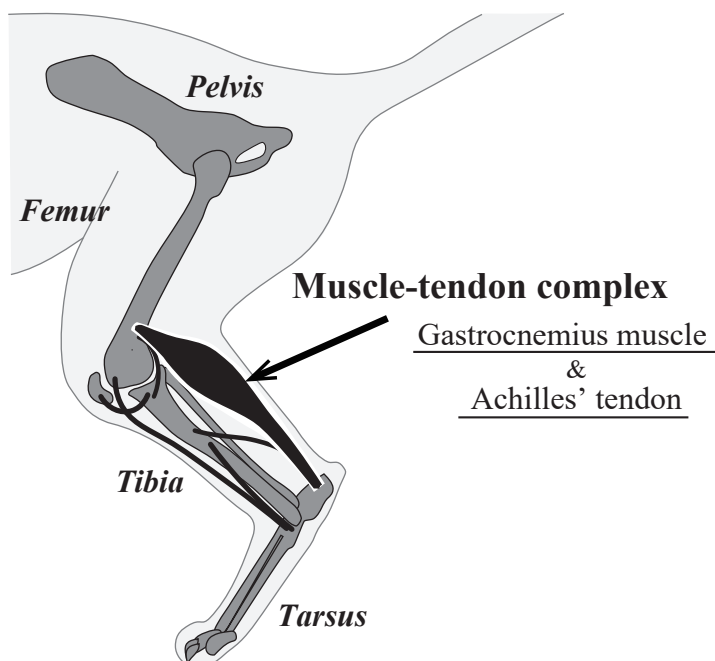


Fig. 2.1: Structure of the lower limb of a cat

跳躍や走行などの動的な運動に重要とされる筋腱複合体の1つは、腓腹筋 (*Gastrocnemius*) とアキレス腱 (*Achilles tendon*) で構成されるものである。ここで、腓腹筋は膝-足根関節周囲で最大の体積を持ち、膝関節の屈筋、足根関節の伸筋に作用する二関節筋である。腓腹筋はアキレス腱を介して踵骨に付着する。

多くの哺乳生物の足根関節の伸筋のうち、単関節筋であるヒラメ筋 (*Soleus*) はあまり発達しておらず、運動への貢献は小さい^[68]、また運動中に着地時の衝撃を吸収して脛骨後部の筋・腱にエネルギーの蓄積し、次の蹴りだし時に再利用が行われている^[12]という考察から、この二関節間の筋腱複合体の弾性要素としての機能の運動能力への貢献は大きいと考えられる。

また、この筋腱複合体は膝伸展のエネルギーを足根関節に伝達するという役割を持つことが示唆されている^[69]。大島ら^[70]は、これをロッドで置き換えて、足根関節モータを排除した脚機構をもつ四脚ロボットを開発して跳躍動作を実現した。しかし筋腱複合体の弾性要素としての機能の模倣には着手していない。

本研究では，哺乳生物の中でも運動能力が高いネコ科の生物の腓腹筋とアキレス腱で構成される二関節間の筋腱複合体の，関節間の協調機能と，弾性要素としての機構に注目して，脚ロボットの機構を開発する．

2.3 下腿の二関節間筋腱複合体を規範とした脚機構のモデル

筋腱複合体のエネルギーの蓄積・再利用の効果や二関節筋の協調機能などは，関節構成や関節間距離などの幾何学的特徴や，筋腱の弾性やモーメントアーム長などの影響を受ける．本研究では，生物の身体的な特徴をロボットの設計に取り入れることで，脚ロボットの性能向上を図る．

ネコ科の生物の走行や跳躍運動への貢献が示唆されている脚部の特徴を取り入れたロボットの脚機構を図2.2に示す．ロボット脚は，哺乳生物の後肢の主要関節である，股関節，膝関節，足根関節の3つの関節を持つ脚構造とした．

脛骨の後部の筋腱複合体は，特にその弾性要素としての機能の運動への貢献に期待できることから，この筋腱複合体を弾性リンクで置き換える．ここで弾性リンクは，直動のガイドと引張ばねで構成され，伸長すると張力が発生する．直動ガイドにより，直動以外の変形は生じない．この機構では，弾性リンク，Shinリンク，ThighリンクとFootリンクで四節の閉リンク構造が構成される．本研究ではこの機構を弾性四節リンク機構（Elastic Four-bar Linkage Mechanism，以降EFLMと称す）と呼ぶ．EFLMは閉リンク構造であり，膝関節と足根関節の間で弾性リンクを介してトルクが伝達される．したがって，腓腹筋とアキレス腱で構成される筋腱複合体のように，膝関節の伸展トルクが足根関節へ伝達される．さらに屈曲トルクも同様に伝達されるため，足根関節を駆動するためのアクチュエータを省略することができる．このアクチュエータの省略は，脚全体の軽量化に加えて，根元関節から遠方の重量を低減することができるため，高加速度での脚振りの妨げとなる根元関節まわりの慣性モーメントを低減できる．また，足リンクの先端（足先）

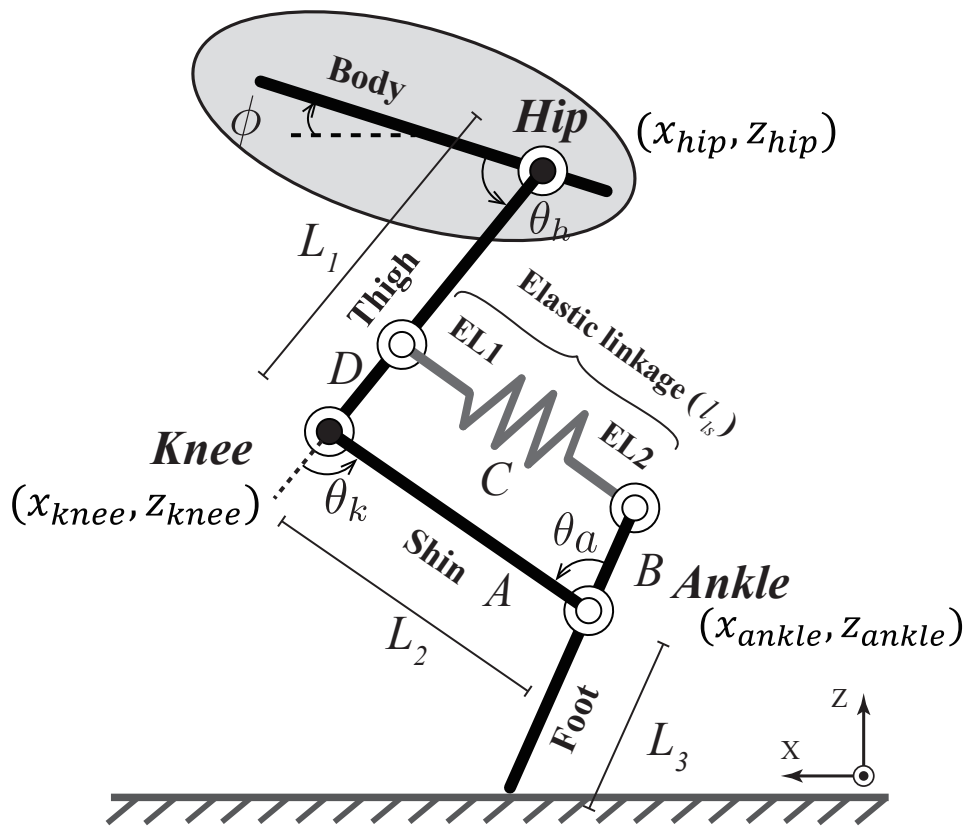


Fig. 2.2: Leg mechanism with the elastic four-bar linkage mechanism inspired by bi-articular muscle tendon complex of cat

が地面に接して反力が加わると，弾性リンクは伸長して弾性エネルギーが蓄積され，そのエネルギーはばねの復元とともに放出される．これによって筋腱複合体の持つエネルギーの蓄積・再利用と同じ機能を再現することができる．

筋腱複合体を置き換えた弾性リンクによる膝-足根関節のトルク伝達機能および張力による足先出力への影響は，四節リンク機構のリンク長の比によって決まる．ここで，高速走行を行うチータの足根関節まわりの腓腹筋/アキレス腱のモーメントアームが長いという知見^[10]に基づき， BD の寸法を $B > D$ の関係が成り立つように設計した．なお，我々が以前に行ったEFLMのリンク長をパラメータとした設計でも，この関係を満たす組み合わせで脚ロボットの性能向上が見込めることが分かっている^[71]．

生物の筋や腱は非線形な弾性特性を持ち，特に伸長量が大きい場合に張力が急激に大きくなる．ここでは，弾性リンクの直動ガイドに可動限界を持たせ，引張ばねが伸長して可動限界に達すると衝突部分に取り付けたシリコーンゴム製の緩衝材に接触することで大きな反力が生じるようにした．これにより弾性リンクは，線形引張ばねによる線形弾性領域と，接触反力による高剛性領域の2段階の剛性を持つ非線形弾性となる．また収縮時にも同様に，引張ばねの自然長付近でガイドが接触するようにすることで，遊脚中でも足根関節の過度な伸展を防止する．

この脚機構は股関節と膝関節が駆動関節となり，それぞれ電磁モータを用いた回転アクチュエータで駆動される．簡単のために，矢状平面に拘束された2次元の運動のみに限定し，内/外転，内/外旋の自由度は付与しない．

2.4 弾性四節リンク機構を有する脚ロボットの試作

前述の機構設計に基づき，弾性四節リンク機構を搭載した脚機構の試作機を製作した．ここでは，関節駆動に用いるアクチュエータの設計と，EFLMを含んだ脚ロボットの詳細を説明する．

2.4.1 アクチュエータ

第1章で述べたように，ロボットのアクチュエータには油圧式，空気圧式，電動式があり，それぞれに特徴がある．本研究では，小型ロボットの開発に向き，他のアクチュエータと比較して制御性やメンテナンス性が良好で，エネルギー供給源まで含めてロボットへの搭載が可能な電磁モータを用いる．

電磁モータは他のアクチュエータと比較して，質量や体積あたりの出力トルクがあまり大きくない．そのため，一般的にはモータと負荷の間に高減速比の減速機構が用いられ，脚ロボットにおいても減速比100以上の減速機がよく用いられている．高減速比の減速機構を用いることで，最小限の質量増加や体積増加で大きな出力トルクを得ることができる．しかしながら，モータ軸や減速機内の摩擦や慣性が大きな抵抗となり，関節のバックドライ

バビリティを極端に低下させる^[73]. 具体的には, 減速比 γ としたとき, 負荷側から見たモータの静止摩擦力は γ 倍, モータのロータの慣性モーメントや粘性摩擦力は γ^2 倍となる. バックドライババビリティが低いと, 動的な運動によるリンク間の動力的な干渉が生じにくくなる. これは干渉を補償する制御が不要になるという利点として扱われるのが一般的である. 一方で, 生物がスマートな身体構造でダイナミック動作を達成している背景には, 胴体と四肢の動力的な干渉を効果的に利用していることがあり, 我々の目指すロボットでも動力的な干渉の積極的な利用が望まれる. 摩擦などの要素は関節の制御性にも影響を与えるため, その要因は可能な限り小さくすることが望ましい. 本研究でも, 走行や跳躍といったダイナミックな動作の実現のために関節間の動力的な干渉の利用を前提として, 減速比をできるだけ小さくしたアクチュエータを設計する.

我々の目指す跳躍や高速走行のような運動では, アクチュエータに軽量, 高出力トルク, 高加速性が要求される. そこで本研究では電磁モータの選定に出力トルク質量比を表すトルク密度 (Torque density^[74]) と応答速度の2つの指標を利用する. 産業用ロボットでは, よくモータ出力 $P = \tau \times \omega$ が指標に用いられるが, 電磁モータの場合は印加電圧を上昇させると回転数は増加するため, 出力は変更可能である. 一方で, トルクは流れた電流に比例して増加するが, ロータに使用される永久磁石の減磁トルクなどで上限が決まり, したがって出力トルクの大きなモータを選定する必要がある.

ここで図2.3に, 電磁モータの回転数対出力トルクの関係の例を示す. 一般的に産業用ロボットなどの場合, モータは定格トルク以下の連続運転領域 (Continuous operation range) 内で使用される. 文献^[74]でも述べられるように, 瞬発的な動作の場合, 大きな出力を要するのは断続的な2~3秒程度の短時間であるため, モータの短時間出力領域 (Short term operation range) を用いることが可能であり, ロボットの運動能力も瞬間的に発揮できるトルクに大きく左右される. このことから, モータの停動トルクを評価に用いる.

トルク密度 d_m は式(2.1)で表される.

$$d_m = \frac{K_t i_p}{m_{motor}} \quad (2.1)$$

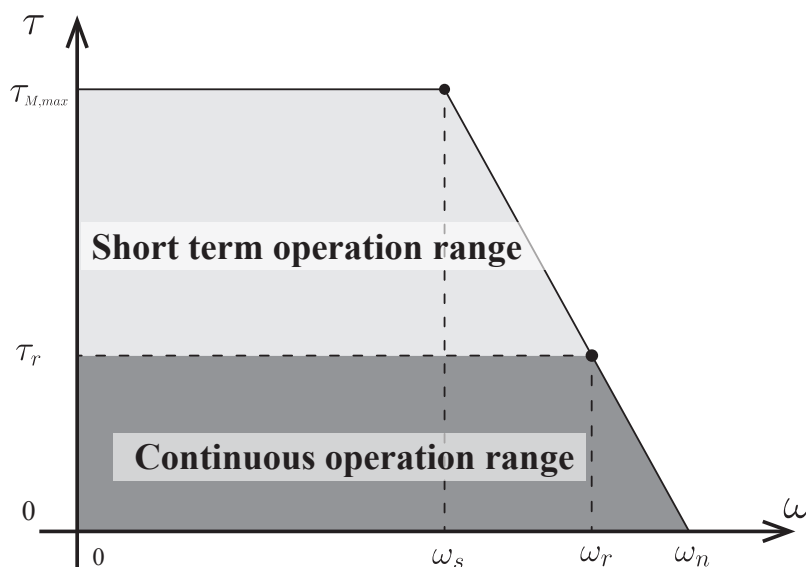


Fig. 2.3: Output torque vs rotational speed of an electromagnetic motor

ただし, m_{motor} はモータの質量, K_t はトルク定数, i_p はピーク電流であり, $K_t i_p$ はモータの停動トルクを表す.

また, モータの応答速度 Ω_{cm} を式 (2.2) で定義する.

$$\Omega_{cm} = \frac{K_t K_e}{R J_{rot}} \quad (2.2)$$

ただし, J_{rot} はモータのロータの慣性モーメント, R は端子間抵抗, K_e は逆起電力定数である. ここではモータのロータおよび関節での摩擦を一切無視した. Ω_{cm} はモータの機械的時定数の逆数の形で表されるもので, 大きいほうが加速性が良いことを示す. 跳躍などの瞬間的に関節を高速回転させる動作や, 走行などの正転/反転が頻発する運動では重要となる.

モータの選定候補として市販で入手可能で, 小型ロボットへの搭載可能性を考慮して, 外形 50[mm] 以内, 長さ 40[mm] 以内, 質量 150[g] 以下の物とした. 電磁モータの中でも永久磁石同期モータは大きさに対して大出力であり, 近年脚ロボットで注目を集めている. また, その中でもフレームレスモータはハウジングを自由に設計できるため, ロボットの筐体と一体化した設

計が可能で，軽量化や部品点数の削減につながる．以上から永久磁石同期モータも選定の対象とし，複数のメーカーから販売されているモータを候補とした．入手可能な高出力モータの評価値を図2.4に示す．なおフレームレスモータの場合の m_{motor} はステータとロータの質量の和とした．

以上の選定の結果，ロボットは家猫の大きさ（体高300[mm]，体長600[mm]

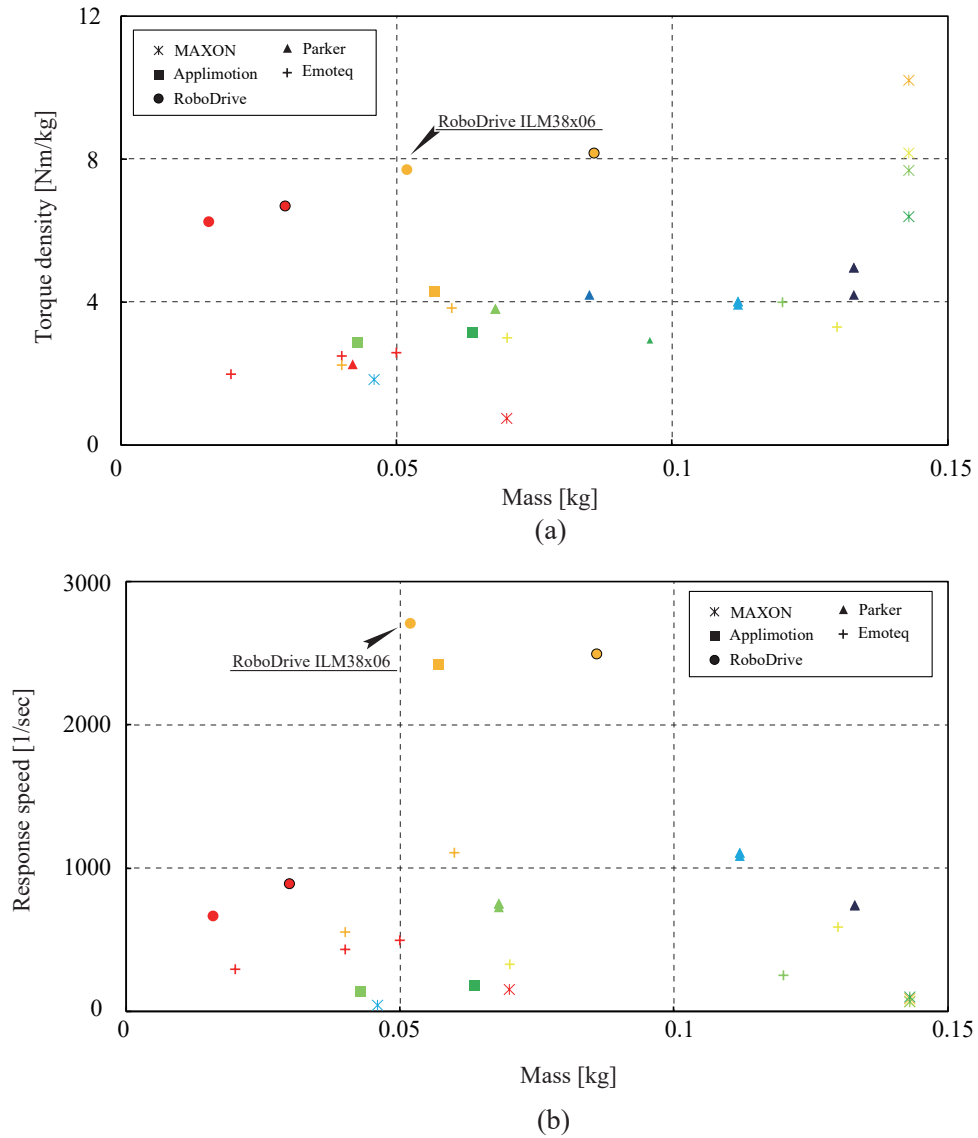


Fig. 2.4: Motor selection: (a) Torque density, (b) Response speed. The specification of these motors are available from manufacturer's websites [75, 76, 77, 78, 79].

程度)に設計することを想定し, TQ Systems 製の RoboDrive ILM38x06^[78] を使用することとした. その基本仕様を表 2.1 に示す. 主要な寸法は, 直径 38[mm], 長さ 13.5[mm] である. ただしフレームは含まない.

このフレームレスモータを用いたモータのハウジング設計を図 2.5 に示す. フレームは, 軽量で高強度, かつ熱伝達率が高く放熱性に優れ, 加工性もよいジュラルミン (A2017) を使用した. ステータとフレームは耐熱性, 耐衝撃性に優れる ThreeBond 製の ThreeBond 2087^{*1} で, ロータとロータシャフトは高

Table 2.1: Specification of RoboDrive ILM38x06

Properties	Units	Values
Mass m_{motor}	g	52
Power P_m	W	95
Rated voltage V_r	V	24
Rated torque τ_r	Nm	0.1
Rated speed ω_r	rpm	7950
Rated current i_r	Arms	5
Peak torque $\tau_{M,max}$	Nm	0.4
Peak current i_p	Arms	19.1
Maximum speed ω_n	rpm	9000
Rotor inertia J_{rot}	kgcm ²	0.01
Terminal resistance R	Ω	0.363
Terminal inductance L_m	mH	0.250
Torque constant K_t	Nm/A	0.021
Back EMF constant K_e	V/krpm	4.90

^{*1}ThreeBond Web カ タ ロ グ <https://www.threebond.co.jp/ja/catalog/catalog.html> (Accessed 6th, January, 2020).

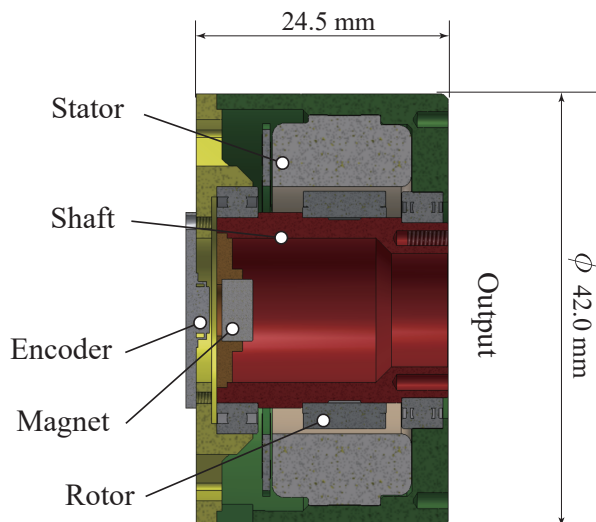


Fig. 2.5: 3DCAD model of the motor housing design (Motor: RoboDrive ILM38x06)

強度で嵌め合い接着に適したHenkel製のLOCTITE 648^{*2}で接着した。

2.4.2 弾性四節リンク脚機構の試作

EFLMを搭載し，前節で選定した永久磁石同期モータを用いた脚機構の3DCADモデルを図2.6に示す．股関節は，胴体リンクに固定されたモータからタイミングベルト（減速比 $\gamma_h = 3$ ）で出力を伝達して駆動される．タイミングベルトはテンショナを用いて予張力が与えられ，高速回転や急加速，急停止時に脱調するのを防止する．膝関節モータは股関節と同軸上に配置し，1段遊星歯車減速機で減速した後，平行リンク機構を介して膝関節軸にトルクが伝達される．ロボットを構成する要素の中でも質量が大きいアクチュエータを脚の根元の関節軸上に配置することで，脚振りに影響する脚の根元関節まわりの慣性モーメントは小さく設計できる．この設計による効果として，以下の2点が挙げられる．

- ・ 高加速度での脚振りが可能になる．

^{*2}Henkel LOCTITE648 https://www.henkel-adhesives.com/us/en/product/retaining-compounds/loctite_648.html (Accessed 6th, January, 2020).

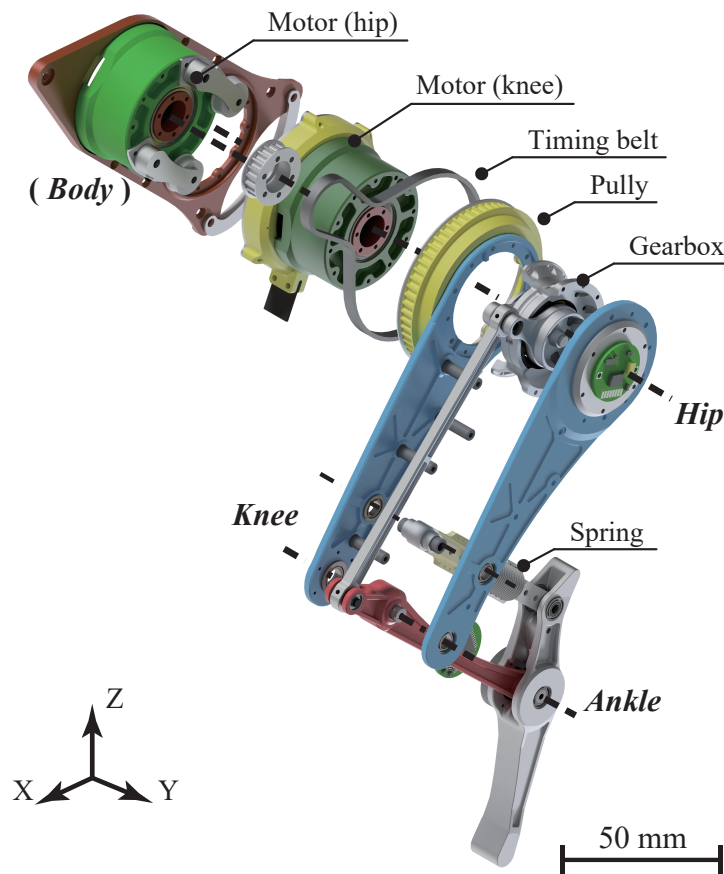


Fig. 2.6: 3DCAD model of the left leg with EFLM

- ・着地時の衝突でのエネルギー損失を小さくできる^[80].

膝関節の減速比 γ_k は，犬が跳躍する際に自重の約3倍の地面反力が生じる^[8]ことを参考に， $\gamma_k = 4.5$ とした．この減速比は一般的な脚ロボットに比べて非常に小さく，モータ軸や減速機構の摩擦や慣性の影響は小さくなる．

Shinリンクの後部の弾性リンクは，直動ガイドに線形引張ばねを取り付けたものである．過去研究^[81]での実験結果で跳躍時に弾性リンクの変位が微小だったことを受け，そのとき弾性リンクに蓄えられた弾性エネルギーと同等のエネルギーを最大伸長時に蓄えることを可能とするばね定数と初張力になる線形引張ばねを用いた．直動ガイドは可動範囲の両端でその変位が制限され，可動限界部のシリコンゴム製の緩衝材に衝突すると大きな

反力が生じる。

以上の設計に基づき試作した一脚ロボットの外観を図2.7に，基本仕様を表2.2に示す．質量と慣性モーメントは，ロボットの3DCADモデルに各パーツの材料特性などを入力して算出されたものである．

ここで，股関節と同軸上にある膝関節アクチュエータを胴体部の質量とみなすと，胴体部の質量は全質量の78%を占める．脚の根元リンクから先端リンクにつれて質量が小さくなる先細り構造になるような設計方針は，特に高度でダイナミックな運動において有利になる．

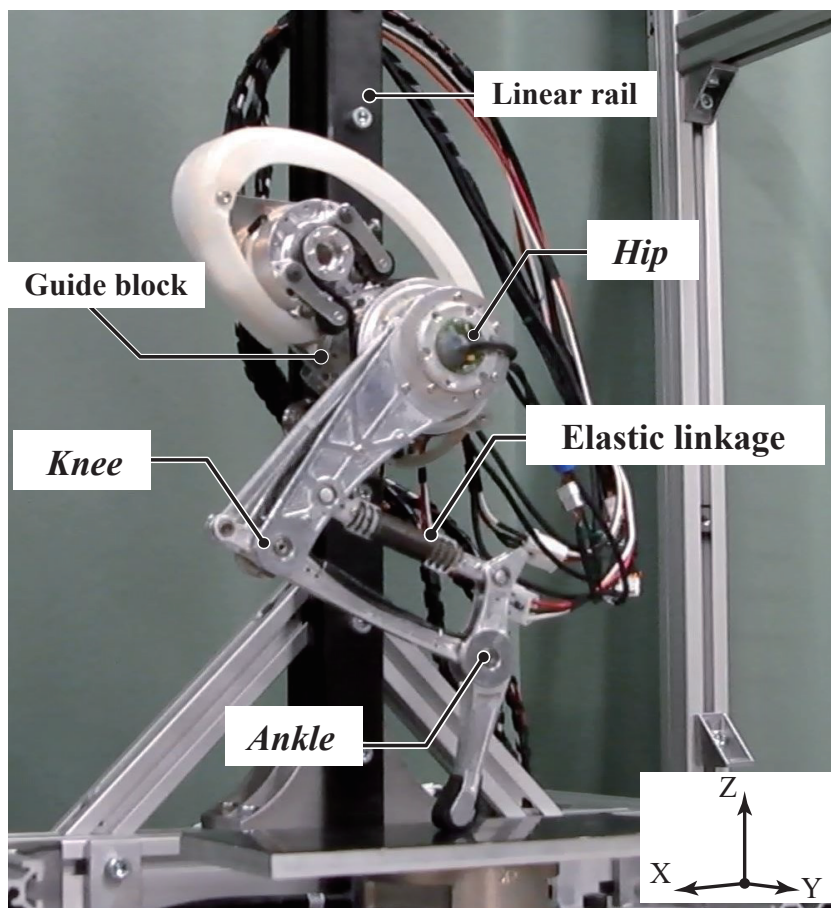


Fig. 2.7: Prototype of the robot leg with EFLM

Table 2.2: Specifications of the prototype

Properties	Units	Values
Total mass	g	558.2
Body moment of inertia about hip	kg·m ²	5.40×10^{-2}
Leg moment of inertia about hip	kg·m ²	12.4×10^{-2}
Hip joint reduction ratio	-	3.0
Knee joint reduction ratio	-	4.5
Hip rotation range of motion	deg	$8 \leq \theta_h \leq 163$
Knee rotation range of motion	deg	$48 \leq \theta_k \leq 145$
Ankle rotation range of motion	deg	$10 \leq \theta_a \leq 118$
Elastic linkage range of motion	mm	$75 \leq l_{ls} \leq 87$
Spring coefficient k_{ls}	N/mm	1.10
Spring initial tension f_{pre-ls}	N	3.45

2.5 弾性四節リンク脚機構の垂直跳躍運動の軌道生成

EFLMの弾性リンクは運動によって受動的に作用するため、これを活用した運動のためには適切に運動制御をする必要がある。本研究では、生物の移動運動の中でも特にダイナミックで、運動能力が顕著にあらわれると考えられる垂直跳躍運動を対象の運動として軌道生成を行う。

2.5.1 軌道生成の課題

跳躍のようなダイナミックな運動の軌道生成において、次の点を考慮する必要がある。

- ・ばねなどの受動要素や受動関節を含む機構の干渉
- ・各リンクの慣性の影響

- ・リンクなどの構成部品同士の可動範囲限界部での衝突
- ・アクチュエータの動出力特性
- ・環境との衝突や摩擦を伴う接触

これまでに開発されている特に跳躍運動を対象とした脚ロボットの運動制御では、アクチュエータのON-OFF制御のみに単純化されたり、目標運動を実行するように試行錯誤的に調整されてたりすることが多い^[28, 42]。我々が開発したロボットでの実験も同様に、関節アクチュエータへの単純なトルクのステップ入力や、試行錯誤的に決定した足先軌道に基づく位置制御するというものであり、複雑な生物模倣機構とそのダイナミクスを本格的に取り扱うまでに至っていなかった^[82, 83]。しかし、上述のような強い干渉性を示すモデルにおいては、このような手法では限界がある。

試行錯誤以外の方法として、ロボット実機で様々な制御入力をして試行させ、機械学習を用いて跳躍高さを最大化するアクチュエータへの入力パターンを探索したものがある^[84]。実機を用いることでモデルを用意する必要がなく、弾性要素やロボットのダイナミクスを反映した軌道生成ができるが、学習には時間を要する。

最大跳躍運動の実現を目的とした運動計画の事例には、跳躍運動の軌道生成をある目的関数の最適化問題に置き換えて、探索的に軌道を決定する方法がある。例えば、跳躍運動中の床反力の時間変化を最適化するもの^[48]、離陸時の重心まわりの角運動量を指標としたもの^[85]、ロボットの運動時の重心軌道を設計するもの^[86]などがこれまでに用いられている。文献^[48]では、弾性体を持たない単純なシリアル2リンク脚ロボットの跳躍高さ最大化を行い、1脚ロボット試作機で跳躍実験をした。この軌道生成にはロボットの質量を胴体の1点に集中させた単純化モデルを用いているが、垂直跳躍のような非常に動的な運動において、各リンクの慣性の影響は無視できるものではない。実際に、文献で報告されているシミュレーション結果と実験結果の間には、跳躍高さにして約24%の差がある。またロボットに弾性体などの受動要素が用いられている場合、運動への影響がその配置や特性に依存するため、各リンクのダイナミクスを無視できない。文献^[85, 86]では、動的

な運動を前提として、ロボットを構成するすべてのリンクの慣性情報をモデルに反映させた、多自由度・多質点モデルを用いてシミュレーションが行われた。しかし、これらで用いられたモデルは複数のリンクを回転関節で接続したものであり、またこれらのモデルも弾性要素は含まない。Babič *et al.*^[87] は、脚部の構造に線形の引張ばねを持つ二足歩行ロボットのモデルで、非線形最適化を用いた跳躍高さ最大化によって軌道生成を行った。しかし、このモデルの関節はすべて駆動関節で構成されており、受動関節を含まない。このように、いずれも比較的簡単なモデル化によるものであった。

2.5.2 ロボットの動力学モデルの概要

これまでの脚ロボットの運動生成では、脚は胴体に対して非常に軽量であるとして脚を無質量とみなし、ロボットの胴体に質量を集中させ、複数の駆動回転関節を脚長方向に伸縮する単一の直動アクチュエータに見立てた倒立振子モデルが用いられる例が数多い。このようにモデルを単純化することによってシミュレーションの煩雑な計算を回避できる。一方で、跳躍のような大きな加速を伴う運動を扱う場合は、脚機構を構成する各リンクの慣性が運動に大きく影響することが予想できる。

本研究では、ロボット開発のために作成した3DCADモデルに基づいて、実環境にできるだけ近い動力学モデルを作成し、関節への入力トルク軌道をパラメータにした探索によって、垂直跳躍運動の軌道を生成する。ロボットの動力学モデルには、各リンクが質量、重心位置、慣性モーメントの情報を持つマルチボディモデルを用いる。非常に動的な運動である垂直跳躍の軌道生成のために、リンク間の動力的な干渉、接地する際の地面-足先間での接触、関節可動域の限界部でのリンク同士の衝突、アクチュエータの動特性などの影響も考慮された計算を行う。

図2.8に動力学シミュレーションモデルの概念図を示す。ただし、この図はモデルに働く外力や拘束などを表すために用意したもので、実際のモデルでは例えば膝関節アクチュエータから膝関節軸に伝達するリンクの慣性情報などもすべて含まれている。

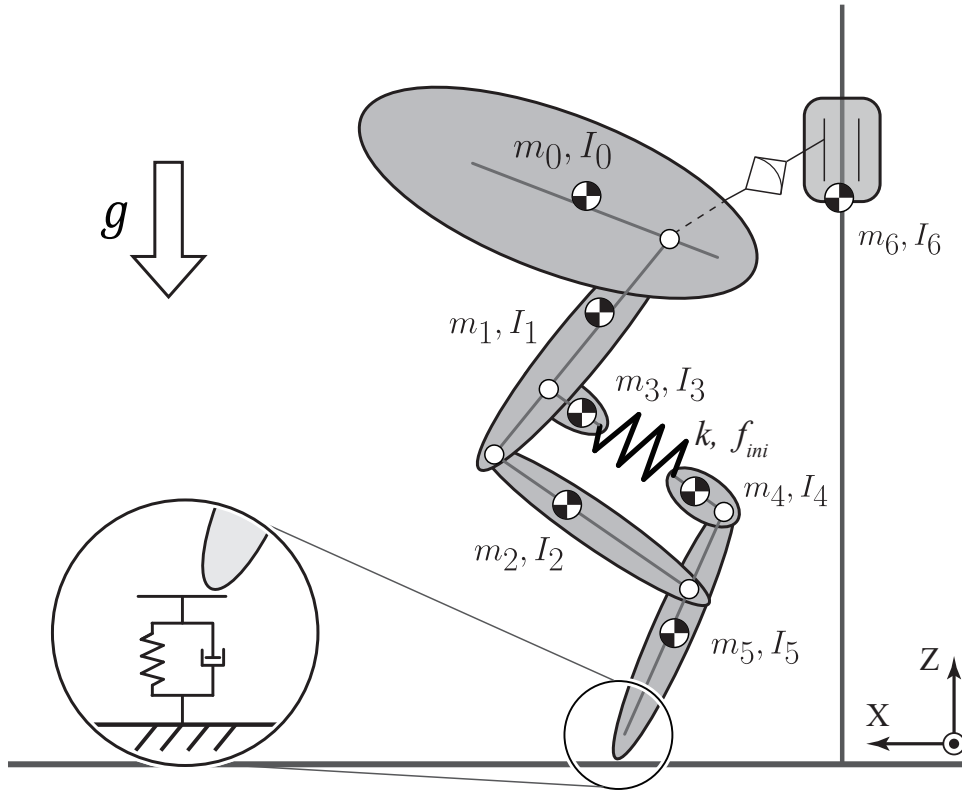


Fig. 2.8: Schematics of the robot leg simulation model

実機実験では図2.7に示すように、地面に垂直に固定されたりニアレールにロボットを取り付け、ロボットの自由度を鉛直並進運動およびピッチ回転運動のみに制限するような拘束を与える。ロボットの足先には、地面との滑りを少なくするために、ウレタンゴム製のゴムシート（厚さ1[mm]）を貼付する。モデル上でも、ロボットの自由度拘束と環境との間にかかる摩擦条件は考慮する必要がある。また、関節が可動域限界に到達して関節の前後のリンクが衝突するときや、地面と足先と衝突するときの接触力についても考慮が必要となる。

関節駆動に用いる電磁モータには前述のように、回転速度に応じて出力できるトルクの上限值が変化する特性がある。そこでシミュレーションにおいては、式 (2.3) (2.4) (2.5) のように回転数に応じたトルクの上限值 τ_{ul} と下限値 τ_{ll} を与え、モータの出力トルク τ_M がこの範囲を超えないようにする

モータ出力動特性モデルを用いる．

$$\tau_{ll} \leq \tau_M \leq \tau_{ul} \quad (2.3)$$

ただし，

$$\tau_{ul} = \begin{cases} \tau_{M,max}, & (\omega \leq \omega_s) \\ -\frac{K_t K_e}{R} \omega + \frac{K_t e}{R} & (\omega_s < \omega \leq \omega_n) \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\tau_{ll} = \begin{cases} -\tau_{M,max}, & (-\omega_s \leq \omega) \\ -\left(-\frac{K_t K_e}{R} \omega + \frac{K_t e}{R}\right) & (-\omega_n \leq \omega < -\omega_s) \end{cases} \quad (2.5)$$

$\tau_{M,max}$ はモータの最大出力トルク， ω はモータの出力角速度， ω_s は最大トルクを出力できる最大角速度， ω_n は無負荷時の角速度， e は印加電圧， R は端子間抵抗， K_t はトルク定数， K_e は逆起電力定数である．なお，モータの熱損失とロータの軸受などの摩擦はこのモデルには含まれない．

2.5.3 ロボットモデルの運動学

弾性四節リンク脚機構の運動学を考える．脚ロボットモデル全体の重心座標 (x, z) は式 (2.6), (2.7) で表される．

$$x = \frac{\sum_{i=0}^5 m_i x_i}{\sum_{i=0}^5 m_i} \quad (2.6)$$

$$z = \frac{\sum_{i=0}^5 m_i z_i}{\sum_{i=0}^5 m_i} \quad (2.7)$$

ただし， (x_i, z_i) は絶対座標系での各リンクの重心座標， m_i は各リンクの質量

とする．これを用いて，胴体の重心座標 (x_0, z_0) は式(2.8), (2.9)で表される．

$$x_0 = x + \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^5 m_i (x - x_i) \quad (2.8)$$

$$z_0 = z + \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^5 m_i (z - z_i) \quad (2.9)$$

ここで，各リンクの近位関節位置から重心位置までの距離 L_{gi} と，リンク軸からの回転角 ψ_i は，それぞれ式(2.10), (2.11)で表される．

$$L_{gi} = \sqrt{x_{gi}^2 + z_{gi}^2} \quad (2.10)$$

$$\psi_i = \arctan2 \left(\frac{z_{gi}}{L_{gi}}, \frac{x_{gi}}{L_{gi}} \right) \quad (2.11)$$

ただし， (x_{gi}, z_{gi}) は各リンクの近位関節に対する重心位置の相対座標とする．これらを用いると，各関節の座標と足先の座標は式(2.12)～(2.19)で求められる．

$$x_{hip} = x_0 - L_{g0} \cos(\phi + \psi_0) \quad (2.12)$$

$$z_{hip} = z_0 - L_{g0} \sin(\phi + \psi_0) \quad (2.13)$$

$$x_{knee} = x_{hip} + L_1 \sin(\phi + \theta_h) \quad (2.14)$$

$$z_{knee} = z_{hip} - L_1 \cos(\phi + \theta_h) \quad (2.15)$$

$$x_{ankle} = x_{knee} + L_2 \sin(\phi + \theta_h - \theta_k) \quad (2.16)$$

$$z_{ankle} = z_{knee} - L_2 \cos(\phi + \theta_h - \theta_k) \quad (2.17)$$

$$x_{toe} = x_{ankle} + L_5 \sin(\phi + \theta_h - \theta_k + \theta_a) \quad (2.18)$$

$$z_{toe} = z_{ankle} - L_5 \cos(\phi + \theta_h - \theta_k + \theta_a) \quad (2.19)$$

ただし， ϕ は胴体姿勢角， L_i はリンク i の長さ， θ_{joint} は関節角度である．

Thighリンクと弾性リンクのなす角度を θ_{k2} とすると，式(2.20)で表される．

$$\theta_{k2} = \arctan2 \left(\frac{L_2 \sin \theta_k - D \sin(\theta_k - \theta_a)}{l_{ls}}, \frac{B + L_2 \cos \theta_k - D \sin(\theta_k - \theta_a)}{l_{ls}} \right) \quad (2.20)$$

これを用いて，各リンクの重心座標は式(2.21)～(2.30)で求まる．

$$x_1 = x_{hip} + L_{g1} \sin(\phi + \theta_h + \psi_1) \quad (2.21)$$

$$z_1 = z_{hip} - L_{g1} \cos(\phi + \theta_h + \psi_1) \quad (2.22)$$

$$x_2 = x_{knee} + L_{g2} \sin(\phi + \theta_h - \theta_k + \psi_2) \quad (2.23)$$

$$z_2 = z_{knee} - L_{g2} \cos(\phi + \theta_h - \theta_k + \psi_2) \quad (2.24)$$

$$x_3 = x_{hip} + (L_1 - B) \sin(\phi + \theta_h) + L_{g3} \sin(\phi + \theta_h - \theta_{k2} + \psi_3) \quad (2.25)$$

$$z_3 = z_{hip} - (L_1 - B) \cos(\phi + \theta_h) - L_{g3} \cos(\phi + \theta_h - \theta_{k2} + \psi_3) \quad (2.26)$$

$$x_4 = x_{hip} + (L_1 - B) \sin(\phi + \theta_h) + L_{g4} \sin(\phi + \theta_h - \theta_{k2} + \psi_4) \quad (2.27)$$

$$z_4 = z_{hip} - (L_1 - B) \cos(\phi + \theta_h) - L_{g4} \cos(\phi + \theta_h - \theta_{k2} + \psi_4) \quad (2.28)$$

$$x_5 = x_{ankle} + L_{g4} \sin(\phi + \theta_h - \theta_k + \theta_a + \psi_4) \quad (2.29)$$

$$z_5 = z_{ankle} - L_{g4} \cos(\phi + \theta_h - \theta_k + \theta_a + \psi_4) \quad (2.30)$$

ロボットの主要寸法，質量，重心の y 軸まわりの慣性モーメントを表2.3，2.4に示す．なおこれらの値は，材料特性などを入力した3DCADモデルから算出されたものである．リンク長は，図2.2に対応する．

Table 2.3: Parameters of the prototype

Link	i	L_i [mm]	m_i [g]	I_i [kg·m ²]
Body	0	-	221	2.90×10^{-2}
Thigh	1	100	215	1.54×10^{-2}
Shin	2	90.0	17.1	2.81×10^{-3}
EL1	3	-	4.30	8.00×10^{-6}
EL2	4	-	3.50	7.00×10^{-6}
Foot	5	54.5	23.2	1.55×10^{-3}
Guide block	6	-	83.8	6.14×10^{-4}

Table 2.4: CoM positions of each linkage

Parameters	Units	Values
(x_{g0}, z_{g0})	mm	(36.2, 1.85)
(x_{g1}, z_{g1})	mm	(-15.4, 15.8)
(x_{g2}, z_{g2})	mm	(-37.4, 0.166)
(x_{g3}, z_{g3})	mm	(-10.1, -0.00300)
(x_{g4}, z_{g4})	mm	(-14.0, -0.0280)
(x_{g5}, z_{g5})	mm	(-4.92, 1.24)

2.5.4 運動方程式の導出

環境から外力が加わるロボットの運動方程式は式 (2.31) で表される.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{E}^T \mathbf{f} \quad (2.31)$$

ただし, $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ は一般化座標 $\mathbf{q}(t) = [x(t), z(t), \phi(t), \theta_h(t), \theta_k(t), \theta_a(t)]^T$, $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は慣性行列, $\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ は遠心力およびコリオリ力, $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ はポテンシャル項, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ はアクチュエータによる関節駆動トルク, \mathbf{f} は環境から系に及ぼされる力であり, \mathbf{E} は外力が及ぼされる位置のヤコビ行列である.

今回のモデルの場合, 系に加わる外力は, 空中期 (足先が地面に接していない期間) においてはガイドによって股関節座標の水平位置の拘束のみである. 立脚期においては, これに加えて地面と足先との間に与えられる床反力が加わる. すなわち, $\mathbf{x}_e = [x_{toe}, z_{toe}, x_{hip}]^T$ とした時, $\mathbf{E}(\mathbf{q})$ は $\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{E}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$ を満たすモデルの足先および股関節の水平位置のヤコビ行列であり $\mathbf{E}(\mathbf{q}) = \left[\frac{\partial x_{toe}}{\partial \mathbf{q}}, \frac{\partial z_{toe}}{\partial \mathbf{q}}, \frac{\partial x_{hip}}{\partial \mathbf{q}} \right]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$, $\mathbf{f} = [f_x, f_z, f_{guide}]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ は足先に働く床反力の水平・垂直成分とガイドから股関節の水平方向に加わる力となる.

ここで, 環境との接触を剛体同士の接触として, 接触点における相対運動の拘束条件を用いて接触力を計算することとすると, その拘束条件は次

の通りである．運動の自由度を矢状面上の垂直方向に制限するリニアガイドによる股関節の水平位置拘束は， $a_0 = x_{hip} - x_{hip0} = 0$ という条件式を満たす必要がある．ただし， x_{hip0} は股関節の水平拘束位置とする．

また，立脚期における地面と足先の間に成り立つ垂直方向の拘束条件は， $a_1 = z_{toe} = 0$ の条件式で表される．ただし，絶対座標系において地面の高さを $Z = 0$ とした．このとき，床反力の鉛直成分 f_z は非負(すなわち $f_z \geq 0$)である必要があり， $f_z < 0$ となった場合は空中期への移行を意味し，地面と足先との間の拘束を解除する必要がある．

足先の水平位置の拘束について，足先の滑りを許容しなければ $a_2 = x_{toe} - x_{toe0} = 0$ の条件式で表せる．ただし， x_{toe0} は初期の足先の水平位置である．立脚期において，クーロン摩擦を仮定したとき，足先には水平方向に摩擦力 f_f が働き，摩擦係数 μ を使って $f_f \leq \mu f_z$ で表される．ここで足先が滑らないと仮定したとき，その条件は足先と地面との間の最大静止摩擦係数を μ_s としたとき， $-\mu_s f_z < f_x \leq \mu_s f_z$ の制約条件を満たさなければならない^[88]．この制約を越えて，かつ足先接地状態($f_z \geq 0$)の場合，足先の水平方向に動摩擦力が生じる．これらは式 (2.32) で表される．

$$\begin{cases} f_f \leq \mu_s f_z & (f_z \geq 0, \dot{x}_{toe} = 0) \\ f_f = -\text{sign}(\dot{x}_{toe}) \mu_d f_z & (f_z \geq 0, |\dot{x}_{toe}| > 0) \\ f_f = 0 & (f_z < 0) \end{cases} \quad (2.32)$$

ただし， μ_d は動摩擦係数， $\text{sign}(x)$ は実数 x の符号に応じて式 (2.33) の値を返す符号関数である．

$$\text{sign}(x) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 1 & (x > 0), \\ 0 & (x = 0), \\ -1 & (x < 0). \end{cases} \quad (2.33)$$

一方で，空中期ではロボットはガイドによる拘束しか受けない．すなわち拘束条件は $a_0 = x_{hip} - x_{hip0} = 0$ のみとなる．ここで， $\mathbf{E}'(\mathbf{q}) = \left[\frac{\partial x_{hip}}{\partial \mathbf{q}} \right]^T \in \mathbb{R}^{1 \times 6}$ ， $\mathbf{f}' = \mathbf{f}_{guide} \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$ とすると，運動方程式 (2.31) は式 (2.34) となる．

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{E}'^T \mathbf{f}' \quad (2.34)$$

以降，式 (2.31) を立脚期の運動方程式，式 (2.34) を空中期の運動方程式と呼ぶ．

関節可動限界部での部品同士の接触によって生じる反力は，式 (2.35) に示すように，関節 j の駆動トルク τ_j に反力によって発生する接触反トルク $\tau_{contact}$ を加算することによってモデル化することが可能である． $\tau_{contact}$ は衝突する物体の材料特性により決定され，関節の角度，角速度に関する関数である．

$$\tau_j = \begin{cases} \tau_{actuator} & (\theta_{j,min} < \theta_j < \theta_{j,max}), \\ \tau_{actuator} + \tau_{contact} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.35)$$

実際に，ラグランジュの運動方程式は (2.36) のように与えられる．

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{u} \quad (2.36)$$

ただし， \mathbf{q} は一般化座標， L はラグランジアン， \mathbf{u} は一般化力である．ラグランジアンは全運動エネルギーと全ポテンシャルエネルギーの和で表され，今回のロボットの場合は式 (2.37) となる．

$$\begin{aligned} L &= K - U \\ &= \sum_{i=0}^5 \left\{ \frac{1}{2} m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{z}_i^2) + \frac{1}{2} I_i r_i^2 \right\} - \sum_{i=0}^5 m_i g z_i - U_{ls} \end{aligned} \quad (2.37)$$

ただし， r_i は各リンクの重心の回転角速度， U_{ls} は弾性リンクに蓄えられた弾性エネルギーである．ここで，弾性リンク長 l_{ls} は，膝関節角度 θ_k と足根関節角度 θ_a を用いて，図 2.2 より式 (2.38) で表される．

$$l_{ls}^2 = L_2^2 + B^2 + D^2 + 2L_2D \cos \theta_k - 2L_2B \cos \theta_a - 2BD \cos (\theta_k - \theta_a) \quad (2.38)$$

自然長を l_{ls0} とすると，弾性リンクの変位 $\Delta l_{ls} = l_{ls} - l_{ls0}$ を用いて，弾性リンクに蓄えられる弾性エネルギーは式 (2.39) で表される．

$$U_{ls} = \frac{1}{2} (k_{ls} \Delta l_{ls} + 2f_{pre-ls}) \Delta l_{ls} \quad (2.39)$$

これまで，弾性要素を脚機構の中に用いた脚ロボットは多く存在する．これらのロボットは，弾性要素をアクチュエータの出力とリンク（または負荷）

との間に導入した直列弾性機構と，アクチュエータの出力に並列に接続した並列弾性機構に大別できる．特に，モータなどの出力後に直列または並列に弾性要素を用いたアクチュエータは，直列弾性アクチュエータ（Series Elastic Actuator, SEA）や並列弾性アクチュエータ（Parallel Elastic Actuator, PEA）と呼ばれる．

本章で扱うEFLMは，膝関節と足根関節をまたがるように弾性要素が配置されている．式（2.38）のように，弾性リンクの変位は関節角度に依存している．ここで，膝関節に与えられるトルク τ_k は，アクチュエータによる駆動トルクを $\tau_{k,ac}$ としたとき，式（2.40）で表される．

$$\tau_k = \tau_{k,ac} + \frac{1}{l_{ls}} (L_2 D \sin \theta_k + B D \sin (\theta_a - \theta_k)) (k_{ls} \Delta l_{ls} + f_{pre-ls}) \quad (2.40)$$

このように，提案する下腿の生物規範機構では，膝関節トルクはアクチュエータによる駆動トルクと弾性要素で発生する張力によるトルクの和で表される．このとき，アクチュエータによる駆動トルクと弾性要素での発生力をうまく干渉させることができれば，アクチュエータの最大駆動力以上の力を発揮させることも可能である．

2.5.5 動力学シミュレーションモデルの作成

慣性や拘束条件などを考慮した運動方程式を導出したが，摩擦の不等式拘束条件やリンク間の物理的な衝突などを計算に組み込むと，計算が煩雑になることが想定される．また，これらはロボットの部品形状などにも依存するため，シミュレーションと実機との誤差の要因になり得る．

そこで，これらをすべて考慮したシミュレーションを容易に実施するために，本研究ではマルチボディダイナミックシミュレータであるMSC ADAMSを用いて，環境を含めたシミュレーションモデルを構築した．ADAMS上では，試作機の3DCADモデルをそのままシミュレーションに利用するモデルとして用いた．これにより実機と同様のジオメトリ情報を持つモデルを扱うことができ，関節可動域限界でリンク同士が接触することや，足先と地面とが接触することを詳細に検出することができる．3DCADで材料密度を考慮して

計算された各パーツの質量，重心位置，慣性モーメントがシミュレーションモデルの各パーツにも設定されている．また，実験で使用する拘束治具まで含めてモデリングし，股関節回転軸が鉛直軸上のみを運動するように拘束を施した．ここで，実験で使用する拘束のためのリニアレールとロボット側に取り付ける拘束治具との間の摩擦計算には，事前の測定値に基づいて，静止摩擦係数 $\mu_g = 0.06$ ，動摩擦係数 $\mu'_g = 0.004$ を使用した．地面と足先との間には，地面と足先のゴムとの摩擦に相当する最大静止摩擦係数 ($\mu_s = 0.8$) と動摩擦係数 ($\mu_d = 0.76$) を設定し，床反力の大きさに応じて水平方向の摩擦力が計算され，地面との接触位置に摩擦力が加わる．なお ADAMS 内でこれらの接触力は，接触部位を粘弾性モデルに置き換えた方法によって，侵入量から反力を算出する方法が用いられる．ここで，ADAMS 内での接触部における摩擦力の計算では，滑り速度 v_{slip} に応じて摩擦係数 μ を式 (2.41) のように計算する．

$$\mu(v_{slip}) = \begin{cases} \text{sign}(v_{slip}) \cdot \text{STEP}(v_{slip}, -v_s, \mu_s, v_s, -\mu_s) & (-v_s < v_{slip} < v_s), \\ -\text{sign}(v_{slip}) \cdot \text{STEP}(|v_{slip}|, v_s, \mu_s, v_d, \mu_d) & (-v_s < |v_{slip}| < v_d), \\ -\text{sign}(v_{slip}) \cdot \mu_d & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.41)$$

ただし， v_s ， v_d はそれぞれ静止摩擦，動摩擦へ移行する境界速度である．また， $\text{STEP}(a, a_0, b_0, a_1, b_1)$ は式 (2.42) で表される関数である．

$$\text{STEP}(a, a_0, b_0, a_1, b_1) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} b_0 & (a \leq a_0), \\ b_0 + (b_1 - b_0) \Delta^2 (3 - 2\Delta) & (a_0 < a < a_1), \\ b_1 & (a \geq a_1). \end{cases} \quad (2.42)$$

ただし，

$$\Delta = \frac{a - a_0}{a_1 - a_0} \quad (2.43)$$

地面と足先との衝突，またはリンク同士の可動域限界での衝突においては，式 (2.44) で表されるような仮想的な非線形ばね・ダンパを考えて接触力 F_{impact} を計算している．

$$F_{impact} = \max \left(0, \quad k_s (\delta_0 - \delta)^\alpha - \text{STEP}(\delta, \delta_0 - d, c_{max}, \delta_0, 0) \cdot \dot{\delta} \right) \quad (2.44)$$

ただし, k_s は剛性, δ は衝突を計算する各モデルの特徴点同士の距離, δ_0 は衝突の計算を開始する特徴点同士の距離, α は剛性を計算するマーカ間の距離に掛かる指数, c_{max} は粘性係数の最大値, d は粘性係数が最大値をとるときの変位である. 地面と足先との衝突およびリンク同士の可動域限界での衝突では, $k_s = 3000[\text{N}/\text{mm}^\alpha]$, $\alpha = 2$, $c_{max} = 1[\text{N} \cdot \text{s}/\text{mm}]$ とした. 弾性リンクにおいては, 直動ガイドの可動限界部にシリコンゴム製の緩衝材を取り付けており, その接触現象の反力は, 実際の挙動に合わせて $k_s = 500[\text{N}/\text{mm}^\alpha]$, $\alpha = 1.2$, $c_{max} = 10[\text{N} \cdot \text{s}/\text{mm}]$ とした.

モータの回転数に応じた出力トルクの制限は, MATLAB/Simulink を用いて表現し, 後述の入力トルク軌道が式 (2.3) を超えた場合はその上限値を ADAMS モデルに入力する.

以上を ADAMS と MATLAB/Simulink 間の Co-simulation 機能を用いて連携し, 1[msec] のシミュレーション時間毎に両ソフトウェア間で相互にデータの入出力を行うことで, ロボットモデルおよびモータ出力動特性モデルのダイナミクスを考慮したシミュレーションを可能とした.

2.5.6 非線形最適化を用いた運動軌道の生成手法

無数にとり得る運動軌道の中から, ロボットの運動能力を最大限に引き出した運動を取り上げるために, 非線形最適化手法を利用した探索による運動軌道の生成を行う.

本研究で用いた非線形最適化手法を用いた運動制御シミュレーションの流れを図 2.9 に示す.

生物規範機構を持つ脚ロボットの跳躍運動を生成するために, 関節の入力トルクの時間変化を B-spline 補間曲線を使ってパラメータ化し, 最適化関数を用いて軌道を生成する. 関節トルクを変数としてモデルに入力することで, 順動力学的に計算ができるため, 一意に定まる運動軌道を得ることができるという利点がある. 各関節の入力トルク軌道は, 式 (2.45) に示す

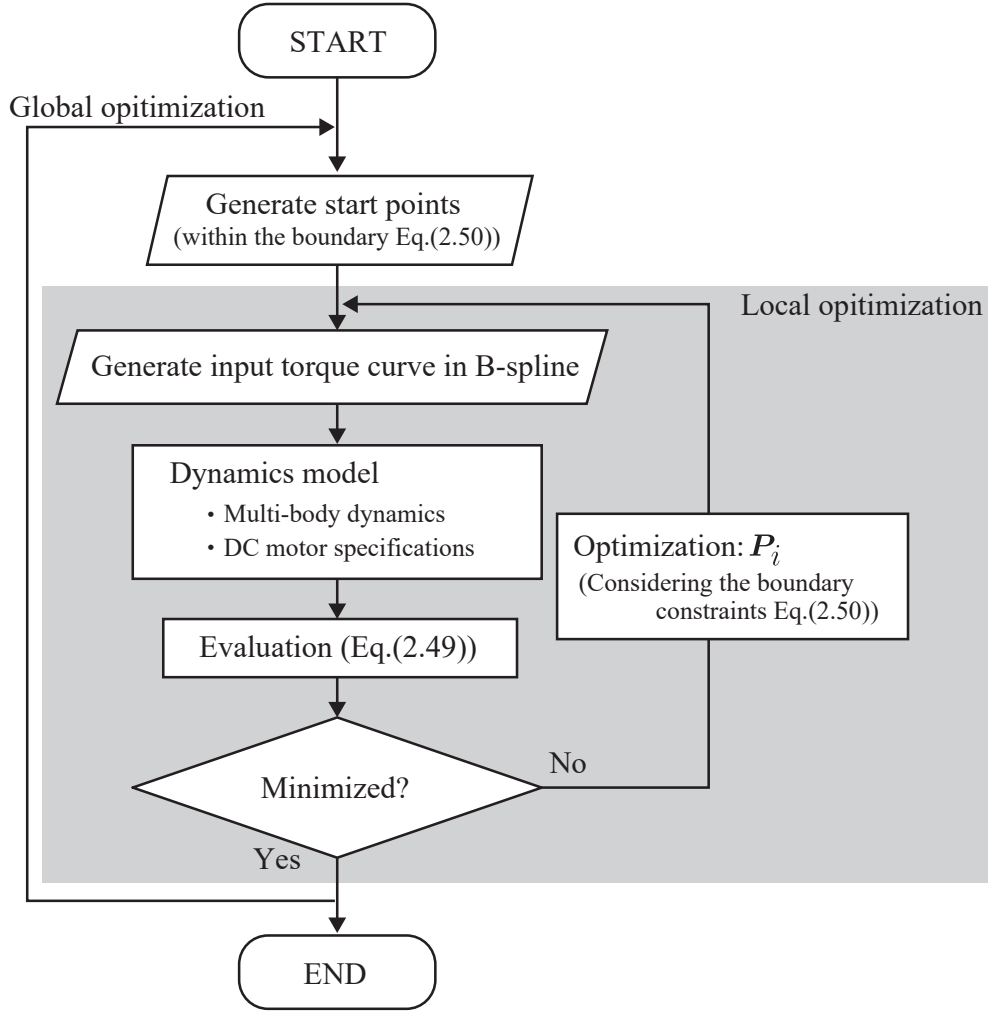


Fig. 2.9: Simulation scheme for vertical jump motion generation

B-spline 補間曲線を用いて表現する。

$$\tau_i(t, \mathbf{P}_i) = \sum_{j=0}^N p_{i,j} B_{j,n+1}(t) \quad (2.45)$$

ただし，式 (2.45) は n 次 B-spline 曲線を表す式であり， i は関節インデックス ($i = 1, 2$)， $t \in [t_n, t_N]$ は基底関数を定めるノットベクトルの要素， \mathbf{P}_i は関節 i の $N+1$ 個 ($N \geq n$) の要素 p_j ($j = 0, 1, \dots, n, \dots, N$) で構成される制御点ベクトル， $B(t)$ は基底関数である。

B-spline 関数の階数 ($n+1$) が 1 より大きいとき、基底関数は式 (2.46) のよ

うに定義される．

$$B_{k,n+1}(t) = \frac{t - t_k}{t_{k+n} - t_k} B_{k,n}(t) + \frac{t_{k+n+1} - t}{t_{k+n+1} - t_{k+1}} B_{k+1,n}(t) \quad (2.46)$$

ここでB-spline曲線の基底関数を定めるノットベクトルの $n+N+2$ 個の要素を，式(2.47) (2.48)のように両端の n 個の要素を重複させ，その間の $N-n+2$ 個を等間隔に増加するように定義することで，曲線の始点と終点をそれぞれ制御点ベクトルの要素 p_0 と p_N と一致させることが可能な開一様B-spline曲線を用いることとした．

$$\mathbf{t} := [t_0, t_1, \dots, t_n, t_{n+1}, \dots, t_N, t_{N+1}, \dots, t_{N+n}, t_{N+n+1}] \quad (2.47)$$

ただし，

$$t_k = \begin{cases} 0 & (k \leq n), \\ 1 & (k \geq N+1), \\ \frac{k-n}{N-n} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.48)$$

制御点ベクトルの第1要素 p_0 には，ロボットが初期姿勢を維持するために必要な関節トルクを代入する。これによって、運動開始直前までロボットは初期姿勢で静止し、運動開始以降の入力トルクと合わせて微分可能な曲線を生成することができる。

以上の曲線補間を用いると，制御点ベクトル \mathbf{P}_i を任意に与えることで，ロボットのモデルの関節に入力するトルク軌道を生成することができる．本研究では， $n=3$ ， $N=13$ とし，各関節の制御点ベクトルをパラメータとする．関節駆動に用いる電磁モータの出力トルクは流れた電流に比例するが，モータの機械的時定数に対して電気的時定数は十分に小さく電流の応答は十分に速い^[89]．そのため，実際のロボットの制御を考えると急峻なトルク変化に対しても十分に対応できると考えられることから，補間曲線が3次でも十分である．

B-spline補間曲線の制御点を，MATLABの制約付き非線形計画法ソルバである`fmincon`を用いて，ある評価関数に対して最適化する．最適化には，内点法アルゴリズムを採用した．

なお，式 (2.47) で表されるノットベクトルは関節トルク軌道の時間軸を正規化したものに相当する．ネコの跳躍運動に要する時間^[90]を参考にして，生成する軌道の時間は $T_{end} = 0.6[\text{sec}]$ とし，ノットベクトルに乗算して利用する．またB-spline曲線には，非減少のノットベクトルを用いた場合に，その関数値が制御点の最大値，最小値の範囲内に収まるという性質がある．この性質を利用して，制御点の取り得る最大値と最小値をロボットの関節に使用するアクチュエータの最大トルクを考慮して設定すれば，不必要に制約条件で非線形性を強めてしまうことなく軌道を生成することができる．

ここでは $-\tau_{i,max} \leq \mathbf{P}_i \leq \tau_{i,max}$ とする範囲制約を与えた上で，各関節の \mathbf{P}_i の間の $N - 2n + 1$ 個を設計変数とした．なお，後の実験でのフィードバック制御に必要なトルクを確保するために， $\tau_{i,max}$ はモータの最大出力トルク $\tau_{M,max}$ の80%に各関節の減速比 γ_i をかけた値に設定した．以上を用い，跳躍運動軌道の生成のために，式 (2.49) に示す評価関数を用いて非線形最適化計算を行う．

$$\text{minimize} \quad F = -h_{\max} \quad (2.49)$$

$$\text{subject to} \quad |p_{i,k}| \leq \tau_{i,max} \quad (k = 0, 1, \dots, N) \quad (2.50)$$

ただし， h_{\max} はADAMSで取得可能なロボットモデルの股関節の地面からの最高到達高さである．すなわち，式 (2.49) はロボットの最高到達高さを最大化する関節トルク軌道を求める最小化問題である．

ロボットモデルは初期姿勢で，股関節，膝関節とも可動域のほぼ中心値である $\theta_h = 90 [\text{deg}]$ ， $\theta_k = 90 [\text{deg}]$ とし，股関節回転軸の真下で足先が接地する姿勢をとり，静止している．この時の股関節高さは地面から191[mm]である．また初期姿勢において，弾性リンクは引張ばねが自然長であるため弾性エネルギーは蓄えられていない．

最適化計算の設計変数の初期値は $p_{i,k} = 0$ ($k = n, n+1, \dots, N-n$)とした．ここで，他研究においては局所最適化で軌道探索をしている例があるが^[48, 87]，本研究で扱うような受動要素や受動関節を含み，非線形性が強い場合，解の初期値への依存性が高くなる．そのため，局所最適化のみではロボットの性能を十分に発揮した運動の生成は難しい．そこでMATLABの大域的最適

化ソルバである *MultiStart* 関数を使って、事前に用意した複数の初期値から局所最適化を行い、複数の局所最適解を大域的に探索する。MATLAB の乱数発生器を用いて生成した一様分布の 5000 の開始点（局所最適化の初期値に相当する）から大域的な最小解を探索した。これで得られた最適解の周辺に、さらに評価関数を小さくする解が存在する可能性があるため、大域的な最適化で得られた解を初期値として、再度局所最小化を行った。

2.5.7 跳躍軌道生成の結果

跳躍高さの最大化を目的とした探索で得られた跳躍高さの結果を表 2.5 に示す。なお、弾性リンク部分に弾性要素を用いず、弾性リンクの自然長と同じ長さの剛体リンクを代わりに用いたロボットモデル (RFLM model) を同様に作成し、前述の手法を用いて跳躍高さ最大化を目的とした軌道生成も行った。この結果も同様に表 2.5 に示した。シミュレーション条件を一致させるために、大域的最適化に用いる 5000 点の開始点には同様のものを用いた。

図 2.10, 2.11 は、弾性リンク機構を搭載した EFLM モデルおよび搭載していない RFLM モデルの跳躍の様子を示す。今回の跳躍軌道生成で、EFLM モデルの股関節の最高到達高さ h_{max} は 441[mm] に到達した。この高さは脚全長の約 2 倍に相当する。図 2.12(a) から (d) はそれぞれ、この跳躍運動での股、膝、足根関節の角度、股、膝関節の角速度、アクチュエータのトルク軌道、股関節の高さ変化、弾性リンク長変位を示す。グラフの網掛け部分はロボットの接地期を示している。

生成された跳躍運動は、初期姿勢からまず膝関節を屈曲させ、その後に伸展させることで跳躍するというものであった。探索の中で試行された他の

Table 2.5: Comparison of the jumping height

	EFLM model	RFLM model
h_{max} [mm]	441	411

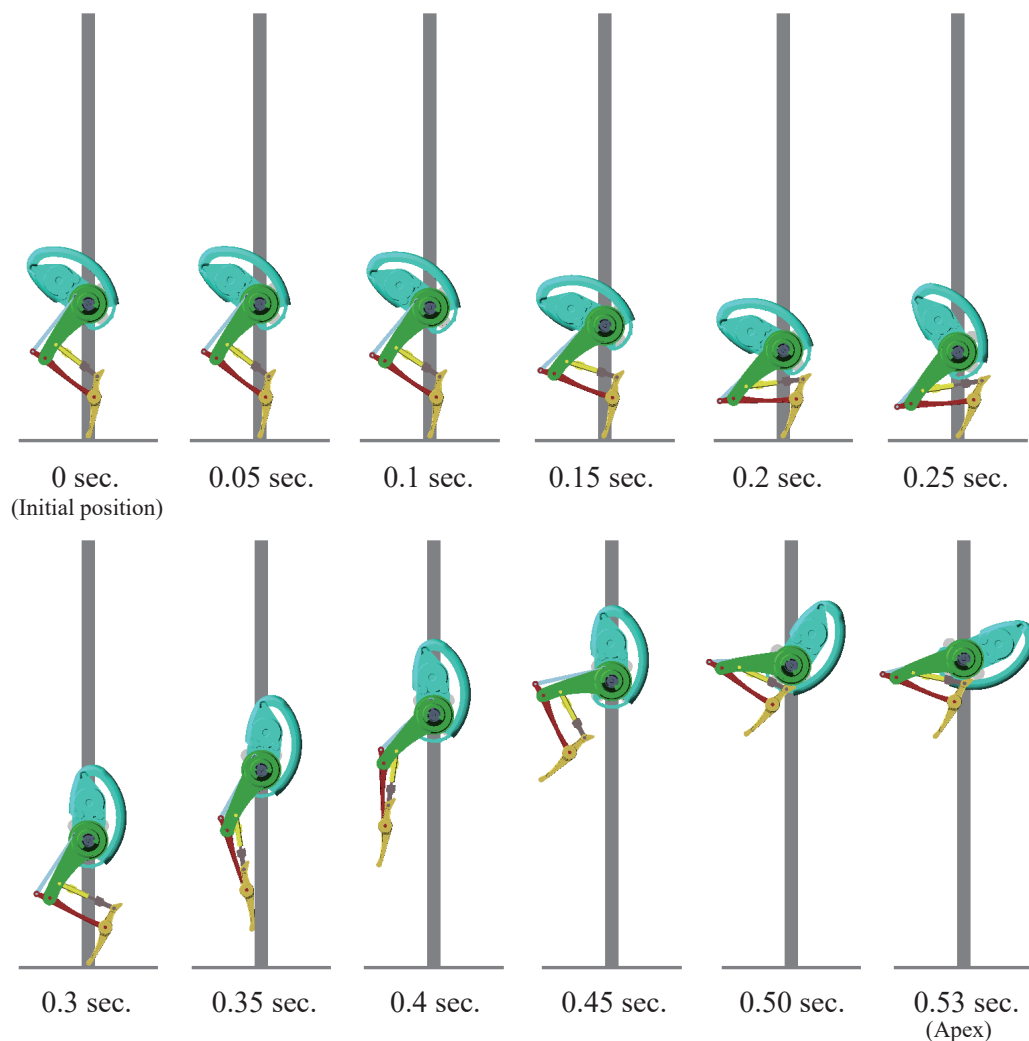


Fig. 2.10: Generated vertical jumping motion (EFLM model)

軌道には、初期姿勢から直接膝を伸展して、離陸するものもあった。その中で、初期姿勢から一度しゃがみ込んでから膝関節を伸展させて跳躍運動に切り替える軌道が跳躍高さ最大化の軌道として得られたのは、生物の運動軌道に類似するものであり、非常に興味深い結果である。関節軌道を見ると、運動開始から膝関節の屈曲に合わせて股関節も屈曲し、膝伸展に先立って股関節を伸展させるような運動になっている。しゃがみ込み後に股関節の回転方向を反転させる運動は、胴体重心を上方へ加速させる運動であり、この影響で下部の受動機構である弾性リンクを効果的に伸張させていると考えられる。通常、脚の伸展は膝伸展トルクによって引き起こされる

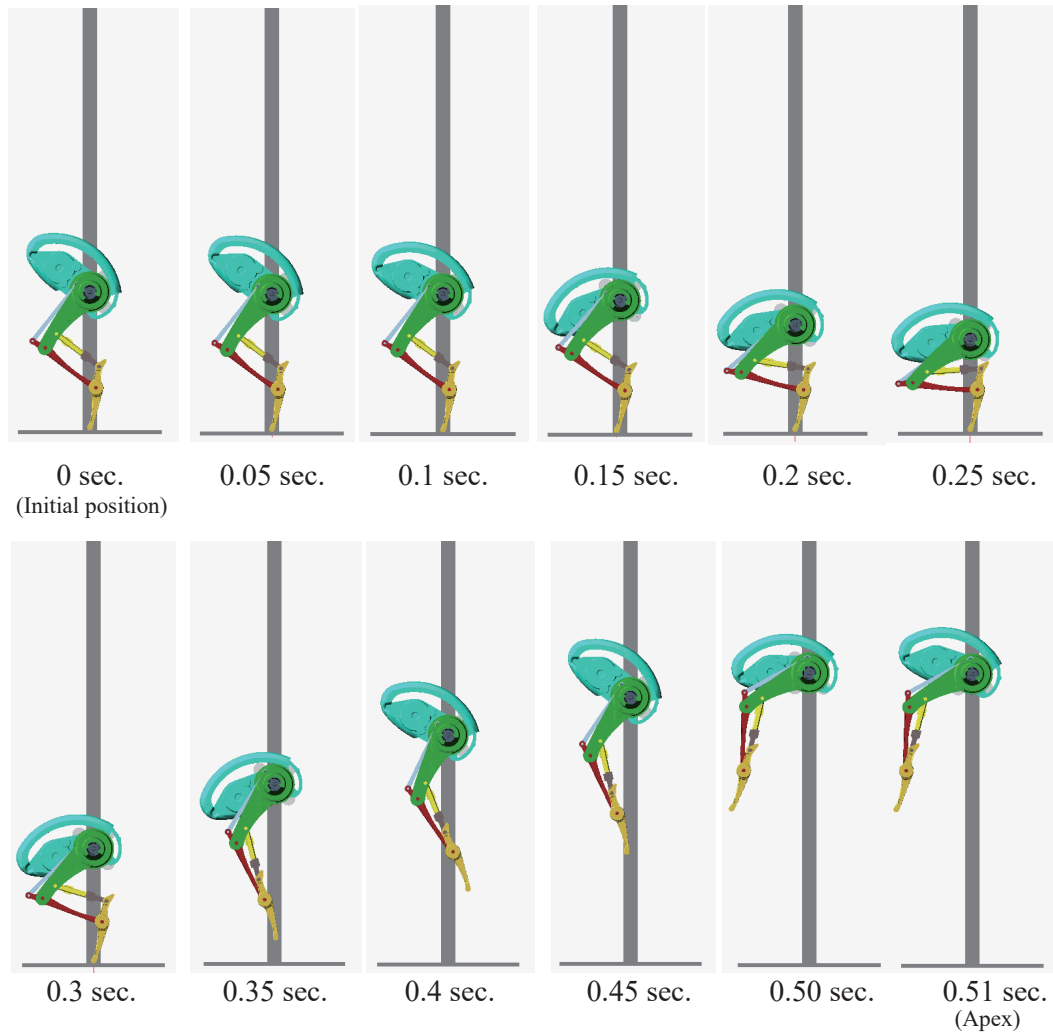


Fig. 2.11: Generated vertical jumping motion (RFLM model)

が、この跳躍の脚伸展動作は、股関節の伸展が膝関節の伸展に加えて行われることで、胴体が振り上げられる際の慣性力が干渉して重心の上方への加速度の向上につながり、跳躍していると考えられる。特に関節には高バックドライバビリティのアクチュエータを用いており、このような干渉効果を積極的に利用できる構成が機能する。

また弾性リンク長の変化を見ると、しゃがみ込みの最下点で最大伸張に達し、弾性リンクの高剛性領域に入って、その後、脚の伸展に合わせて収縮している。膝と足根関節の軌道は、しゃがみ込み時には膝に先行して足根関節が大きく屈曲し、脚伸展の際には膝関節に少し遅れて足根関節が伸展して

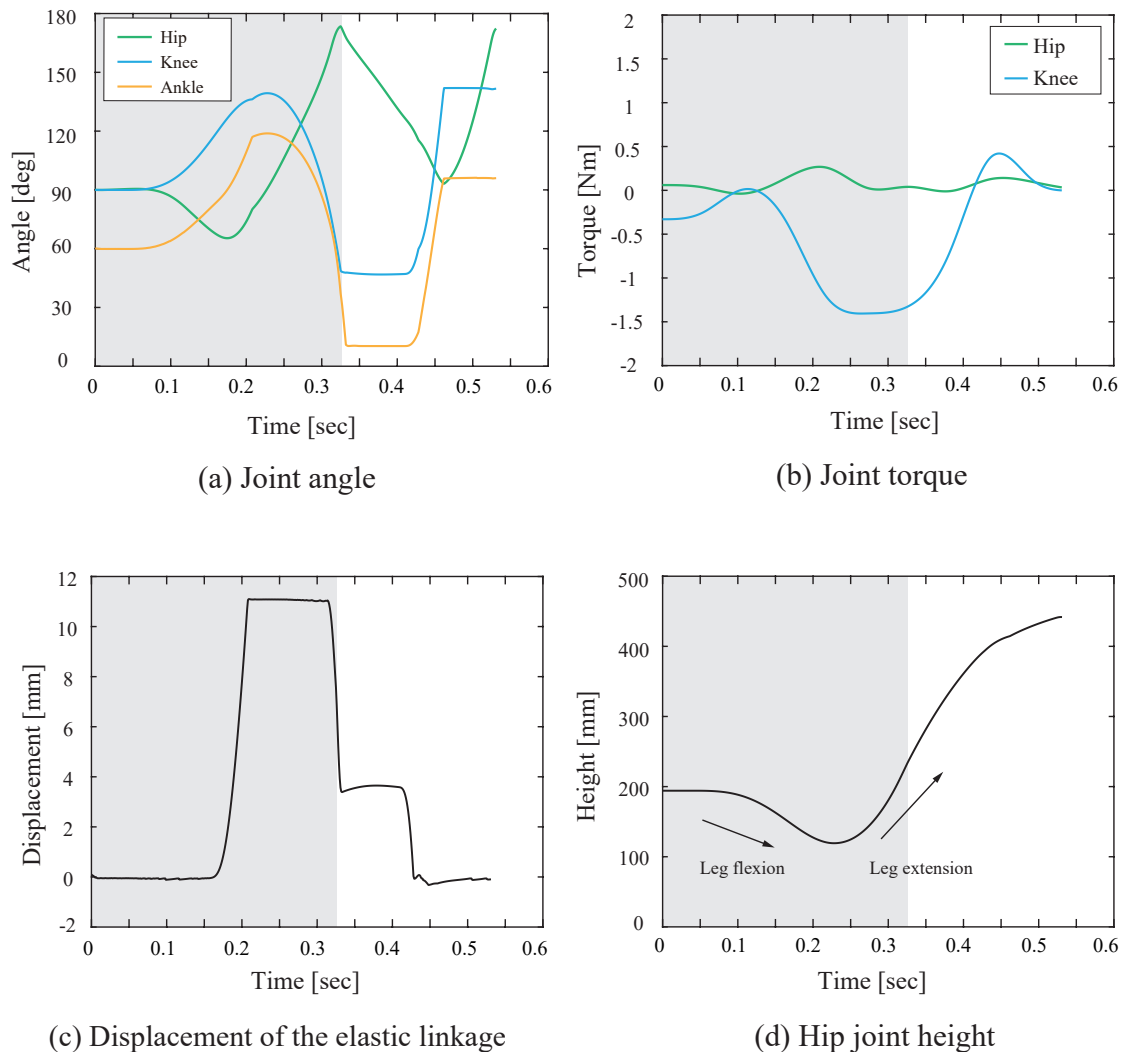


Fig. 2.12: Simulation results (EFLM model)

いる。これは、足先接地時に床反力を受けて弾性リンクが伸張させられることで弾性エネルギーを蓄え、膝の伸展時にそれを放出するという、生物の腓腹筋とアキレス腱の筋腱複合体の役割と同じような効果が得られたと考えられる。この弾性リンクの挙動は、ネコの跳躍時の腓腹筋の筋長変化にも類似している^[90]。このように、生物規範機構が運動に効果的に利用できていることがわかった。以上より、受動要素、受動関節を含み、干渉の強いロボットモデルにおいても、目的の運動軌道を生成できた。

一方で、弾性リンク機構を持たず、剛体リンクに置き換えられたRLFMモ

デルでの軌道生成の結果は，ロボットの股関節の最高到達高さは411[mm]となり，弾性リンク機構を搭載したモデルと比べて30[mm]（約7%）低い結果となった．股関節および膝関節の軌道は，弾性リンクを用いたモデルと類似しており，一度しゃがみ込んだ後に跳躍する結果であった．

弾性リンクを搭載したモデルでは，運動の途中で弾性リンクが一度伸長し，跳躍時にそれを放出している．弾性リンクの収縮力は足根関節の伸展位として作用し，脚の伸長を助長している．

2.6 垂直跳躍実験

2.6.1 実験環境

本章で試作した脚ロボットを用いて実験するにあたり，本研究では脚ロボットのための制御システムを開発した．ロボットの実験環境と制御システムの概要を図2.13に示す．ロボットは，鉛直方向の並進運動とピッチ軸回りの回転運動のみに自由度を制限するようにガイドに治具で拘束されている．

次に開発した制御システムの全体構成を図2.14に示す．システムは，ユーザインタフェースを通して操作者からの指令処理または操作者への情報提示，アクチュエータ用ドライバへ目標値指令，各種センサのフィードバックに基づいて指令値の更新などを行う上位コントローラ，関節駆動モータの電流制御や位置制御などのローカルフィードバック制御を行う下位コントローラ，ロボットの状態を検出するためのセンサ系，各システム要素とアクチュエータに電源供給をする電源系で構成される．本研究では上位コントローラ，下位コントローラ，およびセンサ系の接続に，ノイズに強く，信頼性の高いシリアルバスインタフェースであり，自動車の車載ネットワークとして広く用いられ，産業分野でも利用されているCAN(Controller Area Network)通信を採用した．

制御システムおよび電源装置はロボットの外部に設置した．メインコンピュータでは制御周期1[msec]のリアルタイム制御が行われ，モータドライバへの目標電流指令と測定データの記録を行う．股関節・膝関節モータには回

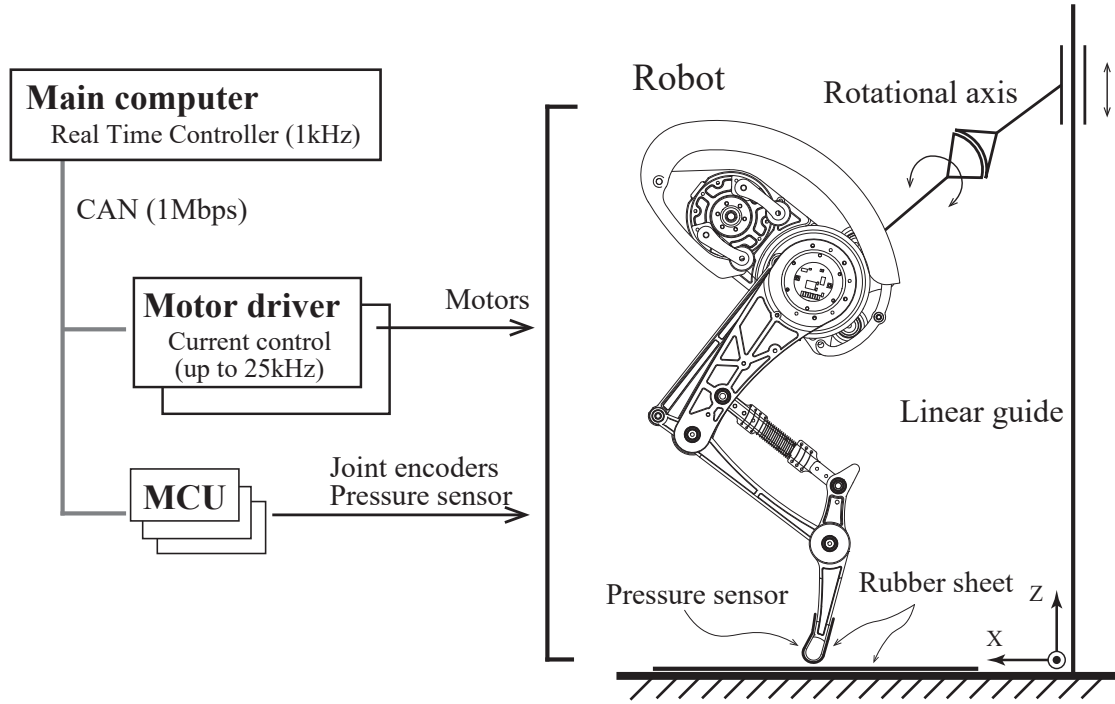


Fig. 2.13: Experimental setup and control system

転角を検出する非接触磁気式エンコーダが取り付けられており、モータ制御するドライバでは最大25[kHz]のサンプル周波数でPI制御による電流制御が行われる。膝関節と足根関節の回転軸上には非接触磁気式エンコーダが搭載されており、回転角を取得できる。またロボットの足先には感圧センサを貼り付け、接地・離地を検出することができる。関節エンコーダおよび感圧センサの取得値はマイクロコントローラで処理され、メインコンピュータに送信される。モータドライバおよびデータ取得用のマイクロコントローラとメインコンピュータとはCAN通信を介してデータの送受信が行われる。制御システムの各構成要素の詳細については付録Aで説明する。

図2.15に制御系ブロック図を示す。各関節モータには第2.5章の軌道生成で最高到達高さが最大となったトルク軌道 $\tau_{i,ff}$ のフィードフォワードに加えて、式(2.51)のように関節エンコーダからのフィードバックを用いた位置PD制御を用いることで、位置・速度誤差の大きさに応じて補正トルクを与える。

$$\tau_{i,ref} = K_p (\theta_{i,ref} - \theta_i) + K_d (\dot{\theta}_{i,ref} - \dot{\theta}_i) + \tau_{i,ff} \quad (2.51)$$

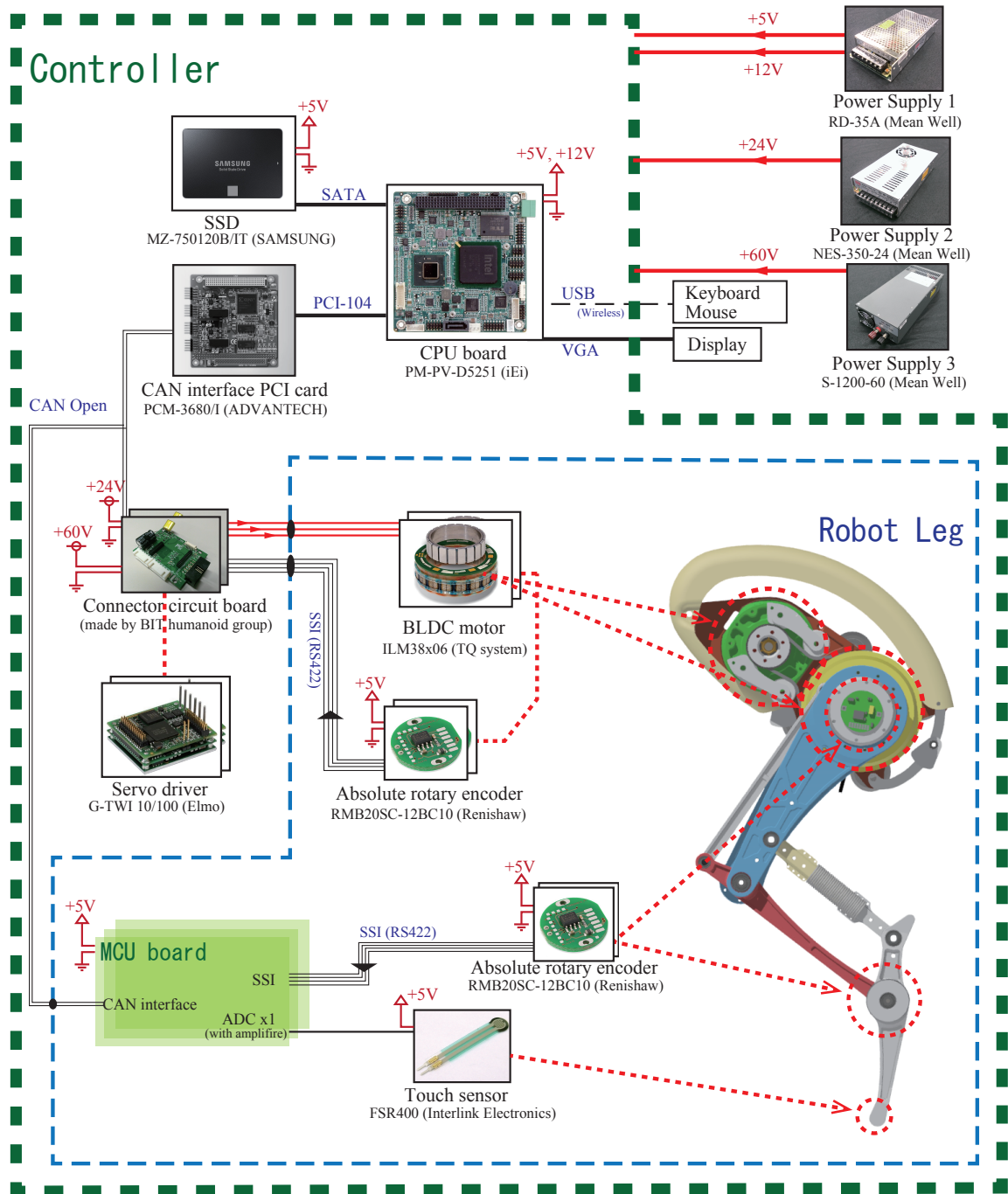


Fig. 2.14: Control system configuration

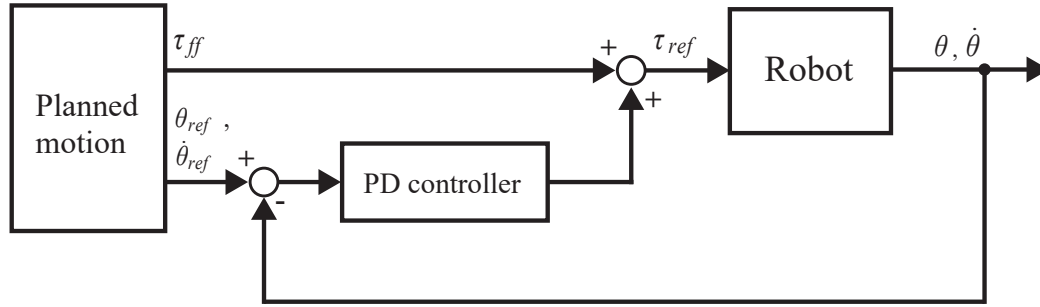


Fig. 2.15: Block diagram of the robot controller

ただし, K_p , K_d はそれぞれ比例ゲイン, 微分ゲイン, θ_i , $\dot{\theta}_i$ は関節 i の角度, 角速度である. 角度, 角速度の目標値 $\theta_{i,ref}$, $\dot{\theta}_{i,ref}$ は同様のシミュレーションで得られた角度軌道, 角速度軌道を利用する. モータドライバには, 事前に同定したモータのトルク定数 $K'_t = 0.020[\text{Nm/A}]$ で目標トルクを除算した目標電流値 $i_{i,ref} = \tau_{i,ref}/K'_t$ を指令する. 実験では $300[\text{fps}]$ で撮影可能なハイスピードカメラで撮影し, 股関節上のマーカーをトラッキングすることでロボットの跳躍高さを取得した. なお, 弾性リンクを搭載した脚ロボットのみ実験を行った.

2.6.2 実験結果

試作機による跳躍の様子を図2.16に示す. 実験時に取得した関節角度, 式(2.38)を用いて算出した弾性リンク長変化, 関節モータに流れた電流から計算した関節出力トルクを図2.17に示す. グラフの網掛け部分は, 足先の感圧センサで検出した接地期を示している. 実験の結果, ロボットは運動生成で得られた結果と同様に, 一度しゃがみ込んだ後, 脚を伸展させて跳躍を行った. 弾性リンクは膝伸展中に最大伸展に達し, その後離陸までに自然長まで収縮していることがわかる. 股関節高さは, 運動開始から約 $0.5[\text{sec}]$ 後に地面から高さ $395[\text{mm}]$ に到達した. 体高と同等程度の障害へのアプローチが可能であると見込まれる.

一方で, 第2.5章で得られたシミュレーションの結果に比べて, 実験では跳

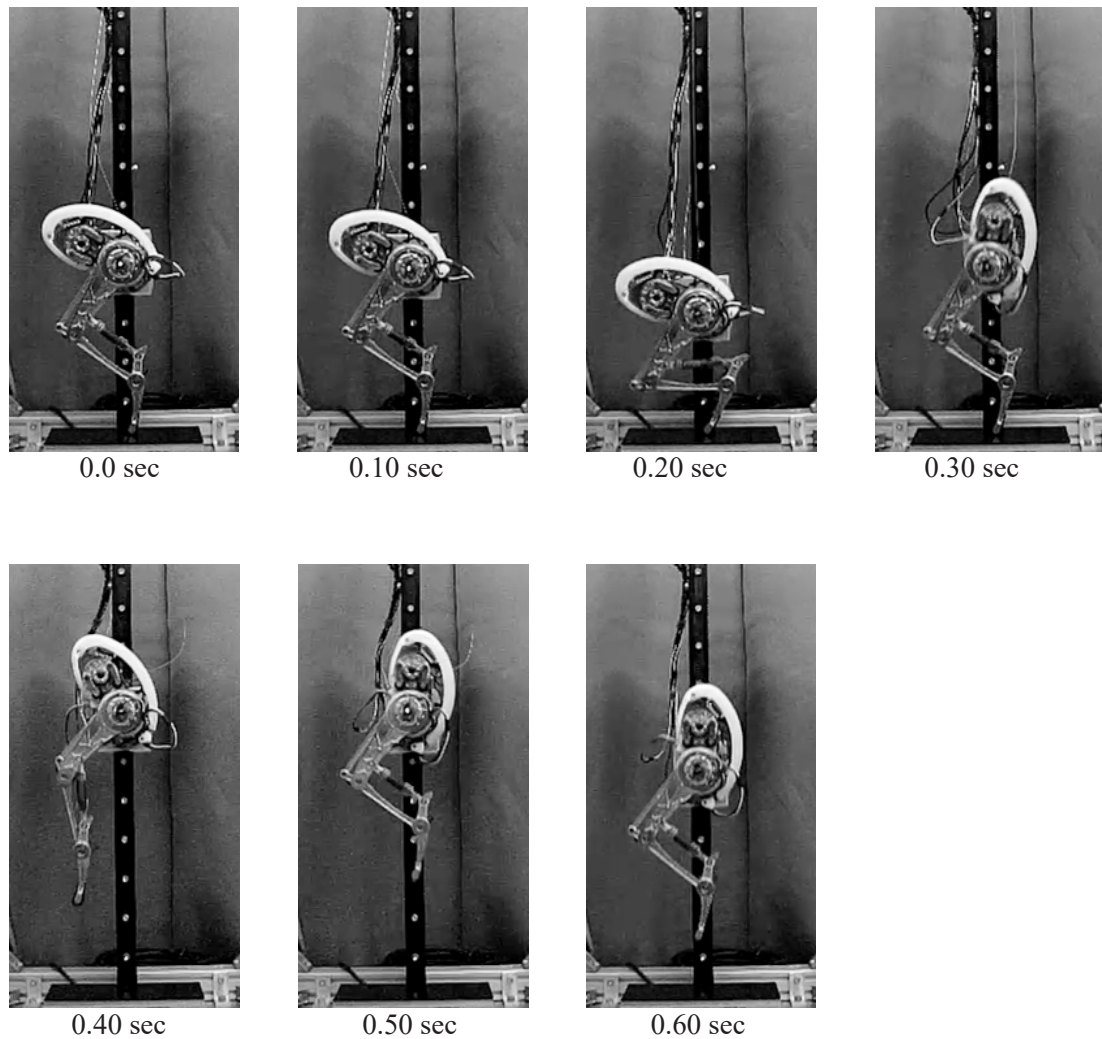


Fig. 2.16: Snapshots of the vertical jumping experiment

躍高さが低い．実験ではロボットはシミュレーションよりも早く最高到達高さに達していることがわかる．図2.17(a)から，時刻0.2[sec]以降から離陸までの脚伸展動作において膝関節が目標角度軌道に追従しきれず，弾性リンクが離陸前に収縮していることが確認できる．この原因として，シミュレーション時には考慮できていない外部の装置とつなぐ配線による影響が考えられる．実際はロボットの動的な運動によってそれらが無視できないほどの外力として加わった可能性があり，フィードバック制御補償の限界を超えたことで，シミュレーションとは異なる軌道となってしまったと考えられる．

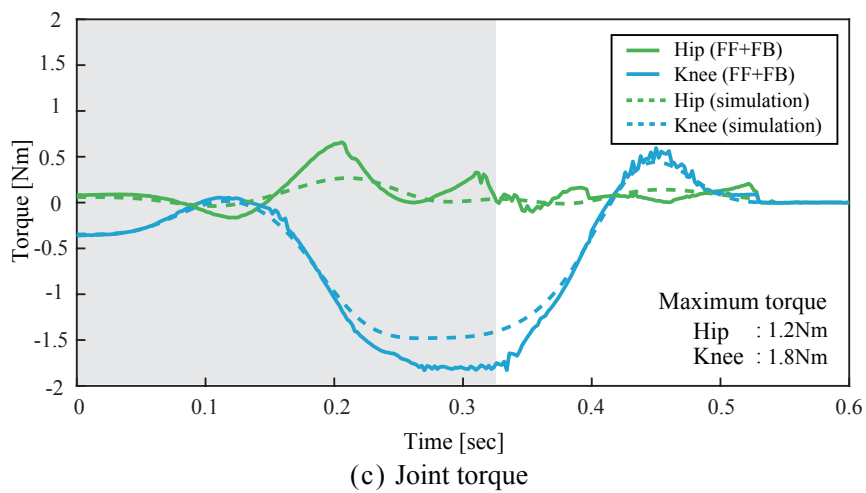
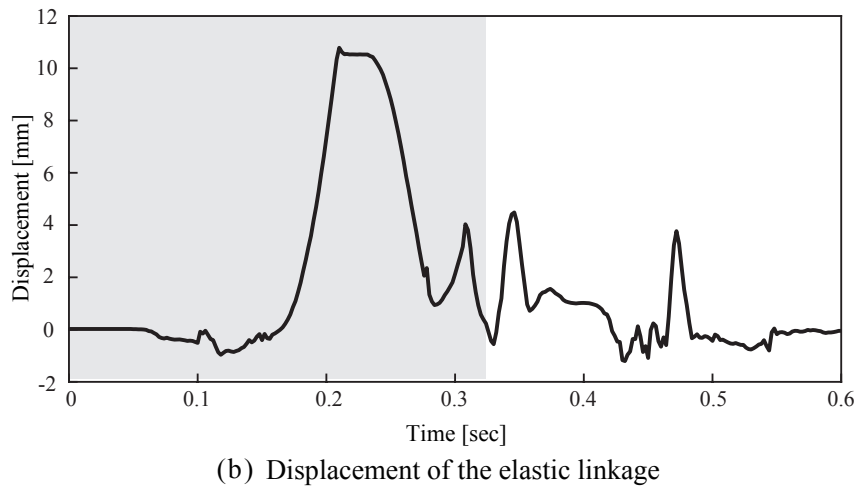
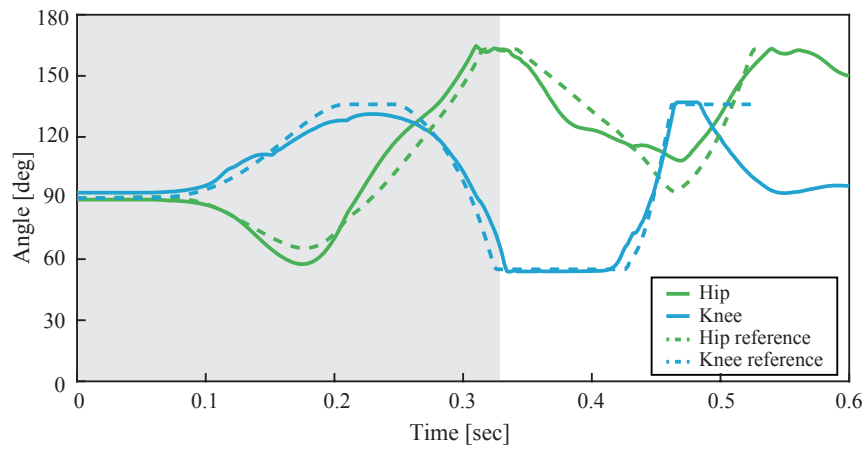


Fig. 2.17: Experimental results

2.7 本章のまとめ

本章では，ネコ科の生物の後肢下腿の筋骨格構造を参考として，その中でも運動への貢献が大きな腓腹筋とアキレス腱で構成される筋腱複合体を規範とした脚機構を開発した．

まず，この筋腱複合体が膝関節と足根関節の二関節間にまたがって配置されており，筋腱複合体の持つ弾性エネルギー蓄積・再利用機能と，関節間のトルク伝達機能をもつという点に着目し，これらの機能を実現することができる弾性四節リンク脚機構を提案した．動的な運動の実現のために，電磁モータと低減速比の減速機で構成される高いバックドライバビリティを確保したアクチュエータ，弾性リンクから構成された脚ロボットを設計，試作した．また，脚ロボットの弾性要素を含む多リンク動力学モデルを構築した．ダイナミックな運動の一例として垂直跳躍運動を取り上げ，動力学モデルを用いた軌道生成を行った．軌道生成では関節の入力トルク軌道をパラメータ化し，非線形最適化計算を用いて跳躍高さの最大化した．その結果，弾性リンクを活用した生物の跳躍運動に類似した垂直跳躍運動軌道を生成できた．最後に試作機を用いた実機実験を通して，軌道生成の有効性を確認した．

第3章

大腿部の筋腱複合体を規範とした脚機構の開発

3.1 概要

本章では，ネコ科の生物の大腿部に備わる筋腱複合体を規範とした脚機構の開発について説明する．大腿部には，脚全体を動かす重要で大きな筋が備わる．特に大腿骨の前部にある大腿四頭筋は，膝関節の伸筋であり，非常に大きな体積を有する．立脚を維持する間，膝関節には自重を支えるためのトルクを発生させる必要があり，この筋群の貢献は大きい．また，走行や跳躍といったダイナミックな運動においては，走行速度や跳躍高さが大きくなればなるほど膝関節には大きな出力が要求される．そこで，大腿部の筋腱複合体を規範とした機構を提案する．次に，この脚機構の機能を解析し，静力学的に効果を検証する．その後，前章と同様に試作機の垂直跳躍運動の軌道生成を行う．最後に，生成された軌道に基づいて，試作機を用いて垂直跳躍実験を行い，機構の効果を検証する．

3.2 四足哺乳生物の後肢大腿部の筋骨格構造

後肢大腿部の筋骨格構造の概略図を図3.1に示す．生物の大腿四頭筋の中の大腿直筋 (*Rectus femoris*) は非常に大きな筋であり，股関節と膝関節にまたがる二関節筋である．この二関節筋は，股関節の屈曲と膝関節の伸展に作用する．これらの筋は，膝蓋骨を介し，膝蓋腱を通して脛骨につながる．また縫工筋も同様に，これら2つの関節をまたがり，同様の作用をする二関節筋である．これらの二関節筋により，股関節と膝関節の運動の協調が可

能になり、また筋腱複合体として弾性エネルギーの蓄積や再利用が行われる。これらの二関節間の筋腱複合体は、跳躍運動における膝伸展や、走行時の蹴り出した脚の引き戻しにおいて作用する重要な要素である。

3.3 大腿部の二関節間筋腱複合体を規範とした脚機構のモデル

第2章で開発した下腿部の二関節間の筋腱複合体は直動ガイドと引張ばねで構成される弾性リンクという形で設計した。しかし、生物の股関節の可動範囲は広く、リンク構造を採用するとリンク同士が衝突してしまい、可動域を制限してしまう可能性が考えらる。また、生物の膝関節前面にある膝蓋骨は、膝の伸屈で大腿骨上を滑るように移動することで、付着する大腿四頭筋腱の膝関節周りのモーメントアームを確保している。以上の観点から、大腿部の二関節間の筋腱複合体の機能を、ワイヤ・プーリ機構と引張ばねで構成される機構によって実現することにする。脚機構のモデルを図3.2に示す。

脚機構は、股関節と膝関節と足根関節の3関節で構成される。ここでは、大腿部の機構の効果を検証することを目的とするため、第2章で開発した弾性四節リンクは用いず、代わりに膝-足根関節間は剛体リンクを用いた平行リンク機構で接続した。平行リンク機構により、膝関節の駆動トルクは1:1の関係で足根関節に伝達される。

胴体リンクの股関節軸上と、Shinリンクの膝関節軸上に、それぞれプーリが1つずつ取り付けられてあり、ワイヤで接続することで股関節と膝関節の間でトルクの伝達を行うことができる。例えば、股関節モータで伸展トルクを与えたとき、機構を介して膝に伸展トルクが伝達される。また、その間に引張ばねを用いることで、ばねが伸張したときに弾性エネルギーが蓄積され、そのエネルギーは各関節に分配される。このばねは、股関節の伸展または膝関節の屈曲によって伸張し、発生する復元力は、各関節のプーリに接線方向の張力として加わるため、各関節にトルクが発生する。

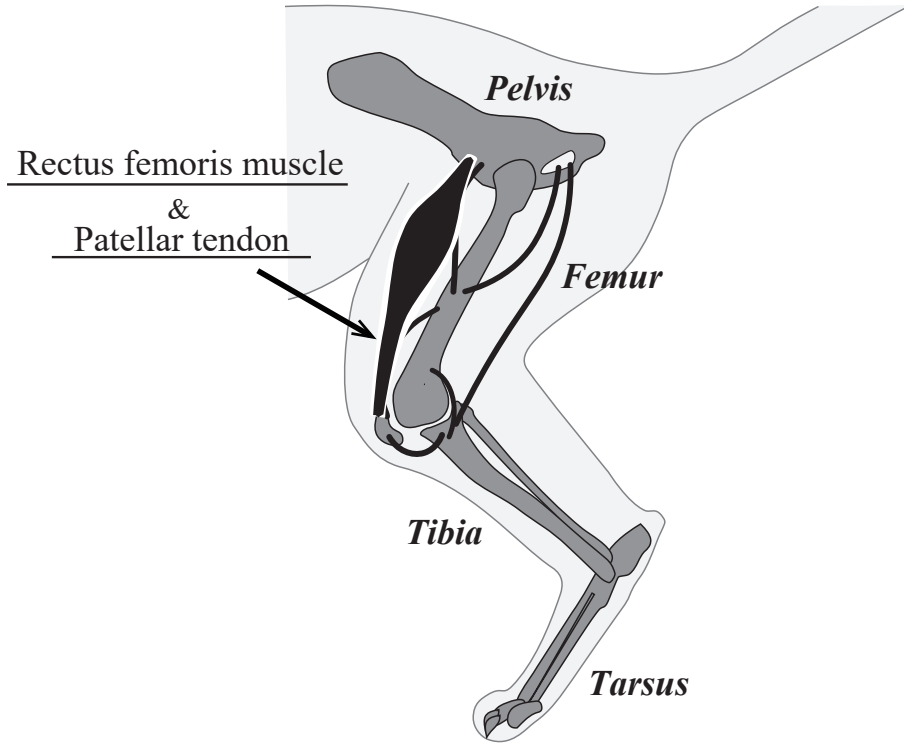


Fig. 3.1: Structure of the upper limb of a cat

ここで、引張ばねの伸張量 Δl_{us} は式 (3.1) で表される。

$$\Delta l_{us} = r_h (\theta_{h0} - \theta_h) + r_k (\theta_k - \theta_{k0}) \quad (3.1)$$

ただし、 r_h , r_k は股関節、膝関節のプーリ半径、 θ_h , θ_k は各関節角度、 θ_{h0} , θ_{k0} は股関節、膝関節それぞれの引張ばねが自然長の時の関節角度を表す。

ここで、ワイヤ・プーリ機構であるため、張力のみが発生する。すなわち、 $\Delta l_{us} < 0$ においては、ばねに力は発生せず、それによる関節への影響はなくなる。引張ばねによる復元力 f_{us} 、および引張ばねに蓄えられる弾性エネルギーは式 (3.2), (3.3) で表される。

$$f_{us} = \begin{cases} k_{us} \Delta l_{us} + f_{pre-us} & (\Delta l_{us} \geq 0) \\ 0 & (\Delta l_{us} < 0) \end{cases} \quad (3.2)$$

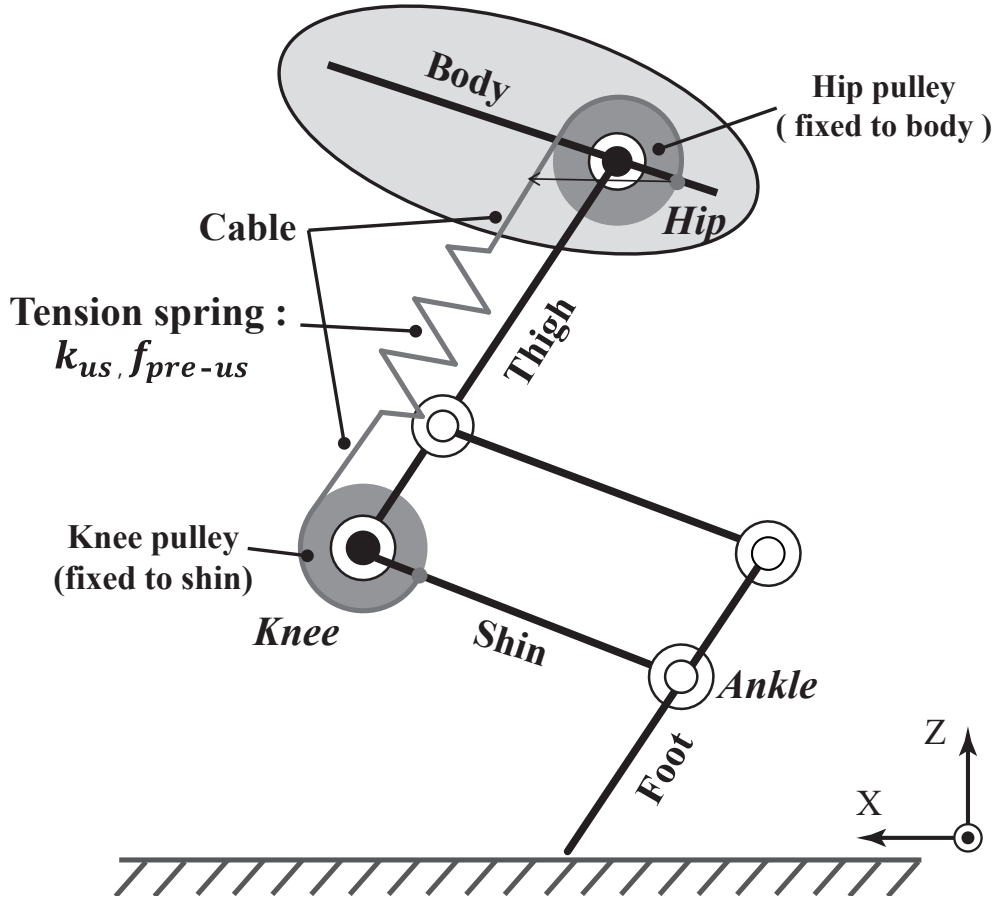


Fig. 3.2: Proposed upper leg mechanism

$$U_{us} = \begin{cases} \frac{1}{2}(k_{us}\Delta l_{us} + 2f_{pre-us})\Delta l_{us} & (\Delta l_{us} \geq 0) \\ 0 & (\Delta l_{us} < 0) \end{cases} \quad (3.3)$$

ただし, k_{us} はばね定数, f_{pre-us} は初張力を表す. ワイヤ・プーリ機構のためプーリ外径の接線方向に張力が加わるので, 式 (3.2) の張力にプーリの半径を乗算したトルクが各関節に与えられる. よって引張ばねの張力によって股関節, 膝関節に加わるトルク τ_{hus} , τ_{kus} は式 (3.4), (3.5) で表される.

$$\tau_{hus} = f_{us}r_h \quad (3.4)$$

$$\tau_{kus} = f_{us}r_k \quad (3.5)$$

ここで, 股関節と膝関節をまたがるように弾性要素が配置されているこ

の機構では，式 (3.4), (3.5) のように，引張ばねで発生する張力によるモーメントが関節角度に依存している．股関節，膝関節に与えられるトルク τ_h , τ_k は，アクチュエータによる駆動トルクを $\tau_{h,ac}$, $\tau_{k,ac}$ としたとき，式 (3.6), (3.7) で表される．

$$\tau_h = \tau_{h,ac} + \tau_{hus} \quad (3.6)$$

$$\tau_k = \tau_{k,ac} + \tau_{kus} \quad (3.7)$$

このように，股関節および膝関節のトルクは，アクチュエータによる駆動トルクと弾性要素で発生する張力によるトルクの和で表される．

ここで，関節アクチュエータの減速機の摩擦は，弾性要素に蓄えられたエネルギーを散逸させる要因となる．前述のように，関節側からみて，減速機の粘性摩擦は減速比 γ の 2 乗に比例して大きくなる．提案機構の弾性要素は，出力リンクに固定されたプーリを介して関節にトルクを及ぼす．関節 i の，モータのロータの慣性モーメントと，粘性摩擦を考慮した運動方程式は，式 3.8 で表される．

$$\mathbf{M}_i(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \gamma_i^2 J_{i,rot}\ddot{q}_i + H_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + (D_{i,L} + \gamma_i^2 D_{i,M}) \dot{q}_i + G_i(\mathbf{q}) = \tau_{i,ac} + \tau_{i,us} + \tau_{i,ex} \quad (3.8)$$

ただし， \mathbf{q} は一般化座標， $\mathbf{M}_i(\mathbf{q})$ は慣性行列の i 行目， γ_i は関節 i の減速機の減速比， $J_{i,rot}$ は関節 i のモータのロータの慣性モーメント， $H_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は関節 i に働く遠心力およびコリオリ力， $D_{i,L}$ は関節 i の出力軸の粘性摩擦係数， $D_{i,M}$ は関節 i の減速機の粘性摩擦係数， $G_i(\mathbf{q})$ は関節 i に働く重力項， $\tau_{i,ac}$ は関節 i の駆動トルク， $\tau_{i,us}$ は弾性機構によって関節 i に与えられるトルク， $\tau_{i,ex}$ は外力によって関節 i に及ぼされるトルクである．右辺の駆動トルクや弾性要素によるトルク，または外力をロボットの運動に有効的に利用するためには，左辺の第 3 項が小さいことが望ましい．すなわち提案機構の場合は，関節の減速比 γ_i を小さくすることは，第 3 項を小さくすることになり，これらの効果を利用した運動のために考慮しておくことが望ましい．

3.4 大腿部機構を有する脚ロボットの試作

第2章で試作したロボットでは，大腿部の機構を搭載するための十分なスペースが無かった．そこで，大腿部の機構の効果を検証するために，新たに図3.3に示す一脚ロボットを試作した．その基本的な仕様を表3.1に示す．各リンクのリンク長や関節の構成は第2章で試作したロボットと同じである．

股関節と膝関節を駆動する電磁モータには，Parker Hannifin製のフレームレスモータK044050-8Y^[79]を使用した．その仕様を表3.2に示す．それぞれの関節は，減速比5のMATEX製の遊星歯車減速機LGU35-5SRS^{*1}を使用した．フレームレスモータと遊星歯車減速機は図3.4のように一体のハウジング内に収められている．

遊星歯車を使用することで，モータの出力軸と減速機の出力軸を同軸に

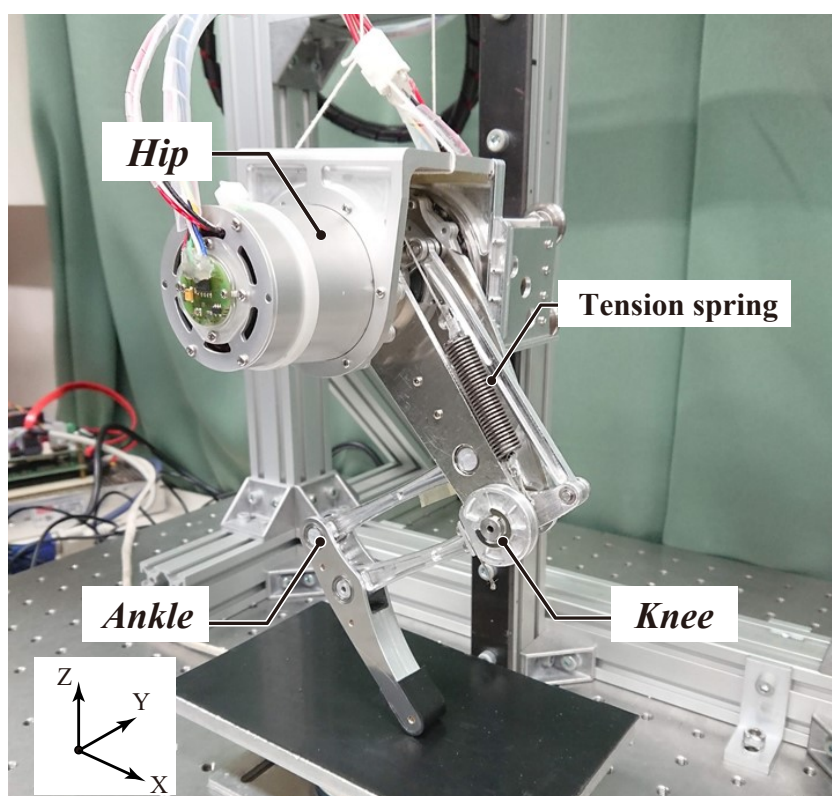


Fig. 3.3: Appearance of the prototype of one legged robot with upper leg mechanism

^{*1}マテックス株式会社電子カタログユニット一覧，https://www.matex-japan.com/products/gear_catalog.html (Accessed 6th, January, 2020).

Table 3.1: Specifications of the prototype

Properties	Units	Values
Total mass	kg	1.06
Hip joint reduction ratio	-	5
Knee joint reduction ratio	-	5
Hip rotation range of motion	deg	$-110 \leq \theta_h \leq 102$
Knee rotation range of motion	deg	$39 \leq \theta_k \leq 129$
Spring coefficient k_{us}	N/mm	1.86
Spring initial tension $f_{ini_{us}}$	N	12.75

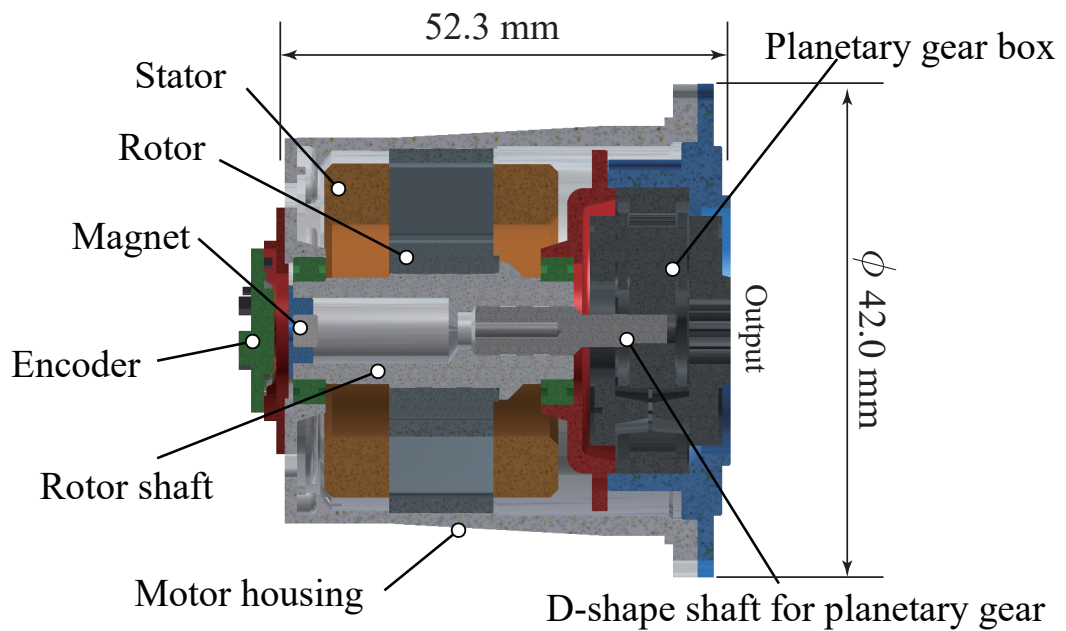


Fig. 3.4: 3DCAD model of the actuator housing design (Motor: Parker K044050-8Y)

Table 3.2: Specification of K044050-8Y

Properties	Units	Values
Weight m_{motor}	g	133
Power P_m	W	53
Rated voltage V_r	V	48
Rated torque τ_r	Nm	0.19
Rated speed ω_r	rpm	7266
Rate current i_r	Arms	3.3
Peak torque $\tau_{M,max}$	Nm	0.66
Peak current i_p	Arms	11.6
Maximum speed ω_n	rpm	7500
Rotor inertia J_{rot}	kgcm ²	0.014
Terminal resistance R	Ω	1.787
Terminal inductance L_m	mH	1.25
Torque constant K_t	Nm/A	0.057
Back EMF constant K_e	V/krpm	3.44

設計することができる．今回の設計ではこれを利点として，股関節と膝関節のアクチュエータを股関節軸上に同軸に配置した．こうすることで，股関節周りの脚の慣性モーメントを小さくすることができる．また体幹の質量分布も，脚の根元に集中するため，将来の四脚ロボットでの動力学計算を幾分か簡単にできる可能性がある．このアクチュエータユニットは股関節と膝関節の両方に使用する．アクチュエータをユニット化し，すべての駆動関節で利用できるようにすることで，設計の工数削減につながる．

大腿部の機構の引張ばねは，搭載可能な大きさで，ばね定数ができるだけ大きなものを選定した結果，MISUMI製のAWF10-60を使用することにした．基本仕様を表3.3に示す．

Table 3.3: Characteristics of AWF10-60

Properties	Units	Values
Spring constant k_{us}	N/mm	1.86
Pretension f_{pre-us}	N	12.75
Equilibrium length	mm	60
Max. deformation	mm	19.5
Diameter	mm	10
Wire diameter	mm	1.4
Max. load	N	49.03

ワイヤには，柔軟性に優れて最小曲率半径が小さく，また高荷重にも耐えられる株式会社新洋製のステンレスロープSC-75^{*2}を使用した．基本仕様を表3.4に示す．

股関節軸と膝関節軸に取り付けられたプーリの半径比によってトルクの伝達比が決まるが，今回は簡単のために半径比を1:1とし，ロボットに取り付けられる最小半径である $r_h = r_k = 13.5[\text{mm}]$ とした．また，引張ばねが自然長の状態における股関節，膝関節角度はそれぞれ， $\theta_{h0} = 32.5[\text{deg}]$ ， $\theta_{k0} = 39.31[\text{deg}]$ とした．膝関節は最大屈曲状態の角度である．股関節は， $\theta_h < \theta_{h0}$ の状況が存在し得る．式 (3.1) において， $\Delta l_{us} < 0$ となる領域ではワイヤがたるむた

Table 3.4: Characteristics of SC-75

Properties	Units	Values
Diameter	mm	0.75
Wire diameter	mm	0.05
Breaking load	N	530

^{*2}株式会社新洋ワイヤ規格表，<http://www.shinyo-h.co.jp/technology/wire.html> (Accessed 6th, January, 2020).

め、張力は発生せず、引張ばねによって各関節に加わるトルクは0となる。

3.5 大腿部脚機構の静力学解析

大腿部の機構が自重による各関節への負荷トルクに対してどのような効果をもたらすかを検証する。具体的には、ある姿勢で静止した状態において股-膝関節間でトルクが伝達されることによるアクチュエータの消費電力を調べることで、機構の効果を検証する。

3.5.1 ロボットモデルの運動学

まず、静力学計算に使用するロボットのモデルを図3.5に示す。大腿部の弾性機構は省略してある。ここで、 m_i は各リンクの質量、 I_i は各リンクの重心まわりの慣性モーメント、 ϕ は胴体姿勢角、 (x_i, z_i) は絶対座標系での各リンクの重心座標、 L_i は各リンクの長さ、 (x_{joint}, z_{joint}) は絶対座標における各関節の座標である。

モデルの重心座標 (x, z) は式(3.9)で表される。

$$x = \frac{\sum_{i=0}^4 m_i x_i}{\sum_{i=0}^4 m_i} \quad (3.9)$$

$$z = \frac{\sum_{i=0}^4 m_i z_i}{\sum_{i=0}^4 m_i} \quad (3.10)$$

これを用いて、胴体の重心座標 (x_0, z_0) は式(3.11)、(3.12)で表される。

$$x_0 = x + \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^4 m_i (x - x_i) \quad (3.11)$$

$$z_0 = z + \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^4 m_i (z - z_i) \quad (3.12)$$

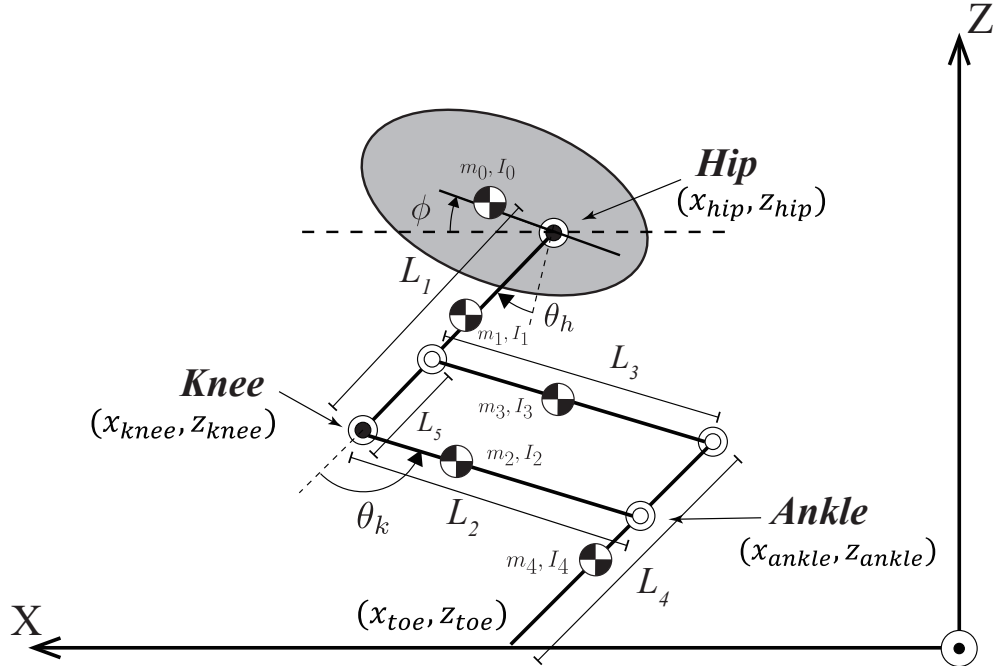


Fig. 3.5: Definition of the model parameters

ここで、各リンクの近位関節位置から重心位置までの相対距離 L_{gi} と、リンク軸からの回転角 ψ_i は式 (2.10), (2.11) と同様に表される.

これらを用いると、各関節の座標は式 (3.13) ~ (3.20) で表される.

$$x_{hip} = x_0 - L_{g0} \cos(\phi + \psi_0) \quad (3.13)$$

$$z_{hip} = z_0 - L_{g0} \sin(\phi + \psi_0) \quad (3.14)$$

$$x_{knee} = x_{hip} + L_1 \sin(\phi + \theta_h) \quad (3.15)$$

$$z_{knee} = z_{hip} - L_1 \cos(\phi + \theta_h) \quad (3.16)$$

$$x_{ankle} = x_{knee} + L_2 \sin(\phi + \theta_h - \theta_k) \quad (3.17)$$

$$z_{ankle} = z_{knee} - L_2 \cos(\phi + \theta_h - \theta_k) \quad (3.18)$$

$$x_{toe} = x_{ankle} + (L_4 - L_5) \sin(\phi + \theta_h) \quad (3.19)$$

$$z_{toe} = x_{ankle} - (L_4 - L_5) \cos(\phi + \theta_h) \quad (3.20)$$

これらを用いて、各リンクの重心座標は式 (3.21) ~ (3.28) で求めることが

できる．

$$x_1 = x_{hip} + L_{g1} \sin(\phi + \theta_h + \psi_1) \quad (3.21)$$

$$z_1 = z_{hip} - L_{g1} \cos(\phi + \theta_h + \psi_1) \quad (3.22)$$

$$x_2 = x_{knee} + L_{g2} \sin(\phi + \theta_h - \theta_k + \psi_2) \quad (3.23)$$

$$z_2 = z_{knee} - L_{g2} \cos(\phi + \theta_h - \theta_k + \psi_2) \quad (3.24)$$

$$x_3 = x_{hip} + (L_1 - L_5) \sin(\phi + \theta_h) + L_{g3} \sin(\phi + \theta_h - \theta_k + \psi_3) \quad (3.25)$$

$$z_3 = z_{hip} - (L_1 - L_5) \cos(\phi + \theta_h) - L_{g3} \cos(\phi + \theta_h - \theta_k + \psi_3) \quad (3.26)$$

$$x_4 = x_{ankle} + L_{g4} \sin(\phi + \theta_h + \psi_4) \quad (3.27)$$

$$z_4 = z_{ankle} - L_{g4} \cos(\phi + \theta_h + \psi_4) \quad (3.28)$$

ロボットを設計するにあたって作成した3DCADモデルに，各パーツの材料特性などを入力して算出されたモデルの慣性情報を表3.5, 3.6に示す．ロボットの重量には，実験で用いるガイドのための治具のものを含めてある．ただし，機構に搭載されたばねは，フレームに対して十分に軽量であるため，質量は無視する．

Table 3.5: Parameters of the prototype

Link	i	L_i [mm]	m_i [g]	I_i [kg·m ²]
Body	0	-	599	3.76×10^{-3}
Thigh	1	100	407	4.01×10^{-3}
Shin	2	90.0	15.9	2.38×10^{-4}
RL	3	90.0	5.70	5.50×10^{-5}
Foot	4	90.0	28.3	2.07×10^{-4}
Thigh2	5	25.0	-	-

Table 3.6: CoM positions of each linkage

Parameters	Units	Values
(x_{g0}, z_{g0})	mm	(0.0460, 2.86)
(x_{g1}, z_{g1})	mm	(9.41, 0.592)
(x_{g2}, z_{g2})	mm	(-28.7, -0.994)
(x_{g3}, z_{g3})	mm	(-45.0, 0.00)
(x_{g4}, z_{g4})	mm	(14.3, -1.30)

3.5.2 モータ消費電力の計算

電磁モータの消費電力 P_c は、式 (3.29) で表される。

$$\begin{aligned}
 P_c &= i_M(V_{in} - V_e) \\
 &= i_M^2 R - i_M K_e \omega
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

ただし、 i_M はモータ電流、 V_{in} は印加電圧、 V_e は逆起電圧、 R は端子間抵抗、 K_e は逆起電圧定数、 ω は回転速度である。

ここでは静止姿勢、すなわち $\omega = 0$ における消費電力を求めるため、式 (3.30) となる。

$$P_c = i_M^2 R \tag{3.30}$$

トルク定数 K_t とモータ電流 i_M より、モータの出力トルクは $\tau_M = K_t i_M$ が求まるため、消費電力と出力トルクの関係は式 (3.31) で表される。

$$\begin{aligned}
 P_c &= \left(\frac{\tau_M}{K_t} \right)^2 R \\
 &= \frac{R}{K_t^2} \tau_M^2
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

R および K_t はモータ固有の定数であり、消費電力 P_c は出力トルクの 2 乗に比例することがわかる。すなわち、静止姿勢を維持するためのモータの必要トルクを低減することで、消費電力を小さくすることができる。

ここで計算される消費電力は、モータの回転運動やジュール熱に変換される。今回は考慮しなかったが、モータの出力は熱にも影響され、温度が高いほど電気-機械エネルギーの変換効率が低下することになる。また将来的にロボットにバッテリーを搭載することを考えると、バッテリーの持続時間は消費電力に依存する。これらを考えると、消費電力を小さくすることは必要なことであるといえる。

今回のロボットのモデルにおいて、静止状態であれば、関節トルク $\tau = [\tau_h \ \tau_k]^T$ と床反力 $f = [f_x \ f_z]$ の関係は式 (3.32) で表される。

$$\tau = -J^T f + \tau_{us} \quad (3.32)$$

ただし、 J は足先のヤコビ行列で $J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{toe}}{\partial \theta_h} & \frac{\partial x_{toe}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial z_{toe}}{\partial \theta_h} & \frac{\partial z_{toe}}{\partial \theta_k} \end{bmatrix}$ 、 τ_{us} は式 (3.2), (3.4), (3.5) で表される股関節および膝関節に作用する引張ばねの復元力によるトルクであり、式 (3.33) で示される。

$$\tau_{us} = \begin{bmatrix} -(k_{us}\Delta l_{us} + f_{pre-us}) r_h \\ (k_{us}\Delta l_{us} + f_{pre-us}) r_k \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

ここで、静止状態においてロボットの重心がモデルの足先位置の鉛直上にあるとき、床反力の水平方向成分 f_x は0になる。また、鉛直方向成分 f_z はロボット全体の重量による重力と等しくなるため、 $f_z = \sum_{i=0}^4 m_i g$ となる。

機構の効果を検証するために、機構の有無によるロボット静止状態でのモータの消費電力を比較する。機構なしのモデルでは、 $\tau_{us} = \mathbf{0}$ とした式 (3.34) を用いて関節トルク計算した。

$$\tau = -J^T f \quad (3.34)$$

式 (3.32), (3.34) で得られた関節トルクを、アクチュエータの減速比5で除算してモータの発揮トルクを求め、式 (3.31) に代入することで、モータの消費電力を計算する。モータの電気的特性は、表3.2に従う。検証では、脚の伸展状態から屈曲状態までの姿勢でモータの消費電力を求め、機構の有無による差を比較した。ロボットの足先を股関節の真下に配置し、立脚時に自重を支えるために伸展トルクを発揮しておく必要がある膝関節について可

動範囲の中で関節角度を1[deg]刻みに変更した．このとき，股関節角度は胴体の地面に対する角度が $\phi = 0[\text{deg}]$ になるように調整した．

3.5.3 解析結果

図3.6に股関節，膝関節のモータ消費電力の総和を示す．グラフより，検証したどの姿勢においても，機構を搭載したモデルのほうが総消費電力が小さいことが確認できた．その減少率は最大で約41.9%であった．

図3.7に，大腿部の機構の有無による各関節モータでの必要トルクの比較を示す．これらの図より，機構を搭載したことによって，膝関節の負荷トルクの一部が股関節に分配され，膝関節アクチュエータの必要トルクを低減させることができていることがわかる．以上より，大腿部の機構による股関節-膝関節の二関節間でのトルク伝達機能が示され，静的に姿勢を維持する場合においてモータでの総消費電力を低減できることを確認した．

本研究で開発した大腿部機構では，簡単のために股関節と膝関節のプーリを円弧として，その半径比が1:1になるように設計した．また，使用する

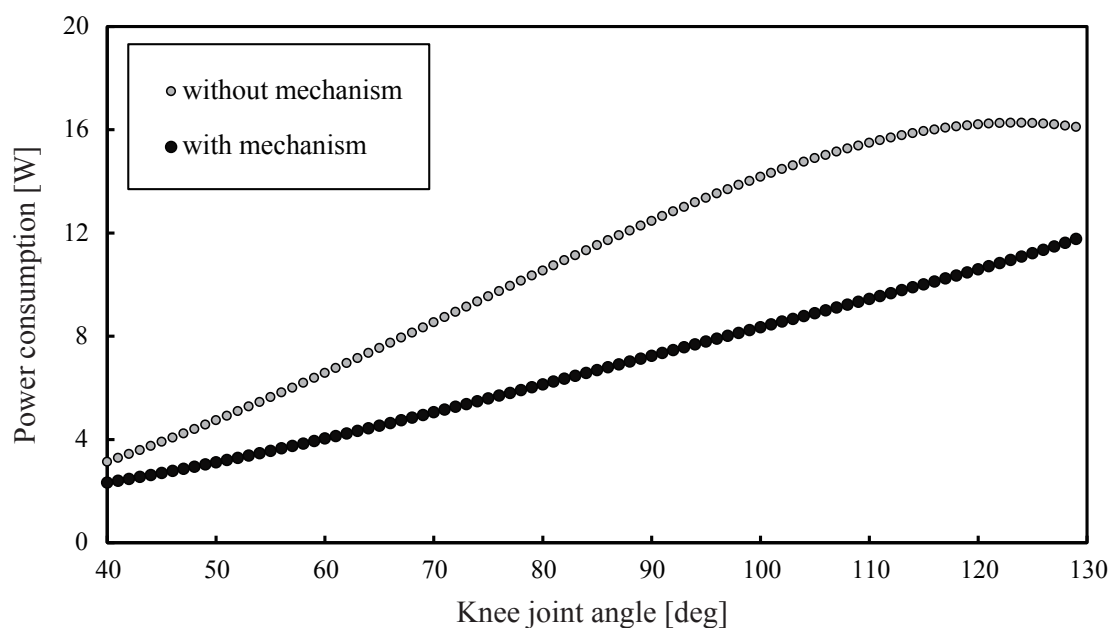
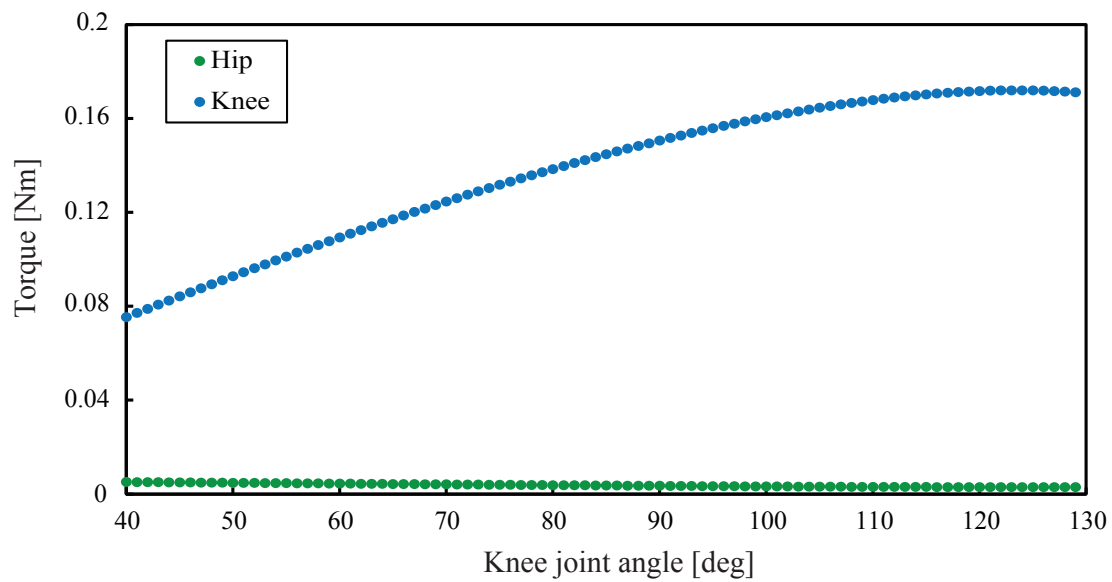
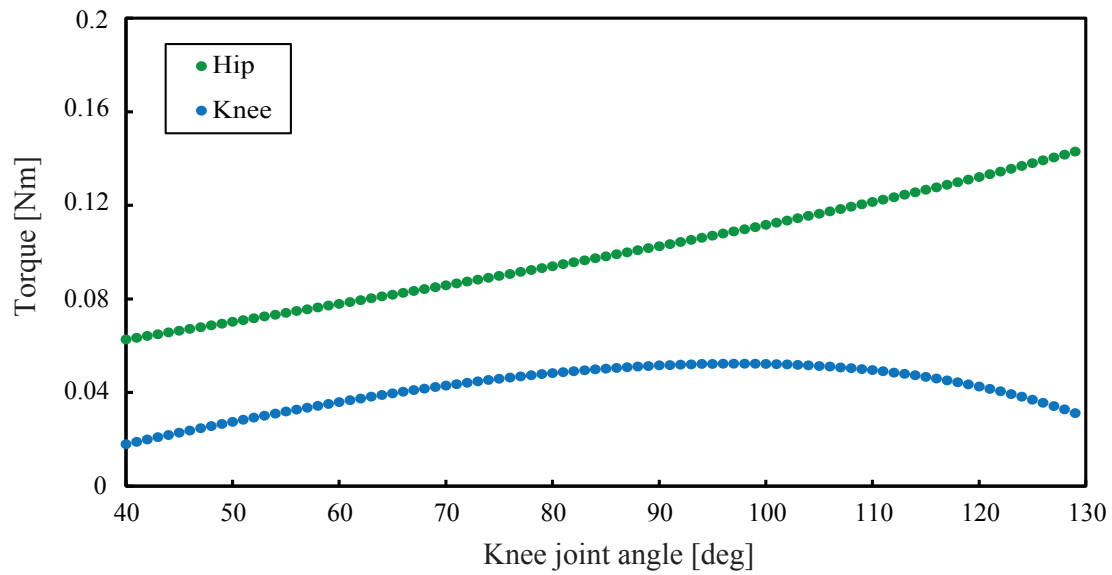


Fig. 3.6: Power consumption



(a) without proposed mechanism



(b) with proposed mechanism

Fig. 3.7: Motor torque

引張ばねの最大タワミ量から，引張ばねの張力が股関節に働き始める角度 θ_{h0} を決定した．今回の計算を用いて，静止姿勢におけるモータの消費電力の総和を最小化することは，プーリ形状，プーリ半径比，ばね自然長時の角度 θ_{h0} などの機構パラメータを設計する 1 つの方法になる可能性がある．

3.6 大腿部機構を有する脚ロボットの垂直跳躍運動の軌道生成

第2章と同様に，動的で負荷の大きな運動の一例として垂直跳躍運動を取り上げ，大腿部機構を有するロボットの垂直跳躍軌道を生成する．

3.6.1 運動方程式の導出

環境から床反力などの拘束力が加わる場合の運動方程式は，式 (2.31) で示したとおりである．第2章で構築したモデルとは，弾性要素の位置とそれが作用する関節が異なる．式 (3.3) で算出される大腿部機構の引張ばねに蓄えられる弾性エネルギー U_{us} を用いて，式 (2.37) を求め，ラグランジュの運動方程式 (2.36) に代入することで，本モデルのための運動方程式が導出できる．なお，一般化座標は $\mathbf{q}(t) = [x(t), z(t), \phi(t), \theta_h(t), \theta_k(t)]^T \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$ であり， $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ ， $\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$ ， $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$ ， $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$ ， $\mathbf{E}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 5}$ である．環境から受ける外力は式 (2.31) と変わらない．空中期においても同様に変更することで利用することができる．

ここで，第2章では接触力や摩擦力の計算の複雑さから，動力学シミュレータを用いて運動生成を行った．既存のシミュレーションソフトを用いることで，複雑な計算をすべて専用のソルバに任せることができると，モデルの構築が容易になり，またシミュレーション結果の可視性が高いという利点があった．一方で，第2章で用いた Co-simulation では，1 回の跳躍シミュレーションの試行に時間を要していた．また，ADAMS 内での接触力計算には，特徴点の侵入量に応じた粘弾性反力を与える弾性接触法が用いられており，衝突の瞬間の反力計算では積分時間幅を極めて小さくする必要があり，こ

れもシミュレーションに要する時間を長くしている要因であったと考えられる。最適化計算では、最適解の探索のために多数の試行を行うため、1回の試行に要する時間は最適化の結果に大きく影響する。

そこで、本章では先で導出した運動方程式を用いて動力学モデルをMATLAB/Simulink上で作成して運動軌道の生成を行う。これによってソフト間でのデータのやり取りが不要になる。また、後述のように環境とロボットとの接触力の計算を弾性接触法ではなく、拘束接触法を用いたものにする事で、積分時間の大きさを極端に小さくすることなく計算が可能になるため、シミュレーションの高速化が見込める。

3.6.2 順動力学による軌道の計算

導出された運動方程式において、立脚期間中（すなわち $\dot{z}_{toe} = 0$ ）は地面と足先との間ですべりが生じない（すなわち $\dot{x}_{toe} = 0$ ）とし、また股関節の水平位置はリニアレールで拘束されている（すなわち $\dot{x}_{hip} = 0$ ）とすると、立脚期では式 (3.35) が成り立つ。

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{E}\dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (3.35)$$

またこれを時間について微分して、

$$\dot{\mathbf{E}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{E}\ddot{\mathbf{q}} = 0 \quad (3.36)$$

式 (2.31), (3.36) の2式から、拘束力 \mathbf{f} と系の加速度 $\ddot{\mathbf{q}}$ は式 (3.37), (3.38) のように導出される。

$$\mathbf{f} = -(\mathbf{E}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}^T)^{-1}\{(\mathbf{E}\mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\tau} - \mathbf{H} - \mathbf{G}) + \dot{\mathbf{E}}\dot{\mathbf{q}}\} \quad (3.37)$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\tau} - \mathbf{G} - \mathbf{H}) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}^T\mathbf{f} \quad (3.38)$$

これらの式を用いれば、ロボットの状態 \mathbf{q} , $\dot{\mathbf{q}}$ と関節入力トルク $\boldsymbol{\tau}$ から、拘束力 \mathbf{f} と加速度 $\ddot{\mathbf{q}}$ を求めることができる。

3.6.3 運動軌道の生成手法

第2章では関節入力トルクをB-spline曲線でパラメータ化して最適化変数としたが、本章ではアクチュエータで制御可能な股関節と膝関節の角度軌道をパラメータ化して最適化変数とする。

関節角度軌道が急峻に変化するような場合、実機でその軌道を実現することは難しい。そこで、B-spline曲線の次数を4次に増やした。また、軌道を生成する時間を $T_{end} = 0.5[\text{sec}]$ とし、制御点ベクトルの要素数を14個（すなわち $N = 13$ ）として、式(2.45)～(2.48)に従ってB-spline曲線を使って各関節の目標角度軌道 $\theta_{i,tra}$ を生成した。

ただし、関節角度には制限があるため、非減少のノットベクトルを用いた場合に関数値が制御点の最大値、最小値の範囲内に収まるというB-spline曲線の性質を用いて、式(3.39)の範囲制約を与えた。

$$\theta_{i,min} \leq p_{i,k} \leq \theta_{i,max} \quad (k = 0, 1, \dots, N) \quad (3.39)$$

運動方程式に代入する関節駆動トルクは、B-spline曲線で生成した目標関節角度 $\theta_{i,tra}$ に対して式(3.40)で表されるPD制御を用いて算出される $\tau_{i,sim}$ を用いた。

$$e_{i,sim} = K_{p,sim}(\theta_{i,tra} - \theta_i) + K_{d,sim}(\dot{\theta}_{i,tra} - \dot{\theta}_i) \quad (3.40)$$

ただし、 $e_{i,sim}$ はモータモデルへの印加電圧、 $K_{p,sim}$ 、 $K_{d,sim}$ はそれぞれ比例ゲイン、微分ゲインである。この式で求められた印加電圧とモータの角速度を用いて、Simulink上で作成した図3.8に示されるモータモデルに入力することでモータの出力トルクを計算し、式(2.3)で表される出力動特性を考慮したトルク制限を通して関節モータのトルクを求めた。これに減速比 γ_i を乗算することで関節駆動トルク $\tau_{i,sim}$ を求めた。

以上の動力学計算をMATLAB/Simulinkで記述し、シミュレーションを行った。運動方程式を用いた運動制御シミュレーションの流れを図3.9に示す。

時刻 $T = 0$ では足先は地面に接しており、立脚状態から始まる。床反力の鉛直方向成分が $f_z \geq 0$ の間、立脚期の運動方程式に従って計算される。立脚期間中、 $-\mu_s f_z < f_x < \mu_s f_z$ を満たさず、足先が滑る場合はその時点で計算を

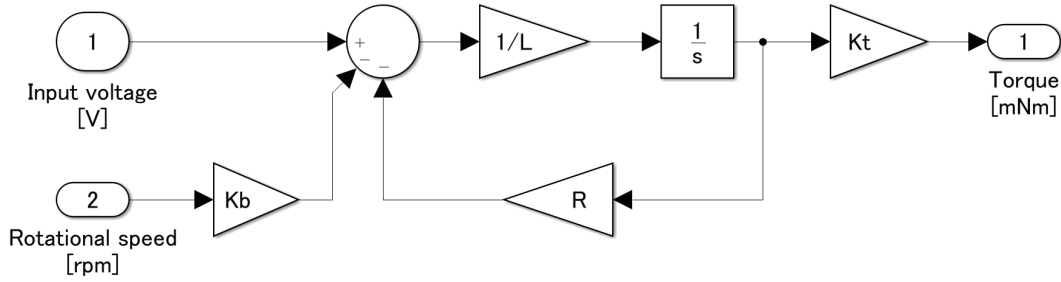


Fig. 3.8: Electromagnetic motor model

終了し評価関数を求める．摩擦係数は，事前に地面と足先の材質を考慮した測定の結果 $\mu_s = 0.69$ を用いた．ただし f_z が0の近傍ではこの不等式を満足しない場合が多く，正常にシミュレーションを進行することができなかったため，足先の滑りの検出は $f_z > 5[\text{N}]$ の時のみ行うこととした． $f_z < 0$ になったとき，足先は地面から剥がれる状態のため，足先の拘束条件を解除した遊脚期の運動方程式 (2.34) に切り替えて順動力学を計算する．なお，一度 $f_z < 0$ となり，空中期に切り替わったらロボットは跳躍したとみなし，その後 $z_{toe} \leq 0$ となる状態が生じたとしても立脚期の運動方程式に再度戻すことはしていない．空中期に，股関節の鉛直方向速度が $\dot{z}_{hip} < 0$ となったとき，股関節は最大到達高さに達したと判断し，シミュレーションの終了条件とする．このときの股関節の高さ z_{hip} を最高到達高さ h_{\max} として評価関数に用いる．

運動軌道の生成では，第2章と同様で，MATLABの非線形計画法ソルバである *fmincon* 関数を用い，最適化には内点法アルゴリズムを用いた．まず *MultiStart* 関数で，事前に用意した複数の初期値から局所最適化を行い，局所最適解を大域的に探索したのち，ここで得られた最適解を初期パラメータとして，再度局所的な最小化を行った．目的関数も同様とし，跳躍高さを最大化することを目的とした．

以上をまとめると，今回扱う最適化問題は次のように表される．

$$\text{minimize} \quad F = -h_{\max} \quad (3.41)$$

$$\text{subject to} \quad \text{Eq. (2.3), (3.35), (3.39)} \quad (3.42)$$

モデルの初期状態は， $\phi = 0 [\text{deg}]$ ， $\theta_h = 28 [\text{deg}]$ ， $\theta_k = 85 [\text{deg}]$ に設定した．今

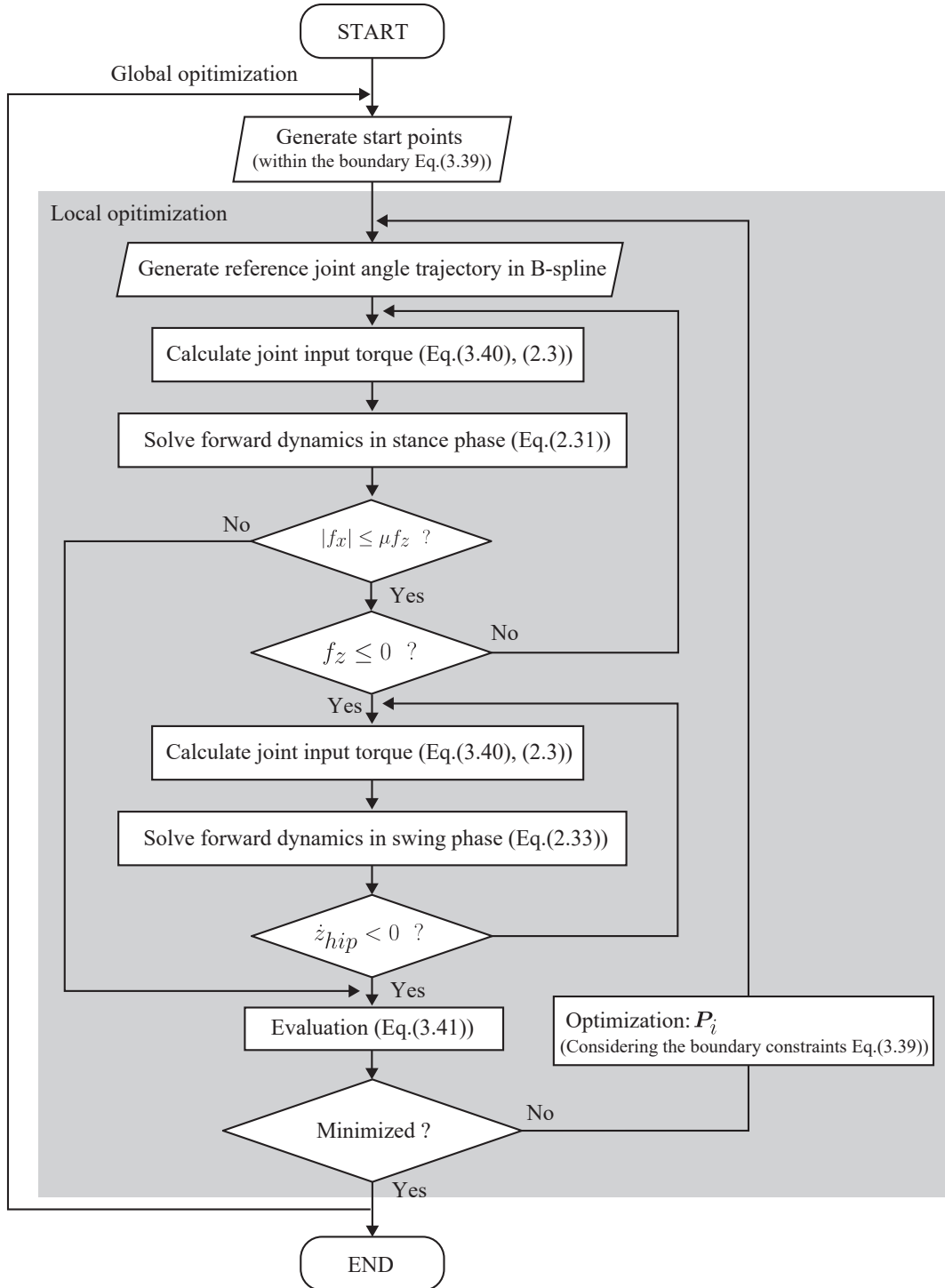


Fig. 3.9: Simulation scheme for vertical jump motion generation

回の軌道生成では，大腿部に搭載したワイヤ・プーリ機構と引張ばねで構成される機構の効果を検証することを目的に，機構を搭載したモデル (Model A) と搭載していないモデル (Model B) のそれぞれで最適化計算を用いた軌道生成を行い，それらの最高到達高さを比較した．比較のために，大域的最適化のための開始点の組み合わせや初期姿勢，その他のシミュレーションの条件はすべて一致させた．ただし，Model Aでは初期姿勢ですでに大腿部の引張ばねが伸張されていることに注意が必要である．

3.6.4 跳躍軌道生成の結果

Model A と Model B のそれぞれで跳躍高さ最大化を行った結果，得られた最高跳躍の運動軌道による股関節の最高到達高さを表3.7に示し，それぞれの跳躍の様子を図3.10に示す．各モデルの膝関節トルクと，Model Aの大腿部の引張ばねの変位を図3.11に示す．

軌道生成の結果，どちらも跳躍軌道を得ることができた．どちらの軌道も，跳躍の前に膝関節を屈曲して一度しゃがみこみ，その後膝関節を急速に伸展させて跳躍を実施している．しゃがみ込みの際に，股関節を伸展させていることがわかる．Model Aにおいてこの股関節の伸展動作は，大腿部の引張ばねを伸張させることになる．

機構の有無による比較を行う．表3.7から，大腿部の機構を搭載したModel Aのほうが高い跳躍運動が得られたことがわかる．図3.11(a)から，Model Bでは膝を伸展するトルクが離陸の前にアクチュエータの停動トルクに達して飽和している．一方で，Model Aのトルクはアクチュエータの最大トルクよりも約1[Nm]程度大きなトルクが膝関節に作用していることがわかる．図

Table 3.7: Comparison of the jumping height

	Model A	Model B
h_{\max} [mm]	401	374

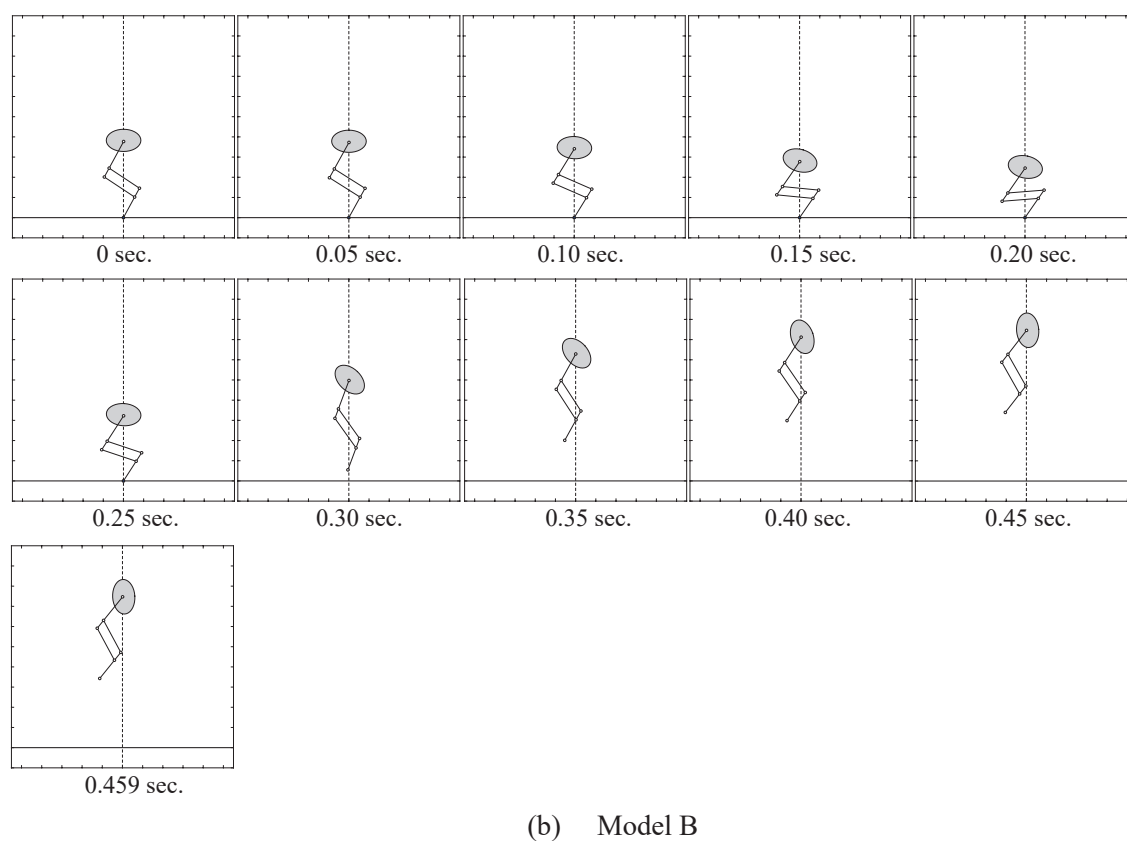
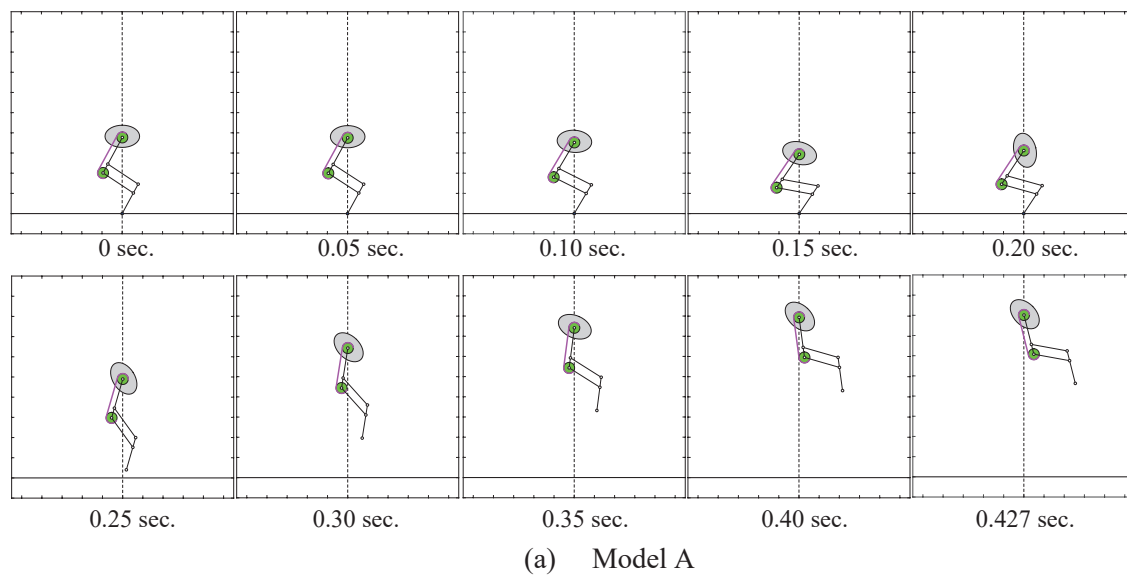


Fig. 3.10: Generated vertical jumping motion

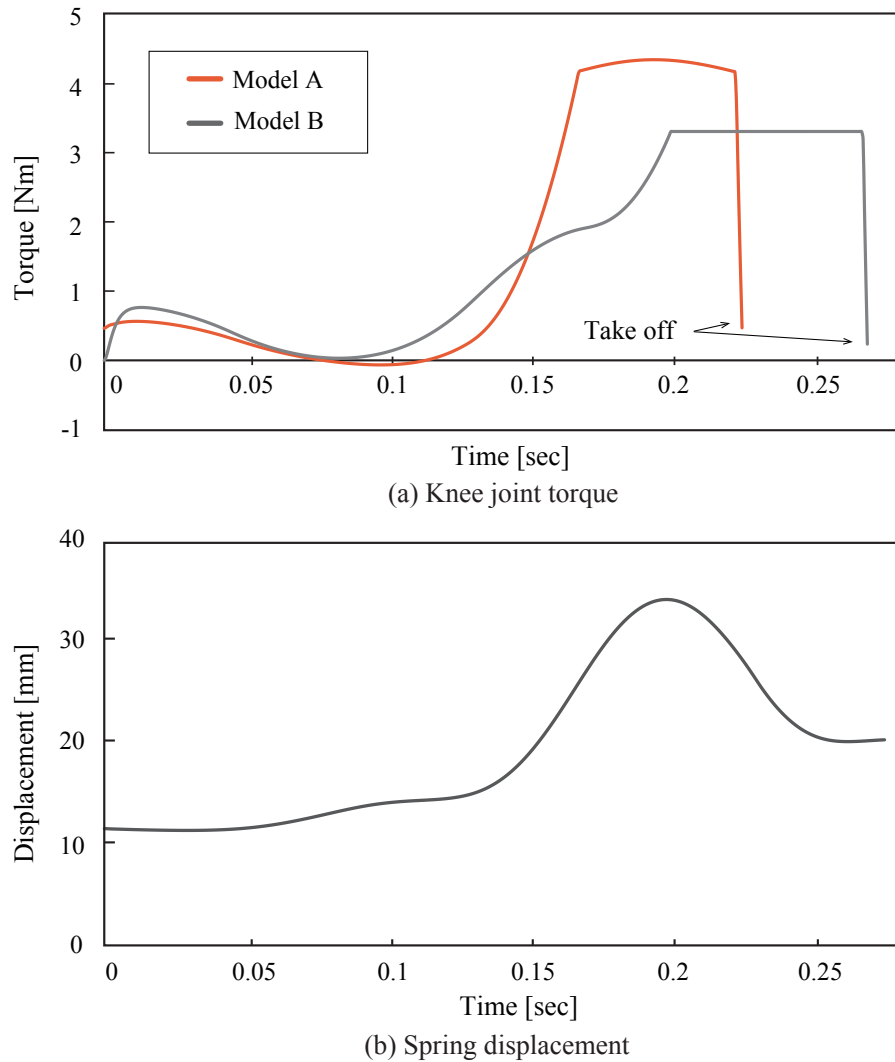


Fig. 3.11: Simulation results

3.11(b)を見ると，時刻0.15[sec]から0.2[sec]にかけて引張ばねが大きく伸張していることが確認できる．これはしゃがみ込み動作時，すなわち膝関節を屈曲する動作の際に，股関節を伸展することで引張ばねをより大きく伸張させており，股関節の駆動トルクが膝関節に伝達されたことによって，膝関節ではアクチュエータの最大トルクを超えたトルクが作用した．膝関節の伸展トルクが大きくなったことは，膝関節の伸展角加速度，ひいては角速度の向上につながり，これによって重心の鉛直上向き速度が大きくなって跳躍高さが向上したと考えられる．以上より，跳躍のようなダイナミックな運動に

においても、大腿部の機構は効果を発揮することがわかった。

ここで、Model AとModel Bを比較する際、初期に持つエネルギーの差がある。初期姿勢は両モデルとも同じで、静止姿勢としているため、重力によるポテンシャルエネルギーは等しく、運動エネルギーは0である。Model Aでは、初期姿勢で大腿部の引張ばねがすでに伸張しているため、初期状態で弾性エネルギーが蓄えられている。初期状態で蓄えられている弾性エネルギー U_{us} を式(3.3)を用いて計算すると0.28[J]である。ここで蓄えられていた弾性エネルギーがすべて重心の位置エネルギー U_p に変換されたと仮定すると、その大きさは約27[mm]となる。

第3.5章での解析結果とあわせると、今回提案した機構は脚の伸展に貢献し、消費電力を抑えつつ、脚の伸展に利用できるエネルギーを蓄えておくことができる可能性が示された。

3.7 実機実験

跳躍運動の軌道生成で得られた軌道に基づいて、試作機を用いて垂直跳躍実験を行った。実験の設備は第2章で用いたものと同様である。

ただし、今回の実験で電流制御を試みた際、各関節の引張ばねの復元力によるトルクによって振動的な挙動を示したため、電流制御によるトルク軌道をフィードフォワードで与えることが困難であった。そこで、最適解で得られた関節角度軌道を目標角度とした位置制御を適用した。具体的には、メインコンピュータから4[msec]毎にモータドライバへ目標モータ角度を指令し、モータドライバ内で位置制御が行われて関節モータに電流が与えられる。

軌道生成で得られた関節軌道を用いた実験での跳躍の様子を図3.12に示す。ただし、モデルとは左右反転していることに注意されたい。また、Model Aでの実験における各関節の角度変化と、大腿部の引張ばねの変位を図3.13に示す。ただし、網掛け部分は足先が接地している期間を示している。

実験の結果、機構を搭載したModel Aでの股関節の最高到達高さは420[mm]、機構を搭載しないModel Bでは340[mm]であった。機構を搭載したものの方が跳躍高さが約24%向上した。図3.13(b)より、跳躍の前に引張ばねが伸張して

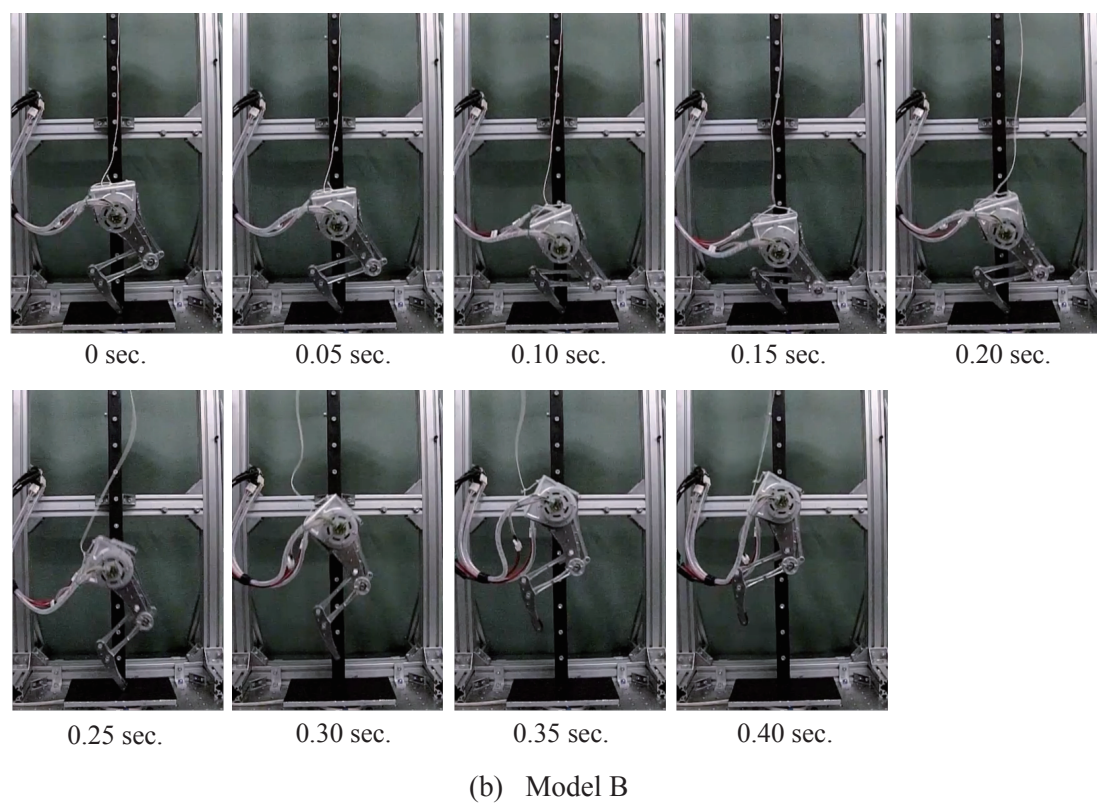
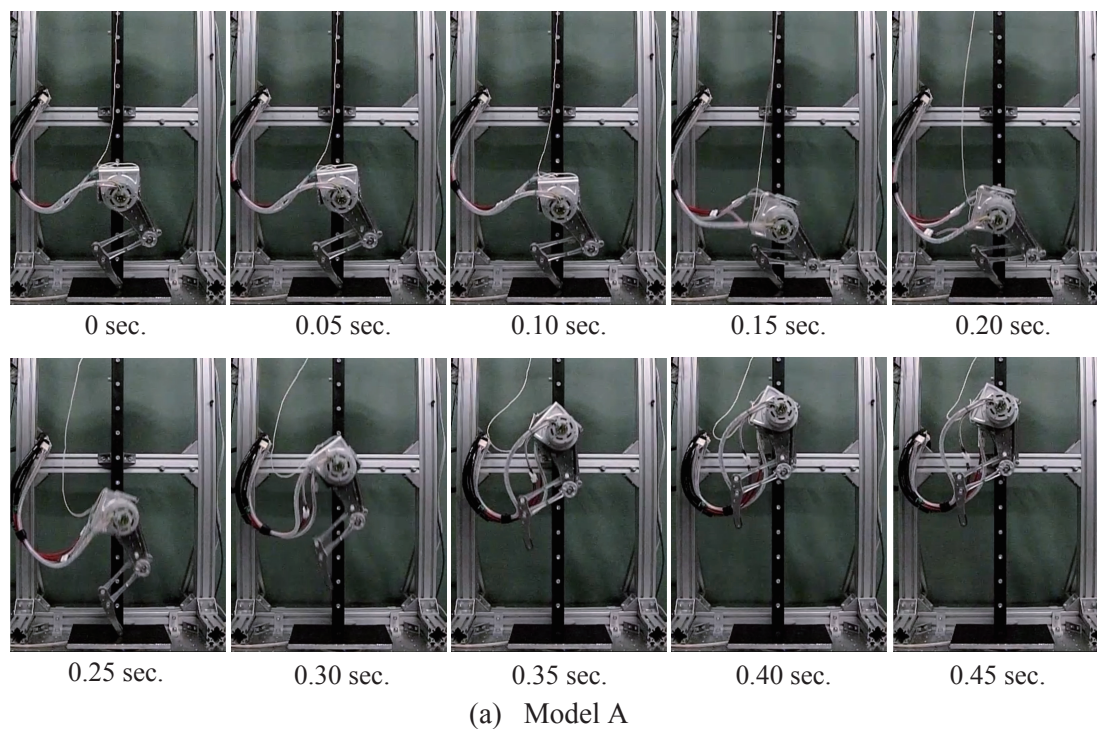
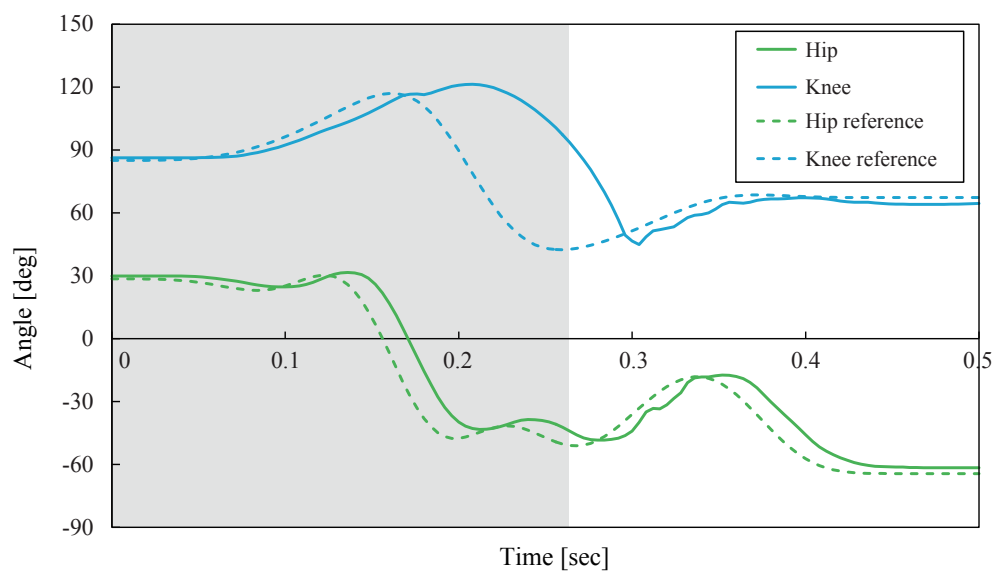
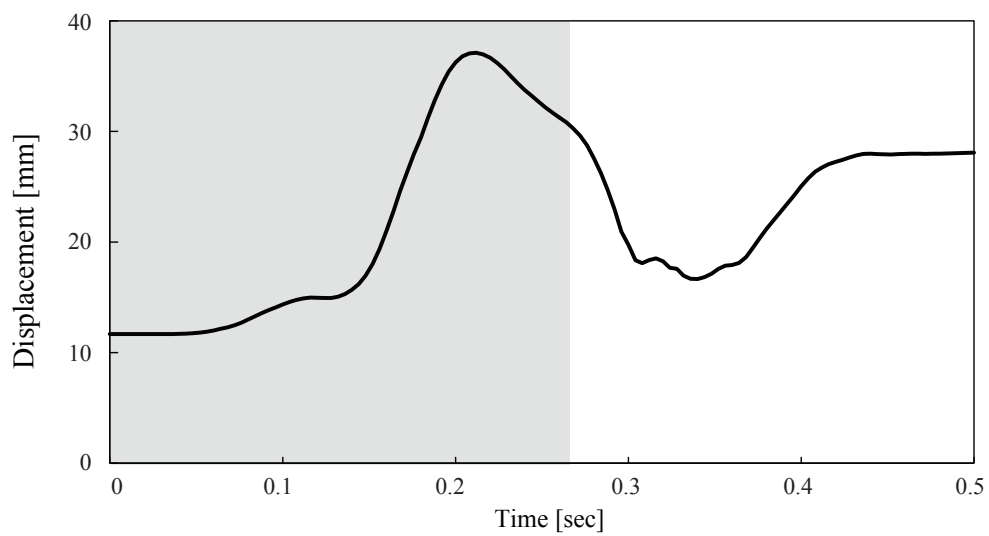


Fig. 3.12: Snapshots of the vertical jumping experiment



(a) Joint angle



(b) Spring displacement

Fig. 3.13: Experimental results

おり、膝の伸展とともにそれが解放されていることが確認できる．図3.13(a)と同時に見ると、股関節を伸展することで、引張ばねが伸張しており、シミュレーションに類似した挙動であることが確認できた．

一方で、シミュレーションと実機実験でロボットの運動中の姿勢を比較すると、特に空中期において差異が認められる．図3.13(a)の膝関節軌道を見ると、跳躍のための膝伸展運動において遅れが生じていることがわかった．この膝関節の追従遅れが運動に影響し、空中での姿勢の違いの要因になった可能性が高く、位置制御のゲインの調整が必要である．また、胴体から外部に引き出している配線やリニアレールの摩擦など、シミュレーション上では考慮していない外力が働いたことも、空中での姿勢の差異を引き起こした原因として考えられる．

3.8 本章のまとめ

本章では、大腿部に備わる脚の伸展に関わる筋・腱のうち、体積が非常に大きく、脚の運動への貢献が大きな股関節と膝関節の二関節筋群を規範とした脚機構を開発した．

まず、二関節間の筋腱複合体が股関節と膝関節間でトルクの伝達を行うことができること、また筋腱複合体の弾性要素としてのエネルギー蓄積と再利用の機能を有することから、ワイヤ・プーリ機構と引張ばねで構成される大腿部の機構を提案した．対象とする筋に抗重力筋としての役割があることから、静止した姿勢での各関節にかかる負荷トルクを解析し、機構によってモータの合計消費電力を低減することができることを示した．次に、ダイナミックな動作の一例として垂直跳躍運動を取り上げ、動力学モデルを用いて運動軌道の生成を行った．機構の有無による比較を行い、機構によって跳躍高さが向上することを確認した．最後に試作機を用いて、生成された軌道に基づいて跳躍実験を行い、シミュレーションと同様に機構による跳躍高さの向上を確認した．

第4章

大腿と下腿に生物規範機構を有する脚機構の開発

4.1 概要

第2章，第3章では，ネコ科の生物の下腿部および大腿部に備わる重要な筋腱複合体を規範とした脚機構を開発した．各機構は，それぞれ独立に設計され，1つの機構のみを持つ試作機によってその効果が検証された．本章では，これら2つの機構を搭載した脚機構を開発する．脚の伸展運動に貢献するこれら2つの機構をあわせて利用することにより，相乗的な効果が期待できる．一方で，複数の弾性機構を搭載したモデルでは，その弾性特性の組み合わせ次第で運動への効果は異なることが予想される．そこで，これまで同様に垂直跳躍運動の軌道生成を行うが，その際，機構の弾性特性を複数通りの組み合わせに変更し，望ましい効果が得られる機構の設計を行う．設計した機構で新たなロボットモデルを構築し，跳躍運動軌道の生成を行い，最後に実機実験にてその効果を検証する．

4.2 動力学モデルの作成

図4.1に，大腿部と下腿部の生物規範機構を搭載した脚機構のモデル図を示す．以降の軌道生成では，第3章で開発した試作機の下腿部の四節リンク機構のうちの，Shinリンクの後方のリンクを，引張ばねと直動シリンダで構成される弾性リンクに置き換えたモデルを用いることにする．また，運動制御に用いる動力学計算は，第3章で述べた運動方程式を用いたものと同様の方法で行う．

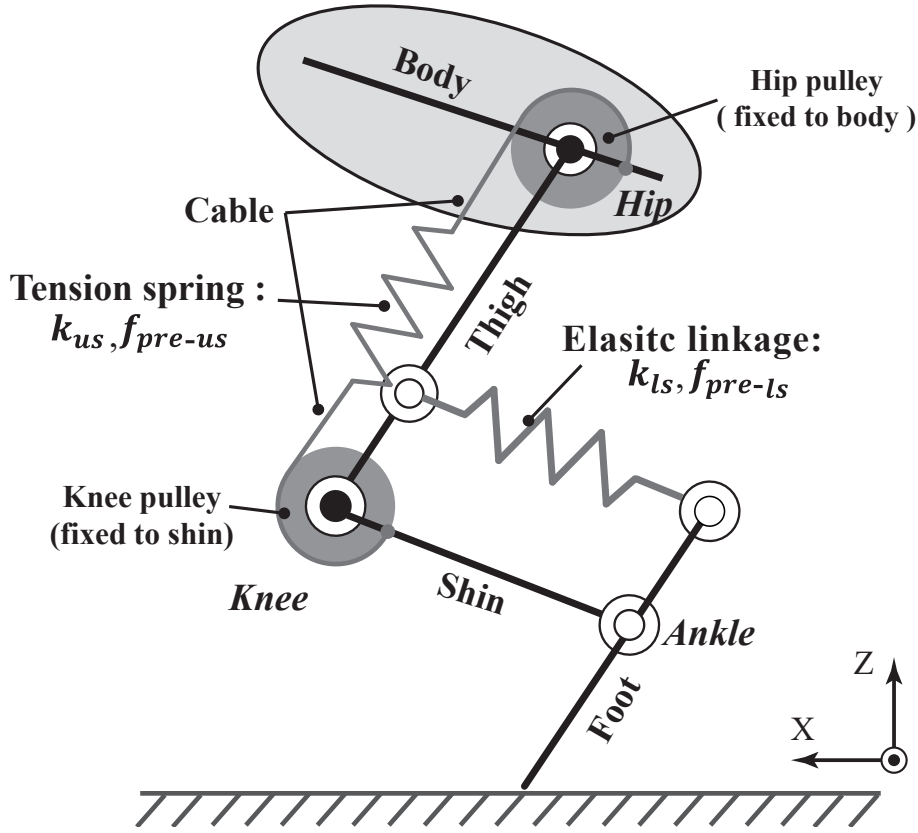


Fig. 4.1: Proposed bio-inspired leg mechanism

第3章で提案したワイヤ・プーリ機構と引張ばねで構成される大腿部の機構はロボットの運動学計算には影響しないため、本モデルの運動学は第2章で説明したものと同様になる。下腿の弾性リンクは、ロボットの質量の違いを考慮して $k_{ls} = 3.63[\text{N/mm}]$, $f_{ls-pre} = 12.75[\text{N}]$ のものを使用するものとする。大腿部の引張ばねは第3章で使用したものを用いる。

また本モデルの運動方程式は、ラグランジュの運動方程式 (2.36) のラグランジアン $L = K - U$ のポテンシャルエネルギー U を式 (4.1) で与えればよい。

$$\begin{aligned}
 U &= U_{ls} + U_{us} \\
 &= \frac{1}{2}(k_{ls}\Delta l_{ls} + 2f_{pre-ls})\Delta l_{ls} + \frac{1}{2}(k_{us}\Delta l_{us} + 2f_{pre-us})\Delta l_{us}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

ただし、第3章で説明したとおり $l_{us} < 0$ においては引張ばねは張力を発生しないため、 $U_{us} = 0$ となる。

なお，一般化座標は $\mathbf{q}(t) = [x(t), z(t), \phi(t), \theta_h(t), \theta_k(t), \theta_a(t)]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ であり， $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times 5}$ ， $\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ ， $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ ， $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ ， $\mathbf{E}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ である．環境との拘束条件は変わらない．床反力の鉛直成分 f_z の符号によって，立脚期と空中期を切り替えることで利用することができる．

EFLMを搭載することで，膝関節の可動域は $63[\text{deg}] \leq \theta_k \leq 134[\text{deg}]$ になった．ここで，下腿の弾性リンク l_{ls} が自然長 l_{ls0} 未満になったとき，弾性リンクは一体となって動作する．これをモデル上で表現するにあたり，弾性リンクが自然長未満になるときに足根関節の可動範囲に制限を与えることになることから，足根関節に式 (4.2) で表される非線形トルク $\tau_{a\text{-contact}}$ を与えることにした．

$$\tau_{a\text{-contact}} = \begin{cases} k_a(\theta_a - \theta_{a0})^3 + c_a\dot{\theta}_a & (\theta_a < \theta_{a0}) \\ 0 & (\theta_a \geq \theta_{a0}) \end{cases} \quad (4.2)$$

ただし， k_a ， c_a はそれぞれ剛性と粘性に相当する係数， θ_{a0} は弾性リンクが自然長のときの足根関節角度である．すなわち，足根関節が弾性リンクが自然長のときの角度を超えて侵入しようとするときに，その侵入量と侵入速度に応じて反トルクを発生する．係数は試行錯誤的に調整し， $k_p = 4000$ [Nm/rad³]， $k_d = 0.15$ [Nm·s/rad] に設定した．ここで足根関節は受動関節であるため，運動方程式の足根関節の駆動トルクは0である．式 (3.3) で表される反トルクをこれに加えることで，弾性リンクの変位の制限を与えた．

4.3 垂直跳躍運動の軌道生成と比較

これまでと同様に，股関節の最高到達高さ最大化を目的として垂直跳躍運動の軌道生成を行った．ここで，複数の弾性機構を有するシステムで，それらを協調的に利用することを考えたとき，ロボットの姿勢の影響やそれらの弾性特性の組み合わせによってロボットの運動に影響が及ぶことが考えられる．そこで，本章ではロボットの姿勢と弾性特性の組み合わせを変更して，跳躍高さを比較する．その手法として，軌道生成のB-spline曲線の制御点ベクトルと同時にこれらを最適化変数として，非線形計画法により最適

化を行う方法が可能である．しかし，パラメータが増えて最適化問題の非線形性がさらに強くなり，解の収束性が悪くなることや計算コストの増加が懸念される．そこで，本論文ではまずロボットの初期姿勢について3つの異なる姿勢で検証し，その後，弾性特性の組み合わせによる影響を検証することにする．

4.3.1 初期姿勢を変更した検証

まず，ロボットの初期姿勢を変更してロボットの跳躍高さを比較する．比較には，表4.1に示す3種類の姿勢を用いた．これらは，股関節の水平位置に対して，足先の水平位置を(1)直下，(2)前方，(3)後方にずらした姿勢である．ここで，初期のポテンシャルエネルギーの違いによる影響をなくすために，それぞれの初期姿勢において位置エネルギーと大腿部の機構に蓄えられた弾性エネルギーの和を等しくしている．なお，下腿の機構の弾性リンクは，初期姿勢において自然長であり，弾性エネルギーは蓄えられていない．

この3種類の初期姿勢それぞれで，同じ開始点群を用いて大域的な最適化による垂直跳躍の軌道生成を行った．それぞれで得られた股関節の最高到達高さが最大となった跳躍での結果を表4.2に示す．また，それぞれの跳躍運動の様子を図4.2に示す．

シミュレーションの結果，すべての姿勢で跳躍運動の軌道生成が行えた．

Table 4.1: Initial posture for comparison

	Body orientation	Hip joint angle	Knee joint angle
	ϕ [deg]	θ_h [deg]	θ_k [deg]
(1)	0	40	95
(2)	4	39	95
(3)	-2.5	40	94

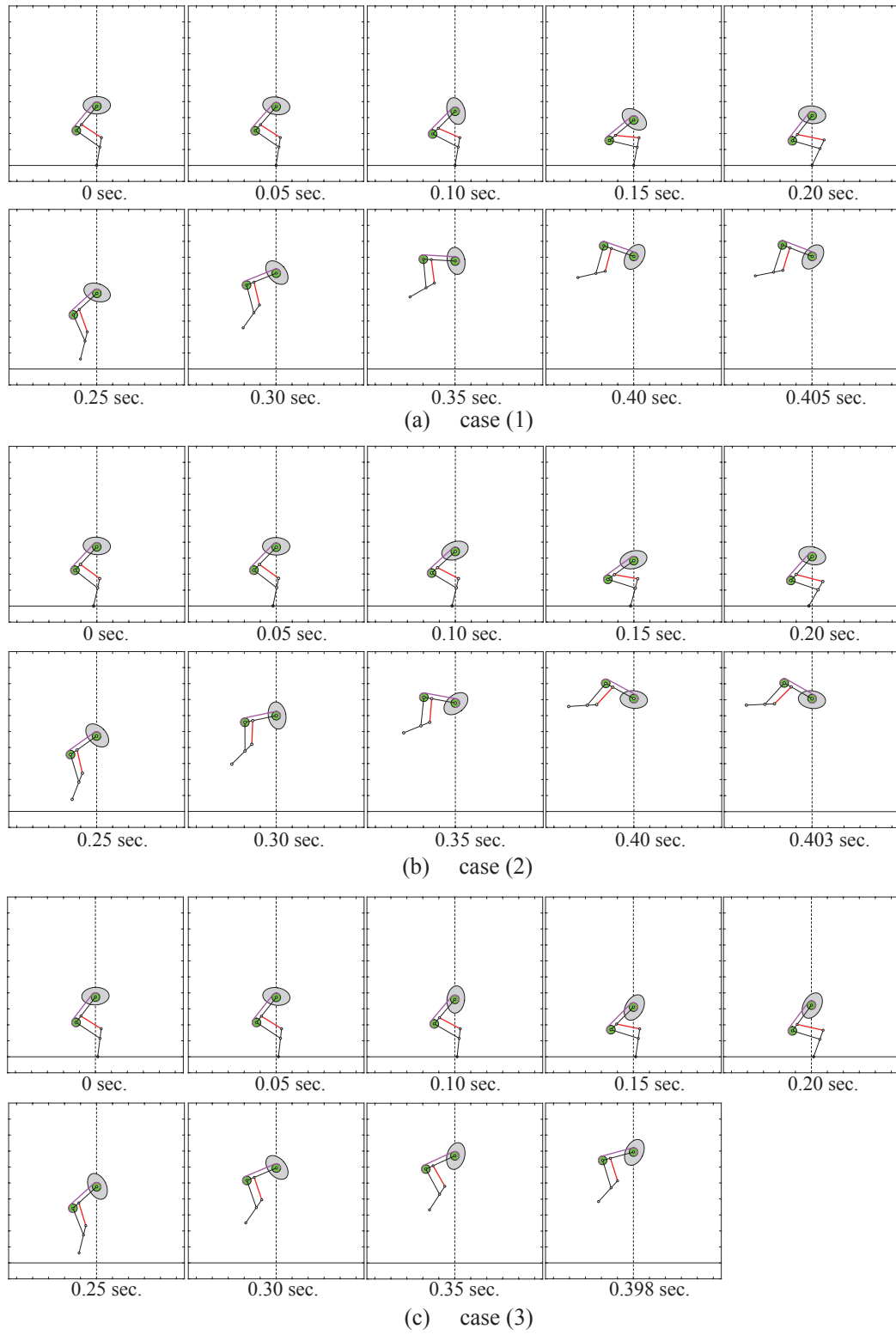


Fig. 4.2: Vertical jumping motion

Table 4.2: Simulation results

	Jumping height h_{max} [mm]
(1)	353
(2)	353
(3)	347

それぞれの最高到達高さには大きな差は見られなかった．一方で図4.2より，どの初期姿勢においてもロボットが空中で大きく回転していることが確認できる．ロボットの跳躍運動では，離地時にロボットが持っていた運動エネルギーが重力による位置エネルギーに変換される運動とみなせ，その運動エネルギーの位置エネルギーへの変換の割合が大きいほど高い跳躍が期待できる．しかし，ロボットが空中で回転していることは，離地時の運動エネルギーのうちの一部分が回転エネルギーに変換されて，すべてを跳躍に使えなかった可能性がある．今回の跳躍軌道生成では，ロボットの股関節位置を鉛直上に拘束しており，その拘束力が回転運動を引き起こす原因となった可能性も考えられる．

ロボットが跳躍後に着地することを考えた場合，空中で回転することは，その後の着地姿勢の制御を難しくする可能性があり好ましくない．そこで今後の展望として，ガイドの拘束力を排除し，空中での角運動量まで考慮した運動制御を導入することを考えている．

4.3.2 弾性特性の組み合わせを変更した検証

次に，下腿部と大腿部の弾性要素の特性の組み合わせによる跳躍運動への影響を検証する．それぞれの部位に搭載可能な引張ばねとして，表4.3に示すSpring I~IIIの3種類の剛性のばねを用意し，全9パターンの組み合わせで垂直跳躍運動の軌道生成を行った．なお，ロボットの初期姿勢は，前節で最高到達点での回転角度が最も小さかった(3)を用いた．

Table 4.3: Characteristics of tension spring for comparison

	(k [N/mm], f_{pre} [N])
Spring I	(1, 3)
Spring II	(3, 8)
Spring III	(5, 13)

前節と同様の開始点群を用いた大域的な探索によって得られた最適軌道での股関節の最高到達高さを表4.4に示す. 結果より, 確かに弾性特性の組み合わせが違いが跳躍運動に影響を及ぼすことが示された.

股関節の最大到達高さとは下腿・大腿の弾性要素の剛性との関係について考察する. 下腿部のばねの剛性に関わらず, 大腿部の引張ばねの剛性が高い方が跳躍高さが高い傾向が示された. これは第3章でも考察したよう

Table 4.4: Simulation results

	Spring		Result
	Lower leg mechanism	Upper leg mechanism	Height h_{max} [mm]
1	I	I	262
2	I	II	269
3	I	III	286
4	II	I	355
5	II	II	348
6	II	III	356
7	III	I	277
8	III	II	299
9	III	III	314

に，初期姿勢において弾性エネルギーが蓄えられているが，ばねの剛性が大きいほうが初期のエネルギーが大きいため，跳躍運動でそれが位置エネルギーに変換されて跳躍高さにつながったことが考えられる．一方で，下腿の弾性四節リンク機構については，Spring IIを用いたときに股関節の最高到達高さが最も高く，次いでSpring III，Spring Iの順となった．剛性が低いSpring Iの場合，跳躍による弾性リンクの伸張量は剛性が高い場合に比べて大きくなるが，EFLMにおいて足根関節が鈍角 ($\theta_a > 90$ [deg]) のときには足根関節軸の弾性リンク復元力のモーメントアームが短くなり，足根関節に及ぼされる伸展トルクは小さくなっていく．これは機構の持つ特性であり，跳躍動作のように大きな脚の伸展トルクが必要になる場合には望ましくない状態である可能性がある．剛性の高いSpring IIIを使用するよりも，Spring IIを使用した方が高い跳躍高さが得られた結果は非常に興味深い．これは単に弾性エネルギーの大きさだけでなく，運動の中での機構の挙動が脚全体の振る舞いに影響を与え，跳躍高さにつながった可能性が考えられる．

4.4 大腿部・下腿部の機構を搭載した脚ロボットの試作

4.4.1 2つの機構を搭載したロボットの開発

第2章，第3章で提案した2つの生物規範機構を搭載した新たな脚ロボットの試作機を開発した．機構を改良した新しい脚ロボットを図4.3に示す．

これまでの実験では，シミュレーション結果と実験結果の違いの要因の一つとして，ロボットから外部に多数出されている配線の影響が挙げられていた．そこで，本章で試作するロボットでは，関節モータを制御するためのモータドライバ2つを胴体リンクに搭載する．搭載する位置は，後述する新たな実験装置との接続部付近にした．これによって，外部と接続する必要がある配線数を削減することができ，さらにその配線はロボットの運動を拘束する治具の近くに集約されるため，運動への影響も小さくなることが期待できる．さらに，ロボットと実験装置との接続部は胴体の股関節から離れた位置にすることで，胴体リンクの股関節周りの慣性モーメントは大き

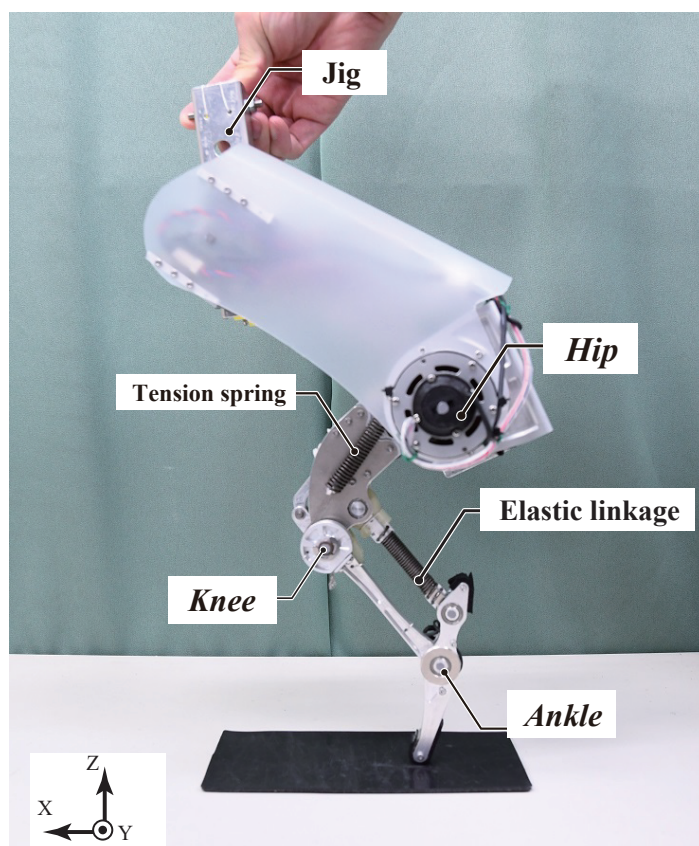


Fig. 4.3: Appearance of the prototype of one legged robot with lower and upper leg mechanism

くなる．これによって，運動中に胴体を振ることによる反動が運動へ影響を及ぼす．なお，実験装置はロボットの前後方向の自由度を付与するように変更し，その治具も変更されている．

改良した試作機の基本的な仕様は表4.5に示す．ただし，大腿部の引張ばねと下腿部の弾性リンクのばね定数と初張力は，実際に使用するものを測定した値を示している．以降のシミュレーションにおいてもこの値を利用することとする．ロボットを設計するにあたって作成した3DCADモデルに，各パーツの材料特性などを入力して算出されたモデルのパラメータを表4.6, 4.7に示す．なお，リンク番号は図4.4に従うものとする．

以上のように，モータ駆動のためのモータドライバを胴体に搭載したことで胴体の質量は115[g]増加した．また，拘束治具を股関節から遠方に取り

Table 4.5: Specifications of the prototype

Properties	Units	Values
Total mass	kg	1.37
Hip joint reduction ratio	-	5
Knee joint reduction ratio	-	5
Hip rotation range of motion	deg	$-85 \leq \theta_h \leq 65$
Knee rotation range of motion	deg	$45 \leq \theta_k \leq 129$
Upper leg spring coefficient k_{us}	N/mm	2.11
Upper leg Spring initial tension $f_{ini_{us}}$	N	0.0
Lower leg spring coefficient k_{ls}	N/mm	3.63
Lower leg Spring initial tension $f_{ini_{ls}}$	N	12.75

Table 4.6: Parameters of the prototype

Link	i	L_i [mm]	m_i [g]	I_i [kg·m ²]
Body	0	-	714	3.70×10^{-2}
Thigh	1	100	414	3.65×10^{-3}
Shin	2	90.0	36.4	4.27×10^{-4}
EL1	3	-	6.17	4.06×10^{-6}
EL2	4	-	4.85	3.05×10^{-6}
Foot	5	54.5	26.5	2.06×10^{-4}
Guide block	6	-	175	2.27×10^{-4}

Table 4.7: CoM positions of each linkage

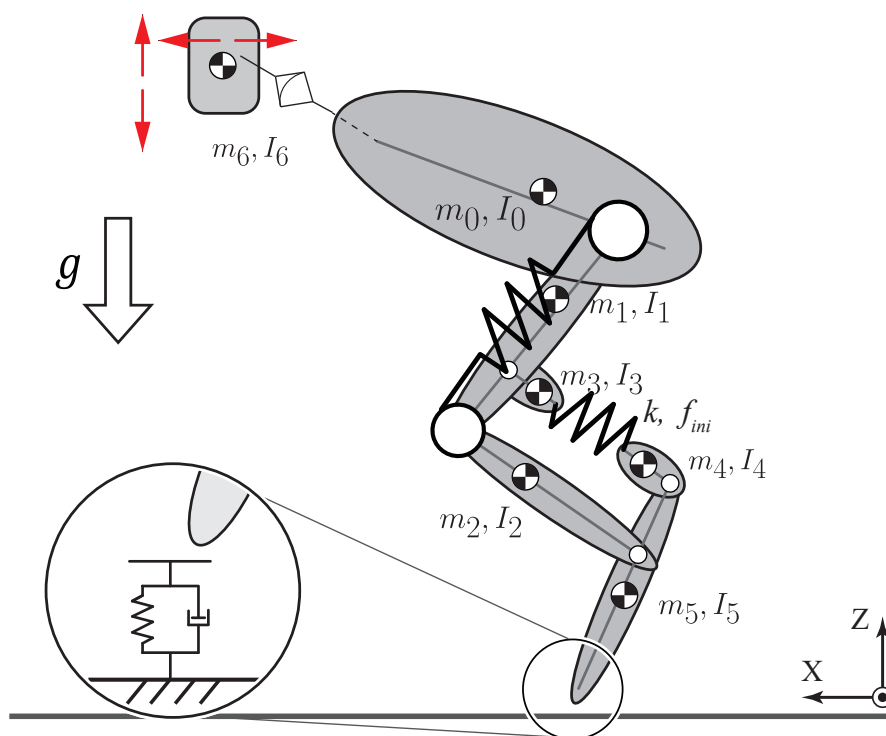


Fig. 4.4: Schematics of the simulation model of the robot leg with the lower and the upper leg mechanism

付けることによって、胴体の重心位置が股関節軸から遠ざかった．治具と胴体を合わせてたとき，股関節まわりの慣性モーメントは $1.18 \times 10^{-3} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ となり，第3章のものの約2倍である．ロボットの総質量は約310[g]増加した．

4.4.2 実験環境の改善

これまでの実験では，環境に対して股関節軸上でのロボットの回転および鉛直方向への並進のみが許容されるように運動拘束が施された．例えば，前方向への床反力が足先に加わった場合に，本来は胴体が前方に加速する運動が予想されるが，拘束によって股関節軸にガイドから後ろ方向への反力を受ける．このとき，下腿の二関節ばねは容易に伸張させられ，すなわちガイドの反力がばねを伸ばす要因になってしまう．これは本来の環境では発生しない力であり，機構の効果を明らかにするためにはこのような拘束は可能な限り排除することが望ましい．そこで，これまでのリニアレールを用いず，新たな実験装置を用意した．新しい実験装置の概略図を図4.5に示す．この装置は，ロボットが取り付けられたブームが，地面に固定された柱を中心に回転できるようなものである．ブームは平行リンク機構を構成し，ロボットは常に矢状平面と平行に運動できる．厳密には柱を中心にした曲面上の運動になるが，ブームを長くすることで無視できるようにする．この改良によって実験は難しくなるが，前後方向の拘束がなくなって，より自然な条件になる．

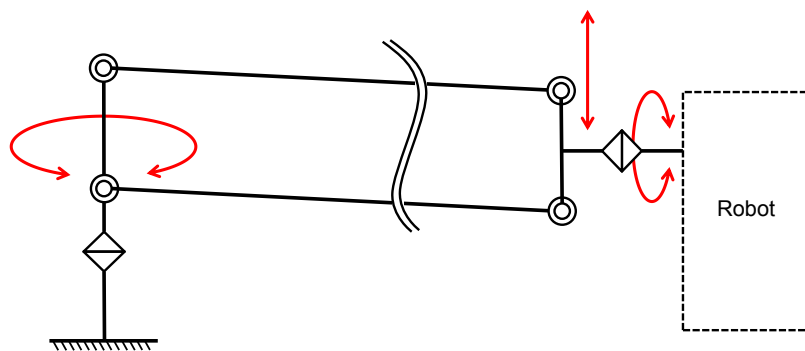


Fig. 4.5: The new experimental setup

4.5 垂直跳躍運動の軌道生成

4.5.1 軌道生成シミュレーションの設定

前節で改良した試作機と実験環境のモデルをもとに，新たに垂直跳躍軌道生成を行った．第2章の軌道生成と同様，ロボットのモデルを動力学シミュレータADAMS上で構築し，MATLAB/SimulinkとADAMSとのCo-simulation機能を用いた．ロボットモデルは3DCADで作成したものをインポートしており，部品の形状などのジオメトリ情報は継承されている．動力学モデルでは，新たな実験環境を想定したものになっており，ロボットの胴体に取り付けられた実験治具が矢状面上で並進運動のみできるように拘束してある．ロボットを構成するそれぞれのリンクには，実機を製作するにあたって作成した3DCADモデルで，部品材料などを設定して計算された重心位置，質量，慣性モーメントなどが入力されている．地面とパーツとの接触，パーツ同士の接触，弾性リンクの可動限界部での反力などの条件は，第2章と同じものを用いた．

軌道生成では，第2章のように，関節駆動トルクをB-spline曲線を用いて表現することでパラメータ化して，非線形最適化計算によって最適化する．シミュレーション時間は $T_{end} = 0.8[\text{sec}]$ とした．

ここで，これまでの軌道生成の結果を受けて，評価関数を式(4.3)のように変更した．

$$\text{minimize} \quad F = -w_1 \cdot \hat{h} + w_2 \cdot \hat{\phi} \quad (4.3)$$

$$\text{subject to} \quad |p_{i,k}| \leq \tau_{i,max} \quad (k = 0, 1, \dots, N) \quad (4.4)$$

ただし，

$$\hat{h} = \frac{h_{max} - h_{min}}{H_{max} - H_{min}} \quad (4.5)$$

$$\hat{\phi} = \frac{|\phi_1| - 0}{\Phi_{max} - \Phi_{min}} \quad (4.6)$$

ここで， \hat{h} ， $\hat{\phi}$ は，それぞれ1回の試行での最高跳躍高さ $h_{max}[\text{mm}]$ と，最高到達高さでの重心と足先を結んだ直線と地面の法線とのなす角 $\phi_1[\text{deg}]$ を無次元

化したものを表す．無次元化には，これまでの結果を参考に， $h_{min} = 0[\text{mm}]$ ， $H_{max} = 500[\text{mm}]$ ， $H_{min} = 0[\text{mm}]$ ， $\Phi_{max} = 90[\text{deg}]$ ， $\Phi_{min} = 0[\text{deg}]$ を用いた．重み係数 w_1 ， w_2 はそれぞれ， $w_1 = 0.8$ ， $w_2 = 0.2$ とした．評価関数の第2項は，空中でのロボットの回転を表す．これは，跳躍後の着地動作を想定して，空中でロボットが極端に回転して，着地が困難な姿勢になることを防ぐ役割がある．また，空中での回転運動を抑制することで，離地時のエネルギーを離陸後に位置エネルギーに変換される並進運動エネルギーに変換して跳躍高さを高くする効果も期待できる．

ロボットモデルは初期姿勢は $\theta_h = 0[\text{deg}]$ ， $\theta_k = 85[\text{deg}]$ として，重心が足先の鉛直上にくるようにした（このとき $\phi_0 = 0[\text{deg}]$ ）．初期姿勢において，弾性リンクは引張ばねが自然長であるため弾性エネルギーは蓄えられていない．

第3章からロボットが改良されて，ロボットの質量分布などが変化している．そこで，本章で新たに「大腿部・下腿部の両方の機構を搭載したモデル (Model C)」，「大腿部機構のみを搭載したモデル (Model D)」，「下腿部機構のみを搭載したモデル (Model E)」，「機構を搭載しないモデル (Model F)」の4種類のモデルを作り，同じシミュレーション条件で軌道生成を行った．なお，大腿部機構を搭載していないモデルは，大腿部のばねの張力を0に設定したものの，下腿部機構を搭載しないモデルは，下腿部の弾性リンクを自然長から長さを変化しない剛体リンクに置き換えたものである．これらのモデルの間で，大域的最適化に用いる5000点の開始点には同様のものを用いた．ただし，初期姿勢において，Model CとModel Dではすでに大腿部の引張ばねが伸張されていることに注意が必要である．

4.5.2 軌道生成の結果

Model CとModel Fの跳躍の様子を，それぞれ図4.6，4.7に示す．また，4種類のモデルで垂直跳躍運動の軌道生成を行った結果を，表4.8に示す．図4.8にModel Cのシミュレーションで得られた，関節角度変化，関節駆動トルク，大腿部，下腿部の引張ばねの長さ変化，ロボット全体の重心位置の変化を示す．

表から，大腿・下腿の両方のばねを搭載したモデルが，最も跳躍高さが高

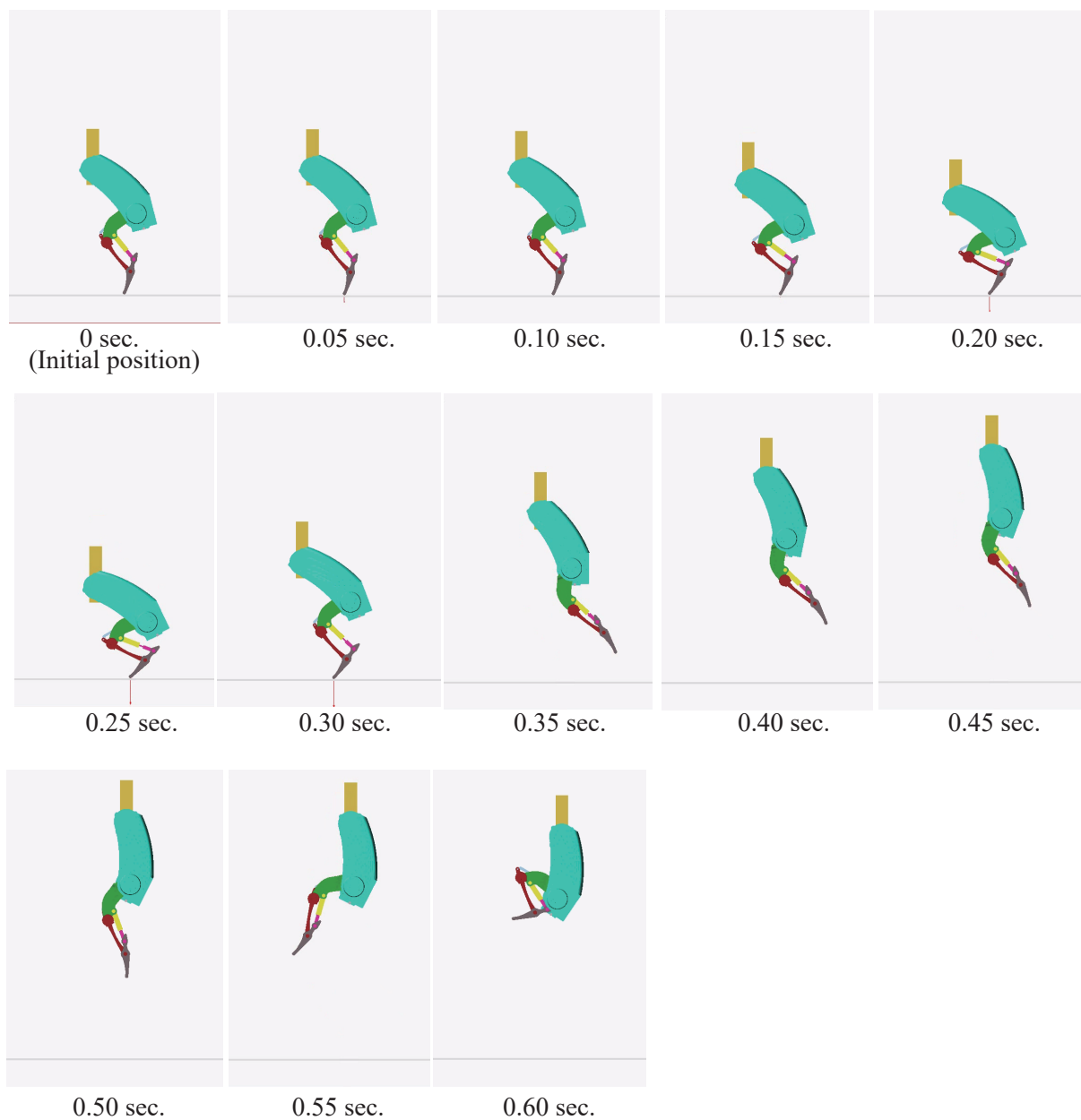


Fig. 4.6: Generated vertical jumping motion (Model C)

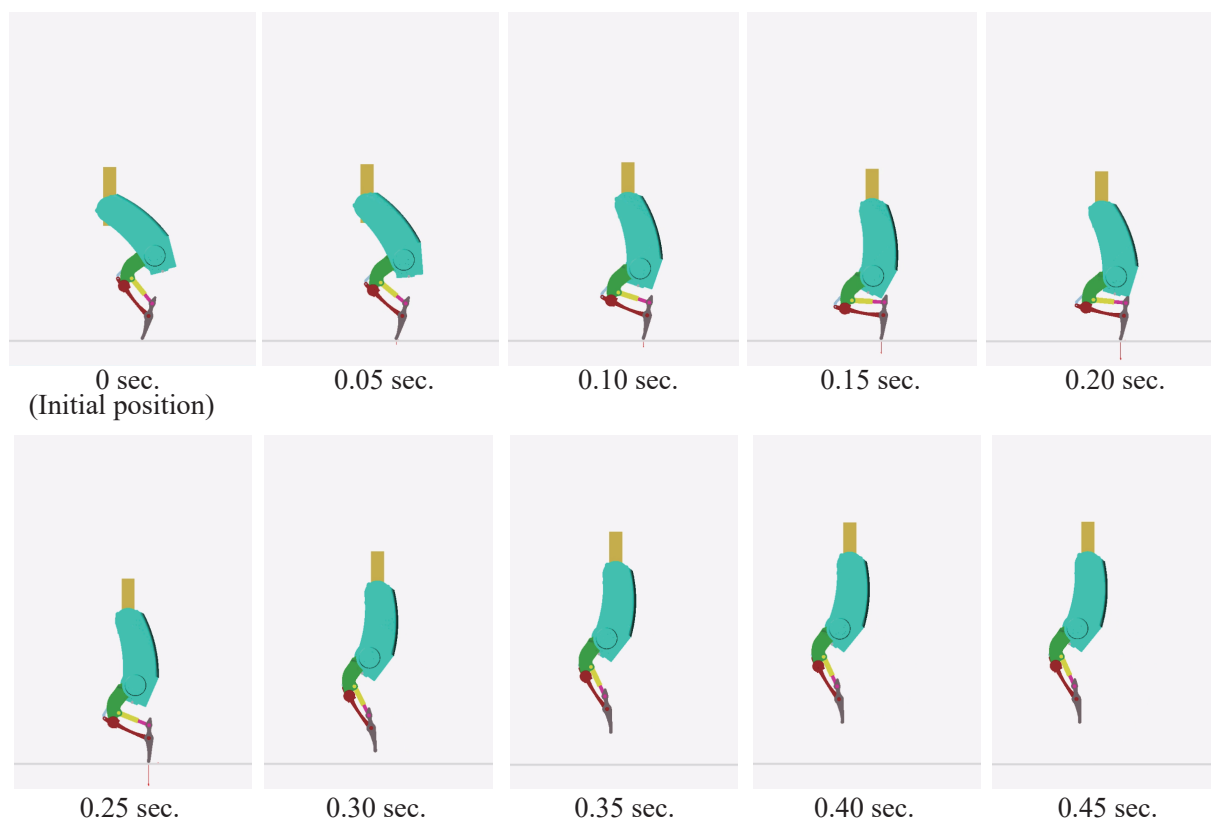


Fig. 4.7: Generated vertical jumping motion (Model F)

Table 4.8: Comparison of the results

	F	h_{max}	ϕ_1
	[-]	[mm]	[deg]
Model C	-0.6516	442	25
Model D	-0.5892	428	43
Model E	-0.5580	371	16
Model F	-0.5511	345	-0.40

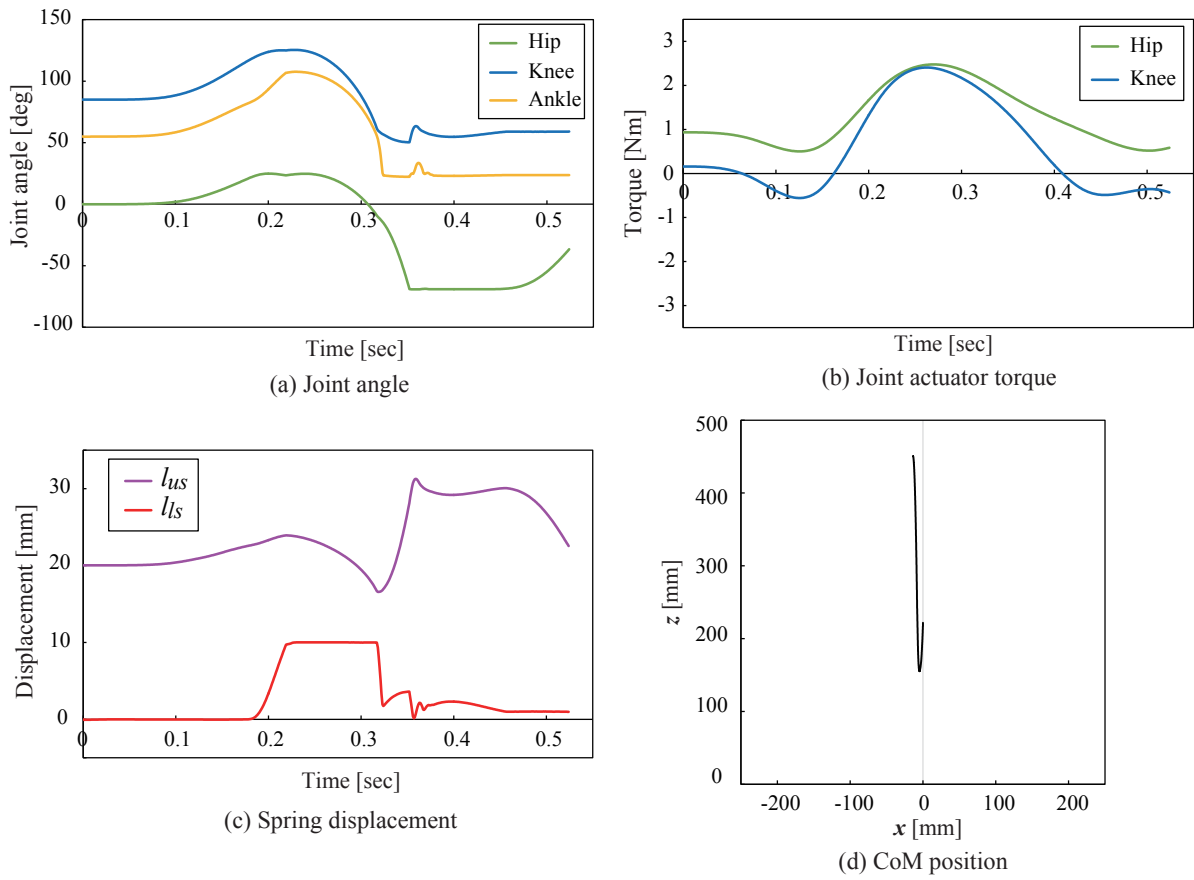


Fig. 4.8: Simulation results (Model C)

くなった．4つのモデルを比較すると，大腿部のばねが，跳躍高さの向上に貢献しているということが分かる．

大腿部のばねは，股関節と膝関節の間でエネルギーを伝達する機能を持つ．跳躍時には膝関節に大きな出力が要求されるが，股関節から伝達することで，これを補うことができる．また，ばねに蓄えられた弾性エネルギーは，膝関節の伸展の運動に利用できる．ばねを用いないモデルでは，前方の並進運動を伴うことがわかった．エネルギーが垂直高さ方向以外に使われている可能性が高い．

4.6 跳躍実験

4.6.1 実験環境

前節の軌道生成シミュレーションの結果に基づいて、実機を用いた跳躍実験を行った。制御システムは、第2章の図2.13のものに従う。実験では、股・膝関節の角度情報、モータの消費電流、足根関節角度と実験装置に対する胴体の角度(すなわち地面に対する胴体の角度)、足先の接地状態、および胴体の角速度を取得できる。関節駆動用のモータは電流制御で制御され、メインコンピュータでは制御周期2[msec]のリアルタイム制御が行われる。また、第2章と同様に、電流による目標トルクのフィードフォワード制御に加えて、図2.15のように位置のPDフィードバック制御を加える。

ロボットの拘束は、これまでのような前後方向への拘束を排除し、矢状面にのみ拘束されたものとなる。実験装置には、長さ約1.5[m]の軽量のCFRP製の中空パイプを使用したブームを用い、その先端にロボットが取り付けられている。ブームの重心移動の影響を小さくするために、ロボットが初期姿勢のときにブームが地面に水平になるように、回転軸の高さを調整した。ロボットと装置の接続部では、ロボットはピッチ回転運動が許容されている。このブームの総質量は約140[g]であり、ロボットの質量の約10%程度に相当する。実験は、大腿部と下腿部の両方の機構を搭載したModel Cの構成のロボットを用いて行った。

4.6.2 実験結果

初期姿勢でバランスをとるようにロボットを地面に置き、跳躍制御を実行した。ロボットはシミュレーション結果と同様に、一度しゃがみこんでから跳躍した。実験は複数回行ったが、初期姿勢が正しくとれていれば、繰り返し実験をしてもほぼ同じ運動が実行できた。表4.9に、前節で得られた軌道生成の結果と、今回の実験結果の跳躍高さおよび最高到達高さでの回転角(股関節と足先を結ぶ直線と地面法線とがなす角)を示す。図4.9に跳躍実験の様子を示す。また、図4.10, 4.11に実験時に取得したデータを示す。

Table 4.9: Results of simulation and experiment (Model C)

	h_{max} [mm]	ϕ_1 [deg]
Simulation	442	25
Experiment	446	78

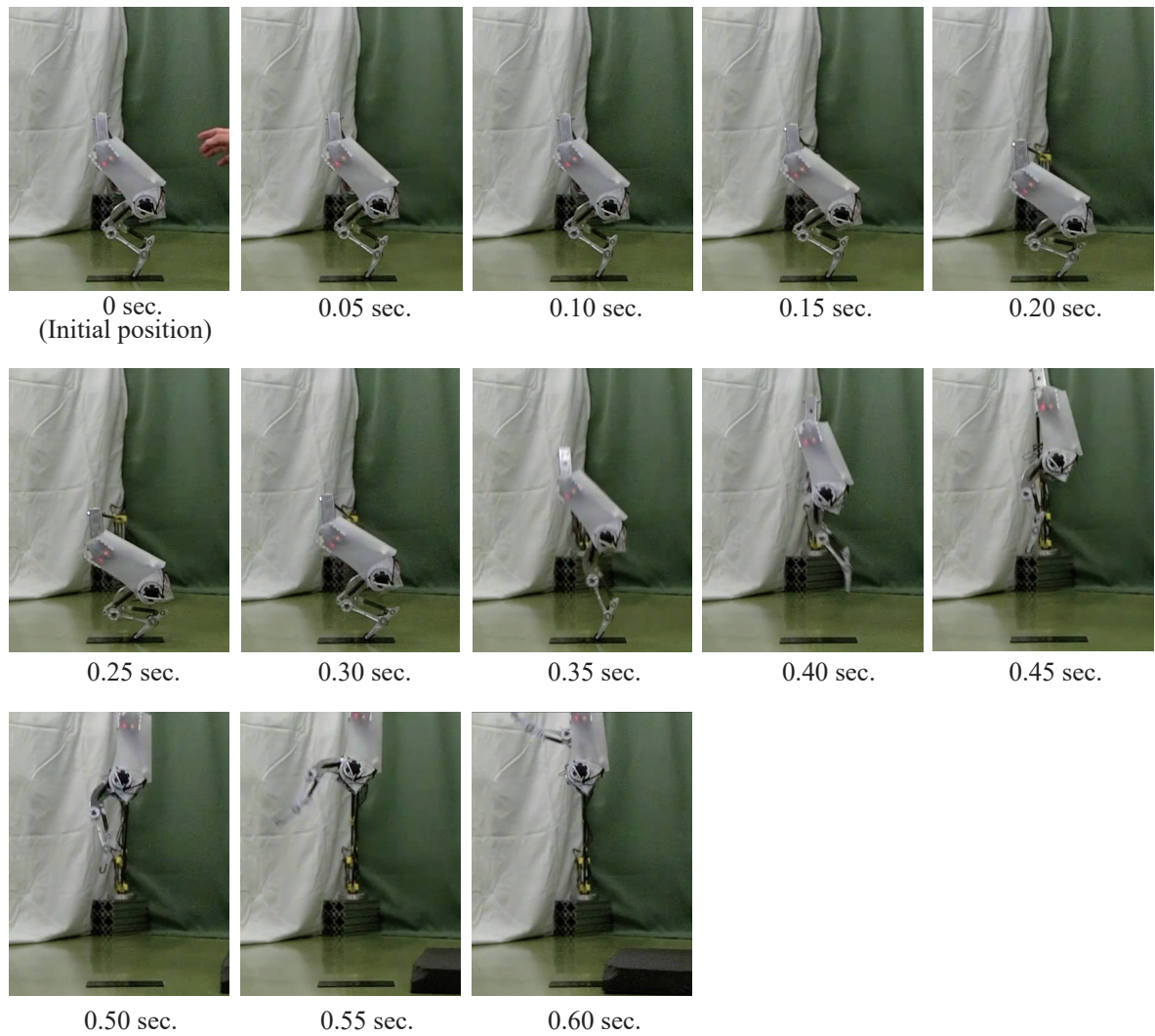


Fig. 4.9: Snapshots of the vertical jumping experiment

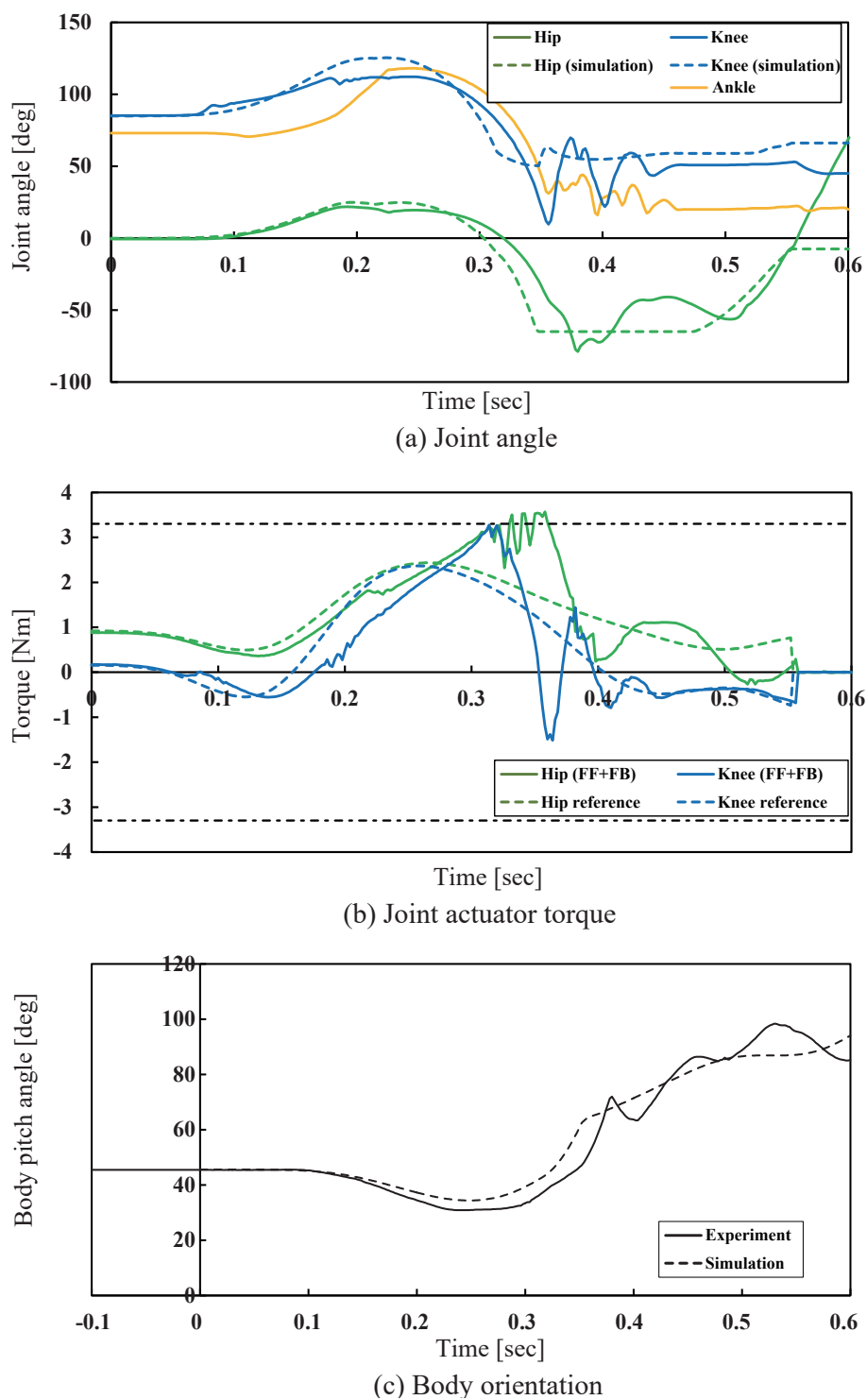


Fig. 4.10: Experimental results (Joint angle, drive torque and body orientation)

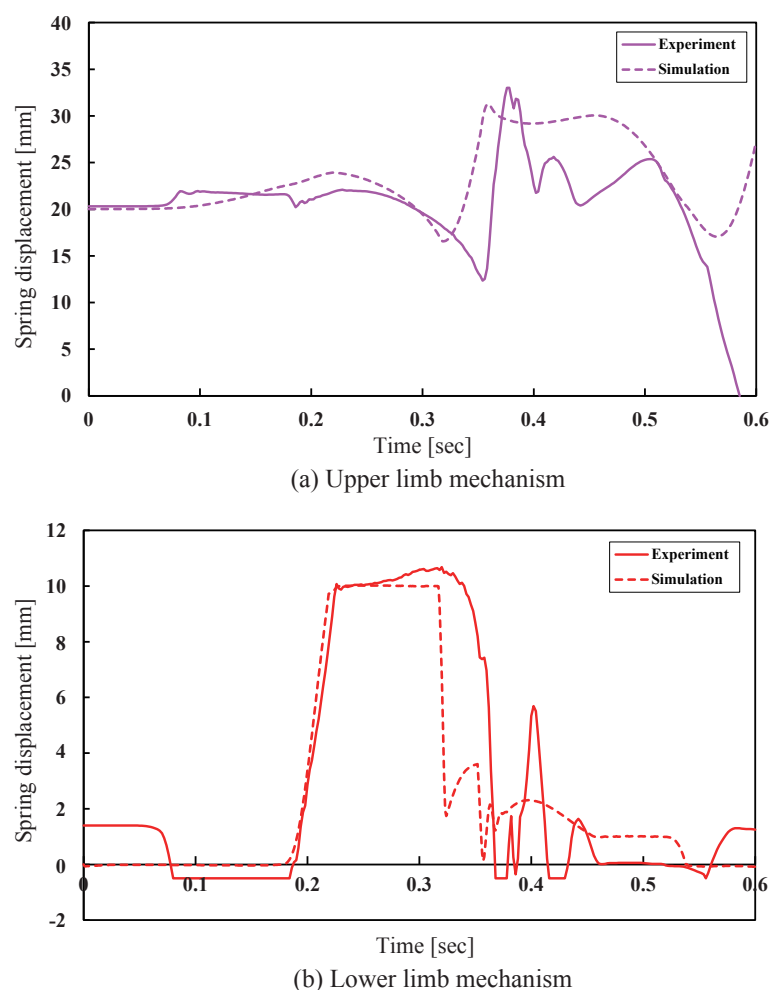


Fig. 4.11: Experimental results (Displacement of the springs)

図4.9と図4.11から，跳躍準備段階のしゃがみ込み時に大腿部および下腿部の弾性要素はともに引き伸ばされ，跳躍のための脚の伸展運動に合わせて放出されているのが確認できる．また，特に胴体の先端の実験治具とロボットの接続部分付近の運動に注目すると，シミュレーションと類似した軌道を描いているように見える．

実験データから，関節角度軌道には多少の追従誤差があることが確認できる．遊脚期には脚が振動してしまうのを防ぐために位置フィードバック制御のゲインを小さくしている．また，モーションデータが終了した時点で制御入力を0にしている．駆動トルクが0になると，大腿部の引張ばねの張力によって，股関節は屈曲方向に，膝関節は伸展方向にトルクが発生するた

め、最高到達点付近において、シミュレーションでは膝関節屈曲状態であるのに対して、実験では脚が伸展してしまっている。その影響で、表4.9のようにロボットの回転角はシミュレーションと実験で異なるが、図4.10(c)のように胴体の姿勢角はそれほど大きな違いはない。

4.7 本章のまとめ

本章では、第2章で提案した下腿部の二関節間の筋腱複合体を規範とした機構と、第3章で提案した大腿部の二関節間の筋腱複合体を規範とした機構とを統合した生物規範型の脚機構を提案した。それらを協調的に利用するために、それぞれの機構の弾性要素の特性の組み合わせを変化させて運動への影響を調査した。その後、2つの生物規範機構を統合した脚ロボットを試作し、動力学モデルを構築して垂直跳躍運動の軌道生成を行った。機構の有無による比較を行い、両方の機構を搭載したモデルで最も高い跳躍軌道が生成された。シミュレーションによって生成された軌道に基づいた垂直跳躍実験の結果、ロボットは跳躍に成功し、生物のそれに類似した運動が実現できた。以上を通して、複数の二関節間筋腱複合体を規範とした機構を搭載した脚ロボットでダイナミックな運動を実現した。

第5章

結論と今後の展望

本研究では，脚式移動ロボットでのダイナミックな運動の実現を目的として，生物の脚部の筋骨格構造を規範としたロボットの脚機構を開発した．本章では，本論文で述べた研究成果をまとめる．最後に本研究の今後の展望について述べる．

5.1 本研究による成果

まず，ロボットの社会的需要から脚式移動ロボットの活動領域の拡大のために，走行や跳躍といったロコモーションが有効な手段であるが，現状の脚ロボットでそのような俊敏な運動が困難である原因が従来の設計手法にあることを説明した．自然界で高度な運動能力を実現する生物の筋骨格構造をロボットに取り入れることがこの解決手段の1つであるとして，生物の筋骨格構造の持つ弾性要素としての役割と，筋や腱の配置が運動に貢献していることを参考にした新しい機構をロボットに導入することで問題解決につながる可能性を説明した．これまでの生物の脚部の構造や機能を参考として開発された脚式移動ロボットの特徴についてまとめ，未だ生物の運動能力に到達しないことを説明した．そこで，本研究では弾性要素を用いた生物の筋骨格構造を規範とする脚機構の開発と運動制御を目的に設定した．

この目的のもと，まずは生物界でも運動能力の高いネコ科の生物の後肢下腿の筋骨格構造を参考として，その中でも運動への貢献が大きな腓腹筋とアキレス腱で構成される筋腱複合体を規範とした脚機構の開発した．この筋腱複合体の配置と機能を明確化して，筋腱複合体の持つ弾性エネルギー蓄積・再利用機能と，二関節筋の持つ関節間のトルク伝達機能をもつという点に着目して提案した弾性四節リンク脚機構を提案した．動的な運動の

実現のために、電磁モータと低減速比の減速機で構成される高いバックドライバビリティを確保したアクチュエータと弾性リンクから構成された脚ロボットを設計、試作した。また運動制御のために、脚ロボットの弾性要素を含む多リンク動力学モデルを構築し、ダイナミックな運動の一例として垂直跳躍運動を取り上げて軌道生成を行った。この軌道生成手法は、関節の入力トルク軌道をパラメータ化し、非線形最適化計算を用いて跳躍高さの最大化するものである。その結果、弾性リンクを活用した生物の跳躍運動に類似した垂直跳躍運動軌道の生成に成功した。この結果に基づく試作機を用いた実機実験を通して、提案した機構の有効性を示した。

次に、大腿部に備わる骨格筋の中でも脚の伸展に関わる筋・腱のうち、体積が非常に大きく、運動への貢献が大きいとされる股関節と膝関節の二関節筋群を規範とした脚機構を開発した。注目した二関節間の筋腱複合体が股関節と膝関節間でトルクの伝達を行うことができること、また筋腱複合体の弾性要素としてのエネルギー蓄積と再利用の機能を有することから、ワイヤ・プーリ機構と引張ばねで構成される大腿部の機構を提案した。対象とする筋が抗重力筋としての役割があることから、静止した姿勢での各関節にかかる負荷トルクを解析し、機構によってモータの合計消費電力を低減することができることを示した。この脚ロボットの動力学モデルを用いて、先と同様の方法を用いて垂直跳躍運動軌道の生成を行い、機構の有無による比較をすることで、機構によって跳躍高さが向上することを確認した。生成された軌道に基づいて試作機で跳躍実験を行い、シミュレーションと同様に機構による跳躍高さの向上を確認した。

最後に、ここまで提案した下腿部の二関節間の筋腱複合体を規範とした機構と、大腿部の二関節間の筋腱複合体を規範とした機構とを統合した生物規範脚ロボットを開発した。これらを協調的に利用するために、それぞれの機構の弾性要素の特性の組み合わせを変化させて運動への影響を調査した。2つの機構を統合した脚ロボットを試作し、動力学モデルを構築して垂直跳躍運動の軌道生成を行った。機構の有無で運動を比較した結果、両方の機構を搭載したモデルで最も高い跳躍軌道が生成された。この生成された軌道に基づいた垂直跳躍実験の結果、ロボットは跳躍に成功し、生物のそ

れに類似した運動が実現できた．以上を通して，複数の弾性要素を含む脚ロボットでダイナミックな運動を実現できる可能性を示した．

5.2 今後の展望

5.2.1 他動作への展開

本論文では提案した生物規範型の脚ロボットによる俊敏な運動の実現可能性を検証するために，ダイナミックな動作の一例として垂直跳躍運動を取り上げ，ロボットの自由度をリニアガイドによって拘束した上での軌道生成と実験にてその効果を示した．開発した脚機構は，上方への跳躍のみならず，前方への推進など2次元平面内での運動が可能であり，他動作でも提案機構が運動へ貢献することは期待できる．本論文で提案した運動軌道生成手法は，評価関数や拘束条件を適切に設定することで，垂直跳躍以外の運動にも拡張可能であると考えられる．そこで，本論文で開発した脚ロボットと軌道生成方法を用いて，他動作における提案機構の作用について検証する．

5.2.2 着地まで考慮した運動制御

本論文では，静止状態から胴体を上方に持ち上げて離地して最高到達高さに達するまでの運動を扱った．脚式移動ロボットのロコモーションで脚は離地したのちに必ず着地を伴う．本論文で脚機構に導入した腓腹筋とアキレス腱で構成される筋腱複合体では，着地時の衝撃によって引き伸ばされて弾性エネルギーを蓄積し，その後の蹴り出し動作でそれを運動エネルギーとして利用できることから，生物は効率的な走行やホッピングを行えていることがわかっており，提案した脚機構でも同様の効果が期待される．機構に組み込まれた弾性要素にエネルギーを蓄えるには適切な着地制御の開発と実装が必要である．具体的には，着地に適した姿勢になるよう空中で姿勢制御を行うことと，着地の床反力によって弾性要素が変形するように関

節剛性の制御を行う必要があると考えている．これらにより振動も含んだ着地制御について検討し，跳躍から着地までの一連の動作をロボットで実現する．

5.2.3 生物規範脚機構を有する四脚ロボットの開発

哺乳生物の多くは四肢を有し，高い運動能力を有するネコ科の生物をはじめとしてその多くは四肢すべての移動に利用している．本研究ではネコ科の生物の筋骨格構造を規範とした脚機構を開発した．工学的に見ても，足の接地部を点とみなした場合は，静的に安定して歩容可能な最低脚数は4であり，移動性などを考慮しても四脚を有するロボットは有利である．そこで，本論文で開発した生物規範型の脚機構を搭載した四脚ロボットを開発し，弾性要素のエネルギー蓄積と放出を活用した高速・高効率な走行運動の実現を目指す．

謝 辞

研究室配属から今日に至るまで，本研究を遂行するにあたって多くの方に支えていただきました．

学部4年次の研究室配属以降，研究活動において熱心にご指導いただき，進路などの面においても様々なご助言をいただいた電気通信大学 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻 明愛国 教授に深く感謝いたします．

学位審査にあたり，電気通信大学 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻 横井浩史 教授，田中一男 教授，内田雅文 教授，田中基康 准教授には，本論文の審査委員を快く引き受けていただきました．また，審査を通じて非常に有意義なご指摘やご助言をいただきました．心より謝意を表します．

研究室配属時から，様々なご指導，ご助言を賜りました電気通信大学名誉教授 下条誠 先生に深く感謝いたします．

本研究において共同で研究を遂行し，多くのご助言をいただいた北京理工大学の Qiang Huang 教授，Zhangguo Yu 准教授，Fei Meng 博士，Huaxin Liu 博士，Xuxiao Fan 博士，Beijing Advanced Innovation Center for Intelligent Robots and Systems の方々に心より感謝いたします．フランス高等機械大学院大学の Jean-Yves Choley 教授には留学中の研究活動においてご指導，ご助言を賜り，生活面においてもご支援いただきました．心より感謝いたします．

そして，これまで共に研究を遂行し，様々なご指摘，ご助言をしていただいた機械知能システム学専攻 明研究室の諸先輩方，同輩方，後輩方に感謝いたします．本研究の一部は，同じ研究グループの，特に日浅崇馬君との共同研究の成果が含まれます．同研究グループメンバーの協力に，心より感謝いたします．

本研究の一部は日本学術振興会，科学研究費補助金（特別研究員奨励費）により行われました．記して謝意を表します．

参考文献

- [1] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: “The Development of Honda Humanoid Robot,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1321–1326, 1998.
- [2] Y.Ogura, H.Aikawa, K.Simomura, H.Kondo, A.Morishima, H.Lim and A.Takanishi: “Development of a new humanoid robot WABIAN-2,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 76–81, 2006.
- [3] T. Buschmann: “Simulation and Control of Biped Walking Robots,” Ph.D dissertation, Technische Universität München, 2010.
- [4] 小島, 唐澤, 上月, 黒岩 他: “高速大出力ヒューマノイドの研究用プラットフォーム JAXON の開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 34, no. 7, pp. 458–467, 2016.
- [5] 広瀬, 有川: “研究用プラットフォームとしての普及型歩行ロボット TITAN-VIII の開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 17, no. 8, pp.1191–1197, 1999.
- [6] S. Kitano, S. Hirose, A. Horigome and G. Endo: “TITAN-XIII: Sprawling-type Quadruped Robot with Ability of Fast and Energy-efficient Walking,” ROBOMECH Journal, vol. 3, no. 1, 2016.
- [7] 阿江, 横井, 宮下, 大木, 渋谷, 橋原: “疾走中の地面反力の変化: 疾走速度の増大による影響”, 日本体育学会第35回大会, p. 381, 1984.
- [8] R. McN. Alexander: “The Maximum Forces Exerted by Animals,” J. Exp. Biol., vol. 115, no. 1, pp. 231–238, 1985.
- [9] N. C. C. Sharp: “Timed running speed of a cheetah (*Acinonyx jubatus*),” J. of Zoology, vol. 241, issue 3, pp. 493–494, 2009.

- [10] P. E. Hudson, S. A. Corr, R. C. Payne-Davis, S. N. Clancy, E. Lane and A. M. Wilson: "Functional Anatomy of the Cheetah (*Acinonyx jubatus*) Hindlimb," *J. of Anta.*, vol. 218, no. 4, pp. 363–374, 2011.
- [11] G. A. Cavagna, N. C. Heglund and C. R. Taylor, "Mechanical Work in Terrestrial Locomotion: Two Basic Mechanisms for Minimizing Energy Expenditure," *The American journal of physiology*, vol. 233, no. 5, pp. R243–R261, 1977.
- [12] R. McN. Alexander: "Elastic Energy Stores in Running Vertebrates," *Integrative and Comparative Biology*, vol. 24, Issue 1, pp. 85–94, 1984.
- [13] R. McN. Alexander: *Elastic Mechanisms in Animal Movement*. Cambridge University Press, 1988.
- [14] C. T. Farley, J. Glasheen and T. A. McMahon: "Running Springs: Speed and Animal Size," *J. of Experimental Biology*, vol. 185, pp. 71–86, 1993.
- [15] M. Goto, M. Kawai, M. Nakata, K. Itamoto, H. Miyata, Y. Ikebe, T. Tajima and N. Wada: "Distribution of muscle fibers in skeletal muscles of the cheetah (*Acinonyx jubatus*)," *Mammalian biology*, vol. 78, issue 2, 2013.
- [16] G. J. van Ingen Schenau, M. F. Bobbert and A. J. van Soest: "The Unique Action of bi-Articular Muscles in Leg Extensions," *Multiple Muscle Systems: Biomechanics and Movement Organization*, Springer Verlag, pp. 639–652, 1990.
- [17] T. Spägle, A. Kistner and A. Gollhofer: "Modeling, Simulation and Optimization of a Human Vertical Jump," *J. Biomechanics*, vol. 32, no. 5, pp.521–530, 1999.
- [18] 熊本: "ヒューマノイド工学生物の進化から学ぶ2 関節筋ロボット機構", 東京電機大学出版局, 2006.
- [19] 山海: "跳ぶロボット", バイオメカニズム学会誌, vol. 20, no. 2, 1996.
- [20] Z. Zhang, J. Zhao, H. Chen and D. Chen: "A Survey of Bioinspired Jumping Robot: Takeoff, Air Posture Adjustment, and Landing Buffer"

- [21] R. McN. Alexander: "Three Uses for Springs in Legged Locomotion," *The Int. J. of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, pp. 53–61, 1990.
- [22] S. Seok, A. Wang, M. Y. Chuah, D. J. Hyon, J. Lee, D. M. Otten, J. H. Lang, and S. Kim: "Design Principles for Energy-Efficient Legged Locomotion and Implementation on the MIT Cheetah Robot," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 3, pp. 1117–1129, 2015.
- [23] M. H. Raibert, *Legged Robots that Balance*. Cambridge: The MIT Press, 1986.
- [24] K. Tanaka, S. Nishikawa, R. Niiyama and Y. Kuniyoshi: "Humanoid Robot Performing Jump-and-hit Motions Using Structure-integrated Pneumatic Cable Cylinders," *Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robotics*, Birmingham, UK, pp. 696–702, Nov 2017.
- [25] T. Tanaka and S. Hirose: "Development of Leg-Wheel Hybrid Quadruped "AirHopper": Lightweight Leg-Wheel Design," *J. Robot. Mechatron.*, vol. 20, no. 4, pp. 526–532, 2008.
- [26] G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos and S. Manesis: "A Survey on Applications of Pneumatic Artificial Muscles," *Proc. of 19th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Corfu, Greece, pp. 1439–1446, Aug. 2011.
- [27] R. Niiyama, A. Nagakubo and Y. Kuniyoshi: "Mowgli: A Bipedal Jumping and Landing Robot with an Artificial Musculoskeletal System," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Roma, Italy, pp. 2546–2551, Apr. 2007.
- [28] K. Hosoda, Y. Sakaguchi, H. Takayama and T. Takuma: "Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure," *Autonomous Robots*, vol. 28, no. 3, pp. 307–316, 2010.
- [29] S. Nishikawa, K. Shida and Y. Kuniyoshi: "Musculoskeletal Quadruped Robot with Torque-Angle Relationship Control System," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, pp. 4044–4050, May 2016.
- [30] R. Niiyama, S. Nishikawa and Y. Kuniyoshi: "Biomechanical Approach to Open-Loop

- Bipedal Running with a Musculoskeletal Athlete Robot,” *Advanced Robotics*, vol. 26, no. 3-4, pp. 383–398, 2012.
- [31] 赤木, 中川, 成岡, 清水, 細田: “空気圧人工筋駆動四足ロボットによる様々な歩容の実現”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A2-O03, 京都, May 2015.
- [32] 中川, 池本, 清水, 細田: “空気圧人工筋駆動小型四脚ロボットの高速走行”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1A2-07b2, 神奈川, June 2016.
- [33] D. G. Caldwell, G. A. Medrano-Cerda and M. Goodwin: “Control of pneumatic muscle actuators,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 15, issue 1, 1995.
- [34] MIT Leg Laboratory. [Online]. Available: <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/robots.html> (accessed on 6th, January, 2020.)
- [35] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, and R. Playter, “Bigdog, the rough-terrain quadruped robot,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 10 822–10 825, 2008.
- [36] Boston dynamics “LEGACY ROBOTS WildCat (2013)”. [Online]. Available: <https://www.bostondynamics.com/legacy> (accessed on 6th, January, 2020.)
- [37] Boston dynamics “Atlas”. [Online]. Available: <https://www.bostondynamics.com/atlas> (accessed on 6th, January, 2020.)
- [38] Boston dynamics “Spot”. [Online]. Available: <https://www.bostondynamics.com/spot> (accessed on 6th, January, 2020.)
- [39] S. H. Hyon and T. Mita: “Development of a Biologically Inspired Hopping Robot - “Kenken”,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Washington, DC, pp. 3984–3991, May 2002.
- [40] 川端, 西, 鳥居, 北浦, 兼松, 玄: “油圧式4脚歩行ロボットRL-A1の開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1A1-I02, 富山, 2014.

- [41] S. H. Hyon, D. Suewaka, Y. Torii, N. Oku and H. Ishida: “Development of a Fast Torque-controlled Hydraulic Humanoid Robot That Can Balance Compliantly,” Proc. of IEEE-RAS 15th Int. Conf. on Humanoid Robots, pp. 576–581.
- [42] C. Semini, N. G. Tsagarakis, E. Guglielmino, M. Focchi, F. Cannella and D. G. Caldwell: “Design of HyQ : a Hydraulically and Electrically Actuated Quadruped Robot,” Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, vol. 225, no. 6, pp. 831–849, Aug. 2011.
- [43] H. Asada and T. Kanada: Design of Direct-Drive Mechanical Arms, Carnegie Mellon University, 1981.
- [44] S. Seok, A. Wang, M. Y. Chuah, D. Otten, J. Lang and S. Kim: “Design Principles for Highly Efficient Quadrupeds and Implementation on the MIT Cheetah Robot,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Karlsruhe, Germany, pp. 3307–3312, May 2013.
- [45] H. W. Park, S. Park and S. Kim: “Variable-speed Quadrupedal Bounding Using Impulse Planning: Untethered High-speed 3D Running of MIT Cheetah 2,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, Washington, pp. 5163–5170, May 2015.
- [46] G. Bledt, M. J. Powell, B. Katz, J. D. Carlo, P. M. Wensing and S. Kim: “MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, pp. 2245–2251, Oct. 2018.
- [47] S. Kalouche: “Goat: A Legged Robot with 3D Agility and Virtual Compliance,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS), Vancouver, BC, Canada, pp. 4110–4117, Sep. 2017.
- [48] Y. Ding and H. W. Park: “Design and Experimental Implementation of a Quasi-direct-drive Leg for Optimized Jumping,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, BC, Canada, pp. 300–305, Sep. 2017.

- [49] J. Hwangbo, V. Tsounis, H. Kolvenbach and M. Hutter, “Cable-Driven Actuation for Highly Dynamic Robotic Systems,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, pp. 8543–8550, Oct. 2018.
- [50] Y. Fukuoka, H. Kimura, Y. Hada and K. Takase: “Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot ‘Tekken’ on Irregular Terrain Using a Neural System Model,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, pp. 2037–2042, Sept. 2003.
- [51] Z. G. Zhang and H. Kimura: “*Rush* : A Simple and Autonomous Quadruped Running Robot,” J. Systems and Control Engineering, vol. 223, no. 3, pp. 323–336, 2009.
- [52] A. Fukuhara, D. Owaki, T. Kano, R. Kobayashi and A. Ishiguro: “Spontaneous gait transition to high-speed galloping by reconciliation between body support and propulsion,” Advanced Robotics, vol. 32, no. 15, pp. 794–808, 2018.
- [53] M. Kovač, M. Fuchs, A. Guignard, J. C. Zufferey and D. Floreano: “A miniature 7g jumping robot,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Pasadena, CA, USA, pp. 1552–1557, May 2008.
- [54] W. Liu, F. Li, X. Fu, C. Stefanini, G. Bonsignori, U. Scarfogliero and P. Dario: “Jumping Like an Insect: From Biomimetic Inspiration to a Jumping Minirobot Design,” Advanced Mechatronics and MEMS Devices, vol. 23, pp. 207–221, 2013.
- [55] D. W. Haldane, M. M. Plecnik, J. K. Yim and R. S. Fearing: “Robotic Vertical Jumping Agility via Series-elastic Power Modulation,” Science Robotics, vol. 1, no. 1, 2016.
- [56] D. W. Haldane, J. K. Yim and R. S. Fearing: “Repetitive Extreme-acceleration (14-g) Spatial Jumping with Salto-1p,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, BC, Canada, pp. 3345–3351, Sept. 2017.
- [57] A. De and D. E. Koditschek: “Parallel composition of templates for tail-energized planar hopping,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Seattle, WA, USA, pp. 4562–4569, May 2015.

- [58] A. Spröwitz, M. Ajallooeian, A. Tuleu and A. J. Ijspeert: “Kinematic primitives for walking and trotting gaits of a quadruped robot with compliant legs,” *Frontiers in Computational Neuroscience*, vol. 8, article 27, pp. 1–13, 2014.
- [59] A. Spröwitz, A. Tuleu, M. Ajallooeian, M. Vespignani, R. Möckel, P. Eckert, M. D’Haene, J. Degraeve, A. Nordmann, B. Schrauwen, J. J. Steil and A. J. Ijspeert: “Oncilla Robot: A Versatile Open-Source Quadruped Research Robot With Compliant Pantograph Legs,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 2018, 2018.
- [60] A. Spröwitz, A. Tuleu, M. Vespignani, M. Ajallooeian, E. Badri and A. J. Ijspeert: “Towards Dynamic Trot Gait Locomotion: Design, Control, and Experiments with Cheetah-cub, A Compliant Quadruped Robot,” *The Int. J. of Robotics Research*, vol. 32, no. 8, pp. 932–950, 2013.
- [61] F. Ruppert and A. Spröwitz, “Series Elastic Behavior of Biarticular Muscle-Tendon Structure in a Robotic Leg,” *Frontiers in Neurorobotics*, vol.13, issue 64, pp.1–11, 2019.
- [62] J. Park, K. S. Kim and S. Kim: “Design of a Cat-inspired Robotic Leg for Fast Running,” *Advanced Robotics*, vol. 28, no. 23, pp. 1587–1598, 2014.
- [63] M. Hutter, C. D. Remy, M. A. Hoepflinger and R. Siegwart: “Starl*ETH*: Design and Control of a Planar Running Robot,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, San Francisco, CA, USA, pp. 562–567, Sep. 2011.
- [64] M. Hutter, C. Gehring, D. Jud, A. Lauber, C. D. Bellicoso, V. Tsounis, J. Hwangbo, K. Bodie, P. Fankhauser, M. Bloesch et al., “ANYmal-a Highly Mobile and Dynamic Quadrupedal Robot,” *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, South Korea, pp. 38–44, Oct. 2016.
- [65] W. Roozing, Z. Li, G. A. Medrano-Cerda, D. G. Caldwell and N. G. Tsagarakis: “Development and Control of a Compliant Asymmetric Antagonistic Actuator for Energy Efficient Mobility,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, no. 2, 2016.

- [66] W. Roozing, Z. Ren and N. G. Tsagarakis: “Design of a Novel 3-DoF Leg with Series and Parallel Compliant Actuation for Energy Efficient Articulated Robots,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Brisbane, Australia, pp. 6068–6075, May 2018.
- [67] S. B. Williams, J. R. Usherwood, K. Jespers, A. J. Channon and A. M. Wilson: “Exploring the mechanical basis for acceleration: pelvic limb locomotor function during accelerations in racing greyhounds (*Canis familiaris*),” J. Exp. Biol., vol. 212, no. 4, pp. 550–565, 2009.
- [68] B. Walmsley, J. A. Hodgson and R. E. Burke: “Forces Produced by Medial Gastrocnemius and Soleus Muscles During Locomotion in Freely Moving Cats,” J. Neurophysiology, vol. 41, no. 5, pp. 1203–1216, 1978.
- [69] G. J. van Ingen Schenau, M. F. Bobbert and A. J. van Soest: The Unique Action of Bi-articular Muscles in Leg Extensions. Multiple Muscle Systems, Biomechanics and Movement Organization, eds J. M. Winters, S. L. Y. Woo (New York, NY: Springer), pp. 639–652, 1990.
- [70] 大島, 百生, 藤川, 鳥海, 小柳, 松野: “動物の脚機構を模倣したリンク機構による跳躍の実現”, 精密工学会誌, vol. 74, no.4, pp. 416–420, 2008.
- [71] R. Sato, E. Kazama, A. Ming, M. Shimojo, F. Meng, H. Liu, X. Fan, X. Chen, Z. Yu and Q. Huang: “Design and Control of Robot Legs with Bi-articular Muscle-tendon Complex,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics(ROBIO), Macau SAR, China, pp. 2605–2610, Dec. 2017.
- [72] “Intelligent control of an experimental articulated leg for a galloping machine,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, Sept. 2003.
- [73] 鈴森: “ロボットのアクチュエータのバックドライバビリティ”, 日本ロボット学会誌, vol. 31, no. 6, pp. 548–551, 2013.
- [74] S. Seok, A. Wang, M. Y. M. Chuah, D. J. Hyun, J. Lee, D. M. Otten, J. H. Lang and S. Kim: “Actuator Design for High Force Proprioceptive Control in Fast Legged Locomotion,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS), Vilamoura, Algarve, Portugal, pp. 1970–1975, Oct. 2012.

- [75] マクソンジャパン. [Online]. Available: <https://www.maxongroup.co.jp/maxon/view/content/index> (accessed on 6th, January, 2020.)
- [76] Celera Motion, A Novanta Company. [Online]. Available: <https://www.celeramotion.com/> (accessed on 6th, January, 2020.)
- [77] Applied Motion Products, Inc. [Online]. Available: <https://www.applied-motion.com/> (accessed on 6th, January, 2020.)
- [78] TQ Systems GmbH. [Online]. Available: <https://www.tq-group.com/en/> (accessed on 6th, January, 2020.)
- [79] PARKER HANNIFIN CORP. [Online]. Available: <http://ph.parker.com/us/en/motors> (accessed on 6th, January, 2020.)
- [80] J. P. Schmiedeler and K. J. Waldron: “Impact Analysis as a Design Tool for the Legs of Mobile Robots,” *Advances in Robot Kinematics*, Springer, pp. 1552–1557, Sep. 2015.
- [81] 宮本: “動物の腓腹筋及び筋腱複合体を規範とする脚機構の研究開発,” 平成25年度電気通信大学大学院修士論文, 2014.
- [82] R. Sato, I. Miyamoto, K. Sato, A. Ming and M. Shimojo: “Development of Robot Legs Inspired by Bi-articular Muscle-tendon Complex of Cats,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, Hamburg, Germany, pp. 129–136, 2000.
- [83] E. Kazama, R. Sato, I. Miyamoto, A. Ming and M. Shimojo: “Development of a Small Quadruped Robot with Bi-articular Muscle-tendon Complex,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics(ROBIO)*, Zhuhai, China, pp. 1059–1064, Dec. 2015.
- [84] 柿谷, 新山, 國吉: “筋骨格ロボットを用いた跳躍運動の学習”, 第14回ロボティクス・シンポジウム予稿集, pp. 380–385(4C2), 北海道, Mar. 2009
- [85] 有川, 美多: “多自由度跳躍ロボットの設計-基本設計と計算機シミュレーション-”, *日本ロボット学会誌*, vol. 20, no. 2, pp. 214–222, 2002.

- [86] 遠藤，伊吹，三平：“重心軌道計画を用いた4リンク3アクチュエータロボットの跳躍制御”，第14回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集，pp. 406–411(C214)，栃木，Jun. 2015.
- [87] J. Babiř, B. Lim, D. Omrřen, J. Lenarřiř and F. C. Park: “A Biarticulated Robotic Leg for Jumping Movements: Theory and Experiments,” *J. of Mechanisms and Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 011013-1–011013-9, 2009.
- [88] 中村，山根：“拘束条件が不連続に変化するリンク系の動力学-環境と接触しながら運動するヒューマンフィギュアへの応用-”，*日本ロボット学会誌*，vol. 18, no. 3, pp. 435–443, 2000.
- [89] 米田，坪内，大隅：はじめてのロボット創造設計（改訂第2版），講談社，2013.
- [90] F. E. Zajac, M. R. Zomlefer and W. S. Levine: “Hindlinb Muscular Activity, Kinetics and Kinematics of Cats Jumping to Their Maximum Achievable Heights,” *J. of Exp. Biol.*, pp. 73–86, vol. 91, no. 1, Apr. 1981.
- [91] 丸山：“ハイパーダイナミックマニピュレータに関する研究”，平成16年度電気通信大学大学院修士論文，2005.

付 録A

制御システム

本章では，開発した一脚ロボットの制御システム構成を説明する．まず，制御システムの全体構成について概要と各構成要素の接続方法について説明する．その後，各要素の詳細を説明する．

A.1 システムの構成

開発した制御システムは，第2章で示した図2.14の通りである．

システムは上位コントローラと下位コントローラの2層で構成されている．上位コントローラでは，操作者の指令処理と情報提示，各種センサのフィードバックに応じた指令値の演算，下位コントローラへの指令値送信などを行う．下位コントローラでは，上位コントローラからの要求に従って，アクチュエータの制御，センサ出力の取得，フィードバックを行う．本研究では各層での通信に，信頼性の高いCAN(Controller Area Network)通信を採用した．CANのネットワーク構成は，バスに各ノードと接続することで成るライン型と呼ばれる方式である．各デバイスからメインコンピュータに届くような配線を用意して直接接続しなければならない場合と比較して，CANのようなシリアルバスで多数のデバイスを接続可能なインタフェースを採用したことで，運動の妨げになり得る関節を跨る配線数を過度に増加させることなくデバイスを追加することができる．ロボットには，状態を検出するためセンサ系としてロータリエンコーダと足先圧力センサが搭載されており，これらの出力はDSPボードで処理をしたのち，CAN通信のバス上に接続されている．

ロボットの，特にサーボ制御において，センサのサンプリングや制御の演算などにかかる制御周期を一定に保つ実時間制御が要求される．そこで本

研究では、将来的に四脚ロボットを開発した際にも利用でき、制御のリアルタイム性を確保できるコントロールシステムを利用することにした。

ここで、本研究ではロボットに用いるアクチュエータとセンサの数量があまり多くなかったため通信インタフェースとしてCANを用いても大きな問題は生じなかった。しかし、ロボットの自由度が増加すると、アクチュエータやセンサの数の増加や、全身状態管理や運動生成のための計算の複雑化が伴う。ネットワーク上のノード数が増加するとCANの最大通信速度である1Mbpsでは制御の遅延につながる可能性がある。また複数のノードが同時に信号を送信することが可能となるマルチマスタ方式と呼ばれる方式が採用されており、信号の衝突が生じる可能性がある。ノードに付与されたIDにより通信の優先順位がつけられるが、これも通信の遅延につながる可能性があり、上位コントローラの制御周波数を下げざるを得なくなる。将来的に四脚ロボットに展開して関節数が増加すると、必然的にアクチュエータやセンサが増えるため、チャンネルを増やしてCANバスを並列に用意して各々のバスに接続するノードの数を少なくすることで通信に要する時間を削減するか、中間層を用意する階層型のコントローラ構成にするか、あるいは別の通信インタフェースを用いるなどの工夫が必要となることをここに記しておく。

以降、システムの各要素の詳細を説明する。

A.2 メインコンピュータ

各関節のモータドライバへの目標電流の指令、各センサからのフィードバック信号の受信、および位置のフィードバック制御はメインコントローラによって処理される。メインコンピュータには、IEI製のシングルボードコンピュータであるPM-PV-D5251-R11^{*1}を利用した。RAMには、DDR3 SO-DIMMの2GBのものを搭載した。コンピュータの主な仕様を表A.2に示す。

^{*1}ICP Deutschland GmbH [Online]. Available: <https://www.icp-deutschland.de/en/industrial-pc/cpu-boards-cpu-cards/embedded-boards/pc-104/pm-pv-d5251-r11.html> (accessed on April 2, 2019)

Table A.1: Specification of the computer PM-PV-D5251-R11

Criterion	
Form factor	PCI-104
CPU	Intel ®Atom ™D525 processor
Clock speed	1.8 GHz
System memory	DDR3 SO-DIMM (up to 4GB)
Power supply	5 V (and 12 voltfor LCD and Fan)
I/O interface	4 x USB 2.0
	1 x SATA 3Gb/s
	1 x RS-232
	1 x RS-232/422/485
	1 x KB/MS
	1 x CF card slot

コンピュータにはオペレーティングシステムとして Microsoft Windows XP がインストールされている。一般にはリアルタイム OS(RTOS)と呼ばれる OS 自体がリアルタイム性を持った OS を用いるが、本研究では使い慣れている汎用 OS を用いて開発時間を削減する要求のもと、WindowsOS をリアルタイム OS に拡張することができる IntervalZero 社の RTX^{*2}を利用した。

CAN を利用してメインコンピュータと下位のモータドライバやセンサ等と通信を行うために、ADVANTECH 製の CAN インタフェースモジュール PCM-3680/I^{*3}を使用した。主な仕様を表 A.2 に示す。

^{*2}IntervalZero[Online]. Available: <https://www.intervalzero.com/japanese/> (accessed on 2nd, April, 2019)

^{*3}Advantech Co., Ltd. [Online]. Available: https://www.advantech.co.jp/products/1-2jklu5/pcm-3680i/mod_4f3cb82a-5d1c-4e56-8e54-4d86efeb3268 (accessed on April 2, 2019)

Table A.2: Specification of the can interface module PCM-3680/I

Properties	Values
Bus	PCI-104
Ports #	2
Communication speed	Up to 1Mbps
CAN frequency	16 MHz
Isolation protection	2.5 kV

メインコンピュータとCANインタフェースモジュールはPCIバスで接続される。各ノードとの接続にはシールドされた配線を用い、モジュールから伸ばした配線上にバス接続された。なお、配線の末端での信号の反射を防ぐために、 120Ω の終端抵抗を取り付けた。各ノードとは1Mbpsの通信速度で信号の送受信を行う。

A.3 モータドライバ

関節駆動には、3相の永久磁石同期モータ (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) を用いる。モータはStar-Serial型の内部結線となっている。このモータの制御には、各相に位相をずらした正弦波電流を印加する必要がある。本研究では、市販のPMSM制御用のモータドライバの中でも、小型・軽量で将来的にロボットの搭載可能なElmo Motion Control製のサーボドライバGold TwitterシリーズのG-TWI 10/100 SE^{*4}を使用した。基本仕様をA.3に示す。

モータドライバの出力はモータの各相に接続され、各相に流れる電流を検出することができる。検出された電流値はフィードバック制御に利用されるほか、モータドライバ内部の過電流保護機能に利用される。

^{*4}Elmo Motion Control Ltd. [Online]. Available: <https://www.elmomc.com/product/gold-twitter/> (accessed on April 2, 2019)

Table A.3: Specification of the servo driver G-TWI 10/100 SE

Properties	Units	Values
Dimension	mm	35 x 30 x 11.5
Weight	g	18.6
Supply voltage	V	10 to 95
Maximum continuous power output	W	800
Maximum output voltage	V	Up to 96% of DC bus voltage
Continuous current	A	10
Peek current	A	20
Current loop bandwidth	kHz	> 4
Current sampling rate	kHz	Up to 25
Velocity loop bandwidth	Hz	> 500
Velocity sampling rate	kHz	Up to 20
Position loop bandwidth	Hz	> 200
Position sampling rate	kHz	Up to 20

PMSMは、ロータの磁極位置に応じて各相に流す電流を制御するため、一般的にはロータの回転角を検出するセンサを用いる。各相の逆起電圧を観測することで位置検出センサを必要としないセンサレス制御法もあるが、応答性が悪い点や、逆起電圧が発生しにくい低速回転の駆動が困難であるという欠点があり、これらの欠点は脚ロボットの関節駆動に用いる場合には好ましくない。位置検出センサとして、ホールセンサを採用した市販のPSMSが多く存在するが、熱による検出精度低下の可能性が存在する。そこで、本研究ではよく用いられる位置検出センサの一つであるロータリエンコーダを採用した。その詳細については後述する。モータドライ

バはロータの回転軸上に搭載されたエンコーダから回転角度のフィードバックを受け取り、ロータの磁極位置を検出することが可能である。このモータドライバでは、内部で電流制御ループ、速度制御ループ、位置制御ループを構成することができ、上位コントローラと比べて高速な制御ループによってモータをサーボコントロールすることができる。実験では、モータ供給用電源に60Vを、モータドライバ制御用電源に24Vをそれぞれ安定化電源から印加した。ロボットを用いた実験の前に、同社から提供されている専用のソフトウェアElmo Application Studio IIを用いて、モータのチューニングを行った。

ロボットの制御では、メインコンピュータと各モータのモータドライバはCANバスを介して接続され、モータドライバはCANopen プロトコル (DS301, DS305, DS402) に従って指令値の受信、および現在値の送信を行う。

A.4 ロータリエンコーダ

市販されているロータリエンコーダは光学式と磁気式の主に2種類の検出方式がある。光学式エンコーダは高精度で高分解能であるが、衝撃や振動に弱く、環境との接触状況が頻繁に変化したり、跳躍や走行などの激しい加減速を伴う運動を行うロボットに用いるには望ましくない。磁気式エンコーダは、耐振動性や耐衝撃性が高く、また粉塵等が舞う悪環境においても利用可能であることから、本研究で扱うロボットでの利用に適している。また、非接触で検出可能であるため摩擦力などが生じることはないほか、光学式と同分解能のものを小型かつ低価格で入手することが可能である。以上の点から、本研究では磁気式のロータリエンコーダを採用した。

関節駆動モータのロータの回転角の検出および関節の回転角を検出する磁気式ロータリエンコーダとして、Renishaw製のRMB20SC12BC10^{*5}を用いた。基本仕様を表A.4に示す。

このエンコーダは、回転軸と同軸に取り付けられた径方向に磁化された円柱状の永久磁石が回転することによる磁場変化を観測することで絶対角

^{*5}RENISHAW [Online]. Available: https://www.rls.si/jp_en/rmb20-rotary-magnetic-module (accessed on April 2, 2019)

Table A.4: Specification of the absolute encoder RMB20SC12BC10

Properties	Units	Values
Diameter	mm	20
Power supply	V	5
Repeatability	degree	≤ 0.07
Resolution	bit	12
Maximum speed	rpm	5000
Accuracy	degree	± 0.5
Hysteresis	degree	± 0.18
Temperature	°C	-40 to +125
Data output	-	Serial data (RS422)
Data input	-	Clock (RS422)
Clock rate	MHz	≤ 4

を検出するものであり，小型である．磁石には，直径4mm，長さ3mmの円柱状ネオジム磁石を用いた．センサの素子表面と磁石表面との距離は1.5mm程度になるように配置した．アブソリュートエンコーダを採用したため，一度キャリブレーションを行えば，電源供給が絶たれても，再度電源が投入された際に原点出し作業をせずに位置情報を取得できる．エンコーダの出力は，同期式シリアルインタフェース（Synchronized Serial Interface, SSI）で，差動信号による伝送方式で比較的ノイズに強いRS-422の通信方式でマスタデバイスに送信される．

A.5 足先圧力センサ

脚ロボットはロコモーションの最中に、環境との接触状況の変化が伴う。特に地面と足先とは、接地と非接地状態が頻繁に変化する。これら環境との接触状況によって、ロボットの系に加わる外力の扱いが変わるため、接触状態を検知することは重要である。足先の接地の有無で運動の期間を区分すると、本論文では一脚ロボットを扱うため、地面と足先が接触している立脚期と、接触していない空中期の2つをとり得る。本研究で行う実験で、立脚期か空中期かを検知することは、シミュレーションとの軌道の差異を考察する際に重要な情報である。一方で今回の用途では、足先に加わる力の向きや大きさを正確にセンシングすることは要求せず、接地/非接地の状態判定とおおよその圧力の大きさを検出できれば良い。そこで足先には地面との接触状態を検出するために、Interlink Electronics製の圧力センサFSR400^{*6}を搭載した。これは、高分子厚膜フィルム (Polymer Thick Film, PTF) を使用し、感圧面に印加される力が増加するに従って電気的抵抗が減少する性質を利用したセンサである。基本性能を図A.5に示す。

A.6 中継ボード

各関節の角度を取得するためのエンコーダの信号取得および足先に取り付けた圧力センサ値の取得のために、マイクロコントローラを搭載した中継ボードを製作した。コントローラには、STMicroelectronics製のSTM32f103CBT6^{*7}を使用した。基本性能を表A.6に示す。

RS422通信でエンコーダとデータ伝送を行うために、MAXLINEAR製の全二重RS422/485ライントランシーバであるSP3490EN-L^{*8}を使用した。通信時のSSIのクロック周波数は1MHzとした。足先に取り付けた圧力センサには1k Ω

^{*6}Interlink Electronics, Inc. [Online]. Available: <https://www.interlinkelectronics.com/fsr-400> (accessed on April 2, 2019)

^{*7}STMicroelectronics [Online]. Available: <https://www.st.com/ja/microcontrollers-microprocessors/stm32f103cb.html> (accessed on April 2, 2019)

^{*8}MAXLINEAR [Online]. Available: <https://www.maxlinear.com/product/interface/serial-transceivers/rs485-422/sp3490> (accessed on April 2, 2019)

Table A.5: Specification of the force sensor FSR400

Properties	Units	Values
Size (diameter)	mm	7.62
Active area (diameter)	mm	5.08
Nominal thickness	mm	0.35
Force sensitivity range	N	0.2 to 20.0
Force repeatability	%	± 2
Stand-off resistance	M Ω	10
Hysteresis	%	10
Device rise time	μ s	< 3

の固定抵抗を用いて抵抗分圧回路を構成し，3.3Vの電圧を印加して，センサに電流が流れることによる降下する電圧をコントローラのADコンバータで検出することでセンサに加わる圧力に応じた値を取得する．Texas Instruments製のCANトランシーバであるSN65HVD230^{*9}を通してDSPボードをCANバスに接続し，メインコンピュータから同期信号を受信した際に取得した各種センサ値を送信できるようにした．膝および足関節の角度を検出するために取り付けられたエンコーダの出力を取得するための中継ボードは，エンコーダと同サイズに設計し，エンコーダに重ねるように配置した．こうすることで，関節軸を跨る配線はCANバスラインのみとなり，運動の妨げになり得る配線を最小限に減らすことができた．

^{*9}Texas Instruments Incorporated [Online]. Available: <http://www.tij.co.jp/product/jp/SN65HVD230> (accessed on April 2, 2019)

Table A.6: Specification of the microcontroller STM32f103CBT6

Properties	Units	Values
Core	-	ARM Cortex M3
Data bus width	bit	32
Package	-	LQFP-48
Maximum clock frequency	MHz	72
Flash memory size	kB	128
RAM size	kB	20
Supply voltage	V	2 to 3.6
Number of I/O	#	37
Number of Timers	#	4
Timer resolution	bit	16
Number of ADC	#	2
Number of ADC Channels	#	10
ADC resolution	bit	12
Interface	-	1 × CAN 2 × I2C 2 × SPI 3 × USART 1 × USB

付 録 B

ロボットの特性

本章では，開発したロボットの特性を測定した実験結果について説明する．

B.1 関節の摩擦トルクと粘性摩擦係数の同定

関節モータ（入力軸）による駆動トルクは，減速比を介して関節（出力軸）に与えられる．モータ電流を制御することで関節のトルク制御をしたい場合，モータに指令する電流値は，目標関節トルクを出力するために必要な電流値を減速比とモータのトルク定数から計算することになるが，その間に潜在する静止摩擦，粘性摩擦等を考慮する必要がある．そこで，開発したロボットの関節の静止摩擦トルクと粘性摩擦係数を同定する．ここでは，第2章で開発したロボットの関節の特性評価について説明する．

B.1.1 静止摩擦トルクの同定

丸山^[91]はダイレクトドライブモータを用いたロボットで，モータへの印加電圧を変えた際の出力トルクをばねばかりを用いて測定し，そのプロットの線形近似直線から静止摩擦を同定する手法を用いた．本研究でも同様に，この方法を用いて静止摩擦トルクを同定する．

実験では，モータに流す目標電流を変化させ，その時の股関節，膝関節の出力トルクを測定した．例として，膝関節トルク測定時の装置を図B.1に示す．この時，ロボットの大腿リンク部が地面に固定されている．モータの制御には，図2.14および付録Aで説明するシステムを用いる．測定にはデジタルフォースゲージFGP-2（日本電産シンポ製，定格荷重容量 ± 20.00 N, 測定精度 ± 0.04 N）を使用し，関節と計測点（図中赤丸）を結ぶ直線が計測軸と点で

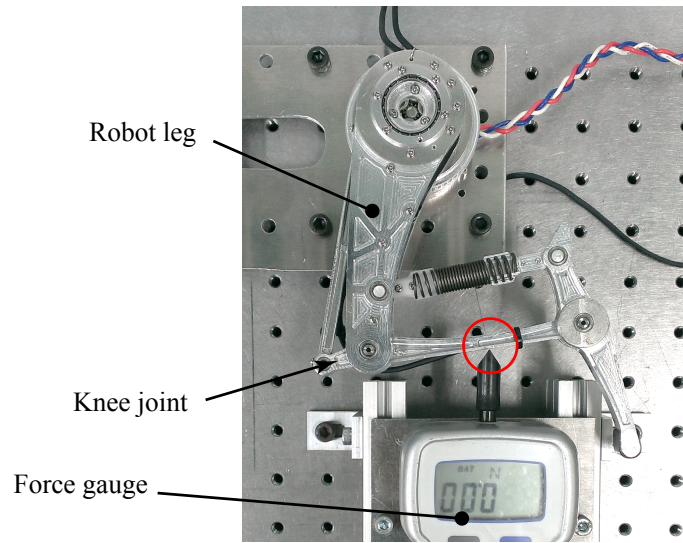


Fig. B.1: Experimental setup for friction identification

接して直交するように設置した．モータへの電流指令値 I_{ref} は $0.5 \leq I_{ref} \leq 10$ [A] の範囲で 0.5A 刻みに変化させた．計測時は電流指令値を与え，測定値が安定してから記録した．0.5A から 10A まで順に指令し，その測定を 7 回繰り返して，その平均値を用いて最小二乗法で線形近似した．

股関節の測定では胴体を地面に固定し，股関節から 60[mm] の位置を計測位置として，角度 76[deg] の時に屈曲方向，角度 95[deg] の時に伸展方向のトルクを測定した．股関節はモータからタイミングベルトを介して駆動され，減速比は $\gamma_h = 3$ である．実験中にモータの発熱が確認されたため，送風して空冷したところ，発熱はほとんどなくなった．

膝関節の測定では股関節部を地面に固定し，膝関節から 50[mm] の位置を計測位置とした．膝関節はモータから遊星歯車減速機を介して駆動され，その減速比は $\gamma_h = 4.5$ である．遊星歯車の組み付け時の誤差等で角度によって摩擦の大きさが違うことが考えられたため，角度 125[deg], 96.5[deg], 57.5[deg] の 3 か所で伸展方向のトルクを測定した．

股関節の測定結果を図 B.2 に，膝関節の測定結果を図 B.3 に示す．各グラフには，モータのトルク定数 (0.021[Nm/A]) と減速比から算出される関節トルクの推定値を示している．また，黒色破線は線形近似直線を示している．

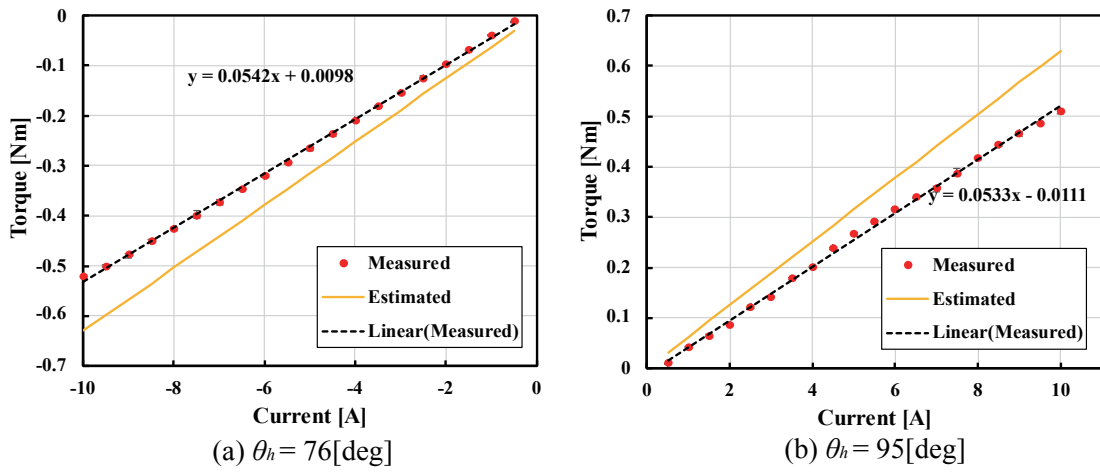


Fig. B.2: Results of the joint static torque measurement (hip)

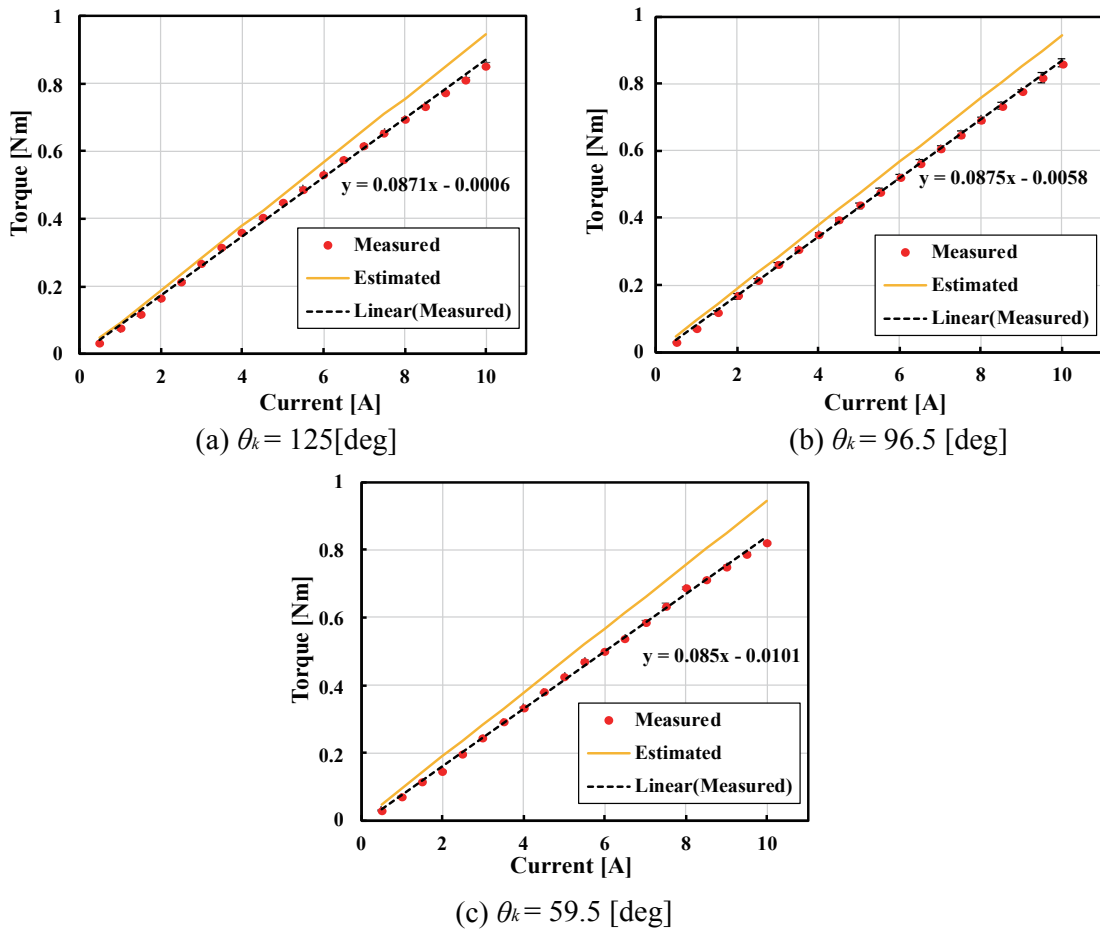


Fig. B.3: Results of the joint static torque measurement (knee)

結果から、股関節では屈曲方向に0.0098[Nm]、伸展方向に0.0111[Nm]の静止摩擦トルクがあると同定できる。股関節はタイミングベルト駆動のため、プリテンションを与えなければならず、摩擦は大きくなりやすいと考えられる。また、その設定によって摩擦は変化する可能性はある。

膝関節は屈曲姿勢で0.0006[Nm]、伸展姿勢で0.0101[Nm]となった。関節角度によって、トルクの測定値は異なった。これらの値は最大連続出力トルク0.45[Nm]に対して十分に小さいため、中間の姿勢における0.0058[Nm]を基準にする。また、線形近似直線の傾きから、モータのトルク定数は0.0194[Nm/A]であると同定した。

B.1.2 粘性摩擦係数の同定

次に、関節角速度に比例する粘性摩擦トルクの同定を行った。跳躍や走行などの瞬発的な運動では、関節を高速で回転させる必要があるため粘性摩擦の影響を受けやすいと考えられる。

ロボットの運動方程式はB.1で表される。

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) + D_f\dot{q} + fr(\dot{q}) = \tau \quad (B.1)$$

ここで、 $M(q)$ は慣性行列、 $H(q, \dot{q})$ は遠心力およびコリオリ力に関する項、 $G(q)$ は重力項、 D_f は粘性摩擦係数、 $fr(\dot{q})$ は静止摩擦を表す。ロボット脚の各関節軸が地面と垂直になるように設置することで、重力の影響を無視できるようにした。

実験は、左脚の股関節および膝関節について、それぞれ測定を行った。モータに速度制御で一定の角速度になるような指令を与え、角速度が安定した際の実際の角速度、および電流を計測した。なお、静止状態からの始動のため、角加速度を約314[rad/s²]とした台形加速を行うことで、振動を防ぎ、安定した角速度、電流を得られるようにした。角速度が安定したところで測定することで、角加速度は0[rad/s²]とみなせ、慣性の影響を無視できる。また指令する角速度を小さくすることで、コリオリ力、遠心力は無視できる。

以上より、関節トルク τ は式B.2となる。

$$\tau_i = \tau_{motor,i} \times \gamma_i - D_f \dot{q}_i - fr(\dot{q}_i) \quad (B.2)$$

ただし、 $\tau_{motor,i}$ はモータ出力トルク、 γ_i は減速比を表す。前節の静止摩擦トルクの同定時に得られた電流と関節トルクの比例定数を用いることで、 $\tau_{motor,i} \times \gamma_i - fr(\dot{q}_i)$ がわかるため、今回同定する粘性摩擦係数が分かれば関節トルクの算出が可能である。モータの角速度指令値は、股関節では1～8[rps]の範囲を1[rps]ずつ、膝関節では1～13[rps]の範囲を2[rps]ずつ与えることとし、すべての速度において7回ずつ測定を行った。反転方向も同様に行った。

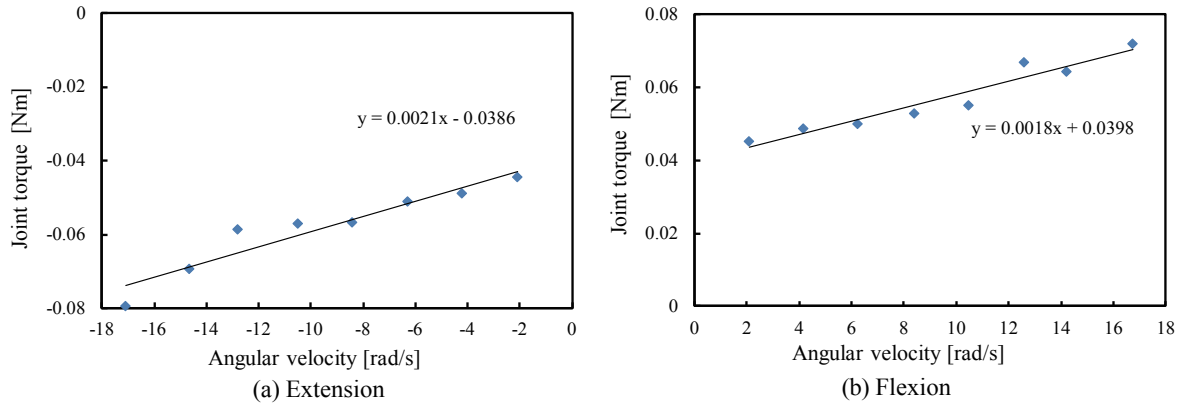


Fig. B.4: Results of the joint viscous friction torque measurement (hip)

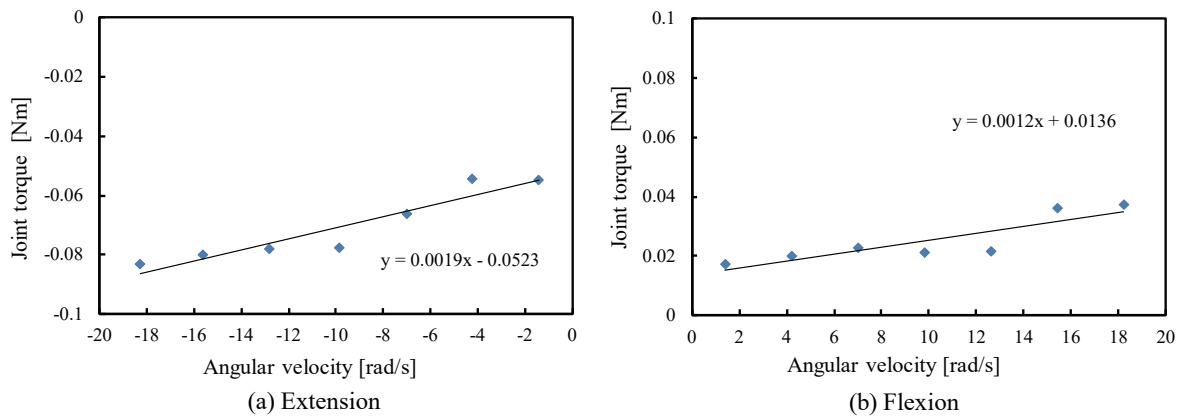


Fig. B.5: Results of the joint viscous friction torque measurement (knee)

測定した電流に，静止摩擦トルクの同定で得られた電流と関節トルクの比例定数を乗算することで，関節トルクを算出した．同様にモータの角速度を減速比で除算することで，関節の角速度を算出した．各角速度で平均をとり，最小二乗法で直線に近似した．結果を図B.4, B.5に示す．

この結果から，粘性摩擦係数は股関節伸展方向は $2.1 \times 10^{-3} [\text{Nm} \cdot \text{s/rad}]$ ，屈曲方向は $1.8 \times 10^{-3} [\text{Nm} \cdot \text{s/rad}]$ ，膝関節伸展方向は $1.9 \times 10^{-3} [\text{Nm} \cdot \text{s/rad}]$ ，屈曲方向は $1.2 \times 10^{-3} [\text{Nm} \cdot \text{s/rad}]$ と同定された．

B.1.3 バックラッシの測定

本ロボットの膝関節の減速機構には，遊星歯車減速機構を用いており，バックラッシが存在した．そこで，膝関節のモータ軸に取り付けられたエンコーダと，遊星歯車減速機の出力軸に取り付けられたエンコーダを用いて，バックラッシの測定を行った．測定ではモータを正弦波駆動した時の両エンコーダの値を取得し，それらの値からバックラッシ量を測定した．エンコーダは，Renishaw社製の磁気式アブソリュートエンコーダRMB20SC（分解能：12bit($\approx 0.0878[\text{deg}]$)，精度 $\pm 0.5[\text{deg}]$ ）を用いている．

実験では，関節軸が重力方向を向くように脚を地面に設置し，重力の運動への影響を排除した．股関節は動かないように固定し，膝関節のみが駆動される．各エンコーダは，膝伸展状態からゆっくりと膝を最大屈曲まで屈曲させたとき，そのカウントを最大屈曲角度とするようにキャリブレーションした．すなわち，このときバックラッシは偏っている．

モータへの角度指令およびエンコーダ値の取得は，コンピュータを用いて2[msec]毎に行った．モータに入力する正弦波は，膝関節角度 $100[\text{deg}]$ を中心として，振幅 $10[\text{deg}]$ ， $25[\text{deg}]$ ， $40[\text{deg}]$ ，角周波数 0.2π ， π ， 2π ， 4π [rad/s]のそれぞれの組み合わせで，10周期から20周期ほど駆動した．このうち，駆動開始から1周期を取り除いたデータを測定の対象とした．

図B.6，図B.7に一例として，振幅 $10[\text{deg}]$ ，角周波数 π の時の測定結果を示す．振幅，角周波数のすべての組合せの測定を評価した結果を表B.1に示す．図B.6より，確かにモータ軸で検出された角度に比べて，関節軸で検出され

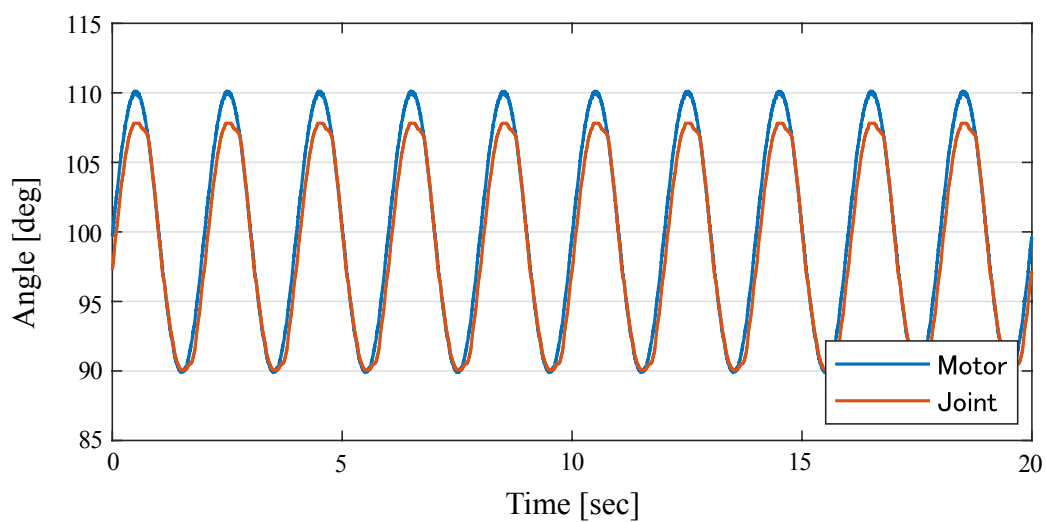


Fig. B.6: Measured results (Angular frequency: π [rad/s], Amplitude: 10[deg])

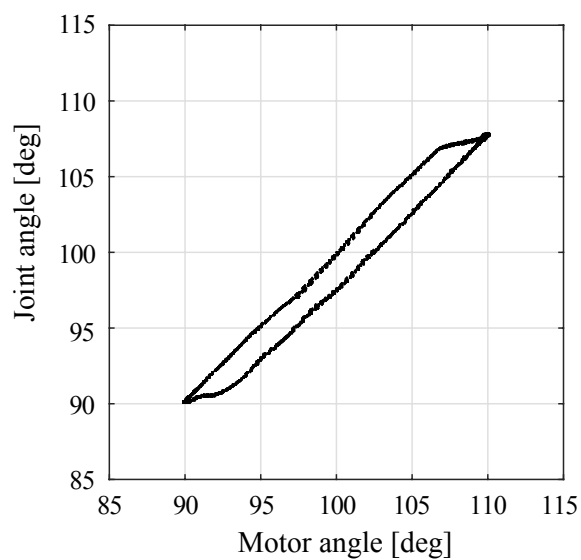


Fig. B.7: Relationship between motor and joint angle (Angular frequency: π [rad/s], Amplitude: 10[deg])

Table B.1: Measured results

Angular frequency [rad/s]	Amplitude [deg]	Backlash [deg]
0.2π	10	2.50
0.2π	25	3.47
0.2π	40	3.34
π	10	2.48
π	25	2.75
π	40	3.54
2π	10	2.90
2π	25	2.97
2π	40	3.72
4π	10	2.68
4π	25	3.49
4π	40	2.74

た角度の波形の振幅が小さく、ピーク部分で平坦になっている．これはバックラッシによるものであると考えられる．図B.7は横軸にモータ角，縦軸に関節角をとったグラフである．このグラフにおいて，モータがある角度の時に関節角度がとり得る範囲がバックラッシ量となる．代表点としてモータ角100[deg]（初期中心値）の時の関節角度の範囲を見ると，バックラッシ量は2.48[deg]となった．全ての測定の結果，バックラッシは最大で3.72[deg]をとることが分かった．

B.2 モータのトルク定数の同定

第3章，第4章の実験で用いたロボットのアクチュエータのトルク定数の同定を行った．実験では，第3章で扱ったロボットを用い，図B.8のように胴体を地面に固定して，大腿リンクのある点に地面に固定されたフォースゲージ

(日本電産シンボ製FGP-10, 定格測定範囲 $\pm 100[\text{N}]$, 精度 $\pm 0.2[\text{N}]$)の測定子を接触させた。フォースゲージの測定軸は、アクチュエータの回転軸と接触位置を結ぶ直線に直交するように設置した。モータドライバから電流制御モードで $0.5[\text{A}]$ から $20.0[\text{A}]$ まで $0.5[\text{A}]$ 刻みでモータに電流指令を与え、そのときのフォースゲージの測定値を記録して、アクチュエータの出力トルクを算出した。実験中はモータを空冷しながら測定した。

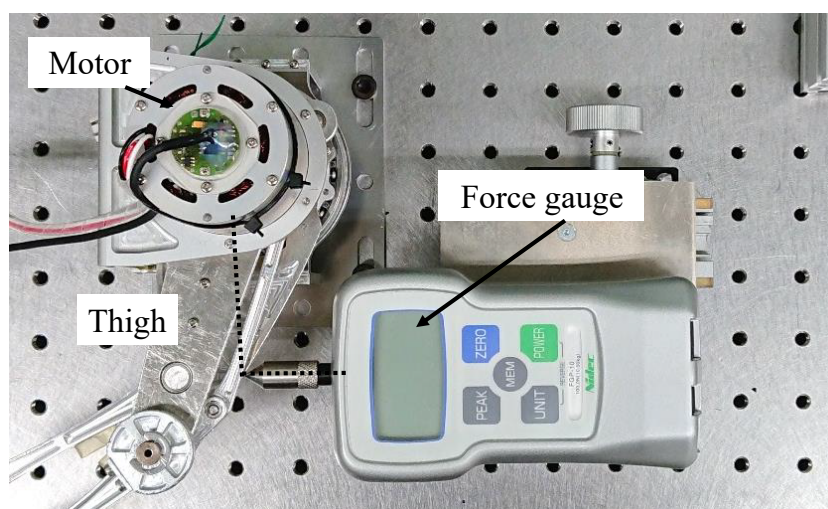


Fig. B.8: Experimental setup for the torque measurement

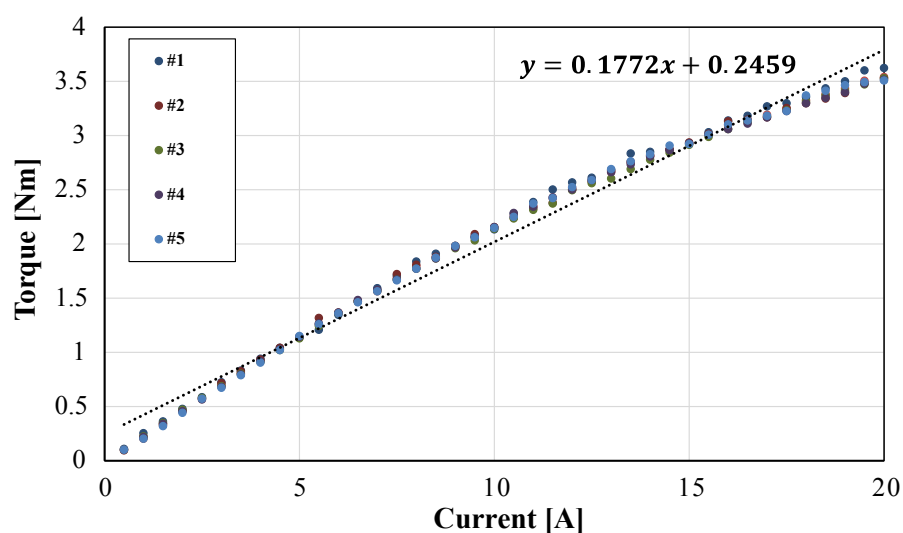


Fig. B.9: Measured results

5回の測定の結果を図B.9に示す。グラフには測定結果を線形近似した際の近似直線も示してある。この結果から、アクチュエータのトルク定数は $0.177[\text{Nm/A}]$ と同定された。

関連論文の印刷公表の方法及び時期

学術雑誌論文

1. 佐藤隆紀，明愛国：“生物規範機構を有する小型脚ロボットのための垂直跳躍運動制御”，日本ロボット学会誌（採録決定済）.
（第2章，第3章に関係する.）

国際会議発表論文（査読付き）

1. Ryuki Sato, Ichiro Miyamoto, Keigo Sato, Aiguo Ming and Makoto Shimojo: “Development of Robot Legs Inspired by Bi-articular Muscle-tendon Complex of Cats,” IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Hamburg, Germany, pp. 1552–1557, Sep. 2015.
（第2章に関係する.）

参考論文の印刷公表の方法及び時期

国際会議発表論文（査読付き）

1. Ryuki Sato, Eiki Kazama, Aiguo Ming, Makoto Shimojo, Fei Meng, Huaxin Liu, Xuxiao Fan, Xuechao Chen, Zhangguo Yu and Qiang Huang: “Design and Control of Robot Legs with Bi-articular Muscle-tendon Complex,” IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 2605–2610, Macau SAR, China, Dec. 2017.

研究業績

学術雑誌論文

1. 佐藤隆紀，明愛国：“生物規範機構を有する小型脚ロボットのための垂直跳躍運動制御”，日本ロボット学会誌（採録決定済）。

国際会議発表論文（査読付き）

1. Ryuki Sato, Hiroaki Matsuda, Motoyuki Fujieda, Hajime Hata and Aiguo Ming: “Design and Implementation of Common Platform for Small Humanoid Robots,” IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 855–860, Takamatsu, Japan, Aug. 2013.
2. Aiguo Ming, Syunpei Nozawa, Ryuki Sato, Zhangguo Yu, and Makoto Shimojo: “Development of Leg Mechanism Using a Knee Joint with Variable Reduction Ratio Adaptive to Load,” IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1574–1579, Shenzhen, China, Dec. 2013.
3. Aiguo Ming, Kazuya Enomoto, Mizuki Shinozaki, Ryuki Sato and Makoto Shimojo: “Development of an Entertainment Robot System using Kinect,” 10th France-Japan/ 8th Europe-Asia Congress on Mecatronics, pp. 127–132, Tokyo, Japan, Aug. 2014.
4. Takuma Uchida, Ryuki Sato, Aiguo Ming and Makoto Shimojo: “Development of Leg Mechanism Using a Knee Joint with Continuously Variable Reduction Ratio Adaptive to Load,” IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1199–1203, Beijing, China, Aug. 2015.
5. Aiguo Ming, Keigo Sato, Ryuki Sato, Eiki Kazama, Ichiro Miyamoto and Makoto Shimojo: “Development of Robot Leg Composed of Parallel Linkage and Elastic Spring for Dynamic Locomotion,” IEEE International Conference on Information and Automation, pp. 38–43, Lijiang, China, Aug. 2015.

6. Ryuki Sato, Ichiro Miyamoto, Keigo Sato, Aiguo Ming and Makoto Shimojo: "Development of Robot Legs Inspired by Bi-articular Muscle-tendon Complex of Cats," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Hamburg, Germany, pp. 1552–1557, Sep. 2015.
7. Eiki Kazama, Ryuki Sato, Ichiro Miyamoto, Aiguo Ming and Makoto Shimojo: "Development of A Small Quadruped Robot with Bi-articular Muscle-tendon Complex," IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1059–1064, Zhuhai, China, Dec. 2015.
8. Ryuki Sato, Shun Hashimoto, Aiguo Ming and Makoto Shimojo: "Development of a Flexible Tail for Legged Robot," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 683–688, Harbin, China, Aug. 2016.
9. Ryosuke Kawasaki, Ryuki Sato, Eiki Kazama, Aiguo Ming and Makoto Shimojo: "Development of A Flexible Coupled Spine Mechanism For A Small Quadruped Robot," IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 71–76, Qingdao, China, Dec. 2016.
10. Ryuki Sato, Eiki Kazama, Aiguo Ming, Makoto Shimojo, Fei Meng, Huaxin Liu, Xuxiao Fan, Xuechao Chen, Zhangguo Yu and Qiang Huang: "Design and Control of Robot Legs with Bi-articular Muscle-tendon Complex," IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 2605–2610, Macau SAR, China, Dec. 2017.
11. Zewen He, Fei Meng, Huaxin Liu, Lei Wang, Xin Zhu, Xuxiao Fan, Ryuki Sato, Aiguo Ming, and Qiang Huang: "Method of Design Optimization and Trajectory Implementation on a Small Cat-like Robot," IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, pp. 323–330, Rennes, France, June 2018.
12. Kanako Kurokawa, Ryuki Sato, Shuma Hiasa, Aiguo Ming, Fei Meng, Huaxin Liu, Xuxiao Fan, Xuechao Chen, Zhangguo Yu and Qiang Huang: "Introduction of Toe Mechanism with Bi-articular Tendon into Legged Robot," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1597–1602, Changchun, China, Aug. 2018.

13. Benjamin Simon, Ryuki Sato, Jean-Yves Choley and Aiguo Ming: “Development of a Bio-inspired Flexible Tail System,” 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics, pp. 230–235, Tsu, Japan, Sept. 2018.
14. Shuma Hiasa, Ryuki Sato, Aiguo Ming, Fei Meng, Huaxin Liu, Xuxiao Fan, Xuechao Chen, Zhangguo Yu and Qiang Huang: “Development of a Bipedal Robot with Bi-articular Muscle-tendon Complex between Hip and Knee Joint,” IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems, pp. 391–396, Shenzhen, China, Oct. 2018.
15. Lei Wang, Fei Meng, Huaxin Liu, Xuxiao Fan, Ryuki Sato, Aiguo Ming and Qiang Huang: “Design and Implementation of Jumping Robot with Multi-springs Based on the Coupling of Polyarticular,” IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 287–292, Kuala Lumpur, Malaysia, Dec. 2018.
16. Zewen He, Fei Meng, Huaxin Liu, Xuxiao Fan, Shengkai Liu, Ryuki Sato, Aiguo Ming and Qiang Huang: “Optimization of Standing Long Jump Strategy on a Small Quadruped Robot,” IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1226–1231, Kuala Lumpur, Malaysia, Dec. 2018.
17. Kohei Tomishiro, Ryuki Sato, Yasuji Harada, Aiguo Ming, Fei Meng, Huaxin Liu, Xuxiao Fan, Xuechao Chen, Zhangguo Yu and Qiang Huang: “Design of Robot Leg with Variable Reduction Ratio Crossed Four-bar Linkage Mechanism,” IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Macau, China, pp. 4333–4338, Nov. 2019.

国内学会発表（査読なし）

1. 川崎涼裕，佐藤隆紀，風間英気，明愛国，下条誠：“動物の筋腱複合体を規範とする小型四脚ロボットの研究開発—柔軟な背骨機構の開発—”，ロボティクス・メカトロニクス講演会，2A2-12a2，神奈川，June 2016.
2. 日浅崇馬，佐藤隆紀，風間英気，明愛国，下条誠：“動物の筋腱複合体を規範とする小型四脚ロボットの研究開発—股関節と膝関節間での駆動

トルクの相互利用を可能とする脚機構の開発―”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-K06, 福島, May 2017.

その他

1. Ryuki Sato: “Design and Control of Legged Robots Using Bio-inspired Mechanism,” Full day Workshops on Articulated Actuation Towards Human Capabilities for Robots, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Invited Talk, Macau, China, Nov. 2019.

著者略歴

佐藤 隆紀（さとう りゅうき）

1990年 11月8日	東京都に生まれる	
2009年 3月	東京都立立川高等学校 普通科	卒業
2010年 4月	電気通信大学 情報理工学部 知能機械工学科	入学
2014年 3月	同上 卒業	
2014年 4月	電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 博士前期課程	入学
2016年 3月	同上 修了	
2016年 4月	電気通信大学大学院 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻 博士後期課程	入学
2020年 3月	同上 修了予定	

2017年4月から2019年3月まで，日本学術振興会特別研究員（DC2）に採用（研究課題：ネコの筋骨格と運動制御を規範とした高運動性能小型四脚ロボットの研究開発）．IEEE学生会員，日本ロボット学会学生会員，日本機械学会正会員．

令和元年度博士論文

生物の二関節間筋腱複合体を規範とした
脚ロボットの開発

電気通信大学大学院
機械知能システム学専攻

情報理工学研究科
明研究室

佐藤 隆紀

提出年月

2020年3月