

< 開発・技術ノート >

ダイナミクスモデルを考慮に入れた コンテナクレーンの高精度位置姿勢制御に関する研究

山根 健治*・河野 進**・田中正吾***

Automatic Attitude Control of Container Crane Based on a Dynamics Model

Kenji YAMANE*, Susumu KOUNO** and Shogo TANAKA***

The authors previously proposed a maintenance-free automatic control system for a lifter type crane. The system realized the optimal control based on a double pendulum model of the lifter.

The paper proposes an on-line automatic control system for a container type crane which is more difficult to be precisely controlled for its complicated structure. To realize the control, the dynamic model of the spreader-container on not only the sway along the direction of progress but also the rotating motion around the vertical line is adopted, and the system uses three rotary encoders for the trolley and two sheaves (small type trolleys), one tacho-generator for the trolley, and two servo-type accelerometers for the spreader to extract useful information on the control. The usefulness of the proposed system is shown by numerical simulations.

Key Words: attitude measurement and control, container crane, dynamics, intelligent sensing, Kalman filter, LQG control

1. ま え が き

港湾における大型コンテナの荷役においては、コンテナクレーンが用いられる。このクレーンでは、コンテナがトロリーから4本のワイヤを通して吊り下げられるため、トロリーを移動、あるいは目標位置で停止するとき、コンテナの積み荷のバランスから生じるワイヤ長の不均衡や風の影響等により、進行方向に振れるだけでなく、コンテナ重心を中心としたねじれ振動が生じる。したがって、作業員へのリスクの回避および稼働率の向上のため適切な制御が望まれる。このことから、トロリーの停止時にコンテナの振れを高速・高精度に抑えることは重要な研究テーマのひとつである。しかしながら、これまでは進行方向の振れについての研究はあるが、ねじれ振動の抑制をも考慮した計測、制御の問題に取り組んだ研究はみられない。^{1)~5)}

通常、クレーンの姿勢計測方法としては、光学系を用いた画

像処理方式が考えられるが、ある程度所望の結果は得られるものの、設備およびメンテナンスの両面においてコストが増大し得策ではない。またこの方式では、多くの演算時間を必要とするためオンライン計測に不向きであるだけでなく、自然光による陰影が大きな外乱となり、コンテナの姿勢計測ができない場合もしばしば生じる。また、他にポテンショメータによる振れ計測なども考えられるが、ポテンショメータは一般的に耐久性が劣り、長期間使用できない欠点がある。そこで、確実に計測ができ、安価で、かつメンテナンスが容易で耐久性のある検出法として考えられるのが加速度センサを使用する方法である。このような観点から田中らは先に、リフター形式クレーンの高効率化および完全無人化を念頭に、二重剛体振り子モデルにサーボ型加速度センサとカルマンフィルタを組み合わせ、メンテナンスが容易で低コスト、かつ高速・高精度なリフター姿勢オンライン計測システムを提案した。⁶⁾そして、状態フィードバック制御により、停止位置と合わせ、停止時の振れ止めを高精度に行う制御方式を考えた。

以上のことから、本稿においても2個の加速度センサを適切に配置し、これによりトロリー停止時、進行方向の振れおよびねじれ振動を共に抑えるコンテナクレーンの姿勢計測および制御を考えることとする。なお、コンテナクレーンではコンテナを直接固定するスプレッドなるものが設けられている(次章 Fig.1 参照)ので、コンテナ・スプレッドは単一剛体

* 宇部工業高等専門学校 宇部市常盤台 2-14-1

** 三菱重工業(株)広島研究所 広島市西区観音新町 4-6-22

*** 山口大学工学部 宇部市常盤台 2-16-1

* Ube National College of Technology, Ube

** Mitsubishi Heavy Industry Ltd., Hiroshima R&D Center, Hiroshima

*** Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube
(Received April 9, 2004)

振り子モデルで十分正確に表せ、さらにスプレッドが4本のワイヤで吊り下げられているためコンテナの振れは比較的小さいなどの利点がある。しかし、先述したような種々の理由により、コンテナ重心を中心としたねじれ振動が生じるという新たな問題が現れる。このようなねじれ振動を抑えるため、トロリー上に2台のシーブ (sheave: 小型トロリ) を設置し、トロリーとこの左右シーブを駆動することにより、オペレータが経験的にねじれ抑制することが行われていた。しかし、あまり良好な結果は得られておらず、長期的には熟練者の不足あるいはコストダウンなどへの対処から、クレーン操作の完全自動化が望まれて来た。

そこで本稿では、このような目標を実現すべく、スプレッドの両端に進行方向に向けて2個のサーボ型加速度センサを設置し、これによりコンテナのねじれ情報およびトロリー進行方向のコンテナ振れ情報を同時に採取することを考え、トロリー停止時、コンテナ進行方向の振れだけでなく、ねじれ振動も併せて効果的に抑制する計測・制御方式を提案する。

2. トロリー・コンテナ系のモデリング

2.1 トロリー・コンテナ系のダイナミクス

まず対象とするコンテナクレーンであるが、Fig.1に示すように移動用トロリーの上部にねじれ振れを抑えるための左右のシーブが2台あり、それぞれのシーブから2本のワイヤが吊り下げられている。この計4本のワイヤの下端には、スプレッドが吊り下げられており、これにコンテナが固定される。

Fig.1からも明らかのように、コンテナ・クレーンの場合にはスプレッドに直接コンテナが固定されるので単一剛体振り子モデルを考えればよい。ただし、この場合は進行方向の振れに加え、コンテナの重心を中心とし鉛直方向を軸とするねじれ振動も考慮して、Fig.2のようにモデル化する。図で M'_0 はトロリーの質量、 M'_1 、 M'_2 はそれぞれ左右のシーブの質量、 l はスプレッド・コンテナの重心までの等価的ワイヤ長、 m はスプレッドとコンテナの部分を含めた質量、 I はその慣性モーメントを表している。いま、Fig.2に示すように、トロリーの進行方向を x 軸、これに垂直な鉛直上方向を y 軸、 x, y 軸に垂直な水平方向の軸を z 軸に選び、トロリー・コンテナ系の運動方程式を求める。コンテナ系の構造から z 軸方向にはほとんど振動が生じないので、先の報告同様⁶⁾、 x, y 平面内のトロリー・コンテナ系の運動方程式を求める。

トロリーの変位を x_0 、左右シーブのトロリー中心からの変位をそれぞれ x_1 、 x_2 、トロリー中心からのコンテナ中心の水平方向変位をそれぞれ d_1 、 d_2 、コンテナのねじれ角度を φ とすれば、Fig.2 の等価モデルから以下の運動方程式が立てられる。

$$M'_0 \ddot{x}_0 = f'_0 - f'_1 - f'_2 \quad (1)$$

$$M'_1 (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_1) = f'_1 + K(d_1 - x_1) \quad (2)$$

$$M'_2 (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_2) = f'_2 + K(d_2 - x_2) \quad (3)$$

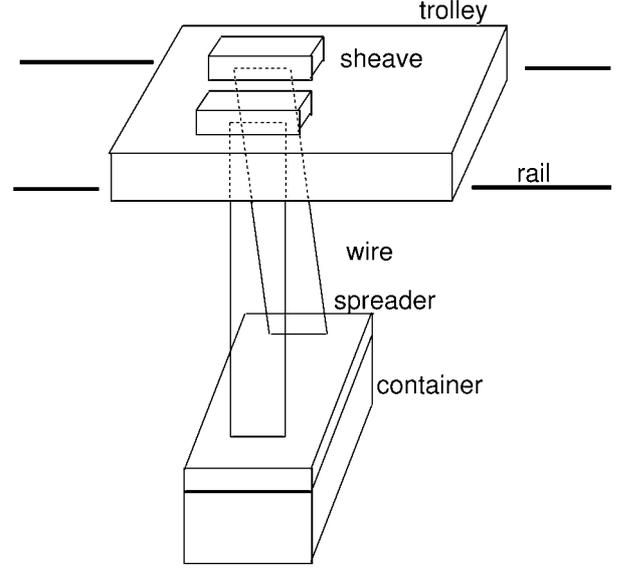


Fig. 1 An outline of container type cranes

$$m(\ddot{x}_0 + \frac{\ddot{d}_1 + \ddot{d}_2}{2}) = -K(d_1 - x_1) - K(d_2 - x_2) \quad (4)$$

$$I\ddot{\varphi} = \frac{Kr}{2}(d_2 - x_2) - \frac{Kr}{2}(d_1 - x_1) \quad (5)$$

ただし、 φ は微小のため、 d_1 、 d_2 を用いて次のように近似される。

$$\varphi \cong (d_1 - d_2)/r \quad (6)$$

ここで K は等価バネ定数で、以下のような関係式

$$\begin{aligned} m(\frac{\ddot{d}_1 + \ddot{d}_2}{2}) &= -\frac{mg}{2} \sin \theta_1 \cos \theta_1 - \frac{mg}{2} \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\ &\cong -\frac{mg}{2} \frac{d_1 - x_1}{l} - \frac{mg}{2} \frac{d_2 - x_2}{l} \\ &= -(\frac{mg}{2l})(d_1 - x_1) - (\frac{mg}{2l})(d_2 - x_2) \quad (7) \end{aligned}$$

により、コンテナ・スプレッドの質量 m と等価ワイヤ長 l を用いて $K = mg/(2l)$ により与えられる。なお、(7) 式において θ_1, θ_2 は、Fig.2に示すように、左右ワイヤの鉛直下方向となす角度である。

一方、各モータ系において実際に発生する駆動力は、トロリーおよび各シーブのモータへの直接入力からモータの回転などに要するエネルギーを差し引いたもので与えられ、 $f'_i = f_i - M_i'' \ddot{x}_i$ ($i = 0, 1, 2$) となる。ここで、 f_i はトロリーおよび各シーブへの実際の直接入力、 M_i'' は当該モータの等価質量と呼ばれるものであり、各モータのエネルギーの関係式から得られる。つまり、各モータの有するエネルギーは

$$\begin{aligned} E_i &= \frac{1}{2} M_i^* V_i^2 + \frac{1}{2} J_i \omega_i^2 \\ &= \frac{1}{2} M_i^* V_i^2 + \frac{1}{2} J_i (\frac{2\pi}{L_i} V_i)^2 \\ &= \frac{1}{2} (M_i^* + J_i (\frac{2\pi}{L_i})^2) V_i^2 \quad (8) \end{aligned}$$

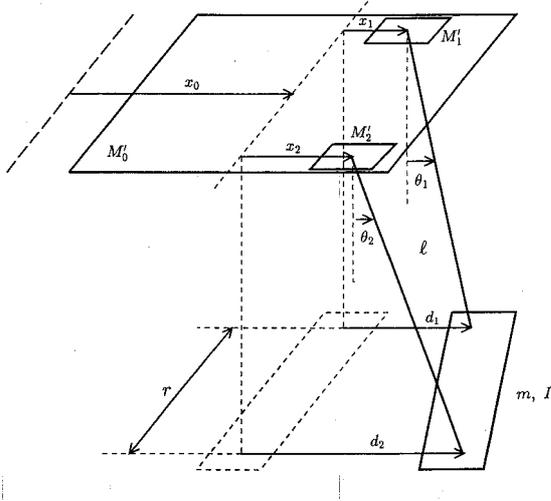


Fig. 2 The model of container type cranes

と表されることから、各モータの等価質量 M_i'' は

$$M_i'' = J_i \left(\frac{2\pi}{L_i} \right) \quad (9)$$

で与えられる。ここに、 M_i^* , ω_i , J_i , L_i は、各モータの質量、回転角速度、慣性モーメントおよびリード長である。

以下においては、我々が直接与えることができるより実際的な直接入力 f_i を用いることにする。いま、(1) ~ (5) 式を $\ddot{x}_0, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \ddot{d}_1, \ddot{d}_2$ について解けば、

$$\ddot{x}_0(t) = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 d_1 + a_4 d_2 + b_1 f_0 + b_2 f_1 + b_3 f_2 \quad (10)$$

$$\dot{x}_1(t) = a_5 x_1 + a_6 x_2 + a_7 d_1 + a_8 d_2 + b_4 f_0 + b_5 f_1 + b_6 f_2 \quad (11)$$

$$\dot{x}_2(t) = a_9 x_1 + a_{10} x_2 + a_{11} d_1 + a_{12} d_2 + b_7 f_0 + b_8 f_1 + b_9 f_2 \quad (12)$$

$$\ddot{d}_1(t) = a_{13} x_1 + a_{14} x_2 + a_{15} d_1 + a_{16} d_2 + b_{10} f_0 + b_{11} f_1 + b_{12} f_2 \quad (13)$$

$$\ddot{d}_2(t) = a_{17} x_1 + a_{18} x_2 + a_{19} d_1 + a_{20} d_2 + b_{13} f_0 + b_{14} f_1 + b_{15} f_2 \quad (14)$$

となる。ただし、係数 a_i ($1 \leq i \leq 20$) および b_i ($1 \leq i \leq 15$) の定義は付録に示す。

いま、状態ベクトルとして、 $\mathbf{x} = (x_0, \dot{x}_0, x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2, d_1, \dot{d}_1, d_2, \dot{d}_2)^T$ を導入すれば、(10) ~ (14) 式は次のように書き表せる。⁶⁾

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (15)$$

ただし、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 & a_2 & 0 & a_3 & 0 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_5 & 0 & a_6 & 0 & a_7 & 0 & a_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_9 & 0 & a_{10} & 0 & a_{11} & 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{13} & 0 & a_{14} & 0 & a_{15} & 0 & a_{16} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{17} & 0 & a_{18} & 0 & a_{19} & 0 & a_{20} & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & b_1 & 0 & b_4 & 0 & b_7 & 0 & b_{10} & 0 & b_{13} \\ 0 & b_2 & 0 & b_5 & 0 & b_8 & 0 & b_{11} & 0 & b_{14} \\ 0 & b_3 & 0 & b_6 & 0 & b_9 & 0 & b_{12} & 0 & b_{15} \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

である(ここに、 T は転置を表す)。なお、入力 \mathbf{u} は

$$\mathbf{u} = (f_0, f_1, f_2)^T \quad (18)$$

で定義される。これがトロリー・コンテナ系の基本的に従うダイナミクスであるが、実際には(1) ~ (14) 式を導出する際の近似誤差、若干の空気抵抗、ワイヤとの摩擦、構造体の微小振動、モータの制御特性、トロリー駆動力の飽和など、各種要因に基づく影響があり、したがって、トロリー・コンテナ系の運動方程式は正確に(15)式で表せるわけではない。これらの影響については制御目的との兼ね合いの上から実機による実験などにより適切に考慮する必要があるが、本稿では従来ほとんど考えられていないねじれ振動を含むコンテナクレーンの振れ止め制御による自動運転を可能にするための基本的な計測制御系の枠組みを得るという目的から、平均値がゼロ、分散 σ_i^2 ($1 \leq i \leq 5$) が適切な値の白色ガウス雑音 $w_i(t)$ ($1 \leq i \leq 5$) を(15)式のダイナミクスに加え、(15)式で表現できない部分を補正するようにした。つまり、次のダイナミクスを採用した。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{\Gamma}\mathbf{w} \quad (19)$$

ここに、 $\mathbf{w} = (w_1(t), w_2(t), w_3(t), w_4(t), w_5(t))^T$ であり、 $\mathbf{\Gamma}$ は位置や角度の変位が滑らかに変化するように次のような定数行列とした。

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

2.2 加速度センサの配置とその出力

本稿の手法では、コンテナの進行方向の振れとねじれ振れを併せて計測するため、2個のサーボ型加速度センサをスプレッドの左右両端にそれぞれ進行方向に向けて配置した。進

行方向に対して左側 (d_1 側) に設置した加速度センサの x 座標を x_a とすれば, 加速度センサ設置点の x 方向の加速度は $\ddot{x}_a = \ddot{x}_0 + \ddot{d}_1$ となる. なお, y 方向に関してはワイヤ長 l が長く, その方向の加速度は微小であるので無視した. したがって, 状態ベクトル $\mathbf{x}(t)$ を用いて加速度センサの出力 $y_1(t)$ を書き表すと, (10),(13) により, 次のようになる. ^{6), 10)}

$$y_1(t) \cong -K\left(\frac{1}{m} + \frac{r^2}{4I}\right)x_1(t) - K\left(\frac{1}{m} - \frac{r^2}{4I}\right)x_2(t) \\ + K\left(\frac{1}{m} + \frac{r^2}{4I}\right)d_1(t) + K\left(\frac{1}{m} - \frac{r^2}{4I}\right)d_2(t) \quad (21)$$

なお, ここでは加速度センサの原理により, センサ内の質点にはこの加速度と逆方向の加速度が加わることから, 出力値に負符号をつけた. また, 右側に設置した加速度センサに対しても全く同様にして出力 $y_2(t)$ を求めることができる.

トロリー・コンテナ系の位置および姿勢情報を得るセンサとして, ほかにロータリー・エンコーダと速度発電機(タコジェネレータ)がある. ロータリー・エンコーダはトロリーおよび左右のシーブに取り付け, これらの位置情報を得る. またタコジェネレータは, トロリーのみに設置し, その移動速度 \dot{x}_0 を測定する. 各センサの配置場所を Fig.3 に示した.

以上の6つのセンサを用いるとして, 状態ベクトル $\mathbf{x}(t)$ の観測方程式を作れば, 観測ベクトル $\mathbf{y} \triangleq (x_0, \dot{x}_0, x_1, x_2, y_1, y_2)^\top$ が次式で与えられる.

$$\mathbf{y} = H\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (22)$$

ここに, H は

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -K\left(\frac{1}{m} + \frac{r^2}{4I}\right) & -K\left(\frac{1}{m} - \frac{r^2}{4I}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -K\left(\frac{1}{m} - \frac{r^2}{4I}\right) & -K\left(\frac{1}{m} + \frac{r^2}{4I}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K\left(\frac{1}{m} + \frac{r^2}{4I}\right) & K\left(\frac{1}{m} - \frac{r^2}{4I}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K\left(\frac{1}{m} - \frac{r^2}{4I}\right) & K\left(\frac{1}{m} + \frac{r^2}{4I}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^\top \quad (23)$$

であり, \mathbf{v} は観測雑音ベクトルを表す.

3. コンテナクレーンの姿勢計測と制御

3.1 コンテナの姿勢計測

ダイナミクス(19)式をサンプリング周期 ΔT で離散化すれば, ^{6), 9)}

$$\mathbf{x}_{k+1} = F\mathbf{x}_k + G\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (24)$$

ここに, F, G はそれぞれ遷移行列, 駆動行列であり, 次式で定義される.

$$F \triangleq \Phi(t)|_{t=\Delta T}, \quad \Phi(t) \triangleq \mathcal{L}^{-1}(sI_{10} - A)^{-1} \quad (25)$$

$$G = \int_0^{\Delta T} \Phi(\Delta T - \tau) d\tau \times B \quad (26)$$

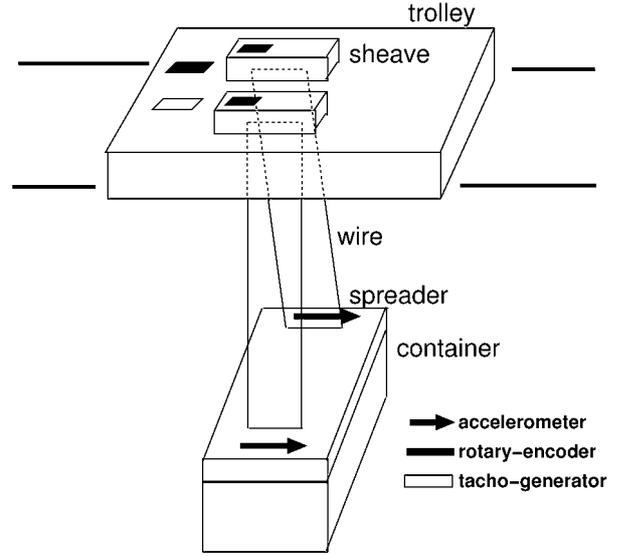


Fig. 3 The arrangement of six sensors

また, \mathbf{w}_k は平均値ゼロ, 共分散行列が

$$W \triangleq E \left[\left\{ \int_0^{\Delta T} \Phi(\Delta T - \tau) \Gamma \mathbf{w}(\tau) d\tau \right\} \right. \\ \left. \times \left\{ \int_0^{\Delta T} \Phi(\Delta T - \tau') \Gamma \mathbf{w}(\tau') d\tau' \right\}^\top \right] \\ = \int_0^{\Delta T} \Phi(\Delta T - \tau) \Gamma \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_5^2\} \\ \times \Gamma^\top \Phi(\Delta T - \tau)^\top d\tau \quad (27)$$

の白色ガウス雑音である. なお, 上式において E は期待値記号を, また $\text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_5^2\}$ は指数を対角成分とする対角行列を表す.

一方, 観測値はサンプリング周期 ΔT ごとに得られるから, 前節の連続形の観測行列 H を用いて, 観測方程式は次のように与えられる.

$$\mathbf{y}_k = H\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (28)$$

ここに, $\mathbf{y}_k, \mathbf{v}_k$ はそれぞれ k サンプリング時刻におけるセンサ出力(観測値)および観測雑音を表す.

ところで, ダイナミック方程式に現れるトロリーおよびシーブの駆動力は $f_i(t) = K_i i_i(t)$ (K_i : 比例定数) のように各モータ駆動電流 $i_i(t)$ に比例し, かつ $i_i(t)$ は電流計により測定できるので, $\mathbf{u}(t)$ は既知入力である. 一方, コンテナ系の物理パラメータ, すなわちトロリー・シーブおよびスプレッド・コンテナの質量およびこれらの重心の位置や慣性モーメント並びに距離データなどは設計図, 実験等によりあらかじめ容易に求まる(もっと正確な値を求めたい場合は, 参考論文8)のパラメータ学習法を適用すればよい). したがって, ここではトロリー・コンテナ系の物理パラメータは既知とする. なお, トロリー移動時, 搬送物を目標位置に搬送しているとき, 空荷のスプレッドを搬送物のある地点に移すときの2つの状態

があり、特に後者の場合、前者の場合に比べ振れが大きくなりコンテナ姿勢計測が若干困難になる。しかし、いずれの状態にしても、上述したように予め正確な系の物理パラメータが得られるので、コンテナの姿勢計測は、結局、ダイナミクスおよび観測方程式がそれぞれ(24)および(28)式で与えられる線形動的システムの状態推定問題に帰着できる。このとき、システムが線形であり、かつ(24)式の観測雑音 v_k が(電気的な雑音や構造体の振動によるものなど多くの独立な要因のため)白色雑音と仮定できるので、このシステムの状態推定に次のカルマンフィルタが適用できる。¹¹⁾

$$\hat{x}_{k/k-1} = F\hat{x}_{k-1/k-1} + G\mathbf{u}_{k-1} \quad (29)$$

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{k/k-1} + K_k\gamma_k \quad (30)$$

$$\gamma_k = \mathbf{y}_k - H\hat{x}_{k/k-1} \quad (31)$$

$$P_{k/k-1} = FP_{k-1/k-1}F^T + W \quad (32)$$

$$P_{k/k} = P_{k/k-1} - K_kHP_{k/k-1} \quad (33)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

ただし、

$$K_k = P_{k/k-1}H^T\Lambda_k^{-1} \quad (34)$$

$$\Lambda_k = HP_{k/k-1}H^T + R \quad (35)$$

ここに、 R は観測雑音の共分散である。上記カルマンフィルタに現れる状態推定値 $\hat{x}_{k/k}$ の第7, 9成分がコンテナの振れ d_1, d_2 の推定値を、また第8, 10成分がそれぞれそれらの変化速度 \dot{d}_1, \dot{d}_2 の推定値を与える。なお第1, 2成分はトロリーの位置およびその速度の推定値を、第3, 4成分は左側のシーブの位置および速度の推定値を、第5, 6成分は右側のそれを与える。

3.2 コンテナの振れ止め制御

前節で述べたカルマンフィルタにより、コンテナの姿勢およびその変化速度のみでなく、トロリーとシーブの位置および速度も併せてオンライン計測される。したがって、これにより得られた推定値に基づき、適切な状態フィードバック制御を施すことにより、トロリー停止時にコンテナの進行方向の振れだけでなく、ねじれ振れも同時に無くすることができる。つまり、より高機能的なコンテナの姿勢および位置の制御がなされる。

コンテナの移動に際しては、移動開始前の停止位置から移動後の停止まで、通常、(稼働の効率を考慮)3つの走行パターンを順次としてトロリーを移動することが行われる。

まず最初の走行パターンは、トロリーの加速に相当するが、加速終了時には、トロリーの速さは所定の速度 (V_0 [m/sec]) に達するだけでなく、このときスプレッドに進行方向の振れおよびねじれ振動が生じないように制御されることが望ましい。

次の第二の走行パターンは、速さ V_0 のトロリー等速運動であり、最初の走行パターン終了時にコンテナに振れおよびねじれ振動が無くなっていれば、加速度ゼロのため第二走行パターン時にはコンテナに振れおよびねじれ振動はほとんど生

じないか、あるいは現れても小さい。

さらに、最後の走行パターンであるが、これはトロリーの減速に相当し、トロリーを所定の位置 $x = d$ に停止させ、しかもこのときコンテナに進行方向の振れおよびねじれ振動が現れないようにする必要がある。

以上のように、トロリーの加速、等速、減速の3つの走行パターンを順次として、トロリー・コンテナ系を最終値 $x = d$ に高速に、かつ高精度に移動するわけであるが、前述したように、等速走行時は言うに及ばず、加速・減速時の各々の走行パターン終了時には、コンテナの振れ及びねじれ振動が無くなるよう適切な制御が施されなければならない。以下では、この3つの走行パターンの各々に対し上記の目的を達成するため、各走行パターンとも、制御評価として次の二次形式評価関数を考える。

$$J = E \left[\sum_{k=0}^{N-1} \{(\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}^0)^T Q_{k+1} (\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}^0) + \mathbf{u}_k^T R_k \mathbf{u}_k\} \right] \quad (36)$$

ここで、 \mathbf{x}^0 は状態ベクトルの各走行パターンにおける目標値であり、(36)式の第1項は状態ベクトルの目標値からの隔たりを、第2項がそのときの使用エネルギーを表す。また、制御評価の重み $\{Q_{k+1}\}, \{R_k\}$ は二つの項が共に正の値をとるようそれぞれ準正値対称行列、正値対称行列としている。このとき、制御対象がLQG系であるため、分離定理が適用でき、コンテナの位置および姿勢制御のための最適制御入力は、前章のカルマンフィルタにより得られた状態推定値に確定系の最適制御則を適用することにより求められる。⁷⁾ つまり、

$$\mathbf{u}_k^* = -K_k(F\hat{x}_{k/k} - \mathbf{x}_{k+1}^1), (0 \leq k \leq N-1) \quad (37)$$

ただし、フィードバックゲイン K_k および \mathbf{x}_{k+1}^1 は以下の漸化式で与えられる。

$$K_j = (G^T P_{j+1} G + R_j)^{-1} G^T P_{j+1} \quad (38)$$

$$M_j = P_{j+1} - P_{j+1} G K_j \quad (39)$$

$$P_j = Q_j + F^T M_j F \quad (40)$$

$$\mathbf{x}_j^1 = P_j^{-1} (Q_j \mathbf{x}^0 + F^T M_j^T \mathbf{x}_{j+1}^1) \quad (41)$$

なお、初期値は $P_N = Q_N$ および $\mathbf{x}_N^1 = \mathbf{x}^0$ である。

このように一般的な制御則が与えられたが、目標値 \mathbf{x}^0 および重み行列 $\{Q_{k+1}\}, \{R_k\}$ は目的に合わせてそれぞれ適切に定められればよい。例えば、第一走行パターンでは、トロリーの目標速度 V_0 に対し、 X' を加速終了時の適切な値として、 $\mathbf{x}^0 = (X', V_0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ を考えればよいし、また第二走行パターンでは、 X'' を走行終了時のトロリーの望ましい目標位置として、 $\mathbf{x}^0 = (X'', V_0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ 。さらに、最後の走行パターン(減速に相当)では、所定のトロリー停止位置の x 座標を $x = d$ とすれば、 $\mathbf{x}^0 = (d, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ が考えられる。なお、 $\{Q_{k+1}\}, \{R_k\}$ については余りにも自由

度が多いので、通常よく採られているように対角行列の枠内で選ぶのが賢明である。

これらの方式によりコンテナ姿勢の計測および制御がなされるわけであるが、当然システムには雑音が含まれるため、完全なトロリーの位置およびコンテナの姿勢制御が行われるわけではなく、計測および制御性能の最終的な評価としては、上記の制御目的が自動化あるいは稼働率の向上を実現するうえで、許容範囲に入っているか否かをみればよいことになる。

4. シミュレーションによる検討

提案したコンテナクレーンの姿勢自動計測制御システムの有効性を示すために、シミュレーションを行った。

(ケース1)

まず、コンテナの姿勢制御が困難と思われる空荷の場合を考え、Fig. 2における種々の物理パラメータを $M_0 = 17,000\text{kg}$, $M_1 = M_2 = 1,500\text{kg}$, $l = 13.0\text{m}$, $r = 5.0\text{m}$, $g = 9.8\text{m/s}^2$, $m = 14,000\text{kg}$, $I = 21,000\text{kg}\cdot\text{m}^2$ のように設定した。また、サンプリング周期は $\Delta T = 0.2\text{s}$ とした。なお、遷移雑音 $w_i(t)$ ($1 \leq i \leq 5$) の分散は、摩擦およびモデル化誤差などを考慮して、それぞれ $\sigma_1^2 = (0.002)^2$, $\sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2 = (0.0002)^2$ を、また観測雑音分散としては $V = (0.0098)^2$ (重力加速度 g の 0.1% 値の 2 乗値) を採用した。このときの離散値系の遷移行列 F , 駆動行列 G , 遷移雑音共分散行列 W の詳細は紙面の都合上、省略する。

また、シミュレーションに際してのシステムの初期状態は $x_0 = (0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.366, -0.169, -0.221, 0.106)^T$ とした。但し、状態ベクトル x の単位は、奇数番目の成分は m , 偶数番目の成分は m/s である。

提案システムの適用に当たったカルマンフィルタの初期値は、 $\hat{x}_{0/-1} = 0$, $P_{0/-1} = 0.01 \times I_{10}$ (但し、 I_{10} は 10 次の単位行列) とし、最初の 10 秒間はトロリーの加速を、次の 10 秒間は等速運動を、最後の 10 秒間はトロリーの減速・停止を行う計 30 秒間のトロリー・コンテナ系の姿勢計測制御を考える。

本シミュレーションに際し、各走行パターンにおける制御評価の重み行列 $\{Q_{k+1}\}$, $\{R_k\}$, および目標値 x^o は、各走行パターンの順にそれぞれ以下のように設定した。

(i) 加速時 :

$$Q_{k+1} = \text{diag}\{6e6, 8e8, 1, 1, 1, 1, 1.5e8, 3e8, 1.5e8, 3e8\}$$

$$x^o = (8.5, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$$

(ii) 等速時 :

$$Q_{k+1} = \text{diag}\{5e2, 1e10, 1, 1, 1, 1, 6.5e8, 6e8, 6.5e8, 6e8\}$$

$$x^o = (18.5, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$$

(iii) 減速時 :

$$Q_{k+1} = \text{diag}\{2e8, 7e8, 1, 1, 1, 1, 3e8, 1e9, 3e8, 1e9\}$$

$$x^o = (22, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$$

ここで、 $\text{diag}\{\dots\}$ はカッコ内の値を対角要素とする対角行列

を、また e は 10 のべき乗を表す (例えば、 eN は 10^N を表す)。さらに、制御入力 u_k の重み行列 $\{R_k\}$ は全走行パターンにおいて共通に $R_k = \text{diag}\{1, 1, 0.1\}$ とした。なお、ここでは各走行パターンで重み行列 $\{Q_{k+1}\}$ の値を変えているが、これはクレーンを運転する立場から最も好ましいと考えられる姿勢制御が実現されるよう試行錯誤的に重み行列を調整した結果である (若干異なる制御形態を示すが、ここで用いた重み行列以外を採用することももちろん可能である。以上は次のケース2でも同様)。

このときのトロリーへの入力 f_0 を Fig.4 に、左右のシープへの入力 f_1, f_2 を Fig.5, Fig.6 に、またトロリーの位置、速度と左右シープの位置、速度およびコンテナ左右両端の水平方向の振れ変位 d_1, d_2 とその速度の時間変化を Fig.7 ~ Fig.16 に示す。なお、図には制御終了後 10 秒間のコンテナ系の動きも併せて示している。

これらの図より、本手法により状態ベクトルの各成分は高精度に計測されていることがうかがえる。すなわち、Fig.7, Fig.8より、トロリーが加速・等速・減速の各走行パターンにおいて、それぞれ適切に制御され、いずれも目標値に到達している。そして、30秒後にはトロリーが目標地点で停止していることがわかる。また、コンテナの振れを表した Fig.14, Fig.16より、加速走行パターンにおいては最初はコンテナの振れが左右で異なっていることから進行方向のみでなく、ねじれ方向にも振れていることがわかるが、加速走行パターン終了時にはこれら2つの振れが共に無くなっていることがわかる。また、等速走行パターンでは制御評価関数が急に変わるため、最初は進行方向とは逆方向に振れるが、すぐにこの振れが抑えられていることもわかる。さらに、この等速走行パターンではねじれ振れがほとんど消えていることも確認できる。なお、トロリーに対する相対的なこの振れパターンは最後の減速走行パターンでも共通にみられる。興味あるところは、減速走行パターンの初めでは、減速のためコンテナが進行方向に振れると思われたが、実際にはトロリーとシープに適切に入力が割り当てられているためか、等速走行パターンと同様、逆方向に振られる現象がみられたことである。しかしながら、この振れも直ちに収まり、トロリー停止時(最終時刻)においてコンテナ両端の水平方向の振れは真値および推定値ともに $\pm 2 \sim 3\text{cm}$ 程度に抑えられており、制御終了後においてもごく微小な振動が残るのみであることがわかる。更に本ケースでは、次のケース2の場合と同様であるが、制御区間の30秒間ではシミュレーション値(真値)と推定値はほとんど一致し、制御終了後(制御無しの状態)にわずかな差異が観測されることがわかる。

(ケース2)

次に、コンテナに荷を積んでいる場合を想定して、先ほどの物理パラメータのうちコンテナの質量を $m = 54,000\text{kg}$, 慣性モーメントを $I = 85,000\text{kg}\cdot\text{m}^2$ に変更し、その他の数値は全てそのまま再度シミュレーションを行った。なお、この場合においてはコンテナの質量が大きく変わっているため、こ

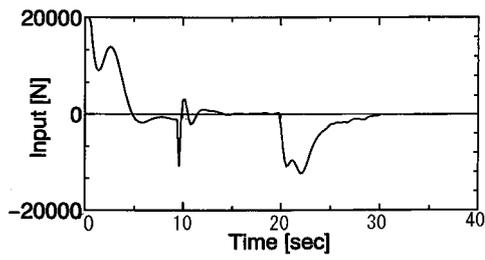


Fig. 4 Input to the trolley : f_0 (Case 1)

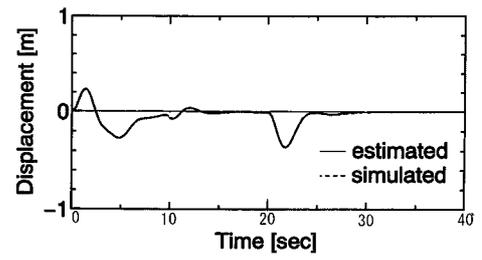


Fig. 9 Displacement of the left-hand sheave : x_1 (Case 1)

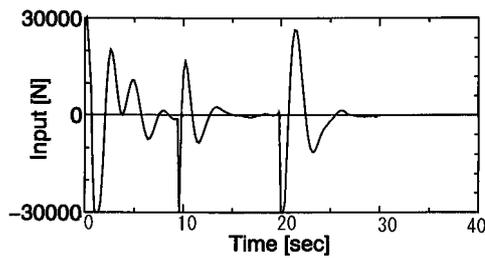


Fig. 5 Input to the left-hand sheave : f_1 (Case 1)

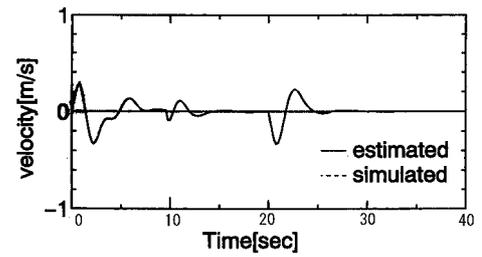


Fig. 10 Velocity of the left-hand sheave : x_1 (Case 1)

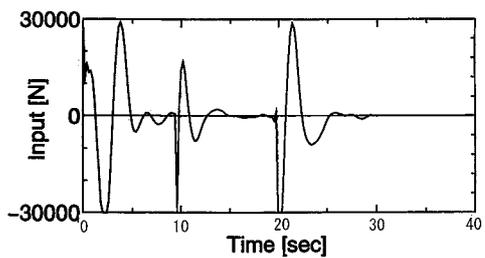


Fig. 6 Input to the right-hand sheave : f_2 (Case 1)

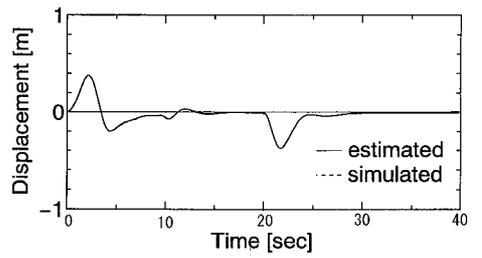


Fig. 11 Displacement of the right-hand sheave : x_2 (Case 1)

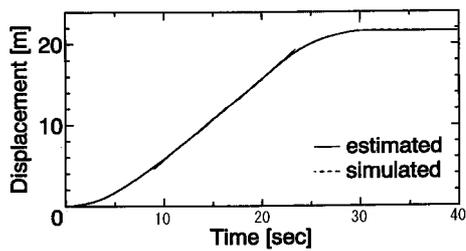


Fig. 7 Displacement of the trolley : x_0 (Case 1)

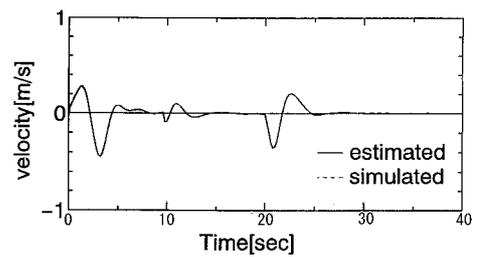


Fig. 12 Velocity of the right-hand sheave : x_2 (Case 1)

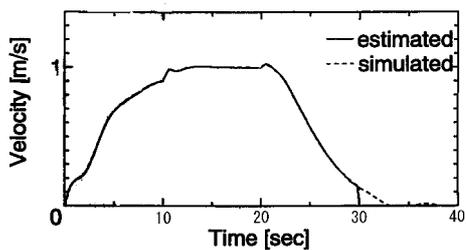


Fig. 8 Velocity of the trolley : x_0 (Case 1)

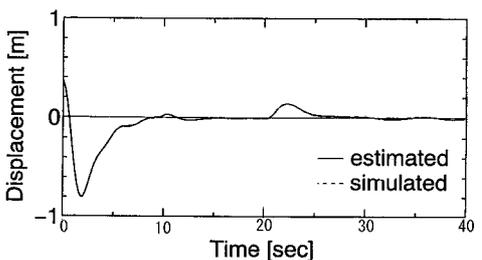


Fig. 13 Displacement at the left end of container : d_1 (Case 1)

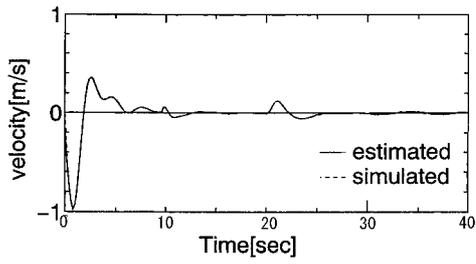


Fig. 14 Velocity at the left end of container : d_1 (Case 1)

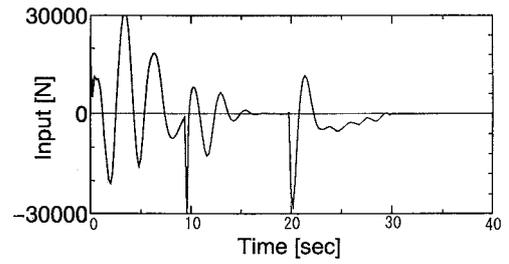


Fig. 19 Input to the right-hand sheave : f_2 (Case 2)

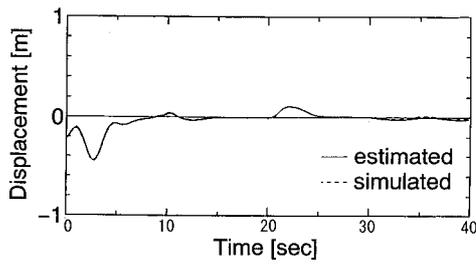


Fig. 15 Displacement at the right end of container : d_2 (Case 1)

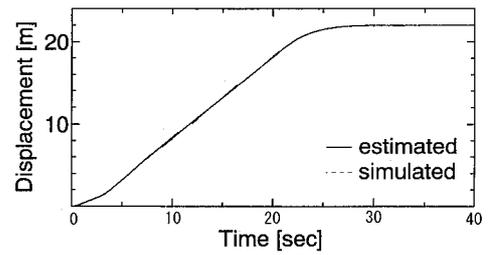


Fig. 20 Displacement of the trolley : x_0 (Case 2)

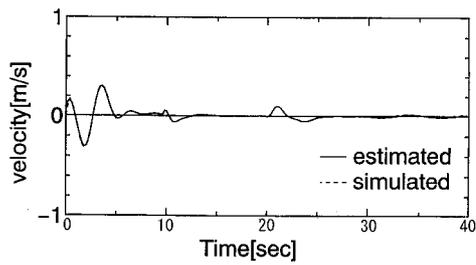


Fig. 16 Velocity at the right end of container : d_2 (Case 1)

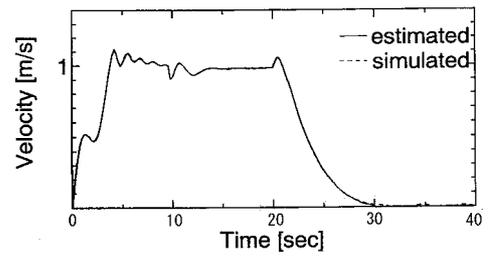


Fig. 21 Velocity of the trolley : \dot{x}_0 (Case 2)

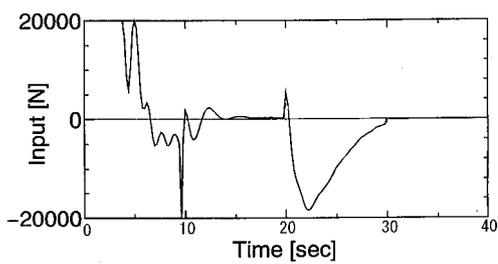


Fig. 17 Input to the trolley : f_0 (Case 2)

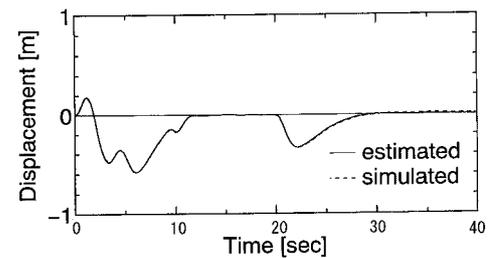


Fig. 22 Displacement of the left-hand sheave : x_1 (Case 2)

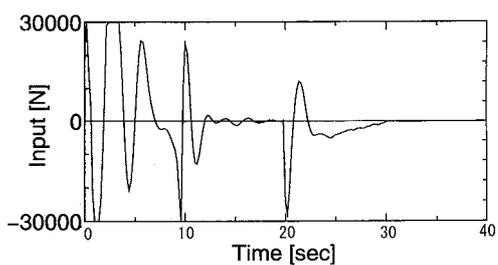


Fig. 18 Input to the left-hand sheave : f_1 (Case 2)

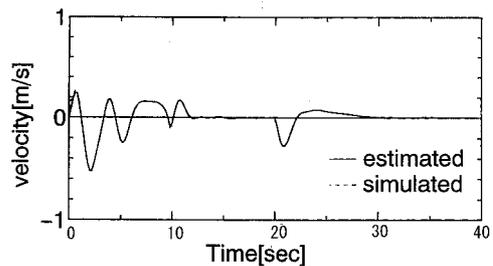
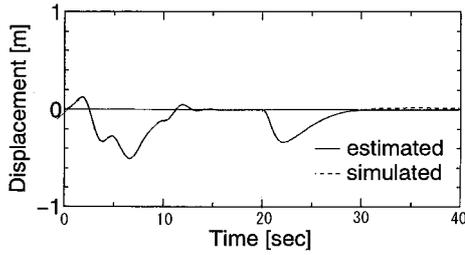
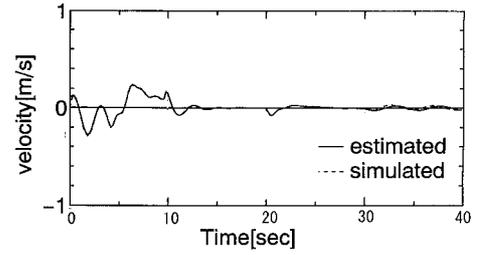
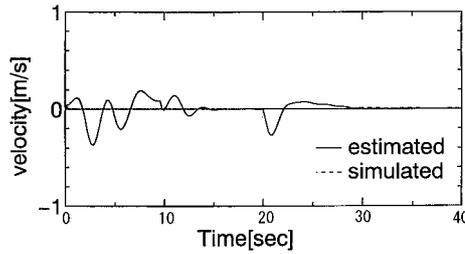
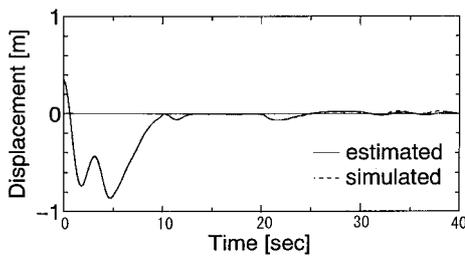
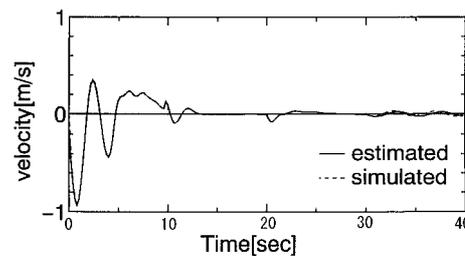
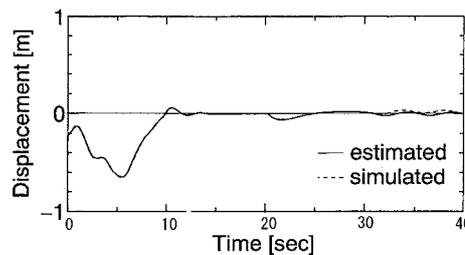


Fig. 23 Velocity of the left-hand sheave : \dot{x}_1 (Case 2)

Fig. 24 Displacement of the right-hand sheave : x_2 (Case 2)Fig. 29 Velocity at the right end of container : d_2 (Case 2)Fig. 25 Velocity of the right-hand sheave : x_2 (Case 2)Fig. 26 Displacement at the left end of container : d_1 (Case 2)Fig. 27 Velocity at the left end of container : d_1 (Case 2)Fig. 28 Displacement at the right end of container : d_2 (Case 2)

のことを考慮し、重み行列 $\{Q_{k+1}\}$ を以下のように変更した。

(i) 加速時 :

$$Q_{k+1} = \text{diag}\{2.5e8, 8e10, 1, 1, 1, 1, 2.5e8, 3e8, 2.5e8, 3e8\}$$

(ii) 等速時 :

$$Q_{k+1} = \text{diag}\{9.5e3, 3e8, 1, 1, 1, 1, 6.5e8, 6e8, 6.5e8, 6e8\}$$

(iii) 減速時 :

$$Q_{k+1} = \text{diag}\{3.5e8, 1.8e9, 1, 1, 1, 1, 8.5e8, 4e9, 8.5e8, 4e9\}$$

このときのシミュレーション結果を Fig.17 ~ Fig.29 に示す。これらの図より、物理パラメータを変更した場合においても、その数値が既知であるならば、推定結果が劣化することはない、高精度な制御が行われることがわかる。

なお、コンテナ両端の水平方向の振れについては $\pm 5\text{cm}$ が完全自動化に際しての許容限界といわれているが、本計測制御システムによる制御結果は最終時刻だけでなく、途中の各走行パターンの大部分の時間帯でも本条件を満たしている。

最後に、上記のシミュレーションだけでなく、初期状態を種々変えたシミュレーションを行ってみたが、いずれも上述の例と同様、良好な結果が得られている。これらのことから提案システムの基本的な有効性が確認される。ただし、外乱や観測雑音が大きい場合に対してはもちろんシミュレーション結果と推定値のばらつきは大きくなり、計測精度および振れ止めの性能は当然劣化することになる。したがって、本稿で提案するシステムの実際の有効性については実機を用いた実験により確認することが必要である。なお、ここではコンテナ質量により異なる重み行列を与えたが、実際のクレーンではトロリー上にワイヤロープの負荷荷重を計測するためのロードセルが搭載され、コンテナの重量が計測される。したがって、あらかじめ種々のコンテナ質量に対して適切な重み行列を決定し、そのデータベースを用意しておけばコンテナ質量に応じた実用的な制御が可能になる。

5. あとがき

本稿では、大型コンテナの荷役に利用されるコンテナクレーンの自動運転を念頭に安全性および稼働率の向上の観点から、振れ止めのための計測制御システムを提案した。すなわち、コンテナの進行方向の振れのみでなく、トロリー移動に伴うコンテナのねじれについてもダイナミクスを考慮した単一剛体

振り子としてのモデル化を行い、状態フィードバック制御のための観測系として、トロリーと2つのシーブに搭載した3つのロータリーエンコーダ、およびトロリーに搭載した1つのタコジェネレータに加えて、コンテナ保持部であるスプレッド両端に設置した2つの加速度センサを利用する計測制御システムに対してシミュレーションによる検討を行った。その結果、トロリー移動に伴うコンテナの進行方向の振れと同時に、ねじれ方向の振れも高速・高精度に計測し、これら6つのセンサのセンサ情報およびこれに基づく最適制御により、トロリー停止と同時にコンテナを静止させるコンテナ姿勢自動計測制御システムの有効性を示した。

これにより基本的な制御方式の枠組みを得たが、今後は、この方式を実機に適用し、必要なら改善法についても併せて検討し、実用化に結びつけたい。

参 考 文 献

- 1) 森下 巖: 走行クレーンの運転自動化のための振れ止め制御, 計測自動制御学会論文集, 14-6, 739/744 (1978)
- 2) 美多, 金井: トロリーの最大速度に注目したクレーンの最適運転法, 計測自動制御学会論文集, 15-6, 833/838 (1979)
- 3) 進藤, 孫, 坂和: コンテナ・クレーンの振れ止め制御, 計測自動制御学会論文集, 19-5, 430/432 (1983)
- 4) 橋本, 土谷ほか: 荷振れ情報を必要としないクレーンの吊り荷の振動抑制制御, 計測自動制御学会論文集, 30-2, 172/180 (1994)
- 5) 新井, 大隈: クレーンとロボットの協調制御による重量物ハンドリング, 精密工学会誌, 57-3, 69/74 (1991)
- 6) 田中, 河野, 林: クレーンリフターの姿勢自動計測制御について, 計測自動制御学会論文集, 32-1, 97/105 (1996)
- 7) D.G.Schultz and J.L.Melsa: State Functions and Linear Control Systems, McGrawHill Book Company (1967)
- 8) 河野, 田中ほか: クレーンリフターの姿勢自動計測に基づくリフターの振れ止めパターン制御, 電気学会論文誌, 155-D-7 (1995)
- 9) Y.Takahashi, M.J.Rabins and D.M.Auslander (高橋, 北森 共訳): 制御と力学系1, コロナ社 (1977)
- 10) 田中正吾: 計測システム工学, 朝倉書店 (1994)
- 11) 有本 卓: カルマンフィルタ, 産業図書 (1977)

《 付 録 》

$$\begin{aligned}
 a_1 &= -\frac{KM_1}{M_0}, & a_2 &= -\frac{KM_2}{M_0}, & a_3 &= \frac{KM_1}{M_0}, \\
 a_4 &= \frac{KM_2}{M_0}, & a_5 &= \frac{K}{M_{11}} \left(\frac{M'_1 M_1}{M_0} - 1 \right) \\
 a_6 &= \frac{KM'_1 M_2}{M_{11} M_0}, & a_7 &= -\frac{K}{M_{11}} \left(\frac{M'_1 M_1}{M_0} - 1 \right) \\
 a_8 &= -\frac{KM'_1 M_2}{M_{11} M_0}, & a_9 &= \frac{KM'_2 M_1}{M_{22} M_0} \\
 a_{10} &= \frac{K}{M_{22}} \left(\frac{M'_2 M_2}{M_0} - 1 \right), & a_{11} &= -\frac{KM'_2 M_1}{M_{22} M_0} \\
 a_{12} &= -\frac{K}{M_{22}} \left(\frac{M'_2 M_2}{M_0} - 1 \right), & a_{13} &= K \left(\frac{1}{m} + \frac{r^2}{4I} + \frac{M_1}{M_0} \right) \\
 a_{14} &= K \left(\frac{1}{m} - \frac{r^2}{4I} + \frac{M_2}{M_0} \right), & a_{15} &= -K \left(\frac{1}{m} + \frac{r^2}{4I} + \frac{M_1}{M_0} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_{16} &= -K \left(\frac{1}{m} - \frac{r^2}{4I} + \frac{M_2}{M_0} \right), & a_{17} &= K \left(\frac{1}{m} - \frac{r^2}{4I} + \frac{M_1}{M_0} \right) \\
 a_{18} &= K \left(\frac{1}{m} + \frac{r^2}{4I} + \frac{M_2}{M_0} \right), & a_{19} &= -K \left(\frac{1}{m} - \frac{r^2}{4I} + \frac{M_1}{M_0} \right) \\
 a_{20} &= -K \left(\frac{1}{m} + \frac{r^2}{4I} + \frac{M_2}{M_0} \right) \\
 b_1 &= \frac{1}{M_0}, & b_2 &= -\frac{M_1 - 1}{M_0}, & b_3 &= -\frac{M_2 - 1}{M_0} \\
 b_4 &= -\frac{M'_1}{M_{11} M_0}, & b_5 &= \frac{1}{M_{11}} \left(\frac{(1 - M_1) M'_1}{M_0} + 1 \right) \\
 b_6 &= \frac{(1 - M_2) M'_1}{M_{11} M_0}, & b_7 &= -\frac{M'_2}{M_{22} M_0} \\
 b_8 &= \frac{(1 - M_1) M'_2}{M_{22} M_0}, & b_9 &= \frac{1}{M_{22}} \left(\frac{(1 - M_2) M'_2}{M_0} + 1 \right) \\
 b_{10} &= -\frac{1}{M_0}, & b_{11} &= \frac{M_1 - 1}{M_0}, & b_{12} &= \frac{M_2 - 1}{M_0} \\
 b_{13} &= -\frac{1}{M_0}, & b_{14} &= \frac{M_1 - 1}{M_0}, & b_{15} &= \frac{M_2 - 1}{M_0}
 \end{aligned}$$

ここに,

$$\begin{aligned}
 M_{00} &= M'_0 + M''_0 \\
 M_{11} &= M'_1 + M''_1, & M_{22} &= M'_2 + M''_2 \\
 M_0 &= M_{00} + \frac{M'_1 M'_1}{M_{11}} + \frac{M'_2 M'_2}{M_{22}} \\
 M_1 &= \frac{M''_1}{M_{11}}, & M_2 &= \frac{M''_2}{M_{22}}
 \end{aligned}$$

[著 者 紹 介]

山 根 健 治 (正会員)



1974年,九州大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年同大学助手。76年宇部工業高等専門学校講師を経て,98年同教授,現在に至る。95年山口大学大学院博士後期課程システム工学専攻修了。位置・形状・力学系の計測制御に関する研究に従事(工学博士)。電気学会,日本機械学会などの会員。

河 野 進 (正会員)



1974年,九州工業大学工学部制御工学科卒業,同年三菱重工業(株)入社,2000年同社広島研究所制御システム研究室長,02年同所研究サポート課長,現在に至る。この間,97年山口大学大学院工学研究科システム工学専攻博士後期課程修了。各種プラント・機械の制御システム,運転訓練シミュレータ及び各種センサーなどの開発研究に従事(工学博士)。

田 中 正 吾 (正会員)



1976年,九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年同大学助手を経て,80年山口大学工学部電子工学科助教授,91年同大学電気電子工学科教授,現在に至る。インテリジェント計測,異常診断,非破壊検査などの理論および応用研究に従事(工学博士)。電気学会,システム制御情報学会などの会員。中国文化賞(2003),文部科学大臣賞(2004)などを受賞。2003年,本会フェロー。