

(解説)

作業船の制御技術

Control Systems for Floating Cranes



上島 衛*
Mamoru Uejima



筒井 昭**
Akira Tsutsui

This paper describes a vertical lifting control and level luffing control design for newly developed full-hydraulic-driven floating cranes. Unlike lattice boom crawler crane for land use, the floating crane is affected by the pitching motion and rolling motion of the pontoons on which the crane machinery is installed. A control algorithm was developed that took into consideration the dynamics of the pitching motion and rolling motion of the pontoons, as well as the motion controls for load hoisting and boom hoisting.

まえがき = 各種港湾工事においては、近年、クレーン作業となる防波堤工事に使われるケーソンや消波ブロックが大型化傾向にあり、また重量物だけでなく軽量物でも迅速かつ精度良く安全に作業を行えるよう、大きな巻上ラインプルで速いフック速度や操作性の改善、多機能な運転操作が必要とされてきている。さらに、バケット作業では高速動力巻下げと施工精度の向上などが望まれている。

コベルコクレーン(株)ではこの要求に対応し、クレーン作業と直巻力を要するバケット作業や砕岩作業を1台でこなすことができる全油圧式多目的作業船 F&G3106(直巻ラインプル 25t)と F&G3111(同 45t, 写真1)を上市している。

本稿では、これらの新シリーズにおいて新たに盛込んだ制御技術の概要を説明し、セールスポイントとなっている鉛直地切制御と水平引込制御について紹介する。

1. 新たに盛込んだ制御技術の概要

1.1 高ラインプル・高速の巻上油圧駆動

従来、バケット直巻 25t クラス以上の能力を有するク

レーン・グラブ兼用機では機械式(モジュレートクラッチ付トルクコンバータ)巻上駆動方式が使用されており、巻上操作性(微速・微量操作性、軽荷重操作性、応答性)の向上が課題であった。新シリーズ作業船では、これに対し主巻、補巻の油圧システムをシリーズ回路ではなく、各々専用ポンプを有した主補独立回路とし、F&G3106では2セット、F&G3111では4セットの油圧モータで駆動する油圧システムとした。この主補独立回路により、両ドラム同時に定格ラインプルを掛けることができ、バケット全閉後の地切時に強力な掘削力の発揮が可能となった。また、クレーン作業の操作性を大幅に向上させ、重量物から軽量物までの作業をスピーディに施工できるようにした。

1.2 電気・油圧制御による多機能な作業

1.2.1 主巻、補巻フックの同期巻上/巻下制御

ロープ掛数、ドラム層数が異なっても自動的に両フックの巻上/巻下速度を同じとする同期制御により、主補巻同時運転作業を安全に、スピーディにできるようにした。

1.2.2 鉛直地切・水平引込制御

鉛直地切制御は、巻上レバーのみの操作でブーム起伏動作も自動的に行い、地切りに伴う吊荷の作業半径方向の移動を抑えるように、また水平引込制御はブーム起伏レバーのみの操作で吊荷の巻上/巻下動作も自動的に行い、岸壁か甲板に対する吊荷高さを一定に保つとともに、作業船に固有な台船動揺の発生を抑えるようにした。なお、水平引込制御は主巻単独か補巻単独使用時のほか、両者同時使用時にも対応できるものとした。これらの詳細については2章以降で説明する。

1.2.3 バケット作業水平掘削

バケット閉じ中にバケットを自動的に巻上、巻下制御することによりバケット刃先軌跡を水平とし、掘削仕上



写真1 F&G3111 全景
Photo 1 Floating crane F&G3111

*コベルコクレーン(株) 開発本部 開発部 **技術開発本部 生産システム研究所

精度を向上した。

1.2.4 モード選択旋回動作

従来、直巻ラインプル 16t の油圧巻上機の巻上で実施してきた「速度制御」と「トルク制御」に加え、「速度制御+トルク制御」の3モード選択を旋回動作に装備した。また、旋回操作はレバー中立フリーであるが、中立ブレーキモードとの切替使用も可能となるように改良した。

1.3 主巻・補巻同時使用対応の過負荷防止装置

従来の過負荷防止装置は、主巻単独か補巻単独使用時のみの対応であったが、両者同時使用時にも対応できる過負荷防止装置を新しく装備した。これにより、吊荷の傾けや天地作業が実施できるようになり、作業の効率化が図れるとともに安全性を高めた。

2. 鉛直地切制御

吊荷を地面から吊上げるとき、巻上ロープの巻上操作のみにて地切作業を行うと、吊荷荷重がクレーンに加わったときのブームたわみ、ロープ伸び、さらに作業船の場合は船体傾斜も加わり、吊荷を地切る直前にはブーム先端位置が吊荷の鉛直上からずれ、吊荷を地切った直後から図1に示すように揺れはじめ、危険な状態となる。

通常、オペレータは図2のように吊荷や台船を揺らさず安全に地切るよう、吊荷の巻上操作とブーム起伏操作を同時に行い、ブーム先端をできる限り吊荷の鉛直上に位置させるようにするが、この操作には熟練を要する。

本制御は、吊荷の巻上操作を行うだけで、ブーム起伏速度と吊荷巻上速度をコントローラが自動的に制御し、地切時の吊荷の揺れを小さくするとともに船体揺動を抑えるシステムとした。

2.1 制御目標

小型(100t 吊り)から大型(400t 吊り)まで4隻のオペレータにヒアリングを行い、作業半径方向の吊荷の揺れを $\pm 30\text{cm}$ とした。

2.2 操作手順

本制御システムは、吊荷揺れ角度や吊荷の移動量の検知をしないオープンループ制御方式としたため玉掛作業時に吊荷鉛直上にブーム先端位置を手動で合わせること

が初期条件となる。ブーム先端位置合わせ後、「鉛直地切スイッチ」をONにし、吊荷巻上レバーを巻上操作すると巻上が始まるとともに作業半径方向の揺れを補正するブーム起伏が始まり、ブーム先端位置が常に吊荷鉛直上に位置するように制御される。

3. 水平引込制御

水平引込とは、吊荷の揚程(高さ)を一定に保持しながら、吊荷の作業半径を変化させる操作であるが、この水平引込動作も鉛直地切動作と同様に、オペレータが手動で行う場合には、吊荷巻上下レバーとブーム起伏レバーを同時に操作しなければならない。また、作業船の場合は吊荷を吊った状態にてブーム角度を変化させると船体の傾斜モーメントが変化するので、図3のように船体揺動が発生しやすい。本制御では、吊荷の高さを精度良く保つとともに船体揺動を抑えるシステムとした(図4)。

3.1 制御目標

鉛直地切制御と同様、オペレータからのヒアリングにより、上下方向の吊荷の揺れを $\pm 30\text{cm}$ とした。

3.2 操作手順

吊荷を任意の揚程にした後、「水平引込スイッチ」をONにして、ブーム起伏レバーを操作すると、ブーム起伏とともに揚程を補正する吊荷の巻上、巻下が自動的に行われる。

4. 作業船固有の制御パラメータ

作業船は陸上クレーンと異なり、海上に浮かぶ浮遊物体であることが大きな特徴である。このため、上述の鉛直地切と水平引込制御にあたっては、クレーンが設置されている台船の揺動状態を考慮した制御システムとする必要がある。台船の揺動特性は、図5に示すような2重振子に近いダイナミクスを持ち、ピッチングとローリングはそれぞれ台船上空にある仮想の回転中心、縦メタセンタと横メタセンタを中心として揺れが発生する。また、図5のダイナミクスは台船がフリー状態での特性であり、岸壁などに係留されている場合は異なる特性を持っていると考えられる。

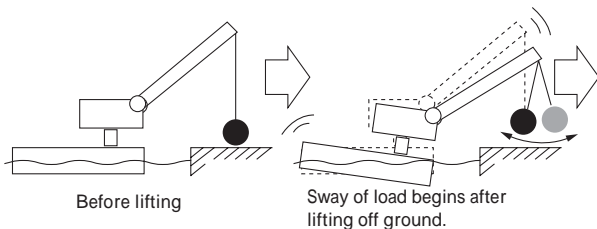


図1 鉛直地切制御がないときの巻上
Fig. 1 Lifting without vertical lifting control

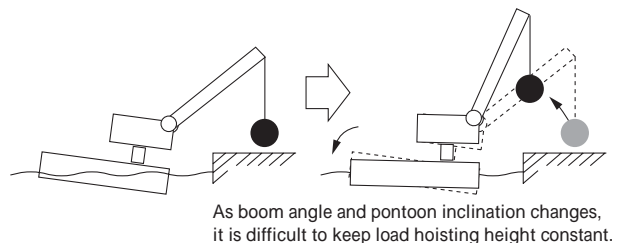


図3 水平引込制御がないときの起伏
Fig. 3 Boom hoisting without level luffing control

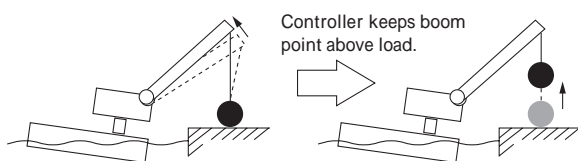


図2 鉛直地切制御があるときの巻上
Fig. 2 Lifting with vertical lifting control

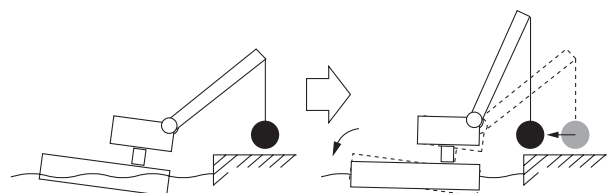


図4 水平引込制御があるときの起伏
Fig. 4 Boom hoisting with level luffing control

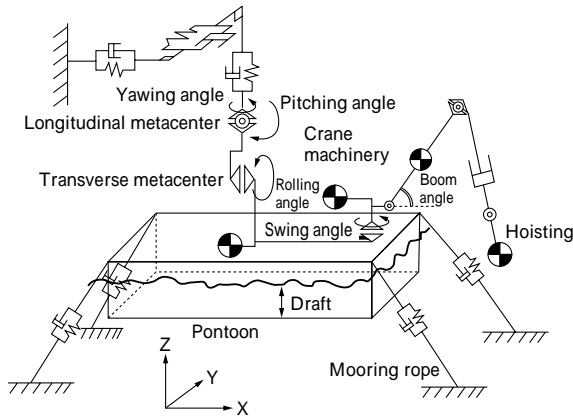


図5 作業船シミュレーションモデル
Fig. 5 Simulation model of floating crane

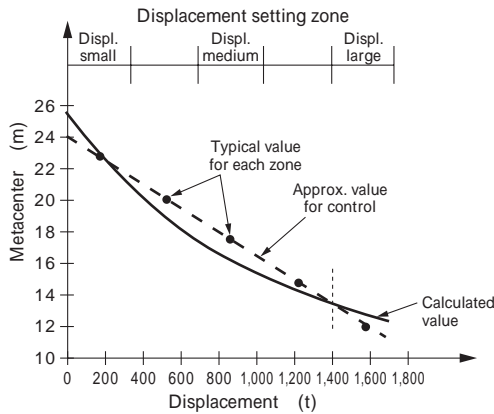


図6 積載荷重に応じたメタセンタの変化
Fig. 6 Metacenter vs. displacement

4.1 甲板積載重量とメタセンタの関係

メタセンタは、「台船がある吃水において静止かつ安定、直立に浮かび、小角度傾斜したとき、傾斜後の浮力中心を通る垂直線と傾斜前の台船の中心線の交点」として定義され、台船寸法と吃水が決まれば、その値は定まる。ここで、吃水とは水面下の台船深さである。ブロック据付けを行う作業船では、据付けの進捗により甲板上のブロック個数すなわち甲板積載重量が変化するので吃水は作業の進捗により変化し、これに応じてメタセンタの値も変化することとなる。

また、台船寸法はこの台船に搭載されるクレーンの大きさと作業から要求される甲板広さから定まるので、同じ機種が搭載される台船でも個々の寸法は異なってくる。最小積載荷重時から最大積載荷重時のメタセンタ計算例を図6に示す。

本制御システムでは、コントローラ内での演算処理を極力軽減するために、あらかじめ基本データとして各機ごとに計算した最小積載荷重時と最大積載荷重時の縦、横メタセンタの値から、破線に示すように積載荷重に対するメタセンタ値の変化を直線近似式で代用し、オペレータが行う積載状況の入力にて、そのときの縦、横メタセンタの値をコントローラが選んで使用するようにした。本稿では詳細説明を省略するが、直線近似による制御性能への影響は小さいことを確認済みである。

4.2 係留の影響

実際の作業船を岸壁からフリーにした場合と岸壁の間

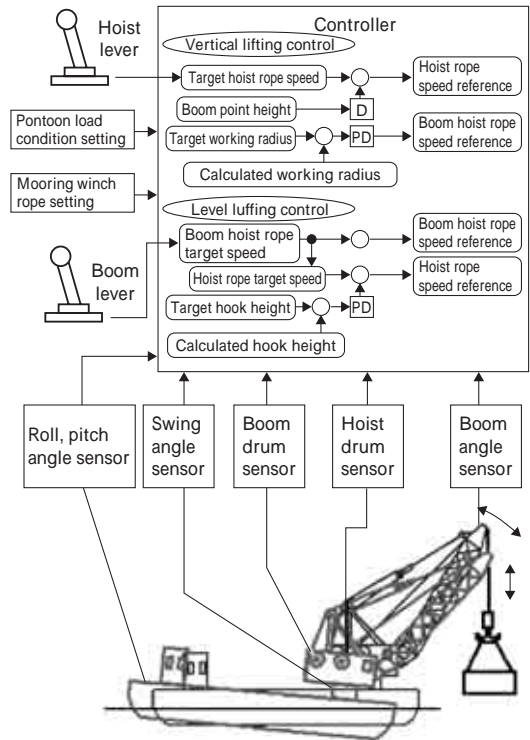


図7 鉛直地切/水平引込制御システム構成
Fig. 7 Control system configuration

の係留ロープを強くした場合について加振実験を行い、揺動特性を計測した結果、作業船が係留されていない場合はメタセンタが揺動の回転中心となっており、一方で係留されている場合はメタセンタが揺動の回転中心ではなくなっていることがうかがえた。

このことから、係留ロープがフリーの場合は前記のメタセンタの値を使用するが、張っている場合は零に切替えるアルゴリズムとし、オペレータが行う係留ロープの状況入力にて、そのときの縦、横メタセンタの値をコントローラが選んで使用するようにした。

5. 制御システム

制御システム構成は図7に示すとおりである。鉛直地切制御では、ブーム先端位置を常に吊荷の鉛直上に保持するようにブーム起伏制御を行うとともに、地切の瞬間に台船を揺らさないよう、オペレータのレバー操作に対して、吊荷巻上速度を抑制する制御を行った。

水平引込制御では、オペレータのブーム起伏操作に応じたブーム起伏速度から、吊荷の巻上、巻下の目標速度を設定し、その値に対して、吊荷の振動を抑制するための巻上、巻下速度を補正する制御を行った。

図7中の作業半径は、メタセンタ位置からブーム先端までの水平方向距離であり、吊荷揚程もメタセンタ位置を基準点とした値である。メタセンタ位置は、前述のように台船の積載荷重と係留ロープの状況に応じて調整される機能を持たせた。

6. シミュレーションでの有効性検証

実機での作動確認に先立ち、図5で示すシミュレーションモデルを用い、鉛直地切制御の検証を行った結果を図8に示す。

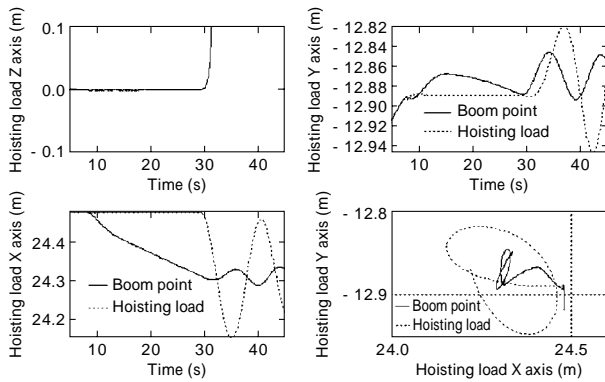


図8 鉛直地切シミュレーション結果
Fig. 8 Simulation results of vertical lifting

シミュレーション条件：

・台船諸元；

長さ×幅×深さ = 57m × 22m × 3m

排水量 = 1,300t, 係留 = フリー

・クレーン；

F&G3111 の 37m ブーム付き

荷重 = 165t × 作業半径 13m, 90 度旋回吊り

地切直後から作業半径方向 (Y 座標) に約 ±6cm, 作業半径と直交方向 (X 座標) に約 ±15cm 振幅で荷振れすることが分かる。いずれの振れも目標内に収まっているが、制御対象となっている作業半径方向の振れが対象となっていない直交方向と比べ約 4 割に抑えられており、制御の有効性が確認できた。

7. 実機作動確認

F&G3111 を台船に搭載後、岸壁にて台船に対する F&G3111 の旋回位置を鉛直地切では 90 度、水平引込では 0, 45, 90, 135, 180 度にて行い、いずれも目視確認にて制御目標に収まることを確認した。鉛直地切制御と水平引込制御の作動確認状況をそれぞれ写真 2, 写真 3 に示す。写真 2 に台船は写っていないが、台船から岸壁に掛けた棧橋が地切開始から終了までの間、大きな変位をしていないことから、吊荷の揺れだけでなく台船の揺動発生も抑制できていることが分かる。

むすび = 本稿の制御システムは、作業船が岸壁から重量物を持ち上げる際の吊荷と台船の揺動防止を目的としたものであり、制御対象を吊荷の巻上動作とブーム起伏動作

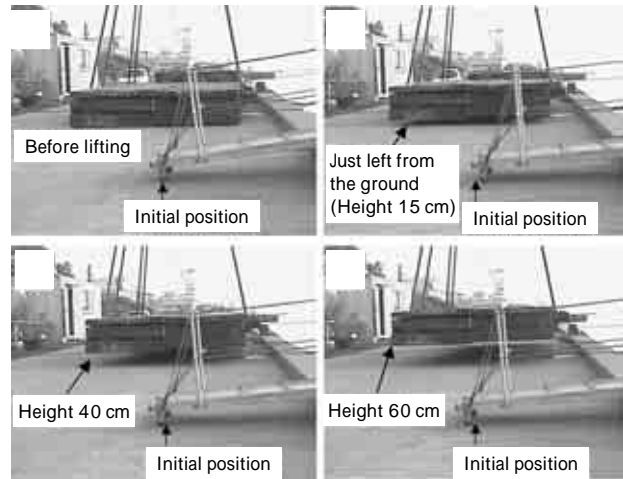


写真 2 鉛直地切作動確認
Photo 2 Experiment of vertical lifting

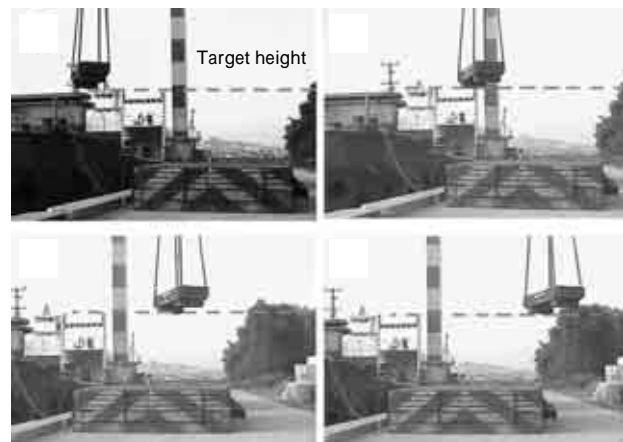


写真 3 水平引込制御作動確認
Photo 3 Experiment of level luffing

とした 2 次元の制御アルゴリズムの有効性をシミュレーションと実機にて確認したことを紹介した。今後は、制御対象に旋回動作を加えた 3 次元制御や吊荷の振角度や移動量を検知するクローズドループ制御により、安全で運転時のオペレータ負担を少なくする制御技術に取組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 岩佐英介：新・実用船舶算法, (1972) p.74, 海文堂.
- 2) 筒井 昭ほか：計測自動制御学会 SI 部会講演会予稿集 (2006 年 12 月) p.242.