

Development of Multipoint Solar Radiation Intensity Measuring System
Based on Analysis of Camera Images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Nobuyuki YAMADA Akiko TAKAHASHI
山田 信行¹ ‡ 高橋 明子²Jun IMAI
今井 純³Shigeyuki FUNABIKI
船曳 繁之⁴

Abstract

In recent years PV systems attract an attention as countermeasures against environmental problems. A wide range of solar radiation intensity measurements is desirable for the operation of a large scale PV system. It is difficult to measure solar radiation intensity in wide area using pyranometers. The authors have proposed the solar radiation intensity measuring method by analyzing camera images. This paper proposes a solar radiation intensity measurement system at multiple points based on camera image analysis. The estimation of solar radiation intensity model used in this system is created by analyzing one point on the PV module. This system consists of a web camera and a personal computer. Three points in the camera image are analyzed to verify the availability of the developed system. The solar radiation intensity measured by the developed system is coincident with the measured value.

Keywords: Photovoltaic Generation, Solar Radiation Intensity, Measurement, Camera Image

キーワード：太陽光発電，日射量，計測，カメラ画像

1. はじめに

近年，電気エネルギーの多くは火力発電によって得られている。しかし，発電の際に発生する温室効果ガスによる地球温暖化や化石燃料の枯渇化が懸念されている。そこで，発電時に温室効果ガスが発生せず，エネルギー源が半永久的である太陽光発電（PV：Photovoltaic generation）システムの導入が進んでいる⁽¹⁾。しかし，大規模な PV システムでは雲や建物によって PV モジュールに部分的な陰ができた場合，システム全体の発電効率が低下する問題がある。そこで，各 PV モジュールの日射量に従いそれらの直列・並列数を変更する方法が提案されている^(2, 3)。現在，日射

量を取得する方法として日射計が使用されている。日射計は，設置した地点の日射量しか計測できないため，全ての PV モジュールの日射量を把握するためにモジュールごとに日射計を設置するには多くの労力と費用が必要であり，実現が困難である⁽⁴⁾。そのため，広範囲の日射量を計測する手法が求められている。

これまで多くの研究者が日射量推定法に関する研究を行っている⁽⁵⁻⁷⁾。その中でも簡易かつ広範囲の日射量を取得する方法として，カメラ画像の色情報と日射量の相関から日射量推定モデルを作成する手法⁽⁸⁾が提案されている。著者らは，実測日射量と画像の色情報から，相関が確認できた彩度と明度を用いて重回帰分析により日射量推定モデルを作成した⁽⁹⁾。この手法では，日射量を計測する地点に対して快晴日と曇天日の天気別の日射量推定モデルを作成し，気象庁によって発表される天気に合わせて，日射量推定モデルを切り替えて日射量推定を行う。しかし，多地点の日射量計測については未検討である。

本論文では，撮影した画像内の指定した多地点の色情報を解析することでリアルタイムに多地点の日射量を計測するシステムの開発を行う。まず，画像内の PV モジュール

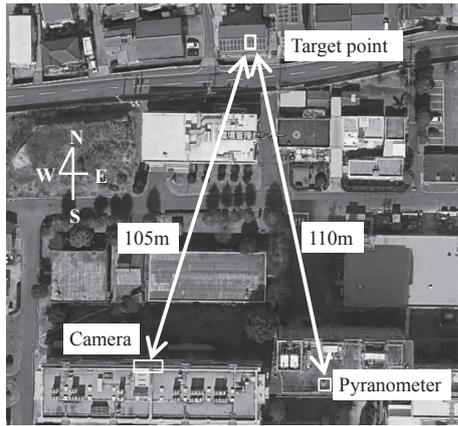
*1 岡山大学大学院自然科学研究科 博士前期課程（〒700-8530 岡山市北区津島中 3 丁目 1 番 1 号） ‡e-mail: nobuyuki.yamada@s.okayama-u.ac.jp

*2 岡山大学大学院自然科学研究科 助教

*3 岡山大学大学院自然科学研究科 准教授

*4 岡山大学大学院自然科学研究科 教授

（原稿受付：2017年2月24日，受理日：2017年6月30日）



(a) Arrangement of a camera, a pyranometer and a target point.

(a) カメラ，日射計，計測対象の配置



(b) Example of an acquired image.

(b) 取得画像の一例

Fig. 1 Experiment environment.

図1 実験環境

上の任意の一地点に対し日射量推定モデルを作成する。そして、日射量推定モデルを作成した計測地点を含む三地点を計測対象として、三地点の各明度値を日射量推定モデルに代入することで、それぞれの日射量をリアルタイムに計測する。開発したシステムで計測した日射量と日射計で計測した日射量を比較し、開発したシステムの実用性を検討する。

2. 日射量推定方法

2.1 日射量推定モデル作成環境

図1に実験環境を示す。図1(a)にカメラ，日射計，計測対象の配置を，図1(b)に設置したカメラから取得した画像の一例を示す。図1(b)の白枠が日射量推定モデルを作成する計測対象であるPVモジュールである。

日射計 (SOLAR MINI PCM-01) は，岡山大学工学部 4号館屋上に傾斜角 20度で南向きに設置する。設置した日射計から日射量を 60秒ごとに取得する。カメラ (Logicool HD Webcam C525) は岡山大学工学部 3号館 4階に設置する。カメラを PV モジュールが画角内に収まるように北へ向け，

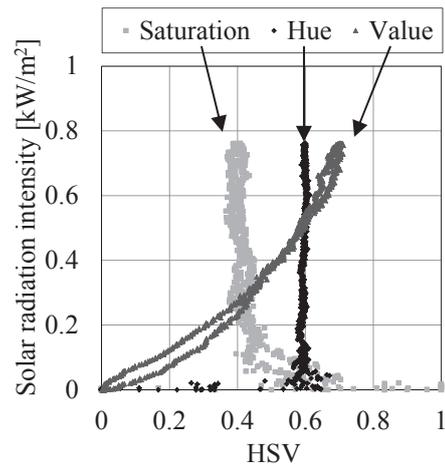


Fig. 2 Correlation diagram between solar radiation intensity and HSV values (Oct. 8, 2014)

図2 日射量と HSV 値の相関図 (2014年10月8日)

Table 1 Average values of correlation coefficients (Oct. 2014).

表 1 相関係数の平均値 (2014年10月)

Hue	Saturation	Value
0.3693	-0.1893	0.9231

60秒ごとに画像を取得する。計測対象と日射計の設置点は一致していないが，本論文では撮影範囲の日射量は同じと仮定する。

2.2 日射量推定モデルの作成

著者らが提案する日射量計測手法では，日射計から得られる実測日射量とカメラで撮影した計測対象の色情報との相関を確認し，相関の強い色情報を用いて重回帰分析により日射量推定モデルを作成する⁹⁾。日射量推定モデルに使用する色情報は色相，彩度，明度を表す HSV (H: Hue, S: Saturation, V: Value) 値である。

画像の各色情報と日射量の相関の強さを次式の相関係数 R で定量的に判断する。

$$R = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})(y(n) - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (y(n) - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

ここで， x は日射量， y は HSV 値の 3 変数のうちのひとつ， N はデータ数， \bar{x} ， \bar{y} はそれぞれのデータの平均値である。

相関係数は，5時00分から18時59分までのデータを用いて1日ごとに算出する。画像と日射量は60秒ごとに取得しているため，データ数は1日あたり840個である。相関係数は-1から1の範囲で与えられ，その絶対値が1に近づくほど線形的な相関が強くなる。また，一般的に相関係数

は絶対値 0.7 以上で強い相関があると判断できる。

一例として、図 2 に 2014 年 10 月の快晴日のうち、最も雲の影響がない 2014 年 10 月 8 日の計測対象の HSV 値と日射量の相関図を示す。図 2 における相関係数は、明度が 0.97、彩度が 0.25、色相が 0.60 であり、日射量と明度に強い相関が確認できる。2014 年 10 月の 30 日分の相関係数を導出しその平均値を表 1 に示す。表 1 より、天気に関わりなく日射量と明度に強い相関が確認できる。

本論文では、文献(9)と同様に雲の影響がない快晴日のデータを用いて、目的変数を日射量、説明変数に明度を用いた 3 次多項式の日射量推定モデルを作成する。使用する日射量推定モデルを次式に示す。

$$E = a_1V + a_2V^2 + a_3V^3 \quad (2)$$

ここで、 E は日射量 [kW/m^2]、 V は明度値、 a_i ($i=1, 2, 3$) はモデル係数である。モデル係数は最小二乗法を用いて導出する。

3. 多量地点計測システム

3.1 開発したシステムの運用方法

開発したシステムは、大規模 PV システムの多地点の日射量計測を行うことを目的としている。開発したシステムでは、日射量計測を行う一地点に対して、予め一定期間に取得した画像データと日射量から(2)式のモデル係数を決定することで日射量推定モデルを作成する。そして、日射量推定モデルを計測システム内に組み込み、計測地点から取得される明度値を日射量推定モデルに代入することで日射量を導出する。

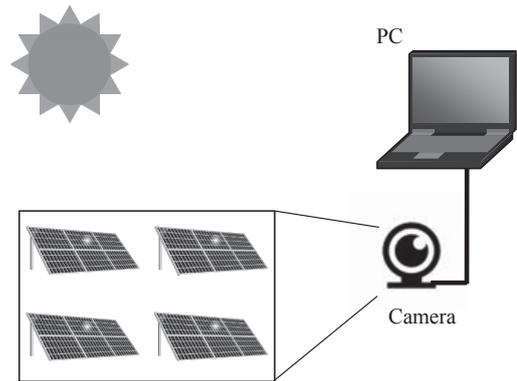


Fig. 3 Conceptual diagram of multipoint solar radiation intensity measuring system.

図 3 多地点日射量計測システムの概念図

日射量推定モデルを計測地点ごとに作成することも可能である。しかし、計測地点が増えるごとに日射量推定モデルを作成する手間が増加する問題点がある。このため本論文では、予め任意の一地点に対して日射量推定モデルを作成する。そして、他の地点の推定を行う際には、作成した日射量推定モデルに計測する地点の明度値を代入することで日射量を導出する。なお、本論文では文献(9)に示す天気ごとのモデルの切り替えは行わない。

図 3 に開発したシステムの構成概念図を示す。計測システムに予め日射量推定モデルが組み込まれていれば、計測システムは図 3 に示す通り、PC (Personal Computer) とカメラのみによって構成され、画像内の任意の地点の日射量を計測できる。



Fig. 4 GUI of developed system.

図 4 開発したシステムの GUI 画面

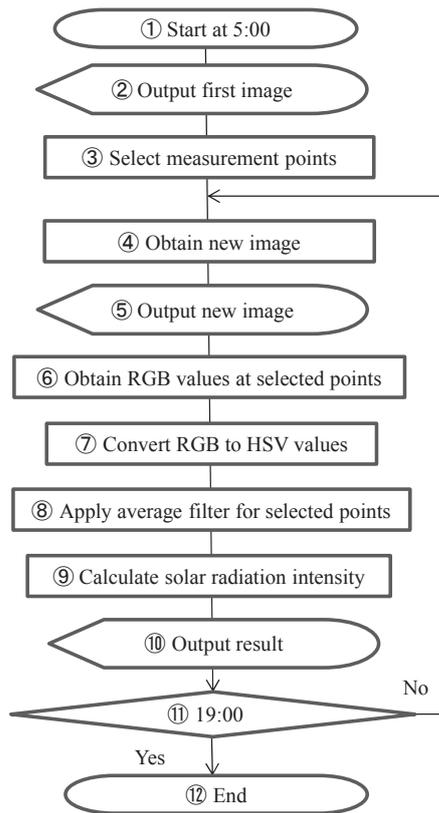


Fig. 5 Flow chart of developed system.
 図5 開発したシステムのフローチャート

3.2 開発したシステム構成

開発した多地点日射量計測システムの GUI (Graphical User Interface) の画面を図4に示す。また、システムのフローチャートを図5に示す。本システムは、日の出頃である5時に画像取得を開始する(図5①)。そして、開始時に計測地点を選択する初期画面が図4のBエリアに出力される(図5②)。カメラから60秒ごとに画像が取得され、取得した画像が図4のBエリアに表示される(図5④、⑤)。図4のCエリアのESR (Estimated Solar Radiation) は計測地点での推定日射量である。

計測地点の選択はシステム開始時に図4のCエリアの「Select Point」ボタンをクリックし、図4のBエリアから計測地点を選択する(図5③)。選択した計測地点とその8近傍ピクセルのRGB (R: Red, G: Green, B: Blue) 値をHSV値に変換する(図5⑥、⑦)。変換した9ピクセルのHSV値の明度値に平均値フィルタを適用し、求めた明度値を2章で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(図5⑧、⑨)、その結果を表示する(図5⑩)。計測した結果は、時系列のグラフとして図4のAエリアに計測地点ごとに表示される。図5の④から⑩の処理を60秒ごとに19時まで続ける。

なお、RGB値は、赤、緑、青を原色としてそれら混色量で色を表現する時の各原色の混色量である。



Fig. 6 Measurement points.
 図6 計測点

Table 2 Coefficients of model.

表2 モデル係数

a_1	a_2	a_3
0.5950	-0.3328	1.5905

4. 日射量計測結果

開発した多地点日射量計測システムの実用性検討のため日射量の計測試験を行った。実測日射量とカメラで取得したPVモジュール上の一地点(図1の白枠)の色情報から日射量推定モデルを作成する。今回用いた画像データの画素数は、縦240、横320ピクセルで76800画素に設定した。図6に計測した三地点を示す。図中の枠①で示した計測地点1は日射量推定モデルを作成したPVモジュール上の一地点、枠②で示す計測地点2は計測地点と同じPVモジュール上の一地点、枠③で示す計測地点3はPVモジュールとは異なる屋根材上の一地点である。撮影期間中のうち、2014年10月8日が快晴であったため、この日の実測日射量と色情報を使用して導出した日射量推定モデルのモデル係数を表2に示す。

また、開発したシステムにより計測した日射量の評価として、次式のMAEを用いる。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |E_m(n) - E_s(n)| \quad (3)$$

ここで、 E_m は日射計で計測した実測日射量 [kW/m²]、 E_s は開発したシステムにより計測した日射量 [kW/m²]、 n は評価期間におけるデータ番号、 N は評価期間でのデータ数である。

図7に、図6で枠①、枠②、枠③で示した三地点を2014年11月27日に計測した結果を示す。図7より、三地点の計測結果は実測日射量と同様に、日射量の時間的変化を示している。三地点それぞれのMAEは、計測地点1で0.088 kW/m²、計測地点2で0.083 kW/m²、計測地点3で0.090

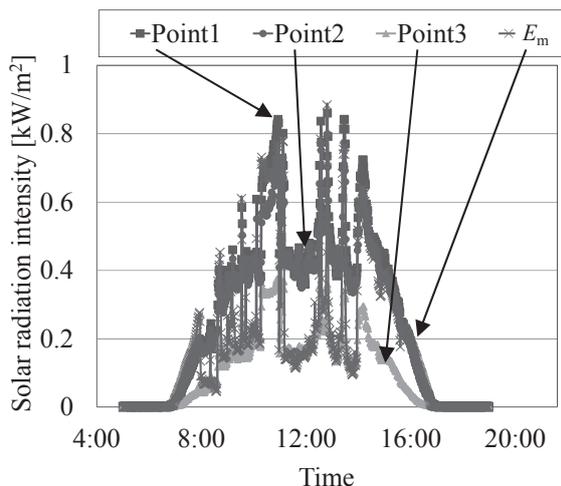


Fig. 7 Results of estimated solar radiation intensity using developed system (Nov. 27, 2014).

図7 開発したシステムによる日射量推定結果 (2014年11月27日)

Table 3 Average MAEs of each point (Nov. 2014).

表 3 各計測地点の平均 MAE (2014 年 11 月)

Point 1 [kW/m ²]	Point 2 [kW/m ²]	Point 3 [kW/m ²]
0.077	0.071	0.095

kW/m²となった。

2014年11月の推定結果のMAEの平均値を表3に示す。計測地点1と計測地点2のMAEは、計測地点3のMAEと比較して小さくなった。また、計測地点1と計測地点2のMAEの差は僅か0.006 kW/m²であった。これは、計測地点1が日射量推定モデルを作成した地点であり、計測地点2が計測地点1に隣接したPVモジュール上の点であるためである。計測地点3の屋根材が日射量推定モデルを作成した計測地点1のPVモジュールと異なることが、計測地点3のMAEを大きくした要因である。ただし、各計測地点の傾斜角の影響は未検討であるため、今後検討する必要がある。

また、図7で雲の影響により日射量が落ちている時間帯に計測地点1と計測地点2の計測値と実測値の誤差が大きくなっている。日射量推定モデルは快晴日のデータを用いて作成しており、雲の影響がある時間帯の色情報と日射量の相関が日射量推定モデルを作った条件での相関と異なるため、計測誤差が大きくなったと考えられる。文献(9)では雲の影響がない快晴日と雲の影響がある曇天日の日射量と色情報の相関から快晴日モデルと曇天日モデルをそれぞれ作成し、気象庁から発表される天気によって計測に用いるモデルの切り替えを行い、計測精度を改善している。図7の計測精度を改善するためには文献(9)の手法の導入が望

まれる。

5. まとめ

本論文では、カメラ画像を用いた多地点の日射量計測システムを開発した。開発したシステムの実用性を検討するため、画像上のPVモジュール上の任意の一地点から日射量推定モデルを作成し、日射量推定モデルの作成地点とPVモジュール上の別の一地点、PVモジュールとは異なる屋根材の一地点について、日射量をリアルタイムに測定した。その結果、日射計による計測値とモデルを作成した地点およびその付近の計測点での日射量推定値のMAEは0.071 kW/m²と0.077 kW/m²であり、MAEの差は僅か0.006 kW/m²となった。しかし、モデルを作成した地点の材質と異なる屋根材でのMAEは0.096 kW/m²と大きくなった。

多地点の測定で、近い二地点間の日射量を計測するためには、地点間の距離に応じてカメラの解像度を調整することで対応可能である。本システムのより実用的な検討のためには、大規模なPVシステムで運用し検証する必要がある。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP16K21188助成を受けたものです。

参考文献

- 1) M. JamilAhmad and G. N. Tiwari, Estimation of Hourly Global Solar Radiation for Composite Climate, *Open Enviroment Sciences*, **2**, 34-38 (2008).
- 2) T. Hayashi, The Serial-Parallel Switching of Photovoltaic Modules and Mixed Integer Programing, *The 2014 Annual Meeting Record I.E.E. Japan* (Mar. 2014), 4-S21-5, Ehime.
- 3) 福川宙季, 高橋明子, 今井純, 舩曳繁之, 最適化手法を用いた太陽電池モジュールの直並列接続切替によるPV発電電力の改善, 平成28年電気関係学会関西支部連合大会 (2016年11月), G3-3, 大阪.
- 4) Q. Zhang, J. Huang, Y. Hongxing and L. Chengzhi, Development of Models to Estimation Solar Radiation for Chinese Locations, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, **2** (2), 35-41 (2003).
- 5) K. N. Shukla, S. Rangnekar and K. Sudhakar, Comparative Study of Isotropic and Anisotropic Sky Models to Estimate Solar Radiation Incident on Tilted Surface: A Case Study for Bhopal, India, *Energy Reports*, **1**, 96-103 (2015).
- 6) M. Boulifa, A. Adane, A. Rezagui and et Z. Ameer, Estimate of the Global Solar Radiation by Cloudy Sky Using HRV Images, *Energy Procedia*, **74**, 1079 -1089 (2015).
- 7) S. Pattarapanitchai and S. Janjai, A Semi-empirical Model for Estimating Diffuse Solar Irradiance Under a Clear Sky Condition for a Tropical Environment, *Procedia Engineering*, **32**, 421 - 426 (2012).

- 8) K. Takigawa, Study of Estimation Method for Solar Radiation Intensity using WEB Camera, Proceedings of the Twenty-fifth Annual Conference of Power & Energy society (Sep. 2012) , 171 , Hokkaido.
- 9) A. Takahashi, H. Morio, J. Imai and S. Funabiki, Estimation Method for Solar Radiation Intensity Using Web Camera, Journal of the Japan Institute of Energy, **94** (11), 1330-1336 (2015).