

修士学位論文

人間からロボットへの日常の動的把持スキルの伝達

平成16年度

学際情報学コース

36101

池田直人

指導教員 池内克史教授

論文要旨

人間からロボットへの日常の動的把持スキルの伝達

学際情報学コース

36101

池田直人

ロボットに教示を行う手法は、これまで様々なものが提案されてきたが、中でもロボットが教示者である人間の行動を観察し、それに基づいて行動プログラムを自動生成する模倣による学習への期待は高まっている。なぜならこの教示技術が完全に実現されれば、エンドユーザである人間は、高度なプログラミング技術を要することなく、ロボットの行動を生成することが可能だからである。本研究ではこの模倣による教示法を用いて、人間の日常動作における静的把持間における遷移、操り動作、動的把持スキルを人間型多指ハンドを有したロボットが獲得することを目的とする。

これまでに、細かく分類された把持の認識から多指ハンドを用いて把持行動を自動生成するという研究が行われた。本研究では上記の研究で扱われなかった日常の静的把持間における遷移、操り動作に見られる新たな把持分類法の導入、日常動作の中でのタスクドメインでの拡大、把持生成の際に触覚センサーの情報を有効活用し、安定な操り動作の実現を行うことで、さらに高度な模倣を行うことのできるシステム構築を目指す。ここで構築したシステムの検証例として、茶道の動作と絵筆による操り動作を選んだ。動歩行可能なヒューマノイドロボットが開発された現在、このようなロボットが人間のような「器用な手」を有し、他者(人間)を観察することで、マニピレーション技能を自動的に獲得できるようになれば、ロボットの活動範囲は家庭やオフィスなど日常生活のあらゆる場所に広がっ

ていくであろう。

これまで様々な把持分類法が提案されてきたが、Napierの2大分類(握力把持と精密把持)から、機械加工工場に見られる作業者の手の使い方を分析し、把持形態の細分化を行ったCutkoskyの分類がロボティクスの分野では一般的である。しかしその分類には鉛筆の把持にみられる日常の把持は含まれていなかった。Kamakuraらは、作業療法で必要となる、中枢神経障害における手の動作パターンの分化・促進を目的として、健常者(7人)の様々な日常品(98品目)の把持の観察により、「フォーム」と「接触部位」から把持の分類を行った。その結果、14の把持の型が得られ、かつそれらを4つに大分類した。「握力把持、中間把持、精密把持、母指不関与把持」である。また観察した把持の大部分(86%)はこれらの型のいずれかで表現でき、残りは中間型、または複合型として表現可能であるとの報告がなされている。この分類法は我々の目指す日常の把持を扱うシステム構築の要求を満たすことから、静的な把持の動作プリミティブとして採用した。そして、本研究では、Kamakuraによる静的把持の遷移間、操り動作中の人間の関節角度、接触情報の観察によって発見された中間把持を導入する。

まず、観察過程としてタスクドメインを茶道における動作に限定し、本「初歩の茶道 風炉手前」(千 宗室著、淡交社)とビデオ「茶の湯・裏千家～風炉～」1・2巻(NHKビデオ)より7種類の静的把持間の遷移、操り動作を抽出した。そして、その7種類の静的把持間の遷移、操り動作に関して、分散触覚センサー付きサイバークラブを用いて、共通した関節角度、接触センサーの変化の大きい部分でセグメントし、発見された中間把持で記述する。

最後に、我々の研究室で開発されたヒューマノイドロボットをプラットフォームとして用い、静的把持遷移、操り動作の生成実験を行う。この実験では、従来の9眼ステレオビジョンや接触センサ等を有した人間型多指ハンドを用いる。また、接触センサの接触情報から、把持のマッピングが正確に行われているか否かの検証を行う。このプラットフォームによって、ロボットへの日常の静的把持間の遷移、操り動作に見られる中間把持をマッピングし、物体の操り動作を目指す。

本論文の目的であるロボットによる物体の持ち替え・操りは、以下の3つの段階に分け、ロボットに物体の持ち替え・操り動作を実現した。

- (1) 人間の動作の観察から静的把持遷移間、操り動作における中間把持を確認。
- (2) 静的把持間の遷移、操り動作を中間把持により記述。
- (3) 静的把持間の遷移、操り動作をロボットにマッピング。

人間の動作の観察から静的把持間の遷移，操り動作における中間把持を確認

我々はタスクドメインとして茶道における動作を選択した．タスクドメインに茶道の動作を選んだ理由は2つある．1) タスク内に静的・動的な日常の把持が含まれている．2) 茶道の動作は，乱雑なテーブルの上から見たこともないコップを取り上げるような日常での何気ないふるまいとは異なり，全行動パターンが開始から終了まで一意に決まっている．そのため人によって把持方法が変わらず，モデル化がしやすいため良い実行例となる．

そこで，本「初歩の茶道 風炉手前」(千 宗室著，淡交社)とビデオ「茶の湯・裏千家～風炉～」1・2巻(NHK ビデオ)より静的把持間の遷移，操り動作を抽出する．

そして，抽出された静的把持間の遷移，操り動作を人間が分散触覚センサー付きサイバークロブを装着し実行する．そして，その操り動作におけるデータから共通した関節角度，接触状態の変化の著しい箇所でセグメントする．そして，新たな把持状態が確認される．これらを中間把持と呼ぶことにする．

静的把持遷移間，操り動作を中間把持により記述

茶道の動作において抽出された静的把持間の遷移，操り動作を上述の中間把持によりいくつかのセグメントし，記述する．そのことにより最初の把持から目標とする把持を実現するまでを段階的に実行する準備が整う．

静的把持間の遷移，操り動作をロボットにマッピング

7種類の把持遷移，操り動作の内，Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型)の遷移と絵筆を用いた操り動作に関して我々の研究室で開発されたヒューマノイドロボットをプラットフォームとして用い，把持の生成実験を行う．

物体認識に関しては，9眼ステレオビジョンにより行う．

操り動作に関しては，接触センサ付きデータグローブから取得した人間の接触センサ情報を参照とし，それぞれの間接把持に関しての接触状態が必ず実現するよう条件式を与え，センサフィードバックを用いる．

そして，関節角度もまた，データグローブから取得した人間の関節角度を参照とする．人間の手とロボットのハンドは構造が違う為，関節角度の決定は，人間による再教示が必要となった．まず，データグローブから人間の関節角度を入力する．そして，目標とする中間把持が達成できない場合は，人間がロボットハンドの動きを観察し，目標とする中間把持が達成できるよう多少関節角度のパラメータを変更することで補償する方法

を行う。

中間把持から中間把持への遷移は、目標とする中間把持の接触状態の達成を次の目標とする中間把持の起点にし、関節角度を変化させていく。また、物体を把持する場合、力が均衡するように指は対向させる。

また、障害物回避に関しては、コンフィギュレーション空間(C - space)の概念を利用し、アドホックに与えて解消する。

目次

目次	i
図目次	iv
表目次	vii
第1章 序論	1
1.1 見まね学習に基づくスキルの伝達.....	3
1.2 把持スキル伝達システムの概要.....	4
1.3 本論文の構成.....	5
第2章 関連研究	7
2.1 把持の定義.....	8
2.2 現在までの把持分類に関する研究.....	8
2.2.1 偶然的考察による分類.....	8
2.2.1.1 Schlesingerによる分類.....	8
2.2.1.2 Napierによる分類.....	9
2.2.2 理論的考察による分類.....	10
2.2.2.1 JacobsonとSperlingによる分類.....	10
2.2.2.2 Arbibによる分類.....	10
2.2.2.3 Iberallによる分類.....	10
2.2.2.4 Kangによる分類.....	11
2.2.3 帰納的な方法による分類.....	12
2.2.3.1 Cutkoskyによる分類.....	12
2.2.3.2 Kamakuraによる分類.....	13
2.3 現在までの操り動作に関する研究.....	27
2.4 先行研究:隠れマルコフモデルによる把持認識システム.....	28
2.4.1 隠れマルコフモデルによる認識.....	29
2.4.2 認識システム.....	29
2.4.3 実験.....	30
2.4.4 考察.....	31
2.5 操り動作の医学的・心理学的解釈.....	32

2.5.1	骨格・関節に見る操り動作可能の要因.....	32
2.5.2	筋の弾性特性に見る操り動作可能の要因.....	32
2.5.3	進化と脳の発達に見る操り動作可能の要因.....	32
2.5.4	運動スキルの習得に見る操り動作可能の要因.....	33
2.5.5	皮膚に見る操り動作可能の要因.....	33
2.2.5.1	皮膚の役割.....	33
2.2.5.2	皮膚の構造と触覚受容の関係.....	34
第3章	静的把持間の遷移に基づく操りのモデル化	36
3.1	操りのモデル化の利点.....	37
3.2	茶道における物体の静的把持から静的把持への遷移.....	38
第4章	中間把持を使用した操り遷移の記述	42
4.1	教示データの観察.....	43
4.1.1	分散触覚センサー付きサイバークロブ.....	43
4.1.2	ハンドモデル.....	44
4.1.3	接触センサー.....	46
4.1.4	センサー融合.....	51
4.1.5	分散触覚センサー付きサイバークロブから得られたデータ.....	53
4.2	観察された中間把持.....	68
4.3	観察された中間把持.....	70
第5章	操り遷移の生成方法	77
5.1	操り遷移の生成方法.....	78
5.1.1	物体認識システム.....	79
5.1.2	コンフィギュレーション空間(C - space).....	85
5.2	人間型実験プラットフォーム.....	86
5.2.1	ビジョン.....	87
5.2.2	アーム・ハンド.....	89
5.2.2.1	人間型ロボットハンド(右手).....	89
5.2.2.1.1	右手ロボットハンドの仕様.....	90
5.2.2.1.2	母指.....	90
5.2.2.1.3	他指(示指,中指,環指).....	90
5.2.2.1.4	ロボットハンドのシステム構成.....	91
5.2.2.1.5	モータ.....	91
5.2.2.1.6	フォース・トルクセンサー.....	91

5.2.2.1.7 接触センサー.....	92
5.2.2.1.7.1 新たに掌部分を開発した狙い.....	93
5.2.3 ボディ.....	94
5.2.4 CORBAに基づくソフトウェアアーキテクチャ.....	94
5.4 実装・実験.....	96
5.4.1 茶道による実装・実験.....	96
5.4.2 絵筆による実装・実験.....	98
第6章 結論	101
6.1 まとめ.....	102
6.2 今後の課題.....	102
謝辞	105
参考文献	106

目次

1	把持スキル伝達システム.....	6
2.1	Napierによる把持分類.....	9
2.2	Arbibによる把持分類.....	10
2.3	Iberallによる分類.....	11
2.4	コンタクトウェブ.....	11
2.5	Kangによる分類.....	12
2.6	Cutkoskyによる分類.....	13
2.7	握力把握-標準型(Power Grip-Standard Type,PoS).....	15
2.8	握力把握-釣型(Power Grip-Hook Type,PoH).....	16
2.9	握力把握-示指伸展型(Power Grip-Index Extension Type,PoI).....	17
2.10	握力把握-伸展型(Power Grip-Extension Type,PoE).....	18
2.11	握力把握-遠位型(Power Grip-Distal Type,PoD).....	19
2.12	側面把握(Lateral Grip,Lat).....	20
2.13	三面把握-標準型(Tripod Grip-Standard Type,Tpd).....	21
2.14	三面把握-亜型I (Tripod Grip-Variation I,TVI).....	22
2.15	三面把握-亜型II (Tripod Grip-Variation II, TVII).....	23
2.16	並列軽屈曲把握(Parallel Mild Flexion Grip,PMF).....	24
2.17	包囲軽屈曲把握(Circular Mild Flexion Grip,CMF).....	25
2.18	指尖把握(Tip Grip,Tip).....	26
2.19	並列伸展把握(Parallel Extension Grip,PE).....	27
2.20	内転把握(Adduction Grip,add).....	27
2.21	HHMによる認識システムの認識結果.....	30
2.22	無毛皮膚の組織と触覚受容器.....	35
3.1	Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型).....	38
3.2	TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持).....	39
3.3	PMF(並列軽屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型).....	39
3.4	Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持).....	40
3.5	Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型).....	40
3.6	PMF(並列軽屈曲把持) TV (三面把持 - 亜型).....	41
3.7	TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持).....	41
4.1	The Virtual Technologies Inc. Cyberglove.....	44
4.2	右手(掌側)の骨格モデル.....	45

4.3	容量性圧力センサーの解剖.....	47
4.4	柔軟な容量性センサー.....	48
4.5	手の接触部分の分析.....	49
4.6	触覚センサー(正面図の配置).....	50
4.7	触覚センサー(側面図の配置).....	51
4.8	触覚センサーを配置したグローブ.....	51
4.9	Cyberglove・触覚のグローブ・コンビネーション.....	52
4.10	Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型) 関節角度1.....	53
4.11	Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型) 関節角度2.....	54
4.12	Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型) 接触センサー情報.....	54
4.13	TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持) 関節角度1.....	55
4.14	TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持) 関節角度2.....	56
4.15	TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持) 接触センサー情報.....	56
4.16	PMF(並列軽屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 関節角度1.....	57
4.17	PMF(並列軽屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 関節角度2.....	58
4.18	PMF(並列軽屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 接触センサー情報.....	58
4.19	Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持) 関節角度1.....	59
4.20	Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持) 関節角度2.....	60
4.21	Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持) 接触センサー情報.....	60
4.22	Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 関節角度1.....	61
4.23	Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 関節角度2.....	62
4.24	Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 接触センサー情報.....	62
4.25	PMF(並列軽屈曲把持) TV (三面把持 - 亜型) 関節角度1.....	63
4.26	PMF(並列軽屈曲把持) TV (三面把持 - 亜型) 関節角度2.....	64
4.27	PMF(並列軽屈曲把持) TV (三面把持 - 亜型) 接触センサー情報.....	64
4.28	TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持) 関節角度1.....	65
4.29	TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持) 関節角度2.....	66
4.30	TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持) 接触センサー情報.....	66
4.31	観察された中間把持.....	69
4.32	Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型) 中間把持記述.....	71
4.33	TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持) 中間把持記述.....	72
4.34	PMF(並列軽屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 中間把持記述.....	73
4.35	Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持) 中間把持記述.....	74
4.36	Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 中間把持記述.....	75
4.37	TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持) 中間把持記述.....	76
5.1	教示環境.....	79

5.2	物体の抽出	80
5.3	統合テンプレートマッチング法に基づく物体の位置と姿勢の同定法	83
5.4	幾何モデルの一致度に基づく物体認識	84
5.5	C-space	85
5.6	実験プラットフォーム	86
5.7	ステレオ装置の測定範囲	87
5.8	視差の測定カーブ	87
5.9	輝度と距離画像(白:近い点, 黒:遠い点)	88
5.10	ロボットアームとハンドの設計	89
5.11	Hand Joint Movements	91
5.12	掌センサー(1)	93
5.13	掌センサー(2)	93
5.14	掌センサー(3)	94
5.15	ロボットのソフトウェア構造	96
5.16	茶道による操り動作(全体図)	97
5.17	茶道による操り動作(手拡大図)	98
5.18	絵筆による操り動作(全体図)	99
5.19	絵筆による操り動作(腕拡大図)	99

表目次

2.1 Kamakuraによる日常動作における把持の分類.....	14
2.2 単一ユーザシステム結果.....	31
2.3 複数ユーザシステム結果.....	31
5.1 検出された形状差.....	83
5.2 ハードウェア制御のためのソフトウェアモジュール(CS).....	95

第1章

序論

第1章 序論

ロボットに教示を行う手法は、これまで様々なものが提案されてきたが、中でもロボットが教示者である人間の行動を観察し、それに基づいて行動プログラムを自動生成する模倣による学習への期待は高まっている。なぜならこの教示技術が完全に実現されれば、エンドユーザである人間は、高度なプログラミング技術を要することなく、ロボットの行動を生成することが可能だからである。本研究ではこの模倣による教示法を用いて、人間の日常動作における静的把持間における遷移、操り動作、動的把持スキルを人間型多指ハンドを有したロボットが獲得することを目的とする。

これまでに、細かく分類された把持の認識から多指ハンドを用いて把持行動を自動生成するという研究が行われた[1]。本研究では上記の研究で扱われなかった日常の静的把持間における遷移、操り動作に見られる新たな把持分類法の導入、日常動作の中でのタスクドメインでの拡大、把持生成の際に触覚センサーの情報を有効活用し、安定な操り動作の実現を行うことで、さらに高度な模倣を行うことのできるシステム構築を目指す。ここで構築したシステムの検証例として、茶道の動作と絵筆による操り動作を選んだ。動歩行可能なヒューマノイドロボットが開発された現在、このようなロボットが人間のような「器用な手」を有し、他者(人間)を観察することで、マニピレーション技能を自動的に獲得できるようになれば、ロボットの活動範囲は家庭やオフィスなど日常生活のあらゆる場所に広がっていくであろう。

これまで様々な把持分類法が提案されてきたが、Napier[2]の2大分類(握力把持と精密把持)から、機械加工工場に見られる作業者の手の使い方を分析し、把持形態の細分化を行ったCutkosky[3]の分類がロボティクスの分野では一般的である。しかしその分類には鉛筆の把持にみられる日常の把持は含まれていなかった。Kamakura[4]らは、作業療法で必要となる、中枢神経障害における手の動作パターンの分化・促進を目的として、健康者(7人)の様々な日常品(98品目)の把持の観察により、「フォーム」と「接触部位」から把持の分類を行った。その結果、14の把持の型が得られ、かつそれらを4つに大分類した。「握力把持、中間把持、精密把持、母指不関与把持」である。また観察した把持の大部分(86%)はこれらの型のいずれかで表現でき、残りは中間型、または複合型として表現可能であるとの報告がなされている。この分類法は我々の目指す日常の把持を扱うシステム構築の要求を満たすことから、静的な把持の動作プリミティブとして採用した[56]。そして、本研究では、Kamakuraによる静的把持の遷移間、操り動作中の人間の関節角度、接触情報の観察によって発見された中間把持を導入する。

まず、観察過程としてタスクドメインを茶道における動作に限定し、本「初歩の茶道 風炉手前」(千宗室著、淡交社)とビデオ「茶の湯・裏千家～風炉～」1・2巻(NHKビデ

オ)より7種類の静的把持間の遷移，操り動作を抽出した．そして，その7種類の静的把持間の遷移，操り動作に関して，分散触覚センサー付きサイバークロブを用いて，共通した関節角度，接触センサーの変化の大きい部分でセグメントし，発見された中間把持で記述する．

最後に，我々の研究室で開発されたヒューマノイドロボットをプラットフォームとして用い，把持の生成実験を行う．この実験では，従来の9眼ステレオビジョンや接触センサー等を有した人間型多指ハンドを用いる．接触センサーの接触情報から，把持のマッピングが正確に行われているか否かの検証を行う．このプラットフォームによって，ロボットへの日常の静的把持間の遷移，操り動作に見られる中間把持をマッピングし，物体の持ち替え・操り動作を目指す．

1.1 見まね学習に基づくスキルの伝達

人間の行動を観察し，それに基づいてロボットが行動プログラムを獲得するというパラダイムは1990年ごろ，CMUの池内らのグループと東大の井上らのグループによりそれぞれ独立に提案された．

池内らのものは，作業の開始時と終了時を明るさの変化から推定し，この2点での距離画像の差から物体認識を行う．この結果を利用し，人間作業の前後の面接触の変化を導き出す．一方計算機内にあらかじめ面接触の変化とそれに必要なロボットコマンドの組を抽象タスクモデルとして用意する．先に検出された面接触の変化よりこの抽象タスクモデルを参照することで人間が行った行動を真似るロボットプログラムを生成するものであった．初期のシステムでは，把持に関しては，あらかじめ対象物体に対して複数の把持戦略を定義し，実行時に衝突回避を考慮しながら最適なものを選ぶというものであった[57]．

井上グループの国吉は，連続的なステレオ画像からオペレータによるpick-and-place行動を真似るシステムを構築した．各pick-and-place行動の細部を記述したフローグラフを前もって用意し，これを利用して画像列の解析から，現時点で人間が何を行っているかを認識した．把持に関してはパラレルジョウを仮定しているため戦略などの解析はなされていない[58]．さらに，TakahashiとOgataも同様のシステムを仮想現実感システムを入力媒体として完成した[59]．これらのシステムは，人間のお手本により，ロボットがプログラムを生成するという点では先駆的ではあった．一方，多指ハンドを前提とした把持戦略解析に関しては，あまり注意が払われていなかった．

このようにロボットに知識を獲得させる様々な方法が提案されてきたが，その中の1つに「見まねによる学習(Imitation Learning)」と呼ばれる方法がある．これは，ロボット専門家がプログラミングによってロボットの行動を作り込むのとは対称的に，ロボット自身が他者(人)の行動を見ることによって，その行動を自身のものとして獲得していく方法

である。

もちろん全くの白紙の状態では視覚に流れ込む膨大な情報の流れを処理することができないため、一般には観察され得る行動の要素となる何らかのプリミティブ集合を持っており、観察している他者の行動とプリミティブとのマッチングを行い、そこからより高次の表現であるシンボルを抽出・自身が獲得しているより高度な行動との比較をすることで、他者の行動をモデル化することが行われていると考えられる。

この時、プリミティブをどうやって決定するのか、プリミティブの表現形態はどうするのか、プリミティブからより高度な行動もしくはシンボルとの関連付はどうするのかといった問題があり、これまでに大きく分けて2つのアプローチがある。

1つは「タスク指向」のアプローチであり、環境物体との相互作用を伴うような比較的複雑なタスクにおいて、そのタスクが実行される領域を限定し、その中の全ての事象を構成することが可能なプリミティブ集合を人間が設計する方法である。

もう1つは「生物機構指向」のアプローチであり、神経科学・認知心理学から知見に基づいて一般性のある行動・プリミティブ獲得のモデルを提案し、行動を自動的に獲得するアプローチである。こちらは、現状では環境との積極的な相互作用を伴わない全身運動を対象として研究が進められている。

あるタスク領域における環境物体との相互作用を含んだ目的指向の行動を対象として、観察によるタスクモデルの自動生成及び、ロボットによる行動の再現を目指す研究である。これまでに、凸物体同士の組み立て作業を対象とした研究[5]、非接触作業における手と操作物体の役割のモデル化を扱った研究[6]、玩具の組み立て作業において作業手順の因果関係をモデル化しロボットとの協調作業を実現した研究[7]などが行われてきた。

本研究では「タスク指向」のアプローチを用いた人間の日常動作の静的把持間の遷移、操り動作に見られる新たな把持分類の認識とロボットによる再現を行う。

1.2 把持スキル伝達システムの概要

本研究における認識部から生成部までのシステムの一連の流れを図1に示す。教示を行う人間は、ロボットの目の前で一連の動作を行う。その際、分散触覚センサーを有したデータグローブを装着し、関節角度と接触情報を入力データとする。それらの低レベルデータから把持プリミティブとのマッチングを行い、人間の行った把持を同定する。認識部において把持の同定が終わると、出力された把持プリミティブをもとに、システムは把持の生成を行う。ロボットは把持の生成が正確に行われているかどうかを接触センサーによって確認する。生成された把持プリミティブが認識部で同定されたそれと等しければ、成功とみなしそのまま終了する。等しく無い場合は、生成は失敗となり再度、把持の生成を行う。

1.3 本論文の構成

日常動作の把持スキル生成を行う前に、まず人間の把持の記述を獲得しなければならない。現在までに様々な把持に関する研究が行われてきており、また、Kamakuraによる把持分類を静的把持においては、採用する部分があるので、まず、第2章では、現在までの日常における人間の把持に関する研究を述べる。また、中間把持を記述する有用性を示すために、現在までの操り動作の研究に関して述べる。次に第3章では、静的把持間に基づく操りのモデル化の利点、実践するための過程においてタスクドメインを茶道にし、茶道において観察された静的把持遷移、操り動作について述べる。第4章では、第3章で抽出した静的把持遷移、操り動作において、人間に分散触覚センサー付きサイバークロブを装着し、実行する。その時得られた間接角度、接触センサーの変化の大きい部分でセグメントし、新たな把持分類である中間把持を記述する。そして、茶道の動作より抽出された静的把持遷移間、操り動作に関して、中間把持により記述する。第5章においては、まず、静的把持遷移、操り動作を中間把持を用いた生成方法に関して述べる。そして、実験プラットフォームであるヒューマノイドロボットを紹介した後、ロボットによる実装、実験に関して述べる。そして、最後に第6章で結論を述べる。

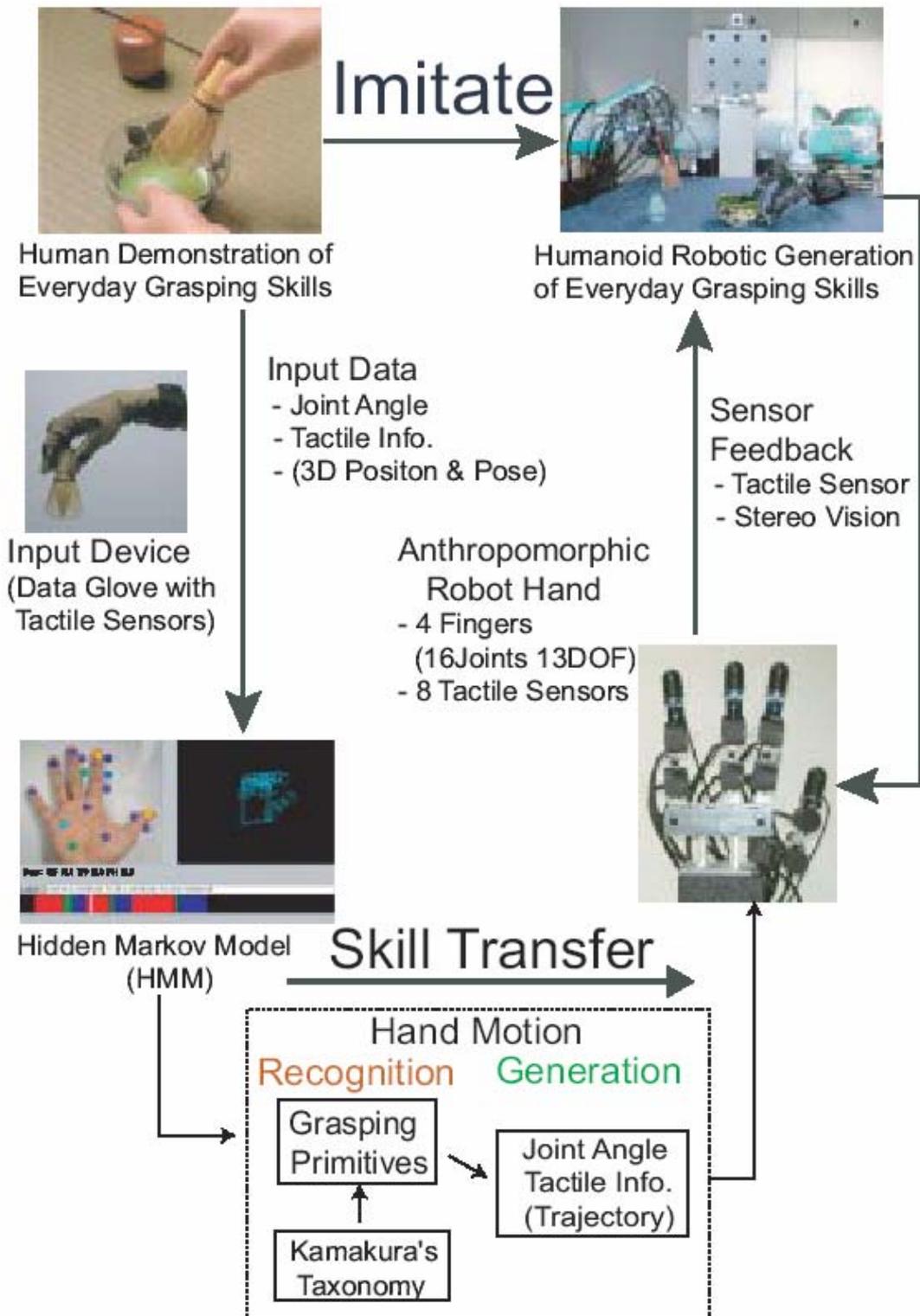


図1 把持スキル伝達システム

第2章 関連研究

第2章 関連研究・把持記述

人間の把持行動を認識するために，人間の「手の使い方」すなわち把持戦略を分類する必要がある．ここで従来の把持分類法を次の3つに大別した．「偶然的考察による分類」，「理論的考察による分類」，「帰納的な方法による分類」である．

本研究では，「鎌倉の静的な把持分類法」と呼ばれる「帰納的な方法による分類」を人間の日常の静的な把持行動を記述する把持プリミティブとして採用し，その静的把持を遷移における始点と終点とした．

また，本研究では，静的把持間の遷移，操り動作は，時系列上で静的把持の連続ではないかという仮説を立てている．

2.1 把持の定義

「物品を片手でとらえて空中に保持することができ」(すなわち引っ掛けや両手による把持を含まない)，かつ「その間に手の接触部位が変わらない場合」を指す．従って，握り，掴み，摘みの使い分けはせず，すべて把持と表す．

2.2 現在までの把持分類に関する研究

手の把持形態を表すプリミティブとして，これまで手の静的な形状の分類分けを利用する方法が提案されている．

2.2.1 偶然的考察による分類

この分類に属するものには，Schlesinger[8]による分類とNapier[2]による分類がある．臨床等，医学界ではもとよりバイオメカニカル，ロボティクスの分野においても，これら2つの把持の分類・記述法は長い間，最も広く受け入れられ使用されているものである．

2.2.1.1 Schlesingerによる分類

Schlesingerは，義手のデザインの必要から把持の分類を行ったと言われ，対象物の形状と手の形態に着目して，hook grasp(鉤握り)，cylindrical grasp(筒握り)，fist grasp(こぶし握り)，

sphericalgrasp(球握り), tip prehension(指尖掴み), palmer prehension(またはpulp prehension 掌側面掴み), lateralprehension(側面掴み) というように把持を分類した。

TylorとShwarz [9], Brunnstom [10], [11], RashとBurk [12]らは皆, Schlesingerの分類を元に, それぞれ把持の分類を行っている。この分類は, 様々な把持の部分的な特徴しか記述しておらず(それはおそらく偶然的な観察による), 手と把持物体との位置関係との定義はなされていない。さらに, ある物体の把握がこれらのタイプに当てはまらない場合が存在する。最も重要な問題点は, これらの分類による呼び名や説明が誤解を招き, 把持方式は物体の形状によって決まると考えられることである。

2.2.1.2 Napierによる分類

Napierは把持の型を決めるのは物の形や大きさではなく作業の目的であるとし, 手の動作は把持と非把持の2群に大別されるとし, 前者すなわち把持は, 安定性を重視し, 広い接触面を使うpower grasp(握力把持)か巧緻性を重視し, 指先を使うprecision grasp(精密把持), あるいは両者の複合型で説明できるとした。使用目的が把持の型を2大別するという指摘において, この分類はすぐれた1つの系統性を示しており, Napierの2大別などと呼ばれロボティクスの分野でも広く受け入れられている。ここでpower graspに関する記述は明確であり, 日常観察される現象とよく一致するものである。しかし, precision graspに関する記述は, 質的な説明として優れているが, その多様なバリエーションを具さに説明したものはいい難い。

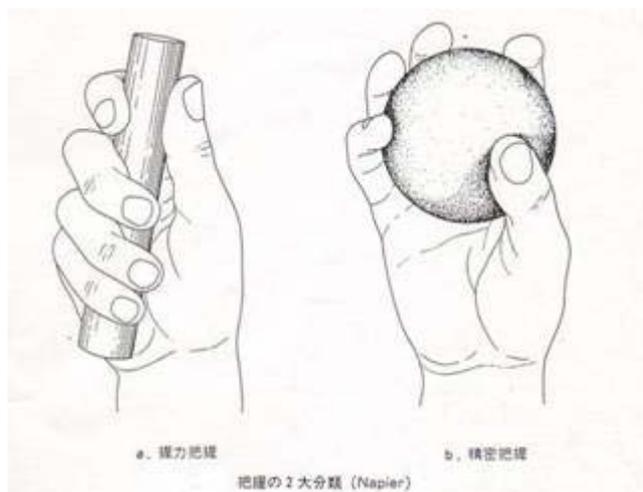


図 2.1 Napier による把持分類

2.2.2 理論的考察による分類

2.2.2.1 JacobsonとSperlingによる分類

JacobsonとSperling[13]は、使用指、接触部位、屈曲など、あらかじめ考えた6つの特性を指ごとにコードで記述するシステムを考えた。これに従えばどんな把持も一応は記述できるが、結果の利用法や分類は利用者の意図にまかされる。30個を超えるコードから1つの手のイメージを得るには、相当の時間と困難が伴う。

2.2.2.2 Arbib による分類

Arbib[14]らは仮想指(virtual finger)という、同じ向きの力を発生する手掌を含む実際の指(realfinger)をまとめて1つの実体として扱うという考え方を導入し、人の手による把持を解釈しやすくした。

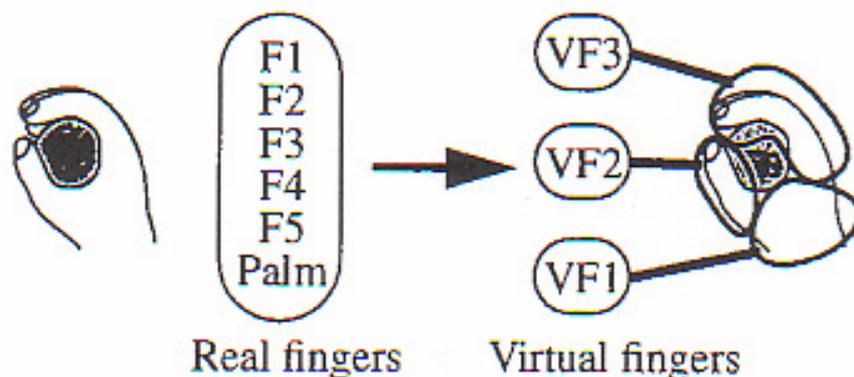


図 2.2 Arbib による把持分類

2.2.2.3 Iberall による分類

Iberall[15], [16]は、人の把持は3つの異なる向きの対向(opposition) から成り立っていると考えた。すなわち手掌の長手方向とほぼ平行な軸における指面(pad)対向、手掌とほぼ垂直な軸における手掌(palm)対向、手掌を横切る方向の軸における側面(side)対向である。指面(pad)対向はprecision graspに用い、手掌(palm)対向はpower graspに用い、側面(side)対向は器用さと把持の強さという面で、前者2つの中間となる。そして一般的な把持はこれらのうちどれか1つまたはいくつかの組み合わせで成り立っていると主張した。

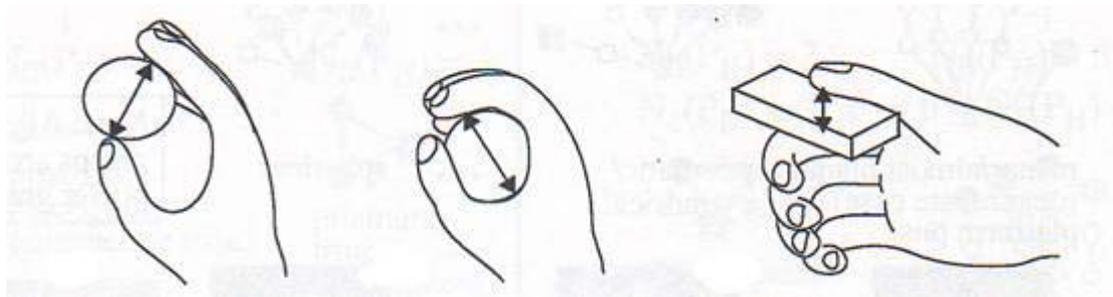


図 2.3 Iberall による分類

2.2.2.4 Kang による分類

Kang[17]は、手の形状だけでなく、把持物体に手の表面のどの部位が接触しているかを指のセグメントと物体表面の接触点であるコンタクトウェブ(contact web)という概念を用いて把持を記述し、手掌の接触の有無という2大別(volar graspとnon-volar grasp)から詳細な分類を行い、把持の自動認識を試みた。

コンタクト・ウェブは、手と把持された物体との間の有効な接触点をつなげる三次元のグラフィック構造体として定義される。指や手掌の一部が把持された物体と接触する時、実際の接触面積は有限である。指のセグメントや手掌と物体との間の接触を概念的に表す場合は、点接触として表すと分かりやすい。表示、解析および把持の際の微調整が容易になるからである。コンタクト・ウェブの形と濃度(cardinality)によって、その把持法に関する重要な情報が得られる。

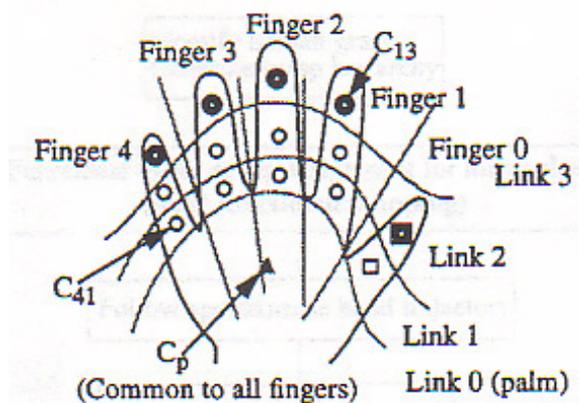


図 2.4 コンタクトウェブ

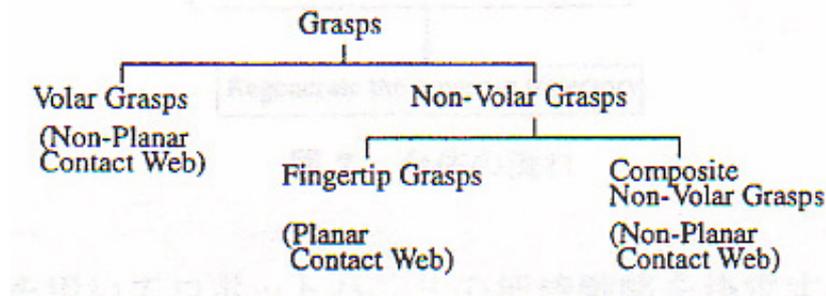


図 2.5 Kang による分類

2.2.3 帰納的な方法による分類

ここでの分類は、あるタスクドメインを決め、そのドメインの中で見いだされるすべての把持方式を分類の対象にする方法を取ったものである。

2.2.3.1 Cutkoskyによる分類

Cutkosky[3]はそのドメインを機械加工工場に選んだ。これは人間の代わりに工場で作業を行う産業用ロボットののためのハンドデザインを視野に入れたものである。Cutkoskyは機械加工工場の作業者の手の使い方を参考に手の形状から把持を分析し、Napierの2大別をもとに、物体の形状や作業要求に応じた把持形態の細分化を行った。

CutkoskyはNapierの分類を拡張し、一般的な機械部品の組立作業において生じる把持を14種類に細かく分類し、樹形図の形で表した。またこれを用いて、人間がどの把持形態をとっているのかを判別するエキスパートシステムを開発した[3]。

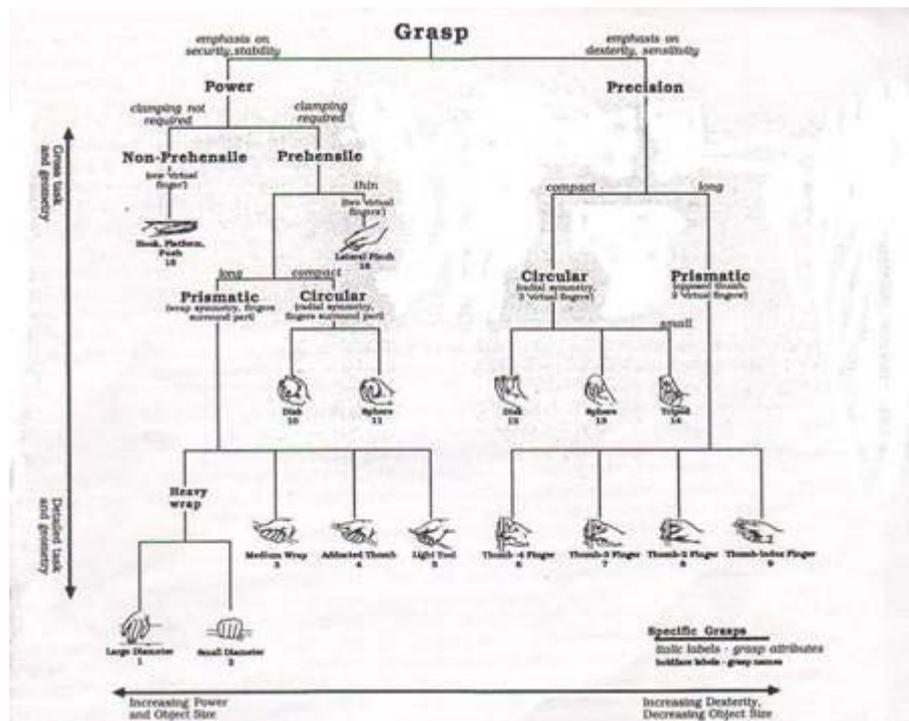


図2.6 Cutkoskyによる分類

しかし, Cutkoskyの分類[3]やKangの方法[18]は組立作業における把持を対象としており, 例えば(1)手のひらの接触を一点で近似する, (2)指の先端以外の側面や腹を柔軟に使った把持を考慮していないといった制限がある, そのため, 日常生活においてよく現れる掌全体を柔軟に使った把持を表現する目的にはそぐわない. また, プリミティブに分類するのではなく手の形状を直接獲得する試みとして, 島田らの時系列上で手形状が緩やかに変化すると拘束から単眼画像より手形状を推定する手[19]や, 上田らの多視点シルエット画像から体積交差法により手のボリューム表現を求め3次元モデルをフィッティングする手法[20]がある. これら手法では非常に高速に手形状を連続認識可能であるが, 手が隠蔽されず完全に見えていることが前提となっており, 本研究のように物体の操作を前提としている場合には直接用いることができない.

2.2.3.2 Kamakuraによる分類

Kamakura[4]は日常生活をタスクドメインに選び, 臨床の現場で治療場面における手の動作パターンの分化促進や用具の使用訓練など実地的な目的のための分類を行った. その副次的成果として, 日常関係の深い諸物品について, それぞれがどの把持方式(2種類以上のことも多い)によって掴まれるかという参考情報を得ることができた[21].

鎌倉は, 作業療法士の立場から日常生活で現れる種々の把持を14種類に分類した[21].

この分類方法とCutkoskyの分類方法との大きな違いは，(1)手の骨格ではなく掌の接触分布で分類分けをしている点，(2)大分類として圧力把握系・精密把握系の他に指の側面をよく使う中間把握系を導入している点にある（表2.1）．

表2.1 Kamakuraによる日常動作における把持の分類

圧力把握系
○ 握力把握-標準型 (Power Grip-Standard Type) ○ 握力把握-釣型 (Power Grip-Hook Type) ○ 握力把握-示指伸展型 (Power Grip-Index Extension Type) 握力把握-伸展型 (Power Grip-Extension Type) 握力把握-遠位型 (Power Grip-Distal Type)
中間把握系
○ 側面把握 (Lateral Grip) 三面把握-標準型 (Tripod Grip-Standard Type) 三面把握-亜型 I (Tripod Grip-Variation I) 三面把握-亜型 II (Tripod Grip-Variation II)
精密把握系
○ 並列軽屈曲把握 (Parallel Mild Flexion Grip) ○ 包囲軽屈曲把握 (Circular Mild Flexion Grip) ○ 指尖把握 (Tip Grip) 並列伸展把握 (Parallel Extension Grip)
母指不関与系
内転把握 (Adduction Grip)

以下に，鎌倉の14種類の静的把持記述を示す．これらの把持を静的把持として採用している．

1. 握力把握系

1-1. 握力把握 標準型(Power Grip-Standard Type,PoS)

これは最も安定した把持の1つで，一般に使用される．指で，物体を上手く包みこみ，また，手の内部はほとんど全て物体に接している．それは，全ての方向に良い安定をもたらす．ハンマー，傘，フライパンなどを保持する場合，この把握が使用される．

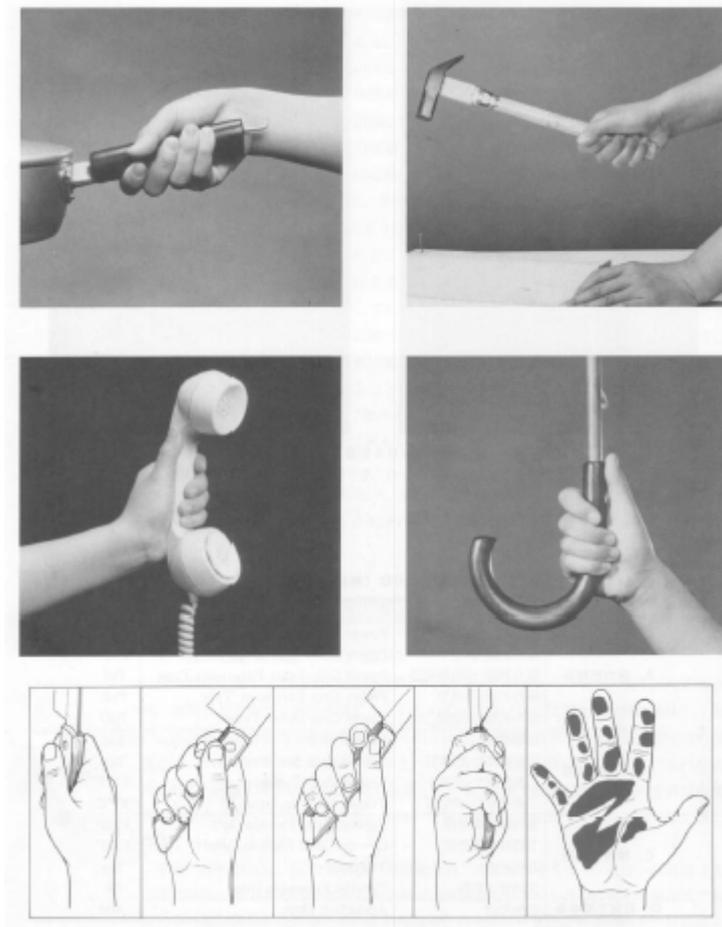


図2.7 握力把握-標準型(Power Grip-Standard Type,PoS)

1-2. 握力把握-釣型(Power Grip-Hook Type,PoH)

これは手が多少オープンになっており、指の方向からの引く力に逆らうかたちで力がかかり、PoSとは異なります。スーツケースなどを運んだり、レバーを引っ張る場合、この把持の形が使用されます。

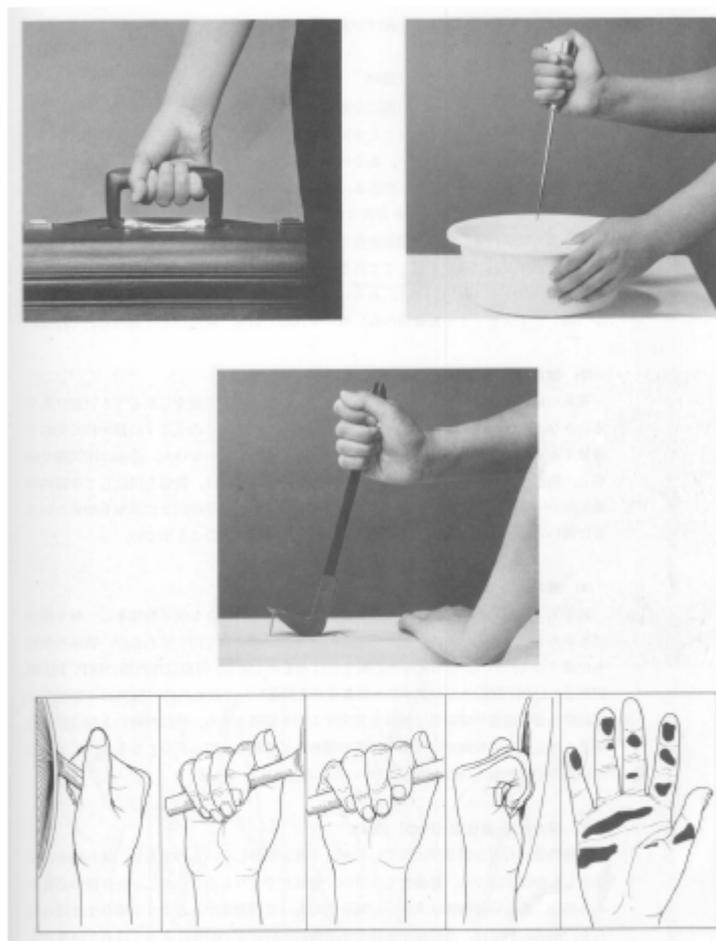


図2.8 握力把握-釣型(Power Grip-Hook Type,PoH)

1-3. 握力把握-示指伸展型(Power Grip-Index Extension Type,PoI)

この握力把握では、人差し指が伸ばされ、物体の先端に触れる。物体の先端の1つの方向へ大きな力が作用すると予想され、人差し指が把持を安定させる支持として使用される。フォーク、ナイフなどを使い切断する場合、使用される。



図2.9 握力把握-示指伸展型(Power Grip-Index Extension Type,PoI)

1-4. 握力把握-伸展型(Power Grip-Extension Type,PoE)

物体を安定して強く保持しなければならない場合，この掌握は使用されるが，水平すぎるので，指でそのまわりで完全に包むことができない．物体の端は掌の中で止める．また，指は圧力を働かせるのにできるだけ曲がっている．テーブルなどの上で大きなボウルを安定させる場合，プレートを運ぶ場合，PoEが使用される．



図2.10 握力把握-伸展型(Power Grip-Extension Type,PoE)

1-5. 握力把握-遠位型(Power Grip-Distal Type,PoD)

これは掌が使用されないという点で、握力把握カテゴリーの例外である。手と比較して、物体が小さく、完全に指によって単独で包むことができる場合、この把持が生じる。さらに、この把持は、その接触表面(グリッパー、ハンドル)が小さく、腕の主要な軸へよりよい物体を置くことを支援することが必要な大きな物体のために使用される。これは小楊枝、爪切り、はさみなどのために使用される。

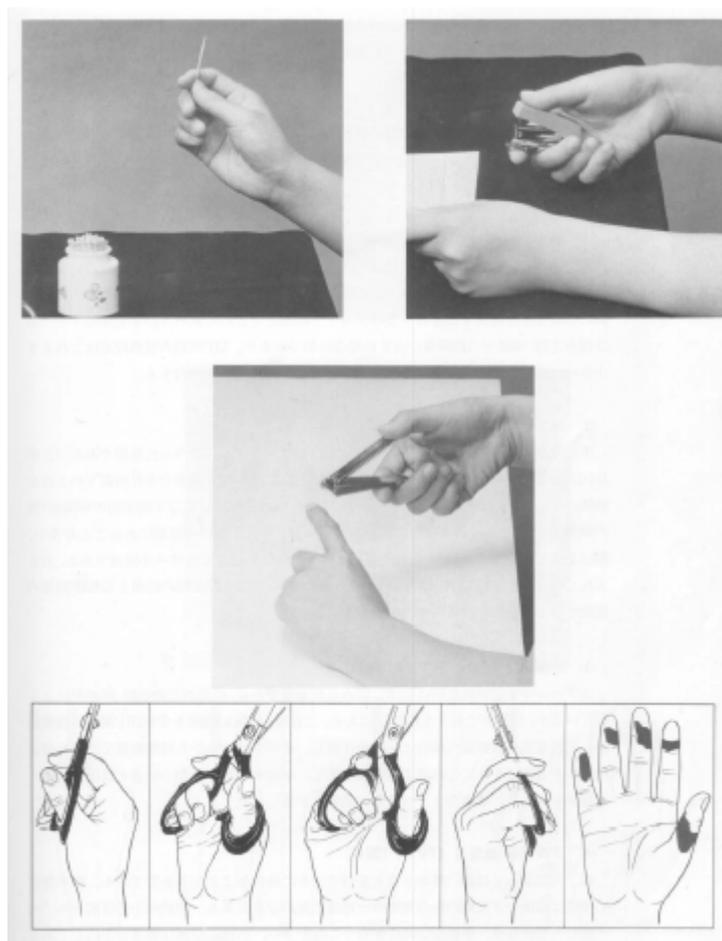


図2.11 握力把握-遠位型(Power Grip-Distal Type,PoD)

2. 中間把握系

2-1. 側面把握(Lateral Grip,Lat)

物体あるいはタスクが指先で単独で達成することができたより安定のかなりの程度を要求する場合、この把持は素晴らしい操作のために使用される。人差し指の側面は接触表面を増加させるために使用される。この把持はPoDのいくつかの形式に似ているが、はるかに緩く、しばしば平らなオブジェクト表面へ適合している。キーや用にクレジットカードなどを渡す時に、使用される。

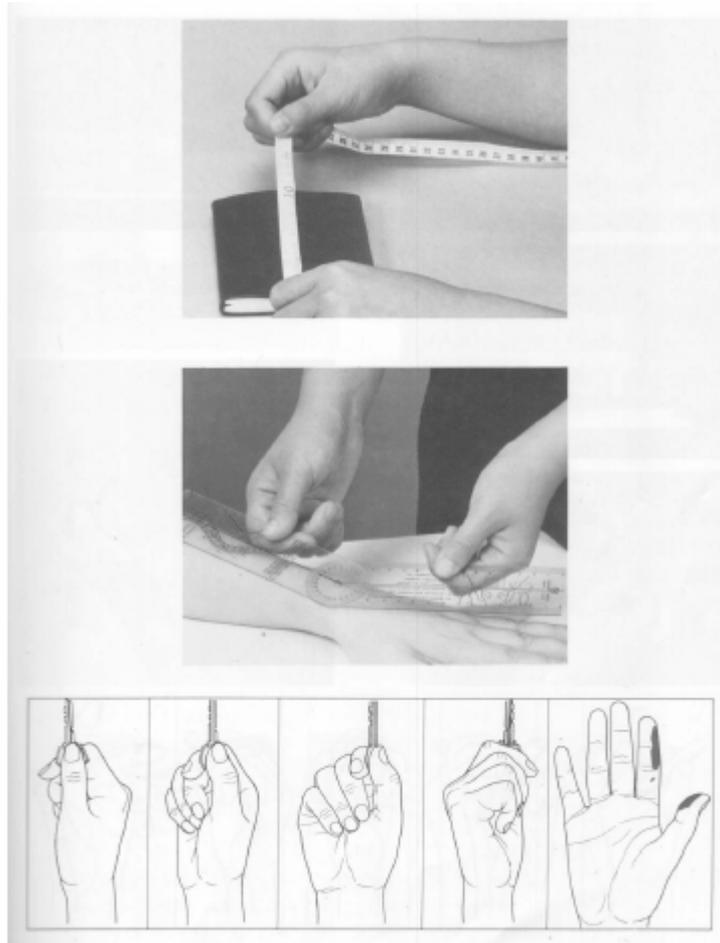


図2.12 側面把握(Lateral Grip,Lat)

2-2. 三面把握-標準型(Tripod Grip-Standard Type, Tpd)

この把持では、親指、人差し指および中指が一般に円筒状のツールの先端で機敏な操作をするために使用される。この把持は大きな可動性を考慮に入れる。物体は、親指および人差し指の先端間で基本的に保持され、より多くの安定のために中指の側面に対してそれらによって押される。多くの場合、道具の後部の末端は、さらに手の側に接している。口紅などを保持する場合、ペンで書く場合、この把持が使用される。

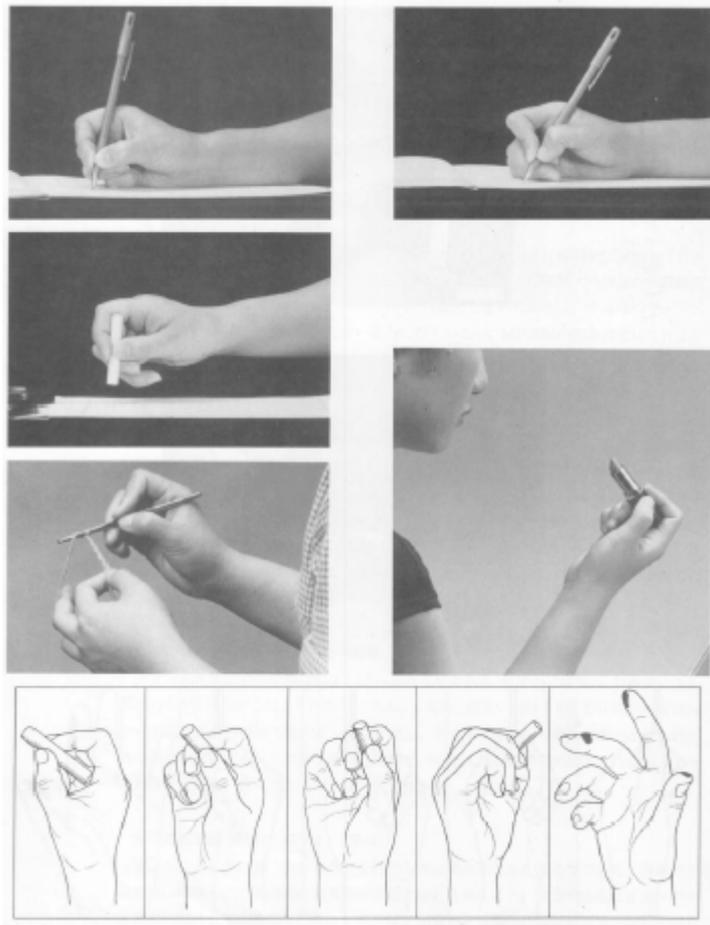


図2.13 三面把握-標準型(Tripod Grip-Standard Type,Tpd)

2-2. 三面把握-垂型I (Tripod Grip-Variation I,TVI)

これは標準のTpdの把持をわずかに変更した形である．この個別の区別は把持の目的の考慮により正当化される．標準のTpdの把持の中で，道具の先端は，親指および人差し指を伸ばして，正確な操作を実行するために保持される．この把持では，道具の先端が親指の方向に対して垂直である．また，道具は人差し指の横で押される．この把持は，手首の人差し指か回転の屈曲部によってより大きな可動性を考慮に入れる．棒などで液体を混合する場合，スプーンを保持する場合、この把持が使用される．

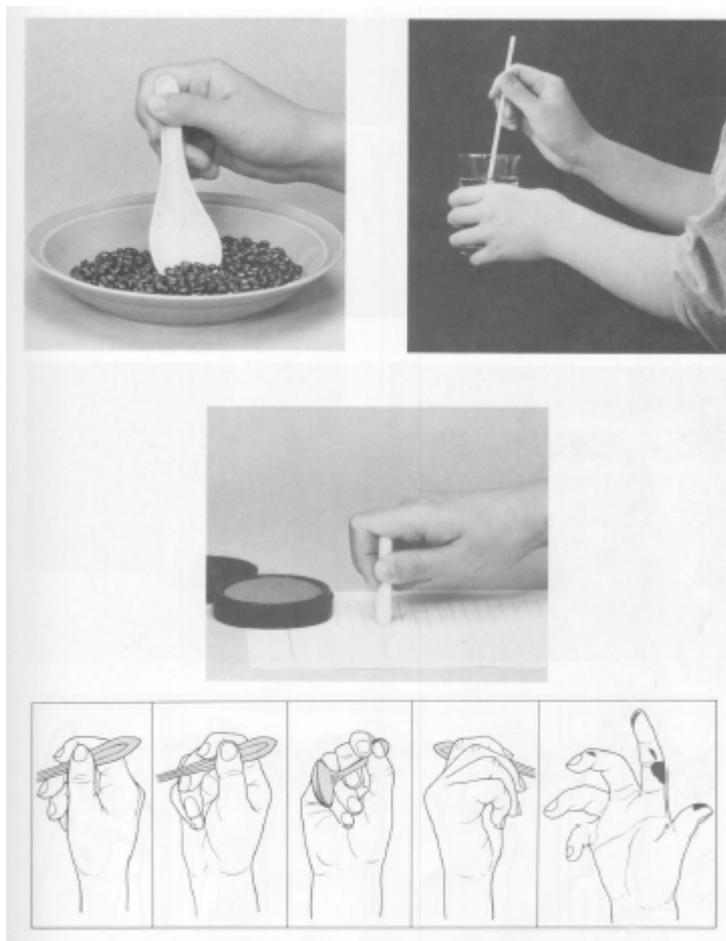


図2.14 三面把握-垂型I (Tripod Grip-Variation I,TVI)

2-3. 三面把握-垂型II (Tripod Grip-Variation II, TVII)

まだ別のTpdの把持．TVIと比較して，中指の先端が使用される．また，薬指さえ使われる．また，両方の指はもっと伸ばされる．これは重点が，可動性よりも長い道具の先端の正確なコントロールに置かれるからである．この把持はブラシまたは箸の扱いのために使用される．

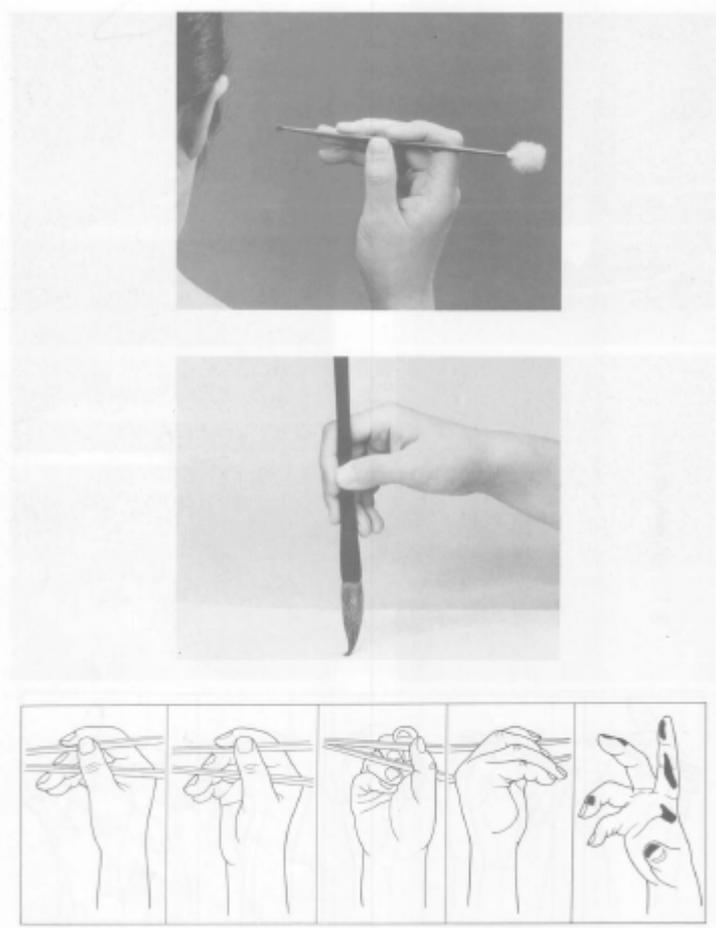


図2.15 三面把握-垂型II (Tripod Grip-Variation II, TVII)

3. 精密把握系

3-1. 並列軽屈曲把握(Parallel Mild Flexion Grip, PMF)

この把持は物体を拾い上げるか、それらを軽く保持する場合、私たちが使用する基礎的な把持である。非常に素晴らしい移動を考慮に入れるために、指先端だけが含まれる。指の先端は、親指だけは反対方向におおざっぱに物体の形をなぞるように物体に接する。この把持は、すべての物体の種類、ペン、カップ、チューブなどの物体のために使用される。

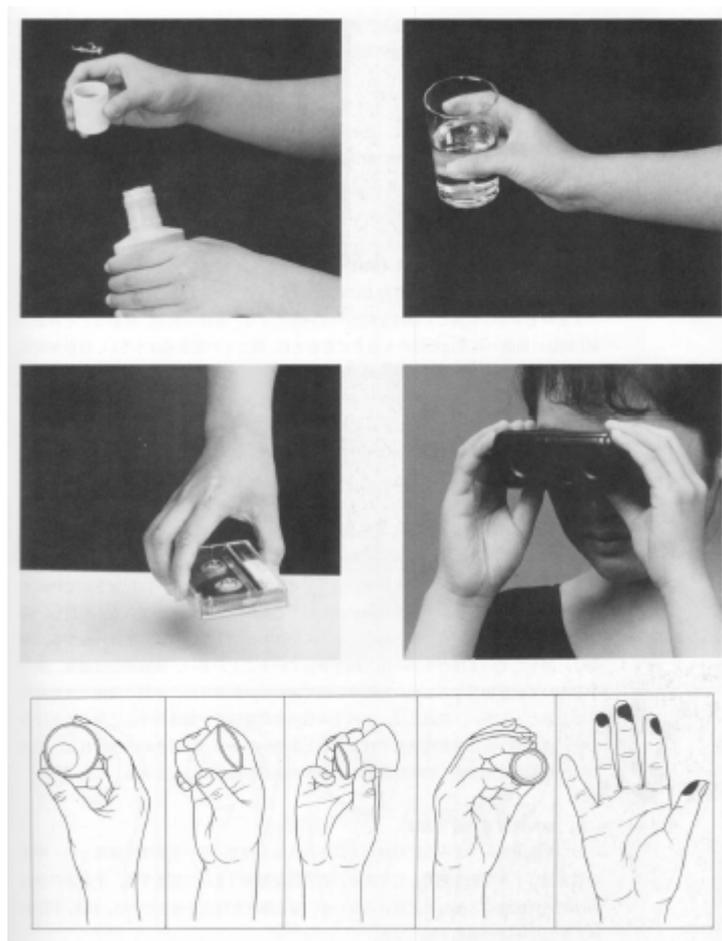


図2.16 並列軽屈曲把握(Parallel Mild Flexion Grip,PMF)

3-2. 包囲軽屈曲把握(Circular Mild Flexion Grip,CMF)

この把持は、指先端がやや循環的な形を形成する以外は、基本的にPMFと同じである。物体自身実際に丸でなくても、蓋を開く場合、キャップのネジを抜く場合、物体を締める場合、この把持はしばしば使用される。

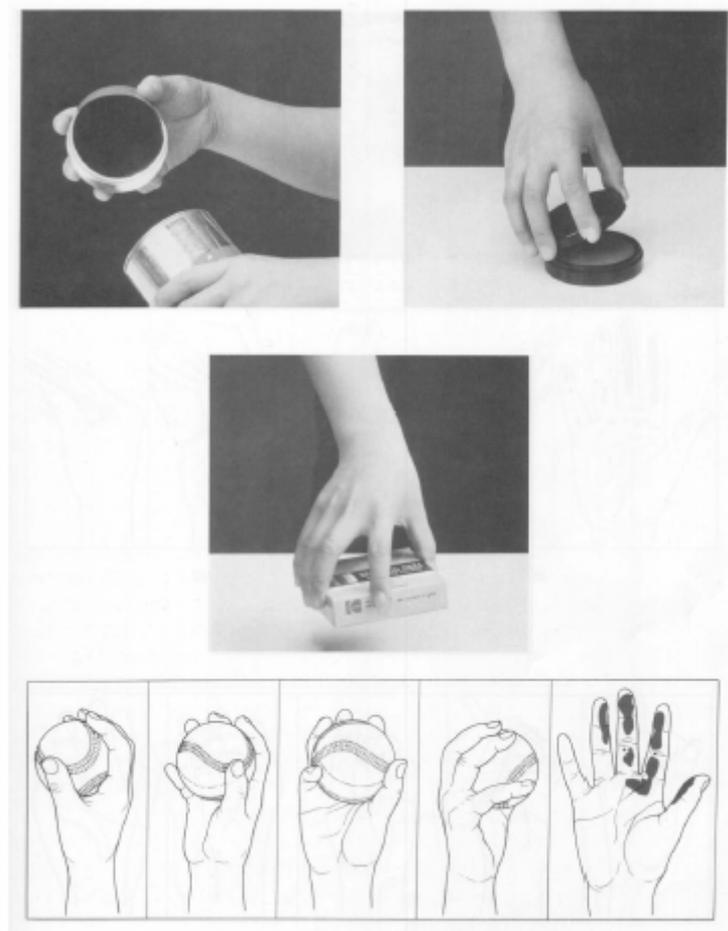


図2.17 包囲軽屈曲把握(Circular Mild Flexion Grip,CMF)

3-3. 指尖把握(Tip Grip,Tip)

この把持では、親指および人差し指のまさに先端が物体に接している。これは、より多くの指によって同時にほとんど触れられないかもしれない非常に小さな物体を操作し、非常に素晴らしい操作を実行するための把持である。針、コイン、ピンなどを保持する場合、この把持が使用される。

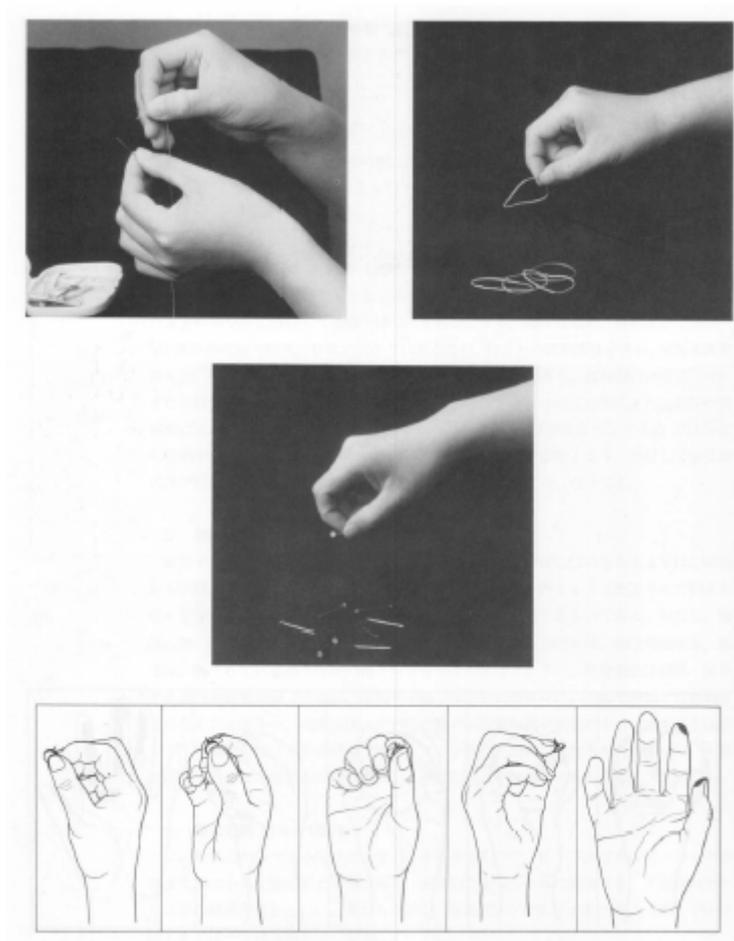


図2.18 指尖把握(Tip Grip,Tip)

3-4. 並列伸展把握(Parallel Extension Grip,PE)

PE把持は、ある物体の表面に触れることを回避するため、あるいはそれが他の物体に接して置かれるように要求されるもので、水平な物体を比較的安定するために使用される。指は親指に反対のラインにある。しかし、CMFと比較して、この把持の指は、物体のより多くの表面を支えるために伸ばしている。ゲーム・カードなどを示す場合、ハンカチを使用する場合、この把持が適用される。

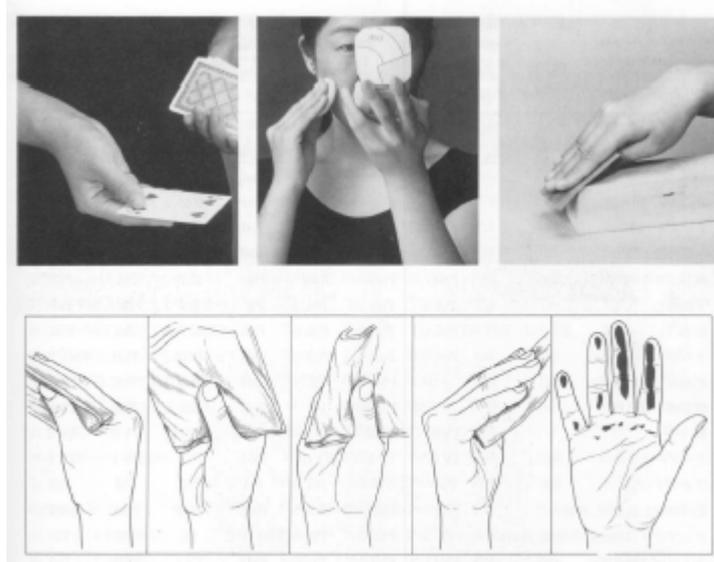


図2.19 並列伸展把握(Parallel Extension Grip,PE)

4. 母指不関与系

4-1. 内点把握(Adduction Grip,add)

親指が使用されない唯一の把持である．それは安定をほとんど要求せず，単に物体(例えばペン，たばこ)を緩めた感じで持つために使用される．

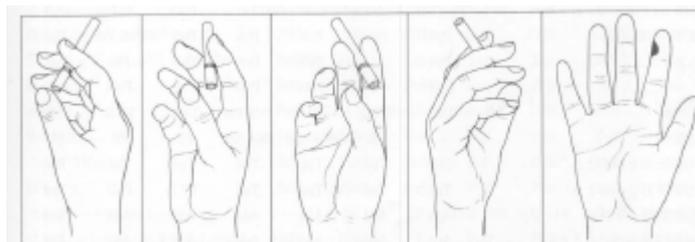


図2.20 内転把握(Adduction Grip,add)

2.3 現在までの操りに関する研究

多指ハンドによる物体の操り動作は，現在までに様々な研究が行われている．多指ハンドによる物体の操り動作は，次の3つのアプローチで研究が行われている．[22]

(1) 対象物体形状に適応した安定な把持

(2) 指の各部の接触による対象の能動的認識

(3) 把持中の物体に対する操作

(1)については、静止摩擦と指の関節トルクとから定まる制限を用い、指が最も滑りにくいような内力を求める手法[23]、指先力に対し、操り力と握力を定義し、適正な握力を設定することにより指先力の制約を満たす手法[24]などが提案されている。(2)については、指のリンクの一部を未知対象に接触させた後、この接触点を指先の接触センサによって検出するための指運動の生成手法[25]、分布型触覚センサによって触覚パターンを獲得するための触覚運動の生成方法[26]などが提案されている。また、(3)について、Kerrら[23]は、転がりにおける指先と対象物体との関係を微分方程式として記述した。この式を用い、Coleら[27]は、転がり接触を前提とした物体操作の制御則を提案した。しかし、ハンドは平面内2本指に限定されている。Maekawaら[28]は、幾何学的情報を用いず、触覚センサで接触点を直接求め、転がり接触によって物体を操作するための制御則を導いた。滑りを伴う物体操作については、鄭ら[29]は、対象物体運動と指の滑り運動の制御の定式化を行っている。沢崎ら[30]は、作業台上で物体を転がすことによる操作を提案している。Michelman [31]は、指軌道生成の解析、作業空間の解析、タスク分割に基づく物体操作の制御則を導いている。また、Okada[32]、Fearing[33]は3本指ハンドにより、指1本ずつを持ち替えながら棒状物体を回転させる操作(twirling操作)を実現した。これらは、離す指の系列がほぼ固定的に決まっている操作である。小俣ら[34]は、4本指による角柱物体を回転するための持ち替え手順の生成法を提案している。しかし、その生成法は、角柱の周りを動くだけのもので、操り動作とは言えない。

また、操り動作までは実現していないが、山高ら[35]がハンドに多点接触検知センサとカラーカメラが取り付け付いたハンドを有した上半身ロボットを開発しており、茶道の静的把持を実現している。

しかし、(1)(2)の研究は、当然のことながら、物体の操り動作まで到達しておらず、(3)の研究は、理論で留まるか、アドホックに値をいれるだけで汎用性のある提案ではなく、活用性がない。

本研究では、有限個の把持記述を考えれば必要十分であり、手による物体の操り動作が可能になることを実証する。

2.4 先行研究：隠れマルコフモデルによる把持認識システム

我々の研究室では、隠れマルコフモデルを用いた認識システムを開発している(全詳細についてはBernardin[36]を参照)。今回は、使用していないが、今後、研究を進めて行く上で、使用することになるだろう。以下に実験結果等を含め紹介する。

2.4.1 隠れマルコフモデルによる認識

筆跡認識やジェスチャー認識などの最近の研究結果が示すように、隠れマルコフモデルはダイナミックなパターン認識に適している。そのため把持認識システムのアルゴリズムとしてこれを採用した。隠れマルコフモデルを使うと複数の利点がある。手の動作を一連の状態として、簡単かつロバストに表現することができ、ノイズの多いデータに対してもロバストである。特に人間の把持を分類する時には、様々な手の形状を扱うことができる上、把持と解放の動作を識別することも可能である。音声認識と同じように、隠れマルコフモデルを使うと事前にセグメンテーションすることなく、動作パターンを認識することができる。例えば、様々な人間の把持方式のように、認識すべきあらゆる抽象的な手の動作パターンに対して、隠れマルコフモデルを作り、複数のトレーニング例を使ってパラメータを学習する。これにより、その作業を記述するための最もふさわしいと思われる一連の隠れマルコフモデルを自動的に人間の実演から抽出することができる。ここで、把持動作は一連の離散的な状態から構成されることが前提となる。この離散的な状態は特徴空間における特定の配置となる。この場合、特徴とはサイバークロブが返す関節角度、及び接触センサの出力値を指す。各隠れマルコフモデルはフラットポロジによって定義される。これらの隠れマルコフモデルは実演データを記録する前に、オフラインでトレーニングされる。認識にはViterbiアルゴリズムを使い、最も可能性の高い隠れマルコフモデル列を計算し、ユーザーの実演にマッチさせる。また、エルゴードポロジを伴うガベージモデルを作ることで、ノイズや不必要なデータのフィルタリングを行う。音声認識でよく使われる簡単なタスク文法を用いることで、探索範囲が限定され、認識速度と認識率を工場することが可能となった。各把持動作の後には、解放動作を行う必要がある。このため実演の認識は把持と解放列に限定される。

2.4.2 認識システム

認識システムでは、入力デバイスとして前述した分散触覚センサを有したサイバークロブを使用する。このデータクロブは、30Hzのサンプリング周期でのデータ取得が可能で、サンプリング周期に同期して時間遅れ無くジェスチャースポッティングを行うことが可能である。各指の関節角と接触情報を入力データとして使い、隠れマルコフモデルによるスポッティング認識を行う。認識システム(図 参照)の一部は、Hidden Markov Model Toolkit(HTK)に基づいている。

本システムでは、実演教示のセグメンテーション、つまり把持および解放の行われる時刻の検出と、各セグメントで実行された把持の種類を時系列データを統計的に妥当に処理する手法である隠れマルコフモデルを適用することによって実現する。手の形状と把持物体との接触状態の情報は、サイバークロブと分散触覚センサの組合わせによって獲得される。触覚センサはセグメンテーションの精度を向上する上で特に有用であり、明確な指の動きを伴わない把持においても、把持の開始時刻と終了時刻を正確に認識することが可能になる。

把持の認識は鎌倉による14種類の把持分類に基づいて行われる。個々の把持は、一方向隠れマルコフモデルによってモデル化される。また全結合型隠れマルコフモデルであるガーベッジモデルを導入することによって、把持とは関係のない動作を除外することが可能になる。隠れマルコフモデルのパラメータは、異なる4人から採取された計112個（各28個）の実演データを元に学習され、認識率は学習データとは別の同数のデータセットを使用して評価された。

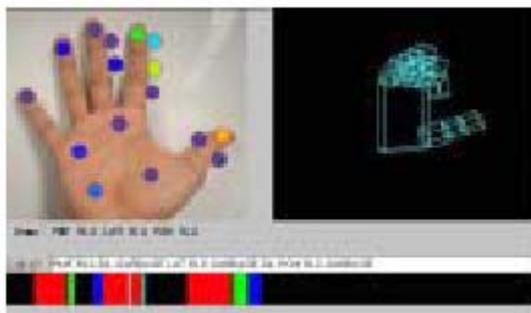


図2.21 HMMによる認識システムの認識結果；上側の画面には手の形と接触センサー情報が示される。有色のバーは分割結果を示す。認識器による仮説はバーの上に表示される。

2.4.3 実験

前述したシステムを用いてKamuakuraの14のプリミティブの認識実験を行った。認識に用いた物体は、ポット、コップ、カセット、書籍、定規、鍵など日常で使用する物品を中心に広範囲にわたるように考慮した(計45品目)。また1種類の把持に様々な形状やサイズの物体を用いた。実演データを記録したユーザは4人で、全ての実演はロボットの前の平面テーブルで行われた。計112回のトレーニングデモと同数のテストセットを記録した。ユーザらは前述した広範囲にわたる物体を把持し、その際に自然な方法で把持と解放の連続動作を行った。また各ユーザに対して個別にオフラインのトレーニングとテストを行った。その結果、学習は12回目の反復トレーニングの後に安定することが分かった。単一ユーザシステ

ムに対する分類結果を表2に示す。

複数ユーザシステムの分類結果を表3に示す。全てのトレーニングデモを使って学習を行い、それぞれのユーザのテストセットをもとに個別にテストを行った。

	User1	User2	User3	User4
Acc.	92.2%	88.7%	85.7%	76.8%

表2.2 単一ユーザシステム結果；値はパーセントで精度レートを表す。

	User1	User2	User3	User4	Total
Acc.	91.1%	89.9%	90.5%	92.2%	90.9%

表2.3 複数ユーザシステム結果

単一ユーザシステムの場合、トレーニングデータが少ないと表2.2のユーザ4のように認識率が下がることがある。複数ユーザシステムはトレーニングデータが少ない場合でも、各ケースについて90%近い正確さを示すことから(表2.3参照)、単一ユーザシステムよりもロバストであることが分かる。

2.4.4 考察

実験の結果、把持対象物体の形状や大きさが異なり、またユーザが複数であるにも関わらず、良い認識結果が得られた。ノイズの多いセンサデータ、ユーザ毎に異なる手の大きさ、異なる把持の順序・把持の速度・把持対象物体といった環境の違いに対し、本システムがロバストに対処できることが確認された。従来は合図のためのジェスチャー認識にのみ適用されていた手法を把持の認識にうまく適用した結果、単一ユーザで92.2%、複数ユーザで90.9%の認識率を達成することができた。実現したシステムでは、把持の種類とそれが生成された時刻の認識を行うが、把持物体の認識や把持物体の姿勢の推定はできない。そのため教示された作業について全部の情報を提供することはできないが、より複雑な「実演に基づく教示」システムのための有用な構成要素となることが期待される。

認識システムにおける大部分の認識エラーは、14の把持プリミティブのうち3つに対して起きた。内転把持(Add)、三面把持-亜型1(TV1)、三面把持-亜型2(TV2)である。これらの把持は他の把持と比べて、手の形状のみから認識を行うことは難しく、認識の成否は接触情報に大きく依存する。しかし、これらの把持に関して、現在のセンサ領域だけでしかるべき接触部位を検出することは難しい。より広い領域にセンサを配置できれば、この問題は解決する。

2.5 操り動作の医学的・心理学的解釈

人間は、操り動作という複雑で、非常に巧みな動作が可能である。その要因は、何であるか医学的・心理学的解釈について述べる[37,38]。

2.5.1 骨格・関節に見る操り動作可能の要因

手の骨格は、27本の骨からなる寄せ木細工である。そして、中手骨（指の第二、第三関節間にある骨）と手根骨（掌の骨）とのあいだに全部で12もの可動関節がある。これらはみな厚い掌の中に収まっており、親指を除いて指が分かれるのはその先の指骨からである。このことによって可能になっている親指とその他の指を向かい合わせにする能力（いわゆる母指対立性）は人間とサルだけに備わったものだが、この能力によってはじめて手はつかんだりしっかり握ったりする器官となる。

手は、粘土のような驚くべき柔軟性により、どんなハンドルや取っ手にも自動的にぴったり合う。手の指は、この部分に限定しても15の関節を持つ。動きの可能な方向（いわゆる自由度）の数は、片手の指で20もある。目的的で適応的な指の動きにおいて、またその動きのすばやさや、正確さや、巧みさにおいて、人間は類縁の種を大きく凌いでいる。手首もまた柔軟で豊かな運動性を兼ね備えており、この手首が土台となることで人間の手はその持ち主である脳にふさわしいすばらしい道具になる。

2.5.2 筋の弾性特性に見る操り動作可能の要因

筋の一つが一つの方向に骨を引っ張るとき、他方の筋は受動的に伸張し、これによってどちらの方向にも関節を動かすことができるのである。このしくみは、筋力による弾性抵抗があるため、より複雑になる。このことは、力が同一でも試行が異なれば運動も異なってしまうという事実は、身体が強制運転しているわけではないこと、すなわち冗長な自由度をもっていることを示している。この冗長な自由度をもっていることにより操り運動のような複雑な動きが可能となるのである。

2.5.3 進化と脳の発達に見る操り動作可能の要因

進化の過程を見てもみると、生存闘争のもとでは、運動の「武装」を徐々に強固なものにしていかなければならなかった。動じに、動物が運動によって解決すべき課題はより複雑で多様になってきた。運動によって解決すべき課題（運動への要求）が難しくなると、どうしてもよりすばやく、より正確に、そしてより巧みに動作を行わなければな

らなくなる．そこで，長きにわたる進化の過程で脳，特に新たな感覚調整の役目をなす大脳皮質が発達し，その付属器官が発達した．

2.5.4 運動スキルの習得に見る操り動作可能の要因

運動スキルの習得・学習は，様々な複雑な運動課題に対して解決策を見いだす能力を発達させることができる．

操り動作といった複雑な動作，運動スキルは，単純な動作，運動スキルの積み重ねにより構築されている．それは，単純な動作，運動スキルを習得していけば，操り動作といった複雑な動作，運動スキルを実行することが可能であることを示唆している．

例えば，幼児はペンの置いてある場所を理解し，手を伸ばし（リーチング）持ち，そして，持ち替えて，文字を書くことができない．しかし，経験を積むことで，これら一つ一つの動作，運動スキルを習得していき，幼少には，誰でも一連の動作，運動スキルとして可能となるのである．

2.5.5 皮膚に見る操り動作可能の要因

2.5.5.1 皮膚の役割

生物はすべて外皮などで体が覆われている．このうち，陸生無脊椎動物の代表である昆虫（および他の節足動物）はかたい外皮を有するのに対し，多くの脊椎動物は柔軟な皮膚を持つ．昆虫の外皮がかたい理由は，一つ目には，外骨格によって体の構造を維持するためであろう．二つ目に，外敵や環境からの刺激に抗するという目的があげられよう．三つ目に，小型であるため体積に対する体表面積の比が大きいので，環境の変化に対して水分バランスを維持する役割を担っていよう．

これに対し，ヒトに代表される脊椎動物は，内骨格系によって構造を維持できること，環境変化や外敵に知的に対処できること，水分バランスや温度の調整機能が優れていること，などの要因により，外皮をかたくする必要性から逃れ，柔軟な皮膚を持つことが可能となった．

皮膚が柔軟になったことにより，物体との柔軟な接触が可能となった．物体との接触形態の複雑化に伴い，触覚受容器も分化，多様化，高密度化し，物体を滑り落とさずに把持することや，「つるつる」「ざらざら」といった触感を検出すること，物体の柔らかさ分布を検出することが可能となった．このように，手指の柔軟かつ複雑な構造とセンシングメカニズムは，前肢の冗長多自由度メカニズムと並び，ヒトの柔軟かつ器用な操り運動のために重要である．

2.5.5.2 皮膚の構造と触覚受容の関係

操り動作を行う上で、必ず、微妙な力調整を行っていると考えられる。皮膚は大きく手掌型の無毛皮膚と有毛皮膚に分けられるが、以下では「器用な手」に大きくかわる、指腹部などの無毛皮膚について述べる。

皮膚の力学的構造と触覚受容との関係はどうなっているのでしょうか。つまり、皮膚がどのように変形したときに、触覚受容器は応答するのであるか。Srinivasan [39]らは、凹凸波長の変化するくし歯状の刺激棒と指断面が接触する際に、触覚受容器が発する神経インパルスの発射頻度と、有限要素法で求めた触覚受容器近傍のひずみエネルギー密度 (SED) の分布を比較した。その結果、両者は非常に似た傾向を示した。つまり、それぞれの触覚受容器は、SEDがそれぞれの受容器の閾値に達した指腹部と触覚受容器の構造と機能するとインパルスを発射しているのである。

また、前野ら[40] [41] [42]は、指腹部の指紋、表皮、真皮、皮下脂肪組織の形状を詳細にモデル化して対象物との静的・動的な接触時における各触覚受容器のインパルス発射頻度を有限要素解析し、それぞれの触覚受容器の配置の妥当性を確認した。つまり、真皮と表皮の境界付近に配置されているSAI (メルケル小体) とFAI (マイスナー小体) は、ちょうど応力集中が生じる場所に配置されているため、皮膚構造の影響を受けやすい。特に、SAI (メルケル小体) は、真皮乳頭を考慮した場合にSED が大きくなり、触覚受容感度が増大する。これは、真皮乳頭の構造により応力集中が生じたためである。一方、FAI (マイスナー小体) は指紋の構造を考慮した場合にSED が大きくなり、触覚受容感度が増大する。これは、それぞれの指紋の凸部で接触反力の極大値が生じ、近傍で応力集中が生じるためである。特に、指紋表面に接線方向の摩擦力が加わった場合には、指紋直下に2列に並んだマイスナー小体のうちの一方のSEDが大きくなり、他方のSEDが小さくなる。

一方、ヘルツの接触理論[43]として知られているように、曲面状弾性体が平板と接触する際には、弾性体内部にせん断ひずみエネルギーが極大となる箇所がある。FA II (パチニ小体)、SA II (ルフィニ小体) は、ちょうどせん断ひずみエネルギーが極大となる箇所付近に配置されている。以上のように、それぞれの触覚受容器は、指紋、真皮乳頭などの複雑な皮膚構造と深くかわり合うことによって、触覚情報を検出しているのである。

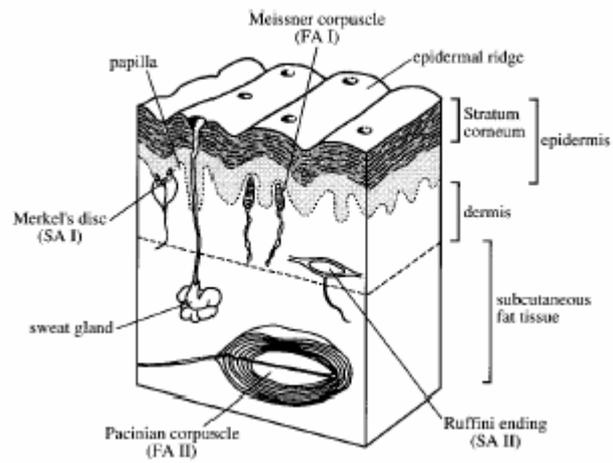


図2.22 無毛皮膚の組織と触覚受容器

第3章

静的把持間に基づく操りのモデル化

第3章 静的把持間に基づく操りのモデル化

操り動作における静的把持間の遷移は、有限個の静的把持の記述だと考えられる。例えば、Kamakuraの把持分類では、精密把持同士の遷移は起こらないことが常識で考えられる。そこで、静的把持間の遷移、操り動作は、時系列上で静的把持の連続ではないかという仮説を立てた。

そこで、まず、タスクドメインを茶道における動作に限定し、本「初歩の茶道 風炉手前」(千宗室著、淡交社)とビデオ「茶の湯・裏千家～風炉～」1・2巻(NHKビデオ)より7種類の静的把持から静的把持への把持遷移抽出した。

3.1 操りのモデル化の利点

操り動作における静的把持間の遷移は、有限個の静的把持の記述だと考えられる。例えば、Kamakuraの把持分類では、精密把持同士の遷移は起こらないことが常識で考えられる。そこで、静的把持間の遷移、操り動作は、時系列上で静的把持の連続ではないかという仮説を立てた。

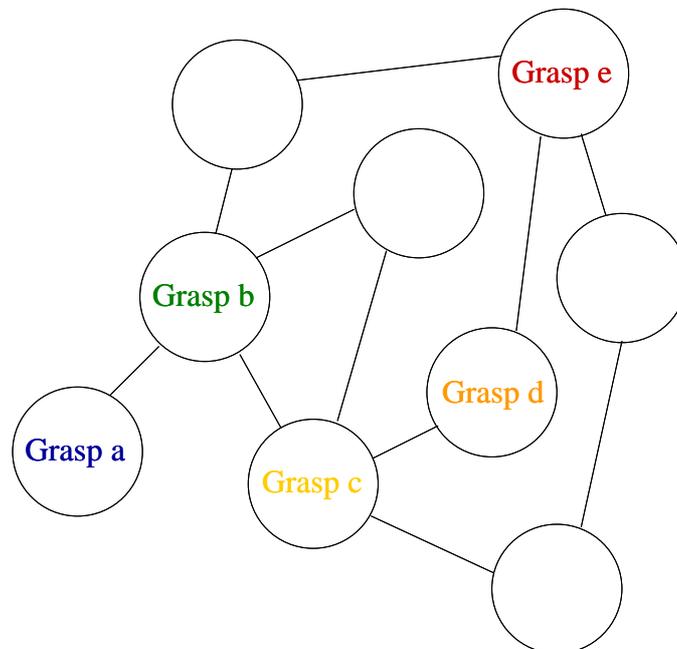


図3.1 操りのモデル化イメージ図

操り動作のモデル化の利点として、次の二つが考えられる。(1) 接触状態が少し変わるだけだからマッピングしやすい。(2) 有限個だから十分性がある。

以上のことより、静的把持遷移間に見られるより細かな把持で記述できればロボットに汎用性のあるマッピングが可能であると言える。そこで、静的把持間遷移、操り動作を観察することにした。そこで、タスクドメインを茶道の動作に決定した。タスクドメインに茶道の動作を選んだ理由は2つある。1) タスク内に静的・動的な日常の把持が含まれている。2) 茶道の動作は、乱雑なテーブルの上から見たこともないコップを取り上げるような日常での何気ないふるまいとは異なり、全行動パターンが開始から終了まで一意に決まっている。そのため人によって把持方法が変わらず、モデル化がしやすいため良い実行例となる。

3.2 茶道における物体の静的把持から静的把持への遷移

本「初歩の茶道 風炉手前」(千 宗室著, 淡交社)とビデオ「茶の湯・裏千家～風炉～」1・2巻(NHKビデオ)より以下の7種類の静的把持から静的把持への把持遷移抽出した。

(1) Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型)

茶杓を掴み、茶を掬う動作で確認された。

以下に動作の写真と把持遷移における始点と終点である静的把持をKamakuraによる把持分類によって示す。



茶杓を掴み運ぶ

Tip

茶を掬う

TV

図 3.1 Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型)

(2) TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持)

茶を掬い、茶杓を置く動作で確認された。

以下に動作の写真と把持遷移における始点と終点である静的把持をKamakuraによる把持分類によって示す。



図3.2 TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持)

(3) PMF(並列軽屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型)

茶筌を掴み、茶を点てる動作で確認された。

以下に動作の写真と把持遷移における始点と終点である静的把持をKamakuraによる把持分類によって示す。

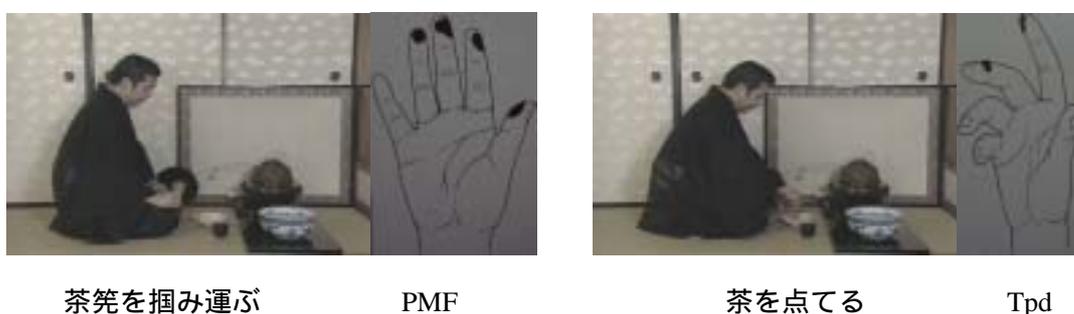


図3.3 PMF(並列軽屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型)

(4) Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持)

茶を点てて、茶筌を器で止める動作で確認された。

以下に動作の写真と把持遷移における始点と終点である静的把持をKamakuraによる把持分類によって示す。

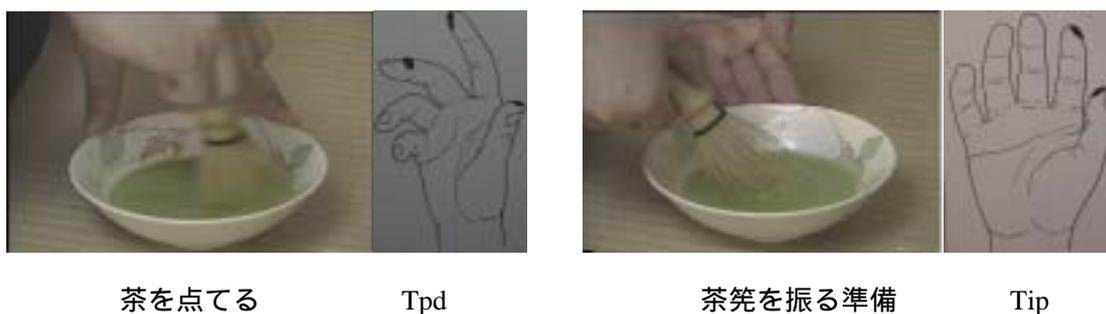


図3.4 Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持)

(5) Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型)

爪楊枝を掴み、菓子切る動作で確認された。

以下に動作の写真と把持遷移における始点と終点である静的把持をKamakuraによる把持分類によって示す。



図3.5 Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型)

(6) PMF(並列軽屈曲把持) TV (三面把持 - 亜型)

畳で火箸を支えた状態から移動し、炭を掴む動作で確認された。

以下に動作の写真と把持遷移における始点と終点である静的把持をKamakuraによる把持分類によって示す。

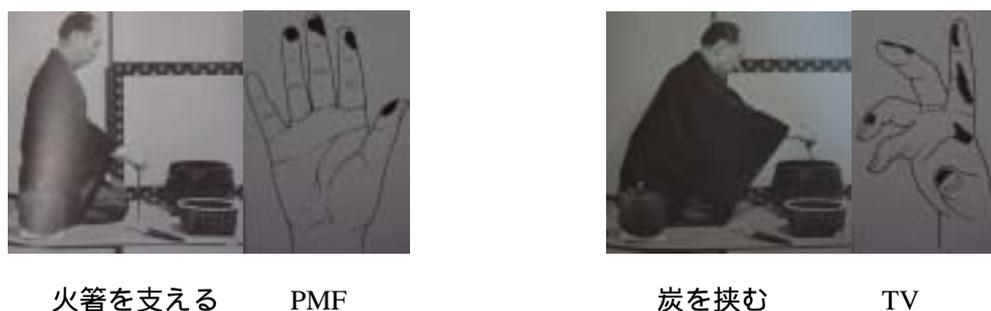


図3.6 PMF(並列軽屈曲把持) TV (三面把持 - 亜型)

(7) TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持)

炭を置き、移動し、畳で火箸を支える動作で確認された。

以下に動作の写真と把持遷移における始点と終点である静的把持をKamakuraによる把持分類によって示す。

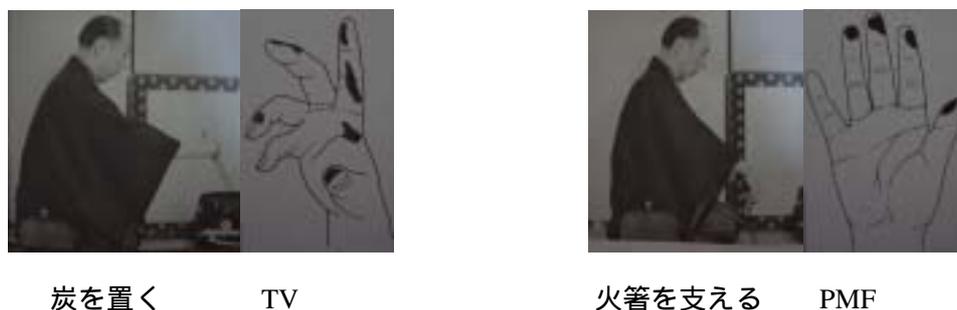


図3.7 TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持)

第4章

中間把持を使用した操り遷移の記述

第4章 中間把持を使用した操り遷移の記述

本章では、前章において紹介した7種類の静的把持から静的把持への把持遷移に関して、前章において紹介した中間把持によって記述した。そのことにより最初の把持から目標とする把持を実現するまでを関節角度、接触センサー情報で段階的に実行する準備が整った。

4.1 教示データの観察

操り動作における静的把持間での遷移の観察方法として我々の研究グループが開発した分散触覚センサー付きサイバークラブを用いる。このデータグローブにより物体を把持し持ち替えを行った際の人間の関節角度と物体との接触情報をデータとして得ることができる。

この分散触覚センサー付きサイバークラブは、Kamakuraの把持分類における把持の生成を前提に開発を行った。しかし、それは、静的把持から静的把持の遷移の間に見られる中間把持においても十分網羅しているものである。

4.1.1 分散触覚センサー付きサイバークラブ

関節角度を測定するためにVirtual Technologies社による非常にポピュラーなCyberglove[44,45]を使用する。このグローブは柔らかく柔軟であるが強健な織物で作られており、軽量であり、そして比較的邪魔にならない(図4.1)。



図4.1 The Virtual Technologies Inc. Cyberglove

グローブの18個のセンサーを使用する。指の屈曲部を測定するために、後部の上に開いた指先および多くの屈曲センサーを持っている。それは3mのケーブルによって、38400ボートの割合でシリアルインターフェイスを通して共同の角度の値を伝えるその計測器に接続される。

Cybergloveは、世界座標系において手およびその回転の位置を示すPolhemus Fastrak磁気追跡道具と共に通常使用される。しかしながら、手形状が変わらない限り、把握はその方位、あるいはそれが生じる場所にかかわらず同じである。追跡道具からの情報は認識の中で使用されない。

このグローブは、多くのユーザの手の形状・大きさに適合するように測定することができる。また、それぞれのセンサーの値は別々に調整し調節することができる。

これらの手の動きに対する関節角度の値は記録され、この値に基づいてすべてのセンサーに対して自動的に測定される。もちろん、この単純な測定は、ユーザの手形状におけるすべての変化を説明することができない。しかしながら、ゴールが実際の手姿勢の正確な表現を獲得するのではなく、把握タイプにそれを分類することであるので、より多くの正確さは要求されない。また、実行した把持の形の様々なオブジェクト・サイズあるいは故意でない違いは、測定エラーより多くの変化を説明する。

4.1.2 ハンドモデル

手の単純な骨格モデルが使用される。値であるパラメーターは、Cybergloveによって返ってくる。合計16のパラメーターの値が使用される。それらは次のとおりである。指の関節角度(親指およびその外転の屈曲部用の4つ、各指の屈曲部用の2つ、および相対的

な指外転角度用の3つ)に対する15の値、および手のひらの弓形になることに見合う1つの値である。

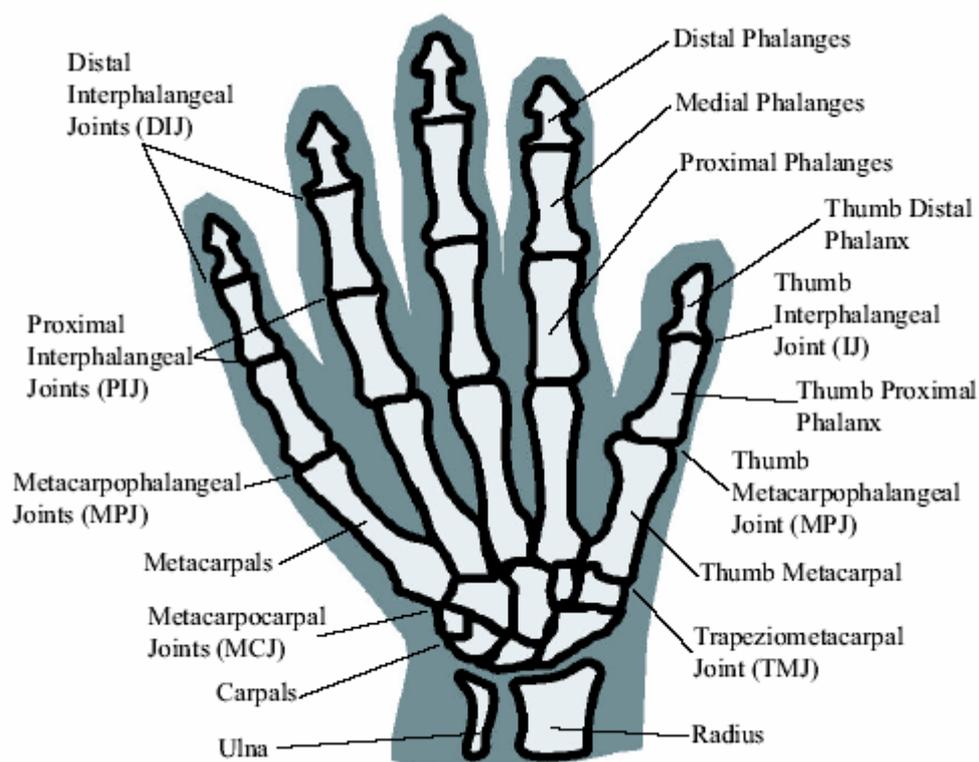


図4.2 右手(掌側)の骨格モデル

下記では、関節が次のように呼ばれる。

- MPJ(Metacarpophalangeal Joint): これは指および掌の結合ポイントである。
- PIJ (Proximal Interphalangeal Joint): これはMPJの次に来る指関節である。
- DIJ (Distal Interphalangeal Joint): これは指の先端に近い指関節である。
- TMJ (Trapeziometacarpal Joint): 親指中手骨が手首の骨に接続するところの関節である。

18個のセンサーを持つCybergloveは、小指から人差し指のDIJの屈曲部を測定するためのセンサーを持っていない。しかしながら、この値はPIP関節の値で関連づけられる。それは、DIJおよびPIJの両方がある割合でともに曲がるように、それらの指を曲げるほとんどの人々にとって自然である。シミュレーション目的のために、DIJの値はある単純な発

見的方法を使用して、評価することができる。しかし、認識目的に対しては、推定の値は余分の情報を単に保持するだけである。それらはしたがって無視できる。

親指は、人差し指のMPJを通り抜ける軸の周りのTMJで最初に回転し次に、人差し指に近づく、または、外転角度によって回転するためにモデル化される。

他の指に対する外転の値は、グローブの背の3つのセンサーによって伝えられる。人差し指 中指、中指 薬指、薬指 小指の間の指外転センサーである。これらのセンサーは、手のひらに関連のある指の絶対的な外転ではないが、互いの相対的な外転を測定する、つまり2本の隣接した指の間の広がりである。人差し指、中指および薬指のために絶対値を得るために、トレードオフは作られる。中指が応答すべき割合は、人差し指 中指、中指 小指の外転によりセット設定される。薬指の位置が決定された後、小指の絶対的な外転は、相対的値から計算される。これはあるエラーを引き起こすが、それは把握という特徴には重大であると判断されない。

Cybergloveは、さらに掌が弓形になることを測定するためのセンサーを持っている。親指の先端と小指の先端を合わせようとする場合、掌部は多少弓形になり、薬指と小指が屈曲し、平面を変更する。また、この変化は、TVIIあるいはCMFのいくつかの形のようなある把握において起き、認識に役立つことができる。

それらは把握の区別に役立つ情報をめったに含んでいないので、グローブの手首ピッチおよびヨーの値によって返された最後の2つの値は、認識過程で使用されない。これに反して、ハンマーを把持する動作やスプーンを把持する動作のような把持している間に物体を移動させる場合、変化する手首の角度の値は付加的に加え、把握クラスの配置スペースを増加させること、練習する例の数がその境界を安定して定義するために必要だった。

4.1.3 接触センサー

次の主要な必要条件が、手表面をカバーする触覚センサーのために決定された。

1. それらは、掌を十分に大きくカバーするべきである。同じ物体での同じ把握を行なう場合さえ、接触表面は多少変わる。センサー(例えば指先上の)が小さすぎる場合、反応しないか、あるいは認識精度を減少させて、単に一部分になる。これを改善するために、ユーザは、センサーが有効な値を得るように把持の方法を変更することができる。しかし、これは、実行の自然さを縮小する。
2. それらはわずかな接触を検知するように十分に敏感であるべきである。ユーザは、センサーの反応を単に保証するために、与えられた把握またはオブジェクトに対して典型的でない力を働かせるようには依頼されてはならない。

3. それらは柔軟で、薄くあるべきである。したがって、それらは指または掌の形にフィットすることができる。硬いセンサーでは、機敏さと感度を非常に害するだろう。さらに、掌自身非常に柔軟であるので、よい適用範囲は、柔軟なセンサーを使用して、単に達成することができる。

このシステムのために、容量性圧力のカスタム・セット、敏感なセンサー、使用した。センサーはPressure Profileシステムズ社(PPS)によって製造されたものである。

それらは次の原理によって作動する(図4.19を参照)。伝導性の布で作られていた2つの電極が、距離 d のエアギャップによって分離される。それらは、従順な層(それはエアギャップが変わることを可能にする圧力の下で圧縮する)によって別々に維持される。距離 d が変わるように、センサーのキャパシタンスも変わる。キャパシタンスのこの変更は応用の圧力を決定するために測定される。2つの電極が連絡をとっていないので、結果はより反復可能である。また、センサーの実行は時間とともに下げた状態になる。さらに、それは温度の変化に、より敏感でより抵抗される。センサーは厚さ0.85mmである。それらのサイズおよび形はカスタマイズ可能である。それらは、60psiの原寸の範囲(FSR)を所有し、0.06psiまで敏感で、0.1%の非反復規模要因がある。それらはアナログ出力(さらにあることが処理した前にそれはアナログ/デジタル変換器によって変形されなければならない)を生産する。それらは非常に柔軟で、指のまわりで曲げられた時でさえ正確な情報を提供する。

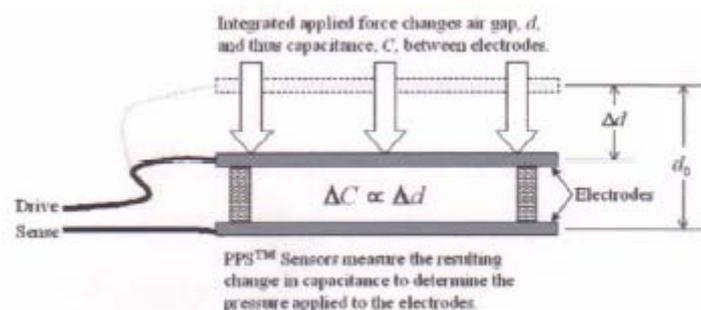


図4.3 容量性圧力センサーの解剖

私たちの分類表中の把握の認識については、これらが物体に応じて非常に変わるかもしれないので、接触ポイントについての正確な情報あるいは働かせられた力は重要ではない。少数の主要な手での接触の発生に関する情報だけが必要であるからである。

これらの分布は単独で手の形に基づいたあまりにも多くの類似性を示すので、分類表の把握を識別する見込みを最大限にするために選ばれた。表中の異なる把握の、およびそれらの予期された接触表面の分析がなされた(図4.21)。センサーで全体の手を

覆うことは、高コストであり、ユーザにして邪魔すぎるので、メイン表面は、把握の中で最も頻繁に使用し、識別されたあるいは特定の把握を認識するのに最も役立ついくつかのものだけを使用し、カバーした。



図4.4 柔軟な容量性センサー

予想通り、指先、特に人差し指および親指の表面が、最も使用された。中心に近い方の指セグメントの掌の側も、力把握の中でしばしば使用されるが、認識が手のひらの活性化に基づいたものとなることができるので、把握を識別するのに役立つと判断されなかった。

手のひらの上のセンサーの分配はそれほど厳密でないためにすぐに決定された。手のひらは、握力把握のためにもっぱら使用される。しかしながら、異なるクラスについては、一つでわずかな違いに気づくことができる。PoSおよびPoIでは、手のひらの全体の表面が平等に(小さなオブジェクトを除いて)カバーされている一方、PoHは、遠位の部分および放射状の部分上のPoEにもっと集中する傾向がある。中心に近い方の尺骨の中手骨の部分はめったに使用されない。

指側のいくつかの部分は、把握を識別するために特別に興味のあるように見つかった。特に、人差し指の放射状の遠位と中央の部分は側面の掌握(Lat)の中で使用される。それらは、遠位のパワー掌握(PoD)および三脚とLatを識別するのに役立つことができる。人差し指の放射状の中心に近い方では、標準の三脚(Tpd)あるいはPoDと三脚の変化(TVI、TVII)を識別するために使用することができる。人差し指に面する中指の側はPoD

およびいくつかのTpdを検知するのに役立つ．この分析に基づいて，触覚センサー配列のための次の配置が選ばれた．

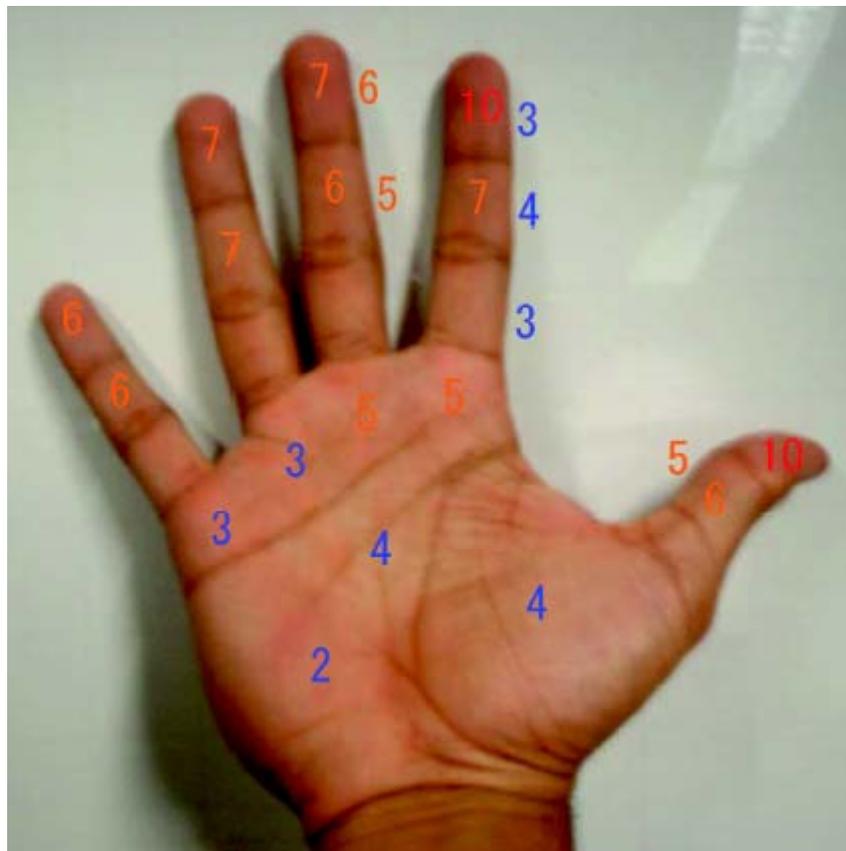


図4.5 手の接触部分の分析；数は抽象的な大きさである．それぞれの部分が，どれくらいしばしば異なる把持クラスの全体にわたって使用されるかを表す．10は，その部分がほとんどすべての把持クラスに一般に使用されることを意味する．1は，1つあるいは2つの把持クラスによってのみその部分が使用されることを意味する．親指と人差し指の指先は最も頻繁に用いられている部分である．



図4.6 触覚センサー（正面図の配置）

親指と指の先端については、指先の形に適応された円筒状の圧力センサーを使用した。それは指腹部の部分だけでなく、先端も(それは先端掌握のような把握を検知するのに役立つ)カバーする。手のひらはそれ自身4つの大きな水平なセンサーで覆われている。ここで、これらが、物体の形に依存する、1つの同じ把握のために非常に異なることができるので、正確な接触ポイントを認識することは重要ではない。もっと正確に言えば、接触が生じる一般表面は決定していることになっている。遠位の放射状のセンサーは最も重要な部分なので、すべての握力把握の中で使用される。放射状のセンサーだけの活性化はPoEのためのサインおよび遠位のものだけの活性化(PoHのためのサイン)でありえる。すべてのセンサーの同時の活性化はPoSかPoIによいサインで、人差し指の形を使用して、区別される。

指の側は以下のようにカバーされる。1つのセンサー、人差し指の遠位の密集方陣、中央の密集方陣および中心に近い方の密集方陣の放射状の側のために各々。これらは、LatおよびTpdの変化を検知するのに最も役立つ。1つのセンサー、Tpdの検知用の中指の遠位と中央の密集方陣の放射状の側のために各々。最後に、親指の遠位の密集方陣の各横の1つのセンサー。合計の量のセンサーは図4.22および4.23.の中で示されるように分配されて、16である。



図4.7 触覚センサー（側面図の配置）

4.1.4 センサー融合



図4.8 触覚センサーを配置したグローブ；センサーが適切な場所に常に適合すると保証するために，センサーは，細い弾性繊維グローブの内部に付けられる．それはCybergloveの下で着用していることになっている．設計は，両方の入力装置を別々に使用することも可能にしている．

認識装置の隠れマルコフ・モデルベースのアーキテクチャーは、Cybergloveからのデータおよび非常に上品な方法で触覚センサーを統合することを可能にする．同様の手姿勢および接触ポイント情報の融合は、[51]に既に提案された．しかしながら，触覚センサーからのデータは，カプロファイル分析を使用して，ユーザ・デモンストレーシ

ョンを分けるためにのみ使用していた。また、把握自体の分析はもっぱらグローブによって測定された指の関節角度に基づいていた。

この方法の中で、位置でかつ触覚、情報、単にHMMレコグナイザーおよび両方の区分化および分類への入力として使用される、結合した入力の流れに基づいたことになる。データはCybergloveから捕らえられ、38400ボートにペンティアムIII 550MHzのウィンドウズNTマシンにシリアルケーブルを通してその手段箱によって送信される。それが処理され、次に、さらに捕獲マシンのA/D変換器ボードに送った場合、触覚センサーからのデータはそれらの手段箱に1mのケーブルを通して最初に渡される。同期が作られ、タイムスタンプがそれに付けられる場合、データはすべてCorbaサーバー・アーキテクチャーによって最初にバッファされる。その後、それは、10ミリ秒の最大のリフレッシュレートで他のマシンに渡される。デモンストレーション、トレーニングおよび認識自体を記録するためのソフトウェアは個別のLinuxマシン上で走る。また、データはCorbaサーバーによってそれに最初に渡されるに違いない。ネットワーク潜在により、記録の間に10ミリ秒の一定のリフレッシュレートを維持することができないかもしれない。また、時々、10ミリ秒のフレームはスキップされた。しかしながら、HMMレコグナイザーが効率的に生じる雑音をフィルターするのに十分に強健だったように、これは認識精度に重要な効果はなかった。



図4.9 Cyberglove・触覚のグローブ・コンビネーション

4.1.5 分散触覚センサー付きサイバークロブから得られたデータ

分散触覚センサー付きサイバークロブから以下のデータが得られた。グラフの数値に対応する対象についてデータの最後に示す。

(1) Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型)

a. 関節角度1

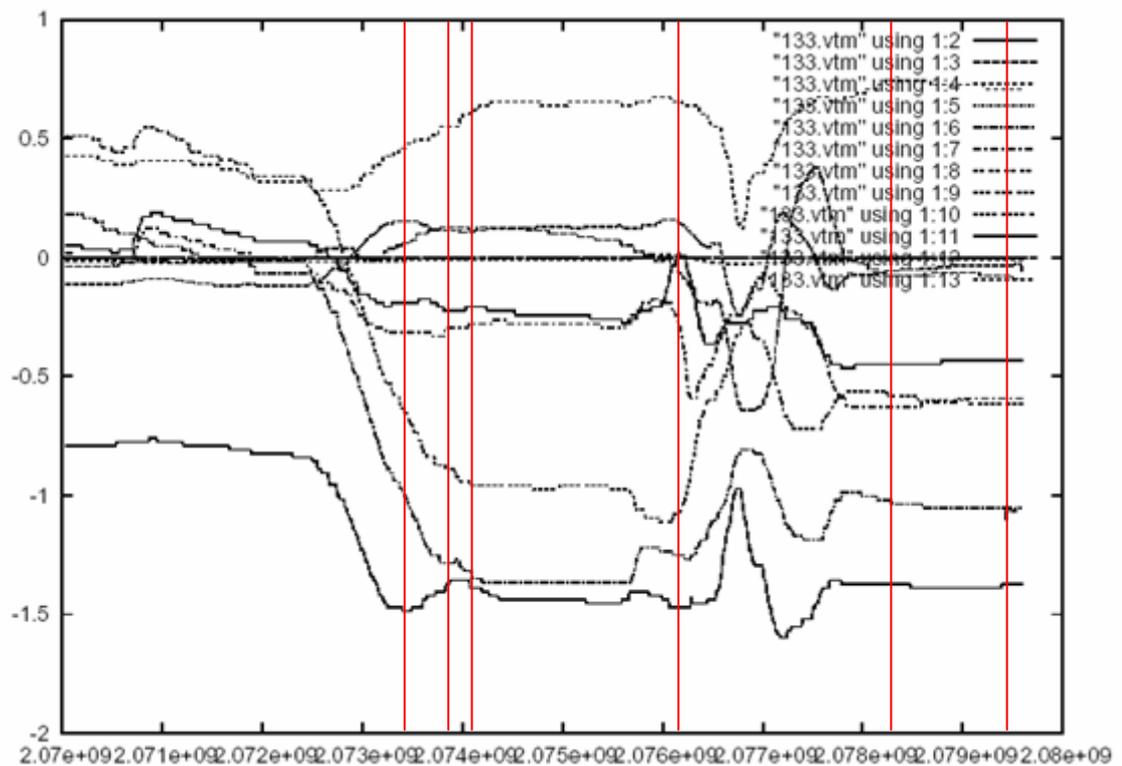
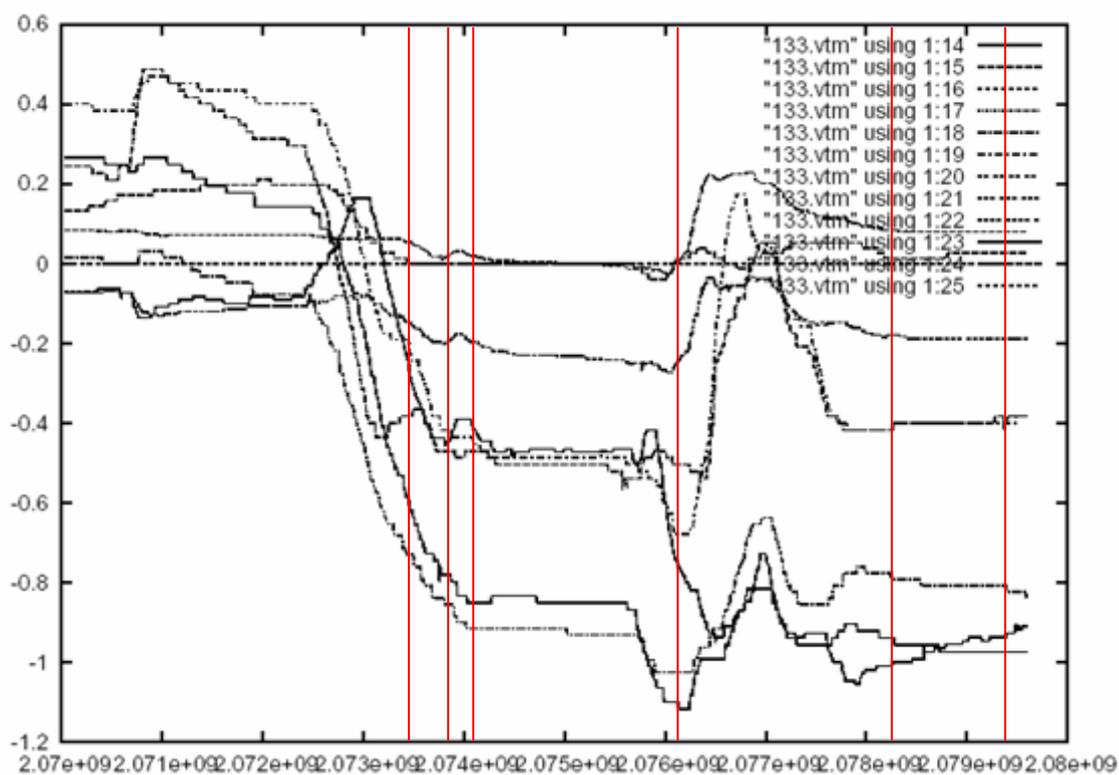
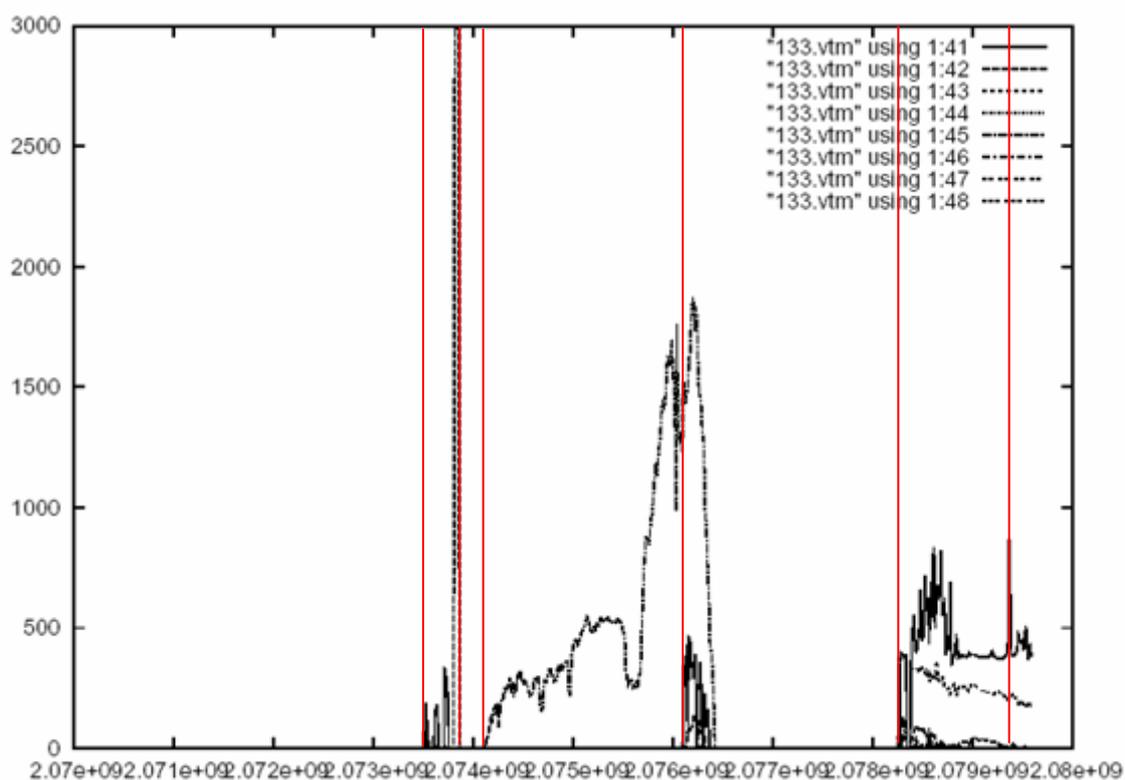


図4.10 Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型) 関節角度1

b. 関節角度2 図4.11 Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型) 関節角度2



c. 接触センサー情報 図4.12 Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型) 接触センサー情報



(2) TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持)

a. 関節角度1

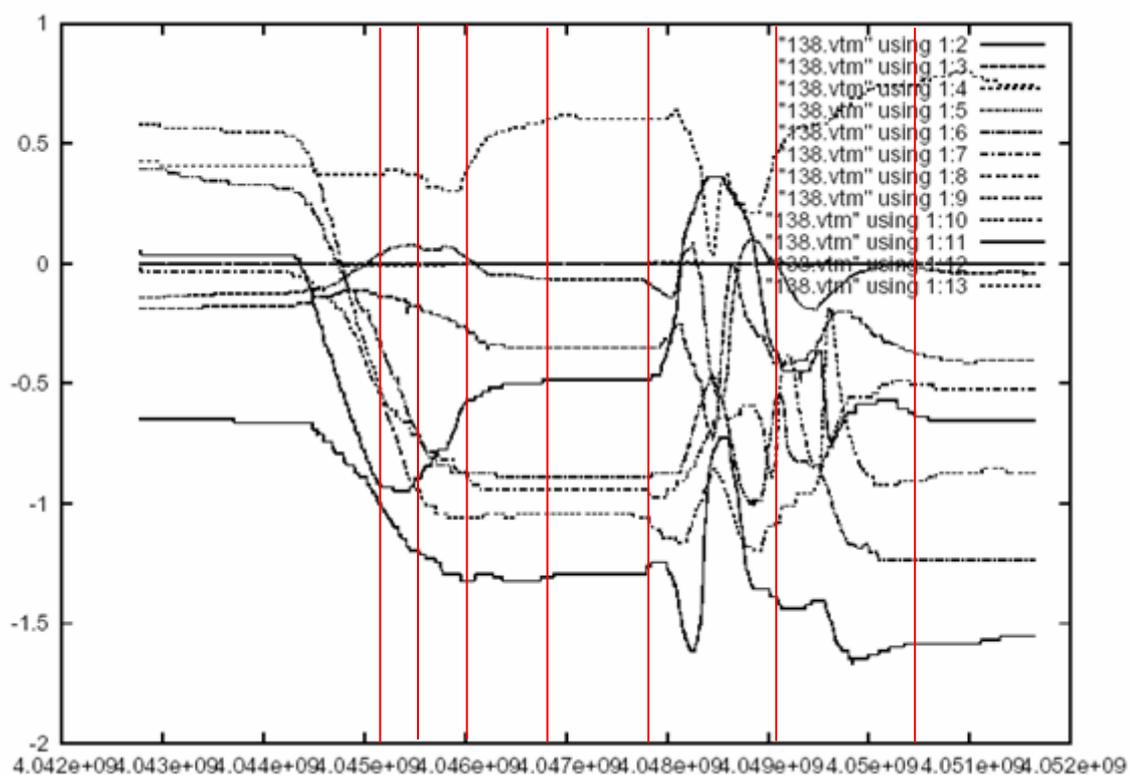
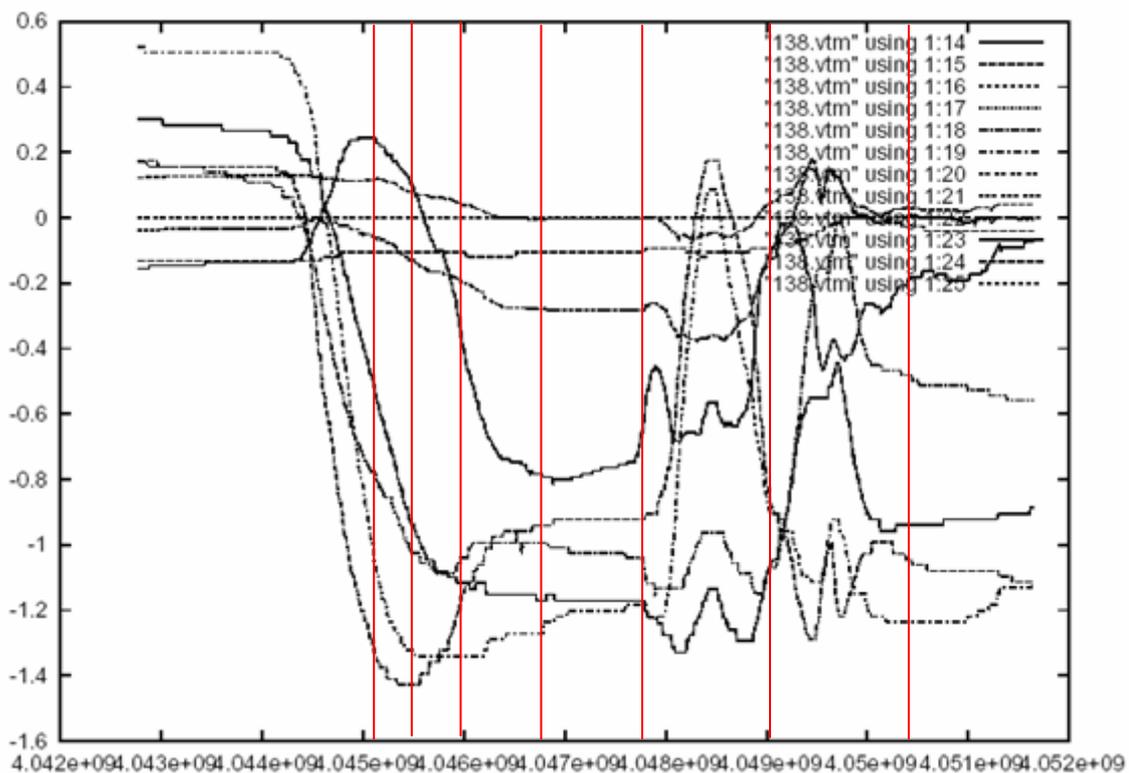
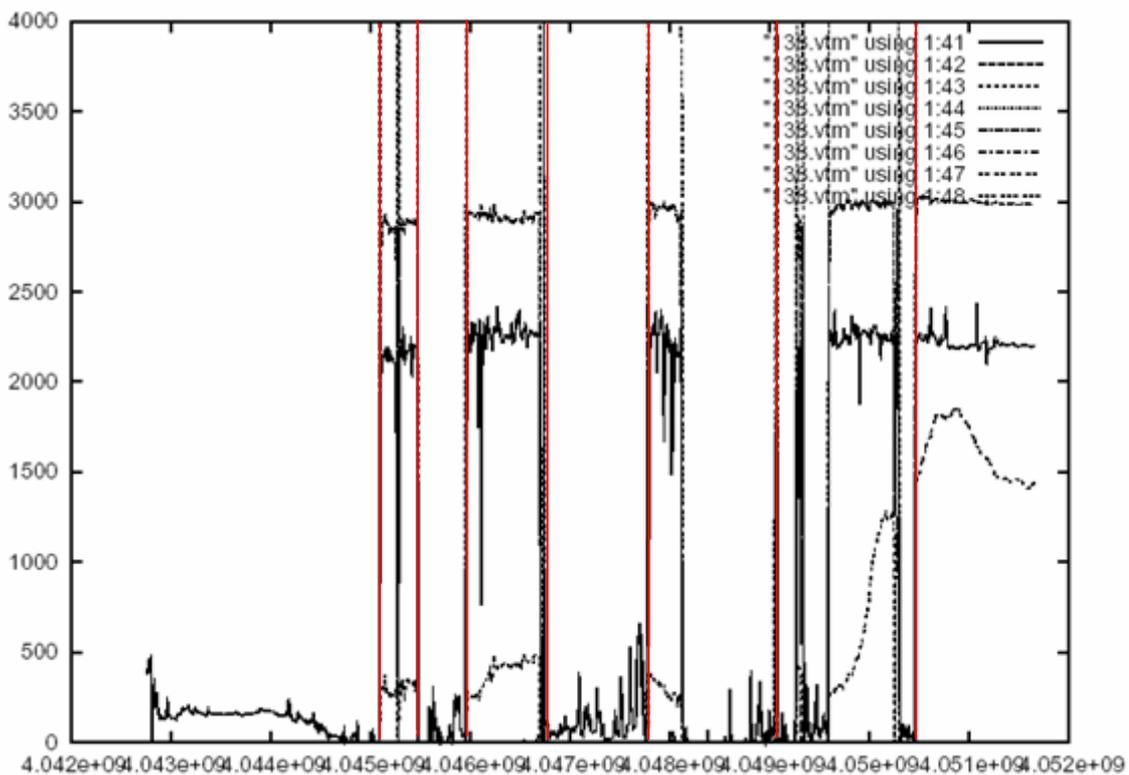


図4.13 TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持) 関節角度1

b. 関節角度2 図4.14 TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持) 関節角度2



c. 接触センサー情報 図4.15 TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持)接触センサー情報



(3) PMF(並列輕屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型)

a. 關節角度1

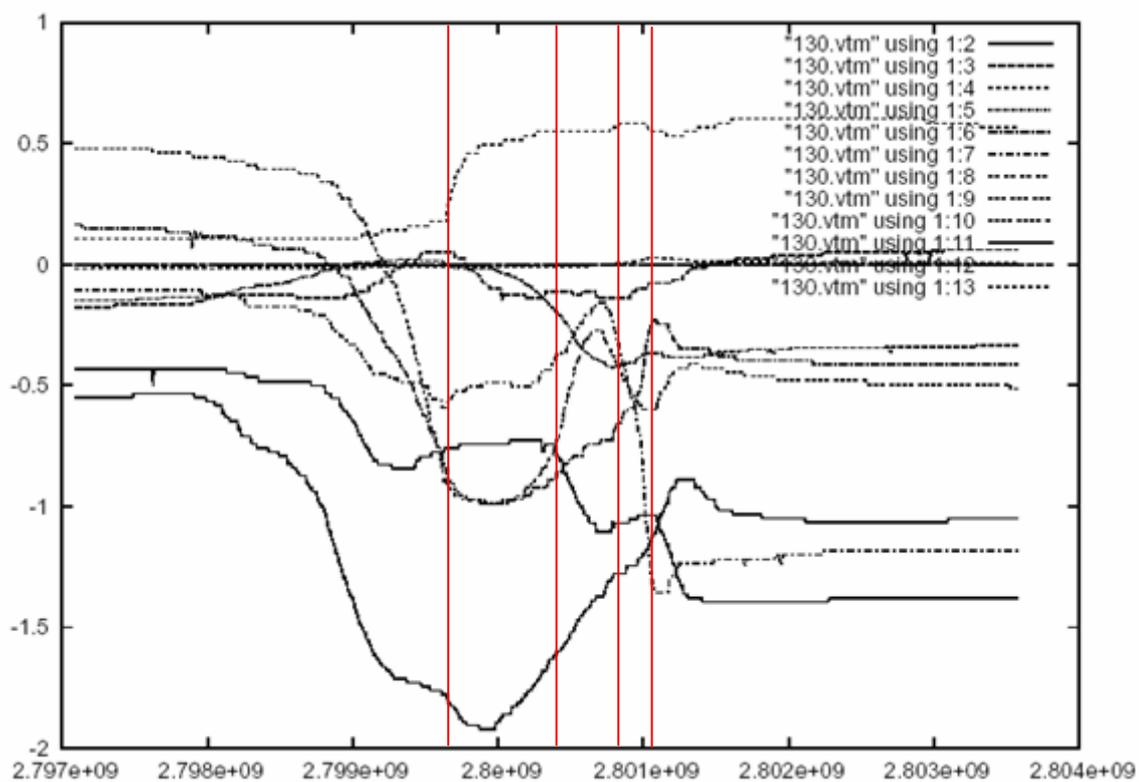
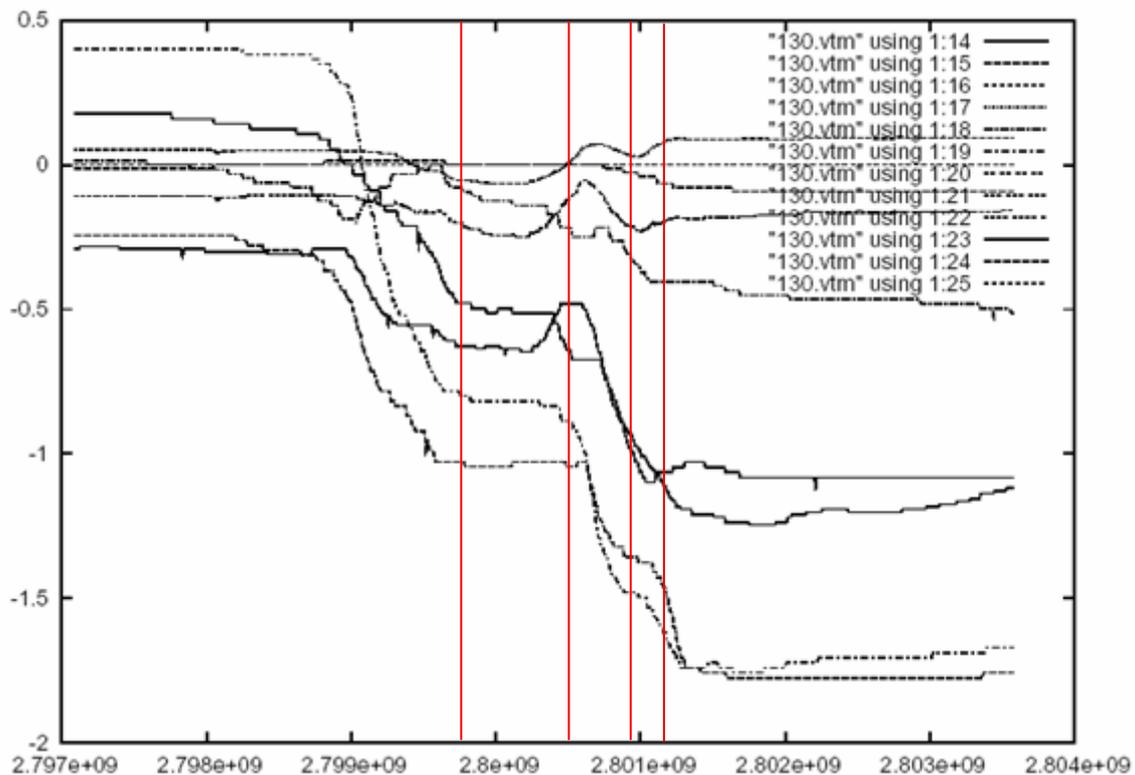
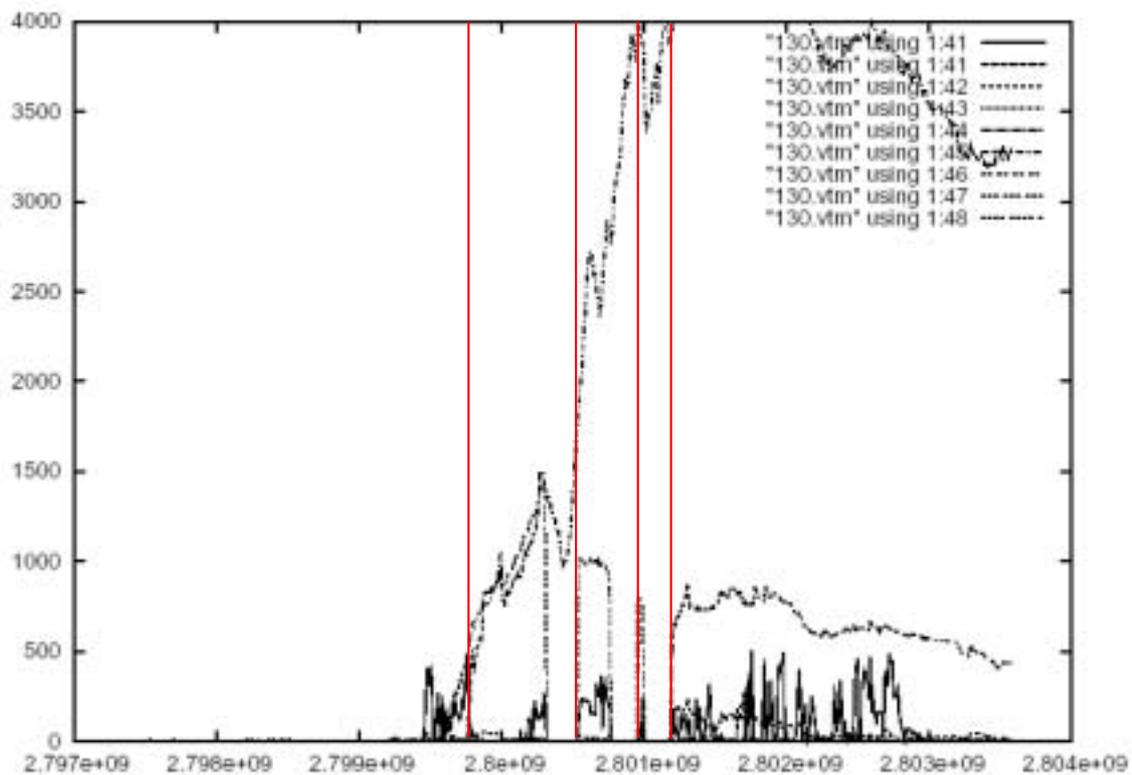


圖4.16 PMF(並列輕屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 關節角度1

b. 関節角度2 図4.17 PMF(並列軽屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 関節角度2



c. 接触センサー情報 図4.18 PMF Tpd 接触センサー情報



(4) Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持)

a. 關節角度1

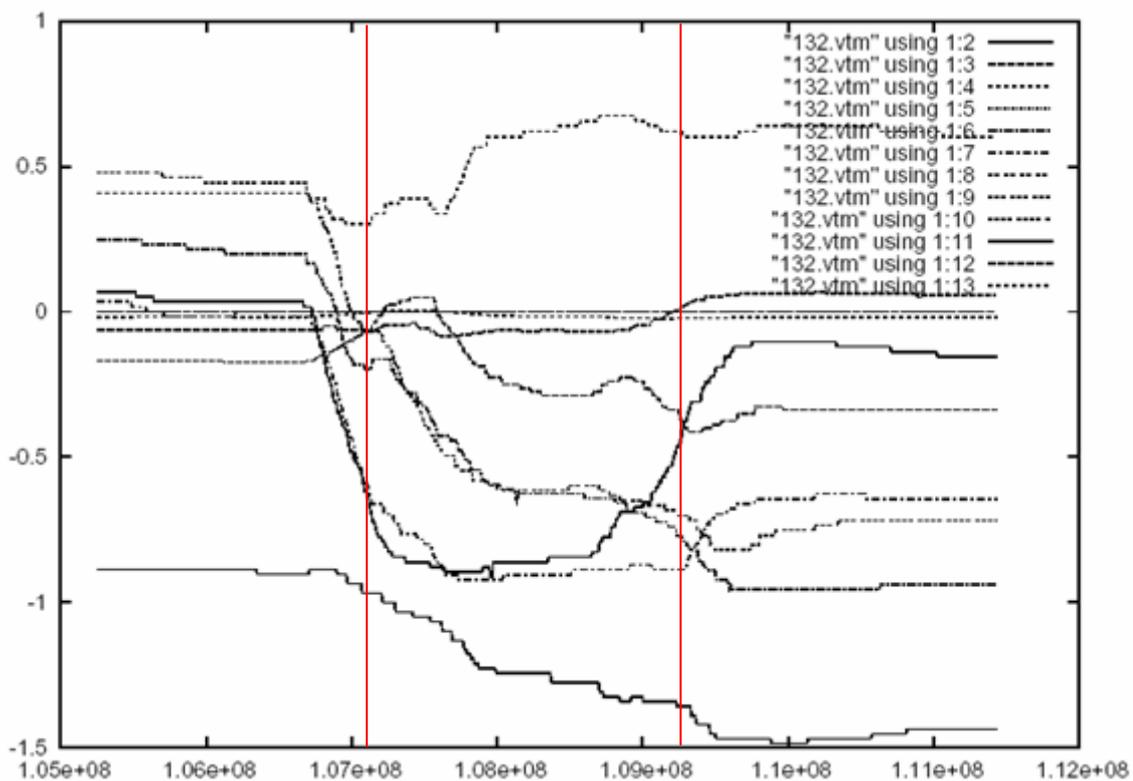
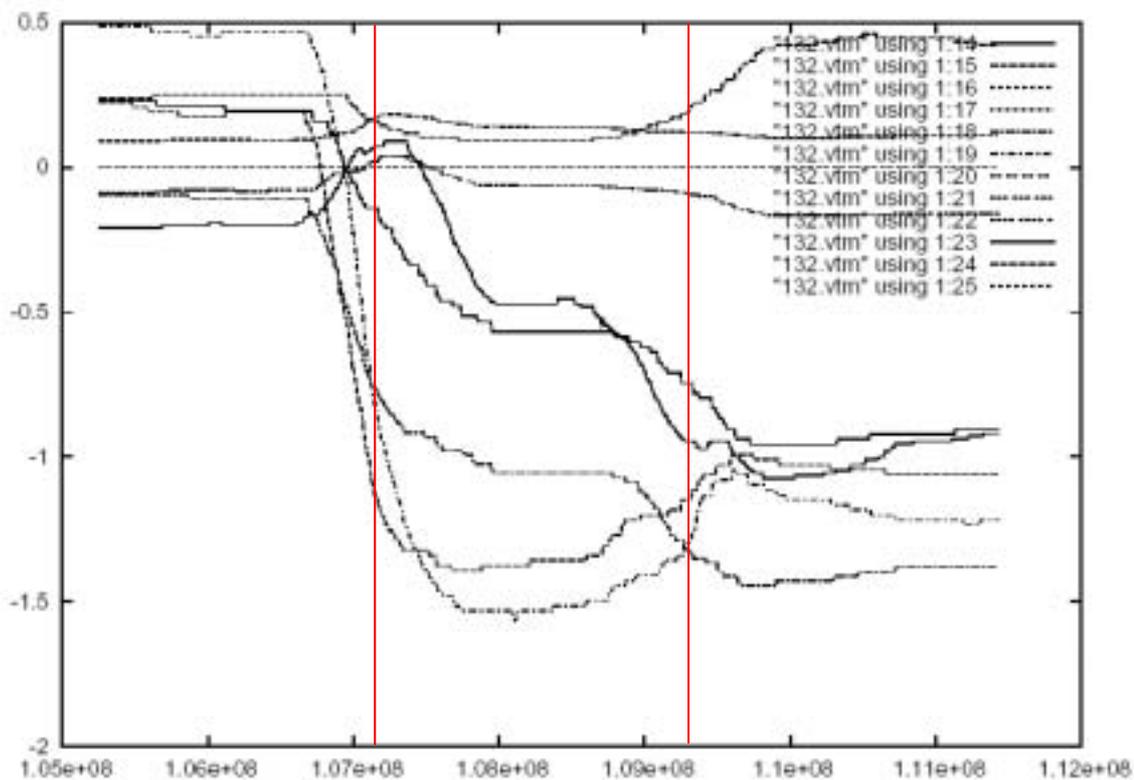
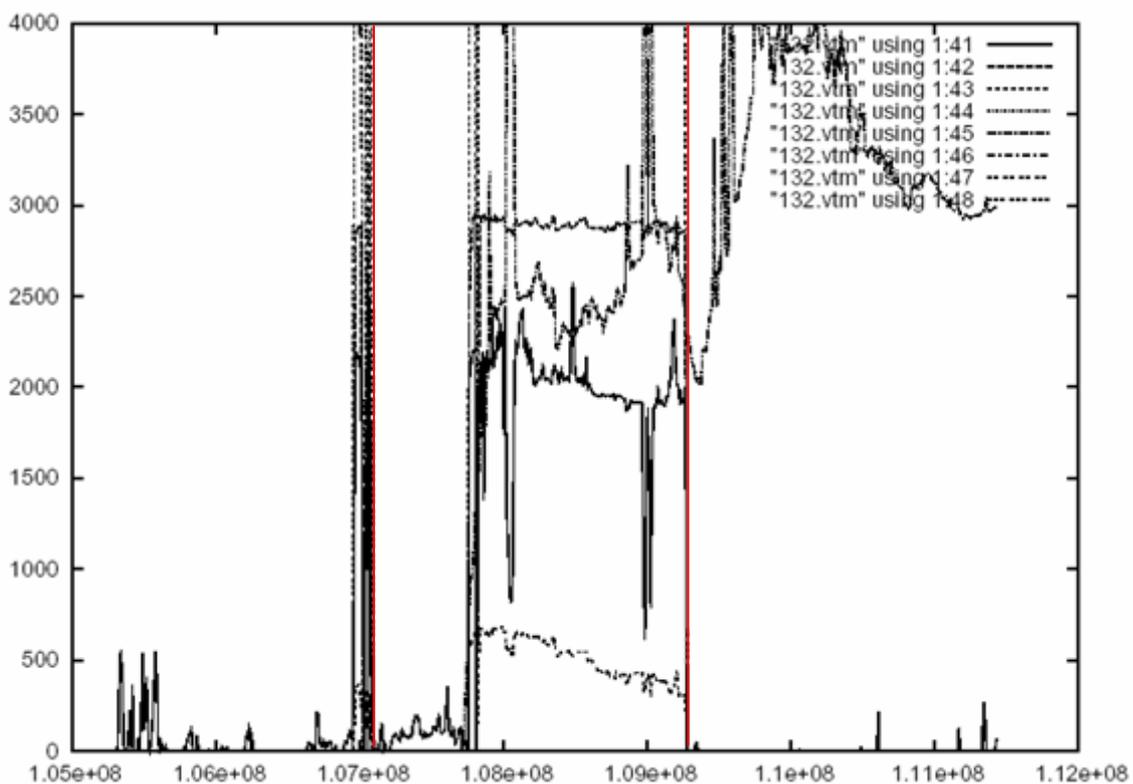


図4.19 Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持) 関節角度1

b. 関節角度2 図4.20 Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持) 関節角度2



c. 接触センサー情報 図4.21 Tpd Tip 接触センサー情報



(5) Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型)

a. 關節角度1

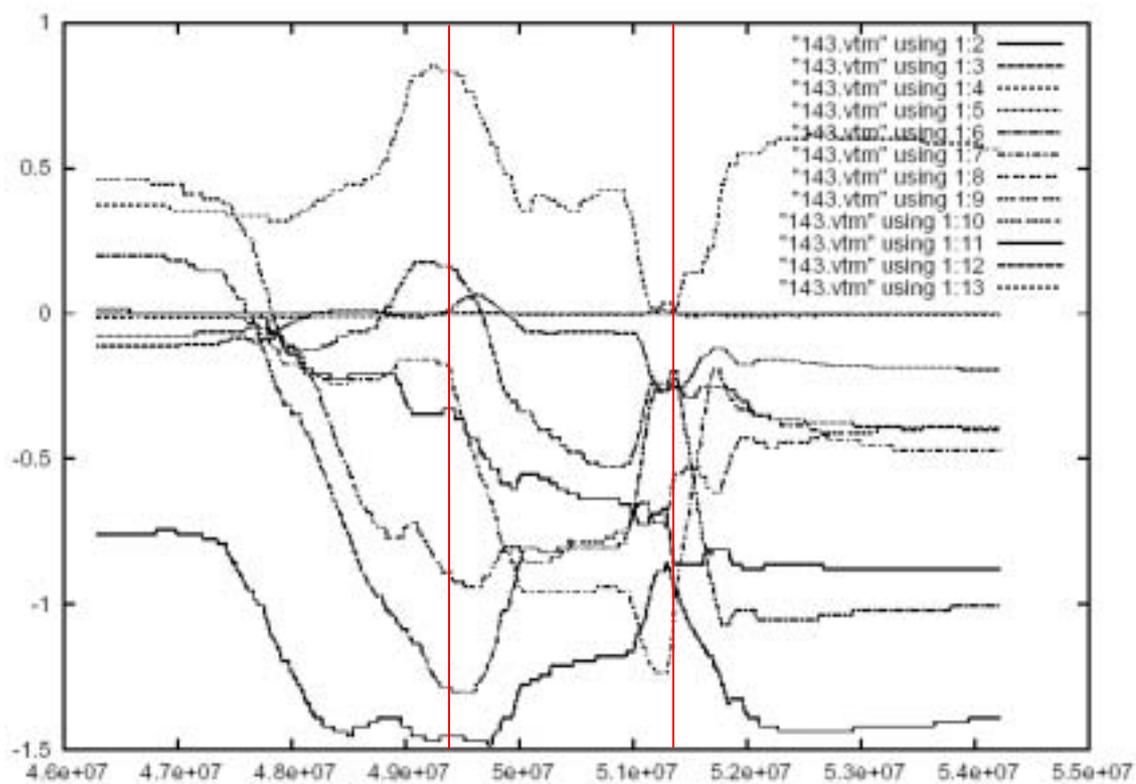
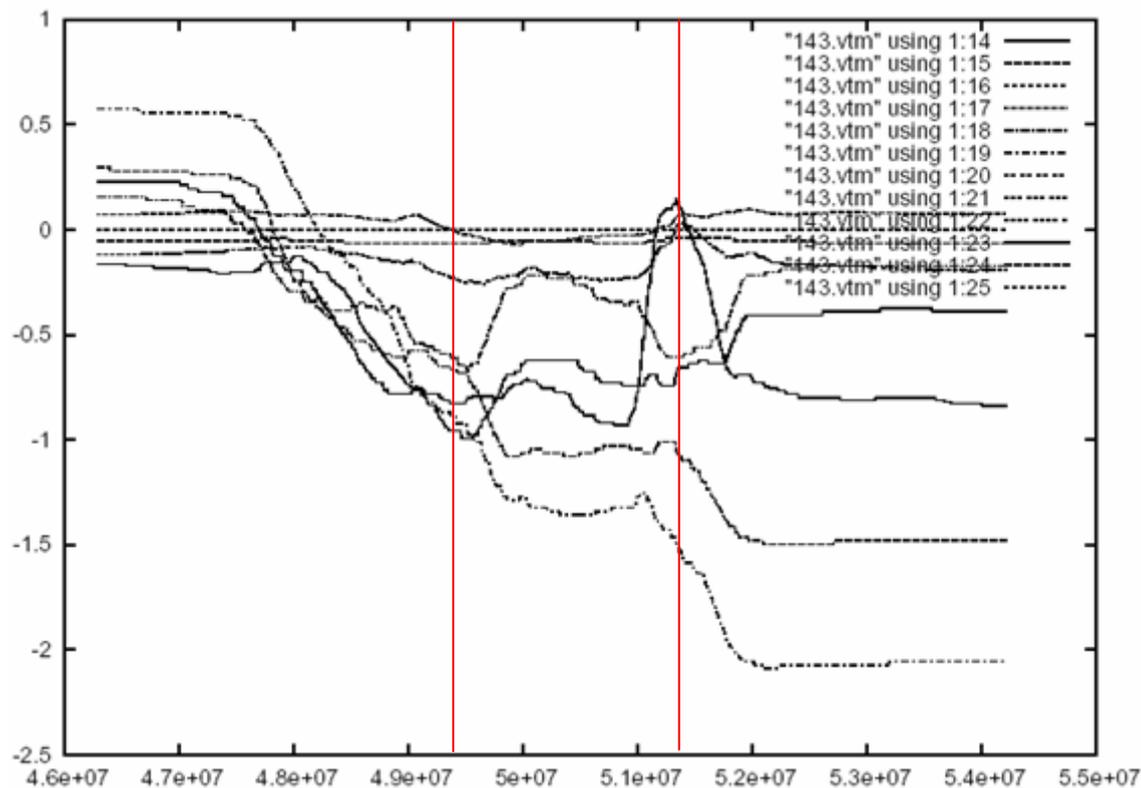
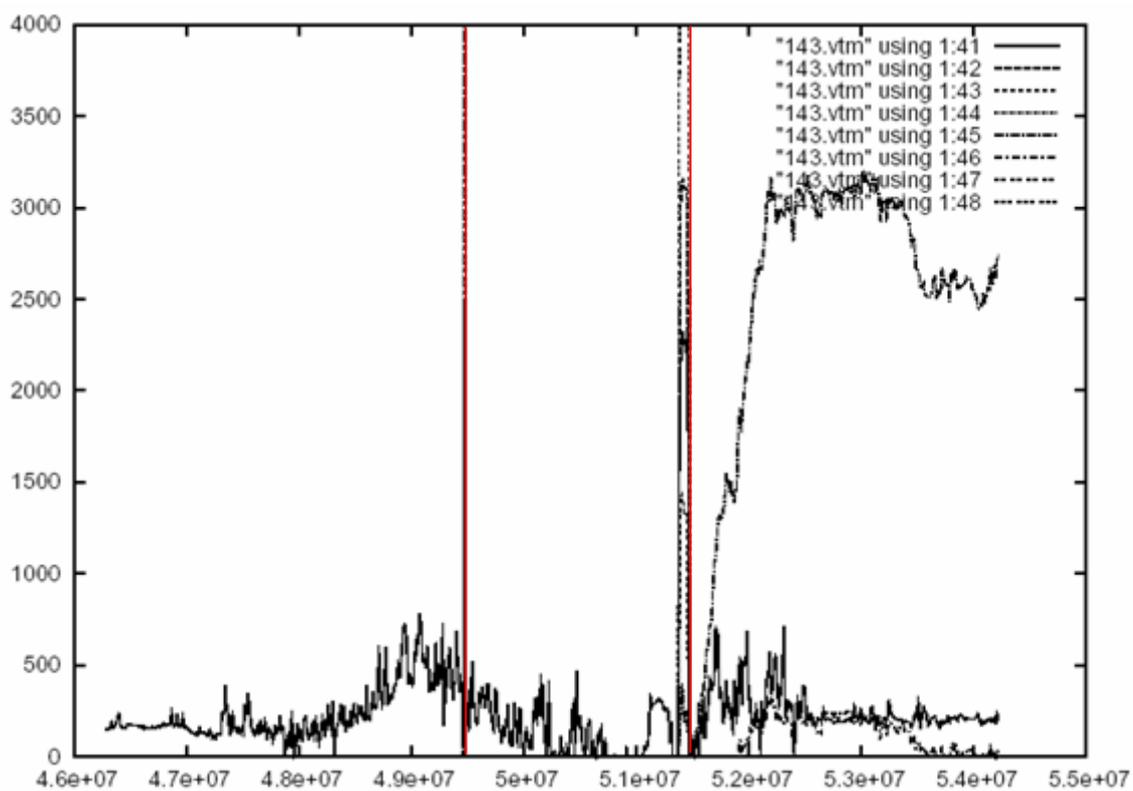


図4.22 Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 関節角度1

b. 関節角度2 図4.23 Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 関節角度2



c. 接触センサー情報 図4.24 Tip Tpd 接触センサー情報



(6) PMF(並列輕屈曲把持) TV (三面把持 - 亜型)

a. 關節角度1

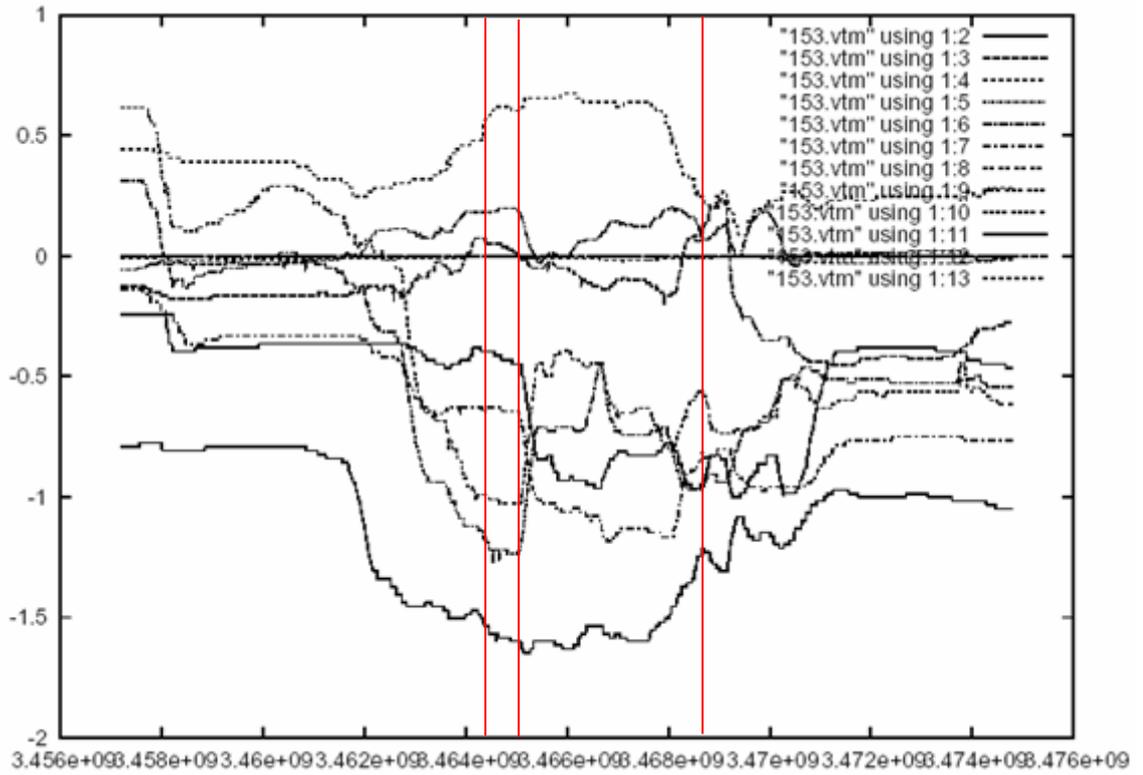
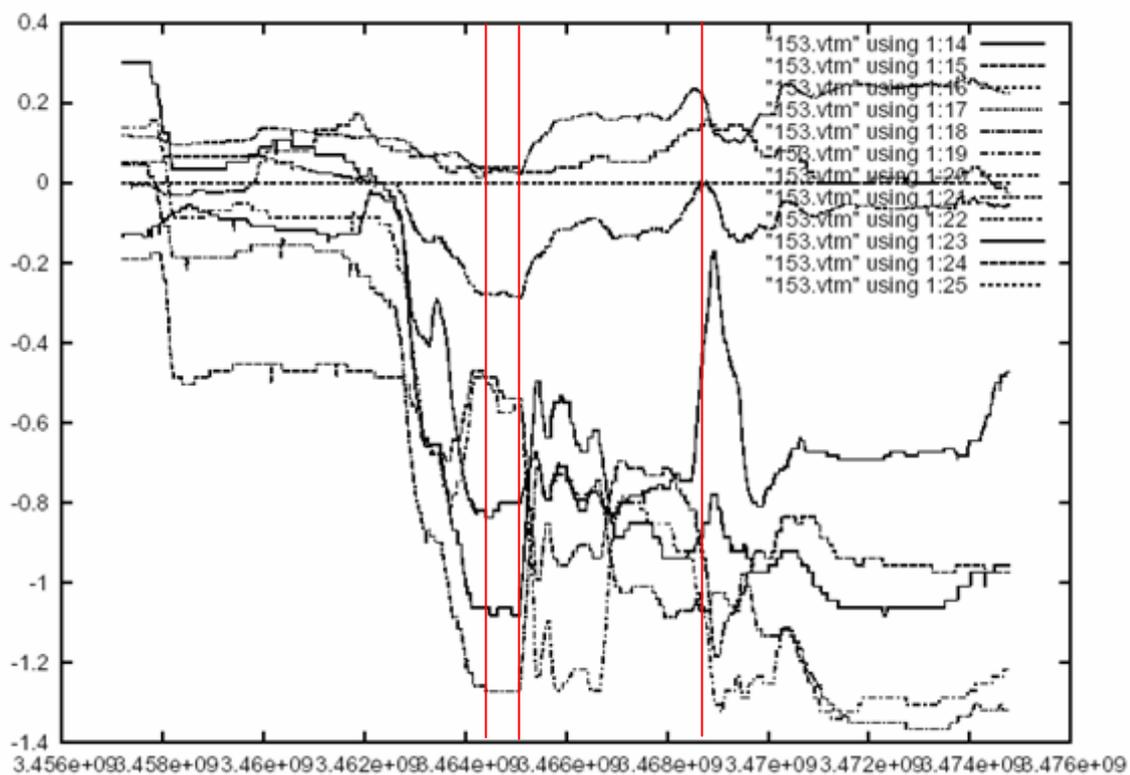
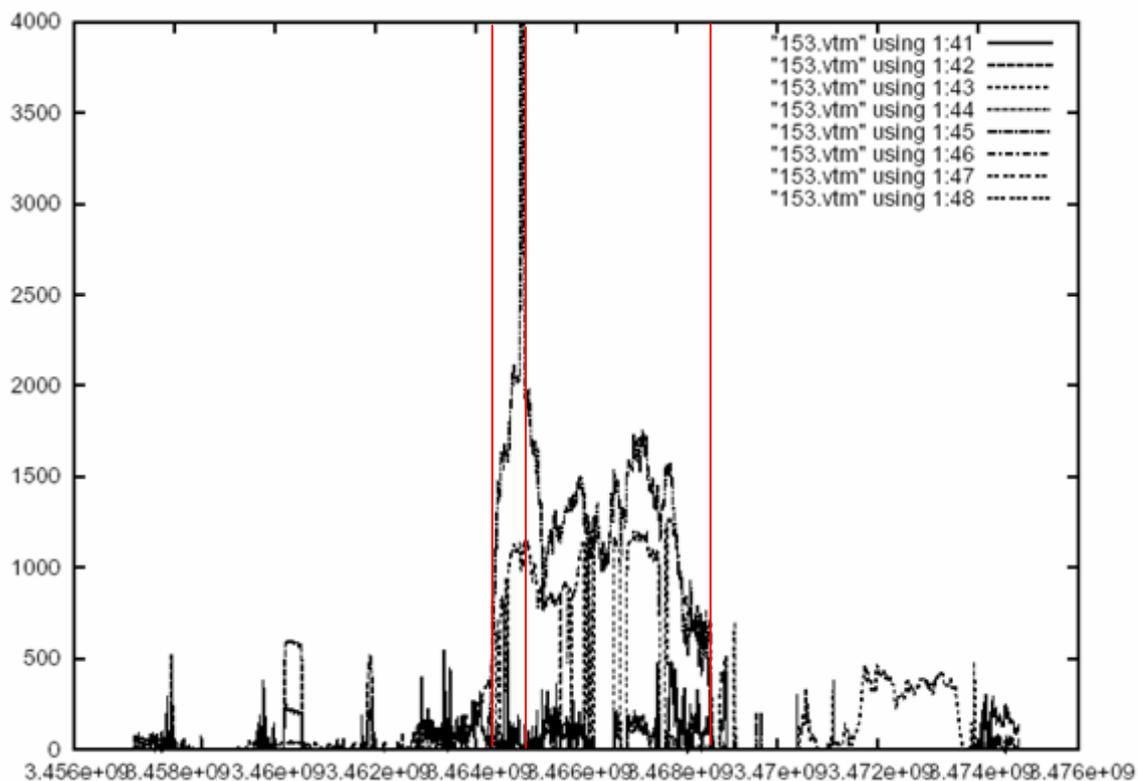


圖4.25 PMF(並列輕屈曲把持) TV (三面把持 - 亜型) 關節角度1

b. 関節角度2 図4.26 PMF(並列軽屈曲把持) TV (三面把持 - 亜型) 関節角度2



c. 接触センサー情報 図4.27 PMF TV 接触センサー情報



(7) TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持)

a. 関節角度1

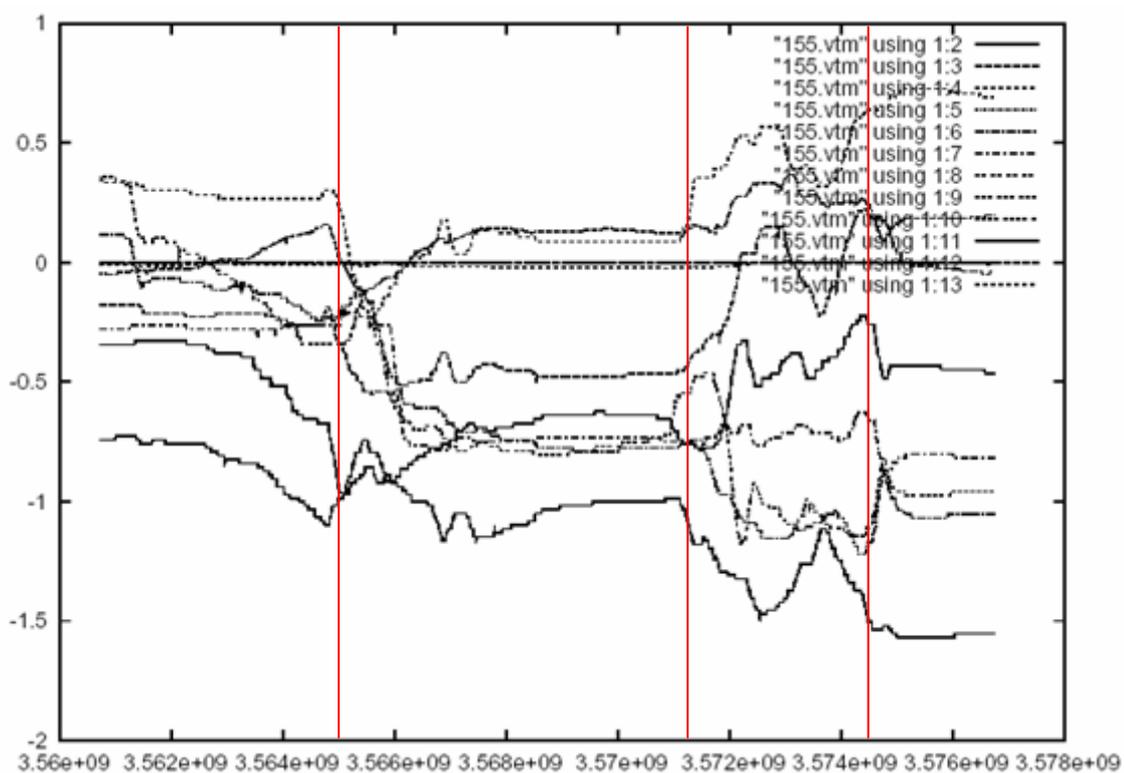
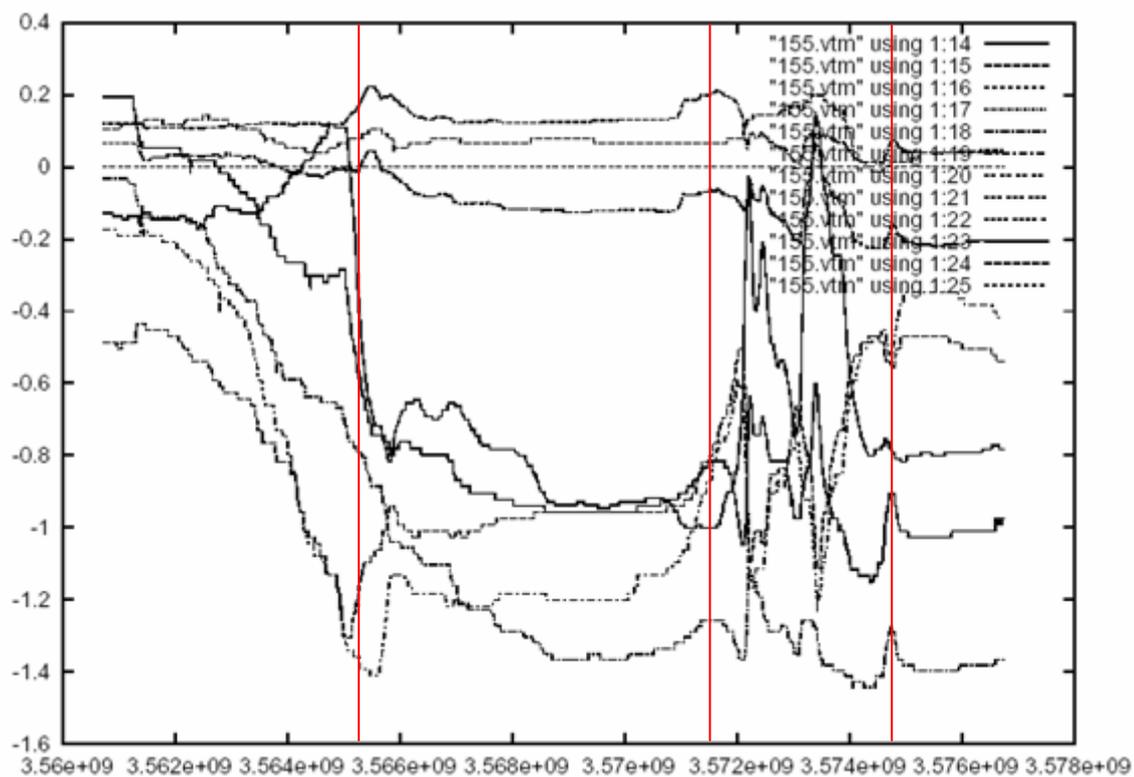
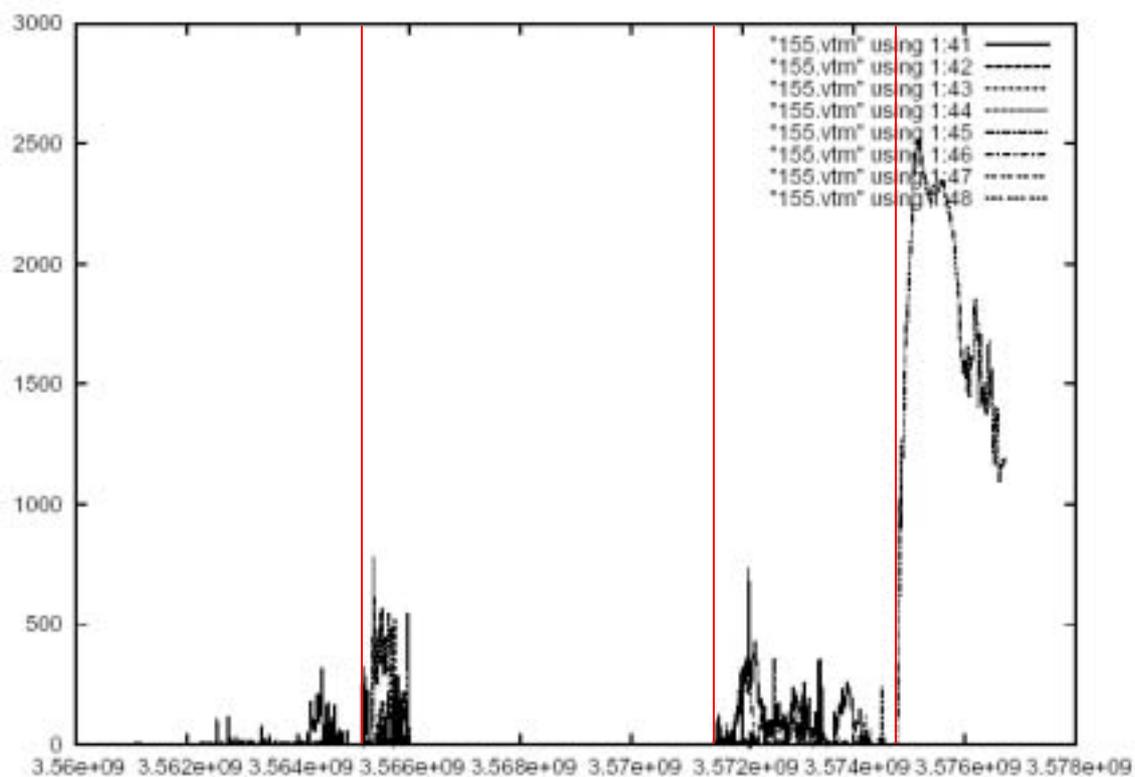


図4.28 TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持) 関節角度1

b. 関節角度2 図4.29 TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持) 関節角度2



c. 接触センサー情報 図4.30 TV PMF 接触センサー情報



数値参照

1 ; 時間

関節角度 2 ~ 2 5 (2 4 , 内 1 8 有効)

2 ; 親指回転 TMJ

3 ; 親指 MPJ (親指の中間から付け根)

4 ; 親指 IJ (外側の親指関節 , 親指の先から中間)

5 ; 親指外転 (親指と人差し指の間)

6 ; 人差し指 MPJ (人差し指の中間から付け根)

7 ; 人差し指 PIJ (人差し指の先から第二関節)

8 ; x

9 ; x

1 0 ; 中指 MPJ (中指の中間から付け根)

1 1 ; 中指 PIJ (中指の先から第二関節)

1 2 ; x

1 3 ; 中指 人差し指外転 (中指と人差し指の間)

1 4 ; 薬指 MPJ (薬指の中間から付け根)

1 5 ; 薬指 PIJ (薬指の先から第二関節)

1 6 ; x

1 7 ; 薬指 中指外転 (薬指と中指の間)

1 8 ; 小指 MPJ (小指の中間から付け根)

1 9 ; 小指 PIJ (小指の先から第二関節)

2 0 ; x

2 1 ; 小指 薬指外転 (小指と薬指の間)

2 2 ; 手の平アーチ

2 3 ; 手首ピッチ

2 4 ; 手首ヨウ

2 5 ; x

接触センサー情報 3 3 ~ 4 8 (1 6)

3 3 ; 手の平 . 左下

3 4 ; 手の平 . 右下

3 5 ; 手の平 . 右上

3 6 ; (手の平 . 右上)

3 7 ; 手の平 . 左上

3 8 ; x

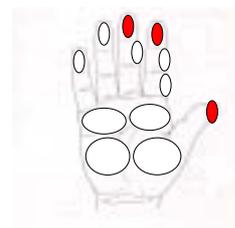
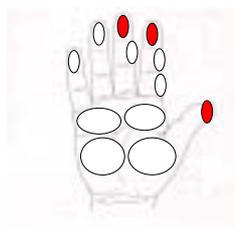
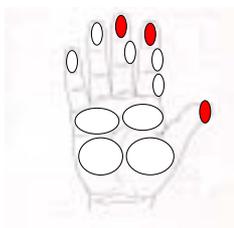
3 9 ; x

4 0 ; (手の平 . 右上)

- 4 1 ; 人差し指 . 外上
- 4 2 ; 人差し指 . 外下
- 4 3 ; ×
- 4 4 ; 薬指先
- 4 5 ; 親指先
- 4 6 ; 小指先
- 4 7 ; 中指先
- 4 8 ; 人差し指先
(中指外がない)

4.2 観察された中間把持

以下に7種類の静的把持間の遷移, 操り動作に観察され, セグメントされた中間把持を示す. 接触状態によっては, 8種類観察され, 関節角度も含めた場合は, 10種類観察された. 上の図は, 接触状態を表し, 下の図は, 関節角度を示している.



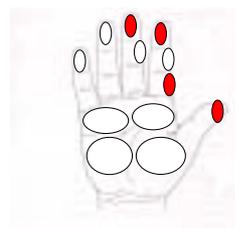
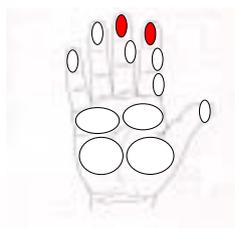
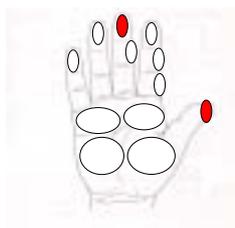
a1



a2



a3





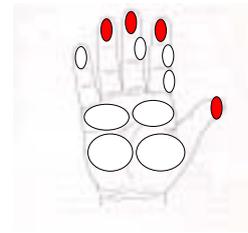
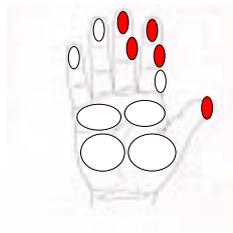
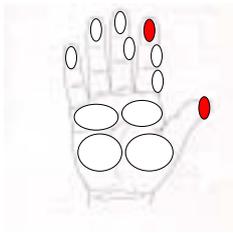
b



c



d



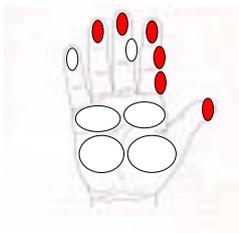
e



f



g



h

図4.31 観察された中間把持

4.5 中間把持遷移グラフ

抽出した7種類の茶道における静的把持間の遷移，操り動作に関して，観察された中間把持により記述する．

(1) Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型)

・茶杓を掴み，茶を掬う動作

六つの区分

親指，人差し指，中指で茶杓を把持 (Tip) .

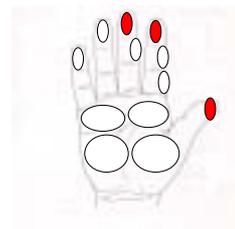
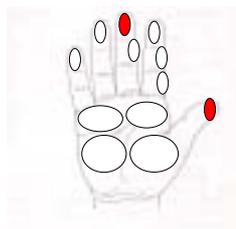
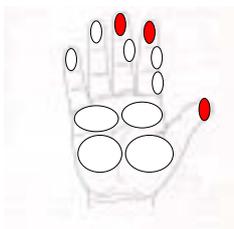
親指と中指で茶杓を挟み，人差し指を外す .

人差し指を移動し，親指，人差し指，中指で茶杓を把持 .

親指を外し，人差し指と中指で茶杓を把持 .

親指で茶杓を持ち上げる .

茶を掬う準備 (TV) .



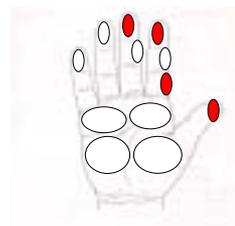
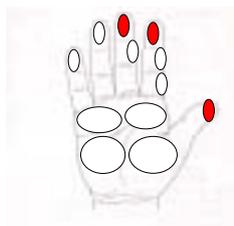
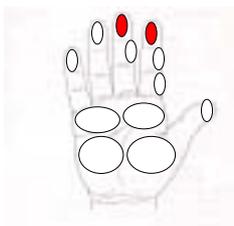
a1



b



a2



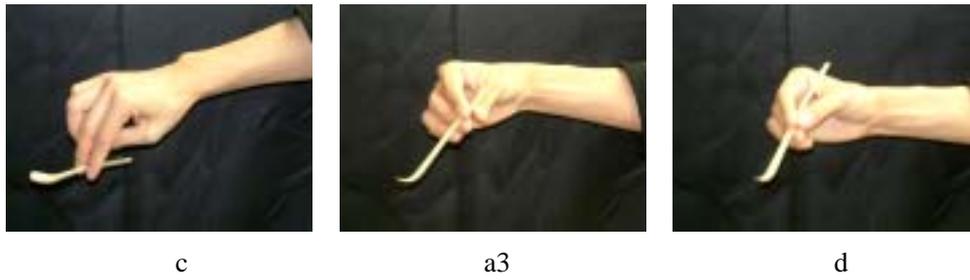


図4.32 Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型) 中間把持記述

(2) TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持)

・茶を掬い、茶杓を置く動作

七つの区分

茶杓をTV の形で親指，人差し指，中指で把持．

中指と人差し指で茶杓を挟み，親指を外す．

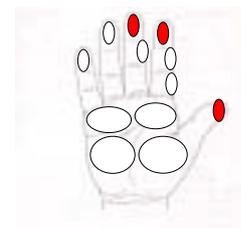
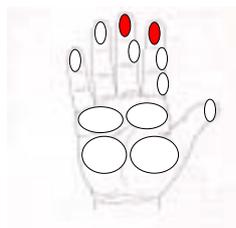
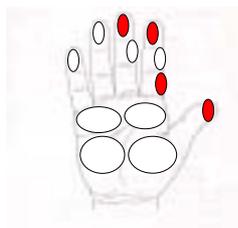
親指を移動し，親指，人差し指，中指で茶杓を把持．

中指と親指で茶杓を挟み，人差し指を外す．

人差し指を移動し，親指，人差し指，中指で茶杓を把持．

親指と人差し指で茶杓を挟み，中指を外す．

中指を添え，親指，人差し指，中指で茶杓を把持 (Tip)．



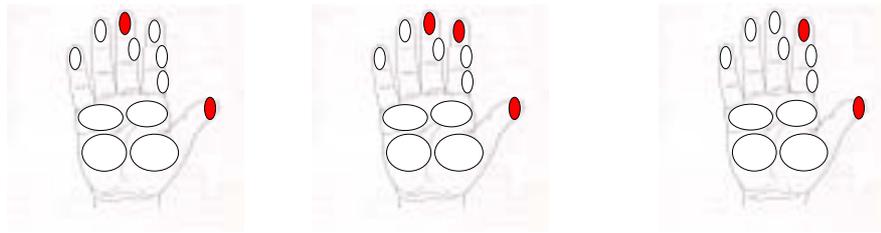
d



c



a2



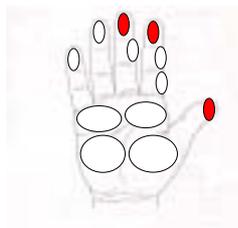
b



a1



e



a1

図4.33 TV (三面把持 - 亜型) Tip(指尖把持) 中間把持記述

(3) PMF(並列軽屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型)

・茶筴を掴み、茶を点てる動作

四つの区分

親指，人差し指，中指で茶筴と掴む (PMF) .

親指と中指で茶筴を挟み，人差し指を外す .

親指と中指を軸に，人差し指で茶筴を回転させる .

茶を点てる準備 (Tpd) .

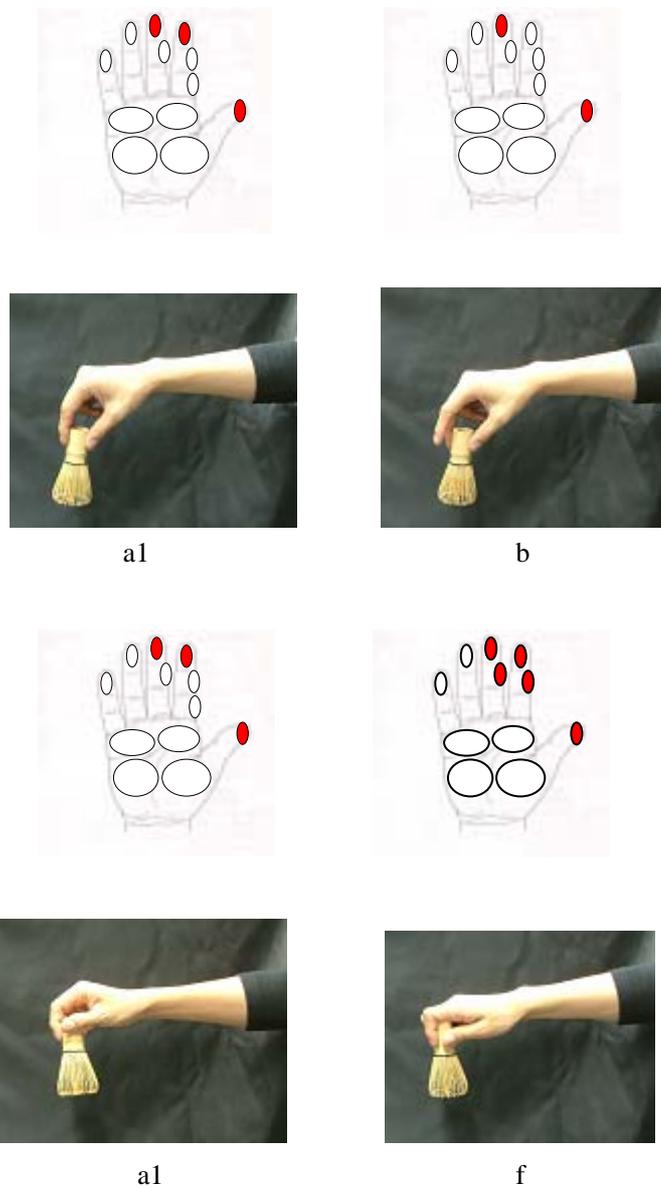


図 4.34 PMF(並列軽屈曲把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 中間把持記述

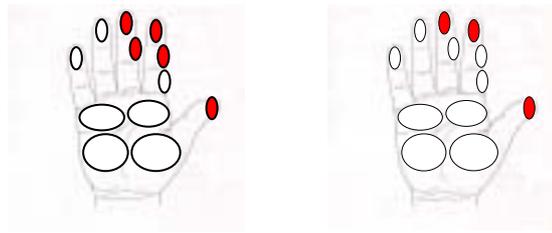
(4) Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持)

・茶を点てて，茶筴を器で止める動作

二つの区分

茶筴と掴む (Tpd) .

指を伸ばしながら，茶筴を回転させ，Tip の形で把持，静止 .



f



a1

図4.35 Tpd(三面把持 - 標準型) Tip(指尖把持) 中間把持記述

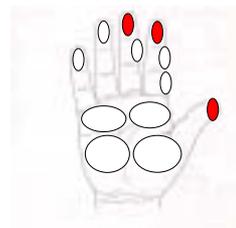
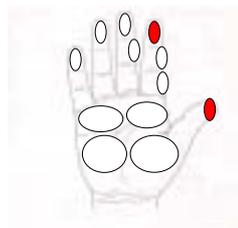
(5) Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型)

・ 爪楊枝を掴み、菓子を切る動作

二つの区分

親指と人差し指で爪楊枝を把持 (Tip)

親指と人差し指で支えながら中指で爪楊枝を移動 (Tpd)。



e



a4

図4.36 Tip(指尖把持) Tpd(三面把持 - 標準型) 中間把持記述

(6) PMF(並列軽屈曲把持) TV (三面把持 - 亜型)

・ 畳で火箸を支えた状態から移動し，炭を掴む動作

三つの区分

親指，人差し指，中指で火箸を支える (PMF) .

中指を箸の間に入れていき，親指・人差し指・中指・薬指で箸を持つ準備 .

それぞれの箸を押さえる (TV)

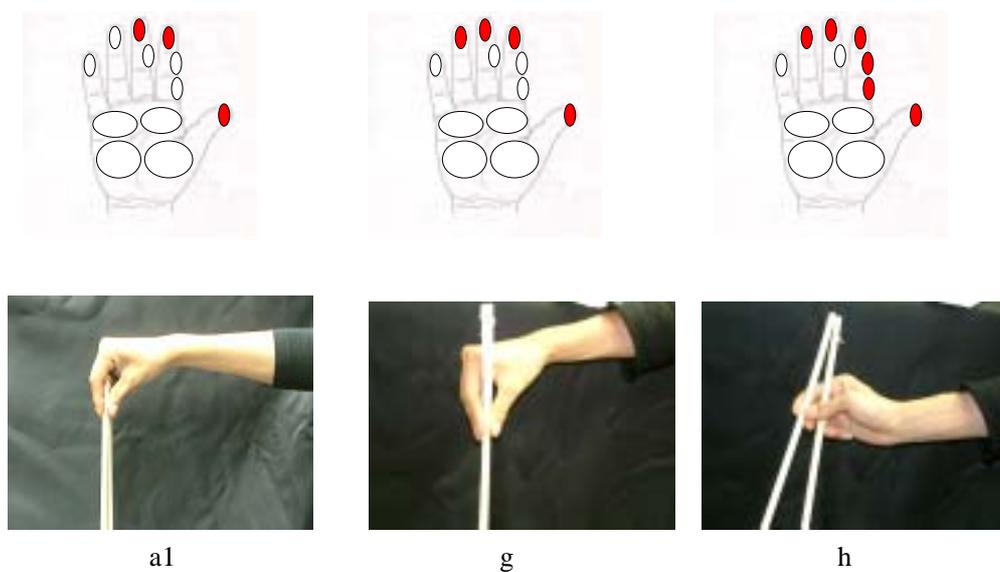


図4.37 PMF(並列軽屈曲把持) TV (三面把持 - 亜型) 中間把持記述

(7) TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持)

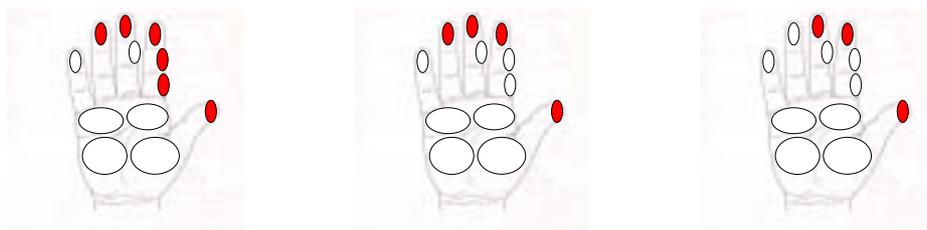
・ 炭を置き，移動し，畳で火箸を支える動作

三つの区分

火箸を使用する形 (TV) .

中指を引いて，箸を閉じていく .

親指，人差し指，中指で火箸を支える (PMF) .



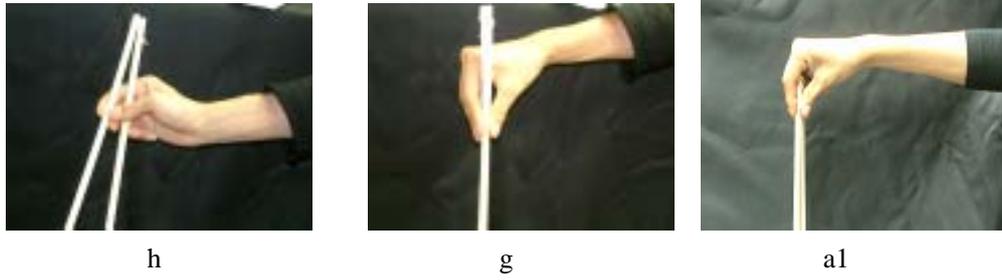


図 4.37 TV (三面把持 - 亜型) PMF(並列軽屈曲把持) 中間把持記述

第5章

操り遷移の生成方法

第5章 操り遷移の生成方法

本章では、我々の研究グループが開発した上半身ヒューマノイドロボットを用いた茶道、絵筆による持ち替え動作に関しての実装・実験について述べる。また、それに関連して、上半身ヒューマノイドロボットの構造、物体認識の為に画像処理システム、コンフィギュレーションスペース (C-Space) の概念についても述べる。

5.1 操り遷移の生成方法

まず、物体の操り動作を行う上で、物体の位置、姿勢、大きさを知らなければ、最初の静的把持に移ることができない。ここでは、信頼度の高い物体認識システムが求められる。そこで、物体認識に関しては、3次元テンプレートマッチング (3DTM) 法をもとにした同定手法をステレオ視覚装置の出力に適用することで同定した。同定に必要な環境物体の形状・色モデルは、実物体を元にCADを使用して生成した。以下で詳しく述べる。

持ち替えに関しては、それぞれの中間把持に関しての接触状態が必ず実現するよう以下の条件式を与え、センサフィードバックを用いた。 x 、 y は、接触センサ付きデータグローブから取得した人間の接触センサ情報を参照とした。ロボットの接触センサの値が x より小さい場合は、大きくなる様、 y より大きい場合は、小さくなる様、関節角度を微調整する。 p_i は、実行時触覚センサ情報を、 M は、参照反応触覚センサ情報集合を示している。

$$y > p_i(t) > x, (x, y > 0, i \in M(t)) \quad (5.1)$$

そして、関節角度は、データグローブから取得した人間の関節角度を参照とした。人間の手とロボットのハンドは構造が違う為、関節角度の決定は、人間による再教示が必要となった。まず、データグローブから人間の関節角度を入力する。そして、目標とする中間把持が達成できない場合は、人間がロボットハンドの動きを観察し、目標とする中間把持が達成できるよう多少関節角度のパラメータを変更することで補償する方法を行った。 s は、ロボットの手形状 (関節角度) を、 s_o は、人間の手形状 (関節角度) を示している。

$$s(t) \approx s_o(t) \quad (5.2)$$

中間把持から中間把持への遷移は、目標とする中間把持の接触状態の達成を次の目標とする中間把持の起点にし、関節角度を変化させていく。また、物体を把持する場合、力が

均衡するように指は対向させた。

また，障害物回避に関しては，コンフィギュレーション空間（C-space）の概念を利用し，アドホックに与えて解消した。

5.1.1 物体認識システム

環境物体の認識には3次元テンプレートマッチング（3D Template Matching:3DTM）[46]法を使用している。3DTMとは，3次元距離データ中において，あらかじめ対象のおおまかな位置と実物体を基にCADにより手動で作成した3次元幾何モデルが既知であるという前提の下で，対象物の正確な位置と姿勢を推定する手法である。

3DTMでは，対象物体の3次元モデルを，レンジデータなどによって得られた対象物体の3次元データ中に投影し，モデルの原点とそれに最も近い周囲の3次元点との重みつき距離の和の平均を求める。この和を指標として，これが最小となる状態に収束するようにモデルの位置・姿勢を変化させていく。収束地点でのモデルの位置・姿勢を変化させていく。収束地点でのモデルの位置・姿勢が推定値となる。

以下は，具体的な方法について述べる。

- 物体領域の切り出し

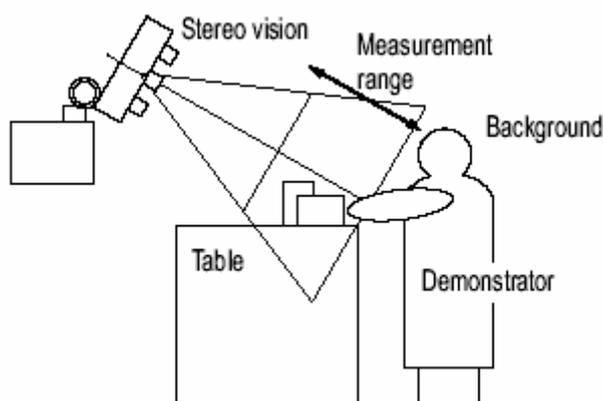


図5.1 教示環境

複数の環境物体が図5.2に示すようにシステムの前に置かれた既知のテーブルの上に存在するとき，ステレオ視覚によって得られたカラー画像・距離データの中から各環境物体に対応する領域を抽出する手順は以下のようになる(図5.2参照)。

1. 図5.1に示すように，本ステレオ視覚装置はカメラ配置の物理的な制約から有効な測定範囲が決まっているが，範囲外の領域であっても何らかの値が格納されるためこの部分

を取り除く必要がある。

そのため、最小及び2番目に小さなSSAD (Sum of Sum of Absolute Difference)の差を評価する手法[47]を用い、距離データ中の測定範囲外のデータを除去する。

2. テーブル表面にあたる領域を推定しその部分をマスクする。

視覚装置のパン・チルト角及びテーブルの既知の幾何情報から、カメラ座標系においてテーブル面を表す平面がどの位置に投影されるかが分かる。これを初期値とし距離データ中で平面のフィッティングを行うことで、距離データ中でのテーブル面の位置を推定し、テーブル面より奥側のデータを除去する。

3. 残った領域に対して、収縮・微小領域の除去・膨張の画像演算をかけ、微小領域を除去する。
4. 残った領域を物体に対応する領域とし、その重心を初期推定位置とする。また、対応するカラー画像上の領域の色相ヒストグラムを取る。

物体の姿勢に関しては、テーブル上での姿勢の自由度が鉛直上向の z 軸回転のみであるとし、物体の幾何形状の対称性に依じて1つから4つの姿勢候補を生成する。物体が完全な軸対象であれば候補は1つ、面对称であれば候補は π だけずれた2つ、対称性が無い場合は $\pi/2$ ずつずれた4つとなる。これは、位置と姿勢のロバスト推定法で述べる推定法が概ね $\pm\pi/4$ までの姿勢のずれを補正することができるからである。それぞれの候補について次の位置と姿勢のロバスト推定法で述べる推定法を用いて位置と姿勢の推定値を計算し、結果の最もよいものを採用する。

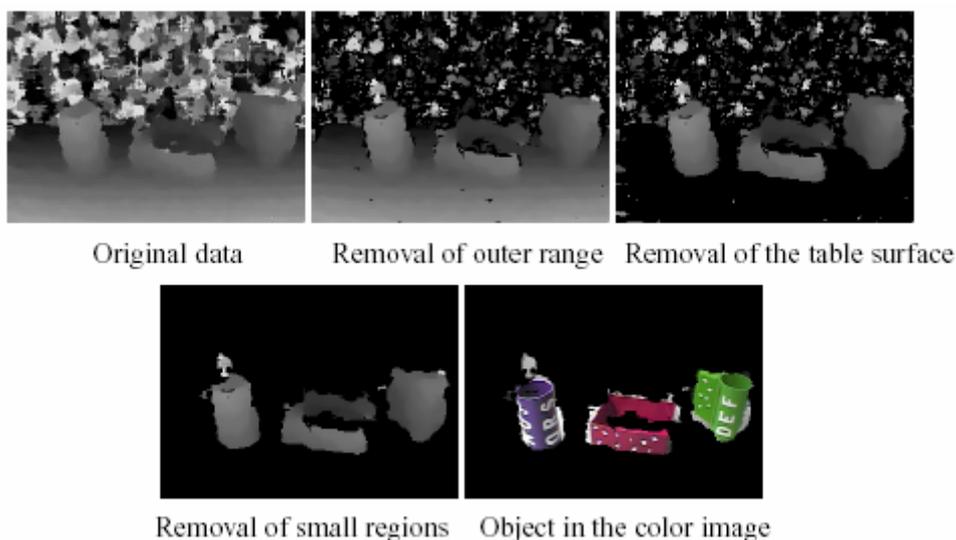


図5.2 物体の抽出

• 位置と姿勢のロバスト推定法

統合テンプレートマッチング法により，対象物の幾何形状と大まかな位置が既知の時に，対象物の正確な位置と姿勢を同定するための手法について述べる．この手法は，環境中の対象物体の認識及び3次元空間を移動する対象物体の3次元追跡に使用される．

統合テンプレートマッチング法は，3次元情報から推定される3次元誤差[48]と2次元情報から推定される3次元誤差[48]を同時に取り扱い，物体のメッシュモデルの初期位置・姿勢が与えられた時に，共役勾配法を用いた反復法によって漸近的に真の位置・姿勢を推定する手法である．

モデルの3次元位置を mp_i とし，距離データ中の対応する3次元点を rp_i とすると，両者の関係は変換式 $\langle \vec{p}, \vec{q} \rangle$ によって誤差を含んだ式(5.3)の形で表される．演算 $\vec{q} \cdot mp_i$ は， mp_i をquaternion \vec{q} に従って回転させることを意味する．

一方， $\langle \vec{p}, \vec{q} \rangle$ に従ってモデルがカラー画像上に投影された時，投影されたモデルのエッジとその再近傍にある画像エッジとは対応することが期待される．これより， re_i (視線ベクトル) と $(\vec{q} \cdot me_i + \vec{p} - re_i)$ との内積が0になるとの拘束条件の下で，画像エッジ点を3次元空間に逆投影することで，モデルエッジとの3次元誤差を推定することができる． re_i と $\langle \vec{p}, \vec{q} \rangle$ によって変換されたモデルエッジ me_i との関係は，式(5.4)で表される．

$$rp_i = \vec{q} \cdot mp_i + \vec{p} + \beta_1 \quad (5.3)$$

$$re_i = \vec{q} \cdot me_i + \vec{p} + \beta_2 \quad (5.4)$$

ただし， β_1 と β_2 はランダムな3次元ノイズであり， β がガウス分布に従うならば， $\langle \vec{p}, \vec{q} \rangle$ は最小二乗法により式(5.5)を最小化することによって解くことができる．

$$f(\vec{q}, \vec{p}) = \sum \| \vec{q} \cdot mp_i + \vec{p} - rp_i \|^2 + \omega \cdot \sum \| \vec{q} \cdot me_i + \vec{p} - re_i \|^2 \quad (5.5)$$

ただし， ω は重みを表す定数である．

しかし，実際の誤差分布は通常ガウス分布に従わないため，最小二乗法の場合外れ値の影響により同定処理が不安定になる．そのため，WheelerはM推定法を誤差分布の評価に用いた物体の同定手法を提案した[48]．M推定法は最小二乗法の一般形であり， $E(z) = \sum_i \rho(z_i)$ と定式化される．ただし， $\rho(z)$ は誤差 z_i の任意の関数である．式(5.6)で表されるLorentzian関数の2乗を $\rho(z)$ として用いることで，外れ値の影響を低減し同定性能を向上させることができる．これにより，対象物体の一部が隠蔽され不可視の場合にも，メッシュモデル上で正しく対応する距離データが無い箇所は外れ値として共役勾配法への寄与が低減されるため，正確な同定が可能となる．

$$\varphi(z) = \frac{z}{1 + \frac{1}{2}z^2} \quad \dots \text{Lorentzian weight function} \quad (5.6)$$

エッジの対応から得られる推定誤差は，視線方向に対して誤差の精度が期待できないため，推定の前半ではまず式(5.5)の ω の値を小さくし，3次元情報からの推定誤差のみによって大まかな姿勢の推定を行う．推定の後半においては， ω を増加させた後再び減少させることによって，2次元情報からの推定誤差を用いて局所解からの脱出を図り，その後再び3次元情報からの推定誤差を利用して真の値への収束を図る．物体近辺にテクスチャが多い場合には，モデルエッジに対応しないエッジが多数検出されるため2次元情報からの誤差が正しく推定されない場合がでてくるが，2次元情報からの誤差は局所解から真の解へのバイアスとして用いられるため，この場合は ω を減少させた時に元の局所解に戻ってくることが期待され，同定性能の劣化の要因にはならない．

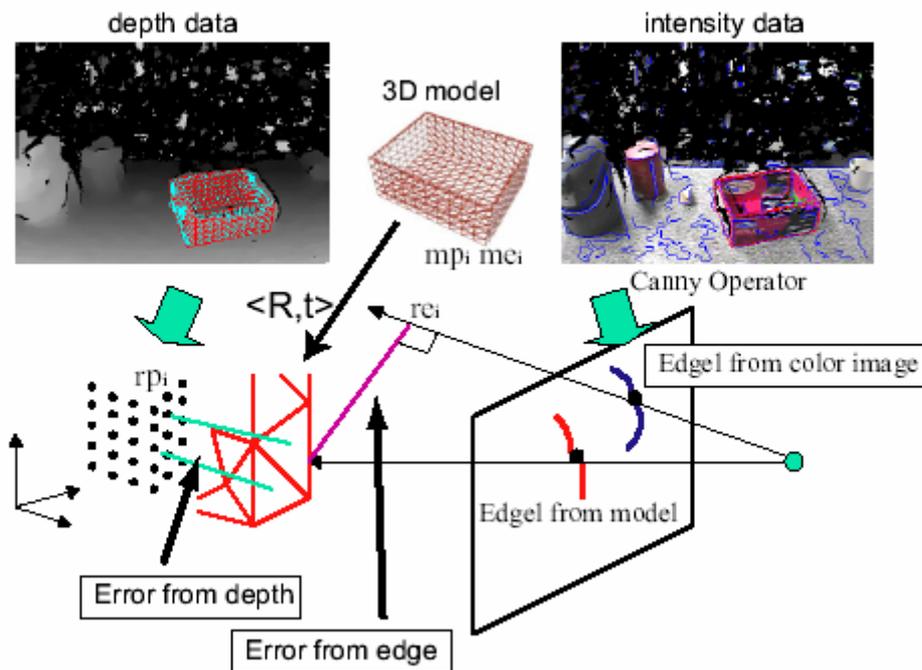


図5.3 統合テンプレートマッチング法に基づく物体の位置と姿勢の同定法

・ 環境物体の位置と姿勢の推定

物体領域の切り出しの手法により環境物体に対応する領域と物体の推定位置が分かる。ついで、図5.3に示すように保持している物体モデルそれぞれについて、モデルを初期位置に投影し位置と姿勢のロバスト推定法に示す手法で位置と・姿勢の推定を行う。この時、物体領域の切り出しで述べたようにモデルの対称性に応じて1から4つの姿勢候補があるので、それぞれについて推定を行う。

この時、モデルとの一致性を評価するための指標として、位置と姿勢のロバスト推定法の手法でM推定法の代わりに平均二乗誤差を使った場合の計算値を使用した。これは、外れ点つまりフィッティング誤差の影響を2乗のオーダーで受けるため、モデルと距離データの差が大きい個所の影響が支配的になり、不一致性を表すよい指標になる。

表5.1 検出された形状差

Objects (in Depth Data)	Models		
	Pack	Dish	Bottle
Pack Histogram	<u>0.25</u>	1.30	0.55
Dish Histogram	2.08	<u>0.65</u>	1.43
Bottle Histogram	0.92	1.20	<u>0.37</u>

表5.1に示すのが、図5.4の3種類の環境物体について、上記の方法で物体領域の識別を行った結果である。この例ではうまく判別ができているが、一般には形状のみでの判別は困難である。そこで、形状評価の指標をヒストグラムで表し、同時に色相ヒストグラム同士の一貫性も評価することで、ロバストな推定を試みた。

$ObjG_i$ を i 番目のモデルに対する形状の一貫性指標とする。 $ModelH_i[j]$ を i 番目のモデルの $j(1 \leq j \leq 12)$ 番目の色相値、 $ObjH[j]$ を対象領域の j 番目の色相値とする。すると、最終的な指標 $eval_i$ は両者の重み付き和である式(5.7)で記述される。

$$eval_i = ObjG_i - \omega \cdot \left(\sum_{j=1}^{12} ModelH_i[j] \cdot ObjH[j] \right) \quad (5.7)$$

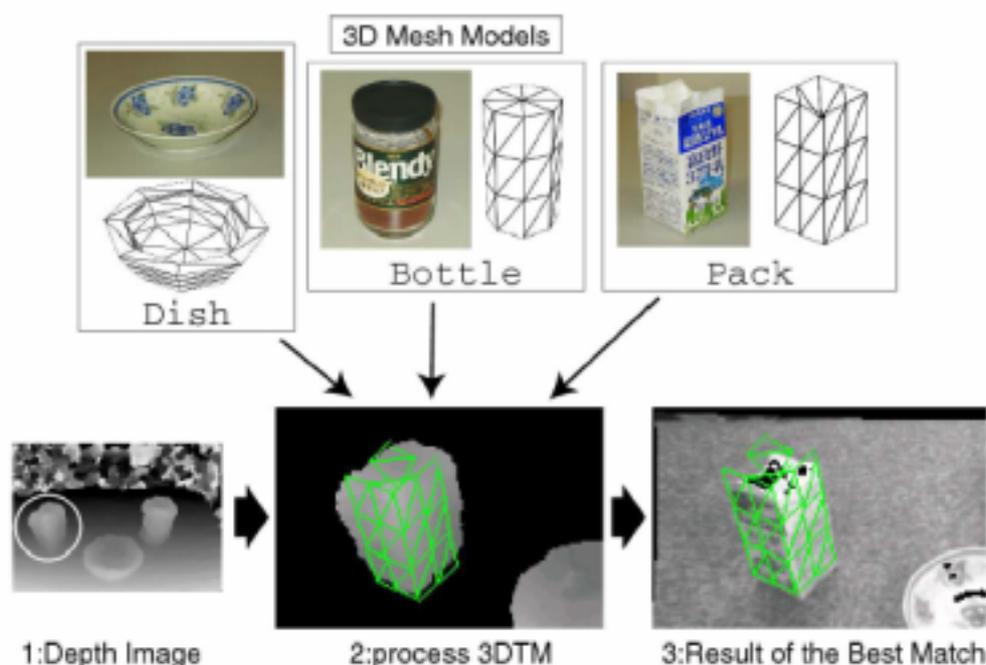


図5.4 幾何モデルの一貫度に基づく物体認識

ロボットは、次の手順で環境物体を認識する。

1. 物体表面色をモデルとして持っておき、色画像上でその領域をセグメンテーションする。
2. 物体は安定姿勢にあるとの仮定をおくと、セグメンテーションにより物体のおおまかな位置・姿勢が分かるため、それを初期位置とし、対応する距離画像上でセグメンテーションされた物体領域と物体の3次元幾何モデルを使用して3DTM

をかけ，位置と姿勢の正確な推定を行う．

5.1.2 コンフィギュレーション空間 (C - space)

障害物回避に関しては，コンフィギュレーション空間(C - space)の概念を利用し，アドホックに与えて解消した．コンフィギュレーション空間とは，障害物に囲まれたある環境内において，そのロボットが配置可能な範囲を各姿勢について集めたものである．特に，ロボットの重心と回転中心が異なる場合では，姿勢について0から360度までの空間の構築が必要となる．この空間を利用することによって，ロボットを点として見なして経路の計画をすることができ，コンフィギュレーション空間内の一点を指定することで実世界でのロボットの位置・姿勢を表すことが可能である．

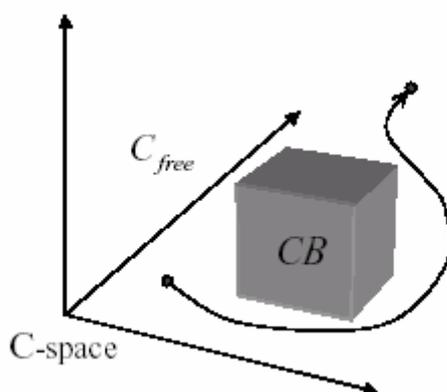


図5.5 C-space

CB(C-obstacle) ; 障害物は空間内の部分集合

C_{free} ; 自由領域, 障害物のない空間

経路は空間内の連続な曲線

5.2 人間型実験プラットフォーム

ロボットによる人間行動の学習及び人間とロボットの協調作業の実現のための実験プラットフォームとして，我々の研究グループでは図5.1に示すようなヒューマノイドロボットを開発した．我々の研究では，人間の行動の中でも手作業に焦点を当てており，ロボットによる人間の手作業の獲得及びその再現を実現することが大きな目標となっている．そのため，視覚・双腕・上半身などの人間の上半身を模し，ほぼ同等の機能を持つような実験

プラットフォームを設計・開発した。

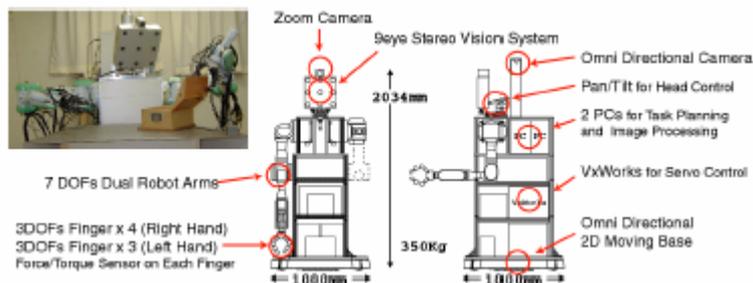


図5.6 実験プラットフォーム

本ロボットの主な特徴は以下の通りである。

- ビジョン

視覚として、対象物の3次元認識のために9眼マルチベースライン実時間ステレオ装置及び対象物の2次元の特徴を精度よく得るためのズームカメラ・ロボットの周り全周を観察するための全方位カメラを備えている。

- アーム・ハンド

双腕として二つの7自由度(DOFs)の多関節ロボットアームを搭載している。右腕に4本指のハンドを、左腕に3本指のハンドを装着している。右手は、人間の形に模した人間型ロボットハンドであり、母指を有し、他指と対向できる形となっている。指腹部や掌に接触センサを配置している。右手の指は、親指4関節4自由度、他指4関節3自由度の計16関節13自由度となっている。左手の指は、全て3関節3自由度である。また、右手、左手の全ての指の指先にForce/Torque センサが付いている。

- ボディ

ロボットボディは全方向移動可能台車の上に搭載されており、2次元平面上を自由に並進・回転移動することで視点及び腕の位置を自由に変化させることが可能となっている。

- CORBA・コンピュータ間通信バス

種々の制御装置・センサを制御するためにロボットには複数のコンピュータが搭載されているが、これらはLANで結合されCORBA[49]による通信バスによってソフトウェアの透過性が図られている。CORBAにより、分散マシン・分散OS環境で容易にソフトウェアを開発することが可能になり、データグローブといった新しい外部機器を既存のシス

テムの組み込むことが容易になっている。CORBAの実装系としては、TAOCORB[50]を使用。

5.2.1 ビジョン

視覚システムは人間の視覚機能を実装する。本ロボットには3種類の視覚装置が搭載されている。一つは9眼マルチベースラインステレオ視覚装置であり3次元の認識に使用される。2つめはEVI-400ズームカメラであり、様々な解像度で2次元的な認識を行う目的で搭載されている。この2つの視覚システムはロボットの頭部に装着されており、ロボットが任意の対象物を注視できるようにパン/チルトの回転駆動系によって駆動される。3つめは全方位カメラであり、ロボットの中心上方に設置されている。このカメラは人間の接近を検出し、前記2つのカメラで注視すべき対象を選択するために使用される。

9眼マルチベースラインステレオ視覚装置

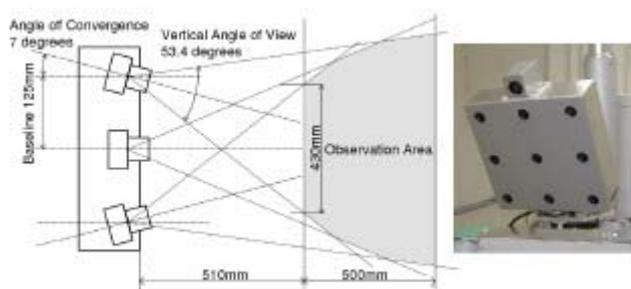


図5.7 ステレオ装置の測定範囲

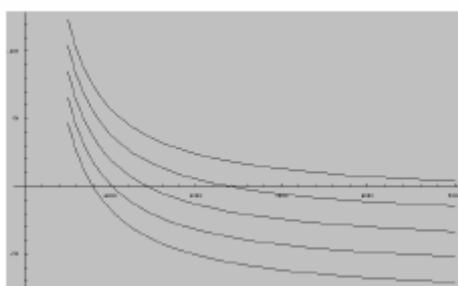


図5.8 視差の測定カーブ

9眼マルチベースラインステレオ視覚装置は、周囲の環境のカラー情報と距離の情報を実時間で計測するために搭載された。このシステムの内ステレオ対応を計算する部分のハードウェアはコマツ株式会社の製品[51]であり、装置の特徴を以下に示す。

- ロバストなステレオ対応の計算

マルチベースラインアプローチ[52]によりの8つのステレオ対(中央のカメラと周辺のカメラ)を歪パラメータも含めてハードウェアで同時に計算し, SSAD (Sum of Sum of Absolute Difference) 指標によって最も信頼性のあるステレオ対の視差情報を採用する.

- ハードウェアチップを用いたリアルタイム処理

ステレオ処理はカスタムチップの上で実行され, 280×200 の視差マップを実時間(15fpsから最大30fps)で出力することができる. ただし, 解像度は固定である. この時, 視差マップと同時に中央のカメラで同期して撮像されたカラー画像をも同時に出力できる. 視差マップは中央のカメラでの視差に変換されて出力されるため, カラー画像ではレンズ歪が補正されていない事を除いて両者の座標系は一致する.

- カメラ自由度

ユーザは, 自由にカメラ配置を設計することが可能である. 我々は, 手作業の観察と再現を目的としており, 必要とする測定範囲はカメラから510 mm から1010mmの間である. そのため, この範囲で最も密に視差マップを獲得できるように, 図5.2 に示すように外周のカメラを内側に輻輳角をつけて取りつけた.

図5.8にこのカメラ配置で測定し得る視差の測定カーブを示す. これは, ステレオ対応を計算する時にエピポーラ線上のどの範囲で視差を計算するのかを規定するもので, 範囲のbit 数はハードウェアで決まっているため奥行き方向の位置のみを決定することができる. 通常は, 図の最も左側のカーブ, つまり最も近接した範囲を使用しており, この時の測定範囲が上記の510mmから1010mmになる.

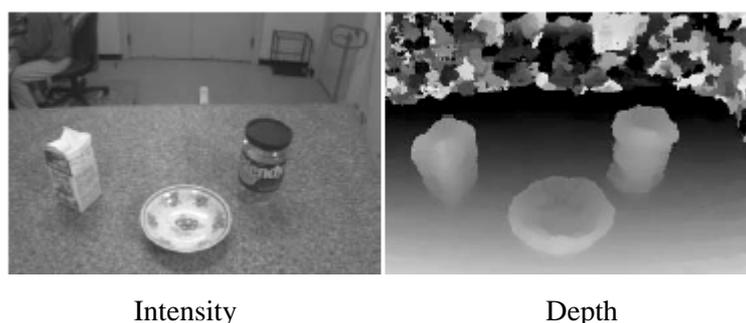


図5.9 輝度と距離画像(白:近い点, 黒:遠い点)

図5.9に, ステレオ視覚から得られるデータの例を載せる.

5.2.2 アーム・ハンド

本ロボットには、双腕として、関節自由度が7つの既成のロボットアーム(三菱重工業製 PA10)を両側に搭載しており、肩から手首までの自由度は人間と同じになっている。この自由度は、ロボットハンドが3次元空間の領域内を(位置・姿勢の面で)広範囲に動くのに十分なものである。

また、右腕に4本指のハンドを、左腕に3本指のハンドを装着している。右手は、人間の形に模した人間型ロボットハンドであり、母指を有し、他指と対向できる形となっている。指腹部や掌に接触センサを配置している。右手の指は、親指4関節4自由度、他指4関節3自由度の計16関節13自由度となっている。左手の指は、全て3関節3自由度である。また、右手、左手の全ての指の指先にForce/Torque センサが付いている。

ここで人間とのスケールの差を見てみると、PA10の肩関節(S1,S2軸)から手首関節(W1,W2軸)までの距離は950mmとなっており、人間が450mmから500mm程であることを考えると2倍ほど長い。また、指関節も大体人間の2倍太いため、全体のスケールングとして2倍となる。そのため、実験時には大きめの物体を選択するか、既存の物をモデラー等でコピーし倍の大きさに加工し直して実験に用いるなどの工夫をする必要がある。

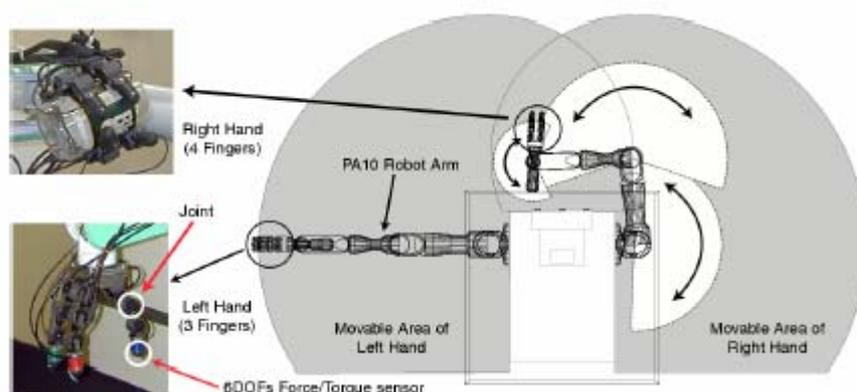


図5.10 ロボットアームとハンドの設計

5.2.2.1 人間型ロボットハンド(右手)

人間の把持スキルの模倣をスムーズに行うために、右手については人間型のハンドを開発した。全体とのバランスの関係から指は環指と小指をまとめて1本とし、指の本数は全部で4本としてある。指の各関節の駆動には安川電機の指関節用アクチュエータを使用し、指先にはBLオートテック社の6軸力覚センサ(NANOセンサー)を取り付けてある。

5.2.2.1.1 右手ロボットハンドの仕様

- ・ 指数4 本(16 関節13 自由度)
- ・ 母指1 本(4 関節4 自由度)
- ・ 他指3 本(4 関節3 自由度)

5.2.2.1.2 母指

他の3本の指に対向するかたちで、4関節4自由度の母指を配置した。鞍関節であるCM関節は他指のMP関節と同様に、2つのサーボモータを組み合わせることで、直交する2つの運動軸を再現している。MP関節の2自由度のうち、内外転の1自由度の変動は微少であるため、この自由度を省いた。

5.2.2.1.3 他指(示指, 中指, 環指)

PIP関節の屈曲・伸展の1自由度、MP関節の屈曲・伸展、内転・外転の2自由度、PIP関節とDIP関節を連動機構にすることにより4関節3自由度の機構を実現した。ここでMP関節の2自由度は人間と同じ作業領域を確保するため、前後に交差させるように配置した。これにより特に手掌付近の把持作業において姿勢調節能力が向上する。また特に日常の把持においては、DIP関節の屈曲が把持の実現に重要な意味を持つことから、これらの全ての指にDIP関節の実装を行った。

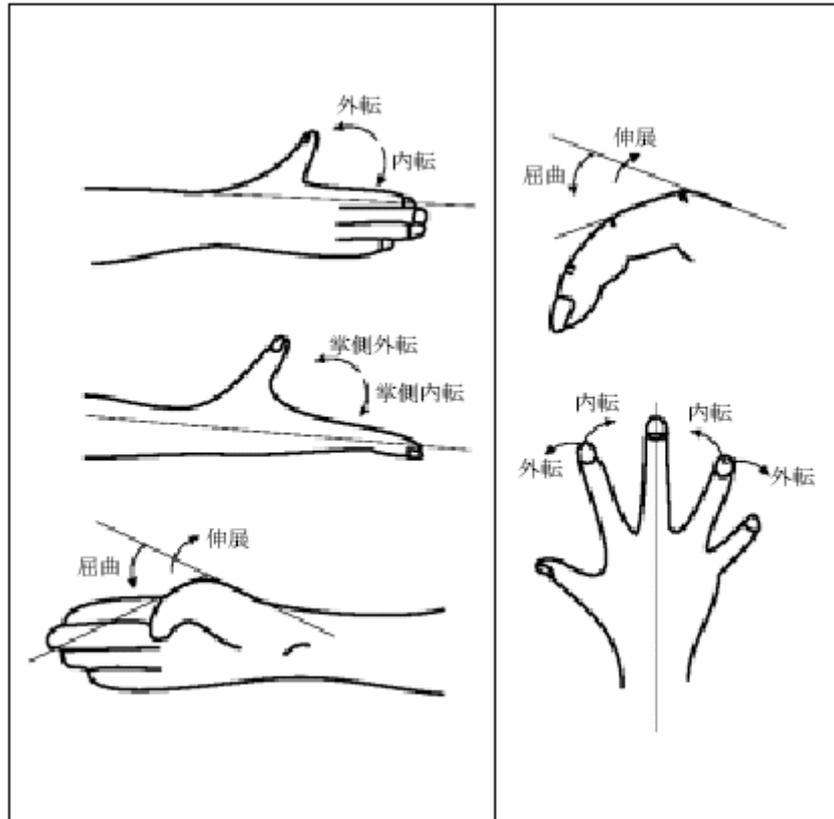


図5.11 Hand Joint Movements

5.2.2.1.4 ロボットハンドのシステム構成

全体の構成は図5.15に示す．RTLlinuxによるリアルタイム制御を行っている．

5.2.2.1.5 モータ

指の各関節の駆動には，安川電機の指関節用小型アクチュエータを採用している．このアクチュエータはACサーボモータ，ハーモニックギア，エンコーダを一体化構造にしたものである．

5.2.2.1.6 フォース・トルクセンサ

力覚センサは，関節に直接取り付けることのできるものが無いため，通常の6軸力センサを指先か指根本に取り付ける方法に限定される．そこで指先の接触情報取得を優先して，全ての指の指先にBLオートテック社のNANOセンサ(指先型6軸力覚センサ)を取り付けた．

NANOセンサは、力とモーメントの検出部(変換器)を可能な限り小型化し、6成分の力とモーメント($F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$)を検出するセンサである。NANOセンサは6組の歪みゲージデータをアナログ信号で出力する。

本研究では主に接触情報の確認に用いるため、特に6成分の力とモーメントは扱わない。

5.2.2.1.7 接触センサー

イナバゴム社のイナストマー(感圧導電性エラストマーセンサー)を用いた。小型軽量なため、空間的制約が厳しい指のリンク間機構でも配置可能である。アナログ値を出力するため、接触だけでなく力の分布も測定可能である。(感圧導電性エラストマーセンサー、ゴム材成形カバードーム型タイプ, SR-Dタイプ, SR-D-15-H)を用いた。

基板の最大外形は12mm×15mmであり、基板底面よりの高さは5.2mmである。イナストマーは、絶縁性のゴム材料中に導電性粒子がほぼ均等に分散された状態で構成されている。無加圧時は導電性粒子は互いに接触しておらず(導電経路を形成していない状態)、加圧により導電粒子が次第に接触し始め、導電経路が形成され、3次元的に導電経路が増えていき、F-R特性はなめらかに変化していく。把持の生成時における接触部位の確認のため、ロボットハンドの掌側面に、指腹部、指側部に6ヶ所、そして、今年掌部分を再開発し、掌部分に18箇所、接触センサを計26箇所配置した。接触センサには、イナバゴム社のイナストマー(ゴム材成形カバードーム型タイプ, SR-Dタイプ)を用いた。センサの特徴は以下の通り。

1. センサ検出部に直接触れないでゴム成形(NRB)ドーム(R8.3)を押した圧力の強弱を連続的に検出が可能。
2. センサカバー本体が柔軟かつ柔らかなゴム成形(NBR)と外部荷重・圧力に対して強いステンレスカバー(SUS 304)にて構成された強力な製品で悪環境条件・防塵性に対して良好。
3. センサ本体がやわらかな曲面形状のドーム型のため検出部に引っ掛かることなく、転がり検出が容易に可能。
4. 最大5mAの電流が使用できLEDを直接ドライブ可能。

電気的特性は以下の通り。

- ・最大許容電圧 30(V)
- ・使用推奨電圧 3から6(V)

- ・最大許容電流 20(mA)
- ・使用推奨電流 5(mA)
- ・無負荷抵抗値 40M 以上
- ・最大負荷抵抗値 500 以上
- ・最大許容負荷 3.0(kgf)

本研究で用いた「SR-D-15-H」の仕様は以下の通り。

- ・基板の最大外形12×15
- ・基板底面よりの高さ5.2mm

5.2.2.1.7.1 新たに掌部分を開発した狙い

新たに掌部分を開発したのは以下の二つの狙いがある。

1. ペンなどを把持する(図5.14)といった日常の把持をよりカバーすることが可能になる。
2. 握力把持, また把持の始点・終点を握力把持とする把持遷移において, より詳細な接触情報を得られることができる。



[Before]

[After]

図5.12 掌センサー(1)

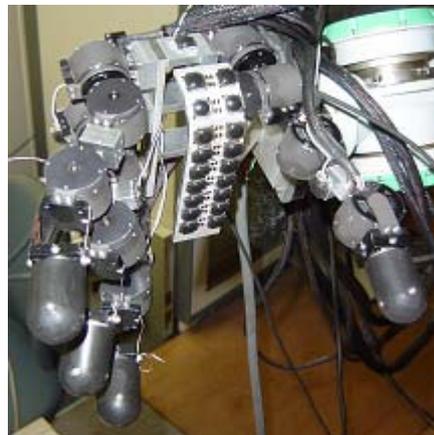
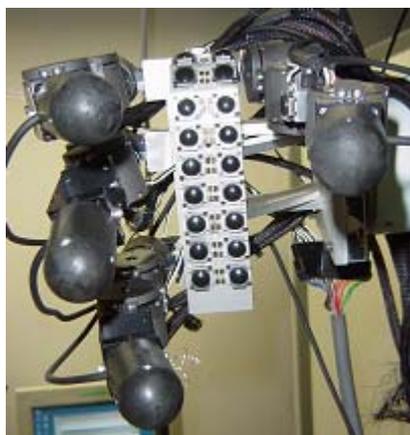


図5.13 掌センサー(2)

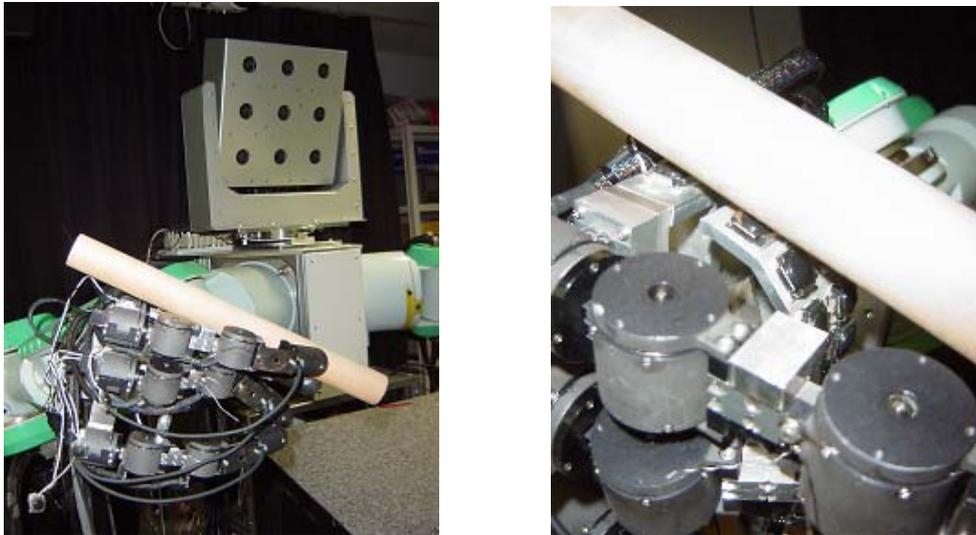


図5.14 掌センサー(3)

5.2.3 ボディ

ロボットボディは、3次元空間でロボットアームの可動範囲およびビジョンをカバーする領域を増やす目的で作られている。人間が手作業をする時に、物体を様々な角度から見るために頭を動かす。それと同時に、腕が届かないところで作業をする時には上半身を曲げたりひねったりする。ロボットに同様な能力を持たせるために我々は前方向移動可能台車[53]を搭載した。この台車によりロボットは体をひねったりフロア上を移動したりできるため、視点や作業スペースを動的に変更することができる。

5.2.4 CORBAに基づくソフトウェアアーキテクチャ

ロボットはLAN 結合された複数計算機上に分散した、複数のコンポーネントサーバによって制御される。一つ一つのコンポーネントサーバ(Component Server, 以下CS) は、表5.2に示すように担当のハードウェアがあり、そのハードウェアの制御を請け負う。本ロボットでは制御すべきハードウェアが多いため、必然的に複数の計算機が混在し、かつLinuxとWindowsの2種類のOS が混在する環境となっている。

表5.2 ハードウェア制御のためのソフトウェアモジュール(CS)

CS	Control Devices	Functions
Audio	Speaker	Speech synthesis system
IP5000	IP5000 board	Image processing
PA10	PA10 manipulators	Calculation of inverse kinematics of the arms and Controller of the PA10 manipulators
Sensor Glove	Cyber Glove	HMM based gesture recognition
Vision	Zoom camera	Image processing by 2D Template Matching
Vision2	9-eye stereo vision	Image processing by 3D Template Matching
Viewer		Robot motion simulator
Visca	Zoom camera	Camera controller by Visca(TM) protocol
Robot	Fingers, neck, moving base	Control command generator for devices which require real-time servo control on RT Linux

これらを集中制御するのがBrain ソフトウェアであり,Brain は任意のマシンで実行され,必要とするCS とネットワーク通信を行い,センサに対応するCS で一次処理されたデータを受け取り,Brain 内部で入力処理と行動の生成を行った後,アクチュエータに対応するCSに対して制御命令を発行する.この時,異なる計算機・異なるOSの混在する環境でそれらを意識せず統一的な通信を行うための枠組みとして,分散オブジェクト技術の標準であるCORBA(Common Object Request BrokerArchitecture)[54]を採用した.これを使うことで,インターフェースの部分IDL (InterfaceDefinition Language) によって依存性の無い形式で記述することができ,使用言語での実装がある場合には,リモートのプログラムをあたかも自身のプログラムの関数と同じ形式で呼び出すことが可能になる.本研究では,CORBAの実装系として,Windows とLinux 上のC++言語をサポートしたTAO ORB [55]を採用した.

図5.15に,ソフトウェア的なアーキテクチャを図解した.

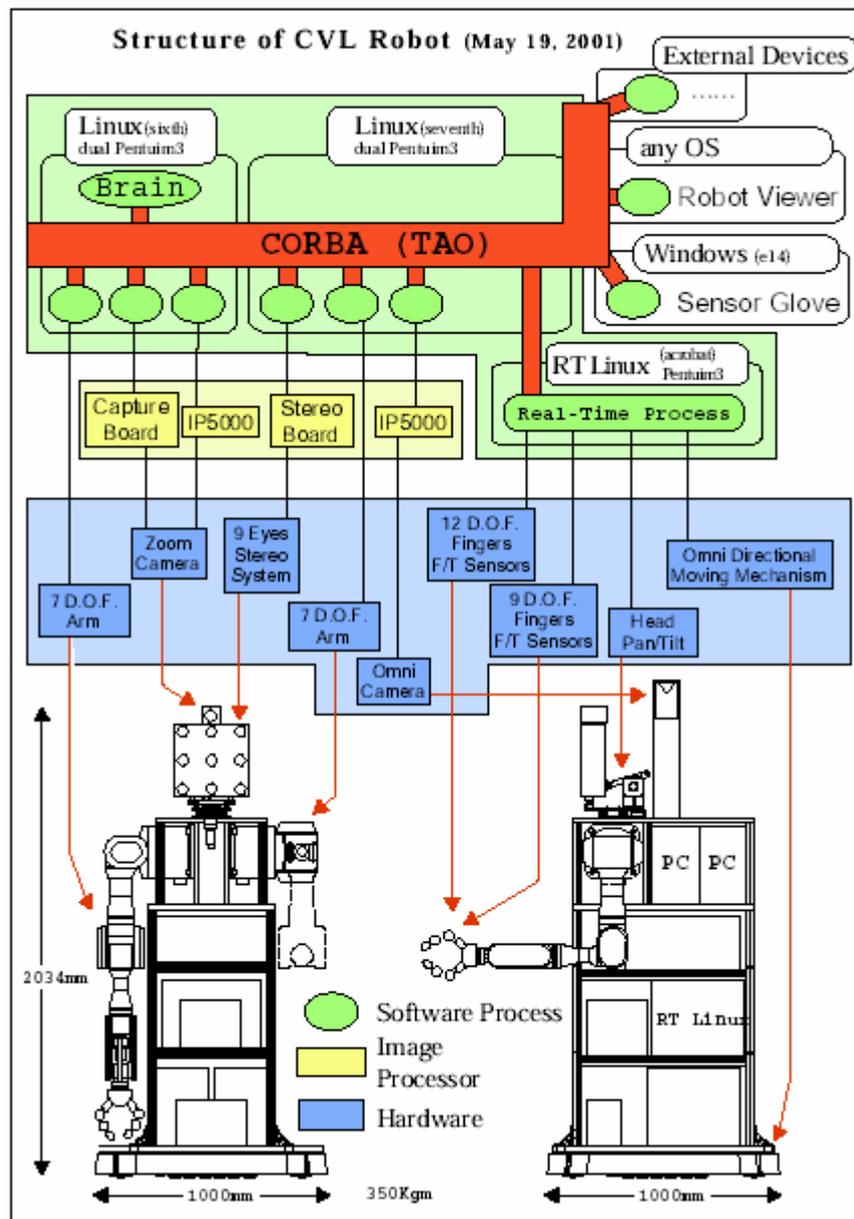


図5.15 ロボットのソフトウェア構造

5.4 実装・実験

5.4.1 茶道による実装・実験

7種類の把持遷移の内,1)Tip(指尖把持) TV (三面把持 - 亜型)に関してロボットに実装を行った. 以下は, 茶道における1) Tip (指尖把持) TV (三面把持 - 亜型)の遷移のそれぞれの中間把持におけるロボットの写真である.



a1



b



a2



c



a3



d

図5.16 茶道による操り動作（全体図）



a1



b



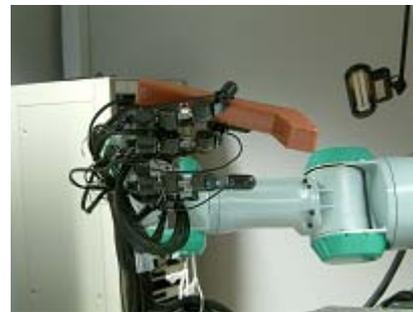
a2



c



a3



d

図5.17 茶道による操り動作（手拡大図）

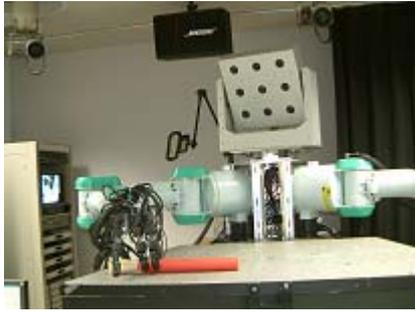
5.4.2 絵筆による実装・実験

違うドメインでも実証可能である。

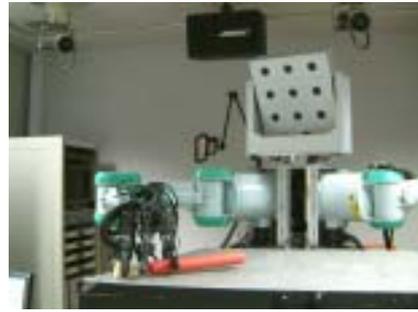
次回の科研プロジェクトである「ロボットに油絵を描かせる」動作の導入として、ロボットに絵筆を掴み、持ち替え、絵を描くという動作を実装した。

この動作は、3つの中間把持で記述される。

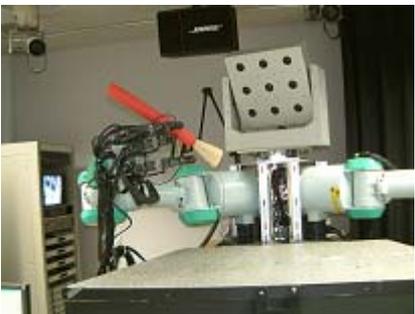
その動作写真を以下に示す。



a1



e



a4

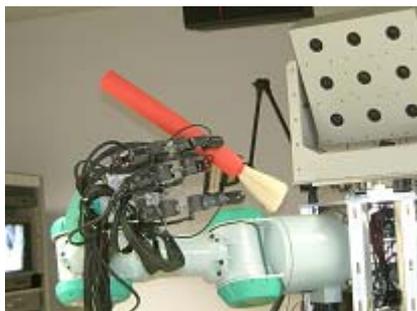
図5.18 絵筆による操り動作（全体図）



a1



e



a4

図5.19 絵筆による操り動作（腕拡大図）

第6章

結論

第6章 結論

6.1 まとめ

日常における静的把持間の遷移，操り動作をロボットにより可能にすることを旨とし，本研究では，以下のことを行った．

- ・ 本「初歩の茶道 風炉手前」(千 宗室著，淡交社)とビデオ「茶の湯・裏千家～風炉～」1・2巻(NHKビデオ)より7種類の静的把持間の遷移，操り動作を抽出した．
- ・ 抽出した7種類の静的把持間の遷移，操り動作に関して，分散触覚センサー付きサイバークロブを用いて，間接角度，接触センサーの変化の大きい部分でセグメントし，10種類の間接把持を発見した．
- ・ 発見された中間把持を基に，抽出した7種類の静的把持から静的把持への把持遷移に関してセグメントし，記述した．
- ・ 中間把持を基にロボットに関節角度，接触センサー情報をマッピングし，ロボットに物体の持ち替え・操り動作を可能とした．
- ・ ロボットの掌部を再開発し，接触センサーを増やした．

6.2 今後の課題

本研究ではドメイン(茶道の動作と絵筆)のみを扱った．その結果，得られた静的把持間の遷移，操り動作のマッピング手法は扱ったドメインに依存して導かれたものもあり，日常のタスクを扱うにはこの手法は1つの初期解に過ぎない．

しかし，日常の動作を網羅したKamakuraによる静的把持は，有限個であり，その間の中間把持もまた有限個である可能性は高く，そして，本研究で提案した中間把持により静的把持間の遷移，操り動作を記述を行うことは有効な方法だとは考えられる．

今後，より日常に近い動作を扱い，LF0 システムの能力を今後さらに高めるため，実生活で生かすためには，少なくとも以下のような課題が考えられる．

- ・ 認識部と生成部のオンライン統合

現在のところ認識部と生成部は独立して動いている．両者のオンライン統合ができれば，模倣学習システムとして完全なものとなる．

- ・ 視覚フィードバックによる把持微調整

現在のところシステムは，把持生成の際に接触確認を行うまでの段階である．静的把持，静的把持間の遷移，操り動作が失敗した際に，視覚によりエラーリカバリを行う機構を導入することで，よりロバストな生成が可能になる．

- ・ 物体の大きさ・重さ依存にしない把持戦略の作成

ロボットハンドは，現在，人間の1.3倍である．このシステムを利用するとなると，物体もその等倍比でなければならない．このシステム，ロボットが実生活で利用可能とするには，人間に合わせてデザインされている道具を扱うことが可能にしなければならず，ロボットハンドの大きさは，人間と同程度のサイズにしなければならない．

また，モーター，アクチュエーターの性能上，現在，軽い物体しか把持することができない．しかし，人間は，ある程度重い物体も把持し，持ち替えたりすることが可能である．けれど，これは，モーターを開発する側の問題で，そちら側に期待するしかない．

- ・ 全ての遷移の成功

今回，茶道の静的把持間の遷移，操り動作に関しては，1種類しか実装していない．そこで，全ての遷移を実行することで，よりこのシステムの有効性を実証できる．しかし，今回，実装した1種類は，最も難しい静的把持間の遷移，操り動作であり，他の静的把持間遷移は，容易に実装できると考えられる．

- ・ ドメインを増やす

今回は，ドメインを茶道における動作と絵筆における動作に限定して実証を行った．しかし，これだけでは，まだまだ，日常の静的把持間の遷移，操り動作を網羅できることの実証性には，乏しく，今後，ドメインを増やしていく必要があると考えられる．

- ・ より細かな力覚情報の利用

今のところ，生成部では幾何学情報，運動学情報，接触情報のみをもとに機能しているが，認識部では接触センサーから力分布のデータ収集が可能である．これらの力情報を使えばロボットのタスク実行における力戦略のプランニングのガイドになり，意図する場所に力を集中して，卵を割ったり，紙を破ったりすることが可能となる．

謝辞

本研究を進めるにあたり，素晴らしい研究環境を整えて頂いた池内克史教授に心から感謝いたします．種々の業務や研究等で御多忙にも関わらず，毎週のようにミーティングで進捗の悪い私を丁寧に適切にご指導をしてくださり本当に深く感謝しています．

池内研究室ロボットグループ・踊りグループの皆さんには大変お世話になりました．

特に小川原光一さんには最初から最後まで迷惑掛けっぱなしで本当にお世話になりました．何度同じことを聞いても，優しく教えてくれて，小川原さんがいなければ，研究が全く進んでいなかったと思います．本当にありがとうございました．深く感謝いたします．

高松淳さん，佐藤啓宏さん，工藤俊亮さん，中岡慎一郎さん，白鳥貴亮さんにはミーティングを始め，研究の際，数々の助言をしてもらい深く感謝いたします．

また，池内研究室卒業生である森田琢磨さん，園田展人さん，崎田健二さんには，研究に関しては勿論のこと，私的な事まで様々お世話をしてくれて本当に感謝しています．

修士2年間共に過ごした同期の山田陽介君，角田哲也君，川上玲さん，ミティ君，アズミ君，太田君に深く感謝します．

最後に長い間，好き勝手にやってきた私をずっと支えてくれた家族に深く深く感謝します．

平成17年1月11日

参考文献

- [1] S. B. Kang and K. Ikeuchi: "Toward automatic robot instruction from perception-mapping human grasps to manipulator grasps," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, **13**, 1, pp. 81-95(1997).
- [2] J. Napier: "The prehensile movements of the human hand," *J. Bone and Joint Surgery*, **38B**,4, pp. 902-913 (1956).
- [3] M. R. Cutkosky: "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, **5**, 3, pp. 269-279 (1989).
- [4] N. Kamakura, M. Matsuo, H. Ishii, F. Mitsubosi and Y. Miura: "Patterns of static prehension in normal hands," *Amer. J. Occup. Ther.*, **34**, 7, pp. 437-445 (1980).
- [5] J. Takamatsu, H. Tominaga, K. Ogawara, H. Kimura and K. Ikeuchi: "Symbolic representation of trajectories for skill generation," *Inter. Conference on Robotics and Automation*, **4**, pp. 4077-4082 (2000).
- [6] K. Ogawara, S. Iba, T. Tanuki, H. Kimura and K. Ikeuchi: "Acquiring hand-action models by attention point analysis," *Inter. Conference on Robotics and Automation*, **4**, pp. 465-470(2001).
- [7] H. Kimura, T. Horiuchi and K. Ikeuchi: "Task-model based human robot cooperation using vision," *IROS '99*, **2**, pp. 701-706 (1999).
- [8] G. Schlesinger: "Der mechanische aufbau der kunstlichen glieder,".
- [9] C. Taylor and R. Schwarz: "The anatomy and mechanics of the human hand," *Artic. Limbs* 2, 2, pp. 49-62 (1955).
- [10] S. Brunnstrom: "Clinical Kinesiology 2nd Edition," FA Davis Co., Philadelphia (1966).
- [11] S. Brunnstrom, 田口: "臨床運動学," 医歯薬出版株式会社, 文京, 東京(1970).
- [12] P. Rash and R. Burk: "Kinesiology and Applied Anatomy," Lee & Febiger, Philadelphia (1963).
- [13] C. Jacobson and L. Sperling: "Classification of the handgrip, a preliminary study," *J. of Occup. Med.*, **18**, pp. 395-398 (1976).
- [14] M. Arbib, T. Iberall and D. Lyons: "Coordinated control programs for movement of the hand," A.W. Goodwin and I. Darian-Smith, editors, Berlin: Springer-Verlag (1985).
- [15] T. Iberall: "The nature of human prehension: Three dextrous in one," *Proc. 1987 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 396-401 (1987).
- [16] T. Iberall: "Human prehension and dextrous robot hands," *Intl. J. of Robotics Research*, **16**, pp. 258-299 (1997).
- [17] S. B. Kang and K. Ikeuchi: "Toward automatic robot instruction from perception-recognizing a

- grasp from observation,” *IEEE Trans. Robot. Automat.*, **9**, 4, pp. 432-443 (1993).
- [18] S. B. Kang. *Robot Instruction by Human Demonstration*. PhD thesis, CMU, 1994.
- [19] S. B. Kang. *Robot Instruction by Human Demonstration*. PhD thesis, CMU, 1994.
- [20] 島田伸敬, 白井良明, 久野義徳, 三浦純. 緩やかな制約知識を利用した単眼視動画像からの関節物体の形状と姿勢の同時推定. *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J81-D-II, No. 1, pp.45.53, 1998.
- [21] 鎌倉: “手のかたち手のうごき,” 医歯薬出版株式会社, 文京, 東京(1989).
- [22] 松岡毅, 長谷川勉, 本田久平, 桐木利弘: “作業状態観測と評価に基づく多関節多指ハンド物体操作システム”
- [23] J. Kerr and B. Roth: “Analysis of Multifingered Hands,” *Int.Journal of Robotics Research*, vol.4, no.4, pp.3-17, 1986.
- [24] 吉川, 永井: “多指ハンドによる対象物の把握と操りの力学”, *日本ロボット学会誌*, vol.7, no.5, pp.491-495, 1989.
- [25] M. Kaneko, H. Maekawa and K. Tanie: “Active Tactile Sensing by Robotic Fingers Based on Minimum-External-Sensor-Realization,” *Proc. 1992 IEEE ICRA*, pp.1289-1294, 1992.
- [26] 石井, 石川: “分布型触覚センサを用いた触覚パターン獲得のための能動的触運動”, *日本ロボット学会誌*, vol.15, no.5, pp.795-801,1997.
- [27] A. Cole, J. Hauser and S. Sastry: “Kinematics and Control of Multifingered Hands with Rolling Contact,” *Proc. 1988 IEEE ICRA*, pp.228-233, 1988.
- [28] H. Maekawa, K. Tanie and K. Komoriya: “Tactile Sensor Based Manipulation of an Unknown Object by a Multifingered Hand with Rolling Contact,” *Proc. 1995 IEEE ICRA*, pp.743-750,1995.
- [29] 鄭, 中島, 吉川: “3指ハンドを用いた操りにおける指の滑りと対象物運動の制御”, *日本ロボット学会誌*, vol.13, no.6, pp.813-821,1995.
- [30] 沢崎, 井上: “多指ハンドによる物体の転がし操作”, *日本ロボット学会誌*, vol.9, no.5, pp.560-571, 1991.
- [31] P. Michelman: “Precision Object Manipulation with a Multi-fingered Robot Hand,” *IEEE Trans. RA*, vol.14, no.1, pp.105-113, 1998.
- [32] T.Okada: “Object-Handling System for Manual Industry”, *IEEE. Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol.SMC-9,no.2,pp.79-89,1979
- [33] R.S. Fering: “Implemeting a Force Strategy for Object Reorientation”, *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp.96-102,1986
- [34] 小俣透, 永田和之, 岩槻重伸, 柿倉正義: “持ち替えによる多指ハンドの物体回転操作の計画” *日本ロボット学会誌* Vol.12, No.5, pp.107-114,1994
- [35] 山高大乗, 空閑融, 柳瀬正和, 多田野宏之, 古川正信, 大塚英史: “器用な手を持ったロボットの開発”, 第22回日本ロボット学会学術講演会, 3L12, 2004

- [36] K. Bernardin: "Continuous grasp recognition using hidden markov models," Master's thesis, Faculty of Informatics, University of Karlsruhe (2002).
- [37] ニコラス A .ベルシュタイン著 ,工藤和俊訳 ,佐々木正人監訳「デクステリティ 巧みさとその発達」
- [38] 前田隆司:“ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能 ” 日本ロボット学会Vol.18 No.6, pp.772-775,2000
- [39] M.A. Srinivasan and K. Dandekar: "An Investigation of the Mechanics of Tactile Sense Using Two-Dimensional Models of the Primate Fingertip," Trans. ASME, J. Biomech. Eng., 118,pp.48-55, 1996.
- [40] 前野 , 小林 , 山崎 :“ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係” , 日本機械学会論文集 , C 編 , vol.63, no.607, pp.881-888, 1997.
- [41] 小林 , 前野 :“ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (第2 報 , 動的接触解析手法および移動する平面と指の動的接触解析結果)” , 日本機械学会論文集 , C 編 , vol.64, no.628, pp.4798-4805,1998.
- [42] 小林 , 前野 :“ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (第3報 , 凹凸を有する面と指の接触解析結果)” , 日本機械学会論文集 , C編 , vol.65, no.636, pp.3321-3327, 1999.
- [43] K.L. Johnson: Contact Mechanics. Cambridge Univ. Press,1985.
- [44] *Virtual Technologies Inc. CyberGloveTM*. Palo Alto, California, USA,1998.
- [45] *Virtual Technologies Inc. VirtualHandTM Software Library*. Palo Alto,California, USA, 1998.
- [46] 末広尚士, 高瀬國克. スキルに基づくマニピュレーションシステム. 日本ロボット学会誌,Vol. 8, No. 5, pp. 551.562, 1990
- [47] 吉見修, 山口博義. 膨張確度係数を用いた視差画像における物体輪郭の鮮鋭化. 第6回画像センシングシンポジウム講演論文集, 2000.
- [48] M. D. Wheeler and K. Ikeuchi. Sensor modeling, probabilistic hypothesis generation, and robust localization for object recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 3, pp. 252.265, 1995.
- [49] Object Management Group. *Common Object Request Broker Architecture*, July 1995.
- [50] L. R. Rabiner and B. H. Juang. An introduction to hidden markov models. *IEEE ASSP MAGAZINE*,pp. 4.16, 1986.
- [51] <http://www.komatsu.co.jp/research/study56.htm>
- [52] 奥富正敏, 金出武雄. 複数の基線長を利用したステレオマッチング. 電子情報処理学会誌(D-II), pp. 1317.1327, 1992.
- [53] S. Hirose and S. Amano. The vuton: High payload high efficiency holonomic omnidirectional vehicle. In *Int. Symp. on Robotics Research*, pp. 253.260, 1993.
- [54] Object Management Group. *Common Object Request Broker Architecture*, July 1995.
- [55] <http://www.cs.wustl.edu/schmidt/tao.html>.

- [56] 園田展人;“人間の日常動作を模倣するロボットの静的な把持スキル生成”,修士論文, 2002
- [57] K. Ikeuchi and T. Suehiro: “Toward an assembly Plan from observation,”IEEE Trans. Robot. Automat., vol.10, pp.368–385,
- [58] T. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue: “Learning by watching : extracting reusable task knowledge from visual observation of human performance,” IEEE Trans. Robot. Automat., vol.10,pp.799–822, Dec., 1994.
- [59] T. Takahashi and H. Ogata: “Robotic assembly operation based on task–level teaching in virtual reality,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. pp.1083–1088, 1992.