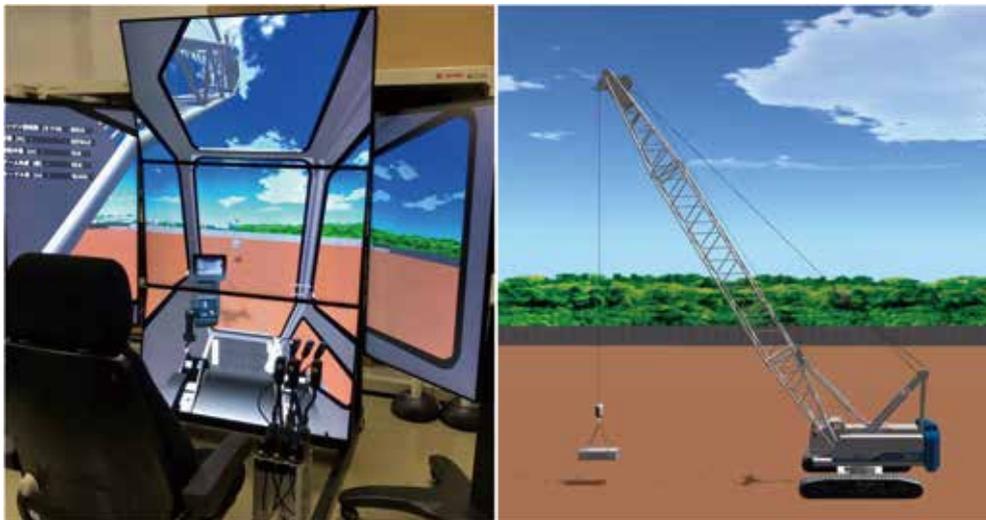


クレーンシミュレータの開発

Development of a Crane Simulator

●山本 泰広* 呉 春男*
Yasuhiro YAMAMOTO Chunnan WU



クレーンシミュレータ
Crane simulator

クレーン作業では、吊り荷の振れや機械の転倒などの危険が多く、振れ止め制御機能の搭載が望まれている。しかしながら、開発段階で制御効果の確認を実機で行うことは容易でなく、特に大型のクレーンでは暴走による転倒や倒壊のリスクを伴う。そこで当社では、クレーンシミュレータを開発し、振れ止め機能や自動運転などのオペレータ支援システムの制御検証に用いることを目指した。クレーンシミュレータは詳細な機構モデルおよび油圧モデルをもとに構成され、入力された指令値に対してリアルタイムに機械の挙動が模擬できてクレーン挙動の把握に優れ、効率的な開発に貢献する。モデルの有効性は、シミュレーション結果と実測値との比較を行い検証した。また、位相平面理論をもとにした振れ止めアルゴリズムも併せて開発し、クレーンシミュレータに適用することでその有効性を確認することができた。

There is much danger situation with crane operation, such as swaying of lifting loads, overturning of machinery itself and so on. And controlling function to stop the swaying has been required. But it's difficult for us to confirm the effect to operate the machinery during development stage, especially there will be some risks with large scale crane, such as turning over and collapsing. So SHI set the goal that a crane simulator would be developed and it would be utilized to verify the control for assisting system for operators, like decreasing to sway and automatic operation. The simulation is applied to detailed structure model and hydraulic model. It can show the machinery movement real-time to response to input signal, and can be used for efficient development. The validity of the model had been evaluated with comparing simulation results with real data. An algorithm to decrease swaying based on the phase plane theory had been also developed, and its validity was confirmed to apply for the crane simulator.

1 まえがき

近年、建設現場における安全作業の徹底や、熟練作業不足への対策として、建設機械の安全機能拡充や自動化へ向けた要望が高まっている。特にクレーン作業では、搬送や地切り時の荷振れによる接触や機械の転倒といった危険が多く存在し、荷の振れ止め機能の実現が望まれている。

しかしながら、制御効果の確認を実機で行うことは容易でなく、特に大型のクレーンでは転倒や倒壊のリスクを伴うことから、制御検証は一般に困難である。そこで当社では、振れ止め機能や自動運転などのオペレータ支援システムの制御

検証に用いるクレーンシミュレータを開発した。さらに、オペレータ支援機能の一例として、振れ止めアルゴリズムを併せて開発し、クレーンシミュレータを活用した制御効果確認試験を実施した。なお、クレーンシミュレータには実機のシートや操作レバーを搭載し、操作訓練用のシミュレータとしての活用も可能なものとした。

2 クレーンシミュレータ

2.1 クレーンシミュレータの構成

図1に、当社にて作製したシミュレータのシステム構成を示す。

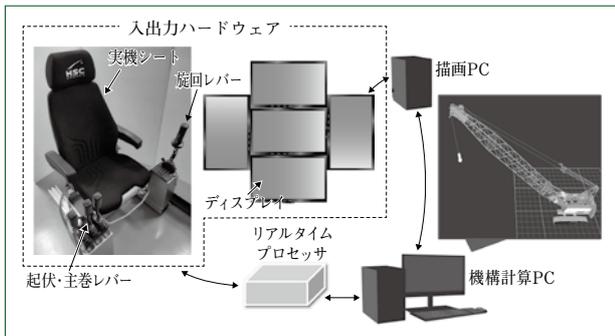


図1 シミュレータの構成
System configuration of simulator

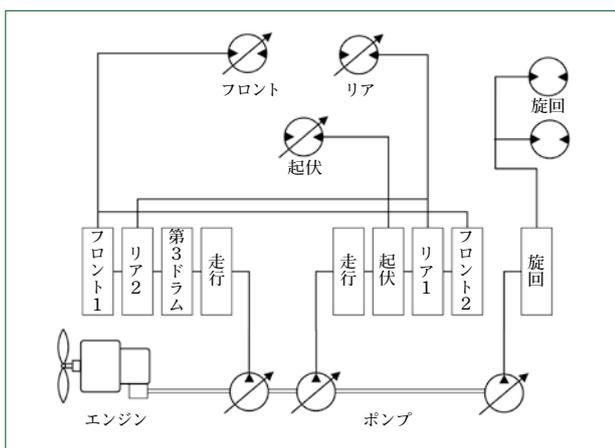


図2 油圧クレーンシステムの構成
System configuration of hydraulic crane

システムは入出力ハードウェア、機構モデル計算PC、アニメーション描画PC、クレーンの油圧モデルを内包したリアルタイムプロセッサをそれぞれ連成させた環境から成る。また、リアルタイムプロセッサ内にオペレータ支援システムを実装しており、機構モデル計算で得られた情報などから制御指令の生成を行う。なお、リアルタイムプロセッサは、MATLAB・SIMULINKからモデルをビルドし、実装することができるものを利用した。

本シミュレータでは、クレーンに実際に搭載されているレバーを用い、動作の基本となる旋回、起伏、巻上げ・巻下げ操作が行えるよう、情報を電気信号として入力できるものとした。レバー操作電気信号は、リアルタイムプロセッサに与えられ、プロセッサ内に実装されているクレーン油圧回路を駆動し、レバー操作量に応じた旋回、起伏、巻上げ・巻下げのトルク指令を生成する。

2.2 機構・油圧モデル

クレーンの機構特性を模擬すべく、当社では物理計算ソフトのVortexツールを用いた。クレーンの詳細な3Dモデルを準備し、それらに質量、慣性、剛性および摩擦を与え、入力されたトルク指令に対してリアルタイムに応答するモデルとした。また、ワイヤについてもVortexツール内に標準搭載されたワイヤモデルを用いており、その剛性や伸びなども考慮したものとした。さらに、地面傾斜や風など外乱の影響を模擬することも可能な仕様となっている。

クレーンの油圧回路の模擬については、油圧回路の特性を

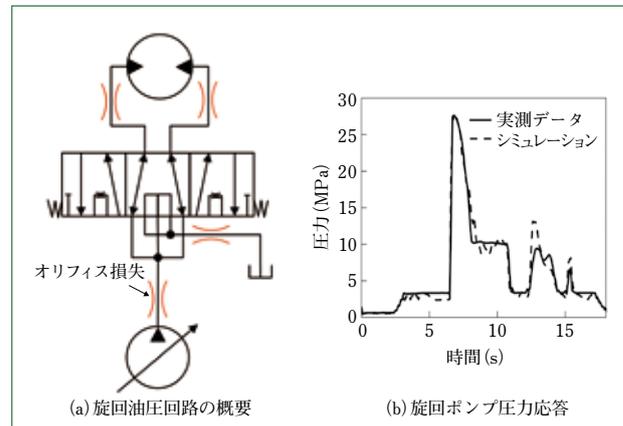


図3 旋回モータシミュレーション
Simulation result of swing motor

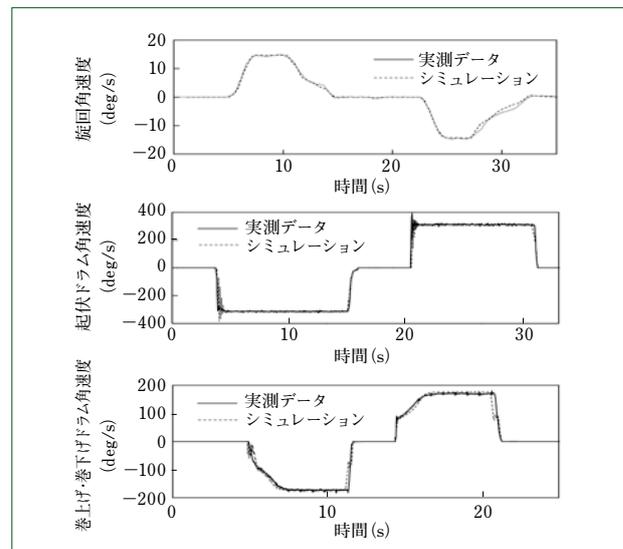


図4 シミュレーション結果(旋回, 起伏, 巻上げ・巻下げ)
Simulation results (Swing, Boom, Hoist)

数式によってモデル化し、MATLAB・SIMULINKによってそれを実装した。図2に、油圧クレーンシステムの構成を示す。

図3に、旋回モータのシミュレーション結果を示す。図3(a)は旋回油圧回路の概要であるが、管路や油圧ホースの取り回しなどに影響され、設計値とは異なった圧損特性となることがほとんどである。これに対応すべく、バルブベンチ試験データをもとに圧損特性を把握し、オリフィス損失を定義することにより再現を試みた。その結果、図3(b)に示す実測に近い旋回ポンプ圧の解析ができ、精度の高いシミュレーションが行えるようになった。

2.3 シミュレーションモデルの検証

クレーンシミュレータ精度を評価すべく、実測とシミュレーションの比較を実施した。クレーンは旋回、起伏、巻上げ・巻下げ動作を基本の動作とするので、これら3軸について確認を行った。図4に、実機とシミュレータから出力された旋回角速度、起伏ドラム角速度、巻上げ・巻下げドラム角速度の比較を示す。シミュレーション結果は実測に近い速度特性を再現しており、シミュレータとして正しく実機動作を模擬

※ [MATLAB] および [SIMULINK] は、Mathworks社の登録商標です。

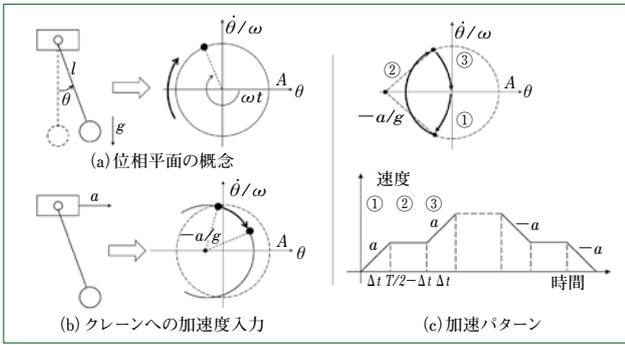


図5 位相平面
Phase plane

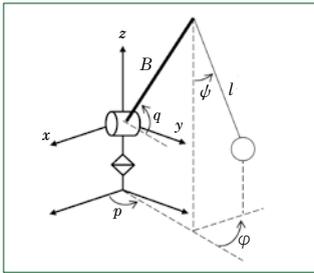


図6 クレーンモデル
Crane model

表1 シミュレーション条件
Simulation conditions

	仕様
ブーム	24 m
吊り荷	5000 kg
ワイヤ長	20 m
ブーム角	60 deg 固定
旋回角	90 deg
搬送時間	20 s



図7 シミュレーション概観
Simulation overview

できることが分かった。このことから、開発したシミュレータがクレーンのオペレータ支援システムの検証に利用できることを確認した。

3 振れ止めアルゴリズム

3.1 位相平面

並進運動を行うクレーンにおいては、位相平面において振れの状態を表現し、オープンループ制御を行う研究が進められてきた。当社においても、旋回を行うクレーンへの適用を目指し、開発を進めている⁽¹⁾。

図5(a)に、位相平面の概念を示す。ワイヤ長、重力加速度、振れ角をそれぞれ l 、 g 、 θ とすると、単振り子の運動方程式は式(1)となる。式(1)より、振れ角と角速度を導けば式(2)、(3)となる。ただし、 A は定数とする。

$$\theta'' = -\frac{g}{l}\theta = -\omega^2\theta \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta = A\cos(\omega t) \dots\dots\dots (2)$$

$$\theta'/\omega = -A\sin(\omega t) \dots\dots\dots (3)$$

これをもとに横軸に振れ角 θ 、縦軸に固有振動数 ω で正規化した角速度 θ'/ω にて位相平面が表現される。振り子運動は位相平面上で時計回りに角速度 ω で回転を行い、一周にかかる時間は振り子の周期 $T(=2\pi/\omega)$ となっている。

ここで、図5(b)に示すように、クレーンに加速度 a が加えられた場合には、運動方程式は式(4)のように変わる。これを式(5)のように式変形することで、位相平面上の円運動は、その中心が $-a/g$ だけ平行移動され、移動された中心周りの円運動に切り替えられたことが分かる。

$$\theta'' = -\frac{g}{l}\theta - \frac{1}{l}a \dots\dots\dots (4)$$

$$\left(\theta + \frac{a}{g}\right)'' = -\frac{g}{l}\left(\theta + \frac{a}{g}\right) \dots\dots\dots (5)$$

よって、適切なタイミングで必要な加速度を与えることで、円運動を原点へ向かわせることができ、運動が原点にきた際に加速度をゼロとすれば、振動を収束させることが可能となる。

この振れ角制御の理論をもとに、本開発では図5(c)に示す加減速パターンを利用することを考えた。このパターンによれば、停止中のクレーンに対して、まず時間 Δt で加速度 a を与える。次に、加速度をゼロとして時間 $T/2 - \Delta t$ だけ等速運動をさせ、最後に時間 Δt で加速度 a を与えることで、振れを発生させることなく加速を行うことができる。加速後は、任意の時間だけ等速度にて搬送を行い、加速パターンの符号を反転させた減速パターンを与えれば、停止時に振れ止めが可能となる。

3.2 クレーンにおける振れ角

3.1で詳述した振れ止めパターンの効果を検証すべく、クレーンの運動学モデルを立てる。

図6に、クレーンのモデルを示す。図のような座標系を取ることで、旋回と起伏によってブーム先端の位置は式(6)～(8)のように表すことができる。ただし、ワイヤ長、重量加速度の記号は3.1において設定したものと同一とし、さらにブーム長 B 、旋回角 p 、起伏角 q 、懸垂物の振れ角 ϕ を定義した。

$$x = B\cos q \cos p \dots\dots\dots (6)$$

$$y = B\cos q \sin p \dots\dots\dots (7)$$

$$z = B\sin q \dots\dots\dots (8)$$

よって、クレーンに対して、起伏角加速度 q'' 、旋回角加速度 p'' を与えたときのブーム先端の加速度は、式(9)～(11)のように記述される。

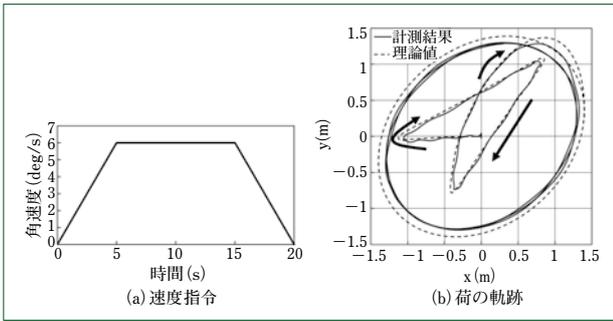


図8 搬送シミュレーション(振れ止めなし)
Transportation simulation (Not sway suppression)

$$x'' = -Bq'' \sin q \cos p - Bp'' \cos q \sin p - B(q'^2 + p'^2) \cos q \cos p + 2Bq'p' \sin q \sin p \dots\dots\dots (9)$$

$$y'' = -Bq'' \sin q \sin p + Bp'' \cos q \cos p - B(q'^2 + p'^2) \cos q \sin p - 2Bq'p' \sin q \cos p \dots\dots\dots (10)$$

$$z'' = -Bq'' \cos q - Bq'^2 \sin q \dots\dots\dots (11)$$

荷の座標系は、図6におけるブーム先端を原点とし、クレーン座標と同じ姿勢の座標系となるようにとれば、荷の重心位置の座標は、次のようになる。

$$x_p = l \sin \phi \cos \varphi \dots\dots\dots (12)$$

$$y_p = l \sin \phi \sin \varphi \dots\dots\dots (13)$$

$$z_p = -l \cos \phi \dots\dots\dots (14)$$

これをもとに、荷の回転運動における ψ 、 ϕ 方向の運動方程式を立てると、式(15)、(16)のようになる。

$$\psi'' = -\frac{1}{l} (2l'\phi' - l\phi'^2 \sin \phi \cos \phi + g \sin \phi + \cos \phi \cos \phi x'' + \cos \phi \sin \phi y'' + \cos \phi z'') \dots\dots\dots (15)$$

$$\phi'' = -\frac{1}{l \sin \phi} (2l'\phi' \sin \phi + 2l'\phi' \phi \cos \phi - \sin \phi x'' + \cos \phi y'') \dots\dots\dots (16)$$

式(15)、(16)の x'' 、 y'' 、 z'' に対し、式(9)～(11)の加速度を適用することで、旋回と起伏動作に対する荷の運動を表現することが可能となる。

ここで、本シミュレータにおいては、荷の状態を確認すべくブーム先端から鉛直真下を常に向き続けるようにカメラ機能を設定している。カメラのxy座標は、クレーン座標のx、yに対して、z軸周りに $-\pi/2$ rad回転し、さらに旋回角に応じてp rad 回転させた状態として表現される。

4 振れ止めアルゴリズムの検証

これまで述べたことをもとに、クレーンシミュレータに対して加速度を与えた際の荷の運動を確認する。シミュレーションは、図7に示すようにクレーンのフックに荷を吊った状態で行う。表1に、シミュレーション条件を示す。まず、シミュレータ上での荷の挙動が、3.2で導いた荷の運動方程式に沿うかについて確認を行った。図8に、その結果を示す。

図8(a)に示した速度パターンを旋回軸に与えた際に、ブーム先端カメラから観測された荷の重心の軌跡が図8(b)に示されている。このシミュレーションにおいて与えた速度は、

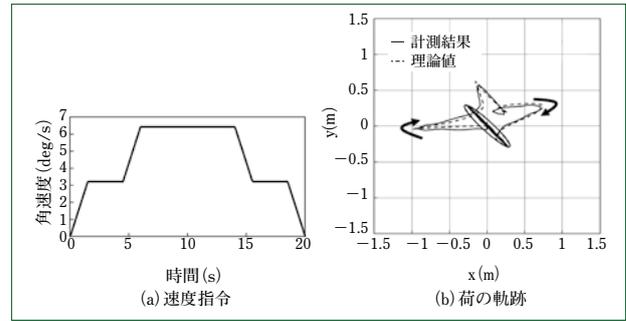


図9 搬送シミュレーション(振れ止めあり)
Transportation simulation (Sway suppression)

振れ止め効果を持つパターンとなっていないことから、軌跡を見れば、残留振動の振幅はx方向に±1.5 m、y方向に±1.5 mほど生じることが分かる。導出した運動方程式による荷の軌跡とシミュレータによる荷の軌跡を比較すると、ワイヤの伸縮や振動などによって軌跡に若干のズレは見られるものの、十分な模擬の行えるシステムとなった。

これに対し、振れ止め指令となる入力を与えたシミュレーション結果を図9に示す。図9(a)に示す旋回速度指令を入れたときの荷の軌跡が図9(b)に示されている。

旋回速度を与えている時間と、旋回する角度は図8に示したシミュレーション結果と同一であり、今回得られた軌跡を見れば、荷振れはx方向に±0.2 m、y方向に±0.2 mほど生じるものの、十分な振れ止め効果を確認することができた。

なお、振れ止め指令は並進クレーンをもとに作成しているが、旋回を行うクレーンでは、荷に対して旋回遠心力が働くことにより、完全な振れ止めとなっていないことに注意されたい。本シミュレータの作製によって、クレーンの運動が十分模擬されることが分かったことから、今後はこれを活用し、より効果の高い振れ止め指令の開発を行っていく予定である。

5 むすび

- (1) 本研究においては、振れ止め機能や自動運転などの、オペレータ支援システムの制御検証に用いることを目的としたクレーンシミュレータを作製した。
- (2) 詳細な3D機構モデルと油圧計算モデルの連成により、旋回モータ、起伏ドラム、巻上げ・巻下げドラムの速度について実機データとの一致を確認することができた。
- (3) オペレータ支援システムとして、位相平面をもとにした振れ止め指令の作製と、クレーンモデルの立式を行い、これをシミュレータへ適用することでその有効性を確認した。

今後は、クレーンの旋回時において発生する荷の遠心力の影響も加味した振れ止め指令を考案し、シミュレータでその有効性を評価する。また、シミュレータでの十分な検討の後に、実機クレーンを用いた振れ止め検証を行う予定である。

(参考文献)

- (1) Yamamoto, Y., Wu, C., Osumi, H., Yano, M., & Hara, Y. (2020), Development of an Algorithm for Crane Sway Suppression, In ISARC, Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, IAARC Publications, Vol.37, pp.584-588.