

— 学位請求論文 —

単・二関節筋同時駆動ロボットの四肢の運動制御
Motion Control of a Robot Limb Using Simultaneous
Drive of Mono- and Bi-articular Muscles

平成22年12月9日

指導教員 古関 隆章 准教授

東京大学大学院工学系研究科
電気工学専攻 博士課程 37-077071

福正 博之

内容梗概

今日、人間を直接手助けするためや人間が立ち入れない環境下で代わりとなって働くための介護・アシストロボット等の研究が行われている。本論文は、産業応用分野と異なり、人間の生活環境のようにある程度広い環境適応性を持つロボットの四肢を対象とし、ヒトの持つ筋骨格構造と出力特性を生かした運動制御の理論と簡単かつ柔軟な制御手法の提案およびそれら工学的検証に関して論ずる。

四肢の二次元平面運動は、上肢における物を押しやり持ち上げる動きに相当し、下肢における直立・着地・二足歩行などの基本となる。ロボットがスムーズな二足歩行を実現することは、階段などの段差が存在する環境下に直接適応出来る点で有用であり、ヒトの筋骨格構造に学びロボットの腕や脚の制御が単純化されれば、直接的にヒトの手助けが実現する点で有用性がある。

本論文では、医学者や理学療法士らが注目する生物の筋骨格構造の中で、生体に特有の二関節筋と呼ばれる筋肉の役割と一関節筋と呼ばれる筋肉との協調性に着目する。生体に特有の二関節同時駆動とは、二関節筋と呼ばれる二つの関節にまたがった筋肉が、収縮時に両関節を同時に同じ力で回転させる駆動系を意味する。従来のロボットは各関節に一関節駆動を装備し、各関節を独自に制御することで多関節マニピュレータの運動を実現してきた。それぞれの関節を独自に駆動するマニピュレータの運動制御手法はロボット工学によって確立されているが、生体には二関節筋が存在することは事実であり、一関節筋と二関節筋の協調活動が行われていることが筋電図測定より明らかになっている。

最初に、3対6筋モデルと呼ばれるヒトの上肢と下肢に備わる筋骨格構造の特徴を利用した2リンクアーム・レッグのモデル化を導出した。次に、静止状態におけるヒトの構造的特徴と一関節・二関節同時駆動の協調性を生かした、先端での力と関節トルクとの関係を理論的に検証した。ヒトが頻繁に行う基本動作である支点と先端を結んだ方向への力の発生に着目し、ヒトの構造的特徴として二つのリンクの長さや関節の回転半径がそれぞれ等しいという条件の下で、一関節・二関節同時駆動の協調性を考慮したアクチュエータ出力と先端力の関係を定式化した。この条件下では、アクチュエータの制御が特異的に簡略化出来ることを理論的に導いた。この特徴的な条件は、先行研究のヒトの先端力と筋電位の同時測定の結果と一致し、ヒトが一関節筋と二関節筋の協調活動によって合理的な先端力制御を行っていることが分かった。そして、二関節筋を持つヒトは、支点と先端を結んだ軸に対称な先端力分布を備えおり、筋電図測定で示された各筋肉の出力制御により先端力の方向を見通し良く制御している。これに習ったアクチュエータ出力の制御手法を提案した。

続いて、腕や脚の運動における質量や慣性および重力の影響を考慮した関節トルク制御の理論を導いた。前述と同じヒトの基本動作である曲げ伸ばし運動に着目し、各リンクの質量が等しいという仮定を置くことで、関節トルクの数学的記述が簡略化出来る。この伸縮運動時の関節トルク分布を計算し、一次関数と二次関数を主とした関数であることから、伸縮運動時の非線形性の補償は簡単であることを導いた。

さらに、生物の柔軟性を仮想的なバネ・ダンパで再現した電磁アクチュエータ制御を利用し、支点と先端を結んだ軸に仮想的なバネ・ダンパを備え、粘弾性をソフトウェアで簡単に調整出来る制御の考え方を提案した。この基本的な伸縮運動が、以上の先端力制御と前項のトルク補償の重ね合わせで実現することを利用し、伸縮運動のヒトに学んだ簡略化手法を提案した。

また、ヒトの歩行についてのモデル化を行い、立脚時に地面を踏む力の方向が支点と先端を結んだ方向を基準に微小変化していることに着目して、提案した伸縮動作を応用した歩行動作を制御する方法を提案した。

そして、提案した伸縮運動制御を実験機に実装し、性能と問題点の評価を通じてその有効性を検証した。

本論文は、ヒトの構造的特徴と運動の特性の何が具体的に優れているのかという視点でヒトの特徴を抽出し、腕や脚の運動を工学的に解析した。その結果、ヒトの持つ二関節筋の役割とリンク長が等しいなどの構造的特徴が、基本動作の簡単な実現に役立っていることが明確化され、その知見がロボットの運動制御の簡単化に役立つことを示した。そして、その制御の具体的実装と実験的検証を試験機を用いて行った。

Abstract

Research on a robot for assisting a human is presently advancing. In this paper, characteristics of limbs of a robot which has wider environment adaptability than industrial applications are mainly discussed. In addition, motion control taking account of musculoskeletal mechanisms and output characteristic of a human is discussed. There are a lot of basic motions of the tip at the two-dimensional plane for a human such as picking up a heavy load by upper limbs and standing, landing and biped-walking in lower limbs.

It is qualitatively proven that cooperation of mono- and bi-articular simultaneous drives which are typical mechanisms of a human derives simplified relationship between each actuator torques and output force at the tip, and control system for a robot taking advantage of the characteristic and flexibility of a human is proposed and verified from the engineering point of view. Characteristic of the bi-articular simultaneous drive is that applies a rotational torque to adjacent joints simultaneously. On the contrary, a conventional artificial multi-joint manipulator does not have the drive and it has been totally controlled by combination of individual control of each joint drive. The conventional control for a multi-joint manipulator has been already realized by robotics. However, we have certainly the bi-articular muscles and the cooperation actuation has been confirmed by measurement of myoelectric potentials of human muscles.

First, two-link model of an arm or a leg taking account of three pairs and six muscles mechanism of a human was theoretically described. In addition, relationship between output force at the tip and joint torques on static condition taking advantages of structural characteristics and cooperation of mono- and bi-articular simultaneous drives of a human has been theoretically described. Relationship between actuator torques depending on the cooperation of mono- and bi-articular simultaneous drives, and output force at the tip has been simply formulated, in case of that the direction of the output force is limited to the axis between a supporting point and a tip which is one of the fundamental action of a human and length of each link and radius of rotation of each joint are set to same respectively from an analogy to human structure. It has been theoretically derived that actuator control can be specifically simplified at the situation. Moreover, those actuator torques for the output force corresponded to activations of muscles of a human from the simultaneous measurement of output force and myoelectric potentials of muscles using Electromiogram (EMG). It has been proven that a human has rational mechanism for output force control at the tip taking advantage of the cooperative actuation of mono- and bi-articular muscles. Additionally, a human has a typical output force distribution which is symmetrical to the axis connecting between the supporting point and the tip, and control of the direction of the force is realized adjusting muscular forces based on the simple linear patterns for the direction to the axis. A simple patterned actuator control taking account of the direction of the output force and activation of each muscle has been proposed based on the investigation.

Furthermore, a control of joint torques for dynamic motions of an arm and a leg taking account of mass, inertia and gravity have been theoretically derived. The characteristics have been simply formulated at stretching motion to the straight line in case of the specific situations as mentioned above and mass of each link is same. It has been derived from numerical calculation that the functional

frames of torques for compensating such inertia and gravity effects are linear and quadratic. Therefore, compensation of the nonlinearity of the motion can be simplified in the stretching motion.

Moreover, flexible control for the stretching motion using virtual spring and damper connecting between the supporting point and the tip has been proposed from biomechanical point of view. Flexibility of a biological subject can be modeled by an electric actuator control using virtual spring and damping factors, and its characteristics are to be tuned by software. The fundamental stretching motion can be realized by superposition of flexible output force control and supplemental simple torques including easy nonlinearity. The easy control method taking advantages of human features is useful from engineering point of view.

Furthermore, a walking motion of a human has been modeled and it has been theoretically described that directions of the reaction force to the ground during the motion are set to the axis connecting the hip point and ankle points, with small displacements from the axis. A control method for the walking motion can be proposed based on the proposed stretching motion.

Finally, the proposed stretching motion control was implemented to a test robot, and the availability of the control was verified through the control performance and a problematic point of experiment.

In this paper, characteristic of motion taking advantage of a human structure and feature of a human has been analyzed from engineering points of view. Consequently, a function of bi-articular simultaneous drive and structural characteristics of a human such as length of each link is same, are useful for realization of simple fundamental motion. The simplified motion control can be applied to engineering robots directly. Experiment of a test arm have proven a practical way of implementation of the control to an artificial robot arm.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	生体の筋骨格構造と筋出力特性に着目した研究	3
1.3	本論文の目的	4
1.4	本論文の構成	5
第 2 章	一関節筋と二関節筋の協調制御特性	8
2.1	ヒトの筋肉と二関節筋の概要	8
2.2	先行研究 [6], [7] でまとめられた一関節筋と二関節筋の協調制御の概要	8
第 3 章	静止状態における先端力の定式化に基づく	
	ヒトのリンク構造と一関節・二関節筋の協調制御の意味	12
3.1	筋配列を考慮した 2 リンクアームのモデル化と二関節同時駆動の概要	12
3.2	ヒトの持つリンク特性と一関節・二関節の協調的同時駆動を利用した先端力特性	13
3.2.1	先端力特性と各筋肉により発生する回転トルクの関係	13
3.2.2	ヒトの構造的特徴に学ぶ先端力の定式化	14
3.2.3	日常生活で頻繁に行われる支点と先端を結んだ方向への力とアクチュエータトルクの関係の定式化	14
3.3	筋配列を考慮した最大力制御の最適化と剛性の観点から見る二関節同時駆動の合理性と優位性	16
3.3.1	先端力特性とアクチュエータトルクの関係から見る二関節同時駆動の利点	16
3.3.2	線形計画法を用いた最大出力の最適化に基づく二関節同時駆動の利点	17
3.3.3	筋の粘弾性を用いた剛性特性から見る二関節同時駆動の利点	20
3.4	支点から任意の方向に真っ直ぐに力を出す場合の先端力の定式化	22
3.5	リンク長が異なる条件下における先端力特性の考察	23
3.6	本章のまとめ	26
第 4 章	動特性を持つ腕自身の運動に伴う関節トルクの定式化と先端力制御との重ね合わせの理論	27
4.1	2 リンクアームの運動方程式	27
4.1.1	本論文で用いる 2 リンクアームモデルの概要	27
4.1.2	ラグランジュの運動方程式を用いた関節トルクの計算	28
4.2	支点と先端を真っ直ぐに結ぶ方向への伸縮運動の特性	30
4.2.1	先端速度・加速度特性	30
4.2.2	鉛直方向への伸縮運動時の関節トルクの定式化	31
4.2.3	鉛直方向への伸縮運動時の関節トルクの非線形性	31
4.3	任意の方向への伸縮運動時における関節トルクの定式化	32
4.3.1	回転行列を用いた任意の方向への伸縮運動時の関節トルクの定式化	33
4.3.2	任意の方向への伸縮運動に伴う関節トルクの非線形性	34

4.4	先端力と腕自身の運動に伴う関節トルク特性を重ね合わせた伸縮運動の制御	34
4.4.1	ダランベールの原理を用いた運動の問題の取扱い	35
4.4.2	数値解析による鉛直方向への伸縮運動時の関節トルク特性	36
4.5	本章のまとめ	39
第5章	生物の柔軟性を考慮した外乱力補償を簡単に実現する伸縮運動の制御	40
5.1	仮想粘弾性と二関節筋の考慮により柔軟な先端力制御を簡単に実現する伸縮運動の制御の提案	40
5.1.1	柔軟な外乱力補償を持つ鉛直方向への伸縮運動の制御	40
5.1.2	任意の方向からの外乱力を補償した鉛直方向への伸縮運動の制御	41
5.2	二関節同時駆動の有無による柔軟な外乱力補償の相違	43
5.2.1	二関節同時駆動を持たない機構による鉛直方向への伸縮運動の制御	43
5.2.2	二関節同時駆動の有無による任意の方向からの外乱力補償の比較	43
5.3	柔軟な外乱力補償を持つ任意の方向への伸縮運動の制御	44
5.3.1	任意の方向への柔軟な伸縮運動の制御	44
5.3.2	任意の方向からの外力を柔軟に補償する伸縮運動の制御	45
5.4	本章のまとめ	46
第6章	実証実験による運動制御特性の評価	47
6.1	実験に基づく伸縮運動の工学的検証の概要	47
6.1.1	先端力を直接フィードバックするための試験機のハードウェア構成とその特徴	47
6.1.2	制御系の構成	48
6.2	一関節・二関節筋の協調的同時駆動を実装した試験機先端力の測定	50
6.3	二関節同時駆動と仮想粘弾性を考慮した外乱力補償の実装と評価	54
6.3.1	想定する運動方向である y 方向の外乱力の補償	54
6.3.2	ヒトの筋出力の微調整と先端力方向の微調整の関係を利用した想定外の任意の方向からの外乱力補償	58
6.4	伸縮運動を実現するための補償トルクによるフィードフォワード制御の実装	69
6.4.1	リンク質量が異なる試験機の伸縮運動に伴う関節トルクの非線形性	69
6.4.2	試験機の回転運動に伴う外乱の影響	70
6.5	本章のまとめ	74
第7章	二関節筋の特長を用いた下肢の柔軟かつ簡単な伸縮運動制御と歩行制御の提案	75
7.1	一関節・二関節の協調的同時駆動と仮想粘弾性を備えた下肢の柔軟な伸縮運動の理論	75
7.1.1	床反力と各筋肉によるアクチュエータトルクの関係の定式化	76
7.1.2	脚の伸縮に伴う関節トルクの定式化	77
7.1.3	脚の伸縮に伴う関節トルクの非線形性	78
7.2	柔軟な床反力制御と脚の伸縮に伴う関節トルク制御を重ね合わせによる鉛直落下からの着地動作の検証	78
7.2.1	鉛直落下からの着地動作の概要と柔軟な床反力補償	78
7.2.2	数値解析に基づく柔軟な着地動作の検証	81
7.3	ヒトの下肢の特徴に着目した一定速度歩行の定式化	83
7.3.1	歩行の概要	83
7.3.2	一定速度歩行のモデル化	83

7.3.3	上体と遊脚を運ぶための床反力の制御	83
7.3.4	立脚中の片脚の運動特性	85
7.4	数値解析に基づく一定速度歩行時の関節トルクの特	87
7.4.1	比較的低速な一定速度歩行	87
7.4.2	歩行速度を上げた場合	87
7.4.3	左右両脚で4ステップ進んだ場合	87
7.5	柔軟な床反力の制御とアクチュエータトルクの微調整に着目した一定速度歩行の簡単な制御の提案	92
7.6	本章のまとめ	94
第8章	結論と今後の課題	95
8.1	結論	95
8.2	今後の課題	97
	参考文献	99
	本研究に関する発表論文および研究業績	100
	謝辞	104
付録A	生体の構造的特徴と先端力特性およびアームの運動に伴う関節トルクの関係	106
A.1	リンクの長さが異なる2リンクアームの運動に伴う関節トルクの特	106
A.2	関節の回転半径が異なる2リンクアームの運動特性	107
A.2.1	先端力特性	107
A.2.2	アーム自身の運動に伴う関節トルクの特	108
付録B	筋電図測定結果に基づく先端力の方向とアクチュエータトルクの制	109
B.1	先端位置が y 軸上にある場合	109
B.2	先端位置が任意の点にある場合	111
付録C	筋の粘弾性と拮抗筋の特徴を利用した剛性特性を考慮した伸縮運動の制御アルゴリズム	114
C.1	一関節・二関節の協調的同時駆動の持つ剛性特性を考慮した伸縮運動の制	114
C.2	二関節同時駆動を持たない機構による剛性特性を考慮した伸縮運動の制	115
C.3	仮想粘弾性を考慮した外乱力補償と筋の粘弾性と拮抗筋による剛性特性を組み合わせた力制御の実装と評価	116
C.3.1	剛性特性の実装と条件設定	116
C.3.2	剛性特性を考慮した一関節・二関節の協調的同時駆動による外乱力の補償	117
C.3.3	剛性特性を考慮した二関節同時駆動の有無による外乱力補償の相違	120
付録D	位置制御形インピーダンス制御と提案する外乱力制御の相違	123
D.1	位置制御形インピーダンス制御	123
D.2	位置制御系の構成	124
D.3	位置制御形インピーダンス制御を用いた外乱力に対する変位の補償	125
付録E	腕や脚の伸縮運動に必要な関節トルクと一関節・二関節筋相当のアクチュエータトルクの関係	129
E.1	腕や脚の伸縮運動に必要な一関節・二関節筋相当のアクチュエータトルクの定式化	129
E.2	伸縮運動時の各アクチュエータトルクの特	130

E.3 伸縮運動時の各アクチュエータトルクのまとめ	132
付 録 F 試験機的设计図	133
付 録 G 3 軸力センサの取扱い	136

目 次

1.1	食事補助ロボット Handy-1 (英)Rehab robotics 社 [3]	2
1.2	日本で作られた有名なヒト型ロボット	2
1.3	ヒトの下肢に存在する腓腹筋を取り入れた跳躍ロボット [10]	3
1.4	沖電気工業製の二関節筋を装備したロボット [11], [12]	4
1.5	FEMS プログラムによるクラウチングスタート時の各筋肉の出力と先端力分布の計測結果 [6]	5
1.6	生体の筋骨格構造を取り入れたロボット [13]	6
1.7	ヒトの下肢の筋骨格構造を模擬したロボット [14]	6
2.1	ヒトの筋配列 [6]	9
2.2	筋肉の構造とミオシンフィラメント [15]	10
2.3	生体の筋肉の基本特性 [16]	11
2.4	ヒトの筋肉のモデル	11
2.5	ヒトの上肢の各筋肉と先端力の関係	11
3.1	2リンクアームモデルの概要と各アクチュエータトルクの定義	13
3.2	二関節筋を持つヒトの先端力分布と一関節駆動のみによる先端力分布	17
3.3	先端が支点から任意の角度 (δ) 上に存在する場合のその方向への力の発生	22
3.4	各アクチュエータトルクの最大値が等しくリンク長が異なる場合の先端力分布特性	24
4.1	x, z 平面内の二次元運動モデル	27
4.2	2リンクアームの伸縮運動に伴う関節トルクの肩関節角加速度と角速度に対する依存性	32
4.3	回転行列を用いた手先位置と重力加速度を考慮した任意の方向への伸縮運動	33
4.4	2リンクアームの伸縮運動に伴う関節トルクの肩関節角加速度と角速度に対する依存性 ($\delta = \frac{\pi}{3}$ rad)	34
4.5	2リンクアームの伸縮運動に伴う関節トルクの肩関節角加速度と角速度に対する依存性 ($\delta = \frac{3}{4}\pi$ rad)	35
4.6	先端が z 軸上を移動する伸ばし運動	37
4.7	ワークを持つアームの鉛直方向への伸展運動時の特性	38
5.1	鉛直方向への力 (F_z) を入力とする鉛直方向への伸縮運動のブロック線図	40
5.2	支点と先端を結ぶ方向に柔軟性を持つ2リンクアームの概念図	41
5.3	鉛直方向への力 (F_z) を入力とし、任意の方向からの外乱力を柔軟に制御する鉛直運動のブロック線図	42
5.4	任意の方向からの外乱力に対する柔軟性を備えた2リンクアームと筋電図結果を利用したアクチュエータトルクの制御の概念図	42
5.5	二関節同時駆動を持たない場合の鉛直方向への伸縮運動のブロック線図	43
5.6	二関節同時駆動を持たない場合の任意の方向からの外乱力を補償した鉛直運動のブロック線図	44

5.7	任意の方向への力 F_Z を入力とする伸縮運動制御のブロック線図	45
5.8	任意の方向からの外力を補償する任意の方向への伸縮運動制御のブロック線図	45
5.9	柔軟性を持つ2リンクアームの任意の方向への運動の概念図	46
6.1	3リンク試験機の概要	48
6.2	製作した試験機の写真	49
6.3	実証実験における軸の取扱い	50
6.4	実験系の構成	50
6.5	3つの姿勢における先端力の測定結果 [N] (入力: $F = 1.00$ [N])	53
6.6	引っ張られたアームが戻る運動	55
6.7	y 方向の微小変位に対する外乱力補償特性の相違, (i) 固有角周波数: $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.75$	56
6.8	y 方向の微小変位に対する外乱力補償特性の相違, (ii) 固有角周波数: $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.50$	57
6.9	二関節筋の有無による外乱力補償特性の相違, (i) 固有角周波数: $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.75$, 微小変位	60
6.10	二関節筋の有無による外乱力補償特性の相違, (ii) 固有角周波数: $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.50$, 微小変位	61
6.11	二関節同時駆動の有無による外乱力補償特性の相違, (i) 固有角周波数: $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.75$, 大きな変位	62
6.12	二関節同時駆動の有無による外乱力補償特性の相違, (ii) 固有角周波数: $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.50$, 大きな変位	63
6.13	異なる姿勢における外乱力補償特性の相違, (i) 固有角周波数: $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.75$	65
6.14	異なる姿勢における外乱力補償特性の相違, (ii) 固有角周波数: $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.50$	66
6.15	異なる姿勢における外乱力補償特性の相違, (i) 固有角周波数: $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.75$	67
6.16	異なる姿勢における外乱力補償特性の相違, (ii) 固有角周波数: $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.50$	68
6.17	リンクの質量が異なる試験機の伸縮運動に伴う関節トルクの肩関節角加速度と角速度に対する依存性	69
6.18	肩関節が一定速度で回転する運動	71
6.19	試験機の肩関節が一定速度で回転する場合の運動特性	72
6.20	肘関節が一定速度で回転する運動	73
6.21	試験機の肘関節が一定速度で回転する場合の運動特性	73
7.1	下肢の筋肉の配置	75
7.2	下肢モデル	75
7.3	2リンクレッグの伸縮運動に伴う関節トルクの足関節角加速度と角速度に対する依存性	79
7.4	鉛直落下からの着地動作の概要	80
7.5	股関節にかかる床反力 (F_z) を柔軟に制御する鉛直運動のブロック線図	80
7.6	減衰振動する着地動作時の運動特性	82
7.7	一定速度歩行の概要	84
7.8	一般的なヒトの地面から股関節と重心までの距離	85
7.9	立脚の運動に伴う関節トルクの足関節角加速度と角速度に対する依存性	86

7.10	一定速度歩行時の運動特性 ($\dot{x}_G = 0.80$ [m/sec])	89
7.11	一定速度歩行時の運動特性 ($\dot{x}_G = 1.20$ [m/sec])	90
7.12	一定速度歩行時の運動特性 ($\dot{x}_G = 0.80$ [m/sec], 4 ステップ)	91
7.13	柔軟な外乱力補償を持つ伸縮運動の制御を拡張した簡単な一定速度歩行制御のブロック線図	93
7.14	提案する簡単な歩行制御と実際の歩行動作の理論式に基づくアクチュエータトルクの差	93
B.1	手先先端が y 軸上に存在する場合の一関節・二関節の協調的同時駆動と従来法から求めたの関節トルク特性の比較	111
B.2	手先先端が任意の位置に存在する場合の一関節・二関節の協調的同時駆動と従来法から求めたの関節トルク特性の比較	113
C.1	鉛直方向への力 (F_z) を入力とし剛性を考慮した鉛直方向への伸縮運動のブロック線図	115
C.2	二関節同時駆動を持たない場合の剛性を考慮した鉛直運動のブロック線図	116
C.3	剛性を考慮した外乱力補償特性, $u_{f2} + u_{e2} = u_{f1} + u_{e1}$	119
C.4	剛性を考慮した外乱力補償特性, $u_{f2} + u_{e2} = 2(u_{f1} + u_{e1})$	121
C.5	剛性を考慮した外乱力補償特性, 二関節同時駆動なし	122
D.1	位置制御に対するインピーダンス制御ループ	123
D.2	位置制御形インピーダンス制御を持つアクチュエータの位置制御のブロック線図	123
D.3	位置制御形インピーダンス制御の外乱に対する変位の補償特性, 固有角周波数: $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.50$, 微小変位	127
D.4	位置制御形インピーダンス制御の外乱に対する変位の補償特性, 固有角周波数: $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数: $\zeta = 0.50$, 大きな変位	128
E.1	任意の一方向への伸縮運動	129
E.2	アームが x 軸から角度 $\delta = \frac{3}{4}\pi$ rad の方向に伸縮運動する際の各アクチュエータトルクの肩関節角加速度と角速度に対する依存性	131
F.1	回転形モータとエンコーダを搭載する関節の構成	133
F.2	回転形モータとエンコーダを搭載する関節の構成およびリンク形状	134
F.3	水平運動を支持する台車構造と先端の出力を測定する 3 軸力センサ	135
G.1	実験に使用した 3 軸力センサ (協和電業 LAT-10010KA-2)	136
G.2	力センサの測定値を x, y 座標に変換するモデル	136

表 目 次

3.1	最大力を計算するための各アクチュエータトルクの条件	19
3.2	垂直方向への力の理論式と線形計画法を用いた最大力の比較	20
3.3	異なるリンク長による最大力分布特性の比較のための条件	25
4.1	2 リンクアームの基本定数と数値解析に用いる条件	28
4.2	アーム先端のワークの質量と先端の加速度特性	36
6.1	製作した試験機の基本定数	49
6.2	実験用モータとセンサ類の諸元	51
6.3	制御コントローラと電源の諸元	51
7.1	2 リンクレッグおよび上肢の基本定数 [27]	78
7.2	鉛直落下からの着地動作の数値計算に用いる変数	81
7.3	一定速度歩行の数値計算例に用いる変数	86
A.1	リンクの長さが異なる場合に手先が z 軸上に存在するための肘関節角度 $\theta_2(n)$ とリンクの長さが等しい場合 $\theta_2(1)$ の比	106
B.1	2 リンクアームモデルの仕様と定数	110
E.1	数値解析に用いる 2 リンクアームの基本定数	130

第1章 序論

1.1 研究の背景

人々は自分たちの生活を今までよりも便利・快適にすることを日夜考えており、その実現のために物を作り、道具を作り、機械を発明してきた。特に機械の発明により文化が著しく発展したことは誰もが知っていることであり、18世紀の半ばにイギリスで産業革命が起こったのを皮切りに織物を製作する産業機械が発明され、今日のような産業製品を作る工作機械へと発展した。その後、馬車などの代わりに自動車や鉄道を作りより速く移動することなどを実現してきた。そして、人間の代わりに仕事をする機械の中で、ロボットと呼ばれる、状況を判断して自動的に連続作業が行える機械の開発も進められた。ロボットという言葉は、1921年にチェコの劇作家カレル・チャペックが書いた“ハッサム万能ロボット (Rossum's Universal Robots)”の中に現れる人造人間が始まりと言われており、その語源は農奴の強制労働を意味するチェコ語の“Robota”とスロバキア語の労働者を意味する“Robotnik”であると言われている [1]。

産業用ロボットは、単純労働をヒトの代わりに実行することや、例えば原子力開発において放射能のある危険な環境下での人手を使わずに安全に作業をするなどの代わりとすることを目的に開発が始まった。その特徴は、既知の環境が準備された中で決められたタスクを自動的に高速かつ高精度に実現出来ることにある。産業応用ロボットは、現在、自動車や携帯電話などの部品を組み立てになどの様々な場所で使われている。自動化の観点からロボットと名づけられているが、一般的にヒトがイメージするロボットは、本論文で対象とするヒト型ロボットであろう。

本論文では、これらの産業用ロボットと対照的なヒト型ロボットについて扱う。ヒト型・動物型ロボットは、その名の通りヒトや動物の形を模擬したものであるが、その目的は先述の機械化の中でも人間が生活する環境下で人間を助ける・代わりとなって仕事をするものである。特に、人間を助けるという意味では、リハビリテーション分野で活躍する介護ロボット・福祉ロボットや、人間を楽しませながらガイドをするなどのエンターテインメントロボットなどが作られている。現状では、ロボット産業の市場の中では産業用ロボットが中心であり [2]、日本の産業用ロボットの総出荷額は世界の7割強を占める。しかし、今後の日本社会の高齢化と人口減少が進む背景から、ヒト型ロボットの需要が高まることは必至であり、サービスロボットなどの開発が進められている。

福祉ロボットとしては、HANDY 1 とよばれる有名なロボットがある。このロボットは基本的に食事専用で、手足がうまく動かないヒトでも自分の意志で食事することを目的として開発され、多くの場所で使われている [3]。その後、2000年あたりからヒューマノイドロボットの開発は急速に進んだ。HONDAが開発したASIMOが二足歩行を実現し、SONYが開発したQRIOがダンスをするなど、人間の基本動作を実現出来るようなロボットが披露され、[4]にあるようなプロジェクトも立ち上げられるようになった。さらに、ロボットスーツなどのように、ヒトが装着して重いものを持ち上げる動作をアシストするようなものも作られている [5]。

これらのロボットは、基本的にヒトや動物などの形に似せて作られている。必ずしも生体と同じような構造にする必要はないが、人間の日常動作の手助けをする目的から、人間が行う動作をロボットが行う頻度が高くなるため、人間の形に似せたものが多く考えられている。また、人間や動物の形に似ていることで我々が親しみやすいという理由もある。

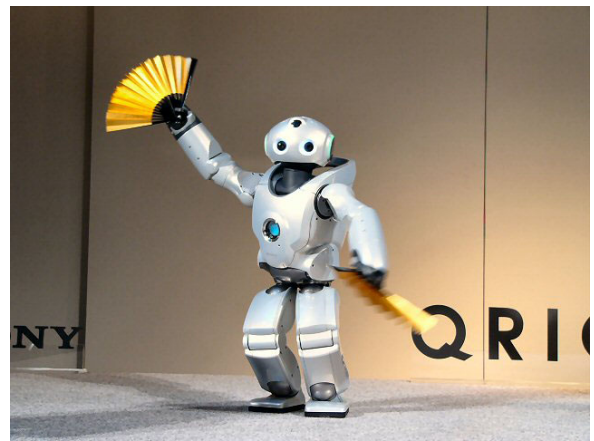
しかし、これらのロボットは外見は生物に似ているが、その機械的構造と駆動方法は生体と全く異なっ



図 1.1: 食事補助ロボット Handy-1 (英)Rehab robotics 社 [3]



(a) HONDA ASIMO



(b) SONY QRIO

図 1.2: 日本で作られた有名なヒト型ロボット

ており、人工物としての機構を扱う伝統的なロボット工学に基づいて作られてきた。この従来のヒト型ロボットは、各関節の独立駆動を基本とし、独立駆動の組み合わせにより多関節マニピュレータの運動制御を実現している。そして、複雑な運動学を解いて関節トルクを制御する理論に基づき、電磁アクチュエータなどを使用した関節の高速なフィードバック制御と運動学計算との組み合わせで運動が実現する。

一方、複雑な運動学計算を行う従来のロボットと比べて、ヒトをはじめとする生物は、単純かつ限定的速度で基本動作を実現していると医学者らは述べてきた。運動のために力を発生する筋肉に関して特性解析を行うと、筋肉は電磁アクチュエータのように応答性が高いわけではなく、非線形性も持つ。ロボットとの駆動源の違いに着目すると、生物は応答の遅い筋肉により動作を効率的に実現している。さらに、脳から神経を通じて制御を行う指令も従来のヒト型ロボットの制御系と比べて遅いと言われている。これは、生体が突然の外乱に俊敏に対応できないことから分かる。

高速なアクチュエータと高速なプロセッサを備えたロボットと生物を比べると、このように性能的に劣っているとも言える生物が運動を効率的に実現するのは何故だろうと考えた。そこには、生物が従来のロボットにない機構と制御系、特に基本動作を簡単に実現するためのシステムを備えているのではないかとの想定に行き当たる。医学者らの研究成果からは、簡単な制御システムは生体特有の筋骨格構

造と駆動特性に因るものではないかと考えられる。そこで、人間が行っている範囲の運動、すなわち頻繁に行う基本動作の簡単な実現のために、医学者らが研究してきた生体の特性をロボットに取り入れ、従来よりも簡単な構造と制御で基本動作が実現することは、ロボットを使うヒトにとって有益となる。

1.2 生体の筋骨格構造と筋出力特性に着目した研究

本節では、本論文で中心的に扱う生体の筋骨格構造その特性を考慮した既存研究を紹介し、概要と工学的アプローチに関して述べる。筋骨格構造とは、生物の上肢や下肢の筋肉の配置を考慮した関節の構造を意味する。生物の持つ筋骨格構造の特徴として二関節筋の存在が挙げられる。多くの生体はこの二関節筋を備えているが、前述の通りロボット工学に基づくロボットの設計論の中では二関節筋は考慮されてこなかった。この背景からヒトの持つ二関節筋に関して中心に述べる。二関節筋の考察は、体幹部でのエネルギーを四肢に伝える役割として二関節筋が機能していることを述べた Ingen Schenau[9] らの研究や、一関節を独立に駆動するロボット比べて一関節をいくつかの筋肉で駆動する意味で冗長性を備えている筋骨格構造が先端の制御に役立っていると述べた Hogan[8] らの研究から始まっている。エネルギー伝達の面では、ヒトの下肢に存在する腓腹筋と呼ばれる二関節筋が、運動時に各関節を駆動するトルクを特に体を鉛直方向へ運ぶための力に変換しているという仮説がある。これに対し、図 1.3 のような試験機を作って評価した研究もある [6]。Ingen Schenau らのグループがすでに腓腹筋を模擬した実験機で垂直飛びを実証実験したが、大島らは機械の支持を必要とせずに筋骨格構造のみで垂直飛び運動を実現し、生体の持つ二関節筋の一つの特徴を評価した [10]。

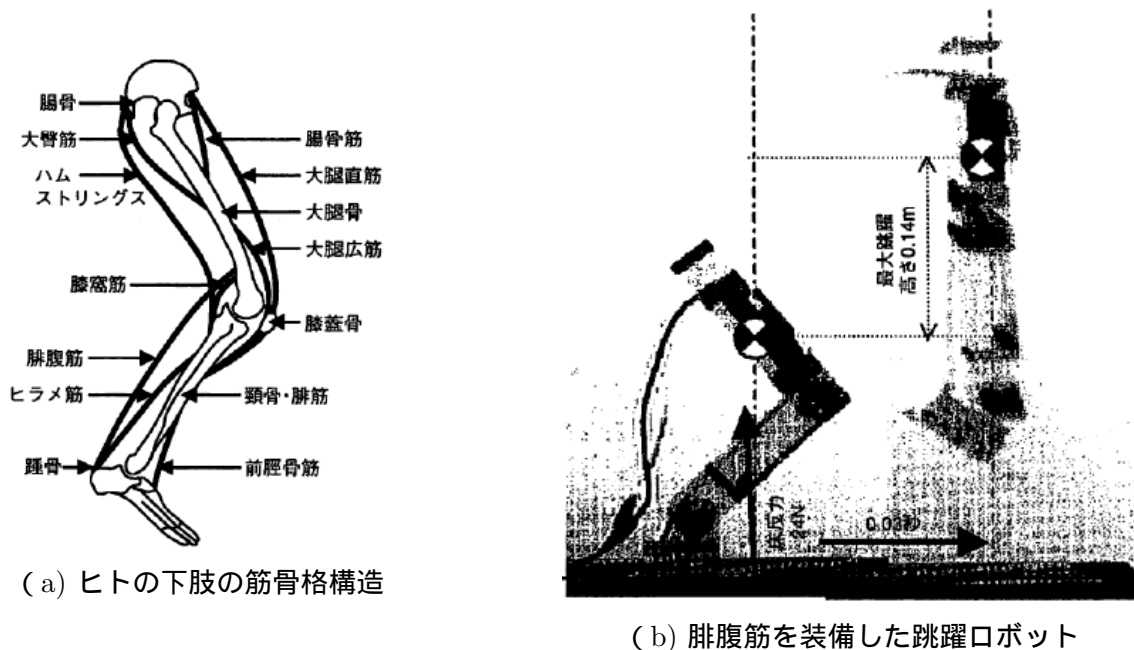
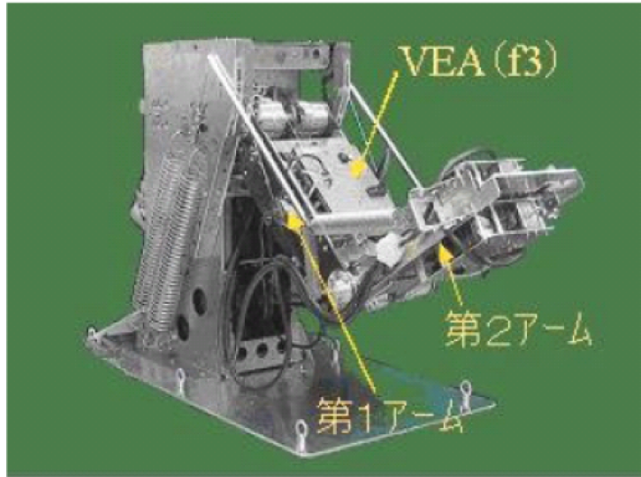


図 1.3: ヒトの下肢に存在する腓腹筋を取り入れた跳躍ロボット [10]

また、熊本らは二次元平面内の運動に限定した場合の筋骨格モデルの特性について論じ [6], [7]、図 1.4 に示す筋骨格構造を備えたロボットアーム・ロボットレッグが小田らによって製作され評価された。二つのロボットはヒトの筋骨格構造を模擬してアクチュエータを配置したところが特徴的である。(a) のロボットアームを先端の剛性特性の評価に使われた。そして、図 1.4(b) のロボットレッグを用いて垂直飛び運動を実現し、筋骨格構造の特性と生体の筋電図測定に基づいた簡単なアクチュエータ制御を検証した [11], [12]。

その他に、筋骨格構造の持つ二次元平面内の力特性の測定結果を具体的に数値化・視覚化した研究もある。図 1.5 はクラウチングスタートの姿勢と、その時の先端力分布から各筋肉の出計算し、視覚化している。冗長な筋肉の足し合わせから先端力が求まる筋骨格構造の特性を計算処理し、表示することを実現している。



(a) ロボットアーム



(b) ロボットレッグ

図 1.4: 沖電気工業製の二関節筋を装備したロボット [11], [12]

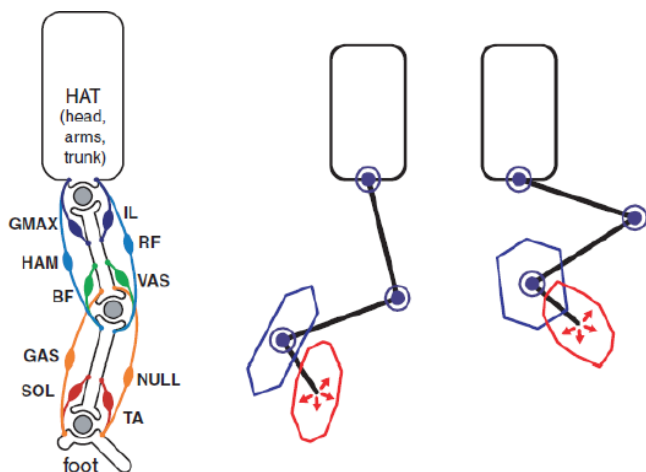
さらに、筋骨格構造に着目した近年の研究に関して紹介する。新山らは、先述の研究グループと同様に筋骨格構造に着目し、Mowgli と呼ばれる椅子の高さまでジャンプすることが出来るカエル型ロボットを製作した。加えて、図 1.6 のようにヒトの下肢の筋骨格構造を利用したモデルを製作している。このロボットは、図 1.6(a) にある筋骨格構造から得られる先端力分布に着目し、(b) の空気圧アクチュエータで各筋肉の出力を制御する機構である。製作した試験機を用いて垂直跳び動作を実現したり、鉛直方向からの着地運動の特性と姿勢の安定性を評価している [13]。

同様に、高山らもヒトの下肢の筋骨格構造をモデル化し、空気圧アクチュエータのバルブのタイミングを調節することで、図 1.7 に示すような連続ジャンプをするロボットを実現した [14]。発表等で実験の様子を拝見すると、ヒトと同じような動きを簡単な制御で実現する段階までに到達してきている。

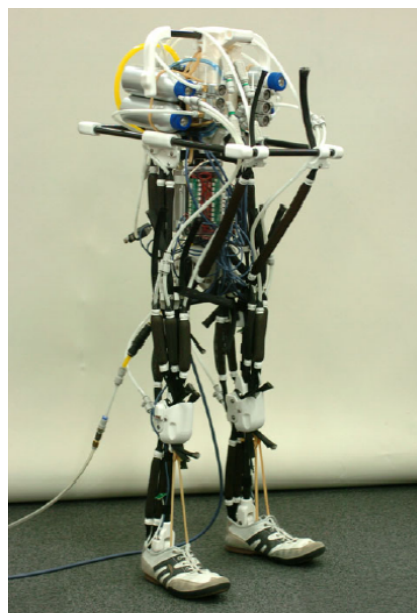
1.3 本論文の目的

背景で述べたヒトの筋骨格構造に着目した研究は、医学者らによるヒトおよび生物の特性解析に始まり、その特徴を取り入れたロボットの製作とデモンストレーションによる評価の段階まで進んできた。一方、生物の持つ特徴は目で見て分かるその構造と静止状態・運動状態の筋肉の筋電位測定などを基に議論されて来たが、ロボットに適用することで得られる特長を理論的・工学的な観点から論じることが重要である。

すなわち、本論文は、まずロボットの四肢の運動制御を単純化する目的で、ヒトの運動制御の何が具体的に優れているのかという視点からヒトの特徴を抽出し、運動を工学的に解析する。特にヒトのリンク長や関節の回転半径の特性や、先行研究 [6][7] などで着目されている、生体に特有の一関節・二関節の協調的同時駆動の特性を定式化する。さらに、ヒトの基本動作に着目し、その運動特性を定式化す



(a) ヒトの下肢の筋骨格構造のモデル化と先端力分布の計算



(b) 筋骨格構造を取り入れた下肢ロボット

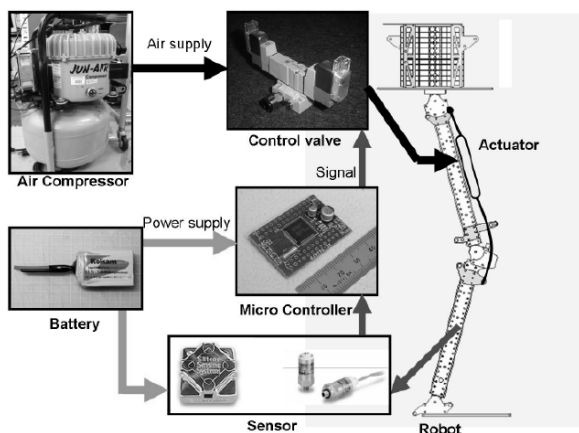
図 1.6: 生体の筋骨格構造を取り入れたロボット [13]

支点と先端を結んだ方向への伸縮運動時の関節トルクの理論の導出 自身の腕や脚を動かすための関節トルクの特性について、第3章で論じる基本動作とヒトの構造的特徴を考慮して定式化する。

特に、ヒトが頻繁に行う、支点と先端を結んだ方向への伸縮運動に伴う関節トルクを定式化し、その特性がヒトの構造的特徴を考慮することで単純化することを示す。伸縮運動時の関節トルクの分布を数値解析を用いて計算し、その非線形性が簡単な関数であることを導出する。

これより、動特性の影響を受ける関節トルクの非線形性が、簡単に補償可能であることを数学的に示すと同時に、ヒトの構造的特徴の合理性を論じ、ロボットの設計にとって重要な知見を工学的にまとめる。

柔軟な先端力制御と簡単なトルク補償を重ね合わせた伸縮運動の制御手法の提案 第3章と第4章からまとめた、構造的特徴と一関節・二関節の協調的同時駆動を利用した簡単な伸縮運動の制御を提案する。ヒトの持つ柔軟性を仮想粘弾性によって再現し、先述の微小変位に対する一関節・二関節



(a) 空気圧の制御による筋出力の制御



(b) 連続垂直ジャンプの様子

図 1.7: ヒトの下肢の筋骨格構造を模擬したロボット [14]

の協調的同時駆動を利用した柔軟かつ簡単な先端力制御を提案する。二関節同時駆動の有無により微小変位を引き起こす外乱力補償の特性が異なることを示し、二関節同時駆動の特長を論じる。そして、先端に働く運動の問題が力の問題に帰着出来ることを利用し、柔軟な先端力制御と第4章の定式化に基づく補償トルクの重ね合わせにより、柔軟性を簡単に実現する伸縮運動制御の理論を提案する。

提案する柔軟な伸縮運動の実験機への実装と有効性の評価 第5章でまとめられた簡単な伸縮運動の制御手法を試験機に実装し、性能の評価と問題点を検証する。

ヒトの持つ構造的特徴に学んだ試験機の構造の設計と製作および、先端力と関節トルク特性を忠実に評価するためのダイレクトドライブによる構成に関して述べる。次に、筋電図測定結果を用いた一関節・二関節の協調的同時駆動を考慮した先端力特性を測定し、先端力と関節トルク特性の実測値から試験機の基本性能を確かめる。

加えて、提案する柔軟な先端力制御を実装し、微小変位を引き起こす外乱力の補償を検証する。同様に、伸縮運動におけるトルク補償の理論に基づくフィードフォワード制御を実装し、伸縮運動の実現を確かめる。以上の二つの理論の重ね合わせについて考え、提案する制御手法の実用性を確かめる。

以上の検証に基づき、ヒトの構造的特徴と一関節・二関節の協調的同時駆動を実装した提案するロボットの制御を簡略化する方法を示す。

ヒトの下肢における柔軟な伸縮運動の提案と伸縮運動制御の拡張による一定速度歩行制御の提案 ヒトは下肢にも二関節筋を備え、一関節筋と協調活動を行っている。そして、直立・ジャンプ・着地など支点と先端を結んだ方向への伸縮運動を基本動作に持つ。よって、上肢と同様に下肢の伸縮運動における先端力特性と関節トルク特性の定式化を行う。加えて、下肢における柔軟な伸縮運動を簡単に実現する制御の理論を提案し、鉛直落下からの着地動作の理論を検証し、数値計算により特性を評価する。

また、同じく基本動作である一定速度歩行を理論的にモデル化し、提案する外乱力を柔軟かつ簡単に補償する伸縮運動の制御を拡張した、歩行に必要な関節トルクの制御を簡略化する方法を示す。

結論と今後の課題 最後に、本論文の結論と今後の課題を述べる。

第2章 一関節筋と二関節筋の協調制御特性

本章では、生体の持つ一関節筋と二関節筋と呼ばれる筋肉に関して説明し、先行研究 [6], [7] 等で述べられている一関節筋と二関節筋の協調制御が実現する生体の駆動特性を述べる。

2.1 ヒトの筋肉と二関節筋の概要

一関節筋や二関節筋は、一般的に先行研究 [6], [7] のように生体の特性を研究している医学者らによって名付けられた筋肉を指す。ヒトの上肢および下肢の筋配列と関節の組み合わせをそれぞれ図 2.1(a) および (b) に示す。一関節筋はその名の通り一つの関節につき、その筋肉の収縮により一つの関節を駆動する回転トルクを発生する。例えば、図 2.1(a) の f_1 の筋肉は肩の一関節筋と呼ばれ、肩関節を起点に上腕を屈曲する筋肉である。同様に f_2 の筋肉は肘の一関節筋で上腕筋と言う名前を持ち、上腕を起点に肘関節を屈曲する。生体の筋肉は収縮時のみに力を発生し、関節に対する関節トルクを与える。そのため、関節の屈曲と伸展のためには、図のように拮抗する筋肉のペアが必要となる。

本論文で具体的に扱う二関節筋に対して説明する。二関節筋は隣接する二つの関節にまたがり、その両関節を同時に収縮する特性を持つ。ヒトの腕の場合は、図 2.1(a) 中の f_3 と e_3 の筋肉がそれにあたり、これらの筋肉はそれぞれ上腕二頭筋、上腕三頭筋と呼ばれている。下肢においては e_3 , f_3 , e_5 が二関節筋であり、それぞれ大腿直筋、ハムストリングス、腓腹筋と呼ばれている。

一関節筋と二関節筋の筋肉自体の特性は同じであると言われている。本論文で対象とするこれらの筋肉は、両端が骨格に接続しているため骨格筋と呼ばれているが、骨格筋は筋繊維と呼ばれる細胞の集まりによって形成される。筋繊維の中筋原繊維と呼ばれる筋収縮を起こす細胞内器官が存在し、その最小構成単位はサルコメア (筋筋) と呼ばれる。このサルコメアは 1 本の太いミオシンを 6 本の細いアクチンが取り囲んだ形で形成される。これらはそれぞれたんぱく質である。神経からの刺激により、アクチンフィラメントがミオシンフィラメントの間に滑り込むことで筋が収縮し、刺激がなくなるとアクチンとミオシンが離れてアクチンフィラメントが元に戻る仕組みである [15]。

筋肉の張力は筋肉の長さに対して図 2.3(a) のような非線形特性を持つ [16]。この非線形な張力は、受動的張力と活動張力と呼ばれる二つの特性の和から形成され、実際の運動時においては図中の生理的範囲内で機能する。加えて、筋肉は収縮速度と筋張力に図 2.3(b) の関係がある。縮みながら筋力を発生する場合 (短縮性収縮) は、収縮速度が大きくなると発生する張力が小さくなるが、伸びながら力を発生する場合 (伸長性収縮) には速度依存しない特性がある。加えて、図中の U で示された運動指令にも依存する特性がある。ゆえに、関連する多くの研究 [17] 等において、図 2.4 のような収縮力に比例するバネ要素とダンパ要素を想定した筋肉のモデルが用いられ、筋の粘弾性を考慮した駆動法の研究が行われている。

本論文では、これらの生理学的検証に基づき一関節筋と二関節筋の筋肉自体の収縮特性は同じものとみなし、各筋肉の収縮により発生する関節トルクを理論的に導出する。

2.2 先行研究 [6], [7] でまとめられた一関節筋と二関節筋の協調制御の概要

本節では、先行研究 [6], [7] 等で測定に基づいた特性解析から、一関節・二関節の協調的同時駆動について定性的にまとめる。

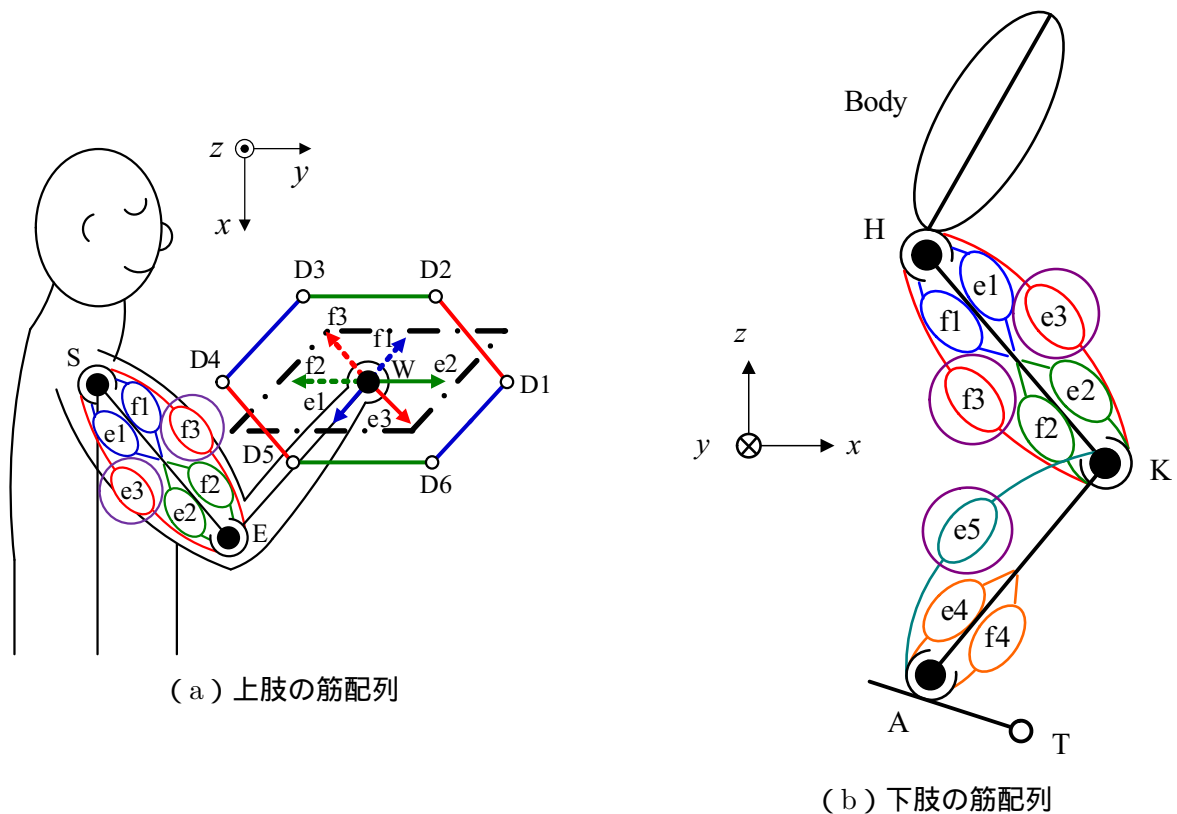


図 2.1: ヒトの筋配列 [6]

図 2.5 に上肢の筋配列を再掲し、協調制御特性について説明する。先述の通り、上肢は肩関節と肘関節にそれぞれ f_1, e_1, f_2, e_2 の拮抗する一関節筋が存在し、 f_3 と e_3 の拮抗二関節筋が存在する。図中の f と e はそれぞれ flexor : 屈筋, extensor : 伸筋を意味し、上肢の屈曲および伸展はこれらの筋肉により実現する。上肢はこのように 3 つの拮抗筋のペアが各関節に配置された構造であるため、筋骨格構造の中でも特に 3 対 6 筋構造と呼ばれる。先行研究 [6] にて、上肢の筋肉の特性の検証実験が行われ、二関節筋の存在の意義が以下のように分析され、説明された。図中の左にあるように、ある手先位置 (関節角度) で腕を固定し、手先先端から任意の方向に意図的に力を出す。その際に、手先先端で発生する力の x, y 方向成分をロードセルを用いて測定し、同時に皮膚表面電極誘導法を用いて $f_1 - e_3$ の各筋肉に相当する実際の筋肉の活動電位を測定した結果が図 2.5 である。図中の $D_1 - D_6$ は、手先 W から発生する力の方向を示しており、それぞれ支点となる肩関節と先端を結んだ方向 (D_1, D_4)、肘関節と手首関節を結んだ方向 (D_2, D_5)、そして肩関節と肘関節を結んだ方向 (D_3, D_6) を意味する。右のグラフは、手先から発生する力の方向に対応した各筋肉の筋電位特性を意味する。グラフの縦軸は各筋肉の最大出力を 100% として正規化したものである。

グラフから先端で発生する力の方向と各筋肉の収縮の関係が読み取れる。それは、任意の力の方向に対して各筋肉の反応が一意に決まることであり、全ての被験者で同じ傾向を示した。2 つの関節に発生する回転トルクから先端で発生する力の x, y 成分が求まるが、これに対して 3 対の拮抗筋は冗長 (余剰) である。すなわち、3 対 6 筋の筋肉は、理論的に先端力の方向に対して複数解を持つが、実際の生体では図 2.5 の右のグラフのように協調活動をしている。右のグラフにあるように、協調性を備えた各筋肉の出力が先端力の方向に対して線形的に変動している点が大きな特徴である。詳細に関しては後述の定式化を用いて論じるが、筋肉の出力パターンにより先端力の方向を調整し、そのパターンが単純な線形補間の形をとることから、先端力を簡単に制御していると考えられている。

加えて、先行研究 [6] で述べられている冗長な拮抗筋の協調制御の機能と役割を簡単に説明する。例えば D_1 の方向に力を発生することを考える。その際に図 2.5 の x, y 平面において反時計回り方向の回

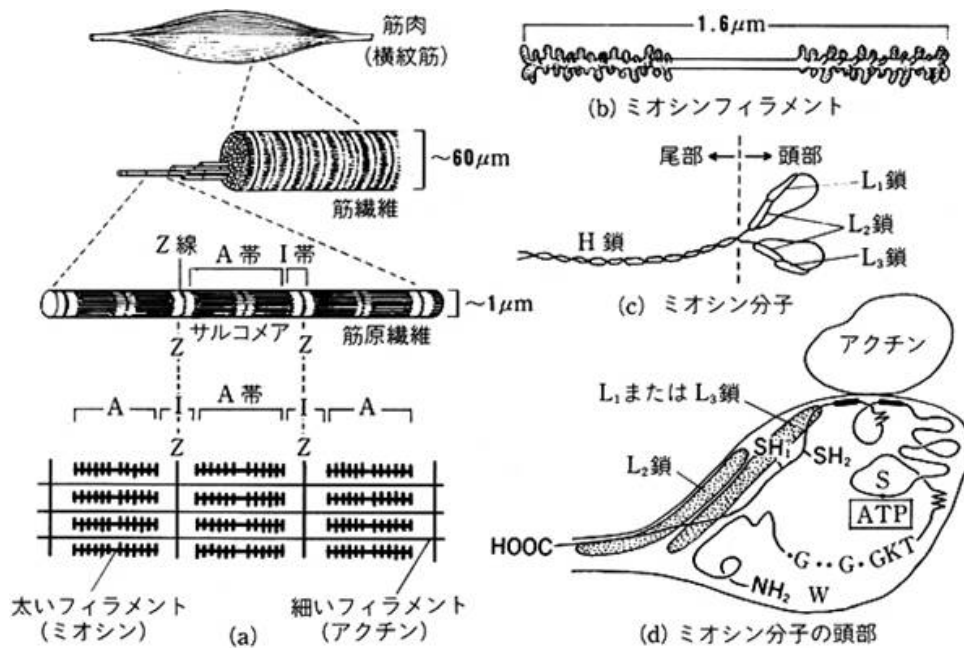


図 2.2: 筋肉の構造とミオシンフィラメント [15]

転トルクを正とすると、D1 方向に力を出す時に 100%の力を発生する筋肉 f1 により肩関節は反時計回りに回転するトルクが得られる。同様に二関節筋を考えると、筋電結果からは e3 の筋肉が 100%の力で収縮していることになり、この筋肉により肩関節と肘関節は同時に時計回りに回転するトルクを得る。その結果、肩関節においては一関節筋と二関節筋が発生するトルクは回転方向が逆なために打ち消し合い、もし二つの筋肉の最大出力が同じであれば肩関節トルクはゼロになる。この場合、肩関節にかかるトルクはゼロであるにもかかわらず各筋肉が力を発生していることは力の無駄遣いのように感じられるが、先行研究 [6] において、この相殺された筋肉の出力和は微小な変位に対する剛性を高めるのに役立っていると述べられている。D1 方向に力を発生させたときの筋電図結果から肘関節の一関節筋の出力を見てみると、e2 の筋肉は肘関節を時計回り回転させるトルクを発生する。そして、二関節筋である e3 は時計回りの回転トルクを発生し、肩関節は上述の f1 と e3 による反時計・時計周りの回転トルクが働く。力の込め方による剛性の調整に関する研究もなされているが、本論文では先端力制御を考える上での二関節筋の有無の得失とこの剛性特性を合わせて第 3.3 節で理論的に論じる。

また、ヒトは例えば D1 から少し D2 寄りもしくは D6 寄りに力の方向が変化する際には、それぞれ f1 と e2 の筋肉が同じ力を発生し続け、e3 の筋力を弱めると同時に f3 が出力するを行ったり、e2 と e3 の筋肉は同じ力を発生し続け、f1 の出力を弱めると同時に e1 が出力をするような特性を備えている。力の方向に応じて各拮抗筋の出力の微調整を行うこの制御は、先端から発生する力の方向 360 度すべてに対して行われていることが筋電図測定結果から明らかになっており、 x, y 平面の全方向に対して各筋肉は簡単な出力調整を行っている点から生体は簡単な力方向制御則を持っていると言える。本論文では、一関節筋と二関節筋の協調制御が基本動作における先端力制御に有効であることを定式化により示す。そして、一関節・二関節の協調的同時駆動を生かした先端力を簡単に微調整する制御を利用し、第 5 章で柔軟な外乱力補償の制御を提案する。

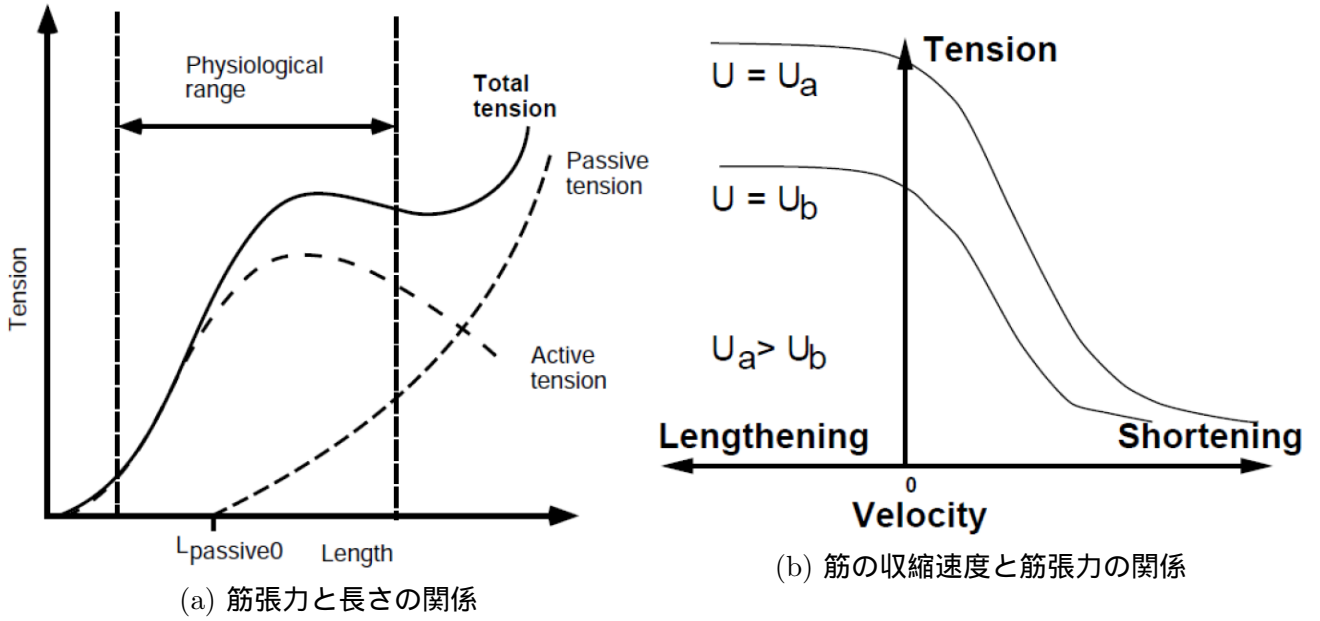


図 2.3: 生体の筋肉の基本特性 [16]

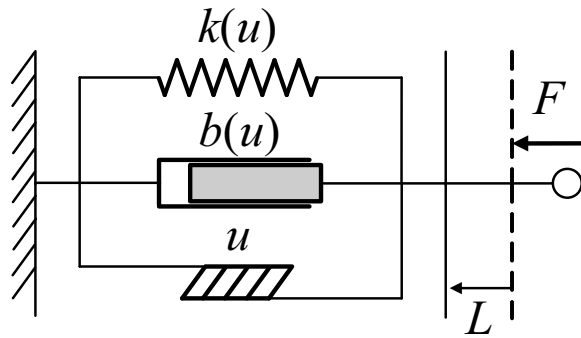


図 2.4: ヒトの筋肉のモデル

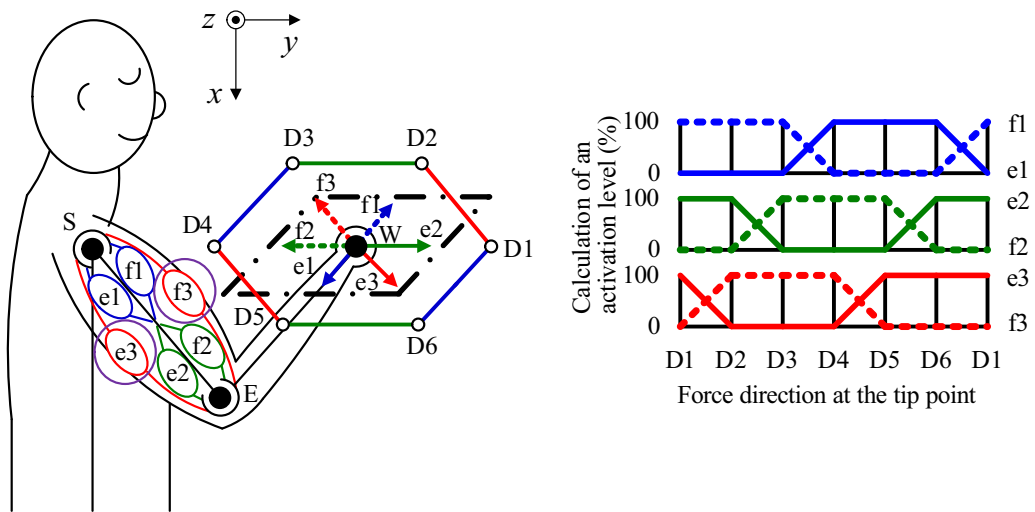


図 2.5: ヒトの上肢の各筋肉と先端力の関係

第3章 静止状態における先端力の定式化に基づく ヒトのリンク構造と一関節・二関節筋の協調 制御の意味

本章では、前章で説明した一関節筋と二関節筋を持つヒトの先端力特性を定式化する。特に、ヒトが日常的に行う基本動作でありロボットにとっても重要な動作である、支点と先端を結んだ方向への力の制御がヒトの構造的特徴と一関節・二関節の協調的同時駆動を考えることで簡単かつ合理的に実現出来ることを示す。そして、二関節同時駆動の特長を、二関節同時駆動を持たない機構の特性と比較する。

3.1 筋配列を考慮した2リンクアームのモデル化と二関節同時駆動の概要

前章で説明した、3対6筋を備えるヒトの上肢を用いて各筋肉の出力と関節トルクの間関係を説明する。図2.5と同様に、 x, y の二次元平面運動に対して3対6筋を持つ筋骨格構造を想定する。

図3.1のように肩関節を支点とし、リンク長： l_1, l_2 [m]、リンク角度 θ_1, θ_2 [rad]、および関節の回転半径： r_1, r_2 [m]を定義する。アームの先端の位置座標は次のように記述される。

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ロボット工学で用いられる、先端位置の角度微分から求められるヤコビ行列は以下のように求まる。

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\{l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\} & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

次に、図2.5に示した3対6筋の各筋肉の出力と関節のトルクの間関係を論じる。図に示すように、筋肉 f_1, e_1 は肩関節を駆動する一関節筋、 f_2, e_2 は肘関節を駆動する一関節筋、そして f_3, e_3 は両関節を同時に駆動する二関節筋である。本論文では図2.5における反時計まわりの回転トルクを正方向と定義する。ゆえに、各関節にかかる回転トルク ($\mathbf{T}_{\text{arm}} = [T_{\text{shoulder}}, T_{\text{elbow}}]^T$) は、関節の回転半径と各筋の出力から次のように表される [17]。ここで、各筋肉が発生する力を $F_{f1}, F_{e1}, F_{f2}, F_{e2}, F_{f3}, F_{e3}$ のように記述する [17], [18]。

$$\mathbf{T}_{\text{arm}} = \begin{bmatrix} T_{\text{shoulder}} \\ T_{\text{elbow}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (F_{f1} - F_{e1})r_1 + (F_{f3} - F_{e3})r_1 \\ (F_{f2} - F_{e2})r_2 + (F_{f3} - F_{e3})r_2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

生体の筋肉は収縮時のみに力を発生するため、式(3.3)に示すように反時計まわりの回転トルクを発生する筋肉(伸筋)による力(F_{fi})と、その拮抗筋である屈筋(F_{ei})の差に対して回転半径を掛けたものが関節にかかる回転トルクとなる。

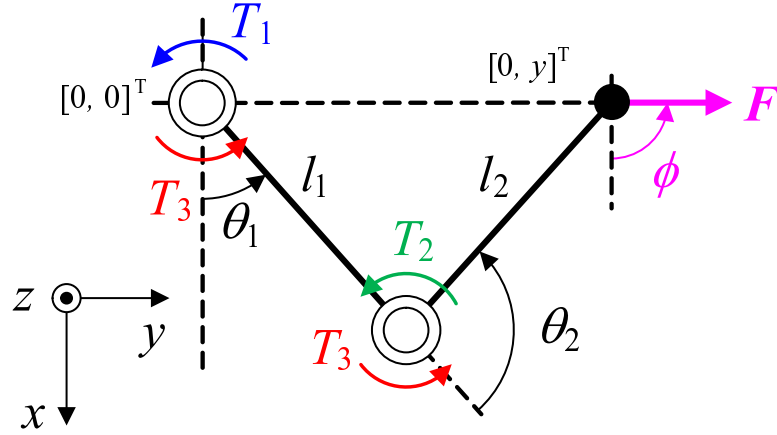


図 3.1: 2リンクアームモデルの概要と各アクチュエータトルクの定義

本論文では、各筋肉により各関節に発生するトルクを、図 3.1 を用いて次のように仮定する。図 3.1 中の T_1, T_2 はそれぞれ肩と肘に存在する一関節筋による回転トルク、 T_3 は二関節筋による回転トルクと定義し、これらをアクチュエータトルクと名付ける。ヒトの腕や脚は多くの拮抗筋を備えているが、拮抗筋の出力差から導かれる回転方向を正負のトルクで表現する。また、本論文ではヒトの腕や脚まわりの関節のつくりに着目し、関節の回転半径は等しいと考える ($r_1 = r_2 = r$)。2つの関節の回転トルクと各アクチュエータトルクの関係は次のように記述される。

$$\begin{bmatrix} T_{\text{shoulder}} \\ T_{\text{elbow}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

これより、各関節に同時に同じ回転トルクを与える二関節筋による回転トルクと、一関節筋によるトルクの関係が数式で表された。

3.2 ヒトの持つリンク特性と一関節・二関節の協調的同時駆動を利用した先端力特性

3.2.1 先端力特性と各筋肉により発生する回転トルクの関係

関節の回転トルクと先端で発生する力について説明する。従来からロボット工学で用いられている通り、仮想仕事の原理から関節トルク (τ) と、先端で発生する力 (F) には次の関係がある。

$$\tau = J^T(\theta)F \quad (3.5)$$

本論文では主に 2 リンクモデルを対象としているため、ヤコビ行列の転置行列の逆行列は式 (3.2) から計算可能である。ゆえに、先端で発生する力と各アクチュエータトルクの関係は次式で表される。

$$\begin{aligned}
\mathbf{F} &= \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = (\mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}))^{-1} \mathbf{T}_{\text{arm}} = (\mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}))^{-1} \begin{bmatrix} T_1 + T_3 \\ T_2 + T_3 \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{l_1 l_2 \sin \theta_2} \begin{bmatrix} l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\{l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)\} \\ l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -\{l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 + T_3 \\ T_2 + T_3 \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{l_1 l_2 \sin \theta_2} \begin{bmatrix} T_1 l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - T_2 \{l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)\} - T_3 l_1 \cos \theta_1 \\ T_1 l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - T_2 \{l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\} - T_3 l_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (3.6)
\end{aligned}$$

3.2.2 ヒトの構造的特徴に学ぶ先端力の定式化

本節では、ヒトの構造的特徴に着目し、一関節・二関節の協調的同時駆動との組み合わせで実現する先端力特性を定式化する。

本節で着目するヒトの構造的特徴の一つとして、腕や脚のリンク長および関節の回転半径がほぼ等しいことが挙げられる。関節の回転半径が等しいことは、二関節筋による力が各関節に同時に同じ回転トルクを発生することを式 (3.4) から導いた。また、式 (3.6) からリンク長が先端力特性に直接寄与することが明らかで、実際に多くの生物でリンク長がほぼ等しいことは、目で見て明らかな特徴である。そこで、リンク長が等しい場合の先端力を記述し、工学的観点からその意味を考える。2 リンクアームのリンクの長さが等しい場合の先端で発生する力は次式で表される ($l_1 = l_2 = l$)。

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} &= \frac{1}{l^2 \sin \theta_2} \begin{bmatrix} l \cos(\theta_1 + \theta_2) & -l\{\cos \theta_1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)\} \\ l \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l\{\sin \theta_1 + \sin(\theta_1 + \theta_2)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 + T_3 \\ T_2 + T_3 \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{l \sin \theta_2} \begin{bmatrix} T_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) - T_2 \{\cos \theta_1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)\} - T_3 \cos \theta_1 \\ T_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) - T_2 \{\sin \theta_1 + \sin(\theta_1 + \theta_2)\} - T_3 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (3.7)
\end{aligned}$$

式 (3.7) より、各アクチュエータトルクが先端力の方向に影響する。すなわち、 T_1 は肘関節と手先先端を結んだ方向への力、 T_2 は支点となる肩関節と手先先端を結んだ方向への力、および T_3 は肩関節と肘関節を結んだ方向への力に寄与することが分かる。この一般的な性質は後述する。

3.2.3 日常生活で頻繁に行われる支点と先端を結んだ方向への力とアクチュエータトルクの関係の定式化

ここでは、ヒトの基本動作に着目した力の方向に焦点を当て、リンク長が等しく一関節・二関節の協調的同時駆動を備えたアームが簡単な力制御を可能とすることを論じる。

基本動作として、ヒトにとって特に重要な支点と先端を結んだ方向への力に着目する。支点と先端を結んだ方向への力は、日常生活の中で頻度が高く、無意識で行うことも多い動作である。これは、例えば上肢において壁を真っ直ぐに押したり物を鉛直に真っ直ぐに持ち上げるような動作を意味する。下肢においては、まず地面に直立することはヒトにおける最も基本的な動作であり、垂直に跳ぶまたは垂直に落下する等の動作も頻繁に行っている。後述する歩行動作についても同じような特性を備えている。

二関節筋がある場合とない場合は先端力分布の形状が異なることが先行研究 [6] から明らかになっている。二関節筋を持つヒトの先端力分布は、支点と先端を結んだ軸に対称な六角形になるのが大きな特徴である。ゆえに、この支点と先端を結んだ方向への力は、ヒトにとって重要であると定性的に考えられる。なぜヒトがこの支点と先端を結んだ軸に対称な先端力特性を備えているのかについては、後述する定式化から明確化できる。また、直立動作などのように、支点と先端を結んだ方向が支点から垂直にあることが多いのもヒトの動作の特徴の一つとして挙げられる。例えば、目隠しをして壁を押す動作などを考えた場合に、手先先端が肩関節から垂直な方向に押す動作なら片手でも行えるのに対して、二次元平面において例えば体が向いている方向から $\frac{3}{4}\pi$ rad の方向に押す動作は両腕を使っても意識的に行わないと難しい。ヒトの自然な動作とは言っても、支点と先端を結んだ方向が肩関節から垂直な場合以外では、手首を巧みに使って先端力の方向を安定させる必要がある。

本節では、ヒトが頻繁かつ最も簡単に行っている、体が向いている方向から垂直に真っ直ぐな方向への力特性を理論的に導き、ヒトの持つ特徴を工学的観点から述べ、その利点を示す。手先先端が図 3.1 の y 軸上に存在し、そこから y 軸方向に力を発生することを想定する。リンク長が等しい 2 リンクアームの先端が y 軸上に存在する場合、関節角度に次の関係がある。

$$\theta_1 + \frac{\theta_2}{2} = \frac{\pi}{2} \quad (3.8)$$

先端が y 軸上に存在する場合の先端力とアクチュエータトルクの関係は、式 (3.7) と式 (3.8) から次式で表される。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \frac{1}{2l \sin \theta_1 \cos \theta_1} \begin{bmatrix} -T_1 \cos \theta_1 - T_3 \cos \theta_1 \\ T_1 \sin \theta_1 - 2T_2 \sin \theta_1 - T_3 \sin \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (\because 2\theta_1 + \theta_2 = \pi) \quad (3.9)$$

そして、この姿勢において y 軸方向に真っ直ぐに力を出す場合の先端力とアクチュエータトルクの関係は次式で表される (すなわち $F_x = 0$)。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T+T_2}{l \cos \theta_1} \end{bmatrix}, \quad (T_1 = T, T_3 = -T) \quad (3.10)$$

式 (3.10) から、リンク長が等しく二関節筋を備えた 2 リンクアームの手先が y 軸上に存在し、 y 方向に真っ直ぐに力を出す動作は、 $T_1 = -T_3$ の関係が成り立てば実現することが分かる。この $T_1 = -T_3$ の関係は、図 2.5 中の D1 (D4) 方向に力を発生する場合には、肩の一関節筋と二関節筋の f_1, e_3 (e_1, f_3) がそれぞれ最大出力を発生し、肘の一関節筋は e_2 (f_2) が最大出力を発生していることから、反時計まわりの回転トルクを正とした定義に基づく式 (3.10) と一致する。第 2 章の図 2.5 にヒトの手先先端での力と各筋肉の筋電位の同時測定の結果を示した。式 (3.10) と筋電図結果を比較すると、リンク長が等しく二関節筋を備えたヒトは、 $T_1 = -T_3$ とすることで y 方向への力を簡単に実現している。

また、 y 方向への力 (F_y) は、式 (3.10) で示すように回転トルク (T) と肘の一関節筋による回転トルク (T_2) および肩関節の余弦関数 ($\cos \theta_1$) に依存する。関節角度により y 方向への力の大きさが変化することは、例えば腕立て伏せを考えると分かりやすい。腕が縮んでいるときには腕を伸ばすために大きな筋力が必要とし、腕が伸びるに従ってこの方向への力のために必要な各筋肉の出力が小さくなり、結果として各筋肉の負担が軽くなる。また、重量挙げやバレーボール選手・競輪選手のように、支点と先端が垂直・特に鉛直に力を出す動作を頻繁に行う場合は、 T_2 に相当する筋肉の発達が目で見ても顕著である。これより、肘の一関節筋による回転トルクは y 方向への力の大きさに独立に寄与することが推定出来る。

以上より、ヒトの基本動作として重要な、支点から垂直な位置に先端が存在し、そこから垂直方向に真っ直ぐに力を出す運動のために、リンク長が等しいことと、一関節・二関節の協調的同時駆動が重要な役割を果たしていることが分かった。

3.3 筋配列を考慮した最大力制御の最適化と剛性の観点から見る二関節同時駆動の合理性と優位性

本節では、二関節筋を持つヒトと、各関節を独立に制御する機構のみで構成された従来のロボットを力特性と剛性特性の観点から比較する。そして、筋配列を考慮した最大出力制御の最適化 [19] から得られる先端力特性と前節の理論的結果を比較する。

3.3.1 先端力特性とアクチュエータトルクの関係から見る二関節同時駆動の利点

本論文で用いる二関節同時駆動に対し、一関節駆動とは一つの関節を一つのアクチュエータで駆動することである。生物の筋骨格構造を考慮していない従来のロボットは、この一関節駆動を各関節に備え、それぞれを独立に制御することで動作を実現してきた。この従来の一関節駆動・独立制御モデルと二関節同時駆動を備えたモデルの特性を理論的に比較する。

二関節同時駆動を備えないモデルにおいても、手先位置が y 軸上にある場合の先端で発生する力 $([F_x, F_y]^T)$ と関節トルク $([t_1, t_2]^T)$ の関係は、先述の通り仮想仕事の原理を用いて記述される。前節での検討を基に、リンクの長さは等しいとする。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} &= \frac{1}{l^2 \sin \theta_2} \begin{bmatrix} l \cos(\theta_1 + \theta_2) & -l\{\cos \theta_1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)\} \\ l \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l\{\sin \theta_1 + \sin(\theta_1 + \theta_2)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{l^2 \sin \theta_2} \begin{bmatrix} t_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) - t_2\{\cos \theta_1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)\} \\ t_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) - t_2\{\sin \theta_1 + \sin(\theta_1 + \theta_2)\} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.11)$$

はじめに、式 (3.6) から計算される先端力分布と、式 (3.11) から計算される先端力分布を比較する。先行研究 [6], [7] で検討されているように、二関節筋を持つヒトの手先先端の力分布は図 3.2 で色付けされた六角形になる。二関節筋を持つヒトの下肢も同様の力分布を持つ。

一方、二関節筋を持たない場合の先端力分布は、図 3.2 の一点鎖線で囲まれた灰色の領域になる。この図は、二関節筋を持つ場合の各関節トルクの最大値を $|T_{1\max}| = |T_{2\max}| = |T_{3\max}| = |T|$ としている。そして、二関節筋を持たない場合の各関節トルクの最大値を $|t_{1\max}| = |t_{2\max}| = |2T|$ としている。そのため、二関節筋を持つ場合の力分布よりも広がっているが、分布の大きさではなく分布形状が明確に異なることが重要である。この二つの先端力分布形状の違いから、支点と先端を結んだ方向への力特性と微小変位に対する力の微調整について考える。

二関節筋を持たない 2 リンクモデルにおいて、手先が図 3.1 上の y 軸上に存在し、 y 方向に力を発生することを考える。その場合の先端力とアクチュエータトルクの関係は、式 (3.11) から次式で表される。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{t_2}{l \cos \theta_1} \end{bmatrix}, \quad (t_1 = 0) \quad (3.12)$$

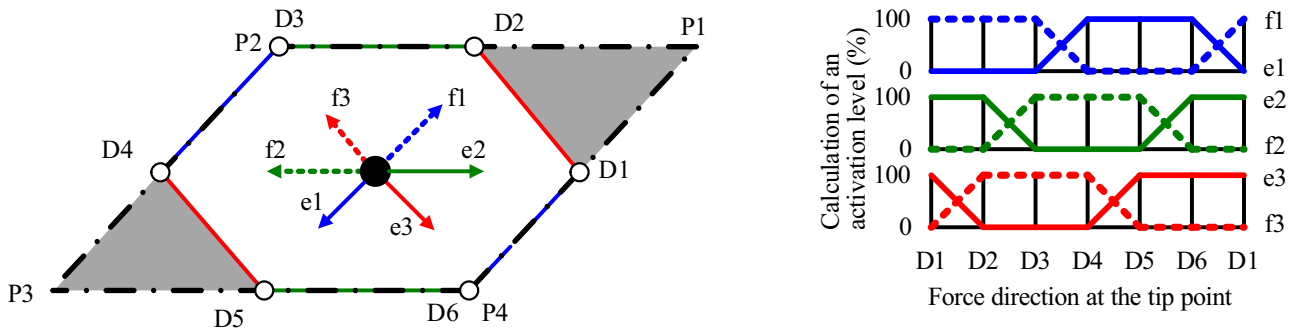


図 3.2: 二関節筋を持つヒトの先端力分布と一関節駆動のみによる先端力分布

式 (3.12) は、式 (3.10) から二関節同時駆動のアクチュエータトルクを外したものである。これより、式 (3.10) と同様に $F_x = 0$ を実現するためには、 $t_1 = 0$ が成り立てば良いことが分かる。

しかし、前節の式 (3.10) を満たす条件である $T_1 = -T_3$ とこの $t_1 = 0$ には本質的な違いがある。これらの理論計算は静力学における仮想仕事の原理から求めているが、静止状態で図 3.1 において y 軸上に存在する手先が y 方向に力を発生させる際には肩の関節トルクがゼロになることが計算から求まる。一方、二関節筋を持つヒトの場合は、 $T_1 = -T_3$ を満たすように一関節筋と二関節筋が肩関節を両方向から引っ張りあっている。

それぞれのアクチュエータトルクは、肩関節から垂直な方向¹への力の簡単な実現と、手先がその位置を維持することの双方に関係する。例えば、 y 軸上に存在する手先から y 方向へ力を出している際に、手先に外乱が働くと、二関節筋が存在する場合は肩関節が二つの筋肉により両方向から引っ張られているため外力を受けても簡単には動かない。外力に対して肩関節をどれだけ静止させられるかは、 T_1 と T_3 の大きさに依存し、それは拮抗筋の収縮力の和に影響する。これは、ヒトの場合力を込めて静止しているか抜いているかを意味する。一方、二関節筋がない場合は肩関節の一関節筋 (f_1, e_1) が同じ筋出力を出すことで肩関節トルクを固定することが出来るが、二関節筋を持つ場合と比べてその力は弱い結果として手先は滑りやすい。

そして、 y 軸上に存在する手先から y 方向へ力を出している際に、手先が y 軸上から外れるような外乱力が加わることを想定すると、二関節筋を備える場合は加わる外力によって崩れる $T_1 = -T_3$ の関係を再び元に戻すようにアクチュエータトルクを制御出来る。二関節筋が存在しない場合は肩関節の回転トルクがゼロとなっているため、微小変位からの回復は自然には出来ない。すなわち、微小変位からの自然な復帰の有無が、二関節同時駆動の有無によるアクチュエータトルクの違いである。この微小変位からの復帰の特性の違いを第 5 章で詳しく述べる。

3.3.2 線形計画法を用いた最大出力の最適化に基づく二関節同時駆動の利点

式 (3.10) と式 (3.12) を比べると、二関節同時駆動が存在することで y 方向への力がトルク T の分だけ増加することが分かる。これは、3 つ目の回転トルクが加わるため当然のことと考えられるが、そのトルクが式 (3.10) で示されるように y 方向への力に寄与することを、筋配列を考慮した最大出力の最適化問題の中で論じてみよう。

杉本 [19] は、各筋肉の配置、すなわちどの筋肉がどの関節トルクに寄与するかを定式化することで、先端での最大力を求める問題を線形計画法を用いた最適化問題に帰着出来ることを示した。この手法を用いれば、二関節筋の有無やヒトとは異なる筋骨格構造を仮定した場合においても、各筋肉の出力から得られる関節トルクを用いて先端力を最大化する問題を簡単に解くことが出来る。ここでは、二関節筋

¹直立する体から真正面の方向を“肩関節から垂直な方向”と定義する。

の有無により、肩関節から垂直な方向への力の大きさが変わるという数式と、線形計画法を用いた場合の肩関節から垂直な方向への最大力を発生するアクチュエータトルクの特性を比較し、二関節同時駆動を備えることの優位性を説明する。

はじめに、線形計画法を用いて最大出力を求める問題について説明する。先端で発生する力に応じた各関節トルクは、先述の通り仮想仕事の原理を用いて求めることができ、先端力の大きさとその方向により関節トルクが変化する。そこで、各関節のトルク ($T_{\text{arm}} = [T_{\text{shoulder}}, T_{\text{elbow}}]^T$) と先端力の大きさ (F) および方向 (ϕ)、そしてその時のマニピュレータの姿勢 (θ) の関係を次式で表す。

$$T_{\text{arm}} = FG(\theta, \phi), \quad \left(G(\theta, \phi) = J^T(\theta)(\cos \phi, \sin \phi)^T \right) \quad (3.13)$$

θ および $J(\theta)$ は任意の姿勢を表す関節角度およびそのヤコビ行列である。また、各筋肉から発生する筋出力と各関節トルクの関係は次式で表される。

$$T_{\text{arm}} = A(\theta)f \quad (3.14)$$

ただし、

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} r$$

$$f = \begin{bmatrix} F_{f1} & F_{e1} & F_{f2} & F_{e2} & F_{f3} & F_{e3} \end{bmatrix}^T \quad (3.15)$$

ここで、 A はモーメントアーム行列と呼ばれ、各関節に回転トルクを生じさせる各筋肉と、回転半径 (r) を掛けたものを意味する。 f は筋出力ベクトルと呼ばれ、その中身である F_{fi}, F_{ei} ($i = 1, 2, 3$) は、図 2.5 に示す 3 対 6 筋の各筋肉を表している。モーメントアーム行列内の正負は、回転トルクの正負と屈筋・伸筋の関係を意味する。式 (3.13) と式 (3.15) から、任意の姿勢における先端力特性と各筋肉の出力の関係は次のように記述出来る。

$$FG(\theta, \phi) = A(\theta)f \quad (3.16)$$

筋出力 f によって先端力 F を陽に表すことを考えると、式 (3.16) の同値変形により次の二式が得られる。

$$F = G^+(\theta, \phi)A(\theta)f \quad (3.17)$$

$$(I - G(\theta, \phi)G^+(\theta, \phi))A(\theta)f = 0 \quad (3.18)$$

$+$ は擬似逆行列を表す記号である。式 (3.17) から、先端力 F は筋出力ベクトル f によって陽に表され、また式 (3.18) から筋出力ベクトル f に対応する先端力 F が ϕ 方向への力であることが保証される。また、各筋肉には出せる力の上限と下限が存在するため、以下の不等式制約を課すことが出来る。なお、本論文では各筋肉の出力が姿勢すなわち筋収縮量に依存しないと仮定する。

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (3.19)$$

表 3.1: 最大力を計算するための各アクチュエータトルクの条件

	Maximum value of each torque [Nm]
Case 1	$ T_{1\max} = T_{2\max} = T_{3\max} = 5.00$
Case 2	$ T_{1\max} = T_{2\max} = 5.00, T_{3\max} = 10.00$
Case 3	$ T_{1\max} = T_{3\max} = 5.00, T_{2\max} = 10.00$
Case 4	$ T_{1\max} = T_{2\max} = 5.00$
Case 5	$ T_{1\max} = 10.00, T_{2\max} = 5.00$
Case 6	$ T_{1\max} = 5.00, T_{2\max} = 10.00$

ただし、不等式は各要素について成立するものとする。

以上より、任意の方向 ϕ への力を最大化する筋出力 f と先端力の最大値を求める問題は、以下の線形計画問題として定式化することが出来る。

最大出力を求める線形計画問題

$$\begin{aligned} \max_f \quad & F = \mathbf{G}^+(\boldsymbol{\theta}, \phi) \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{f} \\ \text{s.t.} \quad & (\mathbf{I} - \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, \phi) \mathbf{G}^+(\boldsymbol{\theta}, \phi)) \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{f} = 0 \\ & \mathbf{f}_{\min} \leq \mathbf{f} \leq \mathbf{f}_{\max} \end{aligned}$$

この線形計画問題から得られる、二関節筋を備えたヒトの最大力分布が六角形となり、先行研究 [6] と一致することが明らかになっている [19]。本論文では、肩関節から垂直な方向への力に着目し、二関節筋の有無による制御性・力特性などを比較することに重点を置いているため、この線形計画法を用いた最適化による、先端の力の大きさと方向と各筋肉から発生するアクチュエータトルクの評価する。

先述の議論と同様にリンク長が等しい 2 リンクアームモデルを想定し、その長さを 0.200 m とする。二関節筋の有無による垂直方向への力の違いと、先述の肘の一関節筋による回転トルクの影響を評価するために、表 3.1 の条件を考察する。ここでは、各アクチュエータトルクの最大値が等しい場合を基準とし、二関節筋の有無を考慮した垂直方向への力を求める式 (3.10)、式 (3.12) の計算結果と、最適化の結果との比較を行う。そして、回転トルク T_2 の影響を計算から評価する。表 3.2 に示す任意の 3 点の姿勢における力の大きさを計算した。計算には MATLAB を使用した。結果を表 3.2 に示す。括弧内の数値は式 (3.10) と式 (3.12) から求めた、各姿勢における肩関節から垂直な方向への力 (F_y) の値である。

表 3.2 から、肩関節から垂直な方向への力の理論式に基づく計算と、ヒトの 3 対 6 筋の筋骨格構造を想定した最適化問題の計算結果は、二関節同時駆動の有無に関わらずそれぞれ完全に一致した。より一般的に、先端力の方向と図 2.5 中のヒトの筋電図測定結果の関係を利用して求めた各アクチュエータトルクの数値計算と、線形計画法を用いた最大力を発生するための各アクチュエータトルクの数値計算結果は一致する。ゆえに、二関節筋を持ち経験的に行っているヒトの先端力の方向制御が合理的であることが数理として証明された。

肩関節から垂直な方向の力を考えると、二つの関節トルク (T, T_2) および y 軸上の手先位置に関係した肩関節角度 (θ_1) を変数に持つ理論式 (3.10) は、線形計画法を用いた最適化問題の計算結果と一致した。これより、二関節筋の存在を想定した先端力制御の妥当性が示され、肩関節から垂直な方向の力が

表 3.2: 垂直方向への力の理論式と線形計画法を用いた最大力の比較

	$\theta_1 = \frac{\pi}{6}, \theta_2 = \frac{2}{3}\pi$ [rad]	$\theta_1 = \frac{\pi}{4}, \theta_2 = \frac{\pi}{2}$ [rad]	$\theta_1 = \theta_2 = \frac{\pi}{3}$ [rad]
Case 1	57.74 (57.74) [N]	70.71 (70.71) [N]	100.00 (100.00) [N]
Case 2	57.74 (57.74) [N]	70.71 (70.71) [N]	100.00 (100.00) [N]
Case 3	86.60 (86.60) [N]	106.01 (106.01) [N]	150.00 (150.00) [N]
Case 4	28.87 (28.87) [N]	35.36 (35.36) [N]	50.00 (50.00) [N]
Case 5	28.87 (28.87) [N]	35.36 (35.36) [N]	50.00 (50.00) [N]
Case 6	57.74 (57.74) [N]	70.71 (70.71) [N]	100.00 (100.00) [N]

簡単な制御で実現することが明確となった。

3.3.3 筋の粘弾性を用いた剛性特性から見る二関節同時駆動の利点

本節では、ヒトの筋肉が備える粘弾性をモデル化し、先端での剛性特性の定式化することで力制御以外の観点から二関節同時駆動を備えることの優位性を論じる。

前節と同様にヒトの上腕に存在する 3 対 6 筋が発生する力を $F_{fi}, F_{ei}, (i = 1, 2, 3)$ と置く。ヒトの筋肉が備える、粘弾性を備えた各筋肉による力特性は、多くの文献において次のようにモデル化されている [20][21]。

$$F = u - kux - bu\dot{x} \quad (3.20)$$

ここで、 u は筋肉の収縮により発生する力、 x は筋肉の収縮により変化する筋長、 k は弾性係数そして b は粘性係数を表す。剛性の定義は力の微小変位であり、微小変位における筋長の速度変化はゼロとみなすことが出来るため、粘性はゼロと仮定する。このような条件において、藤川ら [20] が検討したコンプライアンス特性を基に、剛性の定式化から二関節同時駆動の優位性を論じる。先述と同様に、関節の回転半径が等しい場合の関節トルク特性は次式で表される ($r_1 = r_2 = r$)。

$$\begin{bmatrix} T_{\text{shoulder}} \\ T_{\text{elbow}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{(u_{f1} - u_{e1}) + (u_{f3} - u_{e3})\}r + \frac{\Delta\theta_1}{C_1} + \frac{\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2}{C_3} \\ \{(u_{f2} - u_{e2}) + (u_{f3} - u_{e3})\}r + \frac{\Delta\theta_2}{C_2} + \frac{\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2}{C_3} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

ここで、コンプライアンスは次式で記述される。

$$C_i = \frac{1}{(u_{fi} + u_{ei})kr^2}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.22)$$

剛性の評価を行うために、式 (3.21) と仮想仕事の原理を用いて先端力の微小変位特性を考える。ヒトの構造的特徴に着目し、リンク長を等しいと仮定する ($l_1 = l_2 = l$)。

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \end{bmatrix} &= (\mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}))^{-1} \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{l \sin \theta_2} \begin{bmatrix} \frac{\cos(\theta_1+\theta_2)}{C_1} \Delta\theta_1 - \frac{\cos \theta_1 + \cos(\theta_1+\theta_2)}{C_2} \Delta\theta_2 - \frac{\cos \theta_1}{C_3} (\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2) \\ \frac{\sin(\theta_1+\theta_2)}{C_1} \Delta\theta_1 - \frac{\sin \theta_1 + \sin(\theta_1+\theta_2)}{C_2} \Delta\theta_2 - \frac{\sin \theta_1}{C_3} (\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2) \end{bmatrix} \quad (3.23)
\end{aligned}$$

本論文で着目している手先が y 軸上に存在する場合の剛性特性を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \end{bmatrix} = (\mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}))^{-1} \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2l \sin \theta_1} \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_3} \right) \Delta\theta_1 \\ \frac{1}{2l \cos \theta_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{4}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) \Delta\theta_1 \end{bmatrix}, \quad (\because 2\theta_1 + \theta_2 = \pi) \quad (3.24)$$

次に、二関節同時駆動を持たない機構における剛性を先端力の微小変位から求める。先端力特性を定式化した時と同様に、二関節同時駆動のコンプライアンスを考慮しないことでその特性が求まる。

$$\begin{bmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2l \sin \theta_1} \frac{1}{C_1} \Delta\theta_1 \\ \frac{1}{2l \cos \theta_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{4}{C_2} \right) \Delta\theta_1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

式 (3.24) と式 (3.25) を比較すると、手先が支点から垂直な位置に存在する場合の二関節同時駆動の有無による剛性の相違が分かる。手先が y 軸上に存在する姿勢においては、特に体の柔らかい人間でも肩関節角度の可動域が一般的に $-\frac{\pi}{2} \leq \theta_1 \leq \frac{\pi}{2}$ であるため、二関節同時駆動を備えることで y 方向の剛性が高まることが分かる。一方、手先が y 上に位置する場合、 x 方向の剛性は肩の一関節筋と二関節筋のコンプライアンスの差から求まるため、肩の一関節筋と二関節筋のそれぞれの拮抗筋の条件 (力の込め具合) によっては二関節筋の存在により剛性が低くなる、もしくは x 方向の剛性がゼロになることがある。そして、二関節筋を持たない場合は式 (3.25) から $-x$ 方向の剛性しか備えられないのに対し、二関節筋があることで x 方向の剛性を備えることが出来る。

同様に、手先位置を限定しない場合の二関節筋の有無による剛性特性の相違については、式 (3.23) から求めることが出来る。ここでは本論文で着目する真っ直ぐな方向への力の発生において、その方向に対する剛性が常に高まり外乱力に強くなるという点で一関節・二関節の協調的 simultaneous 駆動の優位性が示された。また、 x 方向成分を持つ外乱を受けた場合に、一関節・二関節の協調的 simultaneous 駆動を備えることで剛性の方向を $\pm x$ 方向に調整出来るため、任意の方向からの外乱力に強くなることが理論的に示された。

以上のヒトの構造的特徴と、一関節・二関節同時駆動を利用した場合の先端力とアクチュエータトルクの関係から、ロボットへの応用を想定した利点は以下の通りである。

1. ヒトの構造的特徴に着目してリンク長を等しくすることで、各筋肉の出力による関節トルクと先端力の方向の関係が明確化する。
2. リンク長が等しく手先が y 軸上に存在する場合は、肩の一関節筋と二関節筋による回転トルクの間 $T_1 = -T_3$ という簡単な制約により肩関節から垂直な方向の力が簡単に実現する。この姿勢と力の方向は、壁を真っ直ぐに押したり直立するなどヒトの基本動作の中でも特に重要な動作であり、リンク長を等しくすることと二関節同時駆動を備えることで、これらの動作が簡単になることは合理的である。また、そのアクチュエータ指令が最大力を求める最適化問題の計算結果と一致する点でも妥当性がある。

3. 垂直方向への力を実現する $T_1 = -T_3$ の関係の中には、先端の微小変位に対する自然な復帰を実現する特性が備わっている。
4. 二関節同時駆動の存在により意図する垂直方向の剛性が高まるため、外乱力に対して高い先端位置保持が実現する。

本節では、ヒトの構造的特徴と一関節・二関節同時駆動および頻繁に行われる基本動作に着目し、先端力の定式化によりその優位性を導いた。これより、ヒトの基本的な力の制御が簡単に行われていることが理論的に証明され、この知見を利用することでロボットの腕や脚の簡単かつ合理的な力の制御が実現する。

3.4 支点から任意の方向に真っ直ぐに力を出す場合の先端力の定式化

前節では、ヒトの動作として非常に重要な肩関節に垂直な方向の先端力の特性を定式化により評価したが、本節ではその拡張として支点から任意の方向に真っ直ぐに力を出す場合の力の特性を定式化して評価する。

図 3.3 に示すように、手先先端が肩関節から角度 δ rad の任意の線上に位置する状態を考える。角度 δ を用いた回転行列 (D) を用い、先端位置を図 3.3 に示す X, Y 座標系で扱う。手先先端の位置およびヤコビ行列はそれぞれ次のように表される。ここで、 X, Y 軸で表される手先先端の座標を $[X, Y]^T$ と表記する [23]。

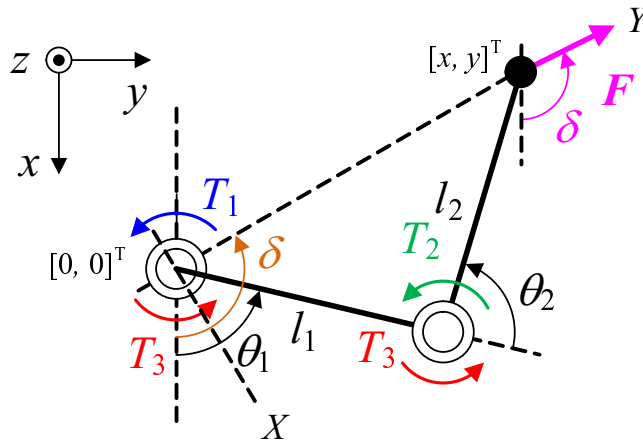


図 3.3: 先端が支点から任意の角度 (δ) 上に存在する場合のその方向への力の発生

$$D = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\theta_1 - \delta) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \delta) \\ l_1 \cos(\theta_1 - \delta) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \delta) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} -\{l_1 \sin(\theta_1 - \delta) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \delta)\} & -l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \delta) \\ -\{l_1 \sin(\theta_1 - \delta) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \delta)\} & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \delta) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

この時、 Y 軸上の任意の位置における力の特性とアクチュエータトルクの関係は次式で表される。ただし、先述の議論を基にリンクの長さを等しくする ($l_1 = l_2 = l$)。

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \end{bmatrix} = \frac{1}{2l \sin(\theta_1 - \delta) \cos(\theta_1 - \delta)} \begin{bmatrix} -T_1 \sin(\theta_1 - \delta) - T_3 \sin(\theta_1 - \delta) \\ -T_1 \cos(\theta_1 - \delta) + 2T_2 \cos(\theta_1 - \delta) + T_3 \cos(\theta_1 - \delta) \end{bmatrix}, \quad (\theta_1 + \frac{\theta_2}{2} = \delta) \quad (3.29)$$

先端から Y 方向に真っ直ぐに力を出す場合の先端力特性とアクチュエータトルクの関係は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T+T_2}{l \sin(\theta_1 - \delta)} \end{bmatrix}, \quad (T_1 = T, T_3 = -T) \quad (3.30)$$

先述の式 (3.10) と同様に、 $F_X = 0$ となるためには $T_1 = -T_3$ が満たされれば良いことが分かる。ゆえに、支点と先端を結んだ方向に力を出すという条件の下では、アクチュエータトルクの条件は任意の方向 (δ) に依存しない。これは、二関節筋を持つヒトの筋電図測定結果と一致する。そして、肘の一関節筋による回転トルクが、筋肉 e2 の収縮により Y 方向への力 (F_Y) に直接影響することも先述の議論と同じである。

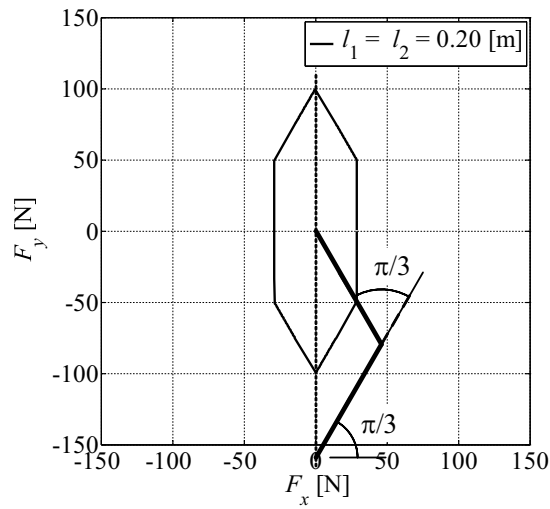
ゆえに、ヒトに学び、リンク長が等しく一関節・二関節の協調的同時駆動を行うという条件の下でアクチュエータトルクを制御すると、静止状態における任意の方向への真っ直ぐな力が簡単に実現する。

3.5 リンク長が異なる条件下における先端力特性の考察

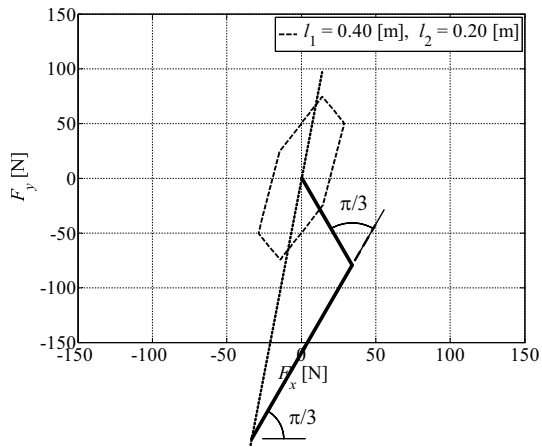
第 3.2 節では、ヒトの腕の特性に学び 2 つのリンク長を同じくすることで先端力特性が簡単化されることを示した。本節では、リンク長が異なる一般的なモデルと、このヒトの特性に学ぶモデルの違いに着目し、本論文で考えるロボットの運動制御の構造と設計の特徴を工学的に論じる。

二関節同時駆動を備える 2 リンクアームモデルにおいて、各リンクの長さが異なる場合の先端力分布を式 (3.6) から計算し、その特性を評価する。任意の姿勢で静止している場合に、リンク長が等しい条件と異なる条件での先端力分布特性を数値計算した。ここで、各アクチュエータトルクの最大値は等しいと仮定した ($|T_{1\max}| = |T_{2\max}| = |T_{3\max}| = 5.00$ [Nm])。各関節の角度を、図 3.1 のモデルで $\theta_1 = \theta_2 = \frac{\pi}{3}$ rad とし、次の表 3.3 に示す各リンク長の条件下での先端力分布を求めた。支点と先端を結んだ方向への力の式 (3.10) と、リンク長の等しいヒトの筋電図測定結果を用いた先端力特性が一致することから、各アクチュエータトルクを図 2.5 の筋電図結果に基づいて変化させ、その時の先端力分布を数値計算で求めた。力の方向 1 周期に対して 600 点、すなわち $\frac{\pi}{300}$ rad ごとの力の大きさを求めた。計算結果を図 3.4 に示す。

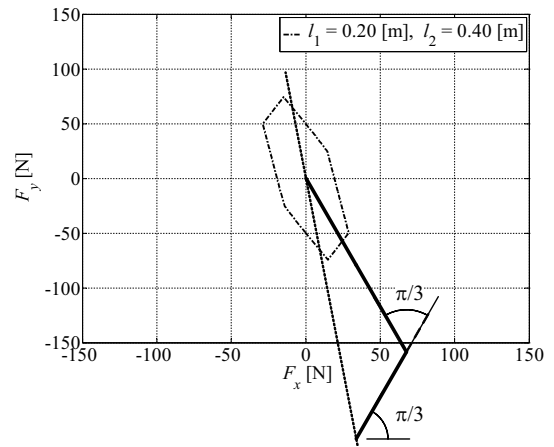
これより、先述の定式化の通り、リンク長が等しい場合 (Case 1) は、二関節同時駆動を備えることで支点と先端を結んだ軸に対称な先端力分布特性を持つ。その他のリンク長が異なる場合は、分布形状が支点と先端を結んだ軸に対称にならない点で Case 1 と異なる。これは、先行研究 [6] で行われたヒトの先端力と筋電位の同時測定の結果と異なるだけでなく、先述の支点と先端を結んだ方向、特に垂直や



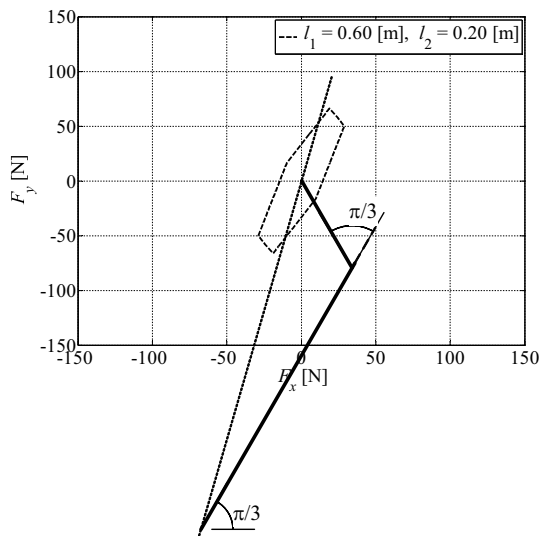
Case 1



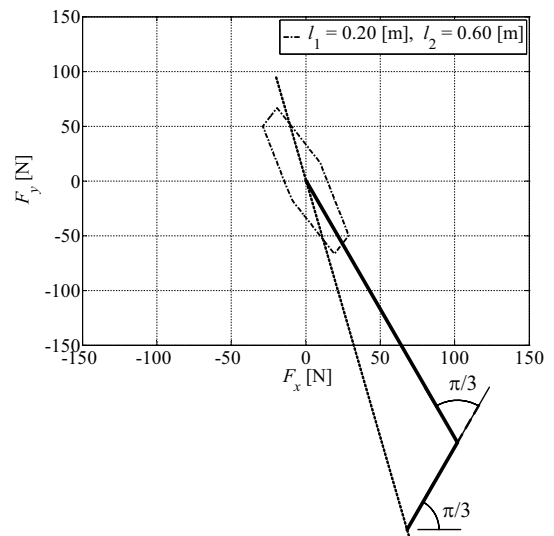
Case 2



Case 3



Case 4



Case 5

図 3.4: 各アクチュエータトルクの最大値が等しくリンク長が異なる場合の先端力分布特性

表 3.3: 異なるリンク長による最大力分布特性の比較のための条件

	Length of each link [m]
Case 1	$l_1 = l_2 = 0.20$
Case 2	$l_1 = 0.40, l_2 = 0.20$
Case 3	$l_1 = 0.20, l_2 = 0.40$
Case 4	$l_1 = 0.60, l_2 = 0.20$
Case 5	$l_1 = 0.20, l_2 = 0.60$

鉛直方向に真っ直ぐに力を出す動作が多いヒトにとっては不利な特性であると考えられる。文献 [18] では、リンク長が異なる動物が存在し (ウマやゾウなど)、それぞれの体格の大きさや日常的に行う運動の違いから、長さが異なるリンクを持つ進化を遂げたと検討されており、図 3.4 の比較はその傾向を示している。

ヒトとこれらの動物の大きな違いに二足歩行と四足歩行が挙げられる。四足歩行の動物の場合は、日常的に行う動作の違いからそれぞれの体の構造が異なり、重心の位置も異なる。その動物に適した動作を効率的に実現するためには、リンク長を微妙に変えることが役立っていると考えられる。

二足歩行のヒトの場合は、二足での直立動作の安定が重要であるように、支点と先端を結んだ方向への力が重視されるため、リンク長が等しいことは重要である。本論文は、ヒトの特徴を生かしたロボットの四肢の運動制御の理論構築を主題とし、ヒトの代わりとなって働くようなロボットの四肢の動作を想定しているため、リンク長を等しくし、支点と先端を結んだ軸に対する力の制御を単純化することを、以降の章では中心的に論じる。

3.6 本章のまとめ

本章では、先行研究 [6], [7] 等で述べられてきた一関節・二関節の協調的同時駆動を工学的に解析し、その優位性を理論的に示した。

先端で発生する二次元方向の力と関節トルクの関係は、仮想仕事の原理を用いて求めることが出来る。本章では、2リンクロボットの先端力制御を簡単化するために、ヒトの構造的特徴とヒトが頻繁に行う基本動作とヒトが持つ二関節筋の特徴に着目した。ヒトの腕や脚を見ると、2リンクの長さで関節の回転半径がそれぞれほぼ等しいことが挙げられる。また、ヒトが日常生活で頻繁に行っている動作は、支点と先端を結んだ軸に真っ直ぐな方向に力を発生させることが多い。これは、壁を真っ直ぐに押ししたり物を真っ直ぐに持ち上げる動作、直立姿勢を維持したり垂直に跳んだり着地するような動作である。

これらの特徴を考慮して先端力特性と関節にかかる回転トルクを理論的に計算すると、先端が支点から垂直な位置に存在し、垂直な方向へ真っ直ぐに力を出す動作は、肩の一関節筋と二関節筋が $T_1 = -T_3$ を満たすように回転トルクを発生させることで簡単に実現することを定式化により示した。この二つの筋肉の特異的な関係は、二関節筋を持つヒトの筋電図測定結果と一致した。これより、ヒトは基本動作の一つである垂直方向への力の発生を、簡単かつ合理的に行っていることが示された。

また、垂直方向への力に関し、杉本 [19] が提案した、筋配列を考慮した各筋肉の出力と先端力を最大化する線形計画法に基づく最適化手法を用いて数値解析を行った。これより、最適化計算においても垂直方向への力を発生させるための条件である $T_1 = -T_3$ が満たされ、本章で導いた理論式の妥当性が確認された。加えて、垂直方向への力に直接寄与する肘の一関節筋による回転トルク (T_2) と、肩の関節角度の余弦関数 ($\cos \theta_1$) に対する依存性も、それぞれの特性が最適化手法による計算結果と一致した。ゆえに、リンク長が等しく二関節同時駆動を備えるというヒトの特性を利用することで、垂直方向への力が簡単な制御で効率的に実現することが理論的に明らかになった。

さらに、一関節・二関節の協調的同時駆動を考慮することは、垂直方向へ力を出す時の姿勢の安定化に重要であること、そして外力による微小変位に対する補償を実現する点で重要であることを論じた。

また、リンク長が異なる場合の先端力特性を理論式から数値解析し、リンク長が等しい場合は分布形状が支点と先端を結んだ軸に対称となり、リンク長が異なると先端力の分布がその軸に対象とならないことを明確にした。支点と先端を結んだ方向への力はヒトの重要な動作であると考えため、本論文では、リンク長を等しくすることはヒトに学んだロボットの簡単な運動制御のために重要である。

工学的には、関節にかかる回転トルクで運動が実現することから、3つ目の二関節筋用アクチュエータは空想的に存在するものと仮定し、仮想的な二関節筋用アクチュエータから2つの関節に同時にかかるトルクと、一関節を駆動するアクチュエータの和を3相2相変換して先端力特性を実現することが出来る。本論文で後述する試験機を用いた理論の検証では、この考え方に基づき二関節同時駆動によるトルクが両関節に同時にかかるものとして仮想的に構成し、実験を行った。また、剛性はヒトの持つ拮抗筋と筋収縮力を用いた筋肉の剛性・弾性の力学モデルをモータに実装して模擬した。微小変位に対して粘弾性を利用した制御系を組み、粘弾性の設定を調整することで系全体の剛性を考慮した設計を行った。その詳細を第5章にて述べる。

第4章 動特性を持つ腕自身の運動に伴う関節トルクの定式化と先端力制御との重ね合わせの理論

前章ではヒトの基本動作として重要な、支点と先端を真っ直ぐに結んだ方向への力の定式化を行ったが、本章ではその方向に運動をする際の動的な変化を伴う関節トルクの制御の理論に関して、ヒトの特徴を考慮して定式化を行う。これより、動的に大きな特性変化を伴わない太極拳のような低速な運動や動特性の影響が小さな非常に軽いリンク機構等のように、前章での静的な特性の延長として考えられる特別な状況だけでなく、一般的な伸縮運動が扱えるようになる。

4.1 2リンクアームの運動方程式

前章と同じ2リンクアームの二次元平面内の運動において、アームの質量・慣性および重力などの影響を考慮した運動に伴う関節トルクの動特性を理論的に考える。

4.1.1 本論文で用いる2リンクアームモデルの概要

図 4.1 に示す $-z$ 方向の重力加速度 (g) を考慮した x, z 平面内の二次元運動を考慮する。関節の回転半径・リンクの長さ・リンクの質量・慣性モーメント等の基本定数を表 4.1 に示す。リンクの形状は、実際の形状に近く記述の容易な数値モデルとして円柱形とする。各関節から各リンクまでの重心距離は、それぞれ $l_{g1} = \frac{1}{2}l_1, l_{g2} = \frac{1}{2}l_2$ [m] と仮定する。各リンクの慣性モーメントの定義は、それぞれのリンクの重心を通る z 軸に平行な軸回りの慣性モーメントである。円柱形のリンクの慣性モーメントは質量・回転半径とリンク長を用いて次のように記述される。

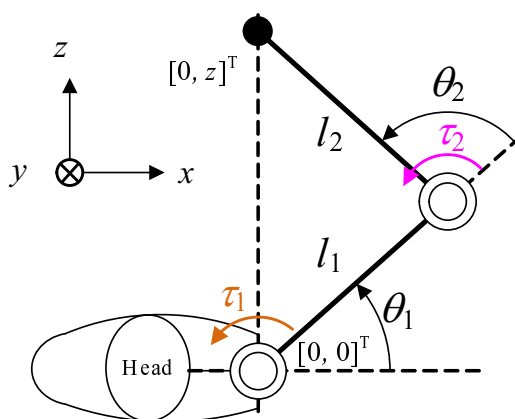


図 4.1: x, z 平面内の二次元運動モデル

表 4.1: 2 リンクアームの基本定数と数値解析に用いる条件

各アームの回転半径 : r_1, r_2	0.030 [m]
各リンクの長さ : l_1, l_2	0.20 [m]
各リンクの質量 : m_1, m_2	2.00 [kg]
各リンクの慣性モーメント : I_1, I_2	0.0071 [kgm ²]
アーム先端の初期位置 : $[x, z]^T$	$[0, 0]^T$ [m]
重力加速度 : g ($-z$ 方向)	9.81 [m/sec ²]

$$\begin{aligned}
 I_1 &= m_1 \left(\frac{r_1^2}{4} + \frac{l_1^2}{12} \right) \\
 I_2 &= m_2 \left(\frac{r_2^2}{4} + \frac{l_2^2}{12} \right)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

4.1.2 ラグランジュの運動方程式を用いた関節トルクの計算

2 リンクアームの運動に伴う関節トルクを求めるための運動方程式は、一般的に次のように記述される。

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) \tag{4.2}$$

ここで、 $M(\theta)$ は慣性行列、 $h(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力・コリオリ力項、 $g(\theta)$ は重力項を意味する。

本論文では、ラグランジュの運動方程式を用いて関節トルクの計算を行う。ラグランジュ法に関して説明する。自由度 n のシステムが一般化座標 $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ で表される場合に、運動方程式はラグランジュ関数 $L = K - P$ を用いて次のように表される。

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right) - \frac{\delta L}{\delta q_i} \tag{4.3}$$

τ_i は各関節にかかる一般化力 (トルク) であり、 K と P はそれぞれシステムの運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを表す。運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを用いると、関節トルクは次のように記述される [22][23]。

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta K}{\delta \dot{q}_i} \right) - \frac{\delta K}{\delta q_i} + \frac{\delta P}{\delta q_i} \tag{4.4}$$

一般的に、剛体の運動エネルギー K は重心の並進速度 \dot{s} 、回転速度 ω 、質量 m 、慣性テンソル I を用いて次のように記述される。

$$K = \frac{1}{2} m \dot{s}^T \dot{s} + \frac{1}{2} \omega^T I \omega \tag{4.5}$$

そこで、これらの関係を利用して先端に負荷を持つ2リンクアームの関節トルクを求める。リンク1の運動エネルギーと位置エネルギーはそれぞれ次のようになる。なお、 g は重力加速度を意味する。

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{2}m_1l_{g1}^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_1\dot{\theta}_1^2 \\ P_1 &= gm_1l_{g1}\sin\theta_1 \end{aligned} \quad (4.6)$$

次に、リンク2の運動エネルギーと位置エネルギーを考える。リンク2の重心位置を以下に示す。

$$s_2 = \begin{bmatrix} l_1 \cos\theta_1 + l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \sin\theta_1 + l_{g2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

式(4.5)からリンク2の運動エネルギーを求める。

$$\dot{s}_2^T \dot{s}_2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_{g2}^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2l_1 l_{g2} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos\theta_2 \quad (4.8)$$

よって、リンク2の運動エネルギーと位置エネルギーはそれぞれ次で表される。

$$\begin{aligned} K_2 &= \frac{1}{2}m_2 \left(l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_{g2}^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2l_1 l_{g2} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos\theta_2 \right) + \frac{1}{2}I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ P_2 &= gm_2 (l_1 \sin\theta_1 + l_{g2} \sin(\theta_1 + \theta_2)) \end{aligned} \quad (4.9)$$

式(4.4)と式(4.6)、式(4.9)から各関節の回転トルクは次のように記述される。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

ここで、各成分は次式で構成されている。

$$\begin{aligned} M_{11} &= I_1 + m_1 l_{g1}^2 + I_2 + m_2 (l_1^2 + l_{g2}^2 + 2l_1 l_{g2} \cos\theta_2) \\ M_{12} &= I_2 + m_2 (l_{g2}^2 + l_1 l_{g2} \cos\theta_2) \\ M_{21} &= M_{12} \\ M_{22} &= I_2 + m_2 l_{g2}^2 \\ h_1 &= -m_2 l_1 l_{g2} (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_2 \sin\theta_2 \\ h_2 &= m_2 l_1 l_{g2} \dot{\theta}_1^2 \sin\theta_2 \\ g_1 &= g \left(m_1 l_{g1} \cos\theta_1 + m_2 \{ l_1 \cos\theta_1 + l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \} \right) \\ g_2 &= gm_2 l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (4.11)$$

以上の計算は、ロボット工学などの教科書に載っている公式であり、リンクの運動特性を考慮した理論計算に基づく運動制御法として計算トルク法等が確立されている。式(4.10)、式(4.11)が示す通り、運動時の関節トルクは関節角度の三角関数や関節の角速度・角加速度などの非線形要素が組み合わさった

複雑な特性であることは自明である。加えて、この関節トルクの計算から運動制御を行うロボット工学においては、先端の位置から逆運動学を用いて関節角度を計算し、式 (4.10) に代入して関節トルクを設計しなければならない。先端の軌道が複雑化すれば関節トルクの設計が複雑化するため、理論的な特性計算に基づくロボットの運動制御が複雑なことは明らかである。

そこで、前章と同様にヒトの基本動作と構造的特徴に着目し、頻度の高い曲げ伸ばし運動に伴う関節トルクの特性を理論的に導出する。

4.2 支点と先端を真っ直ぐに結ぶ方向への伸縮運動の特性

前節で述べた通り、運動に伴う関節の回転トルクは関節の角度・角速度・角加速度を変数に持つ。しかし、実際にアームの運動を考える場合は、軌道関数として角度情報を用いるよりも先端位置情報を用いたほうが運動を設計しやすい。先端の軌跡が複雑な運動の場合は、逆運動学計算が複雑化するために、関節トルクの計算が難しくなることを定性的に述べた。ここでは、真っ直ぐな曲げ伸ばし運動においては軌跡が簡単であることから、トルクの制御が簡単化することを論じる。これより、頻繁に行う基本動作が簡単な制御で成り立っていることを論じる。

4.2.1 先端速度・加速度特性

先端の位置座標を示す式 (3.1) を時間微分することで先端の速度変化が求まる。手先の速度をヤコビ行列を用いて以下のように記述する。

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (4.12)$$

式 (4.12) をさらに時間微分することで先端加速度が求まる。

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \{l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)\} \dot{\theta}_1^2 + l_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \{l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\} \dot{\theta}_1^2 + l_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.13)$$

2 リンクアームモデルでは、式 (4.10) 中の慣性行列の逆行列を求めることが出来るため、関節の角加速度が計算出来る。これより、関節トルクを指令値とした場合の先端の加速度特性が次式のように記述される。

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})^{-1}(\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) - \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\theta})) + \dot{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} &= \frac{1}{\Delta_M} \begin{bmatrix} J_{11}M_{22} - J_{12}M_{21} & -J_{11}M_{12} + J_{12}M_{11} \\ J_{21}M_{22} - J_{22}M_{21} & -J_{21}M_{12} + J_{22}M_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 - h_1 - g_1 \\ \tau_2 - h_2 - g_2 \end{bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} \{l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)\} \dot{\theta}_1^2 + l_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \{l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\} \dot{\theta}_1^2 + l_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.14)$$

ここで、 Δ_M は慣性行列 $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})$ の行列式であり、 $\Delta_M = M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21}$ である。

4.2.2 鉛直方向への伸縮運動時の関節トルクの定式化

手先加速度と関節トルクと遠心力・コリオリ力などの関係を導いたが、二次元平面内の全ての運動を想定した場合の加速度の特性は式 (4.14) から分かる通り複雑である。そこで、先述のヒトの構造的特徴を仮定し ($l_1 = l_2 = l, r_1 = r_2 = r$)、先端が支点の鉛直上を移動する曲げ伸ばし運動を考える。リンク長が等しいアームの鉛直運動には次の条件が成り立つ。

鉛直方向への伸縮運動に着目した場合の条件

条件 1 手先先端が常に支点から鉛直上 (z 軸上) に存在する :

$$2\theta_1 + \theta_2 = \pi, \quad \cos \theta_1 + \cos(\theta_1 + \theta_2) = 0, \quad \sin \theta_1 = \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

条件 2 先端速度の x 成分が 0 である : $\dot{x} = -l\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - l(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) = 0, \quad 2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 = 0$

条件 3 先端加速度の x 成分が 0 である : $\ddot{x} = 0, \quad 2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 = 0$

条件 3 を式 (4.14) に代入することで次の関係式が得られる。

$$\frac{\tau_2 - h_2 - g_2}{\tau_1 - h_1 - g_1} = \frac{J_{11}M_{22} - J_{12}M_{21}}{J_{11}M_{12} - J_{12}M_{11}} \quad (4.15)$$

以上より、先端が z 軸上を真っ直ぐに移動する場合の関節トルク (τ_1, τ_2) は、次のように記述される。

$$\begin{aligned} \tau_1 = & \frac{1}{2} \left(-I_1 - m_1 l_{g1}^2 + I_2 + m_2 (l_{g2}^2 - l_1^2) \right) \ddot{\theta}_1 \\ & + g \left(m_1 l_{g1} \cos \theta_1 + m_2 \{ l_1 \cos \theta_1 + l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \} \right) \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{2} \left(I_2 + m_2 (l_{g2}^2 - l_1 l_{g2} \cos \theta_2) \right) \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_{g2} \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + g m_2 l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (4.17)$$

ここで、ヒトの構造的特徴を考慮して式 (4.16) と式 (4.17) の簡単化を行う。関節の回転半径が等しいリンクにおいて、リンクの長さをそれぞれ等しくすると、各リンクから重心までの長さが等しくなる ($l_1 = l_2 = l, r_1 = r_2 = r, l_{g1} = l_{g2} = l_g = \frac{1}{2}l$)。さらに、特にヒトの腕を見た場合にリンクの質量がほぼ同じであることを利用し、リンクの質量も等しいと仮定する ($m_1 = m_2 = m$)。以上の仮定を置いた場合の各関節のトルク (τ_1, τ_2) は次式で表される。

$$\tau_1 = ml^2 \ddot{\theta}_1 + gml \cos \theta_1 \quad (4.18)$$

$$\tau_2 = -m \left((\cos^2 \theta_1 - \frac{1}{6})l^2 + \frac{1}{4}r^2 \right) \ddot{\theta}_1 + ml^2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 \cos \theta_1 - \frac{1}{2}gml \cos \theta_1 \quad (4.19)$$

これより、先端が図 4.1 中の z 軸上を真っ直ぐに移動する運動に限定すると、運動に伴う各関節の回転トルクは式 (E.2) および式 (E.3) のように θ_1 のみで決まる特性として記述出来る。次節では、この特性を利用し、腕や脚の伸縮運動が簡便な動特性の制御で行えることを、数値例を用いて具体的に示す。

4.2.3 鉛直方向への伸縮運動時の関節トルク为非線形性

式 (E.2) および式 (E.3) の特性を持つ鉛直方向への伸縮運動時の関節トルクを、具体的に数値計算してその非線形性を評価し、ヒトの構造的特徴をロボットに利用する優位性を論じる。

前節で述べた条件から、運動に伴う慣性および重力に由来する関節トルクは、肩関節の角度・角速度・角加速度 ($\theta_1, \dot{\theta}_1, \ddot{\theta}_1$) を変数に持つ関数となる。そこで、一般的なアームの二次元運動の範囲内において、これらの変数を持つ各関節のトルクを計算し、特性を評価する。肩関節の角度 (θ_1) が、 $\frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{3}, \frac{5}{12}\pi$ rad の計 5 点の任意の姿勢を想定した。現実的な 2 リンクアームの運動を想定し、肩関節の角加速度と角速度をそれぞれ ± 10.00 rad/sec², ± 10.00 rad/sec に設定した。リンク長・リンク質量などの定数はそれぞれ表 4.1 の値を使用した。数値解析には MATLAB を使用し、5 点の姿勢における 100 点の関節トルクの肩関節角加速度 ($\ddot{\theta}_1$) および肩関節角速度 ($\dot{\theta}_1$) に対する依存性を計算した。数値計算結果を図 4.2 に示す。

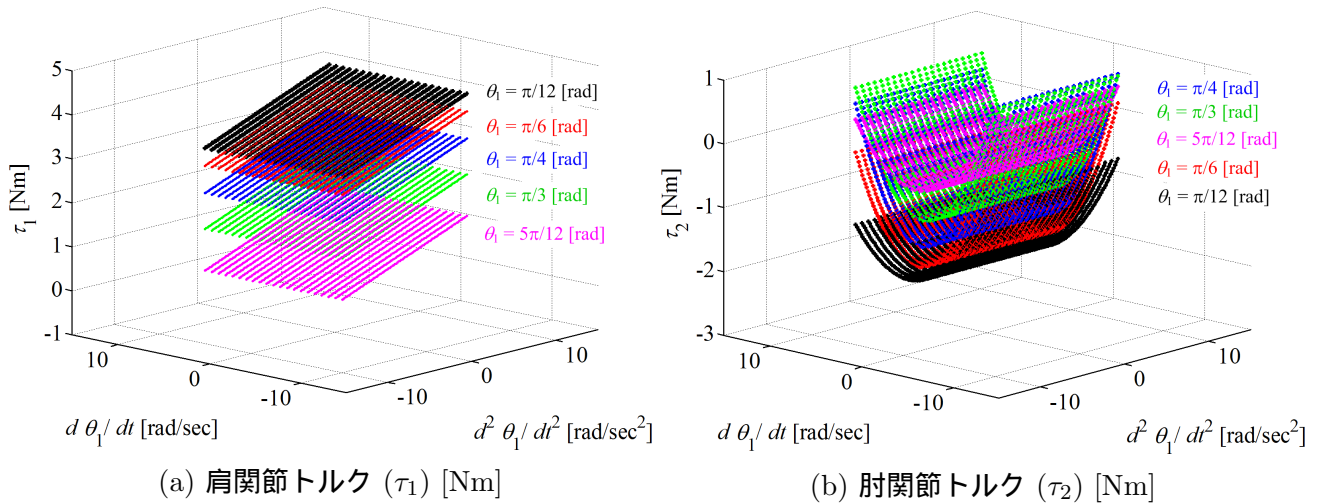


図 4.2: 2 リンクアームの伸縮運動に伴う関節トルクの肩関節角加速度と角速度に対する依存性

図 4.2(a) から、肩関節トルク (τ_1) は肩関節の角加速度 ($\ddot{\theta}_1$) の一次関数を主とした関数であることが分かる。同様に、図 4.2(b) から、肘関節トルク (τ_2) は肩関節の角速度の二次関数 ($\dot{\theta}_1^2$) を主とした関数であることが分かる。ヒトの構造的特徴であるリンク長・関節の回転半径が等しく、さらにリンク質量が等しい場合は、鉛直方向への伸縮運動に必要な関節トルクの非線形性がこのように簡単な特性であることが示された。

動いて止まるという実際の一般的な動作においては、関節角度・加速度・角速度などが時間の三角関数で表されるような非線形特性を持つが、ここで扱っている伸縮運動においてはそれらの関数を含む関節トルク自身の特性が比較的単純なため、結果的に簡易なトルクの補償で運動が実現する。そして、これらの自らの腕や脚の構造に由来するトルク補償項は、自らの腕や脚を日々の生活で何度も曲げ伸ばししていることから、学習により獲得出来ると考えてよい。工学的観点からロボットの動的な制御を考えると、リンクの長さ・関節の回転半径およびリンク質量を等しいという本節で述べた特徴的なハードウェア設計を行うことは、運動制御の単純化という観点で優位性がある。

4.3 任意の方向への伸縮運動時における関節トルクの定式化

本節では、前節で導いた鉛直方向への伸縮運動時の関節トルクの定式化と同様に、任意の方向への伸縮運動に伴う関節トルクを定式化し、その特性を評価する。

4.3.1 回転行列を用いた任意の方向への伸縮運動時の関節トルクの定式化

第3.4節の任意の方向への先端力の定式化と同様に、回転行列を用いて任意の方向への伸縮運動時の関節トルクを定式化する。本論文では、図4.3に示すように、手先先端を結んだ軸 (Z 軸) とそれに垂直な軸 (X 軸) を仮定する。

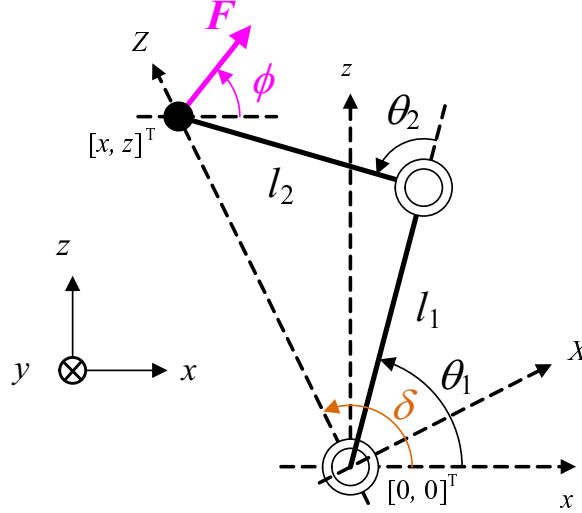


図 4.3: 回転行列を用いた手先位置と重力加速度を考慮した任意の方向への伸縮運動

前章と同様に、 X, Z 軸で表される手先先端の位置 ($[X, Z]^T$) は、 x 軸からの回転角度 (δ) を変数に持つ回転行列 (D) を用いて式 (4.20) のように表される [23]。

$$\begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\theta_1 - \delta) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \delta) \\ l_1 \cos(\theta_1 - \delta) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \delta) \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

また、鉛直方向への伸縮運動と同様に、リンク長が等しい場合の真っ直ぐな伸縮運動には次の条件が成り立つ。

任意の方向への伸縮運動に着目した場合の条件

条件 1 手先先端が常に支点から任意の軸 (Z 軸) 上に存在する : $2\theta_1 + \theta_2 = 2\delta$

条件 2 先端速度の X 成分が 0 である : $\dot{X} = 0, 2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 = 0$

条件 3 先端加速度の X 成分が 0 である : $\ddot{X} = 0, 2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 = 0$

以上より、第 4.2.2 節と同様にリンク長・関節の回転半径・リンク質量が等しい場合の伸縮運動の関節トルクは、次のように表される。

$$\tau_1 = ml^2 \ddot{\theta}_1 + gml \left(\frac{3}{2} \cos \theta_1 + \frac{1}{2} \cos(2\delta - \theta_1) \right) \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & -m \left(\left\{ \frac{1}{3} - \frac{1}{2} \cos 2(\delta - \theta_1) \right\} l^2 + \frac{1}{4} r^2 \right) \ddot{\theta}_1 \\ & + ml^2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\delta - \theta_1) \cos(\delta - \theta_1) + \frac{1}{2} gml \cos(2\delta - \theta_1) \end{aligned} \quad (4.22)$$

前節の式 (E.2), 式 (E.3) と比べると、任意の角度 (δ) が含まれているために多少複雑に見えるが、式 (4.10) の一般解と比べると簡単である。

4.3.2 任意の方向への伸縮運動に伴う関節トルクの非線形性

第 E 節と同様に、式 (4.21), 式 (4.22) で表される関節トルクの数値計算を行い、関数の非線形性を評価し、ヒトの構造的特徴をロボットに利用する優位性を論じる。ここでは、腕が任意の角度 $\delta = \frac{\pi}{3}$ rad および $\delta = \frac{3}{4}\pi$ rad の二つの方向へ伸縮する際の関節トルクを求めた。前節と同様に現実的な 2 リンクアームの運動を想定し、肩関節の角加速度と角速度をそれぞれ ± 10.00 rad/sec², ± 10.00 rad/sec に設定した。アームの基本定数は表 4.1 の値を使用し、計算には MATLAB を使用した。任意の角度 $\delta = \frac{\pi}{3}$ rad の方向へ伸縮する場合は、肩関節が $-\frac{\pi}{12}, 0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{3}$ rad の 5 つの姿勢における 100 点の関節トルクの肩関節角加速度 ($\ddot{\theta}_1$) および角速度 ($\dot{\theta}_1$) に対する依存性を計算した。また、角度 $\delta = \frac{3}{4}\pi$ rad の方向へ伸縮する場合は、肩関節が $0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{2}$ rad の 5 つの姿勢における 100 点の関節トルクの肩関節角加速度 ($\ddot{\theta}_1$) および角速度 ($\dot{\theta}_1$) に対する依存性を計算した。数値計算結果をそれぞれ図 4.4 および図 4.5 に示す。

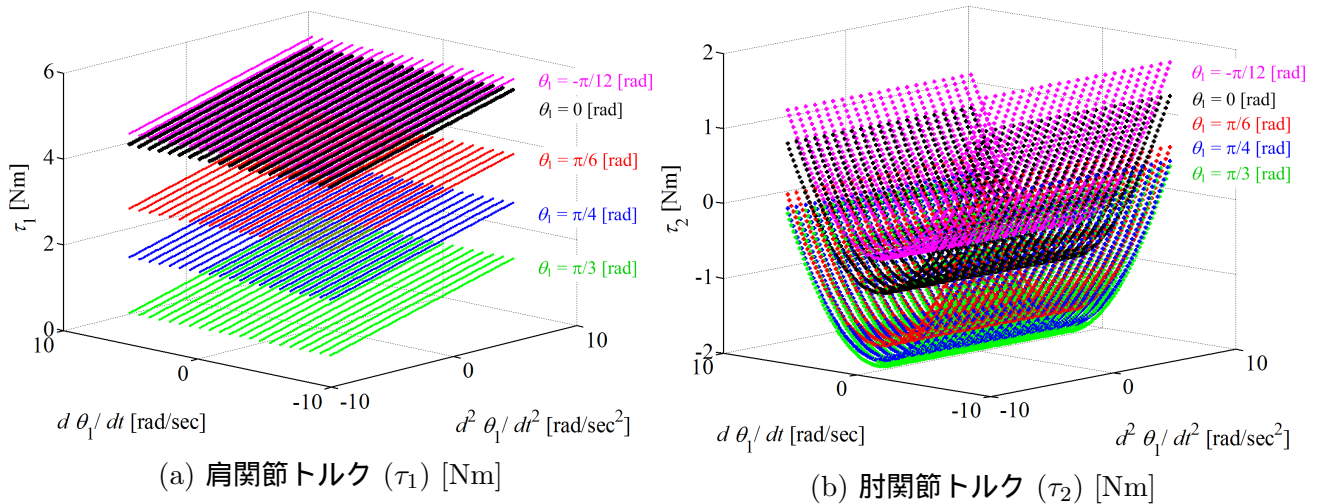


図 4.4: 2 リンクアームの伸縮運動に伴う関節トルクの肩関節角加速度と角速度に対する依存性 ($\delta = \frac{\pi}{3}$ rad)

図 4.4 および図 4.5 から、関節トルクの特徴は第 E 節の図 4.2 の特徴と同様の傾向が見られる。つまり、肩関節トルク (τ_1) は肩関節の角加速度の一次関数 ($\ddot{\theta}_1$) を主とする関数であり、肘関節トルク (τ_2) は肩関節の角速度の二次関数 ($\dot{\theta}_1^2$) を主とする関数であることが見て取れる。

ゆえに、本節と第 4.2 節の検討から、2 リンクモデルの一般的な曲げ伸ばし運動時における関節トルクの特徴は、非線形性を持つものの簡単に補償出来ることが導かれた。これより、ヒトの基本動作である真っ直ぐな伸縮運動は、自身の構造的特徴を利用して簡単な動特性を備えていることが理論的に明らかとなった。この知見を工学的観点からロボットへの設計に利用することで頻繁に行う伸縮運動の制御が簡単に実現する。

4.4 先端力と腕自身の運動に伴う関節トルク特性を重ね合わせた伸縮運動の制御

第 3 章での定式化と本章の定式化により、ヒトが持つ構造的特徴と一関節・二関節同時駆の協調性を利用することで、基本動作として頻繁に行われる支点と先端を結んだ方向に対する伸縮運動が簡単に実

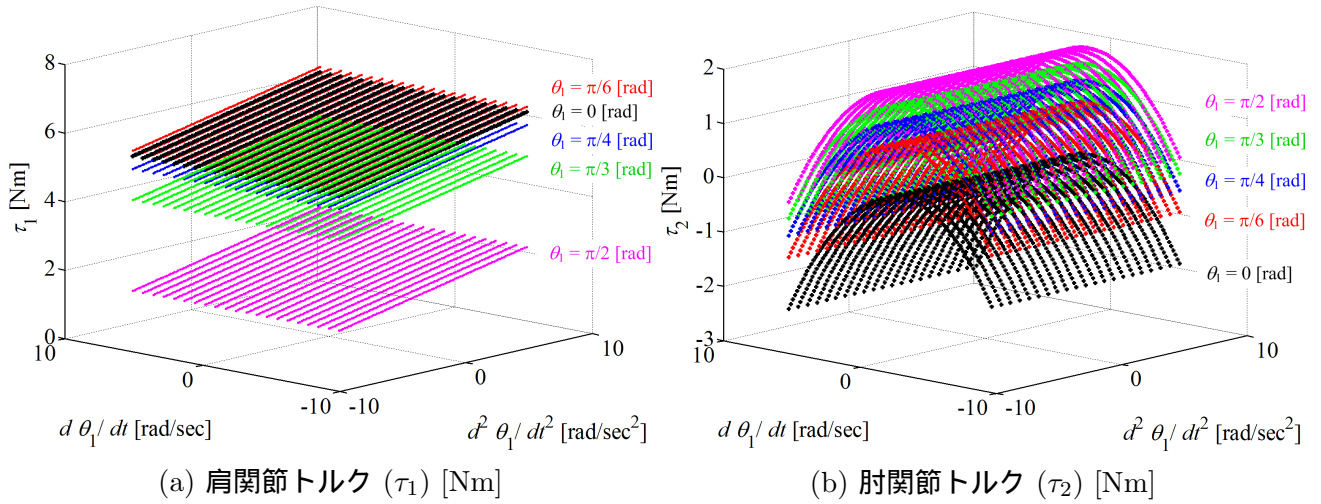


図 4.5: 2 リンクアームの伸縮運動に伴う関節トルクの肩関節角加速度と角速度に対する依存性 ($\delta = \frac{3}{4}\pi$ rad)

現することが示された。本節では、先端力と自身の運動に伴う関節トルクの単純な重ね合わせにより伸縮運動が実現することを論じる。

4.4.1 ダランベールの原理を用いた運動の問題の取扱い

仮想仕事の原理を拡張させたダランベールの原理 [24] を説明する。簡単のため質量 m の一質点を考え、そこに外部から力 F が加わり加速度 $\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}$ で運動する場合を考える。ニュートンの運動方程式から、外力と質点の関係は次式で表される。

$$\mathbf{F} - m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = 0 \quad (4.23)$$

これは、みかけ上の力 $-m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}$ を仮定し、運動の問題を力の釣り合い (平衡) の問題に帰着させられることを意味する [24]。すなわち、先端の運動が力の釣り合いの問題に帰着出来ることを利用すれば、例えば壁を押したり地面を踏む時の先端の運動はそれぞれ力の問題に帰着するため、第 3 章と本章の理論を組み合わせて制御が考えられる。つまり、本論文で着目する伸縮運動の制御は、先端力の制御と自身の運動に必要な関節トルクの重ね合わせで実現する。以上をまとめると、頻繁に行われる鉛直方向への伸縮運動に必要な関節の回転トルクは次式で表される。

$$\begin{bmatrix} \tau_{1\text{Total}} \\ \tau_{2\text{Total}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ml^2 \ddot{\theta}_1 + gml \cos \theta_1 \\ -m \left((\cos^2 \theta_1 - \frac{1}{6}) l^2 + \frac{1}{4} r^2 \right) \ddot{\theta}_1 + ml^2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -F_z l \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

同様に、任意の方向 (δ) への曲げ伸ばし運動における関節トルクも次式で表される。

表 4.2: アーム先端のワークの質量と先端の加速度特性

回転しない先端ワークの質量 : m	5.00 [kg]
先端加速度の時間関数 : \ddot{z}_t	$\frac{0.3\pi^2}{2} \cos \pi t$ [m/sec ²]

$$\begin{bmatrix} \tau_{1\text{Total}} \\ \tau_{2\text{Total}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ml^2\ddot{\theta}_1 + gml\left(\frac{3}{2}\cos\theta_1 + \frac{1}{2}\cos(2\delta - \theta_1)\right) \\ -m\left(\left\{\frac{1}{3} - \frac{1}{2}\cos 2(\delta - \theta_1)\right\}l^2 + \frac{1}{4}r^2\right)\ddot{\theta}_1 + ml^2\dot{\theta}_1\sin(\delta - \theta_1)\cos(\delta - \theta_1) + \frac{1}{2}gml\cos(2\delta - \theta_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F_Z l \sin(\theta_1 - \delta) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

ゆえに、伸縮運動における関節トルクの制御は総合的に簡単である。これがヒトに学び、リンク長・関節の回転半径およびリンク質量をそれぞれ等しくし、一関節・二関節の協調的同時駆動の思想を取り入れることで得られた理論的結果であり、この簡単な特性を用いてロボットの伸縮運動を制御することは工学的観点から優位性がある。

4.4.2 数値解析による鉛直方向への伸縮運動時の関節トルク特性

以上の運動特性の理論的考察に基づき、簡単な数値解析例を用いて関節トルクの特性を評価する。ここでは、手先先端に回転運動を行わない一質点のワークを想定し、ワークを持ち上げながら止める運動時の関節トルクなどを評価する。この運動は、図 4.6 のように壁を真っ直ぐに押す運動を意味する。

図中の (a) のように、腕を折り曲げた状態から最終的に (c) の姿勢まで運動する。(c) の状態は、特異点を避けるために腕が伸びきる手前までを想定する。アームの特性は表 4.1 の値を使用し、ワークの質量と先端加速度の時間特性は表 4.2 に示す値を用いる。アームが動いて止まる自然な運動を想定し、先端の z 方向の速度は時間の sine 関数とした ($\dot{x} = 0$)。そのため、先端加速度の z 成分は時間の cosine 関数となる。表 4.2 の手先加速度 (\ddot{z}_t) に基づく手先先端の運動方程式は次式となる。

$$\mathbf{F} = m\ddot{\mathbf{x}}$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{z}_t + g \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

今回の例は、1 秒間で s 先端のワークを (a) から (c) の状態へ動かすような日常的な運動を想定している。計算には MATLAB を使い、タイムステップは 0.010 sec とした。計算結果を図 4.7 に示す。

先端加速度 (\ddot{z}_t) と式 (4.26) から求まる先端の力特性は、図 4.7(a), (b) のようになる。そして、先端力に伴う関節トルクの時間変化は、式 (3.10) を x, z 平面の問題に置き換えることで図 4.7(c) のように求まる。また、図 4.7(d) は、式 (E.2), 式 (E.3) から求めたアームの運動に必要な関節トルクの時間変化である。そして、図 4.7(e) は、式 (E.2), 式 (E.3) で求まる曲げ伸ばし運動時の関節トルク (τ_1, τ_2) の肩関節角加速度 ($\ddot{\theta}_1$) ・角速度 ($\dot{\theta}_1$) に対する依存性である。

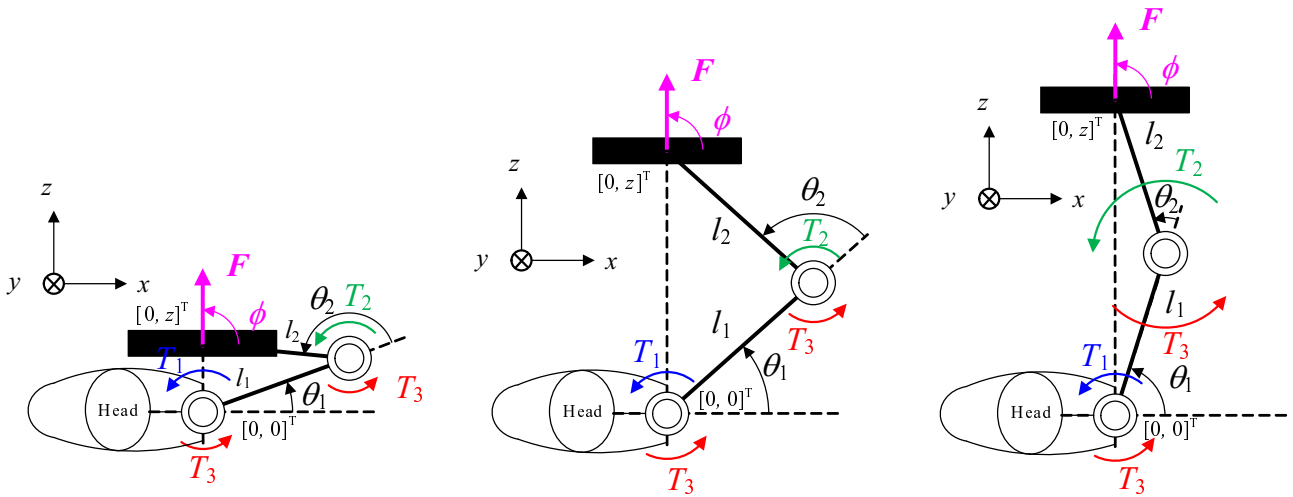
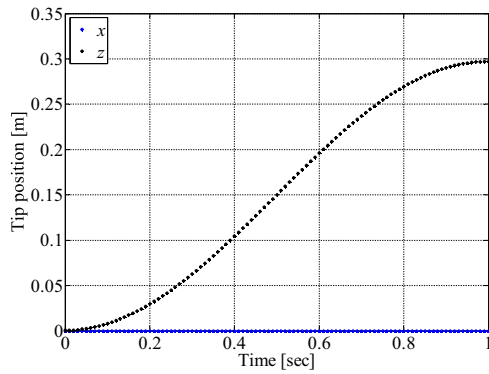


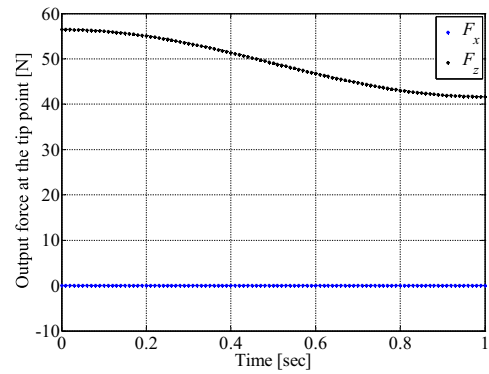
図 4.6: 先端が z 軸上を移動する伸ばし運動

図 4.7(c) にある先端力に応じたアクチュエータトルクは、運動方向が一定であることから第 3 章で述べた $T_1 = -T_3$ を満たしながら鉛直方向への力 (F_y) に応じて変化する。加えて、図 4.7(d) のアーム自身の運動に伴う関節トルクは、先端加速度を時間の cosine 関数で変化させても非線形性が複雑にならないことが見て取れる。それは、図 4.7(e) から明らかである。図 4.7(c) と (d) の各関節の回転トルクを足し合わせたものが伸縮運動に必要な関節トルクであるが、ヒトの構造的特徴を利用することで、基本動作である鉛直方向への伸縮運動の制御が簡単に実現することが数値的に示された。

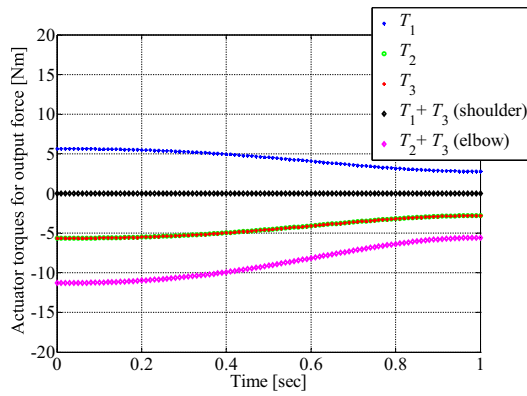
ここでは、壁などのワークを鉛直方向へ運ぶ動作を取り上げたが、任意の方向へ運動する時の関節トルクも方向が常に一定となる制約のもとでは、 x 軸からの任意の角度 (δ) を用いて重力の影響など補償することで同様に実現する。



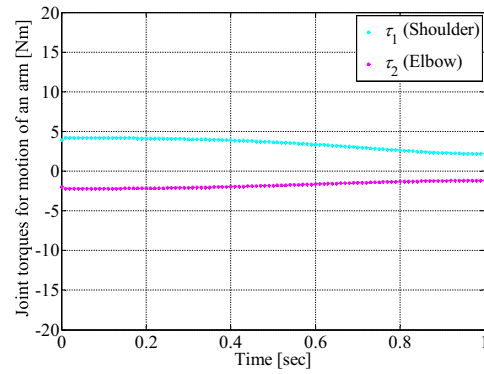
(a) 先端軌跡 (x, z) [m]



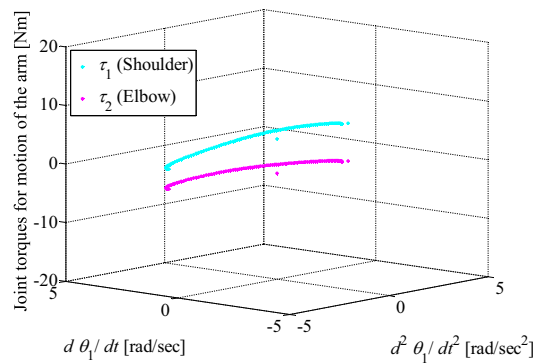
(b) 先端のワークにかかる力 (F_x, F_z) [N]



(c) ワークの運動に必要なトルク $(T_1, T_2, T_3, T_{\text{shoulder}} = T_1 + T_3, T_{\text{elbow}} = T_2 + T_3)$ [Nm]



(d) アームの運動に必要なトルク (τ_1, τ_2) [Nm]



(e) トルク τ_1, τ_2 の肩関節角加速度 $(\ddot{\theta}_1)$ と角速度 $(\dot{\theta}_1)$ に対する依存性 [Nm]

図 4.7: ワークを持つアームの鉛直方向への伸展運動時の特性

4.5 本章のまとめ

本章では、第3章の論述を基にヒトが頻繁に行う伸縮運動時の慣性や重力に由来する動特性を伴う関節トルクを定式化し、工学的観点から運動特性を評価した。

ラグランジュの運動方程式から計算した関節トルクは、一般的な運動においては非線形要素が複雑なため、この複雑な計算をリアルタイムに解いて制御を行うことは容易ではない。一方、前章と同様にヒトの構造的特徴に着目し、リンクの長さで関節の回転半径が等しいという仮定と、本文ではさらにリンクの質量が等しいという仮定を置き、支点と先端を結ぶ真っ直ぐな曲げ伸ばし運動に限定すると、2リンクの関節角速度・角加速度の間に簡単な関係が成立する。加えて、直立・着地など鉛直方向への伸縮運動を考えた場合は、関節の角度にも簡単な関係が存在する。これより、ヒトの構造的特徴に着目した伸縮運動時の関節トルクの特性は、特異的に単純化されることを定式化から導いた。

次に、鉛直方向への曲げ伸ばし運動に伴う関節トルクの理論式から、任意の姿勢における関節トルクの関節角速度および角加速度に対する依存性を数値計算し、その特性を評価した。伸縮運動時の肩関節トルクは肩関節の角加速度の一次関数を主とし、また、肘関節トルクは肩関節の角速度の二次関数を主とした関数であることが数値計算から示された。これより、伸縮運動時の腕自身の運動に伴う関節トルクの非線形性は簡単に補償出来ることが明らかとなった。また、任意の方向への伸縮運動時の関節トルクについても定式化と数値計算を行い、鉛直方向への伸縮運動時と同様にトルクの非線形性が簡単であることを明確になった。本章では、ヒトの腕に着目してリンクの質量が等しいという仮定を置いたが、リンクの質量が異なる場合においても関節トルクの非線形性が大きく変化しないことは、第6章で具体的に述べる。

運動の問題がダランベールの原理により力の釣り合いの問題に帰着されることを利用すると、先端の力制御と自身の運動に伴う関節トルクは単純な重ね合わせで考えられる。これより、伸縮運動に伴う関節トルクの制御は総合的に簡単に実現することが定式化から導かれ、理論式によりその簡略化の方法が明らかになった。工学的な観点からこの考え方のロボットへの応用における有用性は、ヒトの構造的特徴に着目した構造設計を行うことで簡単な関節トルク特性に基づく制御が実現することになる。以上より、ヒトの基本動作である曲げ伸ばし運動の単純化のために、リンクの長さで関節の回転半径を等しくすることが特に重要であることが導かれた。

第5章 生物の柔軟性を考慮した外乱力補償を簡単に実現する伸縮運動の制御

本章では、前章までの定式化と理論評価から得られた知見を生かした伸縮運動の制御系を設計する。加えて、第3章で論じた外乱力を柔軟に補償する制御系を提案し、ヒトのように柔軟に安定した伸縮運動の考え方を論じる。

5.1 仮想粘弾性と二関節筋の考慮により柔軟な先端力制御を簡単に実現する伸縮運動の制御の提案

ヒトは自身の体を動かすことが最も重要であるが、外に対して仕事をすることも基本かつ重要である。前述の通り、ヒトは壁を押ししたり物を持ち上げたり、直立したりジャンプ・着地・歩行などの一方向への仕事を頻繁に行う。そこで、本章ではヒトが頻繁に行う、支点と先端を結んだ方向への簡単かつ柔軟性を備えた力制御を提案する。

5.1.1 柔軟な外乱力補償を持つ鉛直方向への伸縮運動の制御

ヒトの直感的な動作を意図し、鉛直方向への力 (F_z) を入力とし、リンク自身の運動を補償するトルクを重ね合わせた簡単な伸縮運動制御の手法を提案する。第3章および第4章の定式化を用いた制御系を図5.1に示す。

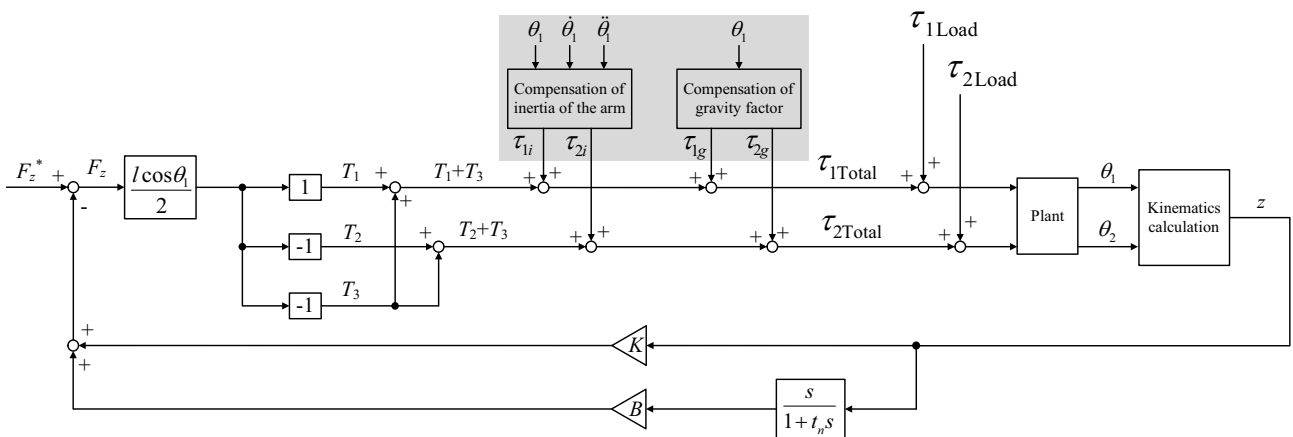


図 5.1: 鉛直方向への力 (F_z) を入力とする鉛直方向への伸縮運動のブロック線図

第3章で述べたヒトに学ぶ特性を考慮した一方向への力制御は、 $T_1 = -T_3$ という条件を持つ。ここでは、肘の一関節筋による回転トルク (T_2) を含めた3つのアクチュエータトルクの最大値を等しく仮定する。ゆえに、第3章で述べた通り、一関節・二関節の協調的同時駆動による各関節の回転トルクは、図中にあるような2行3列で記述される。

加えて、伸縮運動時の腕自身の運動に伴う関節トルク (τ_1, τ_2) は、第4章での定式化とトルクの分布特性から、予め行った計算に基づく肩関節の角度・角速度・角加速度 $(\theta_1, \dot{\theta}_1, \ddot{\theta}_1)$ のテーブルを用いてフィードフォワードで補償する。図中の灰色で囲まれた部分はその関節トルクであり、第4.2節で論述したように簡単な特性である。

そして、本論文では図5.1中に示す、手先先端の z 方向の変位に対し仮想的なバネ・ダンパを備えた外乱力制御を提案する。一般的なロボットの手先位置は、各関節に装備するエンコーダの情報とリンク長のパラメータを用い、式(3.1)から求める。これは、微分演算などを必要としないため簡単に計算出来る。仮想バネ・ダンパを図5.2に示すように支点と先端を結んだ軸に対して配置し、鉛直方向からの外乱力を柔軟かつ簡単に補償する。仮想バネ・ダンパの調整はモータ制御のゲイン調整と等価であるため、実際にバネ・ダンパを装備する必要がなくソフトウェアで簡単に粘弾性を再現できる。

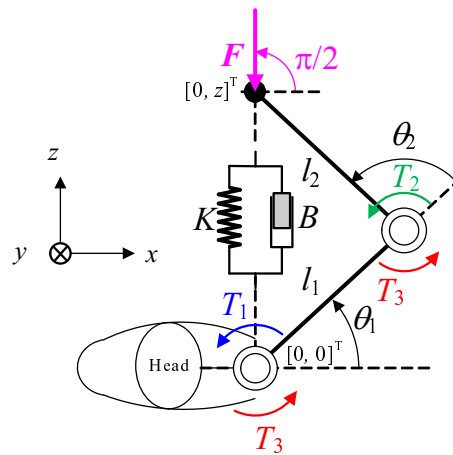


図 5.2: 支点と先端を結ぶ方向に柔軟性を持つ 2 リンクアームの概念図

5.1.2 任意の方向からの外乱力を補償した鉛直方向への伸縮運動の制御

前節の鉛直方向からの外乱力を補償する制御系を拡張し、任意の方向からの外乱力を柔軟かつ簡単に補償する鉛直方向への伸縮運動の制御を提案する。第3章では x, y 平面における任意の方向への力特性を論じたが、ここでは x, z 平面に置き換えて考える。

先述の通り、リンク長の等しい2リンクアームは式(3.9)の先端力特性を備えている。そして、図5.1は式(3.10)に基づいて入力与设计し、鉛直方向の外力 (F_z) にのみ柔軟な補償を実現するシステムであった。一方、 z 軸上に位置する先端が x 方向成分を持つ外力 (F_x) を受けると、先端が z 軸上から変位するために式(3.8)の関係が崩れる。前節の提案システムではこの問題に対応出来ない。 x 成分を持つ外力による変位に柔軟に対応するために、一関節・二関節の協調的同時駆動と仮想バネ・ダンパを利用した先端力制御のブロック線図を図5.3に示す。

手先が z 軸上から外れると、鉛直方向への力(負荷などに対する仕事)が正常に実現しなくなるため、これを回避することが目的である。そのためには、先端を z 軸上に戻すことが重要である。すなわち、式(3.7)にあるそれぞれのアクチュエータトルクを変化させ、肩関節の回転トルクに $T_1 = -T_3$ の関係を再び復元することが必要である。このように、ヒトが T_1 と T_3 に相当する筋力を微調整し、肩関節にかかる回転トルクを安定化することは、図5.3中の T_1 と T_3 が影響する先端力の方向の違いと筋電図結果から明らかである。図5.2と同様に、先端における外力を柔軟に制御する仮想バネ・ダンパを持つ2リンクアームの概念図を図5.4に示す。

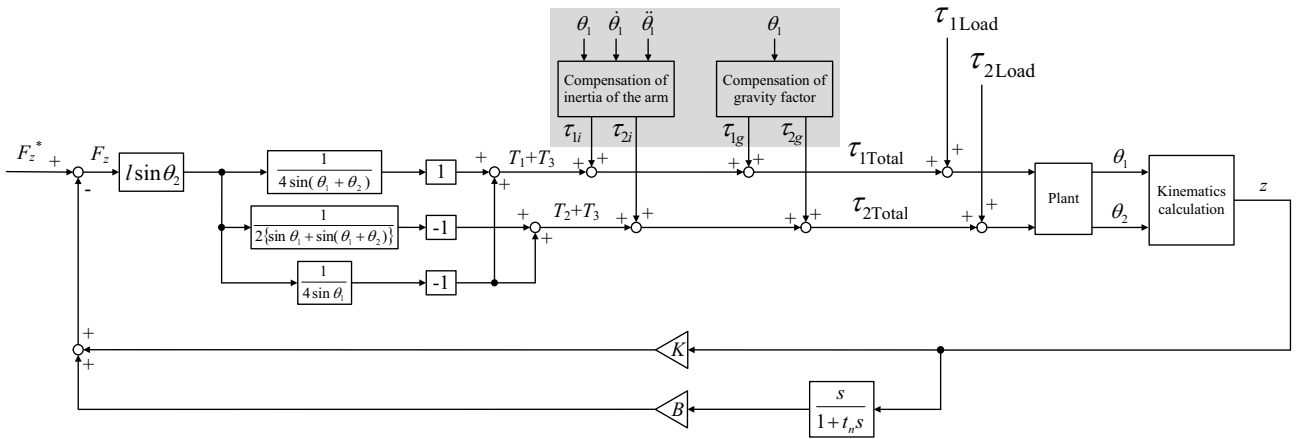


図 5.3: 鉛直方向への力 (F_z) を入力とし、任意の方向からの外乱力を柔軟に制御する鉛直運動のブロック線図

図 5.3 中のそれぞれのアクチュエータトルクに関わる変数は、式 (3.7) と各アクチュエータトルクの最大値が等しいという仮定から導かれる ($|T_{1max}| = |T_{2max}| = |T_{3max}|$)。手先が z 軸上から外れると式 (3.8) が成立しなくなるが、アクチュエータトルクの微調整により再び手先が z 軸上に戻った場合、式 (3.7) と式 (3.10) は一致し、再び z 方向への力が実現する。

図 5.4 はヒトの先端力特性を示しているが [6]、アクチュエータトルクの微調整は図左の円で囲んだ方向の外力に対して特に有効である。提案する制御系は鉛直方向への伸縮運動の簡単かつ安定した実現を目的としているため、円で囲んでいない x 方向への変位に対する補償は難しい。これは、我々ヒトが真横から外力を受けたときに伸縮運動を続けることが難しいことに対応する。ここでは、ヒトが二関節筋の役割により支点と先端を結んだ軸に対称な力分布特性を持つことと、各筋肉の微調整により先端で発する力の方向の微調整が簡単に行える特徴を利用した。ヒトが筋出力の微調整と先端力の方向の微調整の間の簡単な関係を備えていることは、外乱力を簡単に補償しながら多用する鉛直方向への伸縮運動を行うために重要であると言える。ロボットの外乱力補償にこの理論を用いるためには、任意の姿勢における筋出力の微調整と先端力の方向の微調整の関係が分かっているという前提条件が必要である。

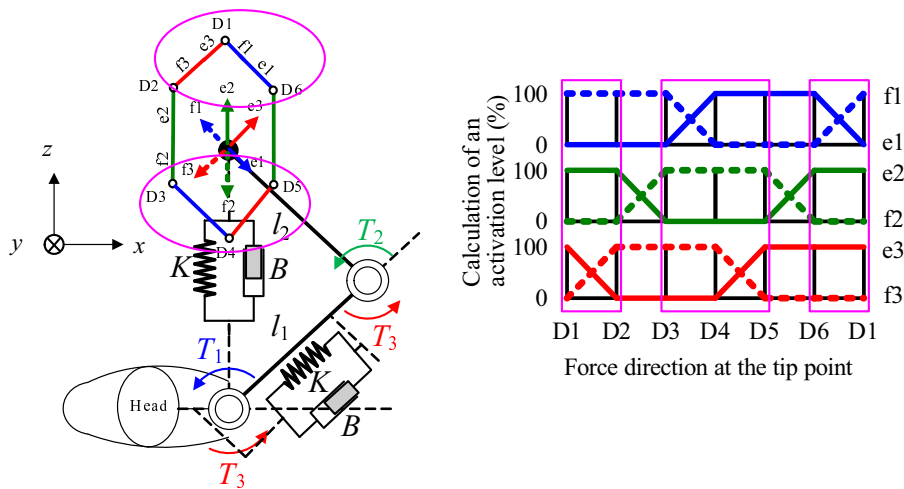


図 5.4: 任意の方向からの外乱力に対する柔軟性を備えた 2 リンクアームと筋電図結果を利用したアクチュエータトルクの制御の概念図

5.2 二関節同時駆動の有無による柔軟な外乱力補償の相違

二関節同時駆動を持たない機構において、前節と同様に鉛直方向への真っ直ぐな伸縮運動の制御を考える。第 3.3 節で論じた二関節同時駆動の有無による力制御特性の相違と、外乱力補償特性の相違を比較し、二関節同時駆動の優位性を論じる。

5.2.1 二関節同時駆動を持たない機構による鉛直方向への伸縮運動の制御

はじめに、前節と同様に鉛直方向からの外力 (F_z) を柔軟に先端力を補償する伸縮運動の制御系を図 5.5 に示す。アーム自身の伸縮運動に伴う補償トルクは、前節と同様の関数を持つためフィードフォワード制御で実装する。先端力に関しては、第 4.2 節で論じた二関節筋を持たない場合の鉛直方向への力を発生する条件式 (3.12) に基づいて関節トルクを設計し、運動に伴う補償トルクとの重ね合わせで伸縮運動の制御系を構成する。図 5.5 に示す提案システムは、 z 方向から外乱力による微小変位に対しては仮想バネ・ダンパと肘の一関節筋の回転トルク (t_2) による外乱力補償を実現する。

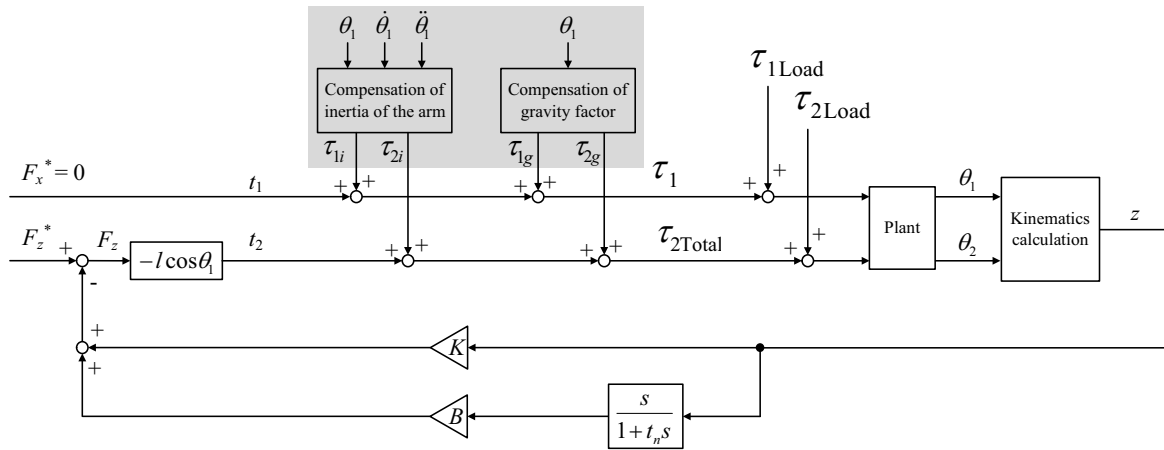


図 5.5: 二関節同時駆動を持たない場合の鉛直方向への伸縮運動のブロック線図

5.2.2 二関節同時駆動の有無による任意の方向からの外乱力補償の比較

微小変位に対する二関節同時駆動の特徴を論じるため、手先が z 軸上に存在するときに x 成分を持つ外乱力を受ける場合を考える。前節と同様に、外乱力により手先が z 軸から外れることを補償する伸縮運動の制御系を図 5.6 を示す。

第 3 章で論じた通り、 z 軸上に存在する手先が z 方向に力を発生する場合は、肩の一関節筋相当のトルクが $t_1 = 0$ を満たされなければならない。これは、前述の通り肩関節に対して全く回転トルクがかからないことを意味する。

微小変位から手先を z 軸上に戻すためには、肩関節角度 (θ_1) の変位に応じて肩関節トルク (t_1) を制御する必要があるが、鉛直方向への力を発生するための条件 $t_1 = 0$ の制約を受けるため、外乱に応じた t_1 の制御が出来ない。つまり、 x 方向の変位により肩関節が大きく変位した場合は、肩関節の回転を補償するトルクがゼロであるために外乱力を補償して元の位置に戻ることは出来ない。この問題を解決するためには、鉛直方向への運動とは別の先端力制御に切り替える必要があり、提案した二関節同時駆動を考慮した柔軟な外乱力補償と比べて計算が複雑になる。

一方、二関節同時駆動を備えた場合は、肩関節の回転トルクを T_1 と T_3 の微調整を主としたトルク制御により肩関節の微小角度変位に対応出来るため、図 5.3 に示した粘弾性を表現する係数 (B, K) を介し

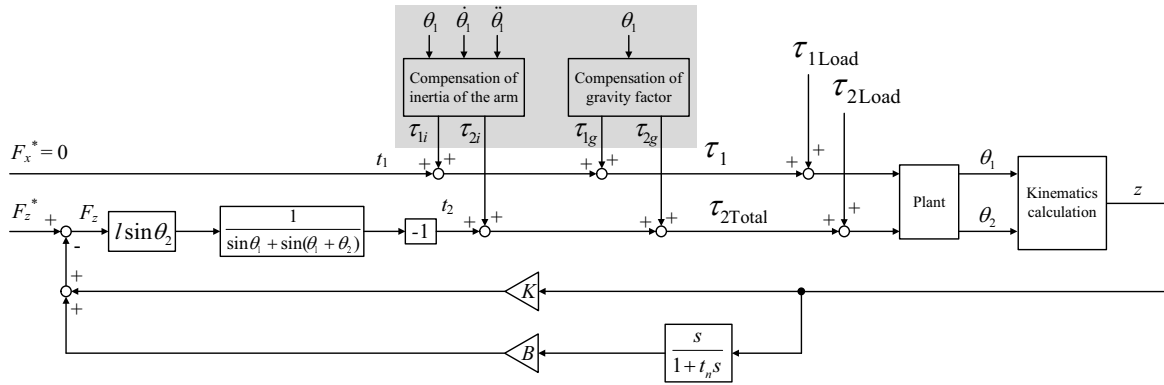


図 5.6: 二関節同時駆動を持たない場合の任意の方向からの外乱力を補償した鉛直運動のブロック線図

た簡単なフィードバックを加えることで外乱力に柔軟な鉛直方向への伸縮運動が実現する。そして、粘弾性のパラメータの調整により柔軟性を自由に設定出来るため、提案システムを用いることでヒトのように柔軟な伸縮運動が簡単に実現する。

外乱力の補償特性の相違は、第 3.3.3 節で述べた二関節同時駆動の有無による剛性特性の相違からも明確に説明できる。第 3.3.3 節で示した二関節筋の有無による剛性の差は、一関節筋と二関節筋のそれぞれの拮抗対のペアを用いて式 (3.24) と式 (3.25) で表された。それぞれの拮抗のペアが出力を高めると、静止した状態で剛性を高めることが出来るため、外乱力に対する姿勢の維持に関係する。第 3.3.3 節で述べた通り、先端が z 軸上に存在する場合の x 方向からの外乱に対する剛性は二関節筋があることでない場合と比べて高くなる。 $T_1 = -T_3$ と $t_1 = 0$ は、二つの筋肉の拮抗筋の組み合わせにより肩関節の回転トルクがゼロとなり鉛直方向へ力が発生することと、肩の一関節筋の拮抗筋の調整のみで肩関節の回転トルクがゼロとなるという明確な相違を意味している。

以上より、第 3.3 節で評価した、二関節同時駆動の有無による微小変位補償の相違は、提案した柔軟な外乱力補償を備えた伸縮運動の制御を考えることで明確化された。これより、伸縮運動における二関節同時駆動の重要性が理解出来る。提案システムは、外乱力補償を備えた一方向への伸縮運動を簡単に実現するための制御系であり、伸縮運動のための関節トルク的设计と柔軟な外乱力補償のいずれのためにも複雑なリアルタイムの計算は不要である。ゆえに、一関節・二関節の協調的 simultaneous 駆動と柔軟性を考慮することで、一方向への伸縮運動が簡単に実現可能である。次章で提案システムの実験的検証と評価を行い、ロボットに二関節同時駆動の思想を適用することの優位性を実証する。

5.3 柔軟な外乱力補償を持つ任意の方向への伸縮運動の制御

5.3.1 任意の方向への柔軟な伸縮運動の制御

本節では、第 5.1 節で提案した鉛直方向への運動の拡張として、任意の方向への伸縮運動も簡単な制御システムで実現することを論じる。

手先が任意の位置に存在し、その方向 (δ) へ真っ直ぐに運動する際の先端力制御とアームの運動に伴う関節トルクは、第 3.4 節および第 4.3 節で δ を変数に持つ回転行列 D を用いて定式化した。そして、一定の方向への運動の場合はそれぞれの特性が簡単であることを導いた。そこで、任意の角度 (δ) の方向へ真っ直ぐに曲げ伸ばし運動を行う場合の、柔軟な外乱力補償を備えた伸縮運動の制御系を図 5.7 に示す。

第 3.4 節における定式化から、任意の方向 (δ) に対応する (X, Z) 軸で考えることで、鉛直方向と同様に簡単な先端力制御を持つ伸縮運動の制御系が実現する。加えて、第 4 章で論じた通り、任意の方向 (δ)

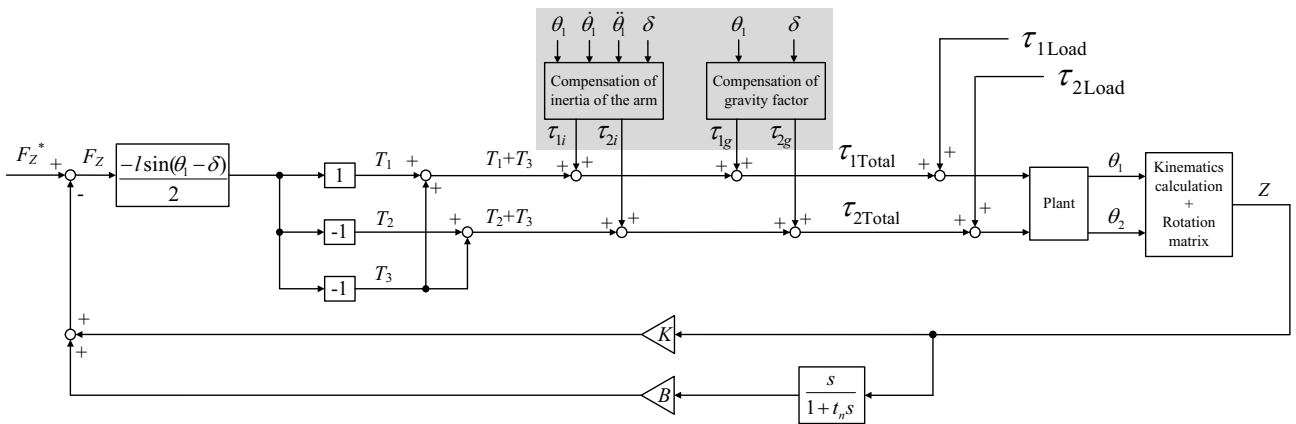


図 5.7: 任意の方向への力 F_Z を入力とする伸縮運動制御のブロック線図

が一定な場合のアーム自身の伸縮運動の制御は、関節トルクの非線形性が簡単であるため、それを補償トルクとしてフィードフォワードで加算して実現する。鉛直方向と比べて多少複雑化するのは重力加速度の取扱いであるが、一直線上の運動の場合は任意の方向 (δ) の正弦・余弦関数に依存するだけであり簡単であると言える。

5.3.2 任意の方向からの外力を柔軟に補償する伸縮運動の制御

鉛直方向への伸縮運動と同様に、任意の方向の微小変位に対して柔軟かつ簡単な補償を備えた制御系を示す。提案する制御系を図 5.8 に示し、任意の方向へ柔軟性を備えたアームの概念図を図 5.9 に示す。

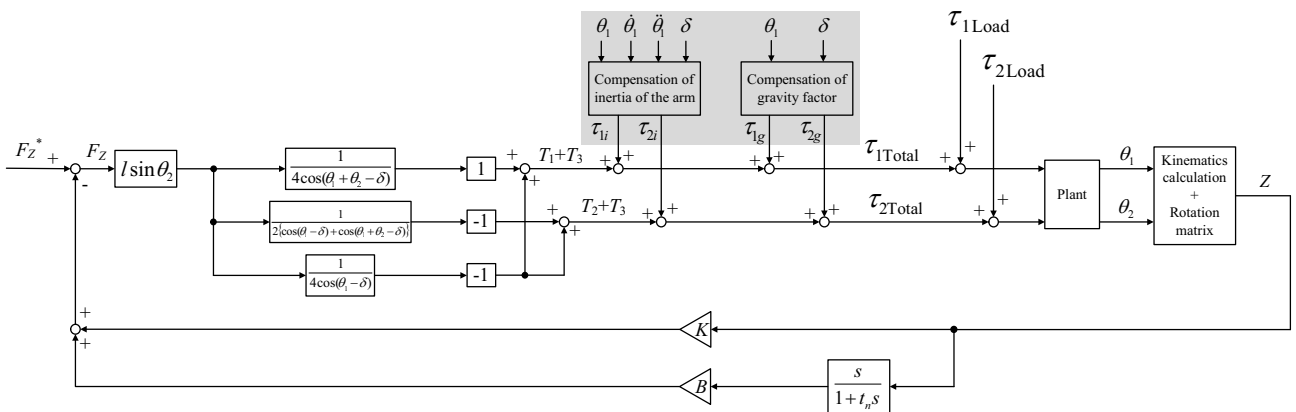


図 5.8: 任意の方向からの外力を補償する任意の方向への伸縮運動制御のブロック線図

第 3.4 節で論じた通り、任意の方向 (δ) への力の制御は力の方向が鉛直な場合と同様に $T_1 = -T_3$ という条件を持つ。よって、外力に対する柔軟な先端力制御は、伸縮運動を (X, Z) 座標で考えることで、鉛直方向への伸縮運動と同様に T_1 と T_3 の微調整を主としたアクチュエータトルク制御により簡単に実現可能である。ゆえに、図 5.8 に示す制御系は、微小変位を引き起こす外力を柔軟に補償して Z 軸方向への伸縮運動を実現する。

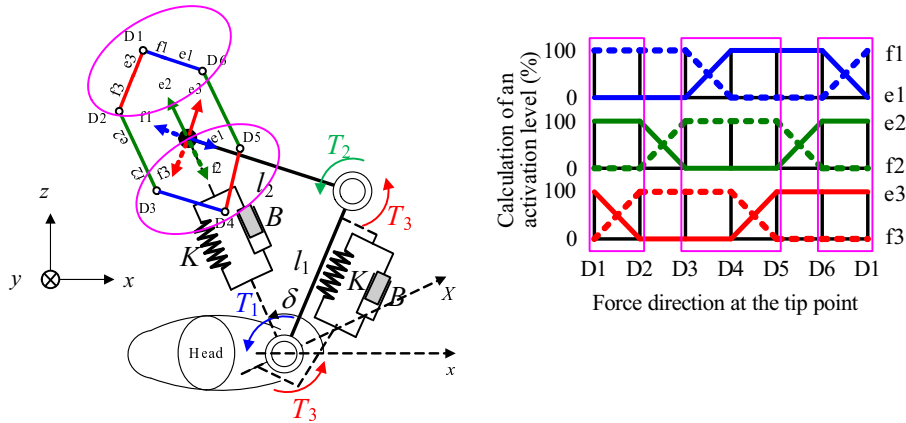


図 5.9: 柔軟性を持つ 2 リンクアームの任意の方向への運動の概念図

5.4 本章のまとめ

本章では、ヒトの持つ柔軟性を仮想バネ・ダンパにより再現し、第 3 章で論じた簡単な先端力制御に柔軟性を加えた外乱力補償と、第 4 章で述べた知見を組み合わせた簡単な伸縮運動の制御の理論を提案した。

はじめに、先端で受ける外乱力の方向を、支点と先端を結ぶ方向に限定した場合の柔軟な先端力制御を提案した。提案した柔軟な先端力制御は、支点と先端を結ぶ仮想的なバネ・ダンパを装備した状態となり、粘弾性をソフトウェアで簡単に調整出来る。この方向の力に対するアクチュエータトルクは、第 3 章で論じた特異的に簡単な条件に当てはまるものであり、この方向の微小変位に対する力制御は、提案した制御手法により簡単に実現する。

次に、ヒトが持つ各筋肉の出力と先端力方向の関係を利用し、想定外の任意の方向からの外乱力を柔軟かつ簡単に補償する鉛直運動の制御を提案した。支点と先端を結ぶ方向への力制御には、肩の一関節筋の回転トルクと二関節筋の回転トルクの間には $T_1 = -T_3$ の関係が存在する。よって、外力による微小変位に対してこの二つのアクチュエータトルクのバランスを主として各アクチュエータトルクの値を調整し、微小変位に対する補償を簡単に実現することを考えた。これは、一関節・二関節の協調的同時駆動の持つ支点と先端を結んだ軸に対称な力分布特性と、関節角度で表した先端力の方向の関係を利用することで初めて実現する。つまり、任意の姿勢における筋出力の微調整と先端力の方向の微調整の関係が分かっている場合に成り立つ制御である。この条件下で、二関節同時駆動を持たない場合の伸縮運動時の外乱力に対する補償を考慮した制御を考え、二関節同時駆動の思想を適用することの優位性を理論的に明確化した。

外乱力に対する柔軟性の調整は、仮想バネ・ダンパを考えることで自在に設計可能である。これより、ヒトの構造的特徴と一関節・二関節の協調的同時駆動およびヒトの持つ柔軟性を考慮した提案システムは、複雑な計算およびフィードバック制御を必要とせず基本動作である伸縮運動を簡単かつ柔軟に実現する。

また、柔軟な外乱力補償を備えた任意の一方方向への伸縮運動の制御を提案した。任意の一方方向へ力を発生させる場合も、鉛直方向と同様に $T_1 = -T_3$ の関係が存在する。また、任意の一方方向へのアームの伸縮運動における関節トルクの非線形性は、鉛直方向に伸縮する場合と同様に比較的簡単である。ゆえに、鉛直方向と同様に任意の方向においても外乱力を柔軟かつ簡単に補償する伸縮運動が実現可能である。

第6章 実証実験による運動制御特性の評価

本章では、第3章、第4章および第5章で述べたヒトの構造的特徴と一関節・二関節の協調的同時駆動を利用した運動制御手法に関して、実験機を用いた検証を行い特性を評価する。はじめに、先端の力特性を直接的に関節トルクに反映させ、二関節同時駆動を仮想的に再現した試験機の概要を説明する。さらに、試験機の構造的特性を考慮した場合の運動制御の概要を説明し、実機による工学的検証とその評価について論じる。

なお、本論文において2リンクモデルを中心的に扱っているにも関わらず3リンクの試験機を製作したのは、ヒトの下肢モデルのようにリンクの数に対してアクチュエータの数が多い、冗長性を持つ生物の筋骨格系の特性を検討するという別の研究者と共同使用するためである。

6.1 実験に基づく伸縮運動の工学的検証の概要

6.1.1 先端力を直接フィードバックするための試験機のハードウェア構成とその特徴

本節では、ヒトの一関節・二関節の協調的同時駆動の特長を検証するために、以下の特徴を持つロボットアームを製作した。

1. 先端力特性と先端にかかる外乱力に対する仮想粘弾性フィードバック制御を直接的に検証するため、比較的大きなトルクを発生する回転形モータを選定し、減速機を設けないダイレクトドライブとした。
2. 試験機にヒトの持つ支点と先端を結ぶ軸に対称な先端力分布を持たせるため、リンクの長さと同関節の回転半径を等しくした。
3. 二関節同時駆動を実現する機構を従来の一関節駆動と合わせて関節トルクを発生する機構は製作上難しいため、二関節同時駆動によるトルクをソフトウェアを用いて仮想的に実現した。
- 既存研究 [28][29] などで二関節同時駆動用アクチュエータを設計する研究も行われているが、筋肉の出力と関節トルクの理論的關係に基づいて二関節筋を仮想的に模擬した特性を評価する。
4. 先端力の測定のためにリンク先端に3軸力センサを装備した。

使用した力センサは手先の3軸のトルクも計測可能であるが、本論文の主目的から二次元平面の力と残りの1軸を加えた3軸の力を計測する。

以上の特性を考慮して製作した試験機の概要を図6.1に示し、試験機の写真を図6.2に示す。図6.2中の先端に装備しているのが力センサであり、シャフトを通じて地面に取り付けられている台車は先端力を受けて運動するワークである。装置全体の質量は、力センサやケーブル等を含めて約2.00 kgの構成となった。リンクの長さと同関節から各リンクの重心までの距離は、本論文の2リンクアームを用いた数値解析条件と同じになるように試験機を製作した。慣性モーメントは、各部品の質量と配置から実測値を使って求めた。また、シャフトの直径が6.00 mmであることから、関節の回転半径は数値計算と同じ3.00 mmである。試験機の基本定数を表6.1に示す。

駆動源である DC モータとエンコーダを含めた各関節の質量が重いことと、リンクが長いことから先端がたわむ問題を回避するため、モータの底とリンク先端に車輪を設けた。ガラステーブルの上に試験機を配置し、ステンレス製の車輪を用いることで水平運動における摩擦の低減を図った。先端の力センサも質量が大きい欠点があるため、先端のリンクにも台車を追加する。また、本論文で対象とする 2 リンクモデルとして実験を行う際には、支点の留め具と根元のリンクを固定する。このリンクを基準軸とし、図 6.2 中の真ん中のモータから先のモータまでをリンク 1 と呼び、先のモータから手先先端までをリンク 2 と呼び、2 リンクでの実験を行う。本論文では、2 リンクアームの検証を主目的とするため、関節 1 をヒトの上肢という肩関節とする。また、試験機に減速機を用いないことから大トルクの発生が難しいため、鉛直方向への運動の実現は難しい。そこで、第 3 章で述べた x, y の二次元平面を想定して実験を行った。試験機を上から撮った写真を用いて x, y 平面の軸の取扱いを説明したものを図 6.3 に示す。

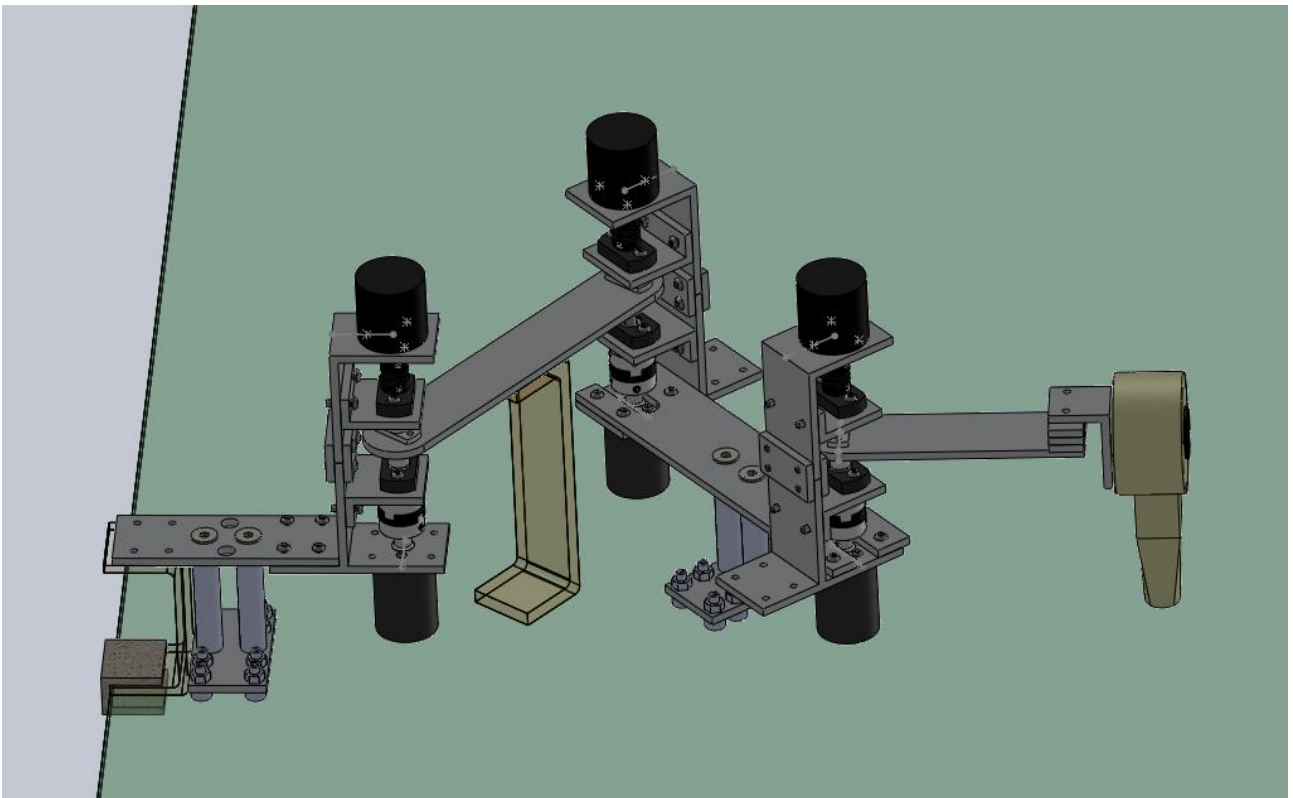


図 6.1: 3 リンク試験機の概要

6.1.2 制御系の構成

本節では、実験機と PC などの制御系に関して述べる。使用した制御用 PC および電源、センサ類の構成を図 6.4 に示す。ロボットの運動制御のためのリアルタイム制御は、上位制御系である PC から送られるデジタルの指令値を DSP (Digital Signal Processor) を用いてアナログに変換し、直流電力増幅器を通して増幅された電流により DC モータのトルクを制御する。そして、各関節に装備されたエンコーダのパルス信号を DSP にフィードバックし、パルスカウンタの値を PC に送ることで関節の回転角度を把握する。同様に、先端に装備した力センサは、センサの変換部に加わる力をアナログ電圧に変換して出力するため、その電圧信号を DSP にて A/D 変換し、PC で力の大きさをモニタリングする。

試験機に用いた DC モータとインクリメンタル形エンコーダおよび 3 軸力センサの諸元を表 6.2 に示す。続いて、制御用 PC・DSP と DC モータの電流制御を行うための電源の諸元を表 6.3 に示す。

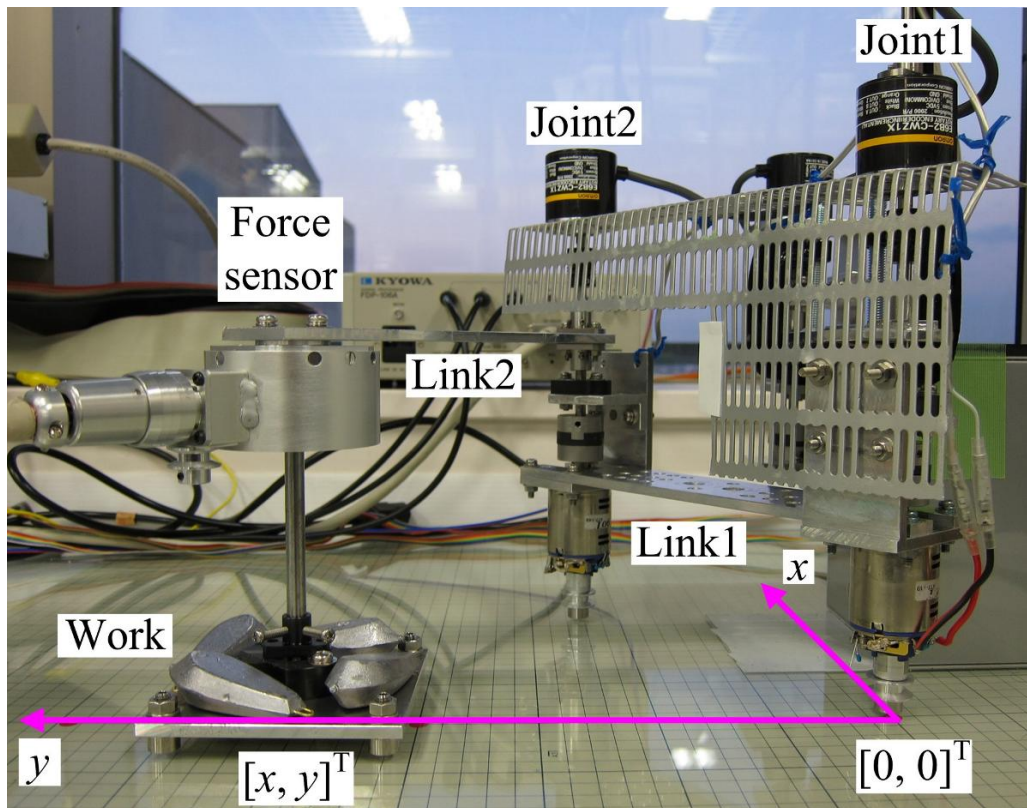


図 6.2: 製作した試験機の写真

表 6.1: 製作した試験機の基本定数

各関節の回転半径 : r_1, r_2	0.030 [m]
各リンクの長さ : l_1, l_2	0.20 [m]
リンク 1 の質量 : m_1	1.128 [kg]
リンク 2 の質量 : m_2	0.150 [kg]
リンク 1 の慣性モーメント : I_1	0.0091 [kgm ²]
リンク 2 の慣性モーメント : I_2	0.0064 [kgm ²]
先端の力センサの質量 : m_{sensor}	0.255 [kg]

減速機を用いないため、市販で買える範囲で出来るだけ大きなトルクを発生する軽量のモータを選択した。エンコーダおよび力センサの応答周波数と DSP の応答周波数は、制御実験のために十分な性能を考慮して選択した。また制御用の PC についても現在市販で購入出来る製品であり、特に高性能なものを必要としない。提案した伸縮運動の制御系は、MATLAB Simulink の Real-Time Workshop を利用して C コードプログラムを生成し、DSP に制御信号を送ることで実現する。運動特性を求めるいくつかの関数は直接 C プログラムを生成し、MATLAB Simulink の Real-Time Workshop に組み込むことで動的な運動に伴う関節トルクの指令値を作成した。

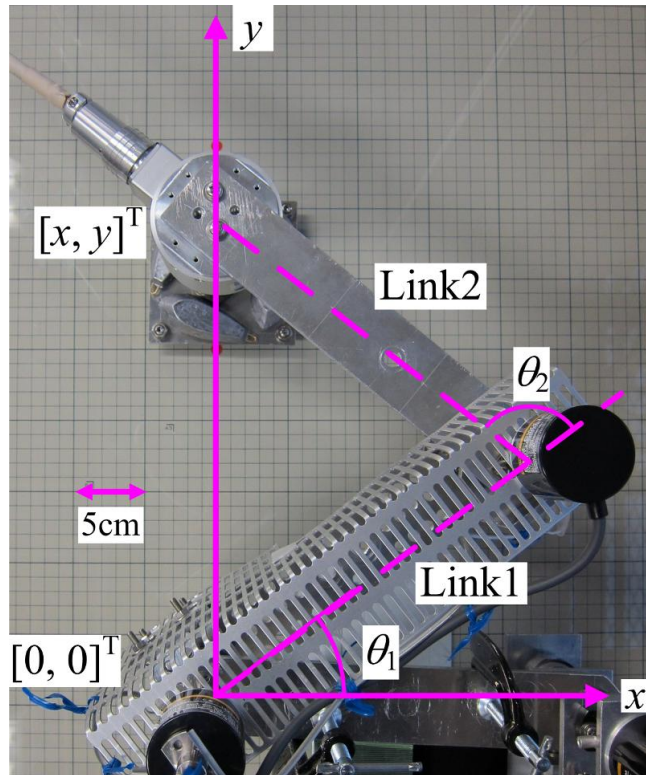


図 6.3: 実証実験における軸の取扱い

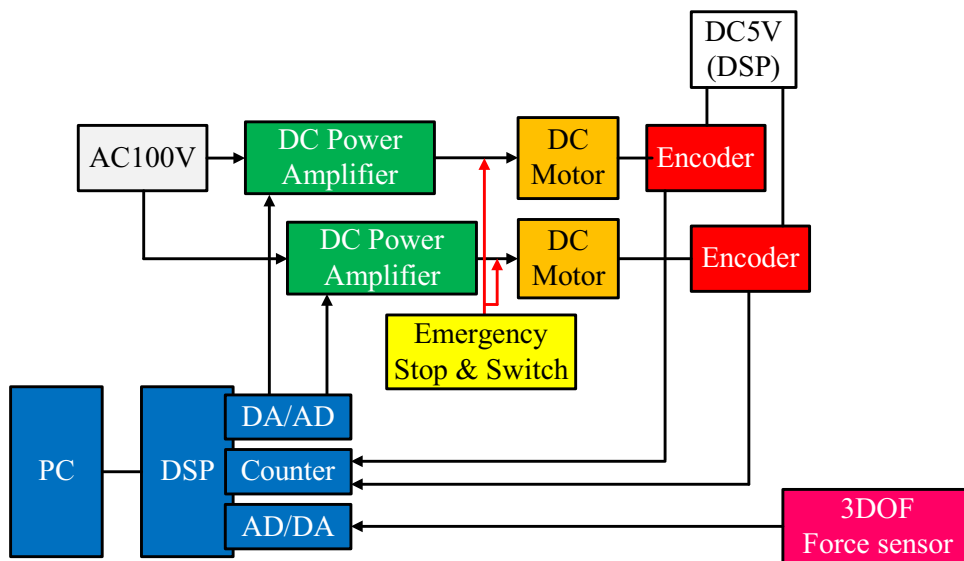


図 6.4: 実験系の構成

6.2 一関節・二関節筋の協調的同時駆動を実装した試験機の先端力の測定

本節では、第 3.1 節、第 3.2 節で論じた先端力とアクチュエータトルクの測定を行い、一関節・二関節の協調的同時駆動の試験機への実装を評価する。先述の通り、二関節同時駆動によるトルクが両関節を同時に駆動することを考慮し、3つのアクチュエータトルクの計算値からソフトウェア的に2つの関節トルクに変換する。

表 6.2: 実験用モータとセンサ類の諸元

DC モータ	MABUCHI MOTOR 540 base : 216.00 [mNm] (Stall Torque)
DC モータの巻線の抵抗値 : R	1.10 [Ω]
DC モータのインダクタンス : L	0.00078 [H]
DC モータのトルク定数 : K_t	0.0127 [Nm/A]
エンコーダ	OMRON E6B2-CWZ1X 2000P/R Resolution : 2000.00 [pulse/rev], Maximum response frequency : 100.00 [kHz]
力センサ	協和電業 LAT-10010KA-2 F_x, F_y : 100.00, F_z : 200.00[N], 0.050 [%/rev], Response frequency : 300.00 [Hz]

表 6.3: 制御コントローラと電源の諸元

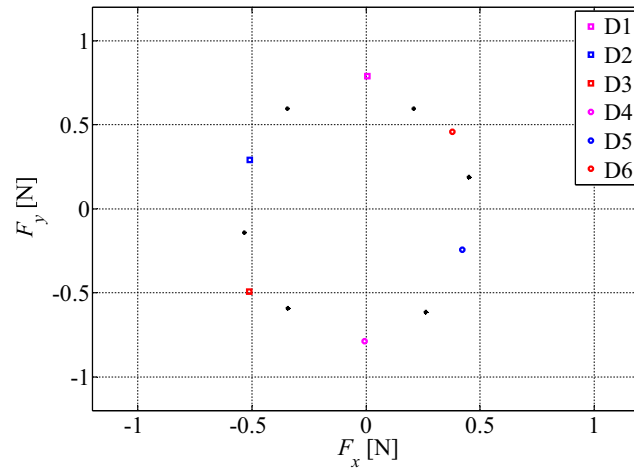
PC	Windows XP SP3
CPU	Intel Core2Quad Q8400 2.66 [GHz]
Memory	DDR2 2.00 [GB]
Digital Signal Processor	dSPACE CP1103 (AD: 4.00 [μ sec], DA : 5.00 [μ sec]), Encoder : 1.65 [MHz]
Power Amplifier	NF ELECTRONIC INSTRUMENTS TA-250, Rated apparent power 250.00 [VA], Rated output voltage ± 17.50 [V], Rated output current ± 10.00 [A], Nominal load 17.50 [Ω]

第 3.1 節, 第 3.2 節で論じた、ヒトの筋電図測定に基づくアクチュエータトルクパターンを入力とした場合の先端力の大きさ (F_x, F_y) を、力センサを用いて測定した。試験機を配置したガラステーブルの下に目盛り付きのマットを敷いて試験機の姿勢を定めた。肩関節および肘関節の角度が (i) $\theta_1 = \frac{\pi}{6}, \theta_2 = \frac{2}{3}\pi$ rad, (ii) $\theta_1 = \frac{\pi}{4}, \theta_2 = \frac{\pi}{2}$ rad および、(iii) $\theta_1 = \theta_2 = \frac{\pi}{3}$ rad の 3 つの姿勢において、先端を固定した状態で力を測定した。アクチュエータトルクの最大値はすべて等しいと仮定した。手先からヒトが持つ六角形の先端力分布の各頂点へ向かう方向 (図 2.5 中の D1 - D6) と、その中間の方向への力を想定し、力ベクトルの大きさを 1 N としての先端力を測定した。先端力 (F_x, F_y) の測定結果を以下の図 6.5 に示す。

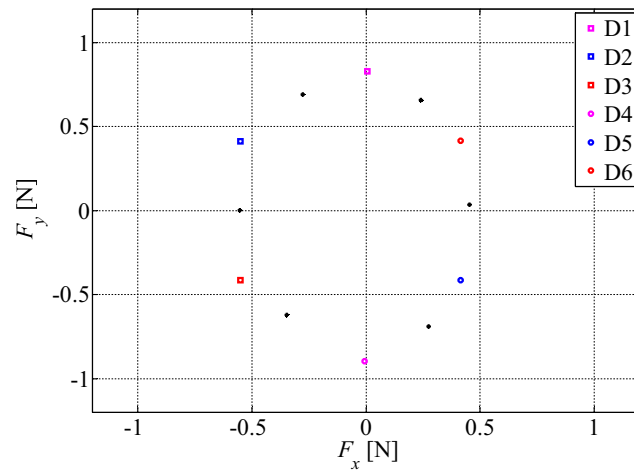
例えば、図 5.1 から $T_1 = 1, T_2 = -1, T_3 = -1$ とした場合は、 y 方向へ力が発生し、逆に $T_1 = -1, T_2 = 1, T_3 = 1$ とした場合には $-y$ 方向への力が発生する。各方向への力の大きさを 1 N としたのは、リンクの長さや DC モータに流せる最大電流に制限があることが理由である。また、姿勢により出しやすい力の方向があることは、第 3 章の定式化から自明である。例えば D1 方向の力を考えた場合に、理論式が

示す通り力 F_y は肩関節角度の余弦関数 ($\cos \theta_1$) を分母に持つため、姿勢によりアクチュエータの出力値が変化する。例えば、 $\theta_1 = \frac{\pi}{3}$ rad の姿勢において $F_y = 1$ N を実現するためのアクチュエータの出力は、 $\frac{\pi}{6}$ rad の姿勢で同じように $F_y = 1$ N とするためのアクチュエータ出力よりも小さくなる。

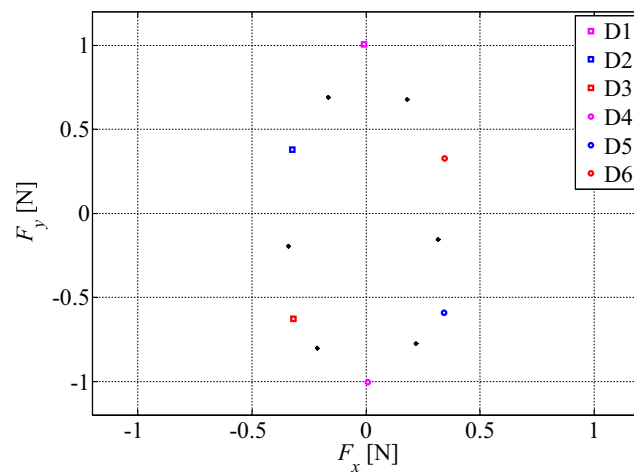
図 6.5 から、試験機の先端力と関節トルクの関係が概ね理論通りの特性を持っていることが明らかとなった。すなわち、ヒトの持つ一関節・二関節の協調的同時駆動を考慮したアクチュエータトルクの制御は、支点と先端を結んだ軸に対称な先端力分布を実現することが確かめられた。



(a) 関節角度 ($\theta_1 = \frac{\pi}{6}, \theta_2 = \frac{2}{3}\pi$ rad)



(b) 関節角度 ($\theta_1 = \frac{\pi}{4}, \theta_2 = \frac{\pi}{2}$ rad)



(c) 関節角度 ($\theta_1 = \frac{\pi}{3}, \theta_2 = \frac{\pi}{3}$ rad)

図 6.5: 3つの姿勢における先端力の測定結果 [N] (入力: $F = 1.00$ [N])

6.3 二関節同時駆動と仮想粘弾性を考慮した外乱力補償の実装と評価

本章では、第5章で提案した支点と先端を結んだ軸に仮想バネ・ダンパを想定し、ソフトウェアの調整により自在に柔軟性を調整可能な先端力制御について、実験による検証と評価を行う。二関節同時駆動の有無による外乱力補償の特性を評価し、一関節・二関節の協調的 simultaneous 同時駆動を考える利点を実験的に明確化する。

6.3.1 想定する運動方向である y 方向の外乱力の補償

初めに、図 5.1 および図 5.5 に示した提案手法を実装した場合の、 y 方向からの外乱力の補償について評価する。試験機の初期姿勢を $\theta_1 = \frac{\pi}{4}, \theta_2 = \frac{\pi}{2}$ rad の位置で固定し、バネ定数とダンパ係数を求めるための質量 (バネ・マス・ダンパ系の減衰振動特性) は 1.00 kg に設定した。次の手順でアームの先端に外力を加えた場合の特性を測定した。

想定する y 方向の外乱力を補償する力制御の実験手順

1. 図 2.5 中の D1, D4 方向がそれぞれ $+y, -y$ 方向を意味する。D1 方向へ先端を微小に引っ張り、離れた時のアーム先端の位置とアクチュエータトルクの時間変化を測定する。
2. D1 方向への変位から外乱力を補償して位置を修正し、安定した状態で、今度は D4 方向へ微小に引っ張る。その後、離れた時のアーム先端の位置とアクチュエータトルクの時間変化を測定する。
3. D1 方向へ大きく引っ張り、離れた時の先端位置とアクチュエータトルクの値および、D4 方向へ大きく引っ張り、離れた時の先端位置とアクチュエータトルクの値を測定する。
4. 同様に、D2 方向へ変位させた場合、D5 方向, D3 方向, D6 方向と順番に変位の方向を変えて引っ張り、離れた後のアームの先端が静止した位置とアクチュエータトルクの時間変化を測定する。
5. 引っ張られたの外乱力補償の成功の有無は、アームの先端を離してから安定した位置 (特に x 座標) と初期位置の差で判断する。
6. 外力を受ける前の静止状態の先端位置と、引っ張られた先端が元に戻って静止した位置の差から $\sqrt{dx^2 + dy^2}$ を求める。同様に、静止状態の先端位置と外力を与えて引っ張った位置の差から $\sqrt{dX^2 + dY^2}$ を求め、この $\sqrt{dX^2 + dY^2}$ に対する $\sqrt{dx^2 + dy^2}$ の値が 20% 以内の場合を外乱力の補償に成功したと判断した。
7. 二関節同時駆動の有無は、図 5.1, 図 5.5 に基づき制御系を試験機に実装して同様の実験を行う。
8. (i) 固有角周波数 $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数 $\zeta = 0.75$ とした場合と、(ii) $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数 $\zeta = 0.50$ とした場合の特性を評価する。

アームが微小変位から元の位置に戻るまでの変化を写真で撮ったものを図 6.6 に示す。また、上の条件で実験した結果を図 6.7 に示す。

図中に D1- D6 と示した点線は、それぞれの方向へ先端に外力を加えて離す手前の状態を意味する。上記の手順 6 に基づく外乱力補償の成功の有無を図中に各々 \times と \times で示した。図 6.7 の (a), (c) は二関節同時駆動を備えた場合であり、(b), (d) は二関節同時駆動を持たない場合である。図 6.7(a) より、意図した D1, D4 方向からの外乱に対して外乱力補償が実現していることが分かる。同様に、図 6.7 の (b) でも D1 方向へ大きく変位させた場合以外は概ね外乱力補償が実現している。これより、外乱力の方向が

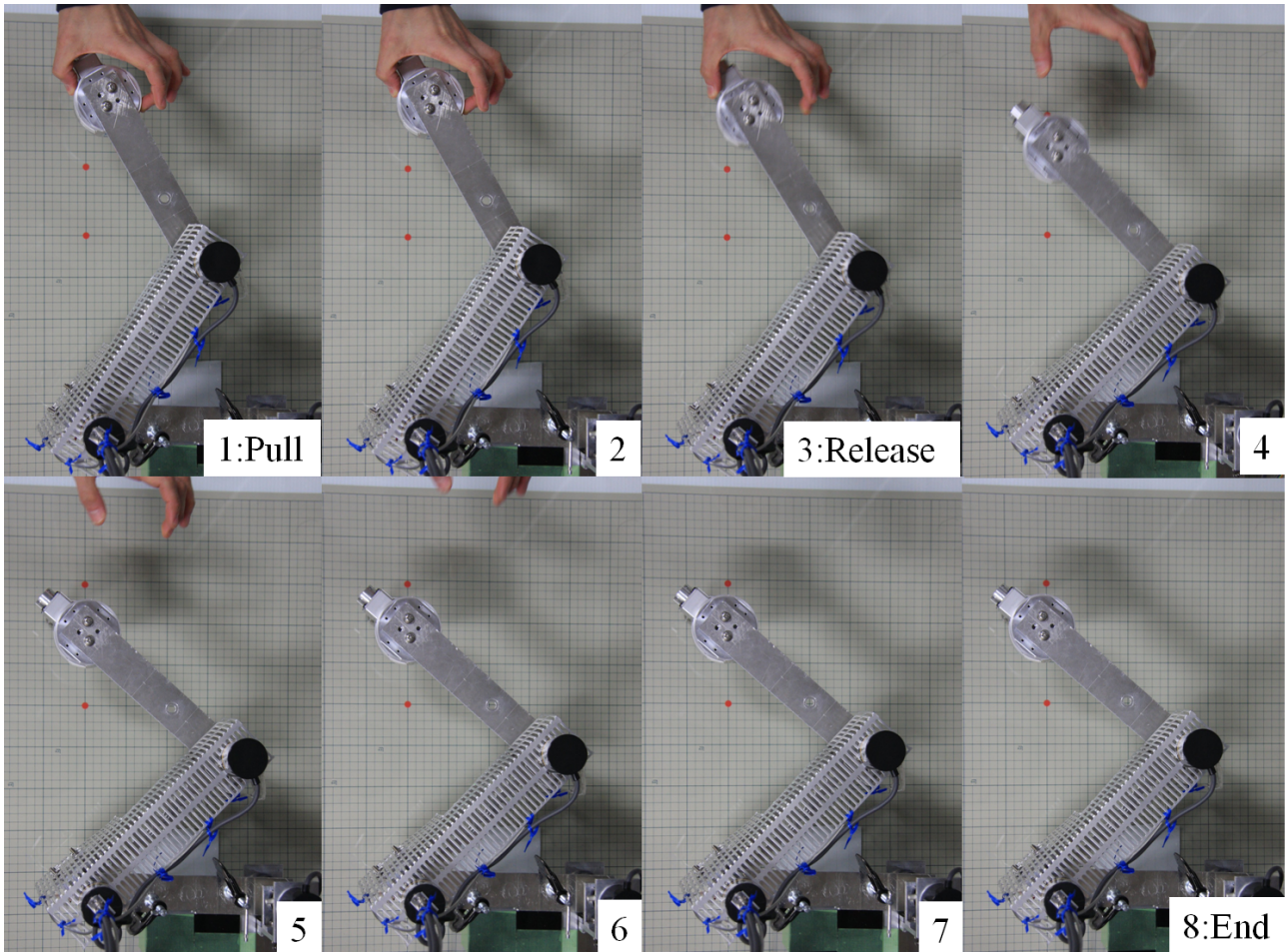


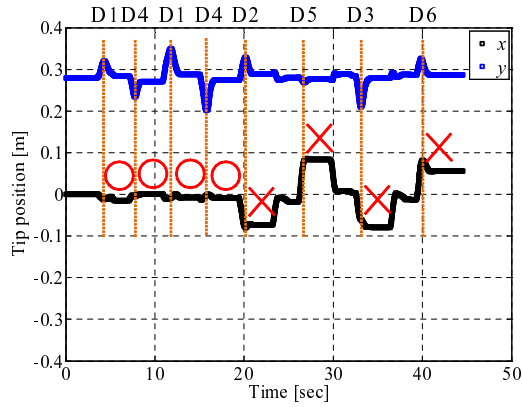
図 6.6: 引っ張られたアームが戻る運動

伸縮運動の方向である D1, D4 ($\pm y$) の場合は、二関節同時駆動の有無に関わらず外乱力補償が実現することが確かめられた。

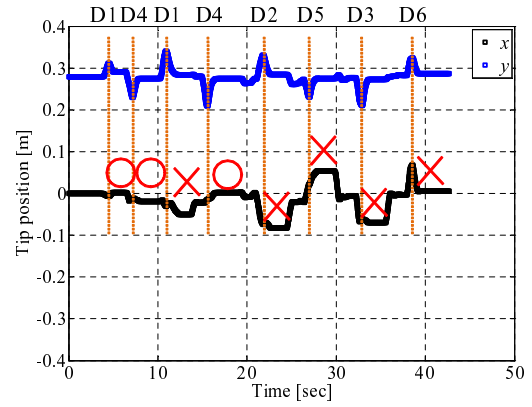
また、意図的に引っ張られた手先が元の位置に戻るまでの時間は、図 6.7(a) から分かるように約 2, 3 秒と短いため、図 6.6 で確認するのは難しい。しかし、図 6.7(a), (b) の先端位置の y 座標から、固定バネ定数の影響でほぼ線形に初期位置に戻り、ダンパ係数を大きく設定したことで高い粘性を持って静止する動きが見て取れる。

次に、(ii) の条件で実験した場合の測定結果を図 6.8 に示す。図 6.8(c), (d) から分かるように、変位に対して大きなアクチュエータトルクを発生している。これは先ほどよりも固いバネを装備していることを意味し、手先に同程度の外乱を与えた場合の変位が小さくなっていることも読み取れる。このように、アームが外乱に対して力を込めて構えているような場合は、外乱力補償の成功率が上昇した。図 6.8(a) の D6 方向への変位に対して正確な外乱力補償が成功していることも、高いバネ定数の想定により実現したと考えられる。

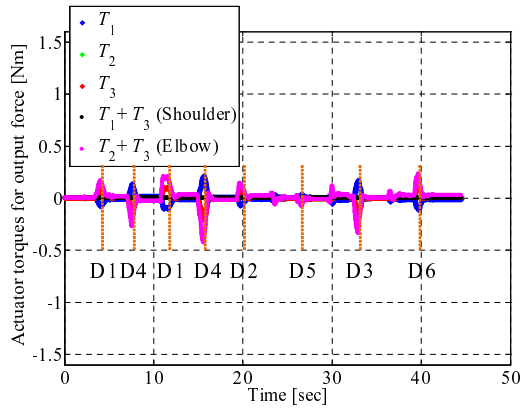
図 6.7 および図 6.8 から、提案した外乱力補償は支点と先端を結ぶ想定した方向からの変位に対応出来ることが確かめられた。ゆえに、壁を押しているときに逆方向の外乱力を受けた場合の対応などが、提案した制御系により簡単に実現する。



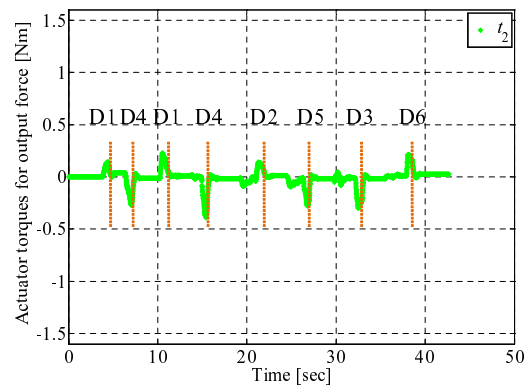
(a) 手先位置 (x, y) [m], 二関節同時駆動あり



(b) 手先位置 (x, y) [m], 二関節同時駆動なし

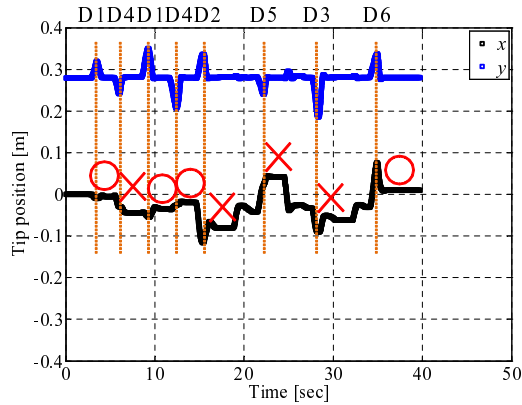


(c) アクチュエータトルク $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$ [Nm], 二関節同時駆動あり

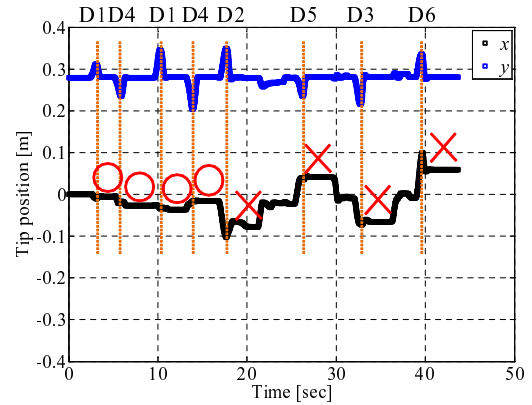


(d) 肘関節トルク (t_2) [Nm], 二関節同時駆動なし

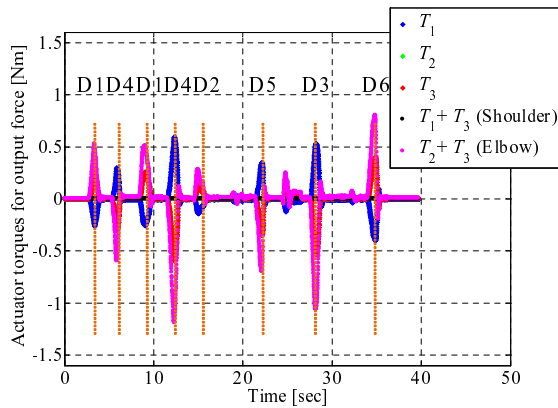
図 6.7: y 方向の微小変位に対する外乱力補償特性の相違, (i) 固有角周波数 : $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数 : $\zeta = 0.75$



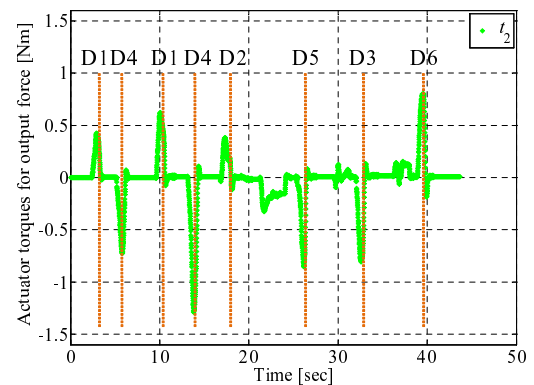
(a) 手先位置 (x, y) [m], 二関節同時駆動あり



(b) 手先位置 (x, y) [m], 二関節同時駆動なし



(c) アクチュエータトルク $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$ [Nm], 二関節同時駆動あり



(d) 肘関節トルク (t_2) [Nm], 二関節同時駆動なし

図 6.8: y 方向の微小変位に対する外乱力補償特性の相違, (ii) 固有角周波数 : $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数 : $\zeta = 0.50$

6.3.2 ヒトの筋出力の微調整と先端力方向の微調整の関係を利用した想定外の任意の方向からの外乱力補償

前節の y 方向からの外乱に対する先端力制御を拡張し、一関節・二関節の協調的同時駆動を考慮した簡単な外乱力補償を実験的に評価し、二関節同時駆動を備えることの優位性を述べる。

二関節同時駆動の有無による外乱力補償の相違

第 5.1 節で提案した、図 5.3 の制御系を試験機に実装し、D1 - D6 の各方向の変位に対する外乱力補償を検証する。同様に、図 5.6 で述べた二関節同時駆動を持たない場合の外乱力補償を試験機に実装し、各方向の変位に対する特性を検証する。

前節と同様に、初期姿勢を $\theta_1 = \frac{\pi}{4}, \theta_2 = \frac{\pi}{2}$ rad の位置で固定し、次の手順でアーム先端に任意の方向からの外力を加えた場合の特性を測定した。

任意の方向からの外乱力を補償する力制御の実験手順

1. 図 2.5 中の D1, D4 方向がそれぞれ $+y, -y$ 方向を意味する。D1 方向へ先端を引っ張り、離れた時のアーム先端の位置とアクチュエータトルクの時間変化を測定する。
2. D1 方向への変位から外乱力を補償して位置を修正し、安定した状態で、今度は D4 方向へ引っ張る。その後、離れた時のアーム先端の位置とアクチュエータトルクの時間変化を測定する。
3. 同様に、D2 方向へ変位させた場合、D5 方向, D3 方向, D6 方向と順番に変位の方向を変えて引っ張り、離れた後のアームの先端が静止した位置とアクチュエータトルクの時間変化を測定する。
- 4.引っ張られたアームの外乱力補償の成功の有無は、アームの先端を離してから安定した位置 (特に x 座標) と初期位置の差で判断する。
5. 外力を受ける前の静止状態の先端位置と、引っ張られた先端が元に戻って静止した位置の差から $\sqrt{dx^2 + dy^2}$ を求める。同様に、静止状態の先端位置と外力を与えて引っ張った位置の差から $\sqrt{dX^2 + dY^2}$ を求め、この $\sqrt{dX^2 + dY^2}$ に対する $\sqrt{dx^2 + dy^2}$ の値が 20% 以内の場合を外乱力の補償に成功したと判断した。
6. 各方向への変位が小さな場合と大きな場合の特性を評価する。
合わせて (i) 固有角周波数 $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数 $\zeta = 0.75$ とした場合と、(ii) $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数 $\zeta = 0.50$ とした場合の特性を評価する。

初めに、(i) の粘弾性係数を用いた場合の、微小変位に対する先端位置とアクチュエータトルクの時間特性を図 6.9 に示す。続いて、(ii) の粘弾性係数を用いた場合の、微小変位に対する先端位置とアクチュエータトルクの時間特性を図 6.10 に示す。上記の手順 5 に基づく外乱力補償の成功の有無を図中に各々と \times で示した。

先述の D1, D4 方向からの外乱力の補償が成功することは、伸縮運動の安定化という目的のために重要であり、図に示すようにほぼ想定通りの結果が得られた。(i) の柔らかい粘弾性特性を実装した場合に、この方向に対する外乱力補償に失敗している原因については後述する。弾性係数を高くした場合は、二関節同時駆動を考慮することで支点と先端を結ぶ方向・肩関節と肘関節を結ぶ方向および肘関節と手先先端を結ぶ方向、さらにその間の全ての方向からの外乱力を補償出来ることが実験結果から分かった。

一方、二関節同時駆動を想定しない場合は、肘関節と手先先端を結ぶ方向である D2 および D5 方向からの外乱を補償出来ないという結果となった。二関節同時駆動を持たない機構で D2, D5 方向への力を

出すためには、肩関節角度 (θ_1) を固定することで実現する。しかし、目的とする y 方向への伸縮運動の制御は、第 3.3 節の論述の通り y 方向へ先端力を発生するために肩関節の回転トルクをゼロにする必要があるため、二関節同時駆動を持つ場合と比較して剛性が小さくなる。よって、 y 方向への力制御のままではこの方向からの外乱力を補償するのが難しい。また、二関節同時駆動を想定しない場合に D3, D6 方向からの外乱力の補償に失敗しているのは、同じく y 方向への力制御のために肩関節の回転トルクをゼロにする必要があるためである。

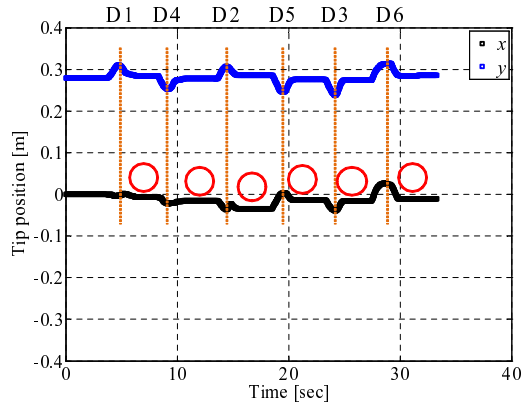
次に、各方向への変位量を大きくした場合の外乱力補償を実験した。初めに (i) の粘弾性係数を用いた場合の、微小変位に対する先端位置とアクチュエータトルクの時間特性を図 6.11 に示す。続いて、(ii) の粘弾性係数を用いた場合の、微小変位に対する先端位置とアクチュエータトルクの時間特性を図 6.12 に示す。前述の通り、微小変位に対する補償が重要であるから、大きな外乱力により手先が大きく動いてしまう場合は外乱力を簡単に補償するのが難しい。想定外の大きな外乱を受ければヒトでも伸縮運動を簡単に実現出来なくなる。ここでは、試験機に実装した簡単な外乱力補償の適応性の限界を確かめるために、先端に比較的大きな変位を与えた場合の外乱力補償を実験から評価する。

図 6.11(a) および図 6.12(a) より、二関節同時駆動を考慮すると微小変位といえない大きな変位に対する補償を実現していることが分かる。特に、弾性係数が大きな場合は、多少の変位に動じない外乱力補償が実現した。図 6.12(c) から明らかな通り、弾性係数の高い状態で変位を大きくするとアクチュエータにかかる負担が大きくなる。しかし、高いトルクを発生できるアクチュエータを備えることでこの問題は解決出来る。

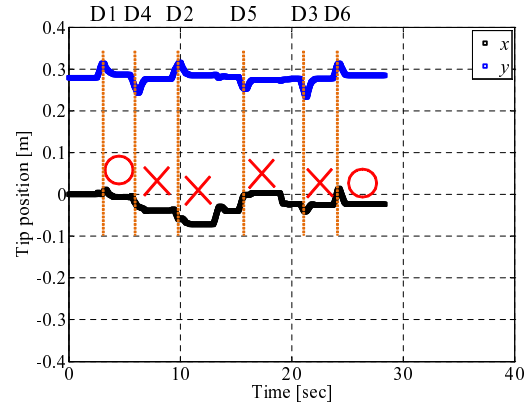
一方、二関節同時駆動を想定しない場合は、図 6.9, 図 6.10 に示す通り、粘弾性係数の大きさに関わらず外乱力補償が実現しない方向が存在した。この理由は先ほどと同じで、 y 方向へ力を発生するために肩関節トルクをゼロとしなければならないため、この力の制御のままでは想定外の任意の方向からの外乱力を補償出来ない。これより、二関節筋の存在が想定外の外乱力の補償を組み込んだ y 方向への力の制御に役立つことが示された。

二関節同時駆動を備えた場合において、変位が小さい時に外乱力補償に失敗し、変位が大きい時に成功した理由を説明する。今回試験機で用いているエンコーダの特性に問題があることが実験の過程で分かった。このエンコーダは低速で動く場合と、変位がゼロ付近の微小な場合に角度情報を出力しない。代用可能なエンコーダを限られた時間の中で調達出来なかったため、エンコーダを交換した再測定が出来なかったが、光学式エンコーダの代わりに磁気式エンコーダなどを使用することで解決する。

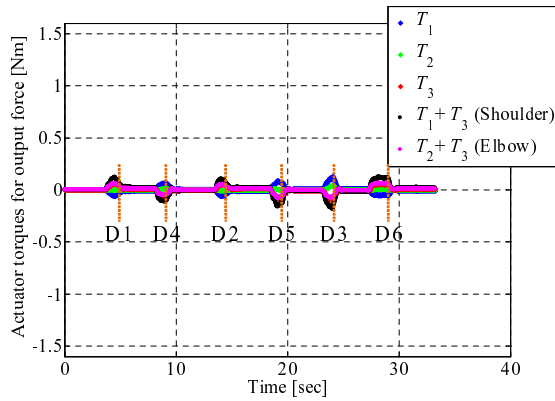
このハードウェア上の問題のない初期変位を比較的大きくとした実験結果に基づき、本論文で目的とする基本動作である伸縮運動は、一関節・二関節筋を協調させ同時駆動することを模擬する制御が、外乱力を簡単に補償出来ることが導かれた。この協調駆動は二関節同時駆動をソフトウェア的に取り入れることでも簡単に実現するため、ロボットに二関節同時駆動を取り入れることの優位性が示された。



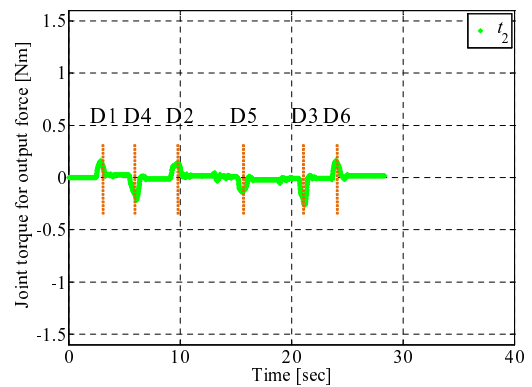
(a) 手先位置 (x, y) [m], 二関節同時駆動あり



(b) 手先位置 (x, y) [m], 二関節同時駆動なし

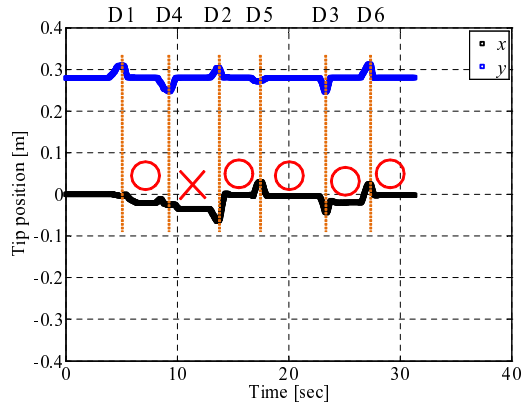


(c) アクチュエータトルク $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$ [Nm], 二関節同時駆動あり

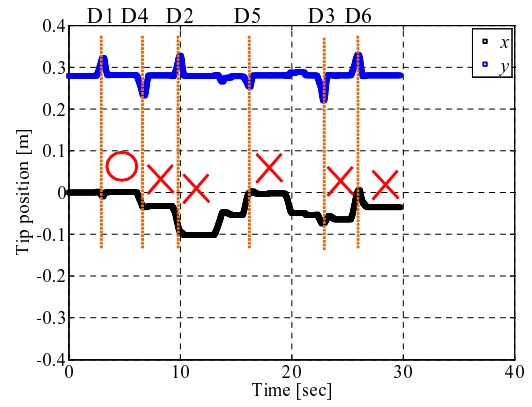


(d) 肘関節トルク (t_2) [Nm], 二関節同時駆動なし

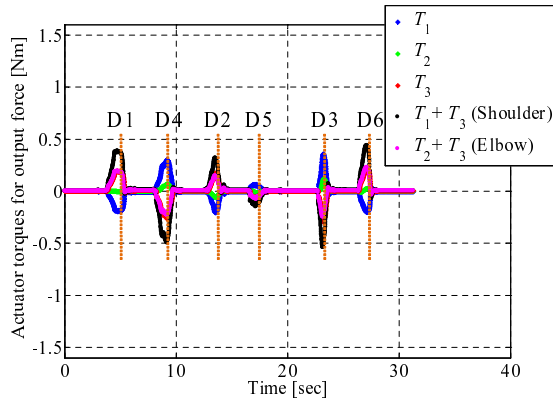
図 6.9: 二関節筋の有無による外乱力補償特性の相違, (i) 固有角周波数 : $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数 : $\zeta = 0.75$, 微小変位



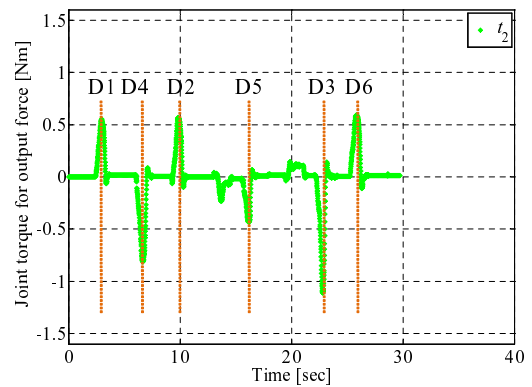
(a) 手先位置 (x, y) [m], 二関節同時駆動あり



(b) 手先先端 (x, y) [m], 二関節同時駆動なし

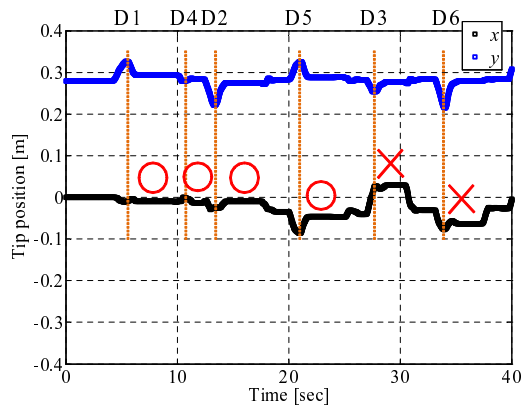


(c) アクチュエータトルク $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$ [Nm], 二関節同時駆動あり

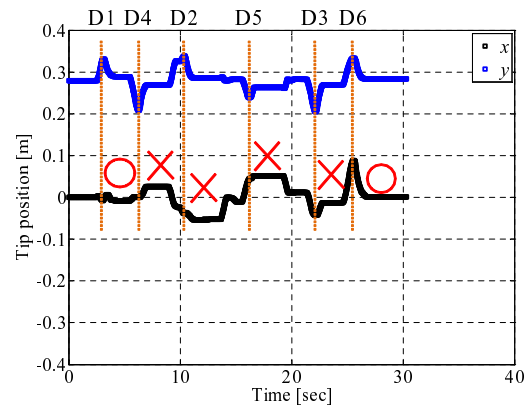


(d) 肘関節トルク (t_2) [Nm], 二関節同時駆動なし

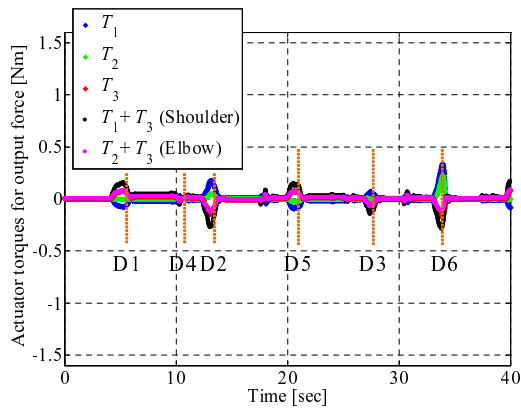
図 6.10: 二関節筋の有無による外乱力補償特性の相違, (ii) 固有角周波数 : $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数 : $\zeta = 0.50$, 微小変位



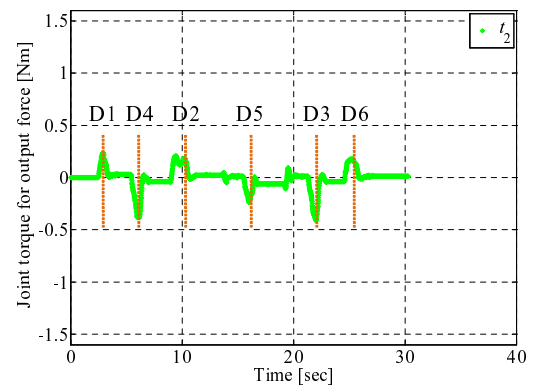
(a) 手先位置 (x, y) [m], 二関節同時駆動あり



(b) 手先先端 (x, y) [m], 二関節同時駆動なし

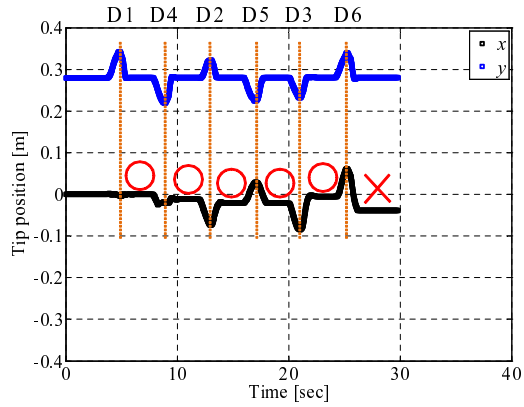


(c) アクチュエータトルク $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$ [Nm], 二関節同時駆動あり

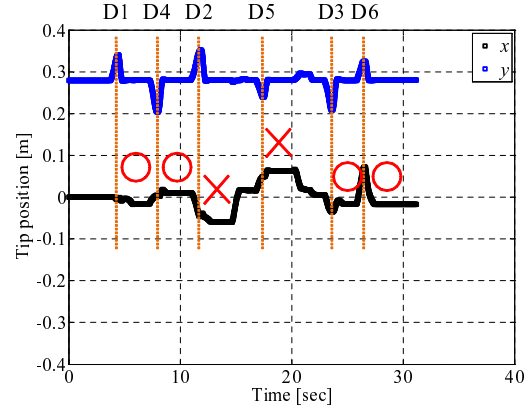


(d) 肘関節トルク (t_2) [Nm], 二関節同時駆動なし

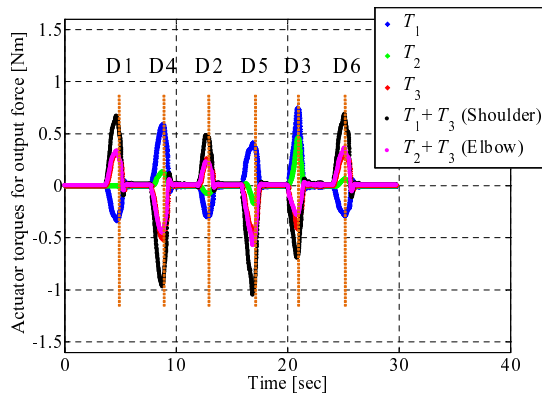
図 6.11: 二関節同時駆動の有無による外乱力補償特性の相違, (i) 固有角周波数 : $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数 : $\zeta = 0.75$, 大きな変位



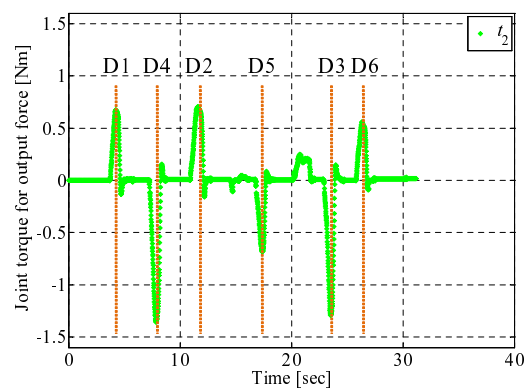
(a) 手先位置 (x, y) [m], 二関節同時駆動あり



(b) 手先先端 (x, y) [m], 二関節同時駆動なし



(c) アクチュエータトルク $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$ [Nm], 二関節同時駆動あり



(d) 肘関節トルク (t_2) [Nm], 二関節同時駆動なし

図 6.12: 二関節同時駆動の有無による外乱力補償特性の相違, (ii) 固有角周波数 : $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数 : $\zeta = 0.50$, 大きな変位

二関節同時駆動を考慮した場合の姿勢変化による外乱力補償の相違

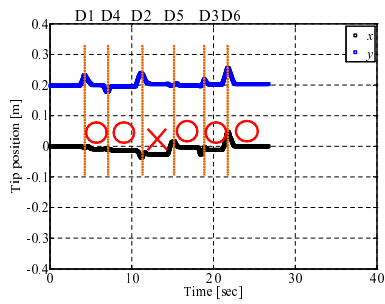
ここでは二関節同時駆動を考慮し、異なる姿勢における変位に対する外乱力補償を評価する。先述と同様の実験方法で外力を加えて変位させた手先位置とアクチュエータトルクの時間変化を測定する。粘弾性係数も先述と同様の特性を用いる。次の3つの姿勢における外乱力補償を評価する。

1. $\theta_1 = \frac{\pi}{6}, \theta_2 = \frac{2}{3}\pi$ rad
2. $\theta_1 = \frac{\pi}{4}, \theta_2 = \frac{\pi}{2}$ rad
3. $\theta_1 = \theta_2 = \frac{\pi}{3}$ rad

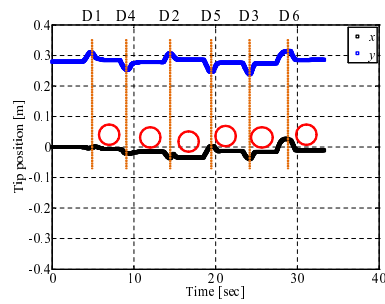
初めに、(i)の粘弾性係数を用いた場合の、微小変位に対する先端位置とアクチュエータトルクの時間特性を図6.13に示す。続いて、(ii)の粘弾性係数を用いた場合の、微小変位に対する先端位置とアクチュエータトルクの時間特性を図6.14に示す。上記の手順5に基づく外乱力補償の成功の有無を図中に各々と×で示した。手先が伸びる姿勢3の状態では、二関節同時駆動を備えても想定外の任意の方向からの外乱力の補償に失敗する確立が高くなった。提案した外乱力補償システムは、力の方向と関節の角度の関係を利用しており、姿勢に応じて先端の力分布形状が変わると同様にその特性が変化する。既存研究[6]による姿勢変化に伴う先端力分布の変化を考えると、ヒトは腕や脚が伸びるに従い支点と先端を結ぶ方向に大きな力を出しやすくなる半面、その他の方向へ出せる力の大きさが小さくなる特徴を持つ。提案手法はこのヒトの先端力特性に基づいて設計しているため、例えばアームが深く曲がっている状態は先端力分布が x 方向に広く色々な方向の変位に柔軟に対応できる。逆に、アームが伸びている状態は、意図する y 方向に大きな力を発生できるが、その他の方向へ出せる力の大きさが小さくなるため、目的とする y 方向以外からの外乱力の補償が難しくなる。図6.14に示すように、粘弾性係数を高くすれば外乱力補償の実現がしやすくなるが、先端の変位への剛性を高くしようとすると同時にアクチュエータに大きな負担がかかることになる。

次に先端の変位を大きくした場合の測定結果を評価する。初めに、(i)の粘弾性係数を用いた場合の、変位に対する先端位置とアクチュエータトルクの時間特性を図6.15に示す。続いて、(ii)の粘弾性係数を用いた場合の、変位に対する先端位置とアクチュエータトルクの時間特性を図6.16に示す。外乱力補償の傾向は、手先の変位が微小な場合と同様である。

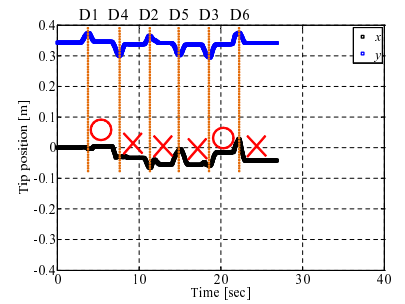
製作した試験機を用いて二つの異なる粘弾性係数による違いを評価したが、今回の実証試験からある程度高い粘弾性係数を想定することが安定した外乱力補償の実現のために重要であることが示された。姿勢により外乱力の影響の補償特性が変化するが、これはヒトと同じである。すなわち、あらゆる姿勢において外乱に強い腕や脚を構成することは、生体から学ぶ基本思想の中ではそもそも無理な話である。提案する二関節筋の存在を想定した制御法により、基本動作である支点と先端を結んだ方向へ運動を安定かつ簡単に実現出来ることが本節の実証実験により示された。すなわち、安定した先端への外乱力の影響の補償に二関節同時駆動が重要であることが実験を通じて定量的に示された。



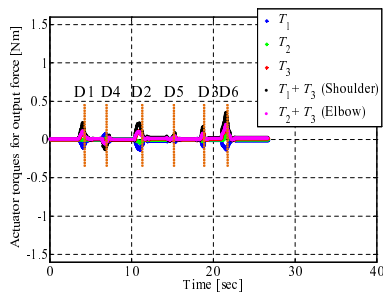
(a) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{6}$ [rad]



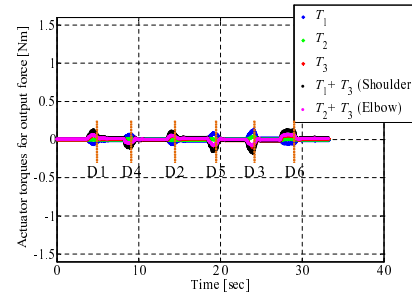
(b) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ [rad]



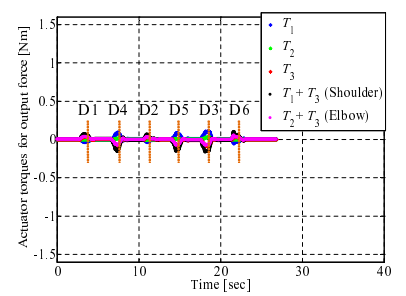
(c) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{3}$ [rad]



(d) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
[Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{6}$ [rad]

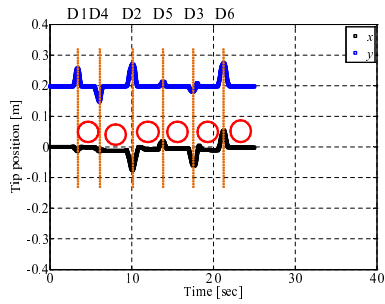


(e) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
[Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ [rad]

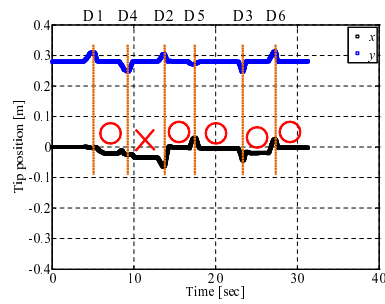


(f) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
[Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{6}$ [rad]

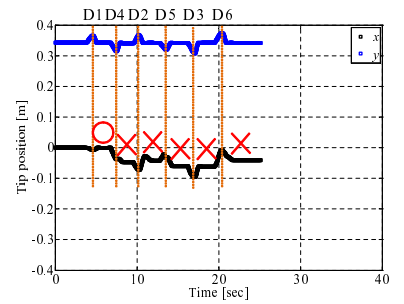
図 6.13: 異なる姿勢における外乱力補償特性の相違, (i) 固有角周波数 : $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数 : $\zeta = 0.75$



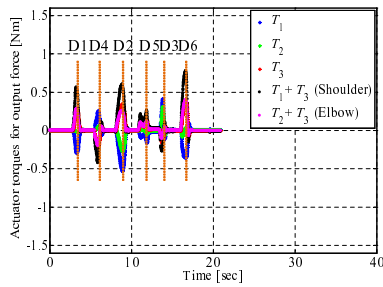
(a) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{6}$ [rad]



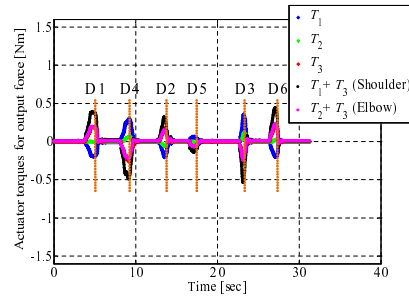
(b) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ [rad]



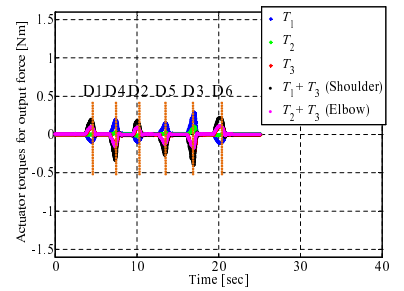
(c) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{3}$ [rad]



(d) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
[Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{6}$ [rad]

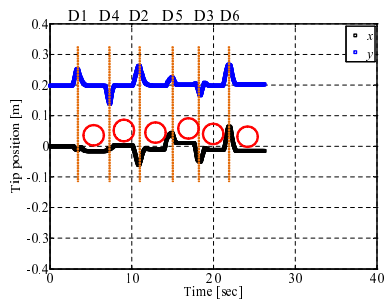


(e) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
[Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ [rad]

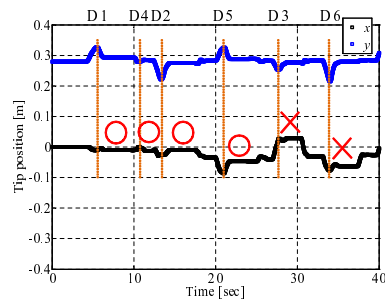


(f) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
[Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{3}$ [rad]

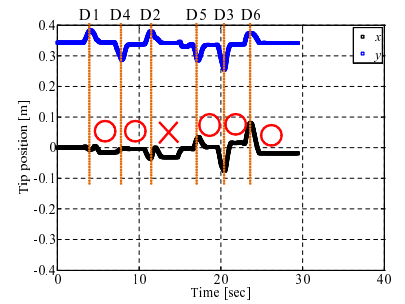
図 6.14: 異なる姿勢における外乱力補償特性の相違, (ii) 固有角周波数 : $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数 : $\zeta = 0.50$



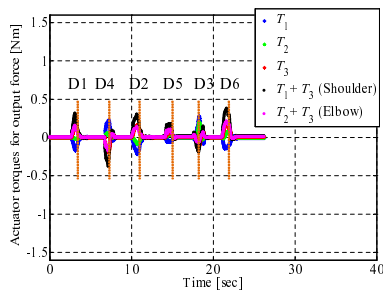
(a) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{6}$ [rad]



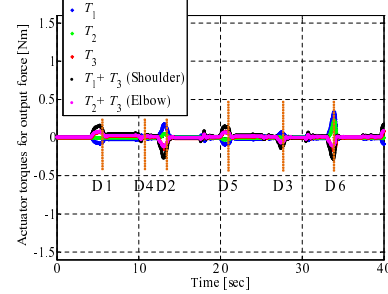
(b) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ [rad]



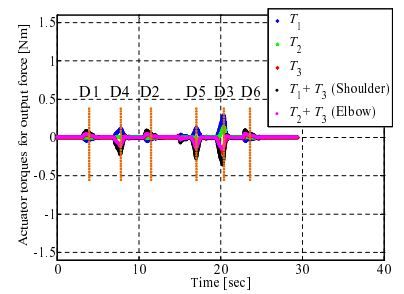
(c) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{3}$ [rad]



(d) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
 [Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{6}$ [rad]

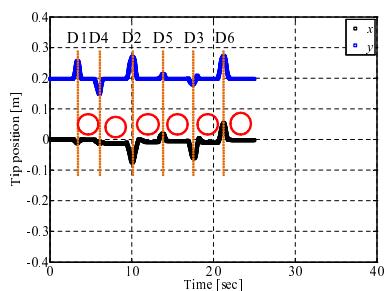


(e) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
 [Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ [rad]

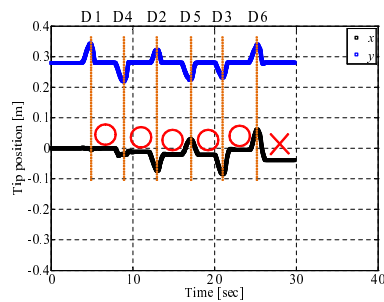


(f) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
 [Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{3}$ [rad]

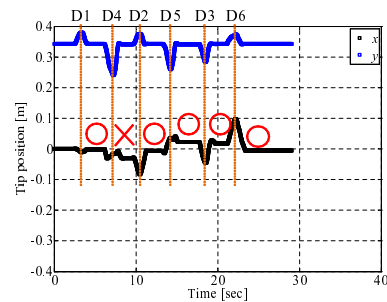
図 6.15: 異なる姿勢における外乱力補償特性の相違, (i) 固有角周波数 : $\omega_n = 5.00$ rad/sec, 減衰係数 : $\zeta = 0.75$



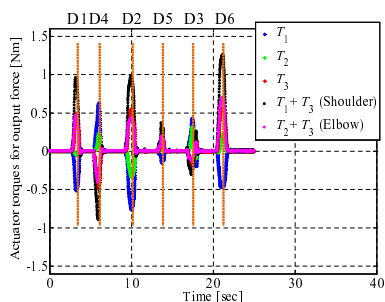
(a) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{6}$ [rad]



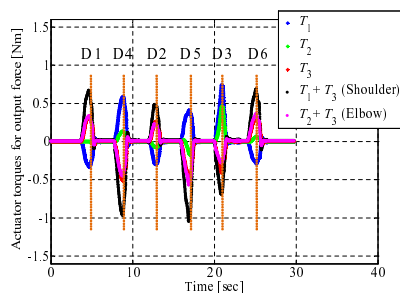
(b) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ [rad]



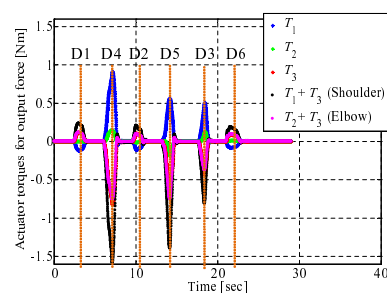
(c) 手先位置 (x, y) [m],
 $\theta_1 = \frac{\pi}{3}$ [rad]



(d) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
[Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{6}$ [rad]



(e) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
[Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ [rad]



(f) アクチュエータトルク
 $(T_1, T_2, T_3, T_1 + T_3, T_2 + T_3)$
[Nm], $\theta_1 = \frac{\pi}{3}$ [rad]

図 6.16: 異なる姿勢における外乱力補償特性の相違, (ii) 固有角周波数 : $\omega_n = 10.00$ rad/sec, 減衰係数 : $\zeta = 0.50$

6.4 伸縮運動を実現するための補償トルクによるフィードフォワード制御の実装

本節では、第 E 節で述べた、手先が支点と先端を結ぶ方向に真っ直ぐに動く時に各関節トルクの非線形性が簡略化されることを利用し、アームの伸縮運動がその補償トルクのフィードフォワード制御で実現することを試験機で確認する。

6.4.1 リンク質量が異なる試験機の伸縮運動に伴う関節トルクの非線形性

第 E 節ではリンクの質量が同じ場合のアームの運動に伴う関節トルクの特徴を述べたが、ここでは製作した試験機のように、リンクの質量が異なる場合の関節トルクの非線形性について論じる。

第 4.2.2 節で論じた伸縮運動における関節トルクの式 (E.2) と式 (E.3) は、リンク質量が異なる場合は以下ようになる。先述の通り、目的とする先端力制御の単純化の観点からリンクの長さは等しいとし ($l_1 = l_2 = l$)、実際に試験機のリンク長さは等しい。

$$\tau_1 = \left(I_1 - I_2 + \frac{1}{4}m_1l^2 + \frac{3}{4}m_2l^2 \right) \ddot{\theta}_1 + \frac{1}{2}g(m_1 + m_2)l \cos \theta_1 \quad (6.1)$$

$$\tau_2 = - \left(I_2 + m_2l^2 \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2} \cos 2\theta_1 \right) \right) \ddot{\theta}_1 + m_2l^2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 \cos \theta_1 - \frac{1}{2}gml \cos \theta_1 \quad (6.2)$$

真っ直ぐな方向への伸縮運動時の関節トルクは、式 (6.1) と式 (6.2) に示す通り肩関節角度・角速度および角加速度 ($\theta_1, \dot{\theta}_1, \ddot{\theta}_1$) を変数に持つ。そこで、第 E 節と同様に、リンクの質量が異なる場合の関節トルクの特徴を数値計算し、評価する。

肩関節が $\frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{3}, \frac{5}{12}\pi$ rad の計 5 点の任意の姿勢を想定した。肩関節の角加速度と角速度は、それぞれ ± 10.00 rad/sec², ± 10.00 rad/sec に設定した。表 6.1 に示した試験機のリンク長・リンク質量・慣性モーメントなどの定数を用いて計算を行った。数値解析には MATLAB を使用し、5 点の姿勢における 100 点の関節トルクの肩関節角加速度 ($\ddot{\theta}_1$) および角速度 ($\dot{\theta}_1$) に対する依存性を計算した。数値計算結果を図 6.17 に示す。

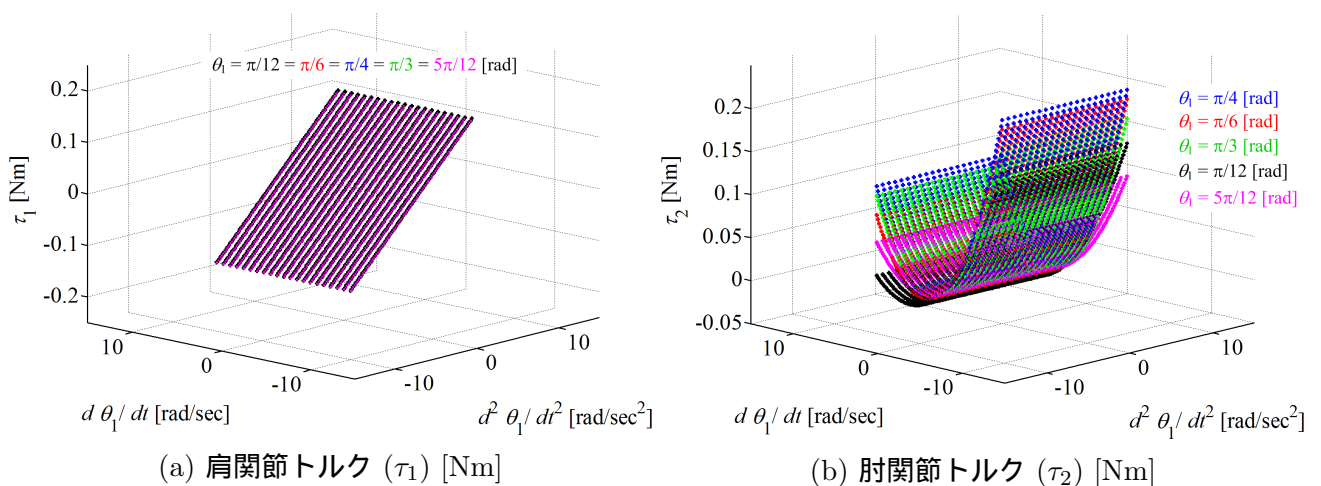


図 6.17: リンクの質量が異なる試験機の伸縮運動に伴う関節トルクの肩関節角加速度と角速度に対する依存性

図 6.17 より、リンク質量が異なる場合の関節トルクは、リンク質量が等しい場合と似た非線形性を持つことが分かる。そして、試験機は水平方向の運動を想定しているため重力加速度の影響を受けない。そのため、肩関節トルク (τ_1) の角加速度および角速度に対する依存性は、全ての姿勢で同じになる。肩関節トルクは肩関節角加速度の一次関数 ($\dot{\theta}_1$) を主とした特性を持ち、肩関節トルク (τ_2) は肩関節角速度の二次関数 ($\dot{\theta}_1^2$) を主とした特性を持つ。先述の通り、リンク長が同じアームであれば、リンク質量が異なる場合のアーム自身の運動に伴う関節トルクは、質量が同じ場合と同様に簡単な非線形性を持つため、リンク質量の異なる試験機の伸縮運動のための関節トルクは、補償トルクとして実装出来ると考えられる。

6.4.2 試験機の回転運動に伴う外乱の影響

前節の考察を踏まえて試験機の二つのモータに式 (6.1), 式 (6.2) を用いて計算したトルク指令を与え、伸縮運動のフィードフォワード制御を実装した。しかし、予想した伸縮運動が実現せず、試験機が第 4 章で論じた理論にはないハードウェア的な外乱を持っていることが分かった。そこで、試験機の各リンクをそれぞれ一定速度で回転させる速度フィードバック制御を行い、それぞれのリンクの関節角速度の測定とモータへの電流指令値のモニタリングを行い、関節角度および時間依存性から、外乱の影響を分析した。

DC モータの速度フィードバック制御の構成

関節を一定速度で回転させるための DC モータの速度フィードバック制御について述べる。表 6.1 に示すように、試験機に用いた DC モータはインダクタンスが小さく、時定数が 0.00078 sec と小さい。DSP の制御周期は 0.0010 sec であるため、本論文では電流制御器を I-P 制御系とし、等価時定数 (τ_i) を 0.0020 sec とした。電流フィードバックの伝達関数は次のようになる。

$$i(s) = \frac{1}{1 + \frac{R+K_{Pi}}{K_{Ii}}s + \frac{L}{K_{Ii}}s^2} i^*(s) \quad (6.3)$$

等価時定数 (τ_i) を用いた分母多項式を Kessler 標準形から次のように定めた。

$$1 + \tau_i s + \frac{1}{2}\tau_i^2 s^2 \quad (6.4)$$

これより、各制御パラメータは次のように計算される。

$$K_{Pi} = \frac{2L}{\tau_i} - R, \quad K_{Ii} = \frac{2L}{\tau_i^2} \quad (6.5)$$

次に、各リンクの回転運動における速度制御器を P-D 制御系とし、等価時定数を 0.010 sec として Kessler 標準形を用いてゲインを求めた [25][26]。関節 j の速度フィードバックの伝達関数は次のようになる。

$$\dot{\theta}_j(s) = \frac{1}{1 + \frac{K_{P\dot{\theta}_j}K_t + I_j}{K_{P\dot{\theta}_j}K_t}s + \frac{I_j\tau_i}{K_{P\dot{\theta}_j}K_t}s^2} \dot{\theta}_j^*(s) \quad (6.6)$$

等価時定数 ($\tau_{\dot{\theta}_j}$) を用いた分母多項式を Kessler 標準形から次のように定めた。

$$1 + \tau_{\dot{\theta}_j} s + \frac{1}{2} \tau_{\dot{\theta}_j}^2 s^2 \quad (6.7)$$

これより、各制御パラメータは次のように計算される。

$$K_{P\dot{\theta}_j} = \frac{2I_j\tau_i}{K_t\tau_{\dot{\theta}_j}^2}, \quad K_{D\dot{\theta}_j} = \frac{I_j}{K_t} \left(\frac{2\tau_i}{\tau_{\dot{\theta}_j}} - 1 \right) \quad (6.8)$$

計算したゲインを用いた各リンクの一定速度制御について以下に述べる。

肩関節が一定速度で回転する場合の特性

図 6.18 に肩関節の一定速度回転運動の概要を示す。図 6.18 に示すようにリンク 2 を真っ直ぐに伸ばした状態で固定し、肩関節から手先まで一つの剛体と仮定した。肩関節を一定速度で回転させる速度フィードバック制御を行い、その運動特性を分析した。結果を図 6.19 に示す。試験機の可動域が $0 - \pi$ rad までと限られているため、高速で回転させたときの結果は可動限界まで達した状態を含んだ。その部分は不要であるため、図 6.19 において白く塗りつぶした。

図 6.19(a) が示す通り、試験機の回転運動は一定速度に定まらなかった。速く回転させた場合は、試験機が指定した回転速度になる前に可動限界に達した問題があったが、遅く回転させた場合も指定した回転速度とエンコーダからの回転速度情報に誤差が残った。加えて、図 6.19(c) にあるように、角速度とモータへの電流指令値は振動的であり、この摩擦は摩擦力と考えられる。試験機は第 6.1 節で述べたように摩擦の低減を意識した設計を行ったが、実際には工作精度による誤差や試験機の重力方向の質量を支える車輪にかかる摩擦の影響が大きかったことが見て取れる。

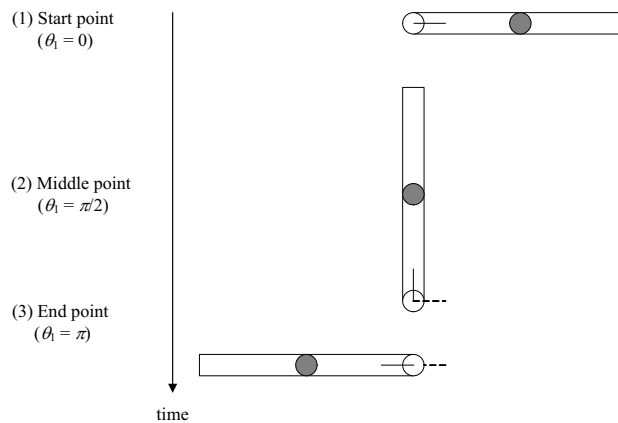
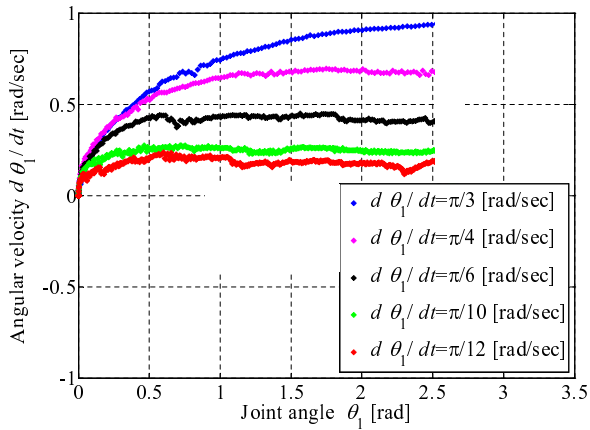


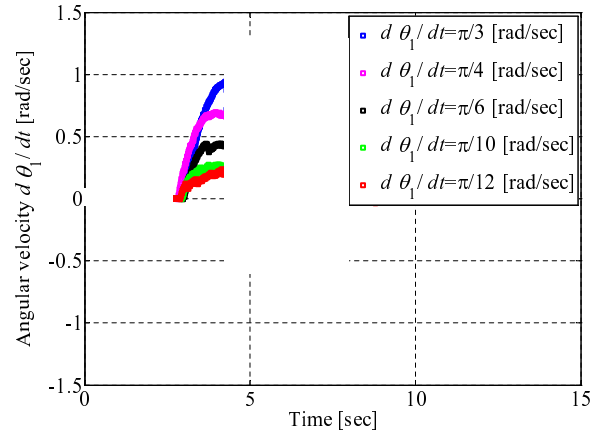
図 6.18: 肩関節が一定速度で回転する運動

肘関節が一定速度で回転する場合の特性

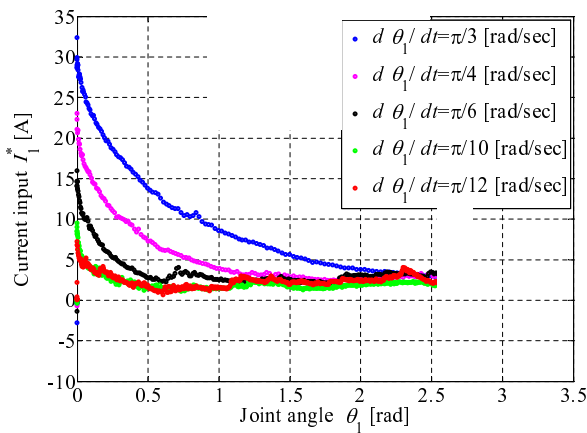
図 6.20 に肩関節の一定速度回転運動の概要を示す。肘関節を一定速度で回転させる速度フィードバック制御を行い、その運動特性を分析した。結果を図 6.21 に示す。肩関節と同じく試験機の可動域が $0 - \pi$ rad までと限られているため、高速で回転させたときの結果は可動限界まで達した状態を含んだ。その部分は不要であるため、図 6.21 において白く塗りつぶした。



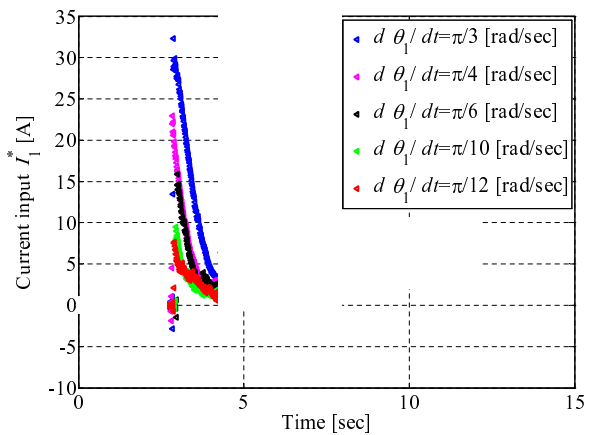
(a) 肩関節角速度の肩関節角度特性



(b) 肩関節角速度の時間特性



(c) DC モータの電流指令値の肩関節角度特性



(d) DC モータの電流指令値の時間特性

図 6.19: 試験機の肩関節が一定速度で回転する場合の運動特性

図 6.21(a) が示す通り、試験機の回転運動は一定速度に定まらなかった。肘関節は肩関節と比べて軽いので、運動開始後すぐに目標値に達したが ($\dot{\theta}_1 = \frac{\pi}{3}$ [rad/sec] を除く)、図 6.21(a), (c) 角速度とモータの電流指令値は角度に依存した非線形性を持っていることが分かった。この主な原因はモータのコギングトルクと考えられる。遅い速度で回転する時は実験中で目で見ても明らかな回転速度のばらつきが確認され、それは磁石に吸引される時の動きと似ていた。関節角度と回転運動の関係は、試験機を組み立てる時のリンク 2 に取り付け位置に依存するが、一定周期で起こる速度の不安定はフィードバック制御を用いた状態でも図のように発生したため、アームを動かして止まる時などのように、トルクの指令値が小さな場合にこの非線形性に依存した外乱を受けてフィードフォワードの伸縮運動が実現しなかったと考えられる。

式 (6.1), 式 (6.2) に示した簡単な非線形性を持つ補償トルクによる、2 リンクアームの伸縮運動が実証されれば、ヒトはリンク長が等しい構造的特徴を備えることで基本動作の鉛直運動を簡単に実現していることを証明出来たが、第 4 章で定式化し、第 5 章で提案した伸縮運動をロボットで実現するためには、補償トルクに加えて外乱の補償が必要であることが確かめられた。この外乱に対する補償は、性能の良いモータもしくは別のアクチュエータを用いることや、製作時の加工精度を上げる工夫がにより実現すると期待される。

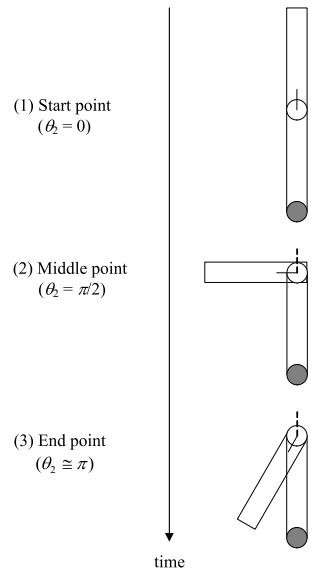
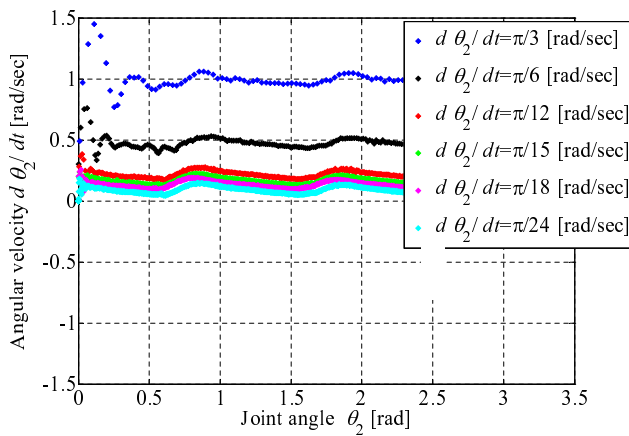
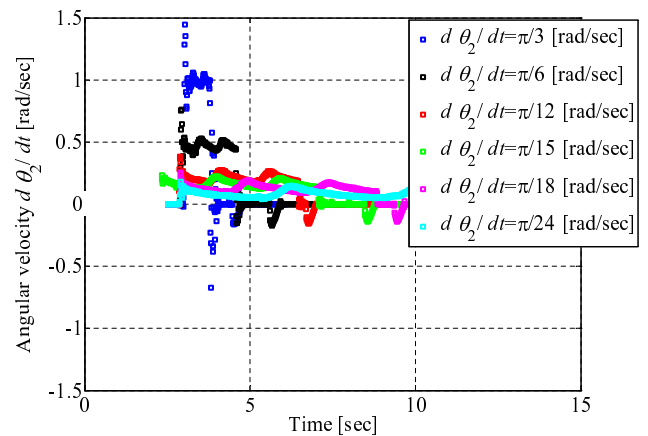


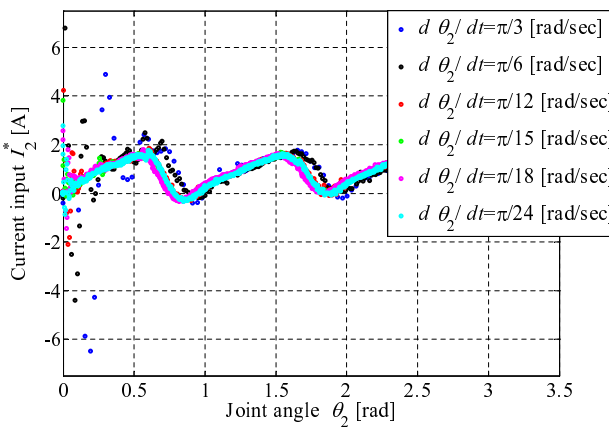
図 6.20: 肘関節が一定速度で回転する運動



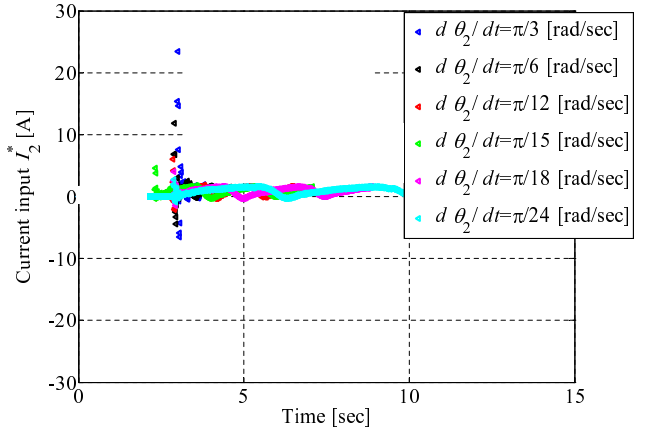
(a) 肘関節角速度の肘関節角度特性



(b) 肘関節角速度の時間特性



(c) DC モータの電流指令値の肘関節角度特性



(d) DC モータの電流指令値の時間特性

図 6.21: 試験機の肘関節が一定速度で回転する場合の運動特性

6.5 本章のまとめ

本章では、ヒトの構造的特徴と一関節・二関節の協調的同時駆動を利用した提案手法に関して、試験機を用いた評価を行い、有効性を確認した。

はじめに、製作した試験機の概要と制御システムについてまとめた。リンクの長さや関節の回転半径が等しい試験機を設計し、さらに先端力と関節トルクの関係を実験的に再現するために、軽量で減速機のないダイレクトドライブ機構にした。二関節同時駆動は、隣り合う両関節に同時に同じ回転トルクを与えるという定義に基づき、ソフトウェアで仮想的に再現した。ハードウェアとしては各関節を独自に駆動する機構であるが、二関節同時駆動のソフトウェア的再現により協調駆動の制御アルゴリズムを確かめることが出来る。

試験機の基本性能を確認するため、先述の特異的なアクチュエータトルクパターンを用いて先端で発生する力を入力として試験機の制御系に実装し、先端で発生する力を測定した。トルクパターンは、六角形の先端力分布の各頂点と中間点の方向に力を発生させる場合の筋電図結果を基にした。つまり、測定した力の方向は支点と先端を結んだ方向・肩関節と肘関節を結んだ方向・肘関節と手先先端を結んだ方向とそれぞれの中間地点、そして各方向の逆方向である。測定結果から、ヒトと同じ六角形の先端力特性が得られた。これより、試験機のハードウェアの性能と二関節同時駆動をソフトウェア的に模擬した制御アルゴリズムの実用性が確認された。

次に、第5章で提案した外乱力を補償する制御を実装した。手先が支点と先端を結んだ方向からの外乱力を受ける場合と、任意の方向からの外乱力を受ける場合において、提案した外乱力補償の実用性と二関節同時駆動の重要性を実験的に示した。また、粘弾性係数の違いによる外乱力補償特性を確認した。試験機はダイレクトドライブであり、機器自身の摩擦や粘性の影響が小さいため、外乱力による微小変位からのフィードバックを正確に再現することが出来た。製作した試験機の場合、弾性係数を高くすることで想定する支点と先端を結ぶ方向からの外乱力を補償することが確かめられた。また、第5章で論じた二関節同時駆動の有無による初期変位に対する先端位置補正のための力のフィードバック制御の相違を確かめた。一関節・二関節の協調的同時駆動を想定し、任意の姿勢で各関節のトルクの微調整によって先端力の方向を微調整できるという仮定の下では、粘弾性係数を高くすることで想定外の任意の方向からの外乱力を補償出来ることが示された。粘弾性係数を高くすることは柔軟性を小さくすることになるため、運動制御の目的により調整する必要があるが、仮想的にバネ・ダンパを想定し、モータのトルクを調整することはこの要求に答えるために有効な考え方である。

そして、第4章で論じた伸縮運動時のアーム自身のフィードフォワード制御に関して試験機を用いた実証を行った。先述の通り、摩擦の少ない構造を考慮してダイレクトドライブで軽量の試作機を製作したが、2リンクアームモデルの理論で想定していなかった関節部の鉛直方向の重量を支持する車輪系の摩擦力や、モータ自身の持つコギングトルクなどの外乱の影響が大きく、第4章で示した補償トルクだけでは円滑かつ高速な伸縮運動が実現しなかった。そこで、伸縮運動においては外乱要素となる、試験機とDCモータの運動時の特性を測定し評価した。アームを一定速度で回転させるフィードバック制御を行い、指令速度と実際の速度の誤差とトルク指令の特性を確認した。この問題は、本章の実験的な検証を限定的なものにする主因となったが、性能の高いモータを採用し摩擦の小さな試験機を作ることで解決されることが期待されるので、本論文の実験の目的とは別の議論として短く言及するにとどめる。