

(技術資料)

BMS1200HD に搭載した主補ウィンチ同調システムの開発

Development of Synchronized Winch System for BMS 1200HD



道田隆治*1
Takaharu MICHIDA



福本圭介*2
Keisuke FUKUMOTO



中澤 亨*2
Toru NAKAZAWA

Hammer grabs are used as equipment for digging deeply into the ground. Their operation requires skill in synchronizing and making full use of two wires. This paper introduces a system developed for enabling even unskilled operators to perform the synchronization of the wires accurately. The system is designed for a lattice boom crawler crane (LBCC) used for hammer-grab operations and comprises capabilities for detecting and controlling the rotation of both the main winch and auxiliary winch of the LBCC. The control means is based on the feedback of the difference in rotation between the main winch and auxiliary winch. It has been confirmed using an actual machine that the system enables efficient digging of even liquefied soil without spillage.

まえがき＝ラチスブームクローラークレーン（以下、LBCC という）は、工事現場において資材の上げ下ろしに使用されるだけでなく、地盤改良現場においてバケットなど掘削機器の操作に使用される¹⁾。掘削するためにはバケットの開閉操作を行う必要があり、操作の手段としては、2本のワイヤをクレーンのウィンチで巻き取って繰出ししている。これまでは、熟練したオペレータがクレーンのウィンチを使いこなすことで掘削作業を行ってきた。深掘りにおける掘削操作は、地中の掘削底に位置するバケットの状態が見えないので、1回の掘削で大量の土をすくうことは難しい。また、本来はバケットを閉じきった状態で巻上げる際に、少しでもバケットを開くと土がこぼれてしまい、作業効率が非常に悪くなる。さらに、掘削サイクルタイムの短縮や掘削効率向上の要求もある。これらが操作に技量を要する理由である。しかし、最近では経験が浅く若いオペレータへの世代交代が進んでいる。すなわち、掘削機器を未熟練オペレータでも効率良く、確実に操作可能とする技術が必要となった。そこで、一つの解決策としてクレーンの主補ウィンチ同調システムを開発した。このシステムにより、未熟練オペレータでもバケットですくった土をこぼすことなく、バケットを閉じた状態で確実に巻上げることができるため、掘削効率を上げることができる。

以下にその開発の詳細を紹介する。

1. クレーンの機能説明

1.1 クレーンの基本構成の説明

図1にLBCC各部の名称と位置を示す。一般的に、LBCCは2つのウィンチを搭載している。一つは、上部フレームの中央部分にワイヤの巻き取りや繰出しを行う主巻ウィンチであり、もう一つは補巻ウィンチと呼ばれ

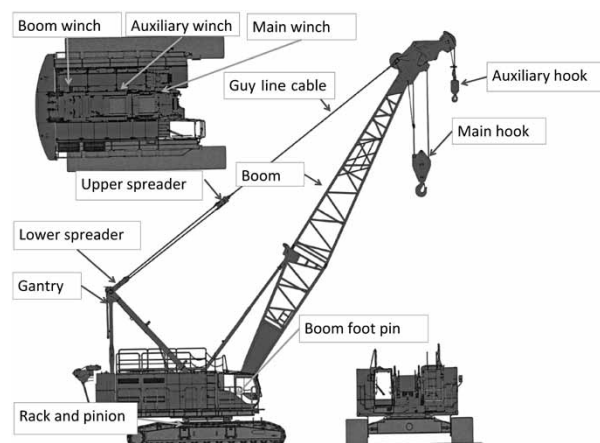


図1 LBCCの各部名称
Fig. 1 Lattice boom crawler crane (LBCC)

る。ワイヤはウィンチからブームの先端を経由して、鉛直下方につり下げられ、その先端は荷物を掛ける部品（フック）で固定されている。この構成により、ウィンチがワイヤを巻き込むとフックは巻上げられ、ウィンチがワイヤを繰出すと、フックを巻下げることが可能になる。クレーン前方に搭載されたウィンチを主巻ウィンチ、クレーン後方に搭載されたウィンチを補巻ウィンチと呼ぶ。補巻ウィンチの後方にブームウィンチが配置されている。ブームウィンチで巻き取り、繰出しされるワイヤは、ガントリを経由して下部スプレッドと上部スプレッド間に掛け回されている。また、上部スプレッドとブーム先端は固定長さであるガイラインケーブルで接続されている。この構成により、ブームウィンチがワイヤを巻き取ると、上・下部スプレッド間の距離が短くなり、ブームがブームフットピンを支点として起き上がる。ブームウィンチがワイヤを繰出すと、上・下部スプレッド間の距離が長くなり、ブームがブームフットピンを支点

*1 コベルコ建機㈱ マーケティング事業本部 クレーンCS部 (現 KOBELCO INTERNATIONAL SINGAPORE CO., PTE. LTD)

*2 コベルコ建機㈱ グローバルエンジニアリングセンター 開発本部 クレーン開発部

として伏せ動作を行う。

また、LBCCは走行体を有する下部と360° 旋回を行う上部で構成されている。下部には円形の旋回歯車が固定されており、上部にはピニオンが固定されている。旋回歯車の上をピニオンが回転&移動することにより上部の回転（旋回）動作が可能となっている。

1.2 ウィンチの巻き取り量や繰出し量の計測手段

LBCCはフックの鉛直方向における位置を認識するために、ウィンチの巻き取り量や繰出し量を計測する機能を備えている。ウィンチの側面にフィン形状の凹凸を一定の間隔で取付け、この凹凸を近接センサにより電気パルス信号として検出する。パルスをカウントすることでウィンチの回転量を認識できる。また、ウィンチの回転方向は、オペレータが操作する操作レバーの方向を検知するセンサからの信号により認識される。これらの構成により、フックの鉛直方向の向きと移動量を認識することができる。

1.3 LBCCの制御回路

LBCCの制御回路は油圧回路と電気回路で構成されている。オペレータが油圧機器で構成された操作レバーを操作すると、油圧信号（圧力）が油圧の油量を制御するコントロールバルブに伝達され、油圧信号に相当する油量がアクチュエータである油圧モータに供給される。油圧モータはこの油量に相当する回転で動作する。この回転動作が減速機を介してウィンチを回転させる。

また、上記の操作レバーとコントロールバルブの間に比例弁を配置しているため、制御コントローラが比例弁を経由したウィンチの回転を制御可能な構成としている。

1.4 ハンマーグラブの説明

今回開発した主補ウィンチ同調システムを適用する対象である「ハンマーグラブ」を説明する。²⁾

ハンマーグラブは大口徑掘削機器の一種であり、落下力によってグラブを地盤に打ち込み、土砂をつかみ取ることで地面に円形の縦穴を深く掘り進める掘削機器である。ハンマーグラブは、本体をつり上げて支持する「支持ワイヤ」と、先端の開閉動作を行う「開閉ワイヤ」でつり上げられている。ハンマーグラブは先端を開いた状態で地面に落とされ、その後、先端を閉じる際に土をすくい取る。つぎに、すくった土を落とさないように先端を閉じた状態でつり上げられるという一連の動作で深掘りを行う。支持ワイヤは主巻ウィンチ、開閉ワイヤは補巻ウィンチに接続する。主巻ウィンチと補巻ウィンチの回転動作や回転速度を操作することにより、ハンマーグラブの開閉や本体の巻き上げ、巻き下げを実現している。

図2にハンマーグラブの開閉動作時の状態を示す。

先端を開いた状態でハンマーグラブを下げる場合には、ハンマーグラブを「支持ワイヤ」で支え、「開閉ワイヤ」を緩めるといふ、2本のワイヤの位置関係を保持した状態で支持ワイヤと開閉ワイヤをともに同調して繰出さなければならない。この際に緩める側の「開閉ワイヤ」を過剰に緩めると、ウィンチの巻き取りが乱れて乱巻などのトラブルが発生するため、繊細な操作が必要であ

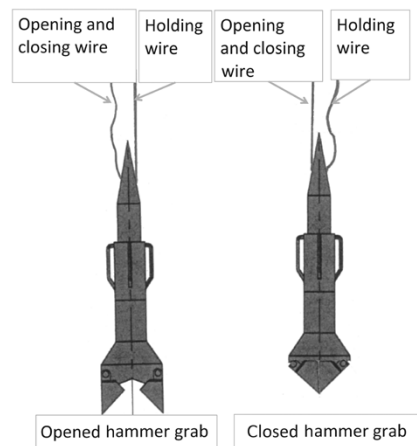


図2 開閉時のハンマーグラブ
Fig. 2 Operation of hammer grab

る。なお、開閉ワイヤが緩んだ状態であれば、ハンマーグラブは自動的に先端が開く構造となっている。逆に、先端を閉じた状態でハンマーグラブを上げる場合には、ハンマーグラブを「開閉ワイヤ」で支え、「支持ワイヤ」を緩めるといふ2本のワイヤの位置関係を保持した状態で、支持と開閉のワイヤを共に同調して巻き上げなければならない。巻き上げの際にも、緩める側の「支持ワイヤ」を過剰に緩めるとウィンチの巻き取りが乱れてトラブルが発生するため、繊細な操作が必要である。このように、ハンマーグラブは常に繊細な操作が必要とされるため、熟練のオペレータの技量が必要であった。

2. 主補ウィンチ同調システム開発の目標

2.1 本開発の背景

LBCCの通常の制御回路でハンマーグラブを操作して閉じ上げをする場合を一例に挙げる。閉じ上げをする場合、あらかじめ支持ワイヤを緩め、開閉ワイヤで全体支持できるように主巻ウィンチと補巻ウィンチの回転位置をバランス調整し、その位置から同時に両ウィンチの巻き上げ操作を行う。この際、油圧制御回路中の制御バルブや油圧ポンプ、油圧モータなどの個体差により両ウィンチの回転量に差異があると（=同調できない）、両ワイヤ間の位置関係が変化する。この結果としてハンマーグラブの先端が開き、土砂がこぼれ、深掘りの作業効率が極めて低くなる。これまでは回転量の差異を熟練のオペレータの操作技量で補ってきた。しかし、最近では経験の浅い若手オペレータへの世代交代が進んでおり、オペレータの操作技量に頼ることが難しくなってきた。このような背景から、主巻ウィンチと補巻ウィンチの回転量を高精度で同調することが可能なシステムの開発が必要となった。

2.2 システムの構成

2.2.1 状態量検出器

制御対象であるウィンチの回転量検出における手段として、標準機でも搭載しているウィンチのフィンの凹凸を検知する近接センサを活用した。近接センサより得られるパルス数がウィンチの回転量の検出値となる。主巻ウィンチと補巻ウィンチのそれぞれのパルス数が同じ値となるようにすることが、同調制御の目標となる。

2.2.2 制御器（油圧コントロールバルブ）

1.3節のLBCCの制御回路で述べたように、油圧の油量を制御するコントロールバルブは、オペレータの操作レバーの操作量に相当する油量をアクチュエータである油圧モータに供給する。これにより、モータの回転量が制御され、結果としてウィンチの回転量が制御される。ここでは、コントローラによる油圧モータの回転量制御を構築するために、LBCCが標準で搭載している比例弁を使用することにした。比例弁は操作レバーとコントロールバルブ間に配置されている。比例弁は、コントローラからの制御信号を受けてコントロールバルブを制御し、油圧モータへの油量を制御する。

コントロールバルブは、油が通過する通路における開口面積の大きさを制御することで油量の調整を行っている。開口特性は、操作レバーの操作量が大きくなると開口面積が大きくなる設定になっている。また、標準クレーン機の開口面積に機体誤差があっても、ウィンチが最大回転速度で回転するように、最大開口部がポンプの供給流量に対してより大きな開口値となるように設定されている。このため、操作レバーの操作量に対して開口面積が非線形に変化する特性となっている。これに対して、同調制御用のコントロールバルブの場合には、比例弁を採用することにより、操作レバーの操作量に対して開口面積が線形に変化する特性とした。このように、コントロールバルブは、同調制御のために専用部品を設定した。コントロールバルブ開口特性のイメージを図3に示す。

2.2.3 制御対象（油圧モータ）

2.2.1項で述べたように、主巻ウィンチと補巻ウィンチのそれぞれのパルス数が同じ値となるようにすることが、同調制御の目標である。また、主巻のそれぞれの油圧モータが主巻ウィンチ、補巻ウィンチを回転動作させているため、制御対象はそれぞれの油圧モータである。

油圧モータに供給される流量が小流量から大流量に変化するに伴い、油圧モータの回転数が低回転速度から高回転速度に増加する。通常は、モータの容量（油圧モータが1回転するために要する流量）が小容量から大容量に変化することで、より広い範囲の回転域を実現できるように構成されている。しかし、油圧モータの容量が変化するという事は、制御理論上は制御対象モデルが変化することを意味する。油圧モータの容量制御を行うことにより、熟練者並みの緻密な制御が可能となる。しか

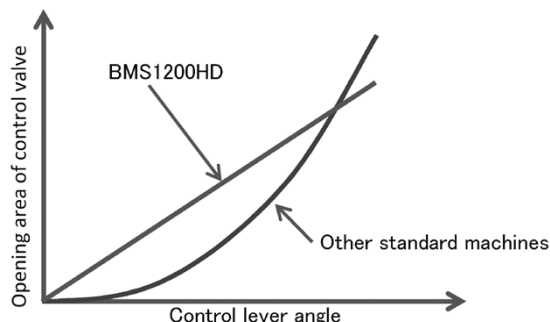


図3 コントロールバルブ開口特性
Fig. 3 Opening area characteristic of control valve

し、今回の開発は同調制御の基本技術の開発と位置づけ、油圧モータの容量を固定したシンプルな構成とした。

2.2.4 制御理論の詳細

ウィンチの側面に配置したフィンの凹凸を近接センサが検出し、得られる主巻ウィンチと補巻ウィンチのパルス信号数の"差"が入力である。ウィンチを回転動作させる油圧モータに対して、供給流量を制御する比例弁への制御値が出力である。主巻ウィンチ用と補巻ウィンチ用の比例弁をそれぞれ独立して配置している。どちらのウィンチが速いのかを判断し、速い側を遅い側に合わせることで同調を達成している。すなわち、主・補ウィンチそれぞれの絶対速度を制御するのではなく、主・補ウィンチの速度比較により、片側補正を行っている。

制御はPIDフィードバック制御を採用している。PID制御の各調整値の決定は、実機で試験を行った。BMS1200HD 試作機を使い、実際にハンマグラフをつり下げ、「開けた状態で下げる動作」や「閉じた状態で上げる動作」が同調制御できるよう、PID制御のゲイン調整を繰り返すことにより最適な調整値を決定した。

2.2.5 商品としての完成度を上げるための工夫

1) エンジン回転数の影響

ハンマグラフを使用した深掘り作業は速く掘り進めることが常であるので、同調制御の開発当初においては、エンジン回転は常に最高回転数で使用されることを前提に検討を進めていた。エンジンが最高回転数であれば、油圧ポンプの吐出し流量も最大である。したがって、これを前提に先述のコントロールバルブの開口特性を設計していた。しかし、オペレータによっては、ウィンチの操作レバーでウィンチの回転速度を操作するだけでなく、ウィンチ回転の元となるエンジンの回転速度をアクセル操作してウィンチの油圧モータに供給される流量自身を変化させる操作を行う。とくに、エンジン回転が低速回転の際には油圧ポンプの吐出し流量が少なく、設計した開口特性では開口値が大きすぎて、油圧モータへの流量が制御できない場合もある。そこで、同調制御で使用するコントロールバルブにおける開口特性の使用範囲にエンジン回転を変数として追加する手法を採用した。この手法では、エンジン回転が低い場合、開口特性値が小さい範囲で流量を制御することができる。これにより、任意のエンジン回転であっても、高精度な同調制御が可能となった。開口特性をエンジン回転によって使い分けるイメージを図4に示す。

2) 経年による油圧機器の性能低下への対応

クレーンに搭載されている油圧機器は経年により性能が低下する。同調制御に影響を及ぼす性能の低下には、容積効率の低下、すなわち、機器からの油の漏れがある。油の漏れが起これば、容積効率が低下した油圧モータに新車時と同じ流量を供給しても、回転数が新車時に比べて下がる現象が発生する。したがって、経年が進むと、新車時と同様の制御を実施しても、同調制御の精度が保てない。また、性能低下は油圧モータだけではなく、コントロールバルブや油圧ポンプでも発生する事象であ

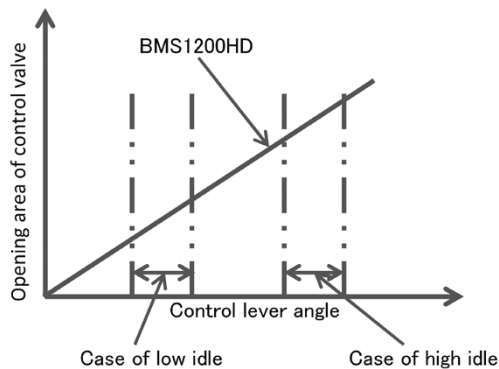


図4 エンジン回転による開口使用範囲の選択

Fig. 4 Selection of opening area range depending on engine speed

り、その程度は機器によっても異なる。末永くクレーンをお客様に使用していただき、商品価値を維持するためには、これらの性能低下にも対応しなければならない。この課題に対しては、次のように考えて対策を施した。機器類に性能低下が発生し、それらが組み合わさった場合においても、結局は同様の事象が発生する。すなわち、新車時と同様の制御を行った場合に、主巻ウィンチ、または補巻ウィンチのいずれかが、遅れ勝手となることで回転量に差異が発生するという現象である。したがって、新車当時の制御出力値に対して、プラス側（遅れ勝手に相当する分多く出力する側）にオフセットすることにより対処ができる。この制御出力のオフセット量をオペレータが調整できる「調整モード」をクレーンに付加した。経年により、オペレータが同調制御の精度が悪くなったと感じられた際には、その都度調整していただく必要が生じるが、作業を止めることなく使用していただける。

これまで説明してきたシステム全体の系統図を図5に示す。

2.2.6 開発した同調制御の達成度

ハンマーグラブを閉じ上げた際の実機計測データを図6に示す。図6によれば、主巻ウィンチと補巻ウィンチの巻上げ量の差異は、おおむね25 mm以内（ウィンチの側面配置したフィン1間隔に相当）に納まっており、ハンマーグラブの操作において実用上問題ない。このように、実機データにおいても、高精度な主補ウィンチ同調システムであることを確認できた。

2.2.7 開発した同調制御の評価

1) ハンマーグラブ使用での評価

ハンマーグラブにおける同調制御の精度について、お客様による評価を実施した。評価方法としては、ハンマーグラブの先端で10 cm角の木片を挟み、そのまま同調制御にて巻上げ、巻下げを行う操作を対象として検証した。その結果、評価者がこの木片を落とすことはなく、非常に好ましい評価が得られた。

2) バケツ使用での評価

インドネシアでは、運河の川底にたまった汚泥の浚渫（しゅんせつ）作業にバケツを使用している。バケツは、ハンマーグラブと同じワイヤ操作でバケツの開閉操作を行うことにより浚渫ができる掘削機器である。汚泥は水分を多く含むため軟らかく、バケツが少して

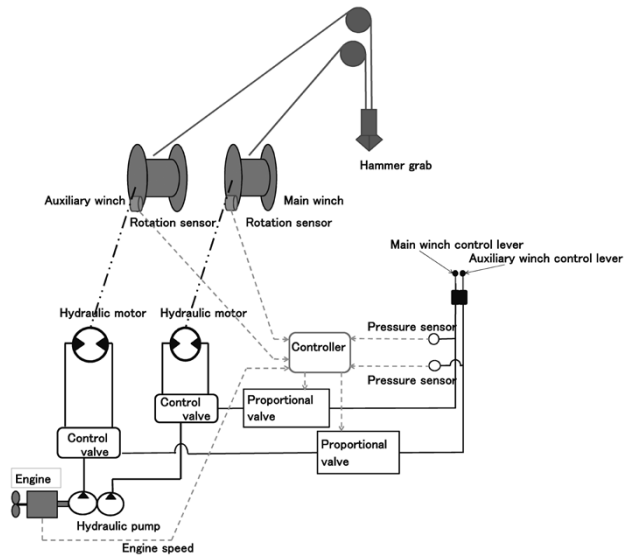


図5 システム系統図

Fig. 5 System diagram

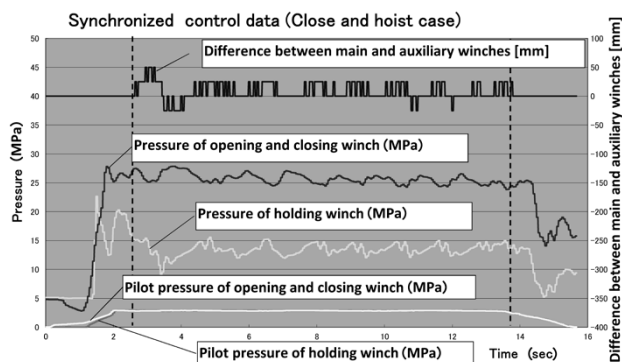


図6 同調制御時の実機計測データ

Fig. 6 Synchronized control data

も開くとほとんどがこぼれてしまう。これは、同調制御にとっては極めて厳しい条件である。しかし、浚渫作業でもお客様の評価を確認したところ、コベルコ建機のクレーンは汚泥がほとんどこぼれないという高評価を得た。

むすび=未熟練オペレータへの世代交代を背景として、掘削作業に使用されるクレーンは、主巻ウィンチと補巻ウィンチの回転量を同調可能とするシステムの開発が要求されている。そこで、クレーンの制御構成や手法を工夫して高精度な主補ウィンチの同調制御を開発することで、お客様の要求に応えることができた。

今回は、バケツやハンマーグラブに対応した同調制御を開発した。今後は、フックの掛け数やつり上げ負荷、さらには油圧モータ容量までコントロールする処理を加えたいと考えている。そして、熟練オペレータの技量を超越するレベルの精度、生産性を実現する同調制御の開発へ発展させていきたい。

参考文献

- 1) 最新建設基礎・地盤設計施工便覧編集委員会編. 土木・建築技術者のための最新 建設基礎・地盤設計施工便覧. 建設産業調査会. 1992. p.841.
- 2) 最新建設基礎・地盤設計施工便覧編集委員会編. 土木・建築技術者のための最新 建設基礎・地盤設計施工便覧. 建設産業調査会. 1992. p.837.