

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23650078

研究課題名(和文) 構造化パタン光投影による植物の光合成状態計測

研究課題名(英文) Measuring States of Plant Photosynthesis by Structured Light Projection

研究代表者

岡谷 貴之 (Okatani, Takayuki)

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：00312637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：光の反射成分を分離するコンピュータビジョンの様々な方法を、植物のクロロフィル蛍光計測の高精度化に応用する研究を行った。成果の一つは、映像プロジェクタを用いて植物にパタン光を投影し、その反射光を直接反射成分と間接反射成分に分離することで、葉の内部を経由して表面に放出される表面下散乱光成分を取り出し、クロロフィル蛍光をより高精度に計測できることを確かめたことである。この他、二色性反射モデルを使った鏡面・拡散反射成分分離の方法などを開発した。

研究成果の概要(英文)：We have studied the application of a range of computer vision techniques of separating reflection components to improving measuring accuracy of chlorophyll fluorescence. One of the main contributions is that we have confirmed that the method of projecting structured light to plants and separating the direct and indirect (or global) components can really extract sub-surface scattering of incident light onto leaves of plants, resulting in the improvement of measuring chlorophyll fluorescence. We have also developed a new method of separating specular and diffuse reflection components based on the dichromatic reflection model.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：コンピュータビジョン 植物光合成状態計測 構造化光投影

### 1. 研究開始当初の背景

農作物への需要の拡大を背景に、近年、植物の生育状態を計測するための方法が盛んに研究されている。中でもクロロフィル蛍光計測は、植物の光合成の状態を生体のまま非破壊的に計測できる大変有効な方法である。

蛍光計測では、照射した光に応じて植物から放射される蛍光を、外部から計測することで光合成の状態を推定する。これは、植物内のクロロフィルは光に励起されると蛍光を放出するが、その量がクロロフィル内部の光化学反応の状態と相関する性質を利用している。蛍光や光の吸収がどのように時間変化するかを捉えれば、光合成の状態を表す様々なファクタがある程度推定できる。

これまでに、この原理に基づくいくつかの測定法が開発・製品化されている。近年、カメラにより蛍光を撮影することで光合成状態を2次元画像化できる装置が一般化し、数々の新しい知見の獲得に貢献している。しかしながら、既存の方法は計測精度やパラメータ数の点で飽和してしまっていた。その背景に、カメラを使っても計測は各画素独立に行われ、その信号処理は時間軸上に限定されていたこと、および空間的に均一な照明を使っていたことがあった。

一方、コンピュータビジョンおよびグラフィックスの分野では近年、プロジェクタから物体に構造化パターン光を照射し、物体表面での光の表面反射を主とする、複雑な光学的現象を計測する方法が次々に実現されている。ただし、用途は画像のレンダリングや画像認識に限られ、植物の計測に応用されることはなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、映像プロジェクタとカメラを組み合わせたシステムを使って、このクロロフィル蛍光計測を中心とする植物の光計測を行う方法を研究する。コンピュータビジョンおよびグラフィックスの分野で、物体表面付近での光の反射現象を計測する方法がよく研究されてきた。画像のレンダリングや画像認識を目的に研究されてきたこれらの方法を、植物の光計測に応用する。プロジェクタからパターン光を植物に照射して、葉の表面付近での反射光を各成分に分離する方法、並びに光合成の励起光と蛍光・吸収の測定光等を分離する方法を実現し、クロロフィル蛍光計測を中心とする植物の光計測を高機能化する。

### 3. 研究の方法

(1) まず、入射光に対するクロロフィル蛍光および葉の表面下散乱光のモデリングを行った。葉表面への入射光に対するクロロフィル蛍光ならびに表面下散乱光を、物理ベースビジョンの立場でモデル化した。これは後述

の反射光成分分離において、投影すべきパターン光の構造の細かさを検討する上で必要な要素となる。

(2) 次に、Nayar らが提案し、Gupta らが発展させた反射光の成分分離方法を、植物の葉付近での蛍光・吸収計測へ適用することを検討した。基本原理は、プロジェクタから構造化されたパターン光を対象物に何種類か投影し、その際の反射光の輝度差から、反射光を直接反射成分とそれ以外に分離するというものである(図1)。市販の映像プロジェクタおよび蛍光カメラを用いて、図2のように実験システムを構築した。

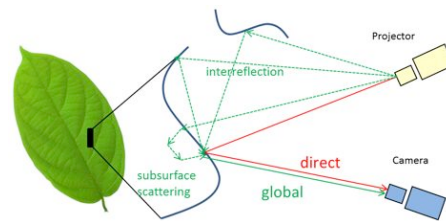


図1. プロジェクタから構造化光を投影し、カメラで反射像を撮影することで、反射光の直接伝達成分と間接成分を分離する。



図2. 本研究で構築した実験システム。

(3) 植物の葉を対象としたときの反射成分分離の性能を実験評価することに主眼を置いた。最後に様々な植物を対象に、種や葉の構造の違いによる反射成分分離への影響を調べた。具体的には、図3に示す複数の植物個体を対象に、パターン光の投影および反射光の成分分離を行い、植物種や葉の表面形状・テクスチャの違いの影響を調査した。



図3. 実験で使用した植物の例。

(4) 以上の研究方法は独立に、撮影画像から直接光の成分を分離する別な方法も検討した。その方法は、色の情報を利用して反射光を拡散反射光と鏡面反射光に分離する方法である。拡散反射光とは、物体表面の微細構造（内部構造含む）が影響を与える反射成分であり、物体固有の色を定めている。一方、鏡面反射とは、物体の表層で直接照明光が反射されてカメラに撮影されるもので、その色は照明の色そのものとなる。以上は二色性反射モデルとして知られているが、このモデルに基づく反射成分の分離方法の研究がこれまで盛んに行われていたものの、いくつかの前提条件を要することや、分離精度の低さから、植物を対象とすることは精度面で難しかった。

#### 4. 研究成果

(1) 本研究で最も中心となる成果は、構造化光投影による直接光と間接光の分離による、蛍光強度計測の高精度化の検証ができたことである。検証の内容は2つに分けられる。

① まず一つ目は、投影パタンの構造の細かさ、それが蛍光計測に与える影響の関係を見積もったことである。具体的には、図4(a)のような構造化パターン光を植物の葉に投影し、一定時間を経た後、均一光を同じ葉に照射すると、同図(c)のような画像が撮影される。画像で認められる植物の葉上のパターンは、すなわちそれまで照射していたパターンと同一形状をしている。これは、植物の葉がパターンによる光の照射の有無によって、光合成状態に違いを生じ、その結果放出される蛍光が異なっていることによると考えられる。このパターン光の構造（空間周波数）を同図(b)のように小さくすると、同図(c)と同様の条件で撮影される画像は同図(d)のようになり、投影したパタンの構造は認められなくなる。その一方で、この構造があまりに小さいと、先述の直接光と間接光の分離も難しくなるため、両方をうまく調節できる投影パタンの設計が必要であった。これに対し、われわれ

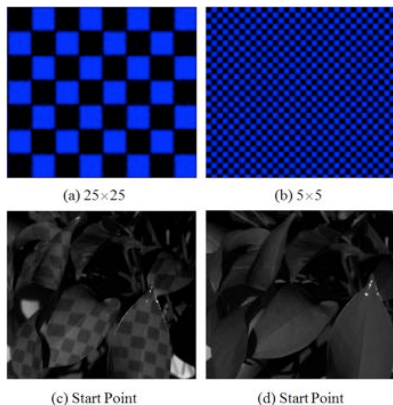


図4. 構造化パタンの構造サイズが植物光合成状態へ与える影響。

は実験を行い、同図(b)のような XGA 画像中

の5画素程度の大きさの構造を持つパターンを用いれば、葉の光合成状態を空間的に一様に保ちつつ、直接・間接光の分離が可能であることを明らかにした。

② 成果のもう一つは、先述の直接・間接光の分離方法が、植物蛍光計測の精度向上に実際に役立つことを確認できたことである。Gupta らの研究により、明暗の細かな繰り返しからなる構造化パターン光を複数枚、対象シーンに投影することで、そのプロジェクタから放出された光に起因する直接成分と間接成分を分離できることが分かっていた。図5に示すような、波状の構造を持つパターンを対象とする植物の葉に照射して求めた2つの成分が同図下段に示したものである。問題は、こうして得られた各成分が、蛍光計測とどのように関係付けられるかである。これを明らかにするため、われわれは、プロジェクタの位置を2通りに変化させて同じようにパターン光を投影したとき、分離される成分の変動を調べるという方法を考案した。プロジェクタの位置が変わると、そこから葉へ到達する光の入射角度が変化する。この変化にともなって直接光の成分は変化するが、間接光は変化しないはずである。図6は実験結果の一例であるが、上段と下段がプロジェクタの位置変更前後の画像で、それぞれの段で左から、撮影画像、分離された直接成分および間接成分である。図に見られるように、直接成分は上段と下段で変化しているが、間接成分は不変であることが分かる。このことは、分離された間接成分が、植物の葉の内部に到達し、

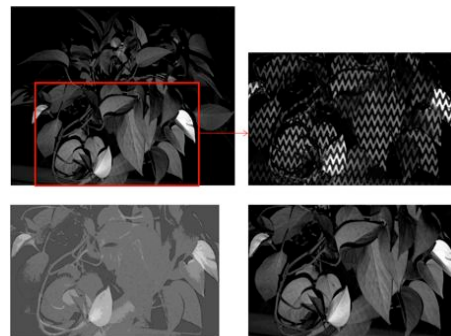


図5. 構造化パターン光投影による直接・間接光分離結果の例。

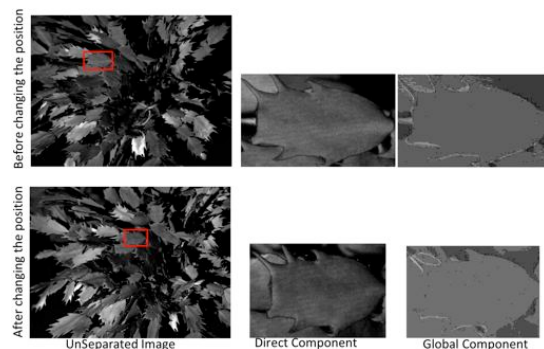


図6. プロジェクタの位置が変化した場合の直接・間接光分離結果の変化

そこから外部に射出された光（表面下散乱光）であることを裏付けている。植物蛍光はこの間接成分内に必ず含まれていることになり、蛍光をまったく含まない直接光と完全に分離できることから、蛍光強度の計測精度がそれだけ向上させられることになる。以上のように、本研究ではプロジェクタによる構造化パタン投影により、この光を蛍光の励起光としつつ、直接・間接成分分離を行うことで、蛍光を余分な直接成分と無関係に計測することが可能になることを示した。

(2) 「研究の方法」に述べたように、二色性反射モデルに基づく、鏡面・拡散反射の分離方法の研究を行った。従来方法は、それぞれの反射の空間分布に関する事前知識を前提とする必要があった。そのような事前知識の最も典型的なものは、鏡面反射と拡散反射はそれぞれが空間的に近い場所にあるということである。このことは、手法の適用範囲を狭める結果となっていた。これに対しわれわれは、このような事前知識を前提とせず、高精度に反射成分分離が行える方法として、スパース非負値行列分解に基づく新しい方法を提案した。従来手法に対する優位性を示す実験結果の一例を図7に示す。

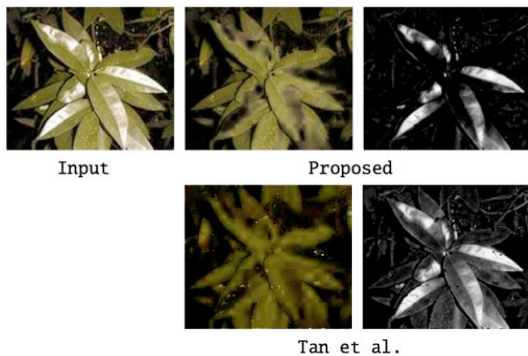


図7. 単一画像での反射成分分離の結果。左上から入力画像、提案手法で分離した拡散、鏡面反射成分、従来手法による結果。

また、以上の鏡面・拡散反射分離問題と深いつながりのある、画像からの光沢度認識についても研究を行った。この問題は、人の視覚が極めて高い性能を示すことから、ディープニューラルネットワークを用いた光沢感認識や、ランキングSVMを用いて画像に写る物体の光沢感や透明感を定量化する方法を実現した。

その他にも、植物の3次元形状をプロジェクタとカメラを組み合わせて、あるいはカメラを使って推定する方法を開発した。これらを用いることで、先述のパタン光投影による反射成分分離法と組み合わせることでその精度を向上させられる可能性がある。研究成果としては、プロジェクタから構造化光を投影し、カメラで撮影した画像から3次元形状を推定する際、面の向きの違いによる濃淡の違

い（陰影とよばれる）を用いて、その精度向

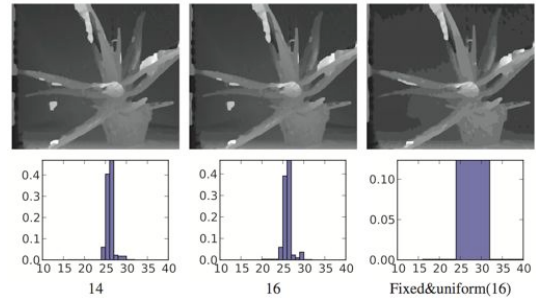


図8. MRFの変数空間動的離散化による奥行き計測の結果。左2枚が提案手法。右が従来手法。

上を行える方法や、カメラ2台を使って対象の形状を計算するステレオ法に対し、これをマルコフ確率場の最適化問題に帰着したとき、その推定精度を向上する方法がある（図8）。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

[雑誌論文] (計5件)

- ① Masaki Saito, Takayuki Okatani, Koichiro Deguchi, Discrete Maximum Posterior Marginal Inference for Non-uniformly Discretized Variable Space, Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 査読有, 1巻, 2013, 57-64  
DOI:10.1109/CVPR.2013.15
- ② Takayuki Okatani, Koichiro Deguchi, Optimal integration of photometric and geometric surface measurements using inaccurate reflectance/illumination knowledge, Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 査読有, 1巻, 2012, 254-261  
DOI:10.1109/CVPR.2012.6247683
- ③ Takashi Abe, Takayuki Okatani, Koichiro Deguchi, Recognizing Surface Qualities from Natural Images Based on Learning to Rank, Proceedings of International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 査読有, 1巻, 2012, 3712-3715  
[http://www.vision.is.tohoku.ac.jp/index.php/download\\_file/view/34/166/](http://www.vision.is.tohoku.ac.jp/index.php/download_file/view/34/166/)
- ④ Takayuki Okatani, Takahiro Yoshida, Koichiro Deguchi, Efficient Algorithm for Low-rank Matrix Factorization with Missing Components and Performance Comparison of Latest Algorithms, Proceedings of International Conference on Computer Vision, 査読有, 1巻, 2011, 842-849  
DOI:10.1109/ICCV.2011.6126324
- ⑤ Eisuke Ito, Takayuki Okatani, Koichiro

Deguchi, Accurate and robust planar tracking based on a model of image sampling and reconstruction process, Proceedings of the 10<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 査読有, 1 巻, 2011, 1-8  
DOI: 10.1109/ISMAR.2011.6092364

〔学会発表〕 (計 4 件)

- ① 明石康宏, 岡谷貴之, 非負値行列分解を用いた画像の鏡面反射分離, 情報処理学会 CVIM 研究会, 2013 年 5 月 23 日, 東京
- ② 重川裕和, 岡谷貴之, ディープニューラルネットワークを用いた物体表面の光沢感認識, 情報処理学会 CVIM 研究会, 2013 年 5 月 23 日, 東京
- ③ 岡谷貴之, プロジェクタカメラシステムの幾何キャリブレーション, 質感脳情報学研究集会「投影型ディスプレイ」(招待講演), 2013 年 2 月 21 日, 大阪
- ④ 齋藤真樹, 岡谷貴之, 出口光一郎, コンピュータビジョンにおける MRF 最適化問題への平均場近似及びその拡張手法の応用, 画像の認識・理解シンポジウム, 2012 年 8 月 6 日, 福岡

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡谷 貴之 (OKATANI TAKAYUKI)  
東北大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号: 00312637