

吸振支持制御によるエレベーターの縦振動抑制シミュレーション

東芝エレベータ(株) ○松岡寛晃, 滝沢真之, 金沢大学大学院 関啓明, 神谷好承

Simulation of vertical vibration suppression of the elevator by adopting the elastic support control

TOSHIBA Elevator and Building Systems Corporation, Hiroaki MATSUOKA, Saneyuki TAKISAWA, KANAZAWA University, Hiroaki SEKI, Yoshitsugu KAMIYA

Since the car and the counterweight are attached to the rope terminals to ensure that the elevator operates in a balanced manner, the length of the rope varies according to the position of the car. Therefore, it is necessary to treat the rope as a variable spring with varying rigidity and the car as a variable mass that varies with the number of passengers. Since the riding comfort is the key item of the elevator's quality, the vertical vibration of the car, especially at low frequency, should be controlled. In this report, we assume the elevator, which has the characteristics mentioned above, as a positioning problem associated with the low-rigidity control model, and propose an elastic support control system. This elastic support control suppresses the vibration of the car by controlling the motor of the traction machine through an elastic support. Specifically, it is possible to effectively suppress the residual vibration of the car by using optimum control parameters designed under the symmetry condition that the mass of the car and the spring constant of rope suspending the car are equal to those of the counterweight.

1. 緒 言

エレベーターはロープの両端に取り付けられた乗りかごと釣合錘をバランスさせて運転を行う, つるべ式が一般的である. ロープは鋼製で, 昇降する乗りかごの位置によって剛性が変化する可変ばねと考えることができる. また乗りかごは乗客数により質量が変化することから可変質量として取り扱う必要がある. このロープ先端に取り付けられた乗りかごを精度良く目標位置に位置決めすると共に, 乗りかごの振動を抑制し乗り心地を向上させることが品質面, 性能面で重要である. 本研究では, エレベーターに特有な条件を考慮した乗りかごの振動抑制手法について検討を行う. 具体的には, 間欠運動を行う機器の残留振動抑制手法として研究されている吸振支持を用いた設計法を応用し, 巻上機の電動機制御により乗りかごの縦振動を抑制する吸振支持制御を提案する. 特に乗りかごと釣合錘の質量, 及びそれらを牽架するロープのばね定数が等しくなる対称条件の下で導出したパラメータを用いて, 乗りかごの縦振動の抑制効果を確認する.

2. エレベーターの運動モデル

エレベーターの運動モデルをFig. 1に示す. 乗りかごの変位を x_1 [m], 釣合錘の変位を x_2 [m], 電動機の回転角を θ [rad]とする. ここで, シーブ半径を r [m], 巻上機トルクを T_m [Nm]とすると, シーブの回転角と巻上機のトルクはそれぞれ第(1), (2)式で与えられる.

$$\theta = \frac{m_1 s^2 + k_1}{rk_1} X_1(s) = -\frac{m_2 s^2 + k_2}{rk_2} X_2(s) \quad (1)$$

$$T_m = m_1 r s^2 X_1(s) - m_2 r s^2 \frac{-k_2}{(m_2 s^2 + k_2)} \frac{(m_1 s^2 + k_1)}{k_1} X_1(s) \quad (2)$$

3. 吸振支持制御の設計とシミュレーション

乗りかごと釣合錘はロープにより牽架され, ガイドレールに沿って昇降路を上下に移動する構造をもつことから,

乗りかごには不動点との間にダンパなどの減衰機構を付加する事ができない. そこで, 乗りかごに発生する残留振動を速やかに減衰させる手法として, ロボットアーム等の残留振動抑制手法として研究されている吸振支持の考え方を適用する. 吸振支持は, 駆動系と負荷系の間にはばね・ダンパ・質量からなる振動系を挿入することで構成されるが, エレベーターにおいてこの機構を実現する手法として, 巻上機をサーボモータとして制御し, 吸振支持の性能を実現する制御について検討する. 比例積分制御の場合, 制御ブロック図はFig. 2で, また伝達関数は第(3)式で表される.

$$\left[\{(\Theta - \theta) \cdot K_p - T_G \omega\} \left(\frac{K_C}{s} + K_D \right) \frac{K_r}{\alpha} - T_m \right] \frac{1}{J s^2} = \theta \quad (3)$$

ここで, K_p は位置ゲイン, K_C は積分ゲイン, K_D は比例ゲイン, K_r [Nm/A]はトルク定数, α [V/A]は電流フィードバック係数, Θ [rad]は巻上機に与える回転角の入力である.

吸振支持制御による振動抑制の基本性能を確認するため, ここでは積分ゲイン K_C に0を与えて検討を行なう.

エレベーターはつるべ式の構造を持つため, 電動機制御の面からは乗りかごと釣合錘の質量が等しく, 乗りかごと釣合錘を牽架するロープのばね定数が等しくなる状態が理想的である. そこで乗りかごの質量 m_1 と釣合錘の質量 m_2 が等しく, かつ乗りかごの変位 x_1 と釣合錘の変位 x_2 が等しくなる対称条件を基準として設計を行う. 対称条件が成立する場合, $m_1 = m_2$ かつ $k_1 = k_2$ が成り立つ. この条件下において,

$$\frac{k}{m} = \Omega^2, \quad \frac{J}{mr^2} = \xi, \quad \frac{\omega_d}{\Omega} = \beta, \quad \zeta_d = \frac{T_G K_D K_r}{2\sqrt{\alpha J K_p K_D K_r}}$$

と置いて第(3)式を整理すると, この系の振動方程式は第(4)式の如くとなる.

$$s^4 + 2\zeta_d \beta \Omega s^3 + \left(1 + \frac{2}{\xi} + \beta^2 \right) \Omega^2 s^2 + 2\zeta_d \beta \Omega^3 s + \beta^2 \Omega^4 = 0 \quad (4)$$

この振動方程式の4根を $-\eta_1 \pm j\Omega_1$, $-\eta_2 \pm j\Omega_2$ と仮定すれば, 運動方程式の解は第(5)式で与えられる.

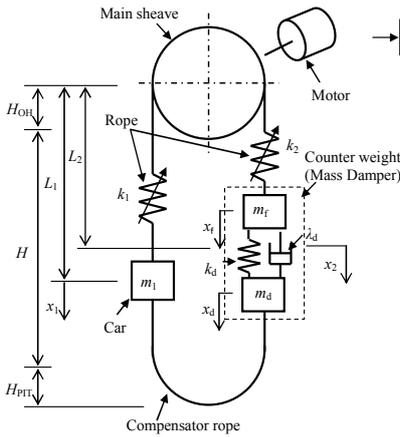


Fig.1 Elevator simulation model

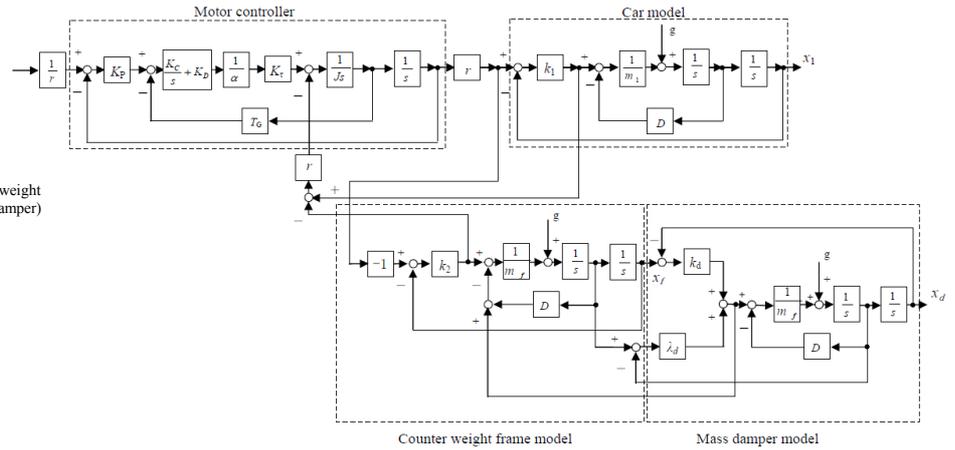


Fig.2 Block diagram of the elevator simulation model

$$x_{1,2} = e^{-\eta t} (C_1 \cos \Omega_1 t + C_2 \sin \Omega_1 t) + e^{-\eta_2 t} (D_1 \cos \Omega_2 t + D_2 \sin \Omega_2 t)$$

ただし、 C_1, C_2, D_1, D_2 は積分定数 (5)

第(5)式の運動方程式において、 η_1, η_2 は残留振動の包絡線の傾きを決定し、かつ η_1, η_2 の内、小さい方 η_{min} の振動成分が残留振動の主成分となることから、良好な吸振効果を得るためには η_{min} が最大となるように設計する必要がある。その際、最適条件を得ると考えられる物理条件を考慮して式を変形し条件を仮定する。その結果、運動方程式の最適パラメータの実数部は $\eta_{OPT} = \eta_1 = \eta_2$ の時、

$$\eta_{OPT} = \zeta_{OPT} \Omega = \frac{1}{2} \zeta_d \Omega \quad (6)$$

また、虚数部は $\Omega_{OPT} = \Omega_1 = \Omega_2$ の時、

$$\Omega_{OPT} = \sqrt{1 - \frac{1}{2\xi}} \Omega \quad (7)$$

として与えられる。従って、慣性モーメント比 $\zeta = J/mr^2 \geq 0.5$ 、かつ固有振動数比 $\beta = \omega_d/\omega = 1$ の条件において、吸振支持制御の最適パラメータが得られる。従って、電動機制御の位置ゲイン K_P 、比例ゲイン K_D は次式にて与えられる。

$$K_P = \frac{\alpha J}{K_D K_i} \omega_d^2 \quad K_D = \frac{2\alpha J \zeta_d}{T_G K_i} \omega_d \quad (8)$$

ただし $\zeta_d = \sqrt{2/\xi} \quad \omega_d = \Omega = \sqrt{k/m}$

Table.1に示す諸元のエレベーターモデルについて、前記対称条件の下で設計された吸振支持制御のゲインを与えて乗りかごの振動を確認する。

Table.1 Specification of elevator model

Travel distance[m]	H	385
Overtop height[m]	H_{OH}	15
Pit depth[m]	H_{PIT}	10
Rated capacity[kg]	m_{rate}	1600
Car weight[kg]	m_{cage}	5500
Over balance	OB	0.5
Counter weight[kg]	m_2	6300
Spring constant of the rope [N/m/m]	k_a	1.70E+08
Sheave radius[m]	r	0.5
Inertia moment of a traction machine[kgm ²]	J	875
Torque constant[Nm/A]	K_t	1
Current feedback coefficient[V/A]	α	1
Resistance coefficient	D	0.2

4. シミュレーション結果

乗りかごの位置と積載の条件を変化させ、乗りかごに変

位1[m]のステップ入力を与えた場合についてシミュレーションを行った結果をFig.3に示す。横軸は時間[s]を示し、乗りかご位置について位置40[m]から360[m]までを80[m]間隔で5分割して示している。また、縦軸は乗りかごの移動量を示し、積載条件については0[kg]、800[kg]、及び1600[kg]の状態を示している。対称条件が成立するのは乗りかごと釣合錘の位置 x_1 [m]、 x_2 [m]及び質量 m_1 [kg]、 m_2 [kg]がそれぞれ等しくなった場合であり、本モデルでは $x_1=x_2=200$ [m]、 $m_1=m_2=6300$ [kg]、乗りかご内の積載 $m_L=800$ [kg]の場合である。釣合錘に組み込んだ動吸振器との併用により、いずれの条件においても残留振動は抑制され、良好な制振性能が得られることが確認された。

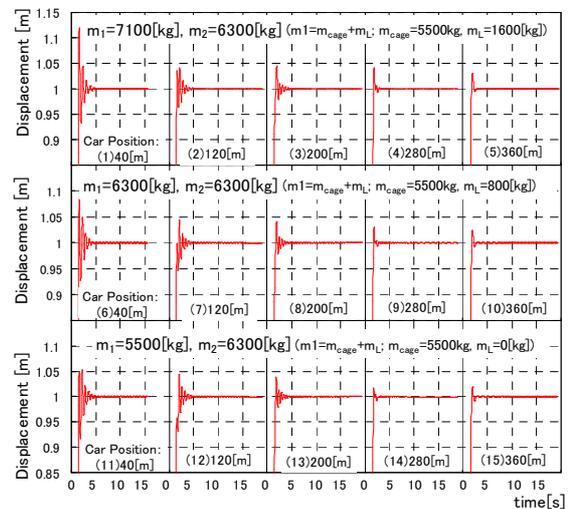


Fig.3 Step response of the car

5. まとめ

エレベーターの電動機制御に吸振支持を応用し、釣合錘に組み込んだ動吸振器との併用により乗りかごの残留振動を良好に抑制できることをシミュレーションにより確認した。

参考文献

- 1) 神谷好承, 高野政晴, 間欠運動の高速化に関する研究, 精密機械 pp81-88, (1977)
- 2) 神谷好承, 横山恭男, 高野政晴, ロボットアームの高速位置決め, 精密機械 pp41-47, (1979)