Levitation and Propulsion for the Magnetically Levitated Conveyance System Using Two Phase Linear Motor

Shunsuke Ohashi Member (Kansai University, ohashi@ipcku.kansai-u.ac.jp)

Keywords: magnetically levitation, linear motor, conveyance system

1. Introduction and Experimental Device

Magnetically levitated conveyance systems have been developed. These systems have an advantage of carrying load without contacting. So conveyance systems for many applications have been underdeveloped. Most system consists of levitation section and thrust one. Thus we need two facilities to realize contact-less conveyance. We have developed the conveyance system that realizes levitation and propulsion. At first a linear motor with three-phase primary is introduced. Although stable levitation is obtained, influence of running speed on the levitation characteristics is large. To reduce this disadvantage, we have developed the system with single facility using two phase linear motor. Fig. 1 shows the experimental device. Two phase linear motor winding is set for propulsion and levitation. On the carrier, two iron cores are installed. Copper windings are given on these cores, and a FET device is connected for switching. Principle for levitation is as follows; when air gap between the iron core and linear winding becomes small, switch (FET) is closed. The winding on the core is short circuited, attractive force decreases. If we need more attractive force, switch is opened, and then attractive force increases. Thus we can control air gap by switching the FET connected to the windings on the core. Principle for propulsion is shown. At first, one of the linear windings (Phase A) is excited. Then current of the Phase A decreases and that of Phase B increases. As distribution of the flux is changed, U-shape iron core on the carrier move to right side. Finally current of the Phase A becomes zero, that of the Phase B maximum. Iterating these procedures, the carrier moves.

2. Result and Conclusion

Fig. 2 shows levitation characteristics under acceleration for running direction. The levitation gap $g = 3.5$ mm is used. When the acceleration of the bogie becomes large, levitation gap is disturbed and little out of directed value. But levitation gap is soon close to the directed value, and the carrier continues the stable levitation.

In this system, levitation and propulsion system are combined. Principle of the levitation and propulsion is shown. Levitation region with each phase excitation state is measured. Using amplitude modulation for the power supply, stable levitation of the carrier with running is given. This system realizes contact-less conveyance. As we need only electrical power for FET switching on the carrier side, power supply system for carrier is not needed. Stable levitation is achieved, and the carrier can run correspond to the frequency of the

amplitude modulation. Also under the acceleration, the carrier levitates at directed levitation gap. Stability of levitation is influenced on the control parameters such as switching line and the resistance installed on the parallel of the FET. More stability at a higher velocity and position control method for running direction should be considered for further research.

Fig. 1. Experimental device

Fig. 2. Levitation with propulsion

2相リニア磁気浮上搬送システムの浮上・推進に関する検討

正 員 大橋 俊介*

Levitation and Propulsion for the Magnetically Levitated Conveyance System Using Two Phase Linear Motor

Shunsuke Ohashi*, Member

The magnetically levitated conveyance systems have been developed. Most system consists of levitation (and guidance) section and thrust one. We have developed the conveyance system that realizes levitation and propulsion with single facility using two phase linear motor. In this system, levitation and propulsion system are combined. Control method for the propulsion system to get more stability is discussed. To obtain the propulsion force, modulation of the voltage applied on the primary windings is undertaken. Traveling field is generated and the carrier with the secondary iron core can move. Levitation force is given by attractive force between flux generated by the primary windings and secondary iron core. As we need only electrical power for FET switching on the carrier side, power supply system for carrier is not needed. From the experimental results, it is shown that this system realizes contact-less conveyance with various propulsion patterns.

キーワード：磁気浮上，リニアモータ，搬送システム

Keywords: magnetically levitation, linear motor, conveyance system

1. はじめに

磁気浮上システムは非接触で搬送を行うことができるため、搬送に伴う摩擦部分がない。よって、騒音が少なく摩擦による粉塵発生がないなどの利点から騒音や粉塵などの発生が好ましくない場所での搬送システムや鉄鋼板の搬送などさまざまな用途への応用が期待されている⁽¹⁾⁽²⁾。ほとんどのシステムにおいて、浮上案内と推進系は別々に構成されているため、完全非接触搬送を実現するためには浮上案内および推進の2つのシステムを用意する必要がある⁽³⁾。本研究では浮上案内および推進を1次側リニアモータ巻線と2次側（搬送車側）に取り付ける鉄心により実現する搬送システム⁽⁴⁾を取り上げる。まず1次側に3相巻線を用いたシステムを考案、実験装置を作成したが、巻線に移動磁界が発生する移動モードと、搬送車が推進方向には停止し浮上状態になる浮上停止モードにおいて吸引力の差が非常に大きいため、浮上停止状態から円滑に移行することが困難であった。そこで、1次側3相巻線を2相にすることで搬送車が地上で停止している状態から浮上し、走行するまで安定した浮上の実現をはかった。本論文では推進を伴う

浮上についてとりあげ、推進方法について説明し、推進特性、その際の特性について述べる。

2. 実験装置

〈2・1〉 1次側リニアモータ巻線 図1にシステム構成を示す⁽⁵⁾。2相リニア巻線が1次側鉄心に施されている。2次側としてU型鉄心が搬送車に取り付けられている。この鉄心はリニアモータの2次側としてだけでなく、吸引型浮上システム用としても用いられる。1次巻線はインバータに接続されている。基本電源周波数は60Hzで、推進力を発生させるため、振幅の変調を行う。図2に巻線の構成

図1 システム構成

Fig. 1. System configuration.

* 関西大学工学部先端情報電気工学科

〒564-8689 吹田市山手町 3-3-35

Department of electrical and computer sciences, Kansai University
3-3-35, Yamate-cho, Suita, Osaka 564-8680

図2 リニア巻線の形状

Fig. 2. Shape of the linear winding.

表1 リニアモータの諸元

Table 1. Dimension of the linear motor.

Voltage and Current	200V・5 A
Width and height	1160 X 100 mm
Thickness (lamination)	40 mm (0.5 mm X 80)
Slot number	72
Turn	150
Pole pitch	66 mm
Phase	2

を示す。それぞれ2相の巻線は Phase-A, Phase-B と定義される。表1にリニアモータ諸元を示す。モータの長さは1.16mである。

〈2・2〉 実験装置の構成 図3に実験装置を示す。2相リニアモータの1次巻線を推進および浮上案内用として設置する。搬送車側には2つのU字鉄心が搭載される。U字鉄心の歯幅はリニアモータの磁極ピッチと同じである。U字鉄心にはコイルが巻かれており、スイッチング用のFETが接続され、そのON-OFFにより吸引力制御を行う。スイッチングの際大きな誘導起電力がFETに加わるので、並列に保護抵抗を挿入している。この保護抵抗はU字鉄心のコイルの電流を変化させるため、浮上特性に影響を与える。2個のレーザーセンサによりU字鉄心表面と1次側コイルの底面間のギャップ（浮上ギャップ）を測定する。これらのギャップデータはA/D変換器を通してパソコンに送られる。ここでサンプリング周波数は10kHzである。

〈2・3〉 浮上方式 図4に浮上原理を示す⁹⁾。浮上ギャップが小さくなると、FETのスイッチが閉じられる。すると鉄心に巻かれたコイルが短絡することで1次側リニア巻線に流れる交流による磁束変化により発生した誘導起電力によって電流が流れ、吸引力を減らす方向に磁束が発生す

図3 実験装置

Fig. 3. Experimental device.

図4 浮上原理

Fig. 4. Principle of the levitation.

る。逆にギャップが目標値よりも大きい場合はFETをOFFにし、吸引力を増加させる。このようにして搬送車側鉄心の巻線に接続したFETのスイッチングにより浮上ギャップを制御できる。また、この方法を用いることで浮上制御に必要なエネルギーは非常に小さくなるため、バッテリーなどを用いると搬送車側に地上からの電源供給の必要がなくなる。

図5に浮上ギャップの制御方法を示す。位相面軌跡が示されており、横軸は浮上ギャップ、縦軸は搬送車の上下速度である。FETがONの領域では吸引力は小さくなり、OFFの領域では大きくなる。スイッチングの領域を分けるのは直線Sであり、この傾きaによって収束性が決まる。もし上下速度を考慮しないとaは無限大になり、ギャップが目標点の近傍付近で回って収束しない状態もあるため、上下速度を考慮することで収束性をよくしている。なお上下速度はギャップと時刻データから計算で求めている。

図6に搬送車の形状を示す。U字鉄心の端に1つずつレーザーセンサが設置されている。U字鉄心に巻かれているコイルは直径0.8mmで巻数は300である。搬送車はアルミフレームを骨格とし、アクリル樹脂で作成され、重量

流は次式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} i_A &= F_A(t) \sin(\omega_1 t) \\ i_B &= F_B(t) \sin(\omega_1 t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで i_A は Phase-A の電流, i_B は Phase-B の電流, F_A は Phase-A 電流の振幅, F_B は Phase-B 電流の振幅であり, ω_1 は基本電源周波数 (ここでは商用周波数 60 Hz) である。推進のための移動磁界を発生させるため, F_A および F_B は次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} F_A &= I \sin(\omega_2 t - \pi/2) \\ F_B &= I \sin(\omega_2 t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ただし, I は最大電流, ω_2 は振幅変調の周波数である。このようにしてそれぞれのリニア巻線に振幅を変調した電流を流す。巻線表面の磁束密度は次式で表される。

$$B = \frac{8}{\pi} B_m \sin \omega_1 t \cos \frac{\pi}{8} \left\{ \cos \left(\omega_2 t - \theta + \frac{\pi}{8} \right) \right\} \dots\dots (3)$$

ただし, B_m は最大磁束密度, θ は巻線上の位置である。

その結果, 最大磁束の位置は ω_2 によって変更され, 搬送車の速度制御が可能となる。三相巻線を用いればもっと簡単に移動磁界が発生するが, 搬送車の停止状態と移動状態での吸引力の差の制御が難しいため, 本システムではこの方式を採用した。図 9 に実験装置図を示す。

3. 実験装置

〈3・1〉 磁束密度分布 図 10 にリニア巻線での磁束分

図 10 リニアモータ上の磁束分布

Fig. 10. Flux density distribution on the linear motor.

図 11 浮上力

Fig. 11. Levitation force ($g = 3.5$ mm).

(a) Phase A or B excited

(b) Phase A or both and B excited

(c) Phase A or both and B excited, U-shape core is set between the slot

図 12 浮上領域

Fig. 12. Levitation region.

図 13 浮上領域の切替直線傾き依存性
Fig. 13. Dependence of the levitation region on a .

図 14 浮上特性
Fig. 14. Levitation characteristics.

布を示す。磁束の測定にはホール素子を用いた。図 10(a) および (c) の Phase-A もしくは B のみの励磁では電流値 4.42 A を用いた。図 10(b) での両方励磁 (2 相励磁) の場合の電流値は 2.92 A を用いている。磁束分布の最大値が移動し、推進力が発生していることが示されている。

〈3・2〉 浮上領域 図 11 に浮上ギャップ $g = 3.5$ mm の場合の浮上力を示す。ここで U 字鉄心に設置されたコイルの FET は OFF となっており、影響はない。このデータから 1 次コイルに供給する電流値の概算を出すことができる。次に搬送車の浮上領域を図 12 と図 13 に示す。グラフの横軸は抵抗値である。この抵抗は図 3 に示した FET と並列に挿入されたもので FET をスイッチングの際の過電圧から守るためである。この抵抗の値は FET が OFF の場合の浮上力にも影響を与えるため、この値も検討する必要がある。縦軸は目標浮上ギャップである。図中の線が浮上成

図 15 浮上状態での浮上 ($v = 12.8$ mm/sec)
Fig. 15. Levitation gap ($v = 12.8$ mm/sec).

図 16 推進状態での浮上 ($v = 38.4$ mm/sec)
Fig. 16. Levitation gap ($v = 38.4$ mm/sec).

功と失敗の境界線である。線で囲まれた内部が浮上可能領域で、外部は落下もしくは 1 次側への吸着により浮上ができない領域である。境界線は 5 回の実験の平均値が示されている。

Phase-A と B でインピーダンスの相違があるため、それぞれ単独で励磁した場合の浮上領域は完全には重ならない。

図 17 加速状況下での浮上特性

Fig. 17. Levitation characteristics under acceleration.

い。図 12(a) にそれぞれの相を単独で励磁した場合、(b) に Phase-A のみ励磁した場合と両方を励磁した場合（2 相励磁）、(c) に U 字鉄心がリニア巻線のスロットの間に配置された場合の結果を示す。電流値は〈3・1〉節で示した値を用いている。図 12(c) は Phase-A 励磁から 2 相励磁する状態へ移行しつつある状態と 2 相励磁状態との比較である。すべて推進方向に対しては停止状態であるが、このすべての励磁状態に対して重なる浮上領域が存在することが確認できる。つまりリニア巻線を移動しながら浮上をすることが原理的に可能であることが示された。図 13 には図 5 で示したスイッチングの切替直線の傾き a の浮上領域への依存性を示す。図より境界となる線で囲まれた浮上領域は $a = 100 \text{ 1/sec}$ で最大となる。よってこの値を実験で用いる。

〈3・3〉搬送車走行時の浮上 図 14 に搬送車の浮上ギャップと FET のスイッチング波形を示す。搬送車の前方と後方につけられた 2 つのセンサ A, B の値を示す。このシステムではピッチングの発生が想定される問題のひとつであるが、大きなピッチング運動が発生していないことが図より示されている。図 15 と図 16 に巻線に流れる電流と浮上ギャップの様子を示す。ここで電源には推進のための振幅変調が行われており、図 15 については変調周波数 $\omega_2 = 0.1 \text{ Hz}$ で 10 sec 間、図 16 では $\omega_2 = 0.3 \text{ Hz}$ で 3.2 sec 間の浮上状態を示している。よって、搬送車の速度は 0.1 Hz の場合で 12.8 mm/sec 、 0.3 Hz の場合で 38.4 mm/sec となる。この結果から、搬送車が各速度で浮上しながら推進することが確認でき、ピッチング角も少ないことが示された。本システムでは搬送車側の U 字鉄心が浮上も兼ねているため推進なしの場合と比較すると浮上ギャップの振動は小さくなっているが、安定した浮上を実現している。また、推進速度が速いほうが浮上状態は安定している。先に示した

ように浮上にはスイッチングの切替直線の傾き a と FET に並列に挿入する抵抗 R の値が影響を与える。よって、各推進速度における最適値について今後検討を行う必要がある。図 17 に加速状態にある場合の浮上特性を示す。加速度が大きい場合には浮上状態が若干乱れ、目標値から多少ずれるが、すぐに目標値付近に復帰し、浮上し続ける。

4. まとめ

2 相リニアモータを用いた磁気浮上搬送システムを取り上げた。このシステムでは浮上系と推進系を統合させることができる。浮上および推進の原理が示された。また、リニアモータの各励磁状態における浮上可能領域を測定した。リニアモータ 1 次巻線の電流に振幅変調を加えることで同時に推進を行うことができ、完全非接触搬送が実現した。搬送車側には FET のスイッチング用電力しか必要でないため、電源の供給も不要となる。浮上を行いながら各推進速度において安定な走行を実現した。また加速状態での安定浮上についても確認した。今後の課題としてはスイッチング状態を決定するパラメータおよび FET に接続する抵抗の値の速度依存性や、浮上安定性の向上があげられる。

本研究の一部は平成 16 年度関西大学在外研究による成果である。

(平成 17 年 9 月 22 日受付, 平成 17 年 12 月 22 日再受付)

文 献

- (1) T. Azukizawa, M. Morishita, S. Kanda, N. Tamura, and T. Yokoyama: "A Linear Induction Motor Control System for Magnetically Levitated Carrier System", *IEEE Trans. on Vehicle Tech.*, Vol.38, No.2, pp.102-108 (1989)
- (2) 正田英介・藤江均治・加藤純郎・水間 毅: 磁気浮上鉄道の技術, オーム社 (1992)
- (3) 電気学会: 磁気浮上と磁気軸受, コロナ社 (1993)
- (4) T. Hikiyama, T. Uejyou, and Y. Hirane: "An Experimental Study on Driving Characteristics of Attraction-type Magnetically Levitated Carrying System", *T. IEE Japan*, Vol.115-D, No.3, pp.282-286 (1995-3) (in Japanese) 引原隆士・上條武史・平根喜久: 「交流吸引形浮上搬送兼用 LIM の走行実験」, 電学論 D, **115**, 3, pp.282-286 (1995-3)
- (5) S. Ohashi: "Levitation characteristics of the magnetically levitated conveyance system using two phase linear motor", *Proceedings of 35th IEEE Power Electron. Specialists Conference (PESC 2004)*, pp.1881-1886 (2004)
- (6) S. Ohashi, E. Asao, and H. Hirane: "Levitation Characteristics of Attraction-type Magnetically Levitated Carrying System", *Proc. of Int. Symposium on Linear Drives for Ind. Appl. (LDIA'98)*, pp.323-326 (1998)
- (7) S. Ohashi: "Control Method of the Propulsion System for the Magnetically Levitated System with Linear Motor", *Proc. of the 2005 Int. Power Electron. Conference (IPEC-Niigata 2005)*, pp.865-870 (2005)

大 橋 俊 介 (正員) 1969 年 10 月 20 日生。1992 年東京大学工学部電気工学科卒。1997 年同大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同関西大学工学部助手, 2000 年同専任講師, 2003 年同助教授, 現在にいたる。1997 年 3 月工学博士。主として、磁気浮上システム, 超電導応用, リニアモータの研究に従事。IEEE 会員。