

初期設計段階における多関節ロボットアームの最適な
関節数，リンク長，軌道に関する研究

Research on Optimum Number of Joints, Length of Links and
Trajectory for Multi-Jointed Robot Arm at Initial Design Stage

2015 年 2 月

金 亨俊

Hyeongjun KIM

初期設計段階における多関節ロボットアームの最適な
関節数，リンク長，軌道に関する研究

Research on Optimum Number of Joints, Length of Links and
Trajectory for Multi-Jointed Robot Arm at Initial Design Stage

2015 年 2 月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
総合機械工学専攻 最適デザイン研究

金 亨俊

Hyeongjun KIM

目 次

第 1 章 序論	- 1 -
1.1 研究背景	- 1 -
1.1.1 ロボットアームの研究における問題	- 1 -
1.1.2 人間の腕の特性	- 2 -
1.2 ロボットアームの形状や軌道に関する従来の研究	- 3 -
1.2.1 ロボットアームの構造解析・設計に関する研究	- 4 -
1.2.2 ロボットアームの経路または軌道設計に関する研究	- 5 -
1.2.3 冗長自由度の有効な利用に関する研究	- 7 -
1.2.4 従来の関連研究における問題点および課題	- 8 -
1.3 研究目的	- 9 -
1.4 研究対象と研究方法	- 10 -
1.4.1 最適化対象と仮定	- 10 -
1.4.2 研究方法と手順	- 10 -
1.4.3 関節数, リンク長, 軌道の最適化の手順	- 11 -
1.5 本論文の構成	- 12 -
第 2 章 多関節ロボットアームの解析手法	- 15 -
2.1 概 要	- 15 -
2.2 多関節ロボットアームのモデル化	- 16 -
2.2.1 リンクの表示	- 16 -
2.2.2 逆運動学解析	- 17 -
2.2.3 Jacobian 行列	- 20 -
2.2.4 特異点	- 20 -
2.2.5 動力学解析	- 21 -
2.3 最適化モデル計画	- 23 -
2.3.1 冗長自由度が生じる場合の設計変数	- 23 -
2.3.2 3 次 Spline 補間を用いた軌道計画	- 25 -
2.3.3 目的関数設定	- 27 -
2.4 遺伝的アルゴリズム(GA)の適用	- 28 -
2.4.1 遺伝的アルゴリズムの原理	- 28 -
2.4.2 交叉, 突然変異, 選択	- 29 -
2.4.3 適用手順	- 30 -

第3章	固定軌道条件で多関節ロボットアームの最適な 関節数とリンク長	- 33 -
3.1	概 要	- 33 -
3.2	ロボットアームのモデル化	- 34 -
3.2.1	座標変換行列による逆運動学解析	- 34 -
3.2.2	運動方程式	- 36 -
3.3	冗長自由度を有するロボットアームの最適設計方法	- 37 -
3.3.1	関節角度の設計変数表現	- 37 -
3.3.2	設計変数を含めた軌道計画	- 38 -
3.3.3	最適化問題の定式化	- 39 -
3.3.4	最適化手順	- 41 -
3.4	最適化設計結果	- 44 -
3.4.1	Case 1 の結果	- 45 -
3.4.2	Case 2 の結果	- 46 -
3.4.3	Case 3 の結果	- 47 -
3.4.4	各 Case の角度, 角速度, 関節トルク	- 48 -
3.4.5	各 Case の効果量 (Effect size)	- 51 -
3.5	本章のまとめ	- 54 -
第4章	初期設計段階における二次元平面内の多関節ロボット アームの関節数, リンク長, 軌道の同時最適化	- 57 -
4.1	概 要	- 57 -
4.2	初期設計段階における最適な関節数, リンク長, 軌道の最適化手法	- 58 -
4.2.1	設計変数	- 59 -
4.2.2	目的関数設定	- 61 -
4.2.3	最適化問題の定式化	- 62 -
4.2.4	最適化手法	- 63 -
4.2.5	多目的最適化の手順	- 64 -
4.3	最適設計結果	- 66 -
4.3.1	単目的最適化問題	- 66 -
4.3.2	多目的最適化問題	- 66 -
4.3.3	単目的最適化と多目的最適化結果の比較	- 67 -
4.4	モデル実験による検討	- 73 -
4.4.1	実験装置	- 73 -
4.4.2	実験方法	- 75 -
4.4.3	実験結果	- 77 -

4.4.4 実験結果の考察	- 81 -
4.5 本章のまとめ	- 81 -
第5章 3次元空間内の多関節ロボットアームの最適な 関節数, リンク長, 軌道の同時最適化	- 83 -
5.1 概 要	- 83 -
5.2 3次元空間のロボットアームのモデル化	- 84 -
5.2.1 運動方程式	- 84 -
5.2.2 冗長自由度を考慮した軌道計画	- 86 -
5.3 最適化問題設定	- 87 -
5.3.1 最適化問題の定式化	- 87 -
5.3.2 最適化手順	- 87 -
5.4 最適化結果	- 90 -
5.5 実用問題への貢献	- 95 -
5.6 本章のまとめ	- 95 -
第6章 結論と今後の展望.....	- 97 -
6.1 本研究の結論	- 97 -
6.2 今後の展望	- 100 -
6.2.1 弾性体と仮定したロボットアームの最適化	- 100 -
6.2.2 作業頻度を考慮した最適化	- 101 -
6.2.3 アクチュエータの問題	- 102 -
参考文献	- 103 -
謝 辞	- 109 -
研究業績	- 111 -

目 次

1 章

図 1.1	産業用ロボットアームの例	- 2 -
図 1.2	人体の黄金比と各種生物の腕の比率	- 3 -
図 1.3	Zvi Shiller の最適化結果	- 4 -
図 1.4	Indura Adjji の State-Value Function	- 5 -
図 1.5	白井の GA と SA を同時に利用したハイブリッド最適化手法 ...	- 6 -
図 1.6	人間の腕の自由度	- 7 -
図 1.7	研究対象の概念図	- 10 -
図 1.8	論文の構成	- 14 -

2 章

図 2.1	順運動学と逆運動学	- 16 -
図 2.2	Denavit-Hartenberg パラメータ	- 17 -
図 2.3	冗長ロボットアームにおける逆運動学の解	- 18 -
図 2.4	PUMA 型ロボットの 4 つの解	- 19 -
図 2.5	冗長ロボットアームにおける逆運動学の解	- 19 -
図 2.6	特異点の位置になっているロボットアームの例	- 21 -
図 2.7	ロボットアームも三次元モデル化	- 22 -
図 2.8	冗長自由度が生じる場合の設計変数の概略図	- 24 -
図 2.9	Spline 補間を用いた軌道計画の概念図	- 25 -
図 2.10	交叉 (Crossover), 突然変異 (Mutation) の概念	- 29 -
図 2.11	ルーレット選択のイメージ	- 30 -
図 2.12	実際のコーディングの例	- 31 -

3 章

図 3.1	関節角計算例の概念	- 35 -
図 3.2	平面剛体ロボットアームのモデル	- 37 -
図 3.3	関節角計算例の概念	- 38 -
図 3.4	軌道計画の概念図	- 39 -
図 3.5	計画した軌道の目標点	- 39 -

図 3.6	制約条件 dn, p の説明図	- 41 -
図 3.7	最適化手順	- 43 -
図 3.8	各最適化結果	- 44 -
図 3.9	Case1 の軌道	- 45 -
図 3.10	Case2 の軌道	- 46 -
図 3.11	Case3 の軌道	- 47 -
図 3.12	Case1 の角度, 角速度, 関節トルクの変化	- 48 -
図 3.13	Case2 の角度, 角速度, 関節トルクの変化	- 49 -
図 3.14	Case3 の角度, 角速度, 関節トルクの変化	- 50 -
図 3.15	各 Case の効果量の棒グラフ	- 53 -
図 3.16	固定軌道のウエハー搬送ロボットアームへの適用例	- 55 -

4 章

図 4.1	軌道計画における設計変数の表現	- 60 -
図 4.2	軌道最適化の概念	- 60 -
図 4.3	本研究における意思決定方法	- 63 -
図 4.4	多目的最適化の手順	- 65 -
図 4.5	多目的最適化のパレート解	- 68 -
図 4.6	可操作度の比較	- 68 -
図 4.7	初期値, 単目的最適化, 多目的最適化の各軌道	- 69 -
図 4.8	初期値, 単目的最適化, 多目的最適化の各角度変化	- 70 -
図 4.9	初期値, 単目的最適化, 多目的最適化の各角速度の変化	- 71 -
図 4.10	初期値, 単目的最適化, 多目的最適化の各関節トルクの変化	- 72 -
図 4.11	実験装置の概略	- 73 -
図 4.12	実際に製作した実験モデル	- 73 -
図 4.13	角度の P 制御とブロック線図	- 74 -
図 4.14	計測系の概略図	- 75 -
図 4.15	重力や摩擦の影響を最小化するための環境設定	- 76 -
図 4.16	ロボットアームの挙動	- 78 -
図 4.17	初期モデルの電圧, 電流, 電力	- 79 -
図 4.18	最適モデルの電圧, 電流, 電力	- 80 -
図 4.19	軌道最適化を含める初期設計段階におけるウエハー搬送ロボットアームへの適用例	- 82 -

5 章

図 5.1	ロボットアーム 3 次元モデル	- 85 -
図 5.2	3 次元空間内の軌道計画方法	- 86 -
図 5.3	3 次元モデルの最適化手順	- 89 -
図 5.4	初期モデルの軌道	- 91 -
図 5.5	最適化モデルの軌道	- 92 -
図 5.6	各場合における角度変化	- 93 -
図 5.7	各場合における関節トルク変化	- 94 -
図 5.8	溶接ロボットへの適用例	- 95 -

6 章

図 6.1	弾性体と仮定したロボットアームのモデル	- 100 -
図 6.2	剛体リンクと回転バネによる弾性体のモデル化	- 101 -
図 6.3	ロボットアームの作業頻度の概念	- 101 -

第 1 章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 ロボットアームの研究における問題

産業用のロボットアームには、図 1.1 のように上下方向の運動はできないが、水平方向で作業でき、ウエハの搬送などに適している通称 SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) 型と呼ばれる水平多関節ロボットアームがある。また、三次元空間内の運動ができ、設置面積に対して広い作業範囲を確保することができ自動車の組み立てなど複雑な作業ができる通称 PUMA 型と呼ばれる垂直多関節ロボットアームもあり、水平多関節ロボットアームと共に代表的な産業用ロボットアームである。このようなロボットアームは作業の適合性を判断して選択され、使用されている。そのためロボットアームは軌道の正確性や反復性が重要な性能として要求され、生産コストを低減することも重要な目標として要求される。従って、ロボットアームの軌道最適化により正確性や反復性を高め、また形状最適化によりロボットアームを軽量化して消費エネルギー減少させる研究が数多く行われてきた。

しかし、このような研究は既存のロボットアームの性能を改善するためには活用できるが、初期設計の段階におけるロボットアームの関節数やリンク長を決める研究とは異なる。また、比較的単純な作業をする平面ロボットアームの場合、関節数やリンク長に関しては作業が可能な最小限の関節数やリンク長についても十分な考察がないまま経験的に決定されている既存の装置が用いられている。その理由としては、既存の装置を使用することは安易であり、装置の改良を試みる場合、関節数が増加することによりアクチュエータの数も増えて初期設備費用が高くなる点とロボットアームは関節数が作業空間の次元を超える時に発生する冗長自由度のため制御が複雑になることなどが考えられる。

第 1 章

言い換えれば、従来のロボットアームの性能を改良する研究は、関節数がコスト等で決まった既存のロボットアームのその性能を改善するという利点はあるが、初期設計段階でロボットアームを設計する際、関節数やリンク長を決める根本的な問題、またこのパラメータの変化により発生する影響に関する議論が十分に行われておらず、決められた関節数の条件の下で最適化を行うにとどまっているのが現状である。

その理由としてロボットの関節数やリンク長を初期設計段階で決定するためには作業内容いわゆる軌道による影響を大きく受ける。また関節数やリンク長が変化することにより計画した軌道も変更しないといけない。つまり、お互い影響を受け、初期環境条件の仮定が難解であることが挙げられる。また、このような問題を解決できたとしても、最適な関節数とリンク長を数理計画法により解いても複数の最適解が存在する。いわゆる多峰性が存在するため求められた解が局所的な最適解である。その他にも、この最適化問題は設計変数が自然数と実数両方を考慮しないといけないので最適化手法の選択も重要な問題と考えられる。



(a) 三菱電機小型水平多関節ロボット



(b) 三菱電機 MELFA RV-F

図 1.1 産業用ロボットアームの例 [1]

1. 1. 2 人間の腕の特性

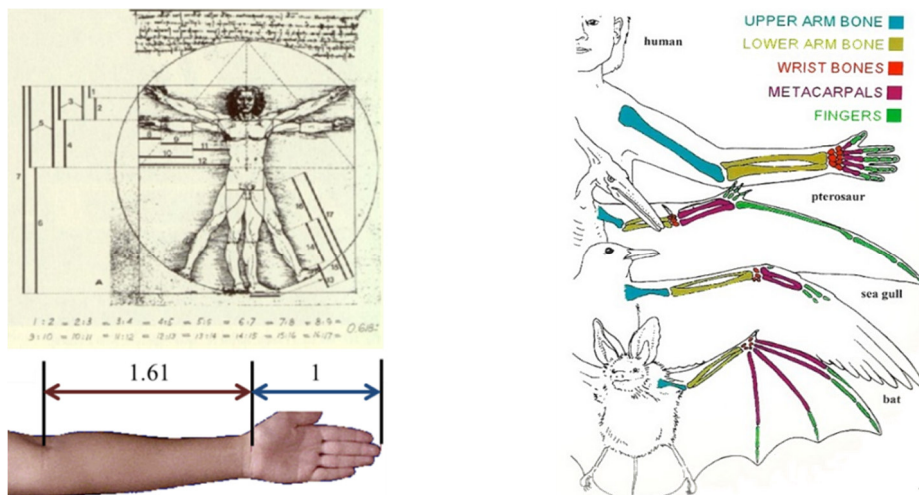
ところで、人間の腕をよく観察すると 2 つの特徴を持っていることが分かる。まず 1 つは、人間の腕は冗長自由度を持っている。人間は冗長自由度をうまく利用することにより障害物を避けて目標支点まで到達するなどの状況に合わせる運動ができ、また怪我をして自由度を 1 つ失っても最低限の運動が確保できる特徴がある [2]。つまり、人間は冗長自由度により発生した複雑性を利用して目標とする所までの学習による結果として直観的に腕を動かす。

もう一つの特徴は、人間の腕は図 1.2 のように各関節が一定な比率を持つこと

1.2 ロボットアームの形状や軌道に関する従来の研究

である．たとえば，腕の場合は手首から手先までとひじから手首までの比率は約 $1 : 1.6$ の比率いわゆる黄金比を持つことが指摘されている．一方，人間の腕に相当する他の生き物の腕を観察してみるとその環境に適合する形となっており，利用目的に合わせた結果腕の比率が人間の腕とは異なる．他に人間と生物学的に似ている類人猿の腕も，人間と異なる生態系に適切な固有の比率を持つ．つまり，人間を含む生き物の腕はその環境や目的に適合する比率を持つことが特徴であり，ロボットアームも作業目的に適合する形（関節数，駆動方式）や比率（リンク長）があるのではないかと考えるきっかけとなった．

これらの特徴については明らかではないが，経験や長い間の進化によって何らかの意味で周囲の環境に対して関節数や腕の長さが適応あるいは最適化された結果と推測される．つまり，ロボットアームの軌道は，関節数・リンク長と緊密な関係があるのではないかと考えられる．これらの観察や考察は，筆者が多関節ロボットアームの最適な関節数，リンク長，軌道に注目して研究を進める動機となった．



(a) 人体の比率 [3]

(b) 多様な生物の腕の比率 [4]

図 1.2 人体の黄金比と各種生物の腕の比率

1.2 ロボットアームの形状や軌道に関する従来の研究

ロボットアームの制御に関する最適化研究は多く存在するが，本研究と直接関連しているロボットアームの形状や軌道に関する最適化研究はそれほど多くない．

第 1 章

したがって、ここではまずロボットアームの最適な関節数、リンク長、軌道に関連した従来の研究を

I) ロボットアームの構造解析・設計に関する研究

II) ロボットアームの移動経路または軌道設計に関する研究

の二つの最適化に関する研究に分け、それらの手法の具体的な内容、特徴について説明する。また I) ～ II) の説明の後には、

III) 冗長性の有効な利用に関する研究

を紹介し、各研究の問題点と取り組むべき課題について考える。ここで、設計という言葉は最適化を含める総合的な意味の設計方法として使っている。

1.2.1 ロボットアームの構造解析・設計に関する研究

ロボットアームの形状に関する研究は Zvi Shiller [5] がロボットアームの各関節に一定の関節トルクが加わる条件の下で作業時間を最小化する最適化を行って軌道に合わせる最適なリンク長を求めた。その結果、図 1.3 のように根元のリンク長が短くなる結果を得た。しかし、Zvi Shiller は各リンク長の総和の値を一定とした条件ではなかったため制作コストが変化し、それによるロボットアーム全体の効率性が変化するために初期値と最適化結果の有効性を比較するには客観性が低い。また最適化を行った対象の関節数が 2 関節のみだったので、関節数とリンク長の影響を説明するには考慮した条件の範囲が狭かったと考える。

室巻 [6] は構造重量と、振動と制御性能の評価のための最適レギュレータの動作指標を目的関数として扱い、ロボットアームの最適形状を求めた。しかし、設計変数として関節数が固定された下で各リンクの断面積だけを考慮し、リンク長までは触れていない。また、評価関数の一つである重量の分布が広範にわたる解となるために、その中から一つの解を選択するには困難であった。

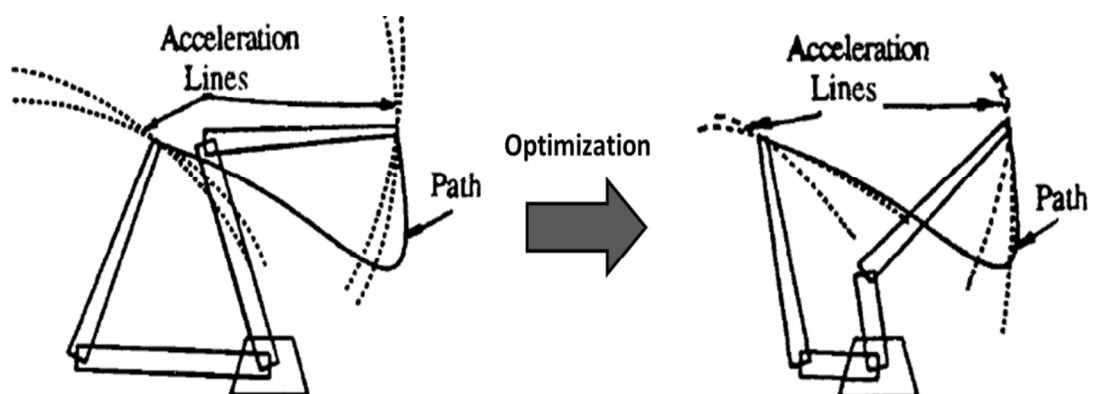


図 1.3 Zvi Shiller の最適化結果 [5]

1.2 ロボットアームの形状や軌道に関する従来の研究

また、B.K.Rout [7] は最適化の手法として GA を用い、ロボットアームのリンク長やリンク質量の最適化を行った。その結果、解が大域的に存在するロボットアームの最適化の問題について GA を用いることで信頼性が高い解を求めることができるという可能性を提示した。

しかし、これらの研究は関節数を固定した前提で行い関節数の変化による影響については議論していない。

1.2.2 ロボットアームの経路または軌道設計に関する研究

ロボットアームの最適な軌道に関する研究は障害物回避の問題を解決するための研究が多い。毛利 [8] は作業空間にロボットアームの手先が侵入できない空間が存在する場合、禁止空間を円で近似し、ロボットアームの手先がこの領域を避けながら目標点まで届くための経路をポテンシャル方法 [9] ～ [10] により探索した。また得られた経路は時間の関数として軌道に変換させたあと、その作業時間を短縮するための手法を提示した。

楊 [11] はロボットアームの各リンクを線分で表し、毛利の研究をロボットアーム全体の障害物回避に拡張させた。これらの研究の時間短縮のためのアルゴリズムは、各関節の駆動力の制約のもとで行われており、作業時間短縮の結果は駆動力の制約に大きく依存されてしまうことが予想される。また、固定した空間経路における軌道に対し、作業時間の最小化を行ったので、経路の最適性は考慮されてなかった。

尾崎は [12] 多関節ロボットアームの各関節角度を B-スプライン関数を利用して近似し、軌道の滑らかさを示す評価関数と障害物回避のためにペナルティ関数の重み付き線形和を評価関数として軌道の最適化を行った。この方法は滑らかな軌道を計画することができるが、B-スプラインの制御点を関節空間で与えるため、設計者は、実空間の障害物の配置等を容易に考慮できない状態で B

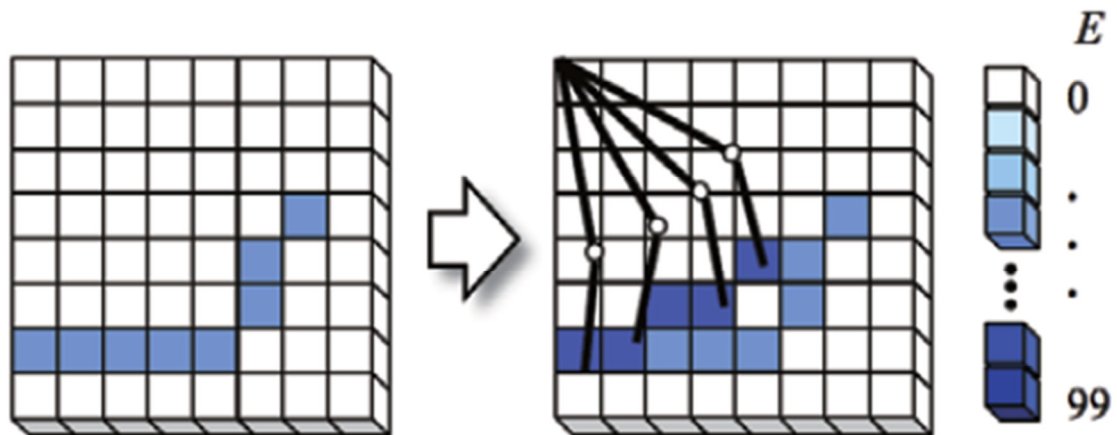


図 1.4 Indura Adji の State-Value Function [11]

第1章

ースプラインの制御点の位置を決めなければならない．また幾何学的運動学だけを利用しており，動力学的要素は考慮していない．さらに多関節ロボットアームを対象としているものの，その冗長自由度の有効な利用については触れていない．

山本 [13] は GA を用いていくつかの初期軌道を決めて，さらに傾斜を用いる数値計画法を用いて消費時間の最小化を行う手法を提示した．この方法では，楊の研究のアルゴリズムを使用して動力学を考慮して最短時間軌道を設計した理由で，最短時間は駆動力に関する制約条件に大きく影響されている形となっている．

その他 Indura Adji [14] も，リンク長を一定と仮定し，作業時間を最小化するため，図 1.4 のようにロボットアームの手先の軌道を State-Value Function で表して最適化を行った．Nicolas Schmit [15] は 3 関節のロボットアームに対して消費トルクを最小化する軌道の最適化を行った．さらに S. Mahalakshmi [16] は作業時間と消費トルクを同時に最小化する多目的最適化問題を考え，Spline 補間による軌道作成方法を提示した．

しかし，これらの研究は関節数やリンク長の変化による最適な軌道の影響については一切，考慮していない．

一方，ロボットアームの軌道や形状を同時に最適化した研究もある．Lee [17]

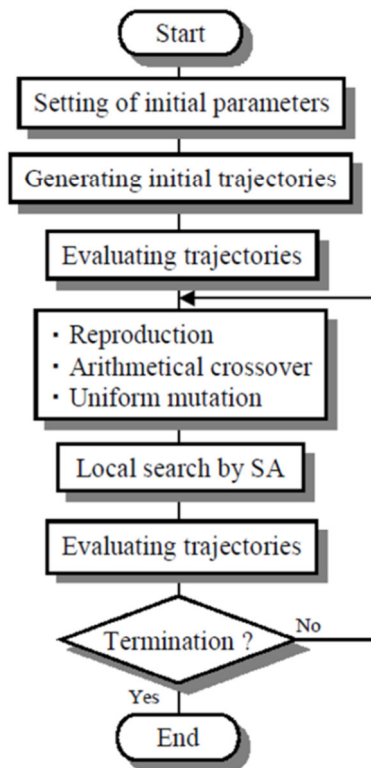


図 1.5 白井の GA と SA を同時に利用したハイブリッド最適化手法 [18]

1.2 ロボットアームの形状や軌道に関する従来の研究

はフレキシブルロボットマニピュレータの軌道と形状と作業時間の同時最適化を行い、消費エネルギー、軌道偏差、作業時間を最小化する最適化問題を考えた。その結果、各目的関数の間にはお互いトレードオフ関係があることを確認し、そのパレート解を求めた。また、白井 [18] は可変長ロボットアームの最適な軌道を求めるため、GA と SA (Simulated Annealing) を同時に利用する図 1.5 のようにハイブリッド最適化手法を提案し、作業時間と軌道偏差を最小化する最適化問題を考えた。その結果、リンク長が変化することにより作業時間の短縮の面で有効だという結果を得た。

しかし、ロボットアームの軌道や形状を同時に最適化する研究でも関節数の変化による最適構造または軌道については考慮していない。

1.2.3 冗長自由度の有効な利用に関する研究

人間の腕は図 1.6 のように 7 自由度を持ち、3 次元空間の 6 自由度に対して一つの自由度が余っている。このようにロボットアームが作業空間の次元が持っている自由度の数より多くの自由度を持つ場合、そのロボットアームは冗長性あるいは冗長自由度を持つと言われる。このようなロボットアームの冗長自由度を有効に利用するための研究が活発に行われている。

冗長自由度がないと障害物を回避して目標とするところまで到着できない場合があるが、その時冗長自由度を活用して回避することができる場合がある。ただ、その場合、各自由度の解析の優先順位、軌道計画問題、評価方法について考慮が必要となり、それらを考慮して障害物回避への利用に関する研究が行われた [19] ～ [24]。

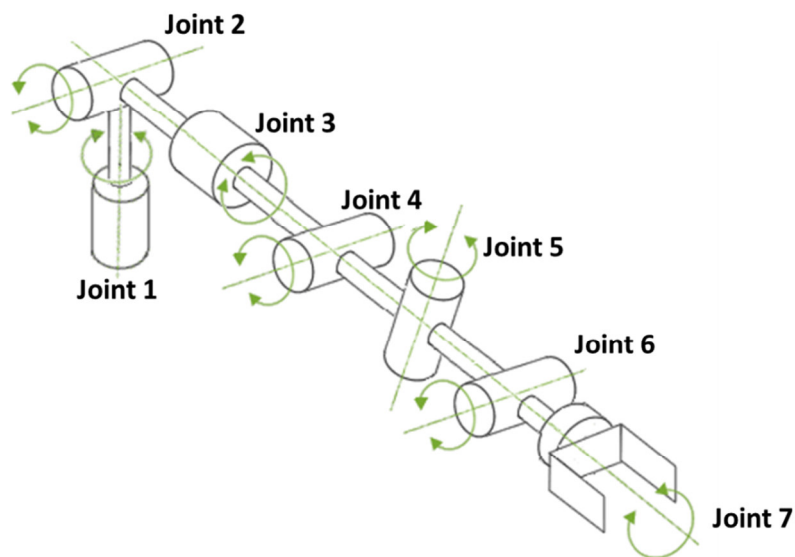


図 1.6 人間の腕の自由度

第1章

さらに、2.3.3 節で詳しく説明する可操作度を評価関数として冗長自由度による特異姿勢回避へ利用した研究も行われた [25] ~ [27].

また、冗長自由度を持つロボットアームの各関節にかかるトルクもしくは消費エネルギーを最適化することにより、関節あたり必要となるトルクを減少させ、加速度など動特性の改善への利用に関した研究が存在する [28] ~ [31].

しかし、これらの研究のほとんどは単一評価関数だけによる有効性を扱っており、実際ロボットアームの性能を表す複数の評価関数については考慮していない。したがって、二つ以上の評価関数を導入することで、より実際に近い最適化モデルを創成することができ、より一般的な最適解を得られると考えられる。

1.2.4 従来の関連研究における問題点および課題

上述した 1.2.1 節のロボットアームの構造解析・設計に関する従来の研究では、関節トルクや作業時間または重量などを評価関数として扱ってロボットアームのリンク長、重量、断面積などを最適化した。しかし、ロボットアームの初期設計の段階で論議する必要がある関節数と冗長性に関しては全く議論が行われていない。

つぎに、1.2.2 節のロボットアームの経路または軌道設計に関する従来の研究は、いずれかの方法にしても軌道は一つではなく複数に存在し、どのような評価関数を用いてもその中から一つの経路または軌道を選ぶことは常に問題であると言える。さらに、冗長自由度を持つロボットアームにおいては駆動力、動作時間など直接性能に関わる評価関数しか考慮していない場合が多く、冗長自由度の有効な利用については議論がされていない。

従来の問題点をまとめると、既存のロボットアームの使用を前提として関節数を固定した条件下で最適化を実行した研究であり、その冗長性の利点については考慮していない。初期設計の段階で関節数、リンク長、等を決める問題に対しては全く取り扱われていない。

したがって、これまで研究されていないが、重要と考えられる初期設計の段階で関節数、リンク長、軌道、冗長性がお互い与える影響を明らかにしながら最適な関節数、リンク長、軌道を求める必要がある。そのためには

(Ⅰ) 3 関節以上の場合発生する冗長自由度の問題

(Ⅱ) 軌道計画方法の問題

(Ⅲ) さまざまな目標にも適応できる総合的な目的関数の設定問題

を考えた新しい最適設計問題の設定とその汎用性のある解法が重要である。

従来の研究は固定した関節数の条件下でさまざまな最適化を行い、関節数を直接設計変数として扱った研究はない。その理由は、関節数は自然数であるが、

その反面リンク長や関節角度は実数となっており両方を考慮した最適化手法が必要となる。それに加えてロボットアームの最適な関節数、リンク長、軌道を同時に満足する最適化問題は、その解は多くの局所的な最適解が存在する、いわゆる多峰性の問題が含まれ、その中で大局的な最適解の選択も望まれる。

したがって、最適な関節数、リンク長、軌道を同時に探索する最適化手法としては

- (Ⅰ) 整数と実数の混合問題
- (Ⅱ) 多点探索が必要となる問題
- (Ⅲ) 多峰性の問題

に適合した手法の選択が重要な問題となる。

従来の数理計画法ではこれらの問題に対して適合した手法とはならず、創発的な手法である遺伝的アルゴリズム (GA) などの活用が必要となる。

1.3 研究目的

本研究では、SCARA 型または PUMA 型ロボットにおいて単純 2 リンクの剛体ロボットアームから多関節の剛体ロボットアームにおける初期設計段階で関節数とリンク長が決定でき、しかも後続の詳細設計の段階でも活用できる汎用性のある設計方法を提示し、その結果に基づいて例示的に設計されたロボットアームに検討を加え、併せて実用的にも有効なことを示すことを目的とする。

具体的にはロボットアーム関節数、リンク長、軌道がそれぞれ与える影響を明らかにする。

最適な決定を行うためには、

- (Ⅰ) 冗長自由度の活用の問題
- (Ⅱ) 軌道計画方法の問題
- (Ⅲ) 障害物が存在するなどさまざまな作業環境にも適応できる総合的な目的関数の設定問題

を解決する。なお最適な関節数やリンク長に影響を与えるアクチュエータの種類や駆動方式はダイレクト駆動を想定して、その数に対応した質量を考慮して運動方程式の計算の際のトルクに間接的に反映する方法を便宜的に採る。さらに提示した設計手法が詳細設計などの後続の設計段階における具体的な最適化問題にも対応できることを示す。上述した課題を解決する設計手法と数値計算例を示し、提示した手法が実際にウエハー搬送ロボットなど既存の産業用ロボットに適用可能かまたコスト面でも有効なことを簡単な例を基に検討する。

1.4 研究対象と研究方法

1.4.1 最適化対象と仮定

多関節の剛体ロボットアームを対象としてその始点から終点までの平面内の二次元運動や三次元空間内の運動を考える．すなわち図 1.7 のようにロボットアームが任意の A から B までの二点間を移動することを想定する．ロボットアームの駆動は，各関節にモーターなどを直接設置するダイレクト駆動方式の他にギヤやベルトを介する駆動方式などの多くの駆動方式が存在しており，そのエネルギー消費は駆動方式に依存する．ここでは，便宜的に各関節にモーターなどを直接設置するダイレクト駆動方式を標準として考える．

1.4.2 研究方法と手順

初期設計段階で多関節の剛体ロボットアームの最適な関節数リンク長を考える上で重要である上記 1.3 の項目に関しては，次のような方法を採用．

(I) 冗長自由度との関係

多関節の剛体ロボットアームでは，平面運動を考えても 3 関節以上では冗長自由度が発生する．この冗長自由度を活用するために各関節の角度も設計変数とする．

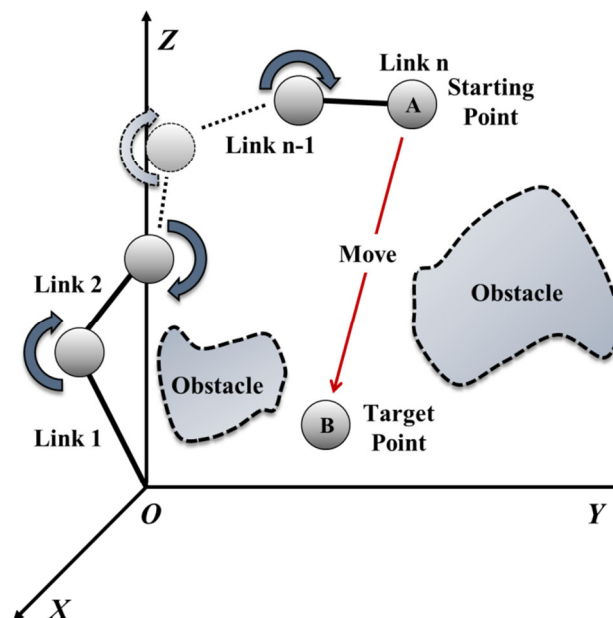


図 1.7 研究対象の概念図

(II) 軌道との関係

予備的な研究として始点から終点までの代表的な軌道を想定する．また主たる研究としてスプライン曲線のコントロールポイントを設計変数として軌道そのものを最適化して最適軌道を求める場合も考える．

(III) 評価指標（目的関数）との関係

最適軌道を評価する評価指導は種々考えられるが，大局的な評価指標の一つである消費エネルギーおよび特異点の回避も考えて可操作性も考える．

(IV) アクチュエータの関係

アクチュエータは簡単のために関節部でダイレクト駆動する方式を想定して，アクチュエータの数に対応する質量を考え，運動方程式による消費エネルギー計算に反映する．

さらに作業環境（タスク，空間，障害物等）により最終的なリンク長やリンク形状は最適化する必要を考え，提案した手法によって関節数を決めた上で，それらの作業環境の変化にも対応できる設計手法を掲載する．また目的関数としては作業時間，位置決め of の正確さ等々，いろいろなものが考えられるが，これらについても提案した手法によって関節数を決めてから考慮できるようにする．

また多関節の剛体ロボットアームの平面運動の場合についてまず研究を展開し，解析が主体の研究と並行して一部モデル実験も行い，比較を試みる．さらに3次元空間の運動についても解析を拡張して検討を行う．

1.4.3 関節数，リンク長，軌道の最適化の手順

関節数に関しては自然数の変数で与えないと系の状態が決まらないので1関節から開始してその数を増加させながら上限数までの各関節数の下でアームの逆運動学解析と動力学解析を行い，アーム長や軌道の最適化を行い，目的関数が最適となる最小の関節数を選ぶ．軌道の最適化においては軌道をスプライン関数で近似をし，そのコントロールポイントを設計変数として扱い，最適軌道を求める．また冗長自由度が発生した場合に関してもアームの回転角を設計変数に取り，姿勢を決定する．

最適化の手法は，1.2.4 で言及した整数・実数混合問題，多点探索必要な問題，多峰性の問題に適合する三つの点を考えた手法とする．本研究で扱うロボットアームの関節数（自然数）やリンク長や軌道のパラメータ（正の実数）が設計変数となることと軌道設計には予備的な研究で多峰性が見られたことなどから遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm)を採用した．(今後遺伝的アルゴリズムについてはGAと簡略化して使う.)

第 1 章

GA は自然選択 (Natural selection) または適者生存 (Survival of the fittest) の原則に立脚して簡素化した最適化アルゴリズムであり、最適化手法として多くの分野で用いられている。GA が一般的な最適化手法と異なる特徴は大きく以下のように四つ程度があり、このような特徴で非線形の問題、不連続な問題、解が全域的空間で存在する時などの場合よく使われ、本研究の最適化手法として適合すると判断した。

- (I) 媒介変数 (Parameter) を直接利用せず、媒介変数の集合 (Parameter set) を使用して最適解を探索する。
- (II) 単点 (Point) ではなく、多点 (Multi points) 探索方法である。
- (III) 付加的な知識を使用せず、適合性を利用する。
- (IV) 決定論的なルールがなく、確率的ルール (Crossover or Mutation) を使用して実行される。

また、多目的最適化においてはパレート解を求め、それらの解の中から適切な解を求める方法を取る。

1.5 本論文の構成

本論文は全 6 章になっており、その構成について以下に示す。

第 1 章の序論では、ロボットアームの関節数やリンク長、軌道の関係についての研究背景や関連する従来の研究と課題を述べた後に本論文の目的、研究対象、研究方法について説明し、最後に本論文の構成を示す。

第 2 章では、多関節ロボットアームについての最適な関節数、リンク長、軌道などの最適化を行うための後続の章で使用する基礎的な解析方法について説明を行う。剛体多関節ロボットアームを対象として GA による最適化を行うためには、適用の対象となっているロボットアームのモデル化、最適化問題の定式化のための最適化モデルの定義が必要となる。その際に実用化を目指した汎用性のある設計方法を提示するためには、設計変数、制約条件、目的関数の選択とその適切なモデル化が必要である。したがって、本章では多関節ロボットアームのモデル化、最適化モデル計画、GA の適用の三つに分けて実際最適化を行うために使われる理論を説明する。

第 3 章では、本論文の中心となる第 4 章の予備的な研究としてロボットアームの平面内運動を対象とし、いくつかの平面内の代表的な軌道を想定した、いわゆる固定軌道に対する研究を行う。多関節ロボットアームがその固定軌道を通った際、冗長自由度による関節トルクや加速度など動特性の改善に着目し、消費エネルギーを最小化する最適化を行い、最適な関節数やリンク長を求める。

最後にロボットアームの構造（関節数，リンク長）と軌道への影響を把握するため効果量の概念を導入し，その傾向を考察するとともに実際に使用されているロボットの作業において実用性も高いことについても言及する．

第4章では，本論文の主要な研究内容である固定軌道による関節数やリンク長への直接的な影響を避けるために第3章の設計方法を拡張し，平面内の軌道自体も変化するものとして軌道も含める最適化問題を考えて後に続く詳細設計の段階でも活用できる汎用性のある手法を提案する．またその有効性を検討するモデル実験も行い，提案した手法の有効性を実用面からも検証する．前章では，想定した軌道をロボットアームに与え，その軌道に沿う際の最適の関節数，リンク長を求めたが，本章では，軌道も未知として設計変数に含めた最適化を行う．また，前章の結果では，関節角度が0となり，特異姿勢となる結果も観察され，本章ではその問題を防ぐための目的関数を設定し，多目的最適化を行う．具体的には，多ロボットアームの最適な関節数，リンク長に加えて軌道も同時に最適化するため，まず始点と終点以外の目標点を設計変数として設定し，**Spline** 補間を用いて軌道を計画する．また特異点の回避も考慮して消費エネルギーを最小化および可操作性の最大化する最適化問題の定式化手法を提案する．最適化問題を定式化し，**MOGA** (**M**ulti-**O**bject **G**enetic **A**lgorithm) により多目的最適化を行い，**Pareto** 解集合の中一つの解を選択する方法を提示した．またモデル実験を実施し，実験的にも最適化の結果を検証する．最後に実際ロボット作業を想定し，その面でも本章で得られる成果が活用できることを示す．

第5章では，第3，4章が平面内の物体を対象とした最適化を行ったことに対して，通常のロボット作業で多く見られる三次元空間内のロボットアームを対象として平面内の手法を発展させた最適化を行い，さらなる汎用性のある手法を提案し，その成果を検討する．また対象が三次元に増えたため座標変換に関する複雑な計算が飛躍的に増える．このために前章（第4章）のモデル化を直接採用すると膨大な計算時間を要することになり実用的ではない．したがって効率的な最適化を行うために，目的関数は消費エネルギーの一つに限定する．その代わり特異姿勢になることを防止するための制約条件を設定した最適化問題を提案し，得られる成果が実用面でも資することを示す．

第6章では，得られたさまざまな成果に基づいて本論文の結論とする．さらに今後の展望について述べる．最後に，本研究に関連する今後の研究の展望を示す．

本研究の各章の構成とキーワードを図1.8に記す．

第1章

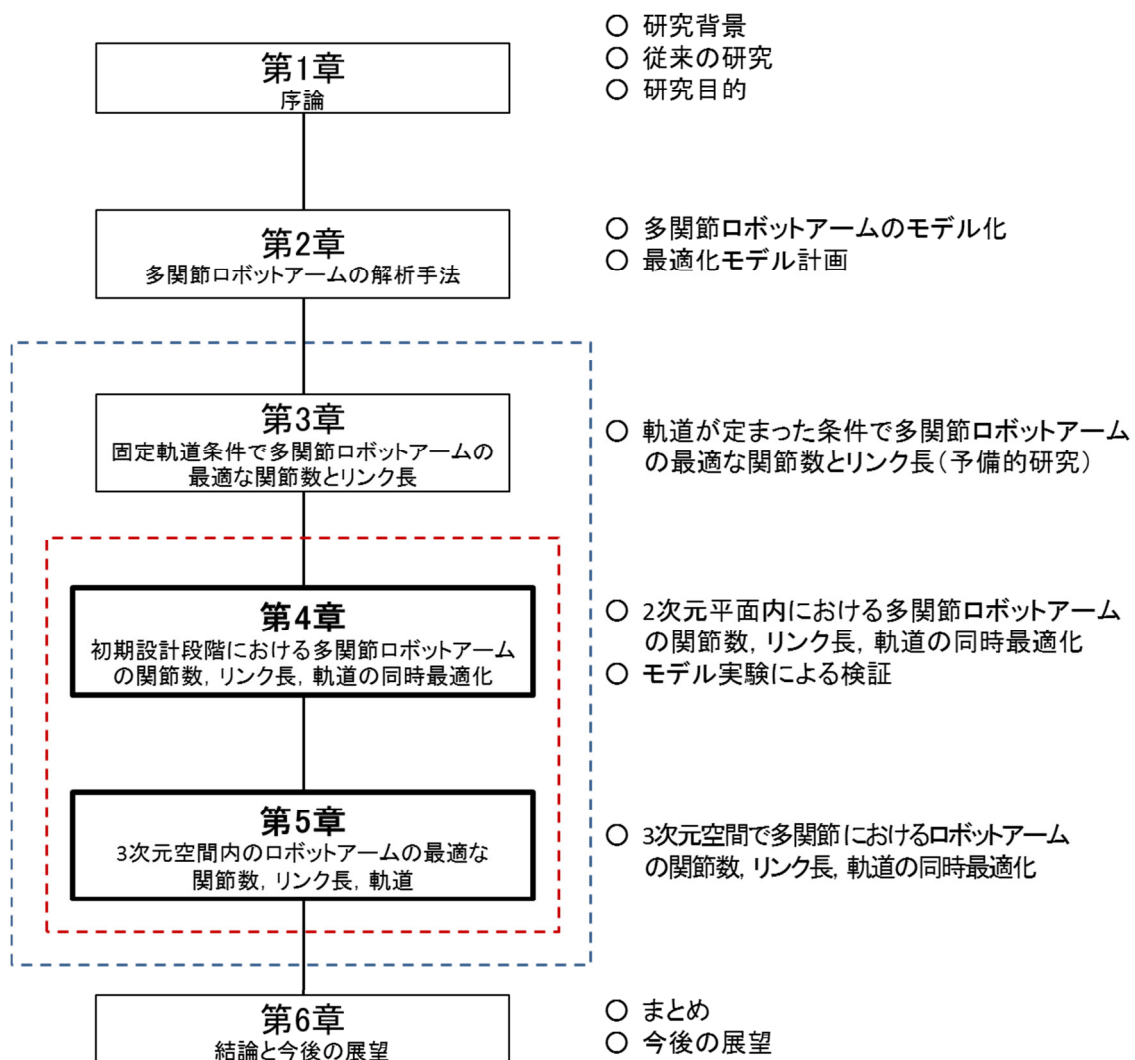


図 1.8 論文の構成

第 2 章

多関節ロボットアームの解析手法

2.1 概 要

初期設計の段階における多関節の剛体ロボットアームの関節数，リンク長，軌道を対象とした汎用性のある最適設計法を提示するためには，対象となっているロボットアームのモデル化と運動学解析や動力学解析，最適化問題の定式化のための最適化モデルの設定が必要となる．

つまり，運動学解析によりロボットアームの先端の位置情報の計算や特異姿勢の解析方法を提示する．また動力学解析によりロボットアームにおける運動方程式を定義し，各関節部の関節トルクを計算し，その値を用いて評価関数と数値計算や個々の値を比較することが可能となる．また本研究の最適化の手法である GA を用いて最適化問題を定式化する方法の提示も必要となる．

したがって，本章では

- I) 多関節ロボットアームのモデル化と解析
- II) 最適化モデル計画
- III) 遺伝的アルゴリズム (GA) の適用

の三つに分けて最適化を行うために使われる理論と実際に適用させる方法について説明する．

まず，多関節ロボットアームのモデル化では，運動学を三次元空間内の関節数 n 個と仮定したロボットアームへの適用におけるリンクの表示方法を提示し，冗長自由度発生による関節角度，Jacobian 行列，特異点についての考察や問題点を述べる．その後，動力学解析を行うため運動方程式を定義し，関節トルクによる式として導出する．

つぎに，最適化モデル計画では，前述した多関節ロボットアームのモデル化に基づいて最適化問題の定式化を行う．その際，本研究の課題である冗長自由

第2章

度による関節角度の問題，軌道計画問題，目的関数の適用方法を提案する．

最後に，遺伝的アルゴリズム（GA）の適用では，GA の原理をプログラミングする方法について検討しながら実際の適用について考察する．

2.2 多関節ロボットアームのモデル化

ロボットアームの運動学（Kinematics）は固定された基準座標系について時間の関数としてロボットアームの運動の幾何学的な解析を行う．このような運動学はロボットの空間移動の解析的な記述，特にロボットアームの手先（エンド・エフェクタ）の位置と姿勢の関係を時間の関数として扱うものである．運動学の図 2.1 に示したように順運動問題と逆運動学問題の 2 つに分けられる．

まず順運動学は関節座標系における関節角度が与えられた場合，直交座標系における手先の位置を計算する問題である．これらに対して逆運動学問題は手先の位置が与えられた場合，それを満足するための各関節角度を計算する問題である．つまり順運動学は関節座標系から直交座標系への変換であり，逆運動学は直交座標系から関節座標系への変換とも言える．

ここでは，ロボットアームの順運動と逆運動学を繋ぐリンクパラメータの概念を基いて多関節ロボットアームに適用におけるリンクの表示，関節角度，Jacobian 行列，特異点について説明する．

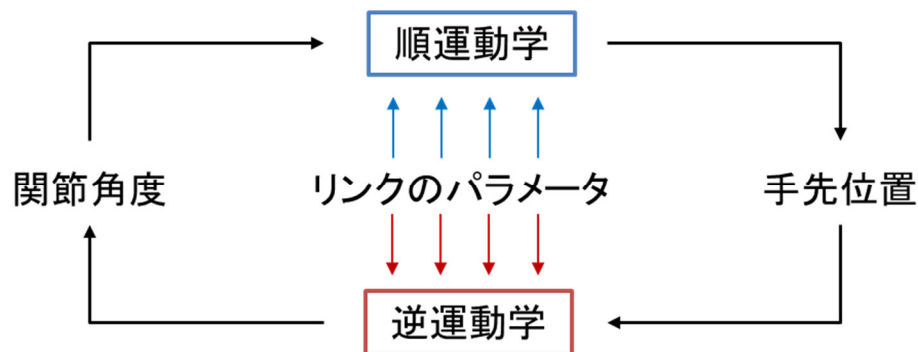


図 2.1 順運動学と逆運動学

2.2.1 リンクの表示

一般的にどのような多関節ロボットアームでも機構学的面では，各リンクについた四つの値を記述できる．二つは基準リンク自体を記述し，残り二つは基準リンクと接する他のリンクとのつながりを記述する．これらの値を利用して機構を定義する規約は Denavit-Hartenberg 表示法と呼ばれている．本研究の 3~5

2.2 多関節ロボットアームのモデル化

章に至る多関節ロボットアームのリンク表示法は Denavit-Hartenberg 表示法を利用する．図 2.2 は一般的な多関節ロボットアームのリンク系を表している．

ここで， $\hat{\mathbf{X}}_{i-1}, \hat{\mathbf{Y}}_{i-1}, \hat{\mathbf{Z}}_{i-1}$ は軸 $i-1$ の単位ベクトル， $\hat{\mathbf{X}}_i, \hat{\mathbf{Y}}_i, \hat{\mathbf{Z}}_i$ は軸 i の単位ベクトルであり，リンクパラメータと呼ばれる $a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i$ は以下のように定義する．

- I) a_i は $\hat{\mathbf{X}}_i$ を基準とし測定した $\hat{\mathbf{Z}}_i$ から $\hat{\mathbf{Z}}_{i+1}$ までの距離
- II) α_i は $\hat{\mathbf{X}}_i$ の回りから測定した $\hat{\mathbf{Z}}_i$ と $\hat{\mathbf{Z}}_{i+1}$ 間の角度
- III) d_i は $\hat{\mathbf{Z}}_i$ を基準とし測定した $\hat{\mathbf{X}}_{i-1}$ から $\hat{\mathbf{X}}_i$ までの距離
- IV) θ_i は $\hat{\mathbf{Z}}_i$ の回りから測定した $\hat{\mathbf{X}}_{i-1}$ から $\hat{\mathbf{X}}_i$ 間の角度

$i-1$ 関節を基準とした座標から i 関節座標変換行列を ${}^{i-1}T_i$ とすると ${}^{i-1}T_i$ は式(2.1)のように表せる．

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos\alpha_{i-1} \cdot \sin\theta_i & \cos\alpha_{i-1} \cdot \cos\theta_i & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} \cdot d_i \\ \sin\alpha_{i-1} \cdot \sin\theta_i & \sin\alpha_{i-1} \cdot \cos\theta_i & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} \cdot d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

座標変換 0T_n は式(2.2)のように与えられる．

$${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{n-1}T_n \quad (2.2)$$

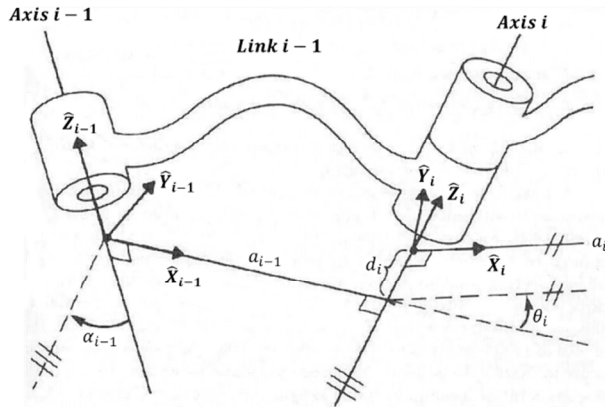


図 2.2 Denavit-Hartenberg パラメータ [32] に追加

2.2.2 逆運動学解析

逆運動学問題とはロボットの末端装置の位置と方角が与えられた時，関節角度を求めることである．逆運動学の問題は順運動学の問題のように簡単ではない．それは逆運動学の連立方程式が非線形の形であるため解を求めることが容易ではない．それに完全な解を求められない場合もある．

第 2 章

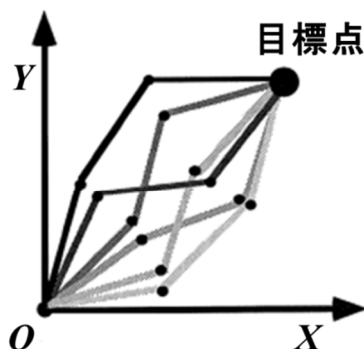


図 2.3 冗長ロボットアームにおける逆運動学の解

逆運動学を解く過程で直面するほかの問題は、いわゆるロボットアームの冗長性によって解が複数存在することである。例えば図 2.3 のように目標点までの関節角度の解は無数に存在する。解の数はロボットアームの関節数によって決定されるが、リンクパラメータ (a_i, α_i, d_i) と関係がある。例えば、PUMA 型ロボットの腕はある目標に到達するには八つの他の解がある。図 2.4 は同じ位置と法角を持つように手の位置を定めた四つの解を示している。描かれたそれぞれの解について最後の三つの関節がひっくり返る可能性がある。つまり、全体的には一つの目標に対して、八つの解を持つこととなる。関節の限界範囲によっては八つの解の中いくつかの解は、不可能である可能性もある。

一般的には、0 ではないリンクパラメータ多くなればなるほど、定められた目標に到達する方法が多くなる。例えば、六つの回転の関節を持っているロボットを考えてみよう。表 2.1 は可能な解の数がリンクパラメータ a_i の中で 0 の数と関係あることを示している。0 がないことが多いほど、より多くの解が存在する。6 自由度で完全なる一般的な回転の関節を持っているロボットは最大 16 個の解が存在する [33] ~ [34]。

表 2.1 a_i による 6 自由度ロボットアームにおける逆問題解の数

a_i	Number of solutions
$a_1 = a_3 = a_5 = 0$	≤ 4
$a_3 = a_5 = 0$	≤ 8
$a_3 = 0$	≤ 16
All $a_i \neq 0$	≤ 16

2.2 多関節ロボットアームのモデル化

ロボットアームが複数の解を持つことは、その中で一つの解を選択しなければいけない問題がある。一つの解を選ぶ時、考慮する選択の基準は設計者によって異なる。例えば図 2.5 のようにロボットアームを A から B まで動かす時 B-a のほうが B-b のほうより移動量の面では合理的だと考えられる。つまり、本研究ではこの例の移動量のような基準を目的関数と設定し、その目的関数を最小化する一つの解を選択する。このような目的関数は今後の最適化問題に合わせて採用する。

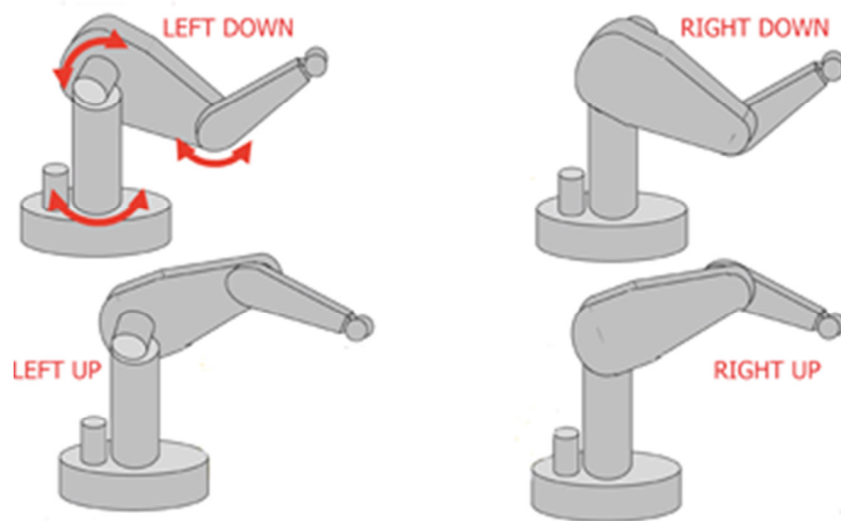


図 2.4 PUMA 型ロボットの 4 つの解 [35]

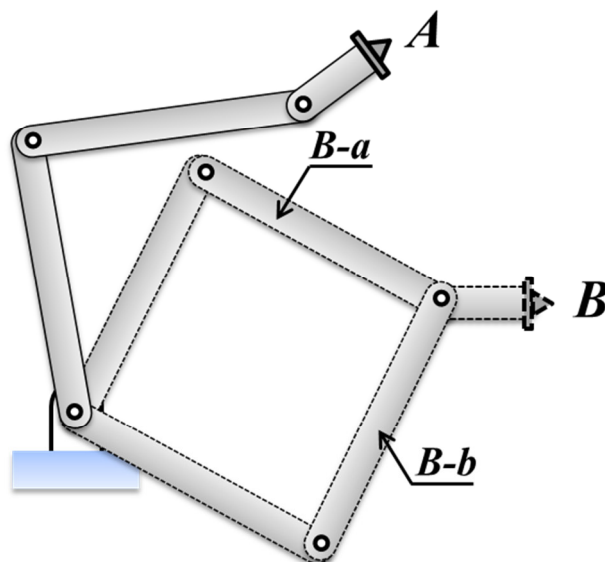


図 2.5 冗長ロボットアームにおける逆運動学の解

第2章

2.2.3 Jacobian 行列

ヤコビアンは微分の多次元の形である．例えば n 個の関数があり，それぞれが n 個の独立変数の関数と仮定すると，

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n) \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n) \\ &\vdots \\ y_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n) \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{F}(\mathbf{X}) \end{aligned} \tag{2.3}$$

のようになり， y_i の微分を x_j 微分の関数で表すと，

$$\begin{aligned} \delta y_1 &= \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \delta x_{n-1} + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \delta x_n \\ \delta y_2 &= \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \delta x_{n-1} + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \delta x_n \\ &\vdots \\ \delta y_n &= \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \delta x_{n-1} + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \delta x_n \\ \delta \mathbf{Y} &= \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \delta \mathbf{X} \end{aligned} \tag{2.4}$$

となる．式(2.4)の偏微分の $n \times n$ 行列をヤコビアン \mathbf{J} と定義する．両辺を時間の微小量で割ると式(2.5)のようになる．

$$\dot{\mathbf{Y}} = \mathbf{J}(\mathbf{X}) \dot{\mathbf{X}} \tag{2.5}$$

ある瞬間 \mathbf{X} がある値を持つようになり， $\mathbf{J}(\mathbf{X})$ は線形変換となる．新たな瞬間ごとに \mathbf{X} は変化してそれによって線形変換をする．

つまりヤコビアンは時間によって変化する線形変換と言える．ロボット工学分野では一般的にロボットアームの関節速度を手先の直交座標系の速度で表現させる行列であり，行列の数は直交座標空間の自由度数と同一である．

2.2.4 特異点

関節速度を直交座標系の速度で連結させる線形変換が与えられた場合，「この行列の逆行列を求められるか」という問題がある．つまり行列が非特異的 (Non-singular) であるかの判断である．この行列が非特異的であればその行列の逆を求めて直交座標系の速度で関節の変化率を計算することができる．

例えば，ロボットアームを直交座標系空間の中で，与えられた速度ベクトル

2.2 多関節ロボットアームのモデル化

でロボットアームを運動させたいと仮定する. そうすると式(2.5)を使うと各瞬間に必要な関節角度の変化率を計算することができる.

逆行列の存在有無に関する根本的な質問は「すべての関節角度値に対してヤコビアンが逆行列が存在するのか. もし存在しないところがあれば, その領域はどこか?」である.

ほとんどのロボットアームはヤコビアンが特異性となる値を持っている. そのような位置を特異点という. ロボットアームが図 2.6 のように特異姿勢となると, 直交座標空間で見るときは 1 個またはそれ以上の自由度を喪失したことになる. その意味は直交座標空間の中でロボットの関節の変化率をどのように選択しても動けない方向 (または空間) が存在することを表す [32].

したがって, 特異姿勢はロボットアームの軌道計画において考慮すべきである重要な問題である. 本研究では, 特異姿勢を避ける方法として目的関数または設計条件の設定により回避するように考えている.

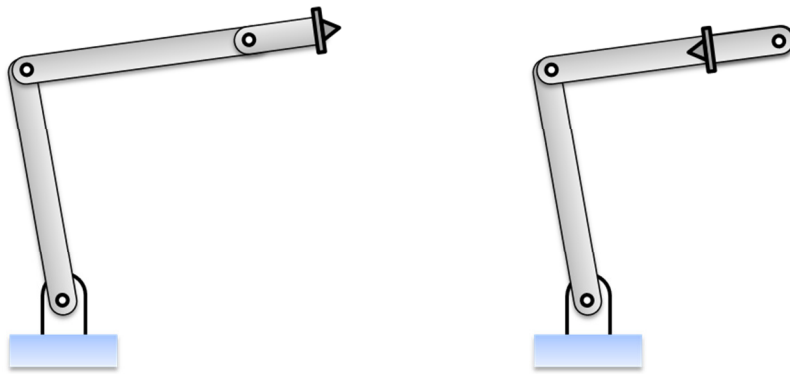


図 2.6 特異点の位置になっているロボットアームの例

2.2.5 動力学解析

本研究では, 多関節ロボットアームを平面や空間内で運動する剛体として扱う. 図 2.7 には三次元で表した場合のモデル図を示す.

関節数を n として各リンクの質量 M_i , 剛体として挙動を示す各関節部の質量 m_i が回転運動し, 減衰エネルギーは考慮しないと仮定する. ここで, θ_j は各関節角度, l_i は各リンク長, A_i は各リンクの断面積, ξ_i は各リンク上の任意の座標点である. ($i = 1, n \quad j = 1, m$)

この際, 全体の運動エネルギー T と全体の位置エネルギー U は式(2.6), (2.7) のようになる. ここで, ρ は密度, $v_{\zeta i}$ はリンク上の任意の座標点の速度, v_{mi} は関節部 m_i の速度である.

第2章

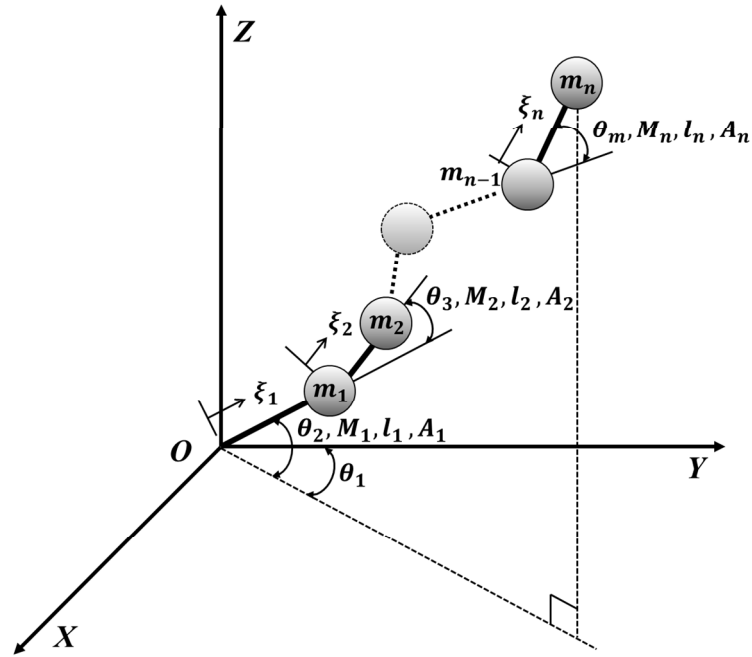


図 2.7 ロボットアームも三次元モデル化

$$\begin{aligned}
 T &= \sum_{i=1}^n T_{Mi} + \sum_{i=1}^n T_{mi} \\
 &= \sum_{i=1}^n \int_0^{l_n} v_{\zeta i}^2 \rho A_i d\xi_i + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (m_i l_i^2) v_{mi}^2 \\
 &\quad (i = 1, 2, \dots, n)
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

$$\begin{aligned}
 U &= \sum_{i=1}^n U_{Mi} + \sum_{i=1}^n U_{mi} \\
 &= - \left(\sum_{i=1}^n M_i gh + \sum_{i=1}^n m_i gh \right) \\
 &\quad (i = 1, 2, \dots, n)
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

ラグランジュ方程式に代入すると式(2.8)のようになる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_j} + \frac{\partial U}{\partial \theta_j} = \tau_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2.8)$$

ここで τ_j は関節トルクである．式(2.8)は式(2.9)のように簡略化した運動方程式となる．

$$\mathbf{J}(\theta)\ddot{\theta}_j + \mathbf{C}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}(\theta) = \tau_j(t) \quad (j = 1, 2, \dots, m)$$

$$[\mathbf{J}] \cdot \{\ddot{\theta}_j\} + [\mathbf{C}] + [\mathbf{G}] = \{\tau_j\} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2.9)$$

ここで， $\mathbf{J}(\theta)$ は慣性行列， $\mathbf{C}(\theta, \dot{\theta})$ はコリオリ力と遠心力， $\mathbf{G}(\theta)$ は重力項である．

本研究では，先に運動学解析により各関節の角度，角速度，角加速度の計算を行い，そのつぎ，式(2.9)の動力学解析により，各関節部の関節トルクの計算ができ，最適化による各部の関節トルクの比較が可能となり，最適化による関節トルク変化などが評価できる．

また本研究では，各リンクは細長い棒として，関節部は集中質量を持つと仮定するため慣性行列による運動特性については考慮しない．

2.3 最適化モデル計画

1章では，ロボットの腕の最適の関節数，関節の長さ，軌道を同時最適化するため，考慮しなければならない問題について説明した．つまり，設計変数設定，軌道計画，目的関数設定の問題をどのように定式化して，最適化を達成するのかがこの研究の重要な点である．したがって，ここでは3.4.5章で扱う最適化問題の定式化を行うときに必要な設計変数の設定，ロボットアームの軌道計画，目的関数設定について説明する．この章ではそれぞれ異なった条件のロボットに適用に向けた一般的な説明をし，詳細な適用は各節で再び論じる．

2.3.1 冗長自由度が生じる場合の設計変数

ロボットアームの関節数が作業空間の次元を超えると冗長自由度が発生し，逆運動学を用いた関節角を求めることができない．そのため本研究では，関節角 θ_j ($j = 1, m$) を式(2.10)のように表し， ϕ_m ($m \geq r$) を設計変数として扱う．三次元モデルの場合は $r = 4$ となり，

第 2 章

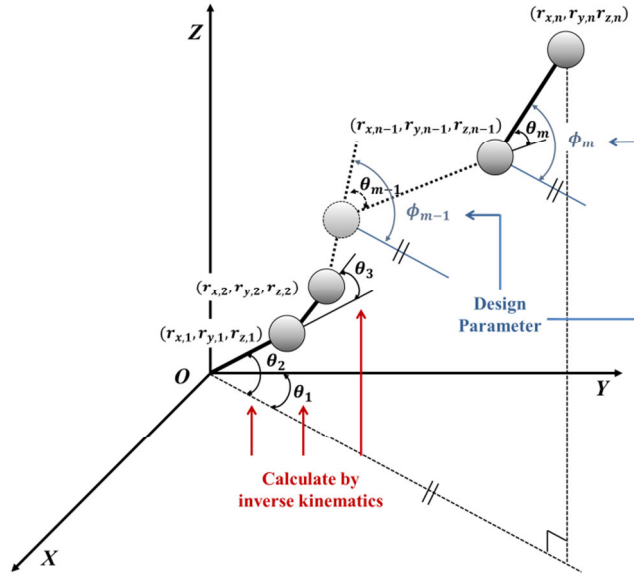


図 2.8 冗長自由度が生じる場合の設計変数の概略図

$$\theta_1 + \theta_2 + \cdots + \theta_{m-1} + \theta_m = \phi_m \quad (2.10)$$

$$\theta_1 + \theta_2 + \cdots + \theta_{m-1} = \phi_{m-1}$$

⋮

$$\theta_1 + \theta_2 + \cdots + \theta_r = \phi_r$$

その時の関節角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は逆運動学を用いて 式(2.11a), (2.11b), (2.11c)のように 計算する.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{r_{y,2}}{r_{x,2}}\right) \quad (2.11a)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{r_{z,2}}{\frac{r_{x,2}}{\cos\theta_1}}\right) - \arctan\left(\frac{k_2}{k_1}\right) \quad (2.11b)$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{\sin\theta_3}{\cos\theta_3}\right) \quad (2.11c)$$

$$\cos\theta_3 = \frac{\left(\frac{r_{x,2}}{\cos\theta_1}\right)^2 + r_{z,2}^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}, \quad \sin\theta_3 = \pm\sqrt{1 - \cos^2\theta_3}$$

ここで, k_1, k_2 以下になる.

$$k_1 = l_1 + l_2\cos\theta_3, \quad k_2 = l_2\sin\theta_3 \quad (2.12)$$

また $r_{x,2}, r_{y,2}, r_{z,2}$ は 2 番目リンクの手先の座標である. $r_{x,2}, r_{y,2}, r_{z,2}$ の計算は,

まず n リンクの手先の座標が $r_{x,n}, r_{y,n}, r_{z,n}$ と与えられたとすると式(2.13a), (2.13b), (2.13c)のより $n-1$ リンクの手先の座標 $r_{x,n-1}, r_{y,n-1}, r_{z,n-1}$ が計算でき, この計算を繰り返すと 2 番目リンクの手先の座標 $r_{x,2}, r_{y,2}, r_{z,2}$ が求められる.

$$r_{x,n-1} = r_{x,n} - l_n \cos \phi_m \cos \theta_1 \quad (2.13a)$$

$$r_{y,n-1} = r_{y,n} - l_n \cos \phi_m \sin \theta_1 \quad (2.13b)$$

$$r_{z,n-1} = r_{z,n} - l_n \sin \phi_m \quad (2.13c)$$

すなわち, ロボットアームの姿勢を表す関節ベクトル $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T$ が求められる. 図 2.8 はその概略を示している.

2.3.2 3 次 Spline 補間を用いた軌道計画

軌道は図 2.9 のように始点と終点を含める l 個のコントロールポイント $P = [P_1, P_2, \dots, P_{l-1}, P_l]$ を与える. 各コントロールポイントに当たる各関節角は式(2.14)のようになる.

$$\theta_{j,k} = \begin{bmatrix} \theta_{1,1} & \theta_{1,2} & \cdots & \theta_{1,l-1} & \theta_{1,l} \\ \theta_{2,1} & \theta_{2,2} & \cdots & \theta_{2,l-1} & \theta_{2,l} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_{m,1} & \theta_{m,2} & \cdots & \theta_{m,l-1} & \theta_{m,l} \end{bmatrix}$$

$$= [\theta_{j,1} \ \theta_{j,2} \ \cdots \ \theta_{j,l-1} \ \theta_{j,l}] \quad (j = 1, m \quad k = 1, l) \quad (2.14)$$

ここで $\theta_{j,k}$ は任意の P における関節角度 θ である. $\theta_{j,k}$ を三次 Spline 補間を用いて時間の関数として各関節の軌道 $\theta_j(t)$ を求める.

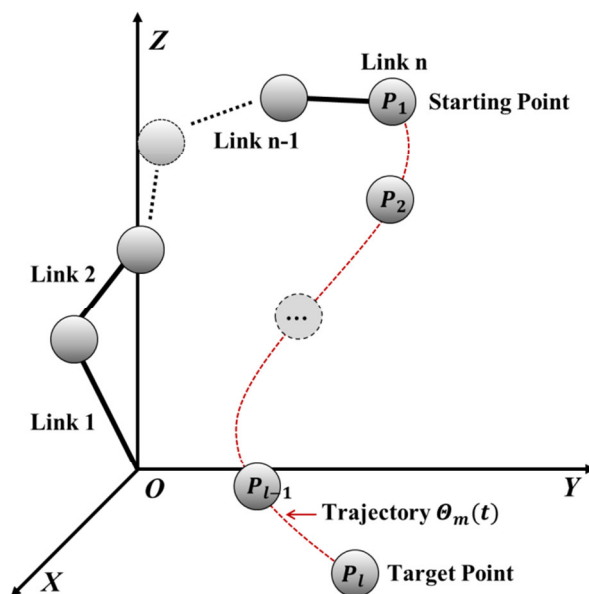


図 2.9 Spline 補間を用いた軌道計画の概念図

第 2 章

3 次 Spline を用いる理由を説明すると 2 次 Spline は、(I) 最初の 2 つの目標点を繋ぐ線が直線になる点、(II) 最後の区間では大きく振動する可能性があるからである。また 4 次以上の高次 Spline は高次多項式が持つ不安定性のため本章では 3 次 Spline を用いる。

各関節の軌道 $\Theta_j(t)$ ($j = 1, m$) は式(2.15)のように定義する。

$$\Theta_j(t) = a_{j,k} + b_{j,k}(t_{j,k} - t) + c_{j,k}(t_{j,k} - t)^2 + d_{j,k}(t_{j,k} - t)^3 \quad (2.15)$$

$$(j = 1, m \quad k = 1, l)$$

ここで、各定数項 $a_{j,k}, b_{j,k}, c_{j,k}, d_{j,k}$ は以下のようになる。まず、

$$a_{j,k} = [\Theta_{j,1} \ \Theta_{j,2} \ \dots \ \Theta_{j,l-1} \ \Theta_{j,l}]^T \quad (2.16)$$

$$h_{j,k} = [t_{j,k+1} - t_{j,k}]^T \quad (2.17)$$

$$d_{j,k} = \left[\frac{c_{j,k+1} - c_{j,k}}{3h_{j,k}} \right]^T \quad (2.18)$$

$$b_{j,k} = \left[\frac{a_{j,k+1} - a_{j,k}}{h_{j,k}} - \frac{h_{j,k}}{3}(2c_{j,k} + c_{j,k+1}) \right]^T \quad (2.19)$$

$$(j = 1, m \quad k = 1, l)$$

となり、 $c_{j,k}$ は式(2.20)のようになり、表示されていない所は 0 である。

$$c_{j,k} = \begin{Bmatrix} c_{j,1} \\ c_{j,2} \\ \vdots \\ c_{j,l-1} \\ c_{j,l} \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ h_{j,1} & 2(h_{j,1} + h_{j,2}) & h_{j,2} & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & h_{j,l-2} & 2(h_{j,l-2} + h_{j,l-1}) & h_{j,l-1} \\ & & & & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ 3 \left(\frac{a_{j,3} - a_{j,2}}{h_{j,2}} - \frac{a_{j,2} - a_{j,1}}{h_{j,1}} \right) \\ \vdots \\ 3 \left(\frac{a_{j,l} - a_{j,l-1}}{h_{j,l-1}} - \frac{a_{j,l-1} - a_{j,l-2}}{h_{j,l-2}} \right) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

$$(j = 1, m \quad k = 1, l)$$

3 次 Spline 補間は一般的に三つの端末条件がある。表 2.2 は各端末条件を示している。本章では $c_{j,1} = 0, c_{j,l} = 0$ の Natural condition を用いる。その理由は、Clamped end condition は曲線の最初と最後の導関数を 0 にしたため補間した曲線の最初と最後が平らなのに比べて仮想の目標点をより漸近するためである。また Not-a-knot condition は 3 次導関数が繋がる端末条件を持っているためより多き曲率を持つ [36] ~ [38]。

表 2.2 3 次 Spline 補間の端末条件

Condition	First and Last Equation
Natural	$c_{j,1} = 0, c_{j,k} = 0$
Clamped end	$2h_{j,1}c_{j,1} + h_{j,1}c_{j,2} = 3 \left(\frac{a_{j,2} - a_{j,1}}{h_{j,1}} - \dot{a}_{j,1} \right)$ $2h_{j,k-1}c_{j,l-1} + 2h_{j,l-1}c_{j,l} = 3 \left(\dot{a}_{j,l} - \frac{a_{j,l} - a_{j,l-1}}{h_{j,l-1}} \right)$
Not-a-knot	$h_{j,2}c_{j,1} - (h_{j,1} + h_{j,2})c_{j,2} + h_{j,1}c_{j,3} = 0$ $h_{j,l-1}c_{j,l-2} - (h_{j,l-2} + h_{j,l-1})c_{j,l-1} + h_{j,l-2}c_{j,l} = 0$

2.3.3 目的関数設定

初期設計の段階で関節数やリンク長をあらかじめ決めるために、どのような目的関数（評価指標）を選択するかは大いに議論のあるところであると考えられる．初期設計に続く詳細設計の段階では具体的ないくつかの目的関数が存在すると考えられるが、ここではまず大局的な目的関数を選択してそれをもとに関節数を決めて後続の詳細設計などの段階における個々目的関数に対しても提示した手法で対応する考え方を採る．

目的関数は汎用を考慮して消費エネルギーと可操作度の二つとし、多目的最適化を行う．その際、消費エネルギー E はロボットアームが始点から終点まで動く時の各リンクの運動エネルギーや位置エネルギーを足した値と考え、式 (2.21) のように表すことができる．

$$\tau_i = [J] \cdot \{\ddot{\theta}_j\} + [C] + [G] \quad (j = 1, 2, \dots, m)$$

$$E = \sum_{j=1}^m E_i = \sum_{j=1}^m \left(\int \tau_j \cdot d\theta_j(t) \right) \quad (2.21)$$

また可操作度 w は、まず N 次元上の m 自由度を持つロボットアームを考え、ロボットアームの姿勢を表す関節ベクトルを $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T$ とし、ロボットアームの位置を表す位置ベクトルを $r = [r_1, r_2, \dots, r_N]^T (N \leq m)$ とする．これらの二つのベクトル θ と r の幾何学的関係は $r = f(\theta)$ で与えられるものとする．これを時間変数で微分すると $\dot{r} = J(\theta)\dot{\theta}$ となり、 $J(\theta)$ はヤコビアン行列である．そして、次式(2.23)で与えられるスカラー w をマニピュレータの可操作度と呼び、操作能力を運動学的な観点から定量化した一つの指標となる [39]．可操作度は最小値 0 と最大値 1 を持ち、最小値 0 の場合は特異点の位置にあり、最大値 1 の場合はほかの作業空間へ移動が容易ということを示す．し

第2章

たがって、最適化の際には式(2.24)のような初期姿勢の可操作度を最大化することにより多様な作業環境に合わせる関節数，リンク長，軌道の最適化が図れるものと考えられる．

$$w = \sqrt{\det J(\theta) \cdot J^T(\theta)} \quad (2.23)$$

$$w_1 = \sqrt{\det J(\theta_{j,1}) \cdot J^T(\theta_{j,1})} \quad (2.24)$$

$$\text{Where } \theta_{j,1} = [\theta_{1,1}, \theta_{2,1}, \dots, \theta_{m,1}]^T$$

2.4 遺伝的アルゴリズム(GA)の適用

ここでは本研究の最適化手法である遺伝的アルゴリズムの原理を述べたあとモデル化した最適問題を実際に適用する方法について検討する．

2.4.1 遺伝的アルゴリズムの原理

自然では A (アデニン)，T (チミン)，G (グアニン)，C (シトシン) という 4 種類の塩基で個体の情報を表すが，一般的に GA では個体の情報は 0, 1 のデータとして表し，デジタルの形で蓄えられる．このようなデータが蓄えられた場所を遺伝的座 (Locos)，遺伝子座に蓄えらことができるデータを対立遺伝子 (Allele) という．また対立遺伝子を複数並べた列を染色体 (Chromosome) という．GA では染色体に情報を入れるために文字列 (String) として直して表す．その方法では 2 つの方法がよく使われる．

I) バイナリーコーディング (Binary coding) [40]

実数値 x と染色体 $[s_1, s_2, \dots, s_l]$ には次の関係がある．

$$x = x_s + \frac{x_e - x_s}{2^l - 1} \sum_{i=1}^l s_i 2^{l-i} \quad s_i \in \{0,1\} \quad (2.24)$$

ここで， l は遺伝子座の数， $[x_s, x_e]$ はコーディングの範囲である． $[s_1, s_2, \dots, s_l]$ のような遺伝子の構成やその配列を遺伝子型 (Genotype) 実数値 x のような染色体の情報に基づいて個体の特性として表現されるものを表現型 (Phenotype) という．例えば，すべての染色体が 0 の場合は最小値 x_s となって，すべての染色体が 1 人やつとは最大値 x_e になる．結局，式(2.24)のバイナリーコーディングは 2 進数表記を 10 進数表記に変換し，コーディング範囲の中で修正したものと同一である．しかし，バイナリーコーディングにはハミングの壁 (Hamming cliff) と呼ばれる問題がある．つまり，単位が変わるところで全く異なる形態の染色体

2.4 遺伝的アルゴリズム(GA)の適用

コードが作られて不連続性が生じることである．一般的にこのような不連続性は最適化を行なう時に問題が発生すると考えられる．近接した染色体コードで不連続性を防止するために考案されたのが次のグレイコーディングである．

Ⅱ) グレイコーディング (Gray coding)

バイナリーコーディングではハミングの壁と言われる問題を持っているため、それを解消するためにグレイコーディングという手法が使われる．これは、表現型の隣り合わせの数字が遺伝子型でも隣り合わせるようにバイナリーコーディングを修正したのである．

グレイコーディングの実数値 x と染色体 $[s_1, s_2, \dots, s_l]$ の関係は以下の式(2.25)のようになる．

$$x = x_s + \frac{x_e - x_s}{2^l - 1} \sum_{i=1}^l (\oplus_{j=1}^i s_j) 2^{l-i} \quad s_i \in \{0,1\} \quad (2.25)$$

ここで、式()の中で $\oplus_{j=1}^i s_j$ は s_1 から s_i までのデータを加えた値を2で分けた時の残りを示す．この演算子によってハミングの壁がなくなる．

2.4.2 交叉, 突然変異, 選択

GA では交叉 (Crossover), 突然変異 (Mutation) と呼ばれる操作を行って次の世代が作成され、交叉、突然変異の概念は図 2.10 で示している．交叉は複数の親子体を用いて行われ、各親子体が持っている対立遺伝子を交叉率 P_c で他の親と交換する．交叉の方法としては一点交、他点交などの方法が提案されている[41]～[43]．

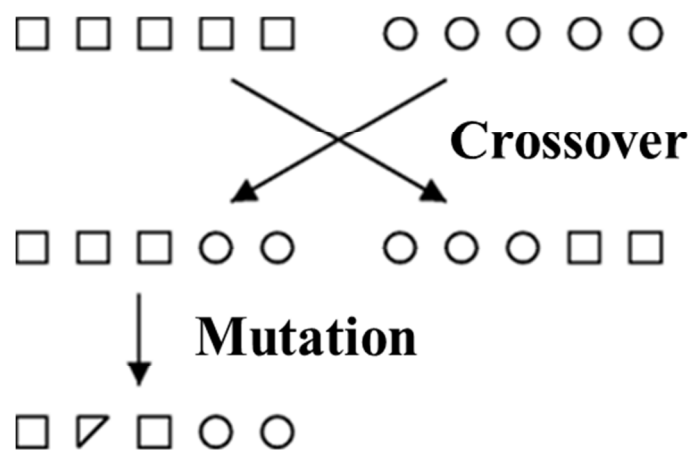


図 2.10 交叉 (Crossover) , 突然変異 (Mutation) の概念

第 2 章

自然界では、親世代で次の世代に染色体がコピーされるミスが時々発生する。これ現象を突然変異という。このようなミスを起こす確率を突然変異率 P_m という。

GA では交を主要な遺伝子オペレータ、突然変異を補助的な遺伝子オペレータとして使用する。その理由は、最適化を行う過程で突然変異がない場合は、すべての親世代の染色体が同じ染色体に収束する結果交叉の意味がなくなる。このような問題を解消するため、突然変異という概念を GA では必要とする。

最適の個体を探すためには、次の世代を生成後、選択という操作が行われ、環境に適合した個体が次の世代に残され、次の世代の親個体になる。このような選択は 1 章で前述したダーウィンの適者生存の原理に立脚して行われる。選択の方法ではルーレット選択、確率的リメインダー選択、ランキング選択など、様々な方法があるが [44] ~ [46]、ここではルーレット選択について扱う。

ルーレット選択とは現在の個体群から優秀な個体を選択する方法としてルーレットを利用する。ルーレットは図 2.11 のように環境への適合度を計算した選択確率によって選択されている。

つまり適合度が高い個体が生き残り、次の世代へ遺伝子を残す。 [47]

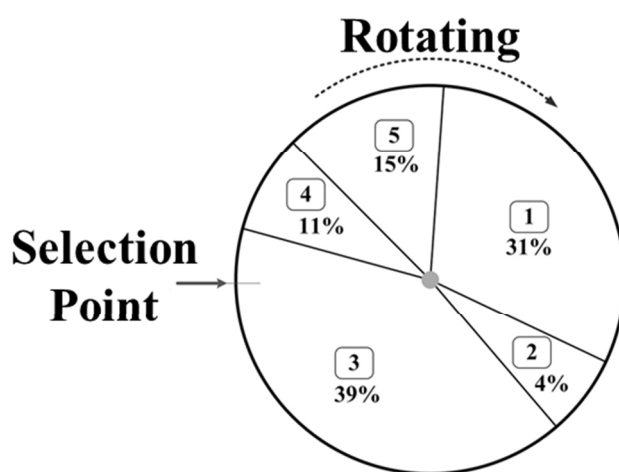


図 2.11 ルーレット選択のイメージ

2.4.3 適用手順

Step 1) 遺伝子型決定

提案したモデルに GA を適用するため、まず各設計変数は図 2.12 のようにグレーコーディングを用いて染色体として変換される。その時染色体には各リ

2.4 遺伝的アルゴリズム(GA)の適用

リンク長，関節角度，中間目標点の情報が含まれている．中間目標点は最適化問題によって省略する．（3章の最適化問題）



図 2.12 実際のコーディングの例

Step 2) 初期遺伝子の個体群決定

Step 1)で決定された遺伝子型で要素違う様々な個体を発生させる．個体の数は問題の難易度や性質に依存するが，一般的に数十個以上発生せる．少なすぎるとデータの並列的処理を特徴とする遺伝子アルゴリズムの長所が発揮されていない．逆に多すぎると一世代のあたり演算量が増えるために無駄な計算量が多くなる．

Step 3) 各個体の適応度評価

遺伝子アルゴリズムでは適応度が非常に重要な概念となる．ここでは，各個体の適応度を事前に決定した方法で演算する．集団中に事前に決めた基準を満足する個体の有無をチェックして個体があれば終了する．そうでない場合は次の段階に行く．

Step 4) 選択

Step 3)で決定した適応度に基づいて次の段階で交叉を行う個体の生存の分布を決定する．

Step 5) 交叉

二つの染色体の間で遺伝子を交叉率により新しい個体を発生させる．

Step 6) 突然変異

遺伝子のどの部分の値を強制的に変え，遺伝子集団としての多様性を大きくする．このようにすることで，より良い解を持つ個体の発生を期待すること

第 2 章

である．もちろん，この突然変異率を大きくすると悪い方向に向かう変異の確率も大きくなり，解を求めることがなかなか難しくなる．

Step 7) 繰り返し

Step 3)に戻り，各個体の適応度を評価する．

第 3 章

固定軌道条件で多関節ロボットアームの最適な関節数とリンク長

3.1 概 要

多関節剛体ロボットロボットアームの最適な関節数やリンク長を初期設計の段階で設計することはかなり難しいことである．その理由は，関節数やリンク長は軌道（関節角度）に緊密関係があり，関節角度を計算するためには非線形の連立方程式を解かなければいけないことや作業内容，作業空間，制御方法など多くの要因と関係があるためである [48] ～ [50]．したがって，本章では，まず予備的な研究として単純化のため

I) ロボットアームは平面上で運動する．

II) 冗長自由度による消費エネルギーの減少に着目し，評価関数は消費エネルギーのみとする．

III) 既定の軌道を与えた時の最適な関節やリンク長を求める．

と仮定し，最適化による関節数，リンク長，軌道の関係を分析する．

この仮定と同じく軌道を与えてロボットアームの最適リンク長を求めた従来の研究もあるが，ここでは，軌道による最適な関節数とリンク長の傾向を把握するために三つの典型的な軌道をロボットアームに与え，各軌道による最適化結果を考察する．

つまり，本章では多ロボットアームの最適な関節数やリンク長を求めるために軌道を固定して問題の単純化を行う．その単純化で本研究の方向性や傾向を運動特性や効果量の分析により把握し，次章の研究内容の方向性を定めること

第3章

が本章の目的である。

最適化を行うための設計変数選択，軌道計画などロボットアームの解析方法については2章で論議された方法に基づく．詳細についてはまた各節で述べる．

章末では，得られた結果の有効性などを各種の観点から示す．

3.2 ロボットアームのモデル化

ここでは，二次元平面上を運動するロボットアームを対象として最適化を行うため，そのロボットアームのモデル化について具体的に説明する．まず 座標変換行列を作成して逆運動による関節角度を求める方法を提示し，つぎは，運動方程式を定式化して関節トルクを計算する動力学解析を行う．つまり，2章で論議したモデル化方法の適用を提示する．

3.2.1 座標変換行列による逆運動学解析

Denavit-Hartenberg の記法による平面 n 関節ロボットアームのリンクパラメータは表 3.1 のように表される．

表 3.1 平面 n 関節ロボットアームのリンクパラメータ

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	l_1	0	θ_2
3	0	l_2	0	θ_3
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
n	0	l_n	0	θ_n

式(2.1)により座標変換行列が式(3.1)ように得ることができ，全体座標変換 0T_n は式(3.2)のように計算できる．

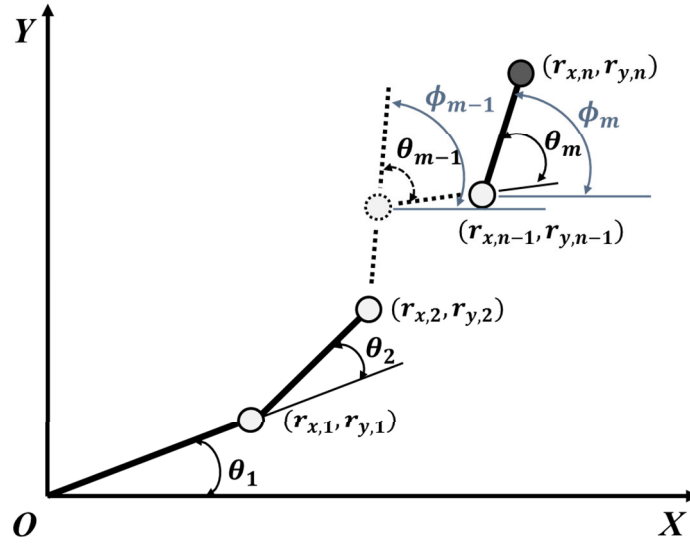


図 3.1 関節角計算例の概念

$$\begin{aligned}
 {}^0T_1 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^1T_2 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & l_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \dots & {}^{n-1}T_n &= \begin{bmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n & 0 & l_{n-1} \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

$${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{n-1}T_n \quad (3.2)$$

式(3.2)の代数学的な解法により各関節角度を求めることができるが、関節数が3関節以上になると冗長自由度発生するため、本研究では以下のような方法で関節角度を計算する。

まず、2次元平面の多関節剛体ロボットアームを図3.1のように表してみると関節角 θ_i ($i = 1, n$) と ϕ_n ($n \geq r$) の中には式(3.3)のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_{n-1} + \theta_n &= \phi_n \\
 \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_{n-1} &= \phi_{n-1} \\
 &\vdots \\
 \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_r &= \phi_r
 \end{aligned} \quad (3.3)$$

ここで $r = 3$ となる。 $n \geq 3$ の場合の関節角度については最適化問題と関係が

第3章

あるため 3.3 節で詳しく説明する．その時の関節角度 θ_1, θ_2 は逆運動学を用いて 式(3.4a), (3.4b)のように 計算する．

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{r_{y,2}}{r_{x,2}}\right) - \arctan\left(\frac{k_2}{k_1}\right) \quad (3.4a)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2}\right) \quad (3.4b)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{r_{x,2}^2 + r_{y,2}^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}$$

$$\sin\theta_2 = \pm\sqrt{1 - \cos\theta_2}$$

ここで, $r_{x,2}, r_{y,2}$ は2番目リンクの手先の座標であり, k_1, k_2 以下のようになる．

$$k_1 = l_1 + l_2\cos\theta_2, \quad k_2 = l_2\sin\theta_2 \quad (3.5)$$

また $r_{x,2}, r_{y,2}$ は2番目リンクの手先の座標である．

3.2.2 運動方程式

本章では図 3.2 のように多関節ロボットアームを2次元平面内で運動する剛体アームとして扱う．各リンクの質量 M_i , 剛体挙動する各関節部の質量 m_i が X, Y 平面で回転運動し, 重力の影響, 減衰エネルギー, 位置エネルギーは解析の簡略のために考慮しないと仮定する．ここで, θ_i は各関節角度, l_i は各リンク長, A_i は各リンクの断面積, ξ_i は各リンク上の任意の座標点である．($i = 1, 2, \dots, n$) この際, 全体の運動エネルギー T は式(3.6)のようになる．ここで, ρ は密度, $v_{\xi i}$ はリンク上の任意の座標点の速度, v_{mi} は関節部 m_i の速度である．

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^n T_{Mi} + \sum_{i=1}^n T_{mi} \\ &= \sum_{i=1}^n \int_0^{l_i} v_{\xi i}^2 \rho A_i d\xi_i + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (m_i l_i^2) \dot{\theta}_i^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

ラグランジュ方程式に代入すると式(3.7)のようになる．ここで τ_i は関節トルクである．ここで, U はポテンシャルエネルギーの総和, τ_i はトルクである．式(3.7)は式(3.8)のように簡略化した運動方程式となる．

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_i} + \frac{\partial U}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.7)$$

3.3 冗長自由度を有するロボットアームの最適設計方法

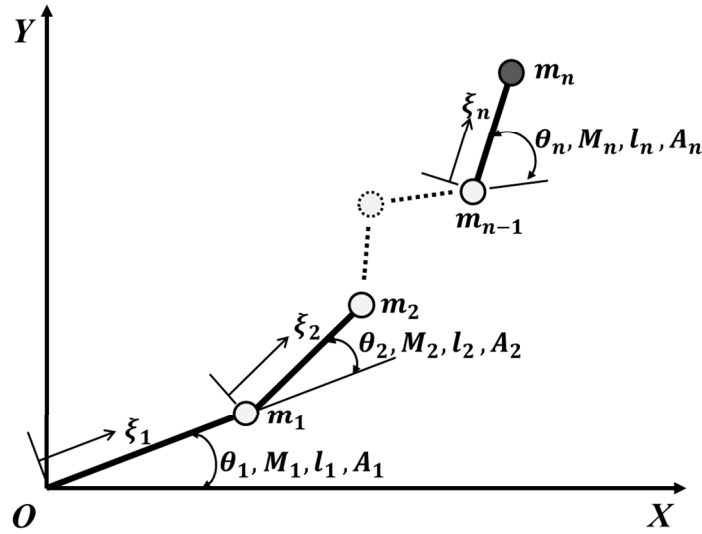


図 3.2 平面剛体ロボットアームのモデル

$$J(\theta)\ddot{\theta}_i + C(\theta, \dot{\theta}) = \tau_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$[J] \cdot \{\ddot{\theta}_i\} + [C] = \{\tau_i\} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.8)$$

ここで、 $J(\theta)$ は慣性行列、 $C(\theta, \dot{\theta})$ はコリオリ力と遠心力である。

3.3 冗長自由度を有するロボットアームの最適設計方法

3.3.1 関節角度の設計変数表現

3.2.1 節で述べたように平面運動ではロボットアームの関節数が 3 以上になると冗長自由度が発生し、逆運動学を用いた関節角を求めるためには超越関数となった非線形の連立方程式を解かないとならないので、かなりの時間や計算が必要となる。そのため、3 関節以上の関節角 ϕ_m ($m \geq 3$) を設計変数として扱い、 θ_1, θ_2 は逆運動学を用いた式(3.4a), (3.4b) により計算し、 θ_m ($m \geq 3$) については式(3.3)の関係を用いてロボットアームの姿勢を表す関節ベクトル $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T$ を求める。その概念を図 3.3 で表す。

第 3 章

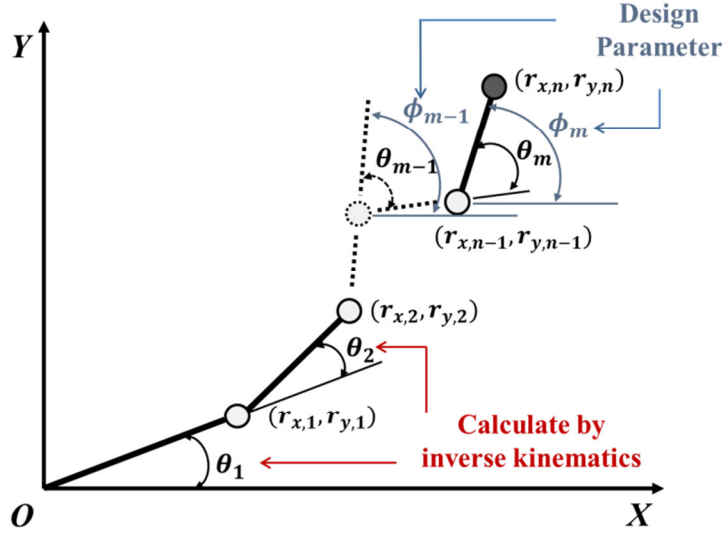


図 3.3 関節角計算例の概念

3.3.2 設計変数を含めた軌道計画

本章では，直線運動，曲線運動，数回の方向転換運動を意図した軌道を与えるため図 3.4 のように始点と終点を含める 5 つの中間点 $\mathbf{P} = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5]$ を決める．そのあと式(3.8)のような各中間点に当たる各関節角

$$\begin{aligned} \Theta_i &= \begin{bmatrix} \Theta_{1,P1} & \Theta_{1,P2} & \Theta_{1,P3} & \Theta_{1,P4} & \Theta_{1,P5} \\ \Theta_{2,P1} & \Theta_{2,P2} & \Theta_{2,P3} & \Theta_{2,P4} & \Theta_{2,P5} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Theta_{m,P1} & \Theta_{m,P2} & \Theta_{m,P3} & \Theta_{m,P4} & \Theta_{m,P5} \end{bmatrix} \\ &= [\Theta_{j,P1} \ \Theta_{j,P2} \ \Theta_{j,P3} \ \Theta_{j,P4} \ \Theta_{j,P5}] \quad (j = 1, m) \end{aligned} \quad (3.9)$$

を 3 次 Spline 補間を用いて時間の関数として各関節の軌道を求める．

また目標点 \mathbf{P} は軌道による多関節ロボットアームの関節数や動きの特性を把握するため図 3.5 のように始点と終点が同一な三つ典型的な軌道を与える．Case 1 は平面上で直線運動を，Case 2 は Y 軸の方向の方向転換のない滑らかな曲線運動を，Case 3 は Y 軸の方向が数回方向を転換する運動を想定した軌道である．

このような典型的な軌道として中間点を与えた理由は，始点と終点が同一な場合軌道の複雑さにロボットアームの関節数やリンク長はどう変化するか確認するためである．

3.3 冗長自由度を有するロボットアームの最適設計方法

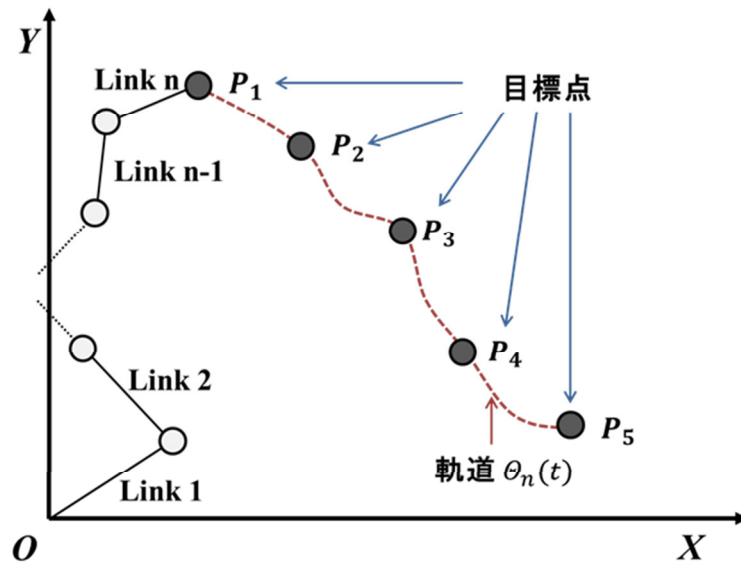


図 3.4 軌道計画の概念図

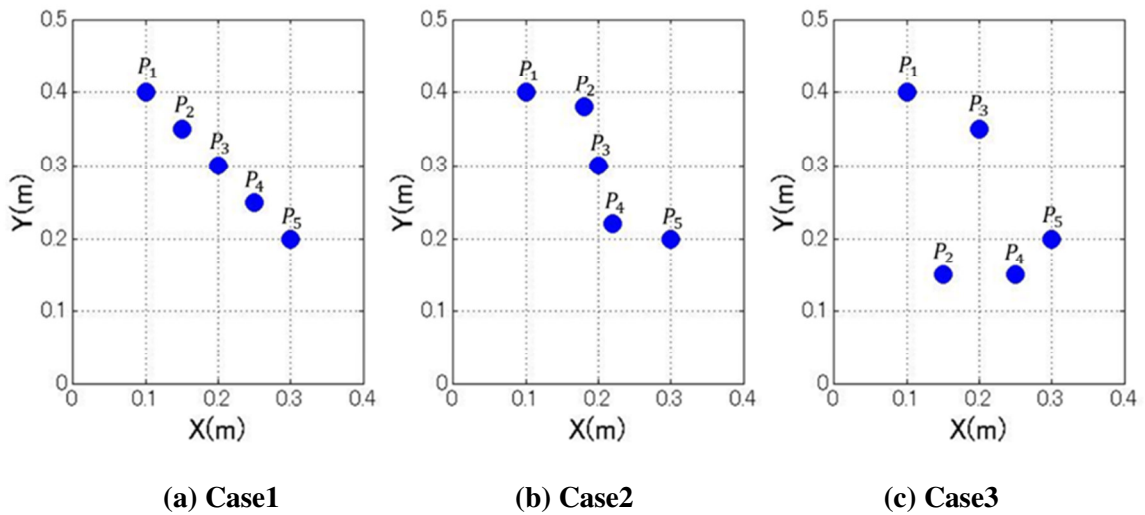


図 3.5 計画した軌道の目標点

3.3.3 最適化問題の定式化

各関節数, リンク長と軌道を最適化するため最適設計問題を表 3.2 のように定式化する.

設計変数は関節数 n , 各リンク長 l_i , 3 関節以上の場合は $\phi_3, \phi_4, \dots, \phi_m$ ($m \geq 3$) が加わる. ここで ϕ_m は式(3.10)のようになる.

第3章

表 3.2 最適化問題の定式化

Design variable (設計変数)	<ul style="list-style-type: none"> • n • $l_1, l_2, l_3 \cdots l_n$ • $\phi_m, \phi_{m-1}, \phi_{m-2}, \cdots \phi_3$ (3 関節以上の場合のみ)
Objective function to be minimized (最小化する目的関数)	<ul style="list-style-type: none"> • Driving energy: $f = E = \sum_{j=1}^m E_i = \sum_{j=1}^m \left(\int \tau_j \cdot d\Theta_j(t) \right)$ ⇒ Min
Constraints (制約条件)	<ul style="list-style-type: none"> • $n \leq n_f$ • $l_1, l_2, l_3 \cdots l_n > 0$ • $l_1 + l_2 + l_3 + \cdots + l_n = l_{Constant}$ • $l_1 + l_2 + \cdots + l_{n-1} \geq d_{n,p}$

$$\begin{aligned}
 \phi_i &= \begin{bmatrix} \phi_{1,P1} & \phi_{1,P2} & \phi_{1,P3} & \phi_{1,P4} & \phi_{1,P5} \\ \phi_{2,P1} & \phi_{2,P2} & \phi_{2,P3} & \phi_{2,P4} & \phi_{2,P5} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{m,P1} & \phi_{m,P2} & \phi_{m,P3} & \phi_{m,P4} & \phi_{m,P5} \end{bmatrix} \\
 &= [\phi_{j,P1} \ \phi_{j,P2} \ \phi_{j,P3} \ \phi_{j,P4} \ \phi_{j,P5}] \quad (j = 1, m)
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

目的関数 f は冗長自由度の利点である消費エネルギー減少に注目し，消費エネルギーを目的関数として設定し，最小化を行う．その際，消費エネルギー E は，ここではロボットアームが始点から終点まで動く時の各リンクの運動エネルギーを加算した値と考え，式(3.11)のように表すことができる．

$$\begin{aligned}
 \tau_i &= [J] \cdot \{\ddot{\Theta}_j\} + [C] \quad (j = 1, m) \\
 E &= \sum_{j=1}^m E_j = \sum_{j=1}^m \left(\int \tau_j \cdot d\Theta_j(t) \right)
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

また制約条件は各リンク長が正となり，リンク長の変化によりコストの増減を防ぐためにリンク長の総和が一定の条件とする．しかし，関節数の変化による目的関数への影響も考慮して関節部（アクチュエータ）の質量は制限しない

3.3 冗長自由度を有するロボットアームの最適設計方法

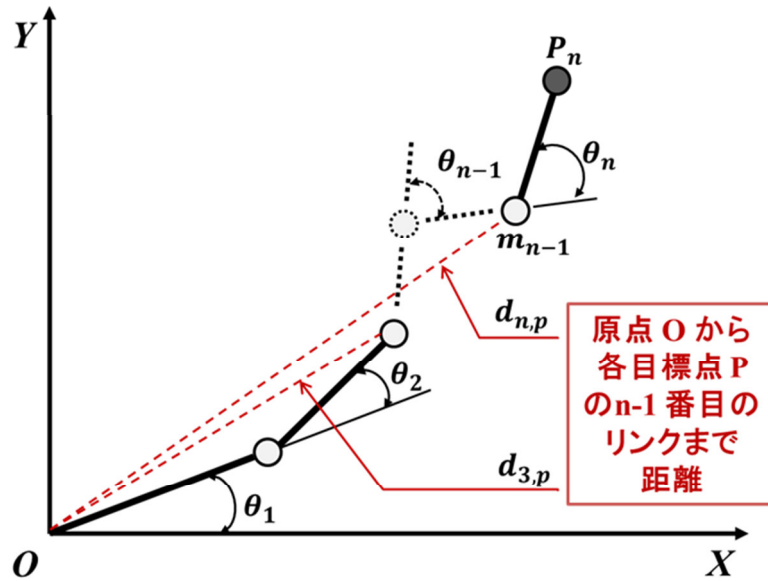


図 3.6 制約条件 $d_{n,p}$ の説明図

条件の中で各リンク長や関節数の変化を確認する． $d_{n,p}$ は図 3.6 で示したように原点 O から与えた各目標点 P の $n-1$ 番目のリンクまでの距離を表す．ロボットアームが 3 関節以上の場合には冗長自由度により逆運動学を用いて角度を求めるため， $n-2$ 個の未知数が生じる．

そのため 3 関節以上の場合には各 P 当たり $n-2$ 個の角度が設計変数になる．またその際， $n-2$ 個の $d_{n,p}$ 制約条件が必要となる．たとえば，5 関節の場合冗長自由度は 3 となり，その際の設計変数の数は l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 の 5 個， ϕ_n の 15 個の総 20 個となり，制約条件は $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 < 0$ の 5 個， $l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = l_{con}$ の 1 個， $d_{n,p}$ の 15 個で総 21 個となる．

3.3.4 最適化手順

図 3.7 本研究の最適化手順を示す．その概略は以下のようになる．

- 1) 関節数，リンク長，軌道の初期値を設定する．
- 2) 初期値が決まった後は，逆運動学を用いて各目標点の角度 θ_j を求める．
- 3) 求めた各目標点の角度を Spline 補間して各リンクにおける角度 $\theta_j(t)$ を求める．
- 4) 動力学解析を行い，目的関数を計算し，消費エネルギーの最小化するため GA による最適化を行う．もし，エネルギーが最小値になると関節数 n は $n = n + 1$ として 1) に戻り，そうではない場合は設計変数を変えて 1) に戻る．

第3章

- 5) n が 3 の場合は設計変数として ϕ_m を加える.
- 6) n が n_f になるとループを終了する.
- 7) 関節数 $1 \sim n_f$ の中から目的関数を最小にする n を選ぶ.

3.3 冗長自由度を有するロボットアームの最適設計方法

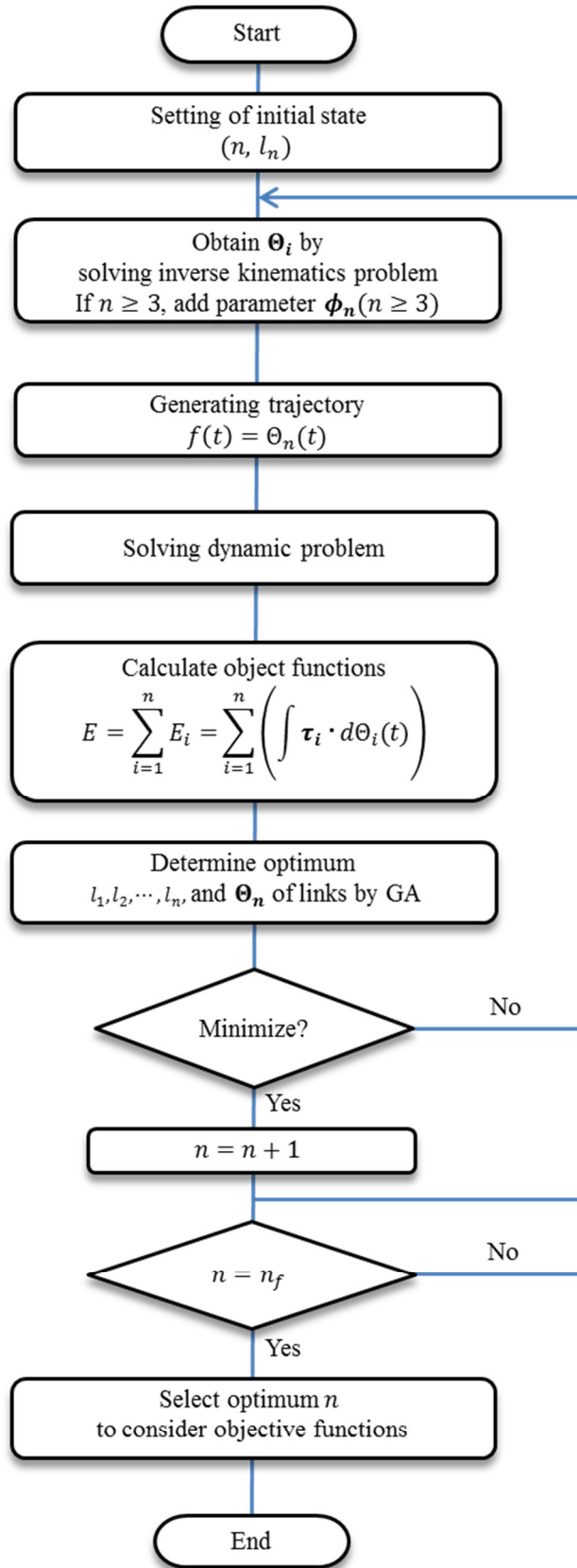


図 3.7 最適化手順

3.4 最適化設計結果

想定した軌道に対し最適な関節数やリンク長を求めるため、GA を基づいた市販最適化ソフトウェア(modeFrontier)を利用して水平面上の 2 関節から 5 関節までのロボットアームにおける最適化を行った。その際、生成した世代数は 1000 世代で交叉、選択、突然変異の適用率がそれぞれ 0.5, 0.05, 0.1 であり、各初期値は卓上用のロボットアームを想定して $n = 2$, $l_1 = 0.25[m]$, $l_2 = 0.25[m]$, $A = 12 \times 10^{-5}[m^2]$, $\rho = 2700[\text{kg}/m^3]$ とする。また体積と密度から各リンクの質量 $M_i (i = 1, 2, \dots, n)$ の計算ができ、各関節部の質量 $m_i (i = 1, 2, \dots, n)$ は $0.29 [\text{kg}]$ の一定な値である。

その結果、図 3.8 ように世代が経過することにより、目的関数は収束し、最適解が求められる。その詳細の内容を各 Case 別に示し、最後に角度、角速度、関節トルクの変化を図 3.12, 3.13, 3.14 で示す。

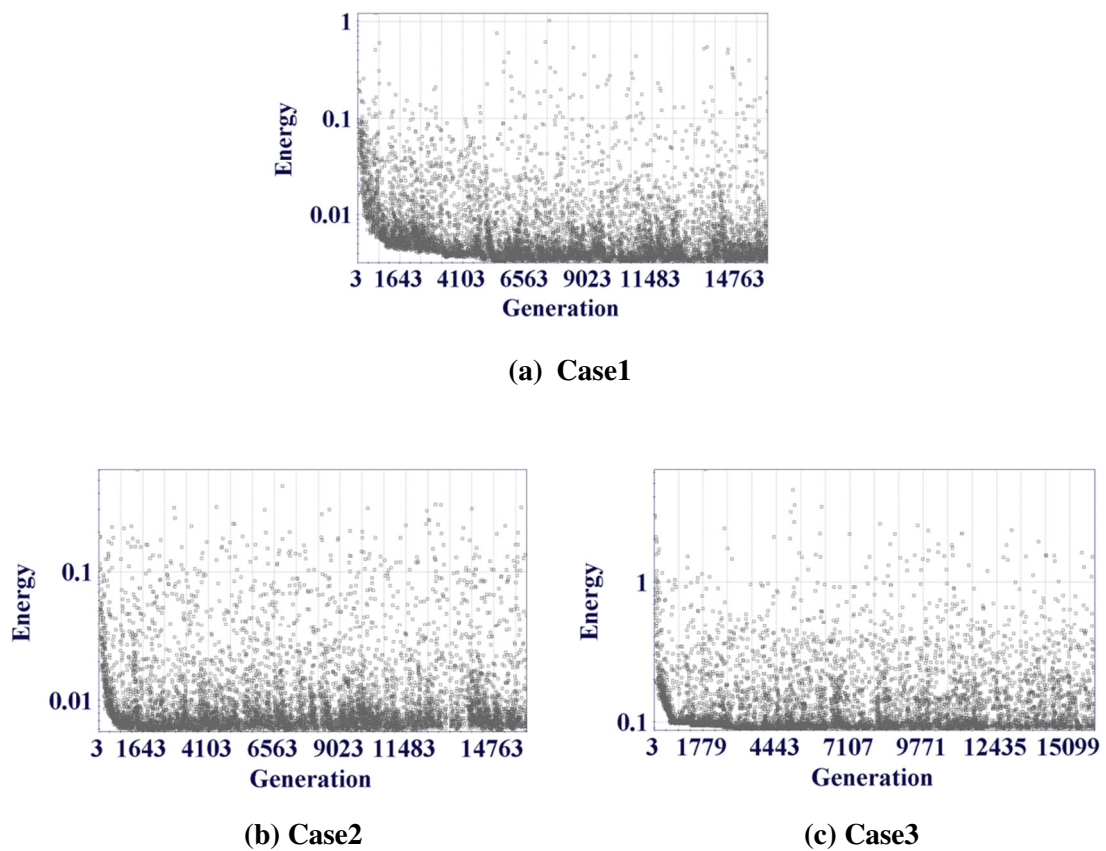


図 3.8 各最適化結果

3.4.1 Case 1 の結果

Case 1 の最適化結果，図 3.9 のように最適関節数は初期値 $n = 2$ から最適化 $n = 3$ の 3 関節となった．リンク長 l_1, l_2, l_3 がそれぞれ 0.21, 0.24, 0.05 [m] となっており，消費エネルギーは $2.97 [\times 10^{-3}J]$ から $2.63 [\times 10^{-3}J]$ になって約 11 [%] 減少した．また各関節数に対する最適化結果を表 3.3 で示す．

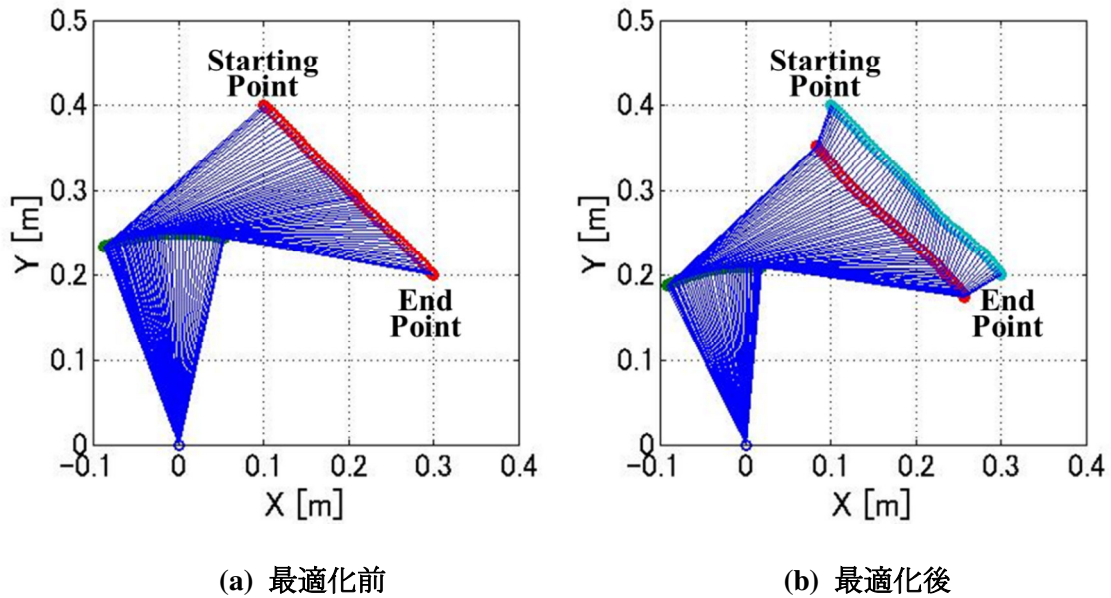


図 3.9 Case1 の軌道

表 3.3 Case1 の最適化結果

設計	Initial	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
$l_1 (m)$	0.25	0.2	0.21	0.19	0.17
$l_2 (m)$	0.25	0.3	0.24	0.11	0.1
$l_3 (m)$	-	-	0.05	0.15	0.08
$l_4 (m)$	-	-	-	0.05	0.1
$l_5 (m)$	-	-	-	-	0.05
Driving Energy [$\times 10^{-3}J$]	2.97	2.86	2.63	2.98	4.03
Rate of change [%]		-3.8	-11.5	0.3	35.8

第3章

3.4.2 Case 2 の結果

Case 2 の最適化結果, 図 3.10 のように最適関節数は初期値 $n = 2$ から最適化 $n = 4$ の 4 関節となった. リンク長 l_1, l_2, l_3, l_4 がそれぞれ 0.12, 0.15, 0.06, 0.12 [m] となっており, 消費エネルギーは $7.01 [\times 10^{-3}J]$ から $5.44 [\times 10^{-3}J]$ になって約 22 [%] 減少した. また各関節数に対する最適化結果を表 3.4 で示す.

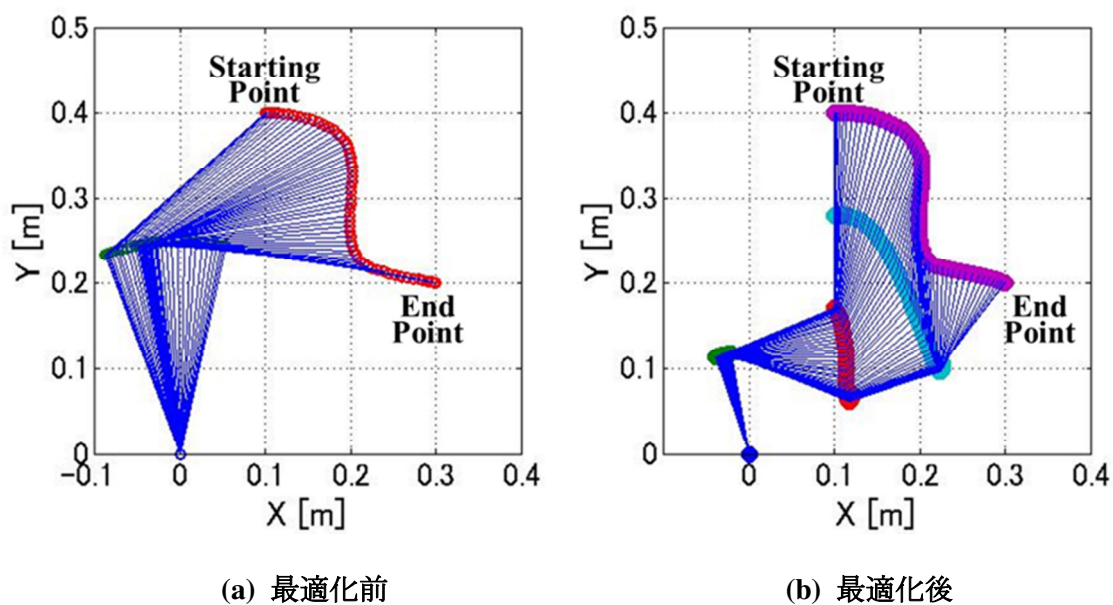


図 3.10 Case2 の軌道

表 3.4 Case2 の最適化結果

設計	Initial	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
$l_1 (m)$	0.25	0.29	0.23	0.12	0.18
$l_2(m)$	0.25	0.21	0.22	0.15	0.17
$l_3(m)$	-	-	0.05	0.11	0.05
$l_4(m)$	-	-	-	0.12	0.05
$l_5(m)$	-	-	-	-	0.05
Driving Energy [$\times 10^{-3}J$]	7.01	6.95	6.57	5.44	9.98
Rate of change [%]		-0.9	-6.2	-22.4	42.4

3.4.3 Case 3 の結果

Case 3 の最適化結果は Case1,2 と違い，図 3.11 のように関節数の変化はなく， $n = 2$ の 2 関節が最適化となった．リンク長 l_1, l_2 がそれぞれ 0.28, 0.22 [m] となっており，消費エネルギーは $59.28 [\times 10^{-3}J]$ から $58.08 [\times 10^{-3}J]$ になって約 2 [%] 減少した．また各関節数に対する最適化結果を表 3.5 で示す．

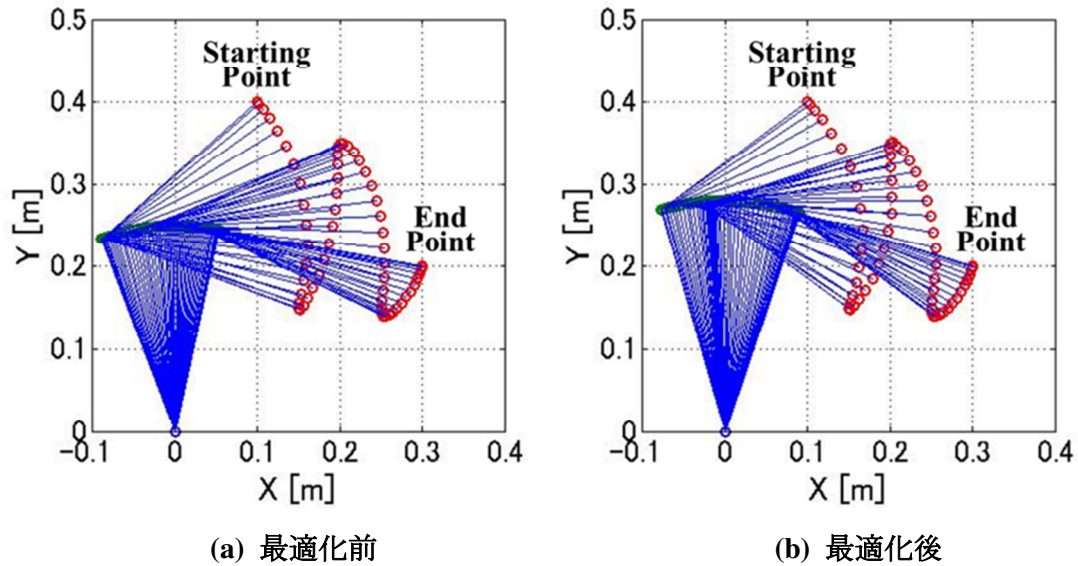


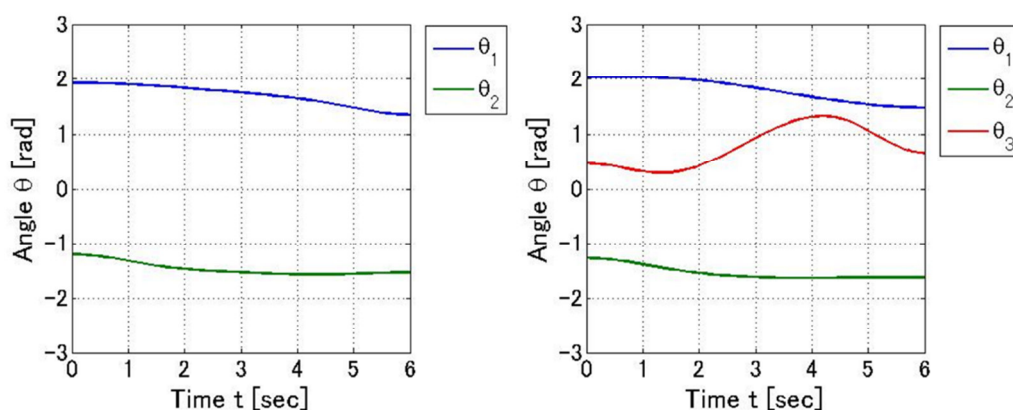
図 3.11 Case3 の軌道

表 3.5 Case2 の最適化結果

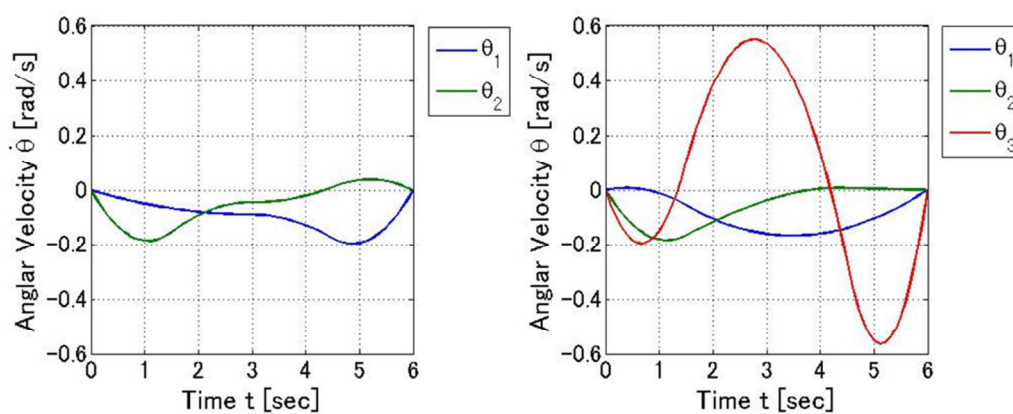
設計	Initial	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
$l_1 (m)$	0.25	0.28	0.25	0.14	0.1
$l_2 (m)$	0.25	0.22	0.11	0.07	0.11
$l_3 (m)$	-	-	0.14	0.05	0.05
$l_4 (m)$	-	-	-	0.24	0.05
$l_5 (m)$	-	-	-	-	0.19
Driving Energy [$\times 10^{-3}J$]	59.28	58.08	73.42	79.04	83.15
Rate of change [%]		-2.0	23.9	33.3	40.3

第3章

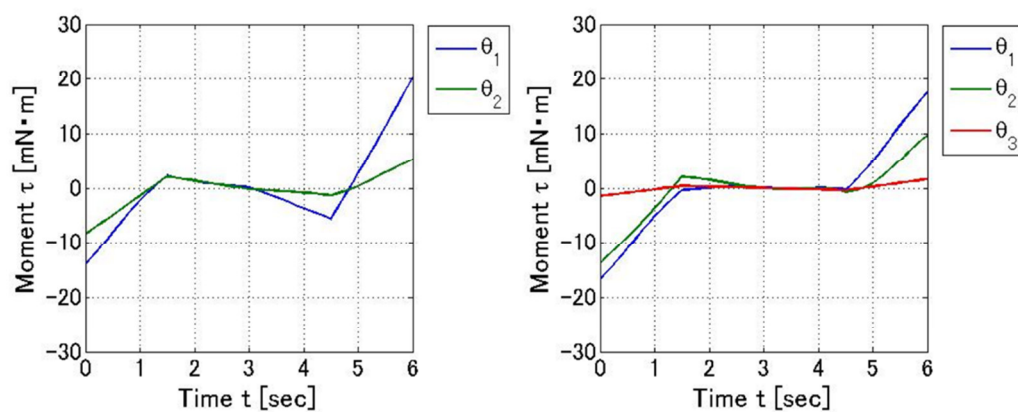
3.4.4 各 Case の角度, 角速度, 関節トルク



(a) 角度変化



(b) 角速度変化



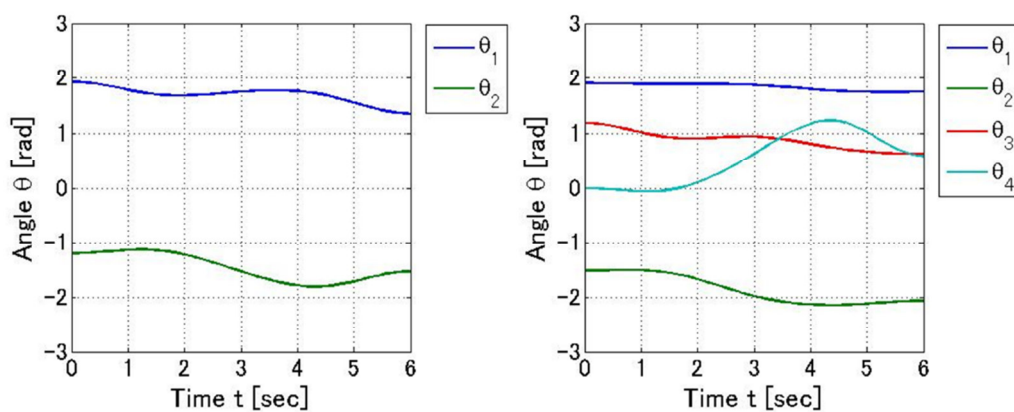
(c) 関節トルク変化

最適化前

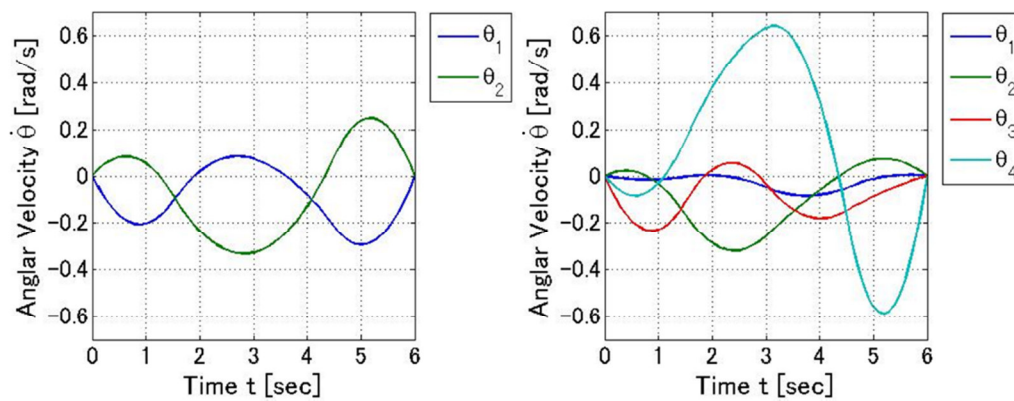
最適化後

図 3.12 Case1 の角度, 角速度, 関節トルクの変化

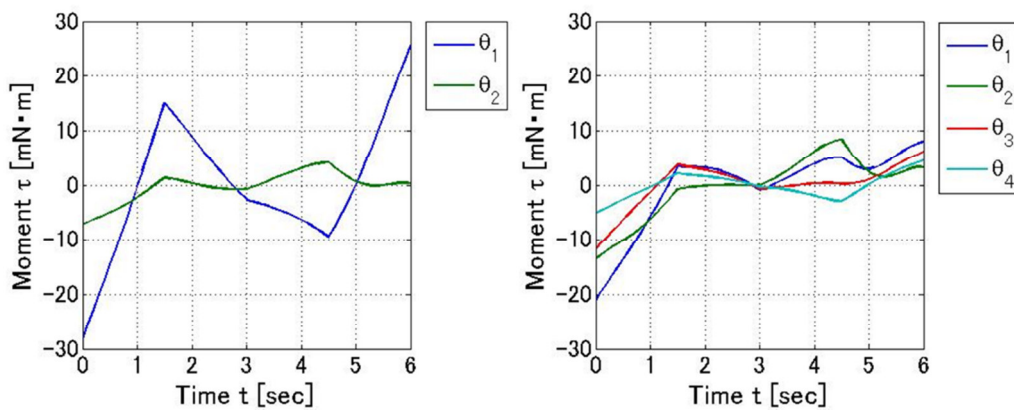
3.4 最適化設計結果



(a) 角度変化



(b) 角速度変化



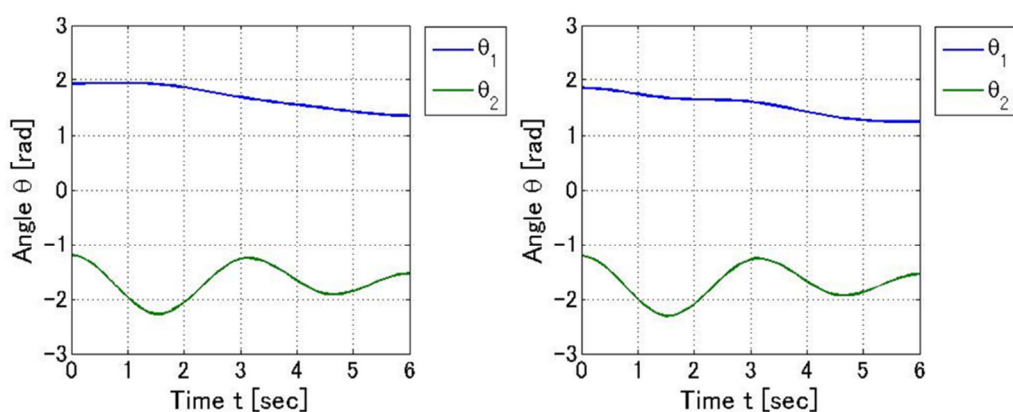
(c) 関節トルク変化

最適化前

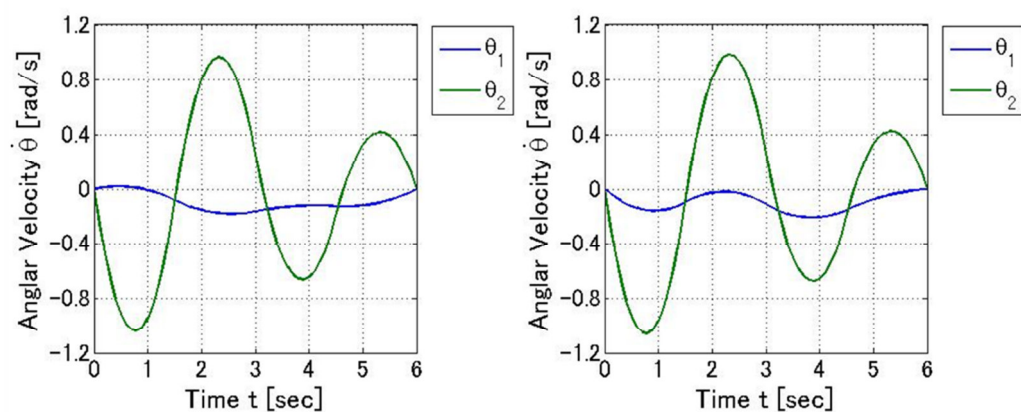
最適化後

図 3.13 Case2 の角度, 角速度, 関節トルクの変化

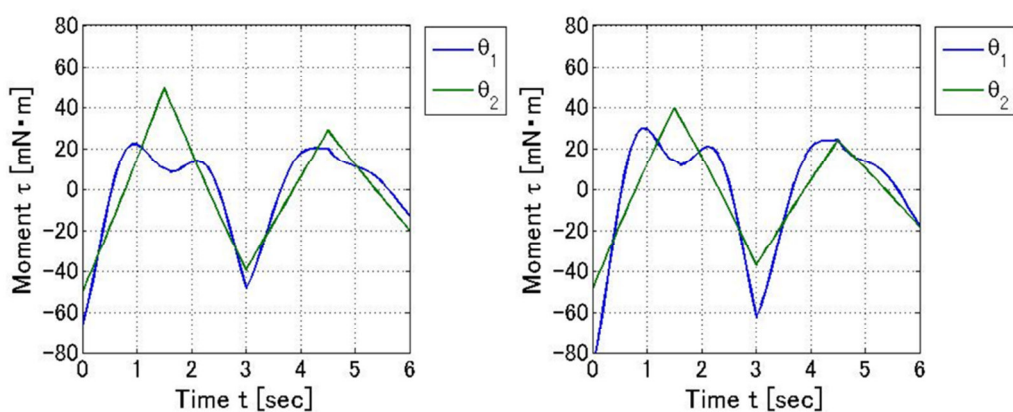
第3章



(a) 角度変化



(b) 角速度変化



(c) 関節トルク変化

最適化前

最適化後

図 3.14 Case3 の角度, 角速度, 関節トルクの変化

3.4.5 各 Case の効果量 (Effect size)

出力値と入力値の間に関連性があるかどうかを予測するために効果量と称する指標を導入する。この指標を比べることによりその系の影響力がわかる。一般的な入力変数に対する効果量 Cohen's d を式(3.12)のように定義する [51]。

$$d = \frac{|x_- - x_+|}{S_g} \quad (3.12)$$

ここで

$$S_g^2 = \frac{(n_- - 1)S_-^2 + (n_+ - 1)S_+^2}{(n_+ + n_- - 2)} \quad (3.13)$$

は一般的な分散となり、

$$S_+^2 = \frac{\sum (x_+ - M_+)^2}{(n_+ - 1)} \quad (3.14)$$

は入力変数の上領域における出力変数 x の集合体の分散、

$$S_-^2 = \frac{\sum (x_- - M_-)^2}{(n_- - 1)} \quad (3.15)$$

は入力変数の下領域における出力変数 x の集合体の分散である。

ここで、 M_+ は入力変数の上限領域における出力変数 x の平均値、 M_- は入力変数の下限領域における出力変数 x の平均値、 n_+ は入力変数の上限領域における値の数、 n_- は入力変数の下限領域における値の数である。

t 検定は式(3.16)のようになり

$$t = \frac{|M_- - M_+|}{\sqrt{\frac{S_g^2}{n_-} + \frac{S_g^2}{n_+}}} \quad (3.16)$$

効果量 d と式(3.17)の関係がある。

$$|t| = d \times \sqrt{\left(\frac{n_- \times n_+}{n_- + n_+}\right) \left(\frac{n_- + n_+ - 2}{n_- + n_+}\right)} \quad (3.17)$$

つまり、効果量が小さくても、データ数が大きくなれば t 値が大きくなるので「有意差あり」となることを示している [52]。

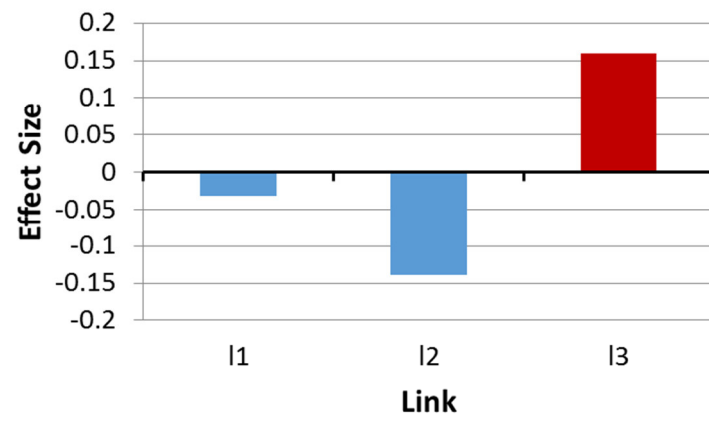
各結果の効果量 d と t 検定値を表 3.6 で示し、最も高い値は影にしてある。Case3 以外は手先リンクの効果量が高く、システムへの影響が大きいことが分かる。

第3章

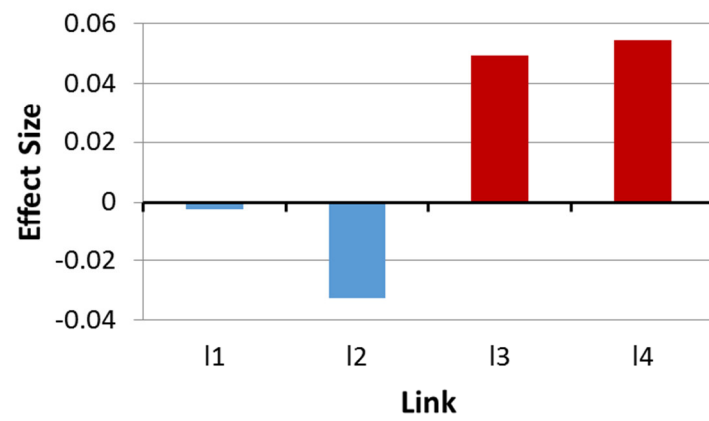
図 3.15 では有効量を棒グラフで表している．棒の高さは効果量と呼ばれ，出力値と入力値の間の関係の強さを示します．ゼロより大きい効果量は，入力変数との比例的な関係を示し，0 より小さい場合は反比例の関係を示す．

表 3.6 各 Case の効果量と t

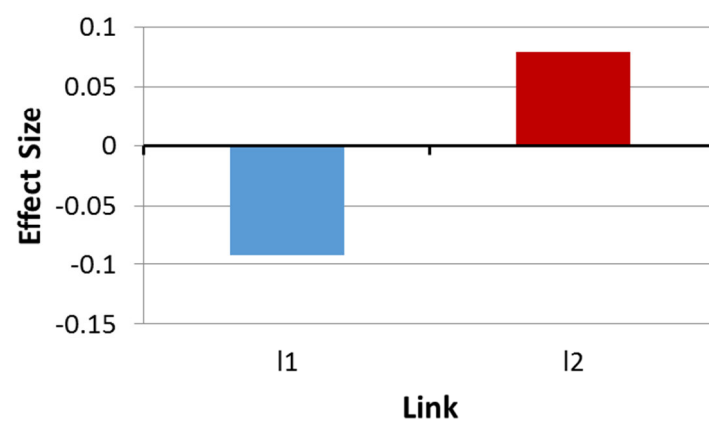
Case	Case1		Case2		Case3	
因子	効果量	t	効果量	t	効果量	t
l_1	-0.032	3.953	-0.002	4.961	-0.092	1.977
l_2	-0.139	14.913	-0.032	8.580	0.079	1.719
l_3	0.160	16.184	0.049	4.114	-	-
l_4	-	-	0.054	9.477		



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

図 3.15 各 Case の効果量の棒グラフ

3.5 本章のまとめ

本章では、ロボットアームの最適な関節数とリンク長が軌道から受ける影響を明らかにするため、まず問題の簡略化を行った。つまり、平面上を動くロボットが計画した軌道に沿って動く時の消費エネルギーを最小化する最適化問題を定式化した。ロボットアームに始点と終点が同一な三つの特徴を持つ典型的な軌道を与え、その軌道に沿って動作するロボットアームの腕を2関節から5関節までGAを用いて最適解求めた。その時3関節以上の自由度で生じる冗長自由度に関しては3関節以上の関節角度を設計変数とすることで解決した。

その結果、各三つの軌道に対して消費エネルギー減少を達成し、最適な関節数やリンク長を求めた。特にCase1とCase2のように比較的単純な軌道において関節数が増え、消費エネルギーの減少率が高く、より効果的であった。その反面Case3のように方向転換が数回あり、複雑な軌道においては関節は2関節のものが最適となり、それにリンク長の変化や消費エネルギーの減少も少ない結果となった。

各場合の角度、角速度、関節トルクの変化を観察してみると共通点が見られる。根元リンクの角度変化は大きくないが、関節トルクの変化は大きいことが分かれる。その反面、先端リンクは角度変化が大きい、関節トルクの変化は少ないことが分かれる。その理由は、根元リンクがエネルギーを多く消費するので、根元リンクが動かない分エネルギー消費が少ない先端リンクが動く方向で最適化が行われたと考えられる。

最適化結果の中Case1とCase2の角速度のグラフではある区間では角速度が急上昇するところがある。この現象については関節角度が0になる特異姿勢の影響ではないかと考えられる。両方とも関節角度が0または0に近くなる区間があり、その原因で角速度が急上昇するのではないかと考える。その理由は、まず式(2.5)を関節角や直交座標の関係で表すと式(3.18)のようになる。

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.18)$$

となり、角速度は式(3.19)のようになる。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta})\dot{\mathbf{v}} \quad (3.19)$$

つまり、角速度はヤコビアン行列の逆行列の計算が必要で、行列式の値が 0 となると逆行列が存在しなくなり、角速度が無限大に発散してしまう。この系は関節角度が 0 となると行列式の値が 0 となり、角速度が発散する。したがって角速度が急上昇の理由は特異姿勢の結果だと考える。

また、全てのケースの共通点で、手先リンクの効果量がプラス [+] で根元のリンクはマイナス [-] の値を持つことがわかる。これが意味することは手先リンクの長さが増加すると消費エネルギーも増加し、根元リンクの長さが増加すると消費は減少する。つまり、最適化は消費エネルギーを最小化するためには手先根元リンクは長く、リンクは短くなる傾向があると考えられる。

しかし、実際の最適化結果では Case1 と Case 2 の場合は根元リンクが短くなり、手先リンクは長くなった。その反面 Case 3 は逆の結果となっている。その理由については、単純に手先リンクが短くなり、根元リンクが長くなるだけでは、余計な動きでエネルギーを消費するのでその場合関節数が増え、冗長自由度により合理的な軌道ができ消費エネルギーが減少することではないかと推測する。

本章では、ロボットアームにおける、最適な関節数、リンク長と軌道との関連性を把握するためモデル簡略を行い、運動特性や効果量を基準としてその影響を確認し、有効性をしめした。

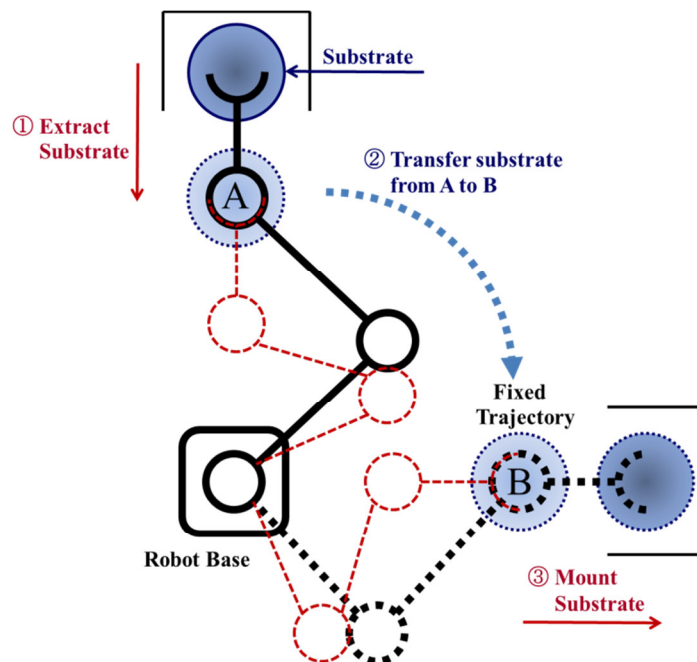


図 3.16 固定軌道のウエハー搬送ロボットアームへの適用例

第3章

この結果に基づいて多関節剛体ロボットアームの初期設計の際、軌道が設計変数に入れると、設計時間の短縮や作業の効率面で有効な関節数やリンク長を決定できるものと考えられる。本章で得られた結果は、初期設計の段階だけではなく、固定軌道下で作業を行うロボットアームに対してもリンク長を変更することで消費エネルギーの減少が期待される。例えば、図 3.16 のように A から B 間の軌道が固定となっているウエハー搬送ロボットアームに対して関節数やリンク長を最適化することでエネルギーの減少ができると考えられ、経済的な利益が発生すると思われる。

しかし、角速度の急上昇やより一般的な結論のためにはモデル化方法や目的関数の設定など更なる研究が必要と考えられる。この内容については 4 章で述べる。

第 4 章

初期設計段階における二次元平面内の多関節ロボットアームの関節数, リンク長, 軌道の同時最適化

4.1 概 要

3 章ではロボットアームの最適化における本質を把握するため, 典型的な三つの固定軌道を与えて問題を簡略化することにより, 関節数やリンク長の最適化を行い, 軌道が最適な関節数やリンク長に与える影響を検討した. さらに効果量分析により結果の傾向について議論した. またウエハー搬送ロボットの例を挙げて最適化結果の有効性を初期設計の段階や既存ロボットアームに対して確認した.

本章では, 初期設計の段階で関節数やリンク長を決定できるより汎用性を有する手法を提示する. ここで言う汎用性のある手法とは, 初期設計段階で提案手法により最適な関節部やリンク長を決定した後, 下流の設計である詳細設計の段階で障害物回避, 作業空間の考慮, 各種の制御, アクチュエータの考慮などの各種の最適化が可能となる手法である. そのために軌道そのものを設計変数に加えたモデル化を行い, 目的関数は消費エネルギーと可操作度の二つの目的を取る最適化問題を設定し, その解法を提示する. 数値計算例によって得られた結果に検討を行うために実際の多関節ロボットアームを製作して実験を行い, 数値計算の結果と比較して検討を加える. 最後に提案した手法をウエハー搬送ロボットに適用することで有効性を示す.

前章では, 準備した三つの固定軌道をロボットアームに与え, その軌道に沿う際の最適の関節数, リンク長を求めたが, 本章では, 軌道も未知として設計変数に含めた最適化を行う. また, 前章の結果では, 関節角度が 0 となり, 特

第4章

異姿勢となる結果となったが、本章ではその問題を防ぐために消費エネルギーとともに可操作度も目的関数に取り、多目的最適化を行う。

すなわち、多ロボットアームの最適な関節数、リンク長に加えて軌道も同時に最適化するための必要な二つの課題を設定する。

(Ⅰ) 始点と終点以外の中間目標点を設計変数として設定し、Spline 補間を用いて軌道を計画。

(Ⅱ) 特異点を回避し、消費エネルギーを最小化する最適化問題の定式化手法として消費エネルギーと可操作度を目的関数にとる方法を提案。

上述の最適化問題を定式化し、MOGA (Multi-Object Genetic Algorithm) [53] ~ [55] により多目的最適化を行い、Pareto 解集合のなか一つの解を選択し、検討を加える。さらに実験モデルを製作して実験による最適化の結果も検証し、提示した方法の有効性と実用面における有用性を示す。

4.2 初期設計段階における最適な関節数, リンク長, 軌道の最適化手法

軌道によって最適な関節数やリンク長が変化する前章の結果から関節数、リンク長には軌道が大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで本章では、初期設計段階で軌道の影響を考える方法として軌道も設計変数に入れる手法を考える。また前章の最適化手法では、ロボットアームが特異姿勢となる結果から大局的な目的関数として消費エネルギーだけではなく、特異姿勢の防止も重要な目的である。ここでは、冗長自由度の利点である特異点の回避と消費エネルギー減少に注目し、可操作度を目的関数として加え、二つの目的関数を持つ多目的最適化問題を定式化する。その時、リンクを駆動するアクチュエータはさまざまなタイプの駆動方式が存在し、その方式によるアクチュエータ位置の問題は最適な関節数やリンク長に密接な関係がある。本章では、ロボットアームの駆動方式はダイレクト・ドライブを採用し、アクチュエータ位置と質量は動力学解析の中に考慮する。つまりアームの運動や消費エネルギーに反映させる方法を採る。

提案手法は、障害物回避、リンク形状の最適化、ロボットアームの制御などのような後の続設計の段階における個別の設計問題にも適用できる汎用性のあ

4.2 初期設計段階における最適な関節数，リンク長，軌道の最適化手法

る設計手法の確立を目指す．

4.2.1 設計変数

(I) 関節数，リンク長

関節数を与えると系の初期のアームの形態が決定できる．ここでは前章と同様に関節数を 1 から与えられた最大値 n_f まで変化させ，各ループ内でリンク長ならびに軌道の最適化を行う．

(II) 軌道計画における設計変数の表現

二次元平面の場合，図 4.1 のようにロボットアームの関節数が 3 関節になると冗長自由度が発生し，逆運動学を用いた関節角を求めることができない．そのため本研究では，関節角 θ_j ($j = 1, m$) を式(4.1)のように表し，

$$\theta_1 + \theta_2 + \cdots + \theta_{m-1} + \theta_m = \phi_m \quad (4.1)$$

$$\theta_1 + \theta_2 + \cdots + \theta_{m-1} = \phi_{m-1}$$

⋮

$$\theta_1 + \theta_2 + \cdots + \theta_r = \phi_r$$

ϕ_m ($m \geq r$) を設計変数として扱う．二次元平面の場合は $r = 3$ となり，その時の関節角度 θ_1, θ_2 は逆運動学を用いて 式(4.2a), (4.2b)のように 計算する．

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{r_{y,2}}{r_{x,2}}\right) - \arctan\left(\frac{k_2}{k_1}\right) \quad (4.2a)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2}\right) \quad (4.2b)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{r_{x,2}^2 + r_{y,2}^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}$$

$$\sin\theta_2 = \pm\sqrt{1 - \cos\theta_2}$$

ここで， k_1, k_2 以下のようになる．

$$k_1 = l_1 + l_2\cos\theta_2, \quad k_2 = l_2\sin\theta_2 \quad (4.3)$$

また $r_{x,2}, r_{y,2}$ は 2 番目リンクの手先の座標である． $r_{x,2}, r_{y,2}$ の計算は，まず n リンクの手先の座標が $r_{x,n}, r_{y,n}$ と与えられたとすると式(4.4a), (4.4b)のより $n-1$ リンクの手先の座標 $r_{x,n-1}, r_{y,n-1}$ が計算でき，この計算を繰り返すと 2 番目リンクの手先の座標 $r_{x,2}, r_{y,2}$ が求められる．

$$r_{x,n-1} = r_{x,n} - l_n\cos\phi_m \quad (4.4a)$$

$$r_{y,n-1} = r_{y,n} - l_n\sin\phi_m \quad (4.4b)$$

すなわち，ロボットアームの姿勢を表す関節ベクトル $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_m]^T$ が求められる．

第 4 章

また, 最適な軌道を求めるため図 4.2 の P_1, P_2 ような 2 つの中間目標点を与え, その座標を設計変数として扱う. ロボットアームが $\mathbf{P} = [P_s, P_1, P_2, P_g]$ を通る時, 各中間目標点に当たる各関節角 $\boldsymbol{\theta}_j = [\theta_{j,ps}, \theta_{j,p1}, \theta_{j,p2}, \theta_{j,pg}]$ ($j = 1, m$) は

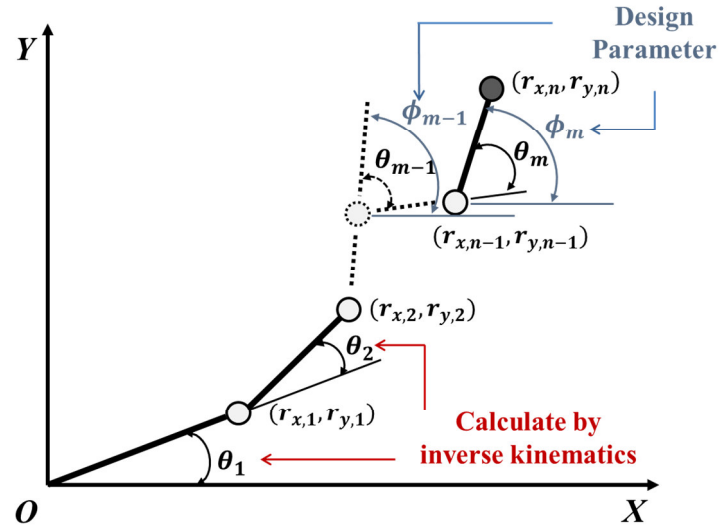


図 4.1 軌道計画における設計変数の表現

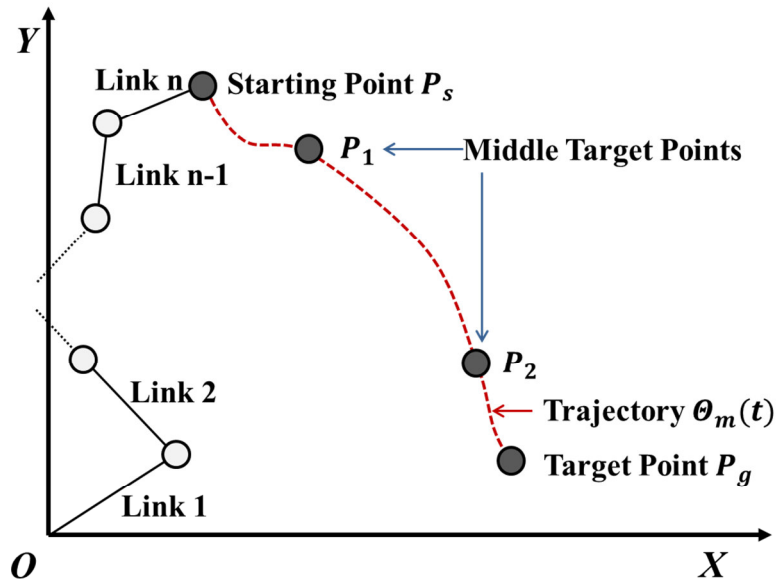


図 4.2 軌道最適化の概念

4.2 初期設計段階における最適な関節数，リンク長，軌道の最適化手法

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Theta}_j &= \begin{bmatrix} \Theta_{1,Ps} & \Theta_{1,P1} & \Theta_{1,P2} & \Theta_{1,Pg} \\ \Theta_{2,Ps} & \Theta_{2,P1} & \Theta_{2,P2} & \Theta_{2,Pg} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Theta_{m,Ps} & \Theta_{m,P1} & \Theta_{m,P2} & \Theta_{m,Pg} \end{bmatrix} \\ &= [\boldsymbol{\Theta}_{j,Ps} \ \boldsymbol{\Theta}_{j,P1} \ \boldsymbol{\Theta}_{j,P2} \ \boldsymbol{\Theta}_{j,Pg}] \quad (j = 1, m)\end{aligned}\tag{4.5}$$

となり，2章と同じように3次 Spline 補間を用いて時間の関数として各関節の軌道 $\Theta_j(t)$ ($j = 1, 2, \dots, m$) を求める．

4.2.2 目的関数設定

本研究の目的関数は初期設計段階の汎用性を考慮した大きな目的である消費エネルギーと特異姿勢の回避を考えた可操作度とし，二つの目的関数を有する多目的最適化を行う．その際，消費エネルギー E はロボットアームが始点から終点まで動く時の各リンクの運動エネルギーを加算した値で式(4.6)のように表すことができる．この式にはアームの質量や関節につけたアクチュエータの質量も考慮してある．

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\tau}_i &= [\mathbf{J}] \cdot \{\ddot{\boldsymbol{\Theta}}_i\} + [\mathbf{C}] \quad (i = 1, n) \\ E &= \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \left(\int \boldsymbol{\tau}_i \cdot d\boldsymbol{\Theta}_i(t) \right)\end{aligned}\tag{4.6}$$

また可操作度 w は，2.3.3 節の定義したように式 (4.7) で示したスカラー w であり，操作能力を運動学的な観点から定量化した一つの指標となる．

可操作度は最小値 0 と最大値 1 を持ち，最小値 0 の場合は特異点の位置にあり，最大値 1 の場合はほかの作業空間へ移動が容易ということを示す．したがって，可操作度を最大化することにより特異点の回避と多様な作業環境に合わせる関節数，リンク長，軌道の最適化が行われると考える．そのため本研究では，初期姿勢の可操作度 w_1 を目的関数として扱い，次式で表す．

$$w = \sqrt{\det \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta})}\tag{4.7}$$

$$w_1 = \sqrt{\det \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}_{j,1}) \cdot \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}_{j,1})} \quad \text{Where } \boldsymbol{\theta}_{j,1} = [\theta_{1,1}, \theta_{2,1}, \dots, \theta_{m,1}]^T\tag{4.8}$$

その逆数 $1/w_1$ を取り，最大化問題を最小化問題に変換する．

第4章

4.2.3 最適化問題の定式化

各関節数, リンク長と軌道を多目的最適化を行うため最適設計問題を表 4.1 のように定式化する.

設計変数は関節数各 n リンク長 l_i 中間目標点 P_1, P_2 であり, 3 関節以上の場合は $\phi_3, \phi_4, \dots, \phi_m$ ($m \geq 3$) が加わる. また, 消費エネルギー f_1 と可操作度の逆数をとった f_2 が目的関数となる.

制約条件は各リンク長が正となり, リンク長の変化によりコストの増減を防ぐためにリンク長の総和が一定の条件とする. しかし, 関節数の変化による目的関数への影響も考慮して関節部 (アクチュエータ) の質量は制限しない条件の中で各リンク長や関節数の変化を確認する. $d_{n,p}$ は原点 O から与えた各目標点 P の $n-1$ 番目のリンクまでの距離を表す. ロボットアームが 3 関節以上の場合は冗長自由度により逆運動学を用いて角度を求めるため, $n-2$ 個の未知数が生じる. そのため 3 関節以上の場合は 1 つの P 当たり $n-2$ 個の角度が設計変数

表 4.1 多目的最適化問題の定式化

Design Parameter (設計変数)	<ul style="list-style-type: none"> • n • $l_1, l_2, l_3 \dots l_n$ • P_1, P_2 • $\phi_n, \phi_{n-1}, \phi_{n-2}, \dots \phi_3$ (3 関節以上の場合のみ)
To Minimize (最小化)	<ul style="list-style-type: none"> • Driving energy: $f_1 = E = \sum_{j=1}^m E_i = \sum_{j=1}^m \left(\int \tau_j \cdot \Theta_j(t) \right)$ • Manipulability measure: $f_2 = \frac{1}{w_1}$ <p>Here, $w_1 = \sqrt{\det J(\theta_{j,1}) \cdot J^T(\theta_{j,1})}$</p>
Subject to (制約条件)	<ul style="list-style-type: none"> • $l_1, l_2, l_3 \dots l_n > 0$ • $l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n = l_{constant}(m)$ • $l_1 + l_2 + \dots + l_{n-1} \geq d_{n,p}$

4.2 初期設計段階における最適な関節数，リンク長，軌道の最適化手法

になる．またその際， $n - 2$ 個の $d_{n,p}$ 制約条件が必要となる．たとえば，5 関節の場合冗長自由度は 3 となり，その際の設計変数の数は l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 の 5 個， P_1, P_2 （各 x, y 座標）の 4 個， ϕ_n の 12 個の総 21 個となり，制約条件は $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 < 0$ の 5 個， $l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = l_{con}$ の 1 個， $d_{n,p}$ の 12 個で合計 18 個となる．

4.2.4 最適化手法

本章では，最適化手法として多目的遺伝的アルゴリズム（MOGA）を利用する．（以下 MOGA とする）MOGA は GA を多目的最適化に拡張した手法である．各目的関数に重みを付けて荷重和を評価する手法と異なり，目的関数の優先度を事前に決定する必要がなく，1 回の最適化計算で複数のパレート解を求められることが特徴の理由から本章の最適化手法として MOGA を選択した．

このような手法で得られたパレート・フロントの最適解は，通常唯一に定まらず複数存在し，どの解を最終的に選ぶのは設計者の意思決定を行う必要がある．意思決定の方法では部分情報を引き出しながら最終的な意思決定解を探索する対話型解法など多くがある．本章では理想点との距離を最小にする解を最終的な最適解に決定する簡単な方法を採用する [56] ～ [59]．

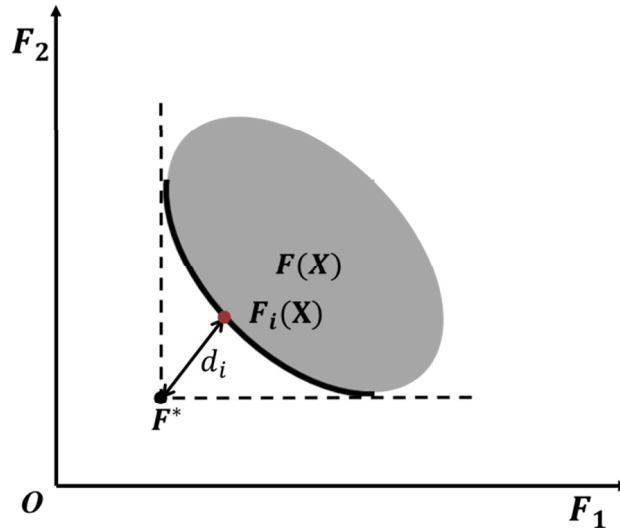


図 4.3 本研究における意思決定方法

図 4.3 はその概略を示している．複数のパレート解から一つの解を選ぶために式 (4.9) のように f_1 と f_2 を最大値で除して無次元化を施し，設計者が希求す

第4章

る理想点 F^* からパレート解 $F_i(X)$ までの距離 d_i が最も短い解を選ぶ．ここでは理想点とは目的関数 F_1 と F_2 の各最小値を考える．距離 d_i は式(4.10)のように表すことができる．実際の計算では，その概略を図 4.2 に示してある．

$$F_1 = \frac{f_1}{f_{1,Max}}, \quad F_2 = \frac{f_2}{f_{2,Max}} \quad (4.9)$$

$$\text{Minimize :} \quad d_i = \sqrt{(F_1^* - F_1')^2 + (F_2^* - F_2')^2} \quad (4.10)$$

4.2.5 多目的最適化の手順

図 4.4 に本研究の最適化手順を示す．ここでは多目的最適化による特異点回避の効果を調べるために，消費エネルギーのみを目的関数に持った単目的最適化も比較のため実行する．その最適化問題の解を求める手順の概略は以下のようになる．

- 1) 関節数, リンク長, Spline 曲線のコントロールポイントの初期値を設定する．
- 2) 初期値が決まった後は，逆運動学を用いて各目標点の角度 θ_i を求める．
- 3) 求めた各目標点の角度を Spline 補間して各リンクにおける角度 $\theta_i(t)$ を求める．
- 4) 動力学解析を行い，目的関数を計算し，消費エネルギーの最小化と可操作度の最大化するため MOGA による多目的最適化を行う．
もし，エネルギーが最小値または初期姿勢の可操作度が最大値になると関節数 n を $n = n + 1$ として増加させて 1) に戻り，そうではない場合は設計変数を変えて 1) に戻る．
単目的関数の場合は，目的関数は消費エネルギーのみとする．
- 5) n が 3 の場合は設計変数として ϕ_m を加える．
- 6) n が n_f になるとループを終了する．
- 7) 関節数 1 ~ n_f の中から目的関数を最小にする n を選ぶ．
- 8) 多目的関数の場合は，Pareto 解から理想点からの距離を最小にする最適解を選ぶ．

4.2 初期設計段階における最適な関節数，リンク長，軌道の最適化手法

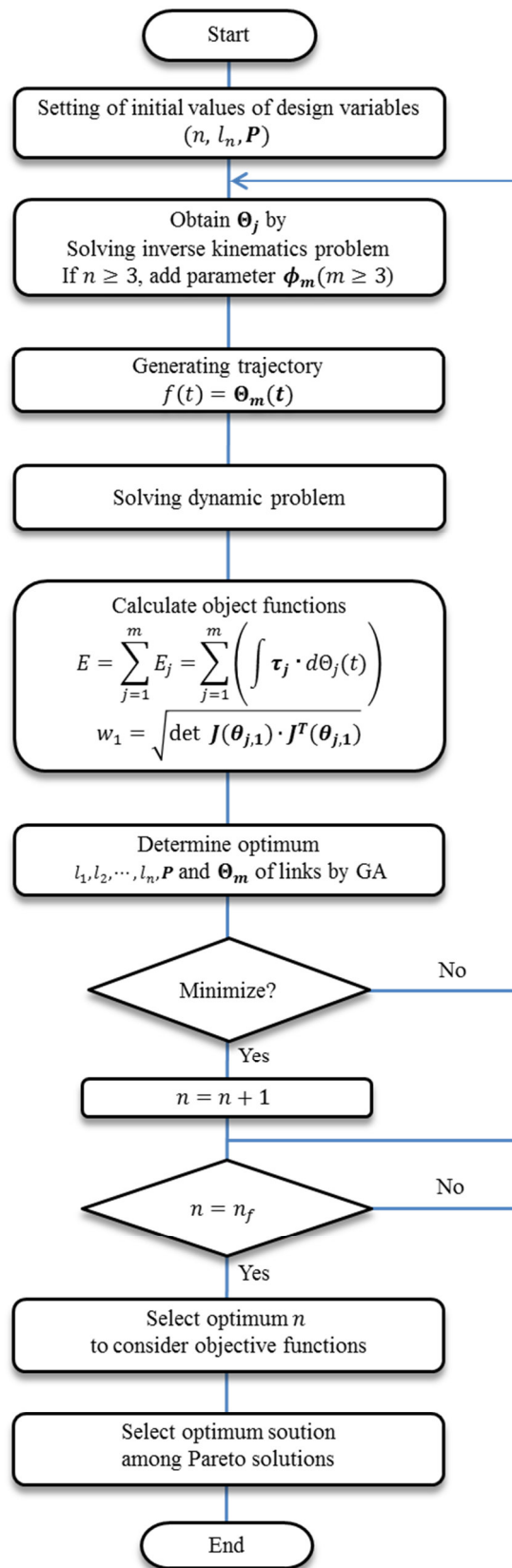


図 4.4 多目的最適化の手順

4.3 最適設計結果

水平面上の2関節($n = 2$)から5関節($n_f = 5$)までのロボットアームにおける最適化を行った。その際、生成した世代数は1000世代で交叉、選択、突然変異の適用率がそれぞれ0.5, 0.05, 0.1とした。各初期値は卓上用のロボットアームを想定して $n = 2$, $l_1 = 0.25[m]$, $l_2 = 0.25[m]$, $A = 12 \times 10^{-5}[m^2]$, $\rho = 2700[kg/m^3]$, $P_1 = (0.1, 0.4)$, $P_2 = (0.3, 0.1)$ と定めた。体積と密度から各リンクの質量は M_i ($i = 1, 2, \dots, n$) の計算ができ、また各関節部の質量 m_i ($i = 1, n$) は実験装置と近い $0.29 [kg]$ の一定な値とした。

可操作度を目的関数に選んだことにより特異点回避への影響を確認するため、消費エネルギーだけを目的関数とした単目的最適化問題も解き、消費エネルギーと可操作度の二つを目的関数として取った本章で提案した多目的最適化と比較する。

4.3.1 単目的最適化問題

表 4.2 に単目的最適化の結果を示す。その結果、最適関節数は初期 $n = 2$ から $n = 3$ の3関節となり、リンク長 l_1, l_2, l_3 がそれぞれ $0.11, 0.17, 0.22 [m]$ となっており、中間目標点 P_1, P_2 がそれぞれ $(0.17, 0.26), (0.36, 0.27)$ となっている。消費エネルギー f_1 は $3.93 [\times 10^{-3}J]$ から $2.39 [\times 10^{-3}J]$ になって約39[%]減少した。最適化により5関節以外はエネルギーが減少したことが分かる。この現象は関節数が増えると関節部の質量も増え、ロボットアーム全体の質量が増えたため消費エネルギーが増加した結果だと思われる。また、根元のリンク長が短くなり、手先のリンク長が相対的に長くなる共通点があることが分かる。

4.3.2 多目的最適化問題

消費エネルギーと可操作度の2つの目的関数を考慮した多目的最適化の結果、図 4.5 のように無数の解 $F(X)$ の中で複数のパレート解 $F_i(X)$ を求めることができた。ここでは理想点とは目的関数 F_1 と F_2 の各最小値を考える。距離 d_i は式(4.2)を用いて計算したあとその最小値を唯一の解とした。実際の計算では、 $F^* = (0.025, 0.417)$ とした。

その結果、最適関節数は $n = 3$ の3関節となり、リンク長 l_1, l_2, l_3 がそれぞ

4.3 最適設計結果

れ 0.11, 0.17, 0.22 [m] となっており, 中間目標点 P_1, P_2 がそれぞれ (0.16,0.25), (0.38,0.28) となっている. 消費エネルギー f_1 は 3.93 [$\times 10^{-3}J$] から 3.78 [$\times 10^{-3}J$] になって約 4 [%] 減少し, 可操作の逆数 f_2 も 17.1 から 15.1 になって約 12 [%] 減少した. その結果を表 4.3 に示す.

表 4.2 単目的最適化の結果

	Initial	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
$l_1(m)$	0.25	0.10	0.11	0.12	0.15
$l_2(m)$	0.25	0.40	0.17	0.10	0.12
$l_3(m)$	-	-	0.22	0.05	0.05
$l_4(m)$	-	-	-	0.23	0.09
$l_5(m)$	-	-	-	-	0.09
Control Points P_1, P_2	-	(0.17,0.25)	(0.17,0.26)	(0.16,0.25)	(0.17,0.25)
		(0.36,0.27)	(0.36,0.27)	(0.36,0.28)	(0.35,0.27)
Driving Energy [$\times 10^{-3}J$]	3.93	2.42	2.39	2.92	3.98

表 4.3 多目的最適化の結果

	Initial	Result
$l_1(m)$	0.25	0.05
$l_2(m)$	0.25	0.19
$l_3(m)$	-	0.26
Control Points P_1, P_2	-	(0.16,0.25)
		(0.38,0.28)
f_1 Driving Energy $\times 10^{-3}J$	3.93	3.78
(Rate of change)		(-4%)
$f_2 = w^{-1}$ Manipulability measure	17.1	15.1
(Rate of change)		(-12%)

4.3.3 単目的最適化と多目的最適化結果の比較

図 4.7~4.10 に単目的最適化と多目的最適化の軌道, 角度, 角速度, 関節トルクの変化の結果を初期値モデルの結果との比較を示す.

まず, 単目的最適化の結果を観察してみると根元のリンクが短くなり, 手先

第4章

のリンクが長くなったことが分かる．この現象は角度変化や関節トルクのグラフで分かるように根元のリンクが多くエネルギーを消費するためその分長さが短くなり，角度変化が少ないことが分かる．多目的最適化の結果でもこのような傾向があり，全体的にエネルギーを多く消費する根元のリンクが短くなる方向に最適化が行われたと考える．

また単目的最適化結果の場合は手先リンクの角度が 0 となり，特異点の位置になっていることが分かる．多目的最適化結果では特異点を回避し，可操作度の変化を比較した図 4.6 から分かるように可操作度を目的関数として扱った多目的最適化の場合の方が全体的に可操作度が高いという結果を得た．

つまり，本研究で提案した手法により目標とする特異点の回避や消費エネルギーの最小化を達成し，多関節ロボットアームの関節数やリンク長や軌道を同時に満足する設計が可能となった．

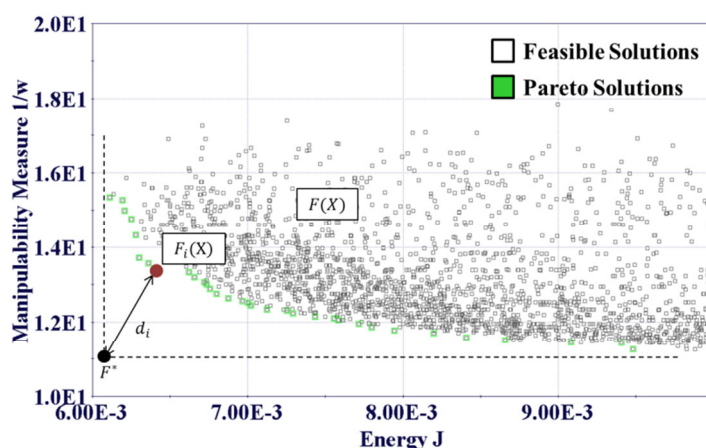


図 4.5 多目的最適化のパレート解

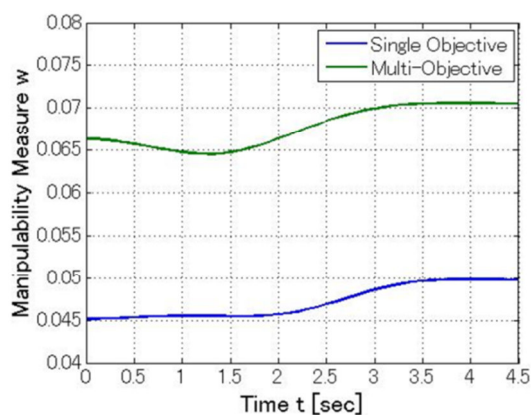
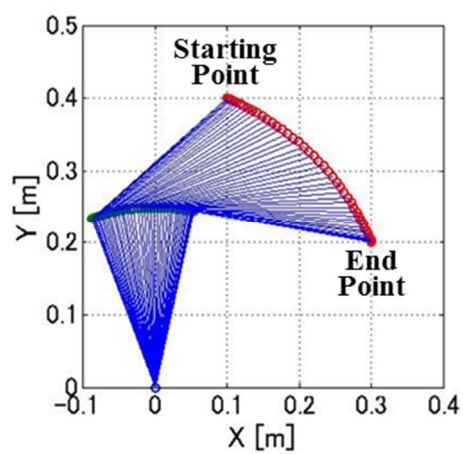
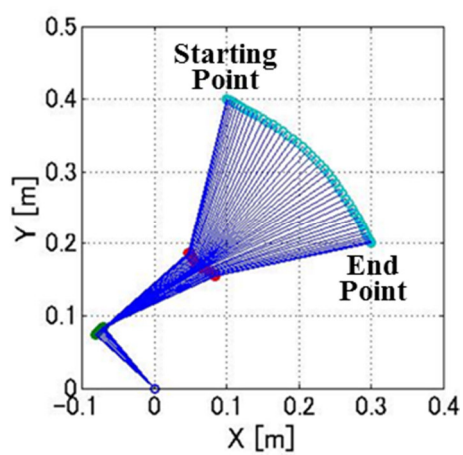


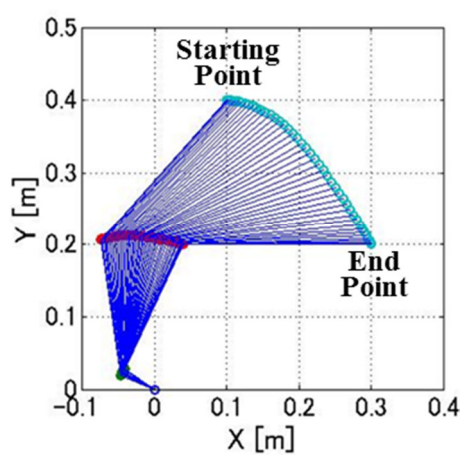
図 4.6 可操作度の比較



(a) 初期値

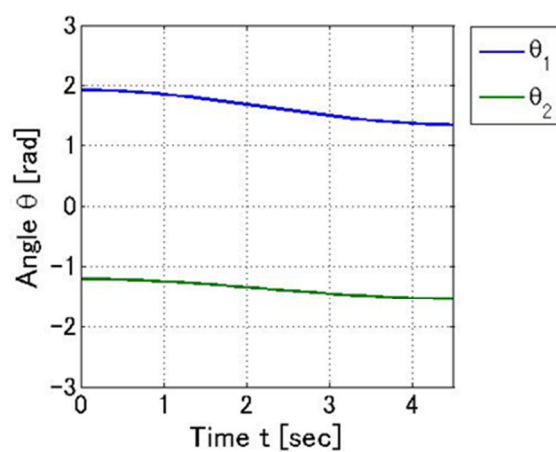


(b) 単目的関数

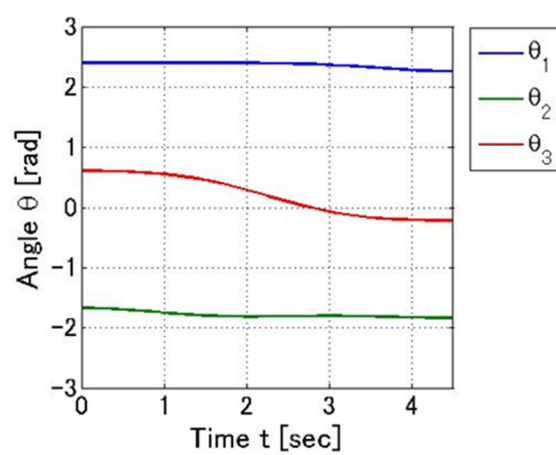


(c) 多目的関数

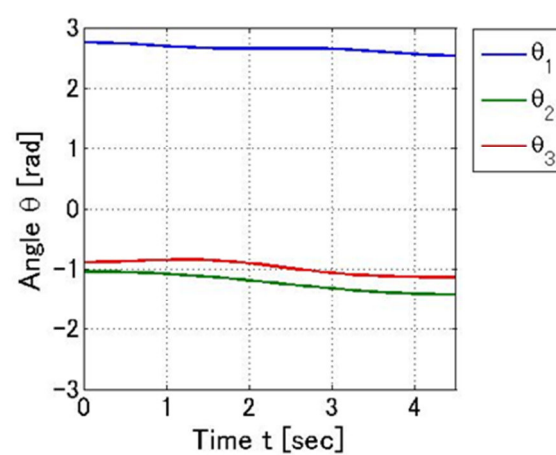
図 4.7 初期値, 単目的最適化, 多目的最適化の各軌道



(a) 初期値

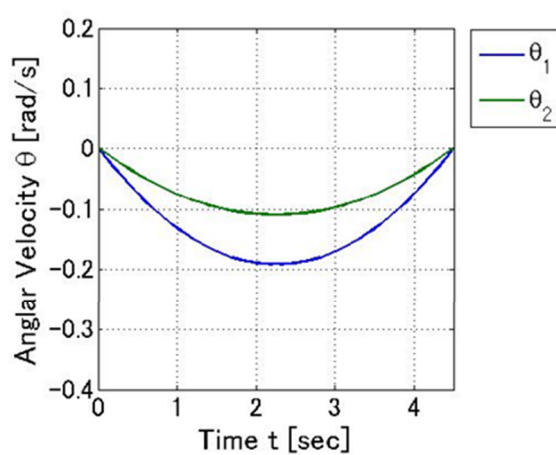


(b) 単目的関数

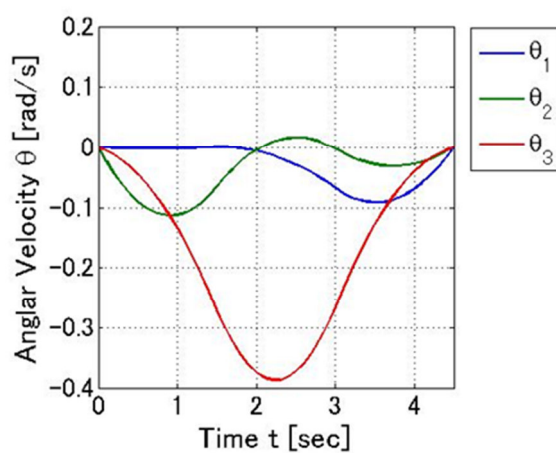


(c) 多目的関数

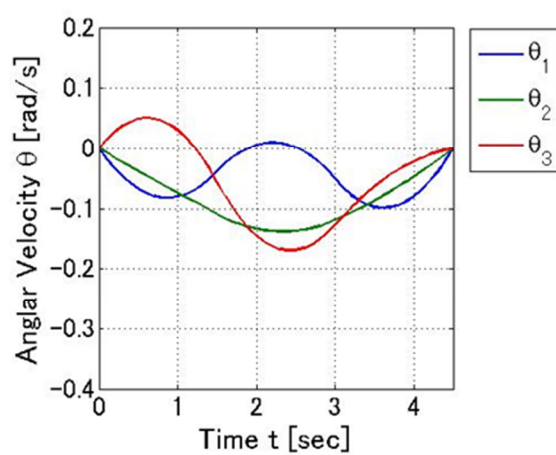
図 4.8 初期値，単目的最適化，多目的最適化の各角度変化



(a) 初期値



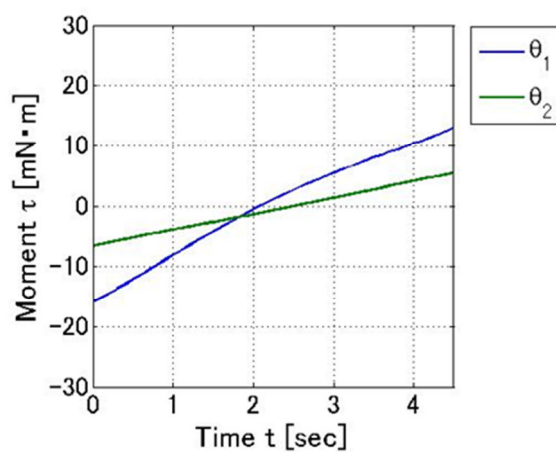
(b) 単目的関数



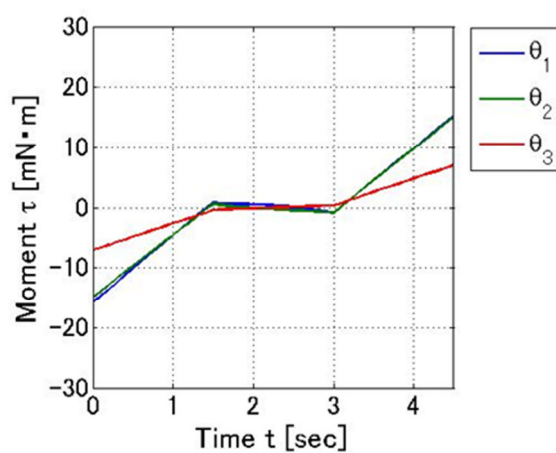
(c) 多目的関数

図 4.9 初期値，単目的最適化，多目的最適化の各角速度の変化

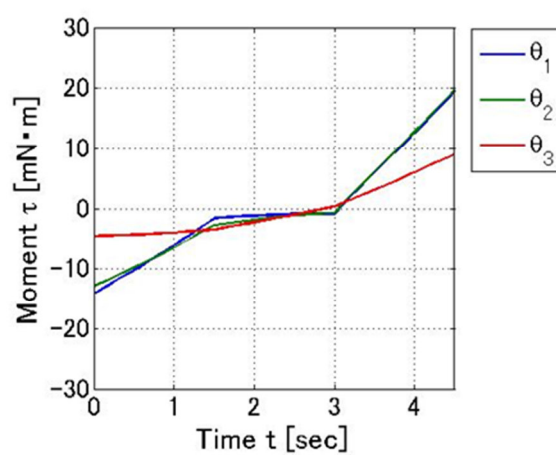
第 4 章



(a) 初期値



(b) 単目的関数



(c) 多目的関数

図 4.10 初期値，単目的最適化，多目的最適化の各関節トルクの変化

4.4 モデル実験による検討

最適化の結果を実用面から検証するためにモデル実験を行った。実験装置の概略は図 4.11 に示す。実験装置は機構系、制御系、計測系の三つから構成されている。

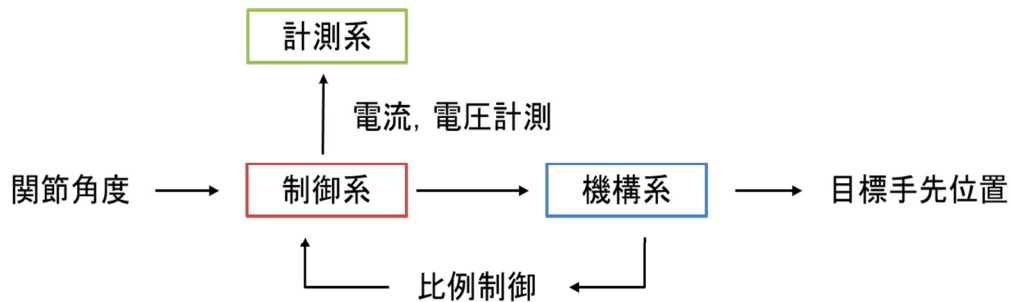


図 4.11 実験装置の概略

4.4.1 実験装置

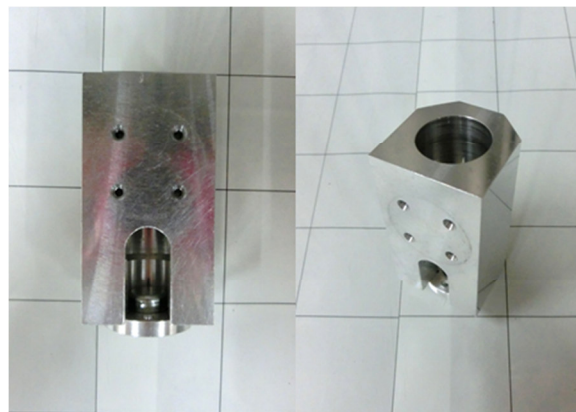
(I) 機構系

ロボットアームはリンク長を調整できるように図 4.12(a)のようにリンクのパーツを取り換えるような構造を考える。各パーツの質量は一定として全体の質量の変化をさせないで、リンク長の調整ができる。

また、関節部も図 4.12(b)のよう容器の中にモーター入れるようになり、直接伝達力をリンクのほうに伝える構造を考え、各関節部は同じ質量を持つようにする。



(a) リンク



(b) 関節部

図 4.12 実際に製作した実験モデル

第4章

(Ⅱ) 制御系

本研究の実験では、目標にした関節角度でロボットアームが動くようにするため、フィードバック制御の一つ種類である比例制御を行う。基本的なフィードバック制御の方法として比例制御（P 制御）は操作量を制御量と目標値の偏差の一次関数として制御する方法である [60] ～ [61]。

実際リンクの移動に必要な関節トルクは、図 4.13 のブロック線図のようになり、その時関節トルクは式(4.11)ようになる。

$$\tau = K(\theta_d - \theta) \quad (4.11)$$

ここで、 θ_d は指令された目標角度の値、 τ はモーターが発生する関節トルクの値、 θ がモーターの現在の角度の値、 K はゲイン（利得）と呼ばれる正（プラス）の数値である。

エンコーダーから読み込んだ現在の角度 θ を目標角度 θ_d と比べ、その差分にゲインである K をかけた値をシステムにフィードバックして目標角度に到達するまでこのループを繰り返す。

実際のエンコーダーやモーターの仕様の詳細は付録に載せる。

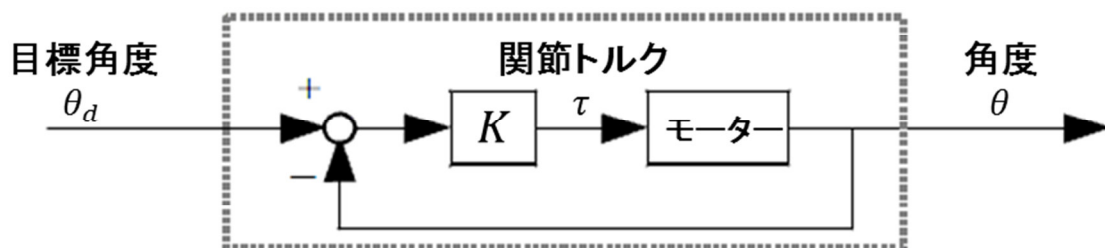


図 4.13 角度の P 制御とブロック線図

(Ⅲ) 計測系

実験の目標は提案した最適化手法による結果を検証することで、実物のロボットアームがある始点から終点まで動く時、消費エネルギーを測定するためには、二つの方法がある。

まず一つは、各関節部にトルクセンサーをつけてロボットアームが作動する時のトルクを直接測ったあと移動した角度をかけて消費エネルギーを計算する方法がある。この方法は直接関節トルクを計測して消費エネルギーがジュール（Joule）の単位として求められるが、関節トルクを測るため動いているモーターに直接センサーをつけるためには機構的な面で問題点があり、さらに動く際に振動や加速度などの外乱で誤差が発生する可能性がある。つまり、トルクセ

センサー付けられた系が運動するシステムには適用するには問題がある。

他の方法はモーターを動かせる時必要な電圧と電流を測ったあと二つの値をかけて時間による電力を求める。最後に時間と電力の面積を計算することで電力量を求め、消費エネルギーを計算することが可能である。この方法は機構的な問題は生じず、回路の配線系を操作することで図 4.14 に示すように簡単に電源からモーターの間流れる電圧と電流を測ることができる。ただし、この方法で求められる電力量はジュールとは違う単位であり、変換が必要である。

したがって、本実験では、機構的に操作が必要なトルクセンサーを使うより電圧と電流を測って電力量を求める方法を利用する。さらに、本実験は最適化前後の消費エネルギーの変化を観察ことが目的なので、電力量をジュールに変換せず、そのままの値を用いて比較する。

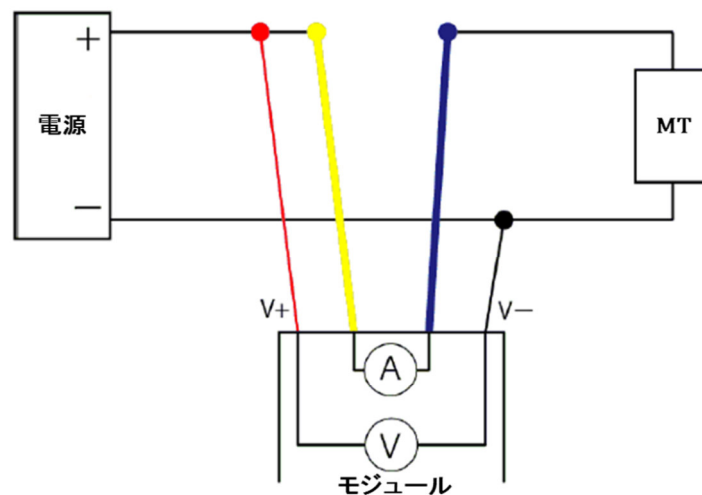


図 4.14 計測系の概略図

4.4.2 実験方法

実験は平面上を運動するロボットアームを仮定し、重力や摩擦の影響を最小化するため、図 4.15 のようにガラスの上をボールキャスターを用いて移動するように実験環境を設定する。

実験は大きく二つに分けてまず一つは最適化前の初期状態の値に基づいて始点から終点まで動かせ、その時の電圧と電流を測定する。他の一つは最適化後の結果に基づいてロボットアームの関節やリンク長を調整したあと同じく電圧と電流を測定する。各実験は誤差などの影響を考え 5 回ずつ繰り返し、最高値や最低値は捨てて残りの値の平均値を取る。実験する時の物性値や実験パラメータの値は表 4.4 ようになる。

第4章

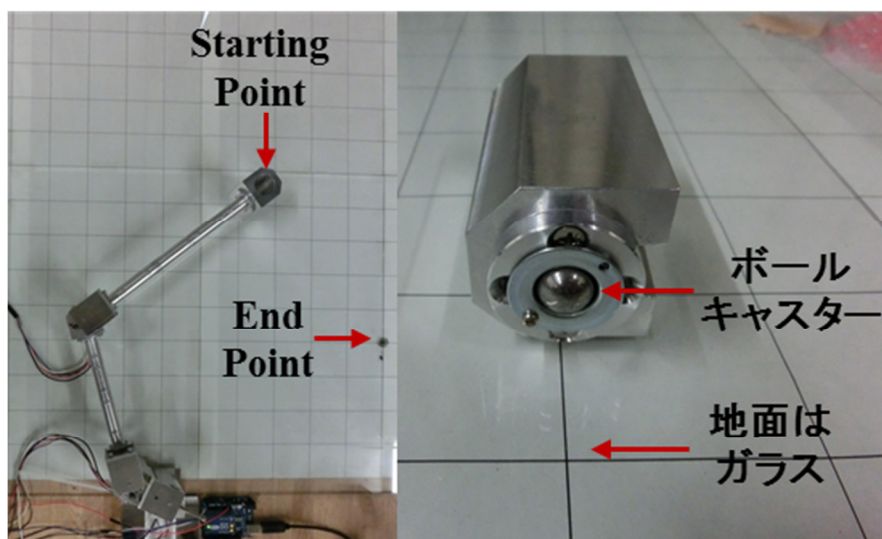


図 4.15 重力や摩擦の影響を最小化するための環境設定

表 4.4 実験装置の仕様

設計結果	Initial ($n=2$)	Result ($n=3$)
$l_1(m)$	0.25	0.11
$l_2(m)$	0.25	0.17
$l_3(m)$	-	0.22
単位リンク質量 (a)	0.03	
関節部質量 (b)	0.498	
総質量 ($a \times \text{リンク長} + b \times n + \text{その他}$)	2.39	2.889
始点座標	(0.1, 0.4)	
終点座標	(0.3, 0.2)	

4.4.3 実験結果

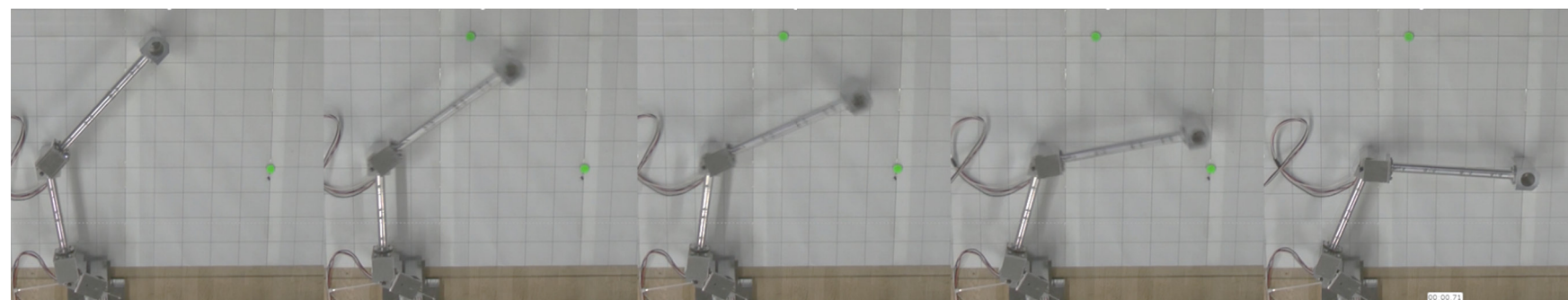
実験の結果を表 4.5 に示す．消費エネルギーの比較は各実験の平均を取った値である．平均消費電力量は最適化前の 0.179 [mWh] から最適化後 0.121 [mWh] となり 32 [%] 減少した．実際のアームの動きを図 4.16 に示し，各場合の実験値である電圧，電流，電力を図 4.17，4.18 で示す．

表 4.5 実験結果（消費電力量）

消費電力量	Initial	Result
1 回 [mWh]	0.158	0.103
2 回 [mWh]	0.184	0.117
3 回 [mWh]	0.194	0.141
平均 [mWh]	0.179	0.121
電力量増減率	-	-32%



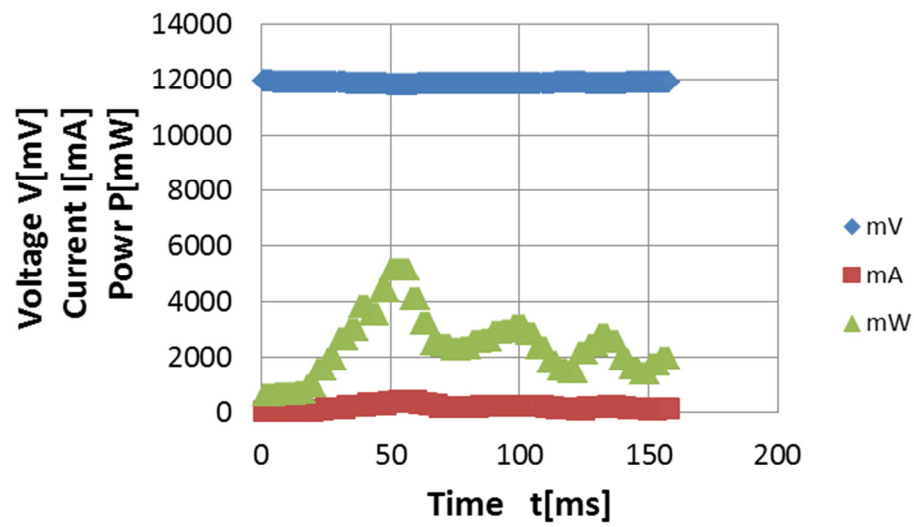
(a) 初期モデル



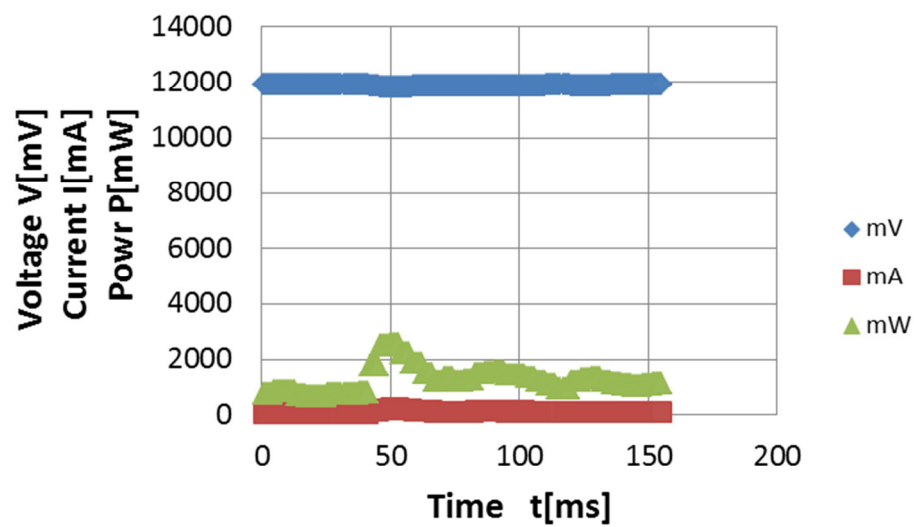
(b) 最適モデル

図 4.16 ロボットアームの挙動

4.4 モデル実験による検討



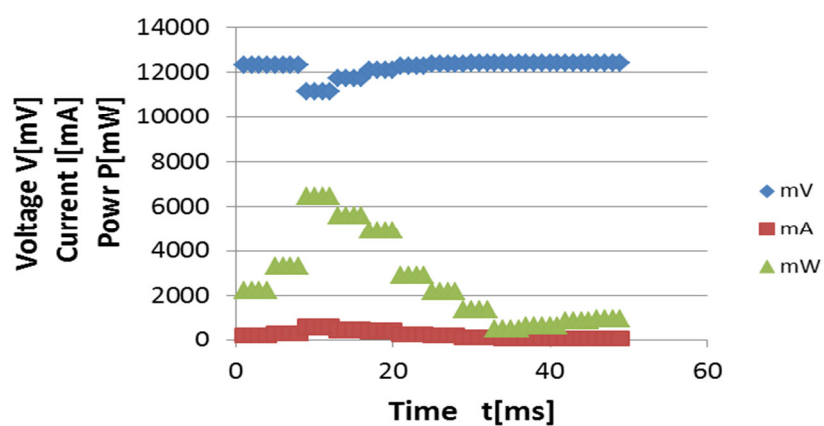
(a) 関節 1



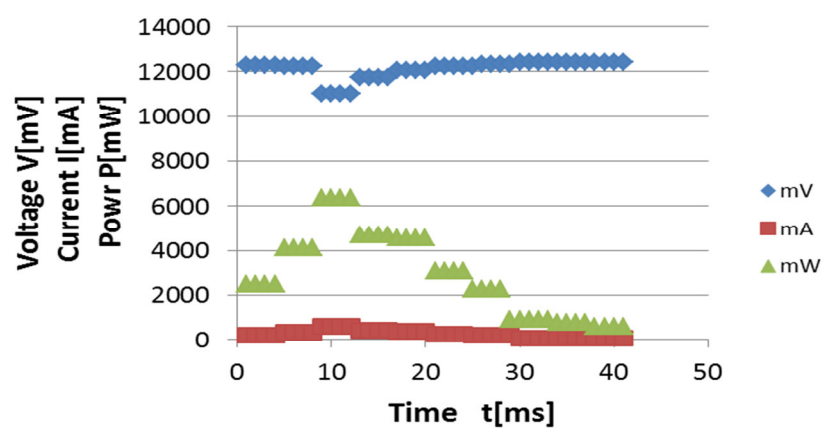
(b) 関節 2

図 4.17 初期モデルの電圧，電流，電力

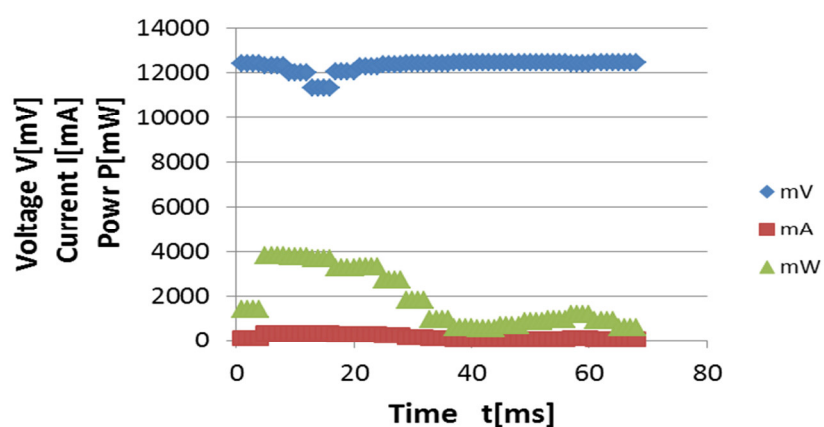
第 4 章



(a) 関節 1



(b) 関節 2



(c) 関節 3

図 4.18 最適モデルの電圧，電流，電力

4.4.4 実験結果の考察

実験の結果、比例制御により計画した目標点まで移動し、電圧と電流を計測することで電力量を測定することもできた。また 5 回の実験のうち最高値や最低値を除いて残りの平均値を比較することで客観性を持つ実験結果だと思われる。

その結果、32 [%] の消費エネルギー減少を確認した。予想外に減少幅が大きい、その理由についてはロボットアームの制御方法として比例制御を使用した結果だと思われる。その理由としては、最適化結果、関節数が増えた影響で、1 つの関節当たり角度変化が少なくなる。つまり、関節数が多いほうが移動距離が少ないため比例制御による外乱の影響が少なくなり、より正確により早く制御ができてエネルギーの損失も無く、総電力量が減ったのではないかと考えられる。それは電圧と電流の変化を表している図 4.17, 4.18 でも確認できる。最適モデルの場合は電力のピークが 1 回だけであるが、初期モデルの場合は電力のピークが 2~3 回観察される。

しかし、この結果は制御の問題であり、その誤差を考慮しても消費エネルギーの減少量は大きい。したがって、モデル実験によっても最適化の効果が確認できる。

より正確な制御のためには比例制御だけではなく、積分動作や微分動作も考慮した PID 制御の導入を考えられるが、さらに検討する必要がある。

4.5 本章のまとめ

初期設計段階において最適な関節数やリンク長を決定するために、影響が大きい軌道も設計変数に入れ、関節数やリンク長を選択する汎用性のある最適設計手法を提示した。

具体的には始点と終点の間に中間目標点を設計変数として設定し、その時の各目標点における軌道を Spline 補間により時間の関数を求め、可操作度を最大化し、消費エネルギーを最小化する最適化問題の汎用性のある定式化手法を提案した。提案した手法は多目的遺伝的アルゴリズム (MOGA) を用いて $n = 5$ までの最適解を探索し、複数のパレート解を得ることができた。複数のパレート解から一つの解を選ぶため理想点を決め、その理想点から最も距離が短い解を探す手法である。また提案した手法は後続の詳細設計の段階における障害物回避、各種の制御、作業空間の考慮、アクチュエータの考慮などの問題に対しても適用できる汎用性と有している。例題では、最適な関節数は 3 関節であり、

第4章

可操作度の逆数 12 [%] 減少と消費エネルギー4 [%] 減少を達成し，特異点を回避することを確認した．

また得られた結果に基づいてモデル実験を行った結果，32 [%] の消費エネルギー減少を確認し，提案した最適化手法の効果を検証した

このような結果は，図 4.19 のように A から B の間を移動するウェハー搬送ロボットアームの初期設計の段階で最適な関節数やリンク長の決定が可能となり，作業軌道の計画も同時に達成できる．このように初期設計の段階で関節数やリンク長などのハードウェアや軌道計画のようなソフトウェアの最適化が同時に達成することは，設計の時間の短縮や制作コスト削減ができて経済的な面で利益があると考えられる．

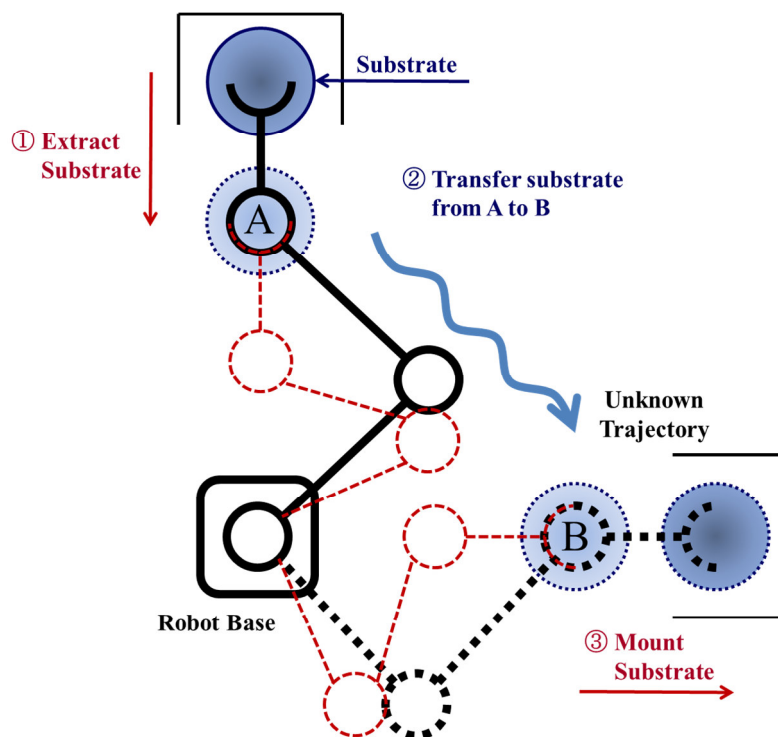


図 4.19 軌道最適化を含める初期設計段階における
ウェハー搬送ロボットアームへの適用例

第 5 章

3次元空間内の多関節ロボットアームの最適関節数，リンク長，軌道の同時最適化

5.1 概 要

前章まで最適化の対象が平面内のロボットアームの運動を対象にしたが，本章ではその対象を3次元空間内のロボットアームの運動に拡張してPUMA型ロボットアームの最適関節数，リンク長，軌道を求めることを目的とする．

ここでは3次元空間内の運動に拡張した一つの試みを示し，詳しくは今後のいろいろな観点からの研究が必要と思われる．最適化の対象が三次元空間内の運動と複雑になったためにモデル化も再度検討する必要がある．すなわち対象が三次元に増えたため超越関数の計算数が飛躍的に増える．したがって効率的な最適化を行うため以下のように新たな仮定を行う．

- (Ⅰ) ロボットアームは3次元空間内で重力の影響を受けるが，減衰エネルギーは無視．
- (Ⅱ) 最適化は3関節まで実行．
- (Ⅲ) 目的関数は消費エネルギーに限定し，その代わり制約条件を増やして特異姿勢になることを防止．

すなわち，重力を考慮した運動方程式を作成し，前章までの最適化結果に基づいて最適化は3関節まで行い，可操作度を目的関数と設定せずに新たな制約条件を加え，計算量を減らす．

表5.1はDenavit-Hartenbergの記法による3関節のPUMA型ロボットアームのリンクパラメータを表している．またそのパラメータにより座標変換行列は式(5.1)のようになる．

第5章

つまり，全体座標変換 0T_4 はかなり複雑な超越関数の式となる．従って，本章で計算量を減らすことを行った．

表 5.1 対象モデルのリンクパラメータ

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	90	0	0	θ_2
3	0	l_1	0	θ_3
4	0	l_2	0	θ_4

$$\begin{aligned}
 {}^0T_1 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^1T_2 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & l_1 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^3T_4 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & l_2 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

5.2 3次元空間のロボットアームのモデル化

5.2.1 運動方程式

本章では，図5.1のようにPUMA型ロボットアームを3次元空間内で運動すると仮定し，剛体アームとして扱う．後半の最適化においては簡単のために関節数を3と限定しているが，ここでは一般的な説明のために関節数を n として各リンクの質量 M_i ，剛体挙動する各関節部の質量 m_i が X, Y, Z 空間で回転運動し，減衰エネルギーは考慮しないと仮定する．ここで， θ_j ($j = 1, m$)は各関節角度， l_i は各リンク長， A_i は各リンクの断面積， ξ_i は各リンク上の任意の座標点である．($i = 1, n$)

5.2 3次元空間のロボットアームのモデル化

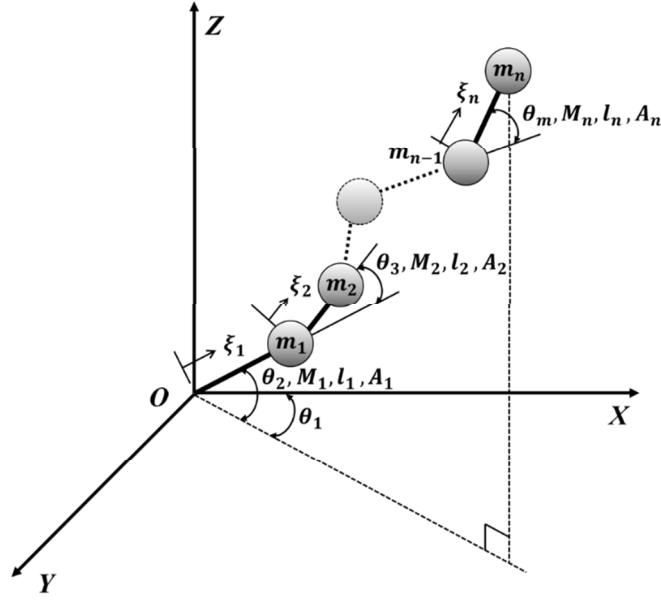


図 5.1 ロボットアーム 3次元モデル

この際、全体の運動エネルギー T と全体の位置エネルギー U は式(5.2), (5.3)のようになり、

$$\begin{aligned}
 T &= \sum_{i=1}^n T_{Mi} + \sum_{i=1}^n T_{mi} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\
 &= \sum_{i=1}^n \int_0^{l_n} v_{\xi i}^2 \rho A_i d\xi_i + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (m_i l_i^2) \dot{v}_{mi}^2
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

$$\begin{aligned}
 U &= \sum_{i=1}^n U_{Mi} + \sum_{i=1}^n U_{mi} \quad (i = 1, n) \\
 &= - \left(\sum_{i=1}^n M_i g h + \sum_{i=1}^n m_i g h \right)
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

ラグランジュ方程式に代入すると式(5.4)のようになる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_j} + \frac{\partial U}{\partial \theta_j} = \tau_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \tag{5.4}$$

ここで τ_i は関節トルクである。式(5.4)は式(5.5)のように簡略化した運動方程式となる。

$$J(\theta) \ddot{\theta}_j + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau_j(t) \quad (j = 1, 2, \dots, m)$$

$$[J] \cdot \{\ddot{\theta}_j\} + [C] + [G] = \{\tau_j\} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5.5)$$

ここで、 $J(\theta)$ は慣性行列、 $C(\theta, \dot{\theta})$ はコリオリ力と遠心力、 $G(\theta)$ は重力項である。

5.2.2 冗長自由度を考慮した軌道計画

平面運動ではロボットアームの関節数が3以上になると冗長自由度が発生し、逆運動学を用いた関節角を求めることができない。そのため本研究では、3関節以上の関節角 θ_m ($m \geq 4$) を設計変数として扱い、 θ_2, θ_3 は逆運動学を用い、計算してロボットアームの姿勢を表す関節ベクトル $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T$ を求める。

最適な軌道を求めるため出発点 P_s と目標点 P_g の間に図5.2の P_1, P_2 のような二つの中間目標点を与え、その座標を設計変数として扱う。ロボットアームが $P = [P_s, P_1, P_2, P_g]$ を通過する時、各中間目標点に当たる各関節角 $\theta = [\theta_{ps}, \theta_{p1}, \theta_{p2}, \theta_{pg}]$ を3次Spline 補間を用いて時間の関数として各関節の軌道 $\theta_j(t)$ ($j = 1, m$) を求める。

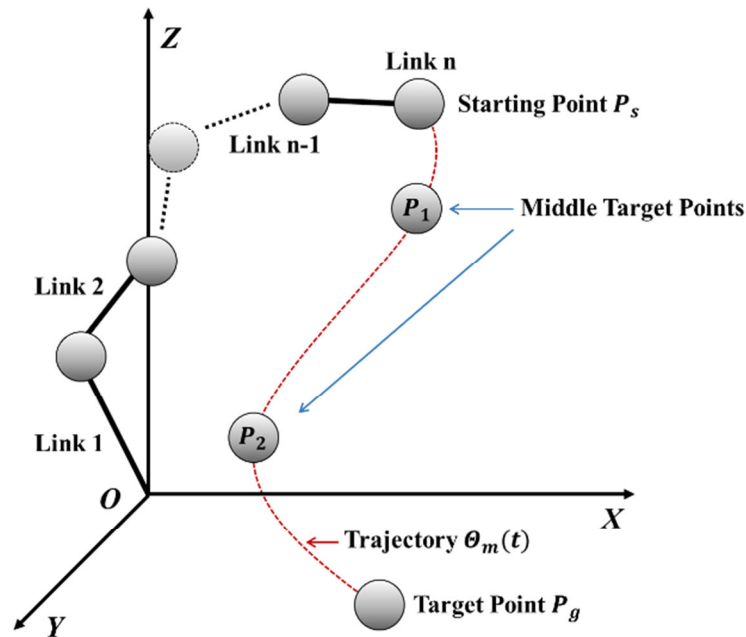


図 5.2 3次元空間内の軌道計画方法

5.3 最適化問題設定

5.3.1 最適化問題の定式化

各関節数, リンク長と軌道の最適化を行うため最適設計問題を表 5.2 のように定式化する.

設計変数は関節数各 n , リンク長 l_i , 中間目標点 P_1, P_2 であり, 3 関節以上の場合 $\theta_4, \theta_5, \dots, \theta_m$ ($m \geq 4$) が加わる.

本研究の目的関数は汎用を考慮して消費エネルギーを最小化する最適化を行う. その際, 消費エネルギー E はロボットアームが始点から終点まで動く時の各リンクの関節トルクと角度の掛け算を積分した値と考え, 式 (5.6) のように表すことができ, 消費エネルギー f が目的関数となる.

$$\tau_j = [J] \cdot \{\ddot{\theta}_j\} + [C] + [G] \quad (j = 1, 2, \dots, m)$$

$$E = \sum_{j=1}^m E_j = \sum_{j=1}^m \left(\int \tau_j \cdot \theta_j(t) \right) \quad (5.6)$$

制約条件は各リンク長が正となり, その総和が一定になる幾何学的条件を用いる. $d_{n,p}$ は原点 O から与えた各目標点 P の $n-1$ 番目のリンクまでの距離を表す. $d_{\theta_{min}} \leq d_{\theta_m} \leq d_{\theta_{max}}$ と $\theta_{min} \leq \theta_m \leq \theta_{max}$ は特異姿勢となることを防ぐための条件である. つまり各中間目標点で関節角度の変化率や角度が指定した最小値と最大値内で決められる. 単純に特異姿勢を防ぐ制約条件は $\theta_m \neq 0$ が簡単な方法であるが, しかし, このような制約条件を考えた理由は, この制約条件だけでは各中間目標点の関節角度は0ではないが, Spline曲線の補間中0となる可能性があり, その影響を防止ためである.

ロボットアームが3関節以上の場合には冗長自由度により逆運動学を用いて角度を求めるため, $n-2$ 個の未知数が生じる. そのため3関節以上の場合には一つの P 当たり $n-2$ 個の角度が設計変数になる. またその際, $n-2$ 個の $d_{n,p}$ 制約条件が必要となる. たとえば, 3関節の場合冗長自由度は1となり, その際の設計変数の数は l_1, l_2, l_3 の3個, P_1, P_2 (各 x, y, z 座標) の6個, θ_n の4個の総13個となり, 制約条件は $n \leq n_f$ の1個, $l_1, l_2, l_3 < l_{min}$ の3個, アームの総質量を一定と考える $l_1 + l_2 + l_3 = l_{con}$ の1個, $d_{n,p}$ の4個で総9個となる.

5.3.2 最適化手順

図 5.3 に本研究の最適化手順を示す.

1) 関節数, リンク長, Spline 曲線のコントロールポイントの初期値を設定する.

第5章

- 2) 初期値が決まった後は、逆運動学を用いて各目標点の角度 Θ_j を求める。
($j = 1, m$)
- 3) 求めた各目標点の角度を Spline 補間して各リンクにおける角度 $\Theta_j(t)$ を求める。
- 4) 目的関数を計算し、消費エネルギーを最小化するため GA による最適化を行う。もし、エネルギーが最小値になると関節数 n は $n = n + 1$ として1)に戻り、そうではない場合は設計変数を変えて1)に戻る。
- 5) n が3の場合は設計変数として Θ_m を加える。
- 6) n が n_f になるとループを終了する。
- 7) 関節数 $1 \sim n_f$ の中から目的関数を最小にする n を選ぶ。

表 5.2 3次元モデルの最適化問題の定式化

Design Parameter (設計変数)	<ul style="list-style-type: none"> • n • $l_1, l_2, l_3 \cdots l_n$ • P_1, P_2 • $\Theta_m, \Theta_{m-1}, \Theta_{m-2}, \cdots \Theta_4$ (3 関節以上の場合のみ)
To Minimize Objective Functions (目的関数の最小化)	<ul style="list-style-type: none"> • Driving energy: $f = E$ $= \sum_{j=1}^m E_j = \sum_{j=1}^m \left(\int \tau_j \cdot \Theta_j(t) \right)$ <p>$\Rightarrow \text{Min}$</p>
Constraints of Links (制約条件)	<ul style="list-style-type: none"> • $n \leq n_f$ • $l_1, l_2, l_3 \cdots l_n > l_{\min}$ • $l_1 + l_2 + \cdots + l_n = l_{\text{Cons}}(m)$ • $l_1 + l_2 + \cdots + l_{n-1} \geq d_{n,p}$ • $d\Theta_{\min} \leq d\Theta_m \leq d\Theta_{\max}$ • $\Theta_{\min} \leq \Theta_m \leq \Theta_{\max}$

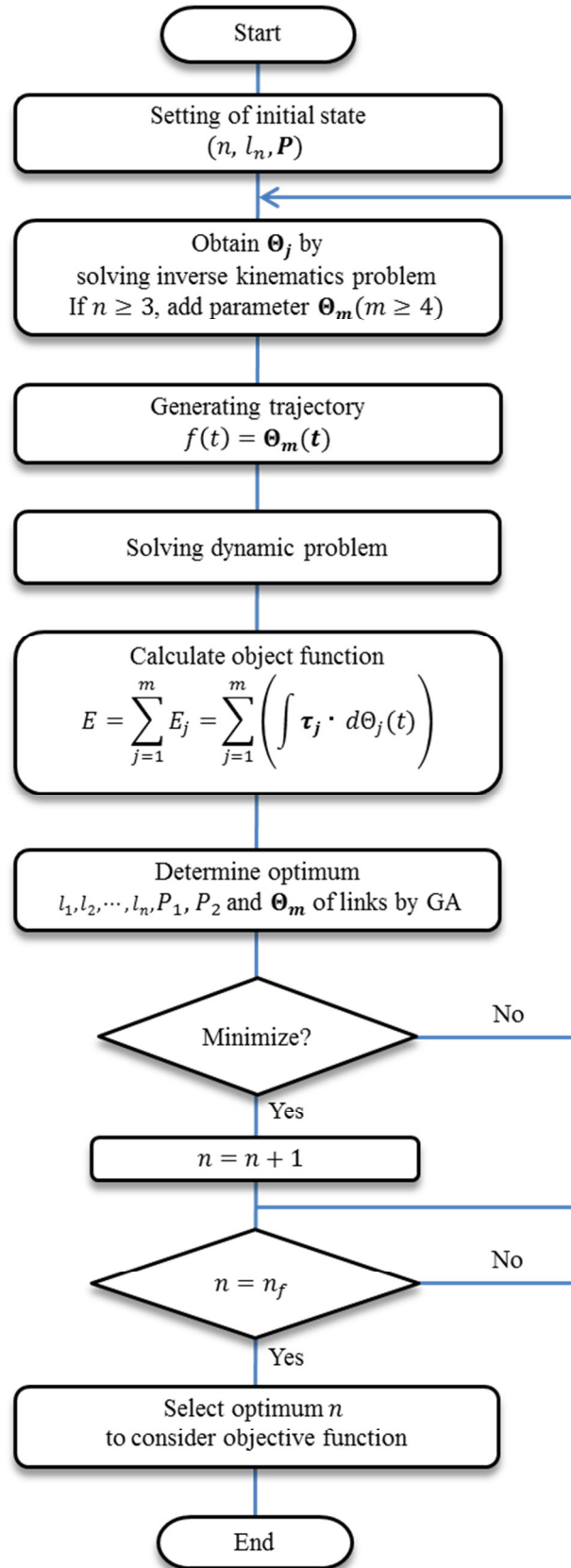


図 5.3 3次元モデルの最適化手順

5.4 最適化結果

GA を基づいた市販最適化ソフトウェア (modeFrontier) を利用して 3 次元空間内の 2 関節から 3 関節までのロボットアームにおける最適化を行った。その際, 生成した世代数は 3000 世代で交叉, 選択, 突然変異の適用率がそれぞれ 0.5, 0.05, 0.1 であり, 各初期値は前章の実験装置を基づいて $n = 2$, $l_1 = 0.25[m]$, $l_2 = 0.25[m]$, $A = 12 \times 10^{-5}[m^2]$, $\rho = 2700[\text{kg}/m^3]$, $P_s = (0.1, 0.4, 0.1)$, $P_g = (0.3, 0.1, 0.1)$ とする。各リンクの質量 M_i ($i = 1, 2, \dots, n$) は体積と密度からの計算ができ, 各関節部の質量 m_i ($i = 1, 2, \dots, n$) は $0.29 [\text{kg}]$ の一定な値である。

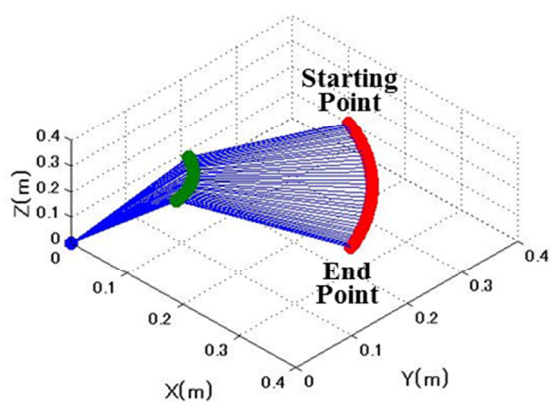
表 5.3 は各関節における最適化の結果を示している。その結果, 最適関節数は初期 $n = 2$ から $n = 3$ の 3 関節となり, リンク長 l_1, l_2, l_3 がそれぞれ $0.18, 0.25, 0.07 [\text{m}]$ となっており, 中間目標点 P_1, P_2 がそれぞれ $(0.21, 0.35, 0.10), (0.21, 0.34, 0.10)$ となっている。消費エネルギー f は $0.61 [J]$ から $0.22 [J]$ になって約 $64 [\%]$ 減少した。

図 5.4, 5.5 は各最適化前と最適化後適軌道を表し, 図 5.6, 5.7 はロボットアームの角度変化や関節トルクの変化を表している。

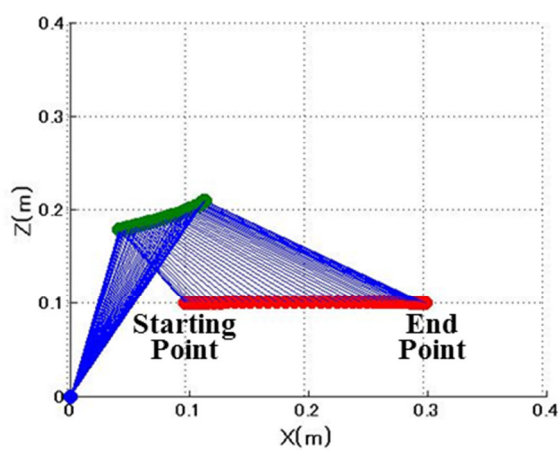
表 5.3 3次元モデルの最適化結果

	Initial	Result
$l_1 (m)$	0.25	0.18
$l_2 (m)$	0.25	0.25
$l_3 (m)$	-	0.07
Driving Energy (J)	0.61	0.22
Rate of change		-64%

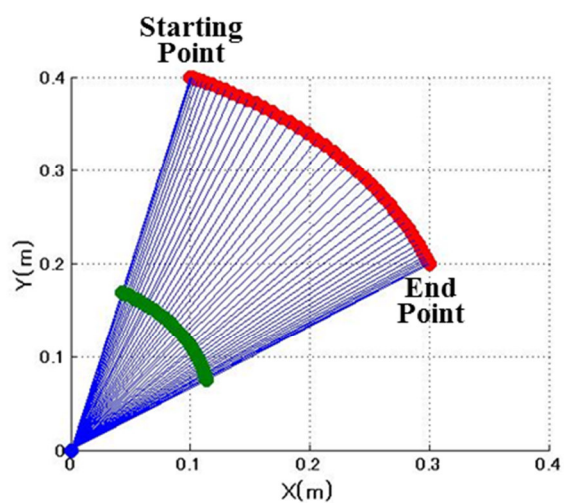
5.4 最適化結果



(a) X-Y-Z

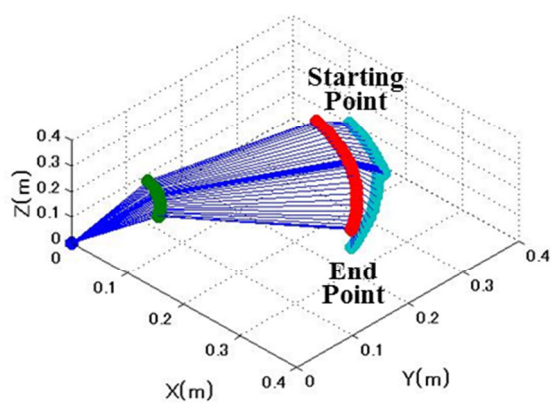


(b) X-Z

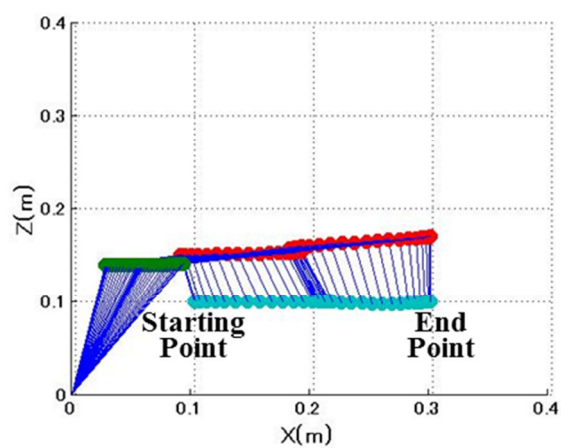


(c) X-Y

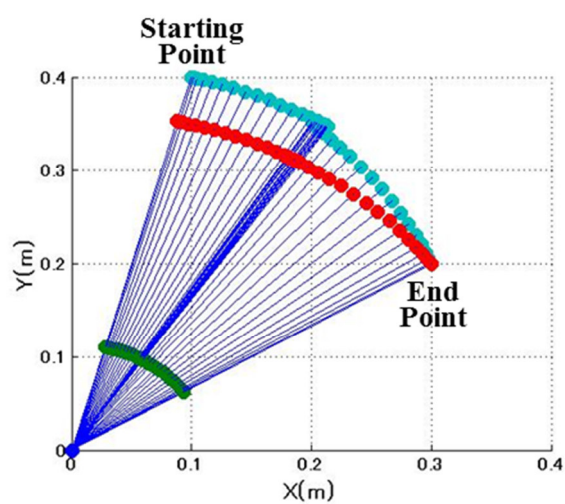
図 5.4 初期モデルの軌道



(a) X-Y-Z



(b) X-Z



(c) X-Y

図 5.5 最適化モデルの軌道

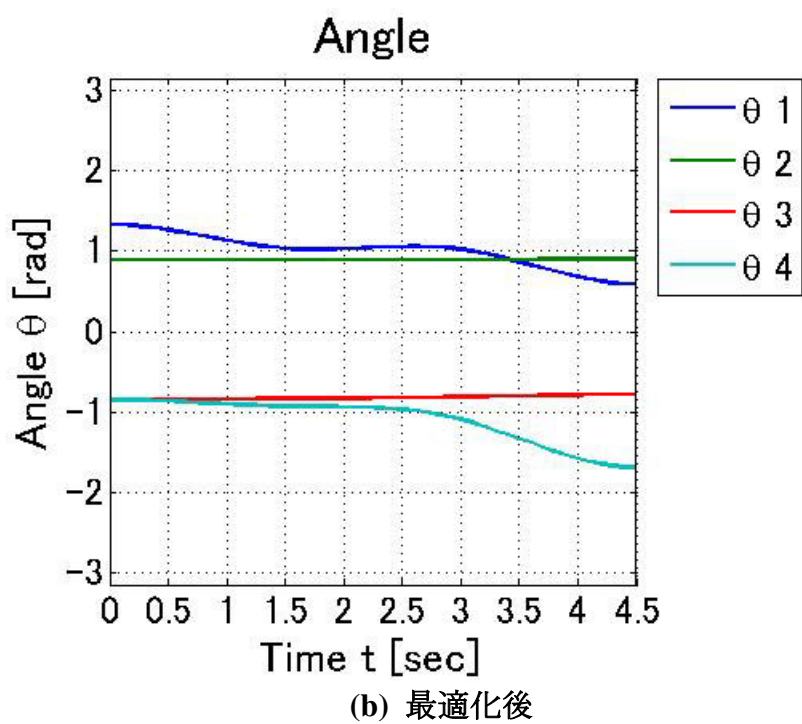
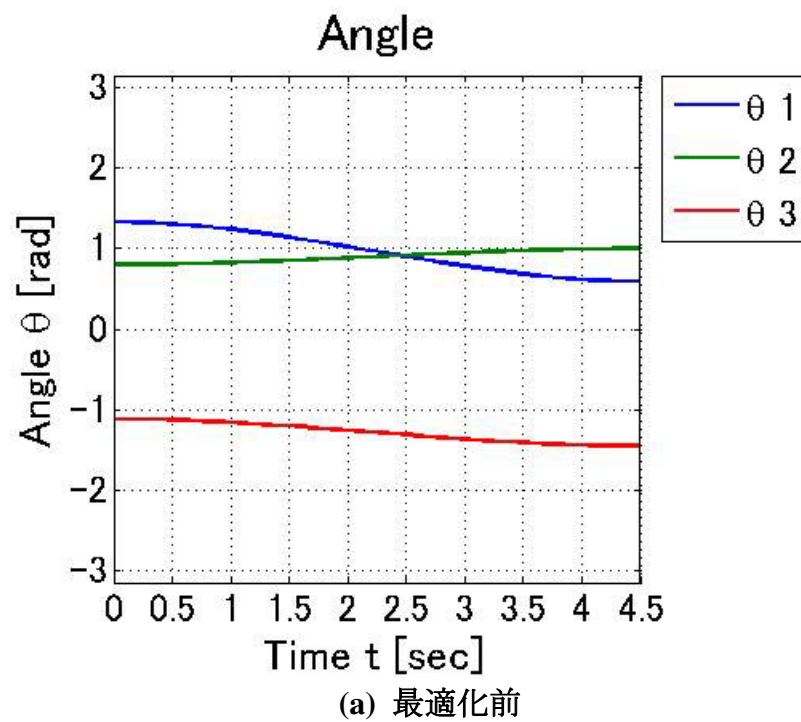


図 5.6 各場合における角度変化

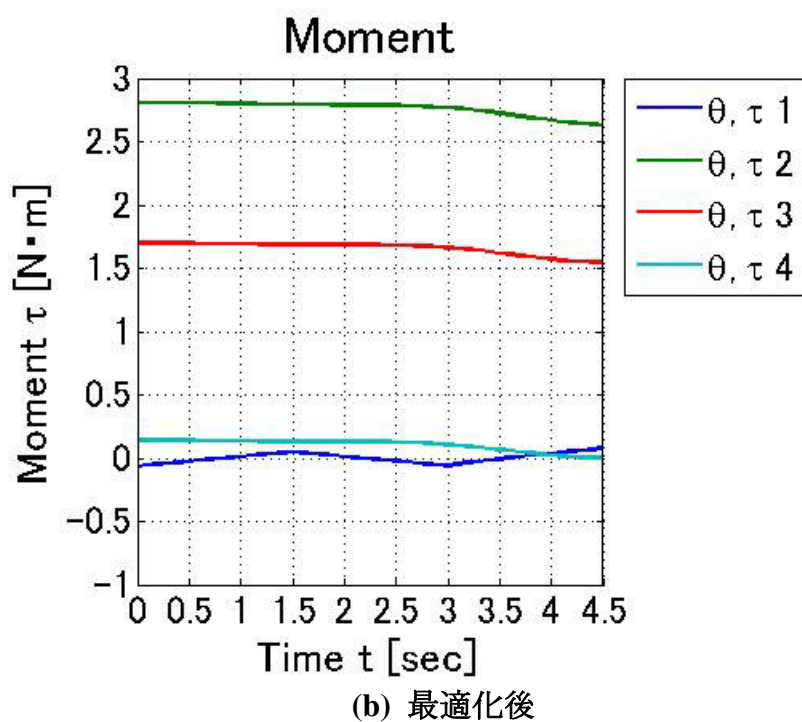
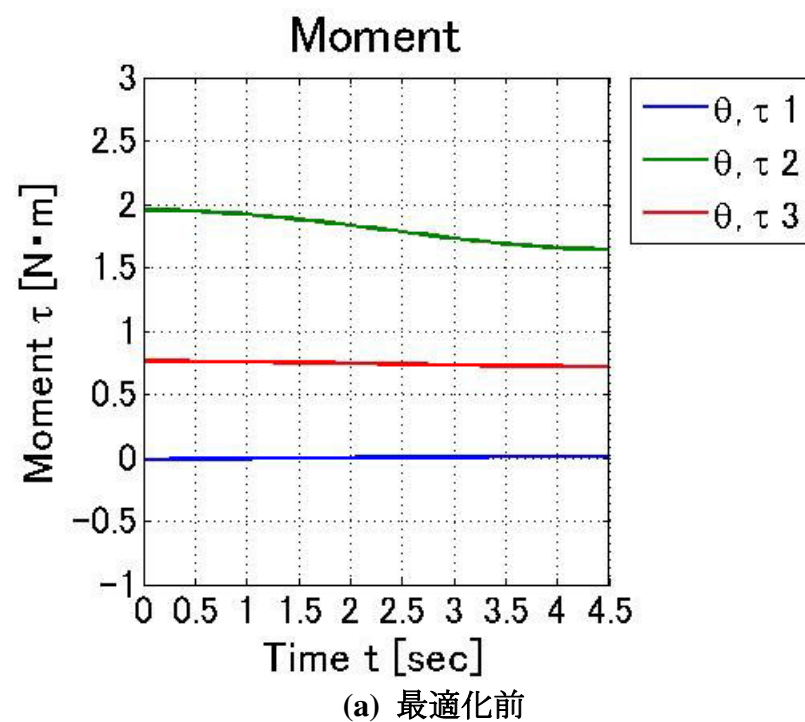


図 5.7 各場合における関節トルク変化

5.5 実用問題への貢献

ロボットアームの最適な関節数，リンク長，軌道を同時に求める提案手法を三次元空間に拡張することにより，例えば図 5.8 のように A から B まで作業する溶接ロボットの消費エネルギーを最小化することができる．つまり，初期設計の段階から最適な関節数，リンク長，軌道を求めることができ，作業効率性を上げ，経済的な利益が発生できると考えられる．また 2 点間だけではなく軌道計画を増えることも可能となり，作業環境や，作業内容を考慮する詳細設計の段階においても適用でき，さらなる有効性が生じると考えられる．

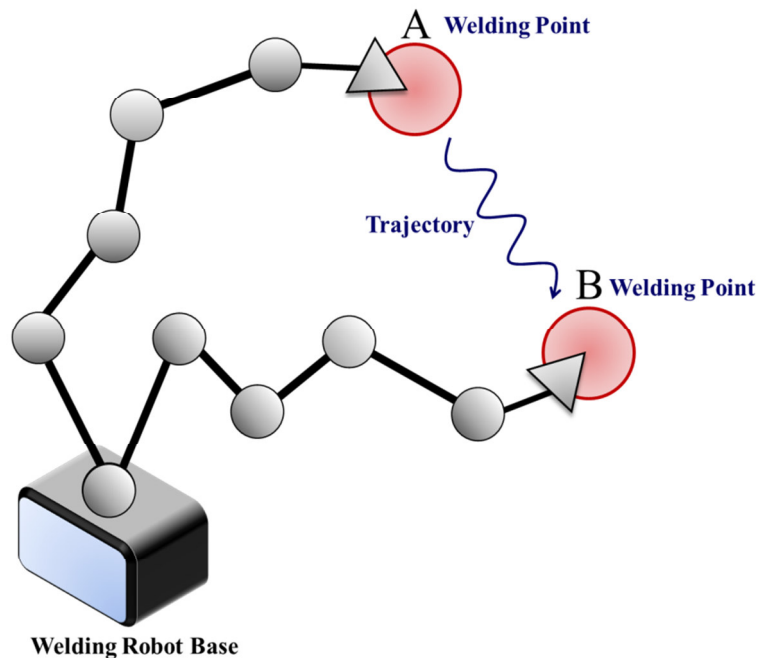


図 5.8 溶接ロボットへの適用例

5.6 本章のまとめ

本章では最適化の対象を前章の二次元平面から三次元空間内で運動するロボットアームの最適設計手法に拡張した．3，4 章で提案した手法を直接三次元問題に拡張した場合，逆運動学問題の解や消費エネルギーの数値計算において莫

第 5 章

大な計算量が生じる。

そのため本章では、計算の負担を減らす方法を提案し、提案した手法により遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて最適解を探索した。具体的には、最適化する関節数の制限を三関節までとし、度変化量、角度の制限をロボットアームへ与える手法を提案した。すなわち、角度の制限により関節角度が 0 となることを防止し、また角度変化量の制限により関節角度がいきなり 0 になることを防いだ。角度制限だけでも特異姿勢となることを防止することができるが、角度変化量の制限により、早い段階で実際再現可能な解か判断ができた。

その結果、提案した手法により特異姿勢を避ける結果を得ることができた。また、最適な関節数は 3 関節であり、消費エネルギー 64 [%] 減少を達成した。重力によるエネルギー消費を減らすため Z 軸の高さが低い軌道となるように最適化が行ったと思われる。

この結果は、提案した最適化手法が 2 次元だけではなく三次元でも通用できると確認できた。三次元の剛体ロボットアームの最適な関節数やアームの長さについてはさらに研究を継続させていろいろな観点から検討する必要があるものと考えられる。

第 6 章

結論と今後の展望

6.1 本研究の結論

本論文では、剛体と仮定した多関節ロボットアームを対象とし、従来の研究におけるあらかじめ関節数やリンク長が固定された下における研究が主であるなどの問題点考えた。その問題点を解決するため選定した課題を基に、ロボットアームの初期設計段階における最適な関節数、リンク長、軌道を求める手法を以下の四点との関係を特に考慮した新たな手法を提示した。提案した手法は、後続の詳細設計の段階でも作業環境、制御、作業内容などの最終的な要求に対しても適用できる汎用性のある手法を示した。

(I) 冗長自由度との関係

多関節ロボットアームがその次元を超える自由度を持つと冗長自由度が発生する。この冗長自由度を有効に利用するための適切な関節角度を設計変数とする最適設計手法を提案した。

(II) 軌道との関係

軌道が最適な関節数やリンク長に及ぼす影響を明らかにするため、まず始点から終点まで固定した軌道を与え、各軌道による最適化結果を比較する方法（効果量比較）を提示する予備的な研究を行った。その結果、軌道が最適な関節数やリンク長に与える影響は大きいことがわかり、スプライン曲線のコントロールポイントを設計変数として軌道そのものを最適化する手法を提示した。

(III) 目的関数との関係

初期設計の段階における大局的な目的関数として一般的な評価指標の一つである消費エネルギーを最小化する単目的最適化問題や関節が増えて生じる冗長自由度の問題と特異姿勢を防ぐため可操作度を目的関

第6章

数として加えた多目的最適化問題の定式化手法を提示した。

(IV) アクチュエータとの関係

アクチュエータの種類やその軌道方式は多く存在し、初期設計の段階で関節数やリンク長の設計に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

しかしながらそれらを包含した設計を行うことは難しいものと考えられる。そこでアクチュエータを関節部に設置されたダイレクト軌道方式と想定して質量を考慮し、運動方程式に従うダイナミクスによって計算される消費エネルギーに間接的に反映させる簡便な手法を取った。

提案した手法は、それに続く詳細設計などにおける作業空間や作業内容、制御などの各章で得られた具体的な結論を以下に簡単にまとめて記す。

第3章では、本論文の中心となる第4章に対する予備的な研究と位置付け、代表的な軌道を考えて軌道を固定条件で多関節ロボットアームの初期設計段階における大きな目的関数の一つである消費エネルギーを最小化する最適な関節数とリンク長を求めた。すなわち、軌道の相違による最適な関節数、リンク長の影響を明らかにするため問題の簡略化を行い、計画した固定軌道を与えた場合の最適な節数とリンク長を求めた。得られた結果は運動特性、効果量の分析を行い、その結果、以下の点を明確することができた。

- (I) 提示した手法により与えた三つの軌道に対して消費エネルギーが削減でき、複雑な軌道より簡単な軌道の場合がよりその効果が高いことが分かった。その際、軌道の相違によって最適な関節数やリンク長に大きな影響を受けることがわかった。
- (II) 角度、加速度、関節トルクの変化から最適化の傾向は、関節トルクが大きい根元リンクの動きが減少する分、手先リンクが動くような方向で最適化が進行したことが分かった。
- (III) 効果量分析により根元リンク長と手先リンク長はエネルギー消費の面ではトレードオフの関係があることを明確にした。
- (IV) 消費エネルギーの最小化により最適化を行ったが、ある領域では特異姿勢となりその結果、角速度が急上昇することが不自然な運動が観察された。その解決策として特異姿勢を防ぐ目的関数の検討が必要なことが分かった。
- (V) 最後に本章の結果はウエハー搬送ロボットなどにおいて実用的にも有効であることを述べた。

第4章では、第3章の予備的な研究の結果、最適な関節数やリンク長に大きな影響を及ぼすことが判明したために、その影響を避けるために前章で指摘し

た特異姿勢を防ぐ目的関数の検討として初期設計段階におけるもう一つの重要な目的関数と考えられる可操作度の評価値を導入し、消費エネルギーの最小化と可操作度の最大化を行う多目的最適化問題について研究を行った。すなわち、多関節ロボットアームの関節数、リンク長、軌道の同時最適化を行い、その解を求めた。また得られた結果を検討するとともにモデル実験により検討を行った。その結果、以下の点を明確にすることができた。

- (I) 提示した手法により多目的最適化を行い、パレート解を求め、消費エネルギーと可操作度にはトレードオフの関係があることが分かった。
- (II) 複数のパレート解の中から設定した理想点との距離が最も短い一つの解を選ぶ方法を提示して消費エネルギーの削減と可操作度の増加を達成した。
- (III) 実際のロボットアームを製作し、最適化結果のデータに基づいてモデル実験を行った。その結果、実際のロボットアームの消費エネルギーの減少を確認し、提案した手法の妥当性や効果を実験的に確認することができた。
- (IV) 本章で得られた成果はウエハー搬送ロボットなどにおいて実用上も有効であることを述べた。

第5章では、さらに一般的な三次元空間内のロボットアームの最適な関節数、リンク長、軌道を求める問題に拡張した。すなわち、提案した手法のより汎用性を持たせるために最適化の対象を三次元空間内で運動する多関節剛体ロボットアームに拡張し、その対象に適合する最適化問題を設定した。ロボットアームが三次元内を動くこととなり、三次元空間の運動の場合、ロボットアームを運動学や動力学で表現すると数多い超越関数の非線形式として表せる。したがって、目的関数を計算するためには莫大な計算量が必要となり、計算時間の縮小をはかるために移動や回転を少なくできることも指摘した。そのために本章では可操作度を目的関数から除外し、その代わり制約条件を利用して特異姿勢を防ぐ方法を提案した。その結果、以下の点を明確にすることができた。

- (I) 提案した手法により、三次元のロボットアームでも消費エネルギーの減少を達成した。
- (II) 制約条件の追加によりロボットアームが特異姿勢にならない効果を確認した。

これらの各章で得られた新しい知見は、今後のロボットアームの構造設計において初期設計の段階からより効率的な設計をするために工学的に十分寄与ができるものと考えられる。

第6章

6.2 今後の展望

本論文の最適化の結果を観察してみると，上腕が前腕より長い人間の腕とは異なる結果となっていることが分かる．その理由についてはさらに研究する必要があるが，人間の腕は本研究で提示した目的関数や制約条件だけではなくより複雑な環境で進化された結果だと思われる．

そのため本研究における今後の展望を以下のように記す．

6.2.1 弾性体と仮定したロボットアームの最適化

本研究では，ロボットアーム剛体と仮定し，変形はないと仮定した．しかし，実際のロボットアームは図 6.1 のように弾性体で変形の影響をうけるものも多く見られる．特に，荷重負荷が大きな作業をするロボットアームまたはリンクが細くて長いロボットアームにはより変形の影響をうける．

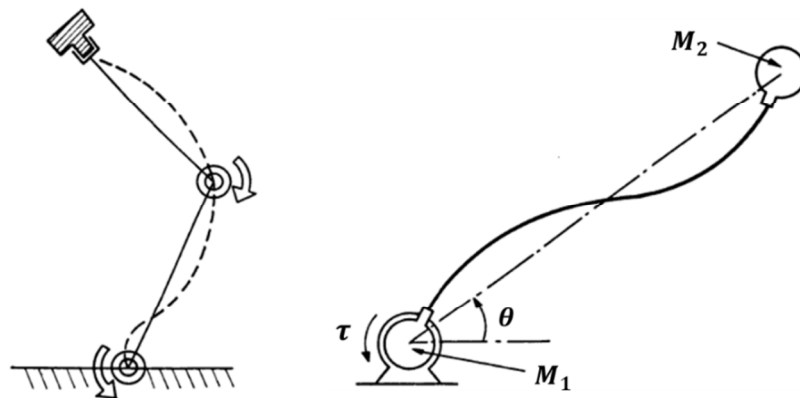


図 6.1 弾性体と仮定したロボットアームのモデル

このような弾性体のフレキシブルマニピュレータについての軌道最適化などはすでに研究されているが [62] ～ [66]，本研究の目的である．最適な関節数，リンク長についてはまだ研究されていない．

従って，ロボットアームを弾性体と仮定し，変形や応力分布や振動の概念を加えることにより，制約条件と目的関数として変形や応力や振動を加えた最適化問題の定式化ができ，より現実的な最適化結果が得られる可能性も考えられる．

本研究において得られた剛体リンクのモデル化は図 6.2 に示すような多数の剛体リンクと回転バネを新たに導入することで弾性アームを取り扱うことができると考えられる [67]．

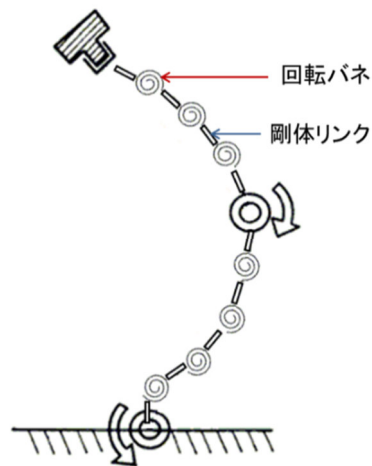


図 6.2 剛体リンクと回転バネによる弾性体のモデル化 [67]

6.2.2 作業頻度を考慮した最適化

本研究では，任意の始点と終点を決めてその軌道を求めた．この方法で作業が決まっている場合には適用できると思うが，より客観性を持つためには軌道を定量的に定義する必要があると思われる．

例えば，図 6.3 に示した 2 関節ロボットアームのように，多関節ロボットアームは作業半径を持っている．しかし特異点の問題で可操作度が 0 となる作業半径までの作業や根元近辺での作業はほとんど行っていない．つまり作業頻度が高い領域が存在し，そこで確率分布または正規分布の導入などを考え，多関節ロボットアームの動きを確率的な観点から客観的に表すことが可能だと考えられる．究極的には「確率分布〇〇の作業頻度〇〇では，〇関節の〇〇リンク長」というテーブルを提出することも可能であると考えられる．

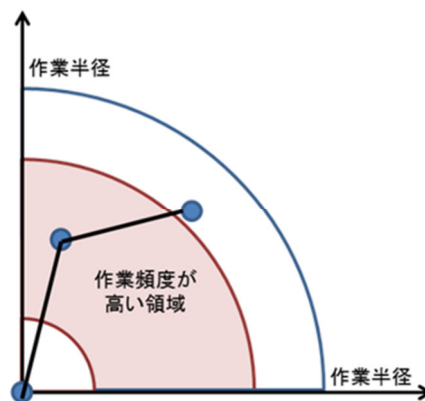


図 6.3 ロボットアームの作業頻度の概念

第6章

6.2.3 アクチュエータの問題

本論文では種類の多いアクチュエータの選択や軌道方式の決定などの問題は、初期設計における最適な関節数やリンク長の決定に大きな影響を及ぼすのを確認していることから問題の複雑化を避けるためにダイレクト・ドライブ方式を想定して、関節数の増加に伴ってアクチュエータの数を増加させる状態を考え、アクチュエータの質量のみを考慮して動力学によって計算させる消費エネルギーに反映させる簡便な方法を採用した。すなわち関節数やリンク長を決めた上でアクチュエータの種類や駆動方式を改めて続く設計の流れで考慮して提示した手法で最適化を行う方法を示した。

しかしながら初期設計の段階でアクチュエータの種類やその駆動方式をある程度、最適化問題に組み込むことは可能と考えられが、問題がさらに複雑化するために今後の研究が必要である。

参考文献

- [1] <http://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/rbt/robot/>
- [2] 米田，坪内，大隅「はじめてのロボット創造設計」講談社，2001
- [3] <http://akihikomatsumoto.com/maxmsp/fm.html>
- [4] <http://ktwr.luna.weblife.me/wlwp1/fibonacci-number/>
- [5] Zvi Shiller 「Design of robotic manipulators for optimal dynamic performance」
IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 344/349
(1991)
- [6] 室巻 孝郎，多田 幸生「フレキシブルロボットアームの多目的形状設計」最適化シンポジウム講演論文集 2006(7)，51/56（2006）
- [7] B. K. Rout and R. K. Mittal 「Optimal design of manipulator parameter using evolutionary optimization techniques」 Robotica, Vol.28, 381-395 (2010)
- [8] 毛利，圓島，山本「マニピュレータの近似最短時間軌道計画（エンドエフェクタが侵入禁止空間を回避する場合）」日本機械学会論文集．C 編 56(530), pp. 2637-2641（1990）
- [9] Luis A. Loeff and A. H. Soni 「An Algorithm for Computer Guidance of a Manipulator in Between Obstacles」 Trans. Of ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.97-3, pp. 836-842(1975)
- [10] 斎藤「極小点のないポテンシャル場を用いたロボットの動作計画」日本ロボット学会誌，Vol.11-5，pp. 702-709（1993）
- [11] 楊，山本，毛利「ポテンシャル関数を用いるマニピュレータの衝突回避軌道計画」日本機械学会論文集．C 編 60(575)，pp. 2345-2350（1994）
- [12] 尾崎，林，麻生「B スプライン制御点最適化によるマニピュレータ障害物回避軌道の生成」日本機械学会論文集．C 編 61(586)，pp. 2495-2500（1995）
- [13] 山本，毛利「大域的探索とこう配法によるマニピュレータの障害物回避準最短時間軌道計画」日本機械学会論文集．C 編 62(597)，pp. 1872-1879（1996）

参考文献

- [14] Indra Adji, Sulistijono 「Human-friendly Arm Robot Using Interactive Particle Swarm Optimization for Trajectory Generation」 ICROS-SICE International Joint Conference, 229/234 (2009)
- [15] Nicolas Schmit and Masafumi Okada 「Simultaneous optimization of robot trajectory and nonlinear springs to minimize actuator torque」 2012 IEEE International Conference, 2806/2811 (2012)
- [16] S. Mahalakshmi and R. Sumathi 「Fuzzy enhanced advanced genetic algorithm for robot trajectory optimization」 IEEE International Conference Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM-2012), 621/626 (2012)
- [17] Lee, Yamakawa 「Simultaneous Optimization of Trajectory and Shape for Flexible Manipulators」 Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. C 65(638), 4084/4092 (1999)
- [18] 白井, 秋原, 松本 「救護ロボットアームの本数, 長さ, 軌道の同時最適化」日本機械学会 No.00-6 Dynamic and Design Conference, 132 (2000)
- [19] A. Liegeois, 「Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms」 IEEE Trans. SMC, Vol. 7-12, pp. 868-871(1977)
- [20] 花房, 吉川, 中村 「多関節ロボットアームの冗長性の解析とその優先順位を有する作業への適用」計測自動制御学会論文集, Vol. 19-5, pp. 421-426 (1983)
- [21] H. Zghal, R. V. Dubey and A. Euler 「Collision Avoidance of Multiple Degree of Redundancy Manipulator Operating Through a Window」 Journal of Dynamic System, Measurement and control, Vol. 114, pp. 717-721(1992)
- [22] 荒川, 福田 「冗長マニピュレータの軌道生成」第 13 回日本ロボット学会学術講演会公演論文集, pp. 509-510 (1995)
- [23] 島地, 渡辺 「マニピュレータの回り込み作業の評価 (キャードリンク機構を用いたマニピュレータの場合)」日本機械学会論文集. C 編 62(597), pp. 1957-1962 (1996)
- [24] 望山, 示村, 小林 「超多自由度マニピュレータの制御: 形状制御に基づく障害物回避手法について」第 14 回日本ロボット学会学術講演会公演論文集, pp. 639-640 (1996)

- [25] 小金澤, 「冗長自由度を有するマニピュレータの逆運動学高速計算法」計測自動制御学会論文集, Vol. 32-3, pp. 341-346 (1995)
- [26] 小林, 樹野, 松山, 大久保「操作性を考慮した冗長マニピュレータの軌道制御」第 13 回日本ロボット学会学術講演会公演論文集, pp. 501-502 (1995)
- [27] 紺野, 馬「実時間姿勢制御による超冗長マニピュレータの可操作性」第 14 回日本ロボット学会学術講演会公演論文集, pp. 635-636 (1996)
- [28] 植野, 中川「冗長マニピュレータ駆動トルクの最適化」第 12 回日本ロボット学会学術講演会公演論文集, pp. 899-900 (1994)
- [29] 馬, D.N.ネンチェフ, 「冗長マニピュレータのための実時間動的冗長性制御法」第 12 回日本ロボット学会学術講演会公演論文集, pp. 901-902 (1994)
- [30] 小田, 村上, 大西「オブザーバに基づく冗長マニピュレータの居所トルク最適化」日本機械学会論文集. C 編 62(602), pp. 3786-3792 (1996)
- [31] 平川, 河村「冗長マニピュレータの消費電力最小化軌道設計」第 14 回日本ロボット学会学術講演会公演論文集, pp. 633-634 (1996)
- [32] John J. Craig 「Introduction to Robotics (Mechanics and Control)」Prentice-Hall (2007)
- [33] B. Roth, J. Rastegar and V. scheinman 「On the Design of Computer Controlled Manipulators」On the Theory and Practice of Robots and Manipulators, International Centre for Mechanical Sciences, Vol. 1, pp. 93-113 (1973)
- [34] L. Tsai and A. Morgan 「Solving the Kinematics of the Most General Six- and Five- degree-of-freedom Manipulators by Continuation Method」ASME, Mechanisms Conference (1984)
- [35] <http://open-robotics.com/>
- [36] 市田浩三, 吉本富士市「スプライン関数とその応用」教育出版 (1979)
- [37] C.DeBoor 「A practical Guide to Splines, Spring-Verlag」New York (1978)
- [38] D.Rogers and J.A.Adams 「Mathematical Elements for Computer Graphics」McGraw-Hill, New York (1976)
- [39] 吉川「ロボットアームの可操作度」日本ロボット学会誌 2-1, pp. 63-67 (1984)

参考文献

- [40] Goldberg, D. E. 「Genetic Algorithms in Search, Optimization and machine Learning」 Addison Wesley (1989)
- [41] G. Syswerda 「Uniform Crossover in Genetic Algorithms」 Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithm, ICGA, pp. 2-9 (1989)
- [42] Whitte, T. and Oppacher, F. 「Adaptive Crossover Using Automata」 Proceedings of Parallel Problem Solving form Nature III, PPSN-III, pp. 229-238 (1994)
- [43] Voigt, H. M., Mühlenbein, H. and Cvetkovic, D 「Fuzzy Recombination for the Continous Breeder Genetic Algorithm」 Proceedings of the sixth International Conference on Genetic Algorithms, ICGA, pp.104-113 (1995)
- [44] Goldberg, D. E. and Deb, K. A 「Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms」 Proceedings of Foundations of Genetic Algorithms, FOGA-1, pp. 69-93 (1991)
- [45] Kreutx, M., Sendhoff, B. and Igel, C 「EALib:A C++ Class Library for Evolutionary Algorithms」 Institut für Neuroinformatik, Ruhr Universität Bochum (2000)
- [46] Zhang, B. T. and Kim, J. J 「Comparison of Selection Methods for Evolutionary Optimization」 Evolutionary Optimization : An International Journal on the Internet, Vol. 2-1, pp. 55-70 (2000)
- [47] 中山, 岡部, 荒川, 尹 「多目的最適化と工学設計 : しなやかシステム工学アプローチ」 現代図書 (2007)
- [48] 吉川恒夫 「ロボット・マニピュレータ」 コロナ (1984)
- [49] 松日楽 信人 (著), 大明 準治 「わかりやすいロボットシステム入門—メカニズムから制御まで」 オーム社 (1999)
- [50] 本多 庸悟 「ロボット工学の基礎 単行本 - 2003/2/1」 昭晃堂 (2003)
- [51] Geoff Cumming 「Cohen's d needs to be readily interpretable: Comment on Shieh」 Behavior Research Methods, Vol. 45-4, pp 968-971 (2013)
- [52] Grissom, R. J. and Kim, J. J. 「Effect sizes for research: Univariate and multivariate applications 」 New York: Routledge (2012)
- [53] Fonseca, C. M. and Fleming, P. J. 「Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization, Formulation, Discussion and Generalization」 Genetic Algorithms,

- Proceedings of the Fifth International Conference, pp. 416-423 (1993)
- [54] Horn, J., Nafpliotis, N. and Goldberg, D. E. 「A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization」 Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vol. 1, pp. 82-81 (1994)
 - [55] Srinivas, N. and Deb, K. 「Multiobjective Optimization Using Non-dominated Sorting in Genetic Algorithms」 Evolutionary Computation, Vol. 2-3, pp. 221-248 (1994)
 - [56] 北山, 山崎, 荒川, 山川「多目的最適設計におけるトレードオフ分析法」日本機械学会論文集. C 編 75(754), pp. 1828-1836 (2009)
 - [57] 北山, 荒川, 山崎「領域適応型 Particle Swarm Optimization の提案」日本機械学会論文集. C 編 73(725), pp. 280-287 (2007)
 - [58] Ehrgott, M. 「Multicriteria Optimization (2nd Edition)」 Springer (2005)
 - [59] Nakayama H. 「Trade-off Analysis Using Parametric Optimization Technique」 European J. Operational Research 60, 87-98, 1992
 - [60] 坪内, 大隅, 米田「これならできるロボット創造設計」講談社, 2001
 - [61] 美田, 大須「ロボット制御工学入門」
 - [62] S. Tzafestas and H. Kanoh 「dynamic Study of Flexible Manipulators」 Proceedings of IMACS/IFAC, Hiroshima Congress, pp. 261-276 (1987)
 - [63] 下山 勲, 三浦 宏文「静たわみ曲線を利用したフレキシブルアームの動力学モデル」日本ロボット学会誌 Vol. 6-5, pp. 367 (1988)
 - [64] 吉川, 細田「仮想的な剛体リンクと受動関節を用いたフレキシブルアームのモデリング」計測自動制御学会, Vol. 27-12, pp. 1389-1395 (1991)
 - [65] 外本, V. J. Modi 「直動リンクを持つ柔軟宇宙ロボットの運動方程式とダイナミックス」日本機械学会論文集. C 編 62(596), pp. 1495-1502 (1996)
 - [66] フェリペ・デラ・ローサ, 梅原「非駆動関節を有する 2 リンク超軽量フレキシブルアームの軌道制御」No.01-5 Dynamic and Design Conference, 527 (2001)
 - [67] 山川宏, 多部田和利「幾何学的非線形性を考慮したフレキシブルアームの構造系と制御系の同時最適化に関する研究」日本機械学会, 機械力学・計測制御講演論文集 (A) pp. 386-389 (1994)

参考文献

謝 辞

本研究を進めるにあたり，懇切なる御指導と御激励を賜りました早稲田大学
山川宏教授に心より感謝の意を表します．2008 年 4 月，創造理工学研究科の科
目等履修生として早稲田大学に入ってから 8 年が過ぎました．その間，山川宏
先生には学問とその他公私のさまざまな面で数多くのことを教えて頂きました．
重なって厚く御礼を申し上げます．

また本論文をまとめるにあたり，有益な御教示，御助言を賜りました早稲田
大学 菅野重樹教授，宮下朋之教授，上杉繁教授 に深く感謝致します．

謝 辭

研究業績

(2015 年 2 月 現在)

種 類 別	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む）
論文	
○	初期設計段階における多関節ロボットアームの関節数，リンク長，軌道の多目的最適化に関する研究，計測自動制御学会論文集，51 巻第 4 号(2015 年 4 月号掲載決定)
○	Multi-Objective Optimization For Number of Joints and Lengths of Multi-Jointed Robot Arm, <i>Proc. of International Conference on Innovative Engineering Systems (ICIES2012)</i> , Dec. 2012, Hyeongjun Kim, Hiroshi Yamakawa
○	Research on Optimal Number and Length of Multi-Jointed Robot Arm, <i>Proc. of 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference (2012)</i> , Sep. 2012, Hyeongjun Kim, Hiroshi Yamakawa
○	Research on Optimal Number and Length of Multi-Jointed Robot Arm, <i>Proc. of 9th World Congress On Structural and Multidisciplinary Optimization 2011</i> , Jun. 2010, Hyeongjun Kim, Hiroshi Yamakawa
講演	
	3 次元空間内の多関節ロボットアームの最適な関節数，リンク長，軌道に関する研究，第 57 回回自動制御連合講演会，2014 年 11 月，金亨俊，山川宏
	Optimization of Trajectory, Number of Joints and Shape of Links for Multi-Jointed Robot Arm, <i>The 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems 2014</i> , May 2014, Hyeongjun Kim, Hiroshi Yamakawa

研究業績

種 類 別	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む）
講演	<p>多関節ロボットアームの最適な関節数，リンク長，軌道に関する研究，第 14 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 SI2013，2013 年 12 月，金亨俊，山川宏</p> <p>ロボットアームの運動と最適な関節数とリンク長に関する研究，第 54 回自動制御連合講演会，2011 年 11 月，金亨俊，山川宏</p> <p>ロボットアームの最適な関節数とリンク長に関する研究，第 14 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 SI2013，2010 年 12 月，金亨俊，山川宏</p>