

論文

画像解析による植物の葉の固有振動数計測

Natural frequency measurement of plant leaf using image analysis

内川 千春*・杉本 恒美¹・佐野 元昭²・
大平 武征¹・中川 裕¹・白川 貴志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

これまでに、植物の水ストレス状態を判断する方法として、葉柄を含む葉全体の固有振動数に着目して研究を行ってきた¹⁻⁴⁾。供試植物として小松菜を用いて固有振動数を連続的に計測したところ、日周変動を示すことが明らかになっており、健康時の葉の固有振動数は点灯前後から徐々に上昇して昼間に最大になり、その後徐々に下降して消灯後の夜間に最小となる。しかし、水ストレスを与えると日周変動に変化が生じ、固有振動数が最大となる時間帯が消灯後にずれこむ現象が確認されている (Fig.1)。この変化は目視によるしおれが確認されるよりも早い段階で起こる

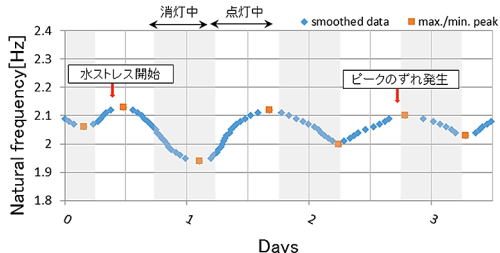


Fig.1 固有振動数連続計測結果例

ため、植物の水ストレス状態を非接触で早期に検出する手段として利用できる可能性がある。そこで、葉の固有振動数の日周変動をもとに小松菜の水ストレスを推定し、灌水制御することにより、農業用水を節約する方法について研究を続けてきた。ところで、これまでの実験では葉の振動変位を計測する手段としてレーザ変位計 (LK-G150, KEYENCE) を用いてきた。計測時は Fig.2 に示す様に対象葉の上方約 15cm に設置し、葉のゆれがきれいな減衰波形として取得できる様に手作業で位置調整を行っていた。しかし、小松菜の株全体の形状は、昼間は葉柄部が倒れて葉が広がった状態になり、夜間は葉柄部が立ち上がって葉が



Fig.2 レーザ変位計設置例

* UCHIKAWA Chiharu, Ohdaira Takeyuki, Nakagawa Yutaka and Shirakawa Takashi: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

² SANO Motoaki: Professor, Faculty of Biomedical Engineering, Toin University of Yokohama



Fig.3 小松菜の葉の状態の変化
(左)点灯中 (右)消灯中

株の中央に向かって閉じる様に変化する (Fig.3)。この傾向は株の中心部に近い若い葉ほど大きい。Fig.3においては、特に中央の2枚の葉が消灯中は立ち上がり、中央に寄っていることが分かる。また、葉はこのように昼夜で上下動するだけでなく、他葉との重なりを避けるように左右にも多少位置を変化させながら成長する。このため、連続的に振動計測を行う場合、葉の位置変化に応じてレーザー変位計の位置をこまめに調整する必要があった。しかしながら、夜間にレーザー光の照射位置が葉上からはずれたり、レーザー変位計の計測可能範囲 ($\pm 40\text{mm}$) を越えてしまうことは避けられず、データのばらつきや抜けの原因となっていた。そこで、葉の振動する様子を動画で保存し、画像を解析することにより葉の固有振動数を計測できればこれらの問題を回避できるのではないかと考えた。まずは予備実験を行い、動画から葉上の特徴点を追尾する方式で振動を抽出する方法を試した。

II. 動画による葉の振動計測の予備実験

1. 撮影条件

Fig.4 に実験セットアップを示す。小松の下方約 15 ~ 20cm の距離にパラメトリックスピーカー (S101AW3PF2 日本セラミック株式会社) を設置し、スピーカーから小松菜の葉の固有振動数を含む 2Hz ~ 4Hz の帯域幅をもつ音波を照射することにより葉を振動させた。小松菜の株全体が映る位置に CCD カメラ (ELECOM 製 UCAM-DLK130T WH) を設置し、ライブカメラソフト Live-

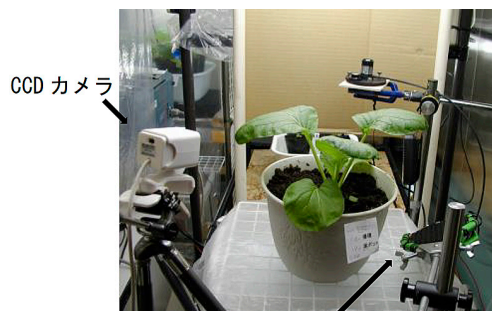


Fig.4 予備実験セットアップ

Capture 3 の動体検知機能により、約 10 秒間葉の振動の様子を撮影した。画像サイズは $320 \times 240 \text{ pixel}$ 、フレームレートは約 30 fps であった。照明には蛍光灯を用い、計測時の明るさは約 10000 lx であった。

2. 結果

動画からの振動抽出には、Dipp-Mortion V(2D) ver.1.1.24 (Ditect 社) を用いた。葉上の特徴点にマーカーを手動で設定し (Fig.5 P1)、マーカーを中心とした $32 \times 32 \text{ pixel}$ を注目領域とし、さらにその周囲 $64 \times 64 \text{ pixel}$ を探索領域とした (Fig.5 右)。開始フレーム上のマーカーを基点として Y 軸方向の変位を相関追尾することにより振動変位を

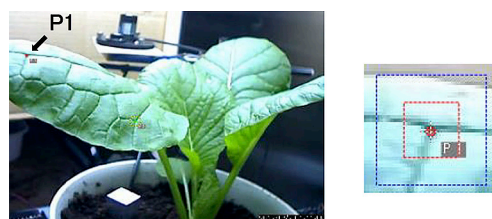


Fig.5 マーカー P1 右は拡大図

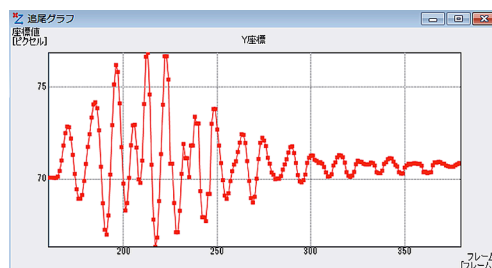


Fig.6 P1 特徴点追尾結果例

求め、CSV形式で保存した。Fig.6は特徴点の追尾結果の一例である。一定期間撮影を行なって得られた動画および追尾結果より、以下の問題点が明らかになった。

(1) 特徴点ではない部分を特徴点として追尾してしまうことがある。これは、小松菜の株全体を撮影したことにより、特徴点付近が鮮明に写っていないことが原因の一つと考えられる。

(2) 全体に蛍光灯のちらつきが写り込んでおり、葉の振動が収まった後も振動しているかのように追尾してしまうことがある。

(3) 共振により小松菜の株全体を振動させているため、計測対象葉以外の葉のゆれが影響し、望ましい減衰波形が得られない場合がある。

そこで、これらの改善点をふまえて次の実験を行った。

III. 動画による葉の振動計測の連続実験

予備実験により、以下の様な改善を加えた上で画像解析による葉の固有振動数の連続計測実験を行った。

1. 改善点

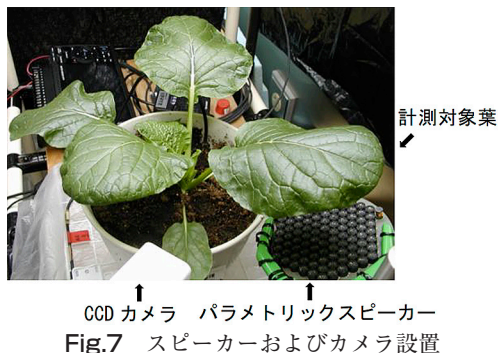
(1) 計測葉をできるだけ鮮明に撮影する。画素数 (pixel) を 320×240 から 640×480 に変更し、撮影範囲を株全体ではなく計測葉のみとする。

(2) 動画に写り込む蛍光灯のちらつきを軽減させるため、照明をLED蛍光灯に変更する。

(3) 共振により株全体を振動させるのではなく、40kHzのsin波の音響放射圧により、できる限り計測対象葉のみを振動させる。

2. 実験セットアップ

小松菜は温度約 21°C 、湿度約 55% の恒温室内で育成し、播種後 38 日目に計測を開始した。照明はLED蛍光灯とし、6:00 から 18:00



までを点灯、18:00 から 6:00 までを消灯とした。Fig.7はカメラおよびスピーカーの設置状況である。CCDカメラ (ELECOM製 UCAM-DLK130TWH) は、計測対象葉のみができるだけ鮮明に撮影できる位置に設置した。また、計測対象葉下方約 10 cm にパラメトリックスピーカーを設置し、15分おきに 40 kHz、 $2 V_{pp}$ の sin 波 4000 cycle を照射して葉を振動させた。LiveCapture3の動体検知機能により撮影が開始され、毎回約 10 秒間の動画が WMV 形式で保存された。フレーム数は約 30 fps、画素数は 640×480 pixel であった。

3. 結果

(1) 改善の効果について

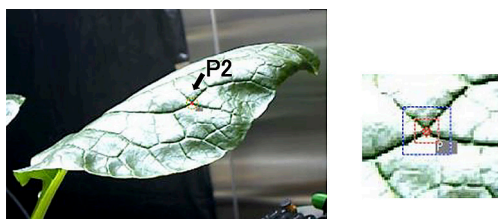


Fig.8 マーカー P2 右は拡大図

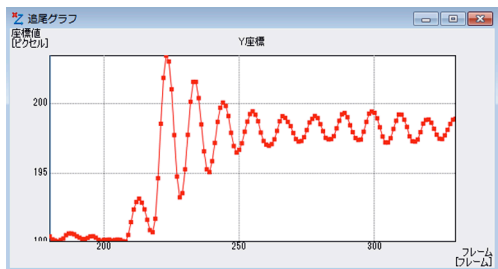


Fig.9 P2 特徴点追尾結果例

Dipp-Mortion V(2D)ver.1.1.24 による振動抽出結果を示す。Fig.8、9 はマーカー設定と特徴点の追尾結果の一例である。

先に述べた改善により以下の様な効果が見られた。まず、撮影範囲を調整したことにより画像が鮮明になった。また、照明をLED蛍光灯に変更したことによる動画のちらつきの解消により、どのフレームにおいても正しく特徴点を追尾できるようになった。さらに、計測対象葉のみを振動させたことにより振動波形の乱れが軽減され、きれいな減衰波形が得られるようになった。

(2) 連続計測結果について

Dipp-Mortion V(2D) ver.1.1.24 により CSV 形式で保存された振動変位データを数値計算ソフトウェア Scilab を用いて FFT することにより、固有振動数を求めた。Fig.10 に約 10 日間に渡る 2 時間ごとの固有振動数解析の結果を示す。

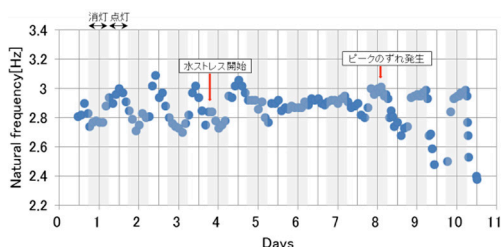


Fig.10 画像解析による連続計測結果

計測開始から 3 日間は、昼に固有振動数が高くなり、夜に固有振動数が低くなる健康時の日周変動が確認できる。また、3 日目午後給水を停止したところ、8 日目以降は消灯後に固有振動数が最大になる水ストレス時の日周変動が確認された。Fig.11 は葉の固有振動数の連続計測をレーザ変位計を用いて行

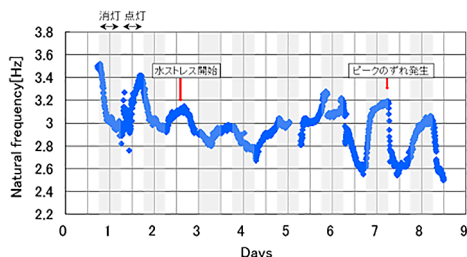


Fig.11 レーザ変位計による連続計測結果例

った場合の一例である。計測開始 2 日目午後給水を停止したところ、7 日目以降に固有振動数の最大値が消灯以降にずれ込み、水ストレス時の日周変動が現れている。今回の実験により、CCD カメラの動画から振動を抽出する手法でも、レーザ変位計による計測と同様の傾向を捉えられる事が確認できた。

IV. 考察

今回の実験においても、できるだけ葉が鮮明に撮影されるように葉の位置変化に応じてカメラの位置調整を行なった。しかし、レーザ変位計の場合ほどこまめに調整する必要はなく、計測時の手間が軽減された。葉の位置変化により写り具合が多少変化しても、マーカーを設定できるような葉の一部がフレーム内に入っていれば振動を抽出できるため、完全にデータが抜け落ちてしまう可能性は少ない。このことから、画像解析はレーザ変位計よりも葉の位置変化に対応しやすい計測方法であると思われる。また、葉の振動する様子が動画で保存されるため、特徴点を何度でも選びなおして振動抽出を行なうことができるという利点もある。ただし、現状では手動で特徴点を選択して相関追尾を実行するため、特徴点の選び方により結果が異なる、解析に時間がかかるといった問題がある。

V. まとめ

葉の固有振動数を連続的に計測する手段として画像解析を用いる方法について検討した。一定期間計測を行い従来のレーザ変位計を用いた計測結果と比較したところ、ほぼ同じ傾向が捉えられたことから、葉の固有振動数の連続計測方法として有効であることが明らかになった。また、計測時の手間が軽減される上、葉の上下動などに伴う位置変化に対応しやすく、データの抜けやばらつきを改善でき

ることも期待される。しかし、植物育成の灌水制御に用いるためには、葉の固有振動数の日周変動の傾向を日々監視する必要があり、そのためには画像からの振動解析を自動で行なえることが望ましい。ここでは Dipp-Motion V(2D) ver.1.1.24 を用いた振動解析を試したが、他の手法についても検討し、解析の自動化を進めていくことが今後の課題である。

謝辞

*本研究は、JSPS 科研費 25450387 の助成を受けて実施されたものである。

【参考文献】

- 1) T. Sugimoto *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52, 07HC04, 2013.
- 2) M. Sano *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52, 07HC13, 2013.
- 3) 佐野 他, 音響講演論文集 (春期) 3-P5-8, pp.1359-1360, 2014.
- 4) M. Sano *et al.*, *Acoust. Sci. & Tech.*, 36, pp.248-253, 2015.