X-Y LIM を用いた搬送・分岐システムの分岐特性

— 台車重心位置が分岐に及ぼす影響 —

Switching Characteristics of Transport and Switch Systems Using X-Y LIM: Influence of the Center of Gravity Position on the Switch

宇津野良・乾 成里・大平脩一

日本大学工学部電気電子工学科, 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 (〒963-8642)

M. Utsuno, S. Inui, and Y. Ohira

Department of Electrical and Electronic Engineering, College of Engineering, Nihon Univ.,

1-Nakagawara, Tokusada, Tamura-cho, Koriyama 963-8642

(1999 年 10 月 28 日受理, 2000 年 1 月 25 日採録)

We have reported various characteristics of systems using an X-Y LIM (X-Y Linear Induction Motor) for non-contact transport. Until now, transport required coincidence of the center of gravity of the bogie-truck and the center of that truck. The center of gravity on the bogie-truck, however, is not always located at the center of the truck because of the load shape, weight, and so forth. We investigated the following aspects of fundamental switching performance of the system: (1) differences in switching caused by shifts in the center of gravity of the bogie-truck; (2) the relationship between starting thrust and switching angle for shifts in the center-of-gravity position on the bogie-truck; and (3) the relationship between starting thrust and rotational angle for center-of-gravity position shifts.

Key words: X-Y LIM, transport and switch systems, center of gravity, switching angle, rotational angle

1. はじめに

X-Y LIM の基本特性については報告済みである^{1)~3)}。分岐に X-Y LIM を応用したシステムにおける基本特性についても報告している^{4), 5)}。さらに, 台車の重心位置が台車の中心に存在している場合についての台車の分岐特性についても報告済みである⁶⁾。

本論文では, 重りを用いて台車の重心位置が偏倚したときの台車の運動^{7), 8)}について, 台車の分岐角度と回転角に注目し, 運動方程式を用いてその比較・検討を行っている。ここでの重心位置の偏倚とは, 台車の中心を基準にして, 台車の進行方向への偏倚, あるいは分岐方向への偏倚のそれぞれ一方向の偏倚についてである。台車の重心位置が偏倚したときの X-Y LIM の推力に対する分岐角度, 回転角への影響について, 以下に示す項目について検討を行う。

- (1) 台車重心位置が及ぼす X-Y LIM の推力に対する分岐角度への影響について

- (2) 台車重心位置が及ぼす X-Y LIM の推力に対する回転角への影響について
- (3) 台車の分岐角度と回転角の関係について

2. システム構成

X-Y LIM (5 極) の構造ならびに仕様などはすでに報告している⁵⁾。本システムは, X-Y LIM, 直線搬送部, 分岐部, 空気浮上設備, 制御盤, 計測装置から構成される。

Fig.1 に本システムの概略図を示す。直線搬送部は長さ 2,500 mm, 分岐部は長さ 2,400 mm, 幅 1,600 mm である。分岐部内では台車を 8 気圧の空気圧により浮上させており, 非接触での分岐を可能にしている。X-Y LIM (一次鉄心長および幅: 330 mm) の中心に原点をとり, X 軸を台車の進行方向としてその推力を F_x , Y 軸を分岐方向としてその推力を F_y としている。X-Y LIM の推力は, 開ループ制御されている。本論文では, 台車の分岐方向を進行方向に対して右方向と定め, 同方向を正の Y 軸としている。

台車は, 重りを積載させて重心位置を偏倚させている。本システムの直線搬送部は, 磁気浮上とローラ支持による 2 種類の搬送が可能であるが, 本論文では重りを容易に積載, 移動ができるローラ支持方式を用いた。使用する台車の寸法は幅 265 mm, 長さ 415 mm, 質量 9.5 kg, 重りは幅 60 mm, 長さ 200 mm, 質量 3.4 kg である。台車の寸法に対し, X-Y LIM は分岐を行うのに十分な寸法である。

Fig. 1 Schematic diagram of the transport and switch system.

3. 台車の運動特性

3.1 台車に作用する力

X-Y LIM 上における台車の運動は、剛体の平面運動であることから、X、Y方向の並進運動と重心における回転運動の合成運動である。そこで、X、Y方向の並進運動は質点の運動、回転運動は剛体の運動⁹⁾として取り扱う。また、台車の運動特性については加速度から変位や角度を求める。

Fig.2 に示すように、台車を 83×53 個の正方形微小剛体要素に分割し、各要素 (i, j) に作用する、X、Y方向推力成分 $F_{x_{0i,j}}$ 、 $F_{y_{0i,j}}$ およびモーメント成分 $N_{0i,j}$ を求め、各要素に作用する成分を作用面積で積分することにより、台車全体に作用する推力ならびにモーメントを求めることができる。

X-Y LIM と重複していない台車の運動は、台車に推力が作用しないことから等速度運動として求めることができる。

3.2 運動方程式

X-Y LIM 上における台車の運動を運動方程式で記すと、以下のようになる。

$$m \frac{d^2 XG(t)}{dt^2} = Fx' \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 YG(t)}{dt^2} = Fy' \quad (2)$$

$$I \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} = N \quad (3)$$

ここに、
 m : 台車の質量 [kg]
 I : 慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
 $XG(t)$: 台車重心位置の X 方向変位 [m]
 $YG(t)$: 台車重心位置の Y 方向変位 [m]
 θ : 台車と X 軸がなす角 [rad]
 Fx' : 台車に作用している X 方向推力 [N]
 Fy' : 台車に作用している Y 方向推力 [N]
 N : モーメント [$\text{N} \cdot \text{m}$]

I は、台車の重心を通る垂線についての慣性モーメントである⁹⁾。 θ は台車の回転角であり、時計回りを正方向としている。

4. 台車の重心位置

重心位置の偏倚は、重りの積載位置を台車の Y 軸上、あるいは X 軸上の各箇所に偏倚させることにより行っている。重心位置は予備実験より求めているが、式 (4) による質量中心の位置¹⁰⁾と一致することを確認している。式 (4) におけるベクトルの始点は、台車の中心としている。本論文では重りを Y 軸あるいは X 軸と平行に偏倚させただけであることから、重心位置の偏倚は一方方向のみの考慮となっている。

$$r' = \frac{\sum (m_{i,j} \cdot r_{i,j})}{\sum (m_{i,j})} \quad (4)$$

Fig. 2 Dynamic analysis model of the bogie-truck.

ここに、 r' : 質量中心点の位置ベクトル

i, j : 要素番号

$m_{i,j}$: 各要素の質量

$r_{i,j}$: 各要素の位置ベクトル

5. 実験方法

本論文では、進行方向推力である Fx を逆相制動として作用させた場合の表示をマイナス (−) とする。実験は、 $Fx = -8 \text{ N}$ 一定、台車の分岐部への進入速度 (平均速度) $V_{in} = 0.5 \text{ m/s}$ 一定として、分岐方向推力 $Fy = 10 \text{ N} \sim 26 \text{ N}$ の範囲で変化させ、それぞれの重心位置について分岐実験を行った。重心位置の偏倚については、台車の中心を基準 (0 mm) として、Y 軸上の偏倚である $y = -23.5, 0, +23.5 \text{ mm}$ と X 軸上の偏倚である $x = -23.5, 0, +23.5 \text{ mm}$ の各点の重心位置について実験を行っている。このときの慣性モーメントは、それぞれ $I_0 = 0.204 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ と $I_{\pm 23.5} = 0.221 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ である。

台車が分岐部の端に達したときの重心位置の X、Y 方向変位を XG 、 YG 、台車の分岐角度を ϕ 、回転角を θ として、それぞれについて実験を行った。

6. 結果ならびに考察

6.1 台車重心位置が及ぼす分岐角度への影響

Fig.3 は重心位置を Y 方向に偏倚させたときの $Fy-\phi$ 特性であり、Fig.4 は重心位置を X 方向に偏倚させたときの $Fy-\phi$ 特性である。Fig.3 から Fy を大きくするにしたがって ϕ は減少している。さらに、重心位置が $-y$ 方向に偏倚することにより大きな ϕ が得られており、 Fy が小さいときほど重心位置の偏倚による影響が大きく現れている。また、Fig.4 から重心位置が X 方向に偏倚したときも同様に、 Fy が大きくなるにしたがって ϕ は減少している。しかし、Fig.3 とは異なり、重心位置が中心から偏倚することにより、中心に存在するときよりも大きな ϕ が得られており、 $-x$ 方向に重心位

Fig. 3 Characteristics of Y-direction starting thrust F_y vs. switching angle ϕ (position of the center of gravity shifted in the Y direction; $F_x = -8$ N, $V_m = 0.5$ m/s).

Fig. 5 Characteristics of Y-direction starting thrust F_y vs. rotational angle θ (position of the center of gravity shifted in the Y direction; $F_x = -8$ N, $V_m = 0.5$ m/s).

Fig. 4 Characteristics of Y-direction starting thrust F_y vs. switching angle ϕ (position of the center of gravity shifted in the X direction; $F_x = -8$ N, $V_m = 0.5$ m/s).

Fig. 6 Characteristics of Y-direction starting thrust F_y vs. rotational angle θ (position of the center of gravity shifted in the X direction; $F_x = -8$ N, $V_m = 0.5$ m/s).

置が偏倚したときに、さらに大きな ϕ を得ている。 F_y が12.5 N以下における $y = +23.5$ mmの台車については、X-Y LIMとの作用面積が大きくX-Y LIMから大きな推力が作用しているために、 $y = -23.5$ mmのときよりも大きな ϕ が得られている。したがって、重心位置偏倚による影響は、負の方向に重心位置が偏倚したとき大きな ϕ となり、特にY方向に偏倚したときに得られる ϕ の差が大きくなることがわかる。

6.2 台車重心位置が及ぼす回転角への影響

Fig.5は重心位置をY方向に偏倚させたときの F_y - θ 特性であり、Fig.6は重心位置をX方向に偏倚させたときの F_y - θ 特性である。Fig.5から F_y を大きくするにしたがって、 θ は増加しており、重心位置が $-y$ 方向に偏倚するにしたがって大きな θ が得られている。また、Fig.6も F_y を大きくす

るにしたがって θ は増加しており、重心位置が $-x$ 方向に偏倚するにしたがって大きな θ が得られている。さらに、重心位置がY方向よりもX方向に偏倚したとき、得られる θ の差が大きく現れている。したがって、重心位置の偏倚による影響は、負の方向に重心位置が偏倚したとき大きな θ となり、特にX方向に偏倚したときに得られる θ の差が大きくなることがわかる。また、重心位置が同時に $-x$ 、 $-y$ 方向に偏倚することにより、さらに大きな重心位置による回転角への影響が現れるのではないかと考えられる。

6.3 台車の分岐角度と回転角の関係

台車が分岐を行うときには、 θ は ϕ と等しくなることが望ましい。その一例として、 $\phi = \theta = 90^\circ$ の直角分岐が挙げられる。 F_y が大きくなるにしたがい、 ϕ は減少し、 θ は増加

していることから、例えば Fig.3 と Fig.5 の $y=0$ mm における実測値のように、 $F_y=20.9$ N において ϕ と θ が 80° で一致する分岐を行うことが可能となる。重心位置が偏倚した場合においても、Fig.3 と Fig.5 の $y=+23.5$ mm における $F_y=22.4$ N での ϕ と θ の実測値は 78° で一致している。これらのことから、重心位置の偏倚に関わらず適切な推力を選択することにより、直角分岐を含めて ϕ と θ が一致する分岐を行うことが可能であると考えられる。また、 $x=-23.5$, $+23.5$ mm において ϕ が逆転する F_y と、 $x=-23.5$ mm において θ がマイナスとなる F_y が等しく、 ϕ と θ はともに台車の作用面積が大きく関わっていることから、 ϕ と θ はお互いが密接に関係していると考えられる。

なお、X-Y LIM の速度特性の実験においては、 0.2 m/s $\sim$ 0.7 m/s において推力変動幅が約 5 % 以下であることを確認しているので、推力変動幅を一定として解析を行った。その結果、実測値と計算値との誤差は小さいが、その誤差の要因になっていると考えられる。

7. おわりに

本論文では、X-Y LIM を分岐に用いた搬送・分岐システムにより、台車の重心位置を進行方向、あるいは分岐方向の一方へ偏倚させて分岐実験を行い、台車重心位置が及ぼす分岐角度ならびに回転角への影響について検討を行い、以下のような結果を得た。

(1) 台車重心位置が及ぼす分岐角度への影響

重心位置が Y 方向に偏倚した台車の分岐角度は、 $-y$ 方向に重心位置が偏倚するにしたがって増加し、X 方向に偏倚した台車の分岐角度については、中心から重心位置が偏倚することによって増加する。X、Y 方向に関わらず、負の方向に重心位置が偏倚することにより、大きな値となることを明らかにした。

(2) 台車重心位置が及ぼす回転角への影響

重心位置の偏倚が X、Y 方向に関わらず、負の方向に偏倚するにしたがって回転角が大きくなることが明らかになった。また、Y 方向より X 方向に重心位置が偏倚したとき、回転角への影響が大きくなることを明らかにした。

(3) 台車の分岐角度と回転角の関係

重心位置に関わらず、台車の分岐角度と回転角が一致す

る分岐が可能であることを明らかにした。適切な推力制御を行うことにより、直角分岐の実現も可能であると考えられる。

以上の結果から、重心位置の X 方向偏倚、Y 方向偏倚ともに、負の方向に重心位置が偏倚することにより、重心位置が中心に存在するときよりも分岐角度ならびに回転角が大きくなることを明らかにした。以上のことから、平面的な重心位置の偏倚に関して、 $-x$ 方向かつ $-y$ 方向に重心位置が偏倚した台車については、一方向偏倚よりさらに大きな影響が現れると考えられる。これらのことを踏まえて、重心位置が偏倚した台車について、中心に重心位置が存在する台車と同じ分岐が可能となる推力選定について検討する必要がある。

本論文では、X 方向推力 F_x ならびに分岐部への台車進入速度 V_m を一定として、台車の重心位置が台車の進行方向、あるいは分岐方向のそれぞれ一方へ偏倚したときの分岐に与える影響について検討を行った。台車重心位置の偏倚における Y 方向推力 F_y 可変による台車の分岐への影響および進入速度 V_m 可変による影響、さらに重心位置を X-Y 平面上の任意の位置へ偏倚した場合の分岐への影響については稿を改めて報告する予定である。

文 献

- 1) 大平 庸一, 古関 隆章, 正田 英介: 電気学会リニアドライブ研資, LD-90-19, 11 (1990).
- 2) 大平 庸一, 古関 隆章, 正田 英介: 日本応用磁気学会誌, 21, 929 (1997).
- 3) 塚田 博之, 大平 庸一: 日本応用磁気学会誌, 23, 1693 (1999).
- 4) 大平 庸一, 川西 利昌, 正田 英介: 電気学会論文誌 D, 108, 469 (1988).
- 5) 大平 庸一, 荻田 充二, 正田 英介: 電気学会論文誌 D, 118, 105 (1998).
- 6) 鈴木 剛, 大平 庸一: 日本応用磁気学会誌, 22, 933 (1998).
- 7) 宇津野 良, 乾 成里, 大平 庸一: 第 23 回日本応用磁気学会学術講演会概要集, p.495 (1999).
- 8) 宇津野 良, 勘田 真弘, 市村 寛之, 知久 順一, 乾 成里, 大平 庸一: 電気学会リニアドライブ研資, LD-99-144, 23 (1999).
- 9) 原島 鮮: 質点系・剛体の力学, p.116, p.135 (裳華房, 東京, 1971).
- 10) A.P.French: MIT 物理 力学, p.119 (培風館, 東京, 1983).