

- 博士論文 -

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
Motion Control Based on Animal
Musculoskeletal Structure

平成21年12月15日提出

指導教員 堀 洋一教授

東京大学大学院工学系研究科
電気工学専攻 77073 吉田 憲吾

内容梗概

本論文では、生物の筋骨格構造に基づくモーション制御に関して論ずる。特に生物の四肢に着目し、(1)拮抗駆動、(2)二関節同時駆動、(3)非線形粘弾性の3つの特徴をロボットの機構として取り入れ、これらの構造に基いた制御手法を実現する。ここでは大きく分けて3つの提案を行なう。すなわち、生物の四肢の機構を取り入れたロボットアームの実現、生物の四肢の特徴を利用したフィードフォワード制御手法、生物のように複雑なアクチュエータ配列を持つアームに適用可能な拡張された操作性指標である。

生物とロボットのアームモデルを比較すると、生物のアームにはまたがった二つの関節を同時に駆動する二関節筋と呼ばれるアクチュエータが存在することが分かる。この筋は従来のロボット工学等では無視されていたものであるが、このような特徴的な機構が生物の巧みな制御機能に重要な役割を果たしており、これを実証し実際に応用することが本研究の目的である。本論文中では、生物の四肢をもとに、6つの筋による3つの拮抗対によって駆動される2リンクのアームモデルを元に議論を進める。

生物の四肢の機構を取り入れたロボットアームとして、タイミングベルトとプーリーによる二関節同時駆動機構を備えた2リンクアームを実現する。3対6筋のモデルのうち各拮抗対をモータで置き換え、筋の粘弾性に関してはソフトウェア的に実現する。実験によって、二関節筋に相当するモータを取り入れることでアームの手先における力出力を改善し、いずれの二つのモータでも駆動する冗長性を備えることを確認した。

次に、筋粘弾性を生かしたフィードフォワード (FF) 制御アルゴリズムを提案する。本アルゴリズムの特徴として、筋の活性度に相当する収縮力のFF的な入力のみで、位置指令と制御特性を設計することができ、FFながらモデル外乱に対してロバストである点が挙げられる。また、任意の軌道追従アルゴリズムも同時に提案する。

最後に、生物型アームに適用可能とするために操作性指標の拡張を行なう。従来、様々な指標が提案されてきたが、これらをそのまま二関節筋のような複雑なアクチュエータの配列を持つアームへ適用することはできなかった。提案する拡張によってこの問題を解決し、生物型アームの公正な比較、正しい設計を可能とした。実際にケーススタディによって複数の事例に適用する。

目次

要旨	1
第1章 序論	5
1.1 研究の背景と目的	5
1.2 筋骨格構造とその応用に関する既存研究	7
1.3 本論文の構成	11
1.4 本論文で使われる記号の一覧	11
第2章 生物型アームのモデル化	13
2.1 筋配列と四肢のモデル	13
2.2 筋の粘弾性モデル	15
2.3 生物型アームの静・動特性	17
2.3.1 生物型アームの手先における力の出力特性	17
2.3.2 生物型アームの動特性	19
第3章 生物の仕組みを取り入れたロボットアーム	21
3.1 生物の仕組みを取り入れたロボットアームの実現	21
3.1.1 生物の仕組みを取り入れたロボットアーム	21
3.1.2 生物型ロボットアームに用いるアクチュエータ	21
3.1.3 二関節同時駆動機構の実現	25
3.1.4 筋粘弾性の実現	29
3.2 二関節同時駆動機構を持つロボットアームの製作	30
3.2.1 ロボットアームの設計	30
3.2.2 製作したロボットアームとその諸元	31
3.2.3 製作したロボットアームの位置付け	32
3.3 実験機の検証	36
3.3.1 手先における力出力の検証	36
3.3.2 動作時における二関節同時駆動機構の検証	41
3.3.3 ロボットアームの冗長性の検証	41
3.3.4 実験のまとめ	46
3.4 遊星歯車機構による二関節同時駆動機構を持つロボットアーム	46
第4章 生物型ロボットアームの制御手法	49
4.1 外乱オブザーバに基づく生物型ロボットアームの位置制御手法	49
4.1.1 二関節同時駆動機構を持つロボットアームへの応用	49
4.1.2 外乱オブザーバに基づく手法の検証	50
4.2 筋粘弾性と拮抗対による動特性	51

4.2.1	拮抗駆動を行なう弾性要素による剛性制御に関する考察	51
4.2.2	拮抗対による単関節の動特性に関する考察	53
4.2.3	拮抗対による2リンクアームの釣り合い特性の考察	54
4.3	拮抗対に基づいた制御器による生物型ロボットアームの制御	56
4.3.1	拮抗対に基づいた単関節の制御器	56
4.3.2	単関節の制御の検証	58
4.3.3	拮抗対に基いた2リンクアームの制御器	59
4.3.4	2リンクアームの拮抗対による制御の検証	59
4.4	筋粘弾性に基くフィードフォワード軌道追従アルゴリズムの提案	62
4.4.1	フィードフォワード軌道追従アルゴリズム	62
4.4.2	フィードフォワード軌道追従の検証	65
第5章	拡張した操作性指標	69
5.1	操作性指標についての導入とその分類	69
5.2	インピーダンスマッチング楕円の拡張	71
5.2.1	インピーダンスマッチングの概念	71
5.2.2	インピーダンスマッチング楕円の導出	71
5.2.3	複雑なアクチュエータの配列を持つマニピュレータへの拡張	72
5.2.4	インピーダンスマッチング楕円の特徴量による指標	74
5.2.5	二関節同時駆動機構を持つ2リンクマニピュレータへの適用	74
5.3	拡張した操作性指標の検証	75
5.3.1	従来指標と拡張した指標の比較検証	75
5.3.2	二関節同時駆動機構を持つロボットアームへの適用	78
5.3.3	姿勢にともなう諸特性の変化	78
5.3.4	操作性に関する特徴量の比較	83
5.4	拡張した操作性指標の応用	86
5.4.1	車椅子のハンドリム漕ぎ動作への応用	86
5.4.2	自転車のペダル漕ぎ動作への応用	89
第6章	結論	92
6.1	まとめ	92
6.2	生物の筋骨格構造の導入に関する今後の展望	92
6.2.1	筋骨格構造の特徴の組み合わせによって実現されること	92
6.2.2	本研究を適用可能な領域	93
	参考文献	96
	発表文献	101
	謝辞	103
	付録A ロボットアームの製作資料	104
A.1	実験機的设计と製作	104
A.2	実験用プログラムの設計と製作	109
A.2.1	実験用プログラムのフレームワーク	109
A.2.2	主な構造体と関数の説明	110

目 次

1.1	日本の人口と年代別割合の推移 [1]	6
1.2	ロボット産業の出荷額と輸出割合の推移 [2]	6
1.3	従来のロボットアームと生物の四肢の構造の比較	7
1.4	腓腹筋 (gastrocnemius muscle) を含む跳躍モデル	8
1.5	沖電気工業による二つの二関節筋の原理を用いたロボット [15][16]	9
1.6	カエルの筋配列を元にした跳躍ロボット [17]	9
1.7	各筋を空気圧アクチュエータで置き換えた跳躍ロボット [18]	10
1.8	筋の出力分布を計測する FEMS プログラム	10
2.1	生物の下肢の筋配列	14
2.2	3対6筋で表された生物のアーム機構	14
2.3	筋の階層構造	15
2.4	等尺的な筋長-張力の曲線	16
2.5	筋の収縮速度と筋力の曲線	16
2.6	筋肉の模式図	17
2.7	二関節筋の有無による各関節トルクの取りうる領域	18
2.8	二関節筋の有無による手先における力の取りうる領域	19
2.9	各拮抗対による手先における力の出力方向	20
2.10	本論文でのシミュレーションに用いるモデル	20
3.1	直動型アクチュエータの構造の比較	22
3.2	流体を用いた人工筋の概念図	23
3.3	IPMC の構造 [38]	24
3.4	ワイヤと剛体による直接接続型の二関節同時駆動機構	27
3.5	リニアモータを用いた直接接続型の二関節同時駆動機構	27
3.6	動滑車を用いる二関節同時駆動機構	28
3.7	タイミングベルトとプーリーを用いた二関節同時駆動機構	29
3.8	HIPRO ロボットに搭載された、可変弾性アクチュエータ (VEA)[15]	30
3.9	SAT による単関節駆動機構 [56]	31
3.10	ANLES のメカニズム [57]	31
3.11	筋の粘弾性を実現するダイアグラム	32
3.12	二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの全体図	33
3.13	制作したロボットアーム	33
3.14	二関節同時駆動機構におけるトルク伝達部	35
3.15	コントロールボックス	36
3.16	各コンポーネントの接続図	37
3.17	完全な3対6筋の構造を持つロボットアームの例	38

3.18	実験のためのセットアップ	38
3.19	ロボットアームの姿勢と座標	39
3.20	筋の交代パターン (二関節筋あり)	40
3.21	筋の交代パターン (二関節筋なし)	40
3.22	二関節同時駆動機構の寄与度を变化させた時の手先において出力可能な力の領域	42
3.23	アームの姿勢を变化させた時の手先において出力可能な力の領域	43
3.24	動作時における二関節同時駆動機構の検証用のブロック図	44
3.25	二関節同時駆動機構に sin 波形を入力した際の応答	44
3.26	冗長性の検証実験に用いた制御ブロック図	45
3.27	冗長性の検証のための駆動実験	45
3.28	遊星歯車機構	46
3.29	遊星歯車機構を用いたロボットアーム	47
4.1	外乱オブザーバに基づく位置制御手法のブロック図	50
4.2	外乱オブザーバに基づく手法による実験結果	51
4.3	弾性特性を並列に持つ要素による拮抗駆動のモデル	51
4.4	弾性特性を直列に持つ要素による拮抗駆動のモデル	52
4.5	拮抗対による単関節の駆動モデル	53
4.6	拮抗対による物体の駆動特性	55
4.7	釣り合い位置と、手先位置を変えた場合の手先出力の変化	57
4.8	拮抗筋による単関節の制御器	57
4.9	拮抗筋による単関節の制御器の PD 制御器を含んだ等価なブロック図	58
4.10	収縮力の和を变化させた際の単関節の拮抗筋による駆動に関するシミュレーション結果	60
4.11	質量を变化させた際の単関節の拮抗筋による駆動に関するシミュレーション結果	61
4.12	把持物体の質量を变化させた際の 2 リンクアームの拮抗対による駆動に関するシミュレーション結果	63
4.13	フィードフォワード軌道追従アルゴリズムの概念図	64
4.14	フィードフォワード軌道追従アルゴリズムのフロー図	65
4.15	収縮力のフィードフォワード入力とトルクのフィードフォワード入力の違い	66
4.16	収縮力を FF する手法とトルクを FF する手法の比較	67
4.17	リンクの質量を变化させた場合のシミュレーション結果	68
5.1	操作性指標の概念図	70
5.2	インピーダンスマッチング楕円の概念	71
5.3	二関節筋の有無による関節トルクの取りうる領域	73
5.4	二関節同時駆動機構を持つアームと c_{omp} の導出	75
5.5	二関節筋の有無による MFE と手先出力の取りうる領域	76
5.6	二関節筋の有無による DME と手先加速度の取りうる領域	77
5.7	二関節筋の有無による IME と把持物体に与える力の取りうる領域	78
5.8	実験によって求めた二関節同時駆動機構を持つロボットアームの手先出力への操作性指標 (MFE) の適用	79
5.9	姿勢による MFE の変化	80

5.10	姿勢による DME の変化	81
5.11	姿勢による IME の変化	82
5.12	姿勢による w_v の変化	84
5.13	二関節同時駆動機構の大きさによる w_v の変化	84
5.14	姿勢による MFE の特徴量の変化	85
5.15	姿勢による DME の特徴量の変化	85
5.16	姿勢による IME の特徴量の変化	85
5.17	車椅子のハンドリム漕ぎ動作のモデル	86
5.18	車椅子のサイズ別のリムの回転角による漕ぎ力の変化	88
5.19	リムの回転角による IME の形状の変化	88
5.20	自転車の漕ぎ動作のモデル	89
5.21	自転車のサドル高さ別のクランクの回転角による漕ぎ力の変化	91
5.22	クランクの回転角による IME の形状の変化	91
6.1	生物の筋骨格系の特徴の組み合わせで実現可能な機能	93
6.2	受動的な姿勢制御機能	94
6.3	歩行時の立脚の力出力	94
A.1	二関節同時駆動機構の R1 側トルク伝達機構部品図	105
A.2	モータの設置位置調整板部品図	105
A.3	リンク 1 部品図	106
A.4	組立図 (リンク 1、リンク 2 部分)	107
A.5	組立図 (ベース、リンク 1 部分)	108
A.6	フレームワークの階層構造	109

表 目 次

1.1	本論文で使われる主な記号の一覧	12
3.1	電磁気力を用いたアクチュエータと人工筋の比較	22
3.2	様々な人工筋肉の比較	26
3.3	モータとセンサ類	32
3.4	制御コントローラの構成	34
3.5	ロボットアームの主な諸元	34
3.6	各ロボットアームモデルの比較	35
3.7	冗長性の検証実験に用いた制御パラメタ	45
3.8	遊星歯車機構を用いたロボットアームの諸元	47
4.1	外乱オブザーバに基づく位置制御実験に用いた制御パラメタ	50
4.2	拮抗対による単関節の駆動シミュレーションに用いたパラメタ	58
4.3	拮抗対による2リンクアームの駆動シミュレーションに用いたパラメタ	62
4.4	フィードフォワード軌道追従の検証に用いたパラメタ	65
5.1	各操作性指標の比較	70
5.2	アームに用いたパラメタ	76
5.3	車椅子漕ぎ動作の際の各種パラメタ	87
5.4	自転車漕ぎ動作の際の各種パラメタ	90

要旨

本論文では、生物の筋骨格構造に基づくモーション制御に関して論ずる。特に生物の四肢に着目し、(1)拮抗駆動、(2)二関節同時駆動、(3)非線形粘弾性の3つの特徴をロボットの機構として取り入れ、これらの構造に基いた制御手法を実現する。ここでは大きく3つの提案を行なう。すなわち、生物の四肢の機構を取り入れたロボットアームの実現、生物の四肢の特徴を利用したフィードフォワード制御手法、生物のように複雑なアクチュエータ配列を持つアームに適用可能な拡張された操作性指標である。

現在、多くの産業用ロボットが先進的な工場において活躍しているが、少子高齢化社会を迎え、医療介護の現場や家庭等、人間の生活空間の中で働くことのできる人間協働型のロボットが待ち望まれている。これまでの産業用ロボットは、人間から隔離された既知環境の中での高速・高精度な動作を求められてきた。一方、人間協働型ロボットでは未知環境での巧みな動作、衝突・接触時の安全な動作がむしろ求められる。巧みな動作、安全な動作は現在のロボットより、人間をはじめとする生物が得意とするところである。人間協働型のロボットを実現するためには、生物の機構と制御から学び、生物の長所を取り入れていく必要がある。本論文ではまず第1章において、研究の背景と目的、生物の機構の働きに関する基礎的な先行研究に関して述べる。

生物とロボットのアームモデルを比較すると、生物のアームにはまたがった二つの関節を同時に駆動する二関節筋と呼ばれるアクチュエータが存在することが分かる。この筋は従来のロボット工学等では無視されていたものであるが、このような特徴的な機構が生物の巧みな制御機能に重要な役割を果たしている。本論文中では、生物の四肢をもとに、6つの筋による3つの拮抗対によって駆動される2リンクのアームモデル(3対6筋のモデル)を元に議論を進める。モデルと基本的な性質に関する議論を第2章で行なう。

第3章では、生物の四肢の機構を取り入れたロボットアームとして、タイミングベルトとプーリーによる二関節同時駆動機構を備えた2リンクアームを実現する。3対6筋のモデルのうち各拮抗対をモータで置き換え、筋の粘弾性に関してはソフトウェア的に実現する。二関節同時駆動機構はベース上に設置されたモータのトルクを、第一関節と同軸上に配置されベアリングによって軸から切り離された伝達機構を用いて、タイミングベルトによって第二関節に直接伝える。これによって第一関節の一関節筋に相当するモータはベースと第一リンクを、第二関節の一関節筋に相当するモータは第一リンクと第二リンクを、二関節筋に相当するモータはベースと第二リンクとを接続する形となる。実験によって、二関節筋に相当するモータを取り入れることでアームの手先における力出力を改善し、いずれの二つのモータでも駆動する冗長性を備えることを確認した。

さらに第4章において、筋粘弾性を生かしたフィードフォワード(FF)制御アルゴリズムを提案する。本アルゴリズムは、筋の活性度に相当する収縮力に着目し、拮抗対にある収縮力を与えた時に生じる振る舞いをベースとする。関節を駆動する拮抗対に一定の収縮力の組を与えると、関節は一意に定まる釣り合い位置に向けて駆動される。この時、拮抗する各筋に与える収縮力の大きさという二つの自由度によって、釣り合い位置と釣り合い

位置に至る際の特性の二つを制御することが可能である。拮抗対による制御器は、収縮力のFF的な入力のみで、位置指令と制御特性を設計することができ、FFながらモデル外乱に対してロバストである。本論文中ではこの拮抗対による制御器をPD制御器を含んだ等価回路によって表し、その特性を議論する。2リンクのアームの手先位置の制御においても、同様に拮抗対による制御器を適用可能である。また、本研究では二関節筋の拮抗対を加えた場合についても検討を行なっている。二関節筋の拮抗対はまたがった両関節の和を制御する働きがあり、作業空間において手先の誤差を抑える働きがあることを明らかにした。さらに、任意の軌道に追従するアルゴリズムを提案し、有効性を確認している。

第5章において、生物型アームに適用可能とするために操作性指標の拡張を行なう。ここで取り上げる操作性指標とは、関節空間における物理量がアームの姿勢等によって、作業空間における物理量へと変換される際の特性を楕円体によって表現するものである。従来、様々な指標が提案されてきたが、これを生物のような複雑なアクチュエータの配列を持つアームへ直接適用することはできなかった。これは、二関節筋のような複数の関節に対してトルクを発生するアクチュエータが存在することにより、各関節が独立にトルクを発生するという前提が崩れてしまうためで、いわゆる冗長マニピュレータとしても扱うことはできない。従来指標を適用すると、二関節筋を無視するか、或いは独立にトルクを発生できるアクチュエータとして扱う他なく、外力(加速度)の出力特性を表す楕円体は傾きも大きさも実際の出力特性とは異なってしまふ。本論文ではインピーダンスマッチング楕円体(IME)と呼ばれる統合的な指標を拡張する。良く知られた動的可操作性楕円体(DME)、操作力楕円体(MFE)はIMEの典型的なケースとして表現することができる。拡張した指標はアクチュエータの発生するトルクから関節トルクへの伝達を表現する行列を導入することで問題を解決し、生物型のアームも正しく扱えるようになった。特にMFEのケースにおいて、上記で製作した3対6筋に基づくロボットアームを用いて実験的な検証を行なっている。様々な姿勢等の条件下で操作性がどのように変化するかを確認し、二関節筋が存在することの優位点を確認した。さらに、実際にケーススタディによって複数の事例に適用する。

最後に第6章において結論と今後の展望を述べる。本研究では簡潔な機構によって生物の筋骨格構造を模擬し、ロボットアームに生物の持つ長所を持たせることができた。二関節筋の模擬である二関節同時駆動機構を従来のロボットアームに加えることで、単関節を駆動するアクチュエータを大型化あるいは冗長化した機構以上の利点を与えることができる。二関節同時駆動機構の追加で、1つのアクチュエータの追加で冗長系とすることができるだけでなく、手先における力・加速度の出力領域をより柔軟に設計できるようになる。動作に最適化して、より小出力のアクチュエータを使うことができるようになるため、冗長化によるコスト増や重量増を抑え信頼性の向上を図ることが可能である。提案する生物の筋骨格構造を基にした制御手法は、拮抗駆動と非線形粘弾性を利用することで、フィードフォワードながらモデル外乱の抑圧機能を持つ。さらに二関節同時駆動の存在によって、手先の誤差を抑えることを示した。生物の機構を取り入れることで、ロボットはより簡単に制御可能となる。さらに、拡張した指標によって生物型ロボットの設計や従来型ロボットとの公正な比較が行なえるようになった。本研究によって生物の筋骨格構造に基づいたロボットのモーション制御に関する原理原則が明らかにされた。

Summary

This dissertation describes a research on motion control based on animal musculoskeletal structure. Especially this research focuses on musculoskeletal structure of animal arm. Three important characteristics of animal arm: (1) antagonistic driving, (2) bi-articular driving and (3) non-linear viscoelasticity, are introduced into robot arm and a control method. This dissertation shows three major theme: a development of robot arm based on musculoskeletal structure of animal arm, control method based on animal muscular principle and extended manipulability measures applicable to arms which have complex alignment of actuators like animal arm.

Recently many industrial robots works in advanced factory. However aging society desire human-cooperative robots which can work in human living space for such as house work and nursing care. Industrial robots require high-speed and precise motion in well-known environment separated from human. However for human-cooperative robots, skillful motion in unknown environment and safety in a collision are more important. Skillful and safe motion are advantage of animals such as human over robots. To realize human-cooperative robots, it is necessary to introduce merits of animal structure and control into robots. Chapter 1 describes background and purpose of research and fundamental researches on role of animal musculoskeletal structure.

By comparison of arm model between robot and animal, animal arm has a unique actuator, bi-articular muscle, which drives both two joints simultaneously. Bi-articular muscle is mostly ignored in conventional robotics. However this unique structure make a important role of animal skilful control mechanism. In this dissertation, discussions are based on two link arm model derived from animal musculoskeletal structure. This model consists from three antagonistic pair of six muscles. Chapter 2 discusses about models and basic characteristics.

Chapter 3 describes development of robot arm based on animal musculoskeletal structure. As bi-articular muscles, developed robot arm has bi-articular driving mechanism which consists from a timing belt and pulleys. Three antagonistic muscular pairs are replaced by three DC motors. Muscular non-linear viscoelasticity is mimicked by software control. The motor corresponding to mono-articular muscular pair of the joint 1 connects the base of robot arm and the link 1. The motor corresponding to mono-articular muscular pair of the joint 2 connects the link 1 and the link 2. The bi-articular driving mechanism connects the base and the link 2. The motor of this mechanism is placed on the base. A torque transfer component of this mechanism is coaxially mounted on the joint 1 but floated from the joint 1 by bearings. Motor torque is transferred to the joint 2 through the joint 1 by the timing belt. Experimental results shows improvement of force output characteristic at end point of the arm. Also the arm obtains redundancy. Any two of the

three motors can drive arm arbitrarily.

Chapter 4 proposes feed-forward (FF) control algorithm based on animal muscular principle. The algorithm utilize a behavior of joint driven by antagonistic muscular pair. When constant contractile forces are given to antagonistic muscular pair, the joint is driven to equilibrium position. Combination of contractile forces of muscular pair controls equilibrium position and behavior of response. Proposed controller based on antagonistic muscular pair is robust over model disturbance in spite of FF control. Given contractile forces can design position command and response. In this dissertation, proposed controller is represented as equivalent block diagram contains PD controller for discussion. The algorithm can be applied for two joint link arm. Moreover the case adding bi-articular muscles is considered. Antagonistic pair of bi-articular muscles has a role to control summation of angles of joints. Results clarify that bi-articular muscles suppress error at end point in working space. Furthermore path tracking algorithm is also proposed and verified its effectiveness.

In chapter 5, manipulability measures are extended to be applicable to arms which have complex alignment of actuators like animal arm. Here, manipulability measure is ellipsoid which represents a characteristic of transfer of physical quantity from joint space to working space by arm posture and others. In the past, several measures have been proposed but it can not apply to animal arm. Existing of multi-articular muscles undermine an assumption that each joint is driven independently. Animal arm can not treated as a serial redundant manipulator. For using conventional measures, multi-articular muscles should be ignored or divided as actuators which generate joint torques independently. Both volume and gradient of ellipsoid representing characteristic of external force (or distal acceleration) become incorrect. In this research, Impedance Matching Ellipsoid (IME) is extended. IME is an unified manipulability measure. Well-known measures, Dynamic Manipulability Ellipsoid(DME) and Manipulating Force Ellipsoid(MFE), are typical case of IME. To introduce matrix which represents transfer from torque of actuators to joint torque, the extended measures solve problems. Especially in the case of MFE, extended measure are verified by experiments. Advantage of existing bi-articular muscle is indicated by analysis changing conditions. Furthermore, extended measures is applied in case studies.

Finally, chapter 6 describes conclusion and future vision. Proposed robot arm mimics animal musculoskeletal structure by simple mechanism and obtains animal advantages. Adding bi-articular driving mechanism, robot arm obtains advantages of output and reliability than enlargement or duplication of motors which drives one joint. Proposed FF control algorithm based on muscular principle is useful and bi-articular muscles help it. To introduce animal musculoskeletal structure, robot can be controlled more easily. Extended measures enables efficient design of arms based on animal structure. This dissertation clarified principles of motion control based on animal musculoskeletal structure.

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

少子高齢化は現代の日本における最も重要な社会問題の一つである [1]。高齢者の増加と若年層、労働人口の減少 (図 1.1 にともない介護・看護のニーズ、また減少する労働力を補うニーズが存在する。ロボット技術はこれらの問題解決として大きな期待が寄せられている。現在のロボット産業をみると、市場規模はおよそ 6000 億円で近年頭打ちとなっており (図 1.2)、出荷額のほとんどを産業用ロボットが占める [2]。ここでも新しいニーズに応えた市場創出は強く望まれている。

産業用ロボットは、人間から隔離された既知の環境で働き、高速・高精度の動作を可能とする。一方、前述の社会の要請に応えるのは人間協働型の新しいロボットである。人間協働型ロボットは人間の生活空間の中で活動し、接触をとまなうような人間と極めて近い距離で働く。人間協働型ロボットの類型としては、パワーアシストスーツやロボット義足といった装着型のもの、あるいは作業支援ロボットのような共同作業型のものが挙げられる。必須ではないが、それぞれ環境に適応するために、ロボットの一部あるいは全部に生物型の形状を有する場合も多い。これらの新しいロボットは人間をはるかに凌駕する高速・高精度な動作は必ずしも必要としない。むしろ未知環境での安定した動作、歩行や走行といった特定の動作における素早さ、衝突時の安全性といった産業用ロボットとは異なる別の能力を要求される。新しいロボットが要求された能力は現在のロボット技術では十分に実現できていない。これらの能力はロボットよりもむしろ人間をはじめとする生物が得意とする点である。現在のロボットは、ヒューマノイドのように生物形の形状をしていても、その機構と制御手法は生物とは全く異なる。

まずは両者の制御手法に着目する。高性能なロボットの制御は高速なフィードバックと、精緻なモデル化によるフィードフォワード補償によって成立している。一方、生物の制御を考えると、まず制御指令の神経系による伝達速度はロボットのそれとは比べものにならないくらいに遅く、フィードバックループには大きな遅れ時間をとまなう。また、モデル化に関してはニューラルネットワークによる学習で行なわれていると考えられる。次に制御対象としてそれぞれのアクチュエータと体を比較すると、ロボットに使われるアクチュエータ、特に電気モータが線形性が高く応答性に優れるのに対し、筋は非線形性が強く応答も遅い。またアクチュエータの配列も、関節自由度に合わせて従来のロボットが単純に配置するのに対し、生物では冗長、複雑に配置される。ロボットがボディ、関節において高い剛性を保てるのに対し、生物は低剛性で柔軟な構造である。このように従来の制御工学の観点から考えると、生物は性質の悪い制御対象と制御器しか持っていない。それにも関わらず、生物は非常に巧みに動作し、いくつかの作業分野においてロボットを凌駕している。様々な外乱を抑え、ロバストに制御を行なうためにはフィードバック機能が必須である。しかしながら神経系を介した制御ループには大きな遅れ時間を伴うため、素早い動きや末端の動作についてはフィードフォワード的に行なわれる。とすれば、生物の制御機能にはその筋骨格構造そのものが大きな影響を与えていると考えられる。

3 総人口の推移

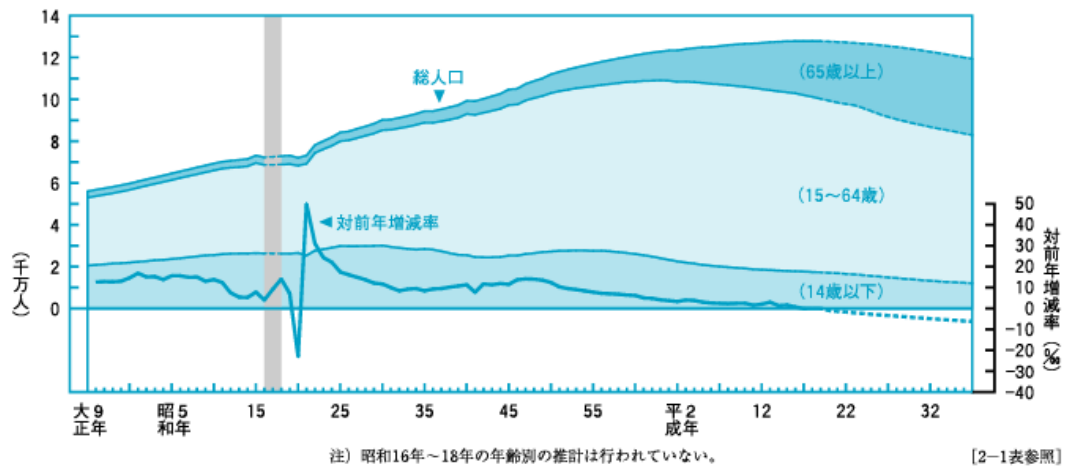


図 1.1: 日本の人口と年代別割合の推移 [1]

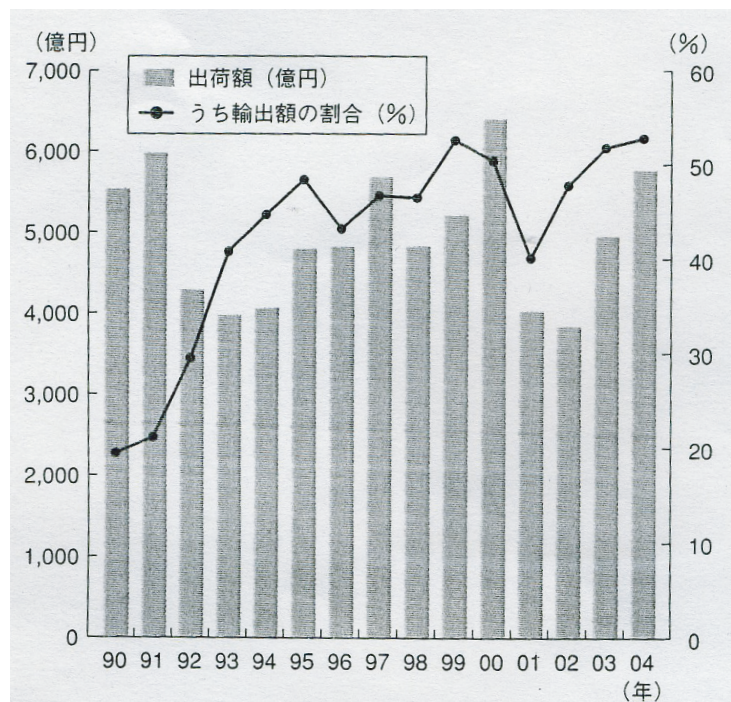


図 1.2: ロボット産業の出荷額と輸出割合の推移 [2]

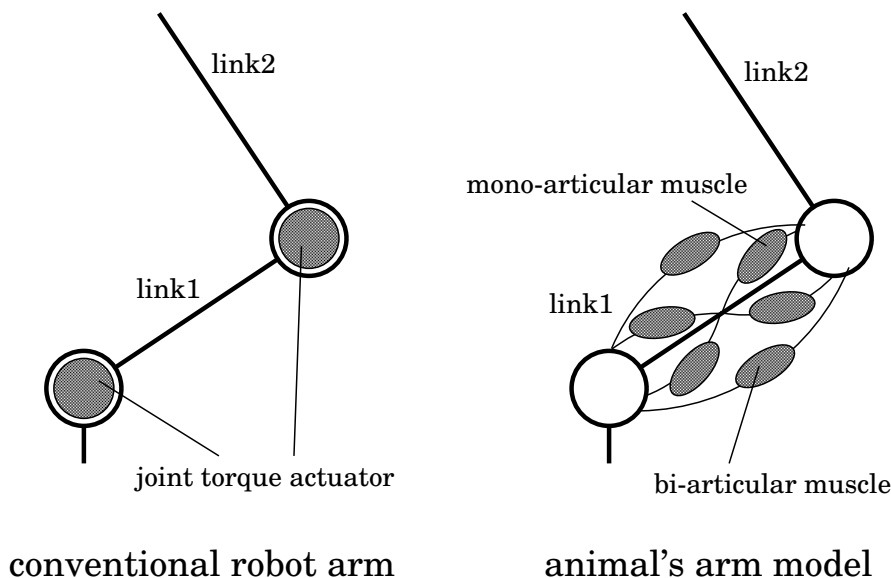


図 1.3: 従来のロボットアームと生物の四肢の構造の比較

本研究では特に生物の四肢の筋骨格構造に着目する。図 1.3 に従来のロボットアームと生物の四肢のモデルを示す。従来のロボットが各関節にそれぞれを独立に駆動するアクチュエータを備えるのに対し、生物は各関節を独立に駆動するアクチュエータ（一関節筋）および二つの関節にまたがってこれらを同時に駆動するアクチュエータ（二関節筋）が存在する。また、筋は収縮時にのみ力を発揮するアクチュエータのため、各関節を両方向に駆動するために拮抗対を作る。また、筋は筋の活性レベルによって可変の非線形な粘弾特性を持つ。本研究においては生物の四肢に特有な (1) 二関節同時駆動、(2) 拮抗駆動、(3) 非線形粘弾性の 3 つの特徴を機構としてロボットに取り入れ、これらの構造に基いた制御手法を実現する。

1.2 筋骨格構造とその応用に関する既存研究

ここでは、生物の四肢の筋骨格構造の基礎的な研究とその応用に関する既存研究について、特に二関節筋に関連するものを中心に述べる。二関節筋の存在自体は解剖学的に非常に古くから知られているが、実際にこの筋がどのようにヒトに役立っているのかということは良く分かっていなかった [3]。二関節筋が存在することによって、一方の関節に協働的に働く時、もう一方には拮抗的に働くという現象が起こる。また各関節を独立に取り扱うということもできなくなる。一見不要にも思われ、これまでのロボット工学においてもほとんど無視されてきたが、この二関節筋が特に生物の制御機能にとって大きな役割を果たしているとして注目されてきている。

IngenShenau らは、二関節筋の役割として、体幹部で発生したエネルギーを四肢に伝える伝達機構としての特性を指摘している [4]。Hogan は手先インピーダンスの制御に関して、二関節筋をはじめとする冗長な筋の拮抗構造が、大きな役割を果たしていることを示した [5][6]。Mussa Ivaldi らは、姿勢による手先のスティフネス楕円体の変化を実験的に示している [7]。生物のアームは様々な筋が組み合わさってできているが、Kumamoto らによって、二次元運動に限定した場合に複雑な筋群を機能の面から一関節筋と二関節筋の 3 対 6 筋の実効筋モデルによって表そうとする取り組みがなされている。手先の力出力の

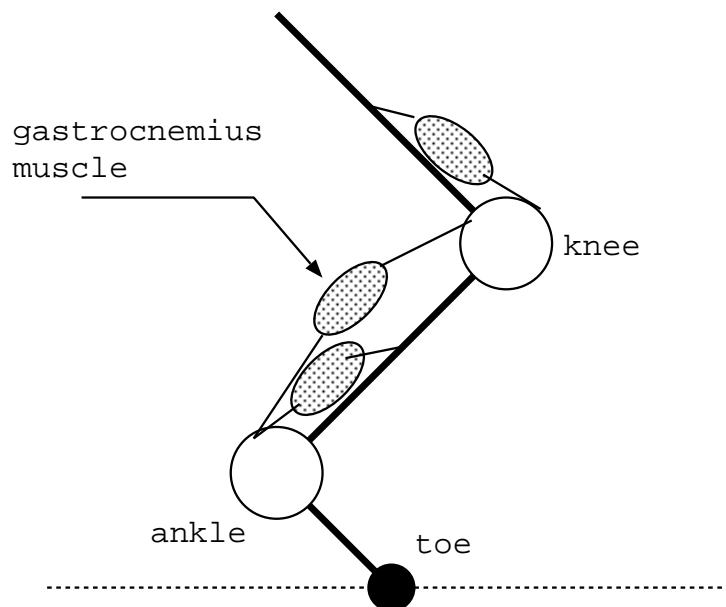


図 1.4: 腓腹筋 (gastrocnemius muscle) を含む跳躍モデル

方向制御に関し、二関節筋を含めた 3 対 6 筋のパターンが EMG(筋電図) 所見から示された [8]。また、手先剛性に関する研究がなされ、二関節筋が生物の制御機能に大きな役割を果たしていると主張している [9][10]。さらに、跳躍時に腓腹筋と呼ばれる下腿部の二関節筋が各関節で生じたトルクを直動運動に効率良く変換する役割を果たしているということが Oshima, Toriumi らによって確かめられた。図 1.4 に腓腹筋を含む跳躍モデルを示す [11][12]。Matjačić らは二関節筋の拘縮のおよぼす歩行障害への影響に関して、ハムストリングや腓腹筋に外骨格状の拘束器具を取りつけることで、健常者に対して人工的に歩行障害状況を作り出した [13][14]。

二関節筋を取り入れたロボットの例としては前述の Kumamoto らによって制作された、アクチュエータとしてラバチュエータを用いたロボットアームがまず挙げられる [8]。これによって等尺条件化におけるアームの手先出力や粘弾性の特性が確認された。また Oshima, Toriumi らは腓腹筋等を実装した跳躍ロボットを提案している [11]。

一方沖電気工業の小田らによって開発された HIPRO ロボットは、筋肉の諸特性を機械的に実現し二次元平面上における生物のアームを模擬するものである。また二関節筋による粘弾性の調整機構を利用して上手く着地することのできる跳躍ロボットも発表している (図 1.5)[15][16]。また、Niiyama らによってカエルの筋配列の一部を空気圧アクチュエータで置き換えたカエル型ロボット (図 1.6) が提案された [17]。高山らは、下肢の筋配列をそのまま空気圧アクチュエータで置き換えた片脚の跳躍ロボット (図 1.7) を提案している [18]。

別の領域における研究とし、リハビリテーションの分野において、単関節筋を選択的に鍛えることによって入院患者の筋力回復を目指す研究が福井らによってなされた。[19] また、大島らによって簡便な方法によって下肢、上肢の筋力測定を実効筋の概念から測定しようとする取り組みがなされている。[20] その応用として実際にスポーツ科学の分野に取り入れて、陸上競技や自転車競技に生かす取り組みも行なわれている。(図 1.8) 田島らにより自動車の操舵に関して、実効筋の概念から力の発揮しやすさ等を検討し次世代のステアリングシステムに関する研究がなされている。[22]

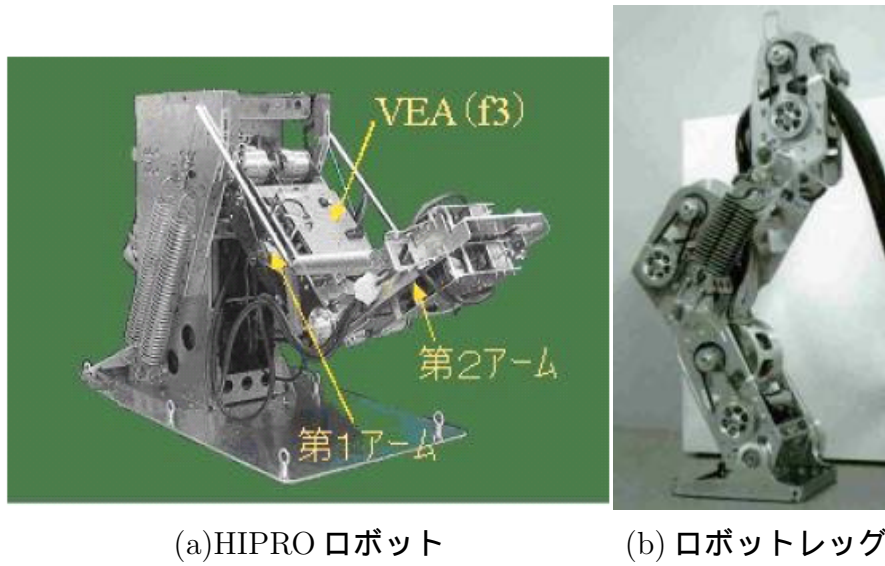


図 1.5: 沖電気工業による二つの二関節筋の原理を用いたロボット [15][16]

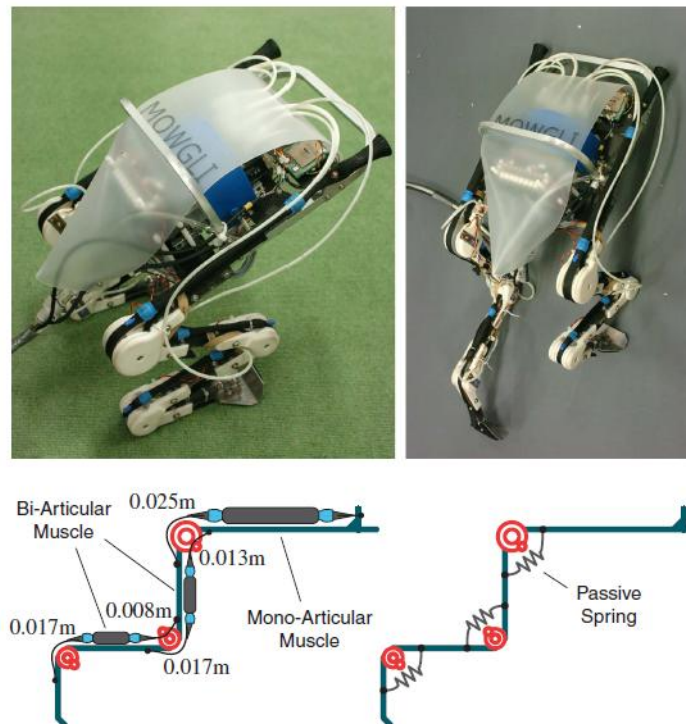


図 1.6: カエルの筋配列を元にした跳躍ロボット [17]

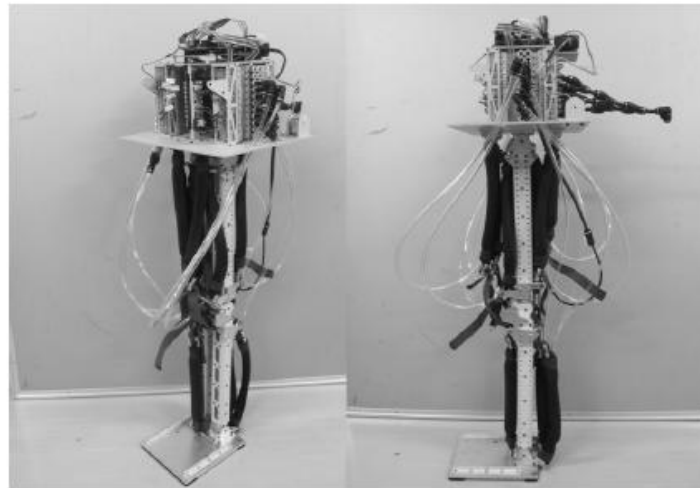


図 1.7: 各筋を空気圧アクチュエータで置き換えた跳躍ロボット [18]

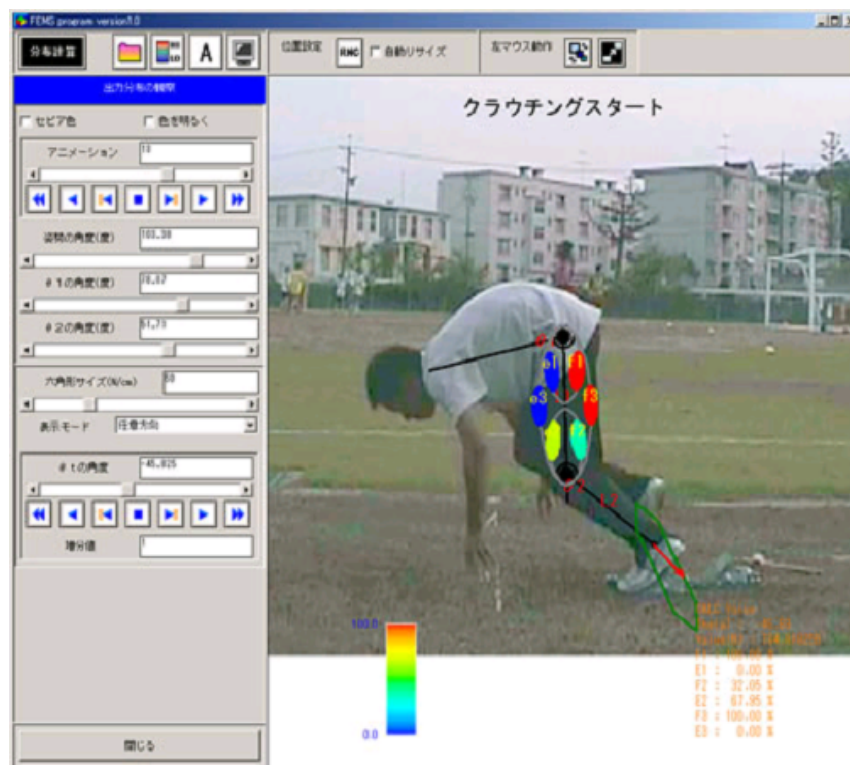


図 1.8: 筋の出力分布を計測する FEMS プログラム

特に精密工学会の生体機構制御・応用技術専門委員会においては、二関節筋を中心とした生物の仕組みの応用に関する研究が活発に行なわれている。至近の研究として、Ohらによって二関節筋の拮抗対のトルクを考慮したヤコビ行列を用いることで、手先出力の方向から容易に各筋における出力を求める手法の提案、二自由度制御系との生物型アームの制御の関連性に関する研究が行なわれた [23][24]。また福正らによって、3対6筋のアームの動特性に関する詳細な解析が行なわれている [25]。辻らはナメクジウオの筋節を7対の3関節筋の拮抗対によってモデル化したロボットを製作し、これがS字状の遊泳運動を行なうことを示した [26]。

1.3 本論文の構成

本論文では、生物の筋骨格構造に基づくモーション制御に関して論ずる。ここでは大きく3つの提案を行なう。すなわち、生物の四肢の機構を取り入れたロボットアームの実現、生物の四肢の特徴を利用したフィードフォワード制御手法、生物のように複雑なアクチュエータ配列を持つアームに適用可能な拡張された操作性指標である。

まず第1章において、研究の背景と目的、生物の機構の働きに関する基礎的な先行研究に関して述べる。本論文中では、生物の四肢をもとに、6つの筋による3つの拮抗対によって駆動される2リンクのアームモデル(3対6筋のモデル)を元に議論を進める。モデルと基本的な性質に関する議論を第2章で行なう。第3章では、生物の四肢の機構を取り入れたロボットアームとして、タイミングベルトとプーリーによる二関節同時駆動機構を備えた2リンクアームを実現する。実験によって理論通りの機能が達成できているかを確認する。さらに第4章において、筋粘弾性を生かしたフィードフォワード (FF) 制御アルゴリズムを提案する。第5章において、生物型アームに適用可能とするために操作性指標の拡張を行なう。最後に、第6章において結論と今後の展望を述べる。

1.4 本論文で使われる記号の一覧

ここでは表 1.1 に、本論文中で横断的に使われる記号を説明する。但し、特に本文中で断りのある場合を除く。

表 1.1: 本論文で使われる主な記号の一覧

F^{ep}, F_{axis}^{ep}	作業空間における、手先で発生する力ベクトル 作業空間における、手先で発生する力の添字 $axis$ 軸成分
X^{ep}, X_{axis}^{ep}	作業空間における、手先の位置ベクトル 作業空間における、手先の位置の添字 $axis$ 軸成分
F^{msl}, F_{midx}^{msl}	筋の張力、添字 $midx$ で表される筋の張力
u, u_{midx}	筋の収縮力、添字 $midx$ で表される筋の収縮力
x^{msl}, x_{midx}^{msl}	筋の収縮量、添字 $midx$ で表される筋の収縮量
k	筋の弾性力に関する定数
b	筋の粘性力に関する定数
T^{jnt}, T_{jidx}^{jnt}	関節のトルクベクトル、添字 $jidx$ で表される関節のトルク
T_{pidx}^{msl}	添字 $pidx$ で表される拮抗対のトルク
r, r_{jidx}	共通の関節の半径、添字 $jidx$ で表される関節の半径
θ, θ_{jidx}	関節の角度ベクトル、添字 $jidx$ で表される関節の角度
l, l_{jidx}	共通のリンクの長さ、 添字 $jidx$ で表される関節から一つ手先方向にある関節をつなぐリンクの長さ
S, S_{pidx}	拮抗対の収縮力の和、添字 $pidx$ で表される拮抗対の収縮力の和
D, D_{pidx}	拮抗対の収縮力の差、添字 $pidx$ で表される拮抗対の収縮力の差
$L^{imit}, L_{aidx}^{imit}$	アームの各拮抗対の最大トルクを定義する対角行列 添字 $aidx$ で表されるアームの各拮抗対の最大トルクを定義する対角行列

第2章 生物型アームのモデル化

2.1 筋配列と四肢のモデル

図 2.1 にいくつかの生物の下肢の筋配列を示す。ここから明らかなように、生物は各関節を複雑に配置された筋によって駆動している。複数の関節にまたがって駆動するもの、あるいは大きさが非対称であったり、欠けていたり、生物ごとの筋配列を作っている [27]。ここで、一つの関節を駆動する筋を一関節筋あるいは単関節筋と呼ぶ。また、複数の関節にまたがって駆動するものを多関節筋と呼ぶが、このうち 2 つの関節にまたがって駆動するものを二関節筋と呼ぶ。

四肢のアーム構造のうち、胴を基準として二つのリンクを取り出した構造を考える。ヒトの上肢であれば、上腕および前腕からなる肩から手首までのリンク構造である。図 2.2 に、平面運動に限定した際の生物の 2 リンクアームの構造を示す。筋配列に関しては、機能の面から 3 対 6 筋に単純化する [3]。ここで図 2.2 の e_1, f_1 は関節 R1 に働く一関節筋、 e_2, f_2 は関節 R2 に働く一関節筋である。また、 e_3, f_3 は関節 R1, R2 にまたがる二関節筋である。ここで e, f はそれぞれ伸筋 (extensor muscle)、屈筋 (flexor muscle) の頭文字をとる。また、 e_1 と f_1 、 e_2 と f_2 、 e_3 と f_3 はそれぞれ拮抗対と呼ばれる組を作り、各関節を両方向に駆動する。

次に各関節におけるトルクが、各筋の出力によってどのように発生するかを示す。二つの関節 R1, R2 の半径をそれぞれ r_1, r_2 とし、各々に発生するトルクを T_1^{jnt}, T_2^{jnt} とする。各筋の出力を F_{midx}^{msl} ($midx = e_1, e_2, e_3, f_1, f_2, f_3$) とすると、式 (2.1) と表わされる。

$$\begin{aligned} T_1^{jnt} &= (F_{f_1}^{msl} - F_{e_1}^{msl})r_1 + (F_{f_3}^{msl} - F_{e_3}^{msl})r_1 \\ T_2^{jnt} &= (F_{f_2}^{msl} - F_{e_2}^{msl})r_2 + (F_{f_3}^{msl} - F_{e_3}^{msl})r_2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

また、各関節の半径を共通 ($r = r_1 = r_2$) として、各拮抗対の発するトルク $T_1^{msl}, T_2^{msl}, T_3^{msl}$ を式 (2.2) に定義する。

$$\begin{aligned} T_1^{msl} &= (F_{f_1}^{msl} - F_{e_1}^{msl})r \\ T_2^{msl} &= (F_{f_2}^{msl} - F_{e_2}^{msl})r \\ T_3^{msl} &= (F_{f_3}^{msl} - F_{e_3}^{msl})r \end{aligned} \quad (2.2)$$

よって、式 (2.1) を式 (2.2) を用いて式 (2.3) のように表すことができる。

$$\begin{aligned} T_1^{jnt} &= T_1^{msl} + T_3^{msl} \\ T_2^{jnt} &= T_2^{msl} + T_3^{msl} \end{aligned} \quad (2.3)$$

1 章の図 1.3 に示したように、2 リンクのアームにおける、生物の四肢の筋骨格構造と従来のロボットアームの構造を比較することで、生物の特徴として以下の 3 点を挙げる事ができる。

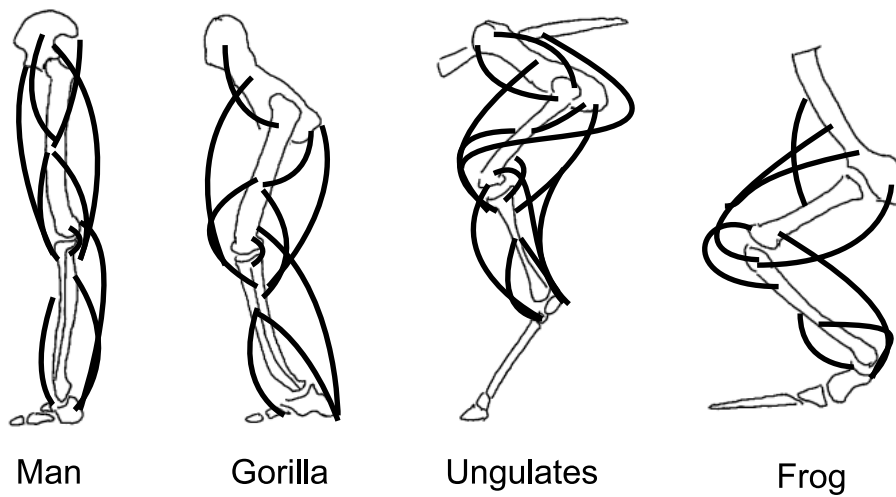


図 2.1: 生物の下肢の筋配列

図は各生物の筋配列を [27] を参考に模式的に表したもので、それぞれの生物の正確な筋の付き方、骨の形状等を示すものではない。

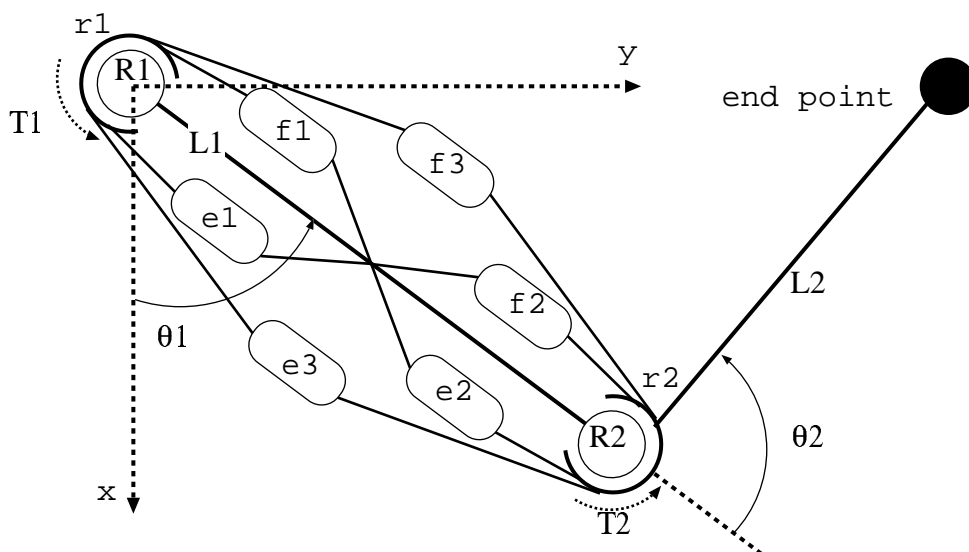


図 2.2: 3 対 6 筋で表された生物のアーム機構

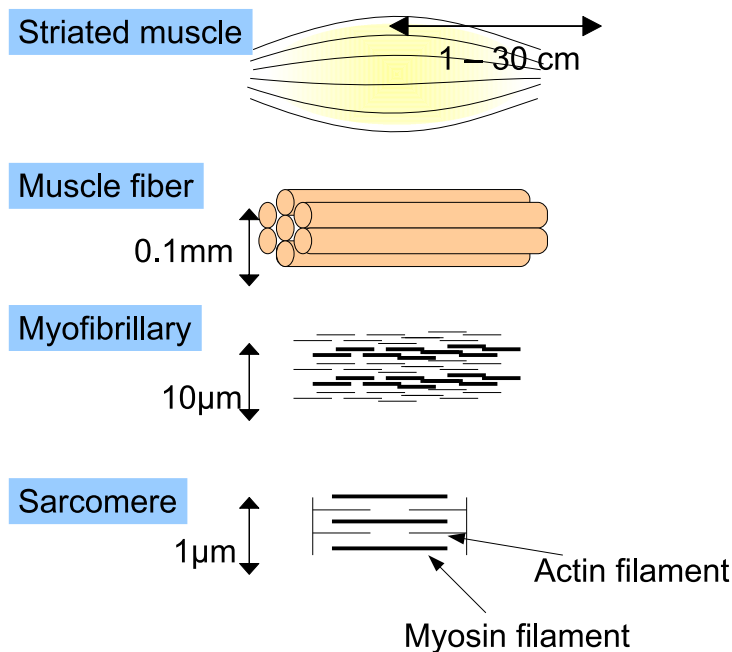


図 2.3: 筋の階層構造

拮抗駆動 筋は片側にのみ駆動するアクチュエータのため、二つ以上の筋が一つの関節を拮抗するように駆動し、その差動によって駆動方向が決まる。

二関節同時駆動 二つの関節にまたがって同時に同じ大きさの力を加える駆動方法である。

非線形粘弾性 筋はその活性レベルによって粘性、弾性の係数が変わる非線形な粘弾性を持つ。2.2節において示す。

従来のロボット工学においては、特に二関節同時駆動に関してほとんど取り上げてこなかった。本論文では二関節同時駆動の特徴を少なくとも持つアームを生物型アームと呼ぶことにする。これに対比して、各関節を独立に駆動するアクチュエータのみ備えるアームを従来型アームと呼ぶ。

2.2 筋の粘弾性モデル

生物の筋の微視的に見ると、筋繊維はサルコメアと呼ばれる筋収縮基本単位が直列につながった筋原繊維の束となっている。これを Fig. 2.3 に示す。サルコメアはアクチンフィラメントとミオシンフィラメントから構成され、筋収縮は両フィラメントが滑って互いに吸いこまれることによって生じる。生物の筋は化学エネルギーを機械的なエネルギーに効率良く変換するアクチュエータである [28]。

巨視的に見た際には、筋長と張力、筋力と速度の関係をそれぞれ Fig. 2.4 および Fig. 2.5 に表されることが実験的に分かっている。この際、筋力 F が筋活動レベル α に比例するとすれば、筋の出力 F^{msl} は活動レベル α と、筋の長さ L^{msl} および筋の収縮速度 V^{msl} からなる非線形な関数の積として式 (2.4) のように表わすことができる。

$$F^{msl} = \alpha g(L^{msl}, V^{msl}) \quad (2.4)$$

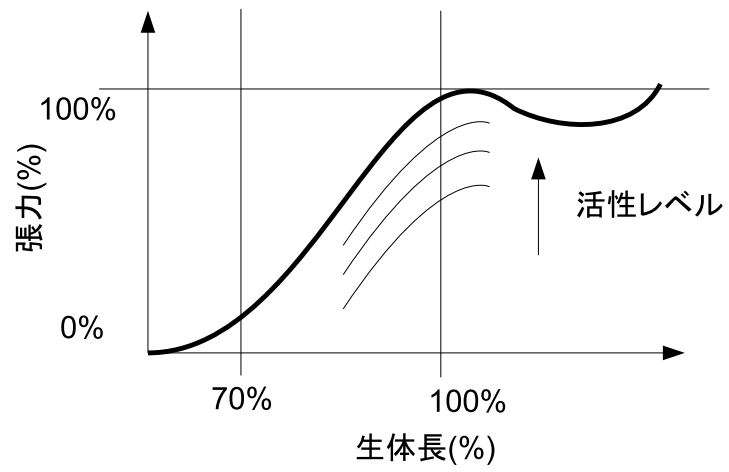


図 2.4: 等尺的な筋長-張力の曲線

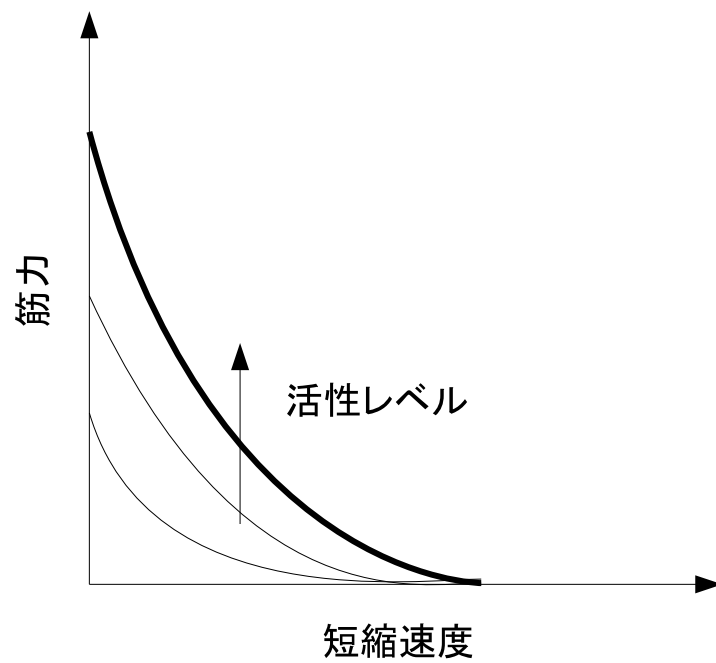


図 2.5: 筋の収縮速度と筋力の曲線

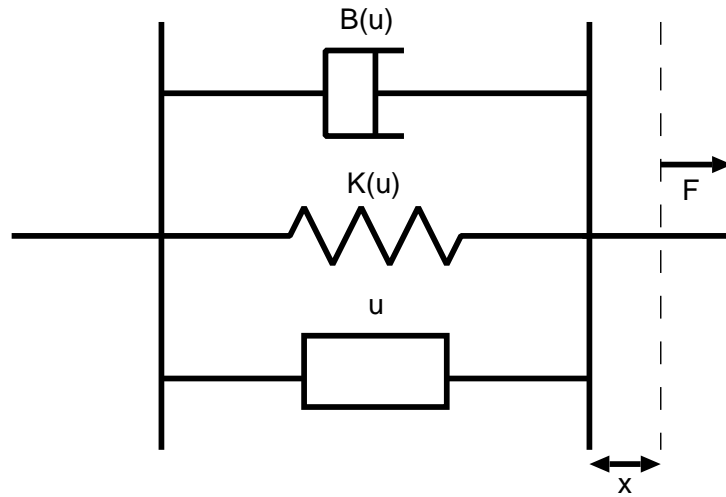


図 2.6: 筋肉の模式図

これを、自然長 $L^{msl} = l_0^{msl}$ および収縮速度 $V^{msl} = 0$ の近傍でテイラー展開することによって、筋の粘弾性モデルを得る。

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

ただし、 k_0, b_0 はそれぞれ正の定数である。ここで、収縮力を $u = \alpha f_0$ とすれば、式 (2.5) に対して

$$k = \frac{k_0}{f_0}, b = \frac{b_0}{f_0}$$

のように置くことで、筋の張力は収縮力を用いて式 (2.6) と表わすことができる [29]。

$$F^{msl} = u - K(u)x^{msl} - B(u)\dot{x}^{msl} = u - kux^{msl} - bu\dot{x}^{msl} \quad (2.6)$$

バネ成分、ダンパ成分の係数は筋肉の収縮力 u に比例する関数として表すことができ、比例定数をそれぞれ k, b とする。 x^{msl} は自然長からの変位である。

よって生物の筋肉は図 2.6 のように、バネ成分とダンパ成分を持ったアクチュエータとして模式的に表すことができる。

2.3 生物型アームの静・動特性

2.3.1 生物型アームの手先における力の出力特性

ここでは生物型アームの静特性に関して、関節トルクと手先における力出力の関係から述べる。現実のアームにおいては、式 (2.7) のように拮抗筋の出力できるトルクの上限が存在する。

$$\begin{aligned} -T_{1max}^{msl} &\leq T_1^{msl} \leq T_{1max}^{msl} \\ -T_{2max}^{msl} &\leq T_2^{msl} \leq T_{2max}^{msl} \\ -T_{3max}^{msl} &\leq T_3^{msl} \leq T_{3max}^{msl} \end{aligned} \quad (2.7)$$

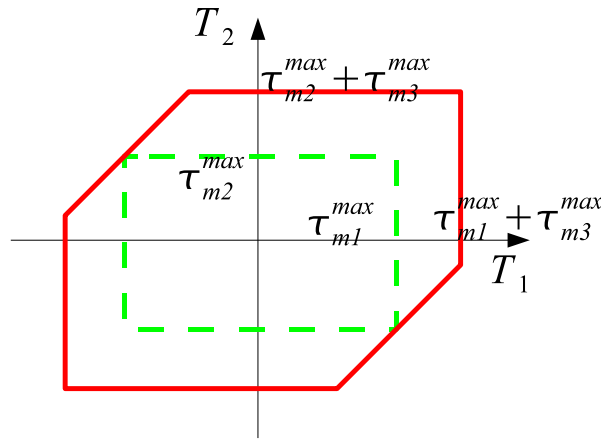


図 2.7: 二関節筋の有無による各関節トルクの取りうる領域

この時、従来型のアームの出力のトルクを式 (2.8) のように示す。これは一関節筋の拮抗対のみ存在する場合と見做すことができる。

$$\begin{aligned} T_1^{jnt} &= T_1^{msl} \\ T_2^{jnt} &= T_2^{msl} \end{aligned} \quad (2.8)$$

この時、従来型アームと式 (2.3) で示される生物型アームの出力可能なトルクの領域は図 2.7 のように示すことができる。点線で表される領域が従来型アームのトルク出力、これに二関節筋の拮抗対のトルク T_3^{msl} を加えた、生物型アームのトルク出力を実線で示す。

次に、アームの手先で出力可能な力を比較してみると、いわゆるヤコビ行列 J_{aco} を用いて手先で出力する力 $F^{ep} = [F_x^{ep}, F_y^{ep}]^T$ は、式 (2.9) のように表すことができる。

$$F^{ep} = (J_{aco}^T)^{-1} T^{jnt} \quad (2.9)$$

生物型アームでは F_a^{ep} として式 (2.10) と従来型アームでは F_c^{ep} として式 (2.11) と表すことができる。

$$F_a^{ep} = (J_{aco}^T)^{-1} \begin{pmatrix} T_1^{msl} + T_3^{msl} \\ T_2^{msl} + T_3^{msl} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$F_c^{ep} = (J_{aco}^T)^{-1} \begin{pmatrix} T_1^{msl} \\ T_2^{msl} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

ただし

$$J_{aco} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}$$

ここで、 l_1, l_2 はそれぞれリンク L1、リンク L2 の長さ、 θ_1, θ_2 は関節 R1、R2 の角度である。また、特異姿勢である $\theta_2 = 0, \pi$ となる姿勢を除く。ここで、拮抗対の発するトルクに制限がある場合の手先における出力可能な力の領域は図 2.8 となる。ここで点線は従来型アーム、実線は二関節筋の拮抗対を加えた生物型アームのものである。トルクの出力領域、手先における力の出力領域ともに従来型アームでは四角形の、生物型アームでは六角形の出力が得られる。

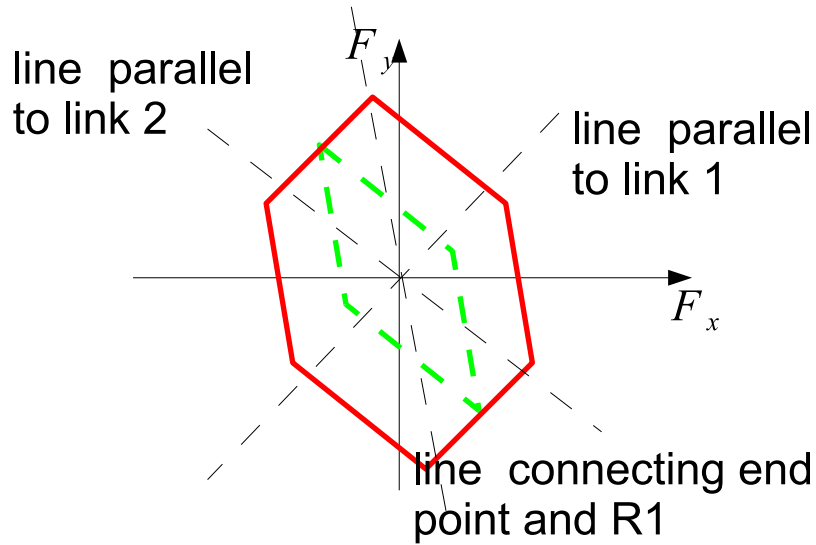


図 2.8: 二関節筋の有無による手先における力の取りうる領域

また、図 2.9 には、各拮抗対による手先における力がどちらの方向に出力されるかを表す。R1 を駆動する拮抗対 ($f_{1,e1}$) はリンク L2 に平行な方向、R2 を駆動する拮抗対 ($f_{2,e2}$) は R1 と手先を結ぶ方向、二関節筋の拮抗対 ($f_{3,e3}$) はリンク L1 に平行な方向に力をそれぞれ発揮する。

2.3.2 生物型アームの動特性

動特性の考察、シミュレーションに用いるモデルを図 2.10 に示す。各リンクを細い棒として考え、リンク 1 の長さを l_1 、リンク 2 の長さを l_2 とし、各関節座標系の原点からリンクの重心までの距離をそれぞれ l_{g1}, l_{g2} とする。それぞれの重量を m_1, m_2 とし、関節座標系の原点を中心とする慣性モーメントの大きさを I_1, I_2 とする。

各関節の半径は r_1, r_2 とし、それぞれ重量はないものとする。

また、各関節の角度は θ_1, θ_2 とし、各関節に働くトルクをそれぞれ T_1, T_2 とする。ここで水平面での二次元平面運動を考え、重力の影響を考慮しないならば、ラグランジュ法を用いて運動方程式は式 (2.12) のように与えられる。[30]

$$\begin{pmatrix} T_1^{jnt} \\ T_2^{jnt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1^{msl} + T_3^{msl} \\ T_2^{msl} + T_3^{msl} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

ただし、

$$m_{11} = I_1 + I_2 + 2m_2l_1l_{g2} \cos \theta_2 + m_2l_1^2$$

$$m_{12} = m_{21} = I_2 + m_2l_1l_{g2} \cos \theta_2$$

$$m_{22} = I_2$$

$$h_{11} = -m_2l_1l_{g2} \sin \theta_2 (2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2)$$

$$h_{21} = m_2l_1l_{g2} \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2$$

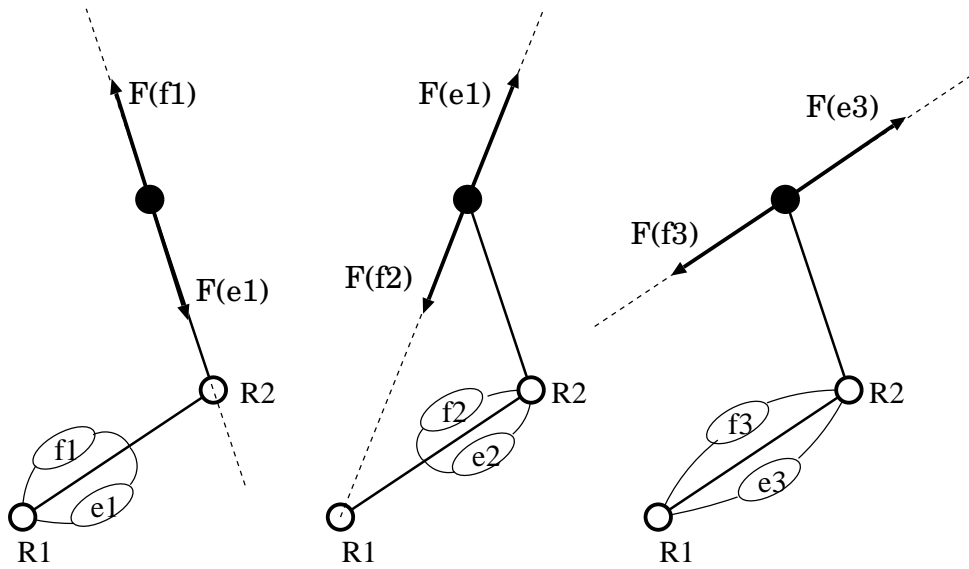


図 2.9: 各拮抗対による手先における力の出力方向
 各拮抗対による手先における力がどちらの方向に出力されるかを示す。左はR1 にかかる一関節筋拮抗対による出力、中はR2 にかかる一関節筋拮抗対、右は二関節筋拮抗対による出力である。

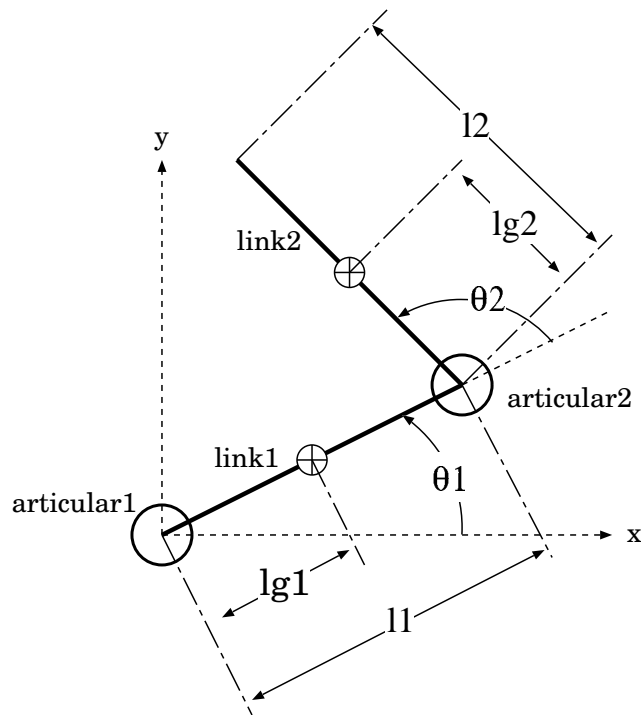


図 2.10: 本論文中のシミュレーションに用いるモデル

第3章 生物の仕組みを取り入れたロボットアーム

3.1 生物の仕組みを取り入れたロボットアームの実現

3.1.1 生物の仕組みを取り入れたロボットアーム

本研究の重要な核の一つとして、生物の仕組みを取り入れたロボットアームを実現する。生物の重要な特徴としては、2章までに述べたように(1)拮抗駆動、(2)二関節同時駆動、(3)非線形粘弾性の3つを挙げることができ、これをどのように機械的に実現するかという点が課題となる。このうち、2章で定義した生物型アームとするためには少なくとも二関節同時駆動を機械的に実現する機構を備える必要がある。

従来のロボット研究のうち空気圧アクチュエータを用いる物、ワイヤ駆動を用いる物は筋肉と同様に単方向にのみ力を発揮できるため、拮抗駆動を取る。また、摩擦の低減等の効果を狙って、差動機構を用いて駆動する例も存在する[31]。非線形粘弾性に関しては、空気圧アクチュエータを用いる場合は、アクチュエータが本来備える非線形な粘弾性が存在する。しかしながら、これは通常外乱として抑圧されるか、この影響を無視できる利用形態において利用される。一方、二関節同時駆動に関してはこれを実現した例は少ない。

各特徴の実現にあたってはいくつかのトレードオフが存在する。拮抗駆動に関しては、アクチュエータ及び力の伝達機構が単方向にのみ力を発揮できるものか否かという点において、任意の運動を可能とするためには拮抗駆動を取らざるを得ない。両方向に駆動が可能な場合は、重量の観点と制御上の困難の観点からこれを考慮する必要がある。ただし、ワイヤ駆動の場合は重量を胴体に収納することができ、一般に単方向に力を発生するタイプのアクチュエータはそれ自身に関しては重量が軽いものが多い。また、二関節同時駆動を実現する場合には、一般に単関節を駆動する機構との拮抗が生じる。

次に二関節同時駆動に関しては、特に機構が複雑になりがちである。また重量増加の問題も生じうる。しかしながら、冗長性の獲得や出力領域の性能向上を見込むことができる。実現方法ごとに、さらに長所短所が存在するが、これに関しては特に3.1.3節にて述べる。

最後に非線形粘弾性に関しては、アクチュエータ自体が持つ場合は特に制御における困難さが増す。しかしながら、機械的な粘弾性を持つことは衝突時の安全に直接的に寄与できる。また、拮抗構造と組み合わせることで機械的に粘弾性を調整することが可能である。

3.1.2 生物型ロボットアームに用いるアクチュエータ

人工筋肉の特徴

現在一般的なロボットアームに関しては、電磁気力を用いた回転型のモータが用いられることが多い。また一部の人間親和型ロボットでは人工筋としてマッキベン式の空気圧アクチュエータもよく用いられる。人工筋の定義としては必ずしも一定ではないが、一般的

表 3.1: 電磁気力を用いたアクチュエータと人工筋肉の比較

	電磁アクチュエータ	人工筋肉
長所	速い応答性 正確なトルク (力) 出力 回転運動が可能	重量比の出力が大きい 機械的な粘弾性を持つ
短所	重量比の出力が小さい	駆動が片方向のみ 応答が遅い 耐久性が低い

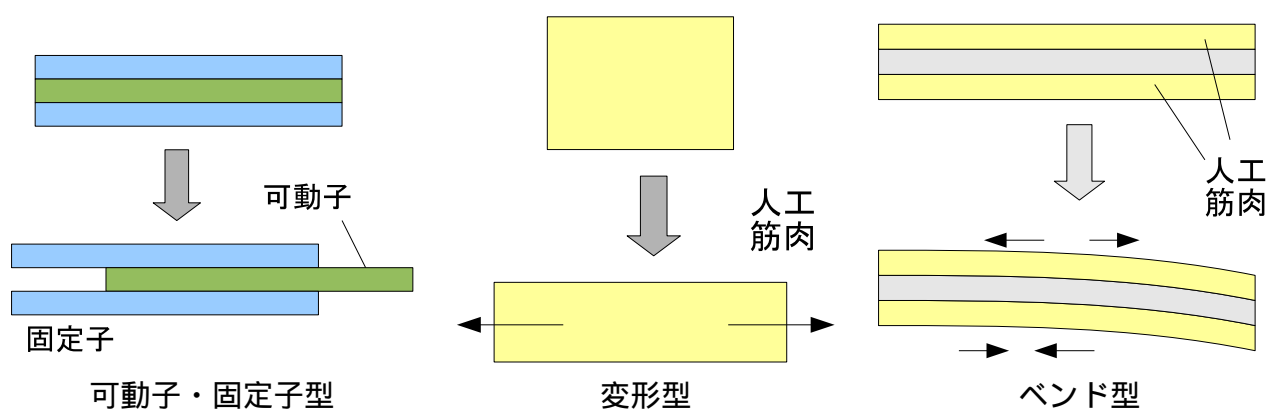


図 3.1: 直動型アクチュエータの構造の比較

には直動運動を行いそれ自身が粘弾性を持つアクチュエータを指す場合が多い。近年は導電性プラスチックなどの新しい材料を利用したアクチュエータが多数提案されている。

電磁気力を用いたアクチュエータと人工筋肉を比較すると、おおむね表 3.1 のような特徴がある。電磁気力を用いたアクチュエータでは速く正確なトルク (力) の出力が可能であり、また回転運動や両方向への駆動も容易である。人工筋肉においては、重量比の出力が大きく、それ自身が機械的な粘弾性を持つという点で長所がある。しかしながら、ほぼ直動型の運動に限られる点、片側にのみ駆動が可能な点、応答が遅く繰り返し動作に対する耐久性が低い等の欠点がある。

直動型のアクチュエータに関して比較を行なうと、電磁アクチュエータでは固定子と可動子が分かれて電磁力によって可動子が動くことによって駆動される。一方、人工筋では粘弾性を持った材料そのものが変形することによって、力や変位を生じる。材料によっては変位が小さいために材料を張り合わせ片方が伸長し片方が収縮することによって、収縮側に屈曲するように動作する。これらを図 3.1 に示す。

流体を用いた人工筋肉

流体を用いる人工筋肉では二重構造になったチューブに、流体をポンプで供給し、その圧力を制御することで望み通りの力を発生させる。二重構造になったチューブは図 3.2 の

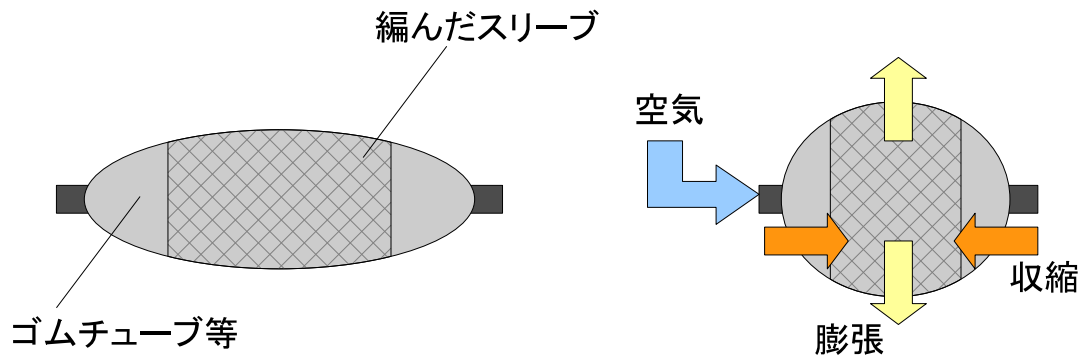


図 3.2: 流体を用いた人工筋の概念図

ように、流体を密閉し圧力によって膨張する内側の一様なチューブと、伸長方向を限定して出力軸方向の力へと変換する外側のスリーブからなる。

流体としてもっとも一般的なものは空気を用いる、マッキベン型のゴム人工筋である。原型となる人工筋は1960年代に開発されている。非常に枯れた技術であり、制御手法やアプリケーションに多数の蓄積がある [32][33][34][35]。ヒトの筋の粘弾性の特性に近い特性が得られるとされており、設計にもよるが比較的大きなパワーを得ることができる。しかしながら、動作にコンプレッサーが必要となること、収縮後に弛緩させる際には空気を捨てねばならず、この際の反応が悪いこと、また動作音が大きいことなどが問題点として挙げられる。

研究段階ではあるが機能性流体を用いた例も存在する [36][37]。機能性流体とは電圧印加などの外部刺激によって特定の性質、機能を示す流体の総称である。ここでは、電界共役流体 (Electro-conjugate fluid, ECF) を用いたもので、液中における電極間に高電圧を印加すると活発な流動 (ジェット流) を得ることができるものである。ジェット流を用いてマイクロ圧力源を作成し、繊維強化フレキシブルチューブの内圧を調整するマイクロ人工筋アクチュエータが提案されている。内圧を高めることによってシリコンゴムで作ったフレキシブルチューブを出力軸と垂直な方向に膨張させ、結果出力軸方向に収縮することで直動運動を得る。竹村らの試作では直径 5mm × 軸方向の長さ 10mm のサイズのもので提案されている。ジェット流を発生するために高電圧 (数 kV) が必要であり、また今回の実験では流体の外部タンクが用いられている。5kV の印加でおよそ、10kPa の内圧を得ることができる。また収縮率は 15% 程度である。発生力の立ち上がり時間はおよそ 8 秒程度、電圧に対して動作領域では 2 次曲線的な発生力の増加を見せる。現在のところ発生力や応答速度の点で問題があるが、小型化することでパワー密度が上げられる点、直並列による高出力や大きな変位量を見こめる点が指摘されている。

有機高分子化合物を用いた人口筋肉

導電性の有機高分子化合物を用いたアクチュエータも様々提案されている。IPMC (Ionic Polymer-Metal Composite) あるいは, IPCF (Ionic Polymer-metal Composite Film) と呼ばれ、図 3.3 に示すように導電性ポリマーのフィルムの両面に薄い電極を加えたものになっている [38][39]。産総研の Oguro によって 1992 年に開発された。電圧を印加することで、内部の陽イオン及び水分子が移動し、移動側の体積が膨張することで素子が屈曲する。利点としては、低電圧 (1 ~ 1.5V) による駆動が可能、応答が早い (100Hz 以上) という特徴があり、

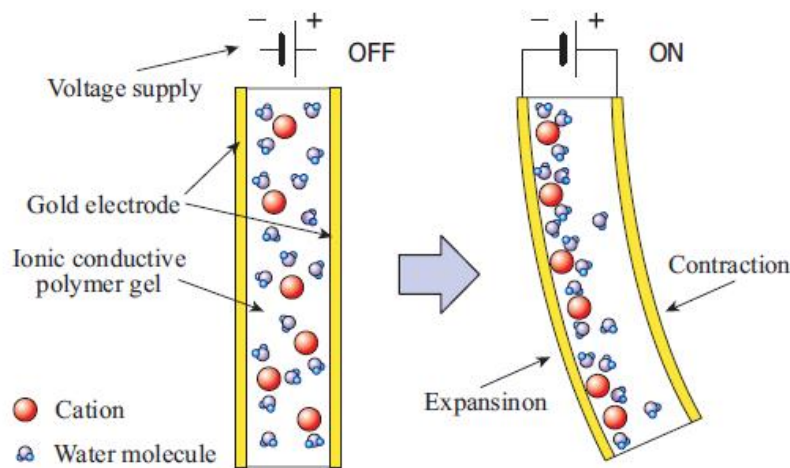


図 3.3: IPMC の構造 [38]

耐久力も 10^6 回以上の屈曲に耐えるなど高い。一方、完全に乾燥した環境では駆動できない、発生力が低いなどの問題点もある。一方、素子を曲げることで起電力が発生するため、センサとしても利用可能である [40]。

また、いわゆる導電性プラスチックに電圧を印加すると、変形が起こることが知られている。これらのアクチュエータはこの特徴を利用したものである。Otero らによって提案されたアクチュエータでは、 LiClO_4 水溶液中のポリピロールフィルムに電圧を加えることで酸化還元反応が生じ、これによって水溶液中の陰イオンが取りこまれて体積の変化が起こり、伸長あるいは収縮すると主張されている [41]。1V 以下の低い電圧でも駆動可能であり、およそ 3-5MPa の引っ張り力を生じ数% の体積の変化を起こすことができた。一方近年、イーメックス社の製品においては高出力型では、数 10MPa 程度の引っ張り力を生じさせることができています。また、高伸縮型では体積の 40% 程度の伸縮が可能となっている [42]。一方で、水溶液中でないと動作できないなどの問題点もあり、動作速度は他の人工筋に対して比較的高速な部類ではあるものの人間の筋ほどではない。

さらに、誘電エラストマ、あるいは電歪エラストマとも呼ばれる人工筋肉を紹介する。誘電体のフィルムの両面に柔軟な電極を貼り合わせ、高電圧をかけることでクーロン力によってこれを押しつぶし変位を発生させる [43]。非常に大きな体積変化を期待でき、エラストマの材質と前処理によっても異なるがシリコンエラストマで 117%、アクリルエラストマで 215% となっている。動作速度も非常に速く、1msec 以下で駆動可能である。ただし、このような出力を得るために数 kV 以上という高電圧が必要なことが問題となる。他に、大きく変化させてしまった後の耐久性に関する問題がある。

他に液晶エラストマと呼ばれる材料を用いたアクチュエータの例が存在する。この材料に電圧を加え、内部分子を整列させることで変位を発生させる。10V 程度の比較的低い電圧で駆動することが可能で、20% 程度の変位を数 100 ミリ秒程度のオーダで得ることができ、特定の溶媒中でのみ動作するなど問題点も多い [44][45]。

無機物質を用いた人工筋肉

人工筋肉と呼ばれるアクチュエータの中で最も強い力を発生させるものの一つが、この形状記憶合金 (Shape Memory Alloy: SMA) アクチュエータである。形状記憶合金は事前

に特定の形状を記憶させれば、低温時に外力による変形を加えても、ある温度以上に加熱することで自ら元の形状に戻る特性を持つ。形状回復時の発生力がワイヤタイプで数100MPaと非常に大きく、回復歪量も5%程度ある。また、コイル状に形状記憶合金のワイヤを巻いたアクチュエータのように形状を工夫することで、伸縮率を高める事が可能となる。欠点としては、まず熱による駆動のため遅れが大きく、特に放熱時に問題となる。またエネルギーの効率も悪い。次に過負荷によって寿命が非常に縮むこと、また変形時、回復時のヒステリシスが大きいことが挙げられる [46][47]。

次に圧電素子を用いたアクチュエータを示す。圧電素子に電圧を加えると歪みを生じ、これを利用することができる。高速・高精度な動作が可能であるという長所があるが、ひずみによる変位量は非常に小さい点が問題であるため、利用範囲は限られる。また、数100V程度の電圧が必要である点と、セラミックのため脆いことも欠点として挙げられる [48][49]。

各人工筋の比較

表 3.2 に各人工筋の諸特性の比較を行なう。一部値の不明確なものに関しては、数字を除いた。例えば空気圧アクチュエータに関しては、設計によって大きく値が異なる。文献 [34] によれば、外形 111.6mm 自然長 793mm の収縮型ゴム人工筋において 600kPa に加圧した際に 340N 程度の力を得、収縮率は 25%程度である。

比較において、比較的生物の筋に近い特徴を持つものは空気圧アクチュエータ、導電性ポリマー、SMA といったところである。SMA に関してはコイル型にすることで、例えば 0.1MPa の発生力で発生力に変化量が 50%程度としたものが市販されている。これらは発生力、変化量ともに申し分ないが筋に比べると動作速度に劣る。他に、水溶液中でないと動作できないもの、動作に高電圧が必要といったロボットへの応用に対して障害となる特性を持つものも多い。

3.1.3 二関節同時駆動機構の実現

二関節同時駆動機構

ロボットアームのアクチュエータとして、単一の関節のみに働くものを単関節駆動機構とし、二つの関節に跨がって同時に同じ大きさの力を加えることができるものを二関節同時駆動機構と呼ぶことにする。従来のロボットは各関節に一つの単関節駆動機構のみを供えていると言うことができる。

理想的な二関節同時駆動機構の要件を下記のように挙げる。

- またがった両関節が機構によって直接結ばれ、片方の関節におよぼした力がそのまま逆向きの力として他方に加わること
- 力を発しない時には、各関節のそれぞれの回転を妨げないこと

本節ではいくつかの実現方法を提案・紹介し、それぞれの特徴、長所短所の比較を行なう。

表 3.2: 様々な人工筋肉の比較

名前	発生力	変位量	動作速度	密度・重量	駆動源
生物の筋肉	0.4MPa	40%	10Hz	1.1g/cm ³	ATP
空気圧	-	-	1 ~ 5hz	-	圧縮空気
ECF	10kPa	15%	0.1Hz 以下	-	高電圧 (数 kV)
IPMC	数 kPa	10%	100Hz	1 ~ 2.5g/cm ³	低電圧 (1 ~ 1.5V)
導電性ポリマー	40MPa	40%	5Hz	1 ~ 2.5g/cm ³	低電圧 (~ 1V)
誘電エラストマ	数 MPa	~ 200%	1kHz	1g/cm ³	高電圧 (数 kV)
液晶エラストマ	-	20%	0.1Hz 以下	-	低電圧 (~ 10V)
SMA(ワイヤ)	400MPa	5%	1 Hz 以下	5 ~ 6g/cm ³	熱
圧電セラミックス	30 ~ 40MPa	0.1%	10Hz 以上	6 ~ 8g/cm ³	数 100V
静電モータ	0.1MPa	数 10%	1kHz	-	高電圧 (数 kV)

直接接続型の二関節同時駆動機構

最も単純な方法としては、直接に直動型のアクチュエータによって両関節を結ぶことである。比較的軽量の空気圧アクチュエータや人工筋肉の場合はこの方式が最も適していると考えられる。ワイヤによってアクチュエータと各関節を接続する場合には、収縮方向にのみ力を発揮できることになるので、関節を反対方向に回転させるために拮抗的に駆動する機構を備える必要がある。一方、剛体リンクによって関節を接続する場合には、収縮と伸長の両方向に力を発揮できるアクチュエータであれば、単独で関節を両方向に回転させることができる。しかしながら、関節の回転角によって伝達できるトルクと変位が異なってしまうために、この点を考慮せねばならない(図 3.4)。比較的重量の大きい電磁型のリニアモータの場合には、特にワイヤ駆動においては重量物がぶら下がることになるため望ましくない。また、剛体で接続する場合においても、リニアモータ自体に十分な剛性が必要となる。図 3.5 のように、レール上にリニアモータの固定子がリンクに対して自由に移動できるように設置し、固定子と可動子のそれぞれから各関節へ接続する。構造は比較的単純ではあるが、比較的重量のあるモータがリンク内で動くことで、制御モデルが変動する点は条件によっては悪影響を及ぼす。

動滑車とリニアモータを用いた二関節同時駆動機構

固定子をリンクに固定した機構としては図 3.6 のようなモデルを考えることができる。リニアモータの可動子が動滑車を駆動し、動滑車にかけられたワイヤを引っ張ることになる。ワイヤの両端は両関節に接続される。この機構の長所としては、直接接続型に比べてストロークを 2 倍かせぐことができることが可能である点がまず挙げられる。リニアモータ

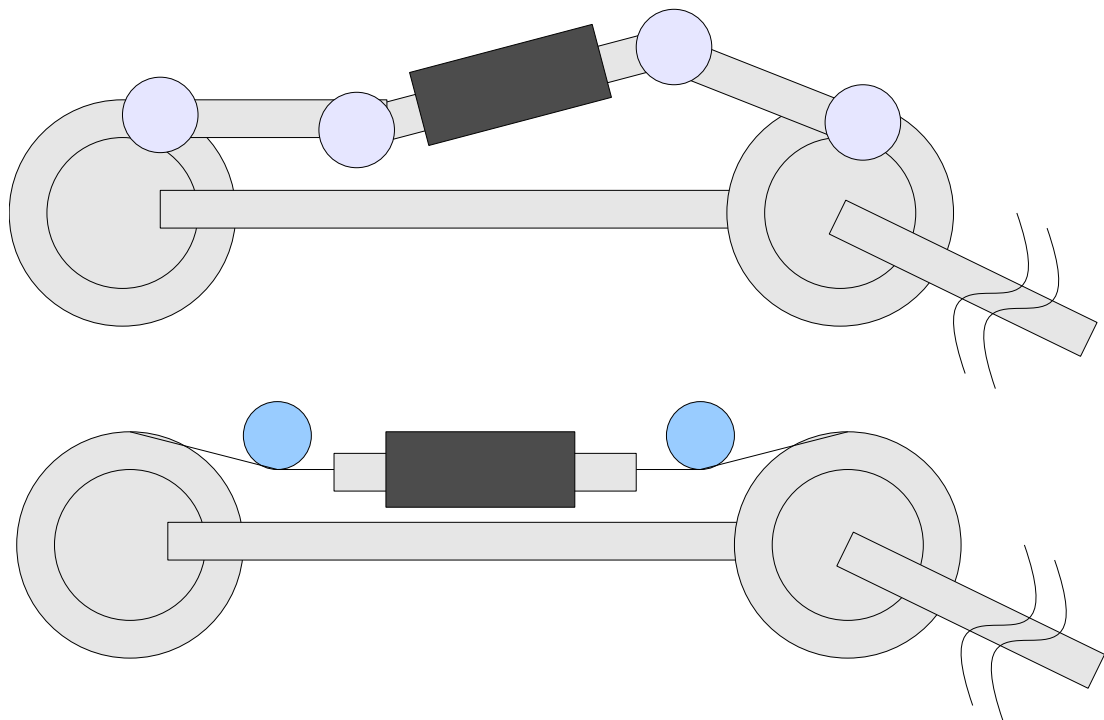


図 3.4: ワイヤと剛体による直接接続型の二関節同時駆動機構

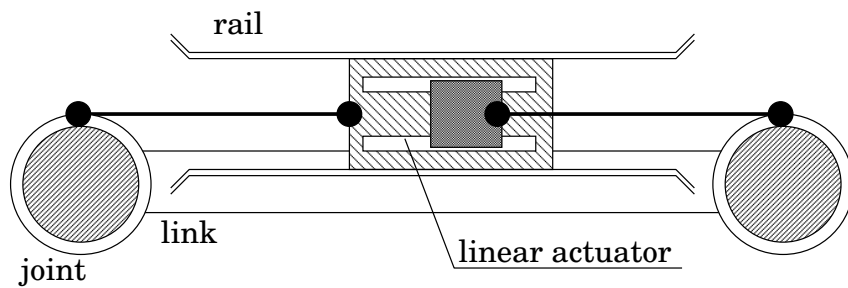


図 3.5: リニアモータを用いた直接接続型の二関節同時駆動機構

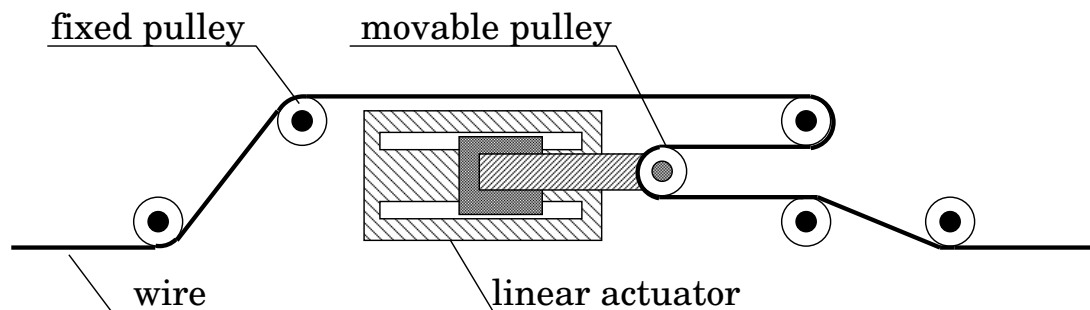


図 3.6: 動滑車を用いる二関節同時駆動機構

タの場合、ストロークの全域にわたって同じ最大力を発揮するためには固定子を延長せねばならず、これが重量増の大きな要因となるため、この特徴はリニアモータの欠点を補うものである。ただし、ストロークを稼いだ分、力の観点からは不利となる。固定子の移動はないため、制御モデルの大きな変動もない。さらに、配置の自由度が高まる点も長所である。しかしながら、ワイヤ長が長くなるためこれによる制御性能の悪化、および比較的大きな面積を必要とする点は欠点となる。

タイミングベルトとプーリーを用いた二関節同時駆動機構

回転型のモータを用いる場合には、前述の機構ではボールネジのように回転運動を直動運動に変換する機構が必要となる。しかしながら、一般的にボールネジを用いることで、バックドライバビリティは犠牲になる場合が多い。ここでは、回転運動をそのまま用いることが可能な機構を提案する。図 3.7 のように、基本的な構造を示す。第 i 関節と第 $i+1$ 関節を同時に駆動する二関節同時駆動機構を考える。モータは $i-1$ リンク上に固定される。第 i 関節上のトルクの伝達機構に関しては、第 i 軸と同軸上に存在するが第 i 軸とは切り離されている。タイミングベルトによって第 i 軸と第 $i+1$ 軸の間を連結する。第 $i+1$ 軸においては軸を直接駆動する。ここで、モータを駆動させることで、第 i 軸と第 $i+1$ 軸を同時に駆動することが可能である。タイミングベルトが緊張することで、伝達機構が剛体のように働きモータは第 i 関節を駆動する。この時第 $i+1$ 関節と第 i 関節に加わるトルクは等しい。回転型のモータをそのまま利用し、また特別な補償を必要としないのは大きな長所である。ただし、二関節同時駆動が機能するためにはタイミングベルトに十分なテンションがかかっている必要があるため、回転方向が反転する状況等タイミングベルトが緩んだ状態においては機能しないという問題点もある。

遊星歯車機構を用いた二関節同時駆動機構

遊星歯車を用いた機構も回転型のモータを用いることができる [50][51]。ただし、これらは単関節駆動機構と二関節同時駆動機構が一体となった機構となる。遊星歯車機構は、サンギア、プラネタリギア、リングギアの 3 つのギアを持つが、サンギアとリングギアに各関節軸とそれらに直結する単関節駆動用のモータが接続される。プラネタリギアを公転させるように駆動するモータが二関節同時駆動機構に相当する。この機構を用いたアームは 3.4 節にて示す。

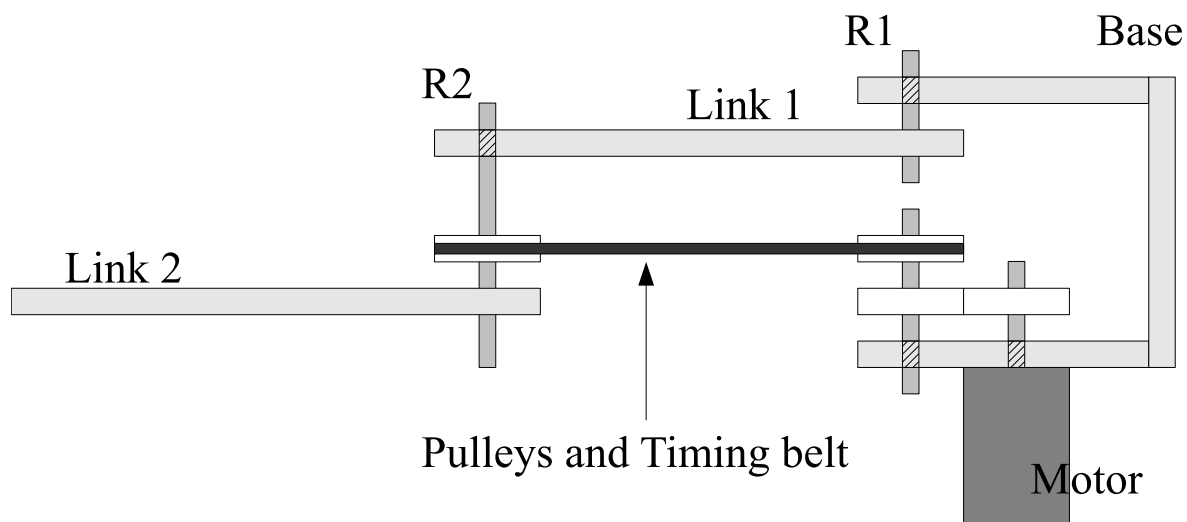


図 3.7: タイミングベルトとプーリーを用いた二関節同時駆動機構

3.1.4 筋粘弾性の実現

機械的に粘弾性を実現することによる最大の利点は、機器に本質的な安全性を備えさせることができるということである。インピーダンス制御等、ソフトウェア的に製作された粘弾性では衝突などの非常に短時間に起こる事象に対しては対応できない。欠点としては、アクチュエータとしての制御性が落ちる点、機構の複雑性が増す点、耐久性に劣るといった点が挙げられる。

式(2.6)のような、筋粘弾性を機械的に作る方法として小田らによるHIPROロボットに用いられた可変粘弾性アクチュエータ(VEA)が挙げられる[15]。これは、アクチュエータとコイルバネからなり、アクチュエータで片方の端面を操作してやることで任意の弾性を発することが可能となる。この機構を図3.8に示す。およそ5Hz程度の範囲において、任意の弾性を発生させることが可能である。装置は比較的大掛りである。また、粘性に関しては自由に設計できるわけではない。

剛性の高いアクチュエータと制御対象の間に、粘弾性を持った要素をはさみこむことで、機械的な粘弾性を得る方法も存在する。線形の弾性要素をはさんだ例としては、Series Elastic Actuator(SEA)という例がPrattらによって提案されている[52]。しかしながら、線形バネでは安全性や応答性といった項目は線形バネの性質によって決まり、これを制御によって再設計することはできない。これを改善するために大きな負荷を担当するSEAに対して、細かな負荷変動を補償する応答のよいアクチュエータを並列に取りつけて、制御性能と安全性の両立を目論んだDM2アプローチも提案されている[53][54][55]。

ここで、線形バネの代わりに非線形粘弾要素を用いる例としては、シリコーンゴムスポンジに網チューブを被せた構造のStiffness Adjustable Tendon(SAT)を組みこんだ腱駆動システムが挙げられる。SATは伸長量に対して指数関数的に張力が増大する非線形弾性特性を持つ。腱駆動によって拮抗的に駆動することで、任意の剛性を作り出すことが可能である。ただし、SATの非線形弾性は定式化が容易ではないので、外乱オブザーバによる想定する張力-伸長量の関数への理想化をほどこしている[56]。一方、石塚らは図3.10に示すようなActuator with Non-Linear Elastic System(ANLES)と呼ばれる非線形弾性要素を用いたロボットを提案している[57]。モータでバネを回転させることで径が変わりバネの一部がガイドに接触することで、回転量に対して指数的に弾性を変化させることができる。

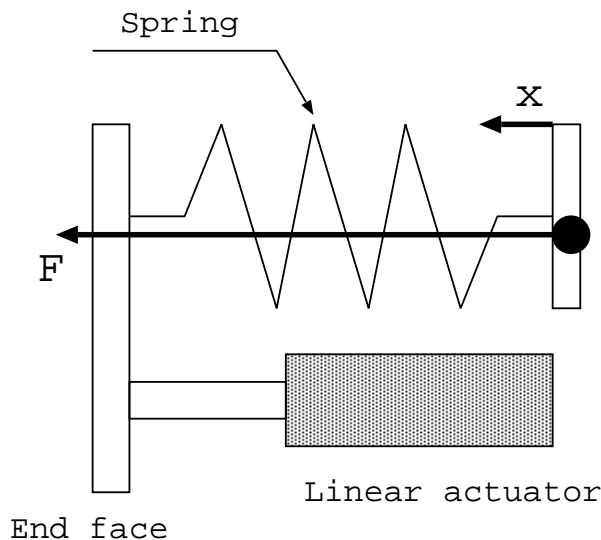


図 3.8: HIPRO ロボットに搭載された、可変弾性アクチュエータ (VEA)[15]

ガイドの形状を変えることで、望みの特性を得ることが可能である。

ソフトウェアによって粘弾性を実現する場合には、エンコーダ等によって位置と速度を検出し、図 3.11 で示すような制御ブロックで仮想的に粘弾性を実現する。このためには、制御性に優れた応答性の高いアクチュエータを用いる必要がある。図中 ⊗ の記号は入力を掛け合わせるの意である。

3.2 二関節同時駆動機構を持つロボットアームの製作

3.2.1 ロボットアームの設計

本研究では、水平面内を駆動する 2 リンクの生物型ロボットを製作する。図 2.2 に示されるモデルより、各拮抗対をモータで置き換え、二関節筋を置き換える二関節同時駆動機構に関しては 3.1.3 節で示した機構を採用する。このロボットアームの模式図を図 3.12 に示す。図中の各軸の網掛け部分に関しては、軸がリンクに対して自由に回転できることを示す。モータ 1 は R1 のみを駆動する単関節駆動機構、モータ 2 は R2 のみを駆動する単関節駆動機構である。模式図の上部のみを取りだせば、これは従来型のロボットアームと同一である。モータ 3 は、タイミングベルトとプーリーを用いた二関節同時駆動を通じて、R1 および R2 の両関節を駆動することができる。

二関節同時駆動はタイミングベルトが十分なテンションを持つ限り成立する。一方拮抗駆動については、各拮抗対に関してはモータで置き換えられているため拮抗の結果生じる関節トルクのみが表れる。ただし、一関節筋と二関節筋の間では拮抗的な駆動がある。筋粘弾性に関しては、必要に応じてソフトウェア的に実現することとし、制御性に優れた主に二関節筋を含んだ筋配列の効果を検証する実験機を目指す。

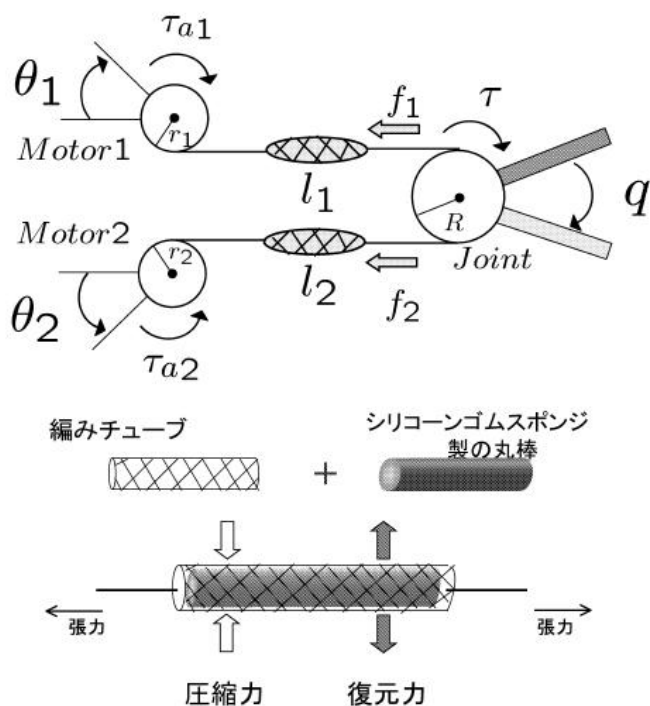


図 3.9: SAT による単関節駆動機構 [56]

3.2.2 製作したロボットアームとその諸元

実際に制作したロボットアームを図 3.13 に示す。ここで二関節同時駆動機構に関しては、強度を保つために図 3.12 からリンク 1 内に折り畳んだ形となる。図 3.14 に R1 軸上に配置する二関節同時駆動機構のトルク伝達コンポーネントを示す。ベアリングによって R1 軸に対して同軸上ではあるが、切り離された状態を実現している。付録 A に、ロボットアームの組み立て図及び重要な部品の設計図を示し、設計の実務的な詳細に関してはここに記す。

ロボットアームに使われているモータとセンサ類を表 3.3 に示す。モータは一般的なギヤードモータを使い変更が可能であるが、本論文中ではタミヤ製の 380K75 を用いる。トルク定数は 0.20Nm/A であり、ロック時の電流は 13A となる。ギヤ比は $75:1$ である。センサ類としては、各軸に対してのみエンコーダが取り付けられている。ロボットアームの

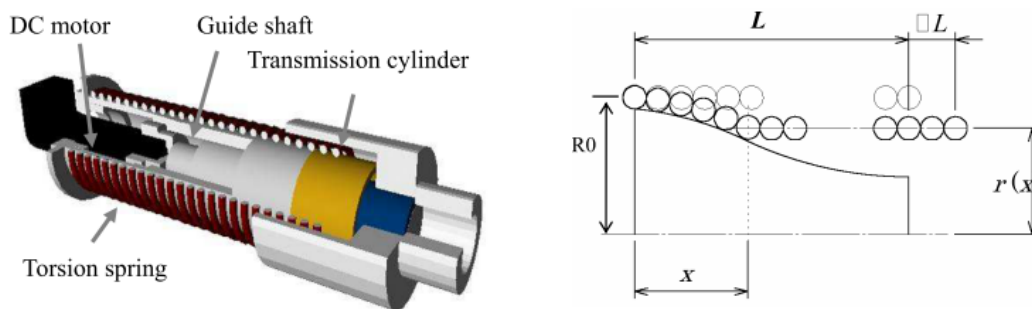


図 3.10: ANLES のメカニズム [57]

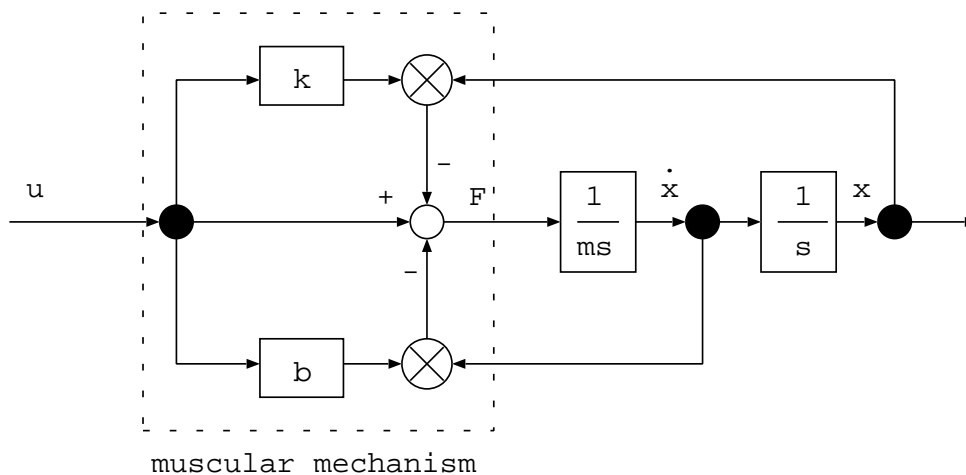


図 3.11: 筋の粘弾性を実現するダイアグラム

表 3.3: モータとセンサ類

Motors	TAMIYA(380K75)
Encoders	OMRON(E6H-CWZ6C)
Force Sensor	NITTA(IFS-67M25A25-140-ANA)
Current Sensor	MAXON ADS 50/5

手先は力センサと接続することが可能である。モータドライバによって各モータの電流値を計測することができる。モータドライバおよび、ドライバの駆動用電源、エンコーダの駆動用電源、緊急停止用の回路等は図 3.15 に示すコントロールボックスに収められる。

モータドライバに関してはMAXON製のADS50/5を用いる。こちらは電流制御モードで動作させ、必要なトルクに相当する電流指令を送る。制御用のPCとして、Art-LinuxによってリアルタイムOS化したVine Linux 4.2 (kernel 2.4.31)を用いる。制御用PCは拡張ボードとしてAD-DAボード、カウンタボード、力センサレシーバボードを備える。ADDAボードはAD8チャンネル、DA4チャンネルの変換が可能であり、それぞれ12bitの分解能を持つ。一方、カウンタボードは4chを持ち、それぞれ4逓倍モードで動作し分解能は一回転あたり14400分割で計測可能である。この構成を表3.4に示す。また図3.16に、各コンポーネントの配線図と制御に関するおおまかな概念図を示す。

リンク長、重量等のパラメタは表3.5に示す。本論文における実験の計算による理論値ではこの値を用いている。

3.2.3 製作したロボットアームの位置付け

ここでは製作したロボットアームと生物のアーム等を比較して、各要素をどのように持つかを表3.6に示す。表中Aは生物のアームモデルであり、B1は図3.17で示す、完全な3対6筋の構造を持つロボットアームの例である。B2は今回製作したロボットアーム、Cは従来型のロボットアームである。それぞれ、単関節駆動、二関節同時駆動、拮抗駆動、

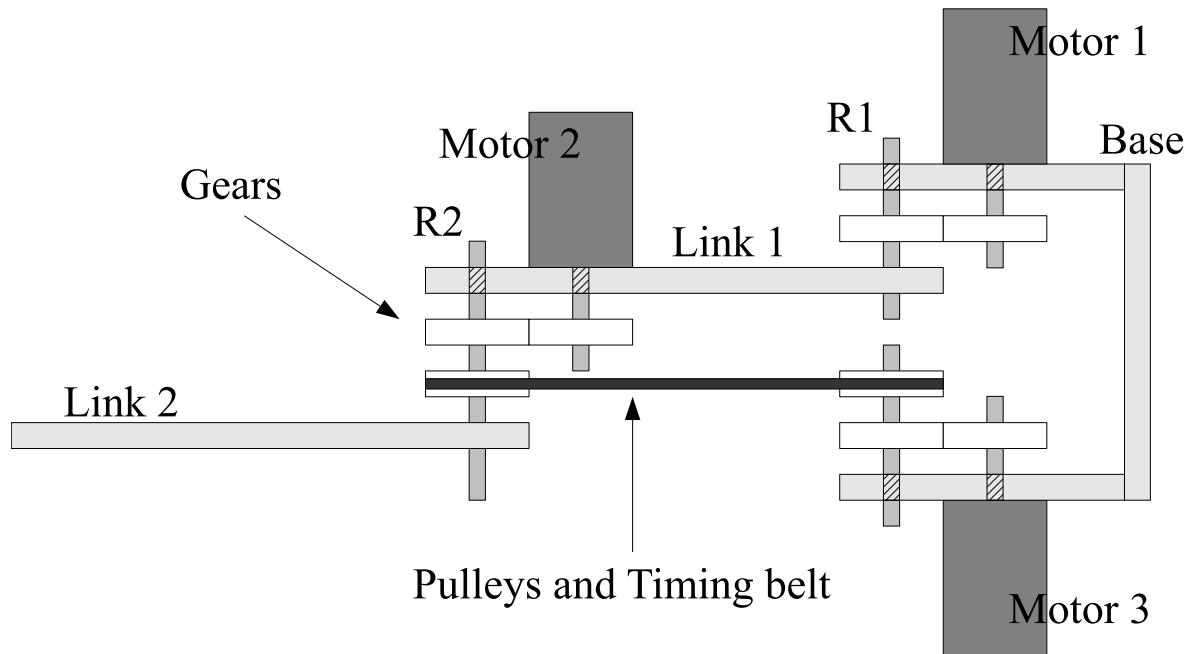


図 3.12: 二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの全体図

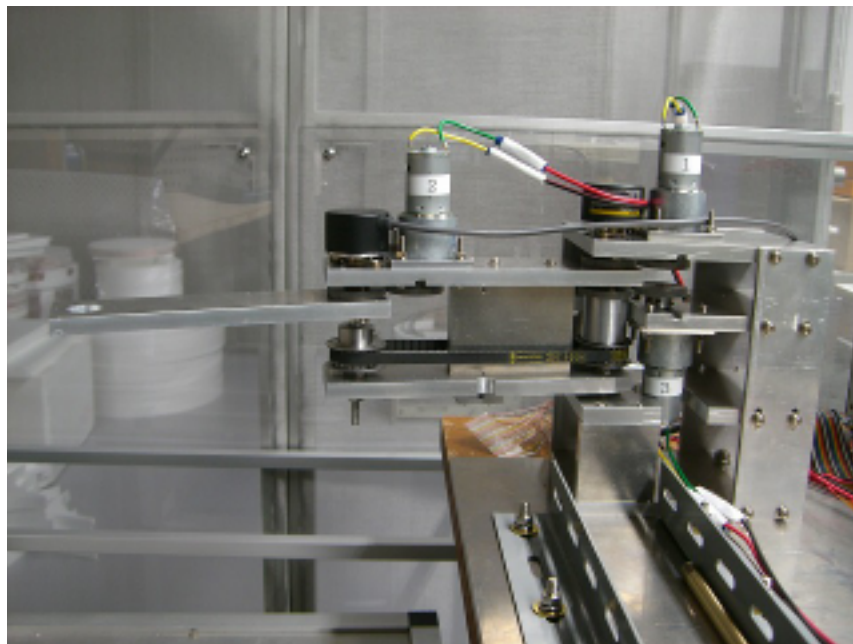


図 3.13: 制作したロボットアーム

表 3.4: 制御コントローラの構成

Motor driver	MAXON ADS 50/5
OS	Vine linux 4.2 (kernel 2.4.31) + ART-Linux
CPU	Intel Pentium4 1.5MHz
AD-DA board	Interface PCI-3523A
Counter board	Interface PCI-6201E
Receiver of force sensor	Nitta IFS-PCI-2184D

表 3.5: ロボットアームの主な諸元

Total height	270mm
Total length	500mm
Total mass of link 1	0.72kg
Total Length of link 1 between joint 1 and 2	165mm
Total mass of link 2	0.27kg
Total length of link 2 between joint 2 and center of force sensor	185mm
Moment of inertia of joint 1	0.034kg·m ²
Moment of inertia of joint 2	0.0058kg·m ²
Torque coefficient	0.20Nm/A

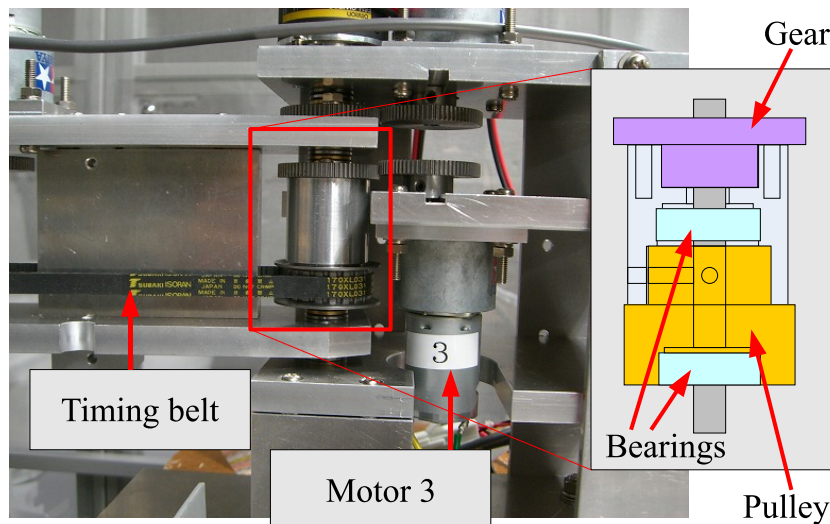


図 3.14: 二関節同時駆動機構におけるトルク伝達部

表 3.6: 各ロボットアームモデルの比較

-	A	B1	B2	C
(1) 単関節駆動				
(2) 二関節同時駆動			*	×
(3) 拮抗駆動				×
(4) 非線形粘弾性				×

A は生物のアームモデルである。また、B1(図 3.17) および B2(図 3.12) は二関節同時駆動機構を用いたロボットアームであり、B2 は今回我々が制作するモデルである。C は従来のロボットアームである。 : 存在, : 仮想的に実現, × : 無し, * : 一部の領域で成立しない場合あり

非線形粘弾性が存在するかどうかを示している。

既存の生物型ロボットと比較すると、新山らの Mowgli はカエルの筋骨格系から、一部の筋を抜き出して空気圧アクチュエータで置き換えた物であり、跳躍力と柔軟な着地に対して特化したモデルである [17]。二関節筋に相当する構造を含むものの、アクチュエータの数と関節の数は等しく冗長性は失われている。高山らの跳躍ロボットに関しては、人間の下肢の筋配列を比較的忠実に空気圧アクチュエータで再現したモデルといえる [18]。大島らの跳躍ロボットでは、下肢の足関節と膝関節を結ぶ二関節筋である腓腹筋をワイヤで置き換えることで、自由な足の駆動を捨て、跳躍時の腓腹筋の役割の検証に特化したモデルといえる [12]。小田らの HIPRO ロボットに関しては、積極的に 3 対 6 筋の構造を取り入れたモデルである。筋としては可変弾性アクチュエータ (VEA) を用いて機械的な筋粘弾性を再現しようとしている。ただし重量がかさみ、構造も複雑である [15]。

提案するロボットアームは二関節筋を含んだアームモデルの一般的な原理原則を明らかにするためのモデルである。構造は比較的単純で、従来型ロボットアームに対して二関節同時駆動機構を加えた構造となる。電気モータを用いることで制御性を高め、各拮抗対内の拮抗駆動、非線形粘弾性に関してはソフトウェア的に実現する。

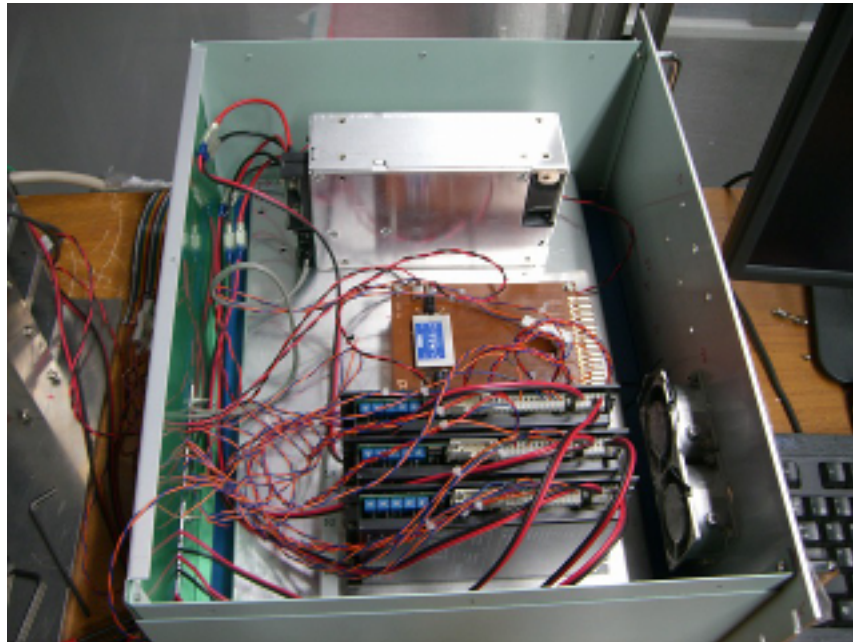


図 3.15: コントロールボックス

3.3 実験機の検証

3.3.1 手先における力出力の検証

手先における力出力の計測方法

二関節同時駆動機構が正しく動作していることの検証として、まずは静的な条件で手先における力の出力範囲を測定し、理論通りの出力が得られているかどうかを確かめる。図 2.8 に示したように、従来型のアームでは四角形の出力範囲が得られるのに対し、二関節筋（二関節同時駆動機構）を加えることで六角形の出力範囲が得られる。

実験のための装置のセットアップを図 3.18 のように示す。力センサはベースに固定される。力センサの上側の端面には直径 10mm の金属製の丸棒を取りつけられるようになっており、ロボットアームのリンク 2 の先端近くの取り付け穴を通すことで手先で発生する力を計測することができる。ロボットアームの諸元は表 3.5 に示す通りである。Art-Linux によるサンプリング周期は 1msec とする。

実験では腕を伸ばした姿勢 ($[\theta_1, \theta_2]^T = [1.013, 1.115]^T$ [rad])、曲げた姿勢 ($[\theta_1, \theta_2]^T = [0.460, 2.213]^T$ [rad])、その中間の姿勢 ($[\theta_1, \theta_2]^T = [0.765, 1.567]^T$ [rad]) について計測を行なう。実験を行なった姿勢と、座標系を図 3.19 に示す。

比較検討するアームモデル

二関節同時駆動機構を持たない従来型のアーム (arm1) と、二関節同時駆動機構の寄与の比を変えた 2 種のアーム (arm2, arm3) について比較実験を行なう。式 (3.1) に定義するように L^{imit} をアームの各拮抗対の最大トルクを表す対角行列とする。

$$L^{imit} = \text{diag}(T_{1max}^{msl}, T_{2max}^{msl}, T_{3max}^{msl}) \quad (3.1)$$

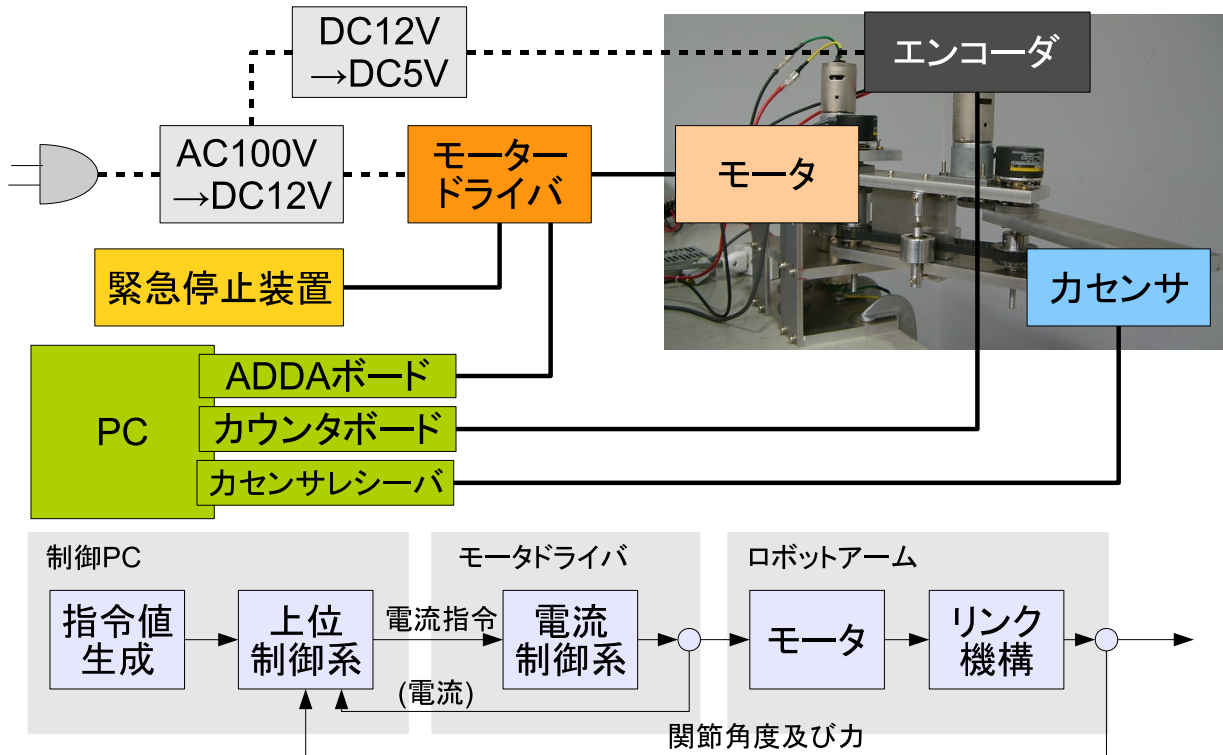


図 3.16: 各コンポーネントの接続図

ここで T_{1max}^{msl} , T_{2max}^{msl} , T_{3max}^{msl} は関節 R1 を駆動する一関節筋の拮抗対、関節 R2 を駆動する一関節筋の拮抗対、関節 R1 と R2 を駆動する二関節筋の拮抗対の最大トルクであり、ここでは各拮抗対を置き換えたモーターのトルクの最大トルクである。式 (3.2) には L^{limit} を用いた際の各関節トルクを示す。手先出力は式 (2.9) で求めることができる。

$$T^{jnt} = A^{align} L^{limit} \tilde{T}^{msl} \quad (3.2)$$

ここで、 A^{align} はアクチュエータの配列を表す行列で、この 2 リンクモーターにおいては式 (5.15) で表すことができる。

$$A^{align} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

また、 \tilde{T}^{msl} は-1 から 1 の範囲に正規化された各拮抗対のトルクベクトルで、ベクトルの要素 \tilde{T}_{midx}^{msl} は添字 $midx$ で表される拮抗対のトルクを T_{midx}^{msl} とし、その最大値を $T_{midxmax}^{msl}$ とし、式 (3.4) で定義される。

$$\tilde{T}_{midx}^{msl} = \frac{T_{midx}^{msl}}{T_{midxmax}^{msl}} \quad (3.4)$$

式 (3.5) では、arm1, arm2, arm3 の各モーターの最大トルク [Nm] を示す。実際の実験では最大電流の制限によって最大トルクを各アームで変える。最大トルクの和を揃えることで公平な実験を行なう。

$$\begin{aligned} L_{arm1}^{limit} &= \text{diag}(0.3, 0.3, 0) \\ L_{arm2}^{limit} &= \text{diag}(0.2, 0.2, 0.2) \\ L_{arm3}^{limit} &= \text{diag}(0.15, 0.15, 0.3) \end{aligned} \quad (3.5)$$

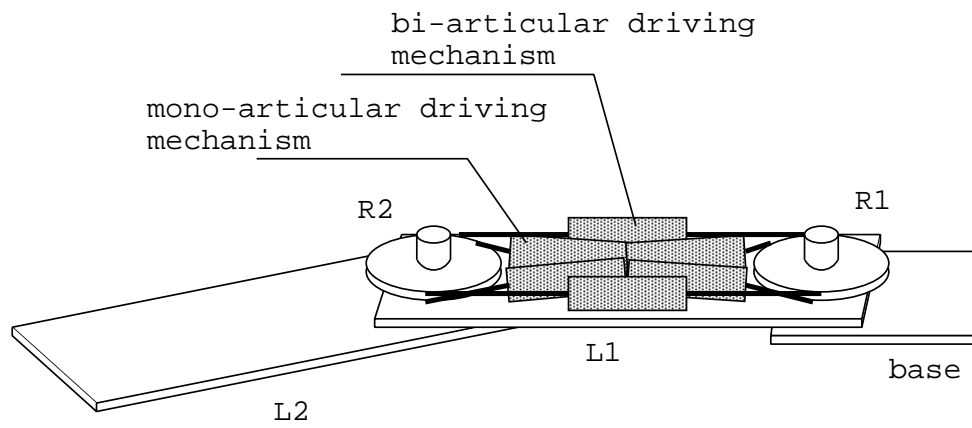


図 3.17: 完全な 3 対 6 筋の構造を持つロボットアームの例

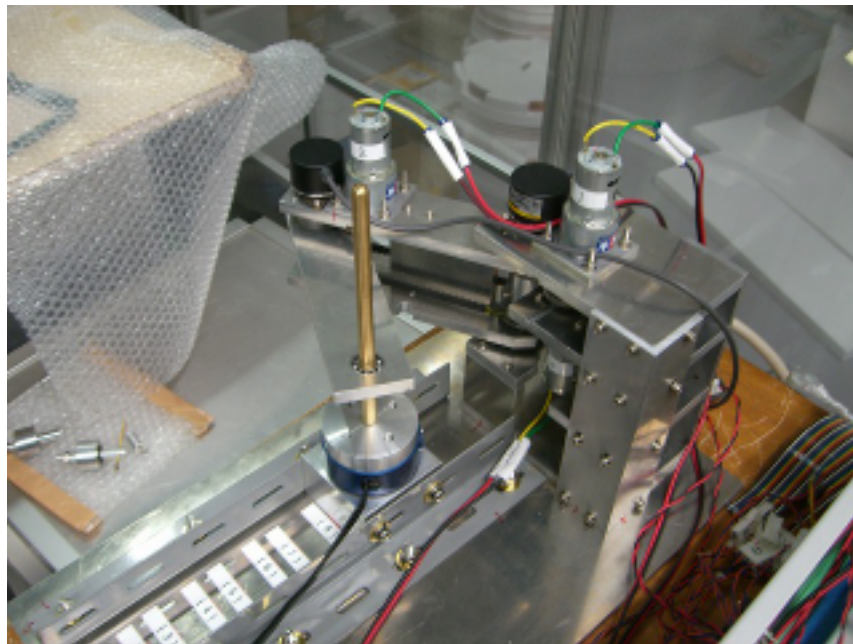


図 3.18: 実験のためのセットアップ

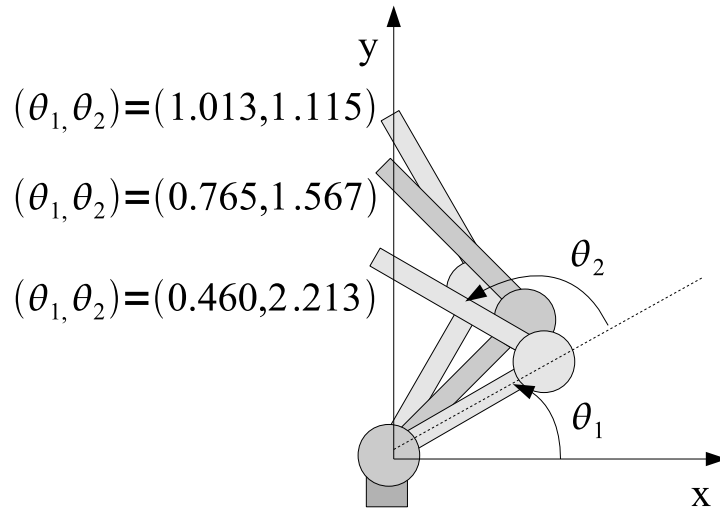


図 3.19: ロボットアームの姿勢と座標

最大出力を得るための筋の交代パターン

実験では、各方向に最大の力を出すように筋の交代パターン [8] に基づき、各拮抗対のトルクを出力させる。便宜的な変数である θ_{msl} を用いて二関節同時駆動機構を持つ arm2, arm3 に関しては式 (3.6) のように出力を求める。

$$\begin{aligned}
 \tilde{T}_1^{msl} &= 1, & \tilde{T}_2^{msl} &= 1 - \frac{6}{\pi}\theta_{msl}, & \tilde{T}_3^{msl} &= 1 & (0 \leq \theta_{msl} \leq \frac{1}{3}\pi) \\
 \tilde{T}_1^{msl} &= 1, & \tilde{T}_2^{msl} &= -1, & \tilde{T}_3^{msl} &= 1 - \frac{6}{\pi}(\theta_{msl} - \frac{1}{3}\pi) & (\frac{1}{3}\pi \leq \theta_{msl} \leq \frac{2}{3}\pi) \\
 \tilde{T}_1^{msl} &= 1 - \frac{6}{\pi}(\theta_{msl} - \frac{2}{3}\pi), & \tilde{T}_2^{msl} &= -1, & \tilde{T}_3^{msl} &= -1 & (\frac{2}{3}\pi \leq \theta_{msl} \leq \pi) \\
 \tilde{T}_1^{msl} &= -1, & \tilde{T}_2^{msl} &= -1 + \frac{6}{\pi}(\theta_{msl} - \pi), & \tilde{T}_3^{msl} &= -1 & (\pi \leq \theta_{msl} \leq \frac{4}{3}\pi) \\
 \tilde{T}_1^{msl} &= -1, & \tilde{T}_2^{msl} &= 1, & \tilde{T}_3^{msl} &= -1 + \frac{6}{\pi}(\theta_{msl} - \frac{4}{3}\pi) & (\frac{4}{3}\pi \leq \theta_{msl} \leq \frac{5}{3}\pi) \\
 \tilde{T}_1^{msl} &= -1 + \frac{6}{\pi}(\theta_{msl} - \frac{5}{3}\pi), & \tilde{T}_2^{msl} &= 1, & \tilde{T}_3^{msl} &= 1 & (\frac{5}{3}\pi \leq \theta_{msl} \leq 2\pi)
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

同様に二関節同時駆動機構を持たない arm1 に関しては式 (3.7) に交代パターンを示す。

$$\begin{aligned}
 \tilde{T}_1^{msl} &= 1, & \tilde{T}_2^{msl} &= 1 - \frac{4}{\pi}\theta_{msl} & (0 \leq \theta_{msl} \leq \frac{1}{2}\pi) \\
 \tilde{T}_1^{msl} &= 1 - \frac{4}{\pi}(\theta_{msl} - \frac{1}{2}\pi), & \tilde{T}_2^{msl} &= -1 & (\frac{1}{2}\pi \leq \theta_{msl} \leq \pi) \\
 \tilde{T}_1^{msl} &= -1, & \tilde{T}_2^{msl} &= -1 + \frac{4}{\pi}(\theta_{msl} - \pi) & (\pi \leq \theta_{msl} \leq \frac{3}{2}\pi) \\
 \tilde{T}_1^{msl} &= -1 + \frac{4}{\pi}(\theta_{msl} - \frac{3}{2}\pi), & \tilde{T}_2^{msl} &= 1 & (\frac{3}{2}\pi \leq \theta_{msl} \leq 2\pi)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

式 (3.6) および式 (3.7) を図 3.20 及び図 3.21 に図示する。

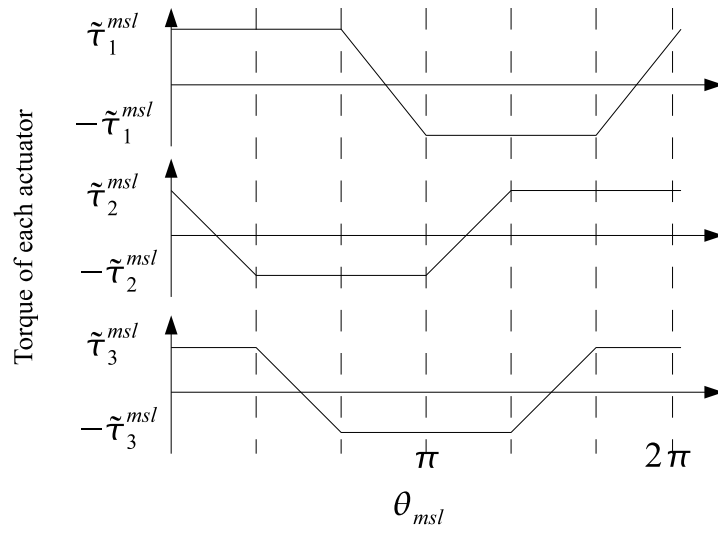


図 3.20: 筋の交代パターン (二関節筋あり)

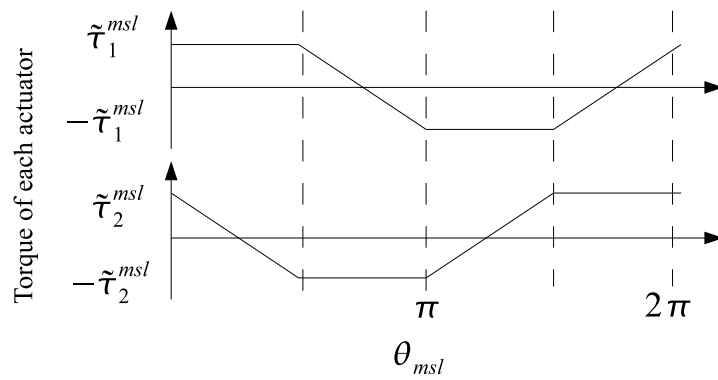


図 3.21: 筋の交代パターン (二関節筋なし)

実験結果

前述の筋の交代パターンに基づき、 θ_{msl} を 0π から 2π の範囲で変化させ、計測点を均等に 40 点求める。力の計測については各モータが一定のトルクを出力し始めてから 50msec 待ち、次の 200msec において計測した力を平均したものを各点の結果とする。

ロボットアームの姿勢を $\theta_1 = 0.765, \theta_2 = 1.567$ とした時の arm1, arm2, arm3 の手先における力を出力可能な領域の比較を図 5.8 に示す。計測点を赤色の + でプロットし、式 (2.9) より求めた計算上の出力を緑色の点線で表示する。この結果、実際の出力は計算上の値と良く合致していることが分かる。従来型のアームにおいては四角形の出力が得られるが、二関節筋、二関節同時駆動機構を供えたアームにおいては六角形の出力が得られる。また、各モータの最大トルクの比率を変えることで出力可能な領域などの特性を変化させることができる。

図 3.23 には、姿勢を変化させた場合の二関節同時駆動機構の有無による出力領域の変化を arm1, arm2 について示す。いずれの姿勢においても、二関節同時駆動機構が機能し、計算で求めた出力と合致している。

3.3.2 動作時における二関節同時駆動機構の検証

ここでは動作時においても、二関節同時駆動機構が機能していることを示す。関節 R1 の駆動について単関節駆動機構なしで、二関節同時駆動機構のみでトルクを与えることができ、また関節 R2 に関しては速度を 0 として制御することで劣駆動ではないことを示す。

実験においてはモータ 1 を完全に外し関節 R1 は二関節同時駆動機構であるモータ 3 でのみ駆動されることにする。モータ 3 には振幅が 1.5A、1Hz のサイン波を電流指令として与える。モータ 2 は 0rad を角度指令とし、外乱オブザーバと PD 制御器を施して関節角 θ_2 を一定に保ち、コリオリ力等の力が加わらないようにする。制御則を式 (3.8) に示す。

$$i_2^* = K_{P2}(\theta_2 - \theta_2^*) + K_{D2}(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_2^*) - (1 - Q)T^{dist} \quad (3.8)$$

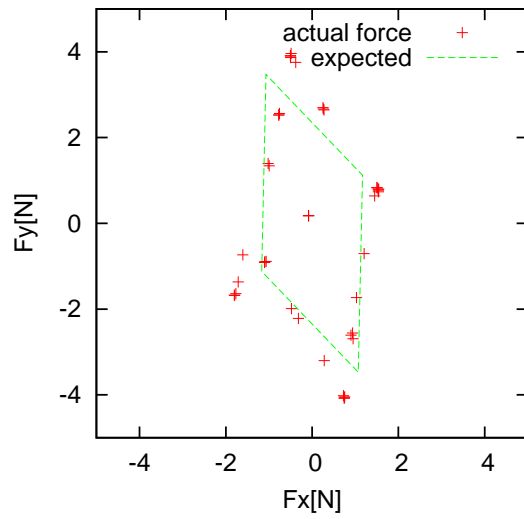
ここで、 i_2^* はモータ 2 の電流指令、 K_{P2}, K_{D2} は PD 制御の比例ゲイン、微分ゲインである。また、 Q は 1 次のローパスフィルタでカットオフ周波数を c_{lpf} とする。 T^{dist} は外乱である。

ブロック図を図 3.24 に示す。ロボットアームの諸元は表 3.5 に示す。

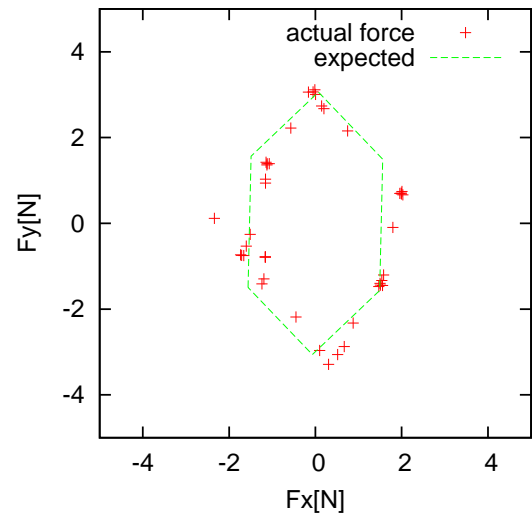
図 3.25 に実験の結果を示す。 θ_2 に関しては、エンコーダがモータでなく関節角を直接計測し、バックラッグが比較的大きいため多少動揺が見られるものの、角速度はほぼ 0 に抑えられている。角速度が 0 の領域においても入力したサイン波に応じて θ_1 を駆動させることができていることが分かる。 θ_1 は回転が負の方向に偏って駆動されているが、これは関節 R1 のわずかな傾きと、回転方向に対して摩擦等の抵抗が異なるためと考えられる。

3.3.3 ロボットアームの冗長性の検証

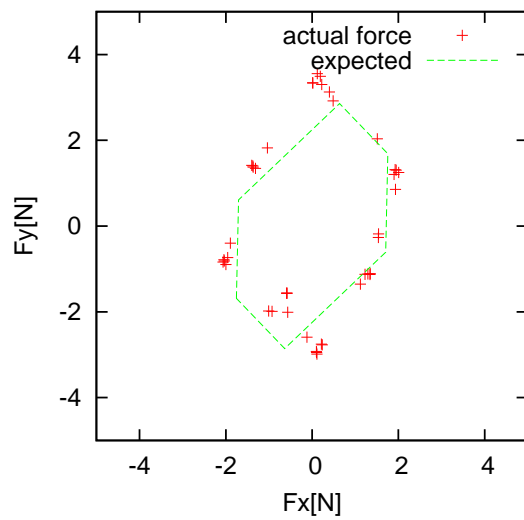
二関節同時駆動機構が二つの関節に同時に力を加えることができ、ロボットアームの 3 つのモータのいずれの 2 つでも駆動できることを確認する。位置指令として各軸に対し振幅 0.3rad の矩形波を与え、各関節角をこれに追従させる。各軸は外乱オブザーバと PD 制御器を用いて図 3.26 のブロック図で制御される。ここで、 K_{P1}, K_{P2} は関節 R1, R2 に対する PD 制御器の比例ゲイン、 K_{D1}, K_{D2} は微分ゲインである。また、外乱オブザーバの



without bi-articular muscles (arm1)
 $L_{arm1}^{limit} = \text{diag}(0.3, 0.3, 0)$

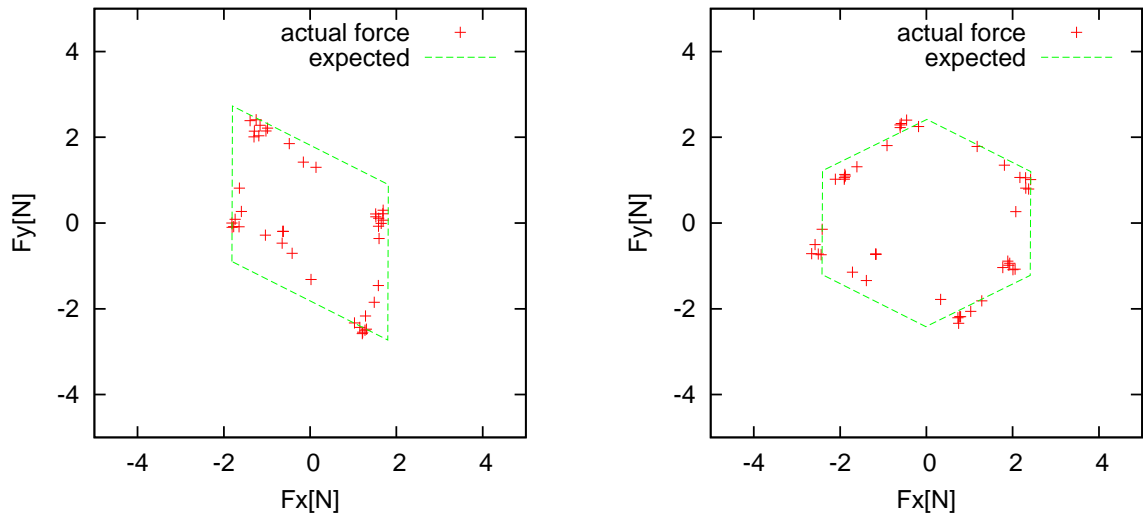


with bi-articular muscles (arm2)
 $L_{arm2}^{limit} = \text{diag}(0.2, 0.2, 0.2)$

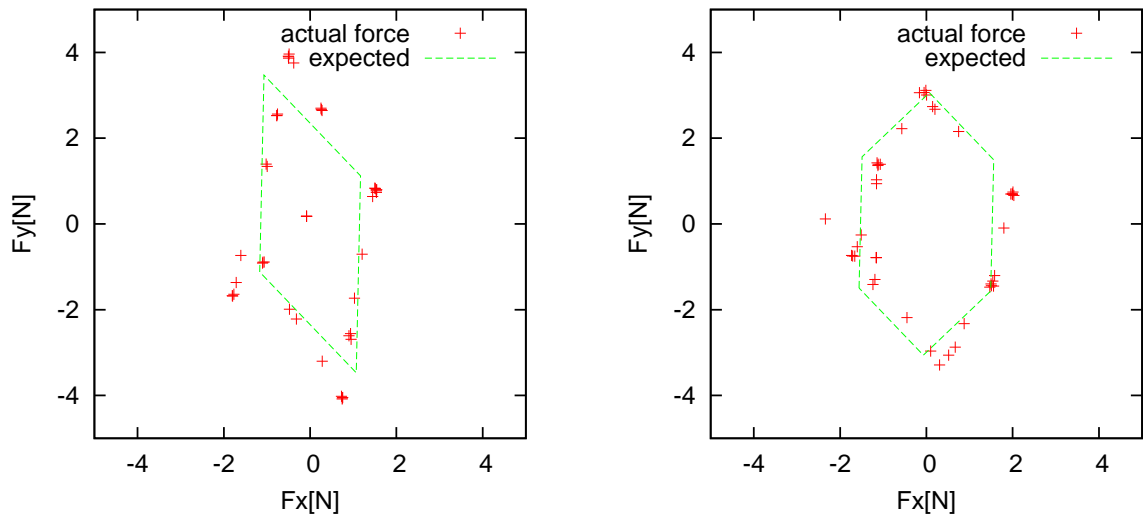


with bi-articular muscles (arm3)
 $L_{arm3}^{limit} = \text{diag}(0.15, 0.15, 0.3)$

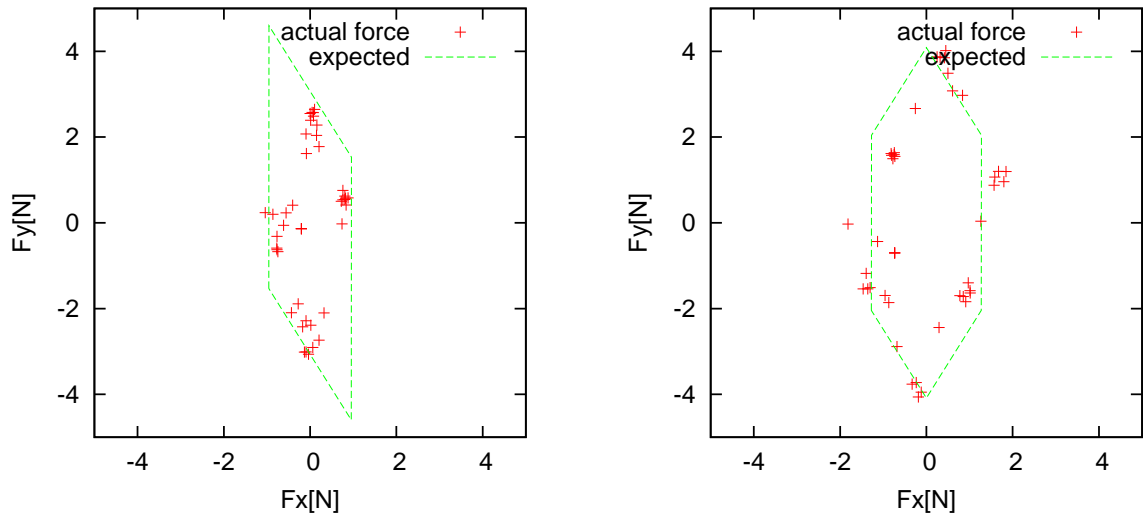
図 3.22: 二関節同時駆動機構の寄与度を変化させた時の手先において出力可能な力の領域



$$\theta_1 = 0.460, \theta_2 = 2.213$$



$$\theta_1 = 0.765, \theta_2 = 1.567$$



$$\theta_1 = 1.013, \theta_2 = 1.115$$

without bi-articular muscle (arm1)

$$\mathbf{L}_{arm1}^{limit} = \text{diag}(0.3, 0.3, 0)$$

with bi-articular (arm2)

$$\mathbf{L}_{arm1}^{limit} = \text{diag}(0.2, 0.2, 0.2)$$

図 3.23: アームの姿勢を変化させた時の手先において出力可能な力の領域

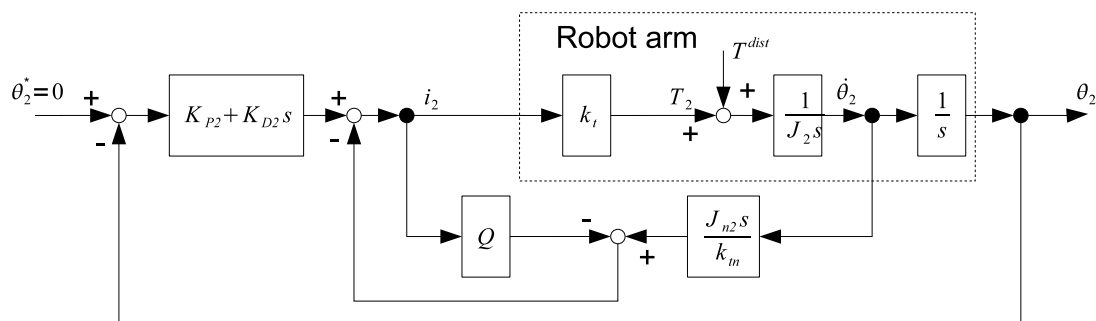


図 3.24: 動作時における二関節同時駆動機構の検証用のブロック図

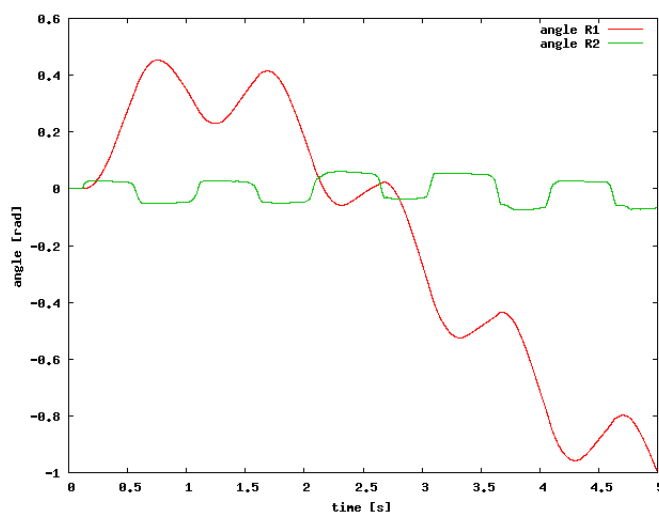


図 3.25: 二関節同時駆動機構に sin 波形を入力した際の応答

ノミナルイナーシャを J_{n1}, J_{n2} とし、トルク定数のノミナル値を kt_n とする。モータ 3 を外した場合は、単関節駆動機構のみとなって従来型のアームと同一である。この時の結果を図 3.27.A に示す。また、図 3.27.B にモータ 2 を外した際の結果を示す。この時は R1 をモータ 1 が、R2 をモータ 3 が駆動し二関節同時駆動機構による R1 側のトルクはモータ 1 が相殺する。図 3.27.C にはモータ 1 を外した際の挙動を示す。この時 R1 をモータ 3 が、R2 をモータ 2 が駆動し二関節同時駆動機構による R2 側のトルクはモータ 2 が相殺する。まず、これらの実験の結果二関節同時駆動機構が正しく働いて両側の関節にトルクを発揮できていることが確認できた。応答の面では、モータ 3 を外した物を基準として考えると、モータ 2 を外した場合にはほとんど同等であるが、モータ 1 を外した際には応答が振動的になってしまっている。これは、R2 側からに比べて R1 側から見た際のイナーシャが大きいため、二関節同時駆動機構によって過大な外乱が R2 側に入力されているためと考えられる。また、二関節同時駆動機構が動作するためには十分なベルトのテンションが必要なため、モータ 2 の動作によってベルトのテンションが緩む方向に回転してしまうと、うまくトルクを伝達できないという問題点も考えられる。この点は 4.1 節にて解決をはかる。

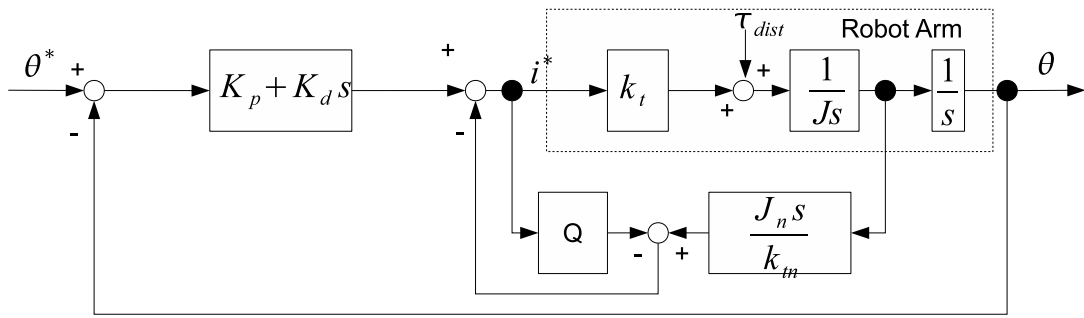
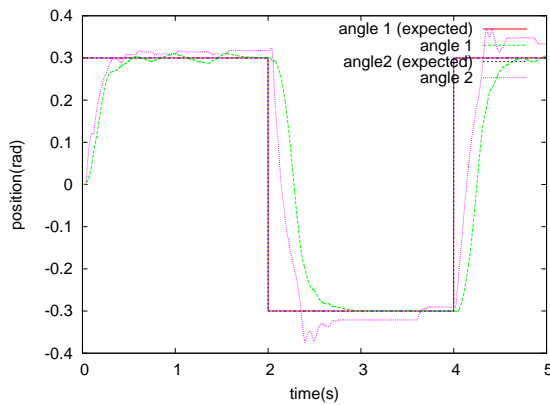


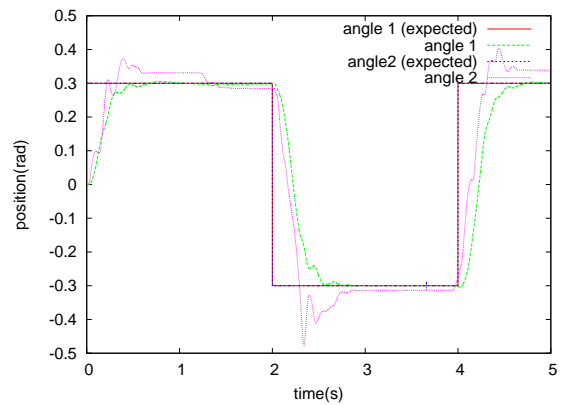
図 3.26: 冗長性の検証実験に用いた制御ブロック図

表 3.7: 冗長性の検証実験に用いた制御パラメタ

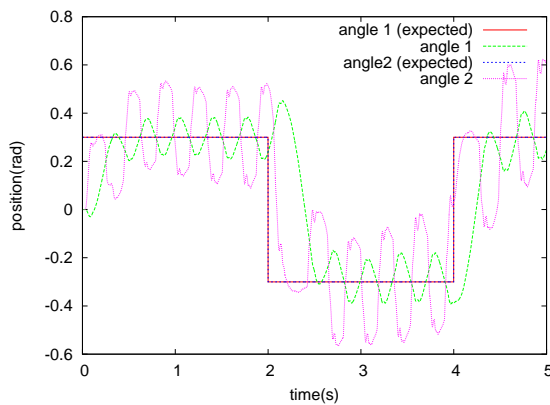
K_{p1}	15.3	K_{d1}	2.45
K_{p2}	2.29	K_{d2}	0.367
J_{n1}	0.02kg·m ²	J_{n2}	0.003kg·m ²
kt_n	0.20 Nm/A		



A. モータ 3 を外したケース



B. モータ 2 を外したケース



C. モータ 1 を外したケース

図 3.27: 冗長性の検証のための駆動実験

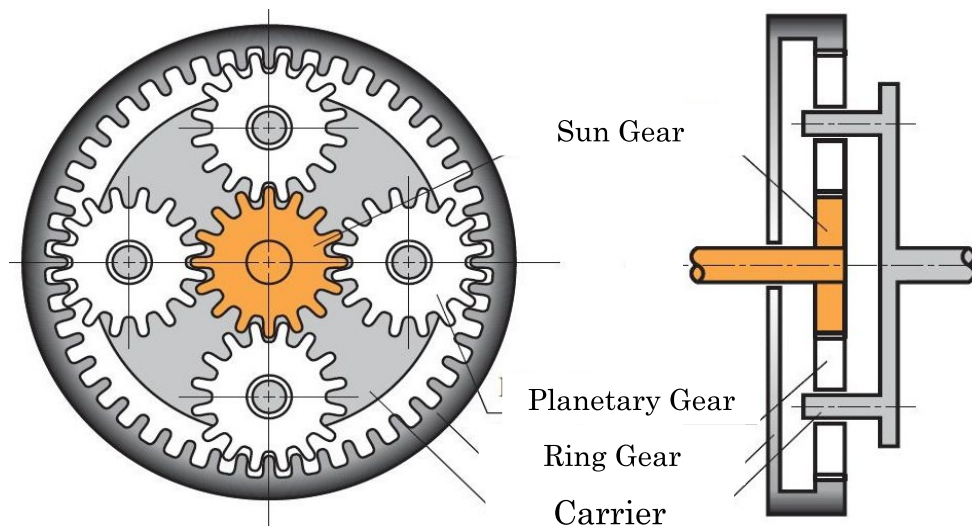


図 3.28: 遊星歯車機構

3.3.4 実験のまとめ

実験によって、二関節同時駆動機構が静的な条件、動的な条件においてともに目論見通り駆動することが確認できた。静的な条件においては、手先での出力可能な領域を二関節同時駆動機構を持つ生物型アーム、これを持たない従来型アームの双方について確認し、ほぼ理論通りの出力が得られていることを確認した。また、動的な条件における実験として、関節 R2 を固定した状態で、二関節同時駆動機構に sin 波形の電流指令のみを与え、関節 R1 を駆動できることを確認した。この実験により、劣駆動システムではいことを明らかにした。また、3つのうちのいずれの2つのモータでも駆動できることを確認し、生物のような冗長性を持つことを確認している。

3.4 遊星歯車機構による二関節同時駆動機構を持つロボットアーム

堀研究室の二号機として遊星歯車機構による3対6筋の模擬を行なうロボットアームが提案されている [51]。遊星歯車の機構を図 3.28 に示す。サンギアを中心に、遊星ギア、リングギアの3つの種類のギアが組み合わされている。遊星ギアの公転に合わせて回転するものをキャリアと呼ぶ。リングギアの回転軸、サンギアの回転軸、キャリアの回転軸にはそれぞれモータが取り付けられ、それぞれ R1 側の一関節筋拮抗対、R2 側の一関節筋拮抗対、二関節筋の拮抗対に相当する。この機構を用いたロボットアームを図 3.29 に示す。水平面内を駆動する2リンクのロボットアームであり、この諸元は表 3.8 に示す。関節 R1, R2 に対してはリングギアとサンギアの軸からタイミングベルトによって回転を伝達する。また、遊星歯車機構はリンク 1 の中程に置かれる。2号機は本論文で主に提案するロボットアーム (1号機) に比べると、ギアによる確実なトルクの伝達を可能とする機構になっている。しかしながら、以下に示すように全てのモータのトルクが両関節に混ざり合って入力されるために、制御によってこれらを分離する必要がある点は欠点である。一部の力を打ち消すことにより、無駄が生じてしまうことがある。

サンギア、キャリア、リングギア、プラネタリギアの回転角を $\theta_s, \theta_c, \theta_r, \theta_p$ とし、リング



図 3.29: 遊星歯車機構を用いたロボットアーム

表 3.8: 遊星歯車機構を用いたロボットアームの諸元

Length of L1	340 mm
Length of L2	300 mm
Digital IO Board	Interface PCI-2130CM
AD/DA Board	Interface PCI-3523A
hline Counter Board	Interface PCI-6205C
Motors	MAXON RE-30
Motor Driver	Zuco MRT07-0004
Encoders	MAXON MR Type L

ギアとサンギアのギア比を ρ とすると、式 (3.9) のような拘束条件が存在する。

$$\begin{aligned}\theta_s - \frac{\rho-1}{2\rho}\theta_p - \frac{\rho+1}{2\rho}\theta_c &= 0 \\ \theta_s + \frac{\rho-1}{2}\theta_p - \frac{\rho+1}{2}\theta_c &= 0\end{aligned}\quad (3.9)$$

ここで、ラグランジアン L_{ag} は式 (3.10) のように置かれる。ここで、 J_r, J_s, J_p, J_c はそれぞれリングギア、サンギア、遊星ギア、キャリアの自転イナーシャ、 J_o はプラネタリギアの公転イナーシャである。

$$L_{ag} = \frac{1}{2}J_r\dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2}J_s\dot{\theta}_s^2 + \frac{1}{2}J_c\dot{\theta}_c^2 + \frac{1}{2}J_p\dot{\theta}_p^2 + \frac{1}{2}J_o\dot{\theta}_c^2 + \tau_r\theta_r + \tau_s\theta_s + \tau_c\theta_c \quad (3.10)$$

ラグランジュの未定乗数法より、サンギアおよびリングギアまわりの運動方程式は式 (3.11) のように表される。

$$\begin{pmatrix} J_r\ddot{\theta}_r \\ J_s\ddot{\theta}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_s \end{pmatrix} + \mathbf{A}_{pln}^{-1}\mathbf{S}_{pln} \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_c \\ \tau_s \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

ただし、

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_{pln} &= \begin{pmatrix} \frac{\rho}{\rho+1}\frac{J_c+J_o}{J_r} + \frac{\rho+1}{2\rho} & \frac{1}{\rho+1}\frac{J_c+J_o}{J_s} + \frac{\rho+1}{2} \\ \frac{\rho}{\rho-1}\frac{J_p}{J_r} + \frac{\rho-1}{2\rho} & \frac{1}{\rho-1}\frac{J_p}{J_s} - \frac{\rho-1}{2} \end{pmatrix} \\ \mathbf{S}_{pln} &= \begin{pmatrix} -\frac{\rho}{\rho+1}\frac{J_c+J_o}{J_r} & 1 & -\frac{1}{\rho+1}\frac{J_c+J_o}{J_s} \\ -\frac{\rho}{\rho-1}\frac{J_p}{J_r} & 0 & \frac{1}{\rho-1}\frac{J_p}{J_s} \end{pmatrix}\end{aligned}$$

このように、サンギア、リングギアの回転軸ともに全てのモータのトルクが影響してしまう。よって、外乱オブザーバを用いて直接影響しないはずのモータの影響を取り除く、二関節筋に相当するモータのトルクが等しく加わるように補償するといった試みがなされている。

第4章 生物型ロボットアームの制御手法

4.1 外乱オブザーバに基づく生物型ロボットアームの位置制御手法

4.1.1 二関節同時駆動機構を持つロボットアームへの応用

3.3.3節において、ロボットアームの動作の検証のためにPD制御器と外乱オブザーバを用いた手法に基づいて制御を試みたが、特にモータ1を外した場合においては動作が振動的になってしまった。よって、本節ではより詳細にコントローラを検討し、課題の解決を図る。

PD制御器および外乱オブザーバによる制御則は式(4.1)の通りである。

$$i^{jnt} = K_P(\theta - \theta^*) + K_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}^*) - (1 - Q)\hat{T}^{dist} \quad (4.1)$$

ここで、 $K_p = \text{diag}(K_{p1}, K_{p2})$ は関節 R1、R2 に対する PD 制御器の比例ゲイン、 $K_d = \text{diag}(K_{d1}, K_{d2})$ は微分ゲインである。また、外乱オブザーバのノミナルイナーシャを $J_n = \text{diag}(J_{n1}, J_{n2})$ とし、各モータのトルク定数のノミナル値を kt_n とする。 Q は1次のローパスフィルターでカットオフ周波数を c_{lpf} とする。 T_{dist} を各関節に加わる外乱とする。 \hat{T}^{dist} は外乱オブザーバで推定した外乱である。ここで、 $i_J = \text{diag}(i_{J1}, i_{J2})$ は従来型アームとみなして制御器を組んだ場合の、必要な各関節トルクを出力するための電流指令であるから、式(4.2)を用いてこれを各モータに分配する。

$$i^{msl} = D^{ist} i^{jnt} \quad (4.2)$$

$i^{msl} = \text{diag}(i_1^{msl}, i_2^{msl}, i_3^{msl})$ は各モータへの電流指令である。ここで、分配行列である D^{ist} は例えば式(4.3)で表すことができる。

$$D^{ist} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

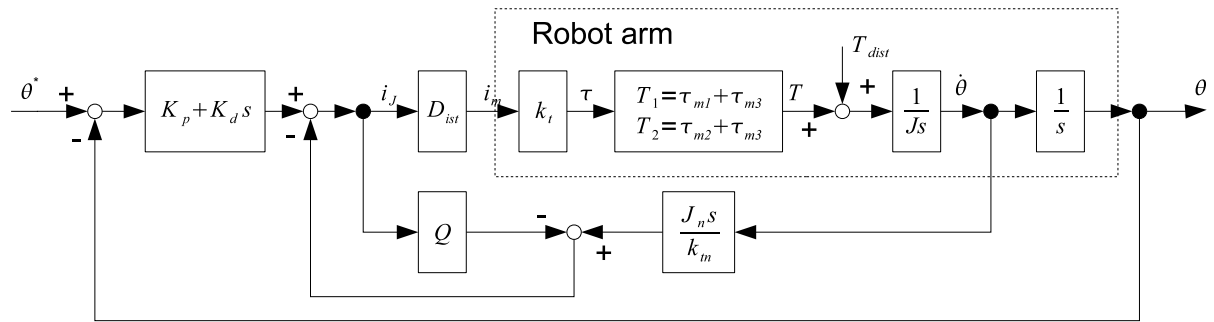


図 4.1: 外乱オブザーバに基づく位置制御手法のブロック図

表 4.1: 外乱オブザーバに基づく位置制御実験に用いた制御パラメータ

K_{p1}	15.3	K_{d1}	2.45
K_{p2}	2.29	K_{d2}	0.367
J_{n1}	0.02kg·m ²	J_{n2}	0.003kg·m ²
kt_n	0.20 Nm/A	c_{lpf}	100.0 Hz

また、いずれか一つのモータを除いた上体においては以下のように表すことができる。

$$D_{12}^{ist} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4.4)$$

$$D_{13}^{ist} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

$$D_{23}^{ist} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

最後に図 4.1 にブロック図を示す。

4.1.2 外乱オブザーバに基づく手法の検証

外乱オブザーバに基づく手法を実験によって確認する。3.3.3 節にて振動的になったモータ 2 とモータ 3 によって駆動するケースに関して、提案する手法を適用して比較する。位置指令として各軸に対し振幅 0.3rad の矩形波を与え、各関節角 $\theta = \text{diag}(\theta_1, \theta_2)$ をこれに追従させる。この時の制御パラメータを表 4.1 に、実験の結果を図 4.2 に示す。トルクの分配を適切に行なうことで、振動を抑えてアームを駆動することができることが分かる。しかしながら、 θ_2 が途中で引き戻されるような動きを見せるなど、二関節同時駆動機構を完全には制御しきれていない部分があり、この点は機器固有の問題もあるものの、今後の改善点となりうる。

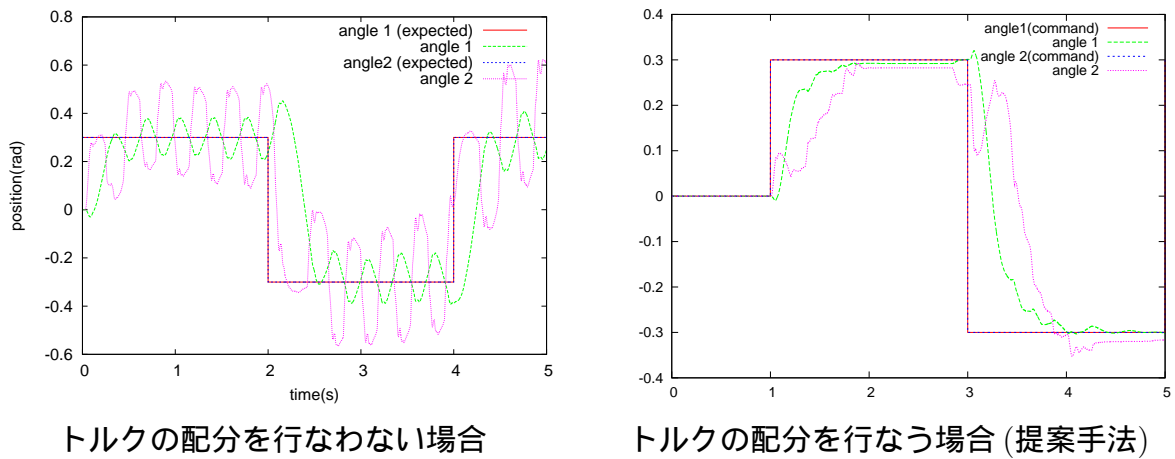


図 4.2: 外乱オブザーバに基づく手法による実験結果

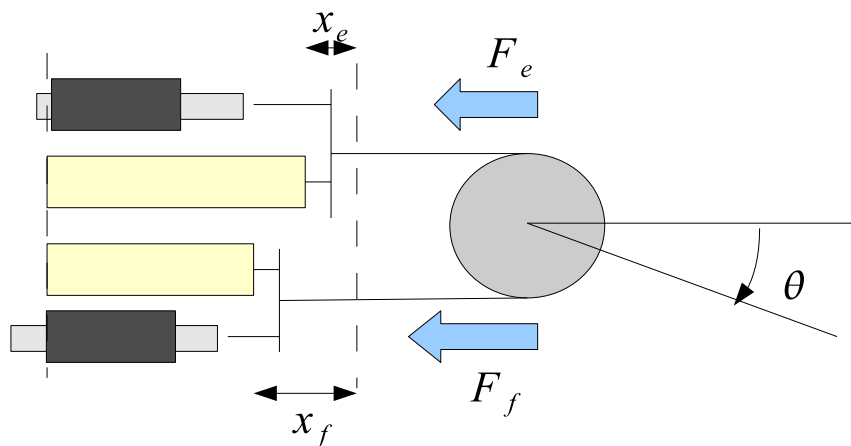


図 4.3: 弾性特性を並列に持つ要素による拮抗駆動のモデル

4.2 筋粘弾性と拮抗対による動特性

4.2.1 拮抗駆動を行なう弾性要素による剛性制御に関する考察

生物の筋骨格構造が持つ特徴のうち、拮抗駆動と非線形粘弾によって剛性制御が可能であると述べたが、ここでは線形の弾性要素あるいは異なった非線形性を持つ弾性要素が拮抗駆動によってどのような振る舞いを示すかを求める。

図 4.3 に示すように、単関節を二つの弾性要素が拮抗駆動する状況を考える。このモデルは弾性要素自身が能動的なアクチュエータとして働く場合を示す。これは、アクチュエータと弾性要素が並列する場合に等しい。式 (4.7)、式 (4.8) に、以下に各弾性要素の特性を式で表す。 x は基準からの弾性要素の変位とする。

$$F^{lmsl} = u - kx \quad (4.7)$$

$$F^{msl} = u - kux \quad (4.8)$$

F^{lmsl} は線形な弾性要素とアクチュエータを並列に繋いだ要素の発生する力である。 F^{msl} は本論文で用いられる筋肉のモデルである。 k はそれぞれ正の定数とする。拮抗駆動を行なう二つの要素を区別するために添字 e および f を用いる。ここで、関節角 θ との間に式

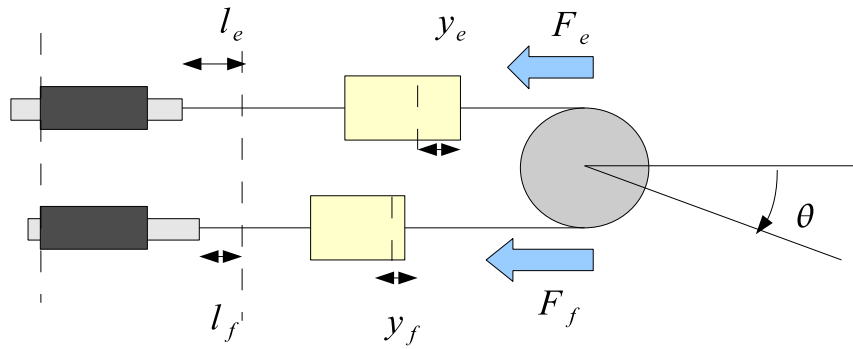


図 4.4: 弾性特性を直列に持つ要素による拮抗駆動のモデル

(4.9) のような関係が成り立つとする。\$r\$ は関節の半径とする。

$$r\theta = x_f = -x_e \quad (4.9)$$

すると、式 (4.7)、式 (4.8) から各関節トルクは式 (4.10)、式 (4.11) と置くことができる。

$$\begin{aligned} T^{lmsl} &= r(F_f^l - F_e^l) = r(u_f - kx_f - (u_e - kx_e)) \\ &= r(u_f - u_e - 2rk\theta) \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} T^{msl} &= r(F_f^{msl} - F_e^e) = r(u_f - ku_f x_f - (u_e + ku_e x_e)) \\ &= r(u_f - u_e - kr(u_e + u_f)\theta) \end{aligned} \quad (4.11)$$

これらを \$\theta\$ によって偏微分すると、式 (4.12)、式 (4.13) となり、線形な弾性要素を持つ場合は剛性の調整を行なうことはできず、筋では収縮力の和によって調整が可能である。

$$\frac{\partial}{\partial \theta} T^{lmsl} = -2r^2 k \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} T^{msl} = -2r^2 (u_f + u_e) k \quad (4.13)$$

$$(4.14)$$

次に図 4.4 に示すように、弾性要素は受動的に働く場合を考える。アクチュエータと弾性要素は直列に接続される。\$F^{lsr}\$ は線形な弾性要素を直列に接続したケース、\$F^{esr}\$ は SAT[56] のような伸長距離に対して指数関数的な性質を持つアクチュエータのケースである。これを式 (4.15) および式 (4.16) に示す。ここで、\$y\$ は各弾性要素の伸長量である。

$$F^{lsr} = ky \quad (4.15)$$

$$F^{esr} = ae^{by} + c \quad (4.16)$$

\$k, a, b, c\$ はそれぞれ弾性要素の特性を表わす正の定数である。拮抗駆動を行なう二つの要素を区別するために添字 \$e\$ および \$f\$ を用いる。ここで、関節角 \$\theta\$ との間に式 (4.17) のような関係が成り立つとする。\$r\$ は関節の半径とする。

$$r\theta = y_e + l_e = -(y_f + l_f) \quad (4.17)$$

関節トルクは式 (4.18)、式 (4.19) と求めることができる。

$$\begin{aligned} T^{lsr} &= r(F_f^{lsr} - F_e^{lsr}) = r(k(-r\theta - l_f) - k(r\theta - l_e)) \\ &= rk(-2r\theta - l_f + l_e) \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} T^{esr} &= r(F_f^{esr} - F_e^{esr}) = r(ae^{b(-r\theta - l_f)} - ae^{b(r\theta - l_f)}) \\ &= ra(e^{b(-r\theta - l_f)} - ae^{b(r\theta - l_f)}) \end{aligned} \quad (4.19)$$

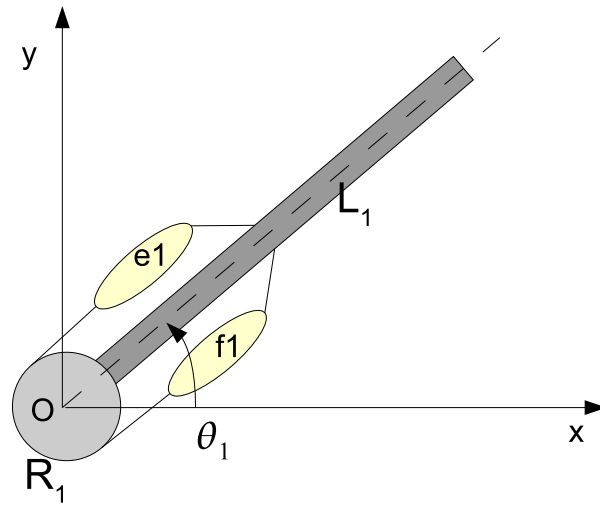


図 4.5: 拮抗対による単関節の駆動モデル

これらを θ によって偏微分すると、式 (4.20)、式 (4.21) となり、線形な弾性要素を持つ場合は剛性の調整を行なうことはできない。一方指数関数的な非線形弾性を持つ場合は、弾性要素の伸長の程度を式に含む。同一の θ であっても l_f, l_e の値が変えることができるため、弾性要素の伸長具合を変え、剛性の調整が可能である。

$$\frac{\partial}{\partial \theta} T^{lsr} = -2r^2k \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} T^{esr} = -abr^2(e^{y_f} - e^{y_e}) \quad (4.21)$$

4.2.2 拮抗対による単関節の動特性に関する考察

図 4.5 に拮抗筋が単関節を駆動する様子を図示する。これは、図 2.2 から、 R_1 を駆動する一関節筋の拮抗対を抜き出してきたものである。この時の関節角を θ_1 とし、関節の半径を r_1 とする。ここで、屈筋 e_1 および伸筋 f_1 の発生する力は式 (4.22) と定義される。

$$\begin{aligned} F_{f_1}^{msl} &= u_{f_1} - ku_{f_1}r_1\theta_1 - bu_{f_1}r_1\dot{\theta}_1 \\ F_{e_1}^{msl} &= u_{e_1} - ku_{e_1}r_1\theta_1 - bu_{e_1}r_1\dot{\theta}_1 \end{aligned}$$

ここで、収縮力の和と差を式 (4.22) のように定義する。

$$S_1 = u_{f_1} + u_{e_1}, D_1 = u_{f_1} - u_{e_1} \quad (4.22)$$

ただし u_{f_1}, u_{e_1} は正の値であり、

$$|D_1| \leq |S_1|$$

とする。すると、関節トルク T_1^{jnt} は式 (4.23) で表すことができる。

$$T_1^{jnt} = r_1(F_{f_1}^{msl} - F_{e_1}^{msl}) \quad (4.23)$$

よって単関節まわりの運動方程式を式 (4.24) と求めることができる。ここで J_1 は関節 R_1 まわりの慣性モーメントである。

$$J_1\ddot{\theta}_1 = r_1(D_1 - kr_1\theta_1S_1 - br_1\dot{\theta}_1S_1) \quad (4.24)$$

θ_1 を時間の関数とし、一定の収縮力が入力される仮定で式 (4.24) を解くと、その解は式 (4.25) と得ることができる。

$$\theta_1(t) = Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t} + \frac{D_1}{kr_1 S_1} \quad (4.25)$$

ただし、

$$A = \frac{\theta_{1.0} - \frac{\dot{\theta}_{1.0}}{\beta} - \frac{D_1}{kr_1 S_1}}{1 - \frac{\alpha}{\beta}}, \alpha = \frac{-br_1 S_1 + \sqrt{(b^2 r_1^2 S_1 - 4J_1 k) S_1}}{2J_1}$$

$$B = \frac{\theta_{1.0} - \frac{\dot{\theta}_{1.0}}{\alpha} - \frac{D_1}{kr_1 S_1}}{1 - \frac{\beta}{\alpha}}, \beta = \frac{-br_1 S_1 - \sqrt{(b^2 r_1^2 S_1 - 4J_1 k) S_1}}{2J_1}$$

である。ここで、 $\theta_{1.0}, \dot{\theta}_{1.0}$ はそれぞれ $\theta_1, \dot{\theta}_1$ の初期値 ($t = 0$) である。式 (4.25) で示される、釣り合いの位置 $\theta_{1.\infty}$ を式 (4.26) に示す。

$$\theta_{1.\infty} = \frac{D_1}{kr_1 S_1} \quad (4.26)$$

$t \rightarrow \infty$ とすれば、振動的 ($b = 0$) にならない限り釣り合い位置に収束する。また、 $-1 \leq \frac{D}{S} \leq 1$ であるから、この拮抗対が安定的に動作できる条件は、式 (4.27) で表される。

$$-\frac{1}{kr_1} \leq \theta_1 \leq \frac{1}{kr_1} \quad (4.27)$$

よって可動範囲は k によって定まる。パラメータをいくつかに変えた時の挙動の変化を図 4.6 に示す。ここでは、 $k = 3.0$ とし、 $S : D = 2 : 1$ としている。

4.2.3 拮抗対による2リンクアームの釣り合い特性の考察

図 2.2 のように、各関節を動かさず一関節筋の拮抗対、各関節をまたぐ二関節筋の拮抗対の3対6筋を含むアームにおける釣り合いに関する特性を考える。まず、単関節の場合と同様に、式 (4.28) 各拮抗対の収縮力の和と差を定義する。

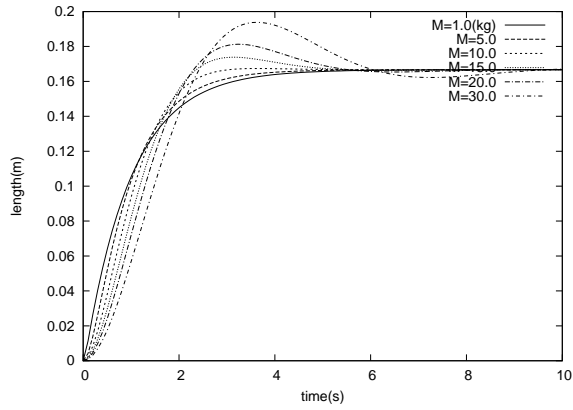
$$\begin{aligned} S_1 &= u_{f1} + u_{e1}, D_1 = u_{f1} - u_{e1} \\ S_2 &= u_{f2} + u_{e2}, D_2 = u_{f2} - u_{e2} \\ S_3 &= u_{f3} + u_{e3}, D_3 = u_{f3} - u_{e3} \end{aligned} \quad (4.28)$$

ただし、

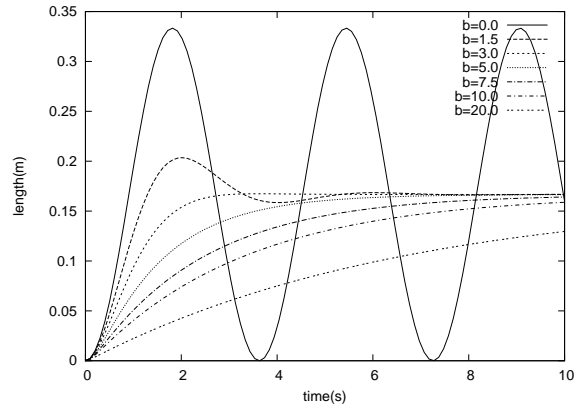
$$|S_1| > |D_1|, |S_2| > |D_2|, |S_3| > |D_3|$$

式 (4.28) を用いて関節トルク T_1^{jnt}, T_2^{jnt} は、式 (4.29) と表すことができる。

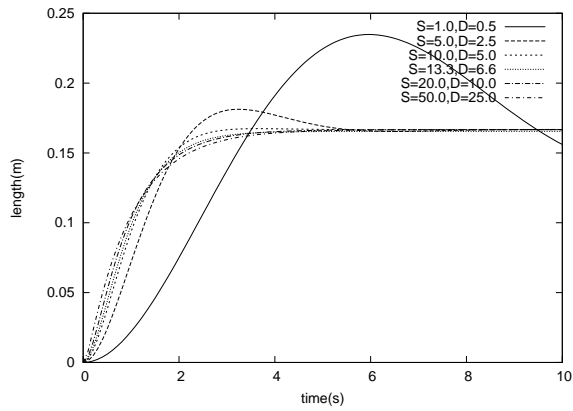
$$\begin{aligned} T_1^{jnt} &= r_1 D_1 - kr_1^2 \theta_1 S_1 - br_1^2 \dot{\theta}_1 S_1 \\ &\quad + r_1 D_3 - k(r_1 \theta_1 + r_2 \theta_2) r_1 S_3 - b(r_1 \dot{\theta}_1 + r_2 \dot{\theta}_2) r_1 S_3 \\ T_2^{jnt} &= r_2 D_2 - kr_2^2 \theta_2 S_2 - br_2^2 \dot{\theta}_2 S_2 \\ &\quad + r_2 D_3 - k(r_1 \theta_1 + r_2 \theta_2) r_2 S_3 - b(r_1 \dot{\theta}_1 + r_2 \dot{\theta}_2) r_2 S_3 \end{aligned} \quad (4.29)$$



(a) 質量を変化させた場合



(b) 粘性を変化させた場合



(c) 収縮力の大きさを変えた場合

図 4.6: 拮抗対による物体の駆動特性

式(4.29)より、 $T_1 = T_2 = 0$ となるような釣り合い位置 $\theta_{1.\infty}, \theta_{2.\infty}$ を求めると式(4.30)を得る。ただし、 $r = r_1 = r_2$ とする。

$$\begin{aligned}\theta_{1.\infty} &= \frac{1}{kr} \frac{(D_1 + D_3)S_2 + (D_1 - D_2)S_3}{S_1S_2 + S_2S_3 + S_3S_1} \\ \theta_{2.\infty} &= \frac{1}{kr} \frac{(D_2 + D_3)S_1 - (D_1 - D_2)S_3}{S_1S_2 + S_2S_3 + S_3S_1}\end{aligned}\quad (4.30)$$

次に各筋にある収縮力を与えた場合にロボットアームの様々な姿勢においてどのような方向に力を発揮するかを示す。図4.7に示すように(a)は二関節筋を持たない場合のベクトル線図である。矢印の始点の座標位置にアームの先端がある場合に生じる力を、矢印の長さを力の大きさ、矢印の方向を力の方向としてプロットしている。二関節筋を持たない場合は式(4.30)において、 $S_3 = D_3 = 0$ となる場合である。この場合でも釣り合い位置を持ち、その位置は、式(4.31)となる。

$$\begin{aligned}\theta_{1.\infty} &= \frac{1}{kr} \frac{D_1}{S_1} \\ \theta_{2.\infty} &= \frac{1}{kr} \frac{D_2}{S_2}\end{aligned}\quad (4.31)$$

また図4.7(b)は二関節筋を持つ場合のベクトル線図である。式(4.30)より求めた釣り合いの位置をアームを図示して示した。さらに、(c)は二関節筋のみの場合のベクトル線図であり、この場合は釣り合いの位置は一点に定まらない。

$$\theta_{1.\infty} + \theta_{2.\infty} = \frac{1}{kr} \frac{D_3}{S_3}\quad (4.32)$$

このように $\theta_1 + \theta_2$ を一定にするので、図では式(4.32)の表す軌跡へとベクトルが向かっていることが分かる。

4.3 拮抗対に基づいた制御器による生物型ロボットアームの制御

4.3.1 拮抗対に基づいた単関節の制御器

式(4.25)で明らかになった特性を利用して、拮抗対の各収縮力の大きさを調整することで、単関節の角度制御を行なう。目標角度を θ_1^* とすると、釣り合い位置の条件である式(4.26)から、式(4.33)のように拮抗筋の和と差 S_1, D_1 を求めることができる。

$$\begin{aligned}S_1 &= P_1 \\ D_1 &= kr_1\theta_1^*\end{aligned}\quad (4.33)$$

ここで、 P_1 は応答の振舞いを定める指令値である。図4.8に拮抗対による単関節の制御器をブロック図で示す。ただし \otimes は、入力値を掛け合わせて出力する記号である。この制御器による関節トルク T_1^{jnt} は θ_1^*, P_1 を用いて式(4.34)のように表すことができる。

$$T_1^{jnt} = kr_1^2 P_1 \theta_1^* - kr_1^2 P_1 \theta_1 - kr_1^2 P_1 \dot{\theta}_1\quad (4.34)$$

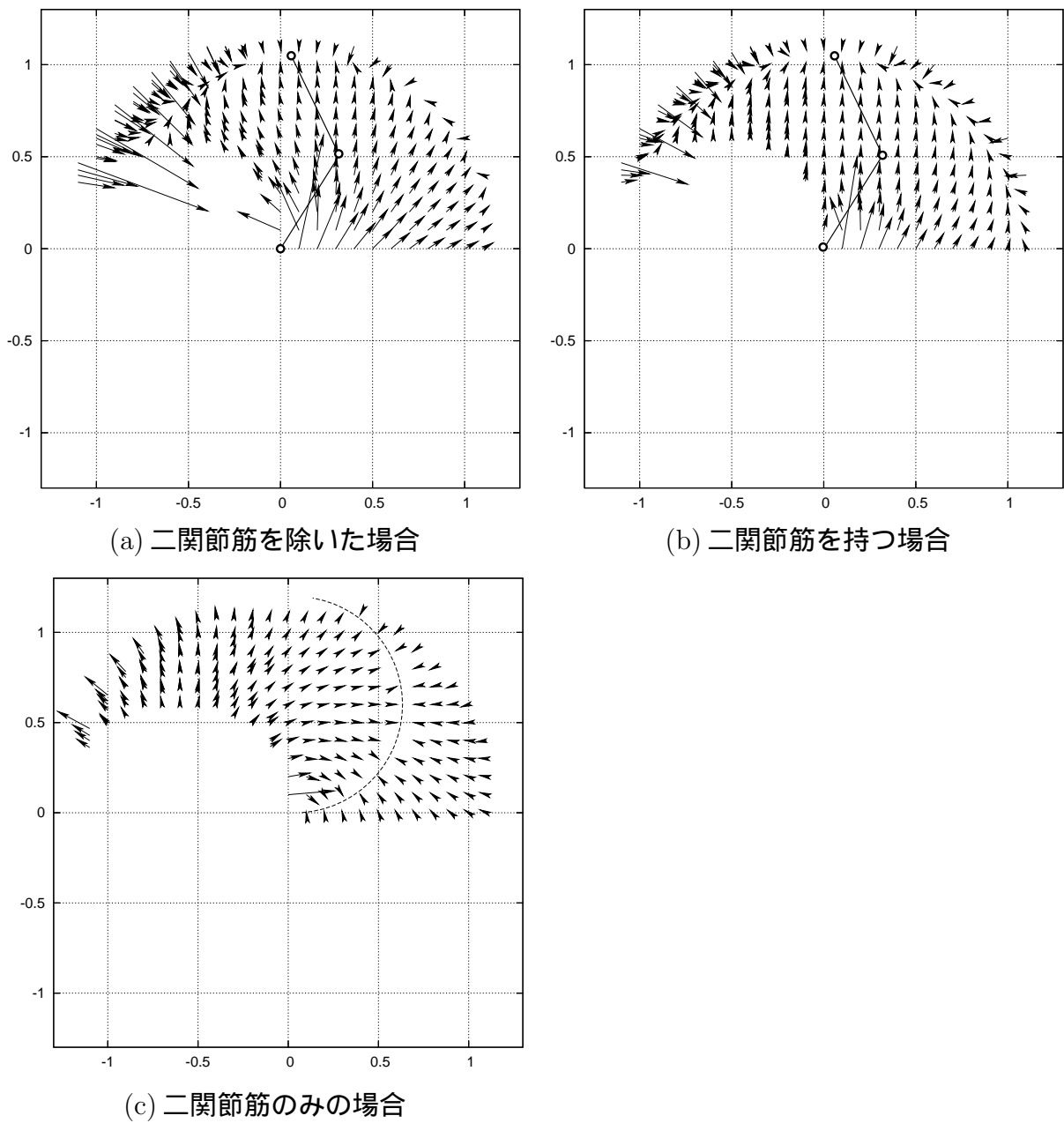


図 4.7: 釣り合い位置と、手先位置を変えた場合の手先出力の変化

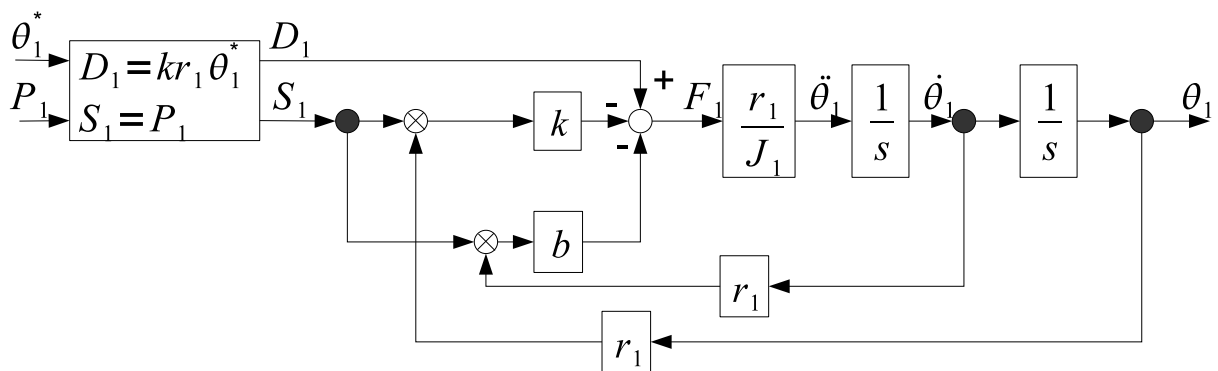


図 4.8: 拮抗筋による単関節の制御器

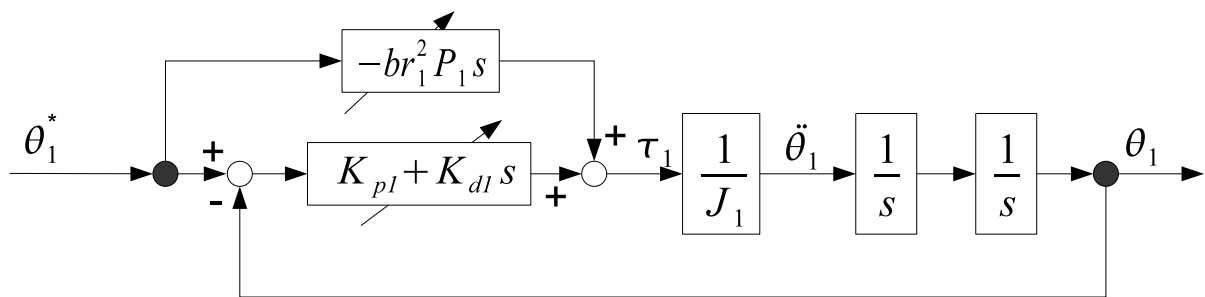


図 4.9: 拮抗筋による単関節の制御器の PD 制御器を含んだ等価なブロック図

表 4.2: 拮抗対による単関節の駆動シミュレーションに用いたパラメータ

l_1	0.165 m	l_{g1}	0.0825 m
m_1	0.27 kg	I_1	0.002·m ²
r_1	0.02m		
k	3.0 N/m	b	1.0 Ns/m

ここから PD 制御器を用いた等価的な回路に変換を試みる。まず、式 (4.35) のように K_{p1} , K_{d1} と PD 制御器の比例ゲイン、微分ゲインを P_1 を用いて表す。

$$\begin{aligned} K_{p1} &= kr_1^2 P_1 \\ K_{d1} &= br_1^2 P_1 \end{aligned} \quad (4.35)$$

式 (4.34) は式 (4.36) のように変形することが可能であり、これは PD 制御器を含んだ等価的な回路である。

$$\begin{aligned} T_1^{jnt} &= kr_1^2 P_1 (\theta_1^* - \theta_1) + br_1^2 P_1 (\dot{\theta}_1^* - \dot{\theta}_1) - br_1^2 P_1 \dot{\theta}_1^* \\ &= K_{p1} (\theta_1^* - \theta_1) + K_{d1} (\dot{\theta}_1^* - \dot{\theta}_1) - br_1^2 P_1 \dot{\theta}_1^* \end{aligned} \quad (4.36)$$

これを図 4.9 にブロック図として示す。

P_1 の値に関しては、式 (4.25) から臨界制動となる付近 (式 (4.37)) を目安に定めることができる。

$$P_1 = \frac{4.0k J_1}{b^2 r_1^2} \quad (4.37)$$

4.3.2 単関節の制御の検証

単関節の制御に関してシミュレーションによる検証を行なう。シミュレーションは 2.3.2 節に従って運動方程式を導出して行なう。また、この時のアームのパラメータは表 3.5 に基づき、表 4.2 に従う。ロボットアームの第 2 リンクを便宜上第 1 リンクとして扱う。シミュレーションでは振幅 0.3rad の矩形波を指令値 θ_1^* として与える。

図 4.10 では、 P_1 を変化させ、結果的に収縮力の和を変化させて応答がどのように変化するかを確認する。表 4.2 の値を用いて式 (4.37) より $P_1 = 90$ 程度が望ましい値ということが計算された。ここでは P_1 を 10, 20, 40, 60, 90, 150 と変化させる。この結果、 $P_1 = 20$ か

ら $P_1 = 40$ 程度とした際に最もすみやかに追従可能であることが分かった。 P_1 の値がそれよりも小さな場合は非常に振動的な動きになってしまう。また、大きくした場合には余り変化がないが徐々に追従が遅くなる。

一方、図 4.11 には $P_1 = 40$ としたケース 1、 $P_1 = 90$ としたケース 2 に対して、手先に物体を把持させその質量を大きくした際にどのように応答が変化するかを示す。把持物体の質量を m_{load} として、0kg, 0.15kg, 0.3kg と変化させる。ケース 1 では無負荷の状態では素早い応答が可能であるが、把持物体の質量を大きくすると応答にオーバーシュートが生じてしまう。ケース 2 では、0.3kg まで重量を増加させても、うまく追従できていることが分かり、ある程度の余裕を見こんだ設定となっていることが分かる。よって、負荷の変動に応じて適切に P_1 の値を選んでやる必要がある。

4.3.3 拮抗対に基いた 2 リンクアームの制御器

ここで、前述の拮抗対に基いた制御器を、2 リンクのアームに拡張する。まず、二関節筋を持たない場合を考える。収縮力の和と差を用いて、各関節トルク T^{jnt} は式 (4.38) と表すことができる。

$$\begin{pmatrix} T_1^{jnt} \\ T_2^{jnt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1(D_1 - kr_1\theta_1S_1 - br_1\theta_1S_1) \\ r_2(D_2 - kr_2\theta_2S_2 - br_2\theta_2S_2) \end{pmatrix} \quad (4.38)$$

ここで、各関節を θ_1^*, θ_2^* に制御することを考えると、同様に式 (4.39) のように S_1, S_2, D_1, D_2 は定めることができる。ここで、 P_1, P_2 はシステムの振る舞いを定める。

$$\begin{aligned} S_1 &= P_1, D_1 = kr_1\theta_1^*P_1 \\ S_2 &= P_2, D_2 = kr_2\theta_2^*P_2 \end{aligned} \quad (4.39)$$

一方、二関節筋の拮抗対が加わる際には関節トルクは式 (4.29) のように表すことができる。式 (4.39) に加えて、二関節筋の拮抗対の収縮力の和と差 S_3, D_3 を定めることができる。これを式 (4.40) に示す。

$$S_3 = P_3, D_3 = k(r_1\theta_1^* + r_2\theta_2^*)P_3 \quad (4.40)$$

このように二関節筋の拮抗対は両関節角の和を制御する特性を持つ。

4.3.4 2 リンクアームの拮抗対による制御の検証

図 4.12 において、2 リンクアームの拮抗対による制御の検証を行なう。シミュレーションは 2.3.2 節に従って運動方程式を導出して行なう。また、この時のアームのパラメータは表 3.5 に基づき、表 4.3 に従う。シミュレーションでは振幅 0.3rad の矩形波を指令値 θ_1^* として与える。ここで、 P_1, P_2, P_3 の値であるが、式 (4.37) を参考に、ここでは以下のように定めた。ただし $r = r_1 = r_2$ である。

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{4.0kJ_1}{b^2r^2} \\ P_2 &= \frac{4.0kJ_2}{b^2r^2} \\ P_3 &= \frac{4.0k(J_1 + J_2)}{b^2r^2} \end{aligned}$$

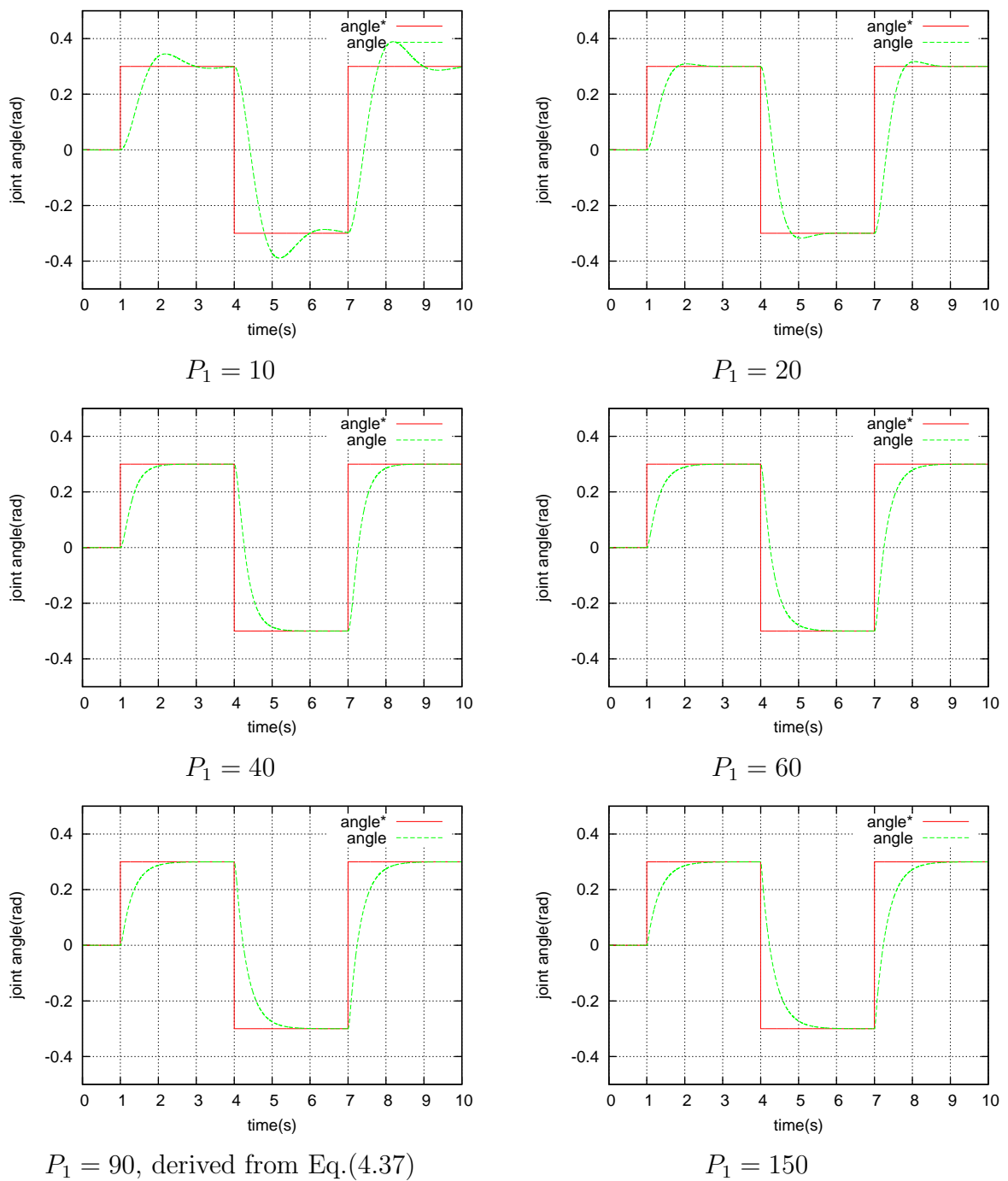


図 4.10: 収縮力の和を変化させた際の単関節の拮抗筋による駆動に関するシミュレーション結果

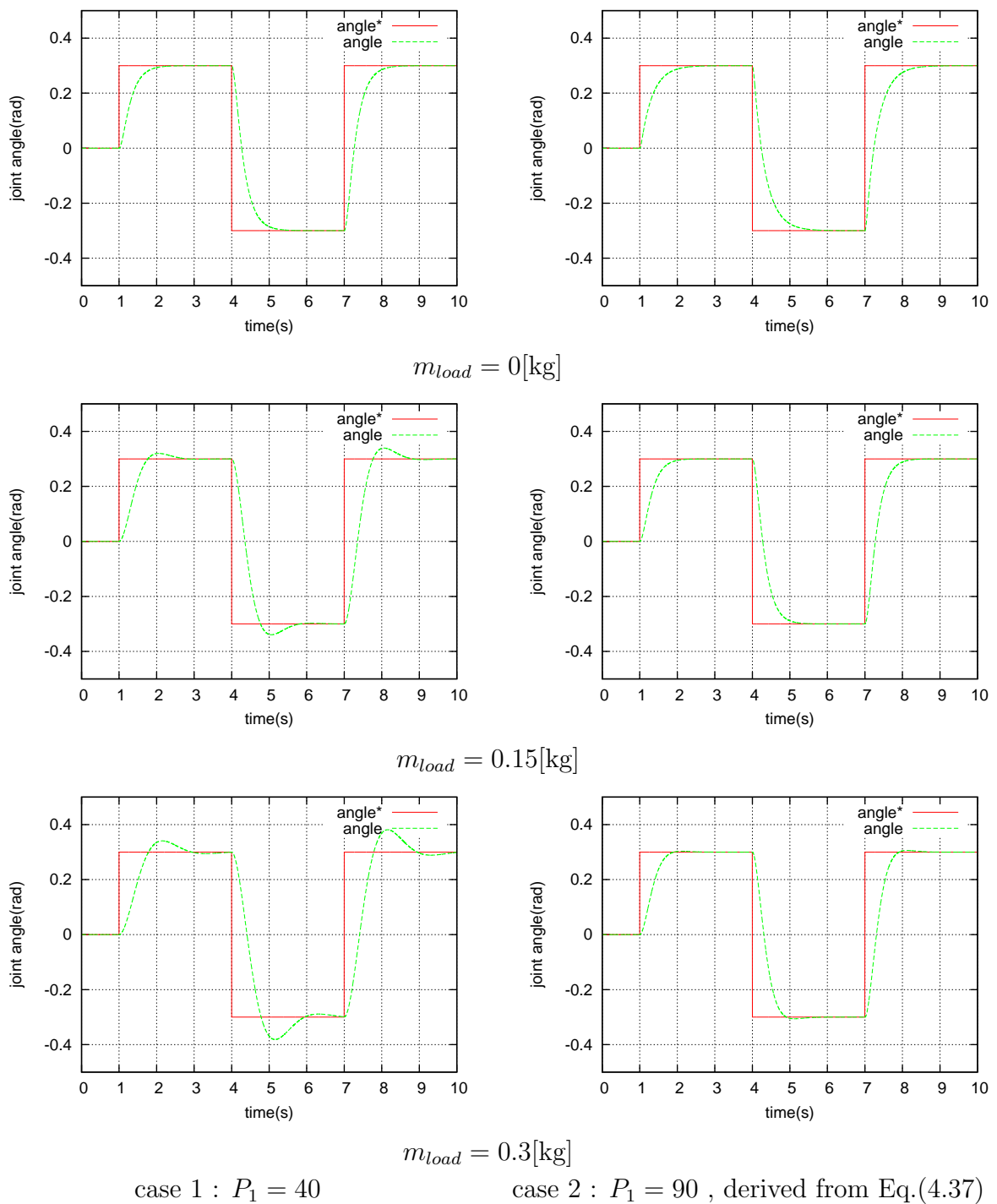


図 4.11: 質量を変化させた際の単関節の拮抗筋による駆動に関するシミュレーション結果

表 4.3: 拮抗対による 2 リンクアームの駆動シミュレーションに用いたパラメタ

l_1	0.165 m	l_{g1}	0.0825 m
l_2	0.165 m	l_{g2}	0.0825 m
m_1	0.72 kg	I_1	0.008·m ²
m_2	0.27 kg	I_2	0.002·m ²
r_1	0.02m	r_2	0.02m
k	3.0 N/m	b	1.0 Ns/m

この結果、二関節筋の有無のいずれの場合でも目標位置に追従させることができたが、二関節筋の有無によってその振る舞いには差異が認められる。二関節筋を持たない場合には、各関節は独立に制御される。また、比較的大きなオーバーシュートが生じていることが分かる。把持する負荷の増大によっては特に θ_2 の応答性に影響がでていることが分かる。一方、二関節筋の拮抗対を持つケースにおいては、 θ_2 の応答が特徴的である。 θ_1, θ_2 ともにオーバーシュートは少なくなっているが、途中から θ_2 の運動が妨げられている。これは、二関節筋の拮抗対による粘性項が働き (これは、PD 制御器を含んだ等価回路においては微分制御にあたる)、相対的に慣性モーメントの小さい θ_2 によく働いたためと考えられる。結果的に手先の動揺を抑えることができています。

4.4 筋粘弾性に基くフィードフォワード軌道追従アルゴリズムの提案

4.4.1 フィードフォワード軌道追従アルゴリズム

任意の経路に対し、それを追従するための、新しい制御アルゴリズムを提案する。これは拮抗対の粘弾性による釣り合いをうまく生かし、特に二関節筋を含んだアームを上手く動作させることのできる手法である。任意の経路が与えられた際に、これを適当な区間に分割し、それぞれの中間点に対して式 (4.30) で定義される釣り合い条件となるように各筋の収縮力を設定する。十分に中間点に近づくように、収縮力を与える時間を定め、次々に中間点間を移動していく。この概念図を図 4.13 に示す。

本アルゴリズムでは 3 対 6 筋を持つ 2 リンクのアームに関する平面内の運動を考える。さて、ここで手先が辿るべき任意の点列 $X^{ep}_m = [x_m, y_m]^T$ が与えられた場合、 $\theta_{n,m}^*$ と各関節が取るべき値を式 (4.41) で計算する。ここで添字の m は点列の m 番目を意味する。 n は拮抗対のインデックスである。

$$\begin{aligned}
 \theta_{1,m}^* &= \arctan(y_m, x_m) - \arctan(\sqrt{x_m^2 + y_m^2 - z_m^2}, z_m) \\
 \theta_{2,m}^* &= \arctan(y_m - l_1 \sin(\theta_{1,m}^*), x_m - l_1 \cos(\theta_{1,m}^*)) - \theta_{1,m}^* \\
 \theta_{3,m}^* &= \theta_{1,m}^* + \theta_{2,m}^*
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

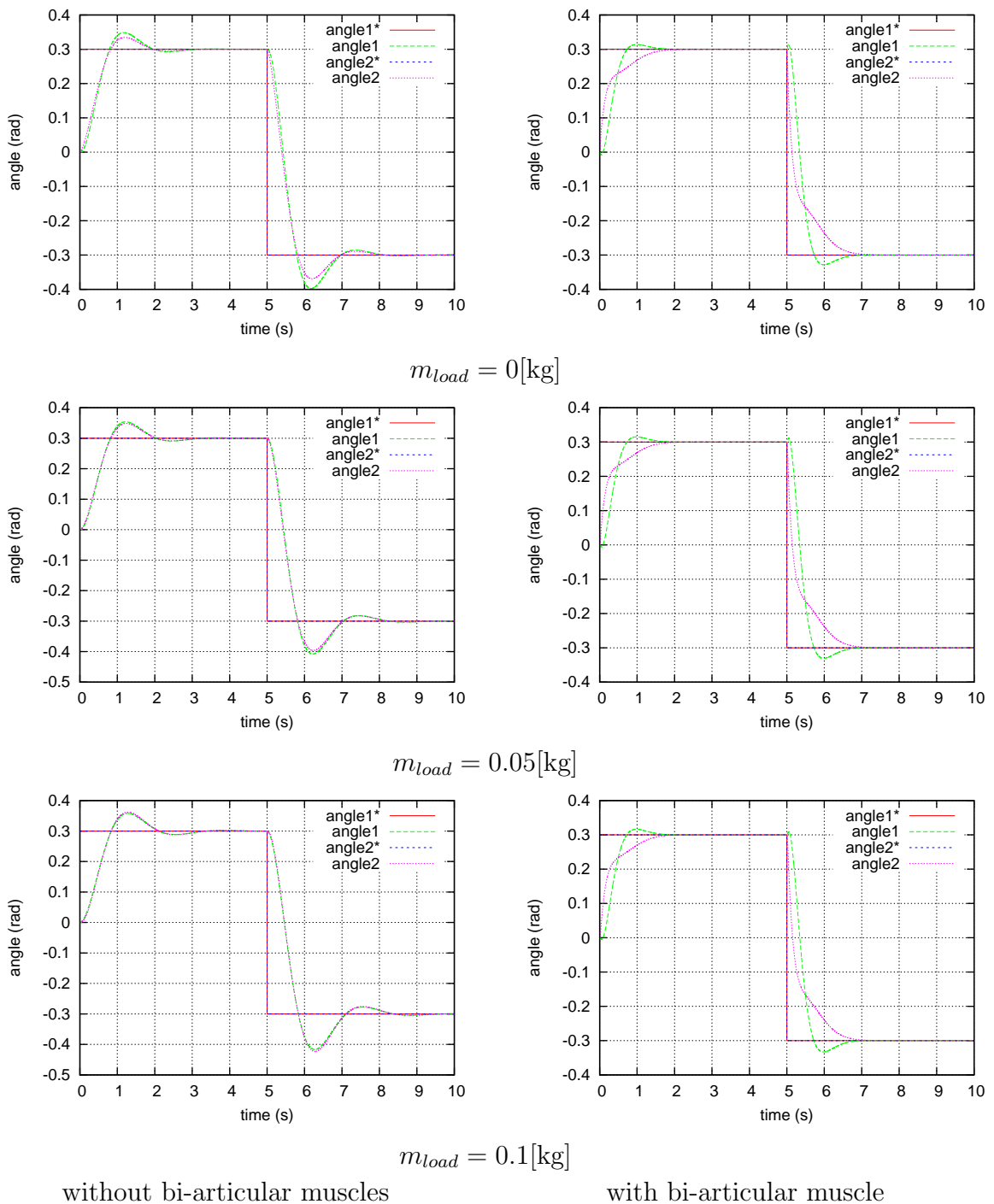


図 4.12: 把持物体の質量を変化させた際の 2 リンクアームの拮抗対による駆動に関するシミュレーション結果

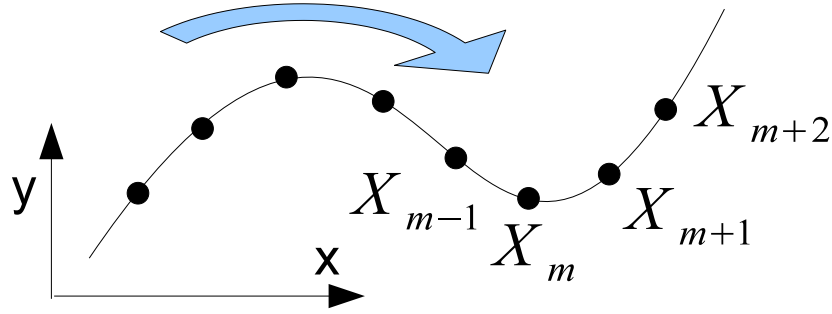


図 4.13: フィードフォワード軌道追従アルゴリズムの概念図

ここで

$$z_m = \frac{x_m^2 + y_m^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1}$$

式 (4.42) は各拮抗筋とそれぞれの駆動する慣性モーメント J_n で見た場合の運動方程式である。ここで $r = r_1 = r_2$ とする。 $S_{n,m}, D_{n,m}$ は拮抗対 n の m 番目の点列から $m+1$ 番目の点列に向かう区間の収縮力の和、差を示す。

$$J_n \ddot{\theta}_{n,m} = r D_{n,m} - k r^2 \theta_{n,m} S_{n,m} - b r^2 \dot{\theta}_{n,m} S_{n,m} \quad (4.42)$$

式 (4.43) のように、 S_n をシステムが臨界制動となるように定める。

$$S_{n,m} = \frac{4k J_n}{b^2 r^2} \quad (4.43)$$

また、このケースでは各関節は静定時間が過ぎれば一定となる。よって式 (4.44) のように $D_{n,m}$ を釣り合いの位置となるように定めることができる。

$$D_{n,m} = k r S_{n,m} \theta_{n,m+1}^* \quad (4.44)$$

$T_{n,m}$ は各拮抗対に与える時間の長さであるが、これは式 (4.45) のように定めることにする。 α はこの時滑らかさを定める定数である。

$$T_{n,m} = \frac{\alpha J_n}{b r^2 S_{n,m}} \quad (4.45)$$

α が 1 に定められる時、 $T_{n,m}$ はシステムの立ち上がり時間に等しい。もし、中間点が適切に与えられれば、ロボットアームはパスをスムーズに追従することができる。ここまでのアルゴリズムの流れを図 4.14 に示す。さて本手法によって $S_{n,m}, D_{n,m}$ が定められた時、これは式 (4.30) で表されるアーム全体釣り合いの式を満たす。

ここで二関節筋の拮抗対に関しては、 θ_3, J_3 を式 (4.46) のように置くこととする。

$$\begin{aligned} \theta_3 &= \theta_1 + \theta_2 \\ J_3 &= J_1 + J_2 \end{aligned} \quad (4.46)$$

$$(4.47)$$

図 4.14 には本アルゴリズムのフローチャートを示す。

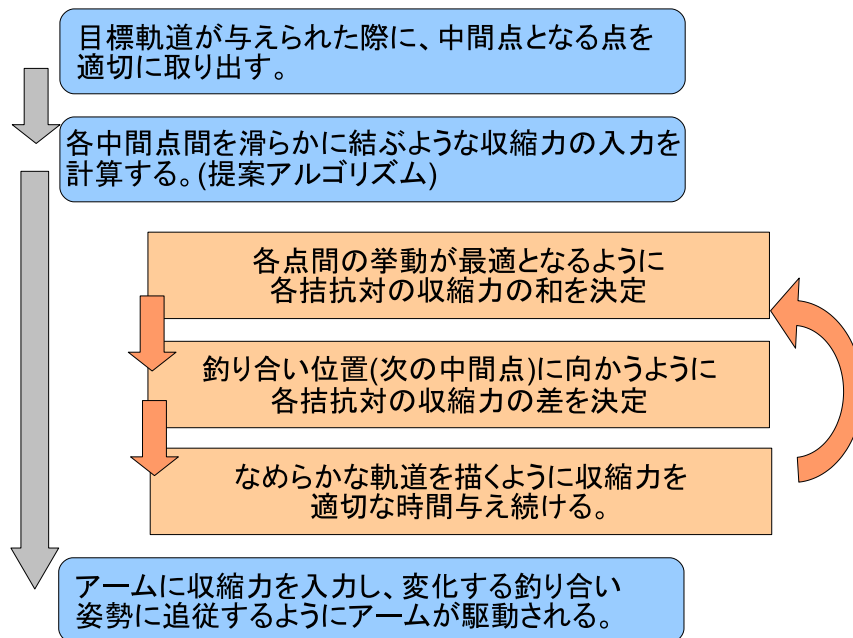


図 4.14: フィードフォワード軌道追従アルゴリズムのフロー図

表 4.4: フィードフォワード軌道追従の検証に用いたパラメータ

l_1	0.6[m]	l_2	0.6[m]
lg_1	0.3[m]	lg_2	0.3[m]
m_1	2.5[kg]	m_2	1.0[kg]
r_1	0.1[m]	r_1	0.1[m]
k	3.3[N/m]	b	5.0[N · s/m]

4.4.2 フィードフォワード軌道追従の検証

シミュレーションはラグランジュ法を用いて行い、水平面上での運動を考えることにする。また目標値となる軌道は式 (4.48) のように楕円として与える。さらに、検証に用いた各パラメータを表 4.4 のように示す。各実験では $\alpha = 1$ とし中間点は均等に 40 点取っている。

$$\left(\frac{x-0.3}{0.6}\right)^2 + \left(\frac{y-0.6}{0.2}\right)^2 = 1 \quad (4.48)$$

まず、提案手法がフィードフォワードながらモデル外乱を抑えるという特徴を持っていることを、記録したトルクをフィードフォワードと比較して示す (図 4.15)。まず、 $m_1 = 2.5, m_2 = 1.0$ [kg] と想定して提案アルゴリズムを用い、入力すべき収縮力の時系列パターンを計算する。ここで計算されたパターンをロボットアームに入力して、軌道に追従させる。この時想定したアームと実際のアームは同一である。追従の結果を図 4.16 の (A) に示す。また (A) の各サンプルでの関節トルク T^{jnt} を記録する。この記録したトルクを、直接フィードフォワード入力する。この時の結果を (B) に示す。(A) と (B) は同一のアームに対して、結果的に同じ関節トルク入力を与えられたことになるため、同じ挙動を見せる。

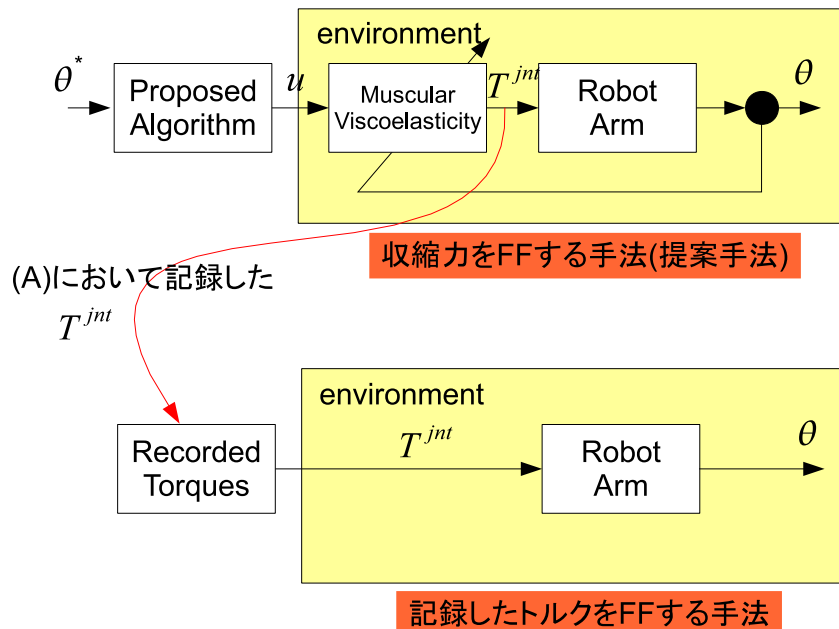
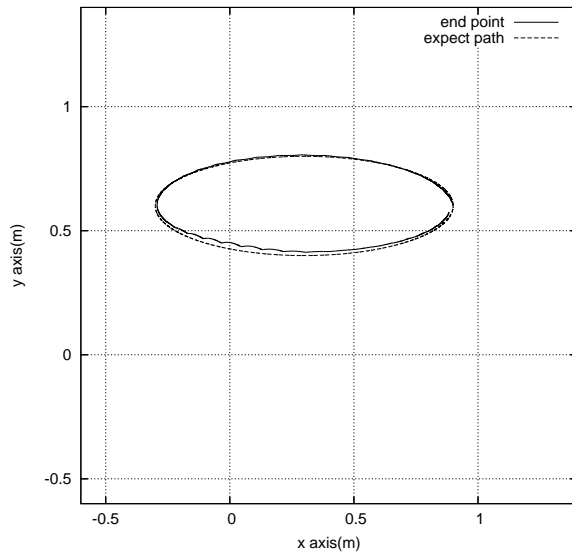


図 4.15: 収縮力のフィードフォワード入力とトルクのフィードフォワード入力の違い

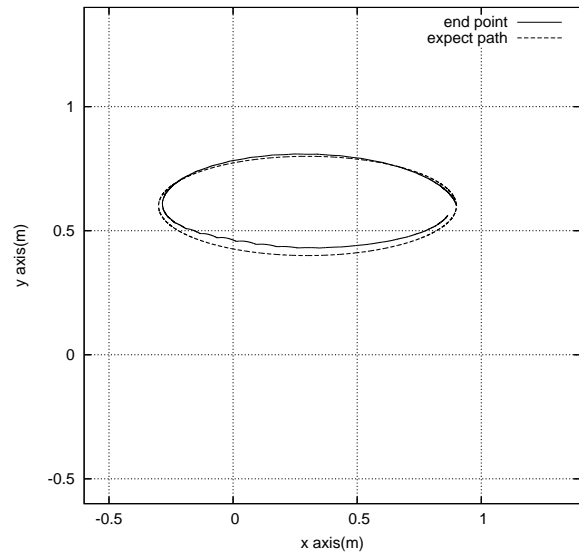
ここで、実際のアームを想定したアームより 1.1 倍重く $m_1 = 2.75, m_2 = 1.1[\text{kg}]$ として、同じ収縮力をフィードフォワード的に入力した結果、同じ記録した関節トルクをフィードフォワード的に入力した結果をそれぞれ (C),(D) に示す。提案手法では、モデルが多少変化しても軌道を追従できているが、トルクをフィードフォワード入力した場合には少しのモデルの変動でも軌道を外れてしまう。

提案手法に対してアームの質量をいろいろに変化させて、モデル外乱に対するロバスト性がどの程度あるのかを検証する。まず、与える収縮力のパターンは $m_1 = 2.5, m_2 = 1.0[\text{kg}]$ として作成し、同じ時系列パターンを異なったアームに与えて軌道を追従させる。ここで、モデルを 1 倍 ($m_1 = 2.5, m_2 = 1.0[\text{kg}]$)、0.4 倍 ($m_1 = 1.0, m_2 = 0.4[\text{kg}]$)、1.4 倍 ($m_1 = 3.5, m_2 = 1.4[\text{kg}]$)、2 倍 ($m_1 = 5.0, m_2 = 2.0[\text{kg}]$)、10 倍 ($m_1 = 25.0, m_2 = 10.0[\text{kg}]$) とした場合と、第 2 リンクのみ重量を増した ($m_1 = 2.5, m_2 = 2.5[\text{kg}]$) のケースについて図 4.17 に示す。リンクの質量を 0.4 倍, 1.4 倍した場合に関してはほとんど問題なく追従できており、リンク 2 のみ質量を増加させた場合もほぼ同様である。一方、各リンクの重量が 2 倍程度になると軌道の変化が大きな部分で、追従が悪い部分が発生する。重量が 10 倍程度になると、軌道を完全に外れてしまうことが分かる。

この結果、およそ 2 倍程度のモデル誤差に対して本アルゴリズムは耐えうることが分かった。本手法は、前節で述べた拮抗対による位置制御の応用にあたり、拮抗駆動と非線形粘弾性による剛性制御機能をうまく使い、フィードフォワードながら外乱抑圧性を持った手法になっている。

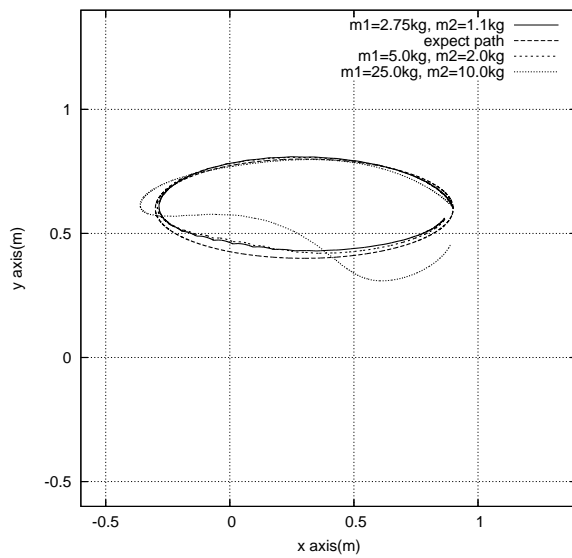


(A) 収縮力の FF 入力

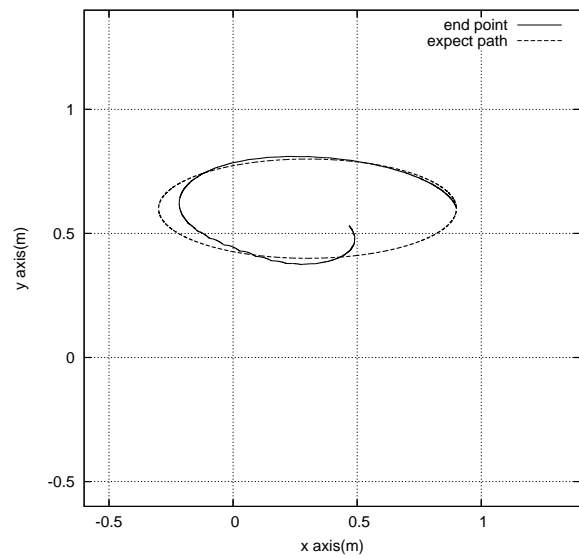


(B) 記録したトルクの FF 入力

想定したモデルと実際のモデルは等しい $m_1 = 2.5, m_2 = 1.0$ [kg]



(C) FF of contractile forces



(D) FF of recorded torques

実際のモデルは想定したモデル ($m_1 = 2.5, m_2 = 1.0$ [kg]) の 1.1 倍

図 4.16: 収縮力を FF する手法とトルクを FF する手法の比較

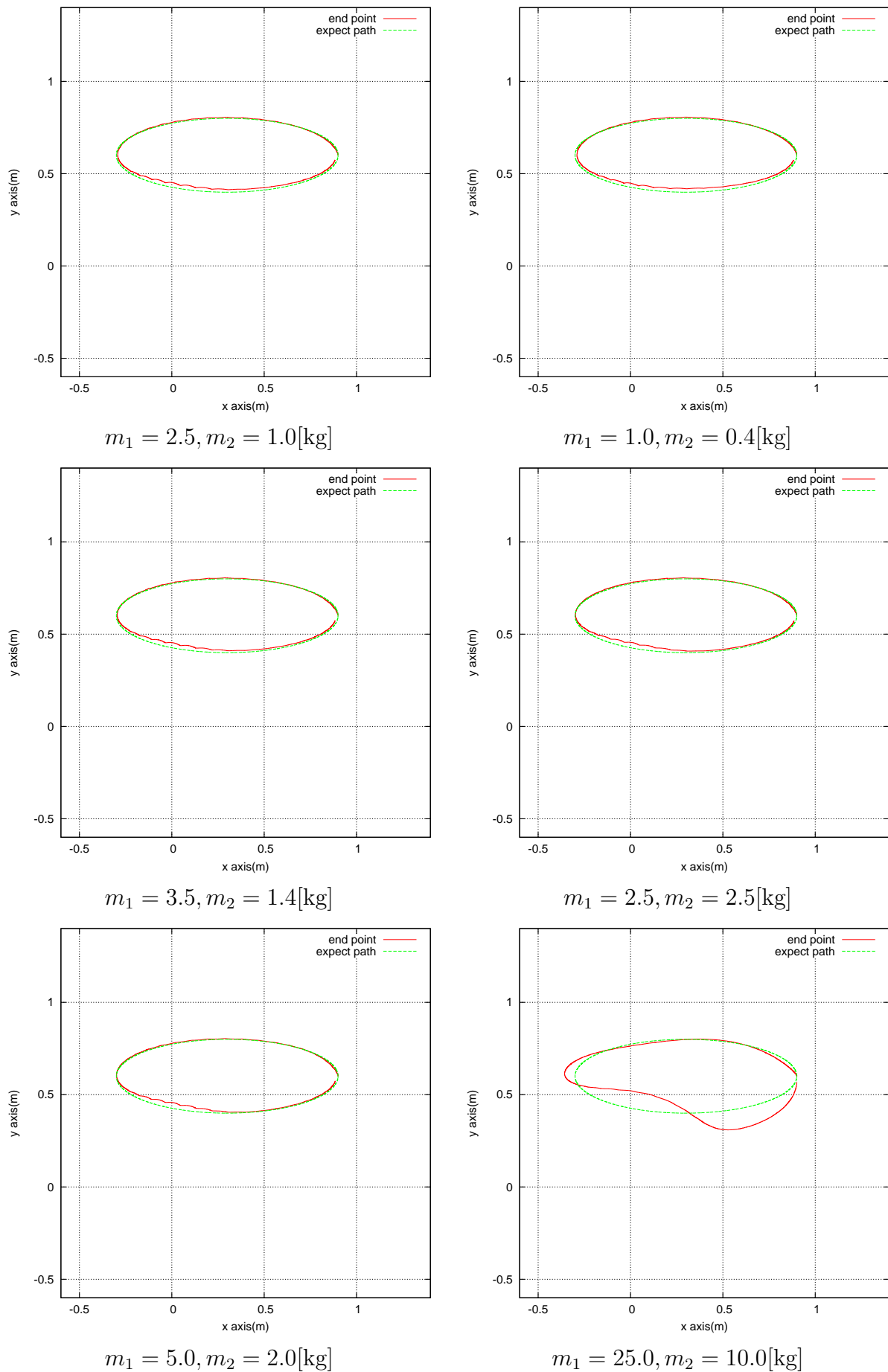


図 4.17: リンクの質量を変化させた場合のシミュレーション結果

第5章 拡張した操作性指標

5.1 操作性指標についての導入とその分類

1980年代から1990年代にかけて、シリアルリンクマニピュレータの操作性を評価する指標が様々に提案されてきた。シリアルリンクマニピュレータは、リンクの枝分かれや、ループの無いマニピュレータを指す。古典的なものとしては、角関節の角速度が手先速度に変換される関係による可操作性楕円体、各関節のトルクが手先における加速度に変換される関係による動的可操作性楕円体 (Dynamic Manipulability Ellipsoid: DME)、静的な関節トルクが手先における力に変換される関係による指標である操作力楕円体 (Manipulability Force Ellipsoid: MFE) といったものが挙げられる [30][58][59][60]。さらに近年、倉爪らによってこれらを統合する概念としてインピーダンスマッチング楕円 (Impedance Matching Ellipsoid: IME) という指標が提案された [61]。これはシリアルリンクマニピュレータが負荷となる物体を駆動する際に、各関節におけるトルクから物体に伝わる力の関係による指標として表わされる。DME, MFE は IME の典型的な形として表すことができる。

これらの指標は関節空間における物理量を取りうる領域を内接する楕円体で代表し、これを作業空間における物理量として写像する。写像された楕円体も作業空間における物理量を取りうる領域に内接する。この写像された楕円体を持って操作性指標として用い、その体積や長径、短径といった楕円体の特徴量によって比較や評価を容易にする。この概念を図 5.1 に示す。ここで関節空間における物理量を $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 、作業空間における物理量を $Z = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$ にて示し、式 (5.1) のように作業空間から関節空間への変換を示す。

$$Z = g^{-1}(Y) \quad (5.1)$$

ここでは、各操作性指標の分類を行なう。表 5.1 に各操作性指標の関節空間における物理量、そこから変換される作業空間における物理量、それぞれの指標が考慮する対象についてまとめる。

操作性指標はこれらの指標はマニピュレータの性能評価に役立ち、冗長マニピュレータのサブタスクとしての利用といった手法が提案されてきた。しかしながら生物型のロボットのような、従来のロボットにはない複雑な駆動機構を持つ対象にはうまく適用することができない。本研究ではアクチュエータの配列を行列としてこれらの指標に取り入れて拡張することで、複雑な機構を持ったロボットにもこれらの指標が適用可能にした。

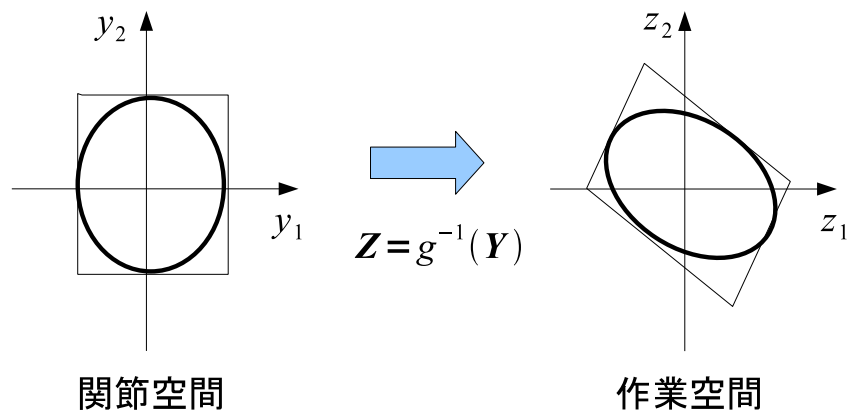


図 5.1: 操作性指標の概念図

表 5.1: 各操作性指標の比較

名称	関節空間 の物理量	作業空間 の物理量	負荷 の質量	マニピュレータ の質量	動特性
IME	トルク	負荷に与える力	任意	任意	考慮可能
MFE	トルク	手先で出力する力	∞	-	-
DME	トルク	手先の速度	0	任意	-
可操作性楕円体	関節速度	手先速度	-	-	-

ここで-は操作性指標に影響がない項目を示す。

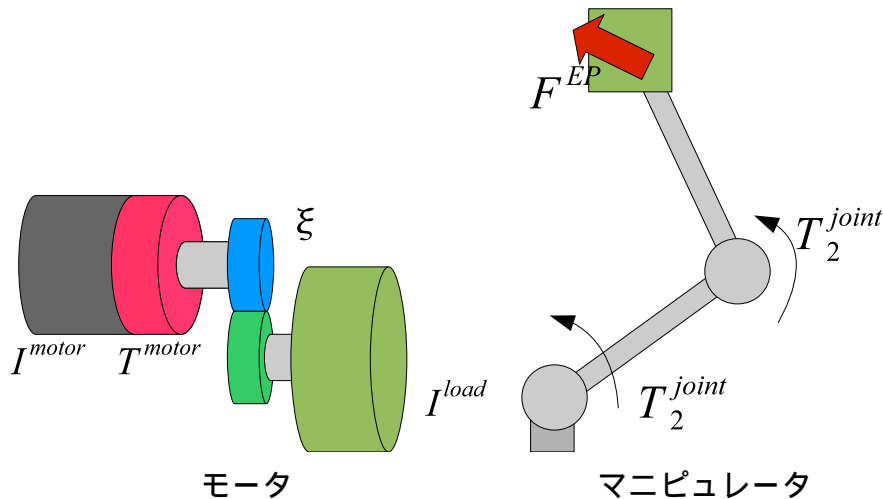


図 5.2: インピーダンスマッチング楕円の概念

5.2 インピーダンスマッチング楕円の拡張

5.2.1 インピーダンスマッチングの概念

モータのインピーダンスマッチングにおいては、モータの慣性モーメント I^{motor} と負荷の慣性モーメント I^{load} によってモータのトルク T^{motor} を最も効率良く伝えるギア比 ξ を求めることができる。一方、インピーダンスマッチング楕円はマニピュレータのインピーダンスの概念に基づくものである。マニピュレータのインピーダンスマッチングは、各関節トルク T^{joint} から手先の負荷に与える力 F^{EP} を最も効率よく伝達できるマニピュレータの姿勢をリンクの質量、負荷の質量から求めるものである。

5.2.2 インピーダンスマッチング楕円の導出

まずは関節空間における関節角ベクトル θ と作業空間の位置ベクトル X^{ep} の変換に関して式 (5.2)、式 (5.3)、式 (5.4) のように表す。ここで J_{aco} はヤコビ行列である。

$$X^{ep} = f(\theta) \quad (5.2)$$

$$\dot{X}^{ep} = \frac{\partial}{\partial \theta} f(\theta) \dot{\theta} = J_{aco} \dot{\theta} \quad (5.3)$$

$$\ddot{X}^{ep} = \dot{J}_{aco} \dot{\theta} + J_{aco} \ddot{\theta} \quad (5.4)$$

次に、シリアルリンクマニピュレータの運動方程式を求める。運動方程式はラグランジュ法等により求めることができ、式 (5.5) のように表すことができる。

$$T^{jnt} = M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + J_{aco}^T F^{ep} \quad (5.5)$$

ここで、 T^{jnt} は各関節トルク、 $M(\theta)$ はマニピュレータの慣性行列、 $C(\theta, \dot{\theta})$ は速度二乗項、 $G(\theta)$ は重力項、 F^{ep} は物体に加える力である。

次に手先物体の運動方程式は式 (5.6) と表わすことができる。

$$F^{ep} = M^{obj} (\ddot{X}^{ep} + \ddot{g}) \quad (5.6)$$

ここで X^{ep} は手先加速度、 \dot{g} は重力加速度、 M_p は物体の質量である。式 (5.4)、式 (5.5)、式 (5.6) より、関節トルクを式 (5.7) のように表わすことが可能である。

$$\begin{aligned} T^{jnt} &= Q(\theta)(F^{ep} - F^{bias}) \\ Q(\theta) &= J_{aco}^T + M(\theta)J_{aco}^\dagger M_p^{-1} \\ F^{bias} &= (J_{aco}^T + M(\theta)J_{aco}^\dagger M_p^{-1})^\dagger \\ &\quad \times [M(\theta)J_{aco}^\dagger(g + \dot{J}(\theta)\dot{\theta}) - C(q, \dot{\theta}) - G(\theta)] \end{aligned} \quad (5.7)$$

ここで F^{bias} は速度や重力の影響を表すバイアス項として捉えることができる。ここで \dagger は、疑似逆行列を示す。ここで正規化トルク \tilde{T}^{jnt} を式 (5.8) のように考える。

$$\tilde{T}^{jnt} = L^{imit^{-1}} T^{jnt} \quad (5.8)$$

L^{imit} は式 (5.9) で定義した制限行列である。

$$L^{imit} = \text{diag}(L_1^{imit}, L_2^{imit}, \dots, L_n^{imit}) \quad (5.9)$$

$$\tilde{T}^{jnt^T} \tilde{T}^{jnt} \leq 1 \quad (5.10)$$

この時式 (5.10) のように表わすことができるから、式 (5.7)(5.8)(5.10) より式 (5.11) のようにインピーダンスマッチング楕円体が定義される [61]。

$$(F^{ep} - F^{bias})^T Q^T (L^{imit})^{-2} Q (F^{ep} - F^{bias}) \leq 1 \quad (5.11)$$

MFE 及び DME は IME の特殊な形として表される。それぞれ静止状態 ($\dot{\theta} = 0$) かつ重力の影響を無視 ($G(\theta) = 0, g = 0$) した状況を考えると、 $M_p = 0$ の時式 (5.11) は DME と等しくなり、 $M_p = \infty$ の時 MFE と等しくなる。MFE と DME を式 (5.12) 及び式 (5.13) に示す。

$$F^{ep^T} J_{aco} (L^{imit})^{-2} J_{aco}^T F^{ep} \leq 1 \quad (5.12)$$

$$\ddot{X}^{ep^T} (M(p)J_{aco}^\dagger)^T (L^{imit})^{-2} (M(\theta)J_{aco}^\dagger) \ddot{X}^{ep} \leq 1 \quad (5.13)$$

5.2.3 複雑なアクチュエータの配列を持つマニピュレータへの拡張

ここで生物のアームのような複雑なアクチュエータの配列を持つような関節を考える。生物には図 1.3 に示す二関節筋のように複数の関節に跨って力を発揮するアクチュエータが存在する。生物やこれを模倣したロボットにおいては前述の指標をそのまま適用することはできない。作業空間における自由度より関節空間における自由度のほうが高い冗長マニピュレータに関しては、前述の指標を適用するような拡張が存在するが、生物型のアームでは関節を独立に駆動できないアクチュエータが存在する点で異なり、こちらも適用はできない。操作性指標の楕円体は、関節空間において各関節トルクを出力できる領域に内接する楕円体 (図 5.3 左側) が、それぞれの空間に写像されたものである。二関節筋が存在すると関節トルクは独立でなくなり、トルクの取りうる領域は図 5.3 右側のようになる。そこでこの出力領域にうまく内接できるような拡張を行なうことにする。

まず、アクチュエータ配列行列 A^{lign} を用いて各アクチュエータの発生するトルクから、各関節トルクへの変換を式 (5.14) と表す。

$$T^{jnt} = A^{lign} T^{msl} \quad (5.14)$$

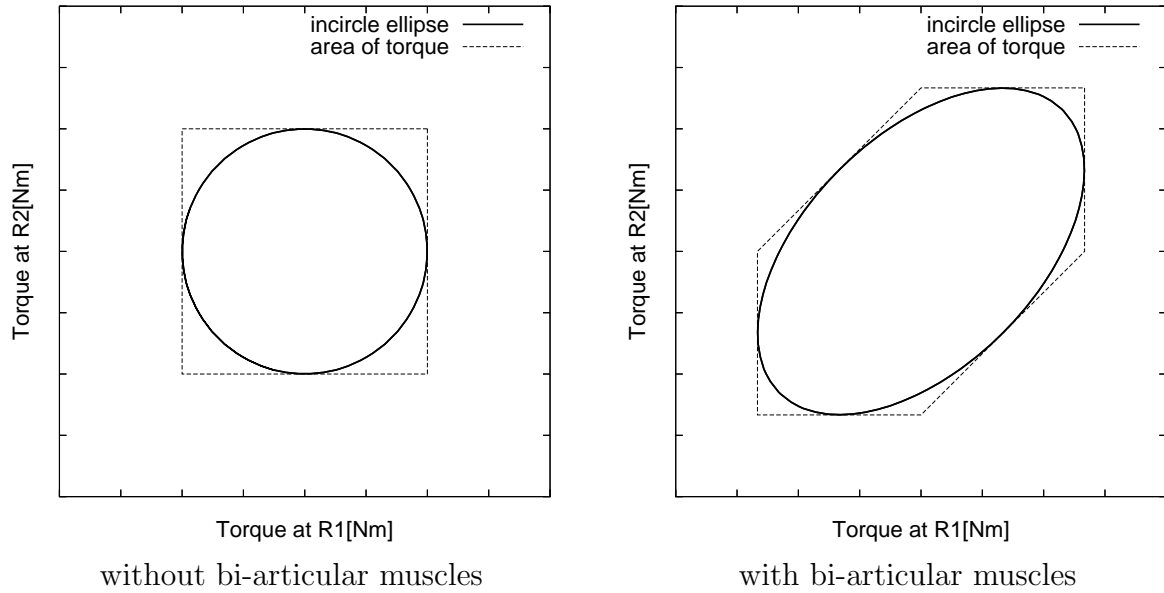


図 5.3: 二関節筋の有無による関節トルクの取りうる領域

ここで $\mathbf{T}^{jnt} = [T_1^{jnt}, T_2^{jnt}, \dots, T_n^{jnt}]$ とし、 $\mathbf{T}^{msl} = [T_1^{msl}, T_2^{msl}, \dots, T_m^{msl}]$ とする。 \mathbf{A}^{lign} は式 (5.15) によって定義され、 m 番目のアクチュエータから n 番目のアクチュエータへの力の伝達係数 $a_{n,m}$ を表す。ここでは、両方向に駆動できるアクチュエータを仮定し、生物のアームでは拮抗対に相当する。

$$\mathbf{A}^{lign} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{2,1} & \dots & a_{m,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & \dots & a_{m,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,n} & a_{2,n} & \dots & a_{m,n} \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

\mathbf{A}^{lign} は一般的に正則な行列ではないので式 (5.14) の逆変換には擬似逆行列を用いる。ここでアクチュエータの発するトルクの制限値を式 (5.9) にならって、式 (5.16) のように表す。

$$\mathbf{L}^{act} = \text{diag}(L_1^{act}, L_2^{act}, \dots, L_n^{act}) \quad (5.16)$$

さらに正規化された各アクチュエータの出力トルクは式 (5.17) のように置くことができる。

$$\tilde{\mathbf{T}}_{act}^{jnt} = c_{comp} (\mathbf{L}^{act} \mathbf{A}^{lign})^\dagger \mathbf{T}^{jnt} \quad (5.17)$$

ここで c_{comp} は正規化のための補正項である。よって式 (5.18) のように正規化されたアクチュエータの出力トルクから楕円体を導くことができる。

$$\tilde{\mathbf{T}}_{act}^{jntT} \tilde{\mathbf{T}}_{act}^{jnt} \leq 1 \quad (5.18)$$

これにより式 (5.12)(5.13)(5.11) の 3 つの指標は、それぞれ以下のように拡張することが可能である。

拡張された MFE:

$$\mathbf{F}^T \mathbf{J}_{aco} \mathbf{E}_{xtend} \mathbf{J}_{aco}^T \mathbf{F} \leq 1 \quad (5.19)$$

拡張された DME:

$$\ddot{\mathbf{X}}^T (M(\theta) \mathbf{J}_{aco}^\dagger)^T \mathbf{E}_{xtend} (M(\theta) \mathbf{J}_{aco}^\dagger) \ddot{\mathbf{X}} \leq 1 \quad (5.20)$$

拡張された IME:

$$(\mathbf{F}^{ep} - \mathbf{F}^{bias})^T \mathbf{Q}^T \mathbf{E}_{xtend} \mathbf{Q} (\mathbf{F}^{ep} - \mathbf{F}^{bias}) \leq 1 \quad (5.21)$$

ただし、 \mathbf{E}_{xtend} は下記のように表される。

$$\mathbf{E}_{xtend} = c_{omp}^2 (\mathbf{L}^{act} \mathbf{A}^{lign})^\dagger{}^T (\mathbf{L}^{act} \mathbf{A}^{lign})^\dagger$$

5.2.4 インピーダンスマッチング楕円の特徴量による指標

各楕円体の特徴量を比較の指標として考え、ここでは超体積、短軸の長さ、短軸と長軸の比を取りあげる。 $c_{omp} (\mathbf{L}^{act} \mathbf{A}^{lign})^\dagger \mathbf{Q}$ の特異値を大きい順に、 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M$ とする。ここで超体積に比例する指標として式 (5.22) を定義する。

$$w_v = \sigma_1^{-1} \cdot \sigma_2^{-1} \cdot \dots \cdot \sigma_M^{-1} \quad (5.22)$$

これは関節トルクから全体としてどれくらい力に変換できるかという指標となる。一方、各方向への出力のバランスという観点から二つの指標を定義する。

$$w_m = \sigma_1^{-1} \quad (5.23)$$

$$w_r = \frac{\sigma_M}{\sigma_1} \quad (5.24)$$

式 (5.23) は楕円体の短軸の長さを表し、最低どのくらいの出力が得られるかを示す。また、式 (5.24) は長軸と短軸の比を表してどのくらいバランス良く出力ができるかを示す。 w_r はいわゆる条件数の逆数となっている。

5.2.5 二関節同時駆動機構を持つ2リンクマニピュレータへの適用

ここでは c_{omp} が二関節筋を持つ2リンクマニピュレータの際にどのように定義されるかを示す。図 5.4 に示すように、二関節筋を持つマニピュレータではトルクの取りうる領域は六角形を書き、楕円の拡大縮小によって各辺に接するように c_{omp} が調整される。各トルクが正負対称に出力できるとすると、図中の A(A') の辺、B(B') の辺、C(C') の辺に接するための c_{omp} の値を計算し、その最大の物を選べば良い (式 (5.25))。

$$c_{omp} = \max(c_{ompA}, c_{ompB}, c_{ompC}) \quad (5.25)$$

ここで、

$$(\mathbf{L}^{act} \mathbf{A}^{lign})^\dagger{}^T (\mathbf{L}^{act} \mathbf{A}^{lign})^\dagger = \begin{pmatrix} e_{1,1} & e_{2,1} \\ e_{1,2} & e_{2,2} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{L}^{act} = \text{diag}(L_1^{act}, L_2^{act}, L_3^{act}) \quad (5.26)$$

ここで L_1^{act}, L_2^{act} はそれぞれ R1, R2 のみを駆動するアクチュエータのトルクの最大値、 L_3^{act} は二関節同時駆動機構のアクチュエータのトルクの最大値である。また、 \mathbf{A}^{lign} は式 (5.27) のように示される。

$$\mathbf{A}^{lign} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.27)$$

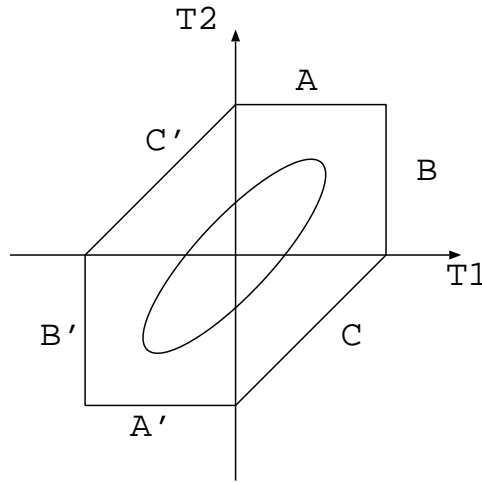


図 5.4: 二関節同時駆動機構を持つアームと C_{omp} の導出

式 (5.26) のように置くと、辺 A, 辺 B, 辺 C と接する条件から導かれる $C_{ompA}, C_{ompB}, C_{ompC}$ の値はそれぞれ式 (5.28), (5.29), (5.30) のように置くことができる。

$$C_{ompA} = \frac{1}{L_2^{act} + L_3^{act}} \sqrt{\frac{4e_{1,1}}{4e_{1,1}e_{2,2} - (e_{2,1} + e_{1,2})^2}} \quad (5.28)$$

$$C_{ompB} = \frac{1}{L_1^{act} + L_3^{act}} \sqrt{\frac{4e_{2,2}}{4e_{1,1}e_{2,2} - (e_{2,1} + e_{1,2})^2}} \quad (5.29)$$

$$C_{ompC} = \frac{4(e_{1,1} + e_{1,2} + e_{2,1} + e_{2,2})}{(L_1^{act} + L_2^{act})^2 \{4e_{1,1}e_{2,2} - (e_{1,2} + e_{2,1})^2\}} \quad (5.30)$$

5.3 拡張した操作性指標の検証

5.3.1 従来指標と拡張した指標の比較検証

検証及び評価に用いるモデル

比較検討として、二関節同時駆動機構を備えない従来型のマニピュレータと、二関節同時駆動機構を備える生物型のマニピュレータについて従来指標と拡張した指標を適用する。各マニピュレータは2リンクのものとし、それぞれのアクチュエータの制限行列を示す。

$$L_{with}^{imit} = \text{diag}\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1\right) \quad (5.31)$$

$$L_{wo}^{imit} = \text{diag}(1, 1) \quad (5.32)$$

ここで式 (5.31) が生物型のもの、式 (5.32) が従来型のものである。各制限行列の対角成分の和が等しくなる条件にて比較を行なう。

またアクチュエータ配列行列の疑似逆行列 $A^{limit\dagger}$ は Moore-Penrose の手法を用いて式 (5.33) を用いる。

$$A^{limit\dagger} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}^T \quad (5.33)$$

表 5.2: アームに用いたパラメータ

l_1	1.0[m]	l_2	1.0[m]
m_1	1.0[kg]	m_2	0.5[kg]

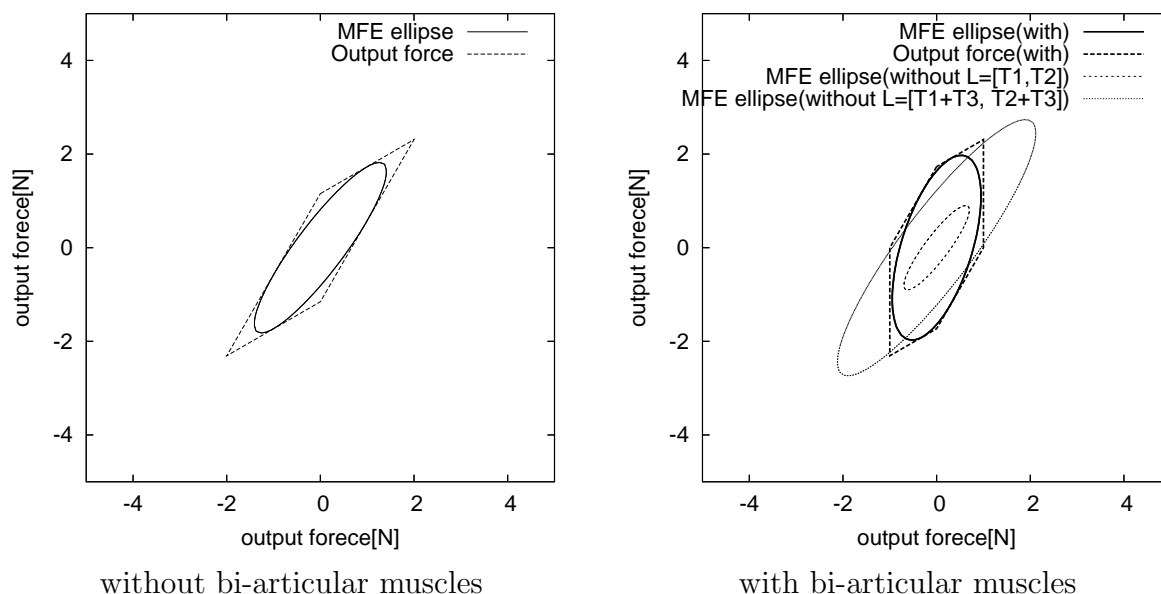


図 5.5: 二関節筋の有無による MFE と手先出力の取りうる領域

アームのリンク長、重量については特に断わりのない限り表 5.2 に従う。リンクは一様な厚みや幅のない棒として考える。

拡張した MFE の検証

式 (5.19) で示されるような拡張された操作力楕円体の検証を行なう。手先出力に関しては式 (2.10), (2.11) より直接求める。まず従来型のアームの手先出力の取りうる領域と MFE の関係を図 5.5 の左図に示す。ここで各関節角は $\theta = [30^\circ, 60^\circ]$ である。手先出力の取りうる領域に MFE が内接していることが分かる。また楕円の主軸は出力の最大となる方向、最小となる方向に対応していることが分かる。次に二関節筋に相当するアクチュエータを備えるアームについて同様に手先出力の取りうる領域と拡張した MFE の値の関係を図 5.5 の右図に示す。ここでも拡張された MFE が出力領域に内接でき、主軸の方向に関してもうまく特性を表わしていることが分かる。同時に拡張前の MFE を重ねて表示しているが、内側の楕円は $L^{imit} = \text{diag}(L_1^{imit}, L_2^{imit})$ として二関節筋を取り除いた時の物、また外側の楕円は $L^{imit} = \text{diag}(L_1^{imit} + L_3^{imit}, L_2^{imit} + L_3^{imit})$ として二関節筋のトルクが各関節に独立に振り分けられるとして算出したものである。これにより、出力の大きさ、方向ともに大きくずれてしまい二関節筋の持つアームの特性を従来の MFE ではうまく表現することができいことが分かる。

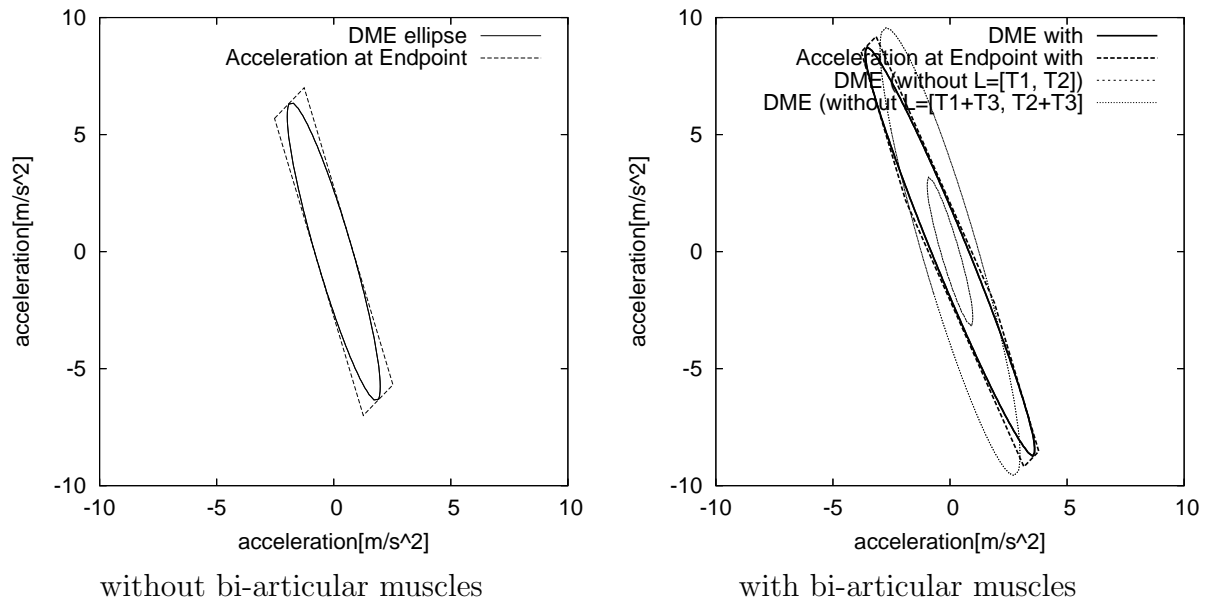


図 5.6: 二関節筋の有無による DME と手先加速度の取りうる領域

拡張した DME の検証

同様に式 (5.20) で示される拡張された動的可操作性楕円体の検証を行なう。手先加速度に関しては式 (5.34) より直接求めて比較する。

$$\ddot{X}^{ep} = J_{aco} M_q^{-1} T^{jnt} \quad (5.34)$$

操作力楕円体と同様に、従来型アームの手先加速度の取りうる領域と DME の関係を図 5.6 の左図に示す。関節角は同様に $\theta = [30^\circ, 60^\circ]$ である。一方二関節筋に相当するアクチュエータを備えるアームについても図 5.6 の右図に示す。DME はそれぞれ手先加速度の取りうる領域に内接し、拡張した DME はうまく二関節筋を備えるアームの特徴を示していると言える。

拡張した IME の検証

次に式 (5.21) で示される拡張されたインピーダンスマッチング楕円体の検証を行なう。把持物体に与える力の領域は式 (5.35) より直接求めて比較する。

$$F^{ep} = Q^\dagger T^{jnt} + F^{bias} \quad (5.35)$$

ここで把持物体の質量を 0.5kg とし、水平面内で静止した状態を考える。この時 F_{bias} 項は 0 となる。IME も同様に従来型のアームの把持物体に与える力の取りうる領域と IME の関係を図 5.7 の左図に示す。関節角は同様に $\theta = [30^\circ, 60^\circ]$ である。一方二関節筋に相当するアクチュエータを備えるアームについても図 5.7 の右図に示す。IME はそれぞれ把持物体に与える力の取りうる領域に内接し、拡張した IME はうまく二関節筋を備えるアームの特徴を示していると言える。

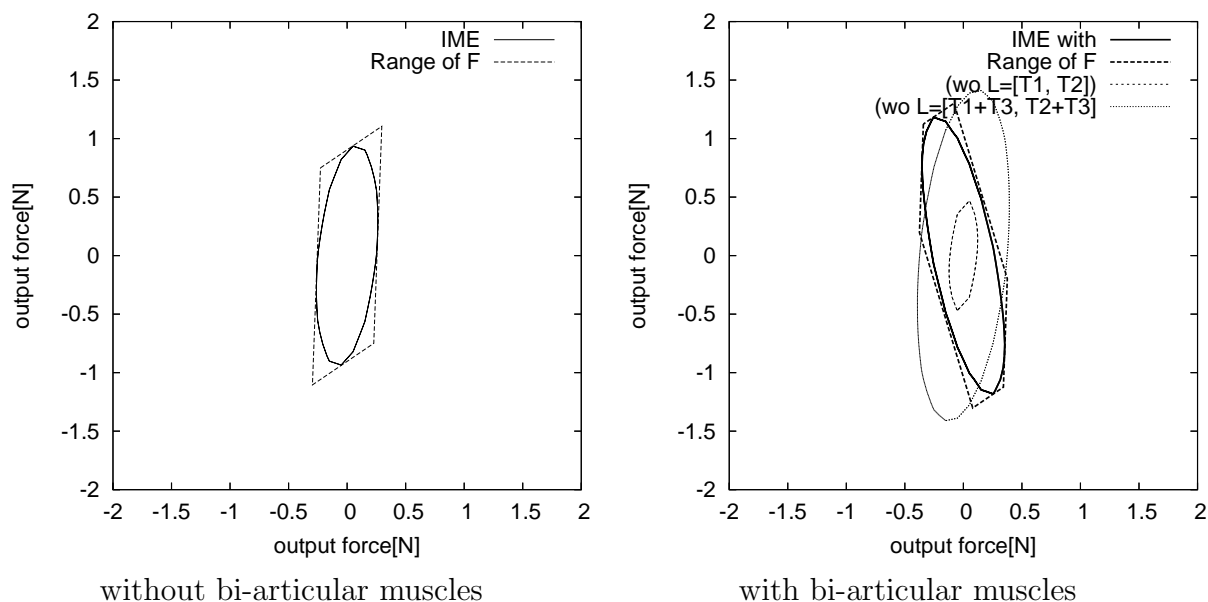


図 5.7: 二関節筋の有無による IME と把持物体に与える力の取りうる領域

5.3.2 二関節同時駆動機構を持つロボットアームへの適用

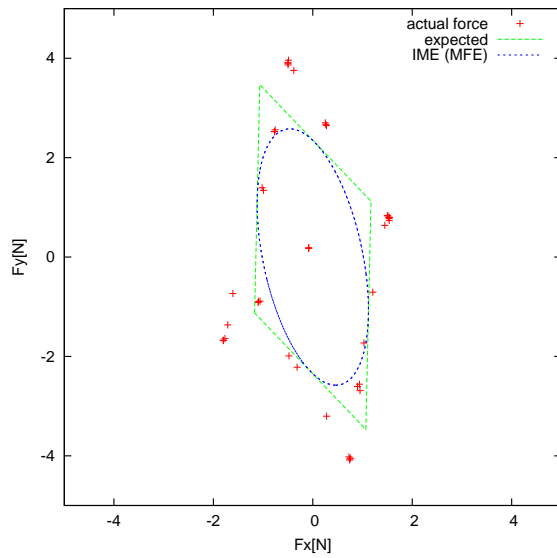
図 5.8 に、二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの手先出力を実際に測定し、操作性指標によって評価する。実験は手先を力センサに固定し、各方向への最大力で 40 点出力して計測する。実験の条件は 3.3.1 節と同様である。各アクチュエータの最大トルクの和を 0.6N に揃えて比較する。この結果拡張した操作性指標がうまくアームの特性をとらえていることを確認できた。

5.3.3 姿勢にともなう諸特性の変化

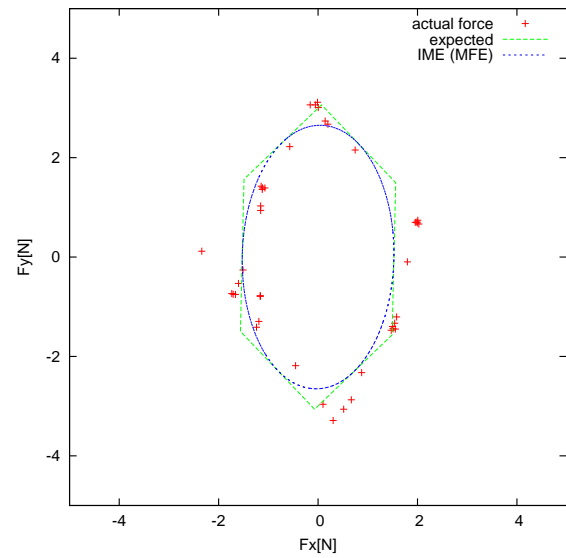
ここでは、姿勢によって各操作性指標がどのように変化して表れるかを示す。ここでは、各アクチュエータの比を変えた 3 つのアームについて示す。各マニピュレータのアクチュエータの比を式 (5.36) に示す。

$$\begin{aligned}
 L_{case1}^{limit} &= \text{diag}\left(\frac{2}{3}, \frac{2}{3}, \frac{2}{3}\right) \\
 L_{case2}^{limit} &= \text{diag}\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1\right) \\
 L_{wo}^{limit} &= \text{diag}(1, 1)
 \end{aligned} \tag{5.36}$$

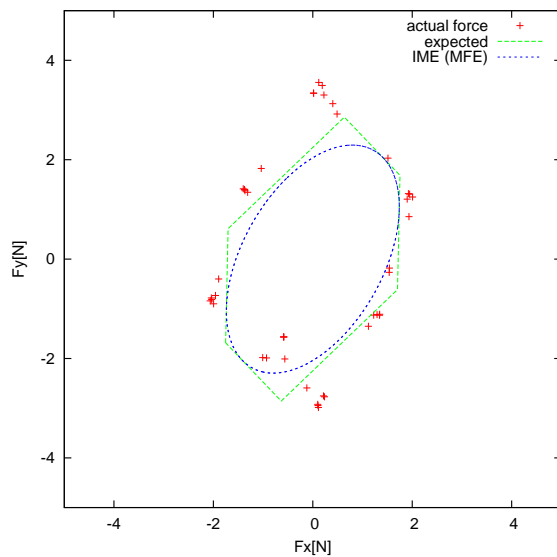
ここで二関節同時駆動機構を備えるマニピュレータのうち、case 1 は単関節の駆動機構と大きさが等しいケース、case 2 については単関節駆動機構に対して大きさが倍となるケースを示す。単関節駆動機構については大きさは等しい。また、アクチュエータの大きさの合計を揃えて比較を行なうこととする。比較を行なう姿勢としては、 θ_1 を 30 度として固定し、 θ_2 は 30 度、60 度、90 度、120 度の 4 箇所についてそれぞれ楕円体を示して比較を行なう。本節では、同一の指標において姿勢とマニピュレータごとの楕円体の形状の比較を行なうため、種類の異なる指標の楕円体においては縮尺が異なることに留意する。例えば MFE と DME 間で、傾きや長軸短軸の比を検討することは意味があるが、指標の大きさを比較することは意味がない。



$L^{limit} = \text{diag}(0.3, 0.3)$
without bi-articular muscle



$L^{limit} = \text{diag}(0.2, 0.2, 0.2)$
with bi-articular muscle



$L^{limit} = \text{diag}(0.15, 0.15, 0.3)$
with bi-articular muscle

図 5.8: 実験によって求めた二関節同時駆動機構を持つロボットアームの手先出力への操作性指標 (MFE) の適用

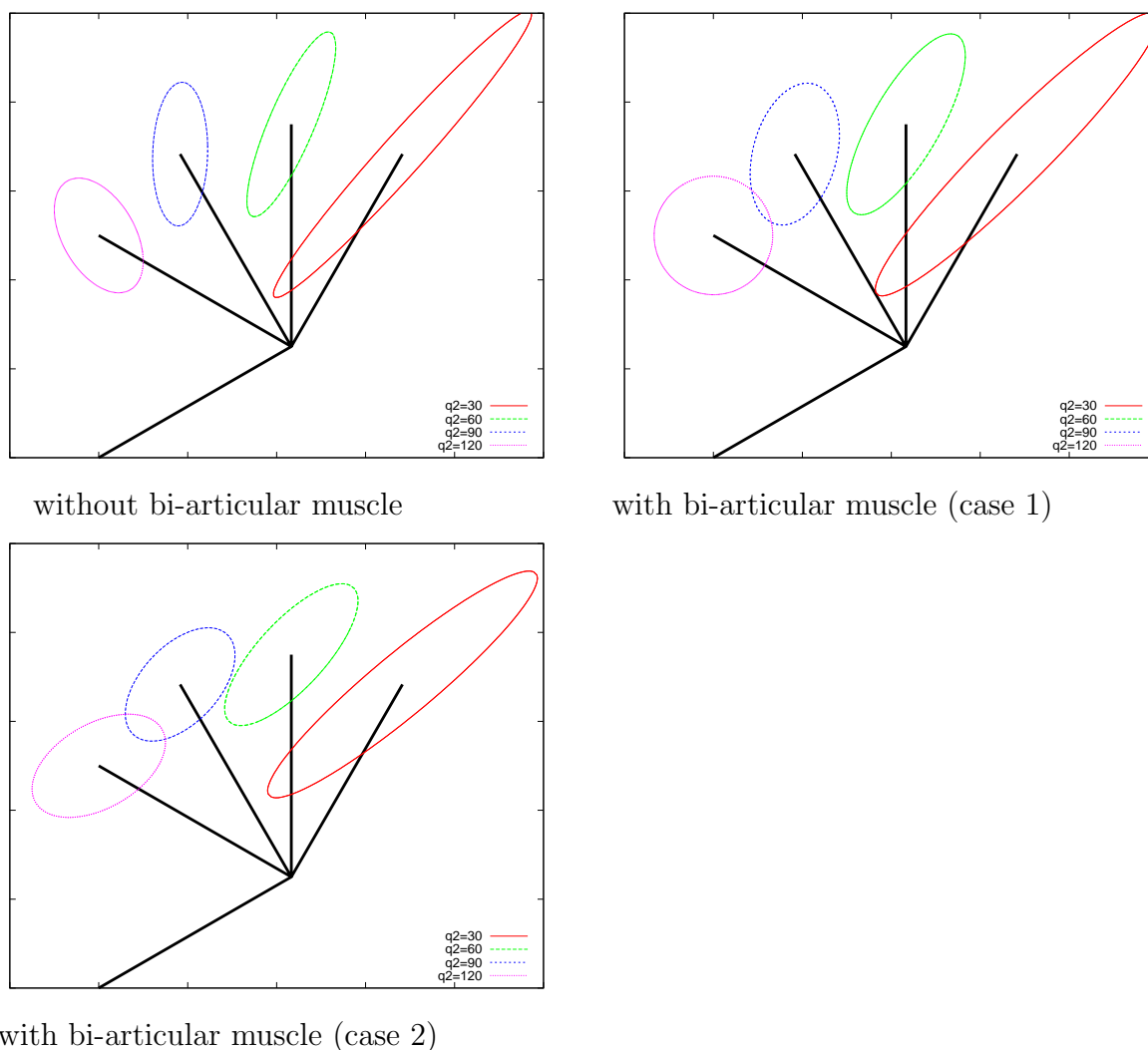
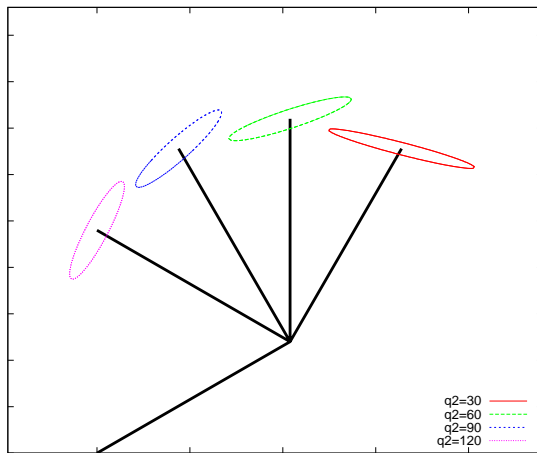


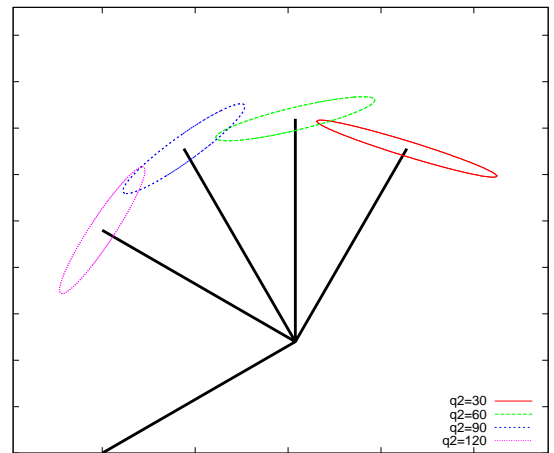
図 5.9: 姿勢による MFE の変化

まず MFE についての結果を図 5.9 に示す。MFE においては、顕著にマニピュレータごとの特性が表れる。二関節同時駆動機構を備えることで、特に腕を曲げた姿勢における特性が変化する。特に case 1 では、 θ_2 を 60 度とした際に全方位に均等な出力が可能となっている。一方、case 2 においては同じ姿勢で、二関節同時駆動機構を持たないケースに比べて出力が大きくなる方向がほぼ 90 度ずれており、大きく出力特性を変更することができる。また、case 2 では腕を伸ばした姿勢において、比較的バランスの良い出力が取れていることが分かる。

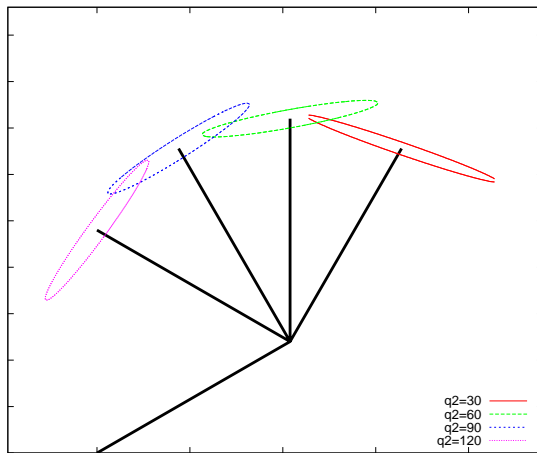
次に DME について示す。こちらは、加速のしやすい方向という点では、3 者でそれほど顕著な差はない。また、こちらは全方向にバランスの良い加速度を作るという点では二関節同時駆動機構を備えることによっては改善されない。ただし、二関節同時駆動機構を備えることで、加速しやすい方向をより助長するような特性が見られ、二関節同時駆動機構の大きさを増した case 2 ではこの特性がさらに顕著に表れる。最後に IME に関して述べる。これは、MFE と IME のほぼ中間の指標となっていることが見てとれる。手先の物体の質量によって、MFE あるいは DME の特性に近づいていく。つまり、負荷の大きな時ほど特に腕を曲げた姿勢において二関節同時駆動機構の有無による影響が大きくなると言える。



without bi-articular muscle

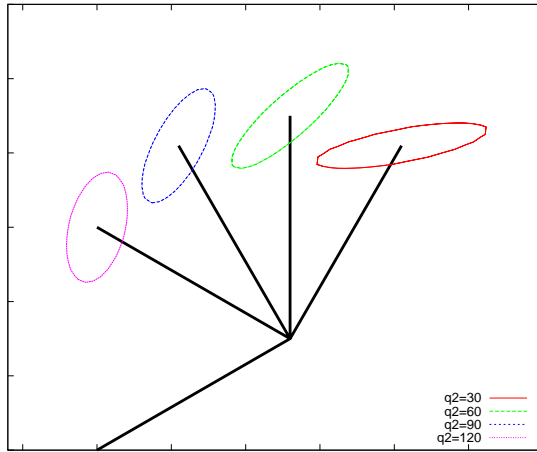


with bi-articular muscle (case 1)

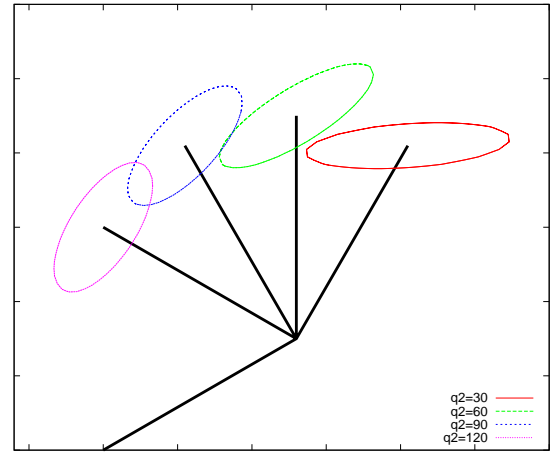


with bi-articular muscle (case 2)

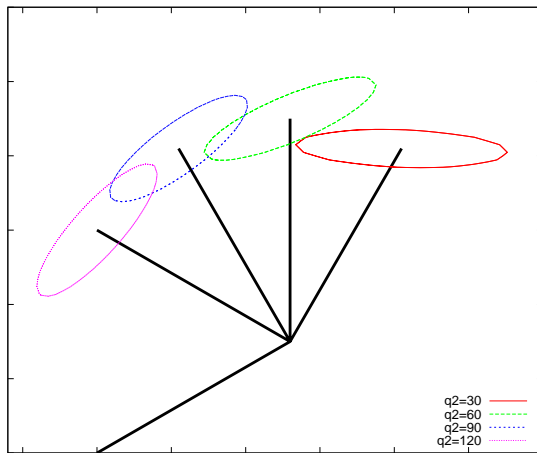
図 5.10: 姿勢による DME の変化



without bi-articular muscle



with bi-articular muscle (case 1)



with bi-articular muscle (case 2)

図 5.11: 姿勢による IME の変化

5.3.4 操作性に関する特徴量の比較

二関節同時駆動機構を持つマニピュレータと従来型のマニピュレータについて3つの楕円体から式(5.22)~(5.24)の指標に関して性能評価を行なう。各マニピュレータについて θ_1 を固定して、 θ_2 を0から180度(π rad)まで変化させて各指標がどのように変化するかを調べる。マニピュレータごとのアクチュエータの比は式(5.36)の通りである。

まず楕円体の面積による指標 w_v に関して図5.12に示す。このように姿勢によって指標の大きさは変化し値が大きいほど、トータルとして大きな力を出せると考えられるが、特異姿勢に近い領域では実用上有効な値ではないと考えられる。各マニピュレータごとの比較を行なうと、どの姿勢であってもcase 1では従来型に比べておよそ1.5倍、case 2では従来型に比べ1.3倍程度の値を取ることが分かる。これは、トルクを出力可能な領域に内接する楕円体の面積がそのまま写像されて表れるためである。図5.13に二関節同時駆動機構の大きさを变化させた場合の w_v が従来型の何倍になるかを示したグラフを示す。トータルの最大トルクを2.0Nとして、 L_3^{limit} の値を0から2まで増やす。単関節を駆動するアクチュエータの大きさは式(5.37)の通りである。

$$L_1^{limit} = L_2^{limit} = \frac{2 - L_3^{limit}}{2} \quad (5.37)$$

これによれば、二関節同時駆動機構の大きさが単関節を駆動するアクチュエータに等しい時つまりcase 1にて最大の大きさをとることが分かり、この点を極大とする単峰性を示す。

図5.14にMFEに関する楕円体の短軸 w_m と楕円体の短軸と長軸の比 w_r が姿勢によってどのように変化するかを示す。前節において、姿勢ごとにMFEを表示し定性的な考察を加えたが、特徴量を用いることで定量的な評価が可能となる。MFEに関してはcase 1においてほぼ全体に渡って出力バランスを改善することができる。特に θ_2 を120度程度に曲げた姿勢で顕著である。さらに深く曲げた姿勢においては、バランスの点からは従来型と変わらないが、最低出力できる大きさでは勝っている。case 2と従来型の比較においては、腕を伸ばした姿勢において改善できていることが見て取れる。図5.15においてはDMEに関する w_m および w_r の値を示す。こちらは、バランスという点においては従来型の方がわずかに高い値を示す。しかしながら、最低限加速できる大きさを見ると、case 1のほうが上回っており性能が劣化している領域はほとんどない。case 2については、 w_m についても従来型を下回るため、前節の図5.10と合わせて考えると、リンク2に平行な方向に対して加速がしにくくなっている。しかしながら、 w_v では大きく上回ることで、リンク2に垂直な方向に対しては非常に加速しやすい状況を作っている。最後にIMEについて把持物体の質量を0.5kgとした場合の変化を図5.16に示す。これはやはり、MFEとDMEの中間の性質を取る。

まとめると、二関節同時駆動機構を備えることで全体として大きく力や加速度を出力することが可能である。また、大きな力を発揮する際には全方位に均等なバランスの良い出力を特に腕を曲げた姿勢で得ることができる。一方、手先の負荷が小さい場合には、従来型のマニピュレータが加速しやすかった方向をさらに助長する形となる。人の上肢で考えれば、二関節筋は体に近い位置での作業性を高め、投擲や棒を振るといった動作をサポートする非常に理にかなった存在であることが分かる。

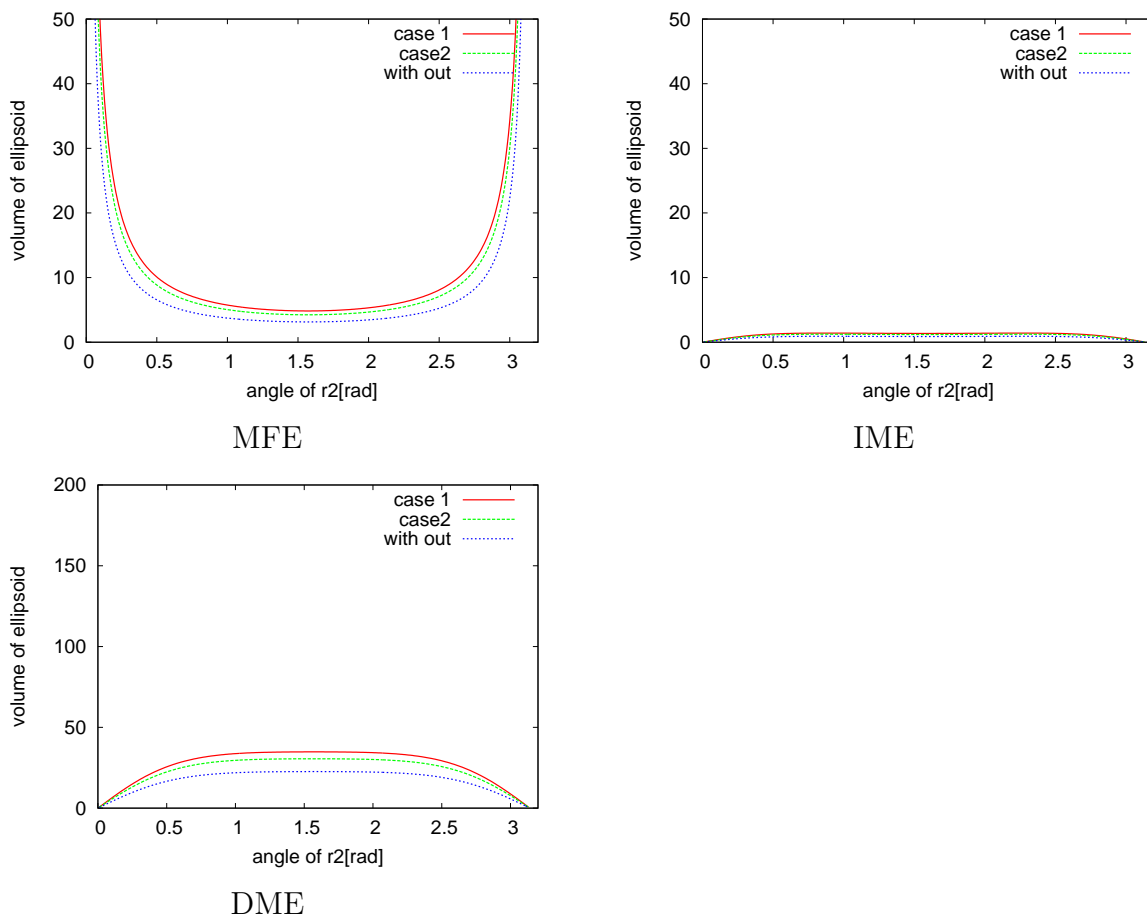


図 5.12: 姿勢による w_v の変化

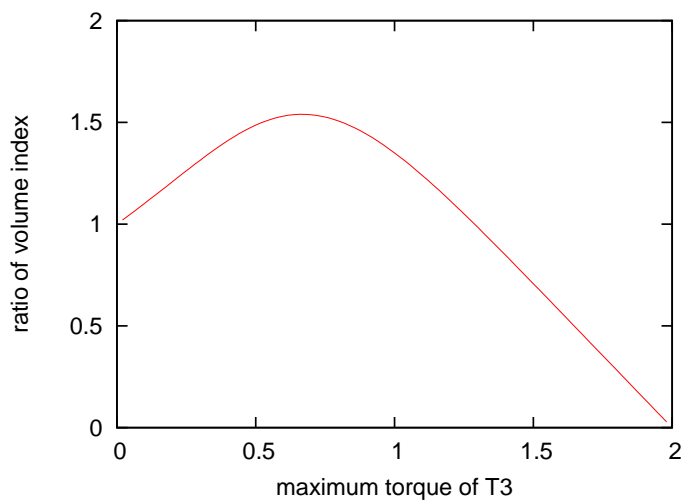


図 5.13: 二関節同時駆動機構の大きさによる w_v の変化

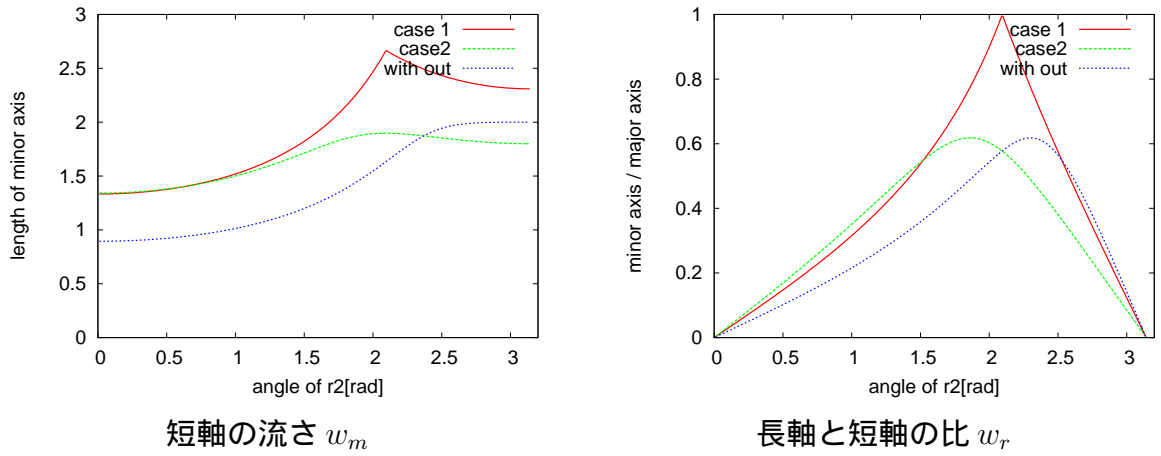


図 5.14: 姿勢による MFE の特徴量の変化

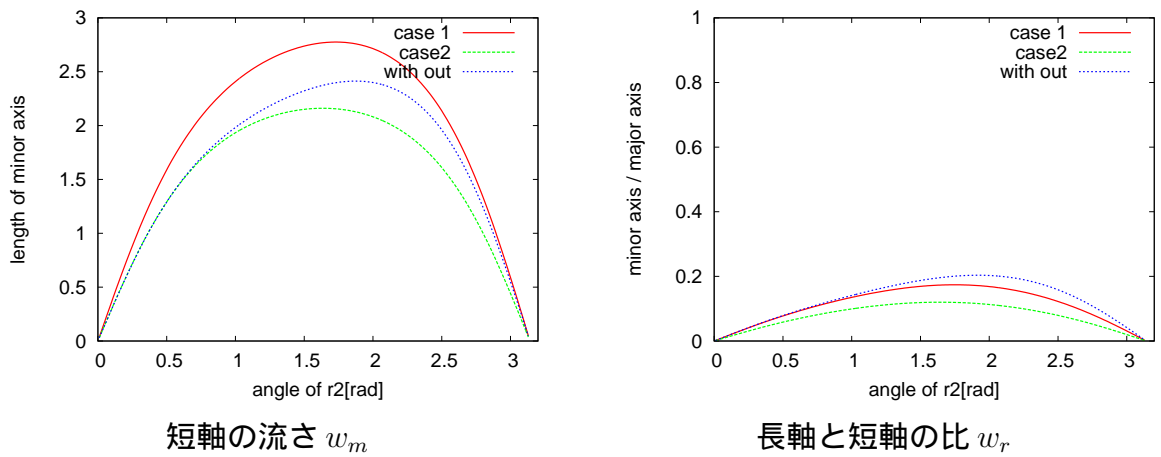


図 5.15: 姿勢による DME の特徴量の変化

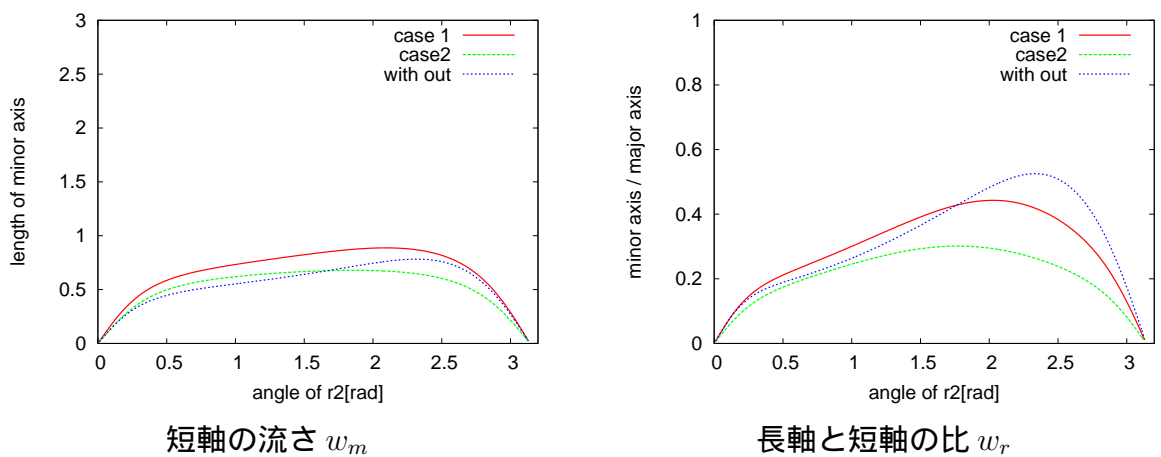


図 5.16: 姿勢による IME の特徴量の変化

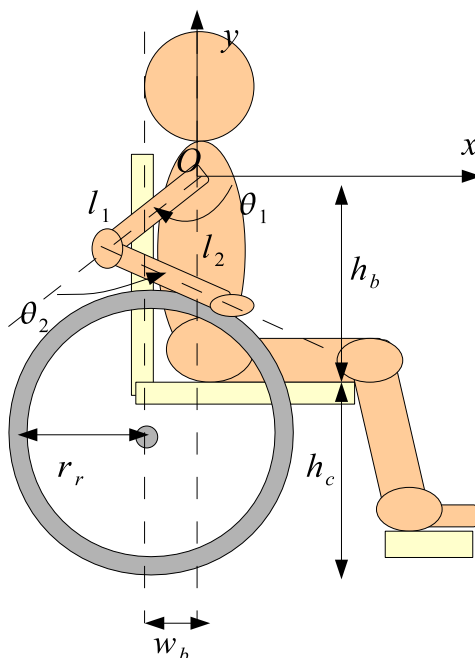


図 5.17: 車椅子のハンドリム漕ぎ動作のモデル

5.4 拡張した操作性指標の応用

5.4.1 車椅子のハンドリム漕ぎ動作への応用

ここでは拡張した操作性指標の応用として、車椅子におけるハンドリム漕ぎ動作に適用する。この動作を図 5.17 にモデル化する。座標系としては、操作者の肩を原点 O として、進行方向を x 軸、鉛直方向を y 軸とする。上腕、前腕を $L1, L2$ として前腕部の先端 X^{ep} がリムと接続される。 $L1, L2$ の長さを l_1, l_2 とし、重量を m_1, m_2 とする一様な幅のない棒と考える。また肩関節を $R1$ 、肘関節を $R2$ とし、それぞれの回転角を θ_1, θ_2 とする。リムの中心を R_o とし、リムの半径を r_r と置く。座面までの高さを h_c とし、座面から x 軸までの高さを h_b とする。また、 y 軸からリムの中心までの距離を w_b とする。操作者の重量を m_b とし、車椅子の重量を m_w とする。式 (5.38) にリムの中心 R_o を示す。

$$\mathbf{R}_o = [-w_b, -h_c - h_b + r_r]^T \quad (5.38)$$

リムの回転角を θ_r とし、手先がリムの頂上に存在する場合を $\theta_r = 0$ とし、車椅子が前方に進む回転方向を正とする。この時前腕部の先端 X^{ep} は式 (5.39) と置くことができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^{ep} &= \begin{pmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{R}_o + [\sin \theta_r, \cos \theta_r]^T \end{aligned} \quad (5.39)$$

慣性モーメントをリムの半径の円筒に全重量が一様に存在していると仮定して、 J_r を式 (5.40) で概算する。

$$J_r = \frac{1}{2}(m_b + m_w)r_r^2 \quad (5.40)$$

表 5.3: 車椅子漕ぎ動作の際の各種パラメタ

l_1	0.3 m	l_2	0.3 m
m_1	2.16 kg	m_2	1.74 kg
h_b	0.5 m	w_b	0.2 m
m_b	60 kg	m_w	14 kg

手先がリムに加える力を F^{ep} とすると、式 (5.6) より式 (5.41) のように、把持物体に換算した質量 M^{obj} として表すことができる。

$$\begin{aligned}
 r_r F^{ep} &= J_r \ddot{\theta}_r \\
 r_r M^{obj} |\ddot{\mathbf{X}}^{ep}| &= \frac{1}{2} (m_b + m_w) r_r^2 \ddot{\theta}_r \\
 M^{obj} &= \frac{1}{2} (m_b + m_w)
 \end{aligned} \tag{5.41}$$

以上より、インピーダンスマッチング楕円を求め、 \mathbf{X}^{ep} におけるリムの接線方向の楕円の幅を求める。この時、人体各部のパラメータは表 5.3 のように定めることにする。人体や各拮抗対の発生するトルクに関しては文献 [20][21][62] を参考とした。ここで、リムの直径が 18 インチ、21 インチ、24 インチ、27 インチの車椅子を考え、 n インチの車椅子のリムの半径 r_r [m] と座面の高さ h_c [m] が式 (5.42)、式 (5.43) のような関係にあるとする。

$$r_r = 0.0254 * n / 2 \tag{5.42}$$

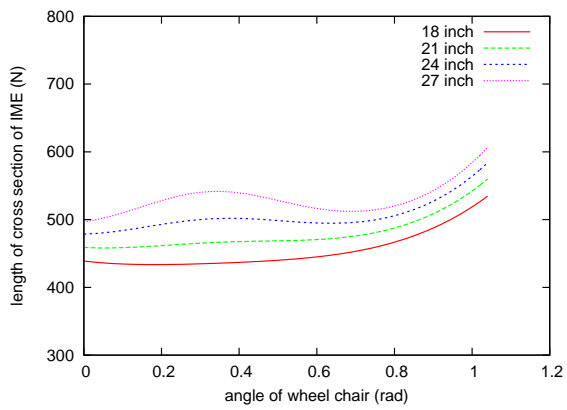
$$h_c = 0.4 * n / 24 \tag{5.43}$$

また、各拮抗対の発生するトルク [Nm] の最大値を式 (5.50) のように定める。

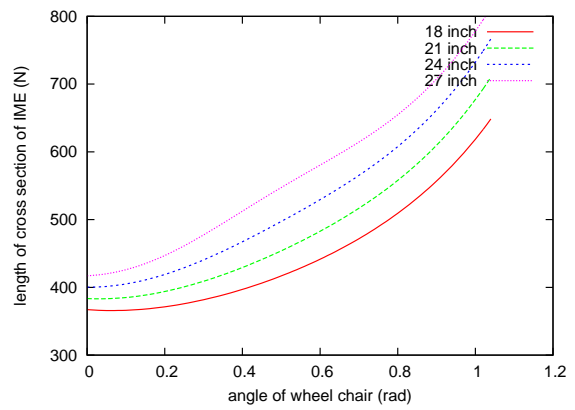
$$\mathbf{L}_{wc}^{limit} = \text{diag}(L_{wc1}^{limit}, L_{wc2}^{limit}, L_{wc3}^{limit}) = \text{diag}(50, 40, 40) \tag{5.44}$$

図 5.18 に θ_r を 0 から $\frac{1}{3}\pi$ まで変化させて、接線方向の楕円の幅を求めた結果を示す。この時リムの径を大きくすると、より力を伝達しやすいことが分かる。今回の計算方法ではリムの径が大きくなっても、テコの原理による力の増加は無視されるので、この結果は純粹に上腕、前腕の姿勢によるものである。また、径を大きくしてやると回転角 θ_r が浅い領域でさらに力を伝達しやすくなっていることが分かる。参考に従来手法による IME を用いた差異の結果を示す。従来手法では、二関節筋の拮抗対が発するトルクが独立に $L_{wc1}^{limit} + L_{wc3}^{limit}$, $L_{wc2}^{limit} + L_{wc3}^{limit}$ として両関節に加わるものとして計算した。従来の指標による結果は拡張した指標による結果からかなり異なっており、正しい設計に用いることはできない。

実際に図 5.19 に、いくつかの姿勢 $\theta_r = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ におけるインピーダンスマッチング楕円体を表示し、どのような形状があらわれているかを示す。リムの径が大きくなり、より腕を折り畳んだ姿勢をとることで接線方向に力を伝達しやすい形状となることが分かる。

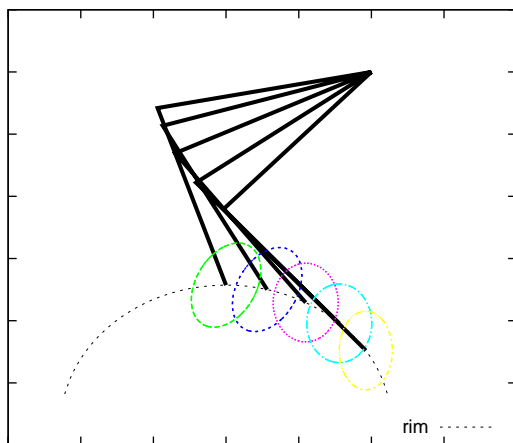


拡張したIMEによるもの

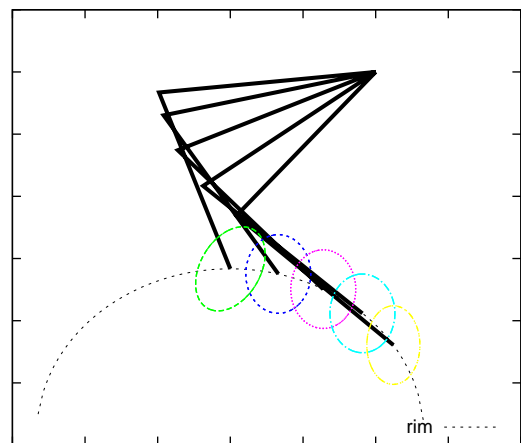


従来のIMEによるもの

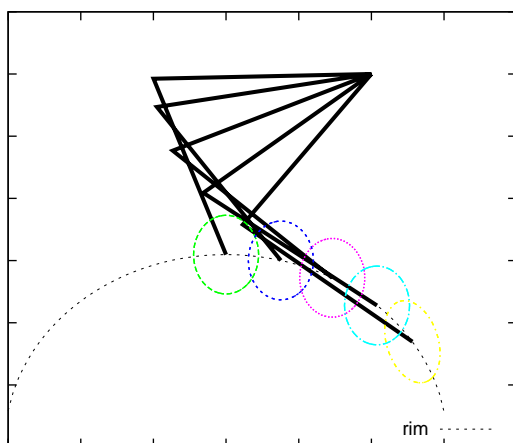
図 5.18: 車椅子のサイズ別のリムの回転角による漕ぎ力の変化



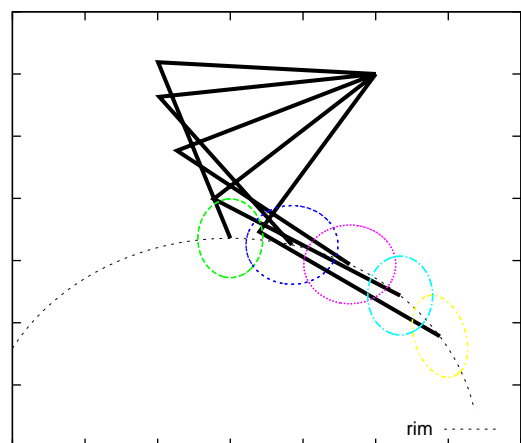
18 インチ



21 インチ



24 インチ



27 インチ

図 5.19: リムの回転角によるIMEの形状の変化

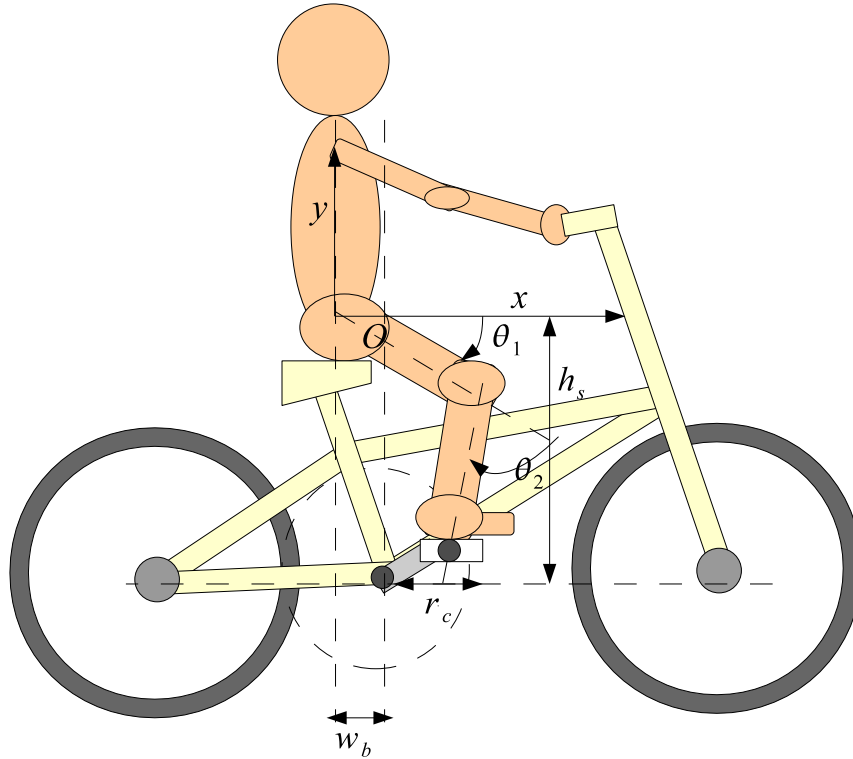


図 5.20: 自転車の漕ぎ動作のモデル

5.4.2 自転車のペダル漕ぎ動作への応用

次に、自転車の漕ぎ動作に関しても、車椅子と同様の考え方で持って適用する。図 5.20 に自転車の漕ぎ動作をモデル化する。座標系としては、操作者の股関節を原点 O として、進行方向を x 軸、鉛直方向を y 軸とする。大腿、下腿を $L1, L2$ として下腿の先端がクランク（ペダル）と接続される。 $L1, L2$ の長さを l_1, l_2 とし、重量を m_1, m_2 とする一様な幅のない棒と考える。股関節、膝関節を $R1, R2$ とし、それぞれの回転角を θ_1, θ_2 と置く。クランクの中心を R_c とし、クランクの半径を r_c と置く。クランクの中心から x 軸までの高さを h_s とする。また、クランクの中心から y 軸までの距離を w_b とする。操作者の重量を m_b とし、自転車の重量を m_c とする。式 (5.45) にクランクの中心 R_c を示す。

$$\mathbf{R}_c = [w_b, -h_s]^T \quad (5.45)$$

クランクの回転角を θ_c とし、足先がクランクの頂上に存在する場合を $\theta_c = 0$ とし、自転車が前方に進む回転方向を正とする。この時、下腿の先端 X^{ep} は式 (5.46) と置くことができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^{ep} &= \begin{pmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{R}_c + [\sin \theta_c, \cos \theta_c]^T \end{aligned} \quad (5.46)$$

慣性モーメントが車輪の半径 r_t の円筒に全重量が一様に存在していると仮定して、 J_t を式 (5.47) とする。

$$J_t = \frac{1}{2}(m_b + m_c)r_t^2 \quad (5.47)$$

表 5.4: 自転車漕ぎ動作の際の各種パラメタ

l_1	0.45 m	l_2	0.45 m
m_1	6.84 kg	m_2	4.26 kg
m_b	60 kg	m_c	18 kg

足先がクランクに加える力を F^{ep} とすると、式 (5.6) より式 (5.48) のように、把持物体に換算した質量 M^{obj} として表すことができる。ただし、自転車のクランクと後輪のギア比を ξ とする。

$$\begin{aligned}
 r_c F^{ep} &= \xi J_r \ddot{\theta}_c \\
 r_c M^{obj} |\ddot{\mathbf{X}}^{ep}| &= \frac{1}{2} (m_b + m_w) \xi r_t^2 \ddot{\theta}_c \\
 M^{obj} &= \frac{1}{2} (m_b + m_w) \xi \left(\frac{r_t}{r_c}\right)^2
 \end{aligned} \tag{5.48}$$

以上より、インピーダンスマッチング楕円を求め、 \mathbf{X}^{ep} におけるクランクの接線方向の楕円の幅を求める。この時自転車と人体各部のパラメータは表 5.4 のように定めることにする。ここでサドルの高さを変えることで、 h_s および w_b の大きさを変化させ検討する。 h_s と w_b の間には式 (5.49) のような関係があるものとする。

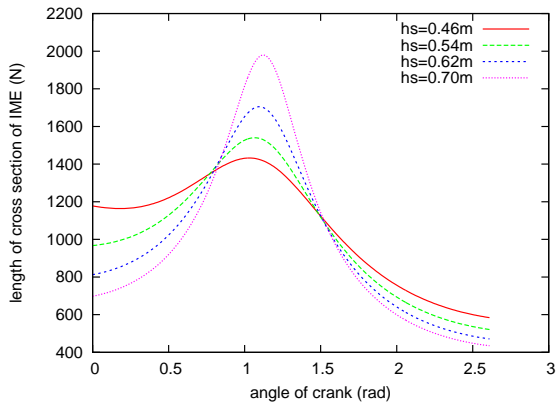
$$h_s = 4w_b \tag{5.49}$$

また、各拮抗対の発生するトルク [Nm] の最大値を式 (5.50) のように定める。

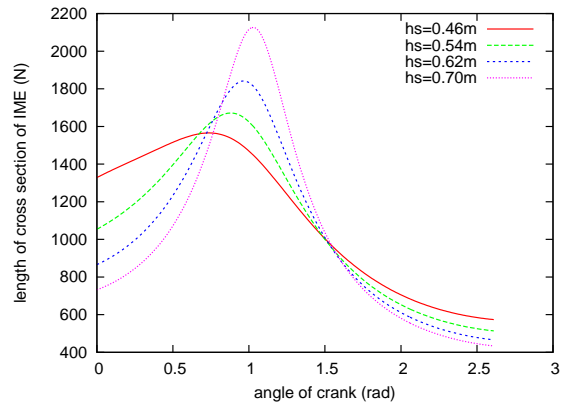
$$\mathbf{L}_{wc}^{limit} = \text{diag}(L_{wc1}^{limit}, L_{wc2}^{limit}, L_{wc3}^{limit}) = \text{diag}(100, 200, 100) \tag{5.50}$$

図 5.21 に θ_c を 0 から $\frac{2}{3}\pi$ まで変化させて、接戦方向の楕円の幅を求めた結果を示す。サドルの高さは 0.42m、0.54m、0.62m、0.70m と変える。この結果、サドルを高くした場合には一部領域で大きな力を伝達できるかわりに、回転角の小さい領域では力が伝達しにくくなってしまふ。クランクと足裏を完全に接続しない場合にはサドルを高くすることで、効率の良い伝達が可能であるが、競技自転車のように足裏とクランクを完全に接続する場合においては、角度が比較的浅い領域における力の伝達に関しても考慮して、設計を行なう必要性がでてくると考えられる。参考に従来手法による IME を用いた際の結果を示す。従来手法では、二関節筋の拮抗対が発するトルクが独立に $L_{wc1}^{limit} + L_{wc3}^{limit}$, $L_{wc2}^{limit} + L_{wc3}^{limit}$ として両関節に加わるものとして計算した。差異は見られるが、車椅子の時ほど顕著には表れない。これは負荷が比較的大きく、リンクを伸ばした姿勢であるためと考えられる。

図 5.22 には、いくつかの姿勢 $\theta_c = 0, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4$ におけるインピーダンスマッチング楕円体を表示し、どのような形状があらわれているかを示す。

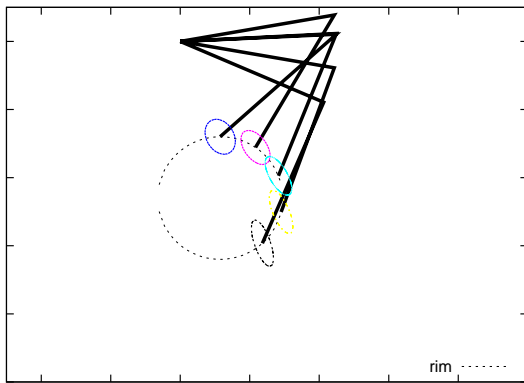


拡張したIMEによるもの

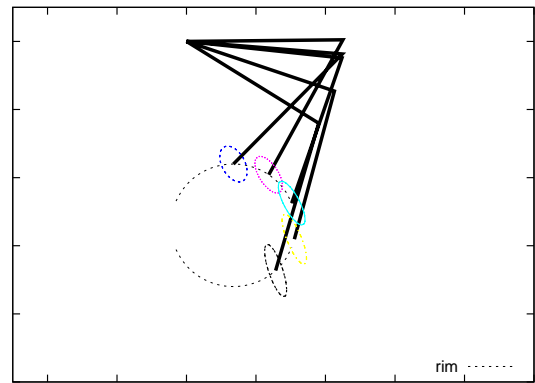


従来のIMEによるもの

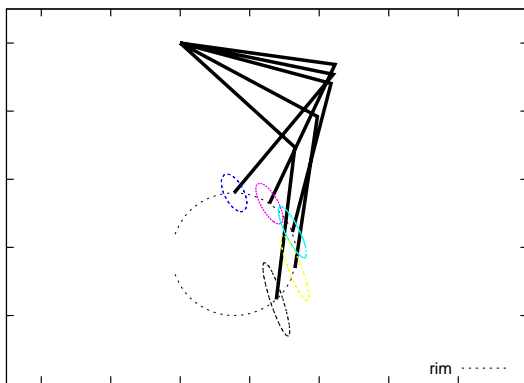
図 5.21: 自転車のサドル高さ別のクランクの回転角による漕ぎ力の変化



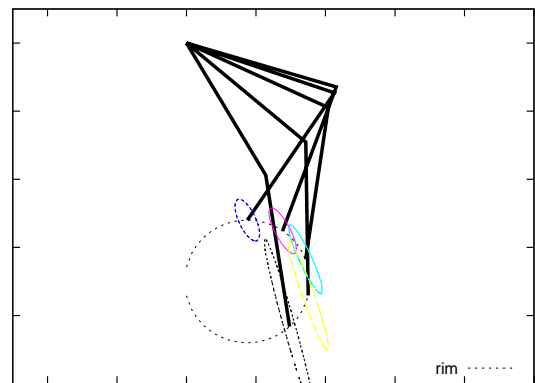
$h_s = 0.46\text{m}$



$h_s = 0.54\text{m}$



$h_s = 0.62\text{m}$



$h_s = 0.7\text{m}$

図 5.22: クランクの回転角によるIMEの形状の変化

第6章 結論

6.1 まとめ

本研究では簡潔な機構によって生物の筋骨格構造を模擬し、ロボットアームに生物の持つ長所を持たせることができた。プーリとタイミングベルトによる二関節同時駆動機構を提案し、静的・動的な特性を確認して理論通りに操作することを確認した。二関節筋の模擬である二関節同時駆動機構を従来のロボットアームに加えることで、単関節を駆動するアクチュエータを大型化あるいは冗長化した機構以上の利点を与えることができる。二関節同時駆動機構の追加で、1つのアクチュエータの追加で冗長系とすることができるだけでなく、手先における力・加速度の出力領域をより柔軟に設計できるようになる。動作に最適化して、より小出力のアクチュエータを使うことができるようになるため、冗長化によるコスト増や重量増を抑え信頼性の向上を図ることが可能である。

提案する生物の筋骨格構造を基にした制御手法は、拮抗駆動と非線形粘弾性を利用することで、フィードフォワードながらモデル外乱の抑圧機能を持つ。さらに二関節同時駆動の存在によって、手先の誤差を抑えることを示した。生物の機構を取り入れることで、ロボットはより簡単に制御可能となる。

さらに、拡張した指標によって生物型ロボットの設計や従来型ロボットとの公正な比較が行なえるようになり、二関節筋が存在することによる利点を明確に示すことができた。また、生物型のロボットだけでなく、車椅子等の人間が直接扱う機器の設計にも応用できることを示した。本研究によって生物の筋骨格構造に基づいたロボットのモーション制御に関する原理原則が明らかにされた。

6.2 生物の筋骨格構造の導入に関する今後の展望

6.2.1 筋骨格構造の特徴の組み合わせによって実現されること

これまでロボット工学においては、生物の筋骨格系の特徴、特に二関節同時駆動に関してはほとんど取り上げられてこなかった。リンク機構のキネマティクス、キネティクスを利用するバイオメカニクスの分野においても同様である。本研究で明らかになったように、生物の筋骨格系の特徴を導入することで、生物の様々な利点を享受することができる。図 6.1 に、生物の四肢の筋骨格系の3つの特徴を中心に、それぞれの組合せでどのようなことが実現されるかを示す。四角囲みの項目は本論文で主に取り上げたものである。二関節同時駆動を取り入れることで、力出力、加速度出力の改善が行なわれた。また、3個のモータで2リンクのアームに対して完全に冗長性を確保できる。さらに生物型のアームの特徴評価を正確に行なえるようになった。次に、拮抗駆動と非線形粘弾性によって各関節のFF制御が、さらに二関節同時駆動を加えることで、2リンクのアームのFF制御をより改善できる。他に、拮抗駆動と非線形粘弾性によって機械的な粘弾性の調整が可能となる。ま

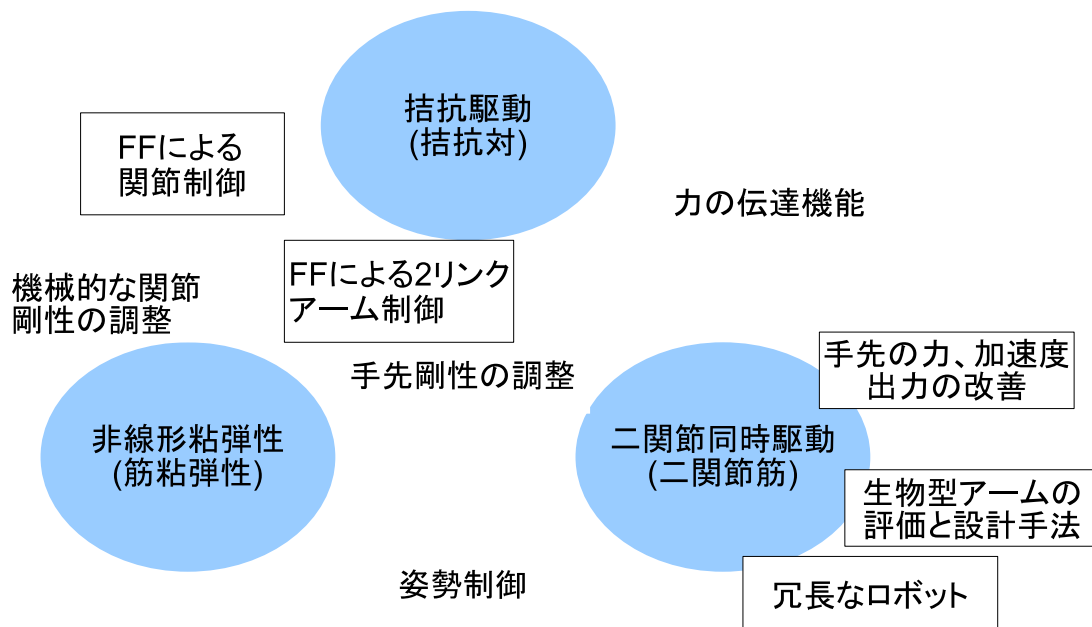


図 6.1: 生物の筋骨格系の特徴の組み合わせで実現可能な機能

た、これに二関節同時駆動が加わることでアームの手先において粘弾性を自由に調整可能となり、またこれを手先における力の出力とは独立に設計可能である。

二関節同時駆動と粘弾性の組み合わせは、受動的な姿勢制御を可能とする。例えば、図 6.2 に示すように特定の姿勢から、胴体が前方に倒れた事例を考える。すると、股関節の角度 θ_1 は、 δ_b だけ減少する。この時太股の裏側に存在する二関節筋が引っぱられることにより発生するトルクは、 θ_1 と θ_2 を共に増加させるように働く。これによって上体を引き起こすとともに、膝をより曲げるといった連動的な動きが可能で、より素早く重心を後ろに戻す効果が期待できる。

さらに、拮抗駆動と二関節同時駆動の組み合わせは、力をうまく伝達することを可能とする。図 6.3 に示すような倒立振り子歩行モデルを考えると股関節と接地点を結ぶ方向への力は、二関節同時駆動機構を持たない場合は膝関節のトルクによる成分しか働くことがない。しかしながら、二関節同時駆動機構を加えることで、股関節による力との合力を所望の方向へと向けることが可能である。

6.2.2 本研究を適用可能な領域

生物の筋骨格構造を導入することで、(1) 従来よりも深く人間の特性を理解することができる、(2) ロボット (機械) が人間 (生物) の長所を取り入れることができる、という効果が期待できる。(1) による影響が大きい分野としては、理学療法、スポーツ医学といった分野をまず挙げることができる。特に本論文で提案する、操作性指標を取り入れることで負荷や運動を考慮した特性評価が可能となり、効果的なトレーニングや車椅子や装具等の設計にも大いに貢献できる。コンピュータサイエンスの分野でも、例えば CG アニメーション等での人の動きを身体的特徴を定義するだけで自動的に作るといった応用が考えられる。さらに、動画画像の処理から人や動物の動きの異常等を検出するといったアニメーションとは逆方向の応用もありうる。

ロボット工学や制御工学の分野では、まず (1) に関連する技術としてパワーアシスト機器が挙げられる。人間が力を出し辛い姿勢を判定して効率良くアシストするなどの効果が

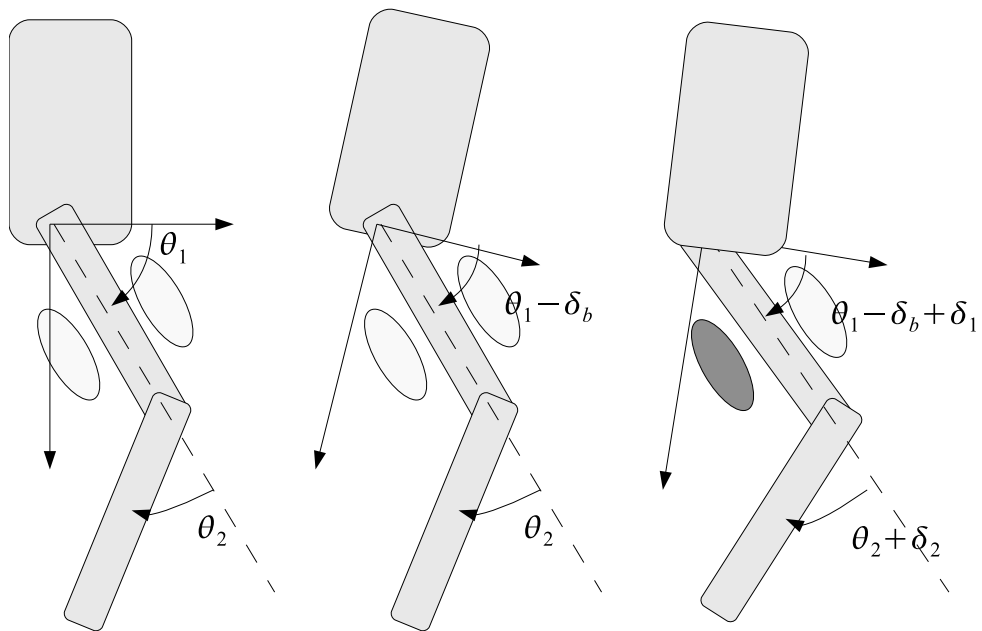


図 6.2: 受動的な姿勢制御機能

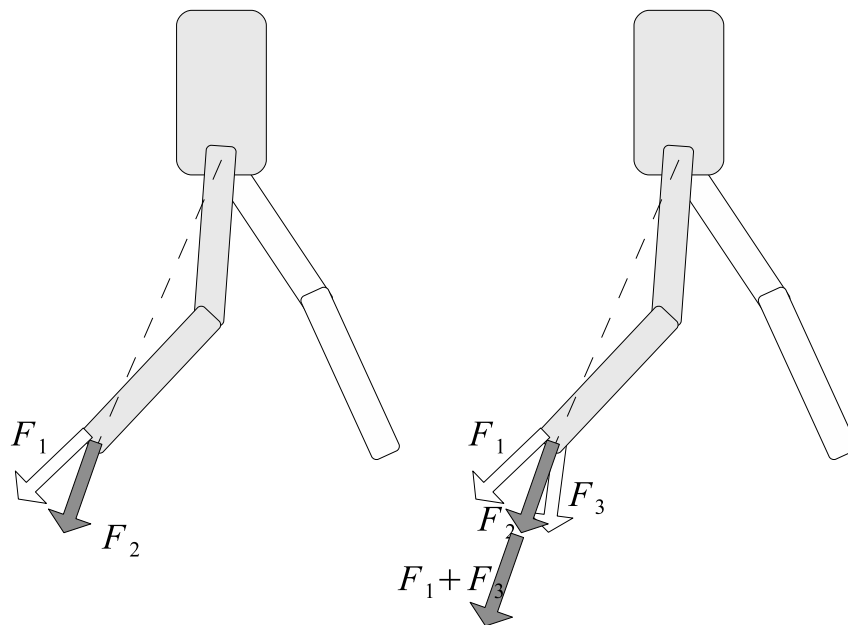


図 6.3: 歩行時の立脚の力出力

見込める。こちらは機器の機構を生物型にしても良いし、従来型のままで制御則として、生物の特徴を考慮しても効果がある。生物の機構を直接機械的に取り入れた場合は、(2)の利点も享受できる。これまで述べてきた人間協働型のロボットだけでなく、例えば極限で活動するロボットにおいても効果的である。例えば惑星探査ロボットを考えると、容易に修理にはいけないから冗長性を確保して耐障害性を上げることは価値がある。しかしながら重量の増加は、打ち上げのコストや燃費等に悪影響を与える。生物型の特徴を取り入れることで、柔軟に作業領域での出力を設計可能となり、これらのトレードオフをうまく両立させることが可能である。マイクロマシンのような小さな機構においては、回転型のアクチュエータを用いることは現実的でない場合もある。論文中で紹介した、人工筋肉は比較的軽量で、質量あたりの出力が大きいという特徴がある。またこれらの中には小型化することで出力密度が上昇するという特徴を持ったものもあって、マイクロマシンへの応用は特に期待されている。現在のところ、人工筋肉は既存のアクチュエータに比べて、実用上の様々な欠点を抱えるため応用範囲に限られるが、本論文で提案する制御手法はこれらの欠点の一部をうまく利用し補うものである。

参考文献

- [1] “日本の統計 2009”, 総務省統計局, 2009
- [2] “2006 年度版ものづくり白書 (ものづくり基盤技術振興基本法第 8 条に基づく年次報告)”, 経済産業省, 2006
- [3] 熊本水頼, ”ヒューマノイド工学”, 東京電機大学出版局, 2006
- [4] G. J. van Ingen Shenau, M. F. Bobbert and R. H. Rozendal, “The unique action of bi-articular muscles in complex movements”, *Journal of Anatomy*, 155, pp. 1-5, 1987
- [5] Neville Hogan, “Adaptive Control of Mechanical Impedance by Coactivation of Antagonist Muscles”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.AC-29, No.8, pp. 681-690, 1984
- [6] Neville Hogan, “On the stability of Manipulators Performing Contact Tasks”, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 6, pp. 677-686, 1988
- [7] F. A. Mussa Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi, “Neural, Mechanical, and Geometric Factors Subservicing Arm Posture in Humans”, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 5, No. 10, pp. 2732-2743, 1985
- [8] 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
- [9] 藤川 智彦, 大島 徹, 熊本 水頼, 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
- [10] 大島 徹, 藤川 智彦, 熊本 水頼, ”一関節筋および二関節筋を含む筋座標系によるロボットアームの機能的特性-筋の収縮力とロボットアームの粘弾性-”, *精密工学会誌*, vol. 66, No. 1, pp. 141-146, 2000
- [11] 鳥海 清司, 大島 徹, 藤川 智彦, 熊本 水頼, 百生 登, “ヒトの腓腹筋である二関節筋の装備が跳躍運動に及ぼす影響”, *日本機械学会論文集 (C 編)*, 69 巻, 688 号, pp. 3263-3268, 2003
- [12] Toru Oshima, Noboru Momose, Kiyoshi Toriumi, “Jump mechanism using coordination in knee and ankle joint and application to leg orthosis”, *The 2005 International Power Electronics Conference*, 2005

- [13] Zlatko Matjačić, Andrej Olenšek and Tadej Bajd “Biomechanical characterization and clinical implications of artificially induced toe-walking: Differences between pure soleus, pure gastrocnemius and combination soleus and gastrocnemius contractures, *Journal of Biomechanics*, vol. 39, pp. 255 - 266, 2006
- [14] Zlatko Matjačić, Andrej Olenšek, “Biomechanical characterization and clinical implications of artificially induced crouch walking: Differences between pure iliopsoas, pure hamstrings and combination of iliopsoas and hamstrings contractures, *Journal of Biomechanics*, vol. 40, pp. 491 - 501, 2007
- [15] 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「HIPRO」 - VEA を用いたロボットアームによる二関節筋特性評価 - “, 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
- [16] 小田 高広, 鴫田 守, 門田 健志, 鈴木 健也, 深井 善朗, 島田 耕吉, “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
- [17] Ryuma Niiyama et al., “A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007
- [18] 高山 仁志, 田熊 隆史, 細田 耕, “二関節筋を含めた筋骨格構造を持つロボットによる連続跳躍の実現”, *JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 2008
- [19] 福井 勉, 岩崎 裕子, “リハビリテーション領域における単関節筋トレーニングの応用”, 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, 2004
- [20] 大島 徹, 藤川 智彦, 熊本 水頼, “一関節筋および二関節筋を含む筋座標系による機能別実効筋力評価 -出力分布の簡便な測定法-”, *精密工学会誌*, vol. 67, No. 6, pp. 944-948, 2001
- [21] 大島 徹, 藤川 智彦, 熊本 水頼, “一関節筋および二関節筋を含む筋座標系による脚の機能別実効筋力評価 -出力分布からの機能別実効筋力の推定-”, *精密工学会誌*, vol. 67, No. 11, pp. 1824-1828, 2001
- [22] 田島 孝光, 大島 徹, “ヒューマンフレンドリーな次世代操舵システムの研究”, 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
- [23] Sehoon Oh and Yoichi Hori, “Development of Novel Two-Degree-of-Freedom Control for Robot Manipulator with Biarticular Muscle Torque”, *2009 American Control Conference (ACC2009)*, 2009.6.10-12, St. Louis, Missouri
- [24] Sehoon Oh, Takuya Koyanagi and Yoichi Hori, “Stiffness Direction Stabilization and Inertia Matrix Diagonalization of Robot Manipulator by Biarticular Muscle”, *IEEE ISIE 2009*, 2009.7.5-8, Seoul
- [25] 福正 博之, 杉本 貴大, 古関 隆章, “二関節筋機構を持つ2リンクロボットアームの動力学計算から見た二関節筋の特徴分析”, 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会第16回例会, 2009

- [26] 辻 俊明, 熊本 水頼, “ナメクジウオ型ロボットによる拮抗3関節機構の模擬とその実験的検証”, 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会第16回例会, 2009
- [27] 大島 徹, 藤川 智彦, 熊本 水頼, “動物の筋配列による四肢先端の運動学的解析”, 日本機械学会論文集 (C編), 65巻, 635号, pp. 2837-2844, 1999
- [28] 日本機械学会, “機械工学便覧 デザイン編 η 8 生体工学”, 日本機械学会, 2007
- [29] 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
- [30] 川崎 晴久, “ロボット工学の基礎”, 森北出版株式会社, 1991
- [31] Nobuhiro Hayashida, Takahiro Yako, Toshiyuki Murakami and Kouhei Ohnishi, “A Friction Compensation in Twin Drive System”, IEEE 6th International Workshop on Advanced Motion Control, 2000
- [32] 高森 年, “アクチュエータ革命 - 変わるエネルギー伝達機構”, 工業調査会, 1987
- [33] B. Tondu et al., “Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators”, IEEE Control Systems Magazine April 2000, pp. 15 - 38, 2000
- [34] 則次 俊郎, “空気圧ゴム人工筋の開発と人間支援ロボットへの応用”, 日本 AME 学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 186 - 190, 2006
- [35] Jung-Gyu Park et al., “外乱オブザーバを用いた空気圧ロボットのインピーダンス制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 4, pp. 154 - 161, 1997
- [36] 竹村, 横田, 他, “電界共役流体に発生するジェット流を用いたマイクロ人工筋アクチュエータ”, 日本機械学会論文集 C編, 71巻, 708号, pp. 141 - 147, 2005
- [37] 三井 和幸, 他, “EHD現象を応用した流体駆動型アクチュエータ”, 生体機構制御・応用技術専門委員会 第12回例会, 2008
- [38] Satoshi Tadokoro et al., “An Actuator Model of ICPF for Robotic Applications on the Basis of Physicochemical Hypotheses”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000
- [39] Kentaro Takagi et al. “Development of a Rajiform Swimming Robot using Ionic Polymer Artificial Muscles”, IEEE IROS, 2006
- [40] M. Shahinpoor et al., “Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles - a review”, Smart Material Structure, No. 7, pp. R15 - R30, 1998
- [41] T.F. Otero et al., “Artificial muscles based on conducting polymers”, Bioelectrochemistry and Bionergetics 38, pp. 411 - 414, 1995
- [42] 株式会社イーメックス, “株式会社イーメックスホームページ”, <http://www.eamex.co.jp>

- [43] Ron Pelrine et al., “High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%”, *Science*, vol. 287, pp. 836 - 839, Feb 4. 2000
- [44] Yusril Yusuf et al., “Low-voltage-driven electromechanical effects of swollen liquid-crystal elastomers”, *Physical Review E* 71, 061702, 2005
- [45] Yusril Yusuf et al., “Swelling dynamics of liquid crystal elastomers swollen with low molecular weight liquid crystals”, *Physical Review E* 69, 021710, 2004
- [46] Koji Ikuta, “Micro/Miniature Shape Memory Alloy Actuator”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1990
- [47] Josiah B. Rosmarin et al., “Synergistic Design of a Humanoid Hand with Hybrid DC Motor - SMA Array Actuators Embedded in the Palm”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008
- [48] S. B. Choi et al., “Position tracking control of an optical pick-up device using piezoceramic actuator”, *Mechatronics* 11, pp. 691 - 705, 2001
- [49] Hyoung-Kyu Kim et al., “Compliant control of a two-link flexible manipulator featuring piezoelectric actuators”, *Mechanism and Machine Theory*, 36, pp. 411 - 424, 2001
- [50] 梅村敦史, 篠原真央, 羽根吉寿正, 斎藤之男, “遊星歯車モータ駆動による二関節ロボットアームの先端出力特性”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 2009
- [51] 肥田知仁, 呉世訓, 内田利之, 堀洋一, “遊星歯車を用いた 2 関節同時駆動機構を有するロボットアームの実現”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-09-121, 2009
- [52] Gill A. Pratt, “Series Elastic Actuators”, *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots System*, vol. 1, pp. 339-406, 1995
- [53] Michael Zinn, Oussama Khatib, Bernard Roth and J. Kenneth Salisbury, “Playing It Safe”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 12-21, June 2004
- [54] Alan Bowling and Oussama Khatib, “Design of Macro/Mini Manipulators for Optimal Dynamic Performance”, *IEEE ICRA 1997*, 1997
- [55] Michael Zinn, Oussama Khatib, Bernard Roth, “A New Actuation Approach for Human Friendly Robot Design”, *IEEE ICRA 2004*, 2004
- [56] 駒田 他, “非線形バネ要素を用いた腱駆動機構の位置・剛性制御”, 平成 19 年産業応用部門大会, 2-S8-3, 2007
- [57] 石塚, 小金澤, “非線形弾性要素を有するアクチュエータを用いた拮抗駆動型関節の剛性および姿勢制御”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会, 2007
- [58] Tuneo Yoshiikawa, “Manipulability of Robotic Mechanisms”, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 4, No. 2, pp. 3 - 9, 1985

- [59] Tuneo Yoshikawa, “Dynamic Manipulability of Robot Manipulators”, Journal of Robotic Systems, vol. 2, No. 1, pp. 113 - 124, 1985
- [60] Stephen L. Chiu, “Task Compatibility of Manipulator Postures”, The International Journal of Robotics Research, vol. 7, No. 5, pp. 13 - 21, 1988
- [61] Ryo Kurazume and Tutomu Hasegawa, “Impedance matching for a serial link manipulator”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2004
- [62] 独立行政法人 産業技術研究所 デジタルヒューマン研究センター, “AIST 人体寸法・形状データベース”, <http://riodb.ibase.aist.go.jp/dhbodydb/>

発表文献

受賞

- [1] 平成 20 年電気学会産業応用部門部門大会優秀論文発表賞（部門表彰）
- [2] 平成 18 年電気学会産業応用部門部門大会優秀論文発表賞（部門表彰）

査読付き論文

- [1] 吉田 憲吾, 内田 利之, 呉 世訓, 堀 洋一, “二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの実現”(投稿中)
- [2] 吉田 憲吾, 呉 世訓, 堀 洋一, “二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの筋粘弾性に基づく制御手法”(投稿準備中)
- [3] 吉田 憲吾, 呉 世訓, 堀 洋一, “生物型アームのための拡張した操作性指標とその応用”(投稿準備中)

査読付き国際学会

- [1] Kengo Yoshida, Sehoon Oh and Yoichi Hori, “Muscular Viscoelasticity Design and Evaluation in Feed-forward Position Control of Robot Arm based on Animal Musculoskeletal Model”, AMC 2010, 2010, Nagaoka (採択済み)
- [2] Kengo Yoshida, Naoki Hata, Sehoon Oh and Yoichi Hori, “Extended Manipulability Measure and Application for Robot Arm Equipped with Bi-articular Driving Mechanism”, IEEE IECON 2009, 2009, Portugal
- [3] Kengo Yoshida, Toshiyuki Uchida, Sehoon Oh and Yoichi Hori, “Experimental Verification on Novel Robot Arm Equipped with Bi-articular Driving Mechanism”, IEEE ISIE 2009, 2009. 7. Korea
- [4] Kengo Yoshida, Toshiyuki Uchida and Yoichi Hori, “ Novel FF Control Algorithm of Robot Arm Based on Bi-articular Muscle Principle - Emulation of Muscular Viscoelasticity for Disturbance Suppression and Path Tracking - ”, IEEE IECON07, 2007. 11, Taiwan
- [5] Kengo Yoshida, Naoki Hata, Toshiyuki Uchida and Yoichi Hori, “ A Novel Design and Realization of Robot Arm Based on the Principle of Bi-articular Muscles ”, IEEE ICIT06, 2006. 12, India

招待講演

- [1] 吉田 憲吾, 内田 利之, 堀 洋一, “ 模擬生体アクチュエータ装備協調制御ロボット ”, 精密工学会 2007 年度秋季大会 シンポジウム「精密工学への 2 関節筋力学体系導入」, 2007. 9, 旭川

国内学会・研究会

- [1] 吉田 憲吾, 呉 世訓, 堀 洋一, “二関節同時駆動機構を持つロボットアームへの操作性指標の適用”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 2009. 9, 横浜
- [2] 吉田 憲吾, 内田 利之, 呉 世訓, 堀 洋一, “二関節同時駆動機構を備えるロボットアームの静・動特性の実験的考察”, 平成 21 年電気学会産業応用部門大会, 2009. 9. 津
- [3] 吉田 憲吾, 呉 世訓, 堀 洋一, “二関節同時駆動機構を持つロボットアームの制御手法の検討”, 生体機構制御応用技術専門委員会第 16 回例会, 2009. 8, 東京
- [4] 吉田 憲吾, 畠 直輝, 呉 世訓, 堀 洋一, “拡張した可操作性指標による二関節筋を持つロボットアームの評価”, 平成 20 年電気学会産業応用部門大会, 2008. 8, 高知
- [5] 吉田 憲吾, 畠 直輝, 呉 世訓, 堀 洋一, “可操作性指標の二関節筋を含むアームへの拡張”, 生体機構制御応用技術専門委員会第 12 回例会, 2008.8, 東京
- [6] 吉田 憲吾, 内田 利之, 堀 洋一, “二関節同時駆動機構を持つロボットアームの実現”, 電気学会産業計測制御研究会, 2008. 3, 東京
- [7] 吉田 憲吾, 古関 隆章, 堀 洋一, “筋の粘弾性を模擬した新しいロボットアームの制御手法”, 平成 19 年電気学会産業応用部門大会, 2007. 8, 大阪
- [8] 吉田 憲吾, 内田 利之, 堀 洋一, “二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの実現と筋の粘弾性を生かした制御に関する研究”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-07-65, 2007.3, 長岡
- [9] 吉田 憲吾, 内田 利之, 堀 洋一, “二関節同時駆動機構を装備したロボットアームの設計と制作”, 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会, 第八回例会, 2006.11, 東京
- [10] 吉田 憲吾, 堀 洋一, “二関節同時駆動機構を持つロボットアーム”, 平成 18 年電気学会産業応用部門大会, 2006.8, 名古屋
- [11] 吉田 憲吾, 畠 直輝, 堀 洋一, “6 つの神経素子によるロボットマニピュレータの駆動方法”, 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会, 第 5 回例会, 2006.3, 東京
- [12] 吉田 憲吾, 畠 直輝, 堀 洋一, “二関節同時駆動機構を持つロボットアームの製作”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-06-09, 2006.3, 浜松
- [13] 吉田 憲吾, 堀 洋一, “二関節筋を利用したロボットアームの特性に関する考察” 電気学会産業計測制御研究会, IIC-05-64, 2005.3, 名古屋

謝辞

学部学生の頃より博士課程まで6年間に渡ってご指導いただきました堀洋一先生にまずお礼申し上げます。

技術職員の内田利之さんにはロボットアーム製作、実験を通して大変お世話になりました。また、歴代の秘書である崎山さん、越智さん、高木さん、降籙さんには日々の研究生生活の中でたくさんのサポートをいただきました。畠直輝先生、呉世訓先生からは研究に対して特に多くのアドバイスをいただきました。さらに、学生としてともに研究生生活を送った堀研究室の皆さんに感謝申し上げます。

熊本水頼先生をはじめとする、精密工学会生体機構制御応用専門委員会の諸先生方には、研究に対するアドバイスや励ましをいただきました。また委員会では多くの発表の機会、議論の機会をいただき、本研究活動の中心でした。深く御礼申し上げます。

電気系工作室の渋谷様には実験機の製作時等で大変お世話になりました。また、電気系事務室、グローバルCOE事務室の皆様にもお世話になりました。古関隆章先生をはじめとする古関研究室の皆様とは二関節筋を中心とした研究に関する議論を行なう機会を何度も持つことができました。改めて感謝申し上げます。

グローバルCOEプログラムおよび財団法人日本学生支援機構からは、リサーチアシスタント制度及び奨学金の形で経済的なサポートをいただきました。最後に、プライベートな部分で支えて下さった家族と友人達に感謝いたします。

付 録 A ロボットアームの製作資料

A.1 実験機の設計と製作

本節では、3章にて製作したロボットアームに関して、主要な構成部品の一部および、組み立て図を示して説明を補足する。まず図 A.1 に示すのが、二関節同時駆動機構のうち R1 側のトルク伝達機構である。円筒形のアルミ棒を繰り抜き、中央部に一つのベアリングが格納できる。両端にはギアとプーリーを食め込み固定することができる。プーリーの内側を掘り下げること、こちらにもベアリングを格納し、都合 2 点で軸から支えることができ、安定したトルク伝達を可能にする。

次に、各モータは調整用の設置位置調整部品 (図 A.2) を介して本体に搭載される。一定の規格のギヤードモータを取り付け可能である。また調整部品の穴位置を変えることで、他の規格のモータも取り付け可能である。図 A.3 はリンク 1 の上板であり、こちらに調整部品を介してモータを取り付け可能である。取り付け部分を長穴としているため、数 mm のギアの噛み合わせの調整が可能となる。リンク 1 に関して、リンク 2 側にはベアリングを埋め込むことができ、その上からエンコーダを固定できる。また、ベース側に関してはギアを埋め込んで固定できる。中央部はリンク 1 の剛性を保つために、上板と下板をつなぐ部材の取り付け穴である。

全体の組立図を図 A.4(リンク 1 とリンク 2) および、図 A.5(リンク 1 とベース) に示す。各軸はリンクあるいはベースに埋め込まれたベアリングによって 2 点で支持され、軸に垂直な方向の力を受ける。また、軸に平行な方向に関しては、スラストベアリングによって受けることができる。高さ方向は、軸の下端のナットを締めることで、調整可能である。また、軸上のプーリ、ギア、その他部品の間は内径が軸の径に等しいスリーブを入れることによって、高さ等の規定をしている。図 A.4 中程は、タイミングベルトのテンション調整機構である。

本機を製作し、運用する中で浮かび上がった改良すべき点、検討すべき点について記す。まず、二関節同時駆動機構についてであるが、本稿でも記したがタイミングベルトのテンションが張った状態でないと効果を得られず、本機においてこの障害となるのはタイミングベルトの緩みと弾性、およびギアのバックラッシュである。これらが存在すると、反転時等でただちにトルクが伝達されず、衝撃的にトルクが加わる、トルクが抜けるということが生じる。この点は、本機構を用いる際には機構面と制御面の両面において対策を講じる必要がある。また、二関節同時駆動機構のモータの位置については、本体内部に完全に閉じ込められる構造となってしまったため、メンテナンス性が下がってしまった。

各モータについては、衝撃や位置の調整を考えるとタイミングベルトによって軸とを連結しても良いと考える。ただし、前述の二関節同時駆動に対して、拮抗駆動に対して悪影響となることはトレードオフとして考慮する必要がある。特に第 2 軸に関しては拮抗駆動されることを考えると、ギアやプーリと軸との接合に対して頑丈にする必要がある。また、本機はエンコーダを各軸にのみ備えているが、各モータに設置し必要に応じて二関節同時駆動機構の動作を調整できたほうがより好ましいと考えられる。

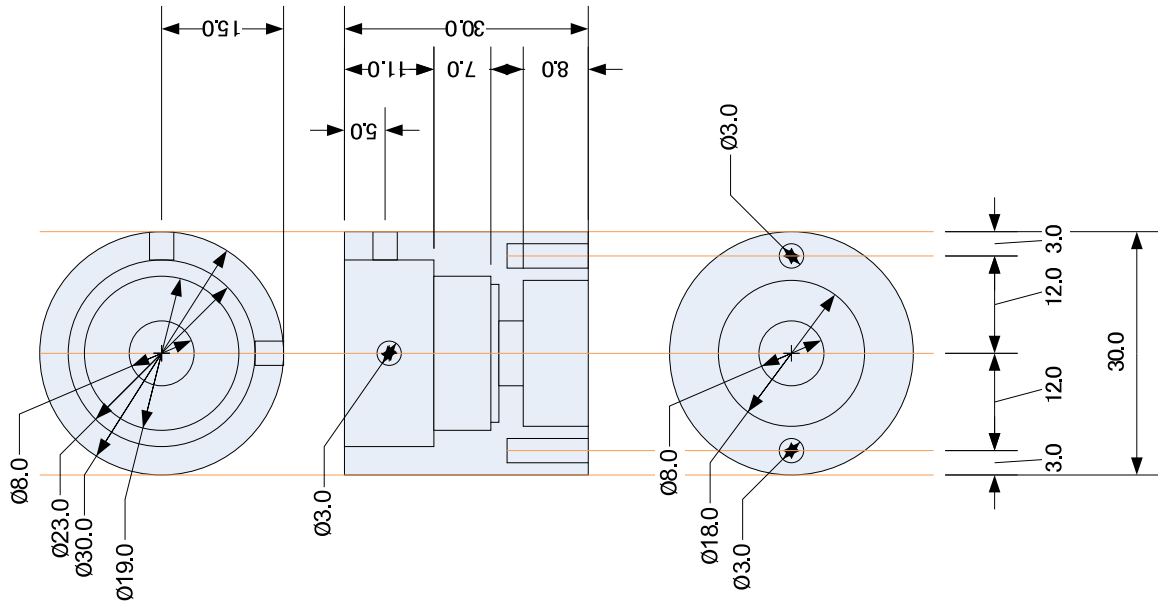


図 A.1: 二関節同時駆動機構の R1 側トルク伝達機構部品図

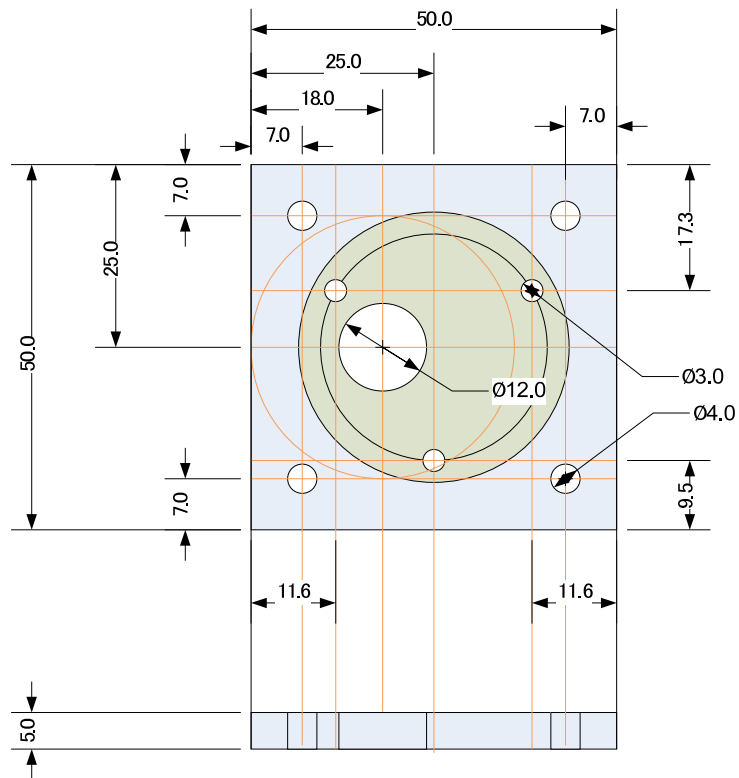


図 A.2: モータの設置位置調整板部品図

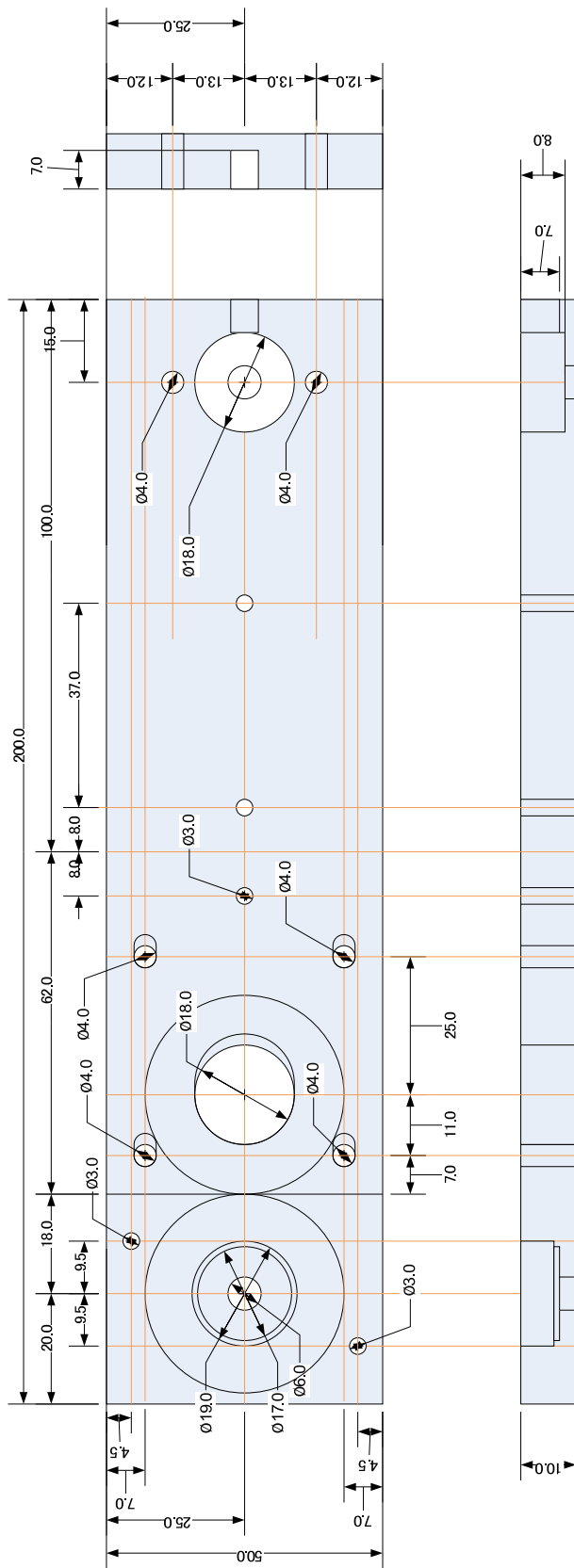


図 A.3: リンク 1 部品図

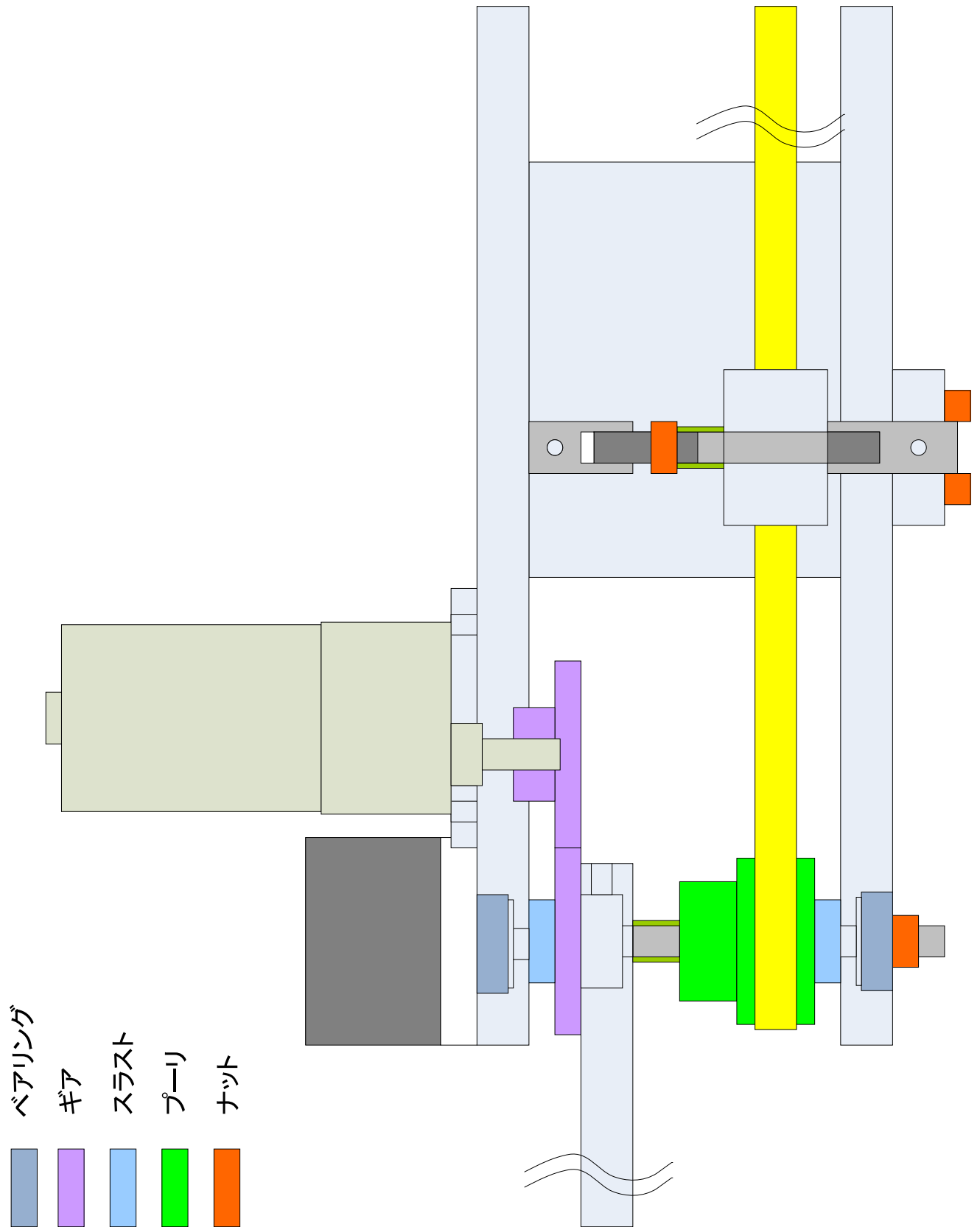


図 A.4: 組立図 (リンク 1、リンク 2 部分)

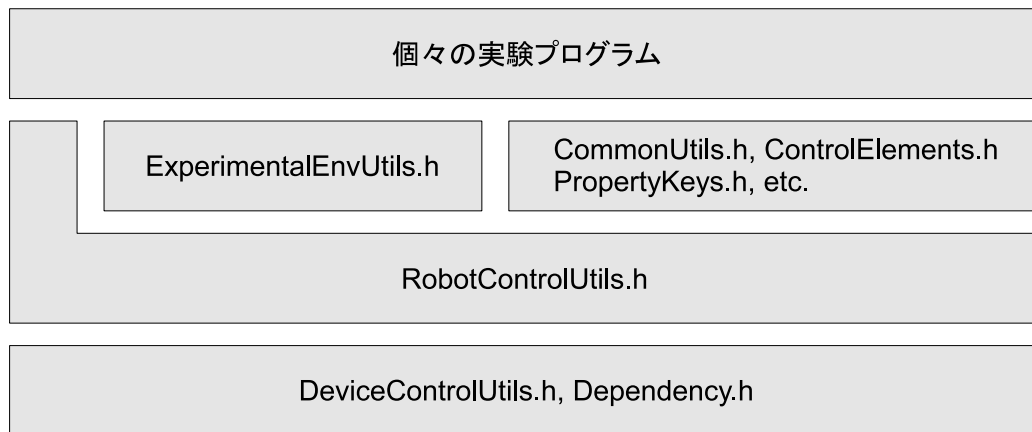


図 A.6: フレームワークの階層構造

A.2 実験用プログラムの設計と製作

A.2.1 実験用プログラムのフレームワーク

二関節同時駆動機構を備えるロボットアームの制御プログラム用の簡易なフレームワークを作成した。本フレームワークは以下の特徴を持つ。

- [1] 階層化によって、制御プログラムとデバイスや OS に依存する部分を切り分けることが可能
- [2] コンパイルの設定を替えることでシミュレーション用プログラムとしても動作させることができ、共用することができる。
- [3] プロパティファイルの形で複数のファイルに分けて管理し、これを読み込むことによって制御パラメタ変更と管理を容易にする。
- [4] 制御用のコンポーネント (制御器、フィルタ等) が利用しやすい形で整理し、用意されている。
- [5] 制御パラメタや実験データの書き出しを容易にする仕組みを備える。

本プログラムは C 言語で作成され、実験用の制御プログラムは現在のところ Art-linux と、インターフェース社製の AD-DA board(PCI-3523A) と Counter board(PCI-6201E) を持つコンピュータで動作する。(ただし、シミュレーションプログラムとしては、Art-linux 化されていない linux システムや cygwin 上でも動作可能である。) ただし、別の実時間システム上へは RobotControlUtils の実装を変更することで移植が容易な作りになっている。また ADDA-ボード等のデバイス類の変更に対しても同様に DeviceControlUtils の実装を変更することで容易に移植可能である。

図 A.6 には、フレームワークの各階層を図示する。DeviceControlUtils.h, Dependency.h では、インターフェースボードの制御の階層であり、メモリマップド IO を用いる際のアドレス等個々のデバイス構成ごとの差異を吸収する。次に、RobotControlUtils.h では、二関節同時駆動機構を持つロボットアームの制御の階層であり、システムの初期化や終了、ロボットに対するトルク指令や関節角度取得といった実験の共通部分を抽象化している。ということで、シミュレーション用のコンパイルではこの階層の実装を変更することで、実

験プログラムをそのままシミュレーションとして用いることができる。さらに上の階層では `ExperimentalEnvUtils.h` では典型的なプログラムの手順をまとめ、個々の実験プログラムごとに異なる部分のみ関数ポインタの形で受け取って実行する。事実上の `main` 文を提供する。個々の実験プログラムは雛形からそれぞれに固有の箇所を埋めることで、実験プログラムを完成させることができ、二重化を防ぐことができ、保守性を高めることができる。`CommonUtils.h`, `ControlElements.h` はそれぞれ、入出力に関するユーティリティ、制御器、フィルタに関するユーティリティとなっている。また、`PropertyKeys.h` には、各種制御パラメータの呼び出しキーを定数としてまとめてある。以下にフォルダ構造と主要なファイルを示す。

<code>Makefile</code>	実験用プログラムのコンパイル用の <code>Makefile</code>
<code>MakefileSim</code>	シミュレーションプログラム用の <code>Makefile</code>
<code>utils/</code>	フレームワークの主要なファイルが格納される。
<code>utils/DeviceControlUtils.h</code>	インターフェースボードの制御
<code>utils/DeviceControlUtils.c</code>	
<code>utils/Dependency.h</code>	個々のコンピュータへの依存情報
<code>utils/RobotControlUtils.h</code>	ロボットアームの制御
<code>utils/RobotControlUtils.c</code>	
<code>utils/RobotControlUtilsForSim.c</code>	シミュレーション用の実装
<code>utils/ControlElements.h</code>	制御器、フィルタに関するユーティリティ
<code>utils/ControlElements.c</code>	
<code>utils/ExperimentalEnvUtils.h</code>	実験プログラムの典型的な手順をまとめる
<code>utils/ExperimentalEnvUtils.c</code>	
<code>utils/CommonUtils.h</code>	入出力等のユーティリティ
<code>utils/CommonUtils.o</code>	
<code>utils/PropertyKeys.h</code>	プロパティファイルに用いるキー
<code>experiment/</code>	個々の実験プログラムを格納する
<code>experiment/template</code>	個々の実験プログラムの雛形
<code>props/</code>	制御パラメータを示す。
<code>props/default.dat</code>	最も一般的な制御パラメータのセット

A.2.2 主な構造体と関数の説明

`DeviceControlUtils.h` の主な関数

`inline unsigned long long int readCpuClockCount()` 現在の CPU カウントを返す。
リアルタイム性の確認に利用する。

`int initAD()` AD ボードの初期化

`int finalizeAD()` AD ボードの終了

`int readVoltage(int ch, double* voltage)` `ch` で表されるチャンネルから値を読み込んで電圧に変換し、ポインタ `value` が指し示す先に書き込む。戻り値が 0 以外はエラー、電圧の単位は V

`int initDA()` DA ボードの初期化

`int finalizeDA()` DA ボードの終了

`int writeVoltage(int ch, double voltage)` `ch` で表されるチャンネルへ、`voltage` で表される電圧に相当する値を書き込む。電圧の最大値 (最小値) を超える値を指定された場合は最大値 (最小値) を書き込む。戻り値が 0 以外はエラー、電圧の単位は V。

`int initCounter()` カウンタボードの初期化

`int finalizeCounter()` カウンタボードの終了

`int readAngle(int ch, double* angle)` `ch` で表されるチャンネルから値を読みこんで角度に変換し、ポインタ `angle` が指し示す先に書き込む。戻り値が 0 以外はエラー、角度の単位は rad

`int writeAngle(int ch, double angle)` `ch` で表されるチャンネルに、`angle` で表された角度に相当するカウントを書き込む。戻り値が 0 以外はエラー、電圧の単位は V。

RobotControlUtils.h の主な関数

`void initSystem()` 実験システムの初期化を行なう。

`void startRealTimePart(int cycleTime)` リアルタイム処理の開始、`cycleTime` ではマイクロ秒で周期を指定する。

`void waitInRealTimePart()` リアルタイム処理中に次の実行時刻まで待機

`void endRealTimePart()` リアルタイム処理の終了

`void beepInRealTimePart(int cntLength)` `cntLength` カウント間ビープを鳴らす。1 カウントは `startRealTimePart()` で指定した周期。

`void sleepInRealTimePart(int cntLength)` `cntLength` カウント間待機する。1 カウントは `startRealTimePart()` で指定した周期。

`int writeCurrentCommand(int ch, double val)` `ch` で指定するモータに、`val` の電流指令を送る。`ch` の指定は、RobotControlUtils.h で定義する定数を用いる。戻り値が 0 以外はエラー、電流値の単位は A。

`int writeCurrentCommands(double val1, double val2, double val3)` モータ 1、モータ 2、モータ 3 にそれぞれ `val1, val2, val3` の電流指令を送る。戻り値が 0 以外はエラー、電流値の単位は A。

`int readCurrentVal(int ch, double* val)` ポインタ `val` が示す先に、`ch` で指定したモータで計測された電流値を書き込む。`ch` の指定は、RobotControlUtils.h で定義する定数を用いる。戻り値が 0 以外はエラー、電流値の単位は A。

`int readCurrentVals(double* val1, double* val2, double* val3)` モータ 1、モータ 2、モータ 3 の電流値をそれぞれポインタ `val1, val2, val3` が示す先に書き込む。戻り値が 0 以外はエラー、電流値の単位は A。

`int readAngles(double* angle1, double* angle2)` ポインタ `angle1, angle2` が示す先に、`R1, R2` の角度を書き込む。戻り値が 0 以外はエラー、角度の単位は rad。

`int writeAngles(double angle1, double angle2)` `R1, R2` の現在の角度を `angle1, angle2` で指定した角度とする。戻り値が 0 以外はエラー、角度の単位は rad。

`ExperimentalEnvUtils.h` の主な構造体

`EXP_FUNC` 個々の実験プログラムにおいて固有の操作に関する関数を関数ポインタの形で格納し、フレームワークの中で呼び出し可能にする。

`ExperimentalEnvUtils.h` の主な関数

`int experimentMain(int argc, char **argv, void* env, EXP_FUNCS* funcs)` 実験プログラムの共通の手続をまとめる。`argc` はプロパティファイルの個数、`argv` はプロパティファイルのパスの配列、`env` は実験の制御器等、個々の環境を表す構造体が入る、`funcs` には固有の操作に関する関数ポインタをまとめた `EXP_FUNC` 構造体。

`CommonUtils.h` の主な構造体

`ARRAY` 実験データ格納用の `n` 行 `m` 列でアクセス可能な配列

`HASH_MAP` 制御パラメタ格納用の、複数の型を受け入れ可能なハッシュテーブル

`CommonUtils` の主な関数

`ARRAY* createARRAY(int row, int col)` `row` 行、`col` 列の `ARRAY` 構造体を作成する。

`void freeARRAY(ARRAY* array)` `array` で示される `ARRAY` 構造体を開放する。

`void writeData(ARRAY* array, int row, int col, double val)` `ARRAY` 構造体 `array` の `row` 行目、`col` 列に `val` の値を書き込む。

`void writeDataList(ARRAY* array, int row, int num, ...)` `ARRAY` 構造体 `array` の `row` 行目の先頭から `num` 個の値を書き込む。書き込む値は引数 `num` の後ろに並べる。

`double readData(ARRAY* array, int row, int col)` `ARRAY` 構造体 `array` の `row` 行 `col` 列の値を返す。

`void writeARRAY2File(FILE* file, ARRAY* array)` `file` が示す先に、`array` の中身を書き込む。値はスペース区切りで出力される。

`HASH_MAP* createHashMap()` `HASH_MAP` 構造体を作成する。

`void freeHashMap(HASH_MAP* map)` `map` を開放する。

`void putInteger(HASH_MAP* map, char* key, int i)` map に key という文字列のキーを使って i の値を登録する。

`int getInteger(HASH_MAP* map, char* key)` map に key で登録された int の値を返す。もし key に登録されていない、或いは値を double 型に変換できない場合は 0 を返す。

`void putDouble(HASH_MAP* map, char* key, double d)` map に key という文字列のキーを使って d の値を登録する。

`double getDouble(HASH_MAP* map, char* key)` map に key で登録された double の値を返す。もし key に登録されていない、或いは値を double 型に変換できない場合は NAN を返す。

`void dumpMap(HASH_MAP* map)` map の内容を、人間が読める形で出力する。

ControlElements.h の主な構造体

LPF ローパスフィルターの各係数と必要な過去の値を格納する。

LPF2 二次のローパスフィルターの各係数と必要な過去の値を格納する。

INTG 積分器の各係数と必要な過去の値を格納する。台形積分を実装する。。

DIFF 疑似微分の各係数と必要な過去の値を格納する。

PID PID 制御器の各係数と必要な過去の値を格納する。

MOTORDOB モータと負荷を k_{tn}/J_n にノミナル化する外乱オブザーバの各係数と必要な過去の値を格納する。

MUSCLE $u - k_{ux} - b_{ux}$ で表される筋モデルの各係数と必要な過去の値を格納する。

MUSCULARPAIR 拮抗対の各係数と必要な過去の値を格納する。

ControlElements.h の主な関数

LPF* `createLPF(double tau, double ts)` tau のカットオフ周波数の逆数 (Hz^{-1})、ts はサンプリング周期 (sec) で LPF を作成する。

`double execLPF(LPFF* lpf, double input)` 入力 input をローパスフィルタ lpf に通して 1 サンプル進め、出力を返す。

LPF2* `createLPF2(double tau, double ts)` tau のカットオフ周波数の逆数 (Hz^{-1})、ts はサンプリング周期 (sec) で二次の LPF を作成する。

`double execLPF2(LPFF2* lpf, double input)` 入力 input を 2 次のローパスフィルタ lpf に通して 1 サンプル進め、出力を返す。

INTG* `createINTG(double ts)` 台形積分による積分器を作成する。ts はサンプリング周期 (sec)

`double execINTG(INTG* intg, double input)` 積分器 `intg` に入力 `input` を与え 1 サンプル進め、その出力を返す。

`DIFF* createDIFF(double tau, double ts)` 疑似微分 $1/(\tau s + 1)$ を作成する。時定数を `tau` とし、`ts` はサンプリング周期 (sec) である。

`double execDIFF(DIFF* diff, double input)` 疑似微分 `diff` に入力 `input` を与え 1 サンプル進め、その出力を返す。

`PID* createPID(double tau, double ts, double kp, double ki, double kd)` PID 制御器の比例ゲイン `kp`、微分ゲイン `kd`、積分ゲイン `ki` を用いて PID 制御器を作成する。ここで `tau` は疑似微分の時定数 (sec) であり、`ts` はサンプリング周期 (sec) である。

`PID* createPDForMotor(double tau, double ts, double zn, double tr, double kt, double j)` モータを k_t/J と見做して、PD 制御器を作成する。`zn` と `tr` はそれぞれダンピングファクタと応答である。`tr` は疑似微分の時定数 (sec) であり、`ts` はサンプリング周期 (sec) である。

`double execPID(PID* pid, double delta)` PID 制御器 `pid` に、制御対象の目標値と実際の値の差分 `delta` を与え、1 サンプル進めて出力を返す。

`MOTORDOB* createMOTORDOB(double tauInner, double tauOuter, double ts, double kt, double j)` モータを k_t/J とノミナル化する外乱オブザーバを作成する。`kt,j` はトルク定数 (Nm/A)、慣性モーメントのノミナル値 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)。 `ts` はサンプリング周期 (sec)、`tauOuter`、`tauInner` はそれぞれ角度から角速度、角速度から角加速度の疑似微分の時定数 (sec) である。

`double execMOTORDOB(MOTORDOB* motordob, double crtcmd, double angle)` 電流指令 `crtcnd` と実際の角度 `angle` を `motordob` に与え、1 サンプル進めて出力を返す。

`MUSCLE* createMUSCLE(double tau, double ts, double k, double b, double r)` 筋をバネ定数 `k`(N/m)、ダンパ定数 `b`(N/ms) とし、関節角を `r`(m) として作成する。`ts` はサンプリング周期 (sec) で、`tau` は粘性項の算出のための疑似微分の時定数 (sec)

`double execMUSCLE(MUSCLE* muscle, double u, double angle)` 筋 `muscle` に関節角 `angle` と、収縮力 `u` を与えて 1 サンプル進め、出力を返す。

`MUSCULARPAIR* createMUSCULARPAIR(double tau, double ts, double k, double b, double r)` 拮抗対をバネ定数 `k`(N/m)、ダンパ定数 `b`(N/ms) とし、関節角を `r`(m) として作成する。`ts` はサンプリング周期 (sec) で、`tau` は粘性項の算出のための疑似微分の時定数 (sec)

`double execMUSCULARPAIR(MUSCULARPAIR* pair, double ue, double uf, double angle)` 伸筋側の収縮力 `ue`、屈筋側の収縮力 `uf` と関節角 `angle` を拮抗対 `pair` に与えて 1 サンプル進め出力を返す。

`double execMUSCULARPAIRSD(MUSCULARPAIR* pair, double S, double D, double angle)` 収縮力の和 S および収縮力の差 D、と関節角 angle を拮抗対 pair に与えて 1 サンプル進め出力を返す。

各制御要素、フィルタを表す構造体はそれぞれに作成、開放、実行、表示の 4 つの関数を備える。作成及び実行に関しては既に示した。ここでは、開放と表示の関数については全ての構造体で同型であるので、構造体を ANY として代表して示し個々の関数は省略する。

`freeANY(ANY* any)` any を開放する。

`printANY(FILE* file, ANY* any any` の種別、係数等を人間が読める形で file に書き出す。