

東京大学 大学院新領域創成科学研究科

基盤科学研究系

先端エネルギー工学専攻

平成 23 年度

修士論文

二関節筋にもとづくモーションコントロール法と
その 2 リンクマニピュレータの
直動運動への応用

Biarticular Muscle Based Motion Control
and Its Application to Straight Motion
of Two-link Manipulator

平成 24 年 2 月 提出

指導教員 堀 洋一 教授

47106058 木村 康人

内容便概

本論文では、生体機構の特徴の一つである二関節筋のロボティクスへの応用を目指し、「直動運動」という単純な運動に焦点を当て、二関節筋との関連を論じる。日頃我々が四肢によって行う動作は単関節のみを駆動する単関節運動ではなく、複数の関節を同時に駆動する多関節運動であり、特に、四肢においては肩や腰といった体幹部の関節と手首、足首といった先端の関節との間を結ぶ直線上の運動がほとんどであり、これを本論文では直動運動と呼ぶ。物体に力を与えつつ先端を直線上で運動させるという静的な直動運動と、跳躍や走行のモデルとなるような動的な直動運動において二関節筋がどのようににはたしているのかを明らかにする。

まず、生物四肢のモデルとしてよく用いられる三対6筋を持った2リンクモデルに関して静力学を解き、直動運動において二関節筋の存在が有利に働くということを示し、実験においての検証をおこなう。

次に、動力学を解くために新たに第一関節の単関節筋と二関節筋のみをもつ Mono-Bi システムを提案し、これに関する静力学、動力学を解く。静力学においては、二対の筋が発揮するトルクの和と差のそれぞれのモードが先端での直行座標系における力に対応することを論じ、また、動力学においては慣性行列の対角化が外乱オブザーバを用いることで非常に簡単に実現できることを示す。さらに、力センサレスインピーダンス制御を取り入れることによって、外部入力に対する系の応答を自由に設定し、natural dynamics を制御によって実現する手法を提案する。

二関節筋の研究と実際のロボットへの応用の間にはまだ大きな隔たりがある。それは前者が手先を固定した場合の手先の出力特性を議論するにとどまっている一方で、後者は歩行や跳躍への応用を目指しているからである。本論文では直動運動と二関節筋の関連を見出したという点で、この隔たりを埋める一助となると考えられる。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	現代社会におけるロボット技術の役割	1
1.1.2	従来型のロボットと今後必要とされるロボット	2
1.2	生体機構としての二関節筋をロボットへ応用した研究	3
1.2.1	生物四肢と従来型 2 リンクマニピュレータとの相違	3
1.2.2	二関節筋に関する先行研究	5
1.3	研究の目的	8
第 2 章	三対 6 筋モデルと関節剛性制御による静的直動運動の実現	10
2.1	先端剛性の調整による静的直動運動に関する研究	10
2.2	生物四肢の三対 6 筋モデル	11
2.2.1	二関節同時駆動	11
2.2.2	筋の持つ粘弾性モデル	13
2.2.3	拮抗筋による拮抗駆動	15
2.3	筋粘弾性と拮抗駆動を利用した関節剛性制御による静的直動運動	17
2.3.1	静力学による生物四肢アームの手先出力特性	17
2.3.2	関節剛性による所望反力	18
2.4	シミュレーション結果	19
2.4.1	二関節筋の有無の比較	19
2.4.2	第二関節単関節筋の有無の比較	19
2.4.3	所望反力生成	19
第 3 章	Mono-Bi システムと脚座標空間による動的直動運動の実現	21
3.1	跳躍や走行を動的な直動運動でモデル化した研究	21
3.2	Mono-Bi システムの運動学・静力学	22
3.2.1	Mono-Bi システムの運動学	22
3.2.2	Mono-Bi システムの静力学	25
3.3	Mono-Bi システムの動力学と脚座標空間オブザーバ	26
3.3.1	Mono-Bi システムの動力学	26
3.3.2	脚座標空間オブザーバ	29
3.3.3	LSO に基づくインピーダンス制御	31
第 4 章	遊星歯車を用いた二関節筋装備型ロボットアームの実装	35
4.1	遊星歯車機構	35

4.1.1	遊星歯車機構の構成	35
4.1.2	遊星歯車機構のトルク伝達式	35
4.2	遊星歯車機構を用いた 2 リンクマニピュレータ	37
4.2.1	2 リンクマニピュレータの設計	37
4.2.2	遊星歯車機構を用いた二関節同時駆動機構のトルク伝達	38
4.2.3	製作した 2 リンクマニピュレータとその諸元	39
4.3	実験機の検証	42
4.3.1	各筋による手先出力	42
第 5 章	提案する制御手法の検証	44
5.1	関節剛性のみの制御による直動運動の実験結果	44
5.1.1	手先出力の直動化	44
5.1.2	直動運動実験	45
5.2	Open Dynamics Engine を用いた脚座標空間オブザーバの 検証結果	47
5.2.1	Open Dynamics Engine について	47
5.2.2	シミュレーションモデル	47
5.2.3	LSO のシミュレーション結果	48
5.2.4	LeSOIC のシミュレーション結果	52
第 6 章	結論	54
6.1	まとめ	54
6.2	今後の展望と課題	55
	謝辞	57
	参考文献	58

第 1 章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 現代社会におけるロボット技術の役割

現在，我が国は少子高齢社会となっており，既に 5 人に 1 人が高齢者（65 歳以上人口）という状況となっている．文献 [1] によれば，生産年齢人口（15 歳～64 歳人口）は 1990 年代以降減少の一途を辿っているにも関わらず，高齢者人口は急速に増え，2055 年には高齢者人口は 40 % に迫ると予想されている．図 1.1 に人口推移の過程と予想を示す．現役世代（20～64 歳人口）人口が何人で 1 人の高齢者を支えているのかを見ると，日本が超高齢化へ突入していることが実感できる．1950 年では 10.0 人の現役世代が，1 人の高齢者を支えていた．これに対し，2010 年には，わずか 2.6 人の現役世代で支えなくてはならなくなり，2050 年には 1.2 人で支えなくてはならない．このように，高齢社会が進行するに従って現役世代への負担が重くのしかかることとなり，社会保障の維持が実現できるかどうか大きな課題となっている．そこで，日本が誇るロボット技術を介護や福祉，製造の現場に導入し，パワーアシストデバイスや歩行アシスト機器，自律型介護・作業ロボットを開発し，少子高齢化による労働人口の減少と被介護者の増加に対応しようとしている．

一方，ロボット産業は異なる面からも期待を集めている．平成 23 年 3 月 11 日の東日本大地震による津波被害は，三陸地方を初めとする広範囲の地域に壊滅的な被害をもたらし，さらに福島第一，第二原子力発電所を全電源喪失という極めて危険な状況へと追い込んだ．災害救助活動や原発での復旧作業は瓦礫や漂流物による足場の悪さに加え，放射線という見えない障害によって困難を極めた．日本はロボット大国でありながら原発作業用のロボット技術開発が進んでおらず，結局米国から借用したロボットが原発内に投入されることとなった．歩行ロボットの極みである本田技研工業の二足歩行型ロボット ASIMO の原発への投入が検討中であるが，足場の悪さが障害となっており，脚部をキャタピラに変更したタイプの製作を行うとしている．

上述した社会問題とそれに伴うロボット技術に対する期待はほんの一例に過ぎないが，共通して言えることは，ロボットが活躍する場所はもはや工場の中だけでは無くなった，ということである．それはすなわち，ロボットがこれまで得意としてきた既知の環境における高速，高精度，高剛性の運動という特性を，未知の環境における，安全性の高い運動特性へと変更しなくてはならないことを意味している．ロボットのエンドエフェクタに接する物体はあらかじめ

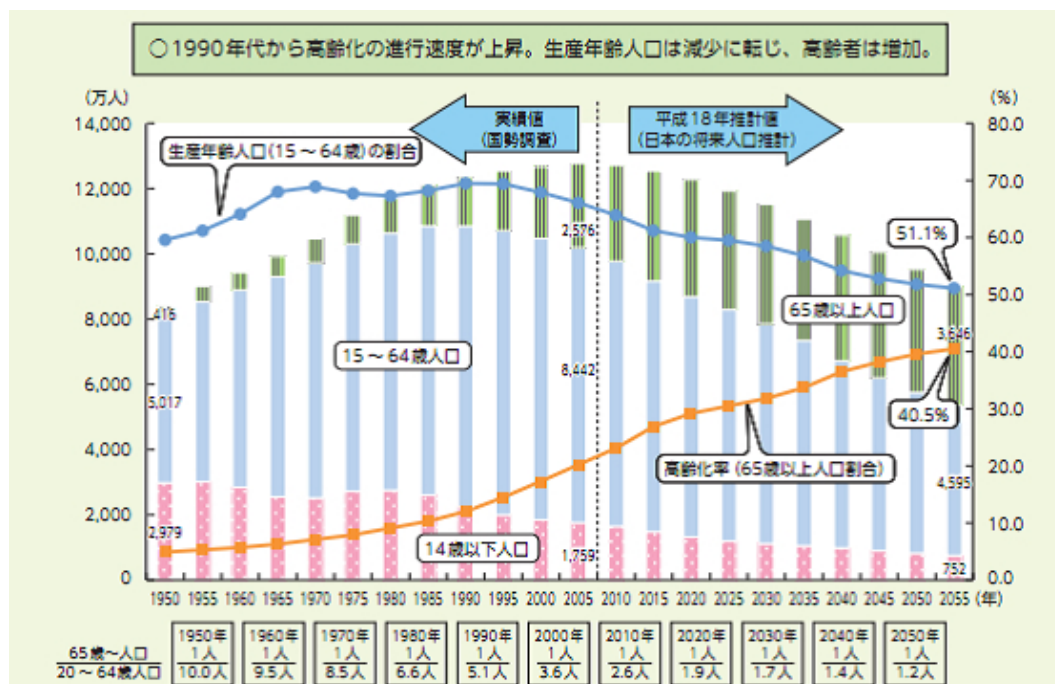


図 1.1 我が国の人口推移

プログラムへ入力された自動車部品などではなく、個体差があり、脆く、しかも運動する人間であるかもしれないし、凹凸もなく摩擦係数も大きい研究所の床ではなく、瓦礫が散乱した災害現場であるかもしれない。

そうした環境で必要とされるロボットとはどのようなものか。それはおそらく、より人間、生物に近いロボットではないだろうか。

1.1.2 従来型のロボットと今後必要とされるロボット

そもそもロボット技術は日本のお家芸であり、図 1.2 に示すような産業用ロボットに関しては世界で7割のシェアを誇っている [2]。この高い技術力を利用すれば、上述したようなロボットの応用はすぐにでも可能なように思われるかもしれない。しかし、実際はそうではない。ロボット技術の開発を産業用ロボットから広げ、サービスや福祉へ向けてから長い年月がたっているが、いまだに商用化した例は数えるほどである。これは単に需要が小さかったり、コストがあまりにも高すぎる、という事だけが問題なのではない。

まず、産業用ロボット向けに完成度を高めた技術をそのまま今後のロボット技術に応用しようとしている点が間違っていると考えられる。今後必要とされるロボットは、より人間に近い距離で働く必要があり、より人間に近い動きで動く必要がある。すなわち、これまでの高速・高精度・高出力・高剛性のロボットでなく、人間ほどの正確さや速度でかわらないので、柔軟な運動が可能なロボットが必要であると考える。

こうしたロボット技術に対する要求の違いを機敏に察知し、生体機構をロボットに取り入れようという研究は多くなされてきている。次節ではそうした先人たちの研究について述べる。



図 1.2 産業用ロボット

1.2 生体機構としての二関節筋をロボットへ応用した研究

1.2.1 生物四肢と従来型 2 リンクマニピュレータとの相違

図 1.3 は従来型の 2 リンクマニピュレータと生物四肢の 2 リンクアームモデルの比較である。従来型のマニピュレータの多くは、各関節ごとに回転型のギアドモータを備えており、1 つのアクチュエータで 1 つの関節を駆動する形となっている。この構造は関節自由度とアクチュエータの数が等しいので、冗長性が無く、逆運動学問題などにおいても解の存在が補償されるため好ましい。

一方、生物の筋骨格構造は極めて複雑である。四肢の運動を平面に限定して考えれば、膝および肘関節は 1 自由度の蝶番関節とみなすことができるが、単純な平面運動に作用する筋は非常に多い。図 1.3 右の生物四肢モデルは、この平面内の運動に作用する複数の筋を機能別に分類し、モデル化したもので、「機能別実効筋モデル」と呼ばれる [6]。この機能別実効筋モデルと従来型マニピュレータモデルで大きく異なる点は、前者には 2 つの関節にまたがって配置され、2 つの関節に同時に収縮力を発揮する二関節筋と呼ばれる筋が存在することである。二関節筋に相当するアクチュエータは、従来型ロボットには存在しない。それは明らかに冗長であり、2 つの関節をつなぐことで自由度を損なうと考えられて来たためである。しかし、ヒトのみならずあらゆる動物が二関節筋などの多関節筋を持っている (図 1.4)。この事実が意味することは、ロボット工学の範疇では冗長で無駄であると考えられる二関節筋は、生物進化の厳しい淘汰を生き抜くために必要なものであったということである。

すなわち、ロボットに生物の特徴を持たせようという立場においては、二関節筋にあたるアクチュエータが存在しないということの方が不自然なことであると考えられる。

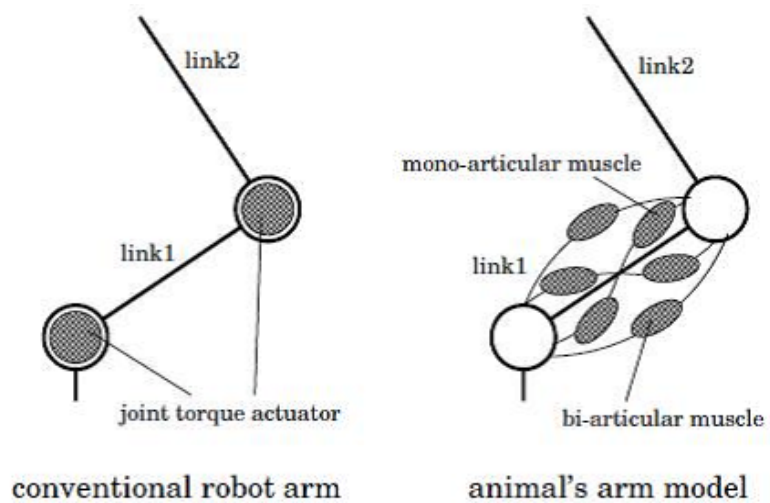


図 1.3 生物四肢モデル

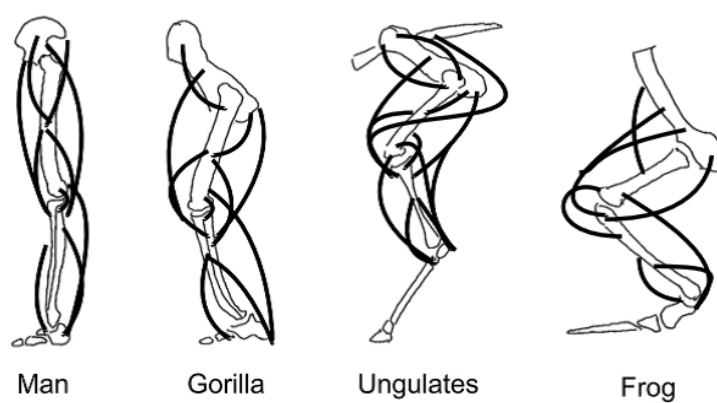


図 1.4 さまざまな生物の脚の筋配置

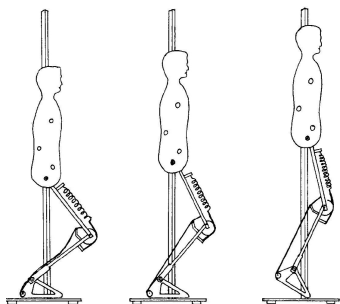


図 1.5 Ingen のホッピングモデル [3]

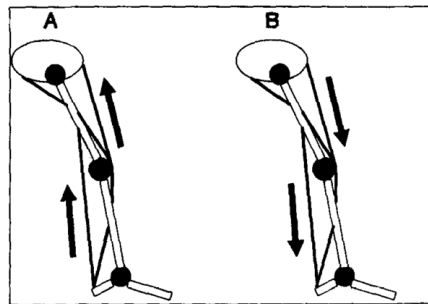


図 1.6 二関節筋によるエネルギー伝達 [4]

1.2.2 二関節筋に関する先行研究

二関節筋の存在は古くから知られていたがなぜ生物に必要なのかは謎のままであった．Ingen Schenau は二関節筋の中の腓腹筋に着目し，跳躍時におけるエネルギー伝達能力を，図 1.5 に示すような簡易なモデルによって検証を行った [3]．Zatsulofsky も二関節筋の存在によって図 1.6 に示すようなエネルギーの流れが生じるとした．Hogan は 2 リンクアームの先端における剛性の調整に生物の拮抗する筋対が深く関わっているとし，特に二関節筋の重要性を説いた [5]．

Kumamaoto らによって四肢の三対 6 筋モデル (図 1.7) が提案され，平面に限定した四肢の運動において二関節筋が先端出力方向制御に大きく貢献していることが，ロボットアームを用いた実験によって示された [6]．この三対 6 筋モデルによる定式化により，二関節筋の研究が活発となり，Oshima らは Ingen Schenau のように腓腹筋に着目し，ワイヤによって膝と足首関節をつないだ単純なロボットレッグ (図 1.8) による実験によって，二関節筋の存在が跳躍時に膝に発生するトルクを効率よく鉛直方向へ変換させていることを示した [7]．Fujikawa らは先端出力制御に関して，ヒトから得た筋電信号 (EMG) パターンをロボットアームの出力に適用することで，ヒトとロボットアームで等しい六角形の手先出力が得られることを示した (図 1.9) [8]．

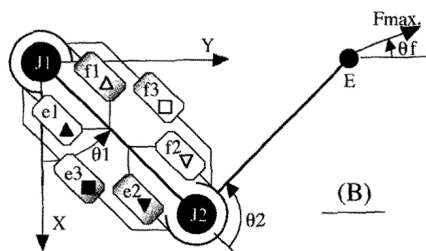


図 1.7 三対 6 筋モデル [6]

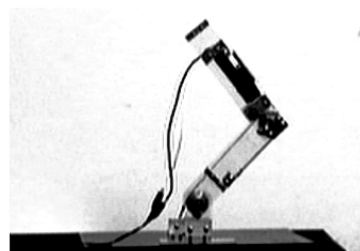


図 1.8 Oshima らのジャンピングモデル [7]

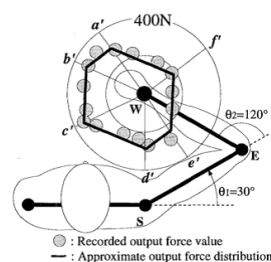
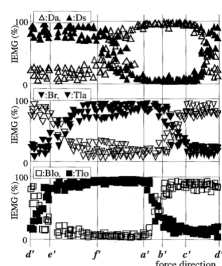


図 1.9 筋電パターンと手先出力 [8]

Kumamoto らによって二関節筋の基本的特徴が明らかとされ、二関節筋をマニピュレータへ適用しようとする試みが多くなされ始めた。Kadota, Oda らは可変弾性アクチュエータを用いて二関節筋装備基本モデル「HIPRO」を製作し(図 1.10)、先端出力特性の測定試験を行い、それをもとにした脚モデルを開発(図 1.11)。先端出力特性を利用した跳躍を実現させた [9][10]。これらのロボットは三対 6 筋モデルを筋の弾性に至るまで非常によく再現したロボットであったが、従来型のアームに比して非常に複雑な構造となってしまった。Tsuji は三関節筋をもったナメクジウオ型ロボットを開発し(図 1.12)、三対 6 筋の出力特性を得る際に利用する協調制御を用いて S 字状の遊泳運動が多関節筋と単純な制御によって実現できることを示した [11]。これは、生物の基本的な動作が多関節筋と簡単な制御によって実現されているということを示唆している。Valerio らは 6 つのモータによるワイヤー駆動型の 2 リンクアームを開発し、冗長性問題の解法として ノルムを用いた解法を提案し、実証している [12]。Umemura らは遊星歯車機構を用いた二関節同時駆動機構を提案し、Yoshida らはタイミングベルトによる機構を提案した [13][14][15]。これらの二関節筋装備型 2 リンクマニピュレータは、一対の筋による拮抗駆動を一つのモータで置き換えているため、アクチュエータは 3 つとなり拮抗駆動の特徴は失われるが、6 つのアクチュエータを要していた HIPRO やワイヤ駆動のアームなどよりもコスト的に優れている。

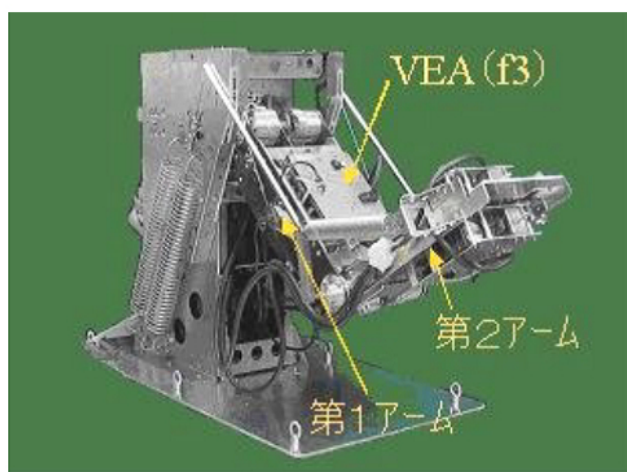


図 1.10 HIPRO[9]



図 1.11 OKI の脚型ロボット [10]

一方、三対 6 筋モデルとは異なる形で二関節筋を装備したロボットも多い。図 1.16 は Niiyama らが開発したカエル型ロボットであり、空気圧アクチュエータを二関節筋となるよう配置し、カエルと同様の跳躍動作を実現させた [16]。Hosoda らは人間の脚の筋配列を空気圧アクチュエータで再現したロボットを開発し、連続跳躍を実現させた [17]。Babic らは腓腹筋を機械ばねによって置き換えた跳躍ロボットを開発し、ばねの強度や切り離すタイミングに関して詳細な検討を行っている [18]。Seyfarth らは脚の筋群をばねによって置き換え、腰部の回転型モータのみの駆動によって安定で効率の良い二足歩行が可能なモデルを提案している [19]。Lewis らは脚内に備えた回転型モータとケブラー繊維によって下肢の筋を再現し、屈曲姿勢から伸展させる際に必要となるエネルギー消費量が、二関節筋の存在によって低減させられることを実験的に示した [20]。また、Niiyama らは走行時の下腿の特性を分析することで、下腿を単なるブレードに置き換え大腿の筋群のみを能動的なアクチュエータとした走行ロボットを開発した

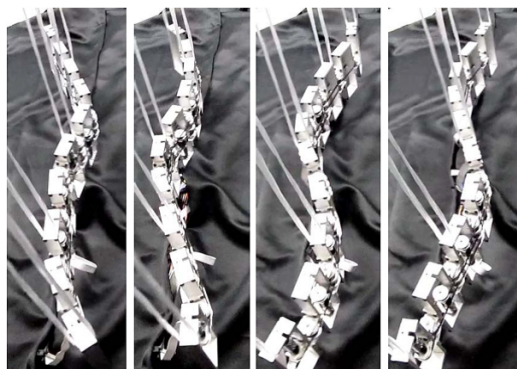


図 1.12 ナメクジウオ型ロボット [11]

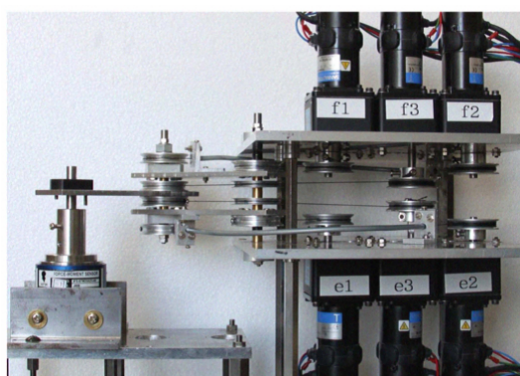


図 1.13 ワイヤ駆動型二関節筋アーム [12]

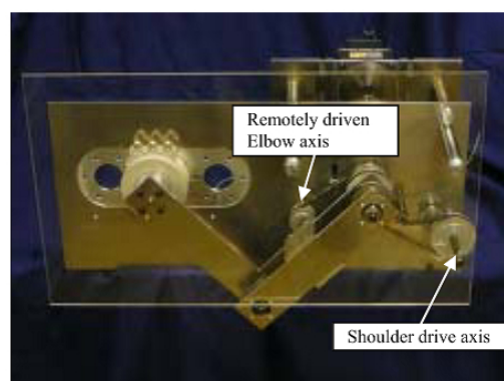


図 1.14 遊星歯車を用いた二関節筋アーム [13]
[14]

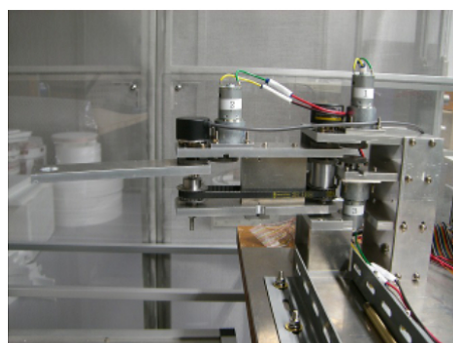


図 1.15 タイミングベルトを用いた二関節筋アーム [15]

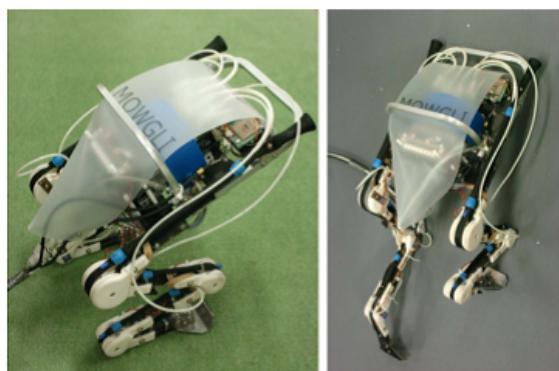


図 1.16 カエルの筋配列を模倣して空気圧アクチュエータを配置したロボット [16]

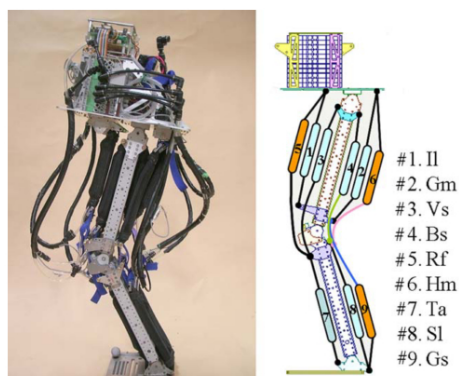


図 1.17 脚筋配列をに再現したロボット [17]

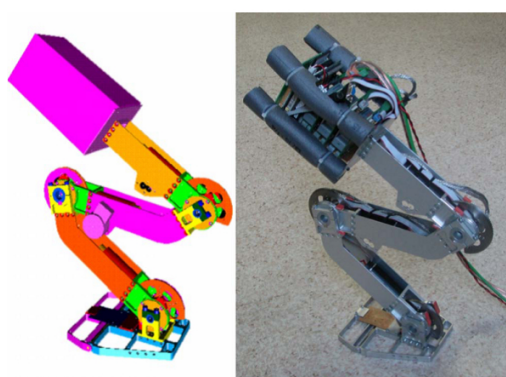


図 1.18 腓腹筋をばねで置き換えた跳躍ロボット [18]

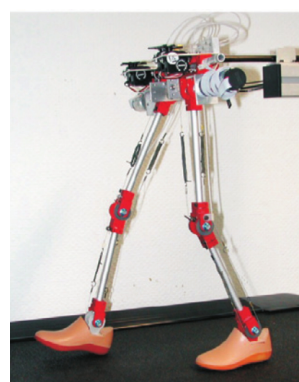


図 1.19 下肢の筋群をばねで再現し腰部のモータで二足歩行するロボット [19]

[21]．このロボットでは，走行時に脚先端で必要となる力を得るために，Kumamoto らが提案した三対 6 筋モデルでの六角形の出力特性を用いて空気圧アクチュエータの出力パターンを決定している．

上述のとおり，二関節筋をロボットへ搭載しようという試みは多く，現在も多くのロボットが開発されている．しかし，これらのロボットは Hogan や Kumamamoto らが提唱した二関節筋の静力学的な先端出力・剛性特性を裏付けするためであったり，一方では二関節筋の機能が明確ではないのにも関わらず，生体機構の模倣として導入し，走行や跳躍を行わせているものが多い．すなわち，二関節筋の基本的な機能の理解は進んでいるが，それがどのように跳躍や走行に役立っているのかについては未だ不明瞭なままとなっている．

1.3 研究の目的

本論文では，前節で述べたような動物の運動と二関節筋との間に存在する関係を明らかにするため，まず，動物の基本的な運動を四肢の「直動運動」として定義する．ここでいう直動運動とは，例えば上肢ならば，肩関節と手関節を結んだ直線状を，手関節が移動するような運動を言い，下肢の場合ならば腰関節と足首関節の間の直線状の運動を表す．我々が普段行っている運動，すなわち歩行や走行，立ち上がり，跳躍，階段昇降，物体の持ち上げ，ドアの押し引

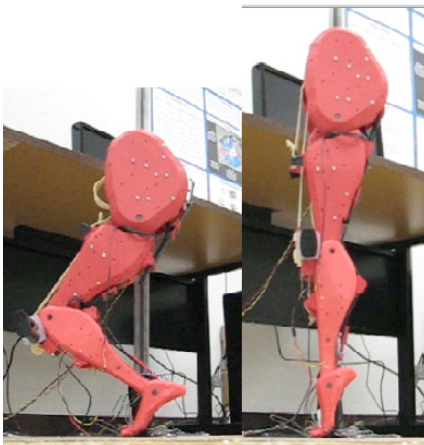


図 1.20 ベルトとモータで筋を再現したロボット [20]

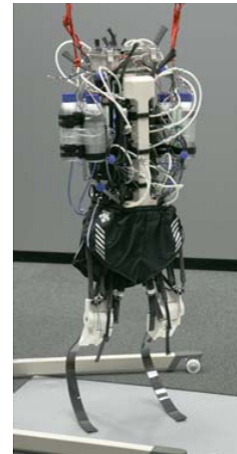


図 1.21 大腿の筋を空気圧アクチュエータで置き換えた走行ロボット [21]

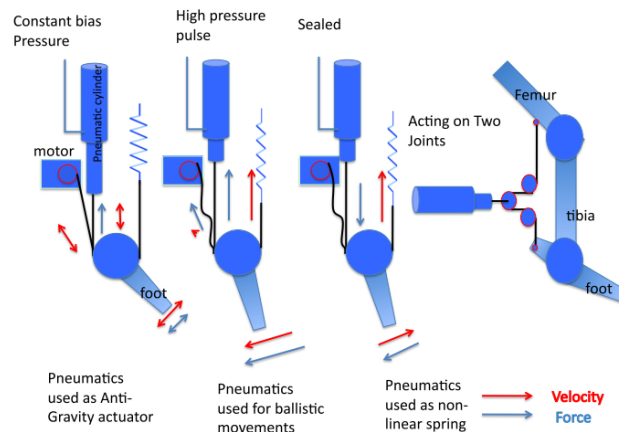


図 1.22 チータの脚を模倣したロボット [22]

き。こういった基本動作は単関節のみを動作させる運動ではなく、必ず多関節運動となっており、しかも先に定義した直動運動である場合が多い。したがって、本論文ではこの四肢の直動運動を動物の基本動作として考え、二関節筋がどのように直動運動に対して関係を及ぼしているのかについて、三対六筋モデルに基づく静力学的な考察と動力学的な考察を行い、二関節筋と運動制御との関連性を明らかにする。

また、二関節筋の機能を備えた 2 リンクマニピュレータとして、遊星歯車を用いた機構を提案する。遊星歯車はギア比のみによって伝達トルクが決定されるため、タイミングベルトなどを用いるよりも優れていると考えられ、また、拮抗駆動を一つのモータに置き換えた構造を採用しているため、コスト的にも三対六筋を忠実に再現した 2 リンクマニピュレータより優れている。ただし、遊星歯車特有の干渉などの問題が生じるため、何らかの対策を行う必要がある。本論文では遊星歯車機構を二関節筋装備型マニピュレータとして用いる手法についても述べる。

第 2 章

三対 6 筋モデルと関節剛性制御による静的直動運動の実現

2.1 先端剛性の調整による静的直動運動に関する研究

文献 [5] において，Hogan は上肢の三対 6 筋機構に着目し，それらの粘弾性と手先における剛性の関係を数式によって記述し，手先の剛性が楕円体であらわされ，その長軸を外力の方
向と一致させるためには 2 つの関節に跨って配置される二関節筋が必要であると結論付け，イン
ピーダンス制御において二関節筋の重要性について言及している．Kumamoto らは文献 [6] に
よって四肢の 3 対 6 筋モデルを数式で記述し，手先の出力，剛性の制御に関して従来型の関節
ごとにアクチュエータを備えたロボットアームよりも有利であることを示し，手先と体幹の関
節を結ぶ直線状を手先が運動するような場合では，二関節筋の存在が不可欠であると示した．
Fujikawa らはさらに Kumamoto らの論を発展させ，実際に空気圧アクチュエータで筋を再現
したロボットによって検証した [8]．Fukusho らは文献 [23] において，従来型マニピュレータに
直動運動をさせる場合に，三対 6 筋モデルによって得られた出力パターンを適用させることを
提案し，実験によって有効性を証明した．Tajima らは二関節筋の出力方向，剛性制御に着目
し，直動方向への力の出しやすさを利用した全く新しい F1 用のステアリングシステムを開発
し，実験によってドライバーの疲労軽減などに効果があることを示した [24] ．

このように，静力学的な直動運動における研究は多く，ステアリングに応用されるほど成熟
してきたといえる．本章ではこの直動運動に関して，三対 6 筋のモデルから詳しく見直し，拮抗
駆動の原理を利用することで単純な関節剛性制御によって直動運動を実現する手法を提案する．

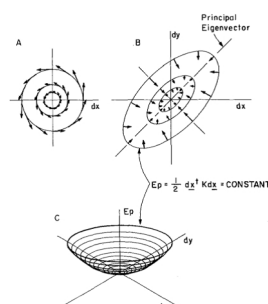


図 2.1 Stiffness ellipse[5]

2.2 生物四肢の三対6筋モデル

2.2.1 二関節同時駆動

図 2.2 は Kumamaoto が提案する三対 6 筋構造を持った 2 リンクアームモデルである [6] . 筋は 6 つあり, $f_i, i = 1, 2, 3$ は屈筋 (flexor muscle) であり, $e_i, i = 1, 2, 3$ は伸筋 (extensor muscle) である. f_1, e_1 は第一関節の単関節筋拮抗対, f_2, e_2 は第二関節の単関節筋拮抗対, そして f_3, e_3 は二関節筋拮抗対である. 単関節筋は一つの関節のみにその収縮力を発揮し, 二関節筋はまたいでいる二つの関節に同時に等しい収縮力を発揮する. 単関節筋は, 拮抗駆動であることを除けば従来型マニピュレータと同様の一つの関節を駆動するアクチュエータとして機能する. 対して二関節筋は従来型マニピュレータにはない, 二関節同時駆動という特徴を持つ.

次に, 各筋で生じる収縮力が関節に及ぼすトルクについて述べる. 各筋の各関節への付着点が等しい位置にあると仮定する. すなわち, 関節の半径は関節ごとに一定であり, それぞれ r_1, r_2 であるとする. また, 関節に生じるトルクを T_1^j, T_2^j とし, 各筋が発生する収縮力を $F_j^m (j = f_1, f_2, f_3, e_1, e_2, e_3)$ とすると, 各筋によって生じる関節トルクは, 式 (2.2) とあらわすことができる.

$$\begin{aligned} T_1^j &= (F_{f1}^m - F_{e1}^m)r_1 + (F_{f3}^m - F_{e3}^m)r_1 \\ T_2^j &= (F_{f2}^m - F_{e2}^m)r_2 + (F_{f3}^m - F_{e3}^m)r_2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

ここで各筋が関節に発揮するトルクは, 第一関節と第二関節の関節半径を等しい ($r_1 = r_2 = r$) とした場合,

$$\begin{aligned} \tau_1^m &= (F_{f1}^m - F_{e1}^m)r \\ \tau_2^m &= (F_{f2}^m - F_{e2}^m)r \\ \tau_3^m &= (F_{f3}^m - F_{e3}^m)r \end{aligned} \quad (2.2)$$

となる. 従って式 (2.2)(2.2) より, 関節トルクは以下のように表すことができる.

$$\begin{aligned} T_1^j &= \tau_1^m + \tau_3^m \\ T_2^j &= \tau_2^m + \tau_3^m \end{aligned} \quad (2.3)$$

すなわち, 二関節同時駆動機構では単関節筋が他の関節に影響を及ぼすことがなく, 二関節筋は等しいトルクを両方の関節に同時に発揮するといえる. これは二関節筋をロボットアームで実現する際に考慮すべき点である.

式 (2.2) であらわされる関節トルクを静力学に適用することで, 三対 6 筋モデルの手先出力特性は図 2.3 のようになる. すなわち, 第一関節の単関節筋は第二リンクの延長上に, 第二関節の単関節筋は第一関節と手先を結ぶ直線上に, そして二関節筋は第一リンクと平行な直線上に, それぞれ出力することが知られている. 従来型の単関節筋に相当するアクチュエータのみを備えたロボットアームでは二つの方向のみへ出力するので, 手先で出力可能な範囲は四角形となるが, 三対 6 筋モデルでは六角形となり, よりバランスの良い出力特性が得られる [6].

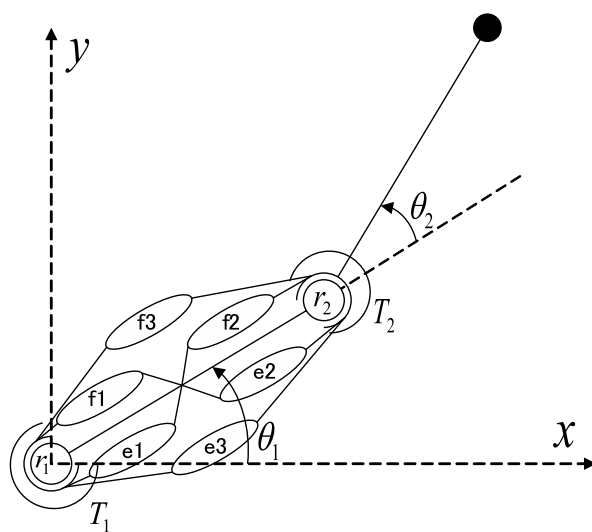


図 2.2 Animal arm model

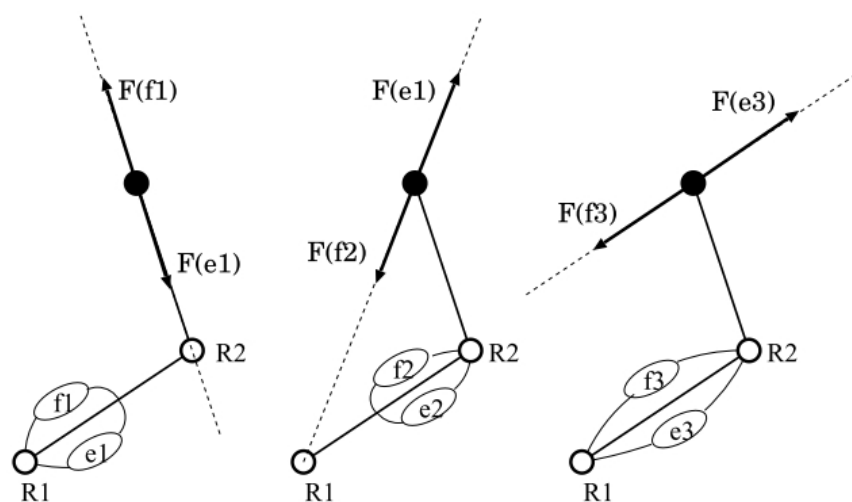


図 2.3 三対6筋モデルの手先出力特性

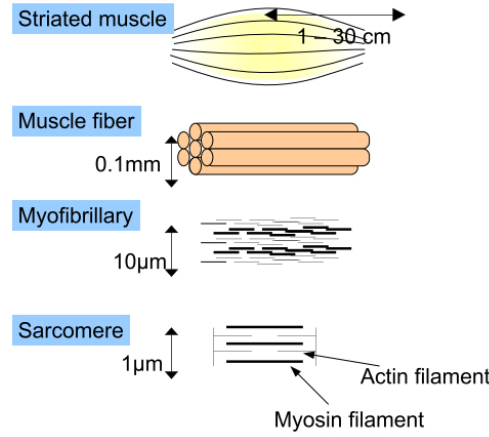


図 2.4 筋の構造

2.2.2 筋の持つ粘弾性モデル

生物の筋は化学エネルギーを力学エネルギーへと変換する非常に優秀なアクチュエータであり、微視的に見るとその構造は図 2.4 にしめす様に、アクチンフィラメントとミオシンフィラメントが吸引しあって収縮力を発揮する構造となっている。

筋を巨視的に見た場合は、図 2.52.6 に示すような出力-筋長および出力-筋収縮速度の関係を持つことが実験的に知られている。従って、筋の張力 F^m は筋の活性レベル α ，筋長 L^m ，筋収縮速度 V^m により，

$$F^m = \alpha g(L^m, V^m) \quad (2.4)$$

とあらわすことができる。ただし， $g()$ は非線形関数であるとする。これを，筋の自然長 $L^m = l_0^m$ ，収縮速度 $V^m = 0$ の近傍でテイラー展開することにより，筋の張力は式 (2.5) のように表される。

$$\begin{aligned} F^m &\approx \alpha \left\{ g(l_0^m, 0) + \frac{\partial g}{\partial L^m} \Big|_{V^m=0, L^m=l_0^m} (L^m - l_0^m) + \frac{\partial g}{\partial V^m} \Big|_{V^m=0, L^m=l_0^m} (V^m - 0) \right\} \\ &= \alpha(f_0 - k_0 x - b_0 \dot{x}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで， k_0, b_0 は筋の弾性および粘性係数で，定数である。また筋の収縮力を $u = \alpha f_0$ とすると，

$$k = \frac{k_0}{f_0}, b = \frac{b_0}{f_0} \quad (2.6)$$

とすることにより，筋の張力を収縮力であらわした式 (2.7) が得られる [35]。

$$F^m = u - K(u)x^m - B(u)\dot{x}^m = u - kux^m - bu\dot{x}^m \quad (2.7)$$

バネ成分とダンパ成分の係数は，収縮力に比例する関数と考えることができ，その比例係数を b, k とする。また x^m は自然長からの変位である。

以上により，筋は図 2.7 のように，バネ成分とダンパ成分を持ったモデルとして扱うことができる。

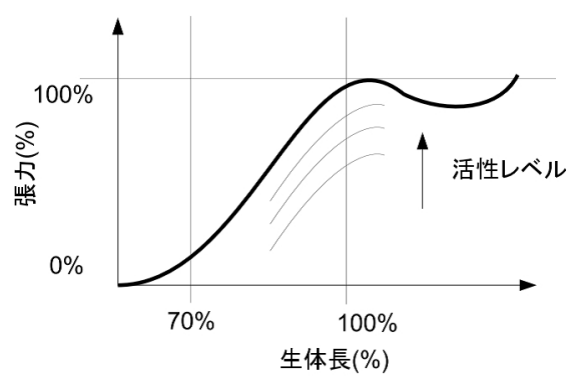


図 2.5 筋の長さ と出力の関係 [6]

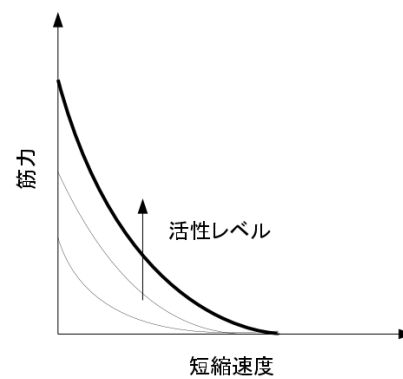


図 2.6 筋の収縮速度 と出力の関係 [6]

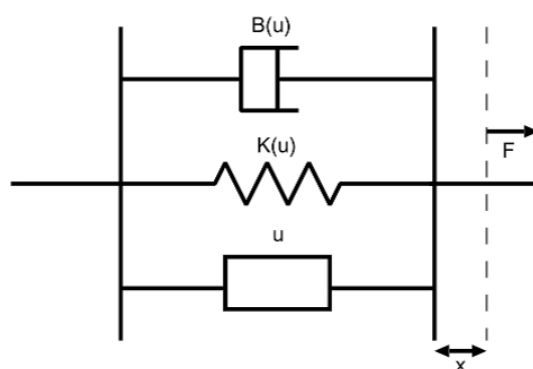


図 2.7 バネ-ダンパ成分を持った筋モデル

2.2.3 拮抗筋による拮抗駆動

生物のアクチュエータである筋肉の特徴として、筋肉は収縮する方向にのみ力を発揮できるということがある。従って、体の多くの関節は伸筋と屈筋という二対の筋が引っ張りあうことによって駆動されている。これを拮抗駆動といい、生物四肢モデルの大きな特徴の一つとなっている。図 2.8 はその概念図である。

拮抗駆動により、関節トルクは式 (2.2) で表される。前節で述べた粘弾性を考慮に入れて計算すると、拮抗駆動であるから拮抗筋の収縮量は伸筋と屈筋で等しくなり、 $x_f^m = -x_e^m$ であるから、第一関節の関節トルクは式 (2.8) となる。

$$\begin{aligned}
 T_1^j &= (F_{f1}^m - F_{e1}^m)r_1 + (F_{f3}^m - F_{e3}^m)r \\
 &= \{(u_{f1} - ku_{f1}x_{f1}^m - bu_{f1}\dot{x}_{f1}^m) - (u_{e1} - ku_{e1}x_{e1}^m - bu_{e1}\dot{x}_{e1}^m)\}r \\
 &\quad + \{(u_{f3} - ku_{f3}x_{f3}^m - bu_{f3}\dot{x}_{f3}^m) - (u_{e3} - ku_{e3}x_{e3}^m - bu_{e3}\dot{x}_{e3}^m)\}r \\
 &= r(u_{f1} - u_{e1}) - r(k + bs)(u_{f1} + u_{e1})x_1^m \\
 &\quad + r(u_{f3} - u_{e3}) - r(k + bs)(u_{f3} + u_{e3})x_3^m \\
 &= r(u_{f1} - u_{e1}) - r^2(k + bs)(u_{f1} + u_{e1})(\theta_1 - \theta_1^{\text{ref}}) \\
 &\quad + r(u_{f3} - u_{e3}) - r^2(k + bs)(u_{f3} + u_{e3})(\theta_{12} - \theta_{12}^{\text{ref}})
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

ここで、 $x_1^m = r\theta_1$, $x_3^m = r\theta_{12}$ であり、 θ^{ref} は筋の自然長を指令値としてとらえたものである。また、 $\theta_{12} = \theta_1 + \theta_2$ であり二関節筋に対応した関節変位を表し、 s は微分演算子である。第二関節についても同様に式変形することができ、式 (2.9) となる。

$$\begin{aligned}
 T_2^j &= r(u_{f2} - u_{e2}) - r^2(k + bs)(u_{f2} + u_{e2})(\theta_2 - \theta_2^{\text{ref}}) \\
 &\quad + r(u_{f3} - u_{e3}) - r^2(k + bs)(u_{f3} + u_{e3})(\theta_{12} - \theta_{12}^{\text{ref}})
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

この筋出力と関節トルクの関係を図に示したものが図 2.9 であり、二自由度制御系となっていることがわかる。ただし、図中の $\Delta\theta$ は $\theta_j - \theta_j^{\text{ref}}$, $j = 1, 2, 12$ である。ここで、筋の出力の和のモードと差のモードで考える。すなわち、筋による出力を以下のように考える。

$$\begin{aligned}
 D_i &= u_{fi} - u_{ei} \\
 S_i &= u_{fi} + u_{ei} \quad (i = 1, 2, 3)
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

差のモードは関節を駆動するトルクとして働き、和のモードはその量によって関節の剛性を制御する働きを持つことがわかる。これらを用いて式 (2.8), (2.9) を表すと、式 (2.11) が得られる。

$$\begin{aligned}
 T_1^j &= rD_1 - r^2(k + bs)S_1\Delta\theta_1 + rD_3 - r^2(k + bs)S_3\Delta\theta_{12} \\
 T_2^j &= rD_2 - r^2(k + bs)S_2\Delta\theta_2 + rD_3 - r^2(k + bs)S_3\Delta\theta_{12}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

吉田はこの特性を用いて筋の釣り合いを利用したモーション制御を提案し [15]、また、呉らはこの二自由度制御系を活かした運動制御をシミュレーションによって検証した [36]。

本研究では筋の受動的な要素のみを考えるため、和のモードのみを出力として利用する。次節では関節剛性と手先剛性の関係を論じる。

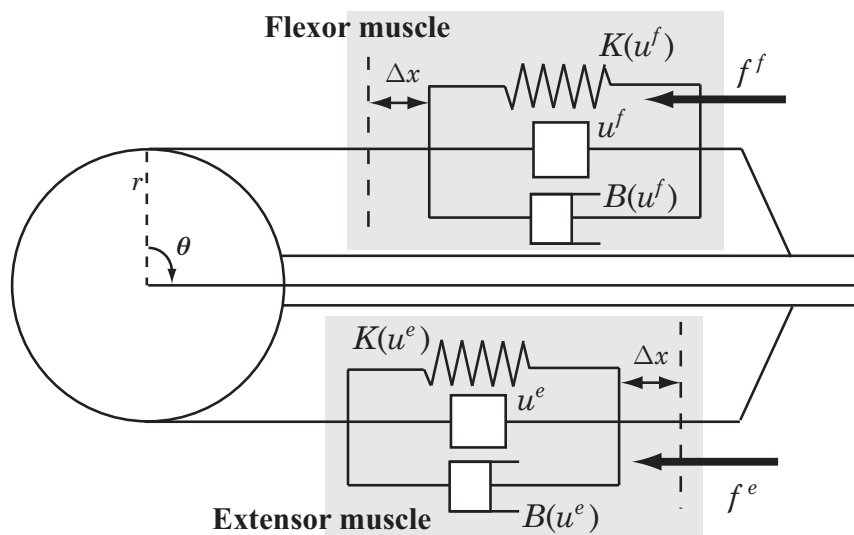


図 2.8 拮抗駆動の概念図

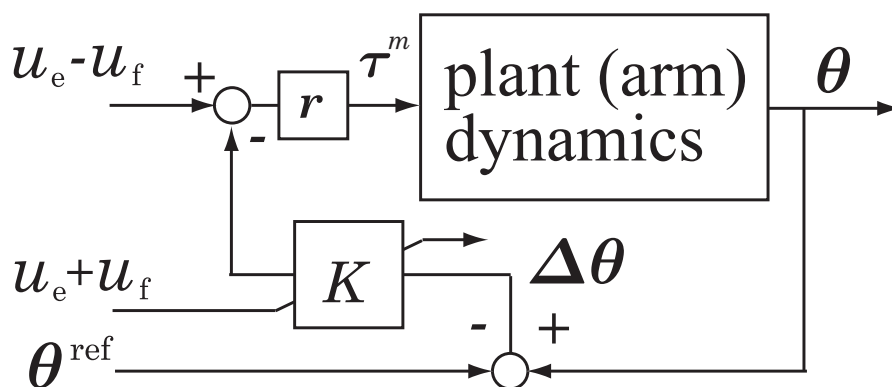


図 2.9 筋の出力に見る二自由度制御の構造

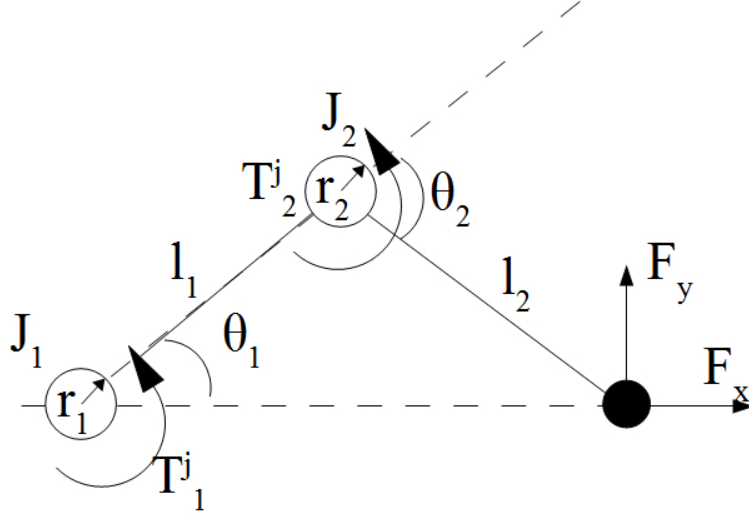


図 2.10 Two-link Manipulator

2.3 筋粘弾性と拮抗駆動を利用した関節剛性制御による静的直動運動

2.3.1 静力学による生物四肢アームの手先出力特性

図 2.10 のような平面 2 リンクアームを考えると，関節トルクによって発生する手先の出力は仮想仕事の原理に基づきヤコビ行列を用いることで，以下のように求められる．

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} l_2 \cos \theta_{12} & -l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_{12} \\ l_2 \sin \theta_{12} & -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin \theta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1^j \\ T_2^j \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

ここに，式 (2.11) であらわされる関節トルクを代入するが，関節剛性による手先剛性に着目するため和のモードのみを用い，さらに弾性のみを考える．すなわち，以下の式 (2.13) を代入する．

$$\begin{aligned} T_1^j &= -r^2(S_1 k \theta_1 + S_3 k \theta_{12}) \\ T_2^j &= -r^2(S_2 k \theta_2 + S_3 k \theta_{12}) \end{aligned} \quad (2.13)$$

ここで， $\theta_i^{\text{ref}} = 0, (i = 1, 2, 3)$ としており，アームが完全に x 軸上に乗る姿勢を指令値としている．これにより， $l_1 = l_2 = l$ としたときの手先における出力は以下の式であらわされる．

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \frac{k r^2}{l \sin \theta_2} \begin{pmatrix} -\cos \theta_{12} S_1 \theta_1 + (\cos \theta_1 + \cos \theta_{12}) S_2 \theta_2 + \cos \theta_1 S_3 \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} S_1 \theta_1 + (\sin \theta_1 + \sin \theta_{12}) S_2 \theta_2 + \sin \theta_1 S_3 \theta_{12} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

式 (2.14) において，手先剛性と関節剛性の関係がわかる．図 2.10 において，x 軸負方向へ手先が微小変位した時の第一関節の微小変位を $\delta \theta_1$ とすると， θ_2 の微小変位と θ_{12} の微小変位はそれぞれ， $\delta \theta_2 = -2\delta \theta_1, \delta \theta_{12} = -\delta \theta_1$ となる．また， $\theta_2 = -2\theta_1$ が成り立っているため， $\sin \theta_2 =$

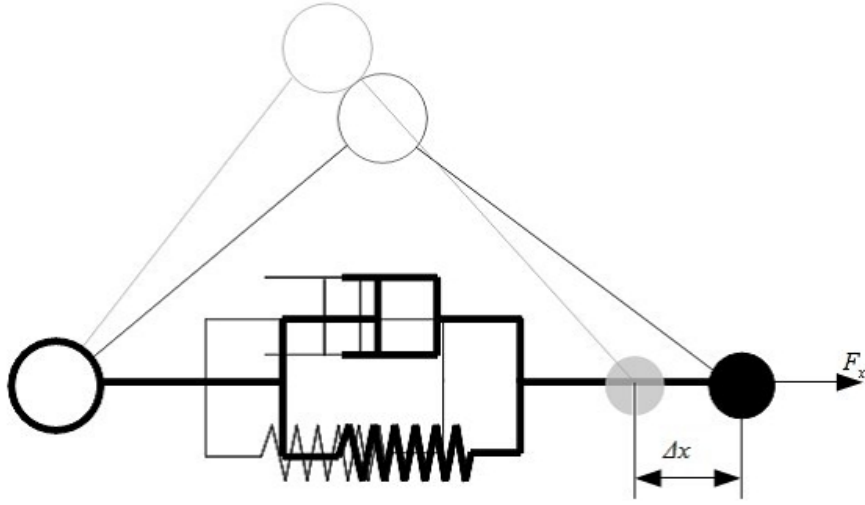


図 2.11 2 リンクマニピュレータの直動化の概念図

$\sin(-2\theta_1) = -2\sin\theta_1\cos\theta_1$, $\sin\theta_{12} = \sin(-\theta_1) = -\sin\theta_1$, $\cos\theta_{12} = \cos(-\theta_1) = \cos\theta_1$ である．これらを代入すると式 (2.15) となる．

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \frac{kr^2\delta\theta_1}{2l} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sin\theta_1}(S_1 + 4S_2 + S_3) \\ \frac{1}{\cos\theta_1}(S_3 - S_1) \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

式 (2.15) が，手先が x 方向へ微小変位した際に手先に生じる力である．

壁をまっすぐに押す，立ち上がる，物体を持ち上げる．こういった基本動作を実現させるためには x 方向への変位が生じた際 F_x の力のみが出力されなくてはならない．そのためには，二関節筋を備えていない従来型のマニピュレータと同様の筋配置では S_1 を用いず， S_2 のみで力を出力しなくてはならない．しかもその際，第一関節の剛性は全くなくなると考えられる．一方，二関節筋を備えた生物四肢モデルならば，第一関節の単関節筋と二関節筋が出力のバランスをとることによって x 方向のみの出力が可能となり，さらに，第一関節の剛性も高まる．

従って，生体の二関節筋を持った三対6筋構造によって図 2.11 のように 2 リンクマニピュレータを直動アクチュエータのように扱うことが可能となる．

2.3.2 関節剛性による所望反力

S_i はフリーパラメータであり，変化させることによって反力を変えることができる．一つの例として，式 (2.16) のように設定すると，反力は x の変位に比例し，第一関節と手先の間にあたかもばねが存在するかのような挙動を示す． k はゲインである．

$$\begin{cases} S_1 = S_3 = k \frac{\sin\theta_1(1-\cos\theta_1)}{\theta_1} \\ S_2 = k \frac{\sin\theta_1(1-\cos\theta_1)}{\theta_1} \end{cases} \quad (2.16)$$

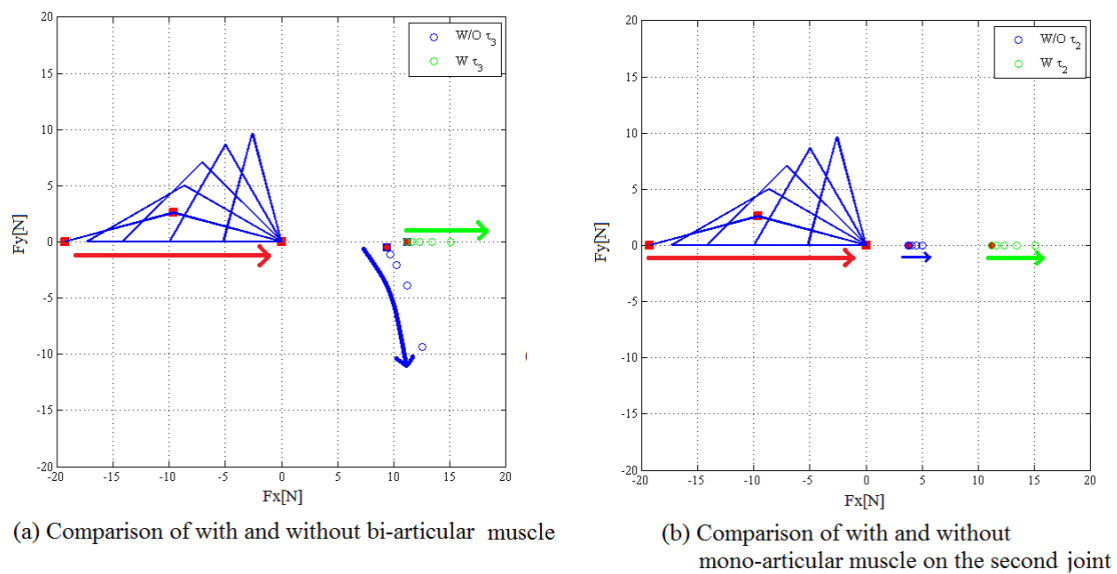


図 2.12 Simulation Results

2.4 シミュレーション結果

2.4.1 二関節筋の有無の比較

図 2.12(a) は二関節筋の有無を比較したシミュレーション結果である。ロボットアームは初期姿勢を $\theta_1 = \pi/12[\text{rad}]$ とし, $\pi/12[\text{rad}]$ ずつ変化させ, $\theta_1 = 5\pi/12[\text{rad}]$ まで見ている。アームのパラメータは $r = 0.1[\text{m}]$, $l = 0.27[\text{m}]$ として計算した。また, $S_1 = S_2 = 100[\text{N}]$ としている。

青色の円群は二関節筋が無い場合 ($S_3 = 0[\text{N}]$) の手先出力を表しており, 緑色の円群は $S_3 = 100[\text{N}]$ とした場合である。二関節筋が無い場合はアームが屈曲していくに従って第一関節単関節筋による y 方向出力が大きくなり, 手先出力が x 方向から逸れて行ってしまう。しかし, 二関節筋を備えた場合では y 方向の出力はバランスされ, 姿勢が変化しても x 方向のみの力を出力できる。

2.4.2 第二関節単関節筋の有無の比較

図 2.12(b) は第二関節単関節筋の有無を比較したシミュレーション結果である。青色の円群は第二関節単関節筋が無い場合の出力であり, 緑色の円群は 3 対 6 筋を備えた場合の出力である。二関節筋と第一関節単関節筋のみを備えた場合では x 方向の出力は著しく小さくなってしまいが, 方向は等しい。従って, 直動運動において重要な要素は第一関節の単関節筋と二関節筋であり, 第二関節の単関節筋はその出力を大きくするために必要とされることがわかる。

2.4.3 所望反力生成

図 2.13 は $S_1 = S_2 = S_3 = 100[\text{N}]$ とした場合と, 式 (2.16) に基づいて機械的なばねのような反力特性を持たせた場合の比較である。このように S を制御することによって反力の特性を変

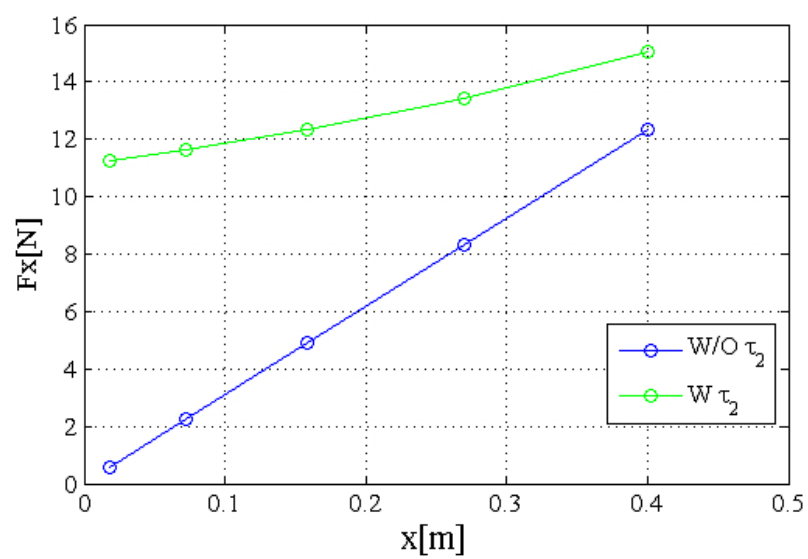


図 2.13 The Relationship of Δx and F_x

化させることが可能であり，走行と歩行の間での反力の変化や整地と不整地での変化などに対応させることができると考えれる。

第 3 章

Mono-Bi システムと脚座標空間による動的直動運動の実現

3.1 跳躍や走行を動的な直動運動でモデル化した研究

跳躍や走行といった動物の運動は二足歩行ロボットにとっては非常に難しい．歩行ロボットの研究で我が国で主流となっているのは Vukobratovic が提案した Zero Moment Point(ZMP) による歩行である．そのため，現行の歩行ロボットの多くが ZMP の計算を行い，安定な歩行を可能とする軌道生成をリアルタイムに行いながら歩行を行っている．しかし，我々動物はこのような膨大な計算をせずとも歩行や走行が可能である．実際人間の神経系フィードバックの速度はロボットのそれに比べて非常に遅く，このような計算を随時行うということは不可能である．

歩行・走行・跳躍ロボットの研究で ZMP とは異なる手法として，ロボットそのものがもつダイナミクスである natural dynamics をうまく活かした手法がある．Matsuoka は直動運動ではないが，脚を無質量の伸縮しない剛体として連続跳躍の安定性を解析し，簡単な制御によって連続跳躍が実現されることを示した [25]．その後，歩行・走行をモデル化する直動運動として，胴体を質点とし，無質量の弾性を持つ脚を持ったモデル，Spring Loaded Inverted Pendulum(SLIP) モデルが取り入れられ，盛んに研究された [29][30][31][32]．伸縮する直動アクチュエータによる跳躍ロボットの最たる例は Raibert の研究である [26][27]．Raibert は直動の油圧アクチュエータを用いて一脚，二脚，四脚のロボットを製作し，単純な位置制御によって連続跳躍・走行を実現させた．この研究で培われた技術は米国の Boston Dynamics 社で開発されている Big Dog[28] にも応用されており，不整地における歩行が可能となっている．Hyon らは，関節を持つ脚を持った犬型の跳躍ロボットを製作し，仮想的な伸縮する直動脚を定義することで Raibert と同様の直動運動の制御による連続跳躍を実現させた [33]．このロボットは下腿の二関節筋である腓腹筋にあたる機械ばねを装備しており，エネルギーの再利用を可能としていたが，二関節筋自体が直動運動にどのように関わるかについては明らかとされていない．Grizzle らは関節をもつ脚に virtual leg として SLIP モデルを用いた二足歩行ロボットを制作し，歩行・走行を実現させた [34]．

このように，脚のモデルとして直動運動を用いた研究は多岐にわたるが，二関節筋との関連を明示したものは無い．本章ではこの点に着目し，SLIP モデルと対応の良い先端での座標系，脚座標系を導入する．さらに，それに対応するアクチュエータとして第一関節の単関節筋と二関節筋をもつ 2 リンクマニピュレータを想定し，静力学，動力学的な面で二関節筋と脚座標の

関係を明らかとする。

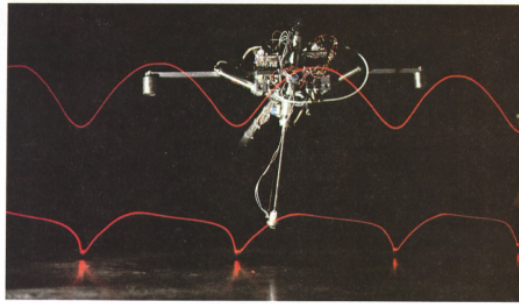


図 3.1 Raibert による一脚跳躍ロボット

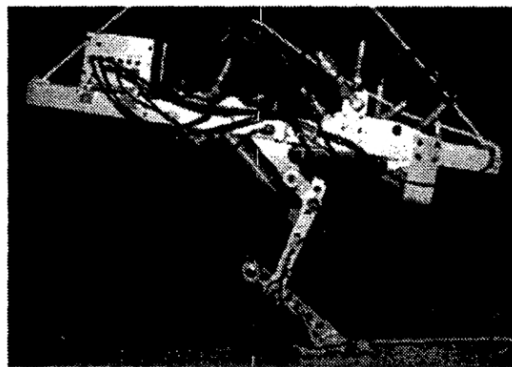


図 3.2 Hyon らによる二関節筋をばねとして持つ一脚跳躍ロボット

3.2 Mono-Bi システムの運動学・静力学

前章では三対 6 筋を完全に備えた生物四肢モデルについて述べたが，手先出力を分析した結果，直動運動のために必要な力を出力するには第二関節の単関節筋のみを用いるか，第一関節の単関節筋と二関節筋を強調させ，バランスさせて出力すれば良いことがわかった．そこで，冗長である三対 6 筋機構を 2 自由度の 2 リンクマニピュレータと対応させるため，新たに第一関節の単関節筋対と二関節筋対とを装備した 2 リンクモデルを考える (図 3.4)．このアクチュエータの配置は，単関節筋対を関節ごとに持つ従来型アームに対して，手先の出力特性および手先の剛性楕円の制御に関して有利であることが知られている [37]．このアクチュエータ配置をした 2 リンクモデルを Mono-Bi システムと呼ぶ．

本章ではこのモデルの運動学，静力学に関して数式によって記述する．

3.2.1 Mono-Bi システムの運動学

2 リンクマニピュレータの運動学を論じる場合，絶対座標系上で議論を展開するのが一般的であるが，ここでは図 3.5 の様に第 1 リンク上に x 軸を固定した座標系で話を進める．この



図 3.3 SLIP モデルを利用した 2 リンク歩行ロボット

ように定義することによって SLIP モデルを考えるうえで重要な点 P での座標 Σ_l 上での運動が論じ易くなる．この点 P における座標を脚座標空間 (Leg Space) と呼ぶこととする．

まず，点 P の Σ 座標上の運動と関節の運動は，以下のように表すことができる．

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\sin \theta_2 \\ 1 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_{12} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_{12} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin \theta_2} \begin{pmatrix} \frac{1}{l_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

ただし，二関節筋に対する一般化座標は $\theta_{12} = \theta_1 + \theta_2$ としている．この関係を回転行列をかけ，脚座標上の運動に変換する．

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_m & -\sin \theta_m \\ \sin \theta_m & \cos \theta_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_l \\ \Delta y_l \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

ここで， $\cos \theta_m = \frac{l_1 + l_2 \cos \theta_2}{l_m}$ ， $\sin \theta_m = \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_m}$ ，であり， $l_m^2 = (l_1 + l_2 \cos \theta_2)^2 + l_2^2 \sin^2 \theta_2$ である．この変換により，脚座標上の運動は以下のように記述される．

$$\begin{pmatrix} \Delta x_l \\ \Delta y_l \end{pmatrix} = \frac{1}{l_m} \begin{pmatrix} l_1 l_2 \sin \theta_2 & -l_1 l_2 \sin \theta_2 \\ l_1(l_1 + l_2 \cos \theta_2) & l_2(l_1 \cos \theta_2 + l_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_{12} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_{12} \end{pmatrix} = \frac{1}{l_m \sin \theta_2} \begin{pmatrix} \cos \theta_2 + \frac{l_2}{l_1} & \sin \theta_2 \\ -\frac{l_1}{l_2} - \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

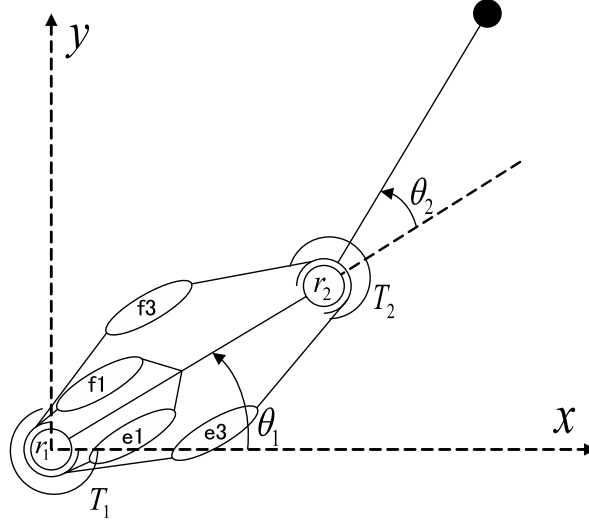
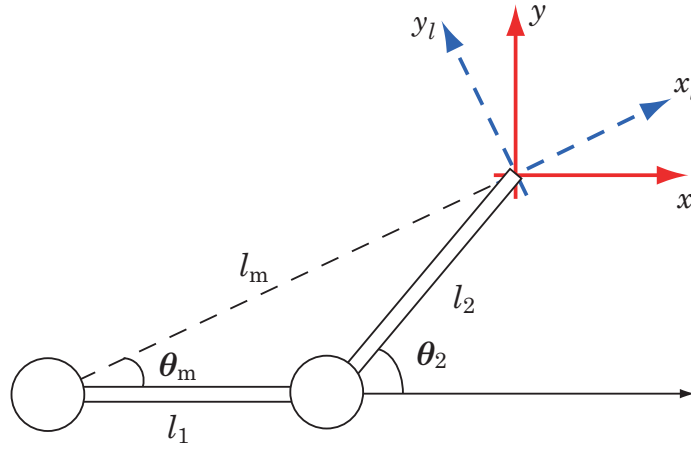


図 3.4 第一関節単関節筋と二関節筋を持つ 2 リンクモデル


 図 3.5 先端における座標系 Σ と Σ_l

ここで, $l_1 = l_2 = l$ とすると, 以下のように簡単化される.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \Delta x_l \\ \Delta y_l \end{pmatrix} &= \frac{1}{l_m} \begin{pmatrix} l^2 \sin \theta_2 & -l^2 \sin \theta_2 \\ l^2(1 + \cos \theta_2) & l^2(1 + \cos \theta_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_{12} \end{pmatrix} \\ &= \frac{l^2}{l_m} \begin{pmatrix} \sin \theta_2(\Delta \theta_1 - \Delta \theta_{12}) \\ (1 + \cos \theta_2)(\Delta \theta_1 + \Delta \theta_{12}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_{12} \end{pmatrix} &= \frac{1}{l_m \sin \theta_2} \begin{pmatrix} \cos \theta_2 + 1 & \sin \theta_2 \\ -\cos \theta_2 - 1 & \sin \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \\ &= \frac{\cos \theta_2 + 1}{l_m \sin \theta_2} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \Delta x + \frac{1}{l_m} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \Delta y \end{aligned} \quad (3.7)$$

この簡単化された運動学で興味深い点は, 各一般化座標 $\Delta \theta_1, \Delta \theta_{12}$ の差のモードと和のモードがそれぞれ x_l 軸と y_l 軸に独立に作用しているという点である. さらに, (3.6)(3.7) は以下のよ

うに書くことができる．

$$\begin{pmatrix} \Delta x_l \\ \Delta y_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 & -T_1 \\ T_2 & T_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_{12} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_1 & H_2 \\ -H_1 & H_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_l \\ \Delta y_l \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

ここで，

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{l^2 \sin \theta_2}{l_m} \\ \frac{l^2 (1 + \cos \theta_2)}{l_m} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1 + \cos \theta_2}{l_m \sin \theta_2} \\ \frac{1}{l_m} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

であり，変換行列 J_{LS} を以下のように定める．

$$J_{LS} = \begin{pmatrix} T_1 & -T_1 \\ T_2 & T_2 \end{pmatrix}, J_{LS}^{-1} = \begin{pmatrix} H_1 & H_2 \\ -H_1 & H_2 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

この変換行列を用いると，(3.8) は以下ようになる．

$$\begin{pmatrix} \Delta x_l \\ \Delta y_l \end{pmatrix} = J_{LS} \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_{12} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_{12} \end{pmatrix} = J_{LS}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta x_l \\ \Delta y_l \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

3.2.2 Mono-Bi システムの静力学

前節で述べた運動学を用いて，脚座標での静力学を導くことができる．まず， Σ 座標上での静力学は，

$$\begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f^x \\ f^y \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{pmatrix} f^x \\ f^y \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin \theta_2} \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -1 \\ \sin \theta_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{l_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

となる．これを同様の回転行列によって変換すると，以下ようになる．

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \frac{1}{l_m} \begin{pmatrix} l_1 l_2 \sin \theta_2 & l_1 (l_1 + l_2 \cos \theta_2) \\ -l_1 l_2 \sin \theta_2 & l_2 (l_1 \cos \theta_2 + l_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_l^x \\ f_l^y \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{pmatrix} f_l^x \\ f_l^y \end{pmatrix} = \frac{1}{l_m \sin \theta_2} \begin{pmatrix} \cos \theta_2 + \frac{l_2}{l_1} & -\frac{l_1}{l_2} - \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \sin \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

さらに， $l_1 = l_2 = l$ とすると，

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{pmatrix} &= \frac{1}{l_m} \begin{pmatrix} l^2 \sin \theta_2 & l^2 (1 + \cos \theta_2) \\ -l^2 \sin \theta_2 & l^2 (1 + \cos \theta_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_l^x \\ f_l^y \end{pmatrix} \\ &= \frac{l^2 \sin \theta_2}{l_m} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} f_l^x + \frac{l^2 (\cos \theta_2 + 1)}{l_m} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} f_l^y \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} f_l^x \\ f_l^y \end{pmatrix} &= \frac{1}{l_m \sin \theta_2} \begin{pmatrix} \cos \theta_2 + 1 & -\cos \theta_2 - 1 \\ \sin \theta_2 & \sin \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{l_m \sin \theta_2} \begin{pmatrix} (1 + \cos \theta_2)(\tau_1 - \tau_3) \\ \sin \theta_2 (\tau_1 + \tau_3) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.17)$$

となる．運動学と同様に，筋肉トルク τ_1 と τ_3 の差のモードと和のモードがそれぞれ f_l^x , f_l^y に対応する．(3.16)(3.17) は，以下のように書くことができる．

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 & T_2 \\ -T_1 & T_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_l^x \\ f_l^y \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} f_l^x \\ f_l^y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_1 & -H_1 \\ H_2 & H_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

(3.18) を J_{LS} で表すと，

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = J_{LS}^T \begin{pmatrix} f_l^x \\ f_l^y \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} f_l^x \\ f_l^y \end{pmatrix} = J_{LS}^{-T} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

となる．ただし，ある正方行列 A に関して， $(A^{-1})^T = (A^T)^{-1} = A^{-T}$ としている．(3.11)(3.18) のとおり，運動学と静力学における二関節筋座標空間と脚空間とのあいだの変換が J_{LS} という一つの変換行列のみで記述できる．このことは従来型のロボティクスでは見られなかった特徴であり，二関節筋をアクチュエータとして取り入れ，脚座標空間上で運動を記述することが自然な発想であることを示唆している．

3.3 Mono-Bi システムの動力学と脚座標空間オブザーバ

本章では前章までで展開した運動学，静力学を用いて脚座標における動力学を考える．SLIP モデルでは脚座標における (f_l^x, f_l^y) と (x_l, y_l) との関係は非干渉となっているが，2 リンクマニピュレータの場合は干渉しあうこととなる．本章ではこの点を数式展開によって明示し，脚座標における外乱オブザーバによって (x_l, y_l) の運動を非干渉化する制御手法を提案する．

3.3.1 Mono-Bi システムの動力学

まず，一般的な 2 リンクマニピュレータの動力学方程式は以下の式 (3.20) であらわされる．

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} J_1 + J_2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & J_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 \\ J_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & J_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} -m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 (\dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \\ m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} g(m_1 d_1 + m_2 l_1) \cos \theta_1 + g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \\ & = \begin{pmatrix} T_1^j \\ T_2^j \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.20)$$

慣性行列の要素を以下のように記述しなおす．

$$A_1 = J_1 + m_2 l_1^2, A_2 = J_2, A_{12} = m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2. \quad (3.21)$$

これにより，慣性行列 (3.20) は，

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} J_1 + J_2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & J_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 \\ J_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & J_2 \end{pmatrix} \\ & = \begin{pmatrix} A_1 + A_2 + 2A_{12} & A_{12} + A_2 \\ A_{12} + A_2 & A_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.22)$$

と表される．

このダイナミクスを二関節筋を用いた座標系で記述するために以下の変換を行う．

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_{12} \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

この変換により，ダイナミクスは次の形に変形される．

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} A_1 + A_2 + 2A_{12} & A_{12} + A_2 \\ A_{12} + A_2 & A_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} -m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 (\dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \\ m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} g(m_1 d_1 + m_2 l_1) \cos \theta_1 + g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \\ & = \begin{pmatrix} T_1^j \\ T_2^j \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} & = \begin{pmatrix} A_1 + A_2 + 2A_{12} & A_{12} + A_2 \\ A_{12} + A_2 & A_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_{12} \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} -m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 (\dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \\ m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} g(m_1 d_1 + m_2 l_1) \cos \theta_1 + g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \\ & = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} \\ & = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 + A_2 + 2A_{12} & A_2 + A_{12} \\ A_2 + A_{12} & A_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_{12} \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 (\dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \\ m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g(m_1 d_1 + m_2 l_1) \cos \theta_1 + g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ g m_2 d_2 \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \\ & = \begin{pmatrix} J_1 + m_2 l_1^2 & m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 \\ m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & J_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_{12} \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} -m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_{12}^2 \\ m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} g(m_1 d_1 + m_2 l_1) \cos \theta_1 \\ g m_2 d_2 \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.27)$$

ここで，慣性行列は，

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & A_{12} \\ A_{12} & A_2 \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

と，簡単化される．これをさらに，前章までで導いた運動学によって， Σ 上での慣性行列へと変換する．

$$\Lambda = (J^T)^{-1} A J^{-1} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\sin \theta_2} \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -1 \\ \sin \theta_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{l_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_2} \end{pmatrix} \\ &\quad \begin{pmatrix} J_1 + m_2 l_1^2 & m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 \\ m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & J_2 \end{pmatrix} \\ &\quad \frac{1}{\sin \theta_2} \begin{pmatrix} \frac{1}{l_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\sin^2 \theta_2} \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{J_1}{l_1^2} + m_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ &\quad \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} + \frac{1}{\sin^2 \theta_2} \begin{pmatrix} \frac{J_2}{l_2^2} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ &\quad - \frac{m_2 d_2}{l_2 \sin^2 \theta_2} \begin{pmatrix} 2 \cos^2 \theta_2 & \cos \theta_2 \sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 \sin \theta_2 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.31)$$

これを同様に以下の回転行列によって脚座標空間の慣性行列へと変換する．

$$\begin{pmatrix} f_l^x \\ f_l^y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_m & \sin \theta_m \\ -\sin \theta_m & \cos \theta_m \end{pmatrix} \Lambda \begin{pmatrix} \cos \theta_m & -\sin \theta_m \\ \sin \theta_m & \cos \theta_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x}_l \\ \ddot{y}_l \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

脚座標での慣性行列を Λ_l とする，すなわち，

$$\Lambda_l = \begin{pmatrix} \cos \theta_m & \sin \theta_m \\ -\sin \theta_m & \cos \theta_m \end{pmatrix} \Lambda \begin{pmatrix} \cos \theta_m & -\sin \theta_m \\ \sin \theta_m & \cos \theta_m \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

である．ここで， $\cos \theta_m = \frac{l_1 + l_2 \cos \theta_2}{l_m}$ ， $\sin \theta_m = \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_m}$ であるから， Λ_l は以下のように記述される．

$$\begin{aligned} &\Lambda_l \\ &= \begin{pmatrix} (l_1 \cos \theta_2 + l_2)^2 & l_1 \sin \theta_2 (l_1 \cos \theta_2 + l_2) \\ l_1 \sin \theta_2 (l_1 \cos \theta_2 + l_2) & l_1^2 \sin^2 \theta_2 \end{pmatrix} \\ &\quad \frac{1}{l_m^2 \sin^2 \theta_2} \begin{pmatrix} \frac{J_1}{l_1^2} + m_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{l_m^2 \sin^2 \theta_2} \frac{J_2}{l_2^2} \\ &\quad \begin{pmatrix} (l_1 + l_2 \cos \theta_2)^2 & -l_2 \sin \theta_2 (l_1 + l_2 \cos \theta_2) \\ -l_2 \sin \theta_2 (l_1 + l_2 \cos \theta_2) & l_2^2 \sin^2 \theta_2 \end{pmatrix} \\ &\quad - \frac{m_2 d_2 \cos \theta_2}{l_m^2 l_2 \sin^2 \theta_2} \\ &\quad \begin{pmatrix} 2(l_1 \cos \theta_2 + l_2)(l_1 + l_2 \cos \theta_2) & \sin \theta_2 (l_1^2 - l_2^2) \\ \sin \theta_2 (l_1^2 - l_2^2) & -2l_1 l_2 \sin^2 \theta_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.34)$$

干渉成分は，

$$\begin{aligned} & \frac{\left((J_1 + m_2 l_1^2 - J_2) \cos \theta_2 + \left(\frac{J_1}{l_1^2} + m_2 - \frac{J_2}{l_2^2} \right) l_1 l_2 \right)}{\sin \theta_2 l_m^2} \\ & - \frac{m_2 d_2 \cos \theta_2}{l_2 l_m^2 \sin \theta_2} (l_1^2 - l_2^2). \end{aligned} \quad (3.35)$$

である．さらに， $l_1 = l_2 = l$ の場合，

$$\begin{aligned} \Lambda_l &= \begin{pmatrix} (\cos \theta_2 + 1)^2 & \sin \theta_2 (\cos \theta_2 + 1) \\ \sin \theta_2 (\cos \theta_2 + 1) & \sin^2 \theta_2 \end{pmatrix} \\ & \quad \frac{l^2}{l_m^2 \sin^2 \theta_2} \left(\frac{J_1}{l_1^2} + m_2 \right) + \frac{l^2}{l_m^2 \sin^2 \theta_2} \frac{J_2}{l_2^2} \\ & \quad \begin{pmatrix} (1 + \cos \theta_2)^2 & -\sin \theta_2 (1 + \cos \theta_2) \\ -\sin \theta_2 (1 + \cos \theta_2) & \sin^2 \theta_2 \end{pmatrix} \\ & \quad - \frac{m_2 d_2 l \cos \theta_2}{l_m^2 \sin^2 \theta_2} \begin{pmatrix} 2(\cos \theta_2 + 1)^2 & 0 \\ 0 & -2 \sin^2 \theta_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.36)$$

となる． $l_m^2 = 2l^2(1 + \cos \theta_2)$ であるから，結局干渉成分は，

$$-\frac{1}{2 \sin \theta_2} \left(\frac{J_1}{l^2} + m_2 - \frac{J_2}{l^2} \right) \quad (3.37)$$

である．これが x_l と y_l が独立な SLIP モデルと 2 リンクマニピュレータの運動において異なる点である．

最終的に，新しい座標系でのコリオリ・遠心力項と重力項を合わせた動力学方程式は以下のようなになる．

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} f_l^x \\ f_l^y \end{pmatrix} &= \Lambda_l \begin{pmatrix} \ddot{x}_l \\ \ddot{y}_l \end{pmatrix} \\ &+ \frac{g}{l_m \sin \theta_2} \begin{pmatrix} (1 + \cos \theta_2) \left(\frac{m_1 d_1 + m_2 l_1}{l_1} \cos \theta_2 - \frac{m_2 d_2}{l_2} \cos \theta_{12} \right) \\ \sin \theta_2 \left(\frac{m_1 d_1 + m_2 l_1}{l_1} \cos \theta_2 + \frac{m_2 d_2}{l_2} \cos \theta_{12} \right) \end{pmatrix} \\ &- \frac{1}{l_m} \begin{pmatrix} (1 + \cos \theta_2) \left(\frac{\dot{\theta}_{12}^2}{l_1} + \frac{\dot{\theta}_1^2}{l_2} \right) \\ \sin \theta_2 \left(\frac{\dot{\theta}_{12}^2}{l_1} - \frac{\dot{\theta}_1^2}{l_2} \right) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{T}_1 \dot{\theta}_2 (\omega_1 - \omega_2) \\ \dot{T}_2 \dot{\theta}_2 (\omega_1 + \omega_2) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.38)$$

3.3.2 脚座標空間オブザーバ

図 3.6 に脚座標空間におけるオブザーバの構成を示す．マニピュレータの関節から得た関節速度情報 ω_1, ω_{12} から，脚座標空間での速度 \dot{x}_l, \dot{y}_l を求め，それを微分して加速度 \ddot{x}_l, \ddot{y}_l を得，前節で求めた慣性行列をかけ，そこから入力するトルクから計算した先端での出力を差し引くことにより脚座標空間での外乱を推定する．すなわち，以下のような式で外乱は推定すること

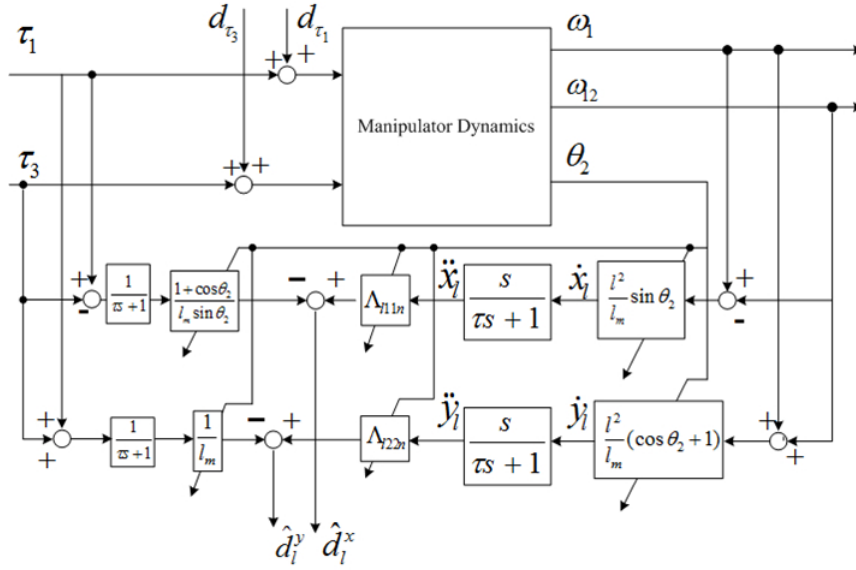


図 3.6 脚座標空間オブザーバ (LSO)

ができる．

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} \hat{d}_l^x \\ \hat{d}_l^y \end{pmatrix} &= Q(s) \left(\begin{pmatrix} f_l^x \\ f_l^y \end{pmatrix} - \Lambda_{ln} \begin{pmatrix} \ddot{x}_l \\ \ddot{y}_l \end{pmatrix} \right) \\
 &= \frac{Q(s)}{l_m \sin \theta_2} \begin{pmatrix} (1 + \cos \theta_2)(\tau_1 - \tau_3) \\ \sin \theta_2(\tau_1 + \tau_3) \end{pmatrix} \\
 &\quad - Q(s) \Lambda_{ln} \frac{l^2}{l_m} \begin{pmatrix} \sin \theta_2(\ddot{\theta}_1 - \ddot{\theta}_{12}) \\ (1 + \cos \theta_2)(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_{12}) \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

ここで， $Q(s)$ は外乱オブザーバの特性を決める Q フィルタである．

干渉成分を外乱として除去するため， Λ_{ln} を以下のように定める．

$$\Lambda_{ln} = \begin{pmatrix} \Lambda_{l1n} & 0 \\ 0 & \Lambda_{l2n} \end{pmatrix} \tag{3.40}$$

$$\begin{aligned}
 \Lambda_{l1n} &= \frac{(1 + \cos \theta_2)^2}{l_m^2 \sin^2 \theta_2} (J_1 + m_2 l^2 + J_2 - 2m_2 d_2 l \cos \theta_2) \\
 &= \frac{1 + \cos \theta_2}{2l^2 \sin^2 \theta_2} (J_1 + m_2 l^2 + J_2 - 2m_2 d_2 l \cos \theta_2)
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

$$\begin{aligned}
 \Lambda_{l2n} &= \frac{1}{l_m^2} (J_1 + m_2 l^2 + J_2 + 2m_2 d_2 l \cos \theta_2) \\
 &= \frac{(J_1 + m_2 l^2 + J_2 + 2m_2 d_2 l \cos \theta_2)}{2l^2(1 + \cos \theta_2)}
 \end{aligned} \tag{3.42}$$

この慣性をノミナルプラントとして用いることで，遠心力・コリオリ力による影響，重力による影響，そして x_l, y_l 軸間の干渉を外乱として推定することができ，フィードバックすることで除去できる．これを図 3.7 に示す．

一般的にマニピュレータは特異点近傍で著しく制御性が劣化する．それは主に，制御系の中に特異点において分母が零になる成分が存在しているからである．LSO においても，(3.40) で

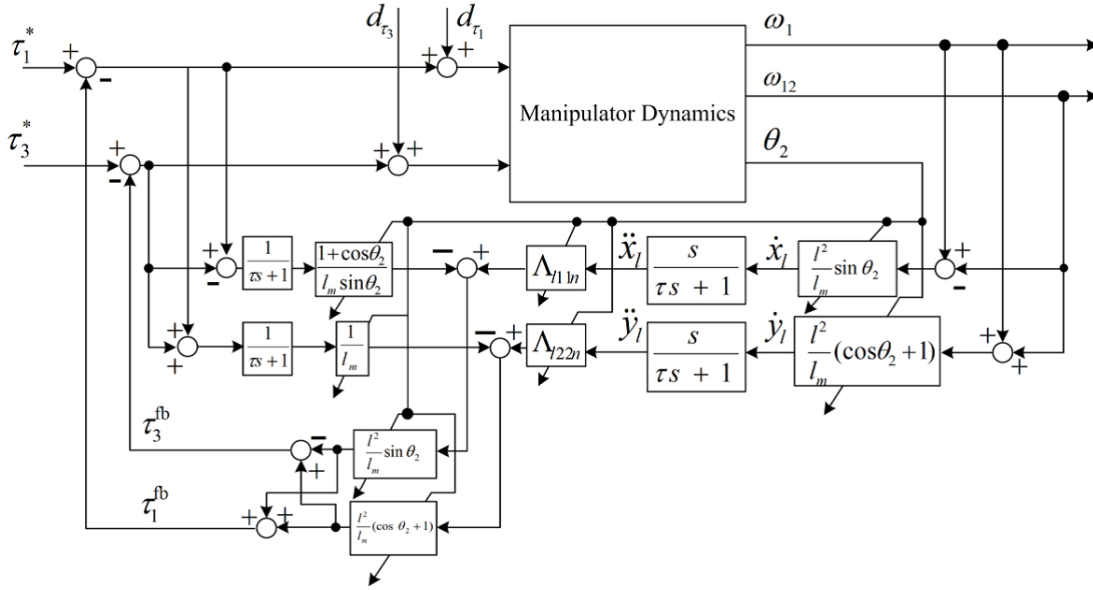


図 3.7 外乱情報をフィードバックした LSO

あらわされるノミナル慣性であるの係数の分母に \sin がある．しかし，この係数に着目すると大変興味深い点に気が付く．以下，係数が掛かる部分をそれぞれ J_1^a ， J_2^a とする．すなわち，

$$J_1^a = (J_1 + m_2 l^2 + J_2 - 2m_2 d_2 l \cos \theta_2) \quad (3.43)$$

$$J_2^a = (J_1 + m_2 l^2 + J_2 + 2m_2 d_2 l \cos \theta_2) \quad (3.44)$$

とする．それぞれの係数はよく見ると，

$$\frac{1 + \cos \theta_2}{2l^2 \sin^2 \theta_2} = \frac{H_1}{T_1}, \quad \frac{1}{2l^2(1 + \cos \theta_2)} = \frac{H_2}{T_2} \quad (3.45)$$

となっていることに気付く．さらに LSO の各変換についても T_1 ， T_2 ， H_1 ， H_2 を用いて表すと，図 3.8 となる．

さらに， $H_1 T_1 = H_2 T_2 = \frac{1}{2}$ であることを用いると，最終的に LSO は図 3.9 まで簡単化することができる．この LSO ではもはや変換行列の要素である H や T も現れず，単なるゲインの計算のみで外乱抑圧が実現できる．そのため，特異点においても発散することがなく，良好な運動が可能となると考えられ，運動学，静力学のみならず，動力学を考えるうえでも，二関節筋と脚座標空間の対応が良いことが解る．

3.3.3 LSO に基づくインピーダンス制御

前章の制御で非干渉化された脚座標に対して，文献 [38] にある力センサレスインピーダンス制御を応用し，外部からの力に対して任意の挙動となるように制御を行い，natural dynamics を実現する．図 3.10 にその制御構造を示す．内側の LSO は外力とノミナルモデルとの誤差を含めた外乱を除去する．推定した外乱から，(3.37) で表される慣性行列の干渉成分である J_a^M

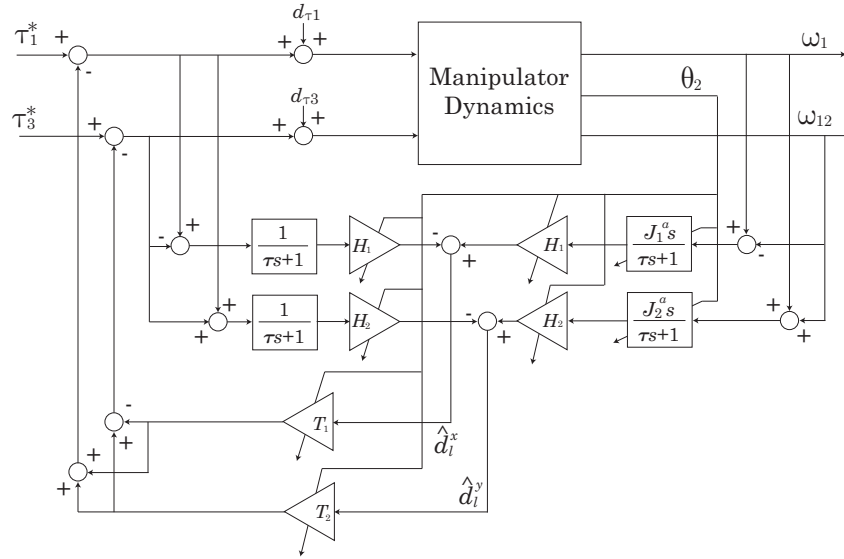


図 3.8 T と H を用いた LSO の表記

を除き，外力の情報を取り出す．モデルインピーダンス P_M^x ， P_M^y はそれぞれ，

$$P_M^x = \frac{s}{M^x s^2 + B^x s + K^x} \quad (3.46)$$

$$P_M^y = \frac{s}{M^y s^2 + B^y s + K^y} \quad (3.47)$$

によって定め，推定した外力を受けてモデルとするインピーダンスが出力するであろう速度を指令値として利用することができる．この制御を Leg Space Observer based Impedance Control (LeSOIC) と呼ぶこととする．LeSOIC の制御ブロックを図 3.11 に示す．この図も LSO と同様に T , H を用いた簡単化を行っており，制御系の中に発散する要素などを持たない．

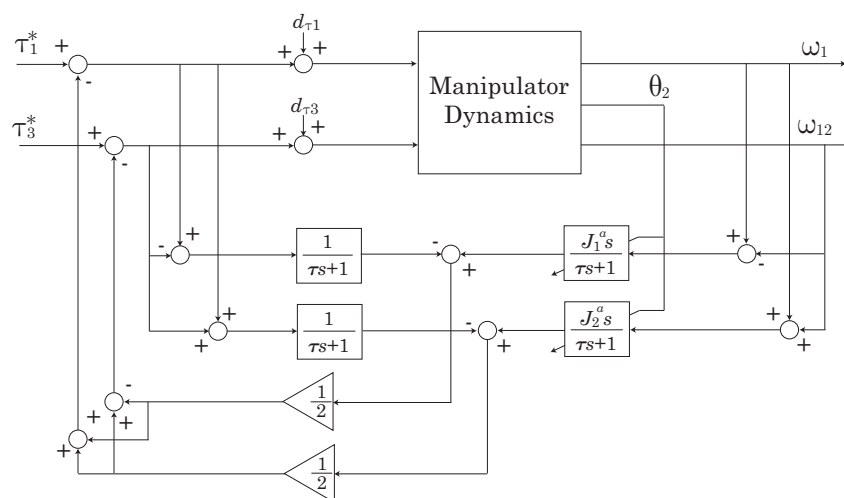


図 3.9 簡単化された脚座標空間オブザーバ

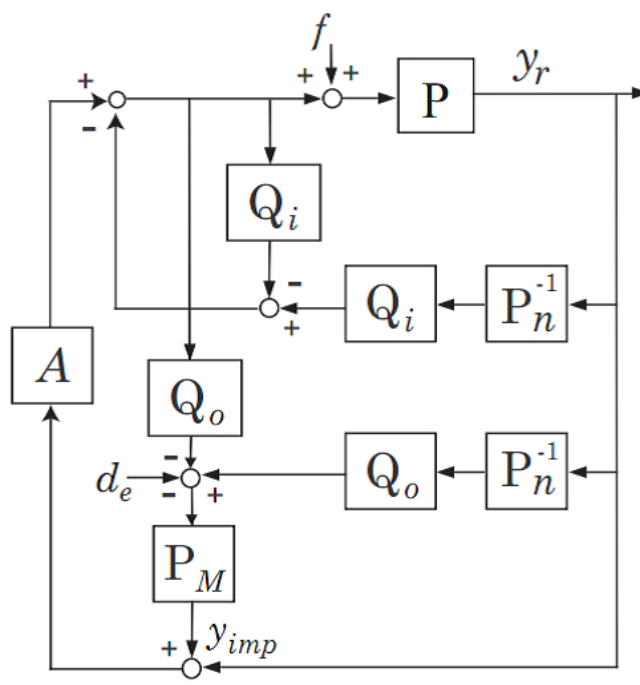


図 3.10 カセンサレスインピーダンス制御

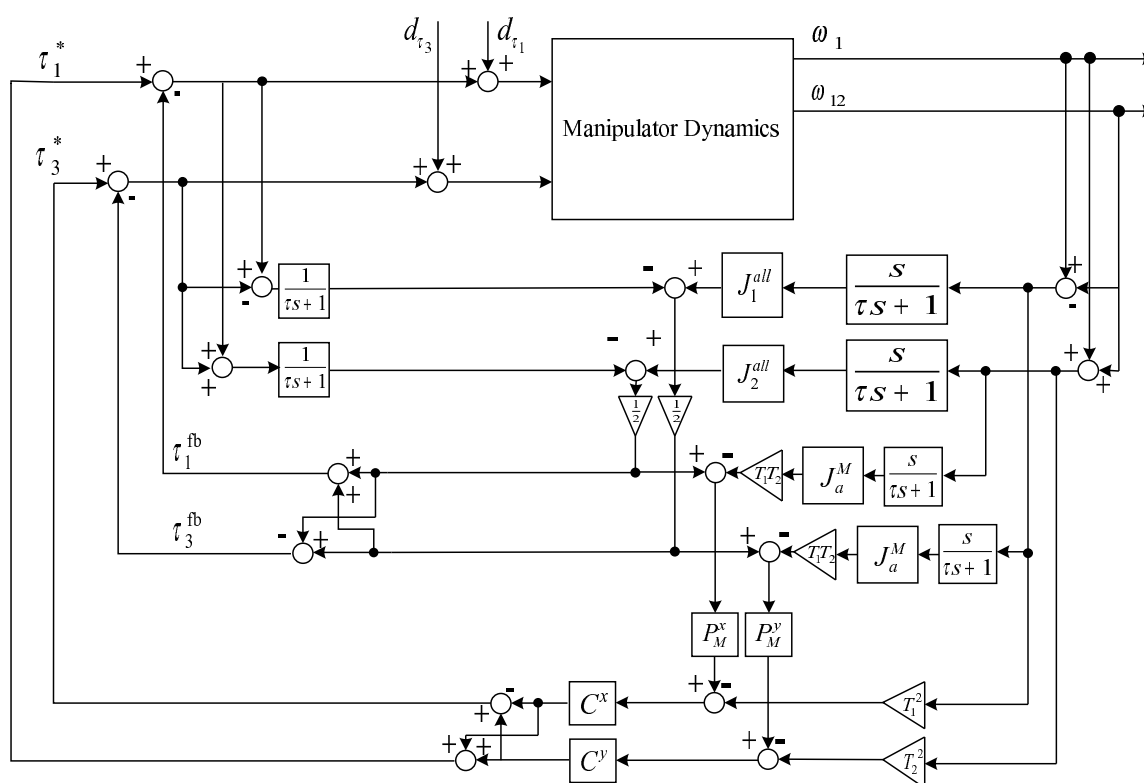


図 3.11 LeSOIC の制御ブロック図

第 4 章

遊星歯車を用いた二関節筋装備型ロボットアームの実装

4.1 遊星歯車機構

4.1.1 遊星歯車機構の構成

二関節同時駆動機構の実現に関する研究は少なくない。しかし筋の粘弾性までを忠実に再現するなどといった非常に複雑な構造のものや、空気圧アクチュエータを用いており、非線形性が大きいものがほとんどである。

本実験機は二関節同時駆動の実現のため回転型モータと遊星歯車機構を用いている。遊星歯車機構は減速機として用いられるほか、自動車の動力分割機構として用いられている。図 4.1 に本研究で用いた遊星歯車機構を示す。中心にサンギアがあり、その周囲を 3 つの遊星歯車が自転しながら公転する。さらにその外側に内歯車と外歯車を持つリングギアがある。遊星歯車の公転軸はキャリア軸と呼ばれ、本研究で用いた遊星歯車機構ではアウトターリングギアと等しいギアを外周に持つ。図 4.2 に遊星歯車機構の内部構造を示す。キャリアはプラネタリギアの自転軸を保持し、サンギア、リングギアと同じ軸を中心として回転する。

4.1.2 遊星歯車機構のトルク伝達式

Aoki らは遊星歯車機構を用いたステアリングシステムを提案している [39]。また、筆者らは依然、遊星歯車の二関節筋利用に関して研究を行った [40]。本研究では依然提案した遊星歯車機構による二関節同時駆動機構と異なり、遊星歯車のダイナミクスまで考慮しなくても良い構成としたため、Aoki が用いたつりあいの式を用いてトルク伝達を行う。遊星歯車のトルク式は式 (4.1)(4.2) となる。

$$\frac{\tau_s}{2} + \frac{\tau_r}{2\alpha} + \frac{\tau_c}{\alpha + 1} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\tau_s}{2} - \frac{\tau_r}{2\alpha} - \frac{\tau_p}{\alpha - 1} = 0 \quad (4.2)$$

ここで、 $\tau_s, \tau_r, \tau_c, \tau_p$ はそれぞれサンギアトルク、リングギアトルク、キャリアトルク、プラネタリギア自転トルクである。また α はインナーリングギアのサンギアに対するギア比である。本研究ではプラネタリギア自転トルクは入力として利用しないため、 $\tau_p = 0$ とする。結局、サ

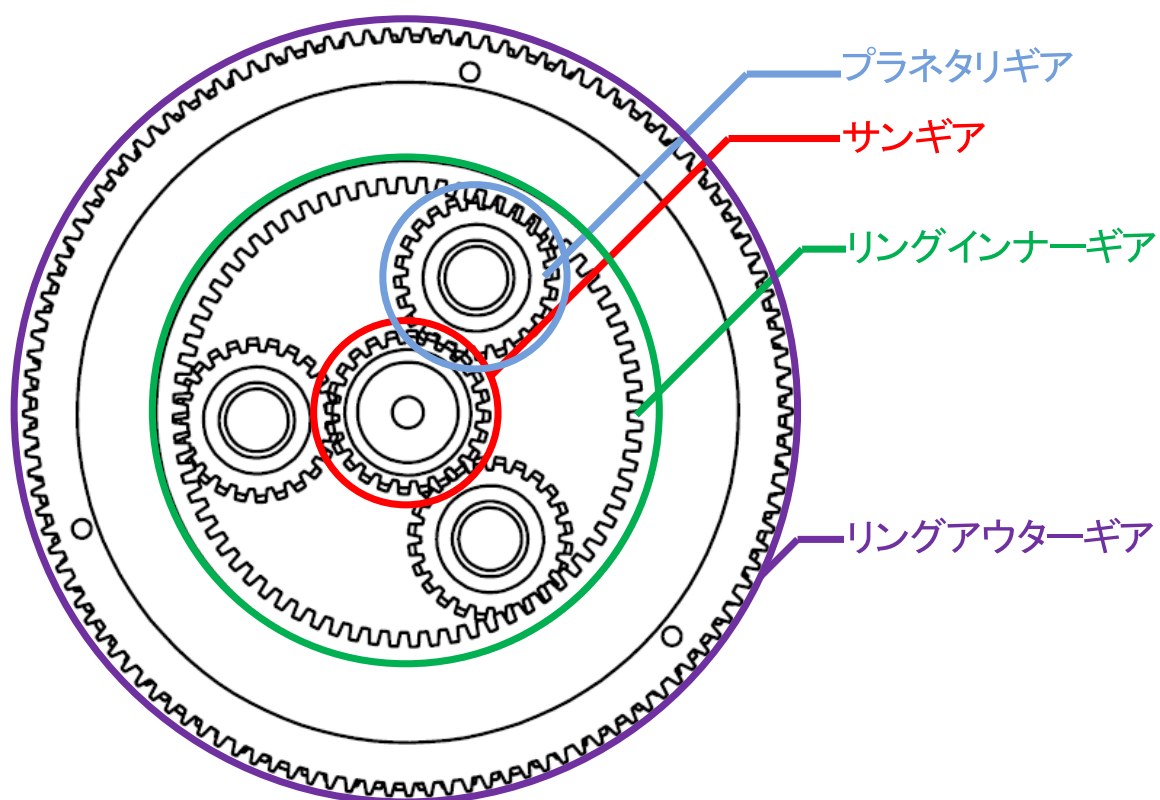


図 4.1 遊星歯車機構

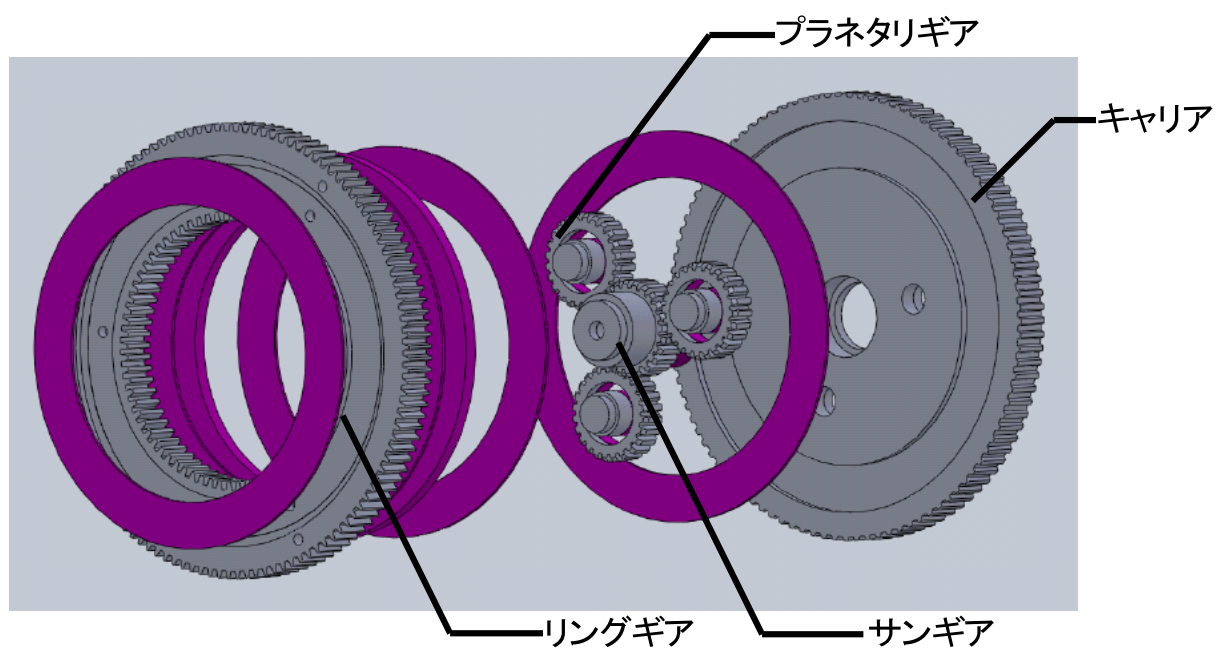


図 4.2 分解したプラネタリギア

ンギアとリングギアのトルクをそれぞれ第一関節，第二関節の関節トルクとして取り出すため重ね合わせの原理により，関節トルク T_1^j, T_2^j は，式 (4.3) となる．

$$\begin{aligned} T_1^j &= \tau_r + \alpha \tau_s - \frac{\alpha}{\alpha + 1} \tau_c \\ T_2^j &= \frac{1}{\alpha} \tau_r + \tau_s - \frac{1}{\alpha + 1} \tau_c \end{aligned} \quad (4.3)$$

次節ではこの式 4.3 を基にした二関節同時駆動機構を備えた 2 リンクマニピュレータについて述べる．

4.2 遊星歯車機構を用いた 2 リンクマニピュレータ

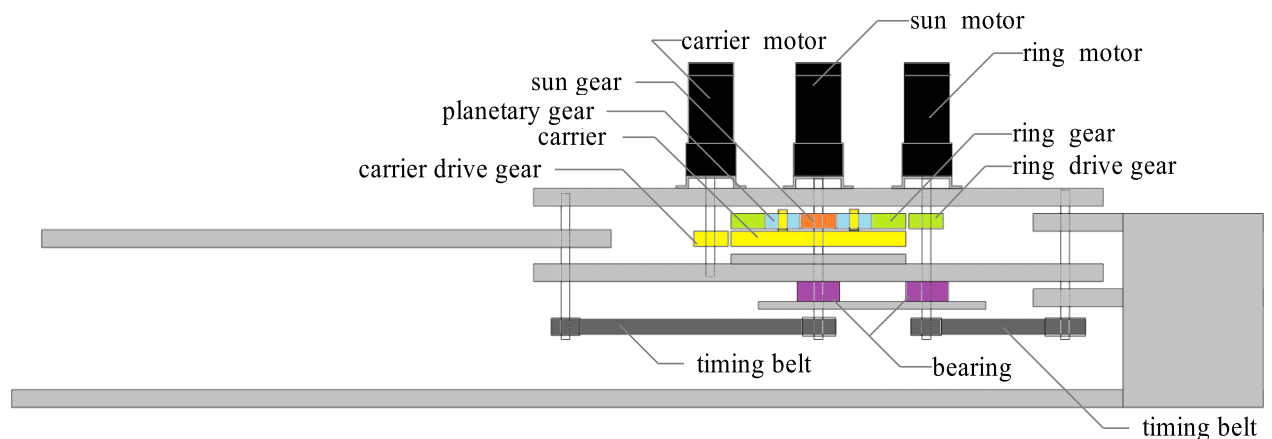
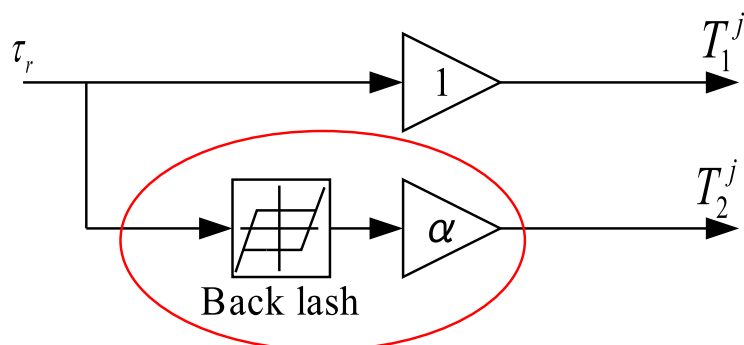


図 4.3 平面 2 リンクマニピュレータの構成図

4.2.1 2 リンクマニピュレータの設計

本研究では，前述した遊星歯車機構を用いた水平面内を駆動する 2 リンクマニピュレータを制作する．図 4.3 にそのモデルを示す．回転型モータは筋肉と違って正転と逆転が可能なため拮抗筋対を一つのモータで置き換えたモデルを採用し，拮抗駆動および筋の粘弾性はソフトウェアによって再現することとする．リングモータはリングギアドライブギアによってリングギアをを回転させると同時に，タイミングベルトによって第一関節を回転させる．サンモータはサンギアを駆動すると同時にタイミングベルトによって第二関節軸を回転させる．キャリアモータはキャリアドライブギアによってキャリアを回転させ，プラネタリギアの公転軸にトルクを入力する．

各関節のトルクとリングギアとサンギアの入力の間では式 (4.3) の関係が成り立つため，干渉成分が生じる．しかし，手先が固定された場合，もしくは手先が準静的な運動のみを行う場合は，ギアが噛みあってトルク伝達をする前にタイミングベルトが各関節にトルク伝達を行うため，非干渉化がなされる．図 4.4 にトルク伝達についての概念を示す．



手先固定時はトルクが伝達されない

図 4.4 単関節筋の他の関節へのトルク伝達

この機構設計により，式 (4.3) は式 (4.4) となる．

$$\begin{aligned} T_1^j &= \tau_r - \frac{\alpha}{\alpha + 1} \tau_c \\ T_2^j &= \tau_s - \frac{1}{\alpha + 1} \tau_c \end{aligned} \quad (4.4)$$

従って，ギア比 α のみで二関節筋トルクの伝達比が決まる．Yoshida らが開発したロボットアーム [15] や Salvucci らが開発したロボットアーム [12] はタイミングベルトの張り具合やワイヤのテンションによって二関節筋の伝達トルクが非線形に変化し，運動制御を行う際には不安定になる場合が見られた．しかし，ギア比のみによってトルク伝達比が決まるため，本研究で用いた機構ならばたとえ静的な条件でない場合でも補償が容易となる．

4.2.2 遊星歯車機構を用いた二関節同時駆動機構のトルク伝達

表 4.1 遊星歯車機構の歯数

サンギア歯数	24
プラネタリギア歯数	24
インナーリングギア歯数	72
アウターリングギア歯数	120
キャリアギア歯数	120
リング駆動ギア歯数	24
キャリア駆動ギア歯数	24

表 4.1 には使用した各ギアの歯数を示す．各ギアのピッチ等は等しいため，歯数からギア比を計算することができる．本項では前項で述べた遊星歯車機構内部のギア比の関係に加え，遊星歯車機構と駆動ギアの関係を考える．まず，キャリア駆動ギアとキャリアギアとの間ではギア比を β とする．また，アウターリングギアリング駆動ギアとの間のギア比を γ とする．すると，キャリアトルクの各関節へのトルク伝達は図 4.5 のように表すことができる．

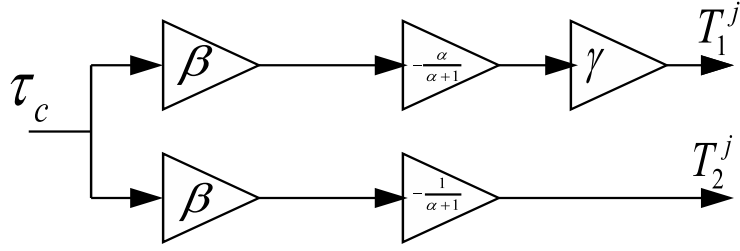


図 4.5 キャリアトルクの伝達

以上より，本研究で用いる二関節筋装備型マニピュレータの静的条件下におけるトルク伝達式は式 (4.5) として表される．

$$\begin{aligned} T_1^j &= \tau_r - \frac{\alpha\beta\gamma}{\alpha+1}\tau_c \\ T_2^j &= \tau_s - \frac{\beta}{\alpha+1}\tau_c \end{aligned} \quad (4.5)$$

従って，(2.3) を実現させるためには，リングモータトルクとサンモータトルクにフィードフォワード的に以下の操作を行えばよい．

$$\begin{aligned} \tau_r &= \tau_r^* + \left(\frac{\alpha\beta\gamma}{\alpha+1} - 1\right)\tau_c = \tau_r^* + L_1\tau_c \\ \tau_s &= \tau_s^* + \left(\frac{\beta}{\alpha+1} - 1\right)\tau_c = \tau_s^* + L_2\tau_c \end{aligned} \quad (4.6)$$

ただし， τ_r^*, τ_s^* はそれぞれリングギアモータ，サンギアモータの指令値である．この補償を行った場合のトルク伝達の様子を図 4.6 に示す．

結局トルク伝達の式は以下ようになる．

$$\begin{aligned} \tau_r &= \tau_r^* - \tau_c \\ \tau_s &= \tau_s^* - \tau_c \end{aligned} \quad (4.7)$$

従って，キャリアモータの回転方向を逆転させれば，二関節同時駆動機構を表す式 (2.3) が成り立つ．

また，表 4.1 から各ギア比を求めると，以下ようになる．

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\text{サンギア歯数}}{\text{リングインナーギア歯数}} = \frac{72}{24} = 3 \\ \beta &= \frac{\text{キャリアギア歯数}}{\text{キャリア駆動ギア歯数}} = \frac{120}{24} = 5 \\ \gamma &= \frac{\text{リング駆動ギア歯数}}{\text{リングアウターギア歯数}} = \frac{24}{120} = \frac{1}{5} \end{aligned} \quad (4.8)$$

4.2.3 製作した2リンクマニピュレータとその諸元

図 4.8 に実際に制作したロボットアームを示す．図 4.3 と同様の構成としており，各モータおよび遊星歯車機構はすべて第一リンクに搭載している．リングギアとサンギアの駆動軸にタ

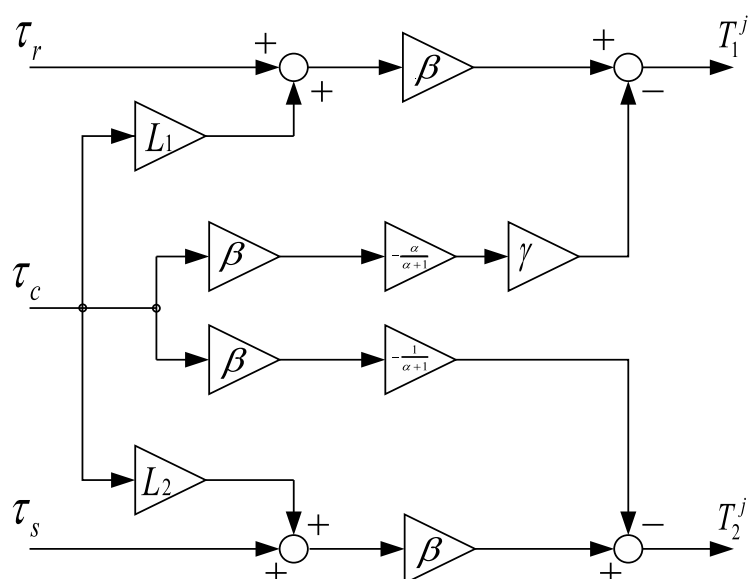


図 4.6 キャリアトルク等分配のための制御ブロック図

イミングベルトが配置され、各関節を駆動する。表 4.2 にモータとセンサ類を示す。モータは MAXON 社製のギアードモータを用いており、遊星歯車を用いたギアヘッドには減速比 18:1 のものを用いる。エンコーダもモータに付属した MAXON 社製のものを用いる。したがって、関節角度はリングギア、サンギアを駆動するモータのエンコーダから得られる角度の 18 分の 1 倍となる。その他、エンコーダ駆動用電源、モータ駆動用電源などについては図 4.7 に示す。モータドライバは MAXON の ADS50/5 を用いる。電流制御モードとしており、指令された電流がモータに流れるように制御する。上位のコントローラには ART-Linux を搭載した PC を用いており、AD/DA ボード、カウンタボード、力センサレシーバボードが備えられている。表 4.3 に制御用 PC の仕様を示す。

また、ロボットアームの諸元を表 4.4 に示す。

表 4.2 モータ・センサ類

Motors	MAXON (RE30)
Gear Head	MAXON
Encoders	MAXON (ME60)
Force Sensor	NITTA(IFS-67M25A25-140-ANA)
Current Sensor	MAXON ADS 50/5

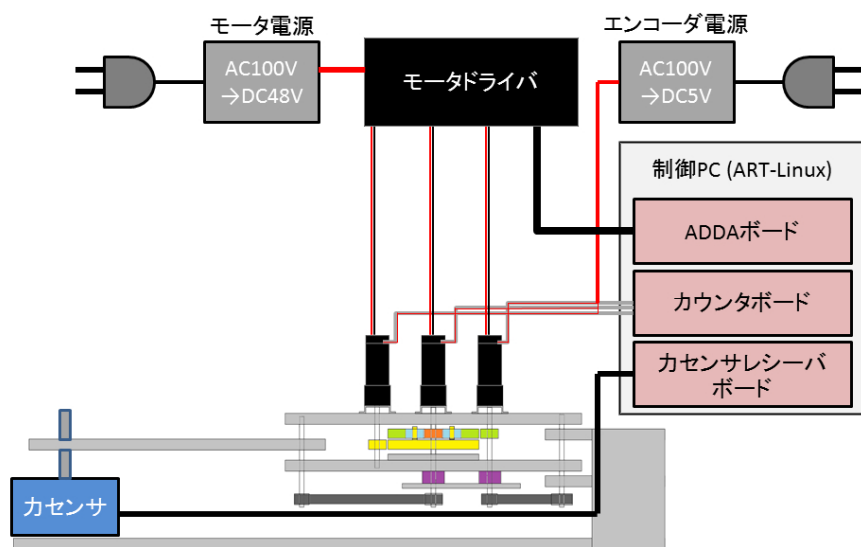


図 4.7 実験機のセットアップ

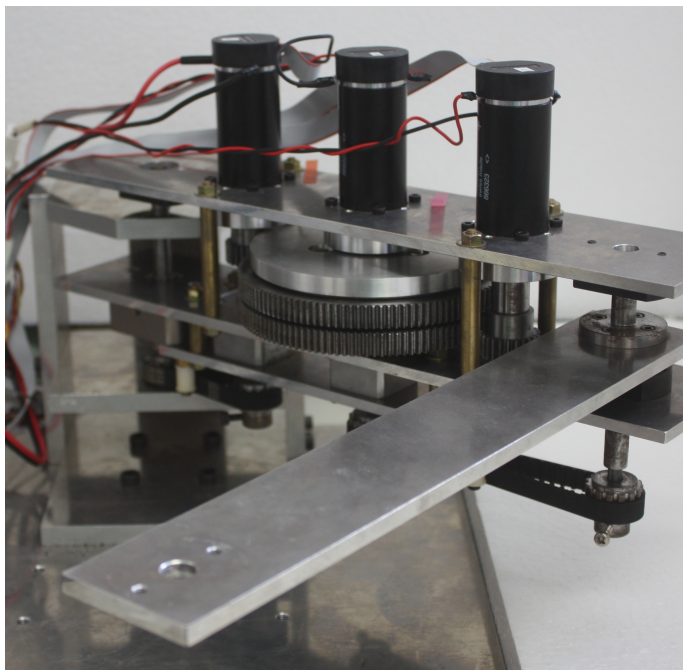


図 4.8 製作した平面 2 リンクマニピュレータ

表 4.3 制御用 PC の構成

Motor Driver	MAXON ADS 50/5
OS	Vine linux 4.2 (kernel 2.4.31) + ART-Linux (kernel 2.4.33)
AD/DA board	Interface PCI-3523A
Counter board	Interface PCI-6201E)
Receiver of force sensor	Nitta IFS-PCI-2184S

表 4.4 ロボットアームの主な諸元

Total height	270mm
Total length	500mm
Total Length of link 1 between joint 1 and 2	260mm
Total length of link 2 between joint 2 and center of force sensor	260mm
Torque coefficient	0.058Nm/A

4.3 実験機の検証

4.3.1 各筋による手先出力

以下の図 4.9 は製作したロボットアームの手先出力測定結果である．関節角度を $\theta_1 = 45[\text{deg}]$, $\theta_2 = -90[\text{deg}]$ とし，各筋としてはたらくモータに 1.0[Nm] から 2.0[Nm] までと， $-2.0[\text{Nm}]$ から $-1.0[\text{Nm}]$ まで 0.2[Nm] 刻みに指令した際に手先に現れる力を測定した．青，赤，緑色の直線はそれぞれ第一関節単関節筋（リングギアモータ），第二関節単関節筋（サンギアモータ），二関節筋（キャリアモータ）が収縮力を発揮した際に手先に発生させる力の方向を示している．図通り，単関節筋は正しい方向へ出力できているが，二関節筋は式 (4.5) のとおり，伝達比が異なるため方向が逸脱している．そこで，式 (4.6) による補償を行うと，橙色のプロットとなり，望みの方向へと是正することができる．

以上により，遊星歯車による二関節同時駆動機構が実現されていることが確認できた．次章ではこの実験機により，直動運動における二関節筋の重要性を検証する．

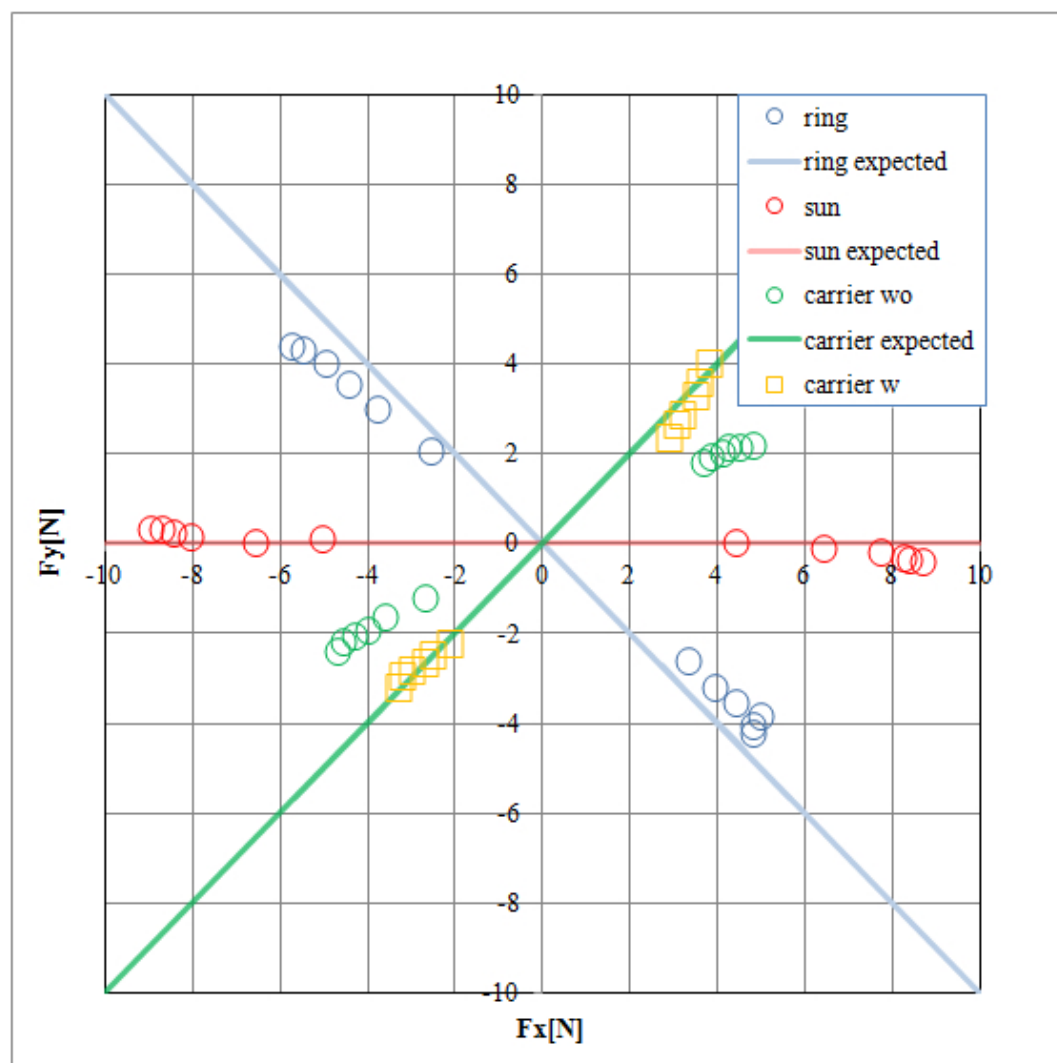


図 4.9 手先出力の測定結果

第 5 章

提案する制御手法の検証

5.1 関節剛性のみの制御による直動運動の実験結果

5.1.1 手先出力の直動化

図 5.1 は $\theta_1 = \pi/12 \sim 4/12\pi$ [deg] における反力を製作したロボットアームによって測定した図である．シミュレーションと同じトルクを出力するよう， $\theta_1 = \theta_2 = 0$ を指令値とする比例制御を行っている．二関節筋を持たない場合，アームが屈曲するにつれて手先の出力は x 軸方向からそれていってしまうが，二関節筋を持つ場合は手先反力が x 軸方向に是正されているのが解る．従って，二関節筋が手先の反力方向制御に大きく貢献していることが実験的にも示された．

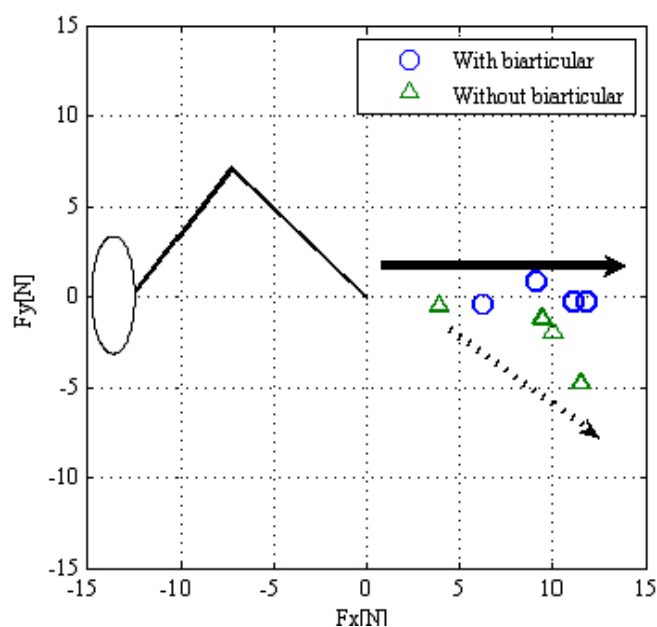


図 5.1 手先出力の直動化

5.1.2 直動運動実験

図 2.10 で示した座標系において，直動運動は

$$2\theta_1 + \theta_2 = 0 \quad (5.1)$$

が成り立つ運動を意味する．そこで，二関節筋を用いた場合に直動運動が実現できているかどうかの検証を実験機によって行った．手先には自由に回転するプーリーを取り付け， y 軸に平行に設置した金属板によって手先のプーリーを x 軸負の方向へ押す，という試験を行った．図 5.4，5.5 は実験の様子であり，二関節筋が無い場合では反力の方向が外力 (x 軸方向) からずれてしまうため手先が滑ってしまうが，二関節筋を持つ場合では外力と反力の方向が一致するため，手先がずれることなく屈曲することがわかる．図 5.2，5.3 は直動運動試験を行わせた際の関節角度に関するグラフであり， $2\theta_1$ ， $|\theta_2|$ ，およびそれらの差を載せている．差が 0 になれば，式 (5.1) が成り立っており，直動運動が実現できているといえる．図 5.2 では二関節筋が無いため $2\theta_1$ ， $|\theta_2|$ は全く異なる値となり，式 (5.1) も成り立たないが，図 5.3 では二関節筋によって差が 0 となっており，直動運動が実現されている．

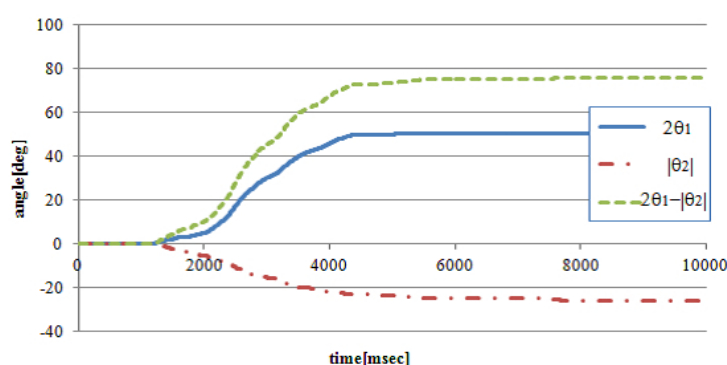


図 5.2 直動運動における関節角度 (二関節筋無し)

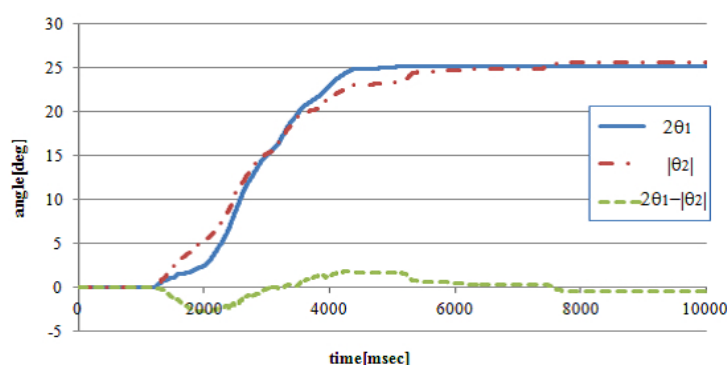


図 5.3 直動運動における関節角度 (二関節筋有り)

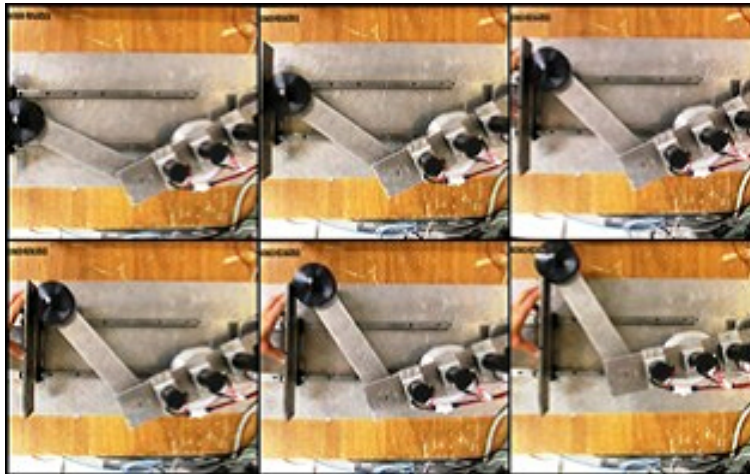


図 5.4 直動運動の様子 (二関節筋無し)



図 5.5 直動運動の様子 (二関節筋有り)

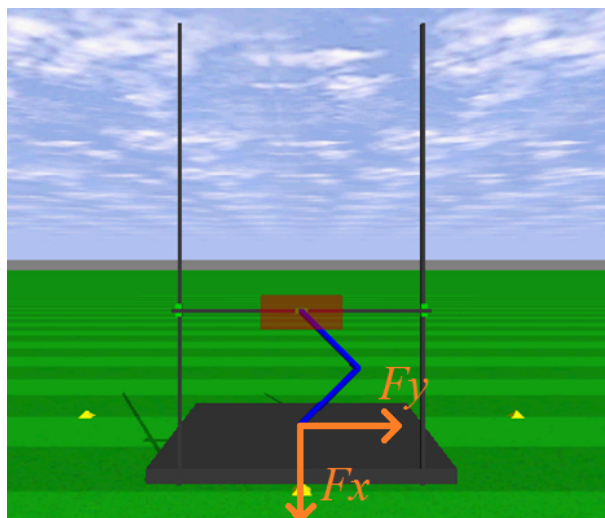


図 5.6 Open Dynamics Engine 上のシミュレーションモデル

5.2 Open Dynamics Engine を用いた脚座標空間オブザーバの検証結果

5.2.1 Open Dynamics Engine について

Open Dynamics Engine(ODE)[41] とは, Smith らによって開発された動力学計算エンジンであり, 同時に 3D 描画が可能である. その大きな特徴は, 高性能であるにも関わらず無償であり, プラットフォームも Windows, Linux, Mac に対応し, 言語も C もしくは C++ であるため汎用性が高いという点である. 精度は産総研の OpenHRP[42] などよりはやや落ちるが, 高速かつ扱いやすいため, 歩行や跳躍, 走行ロボットの動作確認に適しており, 前述した Raibert が属していた MIT の Leg Lab でも使用している. 国内では Demura による解説が著名であり, 本研究においても文献 [43] を参考としてプログラムを構築した.

本研究では, 高精度の歩行などはもとより考慮しておらず, 二関節筋という機構と単純な制御によって動的な歩行を実現することを目標としている. したがって提案する手法を検証するための物理エンジンとして ODE を用いる.

5.2.2 シミュレーションモデル

図 5.6 にシミュレーションモデルを載せる. モデルには実際に制作する一脚跳躍ロボットのデータを利用しており, 表 5.1 にその諸元を載せる. 角度などは図 3.5 で示した通りである.

図 5.6 は鉛直方向への跳躍を考慮したシミュレーションモデルとなっているが, 本検証は LSO および LeSOIC の動作の検証であるため, 可動部は腰部と膝部の関節のみとなっており, 重力を 0 に設定し, 平面 2 リンクマニピュレータとしている.

表 5.1 シミュレーションのパラメータ

m_1	1.0 kg	m_2	1.0 kg
l_1	0.25 m	l_2	0.25 m
d_1	0.125 m	d_2	0.125m
J_1	0.0208 kg·m ²	J_2	0.0208 kg·m ²
θ_1	$\pi/4$	θ_2	$-\pi/2$

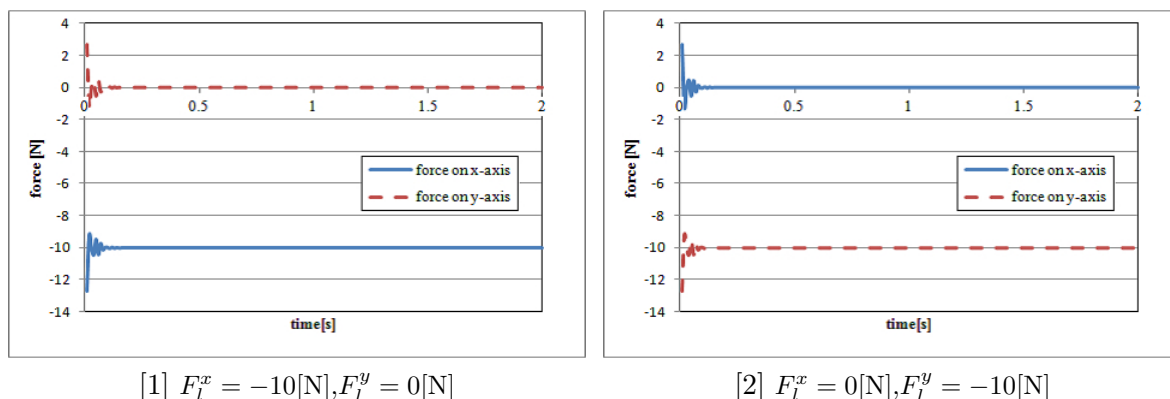


図 5.7 推定した外乱

5.2.3 LSO のシミュレーション結果

外乱推定

図 5.7 に LSO によって外乱を推定した結果を示す．関節角度は $\theta_1 = \frac{\pi}{4}[\text{rad}]$, $\theta_2 = -\frac{\pi}{2}[\text{rad}]$ である．それぞれ先端に x_l , y_l 方向に $-10[\text{N}]$ を与えており , x_l 方向 , y_l 方向の力が推定ができていとわかる．

速度制御

アウターループとして速度制御系を組んだ場合の結果を図 5.8 , 5.9 に示す．指令値として振幅 $0.5[\text{m/sec}]$, 周波数が 10Hz と 2Hz の正弦波を x_l 軸のみに加え , 比例制御を行っている．いずれの場合も,LSO によって y_l 軸方向への影響が除去されていることが解る．

外力に対する応答

図 5.10 に示した結果は , x_l 軸方向へ外部から力を加えた際のマニピュレータの運動を , \dot{x}_l , \dot{y}_l の変化で見たものである．(a) では y_l 方向の外乱のみをフィードバックし , y_l 方向への影響を除去している．これにより , 外力の影響を非干渉化できることが示された．

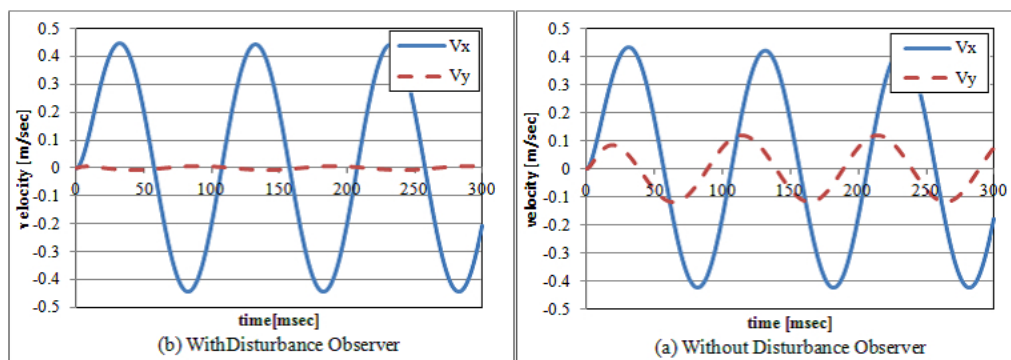


図 5.8 10Hz の正弦波指令値を \dot{x}_l へ指令した場合

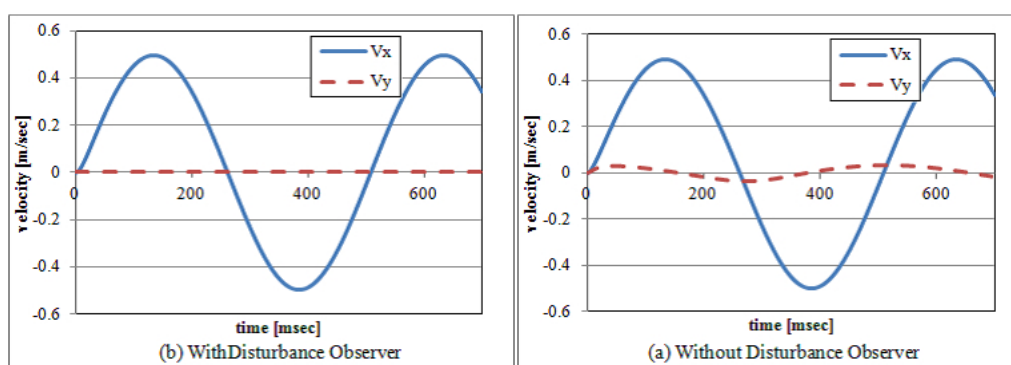


図 5.9 2Hz の正弦波指令値を \dot{x}_l へ指令した場合

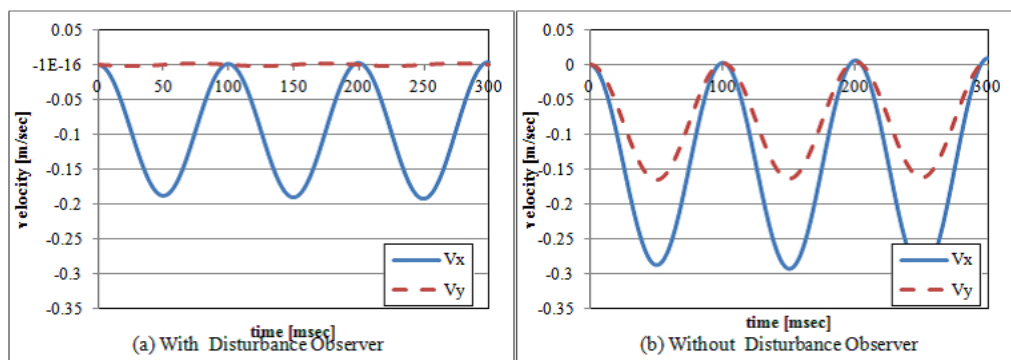


図 5.10 x_l 軸方向の外力に対する応答

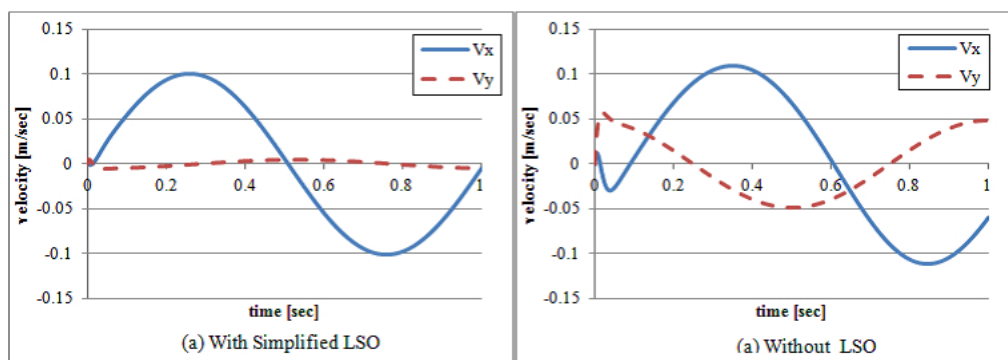


図 5.11 簡単化された LSO におけるシミュレーション結果

表 5.2 Model impedance

Case	M^x [kg]	B^x [Ns/m]	K^x [N/m]
1	—	1000.0	—
2	10.0	—	100.0
3	10.0	10.0	100.0
4	10.0	100.0	100.0

簡単化された LSO の効果

図 5.11 は図 3.9 で表した簡単化された LSO の働きを確認したシミュレーションである． \dot{x}_l に指令値として振幅 1.0 で 1Hz の \sin 波を入力しており，外乱として y_l 軸方向へ振幅 5[N]，1Hz の \cos 波を入力している．LSO が無い (b) の場合は y_l 軸方向に揺られ，また， x_l 軸方向の速度も指令値に追従できていないが，LSO を組めば y_l 軸へのずれは無く，速度も指令値に追従することがわかる．

以上より，Mono-Bi システムと脚座標を用いれば非常に簡単にオブザーバを組み， x_l 軸と y_l 軸の運動を非干渉化することが可能であることが示された．これは従来の関節ごとにアクチュエータを備えたマニピュレータでは実現できない，Mono-Bi システムならではの特徴である．

特異姿勢における LSO を用いた外乱推定

図 5.12 ～ 図 5.15 は特異姿勢， $\theta_1 = \theta_2 = 0$ [rad] における外乱推定の結果であり，それぞれ，[1] は脚空間上での推定外乱であり，[2] はトルク空間上での推定外乱を表す．どの場合においても，得意姿勢であるため， d_l^x は発散しており，正確な値を推定することができない．しかし，トルク空間上における $d_{l<\tau>}^x$ は推定はできないにしても，発散していない．簡単化された LSO で用いるのは後者のみであるため，得意姿勢においても不安定にならない．また，図 5.145.15 のように， y_l 方向への外乱による特異点からの微小変異によって，直ちに x_l 方向の外乱推定機能が回復することがわかる．

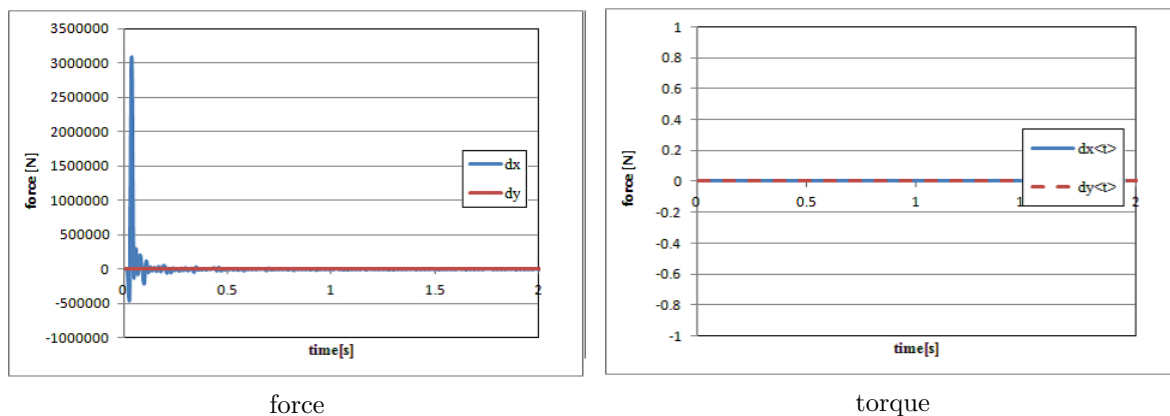


図 5.12 入力を $F_l^x = -10[\text{N}], F_l^y = 0[\text{N}]$ とした場合

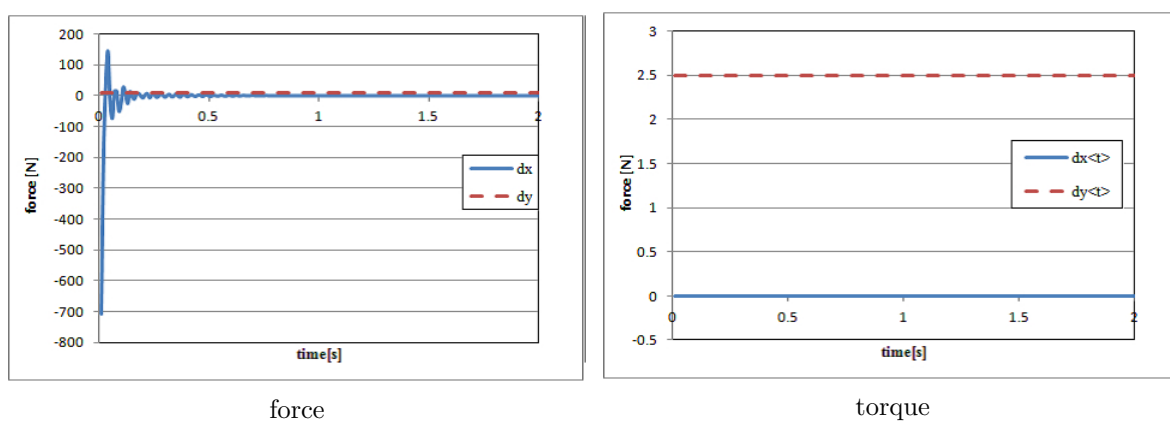


図 5.13 入力を $F_l^x = 0[\text{N}], F_l^y = 10[\text{N}]$ とした場合

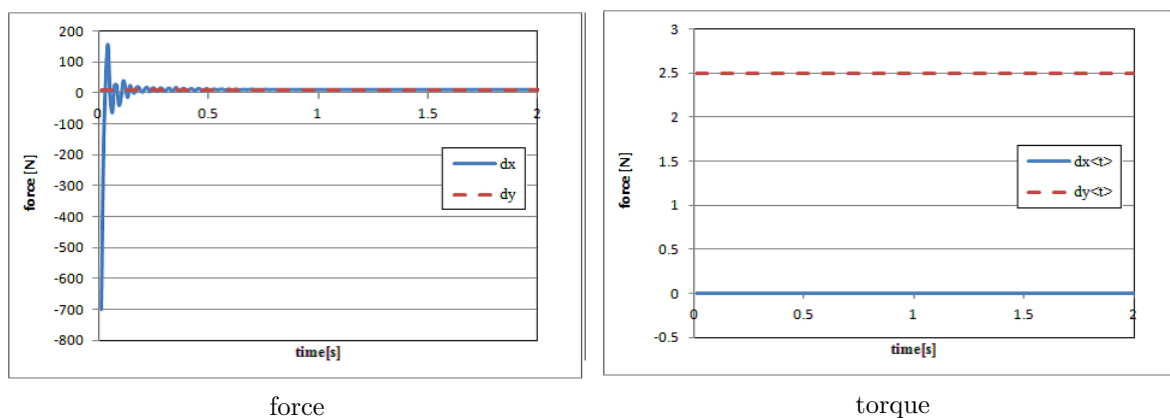
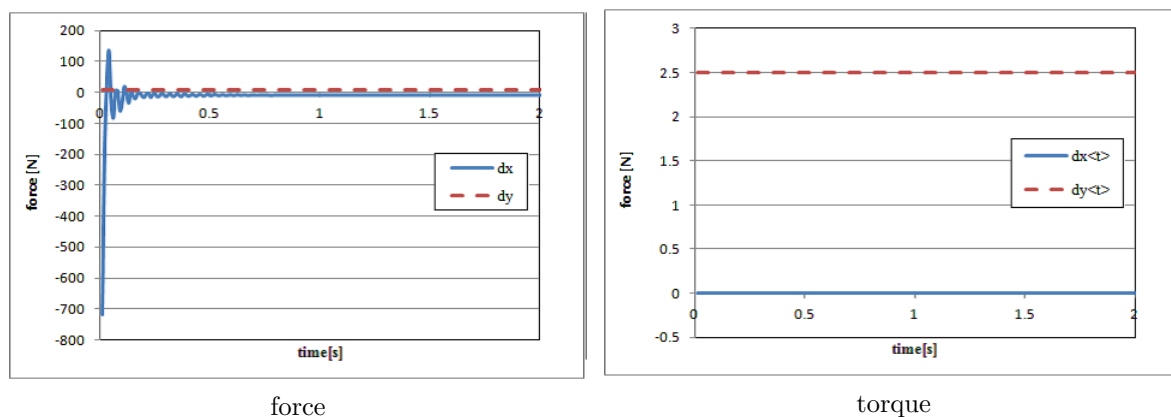


図 5.14 入力を $F_l^x = 10[\text{N}], F_l^y = 10[\text{N}]$ とした場合


 図 5.15 入力を $F_l^x = -10[\text{N}]$, $F_l^y = 10[\text{N}]$ とした場合

5.2.4 LeSOIC のシミュレーション結果

提案する脚座標空間での力センサレスインピーダンス制御, LeSOIC の有効性をシミュレーションで検証する. 姿勢は $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$, $\theta_2 = -\frac{\pi}{2}$ としており, インピーダンス制御は x_l 軸方向のみに施し, y_l 軸方向は LSO のみ閉じている. また, LeSOIC の速度制御器には PI 制御器を用いた. モデルインピーダンスを Table.5.2 によって定め, 外力として, $F_l^x = -10[\text{N}]$ を加えた際の速度指令値と速度, x_l , y_l 方向の推定外力を図 5.16 ~ 図 5.19 に示す. どのインピーダンスにおいてもアーム先端の速度がモデルインピーダンスから算出された指令速度に追従しており, インピーダンス制御が実現できていることがわかる.

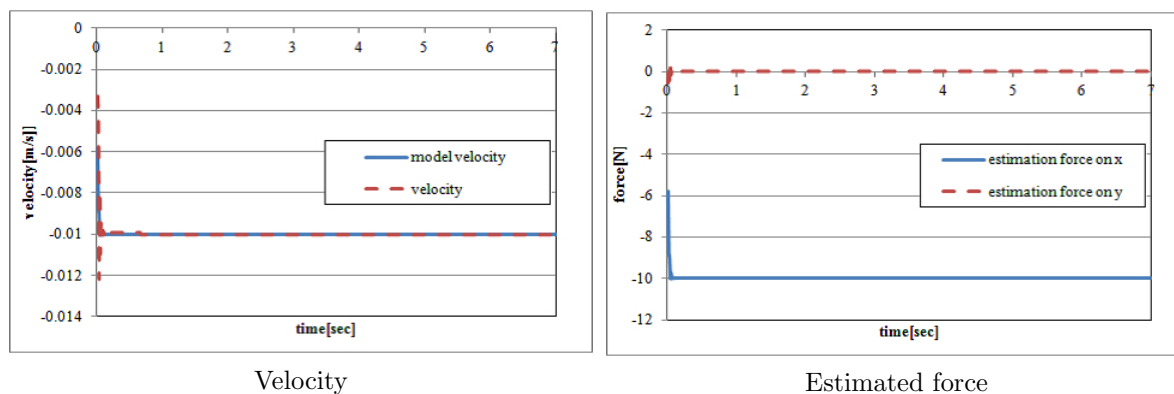


図 5.16 Case:1

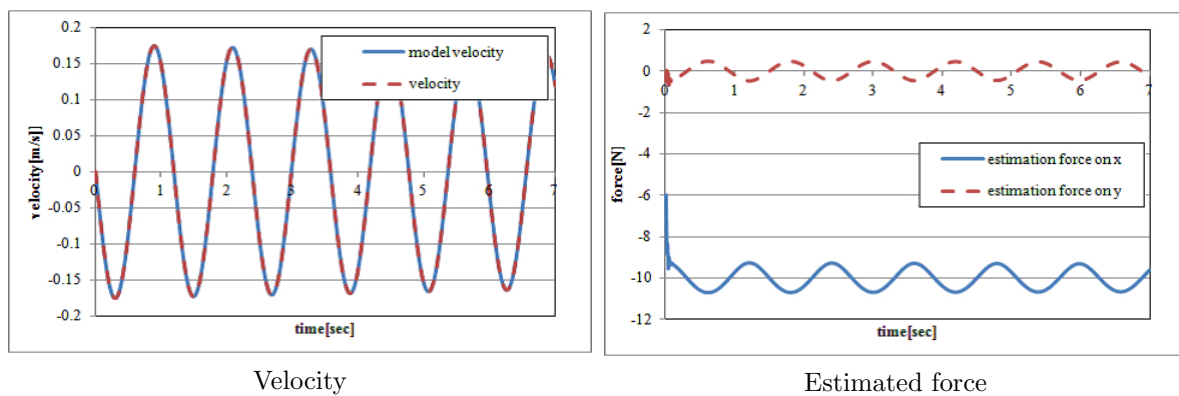


図 5.17 Case:2

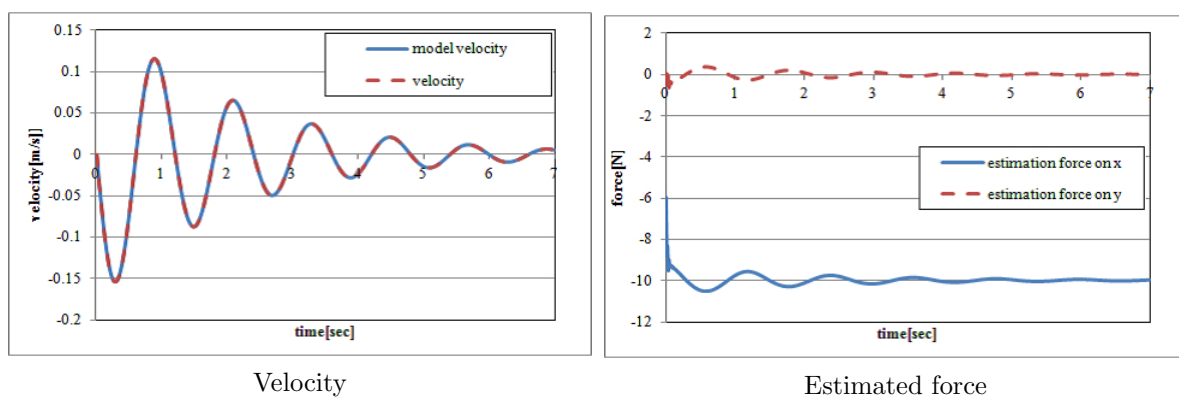


図 5.18 Case:3

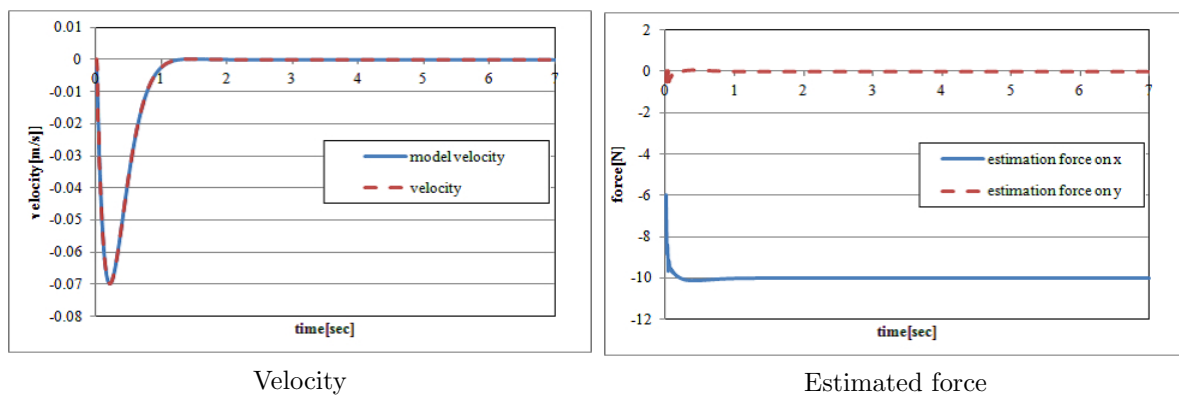


図 5.19 Case:4

第 6 章

結論

6.1 まとめ

本研究では，従来のロボット工学には無い生体特有の機構の一つである二関節筋を 2 リンク マニピュレータに導入するうえで，生物四肢の基本動作は第一関節と末端とを結ぶ方向へ運動する直動運動を中心としている点に着目し，二関節筋と直動運動の関係を静的・動的な面から論じた．

二関節筋に関する多くの研究がなされてきたが，先端出力特性や各筋への出力配分といった基礎的な内容に関する研究が多く，実際のロボットへ利用するには大きな隔たりが存在している．また，歩行や走行をロボットに行わせようという研究も多岐にわたっており，二関節筋をはじめとする生体の筋骨格構造を応用しようという研究も多い．しかし，そういったロボットは生体機構の単なる模倣にとどまっている場合が多く，二関節筋の機能を詳細に理解し，利用した研究は少ない．そこで本研究ではその隔たりを埋めるため，直動運動に焦点を絞って実際のロボットと二関節筋との関連を論じた．

提案した簡単な関節剛性の制御による静的な直動運動は二関節筋が無くては実現できない．現行の歩行ロボットなどに比べ脆弱なフィードバック処理速度しか持たない生物が，歩行などのタスクを実現するために二関節筋をはじめとする筋骨格構造が非常に重要な役割を担っていることを示している．

さらに，新たに提案した第一関節単関節筋と二関節筋による 2 リンク マニピュレータ構造は，SLIP モデルと結びつく脚座標空間の力出力，運動と非常に対応が良い．このことは，二関節筋が歩行や走行，跳躍といった動作において重要な役割を担っていることを示唆している．本研究ではシミュレーションによってこの対応の良さを示し，簡単な制御構造で *natural dynamics* を実現させることが可能であることを示した．

本研究により，二関節筋と四肢の直動運動との関連が明らかとされ，物体の押し動作や引き動作，歩行や走行，跳躍といった今後のロボットに必要なタスクに二関節筋が応用できることを示した．生物の運動に近いロボットができれば，ロボットの活躍する場が広がり，その技術は医療福祉や介護，災害救助などに应用することができると考えられる．さらに，生物の機能を備えたロボットを研究することによって人間の複雑な生体機構の役割を理解することが可能となり，それは生物を知り，医療や福祉を充実させることに還元される．

6.2 今後の展望と課題

図 6.1 に示すのは、筆者が考える生体機構応用型ロボティクスの目的と、その中での本研究の位置づけ、および今後の課題として研究が必要な分野を表したものである。赤色の部分は本研究と関連した部分であり、青色の部分は今後、研究開発が必要な部分である。

提案手法の検証

二関節筋と直動運動を結びつけることによって、これまで先端出力特性の改善程度しか論じられなかった二関節筋の利点がより明らかとなった。今回シミュレーションによって確認した動作を今後は実験機によって検証する必要がある。図 6.2 に、シミュレーションモデルをもとにして作成している一脚平面跳躍ロボットを示す。

バックドライバビリティを備えたアクチュエータ

また、生体機構の特徴として、バックドライバビリティの高さが挙げられる。これは負荷側から駆動側を駆動することが可能かどうかという特性であり、従来型の工業用マニピュレータでは負荷側からの外乱の影響を除くために高減速比のギアを用いることでバックドライバビリティを下げていた。しかし、今後必要とされる人間や未知の環境と接触するロボットはむしろ積極的にバックドライバビリティを高める必要がある。そのため、空気圧人工筋を用いた拮抗駆動や、Series Elastic Actuator[44][45] といったバックドライバビリティを保ちつつ高出力であるようなアクチュエータを二関節筋と合わせて研究する必要がある。

跳躍・走行・歩行アルゴリズム

Raibert らが開発した跳躍ロボットの跳躍アルゴリズムは非常に簡潔であったが、単なる位置と速度フィードバックとフェイズによる切り替えのみであったため、改善の余地が多い。本研究で提案したインピーダンス制御を拡張することで不整地での走行や低速の走行などが実現可能であると考えられる。

その他

二関節筋の技術を実際のロボティクスや医療福祉へ応用する上で、本研究で論じた直動運動と脚座標空間の定義は重要な要素となると考えられる。人間の歩行や走行が SLIP モデルによる直動運動でモデル化できるということを考えれば、二関節筋型のアクチュエータを備えた歩行装具の開発やパワーアシストスーツ、跳躍ロボットなどが実現されることが考えられる。

また、二関節筋が持っていると考えられるエネルギー伝達・蓄積に関してはまだ解明されていない部分が多い。この点に関しても、研究を進める必要がある。

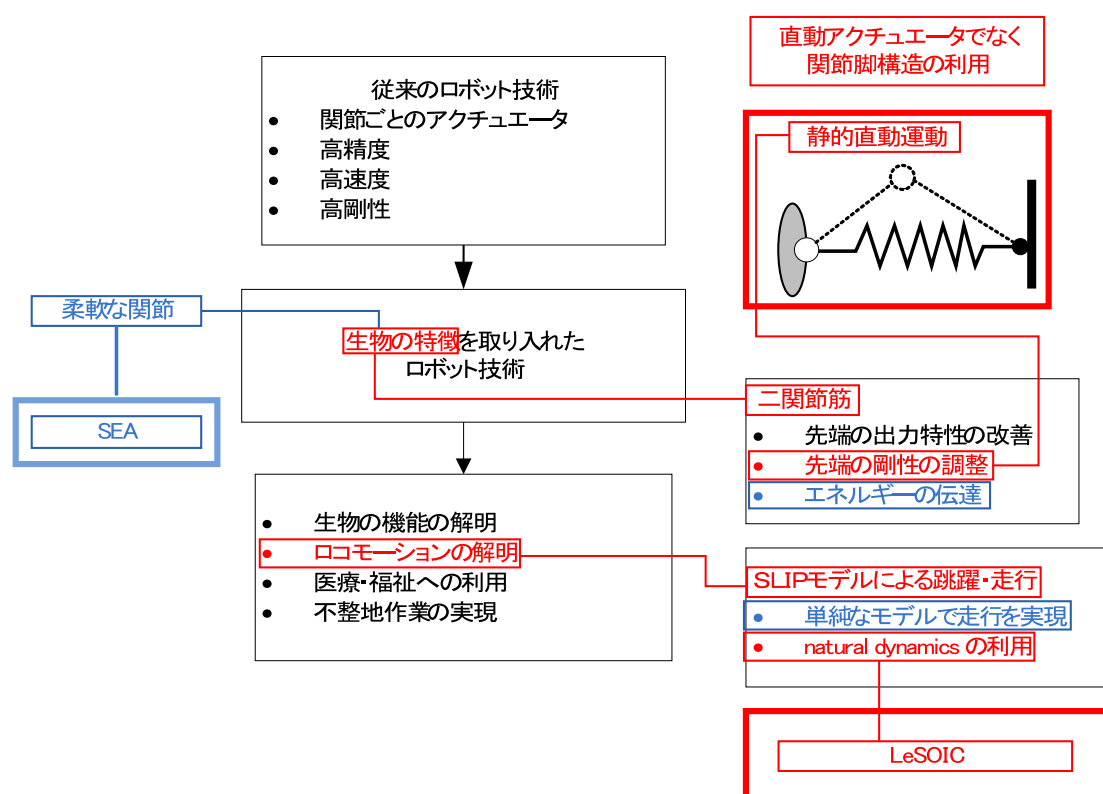


図 6.1 生体機構応用ロボティクスの中での本研究の位置づけと今後の展望



図 6.2 製作中の一脚跳躍ロボット

謝辞

まずはじめに，学部生からの3年間に渡り，研究面はもちろん，エンジニアとしての生き方についてご指導頂いた堀洋一先生に厚く御礼申し上げます．藤本博志先生にはエンジニアとしてのものの見方，考え方，そして貪欲さを教えていただきました．また，呉世訓先生には電気工学はもちろん，生体工学，ロボット工学，実験機の取り扱いに至るまでお世話して頂き，感謝の言葉もございません。

技術職員の内田利之さんにはロボットアームの設計や加工，物品の購入に関して大変お世話になりました．深く御礼を申し上げます．また，秘書の越智さん，松島さんには研究室の事務処理，生活の面で多くの手助けを頂きました．改めて，ここに感謝を申し上げます．居村岳広先生，皆木亮さんとは時には雑談を交わし，研究への取り組む姿勢をお教えいただきました．バレリオサルブッチさんにはグローバルな視点からの物事のとらえ方と研究に対する積極性がいかに重要であるかを教えていただきました．また，南康鉉さん，金潤河さん両先輩には豊富な機械工学の知識によってサポートしていただきました．深く御礼申し上げます．さらに，共に過ごした研究室のメンバーに感謝を申し上げます。

熊本水頼先生をはじめとする，電気学会生体機構に学ぶ運動制御協同研究委員会の諸先生方には研究に関する多くのアドバイスとヒントを頂きました．委員会では生体機構の先生方の貴重な発表やご意見を聞くことができ，本研究の礎となりました．改めて，感謝を申し上げます。

研究室OBである吉田憲吾さんには研究面はもちろん，研究室の運営に関しても大変お世話になりました．同じくOBである河島清貴さんには時に厳しく，研究室での生活や研究態度について指導していただきました．深く，御礼申し上げます。

電気系グローバルCOE事務室の鳴原さんには物品購入の手続きにおいて非常にお世話になりました．また，古関隆章先生には二関節筋の研究に関して様々なご助言を頂きました．改めて感謝を申し上げます。

最後に，プライベートを支えて下さった家族，友人達を始め，大学生活を通して関わったすべての人に感謝致します。

参考文献

- [1] 厚生労働省監修, “平成 23 年度版厚生労働白書,” 2011
- [2] 経済産業省監修, “ロボット産業研究会報告書,” 2009
- [3] G. J. Van Ingen Schenau, “ From rotation to translation: Constraints on multi-joint movements and the unique action of bi-articular muscles, ” *Human Movement Science*, vol. 8, no. 4, pp. 301-337, Aug. 1989.
- [4] B. I. Prilutsky and V. M. Zatsiorsky, “ Tendon action of two-joint muscles: transfer of mechanical energy between joints during jumping, landing, and running., ” *Journal of biomechanics*, vol. 27, no. 1, pp. 25-34, Jan. 1994.
- [5] N. Hogan, “ The Mechanics of Multi-Joint Posture and Movement Cont, ” *Biological Cybernetics*, vol. 331, pp. 315-331, 1985.
- [6] Minayori Kumamoto, Toru Oshima, Tomohisa Yamamoto, “ Control properties induced by existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles -Mechanical engineering model analyses, ” *Human Movement Science* 13, pp611-634, 1994
- [7] T. Oshima, K. Toriumi and T. Fujikawa and N. Momose, “Jump Mechanism using Coordination Function of Bi-articular Muscle in Knee and Ankle Joint (in Japanese),” *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineer, C*, vol. 71, No. 712, pp. 176-182, 2005.
- [8] 藤川智彦, 大島徹, 水頼熊本, 横井信安, “ ヒト上肢における系先端の出力と拮抗筋群の協調活動, ” *日本機械学会論文集 (C 編)*, 65 巻, 632 号, pp. 1557-1564, 1999.
- [9] 門田健志, 鈴木 健也, 深井善朗, 小田高広, “ 二関節筋装備基本モデル「HI PRO」, ” *精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 二関節筋実利用 Workshop*, 2003.
- [10] 門田健志, 鴫田守, 小田高広, 鈴木 健也, “ 協調制御モデル - 二関節筋装備型ロボットレッグ, ” *精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 第 4 回例会*, 2005.
- [11] T. Tsuji, “ A model of antagonistic triarticular muscle mechanism for lancelet robot, ” *Advanced Motion Control*, 2010 11th IEEE, vol. 2, pp. 496-501, Mar. 2010.
- [12] V. Salvucci, Y. Kimura, S. Oh, and Y. Hori, “ BiWi: Bi-articularly actuated and wire driven robot arm, ” in *Mechatronics (ICM)*, 2011 IEEE International Conference on, 2011, pp. 827-832.

- [13] A. Umemura, Y. Saito, and T. Haneyoshi, " The rigidity of the bi-articular robotic arm with a planetary gear, " 2010 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), pp. 490-495, Mar. 2010.
- [14] A. Umemura and T. Haneyoshi, " Tip force depend on the motor distribution with bi-article arm using planetary gear, " in Mechatronics and Automation (ICMA), 2011 International Conference on, 2011, pp. 1849-1854.
- [15] 吉田憲吾, " 生物の筋骨格構造に基づくモーション制御に関する研究," , 学位論文, 2010
- [16] R. Niiyama and A. Nagakubo, " Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system, " Robotics and Automation, no. April, pp. 2546-2551, Apr. 2007.
- [17] 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, Dec. 2009.
- [18] J. Babic, B. Lim, D. Omrcen, J. Lenarcic, and F. C. Park, " A Biarticulated Robotic Leg for Jumping Movements: Theory and Experiments, " Journal of mechanisms and robotics, vol. 1, no. 1.
- [19] A. Seyfarth, F. Iida, R. Tausch, M. Stelzer, O. von Stryk, and a. Karguth, " Towards Bipedal Jogging as a Natural Result of Optimizing Walking Speed for Passively Compliant Three-Segmented Legs, " The International Journal of Robotics Research, vol. 28, no. 2, pp. 257-265, Feb. 2009.
- [20] M. Lewis and T. Klein, " A robotic biarticulate leg model, " in Biomedical Circuits and Systems Conference, 2008. BioCAS 2008. IEEE, 2008, pp. 57-60.
- [21] R. Niiyama, S. Nishikawa, and Y. Kuniyoshi, " Musculoskeletal Force Control for Bipedal Running of an Athlete Robot, " in Proceedings 2010 RSJ, 2010, pp. 7-10.
- [22] M. A. Lewis, M. R. Bunting, B. Salemi, and H. Hoffmann, " Toward Ultra High Speed Locomotors : Design and Test of a Cheetah Robot Hind Limb, " Robotics, 2011.
- [23] H. Fukusho, T. Koseki, and T. Sugimoto, " Control of a straight line motion for a two-link robot arm using coordinate transform of bi-articular simultaneous drive, " in Advanced Motion Control, 2010 11th IEEE International Workshop on, 2010, pp. 786-791.
- [24] T. Tajima and T. Oshima, " Study of the Human Friendly Next Generation Steering System, " The Japan Society for Precision Engineering, Committee of Biological Control System and Its Applied Technology, 2005.11.
- [25] K. Masuoka, " 跳躍・走行機構に関する基礎的研究, " 日本機械学会論文集, vol.43, no.376, pp.4501-4509, 1977.

- [26] M. H. Raibert, " Legged robots, " *Communications of the ACM*, vol. 29, no. 6, pp. 499-514, May. 1986.
- [27] M. H. Raibert, *Legged Robots That Balance*, The MIT Press, 1985.
- [28] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, and R. Playter, " BigDog , the Rough-Terrain Quaduped Robot, " *Control*, 1995.
- [29] R. Blickhan, " The spring-mass model for running and hopping, " *Journal of Biomechanics*, vol. 22, no. 11-12, pp. 1217-1227, 1989.
- [30] T. A. McMahon and G. C. Cheng, " The mechanics of running: how does stiffness couple with speed?, " *Journal of biomechanics*, vol. 23 Suppl 1, pp. 65-78, Jan. 1990.
- [31] C. T. Farley and O. Gonzalez, " LEG STIFFNESS AND IN HUMAN STRIDE FREQUENCY RUNNING, " *Science*, vol. 29, no. 2, pp. 181-186, 1996.
- [32] E. Papadopoulos and N. Cherouvim, " On increasing energy autonomy for a one-legged hopping robot, " *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004. *Proceedings. ICRA '04*. 2004, no. April, pp. 4645-4650 Vol.5, 2004.
- [33] S. H. Hyon and T. Mita, " Development of a biologically inspired hopping robot- ' Kenken ' " *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*, vol. 4, no. May, pp. 3984-3991, 2002.
- [34] J. W. Grizzle, J. Hurst, B. Morris, H.-won Park, and K. Sreenath, " MABEL , A New Robotic Bipedal Walker and Runner, " *Mechanical Engineering*, pp. 2030-2036, 2009.
- [35] 伊藤宏司他, " 筋骨格形 of 双線型特性と義肢制御への応用 ", *電気学会論文誌 C 編*, Vol. 105, No. 10, pp. 201 - 208, 1985
- [36] S. Oh and Y. Hori, " Development of two-degree-of-freedom control for robot manipulator with biarticular muscle torque, " *American Control Conference*, 2009. ACC, pp. 325-330, 2009.
- [37] S. Oh, V. Salvucci, Y. Kimura, Y. Hori, "Verification of Efficient Force Transmission by Biarticular Muscle Actuator" *Proc. IFAC*, pp 13516-13521, 2011
- [38] S. Oh and Y. Hori, "Generalized Discussion on Design of Force-sensor-less Power Assist Control", *10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp.492-497, 2008
- [39] Y. Aoki, T. Uchida, and Y. Hori, " Experimental demonstration of body slip angle control based on a novel linear observer for electric vehicle, " in *Industrial Electronics Society*, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE, 2005, no. 1, pp.6
- [40] Y. Kimura, S. Oh, and Y. Hori, " Novel robot arm with bi-articular driving system using a planetary gear system and disturbance observer, " *Advanced Motion Control*, 2010 11th IEEE.

- [41] Open Dynamics Engine ホームページ, "Open Dynamics Engine", <http://www.ode.org/>
- [42] Open HRP3 公式ホームページ, "Open HRP Official site",
<http://www.openrtp.jp/openhrp3/jp/>
- [43] 出村 公成, "簡単！実践！ロボットシミュレーション," 森北出版, 2007
- [44] G. a. Pratt and M. M. Williamson, " Series elastic actuators, " Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots, no. 1524, pp. 399-406, 1995.
- [45] K. Kong, J. Bae, and M. Tomizuka, " Control of Rotary Series Elastic Actuator for Ideal Force-Mode Actuation in Human?Robot Interaction Applications, " IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 14, no. 1, pp. 105-118, Feb. 2009.

発表文献

論文誌投稿

- [1] 木村 康人, 呉 世訓, 堀 洋一, ”二関節筋と筋粘弾性を用いた反力方向制御の実証,” 日本ロボット学会誌 (投稿済み)

学会発表

- [1] Yasuto Kimura, Sehoon Oh, Yoichi Hori, ”Realization of Bi-articular Driven Robotic Arm with Planetary Gear Based on Disturbance Observer,” International Symposium on Application of Biomechanical Control Systems to Precision Engineering(ISAB), pp.203-208, July. 2010.
- [2] 木村 康人, 呉 世訓, 堀 洋一, ”遊星歯車機構による二関節同時駆動機構を装備したロボットアームの実現,” 平成 22 年電気学会産業応用部門大会, 2010, 8, 東京.
- [3] Yasuto Kimura, Sehoon Oh, Yoichi Hori, ”Novel Reaction Force Control Based on Bi-Articular Driving System Using Intrinsic Muscle Viscoelasticity,” in Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on, 2011, pp. 815-820.
- [4] 木村 康人, 呉 世訓, 堀 洋一, ”二関節筋と筋粘弾性を用いた反力方向制御の実証,” 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 2011, 東京.
- [5] Yasuto Kimura, Sehoon Oh, Yoichi Hori, ”Leg Space Observer on Biarticular Actuated Two-Link Manipulator for Realizing Spring Loaded Inverted Pendulum Model,” AMC 2012, 2012, Sarajevo (Accepted)