

称号及び氏名	博士（応用生命科学）	YUSUF HENDRAWAN
学位授与の日付	平成24年3月31日	
論文名	Intelligent Micro-Precision Irrigation System for Moss Mat Production: Application of Nature-Inspired Algorithms （スナゴケ生産のためのインテリジェント精密灌水システム： 自然感化アルゴリズムの適用）	
論文審査委員	主査	村瀬治比古
	副査	北村 進一
	副査	小山 修平
	副査	杉村 延広

論文要旨

Sunagoke moss *Racomitrium japonicum* is a good potential for greening material. It is one of the plant products which are produced by plant factory. One of the primary determinants of Sunagoke moss growth is water availability. An automated irrigation system in plant factory would be desirable since it could reduce the work load on human, increase the speed of production, improve the quality of the products and optimize the growth of the plant products. In this study, we have developed an intelligent micro-precision irrigation system in a cultured moss mat production factory as shown in Fig.1. The overall goal of this research was to develop a coupled computer vision and neural network system for detection of water content of cultured Sunagoke moss. The specific objective of this study is to compare the performance of nature-inspired algorithms to find the most significant set of image features suitable for predicting water content of cultured Sunagoke moss. Machine vision was used as non-destructive sensing to extract 212 image features such as Color Features (CFs), Morphological Features (MFs), and Textural Features (TFs) from some color spaces i.e. gray, RGB, HSV, HSL, $L^*a^*b^*$, XYZ, LCH and Luv color spaces. Back-Propagation Neural Network (BPNN) was used as a learning algorithm to describe the relationship between

image features and water content of Sunagoke moss. The specificity of this problem is that we are not looking for single image feature but several associations of image features that may be involved in determining water content of cultured Sunagoke moss. Therefore, nine nature-inspired algorithms for feature selection i.e. Neural-Genetic Algorithms (N-GAs), Neural-Discrete Particle Swarm Optimization (N-DPSO), Neural-Honey Bees Mating Optimization (N-HBMO), Neural-Simulated Annealing (N-SA), Neural-Ant Colony Optimization (N-ACO), Neural-Intelligent Water Drops (N-IWD), Neural-Discrete Firefly Algorithm (N-DFA), Neural-Discrete Hungry Roach Infestation Optimization (N-DHRIO) and Neural-Fish Swarm Intelligent (N-FSI) have been proposed.

First, the results showed that the optimum photosynthesis condition was reached when the water content of Sunagoke moss was between 2.0 gg^{-1} and 3.0 gg^{-1} (gram of water content per gram of initial dry weight). Lack of water and soak condition can make the photosynthesis process decrease. Second, generally all CFs, MFs, and TFs showed the same pattern regarding the water content. They showed a critical point when the water content was in wet conditions or water content between 2.0 gg^{-1} and 3.0 gg^{-1} . Third, BPNN model performance was tested successfully to describe the relationship between water content and image features (CFs, MFs, and TFs). Fourth, we conducted a comparison analysis of feature selection between filter and wrapper methods. In most cases, the performance of five proposed feature selection methods (filter methods: (Chi-Squared (X^2), Mutual Information (MI), Correlation-based Feature Selection (CFS), Linear Regression (LR)) and wrapper method: N-GAs) to predict the water content of moss was greatly improved. Overall the results, wrapper (N-GAs) method were much better than filter method. Fifth, we developed four basic wrapper-based feature selection using nature-inspired algorithms i.e. N-GAs, N-ACO, N-SA, and N-DPSO. Using analysis of *t-test* it was shown that there is a significant statistical difference between method using feature selection and method without feature selection at $\alpha = 0.01$ significant level. Nature-inspired feature selection techniques showed low absolute deviation, which means that they have high ability and reliability in selecting relevant features as well as maximizing prediction accuracy and reducing irrelevant features. Sixth, we developed N-DHRIO as a novel nature-inspired feature selection. The best N-DHRIO's fitness function converged with the lowest validation-set Root Mean Square Error (RMSE) of 1.07×10^{-2} when using 37 TFs combination. Seventh, we developed N-IWD as a novel nature-inspired feature selection. The results showed the superiority of N-IWD than the other methods (N-SA, N-GAs and N-DPSO). Eighth, we present three new approaches of swarm-based nature-inspired feature selection

technique i.e. N-HBMO, N-FSI, and N-DFA. Comparative analysis shows the superiority of N-DFA compared with the other feature selection methods such as N-GAs, N-DPSO, N-HBMO, N-FSI, and N-SA, since it achieve better prediction performance. The best N-DFA's fitness function converged with the lowest validation-set RMSE of 5.86×10^{-3} when using 21 features combination. Ninth, we developed two step feature selection technique using N-GAs to improve the prediction performance. The output at the first layer of feature selection will be the input of another feature selection to predict water content using BPNN. This model was tested successfully to find the best combination of relevant features and reduce the number of features in the feature subset. Tenth, we developed an ANN pre-treatment algorithm using nature-inspired algorithms to select relevant RGB intensities to predict Sunagoke moss water content. Comparative analysis showed the superiority of N-HBMO and N-ACO compared with other feature selection methods such as N-GAs, N-DPSO, and N-SA, since they achieved better prediction performance. Eleventh, we observed nine methods of nature-inspired feature selection (N-GAs, N-DPSO, N-HBMO, N-SA, N-ACO, N-IWD, N-DFA, N-DHRIO, and N-FSI) using Multi Objective Optimization (MOO). MOO is an optimization problem that involves multiple objectives or goals. MOO used in this study consists of prediction accuracy maximization and feature-subset size minimization. Based on the optimization performance, N-FSI has the best performance for optimizing the fitness function of MOO problem, followed by N-DFA, N-DHRIO, N-GAs, N-HBMO, N-ACO, N-SA, N-DPSO, and N-IWD in that order, respectively. However, in the testing process, ANN model using feature-subset obtained from N-GAs has the best prediction accuracy which has a higher ability and reliability to predict water content in Sunagoke moss. Twelfth, we have developed an irrigation system called intelligent micro-precision irrigation system. The achieved performance of this irrigation system is promising. Overall, the proposed irrigation system for moss mat production in plant factory is acceptable.

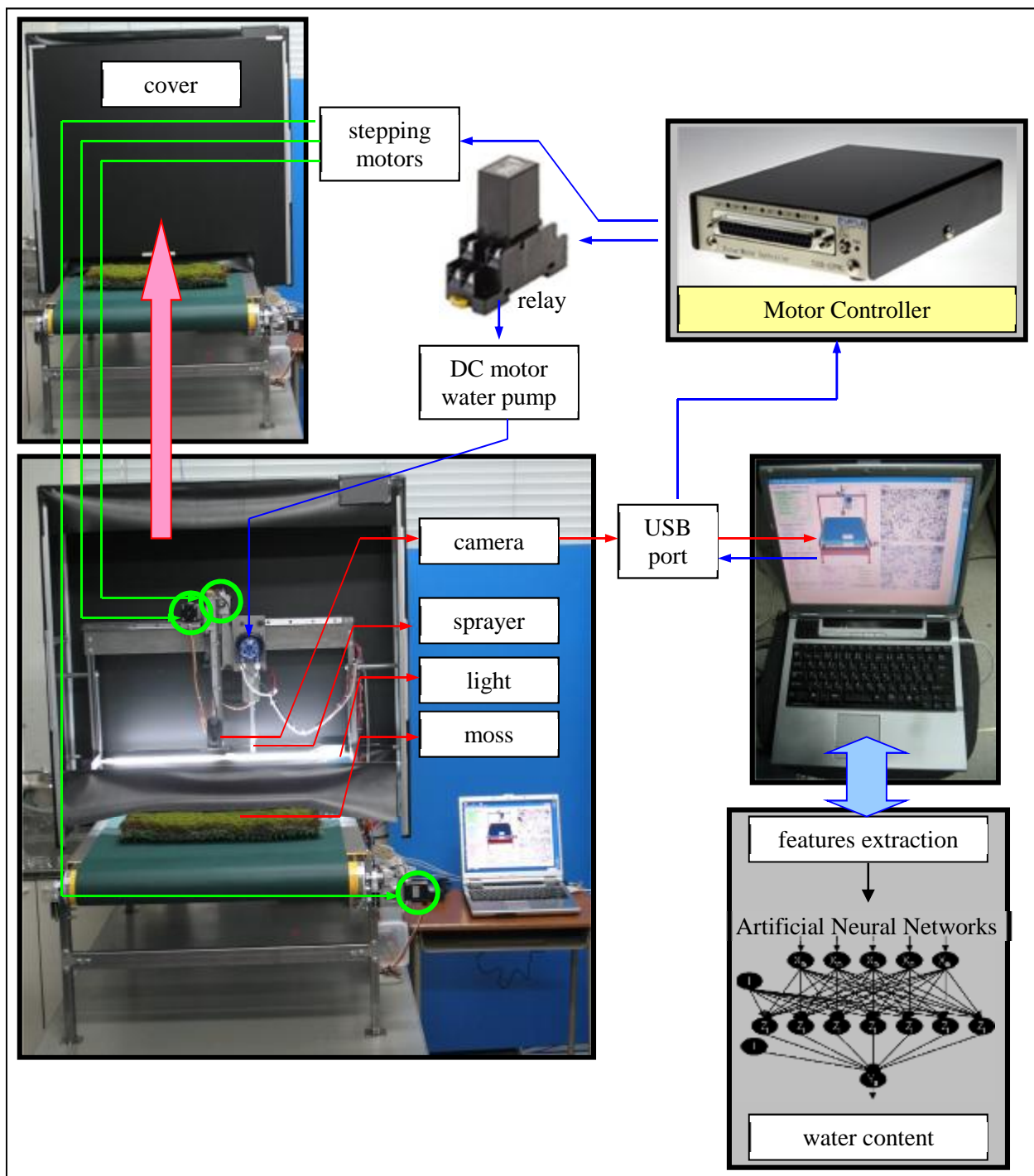


Fig. 1. Design of intelligent micro-precision irrigation system for moss mat.

審査結果の要旨

緑化用コケマットの工場生産が本格化する中で、品質管理の自動化が課題となっている。その中でも精密灌水に関する技術開発が急務とされている。精密灌水はマシンビジョンなどによる自動化が不可欠であり、単調なコケ平面の画像データから必要情報を抽出し給水制御系へ適切な信号を送る必要がある。本論文では、2次元的に繁茂するコケの水分分布を的確に推定するために、自然感化アルゴリズムを駆使した制御ソフトの開発について述べ、さらに、緑化用スナゴケマットを生産する工程に設置する精密灌水装置のプロトタイプ的设计と試作を行う。

本論文の目的は:

1. 精密灌水システムの制御用自然感化アルゴリズムを開発すること,
2. 自然感化アルゴリズムを用いた自動灌水装置を開発すること,

これらの目的が達成されると緑化用スナゴケマットの工場生産においてその品質管理の自動化を実現する基盤技術が確立される。

第1章においては、本研究の位置づけ(問題提起と解決方法)、目的(新規アルゴリズムの開発とその応用)、および期待される有用性、理論検証のための実験方法として緑化用スナゴケ資材生産における自然感化アルゴリズムの適用法など研究全体の構成について述べた。

第2章においては、緑化資材の主要構成素材であるコケ群落(マット状)の画像特徴量(色・テクスチャ・形態)の抽出方法およびその特徴量と緑化資材の基質であるスナゴケマットの水分状態との関係を示した。

第3章ではそのコケマットの水分状態(含水量)を推定するために適用した人工神経回路網(ANN)についてその概要解説およびその適用方法を示した。

第4章では、多数の画像特徴量から有効性の高い特徴量を選択する方法として、フィルター法およびラッパー法を実際の画像データを用いて比較検討した。推定誤差が最も小さくなる計算方法としてラッパー法の一つである遺伝的アルゴリズムが有効であることを明らかにした。

第5章は全部で101個の特徴量空間から最も出力(推定水分量)に対して感度が高い特徴量を選択することが可能な自然感化アルゴリズムとして遺伝的、蟻群、焼き鈍し、離散化粒子群の各アルゴリズムを人工神経回路網の入力パラメータ選択にそれぞれ用いて、推定誤差による評価を基に性能試験を行った。その結果、蟻群アルゴリズムがコケ画像特徴量選択において最も有効であることが明らかとなった。

第6章から第11章では、推定精度を改善する種々の手法が述べられている。RGBの元データをグレースケール、HSV,HSL,Labの各色空間に変換し、120個の特徴量空間を構成した場合に最も出力(推定水分量)に対して感度が高い特徴量を選択することが可能な自然感化アルゴリズムとして、人工神経回路網を適用して離散化した、空腹コック

ローチ捕食アルゴリズムを開発して適用を試みた。また、アプリアリ情報を用いるアルゴリズムである液滴アルゴリズムでは 36 個の高感度特徴量を抽出し、推定誤差に多少の改善が得られた。更に、推定精度を改善するための方法として特徴量をより多様にすることが考えられるが、ここでは、色の特徴量およびテクスチャ特徴量の組み合わせにより 212 個の特徴量を想定した場合の推定について、蜜蜂繁殖、魚群、ホタルの各自然感化アルゴリズムを開発し、魚群アルゴリズムでは 0.6% 程度の推定誤差で 212 個から 31 個の高感度特徴量を抽出するという好成績で他のアルゴリズムを上回った。また、選択アルゴリズムを変更することなく、推定精度を改善する方法について検討したものとして、同質の特徴量(色、形態、テクスチャ)ごとにまず 1 段階の選択をして、選択された特徴量全部に対して 2 段階目の選択を行う。この方法で 106 個の特徴量から最終的に 16 個の特徴量が入力データとして選択され、推定誤差も 0.17% まで収束した。含水量推定に有用な RGB 輝度値の分布を特徴量に加えることで推定精度は改善される。しかし、入力データとなる特徴量の数が膨大となる。その大量の特徴量を用いて前処理するタイプの方法で、蜜蜂繁殖や蟻群アルゴリズムなど 5 種類をテストして、350 個の入力を処理した蟻群アルゴリズムが推定誤差が 2.7% となった。これまで推定誤差のみを適合関数としていたのに対し、特徴量の種類を最小化することも適合関数に加え、複数の評価関数を持つ問題として扱うことについても考察した。

第 12 章では、精密灌水システムの装置について詳述した。CCD カメラ、制御コンピュータ、精密ポンプおよび XY 駆動装置から成り、開発した各種ソフトウェアを適用して精密灌水装置を試作した。

第 13 章は論文のまとめである。種々の自然感化アルゴリズムを適用することで、マシビジョンを用いた複雑系の制御にも応用することが可能であることを精密灌水システムを用いて実証するとともに、装置の試作にも成功したことを報告している。

以上、本研究は緑化用スナゴケマットの自動品質管理用制御システムに自然感化アルゴリズムを組み込んだ精密灌水システムの基盤技術を確立したことを示した。

本研究の成果は、応用生命科学の発展、とりわけ生物情報科学の新たな展開に貢献するものであり本論文の審査ならびに最終試験の結果と併せて、申請者に対し、博士(応用生命科学)の学位を授与することを適当と認める。