

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 14 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420181

研究課題名(和文) 索構造機械装置の波動制御

研究課題名(英文) Wave control of rope-structured machine

研究代表者

西郷 宗玄 (Saigo, Muneharu)

東洋大学・工業技術研究所・客員研究員

研究者番号：80357053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：クレーンなどの懸垂索を用いた運搬機械の性能向上を図る新しい手法として、懸垂索自体の波動伝搬制御法と、質量を無視した索と荷質量で構成する単振子が多重単振子系に懸垂される場合の波動伝搬特性を利用した振れ止め制御法を開発した。懸垂索波動制御は、差分モデル制御則を用いた懸垂索支持点境界で波動無反射状態を生成する手法である。振子振れ止め制御は、制御対象振子が制御器内に構築する波動伝搬制御された多重単振子系に懸垂される状態を支持点の加速度制御によって実現し、振れ止めと目標位置への移動を統合した制御手法で、走行を伴うクレーン巻き上げ巻き下しに対応できることを実験的に検証した。

研究成果の概要(英文)：We developed a new wave control method for the transporting machine constructed by the suspended rope such as crane. Two approaches were investigated; the wave control of the suspended rope with pay-load near the support boundary, and the wave control of the simple pendulum system by the support acceleration. The control strategy of the suspended rope is based on the finite difference model of the rope. The condition for no reflection at the support boundary gives the control force at the boundary finite difference interval. The pendulum approach uses the wave-controlled suspended multiple simple pendulums system in the controller. The connecting condition between the real pendulum and the one in the controller brings the wave control as the support acceleration. The feedback control of the position and velocity of the support are added to the support acceleration to place the support at the other position than the original one. This control strategy was confirmed experimentally.

研究分野：機械力学

キーワード：振動制御

## 1. 研究開始当初の背景

索（ロープ）を用いた運搬機械装置は広く社会に普及している。なかでも懸垂索を利用したクレーンとエレベータはその代表的機械装置である。クレーンは近年のビル建築の高層化に伴って長大化しておりロープ長も数十メートルに及ぶことは珍しくない。また、エレベータも建物の超高層化でロープの長尺化は周知の通りである。クレーンの長大化やエレベータロープの長尺化はロープ系の振れ振動の長周期化をもたらす制振をより一層困難なものにしている。

クレーンは上述の建設現場で使われる屋外装置と工場内で使われる屋内走行クレーンに大別される。屋内クレーン装置の場合は運搬対象や利用形態が特定されることが多く、また、ロープ長も屋外クレーンに比べて短く、各種センサーや制御装置の管理が容易な場合が多い。そのため、制御理論を適用した制御手法の多くの研究があるが、屋内用か屋外用に関わらず上述のクレーン装置の制振方法は固有振動に基づく振動理論を基礎とする振動制御である。屋内走行クレーンを対象にした研究で設定されるように、ロープ振れ角、ロープ長、ロープの伸縮運動速度、加速度などが計測される場合には振動系同定が可能であり、種々の制御理論を適用した制御則の構築とその制御性能は理論的には保証される。しかし、屋外クレーンでは計測には制約が多く、また、一般の建設機械に精巧な IC 機器を導入することは実用的でない。そのため、システム同定が完全でなくても、また、多少の制振性を犠牲にしてでも、簡便な手法で効果的な振動制御に代わる制振技術の開発が望まれる。一方、エレベータロープは下端の境界条件が自由ではなく完全固定または力学的拘束を受けるため、懸垂索自身の制振が課題である。

## 2. 研究の目的

1. に記した研究状況から、本研究では、ロープと荷質量から成るクレーン系とエレベータロープ系を対象として波動吸収制御に基づく新しい制振技術の開発を目的とする。波動制御は系全体の特性を必要としない、局所情報で振動エネルギー吸収をする制御法であり、振動制御法にない利点を有する手法である。懸垂索系（下端荷質量を有する場合も含めて）の制振手段には、懸垂索自体の波動伝搬制御による方法と、索質量を無視した索と下端荷質量からなる単振り子系として扱い、多重単振り子系の波動伝搬制御による方法が考えられる。本研究で両手法の性能を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) 懸垂索の波動制御

懸垂索の運動方程式から上端支持境界近傍に適用する差分制御則を導出し、数値シミュレーションによってその有効性を検証した。波動伝搬挙動が物理的に類似している多重単

振り子系の振れ角波動制御則は、本報告者らによって以前に提案されているが、ベッセル運動方程式となる懸垂索は角変位ではなく横変位であるため波動伝搬解を新たに導出しなければならない。導出した差分モデルでの波動伝搬解を用いた差分モデル数値シミュレーションによって制御性を確認した。次に、差分制御則を分布定数系に適用してその有効性を数値シミュレーションで検証した。下端自由の無負荷の懸垂索ではベッセル方程式の解は第1種0次ベッセル関数となり直交性のある固有モード展開が可能である。しかし、自由下端に付加質量を有するクレーン系や下端固定のエレベータロープの懸垂索系の場合は解を直交固有関数展開できない。本研究で計算法を新たに開発した。

### (2) 多重単振り子系の波動制御

多重単振り子系の振れ角運動と支持点加速度は連成しているので支持点加速度を制御することで振れ角制御ができる。支持点加速度で走行機能も同時に制御できるためクレーンに適用するには最適な制御方式である。報告者らによって以前に提案されている、均質多重単振り子系の支持点加速度制御による振れ角波動制御アルゴリズムでは、均質多重単振り子系の下端からの振り番号と振れ角の積を変数とする波動伝搬解を用いていた。この波動伝搬解は隣接3振子の特性であるため、制御に適用するには2振子が均質である必要があった（3振り目の挙動を理論的に演算する）。

本研究では、均質2自由度懸垂単振り子系を制御器内に数学モデルとして構成してオンラインで挙動を演算することで、既に得られている波動伝搬解を用いた支持点加速度制御による振り振れ角波動制御を1自由度実単振り子系に適用した。本制御法では制御器内に構築する数学モデルの単振り子長さや質量が実単振り子長さに一致しなくても波動制御が実現するので、最適な数学モデル単振り子系を検討した。実単振り子長さが制御時に変化する場合（巻き上げ巻き下げ時）には概略の実単振り子長さが分かれば制御性が向上するので、この特性を考慮した数学モデルの最適化も検討した。一方、適用する波動制御法は支持点加速度制御として与えられるため、制御対象実振り子系の支持点位置を制御できない。そこで、波動制御加速度に支持点の位置と速度のフィードバック制御を重畳することで、多重単振り子系を目的位置に移動させる。制御実振り子の巻き上げ巻き下しに伴う、数学モデル振り子系と実振り子で構成する非均質多重単振り子系の波動伝搬特性に及ぼす波動制御とフィードバック制御の相互作用について検討を加えて、クレーン走行に最適な数学モデル構造を明らかにした。数値シミュレーションによる制御結果を実験検証した。

## 4. 研究成果

### (1) 懸垂索の波動制御

下端に集中質量を有する懸垂索運動方程式の差分近似式から隣接節点変位差を変数とする漸化式を導出し、差分要素に作用する張力に対応する節点番号と変位の積を変数とする差分伝搬解を導出した。差分解をラプラス逆変換してベッセル関数の畳み込み積分表現の時間領域応答解を求めた。上端固定境界での波動制御として、境界節点方程式を内部節点方程式と等価となるよう伝搬解を用いて補償することで、無反射境界を生成した。

導出した波動解の近似精度を、数値シミュレーション解を基準として評価し、懸垂索制御に十分な精度が得られることを確認した。

求めた伝搬解を用いて、下端境界が自由で下端質量の無い場合と有る場合の自由振動制御応答計算により制御則の検証を行った。懸垂索の挙動は、下端質量が無い場合はベッセル関数で表現し、下端質量がある場合は差分モデルを用いた。計算例を図1、図2に示す。索長さ1m、初期変位0.1mで、下端質量は索質量の100倍である。50分割差分制御則を用いている。いずれの場合も5秒程度で整定している。

上記の図より分かるように、差分制御則では、境界近傍の変位が比較的大きくなるため、制御変位を制限する場合の応答も計算した。整定時間は長くなるが(図1の例では制御

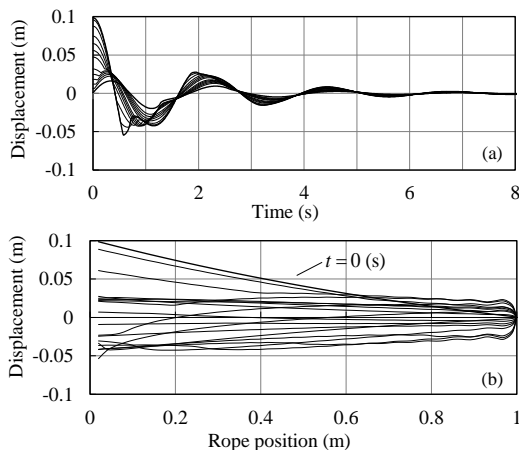


図1 荷質量無の索自由振動制御

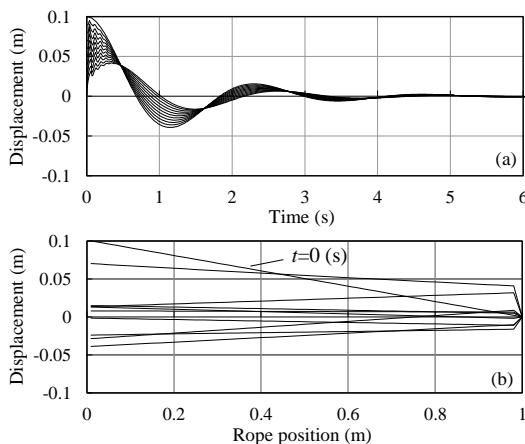


図2 荷質量有の索自由振動制御

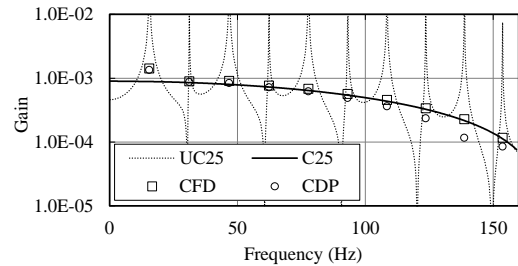


図3 下端固定荷質量有の索強制振動制御

限変位1cmで整定時間約10秒)、制御則は有効に作用することを確認した。

エレベーターロープへの適用可能性を確認するため、下端固定境界の強制振動応答を検証した。計算例を図3に示す(索形状は図2と同じ)。同図は、下端から10cmの位置で加振した場合の索中央の変位の非制御周波数応答計算(UC25)、制御周波数応答計算(C25)とシミュレーション応答(差分モデル演算CFDとサイン関数近似解CDP)である。制御則が十分有用であることが確認できる。

導出した差分制御則は、下端質量を有する場合や差分自由度数が十分大きい場合には上端制御節点での節点間の自重差の影響を無視できるので、その近似精度も検討した。図3の場合では殆ど応答に差異はなかった。

## (2) 多重単振子系の波動制御

多重単振子系の波動制御をクレーンに適用する場合、クレーンロープと荷質量からなる最下端振子長が可変となり、本質的に非均質多重単振子系の波動伝搬特性となる。制御器に構築する数学モデルでは質量が不均質な場合も可能であるが、合理的な設計則を見いだせなかったため、本研究では均質質量とした。クレーン荷質量は可変であるが、全質量を同一としているため、制御則は荷質量には依存しない(運動方程式が各質量の質量比のみで表されるため)。全振子質量が同一の場合、最下端振子長 $l$ とそれ以外の振子長 $l_c$ の比 $\lambda=l_c/l$ が波動伝搬特性を支配する。質量均質な多重単振子系には振子長比 $\lambda$ に対して波動伝搬限界周波数が存在する。クレーン制御は自由振動制御であり、制御対象振子と数学モデル振子を統合した系の固有振動が制振対象であるため、系の全固有振動が波動伝搬限界内に存在する必要がある。

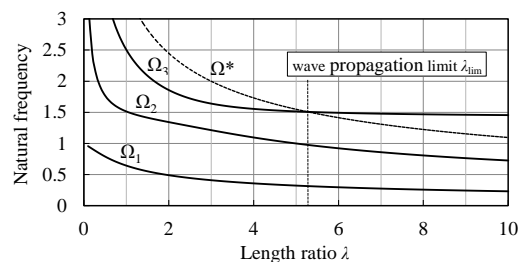


図4 振子長比に対する波動伝搬限界

図4に3自由度系の $\lambda$ に対する固有振動 ( $l=1\text{m}$ で正規化)と波動伝搬限界を示す。図4より数学モデル振子長さ $l_c$ は制御対象振子長さの5倍程度が限界であることが分かる。この特性は固有振動モードの局所化現象で、多重単振子自由度数が大きい場合にも固有振動数1.5近くの固有振動が波動伝搬しなくなる。

波動伝搬解から得られる支持点加速度は振れ角制御はできるが、支持点位置を考慮できないため、支持点の位置と速度のフィードバックを振れ角制御加速度に重畳する。このフィードバック制御は振子系支持点の目標位置への移動機能のみでなく、最下端振子の波動伝搬限界による位相特性を変える作用を有している。その効果によりフィードバック制御によって波動伝搬限界を超える振子長さ比を使用することができる。

図5は $l=1\text{m}$ の振子を、 $l_c=1,10,100\text{m}$ の数学モデル振子で適切なフィードバック (F/B) 制御を併用した波動制御の例である。図中のF/B係数は、 $K_a$ :波動制御係数、 $K_v$ :速度係数、 $K_p$ :位置係数である。 $\lambda (=l_c/l)=100$ でも制御可能であることが分かる。

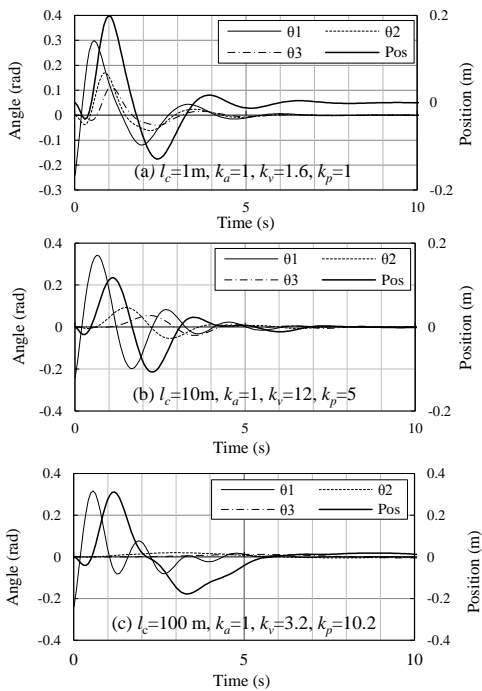


図5 F/B制御併用による数学モデル振子長さの利用範囲の拡大

F/B併用による $\lambda$ の利用可能範囲の拡大は、クレーンロープ長変化に対する数学モデル振子設計に非常に有用である。図6に $l=10\text{m}$ の場合の $l_c=0.1,1,10,100\text{m}$ に対する効果的なF/B係数の範囲を示す(図6(a)、(b)、(c)、(d)に対応)。各図の上段が振れ角制御特性、下段が支持点位置制御特性である。 $l_c=100\text{m}$ の場合にはF/B係数の広い範囲で制御特性が良いことを示している。

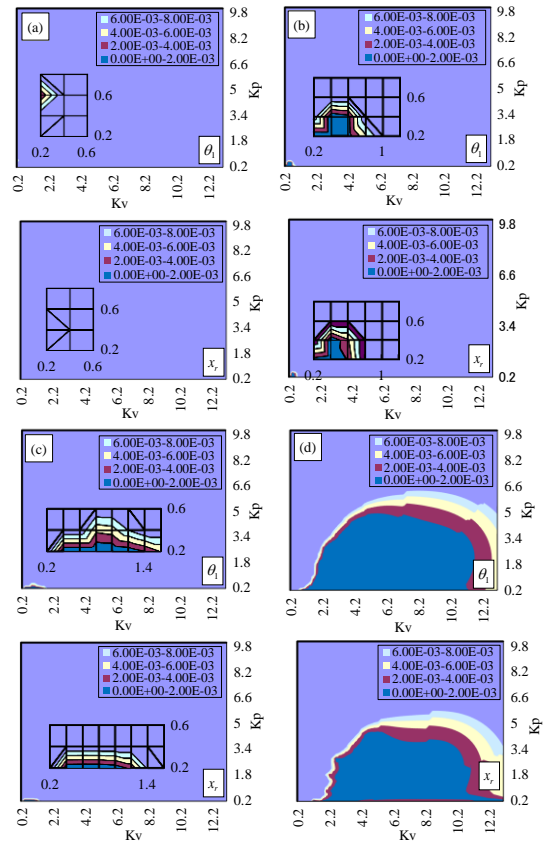


図6 数学モデル振子長さに対するF/B係数の制御特性

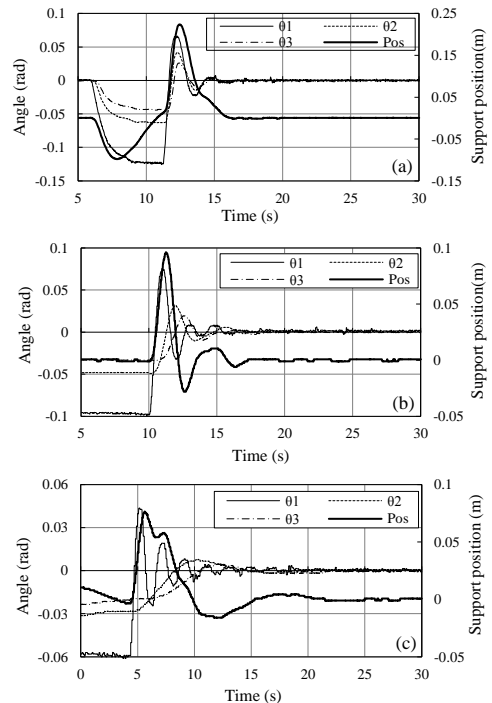


図7 数学モデル振子長さの違いによる制振特性の実験結果

数値シミュレーションで得られた結果を検証するための実験を行った。実験装置は、有効ストローク60cmのボールねじをサーボモ

ータで駆動する方式である。ボールねじナットにパルスモータ式巻き上げ巻下し機構を下端に有する単振子を装着した。

図7は  $l=1\text{m}$ ,  $l_c=1, 10, 100\text{m}$  (同図(a), (b), (c)) の制御実験結果である。数学モデル振子長比  $\lambda$  に係らずほぼ同じ制振効果が確認できる。図8は巻き上げ、巻き下し制御実験、図

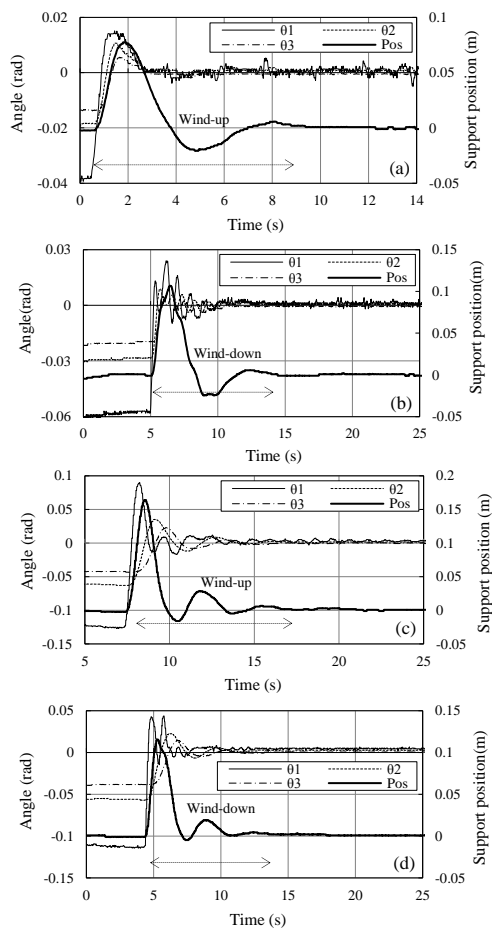


図8 巻き上げ巻き下し制御実験  
(a), (b):  $l_c=1\text{m}$ , (c), (d):  $l_c=10\text{m}$

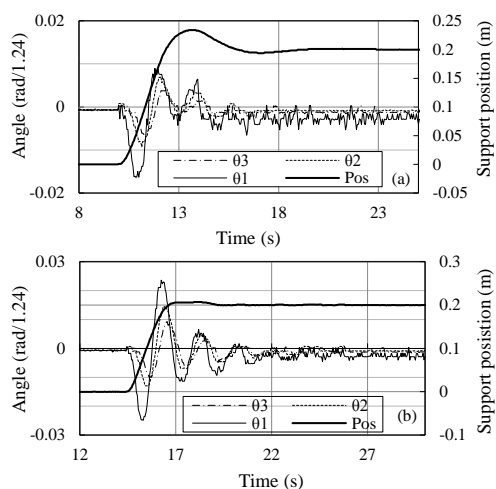


図9 走行制御実験

$k_a=0.25$ , (a):  $k_v=k_p=1.0$ , (b):  $k_v=k_p=2.0$

9は走行制御実験である。図8は数学モデル振子長の大きい方が制振性のよいことを示している。図9は走行制御が十分機能していることを示している。

数値シミュレーションおよび実験により、開発した懸垂索系の波動制御に基づく制振法の有用性を確認した。また、1m懸垂索の波動制御と1m単振子の波動制御の整定時間がほぼ同じであることから、エネルギー吸収法としての力学的共通性を確認した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

(1) Xiolan Zheng, Muneharu Saigo, Hiroyuki Iwamoto, Control of a crane rope-and-mass system by wave absorption with support feedback control, Mechanical Engineering Journal, Reviewed, Vol. 4, No. 1, 2017, pp. 16-00397 1-11, DOI: 10.1299/mej.16-00397

(2) Xiolan Zheng, Muneharu Saigo, Wave control of crane rope-and-mass system, Mechanical Engineering Journal, Reviewed, Vol. 2, No. 6, 2015, pp. 16-00397 1-16, DOI: 10.1299/mej.16-00397

16-00397 1-11, DOI: 10.1299/mej.16-00397  
(3) 鄭小蘭, 西郷宗玄, 懸垂索の差分モデル制御則に基づく波動制御, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 80, No. 818, 2014, pp. 2014dr0306 1-14, DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0306

[学会発表] (計5件)

(1) 鄭小蘭, 西郷宗玄, 岩本宏之, クレーンの波動制御とフィードバック制御の統合振れ止め制振特性, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2016, 2016年8月23日, 山口大学常盤キャンパス (宇部市)

(2) 鄭小蘭, 西郷宗玄, 一次元構造体を介した遠隔振動エネルギー吸収, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2015, 2015年8月25日, 弘前大学文京町キャンパス (弘前市)

(3) Xiolan Zheng, Muneharu Saigo, Wave control of rope and payload system using virtual multiple pendulums system, SICE Annual Conference 2015, July 28, 2015, Hangzhou (China)

(4) 鄭小蘭, 西郷宗玄, 多重懸垂系の波動制御, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2014, 2014年8月28日, 上智大学四谷キャンパス (東京都)

(5) Xiolan Zheng, Muneharu Saigo, Wave control of suspended rope based on finite difference model, The 21st International Congress on Sound and Vibration, June 13, 2014, Beijing (China)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西郷 宗玄 (Saigo, Muneharu)  
東洋大学・工業技術研究所・客員研究員  
研究者番号：80357053

(2) 研究分担者

岩本 宏之 (Iwamoto, Hiroyuki)  
成蹊大学・理工学部・准教授  
研究者番号：90404938