

41. 遠隔操作型油圧ショベルの自動化へ向けた制御手法の開発

(国研) 土木研究所
 (国研) 土木研究所
 (国研) 土木研究所

○ 遠藤 大輔
 山内 元貴
 橋本 毅

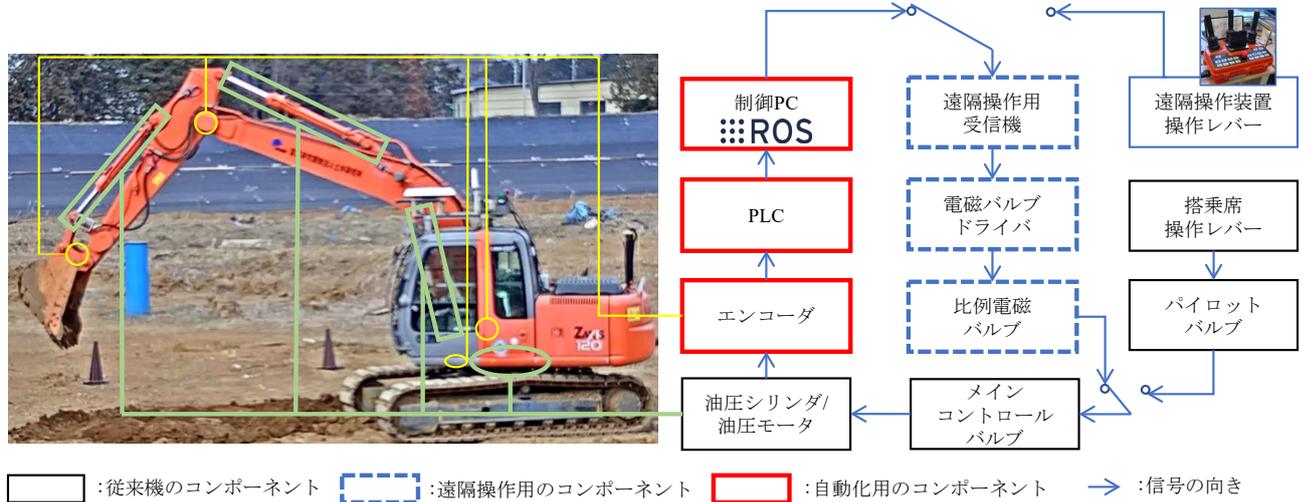


図-1 自動化した遠隔操作型油圧ショベルのハードウェア構成

1. はじめに

環太平洋造山帯に位置する我が国は、活発な地殻活動に起因して生じる巨大地震や火山活動により、甚大な被害を幾度も被ってきた。このような被災地域では、災害復旧工事を行う為の建機として、人的な二次災害を防止するため、遠隔操作型の建機が用いられることがある。これは人が登場して操作する通常の建機を改造し、遠隔地から無線通信を用いて操作を可能とするものである。特に1990年代の雲仙普賢岳噴火による被災地域の復旧工事を契機として、開発および普及された経緯があり、遠隔操作の効率化や操作性の向上を目的とした研究がこれまで行われてきた。¹⁾

また他方、我が国が直面する社会問題として、少子高齢化に伴う労働人口の減少が挙げられる。中でも建設業就業者の人口推移は他業種と比較しても高齢化が顕著²⁾であり、業界としての労働生産性をいかに確保していくかが喫緊の課題となっている。解決策の一つとして、建機の自動化があげられる。これを実現するため、技術的観点からは従来機とは建機のシステムを抜本的に変更することも考えられる。しかし実現には膨大な開発投資が必要である一方で、市場規模については未知数であり、このような建機が登場して世間に普及するには多くの年月が必要とみられる。そこで、従来の遠隔操作に対応した建機をハードウェアのベースとして流用し、自動化するためのソフトウ

ェアを開発していく、所謂レトロフィット型が当面の主流となると考えられる。実際、大手ゼネコンや建機メーカーから、建機の自動化に関する様々な提案がなされ、実証評価が行われている状況にあるが、これらは従来の建機をハードウェアのベースとしている。

本稿では、このような遠隔操作型の油圧ショベルの作業機を用いて、土砂の掘削動作を自動化する際に問題となり易い、ハードウェア上の特性であるむだ時間と、それに対するソフトウェア上の解決方法の一例を紹介する。また、実際に解決法を実装したソフトウェアを用いて、土木研究所が所有する遠隔操作型の油圧ショベルが土砂を自動掘削積する実験をおこなった結果について報告する。本発表により、建機を自動化する際の技術的知見や課題を広く共有することを研究目的とする。

2. テストベッドのシステム

本章では、本研究のテストベッドとして用いる、自動化のために改造を施した遠隔操作型油圧ショベルのハードウェアとソフトウェアの構成について記す。

2.1 テストベッドのハードウェア構成

図1にテストベッドの駆動系のハードウェア構成を示す。ベースとなる機体は日立建機製のZX120である。これは12トンクラスの油圧ショベ

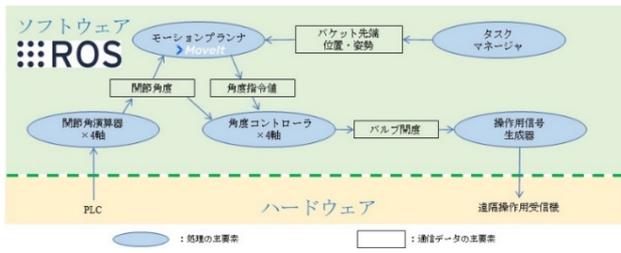


図-2 自動化ソフトウェアの構成概要

ルであり、搭乗者によって操作される通常の建機である。この機体は、従来通りの搭乗による操作と、遠隔操作装置からの信号を基にした操縦が共に可能なよう改造されている。まず、メインコントロールバルブは、操縦席の操作レバーと繋がるパイロットバルブと、それとは独立した比例電磁バルブによって油圧アクチュエータを駆動できるようになっており、スイッチによってどちらをソース信号にするかを選択できる。また、遠隔操作装置からの信号の受信機が搭載されており、この受信情報を、比例電磁バルブドライバへ伝え、このドライバが比例電磁バルブを開閉する。このような構成によって、通常の搭乗操作と遠隔操作が共に可能となっている。

加えて、上記の遠隔操作型油圧ショベルを自動化するため、制御用のPCを搭載している。また、各軸の角度情報を取得するため、ロータリーエンコーダを外付けし、PCとのインターフェースとしてPLC (Programmable Logic Controller) を搭載している。

2.2 テストベッドのソフトウェア構成

テストベッドを自動化するためのミドルウェアとして、近年ロボットの研究開発用 OSS(Open Source Software)プラットフォームとして広く普及している ROS(Robot Operating System)³⁾を利用することとした。また、活用可能な OSS ライブラリについては積極的に取り入れる方針としている。

作業機の動作を自動化するソフトウェアの構成を図2に示す。まず、バケット先端の位置と姿勢の目標値やその軌跡を決定するタスクマネージャという上位プロセスが、作業機各軸の時変の角度指令値を決定するモーションプランナへ指令を与える。モーションプランナは、この位置と姿勢の指令と、その時の関節角度情報を基に、角度コントローラへ角度指令値を発行する。更に角度コントローラは、角度指令値とその時の関節角度情報を基に、PID制御により、目標とするバルブ開度を決定する。このバルブ開度を、操作用信号を生成するプロセスへ発行し、操作用信号が遠隔操作の受信機へ伝えられる。なお、モーションプランナには MoveIt⁴⁾、角度コントローラには pid⁵⁾ という汎用ライブラリをそれぞれ利用している。

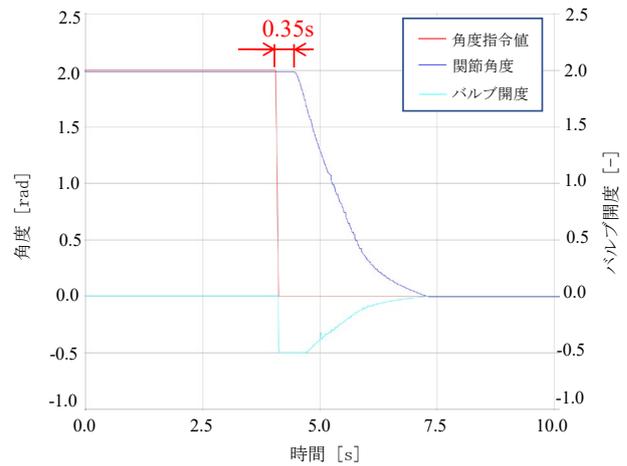


図-3 むだ時間の実機確認結果

3. サーボ系に内在するむだ時間

2.2 節に記した通り、本研究ではテストベッドを自動化するため、各軸角度の PID 制御をベースに、作業機の動作を実現する。この制御系の応答性が十分に良好であれば、モーションプランナが生成する角度指令値に対して精度を高く、かつ高速な動作が実現できる。このような手法は電動機を用いた産業用マニピュレータ等においては一般的と言える。一方で、油圧アクチュエータを用いたテストベッドへ本手法を適用するには、制御系の応答性を阻害するハードウェア由来の特性として、むだ時間が大きいことが挙げられる。本稿で扱うむだ時間とは『テストベッドのソフトウェアが、バルブ開度の指令値を出力してから、実際にアクチュエータが動作し、関節角度の変動として検出されるまでにかかる時間の間隔』とする。このむだ時間が大きくなるほど、制御系のゲイン余裕を低下させることが知られている。

図3に、テストベッドのバケットに対しPID制御を行い、指令値を2.0(rad)から0.0(rad)へ変化させるステップ入力を与えた際の、制御出力 (=バルブ開度) と、バケット角度のプロファイルを示す。この結果から、テストベッドでは0.35(s)のむだ時間が内在することが確認された。なお、本テストベッドにおいては旋回軸、ブーム、アーム、バケットのいずれの軸においても、むだ時間は一律に0.35(s)であった。

4. むだ時間への対策

むだ時間系に対する代表的な対処方法として、スミス法や内部モデル制御 (IMC) が挙げられる。スミス法は制御ループの内部に制御対象のモデルとむだ時間のモデルを有し、むだ時間後の出力を予測し、それに基づいた制御をする手法である。他方、IMC は実モデルと設計モデルとの一致しない部分を、フィードバック制御によって補うもの

である。⑨いずれの手法も、むだ時間後の状態を予測し、予測値を入力としたフィードバック制御系を組むことが、対策の本質であるが、モデルをいかに構築するかが問題となる。建機メーカーであれば、油圧系の詳細な設計情報を有しているため、精密なモデルに基づいてパラメータを高精度に同定することができる。一方で、建機メーカーではない、筆者を含む一般の建機ユーザーが自動化ソフトウェアを開発するようなユースケースにおいて、そのような精密なモデル構築ができるとは限らない。寧ろ可能な限り簡素なモデルを基に、ユーザー側が実施可能な方法で少ないパラメータを同定し、高い効果を得られる方が望ましい。

そこで本研究では、スミス法に基づき、制御対象である油圧シリンダと油圧モータのモデルについて、極力簡易なモデルを立て制御応答を改善する方法を模索し、効果を検証することとした。本章では油圧シリンダを用いるブーム、アーム、バケットと、油圧モータを用いる旋回軸のそれぞれについて記す。

4.1 油圧シリンダ（ブーム、アーム、バケット）

まず初めに、各軸の制御系の出力であるバルブ開度に対して、飽和後の速度(=終端速度)を予め実測しておき、バルブ開度に対して、各軸が実現する角速度を参照テーブルとして作成する。この参照テーブルを基に、次の1)~3)に記す手順でむだ時間後の角度を予測する。

- 1) 現在の時刻 t_c から、むだ時間 δ だけ遡った範囲の制御出力(=バルブ開度)の時間履歴 $e(t)[t_c - \delta, t_c]$ を保持する
- 2) $e(t)[t_c - \delta, t_c]$ を基に、前述した参照テーブルを用いて、現在の時刻 t_c から、むだ時間 δ だけ遡った範囲の速度推定値の時間履歴 $\hat{v}(t)[t_c - \delta, t_c]$ を求める
- 3) 現在の角度 $\theta(t_c)$ に対して、 $\hat{v}(t)[t_c - \delta, t_c]$ を時間積分した値を加えて、むだ時間後の角度の予測値 $\hat{\theta}(t_c + \delta)$ を導出する

$$\hat{\theta}(t_c + \delta) = \theta(t_c) + \int_{t_c - \delta}^{t_c} \hat{v}(t) dt \quad \dots (1)$$

上記の考え方を図解したものを図4に示す。また図5に、一般的な角度コントローラ(図5-(a))と本補償器を角度コントローラに実装した場合(図5-(b))との比較を示す。

図6はバケット軸に本むだ時間補償器を実装しない場合(図6-(a))と、した場合(図6-(b))との、システムの応答の比較である。なお、制御ゲインについては、補償器を実装した場合に適合させた値を、両条件共に用いている。むだ時間補償がない場合、バケット角度が発振してしまい、整定し難い様子が確認できる。このような場合、安定性

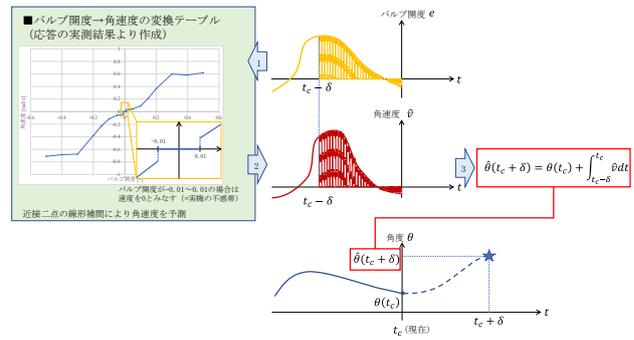


図-4 むだ時間補償器の考え方

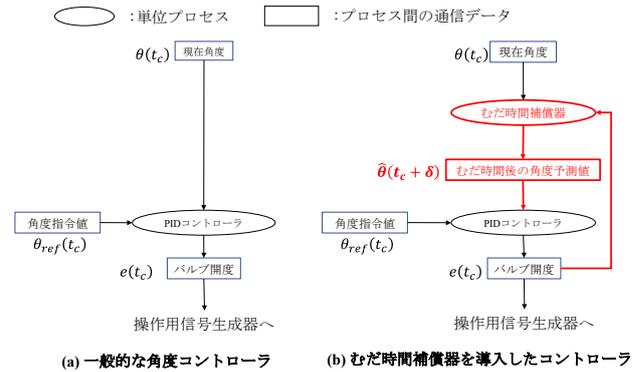
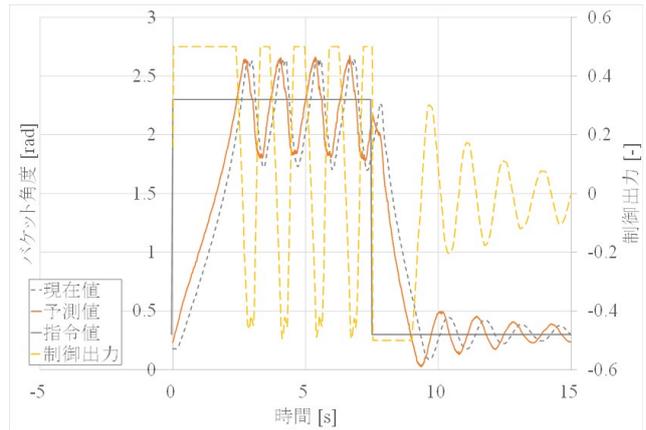
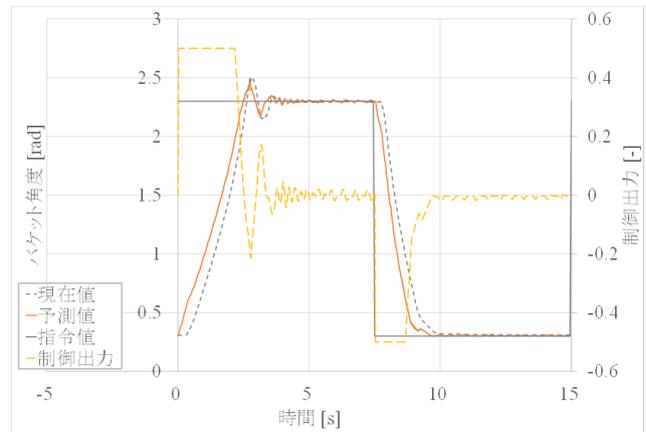


図-5 サーボコントローラの構成比較



(a) むだ時間補償器なし (PID入力：現在値)



(b) むだ時間補償器あり (PID入力：予測値)

図-6 むだ時間補償器の有無によるステップ応答比較

安定性を高めるために制御ゲインを低減する等の対策を要し、結果的に動作速度の低下を招く。他方、補償器がある場合は約4(s)で収束している。

なお補足であるが、図6の(a)と(b)いずれにおいても指令値の立上がり時よりも立下り時の方がオーバーシュート量は小さく、整定時間が短い傾向がある。これは油圧シリンダの圧縮時と伸長時との伝達関数の差によるものと考えられる。このような場合、圧縮と伸長それぞれにおいて制御のモデルや定数を区別して用いるなどの対応が考えられるが、本研究ではこれらの対応は実施せず、制御ゲインについても圧縮時と伸長時で同一の値を用いた。

4.2 油圧モータ（旋回軸）

油圧シリンダで動作する3軸については、前節の1)～3)に示した物理的な時定数を考慮しない単純な補償器により、制御系のゲインを大きくすることができた。一方で、旋回軸について同様の方法で予測値を算出すると、他の3軸よりも予測精度が低く、制御ゲインを高める効果が小さいことが確認された。そこで旋回軸については、モデルの細密化を検討することとした。

一般に、油圧回路の動特性は非線形であるものの、周波数特性の位相差が $-\pi/2$ (rad)以上の領域では設計上、2次遅れ系として近似できることが知られている。⁷⁾実際に、テストベッドの旋回軸にバルブ開度指令+0.3を入力した際の角速度のプロファイルを図7に示す。この結果より、旋回軸については、次の式(2)によって速度推定値 $\hat{v}(t)[t_c - \delta, t_c]$ を算出できると考えられる。

$$\hat{v}(t) = v(t_c) + (V_{sat} - v(t_c))\{1 - \exp(-\omega\delta)(1 + \omega t)\} \quad (2)$$

ここで、 $v(t_c)$ は現在の速度、 V_{sat} はバルブ開度に対する旋回軸の終端速度、 ω は固有角振動数をそれぞれ表す。 V_{sat} および ω はテストベッドの実測結果を基に、最小二乗法を用いてフィッティングすることにより同定した。なお、固有角振動数は旋回軸の負荷となる慣性モーメントにより変動するため、作業機の各軸の角度に依存する。本稿では、慣性モーメントが最小となる、作業機を折り畳んだ状態の実測値を元にする事とした。その理由は、旋回動作中は周囲との干渉を避ける為、作業機を折り畳んだ状態にすることが多いためである。また、バルブ開度に対する依存性を確認するため、バルブ開度の値を変更した複数の条件にてデータを収集し、各条件毎にパラメータを同定した。図7中の曲線は、旋回軸の角速度の実測データを基に、最小二乗法で求めたフィッティングカーブである。実測データがフィッティングカーブ

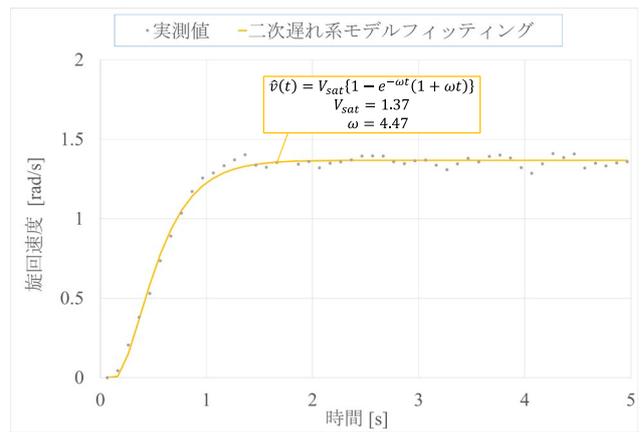


図-7 バルブ開度 0.0→0.3 とした際の旋回軸の速度応答

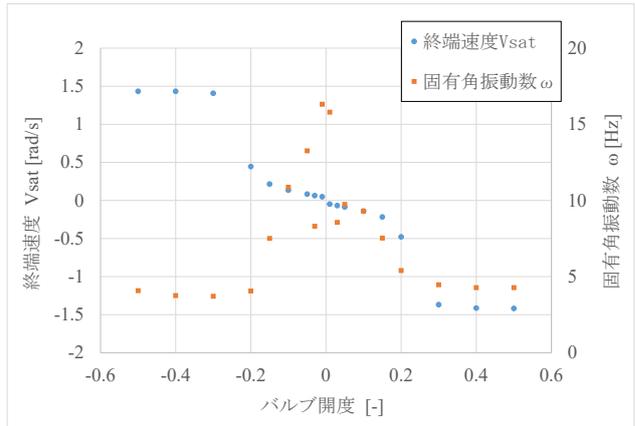
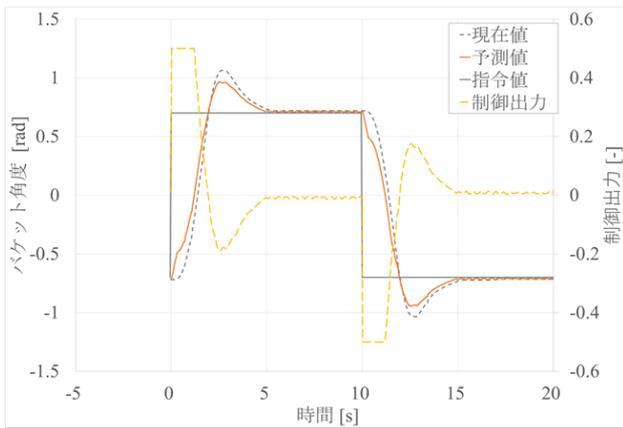


図-8 バルブ開度に対するパラメータ同定結果

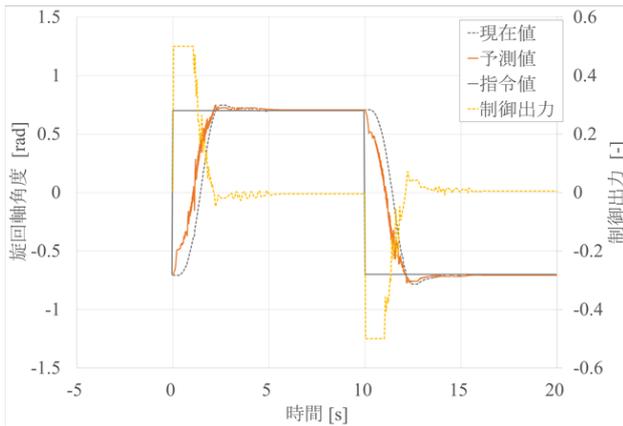
ブとよく一致していることが確認できる。

また、図8は各バルブ開度に対して、同様に求めた終端速度と固有角振動数の同定結果である。この結果より、終端速度と同様に固有角振動数は、バルブ開度に対する依存性があることが確認できる。以降の実験では、バルブ開度に対する速度予測のために、バルブ開度の値に対して、図8の実測結果を元に近接2点の直線補間によって各パラメータを決定することとした。

図9は旋回軸に、4.1節の1)～3)の手法を実装した場合(図9-(a))と、本節に記した改良手法を実装した場合(図9-(b))との、システムの応答の比較である。なお、制御ゲインについては、改良手法を実装した場合に適合した値を、両条件共に用いている。角度の予測値に着目すると、(b)では実測値と予測値の時間方向の差分がむだ時間である0.35(s)に一致する割合が増えたことが確認できるが、信号の雑音が増大している。これは前述した V_{sat} や ω といったパラメータの同定精度や粒度の向上によって、改善が見込める。特に、低速領域における角速度センサの分解能が不十分であり、離散化誤差の影響が作用していると考えられる。他方、角度の実測値に着目すると、(a)に対し、(b)はオーバーシュート量が1/4程度まで低減



(a) 速度モデル：修正前
(油圧シリンダ同様)



(b) 速度モデル：修正後
(二次遅れ系)

図-9 速度モデルの修正によるステップ応答の比較

されており、応答性の改善がみられる。

以上から、現状ではパラメータ同定に改良の余地はあるものの、制御系の応答性を向上する効果があることが確認できた。

5. 土砂の掘削積込の実機試験

2章に記したテストベッドを用いて、4章に記した対策を導入しない場合と、した場合それぞれについて、テストベッドに土砂の自動掘削と放土を続けて行わせる試験を実施した。本章ではこの試験について記す。

5.1 試験方法

図1に示すテストベッドを用いて、目標地点の地面を掘削し、目標位置で放土する試験を行った。ここでは、試験のセットアップと、この動作を実現するソフトウェアとなる、図2中のタスクマネージャの処理について記す。

5.1.1 試験のセットアップ

テストベッドの座標系と掘削目標位置および放土目標位置の関係、および各軸の角度の定義を図10に示す。テストベッドは略水平な地面上に配置される。場所は土木研究所の構内にある、関東口

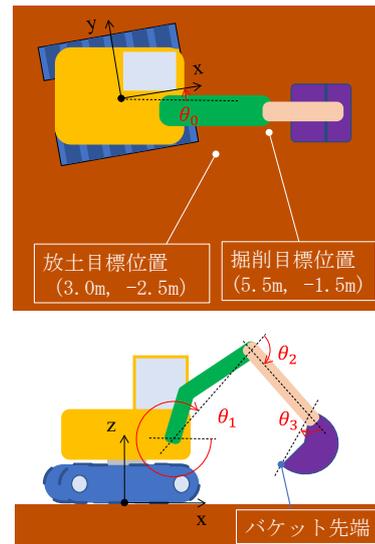


図-10 試験のセットアップと各座標系の定義

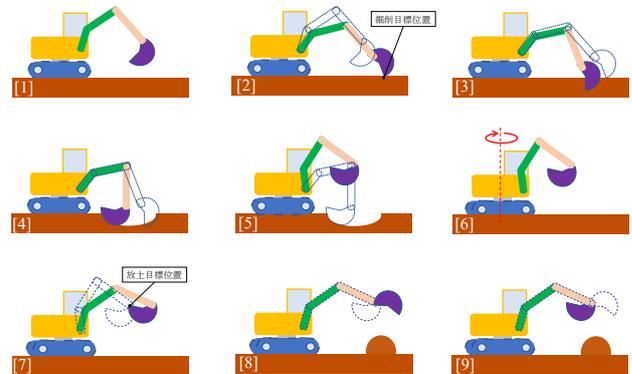


図-11 掘削と放土繰返し動作1サイクル

ーム質の土砂で覆われる屋外の試験場である。

なお、図6に示した通り、むだ時間補償の有無によって、制御応答は異なる。各軸のPID制御ゲインについては、むだ時間補償の有無に応じて、制御系が収束するよう、それぞれ調整した個別の値を用いる。なお、対策前と対策後のそれぞれの条件において、各3回ずつ動作を繰り返し、サイクルタイムを比較する。

5.1.2 タスクマネージャの処理

タスクマネージャは図11に示す[1]～[9]の手順でモーションプランナーへ手先の位置又は関節角度の指令値を与える。それぞれ次に示す指令となっている。

- [1] 初期姿勢をとる
- [2] 掘削目標位置へバケットの先端を合わせる
- [3] バケット先端の貫入角度 $\pi/6$ (rad)で0.5(m)の深さまで地面へバケットを貫入させる
- [4] バケットとアームを[3]の状態からそれぞれ $+0.96$ (rad), $+0.70$ (rad)の姿勢へ動かす
- [5] ブーム、アーム、バケットの3軸を用いて[4]の姿勢からz方向へ姿勢を維持したまま鉛直方向へバケットを移動させる

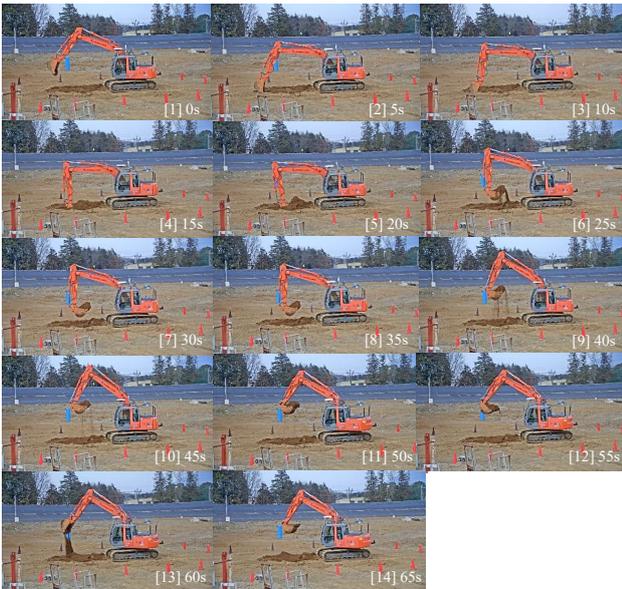


図-12 対策前の動作の様子 (5s 間隔連続写真)



図-13 対策後の動作の様子 (5s 間隔連続写真)

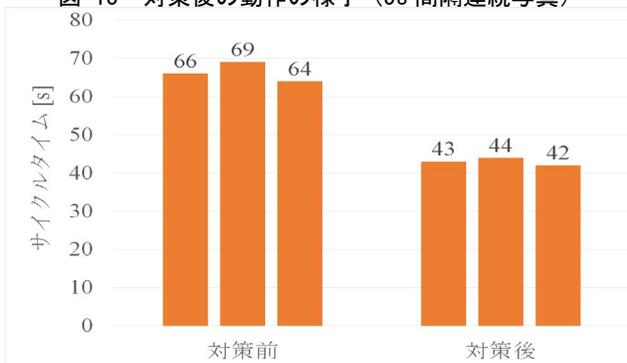


図-14 対策前後のサイクルタイム比較

- [6] 回転軸を用いて、ブーム、アーム、バケットの動作により、バケット先端の中心部を目標位置へ向けられる角度へ回転する
- [7] 姿勢を維持したまま、バケットの先端を放土目標位置へ合わせる
- [8] バケットを -0.57 (rad)まで開き、放土する
- [9] バケットを $2\pi/3$ (rad)まで閉じる

5.2 試験結果

図12および図13に、それぞれ対策前後の試験時の動作の様子を、5(s)間隔の連続写真にて示す。各写真の左下部には、動作開始からの経過時間を

示す。本稿4章に記した対策をする前は1サイクル当たり64~69(s)の時間がかかった。一方で、対策を導入することで、1サイクル当たり42~44(s)となり、およそ2/3程度まで時間が短縮された(図14)。

5.3 考察

対策前後でサイクルタイムが減少したのは、モーションプランナが計画する目標角度に対する制御の応答性が改善していることが影響している。むだ時間補償器によって予測値をフィードバックとしたPIDコントローラを組み合わせることによりハイゲイン化が可能となり、各軸の動作速度を落とさずに動くことができていると考えられる。また、副次的な作用として、モーションプランナは計画した軌道と実際の軌道の乖離が大きくなった場合に、計画そのものを都度修正するため、全体の挙動が振動的になり、目標位置までの収束までに、より多くの時間がかかることがある。4章に記した手法はこのような悪影響を回避する効果もある。

6. まとめ

本稿では、遠隔操作型の油圧ショベルの動作を自動化するソフトウェアを開発する際に障害となる、ハードウェア上の特性である、サーボ系に内在するむだ時間について知見の共有を行った。これは、通常の電動機を用いたマニピュレータのハードウェアでは一般に非常に小さいが、油圧ショベルではサーボ系をハイゲイン化するための阻害要因として無視できない。このむだ時間への対処法として、スミス法に基づいた、状態を予測する補償器の構築方法について、現実的で簡便な対策を紹介した。また、これらの対策を実装したソフトウェアを用いて、油圧ショベルが土砂の掘削と放土を行う実験を行い、土砂の掘削放土動作のサイクルタイムを短縮できることを示した。

参考文献

- 1) 伊藤・坂野・藤野・安藤：無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について、土木学会論文集, vol.73・No.1, pp.15~24, 2017
- 2) 一般社団法人日本建設業連合会：建設業ハンドブック 2020, 2020
- 3) ROS: <https://www.ros.org/>
- 4) MoveIt: <https://moveit.ros.org/>
- 5) pid: <http://wiki.ros.org/pid/>
- 6) 阿部・延山：<第1回>むだ時間システム入門1-伝達関数からのアプローチ-, 計測と制御, 第44巻・第11号, pp.800~804, 2005
- 7) 小波・西海：油圧制御システム, 1999