

学位 (博士) 論文要旨
(Doctoral thesis abstract)

論文提出者 Ph. D. Candidate	生物システム応用科学府 <u>食料エネルギーシステム科学</u> 専攻 一貫制博士課程 平成 <u>30</u> 年度入学(Your Entrance Fiscal Year) 氏名 <u>本多 誠之</u> (Your Name(Family, First) and Seal)				
主指導教員 氏 名 Chief Advisor's Name	金子 敬一	副指導教員 氏 名 Vice Advisor's Name	秋澤 淳	副指導教員 氏 名 Vice Advisor's Name	
論文題目 Title	農業支援のための取得容易なデータに基づく深層学習手法の検討				
<p>論文要旨 (和文要旨(2000 字程度)または英文要旨(500words)) ※欧文・和文どちらでもよい。但し、和文の場合は英訳を付すこと。 Write a summary in Japanese (2000 characters) or in English (500words). If the abstract is written in Japanese, needed to translate into English.</p> <p>作物生長モデル, センシング, 営農モデルといった情報技術を軸とする就農者の意思決定支援ツールを構築するために, 作物の光合成速度つまり炭素の同化率(A)を高精度に予測する技術が望まれている。光合成に関して, 光量が定常状態である光環境での研究は多数存在する一方で, 自然環境下での動的な光量における研究は十分になされていなかった。特に深層学習といった手法を用いて周辺環境の時系列データ, つまり前歴情報を活用したモデリングの研究はなく, その場合に精度の向上に結び付くのか, 予測に重要な説明変数は何かといった点を明らかにする必要があった。</p> <p>まず初めに本研究では, 野外水田圃場におけるイネ個葉を対象としたガス交換測定により得られたセンサーデータを説明変数として, 時系列データに適した再帰的ニューラルネットワークである Long-Short Term Memory Neural Network (LSTM) を応用して, イネ個葉の光合成速度の予測が可能モデルを構築し, 予測精度を定量的に評価した。その結果, 全説明変数を用いた予測精度は MAE (平均絶対誤差) 指標において, 従来の回帰モデルよりも優れた精度を示した。また, 時系列変数を除外することによって予測に重要な変数を特定する実験の結果から, 葉内 CO₂ 濃度 (C_i) と気孔・葉面境界層の水蒸気に対するコンダクタンス (g_{sw}) の時間的変動情報が予測に重要であることが示唆された。</p> <p>LSTM を用いることで高い精度での予測が可能になるが, その実現にはガス交換測定を実施することで得られる葉内部の変数データが不可欠であり, 実用化のためには取得が容易なセンサーデータだけを用いた予測モデルを構築する必要があった。</p> <p>つづく研究では, 葉内部の変数データを疑似的に再現する機構をもたせた BLSTM-augmented LSTM (BALSTM) の開発を行い, 外部環境変数だけを用いた予測モデルの精度向上を目標とした。BALSTM (Q_{in}, Ca, T_{air})の最大の特徴は, 光量子束密度 (Q_{in}), 空気中の CO₂ 濃度 (Ca), 外気温度 (T_{air}) の比較的収集しやすい3つの外部環境変数だけを入力とし, 双方向 LSTM を用いて, 葉内部 CO₂ 濃度 (C_i) と水蒸気に対する気孔コンダクタンス (g_{sw}) を中間出力として生成する点にある。そして中間出力された時系列データを追加の疑似的な説明変数として LSTM モデルの入力に加えることで, A の予測精度の向上を意図している。</p> <p>実験の結果から, BALSTM (Q_{in}, Ca, T_{air})は, Q_{in}, Ca, T_{air}だけを用いた場合の LSTM (Q_{in}, Ca, T_{air}) よりも有意に高い A の予測精度を示した。特に LSTM (Q_{in}, Ca, T_{air}) の予測精度が低くなる幾つかの個体サンプルにおいて, BALSTM (Q_{in}, Ca, T_{air}) は明らかに結果を向上させることが判明した。また, 中間生成する変数を比較する実験の結果から, 特に葉内部 CO₂ 濃度 (C_i) と水蒸気に対する気孔コンダクタンス (g_{sw}) を生成した場合に, 他の候補と比較して優れた精度を示しており, これは先の研究の知見を裏付ける結果と</p>					

なった。

最後に、葉面積あたりの光合成速度を活用するにあたって、圃場における作物の葉面積を推定する仕組みが必要となる。葉面積推定は様々な方法が検討されているが、本研究では、近年活用が進んでいる無人飛行機 (UAV) を利用し、さらに取得が容易な RGB 画像だけからこれを推定するモデルの検討を行った。

BALSTM の学習には、中間出力のための葉内部の変数データを必要としておりモデルの作成自体には計測コストがかかる。また、他の品種や異なる生育条件に直接適用することは出来ない。よって今後は更に広範な条件下でのデータ収集を行い、検討を進める必要がある。しかし本研究の、計測が容易な外部環境を説明変数とする光合成速度の予測モデルの検討は、検討を行った空撮画像やその他のリモートセンシングデータなどの空間的な情報技術を組み合わせることにより、圃場単位でのリアルタイムな光合成の予測、生育管理に結び付くと考えられ、営農者の意思決定に関わる情報基盤の構築への展望を開くことが出来た。

In order to provide decision support tools for farmers based on information technologies such as crop growth models, sensing, and farming models, highly accurate prediction of the rate of photosynthesis, or carbon assimilation rate (A), in crops is required. While there have been many studies on photosynthesis under steady-state light conditions, there has been insufficient research on photosynthesis under dynamic light levels in natural environments. In particular, there have been no studies of modeling using time series data of the surrounding environment (i.e., pre-history information) using methods such as deep learning, and it is necessary to clarify whether this leads to improved accuracy and what explanatory variables are important for prediction.

First of all, we applied a recursive neural network, Long-Short Term Memory Neural Network (LSTM), which is suitable for time-series data, to the sensor data obtained from gas exchange measurements on individual rice leaves in a paddy field, we constructed a model that can predict the rate of photosynthesis of individual rice leaves, and quantitatively evaluated the prediction accuracy. The results showed that the prediction accuracy using all explanatory variables was superior to that of conventional regression models in terms of the mean absolute error (MAE) index. The results of an experiment to identify the variables important for prediction by excluding time-series variables suggested that the temporal variation information of CO₂ concentration in leaves and conductance to water vapor in the stomatal/foiar boundary layer were important for prediction. Although LSTM enables highly accurate prediction, it is necessary to construct a prediction model using only easily obtainable sensor data for practical use.

In the next study, we developed a BLSTM-augmented LSTM (BALSTM) with a mechanism to simulate the data of variables inside leaves, aiming to improve the accuracy of prediction models using only external environmental variables. The most important feature of BALSTM (Q_{in} , Ca , T_{air}) is that it uses only three external environmental variables as inputs, which are relatively easy to collect: light flux density (Q_{in}), CO₂ concentration in the air (Ca), and outdoor air temperature (T_{air}), and generates intermediate outputs of CO₂ concentration inside the leaf (C_i) and stomatal conductance to water vapor (g_{sw}) using two-way LSTM. The intermediate outputs are then added to the LSTM model as additional pseudo-explanatory variables to improve the prediction accuracy of A .

The experimental results show that BALSTM (Q_{in} , Ca , T_{air}) has significantly higher prediction accuracy for A than LSTM (Q_{in} , Ca , T_{air}) when only Q_{in} , Ca , and T_{air} are used. In particular, BALSTM (Q_{in} , Ca , T_{air}) was found to clearly improve results in several individual samples where LSTM (Q_{in} , Ca , T_{air}) had lower prediction accuracy. The results of the experiments comparing the variables to be generated intermediately showed superior accuracy compared to the other candidates, especially when generating the leaf internal CO₂ concentration (C_i) and the stomatal conductance to water vapor (g_{sw}), which confirms the findings of the previous study.

Finally, in order to utilize the photosynthetic rate per leaf area, a system for estimating the leaf area of crops in the field is required. Various methods have been studied for estimating leaf area, but in this study, we investigated a model for estimating leaf area using only RGB images, which can be easily obtained using unmanned aerial vehicles (UAVs).

The training of BALSTM requires data on variables inside leaves for intermediate outputs and cannot be applied directly to other cultivars or different growing conditions. Therefore, further studies are needed to collect data under a variety of conditions.

The construction of a prediction model of photosynthetic rate using the external environment as an explanatory variable, which can be easily measured, will lead to real-time prediction of photosynthesis and growth management on a field-by-field basis by combining spatial information technology such as aerial images and other remote sensing data. This research has opened the prospect of constructing an information infrastructure for farmers' decision making.