

クレーンの振れ止め制御を目的とした音の到来時間差による吊り荷の3次元座標推定

Estimation of payload 3D coordinates for anti-sway control of cranes with arrival time difference of sound signal

研究代表者 広島大学大学院先進理工系科学研究科 助教 福光昌由

Masayoshi Fukumitsu

When operating a crane, unpreparable sway of the payload is often happened due to some disturbances such as centrifugal force and strong wind. For safety operation, it is necessary to control the unpreparable swing. However, since the number of operators who can perform the anti-sway control will be decreasing. Hence, computer-aided anti-sway control will be required. In this work, we present the method of measuring the sway-angle using acoustic signals for estimation of the sway-angle of the payload. Moreover, we use several digital filters such as finite impulse response filter, Kalman filter and adaptive filter. In the experiment, we confirm the effectiveness of the proposed scheme.

要旨

クレーンの運転の際には、吊り荷に揺れが生じるため、コンピュータに基づくクレーンの振れ止め制御の研究が世界中で盛んに研究されている。そこで本研究は、クレーンの吊り荷の振れ止め制御のための、吊り荷位置の推定技術を開発することを目的とする。ここでは、音を用いた吊り荷の位置推定法について研究を進めた。これは、吊り荷から特定の周波数の音を発生させ、複数のマイクロホンを用いてそれを観測することで音の位相差を求め、さらに位相差から求めた到来時間差に基づいて吊り荷の位置を推定した。ただし、音によって観測した吊り荷位置には外乱が含まれている。この外乱成分を低減化するために各種デジタルフィルタを設計し、雑音除去に利用した。最後に、実験によって提案手法の有効性を確認した。

1. まえがき

クレーンは、産業界において広く利用されている。クレーンの運転の際には、図1のように吊り荷に揺れが生じるため、クレーンのオペレータには高度な操作技術が要求される。しかし、このような高度なスキルを有するオペレータは希少であり、さらに高齢化が進んでいる。これは産業界において深刻な問題となっている。このような背景から、コンピュータに基づくクレーンの振れ止め制御の研究が国内外で盛んに研究されている^{(1)~(18)}。しかし、これらのクレーン振れ止め技術は、吊り荷の座標が推定

可能という前提が必要である。実験室レベルでは、カメラやエンコーダを用いた座標推定が行われているが、ワイヤ長が数十メートルある実環境のクレーンでは吊り荷の座標推定は難しい。この問題は、クレーンの振れ止め技術の実用化の最大の障害になっている。

そこで本研究では、クレーン振れ止め技術の実用化のブレークスルーとして、吊り荷の位置推定技術を開発することを目的とする。具体的なアイデアとして、音を用いた吊り荷位置の推定法について研究を進める。これは、吊り荷から特定の周波数の音を発生させ、複数のマイクロホンを用いてそれを観測することで、音波の到来時間差に基づいて吊り荷の位置を推定するものである。音波の到来時間差は、観測した音波をフーリエ変換して周波数領域に変換し、その周波数領域で各音波の位相を求め、それらの位相差を算出することで求める。ただし、空間中を伝搬する音波は外部の騒音や風などによって影響を受ける。したがって、推定した吊り荷の位置情報は外乱が含まれているものとなる。この外乱成分を低減化するためにはデジタルフィルタによる信号処理が必要となる。そこで本研究では、いくつかのデジタルフィルタを設計して適用し、吊り荷位置情報に含まれる外乱の低減化を図る。使用するデジタルフィルタは、有限インパルス応答

(FIR) フィルタ、吊り荷位置の予測を用いたカルマンフィルタ、フィルタ係数が外乱の性質に基づいて適応的に変化する適応フィルタを検討した。

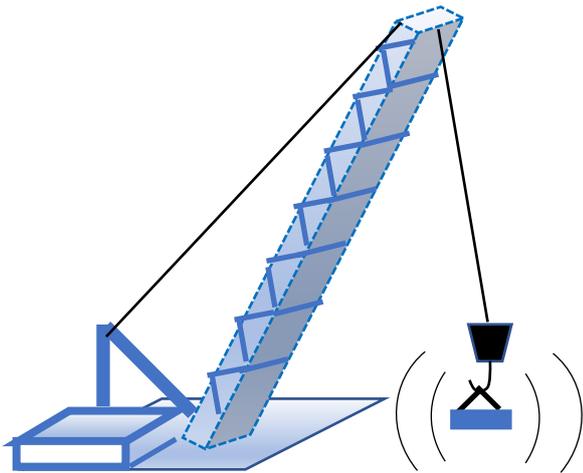


図1 クレーンの吊り荷

2. 理論

2.1 位相差の推定

図1のように、吊り荷を吊るすフックの内部に音源を内蔵し、音波を発生させる。さらに、クレーンのジブ上にマイクロホンを複数配置し、その音波を観測する。ここで、そのマイクロホンをマイクロホン1、マイクロホン2とする。マイクロホン1とマイクロホン2で観測する二つの音波には、図2のように位相差がある。この位相差は、各音波をフーリエ変換で周波数領域に写し、位相スペクトルから算出することができる。

さらに、位相差に音速を乗じることで、距離の差が計算できる。この距離の差を δ とする。 δ を推定することにより、吊り荷の位置(振れ角)を推定することができる。

2.2 振れ角の計算

図3にクレーンにおけるマイクロホン配置を示す。図3において、点Oと点Qをジブの両端、点Pを質点(音源)とする。また、 M_1 、 M_2 をマイクロホン1とマイクロホン2の座標点とする。点Qと点 M_1 の距離を X_1 、点Qと点 M_2 の距離を X_2 とする。三角形 QPM_1 と三角形 QPM_2 に余弦定理を用いることにより、以下の連立方程式を得る。

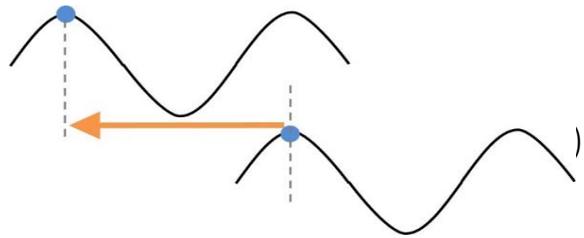


図2 観測した二つの音響信号の位相差

ここで、未知パラメータは吊り荷の振れ角 θ と l_d である。連立方程式は二つあるので、この二つの未知パラメータは推定することが可能となる。具体的には、上式から l_d を消去し、 θ に関する非線形方程式を定式化する。これをニュートン法で解くことで、所望の θ が算出可能となる。 θ が算出されれば、吊り荷の位置は、 $lw \sin \theta$ と計算できる。

2.3 吊り荷の3次元計測

吊り荷の3次元位置 (x, y, z) の推定のためには、3本、もしくは4本のマイクロホンを用いる必要があることが分かった。ただし、マイクロホンの配置によっては吊り荷位置の計算ができない特異点が存在することが判明した。また、3次元位置推定には膨大な時間を要することから、計算アルゴリズムの効率化が必要であることが分かった。

2.4 フィルタの利用

推定した吊り荷の振れ角には外乱が重畳している。したがって、本研究では、いくつかのフィルタを適用して、外乱成分の低減化を図る。本研究では、有限インパルス応答(FIR)フィルタ、カルマンフィルタ、適応フィルタを利用した。

(1) FIRフィルタ

FIRフィルタの差分方程式は、以下のように表される。

$$\theta_{LF}(i) = \sum_{k=0}^N b_k \theta(i-k)$$

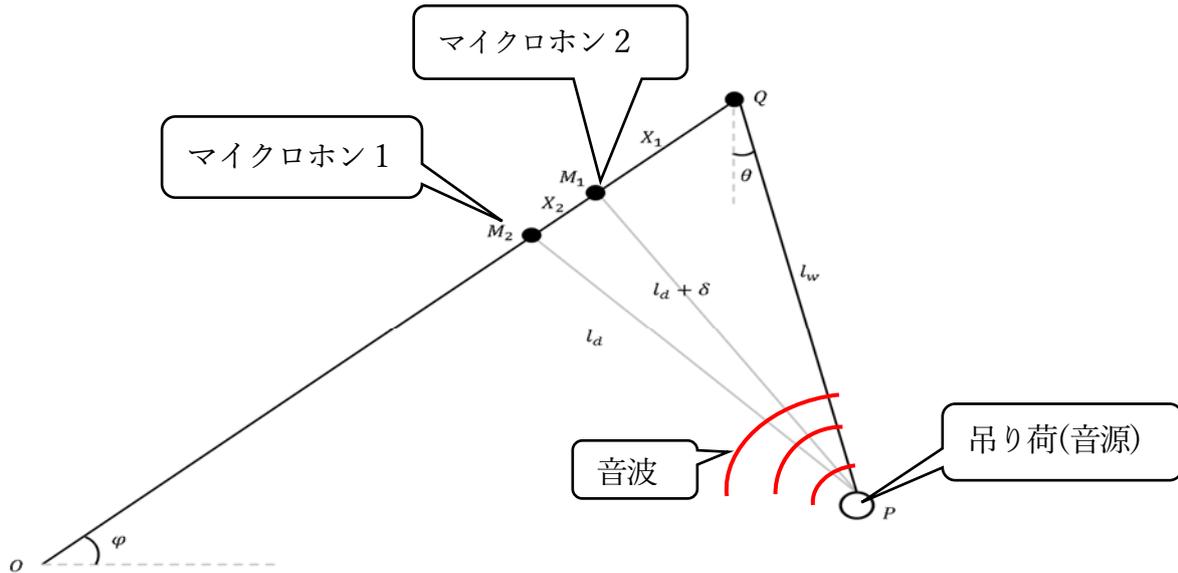


図3 クレーンにおける吊り荷 (音源), マイクロホンの配置, 各パラメータ

ここで, $\theta_{LF}(i)$ はフィルタ出力, $\theta(i)$ はフィルタ入力, b_k はフィルタ係数, N が次数である. ここで, 吊り荷は振り子運動となるので, フィルタ入力は正弦波となり, その周波数はワイヤ長から推定できる. したがって, ローパスフィルタを設計することで, 振れ角成分のみを抽出することができ, 高周波数の外乱成分を除去することが可能となる. なお, FIR フィルタの係数は最小二乗法により設計した.

また, フィルタ処理に要する演算負荷を低減化するために0係数を含むフィルタ (スパースフィルタ) についても検討した. スパースフィルタを用いることで, 少ない演算量で高い性能のフィルタを実現できることを確認した.

(2) カルマンフィルタ

IIR フィルタは, 振れ角信号と外乱信号の周波数特性に着目した手法である. 本研究で対象とするのは, 吊り荷の振れ角であり, これは振り子運動を行うので, 吊り荷の動きは運動方程式でモデル化できる. したがって, 振り子の動きはある程度予測することが可能である. したがって, 吊り荷の動き予測を利用することでカルマンフィルタを適用した. カルマンフィルタのアルゴリズムは以下の式で表される.

$$\hat{\theta}(i) = (1 - K)\theta(i) + K\tilde{\theta}(i)$$

ただし, $\hat{\theta}(i)$ は出力, $\theta(i)$ は入力 (観測信号), $\tilde{\theta}(i)$ はモデルによる予測値, K はカルマンゲインを表している.

(3) 適応フィルタ

最後に, フィルタ係数が時間的に可変となる適応フィルタを考える. この手法では, 振れ角信号に含まれる外乱信号が平均0のガウス分布に従うとの仮定のもと, 外乱信号の二乗平均が最小となるようにフィルタ係数を更新していくものである. これにより, 途中で外乱の性質が変化したとしてもフィルタがそれに合わせて更新されていき, 外乱信号を効果的に低減化できる.

本研究では, 適応フィルタ係数の更新アルゴリズムとして, Normalized Least Mean Square (NLMS) アルゴリズムを利用した. NLMS は, 以下の更新式で実現される.

$$\begin{aligned} y(i) &= \mathbf{h}^T(i)\mathbf{x}(i) \\ e(i) &= x(i) - y(i) \\ \mathbf{h}(i+1) &= \mathbf{h}(i) + \mu \frac{e(i)\mathbf{x}(i)}{\alpha e^2(i) + (1 - \alpha)|\mathbf{x}(i)|^2} \end{aligned}$$

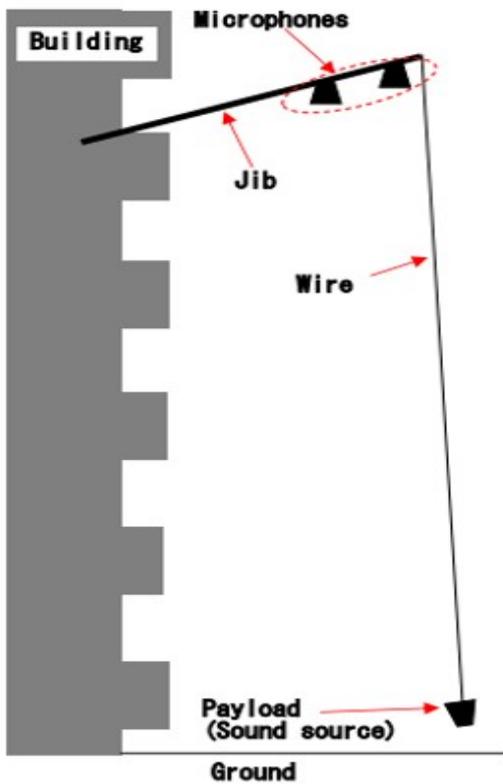


図4 クレーン実験の概略図

ここで、 $x(i)$ はフィルタ入力、 $y(i)$ はフィルタ出力、 $h(i)$ はフィルタ係数である。また、 a は $0 < a < 1$ で決めるパラメータである。

フィルタ係数 $h(i)$ を更新することで、外乱成分を除去することが可能になるが、収束するまでに時間がかかる。そこで、本研究では、事前に $h(i)$ を学習させておくことで収束特性の改善をはかる。

3. 実験

3.1 実験環境

図4のようなクレーン実験環境において、吊り荷位置の実測実験を行った。また、図5が実験装置の写真である。ここで、吊り荷位置の真値は、吊り荷の至近距離にカメラを配置し、吊り荷を物体認識することで算出した。サンプリング周波数 $f_s = 44100$ [Hz]、データ数 $N = 2^{10}$ 、質点距離 $l_w = 14.667$ [m] とし、マイクロホン $X_1 = 0.02$ [m]、 $X_2 = 0.6$ [m] と配置した。



図5 クレーン実験の写真

3.2 FIR フィルタを用いた推定結果

音源の周波数を $f_k = 10034.5$ [Hz] とし、次数 $N = 10, 40, 70, 100$ とした実験結果を図6に示す。赤の実線はカメラで計測した真値を表しており、青い実線は、フィルタを適用する前の吊り荷の位置(振れ角)であり、黒い実線はフィルタ適用後の吊り荷の位置(振れ角)を表している。

図6より、次数を大きくするに従って、外乱信号の低減化が達成できていることが読み取れる。しかしながら、次数を大きくするについて、フィルタ出力の遅延も大きくなっていることが分かる。これは、フィルタの直線位相特性を実現するために、フィルタの群遅延を次数の半分に指定して設計したためである。群遅延を次数の半分以下にすることも可能であるが、その場合においても群遅延は次数に比例して大きくする必要がある。

3.3 カルマンフィルタを用いた推定結果

音源の周波数を 5038.77 [Hz] とし、実験を行った吊り荷位置(振れ角)の推定結果を図7に示す。図7の上のグラフがカルマンフィルタを適用前の結果であり、下のグラフがカルマンフィルタの適用後の結果である。図7の二つの図より、カルマンフィルタによって外乱が除去されていることが確認できる。同様に、振れ角を変更して実験を行った結果を図8と図9に示す。これらの場合においても、外乱を効果的に低減化されており、カルマンフィルタによる、外乱抑制効果が確認できる。

3.4 適応フィルタを用いた推定結果

また、この振れ角に適応フィルタを適用した結果と真値と比較した。まず図10にフィルタ適用前の結果と真値の比較を示す。次に図11に振れ角推定結果と適応フィルタの適用結果の比較を示す。

ここで、青い線が推定結果（フィルタ出力）、橙の線が画像処理によって求めた真値である。

図10より、提案手法によって振れ角を推定することができているが、振れ角推定結果には外乱の影響が含まれていることが確認できる。適応フィルタを適用した図11を見ると、外乱の影響が軽減されている

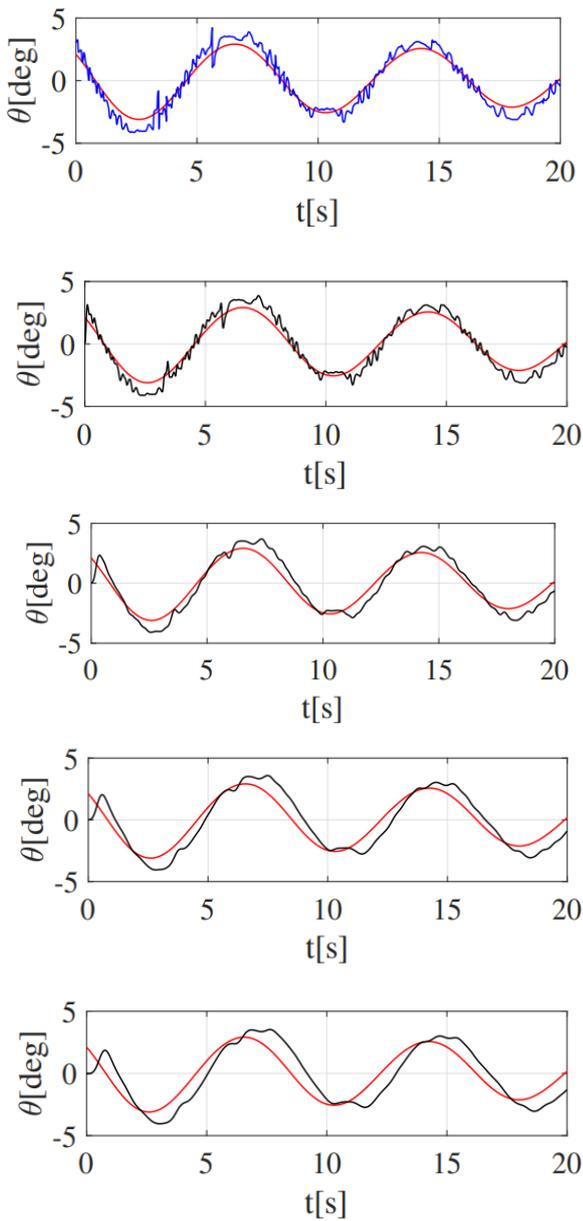


図6 FIRフィルタを用いた実験結果

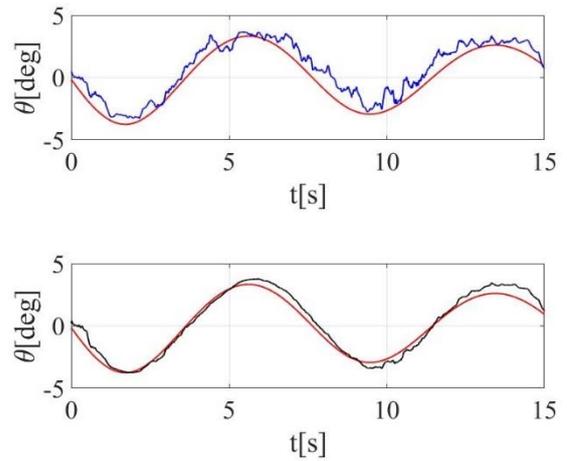


図7 カルマンフィルタを用いた実験結果（1回目）

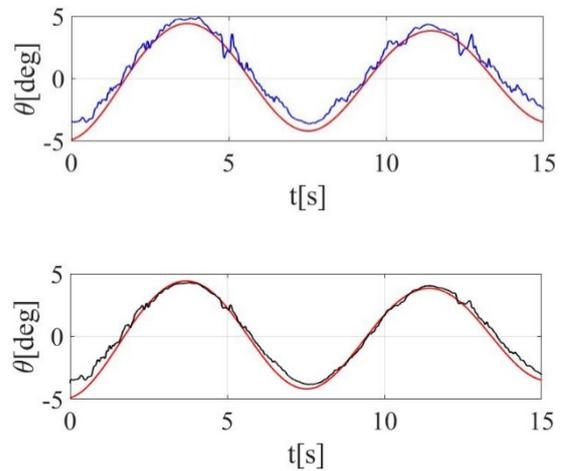


図8 カルマンフィルタを用いた実験結果（2回目）

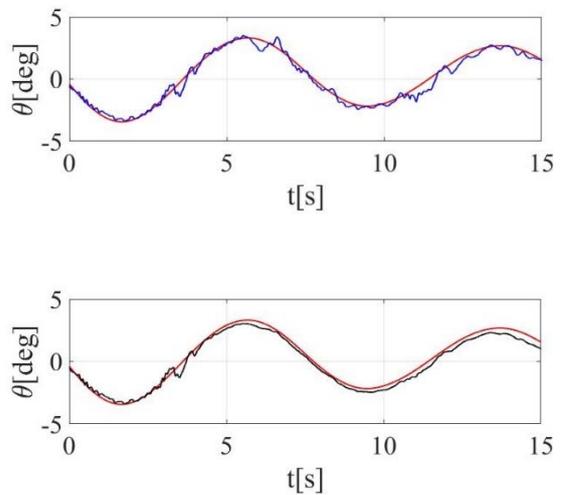


図9 カルマンフィルタを用いた実験結果（3回目）

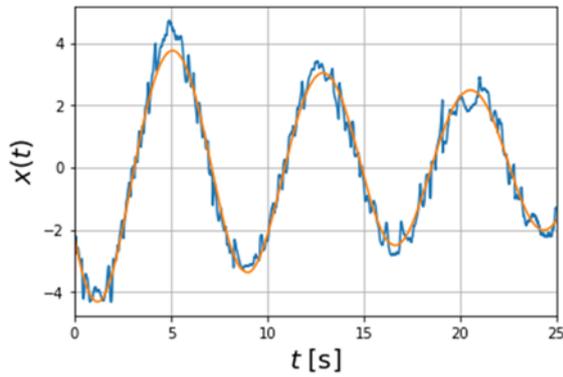


図10 フィルタ適用前の実験結果

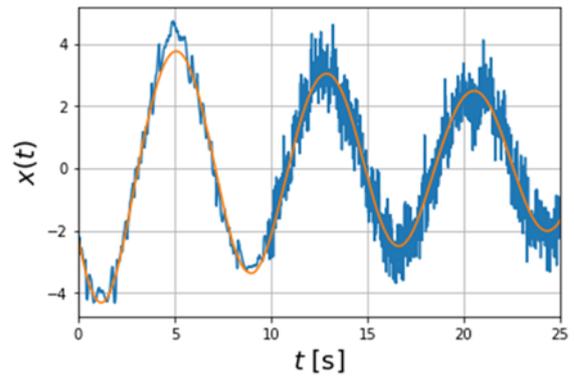


図13 途中で外乱が付加される場合

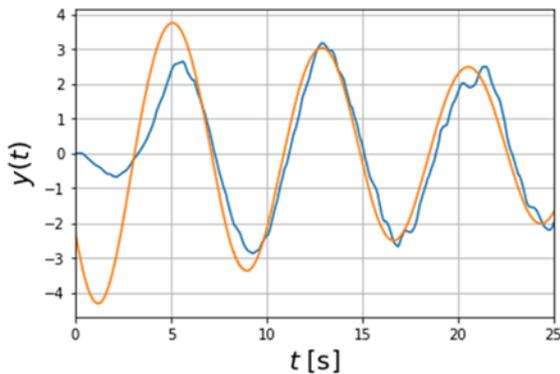


図11 適応フィルタ適用の実験結果（事前学習なし）

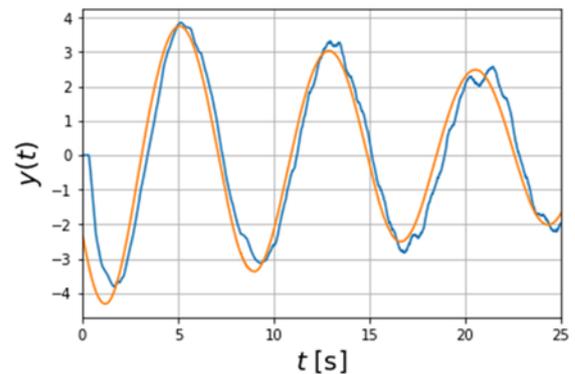


図14 適応フィルタ適用の実験結果

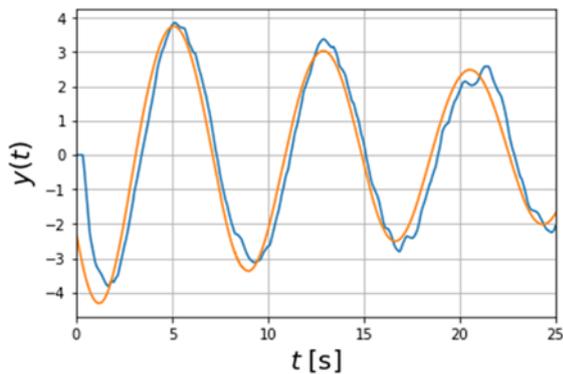


図12 適応フィルタ適用の実験結果（事前学習あり）

ことが確認できる. 図11の結果より, 適応フィルタの適応が進んでいき, 外乱が低減化できていることが確認できる. しかしこの手法では, 適応が完了するまでの間は正しい出力を得ることができない. そこで本研究では, 事前に適応フィルタ処理を実行し(事前学習), 事前学習で得られた適応フィルタ係数を, 外乱を含んだ振れ角信号に用いることで収束特性の改善を試みた.

図12に事前学習した適応フィルタを用いた振れ角

信号と真値の比較を示す. 図12より, 適応して収束するまでの時間が短縮されており, より早く真値に近い値に収束していることが確認できる. したがって, 適応フィルタの係数を事前学習することで, 収束特性の改善が期待できることが分かった.

最後に, 外乱の特性の変化に適応フィルタが適応できるかを確認する. 図13に図10の振れ角推定の開始後10[s]以降に外乱を追加で印加した結果を示す. さらに, 図14に適応フィルタを適用した結果を示す. 図14より, 外乱が追加された部分の外乱も軽減することができていることが確認できる.

4. まとめ

- (1) クレーンの吊り荷用フックに音源を内蔵し, ジブ上に複数のマイクロホンを設置し, その音波の位相差からクレーンの吊り荷の位置を推定する手法を検討した. 位相差は, 周波数領域における各音波の位相スペクトルから計算した. 吊り荷の位置は, 位相差を含む

連立方程式を解くことで求めることが可能となった。

- (2) 推定した吊り荷の位置には外乱が含まれているので, FIR フィルタ, カルマンフィルタ, 適応フィルタを用いて外乱成分を低減化する手法を検討した. 適応フィルタは事前学習を行うことで収束特性を改善する手法を提案した.
- (3) クレーンの屋外実験では, まず音波によって計測した吊り荷の位置とカメラによって計測した吊り荷の位置の比較を行った. その結果, 音波を用いて推定した吊り荷位置には外乱成分が含まれていたため, 上記のフィルタを適用した. その結果, 吊り荷の位置情報に含まれる外乱成分を効果的に低減化できることが明らかになった.

発表論文

- [1] 山田武士, 小川花子, 中本昌由: 音響信号とカルマンフィルタを用いたクレーンの振れ角推定, 令和3年度電気・情報関連学会中国支部第72回連合大会, オンライン 2021年10月.
- [2] 小川花子, 山田 武士, 中本 昌由: 音響信号処理に基づくクレーン振れ角の高精度推定, 電気学会研究会, オンライン, 2022年1月.
- [3] 中本昌由, 相川直幸: 周波数サンプリングを必要としない高次IIR微分器の設計, 令和4年電気学会電子・情報・システム部門大会, 広島, 2022年8月.
- [4] 岩切遼, 中本昌由: 正実性制約を用いたスパースIIRフィルタの設計, 令和4年電気学会電子・情報・システム部門大会, 広島, 2022年8月.
- [5] 岩切遼, 中本昌由: 正実性制約とLASSO回帰を用いたスパースIIRフィルタの設計, 令和4年度電気・情報関連学会中国支部第73回連合大会講演論文集, オンライン, 2022年10月.
- [6] 山田 武士, 中本 昌由: 適応フィルタを用いたクレーン吊り荷の位置推定, オンライン, 電気学会研究会, 2022年12月.
- [7] 山田 武士, 中本 昌由: NLMSアルゴリズムによるクレーン吊り荷データの適応信号処理, 電気学会研究会, 愛媛, 2023年2月.

参考文献

- (1) C.-Y. Chang: Adaptive Fuzzy Controller of the Overhead Cranes With Nonlinear Disturbance, IEEE Trans. Ind. Informatics, vol.3, no.2, pp.164-172, May 2007.
- (2) C.-Y. Chang and H. W. Lie: Real-Time Visual Tracking and Measurement to Control Fast Dynamics of Overhead Cranes, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.59, no.3, pp.1640-1649, March 2012.
- (3) N. Sun and Y. Fang: New Energy Analytical Results for the Regulation of Underactuated Overhead Cranes: An End-Effector Motion-Based Approach, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.59, no.12, pp.4723-4734, Dec. 2012.
- (4) L.-H. Lee, C.-H. Huang, S.-C. Ku, Z.-H. Yang, C.-Y. Chang: Efficient Visual Feedback Method to Control a Three-Dimensional Overhead Crane, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.61, no.8, pp.4073-4083, Aug. 2014.
- (5) K. Zavari, G. Pipeleers and J. Swevers: Gain-Scheduled Controller Design: Illustration on an Overhead Crane, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.61, no.7, pp.3713-3718, July 2014.
- (6) X. Zhang, Y. Fang and N. Sun: Minimum-Time Trajectory Planning for Underactuated Overhead Crane Systems with State and Control Constraints, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.61, no.12, pp.6915-1625, Dec. 2014.
- (7) N. Sun, Y. Fang and H. Chen: A New Antiswing Control Method for Underactuated Cranes With Unmodeled Uncertainties: Theoretical Design and Hardware Experiments, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.59, no.3, pp.453-465, Jan. 2015.
- (8) G. Hilhorst, G. Pipeleers, W. Michiels, R. C. L. F. Oliveira, P. L. D. Peres and J. Swevers: Fixed-Order Linear Parameter-Varying Feedback Control of a Lab-Scale Overhead Crane, IEEE Trans. Control Systems Technology, vol.24, no.5, pp.1899-1907, Sept. 2016.
- (9) J. Smoczek and J. Szytko: Particle Swarm Optimization-Based Multivariable Generalized Predictive Control for an Overhead Crane IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol.22, no.1, pp.258-268, Feb. 2017.
- (10) X. Wu and X. He: Nonlinear Energy-Based Regulation Control of Three-Dimensional Overhead Cranes, IEEE Trans. Automation Science and Engineering, vol.14, no.2, pp.1297-1308, April 2017.
- (11) D. Chwa: Sliding-Mode-Control-Based Robust Finite-Time Antisway Tracking Control of 3-D Overhead Cranes, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.64, no.8, pp.6775-6784, Aug. 2017.
- (12) T. Yang, N. Sun, H. Chen and Y. Fang: Motion Trajectory-Based Transportation Control for 3-D Boom Cranes: Analysis, Design, and Experiments, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.66, no.5, pp.3636 - 3646, May 2019.
- (13) B. Lu, Y. Fang and N. Sun: Adaptive Output-Feedback Control for Dual Overhead Crane System With Enhanced Anti-Swing Performance, IEEE Trans. Control Systems Technology, vol.28, no.6, pp.2235 - 2248, Aug. 2019.

- (14) F. Rauscher and O. Sawodny: Modeling and Control of Tower Cranes With Elastic Structure, IEEE Trans. Control Systems Technology, vol.29, no.1, pp.64 - 79, Jan. 2021.
- (15) H. Tho, N. Uchiyama and K. Terashima: Resonance-Based Tossing Control for Bulk Materials Transportation of an Overhead Crane, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.68, no.1, pp.609 - 621, Jan. 2021.
- (16) L. Tuan: Neural Observer and Adaptive Fractional-Order Backstepping Fast-Terminal Sliding-Mode Control of RTG Cranes, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.68, no.1, pp.434 - 442, Jan. 2021.
- (17) G. Tysse, A. Cibicik and O. Egeland: Vision-Based Control of a Knuckle Boom Crane With Online Cable Length Estimation, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol.26, no.1, pp.416 - 426, Feb. 2021.
- (18) J. Kim, D. Lee, B. Kiss and D. Kim: An Adaptive Unscented Kalman Filter With Selective Scaling (AUKF-SS) for Overhead Cranes, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.68, no.7, pp.6131 - 6140, July 2021.