

走行中の電気自動車への通信機能を有する ワイヤレス送電

松下隼人[†] 加々美友宏[†] 桑原義彦[†]

磁気共鳴ワイヤレス電力伝送技術を用い、走行中自動車へのワイヤレス送電と路車間通信を同時に行うデモシステムを構築し、動作を確認した。

Wireless Power Transmission Demonstration System with Wireless Communication to Running Electric Vehicle Model

Hayato Matsushita[†], Tomohiro Kagami[†]
and Yoshihiko Kuwahara[†]

We have developed a demonstrating system of the wireless power Transfer via strongly coupled magnetic resonances microwave power transmission to a running vehicle model. The system includes the communication system between the load and the vehicle. The aim is fusion of wireless power transmission and wireless communication system.

1. はじめに

電気自動車(EV)が市販され、普及が期待されている。しかし電気自動車には、「走行距離が短い」、「バッテリーの充電時間が長い」、「バッテリーの体積と重量が大きい」などの欠点があり、当面は短距離での使用が想定されている。現在の内燃機関に完全に代替する電気自動車を実現するにはバッテリーに代わる持続的なエネルギー源が必要である。

道路から走行中の車両にワイヤレス送電を行うことができればこの問題が解決できる。近年、電磁結合方式¹⁾を用い、走行中の電動バスに送電する試みが韓国で行われている²⁾。ワイヤレス送電には電磁結合方式のほか磁気共鳴方式³⁾、マイクロ波方式⁴⁾がある。近年は1-2m間の距離を効率よく電力送電できる磁気共鳴方式が注目され、携帯電話や家電製品への適用が検討されている。

マイクロ波送電方式は送電ビームを無限に狭くすると送電損失が0になることから太陽光発電衛星への適用が期待されている⁵⁾。また、駐車中の自動車へのワイヤレス送電も検討されている⁶⁾。マイクロ波送電方式は電子レンジが大量生産され、送電源が安く容易に入手でき、高速情報伝送も容易に実現できることから、人体への安全性の問題が解決できれば電力伝送と路車間通信を使った高度道路交通システム(ITS)との融合が期待できる。

我々はこれまでマイクロ波送電方式を用い、走行中自動車への送電・情報伝送を同時に行う模型を使ったデモシステムを構築している⁷⁾。本稿では送電方式を磁気共鳴方式として送電効率を改善したデモシステムを構築し、実証実験を行ったのでその概要について報告する。

2. 設計コンセプト

2.1 ワイヤレス通信と電力伝送の融合

図1に電力伝送と通信を行うシステムの構成例を示す。図1のように従来の通信システムの送信側にパワーアンプ、受信側にカップラーと整流回路を加えることによって電力伝送と通信の両立が可能となる。

2.2 システム全体の構成

本研究で構築したシステム全体の構成を図2に示す。今回の試作では、路車間通信により模型の電気自動車の運動を制御するとともに、ウィンカやクラクションの制御も行う。それぞれのブロックを簡単に説明する。

- ・ 信号発生器：40.7MHzの信号を発生。

[†] 静岡大学
Shizuoka University

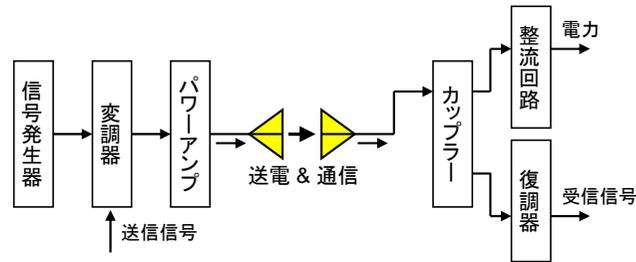


図1 電力伝送と通信を行うシステム構成

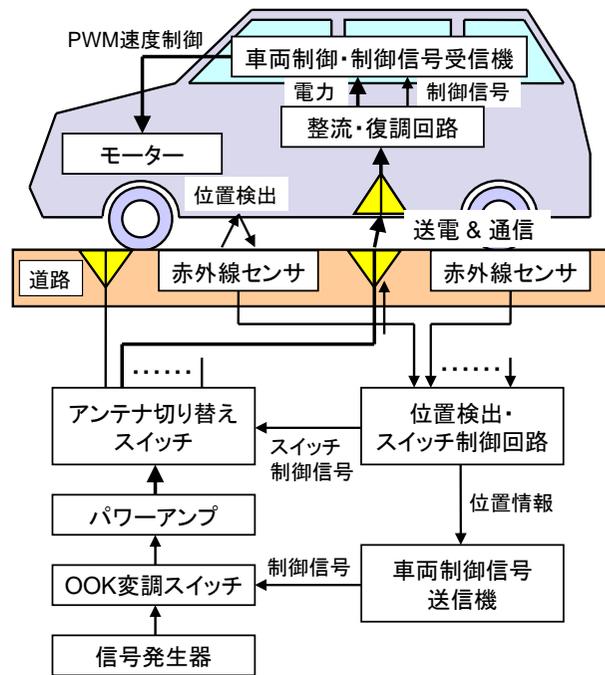


図2 システム全体の構成

- OOK 変調スイッチ：信号発生器で発生した CW 波を On-Off し、OOK(オン・オフ変調)を行う。

- パワーアンプ：変調信号を 7W に増幅する。
- アンテナ切り替えスイッチ：路面に設置した送電アンテナを選択するリレー。
- アンテナ：磁気共鳴コイル。
- 位置検出・スイッチ制御回路：赤外線センサによって車の位置を検出し、アンテナ切換スイッチによりその位置に対応するアンテナから送電する。
- 車両制御信号送信機：位置検出スイッチ制御回路から車両の位置情報を取得し、位置情報に対応した車両を制御するための OOK 変調スイッチの制御信号を発生。
- 赤外線センサ：赤外線を車両に照射し、反射した赤外線の強度から車の位置を検出。
- 整流・復調回路：受電した電磁波を整流し、電力と車両制御の信号を分離して出力する。
- 車両制御・制御信号受信機：制御信号を復調し、受信した制御命令に従って車を制御。
- モーター：本試作では携帯電話の振動モーターを使用した。

3. 設計

3.1 通信と共用する整流回路

電磁波を電力に変換すると同時に ASK(OOK) 復調を行う整流回路の設計を行った。整流回路の設計は高周波で非線形デバイスのシミュレーションが可能な MEL 社の高周波回路シミュレータ S-NAP を用いて行った。回路基板のパラメータとして、比誘電率：2.6，基板厚さ：0.8mm，誘電正接：0.001 を使用した。

図3の倍電圧回路の出力側の電圧は電界コンデンサにより平滑化されるが、2つのダイオードの間の電圧は平滑化されないので復調が可能である。

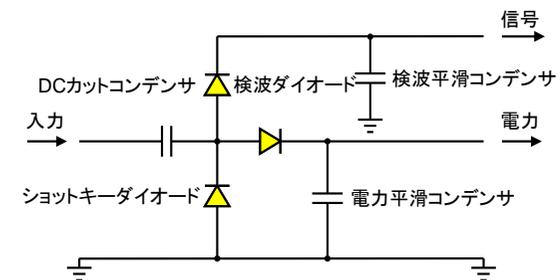


図3 ASK(OOK)復調+倍電圧整流回路

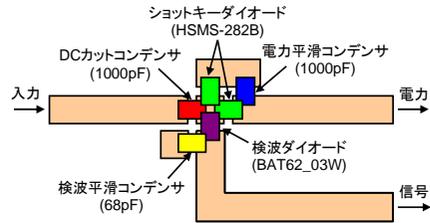


図4 整流回路(単体)

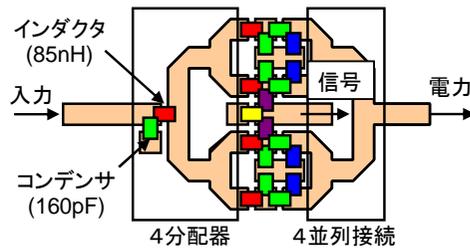


図5 整流回路(4回路)

そこに直列インピーダンスの大きい検波用ダイオードを用いれば高周波成分が信号側に流れるのを防ぎ、整流効率を下げることなく復調が可能である。モーターの消費電力は 1.5V 時に 90mW で、負荷抵抗は 25[Ω]程度である。整流回路は 200~300[Ω]負荷時に最大効率になることが多い。ここでは整流効率より小型化を重視するため 200[Ω]負荷で整合する整流回路を 4 つ並列にすることで、50[Ω]負荷で最適に動作するように設計した。図 4 に整流回路の単体の実装図を示す。DC カットコンデンサは、入力側に直流が加わらないようにするためである。

ダイオードについては整流する電力が大きいため、逆電圧が 15V と大きい Avago 社の HSMS-282B を用いた。電力平滑コンデンサは高周波が出力側に流れ込まないようにするためにある。検波用ダイオード(BAT62_03w)は直列インピーダンスが大きく高周波側に影響せずに、ASK の復調信号のみを取り出す。

図 5 に設計した通信と共用する整流回路を示す。この整流回路は図 4 の整流回路を 4 つ並列に接続し LC マッチングを取ることで電力を 4 分配している。出力側も 4 つ並列に接続することによって、負荷抵抗 50[Ω]で最適になるようになっている。

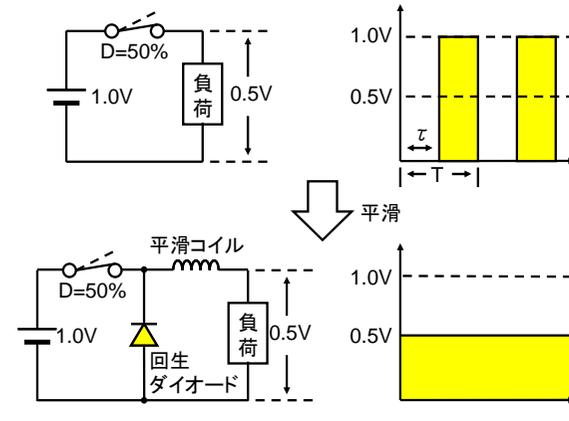


図6 シングル PWM(D=50%時)

3.2 PWM 速度制御

パルス幅変調(Pulse Width Modulation)は、図 6 の様に高速で直流を On-Off し、これを平滑化することによって高効率で出力電圧を制御する技術で、モーター制御やスイッチング電源に用いられる技術である。PWM の On-Off 時間の比はデューティ比とよばれ、式(1)で表される。

$$D = \frac{\tau}{T} \quad (1)$$

今回製作した PWM 回路の回路図を図 7 に示す。速度制御だけでなく正転、逆転、ブレーキ、停止ができるフルブリッジ PWM である。また、負荷抵抗が変換され、効率の向上も期待できる。PWM 制御回路は PIC16F886 に内蔵の PWM コントローラを用いた。

PWM の設計は Texas Instrument 社の回路シミュレータ TI-NA を用いて行った。PWM の主な損失は MOS-FET の ON 抵抗、ゲート寄生容量によるチャージ電流、平滑コイルの抵抗成分、回生ダイオードの順方向電圧である。Nch MOS-FET は、ON 抵抗が小さく、応答速度が速く、ゲート容量の小さい東芝の 2SK2614 を選んだ。回生ダイオードには、順方向電圧が 0.35V と小さく、1A までの電流が流せるローム社の RB051L40TE25 を用いた。平滑コイルには、330μH で抵抗成分が 0.748Ω と小さいサガミエレク社の RTP8010-331-M を選んだ。PIC の出力電流が小さいため、出力電流が大きい AND ゲートを通してスイッチングしている。

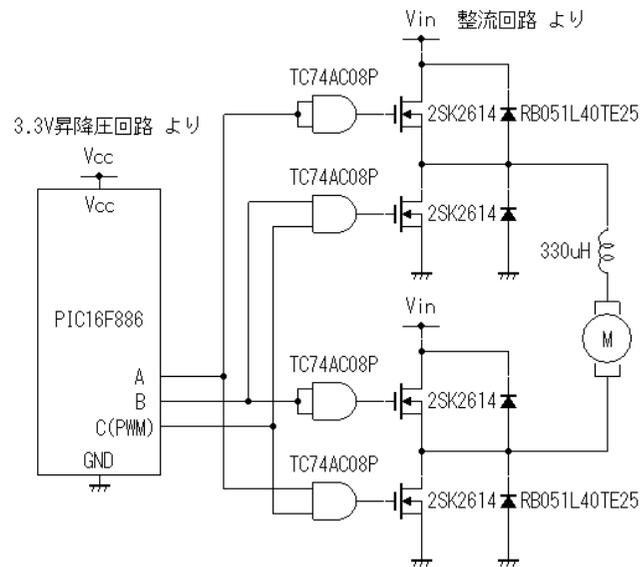


図7 設計したフルブリッジPWM回路

3.3 路側(給電システム)

車の位置を検出し、車両の下にあるアンテナにだけ電力を供給するシステムを構築した。アンテナ切り換えスイッチは高周波リレーを用いた。

位置検出・スイッチ制御回路の構成を図8に示す。制御ICにI/O入出力が44ポートと多いPIC16F887マイコンを用いた。そのままではI/Oポートが足りないため、エンコーダICとデコーダICを用い、必要なI/Oポートを得ている。

図9に赤外線センサの写真を示す。右側が赤外線LED(送信)、左側が赤外線センサ(受信)、上側が位置表示LEDである。赤外線LEDからの赤外線が車に反射し、赤外線センサで反射強度を見ることで車の位置を検出している。

3.4 送電・受電コイル

模型に搭載できるようにコイルを小型化するため文献8を参考としプリント板上に送電と受電コイルを実装した。図10(a)に実測で用いたコイルを示す。コイルは線幅4mm、線間間隔0.1mm、導体厚さ35µm、コイルの外形はD=68mm、内径はD=30mm、巻き数4で厚さ1.6mm、誘電率2.6のプリント基板上に実装されている。図10(b)に送受電システムの回路図を示す。共振を得るためコイルに直列にキャパシタを挿入している。

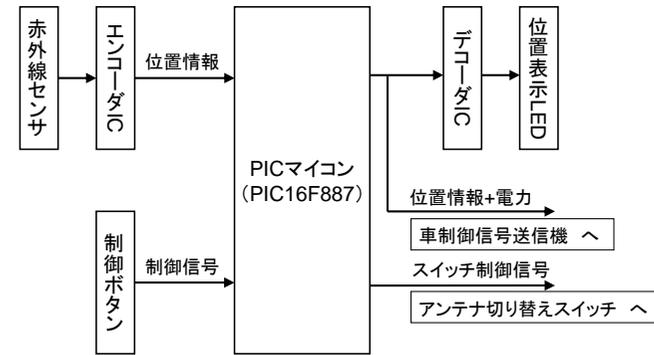


図8 位置検出・スイッチ制御回路の構成

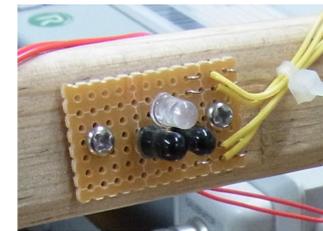


図9 赤外線センサ

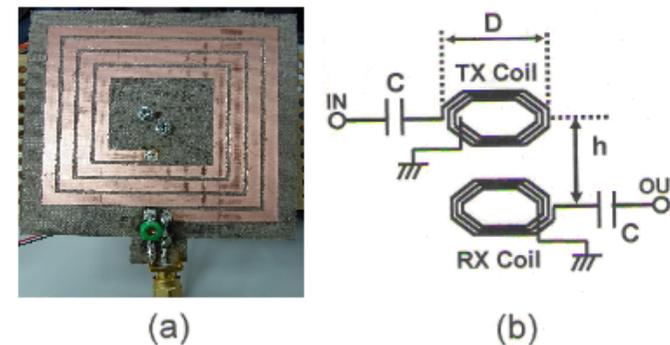


図10 送電・受電コイル

3.5. 通信・車両制御システム

車両の制御信号を送信する送信回路と、データを受信し車両を制御する受信・制御回路の設計を行った。通信には、PIC に内蔵の USART 機能を用い、RS-232C と同じ通信方式で行う。OOK 変調スイッチは、高速でスイッチングが可能な Mini-circuit 社の ZSDR-230 の PIN ダイオードスイッチを用いた。

通信の仕様を表 1 に示す。通信方式は OOK、同期は RS-232C と同じ非同期式である。通信速度は PIC の動作周波数(8MHz)に対し、できるだけ高速でエラーレートの低い 19.2[kbps]を選択した。30 フレーム/秒以上あればなめらかな動きに感じるので、通信回数は 50 シンボル/秒に設定した。また、通信による送信電力の低下は最大 2.5[%]である。

1 シンボル送信データの構成を図 11 に示す。車両の制御は 8 ビット(1 シンボル)で行う。今回は、車両の進行方向、速度、ウインカー、クラクションを制御できるようにした。図 11 のように信号を送信している時以外は 1 で、電力が送り続けられる。車両制御信号送信機の構成を図 11 に示す。車両制御信号送信機は手動で車両を操るだけでなく、アンテナ切り替えスイッチの位置情報から自動的に進行方向を変更する。その位置は DIP スイッチによって指定できる。車両制御・制御信号受信機の構成を図 12 に示す。IC の駆動電圧を保つため、昇降圧 IC には、85%程度の効率で 0.7V~6V の電圧を 3.3V に変換する HOLTEK 社の HT7733A を用いた。整流回路からの通信信号を増幅する増幅器には、PIC 内蔵のコンパレータを用いた。

表 1 通信の仕様

| | |
|------|--------------|
| 周波数 | 40.7[MHz] |
| 通信方式 | ASK(OOK) |
| 同期方式 | 非同期 |
| 通信速度 | 19.2[kbps] |
| 通信回数 | 50[Symbol/s] |

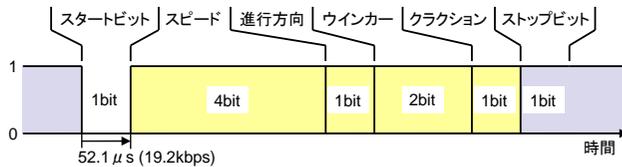


図 11 車制御信号データ構成

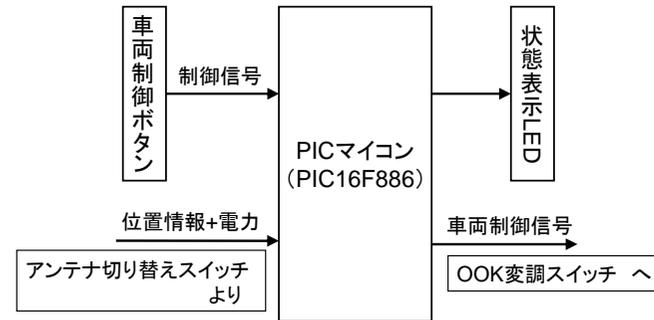


図 12 車両制御信号送信機の構成

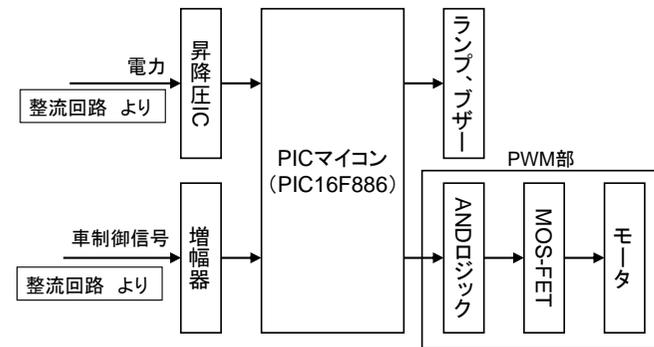


図 13 車両制御・制御信号受信機の構成

4. 試作評価

4.1 整流回路

試作した整流回路の写真を図 14 に示す。整流回路の効率について計算値と実測値の比較を図 15 に示す。25Ω 負荷のときは、計算値と実測値が大体同じ結果であることがわかる。しかし、50Ω 負荷と 100Ω 負荷では整流効率の大小関係が逆になっている。これは最適負荷 50Ω で設計したのに対し、実際には最適負荷が 100Ω であることを意味する。回路の大きさから 40.7MHz では線路の影響をほとんど受けないため、Spice パラメータが実測値と違っていただけと考えられる。整流回路の最大整流効率は 100Ω 負荷、500mW 時に 76.5[%]であった。

4.2 PWM

PWM を実装した模型車両の写真を図 16 に示す。PWM 制御回路によって車両の速度制御と前進、後進、停止が出来ることを確認した。携帯電話用の振動モーターは低電力であるが低トルクであり、デューティ比 $D=50\%$ 以下では始動できなかった。

4.3 路側送電システム

送受信コイル間の S_{21} 特性を図 17 に示す。平行移動特性においてコイル間の距離は $28[\text{mm}]$ である。垂直移動特性において送受信コイルは正対させている。図 18 に試作した路側送電システムを示す。

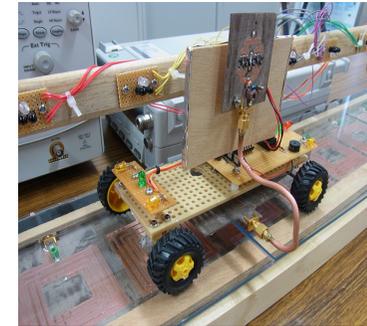


図 16 PWM を実装した模型車両

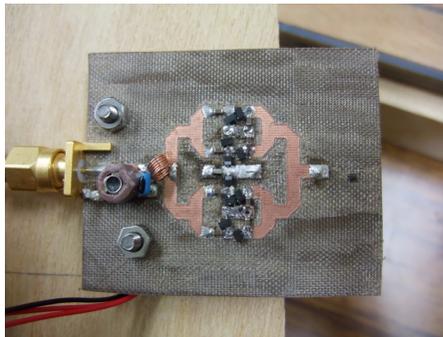
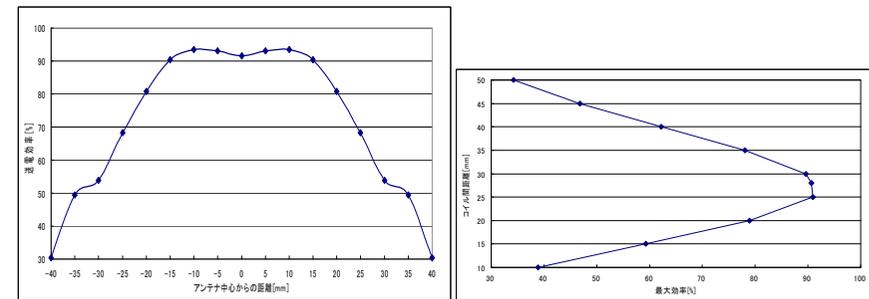
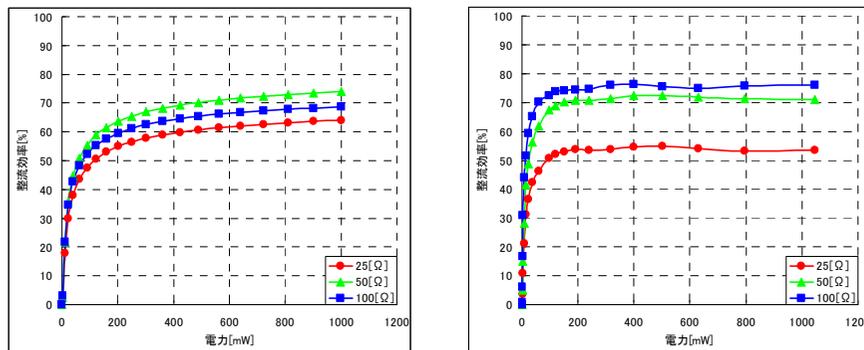


図 14 整流回路の写真



(a) 平行移動特性 (b) 垂直移動特性

図 17 送受信コイル間の S_{21} 特性



(a) 計算値 (b) 実測値

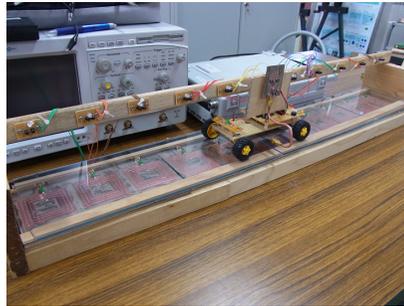
図 15 整流回路の整流効率

4.4 通信・車両制御システム

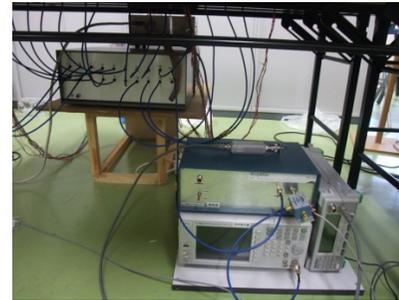
試作した制御信号送信機と車両制御・制御信号受信回路の写真をそれぞれ図 19 に示す。実際に送信機を操作し、制御信号に従って車両を制御できることを確認した。送信アンテナを切り替える瞬間に誤ったデータが通信されることがある。これはアンテナ切り替えスイッチのチャタリングによる影響と考えられ、誤り検出、誤り訂正技術を導入する必要がある。

4.5 総合評価

磁気共鳴ワイヤレス送電と路車間通信を同時に行い、模型を制御できることを確認した。試作した整流回路の最大変換効率は 76.5% であり、送受電コイルの伝送効率は最大で 93% であった。最大総合効率は、 71.1% であった。送受電コイルの伝送効率は 93% と高い効率を示したが、整流回路の整流効率が 76.5% と低く、整流回路の改善がなお必要である。



走行レーン

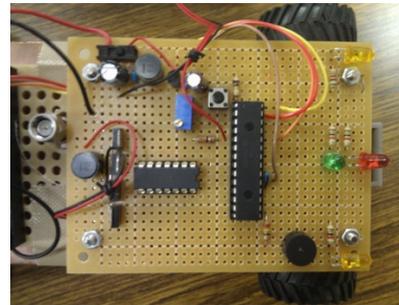


給電システム

図 18 路側送電システム



制御信号送信機



車両制御・制御信号受信回路

図 19 通信・車両制御システム

参考文献

- 1) 阿部茂, 金子裕良, 非接触給電技術, 電気学会誌, Vol.128, No.12, pp.796-799 (2008).
- 2) Road-Embedded Rechargers
http://www.time.com/time/specials/packages/article/0,28804,2029497_2030622_2029703,00.html
- 3) A. Kurs, et al, Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, in Science Express on June 2007, Vol.317, No. 5834, pp.83-86 (2007)
- 4) M. C. Brown, The history of power transmission, by radio wave, IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-32, No.9, pp.1230-1242 (1984).
- 5) 三浦健史, 平山勝規, 篠原真毅, 松本紘, マイクロ波無線電力伝送用レクテナの大電力化に関する研究, 信学論 B, vol.J83-B, No.4, pp.525-533 (2000)
- 6) 篠原真毅, 松本紘, マイクロ波を用いた電気自動車無線充電に関する研究, 信学論, Vol.J87-C, No.5, pp.433-443, (2004).
- 7) 加々美友宏, 松下隼人, 岩堀 大希, 桑原義彦, 走行中の模型電気自動車へのワイヤレス送電デモシステム, 信学技報, WPT2010-20, pp.37-42 (2011).
- 8) 島本潤吉, 居村岳広, 堀洋一, 桜井貴康, 高宮真, 磁気共鳴を用いたプリント基板上のコイル間の無線電力伝送の実測, 信学総大 C-12-22 (2010)

5. おわりに

模型を用いてワイヤレス送電と路車間通信を同時に行うシステムを構築し実証実験を行った。今後は人が乗車できる車両に本システムを適用し、実証実験を行う計画である。