

# 追尾型太陽光発電システムにおける極配置法の設計

## Design of Pole Placement Method in Tracking Photovoltaic Power Generation System

上杉拓矛\*, 天野耀鴻\*

Takumu Uesugi\*, Yoko Amano\*

\*日本大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻

\*Nihon University Graduate School of Engineering, Electrical and Electronic Engineering

キーワード： 追尾型太陽光発電システム (tracking photovoltaic power generation system),  
最適レギュレータ (optimal regulator), 極配置法 (pole placement method)

連絡先： 〒 963-1165 日本大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻 天野研究室  
上杉拓矛, Tel.(024)956-8796:E-mail: control\_lab\_8@yahoo.co.jp

### 1. 緒言

近年, 環境問題や東日本大震災における原子力発電所の事故の影響から, 再生可能エネルギーを活用した分散型電力システムへの期待が高まっている. 太陽光発電の分野では, 固定方式に比べ, 発電効率, 発電量の向上が見込まれる追尾型太陽光発電システムの研究も行われ, 今後さらなる展望が期待されている. 追尾型太陽光発電装置の追尾システムには, センサ方式と起動計算等によるプログラム方式が一般的であり, 太陽の動きに対し太陽電池パネルを正確に追尾する制御システムが必要とされる.

本研究は, 追尾型太陽光発電の基礎題材であるセンサ方式を用いた追尾型太陽光発電装置に最適レギュレータ及び極配置を設計し, センサ性能や光源反射による影響を抑え, パネルを正確に追尾させる制御システムを設計することを目的とする. 設計した制御システムはシミュレーション及び実機実験によって検証を行う.

### 2. 追尾型太陽光発電装置の構成

Fig2. に追尾型太陽光発電装置の構成を示す. 太陽の位置判別に 4 つの光センサを用いる. 各センサの出力信号を制御ボードに入力し, その差が零になるように追尾架台を動作させることで太陽の追尾を可能とする. 追尾架台は DC ギヤードモータを 2 つ用いた 2 軸構造となっており, 仰俯角及び方位角の 2 方向に動作させることができる. ポテンショメータはモータの回転角からパネルの傾斜角度を観測することに用いる. 発電電圧は充放電コントローラを通してバッテリーに充電される.

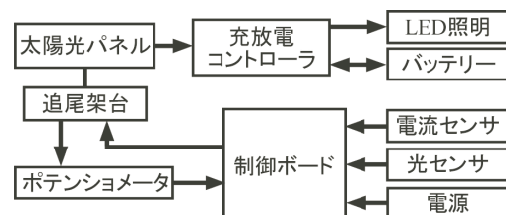


Fig.1 装置のモデル構成

### 3. システム同定によるモデリング

本研究では、仰俯角モータ及び方位角モータの数学モデルを導出する方法としてシステム同定を用いる。

システム同定は制御対象から実測した入出力データを用いて対象に近い数学モデルを推定する方法である。Fig.3. は発電装置のモデル構造を示したもので、ステップ入力をパネルの目標角度  $r(t)$ 、ポテンシオメータで観測したパネルの角度  $y(t)$  を出力とする。この時、(各モータの角度=パネルの仰俯角及び方位角)とし、過渡応答からモデルの推定を行う。数学モデルの推定には MATLAB/Simulink のシステム同定ツールを用いる。

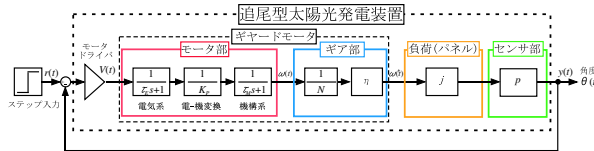


Fig.2 装置のモデル構成

Table 1 モデルのパラメータ

$r(t)$	入力信号	$y(t)$	出力信号
$L_\alpha$	インダクタンス	$j$	負荷 (パネル)
$K_t$	トルク定数	$J$	慣性モーメント
$K_e$	逆起電力定数	$\tau_E$	電気子時定数
$R_\alpha$	電気子抵抗	$\tau_M$	機械的時定数
$\eta$	伝達効率	$1/N$	ギア比
$p$	ポテンシオメータ	$\omega(t)$	角速度

### 4. 状態空間方程式

状態方程式，出力方程式を式 (1)，(2) に示す。システム同定で推定された仰俯角及び方位角モータの各行列要素は式 (3)，(4) となる。

$$\text{状態方程式: } \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

$$\text{出力方程式: } y = Cx(t) + Du(t) \quad (2)$$

$A$ : システム行列     $B$ : 入力行列

$C$ : 出力行列         $D$ : 直達行列

・仰俯角モータの行列要素

$$A = \begin{bmatrix} -1.153 & -0.745 & -0.323 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = [0.00001 \quad 0.003 \quad 0.651] \quad D = [0]$$

・方位角モータの行列要素

$$A = \begin{bmatrix} -1.661 & -1.268 & -0.627 \\ 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0.00004 \quad -0.006 \quad 0.635] \quad D = [0] \quad (4)$$

### 5. 最適レギュレータの設計

最適レギュレータは、線形定数システム

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5)$$

$$x(0) = x_0 \quad A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m} \quad (6)$$

に対し、二次形式評価関数  $J$  を最小にする状態フィードバックゲイン  $F$ ，及び最適制御入力  $u^*(t)$  を求める方法である。評価関数  $J$  を式 (7) に示す。

$$J = \int_0^\infty \{x(t)^T Q x(t) + u^T(t) R u(t)\} dt \quad (7)$$

行列  $Q$  と  $R$  は重み行列といい任意値となる。行列  $Q$  を大きくすると、状態変数を大きく評価し、システムの安定性が向上する。行列  $R$  を大きくすると、入力の影響が小さくなる。

本研究では、仰俯角及び方位角モータの行列要素に対し、重み行列を式 (8)，(9) と指定した。

・仰角モータの重み行列

$$\begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = 160 \quad (8)$$

・方位角モータの重み行列

$$\begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = 95 \quad (9)$$

最適制御入力  $u^*(t)$  を式 (10) に示し、状態フィードバックゲイン  $F$  を式 (11) に示す。

$$u^*(t) = -R^{-1} B^T P x(t) = -F x(t) \quad (10)$$

$$F = R^{-1} B^T P \quad (11)$$

$P$  はリカッチ代数方程式により一意に決定される制対称行列であり、次式で求められる。

$$A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P = 0 \quad (12)$$

Fig3 に最適レギュレータの基本構成を示す。ここで、 $A, B, C, F$  は行列要素及び状態フィードバックゲインに対応している。

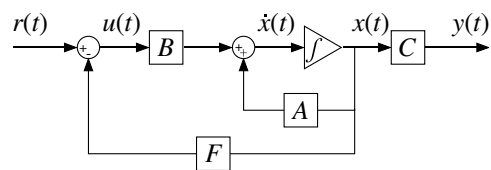


Fig.3 最適レギュレータの基本構成

## 6. 極配置法によるシステム設計

極配置法は、減衰特性と振動特性を有するシステム行列  $A$  の固有値を、望ましい位置に配置することで視覚的に状態フィードバックゲインを調整することができる。

$$u(t) = -F(t) \quad (13)$$

$F$  は状態フィードバックゲインである。アッカーマン法により、システム行列  $A$  の特性多項式の根は、式 (14) となる。

$$\begin{aligned} |(sI - A + BF)| &= (s - p_1)(s - p_2) \cdots \\ (s - p_{n-1})(s - p_n) &= P(s) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで  $p = [p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_{n-1} \ p_n]$  は配置した極であり、式 (14) の  $s$  にシステム行列  $A$  を代入すると次式が求められる。

$$P(A) = (A - p_1 I)(A - p_2 I) \cdots (A - p_{n-1} I)(A - p_n I) \quad (15)$$

また、制御行列  $U$  は、

$$U = [B \ AB \ A^2 B \ \cdots \ A^{n-1} B] \quad (16)$$

となり、式 (15)、(16) 式よりフィードバックゲインは式 (17) となる。

$$F = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 1] U^{-1} P(A) \quad (17)$$

### 6.1 極の選定条件

Fig.4 に極の位置とステップ応答の関係を示す。極配置法は配置する極の位置により制御システムの過渡特性や安定性に影響を与える。一般に、極を配置する場合には以下の条件を考慮する必要がある。

- システムが安定になるには全ての極の実数部が負側でなければならない。
- 制時間短くするためには、極の虚数部を大きくする。
- オーバーシュートを抑えるためには、極の実数部を負側に大きくする。

本研究では、5. で導出したフィードバックゲインから最適レギュレータの極を求め、それを極配置における基準の極とした。

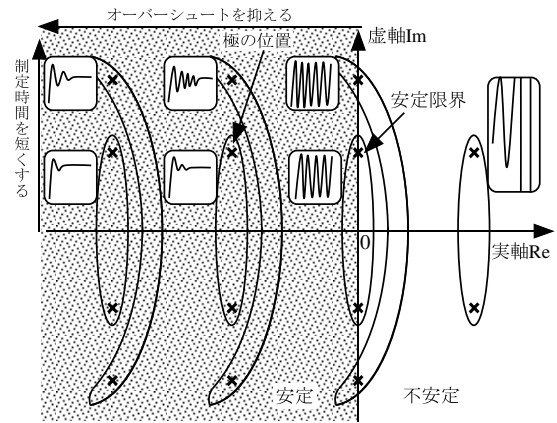


Fig.4 極の位置とステップ応答

### 6.2 極の選定

最適レギュレータと極配置での過渡特性と安定性の比較を行う。式 (11) から最適レギュレータの状態フィードバックゲイン  $F$  を求め、極  $P$  を導出する。導出されたフィードバックゲイン  $F$  及び極  $P$  を次式に示す。

- 仰角モータの状態フィードバックゲイン

$$F = [0.2576 \ 0.1565 \ 0.0048] \quad (18)$$

- 仰角モータの極

$$P_0 = [-0.3115, -0.4837 \pm j0.5371] \quad (19)$$

- 方位角モータの状態フィードバックゲイン

$$F = [0.5969 \ 0.3217 \ 0.0083] \quad (20)$$

- 方位角モータの極

$$P'_0 = [-0.5740, -0.8420 \pm j1.2263] \quad (21)$$

サーボ制御などの追従制御の場合、式 (14) に含まれる複素数内の減衰率  $\xi$  は (0.6 ~ 0.8) の値と範囲とされている。そのため、極の選定には、減衰率  $\xi$  を (0.6 ~ 0.8) の範囲で変えた際の過渡特性及び安定性を検証して行う。

Table.2 に極の選定結果を示す。

Table 2 極の選定結果

仰俯角モータ	$p$	$\xi$
$P_0$	$-0.3115, -0.4837 \pm j0.5371$	0.69
$P_1$	$-0.3220, -0.4540 \pm j0.5470$	0.62
方位角モータ	$p$	$\xi$
$P'_0$	$-0.574, -0.842 \pm j1.2263$	0.57
$P'_2$	$-0.530, -0.9440 \pm j1.2270$	0.61

仰俯角、方位角モータのフィードバックゲインは、次式となる。

$$F_1 = [0.1600 \ 0.1046 \ 0.0049] \quad (22)$$

$$F_2 = [0.7570 \ 0.4307 \ 0.0084] \quad (23)$$

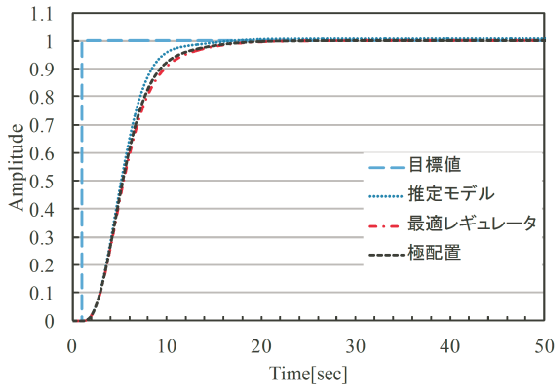


Fig.5 仰俯角動作のシミュレーション比較

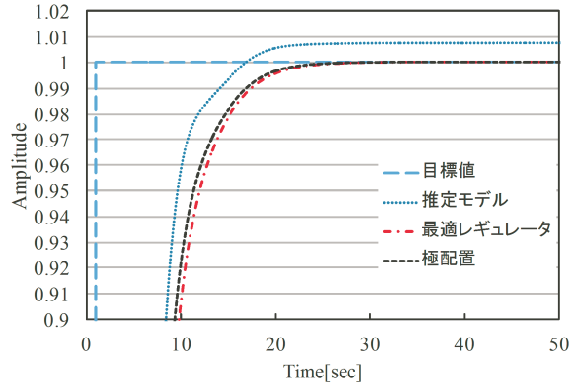


Fig.6 Fig.5の拡大図

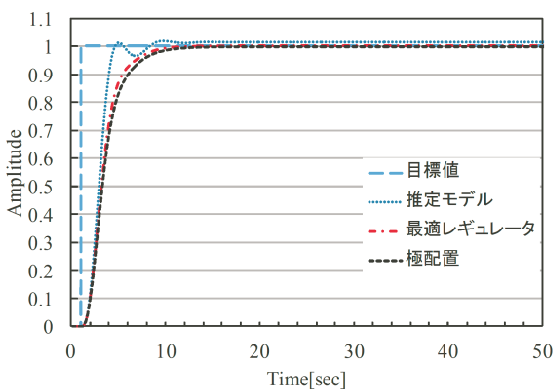


Fig.7 方位角動作のシミュレーション比較

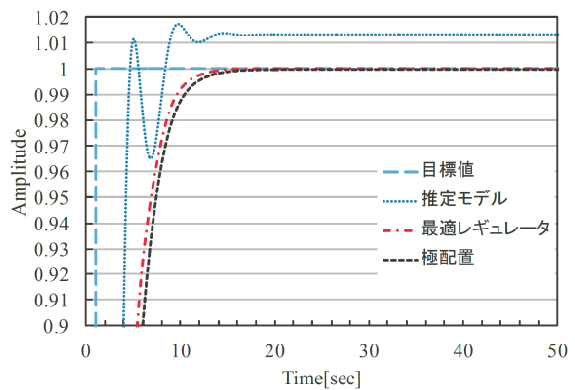


Fig.8 Fig.7の拡大図

## 7. シミュレーションによる検証

Fig.3に示した最適レギュレータの基本構成ブロックをシミュレーションに用いる．推定モデル，最適レギュレータ，極配置それぞれにステップ入力を与え，その時の過渡特性から制御システムの検証を行う．

## 8. シミュレーション結果

### 8.1 仰俯角動作

Fig.5及びFig.6に仰俯角動作のシミュレーション結果を示す．Fig.6の拡大図より，目標値に対する追従特性は推定モデルに対し，最適レギュレータ及び極配置の方が良い特性が得られ，最適レギュレータよりも極配置の方が目標値に対する応答性が向上する．

### 8.2 方位角動作

Fig.7及びFig.8に方位角のシミュレーション結果を示す．Fig.8の拡大図より，最適レギュレータ及び極配置の結果は推定モデルよりもアンダーシュート・オーバーシュートが抑えられ，目標値に対する追従特性が向上する．

## 9. 実機実験による検証

### 9.1 実験条件

人口太陽灯(光源)を用いて実験を行う．光源に対し，太陽電池パネルが真正面になるように装置を設置する．初期条件として，この時の方位角におけるセンサ間電圧の差は $0[V]$ とし，モータの角度は $\pm 0^\circ$ とする．また，仰俯角モータの角度は光源の角度( $55^\circ$ )に対し，パネルが水平状態( $\pm 0^\circ$ )になるように設定する．実験は光源に対する追尾動作と各センサ間電圧に対する追従特性から制御システムの評価を行う．

## 10. 実験結果

### 10.1 仰俯角動作の結果

Fig.9, Fig.10の結果より, 最適レギュレータ及び極配置を実装した場合の動作は制御システムを実装しない場合と比べ, 光源に対する仰俯角の動作が正確になることが確認できた。また, 最適レギュレータと極配置の動作を比較するとセンサ電圧の推移及び角度に変化はないものの極配置の結果の方が動作に遅れが生じること確認された。

### 10.2 方位角動作の結果

Fig.11, Fig.12の結果より, 制御を実装しない場合の動作はセンサ電圧の推移に対し方位角モータの動作が追従しきれていないことがわかる, この結果に対し, 最適レギュレータ及び極配置を組み込んだ場合は, センサ電圧の偏差を少なくすることができ, 方位角の動作が正確になることが確認できた。

## 11. 結言

本研究では, センサ追尾方式の太陽光発電装置に, 最適レギュレータ及び極配置制御システムの設計を行い, 実機実験によりその検証を行った。その結果, 制御システムを実装することでセンサ電圧に対する追尾性能が向上することが確認できた。2つの制御の比較では, センサ電圧及び角度の結果は変わらないものの最適レギュレータ対し極配置の動作結果の方には遅れが生じていた。この理由としては, 制御システムの設計には時間的変化の少ない太陽の動きを目標とし, 応答性よりも追従特性を重視して設計しているためである。

今後の課題としては, 実機実験は固定された光源に対する追尾動作試験のみを行っているため, 今後は屋外で検証を行う必要があり, パネルの発電量を考慮した制御システムの設計を行っていく必要がある。

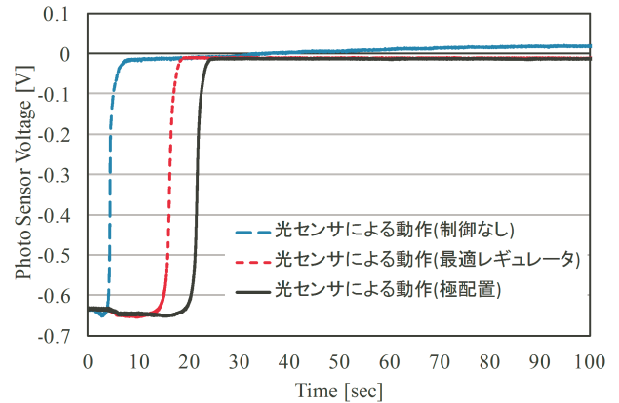


Fig.9 仰角動作時の光センサ間電圧の推移

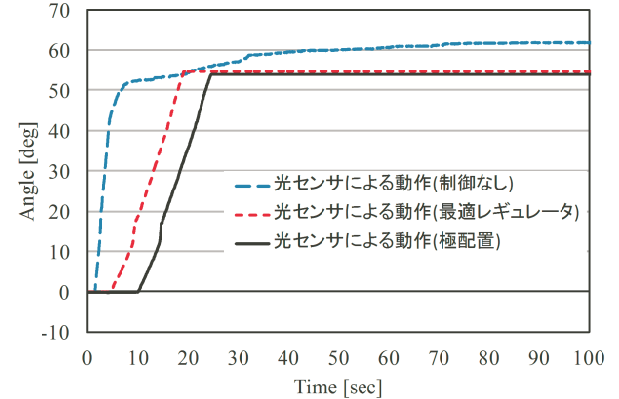


Fig.10 仰角動作推移の比較

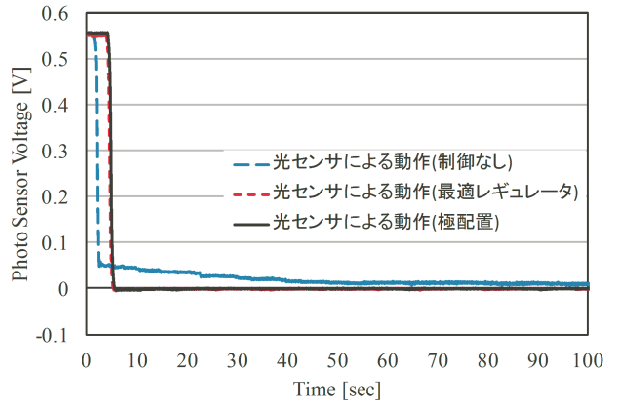


Fig.11 方位角動作時の光センサ間電圧の推移

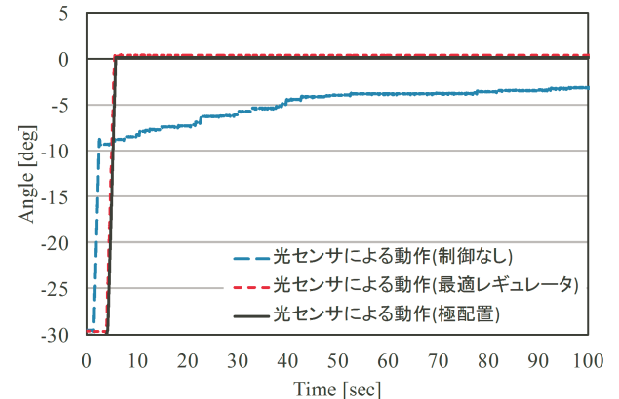


Fig.12 方位角動作の比較

## 参考文献

- 1) 川田昌克, 西岡勝博: MATLAB/Simulink によるわかりやすい制御工学, 159/176, 森北出版株式会社 (2001)
- 2) 足立修一: MATLAB による制御のためのシステム同定, 41/88, 東京電機大学出版局 (1996)
- 3) 片山徹: システム同定-部分空間法からのアプローチ-, 241/282, 株式会社朝倉書店 (2004)
- 4) 三田宇洋: MATLAB/Simulink によるモデルベースデザイン入門, 17/52, 株式会社オーム社 (2013)
- 5) 齋藤健二, 依田浩敏: 反射板方式太陽光追尾型発電装置に関する調査研究~日射量予測と発電実績について~
- 6) Munnik. Haryanti, Abdul. Halim, Arbai. Yusuf: Development of Two Axis Solar Tracking Using Five Photodiodes, EECCIS (2014)
- 7) S. Dasgupta, Freddy. Wilyanto. Suwandi, S. K. Sahoo, \*S. K. Panda: Dual Axis Sun Tracking System with PV Cell as the Sensor, Utilizing Hybrid Electrical Characteristics of the Cell to Determine Insolation, IEEE ICSET 2010 6-9 Dec 2010, Kandy, Sri Lanka