

適応山登り法による太陽光発電システムの最大電力取得制御

正員 高原 健爾 (室蘭工業大学)
学生員 山之内 庸一 (室蘭工業大学)
正員 川口 秀樹 (室蘭工業大学)

Maximum Power Control for a Photovoltaic Power Generation System
by Adaptive Hill-climbing Method

Takahara Kenji, Member, Yamanouchi Youichi, Student Member, Hideki Kawaguchi, Member
(Muroran Institute of Technology)

A modified hill-climbing method for a photovoltaic generation system (PV system), using an adaptive algorithm, is proposed for the maintenance of its output at maximum power levels. The switch duty ratio of the DC-DC converter of the PV system and its output power are selected as the input and output value, respectively, and its characteristics are described by the characteristic curves (the switch duty ratio vs. output power). The characteristics of the PV system are changed due to the changes of external environmental conditions such as atmosphere, loads and so on. The changes of its characteristic curves are detected as the changes of its gradients, which are estimated as parameters of linear functions by adaptive theory. The change of the switch duty ratio is determined based on the detected characteristic changes. That is, the non-linearity of the PV system and its changing characteristics due to the changes of its external environmental conditions are regarded as deviations of the parameters of the linear functions. It is applied in some experiments under various external environmental conditions and its effectiveness confirmed. Therefore, the proposed method is considered to be generally applicable method as a maximum power controller, for which detailed information of the characteristics of the PV system, including its external environmental conditions, is not required.

キーワード : 太陽光発電, 最大電力取得制御, 適応アルゴリズム, 山登り法, 環境

1. はじめに

太陽光発電システムの最大電力点取得制御には、動作点をわずかに上下に変化させて、最大電力点を探索する山登り法⁽¹⁾⁽²⁾が用いられるのが一般的である。なぜなら、太陽光発電の特性は上に凸の山型であり、電力をより大きく取り出すことができるように、動作点を変化させていくことは妥当なことであるからである。特に、日射量や気温、負荷などの変化により特性が時々刻々と変化する自然エネルギー利用システムではシステム特性の記述は容易ではないので、山登り法のような動作点を探索していく方法は有効である。しかしながら、動作点を変化させる大きさの選び方によっては、最大電力点までの到達時間が長くなる、あるいは最大電力付近での動作点が振動する場合がある。これに対して、日射量の変動に伴う最適動作点の変化を直線近似⁽³⁾⁽⁴⁾することによって、到達時間を短くしようとする試みがあるが、環境の変化によってはその近似が有効でな

くなる場合がある。あるいは、動作点の変化幅をファジィ推論によって決定する方法⁽⁵⁾も提案されているが、用いるメンバーシップ関数を最適に選ぶには、構成システムの特性に関する十分な知識が必要である。

本研究では、先に太陽光発電システムのコンバータ出力特性を四次多項式で近似し、適応アルゴリズムを用いてそのパラメータを同定し、直接最大電力点を求める方法を提案し、シミュレーション⁽⁶⁾と実験⁽⁷⁾によってその有効性を確かめた。その方法は、適応アルゴリズムを用いることにより、時々刻々と変化する特性を把握しながら制御を行うので、あらかじめシステム特性に関する知識が得られなくても、所望の制御特性を得ることができた。しかしながら、近似した多項式と出力特性曲線との間に物理的な対応関係がないことなどから、環境の変動によっては近似が不十分な場合があった。

そこで、本研究ではこれまで行ってきた適応アルゴリズムを用いてシステムの特性を把握しながら、把握した特性

表 1 測定条件

Table 1. Measurement Condition

Curve ①		All Covered
Curve ②		Left three Modules Covered
Curve ③		Lower Left Covered
Curve ④		Lower Half Covered
Curve ⑤		Not Covered

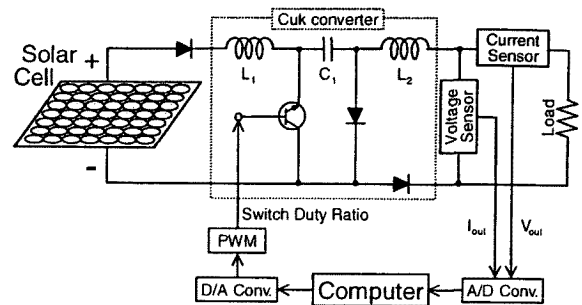


図 1 独立型太陽光発電システム

Fig. 1. Outline of the Independent Photovoltaic Power System

に基づいて動作点の変化幅を決定する適応山登り法⁽⁶⁾を提案する。具体的には、DC-DC コンバータの通流率を入力として太陽電池の出力電力を出力に選んでおり、コンバータ出力電力特性曲線の傾きを適応アルゴリズムによって求め、その傾きに応じて動作点の変化幅を決定する方法である。本論文では、まず実験システムの構成について述べ、次に適応山登り法の考え方とアルゴリズムについて述べる。さらに、提案する方法の有効性を確認するために、種々の環境下で制御実験を行う。

2. 実験システム

本研究に用いた実験システム⁽⁷⁾を図1に示す。本システムは、太陽電池、DC-DC コンバータ、コンピュータ、負荷によって構成された独立型太陽光発電システムである。太陽電池アレイは、最大出力電力 62.7 W の太陽電池モジュール（京セラ（株）製 LA441K63）を 5 枚並列に接続して構成されている。DC-DC コンバータには、Cuk コンバータを用いており、その通流率は、コンピュータにより指定可能である。

本システムにおいて、通流率を 0 から 100 % まで変化させたときの出力電力の様子を図2に示す。図2に示した各曲線は、それぞれ表1に示すような方法で太陽電池モジュールをガーゼで覆った場合の出力電力に対応している。このように、太陽電池パネルをガーゼで覆うことは、雲などの障害物により日射の一部が遮られることを想定している。また、全面あるいは一部を覆うことでさまざまな影のでき方を模擬している。いずれの特性曲線も常に上に凸であり、最大電力点である極大点付近では、最大電力点に近づくほど特性曲線の傾きの絶対値が小さいことがわかる。このことは、日射量や素子温度、負荷の値が異なる場合にも成立する。

次章では、この性質を利用して通流率を最適な値へ速やかに追従させる方法について述べる。

3. 適応山登り法

本研究者は、図2に示したコンバータ出力電力特性曲線を四次多項式で近似し、適応アルゴリズムを用いてその

パラメータを推定することによって最大電力を取得する制御法を提案した⁽⁷⁾。この方法によれば、通流率の変化幅を一定とした山登り法に比べ、環境の変化に伴う発電特性の変動に速やかに対処できることを示した。しかしながら、特性を四次多項式で十分に近似できないような場合には、その性能を発揮できなかった。一方、山登り法は動作点を上下に変化させながら、その変動がより小さくなるように制御されるので、確実に最大電力点付近に到達することができる。しかし、特性変動に速やかに対処し、なおかつ最大電力点での変動をなくすには、図2に示したコンバータ出力電力特性曲線に合わせて動作点を変化させなければならない。

そこで、本研究では適応アルゴリズムを用いて、コンバータ出力電力特性曲線にあった動作点の変化幅を決定し、特性変動に速やかに対処できる適応山登り法を提案する。

まず、コンバータ通流率 $\alpha(k)$ とコンバータ出力電力 $P(k)$

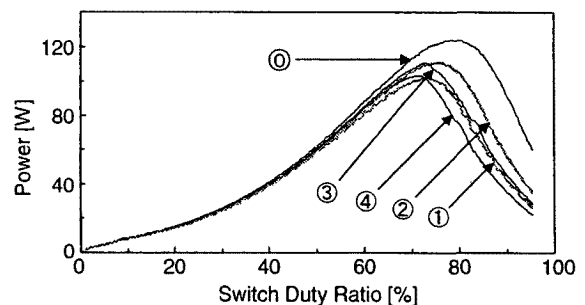


図 2 通流率に対するコンバータ出力電力特性

Fig. 2. Characteristics of Output Power versus Duty Factor

の関係を以下のような一次式で表すことにする。

$$P(k) = a_0 + a_1 \alpha(k) \dots\dots\dots (1)$$

(1)式に対応した数学モデルを(2)式のように構成し、適応アルゴリズムにより推定パラメータ $\hat{a}_0(k)$, $\hat{a}_1(k)$ を推定する。

$$P_m(k) = \hat{a}_0(k) + \hat{a}_1(k) \alpha(k) \dots\dots\dots (2)$$

なお、適応アルゴリズムには、非線形系や時変系においても適応性を発揮できる固定トレースゲイン方式⁽⁹⁾を用いるものとする。得られたパラメータ $\hat{a}_1(k)$ を用いて、通流率の変化量 $\Delta\alpha(k+1)$ を(3)式により求め、通流率 $\alpha(k+1)$ を(4)式により決定する。

$$\Delta\alpha(k+1) = \hat{a}_1(k) \cdot \Delta\alpha_0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha(k+1) = \alpha(k) + \Delta\alpha(k+1) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\Delta\alpha_0$ は定数である。

本制御法では、コンバータ出力電力特性曲線を(1)式のような一次式で近似しているが、制御中は動作点付近のデータから数学モデルのパラメータが推定されるので、推定パラメータ $\hat{a}_1(k)$ は、図3に示すように動作点におけるコンバータ出力電力特性曲線の傾きとみなすことができると考えられる。したがって、(3)式により、通流率の変化幅をコンバータ出力電力特性曲線の傾きに比例して決定することができると考えられる。

本研究では、適応アルゴリズムによって数学モデルのパラメータを推定している。この適応アルゴリズムは、原理的に重み付き最小二乗法と同じでなので、単純に差分から特性曲線の傾きを求める方法⁽¹⁰⁾に比べて雑音などの影響を受けにくいと考えられる。また、パラメータの値は逐次更新されるので、時々刻々と変化する特性曲線の変動を数学モデルのパラメータの変化として検出できると考えられる。

通流率の変化幅を一定とする一般的な山登り法では、その変化幅を大きく選べば最大電力点付近への到達時間は短くなるが、到達後の振動も大きくなってしまふ。一方、最大電力点付近での振動を小さくするために通流率の変化幅を小さくすれば、特性変動に速やかに対応することができない。これに対して、本研究で提案した方法は環境の変動に伴う特性変化を検出しながら、通流率の変化量を変えていくことができ、最大電力点への速やかな追従を実現しながらも最大電力点付近での動作点の変動を抑えることができると考えられる。

次章では提案した制御法の有効性を確認するために、種々の状況下で実験を行う。

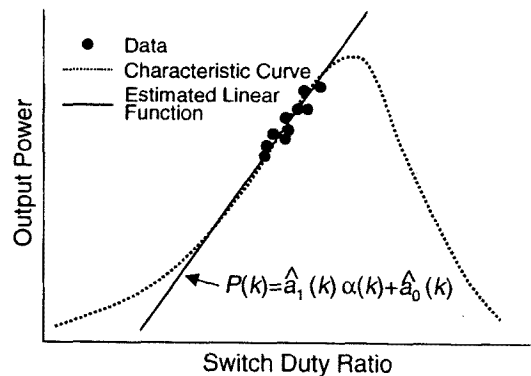


図3 適応アルゴリズムによるパラメータ推定の概念

Fig.3. Concept of Parameter Estimation by Adaptive Algorithm

4. 実験と結果

3章で述べた制御系を図1に示した太陽光発電システムに実装し、日射量および負荷をさまざまに変化させて、制御実験を行った。サンプリング間隔を100ms、DC-DCコンバータの初期通流率を50%、(3)式の定数 $\Delta\alpha_0$ は1とし、実験は日射量の変動が小さい正午前後の快晴のときに行った。

また、比較のために、上記実験と同条件で通流率の変化幅を一定とする山登り法の実験を行った。その際、最大電力点付近での動作点の変動を小さくするために、通流率の変化幅を0.2%とした。

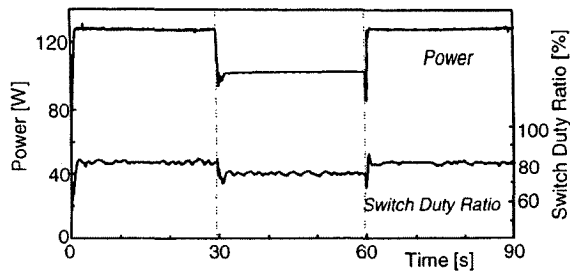
〈4・1〉日射量の変化に対する応答 まず、電力出力特性に影響を及ぼす環境の変化として日射量の変化があげられるので、ガーゼを用いて太陽電池アレイに影を作り、日射量を変化させたときの応答について調べた。影は、表1に示した以下の4通りの方法で作った。

- ①太陽電池アレイ全体を覆う
- ②左側3枚の太陽電池モジュールを覆う
- ③太陽電池アレイ全体の左下半分を覆う
- ④太陽電池アレイ全体の下側半分を覆う

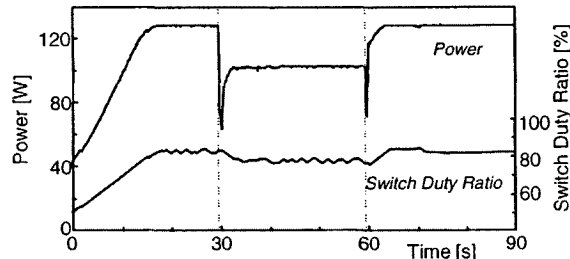
負荷抵抗は5.1Ωとして、実験開始約30秒後に太陽電池アレイをこれらの方法で覆い、約60秒後に外した。

このように、太陽電池アレイ全体に影を作った場合の応答だけでなく、部分的に影を作った場合の応答についても実験を行ったのは、例えばソーラカーなどで太陽電池アレイの一部が地物の影になることを想定したものである。

影を上記の①～④の方法で作ったときの制御結果を、それぞれ順番に図4～7に示す。各図の(a)は提案した適応山登り法、(b)は通流率の変化幅を一定とした山登り法に



(a) Adaptive Hill-climbing Method



(b) Standard Hill-climbing Method

図4 太陽電池アレイ全体を覆って日射量を変化させたときの応答

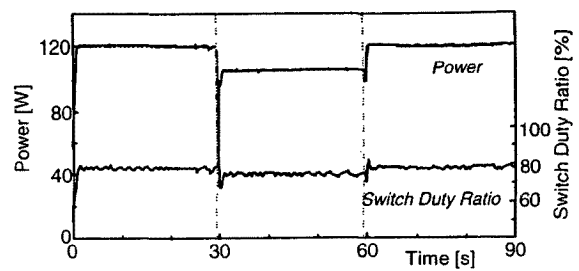
Fig. 4. Responses under Conditions of Sudden Radiation Changes when Covering the Whole PV Array

よる結果であり、それぞれにコンバータ出力電力と通流率の変化の様子を示している。また、図中の縦の点線は日射量を変化させた時点を示している。

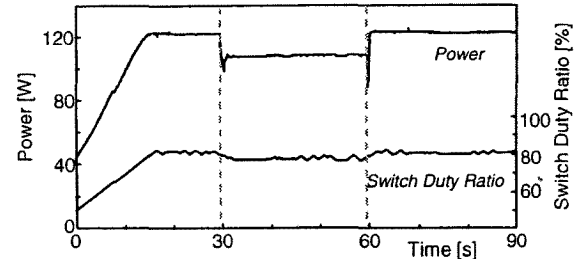
図4～7のいずれの図においても、始動後と日射量の変化後に通流率が最大電力を与える最適な値へと変化しており、最大電力点への追従が行われている。提案した制御法と山登り法の比較では、始動時に提案した制御法の方が山登り法より速やかに最大電力に達していることがわかる。また、図4、図6、図7では、提案した制御法が日射量の変化後においても山登り法より速やかに最大電力へ達していることがわかる。図5では、日射量の変化に伴うシステム特性の変化が小さいので、日射量の変化から最大電力に達するまでの時間は同程度となった。

したがって、提案した適応山登り法では、通流率の変化幅が一定の山登り法に比べて速やかな最大電力点への追従を実現することができ、日射量の変化に伴うシステム特性の変化が大きい場合にも、その有効性を発揮することができると思われる。

〈4・2〉 負荷の変化に対する応答 次に負荷抵抗を変化させたときの応答を図8に示す。先と同様に(a)は適応山登り法、(b)は通流率一定の山登り法による結果である。実験では、図中左の点線の時点で負荷抵抗を10.4Ωから3.0Ωに変化させ、右の点線の時点で3.0Ωから10.4Ωに変化させた。



(a) Adaptive Hill-climbing Method



(b) Standard Hill-climbing Method

図5 太陽電池パネルの左3枚を覆って日射量を変化させたときの応答

Fig. 5. Responses under Conditions of Sudden Radiation Changes when Covering the Left Three Panels of the PV Array

図8より、適応山登り法による制御では、始動時と負荷抵抗の変化後に山登り法よりも速やかに最大電力を得られていることがわかる。したがって、負荷抵抗が変化した場合にも、提案した制御法は有効性を発揮できると考えられる。

5. おわりに

本研究では、太陽光発電システムの最大電力点追従制御法として、適応アルゴリズムを用いて出力特性曲線の傾きを推定しながら入力である通流率の変化幅を決定する適応山登り法を提案した。そして、出力特性に影響を与える環境である日射量と負荷抵抗の値を変化させて制御実験を行い、提案した制御系が特性変動に速やかに対処可能であることを確認した。

本研究では、コンバータ出力電力特性曲線の近似に一次関数を選んだが、このことは精度を落とす近似のようであるが、動作点付近でのデータでパラメータ推定するので、結果的に動作点付近でのコンバータ出力電力特性曲線の接線として得られることになると考えられる。高次の多項式を用いて近似した場合、物理的な対応関係がないので、実験環境によってはローカルミニマムにおちいってしまうことがあるが、直線による近似ではコンバータ出力電力特性曲線の傾きの傾向を確実にとらえることができる。また、適応アルゴリズムによれば、単純な差分で傾きを求める場合に比べて雑音の影響を受けにくい。したがって、最大電力

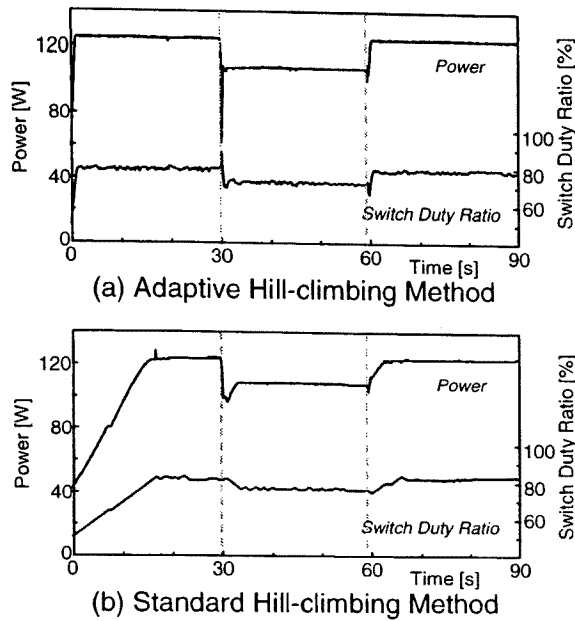


図 6 太陽電池パネルの左下半分を覆って日射量を変化させたときの応答
 Fig. 6. Responses under Conditions of Sudden Radiation Changes when Covering the Lower Left of the PV Array

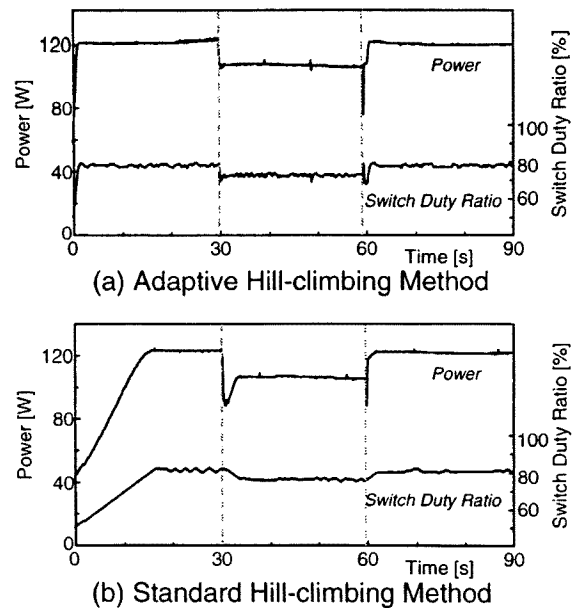


図 7 太陽電池パネルの下半分を覆って日射量を変化させたときの応答
 Fig. 7. Responses under Conditions of Sudden Radiation Changes when Covering the Lower Half of the PV Array

点への速やかな追従を実現しながらも最大電力点付近での動作点の変動を抑えることができると考えられる。

本制御系は一般的な太陽光発電システムの特性の性質に基づいており、適用する際にシステム個別の出力特性や負荷などに関する詳細な情報を必要としない。今後は、より性能のよい最大電力取得制御系を構成するために、比例定数 $\Delta\alpha_0$ を自動調整できる機能を備えた制御系に関する検討を行う予定である。特に、図 2 に示したようなコンバータ出力特性曲線において、通流率 0~20% 付近では傾きが小さいので、通流率の変化幅を推定した特性曲線の傾きに比例させるだけでは最大電力点への到達時間は大きくなってしまい、この対処法については今後の課題である。また、現在抵抗負荷のみならず、ペルチェ素子を用いた温度制御など実用的な負荷に対する評価検討を行っており、その結果については稿を改めて発表したい。さらに、これまで本研究者らが提案した四次多項式近似による方法の問題点を定量化し、本研究で提案した一次式を用いた適応山登り法との組み合わせによる制御方法の検討を行なう予定である。(平成 12 年 10 月 30 日受付, 同 13 年 2 月 5 日再受付)

文 献

(1) B. K. Bose, P. M. Szczesny & R. L. Steigerwald: "Micro-computer control of a residential photovoltaic power condi-

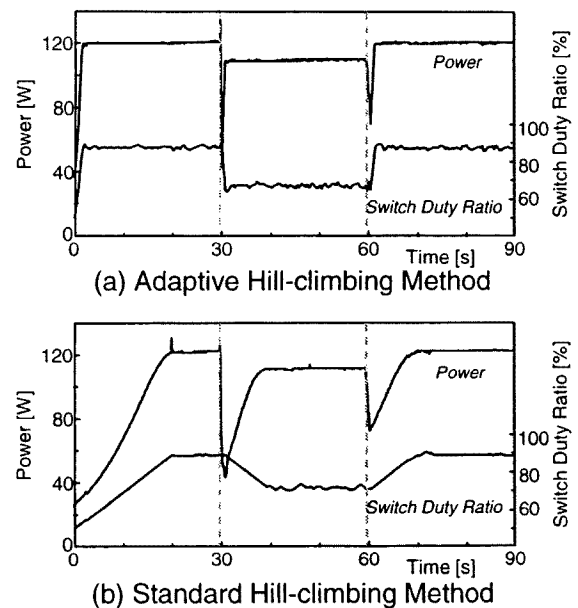
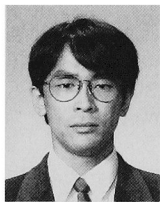


図 8 抵抗負荷を急変させたときの応答
 Fig. 8. Responses under Conditions of Sudden Load Changes

- tion system”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-21, 1182-1191 (1985).
- (2) 岡土千尋:「太陽光発電システムの現状と将来 III. 太陽光発電システムの要素技術-2- 太陽光インバータ技術」, 電学論 C, **155**, 1, 34-39 (1995).
 - (3) 逸見次郎, 岩堀道夫, 高橋徹, 古川誠一, 池田吉堯:「太陽光発電用変換装置とその制御に関する考察」, SPC-84-23, 39-48 (1984).
 - (4) 松永利美, 千徳真也, 松田敏彦:「太陽光発電の抵抗負荷時最大電力取得制御」, 平 7 電気関係学会北海道支部連大, No.385 (1995).
 - (5) Chung-Yuen Won, Duk-Heon Kim, Sei-Chan Kim, Won-Sam Kim & Hack-Sung Kim: ”A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller”, *IEEE Power Electron. Spec. Conf. Vol.1994*, No. Vol. 1, 396-403 (1994).
 - (6) 高原健爾, 松田敏彦:「太陽光発電システムの最大電力取得適応制御法」, 電学論 D, **118**, 810-811 (1998).
 - (7) 高原健爾, 山之内庸一, 松田敏彦:「環境の変化に対処可能な太陽光発電の最大電力取得制御系」, 電学論 D, **119**, 1529-1534 (1999).
 - (8) 山之内庸一, 高原健爾, 川口秀樹, 野崎久司:「太陽光発電のための適応山登り法」, 平 12 電気関係学会北海道支部連大, No.28 (2000).
 - (9) 新中新二:「適応アルゴリズム」, 産業図書, 東京 (1990).
 - (10) 山之内庸一, 高原健爾:「太陽光発電の特性に基づく山登り法による最大電力取得制御」, 平 11 電気関係学会北海道支部連大, No.50 (1999).
 - (11) 中溝高好:「信号解析とシステム同定」, コロナ社, 東京 (1989).

高原健爾 (正員) 昭和 41 年 1 月 11 日生。平成 9 年 3 月 東京医科歯科大学大学院医学研究科博士課程単位取得退学。同年 4 月より室蘭工業大学工学電気電子工学科助手。博士 (工学)。



山之内庸一 (学生員) 山之内庸一 (学生員) 昭和 50 年 5 月 5 日生。平成 11 年 3 月室蘭工業大学工学部電気電子工学科卒業。平成 11 年 4 月同大学大学院工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻入学。現在に至る。



川口秀樹 (正員) 昭和 63 年北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。同年, 日本電信電話 (株) 入社。平成 3 年北海道大学電気工学科助手を経て, 現在, 室蘭工業大学電気電子工学科助教授。博士 (工学)。平成 7~8 年文部省在外研究員 (ダルムシュタット工科大学, ドイツ) 電磁場解析, 荷電粒子光学に関する研究に従事。

