

環境と接触する手作業スキルの
コンプライアンス制御に関する研究

Study on Control Methodology of
Compliant Manipulation Utilizing
Additional Contact with Environment

2011年2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
総合機械工学専攻 知能機械学研究

菅岩 泰亮

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 社会背景と人間共存ロボットへの期待	3
1.3 人間共存ロボット研究と巧みさへの試み	6
1.3.1 人間共存ロボットへの取り組み	6
1.3.2 巧みさのための基礎技術	10
1.3.3 巧みさのための応用技術	15
1.4 本研究の目的	20
1.5 本論文の概要	21
第2章 対象作業の抽出・分析と技術課題の整理	23
2.1 はじめに	23
2.2 能動的身体 環境接触を利用する対象作業の抽出と分類	24
2.2.1 胴部による接触形成	24
2.2.2 腕部による接触形成	25
2.2.3 指による接触形成	27
2.2.4 対象作業の分類	29
2.3 拘束付与・除去作業における不確定性と受動柔軟性の関係	30
2.3.1 拘束付与・除去作業における不確定性	30
2.3.2 パッシブコンプライアンスの利点・欠点	32
2.3.3 パッシブコンプライアンスの利用戦略	34
2.4 作業モデルを用いた運動制御における課題の明確化	36
2.4.1 拘束付与作業の分析	36

2.4.2	拘束除去作業の分析	39
2.4.3	運動制御における技術課題	40
2.5	まとめ	40
第3章	制御枠組みの構築と拘束付与作業への適用	43
3.1	はじめに	43
3.2	能動的身体 環境接触を利用するための制御枠組み	44
3.3	制御枠組みの適用と制御アルゴリズムの選定 -拘束付与作業-	46
3.3.1	制御枠組みの適用	47
3.3.2	動作のポイントと制御アルゴリズムに対する要件	47
3.3.3	制御アルゴリズムの選定	50
3.4	実験用プラットフォーム ”TWENDY-ONE”	52
3.4.1	全体仕様	52
3.4.2	受動柔軟機構	54
3.5	評価試験 -グラス定置作業-	56
3.5.1	試験条件	56
3.5.2	試験結果	57
3.5.3	考察	59
3.6	まとめ	61
第4章	拘束除去作業への適用	63
4.1	はじめに	63
4.2	制御枠組みの適用と制御アルゴリズムの選定 -拘束除去作業-	63
4.2.1	制御枠組みの適用	64
4.2.2	動作のポイントと制御アルゴリズムに対する要件	64
4.2.3	制御アルゴリズムの選定	65
4.3	評価試験 -引出し開け作業-	68
4.3.1	試験条件	68
4.3.2	試験結果	70

4.3.3	考察	74
4.4	評価試験 -皮剥き作業-	76
4.4.1	制御枠組みの適用と制御アルゴリズムの選定	76
4.4.2	試験条件	77
4.4.3	試験結果	78
4.4.4	考察	78
4.5	まとめ	81
第5章	能動的身体-環境接触におけるパラメータを決定する動作計画法	83
5.1	はじめに	83
5.2	パッシブコンプライアンスの利用を考慮した動作計画法	84
5.2.1	パッシブコンプライアンスを活用する条件	84
5.2.2	動作計画法	87
5.2.3	動作計画法の適用例 -筆記作業-	88
5.3	指による道具操作のための制御アルゴリズム	90
5.3.1	作用力制御 -ばねたわみ調整による押し付け力制御-	91
5.3.2	把持・操り制御 -指姿勢補間による受動柔軟性を利用した道具操り-	92
5.3.3	軌道制御 -分解速度制御-	93
5.4	評価試験 -筆記作業-	95
5.4.1	試験条件	95
5.4.2	試験結果	95
5.4.3	考察	101
5.5	まとめ	104
第6章	結論	107
6.1	本研究の成果	107
6.2	今後の展望	110
	参考文献	113

目 次

1.1	Glass Placing Motion of Skilled Server	2
1.2	Forecast of Population Composition in Japan	4
1.3	Essential Activities for Daily Life in Home and Welfare Facilities	7
1.4	Proto-types of Human Symbiotic Robot	8
2.1	People Sitting on Chair	24
2.2	People Leaning against Wall on Train	24
2.3	Man Writing with Pen	25
2.4	Man Soldering	25
2.5	Man Reaching out His Hand Sustained by the Other Hand	26
2.6	Glass Placing with Active BE Contact	27
2.7	Drawer Opening with Active BE Contact	28
2.8	Apple Peeling with Active BE Contact	28
2.9	Positive and Negative Effect of Passive Compliance	33
2.10	Direct Approach for Adding Constraint Task	36
2.11	Approach with BE Contact for Adding Constraint Task	37
2.12	Direct Approach for Removing Constraint Task	39
2.13	Approach with BE Contact for Removing Constraint Task	41
3.1	OBE Loop Produced by Active BE Contact	45
3.2	Task-Execution and Bracing-Control System Defined by OBE Loop	46

3.3	Task-Execution and Bracing-Control System for Glass Placing Task with Active BE contact	47
3.4	Motion Flow of Adding Constraint Task with Active BE contact	49
3.5	Control Block Diagrams for Adding Constraint Task with Active BE contact	51
3.6	Wholebody Appearance and DOF Layout of TWENDY-ONE	53
3.7	DOF Layout of TWENDY-ONE Hand	53
3.8	Visco-Elastic Mechanism of TWENDY-ONE's Passive Joints	55
3.9	Data of Pedestal Force Sensor of Glass Placing Task	58
3.10	Bar Chart of Impact Force of Glass Placing task	60
4.1	Task-Execution and Bracing-Control System for Drawer Opening Task with Active BE Contact	64
4.2	Control Block Diagrams for Removing Constraint Task with Active BE Contact	66
4.3	Motion Flow of Removing Constraint Task with Active BE contact	67
4.4	Actual Drawer -Experimental Setup-	69
4.5	Coordination Systems for Force Measurement	70
4.6	Experimental Results of Drawer Opening Task on Condition A	71
4.7	Experimental Results of Drawer Opening Task on Condition B	72
4.8	Experimental Results of Drawer Opening Task on Condition C	73
4.9	Discrete Change of Finger-Tip Position and Maximum Displacement of Arm's Springs	74
4.10	Discrete Change of Finger-Tip Position and Maximum Displacement of Finger's Spring	74
4.11	Task-Execution and Bracing-Control System for Apple Peeling Task with Knife	77
4.12	Experimental Results of Apple Peeling Task	79
4.13	Sequential Photos of Apple Peeling Task with Active BE Contact	80

5.1	Position Deviation on End-Effector Derived by Uncertainty in Robot Body	85
5.2	Position Adjustment Generated by Passive Compliance Implemented in Joints	86
5.3	Motion-Planning with Active BE Contact	89
5.4	Control Concept for Dexterous Manipulation of Cylindrical Handling Tool	91
5.5	Control Block Diagram for Dexterous Manipulation of Cylindrical Handling Tool	92
5.6	Tri-digital Grip with Pen and Finger's Posture Transition	93
5.7	Four Experimental Conditions of Writing Task with Pen	96
5.8	Experimental Results of Writing Task with Pen on Condition A	97
5.9	Experimental Results of Writing Task with Pen on Condition B	98
5.10	Experimental Results of Writing Task with Pen on Condition C	99
5.11	Experimental Results of Writing Task with Pen on Condition D	100
5.12	Sequential Photos of Writing Task with Pen on Condition A	101
5.13	Rolling Motion Centered on Elbow Joint	102
5.14	Exerted Force and Trajectory of Working Point with Force Adjustment	104

表 目 次

2.1	Classification of Examples of Active BE Contact by its Fundamental Effect	29
2.2	Relationship between Uncertainty and Passive Compliance	34

第1章 序論

1.1 はじめに

少子高齢化という社会問題が顕在化しつつある現在，高齢者の生活支援の拡充が必要とされている．高齢者にとって炊事・洗濯・掃除といった生活作業は，筋力や体力などの身体機能の低下から全て自らの力でこなすことは難しい．そこで生活作業の一部を代替もしくは協力して行うことができる人間共存型ヒューマノイドロボットの開発が期待されている．生活作業には対象物の把持や操作といった手作業が多く含まれており，手の巧みさの実現は人間共存ロボットの重要課題の一つである．

しかしながらこれまでの人間共存ロボット研究を概観すると，手作業をいかに実現するかといった議論は圧倒的に不足している．一つの視点は，接触前の対象物の位置認識や作業・軌道計画に関する研究であり，基礎となる対象物の把持と運搬に加え急須注ぎやモップの操作などが実現されている．しかしながらこの研究分野では，手指による対象物との接触を積極的に取り扱ってはいないため，手部による把持と腕部の運動によってのみ構成される簡単な作業だけが対象であり，極めて限定的である．もう一つの視点は，対象物と接触する手指の運動に着目した研究である．手作業における指の利用は，対象作業を広げ高度な巧みさを発揮するという期待があるが，日常生活に含まれる実作業をとりあげたチャレンジはほとんど見当たらない．この背景には，指を使った巧みな手作業を実現するために必須である，豊富な触知覚機能を持ち精密な動作を実現する多指ハンドの開発が非常に難しく，十分なハードウェアを持つ研究機関が極めて少ないという状況が理由として挙げられる．

加えて，日常生活環境において作業するためには，環境内及びロボット身体に潜在する不確定性への対応能力が求められる．日常生活環境は工場などの整備された環境とは異なり，照明条件の変化による対象物位置の認識誤差や，形状及び摩擦や柔らか

さといった対象物特性の変化など，モデルと実物に差異が生じる可能性が十分に考えられる．また多指ハンドと冗長マニピュレータの組み合わせである人間形ハンド-アームシステムは，多彩な作業を実現しうる汎用性という利点がある半面，複雑な構造に伴いモデル化誤差が生じやすい．例を挙げれば，ロボット自身の体格寸法や重心位置のモデル化誤差を完全に取り除くことは難しく，関節の運動に伴うケーブルの摺動摩擦によるトルク損失など，モデル化すること自体が難しい機械要素も内部に多く含まれる．

これらの不確定性に左右されない手作業の巧みさを実現するために，本論文ではパッシブコンプライアンスと付加的拘束条件の活用というアプローチをとる．パッシブコンプライアンスとは，ロボット身体に機械的な弾性・粘性の柔軟要素を搭載することを指す．パッシブコンプライアンスは対象との接触の際に受動的にたわみを生成し，モデル化誤差を吸収し柔らかくなじむことが可能である．さらに人間形ハンド-アームシステムは高度な冗長性ゆえに，身体を上手く利用し高度な巧みさを発揮することができる可能性がある．例としてコップをテーブルに置く際の飲食店のサービススタッフの所作を挙げる．彼らは Fig.1.1 に示すようにグラスを3指で掴み，テーブルに接地する直前に小指及び薬指の側面でテーブルに触れ，優しくコップを置く．このような把持形態の選択や能動的な身体-環境接触の利用を含む作業方法は動作に対する付加的な拘束条件であり，ロボットで再現しようとしても従来の制御則では与えられない．本研究では付加的拘束条件を，作業から直接的に要求されない，つまりそれを与えなくても作業を実行することはできるが，与えると巧みさを向上させることができる拘束条

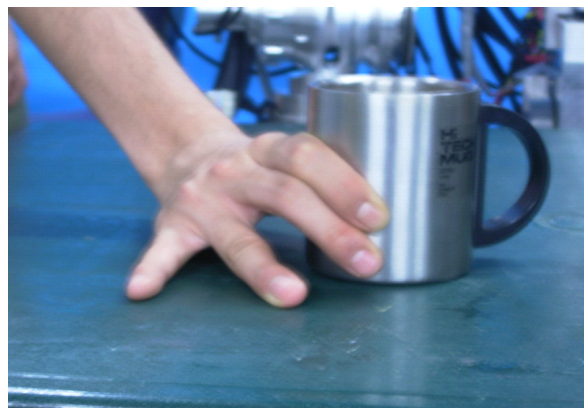


Fig.1.1 Glass Placing Motion of Skilled Server

件であると定義する。プロのサービスマンは特殊な把持方法で対象を掴むことにより能動的に身体と環境を接触させているが、一般の人のようにただグラスを掴みテーブルと接触させるだけで作業自体は遂行することもできる。運動に付加的拘束条件を与えた特殊な方法で作業を行うことにより、巧みさを向上させている。多指ハンド+冗長アームという人間形のロボット手腕を有するヒューマノイドロボットは、人間のよう高度な冗長性を有しているため、同様に付加的拘束条件を与える余地がある。本論文ではこの付加的拘束条件を、パッシブコンプライアンスの特徴を考慮した上で適切に設定することにより、ロボットの巧みさを飛躍的に向上することができると考えた。指を用いた手作業の巧みさ向上のための、パッシブコンプライアンス及び付加的拘束条件を考慮した制御系を構築することが本論文の目的である。

本章では初めに、本研究の背景となる社会状況を踏まえ人間共存ロボットに対するニーズを明確にする。また人間共存ロボットは比較的新しい研究分野であると言え、世界中でさまざまなアプローチが模索されている。そこで次に人間共存ロボット研究の現状を整理し、本研究の立ち位置を明確にする。加えて人間共存ロボットは、メカ・センサ・制御・プランニングといった要素技術の総合的なアプリケーションであると言える。人間共存ロボットによる巧みさを実現するために関連するこれら要素技術を整理し、本研究のアプローチと目的を明確にする。

1.2 社会背景と人間共存ロボットへの期待

行政の調査を基に社会状況を整理する。内閣府より発行されている、平成21年度高齢社会白書（高齢化の状況及び高齢社会対策の実施状況）[1]によると、我が国は現在、総人口に占める65歳以上人口の割合（高齢化率）が22.7%であり、5人に1人が高齢者という社会になっている。また今後、総人口が減少するなかでさらに高齢化率は上昇すると予想されており、2055年には高齢化率は40.5%に達し、2.5人に1人が65歳以上となる見込みである（Fig.1.2）。このような社会構造の変化は、当然ながら人々の生活・就業スタイルにも影響を及ぼし、家族の介護や看護を理由とした離職・転職者数はすでに増加傾向にある。来るべき超高齢社会に対して、社会的な準備が必要とされている。

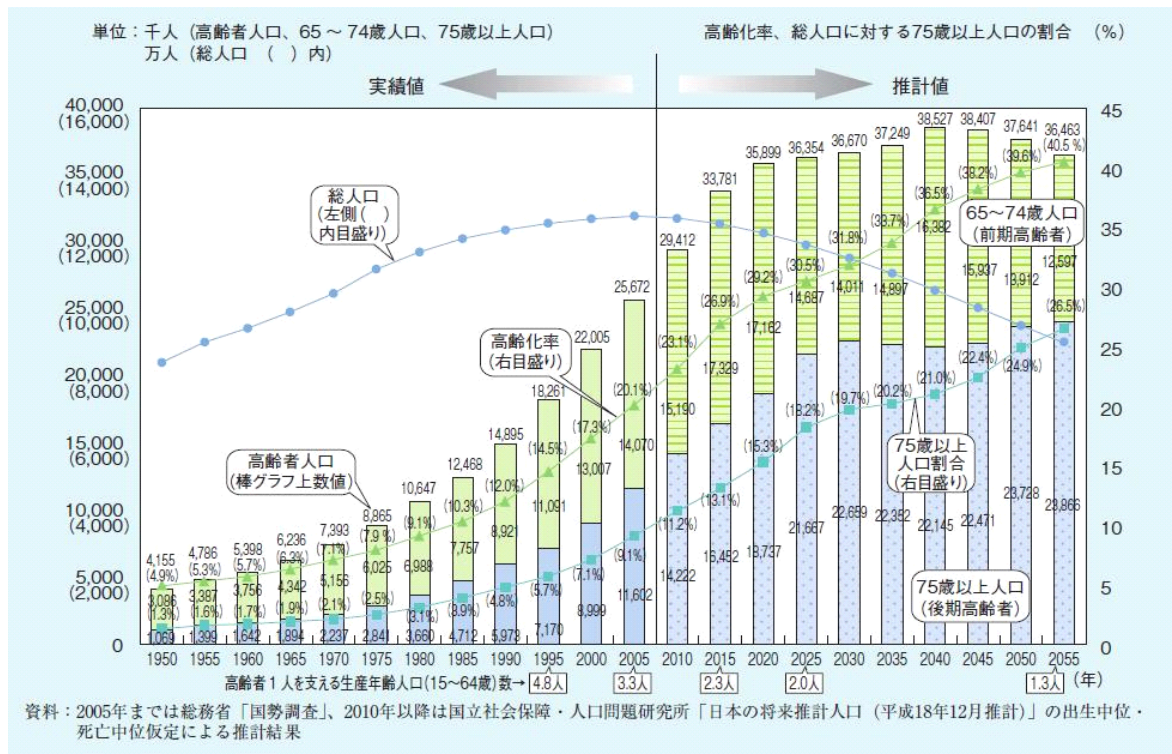


Fig.1.2 Forecast of Population Composition in Japan

社会構造の変化に伴い懸念される問題は、生産力の低下と介護・福祉サービスの不足である。下記は、文部科学省が発表した第7回技術予測調査²⁾の記載を一部抜粋している。

「日常生活は、衣食住、家事、休養、外出、交際などさまざま要素で構成されている。これらを一体のものと捉え、高齢者個々人の残存機能や生活史を踏まえつつ、どのような状態にあってもできる限り普通の生活に近い生活を送れることが重要である。老化とは全般的に身体機能が低下した状態、障害はある機能が低下したあるいは失われた状態であり、機器操作の難易度やバランス感覚、また機器使用時の恐怖感の有無などに相違が見られる。個々の機能低下状態に合わせて調節可能な使いやすい福祉機器の開発、住居設備の整備、日常生活圏のバリアフリー化、支援サービス等により、自立して暮らせる環境を整え、生活の質を高めることが重要である。」

「労働は生きがいに通じる。働く意欲に満ちた経験豊富な高齢者は貴重な労働力源であり、高齢者自身にとっても、自分の能力や経験を生かすことは人生の充実につなが

る。さまざまな技術的支援により、障害者の労働機会が大きく広がることも期待される。また、技術の支援による家事労働の省力化は、効率的な時間配分を可能にし、生活の質を高めることになろう。また、女性の社会参加を支援する手段の一つともなり得る。」

高齢者の身体機能が老化に伴い低下しても、普通の生活を自立して送れるように手助けする技術が求められている。人口、とりわけ労働人口の減少は社会全体の生産力を低下させることに繋がる。普通の生活を送るだけでなく、さらに高齢者の労働機会の増大を促しうる技術により、高齢者の生活が充実しかつ社会の生産力低下を防ぐことを期待されている。

具体的な例を挙げると、同調査では「生活者ニーズへの対応」効果の高い技術課題として、

1位：「高齢者や身障者が介助者なしに、食事、入浴、排泄、娯楽などを自ら行うことを支援するロボットや装置のある住宅が日本で普及する」

6位：「被介護者に不快感・不安感を与えず、入浴等について介護者を支援する介護ロボットが普及する」

12位：「庭の手入れ、病人介護、家事、育児など様々な目的に応じたロボットをリースするサービスが普及する」

といったロボットに関係する技術が上位にきている。このような人間の生活環境において日常生活を支援することができるロボットに対する期待が、非常に高いことが分かる。

本論文で対象とする「人間共存ロボット」はまさにこれに相当し、人間の生活環境において日常生活を支援するために「安全性」「親和性」を備えつつ、実際的な「物理的作業」ができるロボットと定義する。Fig.1.3では、福祉施設で実際に行われている支援の例と、一般家庭において生活する場合に必要な生活作業の例を挙げている。福祉施設では介助者が高齢者に対して、起き上がり・立ち上がり・歩行（移動）・飲食・衣服の着脱・身支度・入浴・排泄・睡眠などの生活行動を支援する。福祉施設においてロボットに期待される役割は、介助者の作業を手伝うもしくは被介助者に使ってもらい介助者の代わりに支援を提供することである。一般家庭においては、炊事・洗濯・掃

除などのいわゆる家事作業が必要となるが，高齢者1人で全ての作業を行うのは大変なため，ロボットと協力して家事を行う．これら生活支援の具体例が実際の「物理的作業」である．Fig.1.3で挙げた物理的作業の中でも福祉施設で行われる清拭作業や食事支援，また一般家庭における生活作業の全てにおいては手を使った対象物の把持と操作が含まれている．このように人間共存ロボット研究においては，この手作業を実現するための取り組みが重要であることが容易にわかり，本研究ではまさにこの人間共存ロボットによる手作業の巧みさという課題に挑戦する．本研究における「手作業」とは，把持した対象物と環境などの他物体の間の接触を制御する作業であり，「巧みさ」とはこの接触状態を精度よく制御する能力と定義する．

1.3 人間共存ロボット研究と巧みさへの試み

本節では関連する従来研究を整理し，本研究の位置付け及びこれまでの研究と本研究のアプローチの相違点を明らかにする．始めに世界で行われている人間共存ロボット研究を紹介し，先に述べた人間共存ロボットの要件である安全性・親和性・作業性の三つについて個別に従来研究を整理する．次に，本研究の課題である巧みな物体操作能力を実現するための技術に関して，要素ごとにこれまでに行われた研究を整理する．

1.3.1 人間共存ロボットへの取り組み

本研究の課題である巧みな手作業を行うためには，人間形の手腕を備えたヒューマノイドロボットであることが望ましい．しかしながらこれまでのヒューマノイド研究においては，2足歩行に代表される全身運動を扱った研究が非常に多い．高西らによるWABIANシリーズ[3]や，企業ではトヨタ自動車のパートナーロボット[4][5]やHONDAのASIMO[6][7]，KAWADA工業と産業総合技術研究所によるHRPシリーズなど[8][9][10][11]が等身大の2足歩行型ヒューマノイドとして有名である．また人間に似せた形態を利用し，2足歩行だけでなく踊りなどの研究も行われている[12]．このような機能はエンターテインメントの面で効果が高く，介護施設でパフォーマンスを見せるといった貢献も期待できる[13][14](Fig.1.4)．

[福祉施設]



[一人暮らし]



Fig.1.3 Essential Activities for Daily Life in Home and Welfare Facilities



Fig.1.4 Proto-types of Human Symbiotic Robot

元来2足歩行型は、住環境に存在する階段などの床面の段差に対応できるという点で有用性が高いとされてきている。しかしながら車いすでの侵入を容易にするバリアフリー化が進んでいる現状では、車輪型のヒューマノイドロボットでも、ある程度の広い範囲で活躍できると考えられる。人間と共存する生活環境においては、人間と接触しつつ行う介助などの協調作業、机や扉・家具などの環境との接触及び操作があるため、上半身に大きな負荷を掛けても転倒しない安定性が重要な課題となる。一般的に2足歩行型は車輪型に比べ安定領域が狭く転倒しやすいため、実際に2足歩行型ヒューマノイドロボットにより物理的な作業を行う研究例は非常に少ない。

ロボットの転倒防止は、ロボット自身が壊れることを防ぐという目的もあるが、周囲の人間に対する安全性の意味で大変重要である。人間共存型ロボット研究専門委員会においても、「人と同時に多様な環境に存在し、人との物理的、情動的、情緒的などのインタラクションを重視したロボットシステム」を「人間共存型ロボットシステム」と呼ぶ」とし、対人安全性とコミュニケーション能力の重要性を挙げている[15]。

人間と空間を共有する人間共存ロボットにおいては、衝突を完全に避けることは不可能であると言わざるをえない。安全性に関する検討は、衝突安全（衝突しても安全）を確保するための研究と、予防安全（衝突しない）のための衝突回避に関する研究、さらに安全基準（リスクアセスメント）の共通化を図る動きに大別できる。衝突安全に関しては、ロボット体表面の柔軟素材や機構の柔らかさに関する研究や[16][17]、衝突検出及び衝突時の動作制御に関する研究が多くなされている[18][19]。衝突回避に関しては、岡田ら[20]による研究や、坪内らによる研究など非接触センサを用いた障害物検知と回避軌道生成が数多くなされている[21]。安全基準に関しては、2005年に開催された愛知万博を契機に、実際にリスクアセスメントを実施する試みが増え[22][23]、2007年には経済産業省により次世代安全性確保ガイドラインが発表されている[24]。

コミュニケーション能力は、指示を伝えるユーザインタフェースという意味でも、生活パートナーとしての親和性という意味でも、人間共存ロボットにとって非常に重要な機能である。要素技術である音声認識や顔認識、発話や語彙選択の技術は個別に研究がなされ、またヒューマノイドによるジェスチャーも含めた会話もさまざまな形で検討が進んでいる。NECのPaPeRo[26]は、画像認識により障害物回避や人物検出を行い、約650語の音声認識と約3,000種類の発話音声機能により、ある程度決められたシナリオに沿って会話を行うことができる。三菱重工のwakamaru[25]は、コミュニケーションに加えインターネットを介した情報提供ツールとしてのサービスを狙っている。小林ら[27]は、ゲームやディスカッションといった多人数相手の集団コミュニケーションに参加することを目的とし、音声認識技術やコミュニケーションシステムに関して議論している。身体表現を伴うコミュニケーションによって、その豊かさを向上させようという研究もある。石黒らによるRobovie[29]は、視線を合わせる、物を指差し注視するといった行動を行い、渡辺らのInterRobotは[28]うなずきで会話がはずむという考えをロボットで実践している。高西らによるKOBIAN[14]やHRP-4cは2足歩行型であることから、全身動作によるジェスチャーを可能にするため、さらに身振り・手振りなどに全身運動も加えたコミュニケーションが期待できる[13]。

ヒューマノイドにより物理的な作業にチャレンジした例を挙げよう。Dillmanらは

ARMAR を用い、運搬作業の基本である対象物へのリーチングと把持を実現している [30]。岡田らも HRP 3 を用いほぼ同様の作業を行っているが [31]、これらの研究はリーチング動作におけるビジョンによる対象物認識と手先軌道計画に主眼が置かれている。人間に直接的に触れる作業として、介助作業に着目した研究例もある。RI-MAN、RI-BA は干渉機構による高出力性を有したロボットであり、被介助者の抱えあげにチャレンジしている [32]。その他にも生活支援とは異なるが、小菅らによる DANCE-Partner [33] は、人間と触れ合いながらダンスという協調作業にチャレンジしている。また、HRP プロジェクトでは人間との協調による長尺物搬送作業が報告されている。

このように、把持やその後の操りといった本当の意味での手作業の巧みさにチャレンジした人間共存ロボット研究はほとんど存在しない。この原因は、巧みな手作業を行うのに必須である高性能な人間形の手を再現する困難さにある。しかしながら我々の研究グループではすでにこの問題にチャレンジし、人間共存ロボット”TWENDY-ONE”を開発している [34]。詳細は後述するが、TWENDY-ONE は安全性・親和性に関しても工夫を施しつつ、豊富な触知覚機能を有しかつ正確な動きを実現可能な手を備えている。そのため現時点で、手作業の巧みさにチャレンジできる世界でも数少ない研究グループの一つであると言える。

1.3.2 巧みさのための基礎技術

巧みに手作業をこなすうえで必ず問題になるのが、対象物との接触をいかに実現するかという問題である。本項では、これまでのロボットによる接触に関する基礎技術を大きく二つに分けて概観する。一つはロボットアームによる接触制御である。ここでは、ロボットアーム全体においていかに運動もしくは力を生み出し、接触を制御するかといった問題を取り扱った研究を取り上げる。これらの研究では、接触を形成する身体部位の構造やデザインといったミクロな問題に関しては詳しく触れていない。もう一つは多指ハンドに関する技術である。巧みな手作業を実現するためには、実際に接触を形成する身体部位であるハンド部のデザインと制御が重要である。ハンドデザインに関しては、大きく分けてグリップ型と多指ハンド型があるが、本論文では手作業の高度な巧みさを目指していることから、多彩な手作業の実現が期待できる多指ハ

ンドに限定して基礎技術を取り上げる。

i ロボットアームによる接触制御

ロボットアームによる外部との接触をコントロールしようという試みは、大きく分けてアクティブな手法とパッシブな手法の二つが行われてきている。

アクティブな手法とは制御により、ロボットアームに柔らかさを与える手法全般を指す。制御的に柔らかさを与えるためには、対象物と接触した際の接触力をコントロールするために、接触力をセンサにより観測しフィードバックすることが必要になる。センサは直接接触力を計測する力センサや、関節ごとに搭載されたトルクセンサ、あるいは電流センサなどが用いられる。

古くは Whitney により提案されたスティフネス制御^[35]やダンピング制御^[36]、これらを複合拡張させたインピーダンス制御、平林らによる仮想コンプライアンス制御^[37]などが存在する。これらの手法はどれも制御アルゴリズムが非常に単純であり、また位置もしくは速度制御系をベースに構成できるため扱いやすい反面、発揮できる柔らかさがセンサ特性や位置・速度制御特性に縛られるという欠点もある。一方で Salisbury らによるアクティブスティフネス制御^[38]、Hogan のインピーダンス制御^[39]などはトルク制御系をベースにした手法であり、アームにバックドライバビリティの良いアクチュエータを搭載すれば固い環境との接触においても柔らかさを発揮しやすいという利点がある反面、動力学補償などの複雑な計算が必要になるため扱いづらいという欠点がある。また Raibert らは、力作業と位置決め作業を同時に行うためのハイブリッド制御を提案している^[40]。以上、紹介した制御手法は 1970～80年代に開発され、以降さまざまな研究でその有効性とロバスト性が詳細に議論されている。現在では産業用ロボットでも利用されており、ロボットアームによる力制御の基礎であると言ってよい。

以降さまざまな場面に拡張されている。T. Tsuji ら^[41]の研究や J. Park ら^[42]の研究においては多点接触を形成する際に各接触点において望みのインピーダンスを与える手法について論じており、また小菅ら^[43]や岩田ら^[44]によって人とロボットの協調動作、小菅らによる複数台のロボットによる協調動作^[45]や双腕による協調動作

[46]などが代表例と言えよう。

これらアクティブな力制御の利点は、複雑になりがちな機構的な工夫が必要なくまた作業に合わせて任意の柔らかさを設計できる点であり、欠点は、サーボの応答性またはアクチュエータのバックドライバビリティの制約から理想的な柔らかさを実現することが難しい、という点にある。

一方で、パッシブな手法とは、機構的にマニピュレータに柔らかさを与える手法全般を指す。Kovitsらはケーブルによる拮抗駆動式関節内に非線形ばねを組み込み、張力制御により関節の柔軟性を調整するPPI (Programmable Passive Impedance) [47]を提案している。同様にケーブルを利用しばねを組み込む関節機構は多く提案され、Townsend [48]によるものや兵頭らによるもの [49]などがある。他にも、ケーブルを介さずより直接的にばねを組み込んだ機構としてSEA (Series Elastic Actuator) [50]やMIA (Mechanical Impedance Adjuster) [51], SJM (Safe Joint Mechanism) [52]などさまざまな方法が提案されている。これらの機構は対象との接触の際にはばねが受動的にたわみを生成し柔らかくなじむことが可能であるため、パッシブコンプライアンスまたは受動柔軟性と呼ばれる。

パッシブな手法の利点は、アクティブな手法とは異なり制約のない理想的な柔らかさの実現が可能である点であり、一方で受動柔軟性の搭載は機構的な工夫を含むことから、ロボットアームの体格・重量の増大が避け難いという点が欠点として挙げられる。

本研究で目標とする人間共存型ヒューマノイドロボットにおいては、さまざまな場面において人間もしくは環境と接触が起きうるため、パッシブコンプライアンスの利点である理想的な柔らかさは多大なメリットをもたらさう。しかしながら、多自由度を有した上で人間並みの大きさに収めなければならない人間共存型ヒューマノイドロボットにおいては、欠点である体格・重量の増大が大きな課題となる。そのためこれまでのパッシブコンプライアンス研究は、単関節レベルの開発に終始しがちであり、等身大のヒューマノイドに搭載された例は極めて少ない [53]。なおケーブル駆動型の機構は、複雑なメカニズムを比較的自由にレイアウトできるという点でデザイン面で有利だが、ケーブルの運動に伴う摩擦などのモデル化しづらい非線形要素の影響が大きいという問題が存在する。ケーブルを使用しない機構においてはこの特徴が逆転する。

この問題を解決するために、我々の研究グループでは空間的に隙間のない受動柔軟機構を開発[54]している。この機構はワイヤを使わずにねじりばねを直接的に組み込んでいることから、高度な線形性を発揮可能なうえに、非常に小型である。本研究で使用する人間共存ロボットのプロトタイプ”TWENDY-ONE”はこの機構を搭載した上で、人間並みの体格を実現している。この機構の仕様は特に3章4節2項で紹介している。

以上、ロボットアームによる接触制御について制御的なアクティブなアプローチと、機構的なパッシブなアプローチを紹介した。本論文では、このパッシブなアプローチによる受動的な柔らかさを活用することを前提に、手作業において高精度に位置と接触力とを制御する巧みさを実現することを目的とする。

ii 多指ハンド研究

巧みな作業を実現するためには、ハンドの設計と制御も大いに関連する研究分野である。ハンドのハードウェア的なデザインに関して大きく多指ハンドとグリッパに分離できるが、本論文では多彩な作業支援を目指すという観点から多指ハンドに限定して従来研究を整理する。

初めに機構学的なアプローチ、つまりハードウェアデザインの視点で、これまでのハンド研究を整理する。人間形多指ハンド用いて巧みな把持や操りを実現した先駆的研究として、OkadaらによるETLハンドの開発が挙げられる[55]。Okadaらは人間の指をモデル化し限定された14種の基本形に分け、さらに、作業時に見られる指の動作を10種の基本動作に分類した。そして人間の指を分析し、2指-1指対向の3指11自由度(母指3, 他指4, , ワイヤ駆動)を設定し、分類した基本動作を実現可能なハンドハードウェアを構築した。実作業としては、ボルトの締結作業を始めとする動作を各指の位置制御によって実現させた。この研究は把持・操り制御においても特筆すべき点として、多指の協調性に着目したことが挙げられる。それは位置制御とトルク制御を組み合わせることにより、大きさ、形状に多少の違いのある物体に対しても対応可能な汎用性の高い制御アルゴリズムとなっていた。この後、SalisburyによるStanford-JPL Hand(2指-1指対向3指9自由度(各指3), ワイヤ駆動)[56], JacobsenらのUtah/MIT Hand

(人間形4指16自由度(各指4),ワイヤ駆動)[57]などが相次いで開発された。この頃までに開発されたハンドは共通してワイヤ駆動方式が採用され,その問題点としてワイヤの摩擦への対処法とともに,大きなアクチュエータ部の配置方法をどう工夫するかが課題となっていた。

これらワイヤ駆動方式に対し小型アクチュエータの実用化が進んだ結果,1990年代末頃からは関節自体をアクチュエータとする関節直動方式を備えたハンドが数多く開発されるようになった。KawasakiらによるGifu-Hand(人間形5指16自由度20関節(母指4,他指3),ギヤ駆動)[58]や,HilzingerらによるDLR-Hand II(人間形4指13自由度18関節(母指3,他指3,手掌1),ギヤ+ベルト駆動)[59][60]は,手指および手掌に関節モータを内蔵し,手掌の環指根元に1自由度配置されており,環指と母指の対向を容易にしている。

ロボットハンド設計においては,駆動方式や自由度配置とともに,触覚・力覚センサや表面素材のデザインも重要な要素である。Gifu-Handには手指手掌に分布型圧力センサが搭載され,高度な触覚機能の特徴とするハンドとなっている。DLR-Hand IIは,指先には6軸力覚センサを備えるロボットハンドである。またNASAによるRobonaut-Hand(人間形5指12自由度19関節,フレックスシャフト駆動)[61]は,手指手掌全面を柔軟な被覆で覆い,手掌性把握を強く意識したハンドとなっている。

我々の研究グループではこれに対して,独自の多指ハンド(人間形4指13自由度16関節,ギヤ駆動)を開発している[34]。詳細は3章で紹介することとするが,このハンドの大きな特徴は前節で述べたパッシブなアプローチを組み込んでいることであり,一部の関節にコイルばねを,指・手掌の全表面に柔軟素材を添付している。アームと同様にこの受動柔軟性を活用し,日常生活環境の様々な対象物を把持・操りすることを目指す。

次に制御工学的なアプローチについて紹介する。中村らは,多指を複数のロボット機構としてとらえ,協調動作によって物体を把持し操る際の問題についての基礎理論を展開した[62]。多指が物体に対して発生させる合力の問題に加え,力の冗長性を表した「内力」について初めて明確な力学的説明をした。またMaekawaらは触覚情報を用いることで,物体を把持して操る際の指先と物体との間の転がり接触を考慮した指先

軌道計画法を提案した[63]。指先に搭載した触覚センサによって検出される接触位置をフィードバックすることにより物体を目標軌道に沿って操ることを実現させている。

これまで述べたような指先の1点でのみ対象物と接触する把持・操りの研究が多く行われてきた中、確実な拘束による把持を目的とし、各指において指先だけでなく各指を構成するリンクでも物体に拘束を与える包み込み把握 (Enveloping Grasp) や握力把握 (Power Grasp) の研究もなされている。前者はあくまでも「把持の形態」を指し、代表的な例としては金子らによる包み込み把握の力学的な解析[64] [65]が挙げられる。これは人間の把握動作から対象物の大きさに応じて把握戦略を変えるべきであるという点に着目し、スケール依存型把握を提案している。握力把握はその包み込み把握の中でも、関節トルクを変化させることなく外乱に抗する力・モーメントを発揮できる力学的な状態を指すものであり、中村らによる限界外力の観点からのロボスタ性の評価法に関する研究[66]や、把持力の不静定性に着目した小俣らの研究[67]などがなされている。

これら制御工学的なアプローチは、把持・操りの力学的・幾何学的解析をベースとし、理論的に安定把持の条件や操りの際の制御手法のあり方を示している。そのため、対象物とハンド自身のモデル化が正確であるという考え方がベースとなっており、人間共存ロボットが活躍すべき日常生活環境に潜むモデル化誤差をいかに取り扱うかといった、実際的な課題に対しての検討は非常に少ないと言える。

1.3.3 巧みさのための応用技術

前項では手作業を行う際に必須となるアーム・ハンドそれぞれに関して、ハードウェアデザイン・制御アルゴリズムの両面から巧みさのための基礎技術を紹介した。特に制御アルゴリズムの理論面に関しては、1980年代から盛んに議論され成熟してきている研究分野であると言えよう。現在は実際に巧みな手作業を行うために、これらの制御アルゴリズムをいかに適用するべきかという実際的な議論が必要な段階であると考えられる。

付加的拘束条件はこの課題に対する一つの切り口であるが、一口に付加的な拘束条件と言っても、前述した把持の方法や能動的な身体 環境接触に加え、自由度の選択

的利用や手腕を含む多関節協調に関する拘束条件などさまざま考えられる。日常生活における手作業は非常に多彩であり、またその一つ一つが複雑な運動を伴う。ヒューマノイドロボットのハードウェアデザインに関しては現在でも世界中で検討が進められており、標準を定めることは難しい。どのようなロボットが、どんな作業にチャレンジする際に、こういった付加的拘束条件を与えると作業パフォーマンスを向上させることができるのか、といった議論を統一的に行う必要がある。

そこで本項ではタスクオリエンテッドアプローチ、付加的拘束条件、身体性の活用という三つのキーワードで巧みさのための応用研究を整理する。タスクオリエンテッドアプローチとは、個々の作業に対する詳細な分析をベースに必要な技術を構築する方法論であり、これまでに様々な形で適用されてきている。このアプローチを採用することで対象作業の明確化を図る。また身体性の活用は、ヒューマノイドの特徴の一つであるハンド アームという組み合わせと、本研究でも採用するパッシブコンプライアンスを生かすという視点から、対象ロボットの明確化を図る。

以上の三つの視点に関連する従来研究を整理することが、本項の目的である。

i タスクオリエンテッドアプローチ

タスクオリエンテッドアプローチをとっている研究を、大きく二つに分けて考える。一つは、組立作業に代表される必要な動作の数・種類が非常に多い複雑な作業をいかに簡単に捉えるかというマクロな視点からの研究と、もう一つは、作業を構成するある動作がどんな性質を持っているかというミクロな視点からの研究である。

古くから行われているマクロな視点の研究といえば、組み立て作業をロボットにより代替するための組み立て工程の抽象化と上位プランニングについての研究である。末広らによる研究 [68] では、複雑な作業工程を基本動作（スキル）の集合として捉えることによって、動作一つ一つを意識することなく上位プランニング可能であることを示している。高松ら [69] はこれを発展させ、抽象表現から把持物体の最適軌道を生成する方法について述べている。

より日常生活作業に近い例としては、横小路ら [70] は手の器用さを理解するためのボトムアップ的なアプローチの1例として、折り紙を取り上げている。人の折り紙作業

の解析を行い，必要な折り操作を整理するとともに難易度に基づく折り紙作品のロードマップを作成している．また「オタマジャクシ」という作品を作るために，折り操作の分析に基づいて指の本数や自由度といった必要なハードウェア構成を導出・開発し，実際に作品を作り上げている．

一方でミクロな視点の研究では，手作業に関連するものとして，藤岡ら[71]はクランクまわしを実現するために，現実的な不確定要因を考慮した作業戦略及びそれを実行するための運動・力・インピーダンス制御系設計法を提案している．さらに，クランクをまわす目標速度と設定回転軸位置の推定誤差，及びまわすことができるか否かの関係を明確にしている．他にも白井らは[72]自動販売機のようなコイン返却口から人がコインを取り出す動作を分析し，把握パターンを整理している．また，高浜ら[73]は双腕マニピュレータによって机上の本を把持し本棚に返却することを目標に，作業を分析した上で各動作に必要な動作計画法を提案している．

全身運動及び介助作業を目指した研究としては，Ogataら[74]は介助支援の実現を目指してモーションキャプチャによりおんぶ動作の解析を行い，臀部を使って相手を跳ね上げる，背負い直す際に体幹を前屈させるという運動における二つのポイントが背負い直し動作の高効率化に寄与しているという結論を得ている．小菅ら[43]は協調システムに適用する制御則を変えた際の作業特性の検証実験を行い，その結果として微細な協調作業ではダンピング制御が，安定した協調作業ではインピーダンス制御が適していると報告している．

さらに吉川ら[75]は，器用な操作かつ“どこを抜いて，どこに置くか？”という知的な戦略が必要とされるジェンガゲームを取り上げ，ミクロ・マクロ両面からの検討を進めている．

これらの研究例が示すように具体的な作業を取り上げるタスクオリエンテッドなアプローチは，作業を理解することによって，ハードウェア・制御則・付加的な拘束条件に関する指針を与えることに成功している．

ii 付加的拘束条件

付加的拘束条件の付与について論じるためには、ロボットが冗長性を有していることが前提となる。これまでに数多くの冗長自由度マニピュレータに関する研究が行われている。Yoshikawa ら[76]や中村ら[78]による研究においては、冗長性を利用することで特異姿勢が回避できることが示されている。同様にリーチング軌道上に障害物がある際の回避軌道計画[77]や、人との接触時の衝撃緩和を狙った動作計画法[79]などの研究も存在し、冗長自由度の有用性が示されている。他にも何らかの評価指標をもとに運動を規定し作業パフォーマンスの向上を目指した研究では、リーチング後の可操作度を最大化する最適制御[82]や、P2P 制御する際に軌道の平均 2 乗加速度が最小となるための制御規範[80]、線倣い作業において目標軌道の幾何学的情報とマニピュレータの運動学的情報から算出する複合的な評価手法[81]などが挙げられる。

他にも前述した金子ら[64]によるスケール依存型把握や、白井ら[72]によるコインの取り出しの際の把握パターンなどは、決して他の形態では把持できないと言いきることは難しく、作業に対する簡便な戦略を与えるものであると考えられる。また清水らによる平面組み付け作業に関する研究は[88]、部品の位置決め誤差に対処するために、部品がある回転中心まわりに自由に回転できるような構造的なコンプライアンス特性を考え、適切に回転中心の位置を与つつ作業を行う方法を提案している。これは、タスクオリエンテッドアプローチを取り作業を理解したうえで適切な付加的拘束条件を与え、作業を容易にする好例だといえよう。また琴坂らは関節縮退を積極的に活用しアクチュエータを選択的に利用する作業方法を提案し、押し動作において消費エネルギーを低減可能であることを示した[89]。

本研究で着目する能動的な身体 環境接触は接触を形成する部位について特に限定はしていないが、マニピュレータの中間リンクを環境と接触させるブレーシングと呼ばれる手法については研究がある。West ら[83]はブレーシングを行った際の静力学的な解析を行い、剛性の向上効果について詳しく述べている。Lew らはブレーシングを行う際のハイブリッド制御手法について提案し[84]、上松らはトルク最適化を実現する制御手法を提案している[85]。山本らはブレーシングした状態における運動方程式を示し、シミュレーションを構築している[87]。能動的に環境に接触するという意味

では, Escande ら[86]は机に逆の手をついてリーチング範囲の拡大する支持点計画法を提案している. これらの研究に共通する点として, 残る二つの重要な視点, つまりどういった身体性を有したハードウェアで, どのような作業を行う際に, これが有効なのかといった実際的な視点での指摘が不足している.

iii 身体性の利用

身体性の利用として挙げるのは二つ, ハンド アーム協調と受動柔軟性の活用である.

ハンド-アーム協調は冗長マクロ・マイクロ・マニピュレータの制御問題として研究が行われてきており, 先端部の慣性が小さくなる[90], 位置制御や力制御の帯域が広がる[91]といった利点が報告されている. 菅野らは, 鍵盤楽器の演奏のような連続位置決め作業において, 指と腕を人間のように協調させる運動計画法を提案している[92]. 永井らは, 多指ハンドのアームと比べて高い動作周波数帯域で運動を実現できるという長所と, アームの広い動作範囲をもつという長所の二つを生かすことを考慮した把持・操りのためのインピーダンス制御を提案している. Quan ら[94]は, 軽量で細かい軌道に敏感なフィンガ部を目標位置追従の主演とさせ, フィンガの可操作度がある閾値を下回ると, その操作性を有効的に補償するためにアームを移動させる動作計画法を提案している. このようにハンド アームを協調させるための理論的・制御的な検討は進んできているものの, 実際的な作業例に応用した研究は非常に少ない.

受動柔軟性の活用を指向した研究例としては, Otto ら[95]は, 関節の受動性を組み込んだマニピュレータモデルによるインピーダンス制御手法を提案し, 岡田らはパッシブとアクティブの両方のコンプライアンスを考慮した上で, 周波数領域において望みのコンプライアンス特性を与える手法を提案している[96]. 佐々木ら[97]は受動関節を有するマニピュレータによりドアを開ける際の軌道計画を提案しているが, ドアのダンパによる戻り力を想定するなど, 実用を強く意識した研究となっている.

これらの研究は関節に受動柔軟要素を搭載することを想定した研究となっているが, ハンド研究の中には指先を柔軟素材にするソフトフィンガの研究がある. 田原ら[99]や井上ら[100]などの研究では, 物体とソフトフィンガの面接触を前提として, これらは理論面で受動柔軟性の効果を明らかにした上で, 物体の安定把持や姿勢制御を行う

ための制御手法を提案している。但し、実験に使用した実機は1もしくは2自由度を持つ2指対向型の極めてシンプルなものである。一方で岩田らは、表面の柔軟素材及び関節ばねの両方を搭載した人間形多指ハンドを開発し、受動柔軟性を有するハンドにおける操りの基礎戦略 [101] を提案している。これは実際に多彩な操り動作を実現している。

1.4 本研究の目的

従来研究の整理により明らかとなったように、人間共存ロボットにおいて重要課題の一つである手作業の巧みさにチャレンジした例は極めて少ない。また巧みさのための基礎的な制御技術はかなり成熟してきているものの、モデル化の正確性を前提としているため実際に手作業に適用するための検討が不十分である。実際的な適用の検討に関しては、タスクオリエンテッドアプローチ、付加的拘束条件、身体性の活用という三つのキーポイントはすでに取り上げられ個別に研究がおこなわれているものの、三つ全てを総合的に捉え手作業の巧みさに焦点を当てた研究は皆無である。

そこで本研究では、パッシブコンプライアンスという身体性の特徴と能動的身体-環境接触という付加的拘束条件の二つを考慮した、指を用いた巧みな手作業のための制御系を構築することを目的とする。本研究で使用する人間共存ロボット "TWENDY-ONE" は、関節にパッシブコンプライアンスを搭載し、豊富な触知覚センサを備えた多指ハンドを有しているため、指を積極的に用いた手作業にチャレンジすることのできる数少ない実験用プラットフォームの一つである。また能動的身体-環境接触は身体における作業部位以外の部位で付加的に行う環境との接触のことであり、前述したグラスの定置動作以外にも筆記動作時における前腕接触など手作業のさまざまな場面で用いられる付加的拘束条件の一つである。このように身体性の特徴と付加的拘束条件を明確にしたうえで、人の日常生活の観察から能動的身体-環境接触を利用する作業を抽出し分類と分析を加えることにより、対象となる作業を明確にし統一的な議論と制御技術の構築を試みる。

1.5 本論文の概要

本論文は全部で6章で構成される．以下に残りの5章の概要を示す．

2章では，対象作業の絞り込みと分析を行い，能動的な身体 環境接触を利用しつつ巧みに作業を行う際の技術的な課題を明らかにする．対象作業の抽出と分類では日常生活から実施例を抽出し，絞り込みのために，人間の生活作業において利用されている能動的な身体 環境接触の紹介から，どういった作業において巧みさへの寄与があるのかを議論する．また対象作業において潜在する不確定性とパッシブコンプライアンスの特性を関連付けて論じることにより，パッシブコンプライアンスを作業において適切に利用するための戦略を与える．対象作業の動作シーケンスを単純なモデルで表現し，各シーケンスにおいて適用すべき制御アルゴリズムを考察することにより，運動制御における技術的な課題を浮き彫りにする．

3章では，能動的な身体 環境接触を利用する際の基礎的な制御枠組みを与える．前章における検討から，対象作業を拘束付与作業及び除去作業に分類することとするが，能動的な身体 環境接触を形成しつつ作業を行うためには，どちらの作業においても二つの接触を同時にコントロールしなくてはならない．この問題をシンプルな方法で解決するために，能動的な身体 環境接触を利用しロボット身体の自由度を二つのグループに分割する枠組みを提案する．本章では拘束付与作業を対象に，作業に潜む不確定性から作業パフォーマンス向上のためのポイントを考察し，提案する枠組みを適用した場合のアルゴリズムの選定を行う．考案した制御枠組みを実機に搭載し拘束付与作業の具体例としてグラス定置作業を行い，その有効性を検証する．

4章では，3章で案出した制御枠組みを拘束除去作業に適用し，その有効性を検証する．3章と同様に，巧みさが向上するメカニズムについて不確定性とパッシブコンプライアンスとを関連付けて考察を行ったうえで，アルゴリズムの選定を行う．拘束除去作業の1例として引出し開け作業及びリンゴの皮むき作業を取り上げ，実機実験により有効性を検証する．

5章では，能動的な身体 環境接触を利用するための動作プランニング手法を案出する．前章までに明らかとなったパッシブコンプライアンスを作業において適切に利用

するための戦略から，パッシブコンプライアンスの利・欠点を鑑みた上で能動的な身体環境接触の形成部位，作業遂行関節を選定することを試みる．TWENDY-ONEで人間に近い把持によりペンを持ち，筆記作業をする場合の本手法の適用例を示す．実際に実機により筆記作業を行い，その有効性を検証する．

最後に6章では，本論文の結論と今後の展望を述べる．

第2章 対象作業の抽出・分析と技術課題の整理

2.1 はじめに

どのような作業において能動的身体-環境接触を利用すると巧みさが向上するのか、という対象作業の明確化と、その際の技術課題を明らかにすることが本章の狙いである。ここで言う「巧みさ」とは前章で定義したように、把持した対象物と環境などの他物体の間の接触を制御する手作業における、接触状態を精度よく制御する能力を指す。また能動的身体-環境接触は、身体による付加的な環境との接触を指し、それを与えなくても作業を実行することはできるという特徴を有している。この能動的身体-環境接触というスキルは、日常生活の中で人間によってさまざまな場面で用いられている。まずはじめに人間の日常生活の観察から、このスキルの実施例を抽出し、その効果によって分類することを試みる。

また本研究ではロボット身体の特徴として、機械的な弾性・粘性の柔軟要素を搭載するパッシブコンプライアンスに着目している。そこで次に、抽出した対象作業に潜む不確定性を分析したうえで、パッシブコンプライアンスの特徴を明らかにし、両者を関連付けてパッシブコンプライアンスの利用戦略を明らかにする。利用戦略を明らかにすることにより、5章で述べる動作計画法を構築する際の基本的な考え方を示す。最後に、実施例を定性的に分析し、実施例に共有することができる概念的な作業モデルを作り出す。この作業モデルに対し、スキルを適用した場合としない場合の比較、及び既存の制御アルゴリズムの適用により実現可能か否かといった詳細な分析を施すことで、運動制御における技術課題を明らかにする。

2.2 能動的身体 環境接触を利用する対象作業の抽出と分類

本節では，人間の日常生活における能動的身体 環境接触の具体的な実施例を挙げ考察を加え，効果を直観的に分類・整理することを試みる．我々人間は，生活の中のさまざまな場面で付加的に接触を形成し作業を遂行している．これらの実施例を整理するために，本節では部位ごとの抽出を試みる．その上で，どのような作業においてどの身体部位で接触を形成しどのような効果を得ているかといった，能動的身体 環境接触の対象作業とそのときの効果に対する考察を述べる．

2.2.1 胴部による接触形成

足裏のみで環境と接触した直立状態を基にして考えると，腰かけた状態は付加的に環境と接触していると考えてよい．そこで，何かに座るという行為は，腰や背中などの体幹部による能動的身体 環境接触の代表例であると言える（Fig.2.1）．この行為は，楽をする，つまりエネルギー消費を抑えることができる．座った状態では上半身の自重は座面により支えられ，下半身へ伝達することがない．そこで下半身が姿勢維持に用いるエネルギーを省くことができる．また手先で作業を行う場合などにも，直立状態に比べ支点から重心及び手先付加までの距離が短く，バランス面でも改善されるため，上半身のみで用意に姿勢維持が可能である．転倒安定性の向上も効果の一つであ

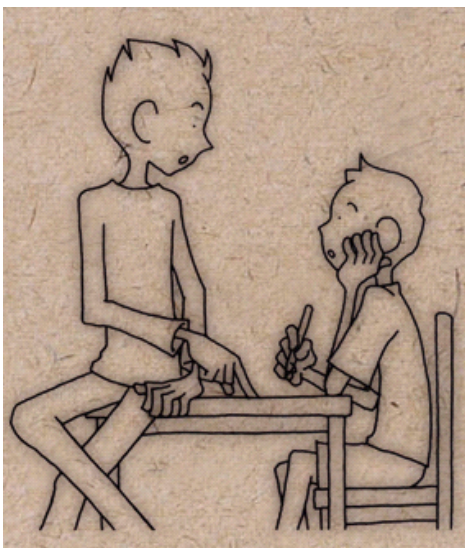


Fig.2.1 People Sitting on Chair



Fig.2.2 People Leaning against Wall on Train

ると言えよう。

もう一つの体幹による接触として挙げられる例は、よりかかるという行為である。電車やバスといった乗り物においては、Fig.2.2のように腰及び背中や肩を壁に接触させ、よりかかっている人が数多くいる。この行為は、座るのと同様に省エネルギーと転倒安定性の向上の二つの効果が得られると考えられ、揺れの激しい乗り物の中では非常に効果的である。

イスに座ると、床に転がったものへのアプローチがしやすい。これはイスに座ることによって必然的に肩位置が低くなり手が届く範囲が変化するうえに、転倒安定性の向上により姿勢維持が容易なためである。手が届く範囲つまり手作業可能領域の変化は、仮にイスに座らなくとも中腰になれば同様のことが可能であり、能動的身体 環境接触によってもたらされる本質的な効果ではないと考えられる。

2.2.2 腕部による接触形成

i 肘・前腕

人間が机上で作業を行う場合、肘から手首にかけての前腕部分で机と接触することは非常に多い。Fig.2.3のような筆記作業における前腕と机との接触は、最も代表的な例であると言えよう[102]。この接触により、前腕から手先にかけての身体の自重及び手先負荷が机によって支えられ、肩関節にかかる負荷トルクが軽減される。省エネルギー



Fig.2.3 Man Writing with Pen



Fig.2.4 Man Soldering

ギが効果の一つである。この効果に着目した例として、植松等による研究が挙げられる[85]。彼らは、マニピュレータの中間リンクにより環境と接触することを前提として、関節トルクの総和を最小化するトルク最適化・関節への最適配分を行うアルゴリズムを構築している。

一方で、この接触においては巧みさへの寄与も認められる。カメラの手ぶれが防げないように、空中で腕を動かす際には微細な振動が発生してしまい、ペン先を狙った位置へ正確に中てることは難しくなる。前腕による接触により、振動を低減し正確さを増すことができる。半田付け、針の糸通しなどの作業においても、同様に手先位置の正確なコントロールが必要となるため、筆記作業と同様の接触が利用される (Fig.2.4)。能動的な身体-環境接触により巧みさが向上している、もっとも身近な好例である。

ii 手首・手掌

机の奥にあるものが取りたいとき、人間は片手を机について、上半身及びもう一方の手を伸ばし対象物を掴むことがある (Fig.2.5)。能動的な接触により自重を支えることで、倒れることなく上半身を傾け、手作業可能領域を拡大している。手首及び掌による接触によって、転倒安定を補償することができている。横井らはこの効果に着目し[86]、適切な身体部位を選択し接触を行う動作計画法を提案している。手作業可能領域の変化は、前述した腰かける行為と同様に副次的に得られる効果であると考えられ、また本研究で焦点をあてている手先における位置・接触力制御の正確性という意



Fig.2.5 Man Reaching out His Hand Sustained by the Other Hand

味での巧みさとは異なる性質である。

2.2.3 指による接触形成

レストランのサービススタッフに着目する。レストランやカフェなどの飲食店において接客を担当するスタッフは、飲み物や料理の運搬といった物理的な作業を行う。この作業は、対象に手を伸ばし、つかみ、運び、目標の位置に置くという非常に簡単かつ基礎的な動作で構成され、接客スタッフは、これらの動作のプロフェッショナルであると言えよう。彼らの手腕の運動は、素早く、滑らかで、それでいて丁寧である。彼らがグラスをテーブルに置くときの運動を観察すると、グラスがテーブルに接地する直前に、小指及び薬指の側面でテーブルに触れていることがわかる (Fig.2.6)。このとき、自らの体でテーブルに触れるまでの運動はとても素早いが、反対に触れた後は速度を落とし、グラスは非常に優しくテーブルに置かれている。

このようなやり方をする一般の人はほとんどいない。普通は、身体の一部でテーブルに触れるようなことはせず、直接グラスをテーブルに置くため、大きな音を起してしまうこともある。これは、人が急ぎ焦っているときや、グラスを置く場所が何かに隠れて見えないときに起きてしまう。接客スタッフはいかなる状況でも、決して大きな音を起てるようなことはない。このように、グラスの定置における能動的身体 環境接触は、人の手作業の巧みさを向上させる一つのスキルであると言えよう。

引き出しを開ける際に人は、掌を上に向け、示指、中指、薬指、小指のうちいくつかを取っ手部分に引っ掛け、引くことによって開ける。このとき、引出し上部のスライド

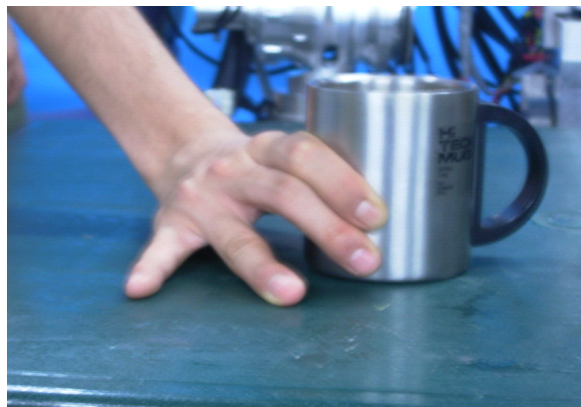


Fig.2.6 Glass Placing with Active BE Contact

しない構造部材に親指で触れてこの作業を行う人がいる (Fig.2.7) . これも能動的な身体-環境接触の1例と考えられる . 冷蔵庫は密閉のため開閉部が磁石できつく拘束されている . そのため拘束力を超える十分な力を与え開ける必要がある . 窓や戸棚なども , 古くなり錆びついたり傷んだりすると滑らかには動かず , 同様に開閉にそれなりの力を要する . 拘束力を超える力を与えたのち , 開閉部は動き出すが , このとき拘束力は瞬間的に消失するため , 開閉部は急激な加速度で動き出すこととなる . この急激な加速度により , 開閉部自体のコントロールを失う , また中のものが飛び出すといったことが起こりうる . 高齢者や子供にとっては , 開閉に要する力は小さくなく , また , 瞬間的な拘束力の消失に対応できずよろめくこともある . 能動的な身体-環境接触は , このような対象の急激な運動を抑制するためのスキルの一つであり , より巧みな方法であると考えられる .

果物の皮をナイフで剥くときもこれと同様のことが起きていると考えられる (Fig.2.8) . 一般的にどの果物も , 皮と果肉では硬さが異なりナイフを進めるのに必要な力も異なる . またナイフとの間に働く摩擦も静止摩擦から動摩擦へ切り替わる . これらの急激な変化を防ぐために , 拇指を果物に当てつつナイフを進める .



Fig.2.7 Drawer Opening
with Active BE Contact



Fig.2.8 Apple Peeling
with Active BE Contact

2.2.4 対象作業の分類

前項では人間の日常生活の観察から，座る，寄りかかる，肘をつく（筆記，半田付け），手をつく（机の奥に手を伸ばす），指をつく（グラスの定置，引出し開け，皮むき）といった能動的な身体 環境接触の具体的な場面を例に挙げた．また考察の結果，能動的な身体 環境接触のもたらす効果として以下の三つがあることが明らかとなった．

- ・省エネルギー
- ・転倒安定性の向上
- ・巧みさの向上

これらの関係をまとめると Table.2.1 のようになる．

Table 2.1 Classification of Examples of Active BE Contact by its Fundamental Effect

作業例	省エネルギー	転倒安定性の向上	巧みさの向上
腰かける 壁 にもたれる			
肘をつく (筆記, 半田付け)			
手をつく (机の奥に手を伸ばす)			
指をつく(グラスの定置, 引出し開け, 皮むき)			

肘をつく，指をつくといった能動的な身体-環境接触が巧みさの向上に寄与する実施例には，一つの共通点があると考えられる．それは対象に与えられる環境からの拘束が，時間的に不連続に変化しているという点である．グラスの定置作業では，それまで人の手により空間上を自由に動くことができたグラスに，机からの拘束が加えられ，運動は机の上面内に制限される．この特徴は，環境（机）からの拘束を対象（グラス）に対し付与する作業であるとみなすことができる．同様の解釈は筆記作業や半田付け作業においても可能であり，本研究ではこれらの作業を拘束付与作業と呼ぶ．

一方で，冷蔵庫の例で示した引出し開け作業においては，当初，引出しは冷蔵庫本体に拘束され全く動けない状態である．だが，人により拘束が除去され，開閉部はレー

ル上を自由に動けるようになる。環境（本体）から与えられていた拘束を対象（引出し）から除去する作業であるとみなすことができる。同様の解釈は皮むき作業においても可能であり、本研究ではこれらの作業を拘束除去作業と呼ぶ。

個々の作業の考察で述べたように、これらの作業では拘束を付与もしくは除去する瞬間に動作が不安定になる。拘束の不連続な変化が、動作の不安定化つまり巧みさが失われる原因であると言える。能動的な身体 環境接触は巧みさの低下を防ぐスキルの一つであると考えられる。

本論文ではこの仮説に従い、対象作業を拘束付与作業及び拘束除去作業の二つに分類し、今後の検討を進める。また本論文は、拘束付与・除去作業の両者において、能動的な身体 環境接触を利用し巧みに作業を実施することを目指し、両者に適用可能な制御系の構築を目的とする。

2.3 拘束付与・除去作業における不確定性と受動柔軟性の関係

本節は、パッシブコンプライアンスというロボット身体に備わる特徴を、作業において利用するための戦略を与えることを目的とする。まず対象とする拘束付与・除去作業においてどのような不確定性が潜み、作業を不安定にさせるのかを論じる。またパッシブコンプライアンスの特徴を整理し、その利点と欠点が拘束付与・除去作業においてどのように影響を与えうるのかを、不確定性に関連付けて論じる。

2.3.1 拘束付与・除去作業における不確定性

日常生活における作業には様々な不確定性が存在するが、作業によって潜在する不確定性が異なり、そのため不確定を起因として発生する現象も異なる。そこで、拘束付与作業の1例としてガラス定置作業、除去作業の1例として引出し開け作業を取り上げ、それらの作業における不確定性とそれにより発生する現象に関して考察する。

i 拘束付与作業

拘束付与作業の1例であるグラス定置では、大きく分けて二つの不確定性が問題となる。一つは環境に潜在する位置・大きさ・形状等の位置情報の不確定性である。テーブルの高さは経年劣化による脚部のグラつきにより変動する。また常に全くものが置いていないクリーンな机上面にグラスを置くとは限らない。ランチョンマットやトレーにグラスを置く場合には、高さが変化する。これらの理由で、設置面の高さがロボット内部に保有するモデル情報とズレていることは多分に考えられる。

もう一つは、グラスとハンドの相対的な位置関係に生じる誤差である。グラスを掴む際にも、把持位置に誤差が生じる可能性がある。テーブルに置いてあるグラスを掴む際に、テーブルの高さ誤差によりグラスの位置（高さ）も変化する。そのためロボットがグラス下部を掴んでしまう、上部を掴んでしまうといったことが生じうる。ここで挙げた把持位置誤差は、鉛直方向に限り言及している。

これらの位置情報の誤差は設置の際に大きな衝撃力を発生しうるため、これは対象と環境間の接触を精度よく制御できているとは言えず巧みさを失いかねない。また同様の問題は、ペンによる筆記や半田付けなどの作業においても発生する可能性がある。これらの作業は対象物と環境の接触を形成する作業であり、ロボット身体と対象物の間に発生しうる把持位置誤差や、環境に潜在する位置情報誤差が問題を引き起こしかねない。

ii 拘束除去作業

拘束除去作業の1例である引出し開け作業においては、引出しを拘束する力の大きさが問題である。引出しが冷蔵庫のものであった場合、初動時は磁力により大きな拘束力を有しているが、一度解放されると動摩擦力のみの小さな拘束力となる。このため、エンドエフェクタに発生する現象としては手先拘束力の減少方向へと不連続変化が生じる。冷蔵庫の磁石は、磁力がある値になるようメーカー側で設計されているが、実際には一定にはならない。さらに、磁石表面に付着したちりやほこりといった条件による変動も見過ごすことはできない。結果としてどの程度の大きさの力が必要かを正確に見積もることは難しい。引出しを開ける作業においては、引出しをできるだけ振動

せずに滑らかに開けることが巧みさの重要な指標となる。不確定な磁力に対して運動を適切にデザインすることは難しく、ある程度の振動の発生は避け難いというのが実際的な問題である。

この問題は冷蔵庫に限ったものではない。一般に引出しや窓などを開ける際には、静止摩擦から動摩擦への切り替えを伴い、その摩擦力を正確に見積もることは難しい。前述した皮むき作業においても摩擦の変動が存在し、また果実の皮と果肉では硬さが異なるため、同様の問題が生じうる。これらの作業では対象物が環境から力拘束を受けており、この力拘束を振り切って運動を与えることが作業の目的である。力拘束の大きさにおける不確定性により、拘束状態から非拘束状態への遷移において不安定な運動が生まれる。

2.3.2 パッシブコンプライアンスの利点・欠点

本項では、パッシブコンプライアンスの利点と欠点について考察する。Fig.2.9に示す受動性を搭載した単関節モデルを用い、考察を進める。単関節モデルは、減速機とモータの組み合わせによるアクチュエータユニット及びねじりばねや板ばねなどの機械ばねで構成される受動要素、出力リンクが直列に接続された回転関節機構を示す概念図である。関節におけるトルク伝達を考慮すると、関節が能動的に運動を生成する際のトルク伝達と反対に外部から運動を強制される場合に分けられる。

外部から運動を強制される場合の、受動性を有する単関節モデルにおけるトルク伝達について考える。Fig.2.9(a)のように、関節の出力リンクの先端が環境に拘束される場合、リンク長や環境位置などのモデル化誤差により、リンク先端が環境と過度に干渉し、めり込むことが生じうる。これを防ぐには作用点位置を調整することが必要であり、これは、受動性のたわみによってもたらされる。たわみに相当する反力がこのとき、環境・リンク双方にかかることとなるが、剛体関節がめり込むことを考えれば、これは極めて小さい力であるといえる。パッシブコンプライアンスの利点は、非常に小さな反力しか伴わない受動的な作用点の位置調整能力である。

関節が能動的に運動を生成する際の、受動性を有する単関節モデルにおけるトルク伝達について考える。このとき Fig.2.9(b)のようにアクチュエータはトルクを出力

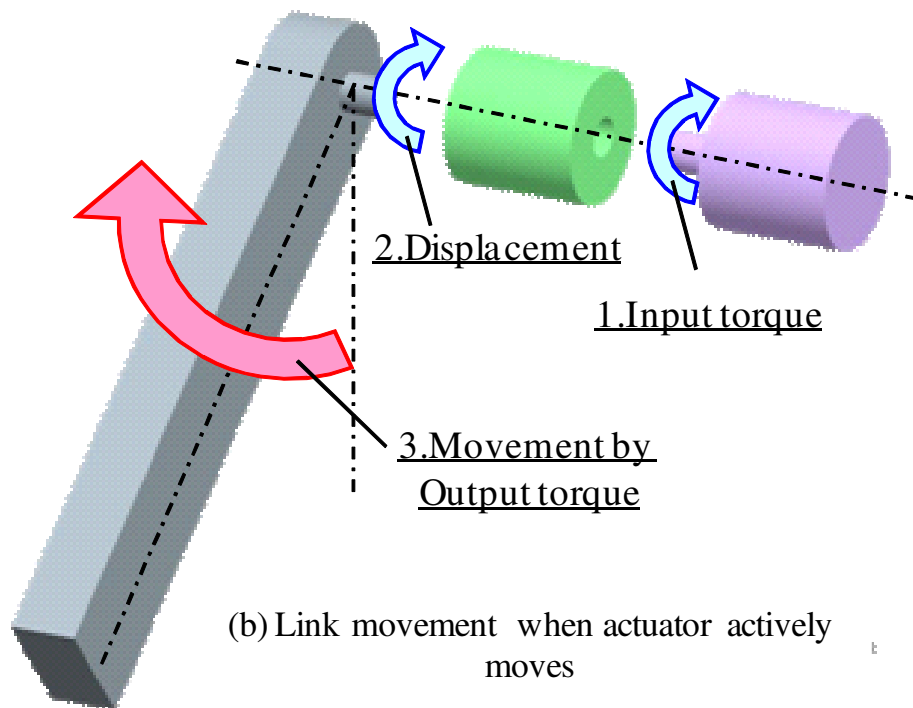
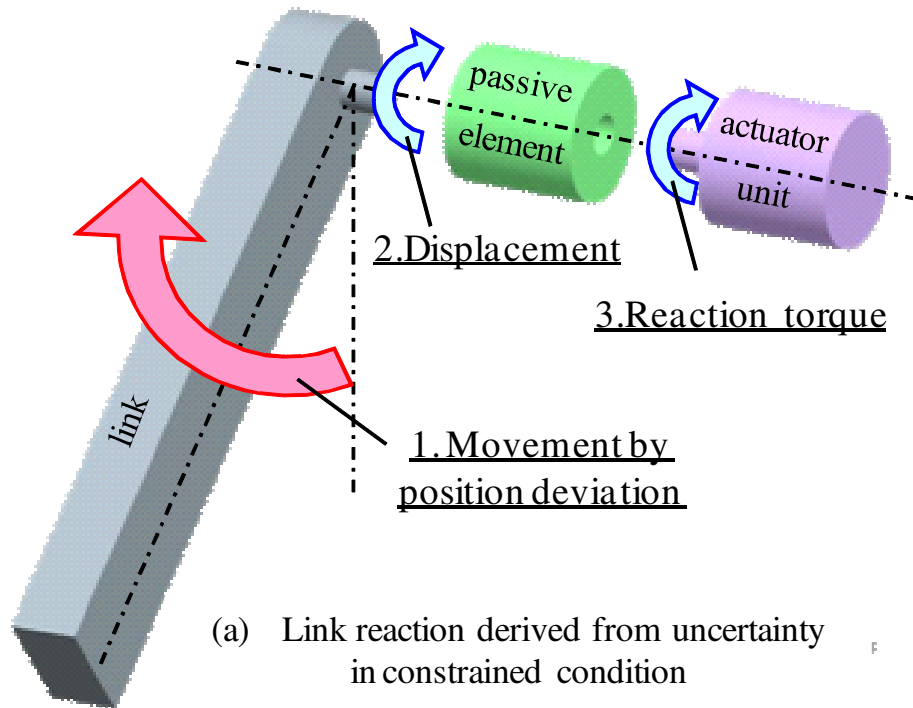


Fig.2.9 Positive and Negative Effect of Passive Compliance

し、受動要素のたわみを生じさせる。受動要素のたわみは、出力リンクにトルクを伝達し運動を作り出す。素早い運動を生み出すためには、瞬間的に強力なトルクが必要となるが、この伝達メカニズムでは、同時に大きなたわみに相当するアクチュエータの回転が必要となる。この回転に必要な時間の分だけ、遅れが生じることになる。パッシブコンプライアンスの欠点は、受動柔軟性を搭載した関節が能動的かつ素早く運動する際に生じる時間遅れである。

2.3.3 パッシブコンプライアンスの利用戦略

前項までに明らかにした、拘束付与・除去作業における不確定性とパッシブコンプライアンスの利・欠点の関係について考察する。拘束付与作業は対象物と環境の接触を形成する作業であり、ロボット身体と対象物の間に発生しうる把持位置誤差や、環境に潜在する位置情報誤差が問題を引き起こしかねない。拘束除去作業では対象物が環境から力拘束を受けており、この力拘束を振り切って運動を与えることが作業の目的である。力拘束の大きさにおける不確定性により、拘束状態から非拘束状態への遷移において不安定な運動が生まれる。パッシブコンプライアンスの利点は、非常に小さな反力しか伴わない受動的な作用点の位置調整能力である。パッシブコンプライアンスの欠点は、受動性を搭載した関節が能動的かつ素早く運動する際に生じる時間遅れである。

具体的な作業を挙げ、潜在的に存在する不確定性と受動柔軟性の関係性を考察した結果、まず日常生活環境における実作業に潜在する不確定性は接触位置・接触力の不連続変化として表出するということがわかった。

また不確定性に起因する不連続変化に対する受動柔軟性の振る舞いは、接触位置の

Table 2.2 Relationship between Uncertainty and Passive Compliance

作業種類	拘束付与作業	拘束除去作業
作業例	グラスの定置	引出し開け
主な不確定性	接触位置	接触力
受動柔軟性の主な影響	利点による作業性向上	欠点による作業性低下

不連続変化に対して、受動柔軟性のなじみ機能により巧みさを向上させる一方で、接触力の不連続変化に対しては関節角度の維持が困難となり巧みさを低減させる効果があると考えられる。これまでの考察結果を Table 2.2 に示す。

ある作業を行おうとした際に、パッシブコンプライアンスの利用方法を考えることは非常に重要である。ここまでの考察から考えられるパッシブコンプライアンスの利用戦略について述べる。拘束付与作業においては、パッシブコンプライアンスの利点を活用することを重視するため、十分なパッシブコンプライアンスの見極めが重要となる。そのうえで欠点を抑制するためにそれ以上のパッシブコンプライアンスは無効化するということになる。また拘束除去作業においては欠点を抑制することを重視するため、可能な限りパッシビティを無効化する。そのうえで残存するパッシブコンプライアンスを利用するという戦略となる。これらの考えを実践するために、能動的身体-環境接触におけるパラメータを設定する具体的な動作計画法として構築することが必要となる。

2.4 作業モデルを用いた運動制御における課題の明確化

本節では、本章2節で明らかとなった、能動的な身体-環境接触が巧みさの向上に寄与する実施例に共通する拘束条件の付与/除去に注目し、対象作業のモデル化を図る。スキルを適用した場合としなかった場合の作業モデルを比較し、作業のポイントとなる箇所を抽出する。また作業モデルの各運動が、既存の制御則の適用だけで実現可能か否かを検討し、運動制御における技術課題を明らかにする。

2.4.1 拘束付与作業の分析

Fig.2.10 は、能動的な身体-環境接触を用いない、一般的な拘束を付与する作業の方法を示す作業モデルである。図中の丸はロボットにより把持された対象物を示し、四角はアクチュエータや構造部材を含めたロボット身体を示す。これは特に、本論文で対象としているハンド-アーム系で構成されるマニピュレータ部を指すこととする。ギザギザ部はロボット身体に搭載されたパッシブコンプライアンスを示す。特定のハードウェアデザインに議論が限定されるのを避けるため、本項の考察においてはどのロボット身体部位にパッシブコンプライアンスが搭載してあるかは特に限定しない。そこで図中のパッシブコンプライアンスの位置も、身体のどこかに搭載されているとい

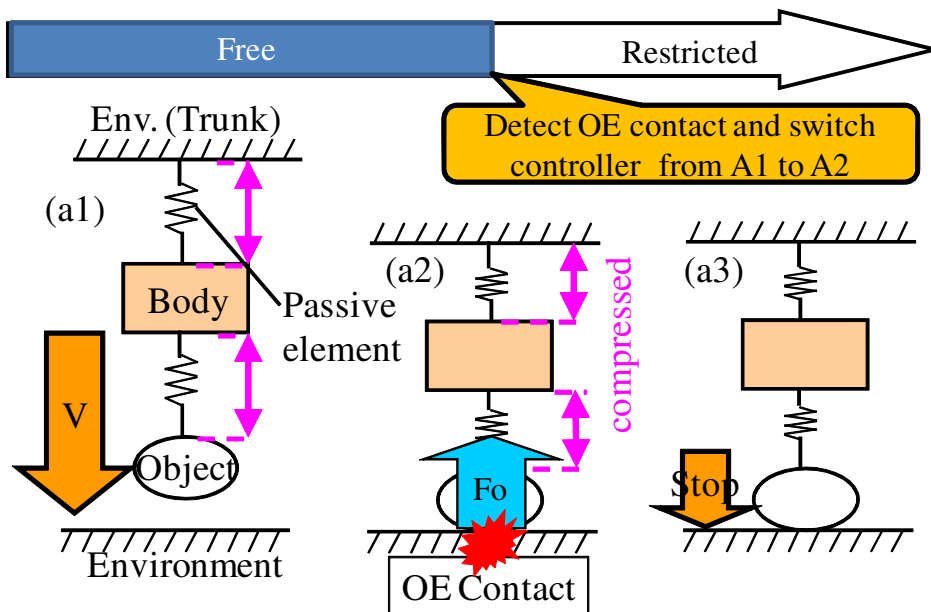


Fig.2.10 Direct Approach for Adding Constraint Task

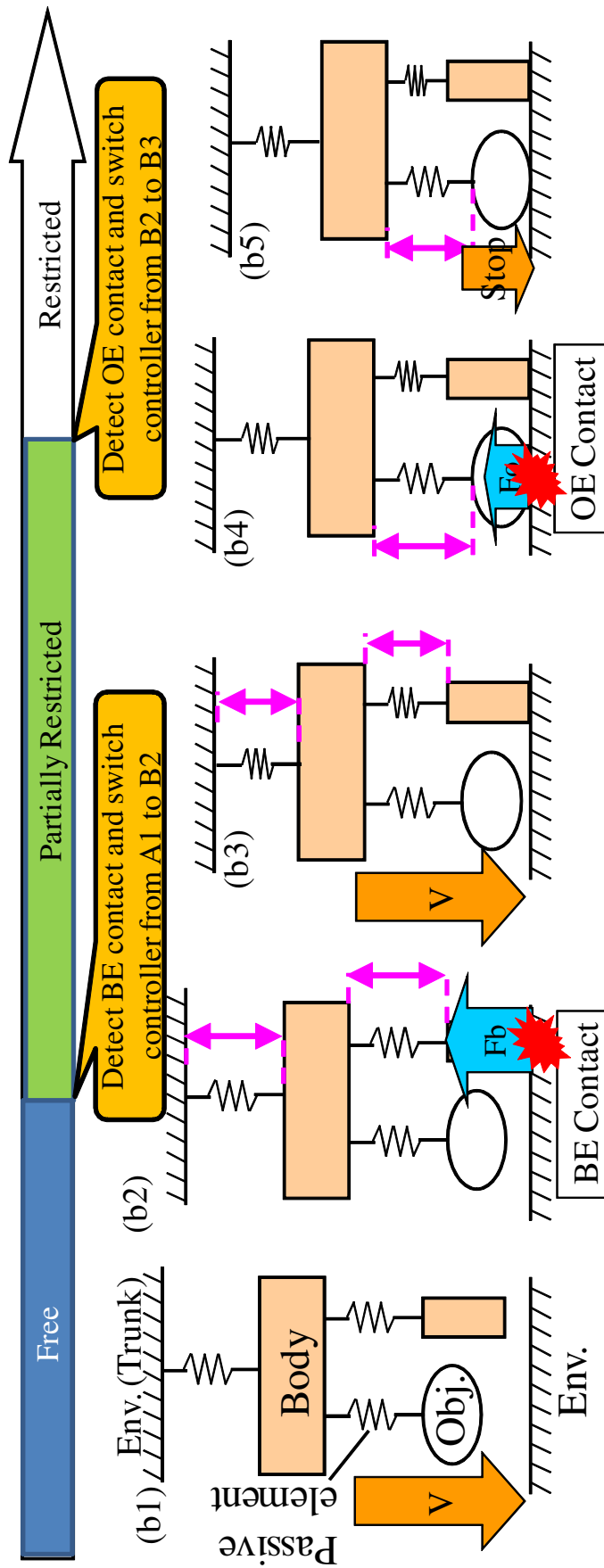


Fig.2.11 Approach with BE Contact for Adding Constraint Task

う意味しか持たない。斜線部は環境を示すが、ロボットのハンド アームを支える体幹部も動作せず質量が十分であることを前提に環境として示されている。動作は左から右に時系列的に描かれており、自由空間上での運動から拘束空間上での運動に遷移していくことが模式的に示されている。

(a1) からわかるように、マニピュレータは任意の速度で環境に接近するが、このとき既に対象を掴んだ状態で動作を開始している。この自由空間上での動作は、マニピュレータに標準的な軌道制御手法を導入することで容易に達成できる。簡単のため、この制御手法を以降では制御 A1 と呼ぶ。この動作の結果として (a2) のように OE コンタクト (対象 (Object) と環境 (Environment) の接触) が形成される。マニピュレータはこの接触を検知すると同時に、制御 A1 から制御 A2 へと切り替える。制御 A2 とは (a3) に示される、OE コンタクトをコントロールするための標準的な力制御手法のことである。作業のパフォーマンスという意味で、この自由空間上での運動から拘束空間上での運動への滑らかな切り替えポイントであり、どんな運動で OE コンタクトを形成するかが重要となる。この作業モデルには記載していないが、実際には、BO コンタクト (ロボット身体 (Body) と対象 (Object) の接触) が存在するが、本論文では簡単のため、ハンドが対象を十分しっかり掴んでいるので BO コンタクトの状態は作業中に変化しないと仮定し、話を進める。

Fig.2.11 は、同様の作業をサービススタッフがいかに行うかを模式的に表した作業モデルである。Fig.2.10 との最も大きな違いは、部分的に運動が拘束された (b3) 及び (b4) の状態である。これらの状態は自由空間上での運動と拘束空間上での運動との間に挿入されている。BE コンタクト (能動的な身体-環境接触) はこの作業モデル上の (b2) において形成されている (b1) から (b2) へ遷移するための動作は (a1) から (a2) への遷移と同じであるため、この動作を実現するためには制御 A1 を適用すれば良い。マニピュレータは BE コンタクトを検知すると同時に、制御 A1 から制御 B2 へと切り替える。制御 B2 は BE コンタクトを維持しつつ (b2) (b3) (b4) に示されるような、OE コンタクト形成するための動作を生成しなくてはならない。前述したように、巧みさの向上のためには、この動作がキーとなる。OE コンタクトが形成されたのちには、制御 B3 は BE コンタクトと OE コンタクトの両方をコントロールしなけれ

ばならない．そこで制御 B3 は制御 A2 とは異なるものとなるが，グラスの定置のような簡単な作業では，OE コンタクトの制御ではなく，指を開き対象を離すだけで良い．そこで本項では，制御 B2 に着目し，論じる．

2.4.2 拘束除去作業の分析

Fig.2.12 は，能動的な身体 環境接触を用いない一般的な拘束を除去する作業方法を示している．図中の記号が示す内容は Fig.2.10 と同様である．動作は左から右に時系列的に描かれているが，拘束付与作業を示す Fig.2.10 と異なり，拘束空間上での運動から自由空間上での運動に遷移していくことが模式的に示されている (c1) のようにマニピュレータはすでに BO コンタクトを確立した状態で，対象を環境から離脱させるための力をかけ始める．この運動は制御則 A2 により，実現できる (c2) のように環境からの拘束力は，マニピュレータが掛ける力に比例して大きくなる (c3) のようにマニピュレータが，環境からの拘束力の限界を超える力を掛けた瞬間に，拘束力は消失する．この拘束力の消失を検出したのち，対象とマニピュレータは制御則 A1 により，自由に動けるようになる (C4) ．この作業モデルに示すシーケンシャルな動作手順は，拘束を付与する作業において示したそのの，基本的に逆バージョンである．そこで，こ

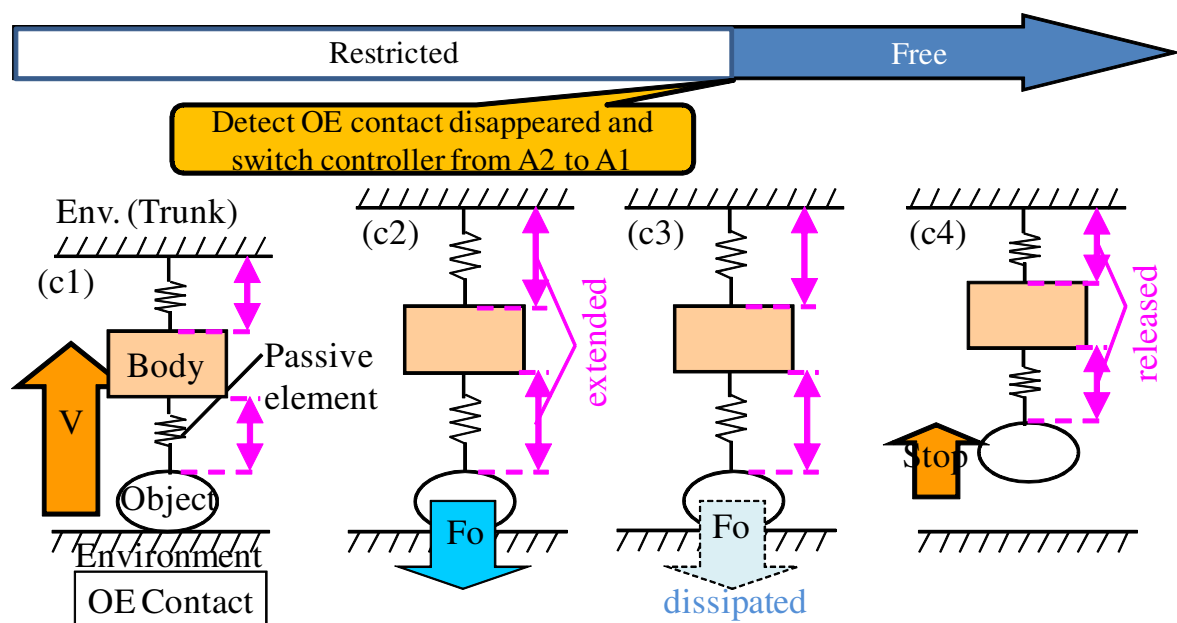


Fig.2.12 Direct Approach for Removing Constraint Task

の動作のキーとなるのは、拘束力つまり OE コンタクトの消失をいかに実現するかという点にある。

Fig.2.13 は能動的身体 環境接触を利用した、より丁寧な拘束除去作業の方法を示している。BE コンタクト及び BO コンタクトの両者が既に形成された状態で、マニピュレータは運動を開始する (d1) (d1) から (d3) への遷移をコントロールする制御則は、BE コンタクトを維持しつつ OE コンタクトを消失させる運動を発現しなければならない。この制御則を D1 と呼ぶが、これが作業の正確さと滑らかさを左右するキーとなる。OE コンタクトが消失したのちは (d4) のように部分的に拘束された状態が挿入されることになる。BE コンタクトはマニピュレータによって能動的に形成されているため、環境からの離脱運動により、容易に消失することができる。制御則 A1 のように自由空間上で有効な軌道制御を用いることで (d4) から (d5) への遷移は実現できる。

2.4.3 運動制御における技術課題

本節における議論によって、能動的身体 環境接触を利用した作業方法において、部分的に拘束された状態での制御則 B2 及び制御則 D1 が課題であることが明らかとなった。またこれらの制御則こそが、作業の正確さや滑らかさといった巧みさのポイントになると考えられる。この二つの制御則はともに、BE コンタクトを維持しつつ OE コンタクトをコントロールするという二つの制御目標を同時に満たさなければならないという要求がある。この機能要求を満たすための制御枠組みを構築することが必要となる。

2.5 まとめ

本章では、巧みさの向上に寄与する能動的身体-環境接触を同定し、こういった作業において効果があるのかを明らかにすることが第1の目的であった。初めに、人間の日常生活における能動的身体-環境接触の例を挙げ、その利用場面、接触形成部位、目的の三つの視点から定性的な整理を試みた。その結果、目的として大きく三つに分け

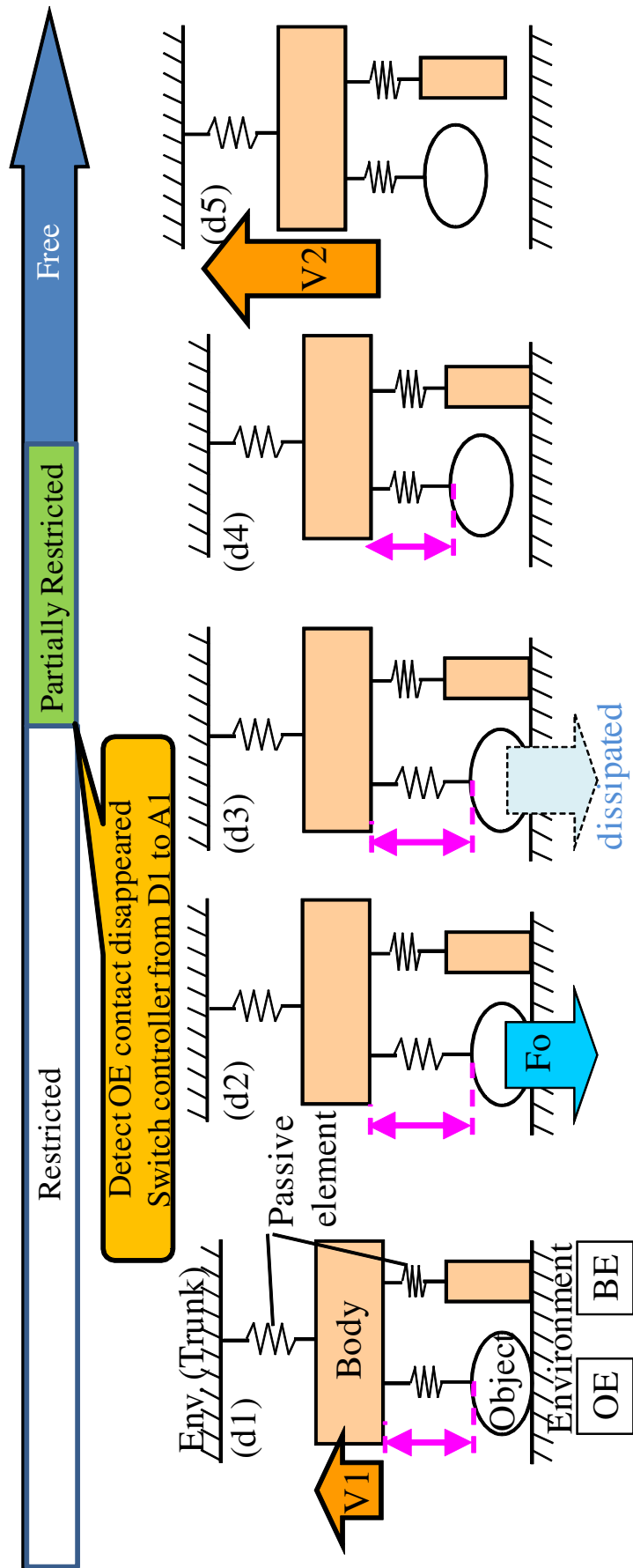


Fig.2.13 Approach with BE Contact for Removing Constraint Task

ることができると考えられ、一つは転倒安定性の向上、二つが省エネルギー、三つが巧みさの向上である。さらに、巧みさの向上を目的とした能動的な身体-環境接触に関して例を加え、これらの例において作業に共通する点を抽出した。その結果、これらの作業においては、拘束が付与もしくは除去される瞬間が有ることがわかった。この拘束の不連続な変化が動作の不安定化の原因であり、能動的な身体-環境接触はこのときの巧みさの低下を防ぐスキルの一つであるという仮説を導き出した。

また作業に潜む不確定性について考察し、拘束付与作業においては接触位置の位置誤差、除去作業においては拘束力の誤差が巧みさに影響を与えると考えた。同時にパッシブコンプライアンスに関して、非常に小さな反力しか伴わない受動的な作用点の位置調整能力という利点及び、受動柔軟性を搭載した関節が能動的かつ素早く運動する際に生じる時間遅れという欠点があると考察した。この二つの考察を関連付けた上で、パッシブコンプライアンスの利用戦略を導き出した。拘束付与作業においては、パッシブコンプライアンスの利点を活用することを重視するため、十分なパッシブコンプライアンスの見極めが重要となり、そのうえで欠点を抑制するためにそれ以上のパッシブコンプライアンスは無効化するという戦略である。また拘束除去作業においては欠点を抑制することを重視するため、可能な限りパッシブコンプライアンスは無効化する。そのうえで残存するパッシブコンプライアンスを利用するという戦略である。これらの戦略を作業に合わせて具現化する動作計画法が必要になる。この動作計画法は、5章において実際の作業に適用できる形で具現化する。

最後に拘束付与作業・除去作業の双方について作業モデルを立案し、実際にロボットマニピュレータにより、能動的な身体-環境接触を利用しつつ作業を行う際の、技術課題を明らかにした。その結果、BEコンタクトを維持しつつOEコンタクトをコントロールするための制御枠組みの構築が必要であることが分かった。この制御枠組みは、3章において具体的に提案する。

第3章 制御枠組みの構築と拘束付与作業への適用

3.1 はじめに

本章では、能動的身体 環境接触を利用して作業を実行するための制御枠組みを提案する。能動的身体-環境接触は、身体による付加的な環境との接触を指し、それを与えなくても作業を実行することはできるという特徴を有している。また対象とする作業は2章における検討から、ガラスの定置作業に代表される環境からの拘束を対象に対し付与する拘束付与作業と、引出し開け作業に代表される環境から与えられていた拘束を対象から除去する作業の二つである。どちらの作業においても提案する制御枠組みにより、能動的な身体 環境接触を形成しつつ巧みに作業を行うことを目指す。

制御枠組みの要件は二つの接触を同時にコントロールすること、つまり BE (Body-Environment) コンタクトを維持しつつ OE (Object-Environment) コンタクトをコントロールすることである。どちらの作業においても、これを満たすことが可能な制御枠組みを案出する。

また拘束付与作業の最もシンプルな1例としてガラスの定置作業を取り上げ作業のポイントを明確にする。さらに受動性と作業のポイントの関係に対する考察を基に、提案した枠組みに実装する制御アルゴリズムを案出する。考案した制御枠組みを実機に搭載し拘束付与作業の具体例としてガラス定置作業を行い、巧みな手作業の遂行つまり、対象物(ガラス)と環境(机)間の接触状態を制御するという面から有効性を検証する。

3.2 能動的な身体 環境接触を利用するための制御枠組み

能動的な身体 環境接触を利用して作業を実行する際には，2章で明らかとなったように，コントローラ B2 及びコントローラ D1 という運動制御器がポイントとなる．これらの制御器は，BE コンタクトを維持するとともに OE コンタクトを形成もしくは消失なくてはならない．本研究では，この機能的要求を満たすことができる，拘束付与作業・除去作業の双方に適用可能な制御枠組みを考案した．

極めてシンプルな発想で提案手法を構成した．本制御枠組みは，BE コンタクト及び OE コンタクトという二つの接触をコントロールする必要があるため，ロボット身体に搭載されたアクチュエータを二つのグループに分割しそれぞれに担当する接触を割り当て，各接触を独立に制御することを考える．

まず初めに，OBE ループ (Object-Body-Environment) の概念を導入する．OBE ループは，BO コンタクトと，新たに形成した BE コンタクトを繋ぐロボット身体で形成される経路として定義する．Fig.3.1 は台車型のヒューマノイドロボットにより，引き出しの取っ手に指を掛け開ける際の様子を示している．Fig.3.1 の左図に示すように，通常ヒューマノイドロボットは，足裏もしくは車輪により BE コンタクトを形成し，指で取っ手に触れ OE コンタクトを制御するため，身体全体による非常に大きなクローズドループを用いて作業をしていることになる．一方で Fig.3.1 の右図に示すように拇指による能動的な身体 環境接触は，付加的な BE コンタクトを形成し，新しいクローズドループを形成することになり，これは必然的に通常より小さなものになる．この新しく形成された小さなクローズドループを OBE ループと名付け，通常のループと区別して考える．

OBE ループを利用し，ロボット身体に搭載されたアクチュエータを二つのグループに分割する．Fig.3.2 に示すように OBE ループに含まれるアクチュエータ (図ではハンド部に相当) を，ひとまとまりのグループとみなし，作業実行システムと呼ぶ．それ以外のアクチュエータ (図ではハンド部以外に相当) を，またひとまとまりのグループとみなし，プレーシング制御システムと呼ぶ．本枠組みでは，作業実行システムには OE コンタクトにおける接触状態をコントロールする役割を与え，プレーシング制

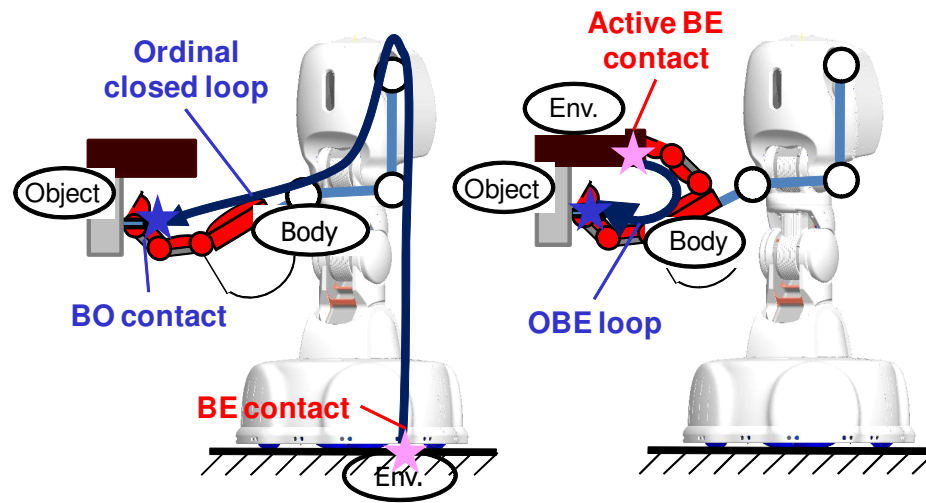


Fig.3.1 OBE Loop Produced by Active BE Contact

御システムにはBEコンタクトにおける接触状態をコントロールする役割を与える。

各システムの役割を明確にする，作業実行システムは，BEコンタクトを支点としたマニピュレータとして振舞い，OEコンタクトをコントロールすればよい．プレーシング制御システムは，ロボット体幹を支点としたマニピュレータとして振舞い，BEコンタクトをコントロールすればよい．作業実行システムに含まれるアクチュエータの数，つまり自由度は，ロボットシステム全体と比べると小さくなる．これは，作業実行システムが能動的な身体環境接触により形成される新しいクローズドループによって定義されるためである．結果として，作業実行システムが実際に作業できる領域（手が届く範囲）はそれほど大きくない．そこで，プレーシング制御システムはBEコンタクトを維持するだけでなく，作業実行システムの要求に応じて，BEコンタクトの作業空間上での位置を修正する．これにより，作業実行システムはBEコンタクトを位置可変の支持点として扱うことができ，作業領域の限定問題をクリアすることができる．この機能は，プレーシング制御システムへハイブリッド制御を導入することにより満たすことができる．

既存の手法に対する優位性を明確にする．既存の多点接触制御手法は，接触を運動方程式に対する拘束条件として記述し，マニピュレータ全体で複数接触点における接触力をコントロールするため，複雑な計算が必要となる．本手法は，二つのシステムが独立に運動を生成するため，シンプルに前述した機能的な要求を満たすことができる．

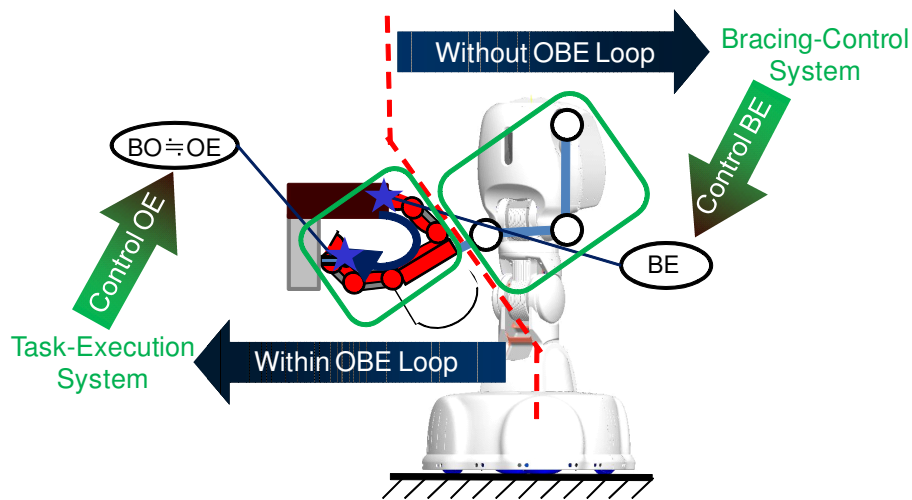


Fig.3.2 Task-Execution and Bracing-Control System Defined by OBE Loop

もう一つの手法の利点は、拘束付与作業・除去作業のそれぞれに適用する際に、作業に合わせて各システムに導入する制御アルゴリズムを選択できるという点である。本手法では、前章で述べた作業に潜む不確定性とパッシブコンプライアンスの特性の関係を考慮し、作業パフォーマンスを向上することを目的として適切な制御アルゴリズムを選択する。具体的には、4章で対象とする拘束除去作業においては、ブレーシング制御システム上に各関節のパッシブコンプライアンスのたわみをキャンセルする制御アルゴリズムを導入するが、既存の制御手法に対し同様の目的を与えると、接触に加えさらに同様の拘束条件を追加するためより複雑な計算が必要となる。

3.3 制御枠組みの適用と制御アルゴリズムの選定 -拘束付与作業-

本節は、拘束を付与する作業の1例として選定したグラスの定置作業に対し、提案した制御枠組みの適用を議論する。初めに作業モデルを利用し、グラスの定置における巧みさを含む作業パフォーマンスを明確にした上で、不確定性の影響を抑えパフォーマンスを向上するための動作のポイントを明確化する。最後に動作のポイントを考慮し、各システムに搭載する制御アルゴリズムについて述べる。

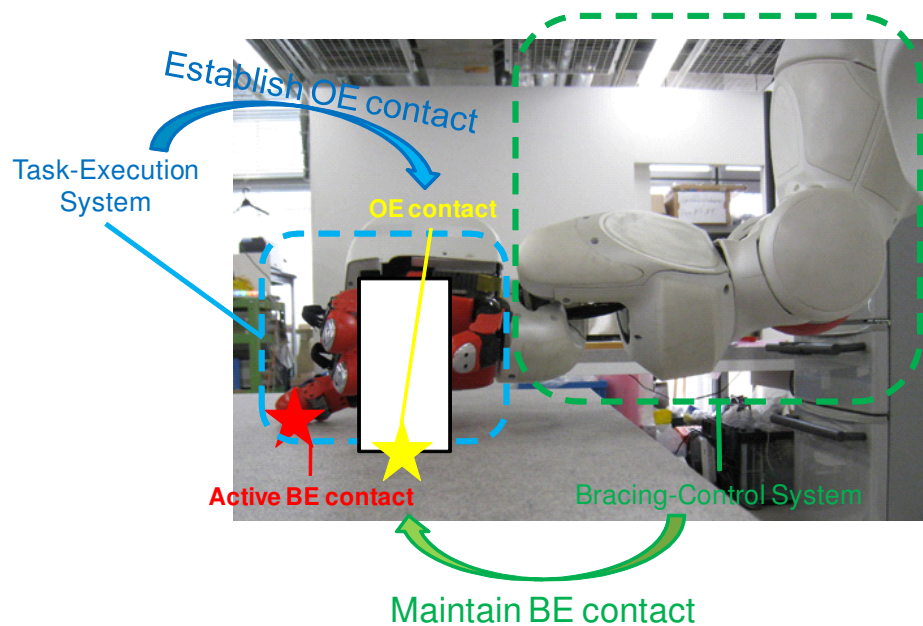


Fig.3.3 Task-Execution and Bracing-Control System for Glass Placing Task with Active BE contact

3.3.1 制御枠組みの適用

制御枠組みの適用について述べる．本章では，能動的な身体 環境接触を形成する部位の選定については詳しく考察せず，サービススタッフの例に倣い小指及び手掌側面を利用する．Fig.3.3は，ガラス定置作業遂行時のロボットの様子を示している．小指指先により机と能動的な身体 環境接触を形成し，示指・中指・拇指の3指によりガラス（図中の白い部分）を掴んでいる．このとき，ガラス底面においてOEコンタクトが形成されるため，OBEループが形成される．これに従い自由度を二つのグループに分けると，作業実行システムは指の自由度全てを含み，ブレーシング制御システムはそれ以外の自由度を含むこととなる．能動的な身体 環境接触が形成されたのち，それぞれのシステムは異なる制御アルゴリズムによって動作を生成する．

3.3.2 動作のポイントと制御アルゴリズムに対する要件

提案した制御枠組みを用いていかに作業パフォーマンスを向上させるのかを議論する．ガラスの定置作業において考えられる不確定性として設置面の高さ及び，把持位置のズレが考えられる．テーブルの高さは経年劣化による脚部のグラつきにより変動す

る．また常に全くものが置いていないクリーンな机上面にグラスを置くとは限らない．ランチョンマットやトレーにグラスを置く場合には，高さが変化する．これらの理由で，設置面の高さがロボット内部に保有するモデル情報とズレていることは多分に考えられる．またグラスを掴む際にも，同様の理由から把持位置に誤差が生じる可能性がある．

これらの不確定性は，グラスを置く際に大きな音を起てかねない．確実に対象物 環境間に生じる衝撃力を小さく抑え，優しく対象物を設置する能力は，日常生活を共にするパートナーにとって非常に重要な要件である．これは本研究で定義する巧みさの一つである．同時に，素早い運動で短時間で作業を行うことも求められる．グラスをテーブルに置く際には，不確定性の影響を抑え込み，素早く，確実にグラス-テーブル間の衝撃を抑えることが作業パフォーマンスという意味で重要な指標である．

高度な作業パフォーマンスを実現するために，ポイントとなる運動の要件について考察する．テーブルに重量があり十分に動きづらいと仮定すると，OE コンタクトにおける力積は以下の式 (3.1) のように表現できる．

$$\int F dt = (e + 1)MV \quad (3.1)$$

上式で F は OE コンタクトにおいて生じる衝撃力， e は反発係数， M は対象の質量， V は接近速度を表す．接近速度 V が小さければ小さいほど力積は小さく抑えられがこれは先に述べた作業時間の短縮とは矛盾し，トレードオフ問題を形成していることが分かる．しかしながら，Fig.3.4 に示す本論文で提案している作業方法であればこの問題を解決することができる．図中の記号が示す内容は，Fig.2.10 と同様であり，丸はロボットにより把持された対象物を示し，四角はアクチュエータや構造部材を含めたロボット身体部位を示す．ギザギザ部はロボット身体に搭載されたパッシブコンプライアンスを示す．斜線部はロボット体幹部を含む環境を示す．この方法においては，(b1) のようにロボットは高い速度 V_1 で机に接近し，BE コンタクトを形成した (b2) のちに制御手法を切り替え，(b3) のように接近速度を低く抑えた上で速度 V_2 で短い距離を運動し，OE コンタクトを形成する (b4) ことができる．この方法では，(b2) において本来グラスに及ぶはずの大きな衝撃をロボット身体で引き受けることになる．また，BE コンタクトを形成したと同時にロボットは机の高さの正確な情報を得ることが

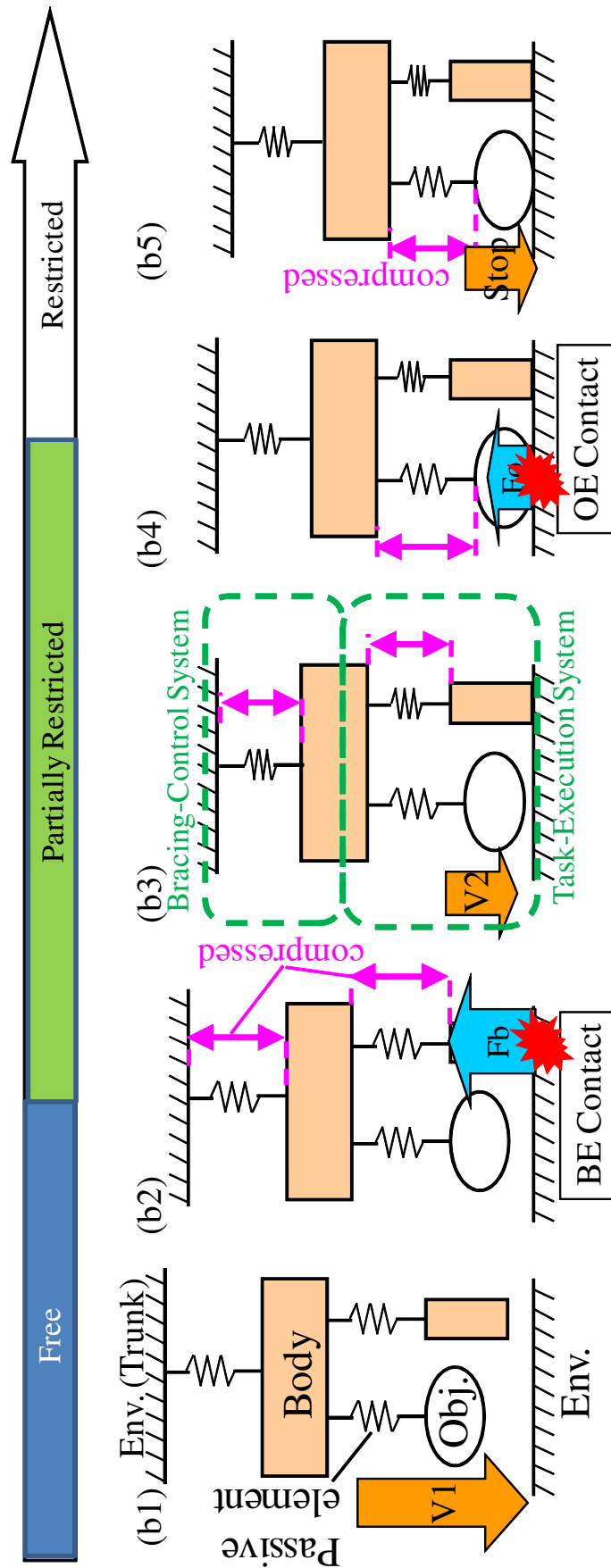


Fig.3.4 Motion Flow of Adding Constraint Task with Active BE contact

でき、確実に接近速度 V_2 を収束することができる。このように、この方法では大局的な接近は高速に行うため、時間の短縮を得るとともに、衝撃を少なく OE コンタクトを形成することができる。

加えて、BE コンタクトにおける衝撃力をも低減することを考える。パッシブコンプライアンスの利点の一つである慣性のデカップリング効果は、式 (3.1) における M に影響を及ぼし、衝撃の低減に役立つ。そのため BE コンタクトを形成する部位を選択する際には、根本側近傍にパッシブコンプライアンスが搭載されている部位を選択すべきだと考えられる。

以上の考察をまとめると、以下の三つの点を踏まえて各システムの制御アルゴリズムを選定するとともに、運動を生成すればよいことが分かった。

- ・ 環境情報の取得
- ・ 接近スピードの減衰
- ・ 慣性のデカップリング

3.3.3 制御アルゴリズムの選定

各システムに搭載する制御アルゴリズムについて議論する。なお、これらの制御アルゴリズムはロボット身体のパッシブコンプライアンスを活用することを前提に構成されている。

作業実行システムに含まれた自由度は OE コンタクトを形成しなければならない。Fig.3.5(a) にこの運動のための、制御ブロック線図を示す。指は対象を把持しつつ、テーブルに対象を置く動作を発現しなければならない。多くの研究者が、このような巧みな操りを実現するためのアルゴリズムを開発しているが、我々の研究グループもまた、機械的な受動要素を当てにした基礎的な操り制御手法 [101] を構築しており、本論文ではこの手法を応用して前述した動作を実現する。その方法とは、各指の初期及び最終姿勢を設計者が手作業でデザインし、コントローラ上で二つの姿勢を関節レベルで線形補間することによって、操り運動を生成するというものである。関節レベルでの線形補間は厳密に指先位置をコントロールするわけではないが、運指にともなう指先位

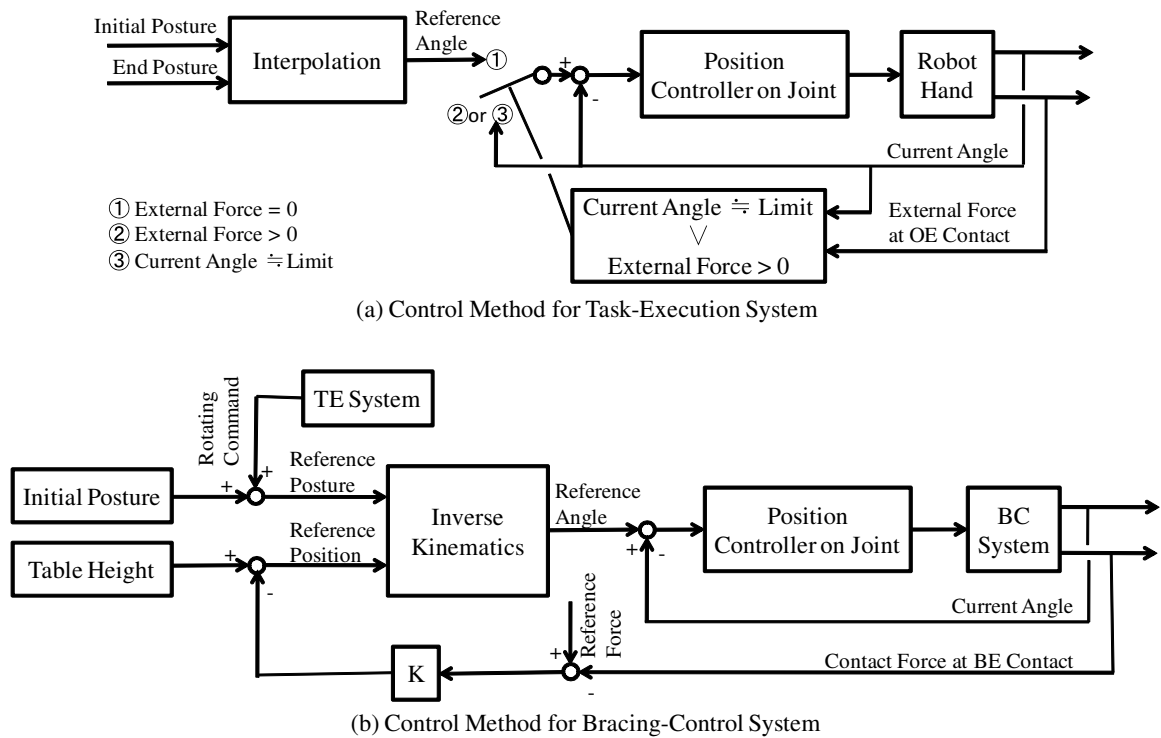


Fig.3.5 Control Block Diagrams for Adding Constraint Task with Active BE contact
置の変動はパッシブコンプライアンスのなじみにより吸収することを前提とし、この
ような単純な構成となっている。実際には、作業実行システムではOEコンタクトの
形成を検知し、その時点で指の運動を停止することになる。また、ブレーシング制御
システムよりBEコンタクトの形成により得られた机の高さ情報を受取り、情報に基づ
き運指速度を減衰する工夫が施されている。

ブレーシング制御システムに含まれた自由度は、BEコンタクトにおいて発生する
接触力を任意の大きさに一定にするための力制御手法によってコントロールされる。
Fig.3.5 (b) にこの運動のための、制御ブロック線図を示す。この制御ブロックは仮想
コンプライアンス制御手法を含み、BEコンタクトにおける接触力を一定に保つ働きを
する。BEコンタクトの形成により、机の高さ情報を運動学から求めることができる。
この情報は作業実行システムに渡される。もし指が最終姿勢に到達してもOEコンタ
クトが形成されなかった場合、作業実行システムはブレーシング制御システムに指示
を出し、ブレーシング制御システムの位置及び姿勢を修正させる。この場合には、ブ
レーシング制御システムにBEコンタクト周りの姿勢の回転を指示し、OEコンタクト

を形成する。

3.4 実験用プラットフォーム ”TWENDY-ONE”

本論文で使用する実機”TWENDY-ONE”の仕様を示す。TWENDY-ONEは台車型の等身大ヒューマノイドロボットである。豊富な力覚・触覚センサが搭載されたハンド・アーム部を用い、以降の試験を行う。

3.4.1 全体仕様

実験に用いる実機 ”TWENDY-ONE ”の主要な仕様を紹介しておく。TWENDY-ONEは全方向移動台車を備えたヒューマノイドロボットで (Fig.3.6), 直立姿勢での肩の高さは床面から 1102[mm] と成人女性の一般的な体格に近いサイズとなっている。台車カバーには複数の超音波センサがぐるりと囲うように配置されているため、周囲環境の接近を検出可能である。また台車カバーに搭載された力覚センサにより、環境との接触を検出可能である。

胴体は旋回 1 自由度, 屈曲 3 自由度の合計 4 自由度を備えている。± 90[deg] の可動範囲を持つ旋回関節により体幹を振るような動きが可能である。また 3 自由度の屈曲動作を組み合わせると、転倒することなく床のものに手が届くように設計されている。胸部のカバーは安全のための柔軟素材で覆われ、またその下には圧力センサが分布するように配されており、本研究では対象としていないが人間共存ロボットのもう一つの重要なアプリケーション例である介助支援などでは、人との触れ合いを検出することが可能である。背部にはバックパックがあり、ロボット各部の運動制御及び動作計画などを計算するコンピュータが 7 台搭載されている。

頭部にはステレオカメラやスピーカが搭載されていて、人間との非接触インタラクションを行う場合に主たる役割を果たす。首は 3 自由度を備えており、カメラのパン・チルトに相当する動きと首を傾げる動きを生成可能である。また他の部位と同様に、力覚センサによる触れ合い検出機能がある。

腕部は肩 3 自由度, 肘 1 自由度, 手首 3 自由度の合計 7 自由度を有する冗長マニピュレータであり、自由度配置やその関節可動域は人のそれに近いデザインとなっている。

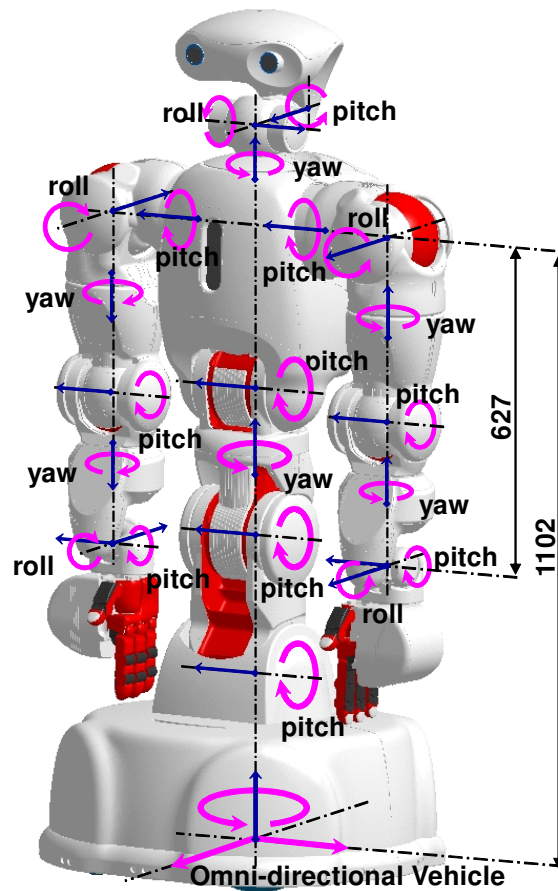


Fig.3.6 Wholebody Appearance and DOF Layout of TWENDY-ONE

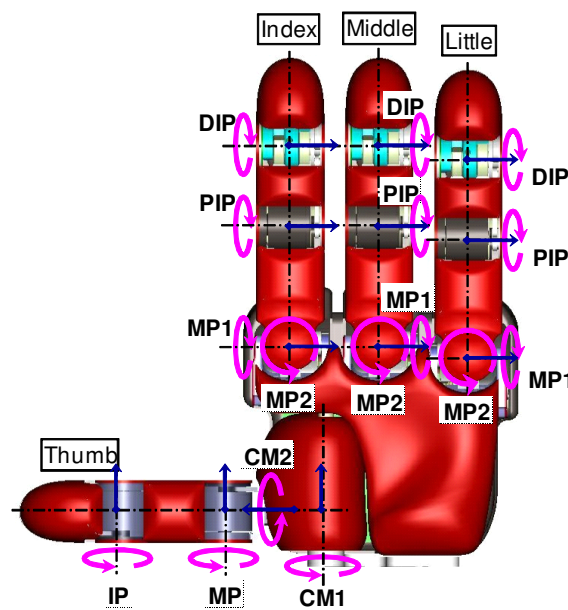


Fig.3.7 DOF Layout of TWENDY-ONE Hand

腕部の手首から肩までの全長は627[mm]である。腕部全体は、滑らかな曲面を基調としたカバーに覆われており、ワイヤハーネスの露出はほとんどない。カバーは安全のための柔軟素材で覆われ、またその下には圧力センサが分布するように配されている。手首には6軸力覚センサが搭載されている。

メカデザインのもっとも特徴的な点として、受動柔軟性を挙げることができる。受動柔軟性は外部との接触に対し非常に柔らかく対応できるという点で、多くの研究者に注目されており、我々の研究グループもまた TWENDY-ONE への採用を決めた。TWENDY-ONE に採用した受動柔軟機構は粘性要素と弾性要素が組み合わせられており、センサによりたわみを計測することができる。これにより、手先で発生する力の制御を非常に簡単に行うことができる。受動柔軟機構は肩3自由度と肘1自由度に搭載されている。詳細は次項に譲る。

手部は示指、中指、小指及び拇指による4指ハンドであり、13自由度を有する。またリンク長や自由度配置を人間のそれにできるだけ模している。Fig.3.7は自由度配置をあらわす。これは日常生活におけるさまざまな手作業を可能とするために、人間の指の動きや把持形態を参考にデザインされており[103][104]、実際に19種類の把持形態をとることが可能である。その他の特徴としては、各指の指先は、人間に模した滑らかな曲面と爪を有し、小型の6軸力覚センサが備えられている。また示指、中指、小指のMP関節及びDIP関節には肩・肘と同様に受動柔軟性を搭載している。ただし指はサイズの面での制約が強く、受動柔軟性は腕部より簡単な構造で、弾性要素であるコイルばねが入っているだけであるが、このたわみはポテンシオメータにより計測可能である。一部を除いて指・手掌の全面は、柔軟素材で覆われており、また柔軟素材の下には分布型の圧力センサが搭載されている。

3.4.2 受動柔軟機構

本研究では、我々の研究グループにより開発された高空間効率な受動柔軟関節機構[54]を利用する。この機構は小型・軽量かつ高い線形性を有する粘弾性機構である。提案する機構は弾性要素であるトーションバーと粘性要素であるロータリダンパの二つの要素からなる(Fig.3.8)。トーションバーは捻転することで弾性を発揮する部材であ

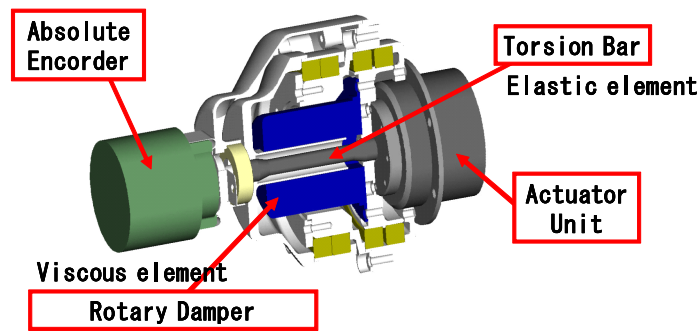


Fig.3.8 Visco-Elastic Mechanism of TWENDY-ONE's Passive Joints

り，屈曲することで弾性を発揮する板ばねと異なり変位のための空間マージンを全く必要としない．トーシヨンバーの両端はセレーション加工を施した上，入出力の各フランジに圧入される．この接続方法は機械的な遊びがないため，弾性特性のヒステリシス低減に非常に効果的である．粘性要素であるダンパは，ディスク中央に出力孔を有し，トーシヨンバーの捻転に対応し粘性効果を発揮するロータリダンパでなければならない．ロータリダンパとトーシヨンバーとを平行同軸で配置することによって空間効率を高め，小型・軽量の粘弾性関節機構を構成することができる．

トーシヨンバーの素材に注目する．一般的に用いられるばね鋼 (SUP9) は強度が低く剛性が高いため細く長い形状にする必要があり，結果的に関節が大型化してしまう恐れがある．そこで本研究ではばね鋼に替わる素材としてゴムメタルに注目した．小型・軽量化するためにトーシヨンバーに求められる性能は細く短い形状でありながら巨大な弾性変形能を発揮することである．つまりトーシヨンバーの素材には低弾性・高剛性であることが求められる．ゴムメタル [105] は豊田中央研究所において開発された超弾性・超塑性チタン合金である．メーカーによるとゴムメタルは他の素材と比較して，著しく低い弾性と高い剛性が共存する素材である．そのため 2.5 % を超える巨大な弾性変形能を発揮することが可能である．これらの特性からゴムメタルでトーシヨンバーを製作した場合，細い軸径でも降伏せず，短い有効長でも大きなばね変位角を実現することができるため，ゴムメタル製のトーシヨンバーを製作し粘弾性機構に取り入れている．

ダンパは，不二ラテックスで開発されたロータリディスクダンパを採用した [106] . 選択したディスクダンパは出力孔がディスクの中心に配置され，回転部は出力孔に，固

定部は入力部に固定された外殻に接続されている．制動力は回転部と固定部の間に注入されたシリコンオイルの粘性抵抗を利用し生成される．

3.5 評価試験 -ガラス定置作業-

ガラスの定置を実機で実際に行い，提案手法の有効性を確認する．ガラスの定置作業は拘束付与作業の中でも最もシンプルな作業であり，本研究で提案した制御枠組みの検証に適していると考えられる．

3.5.1 試験条件

実験は，三つの条件で実際に作業を行った際の，接触により生じる力を計測し評価する．力の計測は机側に埋め込んだ小型6軸力覚センサ（Nitta製 IFS-67M25A 50-I 40）により行う．

全試行において共通する試験条件を述べる．初期条件として，150[g]のガラスを握った上で，机から200[mm]の高さの位置から接近を開始する．接近速度は300[mm/s]で一定とした．これは一般的なロボットの運動においてかなり高速に設定している．どの試行においても，作業シーケンスはオフラインでプログラムされており，接触の検出をキーイベントとしてシーケンスが自動的に進行する．

試験は以下に示す計3種類の条件で行った．

- (a) 直接的なアプローチ
- (b) 手掌の側面による BE コンタクトを用いたアプローチ
- (c) 小指の指先側面による BE コンタクトを用いたアプローチ

条件 (a) においては，ロボットは全手掌掴みにより対象であるガラスの上部を把持し，接近に伴い自動的に机と OE コンタクトを形成するようにロボット手首の姿勢を調整している．このとき BE コンタクトは形成されないため，条件 (a) は能動的な身体環境接触を利用しない一般的な作業方法であると言える．OE コンタクトは拇指指先の6軸力覚センサを用いて行った．

条件 (b) 及び (c) においては，把持は拇指・示指・中指の3指の指先で対象であるガラスを摘み，把持位置はガラスの下部である．これによりロボット身体がガラス底面より机に近い状態で接近を開始し，BE コンタクトの形成を可能とした．

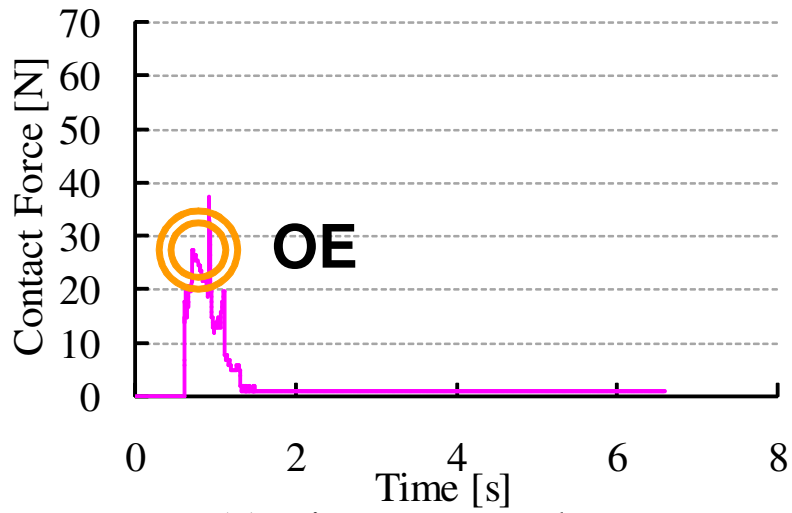
条件 (b) においては，手掌側面により BE コンタクトが形成されるように手首姿勢を調整した．BE コンタクトの検出はロボット手首に搭載された6軸力覚センサを用いて行った．BE コンタクトの検出後，指の運動により把持を維持したままガラスを机に接近させる．このときロボットの運動学から，BE コンタクトの接触位置つまり机の高さ情報を幾何学的に計算し，机の接近に伴い接近速度を減衰させる．

条件 (c) においては，小指指先で BE コンタクトが形成されるように指・手首姿勢を調整した．BE コンタクトの検出は小指指先に搭載された6軸力覚センサを用いて行った．検出後の運動に関しては，条件 (b) と同様である．

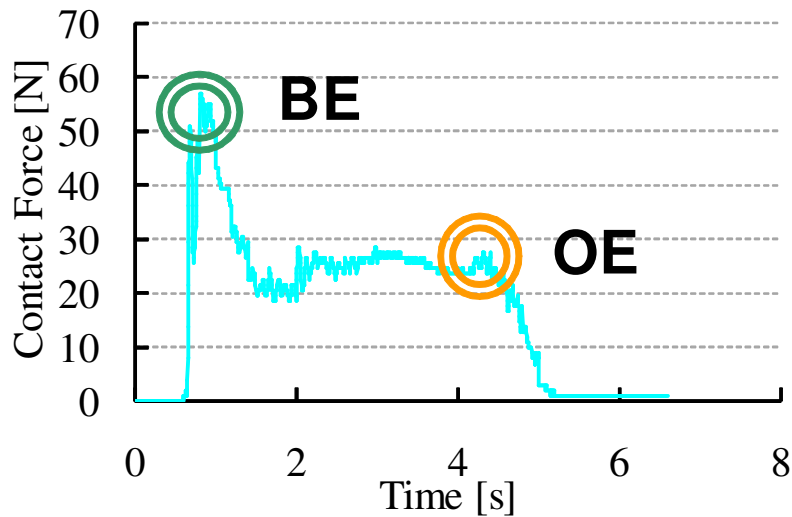
3.5.2 試験結果

Fig.3.9 は試験結果を表す．x 軸は時間 [s]，y 軸は机側のセンサにより計測された接触力 [N] を表す．条件 (a) のグラフには実験開始から 1[s] 程度経過したところで，接触力のピークが表れている．条件 (a) においては，OE コンタクトのみを形成するため，これは OE コンタクトの形成に伴う接触力であり，30[N] に到達している．このとき実際に，非常に大きな衝突音が発生しており，非常に大きな力がガラスにかかっていると考えられる．実験開始から 1.5[s] 程度経過しピークが納まった後に接触力が 0 となっているのは，接触検出後ロボットが素早くガラスを手放しているためである．

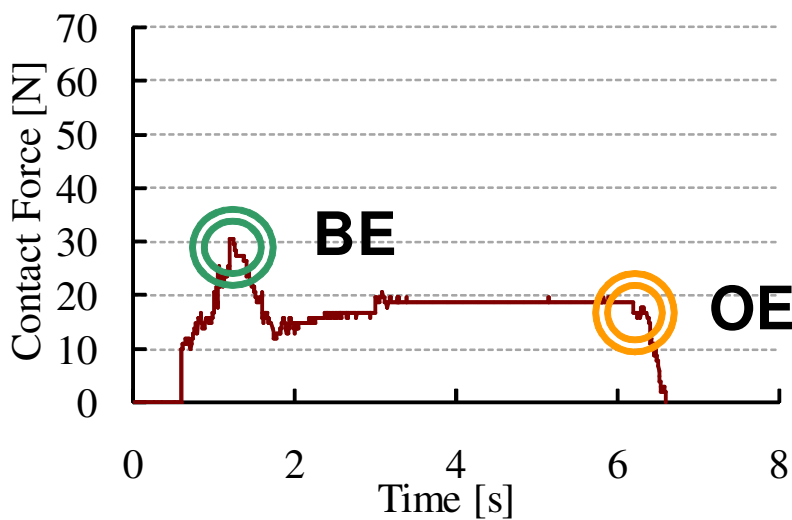
条件 (b) 及び (c) では，初めに BE コンタクト形成し，その後 OE コンタクトを形成するため，接触力のピークが二つ現われてしかるべきである．しかしながら条件 (b) 及び (c) のグラフにおいて，目視ではっきりと確認できるピークは一つだけである．開始から 1[s] 程度経過したところに現れるこのピークは，BE コンタクトにより発生した接触力である．開始から 1.5[s] 程度経過しピークが納まった後にしばらく続く接触力は，BE コンタクトにおいて発生しブレーシング制御システムによりコントロールされている．OE コンタクトにより発生したピークは極めて小さく目視ではピークとして認識しがたいが，拇指の6軸力覚センサの情報によると，条件 (b) においては約 4.3[s] 後，条



(a) Direct approach



(b) With palm contact



(c) With little finger contact

Fig.3.9 Data of Pedestal Force Sensor of Glass Placing Task

件(c)においては6.2[s]後にOEコンタクトが形成されており，グラフ上では同時刻に計測されたピークに印をつけている．実際に，OEコンタクトが形成された瞬間の衝撃音は確認されていない．

3.5.3 考察

Fig.3.10(i)は，各アプローチにおいてOEコンタクトにおいて発生した衝撃力を表している．条件(a)においては35[N]を超える衝撃力が発生しているのに対して，条件(b)及び(c)では5[N]を下回る衝撃力のみ発生している．これにより条件(b)及び(c)では，グラスに非常に小さな接触力のみ掛かっていることが分かった．試験結果から，本論文で提案した手法により対象物(グラス)と環境(机)間の接触状態を精度よく制御可能であり，優しくグラスを置くという巧みな手作業が実現可能であることが示されたと言える．

しかし，Fig.3.9から分かるように，条件(b)及び(c)において作業に掛かっている時間は十分短いとは言い難い．接触力がほぼ0になる時刻を作業終了時とすれば，条件(a)では約1.5[s]，条件(b)では約5[s]，条件(c)では約6.5[s]となっている．これは本実験において，OEコンタクトの接触力を最大限に小さくするために作業実行システムにおける接近速度を極めて小さくしたためである．作業パフォーマンスという観点からは，再調整による改善が望ましい．

Fig.3.10(ii)は，各アプローチにおいてBEコンタクトにおいて発生した衝撃力を表している．条件(b)においては60[N]にも及ぶのに対し，条件(c)においては30[N]程度に収まっている．これは，BEコンタクトを形成する部位の違いによると考えられる．TWENDY-ONEは指のMP関節に受動要素であるばねを有しており，前節で述べたように接触部の質量は他部位の質量と分離(デカップリング)され，応答する．条件(c)においては小指の質量のみ衝撃に影響を及ぼすのに対し，条件(b)ではハンド全体及び前腕部の質量が影響を及ぼす．このデカップリングの効果により，条件(b)と(c)でBEコンタクトでの接触力に違いが出たと考えられる．この結果は，BEコンタクトを形成する部位として，よりOEコンタクト形成部位に近い部位を選ぶべきであるということを示唆している．より小さなOBEループを形成すべきであると言える．

各作業条件における接触力の最大値という観点から，条件 (a) の OE コンタクトにおける接触力と，条件 (b)，(c) の BE コンタクトにおける接触力を比較すると，条件 (b)，(c) の BE コンタクトにおける接触力がより大きいことが分かる．これは条件 (a) においてかなりの接近速度で OE コンタクトを形成した際に，ガラス 指間に滑りが起きてしまったことが原因だと考えている．滑りにより衝撃力が散逸するとともに質量と分離（デカップリング）が起こり，式 (3.1) における質量 M の項が実質的にガラスの重量のみとかなり低減される．仮に滑りが起きないほどの力で把持をした場合には，こ

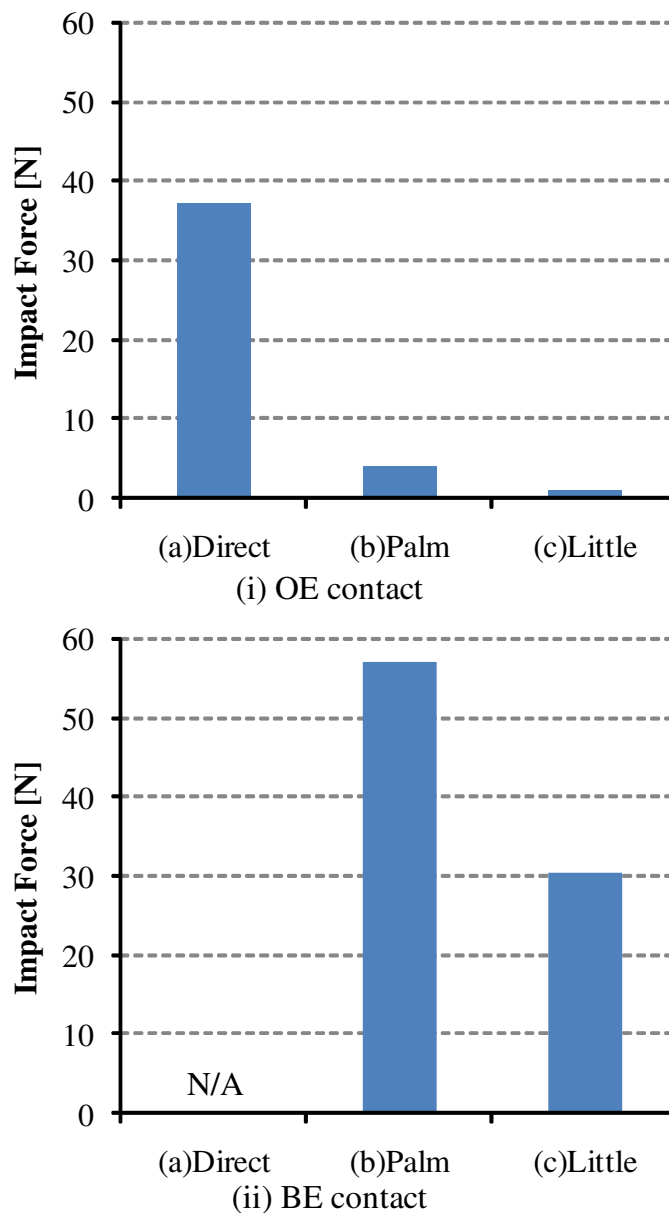


Fig.3.10 Bar Chart of Impact Force of Glass Placing task

の質量項が非常に大きくなり，接触力は条件 (b) と同程度になるものと予想される．実験時に目視のレベルでは滑りを確認しているが，実機の最大把持力という制約上滑りを防ぐことはできず，この考察は厳密には検証できていない．

3.6 まとめ

本章では，能動的身体 環境接触を利用し拘束付与・除去作業を遂行するための制御枠組みを案出した．制御枠組みに対する機能要求は，BE コンタクトを維持しつつ OE コンタクトをコントロールするということである．本枠組みは OBE ループの概念を基にハンド アーム系の自由度を二つのグループに分割し，作業実行システムに OE コンタクトを，プレーシングシステムに BE コンタクトを制御させるという，極めてシンプルなものになっている．また作業モデルの分析からパッシブコンプライアンスと作業パフォーマンスの関係を考察した結果，接触形成による先行的な環境位置の把握，接近速度の減衰，受動要素による慣性のデカップリング効果の三つが影響を及ぼすと結論づけた．本制御枠組みを拘束付与作業の代表例であるガラスの定置作業に適用した場合に必要な制御アルゴリズムを，考察結果を踏まえて導入した．本制御枠組みを実機に適用しガラスの定置作業で効果を検証している．実験により，本制御枠組みにより小指指先や手掌側面といった部位による能動的身体 環境接触を利用した作業方法が遂行可能であることを示した．またこれらの作業方法では，極めて小さな接触力の発生に抑えつつ OE コンタクトを形成可能，つまり優しくガラスを置くことが可能であることが示され，手作業の巧みさの向上を端的に示す結果となった，同時に，能動的身体 環境接触を形成する部位として，小指指先は手掌側面に比べて BE コンタクトにおける接触力という意味で優れており，接触を形成する部位の選択が重要な課題であることが改めて示された．

第4章 拘束除去作業への適用

4.1 はじめに

本章では、3章で案出した能動的身体-環境接触を利用して作業を実行するための制御枠組みを、拘束除去作業に適用しその有効性を検証する。能動的身体-環境接触は、身体による付加的な環境との接触を指し、それを与えなくても作業を実行することはできるという特徴を有している。また対象とする作業は2章における検討から、環境から与えられていた拘束を対象から除去する作業である。3章においては、能動的身体-環境接触を利用する際の必要となる、BEコンタクトを維持しつつOEコンタクトをコントロールするという機能を満たす制御枠組みを提案し、拘束付与作業の代表例であるガラスの定置作業に適用するとともに、実機実験により対象物（ガラス）と環境（机）間の接触力を小さく抑えつつ接触を形成するという意味で巧みさの向上を確認した。本章では、同制御枠組みを拘束除去作業に適用する。まず、拘束除去作業の最もシンプルな1例として引出しを開ける作業を取り上げ、作業のポイントを明確にする。さらに受動性と作業のポイントの関係に対する考察を基に、提案した枠組みに実装する制御アルゴリズムを案出する。実機を用いた実験により、引出し開け作業において提案手法の有効性を検証する。さらに拘束除去作業の他の例として、皮むき作業に対しても同手法の適用と実機実験を示し、有効性を検証する。

4.2 制御枠組みの適用と制御アルゴリズムの選定 -拘束除去作業-

本節では、拘束除去作業の1例として取り上げた引き出し作業に関して、3章で提案した制御枠組みを用いてどのように巧みさを改善できるのかを議論する。

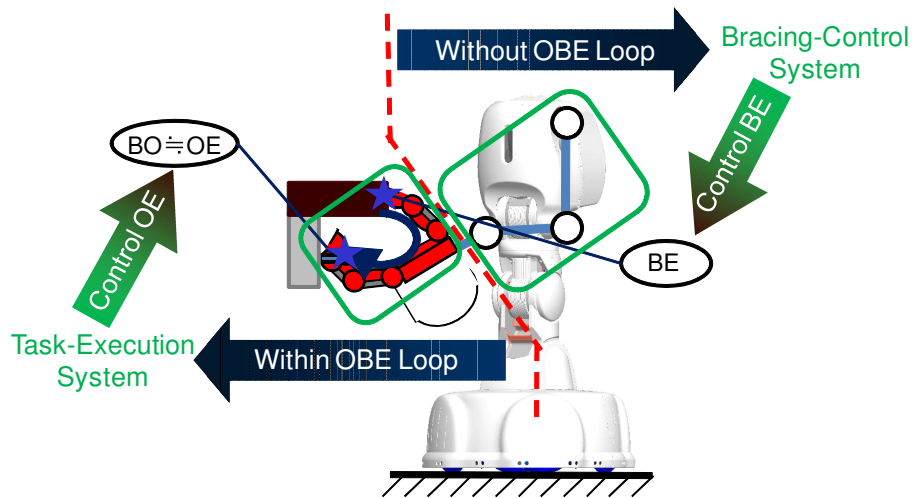


Fig.4.1 Task-Execution and Bracing-Control System
for Drawer Opening Task with Active BE Contact

4.2.1 制御枠組みの適用

引出し開け作業に対する制御枠組みの適用について述べる．本章でも3章と同様に，能動的身体 環境接触を形成する部位の選定については詳しく考察せず，人の方法を参考に拇指指先により能動的身体 環境接触を形成することとした．Fig.4.1に引出し開け作業遂行時のロボットの様子を示している．拇指以外の他指指先を引出しの取っ手に引っ掛け，拇指指先により能動的身体 環境接触を形成する．これにより他指指先から拇指指先に掛けてのOBEループが形成されるため，これに従いロボット身体を二つのグループに分ける．このとき，作業実行システムは指に搭載された自由度全てを内包し，ブレーシング制御システムは他の自由度を内包することとなる．結果として，グラス定置作業と同様のシステム構成となるが，各システムに搭載する制御アルゴリズムは，次項以降の動作のポイントに関する検討により異なるものとなる．

4.2.2 動作のポイントと制御アルゴリズムに対する要件

引出し開け作業の動作のポイントを明確にした上でパッシブコンプライアンスとの関係を明らかにする．2章3節1項で詳しく述べているが，引出し開け作業において問題となるのは，引出しに対し環境が与える拘束が消失する瞬間に起こる突発的な運動である．この急激な運動の発生を抑制する，つまり振動を抑えることが作業のパフォー

マンスを向上するという意味での課題となる。これは本研究における手作業の巧みさの定義、つまり対象物と環境などの他物体の間の接触状態を精度よく制御するという観点からも重要な課題である。拘束された引出しに力をかけるとロボット身体に搭載されたパッシブコンプライアンスは大きくたわみ、弾性エネルギーを保有した状態となる。引出しが磁力で拘束されている場合は特に、ロボットは拘束を振り切るためにある程度大きな力を掛ける。拘束が消失した瞬間にこの弾性エネルギーが解放され、マニピュレータのに急激な運動をもたらす。引出しはこのマニピュレータの急激な運動に引きずられともに運動する。より柔らかいばねを搭載している場合にはたわみが大きくなり、結果としてより大きな弾性エネルギーを貯蓄することになる。このようにこの作業においては、ロボット身体に搭載されたばね全体のばね定数がより大きいことが望まれる。直観的に理解するためにここで合成ばね定数の考え方を確認する。ばねの数を n 、 i 番目のばねのばね定数を K_i とすると、合成ばね定数 K は以下の式のように表わすことができる。

$$\frac{1}{K} = \sum_{i=0}^n \frac{1}{K_i} \quad (4.1)$$

この式から分かることは、合成ばね定数 K を大きくするためにはばねの数 n を少なくする、もしくは各ばねのばね定数 K_i を大きくすることが必要だということである。本研究では弾性エネルギーを貯蔵してするばねの数を減らすことを目的とし、各システムに導入する制御アルゴリズムを検討する。

4.2.3 制御アルゴリズムの選定

制御アルゴリズムは、引出し開け動作の生成及びばねの数を減らすことを目的とし選定する。作業実行システムには、Fig.4.2(a)の制御アルゴリズムを導入し、引出し開け動作を生成させる。これは拘束付与作業において作業実行システムに搭載した制御アルゴリズム (Fig.3.5(a)) とほぼ同じ制御アルゴリズムを導入すればよい。その基本的な構成は各指の初期及び最終姿勢を設計者が手作業でデザインし、コントローラ上で二つの姿勢を関節レベルで線形補間することによって、操り運動を生成するというも

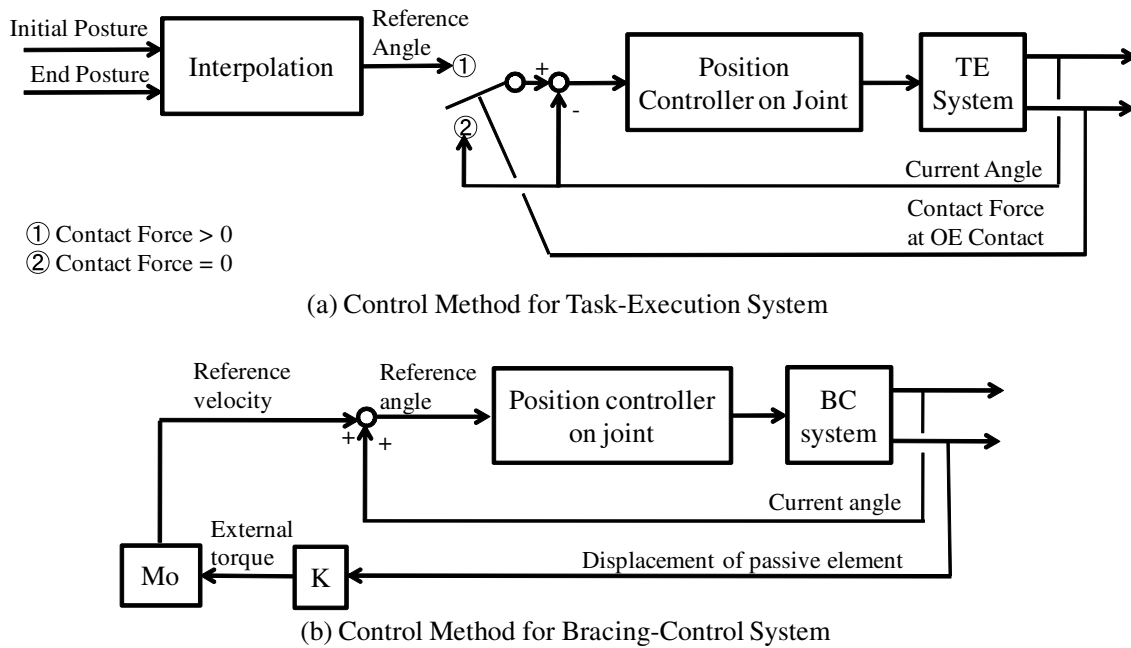


Fig.4.2 Control Block Diagrams for Removing Constraint Task with Active BE Contact
 のである．作業実行システムはOEコンタクトにおいて発生する接触力を監視し，OE
 コンタクトの消失を検出した時に，運動を停止させる．これは Fig.3.5(a) と逆のトリ
 ガーとなっている．

ブレーシング制御システム上の自由度は，Fig.4.2(b) に示される制御アルゴリズムで
 コントロールする．これは各関節に働く外力トルクを監視し，それを打ち消すように
 運動を生成するものである．外力トルクは，関節に搭載された受動要素である機械ば
 ねのたわみを監視することで観測できる．このたわみにばね定数を掛け合わせ外力ト
 ルクを算出したのちに，モビリティ制御によりそれを打ち消すように関節ごとの目標
 速度を算出し，現在角度に足し合わせることで目標としている．

このときブレーシング制御システムは外力から逃げる運動を生成するため，外力は
 拇指側に伝達し BE コンタクトに達する．結果としてハンド アーム系全体の運動と
 しては，BE コンタクトを維持したまま引き出しを開けることができる．また，ブレー
 シング制御システム内のパッシブコンプライアンスは弾性エネルギーを貯蔵しないため，
 仮想的にばねの数 n を少なくすることができる．これにより拘束の消失に伴う引き出
 しの急激な運動を抑制することができる．より急激な運動を抑制するためには，作業
 実行システム内に含まれるパッシブコンプライアンスを少なくすることが必要であり，

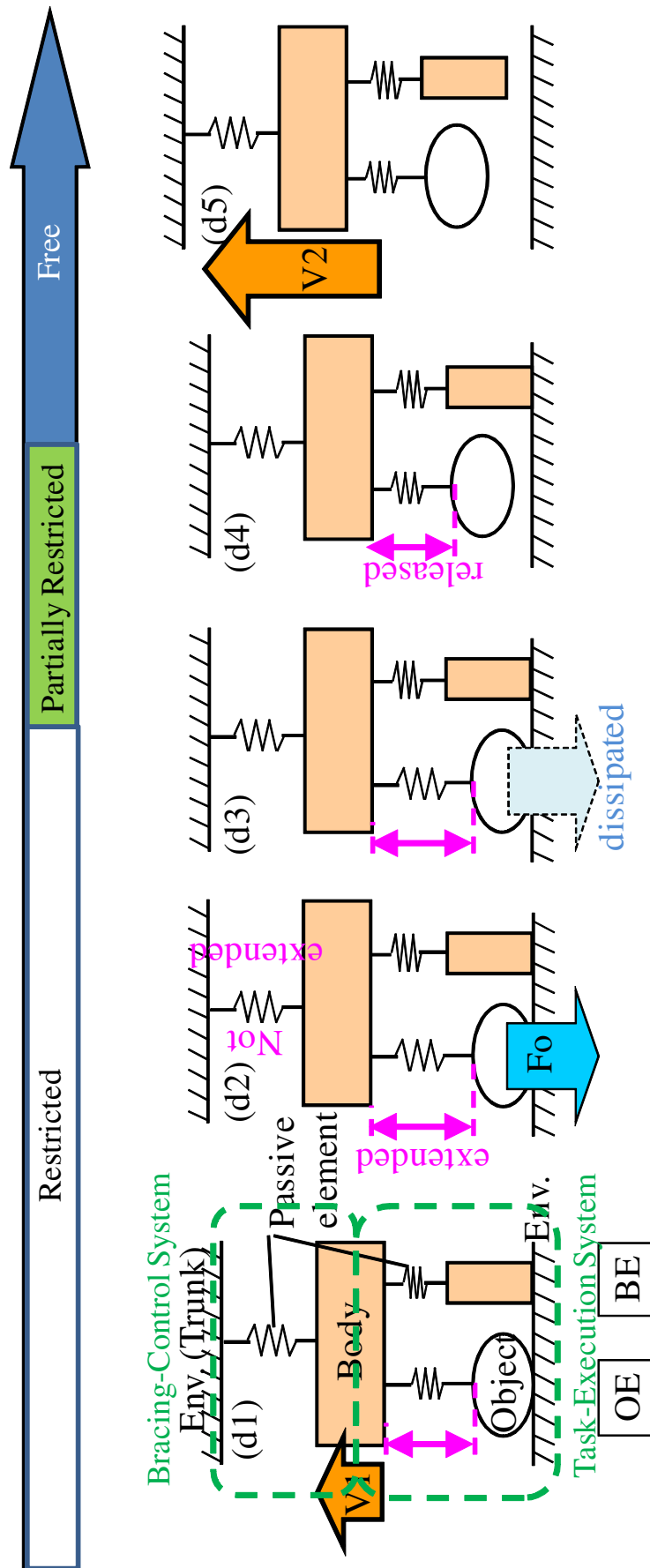


Fig.4.3 Motion Flow of Removing Constraint Task with Active BE contact

より小さな OBE ループが望まれる。

以上の議論に基づき，制御アルゴリズムを適用する．引出し開けの作業モデルを Fig.4.3 に示す．これは能動的身体 環境接触を利用した作業方法を表している．図中の記号が示す内容は，Fig.2.10 と同様であり，丸はロボットにより把持された対象物を示し，四角はアクチュエータや構造部材を含めたロボット身体部位を示す．ギザギザ部はロボット身体に搭載されたパッシブコンプライアンスを示す．斜線部はロボット体幹部を含む環境を示す．(d1) に示す各システムに対し提案する制御アルゴリズムを導入することにより，(d2),(d3) においては引出しに及ぼす力を大きくしても，プレーシング制御システム内のばねが伸展されることはない．なお (d4) 以降の拘束が消失したのちには，能動的身体 環境接触を用いずに，指部の姿勢を固定した上で腕部軌道制御により開ける運動を生成すればよい．

作業に潜む不確定性と提案する作業方法の関係を考える．引出しの拘束力は当然ある値になるよう，メーカ側で設計されているが，厳密には一定にはならない．さらに，磁石表面に付着したちりやほこりといった条件による変動も見過ごすことはできない．結果として引出しの拘束力を振り切るためにどの程度の大きさの力が必要かを正確に見積もることは難しい．しかしながら，本手法はばねの数を減らすという本質的な解決を与えるため，この問題に注意を向けずとも効果を期待できるという特徴がある．

4.3 評価試験 -引出し開け作業-

実機 TWENDY-ONE を用い，拘束除去作業に対する本手法の有効性を確認する．TWENDY-ONE の仕様に関しては3章4節を参照されたい．具体例として拘束除去作業の中でも，最もシンプルでありながら最大拘束力が比較的大きい引出し開け作業にチャレンジする．

4.3.1 試験条件

実験条件として以下の条件を固定とした．

- ・引出し-ロボット体幹間の距離は 350[mm] とする．

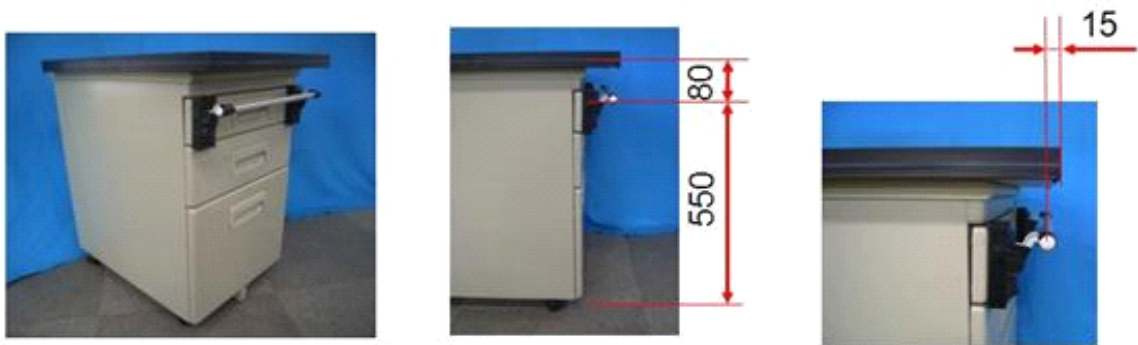


Fig.4.4 Actual Drawer -Experimental Setup-

- ・地面から取手までの高さが550[mm]の引出しを用いる。
- ・頭部，胴部，台車の自由度に関しては使用しない。
- ・引出しは6[s]で50[mm]開けるものとする。
- ・取手を握った姿勢から実験を開始する。

実験対象とする引出しを Fig.4.4 に示す。この引出しの各パラメータの値は一般的な事務機の引出しに基づいて設定した。一般的な引出しを用いてはいるが、取っ手部分は TWENDY-ONE のハンド用に大きめのものを付け加えている。また、引出しの磁力による拘束力は冷蔵庫の引出しを想定し、一般の冷蔵庫と同等の約 20[N] となるように調整を行った。

試験は以下に示す計 3 種類の動作条件で行った。

- (A) 従来のアプローチ（手部姿勢を不変で腕部軌道制御により開ける）
- (B) 提案アプローチ（指軌道は MP1 関節ばねが最もたわみにくい姿勢をつなぐ）
- (C) 提案アプローチ（指軌道は MP1 関節ばねが最もたわみやすい初期をつなぐ）

条件 (B)，(C) において、ハンドの初期姿勢は BE コンタクト及び BO コンタクトの両者が形成できるようにマニュアルでデザインされているが、指先位置と MP 受動関節の位置関係によりデザインに違いを与えている。条件 (B) は指先位置に加わる反力が MP 受動関節に対してできるだけ小さいモーメントアームを形成するようにデザインされ、条件 (C) はできるだけ大きいモーメントアームを形成するようにデザインされている。どちらにおいても、最終姿勢は同様に両接触を維持しつつ引出しを 3[cm] 開けた状態の姿勢が取れるようにデザインされている。これらの二つの姿勢を単純に補

間するだけで，望む運動が手に入る．ただし条件 (B)，(C) では，手部軌道制御で引出しを 15[mm] 開けた後は，腕部の軌道制御により残りの 35[mm] を開ける．上記 3 条件でそれぞれ 3 回ずつ引出し開け作業を行い，手先拘束力の不連続変化が発生した時の指先位置変動量および腕部および手部受動柔軟関節の関節ばねたわみ量を計測した．拘束力の不連続変化の発生を検出する手段として，Fig.4.5 のようにロボットに搭載された 6 軸力覚センサの値を用いる．拇指を環境接触させる場合は拇指の指先 6 軸力覚センサの z 軸方向の力の値を，腕部だけの軌道制御の場合は手首 6 軸力覚センサの x 軸方向の力の値をそれぞれ計測することで拘束力が不連続変化するタイミングのデータを取得することとする．

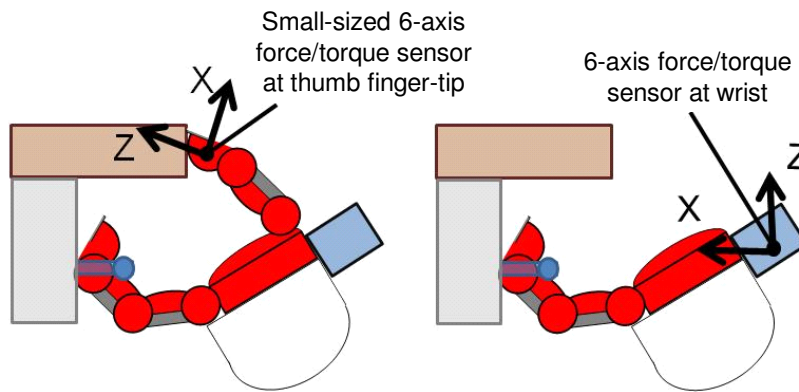
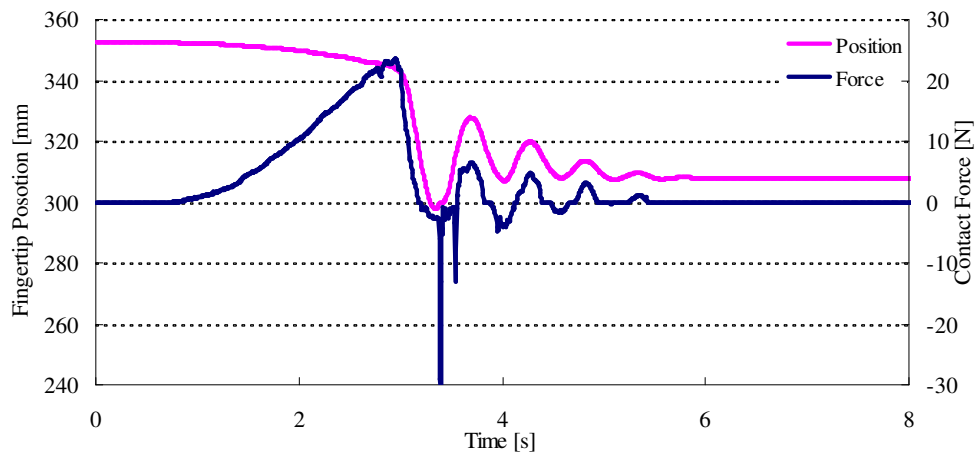


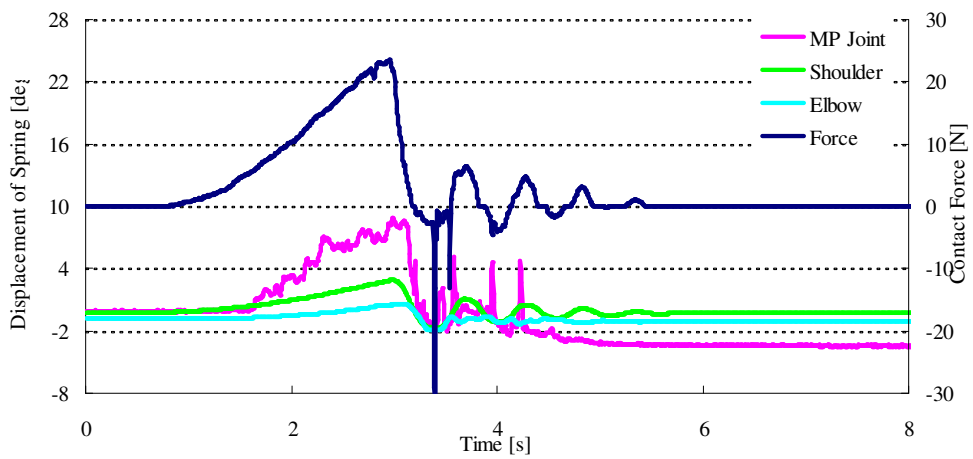
Fig.4.5 Coordination Systems for Force Measurement

4.3.2 試験結果

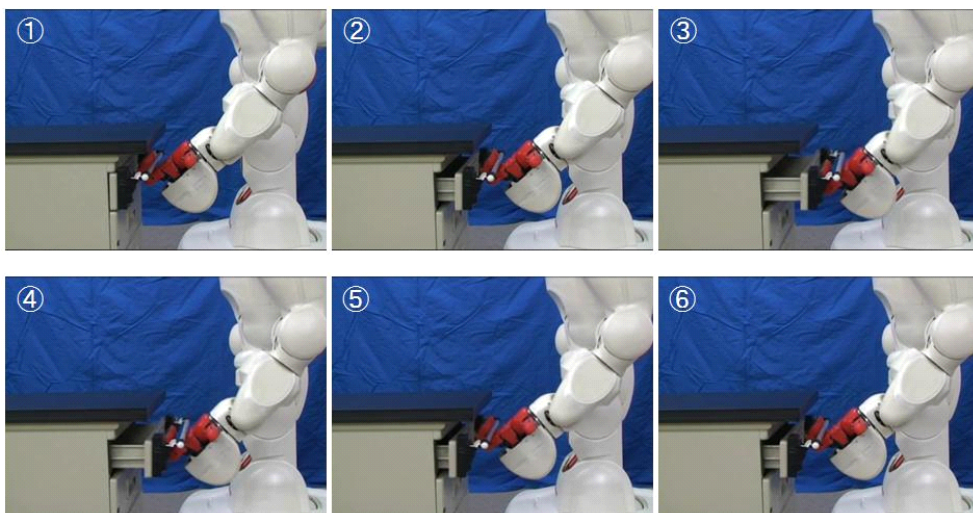
前項条件 (A) での結果を Fig.4.6 に，条件 (B) での結果を Fig.4.7 に，条件 (C) での結果を Fig.4.8 に示す．各図のグラフ (a) は指先位置，手先拘束力の時間変化を表している． x 軸は時間を表し，左の y 軸は指先位置，右の y 軸は接触力を表す．指先位置はロボット座標系の x 軸方向（開閉方向）における指先位置に相当し，反力に関しては前項で述べたセンサで取得した値を表している．各図のグラフ (b) は手先拘束力，腕部肩・肘関節および手部 MP1 関節のばねたわみ量の時間変化を表している． x 軸は時間を表し，左の y 軸は関節ばねのたわみ量，右の y 軸は接触力を表す．グラフ (a),(b) とともに，初めに現れる接触力のピークとともに拘束は消失している．各図の連続写真 (c) は，実際の引出し開け実験における実機および引出しの挙動を示している．



(a) Fingertip Position Movement

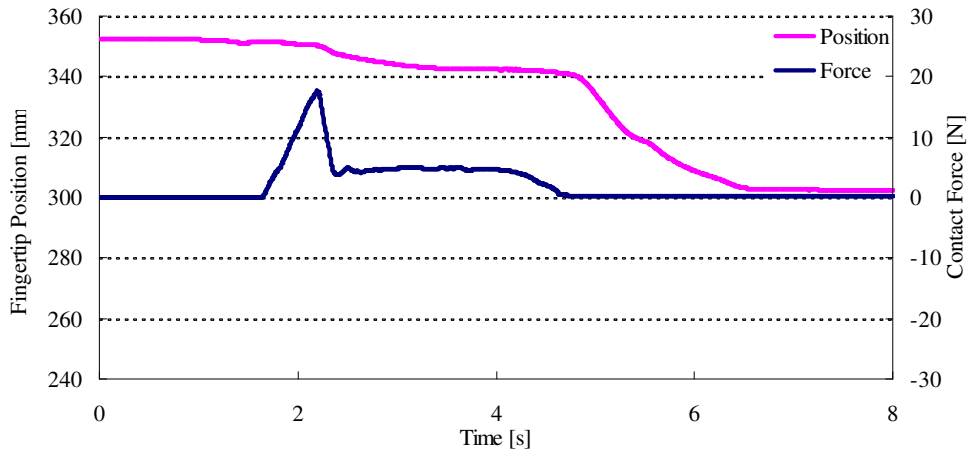


(b) Movement of Spring Displacement

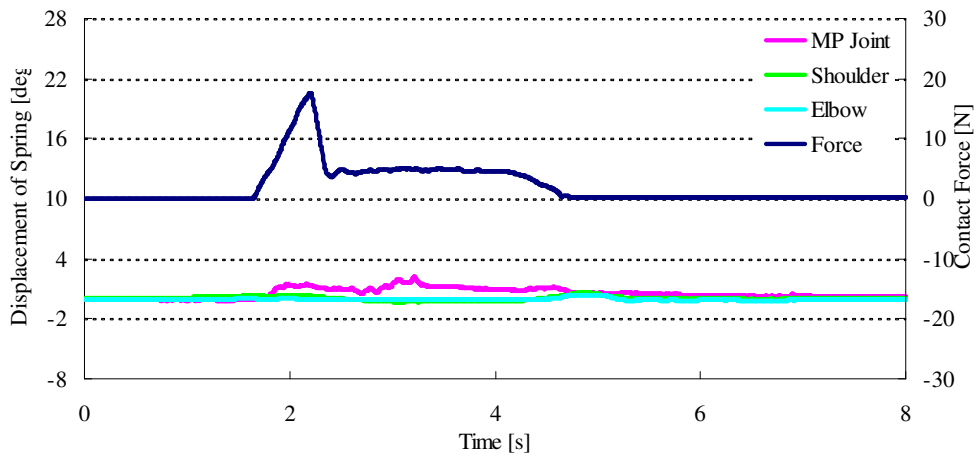


(c) Sequential Photograph

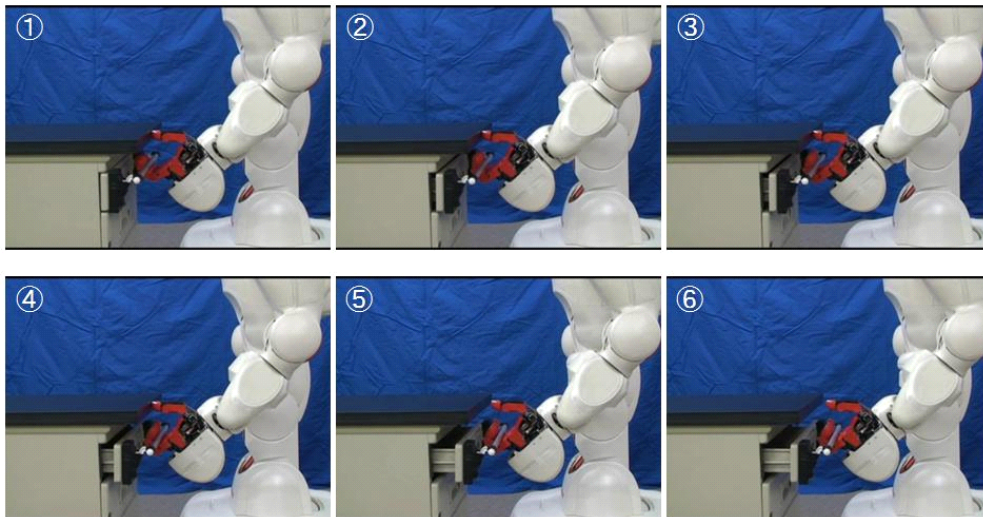
Fig.4.6 Experimental Results of Drawer Opening Task on Condition A



(a) Fingertip Position Movement

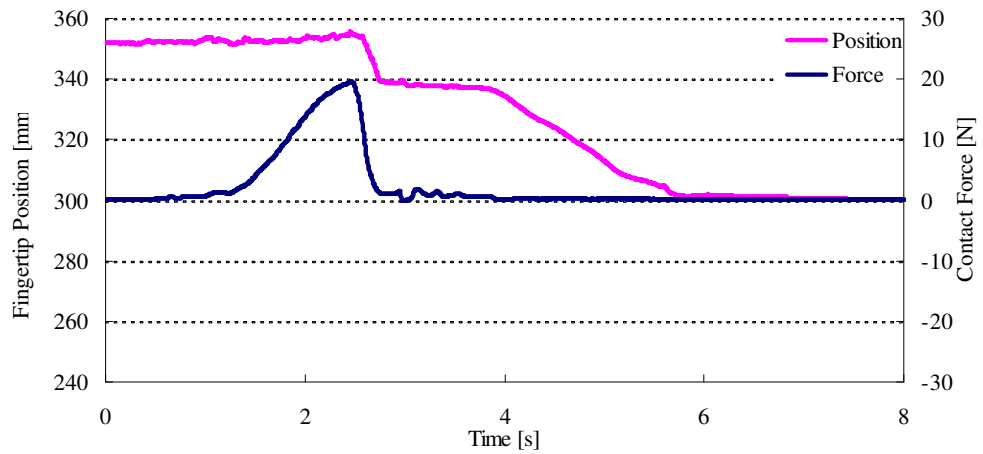


(b) Movement of Spring Displacement

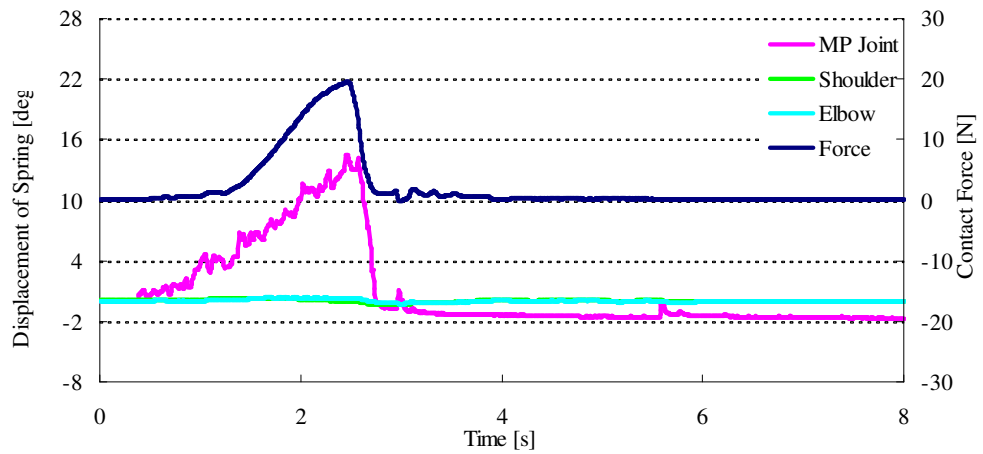


(c) Sequential Photograph

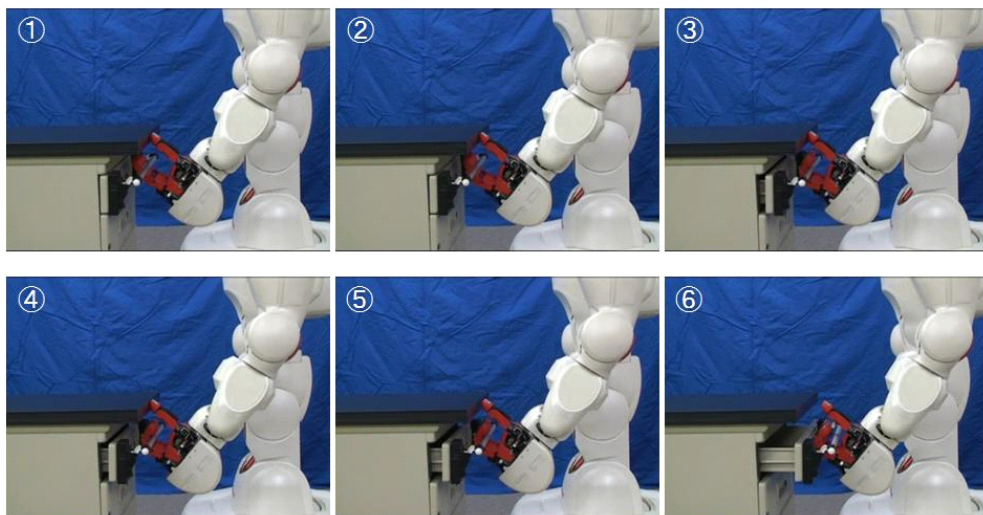
Fig.4.7 Experimental Results of Drawer Opening Task on Condition B



(a) Fingertip Position Movement



(b) Movement of Spring Displacement



(c) Sequential Photograph

Fig.4.8 Experimental Results of Drawer Opening Task on Condition C

4.3.3 考察

条件 (A) ~ 条件 (C) において手先拘束力の不連続変化が発生した際の指先位置不連続変位量と、引出し開け作業中での腕部受動柔軟関節の最大ばねたわみ量を Fig.4.9 に示す。

条件 (A) ~ 条件 (C) において手先拘束力の不連続変化が発生した際の指先位置不連続変位量と、引出し開け作業中での手部受動柔軟関節の最大ばねたわみ量を Fig.4.10 に

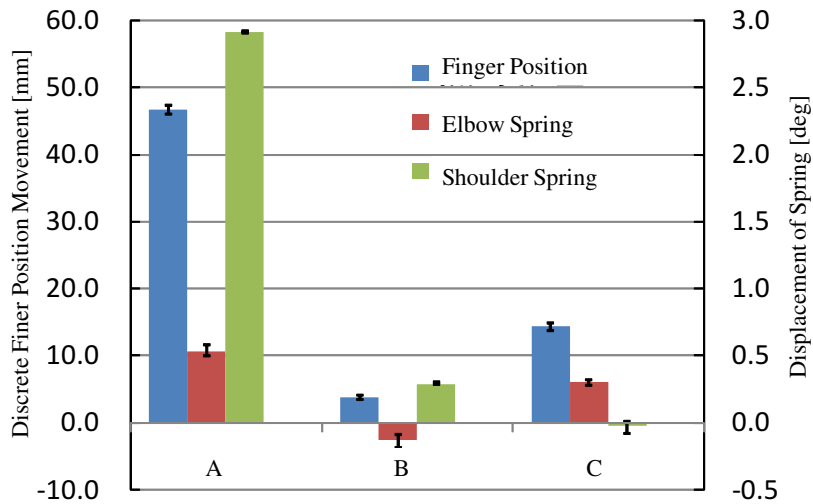


Fig.4.9 Discrete Change of Finger-Tip Position and Maximum Displacement of Arm's Springs

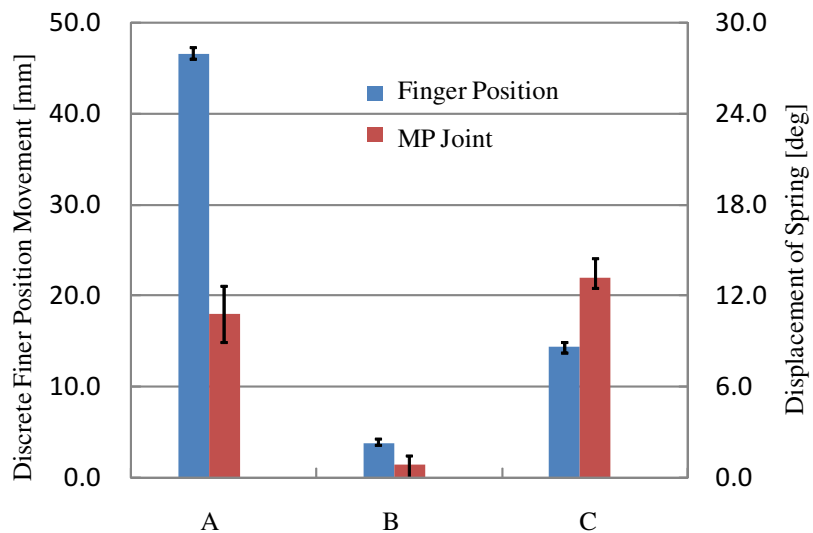


Fig.4.10 Discrete Change of Finger-Tip Position and Maximum Displacement of Finger's Spring

示す。

引出し開け作業での評価実験の考察を行う。まず Fig.4.9 を見ると、腕部軌道制御のみの条件 (A) では、条件 (B) 及び (C) と比べ引出しの磁力による反力により腕部受動柔軟関節の関節ばねが大きくたわんでいることがわかる。また指先位置の振動の最大振幅を比較しても条件 (A) が飛びぬけて大きいことが分かる。MP 関節のばねたわみに関して Fig.4.10 を見ると、条件 (B) においてはかなり小さく抑えられているが、条件 (A) と (C) においては大きな違いは生まれていない。しかしながら、結果としての指先位置の振動に大きな差があるという事実は、引出しからの反力の作用点である指先と関節ばねの距離つまりモーメントアームの観点から、腕部ばねたわみの影響が非常に大きいことを表している。

条件 (B) においては指先位置の急激な変位を条件 A と比較し 9 割以上低減できており。また、手部関節ばねの影響が大きくなる姿勢で実験を行った条件 C においても 7 割低減することができている。以上の結果よりブレーシング制御システムである腕部のばねたわみをキャンセルするという本手法が、指先ならびに引出しの位置を振動することなく制御できるという巧みさの意味で有効であるということが確認された。

加えて Fig.4.6 を見ると、最大反力は 20[N] 程度まで到達するとき（実験開始から約 3[s] 後）にはすでに指・腕のたわみが発生していることが見て取れる。また手首 6 軸力覚センサで検出される x 軸方向の力が、引出しを開けた直後（約 3.3[s] 後）にマイナスに大きな値を示している。これは勢いよく開いた引出しと振動しているハンド アームが衝突することによって発生している衝撃力を表しており、指や引出しの損壊につながる危険な現象だということがわかる。3.5[s] 程度経過したのちには、目視ではっきり確認できるほどの持続的な振動が力及び指先位置のデータに表れている。

一方 Fig.4.7, Fig.4.8 を見ると、提案手法を利用する条件 (B) および (C) で最大反力は条件 (A) と同様に 20[N] 程度まで到達しているが、同時刻に腕部たわみがほとんど発生していないことが分かる。また拘束が消失した後に力データがマイナスになることはなく、条件 (A) とは異なり引出し ハンド アーム間の衝突は起きていないと推察できる。力及び指先位置のデータにおいて持続的な振動も目視では確認できず、滑らかに開けることができたと確認できる。

4.4 評価試験 -皮剥き作業-

実機 TWENDY-ONE を用い、拘束除去作業に対する本手法の有効性検証の一環として、リンゴの皮剥き作業にチャレンジする。一般的にどの果物も、皮と果肉では硬さが異なりナイフを進めるのに必要な力も異なる。またナイフとの間に働く摩擦も静止摩擦から動摩擦へ切り替わる。これらの拘束力の低下から、ナイフが滑って想定以上に進むという危険な挙動が起こりうる。そのため皮むき作業は拘束除去作業の一例として考えることができる。

また前節の引出し作業は、対象物（引出し）と他物体（本体）の間の拘束力が受動的であり、また基本的に指を取っ手に引っかけるだけで作業が可能であるため、作業としては比較的単純であった。しかしリンゴの皮むき作業は、対象物（ナイフ）と他物体（リンゴ）に間に働く拘束力が摩擦によって左右されるため、ロボットの運動により容易に拘束力が変動しうる繊細な作業である。またナイフを把持しつつ刃を進めるといった運動の複雑さも問題となる。そのためこれまでのヒューマノイドで同程度に複雑な手作業にチャレンジした例は、皆無であると言える。

本節では、リンゴの皮むき作業に対する提案手法の適用例を示したうえで、実機実験により有効性を検証する。

4.4.1 制御枠組みの適用と制御アルゴリズムの選定

皮剥き作業は本来、片手でナイフを持ちもう一方の手でリンゴを持ったうえで、両手の協調によりリンゴの回転運動と刃の並進運動を組み合わせ皮を剥いていくが、本論文では簡単のため、刃を持つ側のハンド アームのみに着目し皮剥き動作開始時の切り込み動作のみを行うものとする。また引出し開け作業と同様に、能動的な身体環境接触を形成する部位の選定については詳しく考察せず、人の方法を参考に拇指指先により能動的な身体環境接触を形成することとした。

Fig.4.11 に、ロボットにより皮むき作業を行う時の様子を示す。左図は拇指による能動的な身体環境接触を利用しない場合の模式図、中央は利用する場合の模式図、右図は利用するときの実際の実機の写真である。いずれの場合もナイフは拇指以外の他指

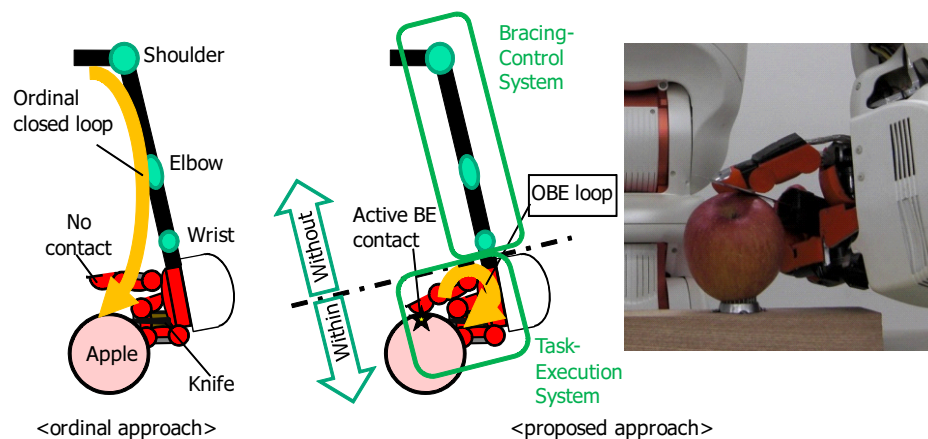


Fig.4.11 Task-Execution and Bracing-Control System
for Apple Peeling Task with Knife

により柄の部分をしっかり握られている。中央に示すように、拇指による能動的な身体環境接触により OBE ループが形成され、作業実行システムは指に搭載された自由度全てを内包し、ブレーシング制御システムは他の自由度を内包することとなる。これは引出し開け作業と同様のシステム構成となる。

拘束力の急激な低下に伴うばねの振動を抑制するという観点から、引出し開け作業と同様の制御アルゴリズム (Fig.4.2) を導入する。具体的には作業実行システムである指関節には初期・最終姿勢の線形補間による操り制御を導入し、腕部には外力によるたわみをキャンセルするモビリティ制御を導入する。指の姿勢はマニュアルでデザインされるが、他指はナイフを握り込んでいてそれ以上の運動を生成することはできないため、拇指の姿勢を変化させることによりナイフを進める運動を生成する。

4.4.2 試験条件

リンゴ皮剥き作業の実験条件を以下のように設定する。

- ・手部における軌道制御生成については人間の作業を観察・模擬することとで初期姿勢および終了姿勢を決定させる。
- ・リンゴはロボットに把持させるのではなく、テーブルに直接固定することとする。
- ・リンゴと拇指の初期接触位置およびリンゴと刃の初期接触位置はあらかじめ人間が設定する。
- ・5[s] で約 20[mm] の皮を剥く作業を行わせる。

なお本試験は、ロボットがナイフを握り作業を行うという意味で潜在的な危険が存在する。本来比較のため行うべき拇指による能動的な身体環境接触を利用しない実験条件は、ハンドアームがナイフを持ったまま振動することが予想されるためチャレンジしなかった。そこで試験は拇指による能動的な身体環境接触を利用した場合のみ行った。

4.4.3 試験結果

リンゴ皮剥き作業における拇指接触力と指先位置の時間変化を Fig.4.12(a) に示す。x 軸は時間を表し、左の y 軸は指先位置、右の y 軸は接触力を表す。指先位置は前額面状の水平位置を表しており、拇指反力は拇指 6 軸力覚センサされた力の同方向成分を抽出し表示している。また拇指接触力と腕部受動柔軟関節ばねたわみ量の時間変化を Fig.4.12(b) に示す。x 軸は時間を表し、左の y 軸は関節ばねのたわみ量、右の y 軸は接触力を表す。グラフ (a),(b) とともに、実験開始から 2[s] 弱経過したときに表れている、接触力のピークとともに刃が進み始めている。Fig.4.13 にリンゴ皮剥き動作におけるロボットの挙動を示す。

4.4.4 考察

Fig.4.12(a) 及び (b) において実験開始時から 2[s] 弱経過した時点で、引出し開け作業と比較すると変化量は小さいが皮部から果実部へ刃が進む瞬間に拇指接触力の急激な変化が発生している。これはすなわち刃に対する拘束力の減少を意味するが、指先位置はこの変化が発生しても振動することなく進んでいることが確認できる。刃の進み具合については、Fig.4.13 でも確認できる。また腕部関節ばねのたわみ角度が 0[deg] で推移しており拘束力が変化しても弾性エネルギーは蓄積していないことがわかる。

Fig.4.12(a) において指先位置が進むに従い拇指接触力が增大している理由としては、リンゴが球状の物体であるため刃が進むに従い切り込む断面積が増大し、切断に要する力や刃が受ける摩擦力が増大していくためと考えられる。

以上の結果からリンゴ皮剥き作業に対し提案手法を適用すると、振動することなく刃を進めることができることが確認できた。

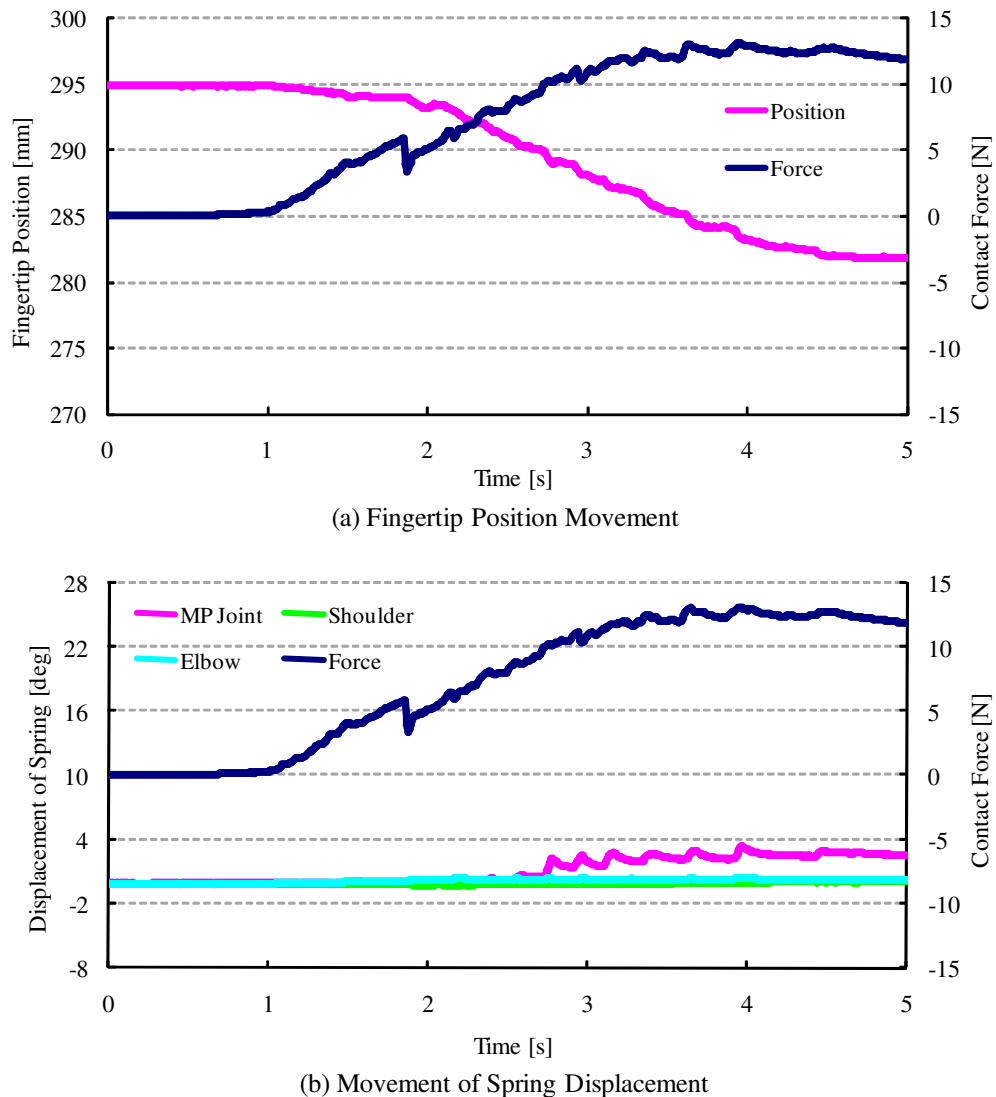


Fig.4.12 Experimental Results of Apple Peeling Task

引出し開け作業との違いについて考察する．引出し開け作業においては約 20[N] の拘束力振り切る必要があるのに対し，リンゴの皮むき作業ではそれほど大きな力を必要としない．その違いが小さな変化量に結びついていると考えられる．本実験で用いたリンゴは近所のスーパーで購入した市販品であるが，傷や腐敗した部分は避けて用いている．こういった部分を剥く際や，より硬い野菜や果実（にんじんなど）を剥く際には，同じ皮むき作業でも切断に必要な力が本実験以上に大きく変化するため，本手法での作業遂行がより重要になると考えられる．

またリンゴの皮剥き作業は，我々人間でも刃先を精密にコントロールすることは難しい．慣れない人では簡単に刃が滑り皮が破れてしまったり，最悪の場合には自らの

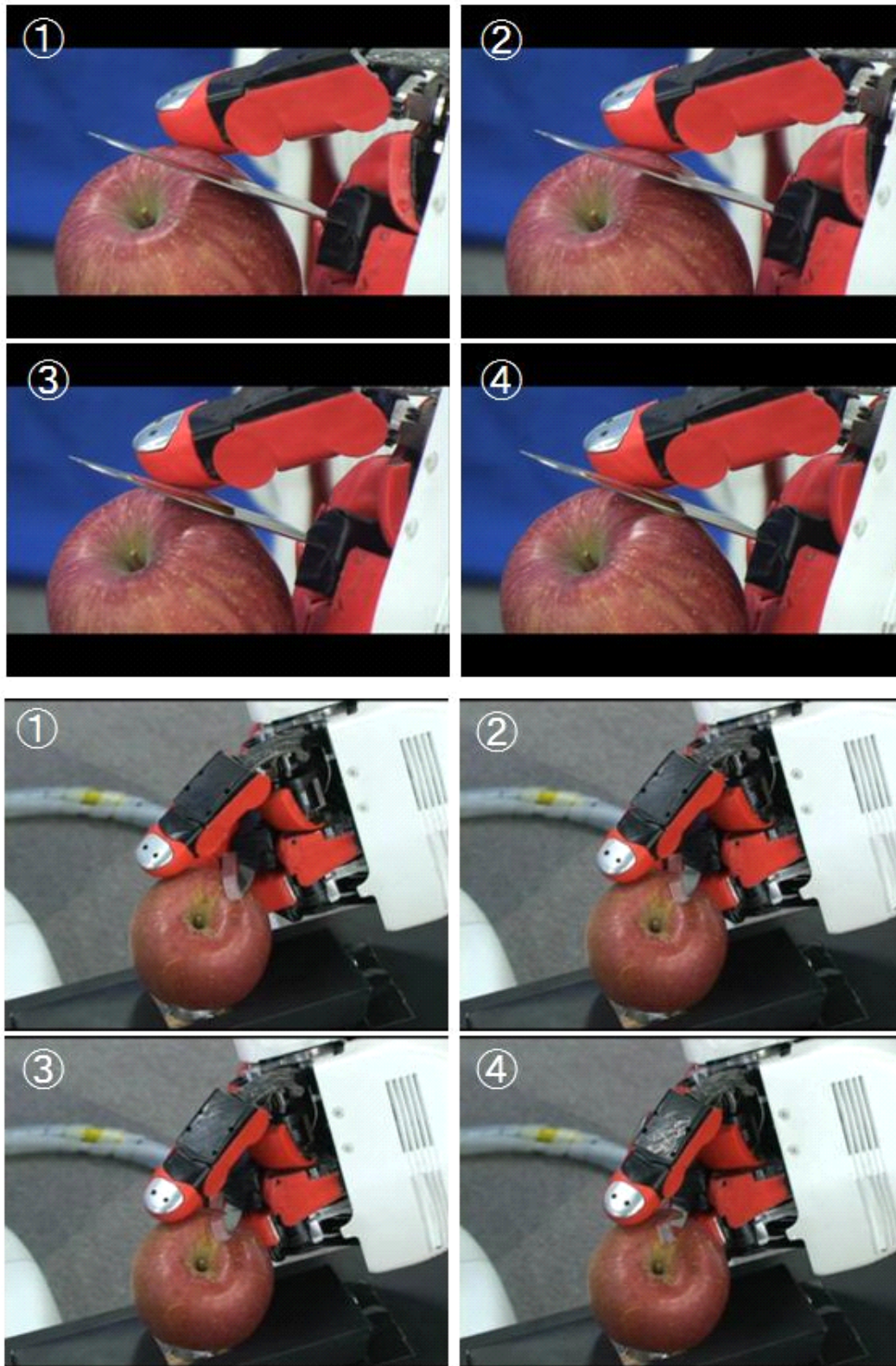


Fig.4.13 Sequential Photos of Apple Peeling Task with Active BE Contact

指を切りかねない．そのため引出し開け作業以上に弾性エネルギーの蓄積が作業性を損なう作業であると言える．人間形ロボットによりこういった危険な挙動なしに皮を剥くという試みは，世界でも類を見ないチャレンジであり，道具操作の作業パフォーマンスという観点で従来とは一線を画す成果であると言える．

4.5 まとめ

本章では，3章で提案した能動的な身体環境接触を利用するための制御枠組みを拘束除去作業に適用し，その有効性を検証した．本枠組みはOBEループの概念を基にハンドアーム系の自由度を二つのグループに分割し，作業実行システムにOEコンタクトを，プレーシングシステムにBEコンタクトを制御させることができる．引出し開け作業の作業モデルを利用し，受動性と作業のポイントの関係に対する考察を行った．そこでロボット身体に搭載されたばねの数を仮想的に減らすことはできないかというアイデアから，プレーシング制御システムに対し関節ごとに受動要素に生じるたわみをキャンセルするという非常にシンプルな制御アルゴリズムを導入することにより巧みさの向上が期待できると考察し，制御アルゴリズムを導入している．

実機試験においては，引出し開け作業及びリングの皮むき作業に対し提案手法を適用し，拘束の消失（低下）に伴う手先位置振動の抑制という点でその有効性を検証している．どちらの作業においても振動することなく作業が行えることから，対象物（引出し，ナイフ）と他物体（本体，リング）間の接触位置を精度よく制御できるという意味で巧みさの向上が確認できたと言える．

ここで，前章の試験結果と合わせて得た知見について考察を加える．拘束の付与/除去する作業において，どちらもより小さなOBEループが望ましいことが分かった．一般的には指先に近い部位で，能動的な身体環境接触を形成することが求められることとなる．同時に，作業実行システムの作業領域は比較的大きくない．このトレードオフ問題を解かなくてはならない．次章ではこの問題を踏まえて，能動的な身体環境接触を形成する身体部位をいかに選択するかといった動作計画について述べる．

第5章 能動的身体-環境接触におけるパラメータを決定する動作計画法

5.1 はじめに

本章では、拘束付与作業に対する能動的身体-環境接触を利用するためのパラメータを決定する動作計画法の構築を目指す。能動的身体-環境接触は、身体による付加的な環境との接触を指し、それを与えなくても作業を実行することはできるという特徴を有している。また対象とする拘束付与作業とは2章における検討から、グラスの定置作業に代表される環境からの拘束を対象に対し付与する作業のことである。前章までに、拘束を付与するもしくは除去する作業の両方で用いることができる制御枠組みを構築し、その有効性を検証してきた。しかしながら制御枠組みを適用する前段階である、どの身体部位で能動的身体-環境接触を形成するのか、どの自由度を利用し作業を実行するのか、といった動作計画の部分は、人のやり方に倣うという非常に直観的な方法で決定していた。そこで本章では、2章で述べたパッシブコンプライアンスの利用戦略を作業に合わせて具現化する動作計画法の構築を目指す。利用戦略とは、拘束付与作業においては、パッシブコンプライアンスの利点を活用することを重視するため、十分なパッシブコンプライアンスの見極めが重要であり、そのうえで欠点を抑制するためにそれ以上のパッシブコンプライアンスは無効化するというものである。さらに、拘束付与作業の一例としてペン操作による筆記作業を取り上げ、動作計画を適用し実施例を示すとともに、実機試験を行い有効性を確認する。検証内容は、書字作業におけるペン先の位置・押し付け力の制御性能という意味での巧みさの向上である。

5.2 パッシブコンプライアンスの利用を考慮した動作計画法

本論文で提案する動作計画法は、パッシブコンプライアンスの効果を考慮した作業実行システムのデザイン手法である。日常生活環境に潜む不確定性はロボットの動作を不安定にさせるが、能動的身体-環境接触はこの影響を作業実行システム内に限定することができる。能動的身体-環境接触を利用する場合の重要な課題の一つに、BEコンタクトを形成する部位としてどの身体部位を選択するかという問題がある。作業実行システムは当然、作業を実行するに十分な自由度を有してなければならない。一方で、作業実行システムが冗長である場合、冗長分も含めた全自由度を使って作業を実行すべきかという問題もある。これらの問題を解くカギとして、本論文ではパッシブコンプライアンスの利点の有効活用及び欠点の抑制を考え、動作計画法を構成する。なお、パッシブコンプライアンスの利用戦略において重視すべきと述べた十分なパッシブコンプライアンスという考え方を、本論文ではパッシブコンプライアンスの効果を確実に発揮することと捉え、動作計画法を構築する。

5.2.1 パッシブコンプライアンスを活用する条件

パッシブコンプライアンスの効果を確実に発揮するための条件について考察する。機械的なばねは通常、弾性変形の範囲に限界があり、それを超えると塑性変形を引き起こしてしまう。そのため、ロボットの関節には、ばねが塑性変形域に到達しないようにたわみに対して機械的なストッパを設けることになる。この機械的なストッパに到達した状態をばねがロックすると呼ぶ。ばねがロックすると、それ以上たわむことができずパッシブコンプライアンスの利点が失われることから、パッシブコンプライアンスの効果を確実に発揮するためには、ばねのロックを避けなくてはならない。

まずロボットの運動によって生じる手先位置誤差について考える。関節の誤差には、ガタなどの機械誤差、摩擦などにより発生する制御誤差、ダイナミクスの影響による誤差などがある。ダイナミクスの影響による誤差は、その関節が動くときに発生する誤差に加え、受動柔軟関節においては他関節の動きによる受動要素にたわみが発生し

誤差が生じうる．各関節においてこれらの誤差は存在し，結果として手先における誤差に繋がる．特に回転関節の場合は，リンク長に応じて関節誤差が与える手先誤差に対する影響が異なり，より根本側の関節における誤差が大きな手先誤差に繋がる．

これを表わしたのが，Fig.5.1 に示す 3 関節マニピュレータの模式図である．受動柔軟関節であるか通常の剛体関節であるかによらず，関節 j は関節誤差 $\Delta\theta_j$ を発生し，関節誤差が集積した結果として目標手先位置 RP と実際の手先位置 AP には位置誤差が生じうる．関節 j にのみ誤差が生じたと仮定すると手先位置は $IP \# j$ となるが， $IP \# 1$ と $IP \# 3$ を比較すれば分かるように，根本側の関節 1 による手先位置 $IP \# 1$ のほうがより大きい誤差を生じている．

次にパッシブコンプライアンスによる手先誤差吸収能力について Fig.5.2 を用い考える．手先位置誤差と大きく異なるのは，通常の剛体関節においてはたわみを発生する能力がないということである．Fig.5.2 においては第 2 関節のみたわみを発生する能力がない．受動関節 j は最大関節たわみ ϕ_j を発生することができるため，この最大たわみが集積した結果として目標手先位置 RP と実際の手先位置 AP の差の分だけ誤差吸収性能があると考えられる．関節 j にのみたわみが生じたと仮定すると手先位置は $IP \# j$ となるが， $IP \# 1$ と $IP \# 3$ を比較すれば分かるように，根本側の関節 1 による手先位置 $IP \# 1$ のほうがより大きい誤差吸収能力がある．このより根本側の関節に搭載された受動柔軟性が，より大きな効果を発揮するということが分かる．

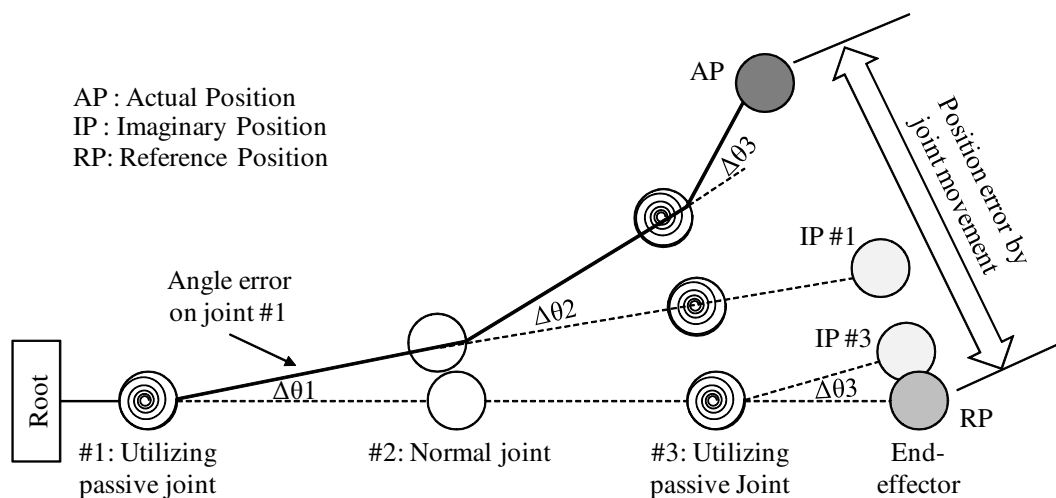


Fig.5.1 Position Deviation on End-Effector Derived by Uncertainty in Robot Body

以上の検討により、明確になったのポイントは2点ある。関節の誤差は剛体関節・受動柔軟関節の両方で生じうるのに対し、関節たわみは受動柔軟関節でのみ発生する。また関節における誤差もたわみも、より根本側の関節が手先に対してより大きな影響を及ぼすということが分かった。

ロボットの運動による手先位置誤差と環境側に潜在する位置誤差（形状も含む）の合計が、受動柔軟関節による手先誤差吸収能力を超えるとばねのロックが起こり柔軟性が失われることとなる。環境側に潜在する位置誤差を正確に見積もることは非常に困難だと考えられる。

このばねのロックを防ぐための方策として考えられるのが、最も根本側の関節に対する受動柔軟性の搭載である。極端な例では、指先にのみ受動柔軟性が搭載されている場合、肩関節が生み出す手先位置誤差を指先に搭載された受動要素で吸収することは、必ずしもできない。逆に肩関節に受動柔軟性が搭載されていれば、手腕全自由度の運動により発生する手先位置誤差を吸収できる可能性は高い。

提案する動作計画法では、この方策を基に能動的身体 環境接触を形成する部位を選択することを考える。

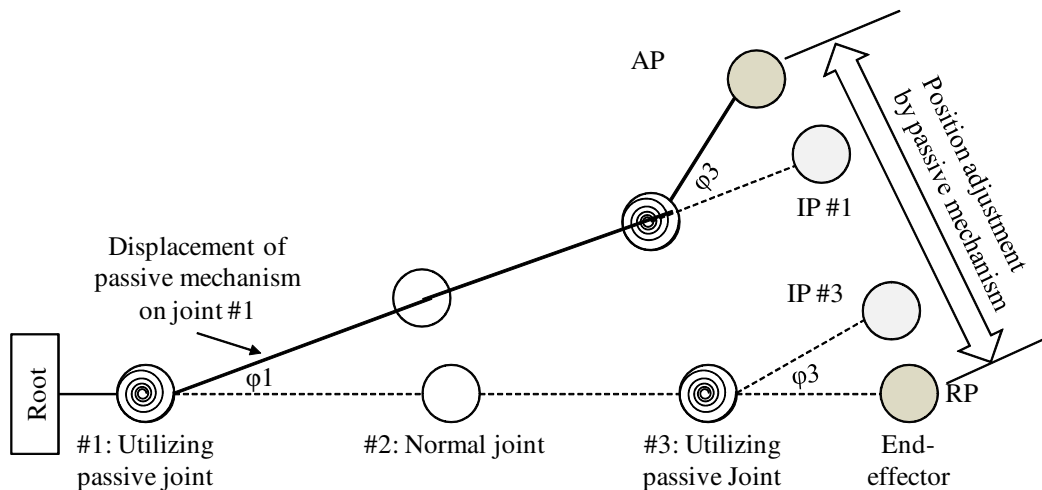


Fig.5.2 Position Adjustment Generated by Passive Compliance Implemented in Joints

5.2.2 動作計画法

能動的身体 環境接触におけるパラメータを決定する動作計画法を提案する．動作計画法の機能要求は，作業を実行する，パッシブコンプライアンスの利点を有効活用する，欠点を抑制することの三つである．動作計画法は以下の3ステップで成る．

i ステップ1：必要自由度の確保

始めに考慮するのは，作業を実行するに足る自由度を，作業実行システムに確保することである．本論文では既に，OBEループのコンセプト及びそれに基づく制御枠組みを提案している．能動的身体 環境接触により作られたOBEループは，ハンド アーム系に搭載している自由度を二つのグループに分けることができる．ブレーシング制御システムはBEコンタクトのコントロールを，作業実行システムはOEコンタクト，つまり作用点のコントロールを担当させる．作業実行システムは，作用点において必要な運動を生成するために十分な自由度を有していなければならない．作業に必要な自由度数を n とすると，BOもしくはOEコンタクト形成する身体部位から n 番目の関節までは作業実行システムに内包されている必要がある．当該の作業部位から n 番目の関節を便宜上，関節 J_1 と呼ぶ．

ii ステップ2：能動的身体 環境接触形成部位の選択

確実にパッシブコンプライアンスの利点を活用することを考慮し，能動的身体 環境接触形成部位を選択する．前節で述べたように，ロボットに搭載された機械的なばねにはたわみに限界が存在し，ばねのロックを防ぐことが重要となる．そのためには作業を実行する関節群に対して，より上位（根本側）の関節にパッシブコンプライアンスが搭載されていることが必要であるということが，前節の結論である．この結論に基づき，確実に受動性の利点を利用するためには，作業実行システム内の最も根本側の関節には，受動要素を搭載しているべきであると考えられる．ステップ1により選択された関節 J_1 より根本側にあり，かつ最も近傍の受動関節を関節 J_2 と呼ぶとすると，関節 J_2 の入力リンクが能動的身体 環境接触を行う部位として選択される．

iii ステップ3：冗長性の抑制

ステップ3では、作業実行システム内の冗長性を取り扱う。関節 J_1 が受動性を有する場合、関節 J_1 と関節 J_2 は同関節となり、作業実行システムは作業を実行するのに必要かつ十分な自由度を有していると言える。それ以外の場合においては、関節 J_2 が関節 J_1 より根本側にあり、作業実行システムは冗長性を有することとなる。冗長自由度がある場合、手先の運動を生成するために必要な各関節の運動が、ない場合に比べ小さくなるため一般的には望ましいが、本論文ではパッシブコンプライアンスの欠点を抑制するために、冗長性を活用しないという戦略をとる。欠点とは、能動的かつ素早く運動する際に生じる時間遅れである。これを抑制するために冗長性がある場合に限ってのみ、作業に必要な運動を生成する関節として受動柔軟関節を除外する。受動性を有する関節は、能動的に運動しなくても、受動的な運動は生成するため、作業実行システム内にあれば利点を生かすことは可能である。また、より根本側の関節のほうが出力側に大きな負荷があるため、時間遅れは大きくなる。そこで作業実行システム内で、より根本側の関節を選択し、運動を生成しない。

5.2.3 動作計画法の適用例 -筆記作業-

本項では、動作計画法の適用例を示す。一例として TWENDY-ONE により人間と同様の把持形態でペンを握り筆記作業をする場合に、提案した動作計画法を適用する (Fig.5.3)。TWENDY-ONE の詳細な仕様に関しては、3章4節を参照されたい。ここで重要になる自由度配置については、TWENDY-ONE の腕部は肩3自由度、肘1自由度、手首3自由度の合計7自由度を有した冗長マニピュレータであり、特に肩・肘の関節には我々が開発した受動柔軟機構が搭載されている。肩関節は根本側からピッチ・ロール・ヨーの順に並んでおり、手首関節はヨー・ロール・ピッチの順に並んでいる。また図中 L は関節間を結ぶリンク (Link) 部分を指し、外部との接触が可能であるとする。

ステップ1によれば、作業に必要な自由度を決定し、関節 J_1 を決めなければならない。筆記作業においてペン先は、書く線に沿って位置が拘束されている。そこでペン先位置を自由に制御するためには、3自由度が少なくとも必要となる。TWENDY-ONE

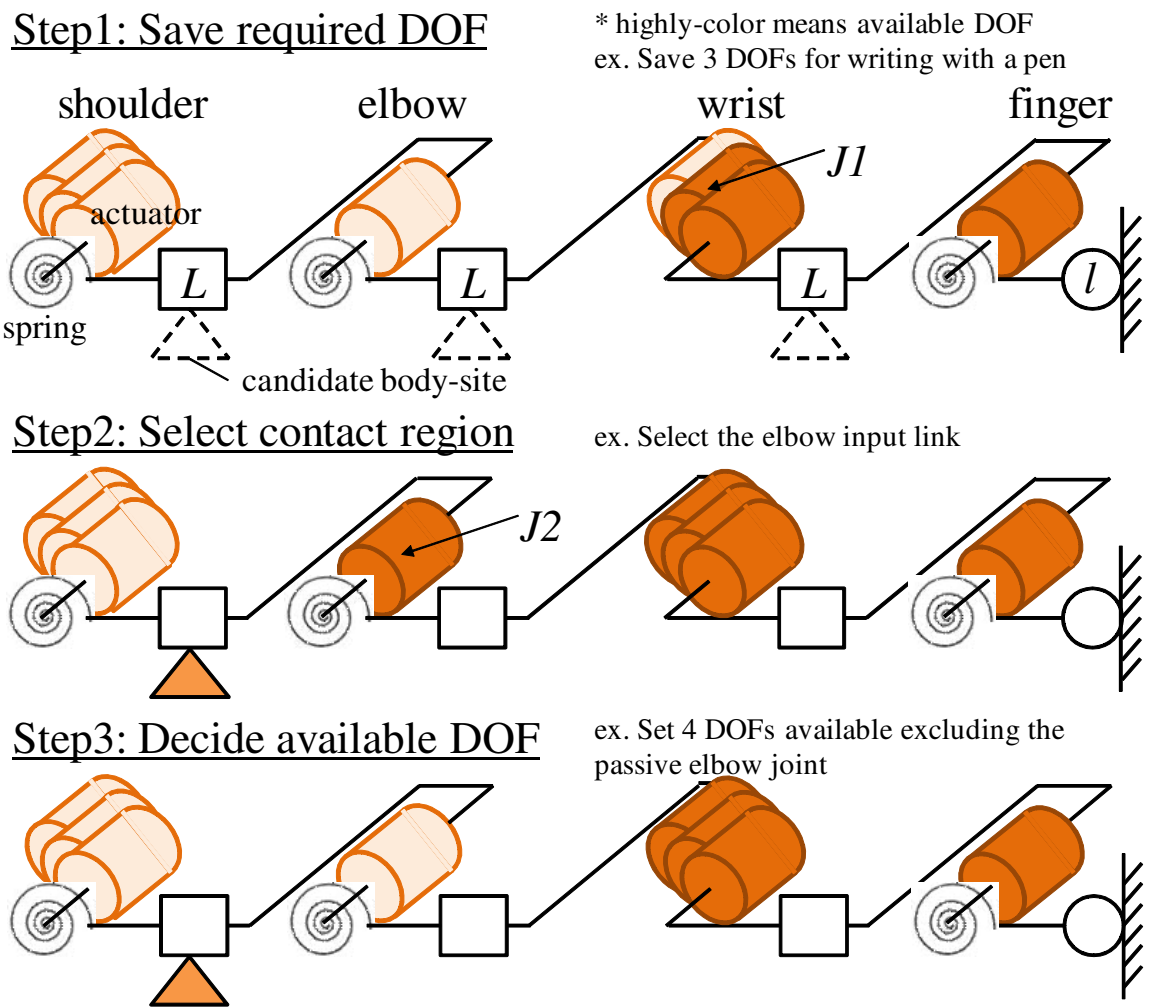


Fig.5.3 Motion-Planning with Active BE Contact

のハンドは、示指、拇指、中指の指先及び示指 MP2 関節側面によりペンと接触し、掴むことができる。この接触部位は人と同様であり、人間のような把持形態であると言える。

この把持形態を3指指頭側面摘みという。この把持形態においては、指の運動により把持を維持したままペンの姿勢を変えることができる。それはつまり示指 MP1 の回転方向の運動であり、ハンド全体で1自由度の運動を生成可能であると言える。この自由度を勘案し、手首のロール関節が関節 J_1 として選択できる。

ステップ2では能動的身体 環境接触部位を選定する。関節 J_2 は関節 J_1 より根本側にあり、受動性を有している必要がある。TWENDY-ONE は手首のロール、ヨー関節に受動性を搭載していないので、肘関節が関節 J_2 として選択され、その入力リンクが能動的身体 環境接触を形成する部位として選択される。

ステップ3では、冗長性を勘案する。この場合、作業実行システムにはハンド1自由度、手首3自由度、肘1自由度の計5自由度が内包されることとなり冗長である。そこで、もっとも根本側の受動関節である肘関節は、作業動作において能動的に動かさないこととする。これで、受動性の利点は利用しつつ、欠点は抑制することができるようになる。

5.3 指による道具操作のための制御アルゴリズム

前節で述べた、TWENDY-ONE による筆記作業により動作計画法の有効性を確認するために、作業実行システムに搭載する制御アルゴリズムを構築する。作業実行システムの目的は筆記作業の実現であり、筆記作業に代表される指を用いた道具操作に適用可能な制御アルゴリズムの構築を目指す。制御アルゴリズムは、受動性の利点を活用しシンプルなデザインで、要件を満たすことを考える。制御アルゴリズムは大きく分けて、作用点（ペン先）での作用力制御、作用点位置の軌道制御、把持・操りの制御の三つで構成される（Fig.5.4）。

これらの制御則が統合された状態の制御ブロック線図を Fig.5.5 に示す。まず、目標作用力 Fw_{ref} と目標手先位置 x_{ref} 及び目標把持力 Fg_{ref} が制御アルゴリズム (CONTROL) に入力される。算出された目標指令値がマニピュレータ (BODY) に送られ、マニピュ

レータの動き (MOVEMENT) が環境 (ENVIRONMENT) に作用した結果, 実際の力 F_{cur} と各関節の角度 θ_{cur} が得られる. センサとして, 受動柔軟関節 (Utilizing Passive Joint) における関節角度センサ (Joint Sensor) とモータ角度センサ (Motor Sensor) 及び指先に搭載された 6 軸力覚センサ情報を利用する.

5.3.1 作用力制御 -ばねたわみ調整による押し付け力制御-

道具先での作用力制御について述べる. 作用点において発生する作用力は肘関節における機械ばねのたわみにより制御する. ペンを握った上で肘関節により能動的な身体環境接触を形成したのち, 作業実行システムは作用点での接触を形成し, 任意かつ一定の作用力を発生しなければならない. 作用点において触れただけの状態, つまり接触はしているが接触力が極めて小さい状態において, 各関節の姿勢を初期姿勢とすると, 初期姿勢からどの程度押し込むか, つまりどの程度ばねたわみを発生するかによって作用力は調整できる. 作用力に相当するばねたわみを計算し, そのたわみが生まれるように肘関節を制御することにより, 望んだ作用力は手に入る. これは一般的な力センサを利用せず, たわみを計測する位置 (角度) センサによる情報を基に制御するため位置制御の 1 種であると言える. 以上により, 簡単ではあるが精度良く作用力をコントロールすることができる.

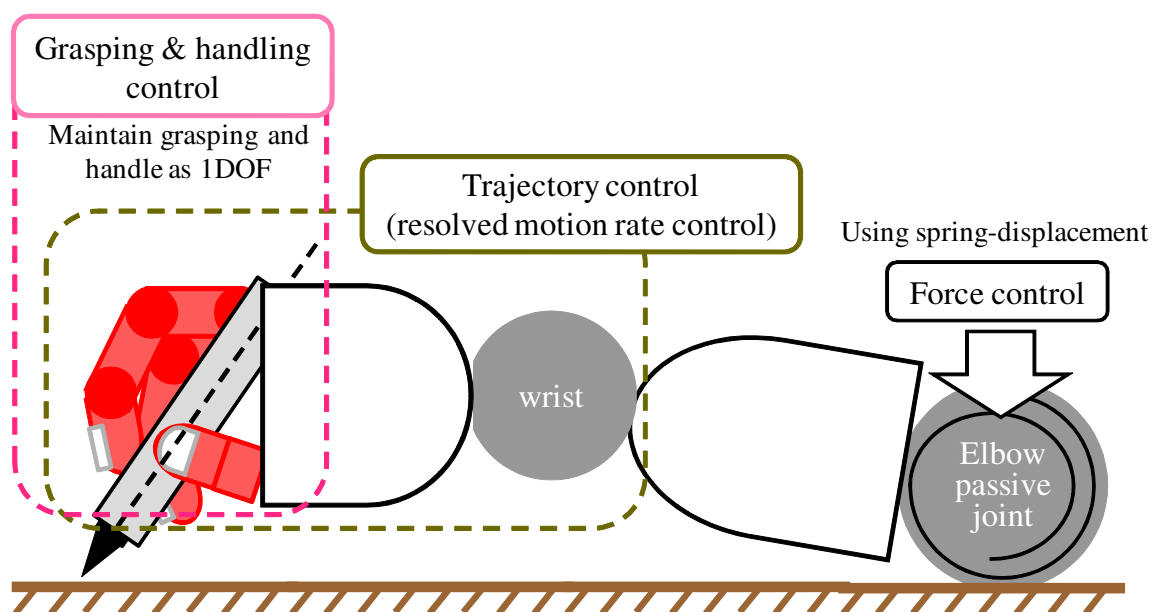


Fig.5.4 Control Concept for Dexterous Manipulation of Cylindrical Handling Tool

この作用力制御は，作業を始めるときにペン先端に働く作用力をコントロールする方法であり，作業中の作用力の調整とは異なる点に注意する．これは提案した動作計画法により，作業中は肘関節を能動的には動かさないとしたためである．作業中は，同様に肘関節のばねたわみによる作用力の観測は利用する．その上で軌道制御に押し込み量の調整を与えることで調整のための運動を生成する．この作用力調整手法においては，受動関節は能動的には動かさずセンサとしてのみ利用する．

5.3.2 把持・操り制御 -指姿勢補間による受動柔軟性を利用した道具操り-

把持・操り制御においても，受動性の利点を利用することを考える．TWENDY-ONEのハンドは関節にコイルばねを搭載し，表面は柔軟素材で覆われている．これら受動性をあてにして，対象物の大きさや形状の大まかな情報さえ与えれば，ラフに掴むことが可能な基礎制御枠組みを構築している[101]．この基礎制御枠組みをペンの操作に応用する（Fig.5.6）．基礎制御枠組みに則り，ペン操作の初期把持姿勢と最終把持姿勢

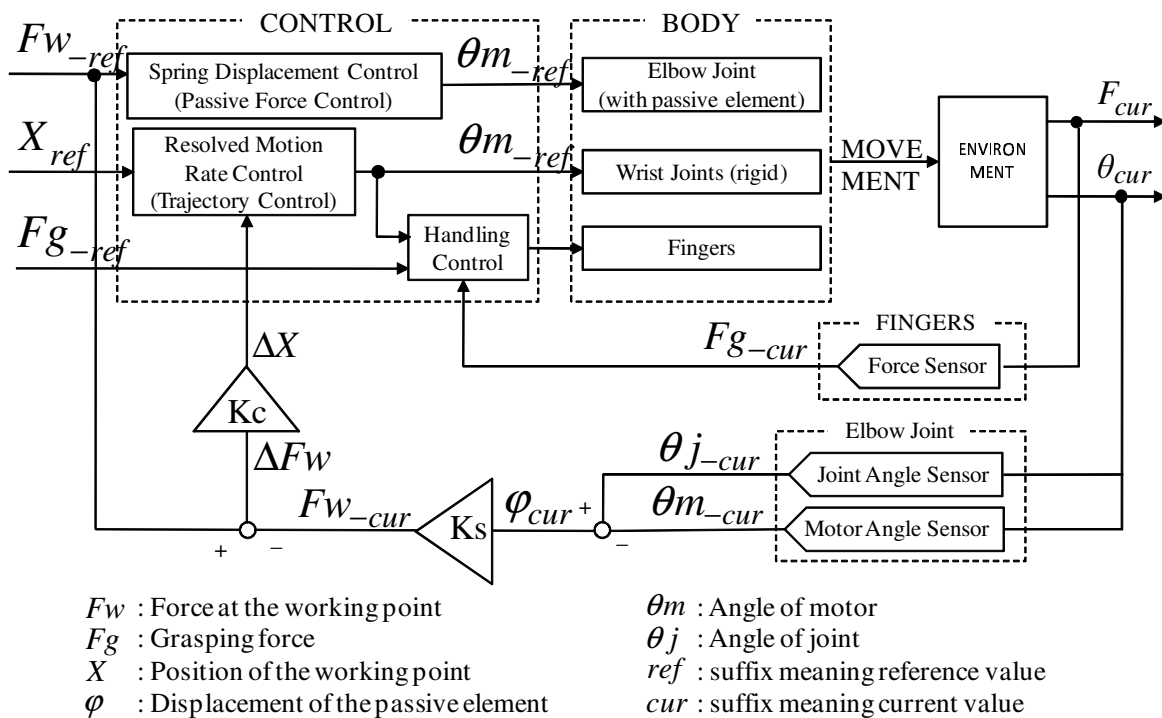


Fig.5.5 Control Block Diagram for Dexterous Manipulation of Cylindrical Handling Tool

をマニュアルで規定し，この二つの姿勢を補間制御によって繋ぐ．しかしながら，ペン操作のような複雑な運動は指先の表面上で接触点が移動するため，ただ繋ぐだけでは把持力が一定とはならない．そこで拇指，中指の2本に，力制御則を導入する．これは各指で発生する接触力をそれぞれ一定に保とうとするものである．示指のMP関節及びDIP関節には受動要素であるコイルばねが入っているおり，これらは把持力の急激な変化を防ぐのに役立つが，能動的にたわみを制御しようとするると遅れが発生しやすいという問題もある．そこで，3指のうち受動性のない2指にのみ力制御を導入し，把持力を一定に制御する．各指の接触力は指先に搭載した力センサにより計測する．操りの進行は示指の姿勢変化に代表させ，制御する．

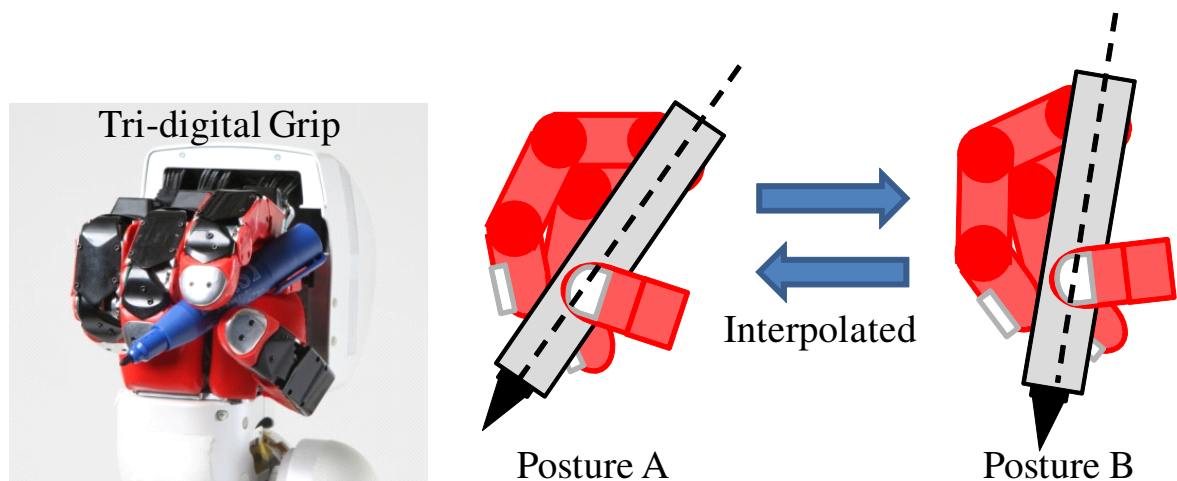


Fig.5.6 Tri-digital Grip with Pen and Finger's Posture Transition

5.3.3 軌道制御 -分解速度制御-

動作計画法により，ハンドの1自由度，手首の3自由度を用い，書くことができる．これらの4自由度により分解速度制御によりペン先の軌道を制御する．作用力の調整のため，この制御器は肘関節のばねたわみを監視し，押し込み量を変化させる．これにより書字運動中の作用力を一定に保つことができる．ここでは，分解速度制御について簡単に紹介する．

分解速度制御は手先位置と関節角度の関係から，各関節の目標速度を導出する．手先位置と関節角度との関係を得るためリンクパラメータから同次変換行列を求めるが，

本研究では簡単のため示指指先とペン先の位置関係が操り中に変動しないという仮説のもとに、同次変換行列を算出する。つまり、ロボット座標原点からペン先の座標までの同次変換行列 ${}^O H_{pen}$ とペン先位置 ${}^O x_{pen}$ は次のようになる。ただし $\emptyset = (0, 0, 0, 1)^T$ である。

$${}^O H_{pen} = {}^O H_{index} {}^{index} H_{pen} \quad (5.1)$$

$${}^O x_{pen} = [\emptyset {}^O H_{pen}]_{xyz} \quad (5.2)$$

このとき、 ${}^O H_{index}$ はロボット座標原点から示指指先までの同次変換行列であり、ロボットの各関節角度により求められる。 ${}^{index} H_{pen}$ は示指指先とペン先の相対的な位置関係が操り中に不変であるという仮説に基づき固定値とする。

ここで、 ${}^O x_{pen}$ を x とすると、各関節角度 θ を用いて次の関係式が成り立つ。

$$x = f(\theta) \quad (5.3)$$

$$\dot{x} = J(\theta)\dot{\theta} \quad (5.4)$$

このとき、 f は順運動学計算のことであり、 J はそれを微分したヤコビアンである。冗長自由度がある場合、式(5.4)の $\dot{\theta}$ の一般解は次の式で与えられる。

$$\dot{\theta} = J^\dagger \dot{x} + (I - J^\dagger J)k \quad (5.5)$$

ただし、 J^\dagger は次の式で与えられる擬似逆行列である。

$$J^\dagger = J^T (J J^T)^{-1} \quad (5.6)$$

式(5.5)を用いることで、目標手先速度から関節速度を求めることができる。冗長性を考慮しなければ第1項だけを計算すればよい。第1項は $\dot{\theta}$ のユークリッドノルム $\|\dot{\theta}\|$ を最小にする解である。

5.4 評価試験 -筆記作業-

動作計画法の有効性を検証するために，TWENDY-ONE を用いて実際に筆記作業を行わせ，実験を行った．各関節に搭載されたばねのたわみに加え，ペン先の軌道，押し付け力を観測し，考察を加えた．

5.4.1 試験条件

試験で実際に行った作業は，非常に素早い運動である．目標軌道は一辺の長さ 40[mm] の長方形である．作業時間は 2[s] で設定した．

一般的なダイニングテーブルに市販のペンタブレットを設置し，筆記作業を行う．作用力及びペン先の軌道に関しては，市販のペンタブレットにより観測した．ペンに関しては，人間用のペンでは小さすぎるため，アルミ製の中空円筒を用意し，ペンと合体させることにより，太さと長さを調節した．合計の重量は 117[g] で外径は 30[mm] である．

実験により確認するパラメータは以下の三つである．能動的身体 環境接触の有無，肘関節による書字運動の有無．把持形態：3 指指頭つまみ，円柱形掴み，これらの組み合わせとして，条件を変え 4 パターンの試験条件で実験した．動作計画法に合致するパターンは (A) である．

- (A) 能動的身体 環境接触の有，3 指指頭つまみ，肘関節による書字運動の無
- (B) 能動的身体 環境接触の無，3 指指頭つまみ，肘関節による書字運動の無
- (C) 能動的身体 環境接触の有，3 指指頭つまみ，肘関節による書字運動の有
- (D) 能動的身体 環境接触の有，円柱形掴み，肘関節による書字運動の有

各条件を Fig.5.7 に示す．このとき，肘を接触させた状態を身体的环境接触がある状態とし，肘関節を動かさない状態を受動柔軟関節の動きが制限された状態とした．

5.4.2 試験結果

各条件での実験結果は Fig.5.8 ~ Fig.5.11 に示されている．各図 (a) は，受動関節のばねたわみの時間推移を表す．x 軸は時間を示し，y 軸はばねたわみを示す．ばねたわみ

は関節に搭載された角度センサにより計測した．これにより，ばねの振動の程度を関節レベルで確認できる．各図 (b) は，ペン先がたどった実際の軌道を表す．図に示す xy 平面は床に水平であり， x 軸は矢状面に垂直， y 軸は前額面に垂直な軸を表す．各図 (c) は，ペン先による押し付け力の時間推移を表す． x 軸は時間を示し， y 軸は押し付け力を示す．Fig.5.12 に，条件 (A) で実際に筆記作業を行ったときの連続写真を示す．

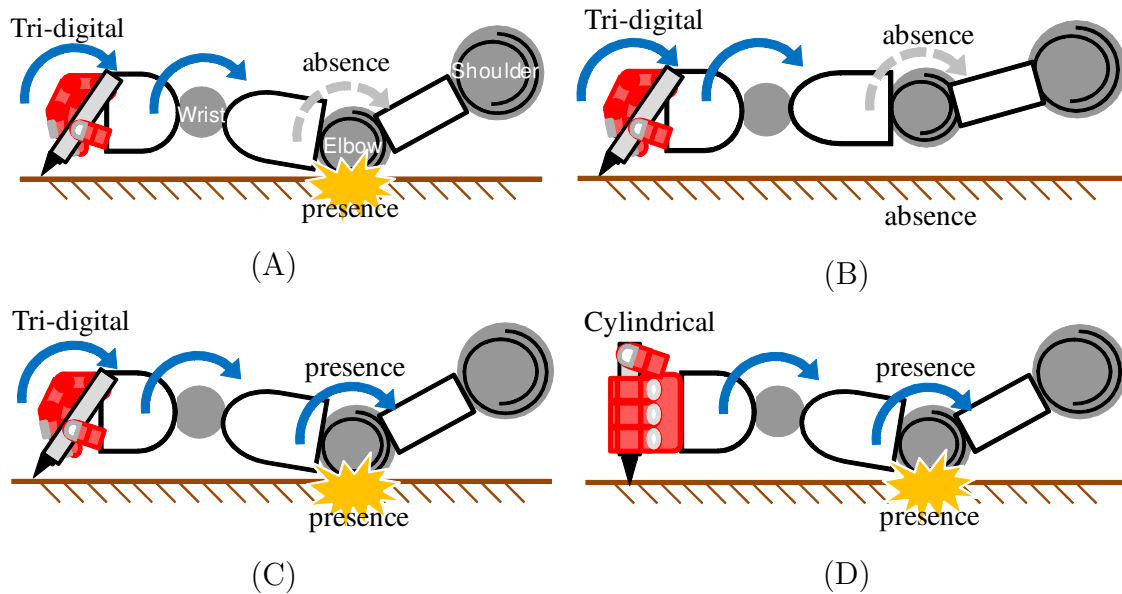
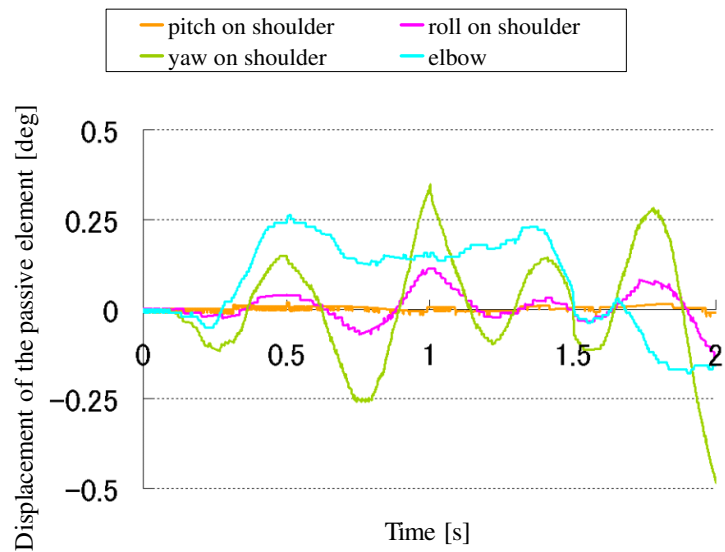
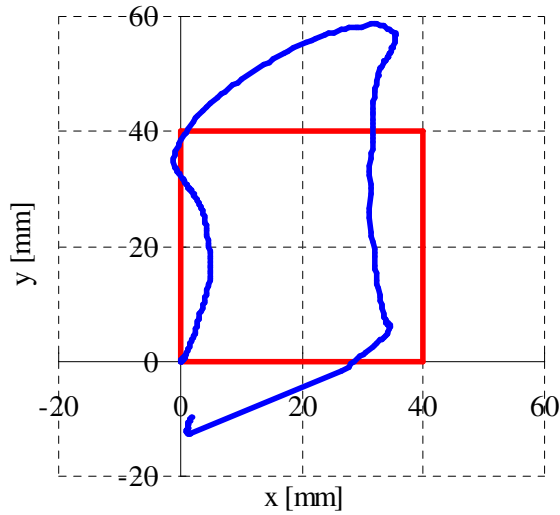


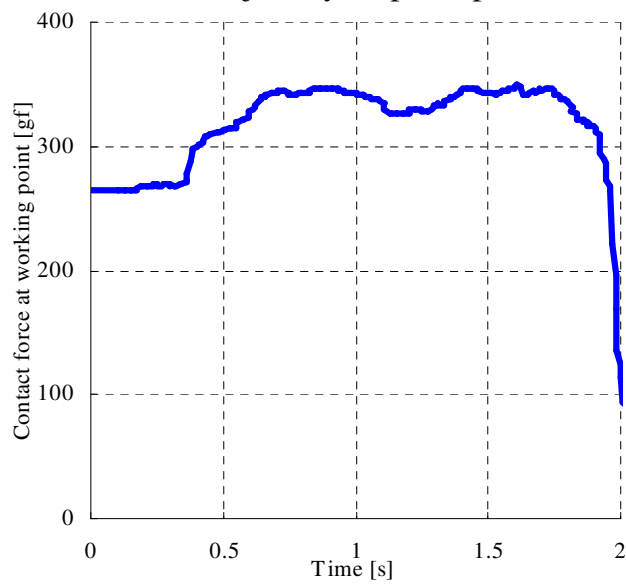
Fig.5.7 Four Experimental Conditions of Writing Task with Pen



(a) Displacement of passive element



(b) Trajectory of pen-tip



(c) Contact force at pen-tip

Fig.5.8 Experimental Results of Writing Task with Pen on Condition A

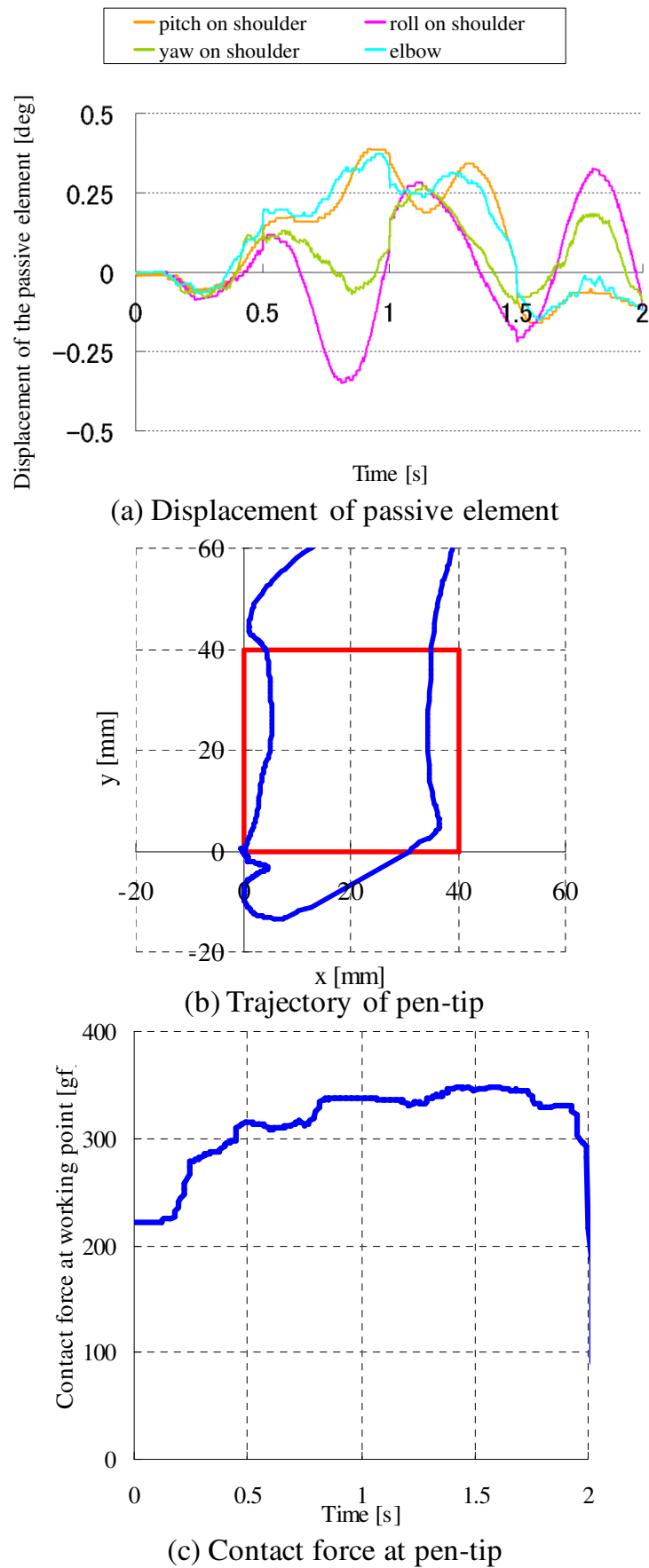


Fig.5.9 Experimental Results of Writing Task with Pen on Condition B

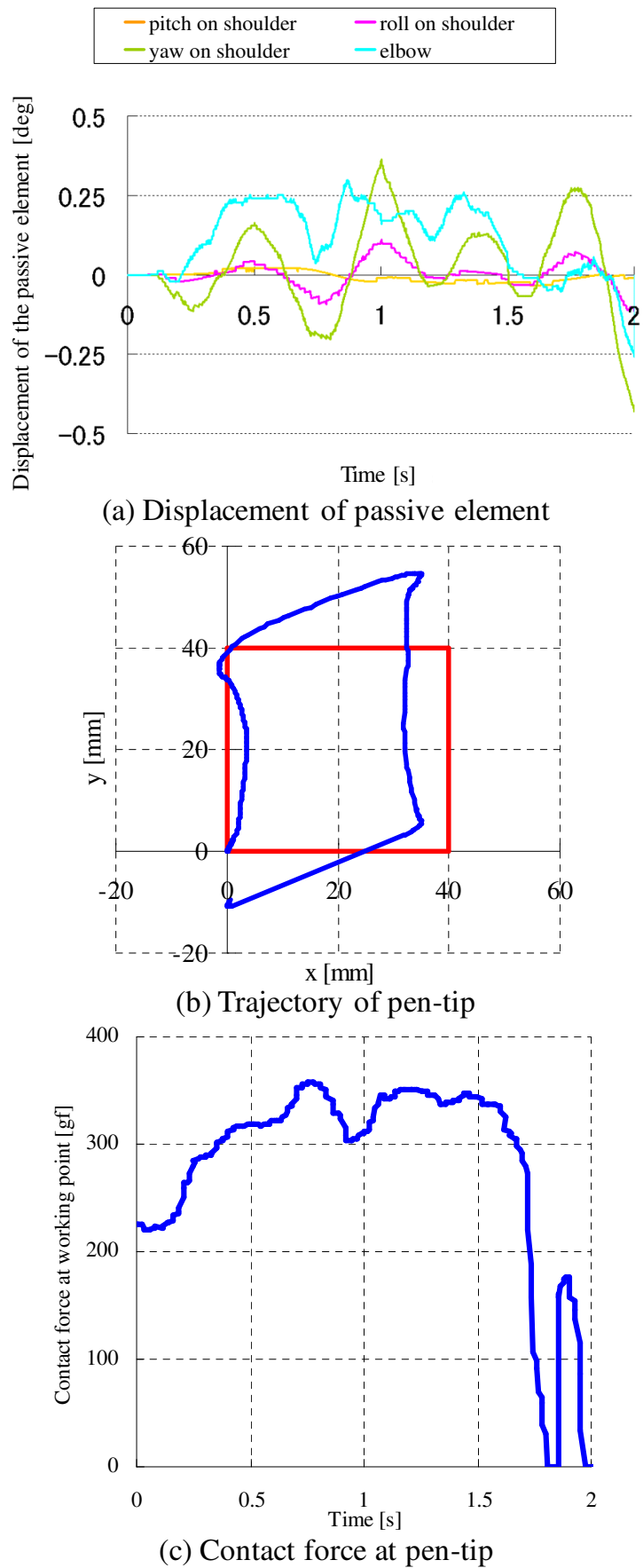


Fig.5.10 Experimental Results of Writing Task with Pen on Condition C

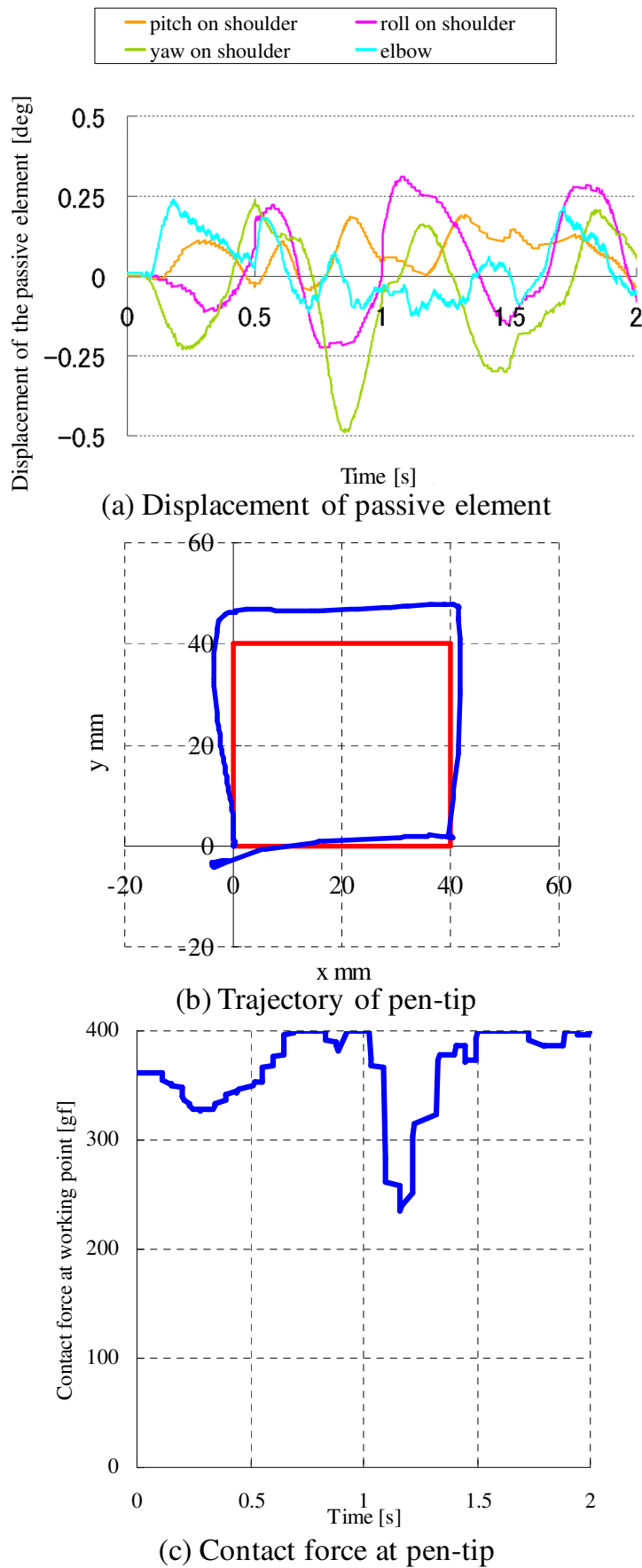


Fig.5.11 Experimental Results of Writing Task with Pen on Condition D

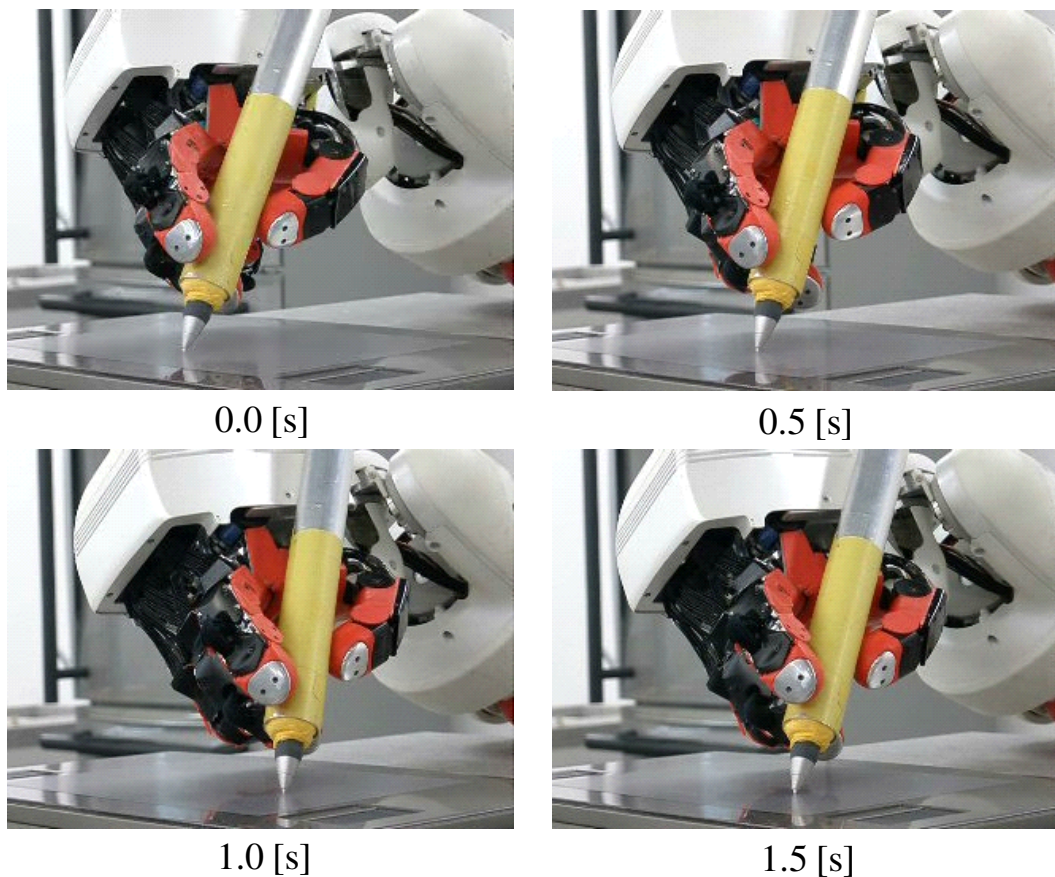


Fig.5.12 Sequential Photos of Writing Task with Pen on Condition A

5.4.3 考察

i 能動的身体 環境接触の効果

能動的身体 環境接触の効果について確認する．条件 (A) における試験結果 Fig.5.8 及び条件 (B) における試験結果 Fig.5.9 のグラフ (a) を比較すると，肩のピッチ関節とロール関節のばねたわみに関して，Fig.5.8 の方が振動が抑制されている．この振動の抑制が能動的身体 環境接触の効果の効果であると考えられる．しかしながら，肩のヨー関節に関しては，あまり違いがみられない．これは肘関節の外殻デザインに理由がある．肘関節の外殻は滑らかな曲面による俵型をしており，Fig.5.13 に示すように肘関節は机に対して転がり運動をすることが可能である．この運動により，作業実行システムの運動がヨー関節に影響を及ぼしてしまい，結果としてたわみが発生したと考えられる．

この振動の抑制効果は，ペン先軌道においてもはっきりと表れている．グラフ (b) を

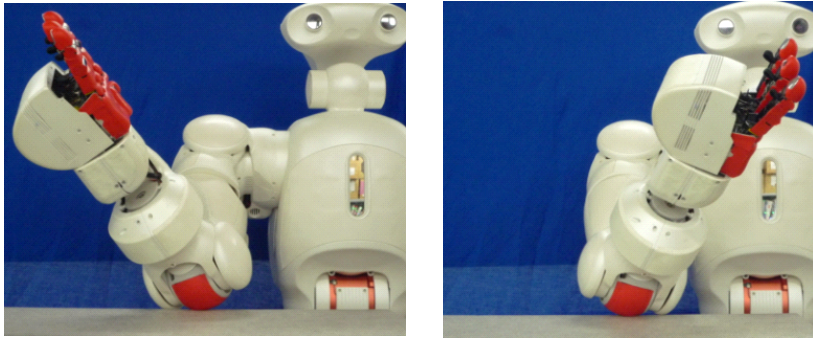


Fig.5.13 Rolling Motion Centered on Elbow Joint

比較すると，Fig.5.8 においてはペン先が描画範囲に収まり全体が描かれているものの，Fig.5.9 においては y 軸の $+$ 方向にペン先が逸脱してしまっている．前述の関節レベルでの振動の抑制が，ペン先軌道にも表れているものと考えられる．

グラフ (c) を見てみると，両者ともに押し付け力の変動が発散することなく作業が遂行されていることが分かる．押し付け力をアクティブに制御せずに得られたこの結果は，両者ともにパッシブコンプライアンスの利点を生かせているからだと言え，本論文で提案した「作業実行システム内の最上位関節に受動性」という戦略の妥当性を示唆している．

ii 冗長性の抑制効果

冗長性の抑制について効果を確認する．条件 (A) における試験結果 Fig.5.8 及び条件 (C) における試験結果 Fig.5.10 のグラフ (a) を比較すると，肘関節のばねたわみはほぼ同等のピークを有しているものの，Fig.5.10 において振動が非常に多く発生している．これは肘関節の能動的な運動によってもたらされていると考えられ，冗長性の抑制効果が認められる．

さらにグラフ (c) においても，Fig.5.8 のほうがより押し付け力の変動が少なく，冗長性の抑制が押し付け力の変動低減に効果を及ぼすことが示唆された．

しかしながら，グラフ (b) においては，ペン先軌道に大きな差異は認められない．これは，のちに述べる把持・操り制御の課題による影響が大きく，目視で確認できるほどの違いとして現れなかったものと考えられる．

以上の考察から，関節レベル及び押し付け力制御の面から，冗長性の抑制効果が確

認された。

iii 指を使った道具操作

最後に、指を積極的に用いることの有効性について検討した。これは動作計画法の検証とは直接の関係はない。条件 (C) における試験結果 Fig.5.10 及び条件 (D) における試験結果 Fig.5.11 のグラフ (a) を比較すると、Fig.5.10 において、肩のピッチとロール関節のばねたわみにおける振動及びピーク値が抑制されている。これは指を用いることで、手先の運動を生成するために必要な各関節の運動が、用いない場合に比べ小さくなったからだと考えられる。指を積極的に用いる効果が、関節レベルでは確認できる。

グラフ (b) からわかるように、指を使う (Fig.5.10) と軌道に関してはかなり目標値とのずれが生じてしまう。これはペン操作中に起こる、指先の表面上での接触点の移動が原因だと考えられる。本論文で提案した把持・操り制御則は非常にシンプルであり、一定の把持力で対象を把持し続けるという意味では効果があるが、ペンの姿勢を制御するという点で課題が明らかとなった

グラフ (c) においては、Fig.5.10 では押し付け力の大きな低下が認められ、Fig.5.11 では押し付け力の増大から、計測可能範囲を逸脱してしまっている (最大 400[gf])。そのためどちらが良いとは言えない。

以上の考察から、指を積極的に用いる効果は関節レベルでしか確認できず、そのアプローチの妥当性は検証できていない。

iv 現時点での最高パフォーマンス

なお、条件 (A) において、作用力調整手法を加えた場合の作用力及びペン先の軌道を Fig.5.14 に示す。この図でわかるように、提案した動作計画を適用した上で押し付け力の調整を導入すると、押し付け力を精度良く制御することができ、また軌道に関しては改善は見られない。

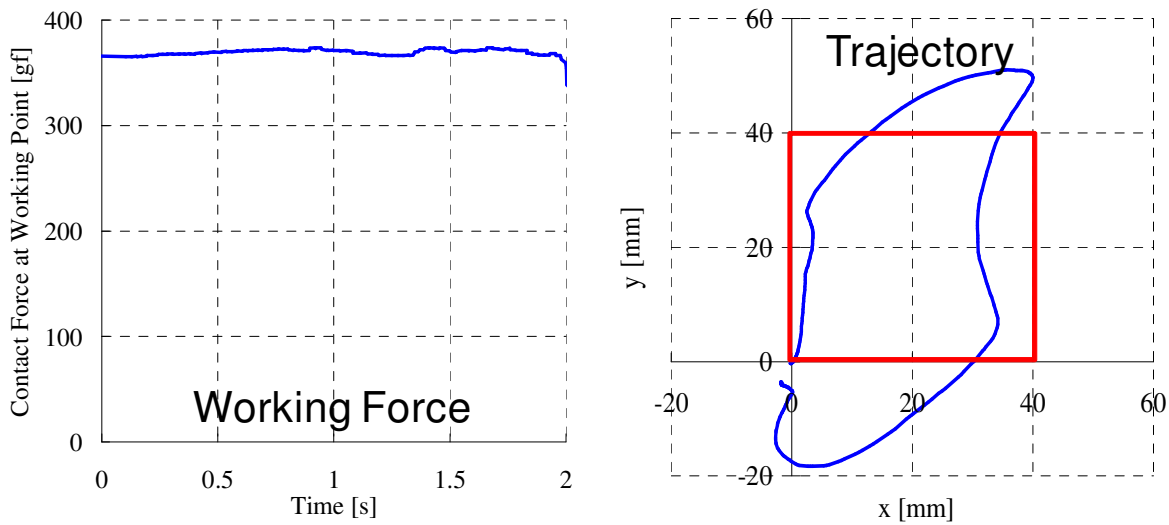


Fig.5.14 Exerted Force and Trajectory of Working Point with Force Adjustment

5.5 まとめ

本章では、拘束付与作業における能動的身体 環境接触を利用するための動作計画法を提案した。パッシブコンプライアンスの利点は、小さな反力しか伴わない受動的な作用点の位置調整能力であり、欠点は能動的かつ素早く運動する際に生じる時間遅れである。この特徴を拘束付与作業において適切に利用するために案出した戦略は、パッシブコンプライアンスの利点を活用することを重視するため、十分なパッシブコンプライアンスの見極めが重要であり、そのうえで欠点を抑制するためにそれ以上のパッシブコンプライアンスは無効化するというものである。ここで重視するべきと述べた十分なパッシブコンプライアンスという考え方を、本論文ではパッシブコンプライアンスの効果を確実に発揮することと捉え、動作計画法において具現化した。具体的に動作計画法は、第1ステップとして作業に必要な自由度を確保し、第2ステップでは作業実行システムの最上位関節が受動柔軟性を持つように能動的身体 環境接触形成部位を選択する、第3ステップにおいて作業実行システム内の冗長自由度分を受動柔軟関節に限り固定するという、3ステップで構成されている。さらに例題として、TWENDY-ONEを用いたペン操作による筆記作業に動作計画法を適用し、肘関節による能動的身体 環境接触の形成と肘関節に能動的な運動をさせないという結論が得られることを示した。またペンの操りに代表される円筒形対象物の操作に必要な制御アルゴリズムを構築し

た．制御アルゴリズムは，指姿勢補間による受動柔軟性を利用した道具の把持・操り制御，軌道制御（分解速度制御），ばねたわみ調整によるペン先押し付け力制御の三つで構成され，これらを組み合わせることで作業を遂行できる．特に把持・操り制御，押し付け力制御の二つは受動柔軟性を利用した極めてシンプルな制御則となっている．実機により実際にペン筆記作業を行い，動作計画法の有効性を検証した．実験結果から本研究の提案する3ステップによる動作計画法により，ばねのロックは回避した上で，欠点であるばねたわみの振動を抑えつつ利点である受動的な位置調整を発揮可能であることが確認され，ペン先の位置・押し付け力の制御性能という意味での巧みさの向上が示されたと言える．

第6章 結論

6.1 本研究の成果

本論文では，人間共存型ヒューマノイドロボットによる指を用いた巧みな手作業の実現という課題に対して，パッシブコンプライアンスの活用及び付加的拘束条件を適切に利用することにより巧みさ向上が期待できるという仮説から，両者を考慮した制御系を構築することを目的とし研究を進めた．構築した技術は大きく分けて以下の三つである．

- ・ 作業に応じたパッシブコンプライアンスの利用戦略
- ・ 能動的な身体 環境接触を利用するための制御枠組み
- ・ 能動的な身体 環境接触を利用する際のパラメータ設定法

結果として得られる柔らかな拘束の付与，滑らかな拘束の除去，安定した接触の維持の三つの機能は，それぞれ具体的な作業として，グラスなどの定置作業，引出しや扉を開ける作業及びリンゴの皮むき作業，筆記作業において把持した対象物と環境などの他物体の間の接触を精度よく制御するという意味での巧みさを向上させうことを示した．

2章では統一的な議論のため，人間の生活作業において利用されている能動的な身体 環境接触を俯瞰し，どういった作業において巧みさへの寄与があるのかを議論することで対象となる作業の絞り込みを行った．対象作業の共通点として，いずれの作業においても手先に与えられる環境からの拘束が変化していることに気づき，対象作業を拘束付与作業，除去作業の二つに分類した．この拘束条件の変化は時間的に不連続であり，この不連続性が作業者の運動を不安定にしており，能動的な身体 環境接触がこの不安定化を防いでいるのではないかという仮説から，研究を構築している，加えて，拘束付与作業，除去作業それぞれに潜在する不確定性及びパッシブコンプライア

ンスの特徴を考察し、両者を関連付けることでパッシブコンプライアンスの利用戦略を案出した。拘束付与作業においては、パッシブコンプライアンスの利点を活用することを重視するため、十分なパッシブコンプライアンスを見極めたうえで、欠点を抑制するためにそれ以上のパッシブコンプライアンスは無効化するという戦略をとった。拘束除去作業においては、欠点を抑制することを重視するため、可能な限りパッシブコンプライアンスを無効化する。また、拘束付与作業・除去作業に対しそれぞれの動作シーケンスを単純なモデルで表現し考察することで、能動的身体 環境接触を利用するための制御枠組みに対する機能要求を明らかにしている。

3章では能動的身体 環境接触を利用するための制御枠組みを提案したうえで、拘束付与作業に適用し有効性を検証している。この制御枠組みは能動的な身体 環境接触を形成しつつ作業を行うために、二つの接触をコントロールしなくてはならない。そこで本枠組みは、能動的身体 環境接触により形成される OBE ループを基にハンドアーム系の自由度を二つのグループに分割し、各グループにコントロールする担当接触点を割り当て、システム全体の運動の整合性を維持したまま作業を実行することとした。具体的には作業実行システムに OE コンタクトを、プレーシングシステムに BE コンタクトを制御させるという、極めてシンプルなものになっている。またガラスの定置作業の作業モデルの分析からパッシブコンプライアンスと作業パフォーマンスの関係を考察した。その結果拘束付与作業に関しては、

- ・ 接触形成による先行的な環境位置の把握
- ・ 接近速度の減衰
- ・ 受動要素による慣性のデカップリング効果

の三つが重要であると結論付けた。本制御枠組みを拘束付与作業の代表例であるガラスの定置作業に適用した場合に必要な制御アルゴリズムを、考察結果を踏まえて導入した。本制御枠組みを実機に適用しガラスの定置作業で効果を検証している。実験により、本制御枠組みにより小指指先や手掌側面といった部位による能動的身体 環境接触を利用した作業方法が遂行可能であることを示した。またこれらの作業方法では、極めて小さな接触力の発生に抑えつつ OE コンタクトを形成可能、つまり優しくガラスを置くことが可能であることが示され、手作業の巧みさの向上を端的に示す結

果となった，

4章では，3章で提案した能動的身体 環境接触を利用するための制御枠組みを拘束除去作業に適用し，その有効性を検証した．引出し開け作業の作業モデルを利用し，受動性と作業のポイントの関係に対する考察を行った．これにより拘束除去作業に関しては，

- ・剛性の上昇

が作業のポイントであると考え，ロボット身体に搭載されたばねの数を仮想的に減らすことはできないかというアイデアを得ている．ブレーシング制御システムに対し関節ごとに受動要素に生じるたわみをキャンセルするという非常にシンプルな制御アルゴリズムを導入することにより，このアイデアを具現化し巧みさの向上が期待できると考察し，制御アルゴリズムを導入している．実機試験においては，引出し開け作業及びリンゴの皮むき作業に対し提案手法を適用し，拘束の消失（低下）に伴う手先位置振動の抑制という点でその有効性を検証している．どちらの作業においても振動することなく作業が行えることから，対象物（引出し，ナイフ）と他物体（本体，リンゴ）間の接触位置を精度よく制御できるという意味で巧みさの向上が確認できたとと言える．

5章では，拘束付与作業における能動的身体 環境接触を利用するための動作計画法を構築し，筆記作業の実機実験により有効性を検証している．2章で案出したパッシブコンプライアンス特徴を拘束付与作業において適切に利用するために案出した戦略を基に，重視すべきとした十分なパッシブコンプライアンスという考え方を，本論文ではパッシブコンプライアンスの効果を確実に発揮することと捉え，動作計画法において具現化した．具体的に動作計画法は，第1ステップとして作業に必要な自由度を確保し，第2ステップでは作業実行システムの最上位関節が受動柔軟性を持つように能動的身体 環境接触形成部位を選択する，第3ステップにおいて作業実行システム内の冗長自由度分を受動柔軟関節に限り固定するという，3ステップで構成されている．さらに例題として，TWENDY-ONEを用いたペン操作による筆記作業に動作計画法を適用し，肘関節による能動的身体 環境接触の形成と肘関節に能動的な運動をさせないという結論が得られることを示した．またペンの操りに代表される円筒形

対象物の操作に必要な制御アルゴリズムを構築した。制御アルゴリズムは、指姿勢補間による受動柔軟性を利用した道具の把持・操り制御，軌道制御（分解速度制御），ばねたわみ調整によるペン先押し付け力制御の三つで構成され，これらを組み合わせることで作業を遂行できる。特に把持・操り制御，押し付け力制御の二つは受動柔軟性を利用した極めてシンプルな制御則となっている。実機により実際にペン筆記作業を行い，動作計画法の有効性を検証した。実験結果から本研究の提案する3ステップによる動作計画法により，ばねのロックは回避した上で，欠点であるばねたわみの振動を抑えつつ利点である受動的な位置調整を発揮可能であることが確認され，ペン先の位置・押し付け力の制御性能という意味での巧みさの向上が示されたと言える。

6.2 今後の展望

本論文で目的とした，手作業の中でも拘束を与える作業及び除去する作業における能動的な身体環境接触を利用した巧みさの向上に対して，さらに巧みさを向上させる，またより広範な条件で作業ができるようにするという視点に立つと，大きく二つの課題が残されていると考えている。

一つは能動的な身体環境接触を行う際の，環境側の部位及び位置を考慮した作業姿勢の数値計算法である。筆記作業を例にあげると，イスに座り机に開いたノートに何かを書きつける際には，人間並みのサイズのロボットであれば本論文で結論として得た肘による接触を無理な姿勢をとることなく行うことができるだろう。しかし我々人間でも，ホワイトボードや黒板などの垂直な面に対し筆記する際に肘を接触させるのは難しい。これは手首姿勢の制約から，可動範囲を超えるような腕部関節の姿勢が必要とされるためである。またノートの周囲が他の文房具などの障害物に囲まれている場合にも，肘接触が可能かどうかもしくは肘接触する環境側の位置に関して考慮する必要がある。本論文で提案した動作計画法は，能動的な身体環境接触を利用する際の基本的な考え方を示しているが，具体的な作業姿勢を決定するための数値計算に関しては言及していない。周囲環境の状況やロボットとの相対的な位置・姿勢に加えロボットの可動範囲などを考慮した作業姿勢の数値計算法を構築できれば，より複雑な条件下での作業実行が可能となる。

もう一つは手作業を行う際の基礎技術である，把持・操り制御の制御性能の向上である．具体的には筆記作業に代表される指を用いた道具操作において，道具先の軌道追従性に関してはまだ課題が残ることが示されている．これは主に指の操りに伴う，指先の表面上での接触点の移動及び柔軟肉のたわみが原因だと考えられるが，これらの要素を厳密にモデル化することは困難であり解析的な方法では限界があると推察できる．同時に，我々の研究グループで提案している指姿勢補間による受動柔軟性を利用した把持・操り制御のような大雑把な方法は，対象物との接触を形成し維持するという基本的な機能が簡単に手に入るが，対象物の位置・姿勢を厳密に制御するには限界がある．そこで，初期及び最終の指姿勢という運動の大枠を規定するというアイデアを残しつつ，補間関数を学習的に獲得するような知能化技術を導入することでさらなる制御性能の向上が期待できる．

また，本研究により得られた人間共存ロボット設計論に対する知見は，パッシブコンプライアンスはグラス定置作業のような拘束を付与する作業においては大きな利点をもたらし，引出し開け作業のような拘束を除去する作業では，大きな欠点となるということである．これは，コンプライアンス可変の受動柔軟機構を，ハンド アーム系の各関節に搭載することが，非常に大きなメリットがあることを示唆している．しかしながら，このコンプライアンス調整機能は当然ながら追加的な機構及び電子部品の搭載を意味し，容易に体格・重量の増大に繋がるため，理想的であるものの現実的ではないと言わざるをえない．本研究で示した能動的な身体 環境接触を利用したアプローチは，特別な機構を搭載せずともコンプライアンス調整機能を実現している．実験の結果はこのアプローチが，例として挙げた作業においては十分に巧みな作業を実行可能であることを示しているが，さらに多くの作業にチャレンジしコンプライアンス調整機構の必要性を明らかにする必要がある．

さらに本論文は統一的な議論のため，付加的拘束条件を能動的な身体 環境接触に絞って議論している．そこでさらなる発展的なチャレンジとして，能動的な身体 環境接触以外の付加的拘束条件を取り上げる必要がある．具体的には，グラスの定置作業で示したような拇指・示指・中指の3指による把持や，筆記作業時の3指指頭側面摘みによる把持と指による操りの選択は，これまでのロボット研究において議論されてきた把

持の安定性だけでは説明することができない．これらの指を積極的に用いた把持・操りに関して安定性や操作性の面から解析を進め，ロボットにより実行するための制御体系を構築することができれば，さらなる巧みさの向上が期待できる．

参考文献

- [1] 内閣府: ”平成 2 1 年度 高齢社会白書,” 2009.
- [2] 文部科学省 科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター: ”第 7 回 技術予測調査,” 2001 年 7 月.
- [3] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, Hun-ok Lim and A. Takanishi: ”Development of A Humanoid Robot WABIAN-2,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.76-81, 2006.
- [4] トヨタ自動車株式会社HP: <http://www2.toyota.co.jp/jp/tech/robot/conference/>
- [5] 高木宗谷: ”トヨタパートナーロボット,” *日本ロボット学会誌 Vol. 24, No. 2*, pp.208 ~ 210, 2006.
- [6] K.Hirai , M.Hirose , Y.Haikawa and T.Takenaka:“ The Development of Honda Humanoid Robot, ”*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* , pp.1321 - 1326 , 1998.
- [7] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki and K. Fujimura:“ The intelligent asimo: System overview and integration, ”*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2478-2483, 2002.
- [8] 井上博允, 比留川博久: ”人間協調・共存型ロボットシステム,” *日本ロボット学会誌 Vol. 18, No. 8*, pp.1089 ~ 1092, 2000.

- [9] 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.
- [10] 金子健二, 原田研介, 金広文男, 木村勉, 宮森剛, 赤地一彦: ”ヒューマノイドロボット HRP-3 の開発,” 日本ロボット学会誌 *Vol. 26, No. 6*, pp.658 ~ 666, 2008.
- [11] 金子健二, 金広文男, 森澤光晴, 三浦郁奈子, 中岡慎一郎, 原田研介, 梶田秀司: ”サイバネティックヒューマン HRP-4C の開発 -プロジェクト概要からシステム設計まで-,” 日本ロボット学会誌 *Vol.28, No.7*, pp.79-90, 2010.
- [12] 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.
- [13] S. Nakaoka, F. Kanehiro, K. Miura, M. Morisawa, K. Fujiwara, K. Kaneko, S. Kajita and H. Hirukawa: ”Creating Facial Motions of Cybernetic Human HRP-4C,” *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 561-567, 2009.
- [14] N. Endo, S. Momoki, M. Zecca, M. Saito, Y. Mizoguchi, K. Itoh and A. Takanishi: ”Development of Whole-body Emotion Expression Humanoid Robot,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* , pp.2140 - 2145 , 2008.
- [15] 人間共存型ロボット研究専門委員会: ”人間共存型ロボットシステムにおける技術課題,” 日本ロボット学会誌 *Vol. 16, No. 3*, pp.288 ~ 294, 1998.
- [16] Antonio Bicchi and Giovanni Tonietti: ”Fast and “ Soft-Arm ”Tactics -Dealing with the Safety-Performance Tradeoff in Robot Arms Design and Control-,” *IEEE Robotics and Automation Magazine Vol.11, no.2*, pp. 22-33, 2004.

- [17] 森田寿郎, 鈴木雄一郎, 川崎毅彦, 菅野重樹: "人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御," 日本ロボット学会誌 *Vol. 16, No. 1*, pp.102 ~ 109, 1998.
- [18] K. Suita, Y. Yamada, N. Tsuchida, K. Imai, H. Ikeda and N. Sugimoto: "A Failure-to-Safety "Kyozon" System with Simple Contact Detection and Stop Capabilities for Safe Human-Autonomous Robot Coexistence," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3089-3096, 1995.
- [19] S. Haddadin, A. Albu-Schaffer and G. Hirzinger: "Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing," *Proceedings of Robotics: Science and Systems Conference*, 2007.
- [20] 岡田慧, 青山拓磨, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允: " 三次元フローを用いた人込みにおけるロボットの障害物回避 ", 第 5 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 214-219, 2000
- [21] 坪内孝司, 浪花智英, 有本卓 : " 平面を移動する複数の移動障害物とその速度を考慮した移動ロボットのプランニングとナビゲーション," 日本ロボット学会誌, *Vol. 12, No. 7*, pp. 1029-1037, 1994.
- [22] 日浦亮太: "wakamaru の挑戦," 日本ロボット学会誌 *Vol. 24, No. 3*, pp.284 ~ 287, 2006.
- [23] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO 技術開発機構), 社団法人 日本ロボット工業会 (JARA): "次世代ロボット実用化プロジェクト「愛・地球博」での実証と「ロボットの安全性に関する考え方」," 2005.
- [24] 経済産業省: "次世代ロボット安全性確保ガイドライン," 2007.
- [25] 川内直人, 古結義浩, 長島是, 大西献, 日浦亮太: "ホームユースロボット" wakamaru", 三菱重工技報 *Vol.40, No.5*, pp.270-273, 2003.

- [26] 藤田善弘: "NECにおけるパーソナルロボットの開発," 日本ロボット学会誌 *Vol. 20 No. 7*, pp.676-679, 2002.
- [27] 松坂要佐, 東條剛史, 小林哲則: "グループ会話に参加する対話ロボットの構築" 電子情報通信学会論文誌 *D-II Vol. J84-D-II, No. 6*, pp. 898-908, 2001.
- [28] 渡辺富夫: "うなずきロボット InterRobot," 日本ロボット学会誌 *Vol.24, No.6*, pp.692-695, 2006.
- [29] 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 前田武志, 中津良平: "研究用プラットフォームとしての日常活動型ロボット"Robovie"の開発," 電子情報通信学会論文誌 *D-I Vol. J85-D-I, No. 4*, pp. 380-389, 2002.
- [30] A. Morales, T. Asfour, P. Azad, S. Knoop and R. Dillmann: "Integrated Grasp Planning and Visual Object Localization For a Humanoid Robot with Five-Fingered Hands" *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5663-5668 , 2006.
- [31] K. Okada, M. Kojima, Y. Sagawa, T. Ichino, K. Sato and M. Inaba: "Vision based behavior verification system of humanoid robot for daily environment tasks," *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 7-12, 2006.
- [32] 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.
- [33] 竹田貴博, 林智大, 平田泰久, 小菅一弘: "社交ダンスにおける人間とロボットとの力学的相互作用型協調運動システム," 日本ロボット学会誌 *Vol. 25 No. 1*, pp.113 ~ 120, 2007.

- [34] H. Iwata and S. Sugano: "Design of Human Symbiotic Robot TWENDY-ONE", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 580-586, 2009.
- [35] D. E. Whitney: "Historical Perspective and States of the Art in Robot Force Control," *The international Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 1, 1987
- [36] D. E. Whitney: "Force Feedback Control of Manipulator Fine Motion," *ASME, Journal of DSMC*, pp. 91-97, 1977
- [37] 平林久明, 杉本浩一, 荒井信一, 坂上志之: "多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御," *計測自動制御学会論文集 Vol. 22 No. 3*, pp. 343-350, 1986.
- [38] J. Kenneth Salisbury: "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates," *Proceedings of 19th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 95-100, 1980.
- [39] N. Hogan: "Impedance Control: An Approach to manipulation: Part1-3," *ASME, Journal of DSMC*, pp. 1-7, 1985
- [40] M. H. Raibert, et. al: "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," *ASME, Journal of DSMC*, pp. 126-133, 1981
- [41] T. Tsuji, A. Jazidie and M. Kaneko: "Multi-Point Impedance Control for Redundant Manipulators," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics Vol.26, No.5*, pp. 707-718, 1996.
- [42] J. Park and O. Khatib: "Robot Multiple Contact Control", *Robotica*, Vol.26, pp. 667-677, 2008.
- [43] 小菅一弘, 風村典秀: "人と協調するロボットの運動生成," *日本ロボット学会学術講演会予稿集*, pp.393 - 394, 1997.
- [44] 岩田浩康, 星野勇人, 森田寿郎, 菅野重樹: "作業性と人間追従性を両立する動作制御手法," *日本ロボット学会誌 Vol. 21, No. 1*, pp. 118-125, 2003.

- [45] 小菅一弘, 古賀雅伸, 古田勝久, 野崎景春, ”仮想内部モデルに基づくロボットアームの協調制御,” 計測自動制御学会論文集 *Vol. 27 No. 1*, pp. 93-100, 1991.
- [46] 小菅一弘, 吉田英博, 福田敏男, 蟹谷 清, 酒井 勝, 針木和夫: ”インピ - ダンス制御に基づく双腕マニピュレ - タの協調制御,” 日本ロボット学会誌, *vol.13*, *no.3*, pp.100 - 106, 1995.
- [47] K. F. Laurin-Kovitz, J. E. Colgate and S. D. R. Carnes: ”Design of Components for Programmable Passive Impedance,” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1479-1481, 1991.
- [48] W. T. Townsend : ”The Effect of Transmission Design on Force-Controlled Manipulator Performance,” *Technical report 1054, MIT Artificial Intelligence Laboratory*, 1988.
- [49] 兵頭和人, 小林博明: ”非線形バネ要素を持つ腱制御手首機構の研究”, 日本ロボット学会誌 *Vol. 11, No. 8*, pp.1244-1251, 1998.
- [50] G. Wyeth: ”Demonstrating the Safety and Performance of a Velocity Sourced Series Elastic Actuator,” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3642-3647, 2008.
- [51] T. Morita, S. Sugano : ”Development and Evaluation of Seven-D.O.F. MIA ARM,” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 462-467, 1997.
- [52] Junho Choi, Seonghun Hong, Woosub Lee, and Sungchul Kang: ”A Variable Stiffness Joint using Leaf Springs for Robot Manipulators,” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 4363-4368, 2009.
- [53] 森田寿郎: ”人間共存ロボットのためのマニピュレータに関する研究,” 早稲田大学博士論文, 1998.

- [54] T. Sugaiwa, H. Iwata and S. Sugano: "New Visco-Elastic Mechanism Design for Flexible Joint Manipulator," *Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp 235-240, 2008.
- [55] 岡田徳次: "柔軟性のある人工の手," *バイオメカニズム Vol. 4*, pp241-251, 1978.
- [56] J.K. Salisbury, "Kinematic and Force Analysis of Articulated Hands," *Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Stanford University*, 1982.
- [57] S.C. Jacobsen, E.K. Iversen, D.F. Knutti, R.T. Johnson and K.B. Biggers: "Design of the UTAH / M.I.T. Dexterous Hand," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1520-1532, 1986.
- [58] 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
- [59] J. Butterfass, G. Hirzinger, S. Knoch and H. Liu: "DLR 's Multisensory Articulated Hand Part I: Hard- and Software Architecture," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2081-2086, 1998.
- [60] J. ButterfaB, M. Grebenstein, H. Liu and G. Hirzinger: "DLR-Hand II: next generation of a dextrous robot hand," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 109-114, 2001.
- [61] C. S. Lovchik and M. A. Diftler: "The Robonaut Hand: A Dexterous Robot Hand For Space," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 907-912, 1999.
- [62] 中村仁彦, 永井清, 吉川恒夫: "複数のロボット機構による協調的あやつりの力学," *日本ロボット学会誌 Vol.4, No.5*, pp. 489-498, 1986.

- [63] H. Maekawa, K. Tanie, and K. Komoriya: "Tactile Sensor Based Manipulation of an Unknown Object by a Multifingered Hand with Rolling Contact," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 743-750, 1995.
- [64] 白井達也, 金子真, 辻敏夫: "スケール依存型把握," 日本ロボット学会誌 *Vol. 17, No. 4*, pp. 567-576, 1999.
- [65] 金子真, 東森充, 辻敏夫: "包み込み把握の遷移安定性," 日本ロボット学会誌 *Vol. 16, No. 5*, pp. 712-720, 1998.
- [66] 中村仁彦, 来島正一郎: "多面凸集合演算を用いたパワーグラスの限界外力空間の計算," 日本ロボット学会誌 *Vol.15, No.5*, pp. 728-735, 1997.
- [67] 小俣透, 永田和之: "多指ハンドによるパワーグラスの力学的特性", 日本ロボット学会誌 *Vol.13, No.4*, pp. 525-532, 1995.
- [68] 末広尚士, 高瀬国克: "スキルに基づくマニピュレーションシステム," 日本ロボット学会誌 *Vol. 8, No. 5*, pp. 551-562, 1990.
- [69] 高松淳, 小川原光一, 木村浩, 池内克史: "ロボットによる実行を目的とした人の組み立て作業の理解 -接触状態遷移からの最適軌道の生成-", 日本ロボット学会誌 *Vol. 22, No. 6*, pp. 752-763, 2004.
- [70] 横小路泰義, 田中健太, 鴨谷悠介: "ロボットハンドによる折り紙作業," 電子情報通信学会技術研究報告 *Vol. 106, No. 410*, pp. 113-118, 2006.
- [71] 藤岡寛之, 前田浩一: "クランクまわし作業のタスク理解," 日本ロボット学会誌 *Vol. 22, No. 7*, pp. 881-891, 2004.
- [72] 白井達也, 野口賢晃, 富岡巧: "ヒトによるコイン形状物体の把握動作解析とロボットハンドへの応用," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, Paper-no. 2P1-L1-6, 2004.

- [73] 高浜孝安, 永谷圭司, 田中豊: ”双腕移動マニピュレータの動作計画に関する研究 - 本の認識-把持-運搬-返却動作の実現-,” *ロボティクスシンポジア予稿集 Vol.9*, pp. 216-221, 2004.
- [74] K. Ogata and Y. Kuniyoshi: ”Analyzing the ”Knacks” of Transferring Human and Developing a Two-Body Integrated Model as a Basis for Humanoid Control,” *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 99-104, 2009.
- [75] 篠田裕仁, 小枝正直, 吉川恒夫: ”ジェンガゲームロボットの開発,” 第26回日本ロボット学会学術講演会, Paper-no. 1E1-08, 2008.
- [76] T. Yoshikawa: ”Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy,” *The First Int. Symp. on Robotics Research, MIT Press*, pp.735 - 747, 1984.
- [77] A. A. Maciejewski and C. A. Klein: ”Obstacle Avoidance for Kinematically Redundant Manipulators in Dynamically Varying Environments,” *The International Journal of Robotics Research*, vol.4, no.3, pp.109 - 117, 1985.
- [78] 中村仁彦, 花房秀郎: ”関節形ロボットアームの特異点低感度運動分解,” *計測自動制御学会論文集*, vol.20, no.5, pp.453 - 459, 1984.
- [79] Ian D. Walker : ”The Use of Kinematic Redundancy in Reducing Impact and-Contact Effects in Manipulation” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 434-439, 1990.
- [80] 狩野弘之, 高山訓治: ”最小加速度規範によるマニピュレータの滑らかな軌道制御,” *日本ロボット学会誌 Vol. 7, No. 1*, pp. 3-10, 1988.
- [81] 岩城敏, ウルリッヒ レンボルト: ”線倣い作業のためのマニピュレータ姿勢評価指標,” *日本ロボット学会誌 Vol. 16, No. 6*, pp. 785-790, 1998.
- [82] 岩附信行, 林巖, 太田毅: ”器用さを目的関数とした冗長ロボットの最適運動制御,” *日本機械学会論文集C編, Vol. 60, No. 574*, pp. 174-180, 1994.

- [83] H. West: "Kinematic Analysis for the Design and Control of Braced Manipulators," *Doctor dissertation, Massachusetts Institute of Technology*, 1984.
- [84] J. Y. Lew, W. J. Book: "Bracing Micro/Macro manipulator Control," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2362-2368, 1994.
- [85] 上松健二, 福田敏男: "ブレーシングコントロールによる冗長マニピュレータのトルク最適化," *日本機械学会論文集C編, Vol. 67, No. 654*, pp. 420-427, 2000.
- [86] A. Escande, A. Kheddar, S. Miossec, 横井一仁: "ヒューマノイドロボットの支持接触点計画法," *第24回日本ロボット学会学術講演会*, Paper-no. 1H1-7, 2006.
- [87] 山本賢, 見浪護: "多点肘つき拘束運動のモデル化とシミュレーションによる評価," *第26回日本ロボット学会学術講演会*, Paper-no. 3E3-03, 2008.
- [88] 清水昌幸, 小菅一弘: "Structured Compliance を用いた平面組付作業," *日本ロボット学会誌 Vol. 20, No. 8*, pp. 852-859, 2002.
- [89] 琴坂信哉, 大滝英征: "多自由度ロボットにおける機構自由度の縮退を利用したアクチュエータの選択的利用," *日本ロボット学会誌 Vol. 25, No. 8*, pp. 1259-1265, 2007.
- [90] O. Khatib: "Reduced effective inertia in macro/micro-manipulator systems," *Proceedings of ACC*, pp. 2140-2147, 1988.
- [91] A. Sharon, N. Hogan and D. E. Hardt: "Controller Design in the Physical Domain," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 552-559, 1989.
- [92] 菅野重樹, 田中良治, 大岡俊夫, 加藤一郎: "指と腕の協調制御手法 -指先の連続位置決め作業における指・腕軌道の自動決定-" *日本ロボット学会誌 Vol. 4, No. 4*, pp. 343-352, 1986.

- [93] 永井清 , 吉川恒夫 : ”アーム・多指ハンド機構による把握と操り,” 日本ロボット学会誌 *Vol. 13, No. 7*, pp. 994-1005, 1995.
- [94] B. T. Quan, J. Huang, M. Harada and T. Yabuta: ”Control of a Macro-Micro Robot System using Manipulability of the Micro Robot,” *JSME international journal. Series C, Vol.49, No.3*, pp. 897-904, 2006.
- [95] C. Ott, A. Albu-Schaffer, A. Kugi and G. Hirzinger: ”On the Passivity-Based Impedance Control of Flexible Joint Robots,” *IEEE Transactions on Robotics, Vol. 24, No. 2*, pp. 416-429, 2008.
- [96] M. Okada, Y. Nakamura and S. Hoshino: ”Design of Active/Passive Hybrid Compliance in the Frequency Domain -Shaping Dynamic Compliance of Humanoid Shoulder Mechanism-” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2250-2257, 2000.
- [97] 佐々木裕之, 高橋隆行, 中野栄二: ”受動関節を有する移動マニピュレータによるドア開け法”, 日本ロボット学会誌 *Vol. 19, No. 2*, pp. 277-284, 2001.
- [98] T. Inoue and S. Hirai: ”Elastic Model of Deformable Fingertip for Soft-Fingered Manipulation,” *IEEE Transactions on Robotics, Vol. 22, No. 6*, pp 1273-1279, 2006.
- [99] 田原健二, 山口光治, 有本卓: ”最小自由度をもつ柔軟 2 本指ロボットによる安定把持および姿勢制御のためのセンソリーフィードバック,” 日本ロボット学会誌 *Vol. 21, No. 7*, pp. 763-769, 2003.
- [100] 井上貴浩, 平井慎一: ”柔軟指による把持物体の姿勢制御,” 日本機械学会論文集 C 編, *Vol. 75, No. 757*, pp. 2537-2546, 2009.
- [101] 岩田浩康, 林隆志, 塩澤裕樹, 菅野重樹: ”受動柔軟性を備えた TWENDY-ONE ハンドの基本制御手法 ~ 把持形態間移行による多彩な把持・操りの実現 ~,” 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Paper No.1E3-05, 2008.

[102] 尾崎康子, "幼児の筆記具操作と描画行動の発達," 風間書房, 2008.

[103] 鎌倉矩子, "手のかたち 手のうごき," 医歯薬出版株式会社, 1989.

[104] I. A. Kapandji, "関節の生理学 I 上肢," 医歯薬出版株式会社, .

[105] 豊田中央研究所: "GUMMETAL,"

Available: http://www.toyotsumaterial.co.jp/en/jigyo/jigyo_05.html

[106] FUJI LATEX Corporation: "Rotary Disk Damper,"

Available: <http://www.fujilatex.co.jp/seimitsuiki/product/4/13/1.html>

謝辞

本研究の遂行にあたり，早稲田大学創造理工学部総合機械工学科 菅野重樹教授により懇切なご指導を賜りました。心より感謝の意を表します。

また，本論文の執筆にあたり多くのご指導を賜りました，早稲田大学創造理工学部 藤江正克教授，山川宏教授，宮下朋之教授，橋本周司教授に深く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり，早稲田大学高等研究所 岩田浩康准教授により常に激励のお言葉を頂き，多大なご指導を賜りました。

共同研究者である岩本国大氏，高橋正浩氏，植村洋平氏，笠井栄良氏，山口泰正氏，鼠家正則氏，藤井元気氏，堀内大介氏，加納弘之氏，江崎佳奈子氏，鹿貫悠多氏のご協力により本研究は遂行することができました。

佐藤潤氏，市川健太郎氏のお二人により暖かい激励を幾度となく頂きました。

平山英介氏，長嶺伸治氏，山下福太郎氏，前代アト夢氏，野口博史氏を含む TWENDY プロジェクトメンバーのご協力によりさまざまな成果を挙げることができました。

皆様のご協力に心より感謝いたします。

最後に両親，兄弟の支えにより，筆者は充実した研究生活を送ることができました。心より感謝の意を捧げここに厚くお礼申し上げます。

2011年2月 菅岩泰亮

研究業績

菅岩 泰亮

種類別	題名	発表・発行掲載誌名	発表発行年月	連名者
1. ○論文	A Methodology for Setting Grasping Force for Picking up an Object with Unknown Weight, Friction, and Stiffness	Proceeding of 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids2010)	2010年12月	Fujii, G. Iwata, H. Sugano, S.
○論文	Motion-planning Method with Active Body-Environment Contact for a Hand-Arm System including Passive Joints	Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010)	2010年10月	Nezumiya, M Iwata, H. Sugano, S.
○論文	Hand-Arm Coordinated Manipulation Using Active Body-Environment Contact	SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration Robotics and Mechatronics	2009年12月	Iwata, H. Sugano, S.
○論文	A Motion Control for Dexterous Manipulation with Human Mimetic Hand-Arm System	Proceeding of 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids2009)	2009年12月	Iwata, H. Sugano, S.
○論文	Dexterous Hand-Arm Coordinated Manipulation using Active Body-Environment Contact	Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2009)	2009年10月	Yamaguchi, Y Iwata, H. Sugano, S.
○論文	Shock Absorbing Skin Design for Human-Symbiotic Robot at the Worst Case Collision	Proceeding of 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2008)	2008年12月	Iwata, H. Sugano, S.
○論文	New Visco-Elastic Mechanism Design for Flexible Joint Manipulator	Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2008)	2008年7月	Iwata, H. Sugano, S.
○論文	Pressure Control on Whole Surface of Human-mimetic Multi-fingered Hand with Tactile Sensing	Proceedings of SICE Annual Conference 2010	2010年8月	Iwamoto, K. Iwata, H. Sugano, S.
2.講演	未知重量・摩擦・剛性対象物に対する把持力設定手法～受動柔軟性を利用した持ち上げ前特性計測の活用～	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会	2010年6月	藤井元気 鹿貫悠多 加納弘之 岩田浩康 菅野重樹
	人間形ハンド・アームによる道具の微細操作に関する研究～受動柔軟性を活用した動作計画及び把持・作用力・軌道制御～	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会	2010年6月	江崎佳奈子 鼠家正則 岩田浩康 菅野重樹

種類別	題名	発表・発行掲載誌名	発表発行年月	連名者
講演	円柱形対象物の重量による転がりを利用した握り込み制御	第10回 SICE システムインテグレーション部門講演会	2009年12月	笠井栄良 岩田浩康 菅野重樹
講演	能動的な身体環境接触を利用した手腕協調制御	第27回日本ロボット学会学術講演会	2009年9月	山口泰正 岩田浩康 菅野重樹
講演	倣い作業における触覚センサ情報の統合による手腕協調制御手法	第9回 SICE システムインテグレーション部門講演会	2008年12月	岩本国大 岩田浩康 菅野重樹
講演	手指手掌全面に柔軟肉を搭載した多指ロボットハンドの触覚センサ設計 ～人による対象物把持における接触頻度・寄与度の高い部位の導出～	第9回 SICE システムインテグレーション部門講演会	2008年12月	岩田浩康 鼠家正則 木村謙大 菅野重樹
講演	広範な把持形態でのなじみ効果発現を考慮した関節ばね弾性設計手法	第9回 SICE システムインテグレーション部門講演会	2008年12月	藤井元気 岩本国大 堀内大介 岩田浩康 菅野重樹
講演	受動柔軟関節を活用した多指ロボットハンドの柔軟対象物把持手法	第9回 SICE システムインテグレーション部門講演会	2008年12月	岩田浩康 堀内大介 塩沢裕樹 菅野重樹
講演	能動的環境接触を考慮した柔軟マニピュレータの肘関節設計	第26回日本ロボット学会学術講演会	2008年9月	岩田浩康 高川元 菅野重樹
講演	人間共存ロボット TWENDY-ONE の開発	第26回日本ロボット学会学術講演会	2008年9月	岩田浩康 菅野重樹
講演	リスクカーブに基づく衝突安全被覆設計	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会	2008年6月	岩田浩康 中村卓磨 菅野重樹
講演	人間共存ロボット TWENDY-ONE のデザイン	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会	2008年6月	岩田浩康 菅野重樹
講演	小型・軽量な柔軟関節マニピュレータのための粘弾性機構設計	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会	2008年6月	岩田浩康 森裕貴 菅野重樹
講演	能動的な身体・環境接触を活用した対象物操作の安定化 ～プレーシング作業における衝撃低減効果の検証～	第26回日本ロボット学会学術講演会	2007年9月	岩田浩康 菅野重樹

種類別	題名	発表・発行掲載誌名	発表発行年月	連名者
3. その他 講演	人間とロボットとの協調移動制御～優先関係と働きかけの導入～	第11回SICEシステムインテグレーション部門講演会	2010年12月	市川健太郎 岩田浩康 金道敏樹 菅野重樹
講演	人間共存ロボットの主体的判断による知能移動	第28回日本ロボット学会学術講演会	2010年9月	菅野重樹 岩田浩康 市川健太郎 金道敏樹
講演	人間共存ロボットの舐触適応行動～第25報：人間追従下における二次的被害防止のための作業拘束解除手法～	第9回SICEシステムインテグレーション部門講演会	2008年12月	岩田浩康 山下福太郎 平塚和俊 菅野重樹
講演	人間共存ロボットの舐触適応行動～第22報：障害物回避・作業遂行のための先行的カベクトル場を用いた人間追従との機能統合手法の提案～	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会	2006年5月	岩田浩康 九谷俊行 菅野重樹
解説	人間共存ロボットにおける生活支援のためのビジョン技術	日本ロボット学会誌	2009年7月	岩田浩康 菅野重樹
解説	人間共存ロボット TWENDY-ONE～汎用生活支援ツールとしての可能性～	福祉介護機器 Techno+,	2008年9月	岩田浩康 菅野重樹
特許	移動体	特許出願 番号：2010-285050	2010年12月	市川健太郎 金道敏樹 菅野重樹 岩田浩康 前代アト夢 野口博史 藤井雄太
特許	移動体	特許出願 番号：2010-210960	2010年9月	市川健太郎 金道敏樹 菅野重樹 岩田浩康
特許	ロボット装置	特許出願 番号：2010-159681	2010年7月	市川健太郎 菅野重樹 植村洋平
特許	ロボット装置	特許出願 番号：2008-309798	2008年12月	市川健太郎 菅野重樹 岩本国大 岩田浩康