

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K21188

研究課題名（和文）広範囲な日射量計測のためのカメラを用いた汎用的な技術に関する研究

研究課題名（英文）A Study on General-purpose Technique for Measuring Solar Irradiance in a Wide Range Using Camera

研究代表者

高橋 明子 (TAKAHASHI, Akiko)

岡山大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：10644213

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）：太陽光発電（PV）電力は気象条件により急峻に変動するため、PVシステムの普及と安定した電力供給のためには、広範囲の日射量を簡易に求めることが必要である。そこで本研究では、カメラで撮影した画像の色情報を解析することで広範囲の日射量を計測する汎用的な技術を創案し、実験により有用性を確認した。この成果を、国際会議や国内会議で発表するとともに、学術雑誌への論文掲載を通じて公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日射計は設置した地点のみの日射量しか計測できない。一方、本研究で開発した技術は、撮影した画像内であれば、複数地点の日射量を計測することができる。したがって、広範囲の日射量を計測するために設置する機器の数を削減でき、安価な計測システムを実現できる。さらに、今後、監視用や情報収集のために屋外カメラの導入が進んだ場合、本研究で開発した技術を発展させることで、本来の目的にプラスして日射量計測も可能になると考えられる。広範囲の日射量は、PV電力を活用した安定な電力供給のために重要な情報であり、本研究の成果は、わが国が推進している低炭素社会実現に大いに貢献できるものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：It is necessary to easily measure solar irradiance in a wide range for the spread of photovoltaic generation (PV) systems and stable power supply because PV power fluctuates sharply depending on weather conditions. In this study, a general-purpose technique for measuring solar irradiance in a wide range is developed by analyzing the color information of images captured by a camera. The proposed methods are verified through experimental simulations and discussed on their results. These results are presented at international and domestic conferences, as well as published in an academic journal.

研究分野：電力システム

キーワード：日射量 画像解析 太陽光発電

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本国内のエネルギー戦略として、PVシステムの導入が推進されている。PV電力は、設置条件や気象条件に起因して変動するため、PVシステムの普及と安定した電力供給のためには、PV電力の変動による影響を補償する制御機器の選定や配置、運用が重要となる。これらを効果的にを行うために、広範囲の日射量を簡易に計測する技術が切望されている。

日射量は、日射計を用いて計測することができる。しかし、日射計は設置した地点のみの日射量しか計測できない。そこで、研究代表者らは広範囲な日射量計測法として、カメラを用いた日射量計測法を開発してきた(以下、従来法と呼ぶ)。従来法のご概念図を図1に示す。まず、カメラで撮影した画像内の任意の一地点(図1では「カメラ撮影画像」の赤丸印)に対して、予め日射量と画像の色情報であるHSV値(H:色相, S:彩度, V:明度)の相関図を作成し、相関図から天気別の2種類の日射量推定モデルを作成する。そして、日射量を計測する際は、撮影した画像の計測地点のHSV値を作成した日射量推定モデルに代入することで日射量を求める。この時、使用する日射量推定モデルを気象庁が発表する天気によって切り替える。

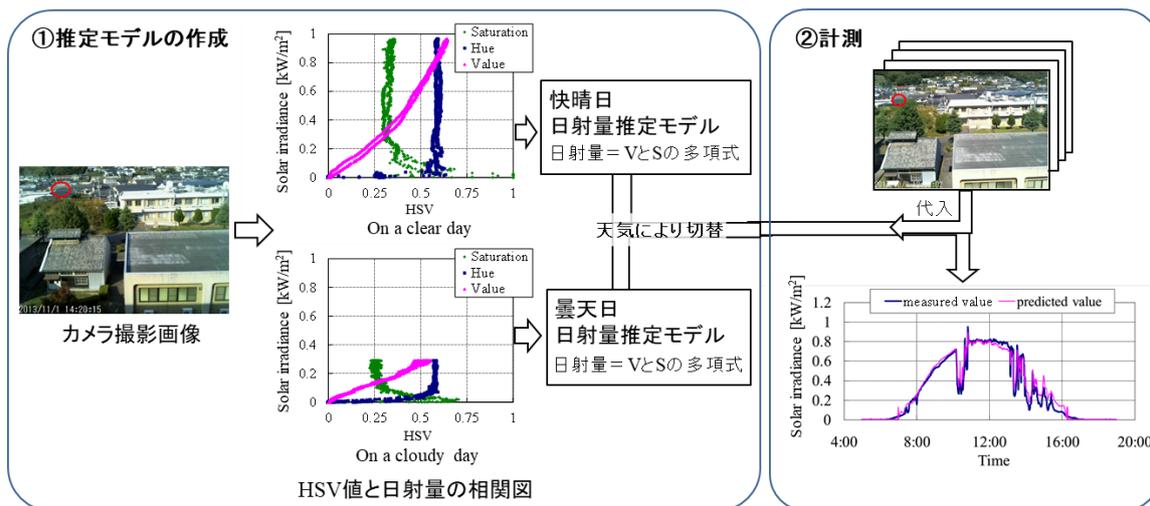


図1 カメラを用いた日射量計測法のご概念図

従来法では、図2に示すように、天気の発表が1日3回であるため、使用する日射量推定モデルを切替える回数が少なく、計測精度が悪化する欠点があった。また、一つの計測地点に対して予め日射量推定モデルを作成し、推定モデル作成地点の日射量計測精度のみを検証していたため、この技術をそのまま拡張して複数地点の日射量を計測する場合、計測地点ごとに日射量推定モデルを作成する必要があり汎用性に欠けていた。

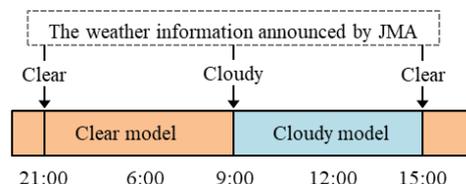


図2 従来法における日射量推定モデルの切替法

2. 研究の目的

本研究の目的は、カメラを用いた広範囲の日射量計測を実現する汎用的な技術を創案し、実験により有用性を確認することである。具体的には、まず「(1)一地点の日射量計測法の改良」を行い、その後、広範囲の日射量を計測するために「(2)複数地点の日射量測定法」へ発展させる。

3. 研究の方法

(1) 一地点の日射量計測法の改良

① 推定モデルの次数

カメラで撮影した画像内の任意の一地点に対して、予め快晴日と曇天日それぞれについて、日射計で計測した実測日射量と画像の色情報であるHSV値の相関係数を求める。これにより、日射量と相関の高い色情報を抽出する。また、標準誤差と自由度調整済み決定係数により、日射量推定モデルの次数を決定する。これらにより、冗長的な情報を削除し、より少ないパラメータでの日射量計測を可能とする。

② 日射量推定モデルの切替法

従来法では、使用する日射量推定モデルを切替える回数が少なく、計測精度が悪化する欠点があった。そこで、明度に対し閾値を設けて、日射量計測時に画像から取得した明度値と閾値を比較することにより、リアルタイムに逐次使用する天気別の2種類の日射量推定モデルを切替える(以下、手法1と呼ぶ)。日射量推定モデルを切替える方法のご概念図を図3に示す。

ここで、 V_m は日射量計測時に画像から取得した計測地点の明度値、 V_{ref} は明度閾値である。 $V_m > V_{ref}$ のとき、快晴日の日射量推定モデルを使用し、 $V_m \leq V_{ref}$ のとき曇天日の日射量推定モデルを使用する。

V_{ref} は、(2)式で定義する快晴日に取得される明度値 V_S を用いて、次式で設定する。

$$V_{ref}(t) = \alpha V_S(t) \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 α は影響係数である。 V_S は、計測地点の緯度と経度から天文学的に算出可能な快晴日の理論日射量 E_S から次式で定義する。

$$V_S(t) = b_1 E_S(t) + b_2 E_S^2(t) + b_3 E_S^3(t) \quad (2)$$

ここで、 $b_i (i=1, 2, 3)$ は、日射量推定モデルを作成する期間に取得した計測地点の快晴日の明度値と、快晴日の理論日射量との回帰係数である。

③ 理論日射量を用いた日射量推定モデルの作成

従来法や手法 1 では、天気別の 2 種類の日射量推定モデルを作成する際に、日射計で計測した実測日射量が必要である。実用化する上では、日射計で計測するデータを必要としない計測法が望ましい。そこで、計測地点の緯度と経度より算出可能な快晴日の理論日射量を用いた手法を開発する（以下、手法 2 と呼ぶ）。

手法 2 では、快晴日の日射量推定モデルを作成する際に、快晴日の理論日射量と快晴日に取得した明度値を用いて回帰係数 ((3)式の a'_i , (7)式の a_i) を決定する。そして、日射量を計測する際は、(3)式に示すように快晴日の日射量推定モデルに変数 β を逐次乗じることで補正する。

$$E(t) = \beta(t) \left(a'_1 V_m(t) + a'_2 V_m^2(t) + a'_3 V_m^3(t) \right) \quad (3)$$

ここで、 E は推定日射量 [kW/m^2]、 $a'_i (i=1, 2, 3)$ は快晴日の理論日射量と快晴日に取得した明度値を用いて決定した回帰係数である。変数 β は、快晴日に取得される明度値 V_S と撮影した画像内の平均明度値を用いて逐次決定する。

(2) 複数地点の日射量測定法

① 計測地点ごとの明度の違いによる補正

これまでに開発した技術は、ある任意の一点に対して予め日射量推定モデルを作成し、日射量推定モデル作成地点の日射量を計測するものであった。この技術をそのまま拡張して複数地点の日射量を計測する場合、モデル作成地点と他の計測地点の色情報の違いにより、計測精度が悪化する問題がある。この問題は、計測地点ごとに日射量推定モデルを作成すれば解決する。しかし、汎用的な日射量計測手法を開発するためには、計測地点ごとに日射量推定モデルを作成するのではなく、計測地点ごとの特徴量を抽出し、任意の地点で作成した日射量推定モデルを補正することが望ましい。

そこで、モデル作成地点と計測地点の明度値を用いて、以下の式で補正值を定義する。

$$\lambda(t) = \frac{V_M(t)}{V_T(t)} \quad (4)$$

$$\lambda_0 = \frac{V_{MN}}{V_{TN}} \quad (5)$$

ここで、 V_M と V_T はそれぞれモデル作成地点と計測地点の明度値、 V_{MN} と V_{TN} はそれぞれ快晴日の正午に取得したモデル作成地点と計測地点の明度値である。補正值として(4)式の $\lambda(t)$ もしくは(5)式の λ_0 を、(6)式に示すように日射量推定モデルに乗じることで各計測地点の日射量を導出する。なお、(6)式は補正值として(4)式を使用した場合である。

$$E(t) = \lambda(t) \left(a_1 V_T(t) + a_2 V_T^2(t) + a_3 V_T^3(t) \right) \quad (6)$$

ここで、 $a_i (i=1, 2, 3)$ はモデル作成期間にモデル作成地点の日射量と明度を用いて決定した回帰係数である。

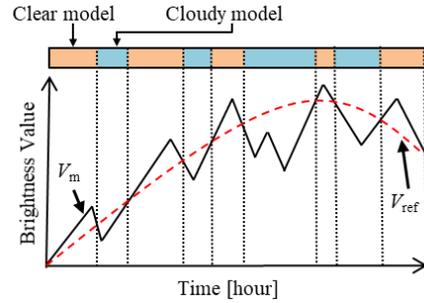


図 3 日射量推定モデルの切替法 (手法 1)

② カメラ向きによる補正

大規模な PV システムにおいて、任意の一地点で作成した日射量推定モデルを用いて複数地点の日射量を測定する場合、各計測地点が同色同素材のものであっても、カメラの方向と各計測地点との位置関係により色情報に影響が生じる。そこで、カメラの方向と各計測地点との位置関係を空間ベクトルで表し、各計測地点の明度値を逐次補正し、日射量推定モデルに代入する。

4. 研究成果

(1) 一地点の日射量計測法の改良

① 推定モデルの次数

実測日射量と計測地点の色情報である HSV 値それぞれについて相関係数を求めた結果、日射量と明度との間に強い相関が、色相との間に弱い相関が確認でき、彩度との間にはほとんど相関が確認できなかった。色相は計測地点の本来の色に大きく依存する値であるため、日射量推定モデルの説明変数に適していない。したがって、従来法では明度と彩度を日射量推定モデルの説明変数として使用していたが、本研究では明度のみを使用することとした。また、説明変数である明度の次数を 3 次と決定し、次式のように日射量推定モデルを表現した。

$$E(t) = a_1 V_m(t) + a_2 V_m^2(t) + a_3 V_m^3(t) \quad (7)$$

ここで、 E は推定日射量 [kW/m^2]、 $a_i (i=1, 2, 3)$ は回帰係数である。これにより、従来法と比べて、より少ないパラメータで日射量推定モデルを表現することを実現した。

② 日射量推定モデルの切替法 (手法 1)

2014 年 10 月 1 日から 31 日に撮影した画像および日射計で計測した実測日射量を用いて、日射量推定モデルおよび快晴日に取得される明度値 V_3 を決定した。実測日射量との二乗平均平方根誤差 (RMSE) が最も小さくなるように、明度閾値を決定する影響係数を $\alpha=0.8$ と決定した。2014 年 11 月 1 日から 2015 年 2 月 4 日の日射量を計測した結果、実測日射量との RMSE が従来法では $0.117 \text{ kW}/\text{m}^2$ であったのに対して、手法 1 では $0.091 \text{ kW}/\text{m}^2$ となり、測定精度を 22% 改善した。

③ 理論日射量を用いた日射量推定モデルの作成 (手法 2)

2014 年 10 月 1 日から 31 日に撮影した画像および快晴日の理論日射量を用いて、快晴日の日射量推定モデルを作成した。2014 年 11 月 1 日から 2015 年 2 月 4 日に日射量を計測した結果、日射計で計測した実測日射量との RMSE が $0.079 \text{ kW}/\text{m}^2$ となった。

本手法は、快晴日の理論日射量と計測地点の快晴日における明度値との相関から、1 種類のみの日射量推定モデルを作成し、日射量計測時に画像内の明度平均値を用いて日射量推定モデルを逐次補正する。そのため、日射量推定モデル作成時に日射計のデータを必要としないだけでなく、使用する日射量推定モデルの数を削減し汎用性を向上させた。さらに、逐次推定モデルを補正するため、従来の技術と比べて計測精度を向上させることを実現した。

また手法 2 の他に、日照時間と積算日射量には強い相関関係があることを利用して、気象庁が発表した日照時間を用いて β を決定する手法を開発した。この手法を用いた場合、実測日射量を用いる場合と同等の精度で日射量を計測可能であることを示した。

図 4 に一例として 2014 年 11 月 27 日に各手法を用いて日射量を測定した結果を、図 5 に 2014 年 11 月 1 日から 2015 年 2 月 4 日までの RMSE の平均値を示す。

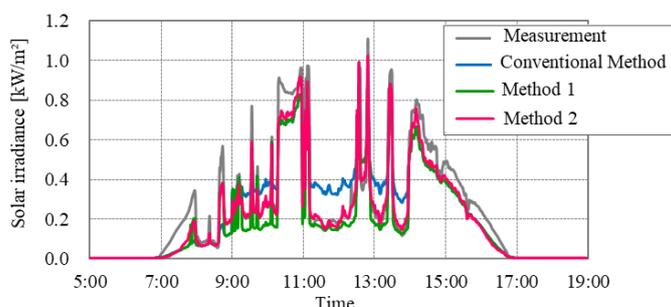


図 4 2014 年 11 月 27 日の計測結果

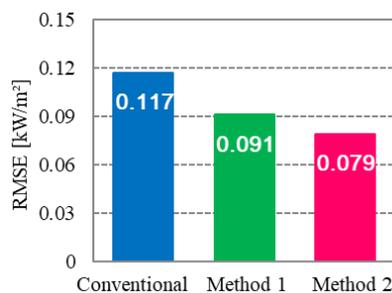


図 5 RMSE の平均値

(2) 複数地点の日射量測定法

① 計測地点ごとの明度の違いによる補正

開発した手法を手法 1 と比較する。モデル作成地点と他の計測地点の明度の違いを明度閾値に

も反映させるために、(1)式右辺に $1/\lambda_0$ を乗じることで明度閾値を設定する。撮影画像内の異なる色の地点を計測地点として検証を行った結果、補正を行うことでモデル作成地点とは異なる地点の日射量をモデル作成地点と同等の精度で計測できることを示した。

補正值として $\lambda(t)$ を用いた場合、計測地点ごとの明度値の違いにより逐次日射量推定モデルを補正できる利点を有する。しかし、モデル作成地点と計測地点の明度値を常に取得する必要があるため、観測範囲を変更して撮影画像内からモデル作成地点が外れた場合、日射量が計測できなくなる。一方、補正值として λ_0 を用いた場合、モデル作成地点とそれぞれの計測地点の快晴日の正午における明度値が取得できれば補正できるため、計測範囲を変更しても日射量を計測することができる。

② カメラ向きによる補正

カメラの方向と各計測地点との位置関係を空間ベクトルで表し、各計測地点の明度値を逐次補正して、日射量推定モデルに代入した。各計測地点で快晴日に計測した日射量を比較した結果、日射量が最大となる時刻が南中時刻と一致するように補正できていることを確認した。これより、カメラの方向と各計測地点との位置関係による影響は空間ベクトルを用いた補正により解消できると考えられる。

以上の結果を踏まえると、本研究はカメラを用いた日射量計測技術の汎用性を高めており、広範囲の日射量計測を実現するものである。本研究の成果は、わが国が推進している低炭素社会実現に大いに貢献できるものと期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 山田信行, 高橋明子, 今井 純, 船曳繁之	4. 巻 43巻4号
2. 論文標題 カメラ画像解析による多地点日射量計測システムの開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 太陽エネルギー	6. 最初と最後の頁 63-68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 黒田涼平, 高橋明子, 今井 純, 船曳繁之
2. 発表標題 位置による色情報の変化を考慮した複数地点の日射量推定手法
3. 学会等名 第28回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kawakami, A. Takahashi, J. Imai and S. Funabiki
2. 発表標題 Measuring Method for Solar Irradiance at Multi-points with Different Color Based on Image Analysis
3. 学会等名 IEEE Energy Conversion Congress & Expo (ECCE) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川上賢人, 高橋明子, 今井 純, 船曳繁之
2. 発表標題 画像解析に基づいた異なる色を持つ屋根材における日射量推定モデルの評価
3. 学会等名 平成30年度太陽/風力エネルギー合同研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒田涼平, 高橋明子, 今井 純, 船曳繁之
2. 発表標題 空間ベクトルを用いた明度のピーク時刻の導出
3. 学会等名 平成30年度太陽/風力エネルギー合同研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Takahashi, A. Moriki, N. Yamada, J. Imai and S. Funabiki
2. 発表標題 A Simple Method for Measuring Solar Radiation Intensity by Image Analyses
3. 学会等名 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川上賢人, 高橋明子, 今井 純, 船曳繁之
2. 発表標題 日照時間を利用した推定モデルによる画像解析に基づいた日射量計測
3. 学会等名 平成29年度(第68回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田信行, 高橋明子, 今井 純, 船曳繁之
2. 発表標題 カメラの向きと計測対象のなす角度が画像解析による日射量推定に及ぼす影響
3. 学会等名 第26回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Moriki, A. Takahashi, J. Imai and S. Funabiki
2. 発表標題 A Novel Method of Estimating Solar Radiation Intensity Based on Camera Image Analysis by Sequentially Switching Models
3. 学会等名 The International Conference on Electrical Engineering 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山田信行, 高橋明子, 今井 純, 舩曳繁之
2. 発表標題 カメラ画像解析による多地点日射量計測システムの開発
3. 学会等名 平成28年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考