

制御工学的視点に基づく油圧ショベルの
動作評価と操作技量評価に関する研究

(A Study on Evaluations of the Behavior and Operational Skills
for an Excavator Based on the Control Engineering Approach)

広島大学 工学研究科
システムサイバネティクス専攻
D160613 小岩井 一茂

2018年3月

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	制御工学と人の操作を必要とする作業機械	4
1.3	本論文の章構成	6
第2章	油圧ショベルのデータ指向型トルク制御	8
2.1	緒言	8
2.2	油圧ショベルの旋回加速系の伝達特性	11
2.2.1	旋回加速システム	12
2.2.2	油圧ポンプの特性	13
2.2.3	リリーフバルブ開放時の制御対象伝達特性	14
2.2.4	圧力と流量の伝達特性	15
2.2.5	リリーフバルブ閉鎖時の制御対象伝達特性	17
2.3	油圧ショベルのデータ指向型トルク制御系の設計	19
2.3.1	伝達特性に基づいたコントローラ構造の設計	20
2.3.2	イベントトリガーの設定	22
2.3.3	ゲインスケジューリング制御によるコントローラ切り替え手法	22
2.3.4	閉ループデータを使用したゲイン算出方法	24
2.4	シミュレーション検証結果	28
2.4.1	PQ制御のシミュレーション検証結果	28
2.4.2	PID制御の検証結果	28
2.4.3	提案手法のシミュレーション検証結果	32
2.5	実機検証結果	36
2.5.1	PQ制御の実機検証結果	36
2.5.2	PID制御の実機検証結果	36
2.5.3	提案手法の実機検証結果	38
2.6	結言	43
第3章	制御工学的視点に基づく 油圧ショベルの操作性評価指標の構築	44
3.1	緒言	44

3.2	評価対象の表現	46
3.2.1	制御工学的視点に基づく評価対象の低次モデル化	46
3.2.2	シミュレータの構築	49
3.3	応答性の評価手法	52
3.3.1	遺伝的アルゴリズムを用いたパラメータ推定法	52
3.3.2	評価手順	55
3.4	評価結果	56
3.4.1	シミュレーションによる評価結果	56
3.4.2	実機による評価結果	58
3.4.3	$L+T$ と応答性官能評価値の関係性考察	58
3.5	結言	62
第4章	制御工学的視点に基づく 油圧ショベル操作技量の特徴抽出	63
4.1	緒言	63
4.2	スキルベースドCMAC-PIDコントローラ	65
4.2.1	小脳演算モデル	65
4.2.2	スキルベースドCMAC-PIDコントローラ	70
4.2.3	スキルデータに基づくCMACの学習法	71
4.3	適用結果	74
4.3.1	適用対象	74
4.3.2	CMACの学習結果	76
4.4	スキルの特徴抽出	79
4.4.1	定性的スキル評価	79
4.4.2	定量的スキル評価	83
4.5	結言	89
第5章	結論	90
	参考文献	94
	引用既発表論文	98
	その他既発表論文	100
	謝辞	102

第1章 序論

1.1 研究背景

総務省の「労働力調査」に基づく、2017年現在、建設業で働く労働者について55歳を超える年齢が約3割となり、その反面で、29歳以下が約1割となっている [1]。また、全産業と比較すると、建設業で働く人の割合は、近年、高齢者が多く、若年者が低い傾向にある。Fig.1.1に国土交通省から発表された「建設業を取り巻く情勢に関する建設業就労者の高齢化」に関する資料を示す。今後、55歳以上の労働者が10年内で大量に離職することと、若年入職者が低迷することにより、建設業の労働者不足が起これると考えられる。一方で、インフラの

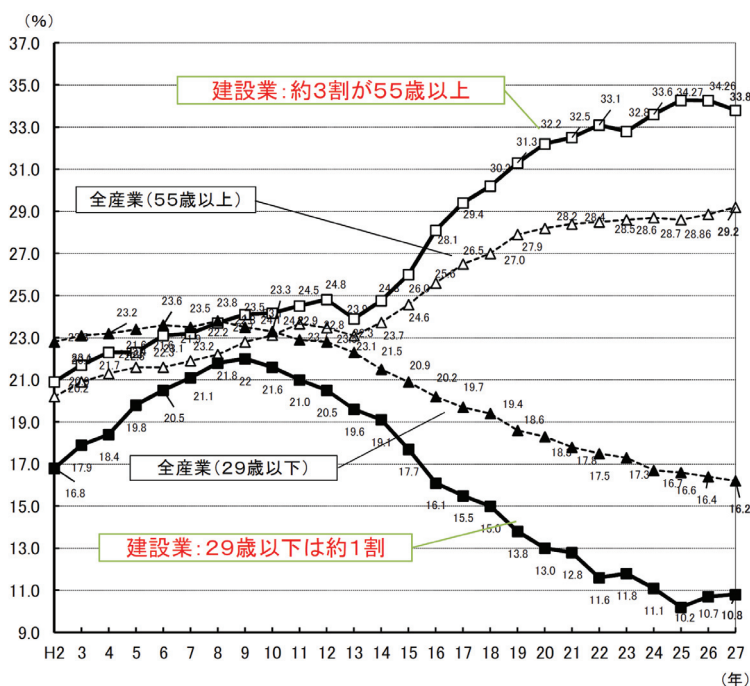


Fig. 1.1: Number of workers for construction fields [1]

整備は我々の生活の中に必要不可欠であり、各地で発生する災害に対する防災や減災対策の実施 [2]、高度成長期以降に整備したインフラの老朽化に対する保全や改修 [3]、2020年に開催される東京オリンピック関連の建設需要の拡大のように、人が生活する上で、インフラの整備に対する需要が減少していく可能性はない。このように、インフラ整備の作業量に対して、労働者が不足するため、労働者一人当たりの生産性を増やし、建設現場全体の生産能力を保つ必要がある。

このような建設業における課題を解決するため、国土交通省の主導によって、「i-Construction」という建設現場の生産性向上に対する方針が打ち出された [4]。この方針は、「魅力ある建設現場作り」を目的として、建設現場に対する、3D計測技術の導入、建設機械の自動化等のICT(Information and Communication Technology)の全面的な活用を行い、建設現場の生産システム全体を効率化することで、生産性を向上させる取り組みである [5, 6]。また、国土交通省から提示されている i-Construction 推進に向けたロードマップには、この取り組みの最終的な狙いとして、新3K（給料が良い、休暇がとれる、希望がもてる）の魅力ある建設現場を実現し、Society5.0を支えるインフラマネジメントシステムの構築を行うことが記載されている [7]。すなわち、建設現場で働く作業者が効率よく業務を進めるために、革新した情報通信技術等を利用して、建設現場の環境を働きやすく変革させることが、今後の建設現場の解決すべき課題である。

建設現場には、油圧ショベル、ブルドーザ、大型ダンプ等のさまざまな建設機械が稼働しており、作業現場の生産性向上には建設機械は欠かせない。ここで、生産性が高いとは、作業量が多いことだけでなく、その作業に使用されたエネルギー量が少ないことも必要である [8, 9]。しかし、エネルギー量を低減させることは、対象の安定性に対する余裕を削ることになるため、様々な環境下で働く建設機械において、特定の条件下での振動現象等を引き起こし、作業を阻害する要因となることがある。この問題を解決するために、建設機械の製造メーカーでは多くの開発時間を要する。また、安定性を確保するための施策として、一部の条

件下で必要以上のエネルギー量を投入することもある。よって、機体を安定性して駆動することが、直接生産性向上につながる。すなわち、生産性向上のためには、建設機械の制御性能を向上させることが重要となる。

また、近年、3次元の施工図面を基に自動施工を行うICT建機が研究・開発されている[10, 11]。これらのICT建機を活用して、調査・計測から設計・施工、さらには維持管理までを行うソリューションの提案も行われている[12]。このような施工現場全体についてデータを使って管理・運用する手段は、建設機械が決められた作業を行う大規模な建設現場に対して、生産性を向上させる有効な手段の一つとなる。しかし、現状では、このような方法を活用して、すべての建設現場をデータで管理し、作業を全て自動化することは困難である。特に、比較的作業が複雑な油圧ショベルに対しては、全ての作業を自動化することは現実的ではない。すなわち、油圧ショベルのような建設機械に対して、人間の操作による作業は依然として必要である。人が操作する機械は、人が操作しやすく設計する必要がある。建設機械の操作性に関する研究も数多く実施されている[13]-[16]。そこで、操作する人を含んだ系で建設機械をとらえ、操作する人がどのように感じて評価を行うかを明確にすることで、定量的な指標を構築する必要がある。さらに、その指標に基づいて建設機械を設計することで、人に操作される建設機械の作業量を上げることができ、その結果として建設現場の生産性向上が可能になると考える。

一方で、建設機械は、その操縦技術に個人差があり、作業効率は操縦者に依存する。すなわち、熟練者による最適化された建設機械の操縦技術により、建設現場の効率的な作業が実現している。そのため、操縦者の作業テクニックやコツといった特徴を定量的に評価し、効率的な作業を把握することで、建設現場をさらに効率的に稼働させることができる。作業機械等の操作における技量やその特徴を抽出する先行研究として、境田らによる掘削時のバケット軌跡の差異による技量抽出[17]、藤田らによる視覚情報に関する認知能力についての技量抽出や[18]、機体操作時の挙動の差異に着目した技量抽出[19]等がある。これらの先行研究

のように、さまざまな視点から熟練操縦者の特徴を抽出することで、将来的には、自動化技術やAIへの活用による生産性向上も期待できる。

以上より、人が操作する建設機械に対して、生産性を向上させるためには以下の項目が重要となり、それらに基づく機体設計が必要となる。

(i) 機体の制御性

(ii) 操作性評価の指標

(iii) 操作技量の評価

1.2 制御工学と人の操作を必要とする作業機械

自動制御を取り入れた最初の装置として、James Watt の開発したガバナと呼ばれる调速機はよく知られている。ガバナは、遠心力を利用して、蒸気機関やエンジンなどの原動機の回転速度等の出力を一定に保つ機械的な機構である。このガバナを使用した原動機を安定して駆動するために、動力学や安定性の解析等が発展した [20]-[22]。これが制御工学の始まりと考えられている。今では、マイクロコントローラ等に様々な制御技術が搭載されており、建設機械においても電子制御は不可欠な技術となっている。このように、制御工学はモノを動かすために発展してきた技術である。

一方で、人がコントローラの代わりを行っていることは、一般的な制御の参考書で表現されている [23]。例えば、人が手のひらで棒を立たせる遊びがある。この遊びは、目で棒の位置や速度を検出し、棒を垂直に立たせるという目標に対して、脳からの指令により手や腕を動かすことで、棒を垂直にする。これは、人間がコントローラとなり、制御対象である棒にフィードバック制御を行っている一例である。このように、人間をコントローラとして扱うことは、一般的な考えとして利用される。一般的な出力フィードバックのブロック線図を Fig.1.2 に示す。特に、人間工学の分野では、制御工学と人間の関係性について、さまざまな研究が

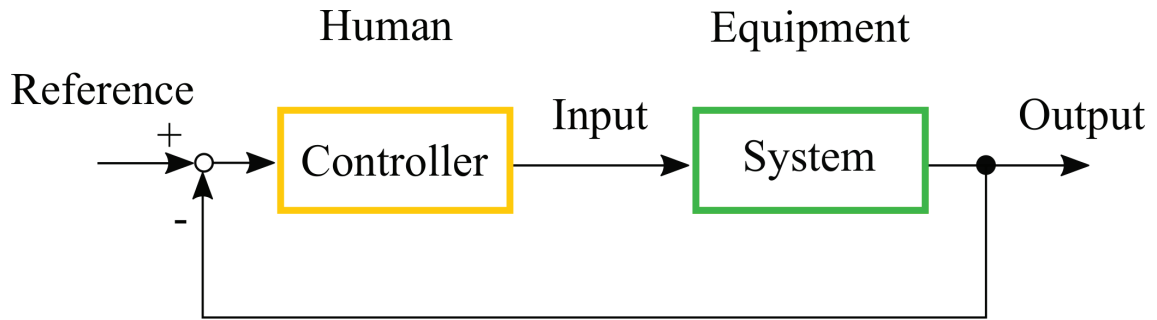


Fig. 1.2: Block diagram of block diagram

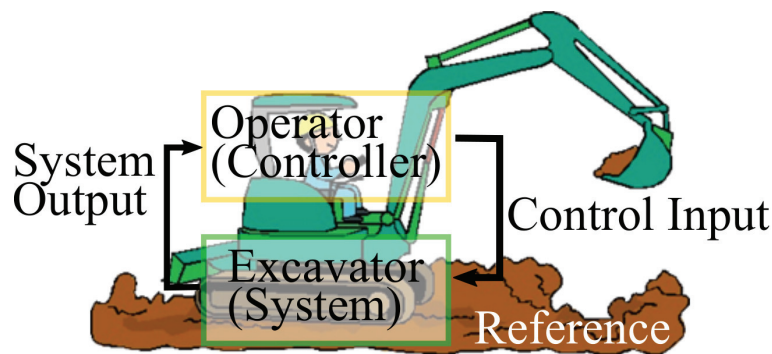


Fig. 1.3: Basic idea of study

古くから行われている [24]-[27]。ここで、油圧ショベルのような建設機械を考える。建設機械は、人が操作することで動作する。このとき、棒の例と同様に、制御工学的な視点でとらえると、建設機械を制御対象、操作する人をコントローラとして考えることができる。具体的な建設機械に対して、建設機械を制御対象、人をコントローラに置き換えて、分析・評価された研究例は、著者の知る限り、実施されていない。

このように、操作する人をコントローラ、操作される機械をシステムと捉えて、人を含んだ閉ループ系とした制御工学的な視点により、建設機械である油圧ショベルに対して、その動きやそれを操作する人の技量を評価・分析することを研究のテーマとする。Fig.1.3に、人が操作する建設機械と制御工学の関係性を示す。なお、本論文では、Fig.1.4に示す油圧ショベルを対象として、上記で説明した制御工学的な視点に基づき、前節で上げた課題に対する評価を行う。



Fig. 1.4: Hydraulic excavator

1.3 本論文の章構成

本論文では，制御工学的な視点に基づき油圧ショベルの動作と，その操縦者の技量を評価する。構成を以下に示す。

まず，第2章では，油圧ショベルにおける制御手法の適用事例として，油圧ショベルのデータ指向型トルク制御を提案し，その有効性を検証する。ここで，制御対象を油圧ショベルの旋回動作，入力を油圧ポンプの指令流量，出力を油圧ポンプの出力トルクとして，旋回体の回転を含んだ系の伝達特性を明らかとする。次に，油圧システムに非線形要素が含まれることを考慮し，その伝達特性に基づき制御則を設計する。さらに，データ指向型制御則に基づくゲイン算出手法を提案する。最後に，シミュレーションと実機を用いて提案する制御手法の有効性を検証し，提案手法により作業性が改善されることを確認する。

次に，第3章では，システムを同定する手法を応用し，油圧ショベルのブーム上げ操作の応答性評価指標を構築する。まず，評価対象をブーム上げの加速操作として，制御工学で用いられる制御対象をモデルする考え方に基づき，操縦者が制御対象である油圧ショベルの動作を低次のモデルで表現していると仮定する。ここでは，加速応答性の低次モデルは一次遅

れ系とする。さらに、一次遅れ系で実機を模したシミュレータを作成し、そのシミュレータと実機の両方で複数名の被験者がブーム上げ操作を実施し、それぞれの加速応答性に関する官能評価を実施する。なお、遺伝的アルゴリズムを用いたパラメータ推定手法で、実機の動作を一次遅れ系で近似する。最後に、一次遅れ系のパラメータと加速応答性の官能評価値の関係性を検証することで、応答性に関する指標を構築する。

さらに、第4章では、コントローラ設計手法を応用し、油圧ショベルの旋回操作の特徴を抽出する。ここでは、操縦者をコントローラとして捉え、その制御パラメータを算出し、算出された制御パラメータを熟練者と非熟練者で比較することにより、操作の特徴を抽出する。まず、油圧ショベルの旋回操作を対象として、熟練者と非熟練者のデータを取得する。次に、小脳演算モデルを用いたスキルベースドPIDコントローラ的设计法を用いて、制御パラメータを算出する。最後に、熟練者と非熟練者のそれぞれで算出された制御パラメータを比較することで、操作の特徴を抽出する。

最後に、第5章では、本論文の研究を総括し、今後の研究活動に対して言及する。

第2章 油圧ショベルのデータ指向型トルク制御

2.1 緒言

建設現場において、建設機械を使用した生産性の最大化が必要不可欠である。建設機械の生産性を最大化するためには、その現場で働く作業機械が最大作業量で作業できることと、それら機械の消費エネルギーを必要最小限に抑えることの両立が必要となる [8, 9]。しかしながら、最大作業量の確保と省エネルギー化にはトレードオフの関係があり、様々な環境下で両者のトレードオフ関係を最適化するためには、制御パラメータの決定等の機体チューニングに時間を要する。

一方、油圧ショベルは、エンジンから供給される動力を油圧ポンプや油圧弁を介して、油圧アクチュエータに伝達する機構により作動し、掘削や重量物の持ち上げ等の作業が可能となる。油圧ショベルにおいて、エンジンの回転数が一定の場合、エンジンが供給する動力は油圧ポンプのトルクによって決まる。さらに、油圧ポンプのトルクは、ポンプに与えられる圧力とポンプが吐出する流量によって決まる [28]。一般的に油圧ショベルは、PQ制御と呼ばれる方式で油圧ポンプのトルクが制御されている。これは、センシングされたポンプ圧力を用いて、所望のポンプトルクから決定されるPQ曲線と呼ばれる圧力と流量によって決まる曲線に基づき、吐出流量の指令値を決める方式である。この方式は、計測された圧力により流量が一意に決まる静的補償器である。しかしながら、静的補償器は位相遅れに対する補償等の機能を持たないため、省エネ性能を追求した機体に対しては、安定性に余裕が少なく、低

温環境下等の駆動条件において安定性の確保が課題となる。それらの課題を解決するために、開発段階のチューニングに時間を要する。さらに、安定性を確保するために低温時の作業性、または省エネ性能のいずれかが若干犠牲になることもある。

この問題に対する先行研究として、トルク制御に動的補償器である PID 制御を用いることが検討された [29]。この研究では、低温時に発生するハンチングと呼ばれる位相遅れに起因した振動現象を防ぐことはできたが、トルクの追従性が確保できないという課題があった。追従性を確保できない理由として、対象とする油圧システムは、駆動中にシステムが切り替わる非線形性を有している。さらに、切り替わった後のシステムが微分要素を含むシステムになるため、一般的な PID 制御ではコントローラの積分要素が相殺されてしまい、追従性の確保が困難となる。

この課題を解決するために、データ駆動型制御 [30] によるトルク制御が提案された [31]。この手法は、システムに発生する微分要素に対して、コントローラに二重積分項を追加することで、追従性を確保する。さらに、データ駆動型制御によりパラメータを逐次更新することで、システムが微分要素をもったときのみコントローラの二重積分要素を働かせ、追従性を確保することに数値シミュレーション上で成功した。しかしながら、データ駆動型制御は繰り返し演算が多く、計算コストが過大となり、建設機械に搭載されている汎用のマイクロコントローラには搭載することが困難であった。

すなわち、油圧ショベルのトルク制御に対して、以下の課題を解決する必要がある。

- (1) 低温環境下等の特殊環境下におけるハンチング防止
- (2) 省エネ性能と低温時の作業性確保
- (3) 開発段階でのチューニング時間の削減
- (4) 微分系を含む系にシステム変動後の追従性確保
- (5) 実機実装が容易なアルゴリズム

一方、「力学的拘束条件の変化」をイベントとして捉え、達成すべき運動の複雑さに合わせて制御則を調整するイベント駆動型制御が山口らにより提案されている [32]。「力学的拘束条件の変化」とは、運動方程式などのダイナミクスの変化を指しており、その変化を観測値から抽出し、イベントに応じて制御則を変更・調整する手法である。この先行研究では、イベント駆動型制御を人間やロボットの運動に応用しているが、機械の動作にも拡張可能であると考えられる。

そこで、上記課題を解決するために、油圧ショベルのデータ指向型トルク制御を提案する。油圧ショベルのデータ指向型トルク制御とは、イベントに応じて変化するシステムに対して、伝達関数で表現されるシステムのダイナミクスから、コントローラの構造をイベントに応じて複数個設定する。次に、それらコントローラのパラメータを一回の実験データから算出する。さらに、イベントとして扱う内部状態の変化に応じて、複数個のコントローラを切り替える制御則である。具体的には、油圧ショベルのシステム変動が内部状態であるポンプ圧力に依存することに着目し、システム変動に対して発生するポンプ圧力の変化をイベントとして捉え、そのイベントに応じてコントローラの構造を変化させる。さらに、システム変動前後でPID制御則を基本としたコントローラの構造を設定することで、イベント間でのコントローラ切り替えはポンプ圧に基づいたゲインスケジューリング制御により実現する。また、制御ゲインは、一般化最小分散制御則 (GMVC: Generalized Minimum Variance Control) に基づき [33]、一回の試験データから直接的に算出する [34]。なお、ゲイン算出に使用するデータは、ポンプ圧力の状態に応じて選定する。

本章では、まず、制御対象である油圧ショベル旋回加速系の伝達関数を明確にする。次に、その伝達関数に基づき、データ指向型トルク制御を設計する。さらに、パソコン上の数値シミュレーションにて理論の検証を行い、実機検証により実際の油圧ショベルのマイクロコントローラに搭載することで、提案手法の有効性を検証する。有効性については、PQ制御、PID制御および提案手法を、それぞれ比較検証する。

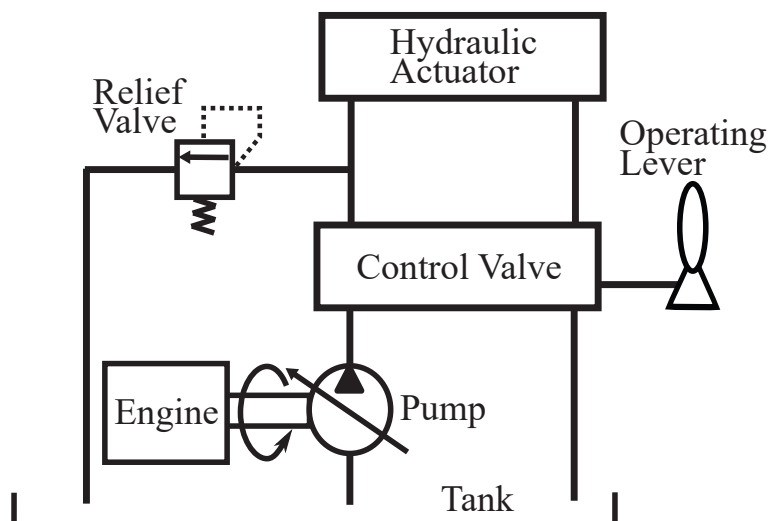


Fig. 2.1: Typical hydraulic circuit for excavator

2.2 油圧ショベルの旋回加速系の伝達特性

本章の制御対象は、油圧ショベルの旋回加速システムを扱い、ポンプトルク $T(t)$ を出力、ポンプ吐出流量の指令値 $Q_{in}(t)$ を入力とする。油圧ショベルの旋回加速中のシステムは、リリーフバルブが開放状態から閉鎖状態になることにより、「一次遅れ+むだ時間」系から微分要素を含む系に切り替わる。詳細を以下に示す。

油圧ショベルの汎用的な油圧回路の概念図を Fig.2.1 に示す。油圧ショベルは、操縦者が操作レバーを動かすことで操作量を入力する。その操作量が油圧回路を通してコントロールバルブに伝わり、操作量に応じたバルブ開度の流路が形成されることにより、油圧ポンプから吐出された油が油圧アクチュエータへ伝わる。これにより、油圧モータや油圧シリンダなどのアクチュエータが動く。ここで、油圧ポンプは、駆動源としてのエンジンに接続されており、特定の回転数で回転する。さらに、油圧ショベルでは、一般的には斜板型可変容量ポンプが使用されており、コントローラからの指示に基づいた流量の油を吐出することが可能である。また、ポンプから吐出された油は、アクチュエータへ送られるが、アクチュエータに負荷がかかった時などは、安全弁であるリリーフバルブを通して、油はタンクに返される。

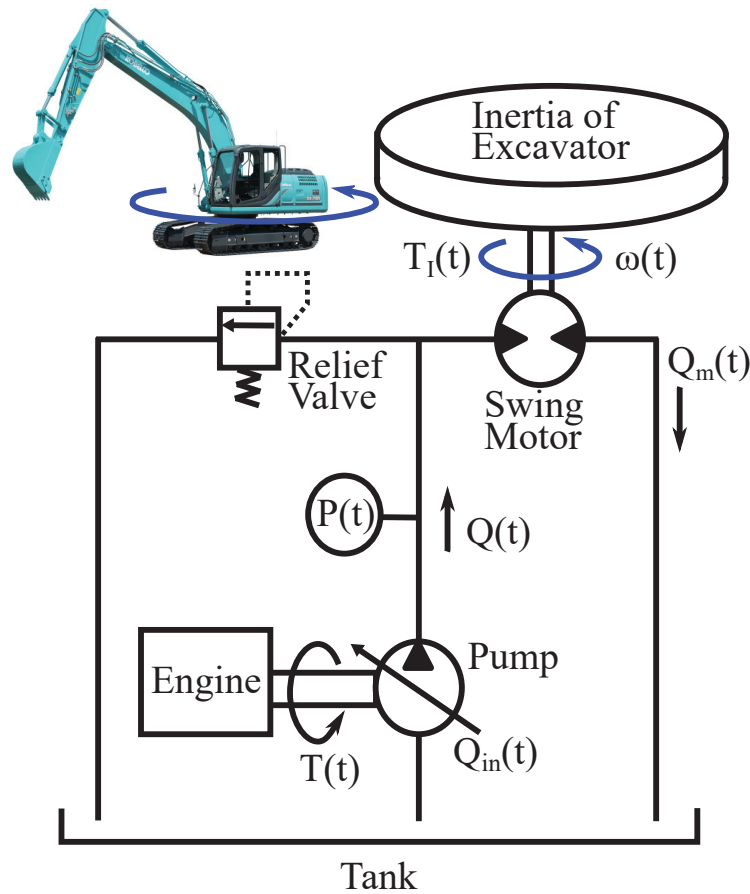


Fig. 2.2: Schematic of a hydraulic system for a swing motion

2.2.1 旋回加速システム

序章で述べた課題 (1) は、旋回操作の最大加速操作時に発生することが多い。そのため、本章における操作対象は油圧ショベルの旋回加速操作とし、減速操作は考慮しない。さらに、最大加速操作は、ステップ状の入力となるようにレバーを操作する。このとき、コントロールバルブの開度は 0 から最大まで、ほぼステップ状で上昇するため、本章ではコントロールバルブの特性は考慮しない。旋回最大加速時の簡略した油圧回路図を Fig.2.2 に示す。

油圧ショベルの上部旋回体を加速させる問題を考える。このとき、上部旋回体を加速させるために必要なトルク $T_I(t)$ と旋回体の角速度 $\omega(t)$ の関係は以下の式で表される。

$$T_I(t) = I \frac{\Delta\omega(t)}{T_s} \quad (2.1)$$

ここで、 Δ は $\Delta = 1 - z^{-1}$ で表される差分演算子、 $T_I(t)$ は旋回体駆動トルク、 I は旋回体の慣性モーメント、 T_s はサンプリング時間、 $\omega(t)$ は旋回体回転速度である。姿勢が変わらない場合、慣性モーメント I が一定となるため、トルク $T_I(t)$ を一定に保つことにより、加速度 $\Delta\omega(t)$ を一定で加速することができる。また、油圧ポンプから供給された動力は、油圧配管を經由して旋回体に接続される油圧モータに伝わり、旋回体が回転する。 $T_I(t)$ は直接制御することが困難なため、 $T_I(t)$ を安定して一定で加速させるためには、間接的にポンプトルク $T(t)$ を一定に保ち、安定した動力を供給する必要がある。

2.2.2 油圧ポンプの特性

油圧ポンプは、回転軸がエンジンに接続され、回転軸に取り付けられた油圧ポンプ内部のピストンが駆動することで油を吐出する。ポンプトルク $T(t)$ は、実ポンプ吐出流量 $Q(t)$ 、ポンプ吐出圧力 $P(t)$ 、単位時間当たりのエンジン回転数 N 、油圧ポンプの全効率 η により、次式で表される。

$$T(t) = \eta \frac{P(t)Q(t)}{2\pi N} \quad (2.2)$$

ここで、エンジン回転数と油圧ポンプの全効率が一定と仮定すると、次式で表される。

$$T(t) = C_{PQ}P(t)Q(t) \quad (2.3)$$

なお、 C_{PQ} は比例定数である。さらに、実ポンプ吐出流量 $Q(t)$ とその指令値 $Q_{in}(t)$ は、以下の関係で近似されると仮定する。

$$A_Q(z^{-1})Q(t) = z^{-(k+1)}B_Q(z^{-1})Q_{in}(t) + \xi(t) \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} A_Q(z^{-1}) := 1 + a_{1Q}z^{-1} \\ B_Q(z^{-1}) := b_{0Q} + b_{1Q}z^{-1} + \dots + b_{mQ}z^{-m} \end{cases} \quad (2.5)$$

ここで、 k はシステムのむだ時間、 z^{-1} は時間遅れ演算子、 m は $B_Q(z)$ の次数、 $\xi(t)$ は平均0、分散 σ^2 のガウス性白色雑音を示す。 a_{iQ} と b_{iQ} は油圧ポンプ単体のシステムパラメータで未知とする。

2.2.3 リリーフバルブ開放時の制御対象伝達特性

リリーフバルブは、油圧回路の過剰圧力を防止する安全弁の一種であり、配管内圧力が設定された圧力に到達すると開放し、管内を設定された圧力に保持した状態で余剰流量をタンクへ返す。管内圧力が低下すると、リリーフバルブは閉鎖する。

ここで、旋回加速時、レバーを入力するとポンプから吐出された油は、油圧モータに伝わり、管内圧力を上昇させる。配管内圧力がある閾値 P_r に達すると、リリーフバルブの流路が開放され、配管内の油はリリーフバルブを通過して、タンクに戻ることで、配管内の圧力は、ほぼ一定の値 P_r に保たれる。

$$P(t) = P_r \quad (2.6)$$

(2.6)式を(2.3)式に代入すると

$$T(t) = C_{PQ} \cdot P_r \cdot Q(t) \quad (2.7)$$

となる。さらに、(2.4)式を(2.7)式に代入すると以下ようになる。

$$T(t) = C_{PQ} \cdot P_r \frac{z^{-(k+1)} B_Q(z^{-1}) Q_{in}(t) + \xi(t)}{A_Q(z^{-1})} \quad (2.8)$$

このように、回転モータ駆動し始めは、リリーフバルブの開放により配管内圧力がほぼ一定となることから、ポンプトルク $T(t)$ とポンプ吐出流量の指令値 $Q_{in}(t)$ の関係を得ることができる。すなわち、リリーフバルブ開放時の制御対象の入出力関係は、以下のように「一次遅れ+むだ時間」系で近似することができる。

$$A_T(z^{-1})T(t) = z^{-(k+1)}B_T(z^{-1})Q_{in}(t) + \xi(t) \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} A_T(z^{-1}) := 1 + a_{1T}z^{-1} \\ B_T(z^{-1}) := b_{0T} + b_{1T}z^{-1} + \cdots + b_{mT}z^{-m} \end{cases} \quad (2.10)$$

ここで、 a_{iT} 、 b_{iT} は入力をポンプ吐出流量の指令値、出力をポンプトルクとしたシステムのシステムパラメータであり、未知とする。

2.2.4 圧力と流量の伝達特性

リリーフバルブのように管内圧力を一定にするような機能が働かない場合、実ポンプ吐出流量 $Q(t)$ の変化に応じてポンプ吐出圧力 $P(t)$ も変化する。すなわち、ポンプ吐出流量 $Q(t)$ を入力、ポンプ吐出圧力 $P(t)$ を出力とした場合に伝達関数で表現することができる。以下に、ポンプ吐出流量 $Q(t)$ とポンプ吐出圧力 $P(t)$ の関係を導出する。

まず、回転体回転速度 $\omega(t)$ と油圧モータからタンクに流れる流量 $Q_m(t)$ の関係は以下となる。

$$Q_m(t) = \frac{q_m}{2\pi}\omega(t) \quad (2.11)$$

ここで、 q_m は油圧モータの押しのけ容量を示す。次に、ポンプ吐出圧 $P(t)$ が油圧モータの入力側の圧力と同じと仮定すると（すなわち、油圧ポンプから油圧モータまでの圧損がないと

仮定すると), 旋回体駆動トルク $T_I(t)$ の関係は以下となる。

$$T_I(t) = \frac{q_m}{2\pi} P(t) \quad (2.12)$$

さらに, 油圧モータへの流入流量がポンプ吐出流量 $Q(t)$ と等しいとして, 油圧モータ内部の体積変化はおこならないと仮定すると, 油圧モータの流入流量 $Q(t)$ と流出流量 $Q_m(t)$ の差と油圧モータの入力側の圧力の関係式は以下となる。

$$P(t) = \frac{T_s}{\Delta} \kappa (Q(t) - Q_m(t)) \quad (2.13)$$

ここで, κ は体積弾性係数を管路内の体積で割った係数を示す。さらに, 以下のように $P(t)$ と $Q(t)$ の関係式で整理する。まず, (2.1) 式, (2.11) 式, (2.12) 式より,

$$Q_m(t) = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{q_m}{2\pi} \right)^2 \frac{T_s}{I} P(t) \quad (2.14)$$

となり, (2.14) 式を (2.13) 式に代入すると,

$$P(t) = \frac{1}{\Delta} T_s \kappa Q(t) - \frac{1}{\Delta^2} \kappa \left(\frac{q_m}{2\pi} \right)^2 \frac{T_s^2}{I} P(t) \quad (2.15)$$

が得られる。さらに, $P(t)$ と $Q(t)$ の関係式で整理すると,

$$(K_1 + \Delta^2) P(t) = K_2 \Delta Q(t) \quad (2.16)$$

$$K_1 = \kappa \left(\frac{q_m}{2\pi} \right)^2 \frac{T_s^2}{I} \quad (2.17)$$

$$K_2 = \kappa T_s \quad (2.18)$$

となり，ポンプ吐出流量 $Q(t)$ とポンプ吐出圧力 $P(t)$ の関係が以下の式で表される。

$$P(t) = \frac{K_2}{K_1 + \Delta^2} \Delta Q(t) \quad (2.19)$$

2.2.5 リリーフバルブ閉鎖時の制御対象伝達特性

リリーフバルブ閉鎖時の制御対象を考える。油圧ショベル本体が旋回し始めて旋回モータが動き始めると，配管内の油は旋回モータを介して，タンクに戻る。これにより，ポンプ圧力 $P(t)$ が P_r 以下となることでリリーフバルブは閉鎖し，管内の圧力を保持する機能が働かない。すなわち，(2.19) 式のポンプ吐出圧力 $P(t)$ とポンプ吐出流量 $Q(t)$ の関係式が有効となる。

ここで(2.19)式に(2.4)式を代入すると，

$$P(t) = \frac{K_2}{K_1 + \Delta^2} \Delta \left(\frac{z^{-(k+1)} B_Q(z^{-1})}{A_Q(z^{-1})} Q_{in}(t) + \frac{\xi(t)}{A_Q(z^{-1})} \right) \quad (2.20)$$

さらに，(2.3)式に(2.4)式を代入すると，

$$T(t) = C_{PQ} P(t) \left(\frac{z^{-(k+1)} B_Q(z^{-1})}{A_Q(z^{-1})} Q_{in}(t) + \frac{\xi(t)}{A_Q(z^{-1})} \right) \quad (2.21)$$

が得られる。(2.21)式に(2.20)式を代入し，係数を整理すると次式が得られる。

$$A_T(z^{-1}) T(t) = \Delta \left(z^{-(k+1)} B_T(z^{-1}) Q_{in}(t) + \xi(t) \right)^2 \quad (2.22)$$

$$A_T(z^{-1}) = A_Q^2(z^{-1}) (K_1 + \Delta^2) \quad (2.23)$$

$$B_T(z^{-1}) = (C_{PQ} K_2)^{\frac{1}{2}} B_Q(z^{-1}) \quad (2.24)$$

さらに， $Q_{in}(t)$ をある平衡点 $\overline{Q_{in}}$ からの変化量 $\Delta Q_{in}(t)$ で表せると仮定し，マクローリン展開

を行うと以下の式が得られる。

$$A_T(z^{-1})T(t) = \Delta z^{-(k+1)}B_T(z^{-1})\Delta Q_{in}(t) + \xi(t) \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} A_T(z^{-1}) := 1 + a'_{1T}z^{-1} + \dots + a'_{nT}z^{-n} \\ B_T(z^{-1}) := b'_{0T} + b'_{1T}z^{-1} + \dots + b'_{mT}z^{-m} \end{cases} \quad (2.26)$$

ここで、 n はリリーフバルブ閉鎖時の $A_T(z)$ の次数を示す。 a'_{iT} , b'_{iT} はリリーフバルブ閉鎖時のシステムパラメータであり、未知とする。

また、油圧ポンプは、機械的制約条件から油圧ポンプの最大吐出流量 Q_{max} が決定される。ここで、機械的制約条件とは最大エンジン回転数や油圧ポンプの最大押しのけ容量を指す。油圧ポンプの吐出量が最大値 Q_{max} に到達すると、以下のコントローラを使い、油圧ショベルを最大速度で旋回させることができる。そのため、ポンプトルク $T(t)$ を一定に保つ必要がなくなり、油圧ショベルの最大速度までの加速が完了する。

$$\Delta Q(t) = \Delta Q_{in}(t) = 0 \quad (2.27)$$

なお、この条件になると、ポンプ圧力 $P(t)$ は損失等を考慮しなければ理論的には0となる。但し、実際の機体では、ポンプ圧は機械エネルギーや油圧エネルギーの損失等があるため完全には0にならず、(2.6)式や(2.19)式と比較して小さい値となる。

制御対象は、油圧ショベルの旋回加速中においてリリーフバルブ閉鎖時から機体が最大速度に到達するまでの範囲で微分要素をもつ系となる。

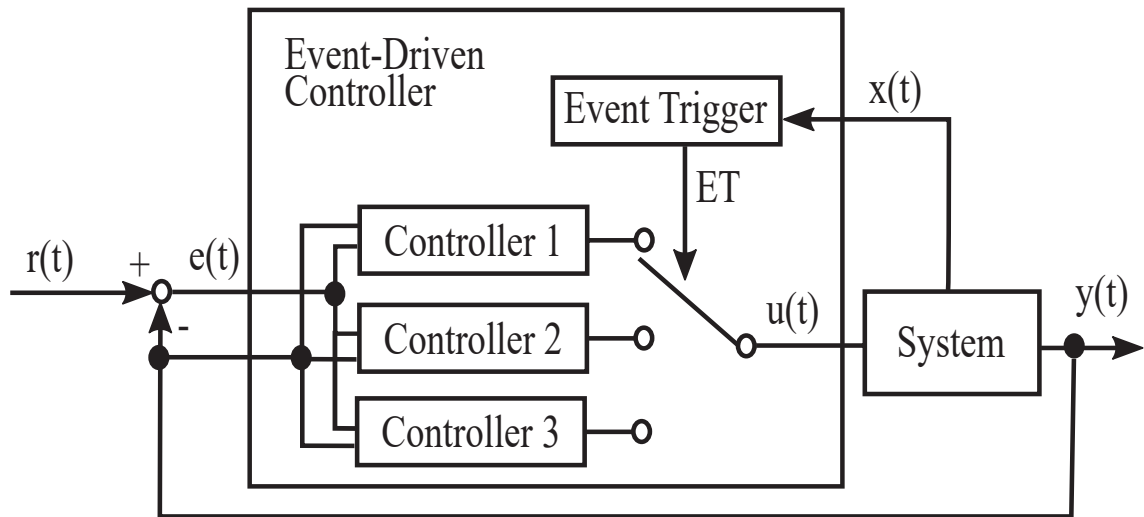


Fig. 2.3: Block diagram of an event-driven controller

2.3 油圧ショベルのデータ指向型トルク制御系の設計

前節で述べたシステムが駆動中に切り替わる非線形システムに対して、一般的な線形コントローラでは、所望の制御性能を得ることが難しい。また、非線形システムに対する有効なコントローラとして、データ駆動型制御が提案されているが [30]、この方法は制御パラメータを逐次更新する制御方式であり、実機に搭載する上で、大きな計算コストと制御方式の複雑さが実機搭載の課題となる。

本章の制御対象は、(2.9)式で示す一次遅れシステムから(2.25)式で示す微分システムに変化するため、それぞれのシステムに対応したコントローラが必要となる。そこで、内部状態の変化をシステムが変化するイベントと捉えて、その内部状態に基づいてコントローラ構造が変化する制御系を設計する。これは、運動状態が変化したことを内部の状態で捉えて、制御則を変化させるイベント駆動型制御と呼ばれるものである [32]。この制御系は、予め設定された内部状態の閾値に基づきイベントトリガーを設定し、イベントに応じて設計した複数のコントローラを切り替える。イベント駆動型制御系のブロック線図を Fig.2.3 に示す。

ここで、コントローラの構造を PID 制御系を基本として設計し、各コントローラの構造に類似性を持たせることにより、コントローラの切り替えを容易にすると共に、データ指向型

制御を利用してコントローラのゲイン調整をオフラインで実施する。また、コントローラの項に類似性があることから、イベントトリガーとして扱う内部状態の変化量に基づいたゲインスケジューリング制御を活用しコントローラのゲインを変化させて、コントローラの構造を滑らかに切り替えることが可能となる。なお、イベントトリガーや各コントローラのゲインはデータに基づき設定されるため本提案手法をデータ指向型トルク制御と呼ぶ。

制御対象である油圧ショベルの旋回操作は、システムが配管内の圧力に応じて切り替わる非線形システムである。そのため、イベントトリガーとして扱う内部状態 $x(t)$ は、ポンプ吐出圧力 $P(t)$ とする。さらに、制御入力 $u(t)$ は油圧ポンプの吐出流量指令値 $Q_{in}(t)$ 、システム出力 $y(t)$ は旋回時の油圧ポンプトルク $T(t)$ とする。

2.3.1 伝達特性に基づいたコントローラ構造の設計

旋回加速時、リリーフバルブが開放されることで、制御対象は(2.9)式で表されるような「一次遅れ+むだ時間」系として扱うことができる。そのため、制御系には以下に示すPID制御則を適用する。

$$\Delta u(t) = K_I(t)e(t) - K_P(t)\Delta y(t) - K_D(t)\Delta^2 y(t) \quad (2.28)$$

$$e(t) := r(t) - y(t) \quad (2.29)$$

ここで、 $e(t)$ は制御偏差、 $r(t)$ は目標値である。

さらに、油圧ショベルが旋回し始めて旋回モータが動き始めると、リリーフバルブが閉鎖されることで、制御対象は(2.25)式で表されるようなシステムが微分要素を持つ系となる。この場合、一般的なPID制御則ではコントローラの積分要素がシステムの微分要素に打ち消されることで、目標値への追従性が確保されない。そこで、リリーフバルブ閉鎖時の制御則は、

PID 制御則に二重積分要素を追加した次式で定義する。

$$\Delta^2 u(t) = K_I(t)\Delta e(t) + K_{II}(t)e(t) - K_P(t)\Delta^2 y(t) - K_D(t)\Delta^3 y(t) \quad (2.30)$$

ここで、 $K_P(t), K_I(t), K_{II}(t), K_D(t)$ はそれぞれ、比例ゲイン、積分ゲイン、二重積分ゲイン、微分ゲインと呼ぶ。

また、制御対象は、機械的に制限があるポンプ吐出流量が最大値に到達すると、機体の旋回速度は機械仕様としての旋回最大速度となり、それ以上加速する必要がない。すなわち、旋回最大速度に到達後は、制御入力を増加させる必要がなく、(2.27)式に基づき以下の制御入力とする。

$$\Delta u(t) = 0 \quad (2.31)$$

微分要素を有する系に対して、(2.30)式の二重積分を持つコントローラを使用すると、コントローラの極とシステムの零点で極零相殺を起こす。これにより、制御入力 $u(t)$ が時間と共に増加していくコントローラが設計され、制御入力の有界性が補償されないため、一般的には好ましいコントローラとは言えない。しかし、入力値に機械的な制限が存在することで、上記(2.31)式で示すようなコントローラに到達するまでの限定的な条件で使用することにより、有界性が補償されていないコントローラであっても、本制御対象に対しては問題とならない。すなわち、制御問題としてポンプトルクを一定として油圧ショベルの旋回体を加速させる問題を扱うことにより、油圧ショベルの旋回速度を安定した状態で最大値に到達させる問題として、間接的に扱うことができる。

2.3.2 イベントトリガーの設定

イベントに応じて複数のコントローラを切り替えるため、予め設定された内部状態に基づきイベントトリガーETを設定する。制御対象の内部状態のうち、観測可能であり、システム変動（ダイナミクスの変化）が表現できる内部状態は、ポンプ圧力 $P(t)$ である。そこで、制御対象である油圧ショベルが最大回転速度まで加速する際のイベントトリガーを以下のように設定する。

ET1 : 回転開始したとき

ET2 : ポンプ圧力 $P(t)$ が100%に到達後、 P_1 に初めて到達したとき

ET3 : ポンプ圧力 $P(t)$ が100%に到達後、 P_2 に初めて到達したとき

ET4 : ポンプ圧力 $P(t)$ が100%に到達後、 P_3 に初めて到達したとき

ここで、 P_1 はリリーフバルブが閉鎖し始めるポンプ圧力、 P_2 はリリーフバルブが完全に閉じて、(2.25)式のシステムに完全に切り替わったときのポンプ圧力、 P_3 は油圧ポンプの最大吐出流量に到達したときの圧力とする。なお、リリーフバルブの特性上、ポンプ圧力が P_1 を下回った後は、再度 $P(t)$ が100%に到達しないとリリーフバルブは開放しない。

2.3.3 ゲインスケジューリング制御によるコントローラ切り替え手法

コントローラは、上記で決定したイベントトリガーETに基づき切り替える。各コントローラをPID制御則に基づき設計したことにより、イベントトリガーETと内部状態 $P(t)$ を使用したゲインスケジューリング制御が活用でき、以下のようにコントローラを切り替えること

で、滑らかに切り替えを行うことができる。

$$K_P(t) = \begin{cases} K_{P_1} & (\text{if ET1} \sim \text{ET2}) \\ \frac{K_{P_2} - K_{P_1}}{P_2 - P_1}(P(t) - P_1) + K_{P_1} & (\text{if ET2} \sim \text{ET3}) \\ K_{P_2} & (\text{if ET3} \sim \text{ET4}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.32)$$

$$K_I(t) = \begin{cases} K_{I_1} & (\text{if ET1} \sim \text{ET2}) \\ \frac{K_{I_2} - K_{I_1}}{P_2 - P_1}(P(t) - P_1) + K_{I_1} & (\text{if ET2} \sim \text{ET3}) \\ K_{I_2} & (\text{if ET3} \sim \text{ET4}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.33)$$

$$K_{II}(t) = \begin{cases} \frac{K_{II_2}}{P_2 - P_1}(P(t) - P_1) & (\text{if ET2} \sim \text{ET3}) \\ K_{II_2} & (\text{if ET3} \sim \text{ET4}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.34)$$

$$K_D(t) = \begin{cases} K_{D_1} & (\text{if ET1} \sim \text{ET2}) \\ \frac{K_{D_2} - K_{D_1}}{P_2 - P_1}(P(t) - P_1) + K_{D_1} & (\text{if ET2} \sim \text{ET3}) \\ K_{D_2} & (\text{if ET3} \sim \text{ET4}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.35)$$

ここで、 $K_{P_1}, K_{I_1}, K_{D_1}$ はそれぞれ、リリーフバルブ開放時のデータから算出される比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインであり、 $K_{P_2}, K_{I_2}, K_{II_2}, K_{D_2}$ はそれぞれ、リリーフバルブ閉鎖時のデータから算出される比例ゲイン、積分ゲイン、二重積分ゲイン、微分ゲインである。

2.3.4 閉ループデータを使用したゲイン算出方法

イベントごとの制御ゲイン K_{P_1} , K_{I_1} , K_{D_1} , 並びに K_{P_2} , K_{I_2} , K_{II_2} , K_{D_2} は, 一回の試験により得られた閉ループデータを用いて一般化最小分散制御則により直接的に算出する。具体的な方法を以下に示す。リリーフバルブ開放時のシステムに対するコントローラは K_{P_1} , K_{I_1} , K_{D_1} を, リリーフバルブ閉鎖時のシステムに対するコントローラは K_{P_2} , K_{I_2} , K_{II_2} , K_{D_2} をそれぞれ算出すればよい。これらのゲインは, 既に提案されている GMVC に基づく閉ループデータを用いた PID 制御系の直接設計法を用いる [34]。

GMVC に基づく閉ループデータを用いた PID 制御系の直接設計法

GMVC に基づく閉ループデータを用いた PID 制御系の直接設計法を説明するため, 次に示す一般的な離散時間モデルで制御対象を考える。

$$A(z^{-1})y(t) = \Delta^{i_d} z^{-(k+1)} B(z^{-1})u(t) + \frac{\xi(t)}{\Delta} \quad (2.36)$$

$$\left. \begin{aligned} A(z^{-1}) &:= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} \\ B(z^{-1}) &:= b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m} \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

ここで, (2.37) 式のシステムパラメータ a_i と b_i は未知である。また, i_d は 0 か 1 の数字で微分系システムか否かを示す係数であり, $i_d = 0$ であれば微分系以外のシステムを示し, $i_d = 1$ であれば微分系を示す。

この制御対象に対して, 次式に示す評価規範 J を最小とする一般化最小分散制御則を導出する。

$$J := E[\phi^2(t+k+1)] \quad (2.38)$$

$\phi^2(t+k+1)$ は一般化出力として定義し、次式で与えられる。

$$\phi(t+k+1) := P(z^{-1})y(t+k+1) + \lambda\Delta^{(i_d+1)}u(t) - P(1)r(t) \quad (2.39)$$

ここで、 λ は入力の変化量に対する重み係数であり、設計者が任意に与える設計パラメータである。さらに、次式で与えられる Diophantine 方程式を導入する。

$$P(z^{-1}) = \Delta^{(i_d+1)}E(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-(k+1)}F(z^{-1}) \quad (2.40)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E(z^{-1}) := 1 + e_1z^{-1} + \dots + e_kz^{-k} \\ F(z^{-1}) := f_0 + f_1z^{-1} + f_2z^{-2} + f_3z^{-3} \cdot i_d \end{array} \right. \quad (2.41)$$

上記多項式 $E(z^{-1})$ と $F(z^{-1})$ の次数は、 $\Delta^{(i_d+1)}A(z^{-1})$ と $P(z^{-1})$ から一意に決まるように設定する。さらに、 $P(z^{-1})$ は所望の応答特性を表す設計多項式であり、参照モデルと呼ばれ、以下のように設定される [36]。

$$P_l(z^{-1}) = 1 + p_1z^{-1} + p_2z^{-2} \quad (2.42)$$

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = -2 \exp\left(-\frac{\rho}{2\mu}\right) \cos\left(\frac{\sqrt{4\mu-1}}{2\mu}\rho\right) \\ p_2 = \exp\left(\frac{\rho}{\mu}\right) \\ \rho = \frac{T_s}{\sigma} \\ \mu = 0.25(1-\delta) + 0.51\delta \end{array} \right\} \quad (2.43)$$

ここで、 σ と 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、設計者が任意に設定する。具体的には、 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 $0 \leq \delta \leq 2.0$ の間で設定されることが望まし

いとされ、特に $\delta = 0$ では Binomial モデルの応答を、 $\delta = 1.0$ の場合は Butterworth モデルの応答を示す。

次に、(2.36) 式、(2.39) 式、及び(2.40) 式より、一般化出力について時刻 t から $k+1$ ステップ先の予測値を算出すると以下のようなになる。

$$\phi(t+k+1|t) := F(z^{-1})y(t) + (E(z^{-1})B(z^{-1}) + \lambda)\Delta^{(i_d+1)}u(t) - P(1)r(t) + E(z^{-1})\xi(t+k+1) \quad (2.44)$$

ここで、時刻 t における最適予測値を以下のように定義する。

$$\hat{\phi}(t+k+1|t) := F(z^{-1})y(t) + (G(z^{-1}) + \lambda)\Delta^{(i_d+1)}u(t) - P(1)r(t) \quad (2.45)$$

ただし、 $G(z^{-1})$ は以下となる。

$$G(z^{-1}) := E(z^{-1})B(z^{-1}) \quad (2.46)$$

$$= g_0 + g_1z^{-1} + \dots + g_{n_g}z^{-n_g} \quad (2.47)$$

$$(n_g = m + k)$$

ここで、 n_g はシステムをむだ時間を考慮して決定する $G(z^{-1})$ の次数である。(2.44) 式と (2.45) 式の関係から

$$\phi(t+k+1|t) = \hat{\phi}(t+k+1|t) + E(z^{-1})\xi(t+k+1) \quad (2.48)$$

となり、

$$\hat{\phi}(t+k+1|t) = 0 \quad (2.49)$$

であれば、(2.38) 式の評価規範を最小化するような制御則を導出することができる。

そのため、(2.45)式と(2.49)式から、GMVC則は次式のように導出される。

$$\Delta^{(i_d+1)}u(t) = \frac{P_I(1)}{G(z^{-1}) + \lambda}r(t) - \frac{F(z^{-1})}{G(z^{-1}) + \lambda}y(t) \quad (2.50)$$

予め得られた閉ループデータの制御入力 $u(t)$ とシステム出力 $y(t)$ を用いて、(2.50)式に最小二乗法を適用することで、パラメータ f_i と g_i の同定が可能である。

リリーフバルブ開放時のゲイン設定

(2.50)式を $i_d = 0$ として(2.28)式と係数比較すると、各ゲインは次式となる。

$$K_{P_1} = -\frac{f_1 + 2f_2}{G(1) + \lambda} \quad (2.51)$$

$$K_{I_1} = \frac{f_0 + f_1 + f_2}{G(1) + \lambda} \quad (2.52)$$

$$K_{D_1} = \frac{f_2}{G(1) + \lambda} \quad (2.53)$$

リリーフバルブ閉鎖時のゲイン設定

(2.50)式を $i_d = 1$ として(2.30)式と係数比較すると、各ゲインは次式となる。

$$K_{P_2} = \frac{f_2 + 3f_3}{G(1) + \lambda} \quad (2.54)$$

$$K_{I_2} = -\frac{f_1 + 2f_2 + 3f_3}{G(1) + \lambda} \quad (2.55)$$

$$K_{I_{I_2}} = \frac{f_0 + f_1 + f_2 + f_3}{G(1) + \lambda} \quad (2.56)$$

$$K_{D_2} = -\frac{f_3}{G(1) + \lambda} \quad (2.57)$$

2.4 シミュレーション検証結果

2.4.1 PQ制御のシミュレーション検証結果

制御対象の簡易シミュレータを作成し、シミュレーションを行った。なお、以下に示す本章の全結果の数値は最大値、又は目標値を100%として正規化されている。常温状態においてPQコントローラで制御した結果をFig.2.4、低温状態における結果をFig.2.5に示す。ここで、低温環境下における駆動は、ポンプに対して所定のむだ時間と時定数を設定した。

この結果、常温状態では静的補償器でもポンプトルクが目標に追従できるが、低温環境下になるとポンプの遅れの影響を受けて、ハンチングと呼ばれる振動現象が発生する。ハンチング現象は、旋回時の機体振動につながるため、作業性を低下させる。ハンチング現象を防止するためには、暖機により油温を一定以上まで上げること、安定性を確保するためにポンプトルクを上げる又は下げること等が考えられる。これらは、暖機による作業開始時間の遅れや燃料消費増加、必要以上のポンプトルク使用による燃料消費増加、ポンプトルクの減少による作業性能の低下が課題となる。

2.4.2 PID制御の検証結果

動的補償器であるPIDコントローラを用いて制御した結果をFig.2.6に示す。ここで、設定したPIDゲインは、ハンチング現象がなくなるように経験的に求めた値で以下に示す。

$$K_P = 3.00 \times 10^{-6}, \quad K_I = 1.10 \times 10^{-7}, \quad K_D = 1.00 \times 10^{-7} \quad (2.58)$$

この結果から、動的補償器であるPIDコントローラを使用することで、ハンチング現象は抑えられるものの、所望のトルクが得られておらず、旋回の加速性能を低下させ、作業性能が低下する。

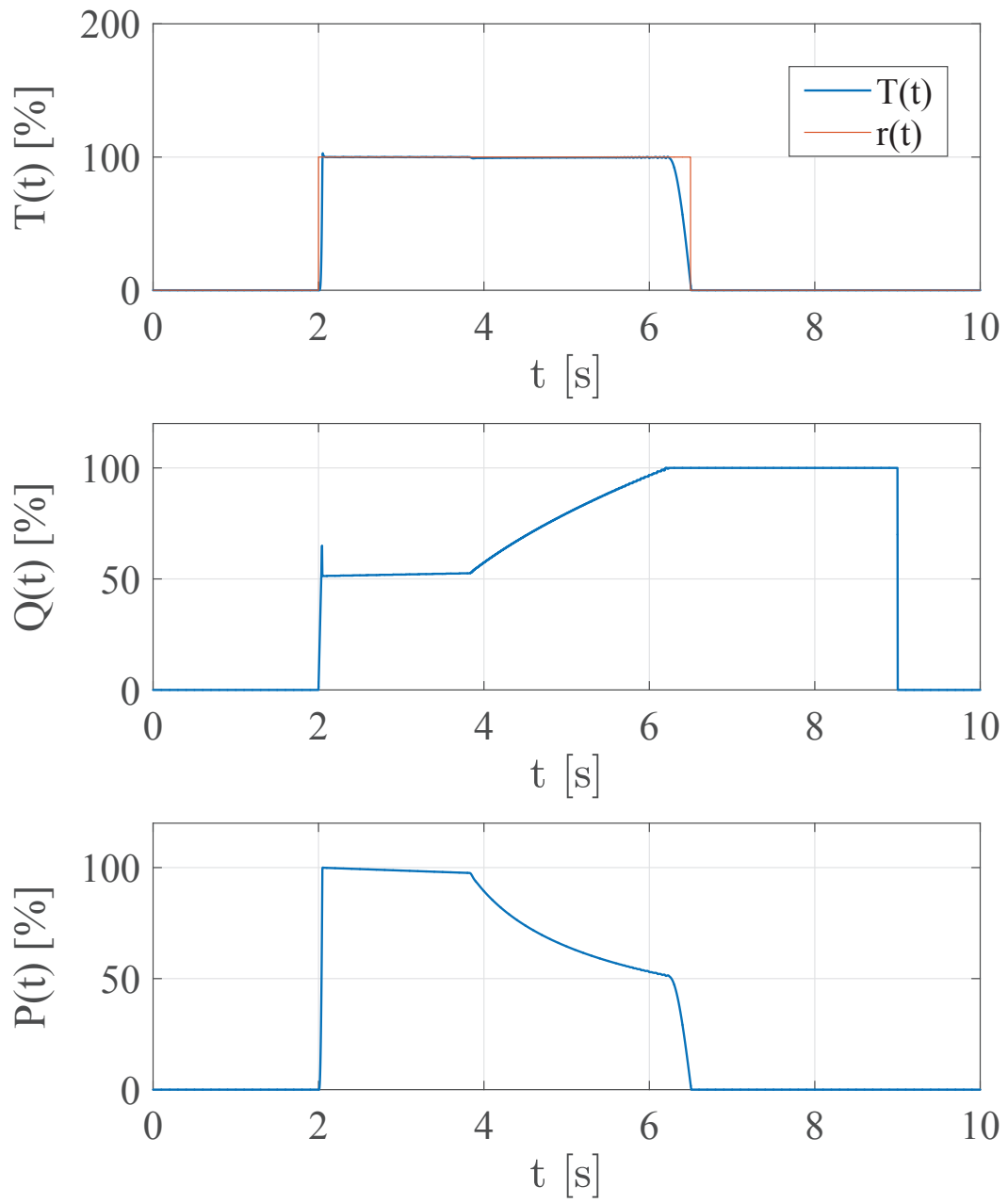


Fig. 2.4: Control result of PQ controller with ordinary

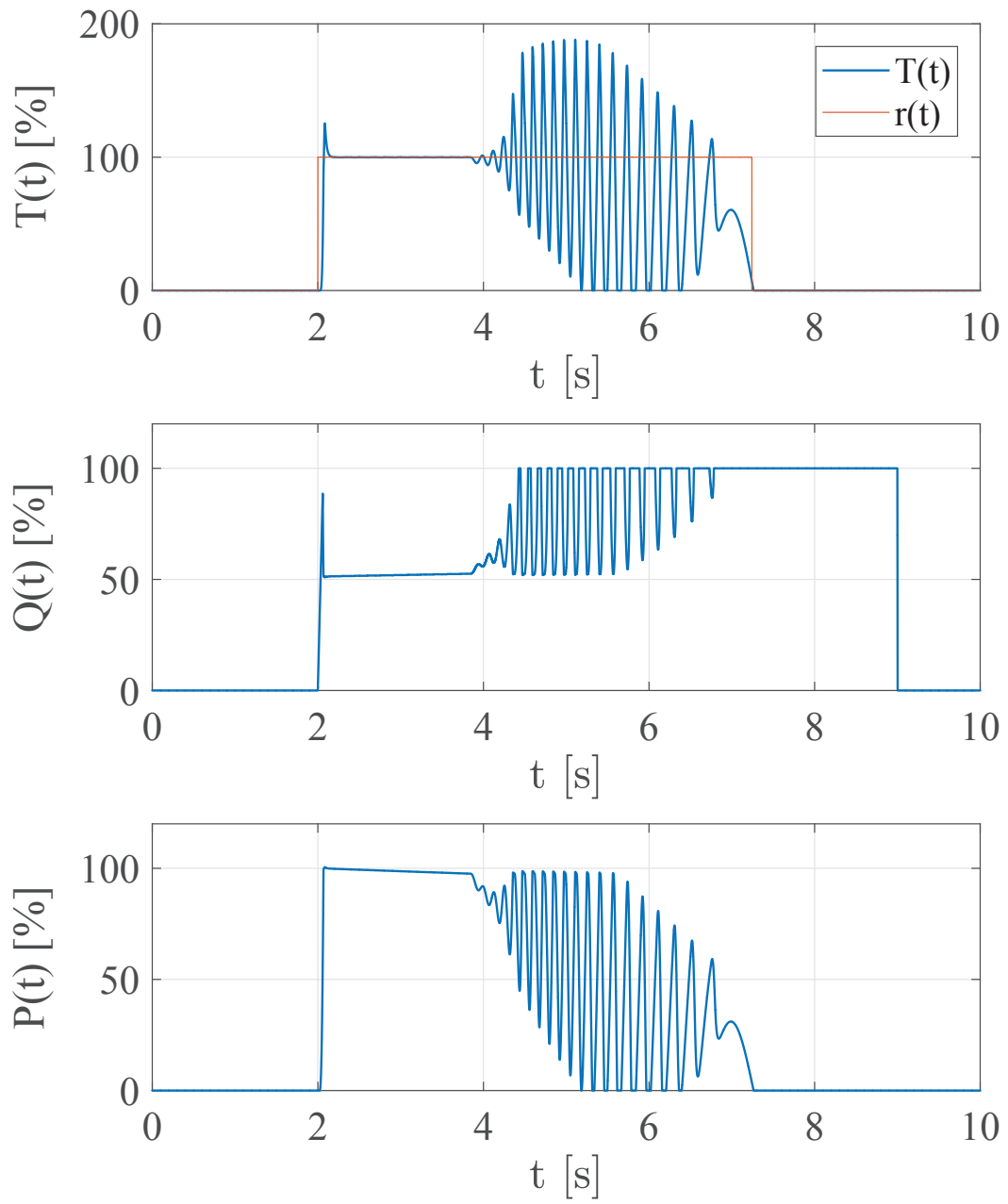


Fig. 2.5: Control result of PQ controller with cold condition

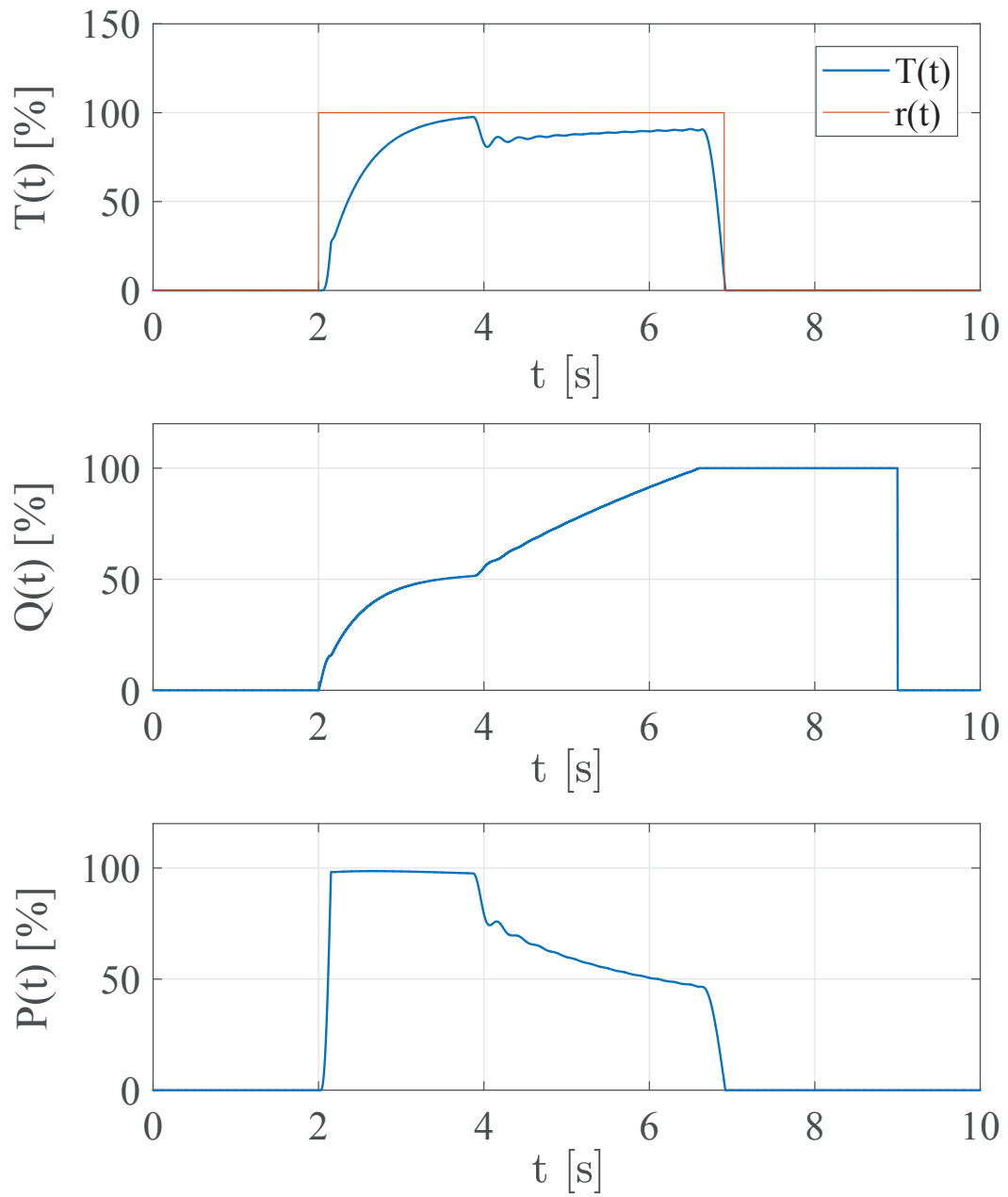


Fig. 2.6: Control result of PID controller with cold condition

Table 2.1: PID gains for event-driven controller

Gain	RV ON	RV OFF
K_P	1.97×10^{-6}	1.95×10^{-6}
K_I	3.68×10^{-7}	1.10×10^{-7}
K_{II}	0	3.89×10^{-10}
K_D	1.61×10^{-6}	2.93×10^{-7}

2.4.3 提案手法のシミュレーション検証結果

PID コントローラによる制御結果の入出力データを用いて、GMVC に基づく PID 制御系の直接設計法で制御則のゲインを算出する。また、ゲイン算出に使用されるデータは、システムの特徴を鑑みて抽出する。具体的な抽出方法を以下に示す。

まず、リリーフバルブが開放している状態は、(2.6) 式で示す圧力がほぼ一定であり、(2.9) 式-(2.10) 式で示す一次遅れ系で近似される立ち上がりの区間のデータである。そこで、PID コントローラの入出力結果の圧力一定区間である 2.2[s] から 3.8[s] のデータを用いる。また、設定パラメータとしては、旋回加速が遅いと感じられないよう、立ち上がり時間を 0.1[s] に設定した。得られた入出力データに基づき、リリーフバルブ開放時の PID ゲインを算出する。その結果を Table 2.1 に示す。

次に、リリーフバルブが閉鎖した状態に着目する。式 (2.19) から $\Delta Q(t)$ の変化により圧力 $P(t)$ が変化する区間で、(2.25) 式-(2.26) 式から微分システムである 3.9[s] から 4.3[s] のデータを用いる。また、設定パラメータとしては、ハンチングを抑制するために即応性よりも安定性を重視し、立ち上がり時間を 1[s] に設定した。得られた入出力データに基づき、リリーフバルブ閉鎖時の PID ゲインを算出する。その結果を Table 2.1 に示す。

なお、それぞれのゲイン算出で $\lambda = 0.01$ に設定した。さらに、旋回時のリリーフバルブで設定されるリリーフ圧 P_r を 100% とし、Fig.2.6 の結果から、 P_1 、 P_2 、 P_3 は 97%、70%、40% と推定されるので、そのように設定した。

提案手法の制御結果を Fig.2.7 に示す。圧力のグラフには、イベントトリガー ET を記載す

る。このときのゲイン変化を Fig.2.8 に示す。

この結果、イベントトリガーにより制御則が切り替わることで、初期加速時のトルク追従性が PID 制御に比較して改善している。また、システムが変動し、微分要素を含む系になったとき、ハンチング現象を発生させず、PID 制御よりもトルクの追従性を改善している。これにより、作業性を落とすことなく、所望のトルクを得ることができる。

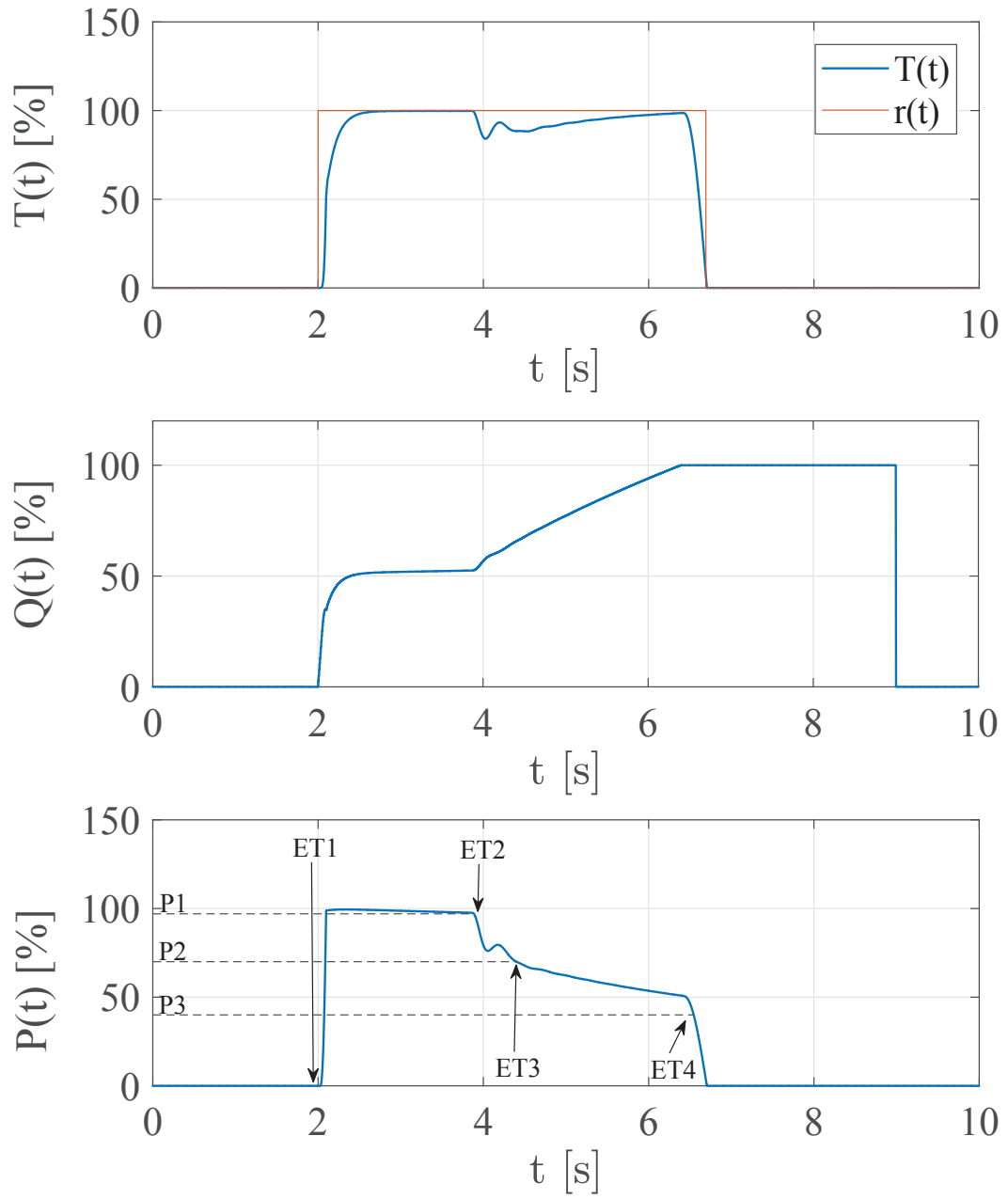


Fig. 2.7: Control result of event-driven controller with cold condition

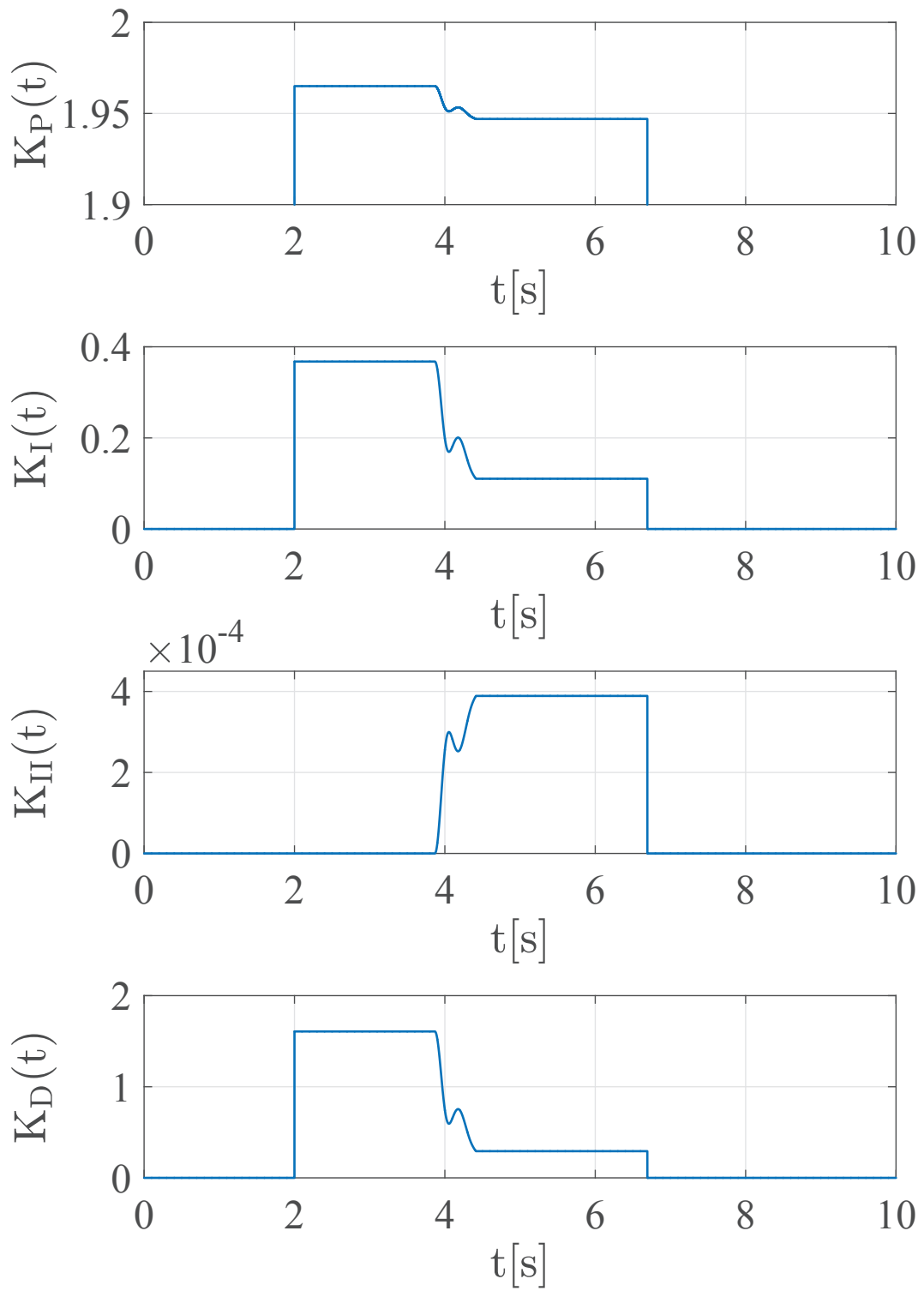


Fig. 2.8: Control parameter trajectories corresponding to Fig.2.7

2.5 実機検証結果

2.5.1 PQ制御の実機検証結果

Fig.1.4 に示すコベルコ建機株式会社製の 20t 油圧ショベル SK200-9 を使用して実機検証を行った。ここで、低温環境下を模擬的に再現するために、ソフトウェア上でポンプに対して所定のむだ時間と時定数を付加した。これにより、定量的に低温環境下を模擬しており、再現性のある試験を実施している。低温状態における PQ 制御の結果を Fig.2.9 に示す。

この結果から、低温環境下ではポンプの遅れの影響を受けて、ハンチングと呼ばれる振動現象が発生することが分かる。また、初期加速時は 1 秒付近でトルクがオーバーシュートしている。ハンチング現象は、旋回時の機体振動につながるため、作業性を低下させる。また、オペレータはハンチング現象による機体の振動を感じ、不快であるとともに、最悪は機体のハンチングによるレバーを握る手の揺れ（レバーハンチング）が発生し、機体のハンチングをさらに助長する可能性もある。

2.5.2 PID 制御の実機検証結果

動的補償器である PID コントローラを用いて制御した結果を Fig.2.10 に示す。ここで、設定した PID ゲインは、油圧ショベルの初期加速が十分に得られ、リリーフバルブ開放時に目標トルクに追従するように、経験的に求めた値で以下に示す。

$$K_P = 5.00 \times 10^{-2}, \quad K_I = 2.50 \times 10^{-3}, \quad K_D = 6.00 \times 10^{-3} \quad (2.59)$$

この結果から、動的補償機である PID コントローラを使用することで、リリーフバルブの解放状態では、初期加速を得るために必要なトルクをオーバーシュートなく目標値に追従することができ、ショックなどがなく、滑らかに起動できるようになったが、リリーフバルブが

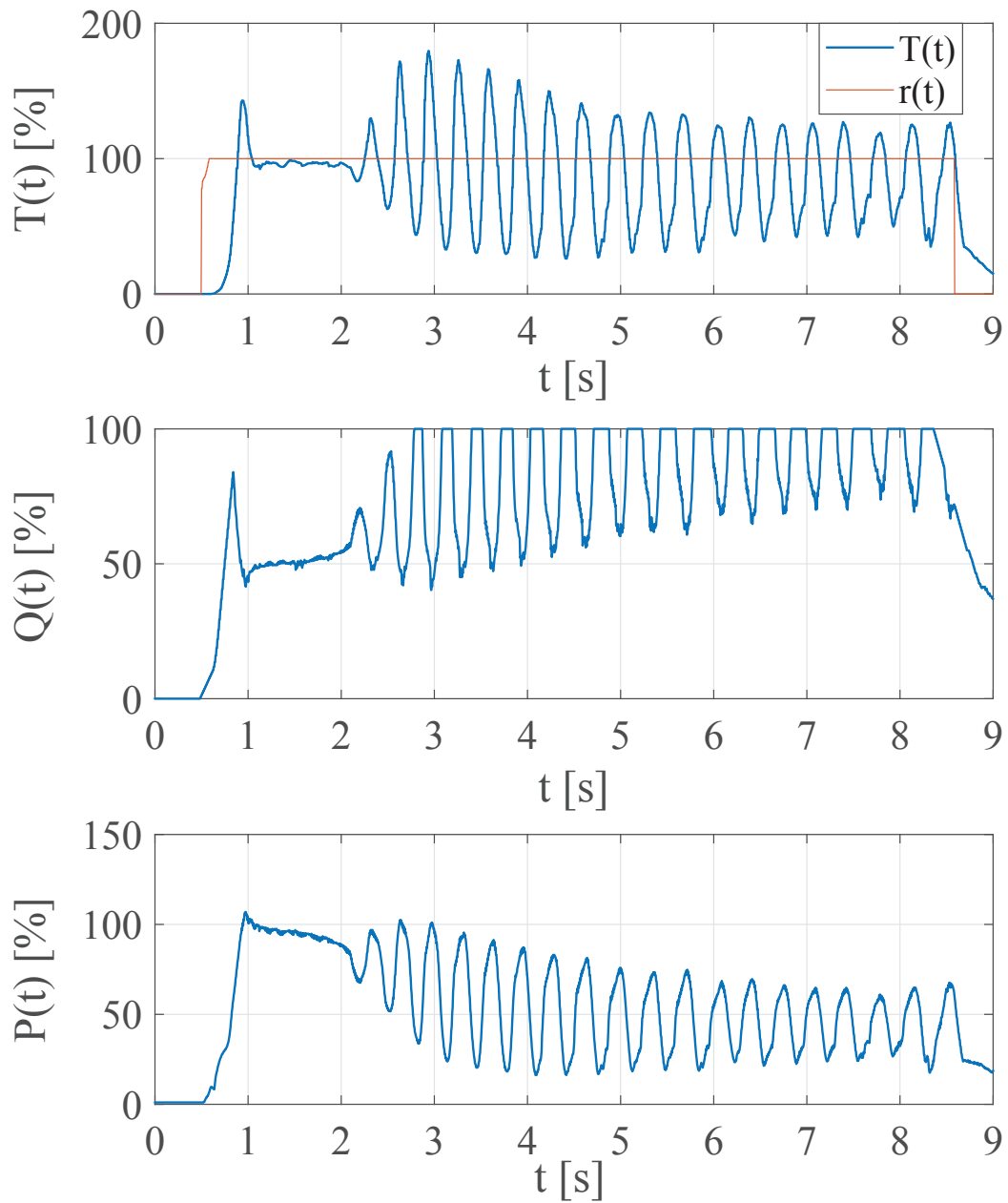


Fig. 2.9: Control result using a PQ controller

閉鎖して微分要素をもつ状態ではハンチング現象が抑制しきれていない。これは、システム変動により微分要素をもつシステムに対して、PID 制御では追従性を確保することができないことが要因である。これにより、操縦者は旋回作動中に振動を感じるとともに、振動が発生するため、作業性が低下する。なお、Fig.2.6 に示すシミュレータの PQ 制御結果のように定常偏差を発生させるように上記よりも小さいゲインを実機上で設定すると、初期加速が得られず、効果比較が困難であったことから、初期加速を重視したゲイン設定とした。

2.5.3 提案手法の実機検証結果

提案手法による検証を行うため、まず PID コントローラによる制御結果の入出力データを用いて、イベント駆動型制御のゲインを算出する。ゲイン算出は、(2.6) 式から (2.26) 式で示されるシステムの特徴を鑑みて、イベントである内部状態のポンプ圧力 $P(t)$ に着目し、ポンプ圧力の状態によって算出に使用するデータの範囲を決定する。具体的な方法を以下に示す。

まず、リリーフバルブが開放している線形システムに近似可能な領域は、(2.6) 式からポンプ圧力が P_r 付近で、ほぼ一定となる区間である。また、目標が立ち上がる時の特性が必要と考え、リリーフバルブ開放前のポンプ圧力がリリーフ圧まで上昇する前のデータも考慮する。そこで、リリーフバルブ開放時における提案手法のゲイン算出には、PID コントローラの入出力結果の 0.8[s] から 1.2[s] のデータを用いた。また、設定パラメータとしては、シミュレーションと同様に、旋回加速が遅いと感じられないよう、立ち上がり時間を 0.1[s] に設定した。なお、 $\lambda = 1$ に設定した。

次に、リリーフバルブ閉鎖時のポンプ圧力変動に着目する。上記同様に、(2.19) 式から $\Delta Q(t)$ に応じてポンプ圧力 $P(t)$ が変動する区間、かつ入力に振動が発生していない区間の 3.9[s] から 6.5[s] のデータを用いた。また、設定パラメータとしては、ハンチングを抑制するために即応性よりも安定性を重視し、立ち上がり時間を 1[s] に設定した。なお、 $\lambda = 0.01$ に設定した。

これらの設定パラメータと入出力データに基づき、各状態における PID ゲインを算出した

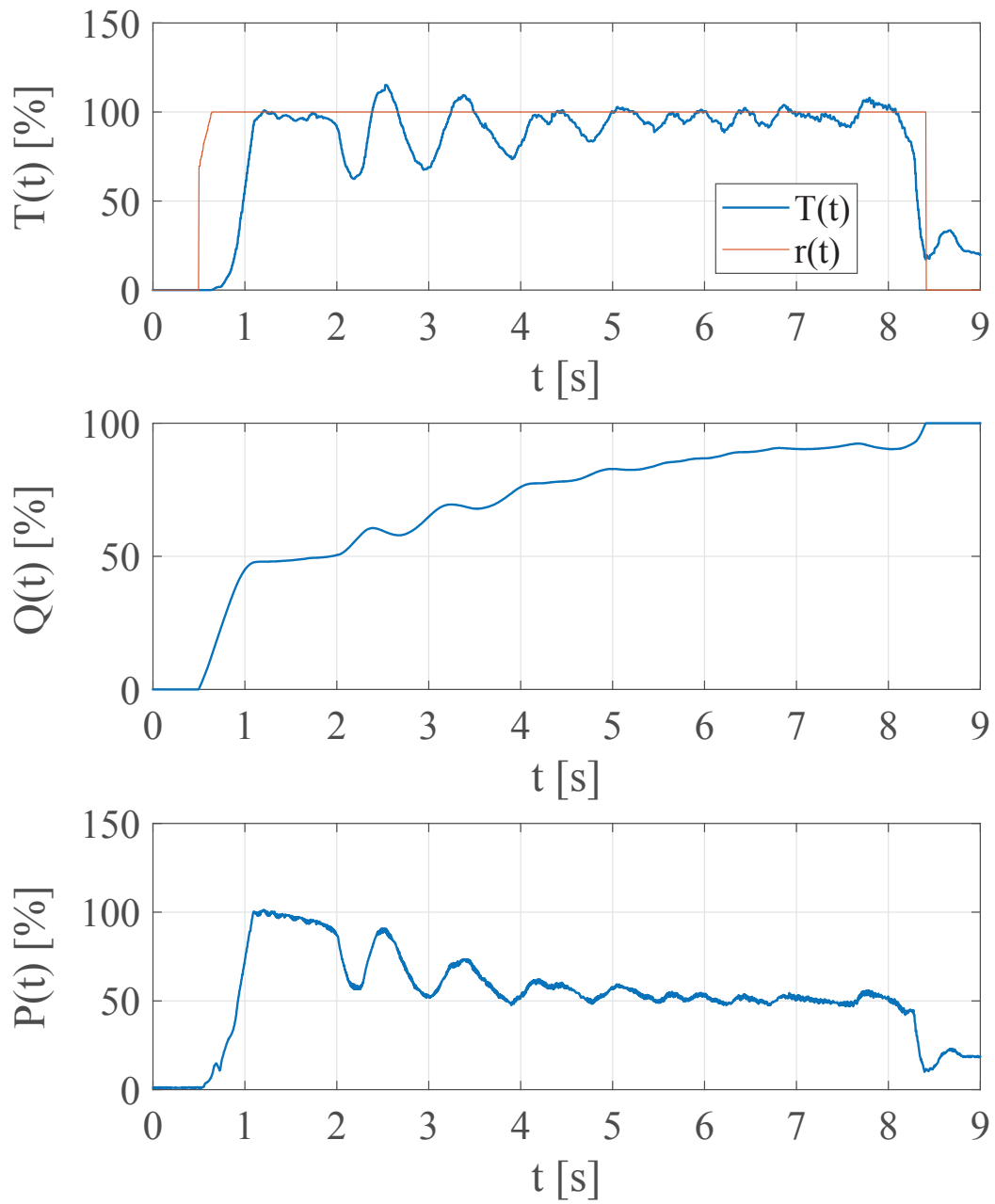


Fig. 2.10: Control result using a PID controller

Table 2.2: PID gains included in the event-driven controller

Gain	RV ON	RV OFF
K_P	5.10×10^{-2}	0
K_I	2.40×10^{-3}	1.90×10^{-3}
K_{II}	0	2.00×10^{-6}
K_D	1.60×10^{-2}	3.00×10^{-3}

結果を Table 2.2 に示す。ここで、リリースバルブ閉鎖時の比例ゲイン K_{P_2} は、数値が非常に小さく、油圧ショベルのコントローラに実装可能な有効数字として算出されなかったため、0 としている。さらに、旋回時のリリースバルブで設定されるリリース圧 P_r を 100% とし、Fig.2.10 の結果から、 P_1 、 P_2 、 P_3 は 83%、60%、40% と推定されるので、そのように設定した。

提案手法の制御結果を Fig.2.11 に、そのゲイン変化を Fig.2.12 に示す。また、Fig.2.11 の圧力のグラフには、イベントトリガー ET を記載する。この結果、イベントトリガーにより制御則が切り替わることで、初期加速時のトルクを確保しつつ、システムが微分要素を含む系になっても、ハンチングを発生せず、追従性を確保していることがわかる。これにより、旋回加速時に作業性を落とすことなく、所望のトルクを得ることが可能となった。さらに、その結果として、機体の旋回速度が最大速度となるポンプ吐出量 Q_{max} までの到達時間も PID 制御よりも提案手法の方が 0.5s 程度早くなっており、油圧ショベルの作業効率の向上につなげることができると思う。

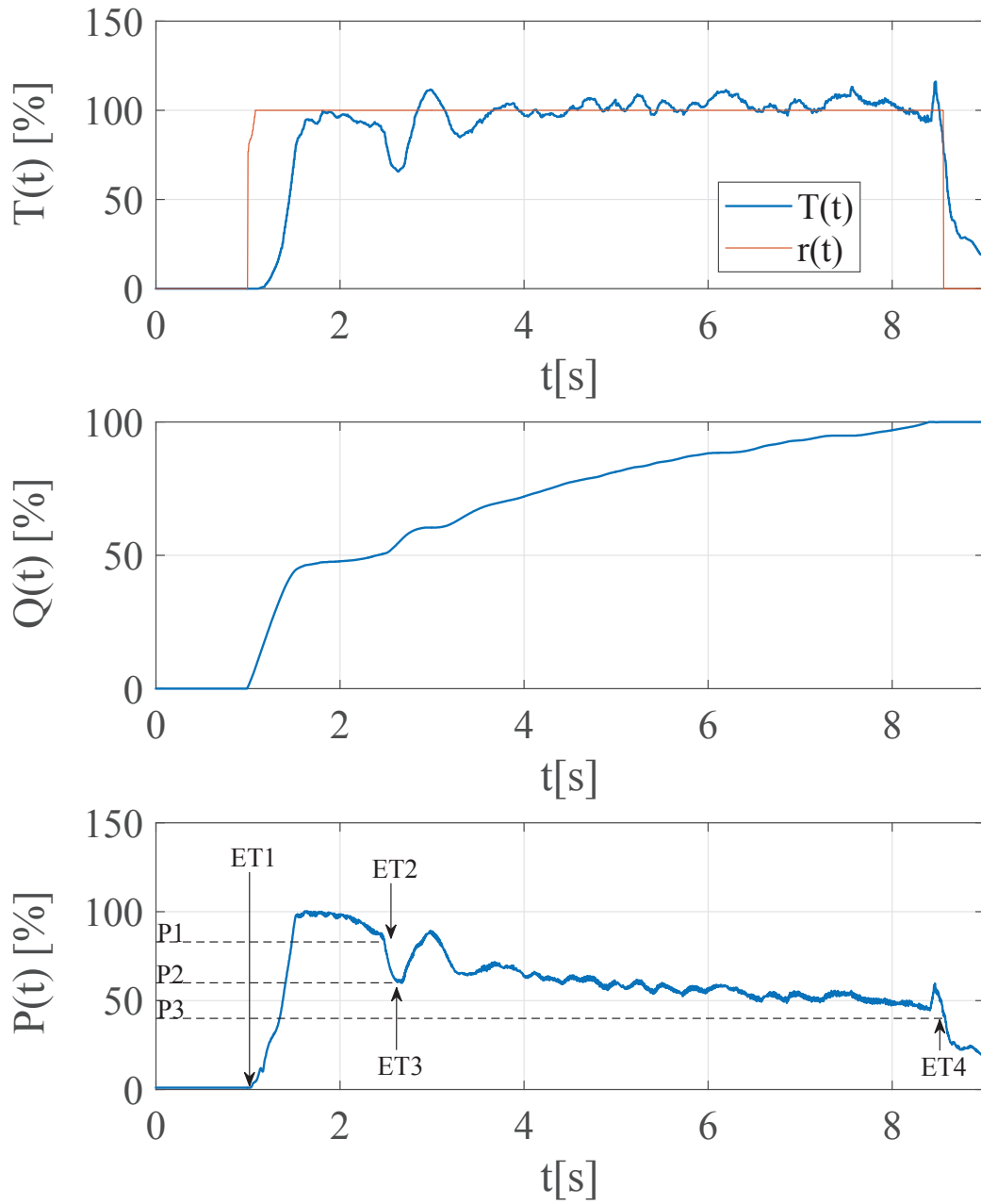


Fig. 2.11: Control result using the event-driven torque controller

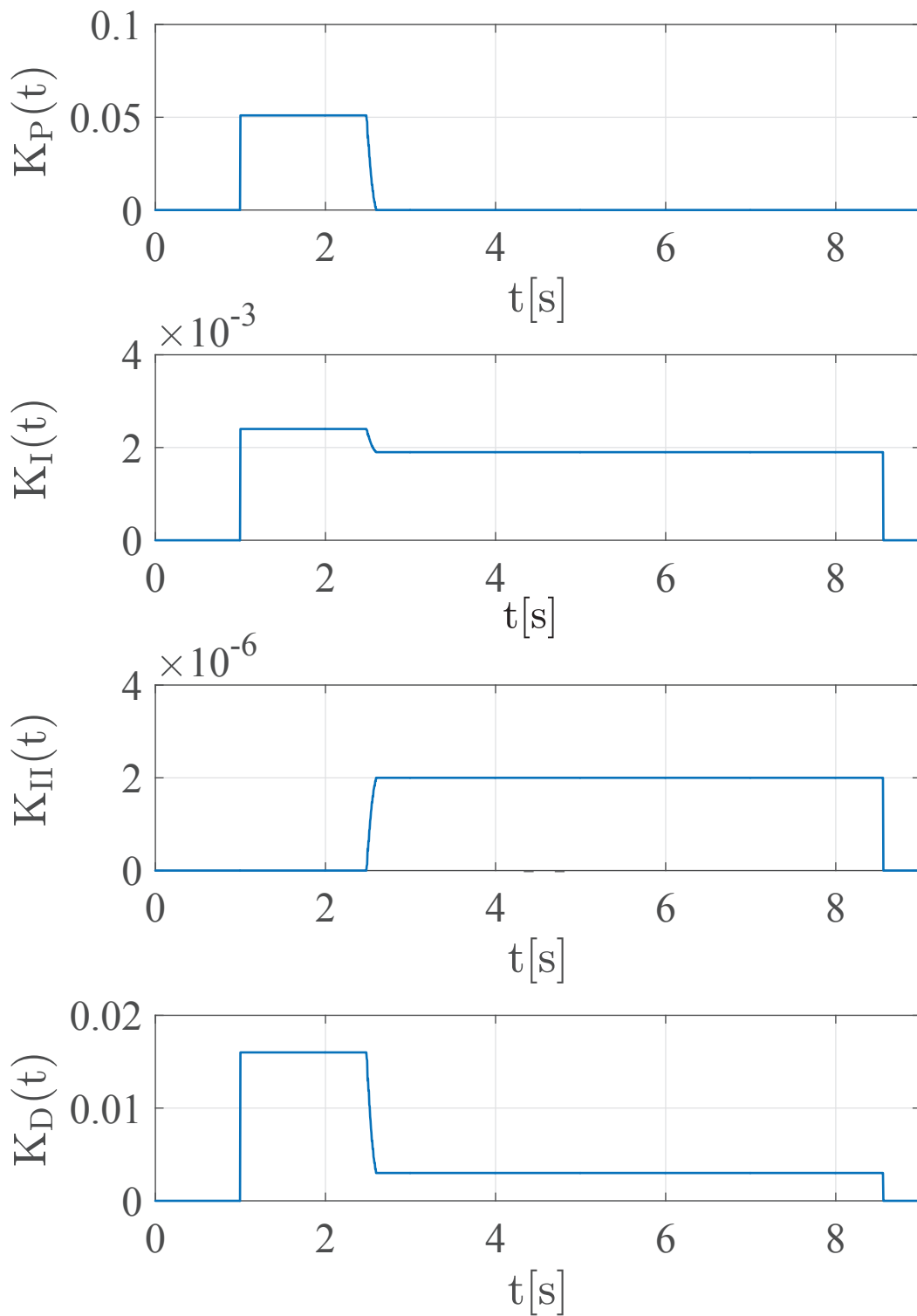


Fig. 2.12: Control parameter trajectories corresponding to Fig.2.11

2.6 結言

本章では、油圧ショベルのデータ指向型トルク制御を提案し、油圧ショベルの旋回を模擬したシミュレータと実機検証にて、その有効性を検証した。油圧ショベルは、作業状態や負荷状態により、油圧回路が切り替わることで圧力変動が発生するため、圧力の状態に応じて切り替わる非線形性を有している。そのため、油圧ショベルの制御対象として、油圧ポンプのトルクを考える場合、システム出力であるトルクのみを使用して制御することは、システムが切り替わったことを捉えることができず、制御性能の向上が見込めないことがある。そこで、内部状態であるポンプ圧力をイベントとして捉え、そのイベントの変化によりコントローラが変化するイベント駆動型トルク制御を構築した。さらに、システム変動の際にイベントであるポンプ圧力の値が連続的に変化することに着目して、ポンプ圧力に基づくゲインスケジューリング制御により、コントローラの切り替えを行った。これにより、データ駆動型制御のような複雑な計算が不要となり、油圧ショベルの車載コントローラへの実装が可能となった。さらに、コントローラに使用した制御ゲインは、直接型のGMVC則を用いて、ポンプ圧力の状態に応じて抽出したデータから直接算出することで、ゲインチューニングに費やされる時間を短縮した。

また、油圧ショベルへの実装検証により、本提案手法は、油圧ショベルで一般的に用いられているPQ制御のように低温状態でハンチングと呼ばれる振動現象を発生させず、さらに一般的な動的補償器であるPID制御器と比較しても、二重積分項の効果により、システム変動後の追従性を確保できることが明らかとなった。これにより、低温環境下といった油圧回路には厳しい条件下でも、所望のトルク設定で駆動することができ、生産性を落とすことなく、作業を実施することができる。さらに、設定された所望のトルクで駆動することは、必要最小限の狙った消費エネルギーで駆動することができることとなり、作業量の確保と省エネの両立が可能となる。

第3章 制御工学的視点に基づく

油圧ショベルの操作性評価指標の 構築

3.1 緒言

制御問題とは、ある目的に基づいて制御入力を決定する問題と考えることが一般的である。例えば、自動車のアクセルを踏んである目標の速度まで車速を上げる事を例に挙げて考えると、ある目標の速度まで車速を上げることが制御目的でありアクセルを踏んだ量、またはアクセル開度が制御入力となる。制御工学的視点により、操作する人間をコントローラ、操作される対象をシステムと捉える。この時、コントローラ側の問題として、目標値に到達・追従させる問題として扱えば、人間が操作する制御入力をどのように与えるかが重要となる。一方で、システム側の問題として、システムの制御しやすさを考える問題として扱えば、人間が機械を操作して制御量を決めるために、制御対象が持つダイナミクスをコントローラである人間がどのように感じて評価した上で操作するかが、操作のしやすさとしての重要な評価指標となる。

ここで、人間の操作を必要とする機械は、自動車や電動車椅子のような身近な生活機器や、油圧ショベルやクレーンのような作業現場で稼動する産業機器等、多数存在し、それらをメーカーが開発する際には、操縦者の要求・評価、例えば操作性や快適性等、を満足する必要がある。例えば、先行研究として、自動車のように日常生活の中で使用される機器に対して、走る

楽しさや喜びを感じさせることを目的とし、居住性、操作性、快適性を求め、それらの定量化や改善に関する研究が実施されている [37, 38, 39]。さらに、作業機械である油圧ショベルやクレーンについては、作業現場の生産性や作業効率を向上させることを目的として、操縦者に対する操作性、すなわち操作しやすさを向上させるための研究が実施されている [40, 41]。

人間の操作を必要とする機械に対して、メーカーが開発を行う際に操作のしやすさを評価するが、これは特定の評価者による官能評価を実施することが一般的である [42]。このような特定の評価者は、固有の評価指標を有しており [43]、人が操作する機械の開発に必要不可欠な存在であるものの、官能評価には以下のような課題がある。

- (1) 官能評価に基づく実機開発に多くの時間を要する
- (2) 天候等の環境条件が影響することがある
- (3) 評価者の健康状態や精神状態が影響することがある
- (4) 固有の基準を持つ評価者育成に時間を要する

上記のような課題を解決するため、人間の操作が必要な機械に対する定量的な操作性指標が必要となる [44, 45]。

一般的に操作が必要な機械は、高次系の複雑なシステムや、条件によって切り替わるような非線形性を有するシステムである場合が多い。制御工学の分野において、制御対象となるシステムを低次のシステムで表現して、制御しやすさの評価やコントローラ的设计を行う。この考え方に基づき、操作が必要な機器が高次のシステムであったとしても、コントローラである人間はその機器を操作するために、操作する機械を低次のシステムへ近似して、その特性を把握していると仮定する。一方で、人間が認知的制御を行う場合にワーキングメモリで処理できるパラメータの数は高々3つか、4つ程度であることが知られている [46, 47]。この考え方からも、操作される機械がいくら複雑なシステムであったとしても、人間が機械を評

価する際には複雑なシステムで捉えることは難しく、簡単なシステムに置き換えて評価していると考えられる。

そこで、本章では、操縦が必要な機器を一次遅れ+むだ時間系としてモデル化し、低次のシステムで捉え、その近似されたシステムパラメータと、人間の官能評価値の関係性を明らかとして、操作性の指標を構築する。生産性向上を目的とする産業機器に対して、このように動作を低次モデルに近似し、官能評価値と操作性の関係性を調査する研究は、著者の知る限りでは行われていない。具体的には、油圧ショベルのブーム上げ操作を評価対象として、その加速時の応答性に対して官能評価を実施し、実機データから近似されたシステムパラメータと官能評価値との関係性を明確にする。なお、一次遅れ+むだ時間系として表現される機体のシステムパラメータは、遺伝的アルゴリズム [48] により、データから直接物理的に意味のあるパラメータを算出する。さらに、油圧ショベルの実機は、機体の制約上、立ち上がりに関するパラメータが限定的にしか選択できないことから、一次遅れ+むだ時間系でブーム上げ加速操作を模したシミュレータを製作し、実機同様の評価を行い、実機での評価結果との整合性を確認した。

3.2 評価対象の表現

3.2.1 制御工学的視点に基づく評価対象の低次モデル化

(i) 評価対象

操作対象の機械は、Fig.1.4 に示すコベルコ建機社製 20t 油圧ショベル SK200-9 を用いる。油圧ショベルの構造は、作業装置として、ブーム、アーム、バケットを持つことで、土砂の運搬や重量物の持上げ等が可能となる。さらに、それら作業装置が上部旋回体に取り付けられ、旋回できることで自分を中心にして 360 度方向の作業を可能とする。また、下部走行体に左右のクローラが取り付けられることで走行ができる。このような装置が複合的に操作さ

れることにより、複雑な作業が可能となる。複数の装置を動かす複雑な作業であっても、基本的な機能の果たすための要素は、各装置の「加速」「定常速度」「減速（停止）」の3つの動作に分けられると考える。

そこで、本論文では、複雑な動きは扱わず、操作の対象はブーム上げの単動操作として、操作性評価の対象は「加速」とすることで、単純な問題として扱うこととする。なお、ブーム操作は、運転席内からみて作業装置の上下運動として捉えることができるため、油圧ショベルの操作の中で、動作を視覚的に捉えやすい作業装置であることから、ばらつきや偏りの少ない官能評価を実施できると考え、評価対象の装置として選定した。また、「加速」「定常速度」「減速（停止）」の3つの動作の中で、「加速」と「減速（停止）」は機体のダイナミクスを直接表す動作である。その中で、「加速」動作は、「減速（停止）」のように技量に依存する操作ではないことから、操作性の評価対象として選定した。ここで、加速が良いかどうかを示す指標として、「応答性」という言葉が使われ、その良し悪しが挙げられる。そこで、「加速」操作の応答性に関する官能評価値に対して検証を行う。

(ii) 評価対象の低次モデル化

制御工学の分野では、コントローラ設計の際にシステムのダイナミクスを把握し、動特性に応じたコントローラを設計することが一般的である。このとき、制御対象の詳細なモデル構造がわかっているならば、それを推定して制御することで所望の制御性能は得られる。

しかし、現実の制御対象に対して、詳細なモデルやパラメータを正確に得ることは難しく、モデル化誤差やノイズなどの影響により、所望の制御性能が得られないこともある。このような場合、システムの詳細モデルは推定せず、システムを低次モデルで近似し、コントローラを設計することがある [51]。例えば、PID コントローラを設計する場合、システムにステップ入力を加えて、そのステップ応答の波形から最大勾配を求めることで、システムの特徴をとらえて PID パラメータを設定する方法が数多く提案されている。Ziegler and Nichols の調整

則 [52] や Chien, Hrones and Reswick の調整則 [53] は有名な方法であり、提案されて四半世紀経つ現在でも、プロセス制御の分野等で多く使用されている。これらの方法は、次式に示す伝達関数でシステムの特徴を表し、時定数 T 、むだ時間 L 、システムゲイン K を近似的に求めることで、コントローラ設計を行う。

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} e^{-Ls} \quad (3.1)$$

さらに、むだ時間 L と時定数 T でシステムを表現することにより、むだ時間と時定数の比率 L/T を用いて、制御のしやすさを評価することもできる。このように、高々1次遅れ系のシステムで近似することで、汎用性のあるコントローラの設計と制御のしやすさの評価が可能となる。なお、先行研究として、長松らにより学習者の習熟度モデルを一次遅れ系で表現した研究が報告されており、制御しやすさの評価を学習者に対する支援のしやすさとして扱っている [54, 55]。

このように制御工学の分野では、低次モデルでシステムの特徴を表現し、その特徴を使ってコントローラの設計を行うことから、操作する人をコントローラ、操作される機械をシステムと捉えたときに、制御工学的な考え方にに基づき、操作者は機械を低次のモデルで表現して、操作のしやすさを評価可能であると仮定する。この考え方を Fig.3.1 に示す。

なお、人間が認知的制御を行う際にワーキングメモリで処理可能なパラメータ数が高々3つか、4つ程度であることが知られている [46]。ワーキングメモリとは、意識して情報を処理する能力の事であり [47]、判断するときや計算するとき等に使用される脳内の記憶領域である。作業機械の操作性等を判断する際も、過去の情報と照らし合わせながら優劣を判断する必要があり、人間が低次のモデルで操作対象のシステムを表現し、少ないパラメータで動作等を評価していると考えられる。

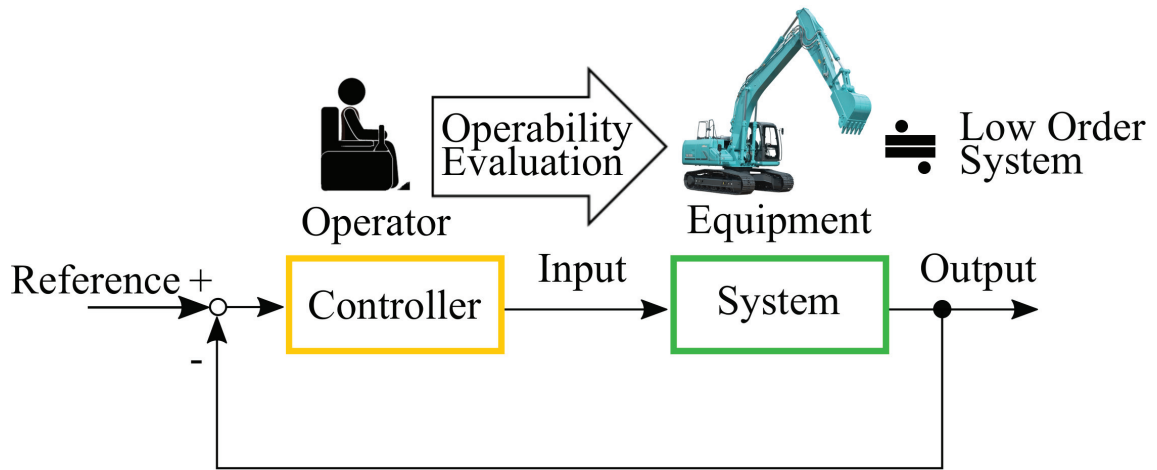


Fig. 3.1: Scheme of operability evaluation

3.2.2 シミュレータの構築

ブーム上げ操作を行った際の操縦席からの視点を Fig. 3.2 に示す。ブーム上げ操作を行うと、機体の動きとしてバケットの上下運動が操縦者の視界に捉えられる。すなわち、操縦者はレバー操作により油圧回路を通して、機体をコントロールするが、バケット等の作業装置の動きに関する情報が操縦者によって捉えられ、官能評価等の主観的評価が実施される。この考え方を Fig. 3.3 に示す。

この状況を再現するため、入力操作と視覚情報に基づく、簡易シミュレータの作成を行った。作成したシミュレータを Fig. 3.4 に示す。シミュレータは、ジョイスティック、ディスプレイとコンピュータで構成され、ジョイスティックを前後に操作すると、バケットを模した画面上の赤い四角が上下する。四角の動きは、(3.1)式で表される一次遅れ+むだ時間系として、コンピュータ内で計算される。Fig. 3.5 に示すように、操縦者はバケットの動きを模した四角の動きを視覚情報から評価することができ、Fig. 3.3 に示す実機評価を模擬することができる。

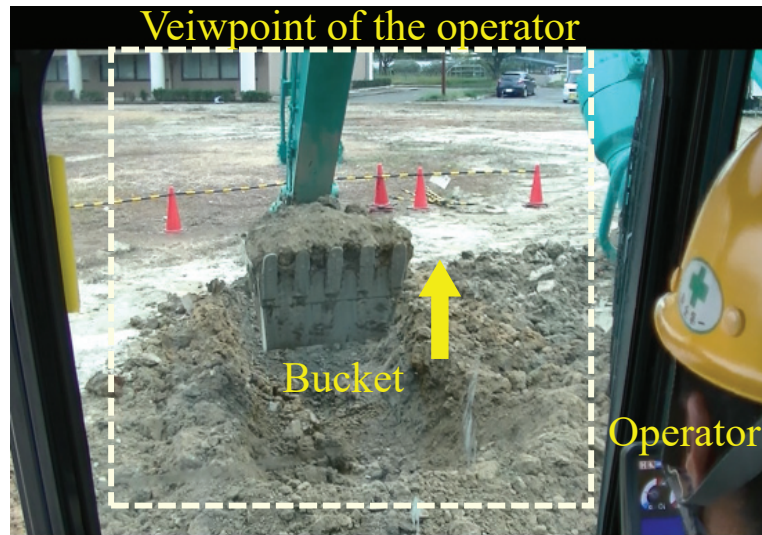


Fig. 3.2: View of Bucket Motion from Cabin

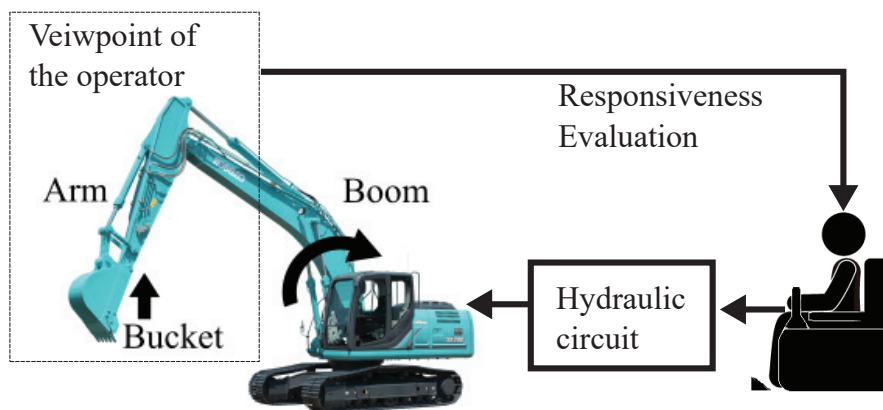


Fig. 3.3: Block diagram of evaluation for motion of hydraulic excavator

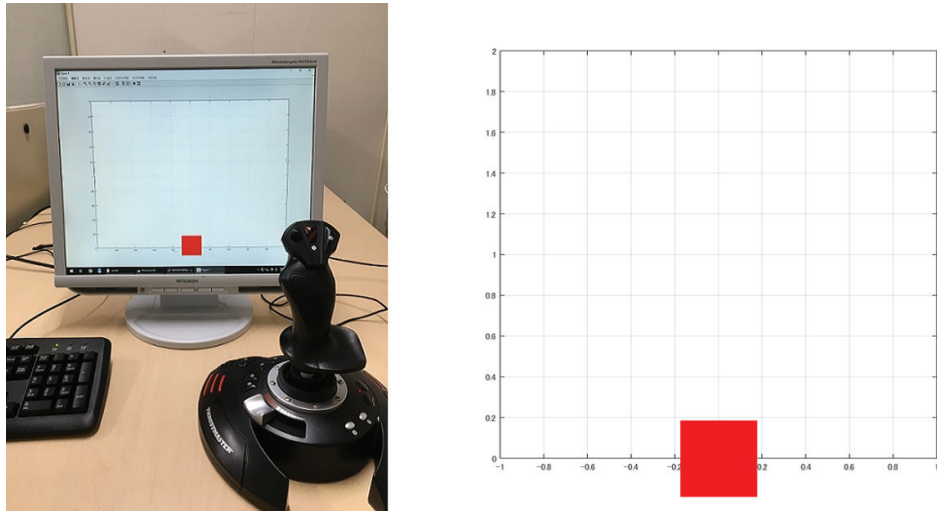


Fig. 3.4: Simulator of bucket motion

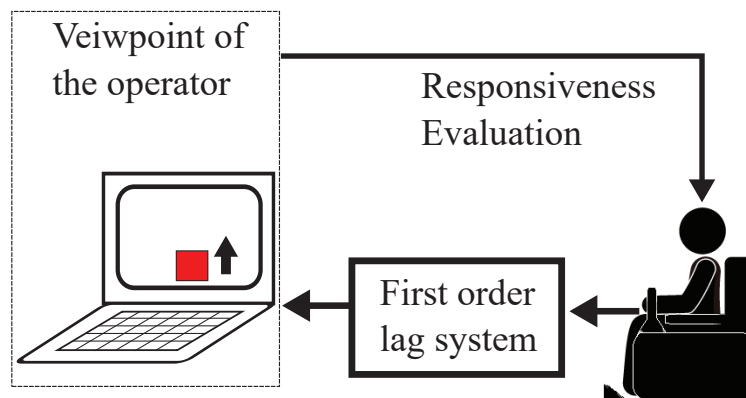


Fig. 3.5: Block diagram of evaluation for simulation

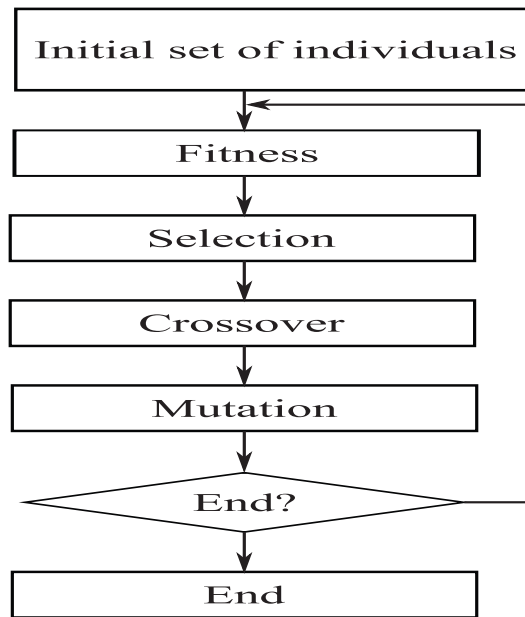


Fig. 3.6: Flow chart of GA

3.3 応答性の評価手法

3.3.1 遺伝的アルゴリズムを用いたパラメータ推定法

遺伝的アルゴリズム（以下，GA）とは，生物の進化過程を模して，組合せ最適化問題の解決において準最適解を探索する手法である。GAの基本的な処理の流れは，以下の(2)から(6)を繰り返す処理である。GAのフローチャートをFig.3.6に示す。

- (1) 初期集団の生成
- (2) 個体の評価
- (3) 個体の選択
- (4) 個体間の交差
- (5) 突然変異
- (6) 終了条件の判定

また，GAの特徴として以下が挙げられる。

- 局所解に陥り難く，限られた時間の中で比較的優れた解を探索可能
- 評価関数の連続性に制約されず，離散的に探索空間から解を探索可能

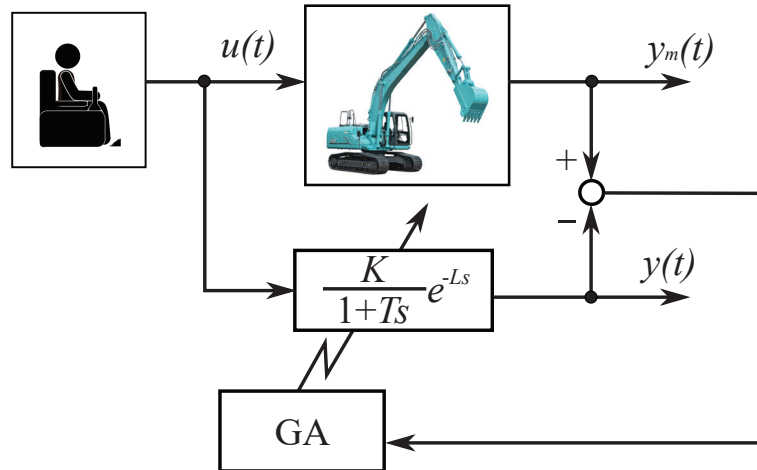


Fig. 3.7: Block diagram of system parameter estimation by GA

遺伝的アルゴリズムを用いたシステムパラメータ同定法のブロック線図を Fig. 3.7 に示し、以下に手順を説明する。

(1) 初期集団の生成

ランダムに決定された遺伝子をもつ N 個の個体からなる初期集団を生成する。個体の遺伝子は、システムパラメータ T , K , L の実数値で構成される。

(2) 個体の評価

生成された各個体に対して、以下に示す評価関数に基づき、それぞれの個体の適応度を算出する。適応度は 1 を最高として、0 に近づくほど低い適応度を示す。

$$J := \frac{1}{1 + \sum_{t=0}^n \omega(t) \{y_m(t) - y(t)\}^2} \quad (3.2)$$

ここで、 $y_m(t)$ は機体の操作により得られた出力であり、本論文では速度を扱う。 $y(t)$ は GA により算出されたシステムパラメータから計算される応答、 n はデータサンプル数、

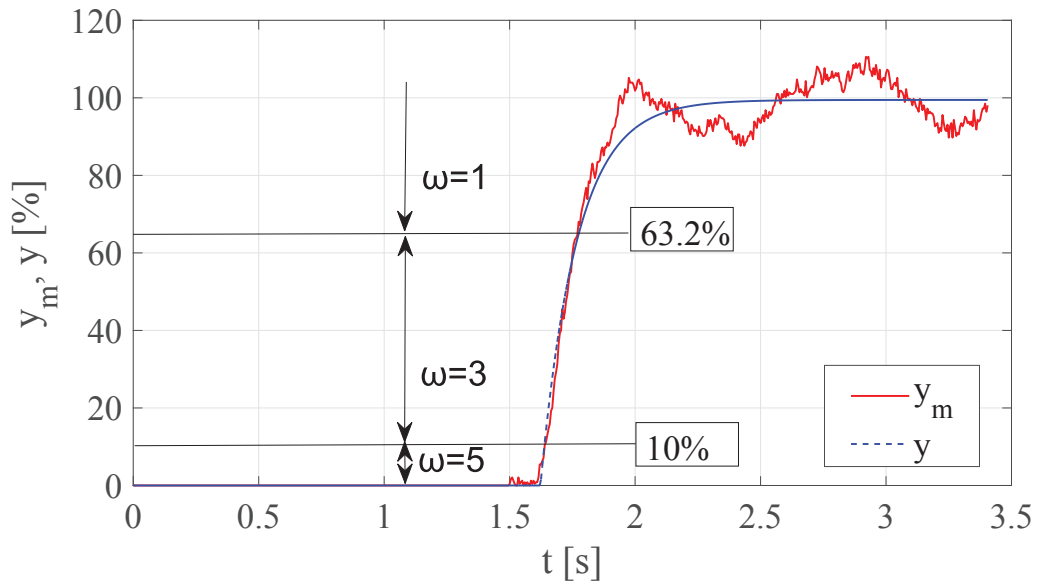


Fig. 3.8: Weight coefficients of criteria for GA

$\omega(t)$ は重み係数であり、以下のように設定する。

$$\omega(t) = \begin{cases} 1 & (y_m(t) > 63.2\%) \\ 3 & (63.2 \geq y_m(t) \geq 10\%) \\ 5 & (y_m(t) < 10\%) \end{cases} \quad (3.3)$$

このように評価関数に重み係数を設定することにより、GAの特徴である連続性に制約されないパラメータ同定が可能となる。すなわち、Fig. 3.8に示すような応答波形 $y_m(t)$ が得られた場合でも、一般的な最小二乗法による同定と異なり、定常時の振動影響を最小限として、起動時のむだ時間と 63.2% までの立ち上がり時間を重視したシステム同定が可能となる。なお、Fig. 3.8の縦軸は最大速度を 100% として正規化した値を記載する。

(3) 個体の選択

計算された適応度に応じて、適応度の上位 $\alpha\%$ を選択し、次世代の個体とする。

(4) 個体間の交差

上記 (3) で選択された個体からランダムに 2 つの個体を $\beta\%$ 選択しそれらを親個体として、以下の式に基づいて交叉を行う [49, 50]。

$$\left. \begin{aligned} P_c &= J_{\max}(P_m, P_n) + \frac{|P_m - P_n|}{4} \\ P_d &= J_{\max}(P_m, P_n) - \frac{|P_m - P_n|}{4} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

ここで、 P_c および P_d は次世代の個体、 P_m および P_n はランダムに抽出された親個体であり、 $J_{\max}(P_m, P_n)$ は選ばれた親個体の P_m, P_n のうち適応度が高い個体を表す。

(5) 突然変異

交叉により発生した次世代の個体の中からランダムで $\gamma\%$ の個体を選び、その個体の遺伝子の一つを別の乱数に置き換える。

(6) 終了条件の判定

(2) から (5) の処理を繰り返し、適応度が所定の値に到達するか、 G 世代に達したときに計算を終了する。その時の適応度が最も高い個体を準最適解とし、その個体の遺伝子 K, T, L をシステムパラメータの近似値とする。

3.3.2 評価手順

シミュレータおよび実機を使用した応答性評価手順を以下に示す。

- (i) 基準となる L と T を設定する。
- (ii) シミュレーション、実機共に、 L と T を 10 条件ずつ準備し、複数名の評価者が各条件で基準と比較しながらズーム上げ操作を実施する。なお、10 条件については、実機はハードウェアの制約上、設定可能な範囲で設定するが、シミュレータは上記の実機で設

定可能な範囲の中で $L-T$ 平面上を格子状に分割し、 $L+T$ が一様に分布するように設定する。

- (iii) 基準を3点として、1から5点の採点法で応答性の官能評価を実施する。なお、各評価者は、各条件の操作を何度実施してもよく、偏った評価は実施しない。
- (iv) 実機の場合はGAにより推定されたシステムパラメータ、シミュレーションの場合はコンピュータに使用したシステムパラメータとし、それぞれのパラメータと得られた官能評価値の関係性調査する。

3.4 評価結果

油圧ショベルのブーム上げ操作に対して、シミュレータと実機を用いて加速の応答性に関する官能評価を実施した結果を以下に示す。

3.4.1 シミュレーションによる評価結果

シミュレーションによる検証は7名の評価者により実施した。評価結果を Table 3.1 に示す。ここで、応答性の官能評価値は7名の平均値を示す。また、 T を横軸、 L を縦軸としてプロットした結果を Fig. 3.9 に示す。なお、図中の数字は各条件で得られた官能評価値を示す。官能評価値は、原点に近づくほど高い値を示しており、原点から離れるほど低い値を示している。また、官能評価値が3点に近い値が赤い一点鎖線の間にあることが分かる。これらの赤い一点鎖線は、 L と T の和が一定の線を示している。なお、赤い一点鎖線はそれぞれ、 L と T の和が 0.4 と 0.7 になる線を示すが、特にそれぞれの数値には意味はなく、シミュレーション結果と実機結果を比較・考察するための目安として使用する。

Table 3.1: Evaluation results of the simulation

No.	L	T	$L + T$	responsiveness
Criterion	0.2	0.25	0.45	3.0
1	0.2	2.0	2.2	2.0
2	0.2	0.1	0.3	4.1
3	0.4	0.5	0.9	2.6
4	0.1	0.5	0.6	3.1
5	0.4	2.0	2.4	1.4
6	0.4	0.2	0.6	3.1
7	0.1	0.125	0.225	4.6
8	0.3	0.15	0.45	3.4
9	0.1	1.0	1.1	2.1
10	0.3	1.5	1.8	1.8

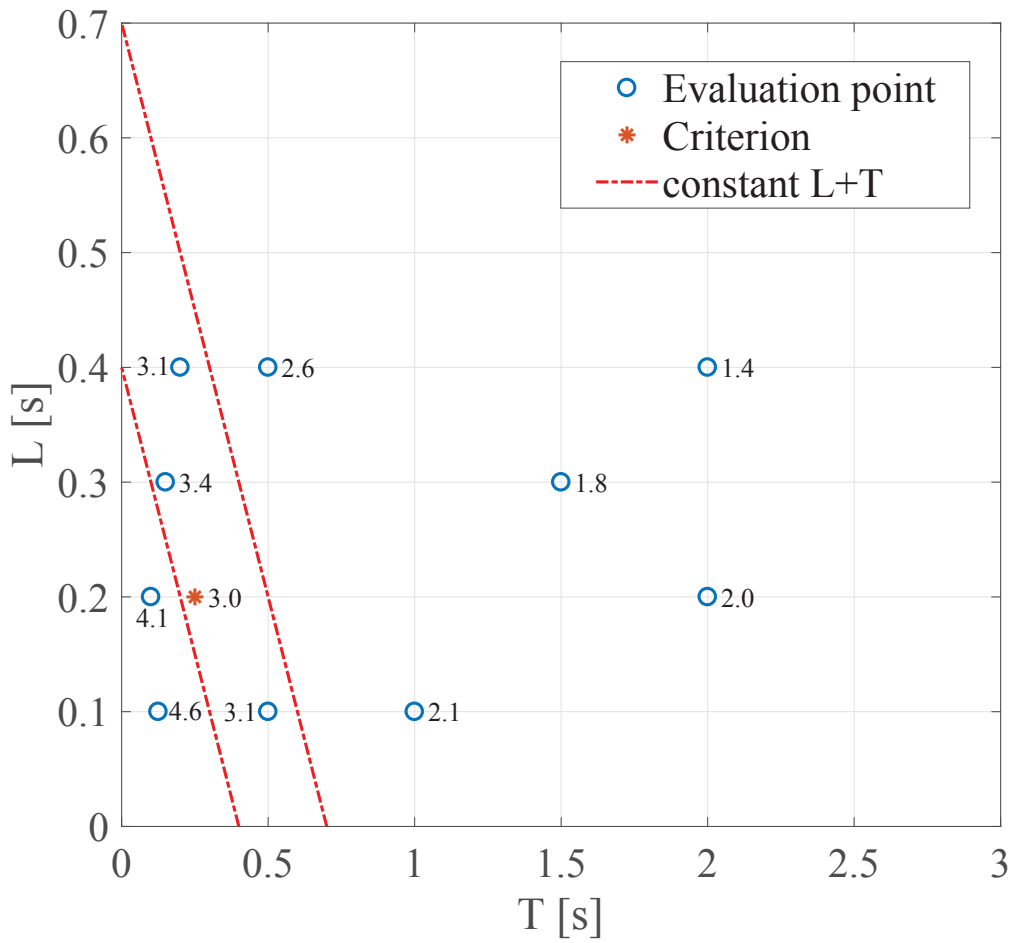


Fig. 3.9: Simulation result of the responsiveness evaluation on the L-T map

3.4.2 実機による評価結果

実機による検証は5名の評価者により実施した。ここで、実機のシステムパラメータは、GAにより推定した値を用いる。評価結果をTable 3.2に示す。また、応答性の官能評価値はシミュレーション同様、5名の平均値を示す。さらに、シミュレーション同様に、 T を横軸、 L を縦軸としてプロットした結果をFig. 3.10に示し、図中の数字は各条件での官能評価値を示す。

実機の結果もシミュレーションと同様に、原点に近づくほど官能評価値は高く、逆に原点から離れるほど官能評価値は低い。また、官能評価値が3点に近い値は一点鎖線の間にあることも、シミュレーションと同様の傾向が得られた。

3.4.3 $L + T$ と応答性官能評価値の関係性考察

シミュレーションと実機による評価結果より、 L 軸と T 軸の原点に近づくにつれて応答性評価が高くなることから、 L と T の総和と官能評価値に関係があると考え、横軸を $L + T$ 、縦軸を官能評価値としてプロットした結果をFig. 3.11に示す。また、併せて官能評価値の標準偏差をバーチャートで示す。この結果から、 $L + T$ と応答性の官能評価値に相関があり、評価者がむだ時間と時定数を足し合わせた時間を応答性の評価値として感じていると考えられる。

ここで、官能評価値を S 、むだ時間+時定数を R として、以下の対数で関係を表す。

$$S = a \log(R) + b \quad (3.5)$$

S と $\log(R)$ の相関係数 r は、Table 3.3のように計算される。

この結果、むだ時間と時定数の総和 R と応答性の官能評価値 S の相関性が最も高いことから評価者は $L + T$ を指標として応答性を評価していることがわかる。また、むだ時間 L は単体として応答性の評価の指標に使用しておらず、時定数 T に重きを置いて評価が行われていると、相関係数から考察することができる。さらに、応答性の官能評価値 S とむだ時間と時

Table 3.2: Evaluation results of the excavator operation

No.	Estimated Parameters			responsiveness
	L	T	$L + T$	
1	0.13	0.14	0.27	4.6
2	0.03	2.60	2.63	1.6
3	0.17	0.58	0.75	2.4
4	0.20	0.27	0.47	3.8
5	0.21	0.18	0.39	4.0
6	0.69	0.27	0.96	1.4
7	0.23	0.32	0.55	3.2
8	0.21	0.27	0.48	3.4
9	0.17	0.21	0.38	4.0
10	0.15	0.17	0.32	4.2

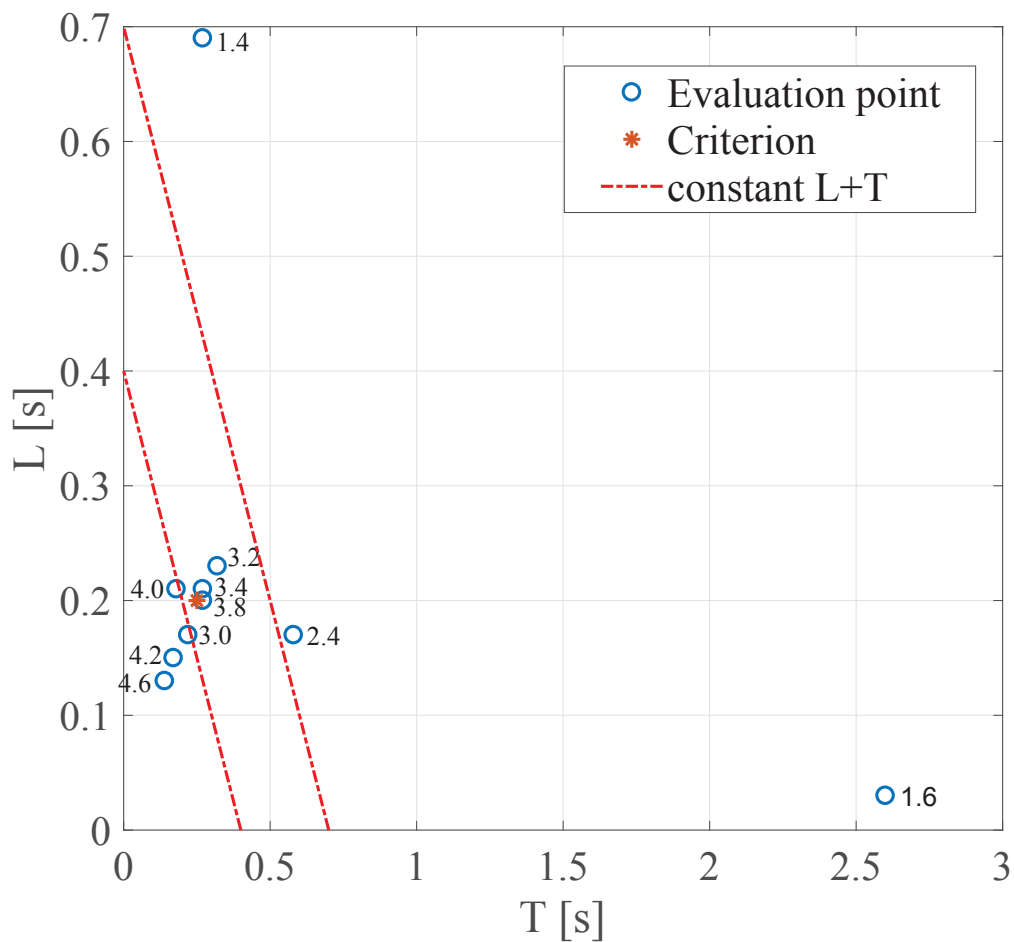


Fig. 3.10: Excavator result of the responsiveness evaluation on the L-T map

定数の総和 R の関係式を対数の関係でモデル化していることもわかる。ここで、Fig. 3.11 にシミュレーション結果を対数則で最小二乗法を用いて近似した結果を示す。各係数は図中に示す。

ここで、一般的な感覚量と刺激量との関係として、ウェバー・フェヒナー則が成立することが良く知られている [56]。このウェバー・フェヒナー則も感覚量 S と刺激量 R の関係を対数で表現しており、刺激量が強くなるにしたがって、感覚量ははじめは急激に変化するが、刺激が大きくなるほど、その増加率が穏やかになる性質がある。これと、同様に官能評価値も物理特性で表現した場合に、良いと判断する側は急激に変化するが、悪いと判断する側は、その減少率が穏やかになることを示しているのではないかと考える。基準よりも悪いと判断するものは、悪いと判断するが、尺度をもって悪いと判断することではなく、その反面、基準より良いものは多少の変化でも段階をつけて良し悪しを判断できることと、直感的にも整合しているように考える。

このように制御工学的視点に基づき、対象の操縦が必要な装置に対して、その動きを入力と出力の関係を使い低次元のシステムとして表現し、そのシステムパラメータを算出することで、官能評価値を客観的な数値で示すことができる。これにより、製品の設計段階で特定のシステムパラメータから、事前にある程度の官能評価値の予測を立てることが可能になると考える。

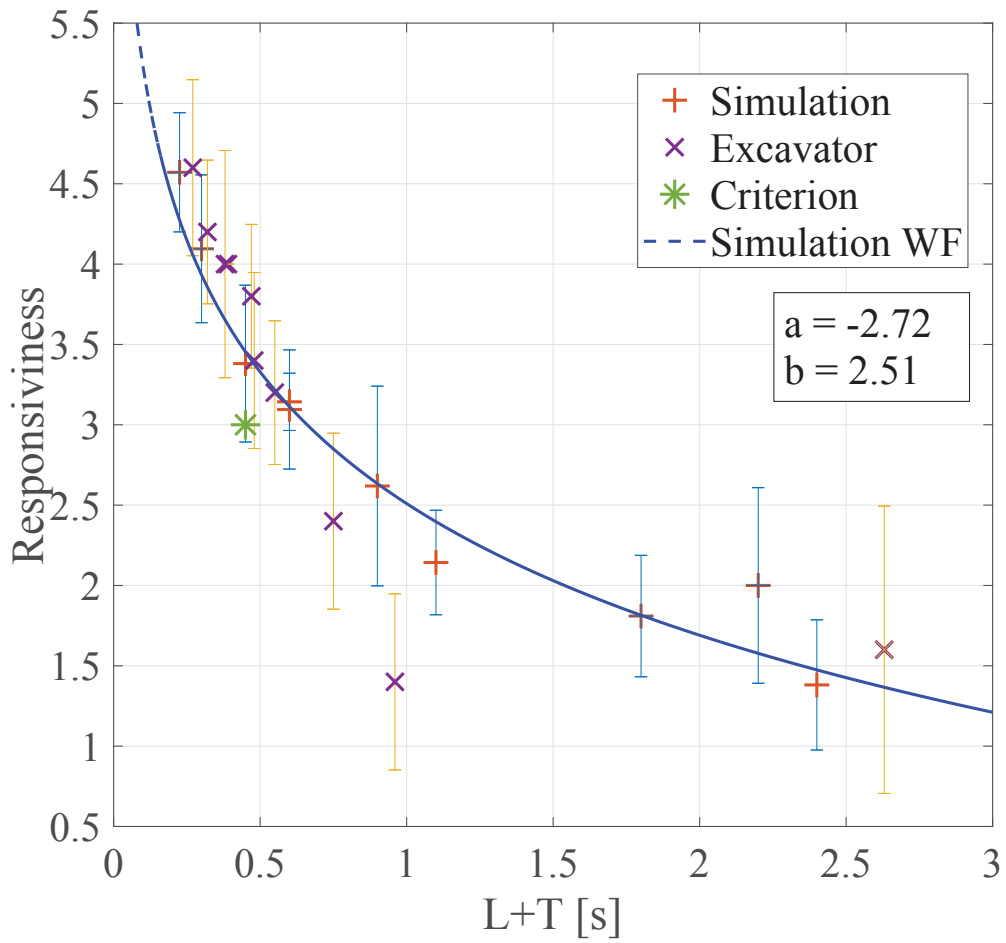


Fig. 3.11: Result of the responsiveness evaluation on the L+T axis

Table 3.3: Correlation coefficients and P-values of evaluations

	Simulation		Excavator	
	r	P[%]	r	P[%]
L	0.39	24.0	0.006	98.5
T	-0.93	2.9×10^{-3}	-0.72	0.80
$L + T$	-0.97	9.1×10^{-5}	-0.88	0.02

3.5 結言

本論文では、操縦が必要な機器を低次元システムとして表現し、そのシステムパラメータと応答性の官能評価値の関係性を明確にした。まず、運転席からの視覚情報に基づき、油圧ショベルのブーム上げ操作のシミュレータを作成し、コンピュータ上で再現した低次元システムを使用して、応答性に対する官能評価を実施した。次に、本来、操縦が必要な機器はシステムが高次系で構成され、動きに振動要素等が含まれるため、所望のシステムパラメータの推定が難しいが、システムパラメータの同定手法としてGAを用い、応答性の評価に必要なパラメータである、時定数とむだ時間を抽出する。これにより、実機においてもシステムパラメータと官能評価値の関係性を抽出した。応答性に関する官能評価値は、一次遅れ系で近似したモデルのむだ時間と時定数の和で表現することが可能であり、その関係性は対数で表現可能であることが分かった。また、対数で表せたことは、良いものは段階を分けて評価が可能であり、悪いものは悪いとひとくくりにして評価することとも、直感的に整合性が取れると考えられる。

物理量として捉えられるシステムパラメータと官能評価値の関係性を明確にすることで、製品の設計段階において、官能評価値とシステムパラメータとの関係性から官能評価値を予測しながらの製品開発が可能となる。今後、ブーム上げ単独操作以外の操作へ本手法の適用範囲を広げる。また、単独操作だけではなく、さらに複雑な複合操作への適用を検討する。

第4章 制御工学的視点に基づく

油圧ショベル操作技量の特徴抽出

4.1 緒言

工事現場、ビル解体現場、クレーン搬送等の建設現場では、現場全体の生産性向上を行うため、国土交通省指導のもと「i-construction」という取り組みが進められている [58]。この取り組みは、測量、設計、施工、検査までの建設現場全体のプロセスにおいて、生産性向上を行うことが目的である。このような方針に基づき、ICT 技術が建設現場に導入され、3次元計測技術 [59] や建設機械の自動化技術 [10, 11] が急速に発展していることで、将来、建設現場における省人化や作業者の負担軽減が期待できる。

一方で、人間の判断を必要とする作業現場がなくなることはなく、未だ人間の操作が必要な産業機械が用いられており、人間の判断に頼った作業となっている現状もある。そのような人間が関わる作業現場では、人間による作業の最適化が行われており、多くの熟練技術が存在する。しかし、近年は、人口減少、非熟練作業者の離職率の増加、熟練作業者の高齢化、作業者の多国籍化が進み、熟練技術を必要とした作業現場での就業人口が減少していることから、技術伝承が進んでいないことが課題となっている。したがって、このような熟練技術を定量化・定式化して評価することで技術継承を可能とし、教育や支援につなげていくことが期待される。さらに、熟練技術を定量化・定式化することで、作業機械の自動化や作業効率向上にもつなげることができる [60]。

先行研究として、作業機械をシステム、それを操作する人間を一種のコントローラとして

捉えたスキルベースドコントローラが提案されている [61, 62]。これらの研究では、人間の熟練技術を非線形コントローラとして考え、PID コントローラとそのパラメータを調整する機構で人間のスキルを表現することが提案されている。ここで、非線形コントローラに対するパラメータチューニング法として、ニューラルネットワークによる調整機構が用いられる。一般的な階層型ニューラルネットワークでは、学習に多くの時間を要するという欠点があったが、ニューラルネットワークの一種である小脳演算モデル (CMAC) [64, 65, 66] を用いることにより、その課題を改善することが検証されている [67, 68]。これらのスキルベースドコントローラに関する研究では、実際の操縦者の運用データを基に、パラメータ調整機構を学習させ、そのスキルと同等の操作性能を有するコントローラを実現できることが、実験装置にて検証されている。しかしながら、これら研究では、スキルの再現を実施しているものの、技術を定量的に評価する手法まで踏み込んで検討されていない。また、実験装置による検証であり、実際の産業機器への適用検証には至っていない。

そこで、本研究では、人間を一種のコントローラとして捉えることで、人間のスキル評価を行う。具体的には、機器の操作入出力をニューラルネットワークの一種である小脳演算モデル (CMAC) に学習させる。CMAC は、学習した結果を PID コントローラのゲインとして出力し、その PID ゲインの変化量により人間のスキルを定量的に評価する。さらに、産業機器への適用として、建設機械の操作スキル評価を実施する。建設機械の操作量を制御入力、アタッチメントの位置情報をシステム出力として、非熟練オペレータと熟練オペレータのデータを取得する。これらのデータを基に CMAC を学習し、非熟練オペレータと熟練オペレータの PID ゲイン変動の差異を比較することで、定量的に人間のスキルを評価する。

4.2 スキルベースドCMAC-PIDコントローラ

スキルベースドCMAC-PIDコントローラを用いて、油圧ショベルの操作における特徴抽出を行う。そこで、以下に操作の特徴抽出手法であるスキルベースドCMAC-PIDコントローラを説明する。まず、CMACと呼ばれる小脳演算モデルについて、構造や特徴などの詳細を述べる。次に、スキルベースドCMAC-PIDコントローラについて、その構造とスキルデータの学習方法について述べる。

4.2.1 小脳演算モデル

脳の機能を数式的モデルで表したニューラルネットワークの研究は盛んに行われ、多岐に渡り実用化されている。階層型ニューラルネットワークは、最もよく知られたニューラルネットワークの一つである。また、近年、畳み込みニューラルネットワークに代表されるディープラーニングもニューラルネットワークの一種である [63]。

このような様々なニューラルネットワーク理論の中で、小脳皮質内の情報処理機構を数学的モデルとして表した小脳演算モデルが Albus によって提案されている [64, 65, 66]。小脳演算モデルは、その英語表記 Cerebellar Model Articulation Controller の頭文字をとることで、通称 CMAC と呼ばれる。その構造、学習アルゴリズム、具体例、並びに特徴を以下に示す。

(i) CMAC の構造及び学習アルゴリズム

CMAC の構造を Fig.4.1 に示す。図の左側に、小脳の構造を図示し、右側に CMAC の構造を図示する。この構造は、入力値を写像することでコード化し、コード化した値で共有メモリ構造の荷重表を参照することにより、出力を得ることができ、次のような一連の写像関係で定義される。

$$S \rightarrow M \rightarrow \mathcal{A} \rightarrow P \quad (4.1)$$

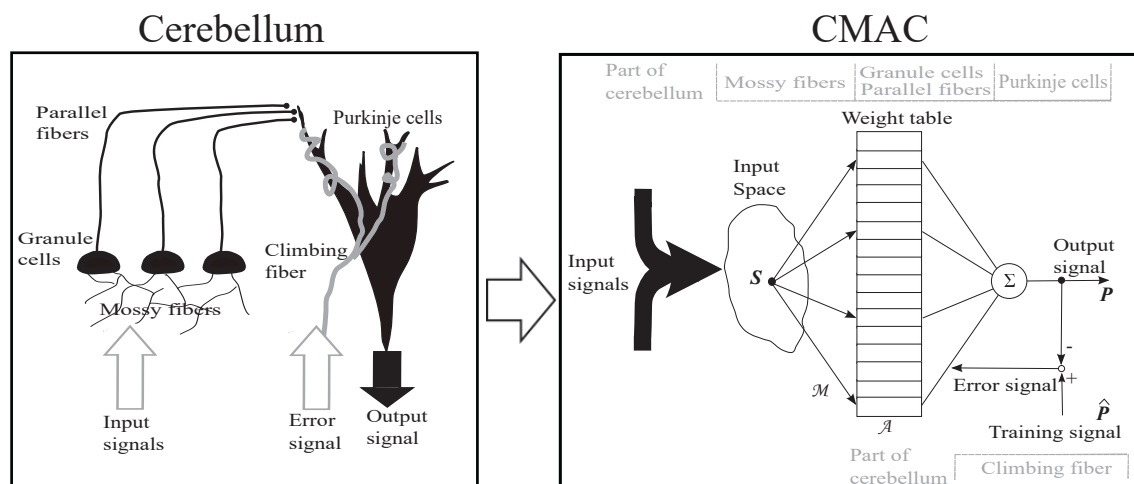


Fig. 4.1: Structure of cerebellum and CMAC

ここで、 S は入力ベクトル、 M はラベルの集合、 \mathcal{A} は荷重値の集合、 P は出力ベクトルを示す。すなわち、入力空間へ入力されたベクトル S をラベルの集合 M に変換し、これらラベル M に基づいて複数の荷重表 \mathcal{A} を参照して、荷重値の総和 P を出力する。この写像関係は、(4.2)式であらわすことができる。

$$P = H(S) \quad (4.2)$$

さらに、CMACは得られた出力と既知のデータや関数を比較することにより学習することが可能である。学習は次のような手順で行われる。

(ii) 学習の手順

[Step1] CMACの学習に用いる教師データ \hat{P} を設定する。

[Step2] ある入力 S_1 に対して、CMACから出力 P_1 を得る。このときCMACの荷重表は何らかの荷重値をもっているものとする。

[Step3] S_1 について、教示データ \hat{P}_1 を得る。

[Step4] 次式により荷重を修正する。

$$W_h^{new} \leftarrow W_h^{old} + g \frac{\hat{P}_1 - P_1}{K} \quad (4.3)$$

ここで、 W_h^{old} は修正前の荷重値、 W_h^{new} は修正後の荷重値、 K は S_1 によって参照された荷重表の数、 g は学習係数を示す。学習係数とは、1回の学習でどの程度学習するか決める係数である。もし $g = 1$ ならば、1回の学習で誤差信号の大きさを一度で学習する。この学習係数が大きすぎると過学習を起こしやすい。逆に、小さすぎると学習に時間を要する。

[Step 4] 荷重表が適正な値になるまで、Step2 から Step4 を繰り返す。

(iii) 2変量の CMAC モデル

Fig.4.2 に簡単な2入力の CMAC を例示する。この2変量の CMAC モデルを用いて、CMAC の計算方法を説明する。この CMAC は、3つの荷重表と4つのラベルで構成される。入力空間に入力 $S(7,4)$ が与えられると、それらをラベル集合 $M\{C,H,K\}$, $\{b,g,j\}$ に変換し、これらラベルに基づいて荷重表から荷重4, 3, 1を参照する。そして、それら合計である8を出力する。もし、この入力に対する教師信号が4とすれば、CMAC は教師信号4と計算によって得られた合計値8の差を荷重表の総数3で割った値、すなわち $-4/3$ で参照した荷重を全て修正して、次の出力を所望の出力へ近づけるように学習する。

(iv) CMAC の特徴

CMAC は、共有メモリを参照することで出力の生成や学習を行うことが、構造的な大きな特徴である。このような共有メモリ構造を有していることで、以下に挙げる機能的な特徴を有する。

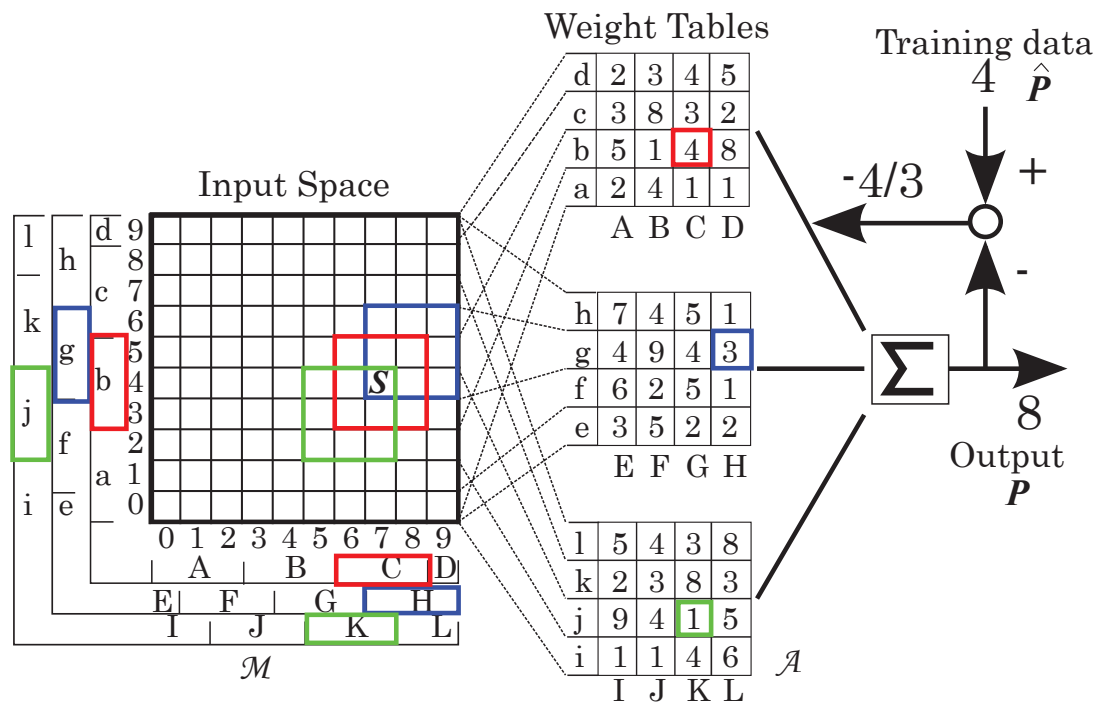


Fig. 4.2: Example of 2 dimensional CMAC model

- (1) 学習時間が比較的短い
- (2) 汎化能力
- (3) 非線形関数が学習可能
- (4) メモリの節約

以下に、CMACの特徴の詳細を示す。

(1) 学習時間

広く使用されている階層型ニューラルネットワークでは、学習方法としてバックプロパゲーション法（以下、BP法）が広く用いられている。しかし、階層型ニューラルネットワークをBP法で学習させる場合、全てのニューロンの結合荷重を調整するため、学習に多くの時間を要してしまうという問題点がある。一方で、CMACは共有メモリ構造により、出力生成及び学習に用いるニューロン、すなわち荷重表を入力との距離に応じて切り替えて学習する。このように一度の学習で荷重表の一部を共有しながら効率的に学習することにより、階層型ニューラルネットワークと比較して、非常に短い時間で所

望の学習結果を得ることができる。

(2) 汎化能力

CMACなどのニューラルネットワークを使用する場合、学習済みの入力に効果を発揮することはもちろんのこと、学習していない入力に対しても効果が得られることが望ましい。このような学習済みの入力から何らかの法則性・規則性を得て、未学習の入力に対しても効果が得られることを汎化能力と呼ぶ。前項でも述べたように、CMACでは入力距離に応じた出力の生成及び学習を行うため、入力距離が近い場合は多くの共通ラベルを持ち、共通の荷重表を参照する。そのため、入力距離が近い一定の範囲では、法則性や規則性を共有することができる。これにより、CMACは特定の入力距離間で高い汎化能力を持っている。なお、入力ベクトルの変化量が分解能にCMACの荷重表の数を掛けた値を超えると汎化性の効果を得られない。

例えば、Fig.4.2は入力ベクトル \mathbf{S} が(7,4)であり、 $\{C, H, K\}$ と $\{b, g, j\}$ に写像される。この入力ベクトルが(7,4)から(6,4)に変化した場合、ラベルは $\{C, G, K\}$ と $\{b, g, j\}$ となり、写像されるラベルは H から G 一つだけ変化する。

(3) 非線形関数の学習能力

CMACのメモリ共有構造は、入力の距離が近い（入力状態の類似度が高い）場合には重複したラベルを参照し、距離が遠くなるにつれて重複したラベルの数が減少する。

例えばFig.4.2の例では、 \mathbf{S} が(7,4)の場合はラベル $\{C, H, K\}$ と $\{b, g, j\}$ に写像される。入力ベクトル \mathbf{S} が(7,4)から(6,4)に変化した場合、ラベルは $\{C, G, K\}$ と $\{b, g, j\}$ となり、元の入力に対して写像されるラベルが H から G へと一つだけ異なるラベルとなり、それ以外のラベルは共通として使用されている。反面、この入力距離が離れ、 \mathbf{S} が(4,7)となった時には元の入力との共通ラベルがなくなる。そのため、一定の距離離れると、全ての異なったラベルに写像されることとなり、全く異なる荷重表が参照され、出力が生

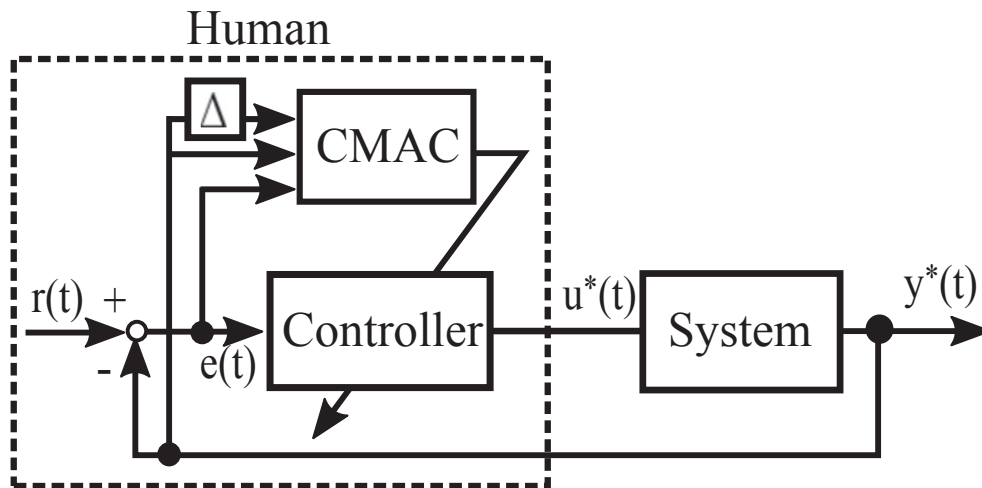


Fig. 4.3: Block diagram of skill based CMAC-PID controller

成される。このことから、入力の増加量等に依存しない出力を得ることができるため、非線形性の強い関数等に対しても学習が可能であるといえる。

(4) メモリの節約

CMACは共有メモリ構造を持つことで、従来のコンピュータなどで用いられているアドレス方式よりメモリを節約できる。従来のコンピュータのアドレス方式とは、1入力に対して、1つのアドレス及び1つの出力が対応しそれらを読み出す方式のことである。例えば Fig.4.2 では、従来のアドレス方式のように1つの入力に対して1つのアドレスが対応するメモリを作ると、全ての出力を得るためには入力空間と同じ大きさの100個のメモリが必要となる。しかし、CMACを用いることでメモリの数、すなわち荷重表は48個でよい。

4.2.2 スキルベースド CMAC-PID コントローラ

スキルベースド CMAC-PID コントローラのブロック線図を Fig.4.3 に示す。ここで、破線部を操縦者、システムを作業機械と考え、人間の操作量 $u^*(t)$ でシステムが操作され、その出力を $y^*(t)$ とする。さらに、PID コントローラと CMAC で構成されるパラメータ調整器にて操作

者を表現する。なお、ここで示される PID 制御則は以下とする。

$$\Delta u(t) = K_I(t)e(t) - K_P(t)\Delta y^*(t) - K_D(t)\Delta^2 y^*(t) \quad (4.4)$$

$$e(t) := r(t) - y^*(t) \quad (4.5)$$

ここで、 $K_P(t)$ 、 $K_I(t)$ 、 $K_D(t)$ はPIDゲイン、 $e^*(t)$ は制御誤差信号を示し、 Δ は差分演算子であり、 $\Delta = 1 - z^{-1}$ のように記述される。

PIDゲインは、CMACからの出力として、以下に示す各荷重表 $W_{PID,h}(t)$ の総和により得られる。

$$\begin{aligned} K_P(t) &= \sum_{h=1}^K W_{P,h}(t) \\ K_I(t) &= \sum_{h=1}^K W_{I,h}(t) \\ K_D(t) &= \sum_{h=1}^K W_{D,h}(t) \end{aligned} \quad (4.6)$$

ここで、 K は各CMACで参照される荷重表の総数を示す。なお、これらCMACは、3入力
のCMACを使用し、入力軸はそれぞれ $e(t)$ 、 $y^*(t)$ 及び $\Delta y^*(t)$ とする。これらの荷重表 $W_{P,h}(t)$ 、
 $W_{I,h}(t)$ 、 $W_{D,h}(t)$ をスキルデータを基に学習させる。

4.2.3 スキルデータに基づくCMACの学習法

スキルデータに基づくCMACの学習アルゴリズムをFig.4.4のブロック線図に示す。既に得られた作業機械の出力 $y^*(t)$ を使用してコントローラ出力 $u(t)$ を計算し、教師信号を人間の操

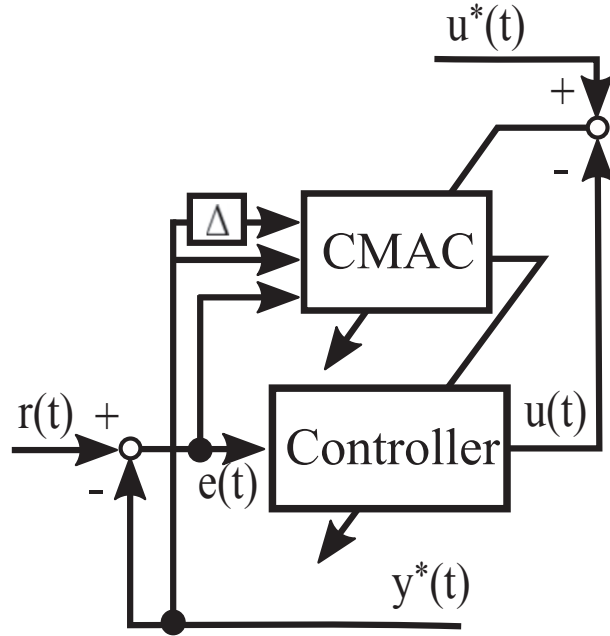


Fig. 4.4: Human skill leaning by CMAC-PID

作量 $u^*(t)$ として, $u(t)$ が $u^*(t)$ に近づくように最急降下法を用いて, 以下のように学習される。

$$\begin{aligned}
 W_{P,h}^{new}(t) &= W_{P,h}^{old}(t) - g(t) \frac{\partial J(t)}{\partial K_P(t)} \frac{1}{K} \\
 W_{I,h}^{new}(t) &= W_{I,h}^{old}(t) - g(t) \frac{\partial J(t)}{\partial K_I(t)} \frac{1}{K} \\
 W_{D,h}^{new}(t) &= W_{D,h}^{old}(t) - g(t) \frac{\partial J(t)}{\partial K_D(t)} \frac{1}{K}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

ここで, $g(t)$ は学習の度合いを決める学習係数, $J(t)$ は評価関数として, 以下のように定義する。

$$g(t) = \frac{1}{c + a \cdot \exp(-b|u^*(t) - u(t)|)} \tag{4.8}$$

$$J(t) := \frac{1}{2} \epsilon(t)^2 \tag{4.9}$$

$$\epsilon(t) = u^*(t) - u(t) \tag{4.10}$$

なお, (4.8) 式の係数 a , b , c は正の整数として, 設計者により学習の速度を鑑みて決定される。 a は教師データ $u^*(t)$ と推定値 $u(t)$ の差が小さいときの学習の速度, c は教師データ $u^*(t)$

と推定値 $u(t)$ の差が大きいときの学習の速度， b は教師データ $u^*(t)$ と推定値 $u(t)$ の差に対する a の寄与を決めるパラメータである。さらに，(4.7) 式に示される各勾配は以下のように与える。

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(t)}{\partial K_P(t)} &= \frac{\partial J(t)}{\partial \epsilon(t)} \frac{\partial \epsilon(t)}{\partial u(t)} \frac{\partial u(t)}{\partial K_P(t)} = \epsilon(t) \Delta y^*(t) \\ \frac{\partial J(t)}{\partial K_I(t)} &= \frac{\partial J(t)}{\partial \epsilon(t)} \frac{\partial \epsilon(t)}{\partial u(t)} \frac{\partial u(t)}{\partial K_I(t)} = -\epsilon(t) e(t) \\ \frac{\partial J(t)}{\partial K_D(t)} &= \frac{\partial J(t)}{\partial \epsilon(t)} \frac{\partial \epsilon(t)}{\partial u(t)} \frac{\partial u(t)}{\partial K_D(t)} = \epsilon(t) \Delta^2 y^*(t) \end{aligned} \tag{4.11}$$

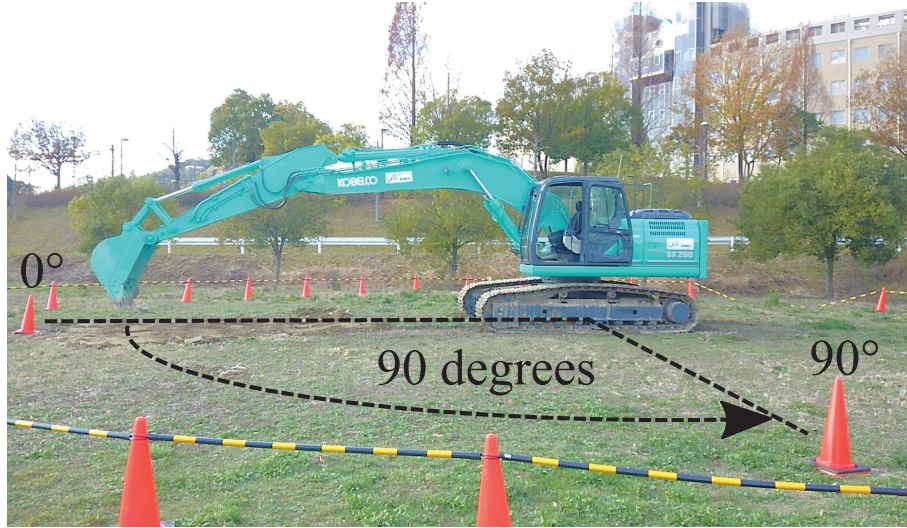


Fig. 4.5: Experimental method

4.3 適用結果

油圧ショベルの旋回操作に対して、前節で述べたスキルベースドCAMC-PIDコントローラを適用した結果を述べる。

4.3.1 適用対象

提案手法を産業機械及びそれを操縦するオペレータに適用する。評価対象は、油圧ショベルの旋回停止操作とする。なお、使用した油圧ショベルは、Fig.4.5に示すコベルコ建機株式会社製 SK200-9 アセラ・ジオスペックである。操作手順は、オペレータが操作レバーを最大に倒して加速を行った後に、90°を目標として機体を停止させる。この操作を10回繰り返す。なお、あらかじめ0°と90°は操縦者が見える位置に目印を付けておく。ここで、システム出力 $y^*(t)$ は機体姿勢を示す旋回角度とし、操作量 $u^*(t)$ は旋回レバーの操作量に応じたパイロット圧とする。データのサンプリング時間 T_s は、人間の反応速度を考慮して200msとする。スキル評価は減速時のみに適用し、加速時はレバーを最大に倒して加速するため評価対象としない。

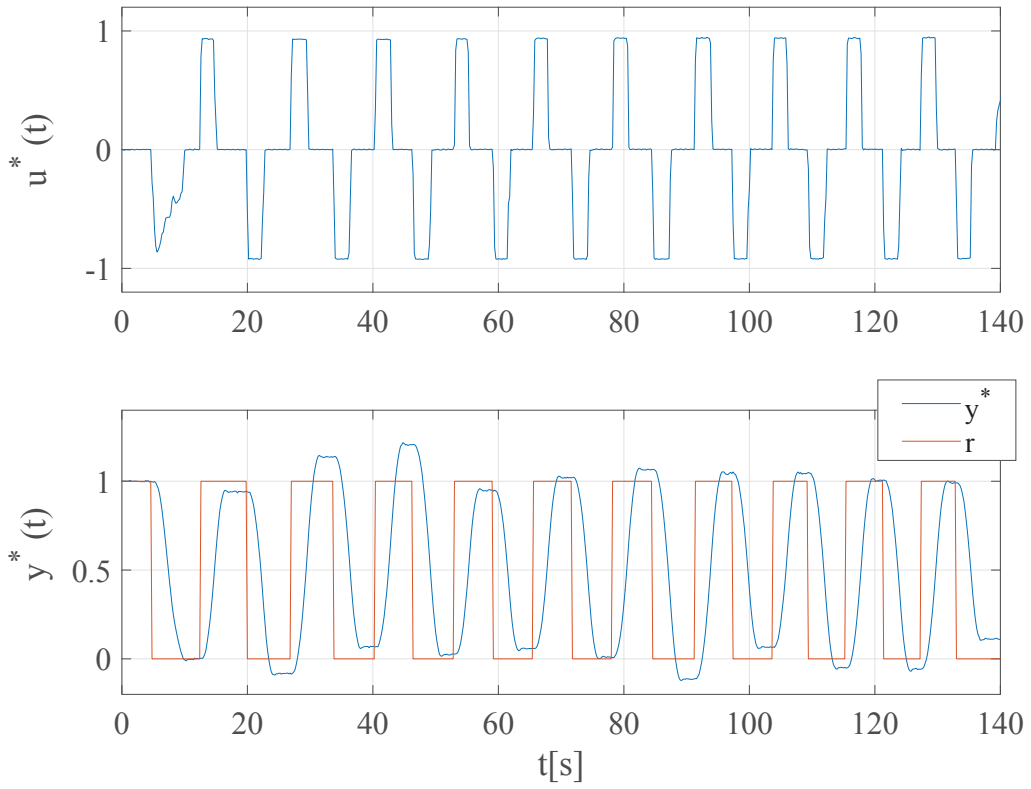


Fig. 4.6: Data of novice operation

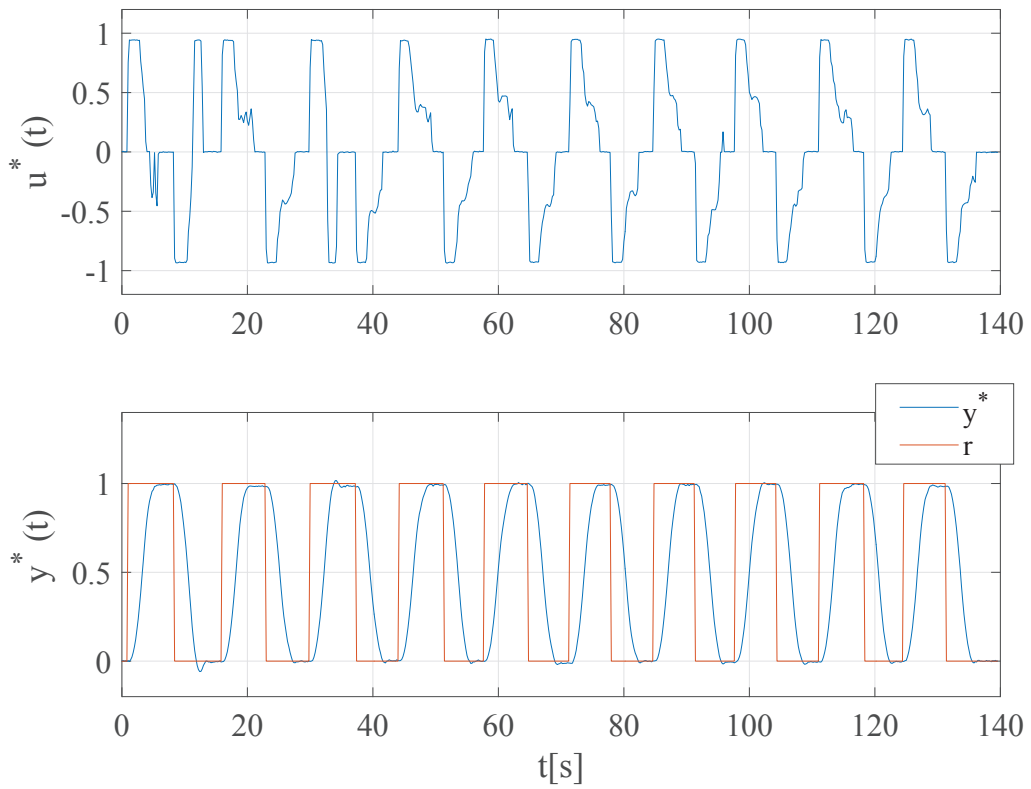


Fig. 4.7: Data of professional operation

4.3.2 CMACの学習結果

熟練オペレータと習熟度の低い非熟練オペレータのデータを取得し、それらの比較を実施する。上記操作手順に従い、それぞれのオペレータが入出力データ $y^*(t)$ と $u^*(t)$ を取得する。今回の実験では、熟練オペレータ 2 名、非熟練オペレータ 2 名のデータを取得した。それぞれ 1 名ずつの取得データを Fig.4.6 と Fig.4.7 に示す。なお、取得したそれぞれのデータに対して、システム出力 $y^*(t)$ は目標値が 1 になるように、操作量 $u^*(t)$ は最大操作圧力が 1 になるように正規化する。次に、 $y^*(t)$ と $u^*(t)$ を使用して (4.4) 式に対して最小二乗法を実施し、PID ゲインの初期値を決定する。さらに、これら初期値が出力されるように CMAC の初期荷重を調整した後に、(4.7) 式-(4.11) 式にて学習計算を実施する。ここで、使用した CMAC は、ラベル数を 10、荷重表の総数を 10 とした。CMAC を学習させた結果を Fig.4.8 と Fig.4.9 に示す。Fig.4.8 が非熟練オペレータの結果、Fig.4.9 が熟練オペレータの結果である。

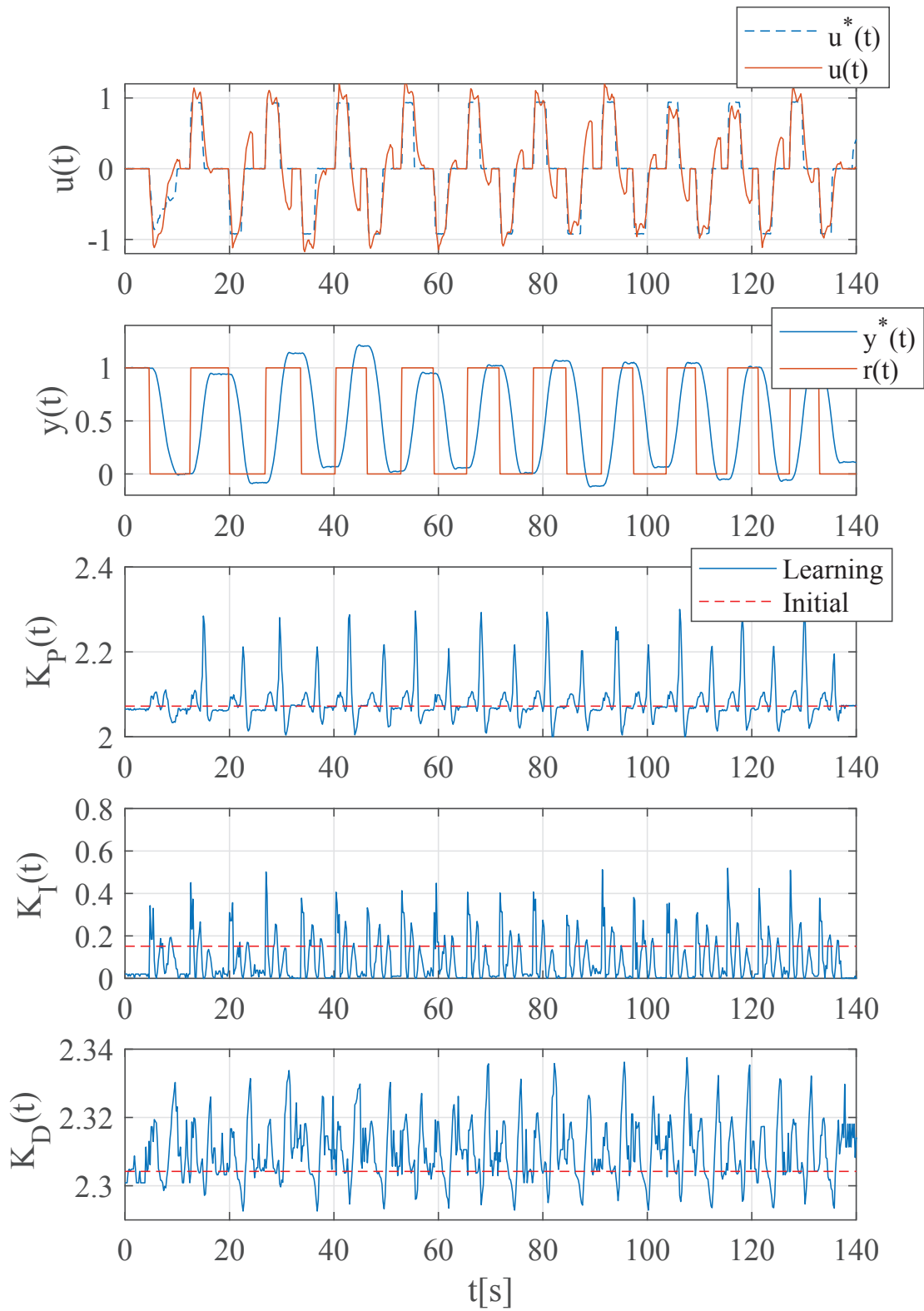


Fig. 4.8: Learning result for novice operation

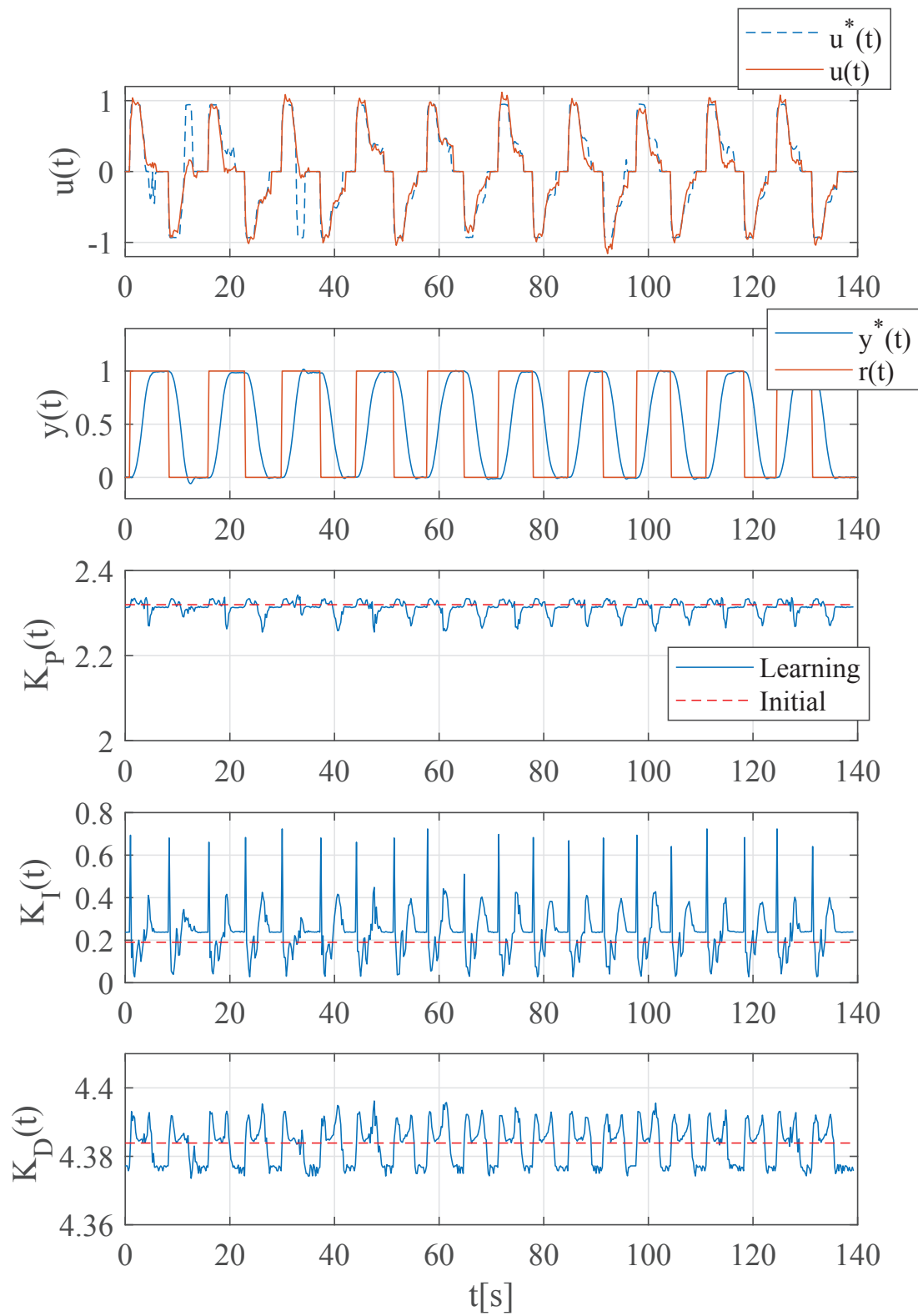


Fig. 4.9: Learning result for professional operation

4.4 スキルの特徴抽出

4.4.1 定性的スキル評価

熟練オペレータと非熟練オペレータのPIDゲインの変化を比較するため、Fig.4.8とFig.4.9からシステム出力の波形が似ている区間を抽出する。抽出した結果をFig.4.10とFig.4.11に示す。熟練オペレータは71秒から77秒の区間、非熟練オペレータは52秒から58秒の区間をそれぞれ6秒間抽出した。

ここで、PIDコントローラにおいて、比例動作は現在の制御誤差、積分動作は過去の情報や経験、微分動作は未来を予測して働くことが知られている[69]。実験結果のPIDゲインの変化を考察するため、次式に示す一般的なPID制御則を考え、PIDゲインそれぞれの役割を考える。

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.12)$$

(4.12)式より、比例動作（P動作）は制御誤差 $e(t)$ 、すなわち現在の情報を重視し、積分動作（I動作）は制御誤差の累積値、すなわち過去の情報を重視し、微分動作は制御誤差の変化の割合、すなわち未来の情報を重視することが分かる。これらからPIDゲインの役割は、 K_P は応答性に関与し、 K_P の値が大きいと目標値変動などに対して応答が良くなるが、反面、大き過ぎると応答のオーバーシュートを引き起こすなど、安定性を欠くことになる。 K_I は、追従性に大きく関与する。 K_I の値により追従性を向上させることができるが、これも大き過ぎると K_P 同様、応答のオーバーシュートを引き起こすなど、安定性を欠くことになる。 K_D は、速応性に関与する。 K_D の値により、応答の素早い立ち上がりに対して、制御入力を抑制する方向へ働くため、オーバーシュートを防止し、目標値に対する速応性を高める。しかし、 K_D も大き過ぎるとゆっくりした立ち上がりに対しても敏感に反応してしまうため、安定性が悪くなる。このように、PIDゲインの変化傾向を考察することにより、コントローラとしての人

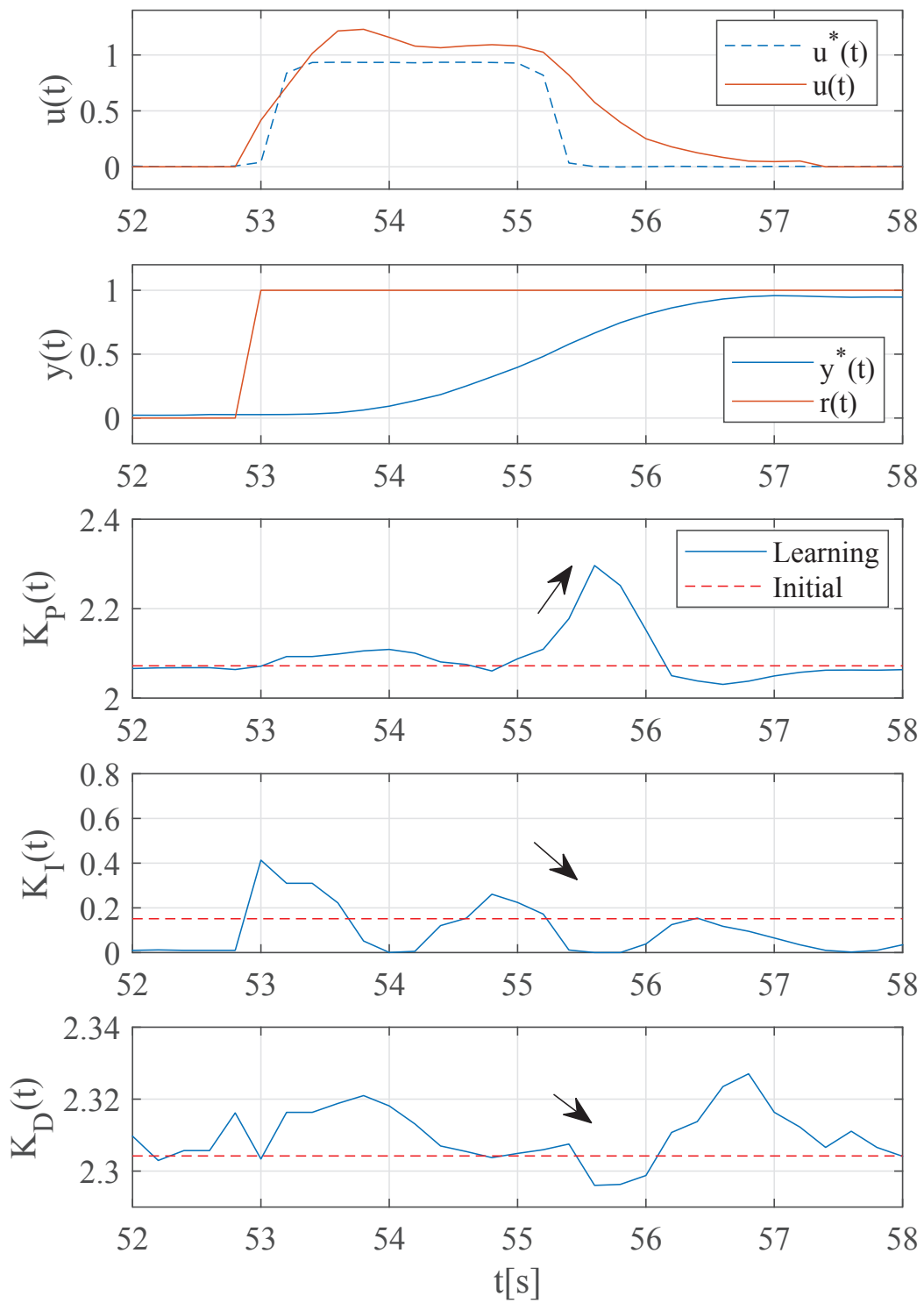


Fig. 4.10: Extracted data of Novice operation

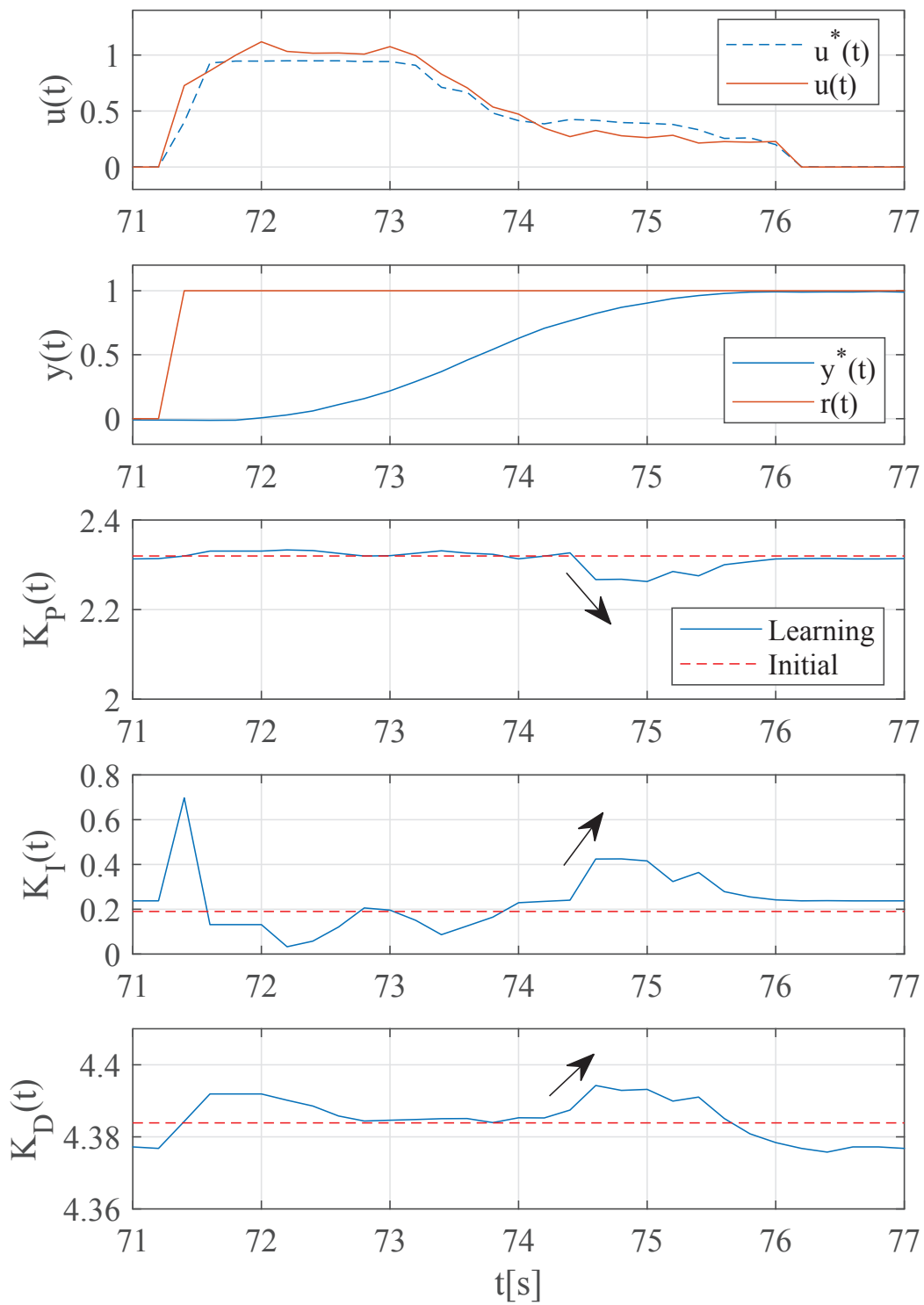


Fig. 4.11: Extracted data of professional operation

Table 4.1: Behavior of each action of PID controller

動作	比例 (P) 動作	積分 (I) 動作	微分 (D) 動作
対象	制御誤差の大きさ	制御誤差の累積	制御誤差の変化の割合
時間領域の役割	現在	過去	未来
周波数領域の役割	ゲイン補償	位相遅れ補償	位相進み補償
制御性	応答性	追従性	速応性
人間の判断	現状判断	過去の経験	将来の予見

間の操作特徴を抽出する。なお、上記で述べた PID コントローラの各動作役割と人の判断との類似性を Table 4.1 にまとめる。

Fig.4.11 の熟練オペレータの停止操作の特徴として、比例ゲインの減少、積分ゲインの増加、微分ゲインの増加があげられる。一方で、Fig.4.10 の非熟練オペレータは、比例ゲインの増加、積分ゲインの減少、微分ゲインの減少の特徴がある。

熟練オペレータは、積分ゲインを増加させて過去情報に基づき目標停止位置に対する追従性を確保する一方で、未来の状況に対して準備するため、すなわち停止時にオーバーシュートさせないために、微分ゲインを増加させる。さらに、現状に対する応答性を落として安定性を確保するために、比例ゲインを低下させる。このように熟練オペレータは状況に応じて、PID ゲインを適切に変化させて、停止していることが分かる。

非熟練オペレータの PID ゲインの軌跡は、熟練オペレータと反対の傾向を示している。積分ゲインが減少し、状況に応じた追従性が確保できておらず、微分ゲインも停止開始時には減少している。さらに、比例ゲインは停止開始時に急激に上昇している。なお、微分ゲインは 56.5 秒付近で上昇しているものの、この時点では既に操作入力が 0、かつほぼ機体が停止している状態であるため、操縦者の意図で先の状況を予見して上昇したものではないと考える。このことから、非熟練オペレータは比例動作に頼った操作になっており、現状判断のみで操作していると推測される。比例ゲインが大きく、積分ゲインと微分ゲインが小さく、0 に近くなると定常偏差を発生するコントローラとなり、追従性が悪く、速応性も悪いコントローラといえる。さらに、もし比例ゲインが極端に大きく、その他のゲインが 0 に近い場合は、ON/OFF 制御に

近い状態で操作を実施しているとも捉えることができる。このような理由により、Fig.4.10の区間のように操作レバー入力のタイミングが上手くあった場合のみ、目標値で停止できるが、タイミングが合わないと目標値から逸脱してしまう。反面、状況に応じて適切にパラメータを変化させて停止させている熟練オペレータは何度繰り返しても同じように目標値で停止させることができる。

4.4.2 定量的スキル評価

Fig.4.10とFig.4.11を定量的に評価するため、各ゲインの差分 $\Delta K_P(t)$ 、 $\Delta K_I(t)$ 、 $\Delta K_D(t)$ について分布をとる。それら分布図をFig.4.12とFig.4.13に示す。ここから各ゲインの差分に対して、偏差やばらつきが異なっており、熟練オペレータの方がばらつきや偏差が少なく、変化量が小さく操作していることが分かる。さらに、同じ評価を別の熟練オペレータと別の非熟練オペレータにも実施したところ、同様の分布を得ることができた。その結果をFig.4.14とFig.4.15に示す。

また、これらの標準偏差を計算した結果をTable 4.2に示す。この結果から、熟練オペレータは標準偏差が小さく、非熟練オペレータは標準偏差が大きいことが分かる。すなわち、熟練オペレータよりも非熟練オペレータの方が急峻にゲインを変化させており、熟練オペレータの方が変動量が少なく、穏やかにゲインを変化させていることが明らかである。

オペレータをコントローラとして考えたときに、熟練オペレータはゲインに大きく調整を行わなくても、必要最小限の変化量で操作を行っている。一方、経験のない初心者にとっては、不必要にゲインを大きく変化させ、さらにはその判断が誤っていることがあり、適切に操作ができない。また、人間が操作する作業機械において、機械は非線形システムであるものの、一般的に量産品は開発段階における評価オペレータ等による試乗評価が実施され、主観的評価により彼らが乗りやすいと感じる機械に仕上がっていることがほとんどである。そのため、熟練オペレータに対して適した設定となっているが、経験がない初心者には操作が

難しい可能性がある。そのため、このような差を埋める機構を構成することで、経験がない初心者でも操作しやすい機械になると考えられる。

Table 4.2: Standard deviation of ΔK_p , ΔK_I & ΔK_D

Operator	Professional 1	Professional 2	Novice 1	Novice 2
ΔK_p	0.017	0.019	0.032	0.041
ΔK_I	0.051	0.060	0.063	0.075
ΔK_D	0.003	0.006	0.009	0.009

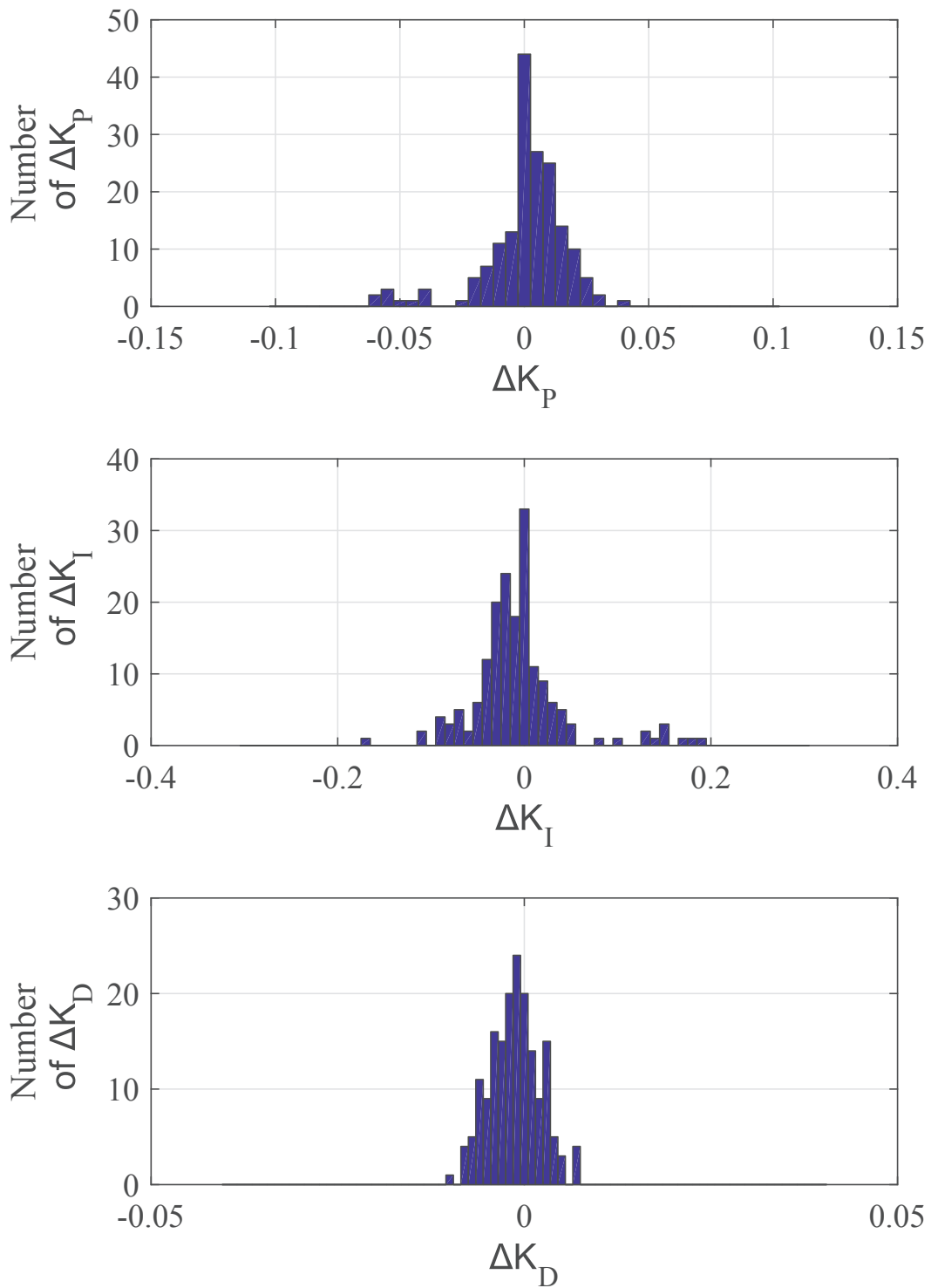


Fig. 4.12: Distribution chart of ΔK_P , ΔK_I & ΔK_D for professional 1

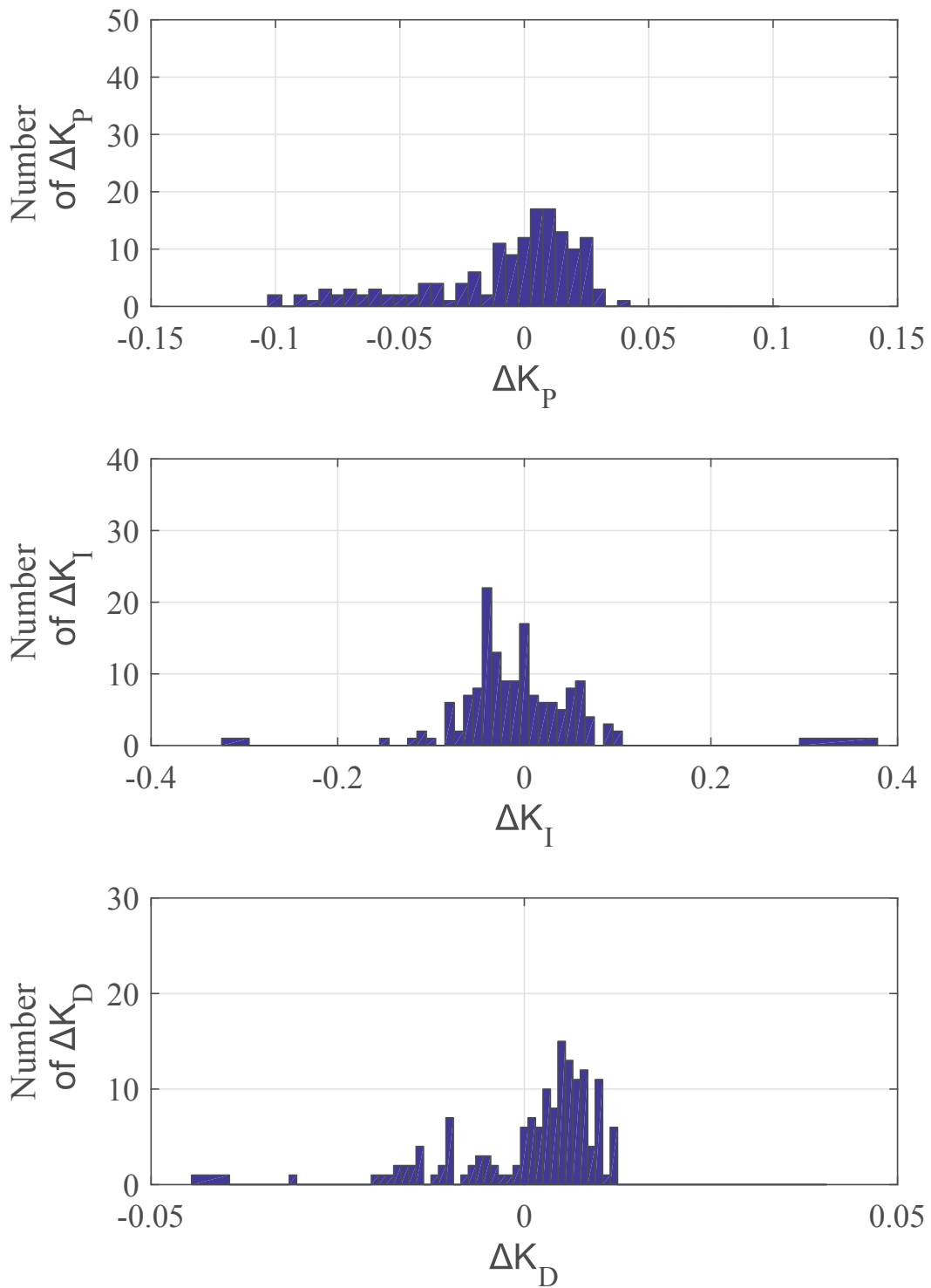


Fig. 4.13: Distribution chart of ΔK_P , ΔK_I & ΔK_D for novice 1

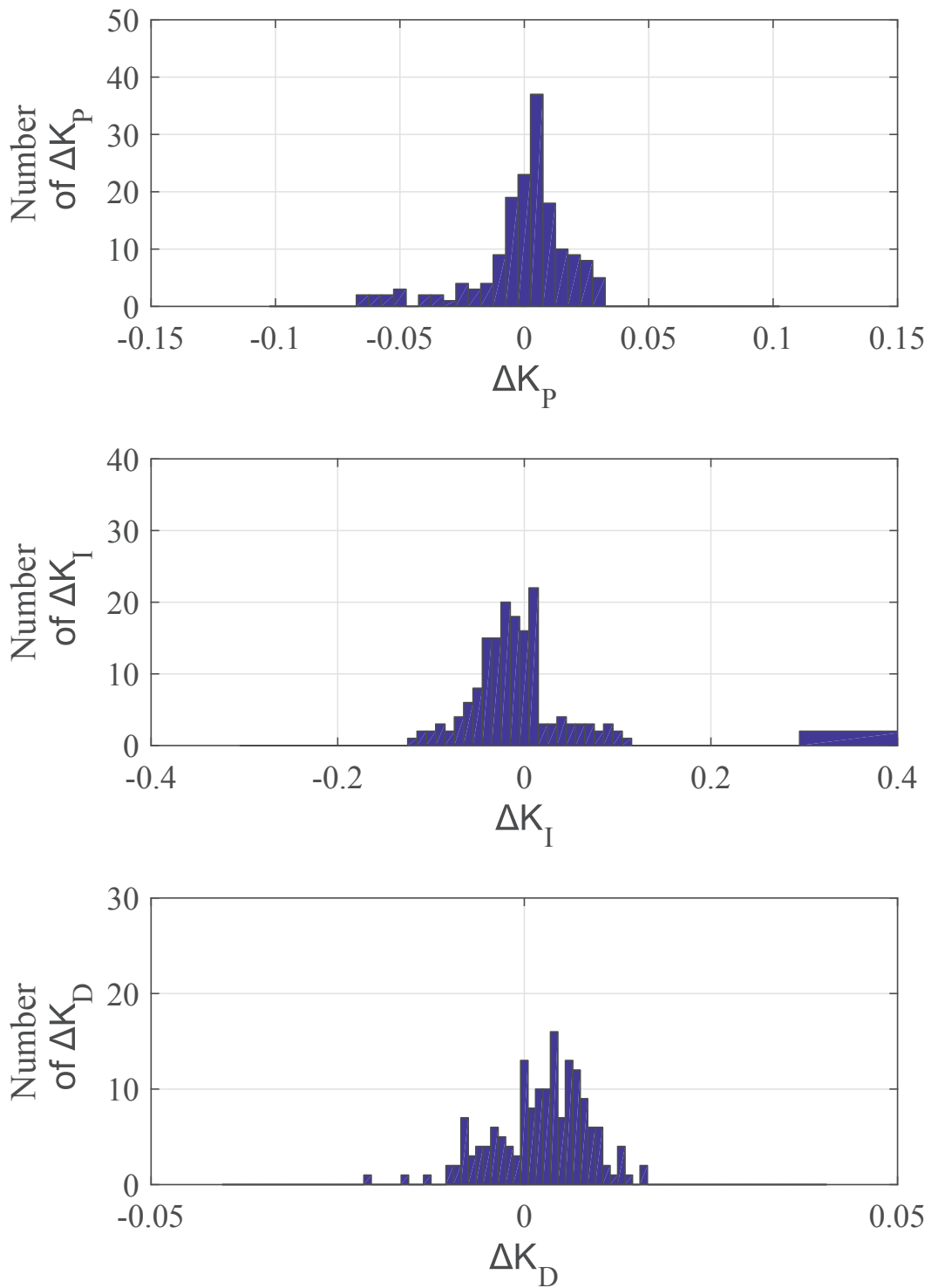


Fig. 4.14: Distribution chart of ΔK_P , ΔK_I & ΔK_D for professional 2

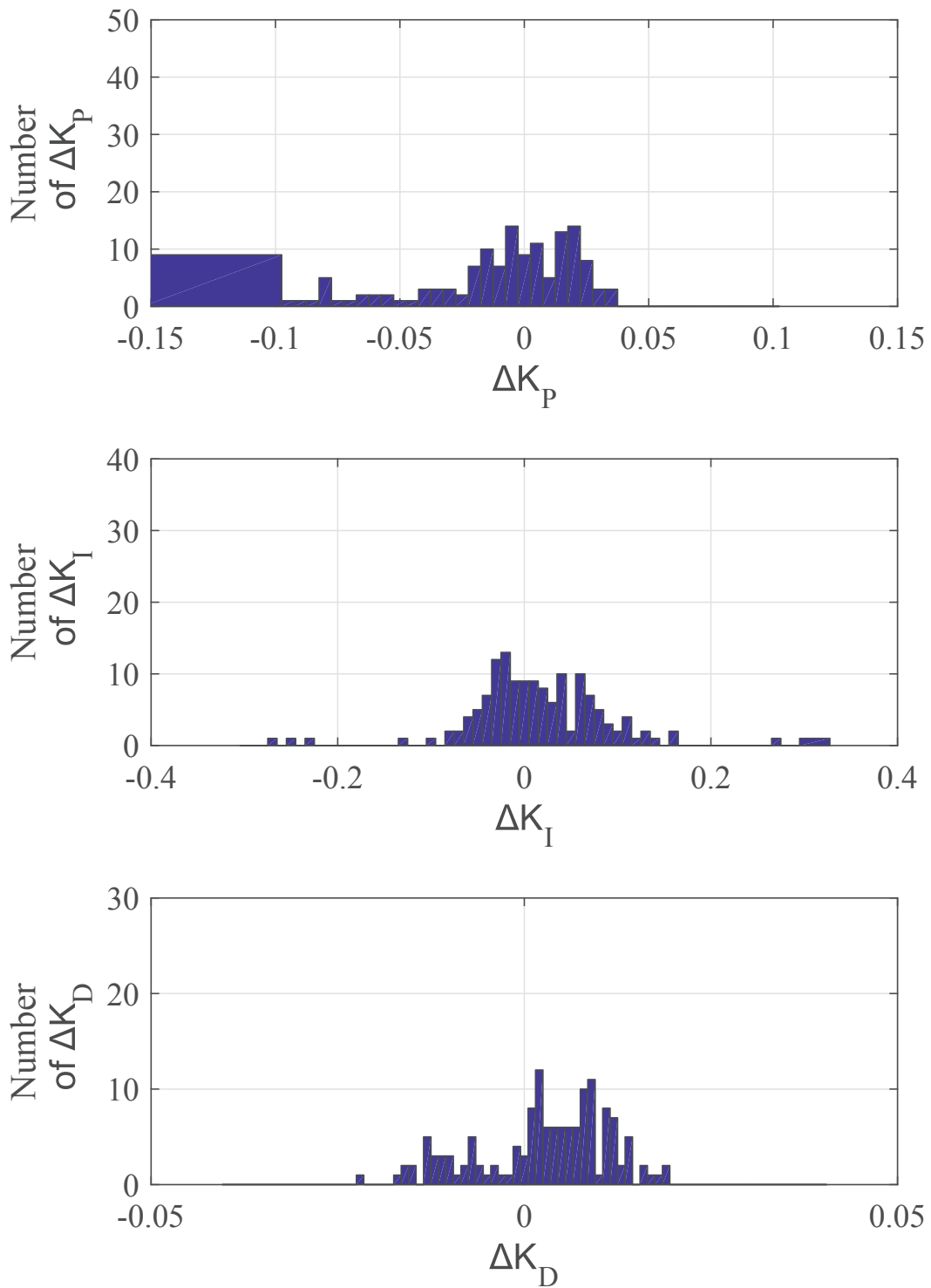


Fig. 4.15: Distribution chart of ΔK_P , ΔK_I & ΔK_D for novice 2

4.5 結言

本章では、スキルベースドCMAC-PIDコントローラを用いて、油圧ショベルの旋回操作を対象とした操作の特徴を抽出し、熟練オペレータと非熟練オペレータの特徴を比較することにより、技量差を評価した。評価方法として、操縦者をコントローラとして捉えることにより、操作技量をコントローラのパラメータで表し、各パラメータを比較することで技量差を明確とした。また、コントローラをPIDコントローラとして考えることで、物理的に意味を持つPIDゲインにより、操縦者の特徴を定性的に考察した。また、PIDゲインの変化量に着目し、PIDゲインの変化量の分散をとることで、スキルの差異を定量的に示した。

この結果、熟練オペレータはPIDゲインの変化量は少ないものの、停止時には先を予見しながら安定的に、ゲインを変化させており、追従性と速応性を確保したコントローラとなっており、反面、非熟練オペレータは停止時にゲインを急激に変化させ、現在の情報を重視した、追従性と速応性の良くない特徴であったといえる。このように、本提案手法を用い、操縦者をコントローラとして捉えることで、操作技量を定性的および定量的に考察することが可能となる。

第5章 結論

制御工学とは、目的に合うように入力を対象に与えることであり、制御工学はモノを動かす上で必要不可欠な技術である。一般的に制御工学は、コントローラを設計し、制御対象を目的通りに動かすことであるが、制御対象の数式モデルを表現し、制御対象に対する制御のしやすさ等を解析することも制御工学である。さらに、設計したコントローラが制御対象に対して、適しているかを評価することも制御工学の領域である。

本研究では、人が操作する油圧ショベルに対して、操作する人間をコントローラ、操作される油圧ショベルをシステムと考えることで、制御工学の考え方を利用して、油圧ショベルの動作を評価し、操作する人間の特徴を判断できないかと考えた。そのため、本研究では、制御工学的視点に基づいた油圧ショベルの制御と評価、さらに操縦する人の技量評価を目的とした。

そこで、まず油圧ショベルの旋回加速を制御対象として、制御工学の基本であるコントローラ設計を実施した。その中で、油圧ショベルのデータ指向型トルク制御を提案し、シミュレータおよび実機で提案手法の有効性を検証した。次に、ブーム上げの加速操作を対象として、制御対象の分析・評価技術であるモデリング手法を利用して、油圧ショベルの動作を低次のシステムでモデリングし、人間の官能評価値との関係性を考察することにより、油圧ショベルの操作性に関する一評価指標を構築した。最後に、油圧ショベルの旋回停止操作を対象として、コントローラ設計の技術を利用して、人間をパラメータ調整型の非線形コントローラと仮定することで、コントローラのパラメータ推定を行うことにより、人間の操縦特徴を抽出した。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、油圧ショベルのデータ指向型トルク制御を提案し、その有効性を数値シミュレーションおよび実機検証により明らかとした。まず、入力を油圧ポンプの指令流量、出力を油圧ポンプのトルクとした制御対象に対して、旋回体を含んだ系の伝達特性を明らかとした。このシステムは内部状態によって切り替わる非線形性を有するため、それぞれの伝達特性に対応したコントローラ構造を選定した。これらのコントローラ構造は、PID制御を基本として構成することにより、コントローラの切り替わりを容易とした。次に、一般化最小分散制御則に基づいて、閉ループデータを用いて各コントローラのゲインを算出した。これにより、チューニングに要する時間を削減する効果に期待できる。さらに、内部状態をイベントとして捉えて、このイベントによりシステムを切り替えるイベント駆動型制御を活用し、ゲインを切り替える。ここで、イベントトリガーである内部状態がシステムの切り替わり時に連続的に切り替わることに着目し、内部状態に基づくゲインチューニング制御を使用し、上記複数のコントローラのゲインを可変とすることで、制御の切り替わりを滑らかとした。なお、上記のようにデータを活用して、コントローラの構造やパラメータを選定するため、提案手法をデータ指向型トルク制御と命名した。提案手法により、低温時の旋回加速に発生するハンチング（振動現象）が抑制され、最高速に到達する時間が短縮されることを確認した。

第3章では、制御対象を近似モデルとして扱う考え方を利用して、油圧ショベルのブーム上げ操作を近似モデルで表現することで、近似モデルのパラメータと操作した人間の官能評価値の関係性について考察し、操作性の一評価指標を構築した。具体的な方法として、複数の被験者に動きが異なるいくつかの条件でブーム上げ操作を実施させ、その時の応答性の官能評価を採点法にて実施する。なお、ブーム上げ操作は、実機と一次遅れ系で作成したシミュレータにより実施する。さらに、操作時に取得したデータから遺伝的アルゴリズムを用いて近似モデルを算出し、操縦者の官能評価値と近似したモデルのシステムパラメータを比較し、その関係性を明確にした。加速時の応答性は、一次遅れ系で表現したシステムのむだ時間と時定数を足し合わせた時間との相関が高く、操作した人が所定の速度まで立ち上がる時間を

応答性として評価していることが分かった。さらに、官能評価値とむだ時間に時定数を加えた時間との関係は、対数の関係で表すことができることも明確となった。

第4章では、コントローラ設計の技術を利用して、操作する人間をコントローラとして捉え、ゲイン調整型の非線形コントローラとして表現し、計算されるゲイン変動で操作特徴が表現できることを明らかとした。まず、油圧ショベルの旋回操作を操作対象として、熟練オペレータと非熟練オペレータに目標位置で停止させる操作を実施させる。これらデータを取得し、スキルベースドCMAC-PIDコントローラに取得したデータを学習させる。ここで、スキルベースドCMAC-PIDコントローラとは、人が操作したデータを用いてCMACと呼ばれる小脳演算モデルにPIDコントローラのゲインを学習させる方法である。熟練オペレータと非熟練オペレータのデータについて、学習済みのCMACから出力されたゲインを比較した。この結果、熟練オペレータはゲイン変動は小さく、非熟練オペレータは急激な変化が見られた。さらに、PIDゲインの物理的な意味から、熟練オペレータは先の情報を予見しながら、安定的にゲイン変化をさせている反面、非熟練オペレータは定常偏差が発生しやすいようなコントローラやON/OFFコントローラに近い形に変化していることが分かった。このようにコントローラ設計の技術を用いることで、油圧ショベルの操作特徴を抽出することが可能となった。

本論文では、油圧ショベルを対象として、制御を適用し、制御工学の見地から機械の動作を分析し、さらに操作する人の特徴を抽出した。これらの結果から、制御工学の知見を活用することにより、油圧ショベルの動作を安定して制御できることはもちろんのこと、油圧ショベルに対して人を含んだ系として扱い、制御手法で分析・評価が可能であることが本研究により示唆された。しかしながら、本論文では、油圧ショベルの一部の動作や特定の操作に対する制御・評価・分析を実施しているのみであり、実際の作業現場での動きに応じた複合的な操作や動作に対しては、検証が行えていない。そこで、今後、本論文の手法を拡張していく必要がある。

最後に、油圧ショベルの研究に対する展望を述べたい。冒頭の序論で述べたように、建設

現場における生産性向上は急務である。そのため、建設機械の自動化技術は、施工情報の管理、統合環境の開発は必須である。これらの技術開発により、建設現場の生産性が改善することは、今後の社会にとって大きな利を生む、社会にとって価値のあるコトと思われる。社会に必要な先端技術を開発するうえでは、このような分野に制御工学を活用していく必要がある。一方で、油圧ショベル製造メーカーとして、油圧ショベルを操作する人たちにとっての働き方を改革し、働く人が幸せになる環境を作る必要がある。すなわち、油圧ショベルのユーザー目線の油圧ショベルの技術革新も必要である。人が使用するための油圧ショベルが技術革新で変化することにより、働く人にとって、新しい領域の仕事を増やし、新しい価値を与えることができる。決して、働く人から仕事を奪うような方向であってはならないと考える。油圧ショベルを使って働く人にとって新たな価値を提供するために、制御技術を多面的に応用し、技術革新を試みていきたい。

参考文献

- [1] 国土交通省：「建設業を取り巻く情勢・変化 参考資料 平成 28 年 3 月 2 日」, <http://www.mlit.go.jp/common/001121700.pdf>, (2017 年 12 月 13 日)
- [2] 井上猛雄：「災害とロボット」, オーム社 (2012)
- [3] 近藤 弘嗣：「人口減少時代におけるインフラ整備の問題と対応策」, 知的資産創造, 2009 年 10 月号, pp. 78-95 (2009)
- [4] 国土交通省：「i-Construction～『ICT 技術の全面的な活用』の取り組みについて～」, <http://www.mlit.go.jp/common/001118343.pdf>, (2017 年 12 月 13 日)
- [5] 近藤 弘嗣：「行政情報 i-Construction への導入：i-Construction 報告書を中心に (特集 トンネル)」, 建設機械施工, Vol.68, No.5, pp. 11-15(2016)
- [6] 五道 仁実：「i-Construction の推進 (特集 建設業の生産性向上 (1))」, 建設機械, Vol.53, No.1, pp. 1-7 (2017)
- [7] 国土交通省：「i-Construction 推進に向けたロードマップ」, <http://www.mlit.go.jp/common/001206546.pdf>, (2017 年 12 月 13 日)
- [8] 佐藤, 稲葉：「CMI 報告 油圧ショベルの省エネ施工：省エネ効果の検証試験」, 建設機械施工, Vol.68, No.7, pp.86-90 (2017)
- [9] 浅井 俊行：「行政情報 省エネルギー型建設機械の導入促進 (特集 建設機械)」, 建設機械施工, Vol.67, No.1, pp.10-14 (2015)
- [10] 大岩 憲史：「荒掘削から仕上げ整地まで自動アシスト制御する ICT 油圧ショベル」, 日本フルードパワーシステム学会誌, Vol.47, No.2, pp.74-77 (2016)
- [11] 原田 純二：「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)
- [12] 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)
- [13] 宮田 圭介：「オペレータの感性を意識した建設機械の操作性設計」, 日本機械学会誌 Vol.102, No.965, pp.233-234 (1999)
- [14] 新谷 裕和：「建設機械の操作性評価に関する研究：操作シミュレータの設計」, 福井工業大学研究紀要. 第一部, Vol.36, pp.245-250 (2006)
- [15] 菅野 直紀, 岡 秀和：「建設機械の操作性と省エネの同時最適化技術 (特集:神戸製鋼グループにおける技術連携)」, R&D 神戸製鋼技報, Vol.57, No.1, pp.62-65 (2007)
- [16] 北原 成郎, 藤野 健一, 西垣 重臣：「バックホウ遠隔操作性向の定量的評価指標に関する研究」, 建設機械, Vol. 48, No. 12, pp.34-39 (2012)

- [17] Y.Sakaida, D.Chugo, H.Yamamoto, H.Asama: "The Analysis of Excavator Operation by Skillful Operator", *Proc. of SICE Annual Conference*, Tokyo, pp.538–542 (2008)
- [18] 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, Vol.67, No.653, pp.201–208 (2001)
- [19] 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, Vol.68, No.666, pp.547–554 (2002)
- [20] S. Bennett: "A history of control engineering", Inst of Engineering & Technology (1986)
- [21] 古田勝久(訳), 山北昌毅(訳): 「制御工学の歴史」, コロナ社(1998)
- [22] 久村富持: 「制御システム論の基礎」, 共立出版(1988)
- [23] 井上和夫, 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)
- [24] 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)
- [25] 横溝克己, 小松原明哲: 「エンジニアのための人間工学」, 日本出版サービス(1987)
- [26] 斎藤正男: 「制御と学習の人間科学」, コロナ社(2005)
- [27] 島田竜矢, 諏訪正典, 田中敬司: 「操縦装置が人間-機械系に及ぼす影響」, 人間工学, Vol. 47 No. 1, pp.36–40 (2001)
- [28] 小波倭文朗, 西海孝夫: 「油圧制御システム」, 東京電機大学出版局(1999)
- [29] 芦田洋一郎, 木下拓矢, 山本透, 遠藤一臣, 鹿児島昌之: 「閉ループデータを用いた油圧パワーショベルのデータ指向型トルク PID 制御系の設計」, 第14回「運動と振動の制御」シンポジウム, USB 論文集, pp.82–85 (2015)
- [30] T.Yamamoto, K.Takao and T.Yamada, "Design of a Data-Driven PID Controller", *IEEE Trans. on Control System Technology*, Vol.17, No.1, pp.29–39 (2009)
- [31] T.Kinoshita, Y.Oshima, K.Koiwai, T.Yamamoto, T.Nanjo, Y.Yamazaki and Y.Fujimoto: "Design of a Data-Driven Control System for a Hydraulic Excavator", *Proceedings of The 2016 International Conference on Artificial Life and Robotics*, Okinawa, pp.393–396 (2016)
- [32] 山口明彦, 川嶋宏彰, 松山隆司: 「イベント駆動型制御とその表現-動的環境下における多自由度ロボットの運動学習を目指して-」, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 2006(51(2006-CVIM-154)), pp.159–166 (2006)
- [33] D. W. Clarke and P. J. Gawthrop: "Self-Tuning Control", *Proc. IEE*, 126D-6, pp.633–640 (1979)
- [34] 脇谷伸, 細川慧, 山本透: 「閉ループデータを用いた PID 制御系の直接的設計法」, 電気学会論文誌 C, Vol.132, No.6, pp.873–878 (2012)
- [35] 大松繁, 山本透: 「セルフチューニングコントロール」, 計測自動制御学会(1996)
- [36] 山本透, 兼田雅弘: 「一般化最小分散制御則に基づくセルフチューニング PID 制御器の一設計」, システム制御情報学会論文誌, Vol.11, No.1, pp.1–9 (1998)

- [37] 福原千絵, 加村孝信, 末富隆雅: 「感性と車づくり 走り感評価の予測技術」, 自動車技術, Vol.61, No.7, pp. 97–103 (2007)
- [38] Y.K.Chang, J.R. Hwang: "A new approach to improve the vehicle ride comfort by electroencephalogram data", International Journal of Vehicle Design, Vol.57, Issue2-3, pp. 106–123 (2011)
- [39] 西川一男, 農沢隆秀, 辻敏夫: 「意のままに操る自動車を目指して」, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 10, p. 851–854 (2014)
- [40] T.Wang, Q.Wang, T.Lin: "Improvement of boom control performance for hybrid hydraulic excavator with potential energy recovery", Automation in Construction, Vol.30, pp. 161–169 (2013)
- [41] A.Nishiyama, M.Moteki, K.Fujino, T.Hashimoto: "Operation analysis of hydraulic excavator with different operation system", Proc. 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Auburn, pp. 487–495 (2016)
- [42] H.Stone, R.Bleibaum, H.A.Thomas: "Sensory Evaluation Practices", Academic Press (2004)
- [43] M.C.Meilgaard, B.T.Carr, G.V.Civille: "Sensory Evaluation Techniques, Fourth Edition", CRC Press. (2006)
- [44] 北原 圭, 孕石 泰丈, 毛利 宏: 「上肢の運動に着目した新しい運転操作系の提案」, 日本機械学会論文誌C編, Vol. 79, No. 806, pp. 3327–3334 (2013)
- [45] 吉田 武司, 長谷 和徳, 大日方 五郎, 羽田 昌敏: 「3次元上肢筋骨格モデルを用いたステアリング動作の解析とハンドル特性評価」, バイオメカニズム学会誌, Vol. 34, No. 1, p. 41–52 (2010)
- [46] 苧阪 直行: 「前頭前野とワーキングメモリ」, 高次脳機能研究, Vol.32, No.1, pp.7–14 (2012)
- [47] トレーシ・アロウェイ, ロス・アロウェイ, 栗木 さつき (訳): 「脳のワーキングメモリを鍛える! 情報を選ぶ・つなぐ・活用する」, NHK 出版 (2013)
- [48] D.E.Goldberg: "Genetic Algorithms in search, optimization, and machine learning", Addison-Wesley Publishing Company (1989)
- [49] 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)
- [50] 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)
- [51] 須田 信英: 「PID 制御」, 朝倉書店 (1992)
- [52] J.G.Ziegler and N.B.Nichols: "Optimum Settings for Automatic Controllers", Trans. of ASME, Vol. 64, pp. 759–768 (1942)
- [53] 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 (1952)

- [54] 長松 正康, 臼坂 高司, 川田 和男, 山本 透, 山根 八洲男 : 「制御工学的アプローチに基づく教師-学習者間モデルに関する考察」, 電気学会論文誌 C, Vol.134, No.10, pp.1537-1542 (2014)
- [55] 長松 正康, 川田 和男, 山本 透, 山根 八洲男 : 「制御工学的アプローチに基づく教師-学習者間モデルに関する考察」, 電気学会論文誌 C, Vol.135, No.1, pp.66-72 (2015)
- [56] Fechner, G.T : "Elements of Psychophysics", New York: Holt, Rinehart and Winston (1966)
- [57] 藤野 健一, 茂木 正晴, 大槻 崇 : 「設現場における IT・RT 普及-次世代の施工技術に向けて」, 土木技術資料, Vol.52, No.1, pp.16-19 (2010)
- [58] 新田 恭士 : 「国土交通省における ICT, 次世代社会インフラ用ロボットの導入推進の取り組みについて」, 計測と制御, Vol.55, No.6, pp.470-476 (2016)
- [59] 池田 直広, 遠藤 健, 柳原 好孝 : 「移動式三次元形状計測システムの開発と運用」, 計測と制御, Vol.55, No.6, pp.511-514 (2016)
- [60] 川副 嘉彦, 榎本 弘一, 松本 仁, 岡部 澄夫, 半田 昌司 : 「ニューラルネットワークによる人間オペレータの技量と巧みさの獲得 : 倒立振子の安定化制御におけるカオスの時系列データからのニューロ制御器の生成」, 第 29 回知能システムシンポジウム資料, Vol.29, pp. 217-222 (2002)
- [61] M.Kato, T.Yamamoto and S.Fujisawa : "A Skill-Based PID Controller Using Artificial Neural Networks", Proc. of Int. Conf. on Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation, pp.702-705 (2005)
- [62] T.Yamamoto, S.Mori and A.Sakaguchi : "Data-Driven Skill-Based PID Control of a Pilot-Scale Helicopter Model", Int. J. of Innovative Computing Information and Control, Vol.4, No.12, pp.3349-3358 (2008)
- [63] 岡谷 貴之 : 「深層学習」, 講談社 (2015)
- [64] J.S.Albus : "A New Approach to Manipulator Control Cerebellar Articulation Control (CMAC)", Trans. on ASME, J. of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol.97, No.9, 220-227 (1975)
- [65] J.S.Albus : "Data Storage in The Control Cerebellar Articulation Control (CMAC)", Trans. on ASME, J. of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol.97, No.9, 228-233 (1975)
- [66] J.S.Albus : "Brains, Behavior and Robotics", McGraw-Hill, (1981)
- [67] T.Yamamoto, R.Kurozumi and S.Fujisawa : "A Design of CMAC Based Intelligent PID Controllers", Artificial Neural Networks and Neural Information Processing, Lecture Notes in Computer Science, Vol.2714, pp.471-478 (2003)
- [68] K.Koiwai, K.Kawada and T.Yamamoto : "Design and Experimental Evaluation of an Intelligent PID Controller using CMAC", Proc. of IEEE Int. Conf. on Networking, Sensing and Control, pp. 740-745 (2009)
- [69] 山本 透・大嶋 正裕 : 「プロセス制御の現在・過去・未来」, 計測と制御, Vol.42, No.4, pp.330-334 (2003)

引用既発表論文

A. 学術雑誌等掲載論文

- [1] Kazushige Koiwai, Liao Yuntao, Toru Yamamoto, Takao Nanjo, Yoichiro Yamazaki, Yoshiaki Fujimoto : “ Feature Extraction for Excavator Operation skill using CMAC ”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.28, No.5, pp. 715-721, 2016
- [2] Yasuhito Oshima, Takuya Kinoshita, Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto, Takao Nanjo, Yoichiro Yamazaki, Yoshiaki Fujimoto : “ Data-Driven Torque Controller for a Hydraulic Excavator ”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.28, No.5, pp. 752-758, 2016
- [3] 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
- [4] 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 (電子・情報・システム部門誌), Vol.138, No.5, (2018年5月号採録決定)

B. 国際学会等講演論文

- [1] Kazushige Koiwai, Yuntao Liao, Toru Yamamoto, Takao Nanjo, Yoichiro Yamazaki, Yoshiaki Fujimoto : “ A Consideration on Feature Extraction for Operation Skill Based on Control Engineering Approach ”, *Proceedings of the 2016 International Conference on Artificial Life and Robotics*, pp.389-392, Okinawa, January 2016
- [2] Takuya Kinoshita, Yasuhito Oshima, Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto, Takao Nanjo, Yoichiro Yamazaki, Yoshiaki Fujimoto : “ Design of a Data-Driven Control System for a Hydraulic Excavator ”, *Proceedings of the 2016 International Conference on Artificial Life and Robotics*, pp.393-396, Okinawa, January 2016
- [3] Kazushige Koiwai, Liao Yuntao, Toru Yamamoto, Takao Nanjo, Yoichiro Yamazaki, Yoshiaki Fujimoto : “ Human Skill Evaluation Based on Control Engineering Approach ”, *Proceedings*

of the 13th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, FriITrack4.2., Kyoto, September 2016

- [4] Kazushige Koiwai, Ryunosuke Miyazaki, Toru Yamamoto, Koji Ueda, Yoichiro Yamazaki: “ A Consideration on Quantitative Evaluation of Machine Responsiveness Based on Control Engineering Approach ” , *Proceedings of The SICE Annual Conference 2017*, pp.531- 534, Kanazawa, September 2017

- [5] Kazushige Koiwai, Ryunosuke Miyazaki, Toru Yamamoto, Koji Ueda, Yoichiro Yamazaki: “ A Consideration on Responsiveness Evaluation for an Excavator Based on Control Engineering Approach ” , *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2017*, pp. 467- 470, Banff, October 2017

その他既発表論文

C. 学術雑誌等掲載論文

- [1] 小岩井 一茂, 山本 透 : 「極配置法に基づく PID 制御系の一設計」, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.136, No.5, pp.730–73 (2016)
- [2] 木下 拓矢, 今井 慎一, 小岩井 一茂, 山本 透 : 「Design of a Data-Oriented Control System for Walking Support」, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.136, No.7, pp. 1013-101 (2016)
- [3] 付秋皓, 小岩井一茂, 山本透 : 「Design of a Data-Oriented Evolutionary Controller」, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.137, No.7, pp. 914–91 (2017)
- [4] Yuntao Liao, Takuya Kinoshita, Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto: “Design of a Performance-Driven CMAC PID Controller ”, The IEICE Transactions on Fundamentals, Vol.E100-A, No.12, pp. 2963–2970 (2017)
- [5] Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto, Koji Ueda, Yoichiro Yamazaki : “ Feature Extraction for Digging Operation of Excavator Based on Data-Driven Skill-Based PID Controller ”, Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, Vol. 4, No. 3, pp. 191-194 (2018)
- [6] Hiromu Imaji, Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto, Koji Ueda, Yoichiro Yamazaki : “ Human Skill Quantification for Excavator Operation using Random Forest ”, Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, Vol. 4, No. 3, pp. 195-200 (2018)
- [7] Yuntao Liao, Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto: “Design and Implementation of a Hierarchical-Clustering CMAC PID Controller ”, Asian Journal of Control (To appear)

D. 国際学会等講演論文

- [1] Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto, Takao Nanjo, Yoichiro Yamazaki, Yoshiaki Fujimoto: “ Data-Driven Human Skill Evaluation for Excavator Operation ”, *Proc. of 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 482- 487, Banff, July 2016

- [2] Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto, Koji Ueda, Yoichiro Yamazaki: “ Feature Extraction for Digging Operation of Excavator ” , *Proc. of the 2017 International Conference on Artificial Life and Robotics*, pp.425- 428,, Miyazaki, January 2017
- [3] Hiromu Imaji, Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto, Koji Ueda, Yoichiro Yamazaki: “ Human Skill Quantification for Excavator Operation using Random Forest ” , *Proc. of the 2017 International Conference on Artificial Life and Robotics*, pp.437- 440, Miyazaki, January 2017
- [4] Yuntao Liao, Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto: “Design of a Hierarchical-Clustering CMAC-PID Controller ” , *Proc. of the 2017 International Joint Conference on Neural Networks*, pp.1333-1338, Anchorage, May 2017
- [5] Qiu hao Fu, Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto: “ Design of a Data-Oriented Evolutionary Controller for a Nonlinear System ” , *Proc. of the 6th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes*, pp.406-411, Taipei, May 2017
- [6] Yuntao Liao, Takuya Kinoshita, Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto: “Design of a Performance-Driven PID Controller for a Nonlinear System ” , *Proc. of the 6th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes*, pp. 529-534, Taipei, May 2017
- [7] Yuntao Liao, Takuya Kinoshita, Kazushige Koiwai, Toru Yamamoto: “Design of a Performance-Driven PID Controller Using Hierarchical-Clustering Based CMAC ” , *Proc. of the 49th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications*, pp.56-57, Hiroshima, November 2017
- [8] Ryota Sekizuka, Kazushige Koiwai, Seiji Saiki, Yoichiro Yamazaki, Toshio Tsuji, and Yuichi Kurita: “ A Virtual Training System of a Hydraulic Excavator Using a Remote Controlled Excavator with Augmented Reality ” , *Proc. of the 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, Taiwan, December 2017

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・ご助言を得て進め、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 工学研究科システムサイバネティクス専攻 山本 透 教授には、研究の推進並びに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、研究の推進や論文作成に対するご指導のみではなく、筆者が博士後期課程に社会人として進学するきっかけを与えてくださったこと、コベルコ建機株式会社と共同研究を長年継続して実施頂いたことが、広島大学へのコベルコ建機共同研究講座設立につながり、その設立に際してご尽力いただいたこと、さらにはコベルコ建機株式会社の研究活動が活発になったこと、それらすべてが筆者の研究につながっていると考えております。これらの事柄に甚大なご助力をいただいたことに、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、有益なご助言と貴重なご意見を賜りました、広島大学 大学院 工学研究科システムサイバネティクス専攻 辻 敏夫 教授，西崎 一郎 教授に深く感謝いたします。

さらに、広島大学 大学院工学研究科システムサイバネティクス専攻 栗田 雄一 准教授，大野 修一 准教授，中本 昌由 助教には、本研究を進めるにあたり、たくさんのアドバイスやご指導をいただき、深く感謝いたします。

コベルコ建機株式会社 社長 檜木 一秀 氏，相談役 藤岡 純 氏，グローバルエンジニアリングセンター長 木下 章 氏，開発本部長 岩満 裕明 氏には、博士課程後期に進学することを許可いただき、このような研究を行う機会を与えていただいたことに、深く感謝いたします。

コベルコ建機株式会社 技師長 藤本 吉明 氏，先行技術開発部 部長 山崎洋一郎 氏，同部 ノバージョン推進グループ グループ長 山下 耕治 氏には，筆者が会社に所属したままで博士課程後期に進学し，研究活動が行える仕組みを社内で構築いただくと共に，研究内容についても的確なご助言をいただいたことことで，大きく成長することができました。心より感謝申し上げます。

また，本研究成果の実験検証にあたっては，同部 システム機能開発グループグループ長 上田 浩司 氏に，ご協力とご助言をいただきました。深く感謝いたします。さらに，同グループ 平岡 京 氏，品質保証部 ショベル開発試験グループ 佐藤 栄司 氏，要素開発部 油圧要素系開発グループ 田中 秀典 氏には，実験検証をともに実施頂き，深く感謝致します。

広島大学の同じ研究室の同輩，先輩・後輩とは共に研究に励み，お互いに励まし，助言し合いながら研究を進め，成長できたことをうれしく思うと共に，感謝いたします。特に，濱 永慎也 氏，宮崎 龍之介 氏には，提案手法の検証，実験データの取得や分析に多大なご協力いただき，本論文を仕上げるための大きな助けとなりました。深く感謝いたします。

最後に，広島大学 博士課程後期への進学，論文執筆に理解を示し，励ましてくれた家族に心から感謝いたします。