

産業用ロボットの外乱オブザーバを用いた  
高性能接触モーション制御法に関する研究

嶋田 直樹

2014年2月



# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的と概要	4
第 2 章	力センサレス接触モーシヨソ制御の理論検討と技術的課題	9
2.1	はじめに	9
2.2	相互に作用するロボットと環境の接触モデルの検討	10
2.3	外力推定による触覚情報を用いたモーシヨソ制御	14
2.4	環境に対する柔軟な動作を目的とした各種モーシヨソ制御法	20
2.5	まとめ	31
第 3 章	ジャーク信号と動的閾値を用いた高加減速のモーシヨソ制御法	35
3.1	はじめに	35
3.2	衝撃の検知に有効な推定外力ジャーク信号による接触検知	36
3.3	高加減速時に接触の誤検知を回避する動力学に基づく動的閾値	39
3.4	シミュレーションを用いた検証	43
3.5	実機実験による検証	48
3.6	まとめ	52
第 4 章	動力学に基づくブレーキと力制御器の初期値更新によるスムーズな接触制御	55
4.1	はじめに	55

---

4.2	接触時の衝撃力を低減する運動エネルギーに基づくブレーキ制御 . . . . .	58
4.3	接触後の応答性を改善する力コントローラ積分器の初期値更新 . . . . .	59
4.4	実機実験による検証 . . . . .	67
4.5	まとめ . . . . .	72
第 5 章	作業空間の環境に対する衝撃力をリミットする動的加速度閾値	75
5.1	はじめに . . . . .	75
5.2	接触運動の運動方程式と衝撃力の解析 . . . . .	76
5.3	球座標による作業空間の等価質量と動的な加速度制限値 . . . . .	79
5.4	実機実験による検証 . . . . .	86
5.5	まとめ . . . . .	90
第 6 章	結論	93
6.1	本論文による成果 . . . . .	93
6.2	ロボットの安全化における本研究の成果 . . . . .	96
6.3	今後の課題 . . . . .	99

# 目次

1.1	博士論文の概要	7
2.1	軸ねじれを考慮した二慣性系モデル：(a) 減速機のねじれを考慮した関節の物理モデル (b) ロボット関節をモデル化した二慣性共振モデル	11
2.2	ロボットの関節軸におけるねじれ特性を含む力制御系のモデル：(a) ロボットの接触動作の概念図 (b) 関節の弾性特性を考慮したロボットの接触モデル	12
2.3	外乱オブザーバと逆動力学計算による反力推定オブザーバ	16
2.4	シミュレーションと実験で検討した試験軌道の位置指令と応答	18
2.5	制御対象の非線形摩擦特性による推定外力の誤差についてのシミュレーション結果	18
2.6	Z軸方向先端速度	19
2.7	推定外力による接触検知の比較：(a) 推定外力によって接触検知をした場合の外力変化 (b) 外力が生じた瞬間にブレーキを行った場合の外力変化	19
2.8	仮想インピーダンスコントローラの概要：(a) イメージ図 (b) アーム位置変位 (c) 外力 (d) ブロック線図	21
2.9	環境の剛性とインピーダンスパラメータを変化させた時の極零点配置の比較	22
2.10	シミュレーション実行時の仮想環境と接触時に想定した姿勢	23
2.11	インピーダンス制御によるロボットの接触動作シミュレーション	23
2.12	インピーダンス制御によるロボットの接触動作シミュレーション	23
2.13	加速度コントローラを用いた P 型加速度制御系	24

2.14	加速度制御系のアーム加速度の閉ループ伝達関数より描画した極配置とボード線図:(a) 極配置 (b) ボード線図 . . . . .	25
2.15	速度制御によってロボットを停止させた場合の接触動作のシミュレーション結果	27
2.16	加速度制御系によってブレーキ加速度を制御する接触動作のシミュレーション結果	27
2.17	速度制御型 I-P カコントローラ . . . . .	28
2.18	カコントローラの違いによる力制御のシミュレーションによる比較 . . . . .	30
2.19	接触運動の従来法比較と本論文で着目した課題 . . . . .	31
3.1	3 自由度産業用ロボットの接触動作シミュレーションの推定外力ジャーク信号の比較 . . . . .	37
3.2	提案する外力ジャーク信号の動的閾値を決定するアルゴリズムの状態遷移図 . .	40
3.3	シミュレーションで想定した 3 自由度産業用ロボットの接触動作 . . . . .	44
3.4	0 次外乱オブザーバによって推定された外力ジャーク信号と動的閾値による接触検知のシミュレーション . . . . .	45
3.5	1 次外乱オブザーバによって推定された外力ジャーク信号と動的閾値による接触検知のシミュレーション . . . . .	45
3.6	動力学計算の慣性項にパラメータ誤差を与えた場合の接触検知シミュレーション ( $\Delta H = +0.2 \times H$ ). . . . .	46
3.7	動力学計算の粘性摩擦項にパラメータ誤差を与えた場合の接触検知シミュレーション ( $\Delta D = 0.5 \times D$ ). . . . .	46
3.8	2 軸高速動作時の 1、3 軸への他軸干渉についてのシミュレーション結果 . . .	47
3.9	台形加速度による速度制御のシミュレーション結果 . . . . .	48
3.10	S 字加速度による速度制御のシミュレーション結果 . . . . .	48
3.11	センサレス力制御による産業用ロボットの接触実験 . . . . .	49
3.12	0 次外乱オブザーバによる従来的一定閾値を用いた接触検知の実験結果 . . . .	50
3.13	1 次外乱オブザーバによる従来的一定閾値を用いた接触検知の実験結果 . . . .	50
3.14	閾値を下げた場合に生じた接触の誤検知 . . . . .	50

3.15	動的な閾値を適用したジャーク信号による接触検知の実験結果 . . . . .	51
3.16	加速中に閾値引き上げ中に環境と接触したときの接触検知の実験結果 . . . . .	52
4.1	ジャーク信号を用いた接触の検知とブレーキのタイミング . . . . .	58
4.2	動力学計算に基づくトルクブレーキのブロック線図 . . . . .	58
4.3	3-DOF ロボットの先端に定義された球座標上の力ベクトル . . . . .	60
4.4	積分器の初期値更新を行わず I-P 力制御に切り替える接触動作実験 . . . . .	63
4.5	積分器の初期値更新を行って I-P 力制御に切り替える接触動作実験 . . . . .	63
4.6	スムーズな接触動作を実現する提案法のフローチャート . . . . .	65
4.7	衝撃力の影響を考慮した球座標ベース I-P 力制御系のブロック線図 . . . . .	66
4.8	3 自由度産業用ロボットによる実験システム . . . . .	67
4.9	位置制御から力制御へ直接切り替えた場合の接触動作実験 (コンクリート): (a) 推定外力 (b) 測定外力 . . . . .	69
4.10	位置制御から力制御へ提案法を用いて切り替えた場合の接触動作実験 (コンク リート): (a) 推定外力 (b) 測定外力 . . . . .	69
4.11	接触動作実験の外力応答結果の比較 (ゴム板): (a)I-P 力制御に直接切り替えた 実験結果 (b) 提案法を用いて I-P 力制御に切り替え実験結果 . . . . .	70
4.12	I-P 力制御に直接切り替える接触動作実験の加速度 (コンクリート): (a) 推定外 力 (b)-(d) 先端 X 方向、Y 方向、Z 方向の加速度測定結果 (e)-(g) 1 軸、2 軸、 3 軸の電流指令 . . . . .	71
4.13	I-P 力制御に提案法を用いて切り替える接触動作実験の加速度 (コンクリート): (a) 推定外力 (b)-(d) 先端 X 方向、Y 方向、Z 方向の加速度測定結果 (e)-(g) 1 軸、2 軸、3 軸の電流指令 . . . . .	71
5.1	接触運動の運動方程式 . . . . .	76
5.2	環境への駆動力を考慮した接触運動のシミュレーション . . . . .	78
5.3	接触運動のシミュレーションで生じた環境からの反力 . . . . .	78

5.4	提案する動的加速度制限値を用いたロボットの速度制御系: (a) 提案法のブロック線図 (b) 動的な加速度リミッタ (c) 球座標に基づく加速度指令と動的加速度閾値の定義 . . . . .	81
5.5	衝撃力を考慮した動的加速度制限の計算ブロック線図 . . . . .	82
5.6	動的な加速度制限値による加速度リミットのフローチャート図 . . . . .	82
5.7	シミュレーションを行った接触動作のテスト軌道 . . . . .	83
5.8	加速度制限を適用しない場合の接触運動シミュレーション結果: (a) 接触判定 (b) 先端速度 (c) 先端加速度 (d) 先端外力 (e) 運動エネルギー (f) 等価質量 . . . . .	85
5.9	加速度制限を適用した場合の接触運動シミュレーション結果 ( $F_{max} = 50\text{N}$ ): (a) 接触判定 (b) 先端速度 (c) 先端加速度 (d) 先端外力 (e) 運動エネルギー (f) 等価質量 . . . . .	85
5.10	加速度制限を適用した場合の接触運動シミュレーション結果 ( $F_{max} = 20\text{N}$ ): (a) 接触判定 (b) 先端速度 (c) 先端加速度 (d) 先端外力 (e) 運動エネルギー (f) 等価質量 . . . . .	85
5.11	6自由度垂直多関節産業用ロボットを用いた実験システム . . . . .	86
5.12	-Z方向への接触実験におけるロボットの動作軌道 . . . . .	87
5.13	加速度制限値を適用しない場合の3軸のモータ速度: (a)1軸 (b)2軸 (c)3軸 . . . . .	87
5.14	加速度制限値を適用した場合の3軸のモータ速度: (a)1軸 (b)2軸 (c)3軸 . . . . .	87
5.15	動的な加速度制限を適用した-Z方向への接触実験の先端速度 . . . . .	88
5.16	動的な加速度制限を適用した-Z方向への接触実験の加速度指令とリミット処理された先端加速度 . . . . .	88
5.17	動的な加速度制限を適用した-Z方向への接触実験の先端反力 (衝撃力上限 $F_{max} = 20\text{N}$ ) . . . . .	88
5.18	+Y方向への接触実験におけるロボットの動作軌道 . . . . .	89
5.19	動的な加速度制限を適用した+Y方向への接触実験の先端速度 . . . . .	89
5.20	動的な加速度制限を適用した+Y方向への接触実験の加速度指令とリミット処理された先端加速度 . . . . .	89



5.21 動的な加速度制限を適用した+Y 方向への接触実験の先端反力 (衝撃力上限 $F_{max}$ = 20N) . . . . .	89
5.22 +X 方向への接触実験におけるロボットの動作軌道 . . . . .	90
5.23 動的な加速度制限を適用した+X 方向への接触実験の先端速度 . . . . .	90
5.24 動的な加速度制限を適用した+X 方向への接触実験の加速度指令とリミット処理 された先端加速度 . . . . .	90
5.25 動的な加速度制限を適用した+X 方向への接触実験の先端反力 (衝撃力上限 $F_{max}$ = 20N) . . . . .	90



# 表目次

3.1	2 慣性系にモデル化された各ロボット関節のモデルパラメータ (第 2 軸) . . . . .	43
3.2	第 2 軸の動力学パラメータ . . . . .	43
3.3	シミュレーションで設定した各パラメータ . . . . .	43
3.4	3 軸の動力学パラメータ . . . . .	49
3.5	実験のセットアップ . . . . .	49
4.1	本章文中で使用している各記号についての説明 . . . . .	57
4.2	接触動作実験のセットアップ . . . . .	68
5.1	接触現象の数値シミュレーションで用いたパラメータ . . . . .	78
5.2	シミュレーションで用いた仮想環境の特性 . . . . .	83
5.3	各関節の特性と速度制御系 (1,2,3 軸) . . . . .	83



# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

近年、製造現場における産業用ロボットの役割は、工場の自動化が推進されるとともに重要性を増している。この背景には、ロボットを構成する高精度な減速機と高度なセンシング技術の発達と、高速演算が可能な計算機による高性能なモーション制御が可能となったことが挙げられる。

現在のロボット技術は、自動車に代表される大規模な製造現場において、人的な作業員に代わって危険な作業や単純作業を行う自動機械の一つとして発展を続けてきた。工作機械などの他の自動機械に対する利点として、教示によって様々な作業での運用が可能な汎用性の高さ、正確かつ高速な位置決め動作が可能であることが挙げられる [1,2]。従来、ロボットにおけるモーション制御の技術的課題は主に、位置決め精度の向上、タスク時間短縮のための高速化に関するものであった。溶接や塗装、運搬といった作業では、教示された作業内容を忠実に再現することが最重要課題であったためである。このため、減速機等の機械的な性能の向上だけでなく、モーション制御技術の発展は重要な位置付けを占めてきた。

現在の産業用ロボットで用いられるモーション制御系では、高速化によるタスクタイムの短縮や先端振動の抑制が主要な技術課題として研究開発が行われてきた [3-7]。電動モータを始めとするアクチュエータのサーボ技術を発展させたフィードバック制御と、ロボットの機械構

造に依存する動力学を考慮したフィードフォワード補償によって、タスク時間の短縮と急加減速時の先端振動を抑えた、正確な軌跡追従性能の向上が達成されてきた [8–10]。

一方で、ロボットは他の機械製品と異なり、人間とのなじみが強い存在であることも注目する点の一つと言える。産業用ロボットの発展とともに確立されてきたロボット技術の展望は、人との協調作業を達成することで、将来的には介護や医療分野、警備や介護といった作業を担う家庭ロボットの実現や、リハビリや運動機能を補助するパワーアシストなど、様々な分野での活躍が期待されている [11–14]。

製造現場におけるロボットは、気温など環境変化とも連動した摩擦の非線形性、ロボットに用いられる部品の公差等から生じるパラメータ誤差があったとしても、計画された作業を正確に行わなければならない。例えば、ロボットが運搬作業に用いる場合には、ワークを把持した場合とそうでない場合では、先端負荷は大きく変化する。そこで、積分器を含む制御器や外乱オブザーバを用いることでパラメータ誤差による影響を補償し、これらの外乱に対してロバストなモーション制御系を用いる必要がある。このような制御器の特徴を人間とロボットの接触に当てはめて考えてみると、人間がロボットに力を加えたとしても、ロボットは外乱を補償することで計画された動きを行う。この時、制御器はロボットの各軸アクチュエータに対して外力に対抗する駆動力を出力させようとするため、環境に作用する力は過大なものとなる。接触した環境が人間であれば、大事故につながる可能性がある。このため、ロバストな位置や速度のモーション制御系は、ロボットが環境と接触することを想定していない。ロボットと環境の接触動作を可能にするためには、環境との接触で生じる外力に対して柔軟なモーション制御系を用いることが必須となる。このため、インピーダンス制御や力制御を従来の位置制御や速度制御と組み合わせて用いるハイブリッド制御についても研究が進められている [15–17]。

外力に対して柔軟なモーション制御を実現する手法の一つとして、仮想インピーダンス制御はよく知られている [18–25]。この手法では従来の位置や速度といったモーション制御系をベースとして、仮想的な機械インピーダンスをシミュレートしてロボットのモーションに反映させることで外力に対する柔軟性を持たせる。この手法の利点は、ロボットの外力に応じた柔軟な動作を実際のバネやダンパといったイメージしやすい概念で実現できること、逆システム

としたインピーダンスコントローラによって位置、速度指令を出力するため、既存のモーション制御系で実現が簡単なことがある。一方で、インピーダンスパラメータと接触する環境の剛性の関係から制御系が不安定になる場合がある。

これに対して、位置や速度のサーボ系と同様に、フィードバックループによって接触する力を制御する力制御も、ロボットの接触運動を実現する手法の一つである。インピーダンス制御と同様に、位置や速度制御系をマイナーループとして、力センサによって検出した先端力をフィードバックする閉ループ系を構成することで実現ができる [26–30]。力制御を用いることで先端力を正確に制御することが可能になるため、接触を伴う作業についての検討でよく用いられている [31–34]。欠点としては、ロボットと環境が接触することによって環境の粘弾性特性によって力制御系の応答性や安定性に大きく影響することが挙げられる。これに対して、環境の特性が変化した場合にも安定した力制御が可能なモーション制御法についても検討されている [35,36]。しかしながら、安定性を高くとることで力制御の応答性が低下するなど、依然として環境の特性を考慮した力制御系の設計が困難であることは技術的課題の一つとなっている。

以上のように接触動作のモーション制御法については様々な検討が行われているものの、実際の現場では普及が進んでいない。大きな問題の一つとして挙げられるのは、低コストで実用的な力センサがないことである。ロボットに用いられる力センサは、ひずみゲージによる方式、静電容量による方式、磁気ひずみを利用した方式など、いくつかの方式で提案されて製品化されている。しかし、いずれも他のセンサに比べて依然高価であり、センサ自体の変形によって力とモーメントを検出するために剛性を高くすることも難しい。また、エンドエフェクタの設計時に、力センサによる外力の検出を考慮されなければならない。そこで、外乱オブザーバを用いた反力推定オブザーバ等による推定外力を用いたセンサレス力制御が提唱され、有効なモーション制御法について検討が進められてきた [37–41]。

外乱オブザーバは数式モデル化した制御対象をモータの駆動力を入力、モータ速度を出力として並行シミュレートし、実モデルの入出力応答と比較することで外乱トルクを推定する。簡単な構造で関節の特性を考慮して設計することができ、ロボットの外力を推定する目的以外にも広く用いられている [42–45]。この推定外乱トルクを用いることで、力センサレスの接触運

動、またロボット全体での接触検知を可能にしている。単に力センサのコストを低減できるだけでなく、検出可能な範囲も拡大する利点がある。しかしながら、制御対象のモデル化誤差や非線形摩擦によって推定トルクに推定誤差が生じるため、非接触状態と接触状態を区別するために推定外力に閾値を設定する必要がある [46]。このため、センサレス力制御の実用化において、閾値の決定法は技術的課題の一つとなっている。

さらに、衝撃力も接触動作において考慮が必要な課題の一つである。ロボットが環境と接触する際の運動エネルギーは短い時間で環境に作用する力に変化する。運動エネルギーはロボットの運動の大きさを表し、これまでもロボットのモーション制御に利用する検討が行われてきた [47, 48]。衝突運動の解析においてもロボットが環境に接触する際の運動エネルギーが大きいほど衝撃力は大きくなる。極めて短い時間で生じる力のため、衝突運動の正確な定式化やモデル化が難しく、関節の特性を考慮した接触運動の解析 [49, 50]、衝撃の影響を瞬間的に生じる仮想的な慣性としてロボットの衝突運動を定式化する検討 [51, 52] のように、様々な手法が提案されている。従来研究の月惑星探査機の着陸を題材として衝撃力の解析と低減手法についての検討 [53] では、仮想インピーダンス制御を用いた衝撃力の低減と、接触直前の減速による無衝撃の接触動作について比較を行っている。この結果からも明らかなように、インピーダンス制御による接触後の緩衝動作による効果は小さく、衝撃力の効果的な低減は接触以前に速度を落として運動エネルギーを小さくすることが必要である。

以上のように、ロボットの高性能な接触運動を実現させるモーション制御の手法は未だに確立されていない。ロボットが非接触状態から環境に接触するまでの連続的なモーションを実現するため、それぞれの課題に対応したモーション制御が必要である。

## 1.2 研究目的と概要

本論文では外乱オブザーバを用いた産業用ロボットの力センサレス接触モーション制御の高性能化を目的とした新しい手法を提案する。本論文の概要を図 1.1 に示す。

まず、第2章では外乱オブザーバを用いた力センサレス接触運動のモーション制御系を構築



する。

最初にロボットと環境の接触運動について、単純化した物理モデルによる解析と考察を行う。ハーモニックドライブ等の軸ねじれを生じる減速機では、負荷側に軸ねじれ振動を生じる。多くのロボットはモータ側にのみ位置情報を取得するロータリーエンコーダが備えられており、負荷側角度を測定するセンサは用いられない。このため、位置や速度の制御系はセミクローズドループで設計され、アクチュエータモデルから設計された状態オブザーバと状態フィードバックによる制振制御によって安定化される。同様にして、軸ねじれを考慮した2慣性共振系の状態変数として外乱オブザーバを設計することによって、軸ねじれ振動を考慮した負荷トルク推定が可能になる。本研究では、この外乱オブザーバと逆動力学計算を用いて推定した外力を元に設計した力制御による産業用ロボットの接触運動について検討していく。

次に、2章の後半では接触運動を実現するモーション制御について比較検討を行い、速度制御型 I-P 力コントローラを提案する。接触運動を実現するモーション制御法の代表的な手法として、仮想インピーダンス制御と加速度制御型 PD 力制御の2つを例に挙げ、接触運動について検討する。仮想インピーダンス制御は外力に対する受動的な応答が可能で、力制御は目的に応じて力指令を変化させることで接触状態をフレキシブルに制御することができる。また、加速度制御型 PD 力制御系を等価変換し、安定性を改良した速度制御型 I-P 力制御を提案する。これらのモーション制御系について衝撃力も考慮したシミュレーションを行い、提案する速度制御型 I-P 力制御の有用性について検証する。

2章のまとめではこれらの検討を通して、接触モーション制御の現状と高性能化についての課題について述べる。

第3章では、推定外力の誤差による接触の誤検知を減らす外力ジャーク信号と動的閾値を用いた接触検知を提案する。

従来のカセンサレスによる接触検知では、モデル化誤差によって生じる推定外力の誤差で接触の誤検知を回避するために事前実験によって閾値を設けていた。しかし、閾値を大きくしすぎると接触時の反力が閾値を超えるレベルになるまで接触検知ができず、逆に閾値を低くしすぎると誤検知を生じる可能性が高くなる。そこで、推定外力の微分である外力ジャーク信号を

用いた接触検知法と、ロボットの動作に合わせて閾値を動的に変化させる動的閾値を新たに提案する。

第4章では、運動エネルギーに基づく衝撃力を低減するブレーキと、I-P力制御による接触運動へスムーズに移行する積分器の初期化による接触モーション制御を提案する。

産業用ロボットの接触を伴う作業において、衝撃力は環境を破損させたり、インピーダンス制御や力制御による接触モーションを不安定な動きにする原因である。そこで、ロボットのモーション制御系において最も高速に動作するトルク制御によるブレーキ制御を、運動エネルギーを考慮したアルゴリズムで行う動力学ブレーキを提案する。また、衝撃力によって生じるウッドペッカー現象などの不安定な動作を、I-P力制御器の積分器初期化によって安定した接触動作に改善できることを示す。

第5章では、ロボットの先端加速度をリアルタイムに制限することによって、環境との接触時に生じる衝撃力を任意の上限値以下にするモーション制御法を提案する。

衝撃力はロボットが環境に接触した瞬間の短い時間で生じるため、接触後のモーション制御によって衝撃力を低減することは困難である。従来の産業用ロボットを用いたはめ合い等の作業では、極めて低速で接触動作を行うことで衝撃力の影響を無視していたが、接近速度と衝撃力の関係を明らかにした上で、接近速度を決定することができればタスク時間の短縮につながる。また、危険領域に人間が侵入してロボットと接触したとしても安全なモーションを実現することができれば、安全柵の撤廃、人間との協調動作が可能になる。そこで、まずロボットの慣性行列と運動エネルギーに基づく等価質量を定義し、この等価質量を用いたリアルタイムの衝撃力推定が可能であることを示す。次に、衝撃力を考慮してロボットの先端加速度を制限することで、接触時に任意の衝撃力以下とするモーションを実現する。

本研究を通して提案される新しい手法を用いることで、従来の課題を解決して産業用ロボットの力センサレス接触モーション制御は高性能化される。本研究の検討はいずれも実際の産業用ロボットに基づくシミュレーションと実験によって有効性を確認される。

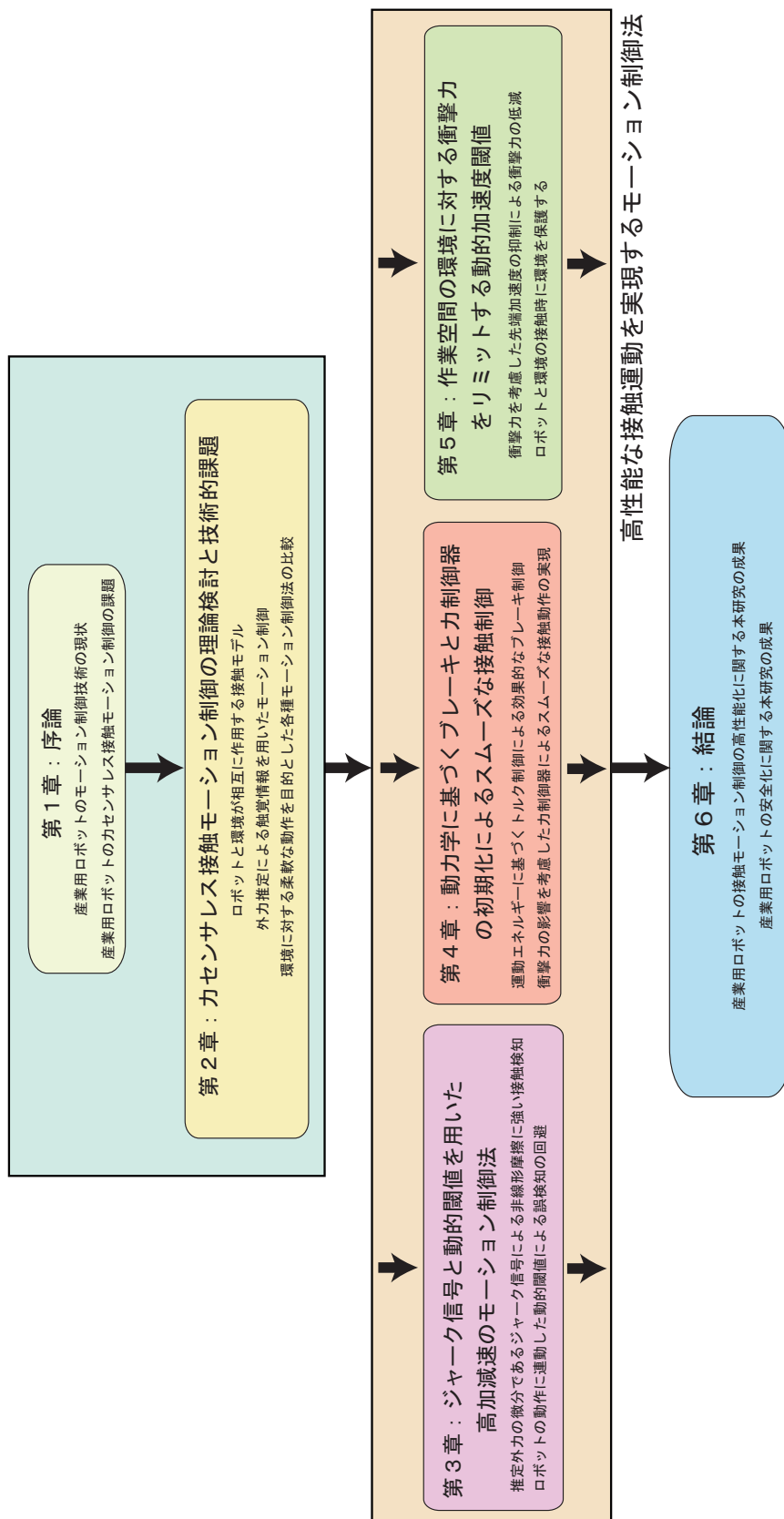


図 1.1: 博士論文の概要



## 第 2 章

# 力センサレス接触モーション制御の理論検討 と技術的課題

### 2.1 はじめに

本章では、ロボットと環境の接触動作を目的としたモーション制御の課題について検討する。

ロボットと環境の接触運動は、ロボットの運動エネルギーと、環境の変位によって生じる反力による物理的な現象としての側面と、インピーダンス制御や力制御など接触運動を行うモーション制御系の構造が変化する制御理論からの両面から検討を行う必要がある。

まず、接触モデルの検討として、ロボットの関節軸ねじれ弾性特性を考慮した接触モデルについて説明する。多くの産業用ロボットでは十分な駆動トルクを得るために小型で高い減速比が得られる遊星歯車減速機などがよく用いられる。しかしながら、これらの減速機は内部の剛性の弱い部分でねじれが生じ、ロボットの先端振動等の原因になることはよく知られている。従って、環境に生じる反力は環境の特性だけでなく、シミュレーションやオブザーバの設計時に減速機のねじれも考慮しなければならないことを示す。

次に、外乱オブザーバを用いたセンサレス力推定法のモーション制御への応用について検討する。モータと減速機を二慣性共振系によってモデル化し、ねじれ特性を考慮したオブザーバの設計法について説明する。また、非線形なバネ特性、摩擦特性によって生じるパラメータ誤

差が推定結果に与える影響について考察し、非線形摩擦をモデルに組み込んだシミュレーションによって検証を行う。

さらに、ロボットの接触動作を行うモーション制御系について従来法の比較と問題点を挙げ、本論文で用いる I-P カコントローラについて説明する。従来法には、仮想的な機械インピーダンスをモーション制御系で再現するインピーダンス制御と、位置と力のハイブリッド制御等で検討される加速度制御をベースとした PD 型力制御を例として挙げた。環境の剛性によってこれらモーション制御系の安定性と応答性が影響を受けるだけでなく、良好な接触動作を実現するためには接触の瞬間に生じる衝撃力による影響も考慮しなければならない。速度制御ベース I-P カコントローラは、加速度制御に基づく PD 型力制御と等価な性能を持ちながら、衝撃力が生じても安定した接触動作を可能にする。

本章の最後に、接触動作のモーション制御法についての現状をまとめ、本論文が解決すべき課題を明らかにする。

## 2.2 相互に作用するロボットと環境の接触モデルの検討

### 2.2.1 ロボットの関節軸弾性特性を考慮した接触モデル

ロボットの先端位置に対して環境を単純な弾性体と定義できるケースでは、エネルギーは循環するだけであり、接触した慣性体が静止することはない。しかし、現実にはそのようなことは起こらず、環境の塑性変形や、粘性によってエネルギー損失が生じるため、接触した慣性体はいずれ静止する。材料工学で多く用いられる反発係数  $e$  は、これらの影響を含む接触特性のパラメータであると理解することができる。

さらに、接触した環境が非常に硬いものであった場合、ロボット先端の変位に対する反力は非常に大きくなる。環境の剛性が無限大に高い場合には、ロボットの先端位置は環境との接触直後から停止したままとなり、環境の変位は 0 であるにも関わらず、無限の反力が生じることになる。しかし、実際にはロボットが堅い環境に接触したとしても、そのような現象は生じない。これは、ロボットの各関節軸における弾性特性が反力に対して抗力として働くため、

$\Delta t \neq 0$  となるためである。従って、硬い環境の場合にはロボットの各関節軸における弾性特性についても考慮する必要がある。

そこで、等価質量行列と同様に、ロボット各軸のねじれ特性を作業空間で表現できることをここでは示す。まず、ヤコビ行列によってロボット各軸のトルクと先端外力を関連づける式として、次式が知られている。

$$\mathbf{F}_{ext} = \mathbf{J}_{aco}^{-T} \boldsymbol{\tau}_{reac} \quad (2.1)$$

この関係式は、仮想仕事の定理から導出されたものであり、ロボットの姿勢が大きく変化しない場合においては、正確に各軸の負荷トルクと先端外力を関連付けることができる。

次に、図 2.2 で示すようにロボット各軸の弾性特性を作業空間上の環境剛性  $K_{ws}$  とみなして、先端位置の微小変位  $\Delta X$  に対して反力が生じると考えると次式が成り立つ。

$$\Delta \mathbf{F}_{ext} = \mathbf{K}_{ws} \Delta \mathbf{X} \quad (2.2)$$

ここで、先端位置の微小変位はヤコビ行列を用いることでロボットの軸速度から次式のように線形変換できる。

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{J}_{aco} \boldsymbol{\omega}_L \quad (2.3)$$

(2.3) 式によって、(2.2) 式は以下のように書き換えることができる。

$$\Delta \mathbf{F}_{ext} = \mathbf{K}_{ws} \mathbf{J}_{aco} \boldsymbol{\omega}_L \quad (2.4)$$

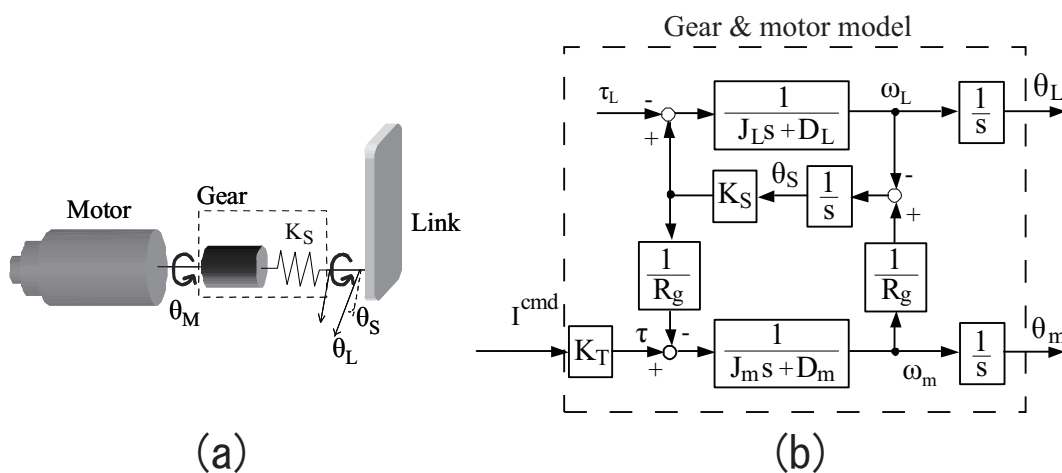


図 2.1: 軸ねじれを考慮した二慣性系モデル : (a) 減速機のねじれを考慮した関節の物理モデル (b) ロボット関節をモデル化した二慣性共振モデル

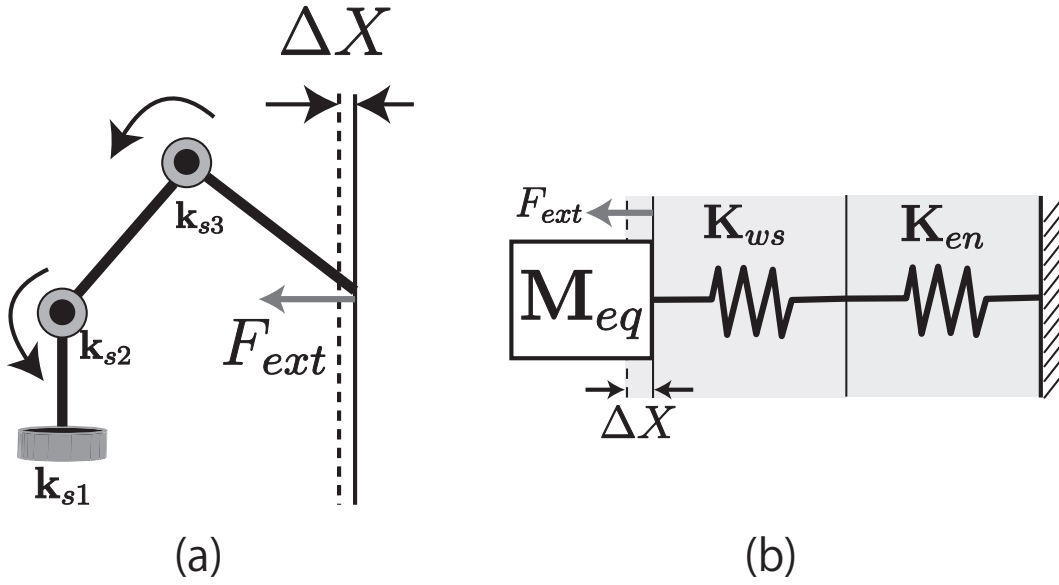


図 2.2: ロボットの関節軸におけるねじれ特性を含む力制御系のモデル：(a) ロボットの接触動作の概念図 (b) 関節の弾性特性を考慮したロボットの接触モデル

次に、各軸の微小角速度  $\Delta\theta_{ts}$  と軸ねじれで生じるねじれトルク  $\Delta\tau_{ts}$  は次式で表わすことができる。

$$\Delta\tau_{ts} = \mathbf{k}_s \Delta\theta_{ts} = \mathbf{k}_s \omega_{ts} \quad (2.5)$$

(2.1) 式、(2.4) 式より、 $\tau_{reac} = \Delta\tau_{ts}$  とすると、次式のように書ける。

$$\Delta\mathbf{F}_{ext} = \mathbf{J}_{aco}^{-T} \mathbf{k}_s \omega_{ts} \quad (2.6)$$

(2.6) 式を (2.4) 式に代入して  $\omega_{ts} = \omega_L$  として式を整理すると、作業空間上の等価変換した等価ばね特性行列を次式のように定義することができる。

$$\mathbf{K}_{ws} = \mathbf{J}_{aco}^{-T} \mathbf{k}_s \mathbf{J}_{aco}^{-1} \quad (2.7)$$

この等価ばね特性行列は導出の過程から明らかなように、仮想仕事の定理が適用できる場合に有効であると考えられる。

ロボットの進行方向に対してロボットの弾性特性と環境の弾性特性は等価的に直接接続された形になるため、環境インピーダンスの合成は次式で示すことができる。

$$K_{cont} = \frac{K_{ws} K_{en}}{K_{ws} + K_{en}} \quad (2.8)$$



また、(2.8) 式は、例え環境の剛性が無限大に高くても、ロボット関節の弾性によって接触動作が可能であることを (2.9) 式のように示している。

$$K_{cont} = \lim_{K_{en} \rightarrow \infty} \frac{K_{ws}}{\frac{K_{ws}}{K_{en}} + 1} \approx K_{ws} \quad (2.9)$$

以上の検討から、ロボットが非常に硬い環境に接触する場合、ロボットの接触動作と接触力の制御は関節のねじれ量を制御しているに等しい。従って、激しい接触や、過度な力を制御しようとした場合、減速機の破損につながる可能性についても考慮する必要がある。

### 2.2.2 ロボットと環境の接触モデル

物体の衝撃力には様々なモデルが提唱されているが、ここではロボットを慣性体とした場合について述べる。衝突速度  $V_{cont}$  で環境に衝突する場合を想定すれば、衝突時の運動量は次式で示される。

$$P_{mass} = M_{eq} V_{cont} \quad (2.10)$$

ニュートン力学の第2法則より、運動量の変化は物体に作用した力の時間積分（力積）に等しいことから、接触時の運動方程式は (2.10) 式のように表現できる。ただし、接触した瞬間の時間を  $t_0$  としている。

$$P_{cont}(t) = P_{mass} - \int_{t_0}^t F_{cont}(t) dt \quad (2.11)$$

(2.11) 式で示すように、衝突過程における衝撃力の変化は運動量の時間変化に等しく、微小な時間  $\Delta t$  における瞬間的な衝撃力と、衝撃加速度は、それぞれ次式によって示すことができる。

$$F_{impact} = \frac{\Delta P_{cont}}{\Delta t} \quad (2.12)$$

$$\alpha_{impact} = \frac{F_{impact}}{M_{eq}} \quad (2.13)$$

(2.12) 式が示すように、衝撃力を低減するためには、機械的な衝撃吸収機構によって接触時間  $\Delta t$  を長くするか、または運動量  $P_{cont}$  を何らかの手段で低減させることが必要である。。衝撃力は、他の力学現象と比較しても短時間のうちに起こる現象であり、通常のフィードバック制御等を用いて制御することは非常に難しい。特に、測定帯域のあまり広くない力センサによるフィードバック制御では、衝撃力を低減することは難しいと考えられる。

以上のことから、衝突過程では衝撃力の低減に特化したモーション制御法が必要となる。

## 2.3 外力推定による触覚情報を用いたモーション制御

### 2.3.1 センサレス力推定による接触検知範囲の拡大

従来の産業用ロボットの多くは、接触を伴う作業を想定して手首部分に力センサを備えるか、または力センサを備えていない。トルク、または力を検出するセンサはコストが高く、複数のセンサをロボットに取り付けることはコストの増大につながるためである。このような状況から、ロボットの手先ではなくアーム部分への接触を検知して、モーション制御に反映させることは困難である。そこで、外乱オブザーバと逆動力学計算を用いた外力推定の方法が提案され、数多く研究が行われてきた [54,55]。

ロボットの機械的構造が事前に明らかであるならば、ロボットが所望の動作を行うために要する各軸の駆動トルクはおおよそ予想することができる。言い換えれば、ロボットの動作に対して過不足なトルクを要する場合には、外部から何らかの力が生じていることになる。つまり、ロボットの正確な数式モデルがあるならば、力を検出する特別なセンサがなくとも、外部からの力を推定できる。このようなセンサレス力推定は、図 2.3 で示されるような外乱オブザーバと逆動力学計算で構成される反力推定オブザーバによって実現することができる。

制御対象を二慣性系とすると状態変数を  $[\omega_m, \omega_L, \theta_s, \tau_L]$  としたときの状態方程式を以下に示す。ただし、 $\omega_m$ :モータ速度、 $\omega_L$ :負荷速度、 $\theta_s$ :ねじれ角度、 $\tau_L$ :負荷トルクとしている。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{D_m}{J_L} & 0 & -\frac{K_s}{J_m R_g} & 0 \\ 0 & -\frac{D_L}{J_L} & \frac{K_s}{J_L} & -\frac{1}{J_L} \\ \frac{1}{R_g} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_t}{J_m} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

この状態方程式から特性多項式  $|sI - (A - k)|$  に対して極:  $g_{obs}$  を極配置すると、状態変数および0次外乱オブザーバのゲインベクトル  $K$  は以下のように導出される。

$$K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4g_{obs}J_LJ_m - D_mJ_L - D_LJ_m}{-(J_mR_g(D_L - 2J_Lg_{obs})) \times (D_L^2 - 2D_LJ_Lg_{obs} + 2J_L^2g_{obs}^2 - 2K_sJ_L)} \\ \frac{J_L^3K_s}{J_mR_g^2 + J_L} - \frac{J_mR_g(D_L^2 - 4D_LJ_Lg_{obs} + 6J_L^2g_{obs}^2)}{J_L^2K_s} \\ \frac{-(J_LJ_mR_gg_{obs}^4)}{K_s} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

(2.14) 式の状態方程式のように、状態変数に外乱トルクを含めて (2.15) 式のオブザーバを設計することにより、減速機の軸ねじれ振動を考慮した負荷側外乱トルクの推定が可能となる。ただし、推定外乱トルクには動力学トルクが含まれているため、ロボットに生じた外力の推定のために逆動力学計算によって動力学トルクを計算して分離することが必要となる [59]。ロボットの逆動力学方程式は、次のような一般形で表される。

$$\tau_{dyna} = H(\theta_L)\dot{\omega}_L + D_L\omega_L + b(\theta_L, \omega_L) + c(\theta_L) + f(\theta_L) \quad (2.16)$$

このとき、 $H(\theta_L)$  は慣性項、 $D_L$  は粘性摩擦項、 $b(\theta_L, \omega_L)$  は遠心力・コリオリ項、 $c(\theta_L)$  は重力項、 $f(\theta_L)$  はクーロン摩擦項を示している [56–58]。

これに対して、負荷トルク  $\tau_L$  は、ノミナル駆動トルク  $\tau_{dyna-n}$  と、外力トルク  $\tau_{ext}$  によって (2.17) 式で表される。ノミナル駆動トルクは、モータのノミナルパラメータ  $J_n$ 、 $D_{Ln}$  によって (2.18) 式で表される。

$$\tau_L = \tau_{dyna} - \tau_{dyna-n} + \tau_{ext} \quad (2.17)$$

$$\tau_{dyna-n} = J_{Ln}\ddot{\theta}_L + D_{Ln}\dot{\theta}_L \quad (2.18)$$

次に、動力学トルク  $\tau_{dyna}$  について、(2.16) 式に従って展開すると (2.19) 式が得られる。

$$\tau_L = (H(\theta_L) - J_{Ln})\dot{\omega}_L + b(\theta_L, \omega_L) + c(\theta_L) + f(\theta_L) + \tau_{ext} \quad (2.19)$$

先述したように、外乱トルク  $\hat{\tau}_L$ 、負荷位置  $\hat{\theta}_L$  はオブザーバによって推定される。従って、外力トルク  $\hat{\tau}_{ext}$  は (2.20) 式のように表すことができる。

$$\hat{\tau}_{ext} = \hat{\tau}_L - (H(\hat{\theta}_L) - J_{Ln})\dot{\omega}_L - b(\hat{\theta}_L, \hat{\omega}_L) - c(\hat{\theta}_L) - f(\hat{\theta}_L) \quad (2.20)$$

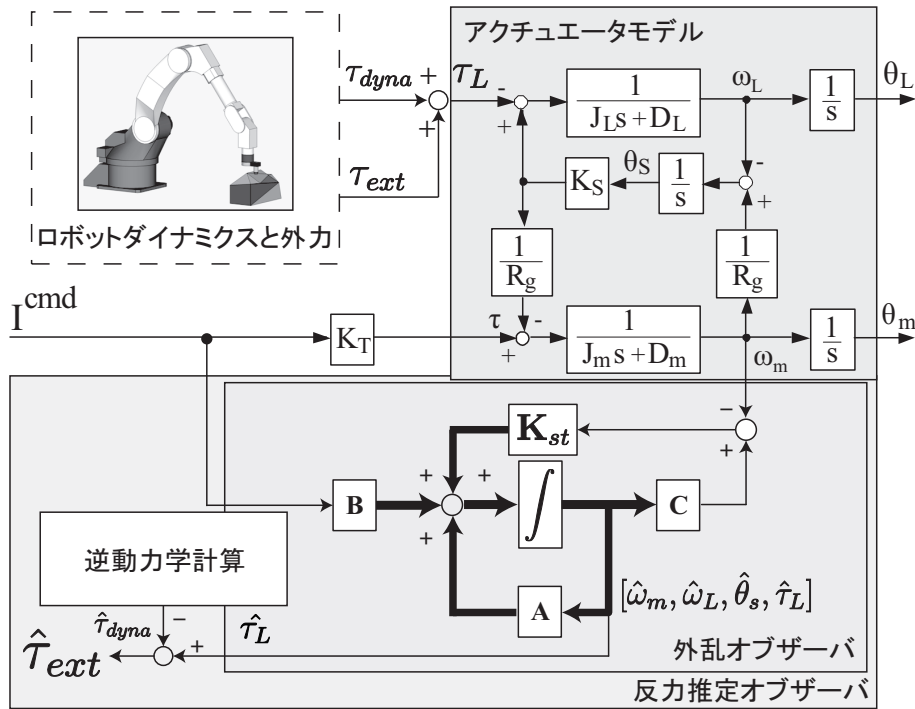


図 2.3: 外乱オブザーバと逆動力学計算による反力推定オブザーバ

この式で示されるように、モータ及び減速機のノミナルパラメータロボットマニピュレータのダイナミクスを同定することができれば、モータの角度情報のみで外力を推定することが可能である。

カセンサレス外力推定の利点は、コストの低減だけでなく、安全性と信頼性向上にも大きなメリットがある。カセンサは通常手先にのみ取り付けられるため、ロボットの腕部への接触を検知することは原理的に不可能である。また、ひずみゲージや静電容量など様々な方式があるものの、いずれも物理的な変形を利用するものであるため破損のリスクがある。カセンサレス外力推定は、アクチュエータの入出力から外力トルクの推定を行うために破損によるカセンサの喪失も生じない。

### 2.3.2 非線形パラメータを含む推定外力の誤差についての考察

カセンサレス外力推定の問題点として、モデル化できていない誤差は推定外力の誤差として現れてしまうことが挙げられる。動力学パラメータの誤差によって生じる誤差分トルクを  $\tau_{Derr}$

とすれば、動力学トルク  $\tau_{dyna}^*$  は (2.21) 式のように表わされる。

$$\begin{aligned}\tau_{dyna}^* &= \tau_{dyna} + \tau_{Derr} \\ &= (\mathbf{H} + \Delta\mathbf{H})\dot{\omega}_L \dots \\ &\quad + (\mathbf{D} + \Delta\mathbf{D})\omega_L + (\mathbf{b}(\theta_L, \omega_L) + \Delta\mathbf{b}) \dots \\ &\quad + (\mathbf{c} + \Delta\mathbf{c}) + (\mathbf{f} + \Delta\mathbf{f})\end{aligned}\tag{2.21}$$

これらの影響は、パラメータの同定精度だけでなく、使用環境で変わる粘性摩擦の影響も含まれる。

また、外乱トルクが大きく変化する場合、外乱オブザーバの帯域も推定外力の誤差を生じる原因となる。外乱オブザーバによる推定外力トルクは実際の外力トルクに対して位相が遅れるため、次式のような推定外力の誤差が生じる。

$$\hat{\tau}_{dis} = G_{dis}(\tau_{dyna} + \tau_{ext})\tag{2.22}$$

$$\begin{aligned}\tau_{Oblag} &= \tau_{dyna} - \hat{\tau}_{dis} \\ &= G_{dis}\tau_{ext} + (1 - G_{dis})\tau_{dyna}\end{aligned}\tag{2.23}$$

(2.23) 式で示す様な、推定外力の位相遅れによって生じる推定外力の誤差はロボットの加減速時に大きくなる。ロボットのセンサレス力制御では、推定外力  $\hat{\tau}_{ext}$  が、外部の力によって生じたのか、(2.24) 式のような見せかけの外力であるかどうかは判別できない。従って、動力学パラメータが真値であったとしても、外乱オブザーバの帯域によって生じる推定外力の位相遅れは推定外力の誤差を生じる要因となる。また、モータのトルクむらや減速機の非線形項も推定外力を生じる大きな要因の一つとなる [60]。制御器やオブザーバの設計は、アクチュエータモデルを線形として設計されるため、非線形項の影響も外乱トルクとして推定される。

これらの要因が推定外力の精度に大きく影響することを示すため、非線形特性をモデルに考慮したシミュレーションを行った。図 2.4、図 2.5 は推定外力の誤差について検証したロボットの動作軌道と推定外力をそれぞれ示している。このシミュレーションでは、動力学トルク、クーロン摩擦、またロストモーションのモデルを考慮し、その他の外乱トルクは加えていない。このシミュレーション結果から明らかなように、外力が一切生じていない場合でも推定外力は大きく生じていることが分かる。非線形項の影響としては、クーロン摩擦によって電流指令のオフセットが生じるため、推定外力にもオフセット分として影響が表れている。また、等

速運動時の軸振動に対してトルクの符号が周期的に変化する場合に、ロストモーションの影響によってねじれトルクが振動的になり、推定外力の振動的な誤差として現れている。

以上の検討からも明らかなように、カセンサレスによる接触動作や接触検知を行う場合には推定外力の精度向上は重要な課題の一つであり、より正確なモデル化の検討が必要である。また同時に、推定外力の誤差が一定量生じることを考慮した接触検知や接触動作の検討も必要とされている。

### 2.3.3 推定外力による接触の検知

接触の検知は、ロボットと環境の接触動作において特に重要な課題である。環境への正確なアプローチのために制御剛性の高いモーション制御を行った場合、接触検知してすぐに制御剛性の低い制御に切り替える必要がある。センサレス力推定で環境との接触を検知する場合、以下のように閾値  $\tau_{th}$  を設定して接触検知を行う。

$$\tau_{th} > (\tau_{Oblag} + \tau_{Derr}) \quad (2.24)$$

推定外力によって接触検知を行うためには、事前の予備実験によって推定外力の誤差を見積もった閾値を (2.24) 式となるように設定する必要がある。しかし、(2.21) 式で示すように、ロボットの動作速度や軌道を変更した場合には推定外力の誤差も変化するため、その度に閾値を再設定する必要がある。

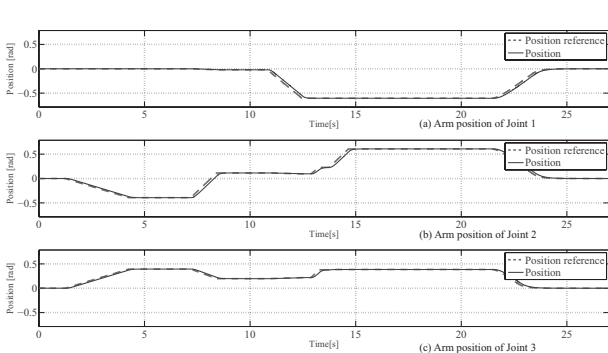


図 2.4: シミュレーションと実験で検討した試験軌道の位置指令と応答

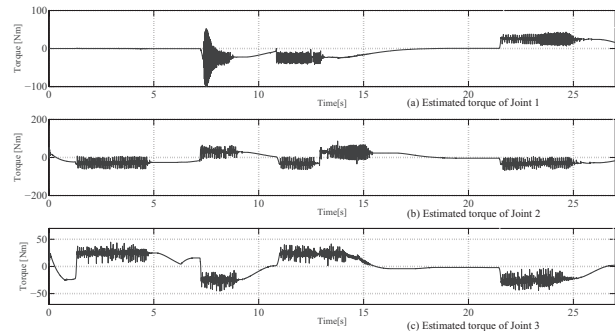


図 2.5: 制御対象の非線形摩擦特性による推定外力の誤差についてのシミュレーション結果

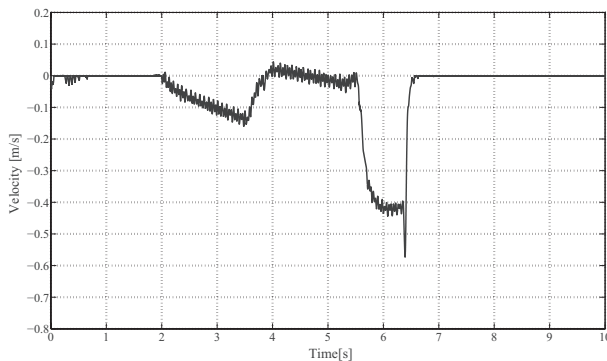


図 2.6: Z 軸方向先端速度

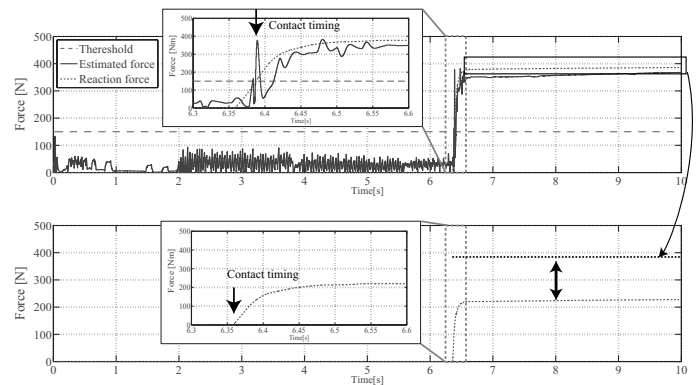


図 2.7: 推定外力による接触検知の比較:

(a) 推定外力によって接触検知をした場合の外力変化 (b) 外力が生じた瞬間にブレーキを行った場合の外力変化

推定外力による接触検知の遅れが衝撃力の大きさに影響することを確認するために、接触動作のシミュレーションを行った。ロボットの関節軸には、クーロン摩擦とロストモーションのモデルも考慮しており、推定外力の誤差で誤検知しない閾値を 150N として検証している。接触する環境は-Z 方向にバネ定数: $K_{en} = 10000\text{N/m}$ 、ダンパ定数: $D_{en} = 20\text{N}/(\text{m/s})$  とした環境があると想定している。

まず、シミュレーションしたロボットの先端速度を図 2.6 に示す。シミュレーション開始から 6.36 秒で環境と接触し、接触検知と同時に全軸の速度指令を 0 にしてロボットの動きを停止させている。

図 2.7 では、(a) に推定外力と閾値で接触検知してロボットを停止させた場合、(b) に外力が生じた時点でロボットを停止させた場合のシミュレーション結果を示している。これらの比較から明らかなように、この条件下ではロボットが環境と接触してから接触を検知するまでに、推定外力を用いた場合では 0.03 秒程度かかっており、この接触検知の遅れが衝撃力をおよそ 150N 増加させる結果となった。

位置や速度といった高剛性のモーション制御系で環境と接触した場合に、わずかな時間でも高い制御剛性のまま動作を続けることによって、接触時の衝撃が非常に大きくなってしまう。この検討から明らかなように、推定外力による接触検知は、推定外力の誤差の大きさに対する

閾値の設定が非常に重要であることを示している。

## 2.4 環境に対する柔軟な動作を目的とした各種モーション制御法

### 2.4.1 モーション制御法における環境の剛性と制御剛性の関係

ロボットにおける位置と力のモーション制御について比較すると、理想とする特徴は相反している。位置決め性能の向上と高速化の目的のためには、ロボットのパラメータ変動が生じた場合でも位置や速度が一切変化しないことが理想である。これに対して、外力に柔軟なモーション制御は、ロボットの動作に必要な最低限のトルクのみをアクチュエータに出力させ、外力に対しては完全に従順であることが求められる。

接触動作について検討する上で、次式で表わされる制御剛性の概念についても考えると、より制御器と接触動作の関係が明確になる。

$$\kappa = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (2.25)$$

(2.25) 式中で、 $f$  はアクチュエータが環境に出力される力、 $x$  は目標位置に対する変位を示している。つまり、 $\kappa$  の値が大きくなるほど、ロボットと環境が接触した際に環境に与える力も大きくなり、接触時に環境とロボットの相互にダメージを与える可能性が高くなる。

位置制御ベースのインピーダンス制御は、従来のモーション制御系をベースとした外力に対するコンプライアンスを実現する方法としてよく用いられるが、位置制御系をマイナーループとするために、外力に対する応答性はより低速となる。このため、硬い環境との接触動作に用いることは難しく、衝撃力など短時間で生じる外力に対する柔軟な動作は期待できない。

これに対して、直接トルク制御や加速度制御による力制御は、高帯域な力制御を可能とする。しかしながら、アクチュエータのパラメータ変動に対して弱く、減速機の軸ねじれや非線形摩擦を代表とする非線形な特性が完全に補償する必要がある。また、ロータリーエンコーダ等の位置センサから加速度フィードバックを取得するためには2階微分を行う必要があり、信号ノイズの問題についても考慮する必要がある。従って、減速機を用いないモータによる直接駆動が可能なシステムでは有効な手法となり得るものの、十分な駆動トルクのために減速機を



用いる多くのロボットでは実現が難しい。

以上のように、ロボットの接触動作に用いる制御系の選定は、ロボットの構造とロボットが行う接触動作を考慮する必要がある。

### 2.4.2 仮想インピーダンス制御を用いた接触動作

位置制御や速度制御などのモーシヨン制御法は、産業用ロボットの高速・高精度を実現するために、外乱やパラメータ誤差に対してより頑強なものが求められてきた。このような制御剛性の高い制御法をベースとした環境に柔軟なモーシヨン制御を実現する代表的な手法として、仮想インピーダンス制御が知られている。

図 2.8 で示すような、仮想的な機械インピーダンスをリアルタイムにシミュレートさせ、この動きをロボットのモーシヨンに反映させる。外力に対する仮想インピーダンスモデルの振る舞いは (2.26) 式のような式で表すことができる。

$$\hat{F}_{ext} = M_{imp}\ddot{X}_{int} + D_{imp}\dot{X}_{int} + K_{imp}X_{int} \quad (2.26)$$

$M_{imp}$  は仮想質量係数、 $D_{imp}$  は仮想ダンパ係数、 $K_{imp}$  は仮想バネ係数である。

インピーダンスモデルに入力された力によって平衡点を基準とした質量  $M_{imp}$  の質点の振る舞いをシミュレートさせ、このモデルにおける位置、速度、加速度をロボストに制御することで、設計した仮想インピーダンス特性を高剛性の制御系で実現することができる。

仮想インピーダンス制御は原理的な特性から、外力に対して受動的なコンプライアンスを実

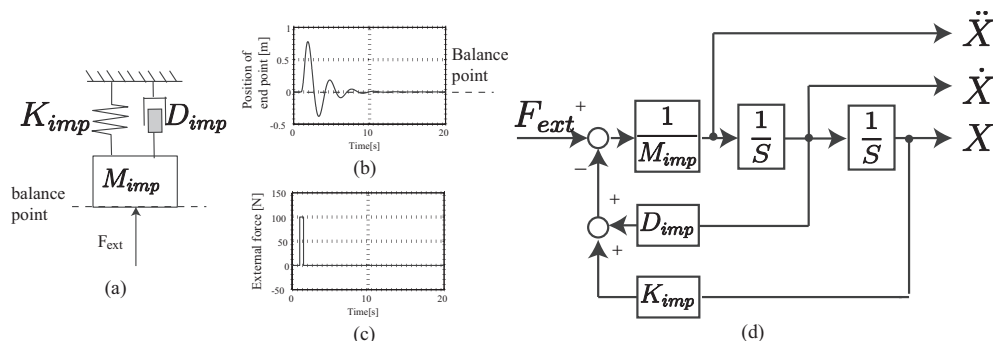


図 2.8: 仮想インピーダンスコントローラの概要 : (a) イメージ図 (b) アーム位置変位 (c) 外力 (d) ブロック線図

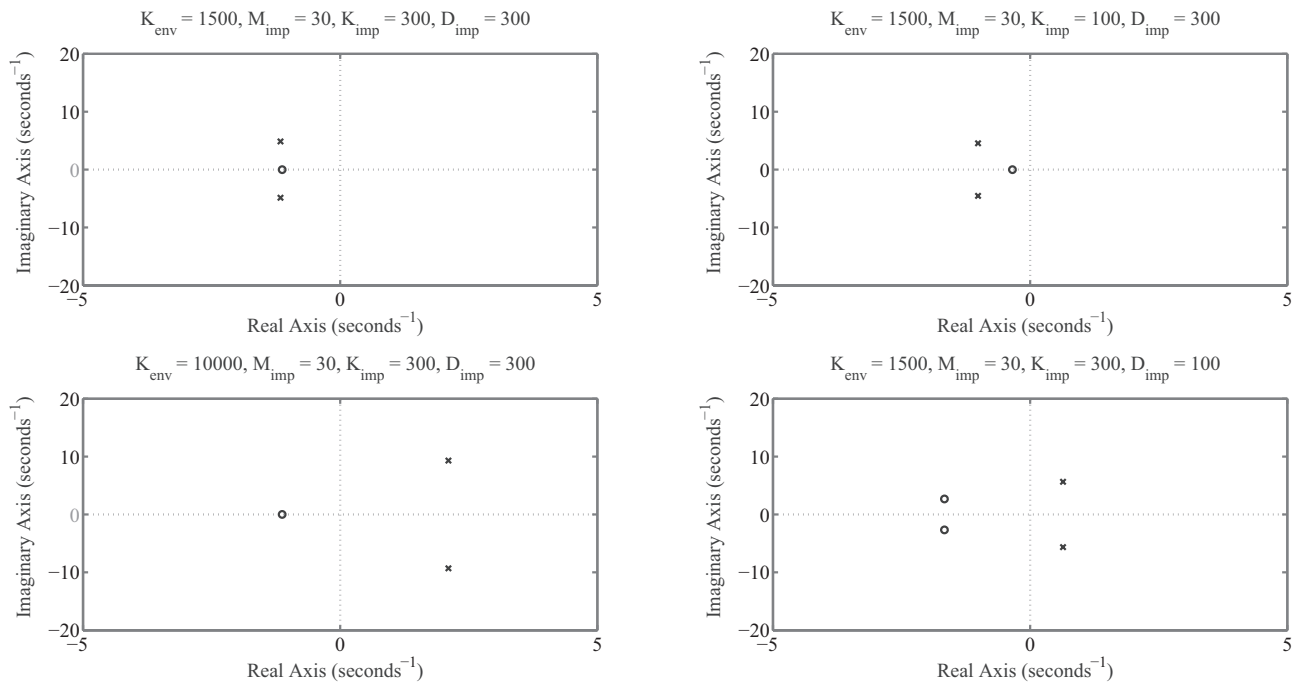


図 2.9: 環境の剛性とインピーダンスパラメータを変化させた時の極零点配置の比較

現するが、接触時の安定性は環境の剛性に大きく依存する。位置制御系にインピーダンス制御を適用した場合の閉ループ伝達関数の特性多項式には  $K_{env}$  および、インピーダンス制御器の各パラメータ ( $K_{imp}$ ,  $D_{imp}$ ,  $M_{imp}$ ) が含まれており、接触動作時の安定性に影響することが分かる。極零点配置について、インピーダンス制御器のパラメータと環境剛性を変化させた場合の比較を図 2.9 に示す。これらの比較からも明らかなように、環境の剛性が高くなるほど安定性が低下する。一方で、インピーダンス制御器のダンパを大きくすることによって、ロボットの接触動作時における安定性を高めることができる。

次に、位置制御系をベースにしたインピーダンス制御によって環境と接触動作を行うシミュレーションを行った。シミュレーションで想定した接触の状況を図 2.10 に示す。この時のインピーダンスパラメータは、 $M = 30\text{Kg}$ ,  $K = 300\text{N/m}$ ,  $D = 300\text{N}/(\text{m/s})$  に設定しており、環境の特性パラメータを  $K_{env} = 1500\text{N/m}$ ,  $D_{env} = 20\text{N}/(\text{m/s})$  とした場合を図 2.11 に、 $K_{env} = 10000\text{N/m}$ ,  $D_{env} = 20\text{N}/(\text{m/s})$  とした場合を図 2.12 にそれぞれ示す。

これらのシミュレーションの結果を比較すると、環境インピーダンスが硬くなるほど、接触動作時の安定性が低下することが分かる。また、環境との接触と離脱を繰り返すウッドペッ

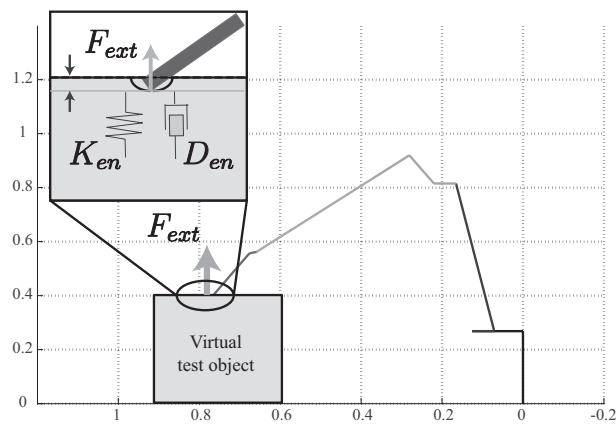


図 2.10: シミュレーション実行時の仮想環境と接触時に想定した姿勢

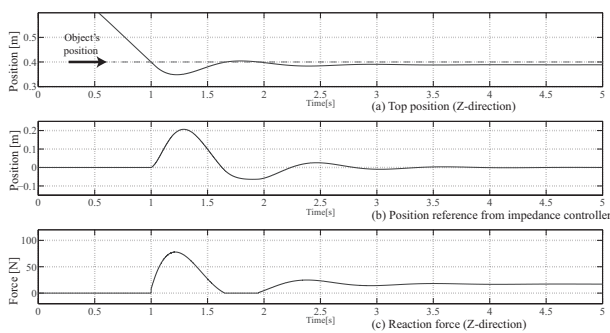


図 2.11: インピーダンス制御によるロボットの接触動作シミュレーション

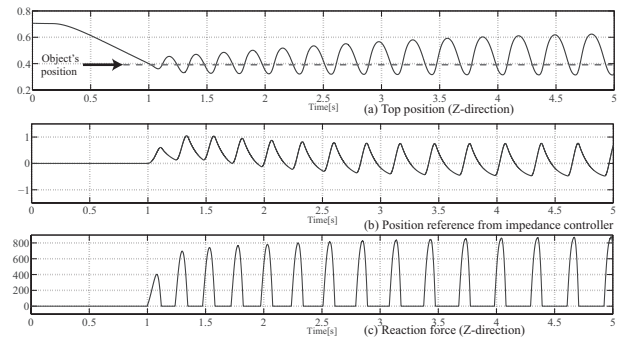


図 2.12: インピーダンス制御によるロボットの接触動作シミュレーション

カーと呼ばれる現象が生じている点にも注目する必要がある。この現象は、ロボットと環境の接触で生じる衝撃力に対してインピーダンス制御によって環境から離れてしまうことから生じる。

以上の検討からも明らかなように、仮想インピーダンス制御はロボットと環境の接触動作を制御する上で有用な方法であるものの、剛性が高く硬い環境との接触によって不安定になるケースがある。このような問題が生じる要因は、環境の剛性が高くなることによってロボットの動きに対する反力が高帯域となり、仮想インピーダンス制御のベースとなるサーボ制御系が環境から目標とする仮想インピーダンスを実現できなくなるためである。先行研究では、この点に着目しサーボ系をベースとしたインピーダンス制御の接触安定性について検討し、サーボ系の位相遅れを補償する制御アルゴリズムを提案したものもある [23]。しかしながら、接触後

のロボットの動きは、環境の剛性に依存することには変わりはなく、精密な接触制御を必要とするアプリケーションには適用が困難であると考えられる。

### 2.4.3 加速度制御を用いた接触動作

ロボットの加速度を正確に制御することができれば、ロボットで実現可能なあらゆるモーションを実行することができる。これは、ロボットの各アクチュエータはトルク、または力を発生させるものであり、ロボットを構成する各軸が目的の動作に必要な加速度で制御されれば、ロボットはどのような動きも可能になるためである。このような考え方に基づくモーション制御法を加速度制御と呼び、これまでも様々な検討が行われてきた [62–66]。加速度制御を用いることで位置制御や速度制御の軌跡追従性を改善するだけでなく、力制御についての検討も度々行われている [67–69]

接触する固定環境を  $K_{env}$  を弾性体として仮定すると、 $F_{cont}(t)$  は、ロボット先端位置の環境に対する変位で決まるため、衝突過程における環境に与える最大衝撃力と最大衝撃加速度は (2.27) 式、(2.28) 式のように定式化することができる。

$$F_{impact} = \sqrt{M_{eq}K_{env}}V_{cont} \quad (2.27)$$

$$\alpha_{impact} = \sqrt{\frac{K_{env}}{M_{eq}}}V_{cont} \quad (2.28)$$

(2.27) 式、(2.28) 式で示されるように、衝撃力も含めたロボットと環境の接触運動は加速度を高性能に制御する必要がある。衝撃力を低減する緩衝動作は、衝撃加速度と逆側に加速度制御することで衝撃力を効果的に低減することができる。環境からの反力を  $F_{reac}$  とすれば、ブ

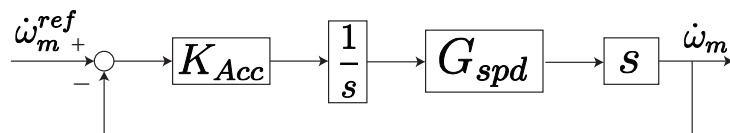


図 2.13: 加速度コントローラを用いた P 型加速度制御系

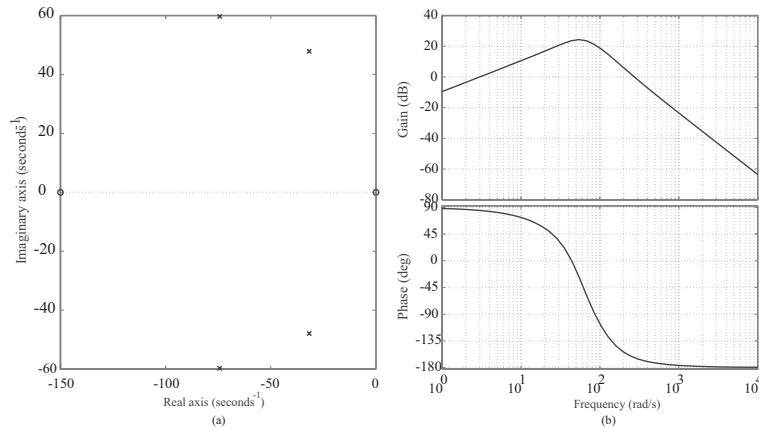


図 2.14: 加速度制御系のアーム加速度の閉ループ伝達関数より描画した極配置とボード線図:(a) 極配置 (b) ボード線図

レーキ制御で与える加速度指令は次式のように表わせる。

$$\begin{aligned} F_{impact} &= F_{reac} \\ \ddot{X}_{brake}^{cmd} &= K_{brake} \frac{F_{impact}}{J_L} \end{aligned} \quad (2.29)$$

加速度制御系を加速度コントローラを用いて状態FB付き速度制御系をベースに図 2.13 のように構成したとき、伝達関数  $G_{Acc}$  は (2.14) 式となる。加速度コントローラは、制御器を加速度次元で構成して積分器によって、速度、ないし位置の次元にすることによって、速度制御系、位置制御系による加速度制御を可能にする手法である。減速機内部の振動を抑制したロバストな位置または速度制御系をマイナーループに用いることができるため、比較的容易に加速度ベースのモーション制御を実現できる。

$$G_{Acc} = \frac{b_2 s^2 + b_1 s^1}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s^1 + a_0} \quad (2.30)$$

$$b_2 = K_{acc} Kt Rg^2 K_{sp} Ks$$

$$b_1 = K_{acc} Kt Rg^2 K_{si} Ks$$

$$a_4 = J_m J_L Rg^2$$

$$a_3 = K_{acc} Kt Rg^2 J_L K_{sp} + J_L Kt Rg^2 f_1 + Rg^2 D_m J_L + J_L K_{sp} Kt Rg^2 + Rg^2 J_m D_L$$

$$a_2 = J_L Kt Rg^2 f_3 + Ks Rg^2 J_m + K_{acc} Kt Rg^2 D_L K_{sp} + J_L K_{si} Kt Rg^2 \\ + K_{acc} Kt Rg^2 J_L K_{si} + D_L K_{sp} Kt Rg^2 + D_L Kt Rg^2 f_1 + Rg^2 D_m D_L + Ks J_L$$

$$a_1 = K_{acc} Kt Rg^2 K_{sp} Ks + K_{acc} Kt Rg^2 D_L K_{si} + D_L Kt Rg^2 f_3 + Ks Kt Rg^2 f_2 \\ + D_L K_{si} Kt Rg^2 + Ks Kt Rg^2 f_1 + Ks Rg^2 D_m + Ks D_L + K_{sp} Ks Kt Rg^2$$

$$a_0 = K_{si} Ks Kt Rg^2 + K_{acc} Kt Rg^2 K_{si} Ks$$

また、加速度制御系のPゲイン  $K_{Acc} = 0.5$  とすると、この加速度制御系の極配置とボード線図を図 2.14 に示す。極配置から明らかなように、ここで設計した加速度制御系は安定であり、周波数特性はボード線図の通りとなる。

次に、ロボットと環境の接触時に加速度制御系によって衝撃加速度を制御することによって、衝撃が低減されることをシミュレーションによって示す。0.25rad/s の等角速度運動でロボットの単軸が環境に接触し、環境からの反力をうける場合を想定する。接触する仮想環境は、環境の剛性  $K_{en} = 10000Nm/rad$ 、粘性特性  $D_{en} = 20Nm/(rad/s)$  と設定した。

このシミュレーションによる検討では、接触の瞬間に関節をフリー状態として、ロボットのブレーキ制御を行わない場合のシミュレーション図 2.15 と、接触の瞬間に加速度制御系に切り替えて衝撃加速度を制御する場合のシミュレーション図 2.16 の2パターンについて比較する。いずれも、0.3s で環境に接触しており、それぞれ (a) アーム速度、(b) アーム加速度、(c) 外力トルクを示している。

まず、図 2.15 について結果を検証すると、ロボットがほぼ停止するまでに 0.1 秒程度の時間を要していることが分かる。ロボットの動きを停止させるためには運動エネルギーを相殺させるだけの力をロボットのアームに作用させる必要があり、通常の方法によるブレーキでは、環境に対する接触力が大きくなってしまっている。これに対して、接触直後の加速度指令を

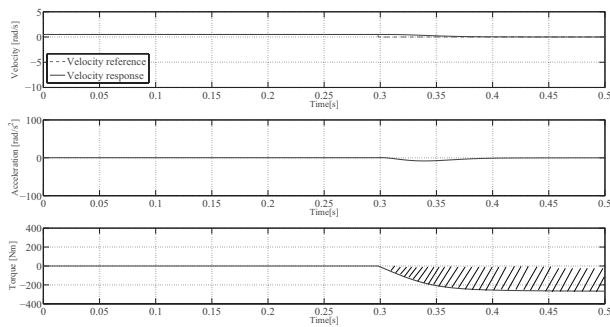


図 2.15: 速度制御によってロボットを停止させた場合の接触動作のシミュレーション結果

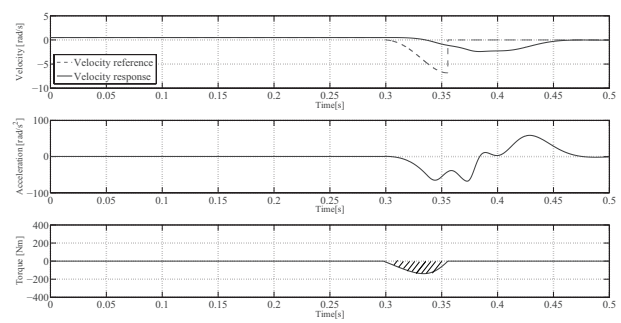


図 2.16: 加速度制御系によってブレーキ加速度を制御する接触動作のシミュレーション結果

$\dot{\omega}_{ref} = 100 \frac{\tau_{ext}}{J_L}$  として加速度制御を行った場合には、衝撃力の大きさが半分程度まで減少しており、力積（図中斜線部分）も図 2.15 に比べて小さくなっている。シミュレーションの検討から、衝撃加速度と同じ方向に加速度制御することで衝撃力を確実に低減させられることが分かる。以上の検討から明らかなように、接触運動を行うモーション制御系の構築は加速度ベースとすることで便利に用いることができる。ロボットの接触運動を実現するモーション制御系はロボットが環境と接触するまでの位置や速度、ロボットが環境と接触することで生じる環境からの反力をそれぞれ制御する必要がある。加速度制御をベースとすることによって、接触後の力制御だけでなく衝撃力に対するブレーキ制御も同じ制御系によって実現できる利点がある。

#### 2.4.4 速度制御ベース I-P カコントローラによる接触制御

次に、速度制御ベース加速度制御系に基づいて構成された I-P カコントローラによる接触制御について説明する。

従来、先行研究で有用性が認められているように PD 型力制御系などが用いられてきた [28]。しかし、微分信号はセンサ等の量子化誤差や信号ノイズによって悪影響を生じるため、D 要素のゲインを小さくする、または単純に P 型制御器を用いることが一般的である [29,30]。本論文で用いる I-P 型力コントローラはこれらの問題を軽減し、また非接触時の安定性も向上する。

図 2.17(a) の PD カコントローラについて、伝達関数および、固有振動数： $f_n$ 、制動係数： $\zeta$

を求めると以下ようになる。

$$\frac{F_{reac}}{F_{ref}} = \frac{(D_{en}s + K_{en})K_{fs2}}{s^2 + (K_{fs2}D_{en} + K_{fs1})s + K_{fs2}K_{en}} \quad (2.31)$$

$$f_n = \sqrt{K_{fs2}K_{en}} \quad (2.32)$$

$$\zeta = \frac{K_{fs2}D_{en} + K_{fs1}}{2\omega_n} \quad (2.33)$$

一般的にコンクリートなどの剛性の高い環境は、 $K_{en} \gg D_{en}$  であると考えられる。従って、十分な値の制動係数を得るには、速度フィードバックゲイン  $K_{fs1}$  が十分に大きい必要がある。しかしながら、速度フィードバックはエンコーダから取得した位置情報を微分したものであり、ノイズを含んだ信号である。さらに、環境から離れてしまった場合反力が常に0となるために、ダンパである速度フィードバックの方がより大きな影響となる場合がある。そこで、速度

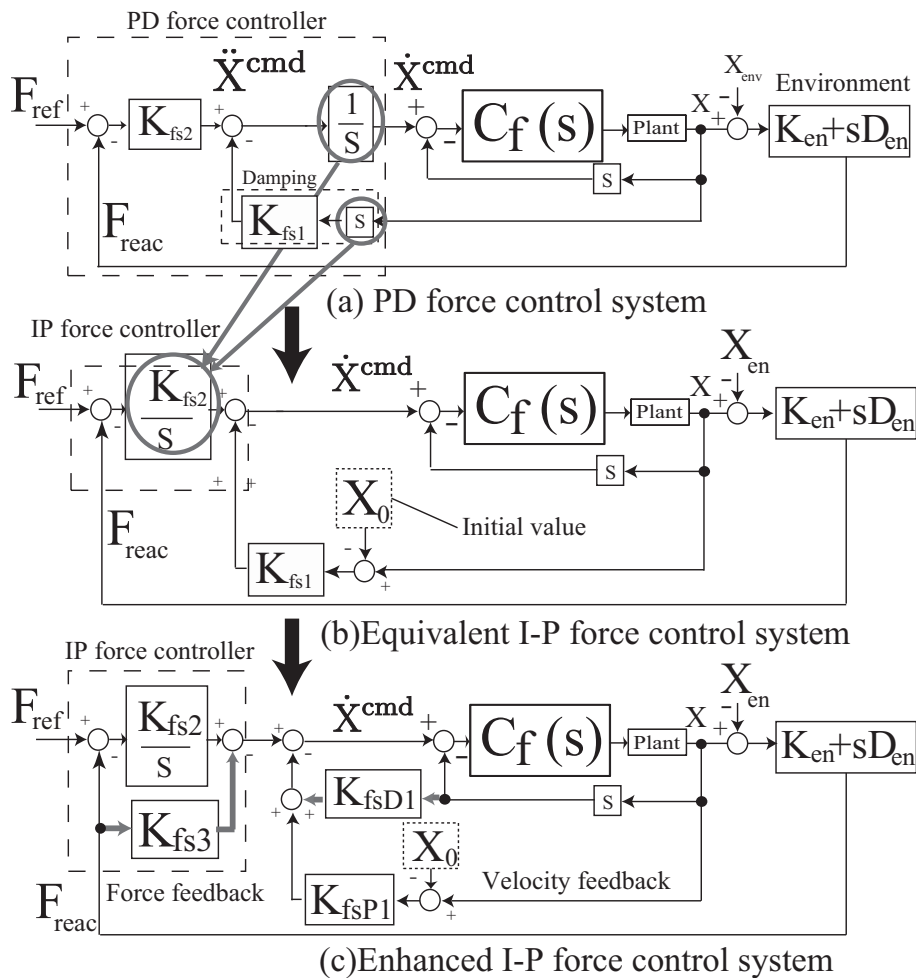


図 2.17: 速度制御型 I-P カコントローラ



フィードバックを大きくする必要のない I-P 型力コントローラを等価変換によって得る (図 2.17 の (b))。積分器は力指令  $F_{ref}$  と、反力推定オブザーバによって推定された反力フィードバック  $F_{reac}$  の偏差を積分する積分要素 (I 要素) となる。これに伴って、PD 型力コントローラの D 成分は位置フィードバックを微分した速度フィードバックから位置フィードバックに置き換えられ、センサノイズの影響を回避する。また、さらに力フィードバック  $K_{fs3}$ 、および速度フィードバック  $K_{fsD1}$  を加えることで、接触時、非接触時ともに安定に動作する改良型の I-P 力コントローラ (図 2.17 の (c)) が得られる。

ロボットのツールを想定した力制御では、接触と非接触の状態が不連続に生じるため、いずれの場合でも安定に動作する必要がある。通常の PD、I-P 型力コントローラでは、安定な力制御のためにダンパ要素である  $K_{fs1}$  を相応に大きく設定しなければならない。このため、非接触時にはこのフィードバック要素が大きくなりすぎ、不安定な動作につながってしまう。本論文で用いる I-P 型力コントローラは、反力に応じた力フィードバックを付加することで、 $K_{fsP1}$ 、 $K_{fsD1}$  が小さくなるため、非接触時ともに安定性の向上を図った。I-P 力制御系は、安定かつ十分な応答を持った状態フィードバック付き PI 速度制御系をマイナーループ (図 2.17 中で  $C_f(s)$ ) としている。この速度制御系に対する極配置は、安定性と応答性を同時に設計可能な係数図法を用いて、等価時定数  $\tau = 1/20$  として設計を行っている [61]。産業用ロボットのセンサレス力制御による接触動作は、これらオブザーバと PI 速度制御系を力制御のベースとして用いることで減速機のねじれによる影響を補償し、高精度な力制御を可能にする。環境の特性を剛性インピーダンス  $K_{en}$ 、ダンパ要素  $D_{en}$  とすると、内側の速度制御系が十分に高速であるとき、I-P 力制御系の伝達関数は (2.34) 式で示される。

$$\frac{F_{reac}}{F_{ref}} = \frac{\frac{(D_{en}s + K_{en})K_{fs2}}{1 + K_{fs2}D_{en} + K_{fsD1}}}{s^2 + \frac{K_{fs2}D_{en} + K_{fs3}K_{en} + K_{fsP1}}{1 + K_{fs2}D_{en} + K_{fsD1}}s + \frac{K_{fs2}K_{en}}{1 + K_{fs2}D_{en} + K_{fsD1}}} \quad (2.34)$$

また、固有周波数:  $f_n$ 、制動係数:  $\zeta$  は、それぞれ (2.35) 式、(2.36) 式となる。

$$f_n = \sqrt{\frac{K_{fs2}K_{en}}{1 + K_{fs3}D_{en} + K_{fsD1}}} \approx \sqrt{\frac{K_{fs2}K_{en}}{1 + K_{fsD1}}} \quad (2.35)$$

$$\zeta = \frac{K_{fs2}D_{en} + K_{fs3}K_{en} + K_{fsP1}}{2f_n(1 + K_{fs3}D_{en} + K_{fsD1})} \approx \frac{K_{fs3}K_{en} + K_{fsP1}}{2f_n(1 + K_{fsD1})} \quad (2.36)$$

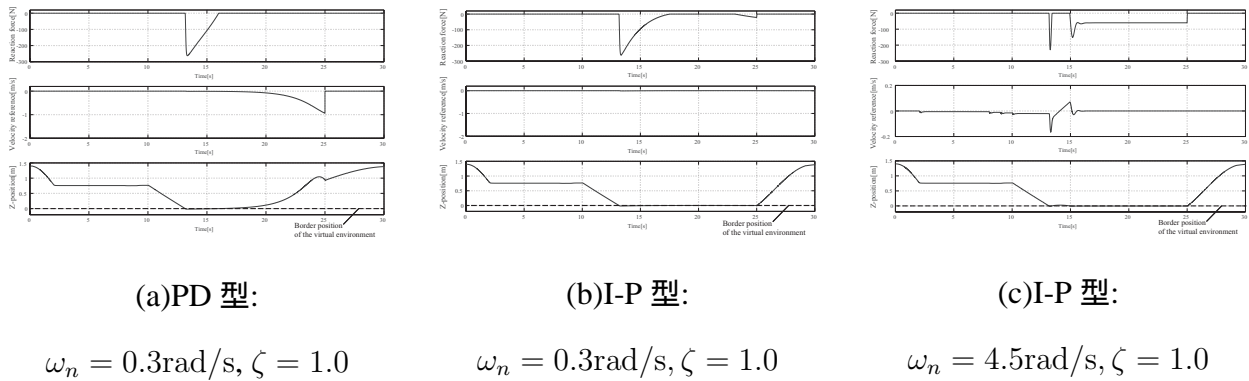


図 2.18: カントローラの違いによる力制御のシミュレーションによる比較

上記のように、(2.35) 式、(2.36) 式は、それぞれ環境のダンパ要素  $D_{en}$  の項を無視して近似する。これは、作業で想定される剛性の高い環境では、 $K_{en} \gg D_{en}$  であると仮定している。また、 $1 \gg K_{fsD1}, K_{fs3}K_{en} \gg K_{fsP1}$  となるようにゲインの選択を行えば、以下のように近似できる。

$$f_n \approx \sqrt{K_{fs2}K_{en}} \quad (2.37)$$

$$\zeta \approx \frac{K_{fs3}}{2\sqrt{K_{fs2}}} \sqrt{K_{en}} \quad (2.38)$$

上式で示されるように、 $f_n$ 、 $\zeta$  とともに、環境の剛性  $K_{en}$  に依存している。実際に実験結果から  $K_{en}$  を接触させる環境に応じて測定することは難しいため、実際には試行錯誤的に  $K_{fs2}$ 、 $K_{fs3}$  の順にゲインを決定する。その際、 $K_{en}$  は応答性と安定性の両方に影響するため、剛性が高い環境の場合にはゲインを小さくし、柔らかい場合にはゲインを大きめに設定することで対応する。さらに、位置フィードバック  $K_{fsP1}$ 、および速度フィードバック  $K_{fsD1}$  によって微調整を行うことで、高精度な力制御が実現できる。

環境の剛性と力制御の応答について検討するため、固有角周波数と制動係数を変化させた場合のシミュレーションを行った。仮想環境は  $K_{en} = 15000\text{N/m}$ 、 $D_{en} = 10\text{N}/(\text{m/s})$  とし、-Z 方向（床面方向）の静止環境に対する力制御を想定している。

図 2.18(a) は固有角周波数  $\omega_n = 0.3\text{rad/s}$ 、制動係数  $\zeta = 1.0$  として設計した PD 型力コントローラを用いている。環境との接触によって生じた衝撃によって、+Z 方向の大きな速度指令が生じたことによって、環境から離れてしまっている。伝達関数からも明らかなように、環境の剛性が大きいほど (2.33) 式に従って、 $\zeta$  の値を大きくするためには速度フィードバック  $K_{fs1}$  を

大きく設定する必要がある。

これに対して、図 2.17 の (c) 図で示されている、提案法の I-P 型力制御系を用いた結果図 2.18(b) では、同様の特性で設計を行ったにも関わらず、上記のような問題が生じていない。接触時の制動係数は力フィードバック  $K_{fs3}$  によってほぼ決定され、環境からの反力が大きいほどダンパが強くなる。また、位置フィードバックと速度フィードバックゲイン  $K_{fsP1}, K_{fsD1}$  は比較的小さな値であり、PD 型力制御のように環境から離れても意図しない動きにつながらない。図 2.18(c) では、より力応答を速くするため  $\omega_n = 4.5\text{rad/s}, \zeta = 1.0$  と設計して I-P 型力コントローラによってシミュレーションを行っているが、良好な接触動作を実現出来ている。

## 2.5 まとめ

現在産業界で用いられている力センサを用いる力制御やインピーダンス制御の問題として、センサコストが高いこと、先端のセンサ以外に接触した場合に外力の検出が不可能なことが挙げられる。そこで本章では、機械構造の軸ねじれ振動を考慮した外乱オブザーバを用いて、力センサレスによる接触モーション制御系の構築について検討を進めた。従来法の接触運動をモーション制御法のまとめと、本論文で解決を図る課題について図 2.19 を示す。

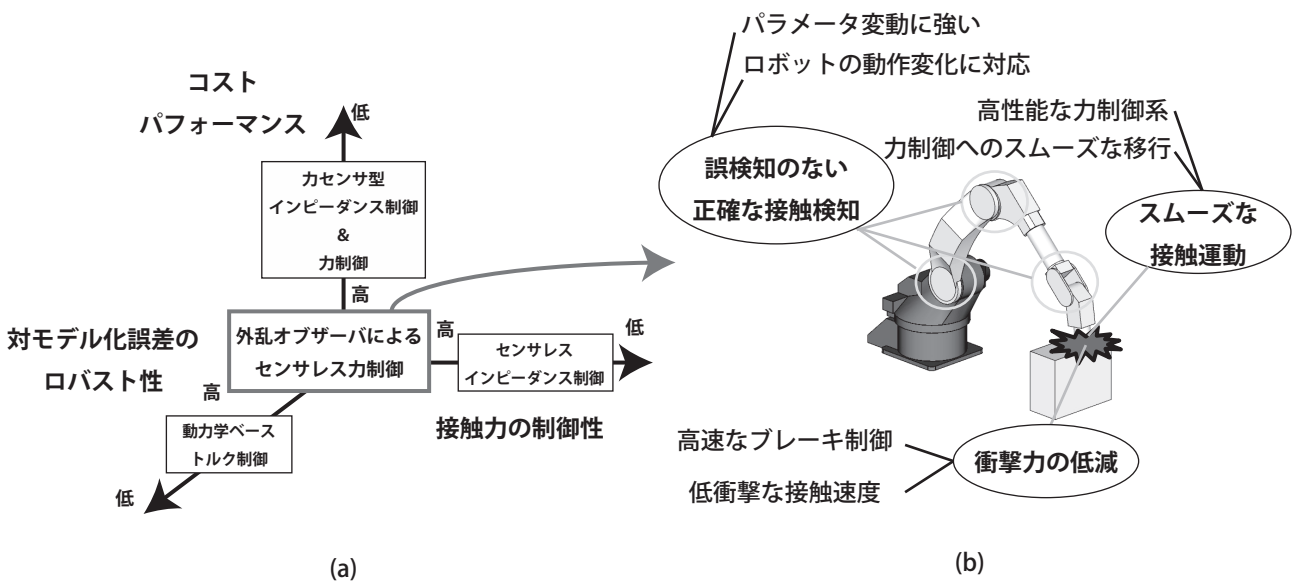


図 2.19: 接触運動の従来法比較と本論文で着目した課題

まず、ロボットと環境の接触動作について、単純化した多関節ロボットとバネ環境の接触モデルについて検討した。この検討から明らかのように、ロボットと環境の接触動作では軸ねじれによる弾性特性とロボットの姿勢によって変化する慣性について考慮する必要がある。ロボットが環境に接触する瞬間に生じる衝撃力の最大値は、慣性が大きく、環境の剛性が高いほど大きくなることを示した。

次に、2 慣性系としてモデル化したロボットのアクチュエータモデルから設計する外乱オブザーバと、カセンサレス外力推定について述べる。軸ねじれを考慮した2 慣性系モデルから、状態変数に外乱トルクを含めることによって設計する外乱オブザーバは、推定負荷トルクに軸ねじれによる影響が補償される。しかしながら、実際のロボットではロストモーションなどのばね定数の非線形性、回転速度に対する非線形摩擦が存在するため、推定外力による接触検知はパラメータ誤差についても考慮しなければならない。そこで、推定外力の誤差を見積もった閾値と推定外力の大きさを比較することによって、カセンサを用いずに接触を検知することができる。シミュレーションと併せて検討したように、外乱オブザーバを用いるカセンサレスのシステムではパラメータ誤差の影響は推定外力の推定誤差として生じる。推定外力の誤差はロボットの運動に応じて変化するため、閾値は十分な値に設定する必要がある。しかし、閾値を高くすることで、検出不能な推定外力の大きさが増してしまうことも検討によって明らかにした。

次に、モーション制御器の比較として、インピーダンス制御と加速度制御型の力制御について比較を行った。インピーダンス制御は仮想的な機械インピーダンスを制御によって実現することで、環境からの反力に応じた柔軟な動作を可能にする。これに対して、加速度制御をベースとした力制御系による接触モーション制御では、接触力を正確に制御することが可能になる。一方で、いずれの制御系を用いた場合にも、接触する環境の剛性が高い場合にロボットと環境が何度も接触と非接触を繰り返す不安定な動作につながる場合がある。本章で検討した速度制御型 I-P 力制御は、環境の剛性が高い場合でも安定した接触動作を可能にし、シミュレーションによる比較でも接触モーション制御に有用であることが示された。

本章の検討を通して、さらなる高性能な接触運動の実現にはいくつかの課題があることが分

かった。まず、パラメータ誤差によって生じる推定外力トルクの誤差に対して設定する閾値の問題が挙げられる。従来のように推定外力に対して一定の閾値を設定する方法では、閾値以下の外力による接触検知を不可能にする。また、接触の検知が遅れることによって、接触時の衝撃力による影響が大きくなることも問題となる。

次に、接触運動の不連続性についても考慮する必要がある。ロボットと環境が接触した際には、ロボットの運動エネルギーに起因する衝撃力が生じる。本章の接触動作のシミュレーションでも明らかなように、衝撃力の影響は接触と非接触を繰り返す不安定なモーションにつながる。このため、衝撃力を低減する効果的なブレーキ制御と、力制御へのスムーズな移行が課題となる。

また、衝撃力の低減は接触後のブレーキ制御だけでなく、接触速度の制限も重要な課題である。手動操作による教示作業、またはめ合いや組み立てなど接触を伴う作業では、ロボットと環境が接触する瞬間に生じる衝撃力が許容値を超えないようにする必要がある。そこで、ロボットの姿勢やモーションに応じた運動の制限が必要であると考えられる。

これらの問題を解決することにより、ロボットの接触運動を大きく改善することができる。



## 第3章

# ジャーク信号と動的閾値を用いた高加減速の モーション制御法

### 3.1 はじめに

ロボットが何らかの障害物に接触したり、アクチュエータ等の機械的な損傷があった場合に、直ちに動きを停止させる必要がある。接触力を検知する最も一般的な方法はロードセルや力センサなどの力覚センサを用いることであるが、ロボット全体を覆うように設置するのは難しく、それぞれのコストも高い。このため、現行のロボットの多くは力センサは備えられておらず、一般的なロボットで用いることのできるセンサはサーボアンプの電流センサと位置センサに限られる。

そこで、電流指令、また外乱オブザーバを用いてロボットの外力トルク推定し、ロボットのモーション制御に用いる力センサレス外力推定が提案された。これらの方法では、事前に行った予備実験によって、ロボットのモデルパラメータに含まれる誤差を見積もって、接触の判定を行うための閾値を設定する必要がある。しかし、減速機の非線形バネ特性、非線形な粘性摩擦の特性などから生じるパラメータ誤差は、ロボットの動きに応じて影響が大きく変化する。このために、閾値を十分に大きくすることによって接触の誤検知を回避する必要があるものの、大きくしすぎることによって、検知可能な外力の範囲を限定してしまう。

そこで本章では、推定外力の微分である外力ジャーク信号（躍度）と、逆動力学計算に基づく動的閾値を提案する。動的閾値はロボットの姿勢と動きによってリアルタイムに変化することで、接触検知の感度を落とさずに推定外力の誤差による接触の誤検知を回避する。

本章ではまず、接触時の衝撃力検知に外力ジャーク信号が有効であることを示し、動力学計算から動作時に生じる推定誤差について検討を行う。次に、設定した最低閾値からロボットの加速度に応じて閾値を引き上げる動的閾値のアルゴリズムを提案し、実際の産業用ロボットに基づくシミュレーションによる検討を行う。そして最後に、実際のロボットの単軸による接触動作実験を行い、外力ジャーク信号とその動的閾値によって、急な加減速を伴うロボットのモーション制御においても、誤検知の少ない力センサレスによる接触検知を実現する。

## 3.2 衝撃の検知に有効な推定外力ジャーク信号による接触検知

### 3.2.1 衝撃の大きさを示す推定外力ジャーク信号

反力推定オブザーバを用いたロボットの接触検知を高速化するためには、ロボットが環境と接触する際の衝撃力を時間遅れなく推定し、接触の判定を行う必要がある。そこで、外乱トルクをランプ状に近似する1次外乱オブザーバを用いる。1次外乱オブザーバを用いることで、推定負荷トルクの位相遅れを小さくすることができ、衝撃力を時間遅れなく推定することができる。この時の、実際の負荷トルクから推定負荷トルクまでの伝達関数を(3.1)式に示す。

$$G_{dis} = \frac{-(5g_{dis}^4 s + g_{dis}^5)}{s^5 + 5g_{dis}s^4 + 10g_{dis}^2 s^3 + 10g_{dis}^3 s^2 + 5g_{dis}^4 s + g_{dis}^5} \quad (3.1)$$

(2.23)式で示されるように、ロボットに生じる負荷トルクが正確に計算されていても、推定外乱トルクの位相遅れによって推定外力の誤差トルクが生じる。例として、遮断周波数 $\omega_c = 30\text{rad/s}$ としたステップ状の外乱トルクに対して、推定外力トルクとの差は図3.1のように現れる。ここで、関節に生じた負荷トルク $\tau_L$ 、外乱オブザーバによって推定された負荷トルクを $\hat{\tau}_L$ としている。このように、1次外乱オブザーバを用いることによって負荷トルクの過渡特性をより正確に推定することができる。同様に、推定負荷トルクの位相遅れによる見かけ



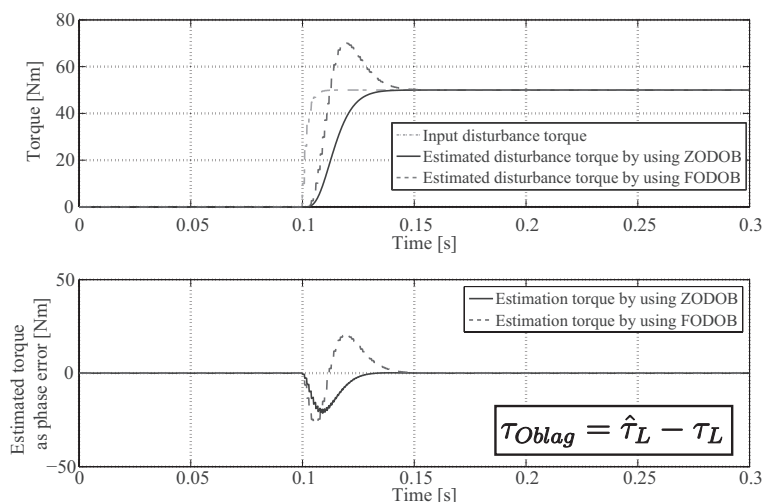


図 3.1: 3 自由度産業用ロボットの接触動作シミュレーションの推定外力ジャーク信号の比較

上の推定負荷トルクも小さくできることが分かる。

ジャーク信号: $R$  は推定外力の時間微分値であり、以下の (3.2) 式で示される。

$$R = \frac{d\hat{\tau}_{ext}}{dt} = \frac{d}{dt}(\hat{\tau}_{dis} - \tau_{dyna} + \tau_{err}) \quad (3.2)$$

また、推定外力の誤差によって生じるジャーク信号: $R_{err}$  は (3.3) 式で表わすことができる。

$$R_{err} = \frac{d\hat{\tau}_{err}}{dt} = \frac{d}{dt}(\hat{\tau}_{Obserr} + \tau_{Derr}) \quad (3.3)$$

外乱オブザーバの位相遅れによる推定外力の誤差ジャーク信号 ( $\frac{d\hat{\tau}_{Obserr}}{dt}$ ) は、動力学トルクが大きく変化した場合にのみ大きくなる。同様に、動力学モデルの誤差によって生じる影響について近似すれば (3.21) 式のように示すことができる。

$$\frac{d\tau_{Derr}}{dt} \approx \Delta H \ddot{\omega}_L + (\Delta \dot{H} + \Delta D) \dot{\omega}_L + \Delta \dot{D} \omega_L \quad (3.4)$$

(3.21) 式で示すように  $\frac{d\tau_{Derr}}{dt}$  の変化は慣性項と摩擦項の誤差分に対して、ロボットの動作に応じて変化する。このため、ジャーク信号による接触検知でも、推定外力による方法と同様にジャーク信号の閾値： $R_{th}$  を (3.5) 式に従って設定する必要がある。

$$R_{th} > R_{err} \quad (3.5)$$

ジャーク信号は環境との接触時に生じた急峻な推定外力の変化に対して瞬間的に大きくなる一方で、摩擦の誤差など、低域の推定外力の誤差に対しては反応が小さくなるという特徴を

持っている。ジャーク信号による接触検知は、推定外力が変化し始めた瞬間に判断できるため、従来の推定外力によって判定する接触検知に比べ、接触検知を高速化できる。

### 3.2.2 外力ジャーク信号の推定誤差についての考察

1次外乱オブザーバによって推定された外力トルクの微分である外力ジャーク信号は、ロボットの高信頼な力センサレス接触検知を実現する上で有用である。

関節のノミナルモデルと動力学パラメータに誤差が含まれていない場合、推定外力は必ず0に収束するが、実際にはパラメータの誤差をなくすことは非常に難しい。ロボットの姿勢変動による軸モデルの負荷慣性の慣性変動、ロボット手先の負荷変動、摩擦の非線形性など、多くの要因が存在するためである。従って、実際の動力学トルクは以下のように定義できる。

$$\begin{aligned}\tau_{dyna}^* &= \tau_{dyna} + \tau_{Derr} \\ &= (\mathbf{H} + \Delta\mathbf{H})_{(\theta_L)} \dot{\omega}_L \dots \\ &\quad + (\mathbf{D} + \Delta\mathbf{D})\omega_L + (\mathbf{b} + \Delta\mathbf{b})_{(\theta_L, \omega_L)} \dots \\ &\quad + (\mathbf{c} + \Delta\mathbf{c})_{(\theta_L)} + (\mathbf{f} + \Delta\mathbf{f})_{(\theta_L)}\end{aligned}\quad (3.6)$$

本稿で提案した反力推定オブザーバを用いることで、ノミナルな動力学トルクは補償することができるため、推定外力には  $\tau_{Derr}$  が残る。また、1次外乱オブザーバで推定した外力ジャーク信号について、動力学パラメータの誤差によって生じる影響について検証する。

まず、慣性項で生じる外力ジャーク信号を  $R_{inertia}$  とすると、次式のように表せる。

$$R_{inertia} = \Delta\mathbf{H}_J(\theta)\ddot{\omega}_L + \Delta\dot{\mathbf{H}}_J(\theta)\dot{\omega}_L \quad (3.7)$$

慣性行列  $\mathbf{H}_J(\theta)$  は、ロボットの姿勢によって変化するため、各軸の慣性はロボットの姿勢に応じて変化する。

次に、コリオリ項と遠心力項によって生じる外力ジャーク信号は、 $R_{coli}$ 、 $R_{cent}$  として、次式のように示すことができる。

$$R_{coli} = \Delta\mathbf{H}_{coli}(\theta)^{ij}(\omega_L^i \dot{\omega}_L^j + \omega_L^j \dot{\omega}_L^i) + \Delta\dot{\mathbf{H}}_{coli}(\theta)^{ij}\omega_L^i \omega_L^j \quad (i \neq j) \quad (3.8)$$

$$R_{cent} = \Delta\mathbf{H}_{cent}(\theta)^{ii}(2\dot{\omega}_L \omega_L + \Delta\dot{\mathbf{H}}_{cent}(\theta)(\omega_L)^2) \quad (3.9)$$

ロボットは、質量を持った複数のリンクが連結されて構成されているため、(3.7)式～(3.9)式の慣性系は、ロボットの姿勢によってそれぞれ変化する。また、ロボットの手先負荷の重さによっても、これらの項は影響を受ける。

次に、重力項もロボットの姿勢によって変化するため、外力ジャーク信号が生じる原因の一つとなる。ここで生じる外力ジャーク信号を  $R_{grav}$  とすると、次式のように示すことができる。

$$R_{grav} = \Delta \dot{T}_g \quad (3.10)$$

最後に、動摩擦項の変化によって生じるジャーク信号は、次式のように示すことができる。

$$R_{fric} = \Delta D\dot{\omega}_L + \Delta \dot{D}\omega_L \quad (3.11)$$

従って、実際の外力が生じていない場合でも、ロボットの動力学にパラメータ誤差がある場合に、(3.7)式～(3.11)式に応じて、外力ジャーク信号が生じる。

### 3.3 高加減速時に接触の誤検知を回避する動力学に基づく動的閾値

#### 3.3.1 外力ジャーク信号の慣性に基づく動的閾値

(3.21)式で示されるように、加加速度： $\ddot{\omega}_L$ が大きくなった場合に動力学トルクも大きく変化する。また、外乱オブザーバの位相遅れによる影響も大きくなるため、その結果  $R_{err}$  は加減速時に大きくなる特徴がある。これに対して、加速度が大きく変化する運動以外では、摩擦項の誤差による影響など、推定外力の変化が緩やかであるためにジャーク信号の変化は比較的小さくなる。

このような特徴から、(3.5)式で示した閾値の設定では加減速時に生じる  $R_{err}$  の大きさを考慮して決定する必要がある。しかし、加減速動作時以外では閾値はより低いレベルで十分であり、低い閾値に設定することで接触検知をより高速に行うことができる。そこで、慣性項に基づき、加減速動作時に閾値を一時的に引き上げる。

加速度が小さいモーションを行っている時、見かけ上推定外力の変化は摩擦の非線形性に起

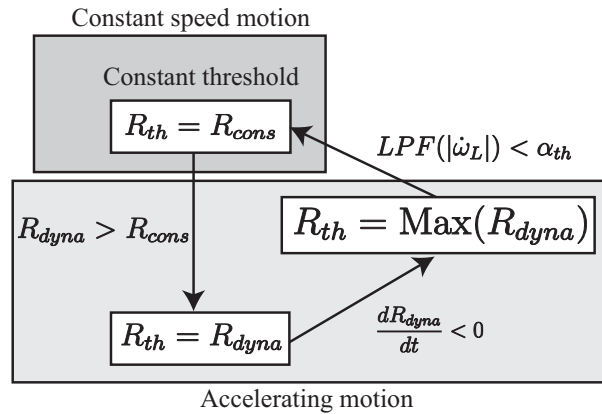


図 3.2: 提案する外力ジャーク信号の動的閾値を決定するアルゴリズムの状態遷移図

因するものが支配的であり、ジャーク信号も小さく不規則に生じる。このため、低域の閾値： $R_{cons}$  を設定し、慣性項の影響が小さい場合には (3.12) 式のように一定に保つ。

$$R_{th} = R_{cons} \quad (3.12)$$

$$: R_{cons} \geq K_{jth} \times (\mathbf{H}\ddot{\omega}_{Lref} + \dot{\mathbf{H}}\dot{\omega}_{Lref})$$

次に、ノミナル慣性項に対する任意の割合である閾値変化率： $K_{jth}$  を設定し、加速度が大きくなる加減速動作に合わせて次式の通り動的な閾値を計算する。

$$R_{dyna} = K_{jth} \times (\mathbf{H}\ddot{\omega}_{Lref} + \dot{\mathbf{H}}\dot{\omega}_{Lref}) \quad (3.13)$$

$$R_{th} = \text{Max}(R_{dyna}) \quad R_{cons} < R_{dyna} \quad (3.14)$$

この閾値の引き上げは、(3.14) 式に示すように動的な閾値が大きくなったことをトリガとして、(3.13) 式の最大となった閾値を保持する。

最大値を保持する理由は、減速機内部に生じるねじれ振動の影響で加速動作直後に振動が残るため、これによって生じる誤検知を回避するためである。加速動作を終了して  $R_{th} = R_{cons}$  に戻す条件として、(3.15) 式に示すように、負荷加速度が設定された加速度の閾値： $\alpha_{th}$  を下回った場合とする。加速度計算には微分が必要となることと、ねじれ振動の影響を平均化した目的から低域通過フィルタ (LPF) を適用している。

$$LPF(|\dot{\omega}_L|) < \alpha_{th} \quad (3.15)$$

また、動的閾値の変化を示した状態遷移図を図 3.2 に示す。以上のように、ジャーク信号に対

する閾値をロボットの動作に合わせて動的に変化させることで、従来より低い閾値を用いた高速な接触検知を実現する。

高速動作時には遠心力・コリオリの力によって、ロボット各軸の速度に応じて次式のように他軸干渉による影響が生じる。

$$b(\theta_L, \omega_L) = N[\dot{\Theta}^2] + U[\dot{\Theta}\dot{\Theta}] \quad (3.16)$$

$N$  は遠心力による影響を示しており、各軸の速度の2乗に比例するため、 $[\dot{\Theta}^2]$  は次式のようになる。

$$[\dot{\Theta}^2] = [\dot{\theta}_1^2, \dot{\theta}_2^2, \dot{\theta}_3^2] \quad (3.17)$$

$U$  はコリオリ効果による影響を示しており、ある軸から見て直進と並進が同時に生じる場合にトルクが生じる。同じく、3自由度の産業用ロボットでは、 $[\dot{\Theta}\dot{\Theta}]$  は以下のように表わされる。

$$[\dot{\Theta}\dot{\Theta}] = [\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2, \dot{\theta}_2\dot{\theta}_3, \dot{\theta}_3\dot{\theta}_1] \quad (3.18)$$

ここで、接触検知のためのジャーク信号は推定外力の時間微分として求められるため、遠心力とコリオリ効果による影響は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \Delta\dot{b}(\theta_L, \omega_L) &= \Delta\dot{N}[\dot{\Theta}^2] + \Delta N[2\dot{\Theta}\ddot{\Theta}] + \dots \\ &\quad \Delta\dot{U}[\dot{\Theta}\dot{\Theta}] + \Delta U[d\dot{\Theta}\dot{\Theta}/dt] \end{aligned} \quad (3.19)$$

ただし、 $[d\dot{\Theta}\dot{\Theta}/dt]$  は以下のようになる。

$$[d\dot{\Theta}\dot{\Theta}/dt] = [\ddot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1\ddot{\theta}_2, \ddot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2\ddot{\theta}_3, \ddot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3\ddot{\theta}_1]$$

$\Delta\dot{N}$  および、 $\Delta\dot{U}$  は、それぞれ遠心力とコリオリ項のパラメータ誤差変化率を示しており、ロボットの動きに応じて非線形に変化する。従って、高速で運転させる場合、以下の式の様に最低閾値  $R_{cons}$  を設定する必要がある。

$$R_{cons} > \Delta\dot{b}(\theta_L, \omega_L) \quad (3.20)$$

実際には、産業用ロボットを設計する際に動力学パラメータについて考慮されているため、動力学パラメータの誤差はそれほど大きくなり考えられる。ただし、外乱オブザーバの帯域に応じて推定外力トルクの位相遅れが大きくなるため、動作速度が速い場合は  $R_{cons}$  を高めに設定することで、動作中の誤検知を回避することができる。

逆に、極端に低速で動作させる場合、エンコーダの分解能により観測ノイズが生じる。このような状態では、サンプル時間に対して速度計算に必要な十分なエンコーダパルスが得られない。このために、加速度を誤検知しやすいことから、極低速では本提案法を用いることは想定していない。また、極低速以上の低速度域でロボットが柔らかい環境に接触した場合、ジャーク信号が小さくなって接触検知が正常に機能しないことが考えられる。このような低速度域に限っては、推定外力の大きさによる接触検知も併用すれば、幅広い速度域に対して接触検知が有効になる。

次に、産業用ロボットで一般的に用いられる台形加速度パターンとS字加減速パターンで提案法を用いる場合について検討する。台形加速度パターンは、加減速時に線形な加速度変化を特徴としており、加加速度がS字加減速パターンに比べて大きく、最大加速度は小さくなるといった特徴がある。動力学パラメータの誤差によってジャーク信号に与える影響を考慮すると、高速でないと仮定してコリオリ・遠心力を無視すれば、(3.6)式より以下のように示される。

$$\frac{d\tau_{Derr}}{dt} \approx \Delta H \ddot{\omega}_L + (\Delta \dot{H} + \Delta D) \dot{\omega}_L + \Delta \dot{D} \omega_L \quad (3.21)$$

(3.21)式から、加加速度が非常に大きくなると仮定すれば、慣性項の誤差に対する影響が特に大きくなることが分かる。動的な閾値  $R_{dyna}$  は(3.13)式で示される。従って、推定外力の位相遅れ  $\tau_{Oblag}$  を無視すれば、台形加速度パターンを用いる場合には、以下の条件が成り立つように  $K_{jth}$  を設定する。

$$K_{jth} > \Delta H / H \quad (3.22)$$

実際には、外乱オブザーバの帯域に応じて動力学トルクの変化に対して推定外力は位相遅れが生じるため、(3.22)式で示されるより、大きい値で設定することが必要になる。

これに対して、S字加減速パターンは加減速時に非線形な加速度変化を持つことにより加加速度を小さく抑え、その反面最大加速度が大きくなる特徴がある。このような特徴を考慮すると、(3.21)式より  $K_{jth}$  の設定は以下のように行う。ただし、摩擦項の誤差は時間に対して急峻に変化しないと考えられるため、 $\Delta D = 0$  としている。

$$K_{jth} > \frac{\Delta H \ddot{\omega}_L + (\Delta \dot{H} + \Delta D) \dot{\omega}_L}{H \ddot{\omega}_L + \dot{H} \dot{\omega}_L} \quad (3.23)$$

以上のように、(3.22) 式、(3.23) 式を比較して、加加速度が小さく、なおかつ最大加速度は大きくなる加速度パターンを用いる場合、加加速度の大きい加速度パターンを用いる場合に比べて、 $K_{jth}$  を大きめに設定することで、接触の誤検知を回避させることができる。

## 3.4 シミュレーションを用いた検証

### 3.4.1 シミュレーションの方法

提案するジャーク信号に対する動的閾値を用いて接触検知を行う方法は、動力学パラメータの誤差に影響を受ける。そこで、実際の産業用ロボットに基づくシミュレーションを行い、動力学パラメータに誤差を与えた場合に各パラメータをどのように設定すればよいか検討する。

シミュレーションに用いるロボットのモデルは、図 3.3 で示すような 3 自由度の産業用ロボッ

表 3.1: 2 慣性系にモデル化された各ロボット関節のモデルパラメータ (第 2 軸)

パラメータ名	記号	設定値
モータ慣性 [Kgm <sup>2</sup> ]	$J_m$	$1.00 \times 10^{-3}$
負荷慣性 [Kgm <sup>2</sup> ]	$J_L$	18.76
モータ粘性摩擦 [Kgm <sup>2</sup> /s]	$D_m$	0
負荷粘性摩擦 [Kgm <sup>2</sup> /s]	$D_L$	90.47
減速比	$R_{gn}$	160
軸バネ定数 [Nm/rad]	$K_s$	$1.45 \times 10^5$
トルク定数	$K_T$	0.57

表 3.2: 第 2 軸の動力学パラメータ

パラメータ名	記号	設定値
負荷慣性 [Kgm <sup>2</sup> ]	<b>H</b>	160.03
クーロン摩擦 [Kgm <sup>2</sup> /s]	<b>Fc</b>	62.76
粘性摩擦 [Kgm <sup>2</sup> /s]	<b>Fv</b>	90.47
重力 [Nm]	<b>C</b>	156(Max.)

表 3.3: シミュレーションで設定した各パラメータ

パラメータ名	記号	設定値
オブザーバ極	$P_{obs}$	-300(multi.)
状態 FB 付き 速度 PI 設定極	$P_1$	-(40+80i)
	$P_2$	-(40-80i)
	$P_3$	-(62+82i)
	$P_4$	-(62-82i)
	$P_5$	-75.45
環境剛性 [Nm/rad]	$K_{en}$	15000
環境粘性 [Nm/(rad/s)]	$D_{en}$	20
環境位置	$X_{en}$	0(Z-axis)
最低閾値 (1st-DOB)	$R_{cons}$	100
慣性変動 (1st-DOB)	$K_{jth}$	30[%]
最低閾値 (zero-DOB)	$R_{cons}$	300
慣性変動 (zero-DOB)	$K_{jth}$	50[%]
加速度閾値 [rad/s <sup>2</sup> ]	$\alpha_{th}$	0.05

トを用いる。検討動作は、第2軸が図3.3に示した順番で動作し、最終的に環境に接触するといった動作を想定している。実際の産業用ロボットから同定した第2軸の二慣性モデルパラメータを表3.1に、ロボットの動力学パラメータを表3.2にそれぞれ示す。また、シミュレーションで用いた設定パラメータを表3.3に示している。

まず、従来よく用いられる0次外乱オブザーバと1次外乱オブザーバを比較した場合、各外乱オブザーバによる位相遅れの影響が推定外力の誤差に生じる影響について検討する。次に、動力学パラメータの慣性項と摩擦項に誤差を与え、それぞれの動力学パラメータの誤差に対して動的閾値の有効性と、パラメータの決定方法について検討する。

さらに、高速時動作、台形加速度パターンとS字加減速パターンを用いた場合の提案法の有効性についても、それぞれ検証した。

### 3.4.2 シミュレーションによる推定外力の誤差と提案する動的閾値についての検討

まず、動力学パラメータ誤差が無い状態のシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果はいずれも、(a) 負荷位置、(b) 外力トルク応答の比較、(c) 外力ジャーク信号と動的閾値を示している。外力トルク応答の比較では、外乱オブザーバと逆動力学計算による推定外力トル

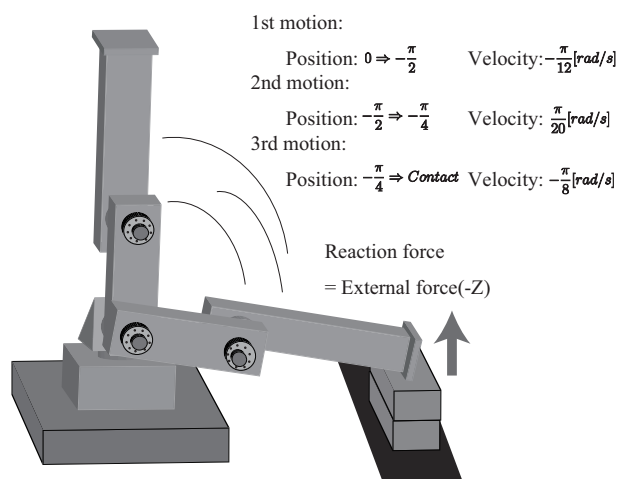


図 3.3: シミュレーションで想定した3自由度産業用ロボットの接触動作



クを赤線、実際に2軸に生じた外力トルクを青線で示している。また、外力ジャーク信号応答の結果では、(3.12)式、(3.14)式で示される位置指令と逆動力計算の慣性項から導出された閾値を赤線、推定外力トルクから求めたジャーク信号を青線で示している。

まず、図3.4と図3.5の比較より、1次外乱オブザーバは0次外乱オブザーバを用いる場合に比べて、過渡的な負荷トルクの変化を正確に推定できるため、推定外力の誤差の変化が極めて小さくなるのが分かる。このため、1次外乱オブザーバを用いることで $R_{cons}$ と $K_{jth}$ を低くすることができ、0次外乱オブザーバを用いる場合に比べて高感度に設計することができた。この結果、0次外乱オブザーバを用いた場合に環境との接触から検知するまで0.03sかかっているのに対して、1次外乱オブザーバを用いた場合には0.007sまで高速化され、1次外乱オブザーバが接触検知に有用であることを示している。

次に、パラメータ誤差を与えた場合のシミュレーション結果を示す。いずれのシミュレーションも、同一の条件・動作指令を与え、1次外乱オブザーバによる接触検知を行った結果である。慣性項に対して20%のパラメータ誤差を与えた場合の結果を図3.6、摩擦項に対して50%のパラメータ誤差を与えた場合の結果を図3.7にそれぞれ示す。

まず、慣性項に対してパラメータ誤差を与えた場合の結果を見てみると、図3.5に比べて、

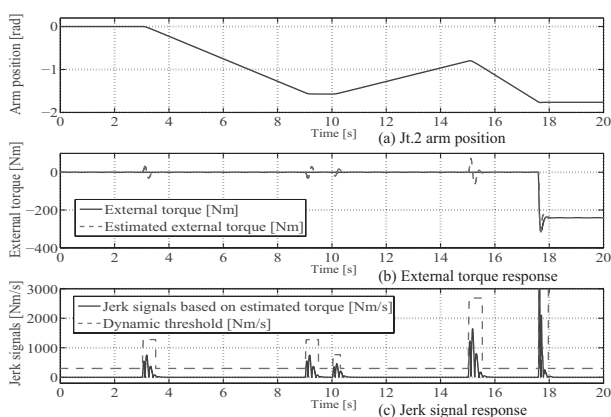


図3.4: 0次外乱オブザーバによって推定された外力ジャーク信号と動的閾値による接触検知のシミュレーション

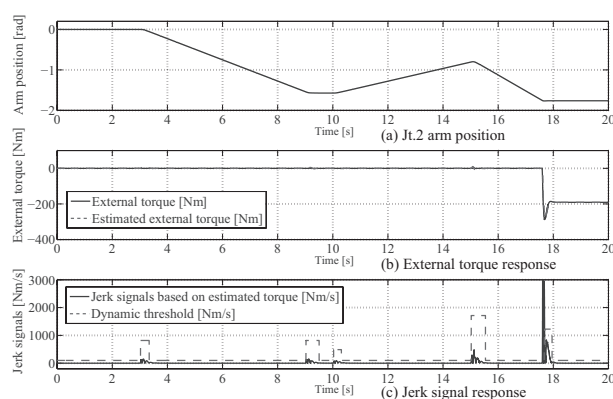


図3.5: 1次外乱オブザーバによって推定された外力ジャーク信号と動的閾値による接触検知のシミュレーション

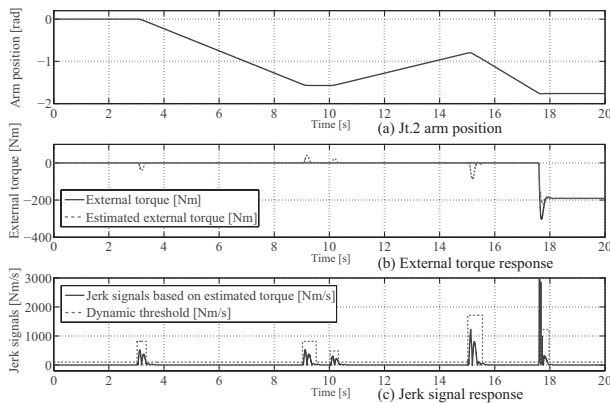


図 3.6: 動力学計算の慣性項にパラメータ誤差を与えた場合の接触検知シミュレーション ( $\Delta H = +0.2 \times H$ ).

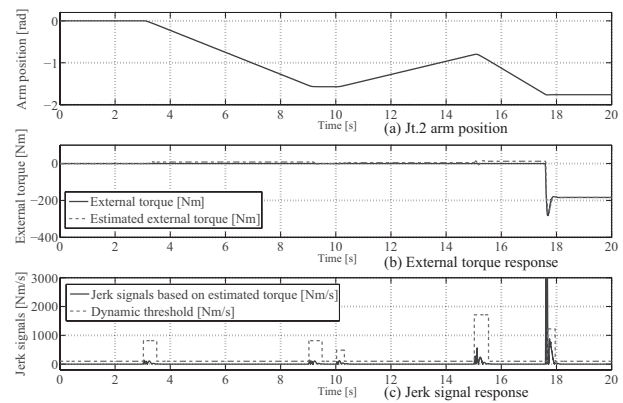


図 3.7: 動力学計算の粘性摩擦項にパラメータ誤差を与えた場合の接触検知シミュレーション ( $\Delta D = 0.5 \times D$ ).

推定外力の誤差が大きくなり、ジャーク信号についてもより大きく出ていることが分かる。つまり、実際に関節に生じる動力学トルクが逆動力学計算で求められる動力学トルクより大きい場合、加減速時に推定外力の誤差として生じてしまっている。本検討では  $K_{jth} = 30\%$  としたため、加減速動作時に推定外力の誤差が大きく生じて、動的な閾値は接触の誤検知を回避している。また、摩擦項に対してパラメータ誤差を与えた場合では、推定外力の誤差が速度に比例して生じていることが分かる。このため、速度に対して一定の推定外力の誤差は生じるが、外力ジャーク信号にはほとんど影響が表れない。摩擦の影響は時間変化すること、温度や潤滑油など様々な要因でも影響を受けるため、正確に同定することが極めて難しい。提案法を用いた接触検知では、このような影響があっても正確かつ高速に接触を検知できることが示された。

### 3.4.3 シミュレーションによるロボットの動作パターンに対する提案法の検証

まず、2軸を高速動作させた場合に、1軸および3軸のジャーク信号にどのような影響が生じるかシミュレーションによって検討を行った。シミュレーション結果図 3.8 は、アームを  $1.5\text{rad/s}$  (モータ速度およそ  $2300\text{RPM}$ ) の速度で高速に動作させた時の、1軸、3軸に対する他軸干渉を示している。1軸、3軸は一切動作させてない場合でも、高速動作中に2軸の加速

度が大きくなるのに合わせて、1軸、3軸にジャーク信号が生じていることが分かる。しかしながら、最低閾値をこれら干渉を考慮して設定されていれば、接触の誤検知を回避できることが、シミュレーション結果からも分かる。

次に、動作パターンを台形加速度とS字加減速を用いた場合を想定したシミュレーションを行った。台形加速度を用いた場合の結果を図3.9に、S字加減速を用いた場合の結果を図3.10にそれぞれ示す。いずれの場合も、 $K_{jth} = 0.3$ 、 $R_{cons} = 100\text{Nm/rad}$ としている。台形加速度を用いた場合の結果では加減速の開始時に加加速度が特に大きくなるため、ジャーク信号もS字加減速の場合に比べて大きく生じているが、閾値も大きく引き上げられていることが分かる。これに対して、S字加減速を用いた場合にはジャーク信号は小さくなっているが、引き上げられた閾値も大きく引き上げられていない。このため、先に述べたように、S字加減速など滑らかな動作を行わせる場合には、 $K_{jth}$  を大きめに設定する必要があると分かる。以上の結果

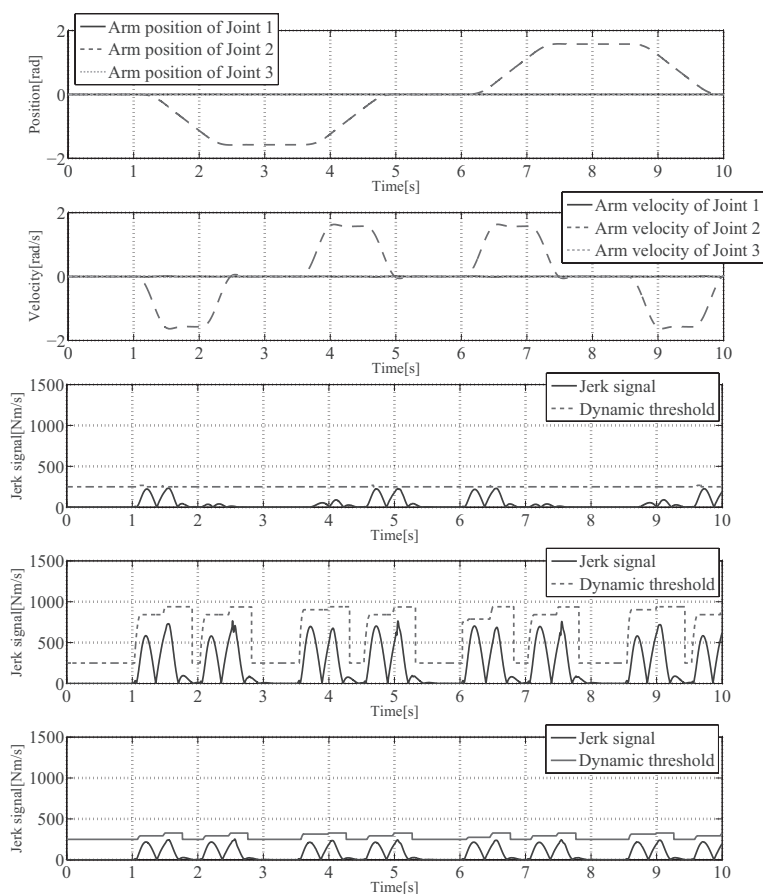


図 3.8: 2軸高速動作時の1、3軸への他軸干渉についてのシミュレーション結果

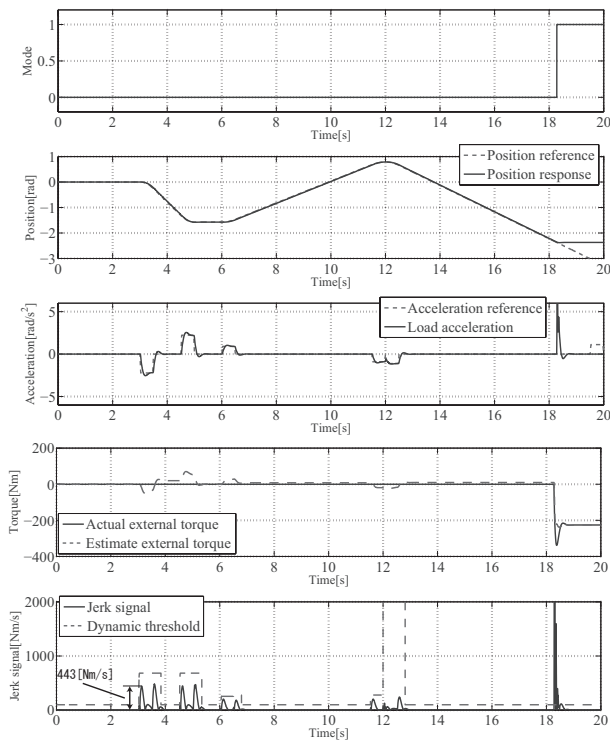


図 3.9: 台形加速度による速度制御  
のシミュレーション結果

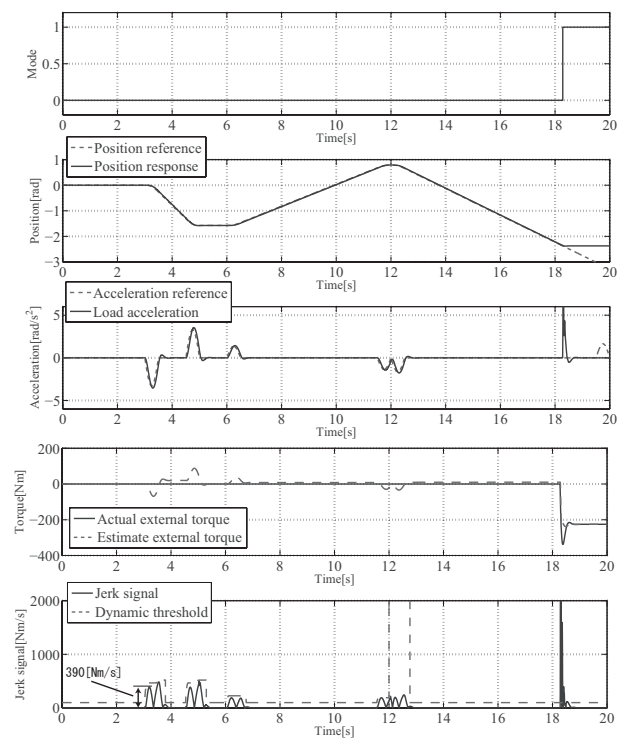


図 3.10: S字加速度による速度制御  
のシミュレーション結果

から、動作パターンに合わせて動的閾値の設定パラメータを適切に選択すれば、様々な状況に対応できることが分かる。

## 3.5 実機実験による検証

### 3.5.1 実験の方法

提案法の有効性を確かめるために、実際の産業用ロボットを用いて実機実験を行った。同定したノミナルなダイナミクスパラメータを表 3.4 に示す。実験は図 3.11 に示すように 3 軸の産業用ロボットを用いて、単軸動作による接触実験を行った。

ロボットの先端には、棒状のエンドエフェクタが取り付けられており、ロボットはエンドエフェクタを介してゴム板に接触する。本実験検討でゴム板を用いた理由は、より衝撃を吸収する環境の方が接触検知は難しくなるためである。接触速度は実験条件を示した表 3.5 の通り、

表 3.4: 3 軸の動力学パラメータ

パラメータ名	記号	設定値
負荷慣性 [Kgm <sup>2</sup> ]	<b>H</b>	3.71
クーロン摩擦 [Kgm <sup>2</sup> /s]	<b>F<sub>c</sub></b>	18.07
粘性摩擦 [Kgm <sup>2</sup> /s]	<b>F<sub>v</sub></b>	33.37
重力 [Nm]	<b>C</b>	46.00

表 3.5: 実験のセットアップ

パラメータ名	記号	設定値
オブザーバ極 [rad/s]	$P_{obs}$	-300
状態 FB 付き 速度 PI 設定極 [rad/s]	$P_1$	-(80+160i)
	$P_2$	-(80-160i)
	$P_3$	-(62+82i)
	$P_4$	-(62-82i)
	$P_5$	-75.45
3 軸接触速度 [rad/s]	$\omega_{cont}$	0.25
固定閾値 (従来法) [Nm/s]	$R_{conv}$	300
最低閾値 [Nm/s]	$R_{cons}$	200
慣性変動 [%]	$K_{jth}$	10
加速度閾値 [rad/s <sup>2</sup> ]	$\alpha_{th}$	0.001
推定外力帯域 [rad/s]	$\omega_{ceat}$	150
加速度 LPF [rad/s]	$\omega_{cacc}$	5

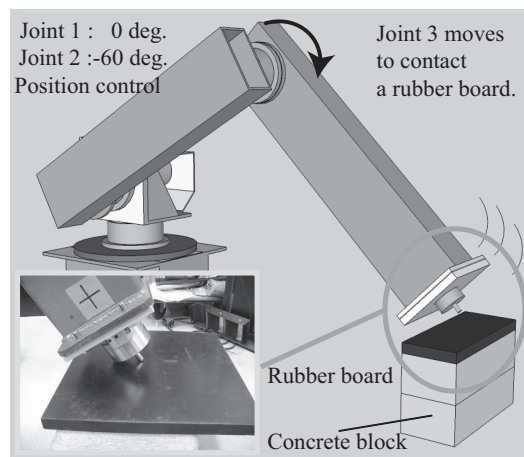


図 3.11: センサレス力制御による産業用ロボットの接触実験

0.25rad/s の回転速度で動作する。また、接触を検知した瞬間に短時間の速度制御によるブレーキを行ったあと、速度制御によって停止 (速度指令:  $\omega_{ref} = 0$ ) させている。

## 3.5.2 実験結果

まず始めに、従来法であるジャーク信号に一定の閾値を設定した場合の実験結果について、0次外乱オブザーバを用いた実験を図3.12、1次外乱オブザーバを用いた実験を図3.13にそれぞれ示す。まず、1次外乱オブザーバを用いた実験結果では、接触検知後に40 Nm (B点)の外力を受ける状態で停止しており、0次外乱オブザーバを用いた場合の53 Nm (A点)と比べて、速く停止したことが分かる。この結果から、1次外乱オブザーバを用いた場合の方が接触時の急峻に変化する衝撃力に対して高速に接触検知が可能であることが分かる。

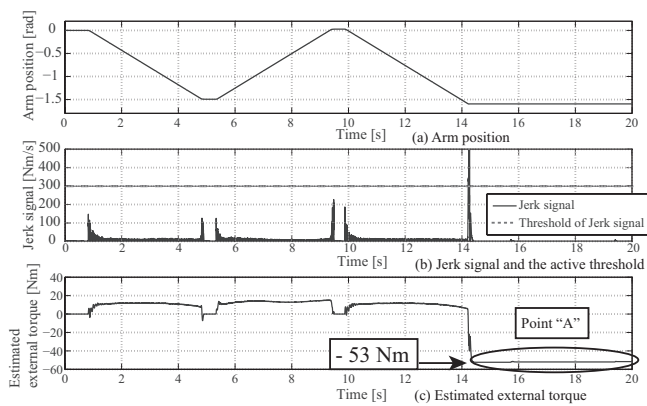


図 3.12: 0次外乱オブザーバによる従来の一定閾値を用いた接触検知の実験結果

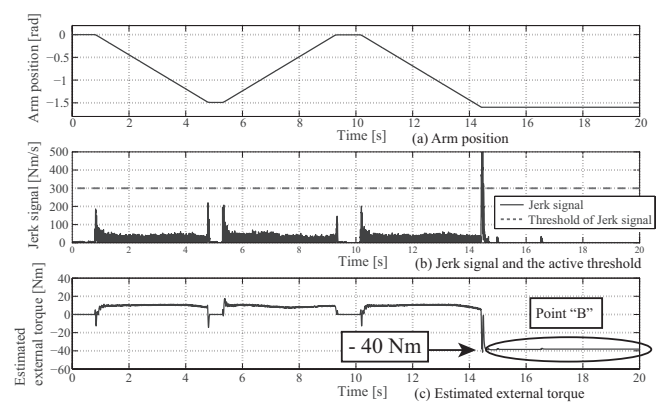


図 3.13: 1次外乱オブザーバによる従来の一定閾値を用いた接触検知の実験結果

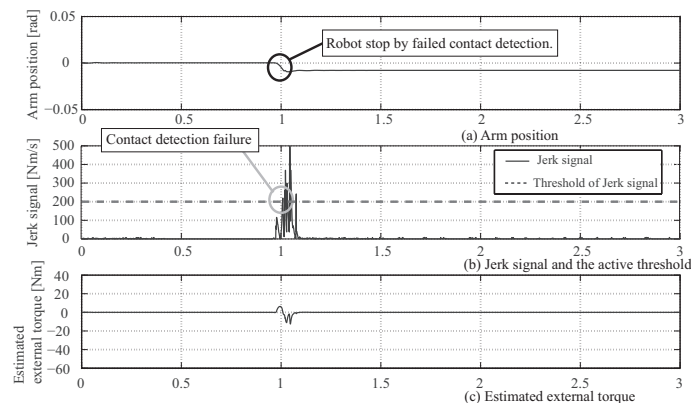


図 3.14: 閾値を下げた場合に生じた接触の誤検知

次に、接触検知を高速化させるためジャーク信号の閾値  $R_{conv} = 200\text{Nm/s}$  とした時の実験結果を図 3.14 に示す。結果から明らかなように、ロボットが動き出した瞬間にジャーク信号が閾値を超えてしまい、実際には接触していないにもかかわらず停止してしまっている。停止状態から動き出しまでは必要な始動トルクと静止摩擦の影響などにより、速度偏差が大きくなり加速度が急激に変化する。これによって、外乱オブザーバで推定した外力トルクの位相遅れ、実際の動力学トルクとの差によって、推定外力の誤差が大きく生じる。従って、ジャーク信号による接触検知では加減速動作に誤検知を生じる可能性が高くなることが分かる。

このような従来法の問題点に対して、提案法を適用した実験結果の図 3.15 では誤検知を回避しながら、加減速動作以外では低い閾値を適用することが可能になった。結果からも明らかであるように、ロボットの加速度指令に応じて閾値が一時的に引き上げられており、加減速時に生じたジャーク信号に対する接触の誤検知が回避されている。その上で、等速運動中に 14.25 秒で環境と接触しており、停止位置の C 点でおおよそ  $12\text{Nm}$  の外力トルクを受けた状態で停止している。実験結果の比較から、閾値を下げたことで接触の検知がより高速になったため、環

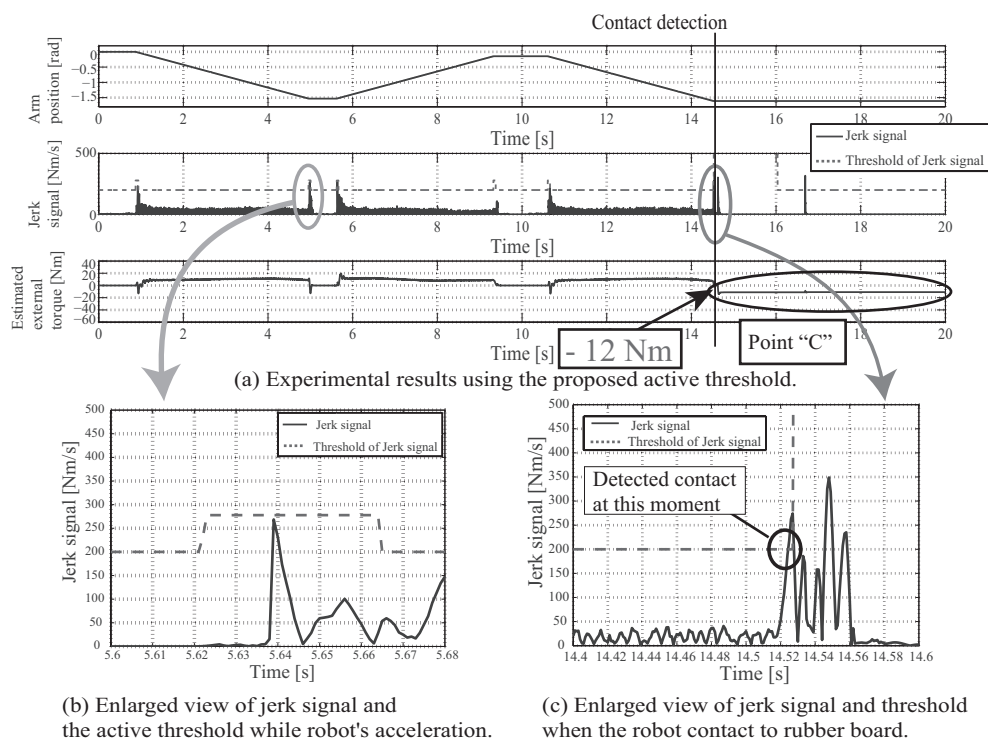


図 3.15: 動的な閾値を適用したジャーク信号による接触検知の実験結果

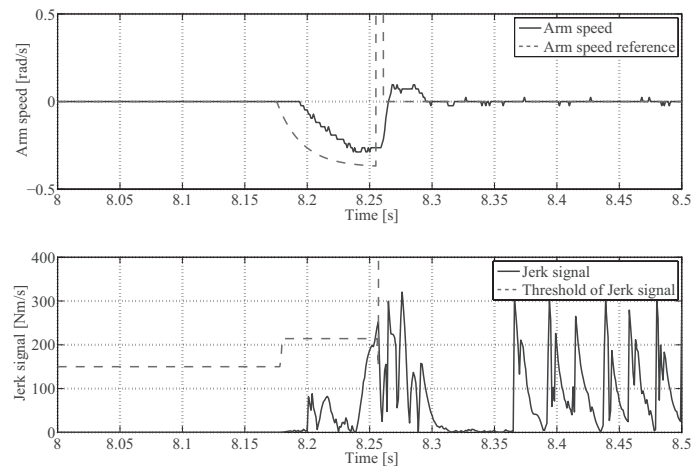


図 3.16: 加速中に閾値引き上げ中に環境と接触したときの接触検知の実験結果

境から受ける外力トルクが小さくなっていることが分かる。

また、図 3.16 では、加速動作時に閾値が引き上げられている状態でも、接触によって生じたジャーク信号は閾値を超えており、正確に接触検知が行われていることが分かる。本稿での検討では、比較的衝撃の小さいゴム板を環境として使用したが、より堅い環境に対する接触では、ジャーク信号の変化はより顕著なものとなる。従って、ジャーク信号を用いた接触検知の判定は、信頼性の高い方法であると言える。

### 3.6 まとめ

本章では、推定外力の時間微分である外力ジャーク信号と、慣性の影響で生じる外力ジャーク信号の推定誤差に着目した動的閾値を用いた力センサレス接触検知の手法について検討した。

従来の推定外力を用いる方法と比較して、外力ジャーク信号と動的閾値による方法は次のような利点がある。

- 動的閾値を用いることによって、電流指令が大きく変化するような高加減速な動作にも適用可能となった
- ロボットの姿勢や軌道を変更しても、動きに応じて閾値を変化させるため閾値の変更が不要



- 粘性摩擦の時間変化、クーロン摩擦の影響など、低域の推定外力の誤差から受ける影響が小さい

接触検知に外力ジャーク信号の動的に変化する閾値を用いることで、従来の電流指令の変化が大きくなる高加減速なモーションでも接触の検知が容易になった。高加減速なモーションでは瞬間的に電流指令が大きくなったり、また外乱オブザーバによる推定外力も推定誤差が大きくなることから、閾値を低くすると、高加減速なモーションで誤検知が頻発することになる。そこで、推定外力ではなく外力ジャーク信号を用いることで、クーロン摩擦や粘性摩擦の変化などの低域の推定外力の誤差に対しては反応が小さく、衝撃力のような急峻な外力を検知しやすくなる。さらには、加減速時の動的に変化する閾値を新たに提案することによって、高加減速のモーションに対しても適切な外力ジャーク信号の閾値を自動的に決めることができ、接触の誤検知を回避することができる。

提案法の有効性は、実際の産業用垂直多関節ロボットを用いたシミュレーションと実機実験によって確認され、従来の推定外力によって接触を検知する手法と比較して、検知感度を大きく落とすことなく、誤検知の少ない接触検知を可能にした。



## 第4章

# 動力学に基づくブレーキと力制御器の初期値更新によるスムーズな接触制御

### 4.1 はじめに

力制御についての検討は、ロボットの接触運動を実現する上で必要不可欠である。力制御は、環境との接触力を力センサ、または外乱オブザーバによる推定外力をフィードバックすることにより、フルクロードな制御系を構成して環境との接触運動を制御するものである。ツール先端の環境に対する接触力を精密に制御が可能のため、高精度な力の制御が必要な作業に適している。

2章では、I-P力コントローラが接触運動のモーション制御系として適していることを、インピーダンス制御等との比較から確認した。しかし、これらの検討でも明らかになったように、衝撃力による影響は依然として接触運動における課題である。衝撃力は極めて短時間で生じる急峻な反力であり、ロボットと環境の双方を損傷させる可能性がある。また、突発的に生じた衝撃力に対して力制御器が反応することによって、ロボットは接触状態を維持できなくなる場合がある。衝撃力は力制御を行う上で特異的な現象であり、通常のフィードバック制御系で理想的な応答を実現することは困難である。

そこで本章では、衝撃力の低減と力制御系による安定な接触動作の実現のために、衝撃力に

特化したモーション制御法について提案する。エネルギーの観点から考えれば、接触時のロボットの運動エネルギーが環境の弾性エネルギーに変化し、この際の環境の変形によって生じる反力が衝撃力であると定義することができる。つまり、反力が大きくなる前に高速なブレーキで運動エネルギーを低減することができれば衝撃を小さく抑えることができる。また、衝撃力に対する力制御器の応答は、I-P力コントローラを用いることで補償することができる。I-P力コントローラに直接切り替えた場合には、力の偏差はコントローラの積分器に蓄積され、ロボットは環境との接触状態を維持できなくなる。しかし、積分器の積算値を衝撃力の影響を相殺する初期値に入れ替えて力制御に切り替えることで、衝撃が生じる以前から安定した力制御が続いているように力制御器は機能する。

本章では、高速なトルク制御によるブレーキ手法とI-P力コントローラを用いた接触動作をベースとした積分器の初期値更新を組み合わせることで衝撃力の影響の小さいスムーズな接触運動を実現する。

なお、本章で使用している各記号については表4.1に示している。

表 4.1: 本文中で使用している各記号についての説明

記号	説明
$G_r$	推定外力ジャーク信号
$G_{th}$	外力ジャーク信号の動的閾値
$W_{imp}$	接触時の運動エネルギー
$W_{break}$	能動的なブレーキ制御によって入力されたエネルギー
$W_{env}$	接触によって環境反力に変化した運動エネルギー
$I_{break}$	ブレーキ制御の電流指令
$I_{limit}$	電流リミット
$K_{brC}$	電流リミットに対するブレーキ力の割合 ( $I_{brake} = K_{brC} \times I_{limit}$ )
$F_{ref}$	力指令
$\hat{F}_r$	球座標上の推定外力
$\dot{X}$	球座標上の速度
$\dot{X}_{ref}$	球座標上の力コントローラによって出力された速度指令
$X_{max}$	最大反力時の先端位置
$X_0$	接触時の先端位置
$W_{int}$	I-P 力制御系の積分値
$W_{Ffb}$	I-P 力制御系の力フィードバック値
$W_{Pfb}$	I-P 力制御系の位置および速度によるダンパフィードバック値

## 4.2 接触時の衝撃力を低減する運動エネルギーに基づくブレーキ制御

まず、ロボットと環境の接触時に生じる衝撃力を低減させるモーション制御について検討していく。これまでに述べたとおり、衝撃力は環境からの反力によってロボットの運動量が変化することで推定することができる。従って、関節トルクによってブレーキをかけ、環境に対する運動量を低減することによって、衝撃力の影響は小さくなることが分かる。

そこで、ロボットのモーション制御系において、通常最も高速に応答するトルク制御によるブレーキについて検討する。この方法では、図 4.2 で示されるように最大トルク制御でブレーキ動作を行い、各軸の慣性エネルギーを打ち消した時点で打ち切ることによって接触動作への移行に最適なブレーキ動作を行わせることができる。

まず、ロボットの動力学方程式に基づく慣性エネルギーは以下の式で計算される。

$$W_{imp[n]} = \frac{1}{2} |H_{[n]}(\theta_L) \omega_{L[n]}^2| \tag{4.1}$$

このとき、 $n$  はロボットの各関節に対応している。(4.1) 式で示されるように、各関節の慣性エネルギーは慣性項： $H_{[n]}(\theta_L)$  と負荷側速度によって計算することができるため、リアルタイムで計算することが可能である。これに対して、モータ側へ入力するエネルギーは、トルク及び

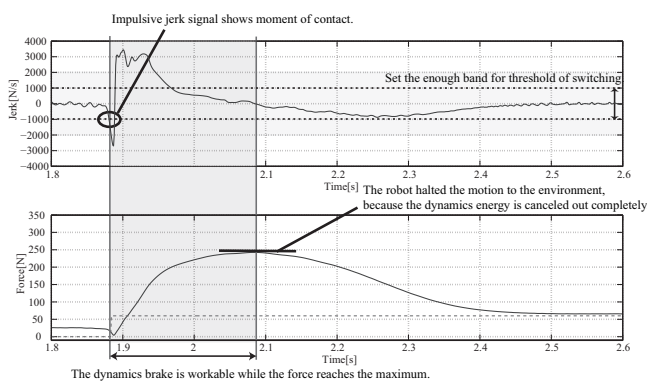


図 4.1: ジャーク信号を用いた接触の検知とブレーキのタイミング

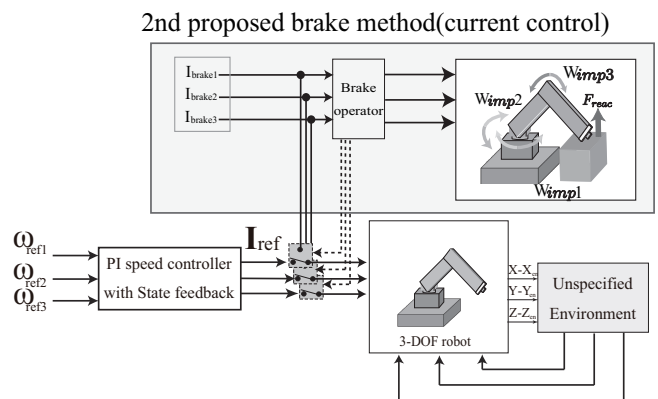


図 4.2: 動力学計算に基づくトルクブレーキのブロック線図

モータ速度から計算することが可能であり、(4.2) 式で示される。

$$W_{brake[n]} = \int |I_{brake[n]} K_{t[n]} \omega_{m[n]}| dt \quad (4.2)$$

ここで、 $K_{t[n]}$  は各軸のトルク定数を表している。また、環境との接触によって、各軸の運動エネルギーは環境との接触力に変化する。この変化分も、オブザーバによって推定された  $\hat{\tau}_L, \hat{\omega}_L$  を用いて (4.3) 式によって表すことができる。

$$W_{env[n]} = \int |\hat{\tau}_L[n] \hat{\omega}_L[n]| dt \quad (4.3)$$

これらの式から、ブレーキ動作の目的は  $W_{imp[n]} = 0$  にすることが目的であり、(4.1) 式、(4.2) 式、(4.3) 式より、(4.4) 式を定義する。

$$\begin{cases} I_{brake}[n] = Sgn(\hat{\omega}_L[n]) K_{brC}[n] I_{limit}[n] & : W_{imp[n]} > (W_{brake}[n] + W_{env}[n]) \\ I_{brake}[n] = 0 & : W_{imp[n]} \leq (W_{brake}[n] + W_{env}[n]) \end{cases} \quad (4.4)$$

このように、ロボットが環境と接触した際の慣性エネルギーに対して、モータ側でのエネルギー量を基準として各軸へのブレーキ入力を打ち切る。そのため、最大トルク制御による緩衝動作が過剰にならず、位置制御から力制御へのスムーズな移行を実現することができる。

本手法の利点は、ロボット自身の慣性エネルギーに着目してブレーキ動作を行うため、環境の特性について考慮する必要がない点である。この手法を用いることで、位置制御による動的なモーションから、力制御による静的なモーションへの移行を素早く行うことができる。

## 4.3 接触後の応答性を改善する力コントローラ積分器の初期値更新

### 4.3.1 球座標表現による作業空間に拡張した I-P 力制御系

作業空間上でツールを介した接触動作を行う場合には、作業に応じた適切な座標系を選択する必要がある。本章の検討では、ロボットのツール端を基準とした球座標を図 4.3 のように定義する。ツール先端で力制御を行うことを考えたとき、球座標を用いることで力ベクトルの方向とベクトルの大きさをそれぞれ別に制御することができるため、1 方向への力制御には都合

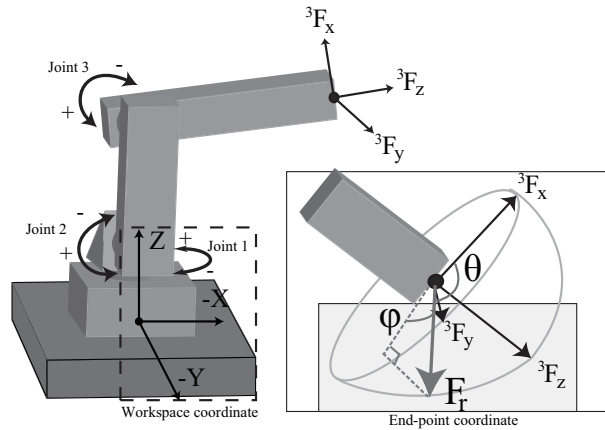


図 4.3: 3-DOF ロボットの先端に定義された球座標上の力ベクトル

が良い。また、力センサを備えていないロボットでも接触動作を可能にするため、力フィードバックは、反力指定オブザーバから推定した各軸の外力トルクを想定している。

反力推定オブザーバによって推定された外力トルクは、(4.5)式に従って作業空間上の外力ベクトルにそれぞれ変換される。

$${}^0\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{J}_{\text{aco}}^{-T}(\theta_L)\hat{\boldsymbol{\tau}} \quad (4.5)$$

次に、作業空間座標から手先座標系に直交変換する回転行列  ${}^3\mathbf{H}_0$  を適用することで、(4.6)式のように手先効果器を基準とした直交座標系を定義する。

$${}^3\hat{\mathbf{F}} = {}^3\mathbf{H}_0(\theta_L){}^0\hat{\mathbf{F}} \quad (4.6)$$

この座標は手先方向を Z 軸とした外力ベクトルであり、 ${}^3\mathbf{F} = [{}^3F_x, {}^3F_y, {}^3F_z]$  で表される。しかしながら、直交座標系で手先効果器の力制御を行った場合、力コントローラが各方向必要となるうえ、複数の力ベクトルを合成する際に相互干渉を考慮する必要がある。そこで、先端座標系として球座標を定義する。

球座標では、ベクトルの長さと、ベクトルの向きを二つの回転角で別々に決定することができるため、手先効果器の力制御を扱う上で、力の強さと向きを独立に制御することができる。先端座標系の外力ベクトルから以下の式のように変換される。



$$\begin{bmatrix} \hat{F}_r \\ \theta_{sph} \\ \varphi_{sph} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{{}^3\hat{F}_X^2 + {}^3\hat{F}_Y^2 + {}^3\hat{F}_Z^2} \\ \arctan\left(\frac{\sqrt{{}^3\hat{F}_X^2 + {}^3\hat{F}_Y^2}}{{}^3\hat{F}_Z}\right) \\ \arctan\left(\frac{{}^3\hat{F}_Y}{{}^3\hat{F}_X}\right) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

(4.7) 式で示されるように、球座標系では力の強さを示すベクトル  $\hat{F}_r$  と、力ベクトルの方向を Z-X 平面の回転角  $\theta_{sph}$ 、Z-Y 平面の回転角  $\varphi_{sph}$  によって決定する。このため、 $\hat{F}_r$  を先端の球座標系に変換して力コントローラを適用することで、ツール端の接触力を制御することができる。力コントローラの出力は力ベクトル方向に対する速度指令として扱い、外力フィードバック  $\hat{F}_r$  と逆方向に座標変換を順次行う必要がある。まず、次式によって先端直交座標の速度指令に変換される。

$$\begin{bmatrix} {}^3\dot{X}_x \\ {}^3\dot{X}_y \\ {}^3\dot{X}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{r}\sin\theta_r \cos\varphi_r \\ \dot{r}\sin\theta_r \sin\varphi_r \\ \dot{r}\cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

(4.8) 式で示されるように Z-X 平面の回転角  $\theta_r$ 、Z-Y 平面の回転角  $\varphi_r$  を設定することで、力ベクトル方向を任意に決定することができる。同様に球座標を用いた力制御、接触動作、把持動作なども数多く提案されている。力コントローラの出力は、先端直交座標、作業空間座標の順に変換され、各軸に対する速度指令を生成する。この速度指令に対して、先述した状態フィードバック付き PI 速度コントローラによって各軸独立に制御されることで、先端効果器の力制御を行わせる。

以上のように、センサレス I-P 力制御による力ベクトル  $\hat{F}_r$  の強さを制御し、方向は速度指令への変換時に指定することで、それぞれを独立させることができる。これによって、先述した I-P 力コントローラの積分器を初期値更新した場合でも、直交座標など複数方向の力制御を行う場合のように、相互干渉を考慮する必要がない。

### 4.3.2 衝撃力積をキャンセルする I-P 力制御器の積分器初期値更新

衝撃力に対する力コントローラの応答は、接触時のみに限らず、その後の接触動作に対しても悪影響を生じる。接触動作における力制御では、非接触状態で常に外力が 0 になるため、正確に動きを制御することができない。従って、力コントローラによる衝撃力に対する過剰な応答を抑制し、接触状態を保つことによって、高速な接触動作への移行が実現できる。I-P 力コントローラの場合の衝撃力に対する応答は (4.9) 式のように表される。

$$\begin{aligned}
 W_{int}(k) &= (F_{ref} - \hat{F}_r) \times K_{fs2} + W_{int}(k-1) \\
 W_{Ffb}(k) &= \hat{F}_r \times K_{fs3} \\
 W_{Pfb}(k) &= (\theta_{max} - \theta_0) \times K_{fsp1} + \dot{X} \times K_{fsd1} \\
 \dot{X}_{ref}(k) &= W_{int}(k) - W_{Ffb}(k) - W_{Pfb}(k)
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

(2.37) 式、(2.38) 式で表されるように、力コントローラの応答性は外力  $\hat{F}_r$  と、積分ゲイン  $K_{fs2}$  に大きく影響される。このため、十分な応答性を得るために  $K_{fs2}$  を大きくする、または接触時の速度が速いほど衝撃力のピークが大きくなるために、衝撃力に対する応答はより大きくなってしまう。

$$\begin{aligned}
 W_{int}(k) - W_{Ffb}(k) - W_{Pfb}(k) &= \dot{X}_{ref}(k) = 0 \\
 W_{int}(\infty) &= F_{ref} \times K_{fs3} + X_0 \times K_{fsD1}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

そこで、力コントローラの応答性を保ち、なおかつ速い接触速度でも静的な接触動作への移行を実現するために、力コントローラの積分器を初期値更新する方法を提案する。初期値更新でセットされる値は、衝撃力の大きさと力指令、また外力ピーク時の位置と接触位置から計算され、衝撃力に対する I-P 力コントローラの応答を抑制する。定常状態は、 $\hat{F}_r = F_{ref}$  とすることで計算が可能であり、積分器の値  $W_{int}$  とダンパである  $W_{Ffb}, W_{Pfb}$  は釣り合った状態となる。

これに対して、ロボットの慣性エネルギーは動力学ブレーキで消費されるとともに、環境からの反力に変化するため、動力学ブレーキ終了時の外力  $F_{max}$  が、接触動作時に最大の外力となる。この場合も、積分器の値は (4.10) 式と同様に求めることができる。

$$W_{imp} = (F_{ref} - F_{max}) \times K_{fs3} + (X_0 - X_{max}) \times K_{fsp1} \quad (4.11)$$

ここで、外力の最大値を  $F_{max}$ 、位置を  $X_{max}$  とそれぞれ置いている。(4.10) 式、(4.11) 式より、以下の式で積分器の初期値を計算し、力制御切り替え時に積分の初期値更新を行う。

$$W_{int} = \frac{\{(F_{max} - F_{ref})K_{fs3} + (X_{max} - X_0)K_{fsp1}\}}{2} \quad (4.12)$$

積分器の初期値更新の有効性を確かめるために、事前に行った単軸動作による検証実験の結果を図 4.4、図 4.5 にそれぞれ示す。なお、図中の点線はトルク指令  $\tau_{ref}$  であり、接触時に  $\tau_{ref} = 20[\text{Nm}]$  としている。この実験では、同じ角速度でアームの先端部分を環境に接触させ、I-P カントローラによって一定のトルク制御を行い、図 4.4 は直接力制御へ切り替えた場合、図 4.5 は積分器の初期値更新を行った場合の結果を示している。

これらの実験結果が示すように、力制御切り替え時における積分器の初期値が接触動作に大きく影響を与えていることが分かる。図 4.4 では、外力の推定誤差、および接触時の衝撃力による偏差が積算され、環境から離れるように速度制御されている。積分器に蓄積された力偏差は、ロボットと環境の接触で生じた力積と考えることができ、I-P カントローラの動作に少なからず影響する。

これに対して図 4.5 では、(4.12) 式に従って積分器の初期値が設定され、この結果接触を維

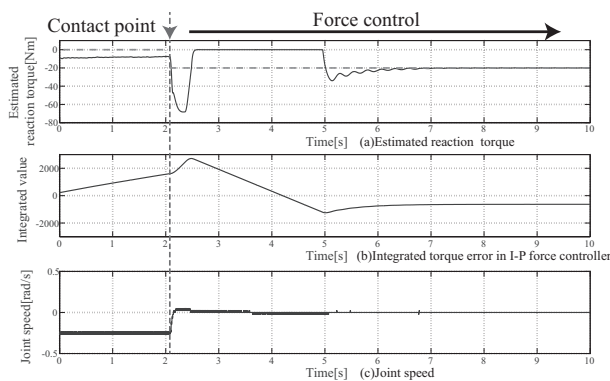


図 4.4: 積分器の初期値更新を行わず I-P 力制御に切り替える接触動作実験

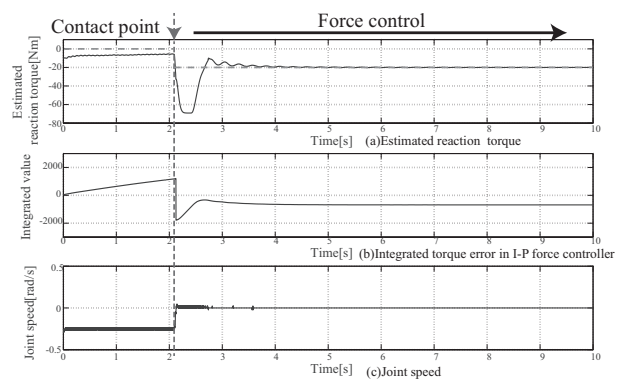


図 4.5: 積分器の初期値更新を行って I-P 力制御に切り替える接触動作実験

持したまま力制御に移行したことが示されている。以上の検証からも分かるように、環境との接触動作では、ロボットの慣性エネルギーによる影響で、大きく力偏差がある状態で力制御へと切り替えられる。さらに、非接触状態では力偏差は一定となってしまうため、力コントローラの応答によって環境から離れてしまうと再び接触するまでに相応の時間がかかってしまう。提案手法である積分器の初期値更新は、衝撃力による力偏差の影響を相殺し、なおかつ安定した接触状態への移行時間を短縮する。

### 4.3.3 接触動作の連続した制御プロセス

これまでに検討してきたトルク制御によるブレーキ制御と I-P カコントローラの積分器の初期値更新を組み合わせた、提案法のブロック線図を図 4.7 に示す。スムーズな接触動作への移行を目的としたモーションコントロールは、図 4.6 に示すフローチャートに従って、外力ジャークによる接触検出、動力学ブレーキ、積分器の初期値更新の順に行われる。ブレーキに必要な慣性エネルギーの計算はリアルタイムで行われており、モータへの入力エネルギーから各関節のブレーキ時間を接触の検知と同時に決定する。ブレーキ完了後に、積分器の初期値更新を行った I-P カコントローラに切り替えられ、位置制御による接触から安定した力制御による接触動作へと素早く切り替える。

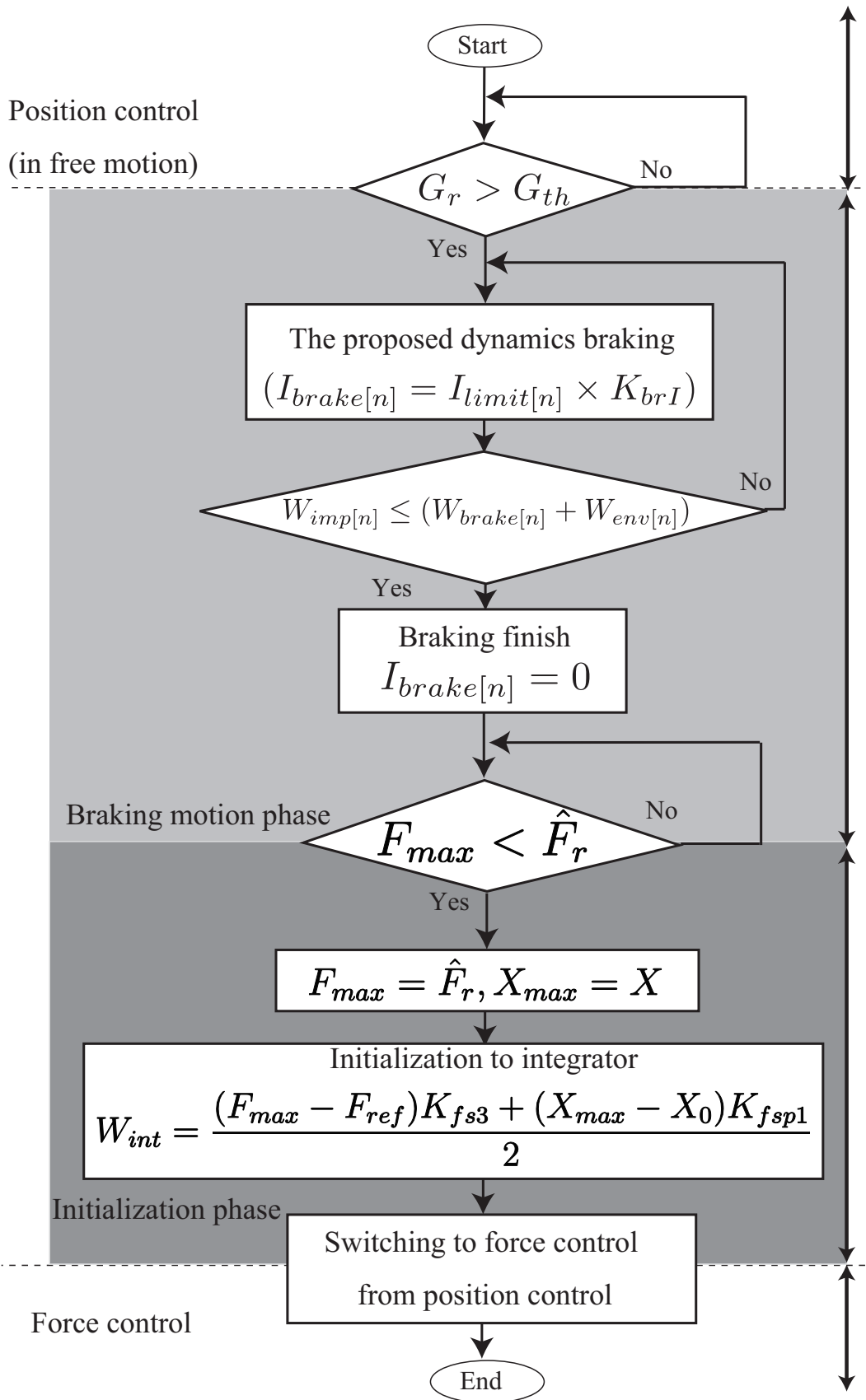


図 4.6: スムーズな接触動作を実現する提案法のフローチャート

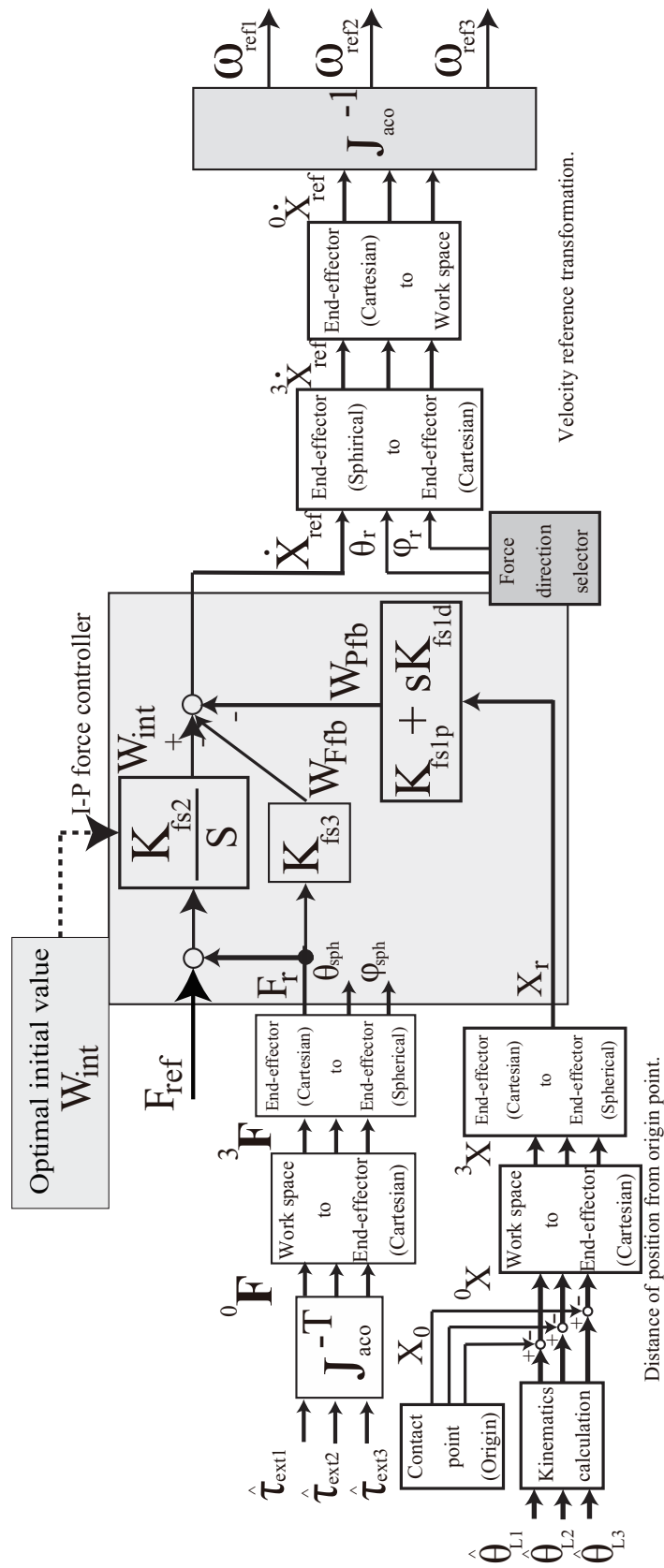


図 4.7: 衝撃力の影響を考慮した球座標ベース I-P 力制御系のブロック線図

## 4.4 実機実験による検証

### 4.4.1 実験方法

提案したモーション制御法による接触動作を実機実験によって検証する。実験システムの外観図を図 4.8 に、実験で用いた設定値を表 4.2 にそれぞれ示す。

この実験では、床面に設置された環境に対して、ロボットを上方から垂直に接触させ、位置制御から力制御へ直接切り替えた場合と、本論文の提案法による切り替えを用いた場合の動作を比較する。ただし、接触検知の方法については、いずれも外力ジャーク信号を用いた切り替えを行う。接触させる環境は、剛性の高いとしてコンクリートブロック、剛性の低い環境として厚さ 20[mm] の硬質ゴム板を使用し、ロボットは先端に取り付けられたジュラルミン製のエンドエフェクタを介して接触する。なお、いずれの環境を用いる場合も、同一の制御系によって実験を行う。

また、検証を行うために、ワコーテック社製 6 軸力センサ "WDF-6A100-2-A"、及び小野測器社製加速度センサ "NP-3576N10" を使用している。力センサは図 4.8 に示すように、エン

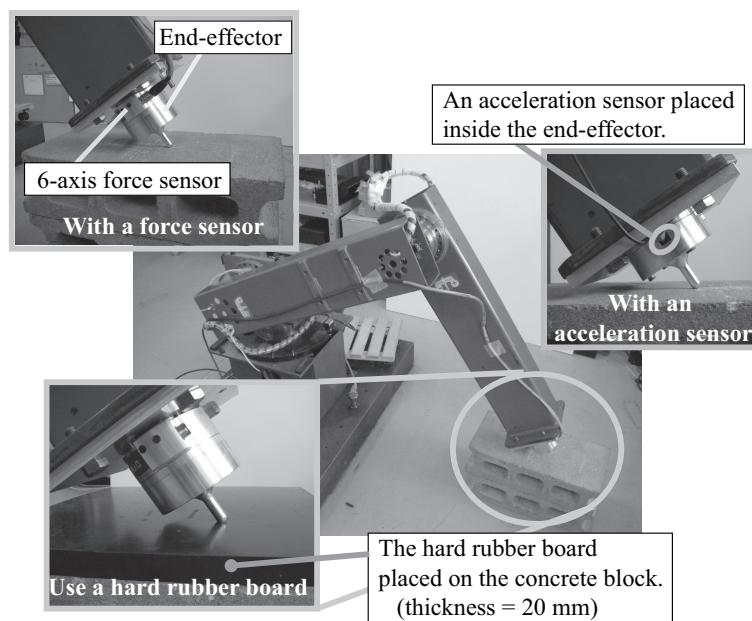


図 4.8: 3 自由度産業用ロボットによる実験システム

表 4.2: 接触動作実験のセットアップ

説明	記号	パラメータ値
オブザーバの設定極 [rad/s]	$g_{obs}$	-300(重根)
力指令 [N]	$F_{ref}$	40
Z 軸方向の力ベクトル [rad]	$\theta_{fc}$	$0.78(\pi/4)$
X 軸方向の力ベクトル [rad]	$\phi_{fc}$	$3.14(\pi)$
接触検知に用いたジャーク信号の閾値レベル [N/s]	$G_{th}$	1000
電流リミットに対するブレーキカゲイン	$K_{brD}$	1.0
ロボットの接触速度 [mm/s]	$\dot{X}_{contact}$	250

ドエフェクタとロボットの間に取り付けて用いる。測定された外力データは、先端の Z 軸方向と X 軸方向の外力として合成し、球座標上の推定外力と比較を行う。加速度センサはアルミプレート上に接着剤で固定されており、エンドエフェクタを上に乗せることで、接触時の先端加速度を計測する。測定された加速度は、推定外力の時間変化と比較を行い、接触時におけるロボットのモーションについて考察を行う。

いずれの実験も、接触時のエンドエフェクタ先端部速度が 250[mm/s] になるよう制御されており、接触時の位置制御から力制御への切り替えによって接触動作を行い、以上の実験結果を通して提案法の有効性を検証する。

#### 4.4.2 力応答の比較によるスムーズな接触動作の検証

実験結果を示しながら、提案法の有効性について考察する。これらの検証では、スムーズな接触の難しいコンクリートブロックに対する接触実験の実験結果を用いている。なお、図 4.9、図 4.10 の図中に示されている点線は、力の指令  $F_{ref}$  であり、0 から立ち上がった時点が力制御に切り替わるタイミングを示している。まず、力センサを用いた実機実験の結果から示す。位置制御から力制御へ直接切り替えた場合の結果を図 4.9 に、提案法の動力学ブレーキと積分器の初期値更新を用いた結果を図 4.10 にそれぞれ示す。いずれも、上から推定外力の時間変化、力センサによる測定外力の順に示している。まず、図 4.9 では、接触から 4s で静的な力制



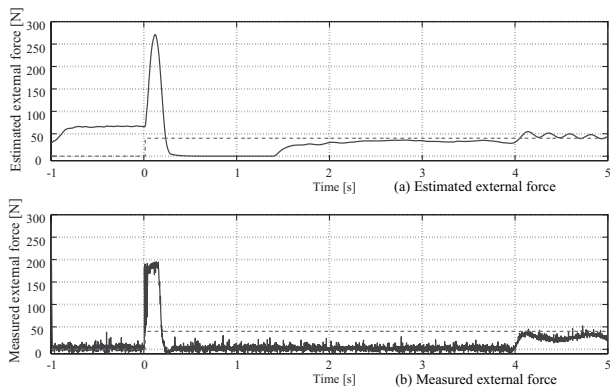


図 4.9: 位置制御から力制御へ直接切り替えた場合の接触動作実験 (コンクリート): (a) 推定外力 (b) 測定外力

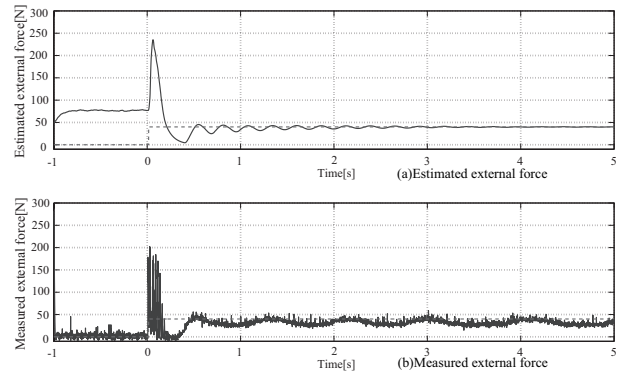


図 4.10: 位置制御から力制御へ提案法を用いて切り替えた場合の接触動作実験 (コンクリート): (a) 推定外力 (b) 測定外力

御に移行していることが確認できる。

この間、接触から 0.2s 後には環境から離れてしまっており、再び接触するまでに 3.8s 程度非接触状態にあったことが力センサの測定結果から分かる。推定外力の結果からは、最初の接触から 1.5s 付近で再接触しているように見られるが、この部分は慣性と摩擦に起因する推定誤差によるものと考えられる。これに対して、図 4.10 と比較してみると、提案法によって力制御への移行時間が大幅に短縮されたことを示している。直接切り替えた場合と同様に 0.2s 後に一瞬離れてしまっているが、およそ 0.4s 後には再び接触していることが確認でき、接触から 0.6s 程度で静的な力制御による接触動作へ移行している。

衝撃による力積の影響を消し、代わりに力指令に素早く収束するための初期値を積分器にセットすることによって、接触後のモーションは大きく改善された。また、提案法を用いた結果図 4.10 では力センサの結果に振動的な応答を確認できるが、これは最大トルクでブレーキをかけることによって 2、3 軸における減速機内部のねじれによる振動が生じたものである。以上の結果から、ブレーキ終了時から力制御への反力の過渡応答と、力制御の平衡状態を考慮した初期値によって、力制御への移行時間が大幅に短縮され、スムーズな接触動作が実現された。

また、剛性の違いによる応答性の違いを検証するため、硬質ゴム板に対する接触実験の結果図 4.11 を示す。図中では、(a) 位置制御から力制御へ直接切り替えた場合、(b) 提案法を用いて

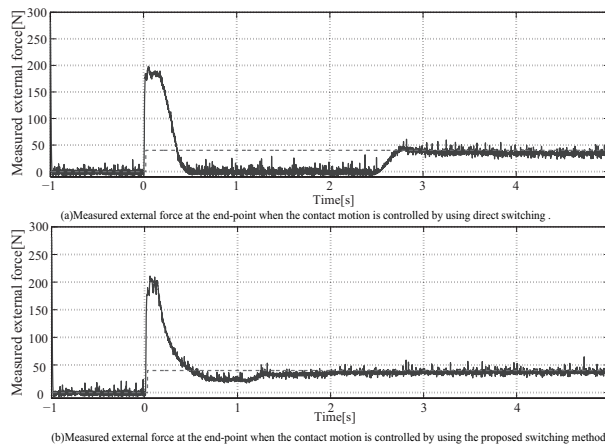


図 4.11: 接触動作実験の外力応答結果の比較 (ゴム板): (a)I-P 力制御に直接切り替えた実験結果 (b) 提案法を用いて I-P 力制御に切り替え実験結果

切り替えた場合をそれぞれ示している。これらの比較からも、提案法を用いて切り替えた場合に、安定した接触動作への移行時間が大幅に短縮されたことが分かる。従って、極端に剛性が異なる場合を除いて、I-P カコントローラのゲインは想定される環境の特性に合わせれば対応が可能であることを示した。また、ジャーク信号による切り替えも十分に余裕があり、積分器の初期値、動力学ブレーキについても、環境の剛性によって影響を受けない手法であるため、多少の環境剛性の変化に対しては有効性は保たれる。以上の結果から、ロボットが高速で環境と衝突した場合でも、本論文で提案した切り替え法を用いてセンサレス I-P 力制御へ切り替えることで、スムーズに接触動作への移行が行われることが確認された。

#### 4.4.3 接触時加速度の比較による接触動作の検証

次に、接触時のモーシオンについて、加速度センサを用いた結果からも考察を行う。カセンサを用いた力応答の比較では、位置制御から力制御への切り替えがスムーズに行われたことを示したが、動力学ブレーキの有効性についてはカセンサの応答性が十分でないと考えられるために結論が得られなかった。そこで、ロボット先端の加速度応答から、接触時の瞬時的なモーシオンについて検証する。

位置制御から力制御へ直接切り替えた場合の結果を図 4.12 に、提案法を用いて切り替えた

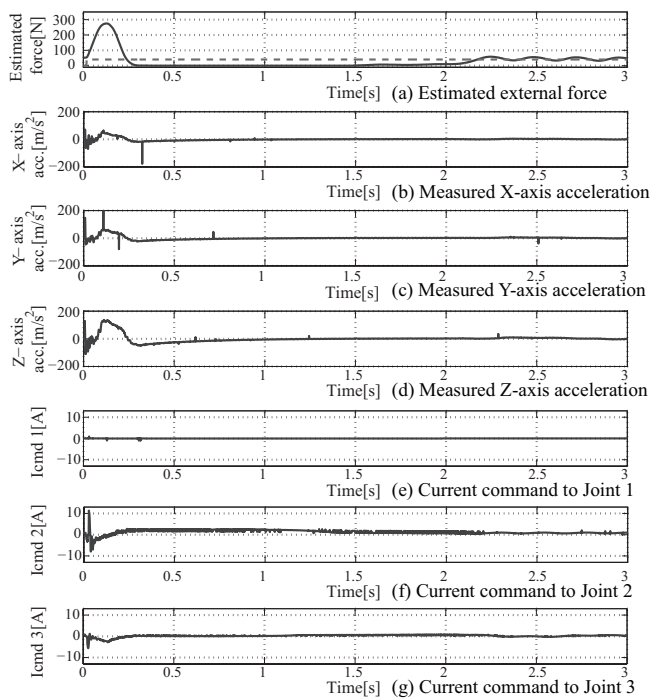


図 4.12: I-P 力制御に直接切り替える接触動作実験の加速度 (コンクリート): (a) 推定外力 (b)-(d) 先端 X 方向、Y 方向、Z 方向の加速度測定結果 (e)-(g) 1 軸、2 軸、3 軸の電流指令

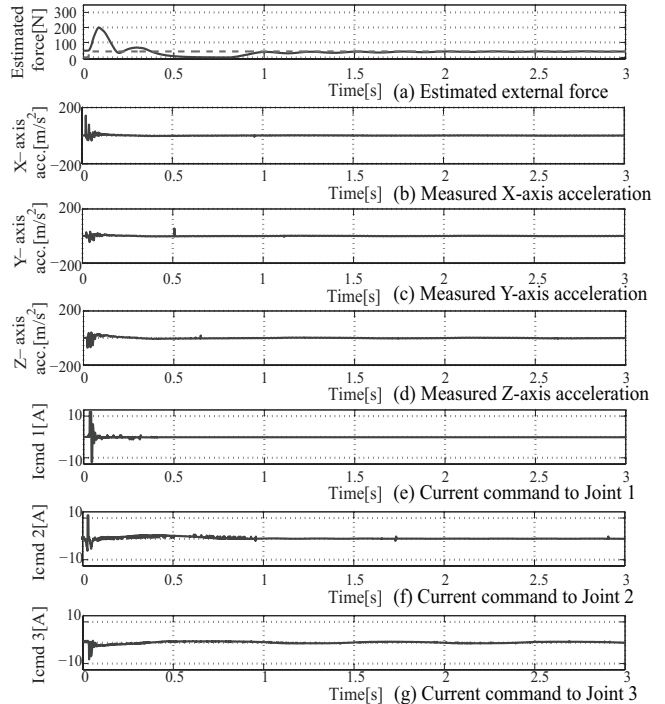


図 4.13: I-P 力制御に提案法を用いて切り替える接触動作実験の加速度 (コンクリート): (a) 推定外力 (b)-(d) 先端 X 方向、Y 方向、Z 方向の加速度測定結果 (e)-(g) 1 軸、2 軸、3 軸の電流指令

場合の結果を図 4.13 にそれぞれ示す。これらのグラフは、上から推定外力の時間変化、先端部分での X,Y,Z 方向加速度、そして各軸の電流指令の順に示している。ここで、各値の座標定義は図 4.3 に従う。まず、位置制御から力制御へ切り替えた場合の結果図 4.12 では、慣性による影響を推察することができる。接触した瞬間に生じた衝撃力による影響は、急峻な加速度応答に表れている。しかし、ロボット自身の慣性エネルギーが残っているために、環境の方向に向かってロボットは動き続けており、これに伴って外力応答も増加している様子が分かる。接触から 0.25s で、逆方向への加速度が生じており、力制御によるモーションに移行したことが分かる。これに対して、提案法の動力学ブレーキでは、図 4.13 で示されるように、接触後に生じる環境方向の加速度が非常に小さくなっている。従って、外力ジャークを用いて接触検知し

た直後に動力学ブレーキを用いることによって、各軸の慣性エネルギーが効果的に打ち消されている。また、慣性エネルギーは接触時の速度とロボット自身が持つ質量に依存するものであり、接触直後の加速度がほぼ0であることから、動力学ブレーキはロボットを停止するために、過不足のないブレーキを実施したことになる。これは、本論文が提案する位置制御から力制御への移行をスムーズに移行させるために最適なブレーキであることを示しており、先述した力センサによる力制御への切り替えがスムーズに行われたことを併せて、提案法による産業用ロボットの接触動作は定量的に有効性が確認された。

## 4.5 まとめ

本章では、力制御による接触運動のモーション制御について、衝撃力に特化したモーション制御とI-P力コントローラを用いたスムーズな接触動作のモーション制御法を提案した。

動力学ブレーキは、ロボットのモーション制御系で最も高速なトルク制御によって、衝撃力の原因となる運動エネルギーを効果的に低減する。また、接触時のロボットの運動エネルギーに対する各軸のとの比較によってトルク指令の時間を決めることで、接触動作への影響を生じない。さらに、I-P力制御系による接触動作のモーション制御は、I-P力コントローラの積分器に積算された衝撃力の影響を相殺することによって、安定した力制御に短時間で移行する接触運動を実現した。力制御が定常状態にあることを想定した積分器の積算値と衝撃力の最大値から初期値は計算され、力制御による安定した接触動作への移行時間を大幅に短縮する。

提案法の有効性を検証するために、3自由度の垂直多関節ロボットを用いた実機実験を実施した。この実機実験では、力センサと加速度センサを用いて接触時の反力と衝撃加速度の測定を行っている。これらの実験結果から、動力学ブレーキによって衝撃加速度は低減され、力制御による接触動作への移行時間も大幅に短縮された。

以上の結果から、本提案法を用いることで、従来の力制御による手法では難しかった衝撃力そのものの低減とスムーズな接触運動への移行の両立を実現した。本手法は、研磨や切削などの接触を伴う作業のモーション制御において、タスク時間の短縮、衝撃による環境やロボット

の破損を防ぐことが期待できる。



## 第5章

# 作業空間の環境に対する衝撃力をリミットする動的加速度閾値

### 5.1 はじめに

ロボットと環境が接触した場合に生じる衝撃力は、環境を破損させたり、ロボットを損傷させる原因になる。衝撃力の原因はロボットの運動エネルギーと駆動力に起因するため、低速でロボットを動作させることで接触した場合の衝撃力を小さくすることは可能である。しかしながら、多関節ロボットでは、姿勢の変化によってロボットの各軸慣性が変化するため、同じ速度でも接触した際の衝撃力が変化することも考慮しなければならない。そこで、本章では衝撃力の上限を設けることによって、ロボットの動きに合わせて変化する動的な加速度閾値について述べる。

本章で提案するモーション制御法のもう一つの特徴として、衝撃力をリミットするモーション制御の実現のために加速度をベースとしている点がある。加速度をベースに用いることによって、衝撃力についての検討に必要な速度と力を加速度次元で統一的に扱うことができる。本章で提案するモーション制御法は、作業空間上で加速度をベースとするモーション制御器を構成し、ロボットの動作に合わせてリアルタイムに変化する加速度閾値によってロボットの先端加速度を制限する。

まず、単純な物理モデルによる接触運動の運動方程式について検討し、慣性体の速度と推進力によって衝撃力が推定できることを示す。次に、ロボットの運動エネルギーに基づく等価質量を定義することによって単純な物理モデルと同様に衝撃力を推定し、先端加速度の上限をリアルタイムに制御することによって、設定した衝撃力を超えないモーション制御法を実現する。

## 5.2 接触運動の運動方程式と衝撃力の解析

### 5.2.1 慣性体の接触で生じる衝撃力

慣性体が一定の力によって運動しているとき、慣性体がフックの法則で表わされる弾性体と接触する物理モデルは図 5.1 のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} F_{reac}(t) &= K_{en} x(t) \\ M \frac{d^2}{dt^2} x(t) &= F_{tp} - F_{reac}(t) \end{aligned} \quad (5.1)$$

また、(5.1) 式の一般解は以下のようになる。

$$x(t) = C_1 \sin\left(\frac{\sqrt{K_{en}}}{\sqrt{M}} t\right) + C_2 \cos\left(\frac{\sqrt{K_{en}}}{\sqrt{M}} t\right) + \frac{F_{tp}}{K_{en}} \quad (5.2)$$

(5.2) 式からも示されるように、接触時のロボットの運動は加速度を時間積分した速度、また速度を時間積分した位置の変化として表わされている。このことから、速度と位置の初期条件を

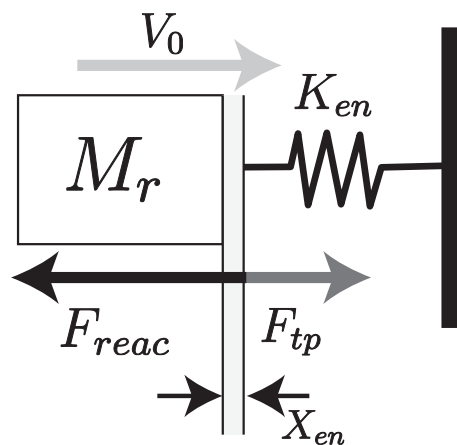


図 5.1: 接触運動の運動方程式



与えることによって、慣性体の接触運動を数値解析することができる。ここで、初期条件として  $x(0) = 0, V(0) = V_0$  とすると、ロボットが環境に接触したときの状況と等価になり、特殊解は次式のように示すことができる。

$$C_1 = \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{K_{en}}} V_0, \quad C_2 = -\frac{F_{tp}}{K_{en}} \quad (5.3)$$

衝撃力が最大となるのは環境の変位  $x(t)$  が最大になる時点であり、(5.2) 式、(5.3) 式より、次式のように運動方程式の係数  $C_1$ 、 $C_2$  の絶対値と、慣性体の推進力によって導出することができる。

$$F_{max} = K_{en} \sqrt{\frac{M}{K_{en}} V_0^2 + \frac{F_{tp}^2}{K_{en}^2}} + F_{tp} \quad (5.4)$$

これまで、単純な慣性体として解析を進めてきたが、ロボットも慣性体として扱うことで、(5.4) 式で示すように衝撃力の最大値  $F_{max}$  を導出することができる。従って、ロボットと環境の接触時に、ロボットの慣性エネルギーによる影響とアクチュエータの駆動力を考慮することによって、ロボットが環境に接触したとしても、想定した衝撃力を超えない動作が可能になる。すなわち、ロボット駆動力が  $F_{tp}$  で制限されることになる。制限された駆動力を  $F_{lim}$  とすると、 $F_{lim} = F_{tp}$  となるべきである。

慣性エネルギーの大きさはロボットの現在速度と慣性モーメントに依存し、ロボットの運動速度はアクチュエータの駆動力によって変化する。現在のロボットの速度が  $V_{tp}$  としたときの駆動力上限値は (5.4) 式より  $F_{lim} = F_{tp}$  と置くと、次式のように導出することができる。

$$F_{max} > K_{en} \sqrt{\frac{M}{K_{en}} V_0^2 + \frac{F_{tp}^2}{K_{en}^2}} + F_{lim} \quad (5.5)$$

$$F_{lim} > \frac{F_{max}^2 - V_{tp}^2 M K_{en}}{2F_{max}} \quad (5.6)$$

(5.5) 式のように衝撃力の最大値  $F_{max}$  を超えない条件式を定義すると、(5.6) 式に示す  $F_{lim}$  が導出される。すなわち、ロボットの動きに対してリアルタイムにロボットの駆動力を  $F_{lim}$  以下に制限することで、接触時に想定した衝撃力を超えないモーションを実現することができる。

### 5.2.2 運動方程式による接触運動のシミュレーション

運動方程式に実際に値を与えて計算シミュレーションを行った。シミュレーションの条件を表 5.1 に示す。シミュレーションの計算結果は、位置、速度、加速度、また環境からの反力とした。また、位置の結果で示した赤線は環境との境界位置を示している。

まず、環境の弾性のみを考慮した場合のシミュレーションをケース 1 として図 5.2、図 5.3 にそれぞれ結果を示す。このとき最大衝撃力を (5.4) 式から計算すると  $F_{max} = 101.48\text{N}$  となる。図 5.3 で示すように、衝撃力の最大値は計算値と一致していることが分かる。

表 5.1: 接触現象の数値シミュレーションで用いたパラメータ

	記号	パラメータ
質量 [Kg]	$M$	10
接触速度 [m/s]	$V_0$	0.25
環境の剛性 [N/m]	$K_{en}$	10000
駆動力 [N]	$F_{tp}$	20

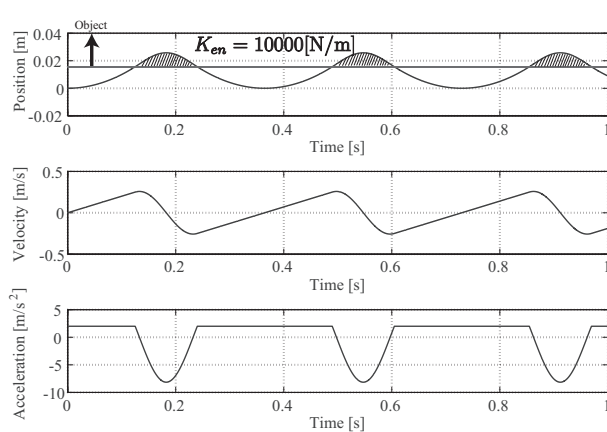


図 5.2: 環境への駆動力を考慮した接触運動のシミュレーション

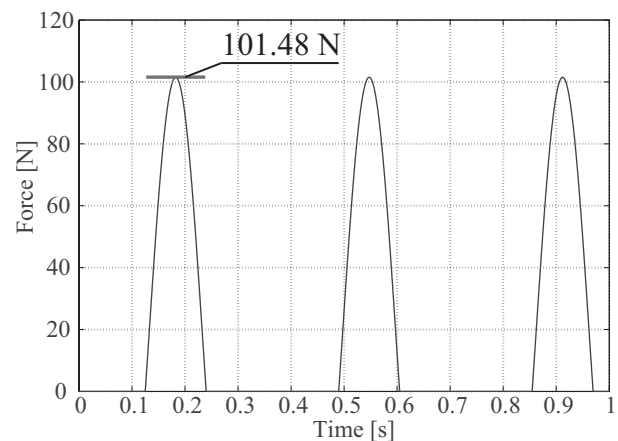


図 5.3: 接触運動のシミュレーションで生じた環境からの反力

## 5.3 球座標による作業空間の等価質量と動的な加速度制限値

### 5.3.1 ロボットの運動エネルギーに基づく等価質量

ロボットが運動しているとき、ロボットはその質量と速度に応じた運動エネルギーを保有している。各関節の慣性イナーシャはロボットの姿勢によってリアルタイムに変化する慣性変動が生じる。慣性変動は、ロボットの各関節の慣性テンソルより導出した慣性行列を用いることによって計算が可能である。この慣性行列を用いて各関節の運動から導出したロボット全体の運動エネルギーと、作業空間上のロボットの先端速度を用いることで、ロボットの進行方向に対する等価的な質量を定義することができる。

ロボットの各軸速度を作業空間上の先端速度  $V_{ws}$  とすると、(5.7) 式のように表わされる。

$$\mathbf{V}_{ws} = \mathbf{J}_{aco} \boldsymbol{\omega}_L \quad (5.7)$$

(5.7) 式の速度ベクトルは3次元の直交座標で表現されるため、速度ベクトルは3つの成分ベクトルによって構成される。また、 $\mathbf{V}_{ws} = [V_X, V_Y, V_Z]$  の絶対値をとることで速度ベクトルの大きさを記述することができ、極座標形式では  $\theta$ 、 $\varphi$  の偏角によって (5.8) 式のように方向を示す。

$$\begin{bmatrix} V_r \\ \theta_r \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2} \\ \arctan\left(\frac{\sqrt{V_X^2 + V_Y^2}}{V_Z}\right) \\ \arctan\left(\frac{V_Y}{V_X}\right) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

次に、ロボット全体の運動エネルギーは各関節での運動エネルギーの総和として、(5.9) 式のように導出することができる。 $\mathbf{H}(\theta)$  はロボットの逆動力学計算で用いる慣性行列である [56–58]。

$$T_{robo} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_L^T \mathbf{H}(\theta) \boldsymbol{\omega}_L \quad (5.9)$$

また、運動エネルギーは座標が異なっても値は変化しないので、運動エネルギーを作業空間に置き換えて考えると、ロボットの作業空間先端速度  $V_{ws}$  は (5.10) 式のように表わせる。

$$T_{robo} = \frac{1}{2} M_{eq} V_r^2 \quad (5.10)$$

(5.10) 式は、 $M_{eq}$  はロボットの進行方向に定義された等価的な質量を示している。一般に、作業空間上で等価質量を定義する場合、ヤコビ行列によって表現された等価質量行列が用いられる。従って、関節空間と作業空間のエネルギーの関係から (5.9) 式、(5.10) 式より、等価質量は (5.11) 式のように定義することができる。

$$M_{eq} = \frac{2T_{robo}}{V_r^2} \quad (5.11)$$

ヤコビ行列を用いた作業空間の等価質量行列はすでに提案されている [71]。本論文ではこの等価質量行列の考え方を衝撃力に対する加速度の動的上限値に用いることを提案する。(5.11) 式の等価質量  $M_{eq}$  は、ロボットの進行方向に対してスカラー量の質量を定義するもので、物体の質量と同様に扱うことができる。 $M_{eq}$  を用いることで、先に検討した動的上限値をロボットの場合に適用することが可能となる。

### 5.3.2 衝撃力をリミットするモーション制御

ロボットが、他の環境またはロボット同士の接触する可能性がある場合、接触した場合に衝撃力の上限を超えないモーションを実現する動的な加速度制限値を機能させることは重要な意味を持つ。

(5.11) 式で導出した等価質量を用いることで、接触時の最大衝撃力  $F_{max}$  を (5.4) 式を用いて次式のように導出することができる。

$$F_{max} = K_{en} \sqrt{\frac{M_{eq}}{K_{en}} V_r^2 + \frac{F_{tp}^2}{K_{en}^2}} + F_{tp} \quad (5.12)$$

この式中で  $V_0$  は接触時の速度、 $F_{tp}$  はロボットの推進力を表している。また、(5.13) 式のようにロボットの推進力の上限  $F_{lim}$  も次式から求めることができる。

$$F_{lim} = \frac{F_{max}^2 - V_r^2 M K_{en}}{2F_{max}} \quad (5.13)$$

次に、等価質量を用いることでロボットの推進力の上限  $F_{lim}$  から動的な加速度制限値  $\alpha_{lim}$  を (5.14) 式のように求める。

$$\alpha_{lim} = \frac{F_{lim}}{M_{eq}} \quad (5.14)$$

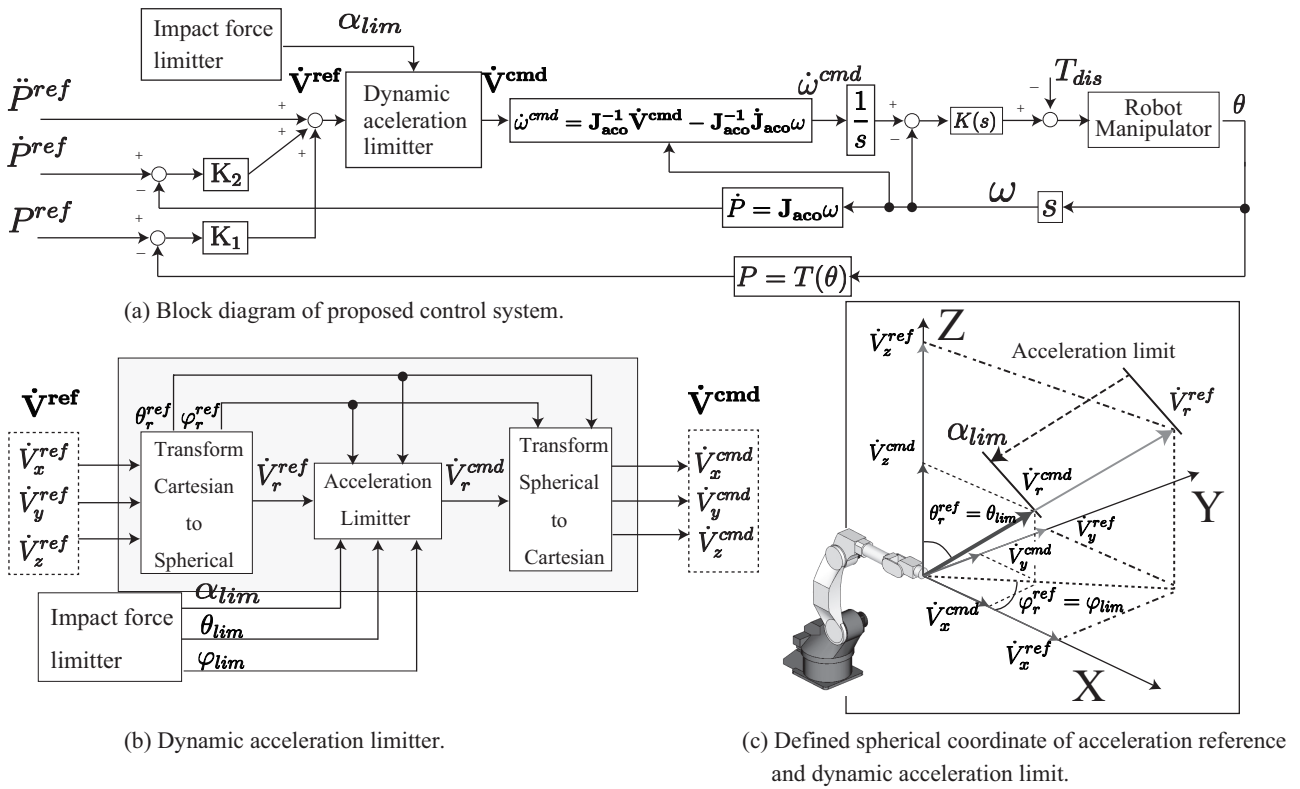


図 5.4: 提案する動的加速度制限値を用いたロボト速度制御系: (a) 提案法のブロック線図  
(b) 動的な加速度リミッタ (c) 球座標に基づく加速度指令と動的加速度閾値の定義

(5.13) 式、(5.14) 式より、ロボトが環境との接触で生じる衝撃力の最大値  $F_{max}$  を与えて、 $< 2.1 >$  の  $F_{lim} = F_{tp}$  と同様に  $\alpha_{lim} = \alpha_{tp}$  について解くと次式となる。

$$\alpha_{lim} = \frac{F_{max}^2 - V_r^2 M_{eq} K_{en}}{2F_{max} M_{eq}} \quad (5.15)$$

ロボトの先端加速度を (5.15) 式より導出される  $\alpha_{lim}$  を上限値としてリアルタイムに制限することにより、ロボトと環境の接触時に生じる衝撃力の最大値  $F_{max}$  を想定した範囲内に留めることができる。

$\alpha_{lim}$  を用いて任意の速度指令に対して、先端の衝撃力を制限するモーション制御系を提案する。提案に基づく加速度制限値  $\alpha_{lim}$  によって生成された  $\dot{V}_r^{ref}$  を用いて各関節の加速度指令を再構成する。本提案法は、図 5.4 に示す加速度制御に基づく作業空間のロボト速度制御系を用いて実現する [64]。図 5.4(a) の作業空間の制御器から出力される加速度の操作量を動的な加速度制限値によってリミット処理を行い、ヤコビ行列で座標変換することで各関節の加速度指

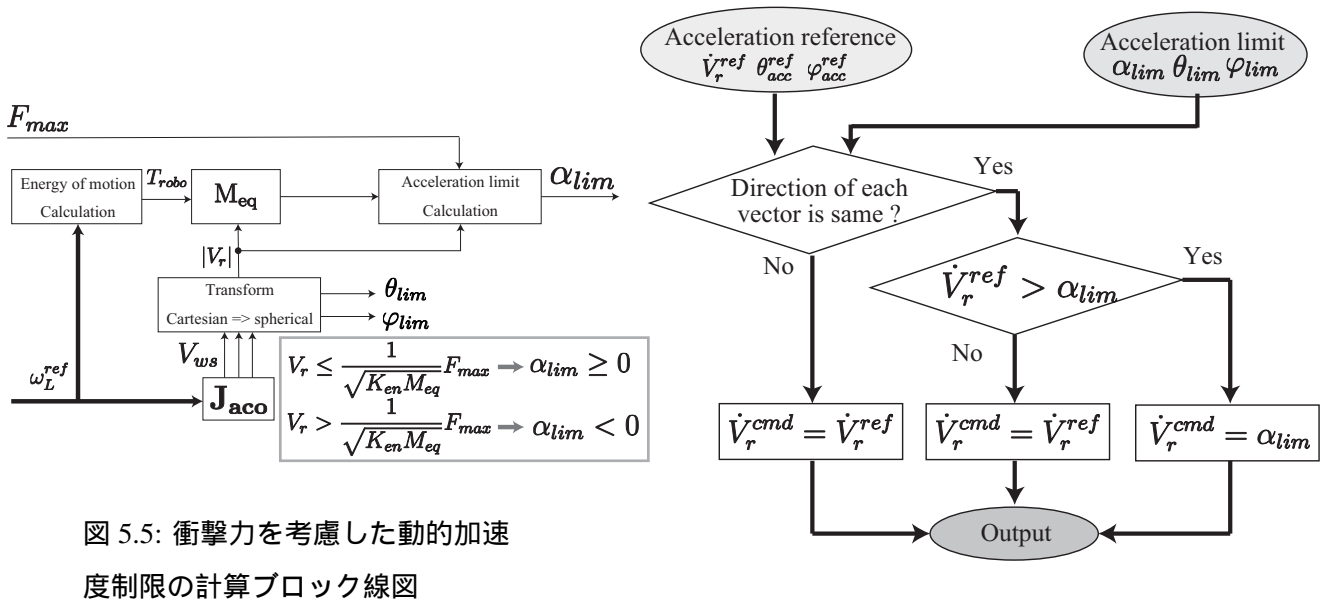


図 5.5: 衝撃力を考慮した動的加速度制限の計算ブロック線図

図 5.6: 動的な加速度制限値による加速度リミットのフローチャート図

令が得られる。ロボットの先端加速度の制限は、図 5.4(b) のブロック線図で示したように作業空間の加速度指令を球座標に座標変換して  $\alpha_{lim}$  と比較して加速度のリミット処理を行う。球座標上で加速度の大きさのみを制限することにより、図 5.4(c) で示すようにロボットの先端加速度の方向を変化させることなく、接触時に衝撃力の上限を超えないモーション制御を実現する。加速度のリミット処理は、図 5.5 のブロック線図に従ってリアルタイムに計算された  $\alpha_{lim}$  と球座標に変換された加速度指令  $\dot{V}_r^{ref}$  とを比較して、図 5.6 のフローチャートに従って  $\dot{V}_r^{ref}$  の大きさを制限する。

提案する動的な加速度制限値によって加速度を制限されたロボットのモーションは、衝撃力の上限值から求められた加速度制限値以下の加速度で運動することになり、環境と接触した場合でも衝撃力は設定した上限値を超えない。

### 5.3.3 シミュレーションによる検討

提案法の有効性を検証するため、実験にも使用する 6 自由度の垂直多関節型ロボットに基づく数値計算シミュレーションによる検討を行った。このシミュレーションでは、図 5.7 に示す軌道で速度ステップ指令に従ってロボットを動かし、軌道上にある環境と接触する動作を想定

表 5.2: シミュレーション

で用いた仮想環境の特性

項目	記号	パラメータ
環境剛性	$K_{en}$	10000
環境粘性	$D_{en}$	20

表 5.3: 各関節の特性と速度制御系 (1,2,3 軸)

項目	記号	1 軸	2 軸	3 軸
反共振周波数 [Hz]	$\omega_{ar}$	10.01	15.37	19.88
共振周波数 [Hz]	$\omega_n$	33.37	25.16	40.80
等価時定数	$\tau$	1/20	1/20	1/20
安定度指標	$\gamma$	[ 2.5, 2, 2 ]		
PI 速度制御器の零点	$\beta$	100		

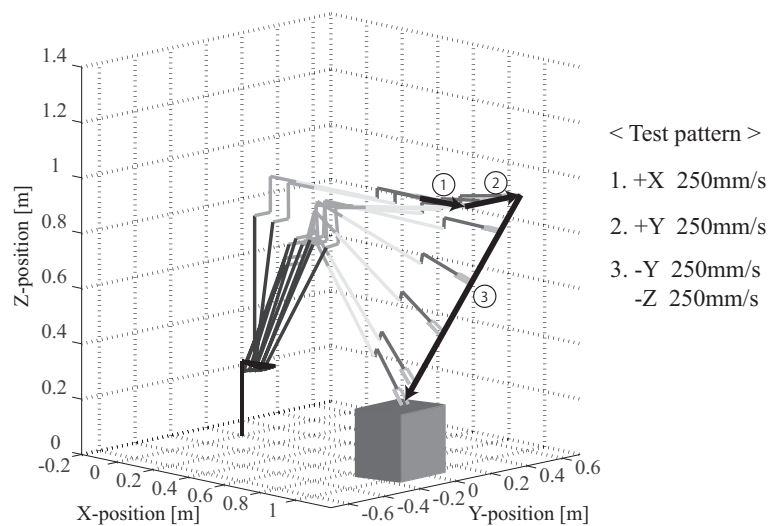


図 5.7: シミュレーションを行った接触動作のテスト軌道

する。また、ヤコビ行列は先端手首軸の 4 軸、5 軸、6 軸のそれぞれの角度が変化しないと仮定して、基本 3 軸に基づくヤコビ行列を導出して用いた。

次に、シミュレーションで用いる仮想環境の特性を表 5.2 に、ロボット各軸の共振・反共振周波数及び、係数図法の等価時定数  $\tau$  と安定度指標  $\gamma$  の設計値を表 5.3 に示している [61]。各軸の速度指令は作業空間上の指令値生成コントローラによって生成され、環境と接触したのちは力指令  $F_{ref} = 0$  とした力制御によって緩衝動作を行うことを想定した。

まず、衝撃力リミットを適用しない場合のシミュレーション結果を図 5.8 に示す。この時の衝撃力の最大値はおよそ 75 N となっていることが分かる。つまり、実施したシミュレーシヨ

ンの条件では速度指令に従って動作して接触した場合、力制御による緩衝動作を行ったとしても最大の衝撃力が75N程度になることを示している。

次に、衝撃力リミットを50Nとした場合のシミュレーション結果を図5.9に示す。この結果では接触時の衝撃力は20.5Nと設定した衝撃力の上限值よりはるかに小さい値となった。また、衝撃力リミットを適用しない場合の実験結果と比較すると、衝撃力リミットを適用した時の等価質量はほぼ同じ特性、運動エネルギーは非常に小さくなっていることが分かる。さらに、運動エネルギーは上限がリミットされ、ある値以上に増加していないことが分かる。

また、衝撃力リミットを20Nとした場合のシミュレーション結果図5.10に示す。50Nにリミットした場合と比較して加速度の動的上限値がさらに小さくなり、全体の動作速度も遅くなっていることが分かる。運動エネルギーは衝撃力の上限を50Nとした場合よりさらに小さくなっており、この場合も上限がリミットされていることが分かる。その結果衝撃力は14Nとなり、衝撃力の上限值を超えなかった。

以上の結果から、衝撃力をリミットする動的な加速度制限値によってロボットのモーションを制限することによって、ロボットの姿勢で変化する等価質量に対して運動エネルギーを一定値以下にリミットすることを確認した。従って、提案したモーション制御法を用いることによって、衝撃力をリミットするロボットのモーション制御が実現可能なことを示すことができた。



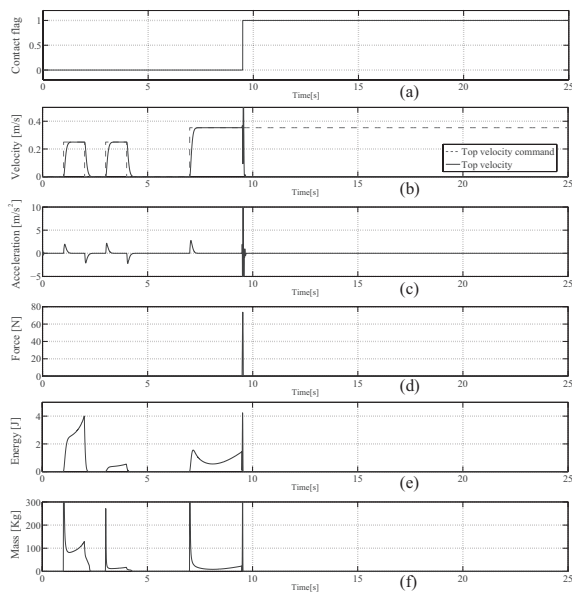


図 5.8: 加速度制限を適用しない場合の接触運動シミュレーション結果 : (a) 接触判定 (b) 先端速度 (c) 先端加速度 (d) 先端外力 (e) 運動エネルギー (f) 等価質量

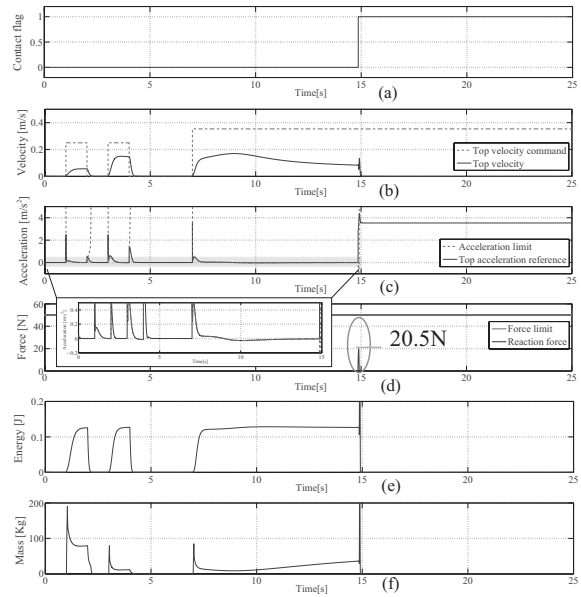


図 5.9: 加速度制限を適用した場合の接触運動シミュレーション結果 ( $F_{max} = 50\text{N}$ ) : (a) 接触判定 (b) 先端速度 (c) 先端加速度 (d) 先端外力 (e) 運動エネルギー (f) 等価質量

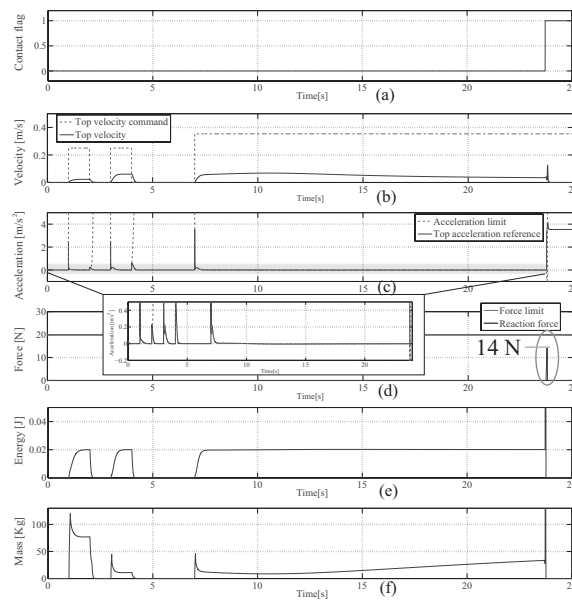


図 5.10: 加速度制限を適用した場合の接触運動シミュレーション結果 ( $F_{max} = 20\text{N}$ ) : (a) 接触判定 (b) 先端速度 (c) 先端加速度 (d) 先端外力 (e) 運動エネルギー (f) 等価質量

## 5.4 実機実験による検証

### 5.4.1 実験の方法

提案法の有効性を確認するために図 5.11 に示す 6 自由度産業用ロボットを用いた実機実験を行った。ロボットには写真で示すように、ニッタ社の力センサ (IFS-30E12A50-I40-EX) が先端に取り付けられている。作業空間のロボスト速度制御系、ロボット各軸の制御器設計はシミュレーションと同じものを用いている。実験では直接教示と同様に作業空間上で速度制御を行わせ、障害物接触時の衝撃力について検討する。任意方向に対する速度指令は 250mm/s とし、提案した衝撃力をリミットする加速度制限値によって先端加速度は制限される。ロボットと環境の接触判定は、先端力センサの値が 5N を超えた瞬間として、接触検知と同時に速度指令を 0 にしてロボットの動きを停止させる。このとき力センサで検出した外力の最大値を衝撃力として、提案法の有効性について検証する。

### 5.4.2 実験の結果

始めに、図 5.12 の動作パターンでの実験結果を図 5.13 ~ 図 5.17 に示す。この実験では、剛性の高い硬質プラスチックボードを環境として用いた。まず、衝撃力リミットを適用しない場合と適用した場合の関節軸モータ速度の結果を図 5.13 と図 5.14 にそれぞれ示す。これらの比

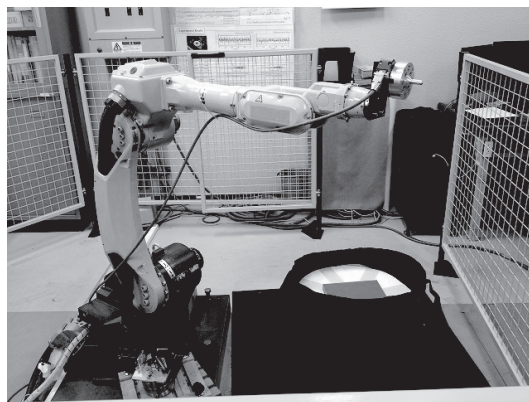


図 5.11: 6 自由度垂直多関節産業用ロボットを用いた実験システム

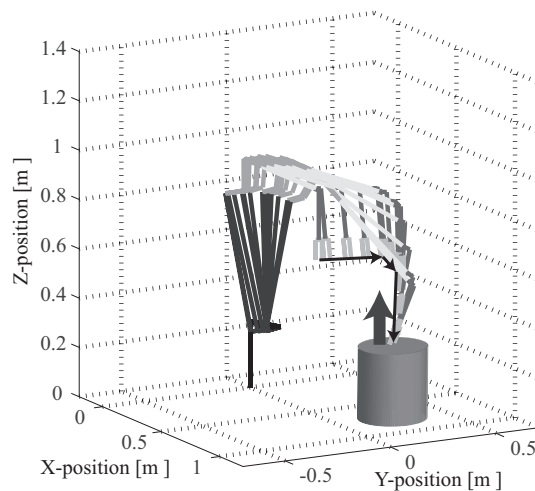


図 5.12: -Z 方向への接触実験におけるロボットの動作軌道

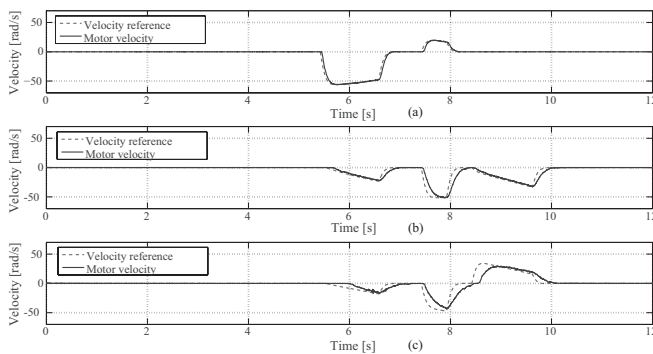


図 5.13: 加速度制限値を適用しない場合の3軸のモータ速度: (a)1軸 (b)2軸 (c)3軸

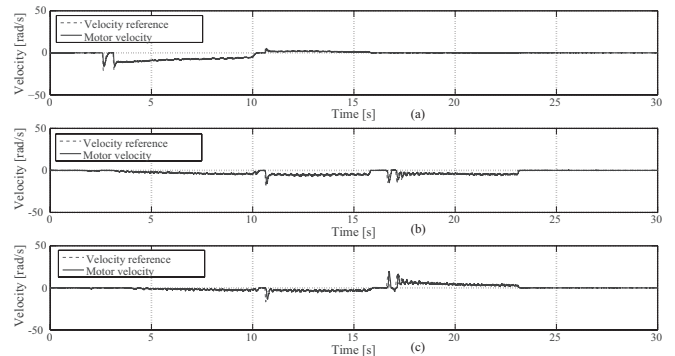


図 5.14: 加速度制限値を適用した場合の3軸のモータ速度: (a)1軸 (b)2軸 (c)3軸

較から、衝撃リミットを適用した場合に先端加速度が制限されて構成された各軸の速度指令によって、軸速度が低速になっていることが分かる。

次に、衝撃力リミットを適用した場合の先端速度の結果を図 5.15、制限される前の加速度参照値と制限された加速度の結果を図 5.16、力センサで検出した先端外力を図 5.17 にそれぞれ示す。これらの結果から、衝撃力をリミットする加速度制限値によって先端加速度がリミットされ、接触時の衝撃力は設定した 20N を下回る 15N に留まっている。

同様に、図 5.18 の動作パターンでの実験結果を先端速度を図 5.19、先端加速度を図 5.20、先端外力を図 5.21 にそれぞれ示す。この実験では、環境に対して横方向（作業空間上+Y 方向）

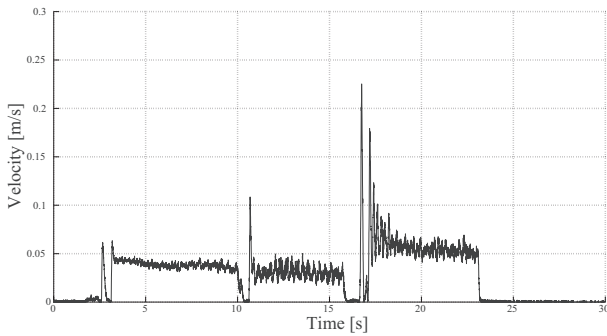


図 5.15: 動的な加速度制限を適用した-Z 方向への接触実験の先端速度

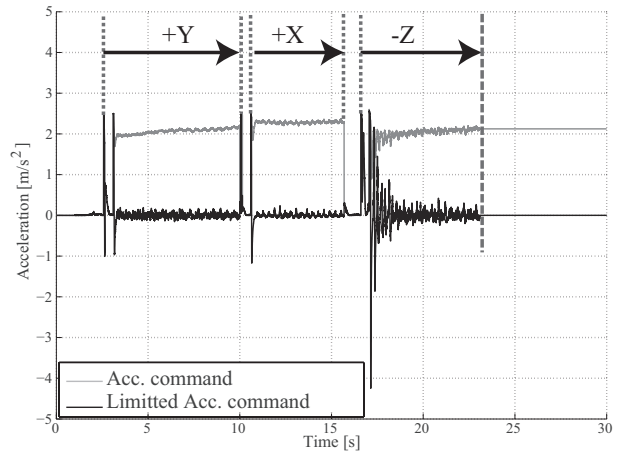


図 5.16: 動的な加速度制限を適用した-Z 方向への接触実験の加速度指令とリミット処理された先端加速度

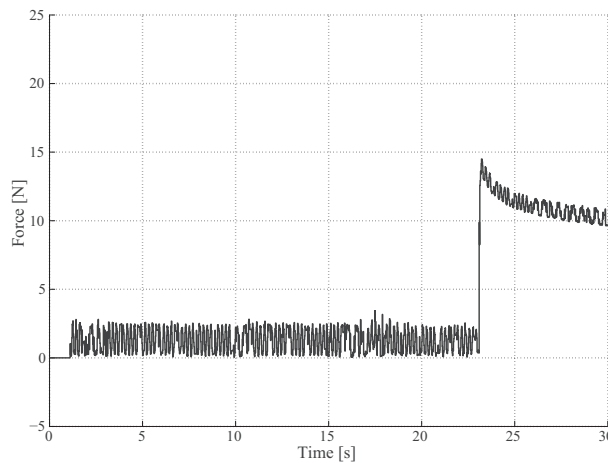


図 5.17: 動的な加速度制限を適用した-Z 方向への接触実験の先端反力 (衝撃力上限  $F_{max} = 20\text{N}$ )

に接触している。結果として、接触時の衝撃力は設定した 20N を下回る 6N 程度となった。作業空間上でロボットが向かう方向は球座標を用いることで 1 方向となるため、先端ツールの横方向に接触するような場合でも提案法は有効となる。

最後に、図 5.22 の動作パターンでの実験結果を先端速度を図 5.23、先端加速度を図 5.24、先端外力を図 5.25 にそれぞれ示す。先の実験とは大きく異なる姿勢であり、+X 方向に動くことで環境に対してエンドエフェクタを突き刺すように接触させる。この時のコントローラから入力した速度指令に応じた加速度指令の絶対値と、上限値によって制限された加速度の結果を図

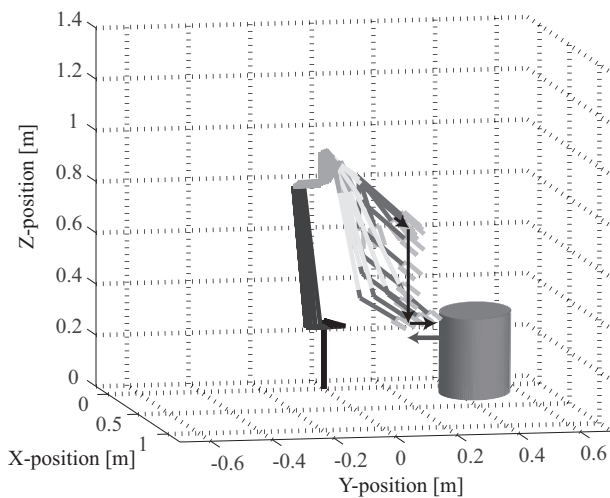


図 5.18: +Y 方向への接触実験におけるロボットの動作軌道

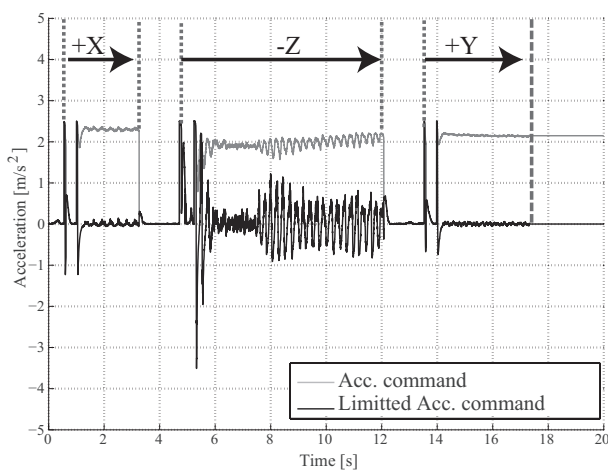


図 5.20: 動的な加速度制限を適用した+Y 方向への接触実験の加速度指令とリミット処理された先端加速度

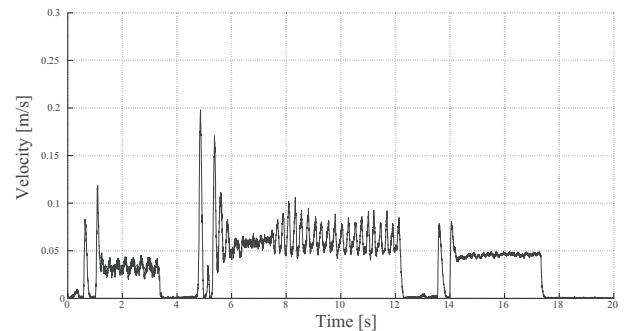


図 5.19: 動的な加速度制限を適用した+Y 方向への接触実験の先端速度

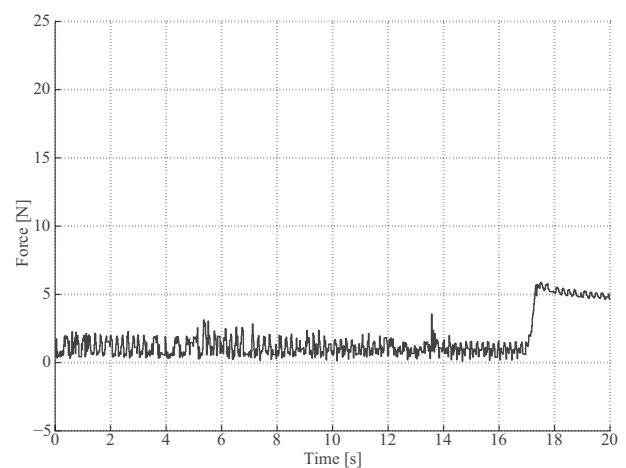


図 5.21: 動的な加速度制限を適用した+Y 方向への接触実験の先端反力 (衝撃力上限  $F_{max} = 20\text{N}$ )

5.24 に、力センサが検出した先端の接触力を図 5.25 にそれぞれ示す。このパターンでの実験では図 5.24 でも明らかなように、加速時に環境と接触していることが分かる。接触したときの反力応答は図 5.25 の通り、設定した最大衝撃力の 20N を超えず、17N 程度という結果になった。+Y 方向の実験と比べて衝撃が大きくなった理由は、環境に対して突き刺すように接触することで、ツール先端に生じる負荷が力センサにそのまま伝わったためだと考えられる。

以上の結果から、提案法の衝撃力をリミットする加速度制限値は、ロボットが環境と接触し

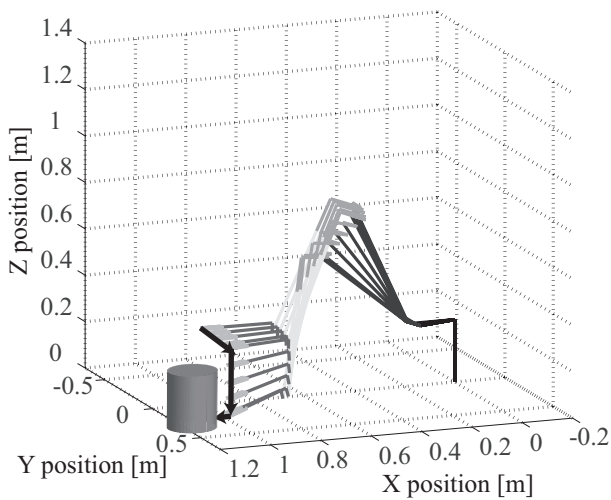


図 5.22: +X 方向への接触実験におけるロボットの動作軌道

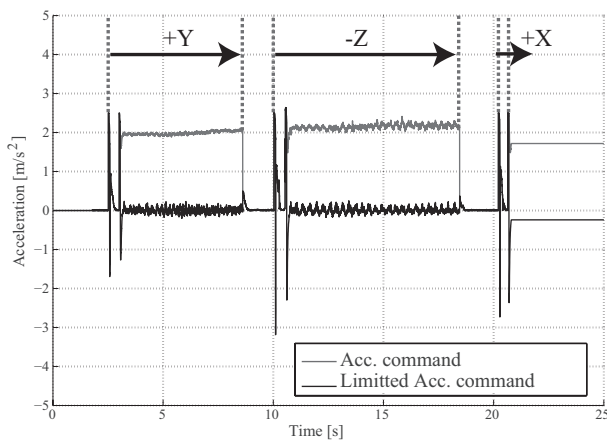


図 5.24: 動的な加速度制限を適用した+X 方向への接触実験の加速度指令とリミット処理された先端加速度

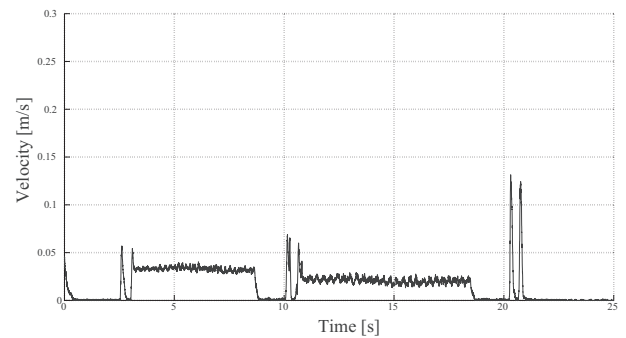


図 5.23: 動的な加速度制限を適用した+X 方向への接触実験の先端速度

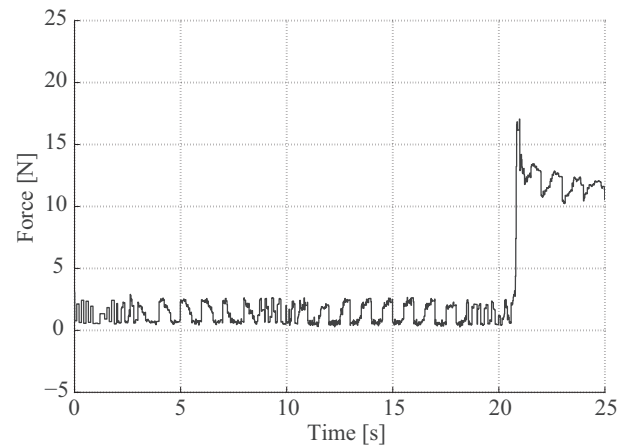


図 5.25: 動的な加速度制限を適用した+X 方向への接触実験の先端反力 (衝撃力上限  $F_{max} = 20\text{N}$ )

た場合でも想定する衝撃力を超えないモーション制御を実現可能なことが示された。

## 5.5 まとめ

本章では、衝撃力をリミットする動的な加速度閾値を提案し、ロボットの先端加速度をリアルタイムに制限することでロボットが環境と接触した場合でも想定する衝撃力を超えないモー

ション制御を実現した。

まず、環境をバネのみの弾性体と仮定した物理モデルを用い、運動方程式による接触運動の検討から、衝撃力の最大値は慣性体の速度と推進力によって導出することが可能であるとともに、慣性体の速度に応じて推進力を制限することで接触時に想定した衝撃力以下となる慣性体の動きを定義できることを示した。

次に、ロボットのモーション制御に適用するため、コントローラの入力に応じた作業空間の速度指令に対して加速度指令を生成するモーション制御器を球座標によって構成した。この加速度指令に対してロボットと環境の接触で生じる衝撃力をリミットする動的な加速度閾値を適用することにより、接触時に生じる衝撃力を想定以下にするロボットのモーション制御を可能にした。動的な加速度閾値を導出するために、運動エネルギーとロボットの先端速度からロボットの進行方向に対する仮想的な等価質量を新たに定義し、この等価質量を用いることによって、等価的に接触運動を単純な物理モデルに置きかえることができた。

提案法の有効性は、実際のロボットパラメータを用いた数値シミュレーションと実際に加速度閾値を適用して環境に接触させた実機実験によって検討した。その結果、ロボットと環境を接触させた場合にも衝撃力は設定した上限を超えなかったことから、提案する加速度閾値によってロボットのモーションを制限することによって衝撃力を上限値以下に抑えられる。

提案法の特徴として、動的な加速度閾値の導出に必要な任意パラメータは、接触を想定する環境の剛性とリミットする衝撃力の最大値のみであり、物理的な理解も容易である。このことから、提案する衝撃力をリミットする動的な加速度閾値は、どのような構造のロボットに対しても簡単に適用が可能であり、環境との接触で生じる衝撃力を抑制することができる。





## 第6章

### 結論

#### 6.1 本論文による成果

本論文では、産業用ロボットの外乱オブザーバを用いた力センサレス接触モーション制御の高性能化を目的とした検討を行ってきた。その成果として、従来の接触モーション制御系の問題点をふまえた3つの新しいモーション制御法を提案した。

まず、ロボットの運動に連動した動的閾値を組み合わせた外力ジャーク信号を用いた接触検知によって、従来の力センサレス接触制御で問題となっていた接触検知の高性能化を実現した。

外乱オブザーバはロボットのモータと減速機からなる数式モデル化されたアクチュエータから設計され、動力学計算と組み合わせることによって外力を推定する。しかし、非線形摩擦や減速機内部の非線形なねじれから生じるパラメータ誤差によって推定外力の誤差が生じ、接触検知には推定外力の誤差をあらかじめ見積もった上で閾値を設定する必要がある。このため、閾値によって検出可能な外力の大きさが制限され、接触検知の感度が低下していた。一方で、ロボットのモーションに合わせて推定外力が変化するため閾値に十分な余裕がなければ誤検知を引き起こす原因となる。これらの理由から、外乱オブザーバを用いた力センサレス外力推定によって高感度でありながら誤検知の少ない接触検知を実現することは困難であった。

そこで、推定外力の微分である外力ジャーク信号を接触検知信号に用いることで、非線形摩擦等による緩やかな推定外力の誤差には反応しにくく、一方で接触によって生じる衝撃力に対

しては高感度に反応する接触検知を実現した。さらには、ロボットの加減速時に軸慣性のパラメータ誤差によって生じる急峻な推定外力の誤差に対して、慣性変動を考慮した動力学計算に基づいた動的閾値を新たに提案した。提案した動的閾値を用いることで、外力ジャーク信号に対する接触検知の閾値はロボットの動きに連動して適切に変化する。外力ジャーク信号と動的閾値を組み合わせた接触検知法によって、誤検知の少ない高感度な力センサレス接触検知を実現することができた。提案法を用いた接触検知は、2種類の異なる構造の産業用ロボットで実験を行い、非線形な摩擦等のパラメータ誤差による推定外力の誤差に対して、高感度で誤検知の少ない接触検知を実現した。

2つめに、運動エネルギーに基づくブレーキによる衝撃力の低減とI-P力制御系の積分器初期値更新によって、接触時における不連続なモーション制御を連続的でスムーズな接触モーション制御へと改善した。

従来の仮想インピーダンス制御や力制御を用いた接触動作では、衝撃緩和が不十分であったり、逆に衝撃に対する反応で環境から離れてしまい、接触と離脱を繰り返す不安定なモーションにつながっていた。この理由として、衝撃力がロボットの接触動作において特異な現象であり、接触時に急峻な外力として環境とロボットに対して生じる。このため、連続的な仮想インピーダンス制御や力制御によって衝撃力の影響を補償することは困難であり、衝撃力に特化したモーション制御の手法が必要であった。

そこで、制御剛性の高い位置制御や速度制御によって環境と接触した直後に、衝撃力の低減と力制御へのスムーズな移行を達成するために、動力学ブレーキとI-P力制御器への切り替えを想定した積分器の初期化を提案した。提案した動力学ブレーキは、衝撃力の原因である接触時の運動エネルギーをトルク制御で高速に相殺することによって衝撃力の影響を抑制する。同時に、トルク制御によるブレーキで入力したエネルギーと比較することによって、接触運動に支障を与えないブレーキ制御を実現した。また、I-P力制御器積分器への切り替えを想定した初期値更新を行うことによって、制御器内部の衝撃力の影響を相殺し、なおかつ安定した力制御が続いているように振る舞う。これによって力制御による接触動作へのスムーズな切り替えを行わせることができた。最終的にこれらを組み合わせたI-P力制御系を用いたモーション制

御法は、実際の産業用ロボットを用いた実験でスムーズな接触運動を実現している。

3つめに、衝撃力をリミットする加速度の動的閾値を用いたモーション制御法では、リアルタイムに求められるロボット先端の加速度閾値によってロボットの先端加速度を制限することで、接触の場合にも想定した衝撃力以下となるモーションを実現した。

衝撃力は非常に短時間で生じる現象であるために、接触後のブレーキによる衝撃力の低減は効果が限定的となる問題があった。力センサや外乱オブザーバによる推定外力を用いたとしても接触検知するまでの遅れ時間、トルク指令に対するトルク制御の応答時間によって、衝撃力の低減に有効なブレーキ制御は、壊れやすい環境に対しては十分でない場合がある。

そこで、ロボットの運動エネルギーから衝撃力を推定し、リミットする衝撃力から導出したロボット先端の加速度閾値でロボットのモーションを制限することによって、環境と接触した場合でも想定した衝撃力を超えないモーション制御が可能になった。接触後に衝撃力を低減する動力学ブレーキとは別に、接触の瞬間に生じる衝撃力の最大値を見積もってロボットの動作を制限することで、ブレーキによる低減が難しい接触直後の衝撃についても考慮したモーション制御が可能になる。さらに本提案手法の特徴として、リアルタイムに加速度の動的閾値を求めるため、あらゆるロボットのモーション制御に適用することができる。実際の産業用ロボットを用いた実機実験においても、様々な姿勢と軌道で動作させ、各方向への接触動作を行った結果、いずれも接触時に設定した衝撃力を下回った。

最後に、本研究で提案した手法によって実現するロボットのモーション制御について考察する。まず、本論文で提案した手法はいずれも、外乱オブザーバを用いた力センサレスでの利用を前提にしている。従って、力センサを持たない産業用ロボット、また力センサの取り付けが困難な産業用ロボットについても、適用が可能である。さらには、産業用ロボットの接触運動における問題点を、接触する環境に対するモーションと接触検知、接触直後の衝撃力に対するモーション、安定した力制御による接触運動へのスムーズな移行のそれぞれについて解決する手法を提案した。これら提案手法を連続した接触運動のプロセスで適用することで、ロボットと環境の接触運動はスムーズに、また多様な状況に対応できるようになった。

以上のように、本論文は従来の外乱オブザーバを用いたセンサレス力制御による接触モー

ション制御の問題点を解決し、産業用ロボットの高性能な接触モーションを実現した。本研究の成果は産業用ロボットの工業的価値を高め、組み立て等作業への利用範囲の拡大、運搬や教示作業などの安全化に寄与することを期待する。

## 6.2 ロボットの安全化における本研究の成果

ロボットの安全における本研究の成果についてまとめる。成果の妥当性を検証する資料として日本工業規格の産業用ロボット安全要求事項（JIS B 8433-1）などを参照する。

まず、日本国内の製造現場における安全の考え方として特徴的なのは人的努力を重視していることにある。指差し呼称や危険予知活動など、個人の人的ミスを減らすことによって労働災害を生じさせない活動が活発に行われている。その一方で、技術による機械や製造現場の安全化は限定的であり、重大な事故も度々生じている。

欧米諸国での安全に関する考え方は、人的ミスで危険が生じるのではなく、人的ミスを起こさせない、または起こしても安全な状態を維持する技術によって、本質的な安全化を目標としている。例えば、工作機械等で一般的なインターロック、ライトカーテンといった技術があり、作業員が危険な領域に立ち上がった場合に自動的に機械の電源を遮断するように設計されている。しかし、試運転を含めたメンテナンスなどの目的から安全機構をバイパスしてしまうことによって、安全性を保証することができなくなってしまう。つまり、技術的な安全機構による安全化においても、現場の作業員の行動を考慮せずに達成することは困難であることを示している。

次に、産業用ロボットの具体的なリスクについて検討する。産業用ロボットが動くことで生じる人間に対する物理的なリスクは大きく分けて、アームの接触による衝撃と、アームや他の環境に巻き込まれる場合との2通りに分けられる。高速高精度な動作が要求されるロボットのモーション制御では外力を補償する制御器が一般的に用いられるため、危険が生じた場合でも人の手で停止させることは非常に難しい。その結果、予期せず動作したロボットに接触したり、巻き込まれることによる死傷事故がこれまでも起きている。近年における産業用口

ロボットによる死亡事故は、その大半がロボットと稼働範囲の周辺機器に挟まれることによって生じ、その他にはロボットが作業者に激突することによって作業者を死傷させる事故が起きている [72]。これら全ての事故は、ロボットの稼働範囲内に立ち入る前に作業員が電源を切ることで回避されることが分かっている。一方で、精密な計画の上で自動化された工場内では、ロボットを停止させることによって生産機能を一時的に停止させなければならない。このため、ロボットの駆動源を切らずに稼働範囲に作業員が立ち入る状況が無くせない理由の一つと考えられる。さらには、今後予想される医療や介護、家庭におけるロボットの利用が進むことで、日本国内で従来から行われてきた人間とロボットの空間的な隔離は不可能となる。従って、ロボットの機構や制御によって、ロボットそのものの安全化を目指す必要がある。

本研究で提案したモーション制御の手法は、外乱オブザーバを用いたセンサレス力制御系をベースとした接触動作について検討を重ねてきた。まず、外乱オブザーバを用いる利点として、高価な力センサを用いることなくロボットの接触動作を制御できる点が挙げられる。また、外乱オブザーバはアクチュエータの入出力から外力トルクを推定するため、ロボットの可動するアーム部分のいずれでも、接触を検出して柔軟なモーション制御が可能である。このようなモーション制御は、各関節の外乱オブザーバによって負荷トルクを推定することで実現できる。一方で、通常はツールの先端力を測定するために手首部分にしか取り付けることのできない力センサでは不可能である。

次に、各章で提案したモーション制御法について考察していく。3章で提案した力センサレス外力ジャーク信号と動的閾値を用いた接触検知では、接触検知の可能範囲拡大と、接触検知の感度を必要以上に落とさず誤動作を少なくすることができた。外乱オブザーバによって推定された外力トルクを用いた接触検知の問題として、推定外力の誤差が検出感度を低下させる要因となっていた。力センサを用いずに接触検知が可能なメリットがあったとしても、接触時の検出感度が低い状態である限り、安全性の向上に寄与することは難しい。外力ジャーク信号は、ロボットが環境と接触した際に生じる衝撃力を高感度に検出が可能であるため、外乱オブザーバによる接触検知の信頼性を向上させる。さらに、逆動力学計算に基づく外力ジャーク信号の動的な閾値を組み合わせたことによって、推定外力の誤差が生じやすい加減速動作におい

て、適切に閾値を変化させられる。本提案手法は、従来の外乱オブザーバを用いた接触検知に比べ、より感度を高く、その一方で誤検知の可能性を低減するものである。これは、産業用ロボットの安全化を達成する上で、要求される機能の制限や追加コストを必要とせずに、実用的な接触の検知機能を付与することにつながる。

次に、4章で提案した動力学ブレーキとI-P力制御による接触動作は、衝撃力の低減と衝撃による不安定な動作を回避することに有効である。衝撃力は極めて短い時間で生じるため、接触直後の高速なブレーキ制御でなければ低減することは難しい。ロボットのモーション制御系では各関節のモータトルク制御が最も高速に応答するが、ロボットの動きを推測することは困難である。このため、単純に大きなトルクによってブレーキ制御を行うことは、逆に危険なモーションにつながる可能性がある。動力学ブレーキは、環境との接触後に大トルクによって強力に衝撃力を低減し、動力学エネルギーと比較して長さを決めることで、不要な動きを抑制することができる。JIS B 9703 : 2011 では、駆動力を完全に遮断する非常停止の手法をカテゴリ0、停止のために駆動力を利用して停止してから駆動力を除去するカテゴリ1と分類されている。動力学ブレーキでは、トルク制御によるブレーキが終了した時点でロボットが停止していることを仮定しているため、カテゴリ1の非常停止動作として使用できる。

また、I-P力制御による接触動作と積分器の初期化によって連続的な接触動作を可能とすることで、接触時の不安定な動きを回避する。研磨や切削などの接触を伴う作業ではより大きな危険が生じ、ロボットや環境の相互を破損させる可能性がある。提案法の動力学ブレーキと積分器の初期化を適用したI-P力制御を用いることによって、接触と同時に所望の接触力で制御することができるため、接触動作の安全性向上に寄与する。

5章で提案した接触時の衝撃力を考慮した動的加速度制限値によるロボットのモーション制御は、接触後ではなく接触前に衝撃力を想定した動作の制限を行うことで、接触による衝撃の影響をあらかじめ制限することができる。この手法は、接触を前提とした動作に限らず、試運転など人間がロボットの可動範囲に立ち入る可能性が高い場合に適用することで、ロボットが人間に接触した場合にも衝撃力の上限を超えないロボットの動きが可能になる。JIS B 8433-1 < 5.12.3 > に記載されている安全設計におけるソフトウェアでの制限は、ロボットの稼働範囲

と停止可能な距離によって空間を制限している。つまり、人間とロボットの空間的な隔離が完全に達成される境界線を定めているに過ぎず、ロボットの動きに対するリスクは低減されない。これに対して、提案する動的加速度制限値でロボットの先端加速度をリミット処理することによって、作業者が稼働範囲に入ってロボットに触れたとしても、ロボットが作業者に作用する衝撃力は設定値以下となる。このことから、ロボットと人間の接触で生じる危険性は低減されることになり、より高い安全レベルを達成することができる。これによって安全柵が不要になれば、作業者とロボットが協調して作業することが可能になる。

本研究によって達成される産業用ロボットのリスク低減について考察をまとめる。外乱オブザーバを用いた力センサレス接触モーション制御系をベースとして、3つの新しい提案法を組み合わせることで、以下のようなロボットの安全化に向けた性能向上が期待できる。

- センサで検出が不可能なロボットのアーム部への接触検知
- 力センサ破損による検出機能の喪失を回避
- ロボットの慣性変動や接触速度で生じる衝撃力を上限値以下にリミット
- 接触直後の効果的なブレーキによる短時間での緊急停止
- 衝撃力を含めた接触力の高い制御性

これらの成果は、産業用ロボットの接触動作で危険を生じる原因とされてきた課題を解決し、今後起こりうるロボットによる労働災害を回避することが期待できる。以上の考察から、本研究の成果は産業用ロボットの安全においても有用な検討である。

## 6.3 今後の課題

本研究によって、高剛性の環境に対する接触モーションは改善することができた。しかしながら、環境の弾性が特に大きい環境や、塑性変形を起こしやすい非線形性の強い環境に対しては、本研究では詳細な検討を行っていない。また、動いている環境や、人間や他のロボットと協調動作する場合における検討も今後必要だと考えられる。本論文での提案法における検討課題として、以下のような点が考えられる。

- 剛性が低く粘性の大きい環境との接触では外力の変化が緩やかになるためジャーク信号での接触検知が難しい
- 塑性変形の大きい環境ではロボットの動作に対する反力の応答が複雑なため、力制御器の設計が困難
- ロボット同士の協調作業時など、接触するロボットも動作していた場合の協調した衝撃力リミットの検討

外力ジャーク信号による接触検知は、剛性の高い環境との接触に際しては高感度に信頼性の高い接触検知を可能にする。一方で、剛性が低く、なおかつクッションのような粘性が大きな環境との接触では反力の変化が緩やかになるため、外力ジャーク信号による接触検知を難しくする。従って、粘性の大きい環境との接触ではジャーク信号と推定外力の大きさの2条件を併用するなど、より汎用性を高める検討が必要だと考えられる。

また、塑性変形の大きい環境に対する接触運動のモーション制御は解決が困難な課題の一つである。フックの法則で定義が可能な環境は弾性変形することが前提であり、塑性変形が比較的大きな環境では環境モデルが複雑になることでロボットの運動と環境からの反力を線形モデル化することは困難になる。このため、位置制御と同様にフィードフォワード制御を加えた2自由度制御系、環境特性の学習などを取り入れた、より高性能なモーション制御系の検討が今後必要になる。

さらに、ロボット同士の協調動作、動く環境に接触する運動など、静止環境でないものに対する力制御と衝撃力の検討も必要であると考えられる。ロボット同士の協調動作で生じる接触は、2台のロボットのそれぞれの慣性と相対速度によって衝撃力が変化する。具体例としては双腕ロボットのモーション制御などが考えられるが、これらのケースでは2台のロボットの動きを同時に検討しなければならない。本研究で提案した動的加速度制限値による衝撃力のリミットを拡張することで、それぞれの動きを考慮した衝撃力を制限するモーション制御を実現できる可能性がある。

以上のように、本研究で得られた成果をさらに発展・展開させることで、ロボットによる接触運動はさらなる高性能化が可能である。



## 謝辞

研究を進めるにあたって、終始ご指導ご鞭撻を賜りました長岡技術科学大学 大石 潔教授に心から感謝し、厚く御礼申し上げます。また、研究が行き詰った際に何度も貴重なアドバイス、ご助言を下さった、長岡技術科学大学 宮崎敏昌准教授、ならびに同大学 横倉勇希助教にも心より御礼申し上げます。

安全パラダイム指向コースにおいて本質安全についての研究指導と貴重なアドバイスを頂き、本論文についても有用なコメントをいただきました、長岡技術科学大学 平尾裕司教授、和田安弘教授、ならびに福田隆文教授に御礼申し上げます。博士課程進学のかっかけを与えていただき、学外から本論文の審査に参加していただいた香川高等専門学校 漆原史朗准教授にも御礼申し上げます。また、学部、修士より、長きに渡って研究と学業のご指導を賜りました、パワー研の近藤正示教授、伊東淳一准教授にも心より感謝いたします。

さらには、共同研究を通して貴重なアドバイスと実験機材の立ち上げに多大なご協力をいただきました、パナソニック溶接システム株式会社の中田広之さま、橋本敦美さま、平田機工株式会社の奈須錦一さま、塚本晃史さま、他多数の関係者各位に対して、この場を借りて御礼申し上げます。

また、充実した研究生生活を共にしていただいた、大石研究室の諸先輩方、同期、後輩、ならびに技術職員の押見 洸先生、秘書の南雲晶子さまにも感謝をいたします。特に、大石研究室のロボットチームとして共同戦線を張り、多大な協力をしてくれた、吉岡 崇くん、穴山 哲くんを始めとするメンバーに格別の御礼を申し上げます。

最後に、研究生生活の精神的支柱であった婚約者の出来田朋子さま、博士課程進学の意義を理解し支援をして頂いた家族に深く感謝を申し上げます。



## 参考文献

- [ 1 ] John J. Craig: 『ロボティクス』三浦宏文, 下山 勲訳.pp.303-322, 共立出版株式会社,1991.
- [ 2 ] 島田 明: 『モーションコントロール』, pp.79-84, 株式会社オーム社, 2004.
- [ 3 ] J. Y. S. Luh: “Conventional Controller Design for Industrial Robots – A Tutorial,” IEEE Trans. Syst., Man, and Cybern., Vol. SMC-13, May/Jun. pp. 298–316 (1983-5/6).
- [ 4 ] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, and D. M. Dawson,: “Control of Robot Manipulators,” New York: Macmillan Publishing., pp. 388–340 (1993).
- [ 5 ] 結城和明・村上俊之・大西公平: 「共振比制御による 2 慣性共振系の振動抑制制御」, 電学論 D , **113** , 10 , pp.1162–1169 (1993-10)
- [ 6 ] Somsawas Tungpataratanawong, Satit Chitbanchong, Toshimasa Miyazaki, Seiichiro Katsura and Kiyoshi Ohishi: “Robust Position Control of End-Effector Considering Gear Stiffness and Arm Stiffness for Industrial Robot”, 電気学会論文誌 D ( 産業応用部門誌 ) , Vol. 127 (2007) , No. 6 , pp.603-609
- [ 7 ] 宮崎敏昌・大石 潔・橋本敦美・中塚 隆: 「ギアの角度伝達誤差を考慮したロボットアームのロバスト速度制御系の一構成法」, 電学論 D , **118** , 12 , pp.1427–1434 (1998-12)
- [ 8 ] 梅野 孝治, 堀 洋一: 「2 自由度ロバストサーボ系の構成とマニピュレータの運動制御への応用」, 電気学会論文誌 D ( 産業応用部門誌 ) , Vol. 110, No.11, pp.1163-1170,1990.
- [ 9 ] C. H. An, C. G. Atkeson, J. D. Griffiths, and J. M. Hollerbach, “Experimental Evaluation of Feedforward and Computed Torque Control,” IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 5, pp. 368–373 (1989-6)
- [ 10 ] 宮崎敏昌・大瀧 栄・ソムサワッス タンパタラタナウォン・大石 潔: 「動力学トル

- ク補償と2自由度制御系に基づく産業用ロボットの高速モーション制御法」, 電学論 D, **123**, 5, pp.525–532 (2003-5)
- [ 11 ] 井上 康之, 永田 英夫, 橋口 幸男: “ロボットの力制御”, 技報 安川電機, 第 69 卷, 第 4 号, pp200/203, 2005.
- [ 12 ] M. Zinn, O. Khatib, B. Roth, and J. K. Salisbury: “Playing It Safe,” IEEE Robot. Automat. Mag., Vol. 11, pp. 12–21 (2004-6).
- [ 13 ] A. Bicchi and G. Tonietti: “Fast and Soft-arm Tactics”, IEEE. Robot. Automat. Mag., Vol.11, pp. 22-33. 2004.
- [ 14 ] Shibata, T.; Murakami, T.; “Power-Assist Control of Pushing Task by Repulsive Compliance Control in Electric Wheelchair” IEEE Trans. on Indu. Elect., Vol.59, Jan, pp.511 - 520(2012)
- [ 15 ] M.H.Raibert, J.J.Craig: “Hybrid Position/Force Control of Manipulators”, Transaction of the ASME, Vol. 102. pp.126-133, 1981.
- [ 16 ] Chiaverini, S.; Siciliano, B.; Villani, L. “Force and position tracking: parallel control with stiffness adaptation”, Control Systems, IEEE, Vol.18, pp.27 - 33, 1998.
- [ 17 ] Roy, J.; Whitcomb, L.L.; “Adaptive force control of position/velocity controlled robots: theory and experiment”, Robotics and Automation, IEEE Transactions on, Vol.18, Jan, pp.121 - 137 (2002)
- [ 18 ] N. Hogan “Impedance Control: An Approach to Manipulation, Part I - Theory, Part II - Implementation, Part III - Applications,” ASME J. Dynam. Syst., Meas., Contr., Vol. 107, pp. 1–24 (1985-3).
- [ 19 ] G. Ferretti, G. Magnani, and P. Rocco: “Impedance Control for Elastic Joints Industrial Manipulators,” IEEE Trans. Robot. Automat., Vol. 20, pp. 488–498 (2004-6).
- [ 20 ] Juyi Park; K.A. Loparo; C.B. Schrader; Pyung Hun Chang, “Bang-bang impact control using hybrid impedance/time-delay control”, Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, Volume 8, pp. 272-277, June 2003.
- [ 21 ] J. K. Salisbury: “Active Stiffness Control of A Manipulator in Cartesian Coordinates,” in

- Proc. IEEE Conf. Decision and Control., pp. 95–100 (1980).
- [ 22 ] 山中 絵理, 村上 俊之, 大西 公平: “ 等価質量と仮想インピーダンス設定による人間と移動マニピュレータの協調動作 ”, 電学論D, Vol. 123, No. 10, pp.1227-1233 (2003) .
- [ 23 ] 榊 泰輔, 舘 隆: “サーボ系をベースとしたインピーダンス制御における接触安定性の改善方法”, ロボット学会誌 , Vol.13, No.5, pp.659-665, 1995.
- [ 24 ] 望山 洋 : 「ロボットマニピュレータの腕全体に対する機械インピーダンス制御」日本ロボット学会誌 , Vol.22 , No.4 , pp:485-491 ( 2004 )
- [ 25 ] S. Chiaverini, B. Siciliano, and L. Villani: “A Survey of Robot Interaction Control Schemes with Experimental Comparison,” IEEE/ASME Trans. Mechatron., Vol. 4, pp. 273–285 (1999-9).
- [ 26 ] Inigo, Rafael M.; Kossey, Robert M.; “Closed-Loop Control of a Manipulator Arm Using a Wrist Force Sensor ”, IEEE Trans. on Indu. Elect., Vol.IE-34, Aug., pp.371-378(1987).
- [ 27 ] Suwanratchatamane, K. ; Matsumoto, M. ; Hashimoto, S. “Robotic Tactile Sensor System and Applications”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on , Vol.57, pp.1074 - 1087, 2009.
- [ 28 ] S. Eppinger and W. Seering, “Understanding bandwidth limitations in robot force control”, In Proc. of Robotics and Automation, Proceedings, 1987 IEEE International Conference on, Vol.4, pp. 904-909,1987.
- [ 29 ] 佐藤 晴哉 , 菅原 佳祐 , 大西 公平: “Performance improvement of PD Force control with reaction force observer” 電気学会研究会資料, IIC 2011(49-53・55-71), 65-70, 2011-03-08.
- [ 30 ] C.H.An, C.G.Atkeson, and J.M.Hollerbach, ”Model based control of a robot manipulator”, MIT Press, 1988.
- [ 31 ] D. E. Whitney: “Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions,” ASME J. Dynam. Syst.,Meas.,Contr., Vol. 99, No. 2, Jun. pp. 91–97 (1977).
- [ 32 ] Stepien, T. ; Sweet, L. ; Good, M. ; Tomizuka, M. : “Control of tool/workpiece contact

- force with application to robotic deburring”, IEEE Robot. Automat. Mag., Vol.3, Feb., pp.7 - 18,1987
- [ 33 ] Jenkins, H.E. , Kurfess, T.R.; “Adaptive pole-zero cancellation in grinding force control” IEEE Trans. on Cont. Syst., Vol.7, May, pp.363-370(1999).
- [ 34 ] O. Khatib. : “A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation.”, IEEE Journal on Robotics and Automation, RA-3(1):43-53, February 1987.
- [ 35 ] 菅井 賢, 志村康治, 堀 洋一: 「ロボットマニピュレータのための2自由度力制御器の提案」, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol. 111, No.10, pp.614-621, 1991.
- [ 36 ] 境野 翔, 佐藤 智矢, 大西 公平: 「運動量に基づいた力制御の安定性解析」, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol. 129, No.6, pp.614-621, 2009.
- [ 37 ] Seiichiro Katsura; Yuichi Matsumoto; Kouhei Ohnishi; “Modeling of Force Sensing and Validation of Disturbance Observer for Force Control”, IEEE Trans. on Indu. Elect., Vol.54, Feb., pp.530-538(2007).
- [ 38 ] Ohba, Y. ; Sazawa, M. ; Ohishi, K. ; Asai, T. ; Majima, K. ; Yoshizawa, Y. ; Kageyama, K. ; “Sensorless Force Control for Injection Molding Machine Using Reaction Torque Observer Considering Torsion Phenomenon” IEEE Trans. on Indu. Elect., Vol.56, Aug, pp.2955 - 2960(2009)
- [ 39 ] Aihara, T. ; Toba, A. ; Yanase, T. ; Mashimo, A. ; Endo, K. ; “Sensorless torque control of salient-pole synchronous motor at zero-speed operation ” IEEE Trans. on Power Elect., Vol.14, Jan, pp.202 - 208(1999)
- [ 40 ] S. Tungpataratanawong, K. Ohishi, and T. Miyazaki: “Force sensor-less impedance control considering resonant vibration for robot manipulator,” Proc. 2005 Technical Meeting on Industrial Instrumentation and Control, IEE Japan, No. IIC-05-62, pp. 25–30, Japan (2005-3).
- [ 41 ] 大賀 淳一郎, 西原 泰宣, 大明 準治, 「産業用ロボットアームの動力学モデルに基づいたセンサレス力制御」, 東芝レビュー 66(5), 38-41, 2011-05

- [ 42 ] K. Ohishi, Y. Ogawa, K. Nakano, I. Miyashita, S. Yasukawa, “An Approach of Anti-slip Readhesion Control of Electric Motor Coach Based on First Order Disturbance Observer”, IEEJ Trans. on Indus. Appli. , vol. 120(3), 382-389, 2000-03-01 (in Japanese).
- [ 43 ] Chan, S.P. ; “A disturbance observer for robot manipulators with application to electronic components assembly” IEEE Trans. on Indu. Elect., Vol.42, Oct, pp.487 - 493(1995)
- [ 44 ] 堀 洋一・澤田英行・全 瑩煥 : 「遅い共振比制御における外乱オブザーバの最適推定速度について」, 電学論 D , 117 , 1 , pp.50-56 (1997-1)
- [ 45 ] T.Miyazaki, K.Ohishi : “Robust Control Based on Disturbance Observer and Polynomial Coefficient Approach for Mechanical System”, 電気学会論文誌 D , 118 巻 , 6 号 , pp.707-714, 1998.
- [ 46 ] Murakami, T. ; Yu, F. ; Ohnishi, K. ; “Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator ” IEEE Trans. on Indu. Elect., Vol.40, Aug, pp.259 - 265(1993)
- [ 47 ] 大石 潔 , 能沢 秀雄 , 宮崎 敏昌 : 「トルク飽和と運動エネルギーを考慮した冗長マニピュレータの一モーション制御法」, 電学論 D , Vol.122 , No.9 pp:935-941 , (2002)
- [ 48 ] 境野 翔 , 大西 公平 : 「運動量を基にした動的力制御の一構成法」, 電気学会論文誌 D ( 産業応用部門誌 ) , Vol. 128, No.6, pp.694-700, 2008.
- [ 49 ] Ferretti, G.; Magnani, G.; Zavala Rio, A.; “Impact modeling and control for industrial manipulators”, Control Systems, IEEE , Vol.18, pp.65-71(1998).
- [ 50 ] Sri-Jayantha, Muthuthamby; “Feedback Control of Impact Dynamics of a Moving-Coli Actuator ”,IEEE Trans. on Indu. Elect., Vol.IE-34, May, pp.277-284(1987).
- [ 51 ] 吉田 和哉 , 指田 直毅 , 梅谷 陽二 : 「拡張逆慣性行列を用いた浮遊リンク系の衝突運動の定式化」, 日本ロボット学会誌 , Vol.11, No.3 , pp:410-418 , 1993
- [ 52 ] 古河 章二 , 山田 克彦 : 「宇宙ロボットのターゲット捕捉時の衝撃力評価 -関節部の剛性の影響-」, 日本ロボット学会誌 , Vol.13 , No.2, 242-248, 1995
- [ 53 ] 茂渡 修平 , 藤本 博志 , 堀 洋一 , 大槻 真嗣 , 橋本 樹明 : 「月惑星探査機のアクティブ着陸脚における衝撃力緩和制御法の基礎検討」, 電学論 D , vol.133, no. 3,pp.335-341,

2012

- [ 54 ] 村上 俊之, 高倉 晋司, 大西 公平, “外乱オブザーバによる障害物との衝突検知およびその回避モーション”, 電気学会論文誌. D, Vol. 110 (1990) No. 11, pp.1155-1162, 1990 年 11 月 20 日
- [ 55 ] 大石 潔, 宮崎 勝, 藤田 昌弘: “力センサを用いない位置と力のハイブリッド制御”, ロボット学会誌, vol.11, No.3, pp.166-174, 1993.
- [ 56 ] M. C. Good, L. M. Sweet, and K. L. Strobel: “Dynamic Models for Control System Design of Integrated Robot and Drive Systems”, ASME J. Dynam.Syst., Meas., Contr., Vol. 107, 1985, pp. 53-59.
- [ 57 ] L. Sciavicco and B. Siciliano: “Modeling and Control of Robot Manipulators”, McGraw-Hill, New York: 1996.
- [ 58 ] Somsawas Tungpataratanawong, Kiyoshi Ohishi and Toshimasa Miyazaki: “Robust Motion Control of Industrial Robot Based on Robot Parameter Identification and Feedforward Control Considering Resonant Frequency”, 電気学会論文誌 D ( 産業応用部門誌 ), Vol. 125 (2005) , No. 6, pp.568-574
- [ 59 ] 武居 直行, 古荘 純次, 藤永 浩司: “二慣性共振特性を有するロボットアームにおける関節トルクセンサを用いた制御”, 電学論 D, Vol. 124, No. 10, pp.985-993 (2004) .
- [ 60 ] 本家 浩一, 井上 喜雄, 原田 孝, 白澤 淳, 伊藤 廣: 「ロボットアームのモータトルクむらに起因する共振現象の制振制御」, 日本機械学会論文集. C 編 57(534), 631-634, 1991-02-25.
- [ 61 ] 真鍋舜治: 「係数図法による 2 慣性共振系制御器の設計」, 電学論 D , 118 , 1 , pp.58-66 (1998-1)
- [ 62 ] 松田 聡 , 大石 潔 : 「位置情報だけを用いた DSP による加速度制御系」, 電学論 D , Vol.110 , No.2, pp:108-116, 1990
- [ 63 ] 大石潔, 藤田昌弘: 「モーションコントロールのための加速度コントローラについての一考察」, 電気学会論文誌 D, 113 巻, 5 号, pp.696-697(1993).



- [ 64 ] 大石 潔, 大西 正紀, 宮崎 敏昌 ; 「ロバスト速度コントローラに基づく多関節ロボットの—モーション制御法」, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 116, No.2, 1996.
- [ 65 ] 堀洋一, 内田利之 : 「加速度制御にもとづく新しいモーションコントロール法の提案」, 電学論 D, vol.109, No.7 pp.470-476, 1989
- [ 66 ] 堀 洋一: 「負荷加速度制御と状態フィードバックによる 2 慣性系の制御」電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌 112(5), 499-500, 1992
- [ 67 ] 駒田 諭, 村上 俊之, 大西 公平 : 「加速度に基づく多自由度ロボットの力フィードバック制御」, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 109, No.5, pp.325-332, 1989.
- [ 68 ] Komada, S.; Ohnishi, K.; “Force feedback control of robot manipulator by the acceleration tracing orientation method”, IEEE Trans. on Indu. Elect., Vol.37, Feb., pp.6-12(1990).
- [ 69 ] Xu, W.L. ;Han, J.D. ; Tso, S.K. ; “Experimental study of contact transition control incorporating joint acceleration feedback”, Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, Volume 5, pp. 292-301, Sep. 2000.
- [ 70 ] Yung-Yaw Chen; Pai-yi Huang ; Jia-Yush Yen: “Frequency-domain identification algorithms for servo systems with friction”, IEEE Trans. on Cont. Sys. Tech., Vol.10, Sep., pp.654 - 665, 2002.
- [ 71 ] 富樫 信之, 山下 徹, 下野 誠通, 元井 直樹, 小田 尚樹: 「作業空間オブザーバに基づく推定等価質量を用いた運動制御手法の有効性検証」, 電学論 D, Vol.134, No.2, pp:115-126 (2014)
- [ 72 ] 芳司 俊郎, 池田 博康, 池田 博康: 『産業用ロボットによる最近の死亡災害発生状況と今後の保護方策について』安全工学研究発表会講演予稿集, 44 巻, pp.175-178, 2011



# 論文目録

## 公表論文

### 学術論文

- (1) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌:「産業用ロボットの正確で高速な接触動作を実現するセンサレス力制御を用いたモーションコントロール法」, 電学論D, Vol.132, No.3, pp:322-332, 2012
- (2) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌, 横倉 勇希:「産業用ロボットのジャーク信号と動力学に基づく動的閾値を用いる力センサレス接触検知」, 電学論D, Vol.133, No.3, pp:368-377, 2013

### 国際会議口頭発表論文 (査読付きフルペーパー)

- (1) **Naoki Shimada**, Kiyoshi Ohishi, Satoru Kumagai, and Toshimasa Miyazaki:“Smooth touch and force control to unknown environment without force sensor for industrial robot”, AMC, 2010 11th IEEE International workshop , pp. 36 - 41 , March 2010.
- (2) **Naoki Shimada**, TakashiYoshioka, Toshimasa Miyazaki, and Kiyoshi Ohishi:“Smooth Touch Control between Position and Force Control for Industrial Robots”, 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp.1949 - 1954, Nov. 2010.
- (3) **Naoki Shimada**, TakashiYoshioka, Toshimasa Miyazaki, and Kiyoshi Ohishi:“Novel force-sensor-less contact motion control for quick and smooth industrial robot motion”, 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp.4238 - 4243, Nov. 2011.
- (4) **Naoki Shimada**, TakashiYoshioka, Toshimasa Miyazaki, and Kiyoshi Ohishi:“Quick and Re-

- liable Contact Detection for Sensorless Force Control of Industrial Robots for Human Support”, 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp.1674 - 1679 , May 2012.
- (5) **Naoki Shimada**, Takashi Yoshioka, Toshimasa Miyazaki, and Kiyoshi Ohishi: “Reliable force-sensorless contact detection method for ball screw drive cartesian robot”, 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp.1 - 6 , May 2013.

## 国内学会口頭発表論文

- (1) 嶋田 直樹, 詫間 永, 大石 潔, 宮崎 敏昌: 「インピーダンス制御を用いた倣い制御による教示方法の提案」, 電気学会産業応用部門大会予稿集, 2009, pp. II-301 - II-304, 平成 21 年 8 月
- (2) 嶋田 直樹, 大石 潔, 宮崎 敏昌: 「外乱オブザーバを用いた I-PD 力制御系によるセンサレス力制御」, ロボット学会学術講演会予稿集, 2M2-03, 平成 21 年 9 月
- (3) 嶋田 直樹, 大石 潔, 熊谷 聡, 吉岡 崇, 宮崎 敏昌, 漆原 史朗: 「未知環境へのスムーズな力制御への移行についての考察」, システムインテグレーション部門講演会, pp.384-387, 平成 21 年 12 月
- (4) 嶋田 直樹, 熊谷 聡, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌: 「産業用ロボットの未知環境との接触時における能動的なセンサレス力制御の一手法」, 電気学会研究会資料. IIC, 産業計測制御研究会 2010(047), 13-18, 平成 22 年 3 月
- (5) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌: 「センサレス力制御に基づく安全な産業用ロボットの接触制御法」, ロボット学会学術講演会予稿集, 1F2-1, 平成 22 年 9 月
- (6) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌: 「センサレス力制御を用いた産業用ロボットのスムーズな接触動作を実現するモーションコントロール法」, 電気学会研究会資料. IIC, 産業計測制御研究会 2011(134), 55-60, 平成 23 年 3 月
- (7) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌: 「産業用ロボットと環境の安全な接触動作を実現するセンサレス力制御の一手法」, 平成 23 年電気学会全国大会講演論文集, 第 4 分冊, pp.310-311, 平成 23 年 3 月

- (8) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌: 「一次外乱オブザーバを用いた産業用ロボットの接触動作に関する一手法」, 自動制御連合講演会 (CD-ROM), 54, 11104, 平成 23 年 11 月
- (9) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌: 「外力ジャーク信号と動的閾値を用いた産業用ロボットの高信頼力センサレス接触検知」, 電気学会研究会資料. IIC, 産業計測制御研究会 2012(133), 107-112, 平成 24 年 3 月
- (10) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌: 「作業空間で動作する産業用ロボットのジャーク信号と動的閾値による高信頼力センサレス接触検知法」, 電気学会産業応用部門大会予稿集, 2012, pp. II-59 - II-64, 平成 24 年 8 月
- (11) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌, 横倉 勇希: 「作業空間と関節空間のジャーク信号による産業用ロボットの誤動作の少ない力センサレス接触検知の一手法」, ロボット学会学術講演会予稿集, 4G2-4, 平成 24 年 9 月
- (12) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌, 横倉 勇希: 「産業用ロボットの力制御動作に最適なジャーク信号を用いた信頼性の高い接触検知法」, 電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, 2012, 8-1, 平成 24 年 9 月
- (13) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌, 横倉 勇希, 穴山 哲: 「産業用ロボットの信頼性の高い接触検知とスムーズな接触動作を実現するジャーク信号に対する 2 つの動的閾値」, 電気学会研究会資料. IIC, 産業計測制御研究会 2013(33-48), 37-42, 平成 25 年 3 月
- (14) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌, 横倉 勇希: 「1 次外乱オブザーバで推定する外力ジャーク信号を用いた産業用ロボットの力センサレス接触検知」, ロボット学会学術講演会予稿集, AC1H1-07, 平成 25 年 8 月
- (15) 嶋田 直樹, 吉岡 崇, 大石 潔, 宮崎 敏昌, 横倉 勇希: 「多関節産業用ロボットの高機能な接触動作を実現する外力ジャーク信号と 3 つの動的閾値の提案」, 電気学会産業応用部門大会予稿集, 2013, pp. II-51 - II-56, 平成 25 年 9 月

## 国際会議口頭発表論文 (査読なし)

- 
- (1) **Naoki Shimada**, Takashi Yoshioka, Toshimasa Miyazaki, and Kiyoshi Ohishi: "A Fine Force Control Strategy with Smooth Contact Method for Industrial Robot", the 20th Tokyo-section Niigata Convention Record of IEEE Japan, IEEE-15, pp.35, Nov. 2010.

---

博士（工学）学位論文  
産業用ロボットの外乱オブザーバを用いた  
高性能接触モーション制御法に関する研究

発行日 2014年2月吉日

著者・発行者 嶋田 直樹

---