

高温超電導バルクモータの基礎研究

吉田, 欣二郎

九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学専攻

高見, 弘

九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学専攻

兼弘, 亮

九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学専攻 : 修士課程

有馬, 繁治

九州電力(株)総合研究所電気利用係

<https://doi.org/10.15017/1474987>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 1, pp.117-122, 1996-09-27. 九州大学大学院システム情報科学研究院

バージョン :

権利関係 :

高温超電導バルクモータの基礎研究

吉田欣二郎* ・高見 弘* ・兼弘 亮** ・有馬繁治***

A Basic Study on HTSC Bulk Motor

Kinjiro YOSHIDA, Hiroshi TAKAMI,
Makoto KANEHIRO and Shigeharu ARIMA

(Received June 24, 1996)

Abstract: Maglev systems and magnetic bearings using the pinning force in High T_c Superconductor (HTSC) have been highlighted. From the viewpoint that the pinning force can be considered as a synchronizing force, we have started to study on a new motor using HTSC bulk. A basic experiment of propulsion and guidance operations has been carried out on the armature guideway in the water tank, by the help of a model ship consisting of a new HTSC linear synchronous motor (LSM). It is successfully confirmed that the pinning force is utilized as a synchronizing force. Favorable propulsion and guidance have been achieved without guidance control only by trajectory control of propulsion motion.

Keywords: High T_c Superconductor bulk, Pinning force, Maglev, Synchronizing force, LSM, Propulsion and guidance operations

1. ま え が き

高温超電導体 (HTSC) を線材としてではなくバルクのままに應用する磁気浮上や磁気ベアリングが脚光を浴びている。HTSCバルクは、磁束ピン止め力を利用し、進行方向に沿って一様な磁束密度を持つ永久磁石軌道上で安定に浮上できることが知られている¹⁾。これはピン止め効果による反磁性を利用したもので、その特徴のひとつである大きな反発力を利用して磁気浮上させ、もうひとつの特徴である位置を固定する性質を利用して横ずれを抑えて安定化させるものである。しかし、ピン止め効果の位置を固定する性質は動くものであるモータへの應用とは相反するものであるから、これについては全く研究されていない。著者らは、この位置を固定する性質を同期化力と見なすことができることに着目し、全く新しい原理のモータを研究開発している^{2)~4)}。

本研究は、高温超電導体バルクとコイル電流を用いて、磁束ピン止め効果によって実現する新しい原理の同期モータの開発に関する基礎研究である。電機子コイルとしては、当研究室に現有する約6m軌道の水中リニア実験モデル車 (ME02) のリニア軌道を用いた。電機子コイル上の磁界は弱いため、HTSCバルクに弱い磁界しか励磁できないのでHTSCバルクを搭載した重量の大きい車両は、そのままでは浮上走行することができない。重量

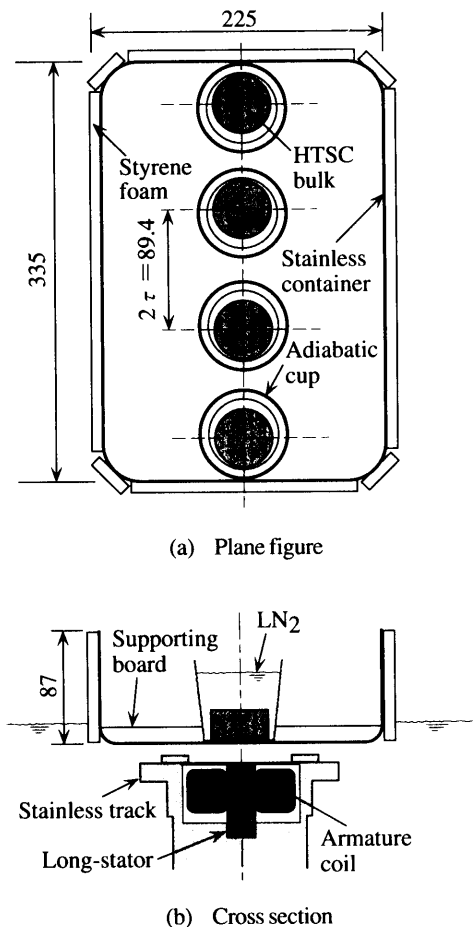


Fig. 1 Experimental model ship with HTSC bulk on board

平成8年6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

*** 九州電力(株)総合研究所電気利用係

を排除するために、HTSC モデル船を工夫し、水上で実験を行うようにした。

2. HTSC 実験モデル船と計測制御システム

2.1 実験モデル船

Fig. 1 に HTSC バルクと実験モデル船を示す。2 τ (τ : ポールピッチ) 毎に配置された 4 個の HTSC バルクを用い、電機子起磁力に対する磁束ピン止め力を利用して、走行・案内を行う。HTSC バルクの冷却と保冷のために、発砲スチロール製の容器の中に HTSC バルクを納めた。HTSC 船の船体は、225mm×335mm×87mm のステンレス製容器と外部断熱の発砲スチロール、後述の走行姿勢計測用反射板から構成されている。なお、HTSC バルクと容器は、船体底面の固定板を取り替えるだけで、容易にその配置が変更されるようになっている。

2.2 HTSC モデル船の姿勢計測システム

HTSC モデル船の走行姿勢を計測するために、システム構成が簡単で高精度の計測が可能なレーザ式変位センサを採用した。推進 (x) 方向と横 (y) 方向の位置およびヨーイング角 (ψ) を計測するために、3 台のレーザ変位センサを用い、それと対向する反射板によって船体の位置と姿勢を計測する。Fig. 2 に各センサの配置を示す。船体をバランスさせるために、反射板を船体の前後左右に取り付けた。

Fig. 2 において、Laser-sensor a, b, c によって 3 点 $A(x_a, y_a)$, $B(x_b, y_b)$, $C(x_c, y_c)$ が得られる。この 3 点より、船体の重心の座標 $G(x_G, y_G)$ およびヨーイング角 ψ は、次式によって計算できる。

$$x_d = \frac{y_c(x_a - x_b)(y_a - y_b) + (x_a - x_b)^2 x_c - (x_a y_b - x_b y_a)(y_a - y_b)}{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad (1)$$

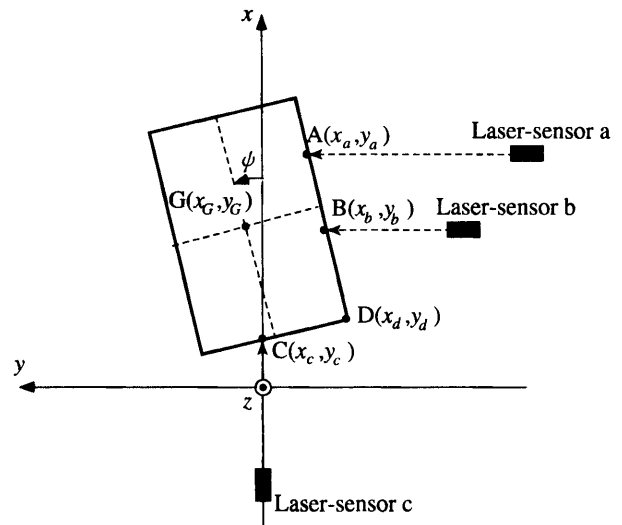


Fig. 2 Arrangement of each Laser sensors and coordinate system

$$y_d = \left(\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} \right) x_d + \left(\frac{x_a y_b - x_b y_a}{x_a - x_b} \right) \quad (2)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} \right) \quad (3)$$

$$x_G = x_d + \frac{l_x}{2} \cos \psi - \frac{l_y}{2} \sin \psi \quad (4)$$

$$y_G = y_d + \frac{l_x}{2} \sin \psi - \frac{l_y}{2} \cos \psi \quad (5)$$

ただし、点 $D(x_d, y_d)$ とする。

2.3 HTSC モデル船の制御システム

Fig. 3 に実験システムの構成図を示す。HTSC のピン止め力によって、リニア軌道に沿って案内力が働くので、HTSC 船走行時のヨーイング角は小さい。従って、HTSC モデル船の x 方向位置は、Fig. 2 における Laser

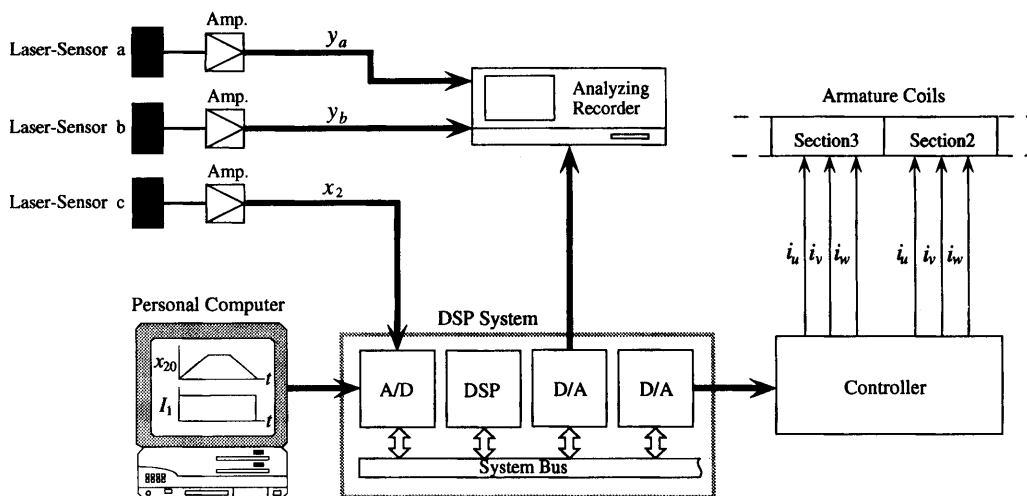


Fig. 3 Construction of experimental system

-sensor c のみを用いて計測できる。Fig. 3 において、DSP (Digital Signal Processor) は、A/D コンバータより入力されたパソコンからの指令パターン (位置、速度、加速度、電機子電流実効値、機械的負荷角) と Laser-sensor c の x 方向位置計測値に基づき、走行パターンに偏差なく軌道追従するようにフィードバック制御演算を行い、コントローラへ各相の電流指令値として出力する。コントローラは、DSP からの電流指令値に基づき、制御電流源として LSM 電機子コイルを駆動する。フィードバック制御則を (6), (7) 式に示す。

$$x_0^* = K_P(x_{20} - x_2) + K_I \int (x_{20} - x_2) dt + K_D(v_{x20} - v_{x2}) + K_A(a_{x20} - a_{x2}) + x_{00} \quad (6)$$

$$x_1 = x_2 + x_0^* \quad (7)$$

ここで、

x_2, v_{x2}, a_{x2} : それぞれ HTSC 船の x 方向の位置、速度、加速度

x_{20}, v_{x20}, a_{x20} : それぞれ x_2, v_{x2}, a_{x2} の目標パターン

x_0^* : 機械的負荷角指令

x_{00} : 機械的負荷角の目標パターン

x_1 : 電機子起磁力の最大位置

K_P, K_I, K_D, K_A : フィードバックゲイン

2.4 HTSC バルクの励磁法

電機子コイルに所定の直流電流を流しながら、ガウスメータにより軌道上の N 極最大点を直接求め、HTSC バルクの中央が N 極最大点になるように HTSC モデル船を固定し、励磁を行った。ここで、軌道表面からバルク底面までの距離 (ギャップ) は、約 1 cm としている。励磁の手順を次に示す。

- 1) HTSC モデル船の最後部のバルクの中心を N 極磁界最大点 (原点) に合わせて固定する。
- 2) 電機子電流実効値 $I_1 = 3A$, 電流位相 $\theta = 0deg$ (原点で機械的負荷角 $x_0 = 0$) の直流電流を電機子コイルに印加する。
- 3) 液体窒素 (LN_2) を 4 つの発砲スチロール容器に順次注ぐ。
- 4) LN_2 は激しく沸騰するが、それがほぼ収まるまで電流を流し続け、 LN_2 が不足しないように LN_2 を発砲スチロール容器に注ぐ。(この間、約 3 分 30 秒を必要とした。)
- 5) モデル船の固定をはずし、走行実験を開始する。なお、 LN_2 を注ぐ際、その重みでモデル船が傾いたり、発砲スチロール容器の外にこぼさないよう細心の注意を払った。

3. 実験結果

Fig. 4 に走行制御のための目標パターンを示す。実験では、HTSC モデル船のいろいろな初期姿勢においてフィードバック制御の有無に対する走行特性を検討した。フィードバックゲインは、走行実験を繰り返し、試行錯誤により得た値を用いた。

3.1 推進実験

Fig. 5 と Fig. 6 の比較から判るように、無制御では、推進方向位置に行き過ぎが生じ、位置、速度、加速度に大きな振動が見られる。フィードバック制御の場合は、行き過ぎが小さく、振動もほとんどなくなり、安定な走行特性が得られている。しかし、横方向位置とヨーイング角は、無制御の方が安定している。これは、推進方向走行パターンの軌道追従制御が、横方向とヨーイングの運動に対して外乱として作用するためである。

HTSC バルクのピン止め開始時の励磁電流 3.0A に対し、走行時の電流を 1.5A と 4.0A とした場合の結果を Fig. 7 (走行時電流 3.0A) と比較して、Fig. 8, Fig. 9 に示す。Fig. 8, Fig. 9 では、位置、速度等に振動や誤差が生じている。これより、HTSC バルクのピン止め開始時の条件が最適な走行条件であることが確認された。

走行実験中に LN_2 の不足などの原因で、HTSC の超電導 (ピン止め) 状態が破壊されると、 LN_2 を追加しても、もとの状態には復元できず走行不能となる。この場合、一旦、HTSC バルクを常電導状態に戻して、再励磁を行わなければならない。同じ条件で再励磁をすれば、超電導破壊前の走行特性を復元できる。

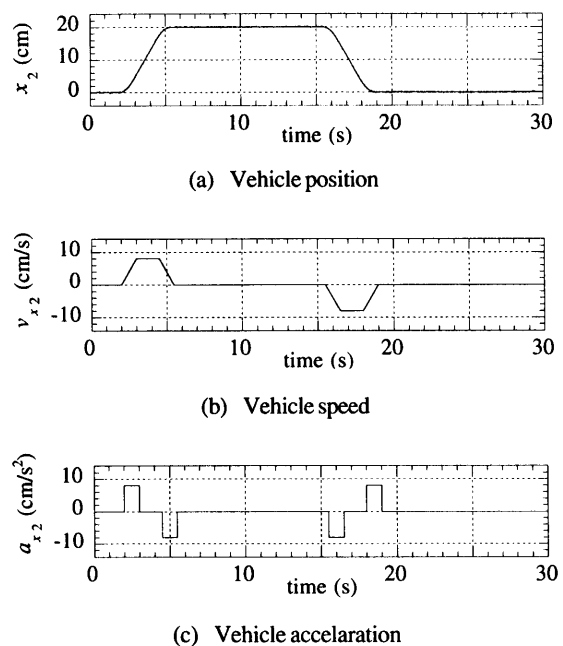


Fig. 4 Demand patterns

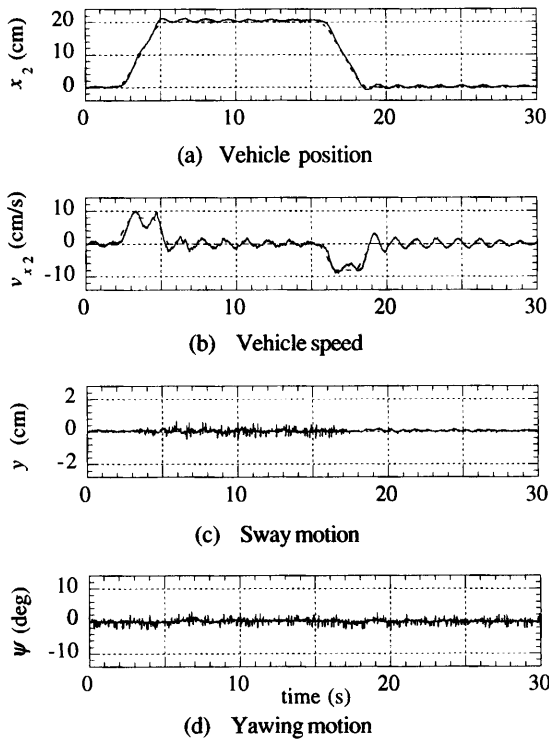


Fig. 5 Propelling without feedback control
 ($I_1=3.0A, y_0=0cm, \psi_0=0deg$)

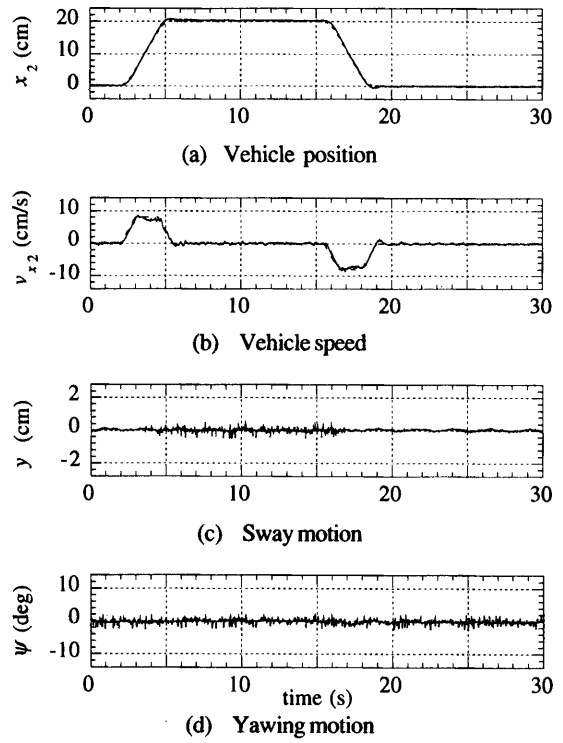


Fig. 6 Propelling with feedback control
 ($I_1=3.0A, y_0=0cm, \psi_0=0deg$)

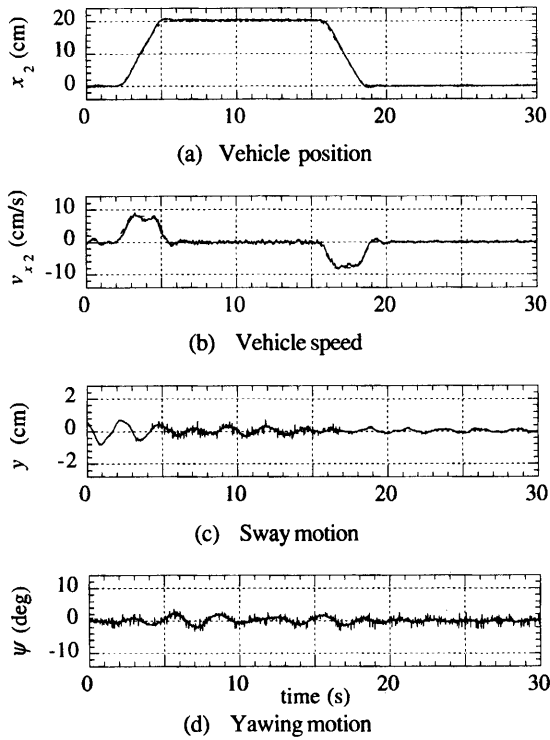


Fig. 7 Propelling with feedback control
 ($I_1=3.0A, y_0=1.3cm, \psi_0=0deg$)

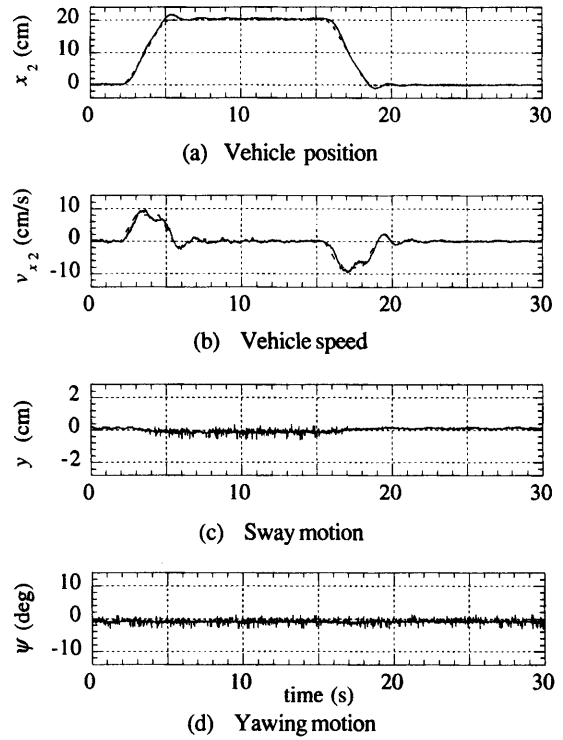


Fig. 8 Propelling with feedback control
 ($I_1=1.5A, y_0=0cm, \psi_0=0deg$)

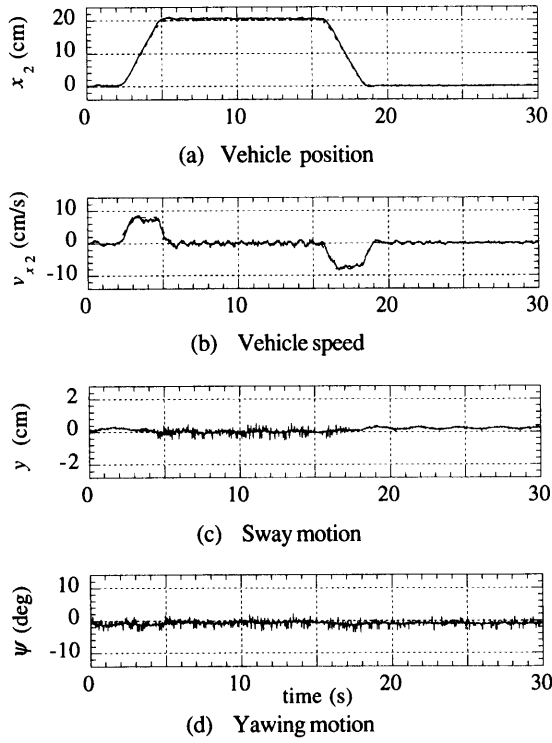


Fig. 9 Propelling with feedback control
($I_1=4.0A, y_0=0cm, \Psi_0=0deg$)

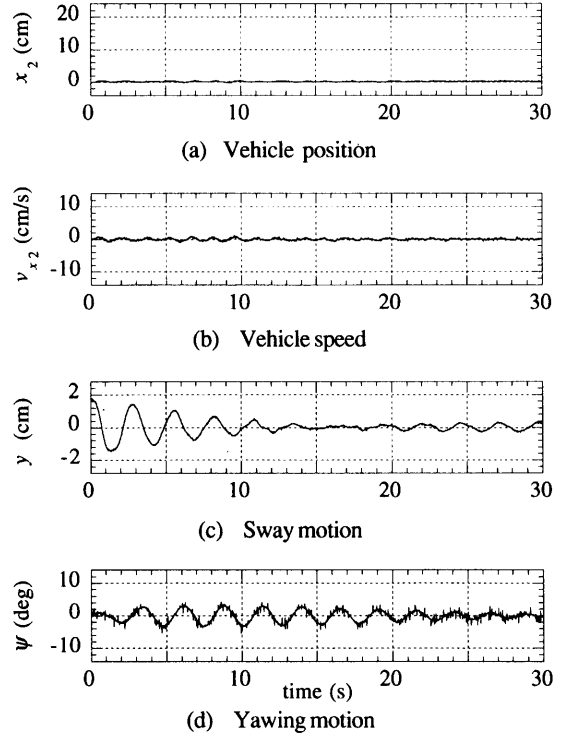


Fig. 10 Staying without feedback control
($I_1=3.0A, y_0=1.7cm, \Psi_0=0deg$)

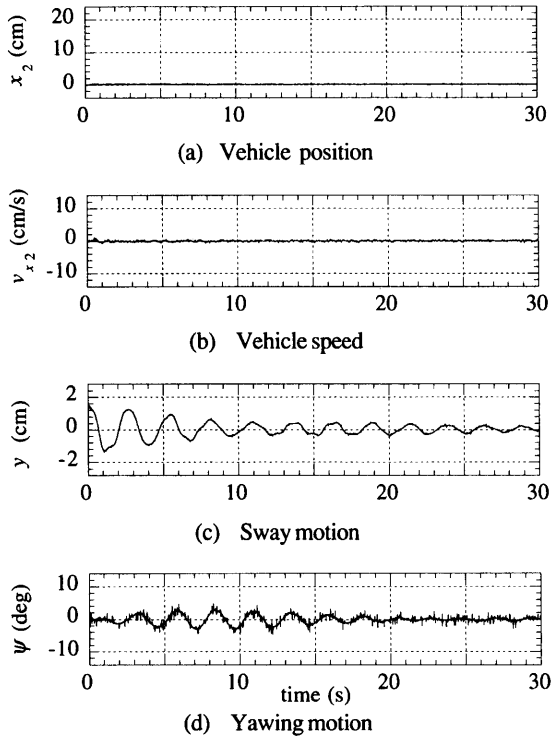


Fig. 11 Staying with feedback control
($I_1=3.0A, y_0=1.7cm, \Psi_0=0deg$)

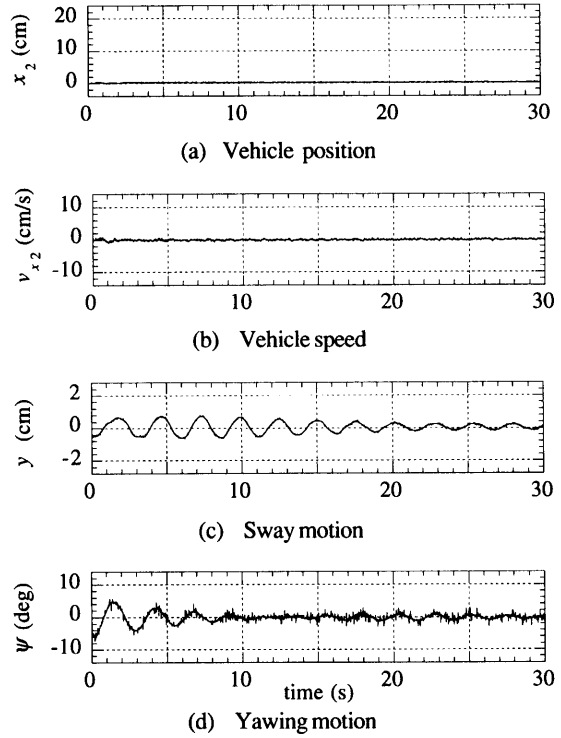


Fig. 12 Staying with feedback control
($I_1=3.0A, y_0=0cm, \Psi_0=-5.8deg$)

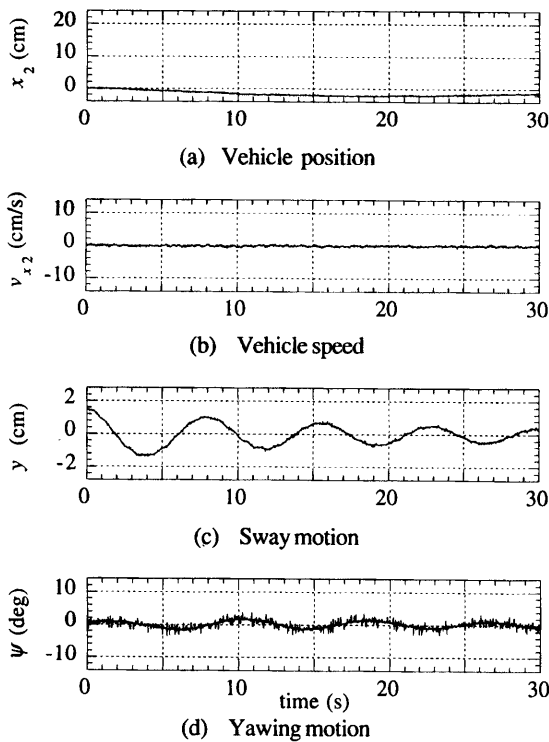


Fig. 13 Guidance characteristics on the condition of $I_1=0$
($I_1=0.0A, y_0=1.6cm, \psi_0=0deg$)

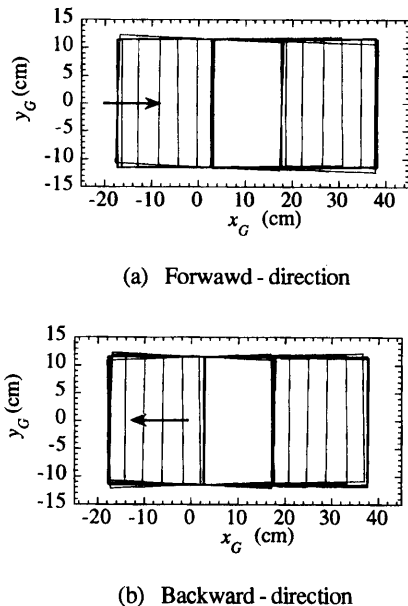


Fig. 14 Visualization of running motion with feedback control
($I_1=3.0A, y_0=0cm, \psi_0=0deg$)

3.2 案内実験

案内運動を観測するために、定位置においての実験結

果を Fig. 10~Fig. 12 に示す。y 方向位置に対しては、無制御の方が速く収束しているが、ヨーイング角は、フィードバック制御の方が、速く安定している。

HTSC バルクと電機子鉄心との作用を観測するため、電機子電流を零として実験を行った場合の結果を Fig. 13 に示す。HTSC モデル船には、リニア軌道中央へ向かう案内力が働いていることが判る。しかし、Fig. 10, Fig. 11 に示した定位置制御時と比較すると、中央に戻る速さは非常に遅い。

3.3 運動の可視化

本実験の様子を視覚的に理解するために、代表的な走行特性 (Fig. 6) を可視化した図を Fig. 14 に示す。Fig. 14 (a) は、HTSC モデル船の走行を始動位置から 20cm 進んだ定点停止位置までの往路について、0.5秒間隔でストロボ写真風に表現した。Fig. 14 (b) は、復路について同様に表現した。太線は、細線が何本も重なり合った状態を示し、定位置制御と自動案内動作が非常にうまく行われている様子を視覚的に示している。

4. む す び

水上を走行できる HTSC モデル船を工夫し、HTSC LSM の基礎実験によって、磁束ピン止め力を同期化力として利用する新しい同期モータの原理の確認に成功した。また、予想したように、ピン止め効果の位置を固定する性質により、特別に案内制御を施すことなく良好な案内力が発生することも確認できた。走行パターンに軌道追従するフィードバック制御によって、モデル船の走行性能が大幅に改善されることを明らかにした。さらに、ピン止め状態が破壊された場合、HTSC バルクを再励磁すれば、ピン止め状態は破壊前に復元できると共に、実験の再現性についても確認できた。

今回の基礎実験では、HTSC バルクの励磁が弱く、水の浮力を利用して浮上させて実験を行ったが、今後は強力な励磁の方法を研究し、無制御で浮上もできる実用的な HTSC LSM システムを開発していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 村上：「超電導体の電磁力を利用した応用」, 第5回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム基調講演, pp. 9-14 (平成5年6月)
- 2) 兼弘 亮：「高温超電導 LSM に関する基礎実験」, 平成7年度九州大学電気工学科卒業論文 (1996年3月)
- 3) 平井隆一：「円形 PM 形 LSM の三次元力解析と高温超電導 LSM への応用に関する研究」, 平成7年度九州大学電気工学専攻修士論文 (1996年3月)
- 4) 吉田・高見・平井・兼弘：「高温超電導 LSM の基礎実験」, 平成8年電気学会全国大会, No. 1072