

平成21年6月22日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560241

研究課題名(和文) 走行ロープシステムの振動抑制

研究課題名(英文) Vibration Control of Traveling Rope

研究代表者

西郷 宗玄(SAIGO MUNEHARU)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・グループ長

研究者番号：80357053

研究成果の概要：走行ロープの運動方程式を位置座標で差分化し時間座標でラプラス変換して境界の影響を受けない内部節点の運動方程式の漸化式を導き、内部節点の運動方程式から得られる進行波・後退波解が境界節点の運動方程式を満足するための条件より、境界近傍（1差分間隔位置）における波動吸収制御則を生成した。制御則は伝達関数のカーブフィット多項式近似伝達関数に基づくフィルタおよび伝達関数の逆ラプラス変換による時間関数の畳み込み積分に基づくアルゴリズムで実現し、その有効性を実験検証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,500,000	0	1,500,000
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	600,000	4,100,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：波動制御、走行ロープ、振動制御、境界制御

1. 研究開始当初の背景

世界の超高層ビル建設が活発な今日では分速 1010m もの超高速エレベーターが開発されている。このような超高速エレベーターは主として吊ロープ式であり、横振動の固有振動数が低い地震時の共振が安全確保の面で最も厳しい課題となっている。中小地震時にはその復旧までの時間短縮、さらに大地震の際にはシステム自身の損傷を軽減するための対策が要求される。近年発生した2004年新潟県中越地震では震源地域での共振による被害のほか、約 150km 離れた関東

平野部では長周期震動が発生し、高層ビルにおいてエレベーターのロープ類が昇降路内の機器に引っ掛かる被害を、さらに、2005年千葉県北西部を震源とする地震では広域で多数のエレベーターが地震時管制運転で長時間にわたり休止する被害を経験した。

既に稼働しているエレベーターシステムには種々の安全対策が施されているが、地震対策技術は、入力が未知であるが故に、これで万全ということではなく、常に、より高性能の技術開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、超高速エレベーターシステムをターゲットとして、索（ロープ）を介して高速駆動される移動体システムの波動制御を基本とした制振制御の新しい手法を開発し、エレベーターシステムの主構成要素であるロープ振動を吸収することを目的としている。エレベーターロープシステムは、上下のシーブ（滑車）で支持され、回転駆動されるロープにかご室（移動体）とカウンターウェイト（移動体）が結合されたもので、エレベーターシステムを振動系として見ると、かご室の走行に伴ってロープ長が変化し、加減速走行時にはロープとかご室の慣性力による張力変化が発生する時変系システムである。時変システムを振動制御問題として扱う時変重みを用いた非定常制御理論の研究では、最適制御理論を適用した研究やロバスト振動制御の研究例はあるが、その制御効果の検証は数値計算にとどまっており、実用面からはより原理的に制振効果の見込める新しい手法の開発が望まれる。本研究は、これらの課題の解決を目指して、走行ロープの支持端近傍で波動吸収制御を行う、ロープ長に依存しない新たな制御手法の開発に関するものである。

3. 研究の方法

(1) 本研究の制御原理は、走行速度とロープ張力をパラメータとして、ロープの運動方程式を差分法によって離散（集中定数）化し、境界条件の影響を受ける差分節点（境界節点と呼ぶ）の運動方程式を、境界条件の影響を受けない差分節点（内部節点と呼ぶ）から導かれる波動伝播解が満たすように制御によって境界条件を補償するものである。境界節点の運動方程式が内部節点のそれと同一となることにより、見かけ上、境界のない無限構造物が構成されて、振動エネルギーが系外に吸収される。ここで実際のエネルギー吸収は境界節点を内部節点と同一にするための制御器によって行なわれる。境界条件として波動伝播条件を付加したとも理解できる。ロープが弦として扱える場合には、境界節点は固定境界に隣接する1節点であり、その節点の変位を計測して制御量を演算することで、境界そのものを制御することなく、境界を制御するのと同様の波動制御性能が実現する。制御に必要なパラメータである速度と張力はロープ・移動体の走行によって変化するため制御係数は一定に決められないが、システムの色度と張力を計測することは容易であり、それらの計測値を用いて制御則の係数を適宜変更する。

(2) 差分化したロープ運動方程式をラプラス変換して得られる差分方程式の特性根（解）は隣り合う節点間の変位の伝達関数と

なるので周波数特性をカーブフィット技法で多項式近似してフィルタを生成すれば、計測した実変位の隣接変位の時間挙動が制御器で予測できる。境界節点運動方程式と内部節点運動方程式の差の項には境界外の仮想的な節点変位が現れる。この仮想節点変位を特性根で予測して補償することで無限構造体と同じ挙動が実現できる。もし、伝達関数がラプラス逆変換できれば計測変位と逆変換関数との畳み込み積分で隣接変位の応答を直接演算できる。多項式近似フィルタではある範囲の周波数特性を十分な精度で一致させても定常特性のみが保証されるだけであるため、過渡特性が近似前の特性と異なりサンプリング間隔によっては不安定化の可能性を含んでいる。逆ラプラス変換による厳密解の探索も試みている。

(3) 実用的なロープは剛性を有し、はりとしての特性が現れるため、差分化したはりの波動伝播特性と境界近傍での波動吸収制御性を明らかにする。解析手順はロープの場合と同じである。波動伝播の基本特性を調べるため最も単純なオイラーベルヌーイはりを扱う。運動方程式を座標で差分しラプラス変換して差分方程式を導出する。内部節点方程式の特性方程式から特性根を求め、周波数特性の多項式近似を試みるとともにラプラス逆変換を探索する。境界条件を見かけ上消失させる制御応答計算を行い、差分モデルの波動解の性質と波動伝播特性を明らかにする。

(4) 走行ロープの波動制御実験を行い、制御則の有用性を検証する。

4. 研究成果

(1) 2006年度

運動方程式を位置座標で差分化し、時間座標でラプラス変換して境界の影響を受けない内部節点の運動方程式の漸化式を導き、内部節点の運動方程式から得られる進行波・後退波解が境界節点の運動方程式を満足するための条件より波動吸収制御則を生成した。内部節点の運動方程式に存在して境界節点の運動方程式に存在しない項が制御量であるので、その項を境界節点変位に対して周波数を変数とした伝達関数として求め、制御フィルタをカーブフィット技法によって生成した。これは制御伝達関数が無理関数を含むため一般的な逆変換手法では実時間に変換できないためである（次年度に逆変換に成功した）。片側の境界節点に制御器を設置する片端制御の場合（上流側と下流側）と両側境界節点に設置して両端制御する場合の3つの場合の特性及び制御性能を数値シミュレーションによって検証し、生成した制御フィルタで波動吸収制御が実現することを明らかにした。走行速度に関わらず、片端制御では

ロープ長内で加振節点から制御節点に向かって波動伝搬状態が実現し、加振節点から非制御節点間では通常の振動モード（共振周波数では共振モード）となること（振幅は十分抑制される）、両端制御では、其々の制御節点に向かって波動が伝播する状態を実現することを確認した。共振周波数近傍で制御振幅は非制御に比して十分小さい。一方、カーブフィット技法に基づく制御フィルタのため、長時間制御演算で発散する場合があることも明らかになった。さらに、ロープなどの分布定数系の位置座標差分による制御手法の汎用性を検証するため、ロープより適用条件が厳しいはりについて同じコンセプトに基づく制御則を適用して、差分手法がより一般的に適用できることも確認した。また、次年度以降の制御実験のためのロープシステム波動制御実験装置設計と部分製作を行った。

(2) 2007年度

① 走行ロープシステムの波動制御アルゴリズムの開発：運動方程式を位置座標で差分し時間座標でラプラス変換して得られる境界の影響を受けない内部節点運動方程式の漸化式からラプラス逆変換で進行波・後退波解の時間表現厳密解を導出し、境界節点運動方程式を満足するための条件となる波動制御則に基づいた制御演算アルゴリズムを生成した。波動伝播の時間表現厳密解は位数2の第1種ベッセル関数で表現される。片側の境界節点に制御器を設置する片端制御の場合（上流側と下流側）と両側境界節点に設置して両端制御する場合の3つの場合について特性及び制御性能の時間軸シミュレーション検証より、この制御アルゴリズムが走行ロープシステムの波動制御を実現することを検証した。制御アルゴリズムは境界から1差分間隔内側の節点の実計測変位と本年度に導出した波動伝播厳密解との畳み込み積分で表され、走行速度はパラメータとして畳み込み積分に含まれるため演算中に安定的に随時変更できる。また、本アルゴリズムを実用ロープシステムに適用するため、走行ロープに対するフリクションレス推力発生機構の開発を行い、前年度に部分的に製作した実験装置を完成させて予備制御実験を行った。

② 走行ロープシステムの波動伝搬特性解析：本制御法は見かけ上、境界条件を消失させて集中定数系無限構造として波動伝搬状態を実現しているため、制御時の波動伝搬特性と分布定数系の波動伝搬特性とを比較検討することにより、差分モデルに基づく制御性能の限界を評価することができる。集中定数系と分布定数系の波動伝播状態の比較による現象理解は、構造としてより複雑であるはりの方が特徴がより明確に現れると考え

られるので、本年度ははりに関してもロープと同じアプローチによる制御の可能性の検討を行った。オイラー・ベルヌーイはりの差分モデル運動方程式をラプラス変換し、特性方程式から特性根を求め、カーブフィット技法により多項式近似伝達関数の導出をMatlabソフトウェアで試みた。しかしながら多項式次数を調整しても周波数 $\rightarrow 0$ となる極低周波域の同定が不可能であった（誤差が非常に多くなる）。

(3) 2008年度

① 走行ロープシステムの波動制御アルゴリズムの開発：前年度に開発した進行波・後退波解が差分境界節点運動方程式を満足させる波動吸収制御則に基づく制御アルゴリズムの制御性能を走行ロープ実験装置で検証した。制御は理論伝達関数のカーブフィット多項式近似伝達関数に基づくフィルターと伝達関数の逆ラプラス変換による時間関数の畳み込み積分に基づくアルゴリズムで検証した。多項式近似伝達関数は定常特性（ゲイン及び位相）は十分な精度で制御伝達関数を表現しているが過渡特性に逆応答を含むため制御時間が長くなると発散することが分かった。Matlabで導出した多項式近似伝達関数は不安定零点を含みステップ応答が逆振れを発生させることが要因であると考えられる。時間関数の畳み込み積分による方法は必要データ数が多くなる（制御器に負荷がかかる）が制御可能であることを確認した。

走行ロープ制御実験を行い、共振周波数でも十分制振された波動伝播状態となることを確認した。

② 走行ロープシステムの波動伝搬特性解析：実用的なエレベーターロープを念頭にして、運動方程式で剛性を考慮する差分はりモデルを対象とする制御則の検討を行った。基本特性を把握するため非走行はりを対象として因果律の成立する厳密な時間領域の解を求めた（ラプラス逆変換）。波動伝播の時間表現厳密解は位数1の第1種ベッセル関数を含む複素根として表現される。独立な4つの共役複素厳密解が得られ、その一次結合から得られる実数解で隣り合う節点間の変位を表現して境界節点を内部節点と等価とする補償制御則を構成した。ラプラス領域での位相特性から因果律（波動伝播に有限時間を要するという物理的合理性のこと。周波数領域の計算では見かけ上現れない。）が成立して位相遅れが全周波数領域で成立する条件を求めた。その結果、複素共役解の算術平均解は全領域で因果律が成立し、この解を用いた制御は、因果律の成立しない理想的な波動伝播解に近い応答を示す唯一の解であることが分かった。はりでは波動伝播しない定在波が存在するため進行波方向解が常に複素共役解となるが、上述の解のみがはり両端波動

制御時の剛体変位（加振周波数=0の応答）を表現できる解であり物理的に唯一合理的な解を表している。

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6件）

- ① M.Saigo, K.Takagi, N.Tanaka, Active wave control of string near fixed boundary, Transaction ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol.130, 014502_1-014502_4, 2008, 査読有
- ② 西郷宗玄、岩本宏之、田中信雄、はりの境界近傍における波動吸収制御、日本機械学会論文集(C編)、73巻、2719-2725, 2007、査読有
- ③ M.Saigo, H.Iwamoto, Dong-Ho Nam, Wave control of beams near fixed boundary, Proceedings of Asia Pacific Vibration Conference 2007, CDROM, 2007, 査読有
- ④ 西郷宗玄、高木清志、田中信雄、一次元弾性体の境界近傍における波動吸収制御、日本機械学会論文集(C編)、72巻、1136-1144、2006、査読有
- ⑤ M.Saigo, Dong-Ho Nam, K.Takagi, Active wave control of one dimensional flexible structure near fixed boundary, Proceedings of the 8th International Conference on Motion and Vibration Control, CDROM, 2006, 査読有

〔学会発表〕（計3件）

- ① 西郷宗玄、岩本宏之、はりの境界近傍における波動吸収制御、第51回自動制御連合講演会論文集、2008年11月22日、山形大学工学部
- ② 西郷宗玄、岩本宏之、田中信雄、弾性はりの境界近傍における波動吸収制御、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007、2007年9月26日、広島大学工学部
- ③ 西郷宗玄、岩本宏之、田中信雄、はりの境界近傍における波動吸収制御、日本機械学会東海支部56期総会講演会、2007年3月7日、静岡大学工学部

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西郷 宗玄 (SAIGO MUNEHARU)

産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・グループ長

研究者番号：80357053

(2) 連携研究者

岩本 宏之 (IWAMOTO HIROYUKI)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：90404938