

統計的干渉法を用いた 最適栽培環境のための高感度植物生育モニタリング

High sensitive plant growth monitoring using statistical interferometry for the optimum cultivation condition

環境センシング研究室 06ME217 玉田 宜久 (Norihisa TAMADA)

指導教員: 門野 博史 准教授

Abstract

Statistical interferometry (STI) is a novel optical interferometric technique that utilizes the complete randomness of a fully developed speckle field. STI has an extremely high sensitivity that permits the growth measurement of plants with sub-nanometric accuracy. In the agriculture, it is very important to find the optimum conditions for the cultivation of plants. The aim of this study was to investigate the optimum illuminating conditions with the help of optical sensing method that permits monitoring of plant reactions in very short time and with very high accuracy. STI was applied to measure the growth of plant under several illumination conditions. An improvement of the measurement system was carried out to be more stable and compact. Experiments were carried out with three different plant species (Syngonium, Chinese chivers, and Qinggengcai) which were subjected to illumination with different wavelength. Based on the experimental results, it was revealed that the growth rate of plants is strongly dependant on the illumination wavelength components.

Keywords: speckle, statistical interferometry, light wavelength

1. はじめに

近年、植物の生長促進要因をコントロールして農作物の収穫を効率的に行う植物工場が注目されている。そこで、作物の最適栽培環境のモニタを短時間で行うことを目指して、超高感度な干渉法である統計干渉法(STI)を用いて日照波長に対する植物の生長応答の計測を試みた。我々が提案してきた STI は、粗面物体にコヒーレント光を照射したときに生じるスペックル場の位相が完全にランダムであり、統計的に非常に安定した性質を利用した原理的に全く新しい超高感度な干渉法である。

はじめに、STI の実用性を向上させ、屋外の自然環境で育つ植物を計測可能なように、小型で安定な計測器として確立することを目的として、従来の STI の小型化に取り組んだ。新規に設計されたプリズムを光学系に用いることで、従来よりも光学系がコンパクトになり、より空気揺らぎを抑制した構造になった。

次に、植物を用いて実験を行った。植物は、シンゴニウム、ニラ、ミニチンゲンサイを用い、植物生長に有効な白色ランプ、赤色 LED (660nm)、青色 LED(465nm)、赤色+青色の LED を用いて、光に対する生長速度との依存性を調べた。また、植物の生長速度は一定ではなくナノメートルスケールで常にゆらいでいることが当研究室の先行研究で明らかになっており、植物の活性状態と相関を持つことが指摘されている。そこで、ゆらぎすなわち生長速度の標準偏差の変化についても注目した。

2. STI の原理

STI に基づく植物生長計測に用いる光学系を Fig.2 に示す。波長 532nm の YAG レーザーから出射した光は偏向ビームスプリッター (PBS) により 2 つの直交する直線偏光光に分けられ、レンズの焦点距離の位置に置かれた

それぞれのミラー(M₁,M₂)によって反射された光はレンズ(Lens)により互いに平行にされ、サンプルを2点で照射する。照明光は物体上の2点で散乱し、それぞれ独立なスペックルパターンが発生する。物体法線に対する観察角 $\theta = 6.0^\circ$ の位置に置かれた CCD カメラを通して、2つの独立したスペックルパターンの重ね合わせの結果生じるランダムな干渉パターンが計算機に取り込まれる。

葉の伸長情報を含む 532nm のレーザー光のみを CCD カメラで検出するために CCD カメラの前には中心波長 532nm の干渉フィルタが挿入されている。

試料上の光照射2点間で相対的に ΔX の変位が生じると、観測面上で干渉する2つのスペックル場の間に $\Delta X' = \Delta X \sin \theta$ の光路変化が導入される。この光路変化を求めることにより、2点間の歪みが求められる。物体が伸縮する際に得られるランダムな干渉パターン (I₁, I₂, I₃...I_n) は順次コンピュータに取り込まれる。その中から任意の3つの干渉画像

$$I_i = I_0(X) [1 + \alpha(x) \cos(\phi(x) + \psi_i)]$$

(i = 1, 2, 3)

を選択する。ここで I₀(x) は平均強度、 $\alpha(x)$ はモジュレーション、 $\phi(x)$ はランダムなスペックル位相である。物体歪みに伴う3つの干渉画像の位相を $\phi_1, \phi_2 (= 0), \phi_3$ とする。しかしここでは、5つの未知数に対して3つの方程式しか与えられていない。そこで $-\phi_1 = \phi_3 = \phi$ と仮定し、スペックル位相 $\phi(x)$ について解くとスペックル位相

$$\phi(x) = \tan^{-1} \left[\frac{I_1(x) - I_3(x)}{I_1(x) + I_3(x) - 2I_2(x)} \frac{\cos \psi - 1}{\sin \psi} \right]$$

が得られる。しかしこれは一般的には成り立たない仮定の下に導かれた‘見かけ上の’スペックル位相であり、‘真のスペックル位相’とは異なる。真のスペックル位相の確立密度分布(PDF)は十分発達したスペックル場に対して、光学系や物体表面のパラメータによらず $-\pi$ から π に渡って一様に分布することが知られている。この非常に安定した特性を統計的な意味で位相決定の基準として用いることができる。‘見かけ上の’スペックル位相の PDF は ϕ_1, ϕ_3 が仮定の値からずれるにしたがって不均一になる。見かけ上のスペックル位相と真のスペックル位相の PDF

との偏差から未知の位相項 ϕ_1, ϕ_3 を決定することが理論的に可能である。これにより物体の変位が求められる。これが STI の原理である。(2)

本手法の利点は統計的手法であるためにその計測精度は単に計算に用いられるデータ点数のみで決定される点である。十分多くのデータ点数を用いることにより従来法をしのぐ精度を極めて簡単な光学系により実現可能である。また、スペックルを用いるため散乱性の表面を持つ物体に適用可能であり、特に生物試料の計測に適している。

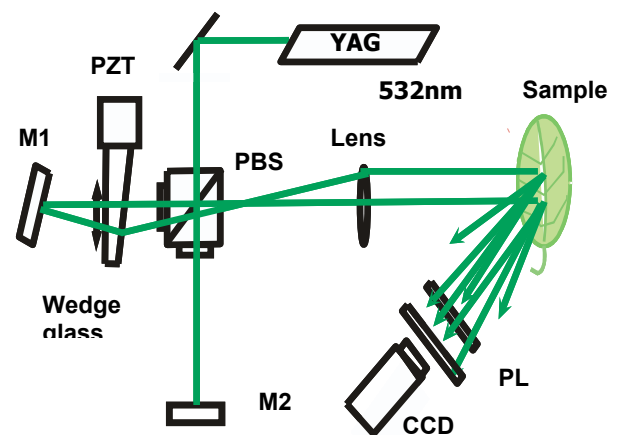


Fig.2 Optical system of STI

3. STI の小型化

Fig.2 に Fig.1 で示した STI の光学系を改良した装置を示す。Fig.1 と大きく違う点が、大きさである。新規に設計されたプリズムを光学系に用いることで、従来よりも光学系がコンパクトになり、縦横 20cm×15cm プレート上に光源から受光部の CCD までが設置することが可能となった。これにより、レーザーの出射点から受光部の CCD まで 100cm 要していた長さを 30cm まで抑えることが出来た。また、光源である半導体レーザーから放射状に発散されるレーザーをよりコンパクトにコリメートされた状態で出射するためファイバーを用いてビームを出射している。この一連の小型化への改良により、空気揺らぎを抑制したコンパクト構造を実現した。また、屋外でも使用できるよう、葉の伸長情報を含む 660nm のレーザー光のみを CCD カメラで検出するために CCD カメラの前には中心波長 660nm の干渉フィルタが組み込まれている。

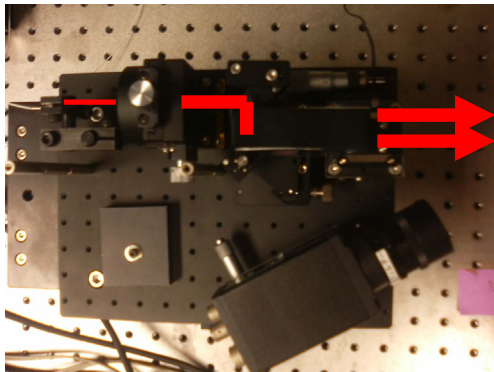


Fig.2 General view of STI

4.実験

4-1 光照射による植物生長の変化

作物の最適栽培環境のモニタを短時間で行うことを目指し、日照波長に対する植物の生長応答の計測を試みた。

シンゴニウム、ニラ、ミニチンゲンサイに対し、白色ランプ、赤色 LED(660nm)、青色 LED (445nm)、赤色+青色(赤色と青色の強度比 10 対 1) を、それぞれ $100 \mu \text{mol/sec m}^2$ で照射したときの応答を測定した。

Fig.3 は、シンゴニウムの葉に対し、暗室で 20 分間測定の後、白色ランプを 40 分間照射した結果である。各々の測定では、5 秒間、葉の伸長を計測し、植物の葉の 1 mm あたりの生長速度(nm/sec mm)を算出した。光が当たっていない状態での平均生長速度は $0.65(\text{nm/sec mm})$ であるのに対して、光の照射を開始すると、およそ 3 分間で生長速度が大きく上昇し、光を照射した 40 分間の平均生長速度は $4.67(\text{nm/sec mm})$ と大きくなった。さらに興味深い点として、ゆらぎ量すなわち生長速度の標準偏差も照明の点灯に伴い、点灯前 $0.30(\text{nm/sec mm})$ から点灯後 $3.27(\text{nm/sec mm})$ へと大きく上昇した。これにより、植物は光が照射されているときの方が大きく生長していることがわかる。

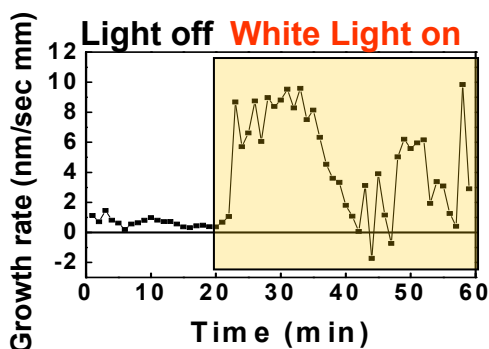


Fig.3 Influence of white light

しかし、光の照射に対して起こる植物生長速度とゆらぎの上昇は必ずしも起こる現象では無く、光の波長に依存することが実験により認められた。Fig.4 は、シンゴニウムの葉に対し、暗室で 1 時間測定の後、青色 LED (445nm) を 2 時間照射した結果である。光が当たっていない 1 時間の平均生長速度は $1.51(\text{nm/sec mm})$ であるのに対して、光を照射した 2 時間の平均生長速度は $0.37(\text{nm/sec mm})$ と Fig.3 の結果とは逆に成長速度が減少するという結果となった。さらに、ゆらぎ量も照明の点灯に伴い、点灯前 $1.38(\text{nm/sec mm})$ から点灯後 $2.01(\text{nm/sec mm})$ へと若干大きくなるものの、白色照明ほど劇的な変化は見られなかった。

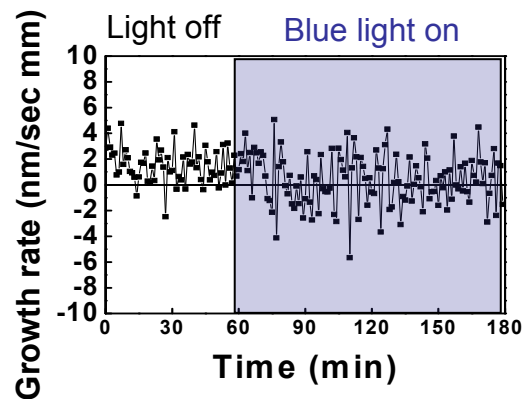


Fig.4 Influence of blue light

また、赤色(660nm)、赤色(660nm)+青色(445nm)の赤色を含む場合、生長速度は大きくは上昇しないものの、ゆらぎが大きくなることが複数回の実験により確認された。一例を Fig.5 に挙げる。Fig.5 は、シンゴニウムの葉に対し、暗室で 1 時間測定の後、赤色 LED (660nm) と青色 LED (445nm) を 2 時間照射した結果である。光が当たっていない 1 時間の平均生長速度は $0.07(\text{nm/sec mm})$ であるのに対して、光を照射した 2 時間の平均生長速度も $0.06(\text{nm/sec mm})$ と生長速度があまり変化しないという結果となった。しかし、ゆらぎ量は、照明の点灯に伴い、点灯前 $0.70(\text{nm/sec mm})$ から点灯後 $1.60(\text{nm/sec mm})$ へと上昇した。

これらの結果から分かるように用いる波長の違いで、植物生長の挙動が異なることが分かる。

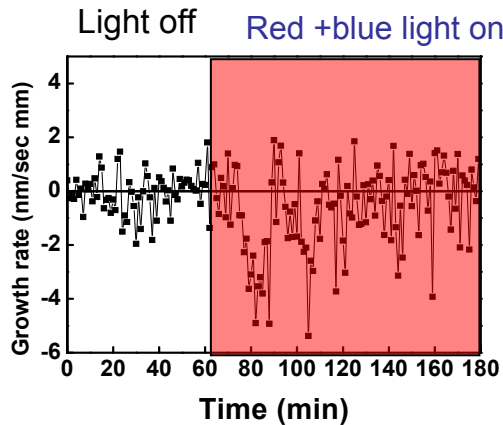


Fig.5 Influence of red + blue light

シンゴニウム、ニラ、ミニチンゲンサイの3種に対し暗室で1時間サンプルの生長測定を行い、その後2時間にわたって白色、赤色、青色、赤色+青色の光の条件で2時間 $100 \mu \text{mol/sec m}^2$ の強度で照射した時に得られた照明点灯時と消灯時の生長速度の差を Fig.6 示し、ゆらぎの比（点灯時のゆらぎ/消灯時のゆらぎ）を Fig.7 に示した。この結果より、植物の応答は波長ばかりでなく、植物の種類の違いによっても、生長速度やゆらぎの変化が生じていると考えられる。

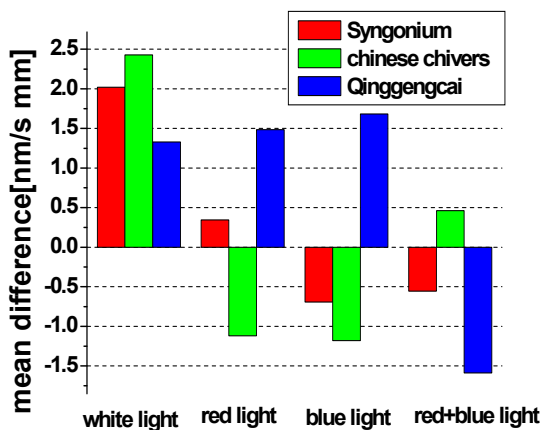


Fig.6 Difference of growth speed

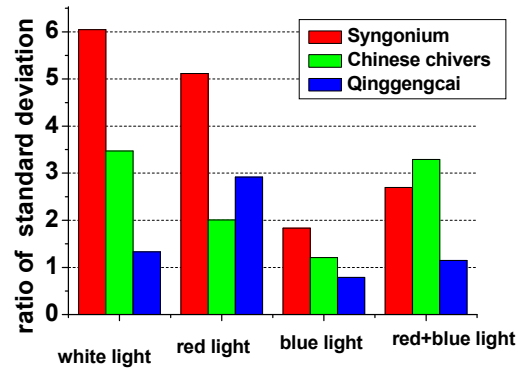


Fig.7 Ratio of standard deviation

5.まとめ

従来の STI をよりコンパクトに改良したことにより空気ゆらぎの少ないシステムになった。

秒単位の高い時間分解能でサブナノレベルの超高精細度計測可能な統計的干渉法を植物に適用することにより植物の生長速度が常にゆらいでいることがわかる。このことに着目し、改良した STI を用いて光の波長条件による植物の生長応答を計測した結果、白色の光を用いた場合に生長速度とゆらぎが大きくなり、赤色 LED、赤色+青色 LED の場合のように赤色を含む場合は生長速度は大きくはならないものの、ゆらぎは大きくなる傾向があることが確認された。植物の種類の違いによっても波長に対する生長速度とゆらぎの変化の特徴が変わるという結果が得られた。

数十秒から数分の時間スケールでの生長速度とナノメートル生長ゆらぎに注目することで、従来よりも早く作物種に合わせた光の最適栽培環境を見出せる可能性を示唆している。

参考文献

- 1) H. Kadono, and S. Toyooka: "Statistical interferometry based on a statistics of speckle phase," Opt. Lett, Vol. 16 (1991), 883-855.
- 2) H. Kadono, Y. Bitoh, and S. Toyooka : "Statistical interferometry based on fully developed speckle field: An experimental demonstration with noise analysis," JOSA ,Vol. 18 (2001), 1267-1274