

ロープレスリニアエレベータのコンタクトレス案内 制御実験

吉田, 欣二郎

九州大学大学院システム情報科学研究所電気電子システム工学部門

張, 先海

九州大学大学院システム情報科学府電気電子システム工学専攻 : 博士後期課程

森山, 修司

トヨタ自動車株式会社

<https://doi.org/10.15017/1515916>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 8 (2), pp.183-188, 2003-09-26. 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 :



ロープレスリニアエレベータのコンタクトレス案内制御実験

吉田欣二郎*・張 先海**・森山修司***

Experiment of Contactless Guidance Control in Ropeless Linear Elevator

Kinjiro YOSHIDA, Xianhai ZHANG and Shuji MORIYAMA

(Received June 13, 2003)

Abstract: Ropeless linear elevator (RLE) is expected to be a new transport solution for skyscrapers and very deep underground applications in the near future. In our Laboratory, an experimental model of RLE has been designed and manufactured using the theory of a controlled-PM linear synchronous motor (LSM) developed by one of the authors. We have succeeded in the fundamental elevate-motion control including the stop experiment without guidance control. Contactless Magnetic guidance becomes possible if the vertical-levitation force of LSM is controlled at the same time with the direct drive of cage by the LSM driving force, too. This paper presents contactless magnetic control by controlling PM of the upside and the bottom side and levitation force between the armatures in four controlled-PM (CPM) that are carried on cage both side in RLE. Moreover, regardless of the elevate-motion time, a change in the gap was restrained at the time of cage stop, and electric power minimization control was realized. This paper presents the experimental implementation of the contactless guide control when moving vertically in the RLE system.

Keywords: Ropeless linear elevator, Controlled-PM LSM, Contactless guidance

1. ま え が き

近年、超高層化や大深度地下空間利用の構想に伴い、縦型搬送・輸送にリニアモータを用いたロープレスエレベータが検討されている。本研究室では、軌道の両側に電機子を有する制御PM LSM方式ロープレスリニアエレベータ(以下RLE)を設計・製作している。案内軌道とローラとの間に働く摩擦力、及び想定した荷重の変化等の不確定要素を考慮して外乱オブザーバを用いたシステムを構成し、LSM推進力の制御によるケージの滑らかな上昇下降及び定位置での安定的な停止実験に成功してきた¹⁾²⁾³⁾。しかし、それはケージが案内ローラを介して軌道に接触したものであった。LSM推進力によるダイレクト駆動と同時にLSMの吸引垂直力を制御すれば案内のコンタクトレス化も可能となる⁴⁾。それにより、メンテナンスの低減・高効率化・騒音の低下・軌道不整の影響の防止・建築物に対する負荷の減少などの利点が挙げられる。

本論文は、ケージに搭載した制御PM及び案内制御コントローラを用いて、完全コンタクトレス案内制御を行うエレベータ動作実験に成功し、その結果について報告するものである。

平成15年6月13日受付

* 電気電子システム工学部門

** 電気電子システム工学専攻博士後期課程

*** トヨタ自動車

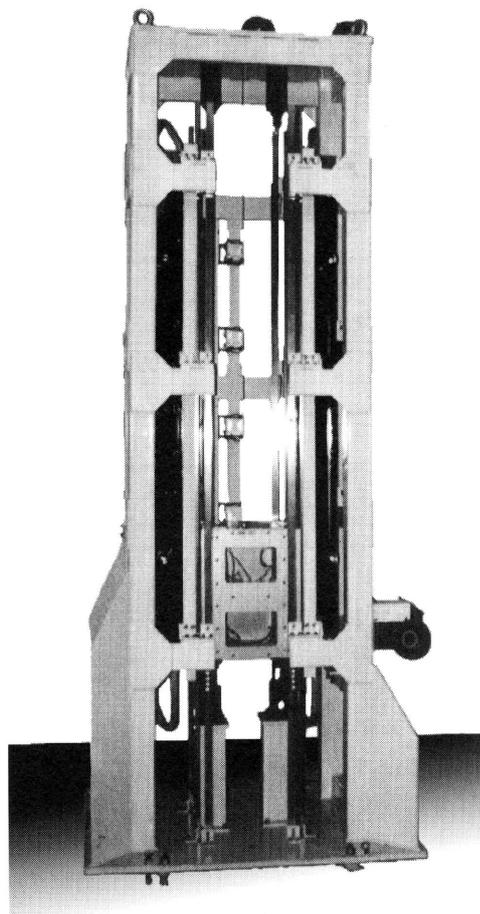


Fig.1 Experiment machine of ropeless linear elevator in our Laboratory.

2. RLE 実験機の構造

Fig.1 は RLE 実験機の写真である。左右両側に電機子鉄心が垂直方向に設置されてある。ケージの両側面に 2 対の制御 PM が搭載され電機子表面に対向し LSM を構成する。制御 PM は、PM ヨークの周囲に制御コイルを巻いた簡単な構造である。ケージの中にコントローラ及びそれに供電するバッテリーが封じてあります。ケージの両側と前後の 4 隅には、案内用と安定支持用の強ゴムローラが位置調整できるように付けてある。また、安全のためにショックアブソーバが実験機の下方向に取り付けられている。ケージの垂直方向の位置は、ケージ背面に刻んだ歯を光学パルスエンコーダによって読み取ること（ターゲットセンサ）で計測され、案内方向の位置は、電機子に向けてケージの側面の上下に設けた 2 対のレーザセンサによって計測される。

RLE 実験機の主な設計データは Table 1 に示す。

Table 1 Main parameters for design of ropeless linear elevator.

項目	記号	設計値
軌道全長	l_{gu}	1974.4 (mm)
歯幅	z_t	4.4 (mm)
ポールピッチ	τ	60 (mm)
固定子鉄心幅	b_1	142 (mm)
固定子コイル巻数	N_1	22 (Turn/slot)
PM の保磁力	H_c	8.9127 (kA/cm)
PM の高さ	h_M	5 (mm)
PM の長さ	l_M	40 (mm)
PM の幅	b_2	150 (mm)
1個 CPM の重量	M_{PM}	5 (kg)
制御コイルの巻数	N_2	20 (Turn/pole)
制御コイル抵抗	R_2	0.0516 (Ω /pole)
ケージ重量	M_c	62 (kg)
ケージの高さ	h_c	480 (mm)
ケージの幅	W_c	290 (mm)
ケージの深さ	b_c	400 (mm)

3. RLE モデルの解析

Fig.2 は RLE のモデルを示している。PM は交互に異極配置されており、制御コイルはそれぞれ逆向きに巻かれている。制御コイルは上側左右 2 つと下側左右 2 つがそれぞれ Fig.3 のように逆直列につながっているので、コイルに電流 ($i_{21} = -i_{23}$, $i_{22} = -i_{24}$) を流して制御 PM の吸引力をプッシュプル式に制御することができる。また、定常状態では左右吸引力の釣り合う位置にケージを制御すれば、案内制御での消費電力を最小にすることも可能である。

ケージ重心の z 方向運動方程式

$$M \frac{d^2 z}{dt^2} = -F_{z1} - F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} \quad (1)$$

$$F_{zi} = F_{zMi}(\delta_i, i_{2i}) + F_{zSi}(\delta_i, I_1) + F_{zMS}(\delta_i, I_1, i_{2i}, \cos \frac{\pi}{\tau} x_0) \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

y 軸周り回転方向に関する運動方程式

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = T(F_{x1}, F_{x2}, F_{x3}, F_{x4}, F_{z1}, F_{z2}, F_{z3}, F_{z4}) \quad (2)$$

ここで、 F_{zMi} は制御 PM ヨークが電機子表面を吸引する力であり、推進では $x_0 = \tau/2$ に制御すること、及び PM の吸引力が非常に大きいことから、支配的な案内力となる。したがって、微小変位法により近傍で線形化すると式(3)となる。

$$F_{zi} = F_{z0} - K_{fz} \Delta \delta_i + K_{fi} i_{2i} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

エアギャップに対する運動方程式が式(4)になる。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\delta}_1 &= a_1 \Delta \delta_1 + a_2 \Delta \delta_2 + b_1 i_{21} + b_2 i_{22} \\ \Delta \dot{\delta}_2 &= a_2 \Delta \delta_1 + a_1 \Delta \delta_2 + b_2 i_{21} + b_1 i_{22} \end{aligned} \quad (4)$$

したがって、案内制御系の状態方程式は次式になる。

$$\begin{aligned} \dot{x}_\delta &= A_\delta x_\delta + B_\delta u_\delta \\ \dot{y}_\delta &= C_\delta x_\delta \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、

$$\begin{aligned} x_\delta &= [\Delta \delta_1, \Delta \dot{\delta}_1, \Delta \delta_2, \Delta \dot{\delta}_2] \\ y_\delta &= [\Delta \delta_1, \Delta \delta_2] \end{aligned}$$

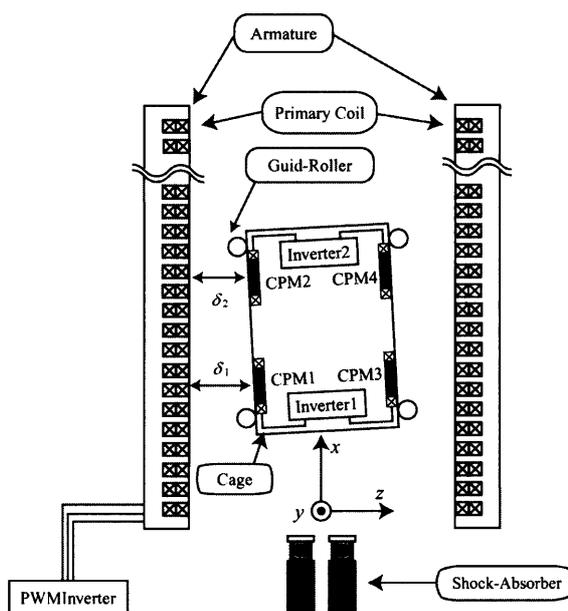


Fig.2 Model of ropeless linear elevator.

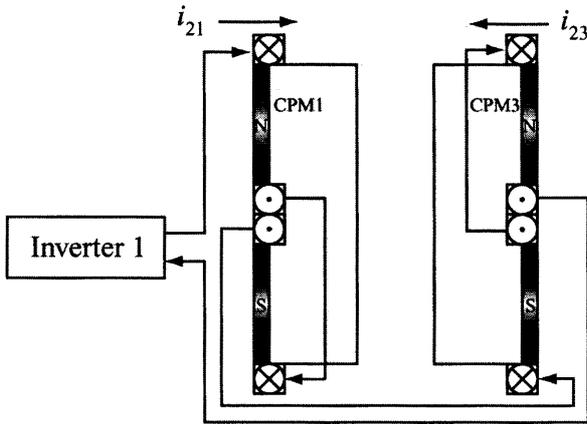


Fig. 3 Model of push-pull controlled-PM.

4. 案内制御システムの設計

制御 PM LSM においては、CPM とアマチュア間で発生した吸引力を制御 PM 電流により案内制御を行う。制御コイルの自己インダクタンス、速度起電力係数はエアギャップ長や一次側電流、 x_0 によって非線形に変化して正確なモデリングは不可能である。よってフィードフォワード要素を抵抗値による電圧降下分のみとし、電流制御ループ (0.1 msec) の外側に運動制御ループ (1 msec) を持っているため、電流制御においては、フィードフォワード要素は PI 制御とし式 (6) になる。これで、十分なサーボ性能を得ることが出来る。

$$v_{2i}^* = v_{2FFi}^* + v_{2FBi}^*$$

$$= R_2 i_{2i}^* + K_P (i_{2i}^* - i_{2i}) + K_I \int (i_{2i}^* - i_{2i}) dt \quad (6)$$

(i = 1, 2)

案内制御系運動制御では、平衡点より離れると非線形性でパラメータの変動が大きくなったり、式(1)により推進力が案内力に与える影響を線形化時に無視されたりすることや、乗員や積載物によるケージ重量と慣性モーメントの変動のことを考慮して、コントローラは外乱オブザーバを用いた。また、式(5)に対して $\Delta\delta_i$ の積分を付加して、その拡大系を考えて、オブザーバ+ライディングモード型コントローラを設計した。案内制御系のブロック線図は Fig. 4 に示す。

また、案内制御系では次の 2 種類のエアギャップ目標値を設定する。

- ・定ギャップ制御：一定のギャップ目標値に対して制御を行う。(案内制御開始時の切り離し及び終了時の着地に使用)
- ・電力最小化制御：御電流の積分値を目標値にフィードバックし、目標値を電力が最小になるようにギャップに誘導し、制御を行う。(定常状態で使用)

$$\delta_{i0} = \delta_{i0} - K_i \int i_{2i} dt \quad (7)$$

案内制御システムの構成は Fig. 5 に示す。電圧型単相インバータ、24 V バッテリー及び DSP をケージに搭載している。DSP 付属の統合環境において、C 言語を用いたアルゴリズムを実装し、DSP に直結しているインバータ制御ボードからゲート信号を出力して、制御コイルに電流を流す。

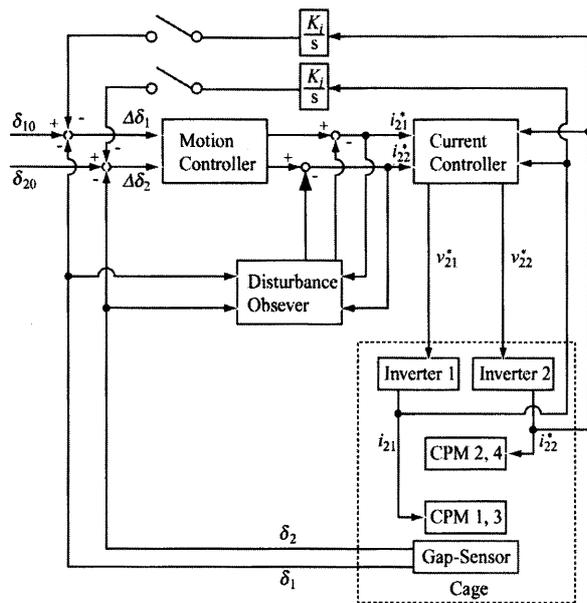


Fig. 4 Block diagram for guidance control of RLE.

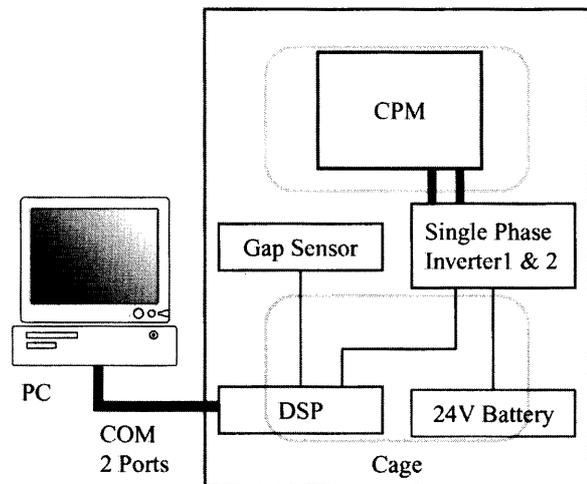


Fig. 5 Experimental configuration of the guidance control system.

5. 実験及びその結果

初期状態 ($x_2 = -6 \text{ cm}$) では、ケージはPMと電機子鉄心間の吸引力により片側ガイドレールにガイドローラを介して接触しており、また、エレベータシャフト最下部に設置されたショックアブソーバにて支持されている。 $x_2 = 0 \text{ cm}$ を1階とし、ケージ高さが48 cmであることから1階分の高さを48 cmと設定し、4階まで1.5 mのエレベータ動作を可能とする。 $x_2 = -6 \text{ cm}$ から $x_2 = 0 \text{ cm}$ までは片側軌道にガイドローラを介して接触した状態のまま推進を行う。 $x_2 = 0 \text{ cm}$ に推進方向停止状態で案内制御を開始し、その後は案内方向非接触のままエレベータ動作を行い、再び $x_2 = 0 \text{ cm}$ に案内制御を終了し片側軌道に着地を行う。なお、案内制御開始時のガイドレールからの切り離し及び終了時の着地はPMの磁界をキャンセルするために大電流を要するため、切り離しと着地時間を0.25 secとした。また、定ギャップ制御の目標値を5.5 mmとした。実験は三つの場合に分けて行うが、まとめてFig.6に示す。(1)は始動しコンタクトしながら上昇させる。(2)は停止した後、切り離して案内制御を開始し定ギャップ制御から電流最小化制御に切り替える。(3),(7),(9)は推進停止状態でコンタクトレス案内の電流最小化制御。(4)は加重加え。(5)は加重を撤去し、(6),(8)は上昇にてコンタクトレス案内の電流最小化制御。(10),(11)は下降にてコンタクトレス案内の電流最小化制御。(12)は電流最小化制御から定ギャップ制御に切り替えて案内制御を終え、そして軌道に接触させる。(13)はコンタクト下降させ再び初期状態へ戻させて動作終了する。

5.1 推進停止制御時の案内制御

実験手順：(1)⇒(2)⇒(3)⇒(12)⇒(13)

実験結果はFig.7に示す。影部が案内制御を行っている時間帯である(以下同様)。

案内方向をコンタクトレス化すると、推進停止制御を支援できる摩擦力がなくなるため、推進停止制御精度の

低下(パルス上の振動の発生)が見られる。その振動が外乱として案内方向の運動に働くが、エアギャップ長のグラフから分かるようにその影響を十分補償できている。切り離し時にはPMの吸引力をキャンセルするために大きな電力を要するが、これは非常に短時間であり、その後の電力最小化制御時の電力の平均は、上下CPM合計で0.22 Ws = 0.81 kWhと良好な電力最小化制御が出来たことがわかる。エアギャップ測定値の振幅はセンサの分解能レベルに留まっているので、案内制御に関しては、乗員に不快感を与えない制御を達成したと言えるであろう。

5.2 推進停止制御時の負荷荷重に対する案内制御

実験手順：(1)⇒(2)⇒(3)⇒(4)⇒(5)⇒(3)⇒(12)⇒(13)

実験結果はFig.8に示す。

電流最小化制御を行っているため、加重時には、エアギャップ及びピッチングに変動が起こるが、それぞれ0.2 mmと0.07°の緩やかな程度に留まっている。また、加重にもかかわらず、エアギャップの目標値を消費電力が最小になる位置に誘導することにより、加重による消費電力の増加が抑えられることが分かる。

5.3 各層推進及び停止制御時の案内制御

実験手順：(1)⇒(2)⇒(3)⇒(6)⇒(7)⇒(8)⇒(9)⇒(10)⇒(7)⇒(11)⇒(3)⇒(12)⇒(13)

実験結果はFig.9に示す。

推進方向停止状態では、推進制御が案内制御に与える影響を十分補償できるが、ケージを推進すると、案内制御への影響が大きくなることが分かる。しかし、案内制御系において約4 A程度までの電流で補償することで、エアギャップ測定値の振幅は非常に小さいので、案内制御系では良好な性能を得ることが出来た。なお、推進時には、一次側電機子の不整にもかかわらず、電力最小化案内制御の実現を確認することが出来た。

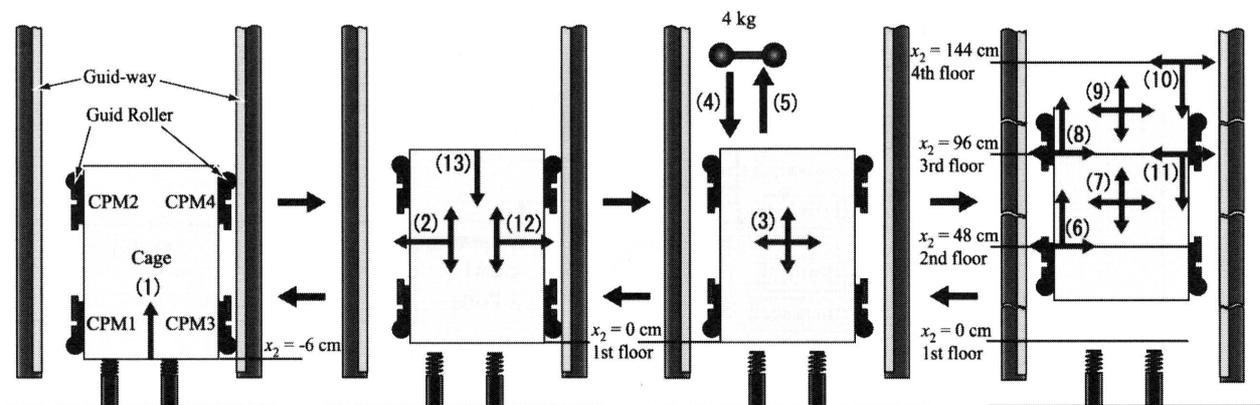
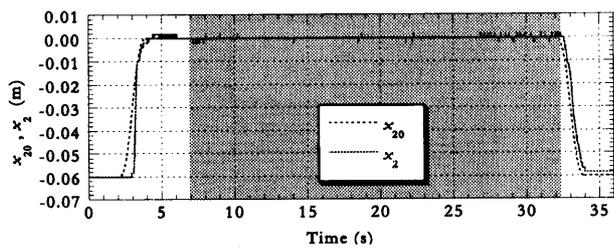
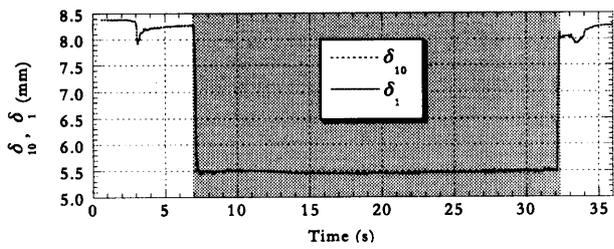


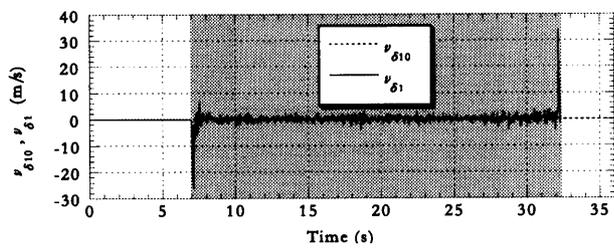
Fig.6 Generalization of the experiment process.



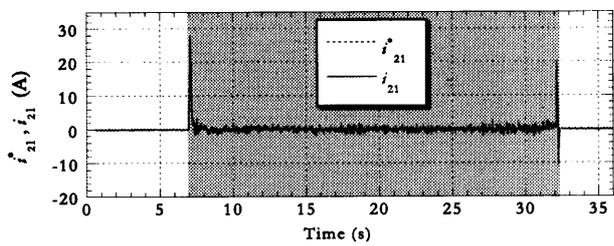
(a) Demand and measured position of the cage



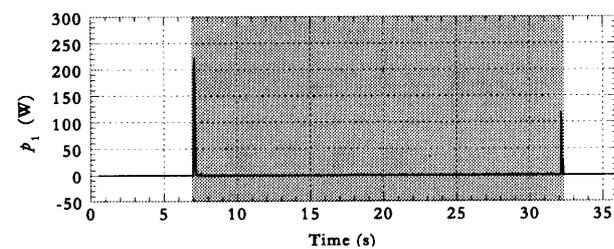
(b) Demand and measured air-gap length of the CPM1



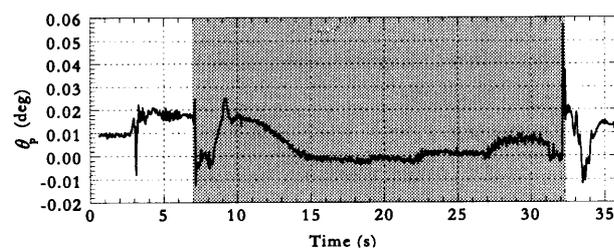
(c) Demand and measured speed of the CPM1



(d) Demand and measured control current of the CPM1

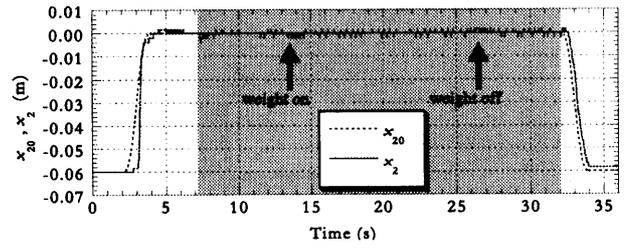


(e) Control power loss of the CPM1

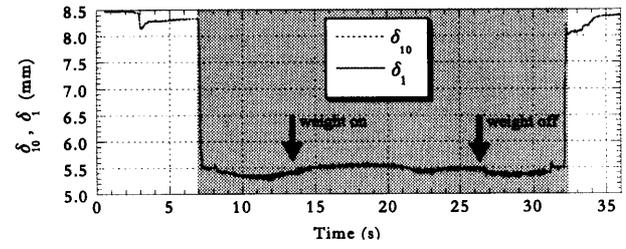


(f) Pitching angle of the cage

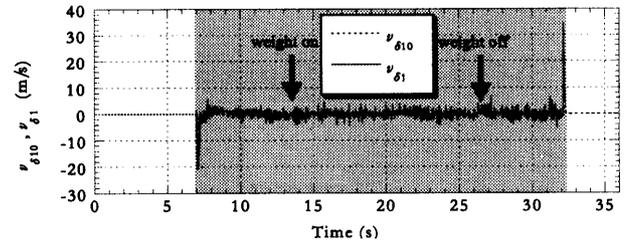
Fig.7 Experimental result of contactless guidance control at standstill.



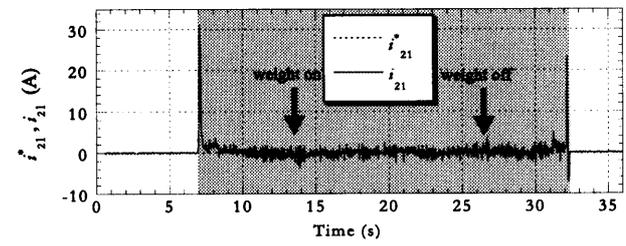
(a) Demand and measured position of the cage



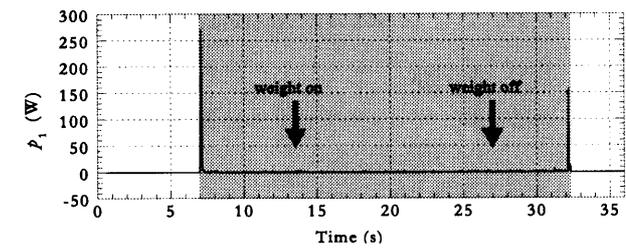
(b) Demand and measured air-gap length of the CPM1



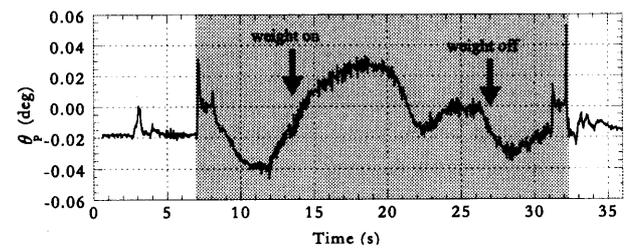
(c) Demand and measured speed of the CPM1



(d) Demand and measured control current of the CPM1



(e) Control power loss of the CPM1



(f) Pitching angle of the cage

Fig.8 Load experimental result of contactless guidance control at standstill.

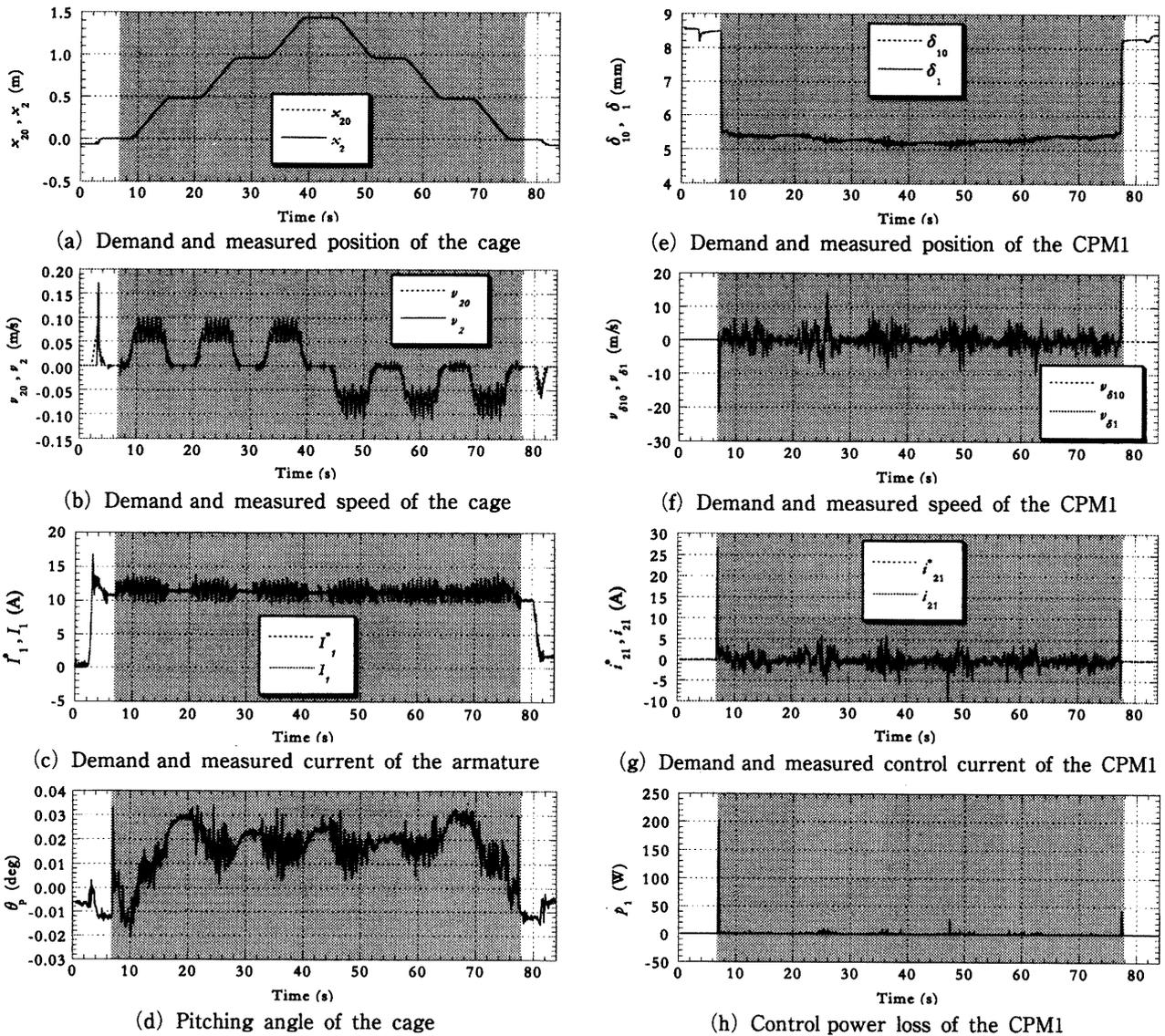


Fig.9 Experimental result of contactless guidance control in propulsion.

6. むすび

本研究では、ケージ内で独立した案内制御システムを構築し、LSM 推進力によるダイレクト推進・停止（及び停止加重）制御と共に安定なコンタクトレス案内制御が得られた。また、ケージが左右電機子の不整にもかかわらず、案内力は釣り合ってエアギャップの平均位置を通るため、電力最小化制御を実現することが出来た。電流最小化制御は定ギャップ制御より軌道不整の影響を抑えることができ、運動の面でも有効的な制御法である。また、本制御システムは、各階推進と停止を行うエレベータ運転の案内制御の場合では、案内制御のための電力損失は平均で約 3 W 程度であり、極めて経済的なシステムである。

本研究は、21世紀COEプログラム「システム情報科

学での社会基盤システム形成」の一環として実施された。

参考文献

- 1) K. Yoshida and M. Ta Cao: "A Robust Control Based on Disturbance Estimation in Ropeless Linear Elevator", *ELECTRIMACS '99*, pp.III.209-213.
- 2) 吉田・秦野・西: 「ロープレスリニアエレベータの高精度停止制御及び推進制御実験」, 平成 13 年度電気学会全国大会, No.5-071.
- 3) 吉田・西・秦野: 「ロープレスリニアエレベータの推進制御」, 平成 13 年電気学会産業応用部門大会, No.269.
- 4) 吉田・西・森山: 「ロープレスリニアエレベータのコンタクトレス案内制御シミュレーション」, 平成 13 年度電気関係学会九州支部大会, No.116.