

# 非接触駆動鉛直輸送システムの分岐部通過特性

立石大輔\*, 中井敏幸, 古関隆章 (東京大学)

Behavior of Contactless Vertical Transportation System at Shunting Place  
Daisuke Tateishi, Toshiyuki Nakai, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

## Abstract

To realize the 'ropeless elevator', the authors have proposed a new vertical transportation system, which can also move in horizontal direction. In this paper, first, the authors analyze the characteristics of LSM with Halbach magnet array for hoisting and U shape hybrid electromagnet at shunting place through the magnetic field computation. Then, the authors examine the performance of hoisting control at shunting place by computer simulation.

キーワード：エレベータ，ハルバッハ磁石配列，リニア同期モータ，電磁石  
(elevator, Halbach magnet array, linear synchronous motor, electromagnet)

## 1. はじめに

都市空間の高度利用のために、上下方向の輸送機関の高性能化が重要な課題の一つとなっている。しかし、現在のロープ式エレベータでは、一つのシャフトに1個のかごしか運行できないため、建物内においてエレベータの占める面積が大きくなるという問題があった。このため、「ロープレスエレベータ」の提案がなされている。ロープレスエレベータにおいて、柔軟な運行を実現するためには、折り返しのための水平移動を素早く行う必要がある<sup>(1)</sup>。このことから、筆者らは、推進用ハルバッハ形磁石配列リニア同期モータと、姿勢制御用の永久磁石つきU字型電磁石の組み合わせによる、水平移動も可能な完全非接触の鉛直輸送システムを提案し、これまでに、通常走行路部分において、推進用モータの特性解析と、姿勢制御手法の基礎検討を行ってきた<sup>(2)</sup>。しかし、構造が複雑になる分岐部分においては、推力や吸引力の特性が通常の走行路とは大きく異なり、推進・浮上制御を困難にする恐れがある。

そこで、本論文では、まず、分岐部分における推力特性及び姿勢制御用電磁石の吸引力特性を、磁界解析により明らかにし、次に、推進制御のシミュレーションを行うことにより、分岐部分におけるプラントモデルの変動が制御系に与える影響について考察する。

## 2. 提案する鉛直輸送システム

<2.1> 提案システムの構成 提案システムの構成を図1に示す。可動子の両側に、一对の推進用リニア同期モータ(LSM)を配置する。推進用LSMは地上一次の構成とし、界磁には、空心でも片側だけに大きな磁界を発生できるハルバッハ配列永久磁石を用いることにより、電機子巻線がコアレス化でき、トルク脈動の抑制が期待できるだけでな

く、可動子への送電量を減らすことができる。なお、電機子巻線の裏側に鉄板を貼り付けることにより適度な吸引力を発生させ、y軸方向及びヨーイング方向に復元力として作用させることが可能である。また、可動子に8つある頂点の内4箇所に、姿勢制御用のU字型電磁石(永久磁石つき)を配置する。この電磁石は、水平移動用LSM(鉄心つき)の界磁と兼用となっている。

<2.2> 分岐部分の構造 鉛直方向の走行路と水平方向の走行路の分岐部分では、図1でもわかるように、姿勢制御用電磁石に対向する鉄心と、推進用LSMの電機子巻線の位置が干渉する。そこで、図2に示すように、姿勢制御用電磁石対向鉄心と、推進用LSMの電機子巻線の裏に貼り付ける鉄板の表面位置を合わせて、地上側からは推進用LSMの

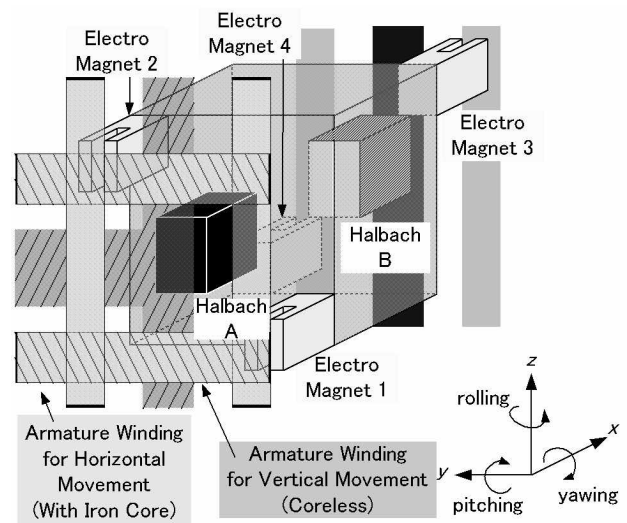


図1 提案する鉛直輸送システムの構成  
Fig. 1 Structure of Proposed Vertical Transport System

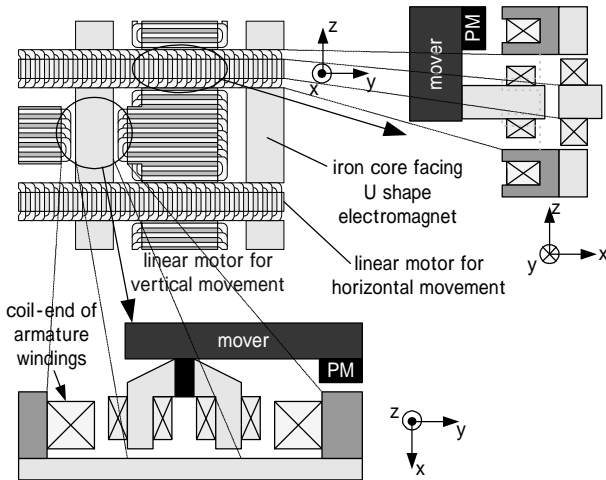


図2 分岐部の構造  
Fig. 2 Structure at Shunting Place

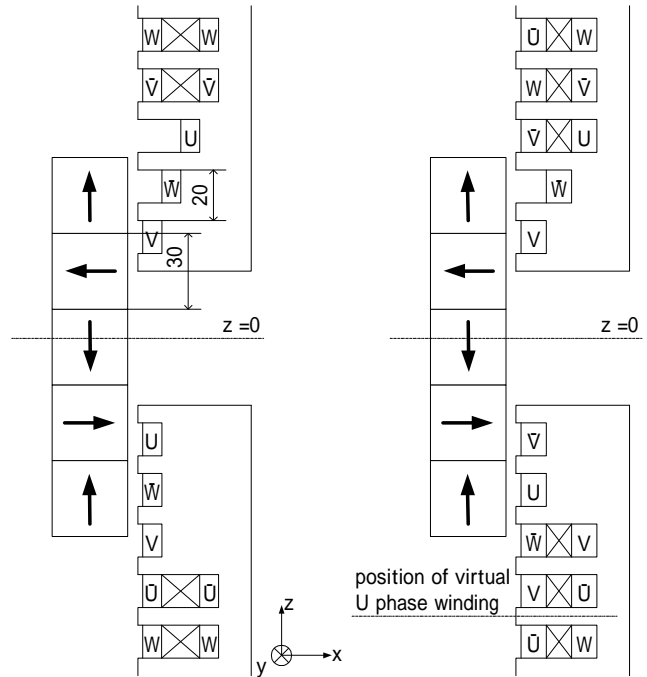
電機子巻線が可動子側に飛び出し、可動子側からは姿勢制御用電磁石が地上側に飛び出す構造を取る。このため、分岐部においては、推進用LSMの電機子巻線が途切れる部分が存在し、また、水平移動用リアモータの巻線の影響により、姿勢制御用U字型電磁石に対向する鉄心も途切れることになる。

3. 分岐部における推進用空心リア同期モータの推力

<3.1> 電機子巻線の結線 推進用モータは空心であるが、推力を支持するため、非磁性材料によってスロットを作り、その中に巻線を取める構造となっている。電機子巻線の結線方法としては、図3(a)に示す全節巻と、(b)に示す短節巻の二通りが考えられる。全節巻の方が基本波成分は大きくなるが、一方、分岐部における電機子巻線の断絶区間長さは短節巻の方が短くなる。また、図3の×印は、コイルエンドの影響により、スロットに巻線を施せないことを表している。図から、スロットサイズを同一とした場合、短節巻の方が巻線を多く施せることがわかる。

<3.2> 分岐部における推力の変動 二次元磁界解析によって、可動子が分岐部に差し掛かった際の推力の変化を調べた。なお、分岐部においては、電機子電流によって作られる磁界の周期性が崩れるため、励磁位相を変更したほうがよい可能性がある。そこで、推力最大化 吸引力最小化 の二つの観点から励磁位置の調整を試みた。その結果を図4及び図5に示す。電流振幅は3Aである。

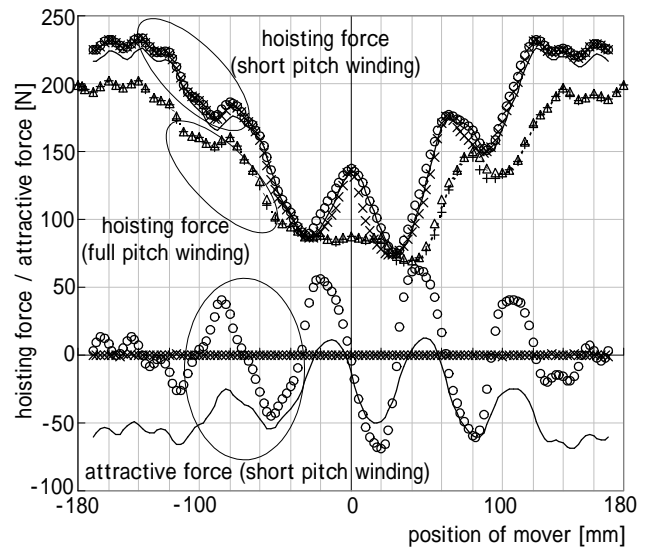
図4より、全節巻よりも短節巻の方が、隣接する二つの電機子の端部にあたる分岐部中心における推力が大きいことがわかる。また、推力を最大化するために必要な励磁電流位相の調整量と、吸引力を最小化するために必要な励磁電流位相の調整量は、図5に示す通り全く逆の位相となっているため、両立することはできないが、励磁電流の位相を調整することにより、吸引力はほぼゼロにできるのに対し、



(a) Full Pitch Winding (b) Short pitch winding

図3 分岐部近傍における推進用モータ電機子巻線

Fig. 3 Armature Windings of LSM for Hoisting at Shunting Place



full pitch	short pitch	
—	-----	No phase adjustment
○	△	With current phase adjustment (to maximize hoisting force)
×	+	With current phase adjustment (to minimize attractive force)

図4 分岐部における推進用モータの推力・吸引力

Fig. 4 Hoisting Force and Attractive Force of LSM at Shunting Place

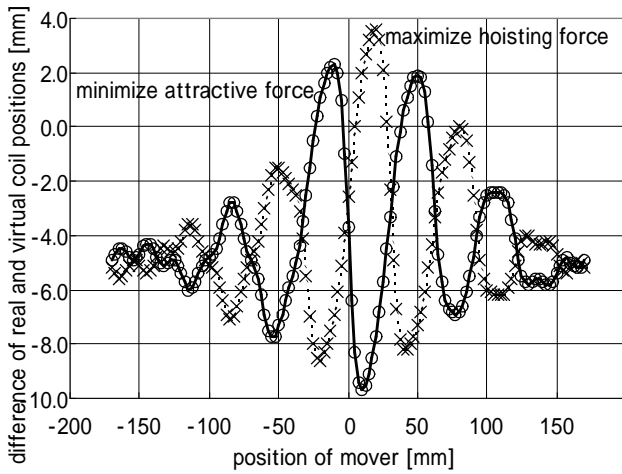


図5 推力最大化もしくは吸引力最小化のための励磁位置調整量

Fig. 5 Current Phase Adjustment to Maximize Hoisting Force or to Minimize Attractive Force

推力は殆ど変化しないことがわかる。このことから、吸引力を低減するような調整が有効であるといえる。

#### 4. 分岐部における姿勢制御用電磁石の吸引力

分岐部においては、水平移動用リニアモータのコイルエンドの影響により、図6に示すように、姿勢制御用電磁石に対向する鉄心が途切れてしまう。そこで、3次元磁界解析によって、分岐部近傍における電磁石吸引力の変化を解析した。

まず、姿勢制御用アクチュエータとして重要である、吸

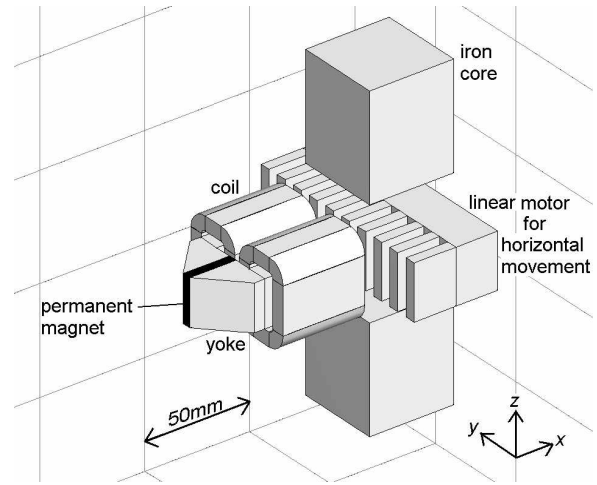


図6 電磁石吸引力の解析モデル

Fig. 6 Model of U shape Hybrid Electromagnet for Magnetic Field Computation

引力のx軸成分の変化を図7に示す。電流値が負であり、ギャップが大きく吸引力が小さい条件下では、分岐部に差し掛かっても殆ど吸引力の変化が見られない。電流値を大きく、ギャップを小さくしていくと、分岐部において確かに吸引力の低下が見られるようになるものの、空心である推進用リニアモータの場合とは違って、鉄心の側面に磁束が回りこむため、吸引力低下の割合はそれほど大きくなく、最大で3割程度である。また、この磁束の回り込みのため、図8に示すように、鉛直方向に、リニアモータ中心に引き戻すような力が生じる。この力は、推進制御系にとっては外乱となるが、最大でも可動子を支持するために必要な力の30%程度であり、外乱力としてはそれほど大きくないこと

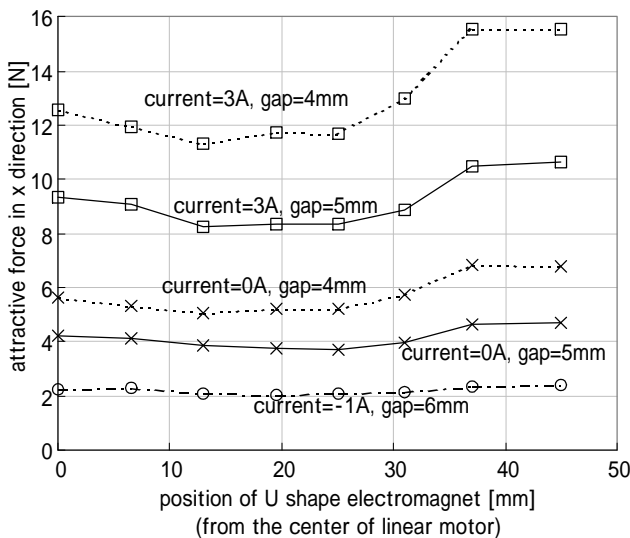


図7 分岐部における姿勢制御用電磁石のx軸方向吸引力  
Fig. 7 Attractive Force of Electromagnet for Levitation Control at Shunting Place (in x Direction)

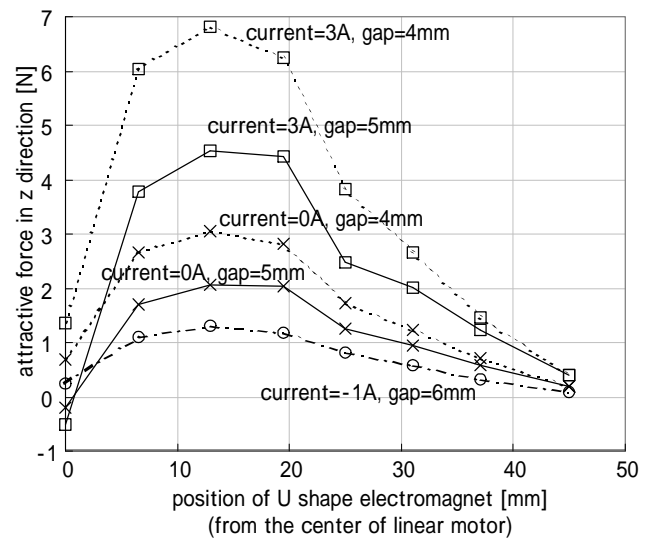


図8 分岐部における姿勢制御用電磁石の鉛直方向吸引力  
Fig. 8 Attractive Force of Electromagnet for Levitation Control at Shunting Place (in Vertical Direction)

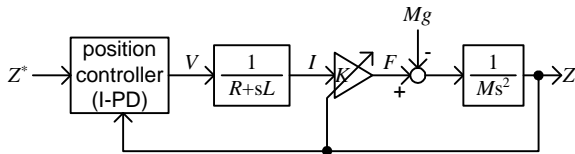


図9 推進制御系のブロック図

Fig. 9 Block Diagram of Vertical Position Controller

がわかる。

## 5. 分岐部における推進制御

これまでの検討によって、分岐部通過によるプラントモデルの変動は、推進制御系に特に顕著であることが明らかとなった。そこで、磁界解析によって得られた推進用リニアモータの特性を用いて、推進制御のシミュレーションを行い、分岐部通過時における制御性能について検証する。

推進制御系のブロック線図を図9に示す。ここで、 $z$  は可動子位置、 $V$  は巻線電圧、 $I$  は巻線電流、 $K$  は電流対推力比、 $g$  は重力加速度を示し、また、電機子巻線抵抗 $R=16.6$ 、巻線インダクタンス $L=0.11\text{mH}$ 、可動子質量 $M=10\text{kg}$ である。

推進用モータは空心であるため、巻線抵抗値に比べてインダクタンスが極めて小さい。そこで、一次遅れの部分を、単なる $(1/R)$ 倍の比例ゲインとして扱う。また、 $K$ の値は本来位置によって可変であるが、これを通常走行路部分における値で一定として扱うと、指令値から位置までの伝達関数は

$$\frac{z}{z^*} = \frac{1}{\frac{MR}{KK_I} s^3 - \frac{K_D}{K_I} s^2 - \frac{K_P}{K_I} s + 1} \quad (1)$$

但し、 $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ ：制御器の比例・積分・微分ゲインとなる。(1)の分母多項式を、3次のKessler標準形

$$s^3 + 4/t \cdot s^2 + 8/t^2 \cdot s + 8/t^3 \quad (2)$$

と比較して、 $K_I = \frac{8MR}{Kt^3}$ 、 $K_P = -\frac{8MR}{Kt^2}$ 、 $K_D = -\frac{4MR}{Kt}$ を得る。

等価時定数を0.1として、可動子を45mm/sの定速で分岐部を走行させた場合のシミュレーション結果を図10に示す。分岐部通過時において、やや速度波形に乱れはあるものの、プラントモデルの大きな変動にもかかわらず推進制御が保たれていることを示している。

## 6. まとめ

本論文では、水平移動も可能な非接触駆動鉛直輸送システムについて、推進用リニアモータの電機子巻線が途切れ、姿勢制御用U字型電磁石に対向する鉄心に間隙が生じる分岐部分について検討を行った。まず、磁界解析によって、分岐部分における推進用リニアモータの推力特性と、姿勢制御用U字型電磁石の吸引力特性を調べ、電流値対推力比

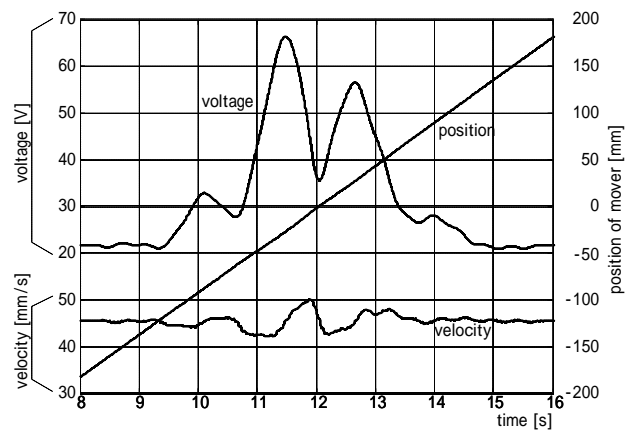


図10 分岐部通過時における推進制御シミュレーションの結果

Fig. 10 Simulation Result of Hoisting Control at Shunting Place

の値は、可動子位置によっては1/3程度にまで低下するものの、姿勢制御用電磁石の吸引力については3割程度の低下に留まることを明らかにした。次に、その結果を踏まえて推進制御のシミュレーションを行い、プラントモデルが大きく変動しても推進制御が成立することを示した。

## 7. 今後の課題

これまで、提案構造において能動的姿勢制御が可能な $x$ 軸方向・ $z$ 軸方向・ピッチング・ローリングの4自由度については、シミュレーションによって姿勢制御が成立することを示してきたが、受動的な安定性に拠っている $y$ 軸方向・ヨーイングの安定性については検討していない。この点について、実験機を製作し、提案方式の特性を明らかにしていく予定である。

## 参考文献

- (1) M. Miyatake, T. Koseki, S. Sone: "Evaluation of Operational Performance in Ropeless Elevator Systems", Journal of The Japan Society of Applied Electromagnetic and Mechanics, Vol. 5, No. 3, pp. 49-55 (1997) (in Japanese)  
宮武昌史・古関隆章・曾根 悟:「ロープレスエレベータの運行特性評価」, 日本AEM学会誌, 5, 3, pp. 49-55(1997)
- (2) D. Tateishi, T. Koseki: "Proposal of Vertical Transportation System, which can also move in Horizontal Direction", Joint technical meeting on transportation and electric railway and linear drives, TER-03-36/LD-03-61, pp. 49-54 (2003) (in Japanese)  
立石大輔・古関隆章:「水平移動も可能な非接触駆動鉛直輸送システムの提案」, 電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会資料, TER-03-36/LD-03-61, pp. 49-54 (2003)