

劣駆動メカニズムの  
タスクベース設計法の研究

鎌田翔一郎



# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 義手の現状	1
1.1.1 義手の種類	1
1.1.2 現在の筋電義手の特徴	4
1.2 人間の手の構造と動作	5
1.2.1 手の骨格	5
1.2.2 手の関節	6
1.2.3 手の動作の分類	8
1.2.4 手の機能の評価	10
1.3 関節の運動の低次元化	10
1.4 これまでのロボットハンドの研究	11
1.4.1 関節が個別のアクチュエータで駆動されるロボットハンド	11
1.4.2 アクチュエータが複数の関節と接続しているロボットハンド	12
1.5 研究目的とアプローチ	13
1.6 本論文の構成	15
<b>第2章 アクチュエータの変位を線形加算する劣駆動機構</b>	<b>19</b>
2.1 線形従属機構	19
2.2 流体を用いた線形従属劣駆動機構の実現方法	21
2.2.1 複数のアクチュエータの変位を線形加算する機構	21
2.2.2 少数の入力を線形加算して多数の出力に変換する機構	23
2.3 ワイヤとプーリを用いた線形従属劣駆動機構の実現方法	24
2.3.1 2つのアクチュエータの変位を線形加算する機構	24
2.3.2 3つ以上のアクチュエータの変位を線形加算する機構	29
2.3.3 少数の入力を線形加算して多数の出力に変換する機構	30
2.4 本章のまとめ	31
<b>第3章 タスクが運動学で定義される場合の設計手法</b>	<b>33</b>
3.1 線形従属劣駆動機構の設計	33
3.1.1 PCA-based method	36
3.1.2 最小二乗解と正規方程式	38
3.1.3 BPLP-based method	39
3.1.4 PCDM と BPDM の比較	40

3.1.5 可操作性楕円体 .....	40
3.2 リンク長さの設計 .....	41
3.2.1 PCA-based method における設計 .....	45
3.2.2 BPLP-based method における設計 .....	46
3.3 設計例 .....	47
3.3.1 ロボットハンドの設定 .....	47
3.3.2 タスクの設定 .....	48
3.3.3 PCDM の設計例 .....	50
3.3.4 BPDM の設計例 .....	53
3.4 関節座標空間の誤差と作業座標空間の誤差の関係 .....	58
3.5 本章のまとめ .....	59
<b>第4章 タスクが運動学と静力学で定義される場合の設計手法 .....</b>	<b>61</b>
4.1 弾性要素を含むメカニズム .....	61
4.2 線形従属劣駆動機構の設計 .....	64
4.2.1 PCA-based method .....	67
4.2.2 BPLP-based method .....	68
4.2.3 マルチタスクの扱い方 .....	69
4.2.4 タスクの重みづけ .....	69
4.2.5 線形従属劣駆動機構の静力学的特性 .....	70
4.3 リンク長さとはばね定数の設計 .....	71
4.3.1 PCA-based method における設計 .....	72
4.3.2 BPLP-based method における設計 .....	73
4.4 設計例 .....	74
4.4.1 ロボットハンドの設定 .....	74
4.4.2 タスクの設定 .....	74
4.4.3 PCDM の設計例 .....	76
4.4.4 BPDM の設計例 .....	80
4.5 本章のまとめ .....	84
<b>第5章 3次元ロボットハンドの設計 .....</b>	<b>85</b>
5.1 設計するロボットハンドの構成 .....	85
5.2 達成させるタスク .....	87
5.3 PCA-based method による設計 .....	93
5.3.1 線形従属劣駆動機構の設計 .....	93
5.3.2 リンク長さとはばね定数の探索 .....	93



5.3.3 動作の評価 .....	94
5.3.4 アクチュエータに必要なトルク .....	97
5.4 BPLP-based method による設計 .....	97
5.4.1 線形従属劣駆動機構の設計 .....	97
5.4.2 リンク長さとはね定数の探索 .....	98
5.4.3 動作の評価 .....	98
5.4.4 アクチュエータに必要なトルク .....	100
5.5 本章のまとめ .....	100
<b>第 6 章 結論 .....</b>	<b>103</b>
6.1 本論文のまとめ .....	103
6.2 今後の課題 .....	106
6.2.1 動力学への拡張 .....	106
6.2.2 制御方法の検討 .....	106
6.2.3 プロトタイプ製作 .....	107
参考文献 .....	109
謝辞 .....	115
本論文に関する発表論文 .....	117



## 目次

1.1	装飾用義手	2
1.2	作業用義手の手先具	2
1.3	能動義手の使い方	3
1.4	Otto Bock の筋電義手	4
1.5	手の骨格と関節	5
1.6	関節面の形態と関節の分類	7
1.7	Schlesinger の分類	9
1.8	Napier の分類	9
1.9	劣駆動機構を用いたロボットハンドの例	13
1.10	関節数に対するアクチュエータ数と関節の駆動できる空間の関係	14
1.11	本論文の構成	17
2.1	線形従属機構	20
2.2	線形従属劣駆動機構を用いたメカニズム	20
2.3	流体を用いた 2 つの変位を線形加算する機構	21
2.4	流体を用いた任意の数の変位を線形加算する機構	22
2.5	流体駆動の線形従属劣駆動機構を用いたメカニズム	23
2.6	2 つのアクチュエータの変位を線形加算する機構（初期位置）	25
2.7	入力軸 1 のみを駆動させた場合の動作	26
2.8	入力軸 1 と入力軸 2 を駆動させた場合の動作	28
2.9	4 つのアクチュエータの変位を線形加算する機構	29
2.10	2 次元の入力を 3 次元の出力に変換する機構	31
3.1	運動学で定義されるタスクを達成するメカニズムの構成	33
3.2	PCDM のリンク長さの設計手順	45
3.3	BPDM のリンク長さの設計手順	46
3.4	ロボットハンドの設定と対象物の初期位置	47
3.5	運動学で定義されるタスクの手順	49
3.6	設計された PCDM (2 主成分)	51
3.7	軌道の誤差(PCDM: 2 主成分)	52
3.8	設計された BPDM (選択された関節 $\theta_2, \theta_4$ )	54
3.9	軌道の誤差(BPDM: 選択された関節 $\theta_2, \theta_4$ )	55
3.10	設計された BPDM (選択された関節 $\theta_1, \theta_5$ )	57

3.11	軌道の誤差(BPDM: 選択された関節 $\theta_1, \theta_5$ )	58
4.1	LDD と弾性要素の接続	62
4.2	$n$ 関節マニピュレータと $r$ 個のアクチュエータの弾性要素を介した接続	62
4.3	LDD と関節の接続	64
4.4	運動学と静力学で定義されるタスクを達成するメカニズムの構成	65
4.5	PCDM のリンク長さとばね定数の設計手順	72
4.6	BPDM のリンク長さとばね定数の設計手順	73
4.7	設計する 2 次元ロボットハンド	74
4.8	運動学と静力学で定義されるタスクの手順	75
4.9	設計された PCDM (3 主成分)	78
4.10	設計された PCDM (3 主成分, 重みづけあり)	80
4.11	設計された BPDM (選択された関節 $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ )	81
4.12	設計された BPDM (選択された関節 $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ , 重みづけあり)	83
5.1	設計する 3 次元ロボットハンドの構成	85
5.2	3 次元ロボットハンドの関節	86
5.3	3 次元ロボットハンドに達成させるタスク	88
5.4	初期姿勢の定義と接触点	91
5.5	設計された PCDM (4 主成分)	95
5.6	設計された BPDM (選択された関節 $\theta_1, \theta_2, \theta_7, \theta_{10}$ )	99

## 表目次

1.1 手の関節可動域 .....	7
3.1 関節角度の主成分の寄与率 .....	48
3.2 作業座標空間での誤差 (PCDM: 2 主成分) .....	53
3.3 作業座標空間での誤差 (BPDM: 選択された関節 $\theta_2, \theta_4$ ) .....	56
3.4 作業座標空間での誤差 (BPDM: 選択された関節 $\theta_1, \theta_5$ ) .....	56
4.1 能動関節角度の主成分の寄与率 .....	76
4.2 タスク 1 の誤差 (PCDM: 3 主成分) .....	78
4.3 タスク 2 の誤差 (PCDM: 3 主成分) .....	78
4.4 タスク 1 の誤差 (PCDM: 3 主成分, 重みづけあり) .....	79
4.5 タスク 2 の誤差 (PCDM: 3 主成分, 重みづけあり) .....	79
4.6 タスク 1 の誤差 (BPDM: 選択された関節 $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ ) .....	82
4.7 タスク 2 の誤差 (BPDM: 選択された関節 $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ ) .....	82
4.8 タスク 1 の誤差 (BPDM: 選択された関節 $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ , 重みづけあり) .....	82
4.9 タスク 2 の誤差 (BPDM: 選択された関節 $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ , 重みづけあり) .....	83
5.1 12 主成分の寄与率 .....	92
5.2 タスク 1 の誤差 (PCDM: 4 主成分) .....	97
5.3 タスク 2 の誤差 (PCDM: 4 主成分) .....	97
5.4 タスク 3 での対象物の回転角度[deg] (PCDM: 4 主成分) .....	97
5.5 アクチュエータに必要なトルク[N·m] (PCDM: 4 主成分) .....	97
5.6 タスク 1 の誤差 (BPDM: 選択された関節 $\theta_1, \theta_2, \theta_7, \theta_{10}$ ) .....	98
5.7 タスク 2 の誤差 (BPDM: 選択された関節 $\theta_1, \theta_2, \theta_7, \theta_{10}$ ) .....	98
5.8 タスク 3 での対象物の回転角度[deg] (BPDM: 選択された関節 $\theta_1, \theta_2, \theta_7, \theta_{10}$ ) .....	98
5.9 アクチュエータに必要なトルク[N·m] (BPDM: 選択された関節 $\theta_1, \theta_2, \theta_7, \theta_{10}$ ) .....	100



# 第1章

## 序論

### 1.1 義手の現状

#### 1.1.1 義手の種類

上肢は、人間が日常生活を営む上で非常に重要な役割を果している。そのため、事故や病気が原因で上肢を失った場合には、その重要な機能や外観を失うことになる。義手とは、上肢を切断した場合に、欠損した機能や外観の再現をすることを目的とした義肢のことである。厚生労働省の平成18年度身体障害児・者実態調査によると、日本では上肢切断者が約8万人いる[1]。現在は、大きく分けて4種類の義手が存在し、上肢切断者の症状や生活環境、使用目的に合わせて用いられている[2][3]。以下にそれら4種類の義手の特徴をまとめた。

#### (A) 装飾用義手

装飾用義手は、上肢の外観の再現を主な目的として考えられた義手であり、手先具に合成樹脂製の装飾用手袋(cosmetic glove)がかぶせられている。日本では、1年間に製作される義手総数の80%以上が装飾用義手であるといわれている[4]。現在は、かぶせる装飾用手袋を製作する技術が高くなり、図1.1のように外観が非常に健側手に近いものを製作することができる。日常生活を営むための機能としては、ものを押さえることや対象物を他動的に

保持する程度のことしかできない。



図 1.1: 装飾用義手

## (B) 作業用義手

作業用義手とは、外観にとらわれず、種々の特定の作業に適するように設計された義手である。肘継手、手継手を組み込んだ骨格構造で手先具交換式である。図 1.2 に示すように、手先具には、曲鉤、双嘴鉤、物押さえ金具、鋤持ち金具などがある。それらの手先具をバヨネット構造の手継手によって自助具のように作業ごとに交換する。特に、農業、林業、木工作业などを行う上肢切断者に利用されている。

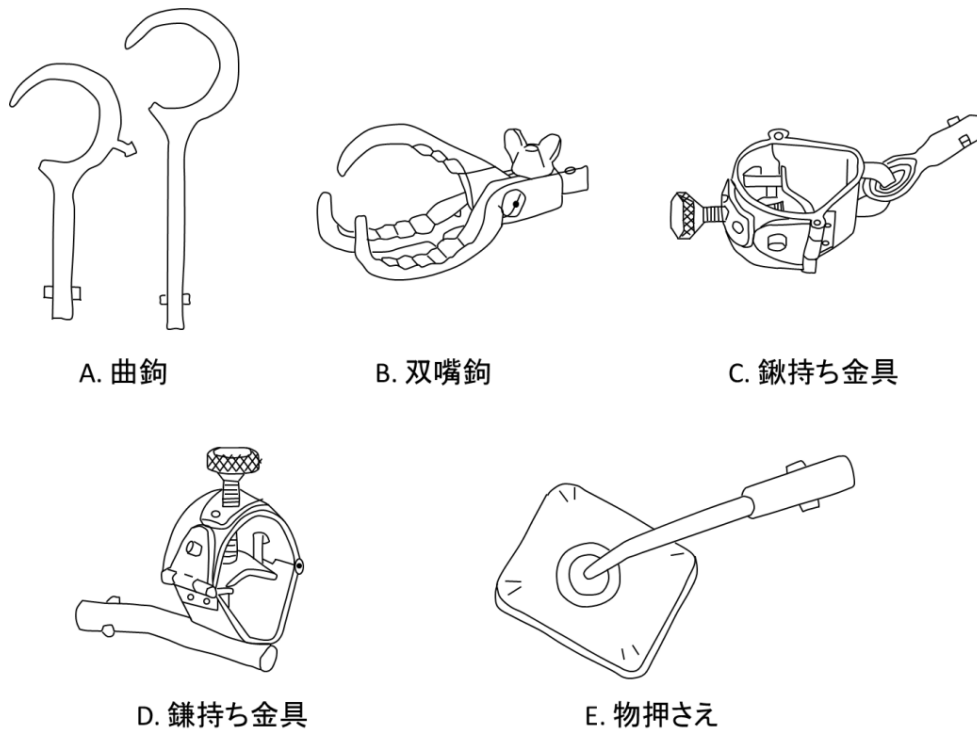


図 1.2: 作業用義手の手先具 ([2]より引用)



### (C) 能動義手

能動義手とは、上肢帯および体幹の運動を義手の制御のために利用し、ケーブルを介して専用の継手や手先具を操作する義手である。上半身にハーネスと呼ばれるループ状になったストラップを装着し、肩周辺の僅かな動きをケーブルで義手の肘継手や手先具に伝達することによって操作する。能動義手を操作するには、基本的には図 1.3(b)のように肩関節の屈曲を利用する。ただ、場合によっては図 1.3(c)のように肩をすぼめるような運動が必要な場合がある。この運動は主に、能動義手を体の近くで操作する場合に用いられる。

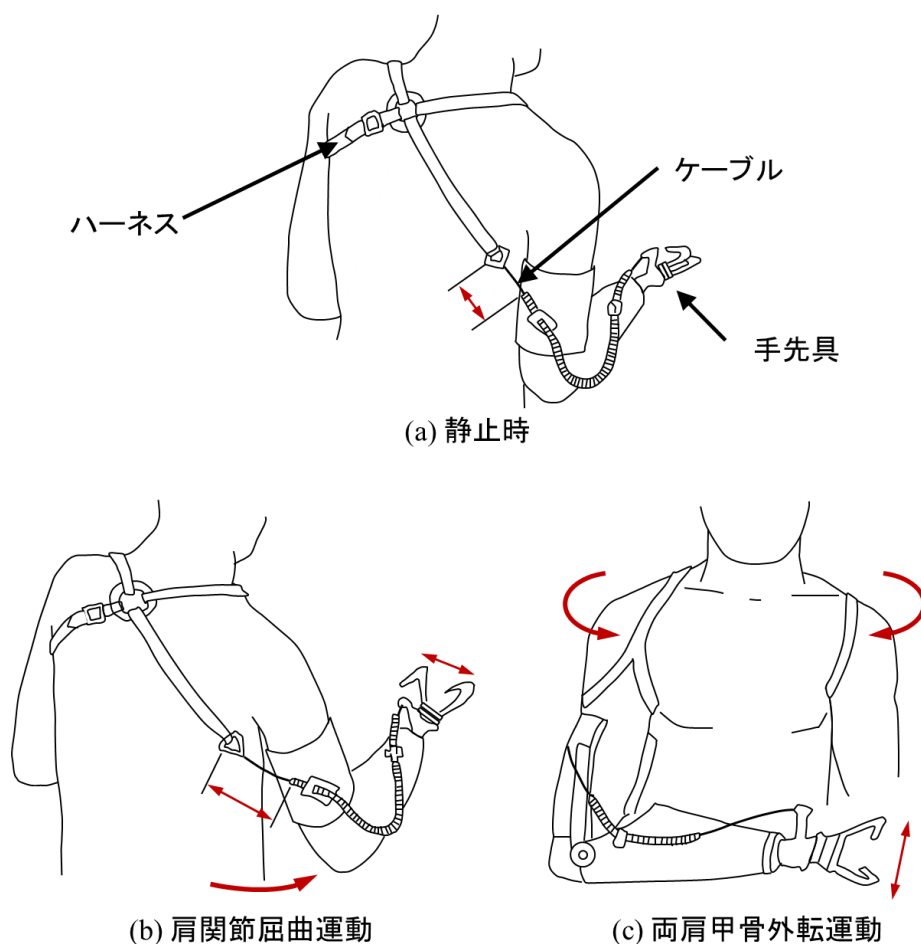


図 1.3: 能動義手の使い方 ([5]より引用)

### (D) 動力義手

動力義手とは、体外に駆動させるための動力源をもつ義手である。動力源の種類で分類すると、液体炭酸ガスを利用したガス義手と電気を利用した電動義手に分かれる。ガス義手はドイツやイギリスでは実用化されているが、日本ではガスボンベの携帯、及び充填が難しいため実用化されていない。電動義手の中には、制御をスイッチで行うものと筋電制

御で行うものがある。電動義手の中で、制御を筋電信号で行うものを筋電義手という。筋電義手は日本では普及が進んでいないが、欧米では標準的な義手として広まっている[6]-[8]。

### 1.1.2 現在の筋電義手の特徴

筋電義手は、装飾性と機能性をあわせもつ義手であり、その研究開発が期待されている。実用的な筋電義手は1960年代に旧ソ連で初めて製品化された[9]。それは、Russian hand とよばれ1万人以上に装着されたといわれている。その後、欧米の各国に広まり、1970年代の終わりには日本でもWIMEハンドが市販された[10]。

現在市販されている筋電義手のほとんどは、アクチュエータとしてDCモータを用いている。原田電子工業[11]やTouch Bionics[12]の義手のように、5本の指をもち各指が独立に駆動させられるような筋電義手もあるが、ほとんどの筋電義手は1つか2つ程度のアクチュエータしか用いられていない[13]-[15]。また、機構としては、指の開閉機構が母指とそれと対向する指からなり、つまみ動作を基本として設計されている。図1.4は、Otto Bockの筋電義手[13]である。この筋電義手は、1つのDCモータと3本の指からなり、母指とそれと対向する指を開閉させることができる（図1.4(a)）。実際に使用する場合は、合成樹脂の手袋を機械の部分にかぶせる（図1.4(b)）。



(a)



(b)

図 1.4: Otto Bock の筋電義手

## 1.2 人間の手の構造と動作

人間の手は、複雑な運動行為を可能にする効果器である。その構造は、機構的にみると多自由度な構造をしている。29の筋が、手の19の骨と19の関節を動かしている。本節では、人間の手の構造と機能について述べる[16]-[19]。

### 1.2.1 手の骨格

図1.5に、人間の手の骨格と主な関節の名称を示した。人間の手の骨格は、大きく分けて手根骨(carpal bone または wrist bone)、中手骨(metacarpal bone)、指骨(phalange)で構成されている。手根骨は、手根を構成する8種類の小骨である。4個ずつ近位側（体幹に近い側）と遠位側（体幹に遠い側）に列をつくっている。近位側の骨は、舟状骨、月状骨、三角骨、豆状骨であり、遠位側の骨は、大菱形骨、小菱形骨、有頭骨、有鉤骨である。中手骨は、手根と指の間にある5本の細長い管状骨であり、母指側から順に第1、第2、第3、第4、第5中手骨とよぶ。指骨は、手の指をつくる小さな管状骨で、母指では2個、他の4本の指では、3個の指骨がある。

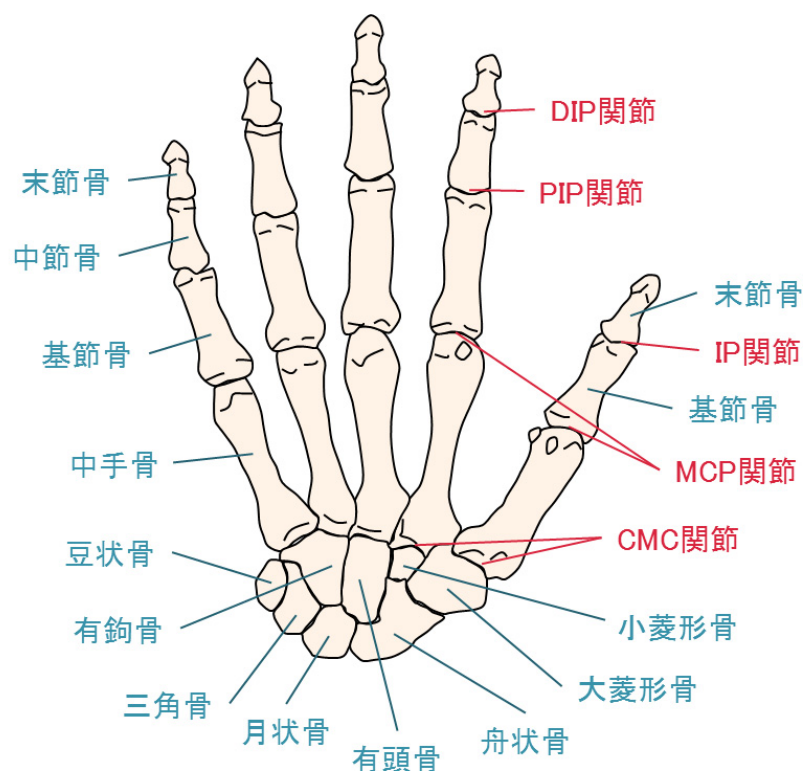


図 1.5: 手の骨格と関節 ([16]より引用)

### 1.2.2 手の関節

図 1.5 に示したように，人間の手には多くの関節がある．図 1.6 は，人間の手に含まれる関節の種類とそれぞれの回転軸を示している．また，以下に人間の手の関節の特徴についてまとめた．

#### (A) 手根中手関節（CMC 関節）

手根中手関節(carpometacarpal joint ; CMC 関節)は，手根骨の遠位列を構成する骨と，第 2～5 中手骨底との間の複関節（3 個以上の骨からなる関節）である．いずれも鞍関節であったものが変化して，可動域が狭い平面関節になったものとみなされている．第 2 中手骨が大・小菱形骨および有頭骨と，第 3 中手骨が有頭骨と，第 4 中手骨が有頭骨および有鉤骨と，第 5 中手骨が有鉤骨と，それぞれ連結している．これらの関節の可動域は小さいが，第 2～5 指全体として手根の運動を補助する動きをする．

#### (B) 母指の手根中手関節

母指の手根中手関節(carpometacarpal joint of thumb ; 母指の CMC 関節)は，大菱形骨と第 1 中手骨底との間にある鞍関節である．互いにほぼ直行する 2 つの運動軸をもつ．そのため，屈曲・伸展，内転・外転ができる．また，両者の動きが複合されわずかな回旋が伴った分回し運動も行える．この関節の向きは，他の手根中手骨とは異なり，その左右軸が掌側面と平行ではないという特徴がある．また，可動域が大きく，他の手根中手関節から独立しており，物を把握するときに重要な役割を果たす．

#### (C) 中手指節関節（MCP 関節）

中手指節関節(metacarpophalangeal joint ; MCP 関節)は，第 1～5 中手骨頭凸面を関節頭とし，それぞれの指の第 1～5 基節骨底凹面を関節窩とした顆状関節（形状は球関節に属するが，関節周囲の靭帯や腱の走行と付着により回旋ができなくなっており，2 軸性の運動のみができる関節）である．各指のこの関節は独立しており，それぞれ，屈曲・伸展と内転・外転が可能である．ただし，母指だけは内転・外転ができない．

#### (D) 指節間関節（IP 関節）

指節間関節(interphalangeal joint ; IP 関節)は，各指の基節骨頭と中節骨底の間の近位指節間関節[PIP 関節 (proximal IP joint)]と，中節骨頭と末節骨底の間の遠位指節間関節[DIP 関節 (distal IP joint)]に分けられる．ただし，母指には，中節骨がないので 1 つの指節間関節しかなく，単に IP 関節とよばれる．関節の形態は蝶番関節であり，屈曲・伸展を行うことがで

きる。

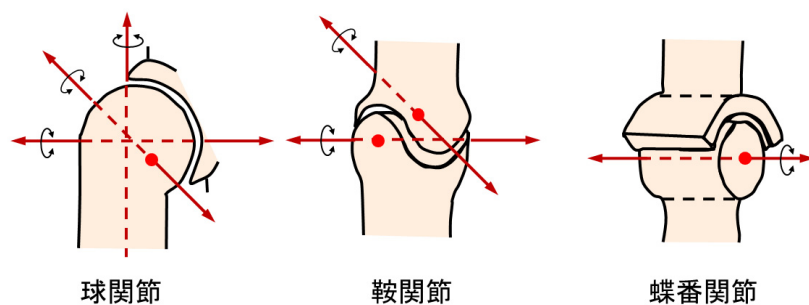
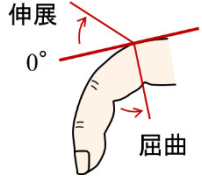
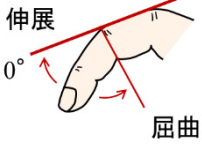
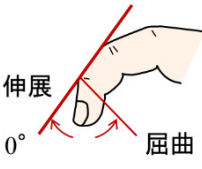
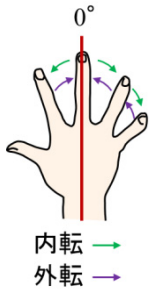


図 1.6: 関節面の形態と関節の分類 ([16]より引用)

表 1.1: 手の関節可動域([19]より引用)

部位名	運動方向	参考 可動域 角度 [°]	基本軸	移動軸	参考図
母指 thumb	橈側外転 radial abduction	60	示指	母指	
	尺側内転 ulnar adduction	0			
	掌側外転 palmar abduction	90			
	掌側内転 palmar adduction	0			
	屈曲 (MCP) flexion	60	第1中手骨	第1基節骨	
	伸展 (MCP) extension	10			
	屈曲 (IP) flexion	80	第1基節骨	第1末節骨	
	伸展 (IP) extension	10			

部位名	運動方向	参考 可動域 角度 [°]	基本軸	移動軸	参考図
指 fingers	屈曲 (MCP) Flexion	90	第 2-5 中手 骨	第 2-5 基節 骨	
	伸展 (MCP) Extension	45			
	屈曲 Flexion	100	第 2-5 基節 骨	第 2-5 中節 骨	
	伸展 extension	0			
	屈曲 Flexion	80	第 2-5 中節 骨	第 2-5 中節 骨	
	伸展 Extension	0			
	外転 abduction		第 3 中手骨 延長線	第 2, 4, 5 指 軸	
	内転 adduction				

人間の手は、多くの関節をもっているが、各関節は任意の関節角度をとれるわけではない。各関節には、それぞれ可動範囲がある。表 1.1 に、日本整形外科学会および日本リハビリテーション医学会が規定している手の関節可動域を示した[19]。

### 1.2.3 手の動作の分類

これまでに、人間の手の動作を分類する研究が数多く行われてきた[20]-[28]。Schlesinger は、義手の設計を目的として人間の手の把握動作の分類を行ったといわれている[20]。対象物の形態に着目し、鉤握り(hook grasp)、筒握り(cylindrical grasp)、球握り(spherical grasp)、指先掴み(tip prehension)、指掌面掴み(palmar prehension)、指側面掴み(lateral prehension)などに分類した(図 1.7)。

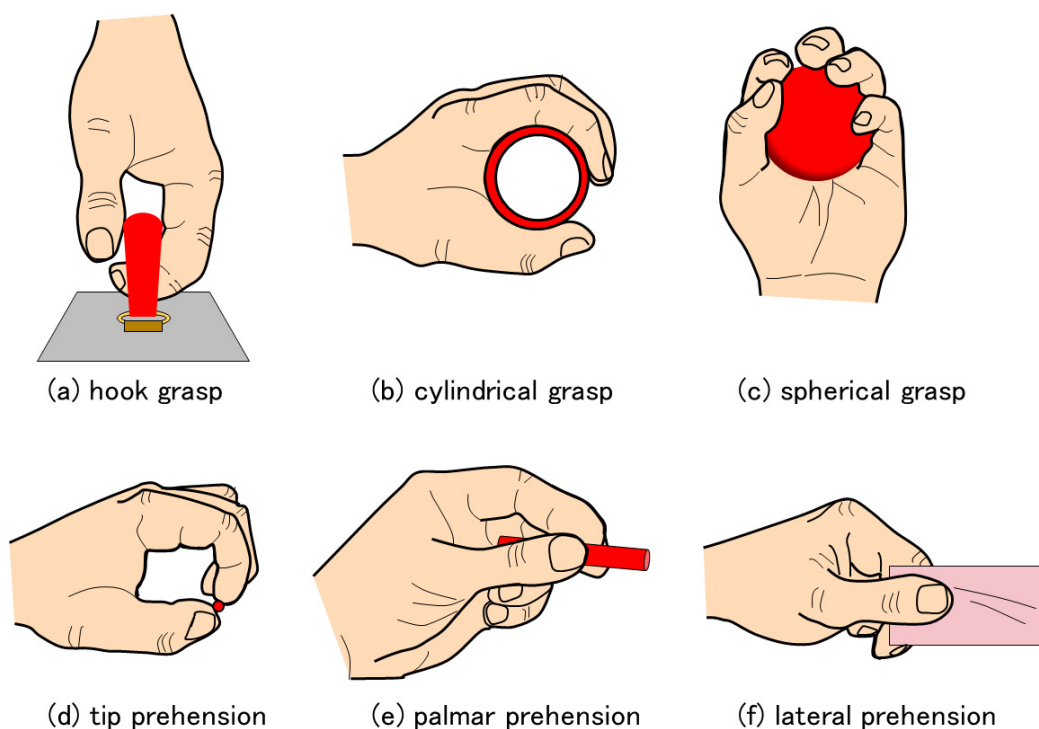


図 1.7: Schlesinger の分類 ([21]より引用)

Napier は、人間の手の動作は把握動作(*prehensile movement*)と非把握動作(*non-prehensile movement*)の 2 つの大きなグループに分けられるとした[22]. ここで、把握動作とは対象物を片手でとらえて空中に保持することであるとする. Napier は、すべての把握動作は握力把握(*power grip*)と精密把握(*precision grip*)のいずれか、または両者の複合型で説明できるとした. ここで、握力把握とは、指や手のひらの表面を広く対象物に接触させ把握する動作である. また、精密把握とは、指先のみで接触し親指と親指に対向するその他の指で把握する動作である. Napier の分類法は 1 つの系統を示し、その後の研究者に大きな影響を与えた.

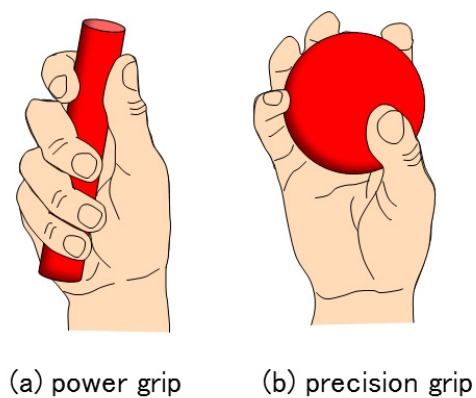


図 1.8: Napier の分類 ([22]より引用)

鎌倉らは、リハビリテーションの現場では Schlesinger の分類では把握の型を十分に表せていないとし、より細分化された 14 種類の分類方法を示した[23]. 行った方法としては、日常生活で把握されるあらゆるものを集め、それらを被験者に把握させ、そのときの手の形と手と対象物との接触領域から分類した. Cutkosky は、人間の代わりに工場で作業を行うロボットハンドの設計を視野に入れた把握動作の分類を行った[24]. 工場での作業従事者が行う一般的な把握動作を 16 種類に分類した. Cutkosky の分類[24]が Napier の分類[22]と共通しているところは、把握動作を大きく握力把握と精密把握の 2 つのグループに分けているところである. Zheng らは、家政婦と機械技術者の把握動作の頻度について調べた[25].

これまでに述べた分類方法は、静的な把握動作のみを扱っていた. 人間が日常生活で行う動作は、静的に物体を把握することだけにとどまらない. 物体を把握してから、操り動作を伴うことも多い. Elliott らは、手で物体を把握したまま操る動作を simple synergies, reciprocal synergies, sequential patterns の 3 つに大別した[26]. 鎌倉らは、日常生活で頻出する動作において、どの指が連動して動くかを調べた[27]. 文献[27]では、第 3 指から第 5 指は連動して動くことが多いことなどが示されている. また、Bullock らは、操り動作のタスクに基づいて手の動作を詳細に分類した[28].

#### 1.2.4 手の機能の評価

The Southampton Hand Assessment Procedure (SHAP)[29][30]は、日常生活活動(ADL)の課題の中の手の把握動作や操り動作を評価するための検査である. SHAP は、既に研究用の義手の機能の評価でも既に用いられている例がある[31]. この検査では、まず形状や重量が異なる物体を把握してそのまま移動させる動作について評価する(Abstract Object Tasks). 次に、14 課題の ADL 検査を行う(ADLs). ADL 検査の中には、コインつまみ、ボタン外し、ねじ回し、ドアのハンドル回し、鍵回しなどがある. そのことから、義手に要求される機能としては大きく分けて 2 つのものと考えられる. 1 つは、形状や大きさの異なる対象物を把握できることであり、もう 1 つは、対象物を把握したまま操り動作ができることである.

### 1.3 関節の運動の低次元化

人間の体は、手に限らず非常に関節の数が多い構造をしている. これまでに、人間の運動を多変量解析の手法を用いて低次元化して解析する研究が行われてきた [32]-[36]. Nakamura らは、筋骨格モデルの 1000 筋肉の張力に独立成分分析を適用し、それらの運動が 100 程度の独立成分で表されることを示した[32]. Kim らは、人間が平地での定常歩行をするときの全身の関節の運動を主成分分析で低次元化し、4 主成分で運動を近似的に復元できることを示した[33]. 三嶋らは、個人間の歩行動作の識別をするのに主成分分析を用いた[34].



人間の手の運動解析では, Santello らが, 人間が複数の種類の把握動作を行うときの指の関節の運動に主成分分析を適用し, 2 主成分で累積寄与率が 80% 以上となることを示した[35]. また, 寺地らは, 人間の手のジェスチャを識別するために, 指の関節角度の時系列を低次元な主成分空間へ射影した[36].

人間の筋肉や関節の運動が低次元化できるのは, 人間の関節や筋肉の運動に大きな相関があるためである. つまり, 人間の筋肉や関節の運動は, 高次元で複雑な運動も低次元な空間に射影することで分析が容易になる.

## 1.4 これまでのロボットハンドの研究

これまでに, 人間の手の機能を模倣しようと様々な種類のロボットハンドやその制御方法が研究されてきた[37]-[65]. 本節では, 関節とアクチュエータの関係から大きく 2 つの種類にロボットハンドを分類して, それぞれの特徴について述べる. 分類されたロボットハンドの 1 つは, 各関節が個別のアクチュエータで駆動される. もう 1 種類のロボットは, 1 つのアクチュエータが複数の関節と接続している.

### 1.4.1 関節が個別のアクチュエータで駆動されるロボットハンド

1.2.2 で述べたように, 人間の指の根元には内転・外転と屈曲・進展の 2 自由度の関節がある. また, その先には屈曲・進展の 1 自由度の関節がある. 文献[37]-[44]のロボットハンドは, そのような人間の指の関節の構造を模倣している. Okada は, 3 指 11 自由度のロボットハンドを提案し, その各指の位置を制御することにより異なる形状の対象物を指先で把握したり, 操ったりできることを示した[37][38]. 他にも, Salisbury らの Stanford-JPL hand (3 指 9 自由度) [39]や, Jacobsen らの UTAH/MIT hand (4 指 12 自由度) [40], Liu らの DLR hand (4 指 12 自由度) などがある. 近年では, 人間の手のように 5 本の指をもつロボットハンドも提案されている[42]-[44]. 文献[37]-[43]のロボットハンドに共通している点は, 関節を駆動するためのアクチュエータはロボットアームの前腕部分などにあり, 関節の位置には配置されていないことである. だが, 最近はロボットハンドに用いることができる小型のアクチュエータも登場している. Kawasaki らの Gifu Hand II は 5 指で独立に駆動させられる関節が 16 自由度もありながら, 関節部分に直接アクチュエータを配置している[44].

本節で紹介したような設計コンセプトのロボットハンドは, 各指の位置や関節トルクを高精度に制御できるという長所がある. しかし, 1.2.2 で述べたように, 人間の手は多自由度な構造である. そのため, 人間の手の骨格を模倣してロボットハンドに関節を与えて, それらを独立に制御できるようにアクチュエータを配置すると, 必要なアクチュエータの数が非常に多くなってしまう. 一般に, 現在ロボットの設計に用いられるような電動モータなどのアクチュエータは, 人間の筋肉に比べて出力重量比が小さい. アクチュエータを

多く用いて設計されたロボットハンドは、質量や体積が大きくなる。そのため、電動義手に研究用のロボットハンドの技術をそのまま応用することは難しい。また、精密把握や指先での操り動作をするための制御方法は研究が進んでいるが、対象物を握力把握するなどの多点接触を伴う動作を行うときの関節トルクの出力を上手く制御することは未だに難しい。

#### 1.4.2 アクチュエータが複数の関節と接続しているロボットハンド

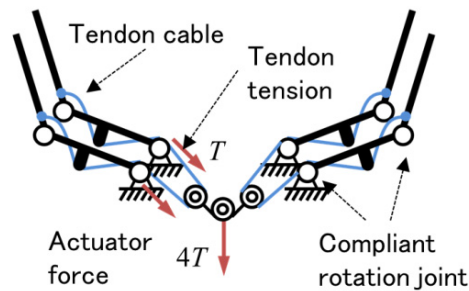
ここで説明するロボットハンドは、1.4.1 で説明したロボットハンドとは異なり人間の指のような関節の構造を模倣していない場合も多い。Hirose らは、2 個のアクチュエータで複数の関節に対して同時に一定トルクが発生できるようなソフトグリップを提案した[48]。Takaki らは、この原理を応用した把持力増大機構を提案し、軽量で小型でありながら大きな把持力を出せるロボットハンドを提案している[49]。

近年、劣駆動機構(underactuated mechanism)をもつロボットハンドの研究が盛んに行われている[50]-[65]。ここで、劣駆動機構とは入力次元より出力次元の方が高い機構のことをいう。提案されている劣駆動機構をもつロボットハンドには様々な種類がある。最も多く見られるのは、各関節にワイヤを接続し、そのワイヤを1つまたは2つのアクチュエータでワイヤを巻き取る機構をもつロボットハンドである[50]-[59]。Massa らは、母指(屈曲・伸展:2自由度, 内転・外転1自由度)、示指(屈曲・伸展:3自由度)、中指(屈曲・伸展:3自由度)の3本の指からなり、1つのアクチュエータで全3指の屈曲・伸展を行い、別のもう1つのアクチュエータで母指の内転外転を行うロボットハンドを提案した[50]。Dollar らは、図1.9(a)のような8自由度、1アクチュエータのロボットハンドを提案した[51]。このロボットハンドでは、1つのアクチュエータと8つの関節がワイヤで接続されている。また、各関節には弾性がある。Brown らは、2つのアクチュエータ変位の線形和に17自由度(5指)が従属するようなロボットハンドを提案している[52]。Grioli らは、関節に異なる従属関係を与えられるアクチュエータとワイヤの機構の組み合わせを複数もつロボットハンドを提案した[59]。他の種類の劣駆動機構をもつロボットハンドとしては、リンク機構や歯車を用いた劣駆動機構をもつロボットハンドがある[60]-[62]。Birglen らは、4節リンクを用いたロボットハンドを提案している[60]。図1.9(b)は、文献[60]で説明されているロボットフィンガの原理を示している。図1.9(b)のロボットフィンガは、2自由度、1アクチュエータをもつ。また、4節リンク中には、ばねがある。赤い矢印の位置に力を加えると根元の関節が駆動する。対象物に触れると対象物の形状に合わせて、ばねが接続されているもう1つの関節が駆動する。石塚らは、4節リンクと複数の遊星ギアを用いた劣駆動機構をもつロボットハンドを提案している[62]。

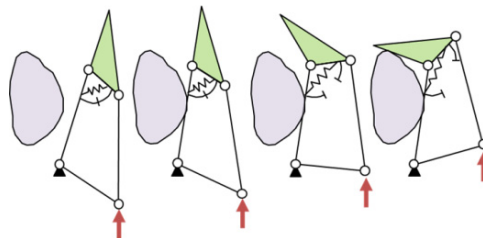
設計された劣駆動機構をもつロボットハンドの機能を評価するための研究も行われている[63]-[65]。Ciocarlie らは、把握動作を評価するための方法を提案した[63]。その方法では、

接触力が指と対象物が滑らない範囲に入っているかどうかを評価する．文献[64]では，Balasubramania らが，異なる入出力関係の劣駆動機構をロボットフィンガに与えた場合の操作力の違いについて議論した．Prattichizzo らは，劣駆動機構をもつロボットハンドが対象物を把持したときの可操作性楕円体について説明している [65]．

劣駆動機構をもつロボットハンドの特徴は，アクチュエータの数を低く抑えることができるため，質量を低く抑えることができることである．また，メカニズム自体に柔軟性をもたせることにより未知の対象物を把握することを容易にする．しかし，劣駆動機構をもつロボットハンドは，各関節を独立に制御することができないので要求されるタスクに合わせてアクチュエータと関節の従属関係をあたえる必要がある．だが，これまでに要求されるタスクに合わせて系統的に劣駆動機構をもつロボットハンドを設計する方法は提案されていない．そのため，性質の大きく異なる把握の仕方や操り動作を含むタスクを達成することは難しい．例えば，精密把握と握力把握を両方達成する劣駆動機構をもつロボットハンドを設計することは難しい．



(a) 8 DOF 1 actuator hand



(b) 2 DOF 1 actuator finger

図 1.9: 劣駆動機構を用いたロボットハンドの例([51][60]より引用)

## 1.5 研究目的とアプローチ

本研究では，義手用ロボットハンドをできるだけ低質量に設計するための手法を提案する．1.2.1 や 1.2.2 で説明したように人間の手は 20 を超える自由度を有している．そのおかげで，1.2.3 で説明したように人間の手は対象物の大きさや形状，目的に合わせて様々な把

握動作をすることができる。一般に、人間の筋肉に比べてロボットに多く用いられているような電動アクチュエータは出力重量比が低い。そのため、人間の手の自由度に合わせてアクチュエータを用いてロボットハンドを設計することは出来ない。一方で、1.3で説明したように人間の関節の運動には、各関節自由度間に大きな相関があることも知られている。つまり、人間の手の機能を代行するロボットハンドは各関節を独立に駆動させる必要はない。そこで本研究では、劣駆動機構を取り入れることによりアクチュエータの数をできるだけ抑えてロボットハンドを設計することを考える。劣駆動機構を取り入れることにより、関節数を減らさなくてもアクチュエータの数を減らすことができる。本研究における劣駆動機構をもつロボットハンドとは以下の式のように、すべての関節角度がアクチュエータの変位の関数で表されるものを指す。

$$\theta(t) = f(q(t)) \quad (1-1)$$

ここで、 $\theta(t) \in R^n$  はロボットハンドの関節角度、 $q(t) \in R^r$  はアクチュエータの変位であり、これらの次元には  $n > r$  の関係がある。 $f$  は関節とアクチュエータの従属関係を与える関数である。劣駆動機構をもつロボットハンドを設計する上で、注意しておかなければならないことがある。それは、関節の次元に対してアクチュエータの次元が低いため、関節角度は従属関係  $f$  でとりえるものしかとれないことである。つまり、関節を個別に独立なアクチュエータでロボットハンドを駆動させる場合に比べ、駆動させられる関節の空間の次元が低くなるという点である（図 1.10）。

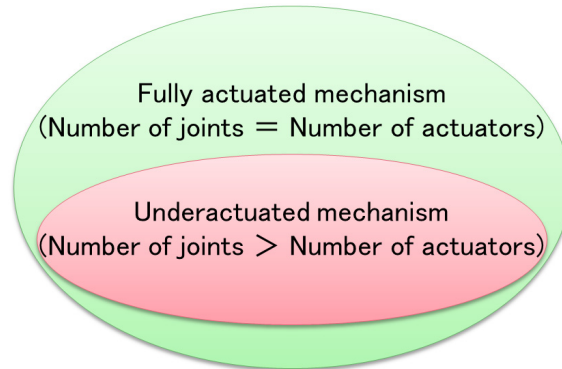


図 1.10: 関節数に対するアクチュエータ数と関節の駆動できる空間の関係

したがって、無暗にアクチュエータの数を減らしたり、従属関係  $f$  を与えたりしても、作業領域内で所望のタスクが達成できないことになる。しかし、1.4.2で説明したように、これまでに系統的に劣駆動機構をもつメカニズムを設計する方法は提案されていない。そこで、本研究ではタスクベースなアプローチを用いた新たな系統的な設計手法を提案して、劣駆動機構をもつロボットハンドを設計する。タスクベースなアプローチをとる理由は、タスクをあらかじめ定義して設計を始めることにより、関節数に対してアクチュエータの数を減らしても、必要な機能を失わせないようにするためである。提案手法は以下のような手

順を踏んでいる。

### 「設計の手順」

- Step 1: ロボットハンドに達成させたいタスクを作業座標系の変数の時系列で定義する。
- Step 2: 各関節が独立したアクチュエータに接続されていて、各関節を正確に位置制御することができるロボットハンドを仮定する。そして、そのロボットハンドが、Step1 で定義されたタスクを達成するときの関節の運動の時系列を計算する。
- Step 3: Step 2 で得られた関節の運動の時系列を低次元な空間へ射影し、運動を低次元化する。そして、関節の運動を少ない独立変数で近似的に復元する。
- Step 4: Step3 で得られた関節の運動と独立変数の関係を用いて、劣駆動機構をもつロボットハンドを設計し、その動作を評価する。
- Step 5: ロボットハンドのパラメータを変更しながら Step 2 から Step 4 を繰り返し、最適なパラメータを探索する。

義手用のロボットハンドに要求されるタスクとしては、1.2.4 で説明したように大きさや形状の異なる対象物を把握できること、また対象物を把握したまま操ることができることである。本論文では、提案手法がそのようなタスクを達成できる義手用ロボットハンドを設計する方法として有効であることを説明する。

## 1. 6 本論文の構成

本節では、本論文を構成する各章と研究内容の概要について述べる。本論文の構成は以下のようになっている。また、図 1.11 では本論文の各章の関連を示している。

### 第 1 章 序論

第 1 章では、まず研究の背景として義手の現状を紹介し、義手が抱える現在の問題について述べる。次に、人間の手の構造やその動作の分類に関する研究について説明し、人間の手に求められる機能について述べる。さらに、これまで研究されてきたロボットハンドについて整理し、本研究で取り組む課題とその重要性を明らかにする。その上で研究目的を決定し、課題解決のアプローチについて述べる。

### 第 2 章 アクチュエータの変位を線形加算する劣駆動機構

第 2 章ではまず、本研究で設計する劣駆動機構を用いたロボットハンドのメカニズムについて説明する。本研究で設計する劣駆動機構は、任意の数のアクチュエータの変位を線形加算して出力するという特徴をもつ。次に、その劣駆動機構を実現する方法について説明する。さらに、本研究で設計される劣駆動機構を用いたロボットハンドの優位性について

て議論する.

### 第3章 タスクが運動学で定義される場合の設計手法

第3章では, タスクが運動学で定義される場合に第2章で説明するロボットハンドのメカニズムを設計する手法について説明する. タスクは作業座標空間中でロボットハンドの指先の軌道として定義される. そのタスクを各関節が個別のアクチュエータにより駆動され正確に位置制御されると仮定したロボットハンドが達成するときの関節角度の時系列を低次元化し, 劣駆動機構を設計する. 第3章では, 劣駆動機構の設計に用いることができる2種類の運動の低次元化方法について説明している. また, 設計時に運動の低次元化を用いたために生じる誤差を最小にするようなリンク長さを逐次的に探索する最適化問題を解く. それによって, 設計されるメカニズムのリンク長さもタスクに合わせて最適化する. 最後に, 設計した機構を用いてシミュレーションを行い, 小さな近似誤差でタスクを達成できることを示す.

### 第4章 タスクが運動学と静力学で定義される場合の設計手法

第4章では, タスクが運動学と静力学で定義される場合に第2章で説明するロボットハンドのメカニズムを設計する手法について説明する. この設計手法は, 第3章で説明した手法を拡張したものになっている. タスクは作業座標空間中で, ロボットハンドの指先の軌道と対象物に加える力で定義される. 第4章では, 設計されるメカニズムには弾性要素を取り入れる. 弾性要素を取り入れることにより運動学と静力学の問題が連成し, ロボットハンドの指の位置を決める関節角度と対象物に加える力を発揮させるための関節角度が計算できる. あらかじめ定義されたタスクを各関節が線形ばねを介して個別のアクチュエータと接続されていると仮定されたロボットハンドが達成するときの関節角度の時系列を低次元化し, 劣駆動機構を設計する. また, 複数のタスクを達成させるロボットハンドを設計する方法やタスクの重みづけの方法についても説明する. さらに, 最適化手法を用いて逐次的にリンク長さとはばね定数をタスクに合わせて探索する. 最後に, 設計した機構を用いてシミュレーションを行い, 小さな近似誤差でタスクを達成できることを示す.

### 第5章 3次元のロボットハンドの設計

第5章では, 第4章で提案された手法を3次元のロボットハンドの設計に応用した場合について説明する. ここでは, 義手用ロボットハンドに要求されるような複数のタスクを与えて設計を行う. 1.2.4 より, 義手用ロボットハンドに要求されるタスクとしては, 形状や大きさが異なる対象物の把握と把握した対象物の操り動作が挙げられる. シミュレーションを行い, 設計された3次元のロボットハンドの動作の評価とアクチュエータに必要なトルクの大きさを計算する. また, 本研究の提案手法を義手に適用した場合の有効性につ

いて議論する.

## 第6章 結論

最後に, 第6章にて本論文を総括し, 今後の課題について述べる.

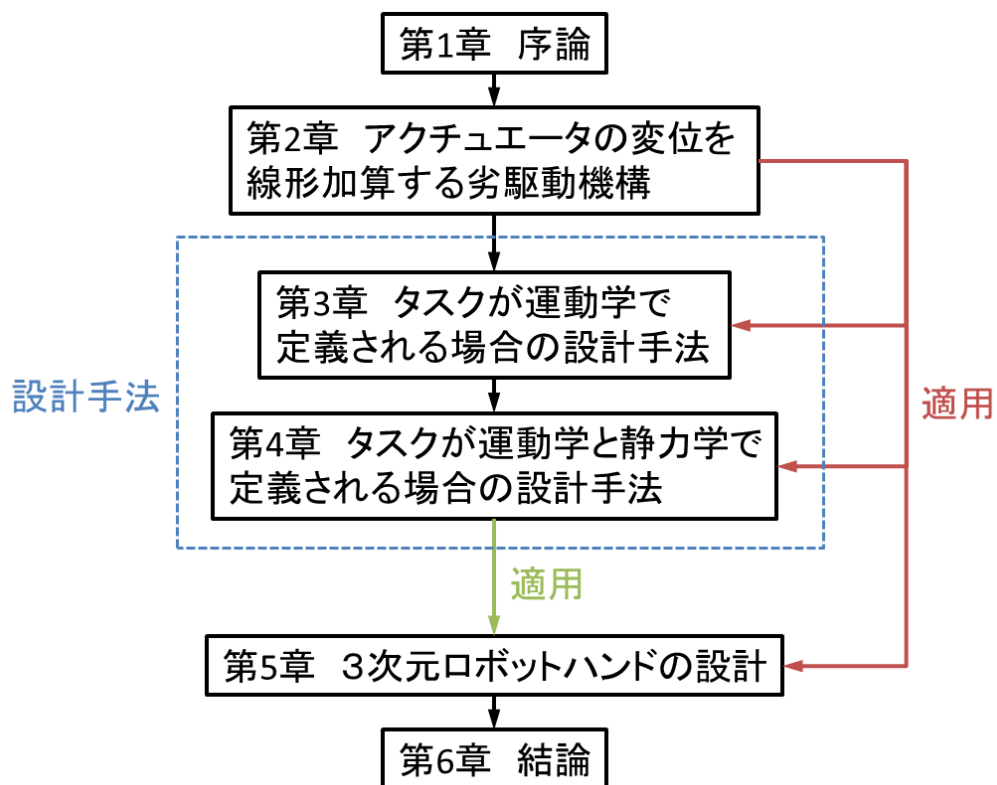


図 1.11: 本論文の構成





## 第2章

# アクチュエータの変位を 線形加算する劣駆動機構

### 2.1 線形従属機構

劣駆動メカニズムを実現するためには、低次元な変位の入力（少数のアクチュエータの変位）を高次元な変位の出力（多数の関節の変位）に変換する機構（劣駆動機構）が必要になる。本研究では、アクチュエータの変位の線形和が関節角度となるような劣駆動メカニズムを扱う。関節角度とアクチュエータの変位の関係を式で表すと以下のようなになる。

$$\theta(t) = Aq(t) + b \quad (2-1)$$

ここで、 $\theta(t) \in R^n$  は関節角度、 $q(t) \in R^r$  はアクチュエータの変位、 $t$  は時間、 $A \in R^{n \times r}$  は正方ではない定数行列、 $b \in R^n$  は定数ベクトルを表す。また、関節角度の次元  $n$  とアクチュエータの変位の次元  $r$  には  $n > r$  の関係がある。本研究では、複数のアクチュエータの変位の線形和を1つの関節に伝達する機構を線形従属機構(Linear Dependent Drive: LDD)とよぶ。また、本論文中では線形従属機構を表す略号として LDD を用いる。図 2.1 は、LDD のはたらきを表している。図 2.2 は、LDD を用いた劣駆動メカニズムの例を示している。図 2.2 のメカニズムは、多関節マニピュレータ、線形従属劣駆動機構(Underactuated LDD mechanism)、アクチュエータの3つの要素からなっている。ここで、線形従属劣駆動機構とは、複数の LDD を組み合わせてできた機構のことである。式(2-1)の行列  $A$  は、線形従属劣駆動機構のパラメ

ータである．また，定数ベクトル  $\mathbf{b}$  は線形従属劣駆動機構とマニピュレータを接続するときのバイアスであり，その意味は後述する．線形従属劣駆動機構の具体的な実現方法については，本章の 2.2 と 2.3 で説明する．

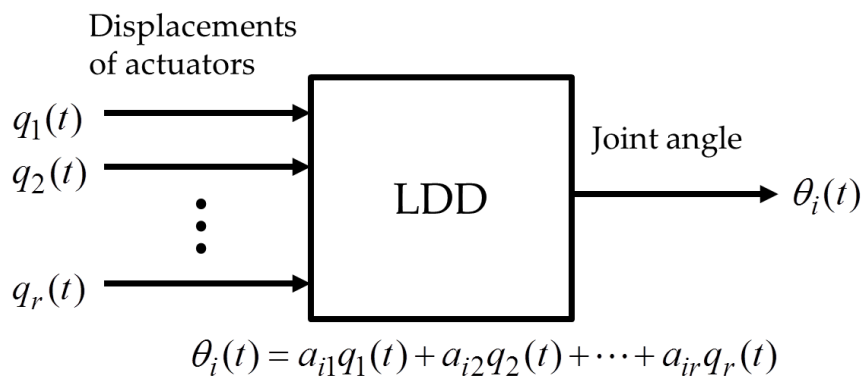


図 2.1: 線形従属機構

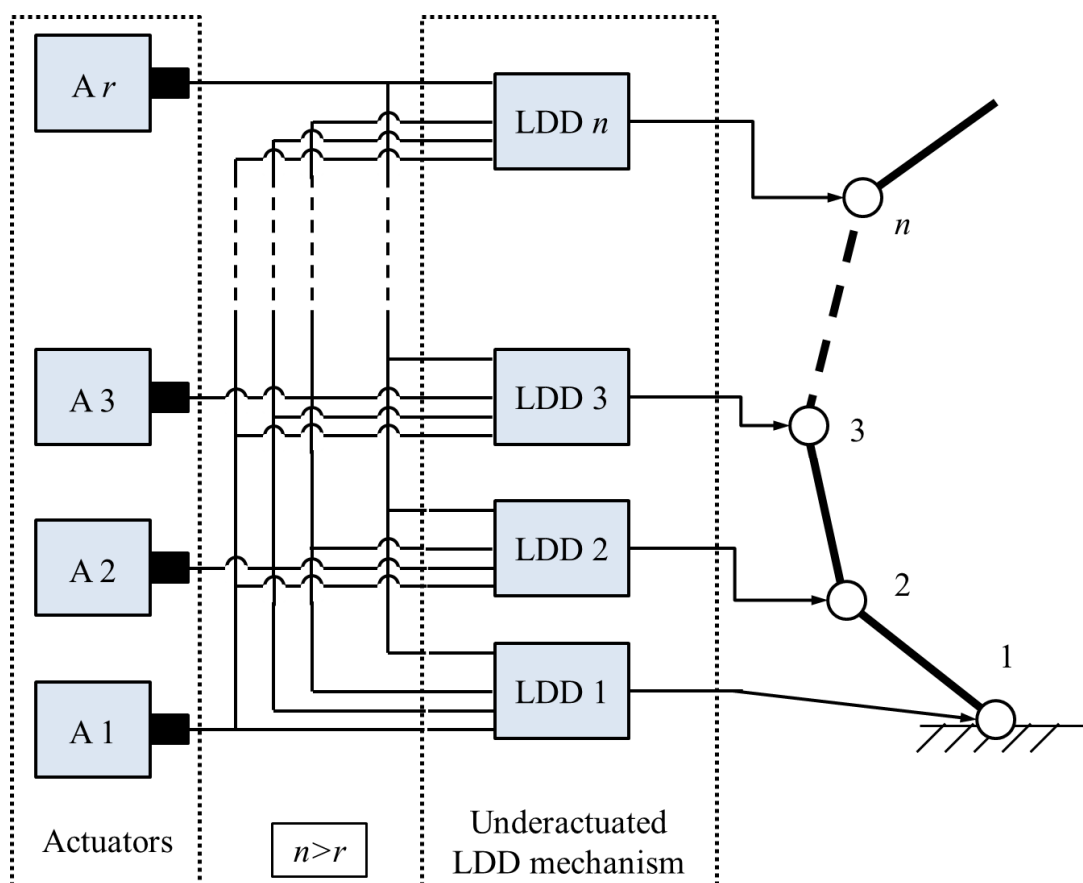


図 2.2: 線形従属劣駆動機構を用いたメカニズム

## 2.2 流体を用いた線形従属劣駆動機構の実現方法

断面積の異なるシリンダと流体を用いた機構を用いると変位を線形に合成することは容易であることが既に知られている．本節では，その特性を用いた線形従属劣駆動機構の実現方法について説明する．

### 2.2.1 複数のアクチュエータの変位を線形加算する機構

まず，2つのアクチュエータの変位を線形加算する機構について説明する．図2.3のように異なる断面積をもつシリンダの流路をつないだ機構を考える．図2.3の機構は，2つの入力用シリンダ(Input 1, Input 2)と1つの出力用シリンダをもつ(Output)．

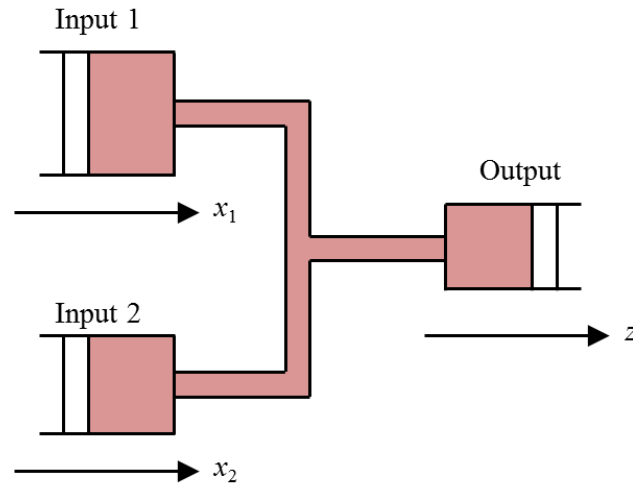


図2.3: 流体を用いた2つの変位を線形加算する機構

ここで，各ピストンの変位を  $x_1, x_2, z$ ，各シリンダの断面積を  $A_1, A_2, A_z$ ，各シリンダへの流量を  $Q_1, Q_2, Q_z$  とする．各シリンダの流量の関係は，式(2-2)のように書ける．

$$Q_z = Q_1 + Q_2 \quad (2-2)$$

また，ピストンの変位とシリンダの断面積及び流量との関係は式(2-3)のように書ける．

$$Q_1 = A_1 \dot{x}_1, Q_2 = A_2 \dot{x}_2, Q_z = A_z \dot{z} \quad (2-3)$$

式(2-2)と式(2-3)から，式(2-4)が得られる．

$$A_z \dot{z} = A_1 \dot{x}_1 + A_2 \dot{x}_2 \quad (2-4)$$

よって， $z$  の速度は以下のように表される．

$$\dot{z} = \frac{A_1}{A_z} \dot{x}_1 + \frac{A_2}{A_z} \dot{x}_2 \quad (2-5)$$

断面積の比率によって，ピストンの速度の関係が変化する．式(2-5)より，入力1のピスト

ンの変位と入力2のピストンの変位の線形和が出力のピストンの変位になることが分かる。入力1入力2のピストンにそれぞれアクチュエータを接続すると、2つのアクチュエータの変位を線形加算できる。

次に、同様の考え方で任意の数の変位を線形加算する機構について説明する。図2.4は、 $r$ 個の断面積の異なるシリンダを接続した機構である。

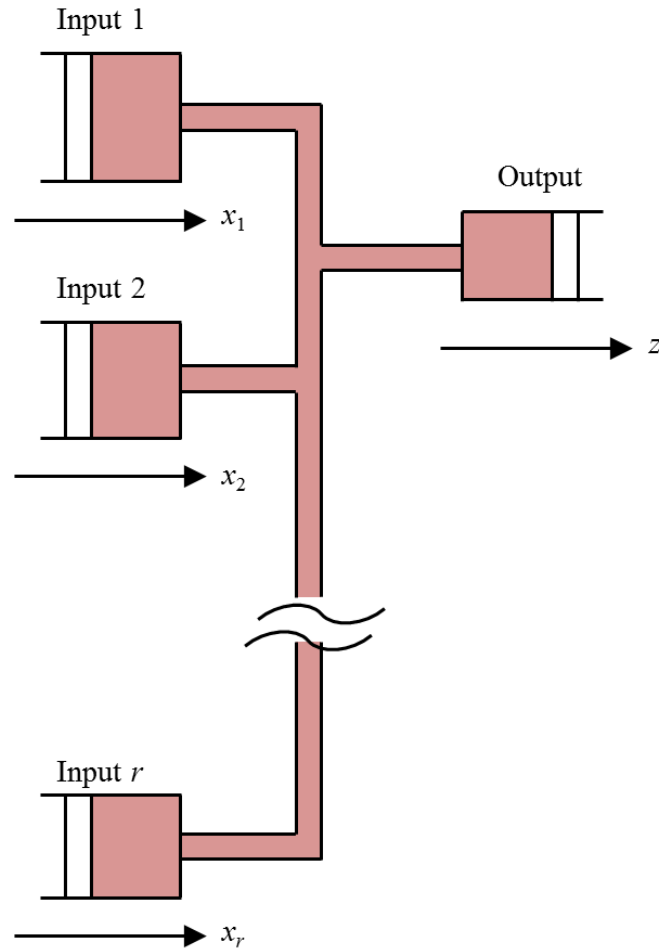


図 2.4: 流体を用いた任意の数の変位を線形加算する機構

図 2.4 のピストンの変位の関係は、式(2-6)で与えられる。

$$\dot{z} = \frac{A_1}{A_z} \dot{x}_1 + \frac{A_2}{A_z} \dot{x}_2 + \cdots + \frac{A_r}{A_z} \dot{x}_r \quad (2-6)$$

ここで、 $x_1, x_2, \dots, x_r, z$  は各ピストンの変位、 $A_1, A_2, \dots, A_r, A_z$  は各シリンダの断面積とする。入力のピストンにそれぞれアクチュエータを接続することにより、アクチュエータの変位を線形加算できる。よって、一般に LDD を流体駆動の機構で実現できるといえる。

### 2.2.2 少数の入力を線形加算して多数の出力に変換する機構

2.2.1 で説明した流体を用いた機構を複数用いることにより少数の入力を線形加算して多数の出力に変換する機構を実現できる。実現される機構は以下のような入出力関係をもっている。

$$\mathbf{z} = A\mathbf{x} \quad (2-7)$$

ここで、 $\mathbf{z} \in R^n$  は出力のピストンの変位のベクトル、 $\mathbf{x} \in R^r$  は入力の変位のベクトル、 $A \in R^{n \times r}$  は定数行列とする。よって、線形従属劣駆動機構を流体駆動の機構で実現できるといえる。図 2.5 は、図 2.2 の劣駆動メカニズムを本節で説明した式(2-7)のような入出力関係をもつ機構で実現した場合の図である。

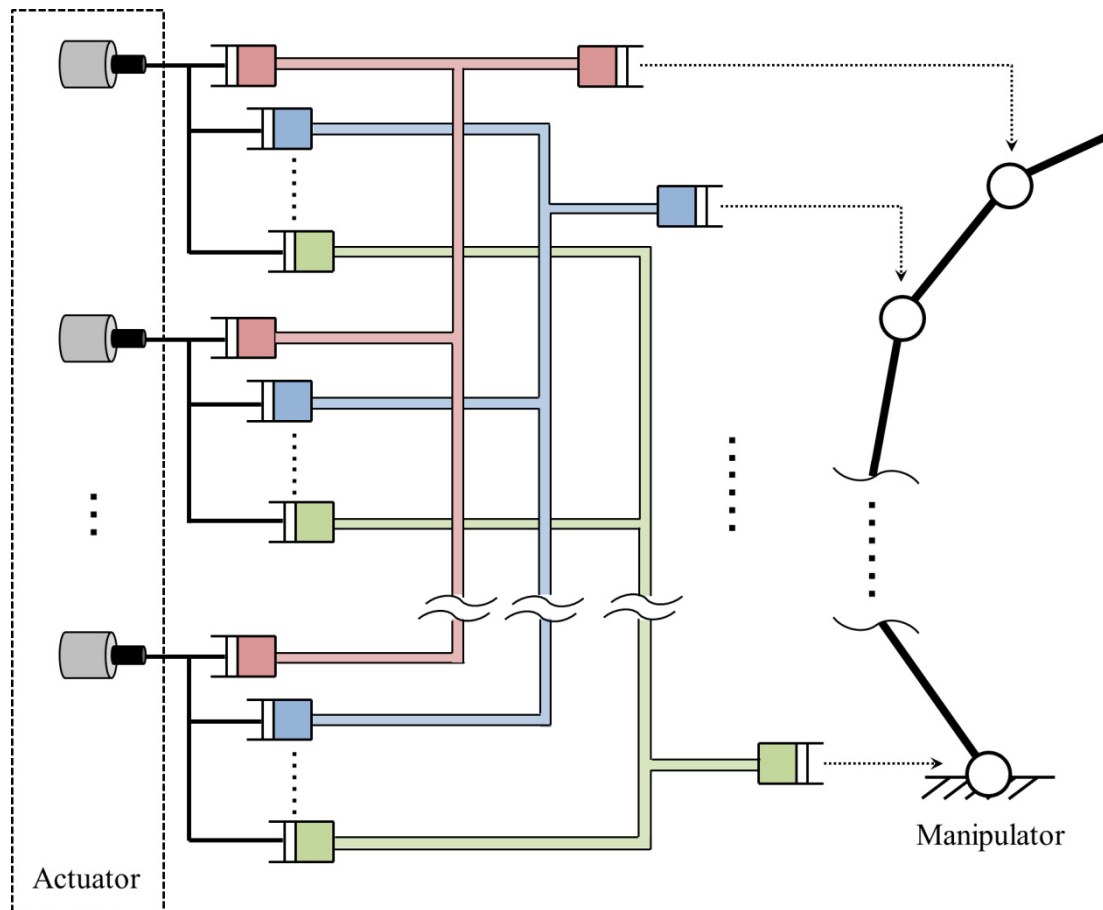


図 2.5: 流体駆動の線形従属劣駆動機構を用いたメカニズム

## 2.3 ワイヤとプーリを用いた線形従属劣駆動機構の実現方法

2.2 から、断面積の異なるシリンダを用いた流体系の機構で線形従属劣駆動機構を容易に構築できることがわかった。しかし、その機構には、複数のシリンダを駆動するためのポンプと流体の圧力、流量を制御する装置が別途必要であり、一般にこれらは大きな重量となる。義手用ロボットハンドを設計する場合に、このよう装置を携帯可能な形で実現することは大きな困難が伴う。

これまでに、機構学の分野では回転運動を性質の異なる運動に変換するための機構が提案されてきた[66][67]。例えばそのような機構としては、てこクランクやスライダクランクなどがある。また、回転運動を加減速したり、軸の向きの変更をしたりできる様々な種類の歯車やプーリも広く用いられてきた。しかし、歯車やプーリの回転角度を合成する機構は提案されていなかった。そのため、これまでに提案されてきたプーリや歯車を用いた機構では線形従属劣駆動機構を実現することは出来なかった。そこで本研究では、ワイヤとプーリからなる簡単なメカニズムだけで線形従属劣駆動機構を実現する新しい方法を提案する。

### 2.3.1 2つのアクチュエータの変位を線形加算する機構

図 2.6 のような機構を用いると 2 つのアクチュエータの変位を線形加算することができる。この機構は、出力軸のプーリ(直径:  $d_o$ )、入力軸 1 のプーリ(直径:  $d_1$ )、入力軸 2 のプーリ(直径:  $d_2$ )、2 つの動滑車(MP1, MP2)、6 つの定滑車(fixed pulley)で構成されている。入力軸にはそれぞれ独立したアクチュエータが接続される。ここで、 $q_1, q_2$  は入力軸のプーリの角度、 $\theta$  は出力軸のプーリの角度であるとする。ワイヤは、2 本使用されている。1 本は、動滑車 MP1 から出力軸のプーリを通して動滑車 MP2 につながれている(図 2.6 の緑のワイヤ)。もう 1 本は、入力軸のプーリ 2 つと動滑車 2 つをたすき掛けしてつないでいる(図 2.6 の紫のワイヤ)。また、用いられているワイヤはすべて伸び縮みせず、プーリとワイヤの間は滑らないものとする。2 つの動滑車は、図の  $y$  軸方向にしか移動できないように拘束されている。定滑車は、ワイヤが動滑車の動作する軸の方向に流れるようにするために設置している。図 2.6 がワイヤと動滑車の初期位置とし、そのときの動滑車の変位  $y_1, y_2$  を 0 とする。A から D は、ワイヤ上の点を表す。また、各点の間の長さを  $l_{AC}, l_{AD}, l_{BC}, l_{BD}$  とする。ワイヤは伸び縮みしないので、各長さは常に一定である。そのため、以下のように定義される  $L_1$  と  $L_2$  は常に一定である。

$$L_1 = l_{AC} + l_{BC} \quad (2-8)$$

$$L_2 = l_{AD} + l_{BD} \quad (2-9)$$

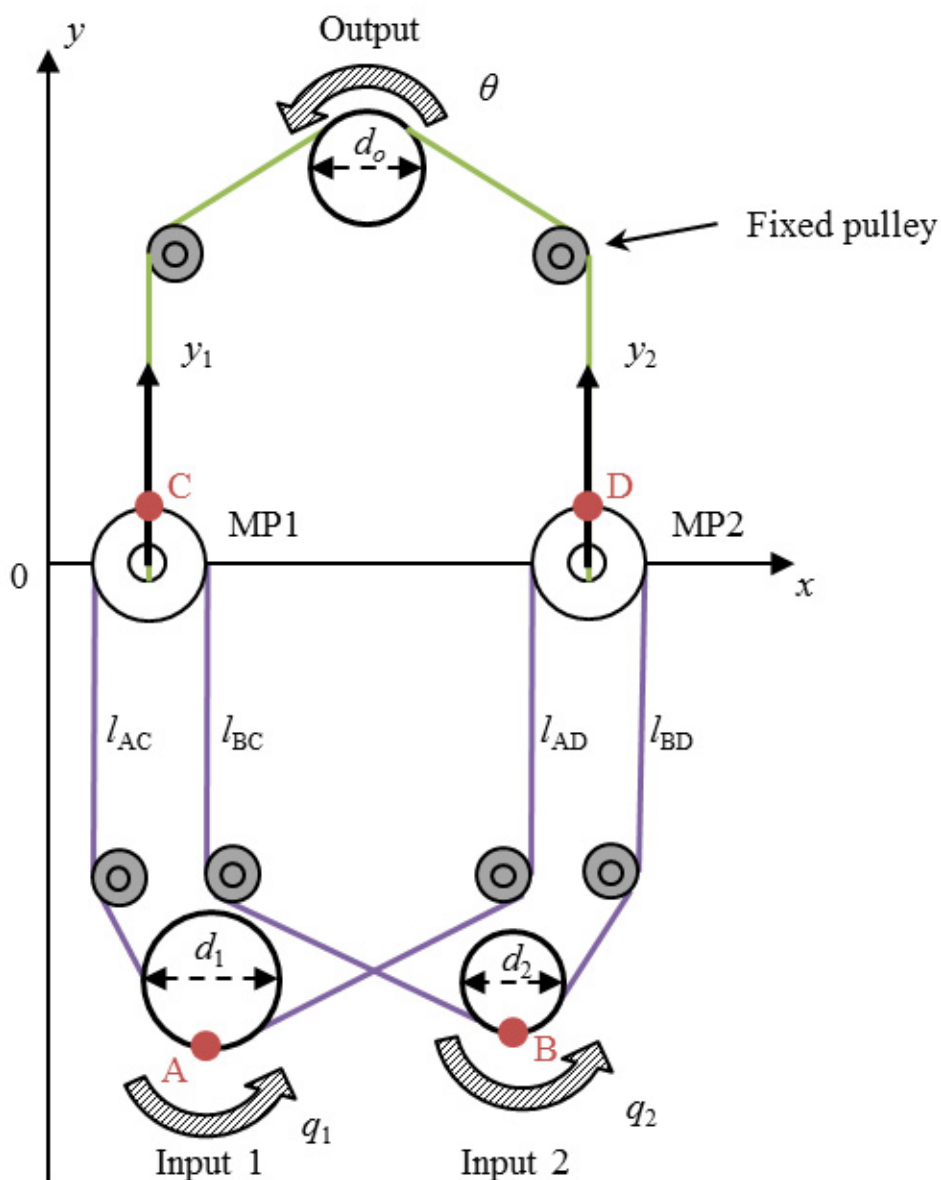


図 2.6: 2つのアクチュエータの変位を線形加算する機構（初期位置）

まず，入力軸1のプーリのみを回転させる場合について考える．図2.7に入力軸1のプーリのみが回転するときの各点の動きを示す． $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ ,  $D'$ はそれぞれ，初期位置で入力軸のプーリ上と動滑車上に  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  があった点である．動作後の入力軸1のプーリから動滑車MP1を通過して入力軸2のプーリまでつながっているワイヤ（ $A' \rightarrow C' \rightarrow B'$ を通るワイヤ）の長さを  $L_{a1}$ ，入力軸1のプーリから動滑車MP2を通過して入力軸2のプーリまでつながっているワイヤ（ $A' \rightarrow D' \rightarrow B'$ を通るワイヤ）の長さを  $L_{a2}$  とすると，それぞれ以下のように表される．





動滑車の  $y$  座標の変化  $\Delta y_1, \Delta y_2$  は、式(2-13)と式(2-14)で与えられる。

$$\begin{aligned}\Delta y_1 &= \frac{1}{2}(L_{a1} - L_1) \\ &= \frac{1}{4}d_1\Delta q_1\end{aligned}\tag{2-13}$$

$$\begin{aligned}\Delta y_2 &= \frac{1}{2}(L_{a2} - L_2) \\ &= -\frac{1}{4}d_1\Delta \phi_1\end{aligned}\tag{2-14}$$

動滑車は、常に  $x$  軸に対して対称に移動する。式(2-15)が成り立つのでワイヤは緩まずに関節につながったプーリを回転させることができる。

$$\Delta y_1 = -\Delta y_2\tag{2-15}$$

出力軸のプーリの角度の変化は以下のようにになる。

$$\Delta \theta = \frac{d_1}{2d_o}\Delta q_1\tag{2-16}$$

入力軸 2 のプーリのみを回転させた場合も、入力軸 1 のプーリのみを回転させた場合と同様に考えることができる。

次に、2つの入力軸のプーリを同時に回転させる場合を考える。図 2.8 に 2つの入力軸のプーリを同時に回転させた場合の各点の動きを示した。動作後の入力軸 1 のプーリから動滑車 MP1 を通って入力軸 2 のプーリまでつながっているワイヤ ( $A' \rightarrow C' \rightarrow B'$  を通るワイヤ) の長さを  $L_{b1}$ 、入力軸 1 のプーリから動滑車 MP2 を通って入力軸 2 のプーリまでつながっているワイヤ ( $A' \rightarrow D' \rightarrow B'$  を通るワイヤ) の長さを  $L_{b2}$  とすると、それぞれ以下のように表される。

$$L_{b1} = L_1 + \frac{d_1}{2}\Delta q_1 + \frac{d_2}{2}\Delta q_2\tag{2-17}$$

$$L_{b2} = L_2 - \frac{d_1}{2}\Delta q_1 - \frac{d_2}{2}\Delta q_2\tag{2-18}$$

動滑車の  $y$  座標の変化  $\Delta y_1, \Delta y_2$  は、以下のように表される。

$$\begin{aligned}\Delta y_1 &= \frac{1}{2}(L_{b1} - L_1) \\ &= \frac{1}{4}(d_1\Delta q_1 + d_2\Delta q_2)\end{aligned}\tag{2-19}$$

$$\begin{aligned}\Delta y_2 &= \frac{1}{2}(L_{b2} - L_2) \\ &= -\frac{1}{4}(d_1\Delta q_1 + d_2\Delta q_2)\end{aligned}\tag{2-20}$$

出力軸のプーリの角度の変化  $\Delta\theta$  は以下のようになる．

$$\Delta\theta = \frac{d_1}{2d_o} \Delta q_1 + \frac{d_2}{2d_o} \Delta q_2 \quad (2-21)$$

式(2-21)から，出力軸のプーリの角度は，2つの入力軸のプーリの角度の線形和になっていることが分かる．また，出力軸のプーリの角度の変化は，入力軸のプーリの角度だけではなく，入力軸のプーリの直径と出力軸のプーリの直径によっても変わることが分かる．そのことから，入力軸のプーリの直径と出力軸のプーリの直径を調節することによって，各入力の重みを調整することができる．

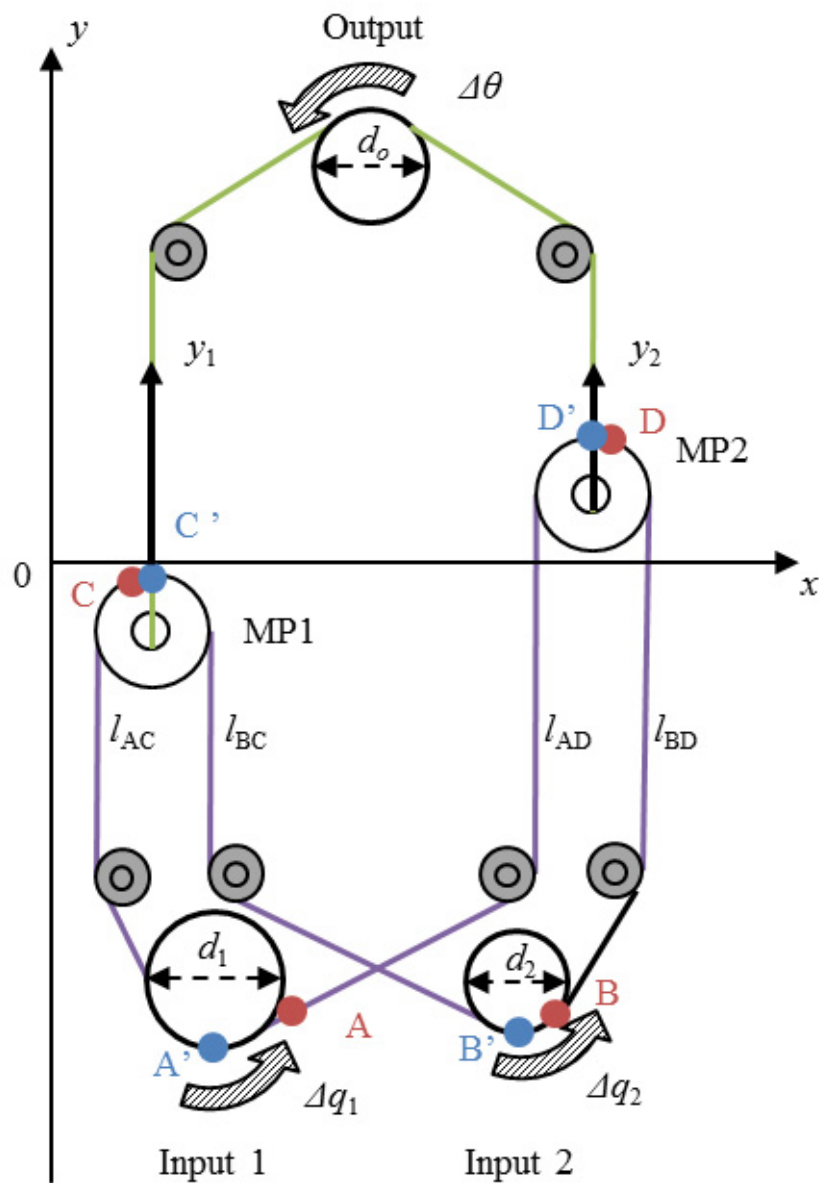


図 2.8: 入力軸 1 と入力軸 2 を駆動させた場合の動作

### 2.3.2 3つ以上のアクチュエータの変位を線形加算する機構

2.3.1 で説明した機構を階層的に用いることにより, 3 つ以上のアクチュエータの変位を線形加算する機構が設計できる. 図 2.9 は, 4 つのアクチュエータの変位を線形加算することができる機構である.

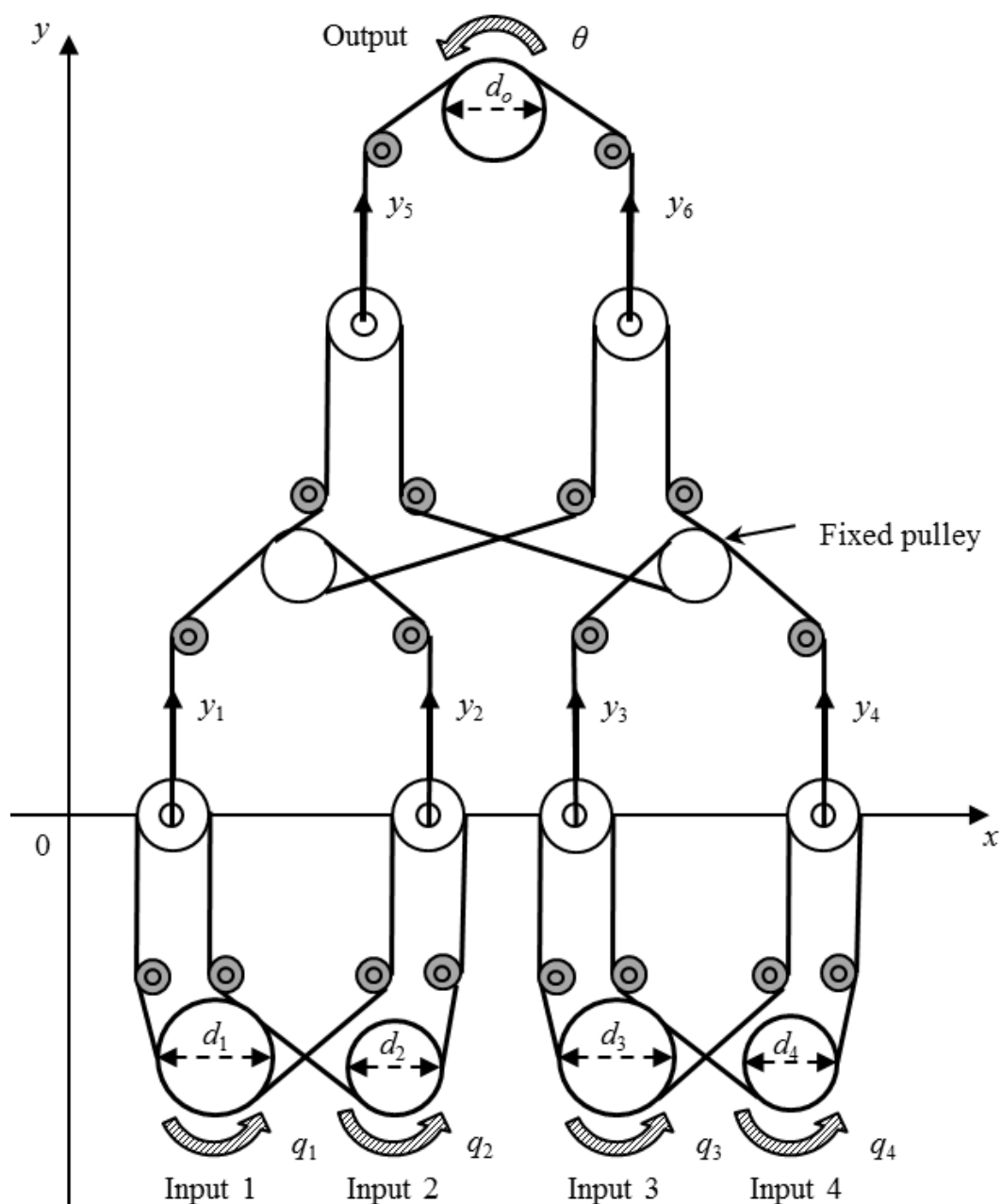


図 2.9: 4 つのアクチュエータの変位を線形加算する機構

この機構には、出力軸のプーリ(直径:  $d_o$ ), 4つの入力軸のプーリ(直径:  $d_1, d_2, d_3, d_4$ ), 6つの動滑車が含まれる. 入力軸のプーリの角度の変化と出力軸のプーリの角度の変化は, 以下のように表される.

$$\Delta\theta = \frac{d_1}{4d_o}\Delta q_1 + \frac{d_2}{4d_o}\Delta q_2 + \frac{d_3}{4d_o}\Delta q_3 + \frac{d_4}{4d_o}\Delta q_4 \quad (2-22)$$

ここで,  $q_1, q_2, q_3, q_4$  は入力軸のプーリの角度,  $\theta$  は出力軸のプーリの角度であるとする. 2.2.1の場合と同様に, 入力軸プーリの角度の変化の線形和が出力軸の角度の変化になっていることが分かる. また, 入力軸のプーリと出力軸のプーリの直径で入力の変位が変化することも同様である.

図 2.9 の機構は, 4つのアクチュエータの変位までしか線形加算することができないが, 同様な設計方法で機構を拡張することにより任意の個数のアクチュエータの変位を線形加算することができる. つまり, 一般に以下のような変位の関係をもつ機構が実現できる.

$$\Delta\theta = a_1\Delta q_1 + a_2\Delta q_2 + \cdots + a_r\Delta q_r \quad (2-23)$$

ここで,  $q_1, q_2, \dots, q_r$  は入力軸のプーリの角度,  $\theta$  は出力軸のプーリの角度,  $a_1, a_2, \dots, a_r$  は定数であるとする. よって, 図 2.1 で表される LDD を一般にワイヤとプーリで実現することができるといえる.

### 2.3.3 少数の入力を線形加算して多数の出力に変換する機構

2.3.1 や 2.3.2 で説明した機構を複数組み合わせると, 少数の入力を線形加算して多数の出力に変換する機構を実現できる. 図 2.10 に 2次元の入力を 3次元の出力に変換する機構の例を示した. 図 2.10 の機構では, 図 2.6 の機構を 3つ用いている. ここでは, 各アクチュエータには直径の異なる入力軸のプーリが接続されていることに注意する. 式(2-21)や式(2-22)から分かるように, 入力軸のプーリの直径を変更することで入力に対して任意の重み係数を与えることができる. よって, 図 2.10 の出力軸のプーリと入力軸のプーリの角度の関係は式(2-24)のように表される.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

ここで,  $q_1, q_2$  は入力軸のプーリの角度,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  は出力軸のプーリの角度,  $\{a_{ij}\}$  は定数であるとする. 同様にして, 2.3.1 や 2.3.2 で説明した機構を用いることにより以下のような入出力関係をもつ機構を実現できる.

$$\theta = Aq \quad (2-25)$$

ここで,  $\theta \in R^n$  は出力軸の角度のベクトル,  $q \in R^r$  は入力軸の角度のベクトル,  $A \in R^{n \times r}$  は定数行列とする. よって, 一般に線形従属劣駆動機構をワイヤとプーリを用いた機構で実現できるといえる.

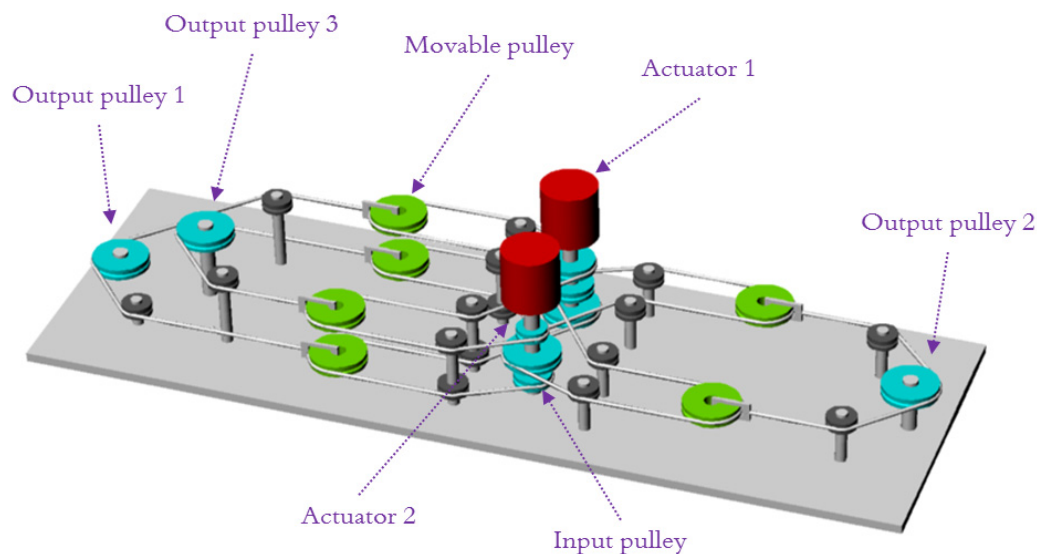


図 2.10: 2次元の入力を3次元の出力に変換する機構

## 2.4 本章のまとめ

本章では、劣駆動機構を実現するための2種類の方法について述べた。提案した機構はいずれも、任意の数のアクチュエータの変位を線形加算して出力するという機能をもつ。1つ目の機構は、流体を用いた機構である。この機構は、従来からある流体駆動の機構を応用したものであり、複数の断面積の異なるシリンダとピストンで構成されている。シリンダをつないでいるパイプが変位の加算器の役割を果たしている。シリンダの断面積を変更することによって、アクチュエータの変位の重みづけを変更することができる。2つ目の機構は、本研究で新たに提案した機構である。この機構は、ワイヤとプーリのみで設計することができる。機構内には複数の動滑車と定滑車がある。動滑車の変位の加算器の役割を果たしている。アクチュエータに接続されるプーリの直径を変更することにより、アクチュエータの角度の重みづけを変更することができる。

これまでに、ロボットに用いるためのアクチュエータとして、電動モータ、空気圧アクチュエータ、油圧アクチュエータ、超音波モータなどの研究開発は盛んに行われてきた[68][69]。しかし、人間の筋肉のように出力重量比が良くかつ制御しやすいアクチュエータはまだない。また、アクチュエータは一般に出力を大きくしようとするとき体積や質量が大きくなってしまふ。一方、本研究で新たに提案したワイヤープーリ系の機構では、プーリの直径の比でその機能が決まる。つまり、全体を小型化しても機能は変わらない。よって、アクチュエータを小型化や軽量化するより、本研究で提案する劣駆動機構を小型化や軽量化することの方が容易であると考えられる。



## 第3章

# タスクが運動学で 定義される場合の設計手法

### 3.1 線形従属劣駆動機構の設計

本章では，タスクが作業座標空間中でマニピュレータの手先の軌道により与えられた場合に劣駆動メカニズムを設計する方法を説明する．図 3.1 を用いて設計方法の概要を説明する．図 3.1 のメカニズムは，多関節マニピュレータ，線形従属劣駆動機構(Underactuated LDD mechanism)，アクチュエータの 3 つのものからなっている．ここでは，表現を分かり易くするために 2 次元平面上で動作する 1 自由度の回転関節のみからなる多関節マニピュレータを扱っているが，本研究の提案手法は容易に 3 次元のマニピュレータに拡張することができる．図 3.1 のメカニズムでは，線形従属劣駆動機構を介して  $n$  個の関節を  $r$  個のアクチュエータで駆動させている．また，関節角度の次元  $n$  とアクチュエータの変位の次元  $r$  には  $n > r$  の関係がある．線形従属劣駆動機構とは，アクチュエータの変位の線形和を関節に伝達する機構である．マニピュレータの関節角度とアクチュエータの変位の関係は以下のように表される．

$$\theta(t) = Aq(t) + b \quad (3-1)$$

ここで， $\theta(t) \in R^n$  は関節角度， $q(t) \in R^r$  はアクチュエータの変位， $t$  は時間， $A \in R^{n \times r}$  は正方形ではない定数行列であり，その階数は  $r$ ， $b \in R^n$  は定数ベクトルとする．線形従属劣駆動機構に

関する詳細な説明および機構の実現方法については第2章で説明している. 図3.1のメカニズム中の線形従属劣駆動機構は与えられたタスクを達成できるような関節の運動を実現できるように設計されていなければならない. ここでのタスクとは, 作業座標空間中にある大きさや配置が既知の剛体の対象物を多関節マニピュレータの手先を用いて把持し, あらかじめ指定された軌道を通わせて移動させることである. 図3.1中のP1とP2は多関節マニピュレータの手先の位置,  $O'$ と $O''$ は接触点を示す. ここでは, 手先と対象物との間の摩擦係数は非常に大きく, 手先と対象物との間の滑りはないものとする.

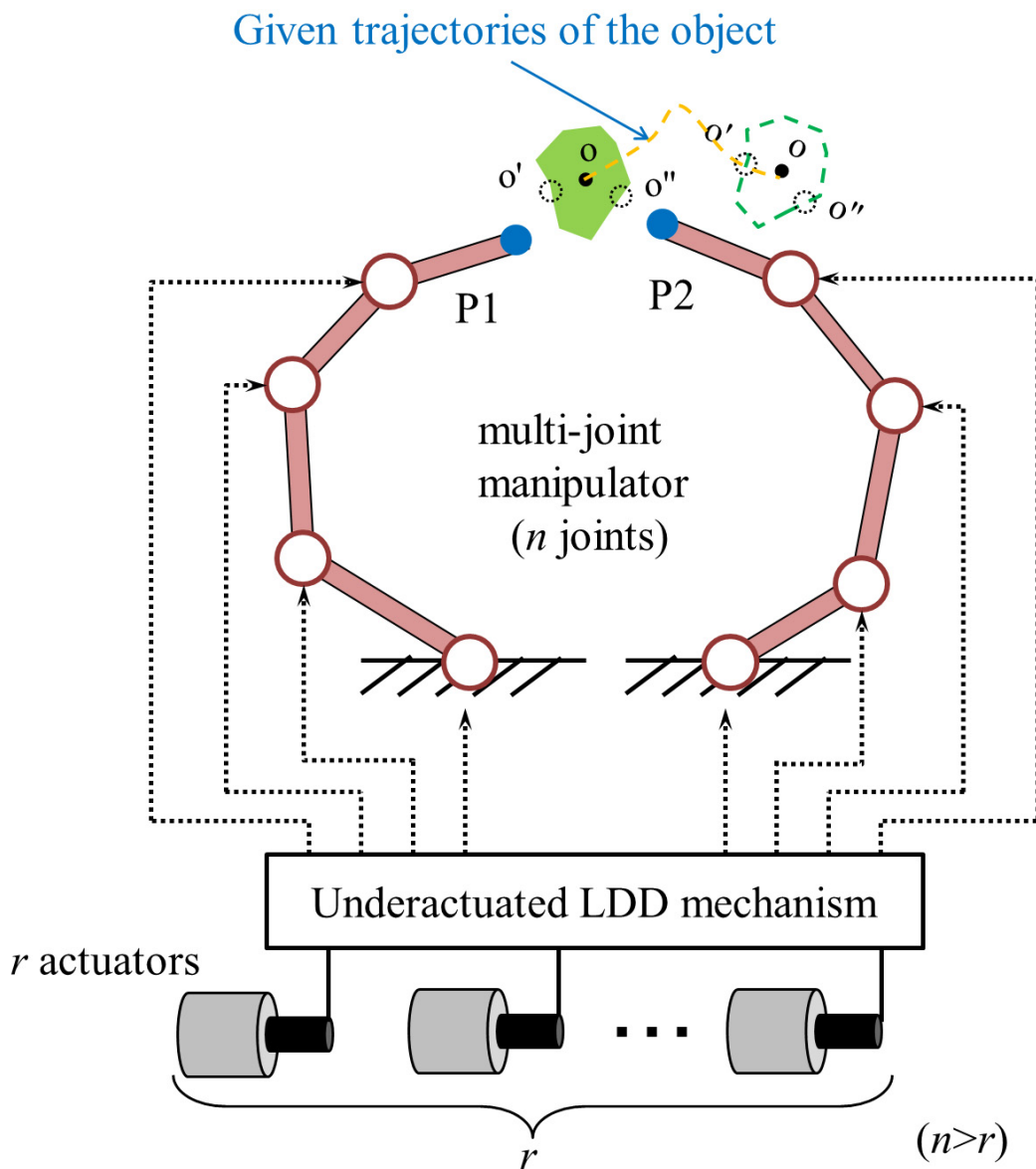


図3.1: 運動学で定義されるタスクを達成するメカニズムの構成



本提案手法はタスクベースなので、達成したいタスクはあらかじめ作業座標空間で与えられる。そのため、そのタスクを達成するための手先の軌道は一般に以下のように与えることができる。

$$\mathbf{x}(t) \in R^h \left( 0 \leq t \leq t_f \right) \quad (3-2)$$

ここで、 $\mathbf{x}(t)$ は手先の位置と姿勢を表すベクトル、 $t$ は時間である。また、作業座標空間の変数 $\mathbf{x}(t)$ の次元 $h$ とアクチュエータの変数の次元 $r$ の関係は $h > r$ であるとする。タスクは、 $t=0$ から $t=t_f$ の間で定義される。図3.3のように手先が複数ある場合には、すべての手先の軌道の運動の情報を $\mathbf{x}(t)$ は含んでいるものとする。つまり、 $\mathbf{x}(t)$ の次元 $h$ はすべての手先の位置と姿勢の次元を含んでいることに注意する。 $h$ 次元で表される手先の位置と姿勢を制御するためには、それより多くの関節を制御しなければならない。つまり、関節角度の次元 $n$ と手先の位置と姿勢の次元 $h$ には $n > h$ の関係がある。手先の位置と姿勢 $\mathbf{x}(t)$ と関節角度 $\boldsymbol{\theta}(t)$ の関係は、一般に以下のように表される。

$$\mathbf{x}(t) = f(\boldsymbol{\theta}(t)) \quad (3-3)$$

式(3-3)の両辺を微分すると、手先の速度と関節速度の関係が以下のように得られる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = J\dot{\boldsymbol{\theta}}(t) \quad (3-4)$$

ここで、 $J$ はヤコビ行列である。式(3-3)と式(3-4)より、あらかじめ定義されるタスクを達成するための関節角度の時系列が得られる。

図3.1のメカニズムの特徴は、アクチュエータの変位と関節角度が線形な関係をもっていることである。式(3-3)と式(3-4)から得られる関節角度の時系列は、マニピュレータの各関節が独立に制御される場合の関節角度の時系列である。本研究では、この時系列で表される連続的な関節の情報を与えられたタスクを達成するために必要な運動情報と考える。そして、関節角度の時系列に線形変換を用いた運動の低次元化手法を用いて線形従属劣駆動機構を設計する。本論文では、その設計方法を2つ説明する。1つ目の方法は、主成分分析(Principal Component Analysis: PCA)[70]-[73]を応用した方法である。その方法を本論文では、PCA-based method とよぶことにする。主成分分析とは、正規直交変換を用いて変数間に相関がある元の観測値を、相関のない主成分と呼ばれる合成変数へ変換する数学的な手法である。また、各主成分にはそれぞれ寄与率を定義することができる。ここでの寄与率は、各主成分がどれほどもとの観測値の情報を含んでいるかという指標になっている。PCA-based method では、すべての関節角度の時系列を主成分空間へ投影し、主成分へ変換する。得られた主成分の寄与率を計算し、高寄与率な主成分のみを選択する。選択された主成分のみで累積寄与率が十分に高ければ、元の関節の運動はそれらのみで近似的に復元することができる。その復元方法は、主成分変換の変換行列を使うことである。その変換行列を線形従属劣駆動機構のパラメータとして用いることにより設計する。PCA-based method で設計されるメカニズムをPCDM(Principal Component Drive Mechanism)とよぶことにする。2つ目の方法は、BPLP(Back Projection for Lost Pixels)法[74][75]を応用した方法であ

る．本論文では，その手法を BPLP-based method とよぶことにする．元々，BPLP は画像処理の分野で，欠損のある画像の欠損情報を復元するために考えられ研究されてきた手法である．BPLP-based method では，すべての関節の元の関節角度の時系列とあらかじめ一部の関節の情報を打ち切った関節角度の時系列との関係を線形変換で近似的に復元する．方法としては，元の関節角度の時系列と欠損のある関節角度の時系列を PCA-based method のときに得られる固有空間（主成分空間）に射影して，その空間中で打ち勝った関節角度の時系列を近似的に復元する．BPLP-based method で設計されるメカニズムを BPDM(Back Projection for lost joints Drive Mechanism)とよぶことにする．以下で，PCA-based method と BPLP-based method について説明する．

### 3. 1. 1 PCA-based method

関節角度の時系列  $\theta(t)$  の共分散行列は式(3-5)のように定義される．ここで，共分散行列になっているのは，マニピュレータの各関節が個別に制御される場合の関節角度の時系列であることを注意する．

$$S = \int_0^t \{\theta(t) - \theta_0\} \{\theta(t) - \theta_0\}^T dt \quad (3-5)$$

ここで， $\theta_0 \in R^n$  は関節角度  $\theta(t)$  の時系列の平均値である．行列  $S$  を固有値分解すると， $n$  個の固有値と  $n$  個の固有ベクトルが得られる．式(3-5)で共分散行列を計算するときには，平均値は引いているが，分散で除算して正規化はしていない．これは，大きく角度の変化する関節をその大きさに応じて重要視して解析するためである．

$$S e_i = \lambda_i e_i \quad (3-6)$$

ここで， $\lambda_i$  ( $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n$ ) は固有値， $e_i \in R^n$  ( $i=1, \dots, n$ ) は固有ベクトルである．ここで得られた固有ベクトルからなる行列  $W \in R^{n \times n}$  を以下のように定義する．

$$W = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n]^T \in R^{n \times n} \quad (3-7)$$

行列  $W$  は主成分分析の変換行列であり，主成分  $p(t) \in R^n$  と関節角度の関係は以下のように与えられる．

$$p(t) = W \{\theta(t) - \theta_0\} \quad (3-8)$$

$i$  番目の主成分の寄与率  $C_i$  は以下のように定義される．

$$C_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} = \frac{\lambda_i}{\text{Tr}(S)} \quad (3-9)$$

$C_i$  は，全体関節角度の時系列の分散の中で， $i$  番目の主成分の分散の割合を示している．また， $C_i$  の値には式(3-10)と(3-11)のような性質がある．

$$\sum_{i=1}^n C_i = 1 \quad (3-10)$$

$$C_i \geq 0 \quad (3-11)$$

関節角度の時系列を低次元化するために、主成分を寄与率によって以下のように 2 つのグループに分ける.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_h(t) \\ \mathbf{p}_l(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_h \\ W_l \end{bmatrix} \{\boldsymbol{\theta}(t) - \boldsymbol{\theta}_0\} \quad (3-12)$$

ここで,  $\mathbf{p}_h(t) \in R^r$  は  $r$  次元の高寄与率な主成分,  $\mathbf{p}_l(t) \in R^{(n-r)}$  は  $n-r$  次元の低寄与率な主成分である. また, 行列  $W_h$  と行列  $W_l$  は行列  $W$  の部分行列であり, それぞれ高寄与率な主成分と低寄与率な主成分への変換行列となっている. 行列  $W$  は正規直交行列なので, 関節角度の時系列  $\boldsymbol{\theta}(t)$  は主成分  $\mathbf{p}(t)$  と変換行列  $W$  で以下のように表される.

$$\boldsymbol{\theta}(t) = W^{-1} \mathbf{p}(t) + \boldsymbol{\theta}_0 = W^T \mathbf{p}(t) + \boldsymbol{\theta}_0 \quad (3-13)$$

式(3-12)と式(3-13)から, 高寄与率な主成分のみで復元された関節角度の時系列  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$  は以下のように与えられる.

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = W_h^T \mathbf{p}_h(t) + \boldsymbol{\theta}_0 \quad (3-14)$$

式(3-14)の関係式が式(3-1)と対応しているため, 線形従属劣駆動機構のパラメータ  $A$  の設計に用いることができる. 式(3-14)の高寄与率な主成分  $\mathbf{p}_h(t)$  がアクチュエータの操作量に対応しているため,  $\mathbf{p}_h(t)$  の次元がアクチュエータの数と一致する. ここで,  $\boldsymbol{\theta}_0$  は線形従属劣駆動機構とマニピュレータの関節を接続するときのバイアスになる. 与えられたタスクに対して関節動作範囲の平均値のベクトル  $\boldsymbol{\theta}_0$  は一般には  $\boldsymbol{\theta}_0 = \mathbf{0}$  とならないので, 関節の平均値のベクトル  $\boldsymbol{\theta}_0$  をバイアスの値として選ぶこととする. これによって, 高寄与率な主成分  $\mathbf{p}_h(t)$  をアクチュエータの操作量として発生させる際に, この平均値の影響を反映させる必要がなくなる. 式(3-12)から式(3-14)より, 元の関節角度の時系列  $\boldsymbol{\theta}(t)$  と復元された関節角度の時系列  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$  の関係が得られる.

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = W_h^T W_h \{\boldsymbol{\theta}(t) - \boldsymbol{\theta}_0\} + \boldsymbol{\theta}_0 \quad (3-15)$$

本研究では, 復元誤差を以下のように定義する.

$$\Delta(t) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(t) - \boldsymbol{\theta}(t) = (W_h^T W_h - I_n) \{\boldsymbol{\theta}(t) - \boldsymbol{\theta}_0\} \quad (3-16)$$

式(3-16)の  $\{\boldsymbol{\theta}(t) - \boldsymbol{\theta}_0\}$  は元の関節角度の時系列の平均値からの変動分である.

### 3.1.2 最小二乗解と正規方程式

本節では、主成分分析を用いて運動の低次元化についてより深く考えてみる．式(3-17)のような  $Y \in R^{r \times k}$  についての線形方程式を考えてみる．

$$W_h^T Y = \begin{bmatrix} \theta_1[0] & \theta_1[1] & \cdots & \theta_1[k] \\ \theta_2[0] & \theta_2[1] & \cdots & \theta_2[k] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \theta_n[0] & \theta_n[1] & \cdots & \theta_n[k] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{\theta}_1 & \bar{\theta}_1 & \cdots & \bar{\theta}_1 \\ \bar{\theta}_2 & \bar{\theta}_2 & \cdots & \bar{\theta}_2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \bar{\theta}_n & \bar{\theta}_n & \cdots & \bar{\theta}_n \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

ここで、 $W_h \in R^{r \times n}$  は式(3-12)の高寄与率な主成分への変換行列、 $\{\theta_i[j]\}$  は 3.1.1 の関節角度の時系列  $\theta(t)$  を離散時化して表したものであり、 $\bar{\theta}_i$  は各関節角度の平均であるとする ( $i=1, \dots, n, j=1, \dots, k$ )．式(3-17)は一般に解をもたない．そこで、式(3-18)で表されるような 2 ノルム  $D$  を最小にする近似解を求めることを考える．

$$D = \|W_h^T Y - \Theta\|_2 \quad (3-18)$$

ここで、 $\Theta \in R^{n \times k}$  は以下のように表されるとする．

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1[0] & \theta_1[1] & \cdots & \theta_1[k] \\ \theta_2[0] & \theta_2[1] & \cdots & \theta_2[k] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \theta_n[0] & \theta_n[1] & \cdots & \theta_n[k] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{\theta}_1 & \bar{\theta}_1 & \cdots & \bar{\theta}_1 \\ \bar{\theta}_2 & \bar{\theta}_2 & \cdots & \bar{\theta}_2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \bar{\theta}_n & \bar{\theta}_n & \cdots & \bar{\theta}_n \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

式(3-18)の近似解は、正規方程式の解であり、式(3-20)のように表される．

$$W_h W_h^T Y = W_h \Theta \quad (3-20)$$

行列  $W_h$  は正規直交行列  $W$  の部分行列なので、式(3-21)が成り立つ．

$$W_h W_h^T = I_r \quad (3-21)$$

ここで、 $I_r \in R^{r \times r}$  は単位行列である．式(3-20)と式(3-21)より、式(3-22)が成り立つ．

$$Y = W_h \Theta = \begin{bmatrix} p_1[0] & p_1[1] & \cdots & p_1[k] \\ p_2[0] & p_2[1] & \cdots & p_2[k] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_r[0] & p_r[1] & \cdots & p_r[k] \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

ここで、 $\{p_i[j]\}$  は離散時刻  $j$  での  $i$  番目の主成分の値である．よって、式(3-14)は方程式(3-17)の最小二乗近似解になっていることが分かる．したがって、3.1.1 で説明した手法で関節角度の時系列  $\theta(t)$  の復元に主成分分析を用いることは、関節角度の時系列  $\theta(t)$  が必ずしも正規分布に従わないものであったとしてもこの最小二乗近似の意味で、誤差を小さくする復元となっている．

### 3. 1. 3 BPLP-based method

BPLP-based method では、元の関節角度の時系列  $\theta(t)$  と選択された一部の関節角度の時系列  $\theta_s(t)$  との関係を求める。選択される関節角度の時系列は、相関の低い関節の組み合わせでなければならない。なぜなら、相関の高い関節の組み合わせを選ぶと、関節角度の時系列を打ち切ったときに、タスクを達成するために重要な運動の情報が失われてしまうからである。 $\theta(t)$  と  $\theta_s(t)$  の関係は以下のように表されるとする。

$$\theta_s(t) = Z\{\theta(t) - \theta_0\} \quad (3-23)$$

ここで、 $\theta_0 \in R^n$  は関節角度の時系列の平均値である。 $Z$  は定数行列であり、 $r$  個の関節を選択するための行列である。行列  $Z$  は対角行列である。また、対角成分は 1 か 0 であり、 $r$  個の 1 の成分を含む。

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & & 0 \\ & 0 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

選択された関節角度の時系列  $\theta_s(t)$  を、式(3-12)の変換行列  $W_h$  を用いて固有空間へ射影する。

$$p_{hs}(t) = W_h \theta_s(t) \quad (3-25)$$

行列  $W$  は正規直交行列なので、関節角度  $\theta(t)$  は近似的に以下のように表すことができる。

$$\theta(t) \approx W_h^T p_h(t) + \theta_0 \quad (3-26)$$

高寄与率な主成分  $p_h(t)$  と選択された関節角度  $\theta_s(t)$  を射影した値  $p_{hs}(t)$  を関係づけるために以下のような行列  $\Gamma$  を定義する。

$$\Gamma = W_h Z W_h^T \quad (3-27)$$

式(3-25)から式(3-27)より、 $p_{hs}(t)$  以下のように表すことができる。

$$p_{hs}(t) \approx W_h Z W_h^T p_h(t) = \Gamma p_h(t) \quad (3-28)$$

さらに、式(3-25)、式(3-26)と式(3-28)より、関節角度の時系列を以下のように復元することができる。

$$\hat{\theta}(t) = W_h^T \Gamma^{-1} W_h \theta_s(t) + \theta_0 \quad (3-29)$$

$\theta_s(t)$  は、 $n$  次元のベクトルであるが、 $n-r$  個の成分は常に 0 の成分である。そのため、式(3-29)の関係式は、式(3-1)と対応させることができ、線形従属劣駆動機構のパラメータ  $A$  の設計に用いることができる。式(3-29)の選択された関節角度の時系列  $\theta_s(t)$  がアクチュエータの操作量に対応している。ここで、 $\theta_0$  線形従属劣駆動機構とマニピュレータの関節を接続するときのバイアスになる。与えられたタスクに対して関節動作範囲の平均値のベクトル  $\theta_0$  は

一般には  $\theta_0=0$  とならないので、関節の平均値のベクトル  $\theta_0$  をバイアスの値として選ぶこととする。これによって、選択された関節角度の時系列  $\theta_s(t)$  をアクチュエータの操作量として発生させる際に、この平均値の影響を反映させる必要がなくなる。元の関節角度の時系列  $\theta(t)$  と復元された関節角度の時系列  $\hat{\theta}(t)$  の関係は、以下のような式で与えられる。

$$\hat{\theta}(t) = W_h^T \Gamma^{-1} W_h Z \{\theta(t) - \theta_0\} + \theta_0 \quad (3-30)$$

運動の復元誤差は以下のように表される。

$$\Delta(t) = \hat{\theta}(t) - \theta(t) = \left( W_h^T \Gamma^{-1} W_h Z - I_n \right) \{\theta(t) - \theta_0\} \quad (3-31)$$

式(3-31)は、 $Z$  が単位行列の場合式(3-16)と一致する。式(3-31)の  $\{\theta(t) - \theta_0\}$  は元の関節角度の時系列の平均値からの変動分である。

### 3. 1. 4 PCDM と BPDM の比較

PCDM と BPDM の異なる点は、アクチュエータの操作量である。PCDM の場合は、アクチュエータ操作量は設計のときに選択された高寄与率な主成分の時系列の値  $p_h(t)$  になる。一方で、BPDM の場合は、設計のときに選択された関節角度の時系列の値  $\theta_s(t)$  になる。一般に、PCA-based method による運動の低次元化後の復元の方が、BPLP-based method の運動の低次元化後の復元に比べて誤差が小さい。それは、BPLP-based method では、はじめの段階で一部の関節角度の時系列を打ち切ってしまうことにある。そのことから、PCDM の方が BPDM より与えられたタスクに必要な運動を精度よく行うことができる。

しかし、BPLP-based method で設計された線形従属劣駆動機構の方が機構としては実現が容易である。なぜなら、BPLP-based method で設計された線形従属劣駆動機構では、アクチュエータの操作量が選択された元の関節角度なので、選択された関節にはアクチュエータを直接接続するだけで済む。選択されなかった関節の運動だけ線形従属劣駆動機構で与えればよい。

また、フィードバック制御を行う場合には、実際のアクチュエータの操作量を推定するために多関節マニピュレータの部分にセンサを配置する必要がある。PCDM では、アクチュエータの操作量が主成分なため、すべての関節角度の値をセンサで計測する必要がある。一方、BPDM では、アクチュエータの操作量が選択された関節角度なので、選択された関節の値をセンサで計測するだけでアクチュエータの操作量を計測できる。

### 3. 1. 5 可操作性楕円体

可操作性楕円体とは、マニピュレータの手先の位置の動かしやすい方向を表す指標である。各関節にアクチュエータが配置されていて、関節が独立に駆動させられるマニピュレータ

の場合は, 式(3-4)のヤコビ行列を特異値分解することで計算することができる[76]. しかし, 本研究で扱っている劣駆動メカニズムでは少し評価方法が異なる. 図 3.2 のメカニズムでは, 各関節は線形従属劣駆動機構を介してアクチュエータと接続されている. また, 作業座標空間の変数  $\mathbf{x}(t)$  の次元  $h$  とアクチュエータの変数の次元  $r$  の関係は  $h > r$  である. 式(3-1)の両辺を微分すると以下ようになる.

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}(t) = A\dot{\mathbf{q}}(t) \quad (3-32)$$

また, 式(3-4)と式(3-32)から, 式(3-33)が得られる.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = JA\dot{\mathbf{q}}(t) \quad (3-33)$$

可操作性楕円体は, アクチュエータの変位の速度が以下のような関係を満足するような手先速度  $\mathbf{x} \in R^h$  のすべてからなる集合である.

$$\|\dot{\mathbf{q}}(t)\| \leq 1 \quad (3-34)$$

式(3-33)の行列  $JA$  を特異値分解することで可操作性楕円体の主軸を求めることができる. ここで, 行列  $JA$  の特異値分解を以下のように表す.

$$JA = U\Sigma V^T \quad (3-35)$$

ここで,  $U$  および  $V$  は  $h \times h$  および  $r \times r$  の直交行列であり,  $\Sigma$  は式(3-36)で与えられる.

$$\begin{aligned} \Sigma &= \begin{bmatrix} \Sigma_r \\ 0 \end{bmatrix} \\ \Sigma_r &= \text{diag}[\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r] \\ \sigma_1 &\geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq 0 \end{aligned} \quad (3-36)$$

また,  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$  は特異値と呼ばれる値であり,  $(JA)^T JA$  の固有値の平方根の大きいものから順に並べたものである. さらに, 行列  $U$  の第  $i$  ベクトルを  $\mathbf{u}_i \in R^h$  と表す.

$$U = [\mathbf{u}_1 \quad \mathbf{u}_2 \quad \dots \quad \mathbf{u}_h] \quad (3-37)$$

可操作性楕円体の主軸は,  $\sigma_1 \mathbf{u}_1, \sigma_2 \mathbf{u}_2, \dots, \sigma_r \mathbf{u}_r$  で与えられる.

## 3.2 リンク長さの設計

式(3-3)に表されるように, マニピュレータの手先の位置と姿勢は関節角度の関数である. しかし, マニピュレータの手先の位置と姿勢は同じ関節角度を与えても, リンク長さなどの運動学パラメータが異なれば変化する. そのことから, 式(3-3)は, 以下のように書き直すことができる.

$$\mathbf{x}(t) = f(\boldsymbol{\theta}(t), \boldsymbol{\xi}) \quad (3-38)$$

ここで,  $\boldsymbol{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_u)$  はリンク長さであるとする. これまでに, ヤコビ行列や可操作性楕円体を目的関数としてリンク長さを目的関数としてリンク長さを設計する研究が行われた

[77]-[79]. 本研究では, 劣駆動メカニズムを設計する過程での運動の低次元化に伴う運動の復元誤差を目的関数にしてリンク長さを設計する. 3.1.1 及び 3.1.2 では, 運動の低次元化に伴う, 関節空間での運動の復元誤差を算出した (式(3-16), 式(3-31)). その復元誤差は, 関節角度の関数である. タスクに必要な手先の位置と姿勢の軌道が一定であれば, 関節角度の時系列はリンク長さを変更することで変わる. 本研究では, 運動の復元誤差を最小にするようなリンク長さを最適化計算の手法を用いて探索する. ただし, 探索をする場合には, 必ず制約条件が必要になる. なぜなら, 関節角度空間での運動の誤差を最小にするようにリンク長さを探索すると, 設計パラメータのリンク長さが発散するからである. 提案する手法は大きく 2 つの段階を踏むことになっている.

- ① PCA-based method または BPLP-based method でアクチュエータの数をタスクに合わせて減らす.
- ② リンク長さを設計変数にして, 関節角度空間での運動の復元誤差を最小にするように最適化計算を行う.

目的関数は式(3-39)のように定義し, その関数を最小にするようなリンク長さを探索する.

$$\Psi(\xi) = \int_0^{t_f} \|A(\theta(t), \xi)\|^2 dt \quad (3-39)$$

最適化計算を行うときには, 制約付き最適化問題を扱うことができる逐次 2 次計画法を用いた[80][81]. 逐次 2 次計画法とは, 目的関数の 2 次形式と制約式の線形近似式によって得られる 2 次計画問題を解き, ラグランジュ関数のヘッセ行列の近似行列を改良した準ニュートン法の更新公式により最適解を求める方法である. 以下で, 逐次 2 次計画法の概要を説明する.

本章で扱う問題は以下のように表される.

$$\left. \begin{array}{l} \text{minimize } \Psi(\xi) \\ \text{subject to } g_i(\xi) \leq 0, i=1, \dots, m \end{array} \right\} \quad (3-40)$$

ここで,  $g_i(\xi)$  は制約条件を表す関数である. 問題(3-40)に対するラグランジュ関数は以下のように定義される.

$$L(\xi, \lambda) = \Psi(\xi) + \lambda g(\xi) \quad (3-41)$$

また, この問題の最適解の必要条件を与える Karush-Kuhn-Tucker 条件 (KKT 条件) は式(3-42)で与えられる.

$$\left. \begin{array}{l} \nabla_{\xi} L(\xi, \lambda) = \nabla \Psi(\xi) + \lambda \nabla g(\xi) = 0 \\ \lambda_i g_i(\xi) = 0, \quad i=1, \dots, m \\ g(\xi) \leq 0, \lambda \geq 0 \end{array} \right\} \quad (3-42)$$

ここで,  $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$  は,  $g(\xi) = (g_1(\xi), g_2(\xi), \dots, g_m(\xi))^T$  に対応するラグランジュ乗数である.  $\nabla g(\xi)$  は  $\partial g_i(\xi) / \partial \xi_j$  を第  $(i, j)$  成分とする  $m \times u$  行列である. いま, 問題(3-40)に対して, 最適解  $\xi^*$



とそれに対応するラグランジュ乗数  $\lambda^*$  が存在するとき, KKT 条件(3-42)の等式部分よりなる  $(\xi^*, \lambda^*)$  に関する連立非線形方程式は以下のように表される

$$\left. \begin{aligned} \nabla_{\xi} L(\xi^*, \lambda^*) &= 0 \\ \lambda_i^* g_i(\xi^*) &= 0, \quad i=1, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (3-43)$$

式(3-43)の左辺のヤコビ行列は, 式(3-44)で与えられる.

$$J(\xi^*, \lambda^*) = \left[ \begin{array}{c|ccc} \nabla_{\xi\xi}^2 L(\xi^*, \lambda^*) & \nabla^T g_1(\xi^*) & \cdots & \nabla^T g_m(\xi^*) \\ \lambda_1^* \nabla g_1(\xi^*) & g_1(\xi^*) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_m^* \nabla g_m(\xi^*) & 0 & \cdots & g_m(\xi^*) \end{array} \right] \quad (3-44)$$

この方程式にニュートン法を適用して  $(\xi^*, \lambda^*)$  を求めることを考えてみる. そのために, 式(3-43)を  $(\xi^*, \lambda^*)$  の近傍の点  $(\xi^{(k)}, \lambda^{(k)})$  において線形近似する. 式(3-45)が成り立つことを考慮して整理すると式(3-46)のようになる

$$\nabla_{\xi} L(\xi^{(k)}, \lambda^{(k)}) = \nabla f(\xi^{(k)}) + \lambda^{(k)} \nabla g(\xi^{(k)}) \quad (3-45)$$

$$\left. \begin{aligned} \nabla_{\xi\xi}^2 L(\xi^{(k)}, \lambda^{(k)}) (\xi - \xi^{(k)}) + \lambda \nabla g(\xi^{(k)}) &= -\nabla \Psi(\xi^{(k)}) \\ \lambda_i^{(k)} \nabla g_i(\xi^{(k)}) (\xi - \xi^{(k)}) + \lambda_i g_i(\xi^{(k)}) &= 0, \quad i=1, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (3-46)$$

この方程式の解を次の点  $(\xi^{(k+1)}, \lambda^{(k+1)})$  とするニュートン法の更新公式は, 次のようになる.

$$\left[ \begin{array}{c|ccc} \nabla_{\xi\xi}^2 L(\xi^{(k)}, \lambda^{(k)}) & \nabla^T g_1(\xi^{(k)}) & \cdots & \nabla^T g_m(\xi^{(k)}) \\ \lambda_1^{(k)} \nabla g_1(\xi^{(k)}) & g_1(\xi^{(k)}) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_m^{(k)} \nabla g_m(\xi^{(k)}) & 0 & \cdots & g_m(\xi^{(k)}) \end{array} \right] \begin{pmatrix} \xi^{(k+1)} - \xi^{(k)} \\ (\lambda^{(k+1)})^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\nabla^T \Psi(\xi^{(k)}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3-47)$$

しかし, このようなニュートン法では, ヤコビ行列に含まれるヘッセ行列  $\nabla_{\xi\xi}^2 L(\xi^{(k)}, \lambda^{(k)})$  を毎回計算しなければならない. それは, 数値計算的にかなりの負担になる. そこで, 準ニュートン法の考え方に基づいて行列  $\nabla_{\xi\xi}^2 L(\xi^{(k)}, \lambda^{(k)})$  を近似する行列を逐次生成することが考えられる.

点  $\xi^{(k)}$  近傍におけるもとの問題(3-40)の目的関数の 2 次近似式のヘッセ行列  $\nabla^2 \Psi(\xi^{(k)})$  を, 行列  $B^{(k)}$  で近似して定数項を省略して得られる 2 次の目的関数を, 制約式の線形近似式のもとで最小化するという, 次の 2 次計画問題を導入する.

$$\left. \begin{aligned} \text{minimize} \quad & \nabla \Psi(\xi^{(k)}) c + \frac{1}{2} c^T B^{(k)} c \\ \text{subject to} \quad & g(\xi^{(k)}) + \nabla g(\xi^{(k)}) c \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (3-48)$$

この問題(3-48)のラグランジュ関数を次のように定義する.

$$L(c, v) = \nabla \Psi(\xi^{(k)}) c + \frac{1}{2} c^T B^{(k)} c + v g(\xi^{(k)}) + v \nabla g(\xi^{(k)}) c \quad (3-49)$$

問題(3-48)の最適解を  $\mathbf{c}^{(k)}$  とし, 対応するラグランジュ乗数  $\mathbf{v}^{(k)}$  をとすれば, 式(3-50)の KKT 条件が成立する.

$$\left. \begin{aligned} \nabla \Psi(\xi^{(k)}) + B^{(k)} \mathbf{c}^{(k)} + \mathbf{v}^{(k)} \nabla g(\xi^{(k)}) &= 0 \\ \mathbf{v}_i^{(k)} g_i(\xi^{(k)}) + \mathbf{v}_i^{(k)} \nabla g_i(\xi^{(k)}) \mathbf{c}^{(k)} &= 0, \quad i=1, \dots, m \\ \mathbf{g}(\xi^{(k)}) + \nabla \mathbf{g}(\xi^{(k)}) \mathbf{c}^{(k)} &\leq 0, \quad u_i \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (3-50)$$

この KKT 条件の等式部分をベクトル行列形式で表せば式(3-51)のようになる.

$$\left[ \begin{array}{c|ccc} B^{(k)} & \nabla^T g_1(\xi^{(k)}) & \dots & \nabla^T g_m(\xi^{(k)}) \\ \hline \mathbf{v}_1^{(k)} \nabla g_1(\xi^{(k)}) & g_1(\xi^{(k)}) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{v}_m^{(k)} \nabla g_m(\xi^{(k)}) & 0 & \dots & g_m(\xi^{(k)}) \end{array} \right] \begin{pmatrix} -\mathbf{c}^{(k)} \\ (\mathbf{v}^{(k)})^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\nabla^T \Psi(\xi^{(k)}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3-51)$$

ここで式(3-47)と式(3-51)を比較しての式(3-52)のようにみなすと, 式(3-51)の  $B^{(k)}$  は式(3-47)の  $\nabla_{\xi\xi}^2 L(\xi^{(k)}, \lambda^{(k)})$  の役割を果たしていることが分かる.

$$\mathbf{c}^{(k)} = \xi^{(k+1)} - \xi^{(k)}, \mathbf{v}^{(k)} = \lambda^{(k+1)} \cong \lambda^{(k)} \quad (3-52)$$

したがって,  $B^{(k)}$  は式(3-41)のラグランジュ関数のヘッセ行列の近似行列とみなすことができる. 準ニュートン法の公式を用いて, がヘッセ行列のよい近似となるように更新できれば, 2次計画問題の解を逐次計算することは, ニュートン法に似た性質をもつことが期待できる.  $B^{(k)}$  の更新は準ニュートン法の Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno(BFGS)公式を適用する. BFGS 公式の計算の仕方を式(3-53)から式(3-55)に示す.

$$\mathbf{p}^{(k)} = \xi^{(k+1)} - \xi^{(k)} \quad (3-53)$$

$$\mathbf{q}^{(k)} = \nabla_{\xi}^T L(\xi^{(k+1)}, \mathbf{v}^{(k)}) - \nabla_{\xi}^T L(\xi^{(k)}, \mathbf{v}^{(k)}) \quad (3-54)$$

$$B^{(k+1)} = B^{(k)} + \frac{\mathbf{q}^{(k)} (\mathbf{q}^{(k)})^T}{(\mathbf{q}^{(k)})^T \mathbf{p}^{(k)}} - \frac{B^{(k)} \mathbf{p}^{(k)} (\mathbf{p}^{(k)})^T B^{(k)}}{(\mathbf{p}^{(k)})^T B^{(k)} \mathbf{p}^{(k)}} \quad (3-55)$$

これまでに述べた内容から, 逐次2次計画法のアルゴリズムは以下のように要約することができる.

Step1: 初期値  $\xi^{(1)} \in R^u$  と初期正定行列  $B^{(1)}$  を選び,  $k := 1$  とおく.

Step2: 点  $\xi^{(k)}$  における2次計画問題

$$\left. \begin{aligned} \text{minimize } \nabla \Psi(\xi^{(k)}) \mathbf{c} + \frac{1}{2} \mathbf{c}^T B^{(k)} \mathbf{c} \\ \text{subject to } \mathbf{g}(\xi^{(k)}) + \nabla \mathbf{g}(\xi^{(k)}) \mathbf{c} \leq 0 \end{aligned} \right\}$$

を解き, 最適解  $\mathbf{c}^{(k)}$  と対応するラグランジュ乗数  $\mathbf{v}^{(k)}$  を求める.

Step3:  $\xi^{(k+1)} := \xi^{(k)} + \mathbf{c}^{(k)}$  とする.

Step4: 現在の点  $\xi^{(k+1)}$  において停止条件を満たせば終了する. そうでなければ, 式(3-53), (3-54)により  $p^{(k)}, q^{(k)}$  を求め, BFGS 公式(3-55)により  $B^{(k)}$  を  $B^{(k+1)}$  に更新し,  $k := k+1$  として Step2 へ戻る.

このようなアルゴリズムを用いて, マニピュレータのリンク長さを探索する.

### 3.2.1 PCA-based method における設計

PCDM のリンク長さ(link lengths)の設計方法を図 3.2 に示した. また, その手順をまとめると以下ようになる.

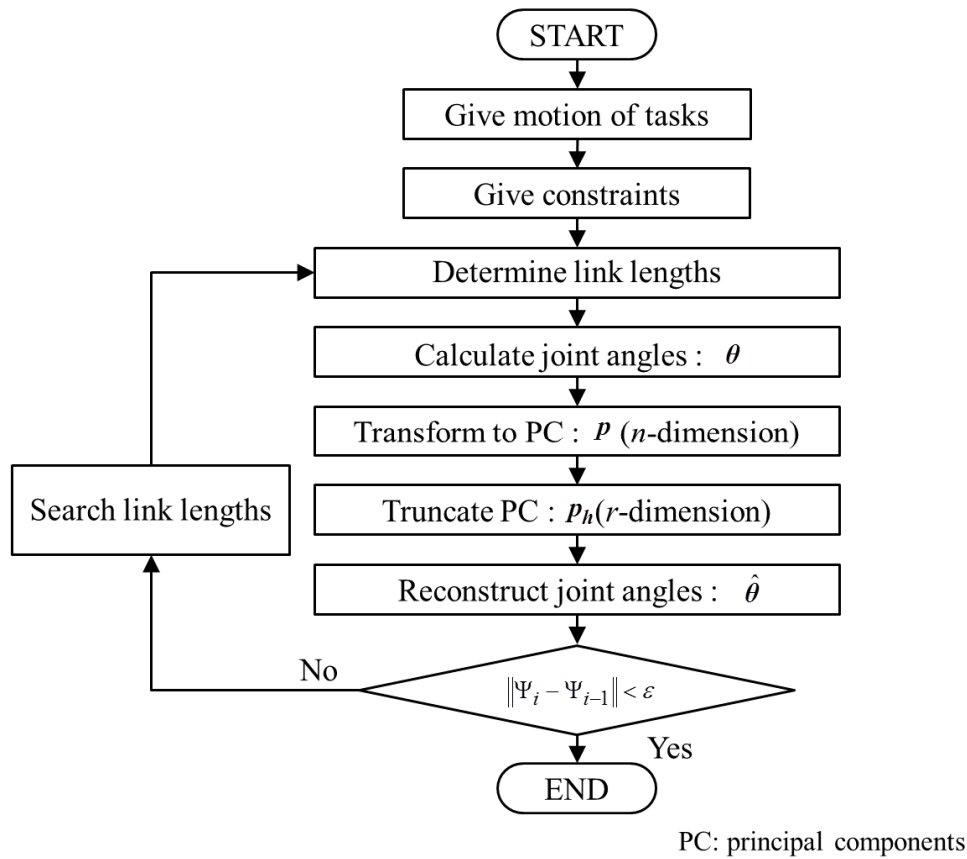


図 3.2: PCDM のリンク長さの設計手順

#### 「PCDM のリンク長さ設計アルゴリズム」

Step 0: タスクの軌道, 制約条件, リンク長さの初期値を与える.

Step 1: タスクの軌道から, 関節角度の時系列  $\theta(t)$  を計算する.

Step 2: 2.2.1 の PCA-based method に従い,  $n$  次元の主成分  $p(t)$  を得る.

- Step 3:  $r$  次元の高寄与率な主成分の集合  $\mathbf{p}_h(t)$  と,  $n-r$  次元の低寄与率な主成分の集合  $\mathbf{p}_l(t)$  に分ける. 低寄与率な主成分の集合  $\mathbf{p}_l(t)$  を打ち切る
- Step 4: 選択された  $r$  次元の選択された高寄与率な主成分  $\mathbf{p}_h(t)$  から  $n$  次元の関節角度の時系列  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$  を復元する.
- Step 5: 元の関節角度の時系列  $\boldsymbol{\theta}(t)$  と復元された関節角度の時系列  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$  の誤差を計算する.
- Step 6: 運動の復元誤差  $\Psi$  を減らすようなリンク長さを探索する. Step 1 から Step 5 までを目的関数  $\Psi$  が収束するまで繰り返す.

### 3.2.2 BPLP-based method における設計

BPDM のリンク長さの設計方法の手順は図 3.3 に示した. また, その手順をまとめると以下のようなになる.

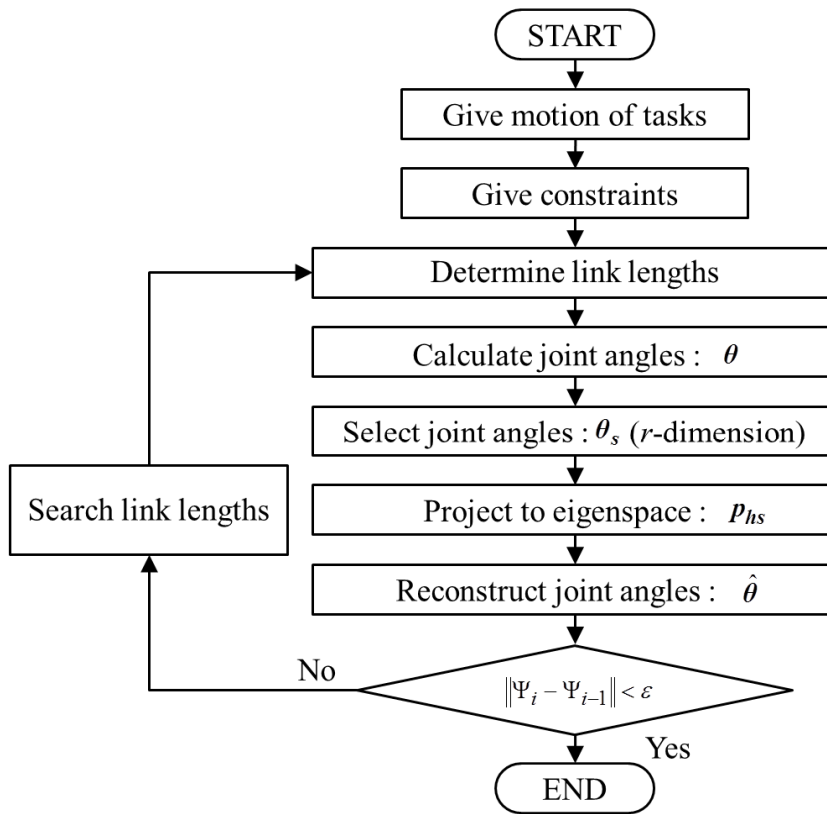


図 3.3: BPDM のリンク長さの設計手順

#### 「BPDM のリンク長さ設計アルゴリズム」

Step 0: タスクの軌道, 制約条件, リンク長さの初期値を与える.

- Step 1: タスクの軌道から, 関節角度の時系列  $\theta(t)$  を計算する.
- Step 2: 3.1.2 の BPLP-based method に従い,  $n$  次元の関節角度の時系列  $\theta(t)$  から  $r$  個の関節を選択し,  $n-r$  個の関節の情報を打ち切る.
- Step 3: 選択された関節角度の時系列  $\theta_s(t)$  を  $r$  次元の固有空間 (主成分空間) へ射影する.
- Step 4: 逆射影を用いて関節角度の時系列  $\hat{\theta}(t)$  を復元する.
- Step 5: 元の関節角度の時系列  $\theta(t)$  と復元された関節角度の時系列  $\hat{\theta}(t)$  の誤差を計算する.
- Step 6: 運動の復元誤差  $\Psi$  を減らすようなリンク長さを探索する. Step 1 から Step 5 までを目的関数  $\Psi$  が収束するまで繰り返す.

### 3.3 設計例

#### 3.3.1 ロボットハンドの設定

本設計例では, 2 指 6 リンクの図 3.4 のようなロボットハンドを設計する. ここで,  $l_{11}, l_{12}, l_{13}, l_{21}, l_{22}, l_{23}$  はリンク長さ,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$  は関節角度,  $\phi_1, \phi_2$  は指先の初期姿勢を決める角度を示している. また, 図 3.4 はタスクを行う前の初期状態も示している.

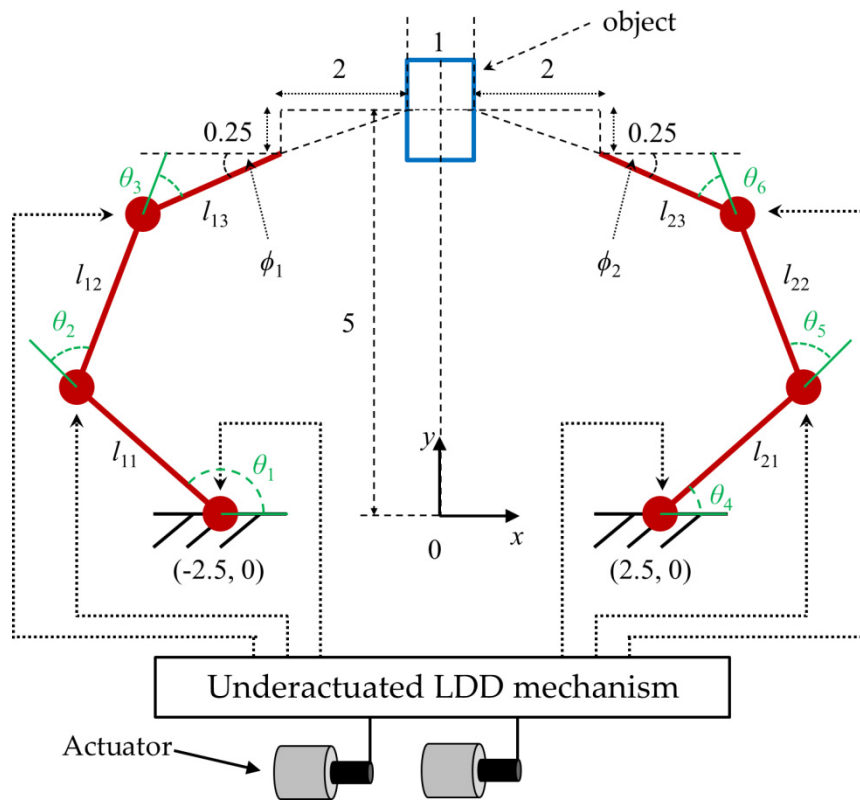


図 3.4: ロボットハンドの設定と対象物の初期位置

ロボットハンドの作業領域には、長方形の物体がある．図 3.4 は、ロボットハンドの初期状態も示している．図中のリンク長さや対象物との距離は、対象物の幅で正規化されている．

### 3.3.2 タスクの設定

本節で与えるタスクは、ロボットハンドの指先を対象物に接触するまで移動させ、指定された軌道を通るように移動させることである．ここで、対象物の表面と指先の間の滑りはないものとする．対象物は、剛体であり変形しないものとする．タスクの手順は、以下の通りである．

Phase 1: 右の指先を対象物に近付け、対象物の側面に接触したら止める．

Phase 2: 左の指先を対象物に近付け、対象物の側面に接触したら止める．そして、このとき対象物は 2 つの指先につかまれた状態になる．

Phase 3: 対象物を指定された軌道を通るように移動させる．

図 3.5 は、タスクの手順を示した図である．緑の線は、対象物の重心が移動する軌道を示している．設計するロボットハンドは、2 指 6 関節であるが、ここでのタスクは指先の軌道で定義されるため、タスクは 4 次元の変数で定義される．ここでのリンク長さ  $l_{ij}$  と  $\phi_i$  は以下のように与えた．

$$\begin{aligned} l_{11} &= 3.50, l_{12} = 3.00, l_{13} = 2.50, \phi_1 = 30.0[\text{deg}] \\ l_{21} &= 3.50, l_{22} = 3.00, l_{23} = 2.50, \phi_2 = 30.0[\text{deg}] \end{aligned} \quad (3-56)$$

式(3-56)のようにパラメータを与えたときの関節角度の時系列に主成分分析をしたときの寄与率は表 3.1 のようになった．

表 3.1: 関節角度の主成分の寄与率

Principal component	Contribution rate [%]
1	87.0
2	12.8
3	$1.39 \times 10^{-1}$
4	$1.59 \times 10^{-2}$
5	$9.64 \times 10^{-4}$
6	$2.73 \times 10^{-6}$

表 3.1 より、第 1 主成分と第 2 主成分で累積寄与率が 99%を越えていることがわかる．このことから、図 3.5 のタスクに必要な関節の運動を近似的に復元するのに 2 つの高寄与率な主成分だけで十分であることがわかる．そこで、本章の例題では 6 関節を 2 つのアクチュエ

一タで駆動させる劣駆動メカニズムを設計する.

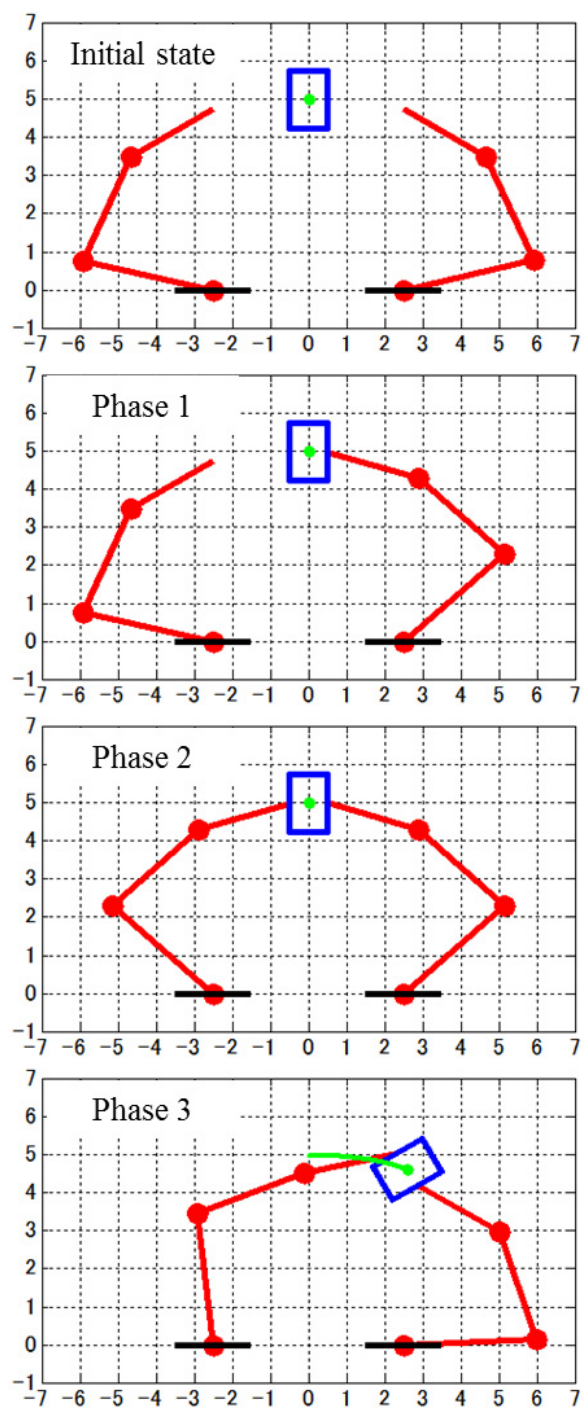


図 3.5: 運動学で定義されるタスクの手順

一般に, ロボットハンドを設計する場合には, その大きさを決めなければならない. そこで, 3.2 で説明した手法でリンク長さを設計する場合には, 制約条件を与える. 本章の例題

では、式(3-57)から式(3-61)のような制約条件を与えて設計問題を解くことにする。

$$l_{11} + l_{12} + l_{13} = 9, l_{21} + l_{22} + l_{23} = 9 \quad (3-57)$$

$$l_{11} \geq l_{12} \geq l_{13}, l_{21} \geq l_{22} \geq l_{23} \quad (3-58)$$

$$l_{11} \leq 5l_{12} \leq 25l_{13}, l_{21} \leq 5l_{22} \leq 25l_{23} \quad (3-59)$$

$$l_{11} \leq l_{12} + l_{13}, l_{21} \leq l_{22} + l_{23} \quad (3-60)$$

$$5[\text{deg}] \leq \phi_1, \phi_2 \leq 45[\text{deg}] \quad (3-61)$$

式(3-57)は、各指の全長を一定にする制約条件である。一般に、ベース近くのリンクの長さが長くなっていくと、指先の可動範囲が狭くなっていく。式(3-58)は、可動領域が狭くなりすぎないようにするための制約である。式(3-61)は、指先の初期姿勢に対する制約条件であり、指先が対象物の方を向くようにしている。しかし、先端のリンクが極端に短くなってしまうと、式(3-61)は意味をなくしてしまう。そこで、式(3-59)と式(3-60)のような制約条件を与えて、特定のリンクが極端に短くならないように制約を与えている。

### 3.3.3 PCDM の設計例

表 3.1 にあるように、図 3.5 のタスクを実行するために必要な主成分は寄与率の高い第 1 主成分と第 2 主成分である。そこで、本節ではこれらの 2 つの主成分を用いて PCDM を設計する。式(3-57)から(3-61)の制約条件に入るように、リンク長さの初期値を式(3-62)のように与えた。

$$\begin{aligned} l_{11} &= 3.00, l_{12} = 3.00, l_{13} = 3.00, \phi_1 = 30.0[\text{deg}] \\ l_{21} &= 3.00, l_{22} = 3.00, l_{23} = 3.00, \phi_2 = 30.0[\text{deg}] \end{aligned} \quad (3-62)$$

3.2.1 で説明した方法でリンク長さを最適化する。ここでは、マニピュレータの初期姿勢のパラメータ  $\phi$  も同時に探索した。すると、式(3-63)のようなパラメータ得られた。

$$\begin{aligned} l_{11} &= 3.00, l_{12} = 3.00, l_{13} = 3.00, \phi_1 = 5.00[\text{deg}] \\ l_{21} &= 3.73, l_{22} = 2.64, l_{23} = 2.64, \phi_2 = 45.0[\text{deg}] \end{aligned} \quad (3-63)$$

図 3.6 は、リンク長さ最適化前の劣駆動ロボットハンド(Synthesized initial robot hand)と最適化後の劣駆動ロボットハンド(Synthesized optimal robot hand)の動作を示している。運動を生成するために用いたアクチュエータの操作量は設計に用いた寄与率の高い第 1 主成分と第 2 主成分である。また、各指先の矢印は可操作性楕円体の軸の向きと大きさを表している。可操作性楕円体は、アクチュエータの速度のユークリッドノルムが 1 以下のときの各指先の速度を表す。図 3.6 では、軸の大きさは単位時間あたりに指先を移動させられる変位の 0.5 倍になっていることに注意する。また、可操作性楕円体は指先が 2 つあるため 4 次元である。図 3.6 中では、可操作性楕円体の第 1 軸(First axis)と第 2 軸(Second axis)を示した。リンク長さ最適化前と最適化後と比較すると、最適後の方が左右の指の軸の長さに偏りが出ている。これは、本節で与えたタスクでは、左右の指を交互に動かさなくてはならないことから生じたと考えられる。



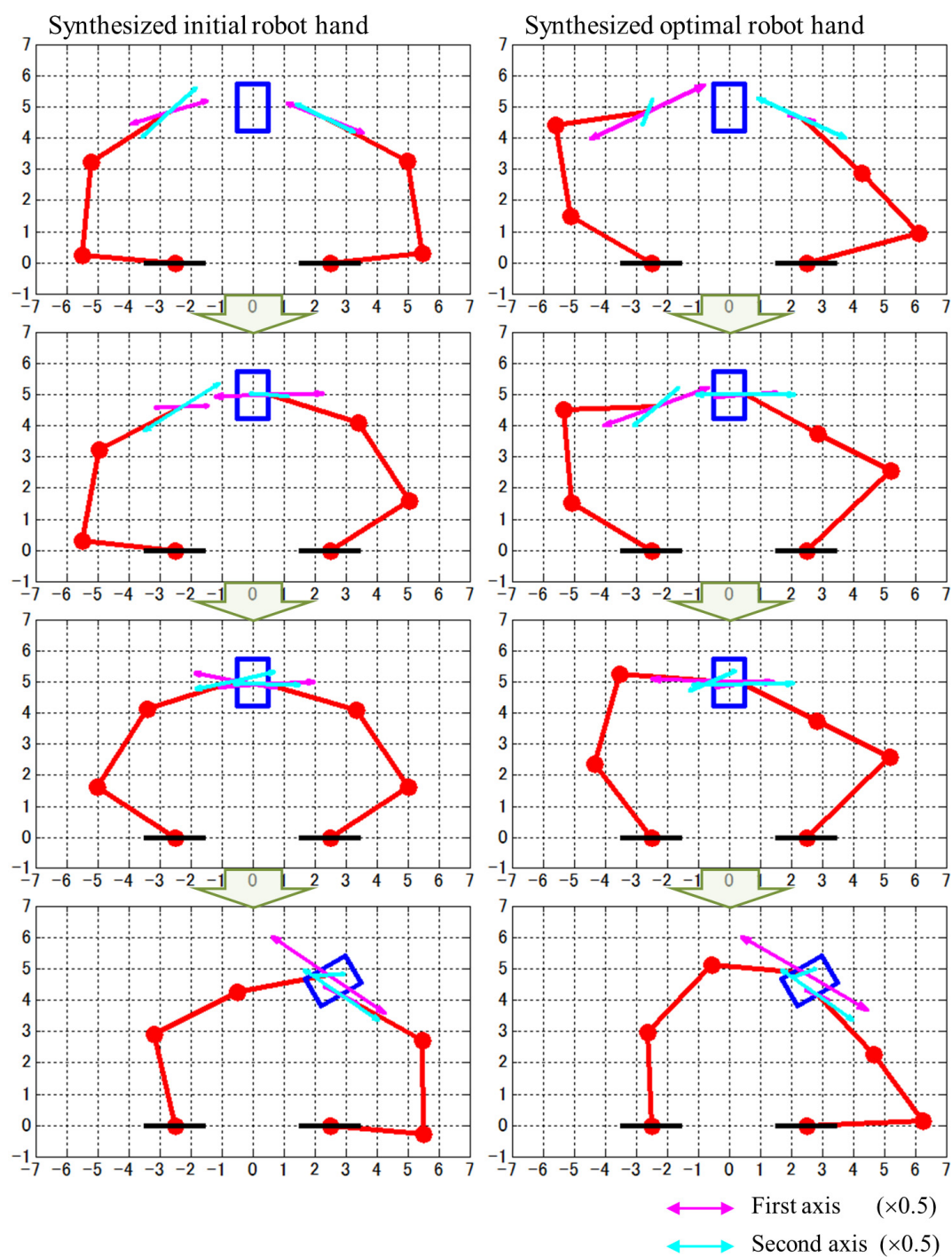


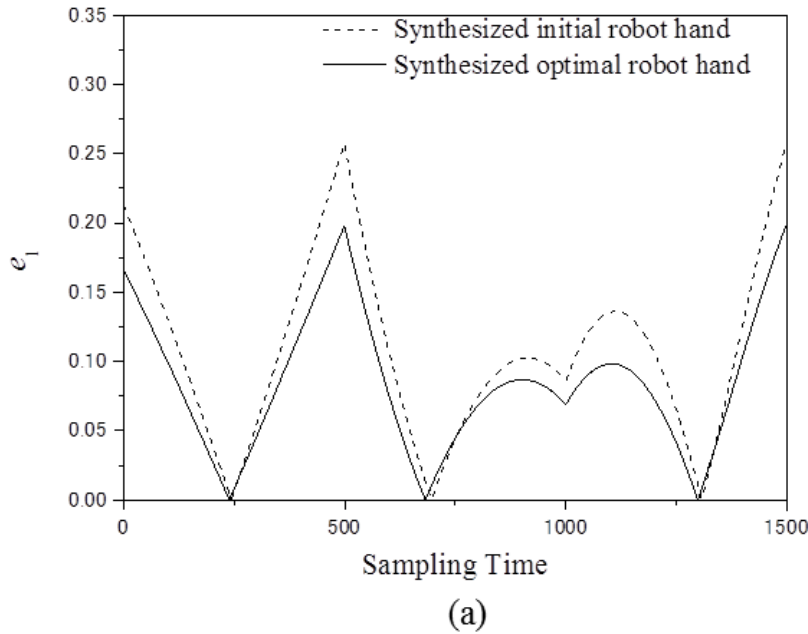
図 3.6: 設計された PCDM (2 主成分)

設計された PCDM が作業座標空間でどれほど精度よくタスクを達成しているかを評価するために、式(3-64)と式(3-65)で表されるような評価関数を定義する。

$$E_X = \frac{\left( \int_0^{t_f} (\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_u(t))^T (\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_u(t)) dt \right)^{1/2}}{\left( \int_0^{t_f} (\mathbf{x}(t) - \bar{\mathbf{x}})^T (\mathbf{x}(t) - \bar{\mathbf{x}}) dt \right)^{1/2}} \times 100[\%] \quad (3-64)$$

$$\begin{aligned} e_1(t) &= \frac{\|\mathbf{x}_1(t) - \mathbf{x}_{u1}(t)\|_2}{d} \\ e_2(t) &= \frac{\|\mathbf{x}_2(t) - \mathbf{x}_{u2}(t)\|_2}{d} \end{aligned} \quad (3-65)$$

ここで、 $E_X$ は作業座標空間での誤差を評価する指標である。 $\mathbf{x}(t)$ は、2つの指先の理想軌道のベクトルである。 $\mathbf{x}_u(t)$ は、設計された劣駆動メカニズムの指先の軌道のベクトルである。 $\bar{\mathbf{x}}$ は、2つの指先の位置のベクトル $\mathbf{x}(t)$ の平均である。 $e_1(t)$ は、左の指先の位置の誤差、 $e_2(t)$ は、右の指先の位置の誤差を表す。また、 $\mathbf{x}_1(t)$ と $\mathbf{x}_2(t)$ はそれぞれ左の指先と右の指先の位置の理想軌道のベクトルである。そして、 $\mathbf{x}_{u1}(t)$ と $\mathbf{x}_{u2}(t)$ は設計された劣駆動メカニズムの左と右の指先のベクトルである。表3.2は、リンク長さ最適化前と最適化後の $E_X$ の値を示している。ここでは、いずれの場合も2つのアクチュエータと線形従属劣駆動機構により駆動されている。



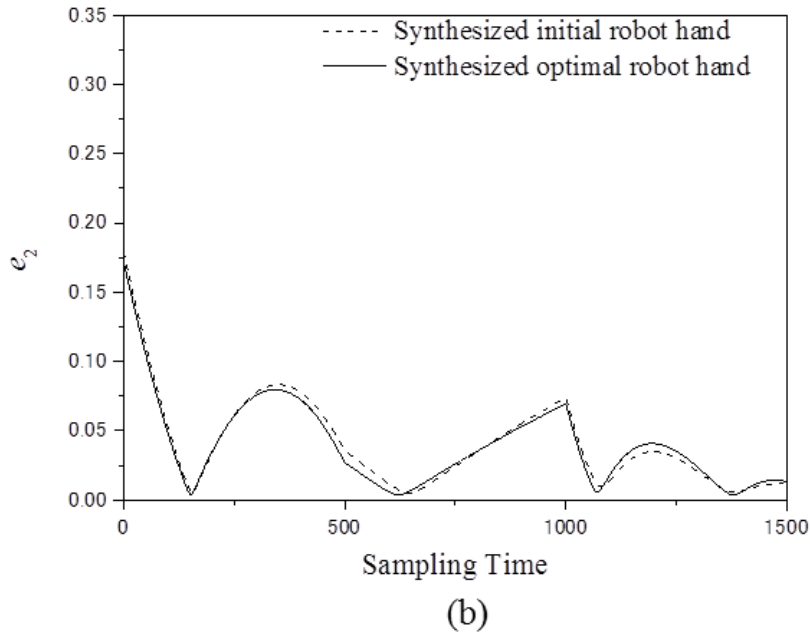


図 3.7: 軌道の誤差(PCDM: 2 主成分)

表 3.2: 作業座標空間での誤差(PCDM: 2 主成分)

	Synthesized initial robot hand	Synthesized optimal robot hand
$Ex$ [%]	7.51	6.04

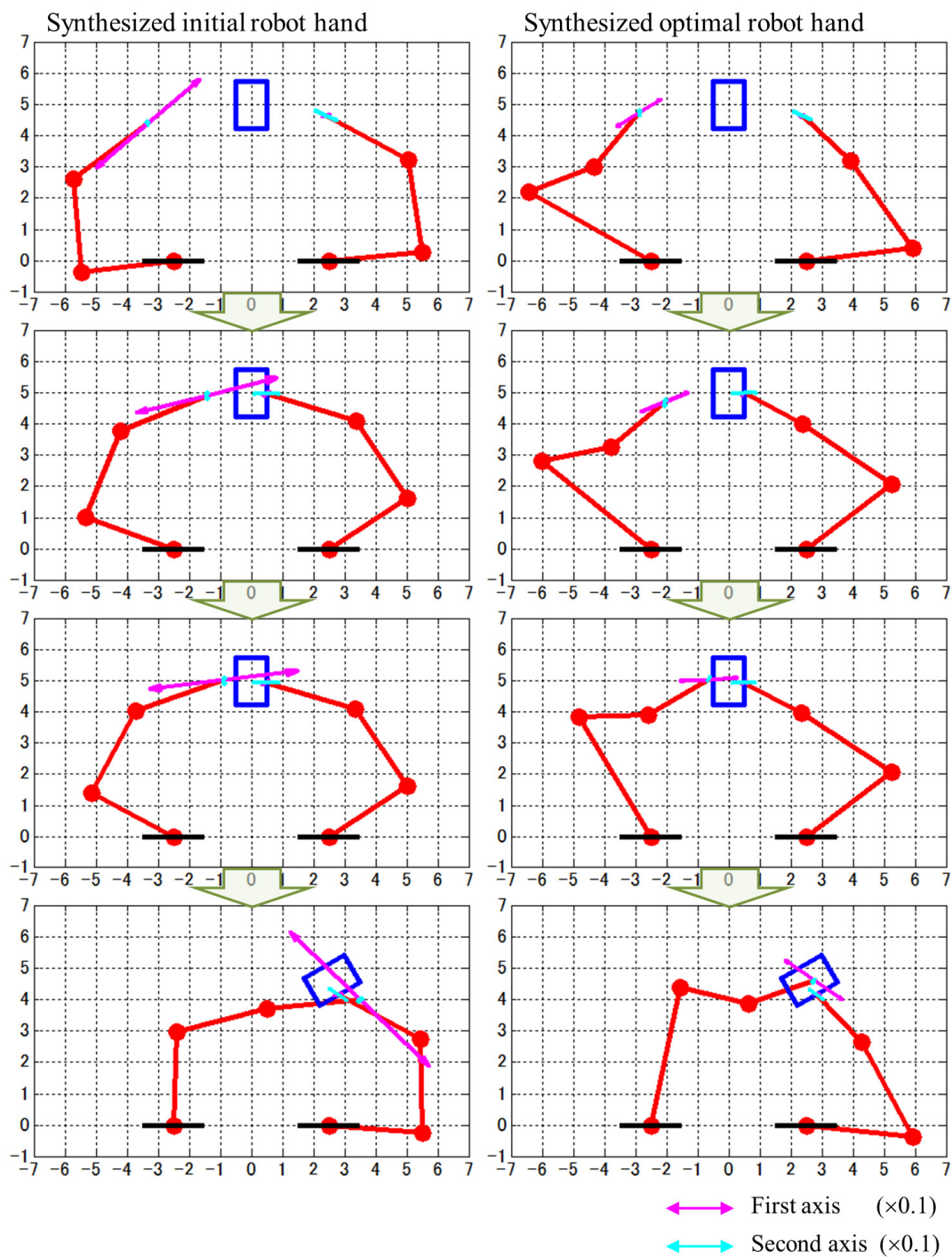
表 3.2 より，リンク長さ最適化前に比べてリンク長さ最適化後の方が 19.6%作業座標空間での誤差が減っていることがわかる．また，図 3.7 では，各指先の軌道誤差を表している．

### 3.3.4 BPDM の設計例

リンクの長さと指先の初期姿勢は，3.3.3 のときと同様に式(3-62)を用いる．BPLP-based method を用いた設計では，あらかじめ設計に用いる関節角度の時系列を選択する．本節では，2 種類の BPDM の設計例を示す．まずは，関節  $\theta_2$  と  $\theta_4$  が選択された場合について説明する．3.2.2 の設計方法に従ってリンク長さ  $l_{ij}$  と初期姿勢  $\phi_i$  を探索すると，式(3-66)のようなパラメータが得られた．

$$\begin{aligned} l_{11} &= 4.50, l_{12} = 2.25, l_{13} = 2.25, \phi_1 = 45.0[\text{deg}] \\ l_{21} &= 3.44, l_{22} = 3.44, l_{23} = 2.11, \phi_2 = 45.0[\text{deg}] \end{aligned} \quad (3-66)$$

図 3.8 は，リンク長さ最適化前と最適化後のマニピュレータの動作を示している．運動を生成するために用いたアクチュエータの操作量は設計に用いた関節  $\theta_2$  と  $\theta_4$  での関節角度の時系列ある．

図 3.8: 設計された BPD (選択された関節  $\theta_2, \theta_4$ )

可操作性楕円体は、アクチュエータの速度のユークリッドノルムが 1 以下のときの各指先の速度を表す。図 3.8 では、軸の大きさは単位時間あたりに指先を移動させられる変位の 0.1 倍になっていることに注意する。図 3.8 中では、可操作性楕円体の第 1 軸(First axis)と第 2 軸(Second axis)を示した。リンク長さ最適化前は第 1 軸が非常に長かったが、最適化後は

短くなった.

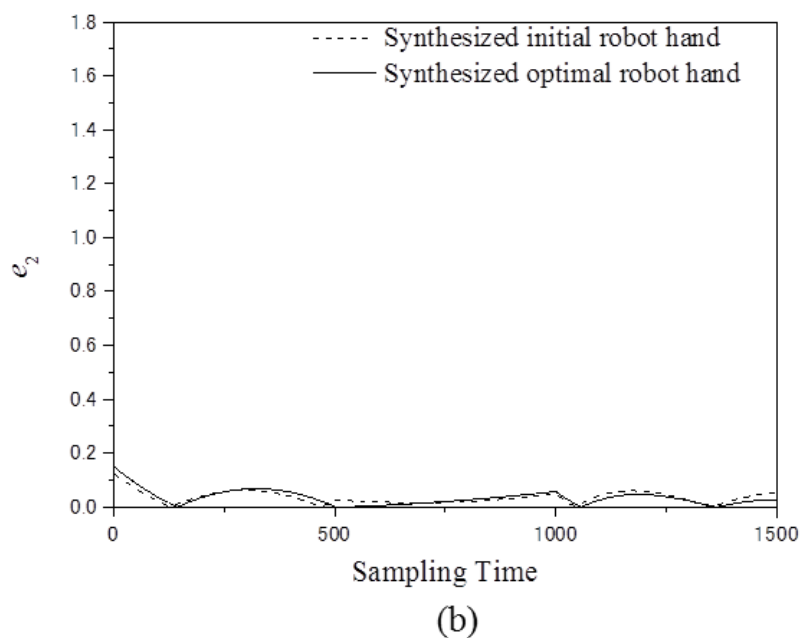
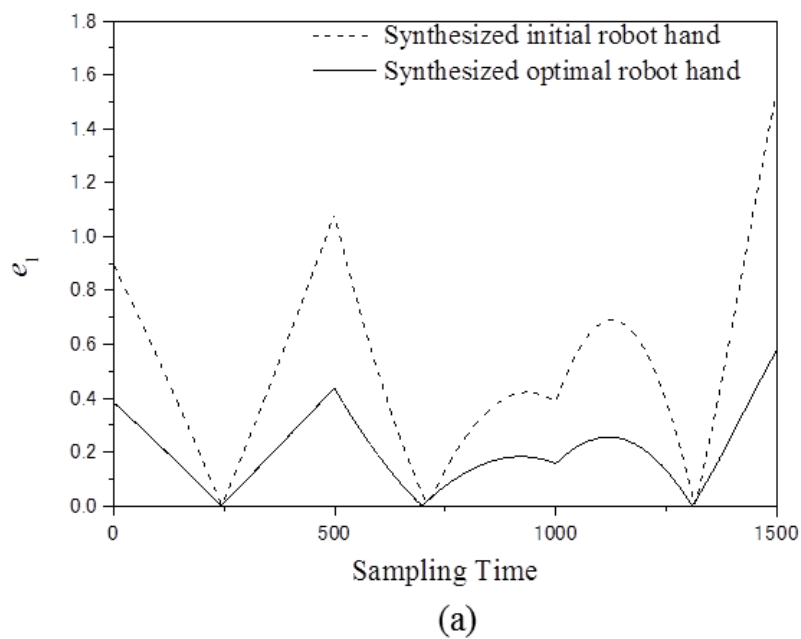


図 3.9: 軌道の誤差(BPDM: 選択された関節  $\theta_2, \theta_4$ )

表 3.3 は, リンク長さ最適化前と最適化後の  $E_X$  の値を示している. ここでは, いずれの場合も 2 つのアクチュエータと線形従属劣駆動機構により駆動されている. 表 3.3 より, リ

リンク長さ最適化前に比べてリンク長さ最適化後の方が 59.7%作業座標空間での誤差が減っていることがわかる．図 3.9 では，各指先の軌道誤差を表している．

表 3.3: 作業座標空間での誤差(BPDM: 選択された関節  $\theta_2, \theta_4$ )

	Synthesized initial robot hand	Synthesized optimal robot hand
$Ex$ [%]	32.5	13.1

次に，関節  $\theta_1$  と  $\theta_5$  が選択された場合について説明する．3.2.2 の設計方法に従ってリンク長さを設計すると，式(3-67)のようなパラメータが得られた．

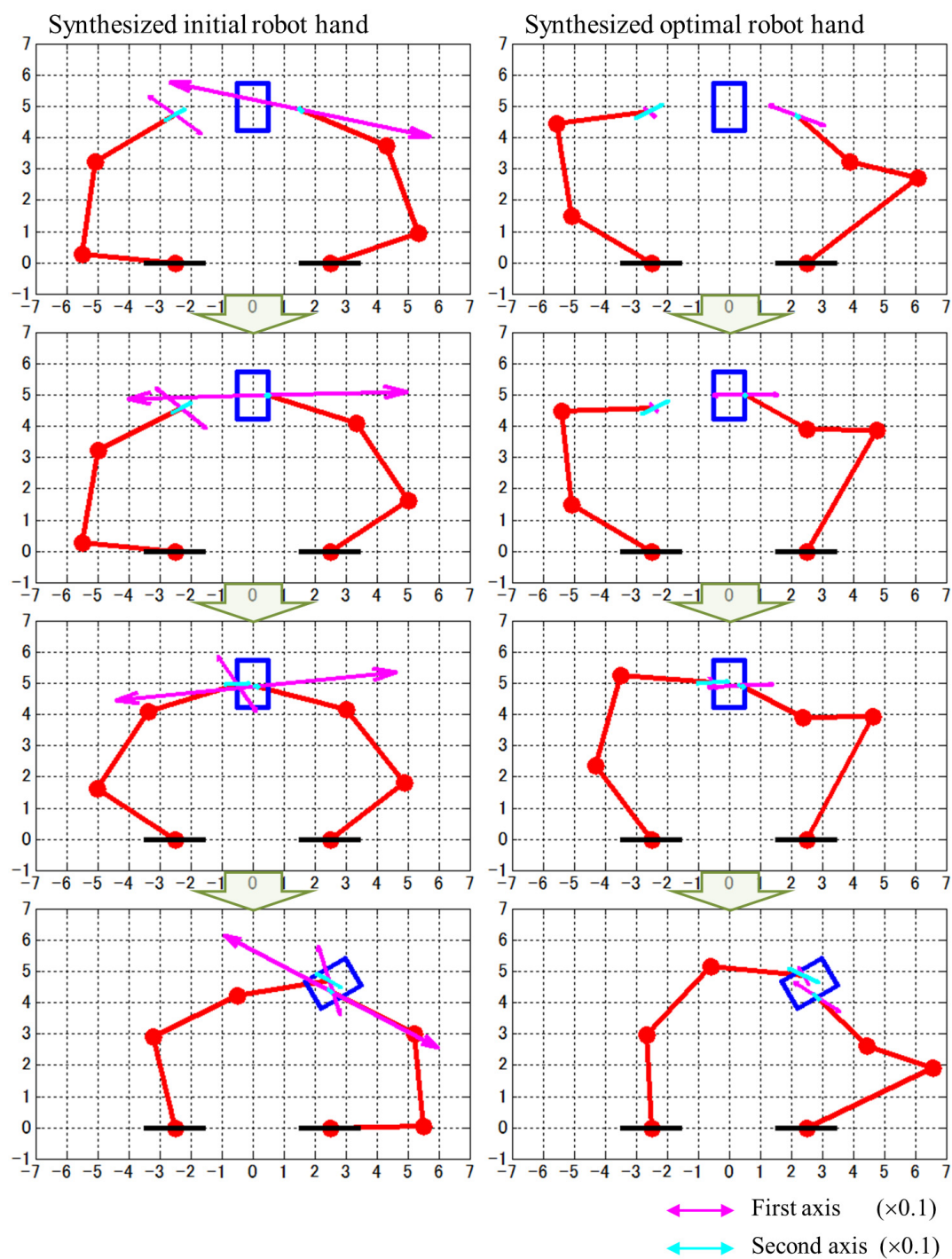
$$\begin{aligned} l_{11} = 3.00, l_{12} = 3.00, l_{13} = 3.00, \phi_1 = 5.00[\text{deg}] \\ l_{21} = 4.50, l_{22} = 2.25, l_{23} = 2.25, \phi_2 = 45.0[\text{deg}] \end{aligned} \quad (3-67)$$

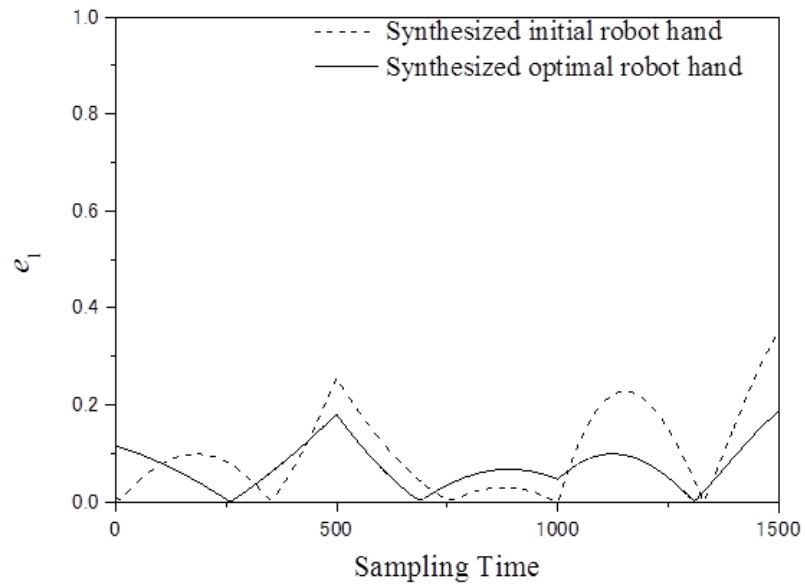
図 3.10 は，リンク長さ最適化前と最適化後のマニピュレータの動作を示している．運動を生成するために用いたアクチュエータの操作量は設計に用いた関節  $\theta_1$  と  $\theta_5$  での関節角度の時系列ある．図 3.10 中の，矢印は可操作性楕円体の軸の向きを示している．図 3.10 では，軸の大きさは単位時間あたりに指先を移動させられる変位の 0.1 倍になっていることに注意する．図 3.10 中では，可操作性楕円体の第 1 軸(First axis)と第 2 軸(Second axis)を示した．また，可操作性楕円体は指先が 2 つあるため 4 次元である．図 3.8 と同様にリンク長さ最適化前と最適化後で軸の長さが大きく変化していることが分かる．ただし，第 1 軸が長くなっている指先は異なっている．表 3.4 は，リンク長さ最適化前と最適化後の  $E_x$  の値を示している．ここでは，いずれの場合も 2 つのアクチュエータと線形従属劣駆動機構により駆動されている．

表 3.4: 作業座標空間での誤差(BPDM: 選択された関節  $\theta_1, \theta_5$ )

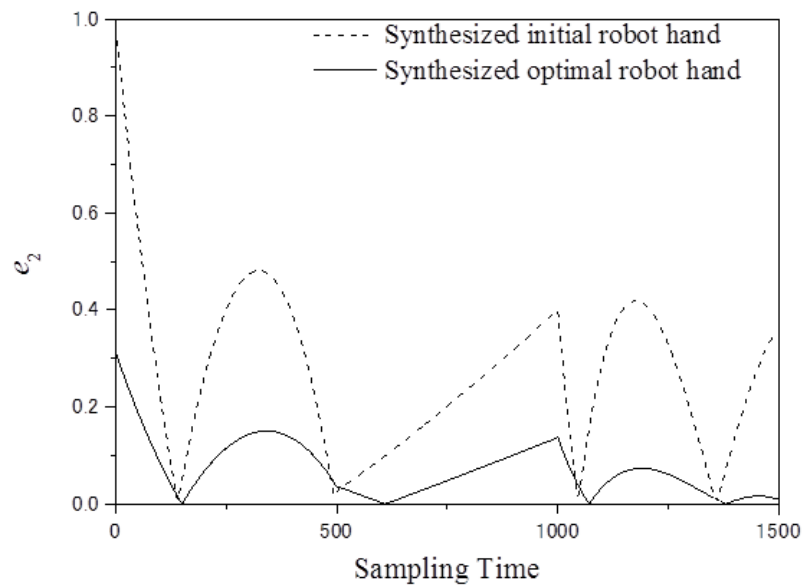
	Synthesized initial robot hand	Synthesized optimal robot hand
$Ex$ [%]	19.1	6.94

表 3.4 より，リンク長さ最適化前に比べてリンク長さ最適化後の方が 63.7%作業座標空間での誤差が減っていることがわかる．また，図 3.11 では，各指先の軌道誤差を表している．

図 3.10: 設計された BPDМ (選択された関節  $\theta_1, \theta_5$ )



(a)



(b)

図 3.11: 軌道の誤差(BPDM: 選択された関節  $\theta_1, \theta_5$ )

### 3.4 関節座標空間の誤差と作業座標空間の誤差の関係

本章では、各リンクが 1 自由度の回転関節によって接続されているようなロボットハンドの設計問題について考えた。マニピュレータの手先の微小変位と関節角度の微小変化の



関係は一般に以下のように与えられる.

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{J}(\mathbf{l}, \boldsymbol{\theta}) \Delta \boldsymbol{\theta} \quad (3-68)$$

ここで,  $\mathbf{x}$  は手先の変位のベクトル,  $\boldsymbol{\theta}$  は関節角度,  $\mathbf{l}$  はリンク長さのベクトルとする. 式(3-68)は, 手先の変位の誤差と関節角度の誤差の関係式にもなっている. 式(3-68)は, フロベニウスノルムを用いると以下のように書き直すことができる[82]. (フロベニウスノルムは劣乗法的ノルムである.)

$$\|\Delta \mathbf{x}\| = \|\mathbf{J}(\mathbf{l}, \boldsymbol{\theta}) \Delta \boldsymbol{\theta}\| \leq \|\mathbf{J}(\mathbf{l}, \boldsymbol{\theta})\| \|\Delta \boldsymbol{\theta}\| \quad (3-69)$$

ここで, ヤコビ行列  $\mathbf{J}$  はリンク長さ  $\mathbf{l}$  と関節角度  $\boldsymbol{\theta}$  の関数である. 一般に, 回転関節のみからなるシリアルマニピュレータのヤコビ行列は, 以下のように関節角度の関数からなる行列とリンク長さのベクトルの積で表される.

$$\mathbf{J}(\mathbf{l}, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{l} \quad (3-70)$$

ここで,  $\mathbf{R}$  は関節角度  $\boldsymbol{\theta}$  の関数からなる行列である.

$$\|\Delta \mathbf{x}\| \leq \|\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})\| \|\mathbf{l}\| \|\Delta \boldsymbol{\theta}\| \quad (3-71)$$

行列  $\mathbf{R}$  の各要素は, 三角関数の特に  $\sin$  と  $\cos$  の積からなる. そのため, 行列  $\mathbf{R}$  各要素には範囲があるため, 行列  $\mathbf{R}$  のノルムには上限がある. また, 本章で扱った設計問題ではリンク長さに制約条件を与えた. よって, 関節角度の誤差を大きく減らすことは, 作業座標空間での手先の軌道の誤差を減らすことにつながるといえる.

### 3.5 本章のまとめ

本章では, タスクが運動学で定義されて与えられる場合のメカニズムの設計手法について述べた. 設計されるメカニズムは, 関節角度とアクチュエータの変位が線形に従属している劣駆動メカニズムである. ここで与えられるタスクは, マニピュレータの手先の軌道で定義された. 本提案手法では, はじめは各関節が独立に制御できる多関節なマニピュレータを仮定する. そして, 運動の低次元化手法を用いて, 与えられたタスクを達成するために必要な関節角度の時系列を低次元空間に射影し少ない変数で近似的に表す. 本章では, 設計に用いることができる運動の低次元化手法を 2 つ紹介し, それらで設計することができる PCDM と BPDM という 2 種類の劣駆動メカニズムについて説明した. さらに, リンク長さを運動の低次元化によって生じる復元誤差を最小にするように最適化手法を用いて探索する方法について説明した. 最後に, 設計した機構を用いてシミュレーションを行い, 小さな近似誤差でタスクを達成できることを示した. また, 本提案手法で設計できる 2 種類の劣駆動メカニズム PCDM と BPDM の可操作性楕円体を比較した.

3.4 で説明したように, 関節座標空間と作業座標空間には密接な関係がある. 本章の提案手法では, リンク長さを探索するために関節座標空間で定義される目的関数を定義した.

その目的関数は、与えられたタスクを達成するために必要な関節角度の時系列の線形変換で表されるため、短時間で計算することができて最適化計算に向いている。リンク長さを探索するときには、作業座標空間で目的関数を定義することもできる。作業座標空間で目的関数を計算するためには低次元化された運動を復元して計算する必要があるため、関節座標空間で目的関数を計算するのに比べて計算時間はかかる。しかし、作業座標空間で目的関数を適切に定義することができれば、タスクとして与えられた運動をより精度よく達成できるメカニズムを設計できる可能性がある。作業座標空間でのメカニズムの評価とそれを利用した設計は、今後の課題の1つである。

## 第4章

# タスクが運動学と静力学で 定義される場合の設計手法

### 4.1 弾性要素を含むメカニズム

本章では、タスクが運動学と静力学で定義される場合のメカニズムの設計問題について説明する。設計方法としては、第3章で説明した方法を拡張する。第3章では、タスクを達成させるために必要な関節角度の時系列を低次元空間へ射影して、劣駆動機構を設計した。しかし、単に関節角度の時系列のみを低次元空間に射影しても、運動学のみを考慮した設計にしかない。そこで本章では、設計するメカニズムに弾性要素を取り入れる。弾性要素を含むメカニズムでは、運動学と静力学の問題が連成するという性質がある。その性質を利用して、運動学と静力学の両方を考慮したメカニズムの設計を行う。

本章では、関節角度とアクチュエータの変位の関係は以下のような式で与えられるメカニズムを扱う。

$$\theta(t) = Aq(t) + c(t) + b \quad (4-1)$$

ここで、 $\theta(t) \in R^n$  は関節角度、 $q(t) \in R^r$  はアクチュエータの変位、 $c(t)$  は弾性要素(Elastic component: EC)の弾性変形による変位、 $t$  は時間、 $A \in R^{n \times r}$  は列方向に長い定数行列、 $b \in R^n$  は定数ベクトルを表す。関節角度の次元  $n$  とアクチュエータの変位の次元  $r$  には  $n > r$  の関係がある。

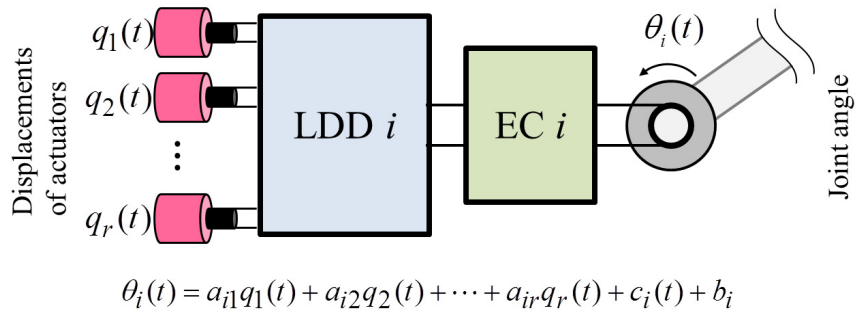


図 4.1: LDD と弾性要素の接続

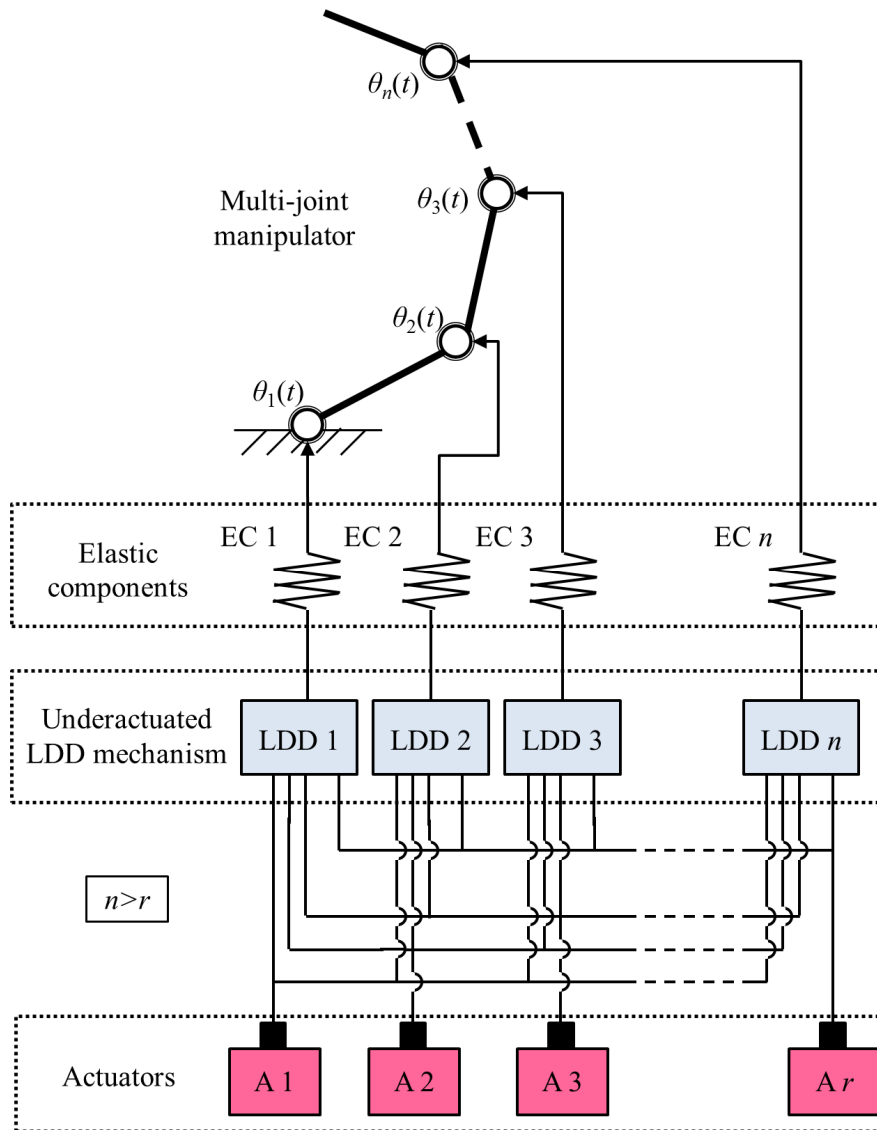
図 4.2:  $n$  関節マニピュレータと  $r$  個のアクチュエータの弾性要素を介した接続

図 4.1 は、メカニズム中の  $r$  個のアクチュエータと  $i$  番目の関節の接続の関係を示している。ここで、線形従属機構(Linear Dependent Drive: LDD)とは、アクチュエータの変位を線形加算して出力する機構である。また、本論文では線形従属機構を表す略号として LDD を用いる。LDD については、第 2 章で詳しく説明している。第 3 章では、LDD からの出力変位を直接関節へ伝達していたが、本章で扱うメカニズムでは、LDD と関節の間には弾性要素がある。図 4.2 は、本章で扱う弾性要素を含む劣駆動メカニズムの例を示している。図 4.2 のメカニズムは、多関節マニピュレータ、線形従属劣駆動機構(Underactuated LDD mechanism)と弾性要素とアクチュエータの 4 つのものからなっている。このメカニズムは、第 2 章の 2.1 で説明した線形従属劣駆動機構を用いたメカニズムに弾性要素を加えたものである。線形従属劣駆動機構のパラメータは、式(4-1)の行列  $A$  の要素と一致する。線形従属劣駆動機構については、第 2 章で詳しく説明している。

本章では、図 4.1 および図 4.2 の弾性要素は線形ばねであるとする。線形ばねを、各 LDD と多関節マニピュレータの各関節の間に入れることにより、マニピュレータの関節にかかるトルクを線形に関節角度に変換する。多関節マニピュレータの関節と LDD の接続の仕方は、図 4.3 のように表されるものとする。図 4.3(a)の P1 と P2 はプーリ、S1 と S2 は線形ばねである。LDD  $i$  はプーリ P1 にワイヤで接続されている。プーリ P1 の角度は LDD  $i$  の出力によって決まる。プーリ P1 とプーリ P2 は、2 つのばね(ばね S1 とばね S2)で接続されている。プーリ P2 はワイヤでマニピュレータの関節と接続されている。プーリ P2 の角度によってマニピュレータの関節角度は決まる。ここで、 $\theta_{ai}(t)$  はプーリ P1 の角度、 $\theta_{pi}(t)$  はばねの弾性変形によって生じるプーリ P2 の角度であるとする。マニピュレータの関節角度は  $\theta_i(t)$ 、プーリ P1 の角度とばねの弾性変形によって生じる角度の和になる(式(4-2))。

$$\theta_i(t) = \theta_{ai}(t) + \theta_{pi}(t) \quad (4-2)$$

図 4.2 のマニピュレータのすべての関節と LDD は、図 4.3 のような接続をしているものとし、以下のように式で書くことができるものとする。

$$\theta(t) = \theta_a(t) + \theta_p(t) \quad (4-3)$$

ここで、 $\theta(t)$  はマニピュレータの関節角度のベクトル、 $\theta_a(t)$  と  $\theta_p(t)$  はそれぞれプーリ P1 とプーリ P2 の角度のベクトルであるとする。本論文では、 $\theta_a$  を能動関節角度(active joint angle)、 $\theta_p$  を受動関節角度(passive joint angle)とよぶことにする。図 4.3(a)で表されているようにマニピュレータに外力が加わらない場合は、 $\theta_p(t)$  は 0 になり、 $\theta(t)$  と  $\theta_a(t)$  は等しくなる。図 4.2(b)のように、マニピュレータに外力が加わると、プーリ P1 とプーリ P2 の間のばねが変形する。プーリ P1 にかかるトルク  $\tau_a(t)$  を能動関節トルク(active joint torque)、プーリ P2 にかかるトルク  $\tau_p(t)$  を受動関節トルク(passive joint torque)とよぶことにし、以下のように表されるものとする。

$$\tau_p(t) = -K\theta_p(t) \quad (4-4)$$

ここで、 $K = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_n)$  はばね定数の行列であり、 $k_i (i=1, \dots, n)$  は正の値であるとする。

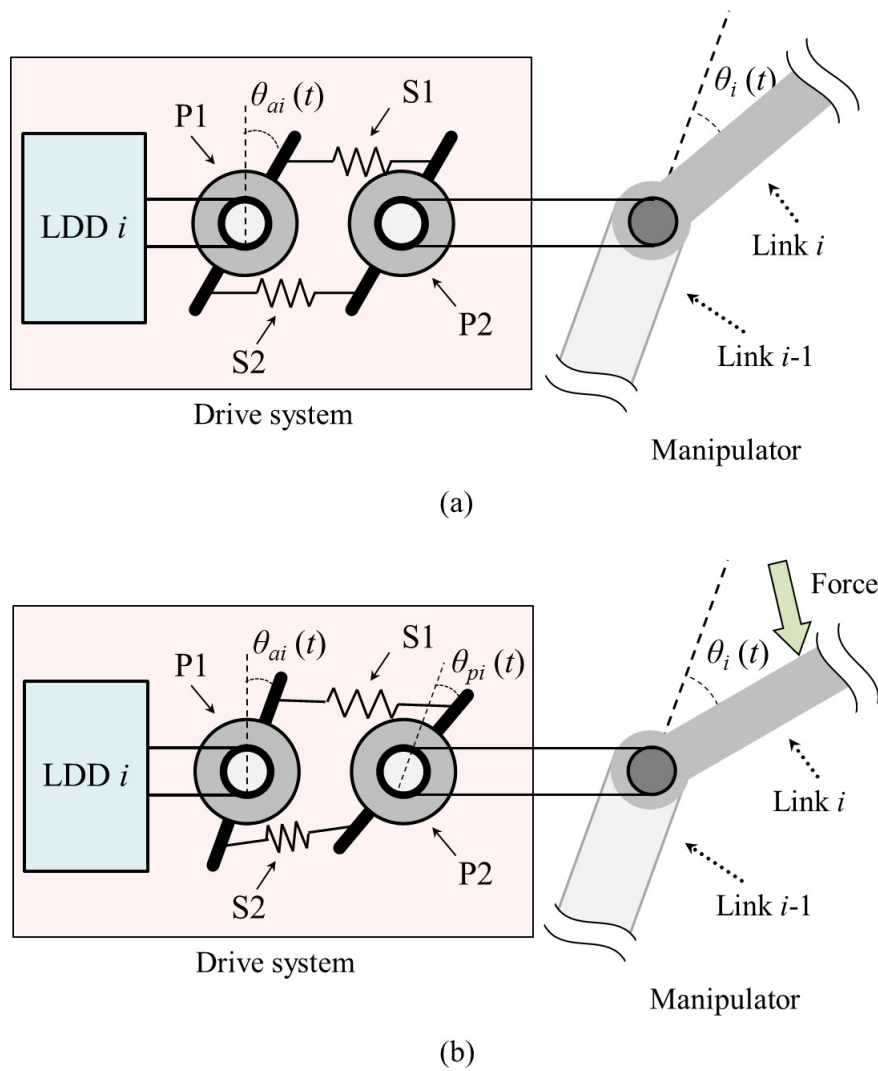


図 4.3: LDD と関節の接続

## 4.2 線形従属劣駆動機構の設計

本節では、タスクが運動学と静力学で定義される場合の線形従属劣駆動機構の設計方法について説明する。図 4.4 を用いて設計方法の概要を説明する。ここでは、表現を簡単にするために 2 次元平面上で動作する 1 自由度の回転関節のみからなる多関節マニピュレータを扱っている。しかし、本章で説明する手法は 3 次元の多関節マニピュレータの場合にも適用することができることに注意する。図 4.4 の多関節マニピュレータの関節数は  $n$  であり、それらが線形従属劣駆動機構を介して  $r$  個のアクチュエータで駆動されるが、 $n$  個の弾性要素が線形従属劣駆動機構それとの間にある ( $n > r$ )。多関節マニピュレータは、作業領域で剛体の対象物に対してあらかじめ与えられたタスクを行う。タスクを実行する場合、末端のリンクが対象物へアプローチし、あらかじめ定義された力を加える。図 4.4 中では、F1 と

F2 は力を表している．それぞれの力は，接触点 C1 と C2 で与えられている．本章では，リンクと対象物との間の摩擦係数は非常に大きくすべりがないものとする．ここでの線形従属劣駆動機構は，タスクで定義されたように対象物に接触し，必要な力を対象物に与えられるように関節角度と関節トルクを出力できるように設計されなければならない．

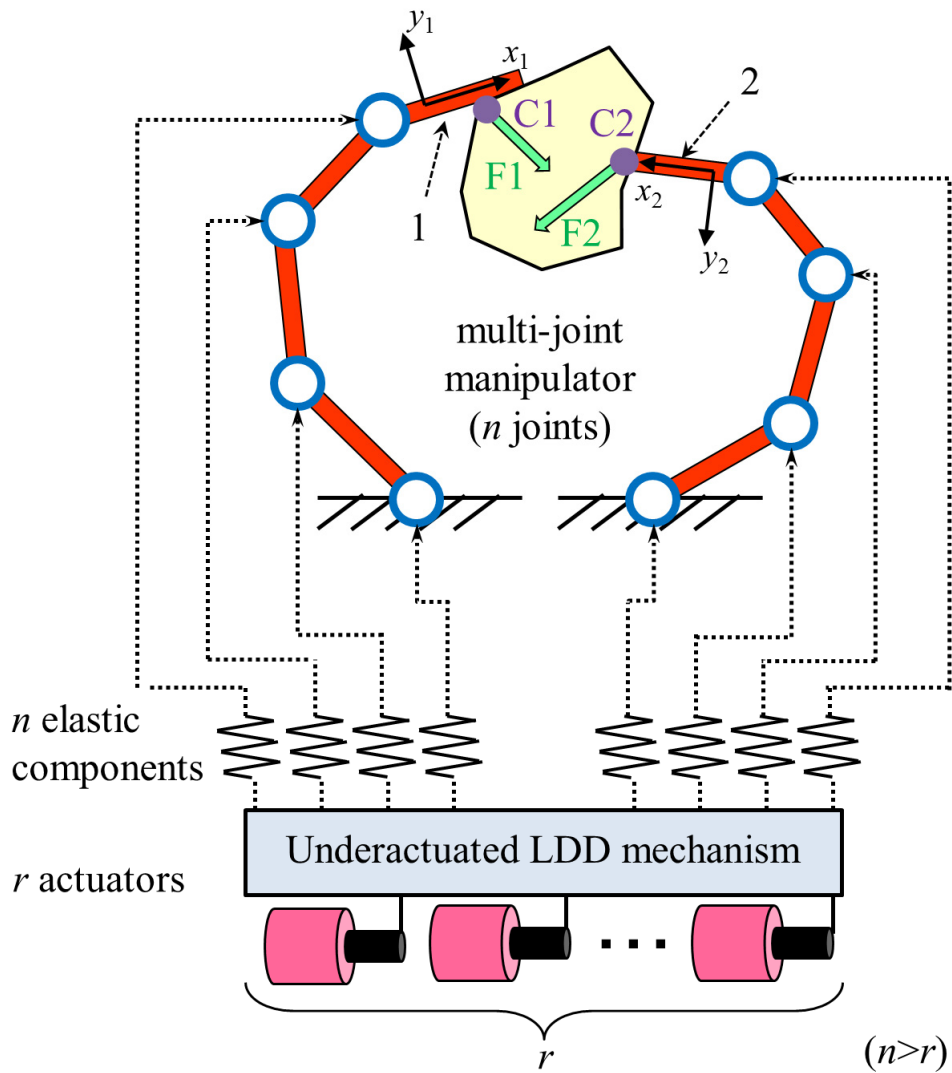


図 4.4: 運動学と静力学で定義されるタスクを達成するメカニズムの構成

本章で与えられるタスクは，リンクの位置・姿勢とリンクが対象物に加える力・トルクを用いて一般に式(4-5)のように定義される．

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t) \in R^h \\ \mathbf{F}(t) \in R^h \end{cases} \quad (0 \leq t \leq t_f) \quad (4-5)$$

ここで、 $\mathbf{x}(t)$ はマニピュレータのリンクの位置と姿勢を表す  $h$  次元のベクトル、 $\mathbf{F}(t)$ は対象物へ加える力とトルクを  $h$  次元のベクトル、 $t$ は時刻である。タスクは、 $t=0$  から  $t=t_f$ の間に  
行われる。 $h$  次元のベクトル  $\mathbf{x}(t)$ を制御するには、マニピュレータの関節数  $n$  はそれよりも  
多くなくてはならない。 $\mathbf{x}(t)$ は、能動関節角度と受動関節角度を用いて以下のような式で書  
くことができる。

$$\mathbf{x}(t) = f(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t)) \quad (4-6)$$

式(4-6)の両辺を微分すると、以下のようにリンクの速度  $\dot{\mathbf{x}}(t)$  と関節角速度  $\dot{\boldsymbol{\theta}}_a(t)$  および  $\dot{\boldsymbol{\theta}}_p(t)$   
との関係を得ることができる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = J(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t)) \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_a(t) \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_p(t) \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

ここで、 $J(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t)) \in R^{h \times 2n}$  はヤコビ行列である。仮想仕事の原理を用いると、関節トルク  
と対象物に加える力の関係は以下のように書ける[83][84]。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_a(t) \\ \boldsymbol{\tau}_p(t) \end{bmatrix} = J(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t))^T \mathbf{F}(t) \quad (4-8)$$

ここで、 $\boldsymbol{\tau}_a(t)$ は能動関節トルク、 $\boldsymbol{\tau}_p(t)$ は受動関節トルクとする。ヤコビ行列を以下のように  
書き直す。

$$J(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t)) = [J_a(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t)) \quad J_p(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t))] \quad (4-9)$$

ここで、 $J_a(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t)) \in R^{h \times n}$ ,  $J_p(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t)) \in R^{h \times n}$  は行列  $J(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t))$ の部分行列である。式(4-8)  
と式(4-9)より、能動関節トルクと受動関節トルクは、それぞれ式(4-10)と式(4-11)のように書  
ける。

$$\boldsymbol{\tau}_a(t) = J_a(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t))^T \mathbf{F}(t) \quad (4-10)$$

$$\boldsymbol{\tau}_p(t) = J_p(\boldsymbol{\theta}_a(t), \boldsymbol{\theta}_p(t))^T \mathbf{F}(t) \quad (4-11)$$

式(4-6), (4-7), (4-11), (4-12)を用いると、あらかじめ定義されるタスクを達成するための関節  
角度と関節トルクの時系列が得られる。

本節では、第3章の3.1で説明した線形従属劣駆動機構の設計方法を拡張して用いる。設  
計のはじめの段階では、設計するメカニズムは、各関節が個別のアクチュエータで駆動さ  
れると仮定する( $n=r$ )。また、各関節は図4.3に示すように線形ばねを介して接続されている  
ものとする。式(4-3)と式(4-4)から、能動関節角度は以下のように表される。

$$\boldsymbol{\theta}_a(t) = \boldsymbol{\theta}(t) + K^{-1} \boldsymbol{\tau}_p(t) \quad (4-12)$$

図4.3に示されているように、プーリ P1にかかるトルクはアクチュエータから LDD を介し



て加えられる．ここでは，そのトルクを能動関節トルクとよび， $\tau_a(t) \in R^n$  と表すことにする．同じ値のトルクがプーリ P2 に伝達される．プーリ P2 にかかるトルクは受動関節トルク  $\tau_p(t) \in R^n$  とよぶ．

$$\tau_a(t) = \tau_p(t) \quad (4-13)$$

式(4-12)と式(4-13)から，能動関節角度  $\theta_a(t)$  は以下のように表される．

$$\theta_a(t) = \theta(t) + K^{-1} \tau_a(t) \quad (4-14)$$

式(4-14)より，能動関節角度  $\theta_a(t)$  はマニピュレータの関節角度  $\theta(t)$  とばね定数で重みづけされた能動関節トルク  $\tau_a(t)$  の和になっている．設計するメカニズム弾性要素を加えたことにより，関節角度と関節トルクの問題が連成している．本章では，能動関節角度の時系列を低次元化することにより，劣駆動メカニズムを設計する．

## 4. 2. 1 PCA-based method

3.1.1 の方法を能動関節角度の時系列に適用する．能動関節角度の時系列の共分散行列は以下のように定義される．

$$S = \int_0^{t_f} \{\theta_a(t) - \theta_{a0}\} \{\theta_a(t) - \theta_{a0}\}^T dt \quad (4-15)$$

ここで， $\theta_{a0} \in R^n$  は能動関節角度の時系列の平均値である．行列  $S$  を固有値分解して得られる固有ベクトルから，主成分分析の変換行列  $W$  が得られる．主成分  $p(t) \in R^n$  と能動関節角度  $\theta_a(t)$  の関係は以下のように与えられる．

$$p(t) = W \{\theta_a(t) - \theta_{a0}\} \quad (4-16)$$

各主成分には寄与率を定義することができ，主成分を寄与率により以下のように 2 つのグループに分ける．

$$\begin{bmatrix} p_h(t) \\ p_l(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_h \\ W_l \end{bmatrix} \{\theta_a(t) - \theta_{a0}\} \quad (4-17)$$

ここで， $p_h(t) \in R^r$  は  $r$  次元の高寄与率な主成分， $p_l(t) \in R^{(n-r)}$  は  $n-r$  次元の低寄与率な主成分である．

$$\theta_a(t) = W^{-1} p(t) + \theta_{a0} = W^{-T} p(t) + \theta_{a0} \quad (4-18)$$

式(4-17)と式(4-18)から，高寄与率な主成分のみで復元された関節角度の時系列  $\hat{\theta}_a(t)$  は以下のように与えられる．

$$\hat{\theta}_a(t) = W_h^T p_h(t) + \theta_{a0} \quad (4-19)$$

式(4-19)の関係式が式(4-1)と対応しているため，線形従属劣駆動機構のパラメータ  $A$  の設計に用いることができる．ここで， $\theta_{a0}$  線形従属劣駆動機構とマニピュレータの関節を接続するときのバイアスになる．式(4-19)の高寄与率な主成分  $p_h(t)$  がアクチュエータの操作量に対応しているため， $p_h(t)$  の次元がアクチュエータの数と一致する．式(4-17)から式(4-19)より，

元の関節角度の時系列  $\theta_a(t)$  と復元された関節角度の時系列  $\hat{\theta}_a(t)$  の関係が得られる．3.1.1 のときと同様に復元誤差を以下のように定義する．

$$\Delta(t) = \hat{\theta}_a(t) - \theta_a(t) = (W_h^T W_h - I_n) \{\theta_a(t) - \theta_{a0}\} \quad (4-20)$$

## 4. 2. 2 BPLP-based method

3.1.3 の方法を能動関節角度の時系列に適用する．BPLP-based method では、まず運動の復元に用いる能動関節角度の時系列を選択する．元の関節角度の時系列と  $\theta_a(t) \in R^n$  と選択された関節のみの能動関節角度の時系列  $\theta_{as}(t) \in R^n$  の関係は以下のように表されるとする．

$$\theta_{as}(t) = Z \{\theta_a(t) - \theta_{a0}\} \quad (4-21)$$

ここで、 $\theta_{a0} \in R^n$  は能動関節角度の時系列の平均値である． $Z$  は定数行列であり、 $r$  個の関節を選択するための行列である．また、行列  $Z$  は、対角行列である．対角成分は 1 か 0 であり、 $r$  個の 1 の成分を含む．

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & & 0 \\ & 0 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

選択された関節角度の時系列  $\theta_{as}(t)$  を、式(4-17)の変換行列  $W_h$  を用いて固有空間へ射影する．

$$p_{hs}(t) = W_h \theta_{as}(t) \quad (4-23)$$

行列  $W$  は正規直交行列なので、能動関節角度の時系列  $\theta_a(t)$  は近似的に以下のように表すことができる．

$$\theta_a(t) \approx W_h^T p_h(t) + \theta_{a0} \quad (4-24)$$

高寄与率な主成分  $p_h(t)$  と選択された能動関節角度  $\theta_{as}(t)$  を射影した値  $p_{hs}(t)$  を関係づけるために以下のような行列  $\Gamma$  を定義する．

$$\Gamma = W_h Z W_h^T \quad (4-25)$$

式(4-23)から式(4-25)より、 $p_{hs}(t)$  以下のように表すことができる．

$$p_{hs}(t) \approx W_h Z W_h^T p_h(t) = \Gamma p_h(t) \quad (4-26)$$

さらに、式(4-23)、式(4-24)と式(4-26)より、関節角度の時系列を以下のように復元することができる．

$$\hat{\theta}_a(t) = W_h^T \Gamma^{-1} W_h \theta_{as}(t) + \theta_{a0} \quad (4-27)$$

$\theta_{as}(t)$  は、 $n$  次元のベクトルであるが、 $n-r$  個の成分は常に 0 の成分である．式(4-27)の関係式は、式(4-1)と対応させることができ、線形従属劣駆動機構のパラメータ  $A$  の設計に用いる

ことができる．式(4-27)の選択された関節角度の時系列  $\theta_{as}(t)$  がアクチュエータの操作量に対応している．ここで， $\theta_{a0}$  線形従属劣駆動機構とマニピュレータの関節を接続するときのバイアスになる．3.1.3 のときと同様に復元誤差を以下のように定義する．

$$\Delta(t) = \hat{\theta}_a(t) - \theta_a(t) = \left( W_h^T \Gamma^{-1} W_h Z - I_n \right) \{ \theta_a(t) - \theta_{a0} \} \quad (4-28)$$

### 4.2.3 マルチタスクの扱い方

本提案手法で与えるタスクは，1 つだけに限る必要はない．複数のタスクを達成する関節角度の運動を同時に扱うことができる．ここで，設計する 1 つのメカニズムに達成させるタスクが  $u$  種類あるとして，それらを達成するための能動関節角度の時系列が以下のように与えられたとする．

$$\begin{aligned} \text{Task 1: } & \theta_{a1}(t) \in R^n \quad (0 \leq t \leq t_{f1}) \\ \text{Task 2: } & \theta_{a2}(t) \in R^n \quad (0 \leq t \leq t_{f2}) \\ & \vdots \\ \text{Task } u: & \theta_{au}(t) \in R^n \quad (0 \leq t \leq t_{fu}) \end{aligned} \quad (4-29)$$

能動関節角度の時系列を式(4-30)のように定義して，4.2.1 や 4.2.2 で説明した手法を適用することで複数のタスクに対応した線形従属劣駆動機構を設計することができる．

$$\theta_a(t) = \begin{cases} \theta_{a1}(t) & (0 \leq t \leq t_{f1}) \\ \theta_{a2}(t - T_2) & (t_{f1} < t \leq t_{f1} + t_{f2}, T_2 = t_{f1}) \\ \vdots & \\ \theta_{au}(t - T_u) & \left( \sum_{i=1}^{u-1} t_{fi} < t \leq \sum_{i=1}^u t_{fi}, T_u = \sum_{i=1}^{u-1} t_{fi} \right) \end{cases} \quad (4-30)$$

ここで，式(4-30)の能動関節角度の時系列  $\theta_a(t)$  は，各タスクを達成するための能動関節角度の時系列を時間の方向に連続させていることに注意する．本論文では，式(4-30)のように能動関節角度の時系列の扱う場合，以下のように表記を用いるようにする．

$$\theta_a(t) = [\theta_{a1}(t) \quad \theta_{a2}(t) \quad \cdots \quad \theta_{au}(t)] \quad (4-31)$$

### 4.2.4 タスクの重みづけ

4.2.1 や 4.2.2 で説明した設計方法では，主成分空間（固有空間）への射影を用いている．主成分分析を行った場合の，第 1 主成分の軸の向きは解析するデータの最も分散の大きい方に向く．第 2 主成分は，上位の主成分軸に直交して，さらに解析するデータの最も分散の大きい方に向く．第 3 主成分以降も同様である．そのことを用いて達成させるタスクの重みづけをすることができる．ここでは，設計するメカニズムに達成させるタスクが 2 つ（Task A と Task B）あるとして，それらを達成するための能動関節角度の時系列が以下の

ように与えられたとする.

$$\begin{aligned} \text{Task A: } \theta_{aA}(t) &\in R^n \quad (0 \leq t \leq t_{fA}) \\ \text{Task B: } \theta_{aB}(t) &\in R^n \quad (0 \leq t \leq t_{fB}) \end{aligned} \quad (4-32)$$

ここでは, Task A を重要視したメカニズムを設計することを考える. その場合は, 式(4-33)のように能動関節の時系列を扱う.

$$\theta_a(t) = \begin{cases} \theta_{aA}(t) & (0 \leq t \leq t_{fA}) \\ \theta_{aA}(t - T_{A2}) & (t_{fA} < t \leq 2t_{fA}, T_{A2} = t_{fA}) \\ \vdots \\ \theta_{aA}(t - T_{A\rho}) & ((\rho - 1)t_{fA} < t \leq \rho t_{fA}, T_{A\rho} = (\rho - 1)t_{fA}) \\ \theta_{aB}(t - T_B) & (\rho t_{fA} < t \leq \rho t_{fA} + t_{fB}, T_B = \rho t_{fA}) \end{cases} \quad (4-33)$$

ここで,  $\rho$  は正の整数であるとする. 式(4-33)の能動関節角度の時系列  $\theta_a(t)$  は, Task A を達成するための能動関節角度の時系列を時間の方向に  $\rho$  回連続させていることに注意する.  $\rho$  の値が大きければ大きいほど Task A の方を重視した解析と設計になる. 本論文では, 式(4-30)のように能動関節角度の時系列を扱う場合, 以下のように表記を用いるようにする.

$$\theta_a(t) = [\rho\theta_{aA}(t) \quad \theta_{aB}(t)] \quad (4-34)$$

#### 4.2.5 線形従属劣駆動機構の静力学的特性

ロボットや機械を設計する場合には, アクチュエータにかかるトルクを見積もって適切なアクチュエータを選定する必要がある. そこで, 本節では, 線形従属劣駆動機構の静力学的な特性について説明する. 線形従属劣駆動機構は一般に以下のような式で表される.

$$\theta_a = Aq \quad (4-35)$$

ここで,  $\theta_a \in R^n$  は線形従属劣駆動機構の出力軸の角度 (能動関節角度),  $q \in R^r$  は入力軸の角度 (アクチュエータの操作量の角度),  $A \in R^{n \times r}$  は定数行列とする. 線形従属劣駆動機構に仮想仕事の原理を適用すると以下のような式が成り立つ.

$$\tau_a^T \delta\theta_a = \tau_q^T \delta q \quad (4-36)$$

ここで,  $\tau_a \in R^n$  は出力軸のトルク,  $\tau_q \in R^r$  は入力軸のトルクであるとする. また, 式(4-35)の両辺を微分すると以下のような式が得られる.

$$\delta\theta_a = A\delta q \quad (4-37)$$

式(4-36)と式(4-37)より, 式(4-38)が得られる

$$\tau_a^T A\delta q = \tau_q^T \delta q \quad (4-38)$$

式(4-38)を常に満たすためには, 式(4-39)が成り立たなくてはならない.

$$\tau_a^T A = \tau_q^T \quad (4-39)$$

よって、入力軸のトルクは式(4-40)のように表される。

$$\tau_q = A^T \tau_a \quad (4-40)$$

### 4.3 リンク長さとはね定数の設計

弾性要素を介してアクチュエータと関節が接続されたマニピュレータの手先の位置・姿勢や対象物に与える力は能動関節角度の関数である。しかし、マニピュレータの手先の位置・姿勢や対象物に与える力は同じ能動関節角度の時系列を与えても、リンク長さなどの運動学パラメータやばね定数が異なれば変化する。4.2.1 及び 4.2.2 では、能動関節角度の時系列の低次元化に伴う、復元誤差を算出した。その復元誤差は、能動関節角度の時系列の関数である。本章では、第3章の3.2と同様な方法で運動を低次元化したために生じる誤差を減らすために、リンク長さとはね定数を探索する。ただし、探索をする場合には、必ず制約条件が必要になる。なぜなら、能動関節角度空間での運動の誤差を最小にするようにリンク長さとはね定数を探索すると、設計パラメータのリンク長さとはね定数が発散するからである。本節で提案する手法は大きく2つの段階を踏むことになっている。

- ① PCA-based method か BPLP-based method でアクチュエータの数をタスクに合わせて減らす。
- ② リンク長さとはね定数を設計変数にして、能動関節角度空間での運動の復元誤差を最小にするように最適化計算を行う。

最適化計算には、制約付き最適化問題を扱うことができる逐次2次計画法を用いている。最適化計算をするときの目的関数は式(4-41)のように定義した。

$$\Psi = \alpha_1 \int_0^{t_{f1}} \|A(\theta_{a1}(t), \xi)\|^2 dt + \alpha_2 \int_0^{t_{f2}} \|A(\theta_{a2}(t), \xi)\|^2 dt + \dots + \alpha_u \int_0^{t_{fu}} \|A(\theta_{au}(t), \xi)\|^2 dt \quad (4-41)$$

ここで、能動関節角度の時系列は式(4-29)と同じとする。また、 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_u$  は重み係数、 $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$  はリンク長さとはね定数であるとする。数式で表すと以下のような問題を扱うことになる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{minimize } \Psi(\xi) \\ \text{subject to } g_i(\xi) \leq 0, \quad i = 1, \dots, v \end{array} \right\} \quad (4-42)$$

ここで、 $g_i(\xi)$  は制約条件を表す関数である。

### 4.3.1 PCA-based method における設計

PCDM のリンク長さ (link lengths) とばね定数 (spring constants) の設計方法を図 4.5 に示した。

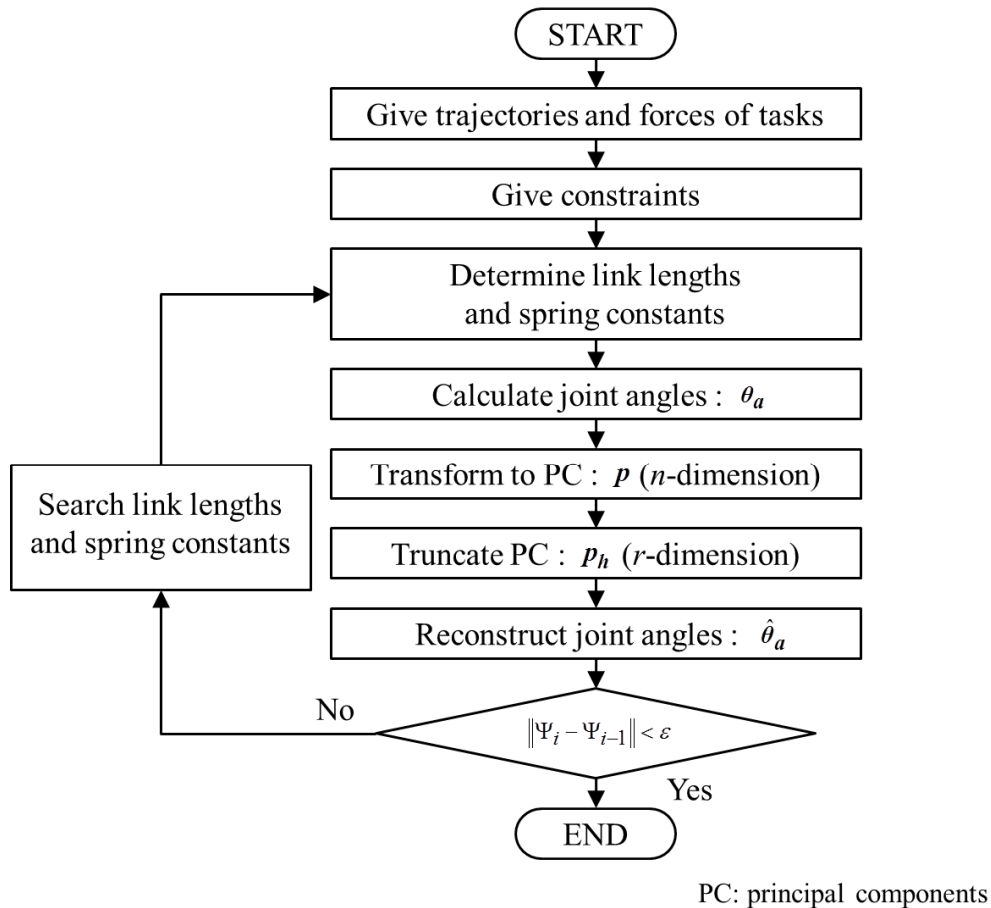


図 4.5: PCDM のリンク長さおよびばね定数の設計手順

#### 「PCDM のリンク長さ及びばね定数の設計アルゴリズム」

- Step 0: タスクの軌道と発揮力, 制約条件, リンク長さおよびばね定数の初期値を与える.
- Step 1: タスクの軌道と発揮力から, 能動関節角度の時系列  $\theta_a(t)$  を計算する.
- Step 2: 4.2.1 の PCA-based method に従い,  $n$  次元の主成分  $p(t)$  を得る.
- Step 3:  $r$  次元の高寄与率な主成分の集合  $p_h(t)$  と,  $n-r$  次元の低寄与率な主成分の集合  $p_l(t)$  に分ける. 低寄与率な主成分の集合  $p_l(t)$  を打ち切る
- Step 4: 選択された  $r$  次元の選択された高寄与率な主成分  $p_h(t)$  から  $n$  次元の能動関節角度の時系列  $\hat{\theta}_a(t)$  を復元する.
- Step 5: 元の能動関節角度の時系列  $\theta_a(t)$  と復元された能動関節角度の時系列  $\hat{\theta}_a(t)$  の誤差を

計算する.

Step 6: 運動の復元誤差  $\Psi$  を減らすようなリンク長さとばね定数を探索する. Step 1 から Step 5 までを目的関数  $\Psi$  が収束するまで繰り返す.

### 4.3.2 BPLP-based method における設計

BPDM のリンク長さとばね定数の設計方法の手順は図 4.6 に示した.

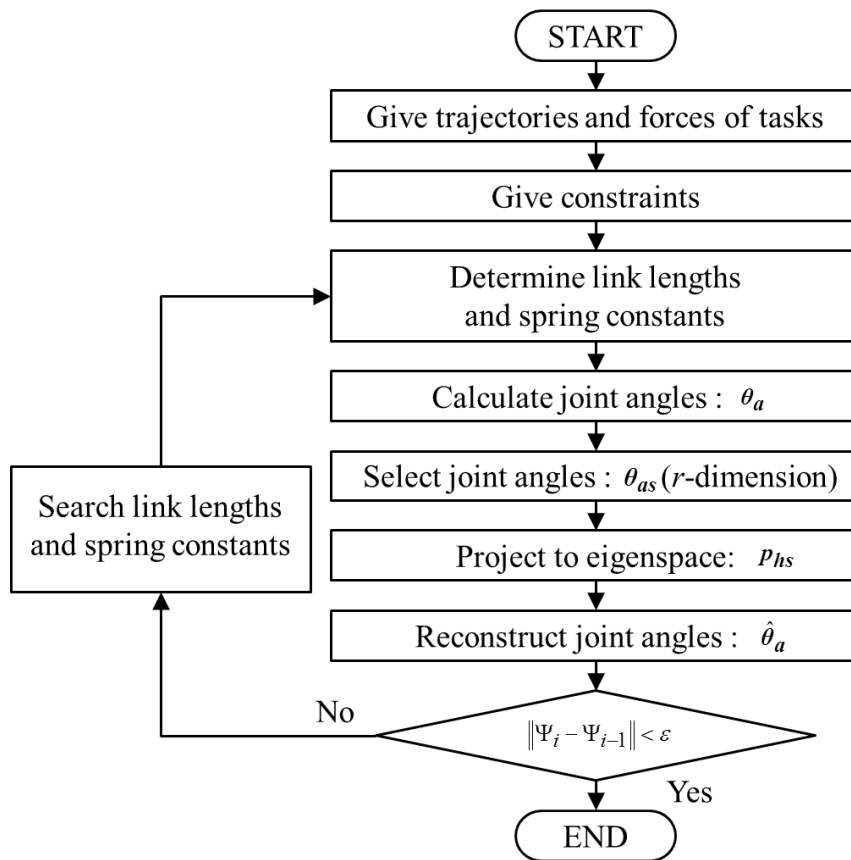


図 4.6: BPDM のリンク長さとばね定数の設計手順

#### 「BPDM のリンク長さ及びばね定数の設計アルゴリズム」

Step 0: タスクの軌道と発揮力, 制約条件, リンク長さとばね定数の初期値を与える.

Step 1: タスクの軌道と発揮力から, 能動関節角度の時系列  $\theta_a(t)$  を計算する.

Step 2: 4.2.2 の BPLP-based method に従い,  $n$  次元の能動関節角度の時系列  $\theta_a(t)$  から  $r$  個の関節を選択し,  $n-r$  個の関節の情報を打ち切る.

Step 3: 選択された能動関節角度の時系列  $\theta_{as}(t)$  を  $r$  次元の固有空間へ射影する.

Step 4: 逆射影を用いて能動関節角度の時系列  $\hat{\theta}_a(t)$  を復元する.

Step 5: 元の能動関節角度の時系列  $\theta_a(t)$  と復元された能動関節角度の時系列  $\hat{\theta}_a(t)$  の誤差を計算する.

Step 6: 運動の復元誤差  $\Psi$  を減らすようなリンク長さとはばね定数を探索する. Step 1 から Step 5 までを目的関数  $\Psi$  が収束するまで繰り返す.

## 4.4 設計例

### 4.4.1 ロボットハンドの設定

本章では, 図 4.7 のような 2 指 6 リンクのロボットハンドを設計する.

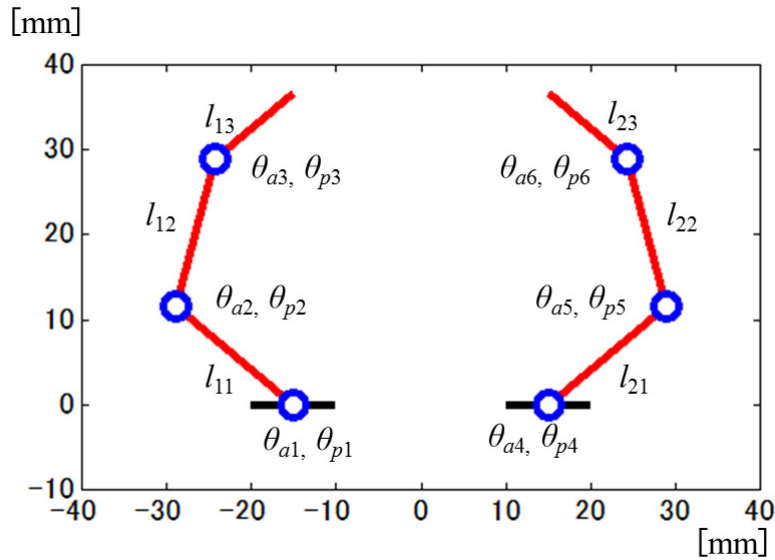


図 4.7: 設計する 2 次元ロボットハンド

ここで,  $l_{11}, l_{12}, l_{13}, l_{21}, l_{22}, l_{23}$  はリンク長さ,  $\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}, \theta_{a4}, \theta_{a5}, \theta_{a6}$  は能動関節角度,  $\theta_{p1}, \theta_{p2}, \theta_{p3}, \theta_{p4}, \theta_{p5}, \theta_{p6}$  は受動関節角度を示している. また, 各関節には線形ばねがあり, それらのばね定数の値は  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  とする. ばね定数の添え字の数字が関節の位置と対応している.

### 4.4.2 タスクの設定

本章では, 図 4.8 にあるような 2 つのタスクを達成できる単一の (同じリンク長さ, ばね定数, 線形従属劣駆動機構をもつ) ロボットハンドを設計する. Task 1 は, 小さな正方形の対象物を 2 つの指先でつまみ, 対象物の側面に垂直な方向に 0.5N の力を加える. ただし, この対象物は平面上に固定されているものとする. Task 2 は, 両先端のリンクの中心で対象物を押さえる. そして, 図 4.8(b)に示されている方向に 0.5N の力を加える. ただし, この



対象物も平面上に固定されているものとする. 図 4.8 の薄い青色の矢印は加えられる力を表しており,  $\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{21}, \phi_{22}$  は, 各タスクでの指先の初期姿勢を決めるパラメータを表している. ここで, 式(4-43)のように各パラメータを与えた.

$$\begin{aligned}
 l_{11} &= 18.0[\text{mm}], l_{12} = 18.0[\text{mm}], l_{13} = 12.0[\text{mm}] \\
 l_{21} &= 18.0[\text{mm}], l_{22} = 18.0[\text{mm}], l_{23} = 12.0[\text{mm}] \\
 \phi_{11} &= 40.0[\text{deg}], \phi_{12} = 40.0[\text{deg}] \\
 \phi_{21} &= 45.0[\text{deg}], \phi_{22} = 45.0[\text{deg}] \\
 k_1 &= 0.0800[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_2 = 0.0800[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_3 &= 0.0800[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_4 = 0.0800[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_5 &= 0.0800[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_6 = 0.0800[\text{N} \cdot \text{m/rad}]
 \end{aligned} \tag{4-43}$$

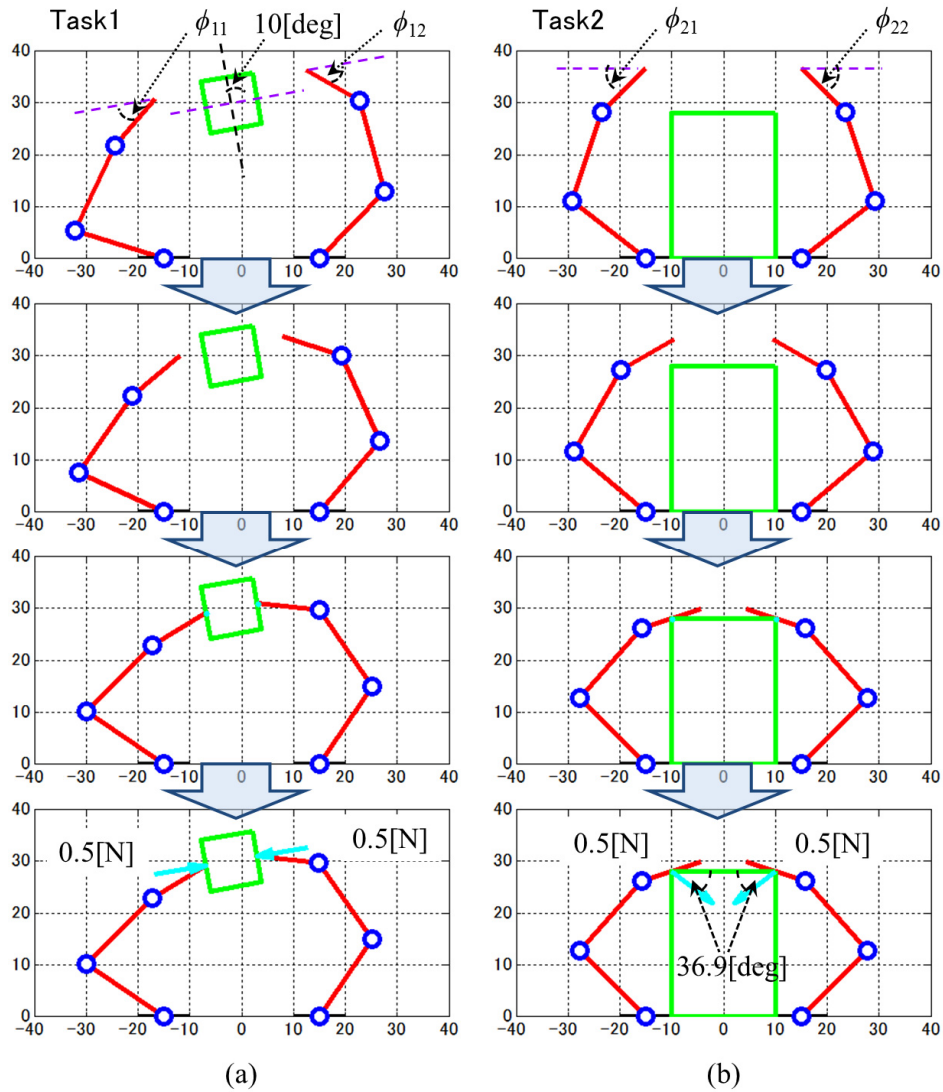


図 4.8: 運動学と静力学で定義されるタスクの手順

ここで、能動関節角度の時系列に主成分分析を適用する．本節では、以下のように能動関節の時系列を扱い、運動の解析とロボットハンドの設計を行う．

$$\theta_a(t) = [\theta_{a1}(t) \quad \theta_{a2}(t)] \quad (4-44)$$

ここで、 $\theta_{a1}(t)$  ( $0 \leq t \leq t_{j1}$ )は Task1 を行うときの能動関節の時系列、 $\theta_{a2}(t)$  ( $0 \leq t \leq t_{j2}$ )は Task2 を行うときの能動関節の時系列であるとする．式(4-42)で表される時系列に主成分分析を適用したときの各主成分の寄与率の値は、表 4.1 のようになった．

表 4.1: 能動関節角度の主成分の寄与率

Principal component	Contribution rate [%]
1	73.5
2	24.5
3	1.82
4	$1.22 \times 10^{-1}$
5	$1.05 \times 10^{-2}$
6	$5.71 \times 10^{-4}$

表 4.1 より、第1主成分から第3主成分までで累積寄与率が99%を越えていることが分かる．このことから、図 4.8 の2つのタスクに必要な能動関節角度の運動を近似的に復元するのに3つの高寄与率な主成分だけで十分であることが分かる．そこで、本章の例題では6関節を3つのアクチュエータで駆動させる劣駆動ロボットハンドを設計する．

4.3 で説明した手法でリンク長さとはね定数を設計する場合には、制約条件を与える必要がある．本章の例題では、式(4-45)から式(4-47)のような制約条件を与えて設計問題を解くことにする．

$$15[\text{mm}] \leq l_{i1} \leq 20[\text{mm}], 15[\text{mm}] \leq l_{i2} \leq 20[\text{mm}] \quad (4-45)$$

$$12[\text{mm}] \leq l_{i3} \leq 15[\text{mm}]$$

$$30[\text{deg}] \leq \phi_{1i} \leq 45[\text{deg}], 45[\text{deg}] \leq \phi_{2i} \leq 60[\text{deg}] \quad (4-46)$$

$$0.05[\text{N} \cdot \text{m} / \text{rad}] \leq k_j \leq 0.2[\text{N} \cdot \text{m} / \text{rad}] \quad (4-47)$$

不等式(4-45)は、リンクの長さへの制約条件であり、ロボットハンドの大きさに対する制約を与えている．不等式(4-46)は、指先が対象物の方を向くようにする制約条件である．不等式(4-47)は、ばね定数への制約である．

### 4. 4. 3 PCDM の設計例

表 4.1 にあるように、図 4.8 のタスクを実行するために必要な主成分は寄与率の高い第1主成分から第3主成分である．そこで、本節ではこれらの3つの主成分を用いて PCDM を

設計する．線形従属劣駆動機構のパラメータを決めるときには，式(4-44)の時系列を用いた．また，リンク長さとはばね定数を探索するときの目的関数は，式(4-48)のように与えた．

$$\Psi = \int_0^{t_{f1}} \|\mathbf{A}(\theta_{a1}(t), \xi)\|^2 dt + \int_0^{t_{f2}} \|\mathbf{A}(\theta_{a2}(t), \xi)\|^2 dt \quad (4-48)$$

リンク長さとはばね定数の初期値は式(4-43)のように与えた．4.3.1 で説明した方法でリンク長さとはばね定数を最適化すると，式(4-49)のようなパラメータが得られた．また，ここでは同時に指先の初期姿勢のパラメータ  $\phi_{ij}$  も最適化している．

$$\begin{aligned} l_{11} &= 20.0[mm], l_{12} = 18.4[mm], l_{13} = 15.0[mm] \\ l_{21} &= 20.0[mm], l_{22} = 20.0[mm], l_{23} = 12.0[mm] \\ \phi_{11} &= 45.0[\text{deg}], \phi_{12} = 45.0[\text{deg}] \\ \phi_{21} &= 56.8[\text{deg}], \phi_{22} = 45.0[\text{deg}] \\ k_1 &= 0.0566[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_2 = 0.200[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\ k_3 &= 0.200[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_4 = 0.137[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\ k_5 &= 0.0565[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_6 = 0.104[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \end{aligned} \quad (4-49)$$

図 4.9 は，リンク長さとはばね定数の最適化前と最適化後の形状とその動作を示している．ここで，Synthesized initial robot hand はリンク長さとはばね定数を最適化前のロボットハンドのことであり，Synthesized optimal robot hand がリンク長さとはばね定数を最適化後のロボットハンドである．アクチュエータの操作量としては，寄与率の高い第 1 主成分から第 3 主成分を用いている．図 4.9 の Given force は，タスクの情報として与えられた力を示し，Actual force は，実際にロボットハンドが発揮する力を示している．

設計された PCDM が作業座標空間でどれほどタスクを達成しているかを評価するために式(4-50)で表されるような評価関数を定義する．

$$\begin{aligned} E_l &= \frac{\|f_{gl} - f_{al}\|}{\|f_{gl}\|} \times 100 [\%] \\ E_r &= \frac{\|f_{gr} - f_{ar}\|}{\|f_{gr}\|} \times 100 [\%] \end{aligned} \quad (4-50)$$

ここで， $E_l$  は左の指が発揮する力の誤差を評価する指標であり， $E_r$  は右の指が発揮する力の誤差を評価する指標である． $f_{gl}, f_{gr}$  は，それぞれ左の指と右の指が発揮する理想の力（タスクの情報として与えられた力）である． $f_{gl}, f_{gr}$  は，それぞれ線形従属劣駆動機構で駆動される左の指と右の指が発揮する力である．

表 4.2 と表 4.3 は，リンク長さとはばね定数の最適化前と最適化後の  $E_l$  と  $E_r$  の値を示している．ここでは，設計された PCDM は 3 つのアクチュエータと線形従属劣駆動機構により駆動されていることに注意する．

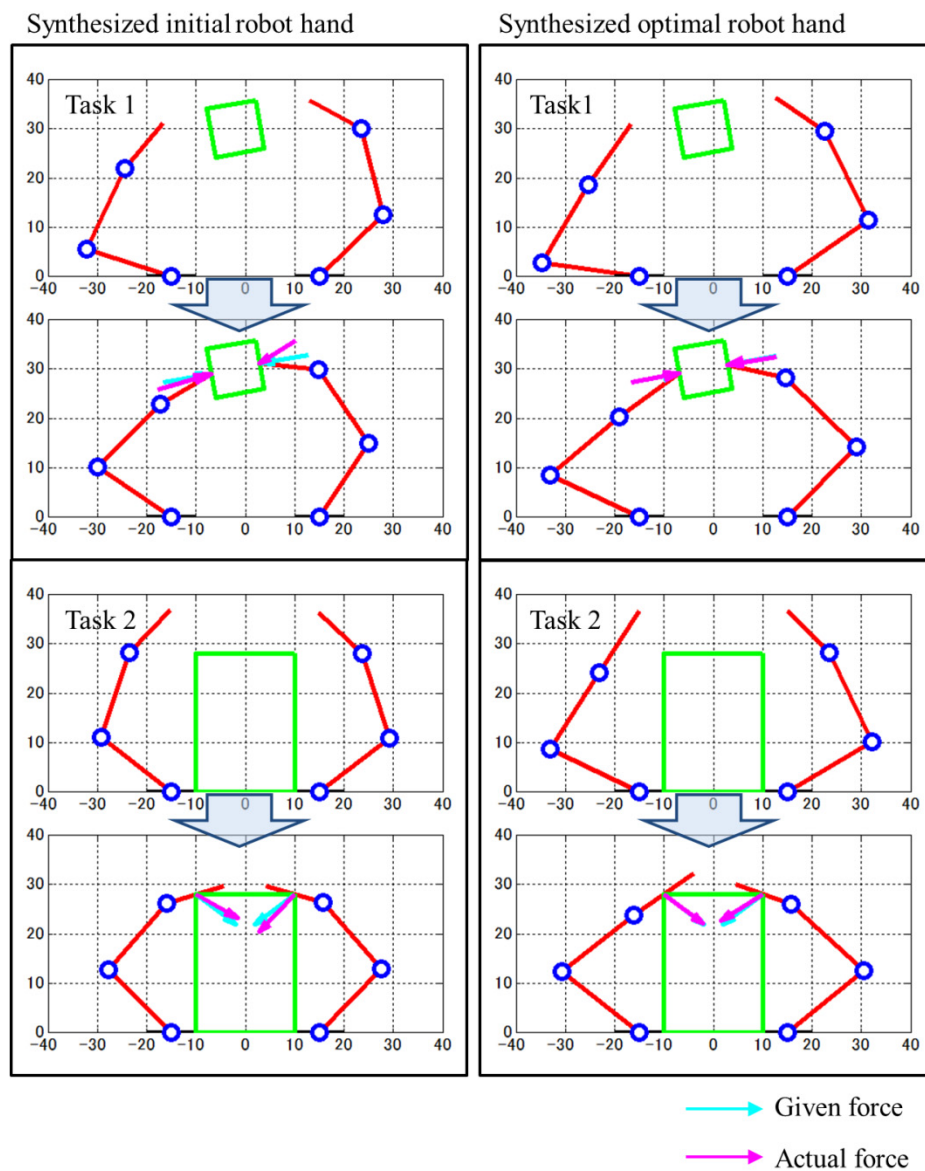


図 4.9: 設計された PCDM (3 主成分)

表 4.2: タスク 1 の誤差 (PCDM: 3 主成分)

	$E_l$ [%]	$E_r$ [%]
Synthesized initial robot hand	18.7	37.7
Synthesized optimal robot hand	0.948	0.691

表 4.3: タスク 2 の誤差 (PCDM: 3 主成分)

	$E_l$ [%]	$E_r$ [%]
Synthesized initial robot hand	12.4	17.8
Synthesized optimal robot hand	0.844	8.04

表 4.2 と表 4.3 より，リンク長さとはね定数の最適化前に比べて最適化後の方がいずれのタスクでも誤差が小さくなっていることが分かる．しかし，タスク 2 の  $E_r$  は他の誤差に比べて大きな値をとっている．この原因としては，タスク 1 に比べてタスク 2 を達成するための能動関節角度の時系列を低次元化することが難しいことが考えられる．そこで，4.2.4 で説明した方法でタスクの重みづけを行う．設計に用いる能動関節角度の時系列を式(4-51)のように与える．

$$\theta_a(t) = [\theta_{a1}(t) \quad 10\theta_{a2}(t)] \quad (4-51)$$

また，リンク長さとはね定数を探索するときの目的関数を以下のように与えた．

$$\Psi = \int_0^{t_{f1}} \|A(\theta_{a1}(t), \xi)\|^2 dt + 10 \int_0^{t_{f2}} \|A(\theta_{a2}(t), \xi)\|^2 dt \quad (4-52)$$

リンク長さとはね定数の初期値は式(4-43)のように与え，4.3.1 で説明した方法でリンク長さとはね定数を最適化すると，式(4-53)のようなパラメータが得られた．また，ここでは同時に指先の初期姿勢のパラメータ  $\phi_{ij}$  も最適化している．

$$\begin{aligned} l_{11} &= 20.0[mm], l_{12} = 18.3[mm], l_{13} = 15.0[mm] \\ l_{21} &= 20.0[mm], l_{22} = 20.0[mm], l_{23} = 12.0[mm] \\ \phi_{11} &= 45.0[\text{deg}], \phi_{12} = 45.0[\text{deg}] \\ \phi_{21} &= 56.8[\text{deg}], \phi_{22} = 45.0[\text{deg}] \\ k_1 &= 0.0500[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_2 = 0.200[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\ k_3 &= 0.200[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_4 = 0.0847[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\ k_5 &= 0.0631[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_6 = 0.0719[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \end{aligned} \quad (4-53)$$

図 4.10 は，リンク長さとはね定数の最適化前と最適化後の形状とその動作を示している．また，表 4.4 と表 4.5 は，リンク長さとはね定数の最適化前と最適化後の  $E_l$  と  $E_r$  の値を示している．ここでも，設計された PCDM は 3 つのアクチュエータと線形従属劣駆動機構により駆動されていることに注意する．

表 4.4: タスク 1 の誤差 (PCDM: 3 主成分, 重みづけあり)

	$E_l$ [%]	$E_r$ [%]
Synthesized initial robot hand	16.9	20.5
Synthesized optimal robot hand	2.98	2.39

表 4.5: タスク 2 の誤差 (PCDM: 3 主成分, 重みづけあり)

	$E_l$ [%]	$E_r$ [%]
Synthesized initial robot hand	13.5	9.31
Synthesized optimal robot hand	2.02	2.85

表 4.3 と表 4.5 を比べると，タスク 2 の能動関節角度の時系列に重みづけしたことにより，タスク 2 の  $E_r$  の値が小さくなっていることがわかる．

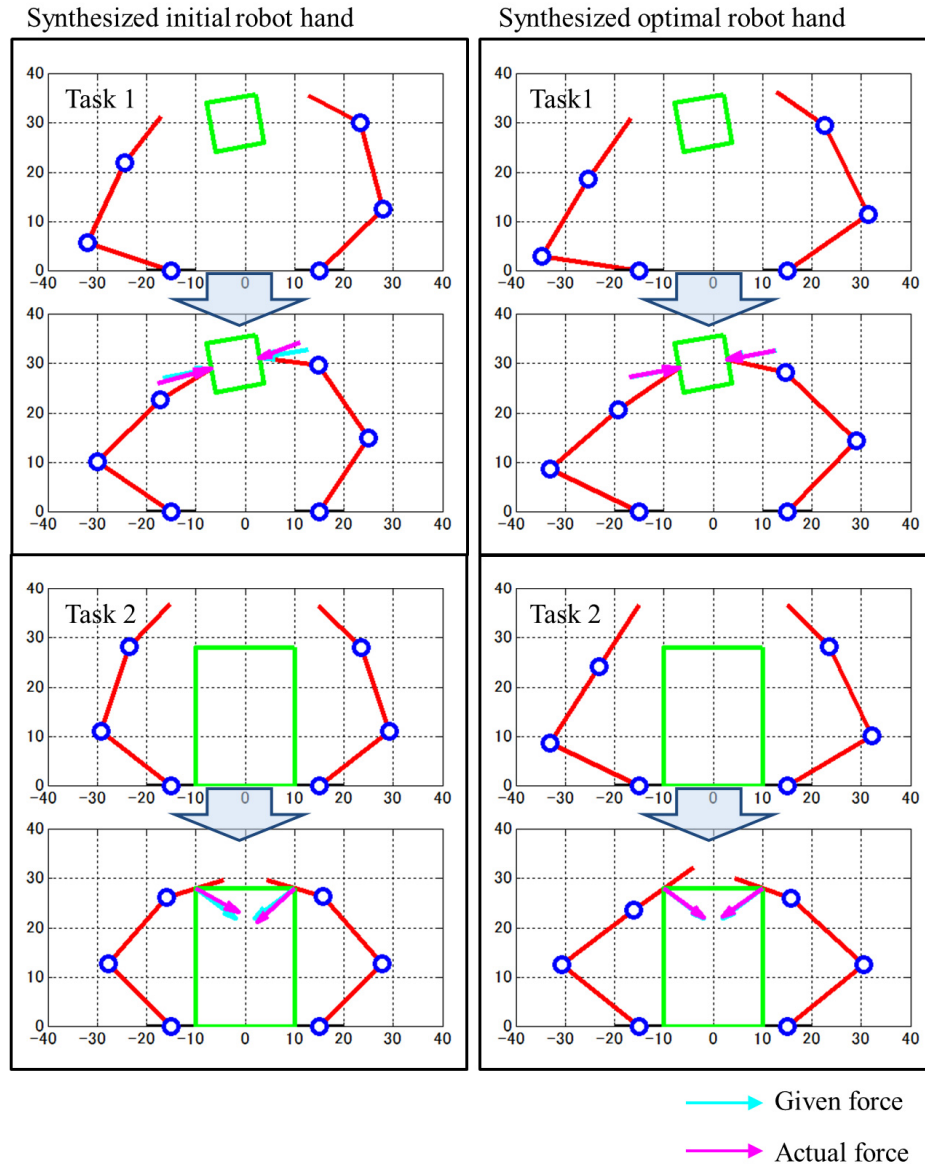


図 4.10: 設計された PCDM (3 主成分, 重みづけあり)

#### 4.4.4 BPDM の設計例

リンク長さとばね定数の初期値は, 4.4.3 のときと同様に式(4-43)の値を用いる. BPLP-based method を用いた設計では, あらかじめ設計に用いる能動関節角度の時系列を選択する. 本節では, 関節  $\theta_1, \theta_3, \theta_5$  が選択された場合について説明する. 線形従属劣駆動機構のパラメータを決めるときには, 式(4-44)の時系列を用いた. また, リンク長さとばね定数を探索するときの目的関数は, 式(4-48)のように与えた. 4.3.2 の設計方法に従ってリンク長さとばね定数を設計すると, 式(4-54)のようなパラメータが得られた. また, ここでは同時に指先の初期姿勢のパラメータ  $\phi_{ij}$  も最適化している.

$$\begin{aligned}
l_{11} &= 20.0[mm], l_{12} = 15.0[mm], l_{13} = 15.0[mm] \\
l_{21} &= 17.7[mm], l_{22} = 20.0[mm], l_{23} = 12.0[mm] \\
\phi_{11} &= 45.0[\text{deg}], \phi_{12} = 45.0[\text{deg}] \\
\phi_{21} &= 52.6[\text{deg}], \phi_{22} = 45.0[\text{deg}] \\
k_1 &= 0.0938[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_2 = 0.194[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
k_3 &= 0.200[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_4 = 0.200[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
k_5 &= 0.104[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_6 = 0.0676[\text{N} \cdot \text{m/rad}]
\end{aligned} \tag{4-54}$$

図 4.11 は、リンク長さとはばね定数の最適化前と最適化後の形状とその動作を示している。

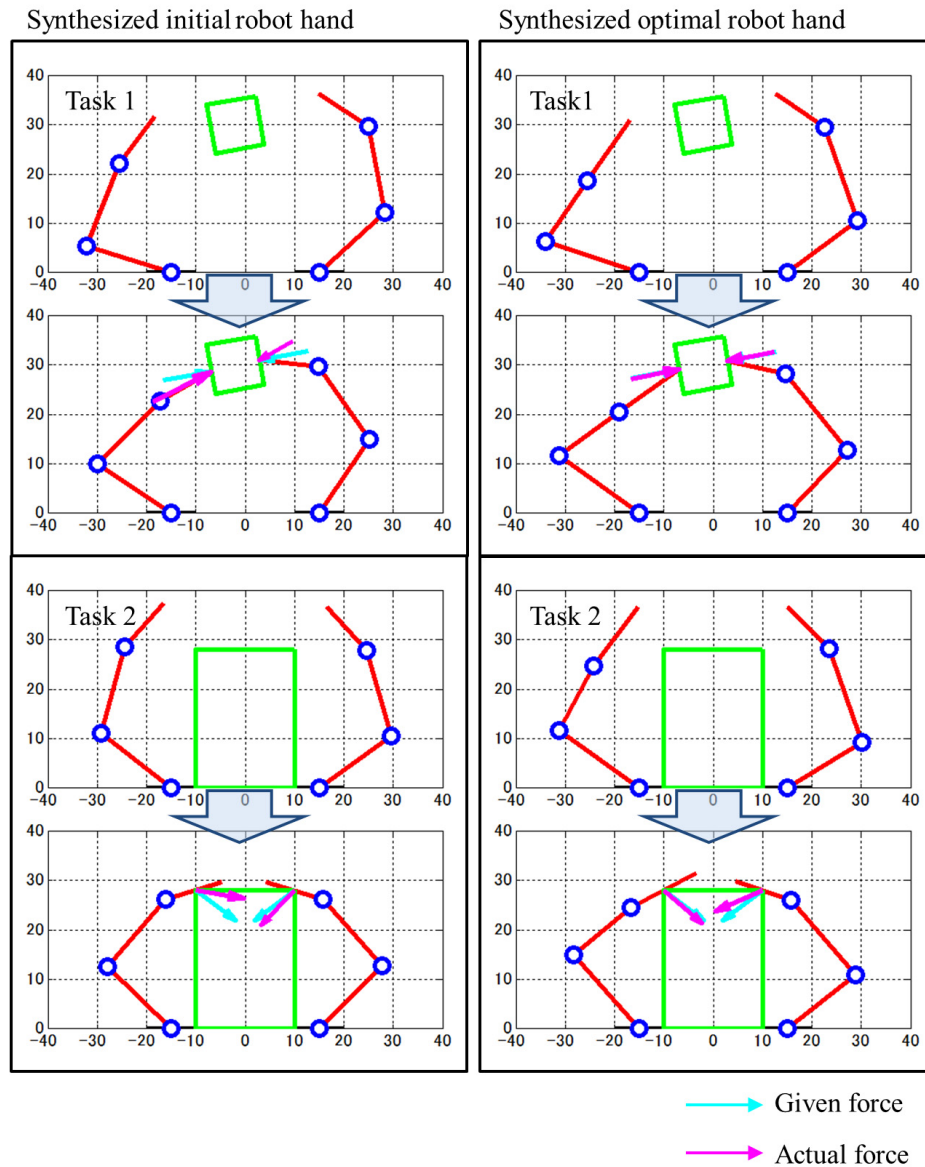


図 4.11: 設計された BPDM (選択された関節  $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ )

表 4.6 と表 4.7 は、リンク長さとはばね定数の最適化前と最適化後の  $E_l$  と  $E_r$  の値を示してい

る．ここでは，BPDM は 3 つのアクチュエータと線形従属劣駆動機構により駆動されていることに注意する．

表 4.6: タスク 1 の誤差 (BPDM: 選択された関節  $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ )

	$E_l$ [%]	$E_r$ [%]
Synthesized initial robot hand	47.8	36.2
Synthesized optimal robot hand	1.71	4.23

表 4.7: タスク 2 の誤差 (BPDM: 選択された関節  $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ )

	$E_l$ [%]	$E_r$ [%]
Synthesized initial robot hand	47.5	15.7
Synthesized optimal robot hand	7.50	23.4

表 4.6 と表 4.7 より，リンク長さとはばね定数の最適化前に比べて最適化後の方タスク 1 の  $E_l$ ,  $E_r$ , タスク 2 の  $E_l$  の値は大きく減ったが，タスク 2 の  $E_r$  は増えている．ここで，前節と同様にしてタスクの重みづけを行う．設計に用いる能動関節角度の時系列を式(4-51)のように与えた．また，リンク長さとはばね定数を探索するときの目的関数を式(4-52)のように与えた．4.3.2 の設計方法に従ってリンク長さとはばね定数を設計すると，式(4-55)のようなパラメータが得られた．また，ここでは同時に指先の初期姿勢のパラメータ  $\phi_{ij}$  も最適化している．

$$\begin{aligned}
 l_{11} &= 20.0[mm], l_{12} = 15.0[mm], l_{13} = 15.0[mm] \\
 l_{21} &= 18.8[mm], l_{22} = 20.0[mm], l_{23} = 12.0[mm] \\
 \phi_{11} &= 45.0[\text{deg}], \phi_{12} = 43.7[\text{deg}] \\
 \phi_{21} &= 52.9[\text{deg}], \phi_{22} = 45.0[\text{deg}] \\
 k_1 &= 0.114[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_2 = 0.200[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_3 &= 0.200[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_4 = 0.200[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_5 &= 0.122[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_6 = 0.0917[\text{N} \cdot \text{m/rad}]
 \end{aligned} \tag{4-55}$$

図 4.12 は，リンク長さとはばね定数の最適化前と最適化後の形状とその動作を示している．表 4.8 と表 4.9 は，リンク長さとはばね定数の最適化前と最適化後の  $E_l$  と  $E_r$  の値を示している．ここでも，BPDM は 3 つのアクチュエータと線形従属劣駆動機構により駆動されていることに注意する．

表 4.8: タスク 1 の誤差 (BPDM: 選択された関節  $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ , 重みづけあり)

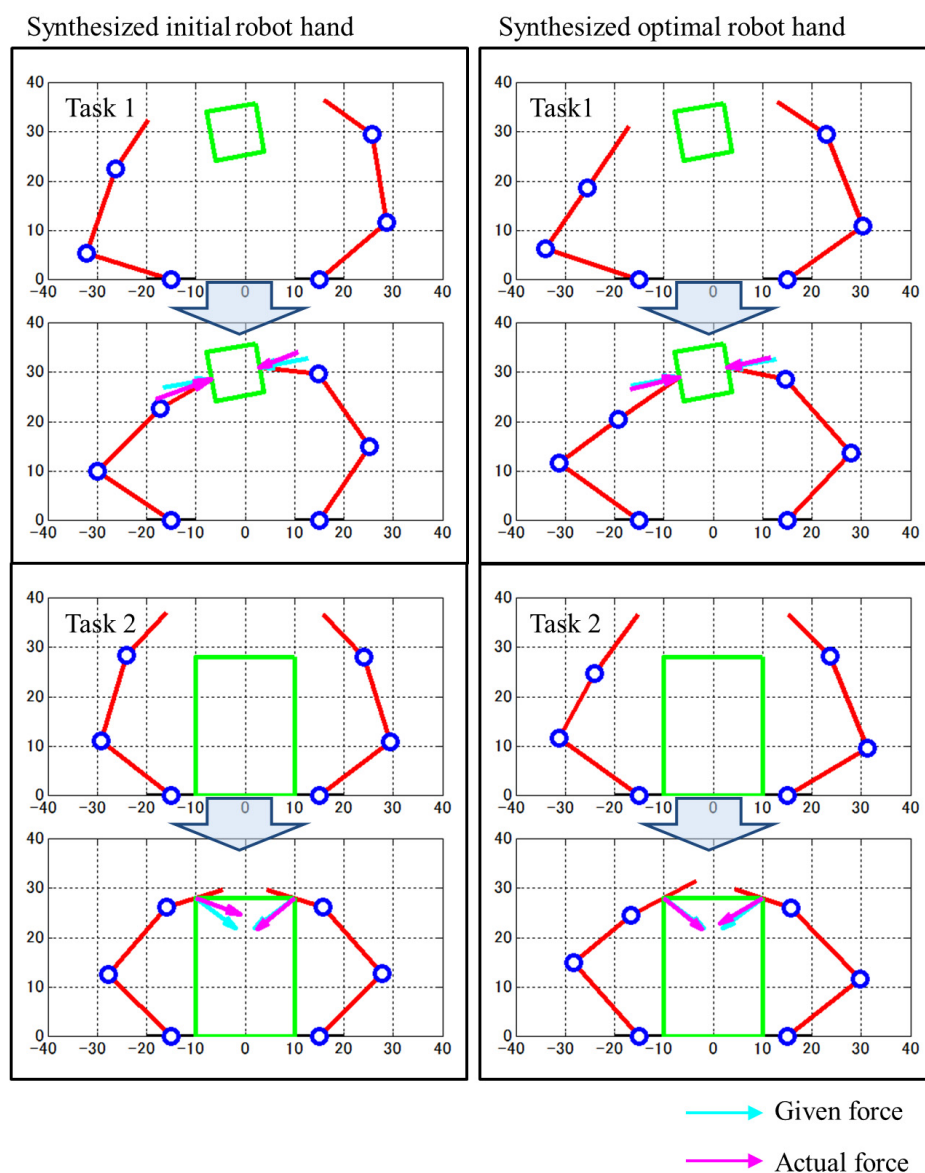
	$E_l$ [%]	$E_r$ [%]
Synthesized initial robot hand	27.4	23.7
Synthesized optimal robot hand	6.97	4.07



表 4.9: タスク 2 の誤差 (BPDM: 選択された関節  $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ , 重みづけあり)

	$E_l$ [%]	$E_r$ [%]
Synthesized initial robot hand	29.5	6.49
Synthesized optimal robot hand	10.6	11.3

表 4.7 と表 4.9 を比べると、タスク 2 の能動関節角度の時系列に重みづけしたことにより、タスク 2 の  $E_r$  の値が小さくなっていることがわかる。

図 4.12: 設計された BPDM (選択された関節  $\theta_1, \theta_3, \theta_5$ , 重みづけあり)

## 4.5 本章のまとめ

本章では、タスクが運動学と静力学で定義される場合に、メカニズムを設計する方法について述べた。設計されるメカニズムは、関節角度とアクチュエータの変位が線形に従属している劣駆動メカニズムであり、メカニズム中には弾性要素を含む。ここで与えられるタスクは、マニピュレータの手先のリンクの軌道と手先が対象物に加える接触力で定義された。本提案手法では、はじめは各関節が独立なアクチュエータに弾性要素を介して接続されていて、各アクチュエータは正確に位置制御ができるマニピュレータを仮定した。弾性要素を含むマニピュレータでは、運動学と静力学の問題が連成する。その性質を利用して、マニピュレータの手先の位置を決めるための関節角度の時系列と対象物に力を加えるための関節角度の時系列を同時に低次元化して劣駆動機構を設計する方法について説明した。低次元化の方法は、第3章で説明した2種類の低次元化方法を用いた。それから、リンク長さとはばね定数を設計することにより、運動低次元化によって生じる復元誤差を最小にするように設計した。

第3章では、単一タスクを達成するメカニズムの設計方法しか扱っていなかったが、本章では、複数のタスクを達成するメカニズムを設計するときの関節角度の時系列の扱い方についても説明し、それを達成する設計例を示した。そして、同様の考え方を利用して、複数のタスクを定義した場合にタスクの重要度を考量した重みづけをする方法についても説明し、重みづけをしたタスクの精度を上げる設計例も示した。

最後に、シミュレーションを用いて設計例を示すことにより、本提案手法の有効性を示した。本章での設計例では、2つの異なるタスクを達成する単一のロボットハンドを設計した。リンク長さとはばね定数の最適化やタスクの重みづけをすることにより、設計されたメカニズムが弾性要素を生かしてタスクを達成できることを確認した。

## 第5章

# 3次元ロボットハンドの設計

### 5.1 設計するロボットハンドの構成

第4章で説明した設計方法を用いて義手として用いることを想定した3次元のロボットハンドを設計する。本章では，図5.1のようなメカニズムを設計する。

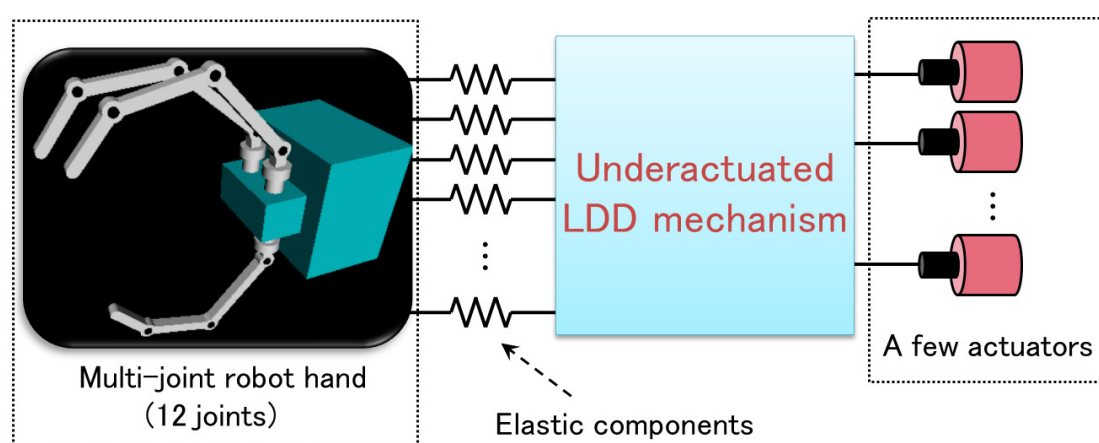


図 5.1: 設計する 3 次元ロボットハンドの構成

設計するメカニズムは，12 関節の多関節ロボットハンド，弾性要素，線形従属劣駆動機構

(Underactuated LDD mechanism), アクチュエータで構成される．線形従属劣駆動機構については，第2章で詳しく説明している．また，多関節ロボットハンドと弾性要素と線形従属劣駆動機構の接続の仕方については，第4章で説明している．図5.2は，図5.1の多関節ロボットハンド部の関節軸の方向と各指の配置を示している．第1章の1.2では，人間の手の骨格についてまとめている．人間の指は根元に内転・外転と屈曲・進展の両方を行うことのできる関節があり，その先に複数の屈曲・進展のみを行える関節が続いている．本章で扱うロボットハンドもそのような骨格を模倣した．多関節ロボットハンドは，指1 (Finger 1), 指2 (Finger 2), 指3 (Finger 3)の3本の指からなり，各指には4つの関節がある．関節の軸の向きは，人間の指を模擬している．各指先の位置は，作業空間内で制御することができる．また，各指のベースの位置は，図5.2にあるように非対称になっている． $\{l_{ij}\}$ は設計パラメータになっているリンクの長さ( $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$ ),  $\theta_i$ は各関節角度を示す( $i = 1, \dots, 12$ ).

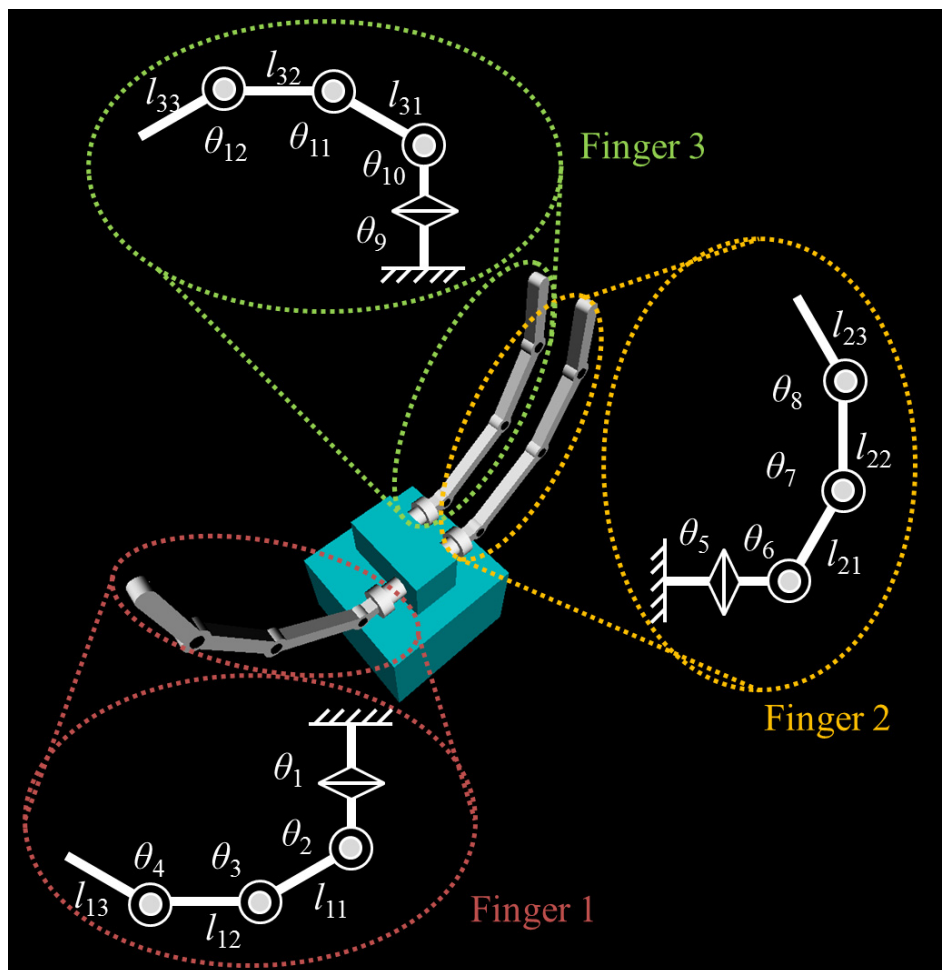


図 5.2: 3次元ロボットハンドの関節

## 5.2 達成させるタスク

第1章の1.2.3と1.2.4では、人間の手の動作や義手に必要な機能について述べた。義手に求められる機能としては、まず、大きさの異なる対象物を把握できることである。次に求められる機能としては、対象物を把握したまま操ることである。日常生活では特に、対象物を把握したまま回転させる動作が多い。本章では、3つの異なるタスク（タスク1、タスク2、タスク3）を与え、それらを達成する単一の（同じリンク長さ、ばね定数、線形従属劣駆動機構をもつ）ロボットハンドを設計する。図5.3は、それら3つのタスクの動作を示している。各タスクの図の1段目は3次元グラフィックによりロボットハンドの動作を示し、2段目は3次元プロットによりロボットハンドの運動と発揮力を示し、3段目は2段目の3次元プロットをx-z平面に投影した図を示し、4段目は2段目の3次元プロットをx-y平面に投影した図を示している。図5.3の青い線はロボットハンドが対象物に加える発揮力を示す。また、図5.3(a)と(b)の対象物の位置は固定されているものとする。図5.3(c)の対象物は、z軸のみに回転することができ、ばね定数  $57.3\text{mN}\cdot\text{m}/\text{rad}$  のばねに接続されているものとする。図5.4は、各タスクでの各指の初期姿勢及び接触点の位置を示している。図5.4の $\phi_j$ は、 $i$ 番目のタスクでの $j$ 番目の指の初期姿勢を決める角度である。

### 「各タスクの手順」

#### タスク1

Step 1: 指1と指2の2本の指先を図5.3(a)のPhase 1のように対象物( $20\text{mm}\times 20\text{mm}\times 20\text{mm}$ )の側面に接触させる。指3は、移動しない。

Step 2: 2本の指を対象物に接触させてつまんだまま、対象物の側面に垂直な方向（指1は+x軸方向、指2は-x軸方向）に各指5Nの大きさの力を加える

#### タスク2

Step 1: 3本の指先のリンクの中心を図5.3(b)のPhase 1のように対象物( $50\text{mm}\times 80\text{mm}\times 55\text{mm}$ )に接触させる。

Step 2: 3本の指先のリンクで対象物をつかんだまま、指1は+x軸方向に5N、-z軸方向に2.5Nを加え、指2と指3は-x軸方向に2.5N、-z軸方向に1.25Nを加える。

#### タスク3

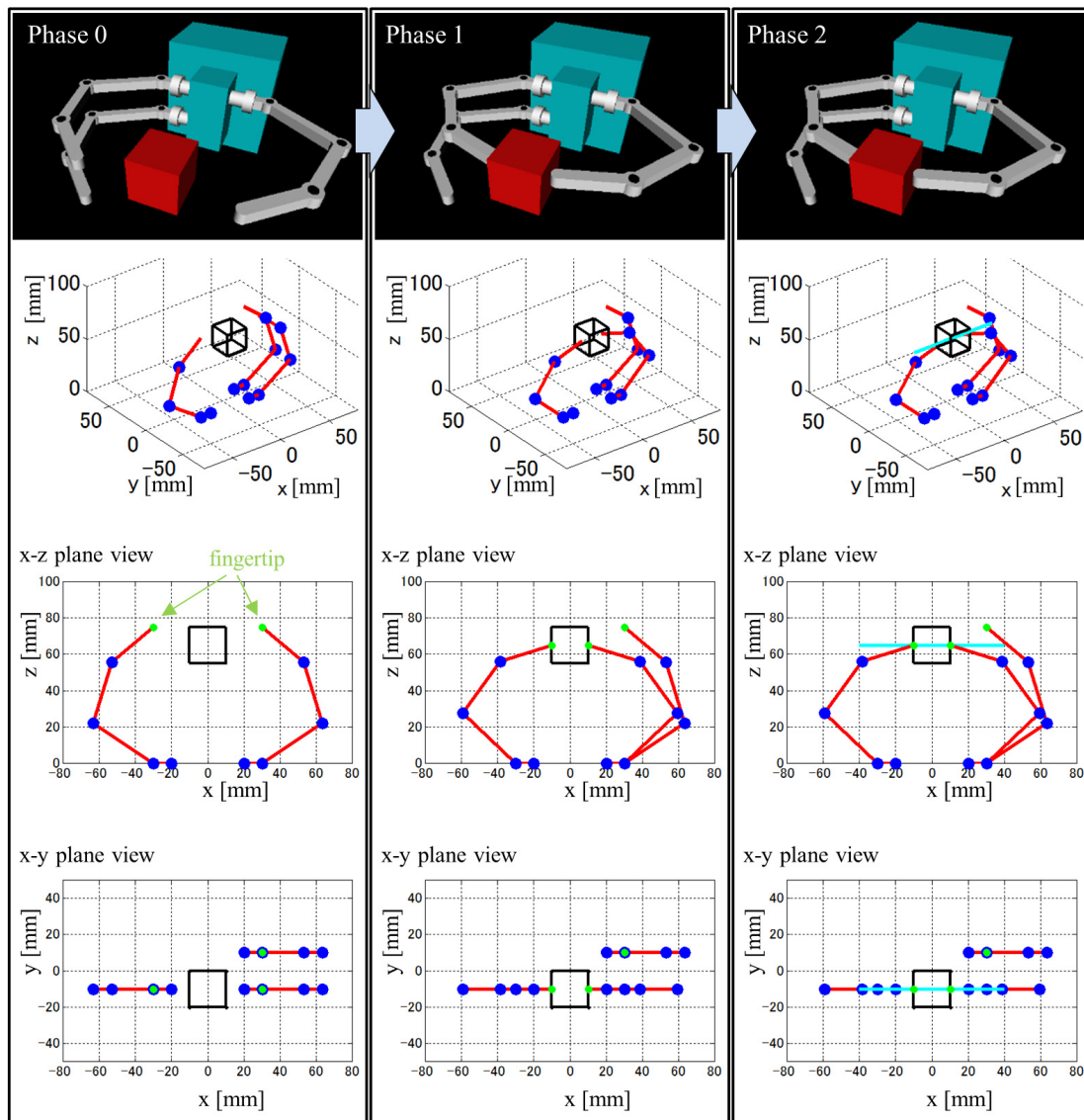
Step 1: 3本の指先で対象物を図5.3(c)のPhase 1のように対象物(直径30mmの円柱)をつまむ。

Step 2: 2本の指を対象物に接触させてつまんだまま、z軸周りに30 mN·mのトルクを加えて対象物を30°回転させる。

タスク1では、2本の指先で小さな対象物を把握するための動作を与えた。指先の2つの力

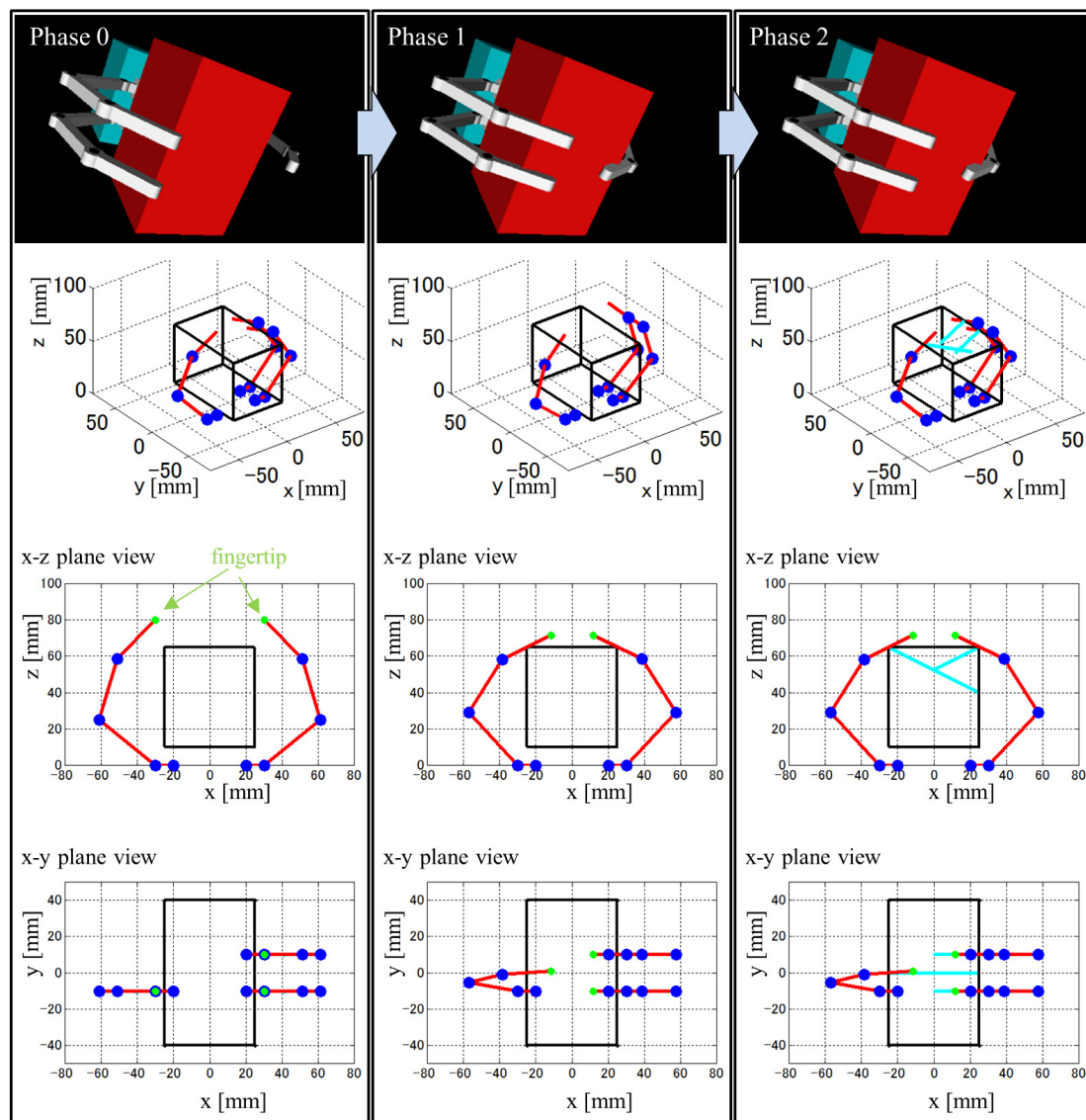
は、拮抗するように発揮されている．タスク2では，すべての指で対象物を抱え込むように把握するための動作を与えた．各指によって発揮される力の合力は，ベースの方を向くように与えられている．タスク2は，タスク1とは性質の異なる把握動作である．タスク2は，接触点を増やすことによりタスク1に比べてロボットハンドと対象物の間の摩擦力を有効に用いることができ，大きな対象物に対応できる把握動作である．2種類の把握動作をタスクとして与えることで，大きさの異なる対象物に対応することができる．タスク3では，3つの指先で対象物を把握し，指先の摩擦力をを用いて対象物のある1つの軸周りに回転させる動作である．接触点を3点にすることにより，対象物を安定して把握したまま操ることができる．

Task 1



(a)

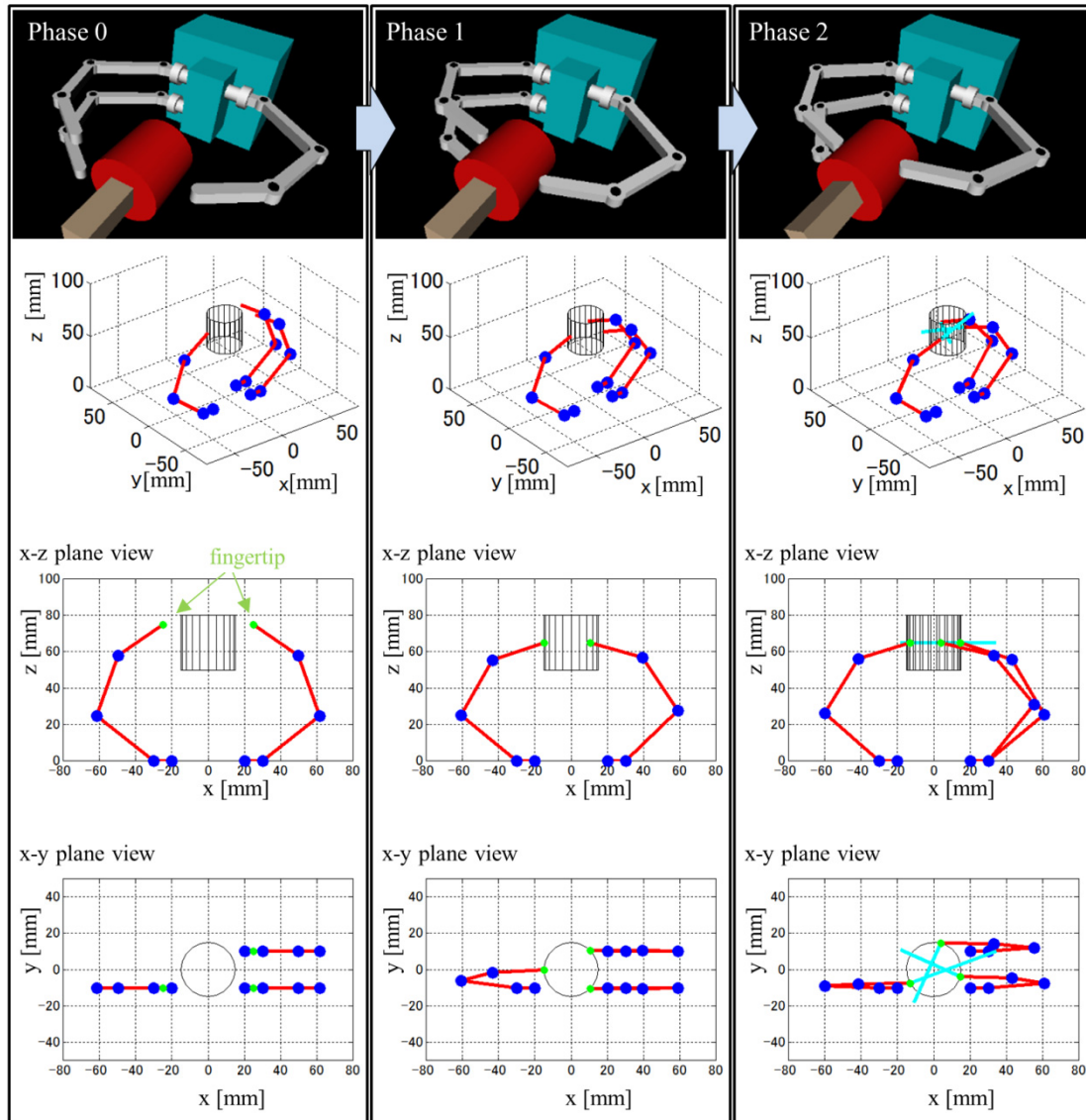
Task 2



(b)



Task 3



(c)

図 5.3: 3次元ロボットハンドに達成させるタスク



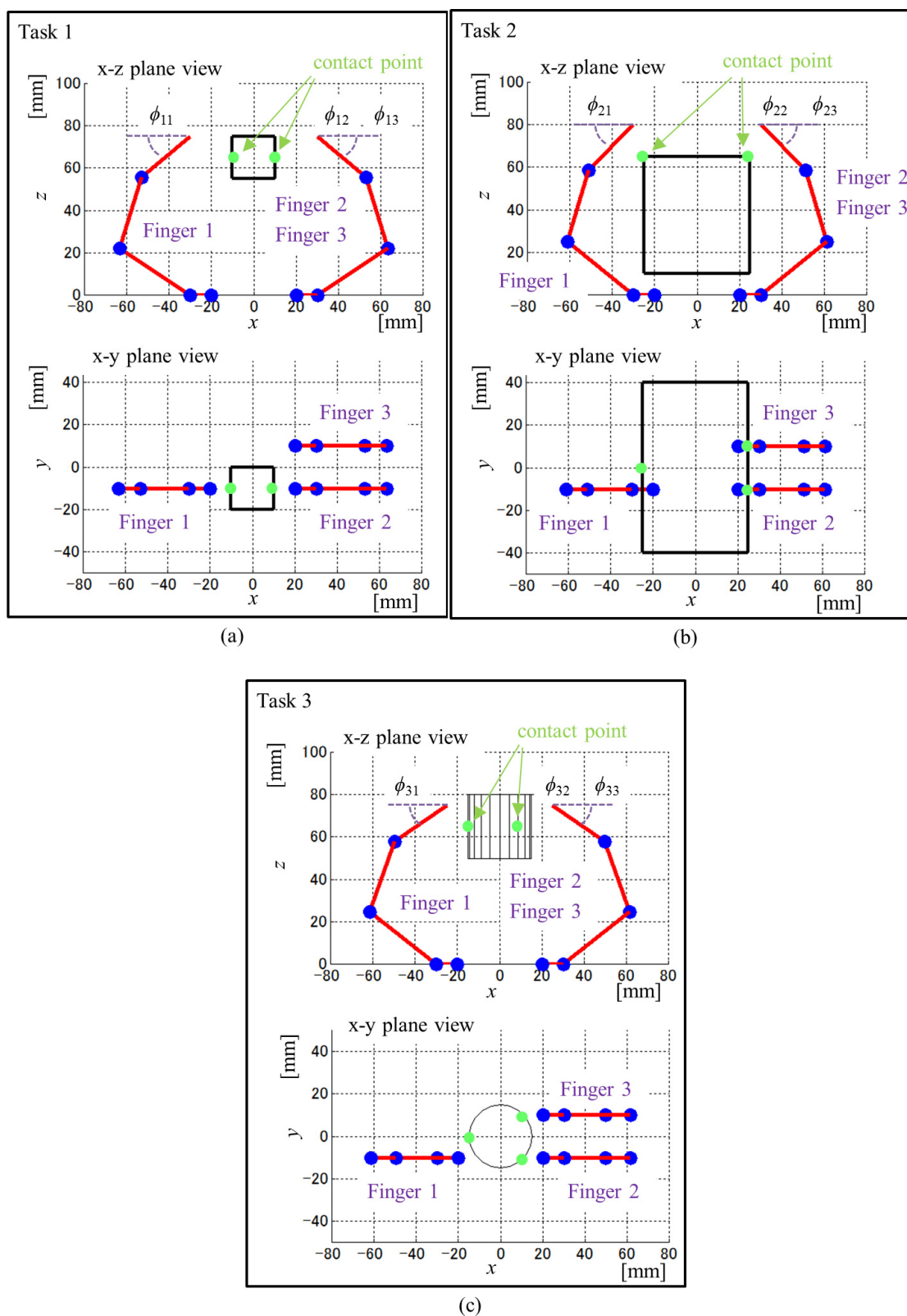


図 5.4: 初期姿勢の定義と接触点

ここで、式(5-1)のように各パラメータを与えた.

$$\begin{aligned}
 l_{11} &= 40.0[mm], l_{12} = 35.0[mm], l_{13} = 30.0[mm] \\
 l_{21} &= 40.0[mm], l_{22} = 35.0[mm], l_{23} = 30.0[mm] \\
 l_{31} &= 40.0[mm], l_{32} = 35.0[mm], l_{33} = 30.0[mm] \\
 \phi_{11} &= 40.0[\text{deg}], \phi_{12} = 40.0[\text{deg}], \phi_{13} = 40.0[\text{deg}] \\
 \phi_{21} &= 45.0[\text{deg}], \phi_{22} = 45.0[\text{deg}], \phi_{23} = 40.0[\text{deg}] \\
 \phi_{31} &= 45.0[\text{deg}], \phi_{32} = 45.0[\text{deg}], \phi_{33} = 40.0[\text{deg}] \\
 k_1 &= 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_2 = 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_3 &= 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_4 = 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_5 &= 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_6 = 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_7 &= 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_8 = 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_9 &= 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_{10} = 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_{11} &= 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_{12} = 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}]
 \end{aligned} \tag{5-1}$$

能動関節角度の時系列に主成分分析を適用する. ここでは, 以下のように能動関節角度の時系列  $\theta_a(t)$  に主成分分析を適用した.

$$\theta_a(t) = [\theta_{a1}(t) \quad \theta_{a2}(t) \quad \theta_{a3}(t)] \tag{5-2}$$

ここで,  $\theta_{a1}(t)$  ( $0 \leq t \leq t_{f1}$ ) は Task1 を行うときの能動関節角度の時系列,  $\theta_{a2}(t)$  ( $0 \leq t \leq t_{f2}$ ) は Task2 を行うときの能動関節の時系列,  $\theta_{a3}(t)$  ( $0 \leq t \leq t_{f3}$ ) は Task3 を行うときの能動関節角度の時系列であるとする. 式(5-2)で表される時系列に主成分分析を適用したときの各主成分の寄与率の値は, 表 5.1 のようになった.

表 5.1: 12 主成分の寄与率

Principal component	Contribution rate [%]
1	45.3
2	28.9
3	22.2
4	2.28
5	$8.89 \times 10^{-1}$
6	$3.06 \times 10^{-1}$
7	$4.67 \times 10^{-2}$
8	$2.24 \times 10^{-2}$
9	$9.86 \times 10^{-3}$
10	$2.87 \times 10^{-5}$
11	$1.17 \times 10^{-6}$
12	$6.80 \times 10^{-7}$

表 5.1 より, 第1主成分から第4主成分までで累積寄与率が99%を越えていることが分かる. このことから, 本章では 12 関節を 4 つのアクチュエータで駆動させるロボットハンドを設

計する。

## 5.3 PCA-based method による設計

### 5.3.1 線形従属劣駆動機構の設計

本節では、図 5.3 の 3 つのタスクを達成するロボットハンドを設計するが、各タスクでは対象物に加える部分の動作が重要なので、それらに関わる能動関節角度の時系列に重みづけをして線形従属劣駆動機構を設計する。式(5-3)のように能動関節角度の時系列に重みづけをした。式(5-3)の表記の意味に関しては、4.2.3 と 4.2.4 を参照されたい。

$$\theta_a(t) = [\theta_{a11}(t) \quad 25\theta_{a12}(t) \quad \theta_{a21}(t) \quad 50\theta_{a22}(t) \quad \theta_{a31}(t) \quad 25\theta_{a32}(t)] \quad (5-3)$$

ここで、 $\theta_{aij}(t)$ は  $i$  番目のタスクの Step  $j$  の能動関節角度の時系列を表すものとする。

### 5.3.2 リンク長さとはね定数の探索

4.3.1 で説明した手法でリンク長さとはね定数を設計する場合には、パラメータに制約条件を与える必要がある。本章の例題では、式(5-4)から式(5-10)のような制約条件を与えて設計問題を解くことにする。

$$\begin{aligned} l_{11} + l_{12} + l_{13} &= 10.5[\text{mm}] \\ l_{21} + l_{22} + l_{23} &= 10.5[\text{mm}] \\ l_{31} + l_{32} + l_{33} &= 10.5[\text{mm}] \end{aligned} \quad (5-4)$$

$$l_{11} \geq l_{12} \geq l_{13}, l_{21} \geq l_{22} \geq l_{23}, l_{31} \geq l_{32} \geq l_{33} \quad (5-5)$$

$$l_{11} \leq 2l_{12} \leq 4l_{13}, l_{21} \leq 2l_{22} \leq 4l_{23}, l_{31} \leq 2l_{32} \leq 4l_{33} \quad (5-6)$$

$$l_{11} \leq l_{12} + l_{13}, l_{21} \leq l_{22} + l_{23}, l_{31} \leq l_{32} + l_{33} \quad (5-7)$$

$$\begin{aligned} k_1 + k_2 + k_3 + k_4 &= 6.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\ k_5 + k_6 + k_7 + k_8 &= 6.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \end{aligned} \quad (5-8)$$

$$\begin{aligned} k_9 + k_{10} + k_{11} + k_{12} &= 6.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\ 1.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}] &\leq k_i \leq 2.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \end{aligned} \quad (5-9)$$

$$\begin{aligned} 35[\text{deg}] &\leq \phi_{11}, \phi_{12} \leq 45[\text{deg}] \\ 40[\text{deg}] &\leq \phi_{21}, \phi_{22} \leq 50[\text{deg}] \\ 30[\text{deg}] &\leq \phi_{31}, \phi_{32} \leq 40[\text{deg}] \end{aligned} \quad (5-10)$$

式(5-4)は、ロボットハンドの各指の全長を一定にする制約条件である。一般に、ベース近くのリンクの長さが長くなっていくと、手先の可動範囲が狭くなっていく。式(5-5)は、可動領域が狭くなりすぎないようにするための制約である。式(5-10)は、手先の初期姿勢に対する制約条件であり、手先が対象物の方を向くようにしている。しかし、先端のリンクが極端に短くなってしまうと、式(5-10)は意味をなくしてしまう。そこで、式(5-6)と式(5-7)の

ような制約条件を与えて、特定のリンクが極端に短くならないように制約を与えている。また、式(5-8)と式(5-9)はばね定数に関する制約条件である。このような制約を与えることで一部のばね定数が小さくなり過ぎないようにしている。また、リンク長さとはばね定数を探索するときの目的関数を以下のように与えた。

$$\begin{aligned} \Psi = & \int \|\mathbf{A}(\theta_{a11}(t), \xi)\|^2 dt + 5 \int \|\mathbf{A}(\theta_{a12}(t), \xi)\|^2 dt + \int \|\mathbf{A}(\theta_{a21}(t), \xi)\|^2 dt \\ & + 10 \int \|\mathbf{A}(\theta_{a22}(t), \xi)\|^2 dt + \int \|\mathbf{A}(\theta_{a31}(t), \xi)\|^2 dt + 5 \int \|\mathbf{A}(\theta_{a32}(t), \xi)\|^2 dt \end{aligned} \quad (5-11)$$

リンク長さとはばね定数の初期値は式(5-1)のように与え、4.3.1 で説明した方法でリンク長さとはばね定数を最適化すると、式(5-12)のようなパラメータが得られた。また、ここでは同時に指先の初期姿勢のパラメータ  $\phi_{ij}$  も最適化している。

$$\begin{aligned} l_{11} &= 43.1[mm], l_{12} = 32.8[mm], l_{13} = 29.1[mm] \\ l_{21} &= 38.8[mm], l_{22} = 35.0[mm], l_{23} = 31.2[mm] \\ l_{31} &= 43.1[mm], l_{32} = 35.0[mm], l_{33} = 26.9[mm] \\ \phi_{11} &= 38.7[\text{deg}], \phi_{12} = 38.7[\text{deg}], \phi_{13} = 38.7[\text{deg}] \\ \phi_{21} &= 43.8[\text{deg}], \phi_{22} = 46.2[\text{deg}], \phi_{23} = 43.8[\text{deg}] \\ \phi_{31} &= 36.3.0[\text{deg}], \phi_{32} = 36.3[\text{deg}], \phi_{33} = 36.3[\text{deg}] \\ k_1 &= 1.41[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_2 = 1.62[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\ k_3 &= 1.57[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_4 = 1.40[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\ k_5 &= 1.52[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_6 = 1.61[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\ k_7 &= 1.38[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_8 = 1.49[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\ k_9 &= 1.50[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_{10} = 1.46[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\ k_{11} &= 1.58[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_{12} = 1.46[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \end{aligned} \quad (5-12)$$

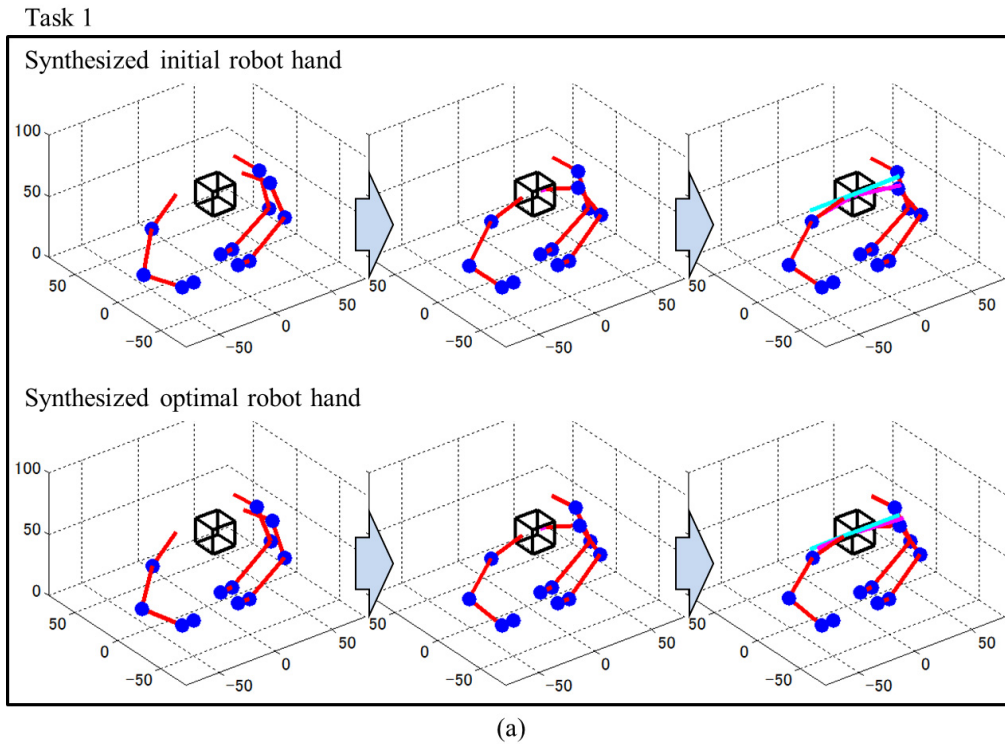
### 5.3.3 動作の評価

図 5.5 は、リンク長さとはばね定数の最適化前と最適化後の形状とその動作を示している。ここで、Synthesized initial robot hand はリンク長さとはばね定数を最適化前のロボットハンドのことであり、Synthesized optimal robot hand がリンク長さとはばね定数を最適化後のロボットハンドである。アクチュエータの操作量としては、設計に用いた寄与率の高い第 1 主成分から第 4 主成分を用いている。図 5.5 の Given force は、タスクの情報として与えられた力を示し、Actual force は、実際に設計されたロボットハンドが発揮する力を示している。

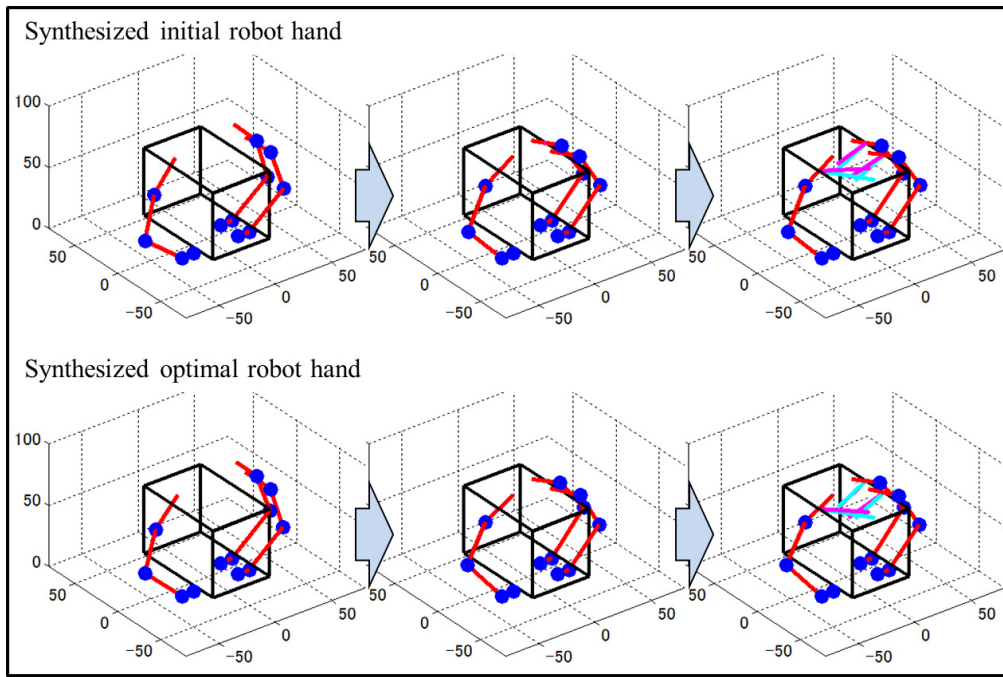
設計されたロボットハンドを評価するために式(5-13)のような評価関数を定義した。

$$\begin{aligned}
 e_{f1} &= \frac{\|f_{g1} - f_{a1}\|}{\|f_{g1}\|} \times 100 [\%] \\
 e_{f2} &= \frac{\|f_{g2} - f_{a2}\|}{\|f_{g2}\|} \times 100 [\%] \\
 e_{f3} &= \frac{\|f_{g3} - f_{a3}\|}{\|f_{g3}\|} \times 100 [\%]
 \end{aligned} \tag{5-13}$$

ここで、 $e_{f1}$ ,  $e_{f2}$ ,  $e_{f3}$  はそれぞれ、指1、指2、指3が発揮する力の誤差を評価する指標である。 $f_{g1}$ ,  $f_{g2}$ ,  $f_{g3}$  は、それぞれ指1、指2、指3が発揮する理想の力（タスクの情報として与えられた力）である。 $f_{a1}$ ,  $f_{a2}$ ,  $f_{a3}$  は、それぞれ線形従属劣駆動機構で駆動される左の指と右の指が発揮する力である。表5.2と表5.3は、タスク1とタスク2での $e_{f1}$ ,  $e_{f2}$ ,  $e_{f3}$ の値を示している。また、表5.4はタスク3でロボットハンドが回転させた円柱の角度を示している。ここでは、設計されたPCDMは4つのアクチュエータと線形従属劣駆動機構により駆動されていることに注意する。

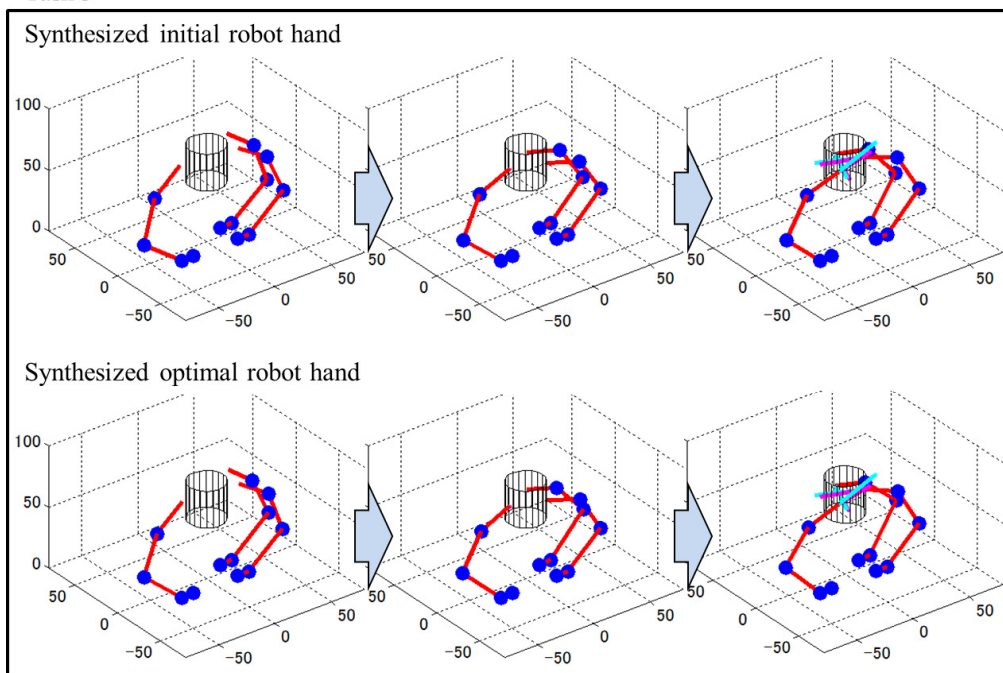


Task 2



(b)

Task 3



(c)

— Given force  
— Actual force

図 5.5: 設計された PCDM (4 主成分)

表 5.2: タスク 1 の誤差 (PCDM: 4 主成分)

	$e_{j1}$ [%]	$e_{j2}$ [%]
Synthesized initial robot hand	12.9	16.0
Synthesized optimal robot hand	7.88	10.3

表 5.3: タスク 2 の誤差 (PCDM: 4 主成分)

	$e_{j1}$ [%]	$e_{j2}$ [%]	$e_{j3}$ [%]
Synthesized initial robot hand	17.7	18.7	17.3
Synthesized optimal robot hand	12.4	16.7	3.71

表 5.4: タスク 3 での対象物の回転角度[deg] (PCDM: 4 主成分)

Synthesized initial robot hand	30.4
Synthesized optimal robot hand	30.8

表 5.2 と表 5.3 よりタスク 1 とタスク 2 において, リンク長さとはね定数の最適化前に比べて最適化後の方がいずれのタスクでも誤差が小さくなっていることが分かる. また表 5.4 より, タスク 3 では, 定義したタスク通りに円柱型の対象物を約 30[deg]回転させている.

### 5.3.4 アクチュエータに必要なトルク

4.2.5 で説明したように, 線形従属劣駆動機構を用いたロボットハンドを設計すると各関節にかかるトルクの線形和がアクチュエータにかかることになる. 表 5.5 には, Synthesized optimal robot hand のアクチュエータにかかるトルクを示した. ここで,  $A_i$  は  $i$  番目の主成分に対応したアクチュエータであるとする.

表 5.5: アクチュエータに必要なトルク[N·m] (PCDM: 4 主成分)

A1	A2	A3	A4
0.123	0.113	0.510	0.0754

## 5.4 BPLP-based method による設計

### 5.4.1 線形従属劣駆動機構の設計

BPLP-based method を用いた設計では, あらかじめ設計に用いる能動関節角度の時系列を選択する. 本節では, 関節  $\theta_1, \theta_2, \theta_7, \theta_{10}$  の能動関節角度が選択された場合について説明する. 線形従属劣駆動機構のパラメータを決めるときには, 式(5-3)の時系列を用いた.

### 5.4.2 リンク長さとはね定数の探索

リンク長さとはね定数を探索するときの目的関数は、式(5-1)のように与えた。4.3.2 の設計方法に従ってリンク長さとはね定数を設計すると、式(5-14)のようなパラメータが得られた。また、ここでは同時に指先の初期姿勢のパラメータ  $\phi_{ij}$  も最適化している。

$$\begin{aligned}
 l_{11} &= 46.5[mm], l_{12} = 31.7[mm], l_{13} = 26.8[mm] \\
 l_{21} &= 43.0[mm], l_{22} = 33.0[mm], l_{23} = 29.0[mm] \\
 l_{31} &= 52.5[mm], l_{32} = 29.5[mm], l_{33} = 23.0[mm] \\
 \phi_{11} &= 40.0[\text{deg}], \phi_{12} = 40.0[\text{deg}], \phi_{13} = 40.0[\text{deg}] \\
 \phi_{21} &= 45.0[\text{deg}], \phi_{22} = 45.0[\text{deg}], \phi_{23} = 40.0[\text{deg}] \\
 \phi_{31} &= 45.0[\text{deg}], \phi_{32} = 45.0[\text{deg}], \phi_{33} = 40.0[\text{deg}] \\
 k_1 &= 2.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_2 = 1.55[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_3 &= 1.45[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_4 = 1.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_5 &= 2.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_6 = 2.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_7 &= 1.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_8 = 1.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_9 &= 1.96[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_{10} = 1.14[\text{N} \cdot \text{m/rad}] \\
 k_{11} &= 1.90[\text{N} \cdot \text{m/rad}], k_{12} = 1.00[\text{N} \cdot \text{m/rad}]
 \end{aligned} \tag{5-14}$$

### 5.4.3 動作の評価

図 5.6 は、リンク長さとはね定数の最適化前と最適化後の形状とその動作を示している。そして、表 5.6 と表 5.7 は、タスク 1 とタスク 2 での  $e_{\beta}$ ,  $e_{\rho}$ ,  $e_{\beta}$  の値を示している。また、表 5.8 はタスク 3 でロボットハンドが回転させた円柱の角度を示している。ここでは、設計された BPDM は 4 つのアクチュエータと線形従属劣駆動機構により駆動されていることに注意する。

表 5.6: タスク 1 の誤差 (BPDM: 選択された関節  $\theta_1, \theta_2, \theta_7, \theta_{10}$ )

	$e_{\beta}$ [%]	$e_{\rho}$ [%]
Synthesized initial robot hand	26.5	35.9
Synthesized optimal robot hand	19.6	24.1

表 5.7: タスク 2 の誤差 (BPDM: 選択された関節  $\theta_1, \theta_2, \theta_7, \theta_{10}$ )

	$e_{\beta}$ [%]	$e_{\rho}$ [%]	$e_{\beta}$ [%]
Synthesized initial robot hand	25.3	43.3	63.3
Synthesized optimal robot hand	24.3	43.4	25.5

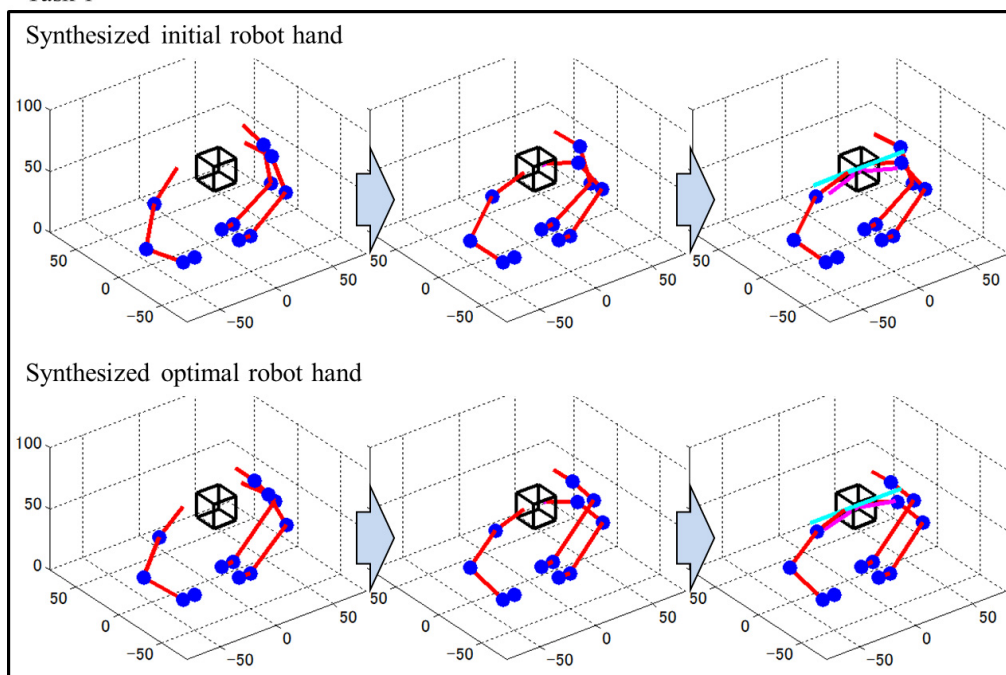
表 5.8: タスク 3 での対象物の回転角度[deg] (BPDM: 選択された関節  $\theta_1, \theta_2, \theta_7, \theta_{10}$ )

Synthesized initial robot hand	25.7
Synthesized optimal robot hand	26.5



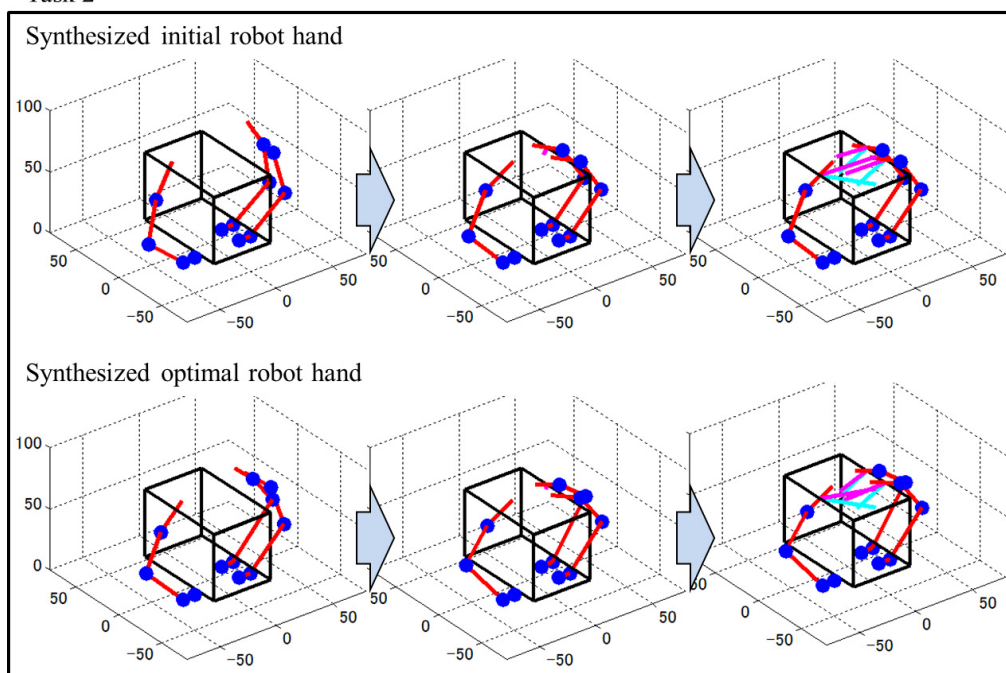
表 5.6 と表 5.7 よりタスク 1 とタスク 2 において，リンク長さとはばね定数の最適化前に比べて最適化後の誤差が小さくなっていることが分かる．また，表 5.8 よりタスク 3 ではリンク長さとはばね定数を探索したことにより，回転角が  $30[\text{deg}]$  に近づいた．

Task 1



(a)

Task 2



(b)

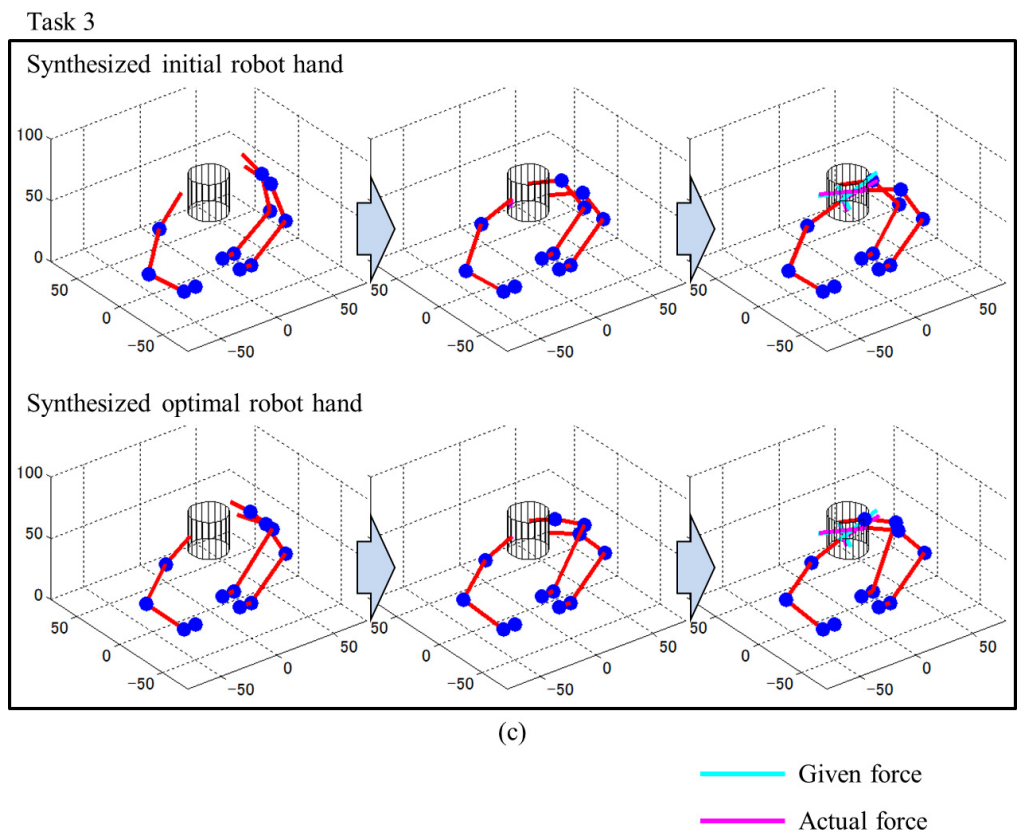


図 5.6: 設計された BPDM (選択された関節  $\theta_1, \theta_2, \theta_7, \theta_{10}$ )

5. 4. 4 アクチュエータに必要なトルク

5.4.3 と同様に、アクチュエータにかかるトルクを算出する. 表 5.9 には, Synthesized optimal robot hand のアクチュエータにかかるトルクを示した. ここで,  $A_i$  は  $i$  番目の能動関節角度に対応したアクチュエータであるとする.

表 5.9: アクチュエータに必要なトルク [N・m] (BPDM: 選択された関節  $\theta_1, \theta_2, \theta_7, \theta_{10}$ )

A1	A2	A7	A10
0.305	0.582	0.301	0.165

5. 5 本章のまとめ

本章では、第 4 章で説明したタスクが運動学と静力学で定義される場合のメカニズムの設計手法を、義手として用いることを想定した 3 次元のロボットハンドの設計に用いた. 第 1 章の 1.2.4 から、義手に求められる機能は大きく分けて 2 つあることがわかった. それらは、形状や大きさの異なる対象物を把握することと対象物を把握したまま操り動作がで

きることである。しかし、これまでに提案された劣駆動機構をもつロボットハンドのほとんどは1種類の把握動作しかできないものであった。本設計例では、3本の指をもち、各指には4つの関節があるロボットハンドを設計した。また、達成させるタスクとしては2本の指先で小さな対象物を把握する動作と3本の指で対象物を把握する動作と円柱型の対象物を3本の指で把握してひねる動作という性質の異なる3種類のものを与えた。PCA-based method と BPLP-based method で設計された2種類のロボットハンドを示し、そのリンク長さとはばね定数を設計することで、元のタスクの運動を近似できることを確かめた。また、設計されたロボットハンドは、弾性要素をメカニズム中にもっていることで少々の誤差があってもタスクを達成できる。そのことをシミュレーションによって確かめた。設計されたロボットハンドは、駆動する関節が12であるのに対し、アクチュエータの数は4にして設計した。関節数に対して3分の1までアクチュエータ数を減らすことができた。本研究の手法で設計されたロボットハンドでは、各関節にかかるトルクはメカニズム中のすべてのアクチュエータに分配される。設計されたロボットハンドのアクチュエータに必要なトルクも算出した。

今後の課題としては、義手として実際に使う状況を想定して、より多様な対象物を把握したり操ったりできるように設計されているか検証することや多点接触を伴う場合のシミュレーションなどがある。また、把握した対象物を安定して把握し続けられるような制御方法を考える必要もある。



## 第6章

## 結論

### 6.1 本論文のまとめ

義手は、上肢の機能や外観の再現を目的とした義肢であり、上肢切断者に広く利用されている。現在、上肢切断者の症状や生活環境、使用目的に合わせた様々な種類の義手が存在する。日本では、外観のみの再現を主目的とした装飾用義手が特に多く利用されている。義手の中には、機能と外観の両方を考慮し、人間の意図を筋電信号で推定してバッテリーのエネルギーで駆動する筋電義手もある。しかし、日本国内では利用者はなかなか増えていかない。人間の手は、多自由度な構造をしている。そして、その特徴を生かして様々な対象物を把握したり、操ったりすることができる。だが、これまでに販売されている筋電義手の多くは低自由度で非常に単純な機構で設計されていて、そのようなタスクを達成することはできない。

人間の手の機能を再現することを目指したロボットハンドの研究は、数十年に渡り行われてきた。これまでに、人間の手の指のような関節の機構をもち、各関節をそれぞれ独立したアクチュエータで駆動させる方式のロボットハンドが多く研究されてきた。各関節を個別のアクチュエータで駆動させると、各関節を高精度に制御できるという利点がある。しかし、そのような設計コンセプトのロボットハンドは、そのまま義手へ転用することはできない。なぜなら、現在ロボットに用いられているような電動モータなどのアクチュエータは人間の筋肉に比べて出力重量比が低く、利用者が可搬できる重量に制限しながら作

業に十分な出力を得ることが難しいためである。

近年、劣駆動機構をもつロボットハンドの研究も盛んに行われている。ここで、劣駆動機構とは、入力次元より出力次元の方が高い機構のことである。劣駆動機構を用いることによって、駆動する関節数に対してアクチュエータの数を低く抑えることができる。また、多くの劣駆動機構をもつロボットハンドは、関節の部分に弾性要素を与えることにより機構自体に柔軟性をもたせている。それにより、単純な制御でも握力把握などを容易にしている。しかし、劣駆動機構を系統的に設計する方法はこれまでに提案されていない。そのため、複数の種類の把持動作、例えば、精密把握と握力把握の両方を達成できる劣駆動ロボットハンドを設計することは難しかった。

本研究では、義手用ロボットハンドをできるだけ低質量に設計するための手法を提案することを目指した。先に述べたように、義手用のロボットハンドを低質量に設計しようと考える場合、アクチュエータを数多く用いることはできない。しかし、日常生活では様々な大きさや形状の対象物を把握したり、操ったりする必要があるので関節数を極端に抑えることもできない。そこで、新たな劣駆動機構をもつメカニズムを設計する方法を提案し、義手用ロボットハンドへの適用することを考える。劣駆動機構をもつメカニズムは、各関節を独立に駆動させることができないため、あらゆる運動を作業領域内で達成できるわけではない。そのため、タスクに必要な関節の運動ができるように設計しないと、無意味なものを設計することになってしまう。そこで、本研究では、タスクベースなアプローチによる設計方法を提案した。

第2章ではまず、本研究で設計する劣駆動機構をもつメカニズムの概要について述べた。ここでの劣駆動機構は、低次元なアクチュエータの変位を線形加算して高次元な出力に変換するという機能をもつ。本論文では、その機構を線形従属劣駆動機構とよぶ。線形従属劣駆動機構を少数のアクチュエータと多関節マニピュレータの間に入れることにより、メカニズムを構成する。また、新しい線形従属劣駆動機構の実現方法を提案した。まず、比較のために既存の考え方で実現する方法について述べた。その方法で実現される機構は、流体を用いた機構である。複数の断面積の異なるシリンダとピストンで構成されている。シリンダをつないでいるパイプが変位の加算器の役割を果たしている。シリンダの断面積の比を変更することによって、アクチュエータの変位の重みづけを変更することができる。ただ、流体駆動の機構は、駆動源を可搬にすることや騒音を抑制することが難しい。そこで、ワイヤープリー系の機構での新たな線形従属劣駆動機構の実現方法についても説明した。その方法で実現される機構内には複数の動滑車と定滑車がある。動滑車が変位の加算器の役割を果たしている。アクチュエータに接続されるプリーの直径の比を変更することにより、アクチュエータの角度の重みづけを変更することができる。

第3章では、タスクが運動学で定義されて与えられる場合に、第2章で説明した劣駆動機構をもつメカニズムを設計する方法について述べた。ここで与えられるタスクは、マニピュレータの手先の軌道で定義された。第3章で説明した手法では、はじめは各関節が独

立したアクチュエータに接続されていて、正確に位置制御されている多関節なマニピュレータを仮定する。そして、そのマニピュレータがタスクを正確に達成するときの関節角度の時系列を計算する。その関節角度の時系列を低次元空間に射影し、運動を低次元化する。第3章では、設計に用いることができる低次元化の方法を2つ紹介した。1つ目の方法は、主成分分析(Principal Component Analysis)を用いた方法である。2つ目の方法は、BPLP(Back Projection for Lost Pixels)法を用いた方法である。BPLP法とは、元々は欠損情報のある画像を復元するための手法である。いずれの方法で低次元化した場合も、低次元な独立変数の時系列を線形変換することで元の高次元な関節角度の時系列を近似的に表すことができる。主成分分析で低次元化した場合の独立変数は主成分であり、BPLP法で低次元化した場合の独立変数は関節角度である。そして、ここでは低次元化のときに得られる変換行列を線形従属劣駆動機構のパラメータとして用いる。本論文では、主成分分析を用いて設計されたメカニズムをPCDM(Principal Component Drive Mechanism)、BPLP法を用いて設計されたメカニズムをBPDM(Back Projection for lost joints Drive Mechanism)とよぶ。PCDMとBPDMを比較すると、PCDMの方がBPDMより高精度にタスクを達成できる。設計されたPCDMを動作させる場合、アクチュエータの操作量は、設計に用いられた主成分である。また、設計されたBPDMを動作させる場合のアクチュエータの操作量は、設計に用いられた関節角度である。そのため、PCDMの線形従属劣駆動機構では、アクチュエータの変位をすべての関節角度に変換しなければならない。一方で、BPDMの線形従属劣駆動機構は、アクチュエータの変位を低次元化のときに独立変数として用いなかった関節角度のみ変換すればよい。そのため、BPDMの線形従属劣駆動機構よりもPCDMの線形従属劣駆動機構の方が複雑になる。さらに第3章では、運動の低次元化によって生じる復元誤差を最小にするようなリンク長さを最適化問題で探索する方法についても説明した。最後に、設計した機構を用いてシミュレーションを行い、小さな近似誤差でタスクを達成できることを示した。

第4章では、タスクが運動学と静力学で定義される場合に、メカニズムを設計する方法について述べた。設計されるメカニズムは、第2章で説明したメカニズム中に弾性要素を加えている。ここで与えられるタスクは、マニピュレータの手先のリンクの軌道と手先が対象物に加える接触力で定義された。第4章で説明している手法では、はじめは各関節が独立なアクチュエータに線形ばねを介して接続されていて、各アクチュエータは正確に位置制御ができるマニピュレータを仮定する。弾性要素を含むマニピュレータでは、運動学と静力学の問題が連成する。その性質を利用して、マニピュレータの手先の位置を決めるための関節角度の時系列と対象物に力を加えるための関節角度の時系列を同時に低次元化して劣駆動機構を設計する方法について説明した。低次元化の方法は、第3章で説明した2種類の低次元化方法を用いた。それから、リンク長さとはばね定数を設計することにより、運動低次元化によって生じる復元誤差を最小にするように設計する。第3章では、単一タスクを達成するメカニズムの設計方法しか扱っていなかったが、第4章では、複数のタスクを達成するメカニズムを設計するときの関節角度の時系列の扱い方についても説明した。

そして、同様の考え方を利用して、複数のタスクを定義した場合にタスクの重要度を考慮した重みづけをする方法についても説明した。最後に、シミュレーションを用いて設計例を示すことにより、本提案手法の有効性を示した。本章での設計例では、2つの異なるタスクを達成する単一の2次元ロボットハンドを設計した。リンク長さとはばね定数の最適化やタスクの重みづけをすることにより、運動の低次元化に伴う誤差を小さくした。第4章で提案された設計手法で設計されたメカニズムは、弾性要素をメカニズム中にもっていることで少々の誤差があってもタスクを達成できる。そのことをシミュレーションによって確かめた。

最後に第5章では、第4章で説明した設計手法を用いて、実際に義手を設計することを想定した3次元のロボットハンドの設計例について述べた。第5章で設計したロボットハンドは、3本の指をもち、各指に4つの関節をもっている。各指の関節は、人間の指を模擬するように与えた。実際の義手には、様々な対象物を把握したり、操ったりすることができなどの機能が求められる。ここでの設計例では、2本の指先で小さな対象物を把握する動作と3本の指で抱え込むように大きな対象物を把握する動作と円柱型の対象物を3本の指の先で把握してそのままひねる動作の3つをタスクとして与えた。第5章では、4つのアクチュエータで駆動するロボットハンドを設計した。シミュレーションにより、設計された3次元元のロボットハンドが設定されたタスクの運動を達成できることを確かめた。本研究の手法で設計されたロボットハンドでは、各関節にかかるトルクはメカニズム中のすべてのアクチュエータに分配される。そこで、第5章で設計されたロボットハンドのアクチュエータに必要なトルクを算出した。

## 6.2 今後の課題

### 6.2.1 動力学への拡張

本論文では、運動学と静力学のみを考慮した設計問題を扱った。設計したメカニズムが、大きな速度で駆動しない場合はこれまでの設計方法でも問題は少ないと考えられるが、大きな速度で駆動させた場合には慣性力などが大きく影響を与えるため問題が生じる可能性が高い。本論文の内容では、劣駆動メカニズムの設計に関節角度の時系列を用いた。しかし、動力学まで問題を拡張する場合は、速度の次元の変数を扱わなくてはならない。また、3章でタスクに合わせた弾性要素の設計方法を説明したが、動力学まで扱う問題では粘性要素も考慮に入れる必要がある。

### 6.2.2 制御方法の検討

本論文で設計したメカニズムは、劣駆動機構をもっていて各関節を独立に制御すること



はできない。そのため、各関節を独立に駆動させられるロボットハンドの制御方法をそのまま適用することはできない。本論文で行ったシミュレーションでは、設計されたメカニズム中のアクチュエータの操作量は、設計に用いた主成分や関節角度の時系列であり、各アクチュエータは正確に制御されているとして評価した。しかし、実際に制御する場合にはそれだけでは上手く駆動しない。例えば、対象物を把握する場合には、外乱に対して安定するように制御する必要がある。実際に制御する場合は、メカニズムの設計に用いた低次元空間を上手く用いて制御する必要がある。ロボットハンドにつけられたセンサから作業座標空間での状態を推定し、関節角度の目標値を決め、低次元空間へ射影してアクチュエータの操作量を決める必要がある。

### 6.2.3 プロトタイプ製作

第2章では、本研究の設計手法に必要な劣駆動機構の実現方法を説明した。また、第3章から第5章では、劣駆動機構をもつロボットハンドの設計方法と設計例を示した。それらに基づいてプロトタイプのロボットハンドを設計する。本研究の目的は、義手用ロボットハンドを設計することである。アクチュエータは、一般に出力を大きくしようとすると体積や質量が大きくなってしまうので、アクチュエータの数を減らして設計できる本研究のロボットハンドは低質量になると考えられる。問題は、どれだけ体積を小さくできるかということである。第2章で説明したワイヤープリー系の機構では、アクチュエータに接続されたプリーの径の比率でその機能が決まる。そのため、劣駆動機構の各部品をできるだけ小さくして、変位を加算する機構の部分をできるだけ小型化する必要がある。



## 参考文献

- [1] 厚生労働省社会・援護局障害保健福祉部, 平成 18 年度身体障害児・者実態調査結果:  
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/list/108-1.html> (2013 年 1 月 7 日)
- [2] 川村次郎(編), 義肢装具学 第 3 版, 医学書院, 2004.
- [3] 伊藤利之, 江藤文夫(編), 新版 日常生活活動(ADL) 評価と支援の実際, 医歯薬出版,  
2010.
- [4] 中島咲哉, “義手の現状と問題点”, 日本義肢装具学会誌, Vol. 20, No. 1, pp. 7-15, 2004.
- [5] 澤村誠志, 切断と義肢 第 4 版, 医歯薬出版, 1999.
- [6] 東原孝典, “今日の義手”, 日本義肢装具学会誌, Vol. 17, No. 4, pp. 228-233, 2001.
- [7] 川村次郎, “筋電義手の普及への展望”, 日本義肢装具学会誌, Vol. 17, No. 4, pp. 257-261,  
2001.
- [8] 大西謙吾, “電動義手の国外の動向”, 日本義肢装具学会誌, Vol. 26, No. 2, pp. 78-81, 2010.
- [9] E. D. Sherman, “A Russian Bioelectric-Controlled Prosthesis: Report of a Research Team from  
the Rehabilitation Institute of Montreal”, Canadian Medical Association Journal, Vol. 91, No. 24,  
pp. 1268-1270, 1964.
- [10] 西岡研一, “前腕用筋電義手ワイムハンド(WIME HAND)”, 日本義肢装具学会誌, Vol. 9,  
No. 4, pp. 347-351, 1993.
- [11] 原田電子工業: <http://www.h-e-i.co.jp> (2013 年 1 月 7 日)
- [12] Touch Bionics, Inc.: <http://www.touchbionics.com> (accessed 7 Jan 2013)
- [13] Otto bock: <http://www.ottobock.com> (accessed 7 Jan 2013)
- [14] Liberating Technology, Inc.: <http://www.liberatingtech.com> (accessed 7 Jan 2013)
- [15] Motion Control, Inc.: <http://www.utaharm.com> (accessed 7 Jan 2013)
- [16] 野村巖(編), 解剖学 第 3 版, 医学書院, 2010.
- [17] 上羽康夫, 手 その機能と解剖 改訂 3 版, 金芳堂, 1996.
- [18] D. A. Neumann(著), 嶋田智明, 有馬慶美(訳), 筋骨格系のキネシオロジー 原著第 2 版,  
医歯薬出版, 2012.
- [19] 米本恭三, 石神重信, 近藤徹, “関節可動域表示ならびに測定法”, リハビリテーション  
医学, Vol. 32, No. 4, pp. 207-217, 1995.
- [20] シグネ・ブルンストーム(著), 田口順子他(訳), 臨床運動学, 医歯薬出版, 1969.
- [21] C. L. Taylor and R. J. Schwarz, “The Anatomy and Mechanics of the Human Hand”, Artificial  
limbs, Vol. 2, No. 2, pp. 22-35, 1955.
- [22] J. R. Napier, “The Prehensile Movements of the Human Hand”, The Journal of Bone and Joint  
Surgery, Vol. 38B, No. 4, pp. 902-913, 1956.

- [23] 鎌倉矩子, 大村道子, 石井晴美, 三星文子, 三浦頼子, “健常手の把握様式: 分類の試み”, *リハビリテーション医学*, Vol. 15, No. 2, pp. 65-82, 1978.
- [24] M. R. Cutkosky, “On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 3, pp. 269-279, 1989.
- [25] J. Z. Zheng, S. De La Rosa, and A. M. Dollar, “An Investigation of Grasp Type and Frequency in Daily Household and Machine Shop Tasks”, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4169-4175, 2011.
- [26] J. M. Elliott and K. J. Connolly, “A Classification of Manipulative Hand Movements”, *Developmental Medicine and Child Neurology*, Vol. 26, No. 3 pp. 283-296, 1984.
- [27] 鎌倉矩子, 三星文子, 浅海奈津美, 中田真由美, “物体の操作における健常手の動きのパターン”, *リハビリテーション医学*, Vol. 23, No. 2, pp. 59-67, 1986.
- [28] I. M. Bullock and A. M. Dollar, “Classifying Human Manipulation Behavior”, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 532-537, 2011.
- [29] C. M. Light, P. H. Chappell, and P. J. Kyberd, “Establishing a Standardized Clinical Assessment Tool of Pathologic and Prosthetic Hand Function: Normative Data Reliability, and Validity”, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, Vol. 83, No. 6, pp.776-783, 2002.
- [30] SHAP: <http://www.shap.ecs.soton.ac.uk/index.php> (accessed 7 Jan 2013)
- [31] S. A. Dalley, D. A. Bennett, and M. Goldfarb, “Preliminary Functional Assessment of a Multigrasp Myoelectric Prosthesis”, *Proceedings of the 34th IEEE EMBS Annual International Conference*, pp. 4172-4175, 2012.
- [32] Y. Nakamura, K. Yamane, and A. Murai, “Macroscopic Modeling and Identification of the Human Neuromuscular Network”, *Proceedings of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference*, pp. 99-105, 2006.
- [33] Y. Kim, Y. Tagawa, G. Obinata, and K. Hase, “Robust control of CPG-based 3D neuromusculoskeletal walking model”, *Biological Cybernetics*, Vol. 105, No. 3-4, pp.269-282, 2011.
- [34] 三嶋賢一, 金田さやか, 中西弘明, 堀口由貴男, 榎木哲夫, “特異値分解を用いた動作における個人間の類似と差異の抽出”, 第 52 回自動制御連合講演会, F1-3, 2009.
- [35] M. Santello, M. Flanders, and J. F. Soechting, “Postural Hand Synergies for Tool Use”, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 18, No. 23, pp. 10105-10115,1998.
- [36] 寺地翔太, 大日方五郎, 長谷和徳, 中山淳, 加藤宏記, “ジェスチャー・インターフェースによるロボットの操縦”, *Dynamics and Design Conference 2006*, pp.551-1-551-4, 2006.
- [37] T. Okada, “Object-Handling System for Manual Industry”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-9, No. 2, pp. 79-89, 1979.
- [38] T. Okada, “Computer Control of Multijointed Finger System for Precise Object-Handling”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-12, No. 3, pp. 289-298, 1982.

- [39] J. K. Salisbury and J. J. Craig, "Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 4-17, 1982.
- [40] S. C. Jacobsen, J. E. Wood, D. F. Knutti, and K. B. Biggers, "The UTAH/M.I.T. Dexterous Hand: Work in Progress", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 21-50, 1984.
- [41] H. Liu, J. Butterfass, S. Knoch, P. Meusel, and G. Hirzinger, "A New Control Strategy for DLR's Multisensory Articulated Hand", *IEEE Control Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 47-54, 1999.
- [42] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, L. Biagiotti, and C. Melchiorri, "UBH 3: an Anthropomorphic Hand with Simplified Endo-Skeletal Structure and Soft Continuous Fingerpads", *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4736-4741, 2004.
- [43] Y. Kurita, Y. Ono, A. Ikeda, and T. Ogasawara, "Human-sized anthropomorphic robot hand with detachable mechanism at the wrist", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 46, No. 1, pp. 53-66, 2011.
- [44] H. Kawasaki, T. Komatsu, and K. Uchiyama, "Dexterous Anthropomorphic Robot Hand With Distributed Tactile Sensor: Gifu Hand II", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 7, No. 3, pp. 296-303, 2002.
- [45] 金子真, "器用な多指ロボットハンドの開発", *日本ロボット学会誌*, Vol. 16, No. 5, pp. 617-619, 1998.
- [46] 小俣透, 永田和之, "多指ハンドによるパワーグラスプの力学的特性", *日本ロボット学会誌*, Vol. 13, No. 4, pp. 525-531, 1995.
- [47] 川崎晴久, *ロボットハンドマニピュレーション*, 共立出版, 2009.
- [48] S. Hirose and Y. Umetani, "The Development of Soft Gripper for the versatile robot hand", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 13, No. 3, pp. 351-359, 1978.
- [49] T. Takaki and Toru Omata, "High Performance Anthropomorphic Robot Hand with Grasp Force Magnification Mechanisms", *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1697-1703, 2009.
- [50] B. Massa, S. Roccella, M. C. Carrozza, and P. Dario, "Design and Development of an Underactuated Prosthetic Hand", *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002.
- [51] A. M. Dollar and R. D. Howe, "The SDM Hand as a Prosthetic Terminal Device: A Feasibility Study", *Proceedings of the 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 978-983, 2007.
- [52] C. Y. Brown and H. H. Asada, "Inter-Finger Coordination and Postural Synergies in Robot Hands via Mechanical Implementation of Principal Components Analysis", *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2877-2882, 2007.

- [53] L. Zollo, S. Roccella, E. Guglielmelli, M. C. Carrozza, and P. Dario, "Biomechatronic Design and Control of Anthropomorphic Artificial Hand for Prosthetic and Robotic Applications", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, No. 4, 2007.
- [54] C. Gosselin, F. Pelletier, and T. Lalibert , "An Anthropomorphic Underactuated Robotic Hand with 15 Dofs and a Single Actuator", Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 749-754, 2008.
- [55] 神川康久, 前野隆司, "ヒトの把持力分布を模倣した5指なじみ機構を有する義手の開発", 日本機械学会論文集(C編), Vol. 74, No. 746, pp. 2542-2548, 2008.
- [56] S. A. Dalley, T. E. Wiste, T. J. Withrow, and M. Goldfarb, "Design of a Multifunctional Anthropomorphic Prosthetic Hand With Extrinsic Actuation", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 14, No. 6, pp. 699-706, 2009.
- [57] M. Ciocarlie and P. Allen, "Data-driven Optimization for Underactuated Robotic Hands", Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1292-1299, 2010.
- [58] L. U. Odhner, R. R. Ma, and A. M. Dollar, "Precision Grasping and Manipulation of Small Objects from Flat Surfaces using Underactuated Fingers", Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2830-2835, 2012.
- [59] G. Grioli, M. Catalano, E. Silvestro, S. Tono, and A. Bicchi, "Adaptive Synergies: an approach to the design of under-actuated robotic hands", Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1251-1256, 2012.
- [60] L. Birglen and C. M. Gosselin, "Kinetostatic Analysis of Underactuated Fingers", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 20, No. 2, pp. 211-221, 2004.
- [61] C. Meijneke, G. A. Kragten, and M. Wisse, "Design and performance assessment of an underactuated hand for industrial applications", Mechanical Sciences, Vol. 2, No. 1, pp. 9-15, 2011.
- [62] 石塚康考, 小金澤鋼一, "複合遊星ギアを用いたロボットフィンガの新機構", 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 6, pp.699-710, 2008.
- [63] M. Ciocarlie and P. Allen, "A Design and Analysis Tool for Underactuated Compliant Hands", Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5234-5239, 2009.
- [64] R. Balasubramanian and A. M. Dollar, "A Comparison of Workspace and Force Capabilities between Classes of Underactuated Mechanisms", Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011.
- [65] D. Prattichizzo, M. Malvezzi, M. Gabiccini, A. Bicchi, "On the manipulability ellipsoids of underactuated robotic hands with compliance", Robotics and Autonomous Systems, Vol. 60, No. 3, pp. 337-346, 2012.

- [66] 伊藤茂, メカニズムの事典, 理工学社, 1983.
- [67] 安田仁彦, 機構学, コロナ社, 2005.
- [68] 武藤高義, アクチュエータの駆動と制御, コロナ社, 1992.
- [69] 川村貞夫, 野方誠, 田所諭, 早川恭弘, 松浦貞裕, 制御用アクチュエータの基礎, コロナ社, 2006.
- [70] 田中豊, 脇本和昌, 多変量統計解析法, 現代数学社, 1983.
- [71] 上田尚一, 主成分分析, 朝倉書店, 2003.
- [72] B. C. Moore, “Principal Component Analysis in Linear System: Controllability, Observability, and Model Reduction”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 26, No. 1, pp. 17-32, 1981.
- [73] M. Okada, K. Tatani, and Y. Nakamura, “Polynomial Design of the Nonlinear Dynamics for the Brain-Like Information Processing of Whole Body Motion”, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1410-1415, 2002.
- [74] T. Amano and Y. Sato, “Image Interpolation Using BPLP Method on the Eigenspace”, Systems and Computers in Japan, Vol.38, No.1, pp.87-96, 2007.
- [75] 田中章, 宮腰政明, “線形推定理論に基づく固有空間 BPLP 法の改善”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J90-D, No. 10, pp. 2840-2847, 2007.
- [76] 吉川恒夫, ロボット制御基礎論, コロナ社, 1988.
- [77] 吉川恒夫, “ロボットアームの可操作度”, 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 1, pp. 63-67, 1984.
- [78] 内山勝, 清水邦敏, 箱守京次郎, “ヤコビ行列式によるロボットアームの機構評価”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 21, No. 2, pp. 82-88, 1985.
- [79] 小笠原伸二, 平元和彦, 土岐仁, “ロボットマニピュレータの LMI による機構設計法とゲインスケジューリング手法を用いた構造・制御系の同時最適設計”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 11, pp. 1216-1223, 2006.
- [80] 坂和正敏, 数理計画法の基礎, 森北出版, 1999.
- [81] 茨木俊英, 福島雅夫, 最適化の手法, 共立出版, 1993.
- [82] 齋藤正彦, 線型代数入門, 東京大学出版, 1966.
- [83] J. J. Craig (著), 三浦宏文, 下山勲 (訳), ロボティクス, 共立出版, 1991.
- [84] Y. Imai, G. Obinata, and K. Hase, “Analysis on Kinematic and Statics of Redundant Parallel Link Manipulators with Passive Joints”, Proceeding of the 2007 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, pp. 472-477, 2007.





## 謝辞

本研究を進めるにあたり、長きに渡って多大なる御指導と御鞭撻を賜りました名古屋大学エコトピア科学研究所の大日方五郎教授に深く感謝の意を表します。大日方教授には、御多忙な身であるにも関わらず、幾度となく研究に関して相談に乗って頂き、数多くの貴重で的確な御助言を頂きました。

また、本論文を審査して下さいとともに、貴重な御助言を頂きました名古屋大学大学院工学研究科の山田克彦教授、山田陽滋教授、新井史人教授に深く感謝を申し上げます。

英語での投稿論文作成の際には、Coventry University の Dr. Dimitar Stefanov に大変お世話になりました。心より感謝を申し上げます。また、Korea Institute of Machinery & Materials の Dr. Youngwoo Kim と名古屋大学大学院工学研究科の長井力 COE 特任助教には、研究の進め方全般について相談に乗って頂き、大変お世話になりました。心より御礼を申し上げます。首都大学東京の長谷和徳教授、名古屋大学グリーンモビリティ連携研究センターの竹原昭一郎特任講師、同大学エコトピア科学研究所の山本江助教には研究室セミナーにおいて御助言を頂きました。心より感謝致します。名古屋大学大学院医学系研究科の平田仁教授と山本美知郎助教には、医学的な見地からの人間の手に関する貴重な御意見を頂きました。心より感謝致します。

そして、博士課程で研究活動をするにあたり、グローバル COE から多大な支援を受けました。おかげで多くの海外の研究者と交流することができ、大変刺激になりました。ここに心から感謝の意を表します。

それから、研究室の先輩、同期、後輩の皆様に感謝致します。皆様のおかげで、大変充実した研究室生活を送ることができました。

最後に、私の学生生活を温かく見守って下さった両親に感謝の意を表します。

鎌田翔一郎



## 本論文に関する発表論文

論文題目	公表の方法及び時期	著者
I. 学会誌		
1 A Study of the Underactuated Mechanisms with Compliance	Advances in Robotics and Automation (Accepted)	<u>Shoichiro Kamada</u> Goro Obinata Dimitar Stefanov
2 Task-Based Method for Designing Underactuated Mechanisms	International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 9, pp. 1-12, 2012.	<u>Shoichiro Kamada</u> Youngwoo Kim Goro Obinata Dimitar Stefanov
II. 国際発表		
1 Task-based Method for Designing Underactuated Elastic Mechanisms	Proceedings of the 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, vol. 2, pp. 383-387, Rome, Italy, July, 2012.	<u>Shoichiro Kamada</u> Youngwoo Kim Goro Obinata
2 On Comparing Two Methods for Low Degree-of-Freedom Mechanisms	Proceedings of 2010 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, pp. 339-344, Nagoya, Japan, November, 2010.	<u>Shoichiro Kamada</u> Youngwoo Kim Goro Obinata
3 Task Based Design Method for High Accuracy and Low Degree-of-Freedom Mechanisms	Proceedings of The First IFToMM Asian Conference on Mechanism and Machine Science, Paper ID 250133, Taipei, Taiwan, October, 2010.	<u>Shoichiro Kamada</u> Youngwoo Kim Goro Obinata

論文題目	公表の方法及び時期	著者
Ⅲ. その他		
1 義手用ロボットハンドのタスクベース設計法	第 54 回自動制御連合講演会, pp. 807-810, 2011. 11.	<u>鎌田翔一郎</u> 金泳佑 大日方五郎
2 アクチュエータ数を低減したメカニズムのタスクベース設計における弾性関節の影響	第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 1E2-2, 2011. 9.	<u>鎌田翔一郎</u> 金泳佑 大日方五郎
3 主成分分析を用いた劣駆動メカニズムのタスクベース設計	第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 1M1-4, 2010. 9.	<u>鎌田翔一郎</u> 金泳佑 大日方五郎