

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 23 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560248

研究課題名（和文） 極薄鋼板の湾曲磁気浮上搬送装置の開発に関する研究

研究課題名（英文） Study on Bended Magnetic Levitation Control Device for Ultra-Thin Steel Plate

研究代表者

粕谷 平和（KASUYA HIRAKAZU）

東海大学・工学部・教授

研究者番号：50056280

研究成果の概要（和文）：

薄鋼板生産ラインの搬送工程においては、ローラによる接触搬送が行われているために表面品質の劣化という問題が発生している。この問題の解決方法として磁気浮上技術の応用による非接触搬送に関する研究がなされている。しかしながら、磁気浮上システムにおいて 0.3mm 未満の柔軟鋼板を浮上対象とする場合には、その薄さゆえにたわみが大きくなり浮上制御は困難となる。そこで柔軟鋼板を塑性変形しない範囲で曲げた状態で浮上させることを提案した。特に本課題ではスライディングモード制御理論を用いて浮上性能の検討を行った。また比較として最適制御理論にて浮上制御を行った。その結果、スライディングモード制御理論を用いることで、外乱を十分抑制できることを確認できた。

研究成果の概要（英文）：

In the transport system of a thin-steel-plate production line, there is a problem that the quality of the plate surface deteriorates over time because the plate is usually in contact with rollers. To solve this problem, studies of electromagnetic levitation technology have been carried out. However, when a flexible thin steel plate with a thickness of less than 0.3 mm is targeted for levitation, levitation control becomes difficult because the thin plate undergoes increased flexure. We propose the levitation of a flexible thin steel plate that is bent to an extent that does not induce plastic deformation. In this study, we examine the levitation performance of a thin steel plate using sliding mode control. The obtained results were compared with the optimal control results. As a result, it was verified that the suppressive effect of the sliding mode control on disturbance is sufficient.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械力学・制御、制御機器

キーワード：電磁力、鋼板、湾曲、切板、非接触、搬送

1. 研究開始当初の背景

自動車、電機製品、製缶、その他の材料として薄鋼板は現代の産業界において幅広く用いられている。近年では極めて薄い鋼板の製造も可能となり、その多岐にわたる需要から要求される表面品質は高級化の一途を辿っている。しかし薄鋼板生産ラインの搬送工程においては、主にローラによる接触搬送が行われているために表面品質の劣化という問題が発生している。この問題の解決方法として磁気浮上技術の応用による非接触搬送に関する研究がなされている。しかしながら、磁気浮上システムにおいて 0.3mm 未満の柔軟鋼板を浮上対象とする場合には、その薄さゆえにたわみが大きくなり浮上制御は困難となる。そこで、当研究室では柔軟鋼板を塑性変形しない範囲で曲げた状態で浮上させることを提案している。鋼板を湾曲浮上させると低周波域を中心に振動が発生する事が確認されている。

しかし、電磁石の傾斜角によって電磁石の吸引力が印加される場所が統一されていなかったため、角度によって電磁石位置が大きく異なり、角度と浮上性能について、十分な考察が行われていなかった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、電磁石の吸引力が印加される場所を揃えるよう、電磁石位置の変更を行い、厚さ 0.18mm の柔軟鋼板を湾曲浮上させた際に、最適制御理論とスライディングモード制御理論を用いて制御理論での浮上性能の比較検討を行った。

3. 研究の方法

Fig.1 に制御システムの概略、Fig.2 に実験装置の概略図、Fig.3 に写真を示す。磁気浮上対象は長さ 800mm、幅 600mm、厚さ 0.18mm の長方形亜鉛めっき鋼板とする。長方形鋼板を 3本のフレームに設置した 5箇所のペアの電磁石 (No.1~5) により吊り下げようとして非接触支持するために、鋼板の変位を 5個の渦電流式非接触変位センサにより検出する。さらに、電磁石コイル電流を測定用の外部抵抗より検出し、合計 10 個の観測値を用いて制御則を A/D コンバータから DSP に入力し制御則を計算する。鋼板は 1 自由度系として扱いモデル化を行っている。5 個の電磁石のうち、周囲の 4 個は Front view のように傾けることが出来る構造になっている。

本研究ではフェライト製の一体型コアを

使用している為、熱損失等は無視できると仮定している。なお電磁石の磁場による渦電流式非接触変位計への影響を計測した結果、測定誤差は 1%以下であり制御系に及ぼす影響はほとんどないことを確認している。電磁石は E 型フェライトコアに $\phi 0.5\text{mm}$ のエナメル線を 1005 回巻いたものを使用する。この電磁石をセンサを挟む形で 2 個配置し、直列接続で使用する。

短手方向は電磁石を傾け湾曲させていくため、x 軸方向から鋼板を見た際、3 点の両端自由の単純支持の梁と仮定し、最もたわみ

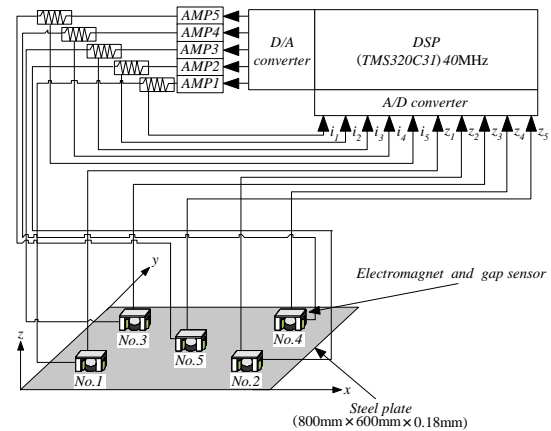


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system

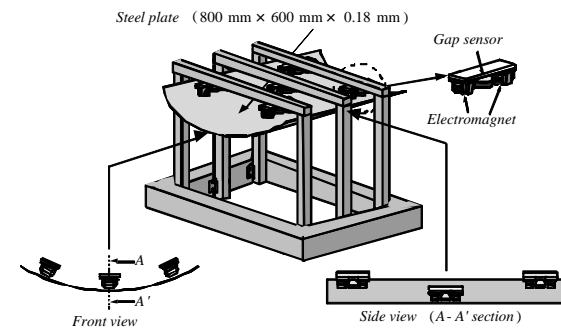


Fig. 2 Schematic illustration of experimental apparatus

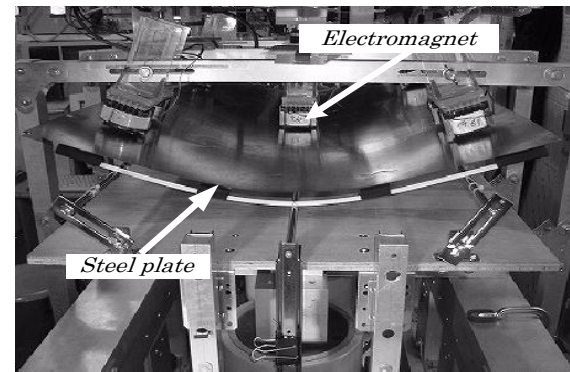


Fig. 3 Photograph of experimental apparatus

の少ない位置を計算により求めた。また、長手方向は電磁石を傾けることでたわみにくくなる。そこで y 軸方向から鋼板を見た際剛体と仮定し、3 点支持として各支持点の反力が同一となる位置（ただし中央は両端の半分の反力）を計算により求めた。Fig.4 にその結果の電磁石配置を示す。

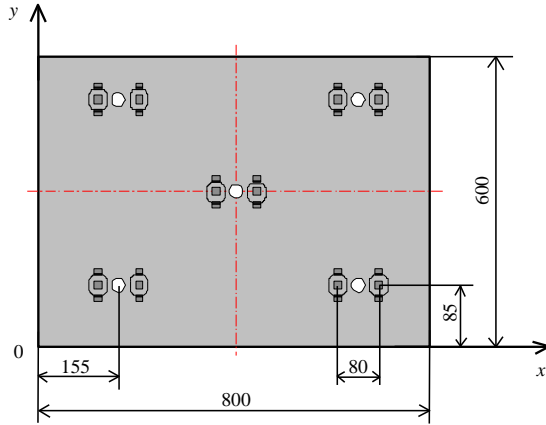


Fig.4 Arrangement of an electromagnet

4. 研究成果

Fig.5 の(a)~(f)に示したように、電磁石の傾斜角を 0° から 25° まで 5° 刻みで変更し、浮上実験を実施する。また、全ての場合において、電磁石表面と鋼板表面との距離は 5mm に保つように制御を行う。その際、過渡状態の影響を除くため浮上開始後約 10 秒後に測定を行った。全ての場合において電磁石表面と鋼板表面との距離は 5mm に保つように制御を行うことから、各電磁石の位置は鋼板の自然なたわみ形状を基に決定した。今回は厚さ 0.18mm の極薄鋼板を使用し、最適制御理論とスライディングモード制御理論の二つの理論を用いて、鋼板を浮上させた際の浮上確率の測定を行った。

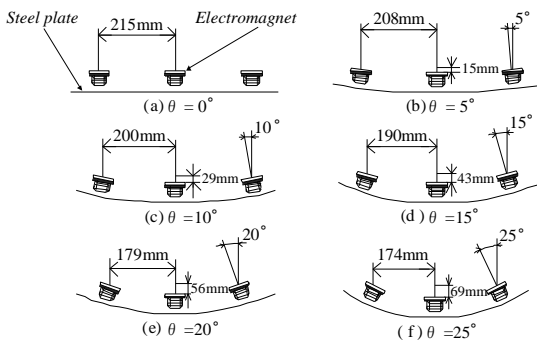


Fig. 5 Relationship between tilt angle of electromagnet and shape of steel plate

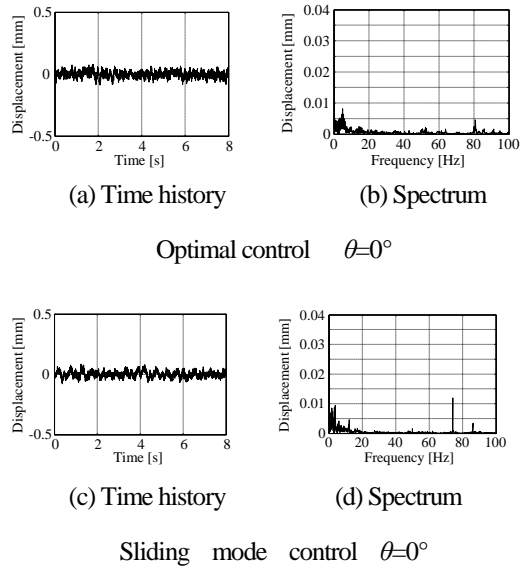


Fig. 6 Time histories and spectrums of displacement of plate

Fig.6 の(a), (b)に最適制御理論適用時の電磁石の傾斜角が 0° での時刻歴変位と周波数応答, (c), (d)にスライディングモード制御理論適用時の電磁石の傾斜角が 0° での時刻歴変位と周波数応答を示す。また, (a), (c)それぞれの標準偏差は 0.0243mm であり, 電磁石の傾斜角が 0° のとき両制御理論の標準偏差が同じになるようにゲインの調整を行い, 鋼板を湾曲させた時の制御理論の違いによる浮上確率の比較を行った。

Fig.7 に最適制御理論と、スライディングモード制御理論での浮上確率の比較を示す。なお、浮上確率は 10 回の浮上実験のうち浮上成功した回数の百分率により算出し、 30 秒間浮上が続いたものを成功とした。まず、最適制御理論適用時では電磁石の傾斜角が 0° の場合、浮上確率 60% となった。電磁石を傾けることによって浮上確率は 90% 以上に上昇していることから、最適制御理論適用時では鋼板を曲げることで浮上確率が上昇することが分かる。次に、スライディングモード制御理論適用時では電磁石の傾斜角が 0° の場合、浮上確率 100% となり、電磁石の傾斜角を変化させた場合でも浮上確率は 90% と高い浮上確率であった。

電磁石の傾斜角が 25° で浮上確率 0% になるのは、両端の電磁石の位置で単純支持とした際の支持点でのたわみ角は 19.2° であり、 25° では大きく超えてしまっているため復元力が大きくなり、浮上が困難になってしまうためと思われる。

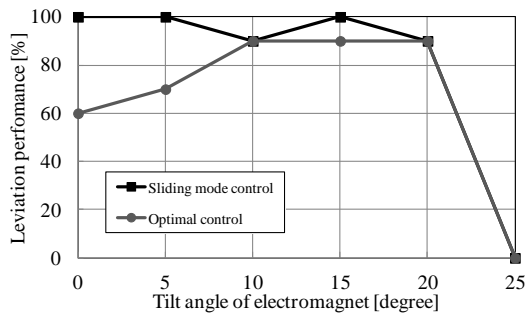


Fig. 7 Experimental results of levitation performance

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

1. Study on Horizontal Noncontact Positioning Control for a Magnetically Levitated Thin Steel Plate (Experimental Considerations on Elastic Vibration Control under Transport) 、 Takayoshi Narita Y.Oshinoya Shinya Hasegawa 、 Journal of Council on Electrical Engineering、査読有、Vol.1、No.3、pp.291-297、2011
2. Basic Study on Bending Levitation Control for Flexible Steel Plate Using Electromagnetic Force 、 Takayoshi Narita Y.Oshinoya Shinya Hasegawa Hirakazu Kasuya、Proceedings of the School of Engineering of Tokai University、査読有、Series E、Vol. XXXVI、accepted、2011
3. Fundamental Research on Optimal Position of Permanent Magnets in Magnetic Levitation Control System for Thin Steel Plate、T.Narita Y.Oshinoya S.Hasegawa H.Kasuya、Proceedings of the School of Engineering of Tokai University、Series E、査読有、Vol. XXXV、pp.41-46、2011
4. Noncontact Guide for Traveling Continuous Steel Plates Using Electromagnets Placed Asymmetrically at the Positions Where Traveling Direction of Plate Changes、T.Narita Y.Oshinoya S.Hasegawa H.Kasuya、Proceedings of the School of Engineering of Tokai University、Series E、査読有、Vol. XXXV、pp.35-40、2011
5. Vibroacoustic Coupling of Cylindrical Structure with both Excited End Plates、H.Tsuchiya A.Kojima H.Moriyama Y.Oshinoya K.Kakimoto、Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics、査読有、ICA 2010、CD53-1、

2010

6. Non-Contact Guide for Traveling Continuous Steel Plates in Loop Shaping Part Using Electromagnetic Force : (1st Report, Fundamental Experiments on Positioning Performance) 、 Ken Kashiwabara Hiroaki Kumagai Y.Oshinoya Kazuhisa Ishibashi H.Kasuya、JSME, Journal of System Design and Dynamics、査読有、No.4(4)、pp.564-574、2010
7. Study on Horizontal Noncontact Positioning Control for a Magnetically Levitated Thin Steel Plate(Experimental Considerations on Elastic Vibration Control) 、T.Narita Y.Oshinoya S.Hasegawa、Proceeding of 16th International Conference on Electrical Engineering、査読有、CD-ROM PS-ORA-19、2010
8. Control of Electromagnetic Levitation Transport of Flexible Steel Plate (Fundamental Considerations on Elastic Vibration Control under Transport) 、 T.Narita Y.Oshinoya S.Hasegawa 、 Proceeding of International Power Electronics Conference-Sapporo2010、査読有、CD-ROM 22P4-43、2010

[学会発表] (計 2 3 件)

1. 伊藤淑人、水平方向からの磁場が磁気浮上鋼板に与える影響、日本機械学会関東支部第18期総会講演会、2012年3月10日、日本大学津田沼キャンパス
2. 行木智哉、薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システムに関する研究 (永久磁石と鋼板間のギャップの最適化の検討)、日本機械学会関東支部第18期総会講演会、2012年3月10日、日本大学津田沼キャンパス
3. 成田正敬、薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システムにおける永久磁石の最適配置 (永久磁石と鋼板のギャップの影響に関する基礎的検討)、第35回日本磁気学会学術講演会、2011年9月29日、朱鷺メッセ
4. 成田正敬、柔軟鋼板の湾曲浮上制御 (ロバスト性に関する基礎的検討)、第23回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2011年5月18日、愛知県産業労働センター
5. 吉田圭一、薄鋼板磁気浮上システムにおける永久磁石の最適配置 (板厚の影響に関する数値解析)、第19回MAGDAコンファレンス 2010年11月22日、北海道大学 札幌キャンパス

6. 内山貴史、走行磁性体に対する非接触案内(電磁石非対称配置に関する考察)、第19回MAGDAコンファレンス、2010年11月22日、北海道大学 札幌キャンパス
7. 成田正敬、ハイブリッド磁気浮上システムにおける鋼板のたわみ抑制に関する考察、第53回自動制御連合講演会、2010年11月5日、高知城ホール
8. 成田正敬、ハイブリッド磁気浮上システムにおける鋼板のたわみ抑制に関する基礎的検討、第34回日本磁気学会学術講演会、2010年9月6日、つくば国際会議場
9. 成田正敬、電磁力による走行連続鋼板のループ形状部分における非接触案内(電磁石非対称配置の実験的検討)、第22回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2010年5月21日、門司港レトロ
10. 政木朋崇、柔軟鋼板の湾曲浮上制御(電磁石配置に関する実験的検討)、日本機械学会関東支部第16期総会講演会、2010年3月11日、明治大学駿河台キャンパス
11. 成田正敬、柔軟鋼板の磁気浮上搬送制御(搬送時における弾性振動の抑制に関する実験的検討)、日本機械学会関東支部第16期総会講演会、2010年3月11日、明治大学駿河台キャンパス
12. 小山内和輝、薄鋼板磁気浮上搬送システムにおける浮上補助用永久磁石の最適配置に関する基礎的検討、日本機械学会関東支部第16期総会講演会、2010年3月11日、明治大学駿河台キャンパス
13. 三浦圭、柔軟鋼板の湾曲浮上制御に関する基礎実験、日本機械学会関東学生会第49回学生員卒業研究発表講演会、2010年3月10日、明治大学駿河台キャンパス
14. 内山貴史、ループ形状部分を走行する柔軟磁性体の非接触案内実験、日本機械学会関東学生会第49回学生員卒業研究発表講演会、2010年3月10日、明治大学駿河台キャンパス
15. 池田敬、磁気浮上鋼板の搬送性能に水平方向の磁場が与える影響、日本機械学会関東学生会第49回学生員卒業研究発表講演会、2010年3月10日、明治大学駿河台キャンパス
16. 吉田圭一、薄鋼板磁気浮上システムにおける永久磁石最適配置の基礎研究、日本機械学会関東学生会第49回学生員卒業研究発表講演会、2010年3月10日、明治大学駿河台キャンパス
17. 浦川和也、柔軟鋼板の湾曲浮上制御(板厚とたわみ角の関係に対する検討)、第18回MAGDAコンファレンス、2009年11月19日、東京都市大学世田谷キャンパス
18. 藤田浩明、走行磁性体に対する非接触案内

- 内(電磁石非対称配置の基礎的検討)、第18回MAGDAコンファレンス、2009年11月19日、東京都市大学世田谷キャンパス
19. 小山内和輝、鉛直方向の磁場中における薄鋼板の水平方向の運動抑制に関する実験的考察、第18回MAGDAコンファレンス、2009年11月19日、東京都市大学世田谷キャンパス
20. 成田正敬、柔軟鋼板の磁気浮上搬送制御(搬送時における弾性振動の抑制に関する基礎的検討)、第18回MAGDAコンファレンス、2009年11月19日、東京都市大学世田谷キャンパス
21. 小山内和輝、永久磁石を用いた薄鋼板搬送システムにおける水平方向の変位抑制の検討、第33回日本磁気学会学術講演会、2009年9月13日、長崎大学文教キャンパス
22. 政木朋崇、柔軟鋼板の湾曲磁気浮上制御に関する検討、第21回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2009年5月20日、メルパルク長野
23. 藤田浩明、電磁力による走行連続鋼板のループ形状部分における非接触案内(外乱入力時に対する基礎的検討)、第21回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2009年5月20日、メルパルク長野

[その他]

ホームページ

<http://www.ed.u-tokai.ac.jp/laboratory/oshinoya/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

粕谷 平和 (KASUYA HIRAKAZU)
東海大学・工学部・教授
研究者番号：50056280

(2)研究分担者

押野谷 康雄 (OSHINOYA YASUO)
東海大学・工学部・教授
研究者番号：70233533

(3)連携研究者 なし