

油圧ショベルのアタッチメント重心挙動に基づく
操作技量評価と掘削支援制御に関する研究

(A Study on Operation Skill Evaluation and
Digging Assist Control based on the Center-of-Mass
Behavior of a Hydraulic Excavator)

広島大学 工学研究科
システムサイバネティクス専攻
D180250 洪水 雅俊

2020年9月

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	油圧ショベルの制御の現状と課題	4
1.3	本論文の章構成	6
第2章	アタッチメント合成重心挙動に 基づく操作技量評価	8
2.1	緒言	8
2.2	油圧ショベルのアタッチメントシステムの重心に基づく表現	10
2.3	合成重心システムのパラメータ推定法	16
2.4	実機検証	18
2.4.1	評価条件	18
2.4.2	システムパラメータの推定	20
2.4.3	考察	21
2.4.4	制御工学的な評価	22
2.4.5	操作技量とシステムパラメータの関係性考察	25
2.4.6	評価指標	26
2.5	結言	31
第3章	アタッチメント合成重心速度に 基づく掘削支援制御	32
3.1	緒言	32
3.2	油圧ショベルの掘削制御系の構築	35
3.2.1	アタッチメント合成重心に基づく制御対象システム	37
3.2.2	合成重心速度に基づく操作支援制御系の構築	38
3.3	制御器の設計	39
3.3.1	参照モデルの設計	39
3.3.2	データ駆動型制御に基づく制御パラメータの算出法	40
3.4	実機検証	42
3.4.1	検証条件	42
3.4.2	マニュアル操作による結果	44

3.4.3	提案法による結果.....	46
3.4.4	マニュアル操作とアシスト制御適用操作の考察, 比較.....	50
3.5	結言.....	54
第4章	油圧ショベルのシステム変動に 対応した掘削支援制御系の設計	55
4.1	緒言.....	55
4.2	疑似外生信号を用いた掘削支援制御系の設計.....	58
4.2.1	疑似外生信号.....	58
4.2.2	制御則.....	58
4.2.3	疑似外生信号を用いた制御パラメータの算出.....	60
4.2.4	シミュレーション結果.....	62
4.2.5	実機適用結果.....	65
4.3	データベース駆動型制御を用いた掘削支援制御系の設計.....	67
4.3.1	データベース駆動型制御.....	67
4.3.2	初期データベースの構築.....	68
4.3.3	FRIT法に基づくデータベースのオフライン学習.....	69
4.3.4	データベースの実装および制御.....	72
4.3.5	実機適用結果.....	72
4.4	結言.....	80
第5章	結論	82
	参考文献	86
	付録	90
	引用既発表論文	93
	その他既発表論文	94
	謝辞	95

第1章 序論

1.1 研究背景

昨今の我が国において、少子高齢化は非常に重要かつ不可避な問題として認識されている。これに伴い、生産年齢人口は徐々に減少しており、経済成長を支える多くの産業で生産性の低下を引き起こしつつある [1]。特に、全産業に対して建設業でこの傾向は著しい。Fig.1.1 に示すように、優れた技量を持ち合わせ、熟練と呼ばれる団塊世代の作業員たちが、徐々に離職していくのに対し、若い作業員たちの入職は減少の一途を辿っており、労働者不足に陥っている。その結果、建設、土木現場の技術力、生産性の低下が危ぶまれている。このような背景から、Fig. 1.2 に示す建設投資額も 1990 年代後半以降減少傾向にあり、社会基盤を作り、経済成長において重要な役割を担う建設業が先細りの状況である。一方で、新たなインフラの整備は勿論のこと、高度経済成長期に建設・整備されたインフラは、今後 20 年以内に建設後 50 年以上が経過するものが急激に増加するため [3]、メンテナンスの需要が高まることは必至である。このままでは、建設業におけるヒューマンリソースやノウハウの需要と供給がマッチせず、各種工事が滞ることで、国内経済発展の鈍化を招く恐れがある。このような問題を受けて、国土交通省によって「i-Construction」と呼ばれる施策が 2016 年より本格的に推進されている [4]-[6]。この施策は、ICT（情報通信技術）の全面的な活用、全体最適の導入、そして施工時期の平準化の大きく 3 つで構成されている。なかでも、ICT の全面的な活用は、ICT 建機 [7] や AI（人工知能）、CIM（Construction Information Modeling）、ドローンなど、様々なモノや情報を繋ぎ、デジタル活用していくことで、建設現場における作業の自動化や省人化を図り [8]、一人当たりの生産性を向上させることを目的としている。建設・土木工事は、

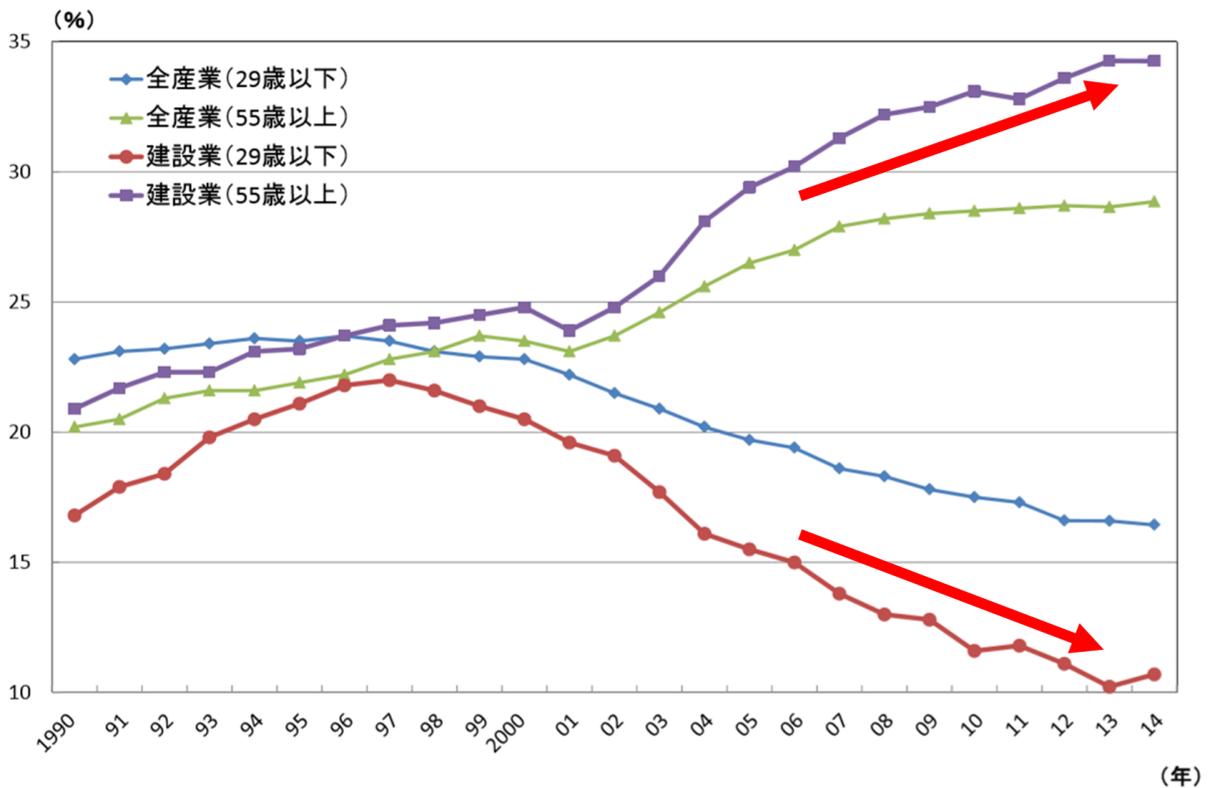


Fig. 1.1: Aging of construction workers.[2]

通常、単一の企業で行われることは少なく、施工毎に様々な企業が参画する。そのような状態に対して、これまで情報を規格化し、共有化するプラットフォームが無かったため、発注者が情報を吸い上げ、集約することは難しく、現場の最適化を図ることは容易ではなかった。i-Construction ではこのような問題に対し、CIM やドローン等で測量されたデジタルデータなどにに基づき、フロントローディング的に現場施工の設計検討を行うことができる [9]。さらに、施工や検査においても上流で検討されたデータを共有し、それに基づき行うことで建設生産プロセスの最適化を図ることができ、Society5.0 においては、技術の深化によって 2025 年度までに 2 割の生産性向上を目指しており、益々の適用が進められている状況である。現在、現場で広く用いられている建設機械においては、自動化、半自動化などの支援技術の実装やドローンを用いた測量との連携などがなされ、現場施工の生産性や安全性の向上 [10] にも大きく寄与している。例えば、油圧ショベルの場合、既に各建設機械メーカーから 3DMC (3-Dimension Machine Control) 機能を持った製品が販売されており [11]、各地の現場で使用されている。こ

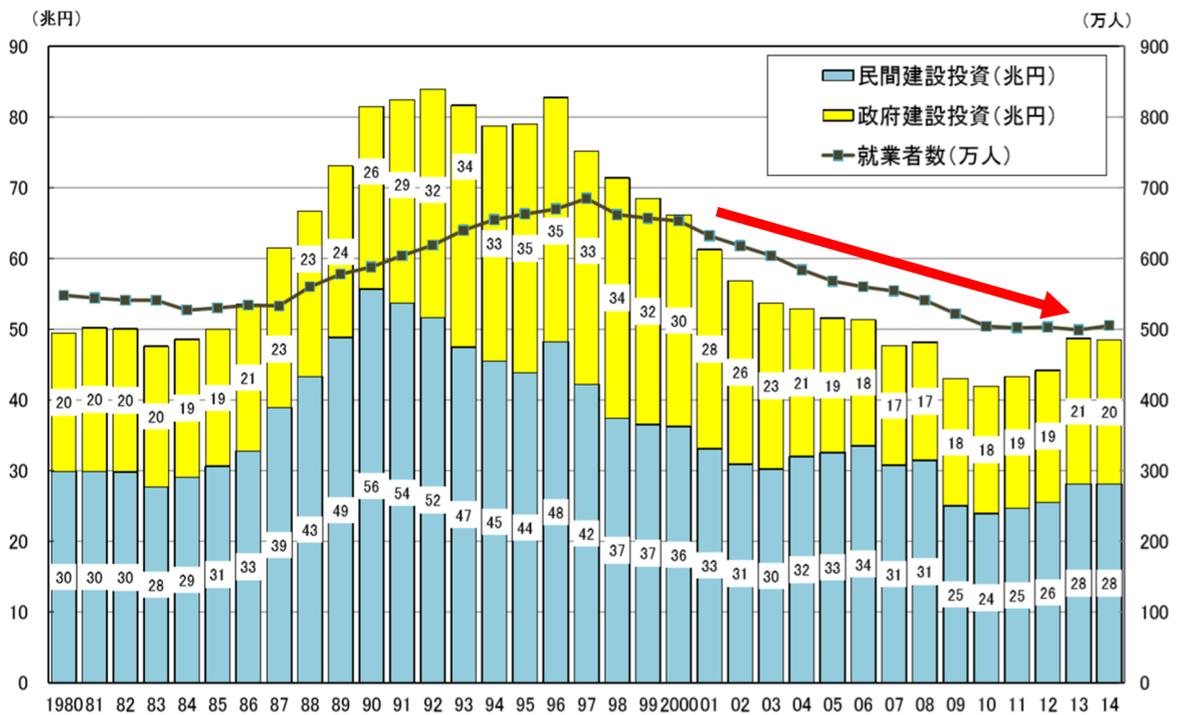


Fig. 1.2: Transitions of construction investment and the number of employees.[2]

の3DMC機能は、自機位置をGPS（全地球測位システム）で測位しながら、施工情報である3次元データに基づき、ショベル作業を行うものである。データを目標値としてアタッチメント動作が制御されるため、施工面以上に掘削し、失敗するといったことが無く、非常に効率的な作業が可能である。また、従来の現場では丁張りと呼ばれる施工の目標を決める作業を行わなければならなかったが、これが不要となるため、作業数の削減、省人化を図ることが可能である。建設機械メーカーやゼネコンは、このような機能やソリューションを開発し、生産性を高める取り組みを進めている。建設現場は俗に言う3K（きつい、汚い、危険）のイメージが定着しており[12,13]、現在の社会において、人気のある職種とは言い難いが、上記施策の推進により、作業を簡易化し、現場環境をスマート化することで、将来的に、建設業を新3K（給与、休暇、希望）と呼ばれる現場へと変貌させ、新入職者が増える、魅力あふれる職種することも可能である。しかしながら、このような機能の適用は現状一部の現場に限られている。国直轄工事では2018年度で約6割の現場で実施されているものの、都道府県・政令市においては約2割の実施に留まっている[6]。また、全ての施工に適用されている訳ではない

ことから、従来通り、人が判断し、操作を行う現場はまだまだ多いということが容易に想定される。この要因として、活用可能なデジタル情報が整備されていないことや、新技術の適用にかかる設備コストが高いことが挙げられる。ただし、多くの建設需要がある昨今、これらの技術が手軽に適用可能となるまで待つ猶予は残されておらず、従来通りの有人操作でも高い生産性を実現するための施策が早急に必要である。

1.2 油圧ショベルの制御の現状と課題

油圧ショベルは様々な機器、構造物によって構成されている。そこには、これらを統合的に制御するコントローラも含まれており、所望の動作特性や安定性などを補償するための制御が検討され、織り込まれている [14]。ただし、土や岩石、建物など、様々なものに対して作業を行うため、同じ条件であることは少ない。そのため、作業条件に適した操作、動作も毎回変わるため、予め設定されている油圧ショベルの特性や制御が適していない場合も考えられる。このような場合、所望の作業、生産性を必ずしも達成できるとは限らない [15]。ここで、操作オペレータが高い技量を有するのであれば、機械特性だけでは対応しきれない部分を的確な操作によって補い、結果的に高い生産性を達成させることができる。一方で、技量が乏しい場合はこれが容易ではない。したがって、建設、土木現場の生産性はオペレータの技量に左右されることとなる。また、効率的な作業とするために着目すべき情報、指標が非熟練者にとって明確となっていないことも考えられる。昨今、研究・開発が加速化している遠隔操縦油圧ショベルなどにおいては [16]-[19]、一層その傾向が強い。遠隔操縦ショベルは、現場に行かないことによる本質的な安全を確保することと [20, 21]、様々な人がオペレータとして活躍できることで就業人口を高めることに大きく寄与するものの、遠隔操縦は実機操縦と比較して、フィードバックされる情報が少ないため、オペレータがそれらを取得することが難しく、操作難易度が実機搭乗と比べて高いとされる [22, 23]。すなわち、将来的には誰でも参画できるようにはなるものの、誰でも高生産的な作業を実現できるとは限らない。した

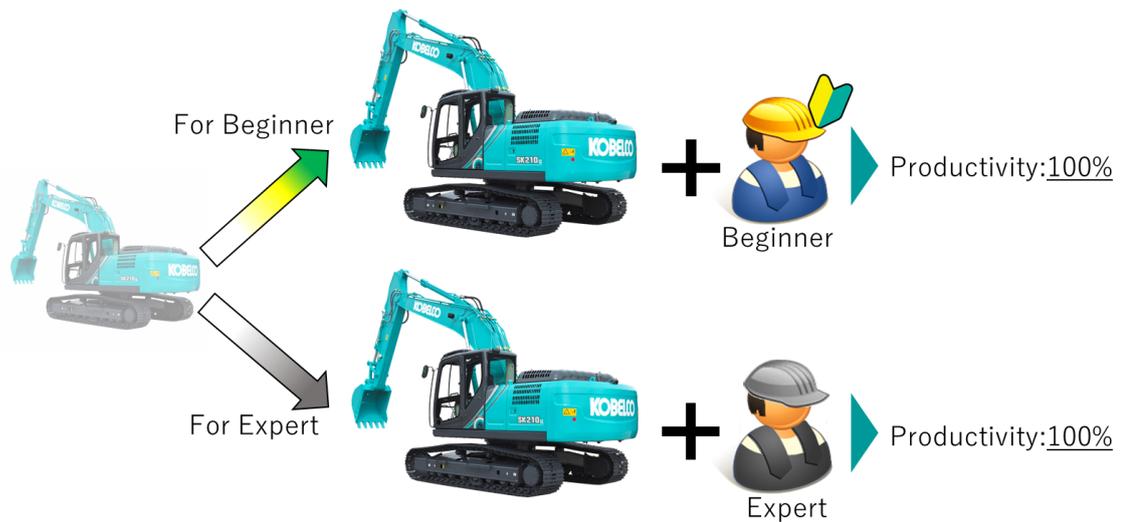


Fig. 1.3: Schematic of construction machine suited skills of each construction worker.

がって、Fig. 1.3 に示すような誰でも適切な操作によって作業が可能となる油圧ショベルが必要である。ここで、油圧ショベルの動かし方はオペレータによって異なるため、操作や動作を細かく既定するのではなく、熟練者の特徴のみを倣うことができれば、汎用性の高い制御になると考えられる。また、油圧ショベルに対して、このような取り組みの研究例は、著者の知る限りでは実施されていない。したがって、有人操作における油圧ショベルにおいて、所望の支援制御を実現するには、以下の課題に対して取り組む必要がある。

(i) 操作技量が表現される動的指標の特定

(ii) 作業の支援制御系の構築

(iii) 制御系の環境変化対応

そこで、非熟練なオペレータにおいて人の操作も含めた特性を、コントローラを用いて作業に適した特性へと変化させ生産性を向上させる、**Human-in-the-loop** 系を考える。この系において、オペレータの技量を制御工学的に評価できる指標を特定し、その指標に基づき人の操作を支援する制御系を構築し、検証することを研究のテーマとする。なお、本論文では、先に挙げた課題に対する有効性を、作業の生産性や制御性能について実機実験を通して評価する。

1.3 本論文の章構成

本論文では、研究対象である油圧ショベルに対して、制御工学に基づき操作者の技量が表現される指標の構築と、その指標に基づき油圧ショベルの掘削作業における操作を支援する制御系を構築する。その構成を以下に示す。

第1章では、建設現場が直面している社会的な課題と、生産性の向上に関する取り組み、なかでも、油圧ショベルにおける制御工学の重要性、先行研究について述べる。さらに、本論文の主題であるアタッチメント重心挙動に基づく操作技量評価と掘削作業を支援する制御系の考え方を明確にする。

第2章では、油圧ショベル操作の技量評価指標について述べる。対象動作をブーム上げとし、入力をアタッチメントの駆動トルク、出力をアタッチメント合成重心の角速度とする2次遅れ+むだ時間システムを構築する。次に、技量差の表れやすい減速、停止時のシステム伝達関数のパラメータを遺伝的アルゴリズムを用いて推定する。さらに、このシステムパラメータから技量を制御工学的な観点で定量的に評価する。最後に、技量評価指標としてのアタッチメント合成重心速度の有効性について考察する。

第3章では、油圧ショベルのアタッチメント合成重心速度に基づく掘削支援制御について述べる。まず、対象動作を掘削作業とし、人の操作が介在する **Human-in-the-loop** 系において、入力をブーム上げ操作量、出力をアタッチメント合成重心速度とする制御系を構築する。次に、掘削作業の入出力データを用い、データ駆動型制御に基づき制御器のパラメータを算出する。さらに、それらの制御パラメータを実機に適用し、提案法の有効性を検証する。最後に、非熟練者の搭乗において、マニュアル操作と提案法を適用した結果の比較および考察を行う。

第4章では、システム変動に対応した油圧ショベルのアタッチメント合成重心速度に基づく掘削支援制御について述べる。油圧ショベルは負荷によってシステム特性が変化する非線形性を有するため、ここでは、この非線形性に対応した制御器の設計を行う。まず、掘削負

荷に起因するシステム変動を疑似的な外乱(疑似外生信号)が入力されたものと見なし, それによる出力変動を抑制する制御パラメータをデータ駆動型制御則に基づき算出する手法を提案する。次に, データベース駆動型制御則に基づき, 逐次制御パラメータを更新し, 非線形性に対応する掘削支援制御を提案する。さらに, これらの手法を油圧ショベルの掘削動作に適用する。最後に, 提案法の有効性を検証し, 支援制御について考察する。

第5章では, 本研究の総括と, 本論文で提案した手法により実現可能な建設機械の将来, および今後の研究展望について述べる。

第2章 アタッチメント合成重心挙動に 基づく操作技量評価

2.1 緒言

昨今の建設業界では、少子高齢化の波が押し寄せており、高い技量を有した熟練作業者たちの数は減少の一途を辿っている。このような状況を打破し、建設、土木現場の生産性を向上させるために、国土交通省では「i-Construction」が推進され、メーカーや研究機関などでは、作業を支援するツールや機械、そしてそれらに活用される制御の研究、開発が進められている。なかでも、土木現場で広く用いられている油圧ショベルは、人力と比べて圧倒的な力によって[14]、土を掘り、地面を所望の形に整え、またある時は重量物の吊り作業を行うなど、その高い対応力によって現場の生産性に大きく寄与している。その一方で、高い生産性を達成するための操作は容易ではない。したがって、熟練者が減少している状況において、現場の高い生産性を達成するため、油圧ショベルへの対応は急務といえる。

先行研究では、将来的な自動化を見越して、効率的な油圧ショベルのバケットの動かし方などの研究が成されているが[24]、非定常な作業が多い油圧ショベルにおいて完全な自動化は現実的でなく、人の判断や操作は残っていくことが考えられる。その際、油圧ショベルによる作業の生産性はオペレータの操作技量に左右される。したがって、作業現場全体としての生産性向上を目指すにあたり、オペレータの技量を適切に評価し、そのレベルによって作業内容を振り分けたり、また、作業の支援などを行わなければならない。技量評価に関する先行研究として、作業中のバケット先端軌跡のばらつきに基づいて評価する手法が提案されて

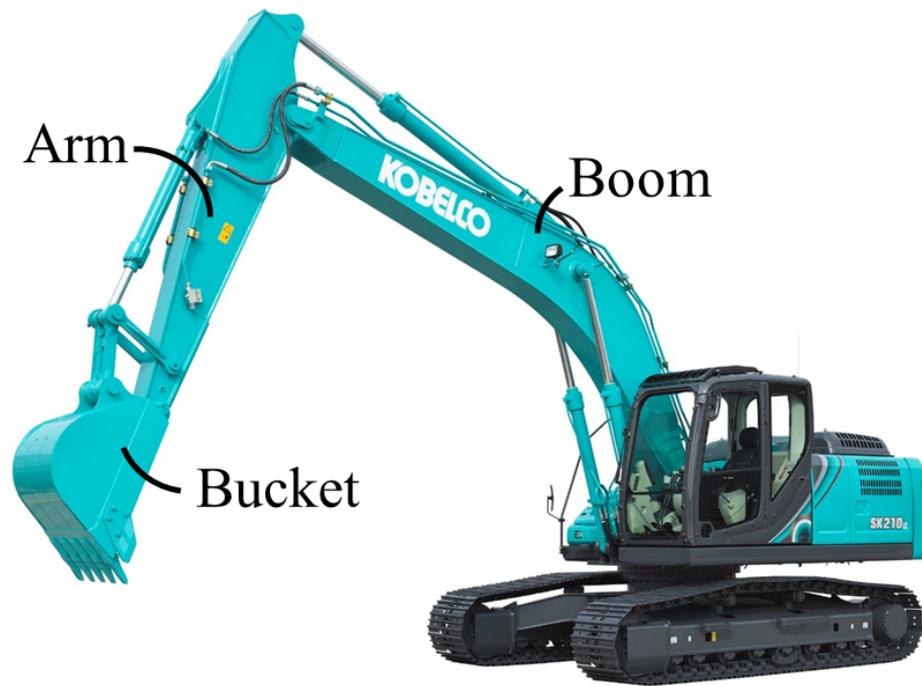


Fig. 2.1: Hydraulic excavator.

いる [25]。これは、技量の高い熟練者であれば、掘削作業におけるアタッチメント先端が一意の軌跡となるのに対し、非熟練者の場合は、軌跡が定まらないため、その軌跡のばらつきによって技量が評価できるというものである。しかし、評価対象となっている軌跡は静的な情報しか持たず、仮に、非熟練者が作業速度ではなく、低速動作により精度を重視した場合を適切に評価可能とは言い難い。したがって、動的に技量を評価する指標も必要である。動的な評価となると、速度や加速度に関する評価となり、油圧ショベルの場合、その対象は各油圧シリンダやアタッチメントが考えられる。ただし、油圧ショベルはFig. 2.1に示すようにブーム、アーム、バケットといった複数リンクの組み合わせで構成され、かつそれらを複雑かつ複合的に操作し、作業を行う。そのため、各リンクの操作や動きから技量を評価することは難しく、動きを統合的に評価可能な指標の構築が求められる。そこで、アタッチメントの重心に着目する。技量が高く、優れた操作を行うことができる熟練オペレータは、操縦席から見えるアタッチメント全体の姿勢や動きを無意識で捉えることで、適切な操作を実現していると推察される。したがって、アタッチメントをそれらの合成重心として表現し、これ

を操作対象と見なせば、その入出力データや特性から、操作者の技量を統合的に評価可能な指標となり得ると考えられる。そこで、アタッチメントの合成重心を計算し、この重心の動きを極座標系で表し、合成重心の回転駆動トルクを入力、角速度を出力として伝達関数で表現する等価的なシステムを考える。

本章では、まず上記の合成重心で表現するシステムを構築する。次に、複合的な動きによる問題の複雑化を避けるため、油圧ショベルのブーム上げ減速操作に対してこのシステムを適用し、合成重心による技量評価の有効性を検証する。さらに、熟練オペレータと非熟練オペレータが操作した時のシステムパラメータの比較によって、操作特徴の明確化を図る。最後に、評価指標としての合成重心の有効性について実験結果を踏まえて考察する。

2.2 油圧ショベルのアタッチメントシステムの重心に基づく表現

オペレータはアタッチメントの動きを視認しながら操作量を調整し、所望の動きを実現する。これは、Fig. 2.2 で示す人を含む閉ループ系で表され、そのシステムには油圧部と機構部を含み、一般的に共に非線形性を有する。油圧系は機器構成、回路構成が複雑なため定式化が難しいが、機構系であれば回転系の運動方程式として表すことができる。ただし、油圧ショベルは Fig. 2.3 に示すように、動力原である油圧ポンプから吐出された作動油をバルブを介して各アクチュエータが共用しているため、同時に複数の要素を作動させると、油の取り合いによる動作干渉が発生する。さらに、アタッチメントは直列に連結されているため、互いの慣性項が干渉し合い複雑化する。そこで、本章ではブーム部の運動のみに限定し、式の簡略化を図る。

次に、人の短期的な記憶の容量は4項目程度と言われていることから [26]、オペレータが操作対象であるアタッチメントをパラメータ数の多い高次システムではなく、比較的低次のシステムとして扱っていると仮定する。そこで、アタッチメント機構部のシステムを低次システムとして表現するために、Fig. 2.4 に示すアタッチメント合成重心座標 $G_c(t)$ を以下の式

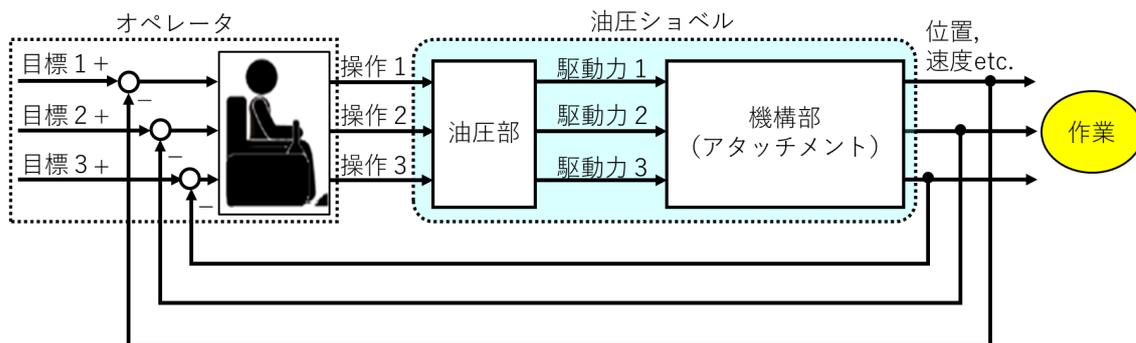


Fig. 2.2: Block diagram at the human operation.

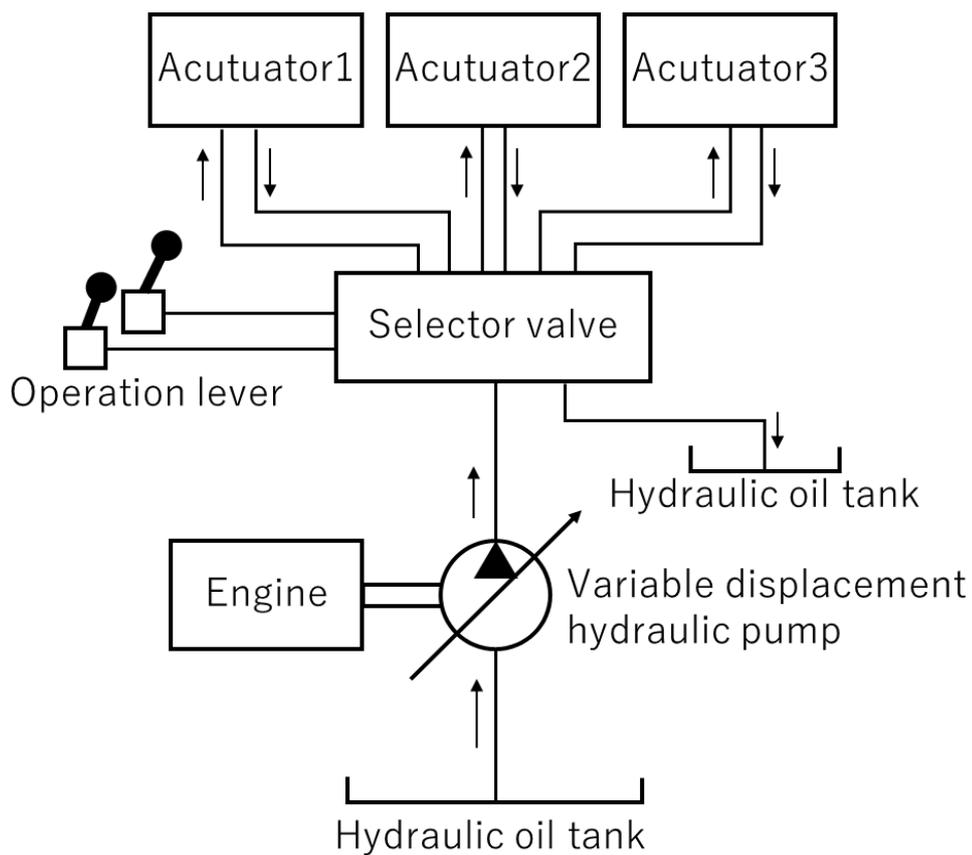


Fig. 2.3: Schematic of hydraulic circuit for the hydraulic excavator.

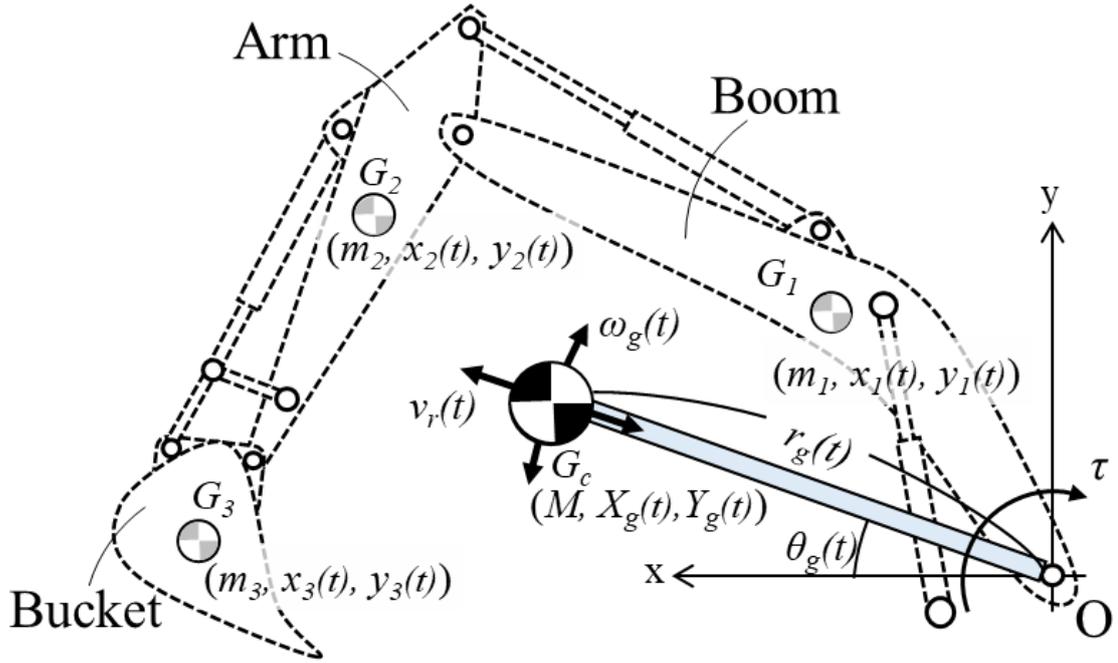


Fig. 2.4: Schematic of combined center of mass model.

で算出する [27]。

$$(X_g(t), Y_g(t)) = \left(\frac{\sum_{i=1}^3 m_i x_i(t)}{m_1 + m_2 + m_3}, \frac{\sum_{i=1}^3 m_i y_i(t)}{m_1 + m_2 + m_3} \right) \quad (2.1)$$

ここで、 m_i は各リンクの質量であり、既知とする。また、 m_i は合成重心座標の算出における各リンクの重み係数と捉えることができる。 $x_i(t)$ 、 $y_i(t)$ はブームフット部 O を原点とした x - y 座標における時刻 t の各アタッチメント要素の重心座標を表しており、計測可能または、計測可能なアタッチメントの姿勢情報から計算可能なものとする。また、 i はアタッチメントの各リンクを表しており、 $i = 1$ はブーム、 $i = 2$ はアーム、 $i = 3$ はバケットを示している。さらに、得られた合成重心の座標を以下に示す極座標系へと変換する。

$$\theta_g(t) = \tan^{-1} \frac{Y_g(t)}{X_g(t)} \quad (2.2)$$

$$r_g(t) = \sqrt{X_g^2(t) + Y_g^2(t)} \quad (2.3)$$

$$\omega_g(t) = \dot{\theta}_g(t) \quad (2.4)$$

$$v_r(t) = \dot{r}_g(t) \quad (2.5)$$

ここで、 $\theta_g(t)$ と $r_g(t)$ は極座標における合成重心座標、 $\omega_g(t)$ は原点 O 回りの合成重心の角速度、 $v_r(t)$ は半径方向速度を示す。本章では、対象動作をブームの動きとしているため、角速度 $\omega_g(t)$ のみに着目する。また、オペレータが操作対象を低次システムとして捉えているとすると [26]、合成重心の動きは以下の運動方程式で示すことができる [28]。

$$\tau(t-L) = J \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + I \frac{d\omega(t)}{dt} + D\omega(t) \quad (2.6)$$

ここで、 J は合成重心の動きに対する躍度、 I は慣性モーメント、 D は弾性係数、 L はむだ時間、そして、 τ は合成重心を原点 O 回りで回転させるための駆動トルクを示す。なお、油圧部の特性は機構部のダイナミクス、すなわち合成重心で表現するシステムのダイナミクスで表現され、操作技量への影響はないものとし考慮しない。(2.6) 式において、ラプラス変換を行い、駆動トルク τ を入力、合成重心の角速度 ω を出力として、入出力関係を伝達関数で表すと下式となる [29]。

$$G(s) = \frac{1}{Js^2 + Is + D} e^{-Ls} \quad (2.7)$$

ここで、駆動トルク τ は以下の計算によって算出することができる。ブームを例に説明すると、操作量 u の大きさに応じて、油圧アクチュエータ、すなわち油圧シリンダへ配分され、流

入する作動油流量 Q_{in} が決まる。次に、シリンダが作動することでシリンダから流出する作動油流量を Q_{out} とすると、油圧シリンダ内の単位時間 Δt 当たりの作動油圧縮量 ΔV は下式で算出することができる。

$$\Delta V = (Q_{in} - Q_{out})\Delta t - V \quad (2.8)$$

ここで、 V は油圧シリンダのヘッド側容積とする。さらに、油圧シリンダ内の作動油押し込み率 λ は下式で算出できる [30]。

$$\lambda = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta P}{\kappa} \quad (2.9)$$

ここで、 ΔP は油圧シリンダヘッド側の圧力変化量であり、ヘッド圧と見なせる、また、 κ は体積弾性係数を表している。体積弾性係数 κ は使用される作動油の種類によって概ね決定される。したがって、(2.9) 式より油圧シリンダのヘッド圧 P_H は下式で得ることができる。

$$P_H = \kappa \lambda \quad (2.10)$$

さらに、シリンダ推力 F_1 は下式で算出される。

$$F_1 = P_H A_H - P_R A_R \quad (2.11)$$

ここで、 A_H および A_R は油圧シリンダのヘッド側、ロッド側の受圧面積を表す。このとき、 F_1 と並行な反力 F_2 がブームフット O 点に作用すると考えると、力のつり合いは下式で表される。

$$F_1 - F_2 = 0 \quad (2.12)$$

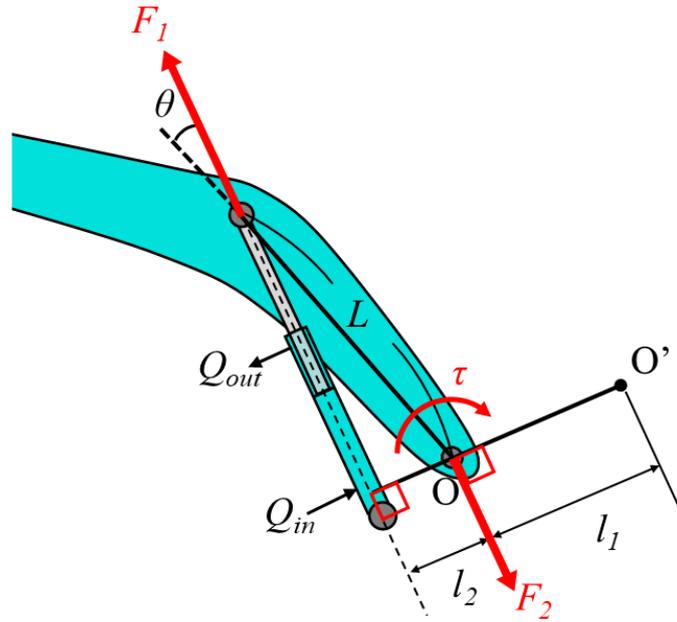


Fig. 2.5: Generation mechanism of boom rotation torque.

さらに， O' 点を仮定すると， O' 点周りのモーメントのつり合いは以下の式で表される。

$$\tau + F_2 L_1 = F_1 (l_1 + l_2) \quad (2.13)$$

したがって，Fig. 2.5 に示すアタッチメント機構部の寸法 L は既知であるため，(2.12) 式と (2.13) 式より，下式で駆動トルク τ を得ることが出来る。

$$\tau = F_1 L \sin \theta \quad (2.14)$$

システム入力は，本来であればオペレータによるレバー操作量となるが，ブーム上げのような単純動作を行う場合，油圧シリンダのロッド側にはほとんど圧力が生じないため，推力 F の大きさはヘッド圧 P_H に大きく依存する。すなわち，駆動トルク τ は操作量によって決まる作動油流量に影響される。そこで，駆動トルクを操作量と等価なものとして見なし，システム入力として扱う。この合成重心で表現されるシステムのパラメータを推定することで，オペレータの操作技量を表現する方法を提案する。

2.3 合成重心システムのパラメータ推定法

合成重心で表現するシステムは油圧ショベルのアタッチメントであるため、そのシステムパラメータの大きさは、機械仕様や動作条件からある程度想定することができる。そのため、パラメータの探索範囲が任意に設定できる遺伝的アルゴリズムを推定手法として用いる。推定の手順を以下に示す [31, 32]。

[Step1] 初期個体の生成

J, I, D, L を遺伝子とした個体 f_N をランダムで N 個生成する。

[Step2] 初期評価

生成した個体の遺伝子を (2.7) 式に代入する。さらに、代入後の伝達関数をサンプリング時間 T_s で離散化し、以下に示す 2 次遅れ系で近似する。 $T_s = 10\text{ms}$ とした。

$$G(z^{-1}) = \frac{z^{-(d+1)}b_0}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (2.15)$$

ここで、 d はむだ時間を示す。さらに、(2.15) 式より、推定するシステム出力 $\hat{y}(k)$ は以下のよう
に算出する。

$$\hat{y}(k) = -a_1\hat{y}(k-1) - a_2\hat{y}(k-2) + b_0u_0(k-d-1) \quad (2.16)$$

ここで、 u_0 はシステムに入力する駆動トルク τ を示す。さらに、パラメータ推定には評価規範が必要となるため、本章では、評価規範 J_E を下式のように定義した。

$$J_E := \frac{1}{1 + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y(k) - \hat{y}(k))^2} \quad (2.17)$$

ここで、 n はデータ数、 $y(k)$ は実験により取得した合成重心の角速度を示している。評価規範 J_E に基づき、生成した個体の初期評価を行う。評価値が 1 に近いほど適応度の高い個体とな

Table 2.1: Condition of parameters used Genetic Algorithm.

Gene of individual	J, I, D, L
Number of individual	$N = 100$
Mutation probability	$\alpha = 30\%$
Number of generation	$G = 200$

る。

[Step3] エリート選択

最も適応度が高い個体をエリートとして保存し、次世代の個体群へと持ち越す。

[Step4] トーナメント選択

個体群から個体 f_m と、他に f_{rdm1} , f_{rdm2} の 2 個体をランダムで抽出し、適応度の比較を行う。適応度が最良の個体を選択し、個体 f_m として更新する。

[Step5] 交叉

個体群から f_m , f_n の 2 個体をランダムで抽出する。これらの遺伝子を以下の式に基づいて入れ替え、より適応度が高い新たな 2 個体 $f_{m_{new}}$, $f_{n_{new}}$ として生成し、更新する [33]。

$$\left. \begin{aligned} f_{m_{new}} &= J_{E_{max}}(f_m, f_n) + \frac{|f_m - f_n|}{4} \\ f_{n_{new}} &= J_{E_{max}}(f_m, f_n) - \frac{|f_m - f_n|}{4} \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

[Step6] 突然変異

各個体を一定確率 α [%] で新たな遺伝子を持つ個体に置き換える。

[Step2]~[Step6] を世代数 G まで繰り返し、最終世代の計算終了時点で、最も適応度の高い個体の遺伝子、すなわちシステムパラメータが得る。本章では、Matlab を用いて、Table2.1 に示す条件で遺伝的アルゴリズムによるパラメータ推定を行った。

2.4 実機検証

2.4.1 評価条件

実験条件を以下に示す。

実験条件)

対象動作：ブーム上げ単独動作（加速，減速，停止）

負荷条件：無負荷（バケット内容量ゼロ）

初期姿勢：アームシリンダ最縮，バケットシリンダ最縮，バケットを接地（Fig. 2.6 参照）

操作：ブーム上げ操作を瞬時最大量で入力後，逆インチング操作で減速，停止操作を行う

停止姿勢：ブームフット部が鉛直状態（Fig. 2.6 参照）

ここで逆インチング操作とは，Fig. 2.7 に示す操作レバーを入力している状態から，操作量がゼロとなるレバー中立状態に向けて，徐々にレバーを戻す操作である。また，所定の位置に停止する際に，「ショック無く停止させる」というタスクを操作オペレータには課す。本章では，操作量ゼロ状態において，アタッチメントの揺動や，機体そのものが振動する状態をショックと定義する。操作オペレータ自身がこれを体感することは容易であり，操作の良否を判断できるため，実験タスクとして，より良い操作を心掛けさせることができる。また，設定した評価条件は，慣性モーメントが大きいことと，最大量操作によって速度が高くなるため，滑らかな減速，停止が容易ではなく，操作技量の差が生じ易い。この一連操作の中で，減速停止区間において操作技量の評価を行う。加速区間については，実験条件にて瞬時最大量操作と既定しており，操作オペレータ毎の技量差は生じないため，評価しない。実験には，20ton級の油圧ショベル（コベルコ建機株式会社製 SK200-9）を用いた。

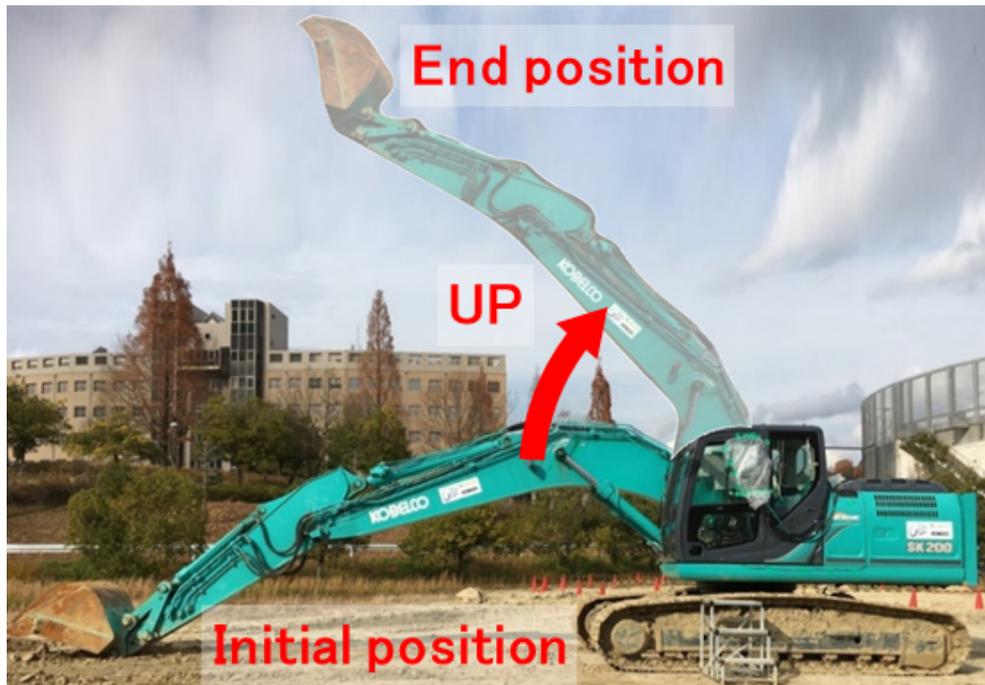


Fig. 2.6: Experimental motion.

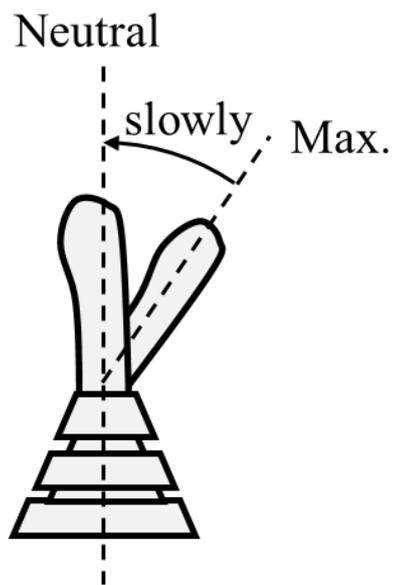


Fig. 2.7: Schematic of reverse inching operation.

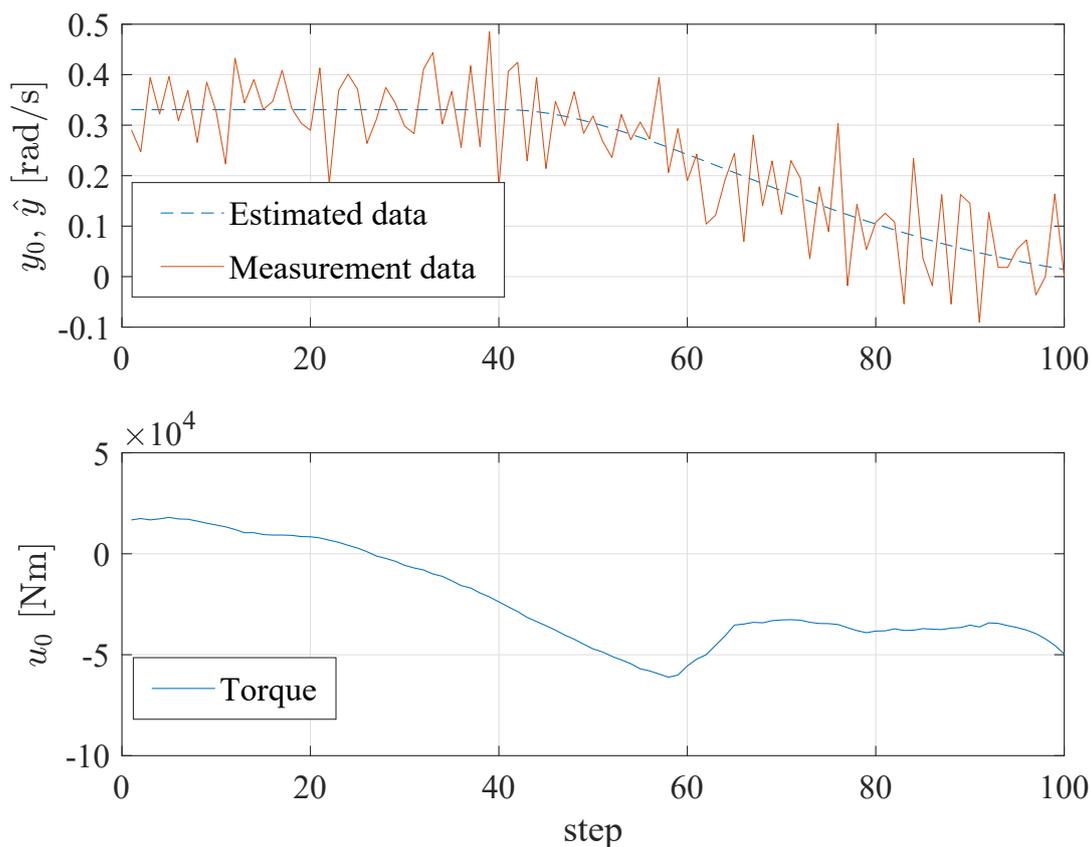


Fig. 2.8: Estimated results of deceleration data by a skilled operator.

2.4.2 システムパラメータの推定

Fig. 2.8 に、実験により得られた入出力データからシステム推定した結果の一例として、熟練オペレータの結果を示す。システム推定に用いたデータは、アタッチメント合成重心速度が定常な状態から減速し、速度がゼロとなるまでを含むデータとした。Fig. 2.8 より、実験データ $u_0(k)$ を推定したパラメータ (J, I, D, L) を含む伝達関数 (2.7) 式に入力した時、その出力 $\hat{y}(k)$ は $y_0(k)$ におおよそ近似できていることが分かる。したがって、2次遅れ系のシステム伝達関数によってその特徴を捉えられることが確認された。

次に、熟練オペレータ 1 名、非熟練オペレータ 4 名のパラメータ推定結果を Fig. 2.9 に示す。これは、被験者毎の各システムパラメータの平均値と標準偏差であり、それぞれ 5 回分の実験データから算出している。慣性モーメント I と弾性係数 D は熟練オペレータと非熟練

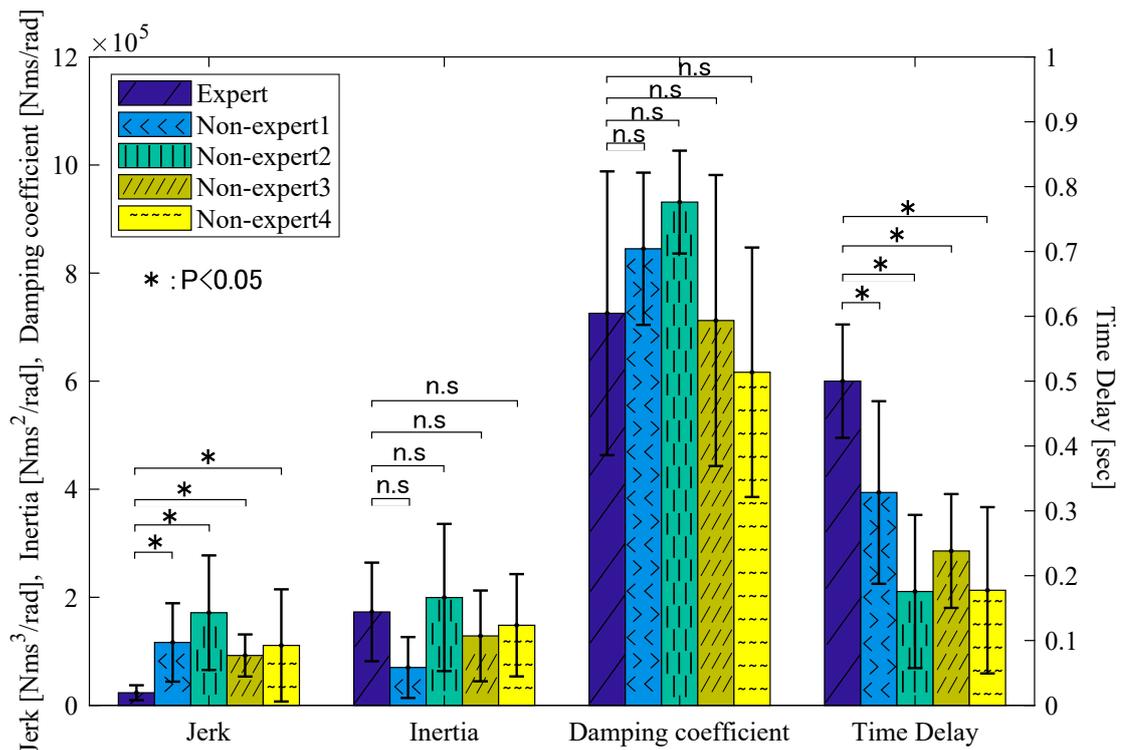


Fig. 2.9: Estimated results of system parameters.

オペレータとの比較において、明確な差や傾向見られず、有意水準 5% の t 検定でも有意差は認められなかった。一方、躍度 J に関しては、熟練オペレータの結果は非熟練オペレータと比較しておおよそ 4 分の 1 程度と著しく小さい結果が得られ、有意水準 5% の t 検定で有意差が認められた。また、むだ時間 L は熟練者が最も大きく、非熟練者は小さい傾向となっており、こちらも有意水準 5% の t 検定で有意差が認められた。

2.4.3 考察

油圧ショベルは機器特性上、非線形特性を有しており、稼働状態（動作点）によってシステム特性が変化する。したがって、このような特性に対して、所望の出力を実現するために行った操作入力と出力の特徴が、推定したパラメータとなって表れる。まず、加加速度を表す躍度 J は、急峻な減速が強いと大きくなる。熟練オペレータの場合、躍度が著しく小さく、機体が急減速ないようにレバー操作を丁寧かつ滑らかに変化させていることを示している。

一方、非熟練オペレータの躍度は大きい。これは、機械特性の把握ができておらず、かつ適切な操作を実現することができないことが要因と考えられる。高速となったアタッチメントの減速と停止において、減速のタイミングを見誤り、操作が遅れることで、急峻なレバー操作で減速しなければ、既定位置での停止が間に合わないという非熟練者によく見られる傾向が表れている。次に、むだ時間 L は、熟練オペレータが最も大きい結果となった。油圧シヨベルには操作に対して出力が反応しないむだ時間や不感帯が存在するが、操作初期に、その帯域を長くとる操作であったと考えられる。すなわち、定常速度状態から減速が始まるまでの操作量変化が、非常に緩やかであると捉えることができる。一方、非熟練者は、熟練者と比較して2分の1程度のむだ時間となっている。なかでも、被験者2と4が最も小さく、そして、ほぼ同じ値で標準偏差も同等であることから、機械特性で決まるむだ時間となっているものと推察される。すなわち、減速操作が非常に急峻なため、操作初期において、オペレータによって操作の微調整がなされていないことを表している。

これらの結果より、システムパラメータには、熟練オペレータが滑らかなブーム上げ減速を実現するための操作の特徴が表れており、アタッチメントの動きを合成重心の動きとして扱った場合においても、技量の特徴と、実態に即した物理特性がシステムパラメータとして表れることが明らかとなった。

2.4.4 制御工学的な評価

前節にて検証した合成重心で表現するシステムについて、制御工学的な観点で評価を行う。本章で定義した伝達関数 $G(s)$ は2次遅れ系であるため、下式の標準形で表すことができる[34]。

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} e^{-Ls} \quad (2.19)$$

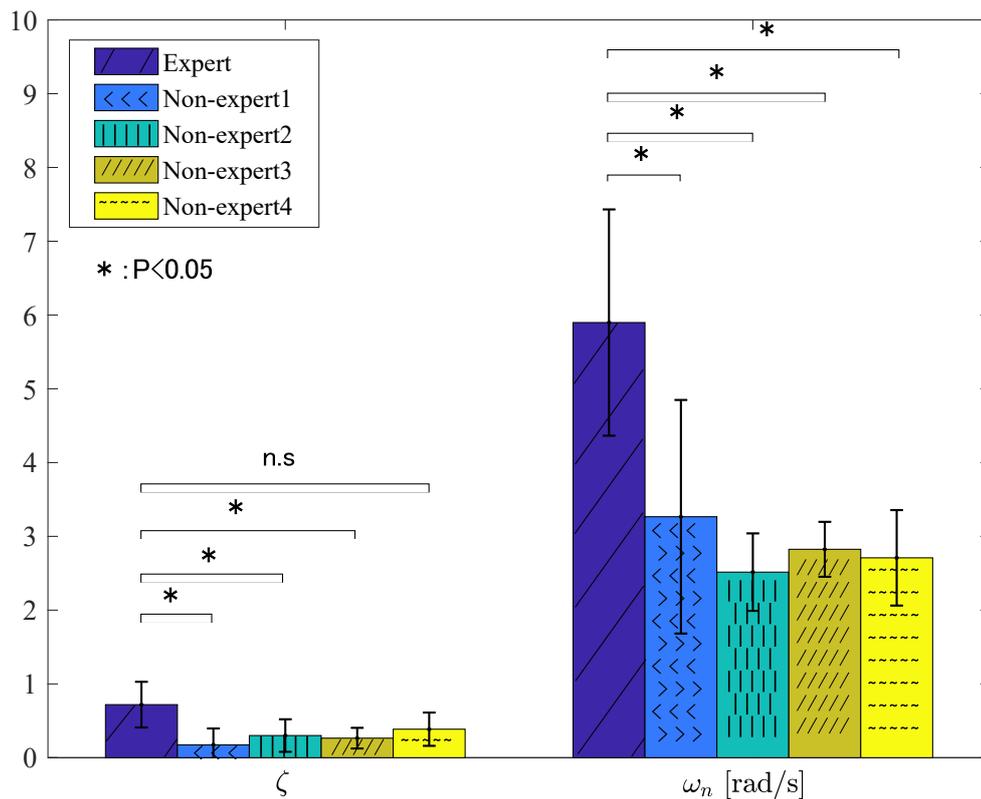


Fig. 2.10: Calculation results of system parameters.

ここで、システムパラメータを (2.7) 式と (2.19) 式との係数比較により、システムの減衰係数 ζ と固有角周波数 ω_n を、以下の式で算出する。

$$\zeta = \frac{I}{2\sqrt{JD}} \quad (2.20)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{D}{J}} \quad (2.21)$$

Fig. 2.9 に示すシステムパラメータ (J, I, D) から、 ζ , ω_n を算出した結果を Fig. 2.10 に示す。ここで、システムゲイン K は、最大操作量で十分に加速し、定常速度となった状態から減速、停止を行うように実験条件として統一しており、オペレータ毎の差が生じないため評価しない。また、Fig. 2.10 に示すデータは被験者毎の平均値と標準偏差であり、Fig. 2.9 で示した 5

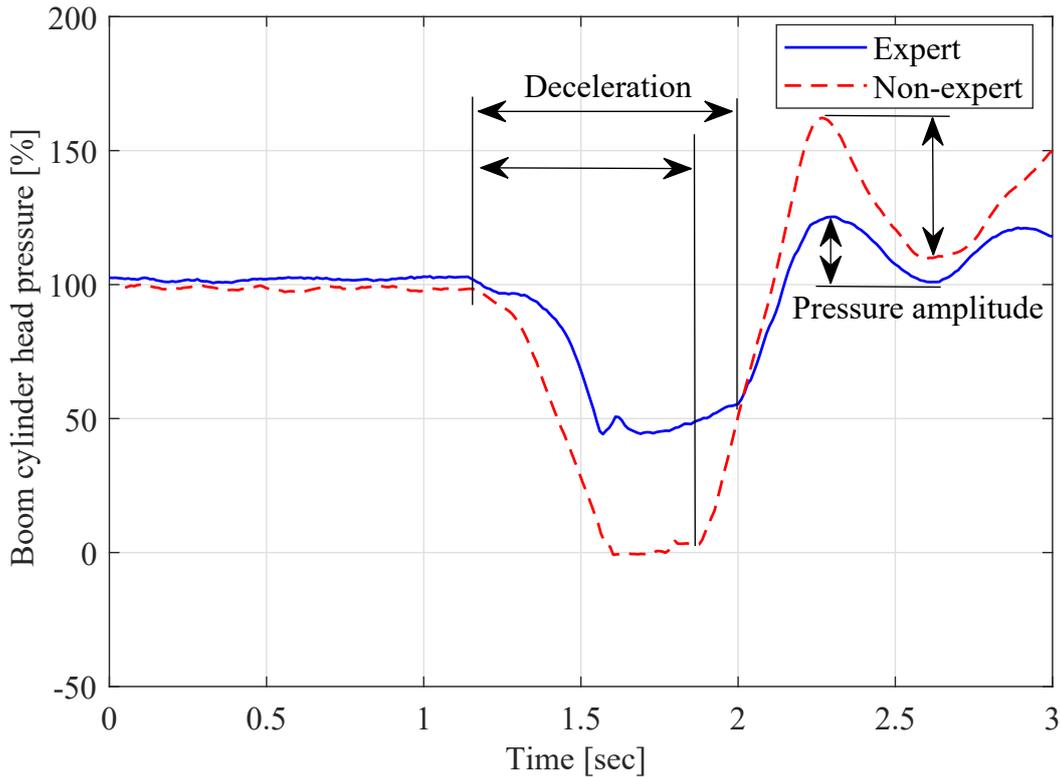


Fig. 2.11: Behaviors of boom head pressure at the deceleration.

回分のシステムパラメータから算出している。

熟練オペレータと非熟練オペレータとの比較において、 ζ ならびに ω_n に明確な差があることが見て取れる。また、これらの差は有意水準5%のt検定において有意差が認められた。まず、システム減衰係数 ζ であるが、熟練オペレータのそれは、非熟練オペレータの約2倍と大きく、目標への収束性が高いことを表している。また、熟練オペレータの減衰係数 ζ が臨界減衰($\zeta = 1$)に最も近く、非熟練オペレータより安定して、減速、停止する系であることが分かる。この特徴は、Fig. 2.11に示す油圧ショベルのブームシリンダヘッド圧力でも確認できる。ここで、ヘッド圧力は、減速前の定常圧を100%として正規化してある。ブームシリンダヘッド圧力は、過剰な速度からブーム上げを停止させると、慣性力によって、シリンダ内部の作動油が圧縮され、大きく上昇する。Fig. 2.11に示すのは、熟練オペレータと非熟練オペレータの減速、停止時のその圧力変化であるが、熟練オペレータは圧力振幅が小さい一方で、非熟練オペレータは振幅が大きく、減速後にアタッチメントが振動しており、既定の位

置で停止していないことを表している。これらの特徴が、システム減衰係数 ζ となって表れており、制御工学的な考察と、実機における現象の傾向が一致していることが分かる。次に、熟練オペレータの固有角周波数 ω_n は、非熟練オペレータと比較して約2倍と大きく、速応性に大きな違いが表れているといえる。

2.4.5 操作技量とシステムパラメータの関係性考察

制御工学的評価の結果から技量差を考察する。ここで、差を明確にするために熟練オペレータと非熟練オペレータ各1名のブーム上げ動作における減速時のレバー操作と、アタッチメント合成重心速度を Fig. 2.12 に示す。この結果より、レバー操作を比較すると、熟練オペレータは操作レバーの可動域 (0-100%) の内、特に中間域 (おおよそ 30-80%) において緩やかな減速操作を行っており、これは、出力に応じて操作を調整しているものと推察される。その結果、速度が比較的緩やかに減速していくことで、停止時の速度アンダーシュートは抑制されている。すなわち、非熟練オペレータと比較して減衰性が高く、速度ゼロへの収束性が優れているといえる。また、速度に合わせて、レバー操作が行われており、停止と共に操作入力ゼロとなる操作となっていることが分かる。1秒にも満たない短い時間のなかで、高速に動くアタッチメントに対して行われるこのような減速操作は、周波数応答の高い操作であることを示しており、速応性の高さを表している。一方、非熟練オペレータは、概ね一定割合で直線的に減少する急操作を行っていることから、操作の中間域を上手く使いこなせておらず、出力に応じて操作ができていないと考えられる。この結果、急減速を起因とする速度のアンダーシュートが発生するため、速度ゼロへの収束性が悪い。さらに、操作入力はアタッチメントが停止する前にゼロとなっているため周波数応答は低く、速応性の低い操作であることを表している。油圧ショベルは操作の仕方一つで特性も変わる非線形システムである。したがって、アタッチメント合成重心の入出力関係を (2.19) 式で表すことにより、操作時のシステムに関する特徴が、 ζ と ω_n として表れていると考えられる。そして、 ζ には減衰性が、 ω_n

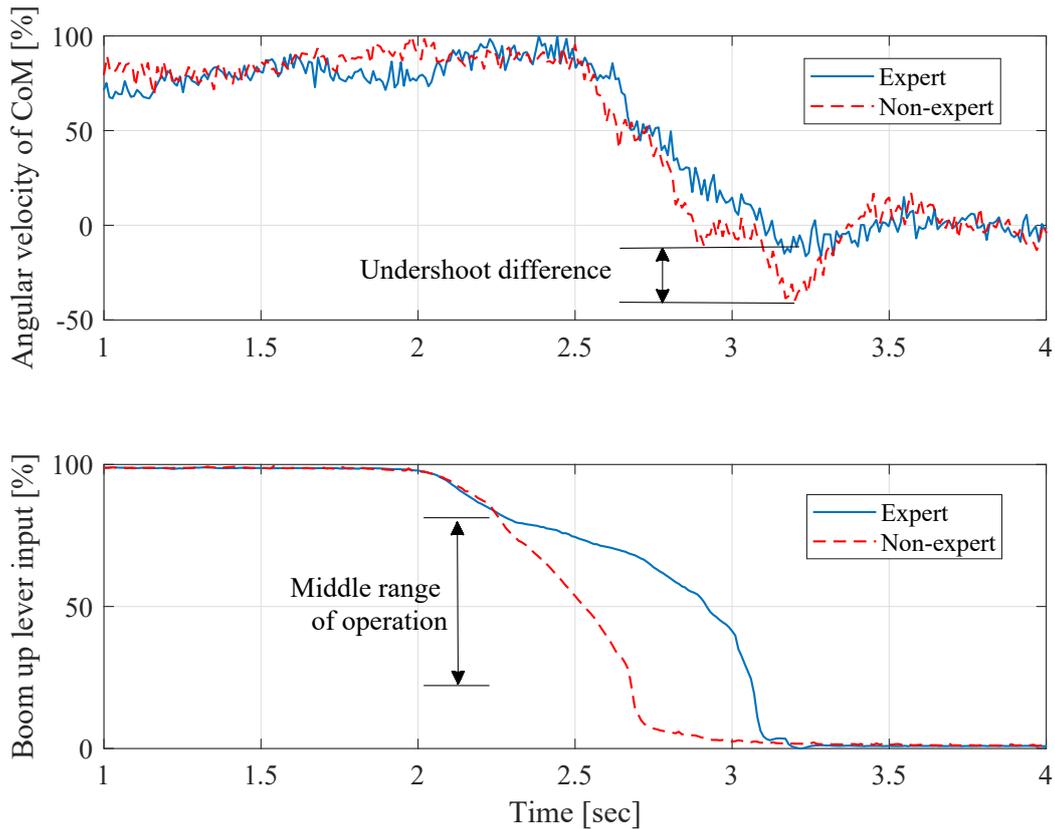


Fig. 2.12: Comparison of lever input and angular velocity of combined CoM.

には対応可能な作業の速さが表現され、これらのパラメータの大きさによりオペレータの技量表現が可能である。例えば、重さが無く特性が非線形な梁の先端に、質量 M の物体が付いたシステムの回転運動を考えると、熟練オペレータは、その物体を振動させず、かつ速応性が良い動作点となる梁特性において操作する一方で、非熟練オペレータは、振動し易い動作点となる梁特性で操作しているといえる。

2.4.6 評価指標

システム減衰係数 ζ 、固有角周波数 ω_n に対して、目標値を明確にし、定量的な技量評価のための指標化を図る。

2次遅れ系のステップ応答において、出力が目標値の $\pm 5\%$ 以内であれば追従したものとする

Table 2.2: System parameters of condition for sudden stop.

J	5.00E+04
I	1.70E+05
D	3.61E+06
ζ	0.200
ω_n	8.50

と、一般的に共振が生じない単調減少で、最も速く停止する際の減衰係数 ζ は概ね $0.7(= 1/\sqrt{2})$ であることが分かっているため [35]、この値をシステム減衰係数の目標値 ζ_r として設定する。次に、固有角周波数 ω_n は大きいほど速応性は高くなるため、理論的に目標値を設定することは難しい。また、油圧ショベルの場合、機器性能などによって制約があり、実現可能な速応性には限界がある。そこで、本章では実験に基づき設定する。油圧ショベルのブーム上げを実験条件と同様に加速させ、定常速度状態としてから瞬時に操作を中立状態（操作量ゼロ）とする。このとき、作動油は瞬時に遮断され、ブームが急停止するため、固有角周波数の限界値を得ることができる。Table 2.2はその実験結果を示しており、最大固有角周波数は $\omega_n = 8.5$ となった。これが、本章で設定した実験条件において、ブーム上げ停止の機械の限界性能であるため、この値を固有角周波数の目標値 ω_{nr} として設定する。ここで、設定したシステム減衰係数 ζ_r 、固有角周波数 ω_{nr} と、Fig. 2.10に示す各被験者の結果を比較すると、熟練オペレータの ζ は ζ_r に概ね一致しており、減衰特性は理論的にも最適な操作であり、その技量の高さが伺える。対して、 ω_n は目標値 ω_{nr} に対して差異があり、熟練者でも幾分か改善の余地がありそうであるが、この度の ω_{nr} は、バケット内に掘削物が入っていた時に、それがこぼれることを考慮せずに最速で停止した時の値であり、実作業を想定するとやや過剰な目標値と考えられる。今後、生産性まで考えて技量を評価する場合、固有角周波数の目標値は動作条件に基づいて、検討を進めていく必要がある。次に、非熟練オペレータの場合であるが、設定した各目標値に対して、どちらも大きく差異が生じていることが分かる。特に、固有角周波数 ω_n は、Table 2.2に示す瞬時中立操作と同程度の値を示している。すなわち、前節で述べた

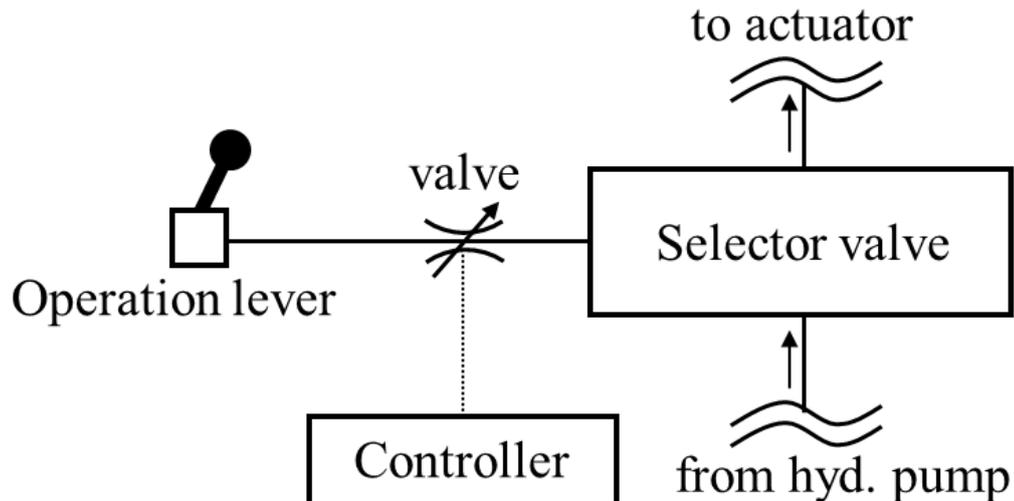


Fig. 2.13: Overview of modification.

通り，非熟練オペレータは操作の微調整がほとんどできておらず，減速，停止は機械特性にしたがった成り行き動作となっているといえる。このとき，油圧回路が瞬時に閉塞するため，アクチュエータを動かしていた作動油が寸断され，急激な減速が発生する。そのため，停止に対して速度の収束性も悪い。そこで，目標値 ζ_r ， ω_{nr} との差異が著しく表れている非熟練オペレータのブーム上げ減速動作に対して，評価指標に基づいた改善を図ると共に，指標の有効性を検証する。

動作の改善は教示などによるトレーニングではなく，レバー操作量を調整する機構によって，非熟練オペレータの操作を補正する方法で行う。一般的な油圧ショベルの操作レバーは油圧方式となっており，その圧力の大きさを操作量が決まるが，ショベルに搭載されている基本的な機器のみで操作量を変更することはできない。そこで，油圧ショベルには Fig. 2.13 に示すような操作量すなわち圧力を電气的に変更可能なバルブを予め改造により取り付けてある。改造の詳細については，本論文の主旨から外れるため省略する。このバルブを所望の挙動でアタッチメントが減速，停止するようにロックアップテーブルに基づき駆動させる。ここでロックアップテーブルは，アタッチメントの位置に応じて操作量を減少させる設定となっており，パラメータは試行錯誤的に決定している。

Fig. 2.14 に熟練オペレータと非熟練オペレータ、さらに同一非熟練オペレータの操作で指標に基づき動作改善を図った際の入出力データを示す。非熟練オペレータによる入力の大きさは、熟練オペレータと比較して大きい。また、0.6~0.7sec にかけて、急激な減速トルクが発生しており、急峻な減速操作を行ったことが分かる。また、それに伴い減速も早いことが確認でき、熟練者の出力挙動には程遠い。次に、このような動作となる非熟練オペレータに対して、アタッチメント合成重心で表現するシステムのパラメータを、目標値 ζ_r , ω_{nr} に近づくようにレバー操作量をバルブによって調整したところ、減速操作に急峻な動きは無くなり、出力は 0.4~0.6sec にかけて熟練者と差異あるものの、0.6sec 以降は概ね同じ挙動となることが分かる。このとき、システム減衰係数は $\zeta = 0.69$ と著しく改善し、熟練オペレータならびに目標値 ζ_r に非常に近い結果を得ることができた。 ω_n については、機械制約で減速特性を線形でしか設定できなかったため、減衰性とトレードオフとなり、目標値まで改善することはできなかった。しかしながら、アタッチメント合成重心の減速、停止は、熟練オペレータに迫る挙動であり、非熟練オペレータでも優れた動作が実現可能となることが確認された。

以上より、アタッチメントの動きを合成重心で表現し、そのシステムパラメータに基づいた評価指標により、ブーム上げ減速停止の制御工学的な技量評価と、不足した技量を底上げし、理想的な挙動への改善が可能であることが明らかとなった。

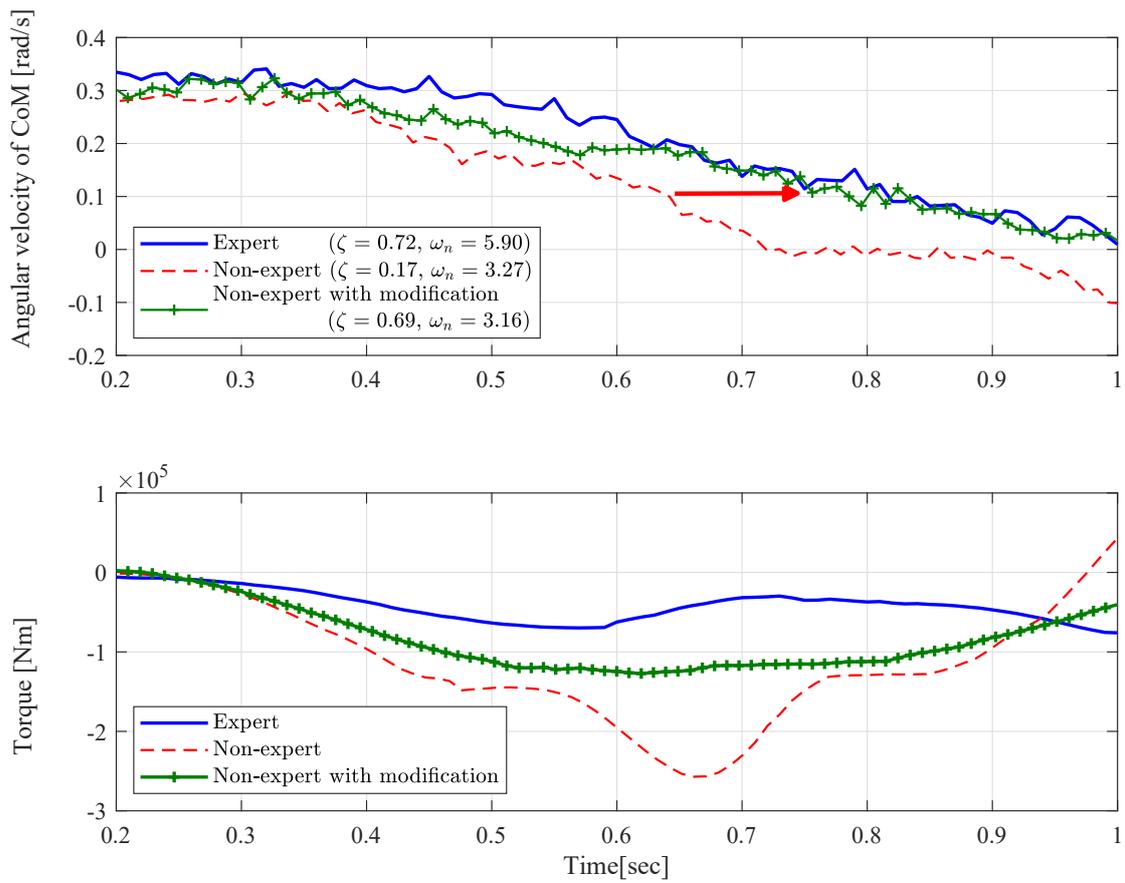


Fig. 2.14: Result of improved motion at boom-up deceleration.

2.5 結言

本章では、油圧ショベルのアタッチメントの合成重心を計算し、その合成重心の入出力に対して仮想的な低次線形システムとして表現し、そのシステムパラメータと操作技量との関係性を明確化することで、技量の評価指標を構築した。まず、油圧ショベルでブーム上げの瞬時最大量操作による加速動作を行い、アタッチメント合成重心の角速度を定常状態とした後、目標地点への減速および停止操作を行う。次に、非線形特性を有する油圧ショベルに対して、合成重心を扱うことで梁先端に質量 M が付いたモデルの回転運動と見なし、仮想的に線形システムと見なす。このとき、動作点に応じた操作の特徴が梁の特性として表現されるため、実験動作で得られたデータに対して、合成重心で表現したシステムのパラメータを推定する。ここで、システムは2次遅れ系、評価対象動作は減速停止域とし、システムパラメータの推定には遺伝的アルゴリズムを用いた。推定したパラメータには、各オペレータによる操作および動作の特徴が物理パラメータとして表れており、現象と傾向が一致することが明らかとなった。また、これらのパラメータを基に算出され、システム減衰係数 ζ と固有角周波数 ω_n で示される目標値への収束性と速応性に関する2つの指標は、減速停止における操作技量と定量的な関係があり、技量の高いオペレータは制御工学的な理想値や、機械の限界に近い値となることが確認された。さらに、これらの指標に基づき動作改善を図ることで、非熟練オペレータでも熟練オペレータに近い動作を実現できることが明らかとなった。

最後に、アタッチメントの動きを合成重心のシステムとして表現することで、技量が統合的に評価できると共に、その特性や出力で特徴を捉え、支援的な制御を行う際の一指標として活用することで、技量の乏しいオペレータに対して生産性の底上げが可能と考えられる。今後、提案した技量評価手法の他動作への適用を進める。また、アタッチメント合成重心を用いた支援制御系の構築を検討する。

第3章 アタッチメント合成重心速度に 基づく掘削支援制御

3.1 緒言

油圧ショベルにおける掘削作業は、最も基本的な作業であり、掘削性能の評価には「力強い」、「速く掘れる」、「止まらない」といった項目が挙げられる。これらは、油圧ショベルのエンジン出力や油圧ポンプの出力設定など、機器性能そのものに依存する部分は大きい。これらの制約の中で、より効率的な掘削を可能とするために、建設機械メーカーは日々研究、開発を行い、掘削性能の向上を目指している。しかし、非常に優れた機械であったとしても、操作オペレータが掘削中のアタッチメントの動きや土砂の状況を把握し、適切な操作を行うことができなければ、機械のパフォーマンスを最大限発揮することは難しく、作業の生産性を最大化することはできない。これは掘削作業に限らず、あらゆる作業動作において共通しており、操作オペレータの技量や経験、センスが大きく影響するが、それらの獲得には長い時間を要するため、入職間もなく、技量が乏しい操作オペレータにとっての課題である。したがって、このようなオペレータに対して、操作を支援することで生産性を高めるための施策が必要である。

このような課題に対して先行研究では、アタッチメントの軌跡追従制御などが提案されている [36]-[39]。これは、目標軌跡に沿ってアタッチメントを動作させるもので、オペレータの操作技量に関わらず、操作量を制御することで所望の動きを実現できるため、狙いの土量を掘削することや、設計通りの出来形が成形可能となる。しかし、予め目標軌跡を設定して

おかなければならないという課題もある。建設土木現場における作業では、非定常な場面が非常に多く、想定される条件となることは少ない。そのような場合、状況を認知、判断し、その結果に応じてオペレータが動作目標を決定してから操作を行うため、必ずしも設定した目標軌跡になるとは限らない。すなわち、常に目標が既知で、かつ更新することができなければ、実作業に適用することは難しい。また、任意の掘削深さを設定でき、その深さとなるように掘削する制御も提案されているが [40]、掘削負荷が大きい場合、その軌跡通りに掘削できない可能性がある。したがって、人を含んだ制御系で操作を支援するには、オペレータ操作に対して制約が大きい軌跡追従型の制御ではなく、操作の自由度を損なわない他の指標に基づいた支援制御である方が、実現場で適用し易く、非定常な現場に対して効果的と考える。

そこで、2章において着目した「アタッチメントの合成重心」を制御量として活用することを検討する。Fig. 3.1 は、熟練および非熟練オペレータの掘削時のアタッチメント先端軌跡を比較したものであるが、熟練オペレータの掘削軌跡には急な変動がなく、非常に滑らかであることが分かっている。また、このときのアタッチメント挙動を、オペレータの技量差が表現されたアタッチメント合成重心の速度として表現することで、Fig. 3.2 に示すように合成重心速度が概ね一定で推移する特徴があることも事前の実験により明らかとなっている。したがって、アタッチメント合成重心の速度に基づき、掘削作業を制御すれば、非熟練者でも熟練者のように滑らかで効率的な掘削作業が実現可能となると考えられる。

重心に関しては、溶接ロボットのような多リンク構造体の位置制御や [41]、2足歩行ロボットなどの転倒防止を目的とした制御 [42]-[45] が先行研究として行われている。しかし、人の操作が介在し、重心の動きに基づいて人の操作を支援する制御系が構築された例は著者の知る限りでは報告されていない。そこで、アタッチメント合成重心速度に基づきオペレータの操作を支援し、掘削中の合成重心速度を一定とする支援制御系を提案する。ここで支援制御とは、所望のダイナミクスを実現するために、制御によって算出された操作量がオペレータの操作に介入し、操作量が適宜調整されるものと定義する。まず、掘削作業を対象とし、掘

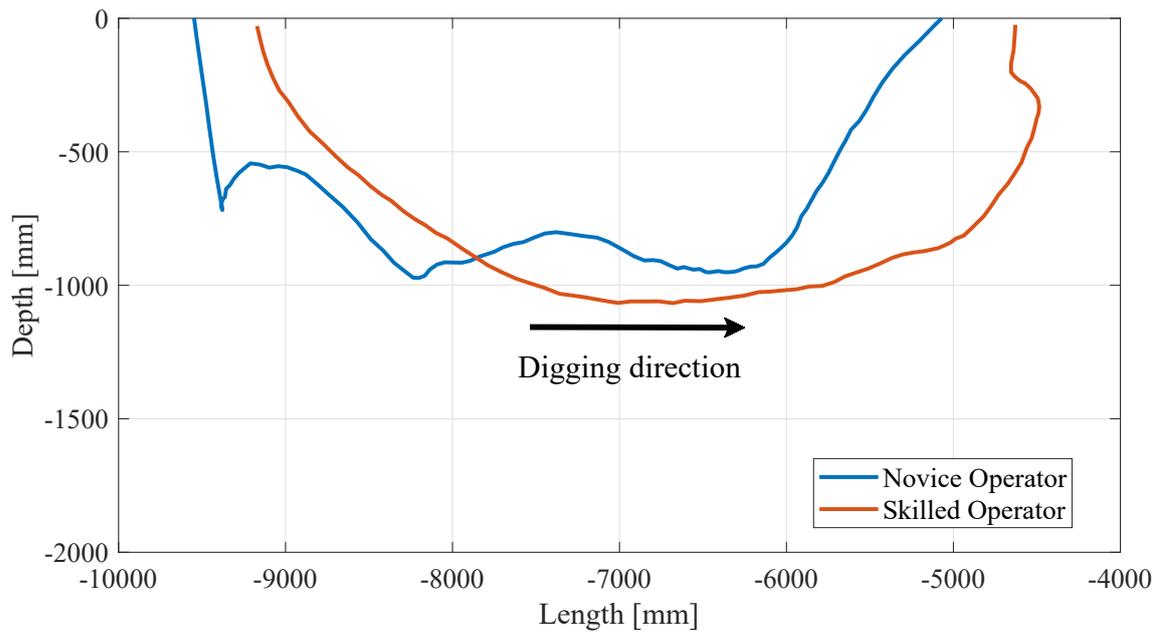


Fig. 3.1: Comparison of attachment tip trajectories during digging operation.

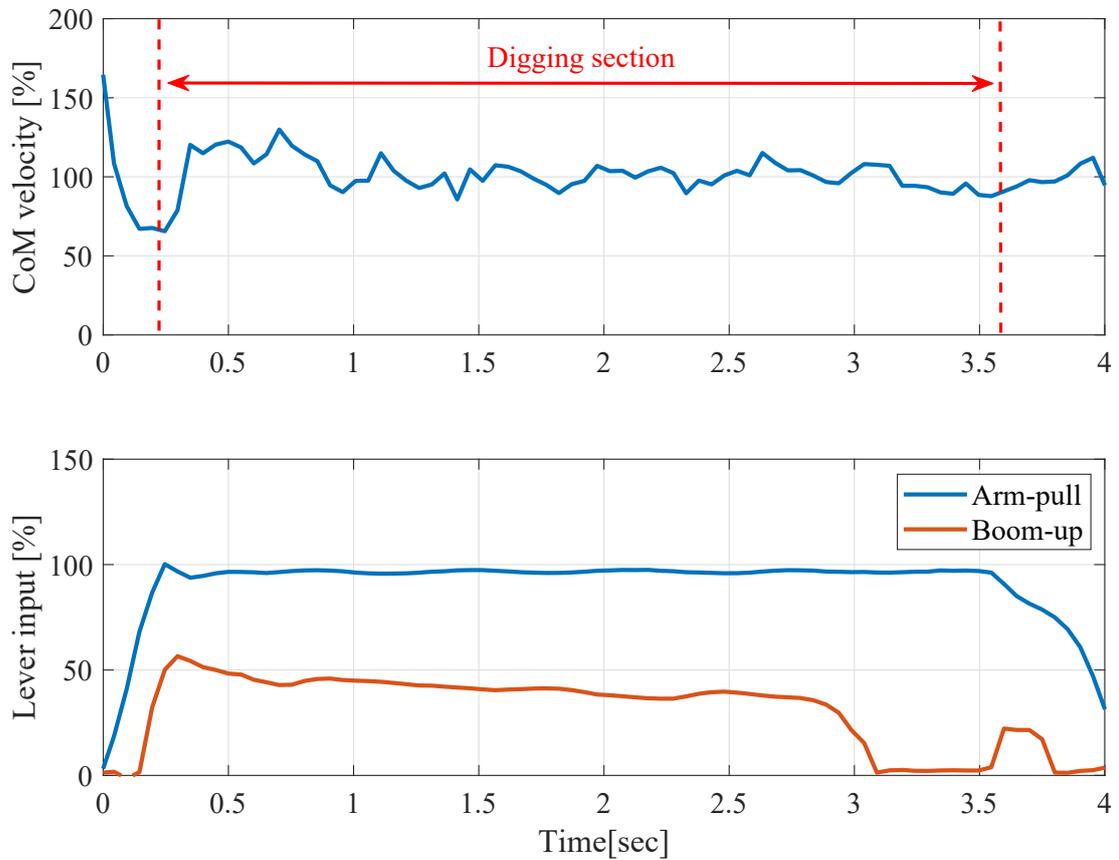


Fig. 3.2: A example of center-of-mass velocity during digging operation by a skilled operator.

削中のブーム上げ操作を制御入力、アタッチメント合成重心速度を出力とする制御系を構築する。次に、所望のダイナミクスを実現するために参照とするモデルを設計し、このモデルが有する動特性を実現するようにコントローラのパラメータを算出する。制御パラメータの算出は、Fictitious Reference Iterative Tuning 法 (FRIT) に基づき [46], 実験で得られた 1 組の入出力データから直接的に算出する。なお、FRIT 法に用いるデータは、レバー操作量から掘削と判断される部分のデータのみを抽出する。

本章では、まず、油圧ショベルの掘削作業を支援する制御系を構築する。次に、初期設定したコントローラゲインを適用し、初期掘削データを取得する。さらに、データ駆動型制御則に基づきコントローラのゲインを算出する。有効性については、油圧ショベルに搭載されているコントローラに提案手法ならびに各コントローラゲインを実装し、同じ非熟練者によるマニュアル操作、提案手法で比較、検証する。

3.2 油圧ショベルの掘削制御系の構築

一般的に、油圧ショベルのアタッチメントはブーム、アーム、バケットの 3 つで構成される。本章で対象とする掘削作業は、これら 3 つの要素を複合的に操作するものであり、なかでも、ブームおよびアームを積極的に動かして作業を行う。油圧ショベルは作業機械であるため、掘削作業は可能な限り早く遂行することが望ましい。そのため、主たる動作であるアーム引きの操作は通常最大量で維持される。このとき、土砂から受ける掘削抵抗が大きいと、操作量が不変でもアーム引きの速度が大きく低下する。これは、油圧ショベルが有する非線形特性に起因するものである。非線形性の詳細については付録 A を参照されたい。効率的な掘削作業とするには、Fig. 3.3 に示すように、ブーム上げを適応的に操作し、土砂から受ける抵抗を低減させることで、アーム引き速度を維持しなければならない。ここで、ブームを上げ過ぎるとバケットに土が入らなくなり、掘削一回当たりの生産性が低下することにも注意しなければならない。操作技量の低いオペレータの場合、機体および作業の状況を把握するこ

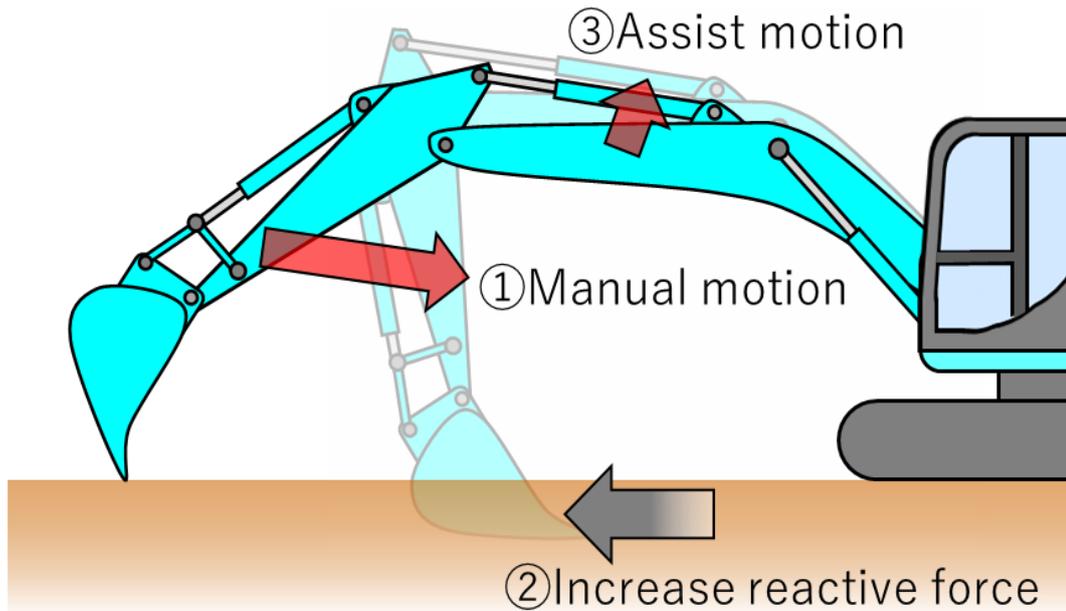


Fig. 3.3: Schematic of attachment motion at the digging operation.

とができないことに加え、操作そのものが煩雑であるため、効率的な動きとすることが難しい。そこで、掘削中の副動作であり、操作量の調整が必要なブーム上げ操作を制御入力とし、アタッチメント合成重心速度を出力とする制御系を構築する。

平地の掘削作業において、アタッチメント合成重心速度はアーム速度とブーム速度の2つが支配的であり、特にアームは水平手前方向に大きく動くため、合成重心速度への寄与が大きい。そのため、掘削中のアタッチメント合成重心速度に目標速度を設定し、これに追従するように制御を行うと、掘削抵抗が大きく、アーム引き速度が目標速度に対して小さい時のみ、不足したアタッチメント合成重心速度を満足するようにブーム上げ操作が入力され、ブームが作動するといった動きを実現できる。このとき、ブームが上昇することで、アタッチメントの土への貫入量が低下するため掘削抵抗は下がり、アーム引き速度が再度上昇する、というサイクルが常に働くため、アーム速度が保たれ、結果としてスムーズな掘削作業となる。したがって、熟練者のような優れた操作技量が無くとも、抵抗を低減させるブーム上げ操作を適応的に入力することが可能となり、掘削作業の効率低下を抑制することができる。

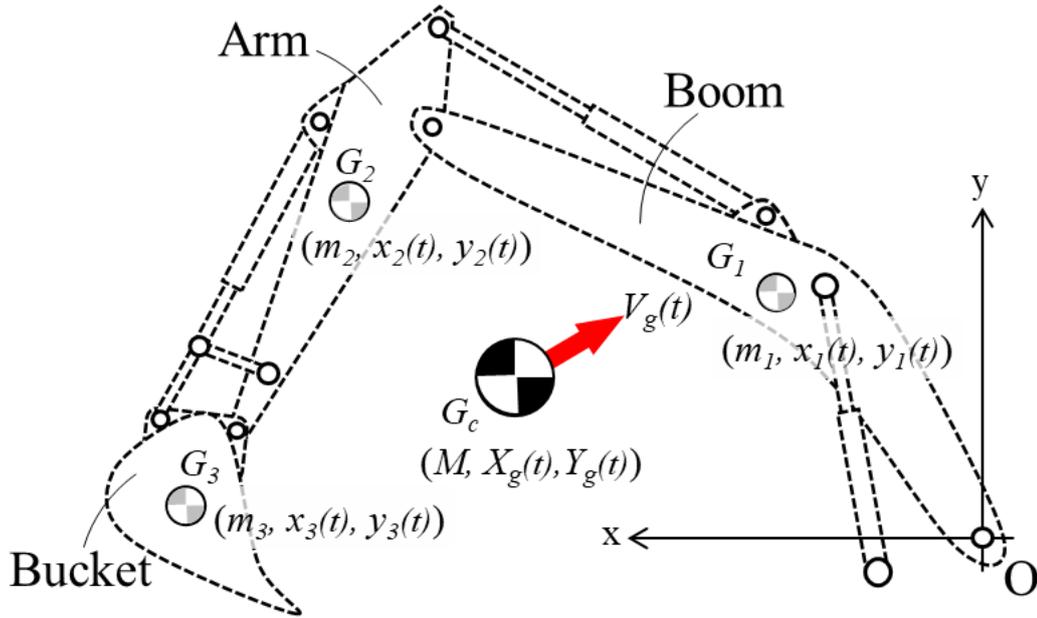


Fig. 3.4: Combined Center-of-Mass model of a hydraulic excavator for digging operation.

3.2.1 アタッチメント合成重心に基づく制御対象システム

3リンクで構成される油圧ショベルのアタッチメントにおいて、各リンクの重量や重心座標は Fig. 3.4 のように表される。原点 \$O\$ を基準に各要素の重心を以下の式で合成することで、合成重心座標を算出する [47]。

$$(X_g(t), Y_g(t)) = \left(\frac{\sum_{i=1}^3 m_i x_i(t)}{m_1 + m_2 + m_3}, \frac{\sum_{i=1}^3 m_i y_i(t)}{m_1 + m_2 + m_3} \right) \quad (3.1)$$

ここで、添え字 \$i\$ はアタッチメントの各リンクを表しており、1 はブーム、2 はアーム、3 はバケットを示す。また、\$m_i\$ は各リンクの質量、\$x_i(t)\$、\$y_i(t)\$ は \$x-y\$ 座標系における時刻 \$t\$ の各リンクの重心座標を示す。各リンクの質量 \$m_i\$ およびローカル重心座標は既知とし、重心座標 \$(x_i(t), y_i(t))\$ は計測により直接取得可能、もしくは他の計測値から算出可能とする。(3.1) 式より算出した合成重心座標を基に、以下の式でアタッチメントの合成重心速度を算出する。

$$V_g(t) = \sqrt{\frac{dX_g(t)}{dt}^2 + \frac{dY_g(t)}{dt}^2} \quad (3.2)$$

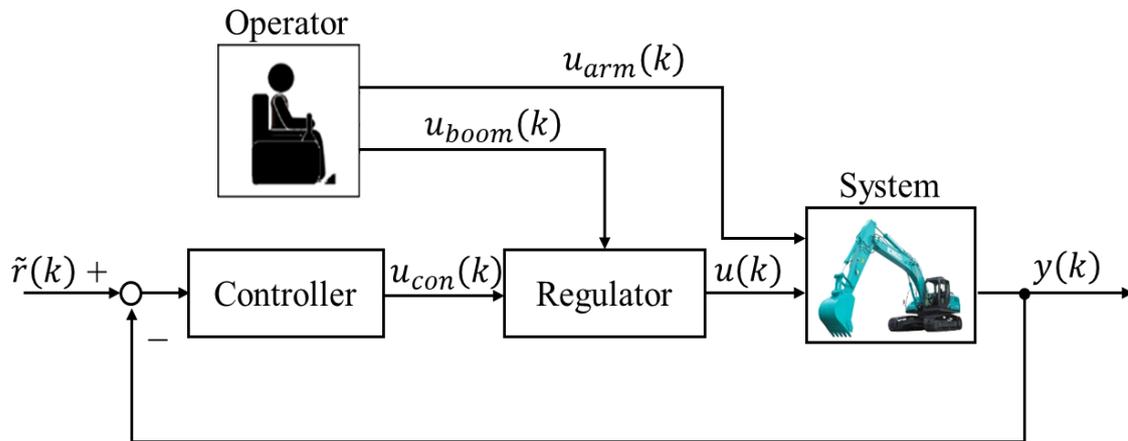


Fig. 3.5: Block diagram of closed-loop system included human operation based on combined CoM velocity for a hydraulic excavator.

本章では、この合成重心速度を制御量とし、一定とする掘削制御系を構築する。

3.2.2 合成重心速度に基づく操作支援制御系の構築

本章で構築する人の操作を含む制御系は、Fig. 3.5のブロック線図で示される。 $r(k)$ はアタッチメント合成重心速度の目標値、 $y(k)$ はアタッチメント合成重心速度、 $u_{arm}(k)$ はオペレータのアーム引き操作量、 $u_{boom}(k)$ はオペレータのブーム上げ操作量、 $u_{con}(k)$ はコントローラによって算出されるブーム上げ操作量、 $u(k)$ はショベルに入力されるブーム上げ操作量である。システム部は、各操作入力を受けて各油圧機器が作動し、アタッチメントが動く油圧ショベルとなっているが、モデル化が容易ではないことから、本章ではデータ駆動型制御則に基づきコントローラを設計するため、システムの特性情報は不要である。したがって、内部の詳細な機構や特性について、ここでは議論しない。また、提案法では非熟練オペレータの煩雑な操作によって発生することが多い、過剰な操作を抑制することを目的に、以下の式で操作入力 $u(k)$ を算出する。

$$u(k) = \min(u_{boom}(k), u_{con}(k)) \quad (3.3)$$

また、目標値 $r(k)$ は、Fig. 3.2 で示した通り、熟練オペレータによる掘削作業において、アタッチメント合成重心速度が一定となることが実験的に分かっているため、出力が 100% となる値を速度目標として設定する。

3.3 制御器の設計

油圧ショベルの動きは応答性が高いこともあり、アタッチメント自身が揺動し易く、掘削中の衝撃などによって振動も発生する。速度フィードバック制御の場合、コントローラに微分ゲインを設定していると、これらの振動が増幅され、所望の動作を実現できない可能性がある。そのため、提案法では以下に示す PI コントローラを用いる。

$$\Delta u_{con}(k) = K_p \Delta e(k) + K_i e(k) \quad (3.4)$$

$$e(k) := r(k) - y(k) \quad (3.5)$$

ここで、 $e(k)$ は制御誤差を表しており、目標値 $r(k)$ とシステム出力 $y(k)$ との差分、 K_p 、 K_i はそれぞれ比例ゲイン、積分ゲインを示す。また、 Δ は差分演算子であり、 $\Delta := 1 - z^{-1}$ で定義される。

3.3.1 参照モデルの設計

対象となる制御系において、所望の動特性を有する出力を実現するため、閉ループ特性を参照モデル $G_m(z^{-1})$ として設計する [48]。参照モデル $G_m(z^{-1})$ の設計方法については、付録 B を参照されたい。本章では、サンプリング時間を $T_s = 0.01[\text{sec}]$ として、油圧ショベルが有する機械特性を考慮し、出力の立ち上がり特性に関するパラメータ $\sigma = 0.25$ 、減衰特性に関するパラメータ $\delta = 0$ で参照モデルを設計した。

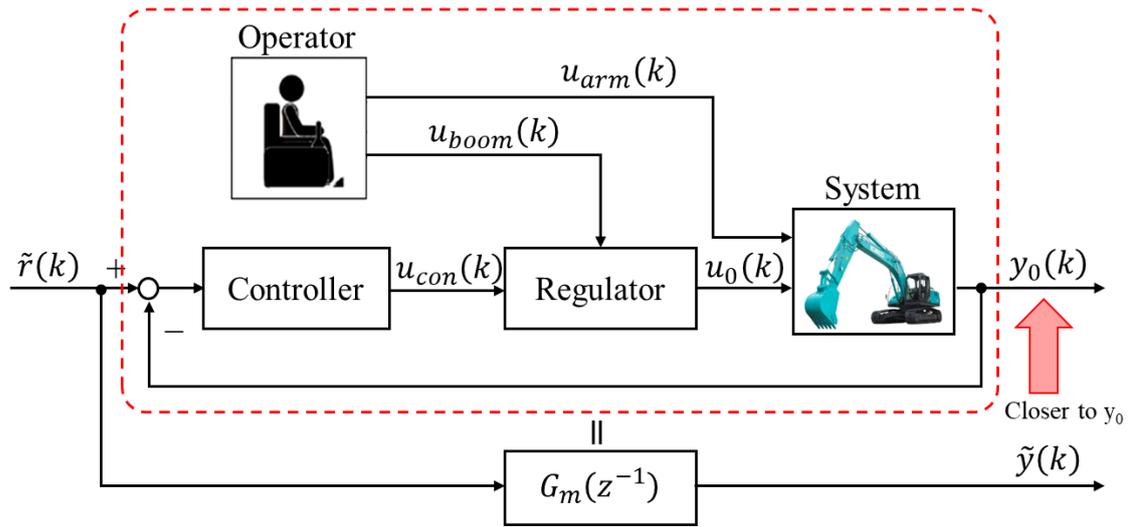


Fig. 3.6: Block diagram that the FRIT method was applied to a system including human operation.

3.3.2 データ駆動型制御に基づく制御パラメータの算出法

本章では，コントローラゲインの設計にFRIT法を用いる [46]。FRIT法は，対象システム
の特性が未知であっても，操業データから直接的にコントローラのゲインを得ることが出来
るため，非常に有効な手法である，ただし，線形システムに対して適用できる手法であり，非
線形特性を有する油圧ショベルには適していない。そこで，掘削中の負荷変動が比較的小さ
い条件に作業を限定し，システムを線形と見なすことで，本手法を適用する。Fig. 3.6にFRIT
法に基づくコントローラ設計のブロック線図を示す。ここで， $u_0(k)$ ， $y_0(k)$ は掘削作業におけ
る1組の入出力データであり，それぞれ掘削時のブーム上げ操作量，アタッチメント合成重
心速度を示している。(3.4)式で示す制御則を式変形し，疑似参照入力 $\tilde{r}(k)$ は以下の式で表す
ことができる。

$$\tilde{r}(k) = y(k) + \frac{1}{K_p + K_i} \Delta u(k) + \frac{K_p}{K_p + K_i} (\tilde{r}(k-1) - y(k-1)) \quad (3.6)$$

そして，上式に初期データ $u_0(k)$ ， $y_0(k)$ を入力し，疑似参照入力 $\tilde{r}(k)$ を得る。3.3.1で設計し
た参照モデル $G_m(z^{-1})$ にこの疑似参照入力 $\tilde{r}(k)$ を入力し，以下に示す参照モデル出力 $\tilde{y}(k)$ を

Table 3.1: Condition of parameter identification used Genetic Algorithm.

Gene of individual	K_p, K_i
Number of individual	$N = 200$
Mutation probability	$\alpha = 30\%$
Number of generation	$G = 200$

得る。

$$\tilde{y}(k) = -p_1\tilde{y}(k-1) - p_2\tilde{y}(k-2) + P(1)\tilde{r}(k-d-1) \quad (3.7)$$

ここで、 d はむだ時間であり、既知なものとする。さらに、コントローラのゲインを以下の評価関数 J に基づき調整する。

$$\epsilon(k) = (y_0(k) - \tilde{y}(k))^2 \quad (3.8)$$

$$J = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \epsilon(k) \quad (3.9)$$

ここで、 N は対象データの数を表す。参照モデル出力 $\tilde{y}(k)$ が初期データ $y_0(k)$ に近づくようにコントローラのゲインを調整し、 J が最小となったとき、閉ループの伝達特性が参照モデル $G_m(z^{-1})$ の特性に相当したことを意味し、所望の動特性を実現するコントローラゲインが得られたことになる。また、コントローラゲインを適用する油圧ショベルには入力値に制約が存在するため、解の探索には、その範囲が任意に設定可能な遺伝的アルゴリズムを用いた。遺伝的アルゴリズムを用いる計算方法については、2章で示した方法を用いており、ここでは詳細を省略する。探索条件は Table3.1 の通りである。

3.4 実機検証

アタッチメント合成重心速度に基づく掘削操作支援制御の有効性検証を行う。検証条件を以下に示す。

3.4.1 検証条件

初期姿勢) アームシリンダは最縮，バケット先端はアームの延長上にある状態とし，ブームはバケット先端が接地するまで降下 (Fig. 3.7)。

対象動作) 初期姿勢からアームが鉛直となるまで掘削 (Fig. 3.7)。

操作方法) 提案法のみ，アーム引き，ブーム上げ操作を開始と共に最大量で入力し，維持 (Fig. 3.8)。

提案法において，アーム引き操作だけでなく，ブーム上げ操作入力も最大量とするのは，オペレータによる操作の調整が無くなるため，実験結果の再現性が高くなることと，(3.3)式によって，コントローラで算出される操作量 $u_{con}(k)$ が必ず選択されるため，提案法の有効性のみを評価することが可能となるためである。また，作業終了ポイントをアーム鉛直姿勢としたのは。アタッチメントの構造上，ブーム先端を中心にアームが回転運動するため，掘削初期からアーム鉛直姿勢にかけてアタッチメントが最も土に食い込み，掘削抵抗の変化が生じ易い。したがって，提案法で改善したい課題の評価に最も適した条件として設定している。実験には，2章で述べた操作量を電氣的に調整可能な油圧バルブ搭載の改造が施してある 20ton 級の油圧ショベル (コベルコ建機株式会社製 SK200-9) を用いた。

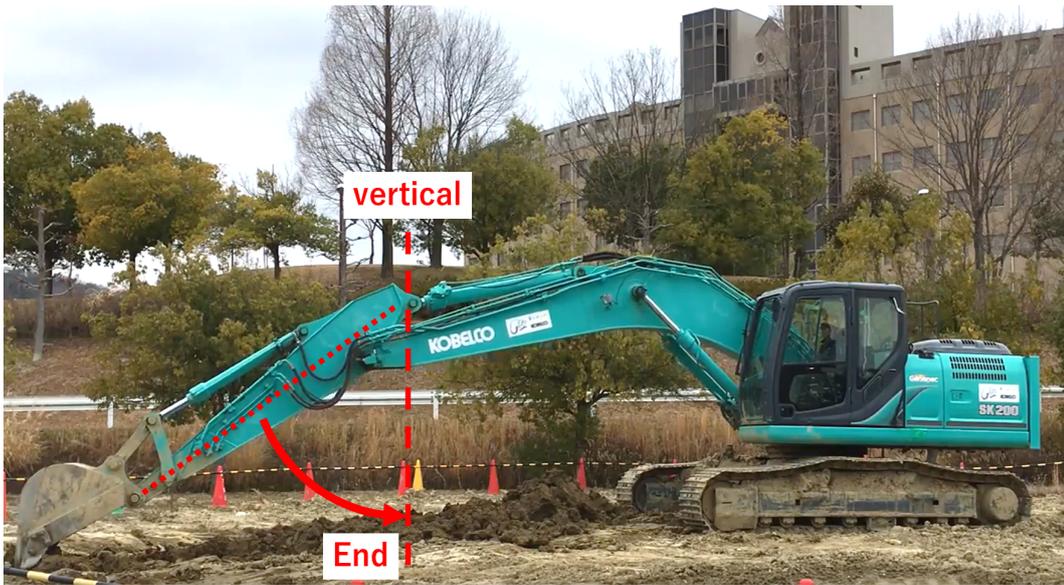


Fig. 3.7: Attachment posture at the experimet.

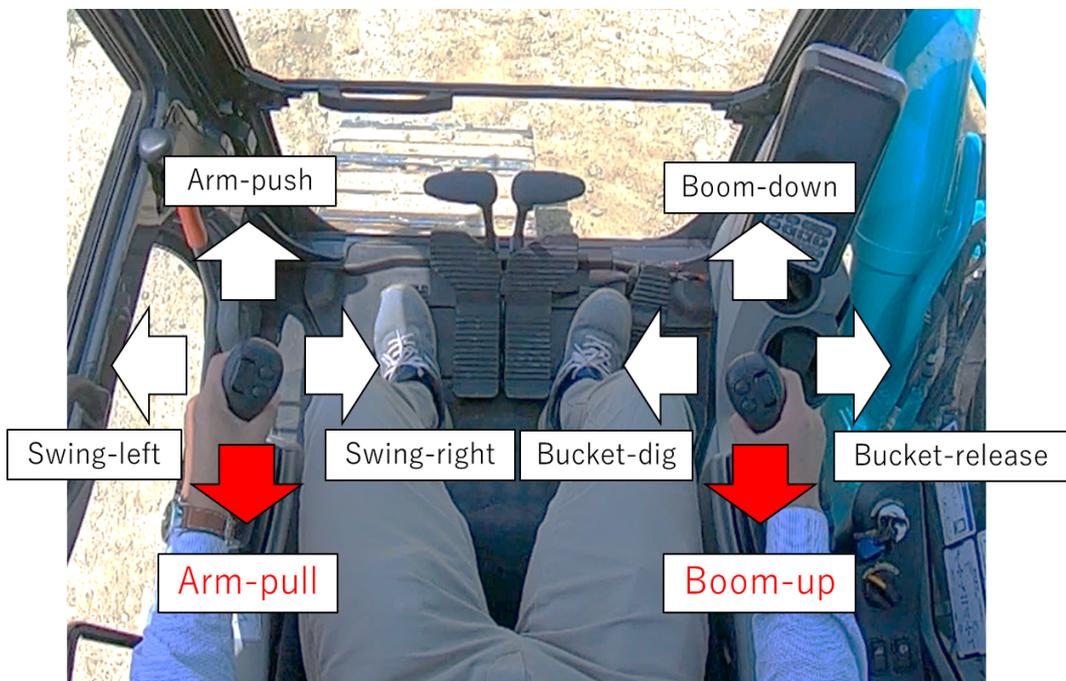


Fig. 3.8: Lever layout and operations at the experiment.

3.4.2 マニュアル操作による結果

非熟練者がマニュアル操作で掘削した結果の一例を Fig. 3.9 に示す。ここで、各操作レバーによる入力（油圧ショベルにおけるシステム上の最大値）と出力であるアタッチメント合成重心速度は目標値をそれぞれ 100% として正規化している。また、以降の油圧ショベルの入出力に関わる値も全て同様の処理を施している。

Fig. 3.9 より、出力が振動的な挙動を示しており、アタッチメントが加減速を繰り返していることが確認できる。これは、アーム引き操作量が定常な状態において、出力変動がブーム上げ操作の変化に連動していることから、ブーム上げ操作が振動的な出力の原因といえる。さらに、Fig. 3.2 に示した熟練オペレータの結果と比較すると、その入出力挙動の差は明らかである。特に、非熟練オペレータは 1.4sec 付近で最も過剰な操作となっており、アタッチメント先端が土に食い込む掘削初期において、状態を適切にフィードバックし、操作に反映することができていない。また、このようにブームが振動しながら動作すると、Fig. 3.1 に示した非熟練者の掘削軌跡のように、アタッチメント先端が上下するため綺麗な弧を描く掘削軌跡とならないため、掘削面は凹凸形状となり易く、土を残したい部分が崩落したり、安定した掘削土量の確保が難しくなる。したがって、ブーム上げ操作を支援し、過剰な操作を抑制することができれば、非熟練者であっても、熟練者のような掘削作業を実現できると考えられる。そこで、非熟練者の掘削作業に対して提案法を適用し、その有効性を検証した。

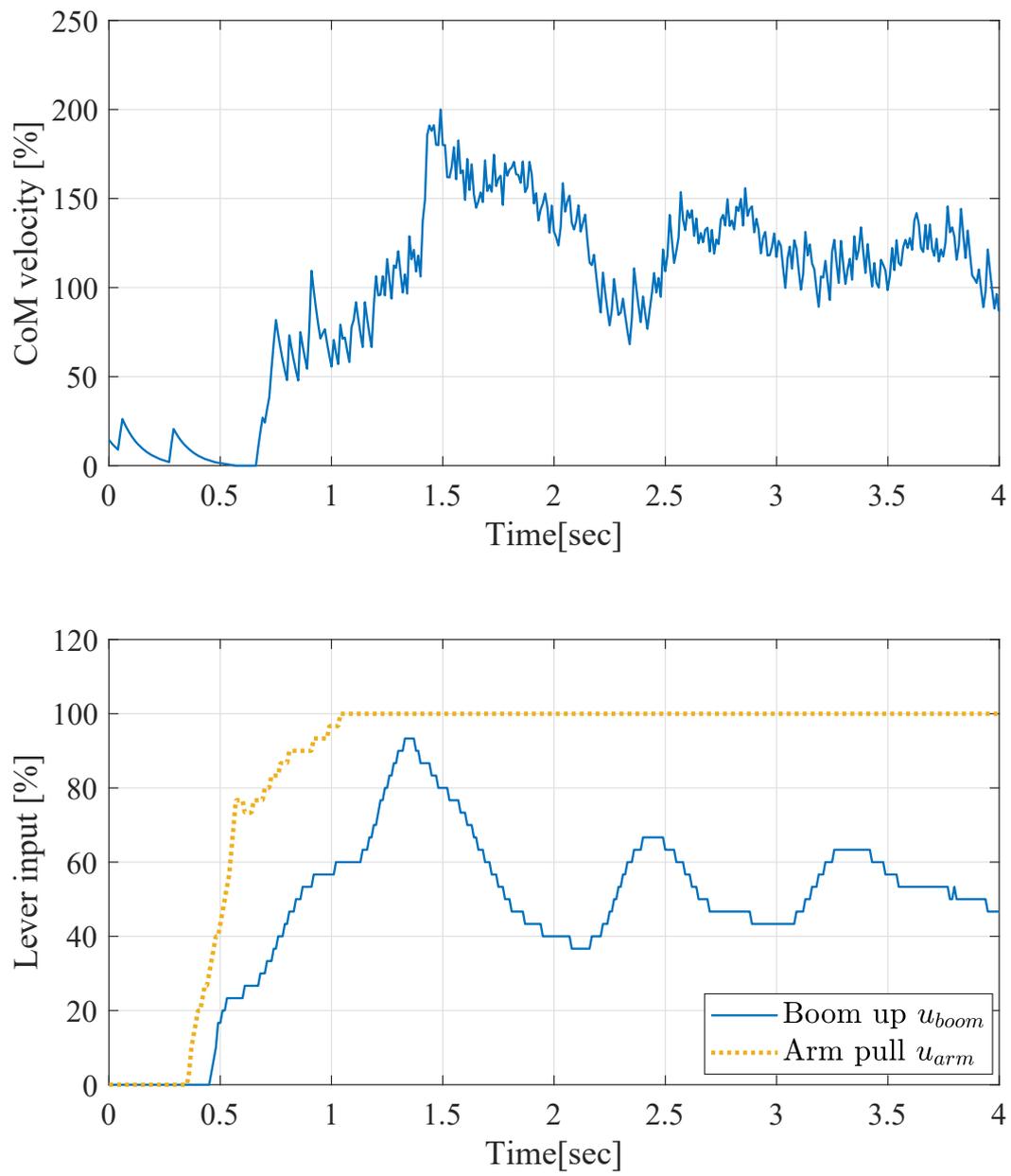


Fig. 3.9: Result of digging work by manual operation of a novice-operator.

3.4.3 提案法による結果

Fig. 3.10 に提案法による掘削作業の結果を示す。ここで、コントローラに適用したゲインは、 $K_p = 0.08$, $K_i = 0.05$ であり、掘削作業として成立するように試行錯誤的に決定している。オペレータは Fig. 3.9 と同じ非熟練者である。

Fig. 3.10 より、掘削初期の過剰な操作、そしてオーバーシュートが解消されていることが分かる。ブーム上げ操作はコントローラの計算値 $u_{con}(k)$ が選択されており、非熟練オペレータの手動操作とは異なる緩やかな変化によって、出力挙動の改善が実現されている。また、1.5sec 以降においてはアタッチメント合成重心速度が目標値に概ね追従していることが分かる。また、ブーム上げ操作は出力に応じて変化していることが確認でき、適応的に掘削抵抗を低減しながら、スムーズな掘削作業が行えていることを表している。この結果より、主動作と副動作の組み合わせで表現される作業を、アタッチメントの合成重心速度を指標に制御することで、副動作が適切に調整され、スムーズな作業を実現できることが分かった。さらに、試行錯誤的なコントローラのゲイン調整では制御性能が十分ではないため、付加的に FRIT 法を用いて掘削初期の速度の立ち上がり特性を改善するコントローラゲインを算出し、より速く、効率的な掘削作業を実現する。FRIT 法には、Fig. 3.10 に示す結果を初期データ $(u_0(k), y_0(k))$ として用いた。

Fig. 3.11 に提案法に FRIT 法を適用した結果を示す。ここで、FRIT 法によって算出し、適用したコントローラゲインは $K_p = 0.21$, $K_i = 0.007$ である。まず、試行錯誤的に決定したゲインと比較して、比例ゲイン K_p は大きく、積分ゲイン K_i は小さくなっており、追従性をある程度保ちつつも、より応答性が高くなる設定となっていることが分かる。その結果、ブーム上げ操作は Fig. 3.10 と比較して、初期の立ち上がりが急峻となっており、アタッチメント合成重心速度の応答性も改善している。その立ち上がり特性は、所望の動特性を有する参照モデル $G_m(z^{-1})$ の出力に概ね追従しており、狙いの出力特性が得られていることが分かる。さらに、ブーム上げ操作は掘削初期に約 60%程度まで増加した後、やや低下して推移する挙動

を示した。これは、Fig. 3.2 に示した熟練オペレータの操作に近い挙動であり、提案法が熟練者のような操作入力を生成していることが確認された。定常状態においては、ブーム上げ操作の応答性の改善がみられるが、出力に大きな違いはなかった。また、レバー入力は微小な振動波形となっているものの、体感上は全く問題がなかったことから、機体挙動への影響はないものとする。

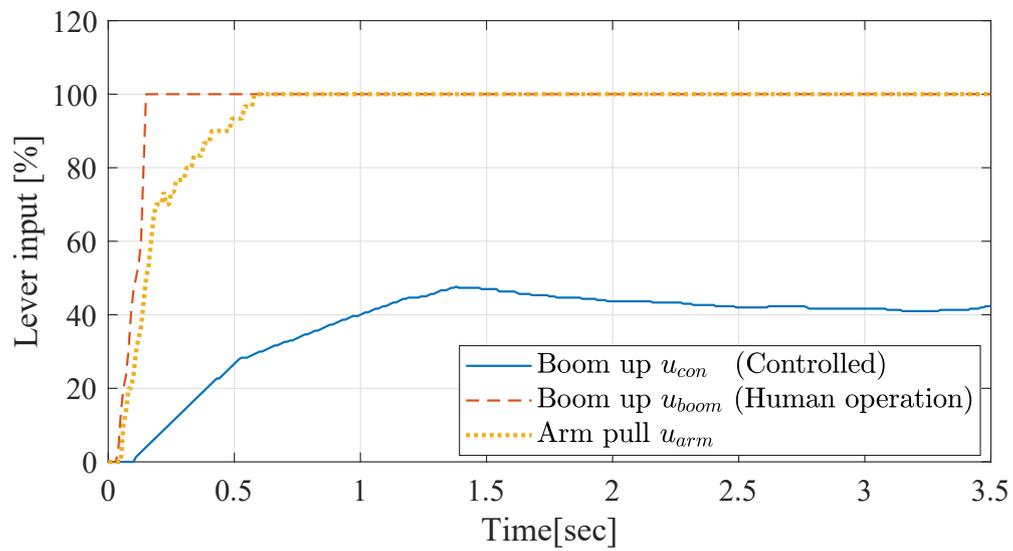
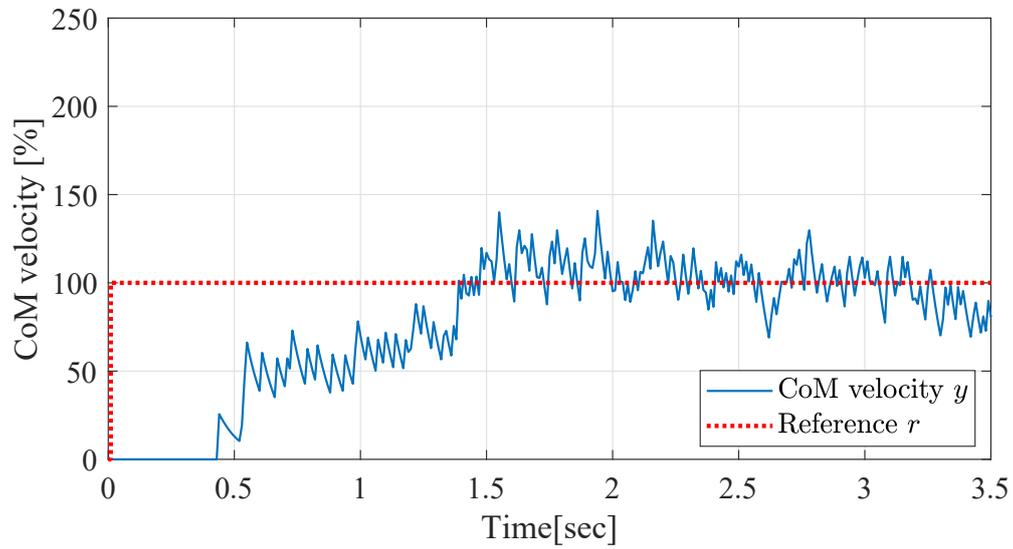


Fig. 3.10: Result of digging work by a novice-operator with proposed method.

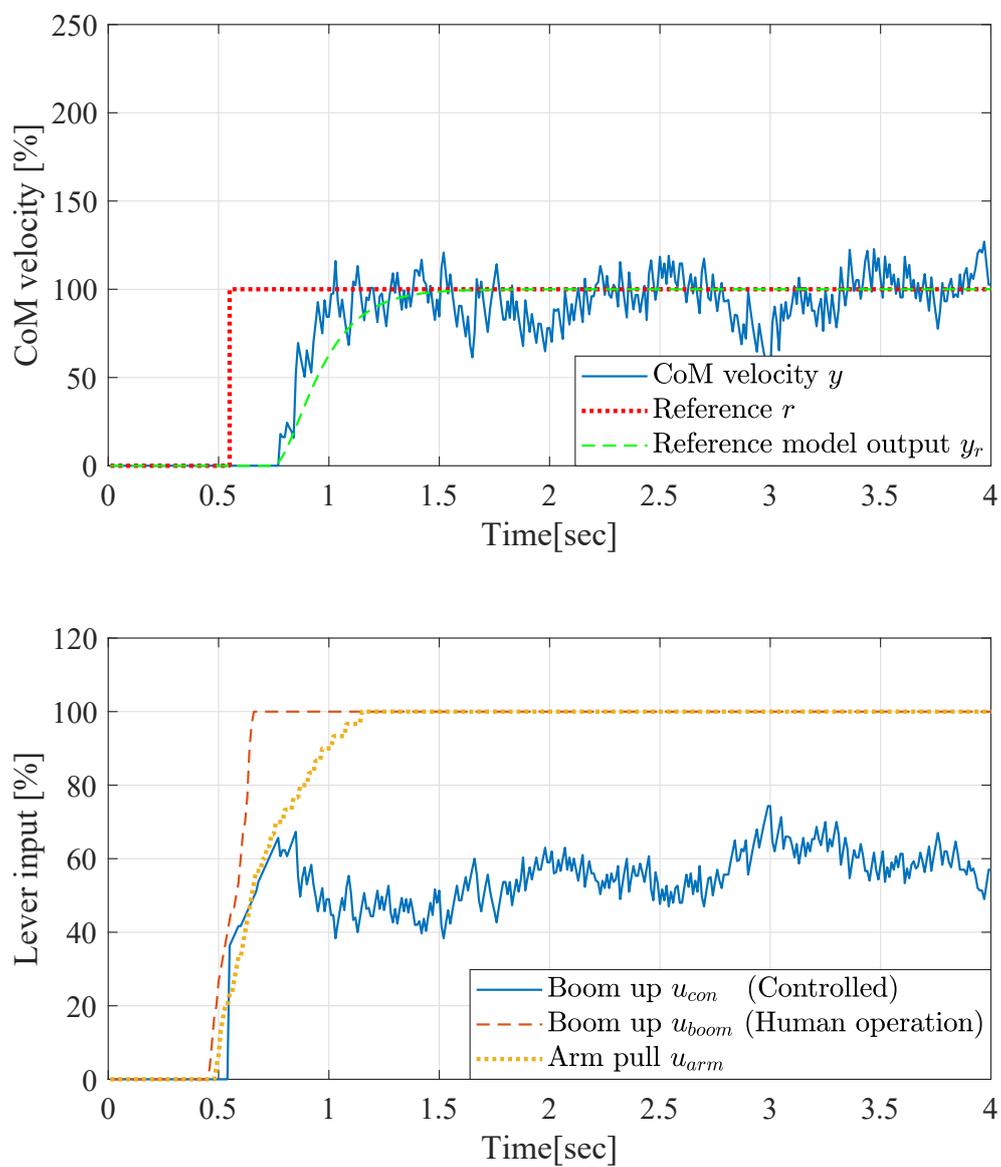


Fig. 3.11: Result of digging work by a novice-operator with proposed method using the FRIT method.

3.4.4 マニュアル操作とアシスト制御適用操作の考察, 比較

Fig. 3.9 に示す非熟練オペレータによるマニュアル操作の結果において, 入力のリバー操作と, 出力のアタッチメント合成重心速度に着目すると, 概ね同じタイミングで振動していることが分かる。例えば, 1.3~1.4sec では速度がオーバーシュートしてから操作入力を下げっており, 2.2sec 付近では目標速度を下回ってから操作入力を上げていることが確認できる。これは, オペレータが現在の機体速度に基づいて, 目標速度に追従させるための操作を行っているためであり, 機体に含まれるむだ時間や動特性を考慮した操作ができていないものと考えられる。そのため, 操作に対して遅れて応答してきた出力によって振動的な挙動となり, 目標速度への追従が悪くなっていると推察される。また, 非熟練オペレータがこのような操作となるもう一つの理由として, 複合操作におけるタスク達成ハードルの高さが影響していると考えられる。これは, 複合タスクでかつ速度が速い作業の場合, 技量が乏しいオペレータは操作の精度が低下することが原因である [49]-[51]。一方で, 熟練オペレータは, 機体の動きや音, 振動など様々な情報から, 長年培ってきた経験や感覚を基にこれから発生し得るアタッチメント速度の変化, すなわちシステムの動特性を予測し, 適切な操作を行う手動制御系であると推察される。このような考え方は, 人をコントローラと見なした研究としてこれまでに多く実施されている [52]-[54]。例えば, Fig. 3.12 に示すように人を非線形コントローラと見なし, 稼働状態に応じてその特性の変化を評価した研究がある [55, 56]。この研究では, 油圧ショベルの旋回を対象作業として, 操作の調整が必要な減速停止において, コントローラのゲインを推定し, 熟練オペレータと非熟練オペレータで比較を行っている。非熟練オペレータの場合, 比例ゲイン K_p が非常に強く表れ, 積分ゲイン K_i および微分ゲイン K_d は変わらない, もしくは低下するのに対して, 熟練オペレータは, その逆の傾向となることが明らかとなっている。制御工学において, 比例動作は「現在」, 積分動作は「過去」, そして微分動作は「未来」の情報に基づいた動作に対応付けられ [57], 熟練オペレータは過去の情報や動向から予見した操作である一方で, 非熟練オペレータは現在の情報に基づいた操作であると

いう本章の結果と一致している。したがって、非熟練オペレータが優れた動作を実現するには、状態を予見して、操作する能力を補う必要がある。ここで、Fig. 3.11 に示す FRIT 法を適用した提案法の結果に着目すると、マニュアル操作の特徴とは異なり、出力が目標値に追従する約 0.2sec 前にブーム上げ操作がピークを向かえており、過去の情報に基づく積分動作によって予見操作が成されていると考えられる。その結果、非熟練オペレータによる操作でもオーバーシュートや振動のない所望の出力を得ることができる。また、制御系のサンプリング時間も寄与していると考えられる。人間は操作対象物の動きなど、何らかの情報を認識するまでにおおよそ 0.2sec かかると言われており [58]、反応後から操作を行うまでにも僅かではあるが時間が必要である。油圧ショベルの操作において、仮に後者の時間がゼロであったとしても、機体情報を取得してから操作を行うまでに 0.2sec の遅れは発生するため、安定した動作を実現するには、そのむだ時間を補償できる操作を行わなければならない。非熟練オペレータにはその補償が難しいが、提案法の制御周期が人の反応時間より十分短いため、人の反応遅れに伴う出力影響をキャンセルできたものと推察される。したがって、非熟練オペレータの特徴であった比例動作重視の判断と煩雑な操作を、提案法に置き換えることで予見操作へと変えることができ、熟練者のようなスムーズな掘削動作を実現することができたものとする。また、本実験では効果を検証することができなかったが、複合動作における操作が提案法によって支援されることで、複合タスクのハードルも下がり、作業精度が向上することも十分に期待できる。

次に、提案法を適用したことによる生産性への効果を比較、検証する。提案法に FRIT 法を適用した結果の掘削時間は、マニュアル操作の結果と比較して、約 0.5sec の短縮効果が確認された。これは、提案法によって所望の立ち上がり特性が実現され、掘削初期の速度上昇のもたつきが改善したことで、掘削作業の主動作であるアーム引き速度の低下を抑制できたためと考えられる。一般的な掘削時間は、作業条件や機械によって異なるため一概には言えないが、20ton 級の油圧ショベルにおいて、非熟練者の掘削時間が 5sec 程度であるとする、

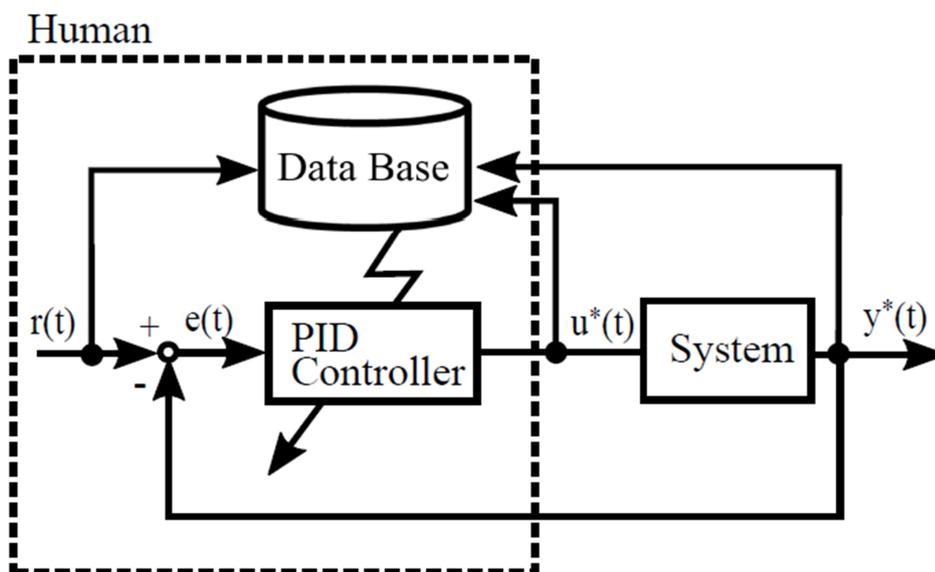


Fig. 3.12: Architecture of Human Operation[56].

おおよそ 10%の作業時間の削減に寄与すると考えることができる。次に、掘削中の油圧ポンプの消費動力を算出し、比較を行った。消費動力 W_p の算出については付録 A を参照されたい。Fig. 3.13 にその結果を示す。ここで、消費動力 W_p はマニュアル操作で掘削中の最大消費動力を 100%として正規化している。まず、掘削初期区間である 0.5~1.5sec において、消費動力に明確な差が表れていることが分かる。FRIT 法を適用した提案法の結果は、マニュアル操作の結果と比較して、掘削全体で約 5%の消費動力の低減が確認された。また、0.5~1.5sec 区間だけで比較すると約 25%の低減が認められた。非熟練オペレータのマニュアル操作では、掘削開始と共にアームが土砂へと食い込むことで発生する高い掘削抵抗を低減できていないため、油圧ショベルが作業を行うために必要な動力が高いが、提案法を適用することで、掘削初期の掘削抵抗が低減されるため、余計な消費動力が削減されたものと考えられる。なお、消費動力は油圧ショベルに搭載されているエンジンなどの動力源に作用するため、燃料消費量の削減に直結する。一方で、1.5sec 以降における効果は約 1%低減であり、明確な差は見られなかった。これは、土を掘り進める仕事に対して最低必要な動力が、油圧ショベルで設定されている馬力を超えたため、操作方法による差が表れなかったものと推察される。

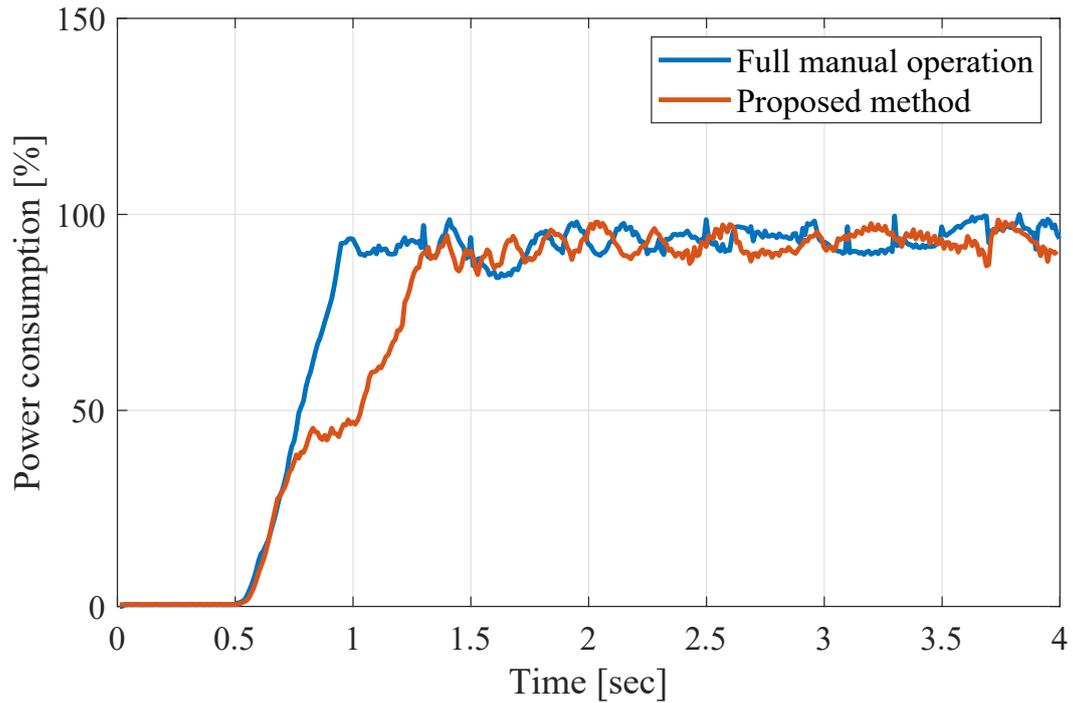


Fig. 3.13: Comparison of power consumption for digging operation by a novice operator.

以上の結果から、操作技量が低いオペレータに対して、提案法を適用することで、掘削動作がスムーズとなることに加え、作業時間が短縮されることが明らかとなった。また、効率的な掘削作業となることで、消費エネルギーの削減にも大きく寄与することが分かり、生産性と省エネの両者を実現するための有効な手法であることが確認された。

3.5 結言

本章では、オペレータの操作が介在する油圧ショベルにおいて、アタッチメントの合成重心速度に基づき掘削作業中のブーム上げ操作量が調整される制御系を提案し、実機検証にて、その有効性を検証した。油圧ショベルは機器特性や馬力制限の影響で、負荷条件に起因する非線形性を有するため、掘削中に土砂から受ける抵抗の大きさによって、作業速度が変化する。そのため、掘削速度を維持した効率的な作業を実現するには、抵抗を適応的に低減しなければならないが、非熟練なオペレータの場合、機械の状態を適切に把握し、操作することが容易ではない。そこで、掘削中の抵抗低減動作の一つであるブーム上げの操作を、アタッチメントの合成重心速度に基づき支援する制御系を構築した。掘削作業において、土砂から受ける掘削抵抗の増大により、アーム引き速度すなわち合成重心速度が低下した際、目標速度に追従するために、負荷低減動作であるブーム上げの操作が制御によって調整される。したがって、掘削中の状態把握能力が乏しくても、熟練オペレータのようなスムーズで速度を維持した掘削が実現可能となり、実機検証においても、その有効性を確認した。

さらに、非線形性を有するためシステム特性の把握が難しい油圧ショベルであるが、負荷変動が小さく、非線形性の比較的小さい条件に作業条件を限定することで、システム特性が未知であってもコントローラのゲインを1組の実験データからチューニングするFRIT法を適用し、生産性に寄与する速い立ち上がりとなる所望の動特性を実現できることが明らかとなった。また、掘削時間による評価では、同一オペレータの搭乗において、掘削時間を約0.5sec短縮し、掘削中の消費動力が約5%低減されることを実機検証により確認した。したがって、作業時間短縮による生産性向上と、動力低減による省エネルギー化の両者の実現が可能となる。

第4章 油圧ショベルのシステム変動に 対応した掘削支援制御系の設計

4.1 緒言

油圧ショベルは油圧機器特性ならびに機構に起因してアタッチメント動作に非線形性を有している。様々な作業において常に安定した生産性を得るということは、この非線形性に対応するということであり、操作技量の高い熟練オペレータは非常に優れた非線形コントローラといえる。そのため、作業中にシステム特性が変化しても、適宜状態に応じた操作によって、安定した作業と高い生産性を実現できる。一方で、技量の低い非熟練なオペレータは、非線形性に対応することが難しく、いち早く熟練オペレータのような操作や作業を獲得するには、非線形性に対応した制御によって、操作を支援する必要がある。このような非線形システムに対して検討されている支援的な制御の多くは、3章で紹介した軌跡制御であるが [36]-[39]、予め動作軌跡を設定する必要がある。仮に、軌跡が定められたとしても、負荷が高いと軌跡を実現できない可能性がある。そのような場合を想定し、動作軌跡上の障害物を押しのける制御の研究も成されている [59]。これは、サーボシステムとモデル予測制御の組み合わせにより、未知物体を押しのけるだけの力を入力加算により実現し、所望の軌跡を実現するというものである。しかしながら、現実的に考えて、押しつけ力のために余分なエネルギーを消費することから、効率的な作業とは言い難い。また、油圧ショベルの入力、すなわち力にも限界があり、押しつけられない可能性がある。一方、著者が提案した掘削制御では、このような場面において負荷増加を回避するように掘削が行われるため、効率的であると考えるが、線形

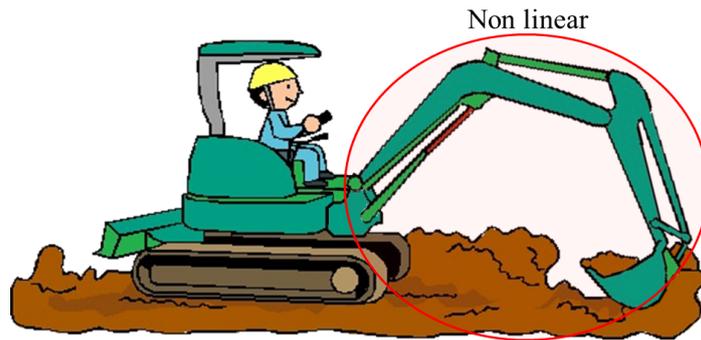


Fig. 4.1: Nonlinearity of attachment motion at the excavation work.

コントローラによる制御であったため、負荷変動に対して柔軟に対応することが難しかった。そこで、本章では油圧ショベルの掘削を対象作業とし、掘削中の非線形性に対応する制御系を2つ提案する。1つは、掘削中の出力変動を、仮想的な外乱入力によるシステムの切り替わりと見なし、線形コントローラも切り替えることで制御を行う方法である。これは、データ駆動型制御則に基づき、切り替わり後のシステムに対応したコントローラのゲインをオフラインで算出するものである。コントローラの切り替え以外は、一般的な線形コントローラであるため、実装が容易である。ただし、システム特性の変化が想定と大きく異なる場合、出力補償が難しくなる。そこで、2つ目の手法として、データベース駆動型制御に基づく掘削制御を提案する。これは、データベース内に格納されている情報と、機械の稼働情報（動作点）を基にコントローラのゲインを逐次更新し、局所線形コントローラとして適用することで、非線形システムに対応するものである [60]。本章では、システム変動に対応するこれら2つの制御手法を適用したアタッチメント合成重心速度に基づく掘削制御について述べる。

前者は、まず、掘削中のアタッチメント合成重心速度が定常な状態において、システム変動に伴うアタッチメント合成重心速度の変化を仮想的な外乱入力（疑似外生信号）によるものと見なす。次に、1組の掘削データから疑似外生信号を計算し、データ駆動型制御則に基づきコントローラのゲインを算出する。さらに、得られたコントローラゲインをシミュレーショ

ンおよび油圧ショベルの掘削作業に適用し、その有効性を検証する。

後者は、掘削データを用いて初期データベースを構築する。次に、非線形システムにおいても所望の動特性となるように、FRIT法に基づきデータベースのオフライン学習を行う。さらに、実機の稼働情報（動作点）と学習後のデータベース内の情報に基づき、コントローラゲインを逐次更新し、適用する制御系を構築する。そして、実機に搭載されたコントローラに提案法を実装し、その有効性を検証する。

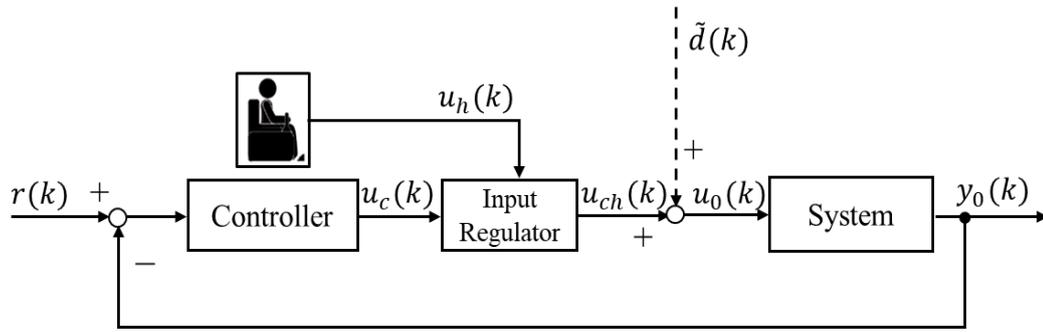


Fig. 4.2: Block diagram of closed-loop system including human operation and disturbance input.

4.2 疑似外生信号を用いた掘削支援制御系の設計

4.2.1 疑似外生信号

本章で構築される制御系のブロック線図は Fig. 4.2 で示され、定常状態にあったシステムの出力変動を、仮想的なインパルス状の外乱入力によるものと見なす。この仮想的な外乱が本章で扱う疑似外生信号 $\tilde{d}(k)$ であり [61], 以下の式で求められる。

$$\tilde{d}(k) = u_0(k) - u_c(k) \quad (4.1)$$

ここで、 $u_0(k)$ は制御入力の初期データ、 $u_c(k)$ はコントローラによって算出された制御入力である。本章では、この疑似外生信号に起因する応答を抑制することを目的に、制御器を設計する。

4.2.2 制御則

制御対象は、Fig. 4.3 に示すような定常状態において、特性の切り替えが発生する切替システムとして考える。このような切替システムに対して、それぞれコントローラゲインを設

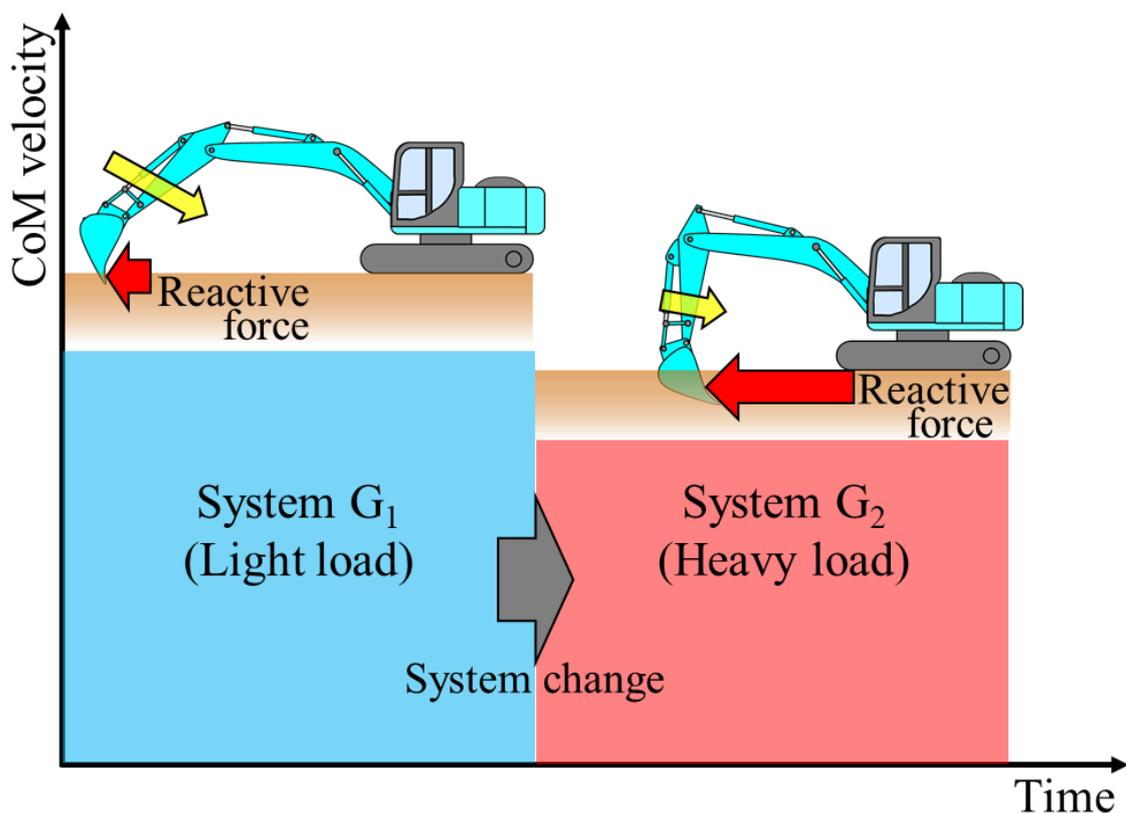


Fig. 4.3: Schematic of system change at the digging work.

定し、制御を行う。評価、検証には以下のPIDコントローラを用いる。

$$u_c(k) = u_c(k-1) + K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d \Delta^2 e(k) \quad (4.2)$$

$$e(k) := r(k) - y(k) \quad (4.3)$$

ここで、 $u_c(k)$ はブーム上げ操作入力、 $e(k)$ は制御誤差であり、目標値 $r(k)$ とアタッチメント合成重心速度 $y(k)$ との差で定義される。 K_p は比例ゲイン、 K_i は積分ゲイン、 K_d は微分ゲインを示している。また、各コントローラのゲインは、システムの切り替わり前後で異なる値が設定される。

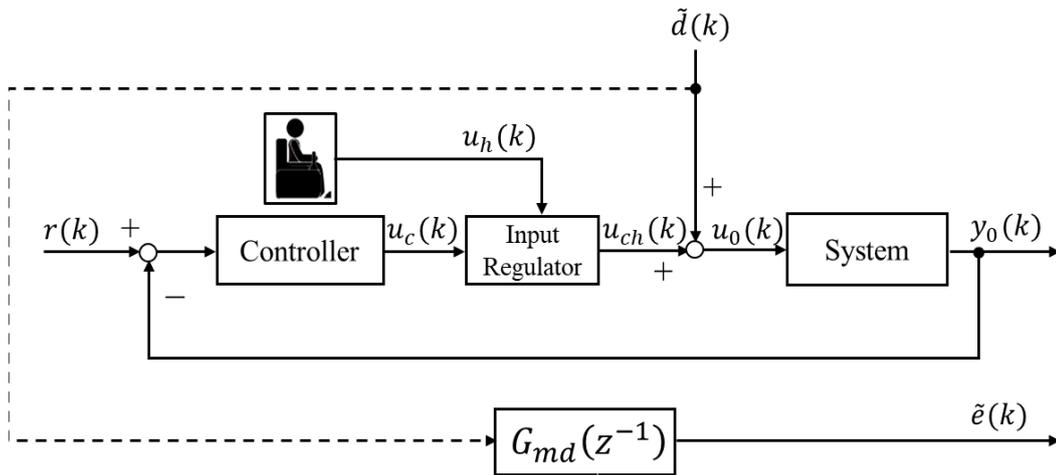


Fig. 4.4: Block diagram using fictitious exogenous signal for designing a controller when the system is switched.

4.2.3 疑似外生信号を用いた制御パラメータの算出

本章で構築される制御系のブロック線図は Fig. 4.4 で示される。システム特性の切り替わりによる出力変動を、外乱入力によるものと見なすため、外乱応答を抑制するようにコントローラを設計する。ただし、システム特性が未知であるため、切り替わり後のシステムに対応したコントローラゲインは、1組の実験データから疑似外生信号を生成し、その信号を用いて、データ駆動型制御則に基づき算出する。コントローラゲインの算出方法の詳細について以下に述べる。

まず、Fig. 4.4 に示す系において、コントローラ出力 $u_c(k)$ が常にシステム入力として選択されるものとする、目標値 $r(k)$ から出力 $y(k)$ への伝達関数 $W_{ry}(z^{-1})$ は以下の式で示される。

$$W_{ry}(z^{-1}) = \frac{G(z^{-1})C(z^{-1})}{1 + G(z^{-1})C(z^{-1})} \quad (4.4)$$

ここで、 $G(z^{-1})$ はシステム、 $C(z^{-1})$ はコントローラを示している。次に、疑似外生信号 $\tilde{d}(k)$ を入力、制御誤差 $e_0(k)$ を出力とした時の伝達特性 $W_{de}(z^{-1})$ は以下で示される。

$$W_{de}(z^{-1}) = -\frac{G(z^{-1})}{1 + G(z^{-1})C(z^{-1})} \quad (4.5)$$

ここで、伝達関数の出力を制御誤差とするのは、定常状態において外乱が入力されるという条件において、制御誤差が発生しないことが望ましい。そこで、制御誤差を最小にすることを規範にコントローラを調整するため、出力を制御誤差としている。さらに、伝達関数 $W_{de}(z^{-1})$ は(4.4)式を用いて以下のように表すことができる。

$$W_{de}(z^{-1}) = W_{ry}(z^{-1})(-C(z^{-1})^{-1}) \quad (4.6)$$

すなわち、 $W_{de}(z^{-1})$ に関して、任意の動特性を有した参照モデル $G_{md}(z^{-1})$ を設計する際、目標値応答における立ち上がり特性を表現している参照モデル $G_m(z^{-1})$ を用いて、下式で記述することができる。

$$G_{md}(z^{-1}) = G_m(z^{-1})(-C(z^{-1})^{-1}) \quad (4.7)$$

したがって、提案法における参照モデル $G_{md}(z^{-1})$ の特性は、付録Bで示した方法を用いて $G_m(z^{-1})$ を設計することで与えることができる。ここで、参照モデル $G_{md}(z^{-1})$ を設計する際の $G_m(z^{-1})$ のパラメータは、FRIT法などによる立ち上がり特性を重視した設計パラメータとは別パラメータとして与える。次に、参照モデル $G_{md}(z^{-1})$ の出力 $\tilde{e}(k)$ は、(4.1)式と(4.7)式より次式で算出される。

$$\begin{aligned} \tilde{e}(k) &= G_{md}(z^{-1})\tilde{d}(k) \\ &= G_m(z^{-1})\left(\frac{\Delta}{\Delta K_p + K_i + \Delta^2 K_d}\right)\tilde{d}(k) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Table 4.1: Condition of controller gain calculation using Genetic Algorithm.

Gene of individual	K_p, K_i, K_d
Number of individual	$N = 200$
Mutation probability	$\alpha = 30\%$
Number of generation	$G = 200$

算出された $\tilde{e}(k)$ が初期データ $e_0(k)$ に近づくようにコントローラゲインを調整することで、所望の制御性能を有するコントローラを得ることができる。ここで、コントローラゲインは次の評価関数 J の最小化に基づき算出する。計算には3章同様に遺伝的アルゴリズムを用いた。

$$J = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e_0(k) - \tilde{e}(k))^2 \quad (4.9)$$

$$e_0(k) := r(k) - y_0(k) \quad (4.10)$$

ここで、 N はデータ数である。また、遺伝的アルゴリズムの探索条件は Table 4.1 に示す。詳細な計算フローについては2章で述べているため省略する。

4.2.4 シミュレーション結果

提案したコントローラ設計の有効性を簡易な数値シミュレーションによって検証する。ここで、以下に示す1次遅れ+むだ時間で表現される切り替えシステムで評価を行う。

$$G_1(s) = \frac{5}{1 + 0.5s} e^{-0.1s} \quad (4.11)$$

$$G_2(s) = \frac{3}{1 + 0.8s} e^{-0.1s} \quad (4.12)$$

これらを離散時間 $T_s = 0.01[\text{sec}]$ で離散化することで以下の式を得る。

$$y_1(k) = 0.9802y_1(k-1) + 0.09901u_1(k-11) + \xi(k) \quad (4.13)$$

$$y_2(k) = 0.9876y_2(k-1) + 0.03727u_2(k-11) + \xi(k) \quad (4.14)$$

ここで、添え字 1 は切替前のシステム、2 は切替後のシステムに対応する。また、 $\xi(k)$ はガウス性白色雑音 (平均 0, 分散 0.01) を示している。さらに、むだ時間は機器特性によって決まるものとし、両システムとも同じ設定とした。シミュレーション検証では、500 ステップにおいて $G_1(s)$ から $G_2(s)$ へとシステムを切り替えるが、 $G_2(s)$ は掘削時に負荷が重くなったことを想定し、 $G_1(s)$ と比較して応答性が低く、速度が出にくいシステム設定とした。初期コントローラゲインは、システム切替に関わらず、(4.11) 式で与えられるシステムパラメータから CHR 法 [62] によって決定し、目標値 $r(k) = 5$ としてシミュレーションを行った。

Fig. 4.5 にシミュレーション結果を示す。適用したコントローラゲインはシステムの切り替わりに関わらず、 $K_p = 0.60$, $K_i = 0.012$, $K_d = 3.0$ であり、システム切替が起きる 500 ステップに着目する。出力変動が大きいことが確認できる。出力は目標値に対して最大 15% 変動し、目標値に対して 5% 以内に復帰するまでに約 110 ステップを要する。すなわち、固定パラメータの線形コントローラでは、システムの変動に対して十分な制御性能を得ることが難しいことを示している。そこで、本結果を初期データ $(u_0(k), y_0(k))$ として、提案法によりコントローラゲインのチューニングを行った。

Fig. 4.6 に提案法によるシミュレーションの結果を示す。システムの切り替わりにおいて、システム入力が増加し、出力の変動が抑制されていることが確認できる。また、出力変動は固定パラメータによる結果と比較して最大 10% 減少し、目標値に対して 5% 以内への復帰は約 25 ステップまで短縮されることが明らかとなった。以上の結果より、提案法が切替システムにおける出力変動の抑制に効果があることが確認された。そこで、提案法を油圧ショベルのアタッチメント合成重心速度に基づく掘削作業に適用した。

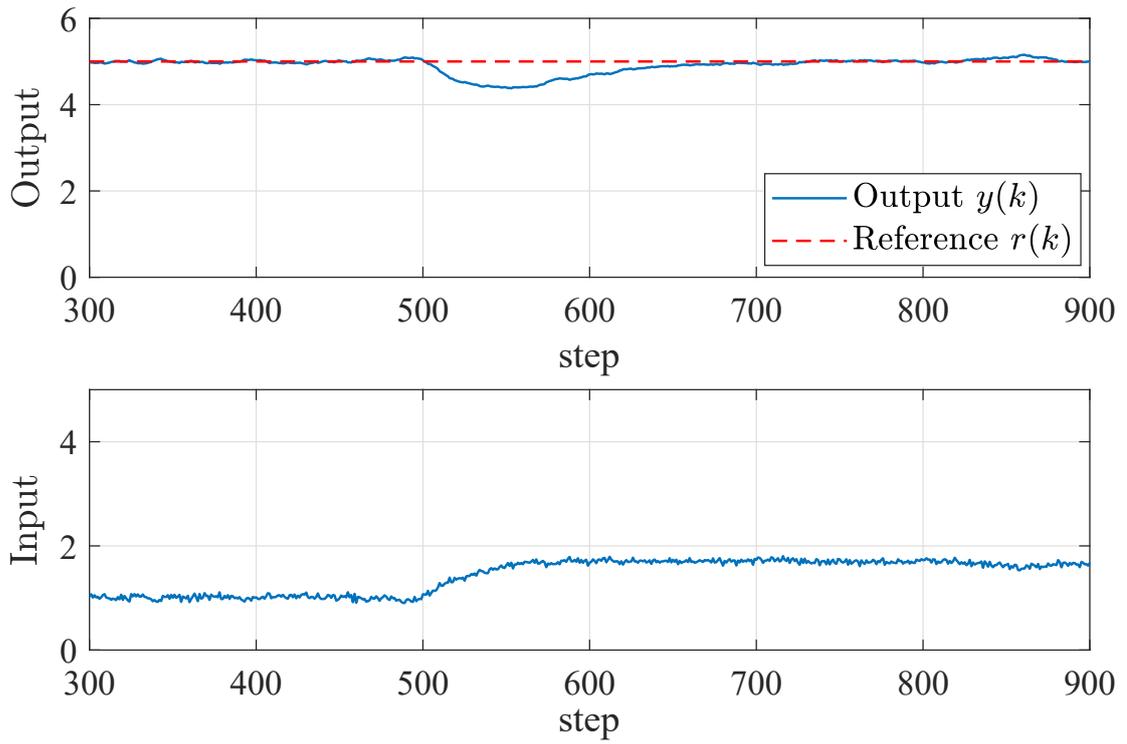


Fig. 4.5: Simulation result of the controller using the CHR method.

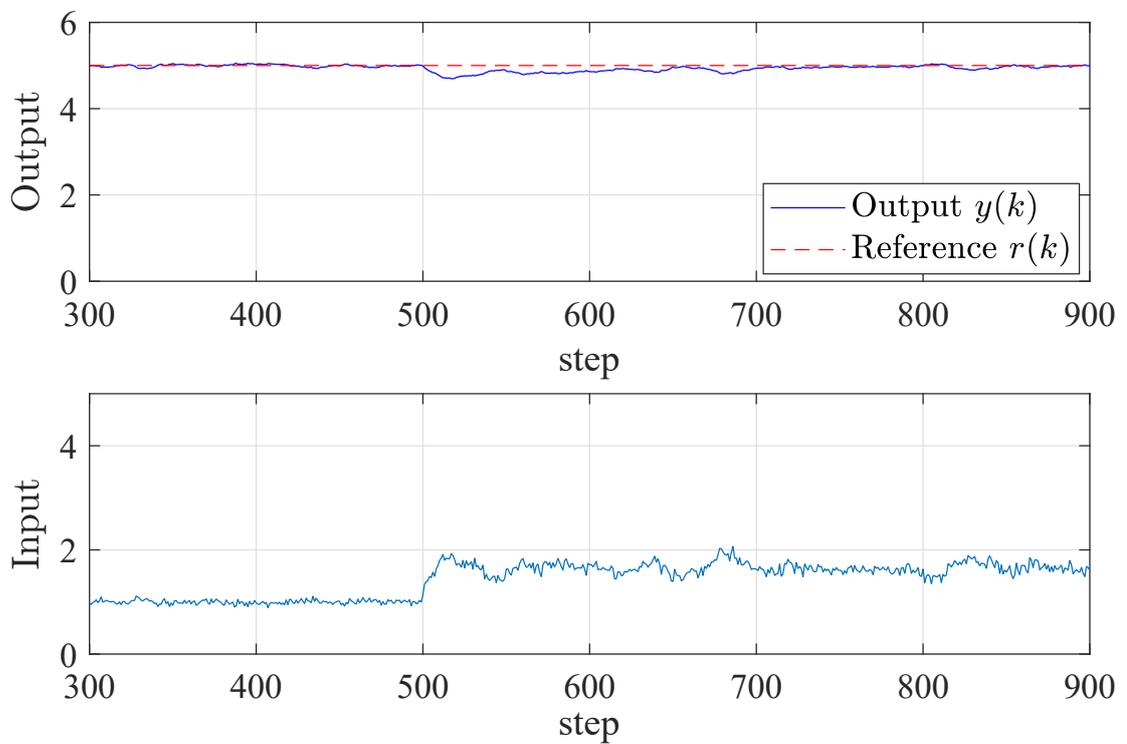


Fig. 4.6: Simulation result of the controller using the fictitious exogenous signal.

4.2.5 実機適用結果

実験は3.4.1と同じ条件で行った。まず、Fig. 4.7に、固定パラメータの線形コントローラによるアタッチメント合成重心速度に基づいた掘削制御を適用した結果を示す。なお、油圧ショベルのシステムは未知であるため、FRIT法により算出したコントローラゲインを固定値として適用している。Fig. 4.7より、掘削初期における出力の立ち上がりは、所望の特性となるようにFRIT法で設計されているため、良い応答性を示していることがわかる。また、アタッチメント合成重心速度も2.5sec付近までは低下することなく、目標値を推移している。一方で、2.5secからアタッチメント合成重心速度の低下が確認できる。これは、掘削抵抗の増加によりシステムの変性を変化したためと考えられ、より速く、効率的な掘削作業を実現するためには速度低下を抑制する必要がある。そこで、本結果を初期データとして使用し、提案法によりコントローラ的设计を行った。

Fig. 4.8に提案法の結果を示す。なお、コントローラパラメータはシステム切り替わり後のみ変更しており、 $K_p = 0.24$ 、 $K_i = 0.20$ である。また、システムの切り替わりは、アタッチメント合成重心速度が閾値未満となったかの判定で行っており、本章では速度90%を閾値とした。まず、掘削初期の応答性はFig. 4.7と同等の結果であることが分かる。次に、システム切り替わり時の出力変動であるが、コントローラパラメータが切り替わることで、ブーム上げ操作が応答よく増加しており、速度の低下が改善されていることが分かる。Fig. 4.7と比較して、出力低下は目標値比約50%⇒30%まで改善され、目標速度への復帰時間も約0.8sec短縮されることが確認できた。数値シミュレーションとは異なり、システム特性は未知であるが、提案法を用いることで、定常状態におけるシステム特性変動に起因する出力変化を抑制可能なコントローラが設計可能であり、良好な制御性能が得られることが示された。

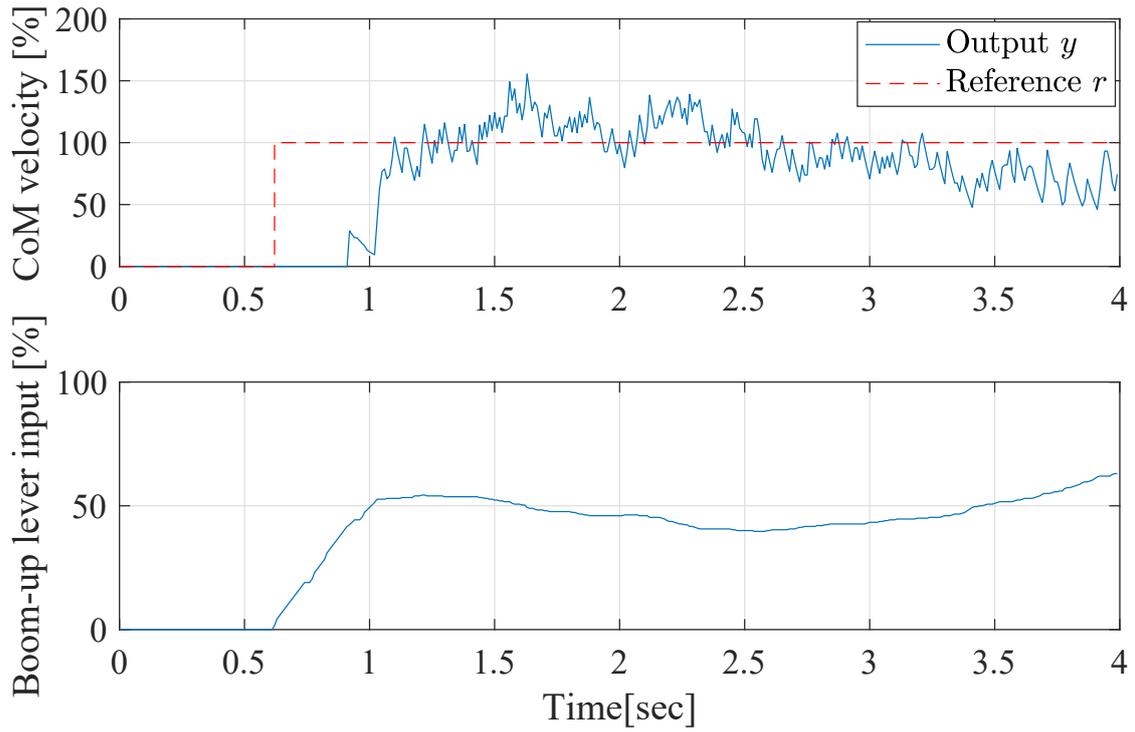


Fig. 4.7: Result of digging work based on combined CoM velocity using the controller applied only the FRIT method.

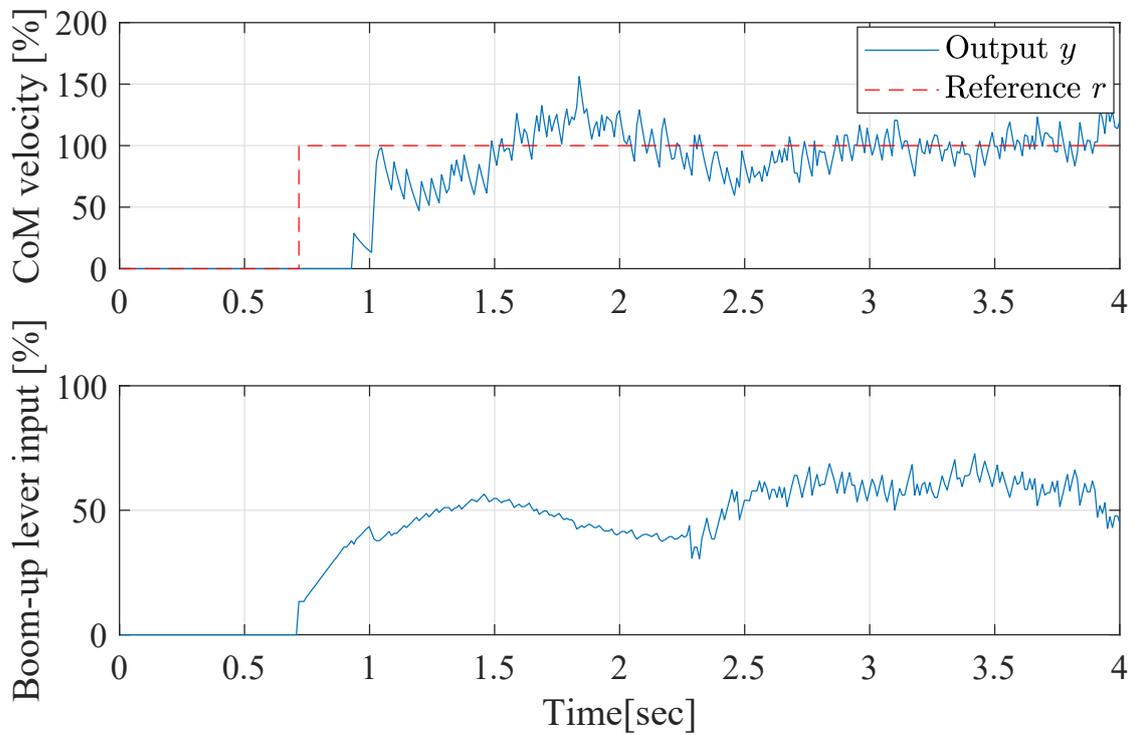


Fig. 4.8: Result of digging work based on combined-CoM velocity using the controller applied the FRIT method and proposed method.

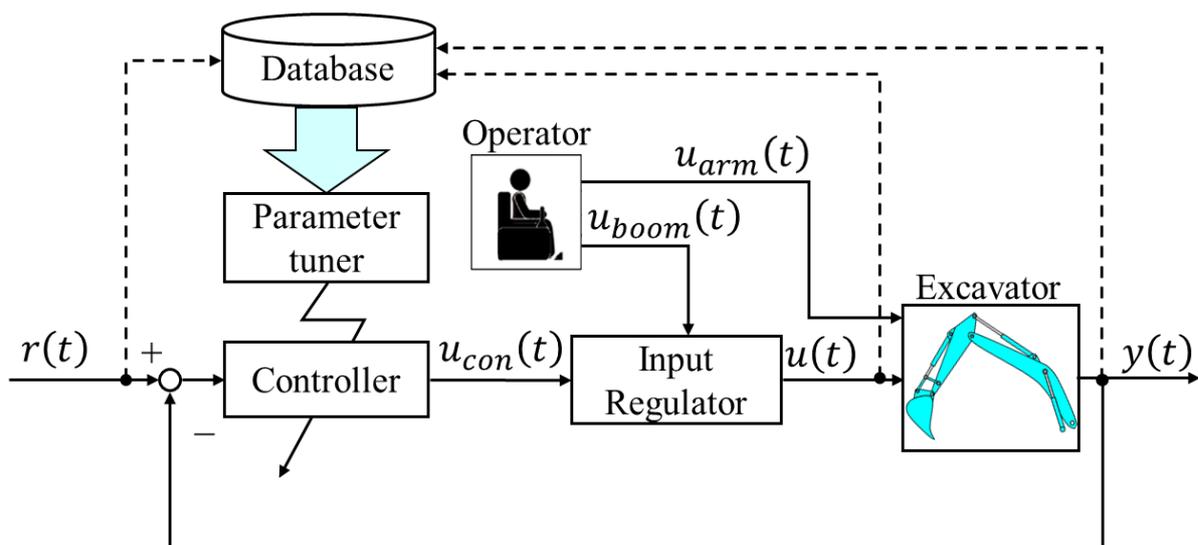


Fig. 4.9: Block diagram of database driven control for digging work including human operation.

4.3 データベース駆動型制御を用いた掘削支援制御系の設計

4.3.1 データベース駆動型制御

次に、本章で構築されるデータベース駆動型制御系のブロック線図を Fig. 4.9 に示す。データベース駆動型制御には、オンラインとオフラインの2つデータベース学習方法がある。オンライン学習は、稼働中のデータからリアルタイムに学習を行う方法であり、動作条件が変わっても、データベースを再学習することで所望の制御性能を得ることが可能である。ただし、学習とは関係のないデータや、学習に値しないデータなどが存在し、それらを学習前に判定、選別する必要があるため、アルゴリズムが複雑となる。また、学習が進む段階で予期せぬ制御特性となる可能性も否定できない。特に、作業現場で稼働する油圧ショベルの場合、それが影響し、事故へと繋がる可能性もある。一方、オフライン学習はリアルタイムで学習しないため、全く想定もしない条件に変わってしまうと所望の制御性能を得ることは難しくなるが、予め設定した条件かつ選定されたデータで学習を行い、稼働させるため、オンライン学習における問題は生じない。そこで、本章では実験の再現性や安全性を考慮し、オフライン学習で構築したデータベースを用いた制御について述べる。さらに、データベース駆動

型アプローチに基づくコントローラゲインの調整は、

- (i) 初期データベースの構築,
- (ii) FRIT 法に基づくデータベースのオフライン学習,
- (iii) 学習済データベースを実装し、コントローラゲインをオンラインで算出し制御する,

の大きく3パートに分けられるため、これらについて順を追って説明する。

4.3.2 初期データベースの構築

データベース駆動型制御は、学習を行う前にベースとなる初期データベースを構築する必要がある。まず、固定パラメータのコントローラを用いて、実験を行い、初期データ $(r(t), u_0(t), y_0(t))$ を取得する。同時刻 t におけるデータを1セットとして以下に示す形式で順次格納し、初期データベースを構築する。

$$\Phi(t) = [\bar{\phi}(t), \mathbf{K}(t)], \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (4.15)$$

ここで、 $r(t)$ は目標値、 $u_0(t)$ はシステム入力、 $y_0(t)$ はシステム出力である。また、 N はデータセットの総数であり、クエリ $\bar{\phi}(t)$ と $\mathbf{K}(t)$ は以下のように定義される。

$$\bar{\phi}(t) := [r(t+1), r(t), y_0(t), \dots, y_0(t-n_y+1), u_0(t-1), \dots, u_0(t-n_u+1)] \quad (4.16)$$

$$\mathbf{K}(t) = [K_p(t), K_i(t)] \quad (4.17)$$

ここで、 n_y , n_u はそれぞれ出力 $y(t)$ と入力 $u(t)$ の次数を表す。

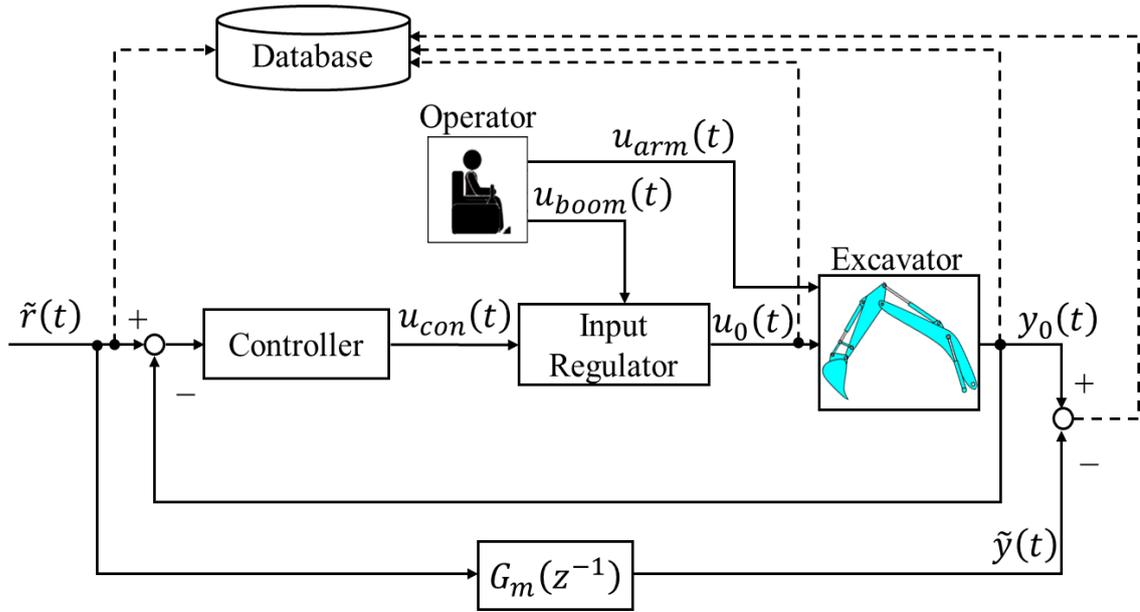


Fig. 4.10: Block diagram of database learning for digging work including human operation using the FRIT method.

4.3.3 FRIT 法に基づくデータベースのオフライン学習

FRIT 法に基づいてデータベースのオフライン学習を行う [63]。Fig. 4.10 は、学習時のブロック線図を模式的に示したものである。学習にあたり、データベースに格納されている初期データ、コントローラの構造、そして参照モデルが必要となる。本章では、3 章同様に以下に示す PI コントローラを用いる。

$$u_{con}(t) = u_{con}(t-1) + K_p(t)(e(t) - e(t-1)) + K_i(t)e(t) \quad (4.18)$$

$$e(t) := r(t) - y(t) \quad (4.19)$$

ここで、 $e(t)$ は制御誤差であり、目標値 $r(t)$ とシステム出力 $y(k)$ との差分、 $K_p(t)$ 、 $K_i(t)$ はそれぞれ時刻 t における比例ゲイン、積分ゲインを示す。また、 Δ は差分演算子であり、 $\Delta := 1 - z^{-1}$ で定義される。次に、参照モデル $G_m(z^{-1})$ の設計であるが、詳細については付録 B を参照され

たい。さらに、疑似参照入力 $\tilde{r}(t)$ を (4.18) 式と初期データから、下式で算出する。

$$\tilde{r}(t) = y_0(t) + \frac{1}{K_p(t) + K_i(t)} (\Delta u_0(t) + K_p(t)(\tilde{r}(t-1) - y_0(t-1))) \quad (4.20)$$

疑似参照入力 $\tilde{r}(t)$ を参照モデル $G_m(z^{-1})$ に入力し、以下の参照モデル出力 $\tilde{y}(t)$ を得る。

$$\tilde{y}(t) = -p_1\tilde{y}(t-1) - p_2\tilde{y}(t-2) + P(1)\tilde{r}(t-d-1) \quad (4.21)$$

ここで、 d はむだ時間であり、既知とする。FRIT 法に基づくデータベースの学習では、評価規範を下式で定義する。

$$J(t+1) := \frac{1}{2}(y_0(t+1) - \tilde{y}(t+1))^2 \quad (4.22)$$

ここで、各時刻において、機械の稼働情報すなわち動作点周りでコントローラゲインの更新を繰り返すことで、結果として所望の制御性能を得るという方策を採用することから、(4.22) 式に示すように、評価関数 J は毎時刻における制御誤差の 2 乗に基づく形をとっている。

次に、疑似参照入力 $\tilde{r}(t)$ を算出するために、逐次必要なコントローラゲインの算出方法について示す。ある時刻 t におけるクエリ $\bar{\phi}(t)$ とデータベースに格納されている各データセット $\bar{\phi}(j)$ との距離 d_s を次式で求める。そして、算出された距離 d_s を昇順で並び替える。

$$d_s(\bar{\phi}(t), \bar{\phi}(j)) = \sum_{l=1}^{n_y+n_u+1} \left| \frac{\bar{\phi}_l(t) - \bar{\phi}_l(j)}{\max \phi_l(m) - \min \phi_l(m)} \right| \quad (4.23)$$

$$j = 1, \dots, N$$

ここで、(4.23) 式で示す $\bar{\phi}_l(m)$ は、データベースに格納されている j 番目の情報ベクトルにおける l 番目の要素を、 $\bar{\phi}_l(t)$ はクエリの l 番目の要素を表している。また、 $\max \bar{\phi}_l(m)$ 、 $\min \bar{\phi}_l(m)$ は、データベースの l 番目の全要素中の最大値と最小値である。さらに、並び替えたデータ

セットの内，(4.23)式で算出した距離 d_s が予め設定した値より小さいものを近傍データとして選択する。これらの近傍データより，時刻 t におけるコントローラゲイン $\mathbf{K}(t)$ を以下の式で算出する。

$$\mathbf{K}(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i \mathbf{K}(i), \quad \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (4.24)$$

ここで， ω_i は重み係数を示しており，(4.23)式で算出し，近傍データとして選択された距離 d_s の大きさに応じて以下の式で算出される。

$$\omega_i = \frac{\exp(-d_s(i))}{\sum_{i=1}^n \exp(-d_s(i))} \quad (4.25)$$

ここで， n は近傍データセットの総数， i はそのデータセットの i 番目を表している。

次に，(4.24)式で算出されたコントローラゲインを $\mathbf{K}^{old}(t)$ とし，最急降下法を用いて以下の式で学習する。

$$\mathbf{K}^{new}(t) = \mathbf{K}^{old}(t) - \eta \frac{\partial J(t+1)}{\partial \mathbf{K}(t)} \quad (4.26)$$

$$\boldsymbol{\eta} := [\eta_p, \eta_i] \quad (4.27)$$

ここで， $\boldsymbol{\eta}$ は学習係数ベクトルを示している。また，各コントローラゲインに関する勾配は次の式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial J(t+1)}{\partial K_p(t)} &= \frac{\partial J(t+1)}{\partial y_r(t+1)} \frac{\partial y_r(t+1)}{\partial \tilde{r}(t)} \frac{\partial \tilde{r}(t)}{\partial K_p(t)} \\ \frac{\partial J(t+1)}{\partial K_i(t)} &= \frac{\partial J(t+1)}{\partial y_r(t+1)} \frac{\partial y_r(t+1)}{\partial \tilde{r}(t)} \frac{\partial \tilde{r}(t)}{\partial K_i(t)} \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

(4.28) 式の偏微分の詳細な展開については，参考文献 [64] を参考にされたい。学習したコントローラゲインを新たに $\mathbf{K}^{new}(t)$ とし，データベース内の最近傍データセットのコントローラ

ゲインで置き換える。さらに、(4.24)式で算出された重み係数付きのコントローラゲインも、最近傍データセットを除くデータセットのコントローラゲインとして更新することで、効率的にデータベースへと学習させることができる。

これらの手順を繰り返すことで、非線形システムにおいて所望の動特性となるデータベースを得ることができる。

4.3.4 データベースの実装および制御

FRIT法に基づきオフライン学習を行ったデータベースを実装し、データベース駆動型アプローチに基づき制御を行う。具体的には、要求点（動作点）の入出力データに基づき、類似のデータベクトル $\Phi(t)$ をデータベースから抽出する。このとき、予め設定している閾値より類似度が高いものは全て抽出される。さらに、 $\Phi(t)$ に含まれる制御パラメータ $K(t)$ に対して、類似度（距離 d_s ）に対応した重み付けをすることによりコントローラゲインをオンラインで算出し、局所線形コントローラを構築することで、制御を行う。この部分は、(4.23)式～(4.25)式で示す計算と同様であるが、詳細は文献[60][63]を参照されたい。

4.3.5 実機適用結果

実験条件

実験条件を以下に示す。

初期姿勢) アームシリンダは最縮、バケット先端部はアームの延長上とし、先端部を接地させる。接地位置は地表面から深さ 1m および 2m の 2 条件とする (Fig. 4.11 参照)。

対象動作) 初期姿勢からアームが鉛直となるまで掘削する。

操作方法) アーム引き操作、ブーム上げ操作共に入力開始後、最大量で維持する。

操作方法については、3章で示した理由から、両操作共に最大操作としている。また、実験には20ton級の油圧ショベル(コベルコ建機株式会社製 SK200-10)を使用した。本実験機も、予めレバー操作量を電氣的に制御可能な油圧調整用バルブを改造により取り付けられている。改造の詳細については、本論文の主旨から外れるため省略する。



Fig. 4.11: Digging condition.

Table 4.2: A example of database learning condition.

Sampling time [sec]	$T_s = 0.01$
Orders of the information vector	$n_y = 3$ $n_u = 2$
Number of data	$N = 1600$
Learning rates	$\eta_p, \eta_i = 0.00001$
Rise-time	$\sigma = 0.25$
Parameter related to damping property	$\delta = 0$
Number of learning	20

実験結果

Fig. 4.12 に線形コントローラを用いたアタッチメント合成重心速度に基づく掘削制御の結果を示す。掘削深さは1mで、コントローラゲインは、FRIT法によって算出しており、 $K_p = 0.24$ 、 $K_i = 0.014$ に設定している。また、目標速度は熟練オペレータの掘削作業結果から実験的に決定している。Fig. 4.12 より、設計した参照モデルに概ね即した立ち上がり特性が実現されていることが分かる。しかし、1.4sec でアタッチメント合成重心速度は目標値付近を推移するものの、それ以降でやや変動的な挙動となっている。なかでも、2.2sec 付近では目標値に対して最大27%程度の出力変動が発生している。これは、掘削時の負荷変動によって生じる油圧ショベルの非線形特性が原因と考えられ、固定ゲインでは、その非線形システムに十分対応できていないことを表している。

さらに、Fig. 4.13 に掘削深さ2mの結果を示す。コントローラゲインはFig. 4.12 と同じ設定としている。姿勢が変化すると、掘削負荷の変動に伴う非線形性だけでなく、土砂から受ける掘削抵抗の向きや大きさ、アタッチメントに作用する重力方向が大きく変化する。そのため、Fig. 4.12 とはまた異なる非線形システムとなる。Fig. 4.13 より、掘削初期のアタッチメント合成重心速度の立ち上がりは遅く、オーバーシュートも大きくなっており、制御性能が悪化していることが分かる。これは、システムの応答が悪くなっていることと、目標に従わない初期区間の偏差によって積分動作が大きくなったことが要因と考えられる。すなわち、固定のコントローラゲインでは、現場で想定される深さが変化していく掘削作業において、所望の制御性能を得ることが難しいといえる。したがって、安定した作業動作を常に得るためには、非線形性に対応した制御系が必要と考えられる。そこで、データベース駆動型アプローチを適用した提案法の有効性を検証した。

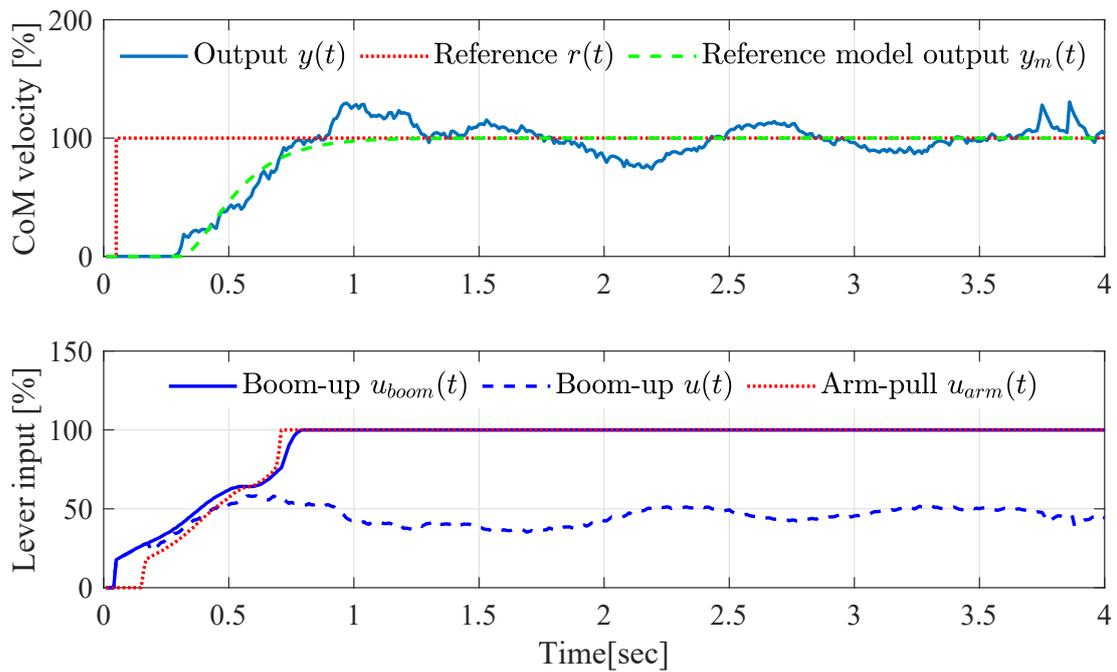


Fig. 4.12: Result of digging work using a linear controller based on combined-CoM velocity by a non-expert. (Digging depth 1.0m)

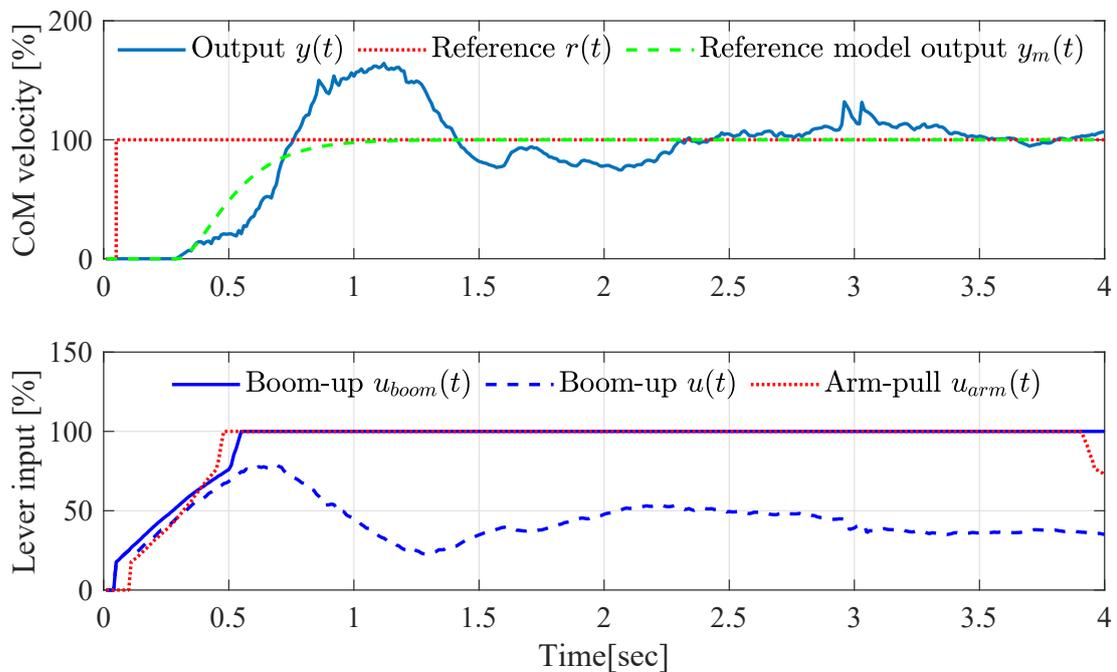


Fig. 4.13: Result of digging work using a linear controller based on combined-CoM velocity by a non-expert. (Digging depth 2.0m)

データベース駆動型制御を適用した提案法の結果を Fig. 4.14, Fig. 4.15 に示す。ここで、適用したデータベースの学習には、Fig. 4.12, Fig. 4.13 の結果を含む、数パターンの線形コントローラによる掘削データを初期データとして用いている。学習条件は Table 4.2 に示す。

Fig. 4.14 は掘削深さ 1m の結果であるが、アタッチメント合成重心速度は参照モデル出力 $y_m(t)$ に立ち上がり、定常区間共に追従しており、所望の挙動が実現できていることが確認できる。コントローラゲインは、適切なブーム上げ操作量とするために、 K_p , K_i 共に状況に合わせて逐次変化していることが分かる。また、Fig. 4.12 に示す線形コントローラの結果と比較すると、立ち上がりのオーバーシュートは解消し、定常区間における出力変動は最大 10% 程度にまで低減できており、明らかな改善が認められる。

さらに、Fig. 4.15 に姿勢の異なる掘削深さ 2m の結果を示す。線形コントローラでは掘削深さが浅い条件と比較して制御性能が悪化していたが、データベース駆動型制御を適用することで、Fig. 4.14 と同等の結果が得られることが確認された。また、Fig. 4.14, Fig. 4.15 に示すコントローラゲインの結果を比較すると、負荷変動が大きく、システム特性が変わり易い立ち上がりの過渡域において、コントローラゲインの挙動は異なっており、逐次、状況に適したゲインが算出、適用されていることが分かる。特に、積分動作に関しては、深さ 1m よりも深さ 2m の方が大きく変化しており、オーバーシュートの抑制や、目標値への追従性が向上するように効果的に変化しているものと考えられる。これらの結果より、提案法にデータベース駆動型制御を適用することで、掘削中の土とのインタラクションに起因する非線形に限らず、姿勢変化に伴うシステム変化に対しても、コントローラが適応的に変化し、優れた制御性能を得られることが明らかとなった。

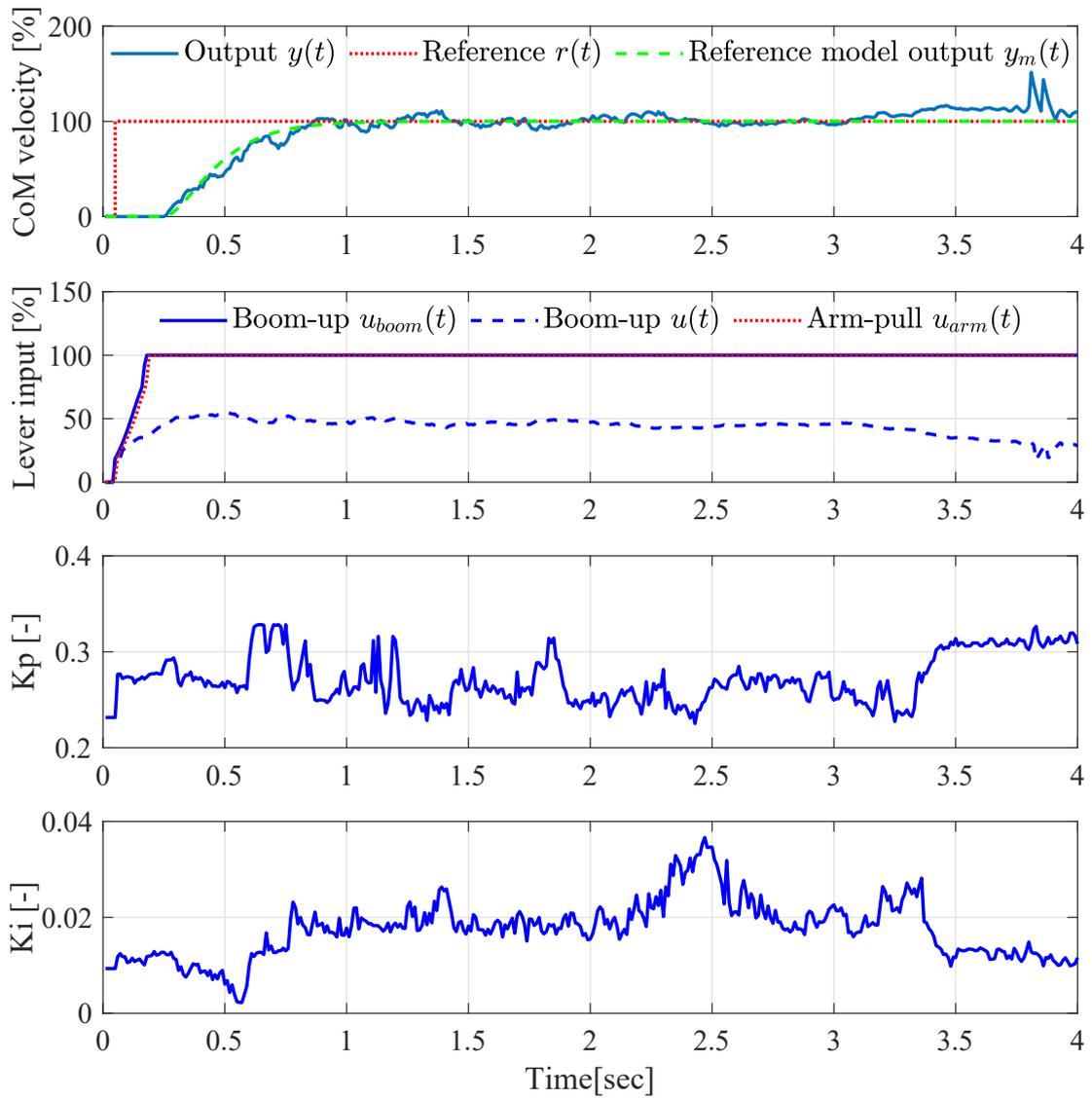


Fig. 4.14: Result of digging work using a database driven controller based on combined-CoM velocity by a non-expert. (Digging depth 1.0m)

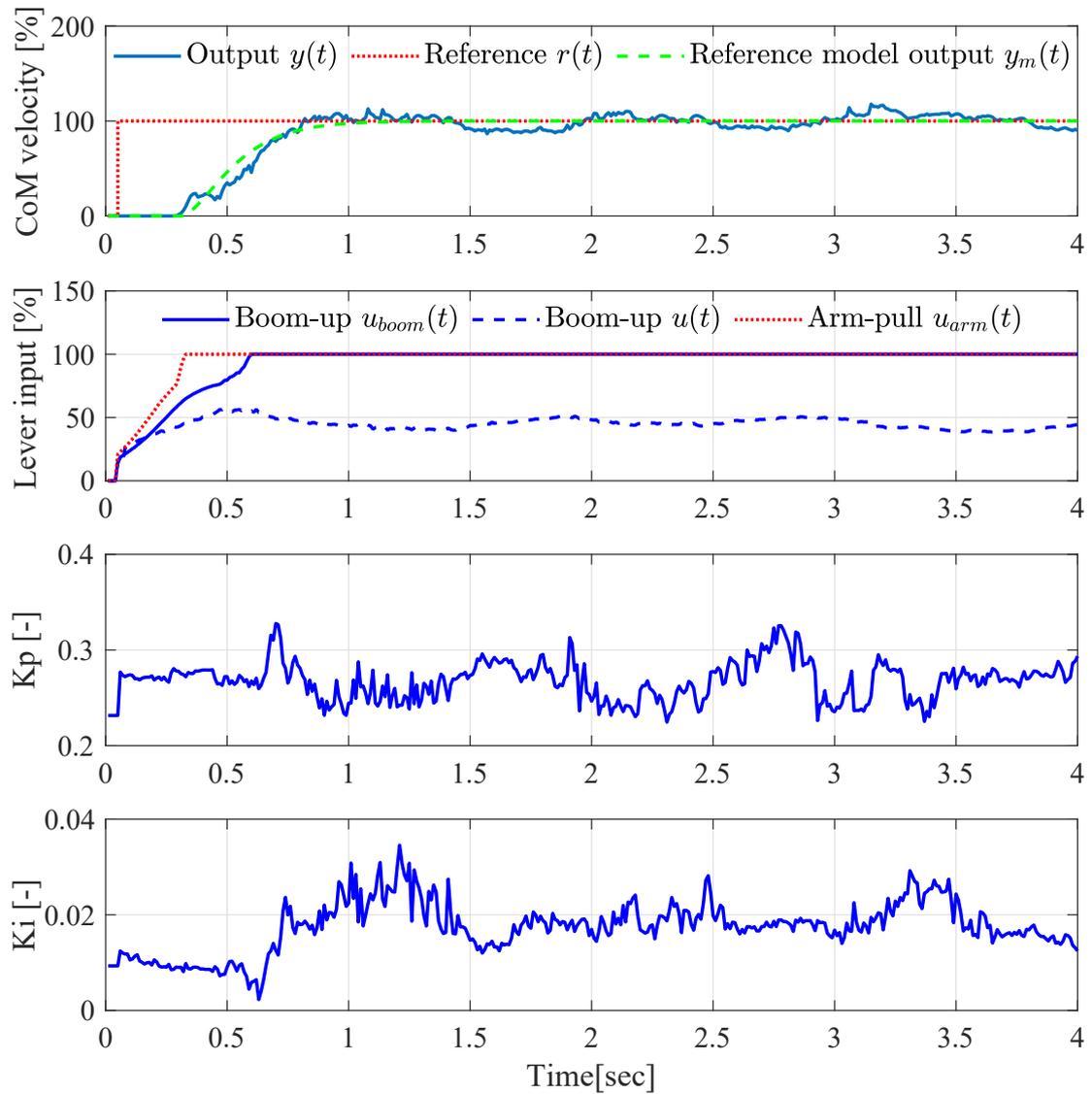


Fig. 4.15: Result of digging work using a database driven controller based on combined-CoM velocity by a non-expert. (Digging depth 2.0m)

4.4 結言

本章では、システム特性が非線形な油圧ショベルの掘削作業において、所望の出力特性を得るための制御手法を2つ提案した。

まず、線形コントローラによってシステムの切り替わりに対応する手法として、疑似外生信号を用いたコントローラ的设计法を提案し、シミュレーションおよび実機検証にて、その有効性を検証した。掘削中の負荷増大によって油圧ショベルが示す非線形性を、一つのシステム切り替わりと見なし、同時にコントローラの特性を切り替える。ここで、システムの切り替わりは掘削速度が定常な状態において生じるものとする。油圧ショベルは非線形特性であり、システムに対応したコントローラゲインをシステム特性から設定することは難しい。そこで、システムの切り替わりに伴う出力変動を、仮想的なインパルス状の外乱（疑似外生信号）が入力によるものとして捉える。さらに、1組の実験データから算出可能な疑似外生信号から、制御誤差までの伝達特性に関して参照モデルを設計し、データ駆動型制御則に基づきコントローラゲインを算出することで、所望の出力とし、またコントローラのチューニングに要する時間を削減した。シミュレーション検証では、固定ゲインを適用した線形コントローラと比較して、提案法により出力変動量、目標値までの復帰時間共に改善することを確認した。

実機検証では、掘削中のアタッチメント合成重心速度が閾値を下回った時、システムが切り替わったものと見なし、提案法を適用したコントローラへの切り替えを行った。その結果、FRIT法で算出した固定ゲインのコントローラと比較して、システム切り替わり後の出力変動は目標値比で最大20%低減し、目標値への追従性が向上することが明らかとなった。これにより、システム特性が未知な制御対象であっても、定常状態におけるシステム特性の変化が近い条件であれば掘削速度を落とすことなく、作業を行うことができるため、生産性を向上させることが可能となる。

次に、データベース駆動型アプローチに基づく掘削支援制御を提案し、実機検証にて、その有効性を検証した。油圧ショベルは作業内容や負荷条件、環境に起因してシステム特性が

逐次変化する非線形性を有するため、想定外の条件となった場合、線形コントローラでは十分な制御性能を実現することが難しい。そこで、目標値、入力および出力の関係から、逐次局所線形コントローラを構築し、非線形性に対応するデータベース駆動型の掘削支援制御を構築した。適用するデータベースは複数の掘削データから構築し、FRIT法に基づきオフラインで学習した。これにより、実機実装時の学習に関する計算コストを削減できる。また、学習に不要なデータを予め選定し、学習結果を確認してから実機に反映することができるため、予期しない特性となることを抑制することができる。

実機検証では、予め設計した参照モデルの出力特性に対して、立ち上がり特性および目標値へ追従することは勿論のこと、定常域における出力変動が目標値比で最大10%と、低減されることを確認した。これは、FRIT法を用いた線形コントローラの結果と比較しても、高い制御性能である。特に、掘削位置が深くなる条件は、線形コントローラで十分な制御性能が得られなかったのに対し、データベース内のデータ同士が補間し合い、動作点に適したコントローラゲインをオンラインで算出し、適用することで、掘削姿勢の変化に関わらず、高い制御性能を得られることが明らかとなった。したがって、環境や機械の特性変化に対しても、高い適応力を発揮するコントローラによって所望の応答性、掘削速度で作業することができ、熟練オペレータのように、作業条件に関わらず生産性の高いスムーズな掘削作業が実現可能となる。

以上、本章では2つの提案手法において有効性が確認された。今後、機械特性や環境の非線形性に主軸を置いた制御だけでなく、人の特性にも着目し[65]-[67]、対応した制御系へと昇華を行う。

第5章 結論

本研究では、人が操作する油圧ショベルにおいて、技量の伴わない非熟練なオペレータによる作業の生産性を向上させるために、アタッチメントの動きを最適化する手法について検討した。具体的には、機体データに基づき操作オペレータの技量が表現される指標を制御工学的に構築し、その指標を用いて、作業における操作を支援し、生産性を高める制御系の構築を目的とした。

そこで、油圧ショベルのアタッチメントをそれらの合成重心で表現した。まず、ブーム上げ減速動作を対象として、実機データより合成重心で表現したシステムのパラメータを推定し、操作オペレータの技量を評価する指標を構築した。次に、掘削作業を対象として、アタッチメント合成重心の速度に基づく掘削操作の支援制御系を構築し、データ駆動型制御則に基づきコントローラを設計することで、実機で提案手法の有効性を検証した。最後に、油圧ショベルの掘削作業を対象として、非線形システムに対応した2つのコントローラ設計手法をアタッチメント合成重心速度に基づく掘削操作の支援制御に適用し、実機でそれら提案手法の有効性を検証した。以下に、本論文の各章に対する概要と結論を総括する。

第2章では、複数のリンクで構成される油圧ショベルのアタッチメントを、それらの合成重心で表現するシステムと見なし、動作時のシステムパラメータから操作オペレータの技量を評価する指標を構築した。複合的かつ複雑な動きで作業を行う油圧ショベルにおいて、各リンク単体の操作が優れていたとしても、作業が優れているとは限らない。そこで、各リンクの動きを統合し、評価するために合成重心として扱った。まず、各リンクの重心座標から合成重心を算出した。次に、対象動作をブーム上げとして、入力をブームの駆動トルク、出

力をアタッチメントの合成重心の角速度とした低次の回転系の運動方程式で表現した。ここで、人が低次のシステムとして扱っているという仮定に基づき、この運動方程式を2次のシステムとして表すことで、そのシステムパラメータから現象に即した物理パラメータが得られ、特に、躍度とむだ時間に技量差が表れることが確認された。さらに、得られたシステムパラメータを基に、システム減衰係数 ζ 、固有角周波数 ω_n を算出し、操作の特徴との相関を考察した。その結果、 ζ には目標値への収束性が、 ω_n には対応可能な作業速度の程度を示す速応性が操作オペレータの技量として定量的に表現された。また、これらを指標とすることで作業動作を改善可能であることも確認され、アタッチメント合成重心が作業を効率化させるための一指標として有用であることが明らかとなった。

第3章では、アタッチメント合成重心の速度に基づき、油圧ショベルの掘削作業において操作を支援する制御を提案し、その有効性を実機検証により明らかにした。まず、対象動作を掘削作業として、人の操作が介在する油圧ショベルシステムに対して、アタッチメント合成重心速度に基づき掘削中のブーム上げ操作が調整される制御系を構築した。なお、制御にはPIコントローラを用い、コントローラのゲインは試行錯誤的に決定した。この結果、非熟練者に見られる掘削時の過剰なブーム上げ操作は抑制され、アタッチメント合成重心速度が目標値に追従することで、熟練者のようなスムーズな掘削動作となることを確認した。さらに、掘削初期の応答性を改善するため、データ駆動型制御則に基づきコントローラを設計した。ここで、非線形性の比較的小さい条件に限定することで、システムを線形と見なし、FRIT法を用いた。掘削初期の応答性は、予め設計した参照モデルに沿った特性に改善され、非熟練者によるマニュアル操作の掘削と比較して、約0.5secの掘削時間の短縮を確認した。このように、アタッチメント合成重心速度に基づいた操作支援制御を適用することで、技量が低い非熟練オペレータであっても、熟練オペレータのような動作を実現し、生産性の向上が可能であることが明らかとなった。

第4章では、アタッチメント合成重心速度に基づく掘削支援制御において、油圧ショベル

の非線形特性に対応するために、疑似外生信号を用いたデータ駆動型のコントローラ設計手法と、データベース駆動型アプローチに基づくコントローラ設計を適用した2つの制御を提案し、その有効性を実機検証により明らかにした。まず、疑似外生信号によるコントローラ設計は、掘削作業において、非線形特性に伴い定常速度状態で生じる出力変動を、一つのシステム切り替わりと捉え、その切り替わりを仮想的なインパルス状の外乱入力（疑似外生信号）によるものと見なした。次に、立ち上がり特性を設計する手法を応用し、疑似外生信号を用いて、外乱による出力影響を抑制するコントローラをデータ駆動型制御則に基づき設計した。ここで、設計したコントローラはシステム切り替わりと同時に適用した。掘削作業における定常速度状態において、システム変動に伴う出力低下は目標値比約20%抑制されることが確認され、より速く、効率的な掘削作業が可能となった。また、変動後のシステム特性が大きく変わらない場合において有効な手法であることが確認できた。

データベース駆動型制御は、非線形なシステムに対して、動作点に基づいて逐次コントローラゲインを更新し、局所線形コントローラとして適用することで非線形システムに対応する手法である。まず、予め線形コントローラによる実験で取得した掘削データを基に初期データベースを構築した。次に、所望の動特性を実現するためにデータベースを学習させる。ここで、学習データの取捨選択が容易なため、想定しない制御特性となること防ぐことができ、実装時の計算負荷を低減することができるという理由から、FRIT法に基づいたオフライン学習を行い、実機に実装した。線形コントローラを用いた結果と比較すると、動作点に応じて、コントローラゲインが適宜調整されることで、アタッチメント合成重心速度の立ち上がり、目標値への追従性は著しく向上することが確認された。さらに、実作業で想定される掘削深さの違いによるシステム変化にも対応し、所望の制御性能を得られることが明らかとなった。これらの結果より、システム特性の変化に対しても、操作が支援され、速度を維持したスムーズな掘削作業が実現できることが確認された。

本論文では、油圧ショベルを対象とし、アタッチメントを合成重心で表現するシステムに

において、操作オペレータの技量を評価し、さらに、人の操作が介在する制御系において、非線形特性に対応した合成重心速度に基づく掘削操作を支援する制御を構築した。これらの結果から、新たな指標と制御工学を組み合わせることで、技量評価や操作支援などが、人を中心とした系で実現可能であることが本研究により示唆された。しかし、適用した作業や条件は限定的であり、今後、実際の現場において有効性の検証や、課題を抽出していく必要がある。また、本論文の手法を軸に、他の作業に対しても支援可能な制御系へと拡張していかなければならない。

最後に、提案手法が実現し得る油圧ショベルの将来について述べる。働き方改革などの推進により、これまでの労働様式は変わりつつある。建設業においては、遠隔操縦ショベルなどのソリューションも相まって、今後、誰でも油圧ショベルを操作し、働ける機会が増えることが予想される。したがって、油圧ショベルそのものも多様性に対応できる形へと変化していかなければならない。そのためには、人の要素にも着目し、支援制御へと取り入れることで、誰が操縦しても操作し易く、一方で、適切な支援によって人が成長する喜びを感じることができる油圧ショベルである必要がある。すなわち、人に易しく、人が成長する制御である。これにより、誰もが働き甲斐を感じ、そして働きたいと思える建設業の実現へと繋がるものとする。現在、その道半ばではあるが、その実現に向け、広い視野をもって研究を進めていきたい。

参考文献

- [1] 一般社団法人 日本建設業連合会：「生産性向上推進要綱」, https://www.nikkenren.com/sougou/seisansei/pdf/seisansei_outline.pdf, (2020年6月11日)
- [2] 一般社団法人 日本建設業連合会：再生と進化に向けて -建設業の長期ビジョン-, https://www.nikkenren.com/sougou/vision2015/vision_pdf.html, (2020年5月26日)
- [3] 国土交通省：社会資本の老朽化の現状と将来, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html, (2020年5月29日)
- [4] 五道 仁実：「国土交通政策最前線/i-Construction 特集 i-Construction による建設現場の生産性革命」, 時評, Vol.58, No.6, pp. 152–157 (2016)
- [5] 建山 和由：「情報化施工の現状と今後の展望について：機械化施工について」, 地盤工学会誌, Vol.58, No.5, pp. 6–9 (2010)
- [6] 国土交通省：【参考資料】 i-Construction の進捗状況, http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/pdf/03.5_kikaku_siryoku6.pdf, (2020年6月17日)
- [7] 原田 純仁：「ICTブルドーザと ICT 油圧ショベルの開発」, 計測と制御, Vol.55, No.6, pp. 523–526 (2016)
- [8] 山元 弘, 茂木 正晴, 大槻 崇, 柳沢 雄二, 野末 晃, 山口 崇, 油田 信一：「動作計画と制御に3次元情報を用いた自律油圧ショベルプロトタイプの開発」, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.8, pp. 488–497 (2012)
- [9] 四家 千佳史, 小野寺 昭則, 高橋 正光：「建機メーカーが描く ICT 建機施工を中心とした建設現場の未来(スマートコンストラクションの導入)」, 建設機械施工, Vol.67, No.12, pp. 16–20 (2015)
- [10] 藤後 博, 木下 明, 小見山 昌之, 越智 智彦, 稗方 孝之：「SK200-10 衝突軽減システム「K-EYEPRO」」, R&D 神戸製鋼技報, Vol.68, No. 1, pp. 74–77 (2018)
- [11] Y.Shimano, Y.Kami, K.Shimokaze：“Development of PC210LCi-10/PC200i-10 Machine Control Hydraulic Excavator”, Komatsu technical report, Vol.60, No.167, pp. 2–7 (2014)
- [12] 常山 修治, 竹下 正一, 堤 英彰, 城澤 道正：「i-Construction (建設現場の生産性革命) の推進と建設現場の安全性の向上に向けて」, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol.73, No.2, pp. 11–16 (2017)
- [13] 蔡 成浩, 土橋 稔美, 吉田 知洋, 中村 隆寛：「建築工事における建設機械の接触災害の防止に関する研究無線 IC タグデータに基づく作業者と建設機械の接近状態の推定方法の検討」, 日本建築学会計画系論文集, Vol.75, No. 656, pp. 2451–2458 (2010)
- [14] 国立科学博物館産業技術史資料情報センター：「油圧ショベルの技術の系統化調査」, 国立科学博物館技術の系統化調査報告, Vol.22 (2015)

- [15] 小岩井一茂, 濱永慎也, 山本透, 南條孝夫, 山崎洋一郎:「油圧ショベルのイベント駆動型トルク制御」, 計測自動制御学会論文集, Vol.54, No.2, pp. 261–268 (2018)
- [16] 近藤高弘, 青木浩章, 宮崎裕道:“建設業における無人化施工の現状と将来”, 大成建設技術センター報, Vol.44, pp. 19-1–19-7 (2011)
- [17] H.Yoshinada, K.Okamura and S.Yokota:“Master-Slave Control Method for Hydraulic Excavator”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.24, No.6, pp. 977–984 (2012)
- [18] 菅原一宏, 星野和則, 小倉弘, 稲田圭介, 竹内隆:“油圧ショベルの長距離遠隔操縦システム”, 計測と制御, Vol.55, No.6, pp. 519–522 (2016)
- [19] M.Ito, Y.Funahara, S.Saiki, Y.Yamazaki and Y.Kurita:“Development of a Cross-Platform Cockpit for Simulated and Tele-Operated Excavators”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.31, No.2, pp. 231–239 (2019)
- [20] 飯盛洋, 畑中俊昭:「建設機械の安全対策」, 建設機械の施工企画, Vol.725, pp. 78–81 (2010)
- [21] 茂木正晴, 山元弘:「無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動」, 計測と制御, Vol.55, No.6, pp. 495–500 (2016)
- [22] T.Hirabayashi:“Examination of Information Presentation Method for Teleoperation Excavator”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.24, No.6, pp. 967–976 (2012)
- [23] 茂木正晴, 橋本毅, 梶田洋規:“操縦装置と画像システムによる油圧ショベル遠隔操作の作業効率改善”, 土木技術資料, Vol.58, No.9, pp. 18–21 (2016)
- [24] 吉田達哉, 小泉孝之, 辻内伸好, 陳侃, 中本洋造:「油圧ショベルの掘削作業における効率向上の検討」, 日本機械学会論文集C編, Vol.78, No.789, pp. 1596–1606 (2012)
- [25] 境田右軌, 中後大輔, 川端邦明, 嘉悦早人, 浅間一:「熟練オペレータによる油圧ショベル操作の解析」, 第23回日本ロボット学会技術講演会, Vol.23, pp. 3I21 (2005)
- [26] 土田幸男, 室橋春光:「ワーキングメモリと学習方法の関連性」, 子ども発達臨床研究, No.9, pp. 47–55 (2017)
- [27] 秋山将貴, 洪水雅俊, 小岩井一茂, 山本透, 上田浩司, 山下耕治, 山崎洋一郎:「油圧ショベルの重心に基づく技量差抽出に関する一考察」, 電気学会制御研究会 制御理論・制御技術一般 (スマートシステムと制御技術シンポジウム 2018) (2018)
- [28] 美多勉, 大須賀公一:「ロボット制御工学入門」, コロナ社 (1989)
- [29] 川田昌克, 西岡勝博:「Matlab/Simulinkによるわかりやすい制御工学」, 森北出版 (2001)
- [30] (一社) 日本フルードパワー工業会:「実用油圧ポケットブック」, (2012)
- [31] D.E.Goldberg:“Genetic Algorithms in search, optimization, and machine learning”, Addison-Wesley Publishing Company (1989)
- [32] 林香予子, 山本透:「閉ループデータを用いたPID制御系の進化的設計法」, 電気学会論文誌C, Vol.131, No.4, pp. 794–799 (2011)
- [33] 川田和男, 十河宏行, 山本透, 間田泰弘:「GAを用いたロバストPD制御法によるクレーンのつり荷の振れ止め制御」, 電気学会論文誌D, Vol.123, No.10, pp. 1097–1103 (2003)

- [34] 寺嶋一彦, 兼重明宏, 三好孝典:「制御工学 技術者のための, 理論・設計から実装まで」, 実教出版 (2012)
- [35] 新中 新二:「システム設計のための基礎制御工学」, コロナ社 (2009)
- [36] 横田 眞一, 笹尾 正典, 一柳 健:「油圧ショベルのブーム, アーム系の高精度軌跡制御」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.62, No.593, pp. 161–167 (1996)
- [37] 横田 眞一, 小林 秀基, 蛭川 立雄, 津村 淳二, 江川 栄治:「油圧ショベルのアーム系 3 軸のロバスト軌跡制御」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.648, pp. 2549–2556 (2000)
- [38] 山田 宏尚, 武市 教児, 武藤 高義:「油圧パワーショベルのスライディングモード制御」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.670, pp. 1768–1774 (2002)
- [39] M.Allan, S.Konduri, H.Maske, P.R.Pagilla and G.Chowdhary: “ Blended Shared Control of a Hydraulic Excavator ”, IFAC-PaperOnLine Vol.50, No.1, pp. 12928–14933 (2017)
- [40] M.Haga, H.Watanabe, K.Fujishima: 「Digging control system for hydraulic excavator」, Mechatronics, Vol.11, No.6, pp. 665–676 (2001)
- [41] 原 直行:「擬似逆行列を用いた柔軟ベース上冗長マニピュレータのトルク制御」, 第 50 回自動制御連合講演会予稿集, pp. 600–605 (2007)
- [42] 竹内 裕喜:「脚式ロボットのリアルタイム制御 -等式拘束条件付 Receding Horizon Control による目標 ZMP 起動の自動生成-」, 日本計算工学会論文集, Vol.2001, pp. 2001001 (2001)
- [43] 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. 1–15 (2017)
- [44] 梶田 秀司:「ゼロモーメントポイント (ZMP) と歩行」, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp. 229–232 (2002)
- [45] M.Vukobratovic, B.Borovac: “Zero Moment Point Thirty Five Years of Its Life” , International Journal of Humanoid Robotics, Vol.1, No.1, pp. 157–173 (2004)
- [46] S.Soma, O.Kaneko and T.Fujii: “ A new method of controller parameter tuning based on input-output data -Fictitious Reference Iterative Tuning(FRIT)- ”, IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, and IFAC Workshop on Periodic Control Systems, Vol.37, No.12, pp. 789–794 (2004)
- [47] 秋山 将貴, 洪水 雅俊, 山本 透, 小岩井 一茂, 山下 耕治, 山崎洋一郎:「油圧ショベルの重心速度に基づいた多入力多出力 PID 制御系の適用」, 第 27 回計測自動制御学会中国支部 学術講演会予稿集, pp. 39–40 (2018)
- [48] T.Yamamoto and S.L.Shah: “ Design and Experimental Evaluation of a Multivariable Self-Tuning PID Controller ”, IEE Proc. of Control Theory and Applications, Vol.151, No.5, pp. 645–652 (2004)
- [49] 藤田 光伸, 鎌田 実, 宮田 圭介:「機械操作における技量の抽出に関する研究 (第 1 報, 視覚情報からの認知能力の抽出)」, 日本機械学会論文集 C 編, No.67, No.653, pp. 201–208 (2001)
- [50] 藤田 光伸, 鎌田 実, 宮田 圭介:「機械操作における技量の抽出に関する研究 (第 2 報, 操作時の認知能力の解明および操作支援への応用手法の提案)」, 日本機械学会論文集 C 編, No.68, No.666, pp. 547–554 (2002)

- [51] 野見山 武徳, 荒毛 将史:「航空機操縦者の二重課題成績」, 日本認知心理学会発表論文集, pp. 101–101 (2011)
- [52] 林 喜男, 大川 雅司, 井口 雅一:「人間・機械システムの設計」, 人間と技術社 (1971)
- [53] 長町 三生, ほか:「現代の人間工学」, 朝倉書店 (1986)
- [54] H.Matsumori, S.Wakitani, M.Deng:“ Design and Application of a Data-Driven Expert Controller Based on the Operating Data of a Skilled Worker ”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.28, No.5, pp. 730–738 (2016)
- [55] K.Koiwai, L.Yuntao, T.Yamamoto, T.Nanjo, Y.Yoichiro and Y.Fujimoto :“ Feature Extraction for Excavator Operation skill using CMAC ”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.28, No.5, pp. 715–721 (2016)
- [56] K.Koiwai, T.Yamamoto, T.Nanjo, Y.Yamazaki and Y.Fujimoto :“ Data-Driven Human Skill Evaluation For Excavator Operation ”, Proc. of the 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 482–487 (2016)
- [57] 須田 信英, 他:「PID 制御」, 朝倉書店 (1992)
- [58] 林 喜男:「制御作業における人間特性」, 人間工学, Vol.3, No.4, pp. 266–274 (1967)
- [59] 戸松 匠, 野中 謙一郎, 関口 和真, 鈴木 勝正:「油圧ショベルにおけるモデル予測追従制御の基礎実験 (未知物体押しのに起因する掘削形状からの逸脱の抑制)」, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.49, No.1, pp. 1–9 (2018)
- [60] T.Yamamoto, K.Takao and T.Yamada :“ Design of a Data-Driven PID Controller ”, IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol.17, No.1, pp. 29–39 (2009)
- [61] 増田 士朗, 武田 郷平:「外乱によって生成された入出力データを用いた外乱抑制 FRIT 法」, 電気学会論文誌 C, Vol.131, No.4, pp. 788–793 (2011)
- [62] K.L.Chien, J.A.Hrones and J.B.Reswick :“ On the Automatic Control of Generalized Passive Systems ”, Trans. ASME, Vol.74, pp. 175–185 (1972)
- [63] 脇谷 伸, 大西 義浩, 山本 透:「FRIT 法を用いた非線形 PID 制御系の設計」, 計測と制御, Vol.52, No.10, pp. 885–891 (2013)
- [64] S.Wakitani, T.Yamamoto and B.Gopaluni:“ Design and Application of a Data-driven PID Control with Data-Driven Updating Algorithm ”, Industry & Engineering Chemistry Research, Vol.58, No.26, pp. 11419–11429 (2019)
- [65] 小岩井 一茂, 宮寄 龍之介, 山本 透, 上田 浩司, 山下 耕治, 山崎洋一郎:「制御工学的視点に基づく油圧ショベル操作における応答性評価指標の構築」, 電気学会論文誌 C, Vol.138, No.5, pp. 506–511 (2018)
- [66] 洪水 雅俊, 山本 透, 小岩井 一茂, 山下 耕治, 山崎洋一郎:「操作技量に応じた油圧ショベル動特性の設計に関する一考察」, 2019 年電気学会 電子・情報・システム部門大会予稿集, pp. 328–331 (2019)
- [67] 木下 拓矢, 池田 啓昭, 山本 透, 町澤 まろ, 田中 精一:「油圧ショベルにおけるデータベース駆動型感性フィードバック制御系の一設計」, 第 61 回自動制御連合講演会講演論文集, pp. 1744–1749 (2018)

付録

付録A 油圧ショベルの非線形性

油圧ショベルは油圧機器の特性やアタッチメントの構造，制御の制約上，非線形性を有している。なかでも，一般的な重機ショベルに搭載されている油圧ポンプは，作業時の負荷に応じて，油圧ポンプが吐出する作動油の量が大きく変化するため，レバー操作入力から，出力となるアタッチメント動作までのシステム伝達関数に変化することとなる。掘削作業を例にこの非線形特性について説明する。主たる動作であるアーム引きは作業を効率的に早く完了させるために最大操作，最大速度で作業行うことが多い。しかし，掘削と共にバケット内部に土砂が堆積するため，これらの土砂から受ける反力抵抗などによって，アーム引きの速度は低下する。この要因の一つが油圧ショベルの非線形性である。本論文で使用している油圧ショベルは，高負荷時において，搭載しているエンジンがストールしないように，以下の式に基づき，油圧ポンプの出力 W_p [kW] が一定馬力となるように制御されている。

$$W_p = \frac{PQ}{60} = \text{const.}$$
$$Q = \frac{qN}{1000}$$

ここで， P は油圧ポンプの吐出圧力 [MPa] であり，油圧ショベルに作用する負荷の大きさを表す。また， Q は油圧ポンプの吐出流量 [L/min]， q は油圧ポンプの押しのけ容積 [cc/rev]， N は油圧ポンプの回転数，すなわち直結されたエンジンの回転数を示す。一般的に，油圧ショベルはエンジン回転数一定で使用するため，高負荷時に馬力を一定にするには流量 Q を変化

させなければならない。したがって、レバー操作量が一定でも、出力は負荷に応じて逐次変化するため、システム特性は非線形となる。

付録B 参照モデルの設計

制御系において、所望の動特性となる出力を得るには、参照とすべき特性すなわちモデルを設計する必要がある。参照モデル $G_m(z^{-1})$ は以下の式で設計される [48]。

$$G_m(z^{-1}) = \frac{z^{-1}P(1)}{P(z^{-1})}$$

$$P(z^{-1}) = 1 + p_1z^{-1} + p_2z^{-2}$$

ここで、 $P(z^{-1})$ は設計多項式であり、以下の式によって定義される。

$$p_1 = -2 \exp\left(-\frac{\rho}{2\mu}\right) \cos\left(\frac{\sqrt{4\mu-1}}{2\mu}\rho\right)$$

$$p_2 = \exp\left(-\frac{\rho}{\mu}\right)$$

$$\rho := \frac{T_s}{\sigma}$$

$$\mu := 0.25(1 - \delta) + 0.51\delta$$

T_s はサンプリング時間である。また、 σ 、 δ はそれぞれ制御系の立ち上がり特性、減衰特性に関するパラメータであり、任意の値に設定が可能である。 σ は制御系の出力がステップ状の目標値の約 60% に達するまでの時間を示している。また、 δ は $0 \leq \delta \leq 2$ の間で設定することが望ましく、 $\delta = 0$ で Binomial モデルに相当する応答形状を、 $\delta = 1$ で Butterworth モデルに相当する応答形状を示す。例えば、プロセス系の制御においては、出力がオーバーシュートすることは好まれないため、 $\delta = 0$ でモデルが設計されることが多い。一方で、機械系の制御では、多少のオーバーシュートを含んだ出力の方が、より応答性を重視することができるため、作業効率の観点では $\delta > 0$ で設定した方がよい場合もある。

引用既発表論文

A. 学術雑誌等掲載論文

- [1] 洪水雅俊、小岩井一茂、山本透、上田浩司、山下耕治、山崎洋一郎：「油圧ショベルのアタッチメント重心挙動に基づく技量評価指標の構築」，電気学会論文誌 C，Vol.139，No.4，pp. 388-394，2019
- [2] 洪水雅俊、山本透、小岩井一茂、山下耕治、山崎洋一郎：「油圧ショベルのアタッチメント合成重心速度に基づく掘削アシスト制御系の一設計」，計測自動制御学会論文集，Vol.56，No.3，pp. 149-155，2020
- [3] Masatoshi Kozui, Toru Yamamoto, Masaki Akiyama, Kazushige Koiwai, Yoichiro Yamazaki : “ Application of a MIMO-PID Controller for a Hydraulic Excavator Considering the velocity of CoM ” , *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.32, No.3, pp. 643-651, 2020
- [4] 洪水雅俊、山本透、小岩井一茂、山下耕治、山崎洋一郎：「非線形特性を有する油圧ショベルのデータベース駆動型掘削支援制御系の設計」，計測自動制御学会論文集，Vol.57，No.3，2021（掲載決定）

B. 国際学会等講演論文

- [1] Masatoshi Kozui, Toru Yamamoto, Kazushige Koiwai, Koji Yamashita, Yoichiro Yamazaki: “ Application of Digging Control based on the Center-of-Mass Velocity of the Attachment of a Hydraulic Excavator ” , *Proceedings of the 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2314-2319, Macau, November 2019

その他既発表論文

C. 学術雑誌等掲載論文

- [1] Mikiya Sako, Shin Wakitani, Masatoshi Kozui, Toru Yamamoto, Koji Yamashita, Kazushige Koiwai, Yoichiro Yamazaki : “ Design and Practice of a Model-Based Development Education in Hydraulic Systems ” , *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.32, No.3, pp. 662-671, 2020

D. 国際学会等講演論文

- [1] Ryotaro Mori, Tomohiro Henmi, Masatoshi Kozui, Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto : “ Relationship between Skill of Expert Operator and the Use of Sense in the Boom up and down Operation of a Hydraulic Excavator ” , *Proc. of The SICE Annual Conference 2019*, pp. 1529-1530, Hiroshima, September 2019
- [2] Mikiya Sako, Shin Wakitani, Masatoshi Kozui, Toru Yamamoto, Koji Yamashita, Kazushige Koiwai, Yoichiro Yamazaki : “ Study on a Model-Based Development Education Platform in Hydraulic Systems ” , *Proc. of The SICE Annual Conference 2019*, pp. 1314-1317, Hiroshima, September 2019

謝辞

本研究の推進及び本論文の作成は、多くの方々のご支援・ご助言によって、完成することができました。ここに感謝の意を込め、御礼を申し上げます。

広島大学 大学院 工学研究科（先進理工系科学研究科）山本 透 教授には、研究の推進や論文の作成において、丁寧なご指導とご高配を賜りました。また、コベルコ建機夢源力共創研究所の設置やその運営に関しましても、誰よりも研究所の将来やプレゼンスの向上をお考えになってくださり、多くの共同研究やプロジェクトとの連携に向けてご尽力いただきましたこと、心より感謝申し上げます。

また、本論文をまとめるにあたり、貴重なご助言・ご意見を賜りました、広島大学 大学院 工学研究科（先進理工系科学研究科）栗田 雄一 教授，高木 健 教授に深く感謝致します。

さらに、広島大学 大学院 工学研究科（先進理工系科学研究科）大野 修一 准教授，脇谷 伸 講師，中本 昌由 助教，木下 拓矢 助教には、本研究を進めるにあたり、大変多くのアドバイスやご協力を賜りました。深く感謝致します。

コベルコ建機株式会社 新事業推進部 部長 山崎洋一郎 氏，同部 新事業企画グループ グループ長 田中 精一 氏，先端技術開発部 部長 山下 耕治 氏には、研究環境の構築にご尽力いただくと共に、研究の方向性についても的確なご助言を賜ったこと、心より感謝申し上げます。特に、先端技術開発部 モデルベースシステム機能開発グループ グループ長 小岩井 一茂 氏には、博士課程後期進学前より、社会人としての共同研究の考え方から論文執筆に至るまで、多岐にわたり多大なるご指導をいただき、心より感謝申し上げます。

また、本研究の検証実験においては、同部 モデルベースシステム機能開発グループ 吉原 秀

雄氏，平岡京氏には，連日の検証にも関わらずご協力をいただき，安全な実験の遂行，そして有益な成果を得ることができました。深く感謝致します。

共に広島大学へ出向した伊藤卓 コベルコ建機ヒューマンインターフェース共同研究講座助教には，研究についてアドバイスやご協力をいただくと共に，日々のコミュニケーションを通して，有意義な研究生活を過ごすことができました。深く感謝致します。

広島大学の同じ研究室で時間を共にした学生の方々とは，互いに研究に励み，成長できたこと，そして様々な場面でご支援いただいたことに感謝致します。特に，秋山将貴氏には，提案手法の構築や検証に多大なご協力をいただき，本論文を作成する上で大きな助けとなりました。深く感謝致します。

最後に，広島大学 大学院 博士課程後期への進学，学位取得に向けた取り組みに理解を示し，いつも支えてくれた家族に心から感謝致します。