

称号及び氏名	博士(応用生命科学) Ondimu Stephen Nyarindo
学位授与の日付	平成21年3月31日
論文名	Bio-Inspired Computing Based Methodologies for Thermal - Physiological Quantification and Analysis: Application to Bio-greening Biosystem  (生物系由来計算法による生体系の熱特性および生理活性の解 析 - 緑化用植物への応用)
論文審査委員	主査 村瀬 治比古 副査 藤浦 建史 副査 北村 進一 副査 小山 修平

## 論文要旨

Bio-greening presents a sound biological engineering intervention for improving functional and aesthetic comfort of built environments. Thermal-physiological understanding is important for designing optimum and sustainable bio-greening systems. In this thesis two adaptive methodologies for thermal-physiological quantification were developed and used to quantify thermal properties and physiological water stress in Sunagoke moss bio-greening biosystem.

The main aim of this thesis is to promote use of bio-greening as a bioenvironmental engineering strategy for improving functional and apparent comfort of built environments. The main objective was to develop adaptive methodologies for thermal-physiological quantification and analysis. The specific objectives were: 1) to evaluate physiological water stress in Sunagoke moss biosystem using Adaptive Thermal-Reflectance StressImaging (ATRIS) methodology; 2) to quantify thermal regulation properties in living Sunagoke moss biosystem using Adaptive Inverse Heat Conduction Problem (AIHCP) method and 3) to identify water content that favours optimum physiological state in Sunagoke moss biosystem.

Chapter 2 is a review on approaches to methods for quantification of physiological water stress and thermal regulation properties in plant biosystems. A hybrid approach utilising bio-inspired computing was selected for this thesis.

Chapter 3 presents the working principles of neural networks (NN) and co-dominance algorithm (CA). The NN were used for inverse modelling in the ATRIS method. The CA was developed by this author and was used for search optimisation in the AIHCP method. Performance test results showed that though simple, the CA is more robust than the GA.

In chapter 4, the working principles of ATRIS methodology are reported. The method combines

probability-distance based texture analysis; Thermal-Reflectance Stress Imaging (TRIS) and NN modelling to detect, quantify and identify physiological stress in biosystems. After development, the method was used to quantify physiological water stress in Sunagoke moss biosystem. Results showed that: one, probability-distance texture analysis is more discriminative and adaptive than conventional texture analysis. Two, the ATRIS methodology is capable of detecting and quantifying both deficit and excess water stress in Sunagoke moss biosystem. And, three, the amount of water to ensure optimum physiological state, in Sunagoke moss biosystem, is 1.5 – 3.0 times its own dry weight.

Chapter 5 presents two AIHCP methods for determining thermal regulation properties of a living biosystem. The Inverse Finite Element NN (IFENN) method combines finite element analysis (FE) with NN to inversely determine thermal properties a biosystem. It was used to determine effective thermal conductivity ( $\lambda_e$ ) of living Sunagoke moss mat. The Network Simulation Co-dominance algorithm (NSCA) method combines Network Simulation method (NSM) and CA to simultaneously, determine thermal properties of a biosystem. The method was used to determine thermal conductivity and heat capacity of living Sunagoke moss biosystem. Results obtained showed that: one, effective thermal conductivity of Sunagoke moss mat varies between 0.1 and 0.28  $Wm^{-1}K^{-1}$  for 0 and 100% water contents (db), respectively; two: thermal diffusivity of living Sunagoke moss biosystem ranges between 6.53E-7 and 1.19E-7  $ms^{-1}$  respectively, for 0 and 200% db water content.

Chapter 6 evaluates the water content at which physiological state is optimum in Sunagoke moss biosystem. This was found to be 2.0 – 3.0 (ave., 2.5) times its initial dry weight. And it corresponds to  $0.423 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , thermal conductivity;  $3.75 \text{ KJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ , heat capacity;  $5.2\text{E-}8 \text{ ms}^{-1}$ , thermal diffusivity and  $3.22 \mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , net fixation rate.

In conclusion, two adaptive methodologies for thermal-physiological quantification were developed in this thesis. The ATRIS can quantify both deficit and excess physiological water stress in Sunagoke moss bio-greening biosystems. The AIHCP methodology can quantify thermal regulation properties of living bio-greening biosystems, simultaneously, without the need to solve an ill-posed IHCP. And, lastly, though Sunagoke moss bio-greening biosystem was used in this thesis, the ATRIS and AIHCP methodologies are novel enough to be extended to other biological systems. Thus, adaptive methodologies for thermal-physiological quantification and analysis can be developed by combining traditional engineering tools (such as TRIS, FE and NSM) and bio-inspired computing.

## 審査結果の要旨

緑化技術の一つとしてビルの屋上や壁面を対象とする特殊緑化に関する技術開発が進められている。特殊緑化では厳しい高温乾燥環境にも耐える植生が用いられる。緑化という観点ではその植生の特性として熱伝導や輻射などの熱力学的機能に加え意匠性や景観なども重要である。特殊緑化における植生の特性を考察するためには、光合成活性などの生理的特性と熱力学的特性を連成系として扱う新たな工学的解析手法の開発が必要である。本論文では、その連成系の解析に適した新規な2種類の適応型解析法を提案し、実際に、特殊緑化用のスナゴケ (*Rhacomitrium japonicum*) について、生理活性依存性の熱力学的特性値を決定することで解析法の有効性を確認した。このような解析手法を確立することにより、これまで得られなかった、特殊緑化に用いられる植物の生理活性に依存する熱特性を把握することが可能になり、緑化における植生の物理的な効果や外観などの最適化に関わる技術の発展に繋がるとしている。

本論文における具体的な研究目的は以下のようなものである、

- 1) スナゴケを用いて、その水ストレス状態を高精度に評価するための確率距離の概念を取り入れたマルコフテキストチャ解析法を開発する。
- 2) 適応型逆熱伝導問題としてスナゴケの熱力学的特性値を推定する手法を確立する。
- 3) 開発した手法を用いてスナゴケの生育に最も適した水分量を特定する。

第2章では植物の水ストレス状態および熱力学的諸指標を評価する8種類の非破壊計測法について検討し、その中で生物系由来のアルゴリズムを取り入れた計算力学的手法が最も実用性が高いことを見出した。

第3章はニューラル・ネットワークと新規に開発した共優性アルゴリズムの原理および機能について詳述した。また、ニューラル・ネットワークを適応型テキストチャ解析法と合わせて逆解析に適用した。共優性アルゴリズムについては今日普及している遺伝的アルゴリズムとその性能を比較したところ共優性アルゴリズムは遺伝的アルゴリズムに比べてロバスト性において勝っていることが確認された。その結果を受けて、適応的熱伝導逆解析の探索アルゴリズムとして適用した。

第4章では、適応型テキストチャ解析法について詳述した。従来のテキストチャ解析法を核として、確率距離の概念を濃度共起行列の計算に取り入れ、ニューラル・ネットワークと組み合わせることで適応型解析手法へ発展させた。画像に見られる僅かなテキストチャの差異をテキストチャパラメータから評価する前提で、従来のテキストチャ解析法と今回開発した適応型テキストチャ解析法を比較したところ、その識別性能において適応型テキストチャ解析法が勝っているという結果が得られた。さらに適応型テキストチャ解析法を用いることでスナゴケにおいてその水分欠乏状態、最適水分状態および水分過剰状態

を容易に画像情報から識別できることが確認された。具体的には、スナゴケの生育にはその含水量がスナゴケ乾燥重量当たりの1.5~3.0倍程度が適していることを明らかにした。

第5章ではスナゴケマットを用いて、その熱力学的特性値を決定するための2種類の適応的熱伝導逆解析法を提案した。まず、有効熱伝導率を推定するために適応型有限要素逆解析法を用いた。また、スナゴケの熱拡散係数および熱容量については適応型の共優性アルゴリズムとRC等価回路を用いた計算手法により推定した。得られた結果を以下に示す。スナゴケマットの有効熱伝導率は0%および100%の水分含有量(db)に対してそれぞれ0.1および0.28  $Wm^{-1}K^{-1}$ であった。スナゴケの熱拡散係数は、0%および200%の水分含有量(db)に対してそれぞれ6.53E-7および1.19E-7  $ms^{-1}$ であった。

第6章ではスナゴケの最適生育状態をその含水量がスナゴケ乾燥重量当たりの2.5倍の場合と仮定し、その場合の熱力学的諸係数を次のように同定した。熱伝導率:0.423  $Wm^{-1}K^{-1}$ 、熱容量:3.75  $KJkg^{-1}K^{-1}$ 、熱拡散係数:5.2E-8  $ms^{-1}$

以上、特殊緑化における植生の特性を考察するために、光合成活性などの生理的特性と熱力学的特性を連成系として扱う新たな工学的解析手法の開発を行った。その連成系の解析に適した新規な2種類の適応型解析法を提案し、実際に、特殊緑化用のスナゴケについて、生理活性依存性の熱力学的特性値を決定することで解析法の有効性を確認した。これまで得られなかった、特殊緑化に用いられる植物の生理活性に依存する熱特性を把握することが可能になり、緑化における植生の物理的な効果や外観などの最適化に関わる技術の発展に寄与するものと思われる。

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。