

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01922

研究課題名（和文）全天空観測映像を用いた太陽光発電の局所・短期変動予測

研究課題名（英文）Local and short-time PV generation prediction from All sky image.

研究代表者

加藤 丈和 (Kato, Takekazu)

静岡理工科大学・理工学部・准教授

研究者番号：30362859

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、カメラで得た全天空の空画像を用いて、太陽光発電の局所的かつ短時間の変動を予測することである。

24時間236日の全天空画像を毎秒一枚の高ダイナミックレンジで観測、記録し続ける全天空観測システムと、そのキャリブレーションアルゴリズムを開発した。予測手法としては、CV技術に基づき、空画像から太陽、雲、空を分離する空モデルを開発し、雲の動きを予測する手法と、機械学習技術によりCNNとRNNを組み合わせる過去数秒の画像から将来の発電量を予測するアルゴリズムを考案した。最後にこれらの予測手法を組み合わせにより事前の画像処理とDNNによって予測精度を向上させる方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気象データや衛星画像を使って行う技術はすでに開発されているが、時間分解能、空間解像度が荒く、局地的な変動をピンポイントでかつ秒単位の変動を予測することはできていない。このような問題に対して、本研究はピンポイントで時間分解能が高い（秒単位）変動予測を目指している点で独創的である。このような局地的かつ秒単位の予測が可能になれば、電力消費機器を太陽光発電の変動に連動して制御することで、太陽光発電の電力変動を吸収しつつ有効活用することができ、電力グリッドの局地的な安定性維持、自家消費型の電力管理、さらに電力網の整っていない地域における独立型電力網制御など、その恩恵は広く社会的な意義が高い。

研究成果の概要（英文）：Our project aims to predict the local and short-term fluctuations of solar power generation by using the whole sky images.

First, we developed the whole-sky observation system that continuously observes and records whole-sky images 24 hours, 236 days capturing a high dynamic range image every second, and its calibration algorithm. Second, we developed two basic methods. One is a CV based sky image analysis model, a sky model that separates the sun, clouds, and blue-sky areas from the sky image. The other one is a machine learning based prediction method that predicted the movement of clouds and CNN and RNN from image sequence of the past few seconds. Finally, we developed a method to improve the prediction accuracy by performing image processing in advance and DNN by combination of the basic method.

研究分野：機械学習、画像認識、電力マネジメント

キーワード：太陽光発電予測 電力マネジメント 深層学習 画像認識

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽光発電はメンテナンス費用を除いて設置後の発電コストが不要で、数 kW の一般の戸建て住宅用の小規模なものから手軽に設置でき、大規模なメガソーラーまで対応可能なため、様々な規模の発電設備の導入が推進されている。

我が国においても、2009年に始まった「太陽光発電の余剰電力買取制度」や2012年より始まった「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」によって太陽光発電の電力の買取を電力会社に義務付け太陽光発電の導入推進を進めている。

一方で、太陽光発電は、天候の影響によって発電量が急激に変化するという問題があるため、電力ネットワークの需給バランスを維持するためには変動を吸収するための蓄電池や火力発電などの制御性の高い発電施設などが必要不可欠であり、電力の大部分を太陽光でまかなうことは困難であった。また、図1に示すように、上記の制度で買取を義務付けている期間は家庭用で10年間、非家庭用の大規模な設備でも20年間でありその先の電力買取は保証されおらず、有利な条件で買取が行われることは期待できないため、できるだけ自家消費を行う地産地消により有効活用する方法が待望されている。



図1. 太陽光発電の導入量と買取精度

2. 研究の目的

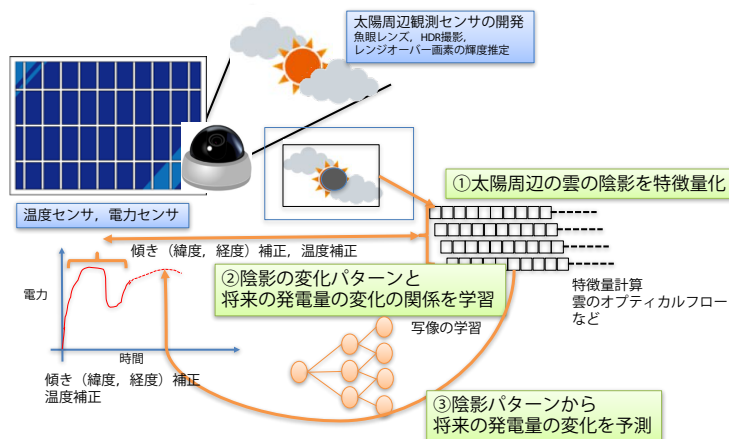


図2. 太陽光発電予測の概要

本研究の目的は、太陽光発電を地産地消型のエネルギーとして効率的に利用するために、太陽光発電の局所的かつ短時間で急激な変動を高精度に予測することである。

具体的には、太陽光パネルと同じ場所に設置した全天空を観測するカメラの映像から、雲の動きを予測し、雲による太陽の遮蔽や透過、散乱、反射を考慮しつつ太陽光パネルに届く光の日射量を推定し、数秒から数分後の太陽光発電の発電量を秒単位で予測する方法を開発する。また、観測地点を多地点に拡張し、地点間の雲の動きと発電量の関係を解析し、メガソーラーのような大規模な発電施設や地域の発電量の予測などより詳細な解析を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、まず太陽光パネルの設置とともに、太陽光パネルの位置から空の様子を観測するために、全天空観測システムを開発した。これは秒単位の全天の画像を24時間、365日継続して記録し続けるシステムである。また、太陽光の発電量も同時に計測して、全天画像とタイムスタンプを同期して記録した。

次に、コンピュータビジョンの技術によって、全天画像中の太陽部分、雲部分、青空部分を分離するためのSky-modelを構築し、雲の部分の動きを追跡するアルゴリズムを開発した。

また、機械学習の技術であるCNNとRNNを組み合わせた手法により、過去数フレームの画像シーケンスを入力として、将来の発電量を予測するアルゴリズムを開発した。

さらに、コンピュータビジョンの手法と機械学習の手法を組み合わせることで、より予測精度を向上させる手法を開発した。

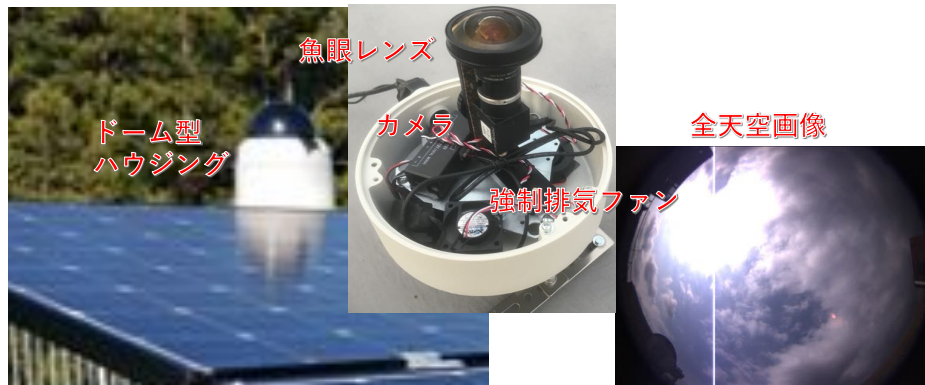


図 3. 全天空観測システム

4. 研究成果

(1) 全天空観測システムの開発

太陽光パネルの設置箇所において、全天空の画像を観測、記録する全天空観測システムを開発した。これは、本研究で必要な太陽と雲を直接撮影するシステムである。

家庭用の太陽光パネル程度の設置箇所でも観測できるようにコンパクトな撮影システムが必要であるが、屋外で太陽を含む空を観測しつづけるためには、風雨対策だけでなく、熱対策も重要となる。そこで図3に示すように、ドーム型ハウジングに熱対策として強制吸気排気ファンを取り付けたハウジングを制作し、その中に魚眼レンズを取り付けたカメラを設置した。

太陽は非常に強い光源であり、これを直接観測するためには通常のカメラではダイナミックレンジが不足している。これに対して太陽観測用の強い減光フィルタを使用する方法や、赤道儀などを用いてカメラの周りに太陽を覆い隠す遮蔽板を用いて撮影するのが一般的であるが、強い減光フィルタを用いるとコントラストの低い雲を鮮明に撮影するのが困難となり、遮蔽板を用いる方法では太陽付近の雲を観測できないという問題がある。そこで、露光時間を変更しながら複数枚の画像を撮影し合成するHDRと言う撮影方法によってダイナミックレンジの広い画像を取得し、雲のコントラストを残しながらできるだけ太陽周辺がレンジオーバーにならないように撮影した。1秒間に露光速度を変えながら4の画像を撮影し、これらを合成して1秒に一枚の高ダイナミックレンジ画像(HDR画像)を生成した。また同時に1秒毎の太陽光パネルの発電量を計測し、HDR画像と発電量は同期したタイムスタンプを付加して記録した。太陽光パネルが発電する日中は画像を非圧縮で記録し、太陽が沈んだ夜間に動画エンコードを行うことで、1年365日継続的に記録し続けるシステムを構築した。

また、魚眼レンズや太陽位置のキャリブレーション手法として、偏光カメラにより青空の変更現象を利用したキャリブレーション手法を開発した。一般的なレンズのキャリブレーション手法では格子パターンのようなキャリブレーションオブジェクトを観測範囲全体に満遍なく配置して撮影した画像を用いてレンズパラメータを推定するのが一般的であるが、全天空観測システムの場合、観測範囲がカメラの全方向でかつ、撮影対象が空であるためフォーカスを無限遠に設定するため、キャリブレーションオブジェクトの配置が困難である。またカメラのフォーカスや絞りなどを変えるとレンズパラメータが変化するため再度キャリブレーションを行う必要がある。さらに太陽位置についても、設置した緯度、経度、方位が正確であれば、地球と太陽の位置関係から計算で求めることが可能であるが、このように正確に設置するのは難しくまた移動すると緯度経度方位を求め直す必要がある。

太陽の位置を画像から直接求める方法では雲で遮蔽されている場合や太陽周辺がレンジオーバーになっている場合に求めることができない。

これらの問題に対して、我々は青空の偏光現象を利用したキャリブレーション方法を提案した。図4. に示すように、一般に青空は太陽光がレイリー散乱によって発生するが、このときに太陽光の方向ベクトルと散乱光の方向ベクトル（視線方向）の両方に直行する方向に光が偏光することが知られている。この現象を利用して、偏光を観測できるカメラを使った全天観測システムを設置し、画像上の偏光方向の分布から、レンズパラメータと太陽位置を推定した。この方法ではキャリブレーションオブジェクトの設置が不要であり、また観測範囲全体の青空を利用して推定可能であるため、精度よく推定可能である。さらに、観測対象である天空画像によってキャリブレーションが可能であるため、レンズの設定変更や設置場所や方向の変更に対しても、新たにキャリブレーションオブジェクトを撮影する必要がないという利点もある。

また、偏光カメラを使った全天空観測システムは、雲と青空の分離や雲の厚みの推定にも利用可能であると考えられる。

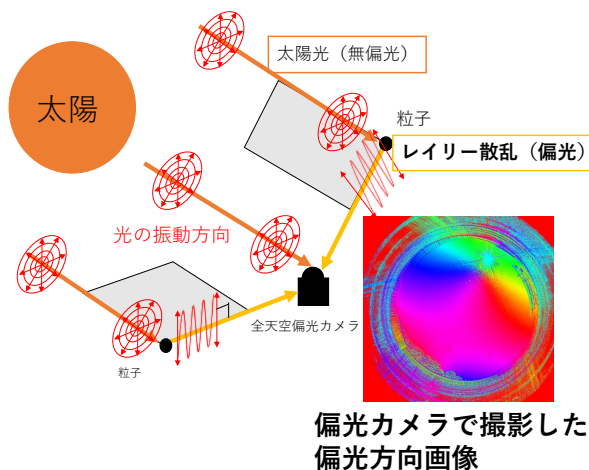


図4. レイリー散乱と偏光画像

(2) コンピュータビジョンの技術による空画像解析

全天空画像のCV技術に基づく解析では、まずSky image modelと名付けた空画像を生成する次のような数式を構築した (図5.)。

$$f^c(p; q, p_s) = \alpha_p [f_{sun}(p; q_{sun}, p_s) + f_{sky}(p; q_{sky}, p_s)] + (1 - \alpha_p) f_{cloud}(p; q_{cloud}, p_s)$$

ここで $f_{sun}(p; q_{sun}, p_s)$, $f_{sky}(p; q_{sky}, p_s)$ は雲がない場合の太陽と青空の輝度値 (R, G, Bの三成分で表現する), $f_{cloud}(p; q_{cloud}, p_s)$ は雲の輝度値を表している。このモデルを全天空画像にフィッティングすることで、太陽、青空、雲を分解する。また、太陽と空部分は時間経過にともなう太陽の移動に基づいて変化を推定し、雲部分は雲の流れを前後の画像の雲成分の線形補完によって推定する。

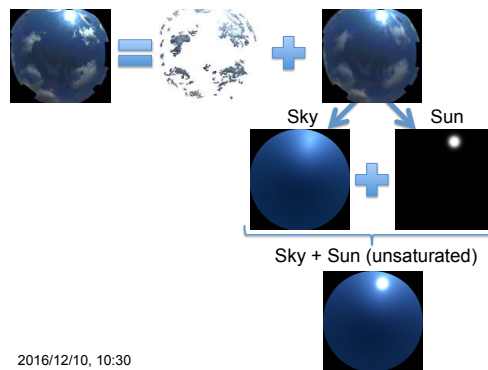


図5. Sky image model

(3) 機械学習の技術による太陽光発電予測

機械学習による太陽光発電予測では、過去数フレームの空画像を入力、将来の発電量を出力として、データベースの空画像—発電量のセットを用いて学習し、未知のデータに対して過去の空画像だけから将来の発電量を予測する手法を提案した。図6に示すように、提案手法では、雲をテクスチャとして解析するために、近傍画素の画素値の連結に対する重みを学習する畳み込みニューラルネットワーク (CNN) と、時系列の数値予測を行うために連続時刻間の連結に対する重みを学習するRNNの一種であるLSTMを組み合わせて使用する方法を提案した。また、入力に画像だけでなく、過去の発電量も使用する方法も提案した。

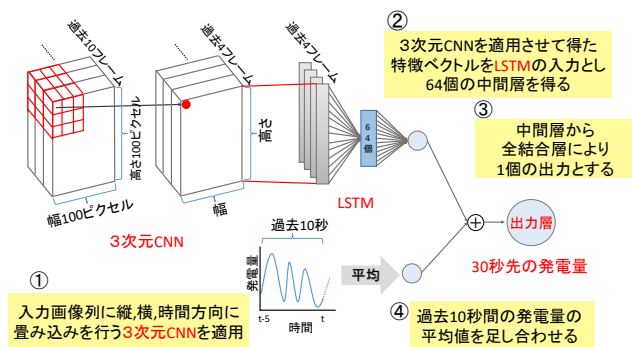


図6. 太陽光発電予測のための学習モデル

この手法によって学習に用いたデータと同様の天候のデータ（学習データからは除いたもの）に対して精度良く推定することができた（図7）。一方で、全く別の日のデータに対してはうまく推定できないことがわかった。この理由として、1) 雲の形や色、厚みなどの多様性が大きいものに対して、学習データの量が足りていないため、2) 太陽の輝度が強すぎて、雲部分のコントラストが無視されてしまうため、3) 出力を発電量のみとしたために学習で評価するのが予測発電量の誤差のみであり、画像の多様性にたいして同様の発電量が得られるケースが多々存在認めと考えられる。

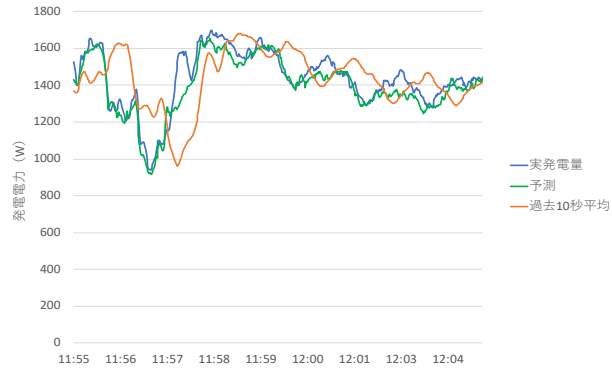


図7. 発電量の予測結果

(4) コンピュータビジョンの技術と機械学習の技術を組み合わせた予測手法

(3) の手法の問題点を解決するために、古典的な画像処理技術や CV 技術と機械学習技術を組み合わせた予測手法を開発した。

まず、画像の太陽部分の輝度の強さに負けずに低コントラストの雲の動きを解析するため、画素値のヒストグラムを解析し、輝度値の順に並べた上位、下位 20% の画素をマスクした（20%トリム）上で、残りの画素のヒストグラムを強調するように画素値の補正を行った。画素値の補正を行った画像に対してオプティカルフローを算出して雲の画素単位の動きを推定した（図8）。また推定したオプティカルフローを用いて、現在の空画像（画素値の補正なし）に対してオプティカルフローを外挿することで将来の空画像を生成した（図9）。このようにして生成した空画像を元画像とともにニューラルネットの入力として与えた。これによって、太陽の輝度の影響で低コントラストの雲の動きが無視される問題が解決できると考えた。

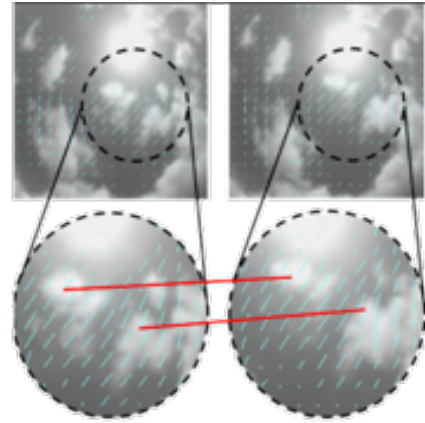


図8. オプティカルフロー

次に、学習時の評価を、最終的な発電量の誤差で評価するのではなく、出力を将来画像として、実際の数秒後の画像を比較して誤差を評価した。これにより上記3) の問題が解決できると期待できる。

実際に、表1に示すように過去画像のみから将来画像をニューラルネットのみで学習する場合に比べて、提案手法で精度の向上が見られた。



(a) もとの空画像 (b) 外挿した空画像 (c) 30 秒後の画像

図9. オプティカルフローの外挿による将来画像の生成

表1. 空画像予測の精度比較（正解画像との RMS）

比較手法	誤差の平均	標準偏差
過去の空画像のみ（従来法）	0.0728	0.0313
過去の空画像+フローベクトル	0.0727	0.0293
提案手法 (過去の空画像+生成画像)	0.0701	0.0283

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 白井 立樹, 鈴木 涼太, 加藤 丈和
2. 発表標題 全天観測カメラを用いた太陽光発電のリアルタイム発電予測
3. 学会等名 第21回 画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山中悠輝, 加藤丈和
2. 発表標題 Node-REDによるHEMSのための複数スマート家電規格の統合
3. 学会等名 第24回CDS研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rodrigo Verschae, Li Li, Shohei Nobuhara, Takekazu Kato
2. 発表標題 A Sky Image Analysis System for Sub-minute PV Prediction
3. 学会等名 The International 2017 IEEE Photovoltaic Specialists Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Rodrigo Verschae, Li Li, Shohei Nobuhara, Takekazu Kato
2. 発表標題 Daytime Sky Image Model and Prediction
3. 学会等名 第20回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井原 裕貴, 加藤 丈和
2. 発表標題 時分割電力伝送システムによる太陽電池セルの個別制御の検討 ~部分影に対する個別最適制御の検証~
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野 隆, 加藤 丈和
2. 発表標題 偏光方向画像を用いた全天空観測システムのキャリブレーション
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川 峻弥, 加藤 丈和
2. 発表標題 空画像とオプティカルフローを用いた 曇み込みLSTMによる短期雲位置予測
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 一矢, 加藤 丈和
2. 発表標題 BEMS・FEMSのための高密度電力計測ネットワークに向けた サブギガ無線電力センサの検証
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takekazu Kato, Yuki Ihara
2. 発表標題 Individual PV Cell Control based on Time Division Power Transmission System
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-Taiwan) - Internet of Energy for Advanced Electric Power Consuming (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takekazu Kato, Takaya Nakagawa
2. 発表標題 Short-Term Sky Image Prediction using LSTMs from the Past Frames of Sky Images and Synthesized Images by Optical Flow Extrapolation
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-Taiwan) - Internet of Energy for Advanced Electric Power Consuming (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川峻弥, 吉田拓矢, 加藤丈和
2. 発表標題 全天観測カメラのためのオプティカルフローと畳み込みLSTMを利用した雲位置短期予測
3. 学会等名 第23回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤丈和, 浅野隆, 角皆諒磨
2. 発表標題 青空の偏光を用いた全天空観測システムのキャリブレーション
3. 学会等名 第23回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2020)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 栗原 聡 (監修), 他執筆者71名	4. 発行年 2019年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 480
3. 書名 人と共生するAI革命 活用事例からみる生活・産業・社会の未来展望	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>第4回スマートエネルギーマネジメントシンポジウム：需要家主体のエネルギーマネジメントを目指して https://site.smart.kyoto-u.ac.jp/events/4th-symposium http://site.smart.kyoto-u.ac.jp</p>
--

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
研究分担者	延原 章平 (Nobuhara Shohei) (00423020)	京都大学・情報学研究科・講師 (14301)	