

# 小型クレーンの製作とシーケンサによる振れ制御手法の検討

新村大起\*<sup>1</sup>・三谷祐一朗\*<sup>1</sup>

## Experimental production of a compact crane and investigation of the sway control method using a sequencer

SHIMMURA Hiroki\*<sup>1</sup>, MITANI Yuuichiroh\*<sup>1</sup>

**Abstract:** This study is to investigate the effectiveness of using a sequencer for sway control of rotary cranes. There are two motivations for undertaking this work. The first motivation is the proposal from Mitsubishi Electric in August 2020 to utilize practical control equipment for the education of Numazu KOSEN students. It is beneficial for KOSEN students to utilize sequencers to study industrial control systems because sequence control technology is widely applied in the manufacturing industry. The second motivation is to improve the motion of the compact rotary crane, which was built as an exhibit for the "International Skills Festival for All, Japan 2007" by the 5th-grade students of Numazu KOSEN in 2007. The refined compact rotary crane using Mitsubishi Electric products demonstrated quick motion with high accuracy and sufficient suppression of the sway motion.

**Key Words:** Rotary crane, Sequencer, Wireless signal transmission, Sway control, Manufacturing industry

### 1. 緒言

2007年11月,ユニバーサル技能五輪国際大会が開催され,沼津市門池地区として設置された大会会場と共に,沼津高専もその会場となった.そこでその年,沼津高専機械工学科のアピールできる製作物として何が良いか,4,5年生全員にアンケート調査を行い,小型クレーンを設計・製作することが決定した.当時の5年生の有志が協力し,構想,設計,モータや部品の購入,製作を行い,沼津高専にて展示した<sup>[1]</sup>.多くの来場者が訪れ,製作を担当した学生が説明を行った.来場者には大変好評で,小型クレーンの写真を撮っていく人も見られた.技能五輪終了後もその小型クレーンは,2012年度まで毎年,沼津高専における「一日体験入学」や「高専祭」にて展示され,小学生や中学生,特にその付き添いで来場した父親に,大変好評であった.また2009年度には,社団法人日本機械学会東海支部主催の「小・中学生のためのハイテクイベント」(産業技術記念館:名古屋市)にて展示した実績もある.しかしそれらの展示の際に常に感じていたことは,クレーンにぶら下げた吊り荷がクレーンの動作時に揺れて危険なことがあり,その振動を抑制したい,ということであった.クレーンの動力源にはDCサーボモータを使用しており,2009年度より4年間にわたり,吊り荷の動作を検知するセンサを取り付けることで,フィードバック制御を試みたが,

好ましい成果は得られなかった.

2020年10月,沼津高専制御情報工学科の教員からの紹介で,三菱電機株式会社(以下,三菱電機と称す)より,三菱電機のFA制御機器を教育や研究に活用してほしい,という相談があった.2013年度より三谷は,オムロン・高専機構共同プロジェクトのメンバーとして,全国高専生を対象とした,生産システムにおける実践的な制御教育を担ってきたが<sup>[2][3]</sup>,オムロン株式会社の制御機器以外を取り扱った経験はなく,ここで受けた相談は大変興味深いものであった.そこで2021年,ユニバーサル技能五輪の展示用として製作した小型クレーンの動力を三菱電機の制御機器にすべて取り換え,荷振れ制御を検討することとした.なおその際,必要な制御機器は三菱電機より無償で借用させて頂いた.

### 2. 小型クレーンの制御のために借用した機器

まず,小型クレーンの動力や制御系をすべて交換するに際し,三菱電機より借用した製品を表1に示す.2020年10月の,三菱電機との打ち合わせにおいては,これまでに教育実績のある,2軸直交ステージおよび画像センサを用いたアライメント装置の製作を想定しており,その製作に必要な制御機器を借用した.しかしその後,上述した状況を振り返り,しばらく活用していなかった小型クレーンの改良のために使用することとした.したがって借用品の中には,小型クレーンの制振には不要な制御機器が含まれている.

\*1 機械工学科 Department of Mechanical Engineering

表1 借用品一覧

製品名	形名	台数
iQ-R 電源ユニット	R61P	1
iQ-R 基本ベース	R35B	1
iQ-R シーケンサ CPU*	R04CPU	1
iQ-R モーションユニット	RD78G4	1
iQ-R 入力ユニット	RX40C7	1
iQ-R 出力ユニット	RY40NT5P	1
GOT2000 本体	GT2510-VTBA	1
MELSOFT GT Works3	SW1DND-GTWK3-JC	1
MELSOFT GX Works3	SW1DND-GXW3-JC	1
サーボアンプ	MR-J5-10G	2
サーボアンプ	MR-J5-20G	1
サーボモータ	HK-KT053W	2
サーボモータ	HK-KT1M3W	1
モータケーブル	MR-AEP1CBL2M-A2-L	3
CC-Link IE フィールドネットワークケーブル (屋内用)	SC-E5EW-S1M	3
AlignSight 130 万画素モノクロカメラ	AS200M-561-50	1
カメラ固定用ブラケット	BKT-2000-ADAPT-00	1
Ethernet ケーブル	CCB-84901-2001-05	1
ブレークアウトケーブル	CCB-PWRIO-05	1
白色照明	IFS-2000-HBRING-WH	1
S マウントレンズ 焦点距離 8mm	LM12-08-01-F25	1
DC 電源	ACC-24I	1
DC 電源用 AC コード	CBLI-24VD,JP	1
アナログーデジタル変換ユニット	R60AD4	1

\*シーケンサ(Sequencer)は PLC(Programmable Logic Controller)を指す。

### 3. 実験装置の製作

図1に、改良した小型クレーン(以下、新クレーンと称す)の概略図を示す。2007年に製作された小型クレーン(以下、旧クレーンと称す)は、最大吊上げ荷重10kgfとしてフレームが設計されていた。そのフレームに対し、改良や制振に必要な機器の取り付けを行った。図2に、駆動機構部を示す。クレーンの旋回部、送信ユニット巻上ウインチ、ジブ起伏ウインチには、それぞれACサーボモータを用いており、モータ

タドライバをAフレーム中央部に搭載している。クレーン本体は、アルミフレームを用いたベースに固定されている。ベースにシーケンサユニット、マスターユニット、変圧器など取り付けることで、持ち運びや設置が容易な構造とし、GOT2000を用いて操作を行うようにした。表2に、今回使用した主要部品を記す。なお、ここに記した部品以外にも適宜、ケーブルや端子などの部品の追加や交換を行った。

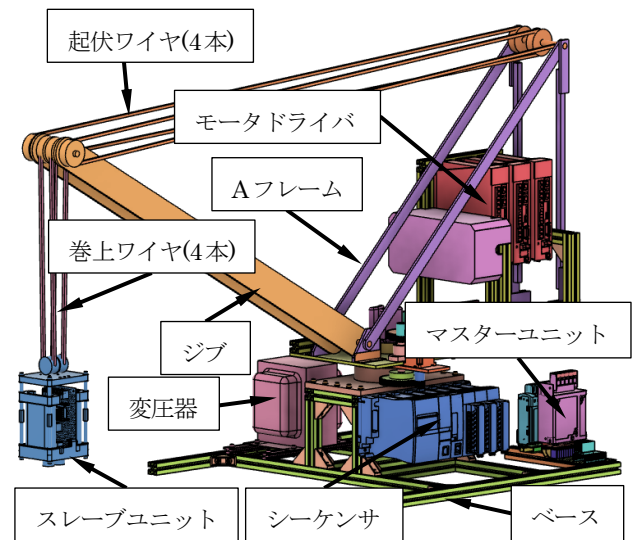


図1 製作した小型クレーン

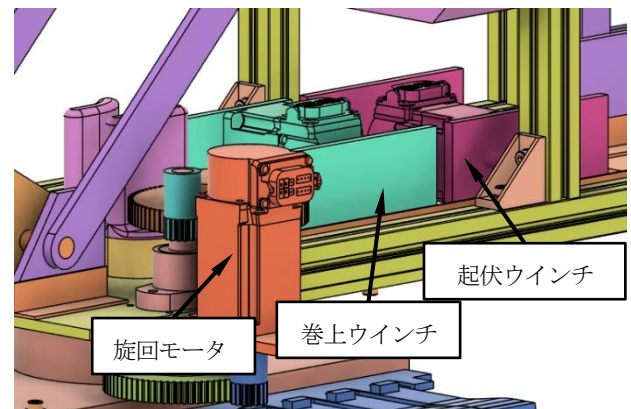


図2 駆動機構

表2 クレーンに使用した主要部品

使用場所	製品名	形名	台数
メイン制御部	iQ-R 電源ユニット	R61P	1
	iQ-R 基本ベース	R35B	1
	iQ-R シーケンサ CPU	R04CPU	1
	iQ-R モーションユニット	RD78G4	1
	iQ-R 入力ユニット	RX40C7	1

	iQ-R 出力ユニット	RY40NT5P	1
	アナログ-デジタル変換ユニット	R60AD4	1
	サーボアンプ	MR-J5-10G	2
	サーボアンプ	MR-J5-20G	1
	サーボモータ	HK-KT053W	2
	サーボモータ	HK-KT1M3W	1
	モータケーブル	MR- AEP1CBL2M- A2-L	3
	CC-Link IE フィールドネットワークケーブル (屋内用)	SC-E5EW- S1M	3
	Ethernet ケーブル	CCB-84901- 2001-05	1
ソフトウェア	MELSOFT GT Works3	SW1DND- GTWK3-JC	1
	MELSOFT GX Works3	SW1DND- GXW3-JC	1
操作パネル	GOT2000 本体	GT2510- VTBA	1
マスターユニット	ESP32-DevKitC-VE	ESP32-	1
	ESP32-WROVER-E 開発ボード 8MB	DevKitC- VE (8MB)	
	MCP4726 搭載 12 ビット D/A 変換モジュール	AE-MCP4726	3
スレーブユニット	ESP32-DevKitC-VE	ESP32-	1
	ESP32-WROVER-E 開発ボード 8MB	DevKitC- VE (8MB)	
	LSM9DS1 使用 9 軸センサーモジュール	AE- LSM9DS1- I2C	1
	モバイルバッテリー	PowerCore 10000	2
	電磁石	-	2
	昇圧型スイッチング電源モジュール LMR62421 使用キット (最大 24V 出力)	AE- LMR62421	1
NPN トランジスタ 40V 3A	2SC3422-Y	1	

表 3 に、設置した AC サーボモータの仕様を記す。ここでは 2 種類のモータを使用し、定格出力 0.15kW のモータは、最もトルクを要する旋回部に用いた。

表 3 AC サーボモータの仕様

型番	定格出力 [kW]	定格トルク [N・m]	最大トルク [N・m]	定格回転速度 [rpm]	最大回転速度 [rpm]
HK-KT053W	0.05	0.16	0.56	3000	6700
HK-KT1M3W	0.15	0.48	1.7	3000	6700

### 3. 1 旋回部減速機構の設計

旧クレーンでは、旋回ギヤと AC サーボモータのピニオンギヤとが、減速機を介さず動力伝達を行っていた。旋回ギヤの歯数  $Z_1$  は 110、ピニオンギヤの歯数  $Z_2$  は 15 であるため、減速比  $i$  は式(1)のように計算される。

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{110}{15} = 7.333 \dots \cong 7.3 \quad (1)$$

最大回転速度を 10rpm に設定した場合、モータに求められる最大回転速度は  $10 \times 7.3 = 73\text{rpm}$  となる。ここで用いた AC サーボモータの定格回転速度は 3000rpm であり、減速比によってモータに求められる最大回転速度に対し、モータの定格回転速度が大きく、そのままではモータの性能を有効に活用できない状況であった。また減速比が小さいため、モータに必要なトルクが非常に大きく、三菱電機製ソフトウェア MELSOFT MR Configurator2 によるモータのチューニング機能を用いた場合、吊り荷のない状態での負荷慣性モーメント比  $M_I$  が 300 倍以上と推測され、推奨最大値  $M_{max}$  である 20 倍を大幅に超える結果となった<sup>[4]</sup>。したがって、減速機構を用いて減速比を大きくする必要があった。しかし、クレーン本体に加えて、荷物における任意の初期状態からの、旋回時負荷慣性モーメント値を求めることは一般に困難である。ここでは、荷振れ制御を行うことを考慮し、負荷慣性モーメント比に充分余裕を持たせる設計とした。まず、吊り荷の無い状態で、負荷慣性モーメント比を 20 倍以下にするには、減速比は以下の式(2)を満たす必要がある。

$$i > \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{M_I}{M_{max}} = \frac{110}{15} \cdot \frac{300}{20} = 110 \quad (2)$$

次に、吊り荷の搬送時における振れの大きさを想定し、減速比は、それに対処できると考えられる設計とした。ただし、旧クレーン本体に搭載可能な大きさの減速機構を検討する必要があり、図3に示す機構に決定した。この機構における減速比の計算を式(3)に示す。式(2)の値を十分に上回っており、妥当な減速機構と判断した。

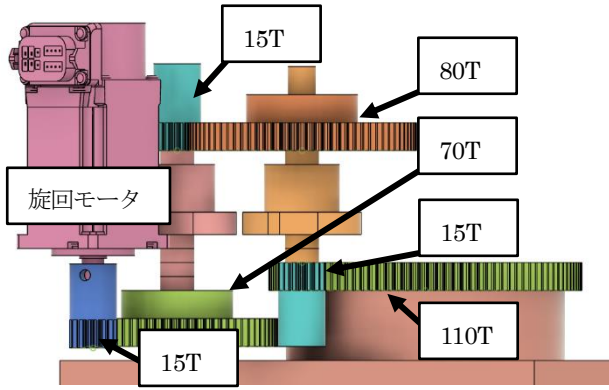


図3 モータの仕様により設計した減速機構

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{Z_3}{Z_4} \cdot \frac{Z_5}{Z_6} = \frac{110}{15} \cdot \frac{80}{15} \cdot \frac{70}{15} = 182.5185 \dots \quad (3)$$

$$\cong 182.5$$

### 3. 2 ウインチ機構の設計

旧クレーンのスレーブユニット巻上動作および、ジブ起伏動作は、ウインチ機構となっていた。動力源であるACサーボモータの仕様に合わせて、ウインチの減速比の計算を行った。詳細を以下に述べる。

#### 3. 2. 1 スレーブユニットの巻上ウインチ

図1に示したように、スレーブユニット巻上ウインチから伸びるワイヤロープは、ジブ先端およびスレーブユニットに取り付けた複数のシーブを介し、フレームに固定されている。これにより、スレーブユニットは4本のワイヤロープにより支持され、したがって巻取りウインチにかかる荷重は、スレーブユニットとワークの合計重量の1/4となる。また、ウインチの減速比*i*は63:15であり、ウインチのドラムの直径*d*は30mmである。スレーブユニットの重量は0.78kgであり、ここで想定するワークの最大重量が0.6kgであるので、巻上荷重はその合計の*F*=1.38kgfとなる。このとき、ACサーボモータにかかるトルク*Tr*[N・m]は、以下の式(4)で表される。ただし、ワイヤの重量は無視できるものとし、重力加速度は*g*=9.8m/s<sup>2</sup>とする。

$$Tr = \frac{F}{4} \cdot g \cdot \frac{1}{i} \cdot \frac{d}{2} = \frac{1.38}{4} \cdot 9.8 \cdot \frac{15}{63} \cdot \frac{30}{2 \cdot 10^3} \quad (4)$$

$$= 0.012075 \dots \approx 0.012 \text{ N} \cdot \text{m}$$

ACサーボモータの定格トルクは0.16N・mであり、荷振れによるワイヤ張力の増加にも充分対処可能と判断した。また、ワイヤロープに加わる張力*T*[N]は以下の式(5)で表される。

$$T = \frac{F}{4} \cdot g = \frac{1.38}{4} \cdot 9.8 = 3.381 \approx 3.4 \text{ N} \quad (5)$$

ワイヤロープの直径は0.81mmであり、耐荷重は90Nであるため、こちらも十分な余裕があるといえる。

#### 3. 2. 2 ジブの起伏ウインチ

図1に示したように、ジブ起伏ウインチから伸びるワイヤロープは、Aフレーム上部に取り付けられたシーブ、ジブ先端に取り付けられたシーブを介してジブを起伏させる。ここで、ワイヤロープに最大の張力がかかるのはジブ角度が最小の時であり、本クレーンにおける最小角度はθ=0度(水平)である。このとき、ワイヤロープとジブの角度は20度である。ジブ角度が0度の時、ジブの自重によってジブ先端のシーブに作用する荷重は1.05kgである。巻上荷重は1.38kgであるため、起伏時にかかる垂直方向の荷重は、その合計の2.43kgとなる。3. 2. 1にて述べたように、ワイヤロープ1本にかかる張力は1/4、ウインチの減速比*i*は63:15、ウインチのドラム径*d*は30mmであるので、ACサーボモータにかかるトルク*Tr*[N・m]は、以下の式(6)で表される。

$$Tr = \frac{F}{4} \cdot \frac{1}{\sin \theta} \cdot g \cdot \frac{1}{i} \cdot \frac{d}{2}$$

$$= \frac{2.43}{4} \cdot \frac{1}{\sin 20} \cdot 9.8 \cdot \frac{15}{63} \cdot \frac{30}{2 \cdot 10^3} \quad (6)$$

$$= 0.0622 \dots \approx 0.062 \text{ N} \cdot \text{m}$$

ACサーボモータの定格トルクは0.16N・mであるため、問題ないといえる。また、このときワイヤロープに加わる張力*T*[N]は以下の式(7)で表される。

$$T = \frac{F}{4} \cdot \frac{1}{\sin \theta} \cdot g = \frac{10}{4} \cdot \frac{1}{\sin 20} \cdot 9.8 \quad (7)$$

$$= 9.8854 \dots \approx 9.9 \text{ N}$$

ワイヤロープの直径は 0.81mm であり、使用荷重は 90N であるため、十分な余裕があるといえる。

### 3. 3 制振制御プログラムの概要

本クレーンは、三菱電機のシーケンサユニットを用いて運転しており、シーケンサのプログラムには GX Works3 を用いている。主に FBD (Function Block Diagram) を用いており、一部に ST (Structured Text) 言語を使用して制御用プログラムを作成し、シーケンサに実装した。図 4 に、プログラムの動作概要を示す。各軸始動後、アナログ→デジタル変換ユニットに入力されたセンサの姿勢角度信号から、適切な速度や加速度などを制御理論に基づき計算し、サーボドライバに対してシーケンサより運転命令を与えている。

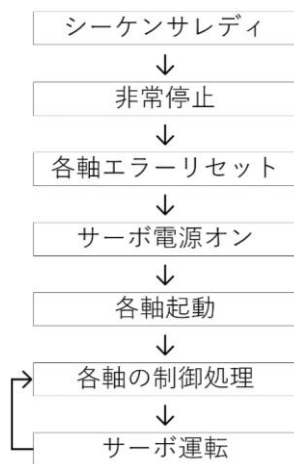


図 4 制振制御プログラムの動作概要

### 3. 4 マイコンを用いた吊り荷の姿勢角度の測定

フィードバック制御を用いた荷振れ制御を行う際、吊り荷の振れ角や振れ方向を取得する必要がある。そこで、吊り荷に角加速度センサまたは加速度センサを取付け、吊り荷の姿勢角度を計算し、フィードバックすることを検討した。しかし、有線による信号通信を行った場合、巻上ワイヤと平行して取り付けられた信号線に屈曲が生じる。これにより、巻き上げ時および旋回時において、吊り荷に不規則な動作が生じ、荷振れ制御に支障が出るのが想定されたため、センサ信号を無線通信により取得することとした。吊り荷をぶら下げるワイヤ先端部に、センサやその電源、およびマイコン等を含むセンサ信号送信用としてのスレーブユニットを設置した。また、クレーンの土台にもマイコン等を取り付け、受信用マスターユニットとし、マイコン同士で相互に通信を行うことでセンサの情報を取得した。

マイコンは、Espressif Systems の ESP32-DevKitC-VE を用いており、Arduino IDE を用いてソースコードを記述した。

荷振れを検知するセンサとして、ST マイクロの複合センサ LSM9DS1 (以下、多軸センサと称す) を用いた。スレーブユニットのマイコンと多軸センサ間は I<sup>2</sup>C 通信を行っており、10ms ごとに多軸センサから角加速度・加速度値それぞれ 3 軸の情報が取得できる。センサにより取得した数値は、マスターユニットのマイコンと Bluetooth 通信により伝達した。マスターユニットは角加速度、加速度値から Madgwick フィルタを用いて吊り荷の姿勢角度を算出しており、姿勢角度は、ピッチ角、ロール角、ヨー角の 3 軸の角度によって表される。図 5 に、吊り荷を鉛直方向より約 12.7 度傾けた状態から、自由振動させた際のロール角の時間的変化を示す。算出された振れ角度の最大値および最小値が、傾けた角度とほぼ同じであること、振れ角度に低周波成分によるドリフト現象が生じていないことから、この信号を荷振れ角として用いることとした。

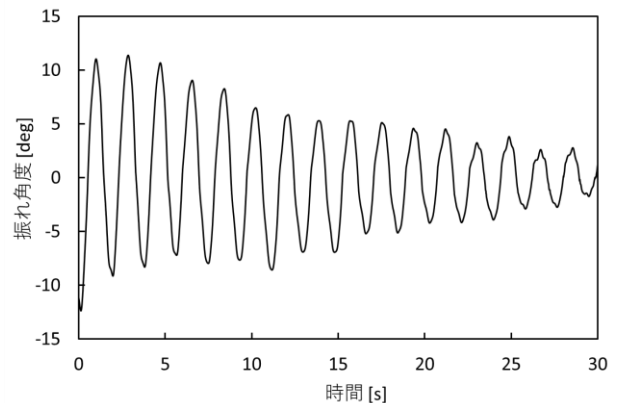


図 5 Madgwick フィルタによる姿勢角度の算出

### 3. 5 マスターユニットとシーケンサユニットの通信

マスターユニットからシーケンサユニットへの信号の伝達には、アナログ通信を用いた。これは、マイコンとシーケンサとをデジタル通信により接続することが困難であったためである。マスターユニットに搭載した D/A コンバータ (以下、DAC と称す) を用いて、吊り荷の姿勢角度をアナログ信号として、シーケンサに接続したアナログ→デジタル変換ユニットに入力した。スレーブユニットにて取得したセンサ信号を、シーケンサに伝達し、サーボモータを運転する無線フィードバックシステムにおける処理の流れを図 6 に示す。

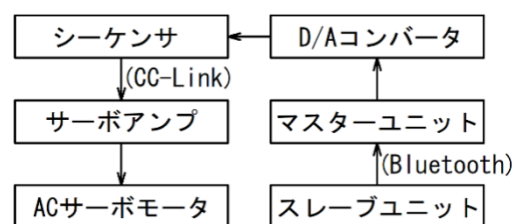


図 6 無線フィードバックシステム





- (4) スレーブユニットのマイコンが、電磁石を駆動する回路を ON にすることで、電磁石に電圧が印加される。

なお、定格が 12V の電磁石を使用した。12V を印加するとスレーブユニットのフレームに使用した樹脂 (PLA) が熱により変形したため、ここでは、熱により変形しないことを確認した電圧 8V に抑えた。電磁石の電源としてモバイルバッテリーを使用しており、その出力電圧 5V を昇圧型スイッチング電源モジュールによって約 8V に昇圧して用いた。なお、ここで使用したモバイルバッテリーは、一定時間負荷がない場合、給電を自動停止する仕様になっており、電磁石を OFF にして時間が経過すると、電磁石を駆動する回路が停止する問題があった。そこで、電磁石の駆動回路と並列に抵抗を接続し、電磁石を OFF とした場合でも、モバイルバッテリーに負荷がかかるようにした。なお、負荷として必要な抵抗値は 44Ω 程度が最大値であったため、220Ω の抵抗を 5 個、並列接続とした。これは、用いた抵抗の定格電力 1/4W を満たすためである。つまり、抵抗における電力 = (バッテリー出力電圧 V)<sup>2</sup> / 抵抗値 R = (5.2V)<sup>2</sup> / 44Ω ≒ 0.615W であり、5 個の抵抗それぞれにおける電力 = 全体の電力 / 個数 = 0.615 W / 5 = 0.123W と求まるので、使用した抵抗の定格電力 1/4 (=0.25) W の半分以下であり、問題ないといえる。

#### 4. フィードフォワード制御による荷振れの抑制

##### 4. 1 シーケンサにおける制御のための処理

Bang-bang 制御理論を用い、クレーン旋回時にフィードフォワード制御を行った<sup>5)</sup>。すなわち、吊り荷の振れ周期 T[s] と等しい時間で、クレーンのブームの旋回方向における等角加速・減速度運動を行い、荷振れの抑制を図った。図 9 に Bang-bang 制御を行った際の、ブームの角速度の時間変化を示す。なお、この時の加速度は、ブームの目標旋回角度より決定した。

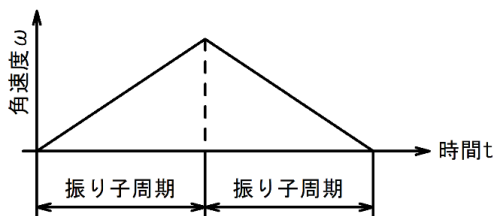


図 9 Bang-bang 制御時の角速度の時間変化

シーケンサにおいて、次に示す処理を順に行い、旋回モータを駆動した。

- (1) 旋回モータのエンコーダから、クレーンの現在の旋回角度を取得し、目標旋回角度との差から、必要な旋回角度  $\theta$  [deg.] を計算する。

- (2) 巻上ウインチに使用している巻上モータのエンコーダ信号から、巻上ワイヤの長さを求める。
- (3) 事前に、巻上ワイヤ長に対する荷振れの周期を測定し、(2) で求めた巻上ワイヤの長さより、現在の荷振れ周期 T[sec] を算出する。
- (4) 式(8)を用い、クレーンに要求される旋回角加速度  $\dot{\omega}$  [deg/s<sup>2</sup>] を導出する。

$$\dot{\omega} = \frac{\theta}{T^2} \quad (8)$$

- (5) 導出した角加速度値を用い、ファンクションブロック MC\_MoveAbsolute によって、クレーンを旋回させる。なお、モータの減速度は加速度と同一であり、ジャークは 0 とした。

#### 4. 2 フィードフォワード制御実験

前節に述べた制御方法を用い、クレーンを 40 度旋回させた際の荷振れを測定した。図 10 に結果を示す。赤と黒の実線がそれぞれ、フィードフォワード制御を行った場合の、吊り荷の加速度の絶対値およびクレーンの旋回速度、青と黒の破線が、フィードフォワード制御を行わずに等しい時間をかけてクレーンを旋回した場合の、それぞれの結果である。フィードフォワード制御を行うことで、吊り荷の振れが 1/3 程度に抑制されたことがわかる。

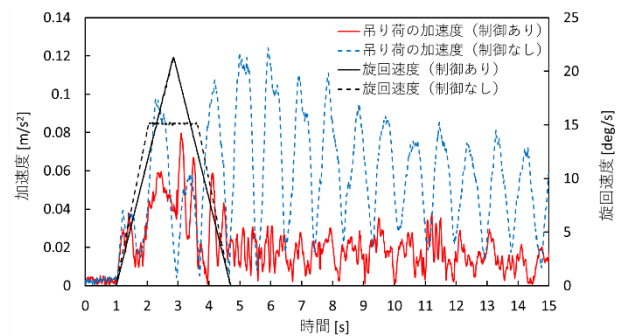


図 10 フィードフォワード制御の結果

#### 5. フィードバック制御による残留振動の制振

##### 5. 1 シーケンサにおける制御のための処理

吊り荷角度の直接速度フィードバック制御を用い、クレーン旋回後の残留振動の制御を行った。スレーブユニットの振れ角にフィードバックゲインを掛け、旋回角速度の目標値とすることで制振効果が得られる。シーケンサでは、以下に示す処理を行い、旋回モータを駆動した。

- (1) アナログ→デジタル変換ユニットに入力された電圧か

ら、吊り荷の振れ角を計算する。

- (2) 吊り荷のロール角は、クレーン旋回円の接線方向の角度であり、旋回時における吊り荷の振れ角とほぼ一致する。ここでは、ロール角を振れ角とみなし、その値にフィードバックゲインを掛け、旋回モータにおける目標旋回速度とする。
- (3) 得られた目標旋回速度を用い、ファンクションブロック MC\_MoveVelocity によって、クレーンを旋回させる。また、なお、MC\_MoveVelocity における目標値の連続更新を有効に設定し、クレーンが滑らかに動作するようにした。また、モータの加速度、減速度、ジャークは 25000 に設定し、その際のバッファモードは 0 とした。

## 5. 2 残留振動のフィードバック制御実験

上記の制御方法を用い、吊り荷における残留振動のフィードバック制御実験を行った。吊り荷が静止した状態から 30 度クレーンを旋回させることで吊り荷に揺れを与え、旋回が終了してクレーンが停止した 3 秒後に制御を開始した。そのときの、吊り荷のロール角の時間変化を図 11 に示す。赤と黒の実線がそれぞれ、制御を行った場合のセンサのロール角およびクレーンの旋回角度であり、青と黒の破線が制御を行わなかった場合である。7 秒付近から制御を開始しており、それ以降ロール角が急激に減少し、振幅は 1/15 程度に抑制されていることが分かる。すなわち、十分な残留振動の制御効果が確認できたといえる。

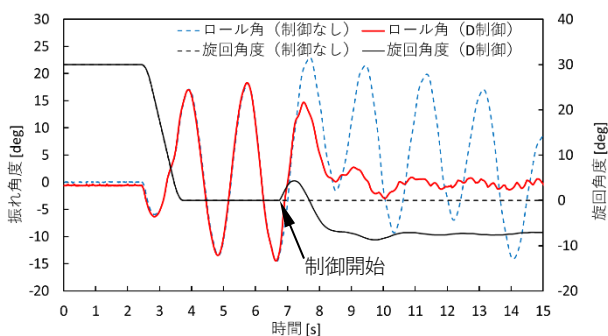


図 11 フィードバック制御の結果

## 6. 結言

2020 年度の、三菱電機からの制御機器を高専における教育・研究に活用してほしいという要望を受け、2007 年度に開催されたユニバーサル技能五輪国際大会の展示用として製作された小型クレーンの制御部および駆動部を改良した。三菱電機製のシーケンサをはじめ、サーボモータやドライバ、入出力ユニット等を活用し、2007 年に製作されたクレーンの動作効率や精度を飛躍的に向上させ、吊り荷の制振に成功した。まず、小型旋回クレーンの駆動部のモータをすべて、DC サ

ーボモータから AC サーボモータに取り換え、AC サーボモータの性能を十分に発揮する改良設計を行った。改良したクレーンの動作性能を確認するために、クレーンの動作軌道を生成することで、吊り荷の振れを抑制することができる、フィードフォワード制御を試みた。旋回運動における加速度制御を行うことで、クレーンが旋回して停止した際の荷振れを十分に抑制できることを確認した。

次に、マイコンを用いた無線通信によって吊り荷の振れ角を三菱電機の制御機器にフィードバックし、クレーンを駆動するシステムを構築した。旋回動作終了時の吊り荷の残留振動を抑制することを目指して、旋回動作を直線運動に近似し、振れ制御を行った。吊り荷の直接速度フィードバック制御を用いることで、残留振動を十分に抑制することにも成功した。

今後は、制御手法を旋回運動に拡張し、2 次元的な吊り荷の制振技術について検討する。まずは旋回運動後の、旋回平面内における残留振動を抑制する。本報で述べた、吊り荷の直接速度フィードバック制御則を利用し、クレーンの旋回運動と同時に、ブームの上下運動と吊り荷の巻き上げ・下ろし動作とを組み合わせることで、平面内での制振が可能と考えている。ただしその場合、吊り荷の制振後の位置は制御できず、目標位置に吊り荷を搬送することができない。そこで次のステップとして、クレーンの位置制御を考慮した制振制御則を構築し、シミュレーション及び実験にてその効果を検証する予定である。

## 謝辞

本研究のために、多くの制御機器を無償で貸し出して頂いた、三菱電機 FA システム事業部の方々に感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 望月一輝, 三谷祐一朗, PSoC マイコンを用いた小型クレーンの製作と制御, 日本機械学会東海学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, pp.124-125, (2007)
- [2] 三谷祐一朗, 谷埜博基, 堀純也, 金田直人, 高難易度な生産技術コンテストによる PBL 型次世代技術者養成プロジェクト, 公益社団法人日本設計工学会 学会誌「設計工学」, 51 巻, 10 号, pp.737-746, (2016)
- [3] Y. Mitani, Y. Kami, T. Sato, Y. Nishi, Educational Training Japan-Korea Joint Program for the Manufacturing Control System, The 10th International Symposium on Advances in Technology Education, (2016)
- [4] 三菱電機株式会社, MR-J5 ユーザーズマニュアル (調整編)
- [5] 吉田, 十河, クレーンのリアルタイムバンバン制御, 総合工学, 第 22 巻, pp.1-6, (2010)