

論文

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Estimation of the water stress of plant using the measuring method of
leaf natural frequency by rectangular division of image佐野 元昭*・内川 千春¹・大平 武征¹・
白川 貴志¹・中川 裕¹・杉本 恒美¹* 桐蔭横浜大学医用工学部、¹ 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2019年3月16日 受理)

I. はじめに

1. 背景

(1) 植物の水ストレス

植物が健全に生育するためには、温度・湿度、光、大気、水、養分など様々な環境が整っている必要があり、そのバランスが崩れると、植物はそれに対応したストレスを受ける。植物の「水ストレス」とは、そのうち水に関するストレスであり、特に水が不足している状態に対して用いられる。

植物が水ストレスを受けると、形態的な変化としてしおれが発生する。ご存知の通り、植物細胞は動物細胞とは異なり、細胞壁によって囲まれているが、細胞壁は、その中にある原形質の圧力（膨圧）によって内部から押されて、やや膨らんだ状態にある。しかし、水が不足すると膨圧が減少し、その結果がしおれとして現れる。

弱い水ストレスであれば、水を与えることにより再び膨圧が上昇し、植物は元の状態に

戻ることができる。しかし強い水ストレスの状態では、原形質膜が細胞壁から剥離し（原形質分離）、細胞は壊れてしまう。したがって、こうなる前に水を与える必要があり、そのためには、植物の水ストレスの状態を非侵襲かつ実時間に把握する必要がある。

(2) スピーキング・プラント・アプローチ

植物は、自分の健康状態を言葉で伝えることはできないので、それを非侵襲に知るためには、植物を様々な方法で観察し、そのわずかな変化を見つける必要がある。このようなアプローチを、スピーキング・プラント・アプローチ (SPA)¹⁾ と言う。

たとえば、植物が水ストレスを受けると、葉温が上昇する。また、葉の色つやも微妙に変化する。そこで赤外線カメラで葉温を測定したり²⁾、葉の分光学的な特性であるレッドエッジのブルーシフト³⁾などが利用されてきた。しかし、分光学的な方法は水ストレスに応じて徐々に変化はするが、しおれの寸前で急激に変化することはないので、灌水制御には不向きに思われる。

* SANO Motoaki: Professor, Faculty of Biomedical Engineering, Toin University of Yokohama, 1614, Kuroganecho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ UCHIKAWA Chiharu: Researcher, OHDAIRA Takeyuki: Researcher, SHIRAKAWA Takashi: Researcher, NAKAGAWA Yutaka: Researcher, SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

そこで植物の水ストレスに対して敏感な、葉のしおれを直接検出する方法が検討されており、たとえば、葉の投影面積を利用する方法が提案されているが⁴⁾、葉はしおれてくると張りを失い弾性定数が変化するので、我々は、それを捉える方法として葉の固有振動数の変化に着目してきた⁵⁻¹⁰⁾。

(3) これまでに分かったこと

小松菜について葉の固有振動数を調べた結果、以下のようなことが分かってきた。

- 1) 葉の固有振動数は日周変化を行う。
- 2) その日周変化は、葉身自身のたわみ振動ではなく、葉柄のたわみ振動（葉身の変位振動）の固有振動数に大きく現れる。
- 3) 健全な葉の場合、その固有振動数は、日中に大きくなり、夜間に小さくなる。
- 4) 水ストレスを受けはじめると、日周変化の大きさが減少する。
- 5) 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、日中に大きく減少する（健全な葉とは逆になる）。

また、小松菜のように葉の固有振動が 10 Hz 以下の場合、ハイスピードカメラ等を用いなくとも、フレームレート 30 fps の汎用のカメラでも十分なことが分かった¹¹⁾。

2. 研究の目的

ところで、撮影した映像から葉の運動を解析するには、一般に相関追尾法が用いられており、そのためには、葉の上に追尾用の特徴的な領域（テンプレート画像）を定める必要がある。しかし通常その決定は人間が行なっているため、これを解決しないと、葉の固有振動数計測の自動化は難しい。

そこで我々は、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、その有効性について検討を行った。

本稿ではその結果について報告する。

II. 実験方法

1. 計測システム

(1) 実験セットアップ

実験セットアップを図 1 に示す。対象とする植物は、培養土で種から育成した発芽後約 1 ヶ月の小松菜とした。給水は吸水シート（東洋紡、コスモ A-1）によって底面より行い、照明は、LED 蛍光灯を用いて、朝 6 時に点灯、夕方 6 時に消灯した。

葉の振動計測は、葉を能動的に加振し、その減衰振動をカメラで撮影し、その映像から葉の振動を解析することにより行なった。

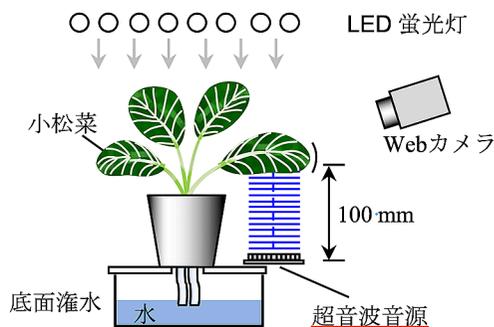


図 1 実験セットアップ

(2) 葉の加振方法

葉の加振には、超音波をキャリアとする超指向性スピーカ（パラメトリックスピーカ）により発生する音響放射圧を利用した。

今回用いた日本セラミック社製のパラメトリックスピーカ AS101AW3PF1 は、キャリアとして 40 kHz の超音波を使用しており、この超音波による音響放射圧によって数秒間、葉を押し上げておき、放射圧を瞬間的に取り去ることにより減衰振動させた。

(3) 葉の振動データの取得

本研究では、汎用の Web カメラ（Elecom、UCAM-DLK130TWH）を用いて葉の映像を撮影し、それを Visual C++ で作成したプログラムによりパソコン（Windows 7）に取り込み、振動データを CSV で保存した。

ただし、夜間消灯中は撮影が困難なため、撮影のタイミングでトリガ信号を発生させ、それによって、葉が減衰振動をしている30秒間のみ照明が点灯するようにした。

2. データ解析

(1) 振動計測

従来は、この減衰振動の様子を撮影した映像から相関追尾によって葉の変位振動を計測し、葉の固有振動数を得ていたが、上述のように、追尾のためのテンプレート画像の設定には人間が介在し、自動化が困難であるため、本研究では、相関追尾を行わずに葉の振動解析を行う方法として、**図2**のように、葉のエッジを含む矩形領域を考え、その領域内の葉の面積比を計測することにより、葉の振動の固有振動数を調べる方法を試みた。

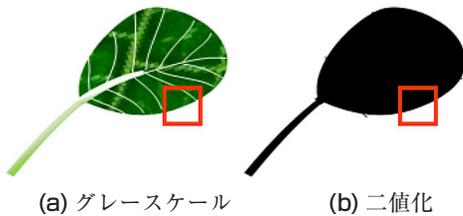


図2 矩形領域による振動計測

ただし、実際のプログラム上では、領域内の葉の面積比を求めるのではなく、領域内の画素値の平均（平均画素値）を求め、その時間変化から振動数を求めた。またその際、映像をグレースケール化だけ行い、その状態で矩形領域の平均画素値を求めてしまう方法と、葉の領域を背景から分離した二値化画像に対して平均画素値を求める方法の2つの方法を考えた。

グレースケール法は、処理が軽いので、動画のフレームレートが30 fpsでも、各フレーム画像に対して処理が可能であり、葉と背景の明度にある程度差があれば、簡便に葉の振動を捕らえることができる。ただし、葉と背景の彩度や色相が異なっても明度が近いと、葉が振動しても平均画素値の変動幅が小さくなってしまいます。さらに照光に通常の蛍光

灯を使用する場合は、100 Hzのフリッカーとの干渉により、矩形領域にモアレ模様が生じてしまうため、インバータ方式の蛍光灯やLEDを用いた光源が必要になる。

その点、二値化法では光源の影響は軽減できるが、使用するパソコンの処理速度によっては、30 fpsが難しいことがある。また、照明の状態によっては、うまく葉が抽出できないことがあるが、本研究では、二値化の方法を用いて実験を行った。なお、二値化の方法として、今回は xy 色度図を用い、簡単のために y の値が0.5以上の領域を葉とした。

(2) 固有振動数解析

得られた矩形領域の平均画素値（明暗）の時間変化は、従来通りScilabによって作成したプログラムによってパワースペクトルを求め、そのピーク周波数をその固有振動数とした。

III. 実験結果

1. 矩形領域における振動計測

(1) 矩形領域化

今回の計測では、カメラのフレームサイズは 640×480 ドットであり、矩形領域は 40×40 ドットの正方形とした。すなわち、画面を横に16分割、縦に12分割した。

図3は、そのように分割されたフレーム画像の各矩形領域の画素値を、上述の二値化法によって平均画素値に置き換えたものの一例

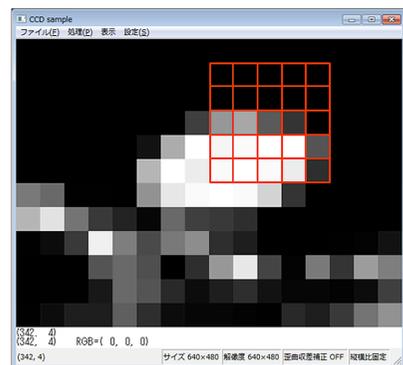


図3 分割された矩形領域の平均画素値

である。

(2) 矩形領域における各変動

このフレーム画像は、1秒間に約30回の割合で更新されるが、図3に示すような5×5の25矩形領域について、それぞれの矩形の平均画素値の時間変化を計測した結果を、図4に示す。

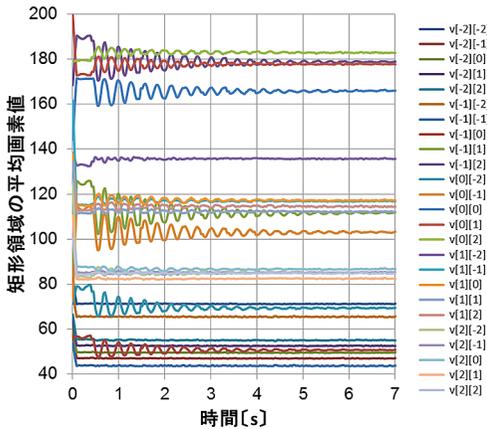


図4 25個の各矩形領域の平均画素値の変化

(3) 固有振動数解析例

図4のように、矩形領域によって、きれいな減衰振動の様子が捉えられているものもあれば、ほぼ平坦なものもある。平坦なものは、領域が葉のエッジから外れていると考えられるので、減衰振動が得られた矩形領域から、最も良さそうな波形を取り出すことにする。図5はその一例である。ここで、測定点は図の黒丸であり、曲線はそれらを滑らかに結んだものである。

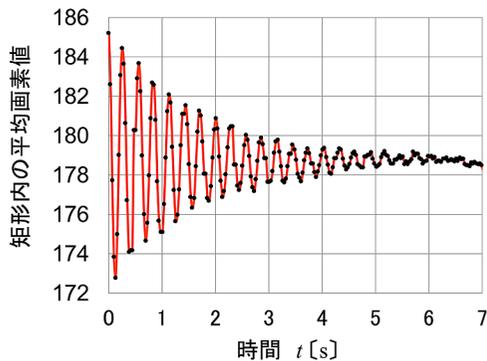


図5 矩形領域による振動計測

求める葉の固有振動数は、これの周波数スペクトルを求めれば得られるので、FFT法により図5の減衰波形のパワースペクトルを計算したものを図6に示す。ただし、このままでは大きな直流成分を持っているので、平均画素値の収束値が0になるように縦軸の原点を移動し、さらに、得られるスペクトルの刻み幅 Δf を小さくするために、減衰振動の後ろに0を10000点追加してからFFTを行った。

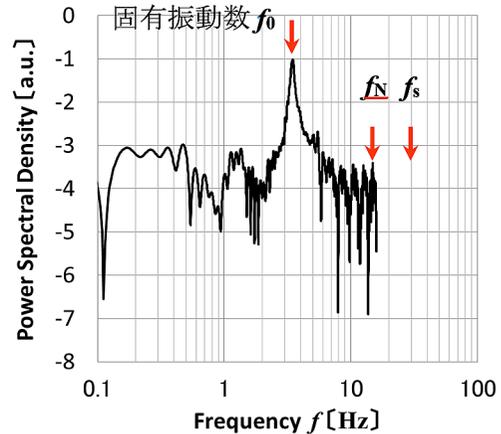


図6 図5のデータのパワースペクトル

サンプリング周波数は $f_s = 30$ Hz (よってナイquist周波数は $f_N = 15$ Hz)であり、このデータにおける固有振動数は、 $f_0 = 3.4$ Hz程度であることが分かる。

2. 固有振動数の連続計測

(1) 計測結果

上記のような矩形領域の平均画素値の変動の固有振動数すなわち葉の固有振動数を30

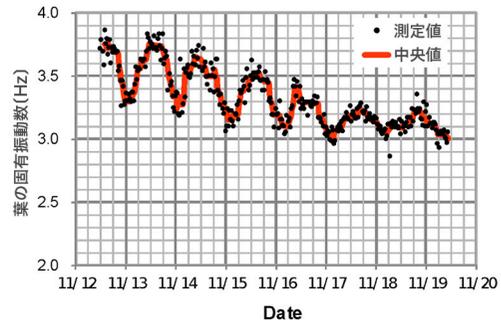


図7 葉の固有振動数の経時変化(日周変化)

分に1回の割合で自動計測し、それによって得られた葉の固有振動数の経時変化をグラフにしたものを図7に示す(黒い点)。

(2) 日周変化について

図7の実線は、中央値平均を用いて移動平均をかけて滑らかにしたものであるが、概ね、朝6:00の照光と共に固有振動数が上昇し、夕方18:00の消灯と共に固有振動数が下降しており、従来の方法と同様の日周変化を得ることができることが示された。

IV. 考察

1. エッジが隣り合う2辺を横切る場合の影響

この方法によって、葉の振動解析を行なおうとする場合、エッジが矩形領域の対辺を横切るときは、エッジの振動変位と矩形領域の平均画素値はほぼ比例すると考えられる。しかし、エッジが矩形領域の隣り合う2辺を横切るときは、領域は三角形になり、領域に含まれる葉の面積は、エッジの変位の2乗で変化する。図8(a)は、エッジの傾きが1/3の状態の葉が上昇して矩形領域と交わった状況を表わしており、 x は葉が交わった瞬間を原点としたときの葉の位置、 R は矩形領域の面積を1としたときの、葉の矩形領域との交わりの面積とすると、 x に対する R のグラフは図8(b)のようになる。すなわち、葉が x 方向に微小振動したとき、振動の範囲が x の $1/3 \sim 1$ の領域から外れると、 R の振動に非線形性が現れる。

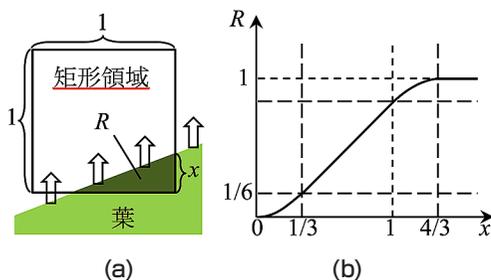


図8 葉とエッジの交わり方による影響

また、上記の例以外にも、エッジが直線的でなく大きく曲がっていたり、葉の先端などのように尖っていたりしても、 x と R の関係は非線形になる。したがって、採用する矩形領域を選ぶ際は、なるべく、 x と R が線形の関係になっている矩形領域を選ぶのが望ましいと言える。

ただし、多少非線形性があっても、基本振動数は同じであるから、パワースペクトルのピークから得られる固有振動数にはあまり影響はないと思われる。

2. 二値化の問題点

二値化にはやや複雑な画像処理が必要なため、使用するコンピュータの性能によっては、30 fpsのフレームレートに届かないことがあるが、それより大きな問題として、色による葉の抽出の場合、光源の色や葉の表面での鏡面反射により、うまく葉を抽出できないことがある。しかしこれは、マルチスペクトルカメラ等を用いて、赤色光(R)と近赤外光(NIR)の比率、すなわちNDVI(Normalized Difference Vegetation Index、正規化差植生指数)等の植生指数から葉を抽出すれば解決することができる。ただしこれには専用のカメラが必要になる。

V. 結論と今後の課題

1. 結論

葉の固有振動数を計測する際、通常は葉の振動変位を計測し、その周波数スペクトルから固有振動数を決定するが、振動変位を求める際に使用される相関追尾法は、画像的に特徴のある領域を毎回人間が設定する必要があり、自動化が難しかったが、固有振動数だけを知りたいのであれば、本報告で示した通り、ある矩形領域の明るさの変動を計測すれば、その変動の固有振動数から、葉の固有振動数を計測することができ、またその方法を用いても、従来の方法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、完全な自動計測への可能性が見えてきた。

2. 今後の課題

ただし、複数の矩形領域のうち、どの矩形の振動が葉の固有振動数を得るために最適かの判断を、現在は人間が行っている。

そこで今後の課題として、各ブロックの減衰振動の波形のうち、葉の振動を最も反映したブロックの振動を自動的に判別する方法を検討する必要がある。また、今回は1枚の葉について固有振動数を検討したが、実際の映像には複数の葉が写っており、葉ごとに異なる固有振動数を持つことから、各ブロックの固有振動数を分類するクラスタリングのような処理が必要になると考えられる。

このような処理が完成すれば、カメラで映像をモニタしながら、植物の水ストレスの状態が推定可能になり、それを灌水システムと連動させることにより、SPAに基づく自動灌水システムが実現すると考えられる。

謝辞

*本研究は、JSPS 科研費 16K07974 の助成を受けて実施されたものである。

【参考文献】

- 1) 仁科弘重：太陽光利用型植物工場の知能化のための Speaking Plant Approach 技術、月刊学術の動向, 15 [6], pp.62-70, 2010.
- 2) 中原正一・井上吉雄：赤外線放射測温によるトマトの水ストレス反応の検出—高糖度トマト栽培における低土壌水分管理への応用—, 農業気象, 53 [3], pp.191-199, 1997.
- 3) 兵頭竜二・高見寿隆・松尾憲一・一丸禎樹・下村義昭：長崎県, 植物の受けるストレスの測定方法及び装置, 特開 2005 - 308733.
- 4) 高山弘太郎・仁科弘重・山本展寛・羽藤堅治・有馬誠一：デジタルカメラを用いた投影面積モニタリングによるトマトの水ストレス早期診断, 植物環境工学, 21 [2], pp.59-64, 2009.
- 5) Motoaki Sano, Tsuneyoshi Sugimoto, Hiroshi Hosoya, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa: Basic Study on Estimating Water Stress of a Plant Using Vibration Measurement of Leaf, Jpn. J. Appl. Phys., 52, 07HC13, 2013.
- 6) 佐野元昭・有馬赳彬・中川裕・杉本恒美：葉の振動計測による植物の水ストレス状態の推定, 桐蔭論叢, 30, pp.155-161, 2014.
- 7) Motoaki Sano, Yutaka Nakagawa, Tsuneyoshi Sugimoto, Takashi Shirakawa, Kaoru Yamagishi, Toshiaki Sugihara, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa: Estimation of Water Stress of Plant by Vibration Measurement of Leaf using Acoustic Radiation Force, Acoust. Sci. & Tech., 36, pp.248-253, 2015.
- 8) 中川 裕・杉本恒美・佐野元昭・白川貴志・大平武征・内川千春：音響計測を用いた植物の水ストレス症状の検出に関する研究, 桐蔭論叢, 32, pp.193-196, 2015.
- 9) 佐野元昭・中川 裕・安齋拓也・内川千春・大平武征・白川貴志・杉本恒美：ハイスピードカメラを用いた葉の振動計測に関する検討, 桐蔭論叢, 32, pp.187-192, 2015.
- 10) 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, 34, pp.155-158, 2016.
- 11) 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, 36, pp.197-201, 2017.