

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：12614

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14261

研究課題名(和文)水中ロボット向け電力通信機能を有する非接触給電装置の研究開発

研究課題名(英文) Development of contactless power transferring system with electric power communication for under-water robot

研究代表者

木船 弘康 (Kifune, Hiroyasu)

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：90323849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：水中で業務に携わるロボットに水中で給電するための「非接触給電ステーション」の開発にあたり、複数ある必要な要素技術の内、本科研費研究では「コイルの位置ズレ対策」および「電力通信」に絞って研究開発を実施した。送電コイルと受電コイルの位置関係のズレがもたらす影響を最小限に抑制するため、送電コイルや受電コイルの配置について検討を行った。これにより、水中ロボットが給電ステーションに対してどのように着底しても確実に効率よく給電する機会を最大化することができた。また海水中という高速無線通信が不可能な環境下で水中ロボットと給電ステーションが確実に通信を実現できる手段の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：This project focused on two themes which are necessary to develop "contact-less electric power station" for under-water robot working under sea water. One is a method to improve the problems that center gap between transferring coil and receiving coil affects their coupling coefficient factor. We found a few optimum layouts of transferring coils and receiving coils, which enable power station to transfer electric power to the robot without fail, even if the robot land on the station in any direction. Another is to provide new principle method for communication between the station and the robot. It is difficult to establish high speed wire-less communication scheme with electromagnetic wave due to electromagnetic characteristics of sea water. We developed a low speed communication method by using electric power converters and the transferring/receiving coils for system redundancy.

研究分野：パワーエレクトロニクス、船舶電気推進

キーワード：非接触給電 水中ロボット 電磁誘導 コイルレイアウト コイルマッチング 電力変換器通信

1. 研究開始当初の背景

国内外で稼働している AUV(自律航行型水中ロボット)のほとんどが内蔵バッテリーで動作している。しかし、潜航調査のたびに人手によるバッテリー交換あるいは充電をする必要性が生じており、動力エネルギーの調達という点において、AUV は真に自動化されているとは言い難い。

そこで、自動車のドライバーがコンパネの給油サインを見て自己判断のもとにガソリンスタンドに立ち寄るように、AUV が自動でバッテリーを充電する仕組みの開発が求められる。一方で海底のように高水圧環境下では、充電システムは完全に電氣的絶縁を維持した防水状態である必要もある。そこで電氣的接触部分が不要な非接触給電技術による AUV への電力転送のシステム開発を行う。

2. 研究の目的

AUV 向け非接触給電システムを構築する上で、様々な技術的チャレンジが挙げられるが、本科学研究では以下の2点(位置ズレ対策・電力通信)に絞って研究開発を実施した。

(1) マルチコイル化とそのレイアウト

数 kW 以上の電力を非接触で授受するには電磁誘導方式が最も有望である。しかし送電側と受電側との位置ズレに対する許容度が他の非接触給電方式と比べて低い。さらに、海水という粘性流体中にある AUV の姿勢制御能力も極端に低い。給電のために位置ズレを数 cm 単位で修正することは不可能である。既存の非接触給電装置の一部では、位置ズレ修正対策として、送電側の内部にアクチュエータを設けて mm オーダーの調整を可能とするものもある。しかし可動部品は故障リスクを高めるため、深海設置機器に装備するのは適切ではない。そこでアクチュエータレスのズレ対策として、送受電コイルをマルチコイル化(複数並列接続)したコイル群の導入を行う。送電コイルのマルチ化に関する事例はあるが、受電コイルもマルチ化した事例は申請者の把握する範囲では皆無である。送電コイルと受電コイルをそれぞれ複数用意することは、発生するズレ量とその機会を根本的に小さくすることができ、AUV 向け非接触給電装置としては検討が必須なテーマである。このように複数のコイルをレイアウトする場合、どのようなレイアウトパターンが最適となるかについて、検証を行う。

(2) コイルマッチング

このマルチコイル化を実現するためには、送電側と受電側の最適なコイルのペアを割り出すためのマッチングが必要になる。そこで本研究では、受電側の整流回路を高周波インバータに置き換え、送電側と受電側の間を電力のキャッチボールができるようにする。このときの消費電力を最小限に抑制するため、非共振状態で動作できるように主回路の構成を工夫する。これにより電力キャッチボ

ールで電圧感度が高いペアを自動でマッチングするというユニークな手法を試みる。実際の運用を考慮すると、海流その他の影響によりズレ量が刻々と変化する可能性があるため、周期的にマッチングをしなければならない。この作業プロセスは非常に複雑かつ煩雑になるため、ごく短時間で最適なコイルペアを割り出すための手法について検討を行う。

(3) 電力変換器通信という試み

給電対象が何であれ、電力需要側の状態に合わせて送電電力を制御する必要がある。一般的な電気製品では、センサーとフィードバック系が存在し、非接触給電ではその情報フィードバックが無線通信で行われている。しかし海水中では電波は極端に減衰し、10mm 程度の距離しか伝播しない。このため一般的な GHz 帯無線通信の環境を整えるにはかなりの工夫が必要である。また1機数億円もする高価な探査機である AUV にとって、電源はまさに生命線であり、その制御通信においては高い冗長性が求められる。

そこでコイルペアのマッチングに利用する非共振状態での電力キャッチボールの機能を制御通信に応用する。この電力通信方式は電力変換器のスイッチングスピードに制限がされるため通信速度は高くできないが、電磁誘導方式であるため、GHz 帯の電波通信よりも確実性が高い。このため陸上汎用機器には明らかに不向きであるが、水中ロボットには不可欠という独自性がある。この電力変換器を用いた通信の特性について試作機を用いて検証を行う。

3. 研究の方法

(1) マルチコイルの評価手法

本研究の実施にあたり、事前評価検討として、実際に試作機を作成した(図 3.1-1)。その上で、送電コイルと受電コイルとの相対的位置関係を変えて電力伝送の効率について実測を行った(図 3.1-2)。各コイルには全て同一形状のコイル(直径 225mm、巻き数 16、内径 110mm)を使用した。送電側コイルと受電側コイルの中心位置のズレにより双方のコイル間の結合係数が変化する。図から明らかのように、結合係数が高くなるほど、高い電力伝送効率を実現し得る。

よって送電コイル側と受電コイル側の間

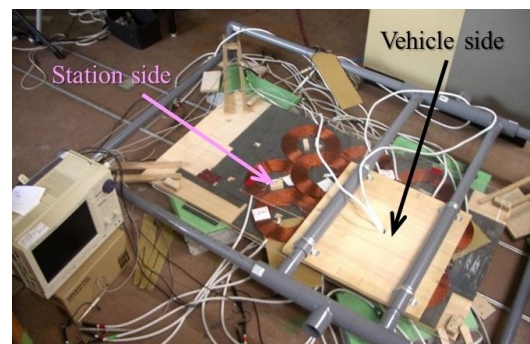


図 3.1-1 試作実験装置の外観

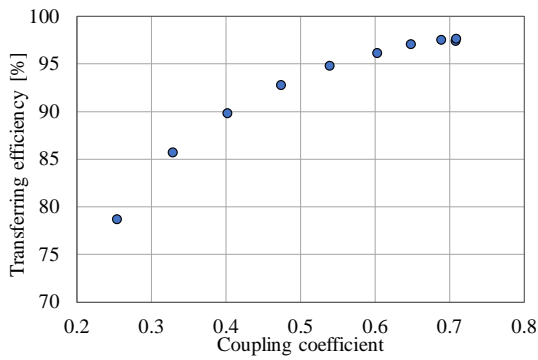


図 3.1-2 結合係数と電力伝送効率

で確実に電力の授受が行われるためには、双方のコイル間の結合係数を一定程度高く保つことが必要である。すなわち、コイルのレイアウトパターンを最適化するための評価用数値として結合係数を用いることができる。また、結合係数を 0.3 以上に保てると、80%以上の電力伝送効率を得られることから、結合係数の値が 0.3 より高いかどうか、評価するポイントとなる。

確実に送受電できることを念頭に置くため、可能な限り隙間なくコイルを配置できるよう送電側コイル群のレイアウトを大きく 2 種類に分けて検討を行った(図 3.1-3)。双方のコイル配置パターンには、図形的な繰り返しの周期があり、図中の黒枠はその 1 周期分を示している。この黒枠内で受電コイルの中心位置を少しずつ移動させ、その都度、結合係数を測定し、結合係数の値をマッピングするという作業を行った。

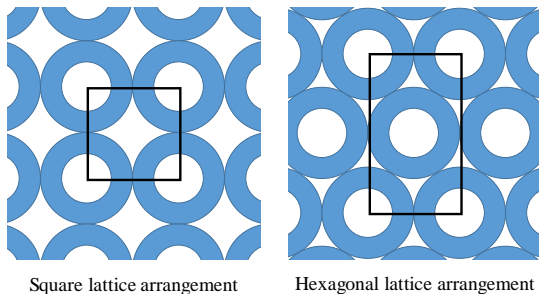


図 3.1-3 送電側コイルの配置

(2) 電圧計測によるコイルマッチング法

水中ロボット側に搭載される受電コイルと給電ステーション側の送電コイルとの精密な位置関係を把握することは送受電の効率を高めるだけでなく、そもそもの確実性を担保する上で極めて重要である。この作業を外部センサーに依存することは、精度の観点から難しい。そこで、双方のコイル間で小電力のキャッチボールをさせ、最適なコイルペアを発見する手法を提案する。特に海水中という環境を考慮し、高速ワイヤレス通信等による相互通信ができないことを前提とし、受電側で電圧を計測するだけで良い簡易な手法を提案し、これを試作実験装置により評価を行う。試作した主回路構成を図 3.2-1 に示す。送電側回路が直列共振、受電側回路が並列共

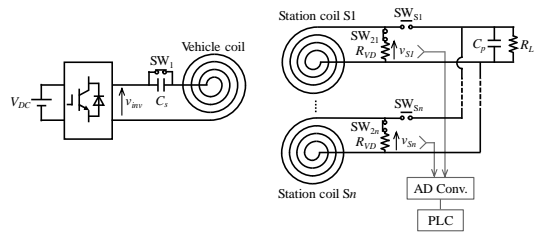


図 3.2-1 主回路構成

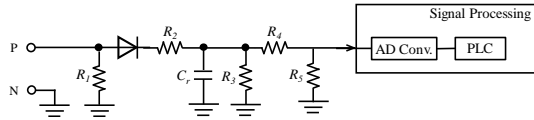


図 3.2-2 電圧検出回路

振となっている。各コイル端に誘導される高周波交流電圧を整流し、レベル検出する回路を接続し、それぞれの値を比較できるようにした(図 3.2-2)。

(3) 試作回路による信号送受信

電力変換器を用いて通信を実験的に行うにあたり、送信側回路はフルブリッジ回路構成(主スイッチには IGBT を採用)とした。また受信側回路は受電回路端に抵抗を接続して閉ループを構成した。

三進法による通信

フルブリッジ回路では正、ゼロ、負の電圧を出力できることから、三進法での通信も可能である。これにより二進法より高密度で通信ができる可能性がある。これを試作回路で検証を行う。

AMI 符号による通信

三進法で明らかになった課題に対応するため、二進法としての AMI 符号を用いた通信の実験を行う。

4. 研究成果

(1) 最適なコイルレイアウト

送電コイル 1 層・受電コイル 1

送電側コイルを図 3.1-3 に示すレイアウトとし、受電側コイル 1 個を黒枠内で走査して結合係数を測定した(図 4.1-1)。

結合係数の大きさを色の濃淡で表現している。濃い色の位置に受電コイルの中心が一致すると、結合係数を高くすることができ、図 3.1-2 で事前に示される通り、高い伝送効率も実現できる。図から明らかのように、送電コイルと受電コイルが正対できる位置関係にある時に最も結合係数が高い。結合係数の最小値は正方格子状配置(左側)の場合で 0.01 未満、六角格子状配置(右側)の場合で 0.03 程度と、いずれも電磁誘導で送電するには結合係数が低すぎる値となっている。ここで結合係数が 0.3 以上となる面積の割合を γ と定義すると正方格子状配置で $\gamma=44.8\%$ 、六角格子状配置で $\gamma=47.6\%$ であった。

この結果から、コイルを複数枚並べるだけでは広い範囲で結合係数を高く維持できないことが明らかとなった。

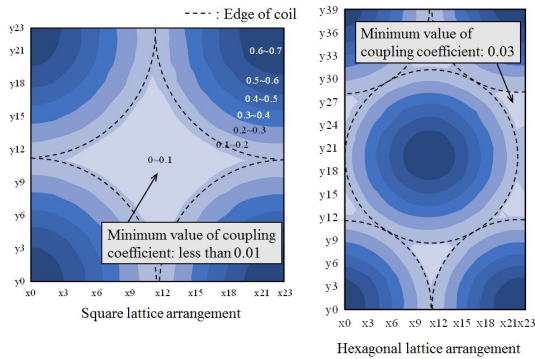


図 4.1-1 結合係数マップ(受電コイル1枚)

送電コイル2層・受電コイル1

結合係数が低くなる位置に別のコイルの中心が位置するようにコイルを二層にレイアウトする実験を行った(図 4.1-2)。この時の結合係数マップを図 4.1-3 に示す。送電コイルが一層の時(図 4.1-1)と比較して、マップ全体で結合係数が高い値をとっていることが明らかである。結合係数が 0.3 以上となる領域がマップ全体に占める割合 γ について算出すると、パターン A のレイアウトでは $\gamma=85.1\%$ 、パターン B では $\gamma=83.3\%$ となった。このことから送電コイルを二層化することで高効率に電力送電できる確率を大きく改善することができた。ただし、言い換えれば、15%近くの領域で、電力伝送の効率が低い、あるいは困難という状況にあり、改善の余地が残される結果となった。対策としては、送電側コイルを更に多層化(三層化)する方法も考えられる。しかしこれ以上の多層化は送電コイル群により構成される給電ステーション建設において大幅なコスト増を招くと

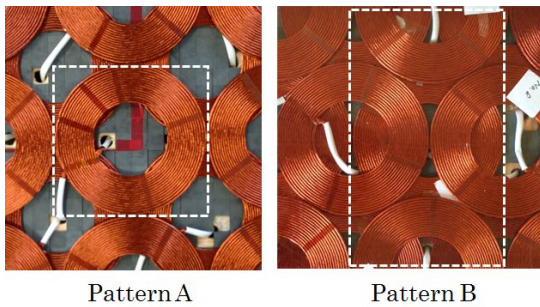


図 4.1-2 二層化した送電コイル

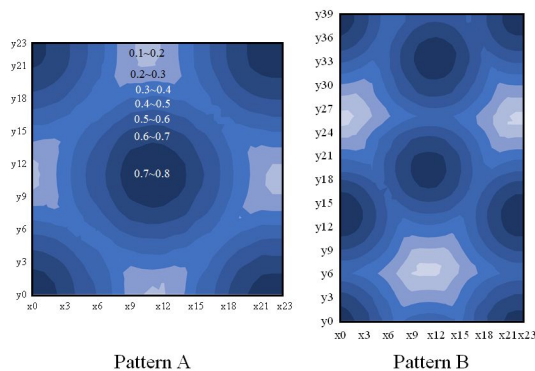


図 4.1-3 結合係数マップ

ともに、リード線の処理や耐水圧や剛性の確保といった構造上の問題が大きくなりやすい。

送電コイル2層・受電コイル2

上述の課題に対応すべく、送電コイル側の更なる多層化ではなく、受電コイルの複数化を検討した。受電コイルが1枚の場合は「向き」を考慮する必要がなかった。一方で受電コイルが2枚になると、2枚の受電コイルの中心位置を結ぶ軸ができるため、送電コイル側との関係において「向き θ 」を考慮する必要が生じる。更に2枚の受電コイルの中心間距離 d もパラメータとして検討する要素に含まれる(図 4.1-4)。これらパラメータの違いによって、同一のコイルパターンであっても様々な結合係数マップが得られる。

その傾向を図 4.1-5 に示す。受電コイル間の中心距離 d をコイル外形で規格化した時の取りうる γ の値の平均値を示している。図から明らかなように、パターン A では d の値がコイル外径に対して約 36%の長さになるとき、結合係数が 0.3 以上となる面積が全体に占める割合 γ を高確率で高く維持できる。またパターン B では、 d の値がコイル外径に対して約 50%の長さのときに、 γ を高くできることが示された。

図 4.1-6 は各条件において結合係数が取りうる最小値 k_{min} 、すなわち結合係数の最低保証値を示している。好都合なことに、パターン A およびパターン B の双方において、 γ が高くなる条件において k_{min} も高くなることが示された。

よって送電コイル側のレイアウトをパターン A とする場合は、受電コイル側の d 値を直径の 36%前後に、また送電コイルレイアウト

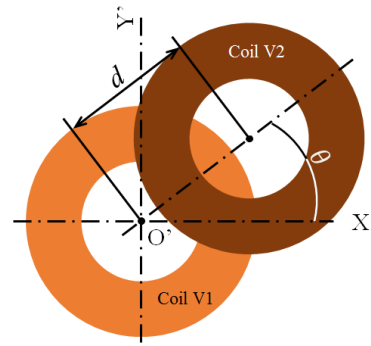


図 4.1-4 受電側コイルのパラメータ

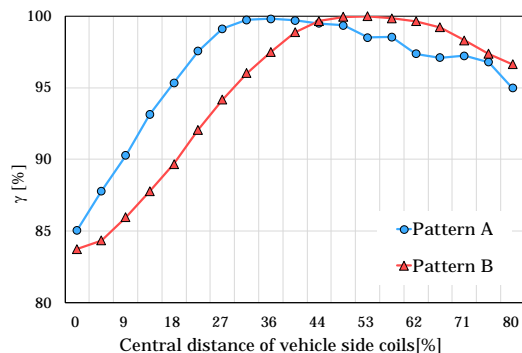


図 4.1-5 結合係数が 0.3 以上となる面積割合

トをパターン B とする場合は、受電コイル側の d 値を直径の 50% 前後に設定することが好ましいといえる。

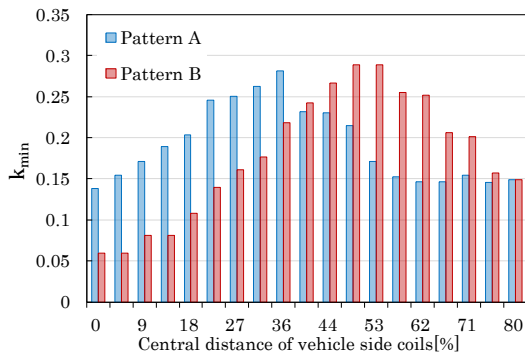


図 4.1-6 取りうる最小の結合係数の値

(2) 電圧計測によるマッチング手法の実験評価検討

コイルが複数あっても、送電コイル端電圧と受電コイル端電圧を計測できれば、結合係数を計測することができる。本システムにおけるマッチングは受電回路側のコイルに高周波パルス電圧を供給し（送信）、送電側コイル端で誘導される電圧を計測（受信）することとなる。このとき送信電圧を一定に保つよう制御をするため、実際には受信電圧を計測するだけで、マッチングのための計測が可能である。

試作実験回路において、送電側コイル（マッチングプロセスにおいては受信動作）を図 4.2-1 の左図のように配置し、黒枠で囲まれた範囲内で受電側コイル（マッチングプロセスにおいては送信動作）を移動させながら電圧パルスを供給した。その計測結果から、どのコイルとの間の結合係数が最も高いか、すなわち送受電をするのに最適なペアはどのコイルであるかを判断させたのが図 4.2-1 の右図である。黒枠内を縦横方向に 2209 点に分割（47×47）して計測し、10 回計測した。図から明らかなように、適切なコイルペアの選択が行われている。なお、中心点（黄色の点）において、コイル S1 と S2 が選択されるエリアが広い。これは、コイル S3 および S4 が二層目にあるため、コイルの厚み分だけ送信側と受信側のコイル間距離が大きくなり、結合係数が若干低下する傾向にあることを意味している。

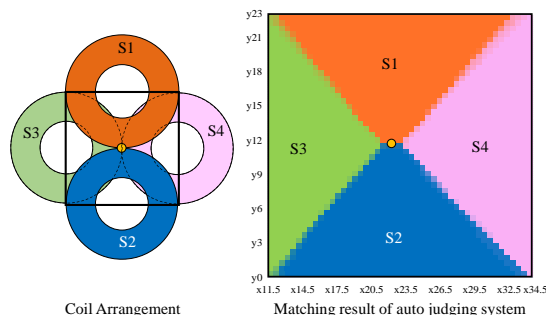


図 4.2-1 マッチングの実験結果

(3) 電力変換器による通信実験結果 三進法による通信

図 4.3-1 に示すように、正、ゼロ、負の 3 レベルの信号を使った通信の可能性について実験的検証を行った。その結果、単純な 3 レベルのスイッチング動作をすると、図 4.3-2 のように、コイルの励磁電流が意図しない電圧を発生してしまうことが明らかとなった。そこで、インバータのスイッチングシーケンスを改善することで励磁電流による信号品質への影響を最小限に抑制する改善を行った結果、励磁電流による信号の乱れを解消することができた（図 4.3-3）。

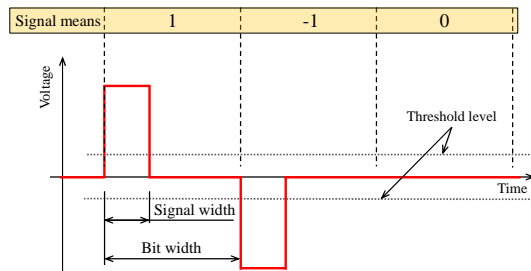


図 4.3-1 三進法の信号イメージ

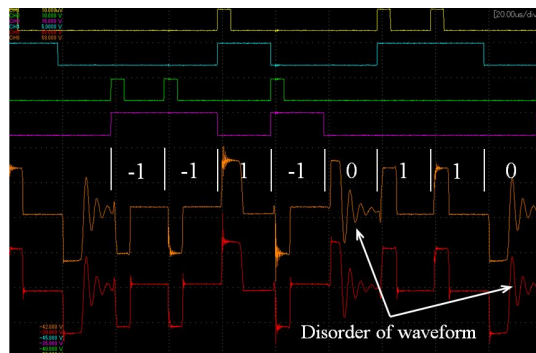


図 4.3-2 励磁電流による信号の乱れ

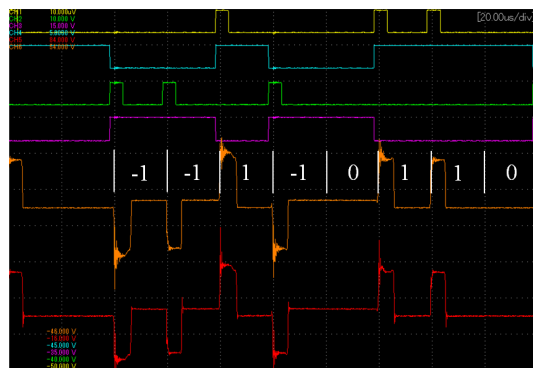


図 4.3-3 改善後の信号波形

また送信側コイルと受信側コイルの物理的な位置関係と結合係数 k_c の関係について調べた結果が図 4.3-4 である。双方のコイルの面と面との距離 Δb が大きくなると、結合係数 k_c が低下している。また双方のコイルの中心位置間の距離 Δa がコイル半径 (112mm) よりも大きくなると結合係数が負の値を取る。すなわち信号の正負が反転してしまうことを意味する。本通信手段は、他の通信手段がすべて絶たれた後の最終手段として利用

することを想定している。このため信号密度を上げるためとはいえ、本信号方式を採用することは困難である。

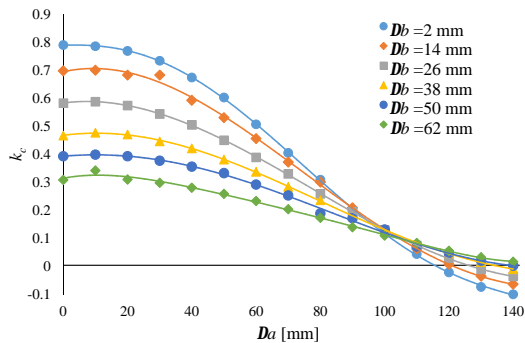


図 4.3-4 コイル間の物理的距離と結合係数の関係

AMI 符号による通信

先述の課題を解決するため、AMI 符号を検討した(図 4.3-5)。正と負の両方に 1 の意味を持たせるため、正の電圧と負の電圧を交互に利用することで励磁電流の影響を抑制し、信号反転の課題も解消できる。図 4.3-6 が実験波形(1 パケット内で 1111100 という信号列を送信し)である。意図した送信信号と受信信号の電圧が得られているのを確認できた。

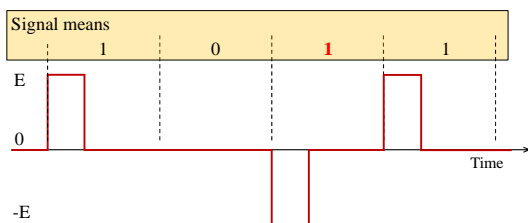


図 4.3-5 AMI 符号のイメージ

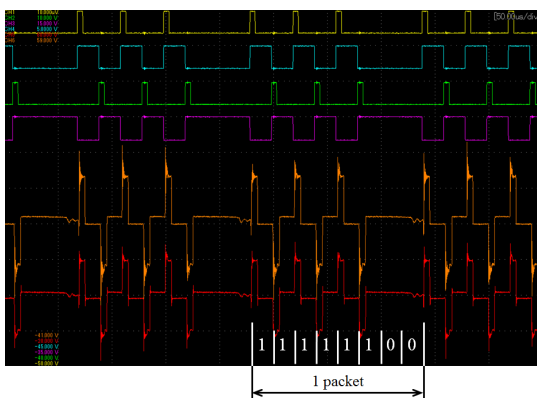


図 4.3-6 AMI 符号を採用した送受信波形

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

- (1) 米田昇平,木船弘康,“共振周波数追従制御を適用した水中非接触給電システムの基礎検討”平成 30 年電気学会全国大会,2018,pp225-226

- (2) 佐藤直樹,中村伸二,米田昇平,木船弘康,“水中探査機向け水中非接触給電におけるコイルマッチング手法の検討”平成 30 年電気学会全国大会,2018,pp357-358
- (3) 中村伸二,佐藤直樹,木船弘康,“AUV 向け非接触給電装置のマッチングシステム”, The 14th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers,2017
- (4) Naoki Sato, Hiroyasu Kifune,“ Study about Coil Matching Method of Contactless Power Supply System for Underwater Vehicle in Seawater”, The 11th international symposium on Marine Engineering, ISME-Tokyo, Oct.2017, pp447-448
- (5) 佐藤直樹,木船弘康,“AUV 向け水中非接触給電システムにおけるコイルマッチング”, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会 JIASC2017,2017,Y-34
- (6) 佐藤直樹,木船弘康,“AUV 向け水中給電ステーションの最適なコイルレイアウトの条件について”, 第 87 回マリンエンジニアリング学術講演会,2017, pp41-44
- (7) 佐藤直樹,井上鴻志,木船弘康,“AUV 向け水中給電ステーションにおけるコイル配置に関する基礎検討”, 半導体電力変換 モータドライブ 合同研究会,2017, pp.19-24
- (8) 佐藤直樹,上松嵩幸,木船弘康,“水中での非接触給電を想定した電力通信に関する基礎研究”, 第 85 回マリンエンジニアリング学術講演会, 2015, pp.213-214
〔図書〕(計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

木船 弘康 (KIFUNE, Hiroyasu)
東京海洋大学・学術研究院・准教授
研究者番号：90323849

(2)研究分担者

松本 洋平 (MATSUMOTO, Yohei)
東京海洋大学・学術研究院・助教
研究者番号：80572081