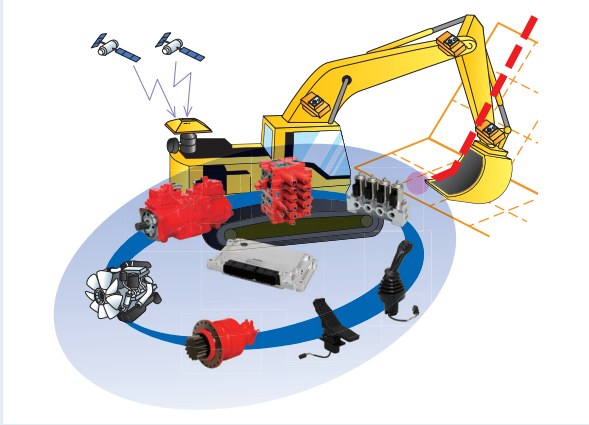


情報化施工を実現するICT油圧ショベル用システムの開発

Development of Systems for ICT Hydraulic Excavators That Enable the Realization of Computer-Aided Construction



村岡英泰① Hideyasu Muraoka
 弓達陽治② Yoji Yudate
 中川仁③ Hitoshi Nakagawa
 陵城孝志④ Takashi Okashiro
 能勢知道⑤ Tomomichi Nose

建設現場の生産性向上を目的に、ICT/IoT技術を活用して高効率・高精度な情報化施工を実現するICT建機の需要が広がっている。当社は油圧機器メーカーならではの知見を活用しながら、ICT油圧ショベルシステムにおいて、その制御精度と動作速度の両立を実現する油圧システムおよびマシンコントロール技術を開発している。また、将来システムに向けた“革新油圧システムを核とした自動化／自律化への取組み”を進めている。

The demand for ICT construction machinery is increasing as it enables the realization of highly efficient and highly accurate computer-aided construction with ICT (Information Communication Technology) and IoT (Internet of Things) technology for enhanced productivity at construction sites. Leveraging its expertise as a hydraulic equipment manufacturer, Kawasaki is developing hydraulic systems and machine control technologies that can achieve a good balance between control accuracy and operating speed in ICT hydraulic excavator systems. For future systems, Kawasaki is also working toward automation and autonomy with the focus on innovative hydraulic systems.

まえがき

昨今の建設現場では、労働人口や熟練者の減少による労働力不足が深刻となっており、生産性の向上を目的とした情報化施工の導入が増えている。

日本においても建設現場の生産性向上を目指す新しい取り組みであるi-Constructionが国主導で2016年度より推進されており、情報化施工の機運がますます高まっている。

1 背景

情報化施工は、建設事業の調査、設計、施工、監督・検査、維持管理という建設プロセスのうち「施工」に着目して、ICT/IoT技術を活用することで、高効率・高精度な施工を実現するものである。また、施工で得られる電子情報を他のプロセスに活用し、建設プロセス全体の生産性向上や品質確保を図ることを目的としている。この情報化施工を実現するために用いられる建設機械がICT建機であり、近年急激に需要が高まっている。

2 ICT建機

ICT建機の機能としては、全球測位衛星システムや車体

センサから推定できる建機の現在の位置と施工の目標値との差分をモニターで表示するマシンガイダンス技術と、目標値と現在位置との差分を最小限とするために建機をリアルタイムに自動制御して施工を行うマシンコントロール技術があり、各社で開発が進められている。現在では、オペレータの整地作業の操作をアシストするマシンコントロール技術が市場に投入され、一般化されつつある。この技術は、整地作業を主とするブルドーザなどから始まり、最近では多様な作業を行う油圧ショベルにも導入されている。当社においても、強みを生かすことができ、マシンコントロール技術導入の難易度が高いICT油圧ショベルシステム

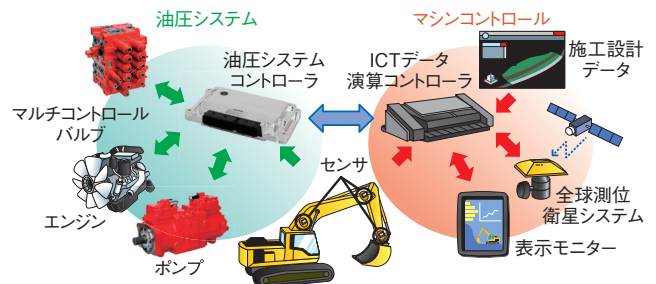


図1 ICT建機（油圧ショベル）のシステム構成
 Fig.1 System configuration of ICT construction machinery (hydraulic excavator)

に着目して、その研究を行っている。

ICT油圧ショベルシステムの主な役割は、油圧ショベルのアタッチメントを構成するブーム・アーム・バケット各軸の動きを制御して、バケット先端を所望の軌跡に追従させることである。主な構成要素としては、図1に示すように油圧シリンダを介して各軸の動作を制御する「油圧システム」と、アタッチメントに配置した角度センサから姿勢を推定してバケット先端位置を制御する「マシンコントロール技術」である。

3 開発目的および方針

他社との差別化を図るためには当社の強みである油圧機器および油圧制御を活用することが不可欠であり、高精度・高効率・低燃費をキーワードとして、ICT油圧ショベルシステムに最適な油圧機器とマシンコントロール技術の開発に取り組むこととした。この取り組みを通じて、顧客へのシステム提案力を強化するとともに付加価値を向上した製品を提供できるようにすることを目標の一つとした。

従来の油圧システムに使用する油圧機器については、主に低燃費と高効率を目的に製品開発を行ってきた。このため、油圧機器制御の核となるマルチコントロールバルブは、圧力損失の低減とアクチュエータ速度の向上を主眼においた製品となっている。これに対し、ICT油圧ショベルシステムでは、施工の目標値に対する誤差を最小限にすることが重要であるため高精度が求められており、従来の油圧機器特性・油圧回路構成では要求を満たすことが難しかった。

そこで、マルチコントロールバルブをはじめとする油圧機器について機器特性および回路構成を工夫することで、精度と速度を両立する油圧システムを開発することとした。また、マシンコントロール技術の開発においては、機器特性や構成を最適化するとともに、施工の目標値に軌跡を追従させることに優れたロボット制御技術を活用しつつ、油圧システムを制御する上での相違点を克服する独自のマシンコントロール技術を開発することとした。

4 技術課題

軌跡追従は産業用ロボットでは基本的な機能として実装され、自動車の組立ラインや半導体製造装置などの産業分野で広く利用されている。しかし、油圧で駆動する油圧ショベルのアタッチメントで同様のことを実現する場合、次の点を考慮する必要がある。

- 非線形性：作動油の圧縮性や漏れ流量などの影響がある
- 自重の影響：アタッチメントのサイズや重量が一般的な産業用ロボットと比較してはるかに大きい

- 応答遅れの影響：油圧ポンプから吐出した作動油を介してアクチュエータを駆動する

① 非線形性の補償

油圧シリンダを駆動する油圧システムは、圧縮性・漏れ流量・ヒステリシスなどの油圧特性に起因する強い非線形性を有する。目標とする軌跡への追従性を高めるためには、各軸の速度を高精度かつ高応答に制御する必要があるが、この非線形性が大きなネックとなる。

また、油圧ショベルは重量物であるアタッチメントを前方に伸ばす姿勢をとり、かつ足場が不安定であることが多いため、必ずしもバランスのとれた構成ではない。このためアタッチメントの急な加減速など、ささいな要因で容易に車体振動を誘発してしまう。

機体の大きさから、わずかな振動でもバケット先端位置に大きな変位を生じるため、精密な施工を実現するためには車体振動の抑制が不可欠である。しかしながら、非線形性により各軸の制御性が悪化すると、必然的に操作量が大きくなり車体振動を誘発してしまう。

このため、車体を安定化して高い追従性を実現するためには非線形性の補償が必要となる。

② 自重の影響の補償

産業用ロボットでは、軌跡追従性の向上のため、動力学計算を基に各軸のトルクを補正し、自重の影響を補償している。一方、油圧ショベルはアタッチメントの重量やサイズが大きく、産業用ロボット以上に自重の影響が大きい。また、油圧シリンダは油圧特有の非線形性を有しており、ロボットに使用される電動モータのような精密なトルク制御が困難である。さらに、共通の油圧源から複数のアクチュエータに作動油を供給する構成であるため、複数の軸が連動して動作する際に各軸を独立して補償するためには、作動油の配分を精密に制御する必要がある。したがって、産業用ロボットと同様の重力補償は適用できず、油圧システム独自の補償が必要となる。

③ 応答遅れの影響の補償

産業用ロボットでは各軸トルクを電動モータにより直接駆動するが、油圧ショベルでは油圧ポンプから吐出した作動油を介してアクチュエータを駆動するため比較的応答遅れが大きい。

通常の油圧ショベルの場合、この応答遅れはオペレータの経験により補間する。たとえば、整地作業ではアームの動作に合わせてブームを上げ下げするが、オペレータは動き始めではアーム動作を確認してからブーム操作をしても間に合わないことを経験から予測し、ブームをアームとほぼ同時に操作している。

マシンコントロール技術では、熟練したオペレータの操作のように、さまざまな軌跡に対する追従性や高い応答性が必要となるため、応答遅れの補償が必要となる。

5 これまでの取組み

(1) 油圧システムの開発

非線形性の補償：油圧システムでは、自重のエネルギーを利用して油圧シリンダの出口流量の一部を入口に戻すことで、高速動作と高エネルギー効率を両立している。このとき入口に戻る再生流量は姿勢や荷重によって変化するため、非線形性の大きな要因となっている。

そこで、シリンダの圧力センサを利用して再生流量を精度よく推定する技術を確立し、再生流量を考慮したシリンダの速度制御を行うことで、制御性の向上を実現した。再生部の油圧回路の構成を図2に、再生流量推定ロジックの概要を図3にそれぞれ示す。

シリンダの圧力センサ値と再生バルブおよび再生カットバルブの開口推定値から再生流量を推定している。この際、再生バルブの制御流量の推定精度が重要であるが、新たな算出方式の導入により推定精度を向上している。

シリンダを安定して効率良く動作させるためには、シリンダの入口流量と出口流量をバランスさせることが重要である。開発した方式では、推定した再生流量を基にシリンダ入口流量を補正することで、再生流量が変化する状況においてもこのバランスを維持することが可能である。

これにより再生流量を有効利用しつつ、線形性の高いシリンダ応答を実現した。

自重の補償：独立メータリングバルブIMV (Independent Metering Valve) と圧力センサを利用した流量制御による重力補償法を開発した。IMVによる制御方式は、シリ

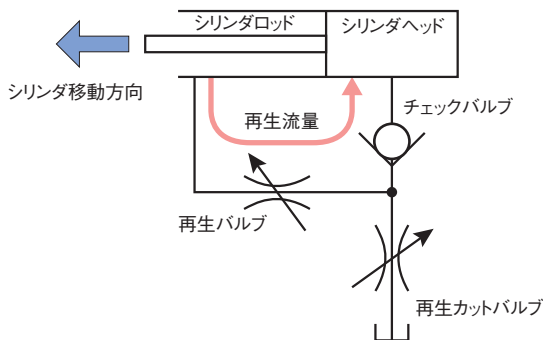


図2 油圧回路構成 (再生部)
Fig. 2 Hydraulic circuit configuration (regeneration section)

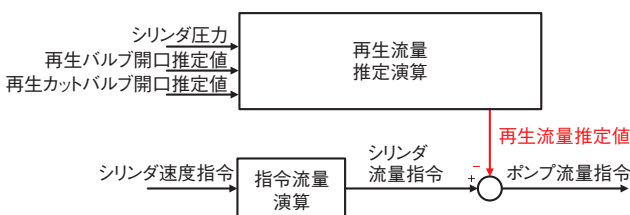


図3 再生流量推定ロジック
Fig. 3 Estimation logic for regeneration flow rate

ンダの入口通路メータインMIと出口通路メータアウトMOを独立に制御する方式であり、状況に応じて両者を最適に制御することでシリンダ速度の制御性を改善することが可能で、従来の制御方式と比較して高い自由度がある。

リンクにかかる重力の影響は主にMO側のシリンダ圧に現れるため、IMVの特性を生かしてシリンダ圧を考慮した精密なMO制御による重力補償を行っている。

各軸の目標速度をMOの目標流量に換算し、目標流量とシリンダ圧力センサから取得したMOバルブの差圧を基に必要な開口を演算して、その開口に追従するようにMOバルブを電子制御することで、シリンダ速度を目標に高精度に追従させる。その際に、バルブの電子制御にはバルブ動特性の考慮などの補正を導入して制御精度の向上と安定化を図った。このように、各軸のMOを精密に制御することで、重力の影響を補償すると同時に複合動作時の作動油の配分が適正化され、共通の油圧源をもつ油圧システムにおいても各軸を独立して制御することが可能となる。

これにより、油圧システムにおいて姿勢や荷重の影響を緩和可能な重力補償を実現した。

(2) マシンコントロール技術の開発

マシンコントロール技術の一つである自動整地アシスト制御では、図4に示すように、オペレータの操作によりバケット先端が目標の整地面を超えて掘り込みそうになると、アームの動きに対して自動的にブームを上昇させる。また、バケット先端が目標の整地面から離れそうになると、自動でブームを下降させる。このような動作を実現するために、コントローラでは各センサ情報から油圧ショベルの姿勢とアタッチメントの姿勢とを常時計算している。

油圧ショベルにおいて、高精度にアーム・ブーム・バケットを動かすために、油圧ポンプからの作動油を最適な流量で吐出するとともに、マルチコントロールバルブで各アクチュエータへの作動油を最適な流量に分配している。さらに、アタッチメントに設置されたセンサ信号から計算されるバケット先端位置を目標整地面に追従させる位置フィードバック制御を実施している。

応答遅れの補償：図5に示すように、アタッチメントが

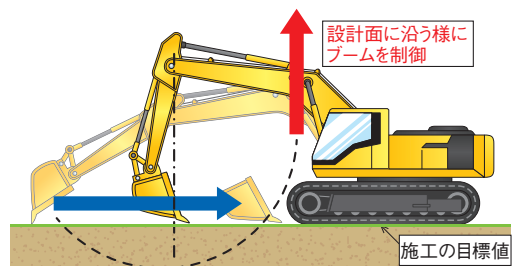


図4 マシンコントロール技術 (自動整地アシスト制御)
Fig. 4 Machine control technology automatic grading assist control

伸びている状態ではオペレータの操作に対して、ブームの上昇量が大きくなる。一方、アームが地面に対して垂直となる付近ではブームの上昇量が小さくなる。このときブームに対する制御ゲインが一定であると、アタッチメントが伸びている状態では応答遅れによりアームの動作にブームが追従できず掘り込みが発生する。また鉛直付近ではアームの動作に対するブーム動作の感度が高く、応答遅れによりハンチングが発生する。この課題を解決するため油圧シヨベルの姿勢に応じてブームの操作量を補正する制御を導入した。これらにより、アタッチメントの動作速度を維持しつつ、安定して滑らかな整地作業を実現している。

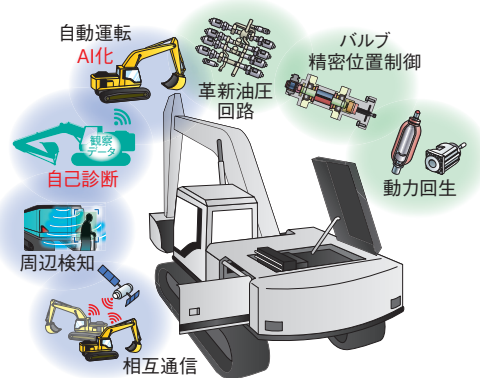


図6 将来システムの構想
Fig. 6 Concept of future system

6 将来油圧シヨベルシステムに向けた取り組み

さまざまな建機メーカーや測量機メーカーにおいて、オペレータの操作をマシンコントロールによりアシストする半自動化のシステムが市場投入されており、さらに、次のステップとして自動化／自律化の実現に向けた研究開発が進められている。

当社においても、マシンコントロールシステムの開発に取り組み、将来に向けて「革新油圧システムを核とした自動化／自律化に対応したシステム開発」に取り組んでいる。当社の強みである油圧技術を活用して、図6に示すような自動化／自律化に最適な革新油圧システムを開発することで、他社との差別化を実現する。

(i) 革新油圧システム

性能向上とコスト効率向上の両立を目指し、自動化／自律化に最適な油圧システムの研究開発に取り組んでいる。具体的には、さらなる圧損低減とエネルギー再生／回生による低燃費・動作効率向上、微操作性と高追従性を両立するとともに高精度でリニアなアタッチメント作動による操作性・制御性向上、機能統合および構成や構造の一新によるコスト効率の向上などを実現するための油圧機器および油圧システムの研究に取り組んでいる。

(ii) 自動化／自律化

建設現場全体としては、複数の建設機械を自動連携させた無人化施工の研究開発が進められている。まさに“建設現場における工場化”と言え、ここで動作する建設機械は

ロボット化すると言える。当社の産業用ロボットで培った技術を活用し、建設機械のロボット化の研究開発に取り組んでいる。具体的には、油圧シヨベル自身が自律学習して最適な動作計画を導き出し作業を行うシステム、周辺の人や障害物を検知して動作計画を補正するシステム、地面の土砂の状況を検知して適応する掘削手法・パターンを補正するシステムなど、熟練オペレータの作業効率や仕上がりの精度を上回るICT油圧シヨベルシステムの実現に向けた研究に取り組んでいる。

あとがき

ICT油圧シヨベル用システム開発として、オペレータの操作をアシストするマシンコントロール技術の開発に取り組んでいる。

今後、さらにこのシステム開発力に磨きをかけ、顧客へのシステム提案力を強化するとともに、そのシステムに最適化した機器開発を行い、油圧シヨベルをはじめとする産業車両の性能向上・機能向上に貢献していく。

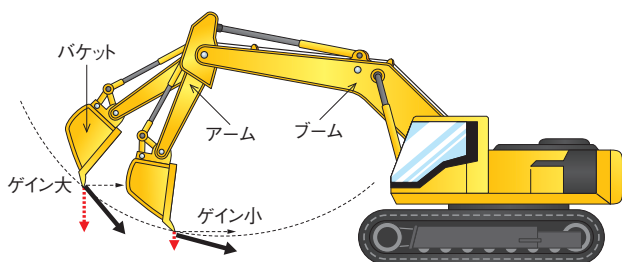


図5 油圧シヨベル姿勢に応じたブーム制御の補正
Fig. 5 Boom control correction based on hydraulic excavator posture



村岡 英泰



弓達 陽治



中川 仁



陵城 孝志



能勢 知道