

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420177

研究課題名(和文) ソーラー磁気浮上搬送装置の開発

研究課題名(英文) Development of Non Contact Carrier System using Solar Magnetic Suspension

研究代表者

石野 裕二 (ISHINO, Yuji)

埼玉大学・総合技術支援センター・技師

研究者番号：50645968

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：従来の磁気浮上搬送車は搬送車側に電力供給が必要な場合、接触型の集電装置または給電ワイヤが必要である。そこで搬送車側に太陽電池を搭載し光による非接触給電を行うことにより、非接触性能を失わないようにする搬送装置の開発を行った。これは工場やクリーンブースの屋内照度環境下での利用を考えると、太陽電池が発電できる電力は少ない。そのため搬送装置の省電力化が重要となる。本研究で製作した磁気浮上搬送車は2.1kgの浮上体を定常浮上時の消費電力を周辺機器と併せて最小180mWを達成した。そして10klxを3日間与え搭載している二次電池とともに5日間の浮上に成功した。また重力を利用した駆動機構の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：A magnetic suspension carrier system is fabricated that works with non-contact power supply. A conventional method of supplying power to a carrier is usually based on through contacts or wires. This research proposes a non-contact magnetic suspension carrier system using solar power generation technique, which needs no external power supply. In rooms, the solar cells produce small power in low illuminance environment. The magnetic suspension carrier system using solar cells needs to be operated with low power. The fabricated magnetic suspension carrier consumed 180mW in the steady state of non-contact suspension. The carrier were placed under an illuminance of 10[klx] during approximately 3 days. The generated power supplied for the magnetic suspension and the battery charging. The illuminance was turned off after 3 days and the carrier used the battery power. The magnetic suspension carrier was achieved standalone suspension for 5 days.

研究分野：制御工学

キーワード：機械力学・制御 制御工学 太陽電池 太陽光発電 再生可能エネルギー

1. 研究開始当初の背景

太陽光発電システムは発電時に機械的な運動が無いため機構部品の損耗がない、設備投資以外のコストが少ない、燃料などを消費しない、廃熱、排ガス、廃棄物を出さないという長所がある。これは地球温暖化対策のひとつとして、一般家庭での太陽光発電やビルや駐車場の屋上、空き地、耕作放棄地などを太陽光発電施設に利用するなど広く普及している。そのため太陽電池セルは年々、高効率・低コストなものが容易に手に入れることができるようになった。太陽光電池を野外に設置する表示標識などの小さな設備に利用すると、外部から給電するインフラを必要としないという長所がある。このような場合は夜間などの低照度時に消費する電力を得るため、昼間に発電した電力を貯蔵するための二次電池やキャパシタなどが必要となる。この蓄電技術も進歩し、高エネルギー密度、長寿命、質量あたりのエネルギーが大きいものが開発されている。

電磁石吸引型磁気浮上系は非接触であるため、振動、騒音、摩擦による熱、損耗がなく長寿命、塵埃を発生しないという長所がある。そのため高速回転が要求される軸受、鉄道の台車、高速エレベータの案内、クリーンブース内の搬送車、回転式ジャイロ、人工心臓のポンプ、宇宙機器、真空ポンプなど、さまざまな場所で利用されている。この磁気浮上系の制御方法の一つにゼロパワー制御がある。これは浮上対象の変位をセンサによって検出し、変位に基づいてコイル電流にフィードバックすると共に、定常的な浮上力を永久磁石の吸引力から得て、定常的なコイル電流をゼロに収束させる制御方法である。そのため定常的な入力エネルギーが原理的にはゼロとなり、省電力な磁気浮上方法として広く利用されている。これを利用したクリーンブース等の屋内で利用する磁気浮上搬送装置が森下らによって開発されている。

ゼロパワー磁気浮上系の省電力な特性に着目し、太陽光発電電力のみを電源とした、鉛直方向1自由度に能動制御を施した、重力環境下におけるソーラー磁気浮上装置の開発をこれまでにを行った。製作した磁気浮上装置は浮上対象の質量が90[g]に対してコントローラ、センサ等を含む定常的に消費されるすべての電力を40[mW]以下とすることができた。その結果5[klx]の蛍光灯下での定常浮上に成功した。本研究はこのソーラー磁気浮上技術を搬送装置に応用したものである。

磁気浮上搬送装置は移動方向が地面と水平方向で軌道距離が長い場合を考える。これは軌道側に浮上用の電磁石を配置する方法と、搬送車側に電磁石を搭載する方法がある。前者では搬送車側に電力供給が不要であるため、原理的には永久に非接触性を保つことができる。しかしながら軌道の距離だけ電磁石を必要とするため、コスト面で不利となる。また後者ではレールがシンプルな構造でよ

いため、長距離であるほどコスト的には前者に比べ有利である。しかし搬送車への電力供給が必要であり、従来では鉄道用パンタグラフ・トロリーに代表される一部接触を許す集電装置や、搬送車に二次電池を搭載し、充電のため駅で接触を伴う充電方法が取られている。そのため常時または一時的に非接触性が失われていた。

2. 研究の目的

本研究ではソーラー磁気浮上技術とゼロパワー磁気浮上搬送車を融合させた、ソーラー磁気浮上搬送装置の開発を目的とする。提案する方法では搬送車側に電磁石を搭載する方式の搬送車側に太陽電池を搭載し、光による非接触電力供給を行う。そのため軌道に電磁石を並べる必用がなく低コストである長所を生かしつつ、原理的には永久完全非接触浮上が可能である。また搬送車には二次電池を搭載し、これも太陽電池の発電電力より充電する。そのため軌道側は搬送車への充電設備が不要となる。しかしながらソーラー磁気浮上搬送装置を屋内照度での使用を考えた場合、現在市販されている太陽電池では数[W/m²]程度しか発電することができない。そのため磁気浮上機構の省電力化が重要となる。磁気浮上搬送車の消費電力とは電磁石で消費される電力の他に制御に必用な変位センサ、コントローラ、アンプ、二次電池への充放電回路などの電源装置の搭載している周辺機器で消費する電力も含む。

従来の磁気浮上搬送装置の軌道方向への駆動は、非接触のリニアモータが多く用いられている。屋内照度環境下での太陽光発電では、浮上のための電力の他にリニアモータを駆動するだけの電力を取り出すことは難しい。そこで軌道に高低差をもたせ、遊具用のジェットコースターや、須田らが開発している省エネ型短距離公共交通システム「エコライド」のように、軌道の高低差と重力を利用して搬送車を駆動する方法を用いる。このとき軌道の高低差をアクチュエータにより駆動すれば、任意の位置で搬送車を停止させることができる。そのため、搬送車側では軌道上を駆動するための電力が不要であり、太陽電池で発電した電力はすべて浮上のために用いることができる。

3. 研究の方法

(1) 実験装置設計製作

この研究はまずハードウェアの製作から行った。開発したソーラー磁気浮上搬送装置の概略図を図1に、写真を図2示す。これは太陽電池と磁気浮上ユニットを搭載した搬送車と、地上に設置された強磁性体レールとそれを駆動するアクチュエータユニットによって構成されている。搬送車はつり下げ型で3つの磁気浮上ユニットをそれぞれ独立制御することによって、鉛直方向と水平面2軸に対する回転(ピッチ、ロール)の3自由度

を能動的に安定化させている。移動方向に対して水平直交軸と、鉛直軸に対する回転（ヨ一）の2自由度は、磁気浮上用電磁石とレール間に生じるのエッジ効果による受動安定を利用している。

製作した磁気浮上搬送車の大きさは 340×156×235[mm]であり両側面および下面に、合計6セルの太陽電池が取り付けられている。周辺回路も浮上体質量に含まれ、浮上体の全質量は2.15[kg]である。

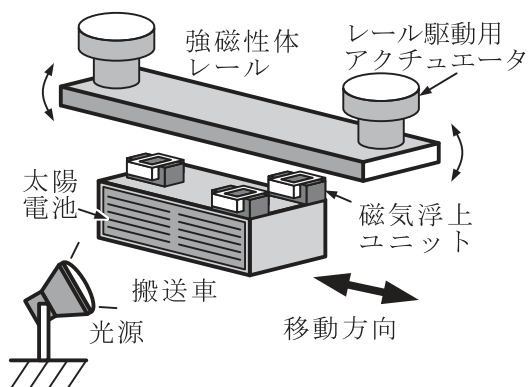


図 1 ソーラー磁気浮上搬送車の概念図



図 2 ソーラー磁気浮上搬送装置写真

使用した太陽電池は定格値(50[klx])で合計3[W]の発電電力が得られる。太陽電池によって発電された電力は、一旦2次電池とキャパシタに充電し、与えられる照度が変化した場合の発電電力変動や、外乱による消費電力の変動を平滑化するのに用いている。2次電池にははじめは006P型8.4[V], 200[mAh], 1.7[Wh]のニッケル水素二次電池を用い、後に単4の1.2[V] 900[mAh]を7本直列にした、合計7.56[Wh]の容量の電池に変更した。このニッケル水素電池が過充電、過放電しないように8bitのPeripheral Interface Controller (PIC)マイコンを用いて監視している。併用したキャパシタには電気二重層キャパシタを使用している。これは浮上開始時や、大きな外乱が入力されたときの瞬間的な大電力が必要な場合に電力を供給する。キャパシタ回路は耐圧の関係から1[F]の電気二重層キャパシタを6個直列接続した回路を太

陽電池と並列に接続した。また電源回路の出力側にも接続した。この電源回路には周辺機器用の定電圧を得るためにDCDCコンバータを搭載している。

磁気浮上ユニットは磁路中に永久磁石を挿入したハイブリッド電磁石と変位センサ、コントローラ、電力アンプ、可動制限用の転がり軸受から構成されている。ハイブリッド電磁石は塊状のE型コアに12[Ω]のコイルを巻いている。永久磁石はE型コアの磁極端部に取り付けられている。変位センサに市販の物を用いたとすると、省電力なセンサでもひとつあたり200~300[mW]消費するため、これを搭載すると搬送車に必需な3ユニット分で1[W]程度となってしまいうため現実的ではない。そのため変位センサは渦電流型変位センサの原理を用いて専用に製作した。コントローラにはPICマイコンを用いた。電力アンプにはPWM電圧出力アンプを用いて、PIC内での制御出力の値を積分フィードバックさせて、制御電圧を0に収束させることにより、結果的に定常的なコイル電流を0に収束させている。

強磁性体レールに傾きを与える駆動用アクチュエータユニットはリンク機構と電磁石、ばね、カウンタバランス、変位センサによって構成されている。

(2) ソフトウェア開発

電源装置に搭載した電源監視用のマイコンの制御周期は1[s]としている。これは搭載しているニッケル水素二次電池電圧の監視、余剰電力の投げ捨て、電圧が下限に達した場合に浮上制御を停止する。太陽電池の発電量が十分に磁気浮上で必要な電力を上回っている場合、余剰電力を搭載している二次電池に充電する。二次電池は過充放電されると、破裂の危険があるとともに、電池の寿命が低下する。そのため過充放電とならないように電池電圧を監視し、FETによって充電のON-OFFをしている。太陽電池の発電電力が多く二次電池も十分充電されている場合には、出力電圧が上昇する。コントローラは出力電圧が一定値を超えた場合、その余剰電力を抵抗器に投げ捨てている。太陽電池の発電量が不十分である場合、二次電池から必要な電力を供給するが、二次電池からも供給不能となった場合は、コントローラは磁気浮上制御を停止する。

磁気浮上ユニットに搭載しているマイコンは制御周期1[ms]で、変位センサの信号に基づきフィードバック制御、制御量をPWMアンプの入力信号を生成している。先に述べたように制御則にはゼロパワー制御を適用している。

4. 研究成果

(1) 電力測定結果

まず製作した周辺機器の消費電力を測定した。電源装置では定常浮上時には7.5[mW]

消費し、充電を伴うと二次電池に充電する電力と二次電池が損失する電力の他に 14.1[mW]の電力消費がある。磁気浮上ユニットでは 3つのユニットをあわせて 15.6[mW]消費する。そのため定常浮上時では電磁石で消費される電力の他 23.1~29.7[mW]の電力が必要となる。

次に磁気浮上搬送車の定常浮上時の消費電力を測定した。これは太陽電池をはずし外部から定電圧電源を接続し、定常浮上時における加えた電圧と電流から消費電力を測定した。また屋内環境を模擬するために蛍光灯により平均 10[klx]の照度を太陽電池に与えたときの発電電圧に対する発電電力を測定した。これには太陽電池セルの両端子に抵抗器を取り付けその値を変えて電流と電圧から測定した。これらの結果を図 3 に示す。太陽電池はその性質上、無負荷での電圧（開放電圧）に対して 70~80[%]程度の電圧において、最大効率となる。搭載した太陽電池は 1セルの定格(50[klx])の開放電圧は 4.7[V]であり、これを 3セル直列接続したものを並列接続して 6セル用いている。この場合 10[V]付近が最大効率となり、10[klx]の照度で 340[mW]ほど発電できる。製作した磁気浮上搬送装置の定常浮上時における周辺機器も含む消費電力は最小で約 180[mW]と、従来の同程度の浮上体を持つ磁気浮上系に比べ低消費電力化に成功した。これらの結果より 10[klx]の照度環境に製作した磁気浮上搬送装置を置けば十分に浮上するための電力が発電でき、余剰電力を二次電池に充電することが可能であることがわかる。

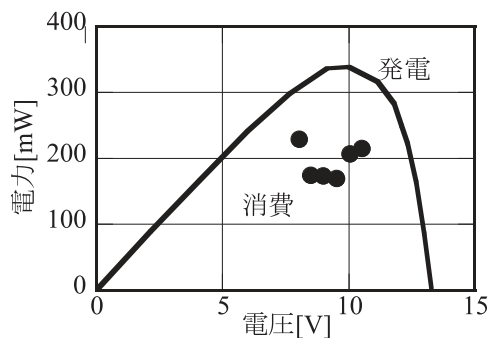


図 3 電力測定結果

次に太陽電池の発電電力のみを用いて磁気浮上搬送装置の定常浮上を行った。この実験では先の実験結果と同様に 10[klx]の照度を蛍光灯で与え、搭載している二次電池は完全放電した状態から始めた。浮上体はレールに対して非接触で浮上しているが、実験のため測定用のケーブルのみは外部に接触している。変位と電源電圧の測定結果を図 4 に示す。変位は 3つの浮上ユニットの上部に外部から別の変位センサにより浮上位置を計測し、その平均値を示している。(A)の期間は 10[klx]の照度を与えている。(B)の期間は搭

載している余剰電力によって二次電池が充電されている期間である。そのため出力電圧が徐々に上昇している。3[日]手前で急激に電圧が上昇しているのは二次電池が完全に充電されたため、充電を停止し、その後余剰電力の投げ捨てが行われている。(C)の期間は、蛍光灯を切り照度を与えずに充電された二次電池のみで電力供給を行った。二次電池の電圧は放電が行われると徐々に下降する。そして電源電圧が下限に至ったことを電源に搭載したコントローラが検出し、そのコントローラから浮上停止信号を出力する。(C)の照度を与えなくなってからほぼ 2日間、搭載している二次電池は浮上に必要な電力を供給することができる。

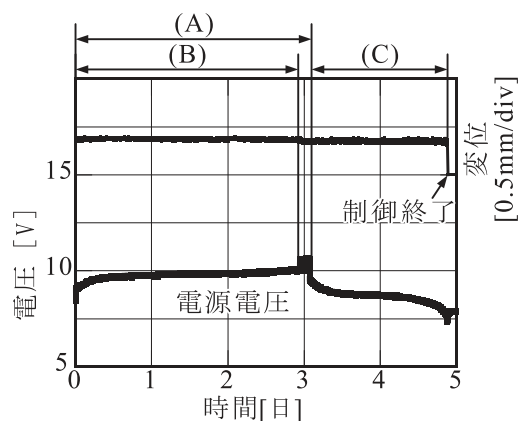


図 4 電装置出力電圧

太陽光発電電力を用いた磁気浮上搬送車を製作し、その発電および消費電力特性を取得した。重力を利用した、駆動機構を備えた搬送軌道を製作した。10[klx]の照度環境下において 3日間、搭載した二次電池に充電を行いながら定常浮上を行い、その後充電された二次電池で 2日間の浮上に成功し、その特性を取得した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1件)

- ① Yuji ISHINO, Masaya TAKASAKI, Takeshi MIZUNO, Fabrication of Non-Contact Carrier System Using Solar Magnetic Suspension, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol.2, No.4, pp.15-00143, 2015.8, DOI <http://doi.org/10.1299/mej.15-00143>

[学会発表] (計 8件)

- ① 石野裕二, 水野毅, 高崎正也, 原正之, 山口大介, 屋外における長時間浮上を目的としたソーラー磁気浮上搬送車の構想と設計, 第 58 回自動制御連合講演会講演論文集, 1I1-7, 2015.11.14, 神戸大学六甲台第二キャンパス(工学部), 兵庫県神戸市灘区。

- ② Yuji Ishino, Takeshi Mizuno, Masaya Takasaki, Masayuki Hara, Daisuke Yamaguchi, Development of Non-contact Carrier System using Solar Magnetic Suspension (3rd report: Continuous 5-day and installation of sloping propulsion mechanism), Proceedings of the 10th Asian Control Conference 2015 (ASCC 2015), pp. 773-778, 2015. 6. 3, Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia.
- ③ 石野裕二, 山口大介, 高崎正也, 水野 毅, ソーラー磁気浮上搬送装置 -第2報 浮上特性の取得-, 第57回自動制御連合講演会, CD-ROM 1A01-2, pp. 74-78, 2014. 11. 10, ホテル天坊, 群馬県伊香保町.
- ④ Yuji ISHINO, Masaya TAKASAKI, Takeshi MIZUNO, Fabrication of Non-contact Carrier System using Solar Magnetic Suspension, proceedings of 14th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB14), pp. 487-490, 2014. 8. 13, Linz, Austria.
- ⑤ 石野 裕二, 水野 毅, 高崎 正也, ソーラー磁気浮上式搬送装置の提案, 第56回自動制御連合講演会講演論文集, CD-ROM 705, pp. 562-567, 2013. 11. 16, 新潟大学工学部, 新潟県新潟市西区.

[その他]

ホームページ

<http://control.mech.saitama-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石野 裕二 (ISHINO, Yuji)

埼玉大学・研究機構・総合技術支援センタ

ー・技師

研究者番号：50645968