

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2018年5月11日(11.05.2018)



(10) 国際公開番号

WO 2018/083932 A1

(51) 国際特許分類:

G01R 31/36 (2006.01) H02J 7/00 (2006.01)
H01M 10/48 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2017/036038

(22) 国際出願日: 2017年10月3日(03.10.2017)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:

特願 2016-215476 2016年11月2日(02.11.2016) JP

(71) 出願人: カルソニックカンセイ株式会社 (CALSONIC KANSEI CORPORATION) [JP/JP]; 〒3318501 埼玉県さいたま市北区日進町二丁目1917番地 Saitama (JP), 学校法人慶應義塾 (KEIO UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒1088345 東京都港区三田2丁目15番45号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 長村 謙介 (OSAMURA Kensuke); 〒3318501 埼玉県さいたま市北区日進町二丁目1917番地 カルソニックカン

セイ株式会社内 Saitama (JP), 足立 修一 (ADACHI Shuichi); 〒2238522 神奈川県横浜市港北区日吉3丁目14番1号 慶應義塾大学 理工学部内 Kanagawa (JP), 八田羽 謙一 (HATTAHA Kenichi); 〒2238522 神奈川県横浜市港北区日吉3丁目14番1号 慶應義塾大学 理工学部内 Kanagawa (JP), 川口 貴弘 (KAWAGUCHI Takahiro); 〒2238522 神奈川県横浜市港北区日吉3丁目14番1号 慶應義塾大学 理工学部内 Kanagawa (JP), 井上 正樹 (INOUE Masaki); 〒2238522 神奈川県横浜市港北区日吉3丁目14番1号 慶應義塾大学 理工学部内 Kanagawa (JP).

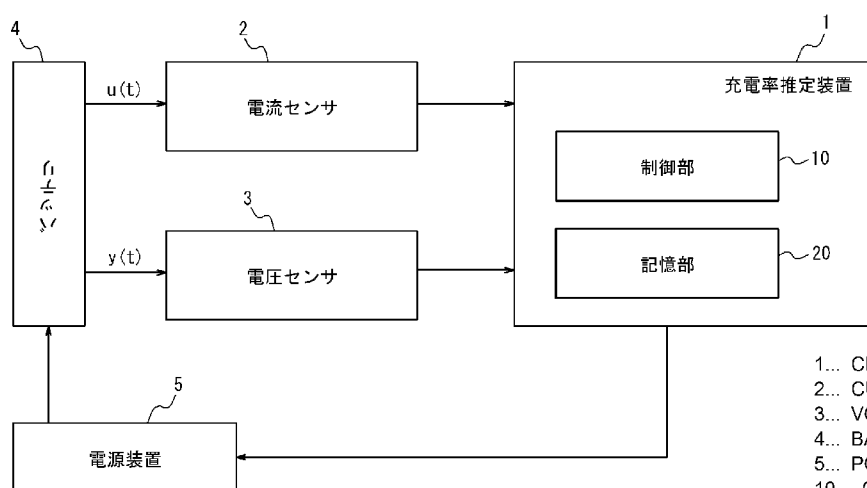
(74) 代理人: 杉村 憲司 (SUGIMURA Kenji); 〒1000013 東京都千代田区霞が関三丁目2番1号 霞が関コモンゲート西館36階 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,

(54) Title: CHARGING RATE ESTIMATION DEVICE AND CHARGING RATE ESTIMATION METHOD

(54) 発明の名称: 充電率推定装置及び充電率推定方法

[図1]



1... CHARGING RATE ESTIMATION DEVICE
2... CURRENT SENSOR
3... VOLTAGE SENSOR
4... BATTERY
5... POWER SUPPLY DEVICE
10... CONTROL UNIT
20... STORAGE UNIT

(57) Abstract: This charging rate estimation device (1) uses an observer based on a model of a battery (4) to estimate the charging rate of the battery (4). The model includes a hysteresis characteristic.

(57) 要約: 充電率推定装置 (1) は、バッテリー (4) のモデルに基づくオブザーバを用いて、バッテリー (4) の充電率を推定し、モデルは、ヒステリシス特性を含む。

[続葉有]

DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第21条(3))

明 細 書

発明の名称：充電率推定装置及び充電率推定方法

関連出願へのクロスリファレンス

[0001] 本出願は、日本国特許出願 2016-215476 号（2016 年 11 月 2 日出願）の優先権を主張するものであり、当該出願の開示全体を、ここに参照のために取り込む。

技術分野

[0002] 本発明は、充電率推定装置及び充電率推定方法に関する。

背景技術

[0003] バッテリーの充電率と開回路電圧との間の関係にヒステリシスを有するバッテリーの充電率を推定する装置が知られている（例えば特許文献 1 等）。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献 1：特開 2016-90322 号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] バッテリーの充電率は、バッテリーモデルに基づいて推定されうる。バッテリーの充電率と開回路電圧との間の関係にヒステリシスを有するバッテリーにおいて、バッテリーモデルを表すパラメータは変化しやすい。バッテリーモデルを表すパラメータの変化によるパラメータの誤差は、バッテリーの充電率の推定精度を低下させうる。

[0006] かかる事情に鑑みてなされた本発明の目的は、バッテリーの充電率の推定精度を向上させることができる充電率推定装置及び充電率推定方法を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0007] 上記課題を解決するために、第 1 の観点に係る充電率推定装置は、バッテ

りのモデルに基づくオブザーバを用いて、前記バッテリーの充電率を推定する。
前記モデルは、ヒステリシス特性を含む。

[0008] 上記課題を解決するために、第2の観点に係る充電率推定方法は、バッテリーのモデルに基づくオブザーバを用いて、前記バッテリーの充電率を推定するステップを含む。前記モデルは、ヒステリシス特性を含む。

発明の効果

[0009] 第1の観点に係る充電率推定装置によれば、バッテリーの充電率の推定精度が向上されうる。

[0010] 第2の観点に係る充電率推定方法によれば、バッテリーの充電率の推定精度が向上されうる。

図面の簡単な説明

[0011] [図1]充電率推定装置の概略構成例を示す機能ブロック図である。

[図2]バッテリー等価回路の一例を示す図である。

[図3A] n 次のフォスタ型のRC梯子回路である。

[図3B] n 次のカウエル型のRC梯子回路である。

[図4]SOC-OCV特性の一例を示す図である。

[図5]ヒステリシスを有するSOC-OCV特性の一例を示す図である。

[図6]ヒステリシス電圧を含むバッテリー等価回路の例を示す図である。

[図7]図6のワールブルグインピーダンスをフォスタ型RC梯子回路に置き換えたバッテリー等価回路の例を示す図である。

[図8]充電率推定方法の一例を示すフローチャートである。

[図9]バッテリー等価回路に対する入力電流の一例を示すグラフである。

[図10]バッテリーのSOCの推定結果の一例を示すグラフである。

[図11]バッテリーのSOCの推定誤差の一例を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0012] 本開示の一実施形態に係る充電率推定装置は、電気自動車又はハイブリッド電気自動車などの車両に搭載されてよい。充電率推定装置は、車両のバッテリーの充電率を推定してよい。車両には、車両を駆動する電気モータ、バッ

テリ、これらのコントローラなどが搭載される。バッテリーは、放電して電気モータへ電力を供給したり、制動時に電気モータから回生充電したり、地上充電設備から充電したりする。充電率推定装置は、バッテリーに流れる充放電電流とバッテリーの端子電圧とに基づいて、バッテリーの充電率を推定してよい。

[0013] [機能ブロック]

図 1 に示されるように、充電率推定装置 1 は、電流センサ 2 及び電圧センサ 3 を介してバッテリー 4 に接続される。充電率推定装置 1 は、電流センサ 2 又は電圧センサ 3 を含んでよい。充電率推定装置 1 は、電源装置 5 に接続されてよい。充電率推定装置 1 は、電源装置 5 からバッテリー 4 に対して充放電電流を入力してよい。電源装置 5 は、例えば電流源であってよい。充電率推定装置 1 は、電源装置 5 を含んでよい。

[0014] 電流センサ 2 は、バッテリー 4 に対する充放電電流を検出する。本実施形態において、充放電電流は、時刻 (t) の関数である $u(t)$ で表されると仮定する。電流センサ 2 は、検出した充放電電流を充電率推定装置 1 に対して出力する。

[0015] 電圧センサ 3 は、バッテリー 4 の端子電圧を検出する。本実施形態において、端子電圧は、時刻 (t) の関数である $y(t)$ で表されると仮定する。電圧センサ 3 は、検出した端子電圧を充電率推定装置 1 に対して出力する。

[0016] バッテリー 4 は、例えば二次電池であってよい。二次電池は、リチャージャブル・バッテリーともいう。バッテリー 4 は、本実施形態においてリチウム・イオン・バッテリーであると仮定する。バッテリー 4 は、他の種類のバッテリーであってよい。

[0017] 充電率推定装置 1 は、制御部 10 と、記憶部 20 とを備える。制御部 10 は、充電率推定装置 1 の各構成部を制御する。制御部 10 は、例えばプロセッサ又はマイクロコンピュータ等で構成されてよい。記憶部 20 は、例えば半導体メモリ又は磁気記憶装置等で構成されてよい。制御部 10 は、充電率推定装置 1 で取り扱われるデータ又は情報等を記憶部 20 に格納してよい。

[0018] 制御部 10 は、電流センサ 2 及び電圧センサ 3 から、バッテリー 4 の充放電電流及び端子電圧をそれぞれ取得する。制御部 10 は、バッテリー 4 の充放電電流及び端子電圧に基づいて、バッテリー 4 の内部状態を推定してよい。

[0019] バッテリー 4 の内部状態は、バッテリー 4 の開回路電圧と、バッテリー 4 の内部で発生する過電圧とをパラメータとして含むモデルによって表されうる。開回路電圧は、OCV (Open Circuit Voltage) ともいう。OCV は、バッテリー 4 の電気化学的平衡状態における電極間の電位差である。OCV は、バッテリー 4 に充放電電流が流れない場合のバッテリー 4 の端子電圧に対応する。過電圧は、内部インピーダンスで生じる電圧降下の大きさに対応する。内部インピーダンスは、バッテリー 4 の内部の電気化学反応の反応速度に応じて決定される。

[0020] バッテリー 4 の内部状態を表すモデルは、図 2 で示されるようなバッテリー等価回路で近似されうる。バッテリー等価回路で近似されたモデルは、バッテリーモデルともいう。バッテリー等価回路の入力は、バッテリー 4 に流れる充放電電流に対応し、 $u(t)$ として示される。図 2 において $u(t)$ が付された矢印は、バッテリー 4 を充電する電流の向きを表す。バッテリー 4 を充電する電流が流れる場合、 $u(t)$ は正の値となると仮定する。バッテリー 4 から放電電流が流れる場合、 $u(t)$ は負の値となると仮定する。バッテリー等価回路の出力は、バッテリー 4 の端子電圧に対応し、 $y(t)$ として示される。図 2 において $y(t)$ が付された矢印の先端側の端子は、バッテリー 4 の正極端子に対応すると仮定する。

[0021] バッテリー 4 の OCV は、バッテリー等価回路において電圧源 201 で表される。電圧源 201 が出力する電圧は、時刻の関数である $OCV(t)$ で表される。 $OCV(t)$ は、バッテリー 4 に充放電電流が流れない場合のバッテリー 4 の端子電圧に対応する。バッテリー 4 に充放電電流が流れない場合は、 $u(t) = 0$ である場合ともいえる。 $u(t) = 0$ である場合、 $OCV(t) = y(t)$ が成立する。

[0022] 図 2 のバッテリー等価回路において、バッテリー 4 の内部インピーダンスは、

R_0 で示される抵抗と、 $Z_w(p)$ で示されるワールブルグインピーダンスとを直列に接続した回路として表される。 R_0 で示される抵抗は、バッテリー4の電解液内での泳動過程等に起因する抵抗を表す。ワールブルグインピーダンスは、バッテリー4内のイオンの拡散過程等に起因するインピーダンスを表す。バッテリー4の過電圧は、バッテリー等価回路に流れる電流によってバッテリー4の内部インピーダンスで発生する電圧降下として表される。

[0023] ワールブルグインピーダンスは、例えば図3Aに示される、 $R_1 \sim R_n$ として示される抵抗と $C_1 \sim C_n$ として示されるコンデンサとの並列回路が直列に n 個接続された n 次フォスタ型回路として表されてよい。ワールブルグインピーダンスは、例えば図3Bに示される、直列に接続された n 個のコンデンサ($C_1 \sim C_n$)の間に、 $R_1 \sim R_n$ として示される n 個の抵抗のそれぞれが並列に接続された n 次カウエル型回路として表されてよい。ワールブルグインピーダンスは、他の線形伝達関数モデルを用いて表されてもよい。

[0024] バッテリー4を近似するバッテリー等価回路のパラメータは、ワールブルグインピーダンスを構成する抵抗の抵抗値と、コンデンサの容量とを含む。バッテリー等価回路のパラメータは、予め設定されてよい。バッテリーモデルのパラメータは、制御部10で保持されてよいし、記憶部20に格納されてよい。

[0025] 制御部10は、バッテリー等価回路のパラメータと、バッテリー4に流れる充放電電流と、バッテリー4の端子電圧とに基づいて、バッテリー4の内部状態を推定する。本実施形態において、制御部10は、バッテリー4の内部状態として、バッテリー4の充電率及び過電圧を推定する。バッテリー4の充電率は、バッテリー4の充電容量に対する充電量の比である。充電率は、SOC (State of Charge) ともいう。制御部10は、バッテリー4の内部インピーダンスを構成する抵抗の抵抗値及びコンデンサの容量を推定しないと仮定する。制御部10は、内部インピーダンスに含まれる抵抗値及び容量を推定しない構成に限られない。制御部10は、内部インピーダンスに含まれる抵抗値及び容量を推定するように構成されてよい。

[0026] 制御部10は、バッテリー4のOCV及び過電圧を推定してよい。この場合

、制御部10は、バッテリー4のOCVに基づいて、バッテリー4のSOCを推定しうる。

[0027] バッテリー4のOCVは、SOCの関数として表されうる。SOCとOCVとの間の関係は、SOC-OCV特性といわれる。SOC-OCV特性は、例えば図4に示されるグラフで表されうる。図4の横軸及び縦軸はそれぞれ、SOC及びOCVを示す。SOC-OCV特性は、予め実験等によって求められうる。制御部10は、バッテリー4のSOC-OCV特性と、バッテリー4のSOCの推定値とに基づいて、バッテリー4のOCVを推定しうる。

[0028] [ヒステリシス特性]

SOC-OCV特性は、ヒステリシス特性を有することがある。ヒステリシス特性を有するSOC-OCV特性は、充電時の特性と放電時の特性とが異なる。ヒステリシス特性を有するSOC-OCV特性は、例えば図5のように示される。図5の横軸及び縦軸はそれぞれ、SOC及びOCVを示す。図5では、バッテリー4の充電時のSOC-OCV特性を示す充電SOC-OCV特性501は、破線で示される。バッテリー4の放電時のSOC-OCV特性を示す放電SOC-OCV特性502は、一点鎖線で示される。

[0029] 充電SOC-OCV特性501及び放電SOC-OCV特性502は、SOC-OCV特性のループを形成する。充電SOC-OCV特性501及び放電SOC-OCV特性502によって形成されるSOC-OCV特性のループは、メジャーループともいう。メジャーループは、バッテリー4に対する充放電の実験によって取得されうる。

[0030] バッテリー4は、SOCが0%となるまで放電した後に充電されるとは限らない。例えば、バッテリー4は、図5のA点まで放電した後に充電されることによって、A点からB点に至る経路で示されるSOC-OCV特性を示しうる。バッテリー4は、SOCが100%となるまで充電された後に放電することによって、C点からD点に至る経路で示されるSOC-OCV特性を示しうる。例えば、A点、B点、C点、D点及びA点の順に結ばれる経路で

示される、メジャーループよりも小さいSOC-OCV特性のループは、マイナーループともいう。マイナーループは、メジャーループとは異なり、事実上無限に存在しうる。マイナーループは、メジャーループと比較して、事前の実験によって取得されにくい。

[0031] 図5において実線で示されるSOC-OCV特性500は、充電SOC-OCV特性501と放電SOC-OCV特性502との平均値に対応する。SOC-OCV特性500は、充電SOC-OCV特性501と放電SOC-OCV特性502との平均値に限られない。SOC-OCV特性500は、充電SOC-OCV特性501と放電SOC-OCV特性502との間に含まれるグラフであってよい。

[0032] SOC-OCV特性500と、メジャーループとの間のOCVの差は、ヒステリシス電圧ともいう。ヒステリシス電圧は、 $h(t)$ と表されると仮定する。ヒステリシスを有するSOC-OCV特性は、事実上無限に存在しうるマイナーループで表される代わりに、ヒステリシス電圧を含む、次の式(1)で表されうる。

[数1]

$$OCV(t) = f_{OCV}(SOC(t)) + h(t) \quad (1)$$

$f_{OCV}(\cdot)$ は、SOC-OCV特性500を表す関数である。

[0033] SOC-OCV特性が式(1)のように表されることで、制御部10がバッテリー4の内部状態を推定する際に $h(t)$ をあわせて推定することによって、SOCとOCVとの間の変換の精度が高められうる。SOC-OCV特性が式(1)のように表される場合、バッテリー等価回路は、図6のように表される。図6のバッテリー等価回路は、ヒステリシス電圧を表す $h(t)$ が追加された点、及び、電圧源201の出力電圧が $f_{OCV}(SOC(t))$ と表される点で、図2のバッテリー等価回路と異なる。

[0034] 本実施形態では、ワールブルグインピーダンスは、図3Aに示されるフォスタ型回路で表されると仮定する。この場合、バッテリー等価回路は、図7のように表される。図7のバッテリー等価回路は、 $Z_w(p)$ がフォスタ型回路に

置き換えられた点で、図6のバッテリー等価回路と異なる。 $v_k(t)$ は、 C_k として示される容量で生じる電圧降下を表す。 k は、 $1 \sim n$ の整数である。

[0035] ヒステリシス現象を表すモデルの一つであるPlettによるヒステリシスモデルによれば、 $h(t)$ の挙動は、次の式(2)によって表される。

[数2]

$$\dot{h}(t) = -\gamma|u(t)|h(t) + \gamma mu(t) \quad (2)$$

γ は、ヒステリシスモデルの電圧降下の速さを表す。 m は、ヒステリシス電圧の最大値を表す。Plettによるヒステリシスモデルについては、例えば、以下の文献が参照されうる。

G. L. Plett: "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 2. Modeling and identification", Journal of Power Sources 134 (2004) 262-276

[0036] 時刻(t)におけるバッテリー4のSOC(t)は、以下の式(3)によって算出されうる。 t_0 は、測定開始時刻を表す。式(3)の右辺第2項の積分は、充放電電流を積算して算出される、バッテリー4に出入りする電荷量を表す。

[数3]

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{FCC} \int_{t_0}^t u(\tau) d\tau \quad (3)$$

[0037] 過電圧は、バッテリー4の内部インピーダンスと、バッテリー4の充放電電流とに基づいて、以下の式(4)のように表される。

[数4]

$$\eta(t) = G_\eta(p)u(t) \quad (4)$$

$\eta(t)$ は、過電圧を表す。 $G_\eta(p)$ は、内部インピーダンスを表し、 R_0 と $Z_w(p)$ との和である。

[0038] ワールブルグインピーダンスがフォスタ型回路である場合、 $Z_w(p)$ は、以下の式(5)のように表される。

[数5]

$$Z_w(p) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{pC_k R_k + 1} \quad (5)$$

ただし、

[数6]

$$R_k = \frac{8R_d}{(2k-1)^2 \pi^2}, \quad C_k = \frac{C_d}{2} \quad (6)$$

である。R_dは、拡散抵抗を表す。C_dは、拡散容量を表す。

[0039] 図7のバッテリー等価回路の出力に対応するy(t)は、次の式(7)で表される。

[数7]

$$y(t) = f_{ocv}(SOC(t)) + h(t) + G_\eta(p)u(t) \quad (7)$$

[0040] 図7のバッテリー等価回路で表されるバッテリーモデルは、充放電電流を入力とし、端子電圧を出力とする、入出力システムによって表される。入出力システムは、単にシステムともいう。入出力システムは、次の式(8)及び(9)によって示される状態空間として表されうる。

[数8]

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(u(t)) \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{b} \cdot u(t) \quad (8)$$

$$y(t) = f_{ocv}(SOC(t)) + \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x}(t) + R_0 u(t) \quad (9)$$

[0041] 状態空間は、システムの状態変数を座標軸として表される空間である。式(8)は、入力と状態変数との関係を表す状態方程式である。式(9)は、状態変数と出力との関係を表す出力方程式である。

[0042] 式(8)のA(u(t))は、実数空間の(n+2)×(n+2)次の行列であり、以下の式(10)で表される。diagは、対角行列を出力する関数である。

[数9]

$$\mathbf{A}(u(t)) = \text{diag} \left(0, -\frac{1}{C_1 R_1}, \dots, -\frac{1}{C_n R_n}, -\gamma |u(t)| \right) \quad (10)$$

$A(u(t))$ は、システム行列ともいう。システム行列は、システムの特
性の少なくとも一部を表す。式(8)のシステム行列は、システムへの入力
を示す $u(t)$ に依存する。よって、式(8)及び(9)で表されるシステ
ムは、パラメータ可変システムであるともいえる。パラメータ可変システ
ムは、P V (Parameter Varying) システムともいう。言い換えれば、図7のバ
ッテリーモデルで表されるバッテリー4のモデルは、P V システムによって表さ
れうる。

[0043] 式(8)の b 及び式(9)の c はそれぞれ、実数空間の $(n+2)$ 次の列
ベクトルを表し、以下の式(11)及び(12)で表される。 T は、転置行
列を表す。

[数10]

$$b = \left[\frac{1}{FCC} \quad \frac{1}{C_1} \quad \cdots \quad \frac{1}{C_n} \quad \gamma m \right]^T \quad (11)$$

$$c = [0 \quad 1 \quad \cdots \quad 1]^T \quad (12)$$

[0044] 式(8)及び(9)の $x(t)$ は、状態変数であり、以下の式(13)で
表される。

[数11]

$$x(t) = [SOC(t) \quad v_1(t) \quad \cdots \quad v_n(t) \quad h(t)]^T \quad (13)$$

[0045] [システムの内部状態推定]

本実施形態に係る充電率推定装置1は、バッテリー4のモデルを表すP Vシ
ステムにおいて、状態変数を推定することによって、バッテリー4の内部状態
を推定しうる。制御部10は、電流センサ2から取得した充放電電流をバッ
テリー4のモデルに入力し、端子電圧の推定値を算出する。制御部10は、端
子電圧の推定値と実際の端子電圧との差を、バッテリー4のモデルにフィード
バックし、バッテリー4のSOCを逐次推定する。

[0046] 本実施形態において、バッテリー4のモデルを表すP Vシステムは、線形パ
ラメータ可変システムであると仮定する。線形パラメータ可変システムは、
L P V (Linear Parameter Varying) システムともいう。L P V システムに

関する以下の説明は、バッテリー 4 のモデルを表すシステムに限定されるものではない。

[0047] LPVシステムは、以下の式(14)～(18)に示される状態空間として表されうる。式(16)～(18)に示されるように、システム行列としてのAは、ポリトープ形式で表されうる。ポリトープ形式は、関数を一次結合で表す形式である。一次結合は、線形結合ともいう。

[数12]

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}(t))\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (14)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (15)$$

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}(t)) = \sum_{i=1}^L \theta_i \mathbf{A}_i \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \left\{ [\theta_1 \ \theta_2 \ \cdots \ \theta_L] : \sum_{i=1}^L \theta_i = 1, \ \theta_i \geq 0 \right\} \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\theta}(t) \in \boldsymbol{\theta} \quad \forall t \geq 0 \quad (18)$$

[0048] 式(14)は、システムへの入力とシステムの内部状態を表す状態変数との関係を表す状態方程式である。式(15)は、状態変数とシステムからの出力との関係を表す出力方程式である。 $\mathbf{x}(t)$ は、実数空間のn次の列ベクトルであり、状態変数を表す。 $\mathbf{u}(t)$ は、実数空間の n_u 次の列ベクトルであり、システムへの入力を表す。 $\mathbf{y}(t)$ は、実数空間の n_y 次の列ベクトルであり、システムからの出力を表す。n、 n_u 及び n_y はそれぞれ、状態、入力及び出力の信号のサイズに応じて設定される。 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}(t))$ 、B及びCとして表される行列のサイズは、各信号のサイズに応じて設定される。

[0049] 式(14)及び(15)で表されるシステムへの入力である $\mathbf{u}(t)$ は、ベクトルであり、太字で表記される。式(8)及び(9)で表されるシステムへの入力である $u(t)$ は、スカラーであり、細字で表記される。以下、発明の詳細な説明の文中で区別するために、ベクトルを表す $\mathbf{u}(t)$ は、以下 $\mathbf{u} \rightarrow(t)$ と表す。 $\mathbf{x}(t)$ 及び $\mathbf{y}(t)$ についても同様に、ベクトルを表す $\mathbf{x}(t)$ 及び $\mathbf{y}(t)$ はそれぞれ、以下 $\mathbf{x} \rightarrow(t)$ 及び $\mathbf{y} \rightarrow(t)$ と表

す。

[0050] 式(14)～(18)で表されるLPVシステムにおいて、正数である a 及び ρ に対して正定値行列 X が存在し、以下の式(19)で示される線形行列不等式が成り立つと仮定する。線形行列不等式は、LMI (Linear Matrix Inequality) ともいう。正定値行列は、正定行列ともいう。

[数13]

$$\begin{bmatrix} X(A_i - aI) + (A_i - aI)^T X & XB & C^T \\ B^T X & -\rho^2 I & 0 \\ C & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad \forall i \in \{1, \dots, L\} \quad (19)$$

式(19)で、 I は単位行列を表す。

[0051] 式(19)で示されるLMIが成り立つ場合、式(14)～(18)で表されるLPVシステムにおける自由応答及び入出力応答は、以下の式(20)及び(21)を満たす。

[数14]

$$\|x(t)\| \leq b \|x(0)\| \exp(-at), \quad b > 0, \quad \forall t \geq 0 \quad (20)$$

$$\|y\|_2 < \rho \|u\|_2, \quad \forall u \in L_2 \quad (21)$$

$\|\cdot\|$ で示される記号は、ノルムを表す。信号のノルムは、信号の大きさを表す。例えば $\|x(t)\|$ は、 $x(t)$ の大きさを表す。 $\|\cdot\|_2$ で示される記号は、 L_2 ノルムを表す。 L_2 ノルムは、信号に含まれる成分を二乗平均した値の平方根として算出される。 L_2 ノルムは、ノルムの一種である。式(21)で L_2 と表される記号は、 L_2 空間を示す。式(21)で、 $u \rightarrow$ は、 L_2 空間の元である。

[0052] 式(19)が成り立つ場合に式(20)及び(21)が満たされることは、定理として与えられる。式(19)～(21)で示される定理は、第1定理ともいう。

[0053] 本実施形態に係る充電率推定装置1は、システムの状態変数及びシステムからの出力を推定する。推定値と真値との間には、誤差が発生しうる。推定値と真値との間に生じる誤差は、推定誤差ともいう。システムの入力には、

外乱が加わりうる。入力に加わった外乱によって、状態変数及び出力の推定誤差が大きくなりうる。

[0054] システムの入力に外乱が加わる場合、システムが以下の式（22）～（24）で表されると仮定する。

[数15]

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\theta(t))\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{w}(t) \quad (22)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (23)$$

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{C}_2\mathbf{x}(t) \quad (24)$$

[0055] $\mathbf{x} \rightarrow (t)$ 、 $\mathbf{u} \rightarrow (t)$ 及び $\mathbf{y} \rightarrow (t)$ はそれぞれ、式（14）及び（15）と同様に、システムの状態変数、システムへの入力及びシステムからの出力を表す。 $\mathbf{z}(t)$ は、実数空間の n_z 次の列ベクトルであり、システムの評価出力を表す。システムの評価出力は、システムからの出力のうち、特に注目して評価する対象となる出力を含む。評価は、外乱抑制性能又は即応性等について実行されてよい。ベクトルを表す $\mathbf{z}(t)$ は、以下 $\mathbf{z} \rightarrow (t)$ と表す。 $\mathbf{w}(t)$ は、実数空間の n_w 次の列ベクトルであり、システムへの入力に加わる外乱を表す。ベクトルを表す $\mathbf{w}(t)$ は、以下 $\mathbf{w} \rightarrow (t)$ と表す。 n_z 及び n_w はそれぞれ、評価出力及び外乱の信号のサイズに応じて設定される。 $\mathbf{A}(\theta(t))$ は、式（16）～（18）で与えられる。 $\mathbf{B}_1$ 、 $\mathbf{B}_2$ 、 $\mathbf{C}_1$ 、 $\mathbf{C}_2$ 及び $\mathbf{D}$ として表される係数行列のサイズは、状態変数、入力、出力、評価出力及び外乱の信号のサイズに応じて設定される。

[0056] 式（22）は、外乱が加わったシステムへの入力とシステムの内部状態を表す状態変数との関係を表す状態方程式である。式（23）は、状態変数及びシステムへの入力とシステムからの出力との関係を表す出力方程式である。式（24）は、状態変数とシステムの評価出力との関係を表す評価出力方程式である。

[0057] 式（22）～（24）において、状態変数、出力及び評価出力をそれぞれ推定値に置き換えることで、式（25）～（27）が導かれる。状態変数、出力及び評価出力の推定値はそれぞれ、 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$ 及び $\mathbf{z}$ の上に記号 $\hat{}$ を付して

表される。

[数16]

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}(t))\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}(t) \quad (25)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{C}_1 \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t) \quad (26)$$

$$\hat{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{C}_2 \hat{\mathbf{x}}(t) \quad (27)$$

以下、 $\mathbf{x} \rightarrow (t)$ 、 $\mathbf{y} \rightarrow (t)$ 及び $\mathbf{z} \rightarrow (t)$ の上に記号 $\hat{}$ を付した項は、 $\mathbf{x} \rightarrow \hat{}(t)$ 、 $\mathbf{y} \rightarrow \hat{}(t)$ 及び $\mathbf{z} \rightarrow \hat{}(t)$ とも表す。

[0058] 状態変数の推定誤差は、以下の式 (28) で表される。状態変数の推定誤差は、 $\mathbf{x} \rightarrow (t)$ の上に記号 $\tilde{}$ を付して表される。

[数17]

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t) \quad (28)$$

以下、 $\mathbf{x} \rightarrow (t)$ の上に記号 $\tilde{}$ を付した項は、 $\mathbf{x} \rightarrow \tilde{}(t)$ とも表す。

[0059] 式 (28) の両辺を時刻 (t) で微分した式に、式 (22) 及び (25) を適用することによって、以下の式 (29) が導かれる。

[数18]

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \dot{\mathbf{x}}(t) - \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}(t))(\mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}(t))\tilde{\mathbf{x}}(t) \quad (29)$$

[0060] 式 (29) において、 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}(t))$ が安定である場合、状態変数の推定誤差は、時刻の経過に応じて収束しうる。言い換えれば、システム行列が安定であるか否かに応じて、推定誤差が収束するか否かが決定されうる。

[0061] 状態変数、出力及び評価出力の推定値を含む式として、式 (25) の代わりに、以下の式 (30) が仮定されうる。

[数19]

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}(t))\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}(t) + \mathbf{L}(\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t)) \quad (30)$$

[0062] 式 (30) の右辺第3項は、出力の推定誤差が状態方程式にフィードバックされることを表す。式 (30) の右辺第3項に式 (23) 及び (26) を適用することで、以下の式 (31) が導かれる。

[数20]

$$\mathbf{L}(\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t)) = \mathbf{L}\mathbf{C}_1(\mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)) \quad (31)$$

[0063] 式(28)の両辺を時刻(t)で微分した式に、式(22)、(30)及び(31)を適用することによって、以下の式(32)が導かれる。

[数21]

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) &= \dot{\mathbf{x}}(t) - \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) \\ &= \mathbf{A}(\theta(t))(\mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)) - \mathbf{L}\mathbf{C}_1(\mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)) + \mathbf{B}_2\mathbf{w}(t) \\ &= [\mathbf{A}(\theta(t)) - \mathbf{L}\mathbf{C}_1](\mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)) + \mathbf{B}_2\mathbf{w}(t) \\ &= [\mathbf{A}(\theta(t)) - \mathbf{L}\mathbf{C}_1]\tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{w}(t) \end{aligned} \quad (32)$$

[0064] 式(32)において、 $\mathbf{A}(\theta(t)) - \mathbf{L}\mathbf{C}$ が安定となるように、 $\mathbf{L}$ が設定されうる。言い換えれば、システム行列が安定であるか否かにかかわらず、推定誤差が収束するような $\mathbf{L}$ が設定されうる。

[0065] 式(30)、(26)及び(27)で構成される式は、システムに対するオブザーバともいう。オブザーバは、状態推定器ともいう。オブザーバは、状態変数の少なくとも一部を直接観測できない場合に、入力と出力とに基づいて、直接観測できない状態変数を推定する機構のことをいう。モデルを表すシステムに対するオブザーバは、モデルに基づくオブザーバともいう。式(30)の $\mathbf{L}$ は、オブザーバゲインともいう。 $\mathbf{L}$ を設定又は決定することは、オブザーバゲインの設計ともいう。

[0066] 式(22)～(24)、並びに、式(30)、(26)及び(27)に基づいて、状態変数、出力及び評価出力の推定誤差はそれぞれ、以下の式(33)～(35)で表される。出力及び評価出力の推定誤差はそれぞれ、 y 及び z の上に記号 $\sim$ を付して表される。以下、 y 及び z の上に記号 $\sim$ を付した項は、 $y\sim$ 及び $z\sim$ とも表す。

[数22]

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = [\mathbf{A}(\theta(t)) - \mathbf{L}\mathbf{C}_1]\tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{w}(t) \quad (33)$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{y}}}(t) = \mathbf{C}_1\tilde{\mathbf{x}}(t) \quad (34)$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{z}}}(t) = \mathbf{C}_2\tilde{\mathbf{x}}(t) \quad (35)$$

[0067] 式(33)～(35)に示される、状態変数、出力及び評価出力の推定誤差の関係は、偏差系ともいう。オブザーバゲインは、システムの初期状態で存在する状態変数の推定誤差の減衰の速度を示す減衰度性能、又は、評価出力の推定誤差に対する外乱の影響を低減させる性能を有するように設計される。

[0068] オブザーバゲインは、種々の方法で設計される。例えば、正数である a 及び ρ に対して、正定値行列 X と行列 Y とが存在し、以下の式(36)で示される LMI が成立すると仮定する。

[数23]

$$\begin{bmatrix} \Xi_i + \Xi_i^T & XB_2 & C_2 \\ B_2^T X & -\rho^2 I & 0 \\ C_2^T & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad \Xi_i = X(A_i - aI) - YC_2, \quad \forall i \in \{1, \dots, L\} \quad (36)$$

[0069] オブザーバゲインが以下の式(37)に基づいて設計されると仮定する。

[数24]

$$L = X^{-1}Y \quad (37)$$

[0070] 式(36)で示される LMI が成立し、且つ、オブザーバゲインが式(37)に基づいて設計される場合、式(33)～(35)で示される偏差系に対する自由応答は、以下の式(38)を満たす。

[数25]

$$\|\tilde{x}(t)\| \leq b \|\tilde{x}(0)\| \exp(-at), \quad b > 0, \quad \forall t \geq 0 \quad (38)$$

システムの初期状態は、時刻 (t) が 0 である場合のシステムの状態である。 $\tilde{x}(0)$ は、システムの初期状態で存在する状態変数の推定誤差を表す。システムの初期状態で存在する状態変数の推定誤差は、状態推定値の初期値誤差ともいう。 a は、状態推定値の初期値誤差が減衰する速度を表し、減衰度ともいう。 b は、適宜定められうる係数である。式(38)は、状態変数の推定誤差の大きさが所定の速度以下で減衰しうること示す。

[0071] 式(36)で示される LMI が成立し、且つ、オブザーバゲインが式(37)に基づいて設計される場合、式(33)～(35)で示される偏差系に

対する入出力応答は、以下の式（３９）を満たす。

[数26]

$$\|\tilde{z}\|_2 < \rho \|\mathbf{w}\|_2 \quad (39)$$

ρ は、適宜定められうる係数であり、評価出力が外乱から受ける影響の度合いを示す。式（３９）は、評価出力が外乱に対して所定の比率未満に低減されうることを示す。

[0072] 式（３６）が成立し、且つ、オブザーバゲインが式（３７）に基づいて設計される場合に式（３８）及び（３９）が満たされることは、第１定理に基づいて導かれる定理として与えられる。式（３６）～（３９）で示される定理は、第２定理ともいう。

[0073] [バッテリーモデルに対するオブザーバの設計]

本実施形態に係る充電率推定装置１は、システムに対するオブザーバを適宜設計することによって、システムの状態変数の推定誤差を所定の速度以上で減衰させうる。本実施形態に係る充電率推定装置１は、システムに対するオブザーバを適宜設計することによって、評価出力の推定誤差に対する外乱の影響を低減しうる。

[0074] バッテリー４のモデルに対応するシステムは、式（８）～（１３）で示されうる。バッテリー４のモデルにヒステリシスモデルが含まれる場合、ヒステリシスモデルのパラメータの不確かさに起因する外乱が、システムへの入力に加わりうる。例えば、式（２）にヒステリシスモデルのパラメータとして含まれる m 及び γ は、真値に対するモデル化誤差を有しうる。 m 及び γ のノミナル値がヒステリシスモデルのパラメータであると仮定されてよい。 m 及び γ のノミナル値はそれぞれ、 m 及び γ として想定される値である。ノミナル値がヒステリシスモデルのパラメータとして仮定される場合、システムを表す式（８）及び（９）を変形して、以下の式（４０）及び（４１）が導かれる。式（４１）は、式（９）と同じ式である。

[数27]

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(u(t))\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) + \mathbf{f}w(t) \quad (40)$$

$$y(t) = f_{\text{OCV}}(\text{SOC}(t)) + \mathbf{c}^T \mathbf{x}(t) + R_0 u(t) \quad (41)$$

[0075] 式(40)の $w(t)$ は、ヒステリシスモデルのパラメータの不確かさに起因する外乱を表す。 $w(t)$ は、以下の式(42)で表される。

[数28]

$$w(t) = [\Delta m \gamma + \Delta \gamma \{m - \text{sgn}(u(t))h(t)\}]u(t) \quad (42)$$

$\text{sgn}(\cdot)$ は、符号関数を表す。符号関数は、入力値が正の値である場合に1を出力し、入力値が負の値である場合に-1を出力し、入力値が0である場合に0を出力する関数である。 Δm は、 m の真値とノミナル値との差を表す。 $\Delta \gamma$ は、 γ の真値とノミナル値との差を表す。

[0076] 式(40)及び(41)に含まれる $u(t)$ 、 $y(t)$ 及び $w(t)$ はそれぞれ、スカラーを表し、 $u \rightarrow (t)$ 、 $y \rightarrow (t)$ 及び $w \rightarrow (t)$ と区別される。

[0077] 式(40)の $\mathbf{f}$ は、以下の式(43)で表される。

[数29]

$$\mathbf{f} = [0 \ \dots \ 0 \ 1]^T \quad (43)$$

$\mathbf{f}$ が式(43)で表される場合、式(13)及び(40)によれば、外乱を表す $w(t)$ の成分は、 $\mathbf{x}(t)$ に含まれる成分のうち $h(t)$ にのみ加わる。

[0078] 式(40)及び(41)は、ヒステリシスモデルのパラメータの誤差を考慮した、バッテリー4のシステムを表す。式(40)及び(41)で示されるシステムに対して、以下の式(44)及び(45)に示されるオブザーバが構成されうる。

[数30]

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}(u(t))\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{b}u(t) + \mathbf{L}(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (44)$$

$$\hat{y}(t) = f_{\text{OCV}}(\hat{\text{SOC}}(t)) + \mathbf{c}^T \hat{\mathbf{x}}(t) + R_0 u(t) \quad (45)$$

$\hat{x}(t)$ 及び $\hat{y}(t)$ はそれぞれ、 $x(t)$ 及び $y(t)$ の推定値を表す。SOC の推定値は、SOC の上に記号 $\hat{}$ を付して表される。SOC の上に記号 $\hat{}$ を付した項は、 $\hat{\text{SOC}}$ とも表す。L は、実数空間の $(n+2)$ 次の列ベクトルであり、オブザーバゲインを表す。

[0079] SOC の推定誤差が十分に小さいと仮定した場合、 $f_{\text{OCV}}(\cdot)$ を線形化して、以下の式 (46) が導かれる。

[数31]

$$f_{\text{OCV}}(\text{SOC}(t)) - f_{\text{OCV}}(\hat{\text{SOC}}(t)) = \alpha(\text{SOC}(t) - \hat{\text{SOC}}(t)) \quad (46)$$

α は、適宜定められうる定数である。

[0080] 状態変数の推定誤差は、以下の式 (47) で表されると仮定する。

[数32]

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t) \quad (47)$$

[0081] 式 (40) ~ (47) に基づいて、以下の式 (48) が導かれる。

[数33]

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = [\mathbf{A}(u(t)) - \mathbf{L}\mathbf{c}_l^T] \mathbf{e}(t) + \mathbf{f}w(t) \quad (48)$$

$\mathbf{c}_l$ は、以下の式 (49) で表される。

[数34]

$$\mathbf{c}_l = [\alpha \quad 1 \quad \cdots \quad 1]^T \quad (49)$$

[0082] システムの評価出力を決定する評価出力方程式として、以下の式 (50) が導入される。

[数35]

$$z(t) = \mathbf{c}_z^T \mathbf{e}(t) \quad (50)$$

$\mathbf{c}_z$ は、以下の式 (51) で表される。

[数36]

$$\mathbf{c}_z = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]^T \quad (51)$$

$\mathbf{c}_z$ は、状態変数の推定誤差を評価出力に反映させる際に、状態変数の推定誤

差に含まれる成分に重み付けを与える。

[0083] 式(50)及び(51)によれば、状態変数のうちSOCの成分だけが評価出力に反映される。言い換えれば、評価出力は、SOCの推定誤差として算出される。よって、 $z(t)$ は、以下の式(52)で表される。

[数37]

$$z(t) = \text{SOC}(t) - \hat{\text{SOC}}(t) \quad (52)$$

[0084] 式(48)及び(50)は、入力を $w(t)$ とし、出力を $z(t)$ とするシステムを表す。以下、式(48)及び(50)で表されるシステムは、 $G(L)$ と表される。 $G(L)$ は、システム行列が $u(t)$ に依存するLPVシステムである。

[0085] $G(L)$ がBIBO (Bounded Input Bounded Output) 安定であり、且つ、 $G(L)$ の入出力ゲインが十分に小さい場合、 $w(t)$ の入力にかかわらず、SOCの推定誤差が小さくされうる。BIBO安定は、システムへの入力が有限値である場合、システムからの出力が有限値であることを意味する。

[0086] BIBO安定であること、及び、 $G(L)$ の入出力ゲインが十分に小さいことは、以下の式(53)及び(54)で表される制約とみなされうる。

[数38]

$$\|e(t)\| \leq b \|e(0)\| \exp(-at), \quad b > 0, \quad \forall t \geq 0 \quad (53)$$

$$\|G(L)\|_{L_2} := \sup_{\|w\|_2 \neq 0} \frac{\|z\|_2}{\|w\|_2} < \rho \quad (54)$$

[0087] 式(53)は、システムの初期状態における状態変数の推定誤差に対する、 $G(L)$ の自由応答が満たすべき減衰度制約を示す式である。 a は、 $G(L)$ の自由応答の減衰度を示す正数である。 b は、適宜定められうる係数である。式(53)は、式(38)に対応する式である。

[0088] 式(54)は、 $G(L)$ の L_2 ゲインが満たすべき L_2 ゲイン制約を示す式である。 $G(L)$ の L_2 ゲインは、 $G(L)$ の評価出力信号の L_2 ノルムと $G(L)$

）の入力信号の L_2 ノルムとの比の上界として定義される。 ρ は、 $G(L)$ の L_2 ゲインの上界の範囲を指定する正数である。 $G(L)$ の L_2 ゲインは、システムが表すモデルに含まれるパラメータの誤差に対する、評価出力の大きさの比を意味する。

[0089] 本実施形態においては、式（53）及び（54）で示される2つの制約が同時に満たされるように、オブザーバゲインが設計されうる。言い換えれば、オブザーバゲインは、所定の制約条件を満たすように設定されうる。所定の制約条件は、減衰度制約及び L_2 ゲイン制約を含む。

[0090] 例えば、式（53）の a は、バッテリー4のSOCの推定誤差が所定の時間内に収束するように設定されてよい。SOCの推定誤差が所定の時間内に収束するように a が設定される場合、さらに式（54）が満たされるように、 ρ が最小化されてよい。

[0091] バッテリー4の充放電電流の大きさは、 $|u(t)|$ と表される。 $|u(t)|$ の最大値及び最小値が既知である場合、バッテリー4のモデルを表すシステムのシステム行列は、以下の式（55）～（58）で示されるポリトープ形式で表されうる。

[数39]

$$\mathbf{A}(u(t)) = \theta_1(u(t))\mathbf{A}(u_{\min}) + \theta_2(u(t))\mathbf{A}(u_{\max}) \quad (55)$$

$$\theta_1(u(t)) = \frac{u_{\max} - |u(t)|}{u_{\max} - u_{\min}} \quad (56)$$

$$\theta_2(u(t)) = \frac{|u(t)| - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} \quad (57)$$

$$\theta_1(u(t)) + \theta_2(u(t)) = 1, \theta_1, \theta_2 \geq 0 \quad (58)$$

$u_{\min}$ は、 $|u(t)|$ の最小値である。 $u_{\max}$ は、 $|u(t)|$ の最大値である。 $\theta_1(u(t))$ 及び $\theta_2(u(t))$ は、ポリトープ形式のパラメータである。

[0092] システム行列は、式（44）及び式（45）で表されるオブザーバのパラ

メータの少なくとも一部を構成する。システム行列がポリトープ形式で表されることによって、オブザーバのパラメータの少なくとも一部がポリトープ形式で表される。

[0093] $A(u(t))$ がポリトープ形式で表され、且つ、正数である a 及び ρ に対して正定値行列 X 及び行列 Y が存在し、以下の式 (59) 及び (60) で示される LMI が成立すると仮定する。

[数40]

$$\begin{bmatrix} \Xi(u_{\min}) + \Xi^T(u_{\min}) & Xf & c_z \\ f^T X & -\rho^2 I & 0 \\ c_z^T & 0 & -I \end{bmatrix} \prec 0 \quad (59)$$

$$\begin{bmatrix} \Xi(u_{\max}) + \Xi^T(u_{\max}) & Xf & c_z \\ f^T X & -\rho^2 I & 0 \\ c_z^T & 0 & -I \end{bmatrix} \prec 0 \quad (60)$$

式 (59) 及び式 (60) において、以下の式 (61) が成り立つ。

[数41]

$$\Xi(u) = X(A(u) - aI) - Yc_l^T \quad (61)$$

[0094] 第2定理によれば、 $G(L)$ が式 (53) 及び (54) を同時に満たすようなオブザーバゲインは、以下の式 (62) によって設計される。

[数42]

$$L = X^{-1}Y \quad (62)$$

[0095] 式 (59) 及び (60) で示される LMI が成立し、且つ、 ρ が最小化されるように、正定値行列 X 及び行列 Y が算出されうる。このように算出された正定値行列 X 及び行列 Y に基づいて、より小さい L_2 ゲインを有するオブザーバゲインが設計されうる。バッテリー4のバッテリーモデルにおいて、 $G(L)$ の L_2 ゲインは、バッテリーモデルに含まれるパラメータの誤差に対する、バッテリー4の充電率の推定誤差の大きさの比である。より小さい L_2 ゲインを有するオブザーバゲインが設計されることによって、バッテリーモデルに含まれ

るパラメータの誤差に応じたバッテリー４の充電率の推定誤差は、減少されうる。オブザーバゲインがより小さい L_2 ゲインを有するように設計されたオブザーバは、ロバストオブザーバともいう。

[0096] 本実施形態に係る充電率推定装置１は、ヒステリシス特性を含むバッテリー４のモデルに基づくオブザーバを用いて、バッテリー４のSOCを推定する。オブザーバを用いることで、ヒステリシス特性の影響等によってバッテリー４のモデルのパラメータの誤差がある場合でも、バッテリー４のSOCの推定精度が向上しうる。また、バッテリーモデルのパラメータの逐次推定によってパラメータの誤差を低減させる場合と比較して、充電率推定装置１の計算負荷が軽減されうる。

[0097] オブザーバゲインがバッテリー４のモデルに含まれるパラメータの誤差に応じたSOCの推定誤差を減少するように設定されることで、バッテリー４のSOCの推定精度が向上しうる。

[0098] オブザーバゲインが所定の制約条件を満たすように設定されることで、バッテリー４のSOCの推定精度が向上しうる。

[0099] オブザーバに含まれるパラメータの一部であるシステム行列が式（５５）－（５８）のようにポリトープ形式で表されることで、オブザーバゲインの算出が容易になりうる。また、オブザーバゲインが所定のLMIを満たすことでも、オブザーバゲインの算出が容易になりうる。

[0100] オブザーバゲインが満たす所定のLMIが、パラメータとして、減衰度 α を含むことで、パラメータの誤差がSOCの推定値に対して及ぼす影響がより低減されうる。

[0101] [充電率推定方法]

本実施形態に係る充電率推定装置１は、図８に示される充電率推定方法によって、バッテリー４のSOCを推定してよい。

[0102] 制御部１０は、バッテリー４のバッテリーモデルのパラメータを取得する（ステップＳ１）。制御部１０は、バッテリーモデルのパラメータを記憶部２０又は外部装置から取得してよい。

[0103] 制御部 10 は、バッテリー 4 のバッテリーモデルで表されるシステムに対するオブザーバを取得する（ステップ S 2）。制御部 10 は、バッテリーモデルのパラメータ、及び、式（62）等に基づいて、オブザーバを設計してよい。制御部 10 は、予め設計されたオブザーバを記憶部 20 又は外部装置から取得してよい。

[0104] 制御部 10 は、バッテリー 4 の SOC を推定する（ステップ S 3）。制御部 10 は、取得したオブザーバに基づいて、バッテリー 4 の SOC を推定しうる。このようにすることで、バッテリー 4 の SOC の推定精度が高められうる。

[0105] [充電率推定結果の例]

式（62）等に基づいて設計されたオブザーバゲインを含むオブザーバによって、バッテリー 4 の SOC が推定されうる。以下、SOC の推定結果の一例の説明において、図 9、図 10 及び図 11 が参照される。

[0106] SOC を推定するために、バッテリー 4 のバッテリーモデルで表されるシステムに対して、図 9 に示されるように時間変動する電流が入力された。図 9 には、電流の時間変動の例として、バッテリー 4 が電気自動車に搭載されて走行実験が行われた際の電流の時間変動が示される。

[0107] 本実施例の SOC 推定に用いられたオブザーバは、 $G(L)$ が式（53）及び（54）を同時に満たすように設計された。言い換えれば、本実施例の SOC 推定に用いられたオブザーバは、減衰度制約と L_2 ゲイン制約とをともに考慮して設計された。一方で、比較例に係る SOC 推定として、 $G(L)$ が式（53）を満たすように設計されたオブザーバを用いた SOC 推定が行われた。比較例に係る SOC 推定に用いられたオブザーバは、 L_2 ゲイン制約を考慮せずに、減衰度制約のみを考慮して設計された。

[0108] 図 10 に示されるように、実施例及び比較例それぞれで設計されたオブザーバを用いて、バッテリー 4 の SOC が推定された。図 10 において、横軸及び縦軸はそれぞれ、時刻及び SOC を示す。SOC の真値は、破線で示される。SOC の真値は、バッテリー 4 への入力電流を積算する等の方法によって算出された値である。実施例に係る SOC の推定値は、実線で示される。比

較例に係るSOCの推定値は、一点鎖線で示される。実施例に係るSOCの推定値は、比較例に係るSOCの推定値と比較して、SOCの真値に近い。

[0109] 図11に示されるように、実施例のオブザーバを用いたSOCの推定誤差は、比較例のオブザーバを用いたSOCの推定誤差よりも小さい。SOCの推定誤差は、SOCの推定値とSOCの真値との差である。図11において、横軸及び縦軸はそれぞれ、時刻及びSOCの推定誤差を示す。

[0110] 図11に例示されるSOCの推定誤差のRMSE (Root Mean Square Error) を計算した結果、比較例に係るオブザーバを用いたSOCの推定誤差のRMSEは、4.5%であった。一方で、実施例に係るオブザーバを用いたSOCの推定誤差のRMSEは、1.9%であった。減衰度制約のみを考慮してオブザーバが設計される場合と比較して、減衰度制約及び L_2 ゲイン制約を含む所定の制約条件を考慮してオブザーバが設計されることによって、SOCの推定精度が向上されうる。

[0111] 本開示に係る実施形態について諸図面および実施例に基づき説明してきたが、当業者であれば本開示に基づき種々の変形または修正をおこなうことが容易であることに注意されたい。従って、これらの変形または修正は本開示の範囲に含まれることに留意されたい。例えば、各構成部、各ステップなどに含まれる機能などは論理的に矛盾しないように再配置可能であり、複数の構成部およびステップなどを1つに組み合わせたり、或いは分割したりすることが可能である。

符号の説明

- [0112]
- 1 充電率推定装置
 - 2 電流センサ
 - 3 電圧センサ
 - 4 バッテリ
 - 5 電源装置
 - 10 制御部
 - 20 記憶部

2 0 1 電圧源

5 0 0 S O C - O C V 特性

5 0 1 充電 S O C - O C V 特性

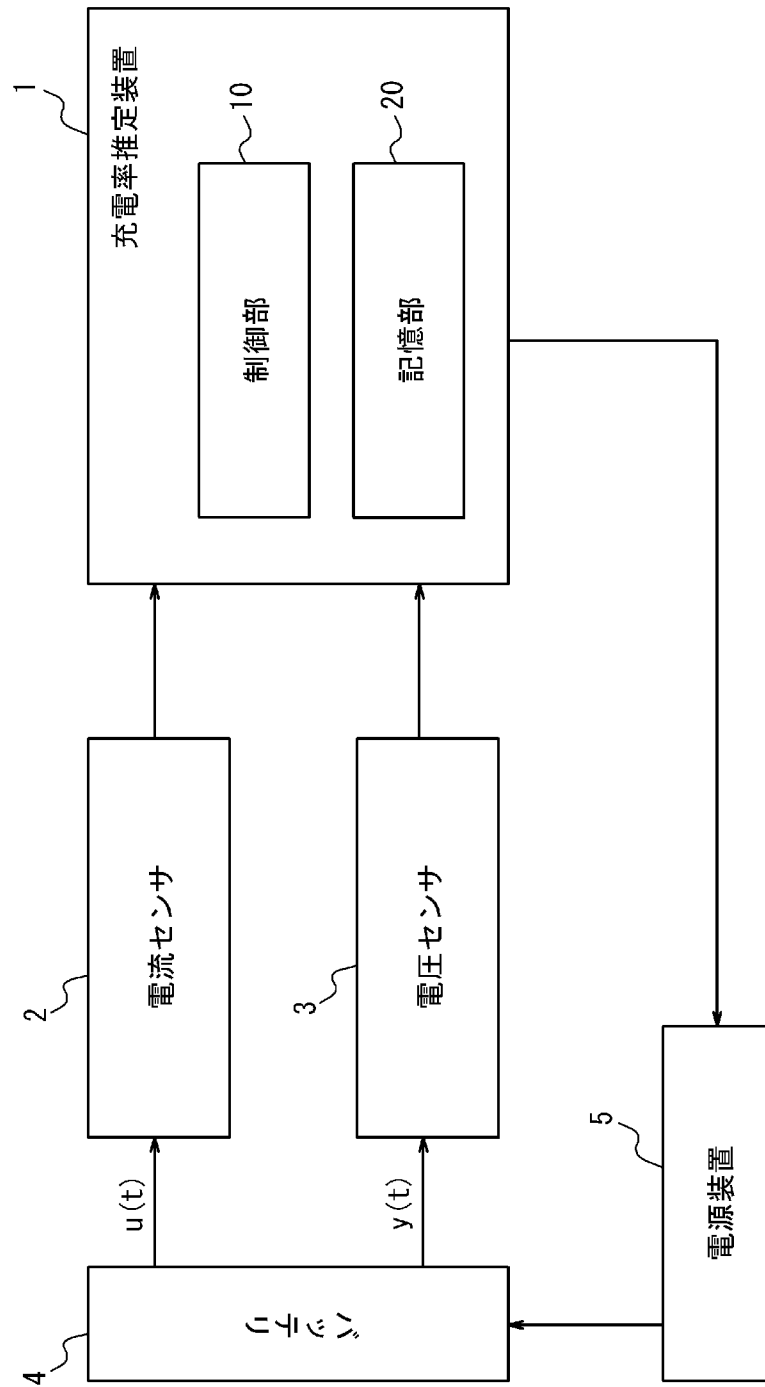
5 0 2 放電 S O C - O C V 特性

請求の範囲

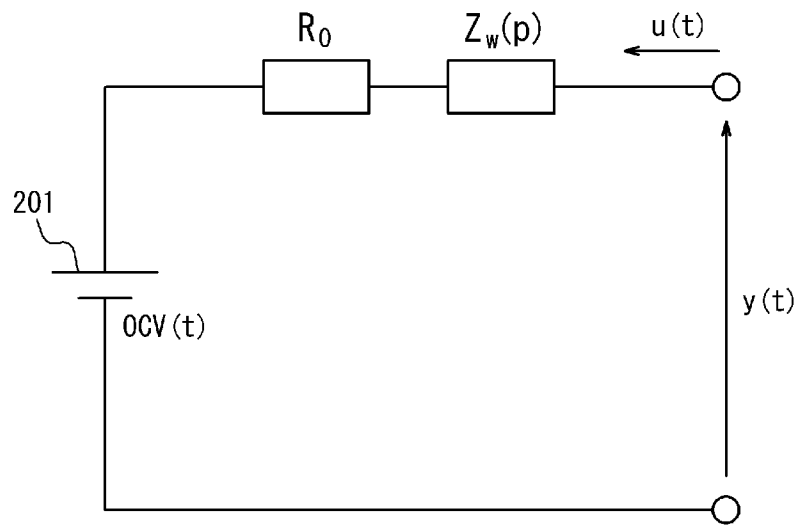
- [請求項1] バッテリーのモデルに基づくオブザーバを用いて、前記バッテリーの充電率を推定し、
 前記モデルは、ヒステリシス特性を含む、充電率推定装置。
- [請求項2] 請求項1に記載の充電率推定装置において、
 前記オブザーバは、パラメータとしてオブザーバゲインを含み、
 前記オブザーバゲインは、前記モデルに含まれるパラメータの誤差に応じた前記充電率の推定誤差を減少させるように設定される、充電率推定装置。
- [請求項3] 請求項2に記載の充電率推定装置において、
 前記オブザーバゲインは、所定の制約条件を満たすように設定される、充電率推定装置。
- [請求項4] 請求項3に記載の充電率推定装置において、
 前記オブザーバに含まれるパラメータの少なくとも一部は、ポリトープ形式で表され、
 前記所定の制約条件は、所定の線形行列不等式で表される、充電率推定装置。
- [請求項5] 請求項3に記載の充電率推定装置において、
 前記所定の制約条件は、前記モデルに含まれる状態推定値の初期値誤差を減衰させる速度を指定するパラメータを含む、充電率推定装置。
 。
- [請求項6] 請求項4に記載の充電率推定装置において、
 前記所定の制約条件は、前記モデルに含まれる状態推定値の初期値誤差を減衰させる速度を指定するパラメータを含む、充電率推定装置。
 。
- [請求項7] バッテリーのモデルに基づくオブザーバを用いて、前記バッテリーの充電率を推定するステップを含み、
 前記モデルは、ヒステリシス特性を含む、充電率推定方法。

- [請求項8] 請求項7に記載の充電率推定方法において、
前記オブザーバは、パラメータとしてオブザーバゲインを含み、
前記オブザーバゲインを、前記モデルに含まれるパラメータの誤差
に応じた前記充電率の推定誤差を減少させるように設定するステップ
をさらに含む、充電率推定方法。
- [請求項9] 請求項8に記載の充電率推定方法において、
前記オブザーバゲインを設定するステップにおいて、前記オブザー
バゲインは、所定の制約条件を満たすように設定される、充電率推定
方法。
- [請求項10] 請求項9に記載の充電率推定方法において、
前記オブザーバに含まれるパラメータの少なくとも一部は、ポリト
ープ形式で表され、
前記所定の制約条件は、所定の線形行列不等式で表される、充電率
推定方法。
- [請求項11] 請求項9に記載の充電率推定方法において、
前記所定の制約条件は、前記モデルに含まれる状態推定値の初期値
誤差を減衰させる速度を指定するパラメータを含む、充電率推定方法
。
- [請求項12] 請求項10に記載の充電率推定方法において、
前記所定の制約条件は、前記モデルに含まれる状態推定値の初期値
誤差を減衰させる速度を指定するパラメータを含む、充電率推定方法
。

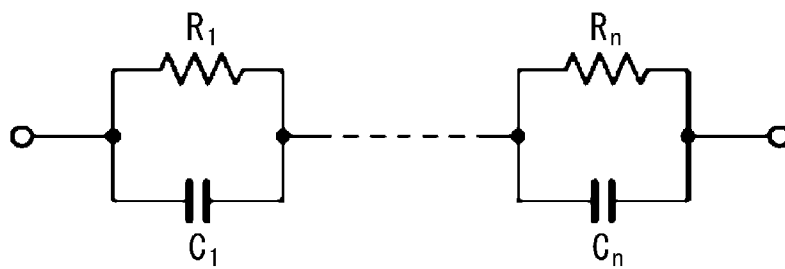
[図1]



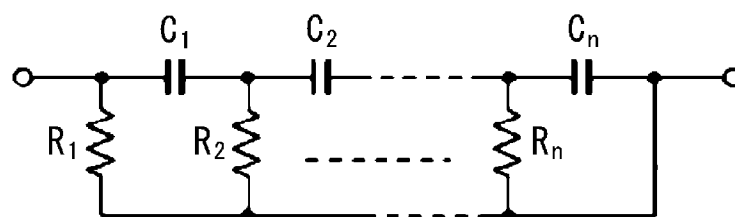
[図2]



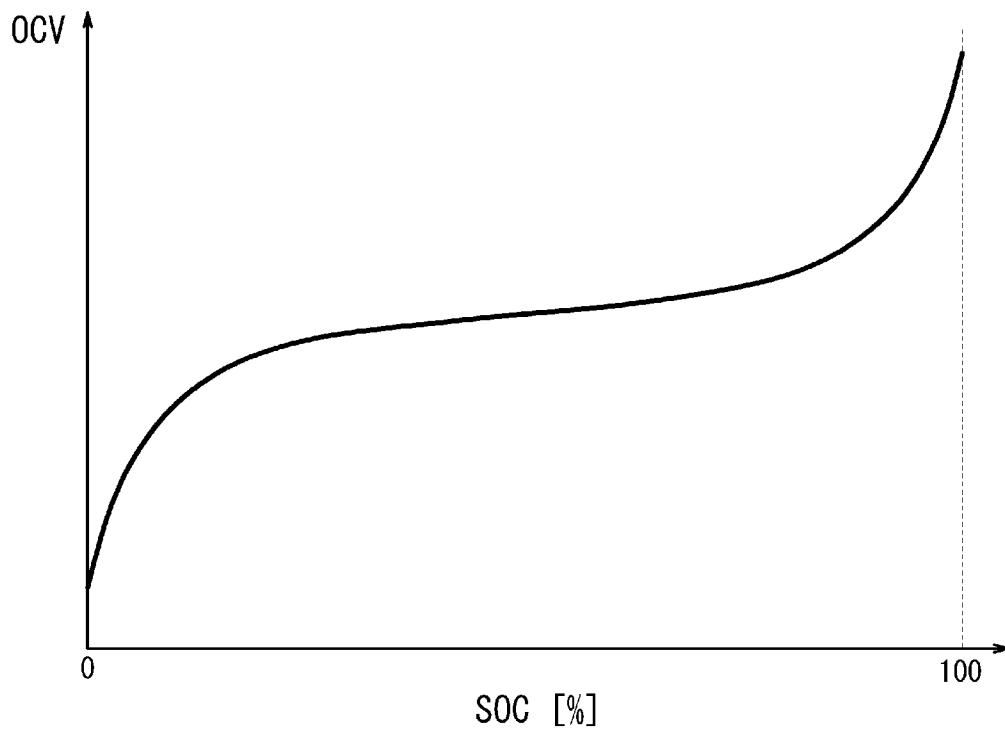
[図3A]



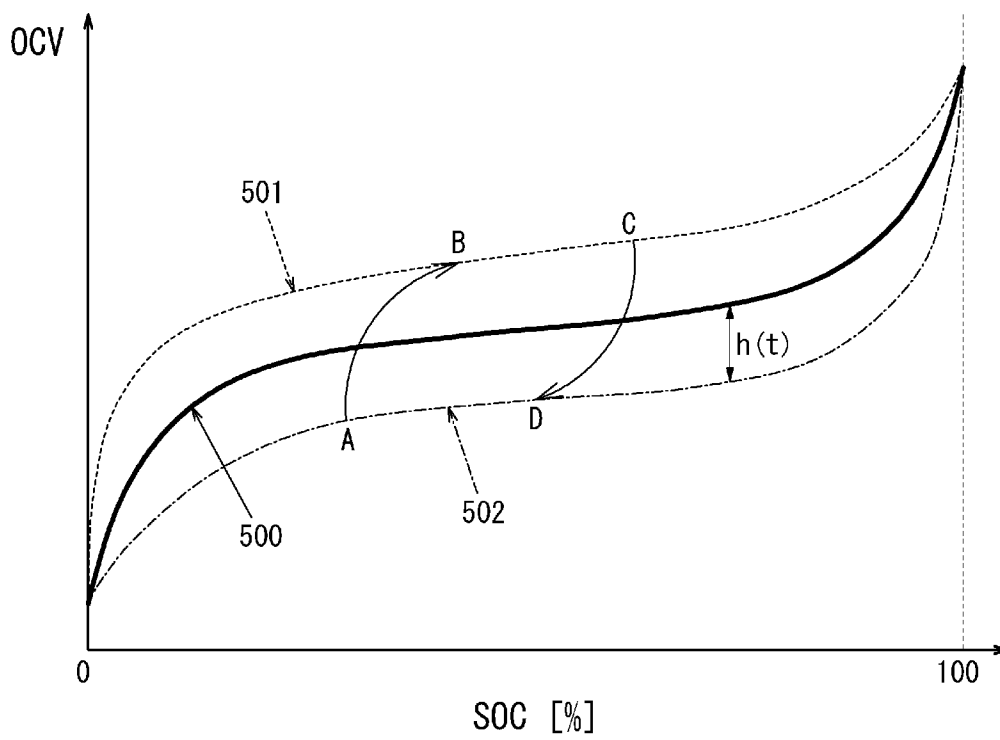
[図3B]



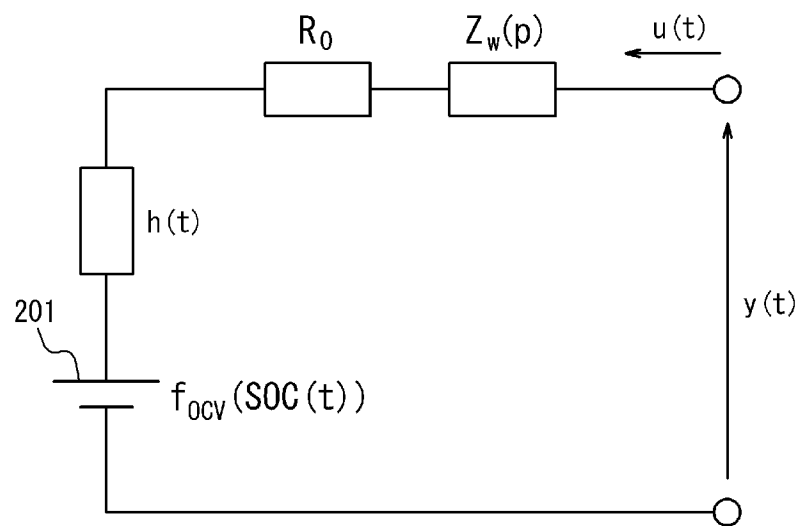
[図4]



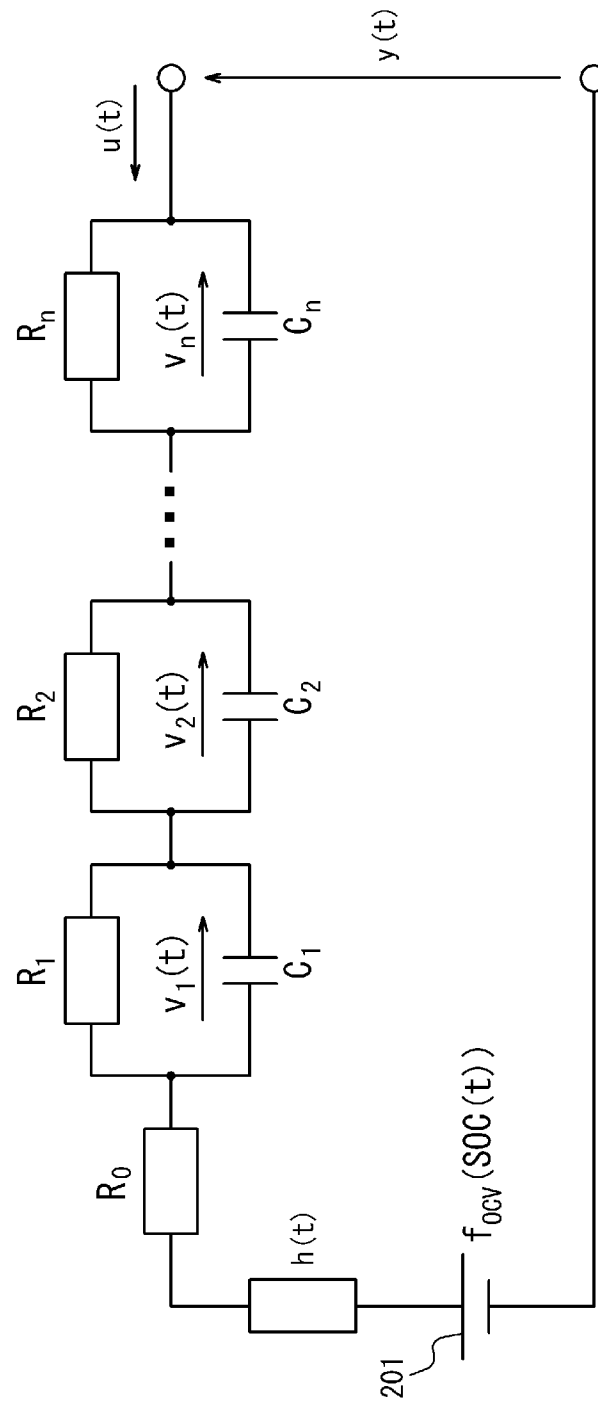
[図5]



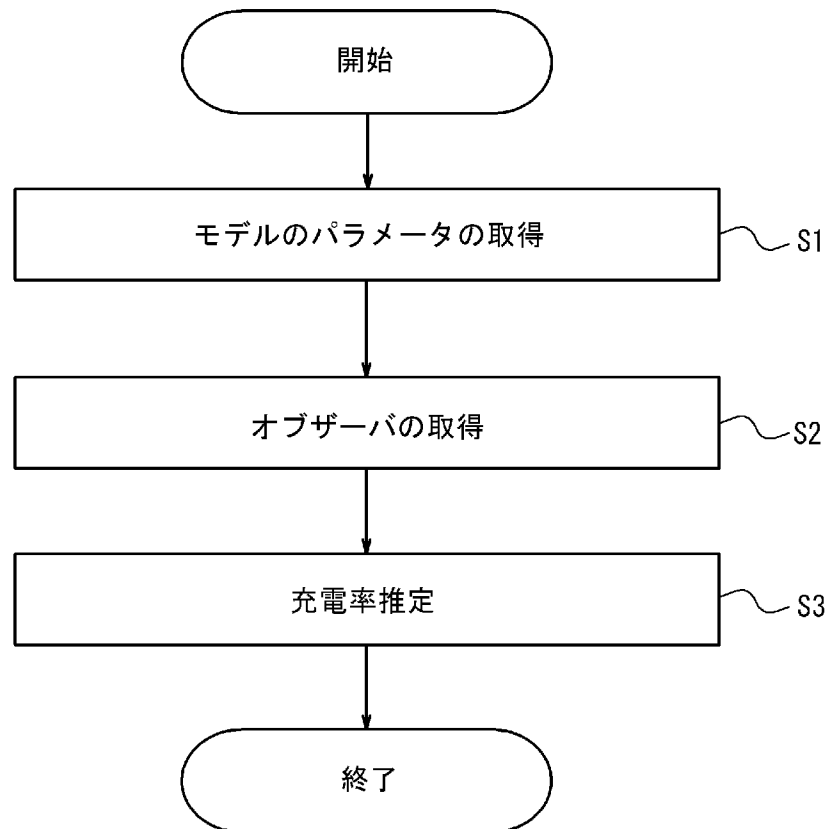
[図6]



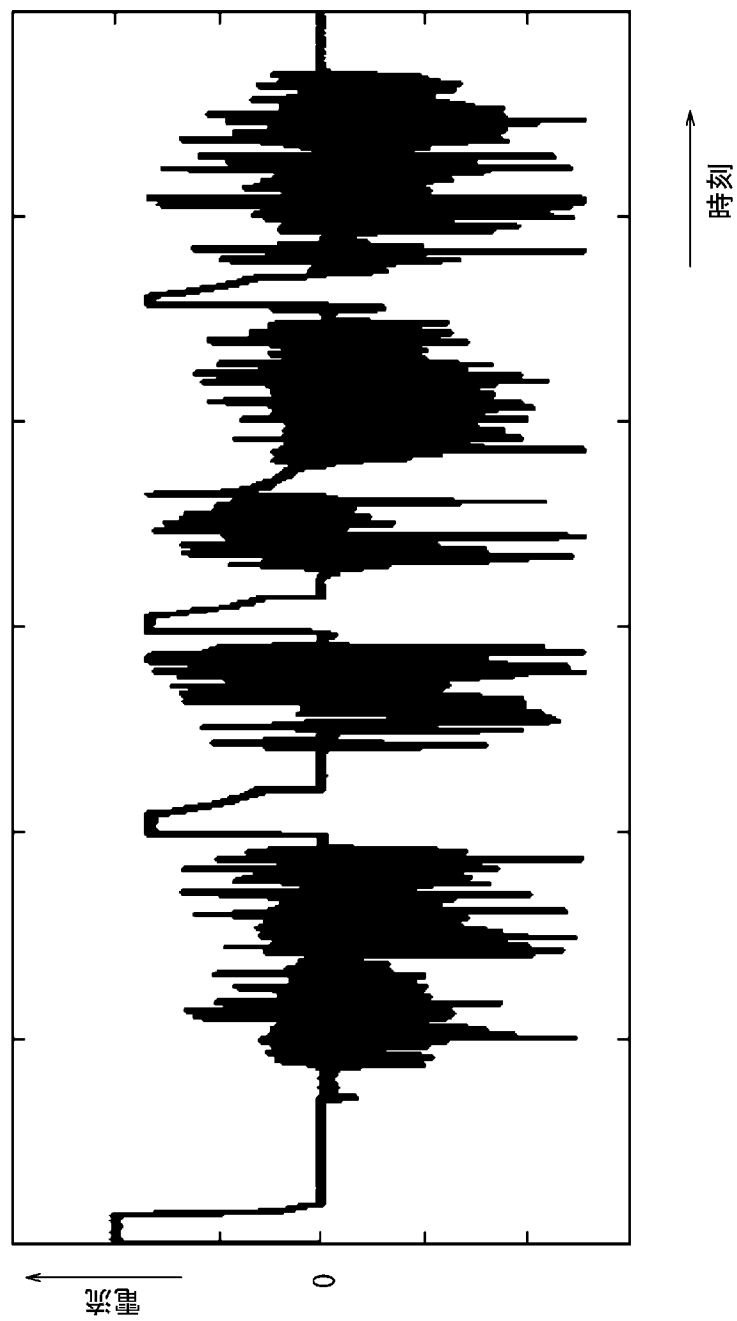
[図7]



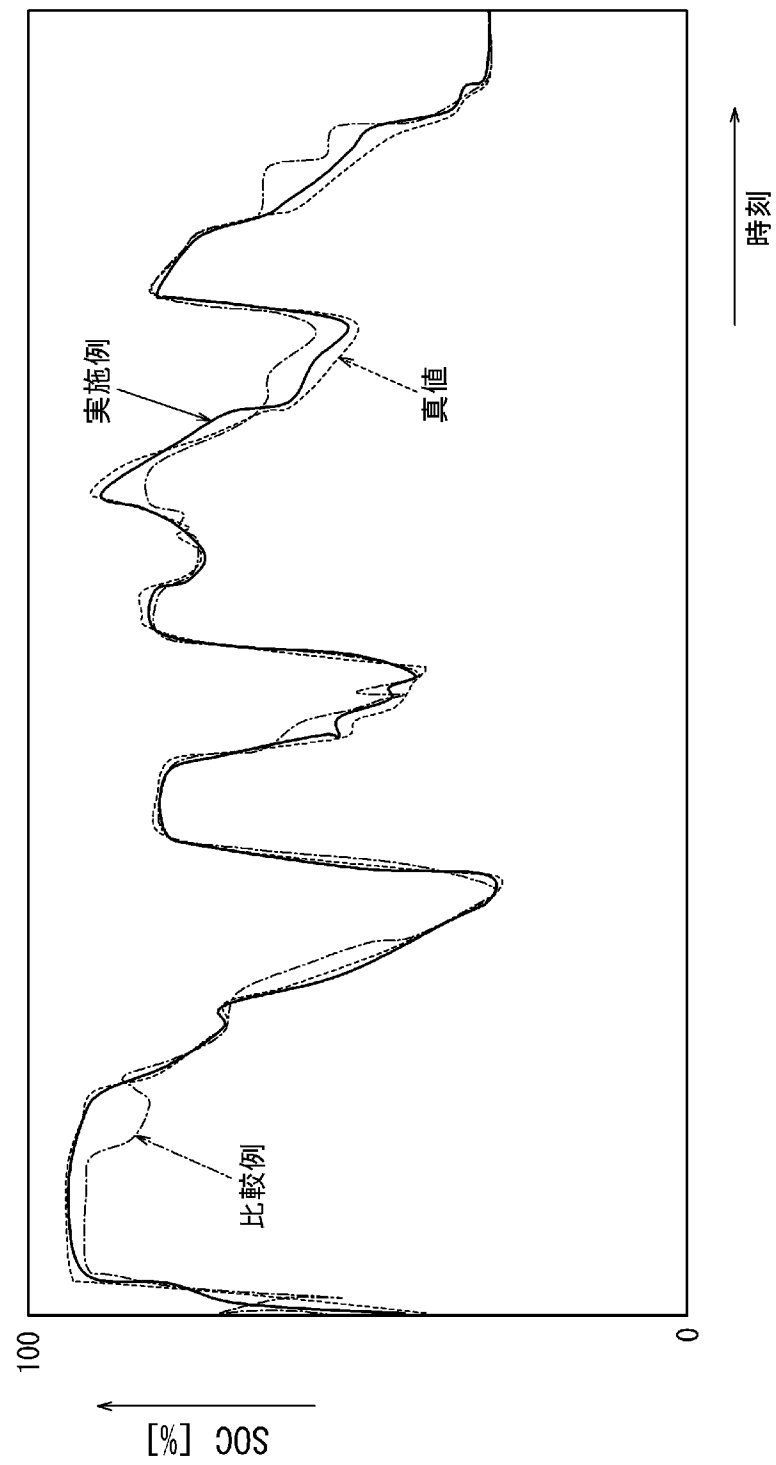
[図8]



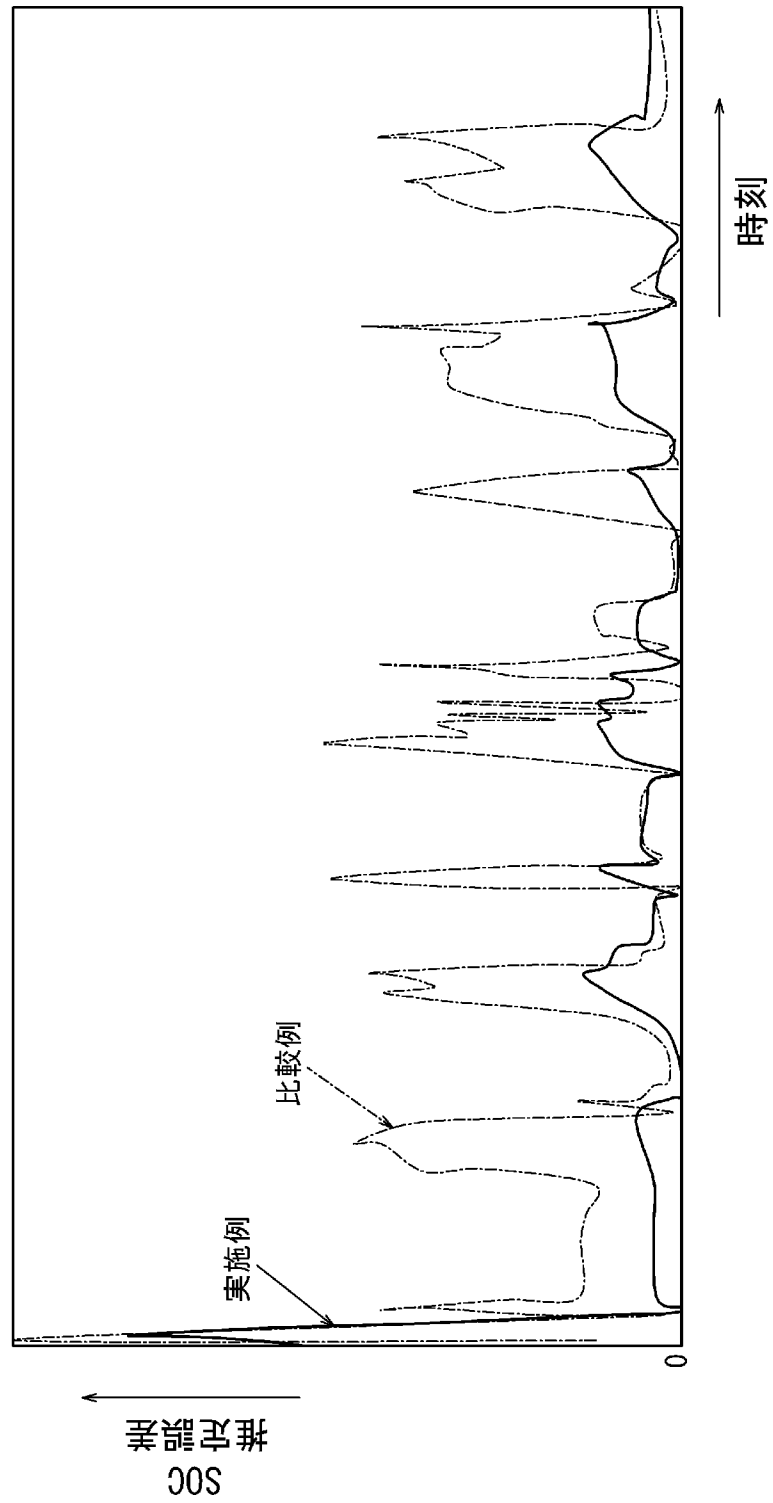
[図9]



[図10]



[図11]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/036038

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. G01R31/36 (2006.01) i, H01M10/48 (2006.01) i, H02J7/00 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl. G01R31/36, H01M10/48, H02J7/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2017
Registered utility model specifications of Japan	1996-2017
Published registered utility model applications of Japan	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	JP 2011-33453 A (HONDA MOTOR CO., LTD.) 17 February 2011, paragraphs [0148]-[0159] (Family: none)	1-2, 7-8 3-6, 9-12



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

21 December 2017

Date of mailing of the international search report

09 January 2018

Name and mailing address of the ISA/

Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/036038

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	王杜 ほか, ポリトープシステムに関する動的機能と制御の研究 (第1報, 線形行列不等式によるポリトープ・オブザーバの設計), 日本機械学会論文集 (C編) [online], vol. 67, no. 663, 社団法人日本機械学会, 26 February 2008 [retrieved on 20 December 2017], Internet: <URL:https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaic1979/67/663/67_663_6484/_article/-har/ja/><DOI:https://doi.org/10.1299/kikaic.67.3484>, pp. 3484-3490 (WANG, D. et al., Dynamic function and control for polytopic system (1st Report, Polytopic observer design by LMI formulation), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Series C), THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS)	2-6, 8-12
X Y	FENG, X. Y. and SUN, Z. C., A battery model including hysteresis for State-of-Charge estimation in Ni-MH battery, Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE [online], 18 November 2008 [retrieved on 20 December 2017], retrieved from the Internet: <URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/4677449> <DOI:10.1109/VPFC.2008.4677449>	1, 7 2-6, 8-12
P, X	八田羽謙一 ほか, ロバストオブザーバによる二次電池の充電率推定, 自動制御連合講演会講演論文集 [online], 一般社団法人日本機械学会, 01 February 2017 [retrieved on 20 December 2017], Internet: <URL:http://www.jstage.jst.go.jp/article/jacc/59/0/59-554/_article/-char/ja><DOI:https://doi.org/10.11511/jacc.59.0_554>, pp. 554-559 (HATTAHA, Kenichi et al., Robust observer design for state-of-charge estimation of rechargeable battery, Proceedings of the Japan Joint Automatic Control Conference, THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS)	1-12

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G01R31/36(2006.01)i, H01M10/48(2006.01)i, H02J7/00(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G01R31/36, H01M10/48, H02J7/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X Y	JP 2011-33453 A（本田技研工業株式会社）2011.02.17, 段落0148-0159（ファミリーなし）	1-2, 7-8 3-6, 9-12

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

21.12.2017

国際調査報告の発送日

09.01.2018

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

山崎 仁之

2S

3015

電話番号 03-3581-1101 内線 3216

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	王杜 ほか, ポリトープシステムに関する動的機能と制御の研究 (第1報, 線形行列不等式によるポリトープ・オブザーバの設計), 日本機械学会論文集 (C編) [オンライン], 67巻663号, 社団 法人日本機械学会, 2008.02.26[検索日 2017.12.20], インターネッ ト:<URL:https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaic1979/67/6 63/67_663_6484/_article/-har/ja/><DOI:https://doi.org/10.129 9/kikaic.67.3484>, p. 3484-3490	2-6, 8-12
X Y	FENG Xuyun and SUN Zechang, A battery model including hysteresis for State-of-Charge estimation in Ni-MH battery, Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE[online], 2008.11.18[retrieved on 2017.12.20], Retrieved from the Internet : <URL:http://ieeexplore.ieee.org/document/4677449> <DOI:10.1109/VPPC.2008.4677449>	1, 7 2-6, 8-12
P, X	八田羽謙一 ほか, ロバストオブザーバによる二次電池の充電率推 定, 自動制御連合講演会講演論文集[オンライン], 一般社団法人日 本機械学会, 2017.02.01[検索日 2017.12.20], インターネッ ト:<URL:https://www.jstage.jst.go.jp/article/jacc/59/0/59_55 4/_article/-char/ja><DOI:https://doi.org/10.11511/jacc.59.0_ 554>, p. 554-559	1-12