Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-06

# ロボットハンドによる物体操作中の触覚情報を利用した認識の研究

中本，裕之

(Degree)
博士（工学）
(Date of Degree)
2009-03-25
(Date of Publication)
2016-07-14
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
甲4618
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004618

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

博 士 論 文

# ロボットハンドによる物体操作中の触覚情報を利用した認識の研究

平成21年 1月

神戸大学大学院工学研究科

中 本　　裕 之

# 目 次

**第 1 章 緒論** **1**

1.1 研究の背景 . . . . . 1

1.2 研究目的 . . . . . 4

1.3 本論文の構成 . . . . . 5

**第 2 章 ロボットハンドと触覚センサ** **7**

2.1 汎用ロボットハンドの必要性 . . . . . 7

2.2 汎用ロボットハンド . . . . . 11

2.3 人間の皮膚と触覚 . . . . . 15

2.4 触覚センサ . . . . . 17

2.4.1 近接覚センサ . . . . . 18

2.4.2 圧力，変位センサ . . . . . 18

2.4.3 滑りセンサ . . . . . 20

2.5 触覚センサを有したロボットハンドによるセンシング . . . . . 20

2.6 結言 . . . . . 22

**第 3 章 ユニバーサルロボットハンド** **25**

3.1 緒言 . . . . . 25

3.2 ユニバーサルロボットハンドシステム . . . . . 25

3.2.1 機構 . . . . . 25

3.2.2 角度センサとトルクセンサ . . . . . 28

3.2.3 分布型圧力センサ . . . . . 29

3.2.4 分散型システム . . . . . 33

3.3 関節制御の基礎評価 . . . . . 37

3.4 分布型圧力センサの計測精度と応答速度 . . . . . 39

3.5 接触面の形状評価 . . . . . 43

3.6 結言 . . . . . 46

**第 4 章　反復回転操作中の対象物の形状識別** **49**
4.1　緒言 . . . . . 49
4.2　反復回転操作 . . . . . 49
4.3　反復回転操作による形状識別 . . . . . 50
4.3.1　尖度パターンの獲得 . . . . . 50
4.3.2　DP . . . . . 51
4.4　実験 . . . . . 53
4.4.1　反復回転操作中の尖度の取得 . . . . . 53
4.4.2　形状識別の正答率 . . . . . 56
4.4.3　回転速度を変化させた場合の識別 . . . . . 58
4.5　結言 . . . . . 58

**第 5 章　連続回転操作中の対象物の形状識別** **61**
5.1　緒言 . . . . . 61
5.2　連続回転操作 . . . . . 62
5.3　連続回転操作による形状識別 . . . . . 62
5.3.1　アルゴリズム . . . . . 62
5.3.2　連続 DP . . . . . 64
5.3.3　評価値を用いた形状識別 . . . . . 65
5.4　実験 . . . . . 66
5.4.1　対称な形状の対象物 . . . . . 66
5.4.2　非対称な形状の対象物 . . . . . 68
5.5　考察 . . . . . 69
5.6　結言 . . . . . 72

**第 6 章　結論** **73**
6.1　本研究のまとめ . . . . . 73
6.2　今後の課題 . . . . . 75

**謝 辞** **77**

**参考文献** **79**

**論文リスト** **87**

# 図 目 次

1.1 Structure of this thesis . . . . . 5

2.1 ASIMO . . . . . 11
2.2 HRP-2 . . . . . 11
2.3 RI-MAN . . . . . 11
2.4 Utah/MIT Dexterous Hand . . . . . 12
2.5 DLR-Hand II . . . . . 13
2.6 Gifu Hand III . . . . . 13
2.7 Barrett Hand . . . . . 14
2.8 High-speed Multifingered Hand . . . . . 14
2.9 Tissue and tactile receptors of glabrous skin . . . . . 16
2.10 Klatzky and Lederman demonstrated that humans use a number of exploratory procedures to determine unknown object properties . . . . . 21

3.1 Universal Robot Hand . . . . . 26
3.2 Finger mechanism . . . . . 27
3.3 Torque sensor . . . . . 28
3.4 Structure of tactile sensor . . . . . 29
3.5 Cross-sectional view of tactile sensor . . . . . 30
3.6 Unit of electrode pattern . . . . . 30
3.7 Electrode sheet . . . . . 31
3.8 Inner layer of electrode sheet . . . . . 31
3.9 Application of pressure distributed sensor . . . . . 32
3.10 Signal process of received current . . . . . 33
3.11 Distributed system of Universal Robot Hand . . . . . 34
3.12 Motion control subsystem . . . . . 34
3.13 Tactile processing subsystem . . . . . 36
3.14 Example of Remote operation subsystem's display . . . . . 37
3.15 Results of step response . . . . . 38

3.16 Stiffness control . . . . . 39
3.17 Results of stiffness control . . . . . 39
3.18 Outputs of load cell and estimated force . . . . . 42
3.19 Impact responses of load cell and developed sensor . . . . . 42
3.20 Example of output distribution and average distribution . . . . . 43
3.21 Test pieces for shape evaluation . . . . . 44
3.22 Average distribution of $xp$ plane . . . . . 45
3.23 Average distribution of $yp$ plane. . . . . 45

4.1 Scene of repetitive rotation manipulation . . . . . 50
4.2 Algorithm of shape classification in repetitive rotation manipulation . . . . 51
4.3 Pressure distribution at 0[s] . . . . . 53
4.4 Pressure distribution at 0.5[s] . . . . . 53
4.5 Pressure distribution at 1.0[s] . . . . . 54
4.6 Pressure distribution at 1.5[s] . . . . . 54
4.7 Pressure distribution at 2.0[s] . . . . . 54
4.8 Pressure distribution at 2.5[s] . . . . . 54
4.9 Pressure distribution at 3.0[s] . . . . . 54
4.10 Pressure distribution at 3.5[s] . . . . . 54
4.11 Objects . . . . . 55
4.12 Relationship between kurtosis and time step in repetitive rotation manipulation . . . . . 55
4.13 Reference pattern of hexagonal prism . . . . . 56
4.14 Kurtosis pattern of hexagonal prism . . . . . 56
4.15 Kurtosis pattern of octagonal prism . . . . . 57
4.16 Kurtosis pattern of cylinder . . . . . 57
4.17 Relation of kurtosis and time step when rotation velocities were changed . . 59

5.1 Scene of continuous rotation manipulation . . . . . 63
5.2 Algorithm of shape classification in continuous rotation manipulation . . . . 64
5.3 Relationship between kurtosis and time step in continuous rotation manipulation . . . . . 67
5.4 Relationship between evaluated value and time step in continuous rotation manipulation . . . . . 68
5.5 Combined object . . . . . 69

5.6 Relationship between kurtosis and time step with combined object . . . . . 70
5.7 Relationship between evaluated value and time step with combined object . 70
5.8 Example of decided distribution in arbitrary direction . . . . . 71

# 表 目 次

2.1 Industrial robots in operation in the world . . . . . 8
2.2 Annual statistics of industrial robot in Japan . . . . . 9
2.3 Shipment value of according to application(million yen) . . . . . 9
2.4 Characteristics of tactile receptors at glabrous tissues . . . . . 16

3.1 Angular range . . . . . 27
3.2 Motion control subsystem . . . . . 35
3.3 Tactile processing subsystem . . . . . 36
3.4 Remote operation subsystem . . . . . 37
3.5 Averages and standard deviations of kurtosis of average distributions . . . . 46

4.1 Averages and standard deviations of evaluated value . . . . . 57
4.2 Classification rate when rotation velocities were changed . . . . . 59

5.1 Classification rate in continuous rotation manipulation . . . . . 68

# 第 1 章

# 緒論

## 1.1 研究の背景

これまで，日本ではロボットに関する多くの研究，開発が熱心になされてきた．1967 年に「人工の手研究会」（現バイオメカニズム研究会）などが主催となって，第 1 回ロボットシンポジウムを開催しており，1973 年には社団法人日本産業用ロボット工業会（JIRA，現社団法人日本ロボット工業会（JARA））が設立され，現在も活動を続けている．また,「ロボット元年」と呼ばれる 1980 年に産業用ロボットは本格的な普及を始めており，1983 年には社団法人日本ロボット学会（RSJ）が設立された．

産業用ロボットの普及とロボットに関する研究活動が盛んになされる中で，1983 年から 1991 年に渡り通商産業省（現経済産業省）による極限作業ロボットプロジェクトが行われた．極限作業ロボットとは原子力プラントなど人間に有害な環境における作業を行うためのロボットや，宇宙，深海などの人間の活動が困難な環境で作業をするためのロボットなどを指し，このプロジェクトでは専門の技術者がマスタースレーブシステムなどを用いて操作操縦をするような特殊なロボットが主に開発された．この極限作業ロボットプロジェクトの結果により，人間の代替として作業を行うロボットの実現は困難であること，その実現にはアクチュエータやセンサ，知能化技術など多くの要素に関する研究開発が必要であることが浮き彫りになり，日本でのロボットに関する研究が多角的になされるようになったきっかけと考えられる．最近では，極限作業の一つである大地震発生後の救命作業にロボット技術を応用することを目標に，阪神・淡路大震災のきっかけに 2002 年から始まった「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」にて，レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発が進められ成果が挙がっている．このように特殊な環境に置いて人間の代わりに作業をするためのロボットの研究が進む一方で，バブル経済の崩壊による一時的な遅滞はあったものの，産業用ロボットを用いたファクトリーオートメーションが進み，日本の製造業において産業用ロボットの存在が不可欠になった．特に現在は，日本の有数の産業である自動車産業において，溶接や塗装などの役割で活躍している．また産業用ロボットは，国内だけでなく海外におい

てもその高機能を認められており，輸出台数が増加している．

一方，1996 年に本田技研工業株式会社が安定した歩行の可能なヒューマノイドロボット P2 を発表し，歩行のみならず階段昇降もスムーズにこなせる洗練された 2 足歩行に多くのロボット研究者が驚嘆した．同社の研究開発の継続の結果，P2 の現バージョンに当たる 2007 年の ASIMO は，複数体で共同作業が行えることや，トレイを運搬したりワゴンを押すなど簡単な作業を連続的に行えること，自律的に充電を行えることなどを特長としている．また，1998 年からは独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による「人間協調・共存型ロボットシステム」（略称：HRP，ヒューマノイドロボットプロジェクト）において，主に独立行政法人産業技術総合研究所によってヒューマノイドロボット HRP-1 や HRP-2 の開発が行われた．人間の作業・生活空間において，通信ネットワークを利用した遠隔操作を併用し，人間と協調した作業や変化のある地形を移動することが可能であった．このプロジェクトの成果物である HRP-2 は，レンタル契約を行うことで研究開発に利用することができ，ヒューマノイドロボットを使った応用研究が多くの機関によって盛んになされている．

上述のように，40 年以上にわたって研究が続けられてきたロボットに関する技術は多くの項目を擁しており，要素，機構と制御，知能化技術，システム化技術などがある．要素については，センサやアクチュエータ，動力源や材料などがあり，それぞれ高い性能を目指して，例えばセンサであればある情報を高精度で高速に計測することを目指して研究が進められている．機構と制御については，アームやハンド，移動機講の高度化を目指して研究が進められている．知能化技術については，視覚情報認識や音声情報処理，触覚・力覚認識，自己位置認識や動作のプランニングなどに関して研究が進められており，システム化技術では，モデリングやシミュレーション，ヒューマンインタフェース，通信ネットワーク，分散システムなどの議論がなされている．このように多くの技術に関する研究が進められてきた結果，現在の高速高精度な動作の可能な産業用ロボットと人間と同等の自由度をもち安定した歩行の可能なヒューマノイドロボットが実現していると考えられる．しかしながら，ロボットの性能が向上する一方で，その応用に対する時代のニーズの変化がある．例えば，産業用ロボットに対しては多品種少量生産，ヒューマノイドロボットに対しては人間の生活中にある様々な作業の補助の実現が求められている．どちらも多種の対象物に対して多様な作業を行うという点において共通しており，この課題に取り組み，両ロボットでそういった作業を実現させることが，今後の世界に対する日本のロボット産業の優位性を維持するために重要であると考えられる．

それではロボットに多種の対象物に対して多様な作業を行わせるためには，現在実現されている産業用ロボットやヒューマノイドロボットに対して，どのような機能を付加する必要があるのだろうか？作業を人間から指示されるあるいは人間の様子から推測するための

ヒューマンインタフェースや，対象物を高精度に認識する視覚情報認識，その対象物に近づくための動作のプランニングなど，上述した知能化技術やシステム化技術を日常的・常用的なレベルまで引き上げることが必要であろう．しかしながら，それらに先んじて実現すべき機能として，具体的な作業（握る，つまむ，引っかける，挟むなど）を行うことが可能なエンドエフェクタ，すなわち人間の手に近い形状をもち，かつ汎用的機能を発揮するロボットハンドが不可欠である．

ロボットハンドの開発では，限られた大きさと形状の中に多数の関節を組み込むための機構設計上の問題と，複雑な関節構造を十二分に活用して多種の作業を実現する制御技術上の問題とを解決することが要求される．これらの問題に関する研究は古くからなされており，安定把握の力学，制御に関する理論的枠組みは 1990 年代はじめにほぼ完成している．関節トルクは人間の指に遠く及ばないものの，人間の指と同等の関節数を有するロボットフィンガの機構についても十分に検討されている．しかし，それ以降に多関節の指で構成されたロボットハンドが実用化されたという報告はない．この実用化されていない原因の 1 つとして，ロボットハンドによる認識に分布型の触覚センサが活用されていないこと，そもそも触覚センサを備えていないことが挙げられる．人間の皮膚の変形刺激に対して応答する機械受容ユニットは 4 種類あり，人間の手掌面には約 17000 個の機械受容ユニットが存在するとされている．人間と同等の触覚を得るためには，同程度の密度で機械変形を計測できる触覚センサを配置することが望ましいが，現在までに開発された様々な計測原理の触覚センサにおいて，同程度の密度で配置できるものはない．さらに，機械受容ユニットを配置するだけでなく，センサとしての精度やレンジ，大変形や急激な変形に耐えられるような柔軟性や耐久性などの問題もあり，ロボットハンドの触覚センサとして応用できる決定的なデバイスが無いのが現状である．また，人間の手掌面には機械受容ユニットが多くあることは上述したが，それらの応答は皮膚に加わった単純な機械的作用に対して発せられるのみである．人間が最終的に得ている触覚，例えば対象物の形状や対象物から掛かる圧力，対象物のテクスチャなどを推定しているのは，脳の体性感覚野が行っているとされている．すなわち，触覚という感覚は，手掌面で実現されているのではなく，体性感覚野が受容ユニットからの応答を情報処理することで実現されていると捉えることができる．このことは，触覚センサを開発するだけでなく，そのセンサの出力の情報処理方法の検討までが重要であることを示唆しているが，これまでの研究ではその部分が十分になされていない．この情報処理方法まで含めて検討することで，今まで曖昧であった触覚センサ素子に必要な機能が明確になることが期待できる．さらに，得られた触覚感覚に応じてロボットハンドの動作を計画することが可能となり，多関節の指をもつ汎用ロボットハンドの実用化に前進すると考えられる．

以上のようなロボットハンドに関する研究の背景から，触覚センサを有するロボットハンドの開発事例が少ないこと，さらにそのハンドを用い触覚情報処理まで含めて触覚センサを

積極的に認識や制御に活用する方法の確立が，汎用的なロボットハンドを実現するための課題として挙げられる．これらの課題に取り組むため，以下，本研究の目的について述べる．

## 1.2 研究目的

本研究の最終的な目的は，主に触覚に相当するセンサを活用して複数の異なるタスクをシームレスに実行可能なロボットハンドシステムを構築することである．その中で本研究では，分布型の触覚センサを備えたロボットハンドを開発すること，そのハンドを用いて操作中の対象物の外形を識別できる方法を実現することを目的とする．

従来開発されてきたロボットハンドは，指先に 6 軸力覚センサを搭載したものが多く，その力覚センサを使った対象物の安定把持について議論されてきた．力覚センサは小型化が進み，現在は人間の手と同等の大きさの多指ロボットハンドにも搭載され活用されている．しかしながら，その力覚センサを応用した安定把持は，主に 2 本もしくは 3 本のフィンガで対象物と指との間で力のつり合いを保つ方法を取っており，対象物の形状や柔らかさなどの情報を積極的に得るような方法ではない．たとえ 6 軸力覚センサで対象物の形状を探ったとしても，1 度の計測で得られる情報は力とモーメントのみであることから何度も走査をする必要がある．このことから，6 軸力覚センサのみを搭載した多指ロボットハンドでは，対象を認識と作業の遂行を両立させることが困難であると考えられる．一方，人間の手に目を向けると，柔軟な皮膚とその下に分布している触覚を対象物の操作中に有効に使うことで器用な動作を実現している．この触覚にあたるセンサの研究は，テクスチャを判別するものやすべりを検出できるもの，せん断方向の力が計測できるものなど，多様な材料や構造を使って現在盛んにおこなわれている．しかし，これら触覚センサでロボットハンドに適用されたものは少なく，適用されても対象物を操作しながら使用された例はほとんどない．

本研究では，まず触覚となる分布型圧力センサを備えたロボットハンドを設計し製作する．この分布型圧力センサは，対象物との接触のなじみがよくなるよう接触面を柔軟な素材で構成される．各関節の高精度で低バックラッシュの動作を実現するため，減速機にはハーモニックドライブ（株式会社ハーモニック・ドライブ・システムズ社製）を用いる．また各関節に薄肉部を設けてそこにひずみゲージを貼付することで関節トルクの検出を可能とする．ところで，ロボットハンドで対象物を操る場合，対象とロボットハンド間の位置・姿勢の関係を同定し，その情報を制御に応用する必要がある．対象の位置・姿勢を同定する 1 つの方法として，ロボットハンドと対象の接触面の局所形状を認識し，その局所形状をモデルと照合するあるいはその局所形状を組み合わせてモデルを構築することが考えられる．そこで本研究では，分布型圧力センサを使って対象物の形状を識別する方法を提案する．この方法では，人間の触覚にあたるセンサを活用することに重点を置き，特にロボットハンドの操作中

に形状識別を行う．本論文では，同じ部位を繰り返し接触させるような操作中に適用可能な方法と，連続的に新しい部位を接触させるような操作中に適用可能な方法の 2 つの方法を提案し，その可能性やその精度について検証する．

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成を Fig. 1.1 に示す．

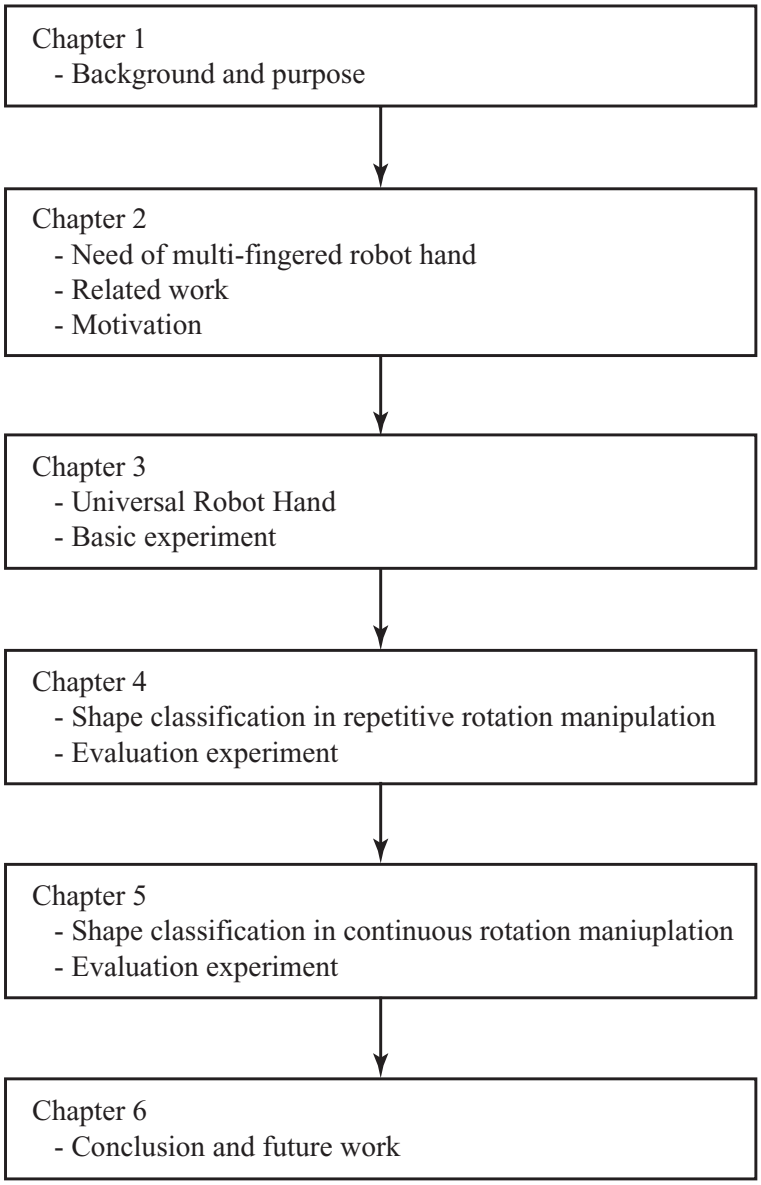


Fig. 1.1: Structure of this thesis

第 2 章では，産業用ロボットとヒューマノイドロボットの現状について概観した上で，多種多様な作業が可能なロボットハンドの必要性について述べる．さらに，これまで研究がな

されてきた主な多関節で構成された指をもつロボットハンドと，ロボットハンドの重要な要素である触覚センサの研究事例について説明し，アクティブタッチやセンサフュージョンの概念にも触れる．そして，本研究を進める動機となる多種多様な作業を実現できる汎用的なロボットハンドに必要な要素について述べる．

第 3 章では，開発したロボットハンドについて詳述する．ロボットハンドは，ハンドのリアルタイム制御や触覚として搭載した分布型圧力センサの多数の計測点における計測など，計算機負荷の大きい処理が必要であることから，それぞれ分散させて計測制御するようなシステムを構成しており，このシステムについて述べる．さらに，関節に加わるトルクを計測する力覚センサと指の表面に加えられる圧力分布を計測する分布型圧力センサに関する基礎実験に関する結果を述べる．

第 4 章では，ロボットハンドの操作中に適用が可能な対象物の形状識別方法について述べる．器用なロボットハンドを実現するためには，人間の手が触覚を使って対象物の位置や姿勢などの情報を得ながら確実な操作を実現しているように，対象物の操作中に適用が可能な対象物情報の取得方法が必要となる．そこで，分布型圧力センサを使って圧力分布を計測，その分布を定量化し，対象物の操作中にその定量化を連続的に行うことで時系列の特徴パターンを生成，パターン識別によってその部位の形状を識別する方法を提案する．この方法では，パターン識別の際に特徴パターンからパターンの切り出しを行っていることからリアルタイムの識別はできないが，精度の高い安定した識別が可能であることを検証する．また，速度の変化についても対応が可能であることも検証する．

第 5 章では，第 4 章で述べた識別方法を拡張して，ロボットハンドで対象物の持ち替えと回転を繰り返し，対象物を一定方向へ連続的に回転させながらその外周形状をリアルタイムに識別する方法を提案する．対称形状の対象物を用いた実験を行い識別が可能であることを実験的に確認する．また，非対称形状の対象物に対しても提案する方法が有効であることを実験結果により示す．

最後に，第 6 章において，第 3 章から第 5 章にかけて検証してきたシステムと 2 つの提案方法について総括し，本研究を通じて明らかとなった事項と，残る今後の課題について述べる．

# 第 2 章

# ロボットハンドと触覚センサ

本章では，日本において産業用ロボットとヒューマノイドロボットが開発されてきた経緯を踏まえ，多種多様な作業を実現可能な汎用的なロボットハンドの必要性について述べる．次に，特に多関節からなる指をもつロボットハンドの従来研究について説明する．また，触覚センサの従来研究についても述べる．その上で，触覚センサを有したロボットハンドを扱った従来研究について述べ，アクティブセンシング（Active Sensing）や人間の探査動作などの研究について概観する．

## 2.1 汎用ロボットハンドの必要性

産業用ロボットは，生産現場の自動化を促進し，生産の効率を高めてきた [1–3]．特に日本は，産業用ロボットを積極的に活用してきており，社団法人日本ロボット工業会の統計資料「世界の産業用ロボット稼動台数」から抜粋した Table 2.1 によると，世界の産業用ロボットの約 37%が日本で稼働している状況にある．また，同統計資料の生産・出荷実績から抜粋した Table 2.2 によると，2002 年度から 2005 年度まで生産，国内出荷，輸出ともに成長し続けており，産業用ロボット産業が開発，販売ともに優良な産業であることがわかる．2007 年度については，生産や国内出荷は 2006 年度と比較してマイナスとなっているが高い値を維持しており，輸出はプラスである．これらの資料から，日本の産業用ロボットは世界に対して技術的優位性の高い製品であり，今後も輸出を中心として成長を続けられる可能性が高いことがわかる．用途については，同統計資料抜粋の Table 2.3 に示すように，組み立てや溶接の割合が高く，大画面ディスプレイの生産に用いられるクリーンルーム内作業に対応した産業用ロボットの成長も近年では著しい．クリーンルーム内作業など新しい用途に対応できる機能が付加されることにより，産業用ロボットの基本的機能，すなわち高い動作速度や繰り返し精度を土台として新たな分野に即座に応用されると考えられる．

さて，近年日本の農業の現場では既に慢性的な担い手不足に陥っており，食料自給率の低下と相まって対策が急がれている．特に耕うんや施肥といった作業と比較して，従来多くの

Table 2.1: Industrial robots in operation in the world

| | 2006 END | 2005 END | 2000 END | 1995 END | 1990 END |
|---|---|---|---|---|---|
| Japan | 351,658 | 373,481 | 389,442 | 387,290 | 274,210 |
| China | 17,327 | 11,557 | 930 | | |
| Other Asia a/ | 37,141 | 30,699 | 16,362 | 9,541 | 3,579 |
| Australia/NZ a/ | 5,554 | 4,938 | 2,833 | 1,840 | 1,430 |
| North America b/ | 150,725 | 139,984 | 89,880 | 56,945 | 34,090 |
| Brazil | 3,102 | 2,672 | 1,230 | | |
| Other America | 853 | 978 | 845 | 479 | 150 |
| France | 32,110 | 30,236 | 20,674 | 13,276 | 8,350 |
| Germany | 132,594 | 126,294 | 91,184 | 51,375 | 27,320 |
| Italy | 60,049 | 56,198 | 39,238 | 22,963 | 12,200 |
| Spain | 26,008 | 24,141 | 13,163 | 4,913 | 2,100 |
| United Kingdom | 15,082 | 14,948 | 12,344 | 8,314 | 5,940 |
| Other W. Europe a/ | 37,472 | 34,849 | 27,188 | 17,807 | 13,675 |
| Russian Fed. a/ | 5,214 | 5,049 | 5,000 | 10,000 | 64,204 |
| Other E. Europe a/ | 6,022 | 4,604 | 2,728 | 2,108 | 4,197 |
| South Africa | 1,028 | 622 | 90 | | |
| Other Africa | 32 | 12 | | | |
| not specified | 583 | | | | |
| Total | 950,974 | 922,838 | 751,119 | 605,000 | 454,465 |

a/ Estimated by UNECE and IFR for some or for all the years.

b/ North America: Canada, Mexico, USA

Table 2.2: Annual statistics of industrial robot in Japan

(quantity) and million yen

| | Receipt of order | Production | Domestic shipments | Overseas shipments |
|---|---|---|---|---|
| 2001 | (56,198) | (59,717) | (33,969) | (24,855) |
| | 365,922 | 406,369 | 241,232 | 161,264 |
| 2002 | (62,610) | (62,120) | (31,562) | (30,926) |
| | 403,599 | 391,351 | 200,258 | 183,590 |
| 2003 | (85,058) | (81,277) | (40,559) | (43,258) |
| | 515,362 | 493,595 | 238,584 | 256,567 |
| 2004 | (103,825) | (98,059) | (46,335) | (51,956) |
| | 621,594 | 589,093 | 272,350 | 304,467 |
| 2005 | (112,087) | (107,910) | (52,451) | (57,201) |
| | 701,064 | 656,521 | 308,021 | 368,594 |
| 2006 | (109,364) | (109,067) | (45,634) | (60,385) |
| | 749,120 | 730,351 | 297,877 | 437,200 |
| 2007 | (110,880) | (108,239) | (44,205) | (63,247) |
| | 736,270 | 712,321 | 285,242 | 438,170 |

Table 2.3: Shipment value of according to application(million yen)

| | April-June, 2007 | | | April-June, 2008 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Domestic | Overseas | Total | Domestic | Overseas | Total |
| Weld | 11,221 | 13,176 | 24,398 | 10,639 | 13,715 | 24,354 |
| Machining | 1,859 | 1,329 | 3,188 | 1,788 | 1,343 | 3,132 |
| Assembling | 16,581 | 58,519 | 75,101 | 17,820 | 65,228 | 83,048 |
| Clean room | 6,310 | 9,666 | 15,976 | 4,301 | 10,376 | 14,676 |
| Others | 12,250 | 15,135 | 27,385 | 12,022 | 17,637 | 29,658 |

人手によってまかなわれてきた収穫作業の自動化が遅れており，ロボット技術を応用することが望まれている[4,5]．収穫作業の自動化は露地栽培の農産物のみならず，食物工場と呼ばれるような管理が行き届いた環境にあっても困難である．この収穫作業に産業用ロボットを応用する場合，収穫対象となる果実の位置姿勢にはビジョンセンサを応用できるが，肝心の果実を把持して収穫する作業にはロボットハンドが必要となる．このロボットハンドは，特定の果実のみを対象とするものではなく，人間の手のように収穫対象や果実の姿勢を考慮した把持を実現することで農作業の効率化が可能になると考えられる．その一方で，世界的に食の安全安心のニーズが高まっている．食品加工工場において，人間が調理や盛り付けなどの作業をすることで衛生上の管理には限界ができ，異物の混入などの問題も発生する余地ができる．調理や盛り付けは，加工や組み付けを得意とする産業用ロボットの応用が考えられる[6]．しかし，ここでも特に盛り付け作業においては，産業用ロボットによる不定形状の食品の把持が課題となり，人間の手のようなロボットハンドの必要性の議論に至る．以上のように，産業用ロボットの応用，ロボット技術の応用として期待されている分野ににおいては，対象物を安定して把持し，操ることの可能なロボットハンドが共通するニーズとして存在する．

一方，近年日本では次世代ロボットが数多く発表されている[7–10]．特に人間の形状をしたヒューマノイドロボットや介護ロボットは，我々の生活環境において日常生活や介護福祉に関わる様々な作業を補助するものとして，一般の人々からの実用化の期待が高い．ヒューマノイドロボットの移動手段である 2 足歩行は，従来より研究が進められてきており[11,12]，最近では本田技研工業株式会社の ASIMO や独立行政法人産業技術総合研究所による HRP-2 が発表されている．また，介護ロボットとしては独立行政法人理化学研究所による RI-MAN などがメディアに多く報道されている[13–17]．各ロボット（それぞれのホームページ[13,18,19]より転載）を Fig. 2.1 から Fig. 2.3 に示す．

これらのロボットは，障害物回避や狭隘部移動や周囲に被害を与えない転倒や動作停止などの成果がある[20,21]．また，それらの両腕は産業用ロボットの技術を基礎として，人間との協調作業や人の舞踊動作の再現などを実現している[22]．しかし，期待されている日常生活における作業の補助という点では，アイロンがけやお茶注ぎ動作などの事例はあるものの[23,24]，連続的に複数の作業を行うような事例の報告はない．Fig. 2.3 に示した介護ロボットは，抱き上げ動作の実現を主なテーマとして研究が進められているが，将来的には要介護者の細々とした身の回りの世話も行う必要があると考えられる．しかし，一台のロボットが連続的に複数の作業を行うためには，汎用的なロボットハンドが必要となり，未だ決定的なロボットハンドが開発されていないことは，先に述べた産業用ロボットに関する事例と同様である．

以上のように，世界に対して日本の技術的優位性の高い産業用ロボットや次世代ロボット

Fig. 2.1: ASIMO

Fig. 2.2: HRP-2

Fig. 2.3: RI-MAN

の応用範囲を広げ，技術的優位性を高めるための技術的要素の一つが，汎用的なロボットハンドの実現であることがわかる．しかし，汎用を主な目的としたロボットハンドの研究の事例は少なくない．次節では，それら事例について述べ，汎用的なロボットハンドの実用化のための考察を行う．

## 2.2 汎用ロボットハンド

汎用的な作業を目的として 3 つ以上の関節からなるフィンガを備えたロボットハンド（以下，汎用ハンドとする）の研究の歴史は長く，主に関節剛性や指先の接触と力覚を利用した理論解析 [25–28] のみならずハードウェアの開発まで幅広いアプローチがなされてきており，把握の力学，制御に関する理論的枠組みは 90 年代はじめにほぼ完成している [29]．最近では計算機の高速化やモータの小型化などによって，ハードウェアの開発を伴った応用研究が中心である．以下では主な汎用ハンドの開発事例について述べる．

1980 年代以降の代表的なハンドに，Utah 大学と MIT が中心となって開発した Utah/MIT Dexterous Robot Hand がある [30]．Utah/MIT Dexterous Hand（文献 [30] より転載）を Fig. 2.4 に示す．このハンドは，幅広い実験に利用できる汎用的な手先効果器としての応用を目指して開発された．4 本指の汎用ハンドで各指はすべて 4 自由度をもち，小指が無いことを除けば，人間の手にきわめて近い構成になっている．各関節はワイヤ駆動で動作する [31]．静電容量の変化を検出原理とする触覚センサも開発され，指 1 本につき 170 点，掌に 64 点の計測点をもつ．Utah/MIT Dexterous Hand は 10 個以上製作され，大学や国立の機関で

研究用途に使用された．ワイヤ駆動にはワイヤの伸びによる動作精度の低下が伴うが，遠隔操作でフライパンを操る応用研究の報告もある [32]．

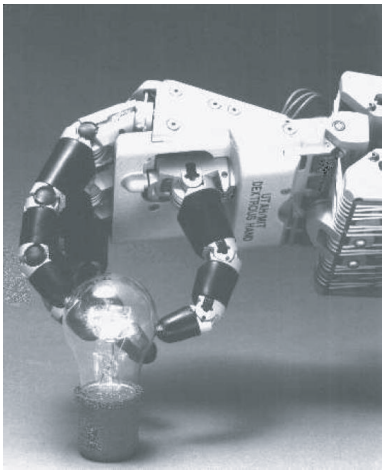

Fig. 2.4: Utah/MIT Dexterous Hand

DLR-Hand は，German Aerospace Center が主体となって開発されている．1998 年に開発された初代の DLR-Hand は 3 自由度の指を 4 本もち，人口筋肉として指の中に張ったワイヤによる駆動方式をとっている [33,34]．その後，2001 年に開発された DLR-Hand II は指を 4 本もち，各指 3 自由度と掌に 1 自由度の合計 13 自由度を備えている．指の根元関節は差動歯車で動作する．指の中間リンクにある関節は，根元のブラシレス DC モータからベルトを介して動力が供給される [35,36]．DLR-Hand II（文献 [36] より転載）を Fig. 2.5 に示す．指先力は 30[N] であり，指先には小型の 6 軸力覚センサをもつ．この 6 軸力覚センサをつかって関節剛性制御などを実現し，びんの蓋を開けるなどの作業や，遠隔操作などにも応用されている．制御には FPGA（Field Programable Gate Array）を用いてリアルタイム制御を実現している [37]．最近では具体的なアプリケーションまでは至っていないが，FPGA に DSP（Digital Signal Processor）を併用して高速な演算を可能とした HIT/DLR Dexterous Hand の開発が報告されている [38,39]．

人間と同じ 5 本指のロボットハンドとして，岐阜大学による Gifu Hand がある [40–43]．Gifu Hand III （文献 [44] より転載）を Fig. 2.6 に示す．各指 4 関節であるが，親指以外の指は指先の 2 関節がリンク機構により連動しており 3 自由度である．指先に 6 軸力覚センサを備える．指の各リンクと掌には導電性インクを使った分布型触覚センサ [45] が搭載されており，掌に 312 点，親指に 72 点，その他の指に 60 点，ハンド全体で 624 点の計測点がある．指先力は 2.7[N] まで出力でき，ハンドの重量は 1.4[kg] である．円筒などを把持した際の分布型触覚センサの出力例の報告はあるが，その出力を積極的にハンドの制御や認識等に用いたという報告はない．現在は指先の形状を変え，人間の指に対向して設置される対向型ハプ

Fig. 2.5: DLR-Hand II

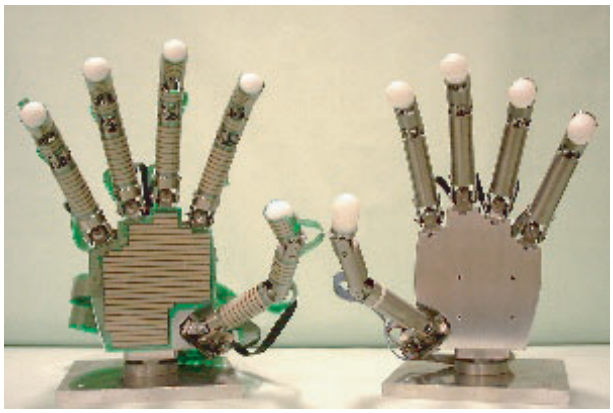

Fig. 2.6: Gifu Hand III

ティックインターフェイスとしても研究が進められている [46]．

3 本指ながらも多様な把持を実現できるロボットハンドとして Barrett Hand がある [47, 48]．Barrett Hand（文献 [48] より転載）を Fig. 2.7 に示す．円盤状の掌部の周囲に 2 関節の指を 3 本配置し，そのうち 2 本は基部が掌の周上で移動可能である．これにより 3 本の指によって決まるリンク運動面の角度を動的に変えることができ，平行，対向，対称など配置を変え，様々な形状と多様なサイズの物体を把持できる．大きさは人間の手と同程度であり，ハンド全体で 1.18[kg] の質量で負荷は指 1 本当たり 2[kg] である．指の配置と把持力から強固な把握が可能であるが，力覚もしくは触覚センサは搭載されておらず，3 本指であることから物体の操りは困難である．主に研究用プラットフォーム，産業用ロボット用の準メカニカルハンドとして Barrett Technology Inc. によって販売されている．

東京大学の石川らによって開発された High-speed Multifingered Hand は，高速な動作を特徴として 3 本指ハンドである [49, 50]．そのハンド（文献 [50] より転載）を Fig. 2.8 に示す．Fig. 2.8 の中央の指が 2 自由度であり左右の指が 3 自由度で計 8 自由度をもつ．Barrett Hand

Fig. 2.7: Barrett Hand

と同様に左右の指の基部が掌部の周上を移動する．各自由度は DC ブラシレスモータによって動作し，指先力は 28.5[N] である．また指先の速度が 4.5[m/s] と非常に高速であり，高速なビジョンセンサと組み合わせて自由落下する対象物の把持を可能としている．

Fig. 2.8: High-speed Multifingered Hand

また，具体的なアプリケーションは提示されていないが，Fig. 2.2 で示した HRP-2 用の汎用ハンド [51] や，金子らによる二重旋回機構を備えた 4 本指ロボットハンド [52]，菅野らによる板ばねを使った柔軟関節をもつ TWENDY-ONE Hand [53,54] など他にも多くの開発事例がある．しかしながら，人間の手のように多種多様な作業をシームレスに実現できる汎用ハンドは未だに開発されていない．この原因の 1 つに，人間の手の触覚に相当する触覚センサの開発が不十分であり搭載が進んでいないこと，さらに搭載されていても有効に活用してされていないことが挙げられる．人間は触覚を使うことで手と対象物の位置関係や加えている力などを認識し，目的に応じて手の多くの自由度を制御することで，様々な把持や操り動作を可能としている．そこで次節では人間の触覚を踏まえたうえで，その触覚を実現すべく開発された触覚センサの研究事例について述べる．

## 2.3 人間の皮膚と触覚

生物はすべて外皮などで体が覆われている．外皮をもつ昆虫に代表される無脊椎動物に対して，人間に代表される脊椎動物は柔軟な皮膚をもつ．かたい外皮をもつ理由としては，体の構造を維持するため，外敵や外からの刺激から自身を守るためなどが挙げられる．一方，脊椎動物は，内骨格により体の構造を維持すること，外敵や環境変化に対して知的に対応できることなどの理由から，かたい外皮が不要になり皮膚が柔軟になった．そして，この皮膚の柔軟性により，物体との柔軟な接触が可能となり，物体との接触状態の複雑化に伴い，触覚受容器が多様化，高密度化された．特に人間は，このような触覚受容器の充実から，物体を滑り落とさずに把持することや,「すべすべ」や「ざらざら」などのテクスチャの検出，物体の柔らかさの検出が可能となった．さらには触覚受容器と多自由度の手が組み合わさることで，人間の器用かつ柔軟な操り運動が可能となっている．このことから，人間の皮膚の柔軟さと触覚受容器の存在は，器用な手に不可欠の存在であると考えられる．

次に人間の皮膚の構造と触覚受容器について概観する．人間の指の軟組織断面の模式図（文献[55]より転載）を Fig. 2.9 に示す．指の軟組織は，表皮（epidermis），真皮（dermis），皮下脂肪組織（subcutaneous fat tissue）から成る．表皮と外界との境界には指紋（epidermal ridge）がある．指紋は高さ約 0.1[mm]，幅約 0.3〜0.5[mm] の小稜である．表皮と真皮の境界には真皮乳頭（papilla）と呼ばれる突起群がある．真皮乳頭は指紋の直下に整然と 2 列に配置されており，真皮乳頭の先端がさらに枝分かれしていることも多い．表皮は角質層（stratum corneum），透明層，顆粒層，有棘層，基底層より成り，角質層が表皮の 2 分の 1 から 3 分の 2 の厚さを占める．また，皮下には形・大きさ・配置の異なる複数種の触覚受容器が埋め込まれており，それぞれの触覚受容器の配置は皮膚構造と深くかかわっている．Fig. 2.9 に 4 つの触覚受容器の配置を，Table 2.4 に大きさと特性を示す．マイスナー小体は真皮乳頭内に存在する楕円球状の受容器であり，受容器の内芯が表皮下部の基底層と結合している．真皮乳頭が指紋直下に 2 列に配されているために，マイスナー小体も Fig. 2.9 で示したように指紋直下に 2 列に並んでいる．メルケル小体はメルケル細胞と軸索終末（メルケル盤）の複合体であり，真皮乳頭間の真皮基底層の最深部に数個ずつかたまって存在している．パチニ小体は，皮下組織内や真皮の深層に存在する卵形の大きな受容器であり，1 本の無随神経軸索を取り巻く内殻と，それをタマネギの皮のように何層にも包み込む外皮から成る．内殻. 外皮間および外皮と外皮の間には液体を含む．ルフィニ小体は真皮のやや深部に存在する紡錘形の受容器であり，長軸方向が皮膚面に平行である．皮膚を横方向に引っ張るとインパルスを発射することが知られている．これら 4 つの触覚受容器の応答特性は，Table 2.4 に示したように FA と SA に分類される[56,57]．FA，SA は，それぞれ，fast adapting, slowly adapting の略であり，FA は応答（順応，adaptation）の速い受容器，SA

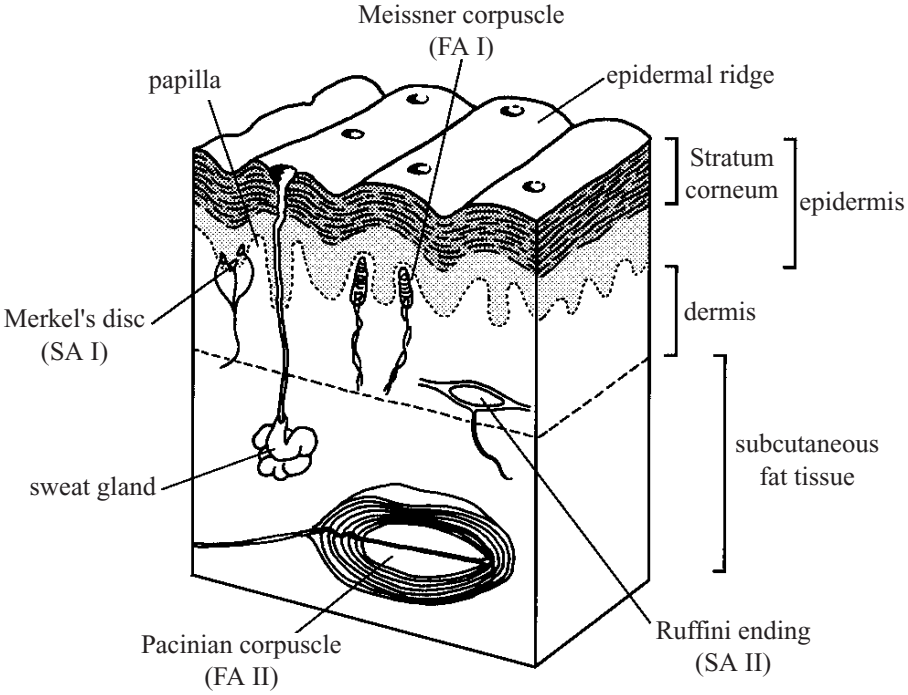


Fig. 2.9: Tissue and tactile receptors of glabrous skin

Table 2.4: Characteristics of tactile receptors at glabrous tissues

| Name of receptors | type | receptive field | adaptation | size |
|---|---|---|---|---|
| Meissner corpuscle | FA I | small | fast | L=20-150um, D=40-70um |
| Merkel's discs | SA I | small | slow | D=7um, T=1um |
| Pacinian corpuscle | FA II | large | very fast | L=0.3-1.5mm, D=0.2-0.7mm |
| Ruffini endings | SA II | large | slow | L=0.5-2mm, D=0.2mm |

(L:length, D:diameter, T:thickness)

は遅い受容器，という意味を示す．すなわち，前者は刺激量が変化する際に応答する受容器，速度・加速度受容器または周波数帯域が広い受容器である．後者は，持続した刺激に応答する受容器である．例えば，指で物体をつまんで離した場合，つまんだ瞬間と離した瞬間に FA の受容器はインパルスを発射し，つまんでいる状態のときには SA の受容器がインパルスを発射することとなる．一方，FA, SA の後の I および II は，受容野の広さを表す．受容野とは，触覚受容器が応答できる皮膚の範囲である．タイプ I は受容野が狭い（直径 2〜4[mm]）タイプ，タイプ II は広くて境界が不鮮明なタイプである．前者は皮膚の上部にある小さな受容器であり，後者は皮膚深部あるいは皮下脂肪層にある大きな受容器である．皮膚に加わる刺激は，皮膚によって分散されることから，深くなるほど情報はあいまいになり，タイプ II が大きなの受容野になっていることは必然的であると考えられる．このように，4 つの触覚受容器は，時間的および空間的な分担をして，皮膚に加わる機械刺激を検出している．そして，最終的にそれらの情報を脳に送ることで，人間はテクスチャや接触面の情報を認識している．

人間の触覚，特に触覚受容器について概観したが，要点として以下の項目が挙げられる．

- 皮膚は柔軟である
- 触覚受容器は皮膚の下に整列し，分布している
- 触覚受容器は 4 種類あり，それぞれ異なる機械刺激を検出している
- テクスチャや接触面の形状などは直接受容器で検出するのではなく，脳による触覚情報処理を経て認識している

次節では，これらの特徴を踏まえて開発された触覚センサの事例について述べる．

## 2.4 触覚センサ

これまでロボットの触覚として多くの触覚センサが提案されているが，未だ人間の多様な触覚をすべて実現できるものはない [58]．そのため，それら触覚センサの研究では，期待されるロボットの能力を実現するため，必要な触覚機能に着目した触覚センサの開発が行われてきた．主には外界との直接的な接触により生じる接触，圧力，すべりなどを検知するセンサとなる．用途により各情報を個別のセンサで検出するような集中型のセンサと，面状にセンサを構成し分布する分布型のセンサの形態をとり，最近では接触の特性を良くするために柔軟な部材を使用する触覚センサが多い [59]．

### 2.4.1　近接覚センサ

ロボットと対象あるいは環境との接触の有無を検知するセンサに近接覚センサがあり，物体の探索，衝突検知などに用いられる．市販のマイクロスイッチをロボットハンドの指先に搭載することで実現できるが，分布の接触情報としてとらえるためスイッチをマトリックス状に配置した研究もある[60,61]．マイクロスイッチを触覚センサに応用した場合，オンオフの情報のみを検出することになり，人間の触覚受容器の代替となることは難しい．一方，人間の触覚とは異なるが，フォトインタラプタを用いて接触前に対象物との数 [cm] 程度の距離の検出を行うセンサが開発されている[62]．このセンサは，視覚センサと触覚センサの中間の役割を担う近接情報を得るものである．対象物を把持する前のハンドのプリシェイピングや，人間や環境との衝突を回避するものとして提案されている．

### 2.4.2　圧力，変位センサ

静的な圧力，変位の検出は，触覚受容器の SA に相当するセンサであり，動的な圧力，変位もしくは振動の検出は，FA に相当するセンサとなりうることから，人間の触覚の代替となるために重要なセンサであると考えられる．そのため，圧力，変位を検出する触覚センサは数多く提案されており，弾性体とその弾性体の変位を検出するセンサを組み合わせたり，感圧抵抗体を用いて構成される．

下条らは，感圧導電性ゴムを用いて圧力分布を検出するセンサを基にして，そのセンサに画像処理の可能な IC を組み合わせたセンサ，センサにゴムの被膜を付けた場合のフィルタ効果，感圧導電性ゴムの履歴特性，液状の感圧導電性ゴムを自由曲面上で硬化させ製作したセンサの特性を調べた研究を行っている[63–66]．感圧導電性ゴムの長所は，薄くて柔軟であること，電気抵抗値の変化がひずみゲージなどと比較して大きく信号処理回路を簡単に構成できること，電極の工夫でマトリックスでの構成が容易であることが挙げられる．一方，短所は履歴特性や温度特性などゴム特有の特性があり，ひずみゲージなどと比較して検出精度が低いことである．マトリックスを構成することで電極の本数が増えることが問題となるが，この問題に対して長久保ら[67]や三谷ら[68]は，外周部の電極のみで領域内部の抵抗分布を推定する技術である EIT（Electrical Impedance Tomography）を使って感圧導電性ゴム上の圧力分布をそれぞれ 16 本，8 本のみの電極で検出している．また，感圧導電性ゴムに衝撃センサを組み合わせてマトリクス状に構成したセンサが福嶋らによって提案されている[69]．

柔軟なシリコンゴムやウレタンゲルなどにひずみゲージなどの素子を埋め込み，ゴムやゲルの変形を検出するセンサも多数提案されている．Utah/MIT Dexterous Hand の触覚センサは，静電容量式の分布型圧力センサを備え，対象を把持した際の圧力分布を出力している[30]．Jockusch らは，ロボットハンドの指先に突起をもったエラストマーのキャップを付

け，そのキャップの内部にピエゾ素子を並べて接触の状態を検出するようなセンサを提案し，指上の位置と圧力を検出している[70]．また前野らは，人間の指紋の形状を模した突起をつけ，その突起の下にひずみゲージを配列したセンサを提案した[71]．このセンサは，テクスチャの柔らかさや摩擦感を評価する触感センサとして，アルミニウムやコルク等 6 種類の触感の違いを検出した．これらセンサは，人間の触覚受容器の SA もしくは FA の機能の再現を目指したものと考えられる．一方，単一の素子だけではなく，複数の異なる種類の素子を用いた研究例もある．Taddeucci ら[72]は，分布型触覚，振動，温度センサをもった指を開発している．また，多田らは，PVDF（Polyvinylidene Fluoride）とひずみゲージを指形状のシリコンゴムの中にランダムに埋め込み，物体のテクスチャの識別を行っている[73]．異なる種類の素子を用いることで，人間の触覚受容器の FA と SA に相当する素子をもった触覚センサを構成できるが，その触覚センサで検出した信号を処理する方法についてはニューラルネットワークを使った研究[74]があるものの未だ十分に議論がされていない．

一方，対象と接触したシリコンゴムなどの変形を光学素子で計測するセンサも提案されている．木下らは，シリコンゴムシートの片側をセンシング表面とし，別の面にセンシング要素群となる円錐突起のアレイ状配列として，この円錐突起と直接接触するアクリル板の反対側から CCD カメラで円錐突起の変形を撮影する触覚センサを提案している[75]．2 指の開閉式ハンドに搭載し，触覚像の識別を行っている．大岡らは半円球形状のアクリル板の上にシリコンで製作した突起状触子を分布させ，アクリル板上の触子の接触画像を CCD カメラで撮影することで垂直力とせん断力を求めるロボット指を製作している[76][77]．

半導体技術を利用して製作した超小型半導体圧力センサを用いたセンサとして，向井による面状触覚センサがある[78]．この触覚センサは，1 点の計測点の大きさが直径 5.8[mm] と比較的大きいが，Fig. 2.3 に示した RI-MAN の腕と胸部に搭載され，抱きかかえた人間の位置や圧力を検出できるよう圧力の検出レンジが広いことが特長である[79]．一方，寒川らは MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）の技術を応用し，微細なカンチレバー上に圧電膜を生成し，そのカンチレバーを 4 つ対向させて配置することで圧力とせん断力の検出ができるセンサを提案している[80]．宮本らは MEMS で小型化をする目的で，ひずみゲージを貼ったカンチレバーを直交した 2 軸の向きに複数並べたセンサを提案している[81]．MEMS は複雑な機構の触覚素子を微細化できる技術であり，触覚センサの小型化が期待される．しかし，触覚センサは接触して情報を得るセンサであることから，微細化することにより強度が低くなっては実用化が困難であることから，強度を上げることが今後の大きな課題と考えられる．

### 2.4.3 滑りセンサ

人間は質量および摩擦係数が未知の対象を，握りつぶしたり滑り落としたりすることなく安定に把持することが可能である．これには，FA I の触覚受容器が特に大きく作用しており，皮膚の状態でみると初期局所滑りが検出されていると考えられている．初期局所滑りとは接触面の一部に初期的に生じる滑りを指す．初期局所滑りを検出すれば，把持物体を完全に滑り落とす直前の状態を検出できるため，ロボットハンドによる物体把持に有効である．

Tremblay らは，球状のシリコンゴム膜の表面に半球状の突起を分布させ，センサと対象間で生じた際の初期局所滑りをセンサ内部の加速度計によって検出するセンサを提案している [82]．このセンサの素子には加速度計が 1 つのみ用いられており，滑り検出の精度は高くなかった．De Rossi らはマトリクス状に配置した PVDF にシリコンゴムを被膜したセンサを提案している [83]．リカレント型ニューラルネットワークを用いて PVDF の出力をシリコンゴム内部の垂直応力とせん断応力の分布と接触状態に変換した．前野らは，単に素子をシリコンゴムに埋め込むだけでなく，指紋などの人間の指の構造的特徴を模倣し接触・非接触，固着・滑りといった状態を推定できるセンサを提案している [84]．また，下条らは感圧導電性ゴムを使って分布ではなく荷重分布中心位置検出センサを構成し，このセンサを使って初期局所滑りを検出できることを実験的に検証している [85]．一方，篠田らは，超音波の共鳴を利用する音響共鳴型テンソルセルによる滑り検出を報告している [86]．このセンサは初期局所滑りを精度良く検出できるが，センサ内に空洞が必要なためロボットの指先に分布型で適用するのが難しい．小笠原らは半球状のシリコンゴムと対象との接触を CCD カメラで撮影し，初期局所滑りによる接触面の変形を表す特徴量として偏心度を用いて滑りを検出する方法を提案している [87,88]．デバイスの小型化により汎用ハンドの指先に搭載しているが，透明なシリコンゴムを使うため外乱光の影響を受けやすいという短所をもつ．

## 2.5 触覚センサを有したロボットハンドによるセンシング

人間の手は，作業を行うためのエンドエフェクタとしての役割があると同時にセンシングも行う．このことに着目した Klatzky らは，Fig. 2.10 に示すように未知の対象の特性を得るための人間の探索動作をの分類を行っている [89]．対象との特性としてテクスチャ，硬さ，温度，重さ，大まかな形状，細かな形状に分け，得たい特性に応じて手の形状を適切に変化させていることが示されている．このように人間は触覚を使って対象の特性を得た上で，その特性，あるはその特性から構築したモデルを使って手で対象を操作する．手で自由にさわることによって生じる対象の知覚は，生理学的にはアクティブタッチ（active touch），またはハプティクス（haptics）と呼ばれ，人間の器用な動作に不可欠であると考えられている [57]．

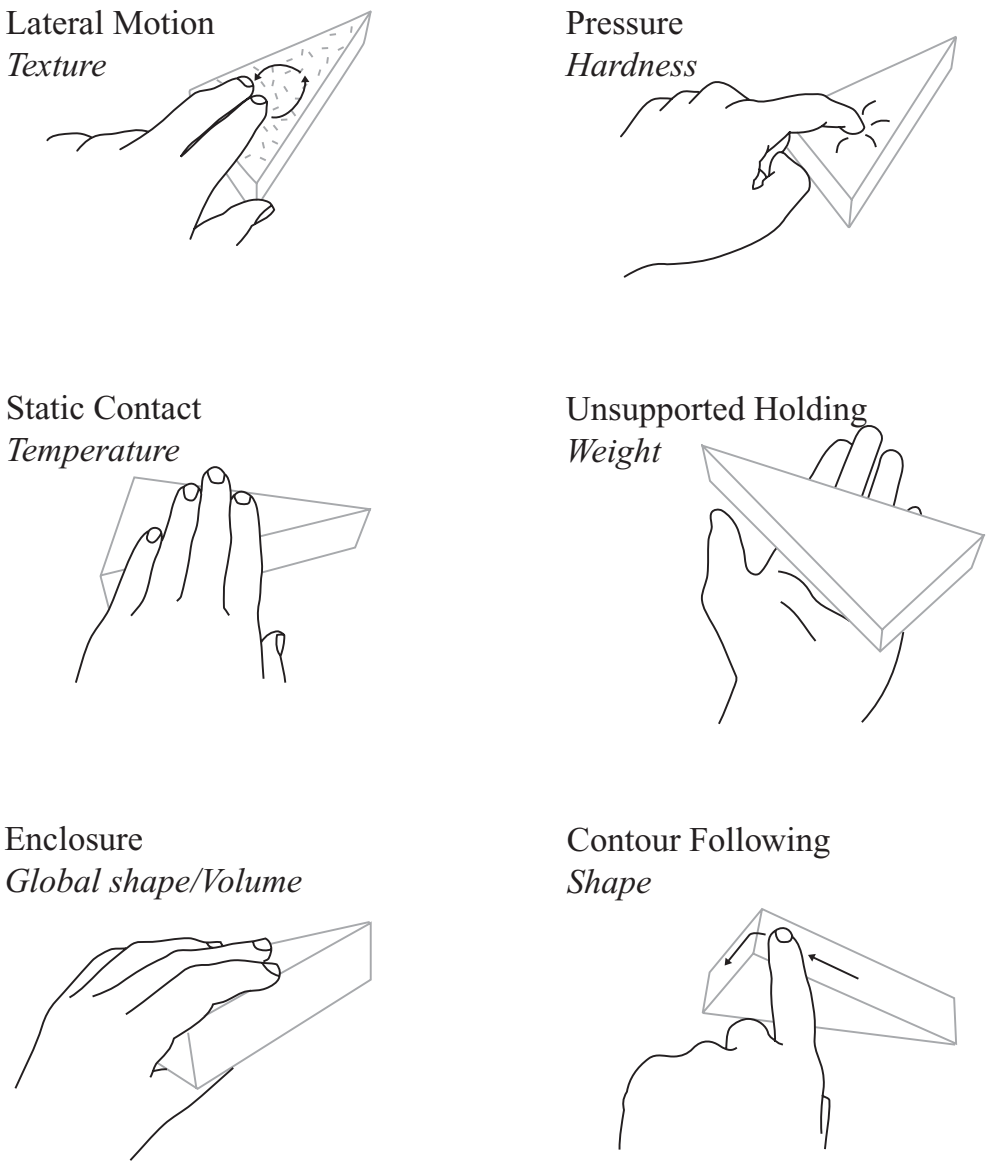


Fig. 2.10: Klatzky and Lederman demonstrated that humans use a number of exploratory procedures to determine unknown object properties

人間の手をロボットハンドに置き換えた場合，アクティブタッチに相当する考え方としてアクティブセンシングがある[90]．センサからアクチュエータへの一方向のフィードバックだけではなく，計測の精度を上げるためや，効率の良い計測を行うために，センサとアクチュエータ間の情報の送受を双方向に行うという考え方である．触覚センサを有したロボットハンドの場合，対象の特徴を得るための対象の探索や，対象全体の形状を検出するための局所性の回避，微細な形状やテクスチャの検出のための空間分解能の向上を目的としてアクティブセンシングが応用される．この触覚に関するアクティブセンシングの研究としては，Pribadi らが指先で未知の対象の外周をなぞることで対象の形状を推定する方法を提案している[91]．Allen らは，ピエゾ抵抗を使った触覚センサを指先に備えた Utah/MIT hand を使い，エッジの検出など画像処理的な方法を応用して，対象の形状を推定している[92]．Okamura らは，光導波路を使った触覚センサを備えた指でなぞり動作を行い，テクスチャ特に微小な凹凸の有無の検出している[93]．渡邊らはマイクスロイッチをアレイ状に並べた触覚センサを備えた指で対象を包み込み把握し，分布情報を処理することで対象の形状を識別する方法を提案している[94]．これらの研究では，触覚センサをもつロボットハンドで，固定した対象の表面を探索することで形状やテクスチャの情報を得ている．

一方，触覚だけでは限界があるという観点から，視覚と触覚を組み合わせた方法が提案されている[95–97]．触覚以外の感覚と組み合わせる点においては，センサフュージョンの考え方に通じる．視覚を加えた場合，汎用ハンドが対象に触れる前に目的とする認識や操作に有利な位置に各指を配置できるという利点がある．さらには，対象を把持し操る間も視覚による情報をフィードバックすることで，汎用ハンドの制御へ利用できると考えられる．しかしながら，汎用ハンドの場合，指によって対象が隠れてしまい，視覚の情報が十分に得られなくなるという問題が生じる．この問題はオクルージョンと呼ばれ，視覚センサ特有の問題であるが，指が最も器用に動作している時に，視覚センサはその機能を発揮できないこととなる．このことから，多種多様な作業を行うことができる汎用ハンドには，触覚センサの情報と汎用ハンドの制御に活用することが重要であり，視覚は大域的な制御や評価に利用するべきだと考えられる．

## 2.6 結言

本章では，人間の手の代替となるような触覚センサを有する汎用ハンドを実現するにあたって，汎用ハンドの研究開発事例，人間の触覚の特徴，触覚センサの研究開発事例などについて概観した．汎用ハンドと触覚センサには多くの研究事例があり，アクチュータや減速機等の小型化により汎用ハンドは小型化され，PVDF などの新しい素材の開発により人間の触覚の要素を実現する触覚センサの研究開発が進められてきている．それらの多くは独立に

研究されてきたが，汎用ハンドに触覚センサを付加する研究例や，最初から触覚センサを適用することを考慮に入れて設計された汎用ハンドの研究例が数は少ないが報告されている．しかしながら，人間の手の代替になる汎用ハンドの実現には更なる議論が必要である．

人間の触覚に関して，触覚受容器は機械刺激を捉えているのみであり，人間の感じる触覚は脳内での処理の結果得られるものとされている．この脳内での触覚を実現するためには，触覚の情報処理方法を考える必要があるが，生理学的にそのプロセスは明確になっていない．このことは，単純な触覚センサであってもロボットハンドの動作生成に有効な情報を得られる可能性があること，触覚センサをもつロボットハンドで対象を把持しそれを操作しながらセンシングを行ったときの触覚情報処理の方法を議論する必要があることを示唆している．これらの示唆に基づいて，次章以降では触覚センサを備えたロボットハンドを開発し，触覚センサからの情報に基づいて操作中の対象の形状を得る方法を提案する．

# 第 3 章

# ユニバーサルロボットハンド

## 3.1 緒言

人間の手は複数の関節を持つ 5 本の指を有し, 様々な複雑作業を行うことができる．このことから，人間の手はユニバーサルなエンドエフェクタであると言える．それと同時に，人間の手の皮膚には無数の触覚受容器が分布しており，撫でるなどの動作を行うことで，手をセンシングデバイスとしても利用することができる．人間の手の器用さは，これら機構と触覚の相互のやり取りを効果的に行うことで実現していると考えられる．すなわち，人間の手による汎用的な作業は, 指表面部に分布する触覚，深部体性感覚にあたる関節の力覚からの情報を，手の制御系と送受するした結果として得られるものであり，作業に対してユニバーサルなロボットハンドを実現するには，人間の手の自由度を参考に機構を設計し，そのロボットハンドの大きさや形状を考慮した触覚センサを付加することが重要である．

そこで，本研究ではユニバーサルなロボットハンドシステムの実現を目指し, 研究プラットフォームとなる 5 本指のロボットハンド（以下，ユニバーサルロボットハンドとする）を開発した．本章では，その特徴・基本仕様について述べたのち，応答特性や剛性制御など基礎的な実験の結果について述べる．また，ユニバーサルロボットハンドに適用するために設計した分布型圧力センサの詳細について述べる．分布型圧力センサに加えられた力を推定する方法，接触面の形状を推定する方法について述べ，評価実験を行う．

## 3.2 ユニバーサルロボットハンドシステム

### 3.2.1 機構

ユニバーサルロボットハンドを Fig. 3.1 に示す． ユニバーサルロボットハンドはアルミを材質とした 5 本の指と手のひらから構成され，全体の重量は約 9.5[kg] である．各指の長さはそれぞれ約 334[mm] となっている．各指は同じ構造をしており，親指を人差し指と中

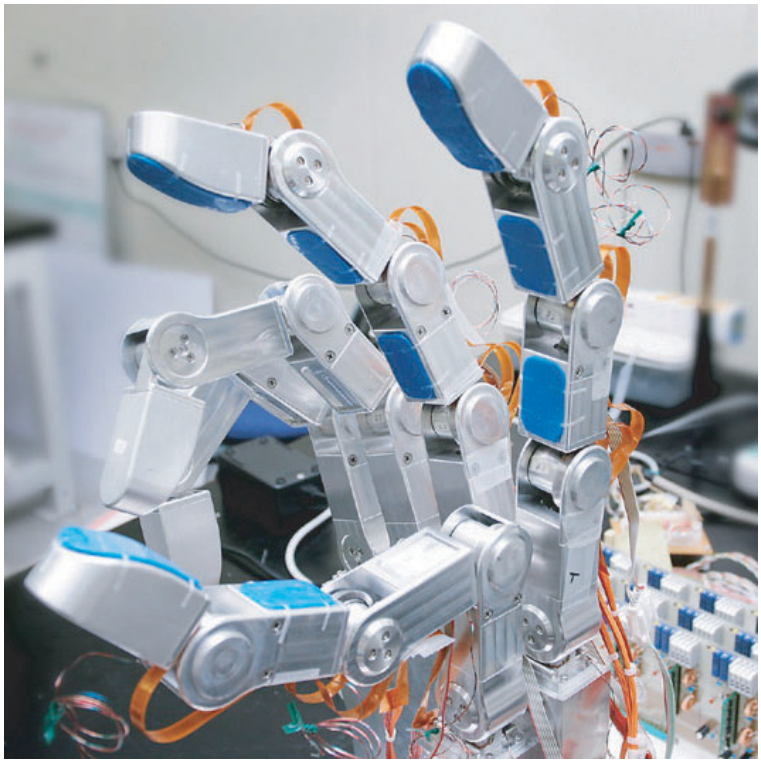

Fig. 3.1: Universal Robot Hand

指の中間位置にに対向させて配置した．指の機構を Fig. 3.2 に示す．指は内部にモータを組み込んだアクチュエータ内蔵型である．Utah/MIT Dexterous Hand [30] などは外部に駆動装置を置くワイヤ駆動方式をとっているが，ワイヤ駆動方式ではワイヤの伸びが生じたり，制御が難しいなどの短所がある．ユニバーサルロボットハンドのように小型モータによる駆動としてアクチュエータを内蔵することで，メンテナンスを少なくし制御も容易になる．動力のモータには光進電気工業株式会社の DC マイクロモータを用いた．小型のモータでありながら最大トルクが 1.1[Nm] であり，その底部にはエンコーダを有する．ユニバーサルロボットハンドでは，各モータの回転を関節部に搭載した株式会社ハーモニック・ドライブ・システムズ社製の減速機を用いて減速する．この減速機は低バックラッシュで組み込みが容易な点に特長があり，その減速比は 1/275 である．各指は 4 関節を有するが，指先の Joint4 と Joint3 はシャフトとギアによって連動するような設計とした．これは人間の手も DIP 関節と PIP 関節が連動することを参考にしているが，指 1 本あたりの自由度を少なくすることによってハンドの制御を容易にする利点もある．そのギア比は 1：1 となっている．各関節の稼働範囲は Table 3.1 のとおりである．

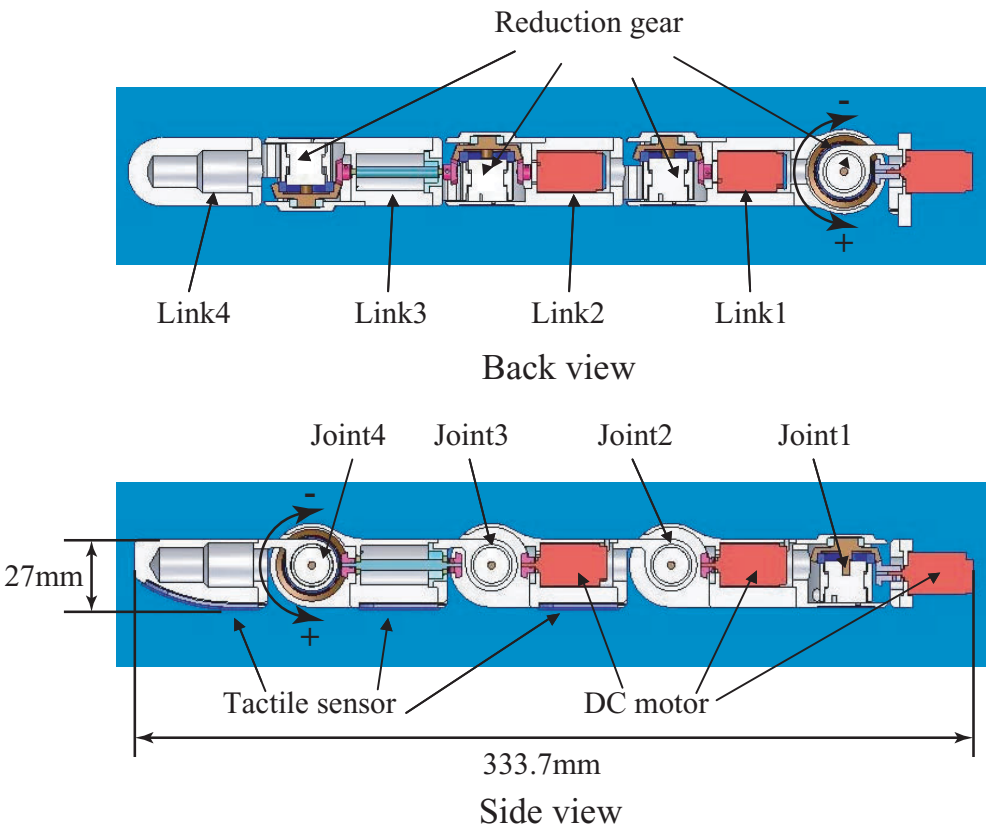


Fig. 3.2: Finger mechanism

Table 3.1: Angular range

| Joint | Range[deg] |
|---|---|
| 1 | -10～10 |
| 2 | -10～90 |
| 3 | -10～90 |
| 4 | -10～90 |

### 3.2.2　角度センサとトルクセンサ

ユニバーサルロボットハンドは，関節の角度を検出する角度センサと，関節に生じたトルクを検出するトルクセンサ，指表面に生じる圧力分布を検出する分布型圧力センサの 3 種のセンサを有する．ここでは，角度センサとトルクセンサについて説明する．

関節の角度の検出には，各モータの底部に付属し，モータの回転をパルス出力する角度センサ（エンコーダ）を用いる．分解能は 64[ppr] であるが，減速機に入力前の回転を検出対象としているため，指の関節角度において高分解能を実現できる．角度センサの出力は，カウンタボードを介してユニバーサルロボットハンドを制御する PC へと入力する．

関節のトルクの検出には，ひずみゲージを用いる．Fig. 3.3 にひずみゲージを貼った関節を示す．トルクセンサは，Fig. 3.3 に示すように各関節の薄肉構造部に貼り付け，関節に加わったトルクによって生じる薄肉部の変形を検出する．4 枚のひずみゲージでブリッジを構成し，さらにストレインアンプにより信号を増幅する．増幅した信号は，A/D 変換ボードを介してユニバーサルロボットハンドを制御する PC へと入力し，トルクに変換される．各指には，この薄肉部が各関節に計 4 か所あるが，Joint2，Joint3，Join4 の 3 か所に 4 枚のひずみゲージを貼りトルクセンサを構成した．

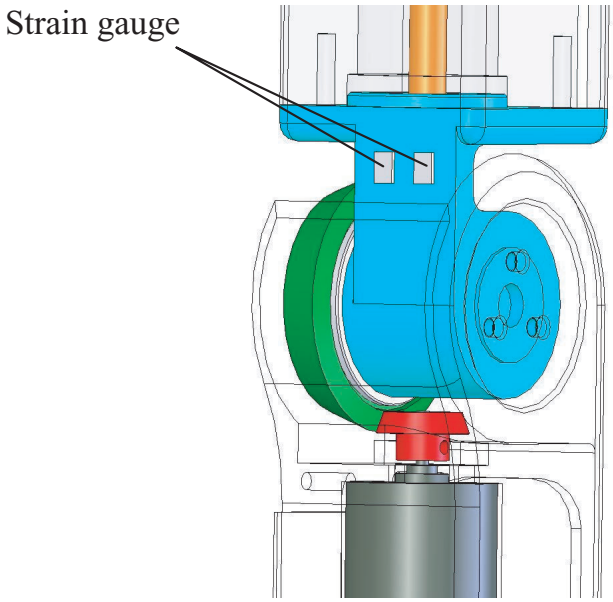


Fig. 3.3: Torque sensor

### 3.2.3 分布型圧力センサ

ユニバーサルロボットハンドの触覚として分布型圧力センサを設計，製作した．製作した分布型圧力センサを Fig. 3.4 に示す．この分布型圧力センサは，物体に接触する面から順に，ウレタンゲル（株式会社エクシールコーポレーション [98] 製），感圧導電性ゴム（イナバゴム株式会社 [99] 製），電極シートの 3 層からなる．このように単純な 3 層構造によって，センサ自体の製作や摩耗しやすいウレタンゲルの交換が容易となる．ウレタンゲルは，アスカー C 硬度が 15 であり厚さが 2.5mm である．感圧導電性ゴムは，厚さが 0.5mm で薄いシート状の素材である．圧力を受け体積が減少するとゴム内に配合される導電性の粒子が接触することから，その部位の電気抵抗値が小さくなるという特性をもつ．分布型圧力センサの一番下の層は電極シートである．ポリイミド素材のフレキシブル基板にパターンを構成したものを製作した．

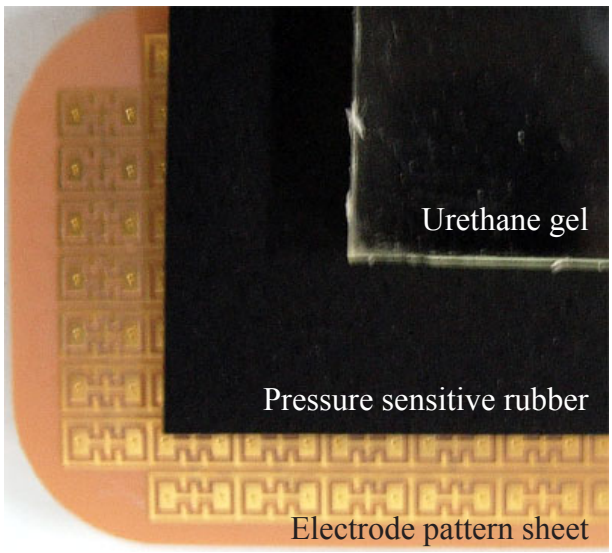


Fig. 3.4: Structure of tactile sensor

次に分布型圧力センサの検出原理について述べる．分布型圧力センサの断面図を Fig. 3.5 に示す．分布型圧力センサの対象と接触する面は柔軟なウレタンゲルである．対象と接触し，ウレタンゲルに力が加わることでウレタンゲルは変形する．この変形により，ウレタンゲルの下層の感圧導電性ゴムにも圧力分布が伝わり，その圧力部分が押され薄くなることから感圧導電性ゴム内の導電粒子が結合する．導電粒子の結合によりその部分の感圧導電性ゴムの電気抵抗値が変化する．このことから，この電気抵抗値を検出することで，その部位に加えられている圧力を算出することができる．

分布型圧力センサの最下層である電極シートは，感圧導電性ゴムの電気抵抗値を計測するため，Fig. 3.5 に示したように電圧を印加するための電極（以下，印加電極とする）と電

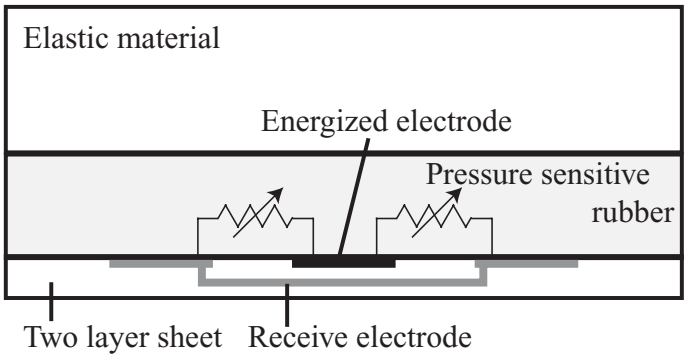


Fig. 3.5: Cross-sectional view of tactile sensor

流を引き込むための電極（以下，引込電極とする）の 2 本の電極が計測点 1 点に対して必要となる．この分布型圧力センサの電極シートでは，電極パターンを 2 層で構成可能なフレキシブル基板を用いて計測点を構成した．また，圧力分布を検出するために，マトリックス状に計測点を並べた．計測点 1 点のパターンを Fig. 3.6 に示す．Fig. 3.6 の計測点 1 点では，周囲に印加電極を，その中に引込電極を配置している．引込電極はスルホールでフレキシブル基板の中間層へ配線される．印加電極と引込電極間の白色部分は電気的絶縁部分になり，Fig. 3.5 に示したように絶縁部分の上部の感圧導電性ゴムが主な抵抗値の検出部分となる．感圧導電性ゴムの変形によって，パターン上には感圧導電性ゴム内の導電粒子の接触による導電経路が複数できるが，その導電経路が多くできやすいほど電気抵抗値の変化が大きくなり分布型圧力センサとしての感度が高くなる．これを実現するには，印加電極と引込電極が近づくよう絶縁部の幅を小さくし，さらに絶縁部を長くすれば良い．そこで，Fig. 3.6 で示すパターンでは，感度を高める目的で，絶縁部の幅を安定して製造できる最小値である 0.2[mm] とし，さらに絶縁部が長くなるよう各電極を凹凸状に入り組んだ形状に設計した．

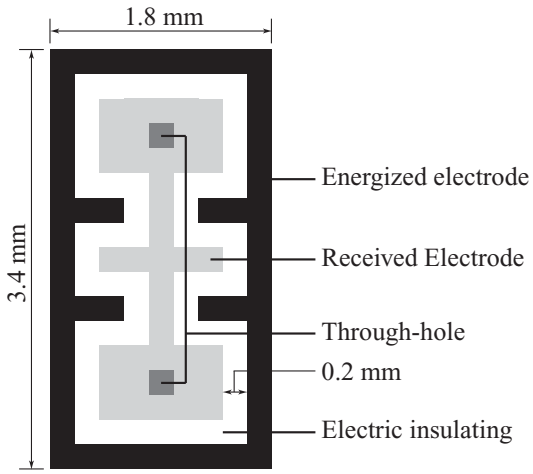


Fig. 3.6: Unit of electrode pattern

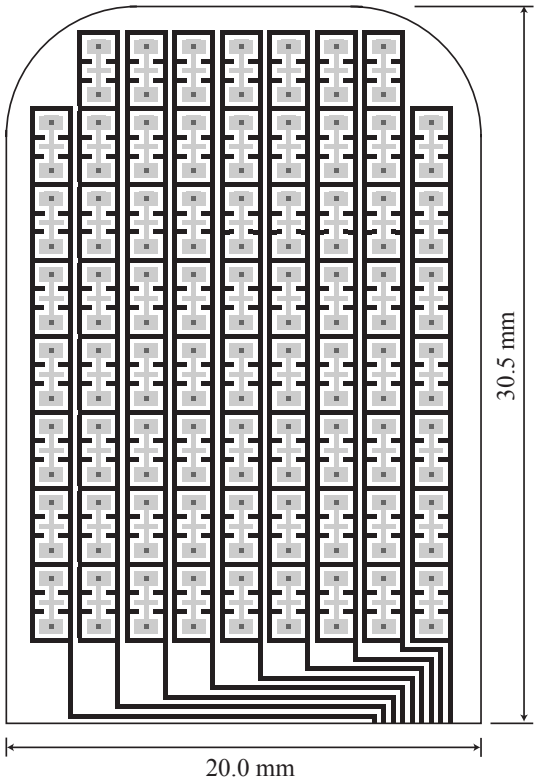


Fig. 3.7: Electrode sheet

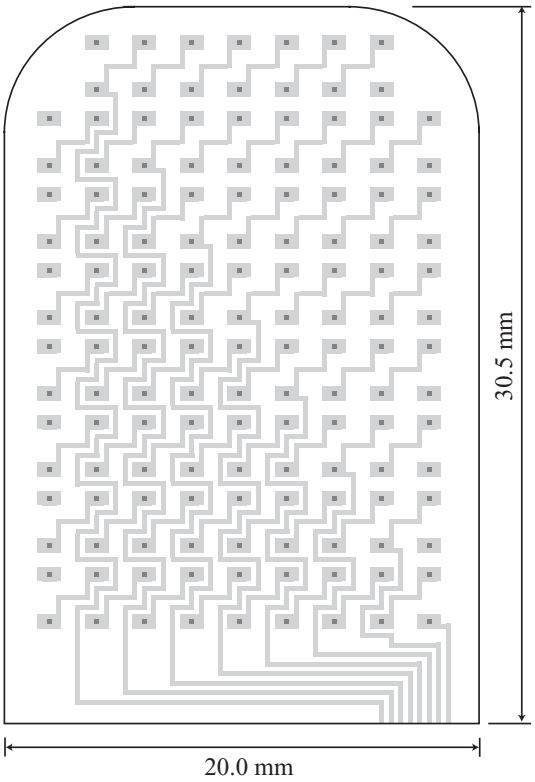


Fig. 3.8: Inner layer of electrode sheet

分布型圧力センサは，各指のリンクの手掌面 3 か所へ貼付し，各リンクに加わる圧力分布を検出する．ユニバーサルロボットハンドは，指先のリンクとそれ以外のリンクで異なる長さであり，分布型圧力センサを貼付できる面積も異なる．そこで，分布型圧力センサの最下層となる電極パターンは指先用とそれ以外の 2 か所用の 2 種類を製作した．指先以外のリンクに適用した分布型圧力センサの電極パターンを Fig. 3.7 に，その引込電極を配線している中間層のパターンを Fig. 3.8 に示す．このパターンは，縦方向に 9 本の印加電極を配置，横方向に 8 本の引込電極を配置し，Fig. 3.6 で示したパターンが 70 点あることから，計測点も 70 点である．このパターンでは，物体が分布型圧力センサに接触したとき力を検出できない面積をできるだけ少なくするため，計測点間（印加電極間）の間隔を 0.2[mm] に設計した．また，Fig. 3.8 で示したように引込電極は，電極の引き出しも含めて中間層で横方向に配線した．このように印加電極を縦方向に配置し，引込電極を横方向に配置することでマトリックスを構成して，抵抗値分布を検出できる．また，引込電極を中間層で配線することで，電極パターン表面では印加電極のみを引き出すだけでよくなり，電極パターン表面で引込電極の配線に必要な面積を削減している．その結果，全パターン面積に対する計測点面積の割合は約 82 %となった．指先リンク用の分布型圧力センサの電極パターンは縦方向が 9 本と同じであり，横方向に 12 本の引込電極を設けて，計測点が 102 点となるように設計し

た．先リンク用の電極パターンの全パターン面積に対する計測点面積の割合は約 80 %である．1 本の指には，指先リンク用が 1 枚とそれ以外のリンク用が 2 枚貼付されるので，1 本の指にある計測点は 242 点である．

分布型圧力センサは指の手掌面に貼付するが，センサの厚みが約 3.5[mm] あるため，指にそのまま貼付すると指の面から分布型圧力センサのみが飛び出すことになる．この場合，ユニバーサルロボットハンドが対象を操作する場合に不具合生じる可能性があるので，Fig. 3.9 に示すように指の面に深さ 2.0[mm] の溝を設けて，そこに触覚センサを配置した．この場合，指の面からはウレタンゲルの表面の 1.5[mm] 分だけ出ることになる．

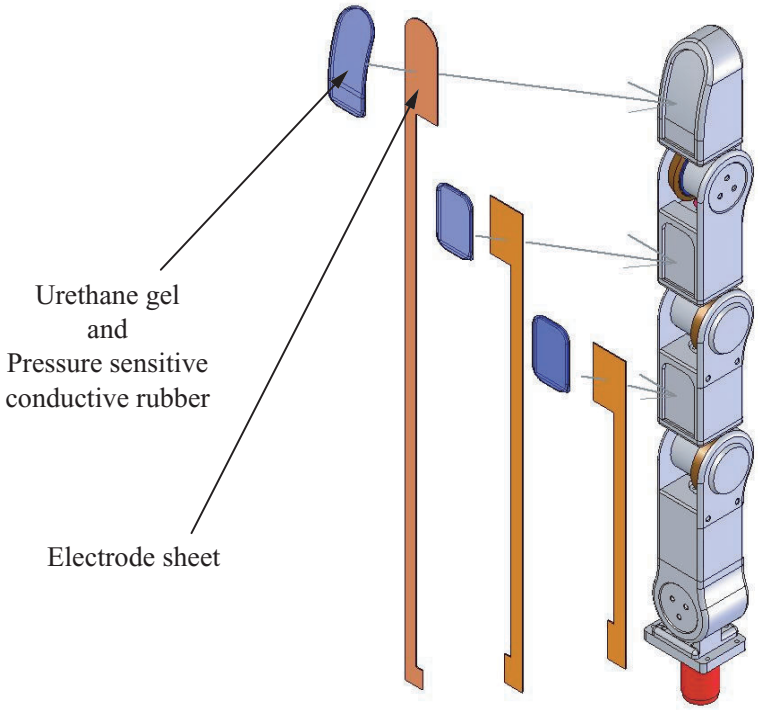


Fig. 3.9: Application of pressure distributed sensor

分布型圧力センサからの配線は，幅約 10[mm] のフレキシブル基板と延長ケーブルを介してセンサ制御回路に接続される．このセンサ制御回路では，各分布型圧力センサの印加電極と引込電極の選択する機能と引込電極から得た電流を電圧に変換し増幅する機能を実装する．電極の選択は，アナログスイッチであるマルチプレクサを用いて，各指先の分布型圧力センサの 1 点と各指のその他 2 つの分布型圧力センサの 1 点を選択し，1 度に各指から 2 点の圧力の計測ができるような構成とした．したがって，指先の圧力分布を検出するには 102 点の走査，その他 2 つ分の圧力分布を検出するには 140 点の走査を要する．指先とその他 2 つは並行して走査を進められるので，140 点分の走査に要する時間，約 20[ms] で指 1 本分

の圧力分布が得られる．この指 1 本分の走査は，センサ制御回路により他の指についても同じ計測点の順で並行して行われるようになっていることから，ハンド全体でも約 20[ms] で全計測点の走査が可能である．一方，引込電極から得た電流を電圧に変換・増幅するには，Fig. 3.10 に示すような回路で行った．引込電極はマルチプレクサによって切り替えられたのち，反転増幅回路を 2 回行って電圧の正の方向に増幅する．Fig. 3.10 中の $V_{in}$ は印加電圧で 5[V] である．$R_{var}$ は感圧導電性ゴムの電気抵抗値を表し，2 つの反転増幅回路中の $R_{f1}$，$R_c$，$R_{f2}$ はそれぞれ 150[Ω]，150[Ω]，15[KΩ] である．出力電圧は $V_{out}$ である．また，マルチプレクサへの電極の選択信号と出力電圧 $V_{out}$ の取り込みは，それぞれ PC 上のデジタル IO ボードと AD 変換ボードを用いて行う．

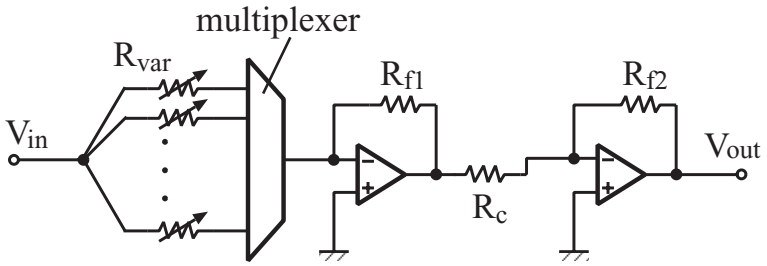


Fig. 3.10: Signal process of received current

### 3.2.4 分散型システム

これまで述べたように，ユニバーサルロボットハンドは多くのモータやセンサを搭載しており，各機能を有効に活用するためには，システムの構成が重要である．本研究では，ユニバーサルロボットハンドがリアルタイムで対象を操作できること，分布型圧力センサの検出が遅延なく行えること，必要に応じてロボットハンドの姿勢情報や分布型圧力センサの圧力分布が相互に参照しつつ動作などを計画できることを目標として，分散型システムを構築した．その概念図を Fig. 3.11 に示す．分散型システムは，触覚処理系と運動制御系，遠隔操作系の 3 つの系からなる．触覚処理系は，分布型圧力センサによる圧力分布検出，及びその結果の処理を対象とする．運動制御系は，関節に作用するトルクや各関節の角度を検出し指の制御を行う．遠隔操作系は他 2 つの系からの情報を受け，操作者に対して視覚的に情報を提示する．このように系を並列した分散型システムを構築することでシステム全体の処理速度が向上し，高度なハンドの制御が可能になると考えた．

運動制御系について述べる．運動制御系は，Fig. 3.12 に示すような構成要素からなる．運動制御系は，3 種類のボードを備えた PC によって制御される．カウンターボード，AD 変換ボード，DA 変換ボードは，それぞれモータのエンコーダ読み取り，ひずみアンプの出力電

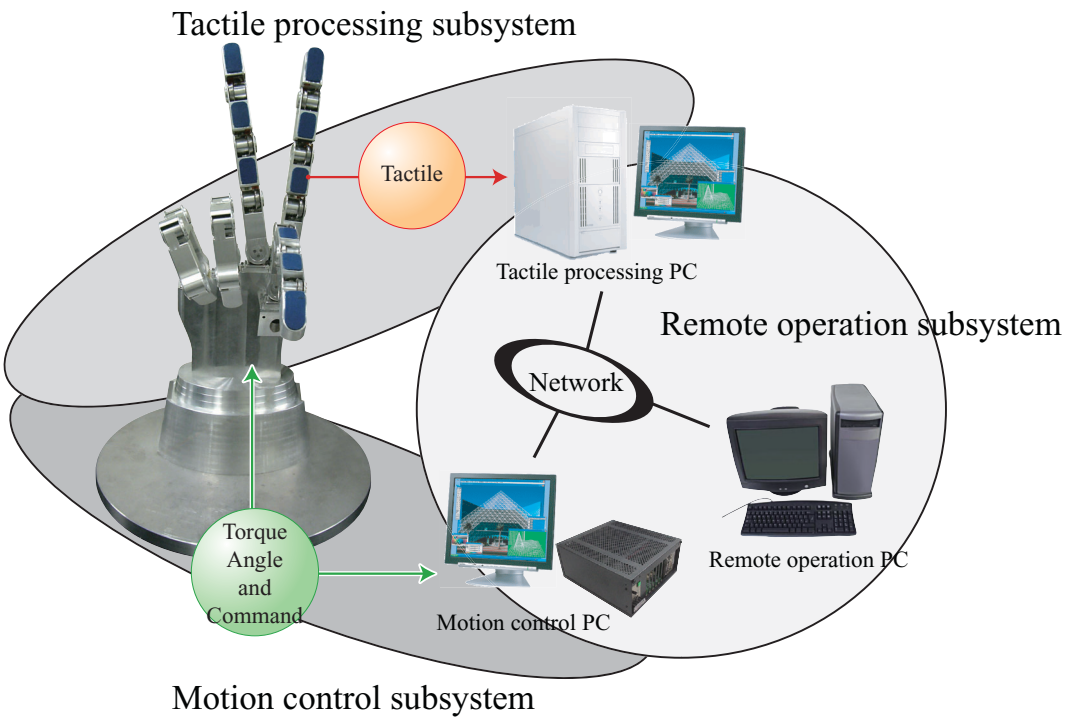


Fig. 3.11: Distributed system of Universal Robot Hand

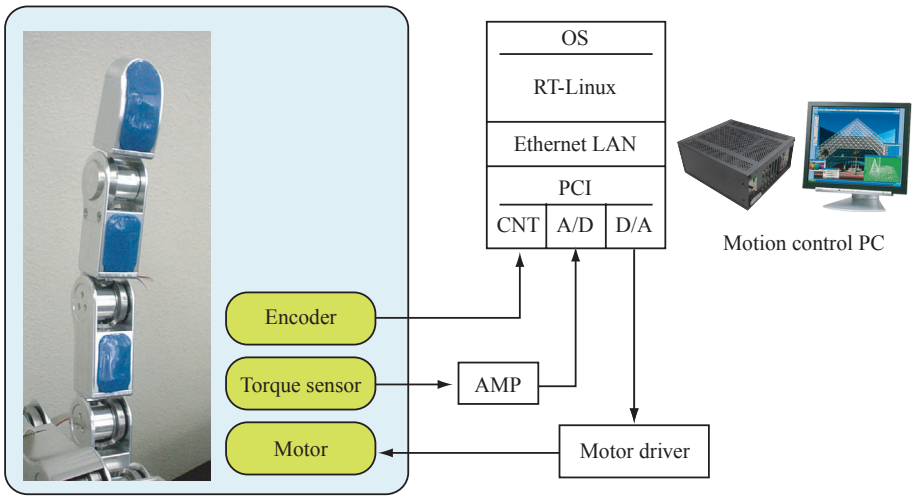


Fig. 3.12: Motion control subsystem

Table 3.2: Motion control subsystem

| | |
|---|---|
| OS | Real Time Linux |
| CPU | Pentium M 1.1[GHz] |
| Memory | 256[MB] |
| HDD | 80[GB] |
| Counter board | 24bit 3mode PulsCounter 4ch (PCI-6201E, Interface) × 3 |
| AD Board | AD 12bit D32/S64ch (PCI-3177C, Interface) |
| DA Board | DA 12bit 16ch (PCI-3346A, Interface) |

圧の取り込み，モータへの入力電圧指令としての役割を担う．ロボットの制御には 1[KHz] 程度の周期が望ましいとされており [100]，この処理系においても 1[KHz] 周期で関節角度とトルクの検出，およびロボットの制御を行うことができる．制御には PD（proportional derivative）制御を用いる．運動制御系を制御するハードウェアの構成をまとめると Table 3.2 になる．

次に触覚処理系について述べる．触覚処理系は，Fig. 3.13 に示すような構成要素からなる．分布型圧力センサは 2 種類のボードを備えた PC によって制御される．AD 変換ボード，デジタル IO ボードは，それぞれ分布型圧力センサの制御回路の出力の電圧検出，計測点指示に用いられる．その全点計測の流れは次のようになる．

(1) DIO ボードで分布型圧力センサの制御回路に計測点を指定する

(2) 制御回路は，DIO ボードからの指示に従い，その計測点に電圧を印加する

(3) その計測点から得られる電流を電圧に変換・増幅し，AD ボードで取り込む

(4) すべての計測点を走査したら (5) へ，そうでないなら (1) へ

(5) 計測を完了する

触覚処理系を制御するハードウェアの構成をまとめると Table 3.3 になる．

最後に遠隔操作系について述べる．ユニバーサルロボットハンドの分散型システムは，将来的に人間に有害な環境での利用も視野に入れている．その場合，自律的にユニバーサルロボットハンドを用いるよりも，遠隔操作が適当な場合もあると考えられる．また，運動制御系と触覚処理系は，それぞれローカルの制御や計測の処理を行っていることから，高度な判断や感覚統合などを行う場合に，計算速度の限界からそれらの系では対応できない可能性がある．そこで，目的に応じて運動制御系と触覚処理系を統合する役割を担う遠隔操作系を分散型システムに組み込んでいる．これら 3 つの系は Fig. 3.11 に示したように，LAN（Local Area Network）により接続し，相互に情報の送受が可能となっている．ハードウェア構成

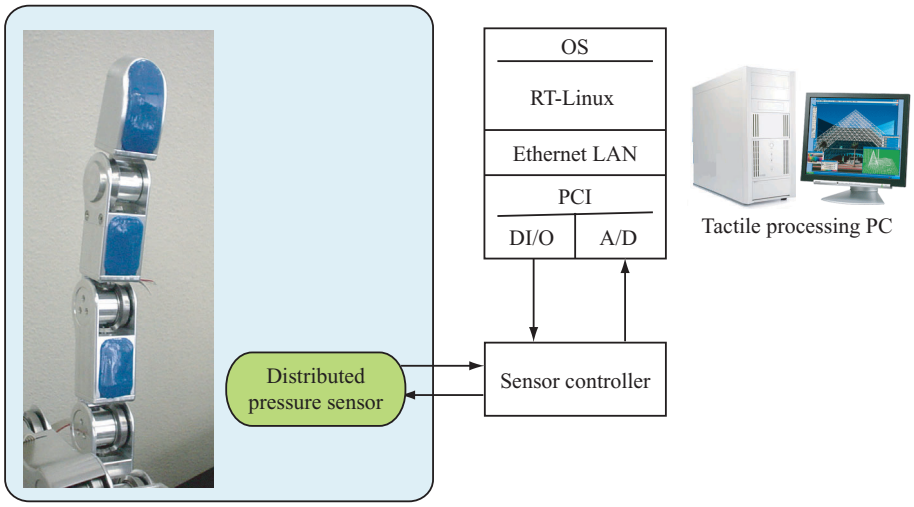


Fig. 3.13: Tactile processing subsystem

Table 3.3: Tactile processing subsystem

| | |
|---|---|
| OS | Real Time Linux |
| CPU | Pentium4 3.0[GHz] |
| Memory | 1[GB] |
| HDD | 160[GB] |
| AD board | AD 12bit 8ch(PCI-3120, Interface) |
| DIO board | DIO 64ch TTL(PCI-2702C, Interface) |

Table 3.4: Remote operation subsystem

| | |
|---|---|
| OS | Windows XP |
| CPU | Pentium D 3.2[GHz] |
| Memory | 1[GB] |
| HDD | 160[GB] |

を Table 3.4 に示す．また，この遠隔制御系のモニタ上で分布型圧力センサで検出した圧力分布を表示している例を Fig. 3.14 に示す．

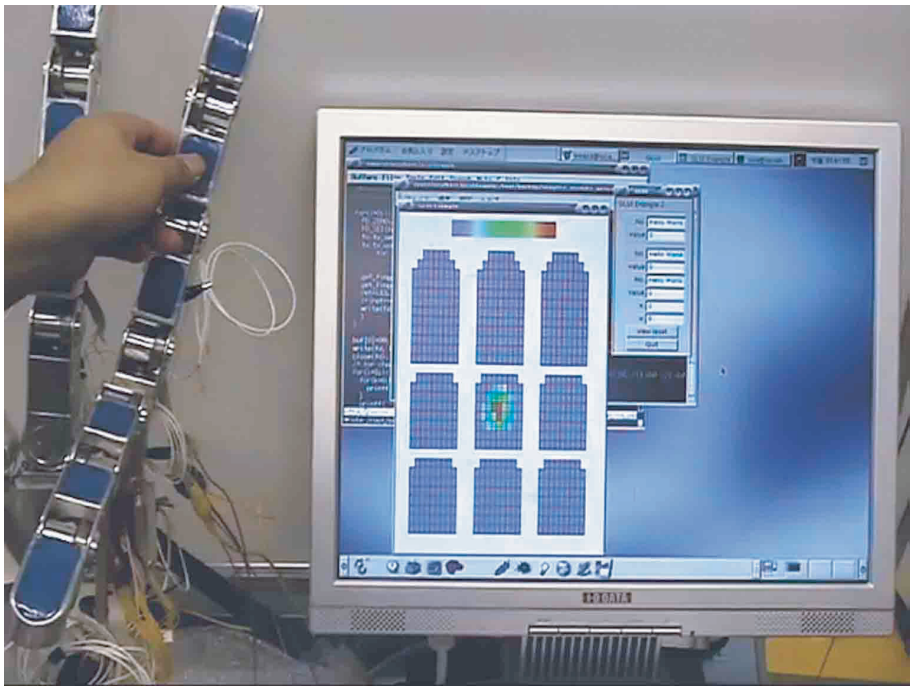

Fig. 3.14: Example of Remote operation subsystem's display

## 3.3 関節制御の基礎評価

ユニバーサルロボットハンドの指の関節レベルでの制御特性を実験的に評価した．ステップ応答の結果を Fig. 3.15 に示す．指先の関節に目標角度を 30[deg] および 60[deg] として与え，PD 制御を行った．指が動作を開始してから目標値までの収束時間は，目標値 30[deg] の場合に約 600[ms]，目標値 60[deg] の場合に約 1050[ms] で収束した．誤差はいずれの場合も 0.3[deg] 以内であり 1[ms] の実行周期のもと高精度の位置制御が可能であることを確認した．

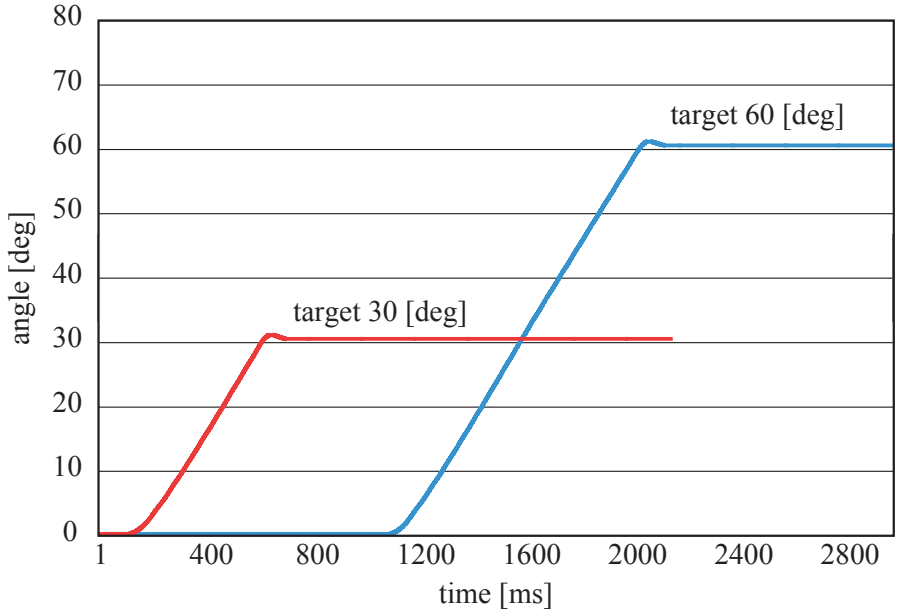


Fig. 3.15: Results of step response

ロボットハンドによる物体の把持や操りの制御においては，対象物の形状に応じて指の姿勢を適応的に調整できることが必要である．そのため，従来よりロボットハンドの指先の位置と指先が対象物に及ぼす力を両者の相対関係を考慮しつつ制御することが研究されてきた．しかし，近年において対象物との相互作用を制御する上で，単に力の制御を行うだけでなく力と位置の関係を規定する剛性制御を導入することが検討されており，自由度の数が多く機構が複雑なロボットハンドの制御において，剛性制御の導入が非常に有効な手法であることが考えられている．そこで，今村ら [26] による剛性制御モデルを導入しその性能評価実験を行った．目標関節角度 $\theta_r$，目標関節トルク $\tau_r$，現在の関節角度 $\theta_a$，現在の関節トルク $\tau_a$，モーター印可電圧 $E_M$，制御ゲインを $\mathrm{K_t}$，$\mathrm{K_p}$ とおくと，剛性制御モデルは Fig. 3.16 で表される．関節トルク $\tau_a$ は $\theta_r$ と $\theta_a$ の差で表され，式 (3.1) が成り立つ，$\tau_a$ が求まれば目標関節トルク $\tau_r$ との関係からモーター印可電圧 $E_M$ は式 (3.2) で与えられる．

$$\tau_r = \mathrm{K_p}(\theta_r - \theta_a) \tag{3.1}$$

$$E_M = \mathrm{K_t}(\tau_r - \tau_a) \tag{3.2}$$

本モデルは位置制御系の制御ゲイン $\mathrm{K_p}$ を変化させることにより，任意に剛性を調整することが可能となる．実験では一定の目標角度（=0[deg]）を与え、位置制御系の制御ゲインをソフトウェアによって変化させながら関節角度と関節にかかる外部トルクとの関係を計測した．Fig. 3.16 で示した位置制御系のゲインを $\mathrm{K_p} = 5, 10, 15$ と設定し、外力を加えて関節を回転させた場合の測定結果を示す．Fig. 3.17 からゲインを 2 倍，3 倍するに従って関節剛性

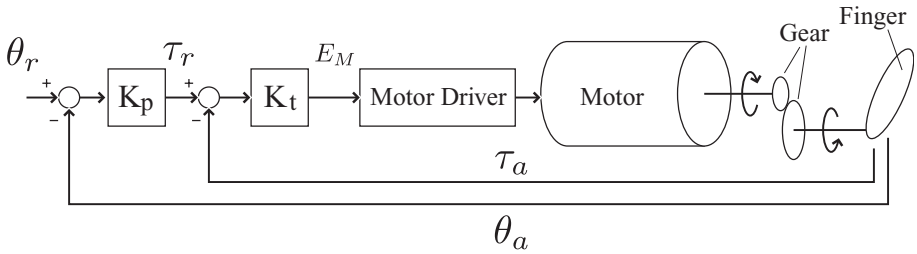


Fig. 3.16: Stiffness control

はほぼ比例している．これよりゲインを調整することで関節剛性制御が可能であることがわかる．関節角度と関節にかかるトルクの間でヒステリシス特性が見られるがこれは駆動系の摩擦の影響がオフセットとして残り、関節角度と関節トルクの間にヒステリシスを生じさせているものと考えられる．

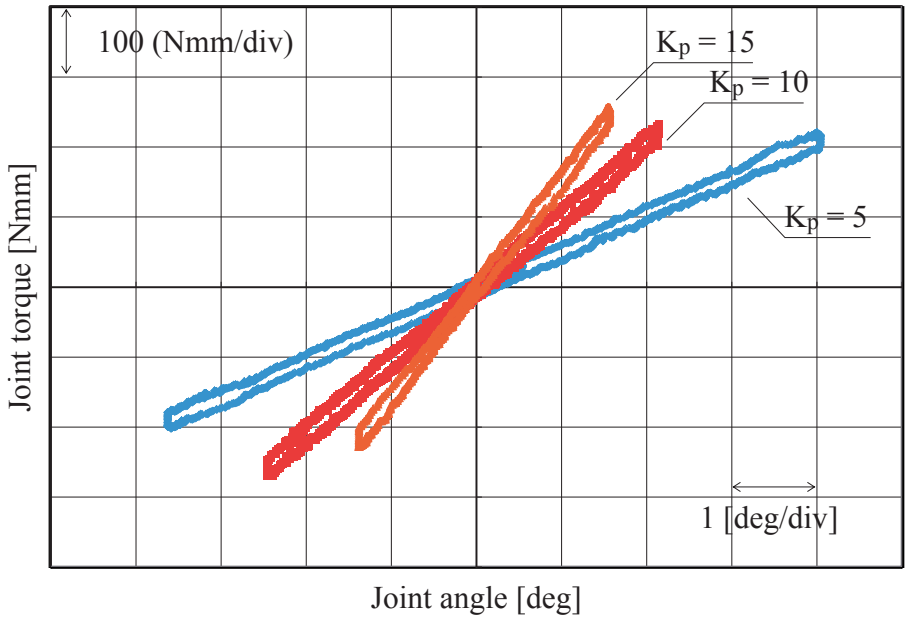


Fig. 3.17: Results of stiffness control

## 3.4 分布型圧力センサの計測精度と応答速度

分布型圧力センサの評価実験として，計測精度の評価を行った．ここでは，1 つの計測点に掛かる力の推定式を提案した上で，実験により分布型圧力センサで計測した力の和を，ロードセルの値と比較する．

$x$ 番目の印加電極と $y$ 番目の引込電極を用いて計測した電圧値からその計測点に掛かる力を推定する式を考える．ただし，計測した電圧値とその計測点 1 点に掛かる力の関係は，感

圧導電性ゴムの特性から非線形の関係にあるので，ここでは式 (3.3) のように 16 変数からなる 1 次方程式を考える．

$$f_{xy} = \beta_0 + \beta_1 v_1 + \beta_2 v_2 + \cdots + \beta_{16} v_{16} \tag{3.3}$$

ここで，$\beta_i (i = 0 \ldots 16)$ は方程式の係数である．$v_j (j = 1 \ldots 16)$ は計測した電圧値を代入する変数であり，計測した電圧値（0〜4095）を 16 分割し，$j$ が小さい $v_j$ から順に $0 \leq v_1 \leq 255$，$0 \leq v_k \leq 256 (k = 2 \ldots 16)$ と電圧値を代入する．例えば，電圧値が 1000 の場合，$v_1 = 255, v_2 = v_3 = 256, v_4 = 233, v_5 = \ldots = v_{16} = 0$ となり，これを式 (3.3) に代入することで計測点に加えられた力 $f_{xy}$ を求める．また，力 $f_{xy}$ を求めるためには係数 $\beta_i$ を事前に求める必要があるが，この方程式を $f_{xy}$ の変数 $v_j$ に対する重回帰式とみなして次のように係数 $\beta_i$ を求める．

$(m+1)$ 個の変数 $\mathbf{F_{xy}}, \mathbf{V_1}, \ldots, \mathbf{V_m}$ について $n$ 組のデータ $(f_{xy1}, v_{11}, v_{21}, \ldots, v_{m1}), (f_{xy2}, v_{12}, v_{22}, \ldots, v_{m2}), \ldots, (f_{xyn}, v_{1n}, v_{2n}, \ldots, v_{mn})$ が得られているとき，変数 $\mathbf{F_{xy}}$ を変数 $\mathbf{V_1}, \mathbf{V_2}, \ldots, \mathbf{V_m}$ の関数として推定することを考える．この場合，$\mathbf{V_1}, \mathbf{V_2}, \ldots, \mathbf{V_m}$ について固定し，$\mathbf{F_{xy}}$ に関する観測方程式として式 (3.4) が得られる．

$$\mathbf{F_{xy}} = \mathbf{VB} \tag{3.4}$$

ただし，$\mathbf{F_{xy}}$ は定数ベクトル，$\mathbf{V}$ は計画行列，$\mathbf{B}$ は求める未知量のベクトルであり，

$$\mathbf{F_{xy}} = [f_{xy1}, f_{xy2}, \cdots, f_{xyn}]^T$$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} 1 & v_{11} & v_{21} & \ldots & v_{m1} \\ 1 & v_{12} & v_{22} & \ldots & v_{m2} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ 1 & v_{1n} & v_{2n} & \ldots & v_{mn} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_m]^T$$

である．ここで重量行列を単位行列と仮定すると，式 (3.4) の観測方程式から最小二乗法により次の正規方程式が得られる．

$$\mathbf{V'VB} = \mathbf{V'F_{xy}} \tag{3.5}$$

ここで，

$$\mathbf{V'V} = \begin{pmatrix} n & \sum v_{1h} & \ldots & \sum v_{mh} \\ \sum v_{1h} & \sum {v_{1h}}^2 & \ldots & \sum v_{1h} v_{mh} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum v_{mh} & \sum v_{mh} v_{1h} & \ldots & \sum {v_{mh}}^2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{V}'\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \sum f_{xyh} \\ \sum v_{1h} f_{xyh} \\ \vdots \\ \sum v_{mh} f_{xyh} \end{pmatrix}$$

である．ただし，$\sum$ は $h$ についての 1 から $n$ までの総和である．また，$\mathbf{V}'\mathbf{V}$ は対称行列になっている．したがって，$\mathbf{B}$ の推定値は，$|\mathbf{V}'\mathbf{V}| \neq 0$ として，

$$\hat{\mathbf{B}} = (\mathbf{V}'\mathbf{V})^{-\mathbf{1}}\mathbf{V}'\mathbf{F}_{\mathbf{xy}} \tag{3.6}$$

で求められる．ただし，この $\hat{\mathbf{B}}$ を用いて式 (3.3) により推定できる力は，$\hat{\mathbf{B}}$ を決める際に用いた定数ベクトル $\mathbf{F}_{\mathbf{xy}}$ の要素 $f_{xyn}$ のとった範囲内の値に限る．

提案した力推定式の評価実験を行った．電極のパターンや感圧導電性ゴムの力－抵抗値特性が不均一の場合，計測点 1 点毎に式 (3.6) を用いて $\hat{\mathbf{B}}$ を決定する必要があるが，この評価実験では均一と考え，全計測点に共通の $\hat{\mathbf{B}}$ を決定する．このとき，計測点 1 点のみの力と電圧値の関係からでも $\hat{\mathbf{B}}$ を決定することができるが，Fig. 3.7 で示したように計測点間の距離が 0.2[mm] と短く，1 点のみに力を加えることは困難である．逆に，全計測点に力を加えるには精密な位置合わせが必要となる．そこでこの実験では，人差し指の中央の 4x4 点を計測対象とし，それよりも一回り小さな面積をもつ一辺が 5[mm] の立方体の面を，ユニバーサルロボットハンドの人差し指と親指の指先同士に互いに平行に押し合う実験を行った．このとき，対象とした計測点は 16 点のみであることから，全点計測より高速な 500[Hz] の周期で計測を行った．また，親指の指先にはロードセルを取り付けて，人差し指に掛かる力の反力を計測した．押し合い動作の力は振幅 15[N]，周期 12[s] の三角波として生成し，正の値をとる半周期 6[s] を目標の力としてロボットハンドを制御し実現した．したがって，1 回の押し合い動作で 6[s]，3000 回の計測となり，ここでは 10 回の押し合い動作を行い取得した 30000 組の分布型圧力センサとロードセルの出力から式 (3.6) により係数の推定値 $\hat{\mathbf{B}}$ を求めた．

次に，押し合う強さを 2 段階に変化させた実験を行い，そのときのロードセルの出力と分布型圧力センサの出力から求めた計測点 16 点分の $f_{xy}$ の和 $\sum f_{xy}$ との比較を Fig. 3.18 に示す．Fig. 3.18 の縦軸は力，横軸は時間を示す．Fig. 3.18 では，3.5[N] 程度の小さい力に関してはロードセルと分布型圧力センサの出力が一致しない部分がある．これはウレタンゲルが分布型圧力センサに掛かる力を減衰し，感圧導電性ゴムまで力が伝わってないことが原因と考えられる．しかし，それよりも強い力に関しては，2 段階の力が一定の状態と 2 段階間の力が変化する状態の両状態において，各出力はほぼ一致し，分布型圧力センサに加えられる力を精度良く推定できることが分かる．これは，ロードセルと分布型圧力センサの出力との重相関係数が 0.99 であることからも分かる．

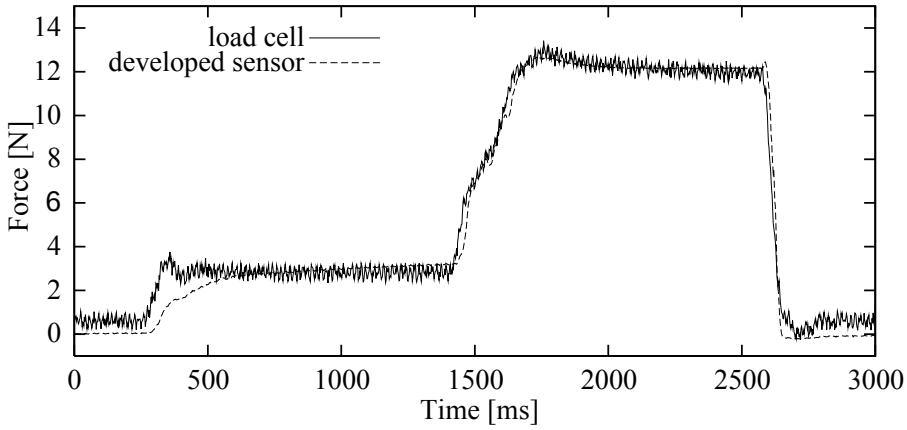


Fig. 3.18: Outputs of load cell and estimated force

応答速度の評価として，押し合い動作を高速（約 1.42[rad/s]）にした場合の，各出力を Fig. 3.19 に示す．Fig. 3.19 の縦軸は力，横軸は時間を示す．指を高速で衝突させたため，時刻 28[ms] で一度当たって跳ね返っているのが分かる．このときの分布型圧力センサの出力は，ロードセルの出力の 3 分の 1 程度であり，衝撃に対して応答できていない．しかし，その後 40[ms] から 50[ms] の約 10[ms] 間で分布型圧力センサの出力が 100[ms] 以降の 11[N] まで達していることから，分布型圧力センサの応答速度は 10[ms] 程度と評価できる．分布型圧力センサの全計測点の計測周期が 20[ms] であることを考慮に入れると，この応答速度は十分小さいと考えられる．

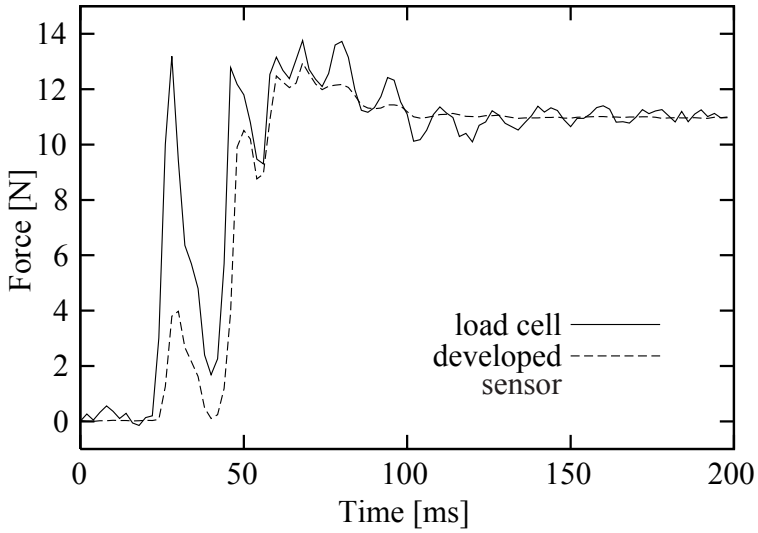


Fig. 3.19: Impact responses of load cell and developed sensor

## 3.5 接触面の形状評価

ユニバーサルロボットハンドが把持状態を認識するために，分布型圧力センサから得られた分布情報に基づいて，把持物の形状認識を行うことを考える．特に Fig. 3.1 に示したような複数の分布型圧力センサを備えるユニバーサルロボットハンドが，フィンガの全体を使って物体を把持することを想定した場合，まず各分布型圧力センサの接触面に関する形状評価を行い，次にそれらの結果を組み合わせて把持物全体の形状認識を行うことが有効であると考えられる．そこで，ここでは一つの分布情報に対する接触面の形状評価方法について述べる．

フィンガに搭載した分布型圧力センサは，対象物が変形しない場合，接触面の形状と加えられる力に基づいて Fig. 3.20 のような分布を検出する．温度や湿度などの環境条件が一定であると仮定し，接触面に加える力を一定にすると，分布は接触面の形状によって決定される．このとき，接触面が分布型圧力センサの表面層のウレタンゲルの厚さよりも小さな起伏で単峰の形状の場合，球のような凸状のあれば，その先端部分のみが大きな値の分布となり，平板であればゆるやかな分布となる．

接触面の形状評価を次のような手順で行う．センサから得られた分布に Fig. 3.20 で示すような座標軸，計測点の位置を示す $xy$ 軸と圧力値を示す $p$ 軸を設定し，$xp$ 平面に対して $y$ 軸方向の圧力値の平均をとった平均分布を求める．$yp$ 平面に対しても同様に平均分布を求める．次に，各平均分布を度数分布とみなし，その尖度を式 (3.7) によって求める．

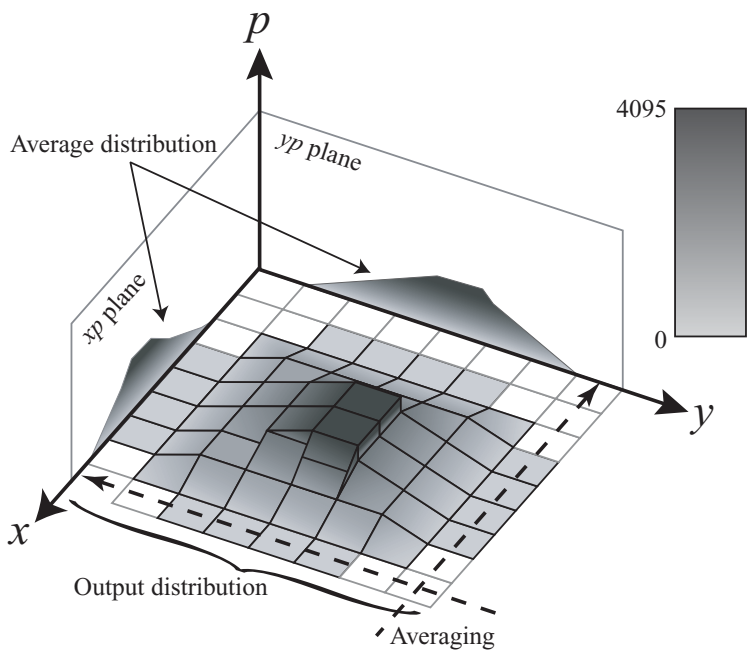


Fig. 3.20: Example of output distribution and average distribution

$$\gamma = \sum_{k=1}^{N} p_k (c_k - \mu)^4 / (N\sigma^4) \tag{3.7}$$

ただし，式中の $p_k (k = 1 \ldots N)$ は分布のデータ，$c_k (k = 1 \ldots N)$ はデータの階級値，$N$ はデータ数，$\mu$ は平均値，$\sigma$ は標準偏差である．尖度は分布が尖っているほど値が大きくなり，ゆるやかであれば値が小さくなる．したがって，分布の尖りの程度を一つの値として表現できることから，分布すなわち接触面の形状評価に適していると考えた．

接触面の形状評価に関する実験を行った．ユニバーサルロボットハンドの前にテストピースを固定し，分布型圧力センサにそのテストピースが接触するようフィンガの関節を動作させた．ただし，今回の実験で対象とするのは人差し指の中節に適用した計測点数が 70 点のセンサである．テストピースは Fig. 3.21 に示すような大きさの 4 種類とした．実験では，Fig. 3.21 における各テストピースの点線で示す面と分布型圧力センサの表面が平行かつ Fig. 3.21 で示す座標軸と Fig. 3.20 で示す座標軸が一致するよう接触させた．

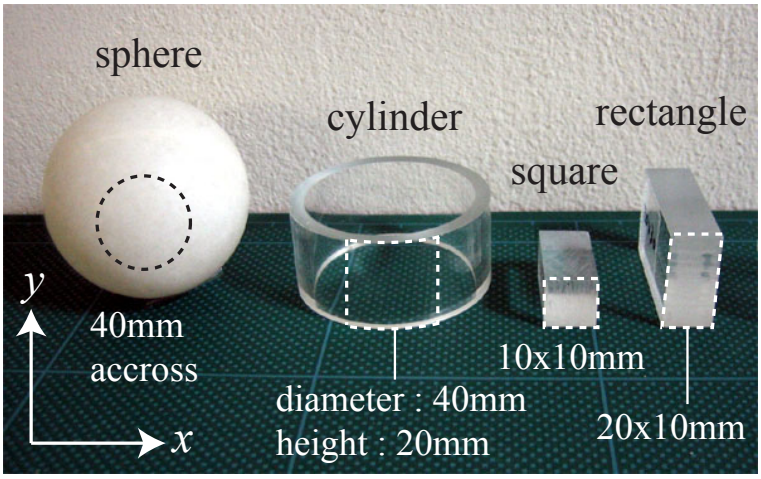


Fig. 3.21: Test pieces for shape evaluation

実験の結果得られた分布から求めた $xp$ 平面の平均分布を Fig. 3.22 に，$yp$ 平面の平均分布を Fig. 3.23 に示す．ただし，センサに加えられた圧力をほぼ一定にするため，各平均分布は元の分布の各値の合計が約 30000 の分布から求めた．実験で用いた分布型圧力センサの電極数が，$x$ 軸方向に 9 本，$y$ 軸方向に 8 本あることから，Fig. 3.22 と Fig. 3.23 の横軸はそれらの本数に応じた要素数となっている．縦軸は AD 変換ボードの出力値である．

$xp$ 平面を示す Fig. 3.22 では，sphere と cylinder が同じような分布となっているが，これらは直径 40[mm] の曲面形状にもとづく平均分布である．また，$yp$ 平面を示す Fig. 3.23 では cylinder と rectangle が同じような分布となっているが，これらは長さ 20[mm] の平面形状にもとづく平均分布である．これらの結果は，開発した分布型圧力センサが各テストピースの接触面の形状に応じた圧力分布を計測できることを示している．

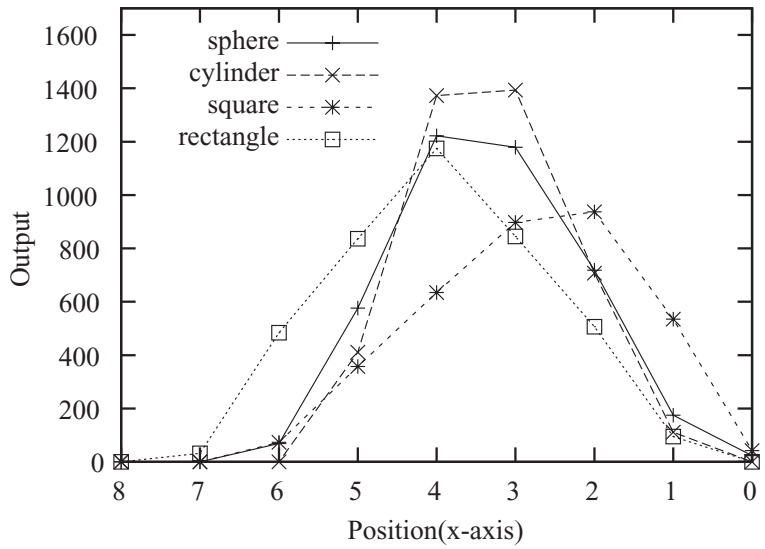


Fig. 3.22: Average distribution of $xp$ plane

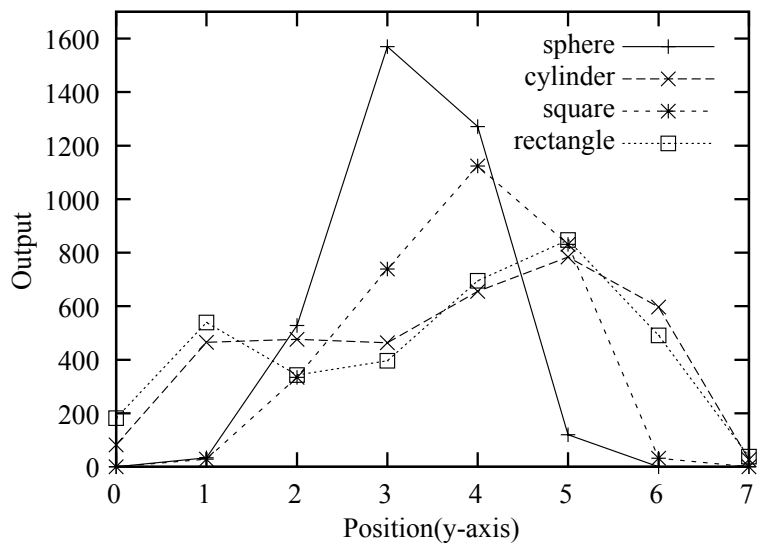


Fig. 3.23: Average distribution of $yp$ plane.

Table 3.5: Averages and standard deviations of kurtosis of average distributions

| test piece | | sphere | cylinder | square | rectangle |
|---|---|---|---|---|---|
| $xp$ plane | average | 2.67 | 2.68 | 2.40 | 2.38 |
| | standard deviation | 0.026 | 0.057 | 0.032 | 0.011 |
| $yp$ plane | average | 2.71 | 1.96 | 2.38 | 1.94 |
| | standard deviation | 0.081 | 0.026 | 0.067 | 0.045 |

次に，同じ実験を 5 回行ったときに得られた各平均分布の尖度の平均値と標準偏差を Table 3.5 に示す．sphere の両平面と cylinder の $xp$ 平面はいずれも直径 40[mm] の曲面形状であるが，それら平均分布の尖度も近い値である．同様に，長さ 20[mm] の平面である cylinder と rectangle の $yp$ 平面，さらには長さ 10[mm] の平面である square の両平面と rectangle の $xp$ 平面の平均分布の尖度も近い値である．また，標準偏差に注目するとそれぞれの平均値の 3%より小さい値となっており，各尖度がばらつきが小さく信頼性の高い値であることを示している．これらの結果から，接触面の形状を尖度で評価できることがわかった．

## 3.6 結言

研究プラットフォームとして開発したユニバーサルロボットハンドについて述べた．ユニバーサルロボットハンドの各指は 4 関節 3 自由度であり指先の 2 つの関節が等しく連動して動作する．センサとして関節の角度センサ，トルクセンサ，触覚となる分布型圧力センサの 3 つを備えている．これら多くの自由度とセンサを円滑に制御し，その柔軟な動作を実現するためにシステムを構築した．ユニバーサルロボットハンドのシステムは，運動制御系，触覚処理系，遠隔制御系の 3 つの系に分かれており，相互にネットワークで結合することで，触覚情報処理をしながら対象を操作するといった複雑な動作が可能である．

開発したユニバーサルロボットハンドの動作やセンサの検証のため，基礎的な実験を行った．減速機に入力前のモータの回転をエンコードすることにより 0.3[deg] 程度の精度で関節角の制御ができることを実験により示した．PD 制御と剛性制御を併用することで柔らかい関節を実現でき，ゲインの設定でその柔らかさを制御できることを実験により示した．また，触覚として貼付した分布型圧力センサに加わる力の推定方法について述べ，リファレンスとして用いたロードセルとほぼ同じ値を推定できることを実験で確認し，分布型圧力センサの出力値の信頼性が高いことを示した．分布型圧力センサの圧力分布から尖度という特徴値を求めることで，接触面の形状を推定できることを実験により確認した．

以上の実験結果により，開発したユニバーサルロボットハンドは剛性制御により対象物に対してほぼ一定の接触力を保ちつつ操ることが可能であり，触覚として貼付した分布型圧力センサは接触面の形状を評価できることを確認した.

# 第 4 章

# 反復回転操作中の対象物の形状識別

## 4.1 緒言

前章の 3.5 において，尖度を用いることで単一の接触面の形状を定量化できることを示した．しかし，対象物の外周形状などを識別する場合は，接触面とセンサ面との位置や姿勢の関係を調整しながら複数回の形状識別を行う必要があり，ロボットハンドでそのような識別を行うのは制御が難しく効率も悪い．一方，ロボットハンドで対象物を操りつつ，その際に周期的に取得した情報に基づいて接触面の形状を識別できれば，操作中に接触した面の形状を一度に識別することができ，識別の効率も良いと考えられる．そこで，本章では特に同じ部位を繰り返し反復して回転操作を行っているロボットハンドに適用可能な，周期的に取得した圧力分布群に基づく形状識別方法を提案する．

## 4.2 反復回転操作

回転操作は親指と人差し指の 2 本のみを用いることとし，断面が円状の対象物を掴み 2 本のフィンガを前後にずらすことで対象物をフィンガの間で回転させる．このとき分布型圧力センサで圧力分布を取得できるよう，対象物と指先の接触面はフィンガに備えられた分布型圧力センサの表面層のウレタンゲル上を転がるものとし，さらに滑りのない転がり接触であるとする．この接触条件に基づき，物体の目標回転角度から指先位置を求め，その指先位置からニュートン法を用いて各関節角を求めることで回転操作軌道を生成する．生成した各関節角は PD 制御によって各関節のトルクに変換される．このとき求めたトルクに対して，剛性制御 [26] による指先トルクの調整を加えることで，ほぼ一定の接触力を実現する．回転操作の様子を Fig. 4.1 に示す．本研究では特に対象物の同じ部位を繰り返し認識することを想定し，対象物をある角度だけ反復して回転させる操作（以下，反復回転操作とする）を行う．Fig. 4.1 に，六角柱を用いた反復回転操作の様子を示す．Fig. 4.1 の 1 では，人差し指に六角柱の外周の平面が接触している．Fig. 4.1 の 2 では人差し指を前方へ進め親指を手前

に引くことで六角柱を回転させ，Fig. 4.1 の 3 で六角柱の角の部分が人差し指に接触している．つぎに Fig. 4.1 の 4 では回転操作を逆転させ，Fig. 4.1 の 5 で 1 と同じ姿勢に戻している．Fig. 4.1 ではユニバーサルロボットハンドが対象物を離した際の対象物の落下を防ぐため，対象物の中心に穴を開けて棒材を通して支えている．

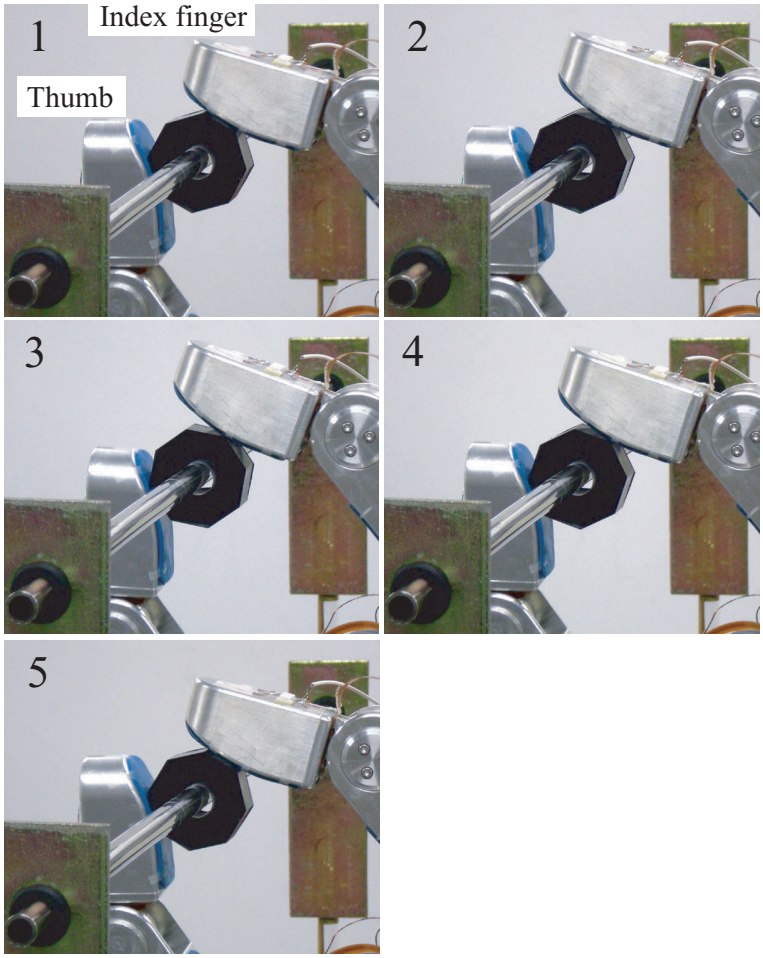


Fig. 4.1: Scene of repetitive rotation manipulation

## 4.3 反復回転操作による形状識別

### 4.3.1 尖度パターンの獲得

反復回転操作中における形状識別のアルゴリズムを Fig. 4.2 に示す．この方法では，まず圧力分布を周期的に取得する．各圧力分布を指の幅方向に平均化し，それによって得られた 1 次元の圧力分布から尖度を求める．尖度は，対象物の角が接触したときには大きくなり，平面が接触した時は小さくなる．したがって，多角形のような平面と角から構成される

形状であれば，時系列の圧力分布から求めた尖度は極値をもつ波形となる．そこで提案するアルゴリズムでは，Fig. 4.2 の点線で囲った部分で示すように時系列の尖度の極値を端点として尖度のパターン（以下，尖度パターンとする）を切り出す．そして，この尖度パターンとあらかじめ回転操作の実験により決定した標準パターンとの間の類似性の評価値を DP (dynamic programming) [101] によって求める．

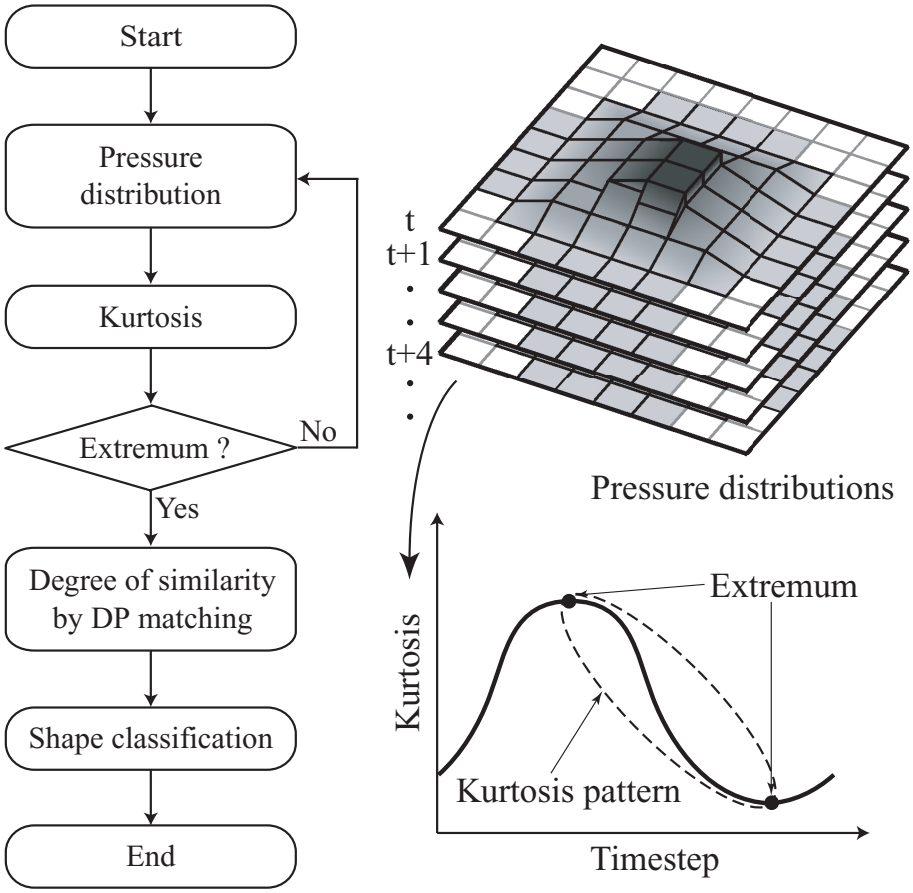


Fig. 4.2: Algorithm of shape classification in repetitive rotation manipulation

### 4.3.2 DP

提案する識別方法では反復回転操作によって得られた尖度パターンを DP を用いて評価する．DP は，2 つのパターンの両端点を一致させ，構成要素が並ぶ順序を逆転させない条件下でパターンを伸縮し，最適な構成要素間の対応付けを行うと同時にパターン間の類似性を評価できる手法である．尖度パターンは時系列の尖度の極大値や極小値によって切り出されていることから，標準パターンとマッチングさせる場合においても両端点を一致させることができる．また，尖度パターンの構成要素は並ぶ順序が逆転せず，回転の速度によってパ

ターン長が変化することから，パターンの伸縮にも対応が可能な DP が提案する形状識別方法に適すると考えた．

DP による尖度パターンと標準パターンのマッチング方法を示す．まず，1 つの標準パターンを

$$Z = \{z(j)|1 \leq j \leq J\} \tag{4.1}$$

で表す．ここで，$j$ は標準パターンの要素番号であり $J$ は標準パターン長を示す．一方，尖度パターンは

$$U = \{u(i)|1 \leq i \leq I\} \tag{4.2}$$

で表す．ここで，$i$ は尖度パターンの要素番号であり $I$ は尖度パターン長を示す．$u(i)$ と $z(j)$ の距離 $d(i,j)$ を

$$d(i,j) = (u(i) - z(j))^2 \tag{4.3}$$

によって定義する．このとき，尖度パターンと標準パターンの $(i,j)$ における累積距離を $S(i,j)$ と表す．DP では，$S(i,j)$ の更新を以下のような漸化式で行う．

初期条件

$i = 1, j = 1$ のとき:

$$S(1,1) = d(1,1) \tag{4.4}$$

$i = 1, 2 \leq j \leq J$ のとき:

$$S(1,j) = \infty \tag{4.5}$$

$2 \leq i \leq I, j = 1$ のとき:

$$S(i,1) = d(i,1) + S(i-1,1) \tag{4.6}$$

$2 \leq i \leq I, j = 2$ のとき:

$$S(i,2) = d(i,2) + \min \begin{cases} S(i-1,2) \\ S(i-1,1) \end{cases} \tag{4.7}$$

漸化式 $(2 \leq i \leq I, 3 \leq j \leq J)$:

$$S(i,j) = d(i,j) + \min \begin{cases} S(i-1,j) \\ S(i-1,j-1) \\ S(i-1,j-2) \end{cases} \tag{4.8}$$

以上の漸化式により，最終的な累積距離 $S(I,J)$ を求める．$S(I,J)$ はパターン間の累積距離が最小の場合であり，$S(I,J)$ に至る $i$ と $j$ の組み合わせがパターン間の最適対応となる．さらに，式 (4.8) の右辺の第 2 項では要素間の対応付けに傾斜制限を加え，パターンが極端に伸縮した場合に 2 つのパターンが同一とはみなさないこととした．

DP はパターンの伸縮の許可し，累積距離が最小となる最適パスが選択できる．ただし，式 (4.8) の右辺の第 2 項では要素間の対応付けに傾斜制限を加え，パターンが極端に伸縮した場合に 2 つのパターンが同一とはみなさないこととした．DP の出力，ここでは尖度パターンと標準パターン間の類似性の評価値 $A$ を次式で求める．

$$A = \frac{1}{T} S(I, J) \tag{4.9}$$

式 (4.9) は，パターン間の累積距離 $S(I, J)$ を対応づけたパターン長 $T$ で正規化する．評価値 $A$ は，値が小さいほどマッチングさせた 2 つのパターンが類似していることを表す．

## 4.4 実験

### 4.4.1 反復回転操作中の尖度の取得

ユニバーサルロボットハンドで反復回転操作を行い周期的に圧力分布を取得する実験を行った．指先の先端近くから根元まで円柱を回転速度は 8.6[deg/s] で回転させたときの圧力分布の推移を Fig. 4.3 から Fig. 4.10 に示す．座標軸は Fig. 4.3 で示し，$x$ 軸と $y$ 軸はそれぞれ電極の座標を示す．円柱の厚さは 15[mm] であり，分布型圧力センサの幅（$x$ 軸方向）は約 18[mm] であることから，両端を除いて $x$ 軸方向はほぼ一定の圧力が出力されている．回転に伴い，$y$ 軸方向にその分布が移動しているのがわかる．Fig. 4.9 と Fig. 4.10 では $x$ 軸方向の分布が不均一になっているが，対象物と指先の接触面がわずかに傾いたことが影響したと考えられる．

次に回転操作中の接触面の形状を反映した尖度が得られることを確認するため実験を行った．実験条件は次のようにした．回転操作の対象は，Fig. 4.11 に示す断面の直径が 35[mm] の円である円柱，内接円の直径が 35[mm] である六角形と八角形を断面にもつ六角柱と八角柱の 3 つである．それぞれの厚さは 15[mm] である．4.2 で述べた方法で反復回転操作の運動を生成し，円柱は 36[deg]，六角柱と八角柱は平面から角の頂点までの角度分だけ回転

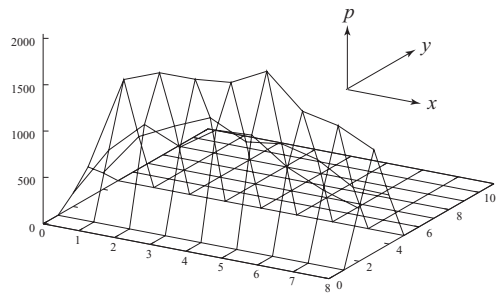


Fig. 4.3: Pressure distribution at 0[s]

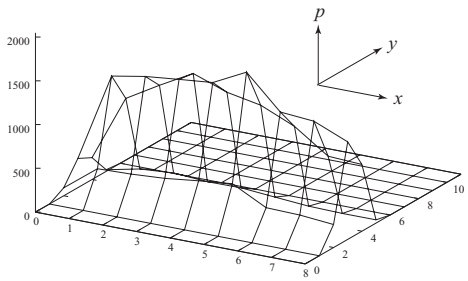


Fig. 4.4: Pressure distribution at 0.5[s]

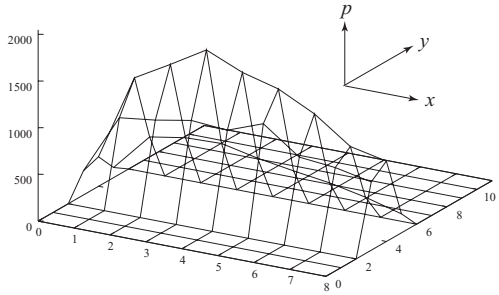


Fig. 4.5: Pressure distribution at 1.0[s]

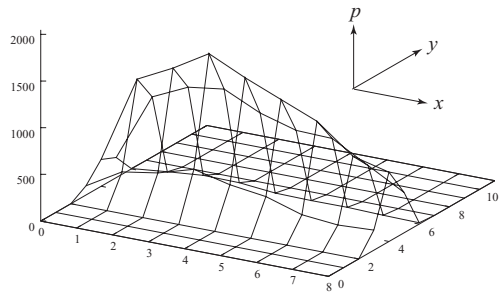


Fig. 4.6: Pressure distribution at 1.5[s]

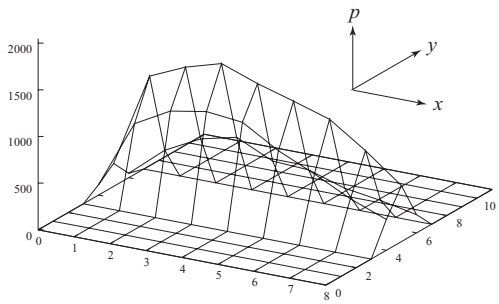


Fig. 4.7: Pressure distribution at 2.0[s]

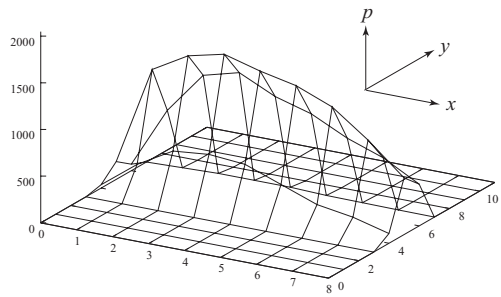


Fig. 4.8: Pressure distribution at 2.5[s]

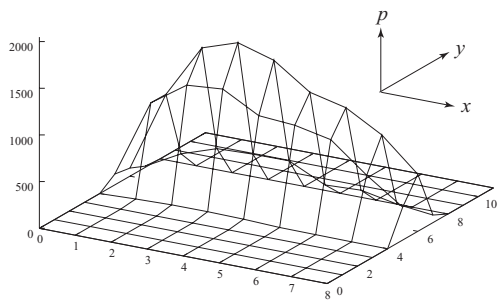


Fig. 4.9: Pressure distribution at 3.0[s]

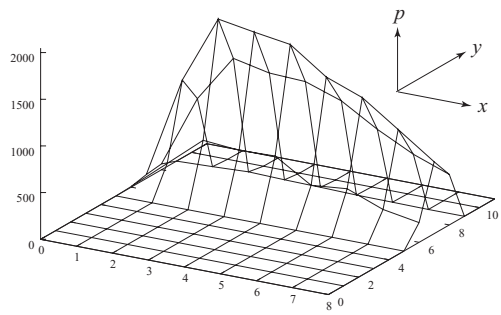


Fig. 4.10: Pressure distribution at 3.5[s]

させた．回転速度は 8.6[deg/s] とした．指先の分布型圧力センサのみを用いているので周期は 10[ms] とした．このとき得られた尖度とタイムステップとの関係を Fig. 4.12 に示す．Fig. 4.12 の縦軸は尖度，横軸はタイムステップ数を表す．

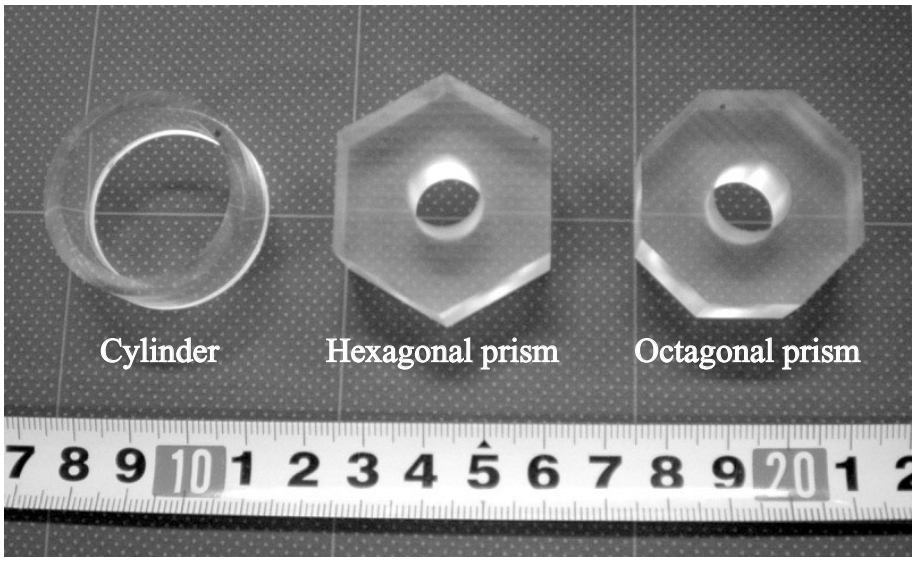


Fig. 4.11: Objects

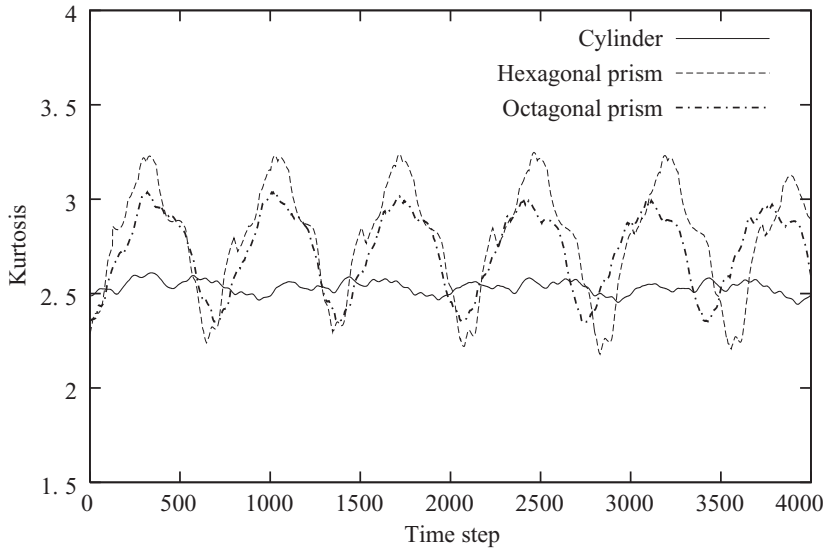


Fig. 4.12: Relationship between kurtosis and time step in repetitive rotation manipulation

Fig. 4.12 によると，円柱の尖度はほぼ一定であり約 2.5 を推移している．この結果は円柱の外周形状が一定であることに起因する．一方，六角柱や八角柱の尖度は回転操作を角と平面を端点として繰り返していることから周期的な波形となっており，この波形の極大値は各々の角が接触した時刻，極小値は各々の平面が接触した時刻と一致している．極大値の

尖度は六角柱の方が高い．尖度は鋭利な分布で高い値となることから，八角柱より六角柱の方が高い尖度になっていることは，角の鋭利さを反映した結果だと考えられる．また，六角柱と八角柱の極小値は，六角柱の方が小さい．六角柱と八角柱の平面部分の長さは，約 20.2[mm] と約 14.5[mm] であり，六角柱の方が平面部分が長いため，八角柱の場合と比べてフラットな圧力分布となり，尖度が小さくなったと考えられる．以上のことから，ユニバーサルロボットハンドに反復回転操作をさせながら得た周期的な尖度が対象物の形状を反映した波形となることがわかった．

### 4.4.2 形状識別の正答率

DP によるパターン間の類似性の評価と識別を行った．Fig. 4.12 を得た実験の場合と同様の条件でユニバーサルロボットハンドに反復回転操作をさせ，極大値と極小値を端点として尖度パターンを切り出した．円柱の場合は 36[deg] だけ回転させた間に得られた尖度を尖度パターンとした．六角柱の標準パターンと六角柱，八角柱，円柱の切り出した尖度パターンの例を，それぞれ Fig. 4.13，Fig. 4.14，Fig. 4.15，Fig. 4.16 に示す．Fig. 4.13 と Fig. 4.14 は同じ六角柱の尖度パターンであることから，同じようなグラフになっている．Fig. 4.15 は八角柱の尖度パターンであり，Fig. 4.14 と比較して最大値が小さく最小値は大きくなっており，これは 4.4.1 で述べたように，角の鋭利さと平面の大きさを反映した値である．Fig. 4.16 は円柱であるのでほぼ一定の値となっている．対象によって横軸のタイムステップ数が異なっているが，これはユニバーサルロボットハンドで回転操作した時の角度が対象によって異なるためである．Fig. 4.13 の標準パターンと Fig. 4.14，Fig. 4.15，Fig. 4.16 の尖度パターンから DP をよって評価値を算出すると，それぞれ 0.0011，0,125，0.117 となる．

次に各対象物に対して 20 パターンを切り出し，それらに対して別途の実験結果により決定した各対象物の標準パターンとのマッチングを行った．各対象物の標準パターンと尖度

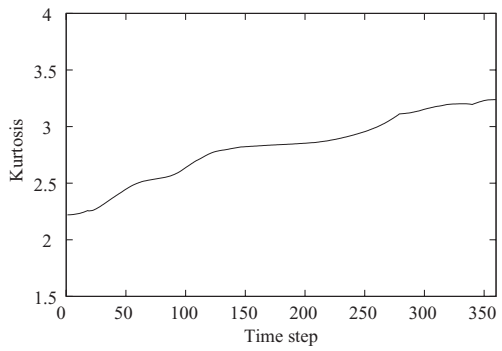


Fig. 4.13: Reference pattern of hexagonal prism

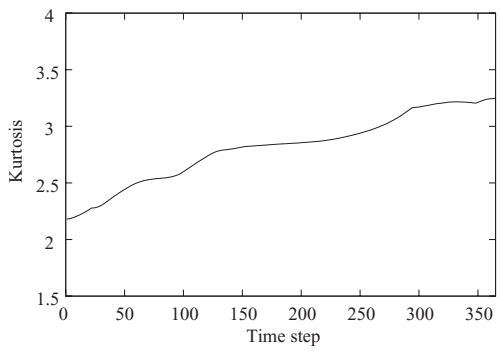


Fig. 4.14: Kurtosis pattern of hexagonal prism

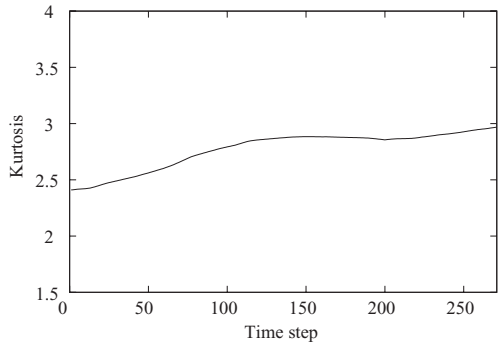


Fig. 4.15: Kurtosis pattern of octagonal prism

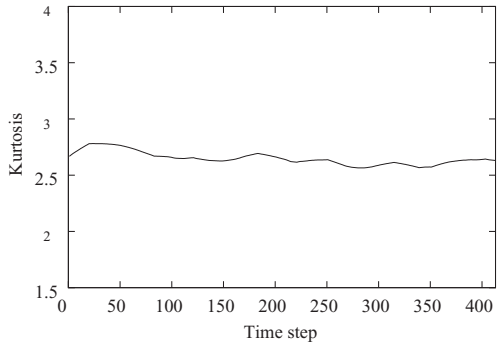


Fig. 4.16: Kurtosis pattern of cylinder

Table 4.1: Averages and standard deviations of evaluated value

| | | reference | | |
|---|---|---|---|---|
| | | hexagonal prism | octagonal prism | cylinder |
| hexagonal prism | average | 0.00121 | 0.01262 | 0.07642 |
| | standard deviation | 0.00106 | 0.00285 | 0.03566 |
| octagonal prism | average | 0.1179 | 0.00241 | 0.03566 |
| | standard deviation | 0.00571 | 0.00227 | 0.00433 |
| cylinder | average | 0.10297 | 0.06107 | 0.00545 |
| | standard deviation | 0.01434 | 0.01093 | 0.00259 |

パターンとの評価値の平均値と標準偏差を Table 4.1 に示す．Table 4.1 によると異なる形状同士の場合は，平均値が 0.01 以上であり標準偏差も同じ形状同士の場合と比較して大きい．平均値が大きいのは標準パターンと尖度パターンが類似していないことが原因である．また，標準偏差が大きいことは評価値の変動が大きいことを示しており，DP でパターン長をそろえつつマッチングする際の偏りがパターンによって異なることが原因であると考えられる．一方，同じ形状同士の場合の標準パターンと尖度パターンは類似のパターンとなるので，平均値が小さく 0.01 以下になっており標準偏差も小さい．ここで平均値のしきい値を 0.01 として，しきい値以下になったパターンの形状であると識別した場合，六角柱と八角柱で 90%，円柱は 95% の精度で識別が可能であり，正答率の高い識別結果が得られた．

### 4.4.3 回転速度を変化させた場合の識別

回転操作の回転速度を変化させた場合の実験を行った．回転速度を 0.5 倍，0.75 倍，1.5 倍，2 倍，すなわち 4.3[deg/s]，6.5[deg/s]，12.9[deg/s]，17.2[deg/s] に変更し，ユニバーサルロボットハンドによる反復回転操作を Fig. 4.11 で示した対象物に対して，円柱は 36[deg]，六角柱と八角柱は平面から角の頂点までの角度分だけ行った．このとき六角柱を用いて取得した各回転速度の時系列の尖度を Fig. 4.17 に示す．それぞれ回転速度に応じた時系列の尖度，例えば回転速度が 2 倍の 17.2[deg/s] の場合 8.6[deg/s] の半分の周期の時系列の尖度が得られている．また，回転速度を変化させても一定の極大値と極小値が得られていることが分かる．これらの結果は八角柱についても同様であった．円柱については，回転させても接触面が変化しないことから Fig. 4.12 と同様にほぼ一定の値であった．

次に，六角柱と八角柱は極大値と極小値を端点として尖度パターンを切り出した．円柱の場合は 36[deg] だけ回転させた間の尖度を尖度パターンとした．それぞれの対象物で各回転速度について 20 ずつの尖度パターンを切り出し，DP によるパターン間の類似性の評価と識別を行った．ただし，標準パターンは 4.4.2 で用いた回転速度が 8.6[deg/s] のものを用いた．回転速度が 8.6[deg/s] の場合である 4.4.2 の結果も併せて，各回転速度のパターンの数（20 パターン）に対する識別の正答回数の割合を識別結果の正答率として Table 4.2 に示す．回転速度が 8.6[deg/s] のときの標準パターンを用いているにもかかわらず，回転速度を 0.5 倍と 2 倍させた場合にも高い正答率となった．この結果は，DP がパターンの伸縮に対応できることに起因しており，提案する識別方法が回転速度の変化にロバストであることを示す．回転速度ごとに標準パターンを準備する必要がなく，回転速度が変化した場合も高い正答率であることから，提案する方法の有効性が検証できた．

## 4.5 結言

ユニバーサルロボットハンドによる反復回転操作中の形状識別方法を提案した．この方法は次のような流れとなる．反復回転操作中に取得した圧力分布群から時系列の尖度を算出する．そこから抽出した尖度パターンと比較対象となる標準パターン間のマッチングを DP によって行い，類似性の評価値を求める．最後に，得られた評価値をしきい値判定することで，操作中の接触面の形状を識別する．ユニバーサルロボットハンドに対象を反復回転させる実験により，その間の接触面の形状を識別できることを確認した．さらに，DP がパターンの伸縮に対応していることを応用して，標準パターンを速度毎に用意しなくても提案の形状識別方法が回転速度の変化に対応できることを述べた．

提案した形状識別方法は，3.5 で述べた尖度から 1 つの接触面の形状を推定する方法よりも対象の広い範囲の形状を一度に識別できる方法である．しかしながら，この方法の中でユ

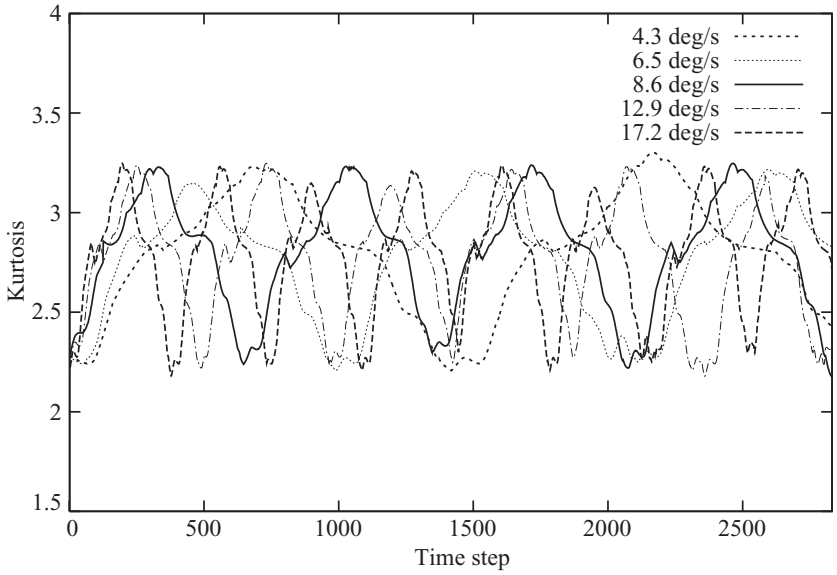


Fig. 4.17: Relation of kurtosis and time step when rotation velocities were changed

Table 4.2: Classification rate when rotation velocities were changed

| | Rotation Velocity [deg/s] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 4.3 | 6.5 | 8.6 | 12.9 | 17.2 |
| hexagonal prism | 85 | 90 | 90 | 90 | 85 |
| octagonal prism | 85 | 90 | 90 | 85 | 80 |
| cylinder | 90 | 95 | 95 | 95 | 95 |

ニバーサルロボットハンドが行った反復回転操作は，例えば麻雀の模牌のような人間にもなじみの深い操作であり，対象をより詳しく調べたいときに行う操作であると考えられるが，対象の全体を調べられるわけではない．そこで，次章では本章で提案した方法を拡張し，対象の外周を識別できる方法を提案する．

# 第 5 章

# 連続回転操作中の対象物の形状識別

## 5.1 緒言

人間の手は，優れたアクチュエータであると同時に優れたセンサでもある．このアクチュエータとしての機能とセンサとしての機能は，密接な相互関係にあり，この相互関係から成る作用によってロバストで多機能な動作や認識が実現されている．厚手のゴム手袋を装着すると，細かい作業ができなくなるのと同じように，触覚となるセンサがない，もしくはセンサからの情報が得られにくい状態となれば，ロボットハンドは対象物の情報を得られなくなり，作業は不可能になる．

また，アクチュエータによる探索方法も考慮する必要がある．対象物の大きさ，形状，質量などにより複数の探索形態があることが Klatzky らによって報告されている [89]．人間は対象物の特性によって探索形態を柔軟に切り替えることができ，机上等に固定された対象物でなければ，手にとってその対象物を操作しながら探索を進めることができる．そしてこのことにより，対象物の広範囲の情報を得ることができる．

対象物の局所的な形状を得るため，前章において，対象の同じ部位を繰り返し探索するための反復回転操作における接触面の形状識別方法を提案した．反復回転操作では，ユニバーサルロボットハンドは対象物を離すことなく回転させるため，角度や位置などの接触の状態が大きく変化することなく安定して接触面の圧力分布を得ることができ，その時系列の圧力分布から 90%近い精度で接触面の識別ができることがわかった．反復回転操作は，安定した情報が得られる半面，対象物の外周の形状を得ることができない．また，識別に用いる標準パターンと同じ範囲の時系列の圧力分布を 1 回の操作で得なければ識別ができないという短所がある．

そこで本章では対象物の全周の形状を得るために，反復回転ではなく持ち替えながら連続的に回転を一定方向に進める操作（以下，連続回転操作とする）をユニバーサルロボットハンドで実現する．さらに，この操作中に得られる時系列の圧力分布から回転の 1 周分の尖度を算出できるが，1 周分の尖度を得たのちに形状を識別するのではなく，各圧力分布を検出

するごとにリアルタイムで形状を識別できる方法を提案する．対称形状と非対称形状の対象を使って評価実験を行い，提案する方法の検証を行う．

## 5.2 連続回転操作

回転操作は親指と人差し指の 2 本のみを用いることとし，断面が円や正多角形の対象物を掴み 2 本のフィンガを前後にずらすことで対象物をフィンガの間で回転させる．このとき分布型圧力センサで圧力分布を取得できるよう，対象物と指先の接触面はフィンガに備えられた分布型圧力センサの表面層のウレタンゲル上を転がるものとし，さらに滑りのない転がり接触であるとする．この接触条件に基づき，物体の目標回転角度から指先位置を求め，その指先位置からニュートン法を用いて各関節角を求めることで回転操作軌道を生成する．生成した各関節角は PD 制御によって各関節のトルクに変換される．このとき求めたトルクに対して，剛性制御 [26] による指先トルクの調整を加えることで，ほぼ一定の接触力を実現する．

対象物の外周の形状を識別するため，回転動作とフィンガ位置を戻す動作の 2 つの動作を繰り返し行い，1 周の回転を実現する．以降では，この回転操作を連続回転操作とする．Fig. 5.1 に六角柱を用いた連続回転操作の様子を示す．Fig. 5.1 の 1 から 3 では，人差し指を引き，親指を伸ばすことで六角柱を右回りに回転させている．この過程で，人差し指の指先の接触面は六角柱の角から平面を経て次の角へ接触が推移する．Fig. 5.1 の 4 ではフィンガを六角柱から離し，5 から 7 にかけて人差し指を伸ばし親指を引いて，各フィンガの指先の位置を回転前の位置に戻す．そして Fig. 5.1 の 8 で再度把持している．この連続回転操作には，持ち替え時に対象物からフィンガが離れる時間があることから，Fig. 5.1 に示すように中心に穴を開けて棒材を通すことで対象物を支えることとした．

## 5.3 連続回転操作による形状識別

### 5.3.1 アルゴリズム

提案する連続回転操作における形状識別のアルゴリズムを Fig. 5.2 に示す．このアルゴリズムでは，まず圧力分布を周期的に取得し，各圧力分布を指の幅方向に平均し得られた 1 次元の圧力分布から尖度を算出する．この尖度を算出する過程は 4.3 で述べたアルゴリズムと同じであり，対象物が多角形のような平面と角から構成される形状であれば，時系列の圧力分布から求めた尖度は極値をもち，形状に依存した波形となる．この時系列の尖度（以下，時系列尖度とする）と，あらかじめ形状を既知として得た尖度のパターン（以下，標準パターンとする）との間の類似性を示す評価値をパターン認識手法より求める．ただし，回転を開始する位置を合わせない場合，1 回の回転操作の始終点が標準パターンの始終点と一致

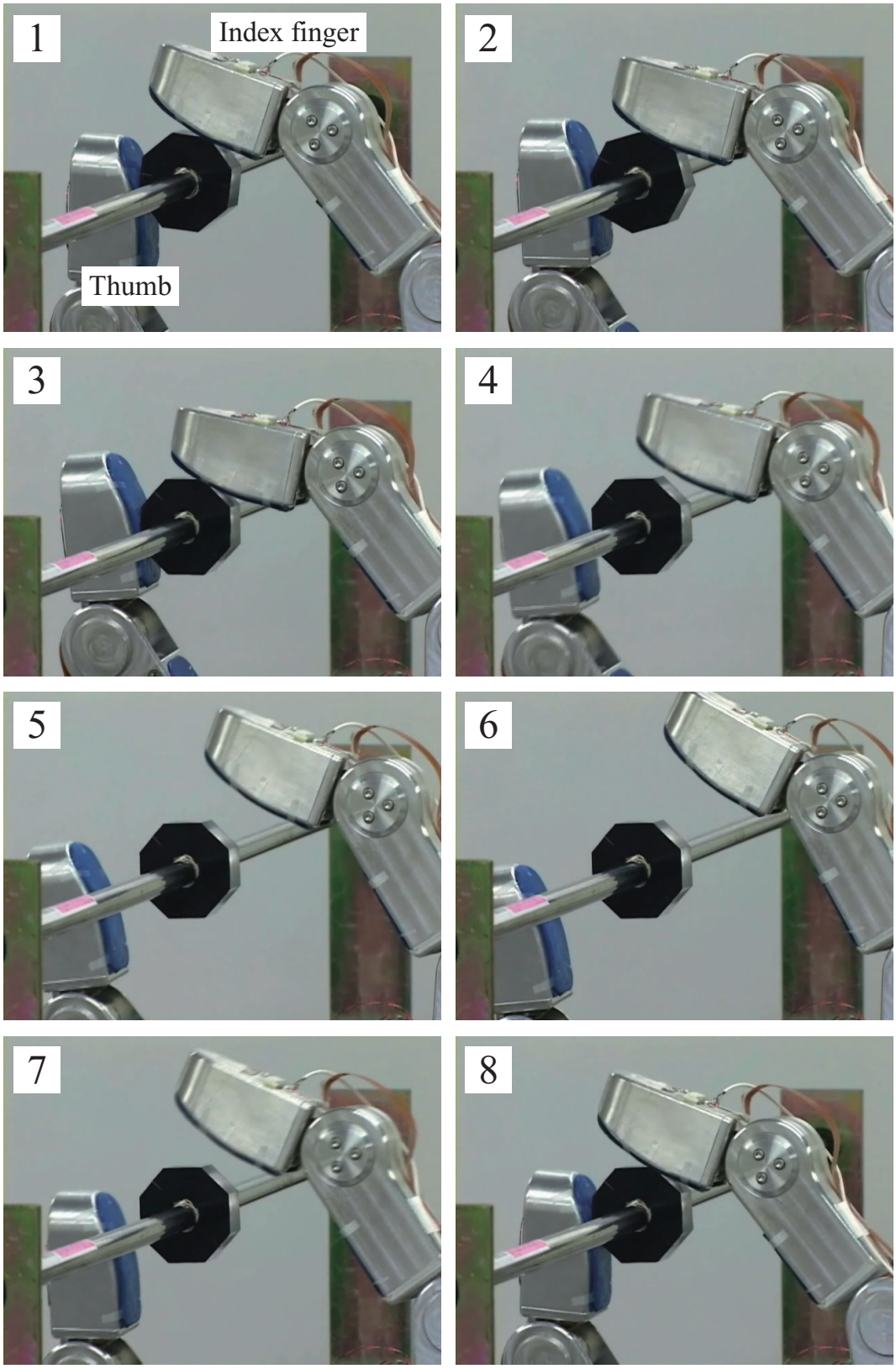


Fig. 5.1: Scene of continuous rotation manipulation

するとは限らない．この場合，対象物の回転操作中のどの時点で始終点となっても良いように尖度を算出するごとにリアルタイムでマッチングを行う必要がある．このようなパターン間の対応をとる方法として，音声認識の分野にスポッティングと呼ばれる方法がある．スポッティングとは，始終点の定まっていないパターンのある時点がもう一方のパターンの終点に対応すると仮定し，それ以前の部分の最適対応を求める方法であり，パターン間の対応と評価を同時に行うことができる．本提案では，スポッティング認識を実現する手法である Continuous Dynamic Programming(以下，連続 DP とする) を用いてマッチングを行う．

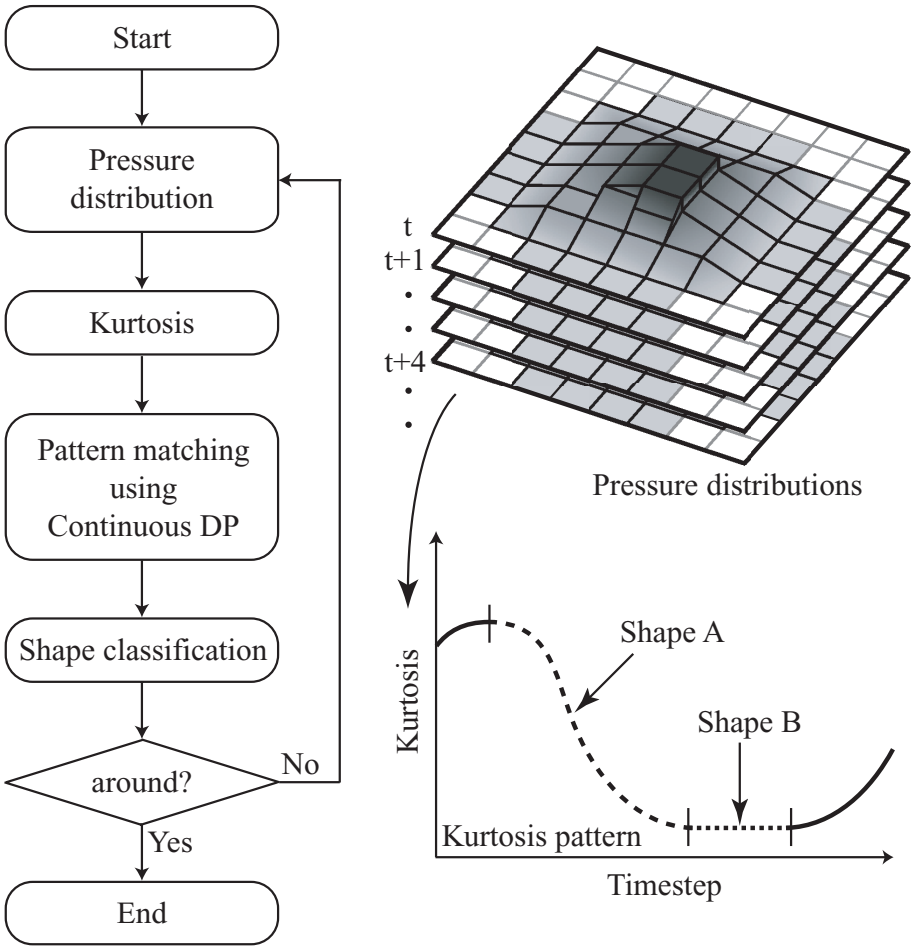


Fig. 5.2: Algorithm of shape classification in continuous rotation manipulation

### 5.3.2 連続 DP

次に連続 DP [102] による時系列尖度と標準パターンのマッチング方法を示す．まず，1 つの標準パターンを

$$Z = \{z(\tau) | 1 \leq \tau \leq T\} \tag{5.1}$$

で表す．$t$ をタイムステップの変数として時系列の尖度を $u(t)$ とすると，$u(t)$ と $z(\tau)$ との距離 $d(t,\tau)$ を

$$d(t,\tau) = (u(t) - z(\tau))^2 \tag{5.2}$$

によって定義する．このとき，連続 DP は $(t,\tau)$ における累積距離 $S(t,\tau)$ を以下のように定義する．漸化式の表現を簡単にするため，式 (5.3) のような規定を初期条件として与える．

$$S(-1,\tau) = S(0,\tau) = \infty (1 \leq \tau \leq T) \tag{5.3}$$

次に，$t \geq 1$ について漸化式，

$$S(t,1) = 3 \cdot d(t,1) \tag{5.4}$$

$$S(t,2) = \min \begin{cases} S(t-2,1) & + & 2 \cdot d(t-1,2) & + & d(t,2) \\ S(t-1,1) & + & 3 \cdot d(t,2) \\ S(t,1) & + & 3 \cdot d(t,2) \end{cases} \tag{5.5}$$

$$S(t,\tau) = \min \begin{cases} S(t-2,\tau-1) & + & 2 \cdot d(t-1,\tau) & + & d(t,\tau) \\ S(t-1,\tau-1) & + & 3 \cdot d(t,\tau) \\ S(t-1,\tau-2) & + & 3 \cdot d(t,\tau-1) & + & 3 \cdot d(t,\tau) \end{cases} \tag{5.6}$$

で与える．ここで，時刻 $t$ に動作が完了したと仮定する．すなわち $\tau = T$ とおくと，$S(t,\tau)$ は標準パターンの区間 $[1,T]$ について入力時系列に最適に整合したときの累積距離であり，それを重みの和 $3 \cdot T$ で正規化したもの

$$A(t) = \frac{1}{3 \cdot T} S(t,T) \tag{5.7}$$

がその時刻での標準パターンに対する連続 DP の出力となる．連続 DP はこの正規化操作によって各標準パターンの要素数の違いを吸収する．本研究では，この出力をパターン間の類似性の評価値として次の形状識別で用いる．

### 5.3.3 評価値を用いた形状識別

評価値を用いた形状識別を次のように行う．識別させたい形状毎にあらかじめ計測した標準パターンを決定しておき，回転操作によって得られた時系列尖度と各標準パターン間の評価値を連続 DP により求める．式 (5.7) で求められる評価値は，値が小さいほど類似したパターンであることを示し，最小の評価値となった標準パターンに対応した形状がそのときの接触面の形状の第一候補となる．ここで，この第一候補を形状識別の結果とすると，標準パターンとして用意していない形状の場合や把持状態の変化により時系列尖度が他の形状の場合のパターンに類似する場合など，誤識別を生じる可能性がある．そこで Fig. 5.2 で示した

アルゴリズムでは，形状識別の精度を高めるために，評価値があらかじめ決定したしきい値以下になった場合に，そのパターン長に対応した形状識別を確定する．

## 5.4 実験

### 5.4.1 対称な形状の対象物

まず，対象物の形状を反映した時系列尖度が得られることを確認するため，ユニバーサルロボットハンドで連続回転操作を行った．実験条件を次に述べる．連続回転操作として 5.2 で述べたように

(1) 回転開始位置でフィンガ 2 本が対象物を把持

(2) 事前に決めた角度だけ対象物を回転

(3) フィンガを対象物から離して回転開始位置に戻す

の操作を繰り返すことで対象物を約 1 周回転させる．対象物は Fig. 4.11 に示した 3 種類を用いた．ただし，円柱には他の 2 つと同じ条件にするため，中心の穴を直径 12[mm] とする部材を別途用いた．回転操作の 1 回の回転角は，36[deg] とした．また人差し指の指先の分布型圧力センサから圧力分布を取得した．

実験で約 1 周の回転したときの尖度と 1 回の計測に要する 10[ms] のタイムステップとの関係を Fig. 5.3 に示す．Fig. 5.3 の縦軸は尖度，横軸はタイムステップ数を表す．値が 0 の部分は，フィンガが対象物から離れたタイミング，すなわち圧力分布の要素がすべて 0 であった時刻を示す．したがって，フィンガと対象物が接触しているのは尖度が 2 以上の値である部分である．フィンガの持ち替え前後で尖度が 0.2 程度の差が生じる場合があるものの，円柱の尖度は約 2.5 前後を推移しており，六角柱と八角柱の尖度は周期的な波形となっている．持ち替え時に 0 となる尖度を無視すると，この六角柱と八角柱の尖度の極大値は各々の角が接触した時刻，極小値は各々の平面が接触した時刻と一致している．極大値の尖度は六角柱の方が高い．尖度は鋭利な分布で高い値となることから，八角柱より六角柱の方が高い尖度になっていることは，角の鋭利さを反映した結果だと考えられる．また，六角柱と八角柱の極小値は，六角柱の方が小さい．六角柱と八角柱の平面部分の長さは，約 20.2[mm] と約 14.5[mm] であり，六角柱の方が平面部分が長いため，八角柱の場合と比べてフラットな圧力分布となり，尖度が小さくなったと考えられる．以上のことから，連続回転操作中に得た圧力分布から対象物の形状を反映した時系列尖度が得られることを確認できた．次に，六角柱を平面から角の頂点まで回転させたときの時系列尖度を標準パターンとして，Fig. 5.3 で示した各尖度列に対して，式 (5.7) により連続 DP の出力として評価値を求めた．その結果を Fig. 5.4 に示す．ただし，ここでは評価値は値が小さいほど標準パターンと似たパターン

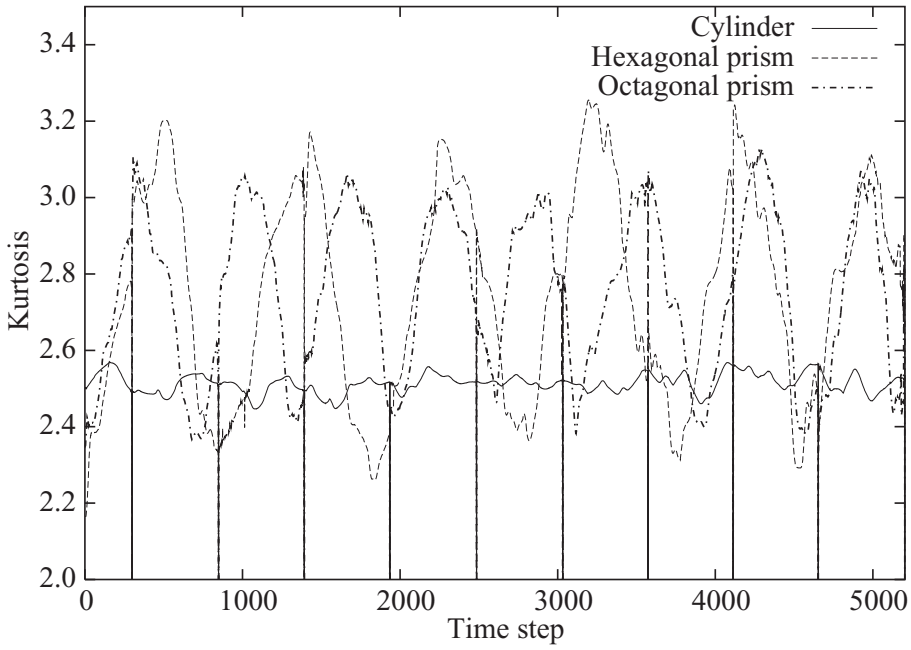


Fig. 5.3: Relationship between kurtosis and time step in continuous rotation manipulation

であることを示す．Fig. 5.4 では六角柱の波形が周期的にほぼ 0 に近付いているが，これは六角柱の尖度パターンを標準パターンとして用いたため，それぞれ 0 に近い部分，すなわち平面から角の頂点まで回転させた時点で標準パターンと近いことを示している．八角柱も同様に周期的な評価値となっているが，六角柱の評価値の極小値がほぼ 1 以下となっているのに対し，八角柱の評価値は 5 程度である．一方，円柱の評価値は 150 程度を推移しており，他の 2 つとは全く異なる形状であることがわかる．

各対象物ごとに標準パターンを設定し，形状識別の正答率について調べた．標準パターンは，円柱が 36[deg] 回転させた場合，六角柱と八角柱が平面から角まで回転させた場合の時系列尖度を別途の実験結果から設定した．各対象物をそれぞれ 20 回転させ，Fig. 5.2 で示した方法でしきい値を 1.0 として形状識別を行った．標準パターンと同じ形状と識別された場合の正答率を Table 5.1 に示す．ただし，この正答率は総数に対する正しい識別の割合を百分率で表しており，誤識別については，標準パターンと異なる形状で評価値が 1.0 以下になる結果は得られなかったので，標準パターンと同じ形状でありながら評価値が 1.0 以下にならなかった場合を誤識別とした．Table 5.1 によると，六角柱や八角柱と比べて円柱の正答率が高い．円柱の外周はどの部分に接触しても同じ形状であることから，連続回転操作中の持ち替え動作前後で発生する尖度の変動が小さく，安定した時系列尖度が得られた結果，正答率が高くなったと考えられる．一方，六角柱や八角柱の識別結果でしきい値以下にならなかった場合の時系列尖度をみると，持ち替え動作前後で尖度に差が生じているものが多く，この原因から正答率が低くなっていると考えられる．ただし，この誤識別では，持ち替え動

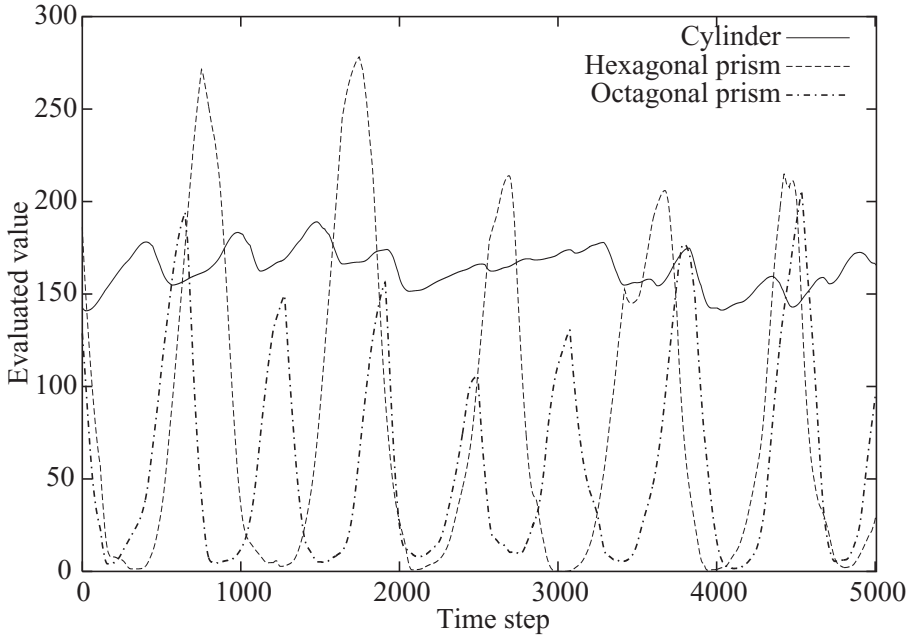


Fig. 5.4: Relationship between evaluated value and time step in continuous rotation manipulation

Table 5.1: Classification rate in continuous rotation manipulation

| | Hexagonal Prism | Octagonal Prism | Cylinder |
|---|---|---|---|
| Classification rate (%) | 81 | 74 | 89 |

作前後で尖度に 0.2 程度の変化が生じても，連続 DP の対応付けにより評価値は極端に変化しておらず，しきい値よりわずかに大きな評価値となっている場合が多い．このことから，しきい値よりわずかに大きな評価値の場合は，ロボットハンドの回転操作を変更し，その部分の識別を再度行うようシステムとすることで正答率を向上できると考えられる．また，すべての識別結果において標準パターンの形状と異なる形状を同じ形状と識別した結果はなかった．この結果は，提案する識別方法が厳密な識別を行っていることを示していると考えられる．以上のことから，識別させたい形状の標準パターンをあらかじめ与え，識別のしきい値を 1.0 程度に小さくすることで，提案する識別方法は持ち替え動作を行いながらも信頼性の高い形状識別が可能な方法であることがわかった．

### 5.4.2 非対称な形状の対象物

非対称の形状をもつ対象物として，六角柱と八角柱を組み合わせた形状の対象物を製作した．非対称な形状の対象物を Fig. 5.5 に示す．この対象物は，六角柱の角が 2 個，八角柱の

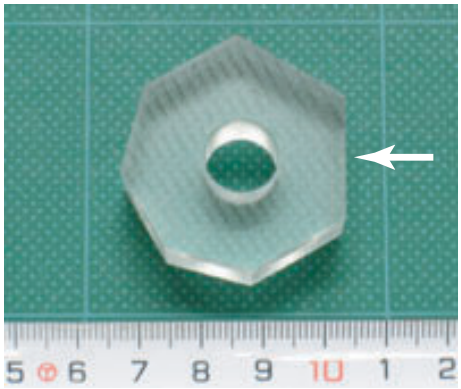


Fig. 5.5: Combined object

角が 3 個，連結した角が 2 つの合計 7 個の角をもつ．この対象物を前の実験と同じようにロボットハンドで回転させたときの時系列尖度を Fig. 5.6 に示す．この回転動作は，人差し指を Fig. 5.5 の矢印の部分から押し当てた状態から開始し，時計回りに回転させた．したがって，最初に六角柱の角に接触し．連結角，8 角柱の角が 3 回，連結角，最後に六角柱の角の順で 1 回転である．Fig. 5.6 では，角が接触したタイミングで極大値となっている．さらには，角の鋭利さが極大値に反映されており，六角柱は約 3.2，八角柱は約 3.0，連結角は約 3.1 である．この六角と八角の結果は，Fig. 5.3 の結果とも一致する．また，連結角の極大値は六角柱と八角柱の中間値であるが，六角柱の頂点の角度が 120[deg]，八角柱の頂点の角度が 135[deg]，連結角の頂点の角度は 127.5[deg] であることを考慮に入れると妥当な尖度が得られている．以上のことから，非対称の図形であっても形状の特徴が時系列の尖度に反映されることがわかった．

次に連続 DP を用いて Fig. 5.6 で示した時系列の尖度にから評価値を算出した．ただし，標準パターンは別の実験で得た連結角の尖度の極小値から極大値までの時系列の尖度を与えた．Fig. 5.7 によると，連結角の頂点のタイミングで極小値が 1 以下になっている．一方，六角柱の角や八角柱の角のタイミングでも極小値があったが，5 以下にはなっていない．このことは，リファレンスパターンに設定した連結角のみの識別が可能なことを示している．この結果から，非対称の対象物でも提案する方法が使えること，7.5[deg] 程度の角度差も識別できることがわかった．

## 5.5 考察

5.4 の実験結果に基づき提案手法の有効性について考察する．

10[ms] の周期で取得した圧力分布から尖度を算出し，接触面の形状の変化に対応した時系列尖度を獲得することができた．この過程において，尖度は指の幅方向に平均化した圧力

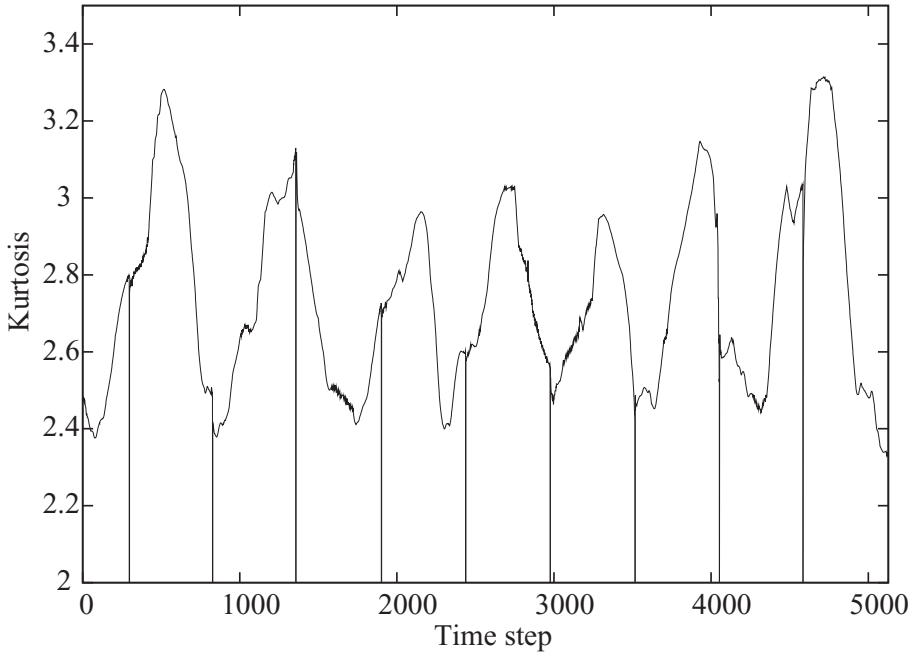


Fig. 5.6: Relationship between kurtosis and time step with combined object

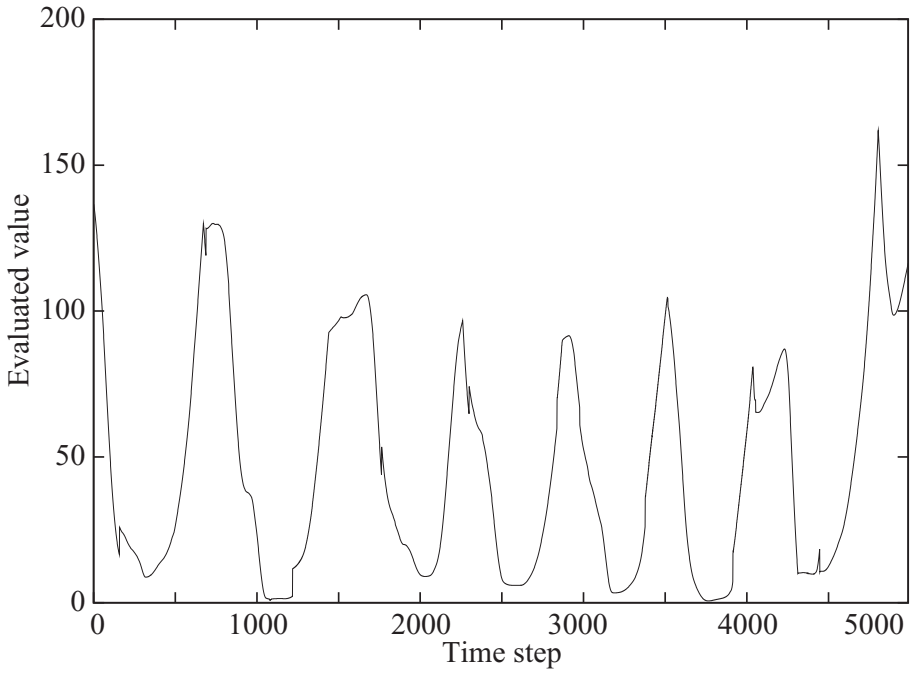


Fig. 5.7: Relationship between evaluated value and time step with combined object

分布から算出した．この圧力分布の平均化処理は，分布型圧力センサの電気的ノイズや接触状態の微小なズレを除去する目的で行ったが，Fig 5.2 の識別方法のアルゴリズムに明示してないように，本質的には必要ない．分布型圧力センサのノイズとユニバーサルロボットハンド制御の改善により安定した圧力分布を取得できれば，Fig. 5.8 に示すように圧力分布を平均せずに任意の断面の分布から尖度を算出できる．さらに，その断面の方向に沿って接触面を推移させることで時系列尖度を獲得し，Fig. 5.2 の識別方法に適用ができる．この場合，指と比較して小さなへこみのない形状であれば，多面体や曲面をもつ対象物についても形状識別が可能となると考えられる．

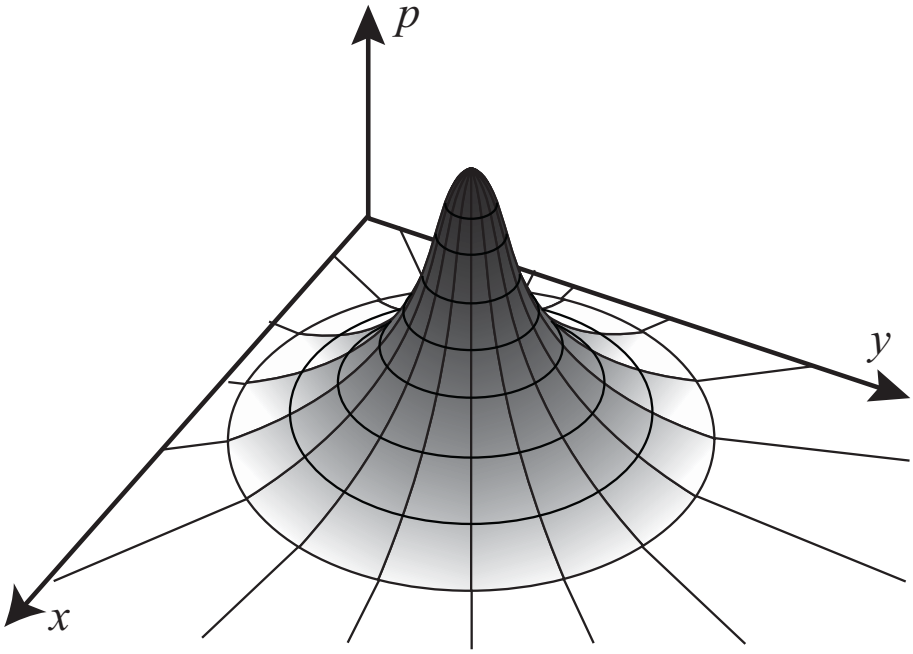


Fig. 5.8: Example of decided distribution in arbitrary direction

また，本研究で用いた対象物は，円柱，六角柱，八角柱，六角柱と八角柱を組み合わせた対象物の 4 種類のみであった．識別結果は，持ち替え動作を含めていても約 75%近いの識別率があり，異なる形状のパターン同士が同じと判断されることはなかった．しかし，本研究の分布型圧力センサの計測点 1 点の大きさは，3.4×1.8[mm] であり，対象物間の形状の差を小さくした場合には識別率が下がると考えられる．人間の触覚受容器であるマイスナー小体などは 1[mm] 以下の高密度に配されている [55] が，微小な形状差を検出するためには分布型圧力センサの高密度化も必要である．この高密度化によって，対象物の微小な形状差を反映させた圧力分布の取得が期待でき，形状の差の小さい識別を高精度に実現できると考えられる．

## 5.6 結言

ユニバーサルロボットハンドによる連続回転操作中の形状識別方法を提案した．回転操作中に得られる圧力分布から尖度を算出し，時系列の尖度をリアルタイムに標準パターンと比較することで，指が対象物を把持したもしくは離したタイミングに関わらず形状識別が可能である．前章で用いた対称形状の対象物を用いて評価実験を行い，反復回転操作の場合よりも正答率は低くなったが 75%近くの識別ができることを確認した．また，非対称形状の対象物に対しても 7.5[deg] の識別の分解能があることを確認した．この実験の中では指の幅方向に圧力分布を平均化しているが，ロボットハンドのアクチュエータとしての能力とセンシングとしての能力を向上させることで，この平均化が不必要になり，接触面のあらゆる方向の形状を識別できる可能性についても考察した

提案した形状識別方法は，ユニバーサルロボットハンドで対象物を操る際に得られる分布型圧力センサから情報をリアルタイムにマッチングすることで，対象物の外周形状を連続的に識別する方法である．識別の正答率が反復回転操作における識別方法の結果より悪くなっているが，一定方向の回転のため対象物から手が離れる時間があることを考慮すると，妥当な結果だと考えられる．識別の正答率を上げ，対象物の外周形状を識別するためには，第 4 章と本章で提案した 2 つの併用することが考えられる．

# 第 6 章

# 結論

## 6.1 本研究のまとめ

日本はロボットに関する技術を得意としており，実用化されたロボットの代名詞である産業用ロボットと今後の活躍が期待される次世代ロボットの研究開発において，世界に先行している．そして，少子高齢社会や食の安全をキーワードに，これまでロボットが積極的に使われてこなかった福祉や食品製造分野などにロボットの導入が求められており，今後も日本の世界に対する技術的優位性を保つためには，それらのニーズに対応できるロボットを提供していかなければならない．しかしながら，ロボットが新しい分野で活躍するためには，未だに多くの要素が未解決であり，その 1 つに人間の手のように多様な作業の可能なエンドエフェクタがある．本研究ではこの人間の手のように多様な作業の可能なロボットハンドを実現することを最終的な目的として，本論文では分布型の触覚センサを備えた多指多関節ロボットハンドの開発，そのハンドが操作中の対象物の外形を触覚センサを利用して識別する方法について議論を行った．

第 2 章では，人間の手と同等の多指ハンドを目指して研究開発された事例について述べた．その多くが小型化のための機構に特徴があり，人間の手と同等の自由度を持つものもあるが，実用化されたものはなく，製造現場ではグリッパと呼ばれる 2 指の開閉式ハンドが未だ主流である．一方，人間の手には触覚の受容器が分布しており，器用な手を実現するために不可欠の要素であるとされていることを踏まえて，人間の触覚受容器の特徴と触覚センサの開発事例を述べた．人間は分布した触覚受容器からの膨大な出力を処理することで触覚情報を得ており，この触覚情報をもとに器用な動作を実現していると指摘されている．しかしながら，この点を考慮したロボットハンドの研究例は数例しかなく，それらもロボットハンドで対象物を操作しつつ，分布型触覚センサで対象物の情報を得るといった研究がほとんどなされていない．これらの背景をもとに，ロボットハンドにおいても分布型触覚センサを操作中の対象の認識に応用することの重要性について考察した．

第 3 章では，開発したユニバーサルロボットハンドの機構，センサ，システムなどについ

て述べた．低バックラッシュで高い速比を特長とする減速機を用いることで，安定した関節角の制御が可能なことを実験により示した．PD 制御と剛性制御を併用することで柔らかい関節を実現でき，ゲインの設定でその柔らかさを制御できることを実験により示した．また，触覚として貼付した分布型圧力センサに加えられた力の推定方法について述べ，リファレンスとして用いたロードセルとほぼ同じ値を推定できることを実験で確認し，分布型圧力センサの出力値の信頼性が高いことを示した．分布型圧力センサの圧力分布から尖度という特徴値を求めることで，接触面の形状を推定できることを実験により確認した．これらの実験を踏まえて，開発したユニバーサルロボットハンドは対象物に対して一定の接触力を保ちつつ操ることが可能であり，その触覚として貼付している分布型圧力センサで取得した圧力分布から接触面の形状を評価できることを考察した．

第 4 章では，対象物を反復的に回転させる軌道をユニバーサルロボットハンドの人差し指と親指に与え，その回転中に得られる圧力分布群から回転時に接触している面の形状を識別する方法を提案した．この方法は，第 3 章で述べた接触面の形状評価方法を用いて，反復回転操作中に取得した圧力分布群から時系列の尖度を算出する．そこから抽出した尖度パターンと比較対象となる標準パターン間のマッチングを DP によって行い，類似性の評価値を求める．そして，得られた評価値をしきい値判定することで，操作中の接触面の形状を識別する．ユニバーサルロボットハンドが対象物を反復回転する実験により，その間の接触面の形状を識別できることを確認した．さらに，DP がパターンの伸縮に対応していることを応用して，標準パターンを速度毎に用意しなくても提案の形状識別方法が回転速度の変化に対応できることを述べた．提案した形状識別方法は，反復回転中という局所的な接触面に限られるが，ユニバーサルロボットハンドが対象物を操りつつ，触覚である分布型圧力センサの出力から接触面を認識できる方法として議論した．

第 5 章では第 4 章で提案した方法を拡張し，対象物を一定方向へ連続的に回転させながら，その外周形状を識別する方法を提案した．この方法では，ユニバーサルロボットハンドが対象物を一定方向へ連続回転させ，分布型圧力センサから圧力分布を取得するごとに，尖度を算出し連続 DP を用いて標準パターンとのマッチングを行う．さらに，マッチングの評価値をしきい値判定して形状を識別する．第 4 章で提案した方法と異なり，マッチングの前に尖度パターンをあらかじめ抽出する必要が無く，リアルタイムに識別できる点に特長がある．3 種類の対称形状の対象物を用いた実験を行い，識別が可能であることを確認した．また，非対称形状の対象物に対しても提案する方法が有効であることを実験結果により示した．提案した連続回転操作中の形状識別方法は，第 4 章で提案した方法よりも識別の精度がわずかに悪くなる一方，ユニバーサルロボットハンドが対象物を操りつつ指先を外周に接触させることで，指先の分布型圧力センサを使ってリアルタイムに接触面を認識できる方法として議論した．

本論文で述べたユニバーサルロボットハンドは，低バックラッシュな減速機を用いるなどにより動作性能を高めたうえで，設計段階から触覚となる分布型圧力センサを貼付することを考慮した．このことから，安定した操り動作を実現し，対称物の識別を実現できた．反復回転操作と連続回転操作中の接触面の形状識別方法においては，これまであまり研究がなされてこなかった触覚情報を利用したロボットハンドによる操作中物体の認識というテーマにおいて 1 つの方法を提案した．ハンドの動作に伴って得られるパターン情報を識別するという観点に立つと，回転操作以外のなぞりや押し動作など他の操作にも応用が可能であり，触覚情報を利用した認識に有効な枠組みを議論できた．

## 6.2 今後の課題

本研究の第 4 章と第 5 章では，それぞれ反復回転操作と連続回転操作という異なる操作中の接触面の識別方法を提案している．前者は詳しく形状を調べる場合，後者はおおまかな形状を調べる場合もしくは識別しやすい差の大きな形状を調べる場合に適用できる方法である．したがって，差の大きい部分は連続回転操作で，差の小さい部分は反復回転操作で識別を行うといったように，識別結果からユニバーサルロボットハンドの操作を変えながら走査を進めるようなシステム構築をすることができる．

現在，各関節にトルクリミッタを内蔵した小型の 5 本指ハンドを開発している．このハンドの分布型圧力センサを適用するよう設計を進めており，計測点が $1.8 \times 1.8$[mm] と小さくなる予定である．このことから形状識別の精度が向上すると考えられ，上述の反復回転操作と連続回転操作の組み合わせや，その操作によって得た形状情報を用いて道具を操るようなアプリケーションへと展開する必要がある．また，回転操作だけではなく，テクスチャや重さ，硬さなどを確認するためのハンドの動きを実現し，触覚センサの高精度化，多軸化も含めてハンドの性能を高めていく必要がある．

それらの研究を踏まえて，アクチュエータの機能とセンサの機能を密接に相互作用できるようなシステムについて議論を進め，有用な汎用ロボットハンドを実現し，社会に研究成果を還元する必要がある．

# 謝 辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切なご指導およびご鞭撻を賜わりました神戸大学大学院工学研究科情報知能学専攻 小島 史男 教授に謹んで感謝を申し上げます．また，本論文をまとめるにあたり貴重なご教授を賜りました神戸大学大学院工学研究科情報知能学専攻 羅 志偉 教授ならびに機械工学専攻 大須賀 公一 教授に深く感謝の意を表します．

神戸大学大学院工学研究科情報知能学専攻 小林 太 准教授には，本研究の内容の詳細にわたって様々な角度からのご助言を賜りました．ここに深謝の意を申し上げます．

博士前期課程まで研究室の学生としてご指導を賜わり，現在は業務の合間を縫って研究を継続することに格別のご理解を賜わっております，兵庫県立工業技術センター所長および兵庫県立福祉のまちづくり工学研究所所長 北村 新三 神戸大学名誉教授に心からお礼申し上げます．

本研究を継続にあたって，終始様々なご支援を賜りました財団法人近畿高エネルギー加工技術研究所・ものづくり支援センターの技術主管であり，この研究を進める母体となったAMPIロボット研究会の事務局を務められている 白沢 秀則 博士に深い謝意を申し上げます．AMPIロボット研究会の顧問としてロボットハンドの基礎的な技術から，ロボットに限らない技術に至るまで幅広いご指導を賜りました広島国際大学機械ロボティクス学科 今村 信昭 教授に厚くお礼を申し上げます．また，AMPIロボット研究会のメンバーとなるきっかけを作っていただきました財団法人近畿高エネルギー加工技術研究所・ものづくり支援センター部長 一森 和之 氏に深い感謝を表します．

実験装置であるユニバーサルロボットハンドシステムを構築するにあたり，多くの協力を頂きました修了生の 新納 啓輔 氏，上田 健二郎 氏，実験の補助をしていただいた学生の 中江 竜 氏，齋藤 裕 氏に厚くお礼を申し上げます．また，研究室での活動において公私にわたるご協力を賜わりました 福井 航 氏 に感謝の意を表します．このほか，小島研究室の学生諸氏には，有意義な議論の場を作っていただきました，ここで厚くお礼を申し上げます．

本研究を進める中での度重なる学会発表や，本論文をまとめる時間をいただき，そのたびに兵庫県立工業技術センター情報技術部の方々へご迷惑をお掛けしました．お詫びするとともに，厚くお礼を申し上げます．

最後に，社会人と学生の両立に理解を示し，絶え間ないご支援・ご協力を賜りました両親と妻，息子，娘に心からの感謝の意を表します．

# 参考文献


1) 榊原伸介: “まだまだ伸びる産業用ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 1, pp. 37–41, 2007.

2) 稲垣荘司: “産業用ロボット技術の歩み”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 4, pp. 464–467, 2000.

3) 稲葉肇: “産業用ロボットと作業環境”, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 5, pp. 637–642, 1999.

4) 嘉数侑昇: “自律農業ロボットの課題と現状”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 951–954, 2000.

5) 藤浦建史: “農業用ロボット”, pp. 1001–1004, コロナ社, 2005.

6) 大永英明: “包装・食品ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 6, pp. 764–767, 1995.

7) 藤田雅博: “アミューズメント, エンタテイメントロボット”, pp. 1020–1025, コロナ社, 2005.

8) 石川和良, 青山 元, 関 淳也, 岡村三男, 石村左緒里, 尾崎功一, 横田和隆, 山本純雄: “屋外清掃ロボットの実用化”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6, pp. 802–812, 2007.

9) 下笹洋一, 若林 潔, 森口拓雄, 杉浦正則, 藤瀬弘樹, 小谷健太郎: “屋外警備ロボット ALSOK ガードロボ i（アイ）の開発と安全方針”, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 156–158, 2006.

10) 柴田崇徳: “メンタルコミットロボット・パロとロボット・セラピーの展開”, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 3, pp. 319–322, 2006.

11) 加藤一郎: “2 足歩行ロボット（WABOT-1）の開発”, バイオメカニズム 2, Vol. 2, pp. 173–174, 1973.

12) 高西淳夫: “ヒューマン・コミュニケーションを志向したヒューマノイドロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 11–14, 1997.

13) 本田技研工業株式会社: “ASIMO オフィシャルサイト”, http://www.honda.co.jp/ASIMO/.

14) 井上博允, 比留川博久: “人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト”, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 1, pp. 2–7, 2001.

15) 金広文男, 金子健二, 梶田秀司, 横井一仁, 藤原清司, 比留川博久, 川崎俊和, 平田 勝, 五十棲隆勝: “人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクトのロボットプラットフォームの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 2, pp. 75–85, 2003.

16) 五十棲隆勝, 赤地一彦, 平田 勝, 金子健二, 梶田秀司, 比留川博久: “ヒューマノイドロボット HRP-2 の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 8, pp. 1004–1012, 2004.

17) 小田島 正, 大西正輝, 田原健二, 向井利春, 平野慎也, 羅 志偉, 細江繁幸: “抱え上げ動作による移乗作業を目的とした介護支援ロボット研究用プラットフォーム “RI-MAN” の開発と評価”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 554–565, 2007.

18) 川田工業株式会社: “人間型ロボット HRP-2”, http://www.kawada.co.jp/.

19) 独立行政法人理化学研究所: “RI-MAN の紹介”, http://www.bmc.riken.jp/ RI-MAN/index.html.

20) 金子健二, 金広文男, 森澤光晴, 梶田秀司, 藤原清司, 原田研介, 比留川博久: “ヒューマノイドの動作一時停止システム–実時間動作一時停止判断と実時間パターン修正–”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 2, pp. 289–298, 2007.

21) 金広文男, 吉見 隆, 梶田秀司, 森澤光晴, 金子健二, 比留川博久, 富田文明: “3D グリッドマップを用いたヒューマノイドの狭隘部移動”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 589–597, 2007.

22) 中岡慎一郎, 中澤篤志, 金広文男, 金子健二, 森澤光晴, 比留川博久, 池内克史: “脚タスクモデルを用いた 2 足歩行ヒューマノイドロボットによる人の舞踊動作の再現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 3, pp. 388–399, 2006.

23) 門脇明日香, 小島光晴, 山崎公俊, 岡田 慧, 稲葉雅幸: “ヒューマノイドによるハンカチのアイロンがけ動作における動作計画と視覚誘導”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 3L14, 2007.

24) 小島光晴, 岡田 慧, 稲葉雅幸: “日常生活支援ヒューマノイドによるお茶注ぎ行動における双腕協調と状態認識”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 3L12, 2007.

25) 金子 真, 今村信昭, 横井一仁, 谷江和雄: “摩擦を考慮した多指ハンドの剛性モデルによる安定把握解析”, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 3, pp. 161–171, 1989.

26) Nobuaki Imamura, Makoto Kaneko, Kazuhito Yokoi, and Kazuo Tanie: “Development of a Two-fingered Robot Hand with Compliance Adjustment Capability”, In *Proceedings of 1990 JAPAN-U.S.A Symposium on Flexble Automation*, pp. 997–1004, 1990.

27) 前川仁: “安定把握とセンシング-力覚と触覚を中心として”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 966–972, 1993.

28) 前川仁: “触覚情報を利用した多指ハンドによる把握・操り”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 776–781, 2000.

29) 金子真: “多指ハンド”, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 7, pp. 889–892, 1998.

30) John M. Hollerbach and Stephen C. Jacobsen: “Anthropomorphic Robots and Human Interactions”, In *Proceedings of 1st International Symposium on Humanoid Robots*, pp. 83–91, 1996.

31) David Johnston, Ping Zhang, John Hollerbach, and Stephen Jacobsen: “A Full Tactile Sensing Suite for Dextrous Robot Hand and Use in Contact Force Control”, In *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3222–3227, 1996.

32) Polly K. Pook and Dana H. Ballard: “Recognizing Teleoperated Manipulations”, In *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 913–918, 1993.

33) J. Butterfass, G. Hirzinger, S. Knoch, and H. Liu: “DLR’s Multisensory Articulated Hand Part I: Hard- and Software Architecture”, In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2081–2086, 1998.

34) H. Liu, P. Meusel, J.Butterfass, and G. Hirzinger: “DLR’s multisensory articulated Hand Part II: The Parallel Torque/Position Control System”, In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2087–2093, 1998.

35) J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger: “DLR-Hand II: Next Generation of a Dextrous Robot Hand”, In *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 109–114, 2001.

36) S. Haidacher, J. Butterfass, M. Fischer, M. Grebenstein, K. Joehl, K. Kunze, M. Nickl, N. Seitz, and G. Hirzinger: “DLR Hand II: Hard- and Software Architecture for Information Processing”, In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 684–689, 2003.

37) Ch. Borst, M. Fischer, S. Haidacher, H. Liu, and G. Hirzinger: “DLR Hand II: Experiments and Experiences with an Anthropomorphic Hand”, In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 702–707, 2003.

38) X.H. Gao, M.H. Jin, L. Jiang, Z.W. Xie, P. He, L. Yang, Y.W. Liu, R. Wei, H.G. Cai, H. Liu, J. Butterfass, M. Grebenstein, N. Seitz, and G. Hirzinger: "The HIT/DLR Dexterous Hand: Work in Progress", In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3164–3168, 2003.

39) P. He, M.H. Jin, L. Yang, R. Wei, Y.W. Liu, H.G. Cai, H. Liu, N. Seitz, J. Butterfass, and G. Hirzinger: "High Performance DSP/FPGA Controller for Implementation of HIT/DLR Dexterous Hand", In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3397–3402, 2004.

40) 川崎晴久, 内山和直, 小松恒夫: "研究用プラットフォームをめざした分布型接触覚センサを有する人間型ロボットハンド", 日本機械学会論文集C編, Vol. 66, No. 651, pp. 3672–3678, 2000.

41) Haruhisa Kawasaki, Kenji Nakayama, Tetsuya Mouri, and Satoshi Ito: "Virtual Teaching Based on Hand Manipulability for Multi-Fingered Robots", In *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1388–1393, 2001.

42) Haruhisa Kawasaki, Hisayuki Shimomura, and Yuuji Shimizu: "Educational-industrial complex development of an anthropomorphic robot hand 'Gifu hand"', *Advanced Robotics*, Vol. 15, No. 3, pp. 357–363, 2001.

43) Haruhisa Kawasaki, Tsuneo Komatsu, and Kazunao 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.

44) 株式会社ダイニチ: "Gifu Hand III", http://www.kk-dainichi.co.jp/.

45) ニッタ株式会社: "タクタイルセンサシステム", http://www.nitta.co.jp/.

46) 川崎晴久, 堀匠, 毛利哲也: "対向型多指ハプティックインターフェイス", 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 4, pp. 449–456, 2005.

47) William T. Townsend: "Description of a Dexterous Robotic Grasper", 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 798–801, 2000.

48) Barrett Technology Inc.: "Barrett Hand", http://www.barretttechnology.com/robot/index.htm.

49) 並木明夫, 石井抱, 石川正俊: "高速センサフィードバックに基づく把握行動", 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 7, pp. 707–716, 2002.

50) Akio Namiki, Yoshiro Imai, Masatoshi Ishikawa, and Makoto Kaneko: "Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching", In

*Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2666–2671, 2003.

51) 金子健二, 原田研介, 金広文男: “等身大ヒューマノイド用多指ハンドの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 1, pp. 98–109, 2008.

52) 東森 充, 丁 憙勇, 石井 抱, 並木明夫, 石川正俊, 金子 真: “二重旋回機構を備えた 4 本指ロボットハンドの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 7, pp. 813–819, 2006.

53) 岩田浩康, 林隆志, 塩澤裕樹, 木村謙大, 石井聡, 坂神啓介, 太田智道, 岩本国大, 菅野重樹: “手指手掌に受動柔軟性を備えた高巧緻多指ハンドの構造設計”, In *Proceedings of the 2008 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 1A1-A01, 2008.

54) 岩田浩康, 林隆志, 塩澤裕樹, 木村謙大, 菅野重樹: “TWENDY-ONE ハンドの触覚センサ設計とセンサフュージョン”, In *Proceedings of the 2008 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 1A1-A02, 2008.

55) 前野隆司: “ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 772–775, 2000.

56) 岩村吉晃: “ヒト触覚受容器の構造と特性”, 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 5, pp. 438–444, 1984.

57) 岩村吉晃: “タッチ”, 医学書院, 2001.

58) 山田陽滋: “触覚”, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 7, pp. 893–896, 1998.

59) 篠田裕之: “柔らかい機械の人工皮膚”, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 7, pp. 814–817, 2001.

60) 市川純章, 原文雄: “ロボット指による物体識別と人の識別能の比較”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会 (CD-ROM), RSJ2008AC1E2-04, 2008.

61) 市川純章, 渡邊健士, 大久保賢一, 原文雄: “接触センサを持つ柔軟な指ロボットの接触情報による物体識別”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会 (CD-ROM), 1F13, 2007.

62) 溝口善智, 明愛国, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: “インテリジェントロボットハンドの研究開発—貫通孔を有する CoP センサによる触覚・近接覚複合センサの実現—”, In *Proceedings of the 2008 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 1P1-I07, 2008.

63) 石川正俊, 下条誠: “ビデオ信号出力を持つ圧力分布センサと触覚パターン処理”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 7, pp. 662–669, 1988.

64) Makoto Shimojo: “Mechanical Filtering Effect of Elastic Cover for Tactile Sensor”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 13, No. 1, pp. 128–132, 1997.

65) 下条誠: “感圧導電性ゴムの履歴特性”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 59, No. 564, pp. 2464–2469, 1993.

66) 下条誠, 金森克彦, 明愛国, 金森哉吏, 石川正俊: “液状感圧ゴムを用いた自由曲面型触覚センサの開発”, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会, 1G24, 2002.

67) 長久保晶彦, アリレザーイーハサン, 國吉康夫: “逆問題解析に基づく触覚分布センサ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6, pp. 970–978, 2007.

68) 三谷隆弘, 林健志, 長野明紀, 羅志偉: “逆問題解析を用いた面状触覚センサの柔軟性と感度に関する考察”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会 (CD-ROM), RSJ2008AC3L1-04, 2008.

69) 福嶋政徳, 増田良介: “圧覚と振動覚を用いた皮膚センサにおける刺激認識率の向上”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会 (CD-ROM), RSJ2008AC3L1-05, 2008.

70) Jan Jockusch, Jorg Walter, and Helge Ritter: “A Tactile System for a Three-Fingered Robot Manipulator”, In *Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3080–3086, 1997.

71) 向坊由佳, 白土寛和, 昆陽雅司, 前野隆司: “ヒト指の機構と知覚機構を模倣した触感センサ”, In *Proceedings of the 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 1P2-N-105, 2005.

72) D. Taddeucci, C. Laschi, R. Lazzarini, R. Magni, P. Dario, and A. Staritar: “An approach to integrated tactile perception”, In *Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3100–3105, 1997.

73) 多田泰徳, 細田耕, 浅田稔: “内部に触覚受容器を持つ人間型柔軟指”, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 4, pp. 482–487, 2005.

74) 白土寛和, 昆陽雅司, 前野隆司: “ヒトの触感認識機構のモデル構築”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 73, No. 733, pp. 2514–2521, 2007.

75) 木下源一郎, 栗本雄仁, 大隅久, 多田興平: “把持物体の動的触覚像取得とその処理”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 5, pp. 550–556, 2002.

76) 小林弘明, 高田純平, Hanafiah Bin Yussof, 大岡昌博, 三矢保永: “多指ハンド用 3 軸触覚センサの特性評価”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会 (CD-ROM), 1C13, 2005.

77) 高田順平, 小林弘明, Hanafiab Bin Yussof, 大岡昌博, 三矢保永: “多指ハンド用 3 軸触覚センサのせん断力特性評価”, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会 (CD-ROM), 1C21, 2006.

78) 向井利春: “ロボットへの装着を目的とした 2 次元曲面状触覚センサ”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会 (CD-ROM), 2C16, 2005.

79) 向井利春, 大西正輝, 平野慎也, 羅志偉: “ロボットに装着した曲面状触覚センサによるフィードバック制御の実現”, 第 6 回システムインテグレーション部門学術講演会 (CD-ROM), pp. 217–218, 2005.

80) 寒川雅之, 野田実, 黄裕銘, 金島岳, 山下馨, 奥山雅則, 池田正哲, 野間春生: “適度な傾斜形状を有する Cr/Si マイクロカンチレバー構造を用いた多軸触覚センサの作製と評価”, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, pp. 47–50, 2007.

81) 宮本良, 小松哲, 岩瀬英治, 松本潔, 下山勲: “ひずみセンサを用いた表面形状の推定”, In *Proceedings of the 2008 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 1P1-I05, 2008.

82) Marc E. Tremblay and Mark R. Cutkosky: “Estimating friction using incipient slip sensing during surface features with stress rate sensing”, In *Proceedings of 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 429–434, 1993.

83) G. Canepa, R. Petrigliano, M. Campanella, and D. De Rossi: “Detection of Incipient Object Slippage by Skin-Like Sensing and Neural Network Processing”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part B, Cybernetics*, Vol. 28, No. 3, pp. 348–356, 1998.

84) 山田大介, 前野隆司, 山田陽滋: “指紋により接触／非接触・固着／滑り分布を検出する弾性ロボットフィンガの開発”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 70, No. 690, pp. 560–566, 2004.

85) 郡司大輔, 荒木拓真, 並木明夫, 明愛国, 下条誠: “触覚センサによる滑り検出に基づく多指ハンドの把持力制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6, pp. 970–978, 2007.

86) 吉海智晃, 但馬竜介, 加賀美聡, 篠田裕之, 稲葉雅幸, 井上博允: “音響共鳴型テンソルセル触覚センサによる滑り予知と把持動作への応用”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 8, pp. 868–875, 2002.

87) 池田篤俊, 栗田雄一, 上田淳, 松本吉央, 小笠原司: “初期滑り時の接触面偏心度に基づく弾性体の把持力制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 3, pp. 337–343, 2005.

88) 石田豊, 近藤誠宏, 上田淳, 松本吉夫, 小笠原司: “滑り知覚を可能とする触覚センサを装着した多指ハンド”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会 (CD-ROM), 1C14, 2005.

89) Roberta L. Klatzky and Susan Lederman: “Intelligent exploration by the human hand”, pp. 66–81, Springer-Verlag, 1990.

90) 石川正俊: “アクティブセンシングとロボットハンド”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 938–942, 1993.

91) K. Pribadi, J. S. Bay, and H. Hemami: “Exploration and Dynamic Shape Estimation

by a Robotic Probe", *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 19, No. 4, pp. 840–846, 1989.

92) P. K. Allen and P. Michelman: "Acquisition and Interpretation of 3-D Sensor Data from Touch", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 4, pp. 397–404, 1990.

93) M. Okamura and R. Cutkosky: "Feature Detection for Haptic Exploration with Robotic Fingers", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 20, No. 12, pp. 925–938, 2001.

94) 渡邊健士, 大久保賢一, 市川純章, 原文雄: "軟性触覚センサアレイシステムによる物体の形状識別", 第 22 回日本ロボット学会学術講演会 (CD-ROM), 1J32, 2004.

95) 赤松幹之, 笠井健: "生体における感覚情報の統合", 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 5, pp. 656–663, 1994.

96) 向井利春, 石川正俊: "アクティブセンシングを用いた視触覚融合システム", 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 1, pp. 75–81, 1997.

97) 並木明夫, 石川正俊: "視触覚フィードバックを用いた最適把握行動", 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 2, pp. 261–269, 2000.

98) エクシールコーポレーション株式会社: "ウレタンゲル（人肌のゲル）", http://www.exseal.co.jp/.

99) イナバゴム株式会社: "イナストマー", http://www.inaba-rubber.co.jp/.

100) 日本ロボット学会（編）: "ロボット工学ハンドブック", pp. 532–536, コロナ社, 1990.

101) 上坂吉則, 尾関和彦: "パターン認識と学習のアルゴリズム", pp. 91–108, 文一総合出版, 1990.

102) 高橋勝彦, 関進, 小島浩, 岡隆一: "ジェスチャー動画像のスポッティング認識", 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. 77, No. 8, pp. 1552–1561, 1994.

# 論文リスト

## 著書

(1) 中本裕之, “柔軟体と導電性ゴムによるロボットハンド用分布型圧力センサ”, 進化する有機半導体, (株) エヌ・ティー・エス, pp. 415–420, 2006 (ISBN4-86043-103-0).

## 投稿論文

(1) 中本裕之, 小林 太, 今村信昭, 白沢秀則, 小島史男: “柔軟体と導電性ゴムによるロボットハンド用分布型圧力センサ”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 73, No. 733, pp. 2561–2567, 2007.

(2) 中本裕之, 小林 太, 今村信昭, 白沢秀則, 小島史男: “ユニバーサルロボットハンドによる回転操作中の形状識別 - DP マッチングを用いた対象物の局所形状識別”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 21, No. 7, pp. 219–225, 2008.

(3) 中本裕之, 小林 太, 今村信昭, 白沢秀則, 小島史男: “連続 DP を用いたユニバーサルロボットハンドによる回転操作中物体の外周形状識別”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 74, No. 746, pp. 2521–2527, 2008.

## 国際会議

(1) Hiroyuki Nakamoto, Futoshi Kobayashi, Nobuaki Imamura, and Hidenori Shirasawa: “Universal Robot Hand Equipped with Tactile and Joint Torque Sensors - Development and Experiments on Stiffness Control and Object Recognition -”, *Proceedings of The 10th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics(WMSCI2006) (CD-ROM)*, pp.347-352, 2006 (Orlando USA).

(2) Nobuaki Imamura, Seiichi Yamaoka, Hidenori Shirasawa, and Hiroyuki Nakamoto: “Development of a Multi-fingered Mechanical Hand with Envelope Grasp Capability for Various Shapes of Parts”, *Proceedings of The 10th World Multi-Conference on*

*Systemics, Cybernetics and Informatics(WMSCI2006) (CD-ROM)*, pp.337-341, 2006 (Orlando USA).

(3) Nobuaki Imamura, Seiichi Yamaoka, Hidenori Shirasawa, and Hiroyuki Nakamoto: "Development of an Articulated Mechanical Hand with Envelope Grasp Capability for Various Shapes of Parts", *Proceedings of 2006 International Symposium on Flexible Automation (ISFA2006)*, pp.883-886, 2006 (Osaka, Japan).

(4) Hiroyuki Nakamoto, Futoshi Kobayashi, Fumio Kojima, Nobuaki Imamura, and Hidenori Shirasawa: "Shape Classification in Continuous Rotation Manipulation by Universal Robot Hand", *Proceedings of Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on Advanced Intelligent Systems(SCIS&ISIS2008) (CD-ROM)*, pp.1111-1116, 2008 (Nagoya, Japan).

(5) Wataru Fukui, Hiroyuki Nakamoto, Futoshi Kobayashi, Fumio Kojima, Nobuaki Imamura, Tadashi Maeda, Kazuhiro Sasabe, and Hidenori Shirasawa: "Development of Multi-Fingered Universal Robot Hand", *Proceedings of Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on Advanced Intelligent Systems(SCIS&ISIS2008) (CD-ROM)*, pp.1117-1122, 2008 (Nagoya, Japan).

(6) Yu Saitou, Hiroyuki Nakamoto, Futoshi Kobayashi, Fumio Kojima, Nobuaki Imamura, Kazuhiro Sasabe, and Hidenori Shirasawa: "Haptic Feedback in Universal Robot Hand Tele-Operation", *Proceedings of Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on Advanced Intelligent Systems(SCIS&ISIS2008) (CD-ROM)*, pp.1123-1128, 2008 (Nagoya, Japan).

(7) Futoshi Kobayashi, Ryo Nakae, Wataru Fukui, Fumio Kojima, Hiroyuki Nakamoto, Nobuaki Imamura, and Hidenori Shirasawa: "Adaptive Tactile Measurement with Genetic Algorithm for Universal Robot Hand", *Proceedings of Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on Advanced Intelligent Systems(SCIS&ISIS2008) (CD-ROM)*, pp.1008-1013, 2008 (Nagoya, Japan).

(8) Hiroyuki Nakamoto, Futoshi Kobayashi, Nobuaki Imamura, Hidenori Shirasawa, and Fumio Kojima: "Shape Classification in Rotation Manipulation by Universal Robot Hand", *Proceedings of 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2008) (DVD-ROM)*, pp. 53–58, 2008 (Nice, France).

## 国内会議


(1) 畑 順一, 中本裕之, 今村信昭, 大森秀雄: “触覚ならびに力覚を有したヒューマノイドロボットフィンガーの試作”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’04(ROBOMEC2004) (CD-ROM), 2P1-L1-7, 2004.

(2) 中本裕之, 小坂宣之, 田路 渡, 竹内 昭, 前田 正, 中村皆生, 中川志信, 小林 太, 今村信昭, 白沢秀則: “ユニバーサルロボットハンドのための高感度触覚センサ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’05(ROBOMEC2005) (CD-ROM), 1P1-N-105, 2005.

(3) 田路 渡, 中本裕之, 竹内 昭, 前田 正, 中村皆生, 中川志信, 小林 太, 今村信昭, 白沢秀則: “触覚ならびに力覚を有したユニバーサルロボットハンドの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’05(ROBOMEC2005) (CD-ROM), 1P1-N-092, 2005.

(4) 新納啓輔, 小林 太, 小島史男, 上田健二郎, 田路 渡, 中本裕之, 竹内 昭, 前田 正, 中村皆生, 今村信昭, 白沢秀則: “ユニバーサルロボットハンドの開発”, 第 6 回システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2005) (CD-ROM), 1I3-3, 2005.

(5) 中本裕之, 武縄 悟, 一森和之, 新納啓輔, 小林 太, 今村信昭, 白沢秀則: “ユニバーサルロボットハンドのための分布型触覚センサ -計測精度と応答速度について-”, 第 6 回システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2005) (CD-ROM), 1I3-4, 2005.

(6) 今村信昭, 中村裕哉, 山岡清一, 白沢秀則, 中本裕之: “多関節メカニカルハンドの把握状態に関する考察”, 第 6 回システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2005) (CD-ROM), 1I3-5, 2005.

(7) 中本裕之, 武縄 悟, 上田健二郎, 新納啓輔, 小林 太, 小島史男, 田路 渡, 竹内 昭, 前田 正, 中村皆生, 田中高穂, 今村信昭, 白沢秀則: “分布型圧力センサを有したユニバーサルロボットハンドによる物体認識”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’06(ROBOMEC2006) (CD-ROM), 2P2-B39, 2006.

(8) 中村裕哉, 今村信昭, 山岡清一, 白沢秀則, 中本裕之: “多関節メカニカルハンドによる包み込み把握”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’06(ROBOMEC2006) (CD-ROM), 1A1-B27, 2006.

(9) 上田健二郎, 小林 太, 小島史男, 新納啓輔, 田路 渡, 中本裕之, 竹内 昭, 前田 正, 中村皆生, 今村信昭, 白沢秀則, 田中高穂: “ユニバーサルロボットハンドの開発と関節剛性の制御評価”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’06(ROBOMEC2006) (CD-ROM), 1A1-B23, 2006.

(10) 武縄 悟, 中本裕之, 一森和之, 今村信昭: “感圧導電性ゴムを用いた分布型圧力センサの高機能化”, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 1C26, 2006.

(11) 中本裕之, 武縄 悟, 一森和之, 今村信昭, 小林 太, 小島史男: “感圧導電性ゴムを用いた高機能分布型圧力センサ”, 第 49 回自動制御連合講演会 (CD-ROM), SU2-3-6, 2006.

(12) 中村裕哉, 今村信昭, 山岡清一, 白沢秀則, 中本裕之: “多関節メカニカルハンドによる包み込み把握に関する考察”, 第 49 回自動制御連合講演会 (CD-ROM), SU4-2-5, 2006.

(13) 中本裕之, 武縄 悟, 一森和之, 中江 竜, 上田健二郎, 小林 太, 小島史男, 田路 渡, 竹内 昭, 前田 正, 田中高穂, 今村信昭, 白沢秀則: “ユニバーサルロボットハンドによる物体回転操作中の形状認識”, 第 7 回システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2006) (CD-ROM), pp.238-239, 2006.

(14) 武縄 悟, 中本裕之, 一森和之, 今村信昭: “感圧導電性ゴムを用いた分布型圧力センサによるせん断力検出に関する一考察”, 第 7 回システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2006) (CD-ROM), pp.478-479, 2006.

(15) 小林 太, 上田健二郎, 齋藤 裕, 小島史男, 中本裕之, 今村信昭, 白沢秀則, 田路 渡, 竹内 昭, 前田 正, 中村皆生, 田中高穂: “進化計算を用いたユニバーサルロボットハンドの操り動作最適化”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’07(ROBOMEC2007) (CD-ROM), 2A1-E04, 2007.

(16) 中江 竜, 小林 太, 小島史男, 上田健二郎, 田路 渡, 中本裕之, 竹内 昭, 前田 正, 中村皆生, 今村信昭, 白沢秀則, 田中高穂: “遺伝的アルゴリズムを用いた触覚センサの計測周期高速化”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’07(ROBOMEC2007) (CD-ROM), 2A1-E05, 2007.

(17) 中本裕之, 武縄 悟, 一森和之, 中江 竜, 上田健二郎, 小林 太, 小島史男, 田路 渡, 竹内 昭, 前田 正, 中村皆生, 田中高穂, 今村信昭, 白沢秀則: “ユニバーサルロボットハンドによる物体回転操作中の形状認識精度”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’07(ROBOMEC2007) (CD-ROM), 2A1-E06, 2007.

(18) 武縄 悟, 中本裕之, 北川洋一: “インダクタアレイを用いたパッシブ型 3 軸触覚センサ”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会 (CD-ROM), 3O24, 2007.

(19) 武縄 悟, 中本裕之, 北川洋一: “インダクタアレイを用いた磁気式触覚センサによる力ベクトル計測に関する一考察”, 第 8 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2007) (CD-ROM), pp.499-500, 2007.

(20) 中村裕哉, 今村信昭, 山岡清一, 白沢秀則, 中本裕之: “多関節メカニカルハンドによる把握の力学的考察”, 第 8 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2007) (CD-ROM), pp.699-700, 2007.

(21) 中本裕之, 武縄悟, 北川洋一, 中江 竜, 小林 太, 小島史男, 前田 正, 田中高穂, 今村信昭, 白沢秀則: “ユニバーサルロボットハンドによる回転操作中物体の外周形状認識”, 第 8 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2007) (CD-ROM), pp.701-702, 2007.

(22) 中江 竜, 小林 太, 小島史男, 中本裕之, 前田 正, 田中高穂, 今村信昭, 白沢秀則: “触覚センサを利用したユニバーサルロボットハンドによる複数物体の把持”, 第 8 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2007) (CD-ROM), pp.703-704, 2007.

(23) 齋藤 裕, 小林 太, 小島史男, 中本裕之, 前田 正, 田中高穂, 今村信昭, 白沢秀則: “ロボットハンド遠隔操作における接触情報提示システム”, 第 8 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2007) (CD-ROM), pp.705-706, 2007.

(24) 小林 太, 田中聡子, 小島史男, 中本裕之, 今村信昭, 白沢秀則: “FPGA を用いた分散知覚のための触覚センサユニットの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’08(ROBOMEC2008) (CD-ROM), 1A1-A09, 2008.

(25) 武縄 悟, 中本裕之, 北川洋一: “磁界解析に基づいた磁気式触覚センサの素子配置に関する一考察”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’08(ROBOMEC2008) (CD-ROM), 1P1-I01, 2008.

(26) 藤本豊久, 中西 敏, 前田 正, 今村信昭, 小林 太, 中本裕之, 笹部和宏, 白沢秀則: “多指多関節ユニバーサルロボットハンドの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’08(ROBOMEC2008) (CD-ROM), 1A1-A10, 2008.

(27) 齋藤 裕, 小林 太, 小島史男, 中本裕之, 前田 正, 今村信昭, 笹部和宏, 白沢秀則: “ロボットハンド遠隔操作における触覚・力覚フィードバック”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’08(ROBOMEC2008) (CD-ROM), 1P1-A14, 2008.