

遠隔操縦油圧ショベルの機体挙動予測に基づく
転倒防止システムに関する研究

2018年 3月

重松 康祐

遠隔操縦油圧ショベルの
機体挙動予測に基づく
転倒防止システムに関する研究

重松康祐

システム情報工学研究科
筑波大学

2018年3月

概要

背景および目的

土砂災害等の二次災害の恐れがある災害現場の初動対応において、遠隔操縦の油圧ショベルが投入されている。このような対応では、有人操縦では行うことができないような急傾斜地での作業が求められることも多い。そのような場所では作業装置を不用意に操作すると、重心位置の変化や慣性力による影響で転倒の恐れがある。有人操縦では、車体の傾斜、加速度や周囲の地形を搭乗者が瞬時に認識できるため、転倒の危険が伴うような動作を回避することができる。一方、遠隔操縦では、ショベルを直接目視するか、カメラ画像を頼りにせねばならず、必ずしも機体の情報や周囲の地形を正確に認識できないため、転倒の危険性を判断するのは実機搭乗時ほど容易ではない。また、カメラ画像や操縦信号には、通信遅延が生じるため、転倒の危険をカメラ画像から判断できても、転倒回避操作が手遅れとなる可能性が高い。前述した遠隔操縦による情報の欠如を補償する方法として、バーチャルリアリティ技術を活用して遠隔操縦者に機体の状態や周囲の状況を提示するシステムが開発されている。しかし、専用の座席やディスプレイ等の機材が大規模になり、災害の初動対応で求められる迅速な機材展開が困難である。また、通信遅延の問題は残る。一般的な遠隔操縦油圧ショベルでは、遠隔操縦者は、カメラ画像に基づき、転倒の危険回避に常に注意を払いながら操縦を行う。しかし、カメラ画像による危険性判断の困難性や通信遅延の影響により、遠隔操縦者が油圧ショベルの転倒を回避することは難しいと考えている。また、操縦信号は直接アクチュエータに与えられるため、操縦者の不用意な操作や誤操作により機体が転倒する恐れがある。そこで、遠隔操縦者に頼らず、遠隔操縦ショベル側での転倒防止制御によって、これらの問題を解決しようと考えた。これは、遠隔操縦者の操作指令に対する将来の機体の運動を予測することで、将来の転倒危険性を機体が動き出す前に予測し、転倒の危険性がある場合には操作入力を転倒しない範囲へ修正して未然に転倒を防ぐものである。本提案手法は、転倒しない範囲の操作入力しかアクチュエータに与えないので、遠隔操縦指令やカメラ画像に遅延があっても本制御に影響を与えない。

油圧ショベルは、移動マニピュレータの一種とみなすことができる。移動マニピ

レータにおいては、以前から転倒防止制御に関する研究が行われてきた。これらの手法は、転倒の危険があると判断される不安定な状態に陥った場合に、マニピュレータの運動により安定性を回復する手法と事前に安定なマニピュレータの軌道を計画する手法に大別される。前者の手法を適用する場合、油圧ショベルの動作指令に対する応答性はモータに比べて遅いため、これら手法を油圧ショベルに適用した場合、モータ駆動の移動マニピュレータと比較し、安定性を回復できる状況は限定的であると考えられる。また、遠隔操縦では、操縦者の意に反してまで安定回復のための動作を行うことは、地上物体との衝突回避の問題なども考慮しなければならず、また操作性の観点からも望ましくないと考える。これらのことから、遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止には、安定性の回復動作を行うというアプローチではなく、機体を不安定な状態に陥らせないというアプローチが適していると考えている。一方、事前に安定なマニピュレータの軌道を計画する手法は、遠隔操縦者が操縦する遠隔操縦油圧ショベルには適用できない。油圧ショベルにおいて、ZMPをリアルタイムで算出し、遠隔操縦者に提示することで転倒を防ごうとする手法が提案されている。また、動いている作業装置を止める時、転倒の恐れがあれば自動的に緩停止させることで転倒を防ぐ手法がすでに提案されている。一方本研究では、動き出す直前に、操作指令値を基に近い将来の機体挙動と転倒危険性を予測し、転倒の未然防止を考えて、リアルタイムの計測による計算よりもさら先立ってその予測をしたいと考える。また、本研究は任意の操作入力に対する機体の転倒危険性を予測することで、作業装置停止時だけでなく、任意の油圧ショベルの状態に対して作業装置動作に伴う慣性力や重心の変化による転倒の防止を図ることができる。

油圧ショベルのモデル化

簡便な油圧ショベル動作モデルの構築

遠隔操縦者の操作入力に対する転倒危険性を予測するためには機体の挙動を予測する必要がある。機体挙動の予測のため、油圧ショベルのモデル化が必要である。前述のとおり、油圧ショベルの精密な物理モデルを構築することは不可能ではないが、これらの様な物理モデルを用い、将来の油圧ショベルの運動を高周期にシミュレーションできるほど高性能な計算機を油圧ショベルに搭載することは不可能ではないが現実的ではない。また、多様な油圧ショベルに本手法を適用することを考えた場合、同定すべきパラメータはそれほど多くないことが望ましい。そこで、本研究では高周期に計算可能なアクチュエータの簡易な動作モデルを構築する。先行研究を参考にし、操作入力に対するアクチュエータの速度応答を2次遅れ系としてモデル化した。このモ

デルを用いることで操作入力に対する将来のアクチュエータの動作および機体挙動の高速な予測が可能となった。

検証用シミュレータ

転倒防止システムの効果を検証するためには、油圧ショベルの機体の転倒を模擬する必要があるが実機を用いた実験は、安全性やコストの面において現実的ではない。そのため、実機の挙動を再現するシミュレーションモデルの構築を行った。油圧ショベルのモデル化にあたり、実機の油圧ショベルのブームおよび旋回動作動作特性を取得する予備実験を行った。予備実験の結果より、油圧ショベルの姿勢の変化に応じて油圧ショベルの速度応答が変化することが分かった。ブーム動作時は、重力によりブームシリンダに応じてシリンダ速度の定常速度が特に大きく変化し、旋回時は旋回軸周りの慣性モーメントに応じて加減速度が大きく変化することが確認できた。シミュレータとして Matlab/Simulink と V-rep を併用して油圧ショベルの油圧システム、キネマティクス、ダイナミクスをモデル化し、実機の挙動および転倒を再現するシミュレーション環境を構築した。

機体 ZMP および重心の予測に基づく転倒防止システム

本研究では、油圧ショベル自体の作業装置の動作によって転倒する場合を対象とし、掘削などの作業に伴うバケットと地面との衝突や掘削反力による転倒については対象としないものとする。このような前提条件の下では、油圧ショベルが転倒するケースは以下の2つが考えられる。

- ・ケース1 作業装置動作に伴う慣性力による転倒
- ・ケース2 作業装置動作に伴う重心位置変化による転倒

ケース1は、転倒危険性のある慣性力を作業装置の動作により発生させないように操作入力を自動調整することで防ぐことができる。つまり、この操作入力の自動調整により、作業装置動作時の加速度を機体の転倒が生じない範囲に制限するものとなっており、加速度を滑らかにするものである。ケース2は、転倒危険性のある重心位置となる姿勢になる前に自動停止させることで防ぐことができる。これは、油圧ショベルの姿勢に制限を与えるものである。これらケース1及びケース2に対する対応である操作入力の自動調整及び自動停止を組み合わせることで、動作時の加速度と姿勢が制限され、静的及び動的な転倒を防ぐことが期待できる。自動調整プロセスは、遠隔操縦者が与えた操作入力及び機体のセンサ情報から予測した将来の ZMP に基づき動的に安定な範囲に調整された操作入力をアクチュエータに与えることで、動的に安定な

機体状態を保つ。自動停止プロセスは、操作入力及び機体のセンサ情報から予測した将来の重心の鉛直床面投影点を予測し、転倒危険性を判断する。そして、転倒の危険がある場合には、予測した将来の重心の鉛直床面投影点及びZMPに基づき静的及び動的に機体を安定に保ちながら作業装置を自動停止させる。自動停止プロセスによるアクチュエータに対する入力は、自動調整プロセスよりも優先させることで、自動的かつ安全に作業装置を停止させることができる。転倒危険性の予測や操作入力修正の計算時間は、アクチュエータの動作までの遅延時間や通信遅延時間に比べて非常に短い時間であることが期待できるため、転倒の防止を妨げる程の悪影響はないと考えられる。提案するシステムの効果の検証のため、模型車両を用いた実験を行い、本手法により転倒を防ぐ効果を確認した。

機体の浮き上がりを考慮した正規化エネルギー安定余裕の予測に基づく転倒防止システム

提案した機体ZMPおよび重心の予測に基づく転倒防止システムは、ZMPおよび重心の鉛直床面投影点が支持多角形内に留めることで機体を安定に保つものであるため、慣性力による機体の傾斜を一切許容しないものである。しかし、実際には機体が浮き上がっても機体が即時に転倒するとは限らない。機体が転倒しない範囲で機体の傾斜を許容することで動作可能な範囲の拡大や機体の動作速度を向上させることができる。考えた。アクチュエータの動作による機体の一部の浮き上がりを予測し、機体が浮き上がった後の転倒危険性を予測する。遠隔操縦者の操作入力から予測した転倒危険性が許容値以下となる操作入力に修正してアクチュエータに与える。これにより、動的および静的に安定な機体の状態を維持する操作入力のみをアクチュエータに与えることができる。転倒危険性の指標として正規化エネルギー安定余裕を用いた。正規化エネルギー安定余裕は、0より小さくなると転倒することを意味する。そのため、本システムでは正規化エネルギー安定余裕があるマージン以上を維持するように操作入力を修正する。このマージンを一定値にすることで、機体の姿勢や転倒の方向によらず機体を転倒させるのに必要なエネルギーのマージンを一定にすることができる。本手法は、任意の油圧ショベルの状態に対してあらゆる操作入力を与えたときの将来の正規化エネルギー安定余裕を予測し、予測した正規化エネルギー安定余裕がしきい値以上かつ遠隔操縦者の操作入力に近い値を選択する。そのように操作入力を選択することで、転倒を防ぎつつ、遠隔操縦者の操作性をできるだけ低下させないことを目指すものである。油圧ショベルは、旋回やブームなど複数のアクチュエータを持っており、操作入力の組み合わせも膨大である。CPUによる繰り返し処理により、実時間ですべての操作入力の組み合わせに対する将来の正規化エネルギー安定余裕を計算する

のは難したため、GPUを用いた並列計算により処理することにより実時間での処理を行う。提案するシステムの効果の検証のため、シミュレーション環境を構築し、本手法により転倒を防ぐ効果を確認した。

結論

本研究では、遠隔操縦油圧ショベルが自身のアクチュエータの動作による転倒を防ぐシステムを提案した。本手法は、操作入力に対する将来の転倒危険性を事前に予測し、転倒の危険がある場合には操作入力を修正することで転倒を防ぐものである。本研究の成果として、以下の結果を得た。

- ・操作入力に対する油圧ショベルのアクチュエータの速度応答を簡便にモデル化した。これにより、操作入力に対する油圧ショベルの挙動を高速にシミュレーションすることが可能となった。

- ・機体 ZMP および重心の予測に基づき転倒を防止するシステムを提案した。このシステムにより、機体の ZMP および重心を支持多角形に留め、機体を安定状態に保つことができる。模型車両による実験により、本手法により転倒を防ぐことができることを確認した。

- ・機体の浮き上がりを考慮した正規化エネルギー安定余裕の予測に基づく転倒防止システムを提案した。このシステムにより、機体の浮きあがり後の正規化エネルギー安定余裕を予測し、正規化エネルギー安定余裕を許容値以上に留めることで機体を安定状態に保つことができる。また、本手法は複数のアクチュエータの同時動作に対応し、GPUを用いた並列計算により実時間処理が可能であることを示した。シミュレーションにより、本手法により多くのシチュエーションで転倒を防ぐことができることを確認した。

本研究では、過去取り組まれた例が少ない災害現場に投入される油圧ショベルの転倒を防止するシステムについて検討を行い、模型実験およびシミュレーション実験で提案手法の有効性を示した。本研究により災害現場等の急傾斜地において機体を安定状態に保つ技術の向上に貢献したものであると考える。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止システムのアプローチ	3
1.3	研究の目的と前提条件	4
1.4	提案するシステムの構成	5
1.5	関連研究	6
1.6	論文構成	7
第2章	油圧ショベルのモデル化	9
2.1	概要	9
2.2	実機の動作特性	9
2.3	簡便な油圧ショベルの動作モデル	11
2.4	検証用シミュレータ	16
2.5	まとめ	18
第3章	機体 ZMP および重心の予測に基づく転倒防止システム	22
3.1	概要	22
3.2	操作入力の自動調整および自動停止	24
3.3	機体 ZMP および重心の鉛直床面投影点の予測	25
3.4	機体振動を考慮した機体の ZMP の予測	27
3.5	実験環境	29
3.6	実験	31
3.7	シミュレーション実験	37
3.8	まとめ	40
第4章	機体の浮き上がりを考慮した正規化エネルギー安定余裕の予測に基づく 転倒防止システム	51
4.1	概要	51
4.2	機体の浮き上がりを考慮した NE 安定余裕の予測	52

4.3	機体の浮き上がりを考慮した NE 安定余裕の予測に基づく操作入力 の選択	53
4.4	処理の高速化	55
4.5	シミュレーション実験	57
4.6	機体 ZMP および重心の予測に基づく転倒防止システム（3 章）との比較	61
4.7	まとめ	63
第 5 章	結論	73
5.1	研究の成果	73
5.2	実用性向上のため残された課題	74
	謝辞	77
	参考文献	78

目 次

1.1	急傾斜地において遠隔操縦油圧ショベルが土砂撤去を行っている様子 (栗原市より提供)	2
1.2	一般的な遠隔操縦油圧ショベルの構成	5
1.3	提案する転倒防止システムの構成	5
1.4	2章から4章の構成	8
2.1	センサ取り付け位置	11
2.2	実験時の油圧ショベルの姿勢	11
2.3	ブーム上げ時の実験結果	12
2.4	ブーム下げ時の実験結果	12
2.5	旋回時の実験結果	13
2.6	重力により生じるブームの関節トルク	14
2.7	重力により生じるブームの関節トルクとブームシリンダに加わる力	15
2.8	シミュレーションの構成	17
2.9	構築した Matlab/Simulink のブロック	19
2.10	油圧ショベルの座標系	20
2.11	ブーム上げ時のシミュレーション結果	20
2.12	ブーム下げ時のシミュレーション結果	21
2.13	旋回時のシミュレーション結果	21
3.1	支持多角形の内側に安全領域を設定	23
3.2	提案するシステムの構成	24
3.3	操作入力の自動調整のフローチャート	25
3.4	自動停止のフローチャート	26
3.5	油圧ショベルの各部を質点系として近似	27
3.6	ZMP 予測のフローチャート	28
3.7	重心予測のフローチャート	28
3.8	機体振動による ZMP の振動	29
3.9	機体振動を考慮した機体の ZMP 予測のコンセプト	30

3.10	機体振動を考慮した機体の ZMP の予測のフローチャート	31
3.11	実験用模型車両	31
3.12	床反力計測装置	32
3.13	フィッティング結果（ブーム）	32
3.14	フィッティング結果（旋回）	33
3.15	実験の配置	34
3.16	実験結果（ブーム上げ）	35
3.17	実験結果（ブーム下げ）	35
3.18	実験結果（旋回）	36
3.19	実験の様子（ブーム上げ）	36
3.20	実験の様子（ブーム下げ）	37
3.21	実験の様子（旋回）	37
3.22	自動停止の実験結果	42
3.23	自動停止の実験の様子	43
3.24	ZMP 振動モデルのパラメータ同定結果	43
3.25	実験結果（ブーム上げ）	44
3.26	実験結果（ブーム下げ）	44
3.27	実験の様子（ブーム上げ）	45
3.28	実験の様子（ブーム下げ）	45
3.29	旋回のフィッティング結果（姿勢変化を考慮しない）	46
3.30	旋回のフィッティング結果（姿勢変化を考慮する）	46
3.31	ブーム上げのフィッティング結果（姿勢変化を考慮しない）	46
3.32	ブーム上げのフィッティング結果（姿勢変化を考慮する）	47
3.33	ブーム下げのフィッティング結果（姿勢変化を考慮しない）	47
3.34	ブーム下げのフィッティング結果（姿勢変化を考慮する）	47
3.35	アーム上げのフィッティング結果	48
3.36	アーム下げのフィッティング結果	48
3.37	ブーム上げ時の実験結果（操作入力の自動調整なし）	49
3.38	ブーム上げ時の実験結果（操作入力の自動調整あり）	49
3.39	旋回時の実験結果（自動停止なし）	50
3.40	旋回時の実験結果（自動停止あり）	50
4.1	正規化エネルギー安定余裕	52
4.2	システム構成	53
4.3	NE 安定余裕の予測	54
4.4	操作入力の選択	55

4.5	旋回とブームの操作入力の組み合わせに対する予測NE安定余裕の例	56
4.6	シミュレーション実験の座標系	57
4.7	ブーム上げ, 転倒防止システムなし [実験条件 1]	59
4.8	ブーム上げ, 転倒防止システムあり (動作対象: 旋回, ブーム, アーム), 動作モデル: 姿勢変化考慮なし, 高速化なし [実験条件 1]	60
4.9	ブーム上げ, 転倒防止システムあり (動作対象: 旋回, ブーム, アーム), 動作モデル: 姿勢変化考慮なし, 高速化あり [実験条件 1]	61
4.10	ブーム上げ, 転倒防止システムあり (動作対象: 旋回, ブーム, アーム), 動作モデル: 姿勢変化考慮あり, 高速化あり [実験条件 1]	62
4.11	ブーム上げ, 転倒防止システムあり (動作対象: ブーム), 動作モデル: 姿勢変化考慮あり, 高速化あり [実験条件 1]	63
4.12	ブーム上げ, 転倒防止システムなし [実験条件 2]	64
4.13	ブーム上げ, 転倒防止システムあり (動作対象: 旋回, ブーム, アーム), 動作モデル: 姿勢変化考慮なし, 高速化なし [実験条件 2]	65
4.14	ブーム下げ, 転倒防止システムなし [実験条件 3]	65
4.15	ブーム下げ, 転倒防止システムあり (動作対象: 旋回, ブーム, アーム), 動作モデル: 姿勢変化考慮あり, 高速化あり [実験条件 3]	66
4.16	ブーム下げ, 転倒防止システムあり (動作対象: ブーム), 動作モデル: 姿勢変化考慮あり, 高速化あり [実験条件 3]	67
4.17	旋回, 転倒防止システムなし [実験条件 4]	67
4.18	旋回, 転倒防止システムあり (動作対象: 旋回, ブーム, アーム), 動作モデル: 姿勢変化考慮なし, 高速化なし [実験条件 4]	68
4.19	旋回, 転倒防止システムあり (動作対象: 旋回), 動作モデル: 姿勢変化考慮なし, 高速化なし [実験条件 4]	68
4.20	旋回, 転倒防止システムあり (動作対象: 旋回), 動作モデル: 姿勢変化考慮あり, 高速化あり [実験条件 5]	69
4.21	旋回およびブーム上げ, 転倒防止システムなし [実験条件 6]	69
4.22	ブーム上げの実験結果の比較 (操作入力)	70
4.23	旋回およびブーム上げ, 転倒防止システムあり (動作対象: 旋回, ブーム, アーム), 動作モデル: 姿勢変化考慮なし, 高速化なし [実験条件 6]	70
4.24	ブーム上げの実験結果の比較 (操作入力)	71
4.25	ブーム上げの実験結果の比較 (ZMP)	71
4.26	旋回の実験結果の比較 (操作入力)	71
4.27	旋回の実験結果の比較 (ZMP)	72

表 目 次

1.1 転倒防止手法の分類	4
2.1 油圧ショベルのモデル化	10
2.2 油圧ショベルのパラメータ	17
3.1 スケールモデルのパラメータ	30
3.2 速度応答のパラメータ (ブームシリンダ)	33
3.3 速度応答のパラメータ (旋回モータ)	34
3.4 ZMP 振動モデルのパラメータ	38
3.5 速度応答のパラメータ (旋回)	39
3.6 速度応答のパラメータ (ブーム上げ)	39
3.7 速度応答のパラメータ (ブーム下げ)	40
3.8 速度応答のパラメータ (アーム上げ)	40
3.9 速度応答のパラメータ (アーム下げ)	41
4.1 高速化処理の一例	56
4.2 ブーム上げの実験条件	58
4.3 ブーム下げの実験条件	59
4.4 旋回の実験条件	61
4.5 旋回, ブーム複合動作の実験条件	62

第1章 序論

1.1 研究の背景

大雨や火山の噴火による地滑りやがけ崩れなどのような土砂災害においては、その被害拡大の防止や人命救助のために初動対応が重要である。しかし、この対応の最中にさらに崩落が起きることによる二次災害の危険があるので、細心の注意を払う対応となる。その一つとして、この初動対応において図 1.1 に示すような遠隔操縦の油圧ショベルが投入される [1, 2, 3]。土砂災害の初動対応における遠隔操縦油圧ショベルの作業手順としては、まず走行路を確保しながら作業現場に進み、次に足場の形成をしてから必要な作業を行う [4]。このとき、有人操縦では行うことができないような急傾斜地での作業が求められることも多い。そのような油圧ショベルが非常に不安定な場所では作業装置を不用意に操作すると、重心位置の変化や慣性力による影響で転倒の恐れがある。特に遠隔操縦油圧ショベルでは、有人操縦時に比べて以下 4 つの要因のため転倒危険性が増大する。

作業現場の困難性

遠隔操縦油圧ショベルは、遠隔操縦者の安全確保の観点から有人操縦の油圧ショベルの投入が困難な急傾斜地、軟弱地などに投入される。そのため、有人操縦時と比較してもとものと転倒する危険が高い環境での作業が求められる。

機体状態および環境の把握の困難性

有人操縦では、車体の傾斜、加速度や周囲の地形を搭乗者が瞬時に認識できるため、転倒の危険が伴うような動作を回避することができる。一方、遠隔操縦では、油圧ショベルを直接目視するか、カメラ画像を頼りにせねばならず、必ずしも機体の情報や周囲の地形を正確に認識できないため、転倒の危険性を判断するのは実機搭乗時ほど容易ではない。雲仙普賢岳で実施されている無人化施工現場では、遠隔操縦者は自身の操縦する建設機械に搭載したカメラ画像だけでなく別視点の画像を提供するためのカメラ車や現場に固定した監視カメラなど多視点の画像をもとに作業を行っている [5]。災害の初動対応では、遠隔操縦者はカメラ車などの画像を利用できないため、通常の無人化施工現場での作



図 1.1: 急傾斜地において遠隔操縦油圧ショベルが土砂撤去を行っている様子 (栗原市より提供)

業に比べ，機体状態および環境の把握は困難となる．

通信遅延

遠隔操縦システムでは，遠隔操縦油圧ショベルと遠隔操縦者間の通信に遅延がある [6] ため，カメラ画像や遠隔操縦者の操作に遅延が生じる．そのため，遠隔操縦者がカメラ画像を見て操作を行っている場合には，その遅延により危険を察知するのも有人操縦時に比べて遅れる恐れが大きい．また，危険を察知した後の遠隔操縦者による危険回避のための操作も，この遅延により実際の転倒回避が手遅れになる可能性が高い．

熟練遠隔操縦者確保の困難性

遠隔操縦油圧ショベルの遠隔操縦者は国内に数が少なく，特に傾斜地で作業することができるほど熟練した遠隔操縦者は国内で 20 人程度と非常に少ない [2]．そのため，必ずしも熟練した遠隔操縦者が作業にあたることはできるとは限らず，遠隔操縦者の技量不足により転倒の危険性が高まる可能性がある．

以上の要因から，遠隔操縦油圧ショベルでは転倒の危険と隣合わせの状況での作業が求められる．遠隔操縦では，機体の転倒による人的な被害はないが，機体の損傷による経済的損失は免れず代替機の確保に時間を要して初動対応に遅れが出るなど，速やかな任務遂行へ支障が出る恐れがある．本研究では遠隔操縦で作業中の油圧ショベ

ルについて、不用意な入力操作により機体が転倒する危険があるとき、機体が転倒に至らないようにするシステムについて検討する。

1.2 遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止システムのアプローチ

遠隔操縦油圧ショベルの転倒を防止するシステムとしては、様々なアプローチの手法が考えられる。以下に考えられる手法とその特徴を挙げる。

操作入力を自動的に調整する手法

転倒の危険がある操作入力が入力された場合、転倒しない範囲の操作入力に調整することで転倒を防ぐ。本手法は、油圧ショベル自身の動作によって機体不安定になるケースの転倒を防ぐことが期待できる。

反動により安定性を回復する手法

油圧ショベルが転倒危険な状態に陥る場合、作業装置を自動的に動作させ、その反動により機体状態を安定な状態に回復する。このような安定回復動作を開始する時の機体状態やアクチュエータの応答速度によっては、必ずしも機体状態を回復することができない可能性がある。また、油圧ショベルの作業装置と外部物体との接触を考慮する必要がある。

転倒時に手先を地面に着く手法

油圧ショベルが転倒する際に手先（バケット）を地面に着くことで機体が転倒することを防ぐ。この手法も機体状態やアクチュエータの応答速度によっては、必ずしも機体状態を回復することができない可能性がある。また、地面の軟弱さによっては転倒を防ぐための十分な反力が得られない可能性がある。

アウトリガの追加

油圧ショベルにアウトリガを搭載し、作業時にはアウトリガを固定することにより機体の安定性を増加させる。地形によってはアウトリガを固定できない可能性があり、また軟弱な地面では十分な反力が得られない可能性がある。油圧ショベルの機体構造の変化に伴い、コストが大幅に増加することが懸念される。

クローラ部の拡大

油圧ショベルのクローラ部を拡大することにより機体の安定性を向上させる。油圧ショベルの機体構造の変化に伴い、コストが大幅に増加することが懸念さ

表 1.1: 転倒防止手法の分類

	機体構造の変更を伴わない	機体構造の変更を伴う
安定状態を維持	<ul style="list-style-type: none"> ● 操作入力を自動的に調整 	<ul style="list-style-type: none"> ● アウトリガの追加 ● クローラ部を拡大
不安定状態を回復	<ul style="list-style-type: none"> ● 転倒時に手先を地面に着く手法 ● 反動により安定性を回復する手法 	

れる。また、機体のサイズが大きくなるため輸送性の低下が懸念され、遠隔操縦油圧ショベルに求められる迅速な機材展開が困難になる恐れがある。

これらの転倒防止手法は、機体構造の変更を伴うものと伴わないもの、安定状態を維持するものと不安定状態を回復するものとに分類できる（表 1.1）。機体構造の変更を伴わない手法は機体構造の変更を伴う手法に比べてコスト面で有利であることから、本研究では機体構造の変更を伴わない手法について検討することとした。不安定状態を回復する手法は、油圧ショベルの機体の状態によっては必ずしも転倒を防ぐことができない可能性があるため、まずは安定状態を維持する手法である操作入力を自動的に調整する手法について取り組むこととした。

1.3 研究の目的と前提条件

本研究では遠隔操縦油圧ショベルが転倒する危険がある場合に、遠隔操縦者の操作入力を転倒しない範囲に自動的に調整することで機体の転倒を防ぐ手法について検討する。遠隔操縦者の操作性の観点からは、操作入力の調整は必要最小限であることが望ましく、転倒しない状況では遠隔操縦者の操作入力通りに動作することが必要である。

転倒が生じる要因としては油圧ショベルが移動する場合と作業装置を動作させる場合が考えられる。油圧ショベルが移動する場合については、滑落やクローラの動作による移動が考えられるが外部の地形の状態や地面とクローラとの相互作用が影響するため問題が複雑となる。そのため、本研究ではまず油圧ショベル自身の作業装置動作によって転倒する場合を対象とする。

極端に軟弱な地面や凹凸のある地面では、作業実施前に地面をならす等の下準備をすることにより環境を整えることを想定している。そのため、本研究では作業環境として、沈みこみのないフラットな地面を仮定して検討を進める。

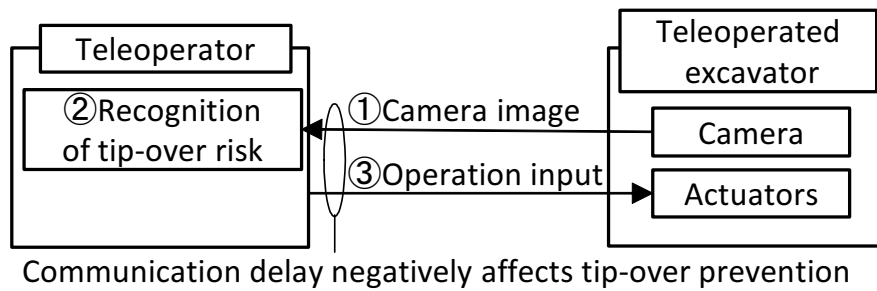


図 1.2: 一般的な遠隔操縦油圧ショベルの構成

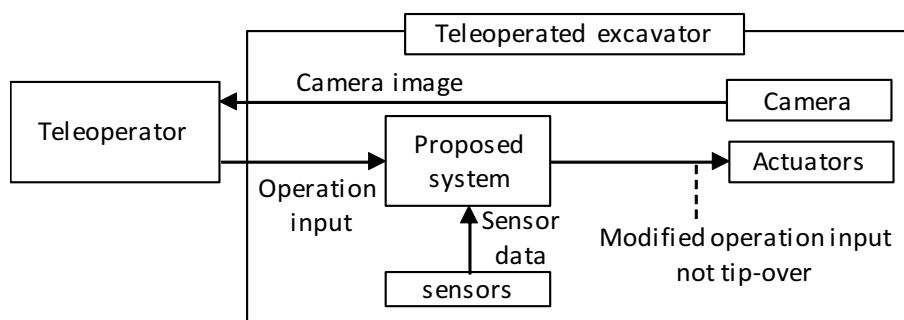


図 1.3: 提案する転倒防止システムの構成

1.4 提案するシステムの構成

図 1.2 に一般的な遠隔操縦油圧ショベルのシステム構成を示す．遠隔操縦者は，カメラ画像に基づき，転倒の危険回避に常に注意を払いながら操縦を行う．しかし，カメラ画像による危険性判断の困難性や通信遅延の影響により，遠隔操縦者が油圧ショベルの転倒を回避することは難しいと考えている．また，操縦信号は直接アクチュエータに与えられるため，操縦者の不用意な操作や誤操作により機体が転倒する恐れがある．

そこで，遠隔操縦者に頼らず遠隔操縦ショベル側での転倒防止制御によってこれらの問題を解決しようと考えた．図 1.3 に提案するシステムの概要を示す．これは，遠隔操縦者の操作指令に対する将来の機体の運動を予測することで，将来の転倒危険性を機体が動き出す前に予測し，転倒の危険性がある場合には操作入力を転倒しない範囲へ修正して未然に転倒を防ぐものである．本提案手法によって，転倒しない範囲の操作入力しかアクチュエータに与えないので，遠隔操縦指令やカメラ画像に遅延があっても本制御に影響を与えない．将来の転倒危険性を予測するためには，将来の機体運動を予測する必要がある．

1.5 関連研究

遠隔操縦による情報の欠如を補償する方法として、バーチャルリアリティ技術を活用して遠隔操縦者に機体の状態や周囲の状況を提示するシステムが開発されている [7, 8, 9]. しかし、専用の座席やディスプレイ等の機材が大規模になり、災害の初動対応で求められる迅速な機材展開が困難である。また、通信遅延の問題は残る。通信遅延がある状況では、遠隔操縦者の操作により転倒の危険を回避する方法では手遅れになる可能性がある。そのため、遠隔操縦者に頼らず、システム側で転倒しないことを担保するアプローチが適当ではないかと考える。

油圧ショベルは、移動マニピュレータの一種である。移動マニピュレータにおいては、以前から転倒防止制御に関する研究が行われている。これらの手法は大きく次の2つに分類される。一つ目は、転倒の危険があると判断される不安定な状態に陥った場合、もしくは陥りそうな場合に、マニピュレータの運動や走行装置の動作により安定性を回復し、転倒を防ぐ手法である [10, 11, 12]. 二つ目は、安定な動作経路計画を事前に行う手法である [13, 14, 15, 16]. 一つ目の手法を油圧ショベルに適用した場合、モータ駆動の移動マニピュレータと比較し、応答性が悪く [17] 安定性を回復できる状況は限定的であると考ええる。また、遠隔操縦では、操縦者の意に反してまで安定回復のための動作を行うことは、地上物体との衝突回避の問題なども考慮しなければならず、また操作性の観点からも望ましくないと考える。これらのことから、遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止には、安定性の回復動作を行うというアプローチではなく、機体を不安定な状態に陥らせないというアプローチが適していると考えている。また、本研究では遠隔操縦油圧ショベルを対象としており、事前に経路を計画することはできず、二つ目の手法を適用できない。

油圧ショベルにおいて、作業装置動作中の動的な転倒危険性の評価指標として、ZMP (Zero Moment Point) [18] を用いた例がある。遠隔操縦油圧ショベルの転倒危険性の評価のため、重心位置を使うことで油圧ショベルの加速度変動による ZMP の誤差を抑えることができる Static compensation ZMP が提案された [19]. また、遠隔操縦油圧ショベルの転倒を防ぐ手法として、油圧ショベル各部に取り付けた加速度センサやシリンダストロークセンサなどから機体の姿勢や運動を計測することでリアルタイムに算出した ZMP を遠隔操縦者に可視化して提示することにより遠隔操縦者に転倒危険性を認識させて転倒の防止を図る方法がある [20, 21]. しかし、遠隔操縦者と油圧ショベル間の通信には遅延があるため、遠隔操縦者による転倒回避のための操作が手遅れとなる可能性が高い。また、リアルタイムに算出された ZMP を支持多角形内に留めるようにアクチュエータを自動的に制御する方法も考えられるが、油圧アクチュエータの応答性から制御が手遅れとなる可能性がある。また、油圧ショベルの転倒防止としてショベルの作業を停止させる時に転倒の恐れがある場合、緩停止を行う

ことで転倒を防ぐ手法についても提案されている [22, 23]. 本研究では, 停止時だけでなく任意の操作, 姿勢に対応した転倒防止システムを目指す.

本研究では, 遠隔操縦者から操作入力油圧ショベルに与えられて機体が動き出す前に, 操作入力量をもとに近い将来の転倒危険性を予測することで危険の未然防止を考えている. したがって, 作業中のその時刻の計測によるその時刻の転倒危険性の計算よりもさら先立ってその予測をしたいと考える. 本研究は任意の操作入力に対する転倒危険性を予測し, 予測された転倒危険性に基づき操作入力を調整することで, 作業装置動作に伴う慣性力や重心変化による転倒の防止を図ることができる.

これまでに遠隔操縦油圧ショベルを前提とした転倒防止制御に取り組まれた例はほぼない. 遠隔操縦を対象とした転倒防止システムでは, 転倒しないことに加え, 遠隔操縦者の操作入力に対してシステムがどのように介入するかという問題がある. つまり, システムが介入することによる操作性への影響なども考慮する必要がある.

将来の状態を予測し, 制約条件を考慮した最適制御としてモデル予測が挙げられる [24]. モデル予測制御は, 制御対象のモデルに基づき将来を予測し, ある評価値を最小化する現時刻の入力を決定するものである. 一方, 提案手法の基本的な考え方は, 操作入力に対する転倒危険性を予測し転倒とすると判断された場合は, 操作入力に最小限の修正を加え, 転倒しない範囲のアクチュエータに与えることで転倒を防ぐものである. 転倒しないことを制約条件とし, 遠隔操縦者が与えた操作入力を変更した量を評価値と考えると, 提案するシステムはモデル予測制御の枠組みの範疇であると考えられることもできる.

1.6 論文構成

本稿は全5章から構成される. 1章では, 研究の背景などについて述べた. 図 1.4 に2章から4章の構成を示す. 2章では, 油圧ショベルのモデル化について述べる. 油圧ショベルのモデル化では, 将来の機体運動を高速に予測するための簡便な油圧ショベルの動作モデルおよび提案するシステムを検証するための実験環境として検証用シミュレータを構築した.

3章と4章では, それぞれ別の転倒防止システムについて述べる. 3章では, 機体ZMPおよび重心の予測に基づく転倒防止システムについて述べる. 機体ZMPおよび重心の予測に基づく転倒防止システムでは, 2章で述べた簡便な油圧ショベルの動作モデルを用い, 転倒危険性の判断指標としてZMPと重心の位置を利用した転倒防止システムについて述べる.

4章では, 機体の浮き上がりを考慮した正規化エネルギー安定余裕の予測に基づく転倒防止システム述べる. このシステムは3章のシステムの問題点に対応したもので

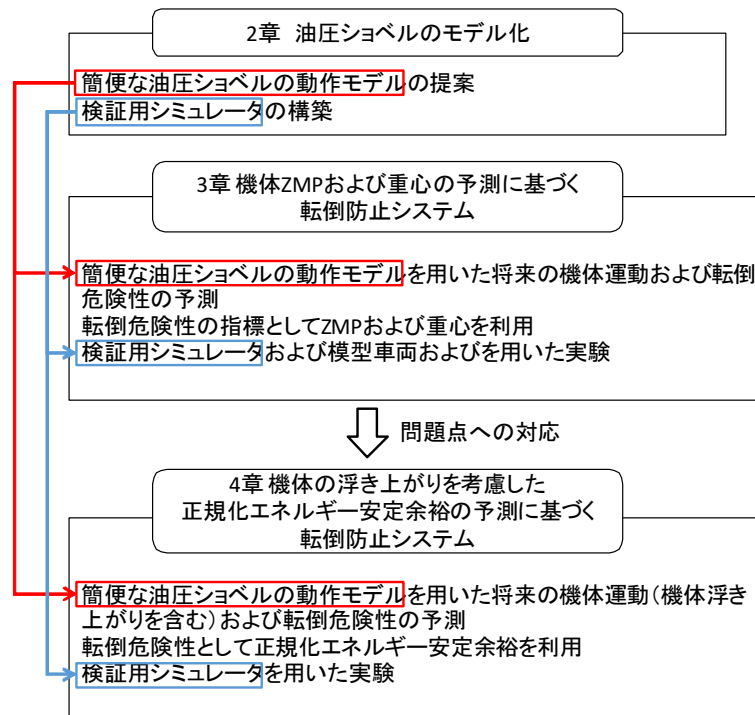


図 1.4: 2 章から 4 章の構成

ある。

5 章では，本研究の結論について述べる。

第2章 油圧ショベルのモデル化

2.1 概要

本章では、簡便な油圧ショベルの動作モデルと検証用シミュレータについて述べる。簡便な油圧ショベルの動作モデルは、転倒防止システムのための機体動作の予測に用いる油圧ショベルの動作モデルである。機体動作の予測を含む転倒防止システムの処理時間は、遠隔操縦者が操作を入力してから機体が動くまでの動作の遅延時間に影響する。無人化施工では、通信遅延が増えるにつれ施工効率が低下する [6]。システムの処理時間は、遠隔操縦者から見ると通信遅延と等価であるため、システムの処理時間が増加すると施工効率が低下すると考えられる。そのため、施工効率の観点からはシステムの処理時間は短いことが望ましい。システムの処理時間のうち、大きな割合を占める処理が機体動作の予測である。機体動作の予測のためには、油圧ショベルのモデリングが必要になる。油圧ショベルの動作モデルとして、精密な物理モデルを構築するのは不可能ではないが、高速に将来の機体挙動を予測できるほど高性能な計算機を油圧ショベル上に搭載するのは現実的ではない。そのため、高速に実行できる簡便な油圧ショベルの動作モデル構築し、提案する転倒防止システムに用いる。

一方、提案手法の検証のために用いる検証用シミュレータは、転倒防止システムの評価実験を行うために操作入力に対するアクチュエータの挙動および油圧ショベルの挙動を可能な限り精密に再現するように作成したシミュレータである。実験に実機や模型車両を用いることも可能であるが、本当に機体が転倒してしまった時のリスク、実験の再現性、実験条件変更の容易性からシミュレータを用いた実験を行う方が得策である。このモデルは、リアルタイムに実行できることは必ずしも必要ではないが、実機の挙動をほぼ再現するものでなければならず、本研究では一般的に利用可能ないくつかの計算実装を組み合わせで構成した。

2.2 実機の動作特性

油圧ショベルのモデル化にあたり、実機の挙動を確認するため、油圧ショベルとして土木研究所が保有する日立建機 ZX120 を利用し、ブーム上下、旋回動作開始時と

表 2.1: 油圧ショベルのモデル化

	目的	要件
簡便な油圧ショベルの動作モデル	機体挙動の予測に使用	高速に実行
検証用シミュレータ	転倒防止システムの検証実験に使用	実機の挙動を再現

停止時の動作特性をまず取得した。ブームシリンダの動作を計測するためのセンサとしてワイヤ式変位計（Celesco SE1-50）をブームシリンダに取り付け、旋回動作を計測するセンサとして IMU（MicroStrain 3DM-GX4-15）を機体の上部旋回体の後部に取り付け、レバー傾倒角を取得するために IMU（Xens Mti-G-700）を運転席内の操作レバーを取り付けた。図 2.1 にセンサの取り付け位置を示す。ワイヤ式変位計は、マイコンボード（Arduino Nano）を介しノート PC に USB で接続した。また、IMU についても同一の PC に USB で接続しているため、すべてのセンサの取得時刻はほぼ同期がとれている。

シリンダの速度、旋回速度は、各センサから得られたシリンダ長、角度の後退差分により算出した。動作時の姿勢は、図 2.2 に示すようにアームを伸ばした姿勢とアームを縮めた姿勢のそれぞれ 2 つの姿勢で動作を行った。これは、姿勢変化による動作特性の変化の有無を確認するためである。

エンジンの回転数は最大と設定した。実験は操縦者が搭乗した状態で行い、動作開始時は操作レバーを可能な限り迅速に最大に傾け、動作停止時はレバーから手を離すことでレバーを迅速に中立位置に戻した。

図 2.3 にブーム上げ時のブームシリンダの速度応答およびレバーの傾倒角を示す。ブーム上げ時において、アームを伸ばした姿勢とアームを縮めた姿勢での結果を比較すると、アームを縮めた姿勢の方が最大速度が大きくなっていることが確認できた。また、加減速度については 2 つの姿勢で大きく変化しないことが確認された。図 2.4 にブーム下げのブームシリンダの速度応答およびレバーの傾倒角を示す。ブーム下げ時は、アームを伸ばした姿勢の方が定常速度が小さくなっており、加減速度については 2 つの姿勢で大きく変化しないことが確認された。これらのことからブーム動作時は、姿勢変化によってシリンダに加わる力が変化し、最大速度が変化しているものと考えている。また、加減速度が 2 つの姿勢で大きく変化していないことから慣性モーメントの変化の影響は小さいものと考えられる。

図 2.5 に旋回時の速度応答およびレバーの傾倒角を示す。旋回動作時は、2 つの姿勢で定常状態の速度が大きく変化していないことが確認できた。また、アームを縮めた姿勢の方が応答が早くなっていることが確認できた。これは、姿勢変化による慣性モーメントの変化によるものと考えられる。



図 2.1: センサ取り付け位置

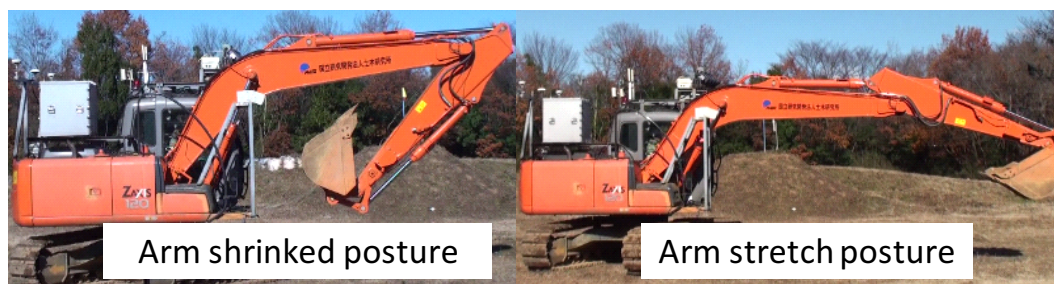
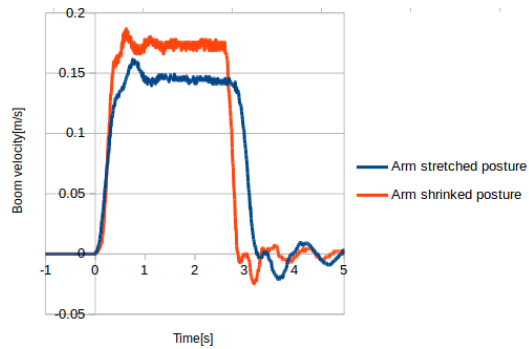


図 2.2: 実験時の油圧ショベルの姿勢

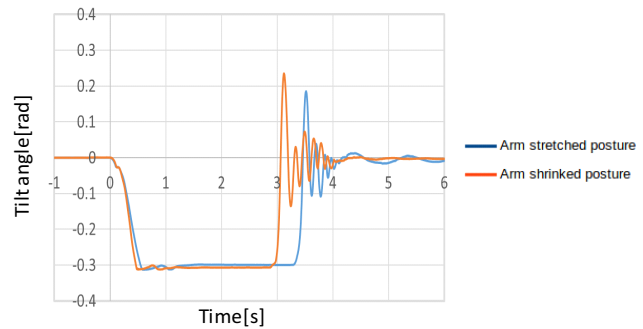
2.3 簡便な油圧ショベルの動作モデル

提案する転倒防止システムでは、まず数秒程度の近い将来の油圧ショベルの機体挙動を予測する必要がある。この機体挙動の予測の処理時間は、遠隔操縦者が操作入力を与えてアクチュエータに操作指令が与えられるまでの遅延時間に影響するため、リアルタイム処理が求められる。また、様々な遠隔操縦油圧ショベルに機体挙動の予測を適用することを考えると、予測に関する油圧ショベルのパラメータは少ないことが望ましい。これは、パラメータが少ないことで少ない予備実験にてパラメータが取得できることが期待でき、様々な油圧ショベルへの提案システムの適用が容易になるためである。

通常の油圧ショベルの操縦席にロボットを載せることにより、油圧ショベルを遠隔操縦させるシステムが開発されている [25]。これは、迅速に様々な市販油圧ショベル

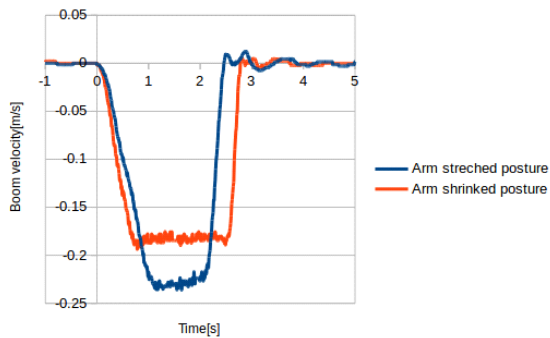


(a) シリンダの速度応答

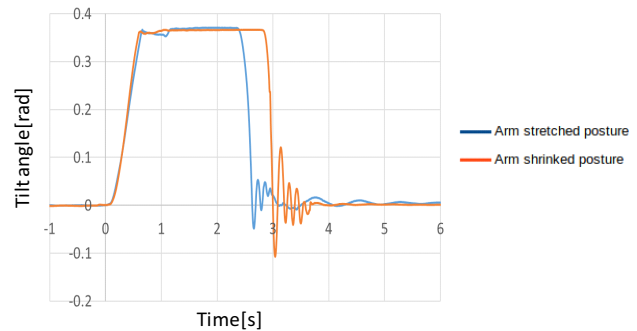


(b) 操作レバー傾倒角

図 2.3: ブーム上げ時の実験結果



(a) シリンダの速度応答



(b) 操作レバー傾倒角

図 2.4: ブーム下げ時の実験結果

を遠隔操縦に対応させることにより、迅速な機材展開やコスト低減を図ったものである。提案するシステムを適用するための予備実験が少ない手間であれば、これらのシステムと組み合わせることによって迅速にこれらの機材に転倒防止システムが適用できることになる。

オフライン計算でありとあらゆる入出力関係のテーブルを事前に生成し、オンラインでこのテーブルを参照することで計算コストの高い処理をリアルタイムに処理することを可能とする手法が提案されている [26]。しかし、この手法を油圧ショベルの予測に適用しようとするとき、油圧ショベルの各軸の姿勢、速度、加速度など入力次元が非常に多く、実機を使用してとあらゆるテーブルを作成するのは困難である。

深層学習を用いて一定時間先の事象を予測する研究が行われている [27, 28, 29]。この手法は、入出力関係を直接学習するものである。この手法を用いることでリアルタイムな予測が可能であるが、一般的に深層学習は大量の学習データが必要であるため、

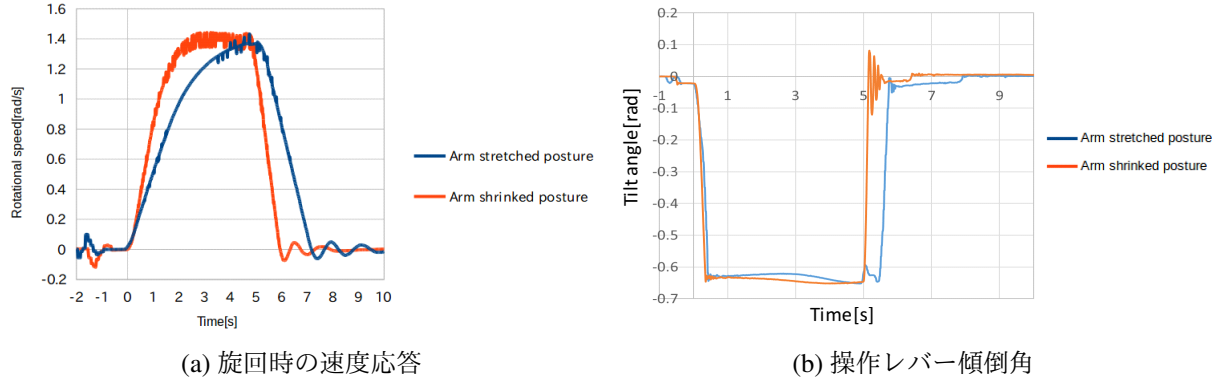


図 2.5: 旋回時の実験結果

学習に必要なデータセットの用意に手間を要することが懸念される。

先行研究 [30] では、操作入力に対する油圧シヨベルの関節角速度応答を 2 次遅れ系およびむだ時間要素として近似することで、実機の応答を模型車両により再現している。本研究でも、アクチュエータの速度応答を簡易にモデル化することを目的とし、操作入力に対する速度応答を次式のように 2 次遅れ系として近似する。この近似は、油圧の動作や各関節間の相互作用などを簡略化し、操作入力に対するアクチュエータの挙動のみをシミュレーションするためのものである。

$$\frac{d^2V(t)}{dt^2} + 2\zeta\omega\frac{dV(t)}{dt} + \omega^2V(t) = V_{max}I \quad (2.1)$$

ここで、 $V(t)$ はアクチュエータのピストンロッドの速度または油圧モータの回転速度、 ω は固有振動数、 ζ は制動係数、 V_{max} は 100 % の操作入力量に対する速度、 I は 0～100 % の操作入力量である。操作入力とアクチュエータの定常速度は比例するものとする。このモデル化では、 ω 、 ζ 、 V_{max} がモデルパラメータとなる。式 (2.1) を 4 次のルンゲクッタ法で解くことにより、アクチュエータの挙動を予測できる。油圧シリンダについては、シリンダ延伸時と縮小時では、作動油の流路や受圧面積が異なるためそれぞれ別にモデルパラメータを使い分ける。また、加速時と減速時では力が発生する原理が異なるため、それぞれ別にパラメータを求める。式 (2.1) の解を操作入力 100 % 時のアクチュエータの動作速度のステップ応答に最小二乗法でフィッティングさせることによりモデルパラメータである ω 、 ζ 、 V_{max} を同定する。

油圧シリンダは、稼動範囲に限界があるため、この動作モデルにも稼動範囲の限界を考慮する必要がある。油圧シヨベルの場合、稼動範囲の限界に達することにより大きな衝撃が加わるのを防ぐため、自動的にシリンダが停止するように設計されている

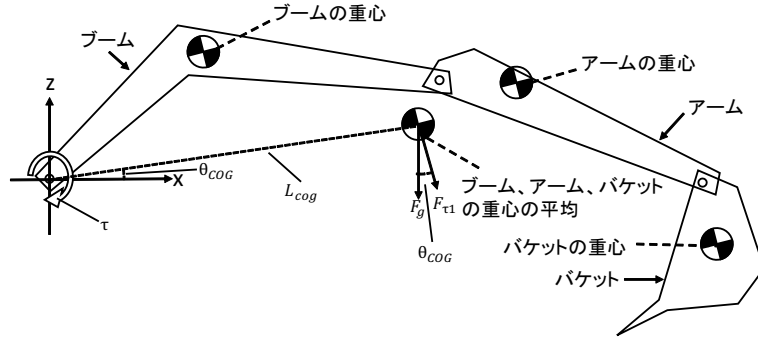


図 2.6: 重力により生じるブームの関節トルク

[31]. 簡便な油圧ショベルの動作モデルでは、この機能を模擬するため稼動範囲の限界に到達すると強制的に操作入力を 0% とする．これにより、シリンダの挙動の予測期間内に稼動範囲限界に達する場合、シリンダが停止し、それによって生じる加速度などを予測できる．

2.2 節の予備実験の結果より、油圧ショベルのアクチュエータの速度応答は油圧ショベルの姿勢によって変化することが確認されたため、姿勢変化を考慮する場合の簡便な油圧ショベルの動作モデルについて検討する．油圧シリンダ動作時は重力によりシリンダに加わる力に応じてシリンダ速度の定常値が変わると考えられるため、油圧シリンダ動作時の V_{max} は、次式の通り重力により油圧シリンダに加わる力に関する 1 次関数とする．

$$V_{max} = V_{max1}F_{cylinder} + V_{max2} \quad (2.2)$$

重力によりシリンダに加わる力は、油圧ショベルのリンク構造に基づいて計算することができる．本稿では、ブーム、アームシリンダに加わる力を解析する．図 2.6 に重力によるブームの関節に加わるトルクを示す．重力により生じるブーム関節回りのトルクは、

$$\tau = F_{\tau 1}L_{COG} \quad (2.3)$$

である．図 2.6 に重力により生じるブームの関節トルクとブームシリンダに加わる力との関係を示す．重力により生じるブームの関節のトルクとブームシリンダに加わる力の関係は、

$$\theta_1 = \cos^{-1} \frac{L_{cyl}^2 + L_1^2 + L_2^2}{2L_{cyl}L_1} \quad (2.4)$$

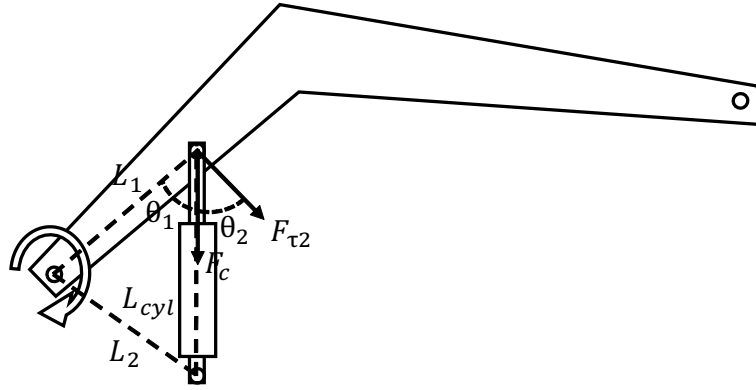


図 2.7: 重力により生じるブームの関節トルクとブームシリンダに加わる力

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta_1 \quad (2.5)$$

$$F_{\tau 2} = F_c \cos \theta_2 \quad (2.6)$$

式 (2.3), (2.4) より, 重力により生じるブームシリンダに加わる力は,

$$F_{\tau 1} L_{cog} = F_c \cos \theta_2 L_1 \quad (2.7)$$

$$F_c = \frac{F_{\tau 1} L_{cog}}{\cos \theta_2 L_1} \quad (2.8)$$

重力により生じるアームシリンダに加わる力についてもブームシリンダ同様に算出できる.

上部旋回体の旋回動作時は慣性モーメントに応じて応答特性が変わると考えられるため, 上部旋回体の旋回時の ω , ζ は, 次式の通り, 旋回軸周りの慣性モーメントに関する 1 次関数とする.

$$\omega = \omega_1 I_{swing} + \omega_2 \quad (2.9)$$

$$\zeta = \zeta_1 I_{swing} + \zeta_2 \quad (2.10)$$

回転軸周りの慣性モーメントは, 機構解析ソフトウェアである MotionGenesys[32] を利用し導出する.

前述の 2 次遅れ系の動作モデルを 4 次のルンゲクッタ法で解くことにより, アクチュエータの将来の動作を予測することができる. そして, 予測したアクチュエータの将来の動作とリンク構造から将来の機体の運動を予測することができる.

2.4 検証用シミュレータ

提案する転倒防止システムの検証実験を行うためのシミュレーションモデルを構築する。このシミュレーションモデルは、実機の動作特性および機体の転倒を再現することが求められる。これらを再現するためには油圧ショベルの油圧システム、キネマティクス、ダイナミクスなどをシミュレーションすることが必要である。

油圧ショベルのシミュレータを構築した研究例がある [33, 34, 35]。これらのシミュレータは、転倒を再現するためのものではないため、本研究では既存シミュレータを組み合わせることで、油圧ショベルの動作と機体の転倒をシミュレーションするためのシミュレータを開発する。

モデリング対象は、12 t クラスの建設機械である日立建機 ZX120 とした。シミュレータとして、Matlab/Simulink [36] と V-Rep [37] を併用する。Matlab/Simulink は、ツールキットと呼ばれる追加パッケージを用いることでアクチュエータの油圧システム、油圧ショベルのリンク構造を考慮したキネマティクス、ダイナミクスをモデリングできる。しかし、油圧ショベルと床面との接触状態や機体の浮き上がりを Matlab/Simulink を用いてシミュレーションするのは実装上困難である。一方、V-REP では油圧システムのシミュレーションを行う機能はないが、油圧ショベルと地面との接触や機体の浮き上がりのシミュレーションを容易に実装可能であるという特徴がある。そこで、Matlab/Simulink では油圧ショベルの動作のみのシミュレーションを行い、シミュレートされた動作を V-REP に与え、V-REP 側の油圧ショベルのモデルに Matlab/Simulink 側のモデルと同じ動作を行わせる。V-REP 側では機体の浮き上がりなどをシミュレーションできるため、機体の転倒をシミュレーションできる。

図 2.8 にシミュレータ環境の構成を示す。Matlab/simulink のモデルの実行速度はシミュレーション中に変動するため、実行速度が遅いときに合わせ実時間の 1 秒間の動きを計算機上では 20 秒かけて計算する。V-REP も同様に計算することで、シミュレータ間の時間的な同期をとる。V-REP では、アクチュエータに対して速度を入力することができる。速度が入力されると次のシミュレーションステップで入力した速度を実現するようにアクチュエータに力が発生する。Matlab/simulink は、油圧ショベルモデルのアクチュエータの速度を V-REP に与える。シミュレータ間の通信は ROS [38] トピックを用いる。V-REP については、ROS に対応しており、Matlab/simulink については、追加パッケージである Robotics System Toolbox を用いることで ROS トピックを扱うことが可能となる。V-REP の物理エンジンは、Vortex [39] を使用した。

Matlab/simulink のモデルの油圧ショベルのリンク構造やダイナミクスは、追加パッケージである Simscape Multibody を利用し、モデリングした。油圧ショベルのアクチュエータである旋回モータ、ブームシリンダ、アームシリンダ、バケットシリンダは、油圧で駆動されるアクチュエータであり、追加パッケージである Simscape Fluid

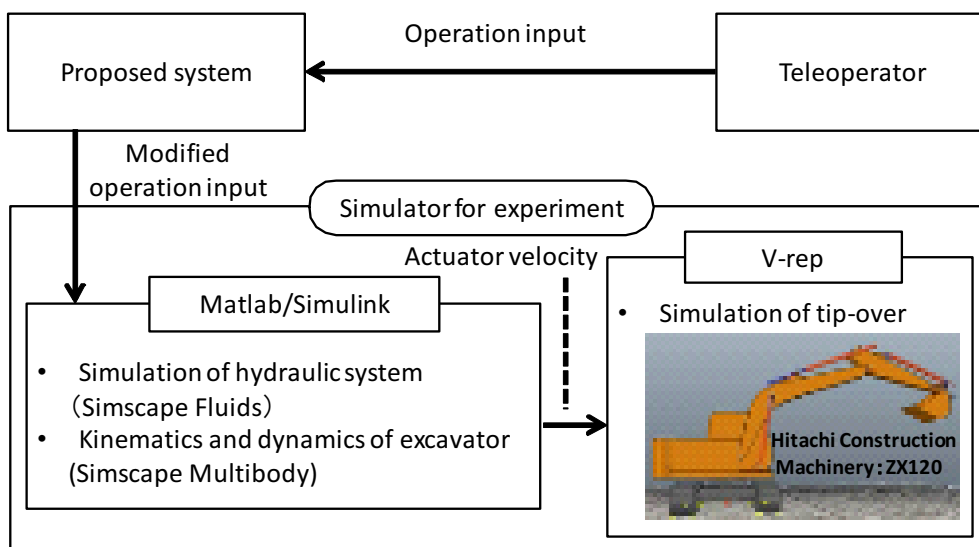


図 2.8: シミュレーションの構成

表 2.2: 油圧ショベルのパラメータ

	重量 [kg]	重心位置 [mm]		リンク長 [mm]
	m	x	y	l
クローラ部	3816	16.9	416.3	1425.0
上部旋回体	6514	-534.7	106.4	167.0
ブーム	992	2216.0	594.4	4595.2
アーム	392	702.6	187.8	2520.6
バケット	386	482.4	360.8	1240.2

を用いることで油圧回路をモデリングする．図 2.9 に構築した Matlab/Simulink のブロックを示す，

各部の寸法については，日立建機が公開している CAD データ [40] から推定した．図 2.10 に油圧ショベルの座標系を示す．表 2.2 にシミュレーションモデルの油圧ショベルのパラメータを示す．

各部の重心および慣性モーメントについては，メーカーが公開している CAD データ [40] から Solidworks[41] で 3 次元モデルを作り，Solidworks の機能を用いて算出した．Simscape Fluid で設定できる油圧システムの各部のパラメータについては，2.2 節で取得した実験データとシミュレータの実験結果が同様になるように調整した．

図 2.11，図 2.12，図 2.13 にパラメータを調整した結果のシミュレーションでのアクチュエータの速度応答を示す．油圧ショベルの初期姿勢や操作入力を与えるタイミ

ングは，2.2 節の実験と同様とした．結果より，ブーム上げ，ブーム下げ，旋回時ともに実機の応答を概ね再現することができたと考え，これをシミュレータとして利用することとした．シミュレーションにおいても実機同様に，アームの姿勢変化によりブームおよび旋回動作時の速度応答特性が変化することが確認できた．

2.5 まとめ

本章の成果は次のとおりである．

簡便な油圧ショベルの動作モデル

高速に将来の機体運動を予測するための簡便な油圧ショベルの動作モデルを構築した．これは，油圧ショベルのアクチュエータの速度応答を2次遅れ系として近似したものである．また，姿勢変化により2次遅れ系のパラメータを変化させることで，油圧ショベルの姿勢変化により生じる速度応答特性の変化を考慮した．このモデルにより高速に機体挙動を予測することが可能になった．

検証用シミュレータ

提案する転倒防止制御の評価実験を行うための実験用シミュレーションモデルを構築した．Matab/Simulink と V-REP を併用し，油圧ショベルの油圧システム，キネマティクス，ダイナミクスをモデリングし，実機挙動をほぼ再現するシミュレーションモデルを構築した．

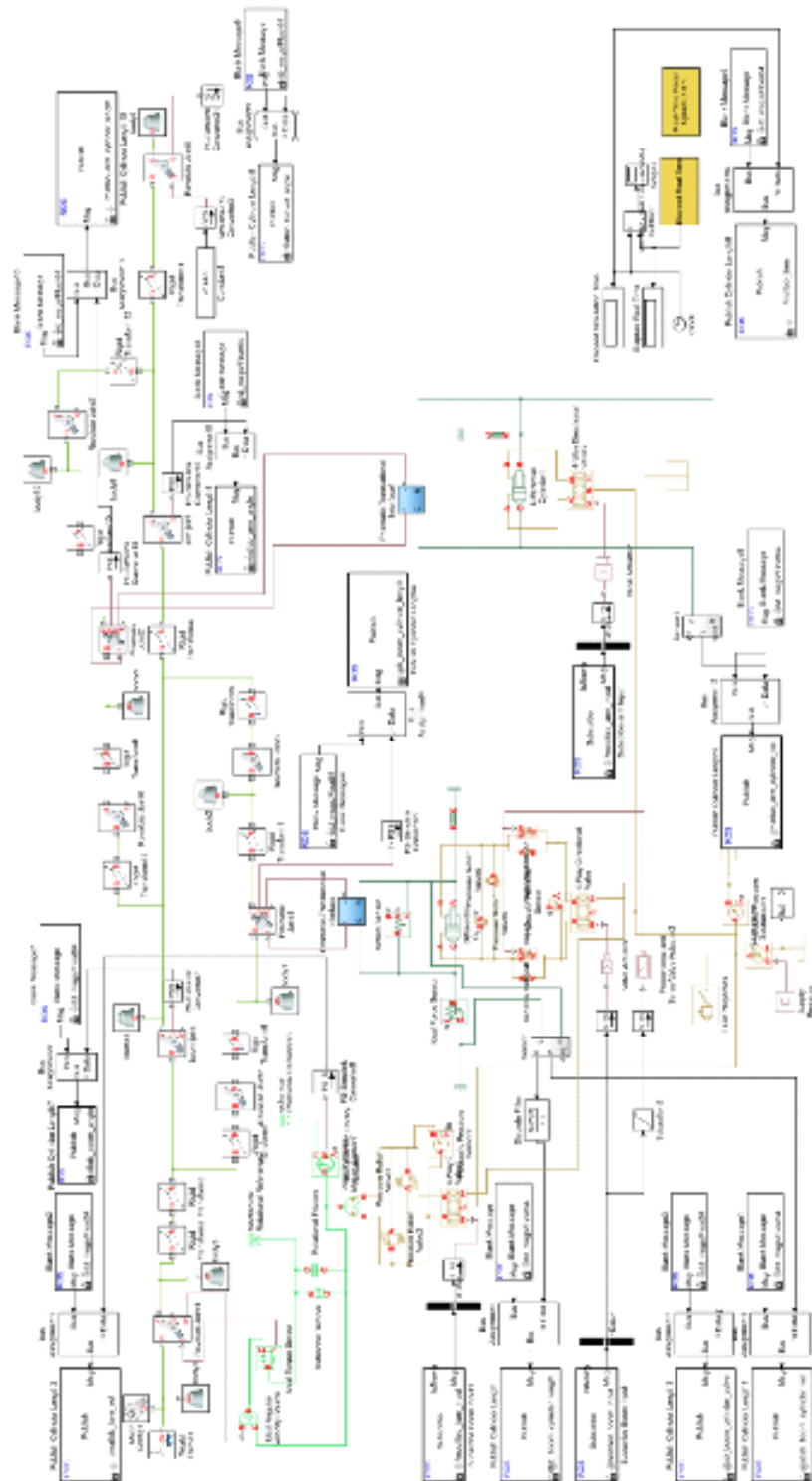


図 2.9: 構築した Matlab/Simulink のブロック

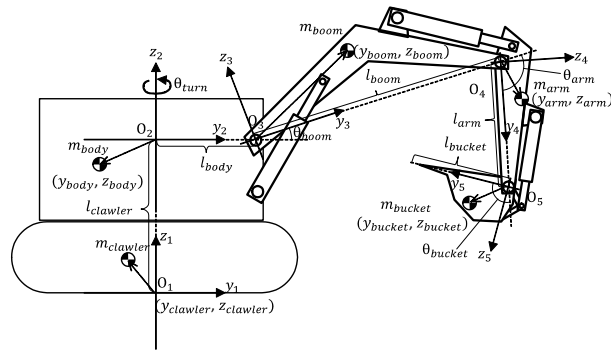


図 2.10: 油圧ショベルの座標系

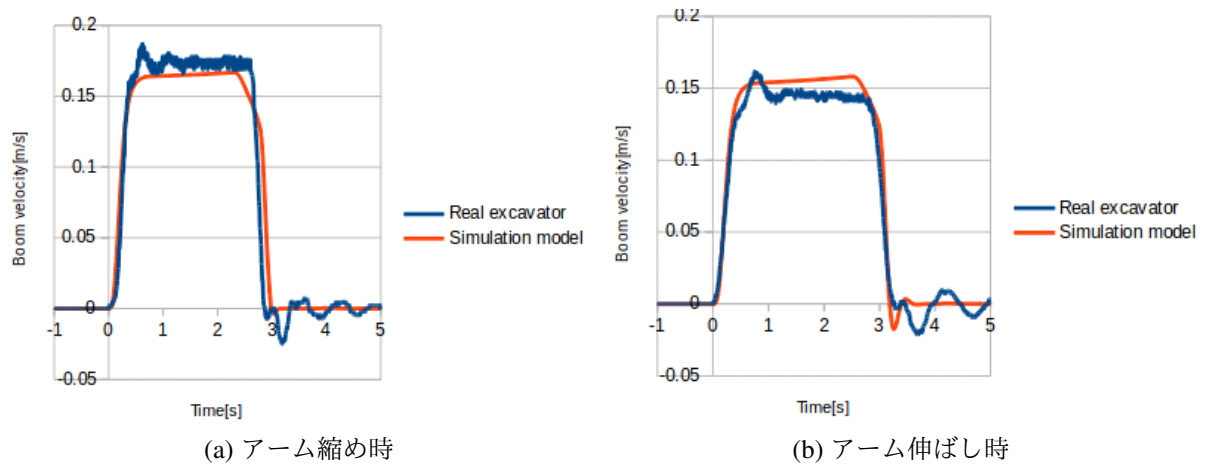
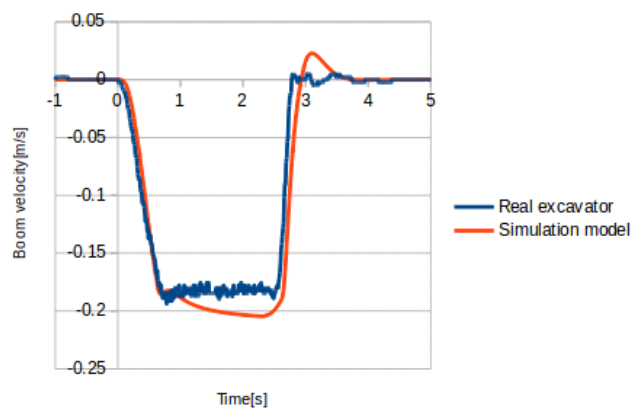
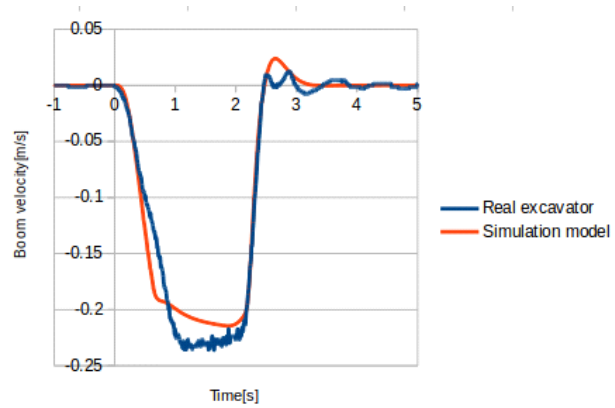


図 2.11: ブーム上げ時のシミュレーション結果

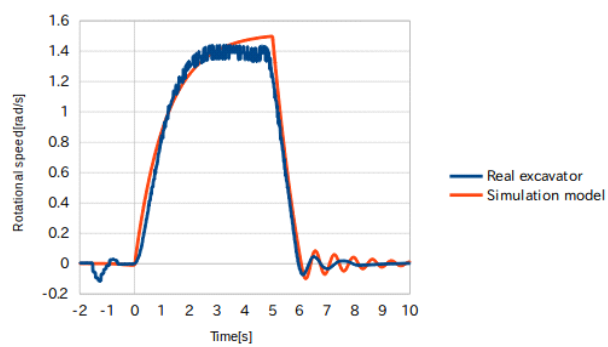


(a) アーム縮め時

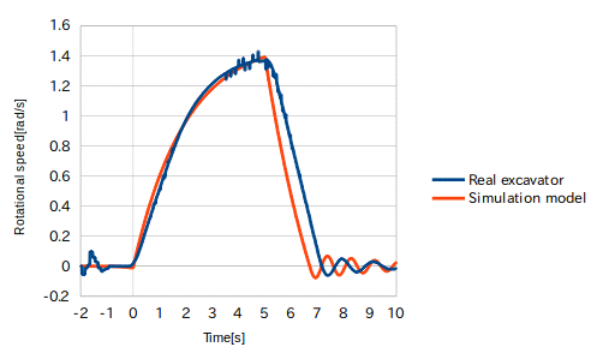


(b) アーム伸ばし時

図 2.12: ブーム下げ時のシミュレーション結果



(a) アーム縮め時



(b) アーム伸ばし時

図 2.13: 旋回時のシミュレーション結果

第3章 機体ZMPおよび重心の予測に基づく転倒防止システム

3.1 概要

本章では、静的な転倒危険性の判断指標として重心の鉛直床面投影点を用いる。油圧ショベルの機体の重心の鉛直床面投影点が支持多角形内であれば静的に安定であるが、重心の床面投影が支持多角形外に位置すると転倒が生じ始める。また、動的な転倒危険性の判断指標としてZMPを用いる。機体のZMPが支持多角形内であれば動的に安定であるが、ZMPが支持多角形境界に位置するとクローラの一部がほとんど浮きかけている状態であり、転倒危険のある状態であると考えられる。理想的には、これらの重心の鉛直床面投影点及びZMPを支持多角形の内側に保つことで油圧ショベルの転倒を防ぐことができる。しかしながら、実環境においては、クローラと床面との接触状態が不明であることや転倒防止制御に誤差が含まれることを考慮し、安全のためのマージンとして図3.1に示すように支持多角形の内側に安全領域を設定する。そして、提案する転倒防止制御によって重心の鉛直床面投影点及びZMPを安全領域の内側に保つことで油圧ショベルの転倒防止を図る。安全領域のマージンを大きく設定し過ぎると遠隔操縦者の操作が必要以上に転倒防止制御の介入を受け、操作性が大きく低下する恐れがある。そのため、安全領域は平地など転倒の恐れがない状況においては操作入力に対する転倒防止制御による介入が発生しない程度に設定することを想定している。

一般的な遠隔操縦油圧ショベルでは、遠隔操縦者はカメラ画像に基づき、転倒の危険回避に常に注意を払いながら操縦を行う。しかし、カメラ画像による危険性判断の困難性や通信遅延の影響により、遠隔操縦者が油圧ショベルの転倒を回避することは難しいと考えている。また、操縦信号は直接アクチュエータに与えられるため、操縦者の不用意な操作や誤操作により機体が転倒する恐れがある。

本研究では、油圧ショベル自体の作業装置の動作によって転倒する場合を対象とし、掘削などの作業に伴うバケットと地面との衝突や掘削反力による転倒については対象としないものとする。このような前提条件の下では、油圧ショベルが転倒するケースは以下の2つが考えられる。

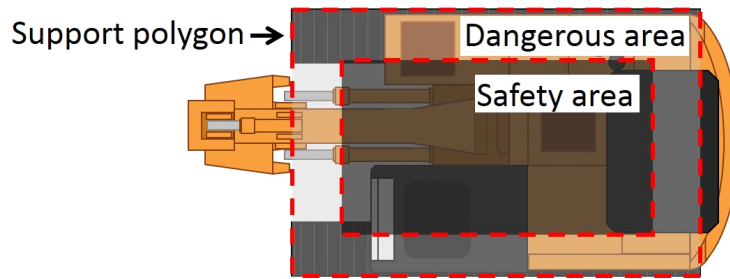


図 3.1: 支持多角形の内側に安全領域を設定

- ・ ケース 1 作業装置動作に伴う慣性力による転倒
- ・ ケース 2 作業装置動作に伴う重心位置変化による転倒

ケース 1 は、転倒危険性のある慣性力を作業装置の動作により発生させないように操作入力を自動調整することで防ぐことができる。つまり、この操作入力の自動調整により、作業装置動作時の加速度を機体の転倒が生じない範囲に制限するものとなっており、加速度を滑らかにするものである。ケース 2 は、転倒危険性のある重心位置となる姿勢になる前に自動停止させることで防ぐことができる。これは、油圧ショベルの姿勢に制限を与えるものである。また、作業装置を安全に停止することを担保するものである必要がある。これらケース 1 及びケース 2 に対する対応である操作入力の自動調整及び自動停止を組み合わせることで、動作時の加速度と姿勢が制限され、静的及び動的な転倒を防ぐことが期待できる。

上に述べた考察より、本章で提案するシステム構成を図 3.2 に示す。操作入力の自動調整プロセスは、遠隔操縦者が与えた操作入力及び機体のセンサ情報から予測した将来の ZMP に基づき動的に安定な範囲に調整された操作入力をアクチュエータに与えることで、動的に安定な機体状態を保つ。自動停止プロセスは、操作入力及び機体のセンサ情報から予測した将来の重心の鉛直床面投影点を予測し、転倒危険性を判断する。そして、転倒の危険がある場合には、予測した将来の重心の鉛直床面投影点及び ZMP に基づき静的及び動的に機体を安定に保ちながら作業装置を自動停止させる。自動停止プロセスによるアクチュエータに対する入力は、自動調整プロセスよりも優先させることで、自動的かつ安全に作業装置を停止させることができる。転倒危険性の予測や操作入力修正の計算時間は、アクチュエータの動作までの遅延時間や通信遅延時間に比べて非常に短い時間であることが期待できるため、転倒の防止を妨げる程の悪影響はないと考えられる。

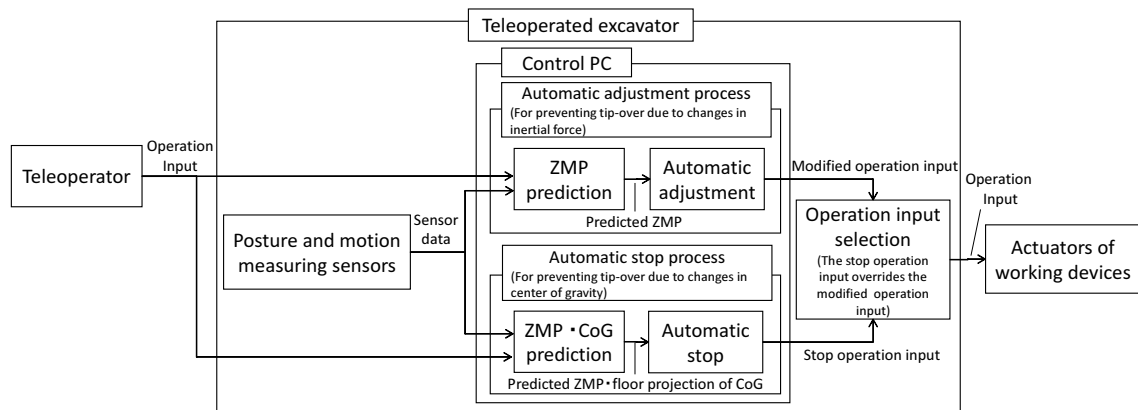


図 3.2: 提案するシステムの構成

3.2 操作入力の自動調整および自動停止

前述の通り、提案するシステムは、操作入力の自動調整と自動停止の2つの機能から構成される。以下にそれぞれの詳細について述べる。

機体 ZMP の予測に基づく操作入力の自動調整

作業装置を動かす際の慣性力による転倒を防ぐため、ZMP が安全領域を超えないように操作入力を自動的に調整する。図 3.3 の左に操作入力の自動調整の処理フローを示す。また図 3.3 の右に、その動作の典型的な想定例を示す。操縦者の操作入力量から、ある時刻 t 秒までの ZMP を油圧ショベルの運動モデルに基づき予測し、それを予測 ZMP と定義する。そしてその予測 ZMP が設定した安全領域内であれば、操作入力をアクチュエータへの動作指令としてそのまま与える。また、予測 ZMP が、安全領域外であれば、操作入力量を少しずつ増加・減少させ、安全領域内に入るまで再計算を繰り返す。これにより、ZMP が安全領域を超えない操作入力に修正することができる。例えば、操作入力を 5% 刻みで修正する場合、 $\pm 0\%$, $+5\%$, -5% , $+10\%$, -10% , といった順で操作入力の修正量を増加させながら修正する。

機体 ZMP および重心の予測に基づく自動停止

図 3.4 の左に自動停止の処理フローを示す。また図 3.4 の右にその動作の典型的な想定例を示す。操作入力及びセンサ情報からある時刻 t 秒までの重心の鉛直床面投影点を油圧ショベルの運動モデルに基づき予測する。もし、重心の鉛直床面投影点が重

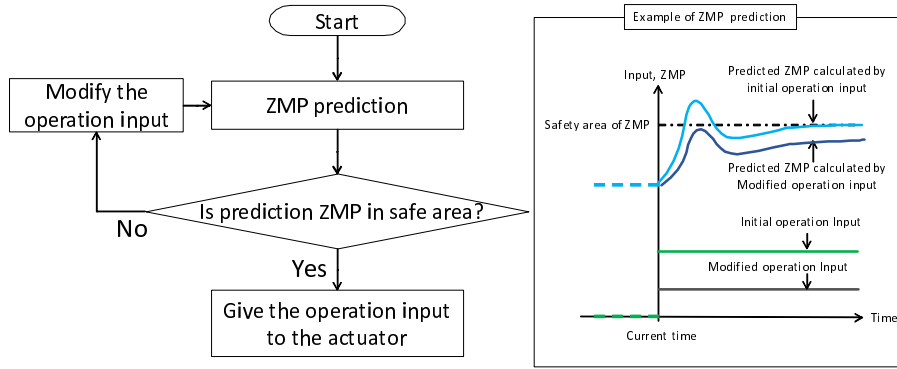


図 3.3: 操作入力の自動調整のフローチャート.

心の安全領域を超えると予測された場合は、 $T_C[s]$ 後から安全領域を超えると予測される時間 $T_{T2}[s]$ まで操作入力を単調減少させた時の ZMP を予測する。もし、ZMP が安全領域を超えると予測される場合には、 $T_C[s]$ 後から停止を開始した場合に転倒の危険があると判断できるため、現時刻から安全領域を超えると予測される時間にかけて停止を行う。 $T_C[s]$ は、計算周期より大きい値に設定することで、自動停止が手遅れになることを防ぐ。この自動停止により自動停止開始から停止完了までの間、重心の鉛直床面投影および ZMP が支持多角形外に出ることなく作業装置を停止することができる。

3.3 機体 ZMP および重心の鉛直床面投影点の予測

図 3.5 に示すように車両各部を質点系として近似すると、重心の鉛直床面投影点は次式の通り、質点位置、質量及び車両傾斜角度より算出できる。各リンクの質点位置はシリンダストロークセンサ等により計測したシリンダ長及びリンク構造より算出できる。また、車両傾斜角度は、加速度センサ等により計測できる。バケット内に土砂等が積載されるとバケットの質量及び質点位置が変化するが、本研究ではバケット内の内容物による質量変化は考慮しないこととする。

$$CoG_x = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \{g \cos \theta_{roll} x_i - g \sin \theta_{roll} z_i\}}{\sum_{i=1}^N m_i g \cos \theta_{roll}} \quad (3.1)$$

$$CoG_y = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \{g \cos \theta_{pitch} y_i - g \sin \theta_{pitch} z_i\}}{\sum_{i=1}^N m_i g \cos \theta_{pitch}} \quad (3.2)$$

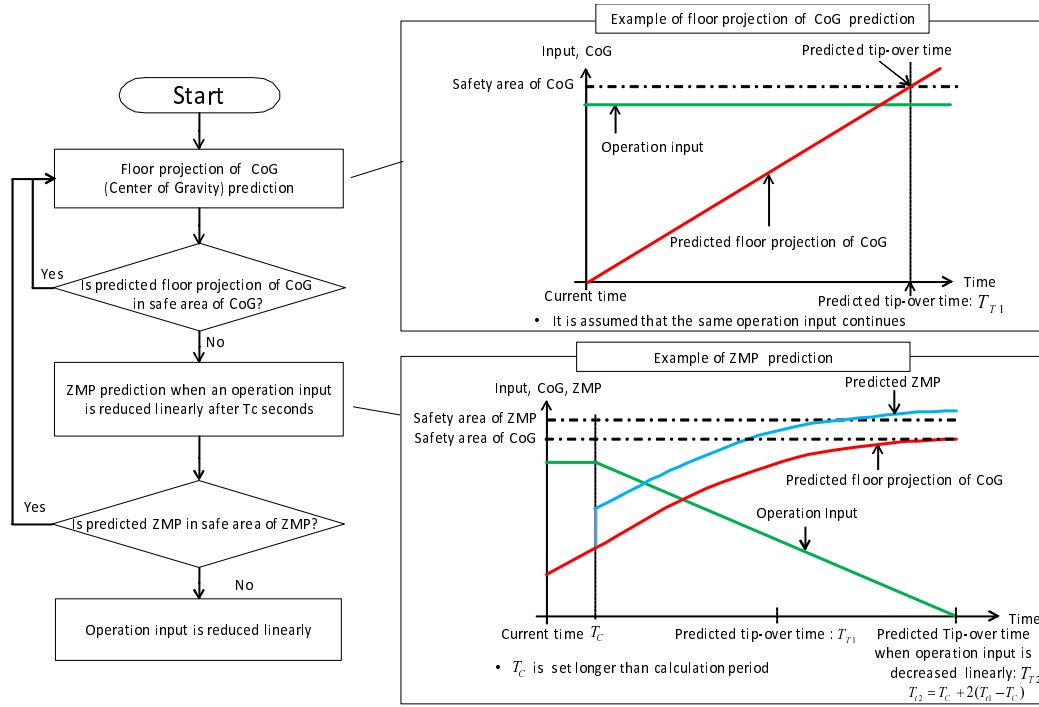


図 3.4: 自動停止のフローチャート

ZMP は次式の通り，質点位置，質量，加速度及び車両傾斜角度から算出できる．各質点の加速度は，質点速度の後退差分により算出し，質点速度は質点位置の後退差分より算出することができる [42]．

$$ZMP_x = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \{ (\ddot{z}_i + g \cos \theta_{roll}) x_i - (\ddot{x}_i + g \sin \theta_{roll}) z_i \}}{\sum_{i=1}^N m_i (\ddot{z}_i + g \cos \theta_{roll})} \quad (3.3)$$

$$ZMP_y = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \{ (\ddot{z}_i + g \cos \theta_{pitch}) y_i - (\ddot{y}_i + g \sin \theta_{pitch}) z_i \}}{\sum_{i=1}^N m_i (\ddot{z}_i + g \cos \theta_{pitch})} \quad (3.4)$$

これらの重心の鉛直床面投影点及び ZMP を予測するためには，油圧ショベルの動作に伴い時々刻々と変化する質点の位置及び質点加速度を予測する必要がある．そのため，油圧ショベルのアクチュエータの動きを予測することができれば，重心の鉛直床面投影点及び ZMP が予測できる．現在の操作入力維持されたと仮定して簡便な油圧ショベルの動作モデルを解くことにより，近未来（例えば 2 s 後）までのアクチュ

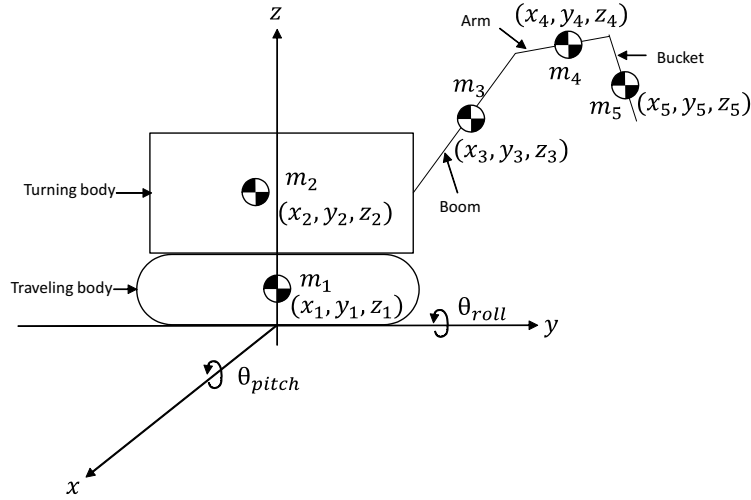


図 3.5: 油圧ショベルの各部を質点系として近似

エータの動きをシミュレーションする．予測されたアクチュエータの動作から機体運動のシミュレーションを実行し，将来の ZMP 及び重心を予測する．図 3.6 に ZMP 予測のフローチャートを，図 3.7 に重心の予測のフローチャートをそれぞれ示す．

3.4 機体振動を考慮した機体の ZMP の予測

図 3.8 に示すように油圧ショベルの作業装置を急動作または急停止を行った際，車体のフレームの剛性等による影響により，車体の動揺が生じる．模型車両を通じた予備実験により，特に作業装置を急停止させた時に大きな車体振動が確認され，ZMP に与える影響を無視できないと考えた．そのため，作業装置停止時の車体振動を考慮した ZMP の予測を行うため，ZMP の振動モデルを構築する．図 3.9 にブーム停止時の ZMP 計測値の概念図を示す．ZMP の最初のピークについては，アクチュエータの動作によって生じるものであると考えられ，前述の簡便な油圧ショベルの動作モデルによって予測できると仮定する．最初のピークと逆向きの 2 番目のピークは車体振動によるものであると考えられ，このピーク値を予測する必要がある．この車体振動はアクチュエータの動作によって生じる ZMP の指数関数的な減衰振動であると仮定すると，車体振動による ZMP は式 3.5 のように表すことができる． a_x ， a_y は，アクチュエータの動作に基づく予測 ZMP， T は振動周期であり時系列データのピーク値の周期から推定する． b は減衰係数である．

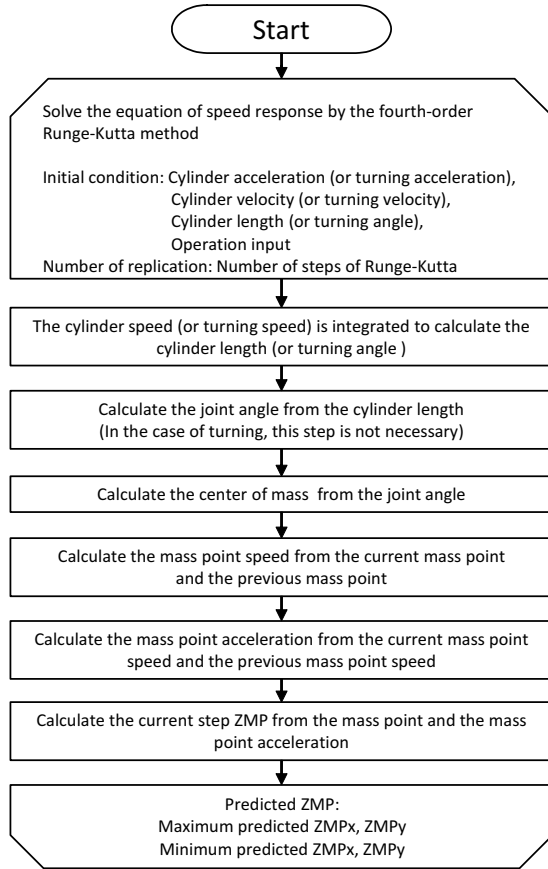


図 3.6: ZMP 予測のフローチャート

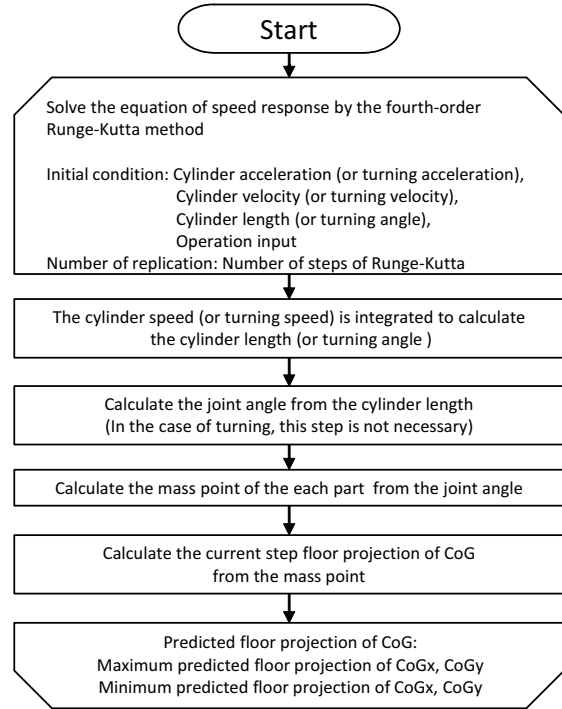


図 3.7: 重心予測のフローチャート

$$ZMP_{vx} = -a_x e^{-bT/2} \quad (3.5)$$

$$ZMP_{vy} = -a_y e^{-bT/2} \quad (3.6)$$

機体 ZMP 予測の処理フローを図 3.10 に示す。操作入力及びセンサ情報より、機体挙動の予測に基づく予測 ZMP を算出する。作業装置加速時には、機体運動の予測に基づく予測 ZMP を制御に用いる ZMP とするが、作業装置減速時には機体振動モデルに基づく ZMP を算出し、両者のうち、より支持多角形に近づく方を予測 ZMP とする。

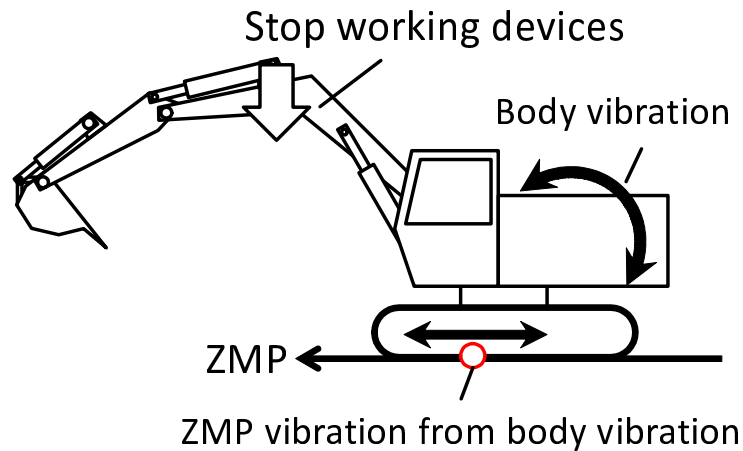


図 3.8: 機体振動による ZMP の振動

3.5 実験環境

油圧ショベルの実験用模型車両として図 3.11 に示す RC4WD 社製の 1/12 Scale Earth Digger 4200XL Hydraulic Excavator を使用して実験を行った。模型車両の質量は 18 kg, クローラ長は 400 mm, クローラ幅は 248 mm である。ブーム, アーム及びバケットについては, 油圧シリンダにより駆動し, 基本的な動作原理は実機と同様である。油圧バルブはロータリバルブであり, ロータリバルブをサーボモータで回転させることにより油圧シリンダを制御している。

この模型車両では, 上部旋回体の旋回は電動モータによって行っている。この実験では, この旋回のためのモータをツカサ電工社製 TG-05P-SG-150-HA に交換し, エンコーダとしてオムロン社製 E6A-GWZ3C を搭載した。モータドライバは, ツジ電子社製 TF-2MD3-R6 を用いた。

表 3.1 に模型車両各部の重心位置及び質量を示す。ブーム, アーム及びバケットのシリンダ長を計測するため, 各シリンダにワイヤ式のポテンシオメータ (セレスコ社製 SM2-12) を取り付けした。ポテンシオメータの出力値は, マイコンボード (Arduino Uno) を介し, 10bit で量子化し USB で接続した PC で記録する。各シリンダの速度, 加速度は, 30ms の後退差分により算出する。各シリンダのスプール弁を駆動するためのサーボモータは, マイコンボード (Arduino Uno) を介し, USB で接続した PC から制御する。

実験では計算による ZMP の予測と実際の模型車両の ZMP の動きを比較したい。そのための計測装置として, 図 3.12 に示すように天板の木材にロードセル (Measurement Specialties 社製 FC2231) を 4 か所に取り付けた床反力計測装置を製作した。ZMP は,

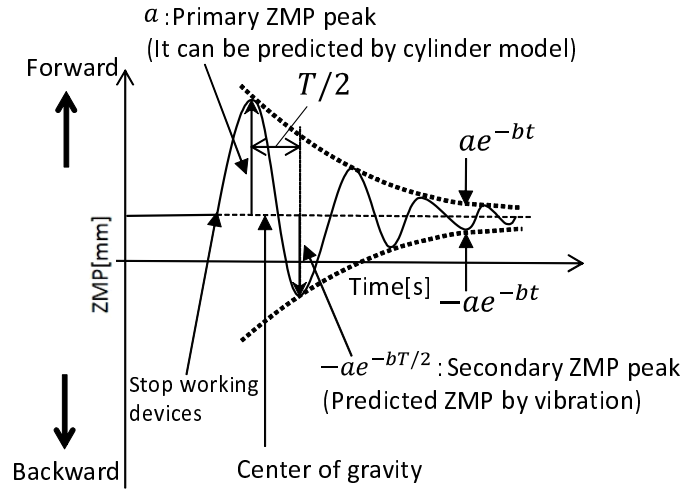


図 3.9: 機体振動を考慮した機体の ZMP 予測のコンセプト

表 3.1: スケールモデルのパラメータ

	Mass[g]	Center of gravity[mm]		Link length[mm]
	m	x	y	l
Traveling body (Crawler)	7,054	-10.5	45.1	168
Turning body (Body)	7,915	-115.3	-33.1	12
Boom	1,562	228.0	51.8	480
Arm	672	107.3	17.0	260
Bucket	671	29.6	45.5	125

床反力の圧力中心であるため次式の通り，各ロードセルに加わる圧力分布により算出できる [43].

$$ZMP_x = \frac{F_1 P_{1x} + F_2 P_{2x} + F_3 P_{3x} + F_4 P_{4x}}{F} \quad (3.7)$$

$$ZMP_y = \frac{F_1 P_{1y} + F_2 P_{2y} + F_3 P_{3y} + F_4 P_{4y}}{F} \quad (3.8)$$

ここで， $F_{1\sim 4}$ は各ロードセルの出力値， $P_{1x\sim 4x}$ は各ロードセルの位置の x 座標， $P_{1y\sim 4y}$ は各ロードセルの位置の y 座標， F は各ロードセルの出力値 $F_{1\sim 4}$ の総和である．

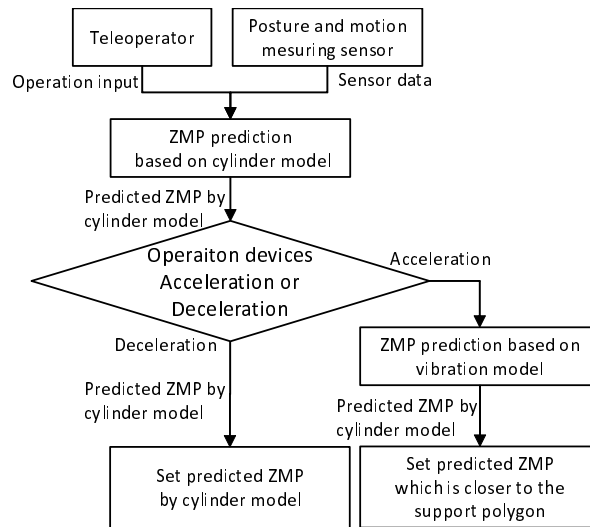


図 3.10: 機体振動を考慮した機体の ZMP の予測のフローチャート



図 3.11: 実験用模型車両

3.6 実験

パラメータ同定

予備実験として，簡便な油圧ショベルの動作モデルの式 2.1 の未知パラメータを求めた．パラメータは，ブームシリンダ及び旋回モータを動作させたときの速度応答の計測値に式 2.1 を最小二乗法でフィッティングさせることにより求めた．ここでは，姿勢変化を考慮しない簡便な油圧ショベルの動作モデルを用いた．ブームシリンダは，ブームを 0° から 24° まで動作させ，アーム角度は 163° ，バケット角度は 144° とした．旋回については，上部旋回体を 30° 旋回させ，ブーム角度は 13° ，アーム角度は 139° ，バケット角度は 144° とした．図 3.13，図 3.14 に，ブームシリンダ，旋回モータ動作時の実測値とフィッティング結果をそれぞれ示す．表 3.2，表 3.3 に，ブームシリンダ，旋回モータの求めたパラメータをそれぞれ示す．

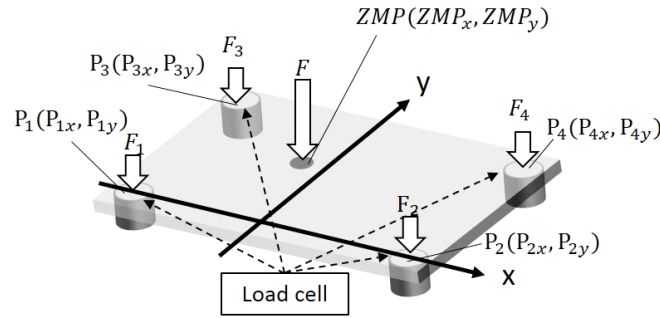


図 3.12: 床反力計測装置

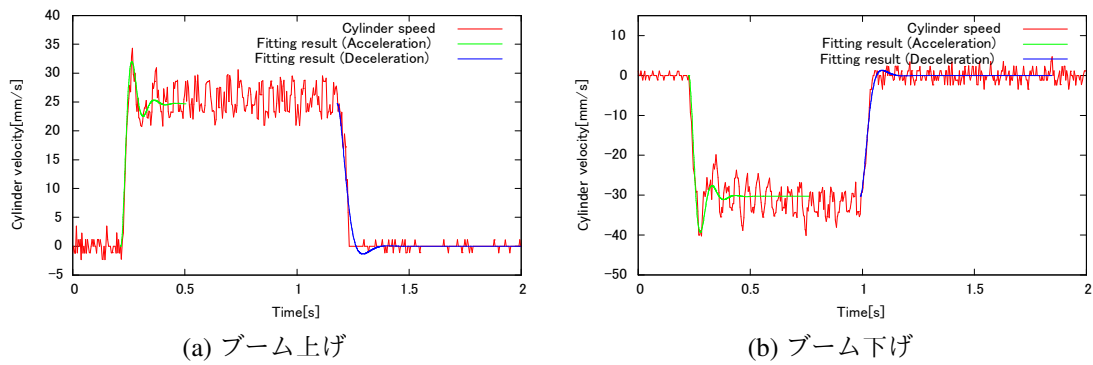


図 3.13: フィッティング結果（ブーム）

操作入力 of 自動調整

操作入力の自動調整の有効性を確認するため、転倒の危険がある状況における操作入力の自動調整の有無による挙動の差異を確認する．ここでは、機体振動を考慮しない ZMP 予測を用いる．転倒の危険がある状況を模擬するため、図 3.15 に示すように、 35° の傾斜台上に床反力計測装置を配置し、その上に斜面とクローラが平行となるように模型車両を配置した．動作は、ブームの上下及び旋回動作を行った．ブーム上げは、ブーム角度 50° から 63° まで動作を行い、アーム角度は 90° 、バケット角度は 144° 、旋回角度は左 90° とし、上部旋回体を斜面下側に向けた状態とした．ブーム下げは、ブーム角度 65° から 55° まで動作を行い、アーム角度は 75° 、バケット角度は 144° 、旋回角度は左 90° とした．旋回は、上部旋回体をクローラ正面に向けた状態から斜面上側に向けて右に 45° 旋回を行い、ブーム角度は 52° 、アーム角度は 37° 、バケット角度は 144° とした．重心の安全領域は $\pm 124 \text{ mm}$ とした．操作入力の修正刻みは 1% とし、将来の ZMP の予測時間は 0.5 s とした．

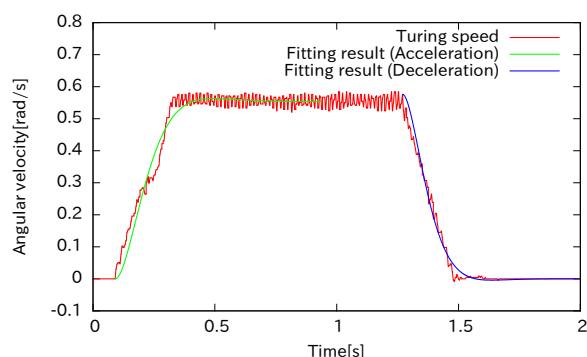


図 3.14: フィッティング結果（旋回）

表 3.2: 速度応答のパラメータ（ブームシリンダ）

Parameters	$V_{max}[\text{mm/s}]$	ω	ζ
Accelerate(stretching)	24.7	68.1	0.36
Decelerate(stretching)	24.7	37.7	0.68
Accelerate(shrinking)	-30.3	65.2	0.36
Decelerate(shrinking)	-30.3	46.4	0.71

ブーム上げ時の結果を図 3.16 に，ブーム下げ時の結果を図 3.17 に，旋回動作時の結果を図 3.18 に示す．また，ブーム上げ時の実験の様子を図 3.19 に，ブーム下げ時の実験の様子を図 3.20 に，旋回動作時の実験の様子を図 3.21 に示す．ZMP の正方向が車両前方であり，負方向が車両後方である．ブーム上げ時，下げ時，旋回時ともに操作入力の自動調整ありの場合においては，操作入力修正されることで，ZMP の変動を抑えられ，計測された床反力中心が安全領域を超えていないことが確認できた．また，ブーム下げ時においては，操作入力の自動調整なしでは転倒したが，操作入力の自動調整を行うことで，転倒を防ぐことができた．

自動停止

提案する自動停止の有効性を確認するための実験を行った．上部旋回体は，クローラ正面から 90° 右に向け，上部旋回体を斜面上側に向けた姿勢から，斜面下側に向けて 180° 左旋回を行った．この時，操作入力量は 100 % とし，ブーム角度は 43° ，アーム角度は 29° ，バケット角度は 144° とした．

表 3.3: 速度応答のパラメータ (旋回モータ)

Parameters	V_{max} [rad/s]	ω	ζ
Accelerate	0.55	0.80	12.87
Decelerate	0.55	0.84	15.99

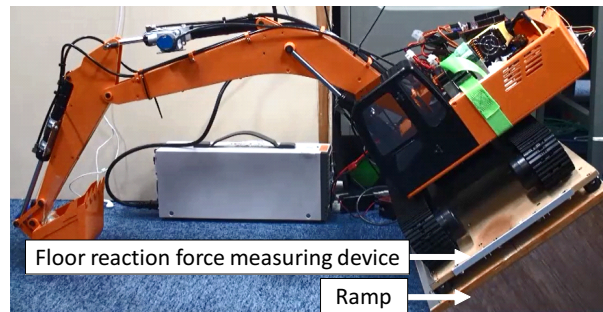


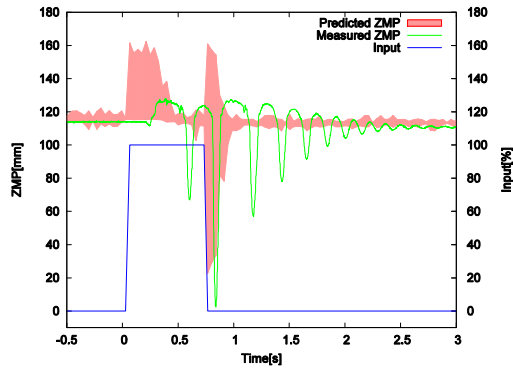
図 3.15: 実験の配置

重心及び ZMP 予測に基づく自動停止ありの条件，自動停止なしの条件，また，比較対象として重心の鉛直床面投影点が安全領域を超えた場合に旋回動作を停止する条件の 3 つの条件で実験を行った．重心及び ZMP 予測に基づく自動停止における重心安全領域は ± 120 mm とし，ZMP 安全領域は ± 124 mm とした．将来の重心及び ZMP の予測時間は 2 s とした．

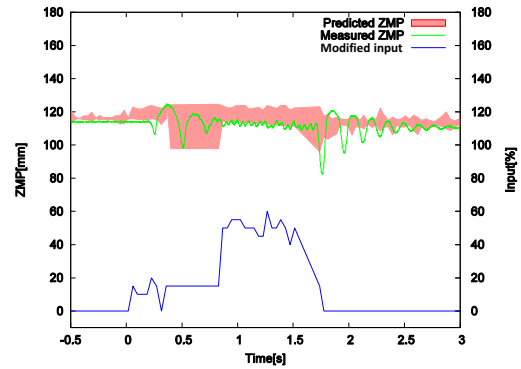
実験結果を図 3.22 に示す．また，実験の様子を図 3.23 に示す．結果より，自動停止なし及び重心の鉛直床面投影点が安全領域を超えた場合に旋回動作を停止させる条件では転倒が生じたが，提案する自動停止ありの場合では，転倒しないことが確認できた．自動停止なしの条件では，重心の鉛直床面投影点が支持多角形を超え，静的に不安定になることにより転倒が生じた．また，重心の鉛直床面投影点が安全領域を超えた場合に旋回動作を停止する条件では，重心の鉛直床面投影点は支持多角形を超えていないが，計測 ZMP が支持多角形を超え，動的に不安定になることにより転倒が生じた．一方，自動停止ありの条件では，重心の鉛直床面投影点及び ZMP が支持多角形内に留まっており，静的及び動的に安定に停止できていることが確認できる．

機体振動を考慮した ZMP 予測を用いた時の操作入力の自動調整

機体振動を考慮した ZMP 予測を用いた時の操作入力の自動調整の効果の確認を行う．まずは，振動モデルのパラメータを求める．ブーム角度は約 6 度から 26 度まで動作させ，模型車両のアーム角度は 29° ，バケット角度 163° とした．動作開始は実験

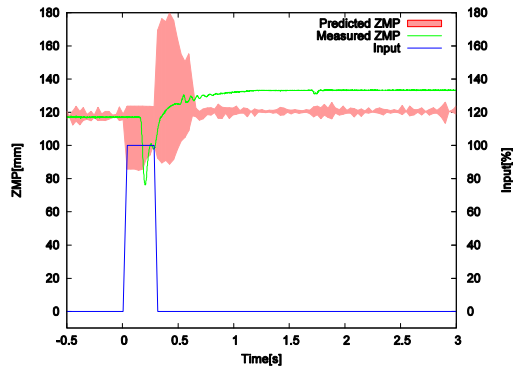


(a) 操作入力の自動調整なし

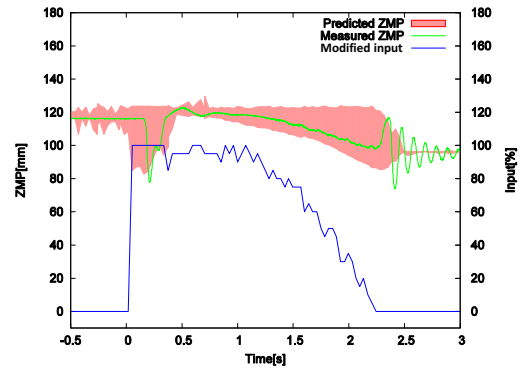


(b) 操作入力の自動調整あり (安全領域: ± 124 mm)

図 3.16: 実験結果 (ブーム上げ)



(a) 操作入力の自動調整なし



(b) 操作入力の自動調整あり (安全領域: ± 124 mm)

図 3.17: 実験結果 (ブーム下げ)

開始から 5s 後とした．図 3.24 にブーム停止時の床反力中心の時系列データを示す．*b* については，時系列データから得られた ZMP ピーク値に式 3.5 を最小二乗法でフィッティングすることにより同定した．*T* については，最初のピークの時間と 2 番目のピークの時間の差から求めた．表 3.4 に求めたパラメータを示す．

転倒防止制御の有用性示すため，転倒の危険がある状況における転倒防止制御の有無による挙動の差異を確認する．転倒の危険がある状況を模擬するため，約 35° の傾斜台上に床反力計測装置を配置し，その上に模型車両を配置する．模型車両の姿勢は旋回角度約 90° ，アーム角度約 60° ，バケット角度約 163° とした．ブーム上げについては，ブーム角度は約 45° から約 52° まで動作を行い，ブーム下げについては，ブーム角度は約 65° から 58° まで動作を行う．シリンダ速度はシリンダ変位の後退

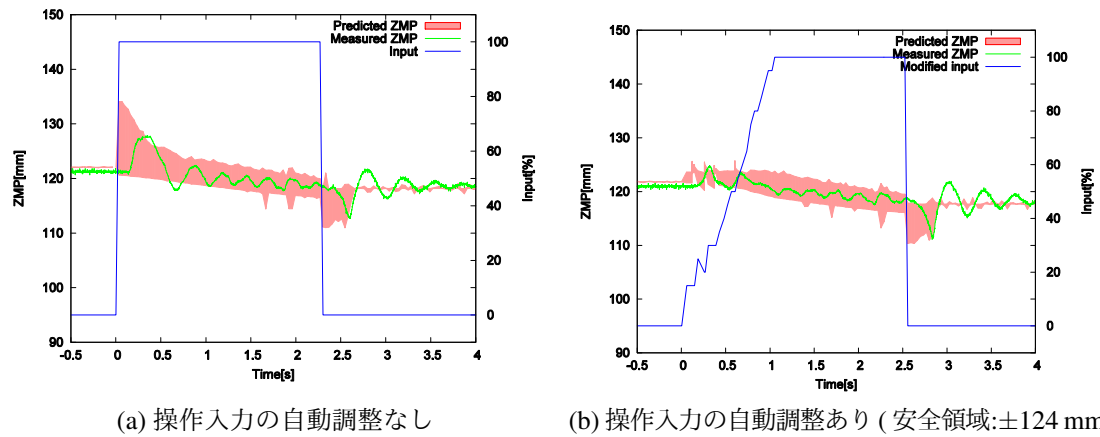


図 3.18: 実験結果（旋回）

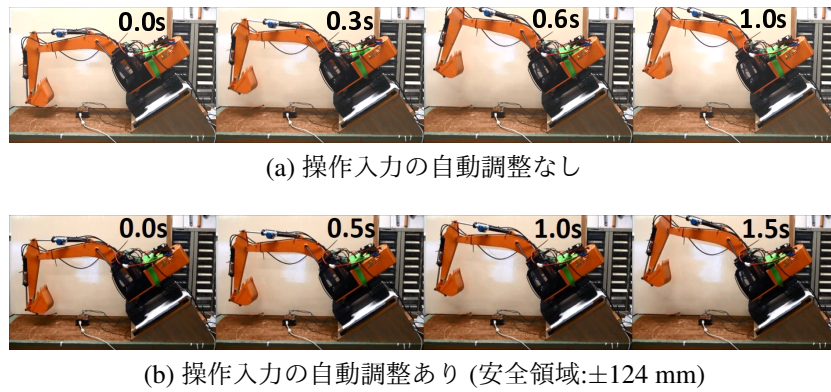
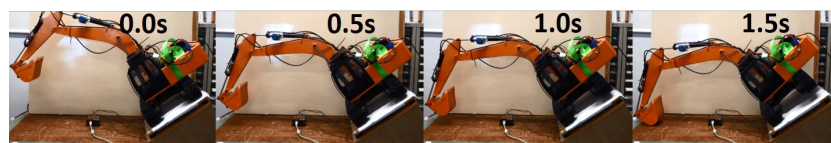
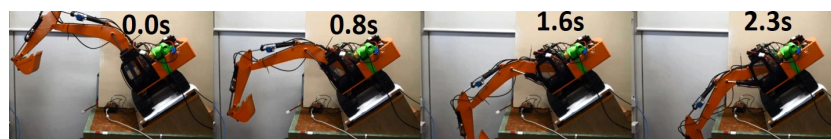


図 3.19: 実験の様子（ブーム上げ）

差分 (20ms) から求め、シリンダ加速度はシリンダ速度の後退差分 (20ms) から求めた。ブーム上げ時の結果を図 3.25 に、ブーム下げ時の結果を図 3.26 に示す。ZMP の正方向が車両前方であり、負方向が車両後方である。ブーム上げ時、下げ時ともに転倒防止制御ありの場合においては、操作入力修正されることで計測された床反力中心が安全領域の設定値 ($\pm 120\text{mm}$) を超えていないことが確認できる。ブーム上げ時の実験の様子を図 3.27 に、ブーム下げ時の実験の様子を図 3.28 に示す。転倒防止制御なしの場合においてはブーム上げ時、下げ時ともに転倒したが転倒防止制御ありの場合では転倒が防止できていることが確認できる。



(a) 操作入力の自動調整なし



(b) 操作入力の自動調整あり (安全領域: ± 124 mm)

図 3.20: 実験の様子 (ブーム下げ)



(a) 操作入力の自動調整なし



(b) 操作入力の自動調整あり (安全領域: ± 124 mm)

図 3.21: 実験の様子 (旋回)

3.7 シミュレーション実験

パラメータ同定

提案する操作入力の自動調整および自動停止の効果を確認するためのシミュレーション実験を行う。シミュレータとしては、2.4節で述べた検証用シミュレータを用いる。予備実験として、シミュレータに対する簡便な油圧ショベルの動作モデルのパラメータ同定を行う。シミュレータモデルに対して旋回動作、ブーム上げ、ブーム下げ、アーム上げ、アーム下げを行い、それぞれのパラメータを同定する。各操作入力は、操作入力0%で静止した状態から100%与え、一定時間動作を継続後に操作入力0%を与える。この動作により、操作入力に対する加速時の速度応答および減速時の速度応答を取得できる。実験条件は、2.2節の実機実験と同様とした。また、旋回、ブーム上げ、ブーム下げについては、アームを伸ばした状態および縮めた状態でそれぞれ実験を行った。シミュレーション時の床面は傾斜がない平面とした。

表 3.4: ZMP 振動モデルのパラメータ

Parameters	Value
b	1.1
T[s]	0.5

速度応答のパラメータは，実験時の速度応答に対して式 2.1 の解を最小二乗法でフィッティングさせることにより求めた．パラメータは，旋回時の加速時および減速時，ブーム上げ時の加速時および減速時，ブーム下げ時の加速時および減速時，アーム上げ時の加速時および減速時のパラメータをそれぞれ求める．また，姿勢変化を考慮しない簡便な油圧ショベルの動作モデルのパラメータおよび姿勢変化を考慮した簡便な油圧ショベルの動作モデルのパラメータをそれぞれ求めた．

図 3.5 に同定した旋回時パラメータを，図 3.6 にブーム上げ時のパラメータを，図 3.7 にブーム下げ時のパラメータを，図 3.8 にアーム上げ時のパラメータを，図 3.9 にアーム下げ時のパラメータを示す．

図 3.29 に旋回動作時の姿勢変化を考慮しないパラメータの場合の簡便な油圧ショベルの動作モデルのフィッティング結果を，図 3.30 に姿勢変化を考慮する場合のフィッティング結果を示す．図 3.31 にブーム上げ動作時の姿勢変化を考慮しないパラメータの場合の簡便な油圧ショベルの動作モデルのフィッティング結果を，図 3.32 に姿勢変化を考慮する場合のフィッティング結果を示す．図 3.33 にブーム下げ動作時の姿勢変化を考慮しないパラメータの場合の簡便な油圧ショベルの動作モデルのフィッティング結果を，図 3.34 に姿勢変化を考慮する場合のフィッティング結果を示す．図 3.35 にアーム上げ動作時のフィッティング結果を，図 3.36 にアーム下げ動作時のフィッティング結果を示す．

姿勢変化を考慮しない簡便な油圧ショベルの動作モデルのフィッティング結果と姿勢変化を考慮したモデルのフィッティング結果を比較すると，姿勢変化を考慮したモデルの方が計測データにより近いフィッティング結果になっていることが確認できた．姿勢変化を考慮しない簡便な油圧ショベルの動作モデルでは，姿勢変化によらず一定の応答を示すが，シミュレータは姿勢変化によって速度応答が変化する．そのため，シミュレータの応答と簡便な油圧ショベルの動作モデルの速度応答が乖離しているものと考えられる．一方で，姿勢変化を考慮する簡便な油圧ショベルの動作モデルでは，姿勢変化による速度応答の変化を吸収していることで，比較的良好なフィッティング結果になっているものと考えられる．

表 3.5: 速度応答のパラメータ (旋回)

動作モデル	加減速	$V_{max}[\text{rad/s}]$	ω	ζ	ω_1	ω_2	ζ_1	ζ_2
姿勢変化考慮なし	加速	1.46	3.00	2.06	-	-	-	-
姿勢変化考慮なし	減速	-	3.00	0.94	-	-	-	-
姿勢変化考慮あり	加速	1.49	-	-	0.00	3.00	3.59	-3.97
姿勢変化考慮あり	減速	-	-	-	-2.56	7.00	0.359	0.16

表 3.6: 速度応答のパラメータ (ブーム上げ)

動作モデル	加減速	$V_{max}[\text{m/s}]$	ω	ζ	V_{max1}	V_{max2}
姿勢変化考慮なし	加速	0.159	7.94	0.82	-	-
姿勢変化考慮なし	減速	-	14.44	0.62	-	-
姿勢変化考慮あり	加速	-	7.89	0.79	-3.71×10^{-7}	0.19
姿勢変化考慮あり	減速	-	14.44	0.62	-	-

操作入力の自動調整

操作入力の自動調整の有効性を確認するためのシミュレーション実験を行う。機体の前方に 25 傾斜させた状態で 2 秒間 100% の操作入力で行った。バケット内に土砂満載の状態を模擬し、バケット重量を 900kg 増加させた。支持多角形境界は、機体前方 1467mm，機体後方 1413mm，機体左右 1245mm である。ZMP の安全領域は、支持多角形境界と同一とし、機体前方 1467mm，機体後方 1413mm，機体左右 1245mm とした。

操作入力の自動調整なしの実験結果を図 3.37 に示す。操作入力の自動調整ありの実験結果を図 3.38 に示す。操作入力の自動調整なしの場合では、ブーム上げ開始時の慣性力により転倒が生じたが、操作入力の自動調整ありの場合では操作入力が増減されることにより転倒しないことが確認できた。

自動停止

操作入力の自動停止を確認するためのシミュレーション実験を行う。機体の側方に 25 傾斜させた状態で 50% の操作入力で行った。上部旋回体は 180 度回した状態を初期姿勢とした。バケット内に土砂満載の状態を模擬し、バケット重量を 900kg 増加させた。ZMP の安全領域は、支持多角形境界と同一とし、機体前方 1467mm，機体後方 1413mm，機体左右 1245mm とした。重心の鉛直床面投影点の安全領域は、支

表 3.7: 速度応答のパラメータ (ブーム下げ)

動作モデル	加減速	V_{max} [m/s]	ω	ζ	V_{max1}	V_{max2}
姿勢変化考慮なし	加速	0.200	3.47	0.72	-	-
姿勢変化考慮なし	減速	-	6.10	0.55	-	-
姿勢変化考慮あり	加速	-	3.49	0.69	3.17×10^{-7}	0.17
姿勢変化考慮あり	減速	-	6.10	0.55	-	-

表 3.8: 速度応答のパラメータ (アーム上げ)

動作モデル	加減速	V_{max} [m/s]	ω	ζ	V_{max1}	V_{max2}
姿勢変化考慮なし	加速	0.17	3.94	1.00	-	-
姿勢変化考慮なし	減速	-	3.74	0.94	-	-
姿勢変化考慮あり	加速	-	3.95	1.01	2.64×10^{-8}	0.17
姿勢変化考慮あり	減速	-	3.74	0.94	-	-

持多角形境界から 50mm のマージンを加え、機体前方 1417mm, 機体後方 1363mm, 機体左右 1195mm とした。

自動停止なしのときの結果を図 3.39 に示す。自動停止ありのときの結果を図 3.40 に示す。自動停止なしの場合では、重心位置変化により転倒が生じたが、自動停止ありの場合では自動的に停止することにより転倒しないことが確認できた。

3.8 まとめ

本章では、操作入力の自動調整と自動停止から構成される転倒防止システムを提案した。模型車両やシミュレーションによる実験により転倒防止効果を確認した。

本システムは、機体 ZMP を支持多角形内に設定した安全領域に留めるように操作入力を調整するため、機体の浮き上がりを許容しないものであるが、機体が浮き上がっても即座に機体に転倒するとは限らない。本システムは、機体の浮き上がりを許容しないシステムであり、より安全側のシステムといえる。しかし、転倒しない状況にも関わらずシステムが介入することによる操作性の低下が考えられる。

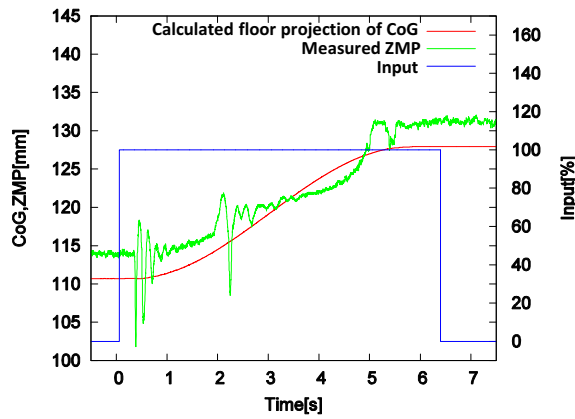
本システムでは、支持多角形境界から一定の距離をマージンをとった安全領域を設定している。機体の姿勢や転倒の方向によって転倒するときのエネルギーのマージンが異なるという特徴がある。そのため、転倒しやすさに対するマージンが一定ではないという課題がある。

本システムでは、操作入力の自動調整と自動停止の 2 つのプロセスを組み合わせ

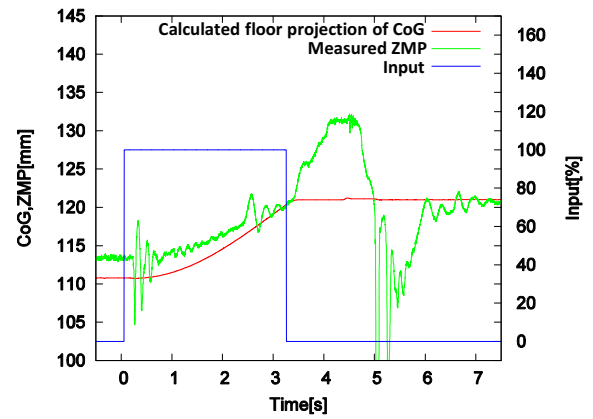
表 3.9: 速度応答のパラメータ (アーム下げ)

動作モデル	加減速	V_{max} [m/s]	ω	ζ	V_{max1}	V_{max2}
姿勢変化考慮なし	加速	0.11	4.39	0.65	-	-
姿勢変化考慮なし	減速	-	3.79	0.96	-	-
姿勢変化考慮あり	加速	-	4.54	0.77	5.55×10^{-7}	0.13
姿勢変化考慮あり	減速	-	3.79	0.96	-	-

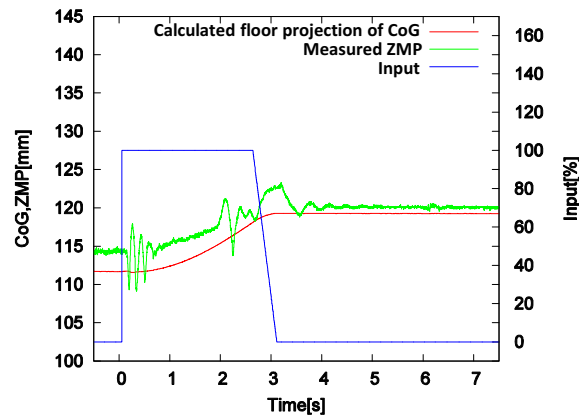
おり、2つのプロセスの役割分担などの見通しが悪く、転倒し得るすべての条件を網羅しているか直感的に把握し難いという課題がある。また、これらのシステムは1つのみのアクチュエータの動作しか考慮していないが、油圧ショベルは複数の入力と同時に与えられることがあるため、複数の入力に対応したシステムが求められる。これらの問題にも対応すべく転倒危険の判断の方法などに新たな考え方を導入した方法を考案した。次章でこの詳細を述べる。



(a) 自動停止なし

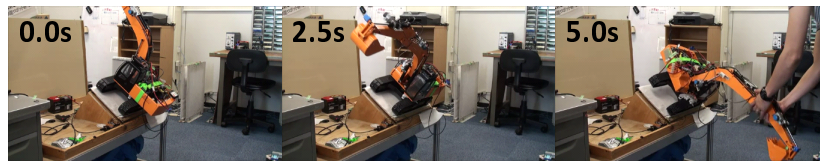


(b) 重心の鉛直床面投影点が ± 124 mm を超えた場合に自動停止

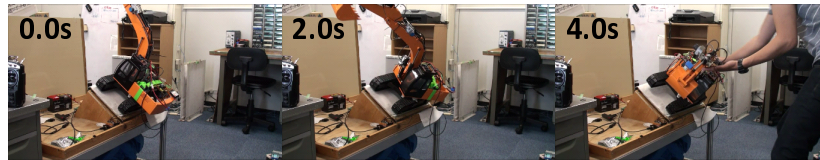


(c) 提案する自動停止 (ZMP 安全領域: ± 124 mm, CoG 安全領域: ± 120 mm)

図 3.22: 自動停止の実験結果



(a) 自動停止なし



(b) 重心の鉛直床面投影点が $\pm 124 \text{ mm}$ を超えた場合に自動停止



(c) 提案する自動停止 (ZMP 安全領域: $\pm 124 \text{ mm}$, CoG 安全領域: $\pm 120 \text{ mm}$)

図 3.23: 自動停止の実験の様子

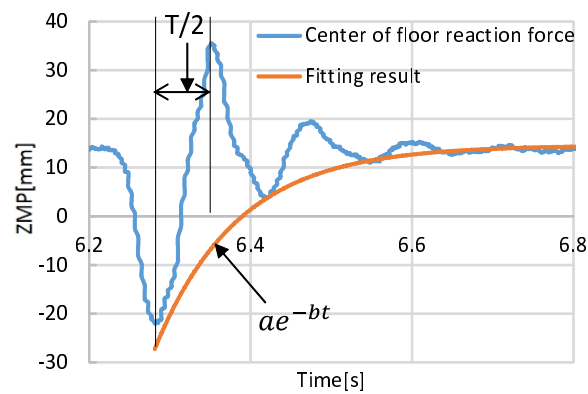
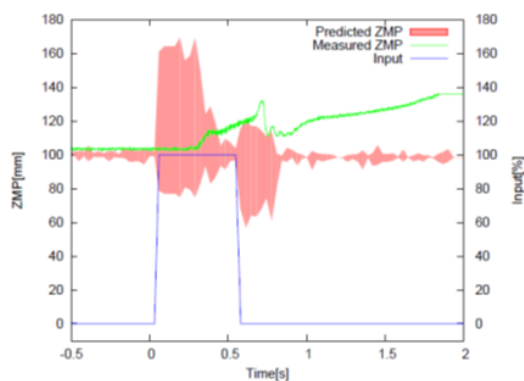
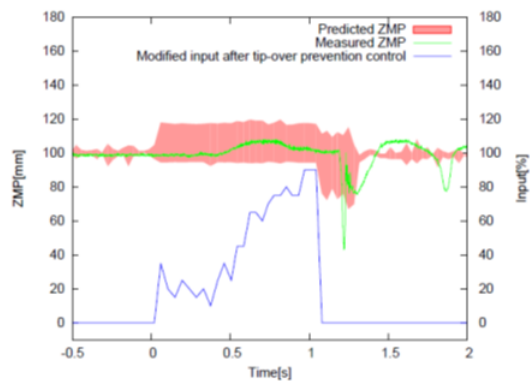


図 3.24: ZMP 振動モデルのパラメータ同定結果

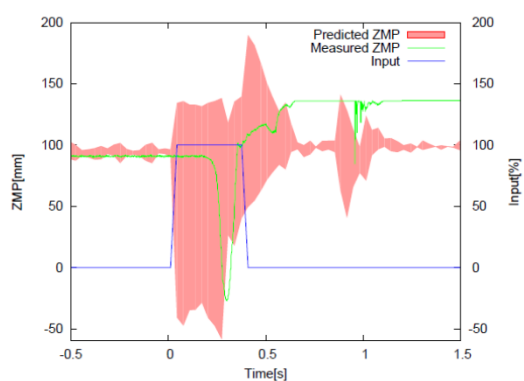


(a) 操作入力の自動調整なし

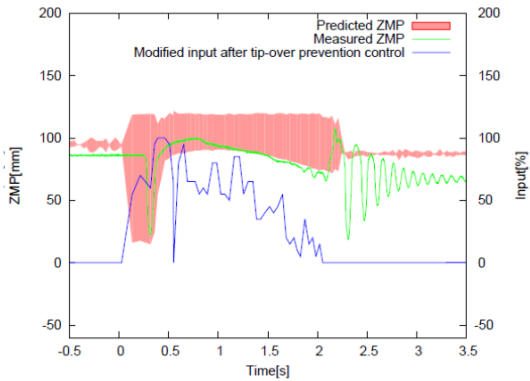


(b) 操作入力の自動調整あり（安全領域： $\pm 120\text{mm}$ ）

図 3.25: 実験結果（ブーム上げ）

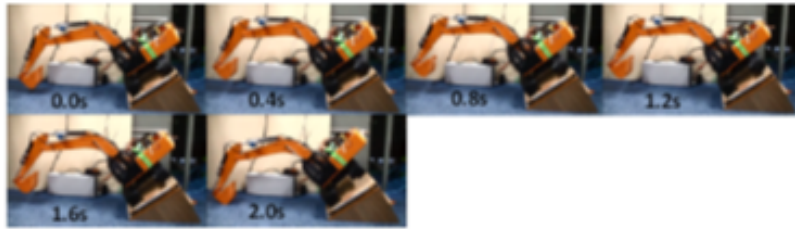


(a) 操作入力の自動調整なし

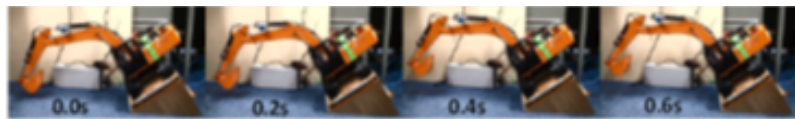


(b) 操作入力の自動調整あり（安全領域： $\pm 120\text{mm}$ ）

図 3.26: 実験結果（ブーム下げ）

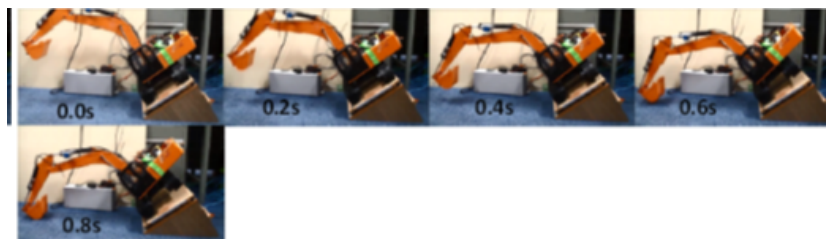


(a) 操作入力の自動調整なし

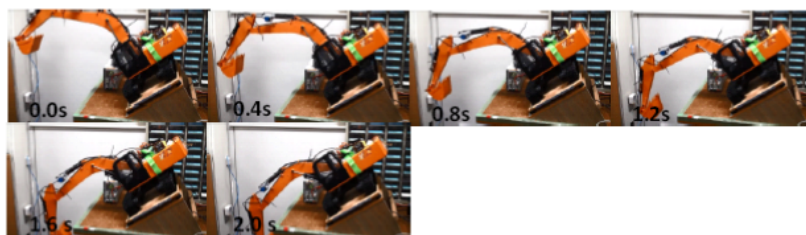


(b) 操作入力の自動調整あり（安全領域： $\pm 120\text{mm}$ ）

図 3.27: 実験の様子（ブーム上げ）

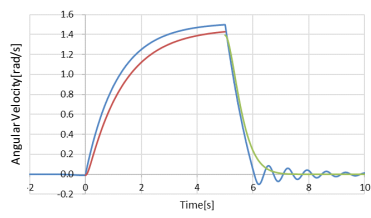


(a) 操作入力の自動調整なし

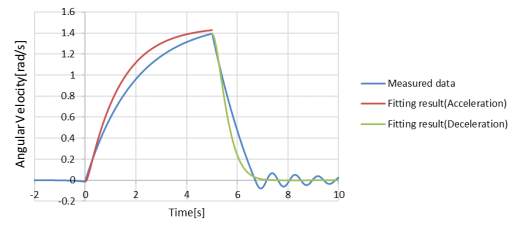


(b) 操作入力の自動調整あり（安全領域： $\pm 120\text{mm}$ ）

図 3.28: 実験の様子（ブーム下げ）

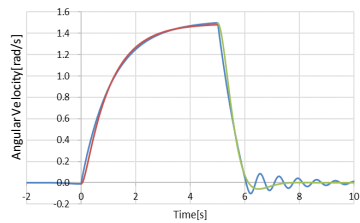


(a) アーム縮め

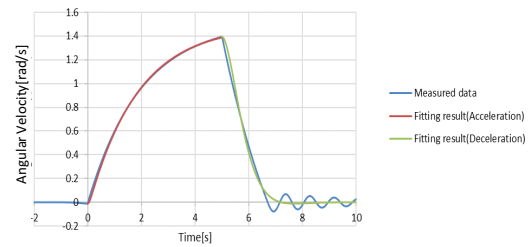


(b) アーム伸ばし

図 3.29: 旋回のフィッティング結果（姿勢変化を考慮しない）

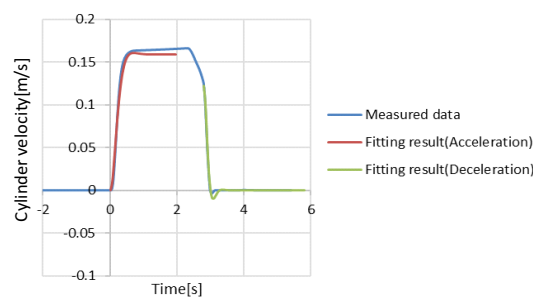


(a) アーム縮め

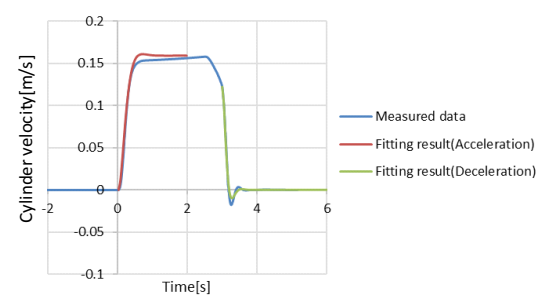


(b) アーム伸ばし

図 3.30: 旋回のフィッティング結果（姿勢変化を考慮する）

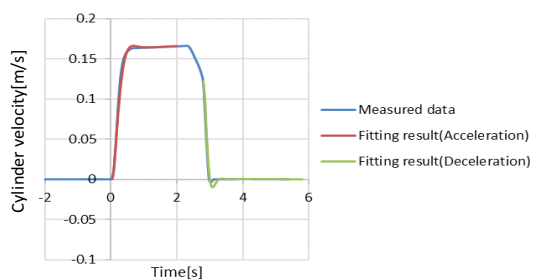


(a) アーム縮め

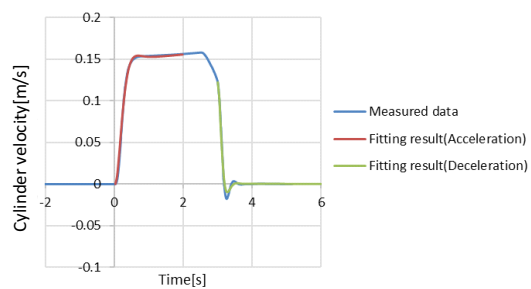


(b) アーム伸ばし

図 3.31: ブーム上げのフィッティング結果（姿勢変化を考慮しない）

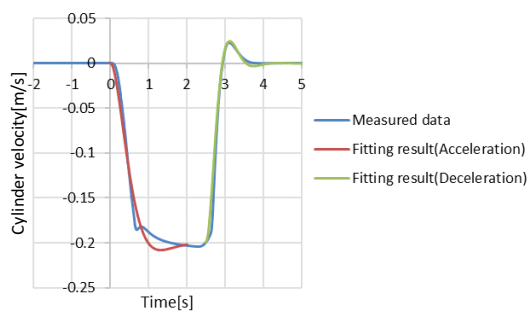


(a) アーム縮め

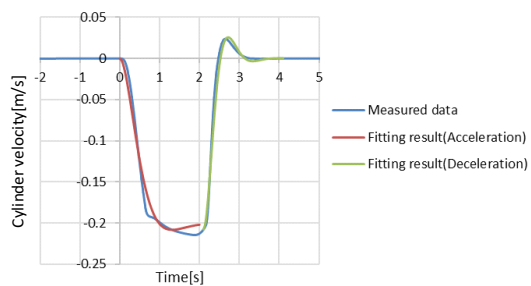


(b) アーム伸ばし

図 3.32: ブーム上げのフィッティング結果（姿勢変化を考慮する）

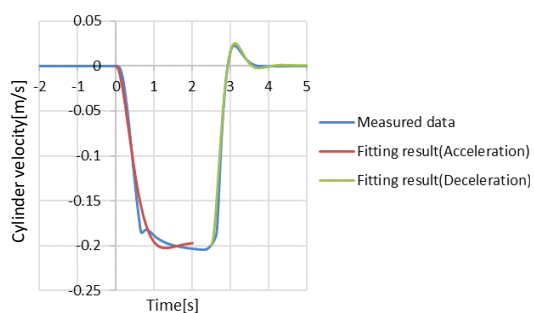


(a) アーム縮め

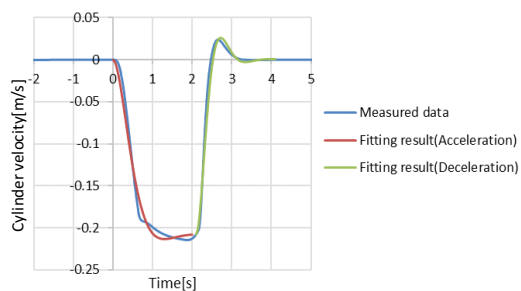


(b) アーム伸ばし

図 3.33: ブーム下げのフィッティング結果（姿勢変化を考慮しない）

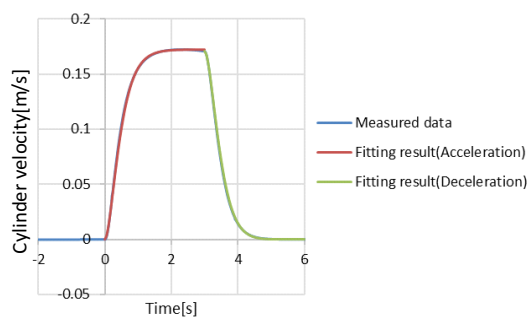


(a) アーム縮め

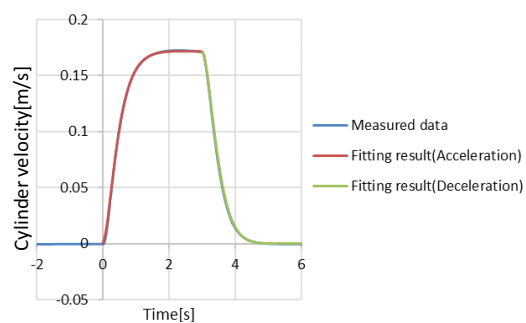


(b) アーム伸ばし

図 3.34: ブーム下げのフィッティング結果（姿勢変化を考慮する）

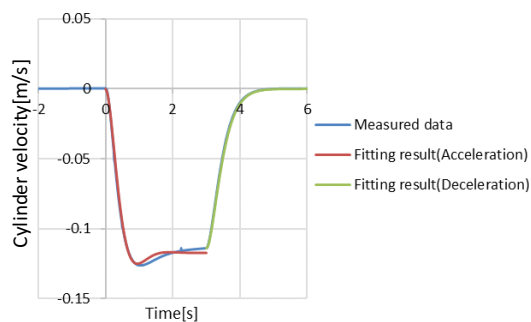


(a) 姿勢変化を考慮しない

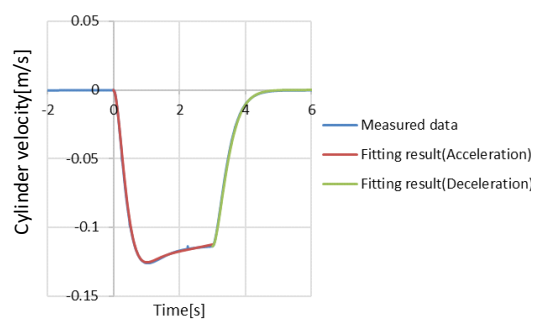


(b) 姿勢変化を考慮する

図 3.35: アーム上げのフィッティング結果

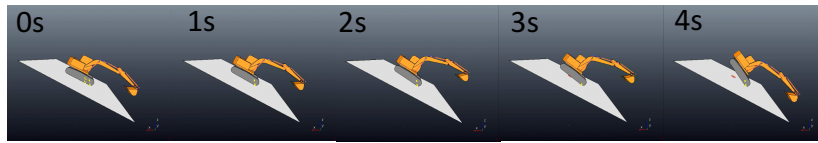


(a) 姿勢変化を考慮しない

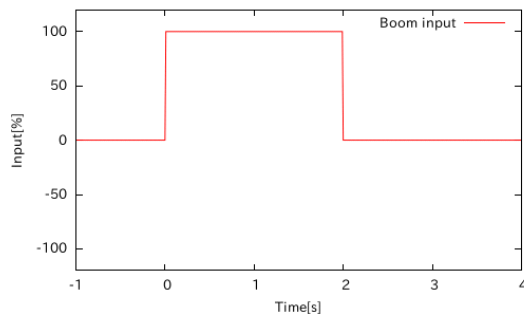


(b) 姿勢変化を考慮する

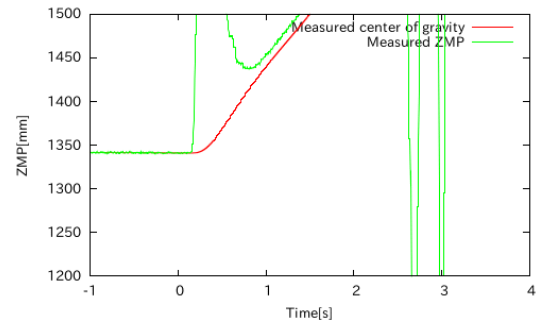
図 3.36: アーム下げのフィッティング結果



(a) シミュレーションの様子



(b) 操作入力

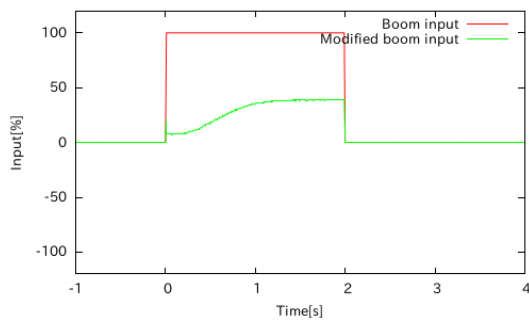


(c) ZMP, 重心

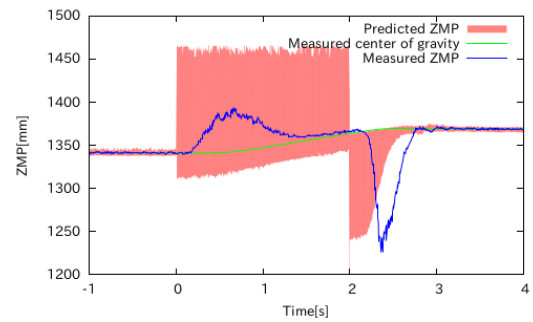
図 3.37: ブーム上げ時の実験結果（操作入力の自動調整なし）



(a) シミュレーションの様子



(b) 操作入力

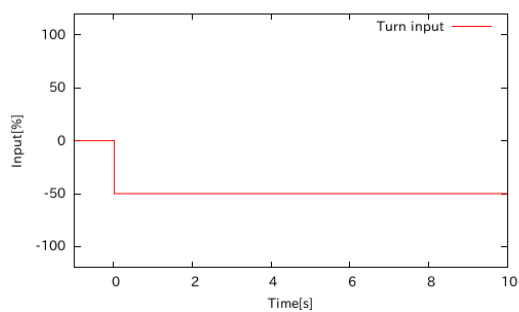


(c) ZMP, 重心

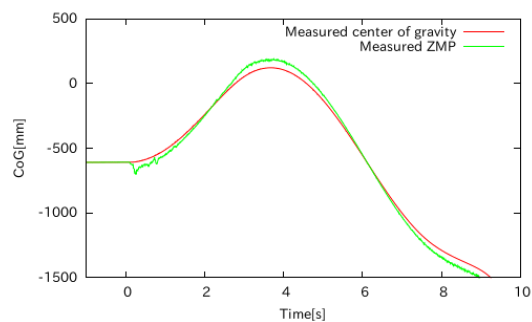
図 3.38: ブーム上げ時の実験結果（操作入力の自動調整あり）



(a) シミュレーションの様子

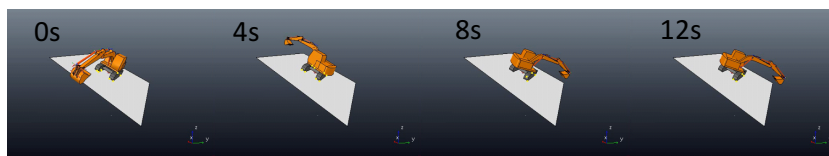


(b) 操作入力

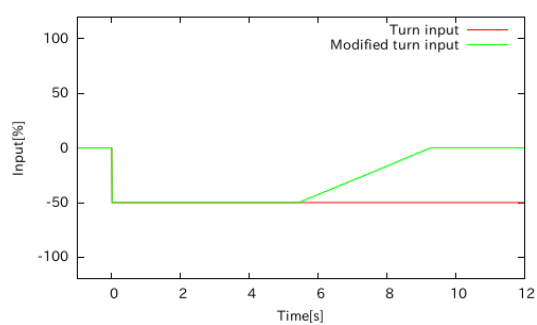


(c) ZMP, 重心

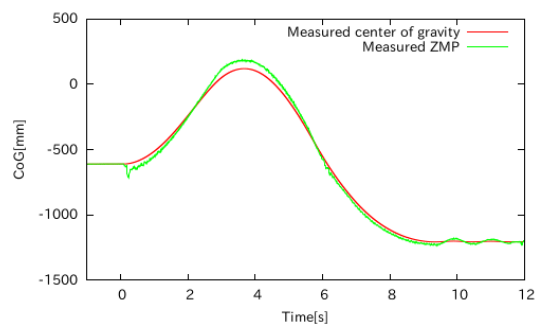
図 3.39: 旋回時の実験結果（自動停止なし）



(a) シミュレーションの様子



(b) 操作入力



(c) ZMP, 重心

図 3.40: 旋回時の実験結果（自動停止あり）

第4章 機体の浮き上がりを考慮した正規化エネルギー安定余裕の予測に基づく転倒防止システム

4.1 概要

提案するシステムは、油圧ショベルの機体動作および転倒危険性を予測し、機体が転倒すると予測される場合は操作入力を調整する。本システムでは、転倒を防ぐ一方で、転倒しない範囲の機体の浮き上がりを許容することで前章で述べたシステムよりも動作可能範囲を広げ、遠隔操縦者に対するシステムの介入を最小限にすることを目指す。つまり、転倒しない限りはシステムが介入することではなく、操作性の低下が最小限になることが期待できる。

本システムは、機体の動作に伴う機体傾斜を予測し、機体が転倒すると予測される場合のみ操作入力を修正する。このときの転倒危険性の判断指標としてに示す正規化エネルギー安定余裕（以下、NE 安定余裕とする）を用いる（図 4.1）。NE 安定余裕が 0 になると静的には機体は転倒すると判断できる。また、NE 安定余裕が 0 である状態は重心の鉛直床面投影点が支持多角形境界に位置する。

提案するシステムにより、機体の NE 安定余裕をある値以上に維持する。この値は 0 であるとマージンがない状態であり、値を大きくするとより安全マージンの大きい安全側のシステムとなる。この安全マージンは、エネルギーの次元として考えることができ、安全マージンを一定とすると、転倒に至るまでに必要なエネルギーのマージンが機体の姿勢によらず一定となる。

図 4.2 に提案するシステム構成を示す。このシステムは、ブーム、旋回といった複数のアクチュエータの同時動作に対応する。このことは、3 章で提案した手法が一つのみのアクチュエータにしか対応できなかった欠点を補うものとなっている。本システムは、アクチュエータに与えるすべての操作入力の組み合わせにおける機体挙動を並列に予測し、それぞれの操作入力組み合わせに対する将来の NE 安定余裕を予測する。予測した NE 安定余裕が設定したマージン以上の操作入力の組み合わせのうち、遠隔操縦者が与えた操作入力に近い操作入力の組み合わせを各アクチュエータに与える。

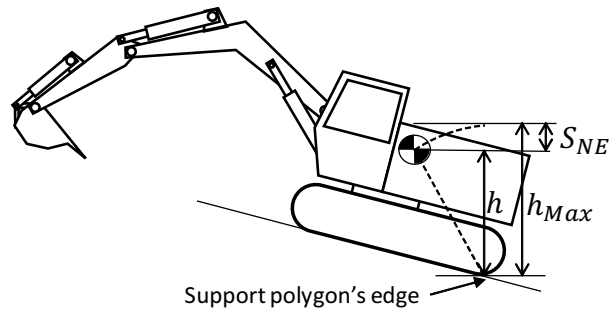


図 4.1: 正規化エネルギー安定余裕

これにより、転倒しない操作入力に修正され、また、遠隔操縦者の操作入力の変更を最小限にとどめるため、操作性への悪影響も最小限となることが期待できる。

4.2 機体の浮き上がりを考慮した NE 安定余裕の予測

機体の浮き上がりを考慮した NE 安定余裕の予測では、ある操作入力に対する機体の動作に伴う機体の浮き上がりを予測し、機体が浮き上がった後の NE 安定余裕を予測するという処理が必要となる。

図 4.3 に機体浮き上がりを考慮した NE 安定余裕の予測の流れを示す。簡便な油圧ショベルの動作モデルを 4 次のルンゲクッタ法で解くことにより、次ステップの油圧ショベルの姿勢や各部に生じる加速度が算出できる。算出した油圧ショベルの姿勢と各部に生じる加速度から ZMP を算出できる。ZMP がクローラと地面との接触面内にある場合には機体を回転させるトルクはクローラ部に生じる反力により機体を回転させないが、ZMP がクローラの地面との接触面の端部に位置すると ZMP を回転中心とした機体を浮き上がらせる角加速度が生じる。ZMP がクローラの地面との接触面の端部に位置する場合、角加速度を積分することで機体の浮き上がり角度を算出する。そして、その時の姿勢における NE 安定余裕を算出する。ある予測期間に、この NE 安定余裕が許容値以下になる時、機体が転倒してしまう恐れが高いと判断できる。NE 安定余裕が許容値以上であれば、機体が浮き上がったとしても安定な状態に戻ることが予想される。

これらの予測は、ここではブーム、アーム、旋回の 3 自由度に対して想定し得る操作入力の組み合わせの数だけ行う必要がある。これらの各操作入力に対する予測を CPU による繰り返し処理を行う方法では、リアルタイムに処理するのは困難であるため、GPU による並列計算を利用する。GPU の 1 つ 1 つのコアの動作周波数は CPU に及ばないが、CPU と比較して多くのコアを持っているため並列計算可能な処理に

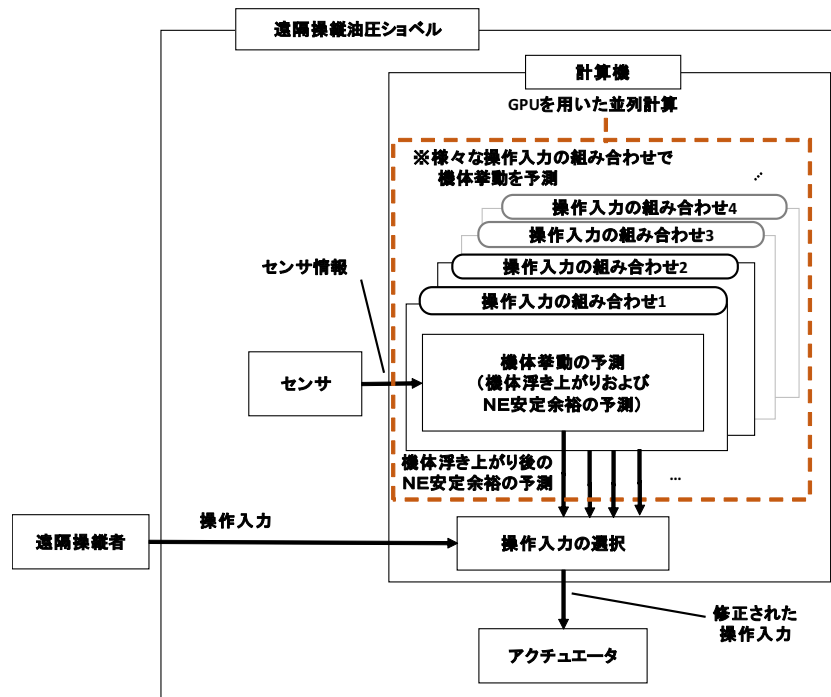


図 4.2: システム構成

においては、CPU よりも高速に処理が可能である。高性能な GPU は一般にデスクトップ PC に搭載されるため、油圧ショベルの機体に搭載しようとすると高い消費電力や車載時の振動による悪影響などが懸念されるが、NVIDIA DRIVE PX[44] といった自動運転のための車載向け GPU 搭載 PC が存在しており、このような製品を用いることで消費電力や振動の問題も解決できると考えている。

4.3 機体の浮き上がりを考慮した NE 安定余裕の予測に基づく操作入力の選択

様々な操作入力の組み合わせにおける NE 安定余裕を予測した後、それらの操作入力の組み合わせのうち 1 つをアクチュエータに与えることになる。この操作入力の組み合わせを選択する手法について述べる。転倒を防ぐためには、NE 安定余裕が許容値以上の操作入力の組み合わせを選択する必要がある。これにより、転倒しない操作入力のみをアクチュエータに与える事ができる。この時、NE 安定余裕が許容値以上の操作入力の組み合わせは複数あることが想定されるが、遠隔操縦者の操作性を考慮すると遠隔操縦者の操作入力に近い操作入力を選択することで、操作性の低下を最小

- ①簡便な油圧ショベルの動作モデル式を解くことにより次ステップのアクチュエータの姿勢を算出
- ②アクチュエータの姿勢から油圧ショベルの姿勢(各部の質点位置)を算出
- ③各部の質点の位置の後退差分により質点の加速度を算出
- ④質点位置及び質点の加速度からZMPを算出
- ⑤ZMPが支持多角形境界に位置する場合、ZMPまわりのトルクを算出
- ⑥ZMPまわりのトルクとZMPまわりの慣性モーメントから角加速度を算出
- ⑦角加速度を積分することにより機体の浮き上がり角度を算出
- ⑧NE安定余裕を算出

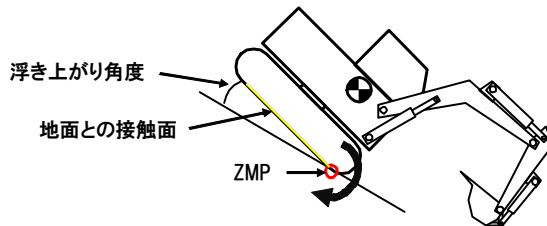


図 4.3: NE 安定余裕の予測

限にできると考えた。

図 4.4 にフローチャートを示す。ここでは、転倒防止システムが旋回、ブーム、アームのアクチュエータを動作させる場合の例を示す。操作入力の手組み合わせごとに T 秒後先までの NE 安定余裕を予測する。NE 安定余裕が許容値以上の操作入力の手組み合わせのうち、各操作入力の修正量の二乗和が最小の組み合わせをアクチュエータに与える。この例のように転倒防止システムが旋回、ブーム、アームのアクチュエータを動作させる場合は、オペレータが操作していないアクチュエータも転倒防止システムが介入することにより動いてしまう可能性がある。

オペレータが複数のアクチュエータを同時に操作しない場合には、動かしているアクチュエータのみに転倒防止システムが介入させるといった方法も考えられる。この場合、オペレータが操作したアクチュエータ以外のアクチュエータが動作することはない。

NE 安定余裕が許容値以上の操作入力の手組み合わせがない場合は、NE 安定余裕が許容値を逸脱した量の予測時間中の積算値が最小である操作入力の手組み合わせを選択する。これにより、外乱等により意図せずに機体が不安定状態になったとしてもシステムが破綻せず安定状態に回復しようとする動作が発生することが期待できる。

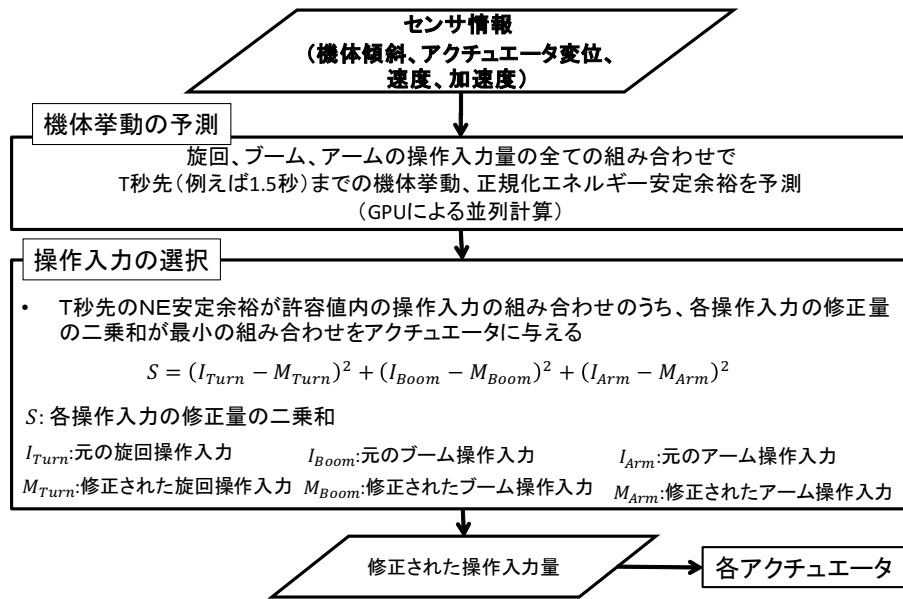


図 4.4: 操作入力の選択

4.4 処理の高速化

計算処理時間は、遠隔操縦者が操作入力を与えてからアクチュエータに操作入力を与えられる遅延時間に影響する。この遅延時間は、遠隔操縦者の操作性や施工効率を低下させる恐れがあるため、できるだけ短いことが望ましい。人間が許容できる視覚情報と触覚情報間の遅延として 100ms が目安になる [45, 46]。そのため、ここでは 100ms 以下の計算時間を目指す。

例えば、旋回、ブーム、アームの 3 軸を同時に動作させる場合、操作入力の刻み幅を 5% とすると、68,921 通りの操作入力の組み合わせとなる。このとき、ルンゲクッタ刻み幅 50ms、予測時間 1.5s とし、NVIDIA GTX1080 の GPU を使用し処理を行ったところ 0.74s の処理時間であった。本研究では、並列計算プラットフォームである NVIDIA CUDA[47] を用いた。

処理時間を短くするためには、組み合わせ数を減らすという方法がある。組み合わせ数を減らすためには操作入力の刻み幅を荒くすることがまず第一に考えられる。操作入力の刻み幅を荒くするとアクチュエータに与えることができる操作入力の刻みが荒くなるため、遠隔操縦者は細やかな操作が困難になる。例えば、遠隔操縦者が 8% の操作入力を与えたいとしても、操作入力の刻み幅が 10% の場合ではシステムを介すことでアクチュエータには 10% の操作が入力されてしまう。そのため、操作入力の刻み幅は細かいことが望ましいため、操作入力の刻み幅は 1% を目標とする。

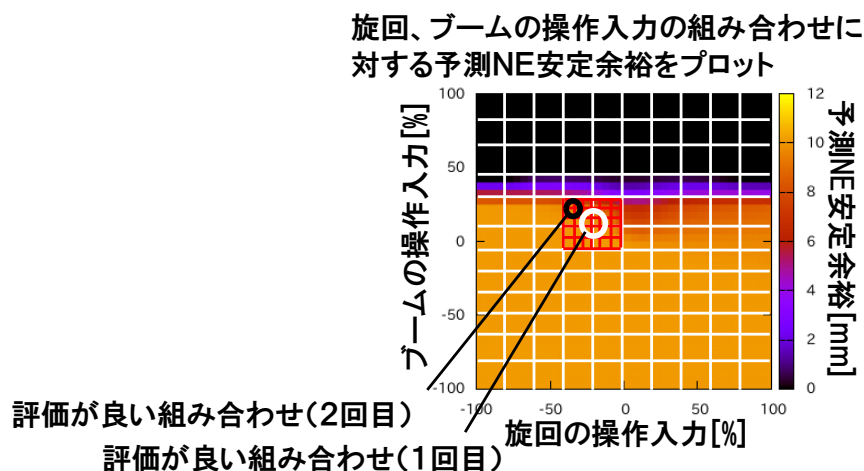


図 4.5: 旋回とブームの操作入力の組み合わせに対する予測NE安定余裕の例

表 4.1: 高速化処理の一例

処理回数	操作入力の範囲	操作入力の分割数	操作入力の刻み幅
1	200%	11	20%
2	40%	11	4%
3	10%	11	1%

以上の目標を満たすため、処理の高速化を行う必要がある。まず、高速化の基本的なアイデアについて述べる。まず荒い刻み幅の操作入力の組み合わせでNE安定余裕の予測を行う。その後、評価の良い操作入力の組み合わせ（NE安定余裕が許容値以上かつ操作入力の修正量の二乗和が最小）付近のみを細かい刻み幅とする。図 4.5 に高速化処理の概念図を示す。

この処理を数回繰り返すことにより、細かい刻み幅の操作入力を選択することが可能となる。これによりすべての組み合わせで細かい刻み幅でNE安定余裕を予測する場合に比べて組み合わせ数を大幅に減らすことができる。網羅的にすべての組み合わせで細かい予測を行った場合と必ずしも同様の結果となる保障はないが、転倒しない操作入力を選択するという観点からは問題ないと考えている。表 4.1 に操作入力の変更範囲、操作入力の分割数、操作入力の刻み幅の一例を示す。このように3回の処理により、操作入力の刻み幅 1%、処理時間は 0.09s となり、目標の処理時間を達成することができた。

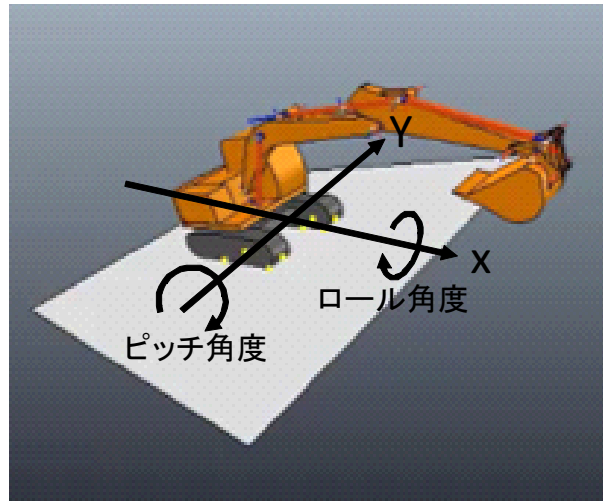


図 4.6: シミュレーション実験の座標系

4.5 シミュレーション実験

本章で提案する転倒防止システムの有効性を確認するため、転倒の危険がある斜面において転倒防止システム有無による挙動の差異を確認した。図 4.6 に実験時の油圧ショベルの座標系を示す。転倒する危険が高い状況を模擬するため、バケット重量を 900kg 増加させた。これは、バケットに土砂を満載した時の重量である。転倒防止システムの簡便な油圧ショベルの動作モデルに対してもこの重量増加分を反映させた。NE 安定余裕の許容値を 3mm と設定した。

表 4.2 にブーム上げの実験条件を示す。実験条件 1 では、2 秒間 100% のブーム上げを行った。実験条件 2 では、4 秒間 100% のブーム上げを行った。実験条件の実験高速化の有無は、4.4 節で述べた高速化処理の使用の有無である。姿勢変化の有無は、2.3 節で述べた簡便な動作モデルに対して姿勢変化に応じて簡便な油圧ショベルの動作モデルのパラメータを変更するか否かである。

図 4.7 に実験条件 1 の転倒防止システムなしの結果を示す。転倒防止システムなしの実験条件では、ブームを上げ始めるときの慣性力により機体が浮き上がり転倒した。図 4.8 に実験条件 1 の転倒防止システムあり（動作対象：旋回、ブーム、アーム）、姿勢変化の考慮をしない油圧ショベルの動作モデルを使用、高速化なしの結果を示す。図 4.9 に実験条件 1 の転倒防止システムあり（動作対象：旋回、ブーム、アーム）、姿勢変化を考慮しない油圧ショベルの動作モデルを使用、高速化ありの結果を示す。図 4.10 に実験条件 1 の転倒防止システムあり（動作対象：旋回、ブーム、アーム）、姿勢考慮ありの油圧ショベルの動作モデルを使用、高速化ありの結果を示す。図 4.11 に実験条件 1 において、転倒防止システムあり（動作対象：ブーム）、姿勢変化の考

表 4.2: ブーム上げの実験条件

番号	アクチュエータ	制御の有無	ロール	ピッチ	動作モデル	高速化の有無
1	-	無	0°	25°	-	-
1	旋回, ブーム, アーム	有	0°	25°	姿勢変化の考慮無し	無
1	旋回, ブーム, アーム	有	0°	25°	姿勢変化の考慮無し	有り
1	旋回, ブーム, アーム	有	0°	25°	姿勢変化の考慮有り	有り
1	ブーム	有	0°	25°	姿勢変化の考慮有り	有り
2	-	無	0°	-35°	-	-
2	旋回, ブーム, アーム	有	0°	-35°	姿勢変化の考慮無し	無

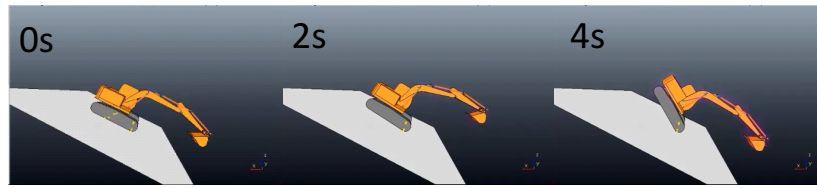
慮ありの動作モデルを使用, 高速化ありの結果を示す.

転倒防止システムありの実験条件では, ブームの操作入力が増減され転倒しないことが確認できた. これは, ブームを上げ始める際の慣性力が小さくなることによる効果である. 高速化有りと無しの実験結果は, ほぼ同様の結果となり, 高速化による悪影響はないことが確認できた. また, 姿勢変化の考慮なしの油圧ショベルの動作モデルを使用した場合と姿勢変化の考慮ありの油圧ショベルの動作モデルを使用した場合を比較すると, 姿勢変化の考慮ありの場合の方が, 遠隔操縦者の入力に近い操作を転倒防止システムが出力していることが確認できる. これは, 姿勢変化を考慮することで機体挙動の予測の精度が向上したことによるものと考えられる.

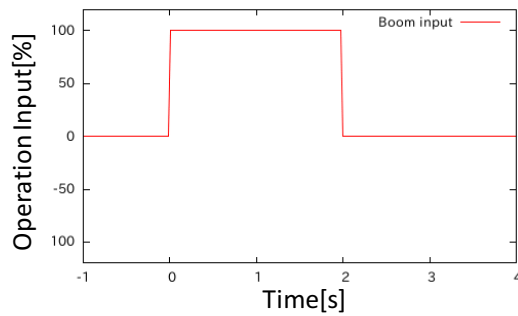
転倒防止システムにより動作させるアクチュエータの動作対象をブームのみに限定した場合と旋回, ブーム, アームとした場合の両方において転倒を防ぐ効果が確認できた. 旋回, ブーム, アームを動作させる場合は, ブームのみを動作させる場合に比べて遠隔操縦者の操作指令に近い操作が転倒防止システムが出力していることが確認できた.

図 4.12 に実験条件 2 の転倒防止システムなしの結果を示す. 結果より, 停止時の慣性力により機体が浮き上がり転倒している. 図 4.13 に実験条件 2 の転倒防止システムありの結果を示す. 転倒防止システムあり (動作対象: 旋回, ブーム, アーム) の実験条件では, ブーム上げにより, ブームシリンダの稼動限界近づくことで操作入力が増減され, 転倒が防がれた. これは, 停止時の慣性力が小さく抑えられていることによるものと考えられる.

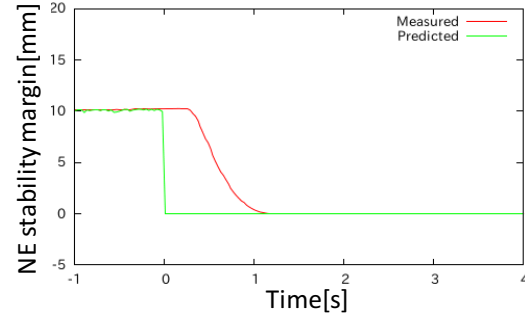
表 4.3 にブーム下げの実験条件を示す. この実験条件では, 1 秒間 100%のブーム下げを行った. 図 4.14 に転倒防止制御システムなしのときの実験結果を示す. このとき, ブームを停止した時の慣性力により, 機体が正面方向に浮き上がり転倒が生じた. 図 4.15, 図 4.16 に転倒防止システムありの時の実験結果を示す. 転倒防止システ



(a) シミュレーションの様子



(b) 操作入力



(c) NE 安定余裕

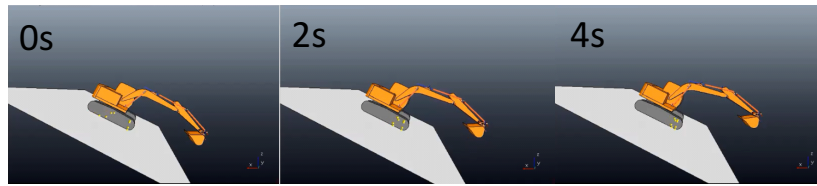
図 4.7: ブーム上げ，転倒防止システムなし [実験条件 1]

表 4.3: ブーム下げの実験条件

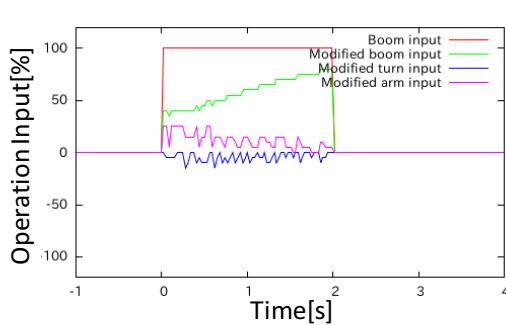
番号	アクチュエータ	制御の有無	ロール	ピッチ	動作モデル	高速化の有無
3	-	無	0°	25°	-	-
3	旋回，ブーム，アーム	有	0°	25°	姿勢変化の考慮有り	有り
3	ブーム	有	0°	25°	姿勢変化の考慮有り	有り

ムありの場合では，ブームの停止が滑らかになることにより転倒が防がれたものであると考えられる。

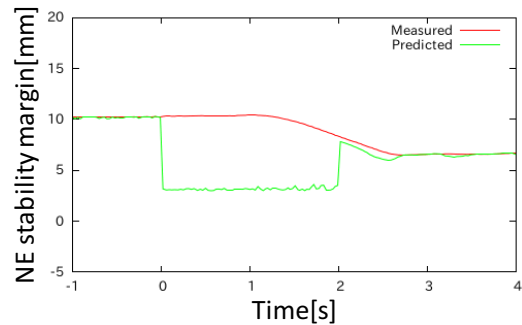
表 4.4 に旋回時の実験条件を示す．実験条件 4 では，右旋回を 100% の操作入力 で 4 秒間行った．実験条件 5 では，右旋回を 50% の操作入力を継続した．図 4.17 に実験条件 4 の転倒防止システムなしの結果を示す．転倒防止システムなしの実験では，右旋回により機体の重心が変化することによる転倒が生じている．図 4.18 に転倒防止システムのアクチュエータの出力を旋回，ブーム，アームとしたときの実験条件 3 の転倒防止システムありの結果を示す．結果より，操作を入力していないブーム，アームの操作入力が現れ，旋回動作を続けても転倒しないことが確認できた．このとき，旋回の操作入力は修正されていない．これは，ブーム，アームの操作により機体の重心が安全側に移動することで，操作入力通りの旋回ができたものと考えられる．図 4.19 に



(a) シミュレーションの様子



(b) 操作入力



(c) NE 安定余裕

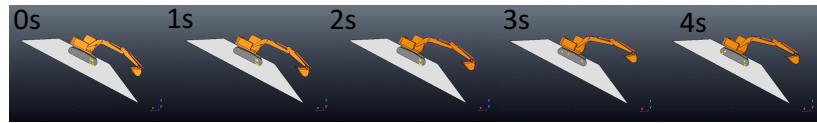
図 4.8: ブーム上げ，転倒防止システムあり（動作対象：旋回，ブーム，アーム），動作モデル：姿勢変化考慮なし，高速化なし [実験条件 1]

転倒防止システムのアクチュエータの出力を旋回のみとしたときの実験条件 4 の転倒防止システムありの結果を示す．結果より，旋回の操作が入力され続けているにもかかわらず旋回動作を自動的に停止していることにより転倒を防いでいることが確認できた．このように転倒防止システムありの条件において，システムが出力するアクチュエータの動作を旋回のみとした場合と旋回，ブーム，アームとした場合は両者とも転倒防止効果が確認されたが，特性が大きく変わることが分かった．

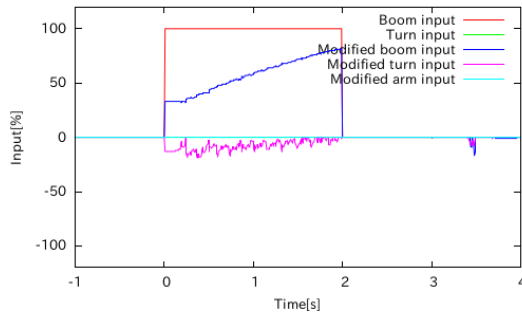
図 4.20 に実験条件 5 の転倒防止システムありの結果を示す．結果より，旋回の操作が入力され続けているにもかかわらず旋回動作を自動的に停止することにより転倒を防いでいることが確認できた．

表 4.5 に旋回およびブーム上げの複合動作時の実験条件を示す．この実験条件 6 では，上部旋回体を 30° 右に旋回させた状態を初期姿勢とした．右旋回とブーム上げを同時に 4 秒間行った．図 4.21 に実験条件 6 の転倒防止システムなしの結果を示す．転倒防止システムなしの実験では，右旋回およびブーム上げにより機体後部が浮き始め転倒が生じた．これは，旋回およびブーム上げ開始時に機体を転倒させる慣性力が生じたことによるものである．

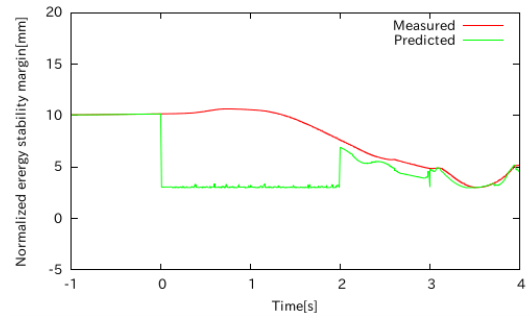
図 4.23 に実験条件 6 のシステムありの結果を示す．結果より，ブームの操作入力



(a) シミュレーションの様子



(b) 操作入力



(c) NE 安定余裕

図 4.9: ブーム上げ，転倒防止システムあり（動作対象：旋回，ブーム，アーム），動作モデル：姿勢変化考慮なし，高速化あり [実験条件 1]

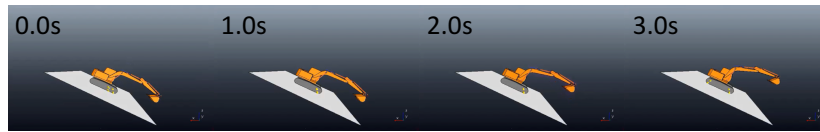
表 4.4: 旋回の実験条件

番号	アクチュエータ	制御の有無	ロール	ピッチ	動作モデル	高速化の有無
4	-	無	25°	0°	-	-
4	旋回，ブーム，アーム	有	25°	0°	姿勢変化の考慮無し	無
4	旋回	有	25°	0°	姿勢変化の考慮無し	無
5	旋回	有	25°	0°	姿勢変化の考慮有り	有

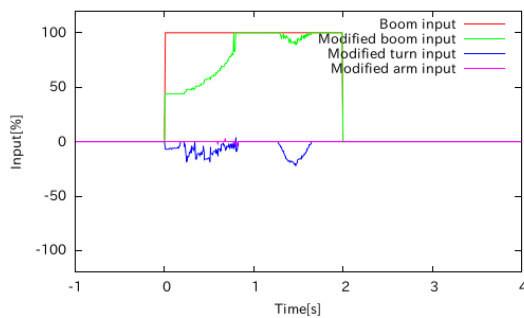
加減されることやアームの操作が発生することより転倒を防止する効果が確認できた。

4.6 機体 ZMP および重心の予測に基づく転倒防止システム（3章）との比較

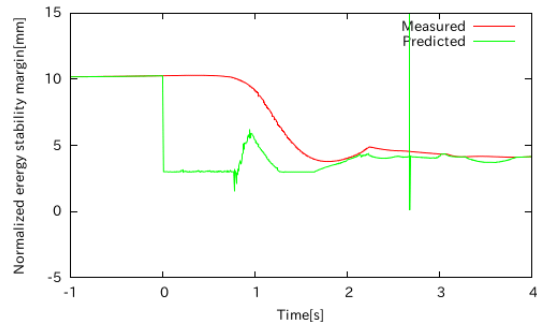
3章で提案した機体 ZMP および重心の予測に基づく転倒防止システムと本章で提案した機体の浮き上がりを考慮した NE 安定余裕の予測に基づく転倒防止システムとの比較を行う。3章のシステムは，機体 ZMP および重心の鉛直床面投影点を支持多角形内に設定した安全領域内に留めることで機体を安定な状態に保つシステムであるため，機体を一切浮き上がらせない。機体が浮き上がったからといって油圧シヨベル



(a) シミュレーションの様子



(b) 操作入力



(c) NE 安定余裕

図 4.10: ブーム上げ，転倒防止システムあり（動作対象：旋回，ブーム，アーム），動作モデル：姿勢変化考慮あり，高速化あり [実験条件 1]

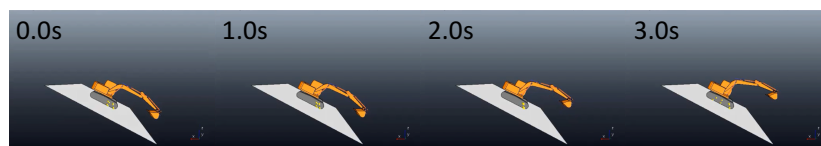
表 4.5: 旋回，ブーム複合動作の実験条件

番号	アクチュエータ	制御の有無	ロール	ピッチ	動作モデル	高速化の有無
6	-	無	0°	30°	-	-
6	旋回，ブーム，アーム	有	0°	30°	姿勢変化の考慮無し	無

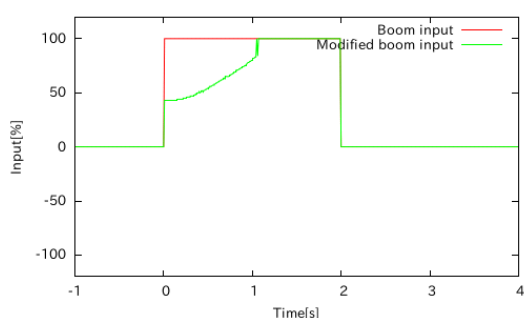
が転倒するとは限らないため，過剰に操作入力が修正されることが懸念される．これは，より安全側のシステムであるといえるが，遠隔操縦者の操作性を低下させる恐れがある．一方，4章のシステムでは，転倒しない限り機体の傾斜を許容するといった特徴がある．

図 4.24 にブーム上げ時の操作入力の比較結果を示す．結果より，4章のシステムの方が修正後の操作入力が遠隔操縦者の操作入力に近い値が出力されている．図 4.25 に ZMP の比較結果を示す．3章のシステムでは，ZMP は支持多角形境界の内側を推移しているが，4章のシステムでは一時的に ZMP が支持多角形境界を超えていることが確認できた．

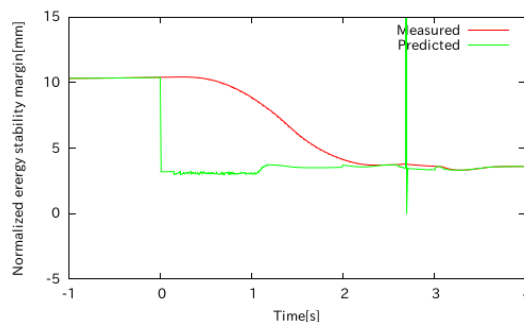
図 4.26 に旋回時のそれぞれのシステムの比較結果を示す．結果より，4章のシステムの方が長時間遠隔操縦者の旋回入力が修正されなかった．図 4.27 に ZMP の比較結果を示す．ブーム上げ時と同様に，3章のシステムでは ZMP は支持多角形境界の内側を推移しているが，4章のシステムでは一時的に ZMP が支持多角形境界を超えて



(a) シミュレーションの様子



(b) 操作入力



(c) NE 安定余裕

図 4.11: ブーム上げ，転倒防止システムあり（動作対象：ブーム），動作モデル：姿勢変化考慮あり，高速化あり [実験条件 1]

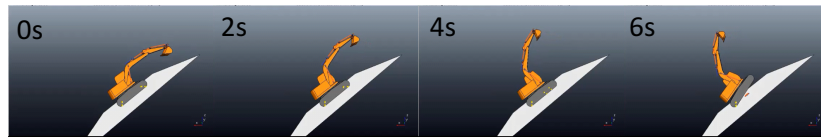
いることが確認できた。

これらの結果は，4 章のシステムでは機体傾斜を許容することにより，遠隔操縦者の操作入力の修正量が最小限になったことによるものと考えられる．これにより，遠隔操縦者の操作性への影響は 3 章のシステムと比べて小さく，また，作業装置の動作可能範囲を拡大できているものと考えられる。

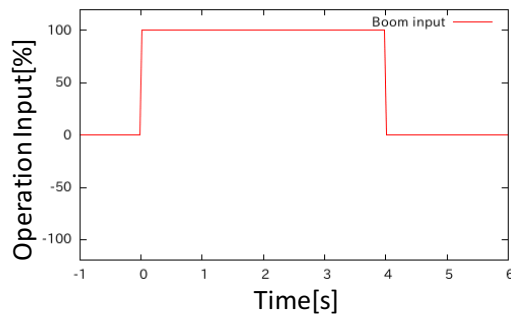
4.7 まとめ

本章では，機体の浮き上がりを考慮した NE 安定余裕の予測に転倒防止システムを提案した．これは，油圧ショベルのモデルに基づき機体の浮き上がりをシミュレーションすることで，機体が転倒するか否かを事前に予測し，転倒すると予測される場合は操作入力を修正することで転倒を防ぐものである．複数の操作の同時入力を考慮すると様々な操作入力の組み合わせに対する NE 安定余裕を予測する必要があるため，1 つの操作入力のときに比べて計算量が膨大となるが，GPU による並列計算や高速化の取り組みによってリアルタイム処理を達成することができた．また，提案するシステムを評価するためにシミュレーションによる実験を行い，転倒防止効果を確認した．

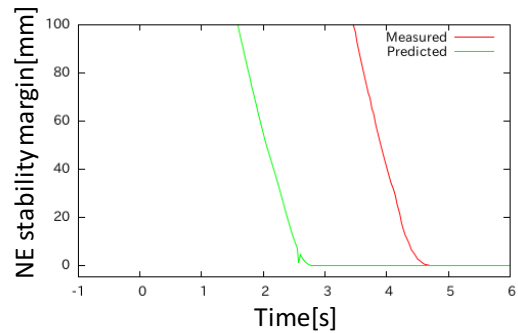
本システムでは，油圧ショベルや転倒防止システムのパラメータ次第では作業装置を安全に停止することができないケースがあると考えられる．これには，転倒防止シ



(a) シミュレーションの様子



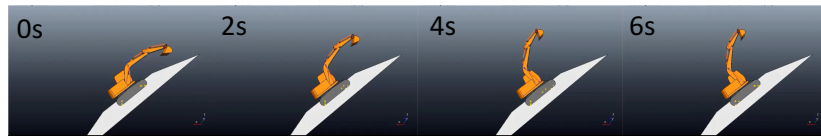
(b) 操作入力



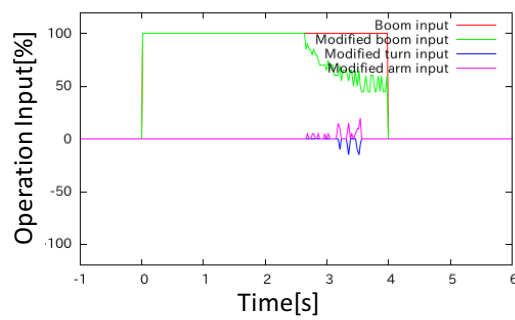
(c) NE 安定余裕

図 4.12: ブーム上げ, 転倒防止システムなし [実験条件 2]

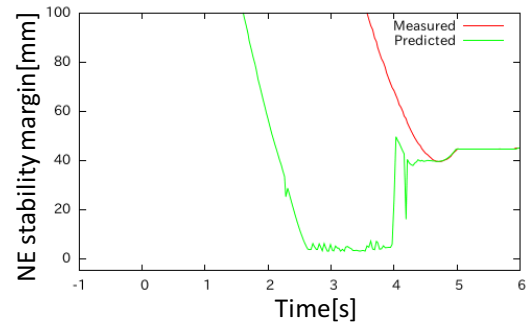
ステムのパラメータのうち将来を予測する予測時間が大きく影響すると考えられる。特に予測時間を短く設定しすぎると、転倒が予見された時には既に手遅れとなる可能性が高い。予測時間を長くしすぎると、安全側なシステムになり安全に停止することが期待できる一方で、遠隔操縦者の操作入力量が小さい値に修正されてしまうことが懸念される。この予測時間をどの程度の値に設定することが適切であるかについては今後検討する必要がある。



(a) シミュレーションの様子

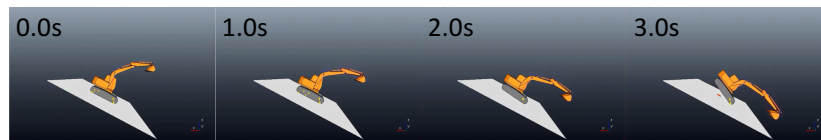


(b) 操作入力

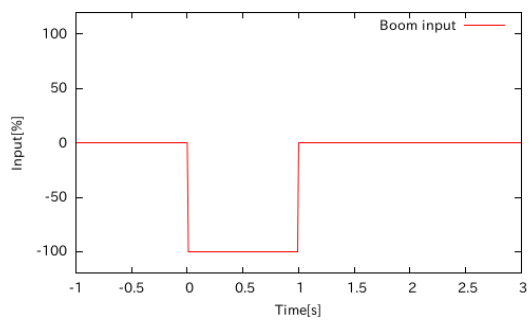


(c) NE 安定余裕

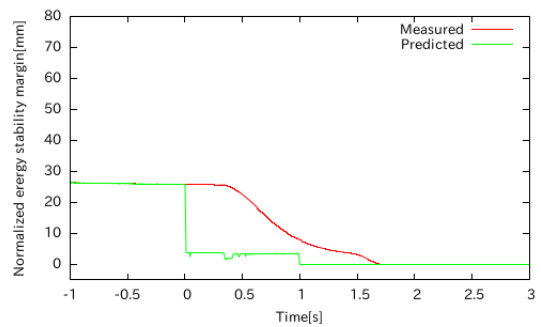
図 4.13: ブーム上げ, 転倒防止システムあり (動作対象: 旋回, ブーム, アーム), 動作モデル: 姿勢変化考慮なし, 高速化なし [実験条件 2]



(a) シミュレーションの様子

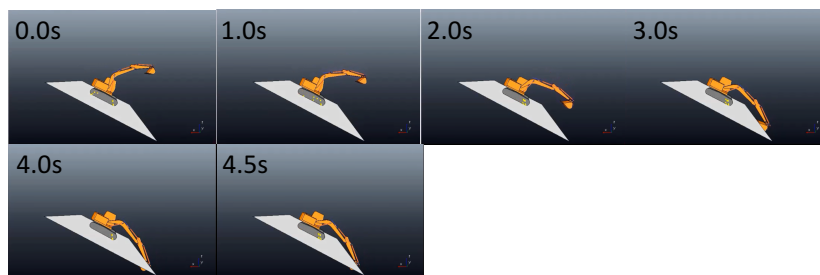


(b) 操作入力

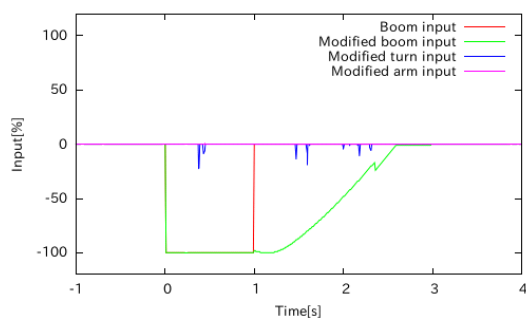


(c) NE 安定余裕

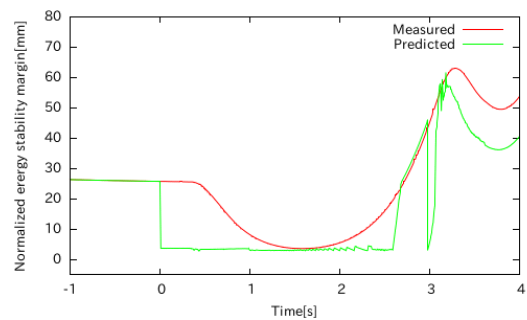
図 4.14: ブーム下げ, 転倒防止システムなし [実験条件 3]



(a) シミュレーションの様子

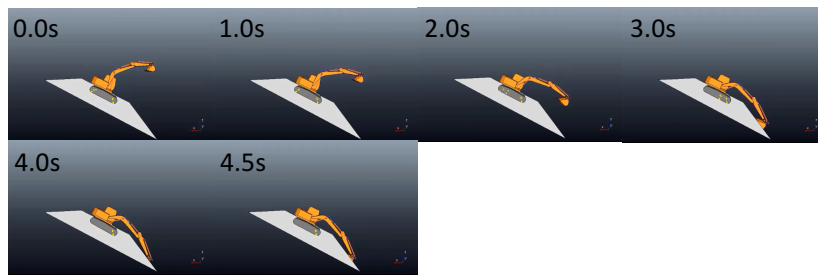


(b) 操作入力

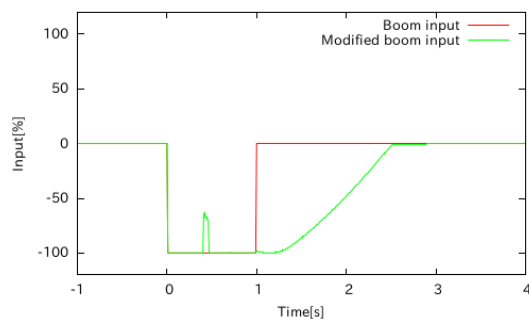


(c) NE 安定余裕

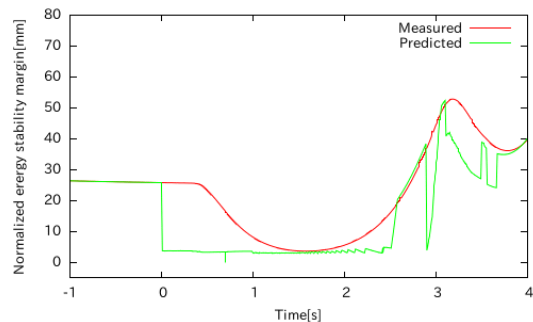
図 4.15: ブーム下げ，転倒防止システムあり（動作対象：旋回，ブーム，アーム），動作モデル：姿勢変化考慮あり，高速化あり [実験条件 3]



(a) シミュレーションの様子

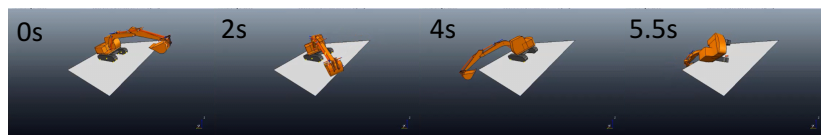


(b) 操作入力

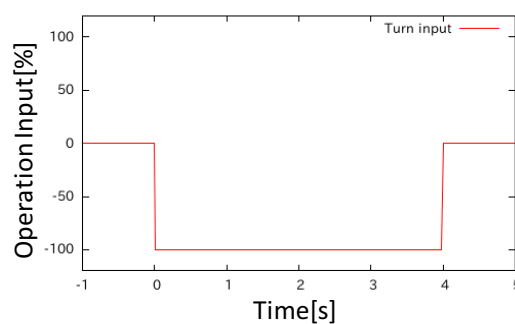


(c) NE 安定余裕

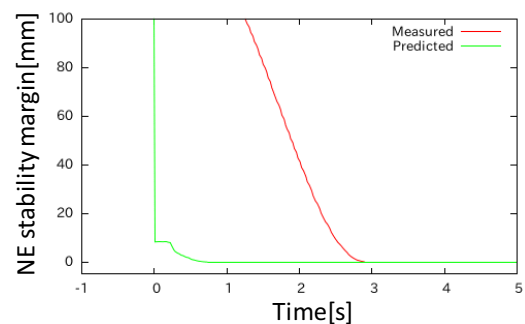
図 4.16: ブーム下げ, 転倒防止システムあり (動作対象: ブーム), 動作モデル: 姿勢変化考慮あり, 高速化あり [実験条件 3]



(a) シミュレーションの様子

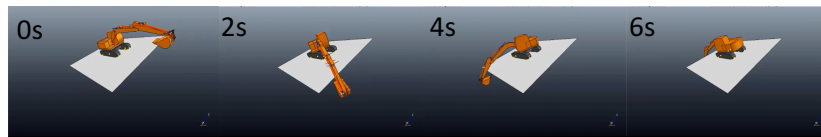


(b) 操作入力

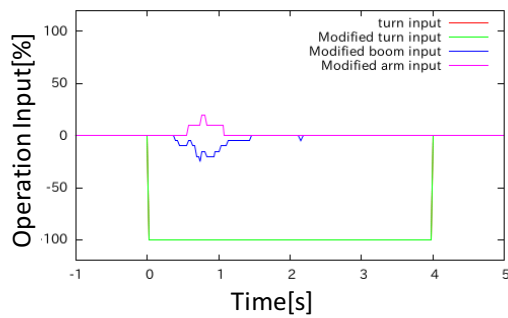


(c) NE 安定余裕

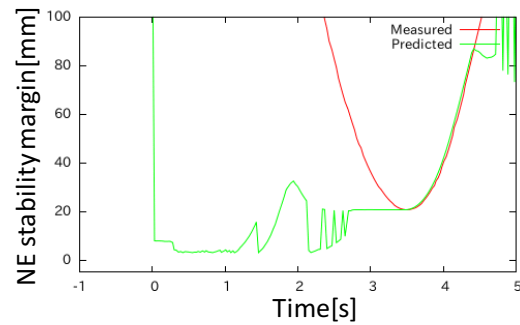
図 4.17: 旋回, 転倒防止システムなし [実験条件 4].



(a) シミュレーションの様子

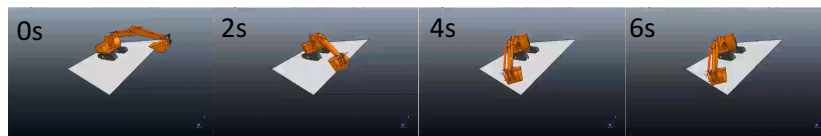


(b) 操作入力

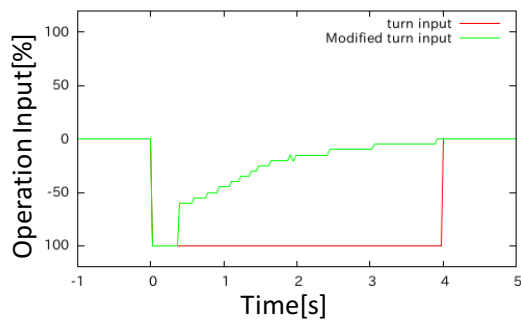


(c) NE 安定余裕

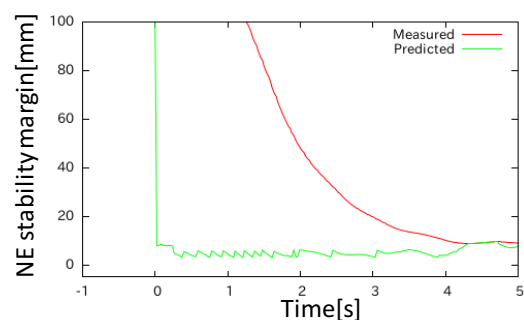
図 4.18: 旋回，転倒防止システムあり（動作対象：旋回，ブーム，アーム），動作モデル：姿勢変化考慮なし，高速化なし [実験条件 4]



(a) シミュレーションの様子

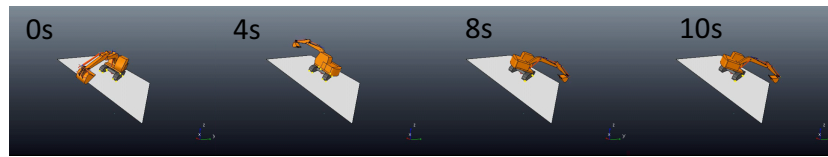


(b) 操作入力

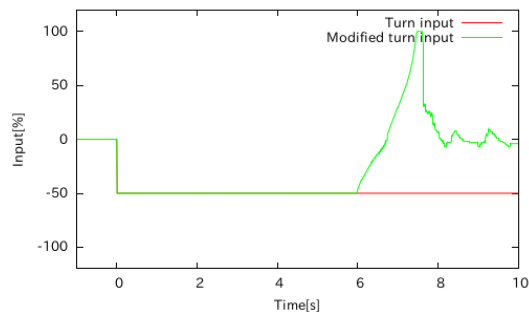


(c) NE 安定余裕

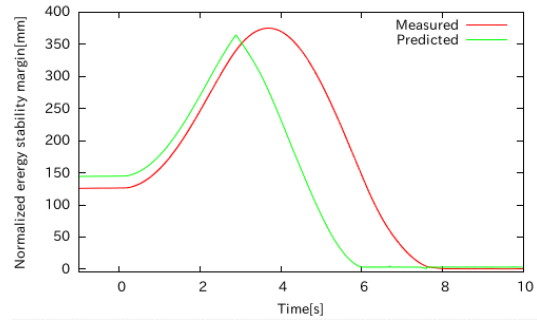
図 4.19: 旋回，転倒防止システムあり（動作対象：旋回），動作モデル：姿勢変化考慮なし，高速化なし [実験条件 4]



(a) シミュレーションの様子

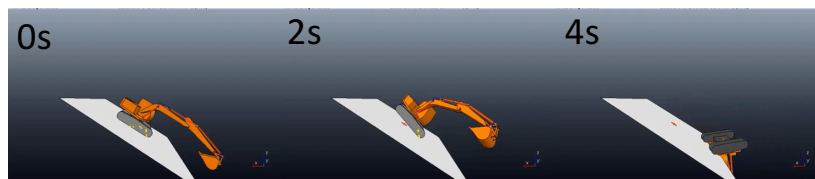


(b) 操作入力

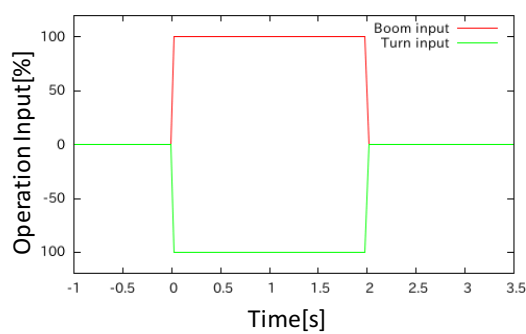


(c) NE 安定余裕

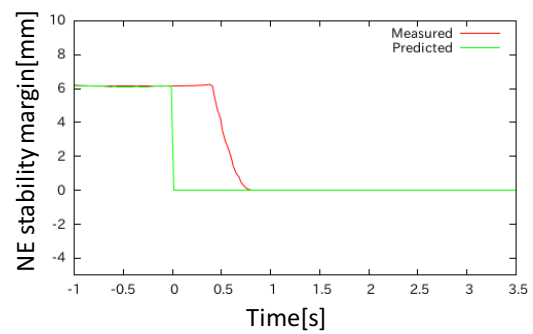
図 4.20: 旋回，転倒防止システムあり（動作対象：旋回），動作モデル：姿勢変化考慮あり，高速化あり [実験条件 5]



(a) シミュレーションの様子

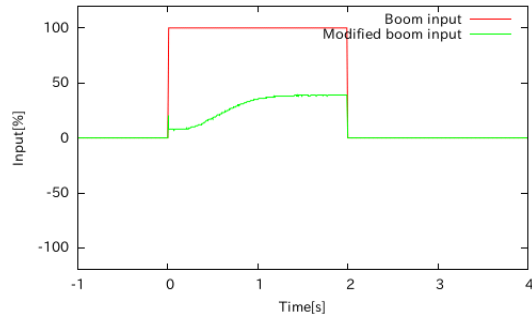


(b) 操作入力

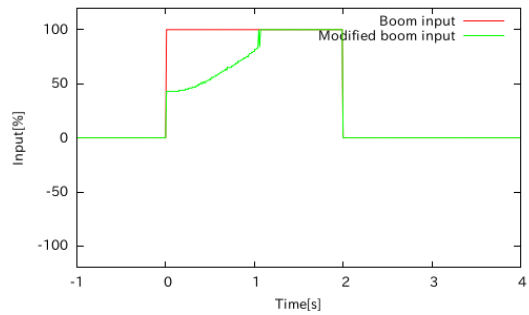


(c) NE 安定余裕

図 4.21: 旋回およびブーム上げ，転倒防止システムなし [実験条件 6]

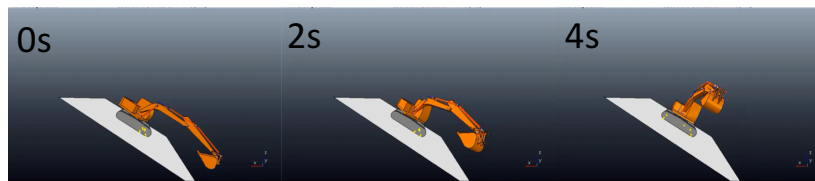


(a) 3 章のシステム（操作入力の自動調整）

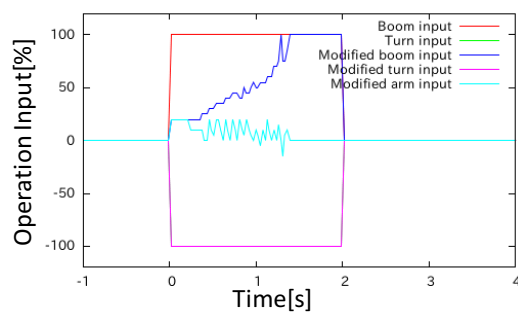


(b) 4 章のシステム

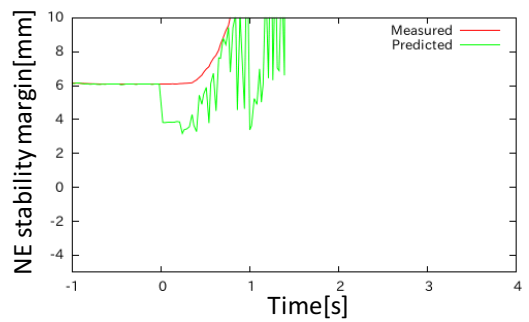
図 4.22: ブーム上げの実験結果の比較（操作入力）



(a) シミュレーションの様子

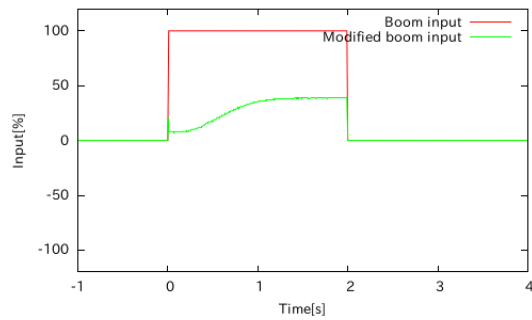


(b) 操作入力

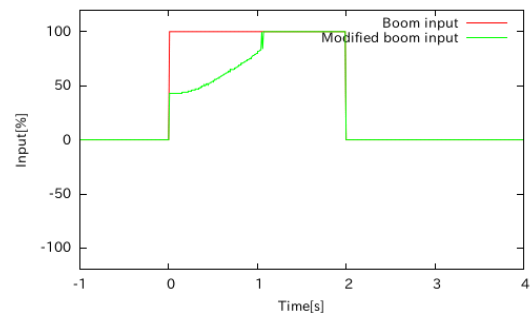


(c) NE 安定余裕

図 4.23: 旋回およびブーム上げ，転倒防止システムあり（動作対象：旋回，ブーム，アーム），動作モデル：姿勢変化考慮なし，高速化なし [実験条件 6]

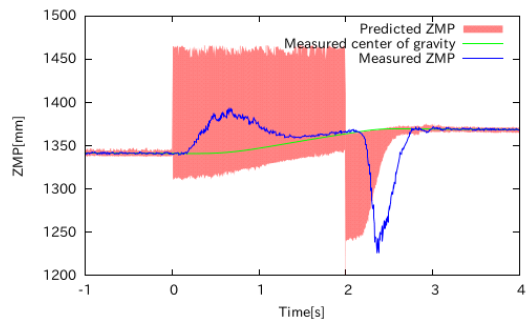


(a) 3 章のシステム（操作入力の自動調整）

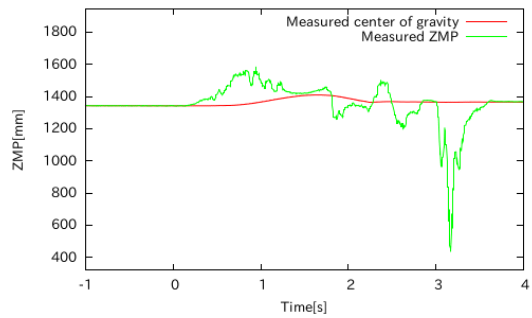


(b) 4 章のシステム

図 4.24: ブーム上げの実験結果の比較（操作入力）

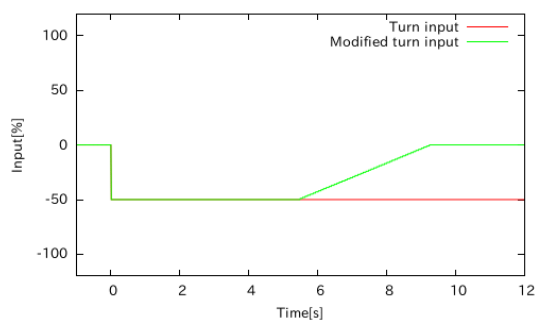


(a) 3 章のシステム（操作入力の自動調整）

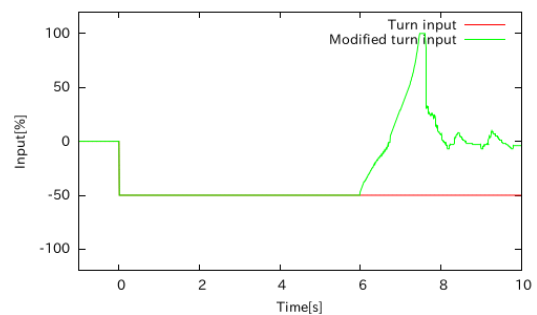


(b) 4 章のシステム

図 4.25: ブーム上げの実験結果の比較（ZMP）

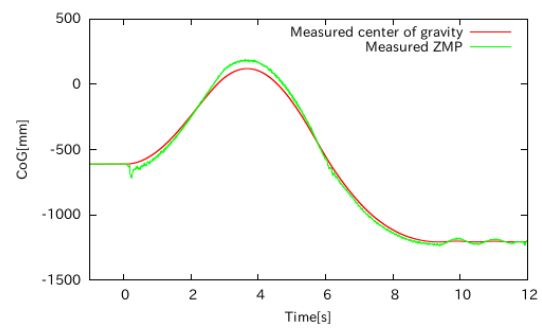


(a) 3 章のシステム（自動停止）

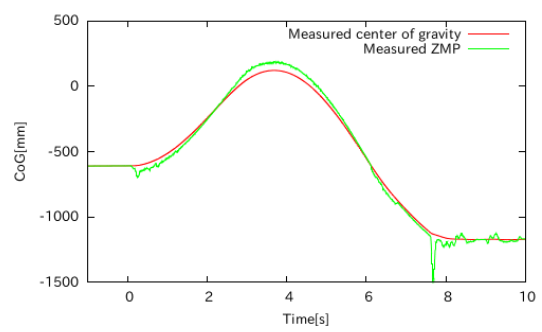


(b) 4 章のシステム

図 4.26: 旋回の実験結果の比較（操作入力）



(a) 3 章のシステム（自動停止）



(b) 4 章のシステム

図 4.27: 旋回の実験結果の比較（ZMP）

第5章 結論

土砂災害等の二次災害の恐れがある災害現場の初動対応において、遠隔操縦の油圧ショベルが投入されている。このような対応では、有人操縦では行うことができないような急傾斜地での作業が求められることも多い。そのような場所では作業装置を不用意に操作すると、重心位置の変化や慣性力による影響で転倒の恐れがある。遠隔操縦に起因する情報の欠如や通信遅延により、遠隔操縦者による転倒危険の回避は困難である。

本研究では、このような災害現場で活躍する遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止システムの実現に取り組んだ。遠隔操縦油圧ショベル側に転倒防止機能を付与することで遠隔操縦者に頼らず、ショベル側で転倒しないことが担保できると考えた。提案する転倒防止システムは、将来の油圧ショベルの機体運動を予測し、転倒すると予測された場合は転倒しない範囲に遠隔操縦者の操作入力を修正するものである。このアイデアに基づく2つのシステムを実装し、模型実験およびシミュレーション実験で提案するシステムの効果を確認した。本研究より災害現場等の急傾斜地において機体を安定状態に保つ技術の向上に貢献したものと考える。

5.1 研究の成果

本研究では、機体挙動の予測に基づく遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止システムに取り組んだ。以下に転倒防止システムおよびシステムの実現に必要な要素技術の検討の成果を示す。

簡便な油圧ショベルの動作モデル

高速に将来の機体運動を予測するための簡便な油圧ショベルの動作モデルを構築した。これは、油圧ショベルのアクチュエータの速度応答を2次遅れ系として近似したものである。また、姿勢変化により2次遅れ系のパラメータを変化させることで、油圧ショベルの姿勢変化により生じる速度応答特性の変化を考慮した。このモデルを利用することにより油圧ショベルの機体挙動を高速に予測することが可能になった。

検証用シミュレータ

転倒防止システムの効果を検証するためには，油圧ショベルの機体の転倒を模擬する必要があるが実機を用いた実験は，安全性やコストの面において現実的ではない．そのため，実機の挙動を再現するシミュレーションモデルの構築を行った．シミュレータとして Matlab/Simulink と V-rep を併用して油圧ショベルの油圧システム，キネマティクス，ダイナミクスをモデル化し，実機の挙動および転倒を再現するシミュレータを構築した．

機体 ZMP および重心の予測に基づく転倒防止システム

本システムは，機体 ZMP および重心を予測し，それらを支持多角形内側に設定した安全領域内に留めることで機体を安定状態に保つものである．このシステムは，慣性力による転倒を防ぐ操作入力の自動調整と重心の変化による転倒を防ぐ自動停止を組み合わせることで，自身の作業装置の動作による転倒を防ぐ．模型車両を用いた実験およびシミュレーションにおいて，典型的な転倒危険のある急斜面において転倒を防ぐことができることを確認した．

機体の浮き上がりを考慮した NE 安定余裕の予測に基づく転倒防止システム

本システムは，機体の浮き上がり後の NE 安定余裕を予測し，NE 安定余裕を許容値以上に維持することで機体を安定状態に保つものである．本手法は複数のアクチュエータの同時動作に対応し，GPU を用いた並列計算と高速化の工夫により実時間処理が可能であることを示した．シミュレーションにより，本手法により多くのシチュエーションで転倒を防ぐことができることを確認した．

5.2 実用性向上のため残された課題

本システムの実用性の向上，あるいは適用範囲を広げるためには以下の課題に取り組む必要がある．

操作性の評価

提案システムは、転倒危険のある状況において操作入力を修正することで転倒を防ぐシステムである。つまり、転倒危険のある状況においては、遠隔操縦者の操作通りに機体は動かず、遠隔操縦者の操作性が低下することが懸念される。どの程度操作性が低下し、それが許容できる範囲かを評価する必要がある。

ユーザインターフェース

提案するシステムは、遠隔操縦者の操作入力に介入し、遠隔操縦者の意図しない動きとなる可能性がある。この時遠隔操縦者は違和感を感じる恐れがあるため、遠隔操縦者に対してシステムが介入したことを通知するようなインターフェースが必要であると考えられる。また、どの程度の操作入力ならばシステムの介入を受けないかを遠隔操縦者に提示することも必要である。

外力の推定

本研究では、油圧ショベルと外部物体との接触により生じる力を考慮していない。しかしながら、実際の作業では外部物体と油圧ショベルの作業装置が衝突する時の外力により転倒が生じることも考えられる。特に、バケットと地面は作業の中で頻繁に接触する。このときにバケットに加わる外力を推定できれば、転倒の予測のモデルに考慮することが可能となる。外力を推定する方法としては、油圧アクチュエータ内の圧力から推定する方法 [49] やバケットリンクに取り付けた歪みゲージの出力から推定する方法 [50] などが研究されており、このような手法を利用することで外力についても考慮することができる可能性がある。

バケット内重量の推定

提案した転倒防止システムにより、転倒の予測をするためには、バケット内重量が必要である。作業中に土砂などが積載されることによりバケット内重量は変わる。本研究ではバケット内重量を既知とした。バケット内重量を推定しない、もしくはできない場合はバケット満載時の内容物の重量を用いて機体の転倒の有無を予測することで転倒防止を図ることができる。しかしながら、バケットが空であるときは安全側のシステムとなり過ぎ、システムが過剰に操作入力に対して介入することによる操作性の低下が懸念される。そのため、リアルタイムにバケット内の重量を推定すること

で、より精度の良い機体挙動の予測および転倒の予測が可能となると考えている。バケット内重量を推定する方法としては、油圧アクチュエータ内の圧力から推定する方法 [49] やバケット内を写した画像からバケットの内容物の種類や容量を推定する方法などが考えられる。

外部物体との衝突の防止

本研究では、油圧ショベルと外部物体との衝突を考慮していない。そのため、例えば作業現場の周囲が木々に囲まれた様な狭い場所での作業となると本システムの操作入力の修正により、木などの外部物体と衝突が生じる可能性がある。このような衝突により、油圧ショベルの転倒や機材が破損してしまう恐れがある。衝突を防ぐためには、LIDAER やステレオカメラなどのセンサにより周辺環境の形状を計測し、機体挙動の予測の際に油圧ショベルと外部物体との接触の有無を予測する必要がある。そして、接触しない操作入力をアクチュエータに与えることで外部物体との衝突を防ぐことができる考える。

謝辞

本研究は、工学博士 坪内孝司 筑波大学 教授のもとで行われたものです。同教授には、本研究を立ち上げ、進めるにあたり多くの議論を重ねさせていただき、適切かつ熱心なご指導を頂きました。博士（工学） 皿田滋 筑波大学 研究員には、研究を進めるにあたり数多くの有益なご助言を頂きました。博士（工学） 大矢晃久 筑波大学 教授には、研究の方向性を決める上で重要なご指摘を頂きました。博士（工学） 伊達央 筑波大学 准教授には、研究の質を高める上での具体的なアドバイスを頂きました。本論文をまとめるにあたりまして、博士（工学） 相山康道 教授、博士（情報科学） 望山洋 准教授、工学博士 浅間一 東京大学 教授には大変有益なご指導を頂きました。国立研究開発法人 土木研究所 技術推進本部 先端技術チームの皆様には油圧ショベルの実機実験の実施に際し、大変お世話になりました。特に、博士（工学） 橋本毅 主任研究員には共同研究協定の締結や試験実施においての技術的なアドバイスを頂きました。株式会社熊谷組 北原成郎氏には、無人化施工の実施事例について大変有益な情報を頂きました。筑波大学知能ロボット研究室の皆様にはミーティングでの議論や研究環境の構築をはじめとして、公私共に大変お世話になりました。最後に、筑波大学での研究の機会を与えてくださり、また様々な面でご支援して頂いた防衛装備庁の関係者の皆様に謝意を表します。特に、陸上装備研究所 小林松男元所長、山口弘前所長、野間俊人所長、佐藤祐司部長、森下政浩室長、上村圭右氏、成瀬正啓氏、後藤和久氏、渡邊嵩智氏に心から感謝申し上げます。上述の皆様をはじめ、多くの方々の助けにより本論文を執筆することができました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 浅間 一:“災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築”, 日本ロボット学会誌, vol. 32, No. 1, pp. 37–41, 2014.
- [2] 新田 恭士:“災害復旧に貢献する無人化施工技術”, 土木技術, vol. 67, No. 4, pp. 16–23, 2012.
- [3] Sulaiman, M. N. A. Saadun, and A. A. Yusof: “MODERN MANNED, UNMANNED AND TELEOPERATED EXCAVATOR SYSTEM”, J. Mechanical engineering and technology, vol.7, no.1, pp.57–68, 2015.
- [4] 産業競争力懇談会 2012 年プロジェクト:“無人化施工システムに関する提言”, 災害対応ロボットと運用システムのあり方最終報告 付録, 2012.
- [5] 供田 英一, 岩崎 肇, 岡本 仁:“赤松谷川 9 号床固工工事における無人化施工”, 建設の施工企画, Vol. 726, pp.14–21, 2010.
- [6] 林 宏樹, 田村 隆幸, 三鬼 尚臣:“無人化施工における通信遅延と通信周期が施工効率に与える影響の分析と改善提案”, 平成 21 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集, No. 23, pp. 119–59, 2009.
- [7] 古屋 弘, 清水 千春:“簡易 VR を用いた「次世代無人化施工システム」の開発: 建機の遠隔操作に VR を導入し, 作業効率を改善したシステム”, 建設の施工企画, Vol. 753, pp. 53–59, 2012.
- [8] Hironao Yamada, Takuya Kawamura, and Katsutoshi Ootsubo :“Development of a Teleoperation System for a Construction Robot”,*J. Robotics and Mechatronics*, Vol. 26, No. 1, pp. 110–111, 2014.
- [9] Dingxuan Zhao, Yupeng Xia, Hironao Yamada, and Takayoshi Muto: “Presentation of Realistic Motion to the Operator in a Tele-operated Construction Robot”, J. Robotics and Mechatronics, Vol.14, No.2, pp.98–104, 2002.

- [10] 羽多野 正俊, 小原 治樹:“抗力規範による移動マニピュレータの転倒安定性判別と安定化運動の実機による検討”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 703, pp. 928–935, 2005.
- [11] M. Hatano and H. Obara: “Stability evaluation for mobile manipulators using criteria based on reaction”, *Proc. of SICE2003 Annual Conference* , pp.2050-2055, 2003.
- [12] Rey, A. D. and Papadopoulos, G. E.:“On-line automatic tipover prevention for mobile manipulators”, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1273–1278, 1997.
- [13] 黄 強, 菅野 重樹, 加藤 一郎:“ヴィークル搭載型マニピュレータの安定化制御-安定規範とマニピュレータによる補償運動-”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 7, pp. 861–870, 1995.
- [14] Qiang Huang, Kazuo Tanie, and Shigeki Sugano: “Coordinated motion planning for a mobile manipulator considering stability and manipulation”, *Int. J. of Robotics Research*, Vol.19, No.8, pp.732-742, 2000.
- [15] S. Dubowsky and E. E. Evanc:“Planning Mobile Manipulator Motions Considering Vehicle Dynamic Stability Constraints”, *Proc. 1989 ICRA*, pp. 1271–1276, 1989.
- [16] Q. Huang, S. Sugano and I. Kato:“Stability Control for a Mobile Manipulator Using a Potential Method”, *Proc. IROS '94*, pp. 839–846, 1994.
- [17] 土木研究所:“油圧ショベルによる掘削作業の自動制御技術に関する研究”, 平成 21 年度戦略研究報告書, 2009.
- [18] M. Vukobratovic and D. Juricic:“Contribution to the synthesis of biped gait” *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 1–6, 1969.
- [19] Bo-Hyun Yu, Ki-Young Park, Kyung-Don Lee, and Chang-Soo Han:“Static compensation ZMP algorithm preventing tips-over of a tele operation excavator”, *Proceedings of the 29th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp. 652–659, 2012.
- [20] 水落 麻里子, 石井 啓範, 山口 仁一:“建設機械における動的安定性計測システムの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 1A1-B15, 2010.
- [21] 水落 麻里子, 石井 啓範, 山口 仁一:“作業機械”, WO2011/049079, 2011.

- [22] 水落 麻里子, 石井 啓範, 山口 仁一:“作業機械”, *WO2012/169531*, 2012.
- [23] 水落 麻里子, 石井 啓範, 山口 仁一:“作業機械”, *WO2014/013877*, 2014.
- [24] 足立 修一:“モデル予測制御の基礎”, *日本ロボット学会誌*, Vol.32, No.6, pp.499–502, 2014.
- [25] 茶山 和博, 河崎 英己, 吉永 勝彦, 藤岡 晃:“遠隔操縦ロボット (ロボQ) ”, *日本ロボット学会*, Vol. 21, No. 1, pp.59–pp.60, 2003.
- [26] Atsushi Watanabe, Akihisa Ohya, Shin'ichi Yuta:“Feedforward current control system design for efficient drive method of small-sized brushless DC motor”, *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON2011)*, pp.523–528, 2011.
- [27] Martin Langkvist, Lars Karlsson, Amy Loutfi:“A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling”, *Pattern Recognition Letters*, Vol.42, pp.11–24, 2014.
- [28] Yisheng Lv, Yanjie Duan, Wenwen Kang, Zhengxi Li, Fei-Yue Wang:“Traffic Flow Prediction With Big Data: A Deep Learning Approach”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.16, No.2, pp.865–873, 2015.
- [29] Yuuki Horiuchi, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda:“Computational Foresight: Forecasting Human Body Motion in Real-time for Reducing Delays in Interactive System”, *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, 2017.
- [30] 倉鋪 圭太, 井上 雄仁, 深野 亮, 吉灘 裕:“実機特性を付与した建設機械模型の研究”, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集*, 1A1-Q14, 2013.
- [31] 岡部 信也:“油圧ショベル大全”, 日本工業出版, 2007.
- [32] MotionGenesys:[http:“http://www.motiongenesis.com/”](http://www.motiongenesis.com/).
- [33] K. Maehara:“SYSTEM SIMULATION FOR HYDRAULIC EXCAVATOR”, *Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power*, pp.313–316, 2008.
- [34] Soon-Kwang Kwon, Jae-Jun Kim, Young-Man Jung, Chan-Se Jung, Chang-Don Lee and Soon-Young Yang:“A HYDRAULIC SIMULATOR FOR AN EXCAVATOR ”, *Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power*, pp.611–616, 2008.

- [35] Qiang Feng, Qingfeng Wang, Wen Gong:“RESEARCH ON HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULATION SYSTEM OF HYDRAULIC EXCAVATOR”, *Proceedings of the 8th JFPS International Symposium on Fluid Power*, pp.318–323, 2011.
- [36] MathWorks:“<https://jp.mathworks.com/>”.
- [37] Coppelia Robotics, V-REP:“<http://www.coppeliarobotics.com/>”.
- [38] ROS(Robot Operating System):“<http://www.ros.org/>”.
- [39] Vortex:“<https://www.cm-labs.com/vortex-studio/>”.
- [40] ZX120 CAD データ:“<https://japan.hitachi-kenki.co.jp/products/cad/cad-medium-excavators/>”.
- [41] SOLIDWORKS:“<http://www.solidworks.co.jp/>”.
- [42] 梶田 秀司:“ヒューマノイドロボット”, オーム社, 2005.
- [43] Kouji Murakami, Tsutomu Hasegawa, Kousuke Shigematsu, Fumichika Sueyasu, Yasunobu Nohara, Byong Won Ahn, Ryo Kurazume:“Position tracking system of everyday objects in an everyday environment”, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 3712–3718, 2010.
- [44] NVIDIA DRIVE PX:“<https://www.nvidia.com/ja-jp/self-driving-cars/drive-px/>”.
- [45] 宮里 勉, 岸野 文郎:“視覚情報と触覚情報の間の遅延知覚に関する主観評価”, *テレビジョン学会誌*, Vol.49, No.10, pp.1353–1356, 1995.
- [46] Lothar Pantel, Lars C. Wolf:“On the Impact of Delay on Real-Time Multiplayer Games”, *Proceedings of the 12th international workshop on Networ and operating support for digital audio and video*, pp.23–29, 2002.
- [47] NVIDIA CUDA:“<https://developer.nvidia.com/cuda-zone>”.
- [48] 広瀬 茂男, 塚越 秀行, 米田 完:“不整地における歩行機械の静的安定性評価基準”, *日本ロボット学会誌*, vol.16, No.8, pp.48–54, 1997.
- [49] 岡田 大貴, 横小路 泰義, 田崎 勇一, 吉灘 裕, 中村 晋也, 倉鋪 圭太:“多自由度油圧駆動ロボットのシリンダ圧に基づく手先負荷力推定による力覚フィードバック”, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集*, 2A1-P06, 2017.

- [50] 土木研究所 油圧ショベルによる掘削作業の自動制御技術に関する研究:“<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2008/pdf/2008-sen-3.pdf>”.

研究業績

学術論文

1. 重松 康祐, 坪内 孝司, 皿田 滋:“重心及び ZMP 予測に基づく遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止制御”, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 850, pp. 17-40, 2017.
2. 重松 康祐, 小西 裕一, 満留 諒介, 坪内 孝司:“ロボットの横断歩道横断のための深層学習を用いた歩行者用信号機の認識”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 54, No. 1, pp. 99-110, 2018.

査読付国際会議論文

1. Kosuke Shigematsu, Takashi Tsubouchi, Shigeru Sarata:“Tip-over prevention control of a teleoperated excavator based on ZMP prediction”, Proceedings of IEEE 12th Conference on Automation Science and Engineering(CASE2016), pp. 1380-1386, 2016.

国内学会

1. 重松 康祐, 坪内 孝司, 皿田 滋:“遠隔操縦油圧ショベルの機体挙動の予測に基づく転倒防止制御”, 第 18 回 SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2017), 3C4-07, 2017.
2. 山崎 佑太, 小西 裕一, 重松 康祐, 今井 勝, 坪内 孝司, 伊達 央:“シミュレータを活用した深層学習による移動ロボットの自律走行”, 第 18 回 SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2017), 1F1-07, 2017.
3. 小西 裕一, 重松 康祐, 今井 勝, 山崎 佑太, 坪内 孝司, 大矢 晃久:“つくばチャレンジ 2017 における深層学習を用いた探索対象者認識のためのデータ拡張”, 第 18 回 SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2017), 1F1-08, 2017.

4. 今井 勝, 重松 康祐, 小西 裕一, 山崎 佑太, 満留 諒介, 坪内 孝司:“つくばチャレンジ 2017 に向けた筑波大学知能ロボット研究室チーム MASARU の取り組み”, 第 18 回 SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2017), 1F3-01, 2017.
5. 重松 康祐, 坪内 孝司, 皿田 滋:“遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止のための機体動作の予測に基づく転倒防止制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1P2-B04, 2017.
6. 重松 康祐, 小西 裕一, 坪内 孝司, 諏訪部 純, 満留 諒介, 伊達 央, 大矢 晃久:“つくばチャレンジ 2016 における信号機及び探索対象者の深層学習による認識の試み”, 第 17 回 SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2016), 2B2-3, 2016.
7. 小西 裕一, 重松 康祐, 坪内 孝司, 諏訪部 純, 満留 諒介, 伊達 央, 大矢 晃久:“つくばチャレンジ 2016 における信号機及び探索対象者認識のための疑似画像を併用した深層学習”, 第 17 回 SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2016), 2B2-3, 2016.
8. 鈴木 与海, 伊達 央, 坪内 孝司, 大矢 晃久, 重松 康祐, 満留 諒介:“幾何学的に正確な経路情報のみを事前情報としたナビゲーション”, 第 17 回 SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2016), 2B2-3, 2016.
9. 重松 康祐, 坪内 孝司, 皿田 滋:“遠隔操縦油圧ショベルのための機体 ZMP の予測に基づく操作入力の自動調整による転倒防止制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2A2-09b, 2016.
10. 満留 諒介, 伊達 央, 大矢 晃久, 坪内 孝司, 重松 康祐, 鈴木 与海:“シミュレータ Gazebo で利用可能な環境モデルのセンサデータからの自動構築”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2A2-07a3, 2016.
11. 鈴木 与海, 伊達 央, 大矢 晃久, 坪内 孝司, 重松 康祐, 満留 諒介:“初めて訪れる場所における幾何学的に正確な経路情報に基づく移動ロボットのナビゲーション”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2A2-07a7, 2016.
12. 鈴木 与海, 伊達 央, 重松 康祐, 満留 諒介, 坪内 孝司, 大矢 晃久:“幾何学的に正確な経路情報と SLAM を利用した移動ロボットのナビゲーション”, 第 21 回ロボティクスシンポジウム, 4A2, pp.256–261, 2016.
13. 重松 康祐, 坪内 孝司, 伊達 央, 皿田 滋:“遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止制御のための操作入力に基づく機体 ZMP の予測”, 第 16 回 SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2015), 1N4-3, 2015.

14. 鈴木 与海, 伊達 央, 坪内 孝司, 大矢 晃久, 重松 康祐, 満留 諒介:“幾何学的に正確な経路情報に基づくナビゲーションシステムの開発”, 第 16 回 SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2015), 1K4-1, 2015.
15. 満留 諒介, 伊達 央, 坪内 孝司, 大矢 晃久, 重松 康祐, 鈴木 与海:“つくばチャレンジ環境の Gazebo によるシミュレーション”, 第 16 回 SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2015), 1K3-5, 2015.