S151016

クレーンの制振搬送訓練シミュレータの開発佐々木 剛^{*1}, N. Yong Jian^{*1}, 野田 善之^{*2}, 三好 孝典^{*1}, 寺嶋 一彦^{*1}**Development of crane training simulator for sway suppression transfer**Tsuyoshi SASAKI^{*1}, Nyioh Yong Jian^{*1}, Yoshiyuki NODA^{*2},
Takanori MIYOSHI^{*3} and Kazuhiko TERASHIMA^{*3}^{*1,*3} Toyohashi University of Technology
Hibarigaoka 1-1, Tempaku-cho, Toyohashi, 441-8580 Japan^{*2} University of Yamanashi
Takeda 4-4-37, Kofu, Yamanashi, 400-8510 Japan

Expert skill is needed to operate a crane and transfer load without exciting the load sway. Typical teaching method such as explain verbally is difficult to be understood. Recently, a crane simulator is used to learn operator skill of crane. However, its time of training is no great distinction between a crane simulator and actual crane. In this paper, a simulator capable of shortening the training period of unskilled crane operators is newly built. First, referring to the sway suppression skill taught in crane driving school, sway suppressing control input is derived theoretically. Next, a learning support method that presents haptic and visual sensory information to facilitate acquisition of the sway suppression skill by the unskilled operators is proposed. An experiment was performed to validate the effectiveness of the proposed learning support method and the results indicate that proposed method can be beneficial in the training of crane operators.

Key Words : rotary crane, oscillations, human-machine interface, virtual reality, teaching

1. 緒 言

湾港、建築現場、工場における荷の搬送や積み下ろしには、旋回クレーンが広く用いられている。旋回クレーンは、ブームの旋回、起伏、ロープの巻上げ下げにより、任意の位置へ荷を搬送することができる。また、構造が簡易で分解が可能であることから、作業現場で組立、解体ができる他、小さい設置面積に対して作業面積が広いという利点を持つ。

一般的にクレーンを用いた荷の搬送には、荷の揺れを抑えた操作技術が求められる。この理由としては大きく二つあり、ひとつ目は安全面を考慮し、揺れによる荷の落下による事故を防ぐためである。ふたつ目は、荷が目標位置へ到達した際の残留振動を極力抑え、作業効率を高めるためである。クレーン運転士は、これらを考慮した操作技術が求められ、この技術を習得するために事前に訓練をする必要がある。運転士の試行錯誤的な練習に委ねられ、その訓練期間は長期に渡ることもある。訓練方法には、実機を用いて訓練する方法が挙げられるが、思わぬ事故が起きる可能性があるため、安全面を考えると適当でない。そこで、近年では実際の荷の揺れ等、物理現象を再現したクレーンシミュレータで安全に訓練を行うことが望ましいと考えられる。これを踏まえ、現在では様々なクレーンシミュレータが開発されている。しかし、訓練時間に着目すると、どのクレーンシミュレータも訓練要素が不十分であり、実機を用いた場合と同様の訓練時間を要する。

そこで、本研究では荷の振れを抑制する制振制御技術を応用し、クレーン運転士の訓練時間の短縮を目的とし

^{*1} 学生員、豊橋技術科学大学大学院 工学研究科 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

^{*2} 正員、山梨大学 (〒400-8510 山梨県甲府市武田 4-4-37)

^{*3} 正員、豊橋技術科学大学

E-mail: t_sasaki@syscon.me.tut.ac.jp

たクレーンの操作訓練シミュレータを開発する。制振制御により得られた荷の振れを抑制する制振入力を運転士へ教示することで、運転上ははじめから荷を揺らさない操作技術を効率良く学ぶことができる。まず、クレーンを数学モデル化し、それを基に制振制御を行って搬送シミュレーションにより荷の揺れが抑制されているか確認する。次に、構築した制御系の入力を運転士へ情報提示する方法を考える。本稿では、力覚、視覚的に提示する方法を提案する。最後に、クレーンの操作経験のない複数の被験者により実際に訓練を行い、その効果を評価する。

2. 旋回クレーンのモデル化

本研究の研究対象である旋回クレーンの振り子系は、旋回時における荷の支点の運動が円弧状の軌道となる。そのため、遠心力の影響も考慮し、荷の振れを円錐振り子としてモデリングする必要がある。旋回クレーンの概略図を図1に示す。また、システムを簡略化するため、クレーン本体をたわみのない剛体とし、荷の荷重を質点と考えることとする。また、ロープの重量、たわみ、伸びを無視し、動力伝達部のバックラッシュや摩擦等も無視するものとする。荷によるロープ張力の力のつり合いより、クレーンの運動方程式は式(1)、(2)となる。ここで、 l はロープ長、 L_B はブーム長、 α 、 β はそれぞれブームに対する旋回方向の振れ角と半径方向の振れ角、 θ はブームの旋回角度である。

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha}l(\cos\alpha + \sin\alpha \tan\alpha) + \ddot{\beta}l \sin\alpha \tan\beta + \dot{\beta}^2 l \sin\alpha - 2\dot{\alpha}\dot{\beta}l \sin\alpha \tan\alpha \tan\beta + g \sec\beta \tan\alpha \\ = -\ddot{\theta}l \cos\alpha \sin\beta + \dot{\theta}^2(L_B + l \sin\alpha) + 2\dot{\theta}(\dot{\alpha} \sin\alpha \sin\beta - \dot{\beta} \cos\alpha \cos\beta) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\beta}l(\cos\alpha \cos\beta + \sin\beta \cos\alpha \tan\beta) - \dot{\alpha}\dot{\beta}l(\sin\alpha \cos\beta + \cos\alpha \sin\beta \tan\beta) + g \tan\beta \\ = \ddot{\theta}(L_B + l \sin\alpha) + \dot{\theta}^2 l \cos\alpha \sin\beta + 2\dot{\theta}\dot{\alpha} \cos\alpha \end{aligned} \quad (2)$$

3. 制振入力の導出

旋回クレーンの場合、ブームが旋回動作を行うため、荷の振れは図2に示すように加減速と遠心力の影響で旋回方向と半径方向の2次元の振れとなる。また、図2に示す旋回角度が90[deg]の場合のように、旋回角度によっては半径方向の振れが旋回方向の振れに変化する場合がある。本稿では、旋回動作のみを制御して荷の振れを抑制する制御系を構築することを考える。

この2次元の振れを抑制するため、図3に示すように3段階の速度入力を行う2-Mode Input Shaping法が提案された⁽¹⁾。これは残留振れが最小となるように最適な速度 A_i と変化させるタイミング t_i を導き出し、旋回方向と半径方向の2次元の残留振れを抑制する方法である。この方法を用いて荷の振れの抑制を行う。

Fig 1 Schematic of rotary crane for a load position model

Fig 2 Characteristic of load sway for rotary crane

旋回速度 $\dot{\theta}$ と振れ角 α, β の関係を状態方程式 (3) で表す.

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \ddot{\beta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ (\dot{\theta}^2 - \omega_0) & 0 & 0 & 2\dot{\theta} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2\dot{\theta} & (\dot{\theta}^2 - \omega_0) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \\ \alpha \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (3)$$

状態方程式の固有値から, システムに 2 モードの振れ v_{tot}, y_{tot} が存在することがわかる. これらを式 (4), (5) で表せる.

$$v_{tot} = v_{01}e^{i(\omega_1^+ t_2 + \omega_2^+ (t_3 - t_2))} + v_{12}e^{i\omega_2^+ (t_3 - t_2)} + v_{23} \quad (4)$$

$$y_{tot} = y_{01}e^{i(\omega_1^+ t_2 + \omega_2^+ (t_3 - t_2))} + y_{12}e^{i\omega_2^+ (t_3 - t_2)} + y_{23} \quad (5)$$

ただし,

$$v_{jk} = -\frac{L_B}{2l\omega_0} \left(\frac{\dot{\theta}_2 \omega_0}{\omega_3} - \dot{\theta}_1 \left(1 + \frac{\dot{\theta}_1 \omega_4}{\omega_1 \omega_2} \right) \right)$$

$$y_{jk} = \frac{L_B}{2l\omega_0} \left(\frac{\dot{\theta}_2 \omega_0}{\omega_4} - \dot{\theta}_1 \left(1 + \frac{\dot{\theta}_1 \omega_3}{\omega_1 \omega_2} \right) \right)$$

$$\dot{\theta}_0 = 0 \quad \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_f A_1 \quad \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_f (A_1 + A_2) \quad \dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_f$$

$$\omega_j^+ = \omega_0 + \dot{\theta}_j \quad \omega_k^+ = \omega_0 + \dot{\theta}_k \quad \omega_j^- = \omega_0 - \dot{\theta}_j \quad \omega_k^- = \omega_0 - \dot{\theta}_k$$

ここで, ブームの長さ $L_B=17.5$ [m], ロープ長 $l=20$ [m], $\omega_0 = \sqrt{g/l}$, $\dot{\theta}_j$ は初期速度, $\dot{\theta}_k$ は最終速度である.

v_{tot}, y_{tot} が最小となる A_i, t_i を求め, 搬送シミュレーションを行った結果を図 4 に示す. この結果より, 2-Mode Input Shaping 法を適用することで荷の残留振れを抑制できていることが確認できた. また, 2 回目と 3 回目の速度変化を入力するタイミング t_i は, どちらも旋回方向の振れ角 β が 0 [deg] の時であることがわかった.

4. 操作訓練システム

4・1 力覚情報による訓練システム

スポーツトレーニングをはじめ, 多くの場面でトレーナーが実際に手を取り, 動作を相手の身体に教え込むといった方法は頻繁にみられる. これに着目し, クレーンの操作用インターフェイスであるジョイスティック自体

Fig 3 2-Mode Input Shaping command template

Fig 4 Simulation result for 2-Mode Input Shaping

Fig 5 Experiment equipment of joystick

Fig 6 Indicator for visual guidance

が制振入力操作感覚を教示する方法を提案する。これに伴い、本研究では図5に示すようなアクティブジョイスティックを開発した。このジョイスティックは6軸力覚センサとACサーボモータを取り付け、傾きに応じた速度指令をシミュレータへ与えることができる。このジョイスティックを用いて、モータを駆動させて制振入力を再現させる。これに運転士は手を添えることにより、制振入力操作感覚を覚えることができると考えられる。

4・2 視覚情報による訓練システム

構築したクレーンシミュレータ画面上に図6のようなインジケータを設ける。これを用いて、操作量を視覚的に教示する方法を提案する。このインジケータは、ジョイスティックの傾きによってメーターが変化するようにになっており、各タイミングの操作量を目盛で表している。訓練では、3章で述べたように β が $0[\text{deg}]$ となるタイミングで目盛分だけジョイスティックを傾けることで、制振入力操作感覚を覚えることができると考えられる。

5. 訓練実験

5・1 訓練内容

提案した訓練システムの有効性について実験的に検証する。被験者はクレーン操作の経験がない成人男性13名とし、ランダムに以下の4つのグループに分けて訓練を行う。

グループA：2名、自主訓練、口頭説明なし

グループB：3名、自主訓練、口頭説明あり

グループC：4名、力覚情報提示による訓練、口頭説明あり

グループD：4名、視覚情報提示による訓練、口頭説明あり

グループA以外のグループには、訓練開始前に口頭で制振入力のタイミング等、操作感覚を説明する。訓練内容としては、シミュレータを用いて旋回動作のみで目標位置まで搬送を行い、目標位置到達時の荷の残留振れの大きさで評価する。各グループの被験者は、3回のテスト(何も情報がない状態での操作)と3回の訓練を1セットとし、これを5セットの計30回訓練を行う。最後に3回の最終テストを行い、それを評価対象とする。グループAとBは常にテストの状態となる。

5・2 訓練結果

図にそれぞれのグループの初回のテストと最終テストにおける残留振れの平均を示す。それぞれの訓練結果について考察する。グループAに関しては、なにも情報がなく試行錯誤的に訓練を行うのみであり、その訓練の効果は低い。次に、グループBに関しては、口頭説明によって操作のタイミングは明確である。しかし、その操作量がわからないため、模索した結果ある程度残留振れを減少させることができたと考えられる。

一方、グループCとグループDの残留振れの減少の割合は大きい。はじめから揺らさない操作方法を訓練することで試行錯誤の時間なくし、より効率良く制振操作技術を身に付けられていることがわかる。視覚情報提示が

Fig 7 Condition of experiment

Fig 8 Comparison of residual sway before and after training for each group

最も残留振れを減少できた理由としては、リアルタイムで理論値と自らの操作量の誤差を確認、修正できることから、より訓練効果が高まったと考えられる。

6. 結 言

本研究では、制振搬送における教示機能が備えた操作訓練シミュレータを構築した。旋回クレーンをモデル化して構築したクレーンシミュレータを用いて、旋回動作における荷の制振搬送入力を導出した。また、訓練システムとしてアクティブジョイスティックを用いた力覚情報と、インジケータを用いた視覚情報のそれぞれの提示方法を提案した。訓練シミュレータを用いた訓練結果より、提案した視覚情報提示方法において、従来の訓練方法よりも残留振れが65%小さくなったことを示した。

文 献

- (1) Jason Lawrence and William Singhose, "Command Shaping Slewing Motions for Tower Crane", Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 132, No.1, 2010.
- (2) 末長修; 能動操作器を用いた技能習熟支援システム, 人間工学, Vol.37, pp.288-289, 2001.
- (3) 藤本英雄, 佐野明人, 松下和慶; アクティブメディアを用いたコーチによるスキル伝達, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.2, pp.225-232, 2001.
- (4) 尾崎光芳, 岡夏樹; 技能アーカイブのマイニングと可視化による技能習得支援システム, 電気情報通信学会技報, Vol. 105, No.639, pp.5-10, 2006.
- (5) N. Yong Jian, Y. Noda, K. Terashima, "Simulator Building for Agile Control Design of Shipboard Crane and its application to Operational Training", 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), pp.7375-7383, 2011