

ワイヤレス電力伝送における LCL-S 回路による 一次側入力電流の変化を用いた SOC 推定の基礎研究

佐藤 悠介* 居村 岳広 堀 洋一 (東京理科大学)

A Basic Study of SOC Estimation Using Primary Side Input Current Variation in Wireless Power Transmission Using LCL-S Circuits

Yusuke Sato*, Takehiro Imura, Yoichi Hori (Tokyo University of Science)

With the advent of the trillion sensor society, the problem of how to supply power to sensors has arisen. In this paper, we propose a method to estimate the charge rate of a sensor battery by reading only the parameter changes on the transmission side (robot side) of the LCL-S circuit. This provides advantages such as prevention of overcharging. In this study, we conducted simulations and experiments to verify the feasibility of the proposed SOC estimation method. The results show that the proposed method can be used to estimate the SOC to prevent overcharging and to determine the end of charging.

キーワード：ワイヤレス電力伝送, LCL-S 方式, 充電率, リチウムイオン電池
(Wireless Power Transfer, LCL-S Topology, State of Charge, Lithium-ion Battery)

1. はじめに

近年、電気自動車や IoT 機器への給電方法としてワイヤレス電力伝送(Wireless Power Transfer : WPT)が研究されている⁽¹⁾。また、現代社会の課題として「少子高齢化」が挙げられる。少子高齢化により、将来的に労働人口が減少することが考えられるため、あらゆる環境において省人化を進める必要がある。そのため、データを収集して有効に利活用するトリリオンセンサ(Trillion Sensor)という考え方が広まっている⁽²⁾。2025 年には全世界で年間 1 兆個のセンサが消費されると考えられており、センサの電源が問題となる。センサの数が急増し、壁に埋め込むセンサなどが普及することにより電池の交換が困難かつ面倒になると考えられる。本論文では、この課題の解決策としてロボットが給電対象にワイヤレスで電力伝送を行う「ロボット・ワイヤレス給電システム(以下、ロボット給電システム)」を提案する⁽³⁾⁽⁴⁾(Fig.1)。ロボット給電の課題として充電率(State of Charge : SOC)の推定をどのようにして行うかというものが挙げられる。本論文ではロボット給電システムに適用できる SOC 推定法を提案し、基礎研究を行った。

2. 研究目的

本論文ではロボット給電システムにおける SOC 推定方法として、一次側のパラメータ変化のみを使用した方法を提案する。

現在、センサに一般的に用いられる電池としてリチウムイオン電池が挙げられる。リチウムイオン電池は正極と負極をリチウムイオンが行き来することにより、充放電が可能である。また、長時間の充放電は発熱・発煙・発火を引き起こし火災につながる恐れがある。これらの現象を防止するために、SOC 推定によって長時間の充放電を抑制する必要がある。リチウムイオン電池の充電には、安全性・高寿命化のために定電流定電圧(Constant Current Constant Voltage : CCCV)充電方式が用いられている。現段階では追加コンポーネントを用いることなく CCCV 充電方式と SOC 推定の両方を同時に満たす方法は提案されていない。

本論文では、WPT において CCCV 充電が可能な回路方式として LCL-S 回路を提案し、当回路における送電側回路の入力電流の時間変化を用いた給電対象の SOC 推定の有用性を検討する。

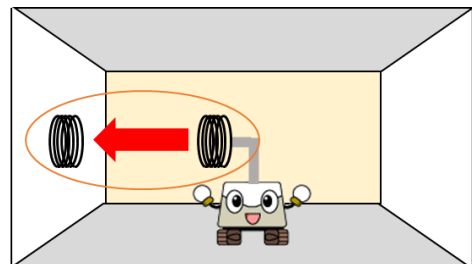


図1 ロボット・ワイヤレス給電システム

Fig.1 Robot wireless power supply system

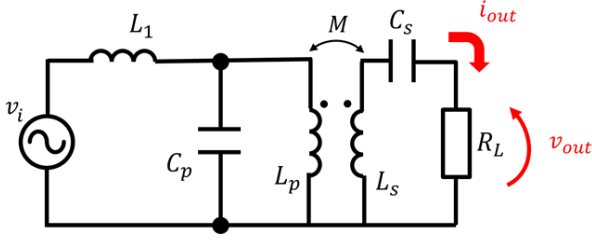


図2 LCL-S回路(CVモード)
Fig.2 LCL-S topology (CV mode)

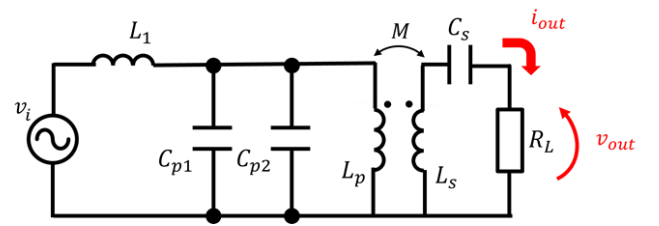


図3 LCL-S回路(CCモード)
Fig.3 LCL-S topology (CC mode)

3. 使用回路の検討

本節ではロボット給電システムおよび本論文におけるSOC推定の対象となる回路方式を検討する。

センサなどの電源としては「リチウムイオン電池」が多くの場合用いられる。リチウムイオン電池の充電には、初めに定電流(Constant Current: CC)で充電したのち、定電圧(Constant Voltage: CV)に切り替えて充電するCCCV充電方式が用いられている。そのためロボット給電システムには、CC特性とCV特性の両方を持つ回路方式を採用する必要がある。そこで本論文ではLCL-S回路を提案する。

〈3・1〉 CVモード LCL-S回路をFig.2に示す。回路方程式を解くと、出力電流 i_{out} は式(1)のようになる。

$$i_{out} = \frac{\begin{vmatrix} j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_p} & -\frac{1}{j\omega C_p} & v_i \\ -\frac{1}{j\omega C_p} & \frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_p & 0 \\ 0 & j\omega M & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_p} & -\frac{1}{j\omega C_p} & 0 \\ -\frac{1}{j\omega C_p} & \frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_p & j\omega M \\ 0 & j\omega M & j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_L \end{vmatrix}} \quad (1)$$

ここで共振条件

$$\omega^2 = \frac{1}{L_1 C_p} = \frac{1}{L_p C_p} = \frac{1}{L_s C_s}$$

を簡単のため、 $L = L_1 = L_p = L_s$ 、 $C = C_p = C_s$ とすると、

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

となる。これを式(1)に代入すると、 i_{out} と出力電圧 v_{out} は、

$$i_{out} = -\frac{M}{LR_L} v_i \quad (3)$$

$$v_{out} = i_{out} R_L = -\frac{M}{L} v_i \quad (4)$$

となる。ゆえに式(3),(4)より、 i_{out} は負荷 R_L に依存するのに対し、 v_{out} は R_L に依存しない。よってFig.1の回路はCC特

性を持たない一方で、CV特性を持つため、この回路をLCL-S回路のCVモードとする。

〈3・2〉 CCモード Fig.2の回路の一次側回路のコンデンサを2並列にした回路をFig.3に示す。回路方程式を解くと、出力電流 i_{out} は式(5)のようになる。

$$i_{out} = \frac{\begin{vmatrix} j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega(C_{p1}+C_{p2})} & -\frac{1}{j\omega(C_{p1}+C_{p2})} & v_i \\ -\frac{1}{j\omega(C_{p1}+C_{p2})} & \frac{1}{j\omega(C_{p1}+C_{p2})} + j\omega L_p & 0 \\ 0 & j\omega M & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega(C_{p1}+C_{p2})} & -\frac{1}{j\omega(C_{p1}+C_{p2})} & 0 \\ -\frac{1}{j\omega(C_{p1}+C_{p2})} & \frac{1}{j\omega(C_{p1}+C_{p2})} + j\omega L_p & j\omega M \\ 0 & j\omega M & j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_L \end{vmatrix}} \quad (5)$$

式(5)に式(2)の条件を代入すると、 i_{out} と出力電圧 v_{out} は、

$$i_{out} = \frac{j}{\omega M} v_i \quad (6)$$

$$v_{out} = i_{out} R_L = \frac{j R_L}{\omega M} v_i \quad (7)$$

となる。ゆえに i_{out} は負荷 R_L に依存しないが、 v_{out} は R_L に依存する。よってFig.3の回路はCC特性を持つ一方で、CV特性を持たないため、この回路をLCL-S回路のCCモードとする。

〈3・3〉 LCL-S回路の優位性 以上より、ロボット給電システムに用いる回路としてLCL-S方式(Fig.4)を提案する。この回路の優位性として、スイッチ一つでCV特性とCC特性の両方が実現可能である点が挙げられる。これにより、回路の簡易化やコストの削減を期待できる。

また、CVモードに関して一次側の入力電流 i_{in} を求め、式(2)の共振条件を代入すると、

$$i_{in} = \frac{M^2}{L^2 R} v_i \quad (8)$$

となる。よってエアギャップが大きくなった場合、つまり $M \rightarrow 0$ となった場合に、

$$\lim_{M \rightarrow 0} i_{in} = 0 \quad (9)$$

となる。したがってエアギャップが大きい場合はロボット側に大電流が流れないため、安全性が保障される。

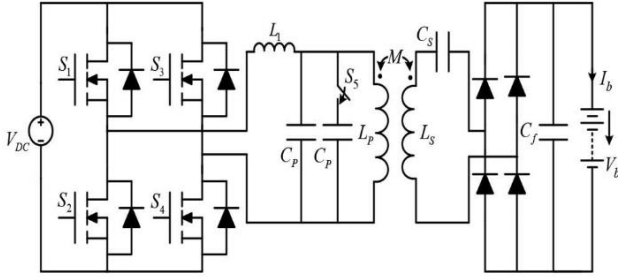
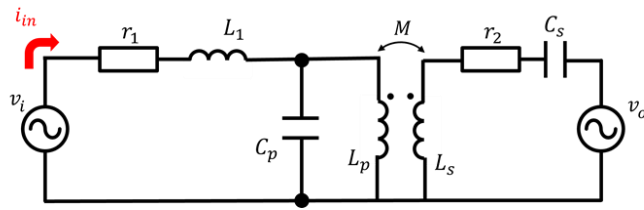
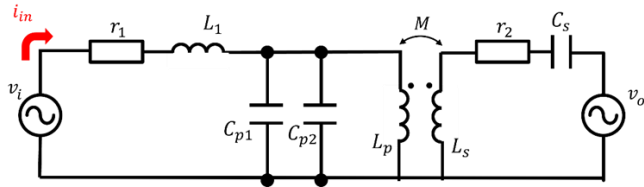


図4 ロボット給電システムに用いる回路(5)

Fig.4 Circuit used for robot power supply system(5)



(a) CV mode



(b) CC mode

図5 LCL-S回路におけるSOC推定

Fig.5 SOC estimation in LCL-S topology

4. LCL-S回路におけるSOC推定法の提案

3節の結果、ロボット給電システムの使用回路としてLCL-S方式を提案した。このLCL-S方式におけるSOC推定法を検討する。

本論文では、入力電流の変化をロボットが検知することによりリチウムイオン電池のSOCを推定する方法を提案する。このSOC推定法の利点は3点ある。

1点目は過充電の防止である。リチウムイオン電池を過充電すると発熱・発煙・発火する可能性があり、最悪の場合火災を引き起こすことも考えられる。2点目はCCモードとCVモードの切り替えのタイミングを計れることである。リチウムイオン電池のCCCV充電方式では、3節で述べたように、初めはCCモードで充電し、所定の電圧に到達したのちにCVモードで充電する。CCモードとCVモードの切り替えを適切なタイミングで行うことで、より効率的に充電を行うことができる。3点目は受電側回路の簡易化である。一次側の入力電流の変化のみでSOC推定を行うことによ

り、受電側に他のコンポーネントを追加する必要がないため回路を簡易化することができると考えられる。

〈4・1〉CVモードにおけるSOC推定 CVモードの出力に電圧 v_o のリチウムイオン電池を入れた回路をFig.5(a)に示す。この回路について回路方程式を解くと入力電流 i_{in} は式(10)のようになる。

$$i_{in} = \frac{\begin{vmatrix} v_i & -\frac{1}{j\omega C_p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_p & j\omega M \\ -v_o & j\omega M & j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + r_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_p} + r_1 & -\frac{1}{j\omega C_p} & 0 \\ -\frac{1}{j\omega C_p} & \frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_p & j\omega M \\ 0 & j\omega M & j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + r_2 \end{vmatrix}} \quad (10)$$

$$= \frac{[\omega^2 C_p L_1 + \omega C_s \{\omega L_s + \omega^3 C_p (M^2 - L_1 L_s) + j r_2 (\omega^2 C_p L_1 - 1)\} - 1] v_i - \omega^2 C_s M v_o}{C_s M^2 \omega^3 \{C_p \omega (r_1 + j\omega L_1) - j\} + \{\omega C_s (\omega L_s - j r_2) - 1\} \{r_1 - \omega^2 C_p L_p r_1 + j\omega (L + L_p - \omega^2 C_p L_1 L_p)\}} \quad (10)$$

式(2)の共振条件を代入すると、

$$i_{in} = \frac{M(Mv_i - Lv_o)}{M^2 r_1 + L^2 r_2} \quad (11)$$

となる。よって v_o は、

$$v_o = \frac{M^2 v_i - (M^2 r_1 + L^2 r_2) i_{in}}{ML} \quad (12)$$

となり、 i_{in} の関数として表すことができる。よってLCL-S方式のCVモードにおいて一次側の入力電流を用いたSOC推定が可能であると考えられる。

〈4・2〉CCモードにおけるSOC推定 4・1節と同様にCCモードの回路をFig.5(b)に示す。回路方程式を解くと入力電流 i_{in} は式(13)のようになる。

$$i_{in} = \frac{\begin{vmatrix} v_i & -\frac{1}{j\omega(C_{p1} + C_{p2})} & 0 \\ 0 & \frac{1}{j\omega(C_{p1} + C_{p2})} + j\omega L_p & j\omega M \\ -v_o & j\omega M & j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + r_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega(C_{p1} + C_{p2})} + r_1 & -\frac{1}{j\omega(C_{p1} + C_{p2})} & 0 \\ -\frac{1}{j\omega(C_{p1} + C_{p2})} & \frac{1}{j\omega(C_{p1} + C_{p2})} + j\omega L_p & j\omega M \\ 0 & j\omega M & j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + r_2 \end{vmatrix}} \quad (13)$$

$$= \frac{[\omega^2 C_p L_1 + \omega C_s \{\omega L_s + \omega^3 C_p (M^2 - L_1 L_s) + j r_2 (\omega^2 C_p L_1 - 1)\} - 1] v_i - \omega^2 C_s M v_o}{C_s M^2 \omega^3 \{C_p \omega (r_1 + j\omega L_1) - j\} + \{\omega C_s (\omega L_s - j r_2) - 1\} \{r_1 - \omega^2 C_p L_p r_1 + j\omega (L + L_p - \omega^2 C_p L_1 L_p)\}} \quad (13)$$

式(2)の共振条件を代入すると、

$$i_{in} = \frac{M(Mv_i - Lv_o)}{M^2 r_1 + L^2 r_2} \quad (14)$$

よって電池電圧 v_o は、

$$v_o = \frac{M^2 v_i - (M^2 r_1 + L^2 r_2) i_{in}}{ML} \quad (15)$$

となり、CVモードと同様に一次側の入力電流を用いたSOC推定が可能であると考えられる。

5. SOC 推定に関するシミュレーション・実験

本論文で提案した SOC 推定法の有用性を検証するためシミュレーションと実験を行った。

〈5・1〉シミュレーション 本論文において、シミュレーションは LTspice で行った。LTspice で Fig.4 の回路を再現し、電池の電圧をパラメータとして、電池の電圧と一次側の入力電流との関係を調べた。ただし本論文では、ロボット給電システムの受電対象となるセンサ側の回路は規格化するものとし、各素子値を既知の値(Table 1)とした。また、ロボット給電システムにおける SOC 推定はロボットが静止した状態で行われるものとするため、結合コイル間の結合係数を 0.5 として固定した。

〈5・2〉実験

〈5・2・1〉電池の特性評価 本論文で用いたリチウムイオン電池には、過充電・過放電防止の保護回路が入っている。そのため電池電圧の最大電圧(SOC=1)と最小電圧(SOC=0)が不確かであった。そこで、電池に対して $2.5\ \Omega$ の抵抗をつないで放電を行い、電池間電圧の時間変化をデジタルマルチメータで測定した。結果を Fig.6 に示す。Fig.6 より、電池の最大電圧を 3.9 V、最小電圧を 2.3 V としてシミュレーションと実験を行った。

表 1 各素子値

Table 1 Each element value

	インダクタンス/ キャパシタンス	内部抵抗
L_1	46.6 μH	1.2 Ω
C_{p1}	69.6 nF	3.9 m Ω
C_{p2}	75.3 nF	307.2 m Ω
C_s	71.4 nF	17.7 m Ω
L_p	49.4 μH	165.8 m Ω
L_s	47.9 μH	162.4 m Ω

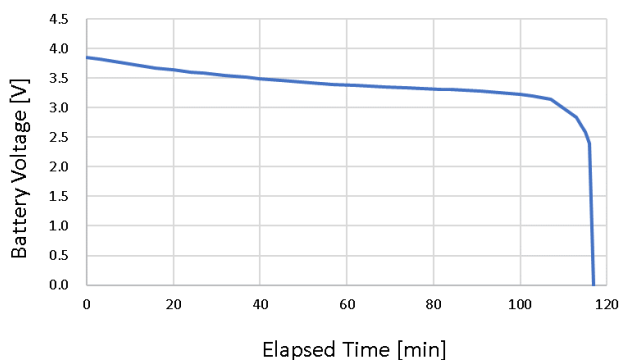
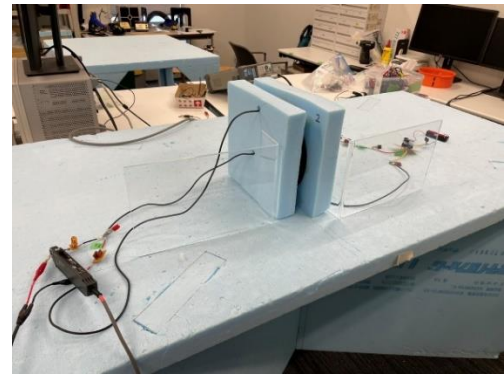
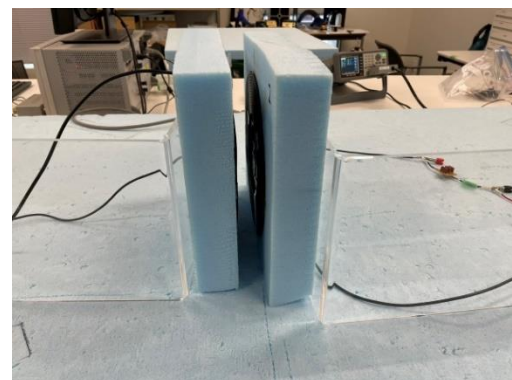


図 6 電池間電圧の時間変化

Fig.6 Time variation of battery voltage



(a) Overall view



(b) Coupling part



(c) Coupling coil



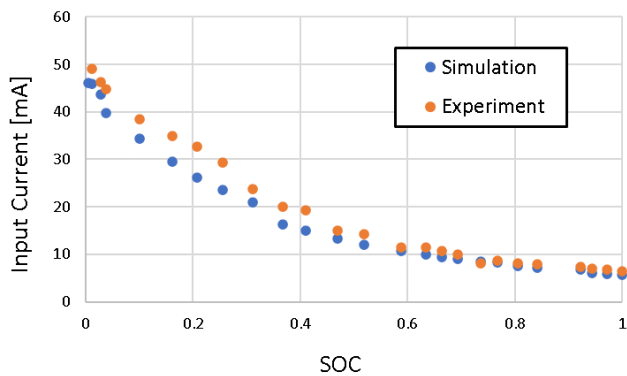
(d) Lithium-ion battery

図 7 SOC 推定の有用性検証実験の様子

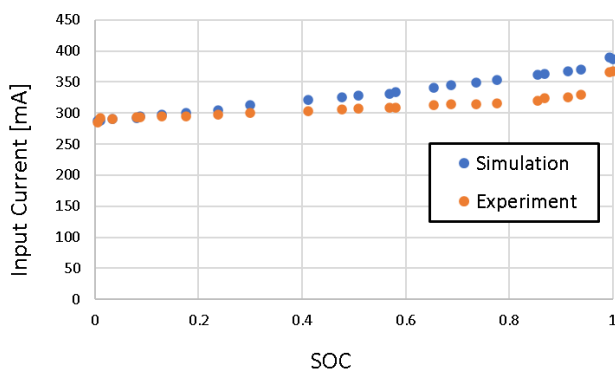
Fig.7 Actual Condition of experiment of SOC estimation

〈5・2・2〉SOC 推定の有用性検証実験 シミュレーションと同様に Fig.4 の回路を製作して本論文で提案する SOC 推定法の有用性を検証する実験を行った。ただし、入力電源はインバータを通した後の交流電源とした。また、給電対象の電池として 18650 充電式リチウムイオン電池(GOODGOODS)を用いた。実験の様子を Fig.7 に示す。シミュレーションと同様に結合係数を 0.5 に固定するため、コイル間距離を 3.2 cm に固定した。

〈5・3〉シミュレーションと実験の結果の比較 シミュレーションと実験によって得られた一次側の入力電流と電池間電圧から得られた電池の充電率(SOC)との関係を Fig.8



(a) CV mode



(b) CC mode

図8 シミュレーションと実験との比較

Fig.8 Comparison between simulation and experiment

に示す。シミュレーションと実験の結果より、電池の SOC を入力電流の関数で表すことが可能であることが確認できた。現段階でも SOC が 100% のときは誤差が小さいため、過充電の防止や充電終了判断のための SOC 推定は可能であると考えられる。本論文では、提案した SOC 推定法の応用先としてロボット給電システムに限定した。しかし将来的にはロボットやドローン、IoT 機器への給電にも応用できると考えられる。

6. まとめ

本論文では、トリリオンセンサ社会の課題に対する解決策として「ロボット給電システム」を提案した。またロボット給電システムで用いる回路方式として LCL-S 方式を提案した。さらに、LCL-S 方式における電池の SOC 推定方法として一次側の入力電流の変化を用いる方法を提案し、シミュレーションと実験を行った。その結果、電池の電圧変化に依存して一次側の入力電流が変化することがわかり、電池電圧つまり電池の SOC を一次側入力電流の関数として表すことができた。これにより LCL-S 方式において一次側および二次側の素子値が既知である場合に、一次側入力電流の

みを用いることによって、給電対象であるリチウムイオン電池の SOC 推定が可能であると考えられる。

今後の課題としてはリチウムイオン電池の内部抵抗を考慮に入れることが挙げられる。リチウムイオン電池の内部抵抗は電池間電圧や温度によって変化する⁽⁶⁾。そのため、内部抵抗の変化を関数として表し SOC 推定の式に入れ込む必要があると考えられる。

文 献

- (1) 居村岳広, “磁界共鳴によるワイヤレス電力伝送”, 森北出版株式会社(2017)
- (2) NEDO (2021) 『技術戦略研究レポート TSC Foresight Vol.102』, [URL:https://www.nedo.go.jp/content/100926429.pdf](https://www.nedo.go.jp/content/100926429.pdf) (参照日: 2022 年 1 月 5 日)
- (3) Sousuke Nakamura, Taito Suzuki, Yoshinori Kakinuma, Seiya Saruwatari, Koudai Yamamoto, Kazuhiro Arai, Keita Akiho, Hideki Hashimoto, “Prototype system for energy management of mobile device via wireless charging robot”, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM), pp.727-732(2016)
- (4) 橋本秀樹, “ロボットシステムによる持続可能な社会の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol.36, No.1, pp.13-18 (2018)
- (5) Ravikiran Vaka, Ritesh Kumar Keshri, “Reconfigurable WPT system for load-independent CC and CV output with transmitting-side control”, IET Electric Power Applications, Vol. 14 Iss. 4, pp.685-694(2020)
- (6) 乾義尚, 渡瀬祐樹, 花本武史, 綾部泰, “円筒形リチウムイオン二次電池内温度・電流分布の簡易発熱モデルを用いた 2 次元解析”, IEEJ Trans. PE, Vol.124, No.8 (2004)