

令和 元年 6 月 10 日現在

機関番号：32717

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K07974

研究課題名(和文)植物映像のゆらぎ解析による作物給水ニーズの推定

研究課題名(英文) Estimation of crop water supply needs by fluctuation analysis of plant images

研究代表者

佐野 元昭 (Sano, Motoaki)

桐蔭横浜大学・医用工学部・教授(移行)

研究者番号：90206003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：土耕栽培における最適灌水制御に向けて、我々は、植物の水ストレスを葉の固有振動数の変化によって推定する方法を検討してきた。しかし、葉の振動を動画像により計測する際に用いられる相関追尾法は、追尾に使用する注目領域の設定が必要であり、そのため、自動計測化が困難となっていた。そこで本研究では、相関追尾法によらない方法として、植物の映像ゆらぎから植物の葉の固有振動数を計測する方法を提案し、それをを用いて自動計測ができるかを検証した。その結果、鉢植えの小松菜について30分毎の葉の固有振動数の変化の連続自動計測に成功した。これにより、葉の固有振動数の日周変化を自動的に長期間にわたって計測することが可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この方法により、様々な植物について、葉の固有振動数の長期間にわたる日周変化が容易に計測できるようになるため、植物の葉の固有振動数の日周変化の機序の解明がさらに進むものと期待でき、植物生理学的な意味でも意義がある。

また、多くの植物についてデータを取ることで、葉の固有振動数の日周変動の仕方の変化と葉の水ストレスとの関係についても、より明確になると考えられ、それにより、植物の水ストレス推定がより正確かつ容易に行えるようになることが期待される。その結果、植物工場のみならず、一般家庭においても、土耕栽培植物の最適灌水制御を容易に行なうことができるようになると思われ、社会的意義も大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to perform the optimal irrigation control in soil culture, we have studied the methods for estimating the water stress of a plant by the changes in natural frequency of a leaf. However, the correlation tracking method used when measuring the vibration of a leaf by the moving image needs to set an attention area used for tracking, so that the automatic measurement has been difficult.

Therefore, in this research, the method of measuring the natural frequency of the leaf of a plant from the image fluctuation of a plant was proposed as a method not based on the correlation tracking method, and it was verified whether automatic measurement could be performed. As a result, we succeeded in continuous and automatic measurement of the change of natural frequency of leaves every 30 minutes for potted Komatsuna. Thus, it has become possible to automatically measure diurnal changes in the natural frequency of a leaf over a long period of time.

研究分野：信号処理

キーワード：植物の水ストレス 固有振動数解析 Webカメラ スピーキング・プラント・アプローチ 超節水精密農業

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

植物工場などにおける灌水制御は、無駄な排水の抑制のみならず、作物の糖度や味などの向上に不可欠である。しかしそのためには、必要なとき必要な分だけ水を与える最適灌水制御が必須であり、作物給水ニーズ、すなわち植物が今現在どのくらい水を欲しているかを、非侵襲かつ実時間に植物から聞き出す必要がある (Speaking Plant Approach, SPA)。篤農家は、それを長年の経験と勘によって行っているが、その補助として、植物の水ストレス状態を自動的かつ継続的に監視することができれば、農家の負担軽減につながる。

このような背景のもと、植物の水ストレス推定に関して、植物の葉の投影面積による方法や分光学的な手法など、多くの研究がなされているが、その中で我々は、超節水精密農業技術の開発の一環として、植物の水ストレスを葉の固有振動数の変化によって非侵襲的かつ実時間に推定する方法を検討しており[1,2]、図1のような実験装置で図2のような葉の減衰振動を計測し、それをフーリエ解析することにより、葉の固有振動数を調べてきた。

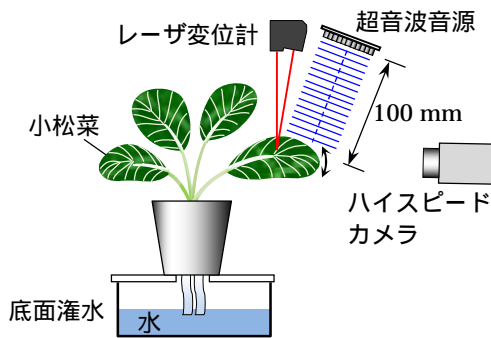


図1 実験セットアップ

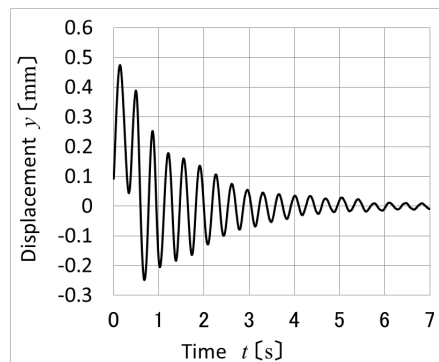


図2 計測された減衰振動の例

植物としては、底面灌水で育成した発芽後 30 日程度の小松菜を用い、葉の 1 枚を超音波音源 (パラメトリックスピーカ AS101AW3PF1、日本セラミック社製) が発する 40 kHz 超音波による音響放射圧 (約 1 Pa) により葉を減衰振動させた。そしてその振動を 3 台のレーザ変位計を用いて計測し、「葉柄のたわみによる葉全体の変位振動 (葉柄のたわみ振動)」と「葉身自身のたわみ振動」に分離して解析を行った。その結果、小松菜の葉の「葉柄のたわみ振動」の固有振動数は、以下のような興味深い振る舞いを示すことを見出した (図 3)。

- 1) 葉の固有振動数は日周変化を行い、健全な葉の場合、固有振動数は日中に大きくなり、夜間に小さくなる。(この傾向は、赤矢印の灌水停止もしくはばらしくは変わらない。)
- 2) 水ストレスが増すと、日周変化の量が減り、さらに強い水ストレスを受けると、固有振動数は夜間ではなく、日中に大きく現象する (健全な葉とは逆になる (図 3 の青矢印))。

一方、「葉身自身のたわみ振動」には、日周変化は観測されなかった。この実験をハイスピードカメラでも行ったが、同様の結果を得た。すなわち、植物の葉のしおれ、あるいは水ストレスの推定には、「葉柄のたわみ振動」を調べるのが有効であることが分かってきた。

ところで、小松菜の「葉柄のたわみ振動」の振動数は高々 10 Hz なので、レーザ変位計やハイスピードカメラでなく、汎用の CCD カメラ (30 fps) でも十分であることも実証された[5]。

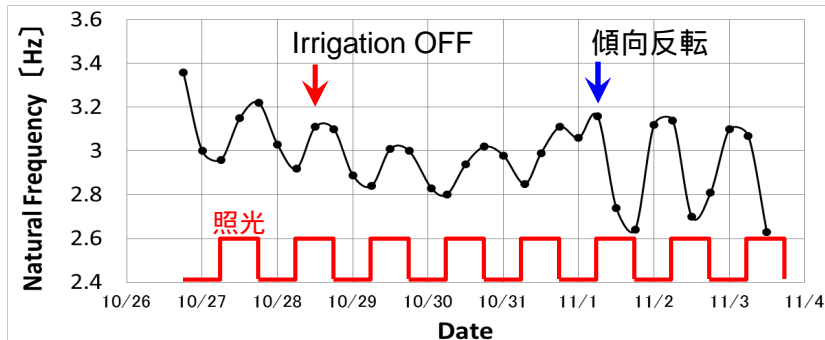


図3 レーザ変位計による小松菜の葉の固有振動数の日周変動計測

2. 研究の目的

汎用の CCD カメラで、葉の固有振動数を計測し植物の水ストレスが推定できることが分かったが、それを 24 時間の自動計測するためには、夜間の撮影の問題がある。すなわち、夜間は消灯しているので、通常の CCD カメラでは葉の振動を撮影することができない。さらに葉の振動解析にも問題がある。すなわち、撮影したカメラ映像から葉の振動を解析するには、フレーム画像上に追尾用の特徴領域 (テンプレート画像) を定め、その領域を相関追尾によって追いかける必要があるが、特徴領域の選定は一般に人間が行うため、自動化は困難である。

そこで、これを解決するために、相関追尾を用いずに葉の振動を計測する方法を検討しており、その結果、カメラ映像の明暗の揺らぎから、葉の固有振動数を得る方法を提案した。本研

究では、その有効性について評価を行い、自動化の可能性を検討することを目的とする。

さらに、この方法を拡張することにより、1枚の葉ではなく、群落のゆらぎから、その群落の水ストレスが推定できないか検討する。

3. 研究の方法

(1) 実験セットアップ

実験セットアップを図4に示す。基本的には従来の方法と同じく、植物は発芽後約30日の小松菜とし、吸水シート(東洋紡、コスモA-1)を用いて底面給水を行った。照明はタイマーを用いて、朝6:00に点灯、夕方18:00に消灯するON-OFF制御を行った。葉の振動は、超音波音源による音響放射圧で葉を0.6秒程度押し、それを切った後に起こる減衰振動の様子を撮影した。ただし、撮影には汎用のWebカメラ(Elecom、UCAM-DLK130TWH)を用いた。

また、振動時のみ一時的に照明を点灯するために、図5(a)に示す上述のON-OFF信号に、(b)のようなトリガ信号を用いてそれらの論理和を図6のOR回路で生成し、その出力(c)(図5(c))を図6のソリッドステートリレー回路に入力して、蛍光灯を点灯させる点灯システムを作成した。

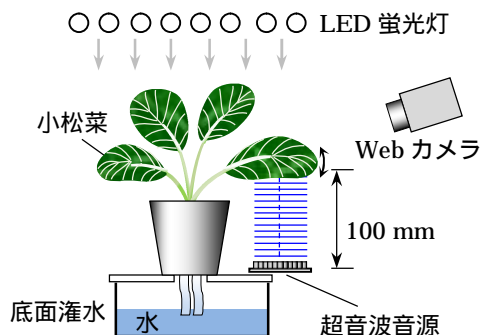


図4 実験セットアップ

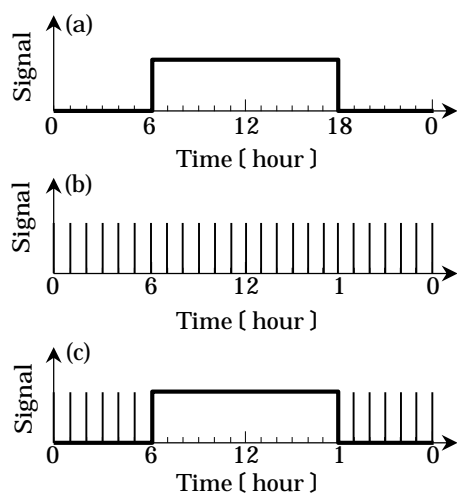


図5 光源の制御信号

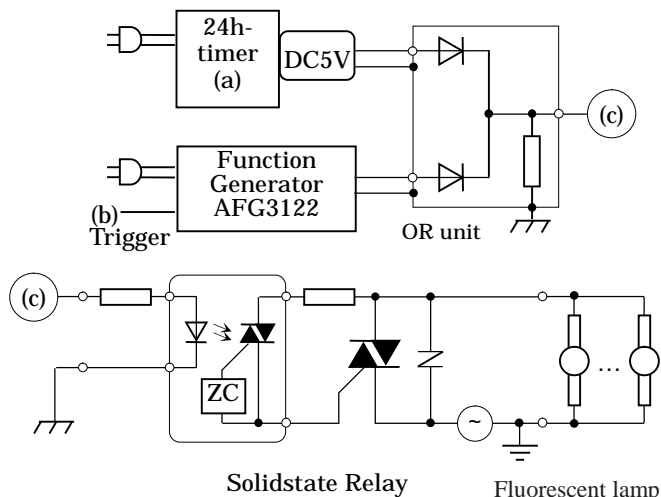


図6 光源の制御回路

(2) 葉の振動解析の原理

今回の研究の目的は、自動化の難しい相関追尾法を用いない、新たな葉の振動解析の手法を開発することであるが、その一つの方法として、今回我々は、撮影した葉の振動の映像のゆらぎの振動数を計測する方法を提案した。

その方法とは、図7のように画像内に葉のエッジを含む矩形領域を考え、その領域の平均画素値の変化から、葉の振動数を求めるもので、葉が葉柄のたわみによって振動すると、矩形領域内の葉の面積が周期的に変化するの、その平均画素値の葉の変動の周波数は、葉の振動数と同じであることが期待される。

今回、領域内の画素値として、図7(a)のようにグレースケールを利用する方法と、図7(b)のように色情報等から葉を抽出し、二値化する方法の2種類の方法について検討した。

なお、葉の位置は昼夜で意外に大きく変動し、また、成長もするので、矩形領域の位置を常に最適に保つ必要があるが、それは現実的でない、本実験では、フレーム画像を碁盤の目のように予め分割して、全ての矩形領域の平均画素値の変動を求めてしまい、その中から葉の振動を反映している矩形を選んで、その矩形領域の平均画素値の変動周波数から、葉の振動数を求めた。今回、フレーム画像のサイズは640×400ドットであり、矩形領域の大きさは40×40ドットの正方形とした。すなわち、フレーム画像を、横に16分割、縦に12分割した。

図8に、本研究で得られた計測結果の一例を示す。この例では、(a)のような矩形領域のまわりに、(b)のような24近傍(計25個の矩形領域)を考え、それら25個の矩形領域の平均画素値の時間変動のデータを全て取り込んだ。それ一例を(c)に示す。

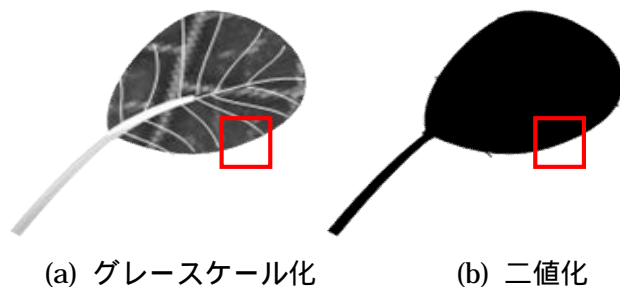


図7 矩形領域による振動計測原理

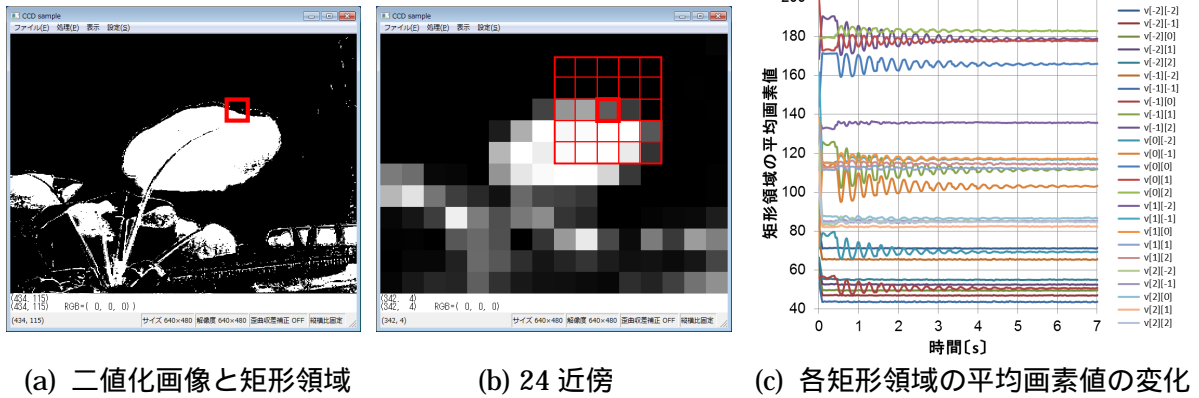


図 8 矩形領域による振動計測例

画像取り込みソフトは、Microsoft SDK v7.0(Direct Show)を用いて Microsoft Visual Studio で自作したものであり、USB 接続された市販の Web カメラから、フレーム画像を約 30 fps で取り込み、その画像の表示、グレースケール化・二値化(図 8(a))、矩形領域分割(図 8(b))、各矩形領域の平均画素値の計算を行い、設定した注目領域を中心とする 25 個の矩形領域の時間変化の保存(図 8(c))および、その時の画像の保存を行うようにした。測定のタイミングは、PC の時計を使い、毎時 0 分と 30 分にトリガ信号をスピーカ出力して、それを用いて、超音波スピーカのコントローラに信号を入力し、0.6 秒間だけ音響放射圧を放射させると共に、それを図 6(b)のトリガ信号として入力することにより、夜間の場合は光源を点灯させて、葉の減衰振動の動画を取り込むようにした。

図 9 は、得られた 25 個のデータの中から、選んだ典型的な減衰振動の例と、そのパワースペクトル密度である。図(b)のピークから、固有振動数を f_0 求めることができる。

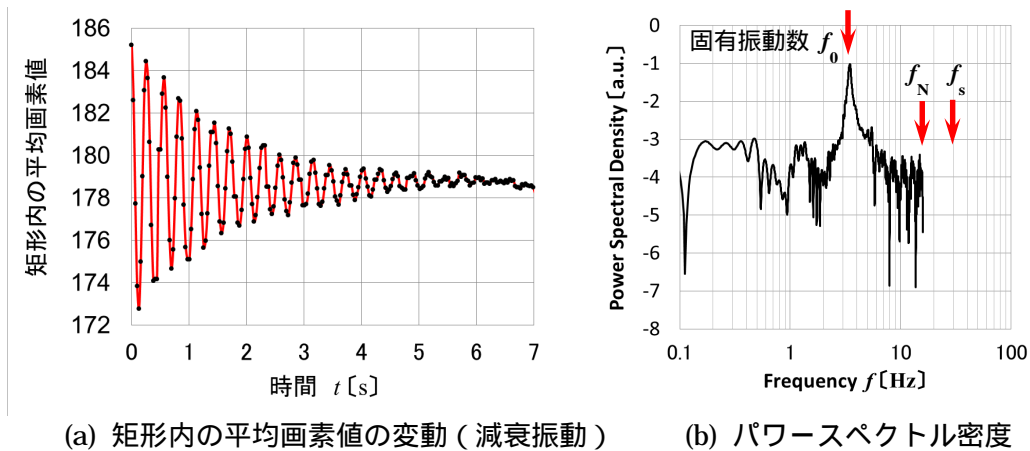


図 9 周波数解析の例

4. 研究成果

この測定方法を用いて、葉の振動画像の昼夜連続計測を 30 分間隔で行い、その固有振動数を求めた結果を図 10 に示す。図 10 の黒い点は実測された各時刻における葉の固有振動数であり、赤線は、前後 3 点(計 7 点)の中央値平均の値を結んだものである。

この結果から分かるように、本研究により

高価なハイスピードカメラやレーザ変位計を用いなくとも、安価で汎用の Web カメラでも十分に葉の固有振動数を求めることができること、

人間による決定が必要な相関追尾法による葉の振動計測を行う代わりに、映像を矩形領域に分割し、その矩形の平均画素値の変動を計測するという簡単な画像処理だけを用いて、葉の振動数が求められることできるようになり、自動化の目的が立ったこと、

の 2 つの成果が得られ、その結果、より安価で容易に、従来と同様の葉の固有振動数の日周変化を捉えることができるようになった。

ただし、25 個の矩形領域のうち、どの矩形のデータを採用するかは、現在手動で行っている。しかしこれは、減衰振動が否か、あるいは、スペクトルのピークがきれいに現れているかなどの条件で選択すれば、比較的簡単な方法で選定が可能と思われる。

なお、この方法の問題点として、葉の画像の二値化について、現在は xy 色度図の y の値が 0.5 以上の画素を葉の緑色と判断し、その部分を白(255)、それ以外を黒(0)として二値化を行っているが、光の当たり方によっては、反射して葉が光ってしまい、葉と判定されない問題などがある。そこで、葉をより確実に抽出するために、マルチスペクトルカメラのように、レッドエッジを利用した方法が最も好ましいと思われる。すなわち、赤色光(R)と近赤外光(IR)を計測し、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index、正規化差植生指数)

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (1)$$

を用いて、葉を抽出することが望ましい。最近ではNDVIカメラなるものも開発されているので、そのようなものを用いても良いかと思われる。ただし、NDVIを利用するには、光源として太陽光のように多くの赤外線を含むことが望ましいので、光源として、3波長型等の蛍光灯やRGB発光のLED灯は好ましくない。また、一般的に用いられる青色LEDで黄色発光の蛍光体を光らせる白色LEDも赤色や赤が弱いので、NDVIを用いる場合は、別途赤色光～赤外光を照射する必要がある。

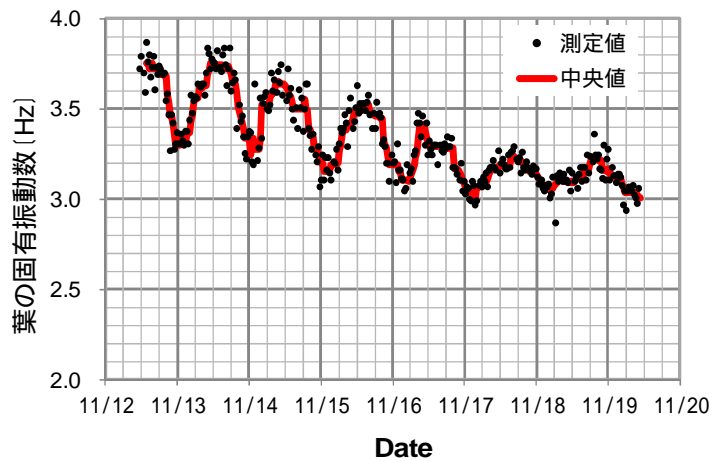


図 10 得られた固有振動数の日周変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

佐野元昭、内川千春、中川 裕、安齋拓也、大平武征、白川貴志、杉本恒美、レーザ変位計を用いた葉の同時多点振動解析による植物の水ストレスの推定、桐蔭論叢、査読無し、第 34 巻、2016、155-158

内川千春、杉本恒美、佐野元昭、中川 裕、植物の葉の固有振動数のモデル化に関する研究、桐蔭論叢、査読無し、第 34 巻、2016、139-143

佐野元昭、内川千春、中川裕、大平武征、白川貴志、杉本恒美、CCD カメラを用いた葉の固有振動数解析による植物の水ストレス解析、電子情報通信学会技術研究報告 Vol.117, No. 111 (US2017-26)、査読無し、2017、31-36

内川千春、中川裕、大平武征、佐野元昭、杉本恒美、植物栽培中の培養土における伝搬音速計測に関する検討(2)、桐蔭論叢、査読無し、第 36 巻、2017、233-236

佐野元昭、内川千春、中川裕、大平武征、白川貴志、杉本恒美、CCD カメラを用いた葉の固有振動数計測による植物の水ストレス推定、桐蔭論叢、査読無し、第 36 巻、2017、197-202

内川千春、中川裕、大平武征、佐野元昭、杉本恒美、植物の葉の固有振動数のモデル化に関する研究(2)、桐蔭論叢、査読無し、第 36 巻、2017、227-232

内川千春、杉本恒美、佐野元昭、大平武征、中川裕、白川貴志、植物の葉の固有振動数の日周変動を用いた灌水制御についての検討、桐蔭論叢、査読無し、第 38 巻、2018、121-126

佐野元昭、内川千春、中川裕、大平武征、白川貴志、杉本恒美、CCD カメラを用いた葉の固有振動数解析による植物の水ストレス解析 2、電子情報通信学会技術研究報告 Vol.118, No. 199 (US2018-44)、査読無し、2018、19-24

内川千春、杉本恒美、佐野元昭、大平武征、中川 裕、白川貴志、画像解析による植物の葉の固有振動数計測、桐蔭論叢、査読無し、第 40 巻、2019、123-127

佐野元昭、内川千春、大平武征、白川貴志、中川 裕、杉本恒美、映像の矩形分割による葉の固有振動数計測法を用いた植物の水ストレス推定、桐蔭論叢、査読無し、第 40 巻、2019、117-122

〔学会発表〕(計 14 件)

佐野元昭、内川千春、中川裕、大平武征、白川貴志、杉本恒美、葉の同時多点振動解析による植物の水分ストレスの推定、日本生物環境工学会 2016 年金沢大会(金沢工業大学)、2016.9.13

Chiharu UCHIKAWA, Tsuneyoshi SUGIMOTO, Motoaki SANO, Yutaka Nakagawa, Takeyuki OHDAIRA, Study on the modeling of the resonance frequency of a plant leaf(), 11th Toin International Symposium on Biomedical Engineering (Toin Gakuen Academium, Toin University of Yokohama)、2016.10.29

佐野元昭、内川千春、中川裕、大平武征、白川貴志、杉本恒美、通常の CCD カメラを用いた葉の固有振動数解析による植物の水ストレス推定、日本音響学会 2017 年春季研究発表会(明治大学生田キャンパス)、2017.3.17

佐野元昭、内川千春、中川裕、大平武征、白川貴志、杉本恒美、CCD カメラを用いた葉の固有振動数解析による植物の水ストレス状態の推定、超音波研究会 US2017-26(東京大学本郷キャンパス)、2017.6.27

佐野元昭、内川千春、中川裕、大平武征、白川貴志、杉本恒美、通常の CCD カメラを用いた葉の固有振動数の日周変動測定による植物の水ストレス推定、日本生物環境工学会 2017 松山大会(愛媛大学樽味キャンパス)、2017.8.31

Motoaki Sano, Chiharu Uchikawa, Yutaka Nakagawa, Takeyuki Ohdaira,

Takashi Shirakawa, Tsuneyoshi Sugimoto, Estimation of water stress of plants by measurement of diurnal variation of natural frequency of leaves using ordinary CCD camera, The 38th Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2017) (Tagajo City Cultural Center), 2017.10.27

Chiharu Uchikawa, Tsuneyoshi Sugimoto, Motoaki Sano, Takeyuki Ohdaira, Yutaka Nakagawa, Takashi Shirakawa, Study on the irrigation control using periodic frequency change of a plant leaf, 12th Toin International Symposium on Biomedical Engineering (Toin Gakuen Academium, Toin University of Yokohama), 2017.11.11

佐野元昭, 内川千春, 中川裕, 大平武征, 白川貴志, 杉本恒美、通常の CCD カメラを用いた葉の固有振動数解析による植物の水ストレス推定 2、日本音響学会 2018 年春季講演発表会 (日本工業大学) 2018.3.15

佐野元昭, 内川千春, 中川裕, 大平武征, 白川貴志, 杉本恒美、CCD カメラを用いた葉の固有振動数解析による植物の水ストレス状態の推定 2、超音波研究会 US2018-22(東京工業大学田町キャンパス) 2018.8.30

杉本恒美, 佐野元昭, 内川千春, 大平武征, 中川裕, 白川貴志、音波振動を用いた植物の育成状態評価に関する 波振動を用いた植物の育成状態評価に関する検討、日本生物環境工学会 2018 東京大会 (東京農工大学府中キャンパス) 2018.9.20

佐野元昭, 内川千春, 大平武征, 白川貴志, 中川裕, 杉本恒美、CCD カメラを用いた葉の固有振動計測による植物の水分ストレスの検出 2、日本生物環境工学会 2018 東京大会 (東京農工大学府中キャンパス) 2018.9.21

Motoaki Sano, Chiharu Uchikawa, Yutaka Nakagawa, Takeyuki Ohdaira, Takashi Shirakawa, and Tsuneyoshi Sugimoto, An analysis of natural frequency of leaf by the fluctuation of CCD camera image and the estimation of water stress of plant, The 39th Symposium on UltraSonic Electronics (USE 2018) (Kambaikan, Doshisha University) 2018.10.30

佐野元昭, 内川千春, 大平武征, 白川貴志, 中川裕, 杉本恒美、CCD カメラ画像の矩形領域化による葉の固有振動数解析と植物の水ストレス推定、日本音響学会 2019 年春季講演発表会 (電気通信大学) 2019.3.5

佐野元昭, 内川千春, 大平武征, 白川貴志, 中川裕, 杉本恒美、Web カメラ映像の矩形領域分割による葉の固有振動数解析と植物の水ストレス推定、2019 年電子通信情報学会総合大会 (早稲田大学西早稲田キャンパス) 2019.3.20

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等特になし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 杉本 恒美

ローマ字氏名: (SUGIMOTO, Tsuneyoshi)

所属研究機関名: 桐蔭横浜大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 25450387

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 内川 千春

ローマ字氏名: (UCHIKAWA, Chiharu)

研究協力者氏名: 大平 武征

ローマ字氏名: (OHDAIRA, Takeyuki)

研究協力者氏名: 白川 貴志

ローマ字氏名: (SHIRAKAWA, Takashi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。