作業機の起動停止時の予兆伝達による機械操作支援*

宮 田 圭 介^{*1}, 鎌 田 実^{*2}

Machine Operation Assistance by Using Predictive Information

Keisuke MIYATA^{*3} and Minoru KAMATA^{*3} Department of Art and Science, Shizuoka University of Art and Culture,
1794-1 Noguchi, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 430-8533 Japan

To lessen operation errors in case of the start/stop operating of hydraulic transmission machines, the predictive information system is considered. That is, before actuator's start or stop, its predictive sign is informed to the operator by this system, it is helpful for operators to do more precise operation. This system is applied to the boom tilt operation of the rough-terrain crane. Its motion prediction is assumed by sensing its actuator's hydraulic pressure change. This pressure sensor signal is transformed to the sound information so as to transmit its prediction to the operator. This sound volume and frequency are varied in accordance with its pressure signal. Two professional operators have tried the tilt operation task; this system has lessened operating errors on account of the assistance of the start/stop timing recognition.

Key Words: Prediction, Assistance, Information, Crane, Man-Machine, Human Error

1. は じ め に

機械の運転操作では、操作者には「知覚・認識・判断・操作」の能力が求められるため、操作性の向上を目的として、操作者の能力を支援する研究が行われてきた。例えば、知覚・認識能力の支援に関する研究としては、運転操作に有効となる情報の①呈示内容、②呈示方法、③呈示タイミングの三種類に大別される。

①については、機械システムの状況認識支援のための情報提示法⁽¹⁾、車両特性を考慮した誘導支援⁽²⁾などの報告がある。②については、認知状態解明による最適支援情報の選択⁽³⁾や五感への情報呈示効果実験⁽⁴⁾、人間特性を考慮した呈示方法⁽⁵⁾などの報告がある。③については、システム限界警報の設定タイミング⁽⁶⁾などの報告がある。

特に情報の呈示内容に関して言及すると、機械の運転中の状態を操作者に伝える手法の報告は多いが、あまり検討されていないことに、機械の起動停止の遷移

状態を操作者に伝える手法が挙げられる。

自動車や建設機械など、油空圧や摩擦機構が介在する動力伝達機構では、不感帯や圧縮性など非線形特性が運転操作性に大きく影響を及ぼしている。特に起動停止時における運転操作では、「静止→運動」「運動→静止」の遷移状態を知覚することが難しいため、操作エラーが生じやすい。静止中の機械は情報を発しないため、操作のタイミングがつかめないからである。

例えば、自動車の発進時には、クラッチ操作において、つながるタイミングが分かりにくいいため、エンストを生じることがあったり、アクセル操作において、踏みすぎて急加速したりすることがある。操作レバーやペダルなど操作器の微操作域のストロークを大きくして操作エラーを予防する工夫や、起動停止の状態変化が知覚しやすいよう、触覚や視聴覚情報で操作者に伝える機構は多々存在するが、本質的な解決につがっていない。

以上の背景を受けて、本研究では機械の起動停止が知覚しやすい情報呈示手法を提案する。はじめに、知覚しやすい起動停止情報を検出する機構の検討を行う。その結果を基に、実際の車両に適用できる情報伝達システムの提案を行う。最後に、実際の車両で本手法の適用実験を行い、手法の有効性の検証を行う。

* 原稿受付 2005 年 6 月 2 日。

^{*1} 正員、静岡文化芸術大学デザイン学部(〒430-8533 浜松市野口町 1794-1)。^{*2} 正員、東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)。

E-mail: miyata@suac.ac.jp

2. 起動停止の情報呈示機構の検討

本研究では、クレーンの起動停止操作を対象とする。クレーンの起伏、旋回操作における吊り荷の揺れの原因は、主に起動停止時の操作エラーによって生じることが研究⁷⁾で確認されている。従って、知覚しやすい起動停止情報が呈示できれば、操作エラー減少により吊り荷の振れ幅が低減して、本手法の有用性が特に期待できるからである。

まず、筆者が以前実施したクレーン作業機の運動情報呈示実験⁸⁾を基に、起動停止情報の呈示方法と検出方法の検討を行った。この実験では、作業機の加速度変化を反力で操作レバーにフィードバックする機構を実車に搭載した。

(1) 呈示方法

人間の単純反応時間で考えると、触覚入力の方が視覚や聴覚入力より反応が早い。既報⁸⁾の実験では触覚呈示手法を用いたが、操作レバーの操縦性に干渉する可能性があった。また、視覚呈示では視線移動を必要とするため、本報は受動的に知覚することが可能な聴覚呈示手法を用いる。

(2) 検出方法

既報⁸⁾の実験でも、作業機の起動停止のタイミングが知覚しやすくなることは確認された。しかし、吊り荷の重さが変わると起動停止のタイミングが変わるため、操作レバーの操作量と起動停止が一義的に決まらず、作業機が起動するまでは操作レバーをゆっくり動かさなければならなかった。従って、作業機の負荷変動にも対応できる検出方法が必要である。

操作レバーを動かしてから作業機が起動するまでに時間遅れが生じるが、負荷の大きさによって遅れ幅は変化する。もし、作業機が起動する前に伝達経路の変動を検出して、その情報が呈示できれば、この問題は解決すると考えられる。言い換えると、起動停止の予兆情報を呈示することができれば、負荷変動に関わらずレバー操作が容易になると考えられる。

そこで、ラフテレンクレーンのブーム起伏操作に関わる油圧系について、起伏用油圧シリンダが動く直前の油圧系の変動を計測して、シリンダの動く予兆が操作者に伝達可能であるか、機構検討を行った。ブーム起伏用シリンダを動かす油圧回路の概要を図1に示す。

Fig.1 Hydraulic circuit of the tilt control

Fig.2 Sensor attachment condition

Fig.3 Sensor attachment condition

例えば、操作者が、ブーム伏せ操作により吊り荷を降下させたいときには、操作レバーで切替弁を下げ位置 Down に切替える。これにより、油圧ポンプからの圧油は、切替弁から油圧シリンダに供給されて、油圧シリンダが作動する。ただし、切替弁を動かすには大きな推力が必要となるため、操作レバーで圧力比例制御

Fig.4 Piping vibration and cylinder velocity

弁を動かして、そのパイロット圧油を用いて切替弁を動かす機構となっている。

この回路内の何らかの変動を検出できれば良く、ここでは油圧系の振動に着目した。切替弁が開くか閉じる際に弁の振動が発生し、その振動が管路を伝搬することが経験的に確認されている。そこで、この振動情報を用いて予兆が検出可能か確認するために、25t 吊りラフテレンクレーンを使用して、起伏用油圧シリンダ速度と油圧シリンダに接続された配管の振動測定を行った。シリンダ速度はローラ式エンコーダ（小野測器、RR-721(I200P/R)）をシリンダロッドに装着（図2）し、配管振動は加速度型振動ピックアップ（B&K、Type4371）をゴムホース部に装着（図3）して計測を行った。測定結果の一例を図4に示す。

油圧シリンダ起動時には、昇圧による配管振動が発生してから、それぞれ時間 Ta, Tb, Tc の時間遅れを経て、シリンダが動き始める。従って、時間 Ta, Tb, Tc が起動予兆域となりうるため、配管振動を計測すれば、シリンダの起動の予兆は検出可能であることが確認された。同様に、時間 Tx に示されるように、油圧シリンダ停止時には配管振動が低減してからシリンダ速度は減速しており、配管振動の計測から停止時の予兆を検出することも可能であることが確認された。

そこで、予兆情報を計測する最適検出手段の選定実験を実施した。現実的な手段としては、配管振動加速度計測、管内圧力計測、配管振動音計測の三種類が考えられる。そこで、25t 吊りラフテレンクレーンを使用して比較検討実験を行った。同時にシリンダ速度と、

Fig.5 Cylinder vibration trend (Up)

Fig.6 Oil pressure trend (Up)

傾斜計（アキュスタークリノメータ、PN02338-03）による操作レバー角度計測も行った。

(1) 配管振動加速度計測

- ・使用センサ：加速度型振動ピックアップ
- ・装着部位：ブームシリンダヘッド・ボトム配管

図5に測定結果の一例を示す。操作レバー変位と配管振動加速度、シリンダ速度の関係を示したグラフである。シリンダの起動時刻0.85sec以前に配管振動の発生時刻0.63secを検知することが可能で、起動のタイミングが確実に分かる。しかし、エンジン回転や油圧ポンプ等の振動も伝播するために、振動レベルがばらつく欠点がある。

(2) 管内圧力計測

- ・使用センサ：圧力センサ
- ・装着部位：ブームシリンダヘッド・ボトム配管

図6に測定結果の一例を示す。操作レバー変位とシリンダ内圧力、シリンダ速度の関係を示したグラフである。シリンダの起動時刻0.48sec以前に圧力変動開始時刻0.35secを検知することができて、起動のタイミン

グが確実に分かる。振動ピックアップと比較すると、出力も安定して、価格も安価である。

(3) 配管振動音計測

- ・使用センサ：マイクロホン（ACO, Type7046）
- ・装着部位：切替弁から約200mm離して設置

振動音をそのまま呈示すると、エンジンの音圧レベルが高く耳障りであった。周波数分析を行うと、配管振動特有の数kHzの周波数帯域が検出されるので、ハイパスフィルタを使用して、振動音だけ強調呈示することは可能であるが、高価なシステムとなる。

以上の検討より、圧力センサを用いた仕様が最適であることが確認された。ただし、加速度型振動ピックアップを用いた仕様も装着が容易であるため、二つの仕様で予兆伝達システムを試作した。

3. 予兆伝達システムの試作

3.1 システムの検討 まず、油圧系の圧力変動を検出して、その変動を合成音に変換して、操作者が直感的に分かる予兆情報を音で呈示するシステムの検討を行った。2章の実験より検出手段と呈示手段は絞られたので、呈示音の特性が定まればシステムの仕様が決まる。そこで、呈示音の周波数、音圧、呈示タイミングについて検討を実施した。

(1) 呈示周波数

「フレッチャー・マンソンの聴覚曲線⁽¹⁰⁾」によれば、1000-2500Hzの周波数帯の聴覚感覚が良いため、その領域を主体とする音で予兆を伝達する。また、作業機が低速域では低周波音、高速域では高周波音を呈示すると操作者の感覚と一致するので、起動時には「低周波から高周波」、停止時には「高周波から低周波」に移行する音を呈示する。

(2) 呈示音圧

作業機が低速域では小音量、高速域では大音量を呈示すると操作者の感覚と一致するので、作業機速度に合わせて音圧を変化させる。ただし、常時間こえるのは煩わしいので、作業機がある速度に達したら呈示を止める。

(3) 呈示タイミング

予兆を知覚しやすい呈示タイミングは実験を行わなければ設定が難しいため、起動停止時の圧力変化量に閾値を設定して呈示音のオンオフを行うロジックを設けて、実験チューニングで対処する。

3.2 システムの構成 検討結果を基に、ブーム起伏用シリンダの起動停止時の予兆を操作者に伝達するシステムの試作を行った。システム構成を図7に示す。

Fig.7 Predictive transmission system of the cylinder motion

Fig.8 Oil pressure trend (down)

起動停止のタイミング検出のため、ブームシリンダのヘッドとボトムの配管ニヶ所に圧力センサを装着した。また、シリンダ速度検出のためにローラ式エンコーダをシリンダロッドに装着したが、シリンダの伸縮方向がエンコーダの特性上判別できなかった。そこで、方向判別のために、操作レバーで動く圧力比例制御弁にパイロット圧力センサを装着した。

ブームシリンダ用圧力センサ（又は振動ピックアップ）とパイロット圧力センサのアナログ信号を音源コントローラ用パソコンに取り込み、圧力信号（又は加速度信号）を呈示音信号に変換する。ここでは、ブームシリンダ圧力信号（又は加速度信号） V_{cyl} とパイロット圧力信号 V_{ppc} を掛け合わせて、呈示音信号 V_{out} の音圧と周波数を制御している。入力電圧（圧力、又は加速度） V_{in} が小さい場合には、呈示音 V_{out} の周波数は低く、音圧も小さい。逆に入力 V_{in} が大きい場合には、周波数は高く、音圧も大きい。その信号を操作者耳元のスピーカで再生する。入力電圧 V_{in} に対する周波数、音圧特性 V_{out} は、チューニングに時間を要するため、官能的に最適ではなかったが、第三者が理解しやすいよう図7の特性を用いた。

また、ブーム起伏用シリンダの制御特性は、図6と図8で示されるように、起し方向と伏せ方向で起動停止特性は大きく異なる。ブームの自重による負荷がシリンダに常時加わるため、起し方向の起動には、伏せ方向より高い圧力が必要となるからである。従って、パイロット圧力、ブームシリンダ圧力、シリンダ速度の関係は、起し方向と伏せ方向で異なるため、本システムでは方向によってゲイン K_{ppc} 、 K_{in} を変えている。例えば、このシステムでは配管加速度振動信号を入力した場合、ブーム起伏操作に対して図9のように作動する。ここでは、起し側と伏せ側の両方向にレバー操作を行っているが、エンコーダの特性上、シリンダ速度信号は両方向ともプラス電圧となっている。

Fig.9 Reaction of the sound controller
(Input: Cylinder vibration signal)

3.3 システムの操作方法 試作したシステムの作動原理を、図6を用いて説明する。

図6は操作レバー変位と油圧シリンダ圧力、シリンダ速度の関係を示した一例である。時刻0.12secで操作レバーの操作を開始すると、少し遅れて時刻0.35secでシリンダ圧力は上昇を開始する。さらに遅れて時刻0.48secでシリンダが作動を開始してブームが動き始める。シリンダの変動開始圧力を圧力センサで検出して、この信号が予兆音源コントローラに送られる。

故に、このシステムを用いると、図6の場合、操作者は次のように操作を行うと予想される。

- (1) 時刻0.12secにレバー操作を開始する。
- (2) 時刻0.35secにスピーカから予兆情報を受けて、油圧シリンダの起動への心構えをする。
- (3) 時刻0.48secにブーム速度の変化を目で確認して、操作を行う。

操作レバーの動かし方が変わると、シリンダ圧力の上昇開始時刻やシリンダ作動開始時刻も当然変わるが、これらの変動順序は変わらない。従って、この方法によって、シリンダが動く前に起動情報を獲得すること

Fig.10 Evaluation test condition

ができるため、より正確なタイミングでレバー操作が可能になり、吊り荷の振れ幅が低減して、安定した操作が行われると想定される。

4. 実験と考察

4.1 客観評価 本システムの客観評価を第三者が確認することは難しい。そこで、研究の方向性が正しいことを実証するために、予兆音の有無による操縦性評価の簡易実験を行った。切替弁の振動音（予兆音）が良く聞こえる市販 25t 吊りクレーンを使用して、操作者に防音ヘッドホンを装着してもらい、外部騒音を遮断した状態で作業を行った。被験者には、高度技能

を有する職業操作者（経験 7 年）2 名を用いた。このレベルの職業操作者であれば、再現性の高い操縦能力を有することが実験⁽⁴⁾で確認されている。試験方法は、図 10 のようにブームを最大長 32.5m に固定して、起伏角度 45-60deg で吊り荷を往復させて、前後 2 つのパレット上で荷を静止させる作業である。超音波距離センサ（キーエンス UD360、検出精度:±6mm）を用いて、円筒形（直径 80cm、質量 500kg）の荷の振れ幅、振れ止め操作の所要時間を測定した。この試験の場合、起伏角 45deg での前後方向±50cm の荷揺れは、操作者からは視野角 0.1deg、±6mm の変位にしか見えない。見にくい吊り荷の微操作は極めて難しいため、クレーンの操作性の良否が容易に判定可能となる。

順序効果の影響を避けるために、「遮音作業→通常作業→遮音作業→通常作業」の順序で 10 往復ずつ試験を行い、後半 20 往復のデータを使用した。

吊り荷をパレット上で静止させた時の代表的な操作レバー変位と吊り荷変位のパターンを図 11、図 12 に示す。予兆音が聞こえる場合、パレット上での吊り荷の振れ幅は、遮音しない方（図 11）が遮音時（図 12）より平均 6%低減した。また、振れ止め所要時間も、平均 27%短縮した。この結果から、切替弁の振動音（予兆音）が聞こえる方が操縦しやすいことが確認された。

4.2 主観評価 簡易実験で有効性が確認されたので、別の職業操作者（経験 7 年）2 名を被験者として、25 t 吊りラフテレンクレーンに本システムを搭載して、システムの有無による操縦感の評価を行った。

Fig.11 Test result (with sound)

Fig.12 Test result (without sound)

予兆伝達システムとして、ブームシリンダ配管の圧力検出仕様と加速度検出仕様の二種類用意したが、加速度検出仕様は音色が不快であったため、圧力検出仕様で実験を行った。試験方法は、4.1の試験と同様、ブーム起伏角度 50-55 度で円筒形の吊り荷を往復させて、前後のパレット上に静止させる作業である。操作者の主観評価は以下の通りであった。

- ・起動停止直前の状態変化やブームの速度変動が音で知覚できる。切替弁の振動音に煩わされないで、疲れにくく作業に集中できる。

- ・起動タイミングが分かるので、目を凝らさなくても微操作やイン칭ング操作が容易にできる。

- ・停止のタイミングが分かるので、従来はブーム先端を見ながらブームのたわみによる残留振動が残らぬよう停止操作をしていたが、ブームを見なくとも停止操作が可能となった。伏せ操作時の数十 mm の微妙な操作等に特に有効である。

結論として、予兆音の呈示により、起動停止のタイミングを操作者が正確に知覚できるため、操作が容易になり、ブームの起伏操作エラーの減少することが主観、客観評価の両面から確認された。

5. お わ り に

本研究では、油空圧や摩擦機構が介在して非線形特性のある伝達機構を有する機械を対象に、運転操作における起動停止が知覚しやすくする手法について検討を行った。得られた結果は以下に要約される。

- (1) 油圧シリンダの起動停止時に発生する切替弁の振動に着目して、シリンダの動く予兆が検出可能な実験検討を行った。
- (2) 起動停止時の油圧系の圧力変動を検出して、その変動を合成音に変換して、予兆情報を操作者に呈示するシステムの検討を行った。
- (3) ラフテレンクレーンを対象に、本システムを用いた操縦実験を行い、提案する手法の有効性を示した。

なお、本研究は著者がコマツ在籍時に実施したものであり、発表許可を与えていただいたコマツと、研究遂行にあたりお世話になりました碓政典氏、池田昌弘氏、関野雄作氏、野谷勝博氏に謝意を表します。

文 献

- (1) 狩川、高橋、石橋、北村「オートパイロットの状況認識支援のための情報提示法に関する実験研究」、ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.5, No.1, (2003), 11-17.
- (2) 前田、鎌田、小竹「車両ダイナミクスを考慮した歩道除雪車両の運転操作支援システムの開発」、機講論, No.04-53, (2004), 233-236.
- (3) 藤田、鎌田、宮田「機械操作における技量の抽出に関する研究」、機論 C, Vol.68, No.666, (2002), 547-554.
- (4) 宮田、池田、出浦、早川「クレーン操作において見えないブームの動きを知覚させる方法」、機講論, No.96-20, (1996), 246-249.
- (5) 宇野「人間の特性を考慮した視聴覚表示による情報提供方法」、自動車技術, Vol.58, No.12, (2004), 22-27.
- (6) 鈴木、丸茂「システム限界時におけるドライバの運転特性」、機論 C, Vol.69, No.685, (2003), 2431-2436.
- (7) 宮田、池田、出浦、早川「ラフテレンクレーンの操作性」、機講論, No.940-59(H), (1994), 88-92.
- (8) 宮田、池田、柏原、出浦「クレーン操作において操作者の技量を引き出す方法」、機講論, No.98-37, (1998), 195-198.
- (9) 宮田、池田、出浦、早川「熟練者を用いたクレーン操作性の評価」、機講論, No.96-5(I), (1996), 516-519.
- (10) 長町他「現代の人間工学」、(1986), 121, 朝倉書店.