

高速時における反発制御形超電導LSM磁気浮上列車の ピッチング運動シミュレーション

吉田, 欣二郎
電気電子システム工学専攻

清水, 敦夫
電気電子システム工学専攻 : 博士後期課程

<https://doi.org/10.15017/1485129>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 2 (1), pp.119-124, 1997-03-26. 九州大学大学院システム情報科学研究所
バージョン :
権利関係 :

高速時における反発制御形超電導 LSM 磁気浮上列車の ピッチング運動シミュレーション

吉田欣二郎*・清水敦夫**

Pitching-Motion Simulation of Superconducting LSM Controlled-Repulsive Maglev-Vehicle in High-Speed Mode

Kinjiro YOSHIDA and Atsuo SHIMIZU

(Received December 24, 1996)

Abstract: This paper proposes a new repulsive-Maglev vehicle in which superconducting linear synchronous motor (LSM) can levitate and propel simultaneously, independently of the vehicle speeds. A compact control method is developed which is based on the concept of controlling individually the levitation system by armature-current and the propulsion system by mechanical load-angle. In dynamics simulations, pitching motions of cabin and bogie are taken into account which are one of the most important motions to be made clear. The vehicle is controlled to follow very well the demand speed pattern in both cases for accelerations of 1 m/s^2 and 3 m/s^2 . By using the compact control-method proposed here, the vehicle is operated with good ride-quality especially during the constant speed phase.

Keywords: Controlled-repulsive Maglev vehicle, Superconducting LSM, Combined levitation and propulsion, Pitching motion, Ride quality

1. ま え が き

超電導LSMを用いたMaglev列車であるJRの宮崎実験線や建設中の山梨実験線では、推進にLSMを、浮上には誘導反発磁気浮上方式を用いている。この方式はある速度以上にならないと磁気浮上できない。停止時から浮上可能速度の範囲内では、飛行機のように車輪支持が必要である。

先に筆者の一人は、速度に依存せず停止時から浮上走行可能な新方式Maglev列車を提案した¹⁾。これは、超電導LSMの推進力に垂直に働く反発力を浮上力として利用

する方式である。浮上力と推進力は、地上電機子コイルに供給する三相交流のみの制御によって同時に浮上推進制御される。この反発制御方式Maglev列車の基本的な問題は、浮上走行時のピッチング運動と乗り心地である。

本論文は、超電導マグネットを搭載した4台の台車、客室とこれらを連結する二次サスペンションから基本構成される反発制御方式Maglev列車のピッチング運動を含む浮上走行運動を解明する。まず、Maglev列車の基本運動モード、浮上、推進、ピッチング運動の3軸モデルを誘導する。次に、推進運動を電機子電流の位相角、すなわち、機械的負荷角で制御し、浮上運動を電機子電流の実

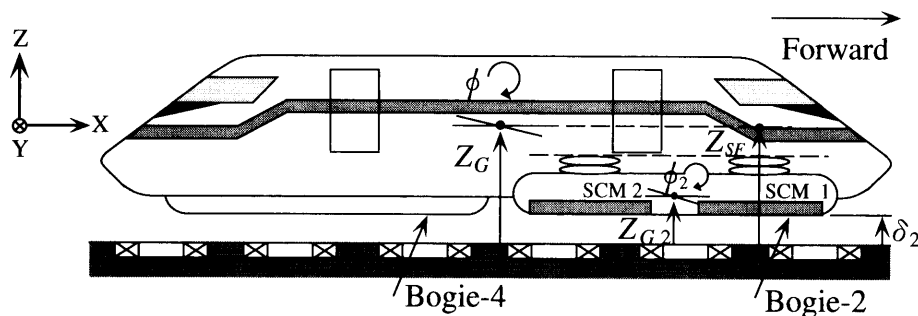


Fig.1 A model for vehicle dynamics analysis

平成8年12月24日受付

* 電気電子システム工学専攻

** 電気電子システム工学専攻修士課程

効値で制御する浮上推進制御法を提案する。Maglev列車の加減速浮上走行シミュレーションを行い、特にピッチング運動と乗り心地について検討する。

2. 運動方程式

Fig. 1に示すようなMaglev列車のモデルを考える^{2),3)}。モデルは客室の下に4台の台車がそれぞれ2個の二次サスペンションを介して連結されており、各台車には2個の超電導マグネットを搭載したものを考える。この解析では、車両の上下運動、推進運動、そしてピッチング運動のみを考える。なお、超電導マグネット(SCM)はすべて軌道に対して並行のまま上下運動する。また、軌道は水平で、軌道の不整や振動はない。

2.1 上下運動

台車と客室の上下運動は次のように記述される。

$$M_B \frac{d^2}{dt^2} Z_{Gi} = \sum_{j=1}^2 (F_{Z,ij} - f_{s,ij} - f_{d,ij}) - M_B g \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

$$M_C \frac{d^2}{dt^2} Z_G = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 (f_{s,ij} + f_{d,ij}) - M_C g \quad (2)$$

$$f_{s,ij} = K_S \Delta l_{s,ij} \quad (3)$$

$$f_{d,ij} = K_D \frac{d}{dt} \Delta l_{s,ij} \quad (4)$$

ただし、 M_B ：台車の質量、 M_C ：客室の質量、 Z_{Gi} ： i 番目台車の重心の高さ、 Z_G ：客室の重心の高さ、 $F_{Z,ij}$ ： i 列 j 番目のSCMに働く浮上力、 $f_{s,ij}$ ： i 列 j 番目の二次サスペンションの反発力、 $f_{d,ij}$ ： i 列 j 番目の二次サスペンションのダンピング力、 $\Delta l_{s,ij}$ ： i 列 j 番目の二次サスペンションの変位、 K_S ：二次サスペンションのバネ係数、 K_D ：二次サスペンションのダンピング係数、 g ：重力加速度

2.2 ピッチング運動

台車のピッチング運動は次のように記述される。

$$I_{\phi B} \frac{d^2}{dt^2} \phi_i = -F_{X,i1} L_{BM} \sin(\phi_M + \phi_i) - F_{Z,i1} L_{BM} \cos(\phi_M + \phi_i) - F_{X,i2} L_{BM} \sin(\phi_M - \phi_i) + F_{Z,i2} L_{BM} \cos(\phi_M - \phi_i) + (f_{s,i1} - f_{d,i1}) L_{BS} \cos(\phi_S - \phi_i) - (f_{s,i2} - f_{d,i2}) L_{BS} \cos(\phi_S + \phi_i) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

ただし、 L_{BM} ：台車重心とSCMの距離、 L_{BS} ：台車重心から二次サスペンションへの台車の接続点までの距離、 ϕ_M ： L_{BM} とX軸のなす角、 ϕ_S ： L_{BS} とX軸のなす角、 ϕ_i ： i 番目台車のピッチング角、 $I_{\phi B}$ ：台車のピッチング運動に関する慣性モーメント

また、客室のピッチング運動は次式で記述される。

$$I_{\phi C} \frac{d^2}{dt^2} \phi = - \sum_{i=1}^2 (f_{s,i1} - f_{d,i1}) L_f \cos(\phi + \phi_f)$$

$$+ \sum_{i=3}^4 (f_{s,i2} - f_{d,i2}) L_f \cos(\phi + \phi_f) - \sum_{i=1}^2 (f_{s,i2} - f_{d,i2}) L_n \cos(\phi + \phi_n) + \sum_{i=3}^4 (f_{s,i1} - f_{d,i1}) L_n \cos(\phi + \phi_n) - \sum_{i=1}^2 \frac{F_{X,i1} + F_{X,i2}}{2} \times \{L_f \sin(\phi_f + \phi) + L_n \sin(\phi_n + \phi)\} - \sum_{i=3}^4 \frac{F_{X,i1} + F_{X,i2}}{2} \times \{L_f \sin(\phi_f - \phi) + L_n \sin(\phi_n - \phi)\} \quad (6)$$

ただし、 L_f 、 L_n ：客室重心から客室の二次サスペンションとの接続点までの距離(客室重心から遠いものを L_f 、近いものを L_n とする)。

ϕ_f 、 ϕ_n ：X軸と L_f 、 L_n のなす角、

$I_{\phi C}$ ：客室のピッチング運動に関する慣性モーメント、

ϕ ：客室のピッチング角

2.3 推進運動

列車の推進運動は次のようになる。

$$M \frac{d}{dt} v_x = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 F_{X,ij} - K_A v_x^2 \quad (7)$$

ただし、 $M = 4M_B + M_C$ ：列車の質量、

v_x ：列車の速度、 K_A ：空気抵抗の係数、

$F_{X,ij}$ ： i 列 j 番目のSCMに働く推進力

3. 浮上推進制御法

3.1 推進制御

電機子電流実効値 I_1 と機械的負荷角 x_0 の指令値 I_1^* 、 x_0^* は、次の(8)、(9)式に示すように、目標加速度 a_{x0} と目標速度 v_{x0} を超電導LSMの解析式に用いることで得られる。

$$I_1^* = \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{M a_{x0} + K_A v_{x0}^2}{K_X} \right)^2 + \left(\frac{Mg}{K_Z} \right)^2} \quad (8)$$

$$x_0^* = \frac{\tau}{\pi} \tan^{-1} \left\{ - \frac{(M a_{x0} + K_A v_{x0}^2) K_Z}{Mg K_X} \right\} + \tau \quad (9)$$

ただし、 K_X 、 K_Z ：推進力、浮上力の係数、

τ ：ポールピッチ

浮上推進システムの反発領域を使用するためには、 x_0^* を反発浮上推進制御には $\tau/2 \sim \tau$ 、反発浮上制動制御には $\tau \sim 3\tau/2$ の範囲で制御しなければならない。機械的負荷角の指令値 x_0^* に追従するLSMを実現するために、 x_0 はPIDコントローラで制御する。これは、(10)式のように与

えられる。

$$\Delta x_o = G_P(v_x - v_{x0}) + G_I \int (v_x - v_{x0}) dt + G_D(\dot{v}_x - \dot{v}_{x0}) \quad (10)$$

$$x_o = x_o^* + \Delta x_o \quad (11)$$

ただし、 G_P 、 G_I 、 G_D ：フィードバックゲイン、 Δx_o ： x_o の変動分、 v_{x0} ：列車速度の目標値

3.2 浮上制御

浮上制御では、ピッチング運動を無視し、状態方程式は定常状態(I_1^* 、 $x_0^* = \tau$ 、 Z_{G0} 、 Z_{GB0})で線形化すれば、以下のような行列形式で表わされる。

$$\dot{X} = AX + BU \quad (12)$$

$$Y = CX = [\Delta Z_G] \quad (13)$$

$$X = [\Delta Z_G \quad \Delta X_{GB} \quad \Delta \dot{Z}_G \quad \Delta \dot{Z}_{GB}]^T \quad (14)$$

$$U = [\Delta I_1] \quad (15)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{4K_S}{M_C} & \frac{2K_S}{M_C} & -\frac{8K_D}{M_C} & \frac{4K_D}{M_C} \\ \frac{K_S}{M_B} & \frac{K_{\delta Z} - K_S}{M_B} & \frac{2K_D}{M_B} & \frac{2K_D}{M_B} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{IZ}}{M_B} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (18)$$

ただし、 ΔZ_G ：客室高さ Z_{G0} からの変動分、 Z_{G0} ：定常状態の客室高さ、 ΔI_1 ： I_1 の変動分、 ΔZ_{GB} ： Z_{GB0} 台車高さからの変動分、 Z_{GB0} ：定常状態の台車高さ、 $K_{\delta Z}$ 、 K_{IZ} ：エアギャップ長と電機子電流に関する浮上力の線形化定数

浮上制御には次のロバストサーボ制御則を適用する。

$$\Delta I_1 = -K_1 \Delta Z_G - K_2 \Delta Z_{GB} - K_3 \Delta \dot{Z}_G - K_4 \Delta \dot{Z}_{GB} - K_5 \int \Delta Z_G dt \quad (19)$$

ただし、 K_1, K_2, \dots, K_5 ：フィードバックゲイン
 K_1, K_2, \dots, K_5 は、LQ制御理論に基づき次式の評価関数 J を最小化するように解くことで得られる。

$$J = \int_0^{\infty} \{q_1 \Delta Z_G(t)^2 + q_2 \Delta Z_{G1}(t)^2 + q_3 \Delta \dot{Z}_G(t)^2 + q_4 \Delta \dot{Z}_{G1}(t)^2 + r \Delta I_1(t)^2\} dt \quad (20)$$

ただし、 q_1, q_2, q_3, q_4, r ：重み係数
したがって、電流実効値は

$$I_1 = I_1^* + \Delta I_1 \quad (21)$$

で計算される。

u 相の電機子電流の瞬時値の指令値 i_u^* は次式で得ら

れる。

$$i_u^* = \sqrt{2} I_1 \cos \left(\frac{\pi}{\tau} \int_0^t v_{x0} dt + \frac{\pi}{\tau} x_0 + \frac{\pi}{2} \right) \quad (22)$$

(22)式の $\pi/2$ は、 u 相コイルの位相を列車の始動位置と一致させるためのものである。

4. 浮上走行シミュレーション

列車のパラメータをTable 1に示す。列車が、乗客を乗せない無負荷状態で、停止時に定格浮上位置に安定に浮上した状態から、定められた速度パターンに追従させるシミュレーションを行って、最も重要なピッチング運動を解明する。超電導マグネットは常に軌道に平行かつ電機子コイル中央に保たれているとする。数値シミュレーション実験は2通りの加(減)速度で行い、Fig. 2には 1 m/s^2 の場合を、Fig. 3に 3 m/s^2 の場合の結果を示す。

4.1 加速度 $a_{x0} = 1.0 \text{ m/s}^2$ の場合

Fig. 2(a), (b)に示すように、列車は速度及び加速度パターンによく追従している。また、Fig. 2(c), (d)より、台車2のSCM2(後方)と台車4のSCM1(前方)のエアギャップは常に、ほとんど目標値に制御されているが、台

Table 1 Design parameters

超電導マグネット：		
台車1台の極数	P	2
コイルの長さ	L_{SC}	2.2 m
コイルの幅	W_{SC}	0.5 m
ポールピッチ	τ	2.7 m
起磁力	I_{SC}	700 kAT
電機子コイル：		
コイルの長さ	L_{AC}	1.5 m
コイルの幅	W_{AC}	0.6 m
巻数	N	30turns
質量：		
台車1台の質量	M_B	2 t
客室の質量	M_C	10 t
二次サスペンション：		
バネ定数	K_S	$1.3 \times 10^6 \text{ N/m}$
ダンピング定数	K_D	$2.3 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{s/m}$
自然長	l_0	0.3 m
車両のサイズ：		
客室の長さ	L_C	10.8 m
客室の幅	W_C	1.5 m
客室の高さ	H_C	2.0 m
台車の高さ	H_B	0.5 m
モーメント：		
台車のピッチングに関する慣性モーメント	$I_{\phi B}$	4208 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
客室のピッチングに関する慣性モーメント	$I_{\phi C}$	100533 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
空気抵抗の係数：	K_A	$1.305 \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$

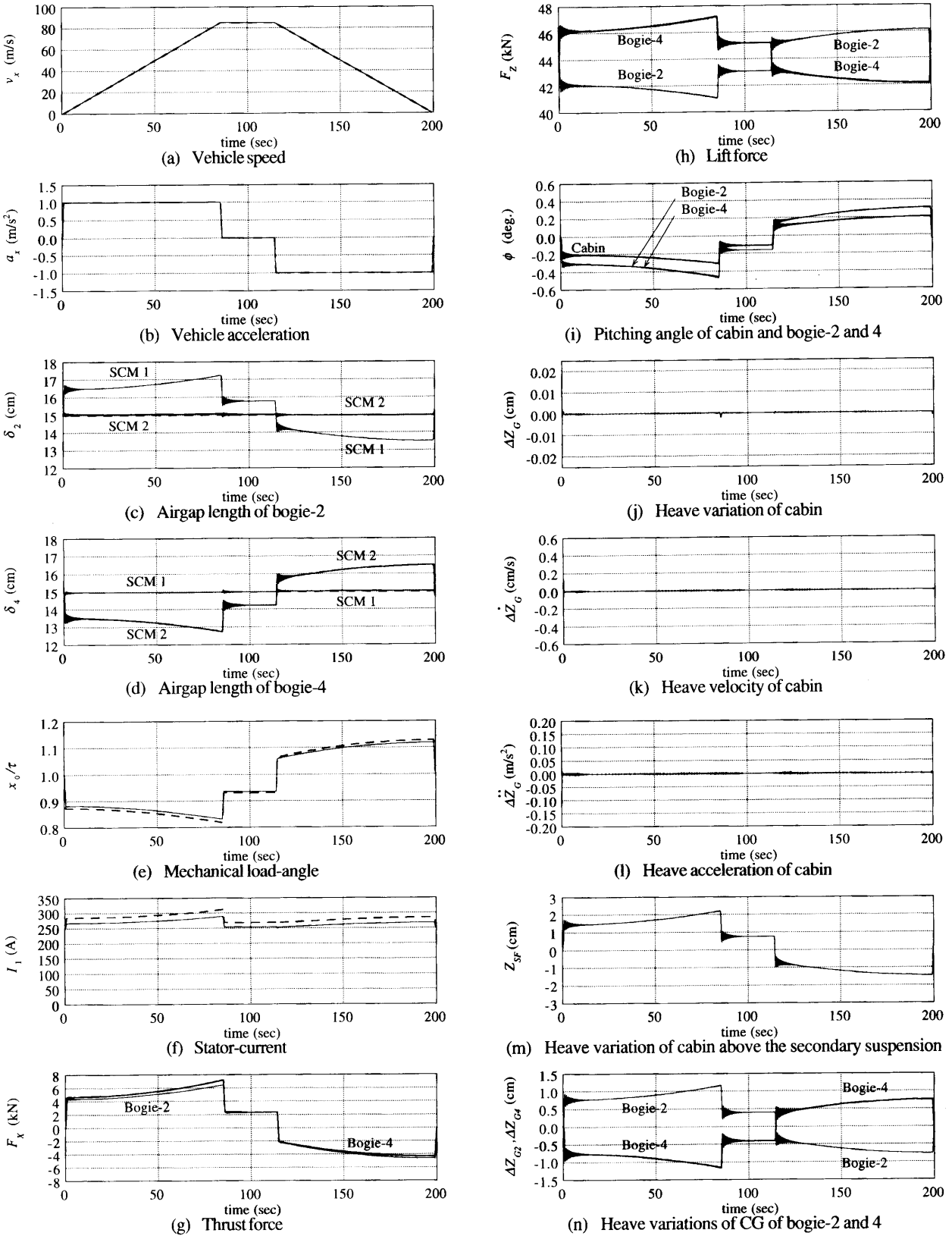


Fig.2 Levitation and propulsion control for acceleration and deceleration of 1 m/s²

—: Demand or Command values, — — —: Simulated results

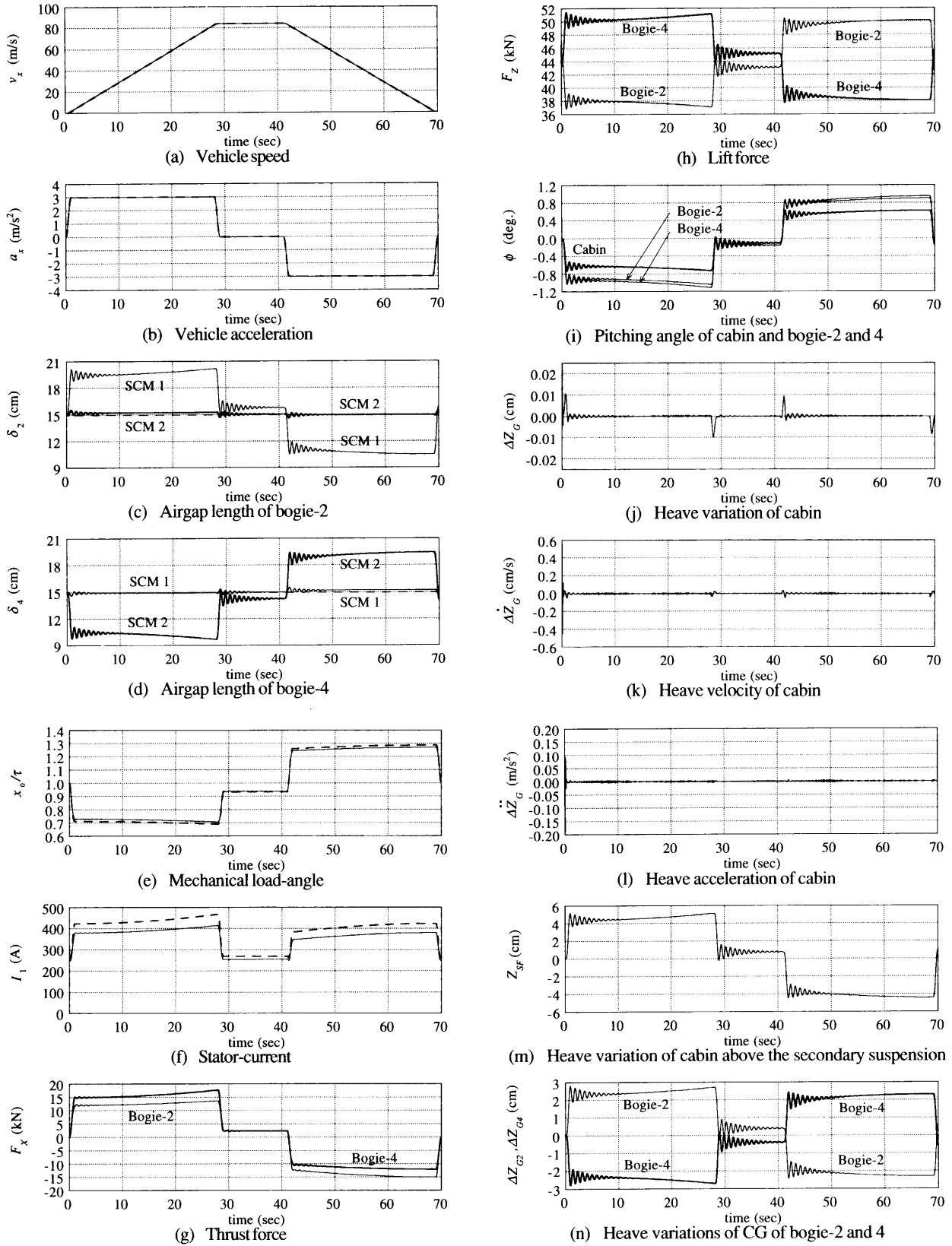


Fig.3 Levitation and propulsion control for acceleration and deceleration of 3 m/s^2
 ———: Demand or Command values, ———: Simulated results

車2のSCM1(前方)と台車4のSCM2(後方)には目標値からのずれがみられる。加速域では、台車2のSCM1と台車4のSCM2のエアギャップは目標値からそれぞれ $\pm 1.5\text{ cm} \sim 2.5\text{ cm}$ ずれており、減速域ではその逆となっている。これは、**Fig. 2(g)**に示す推進力及び制動力が加速及び減速域で互いに逆方向にピッチング運動を起こすためである。このピッチング運動は、列車の最前部及び最後部のSCMにのみ強く影響を及ぼす。また、速度の二乗に比例して空気抵抗がかかってくるため、このように2次関数的にカーブを描いている。

この車両モデルでは、隣り合う台車の間隔が小さいにもかかわらず、台車のピッチング運動と比べると、二次サスペンションは客室のピッチング運動を約67%に抑えている(**Fig. 2(i)**)。 **Fig. 2(j)**, **(k)**, **(m)**より、列車の重心の上下運動は微小であることが判る。これは、台車2のSCM2と台車4のSCM1、つまり客室重心に近い側のSCMの上下運動がほとんどないためである。台車2, 4の重心の上下運動は、推進力の影響で加速、減速時に客室がそれぞれ前上がり、前下がりとなるため、**Fig. 2(n)**のようになった。このため、客室重心近辺での乗り心地は非常に良いことが判った。**Fig. 2(m)**は客室重心から4.05 m前方の位置(先頭のサスペンションの真上)の上下変位を示しており、**Fig. 2(c)**に示す台車2のSCM1の $\pm 1.5\text{ cm} \sim 2.5\text{ cm}$ の変位にほぼ従ったものとなった。この変位はさほど重要ではなく、その加速度はかなり小さいものである。したがって、列車の先頭及び後方近辺での乗り心地もまた、非常に良いことが判った。

また、推進浮上制御系については、推進系に対して機械的負荷角を、浮上系に対して電機子電流実効値をそれぞれ制御する。前述したように、台車2のSCM1と台車4のSCM2には目標値からの誤差があり、このため、**Fig. 2(f)**のように電流が目標値より少し低く制御される。したがって、推進系では機械的負荷角が、**Fig. 2(e)**のようにこれを補い少し小さく制御される。これらの値も、空気抵抗の影響を保証するためカーブを描いていることが解る。

4.2 加速度 $a_{x0} = 3.0\text{ m/s}^2$ の場合

Fig. 3は**Fig. 2**の3倍の加速度で列車を加速する場合の結果である。**Fig. 3(c)**, **(d)**から判るように、台車2のSCM1と台車4のSCM2のエアギャップ変位は**Fig. 2**のそれらに比べて、3倍大きく、これは加速度に比例している。このため、**Fig. 3(f)**では電機子電流実効値が減少し、指令値からの誤差も**Fig. 2**の3倍になっている。また、空気抵抗の影響も顕著に見られる。しかし、**Fig. 3(a)**, **(b)**から判るように、速度パターンへの追従性は**Fig. 2**の場合と同様に非常によく、**Fig. 3(j)**, **(k)**, **(l)**から乗り心地についても同様に良好であると言える。

5. む す び

反発制御方式Maglev列車の浮上、推進、ピッチングの運動モデルを誘導し、浮上走行制御の数値シミュレーション実験を行った。その結果、提案した浮上走行制御法が非常に有効に適用できることが明らかになった。また、加速度が 1 m/s^2 と 3 m/s^2 の場合、加減速時には先頭と最後尾のSCMが互いに上下に変位するが、中央の2個のSCMは上下変位せず、前後の台車はわずかにピッチング運動を起こす。しかし、その振動は小さく、客室には殆ど影響を与えず、特に定速走行時には、乗り心地は良好であることが判った。

参 考 文 献

- 1) 吉田・永尾・平井：「停止時から浮上可能な超電導 LSM 反発制御形磁気浮上列車の浮上走行制御」, 電気学会リニアドライブ研究会資料 LD-94-99, pp. 1-9 (平成6年12月)
- 2) 吉田・平井・江頭：「反発制御形超電導 LSM 磁気浮上列車のピッチング運動シミュレーション」, 電気関係学会九州支部連大, No. 226, p. 100 (平成7年9月)
- 3) 江頭：「超電導 LSM 反発制御形磁気浮上列車のダイナミクスシミュレーション」, 九州大学電気工学科卒業論文 (平成7年2月)
- 4) K. Yoshida, T. Egashira: "Regardless-of-Speed Superconducting LSM Controlled-Repulsive Maglev Vehicle", Proc. of 3rd Inter. Symp. on Magnetic Suspension Technology, NASA Conf. Pub. No. 3336 Part 1, pp. 125-140, July, 1996