

植物の剪定補助のための受光量近似計算手法

磯兼 孝悠¹ 大倉 史生¹ 松下 康之¹ 八木 康史¹

概要：植物の剪定作業は長期間の訓練と豊富な経験を必要とする繊細な作業である。本研究では、植物の剪定を補助するシステムの開発を目指す。カメラで撮影された画像群から復元した樹木の三次元形状および周囲の環境画像を用いて光合成の効率をシミュレーションし、最適な剪定方法をユーザに提案する。その際、植物の光合成速度が受光量に比例することを利用し、葉の受光量から光合成量を推定および評価する。本論文では、剪定補助システム開発の初期段階として、植物の三次元形状と周囲の環境を入力とした光学シミュレーションによる受光量の近似計算手法を提案し、実験によってその有効性を示した。

キーワード：剪定, Visibility Map, 三次元復元

1. はじめに

果樹を栽培し良質な果実を収穫するためには、適切に枝葉を切り落とし栄養を果実に集中させる、剪定と呼ばれる作業を適切に行うことが必要不可欠である。しかし剪定は長年の経験を要する非常に繊細な作業であり、専門知識を持たない人には適切な剪定は困難である。第一次産業の就業人口減少が大きな社会問題として懸念されている中、習熟に長期間を要する剪定作業を担う専門家の減少が危惧される。

そこで本研究では専門知識のない人でも簡単に効率良く適切な剪定ができるようになる剪定補助システムの開発を目指す。コンピュータビジョンの技術を利用し、どの葉を剪定しどのように形を整えるのか等の、専門知識を必要とする判断をコンピュータが行うことで、専門家でなくとも良質な農作物を作れるようになり、第一次産業の就業人口減少の防止につながると考えられる。また、コンピュータによる最適な剪定パターンの推定により、従来の栽培技術の枠を超えた、より優れた剪定手法を発見し、農作物の付加価値を増大させることができる可能性がある。

本システムはユーザーがカメラで植物を撮影すると、光合成の効率をシミュレーションし最も光合成の効率がよくなるような剪定方法を推定し、ユーザーに提案する。植物が生育する際に光合成の効率を決定する要素としては、果実の個数に対する葉の枚数や、葉の若さ、光の当たり方などがある。剪定を補助するシステムでは、機械学習により最適な誘引パターンを導出したり、単純に枝葉の数によって

剪定方法を決定すること等が考えられるが、本研究では植物の形状や周囲の環境を考え、葉の受光量を計算することで光合成量を推定し、光の当たり方による光合成の効率を評価する。本論文ではシステム構築の初期段階として、固定光源の光が相互被陰のある植物の葉に入射する光量(受光量)を推定する光学シミュレーション手法を提案する。

2. 関連研究

本章では光合成の基本的知識を概説した上で、受光量計算のための光学シミュレーションの手法を紹介し、本研究の位置づけを明らかにする。

2.1 光合成の計測

植物の光合成は主に以下のような方法で計測される。

- 酸素発生量の測定 [1]
- 二酸化炭素吸収量の測定 [2][3]
- クロロフィル蛍光の測定 [4]

これらの計測方法は植物全体を密閉しなければならないため大きな植物には適用しにくいほか、機器を植物に固定するため、自然に相互被陰している環境下での個々の葉の光合成量を測定することが困難である。また測定機器が非常に高価であることも問題である。そのため、大きな対象の周囲の環境を阻害することなく安価に光合成量を推定する手段が必要である。

図1はブドウの葉の二酸化炭素の吸収速度(光合成速度)を測定し、葉に当たる光の強さとの関係を表した曲線(光合成曲線)である。植物の光合成曲線には、弱光の狭い範囲では比例し、光が強くなると飽和に達するものが多い[5]。

¹ 大阪大学
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

つまり葉の照度と光合成速度には相関関係が存在するため、葉の受光量を測定することによって光合成速度を推定することができる。

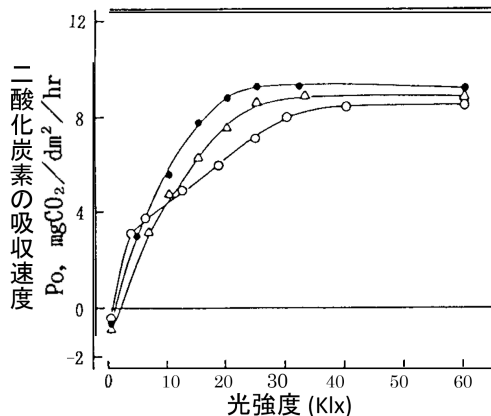


図1 ブドウの光合成曲線 (○ 15℃ ● 25℃ △ 35℃)[3]

また、太陽から放射され地表に到達するエネルギーのうち、大部分の光合成生物が利用する 380～710nm の波長の光を光合成有効放射 (photosynthetically active radiation, PAR) と呼ぶ。人間の可視光領域はおよそ 400～800nm であるため、PAR は可視光領域とほぼ一致する。つまり葉に当たる光のうち光合成に使われる光は、可視光を観測する一般的なカメラで測定することができる。

2.2 剪定

樹木に何も手を加えずに成長させると養分が分散してしまうほか、枝葉が混み合うことで風通しや日当たりが悪くなり、成長が妨げられてしまう。そのため樹木を健康に成長させ果実を収穫するためには、成長しやすいように形状を整えたり、果実に袋をかけて虫や鳥に食べられないようにしなければならない。また不要な枝葉や実を切り落とすことで、栄養を残りの果実に集中させることができる。あるいは樹木は枝を切られるとそれ以上に伸びようとする性質を持っているため、剪定すると自然に成長させるよりもよく育つ [6][7]。

2.3 三次元復元

本研究では、植物の三次元モデルを用いて受光量を推定する。三次元モデルの生成には、RGB カメラで撮影した複数の二次元画像から三次元形状を復元する Structure from Motion (SfM) を用いる。

SfM は、複数枚の画像間で特徴点検出などによって対応点が決定されているとき、その対応情報からカメラ位置および姿勢を推定し、疎な三次元点群を生成する。提案された当初の SfM は、Tomasi-Kanade の因子分解法 [8] を用いて、対応点群から作成された行列を特徴点の三次元位置を表す行列とカメラ位置を表す行列に分解するものであった。

実用上は、画像上での特徴点群の最適な対応付けを求め特徴点の再投影誤差を最小化するバンドル調整 [9] を用いることが一般的である [10]。近年、アルゴリズムの改良や並列計算により多数の画像から比較的高精度に、高速に三次元復元できるようになってきた [11][12]。また、SfM により生成されたカメラ位置・姿勢を入力として Multi-view Stereo (MVS)[13] を用いることにより、密な三次元形状を復元することができる。最新の SfM や実装のいくつかはライブラリとして公開 (VisualSfM[14], CMVS/PMVS[15][16], CPMVS[17][18]) され、様々なアプリケーションに用いられている [19][20]。

2.4 光学シミュレーション

光源からの光が三次元モデルにどのように入射し反射され投影面に到達するのかを計算し二次元画像を生成することをレンダリングという。レンダリングには透視投影や陰面消去、シェーディングなど様々な工程があるが、環境光が対象物にどのように入射するのかを計算することをレイトレーシング^{*1} という [21]。

レイトレーシングとは、視点 (カメラ位置) からスクリーンの画素に向かうレイとポリゴンとの交点を計算し、そのポリゴンの色でスクリーンの画素を塗る手法である。この交点の色 (輝度値) は、レンダリング方程式 [22] によって求められる。レンダリング方程式はエネルギー保存則に基づいており、交点から視線方向へ射出される光 L_o は、その交点の自発光による放射輝度 L_e と、その交点へあらゆる方向から入射する光 L_i が反射した放射輝度 L_r の和で表される。様々な提案されているレンダリング技術は、この方程式を解くことを試みている。

入射光 L_i を求めるためには、周囲のオブジェクトや光源との位置関係によって光源からの光がどのように交点へ到達または遮蔽・減衰されるかを計算する必要がある。

写実的なシーンを描画するためには、多重反射を考慮し自然現象に忠実な光を再現しなければならないが、反射の回数が増えると計算時間は指数関数的に大きくなる。そこで Wang ら [23] はリアルタイムレンダリングを目的とした照明計算方法を提案している。この手法ではまず照度計算点からあらゆる方向にレイを飛ばし、その点の周囲全方位に見える景色をレンダリングする。このとき反射は考慮せず、レイが物体に交差するかしないかを描画した Visibility Map (VM) と呼ばれる 2 値画像を作成する。照明情報を別の全方位画像 (環境画像) として用意し、これら 2 つを掛け合わせることで照明からの直接光が照度計算点にどれだけ入射するかを計算する。光の反射および拡散を考慮しないことで、計算時間を大幅に減らすことができる。

^{*1} 光線の反射・透過等の過程をたどることによって相互反射を表現する手法を (狭義の) レイトレーシングと呼ぶことがあるが、ここでは広義のレイトレーシングを指す。

図2のように n 個のポリゴンの周囲に画素数 x の環境画像を配置した空間を考える。ある1つのポリゴンから環境画像の画素数 x 本だけ周囲にレイを飛ばすとき r 回の多重反射を許すと、計算回数は n 個のポリゴンから r 回の反射点を決定する回数に他ならないから、 $x_n P_r$ である。これを n 個中 m 個のポリゴンに対して行くと、全体の時間計算量は $O(mxn^r) = O(n^r)$ となる。一方、多重反射を考慮しない場合、0回反射であるから $O(n^0) = O(1)$ の時間計算量で済む。

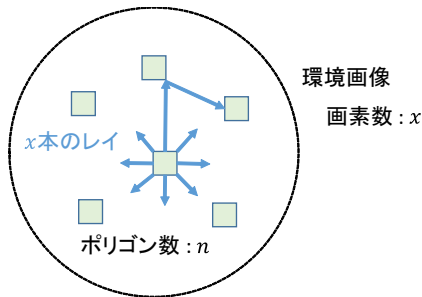


図2 レイトレーシングの模式図：ある空間で1つのポリゴンから環境画像の画素数だけ周囲にレイを飛ばす

2.5 本研究の位置づけ

光合成の厳密な量を測定することは難しいが、カメラで可視光を観測することで光合成の相対的な量を推定することができる。そこで本研究ではまず植物をカメラで撮影し、得られた二次元画像群を入力として SfM (VisualSfM[14]) および MVS (CMPMVS[17][18]) を用いて三次元形状を復元する。その三次元モデルと、全方位カメラで撮影した植物の周囲の環境画像を使って光学シミュレーションにより各葉の受光量を推定し、光合成の効率を評価する。

3. 提案手法

3.1 システムの概要

本研究で想定する植物の剪定補助システムのシステムフローは図3のようになる。

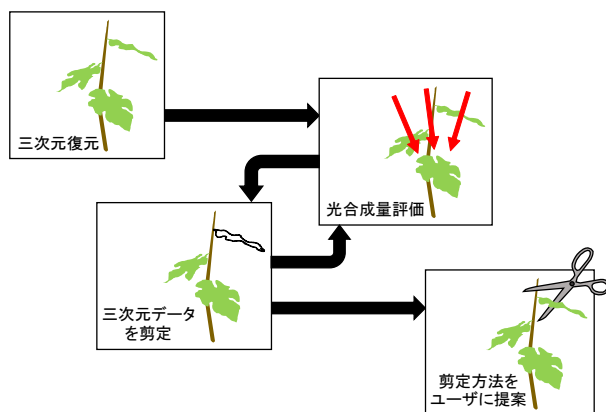


図3 植物の剪定補助システムのフロー

本システムではまず、植物を複数の位置から撮影した画像群を用いて三次元復元する。異なる時間・季節の太陽の動きに合わせて光源を動かしながら周囲の環境画像を仮想的に生成し、復元された植物の三次元形状を使って個々の葉および樹全体の光合成量を推定し、その効率を評価する。次に一部の枝葉を仮想的に三次元データ上で剪定し、再び光合成の効率を評価する。剪定する枝葉を変えながら計算を繰り返し、どのように剪定すれば樹全体の光合成の効率が最も良くなるのかをユーザに提示する。光合成量の評価要因として、相互被陰による各葉の受光量をはじめ、葉や枝の若さによる光合成のエネルギー変換効率や葉果比、誘引の仕方などが考えられるが、本論文では研究の初期段階として受光量の計算方法を提案する。

3.2 受光量の計算

本節では受光量の計算方法を詳述する。葉面上の各頂点に入射する光量を計算し、その和を葉全体の受光量とする。

自然現象に忠実に受光量計算をする場合、光源から直接到達する光だけでなく、光の反射や吸収なども考慮する必要がある。植物は一般的に、入射した光合成有効放射 (PAR) のうち 80% を吸収し光合成によって化学エネルギーに変換する。内部へ入射した光は複雑な細胞構造によって拡散され 8% が葉の裏側へ透過する。その拡散光の残りと葉の表面で反射した光を合わせて 12% が反射光となる [5]。それに従ってすべての光を追跡した場合、図4(a)のように直接光、拡散光、透過光、反射光をすべての受光量計算点においてあらゆる方向に対して計算する必要がある。しかし本システムでは剪定する枝葉を変えながら繰り返し光合成量を推定・評価するため、相互反射や光の拡散を考慮しながら受光量を計算することは現実的ではない。また Seitz ら [24] によると、複数回反射した光の影響は直接光に比べて無視できるほど小さい。そこで本研究では、図4(b)のように直接光および直線的な透過光のみを考慮した近似モデルを考え、各点の照度を Visibility Map を応用した手法で計算する。

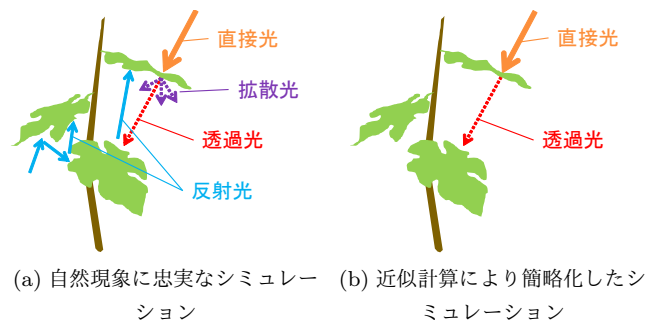


図4 近似計算手法によるシミュレーションの簡略化

イメージベースドライティング (Image Based Lighting[25][26]) を用いて植物の三次元モデルの周囲に環境画像

を配置し、受光量計算点からあらゆる方向にレイを飛ばし、その点から見える全方位パノラマ画像 (シミュレーション画像) を生成する。受光量計算点と環境画像との間に葉がある場合はその透過度を考慮しながら後ろの背景画像をレンダリングする。このシミュレーション画像の輝度値の和を受光量計算点の照度とする。

シミュレーション画像の生成

与えられた三次元モデルと環境画像に対して、ある点のシミュレーション画像を生成するプログラムを作成した。

三次元モデルは複数の三角ポリゴンからなるメッシュモデル、環境画像は全方位パノラマ画像で入力する。三次元モデルを OpenGL で読み込み、その周りに十分に大きい球を配置し環境パノラマ画像をテクスチャとして貼り付ける。指定した三次元座標 (受光量計算点) から 90 度の画角で視線方向を変えながら周囲 6 方向をレンダリングし、パノラマ画像に幾何変換して出力する (図 5)。

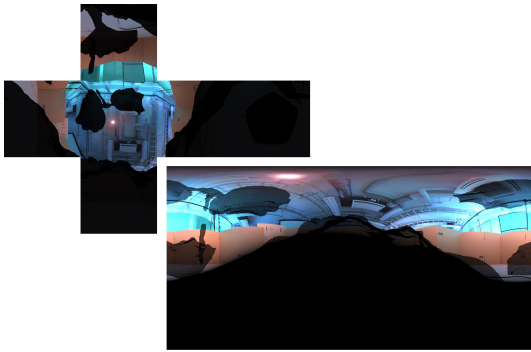


図 5 シミュレーション画像の生成

このとき、屋外で無限遠の光源を仮定すれば、植物上のどの点でシミュレーション画像を作成しても背景環境は同一とみなせる。そこで OpenGL では環境画像をマッピングせず、Visibility Map (図 6) のみをレンダリングし、あとで環境画像を合成することでレンダリングを高速化する。本研究で用いる Visibility Map は一般的に用いられる二値 (0 or 1) のものと異なり、透過度を画素値として保持するため、環境画像と合成するときに環境光をどれだけ透過するかを表すマスクとして扱うことができる。



図 6 Visibility Map

環境光をなるべく正確に表現するため、環境画像にはダイナミックレンジの広いハイダイナミックレンジ画像

(HDR 画像) を使用する。パノラマ画像は球状の画像を切り開いて平面にしたもので高緯度の部分ほど引き延ばされているため、緯度による光の寄与の重みを考慮した緯度加重マップを用意する (図 7)。緯度による重み $L(\mathbf{x})$ は画像中の画素の位置 $\mathbf{x} = (x, y)$ 、画像の幅 W に対して式 (1) で表される。

$$\theta(\mathbf{x}) = \frac{(y - W/2)\pi}{W}$$

$$L(\mathbf{x}) = \cos \theta(\mathbf{x}) \quad (1)$$

また、平面にある量の光が入射するとき、光量が等しければ入射角が大きいほど照射される面積が大きくなり、光が平面に与える影響が小さくなる。そこで三次元モデルがもつ法線情報を利用し、法線に対する重みを考慮した法線加重マップを用意する (図 8)。画像中の画素の位置を $\mathbf{x}$ 、画像の幅を W 、画像の高さを H とすると、三次元空間上の座標 $\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)$ は極座標変換により以下のように求められる。

$$\phi(\mathbf{x}) = \frac{(2x - W)\pi}{W}, \quad \psi(\mathbf{x}) = \frac{\pi y}{H}$$

$$\begin{cases} t_x = \sin \psi(\mathbf{x}) \sin \phi(\mathbf{x}) \\ t_y = \sin \psi(\mathbf{x}) \cos \phi(\mathbf{x}) \\ t_z = \cos \psi(\mathbf{x}) \end{cases}$$

$\mathbf{t}$ と法線ベクトル $\mathbf{n}$ とのなす角を $\lambda(\mathbf{x})$ とすると、法線による重み $N(\mathbf{x})$ は式 (2) で表せる。

$$N(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{t}}{|\mathbf{n}| |\mathbf{t}|} & (0 \leq \lambda(\mathbf{x}) \leq \frac{\pi}{2}) \\ 0 & (\frac{\pi}{2} < \lambda(\mathbf{x}) \leq \pi) \end{cases} \quad (2)$$



図 7 緯度加重マップ

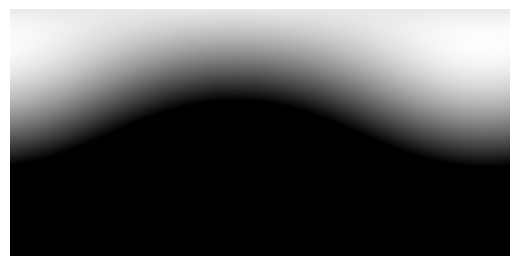


図 8 法線加重マップ

これら2枚の加重マップおよび Visibility Map と HDR 環境画像を掛け合わせて合成し、シミュレーション画像を生成する。さらにグレースケールに変換し輝度値を足し合わせたものをその受光量計算点における受光量とする。画像中の画素の位置 $\mathbf{x}$ に対して Visibility Map の輝度値 (透過度) を $V(\mathbf{x})$ 、環境画像の輝度値を $E(\mathbf{x})$ とすると、照度 I は式 (3) で表される。

$$I = \sum_{\mathbf{x}} E(\mathbf{x})V(\mathbf{x})L(\mathbf{x})N(\mathbf{x}) \quad (3)$$

4. 評価実験

4.1 内容・条件

図9に示すように、まず実際の植物模型上のある点で、植物模型の葉や実環境背景が写った真値全方位画像を撮影する。次に三次元モデル上の同じ点でシミュレーション画像を作成し、それらを比較することで、本研究で提案する反射や拡散を無視したシミュレーション手法の精度を検証した。

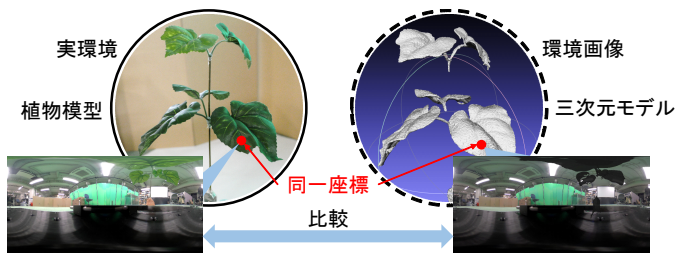


図9 実験方法

本実験にはプラスチックの植物模型を使用する。一眼レフカメラで様々な位置から454枚の写真を撮影し、一般公開されている SfM ソフトウェアである VisualSfM[14] および MVS ライブラリ CMPMVS[17][18] を使って植物の三次元形状を復元した。SfM および MVS は対象物体が剛体であると仮定するため、実環境では風の影響により形状が変化する植物を正確に三次元復元できない可能性がある。そこで本実験では簡単のため、植物が剛体であると仮定できるように風の無い屋内で撮影を行った。また Visibility Map の作成時に設定する葉の透過度は、本実験で用いた植物模型における実測値に基づき9.4%とした。

4.2 撮影

図10のように、植物模型が着脱可能で、全方位カメラを水平に移動させることができる装置を作成した。本実験では装置の都合上、植物模型の下に法線が鉛直上向きの葉があるという想定で、植物模型を仰ぐ36の地点で撮影を行った。本実験の環境では光源が無遠慮でなく背景環境画像のずれが無視できないため、各撮影点でシミュレーション用の環境画像および真値全方位画像を撮影した。

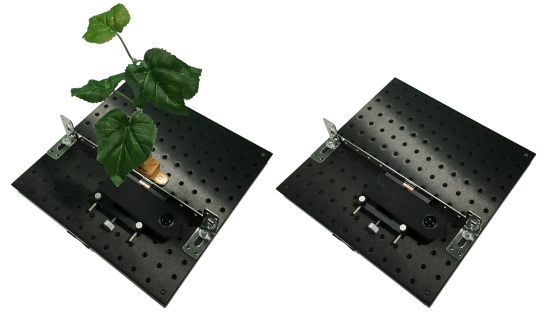


図10 実験装置

4.3 誤差の考察

各撮影点における、真値全方位画像、シミュレーション画像および環境画像の受光量を比較したグラフを図11に示す。また、シミュレーションの照度を S 、真値全方位画像の受光量を G とし、式 (4) によって算出した受光量の相対誤差 Err のヒストグラムは図12のようになった。

$$Err = \left(\frac{S}{G} - 1 \right) \quad (4)$$

シミュレーションおよび真値全方位画像の相対誤差の平均値は0.77%、誤差の絶対値平均は2.28%であり、本実験の環境では、反射や拡散を無視した受光量計算手法による光学的誤差や、三次元復元した形状の幾何的誤差の影響は小さいことがわかった。誤差の最大値は9.28%、最小値は0.09%であった。真値全方位画像となる画像およびシミュレーション画像の例を図13に示す。画像の下半分は法線の加重によって計算上無視されるため省略する。

これらの図からは、誤差の要因を判断することができない。そこで三次元復元による幾何的誤差を調べるため、すべての撮影点の真値全方位画像の葉の形状を手動で切り抜いたシルエット画像を用意する(図14(a))。そして同地点の Visibility Map (図14(b)) との残差画像を作成した(図14(c))。赤が真値全方位画像にのみ見られる形状、青が Visibility Map のみに見られる形状である。

残差画像をグレースケールに変換したとき、画素の位置 $\mathbf{x} = (x, y)$ とその画素値 $r(\mathbf{x})$ について、

$$R(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & (r(\mathbf{x}) \neq 255) \\ 0 & (r(\mathbf{x}) = 255) \end{cases}$$

を定義すると、形状誤差 Err_g を式 (5) のように定義できる。

$$Err_g = \frac{\sum_{\mathbf{x}} R(\mathbf{x})L(\mathbf{x})N(\mathbf{x})}{\sum_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x})N(\mathbf{x})} \quad (5)$$

受光量誤差 $|Err|$ および形状誤差 Err_g を図15に図示した。受光量誤差は光学的誤差および幾何的誤差両方の影響を受けていると思われる。ただし本実験のような比較的単純な環境では、光学シミュレーションの近似誤差や形状誤差、透過度の有無による誤差が結果に大きく影響しないことがわかった。本実験では、同等の強さの光源が多数存在

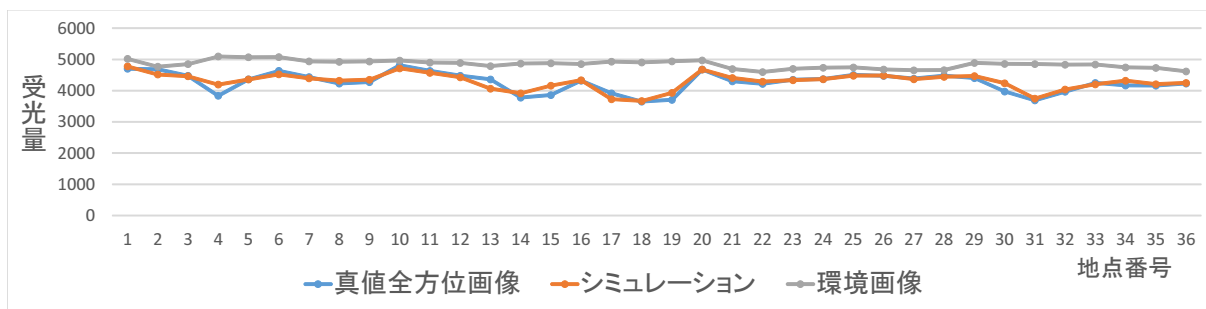


図 11 各撮影地点における受光量の比較

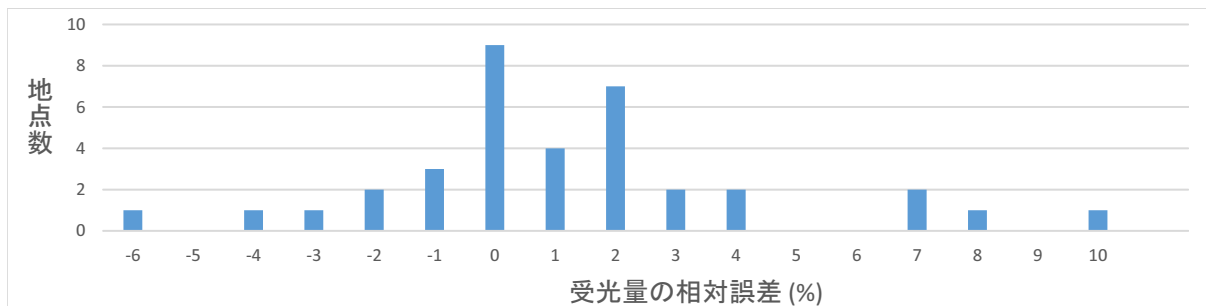


図 12 受光量の相対誤差のヒストグラム



(a) 真値全方位画像

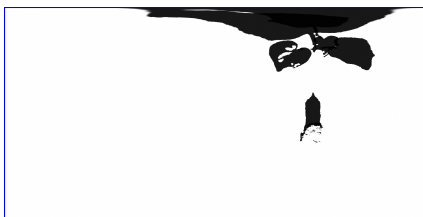


(b) シミュレーション画像

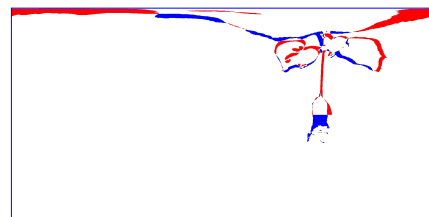
図 13 実際に撮影した画像とシミュレーション画像の比較



(a) 真値全方位画像の葉のシルエット



(b) Visibility Map



(c) 残差画像

図 14 形状比較

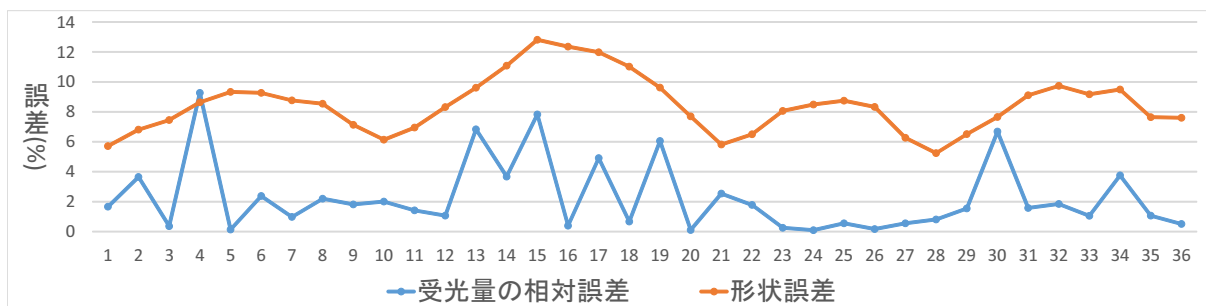


図 15 受光量および形状の誤差

する環境で、重なりが少ない単純な植物模型を使用した。今後、屋外に似た環境や、複雑な形状をもつ植物を用いた実験を行うことにより、さらなる詳細な評価をすることが望まれる。しかし現時点の SfM では葉がこれより多くなると葉同士が接続されてしまい復元することが困難であるため、複雑な植物形状や実際のアプリケーションを想定すると、三次元復元手法の改良が必要である。

5. 受光量の可視化

本研究で提案する受光量推定手法の応用アプリケーションの1つとして、受光量を可視化することが考えられる。三次元モデルおよび環境画像を入力したとき、各頂点の受光量を計算し、三次元モデル上にヒートマップで表示するプログラムを作成した。受光量の絶対量ではなく、受光量が最も高い点を基準とした相対量で示している。このプログラムではマウスでの拡大・縮小、移動、回転操作により三次元モデルをあらゆる角度から見ることができる。本研究の提案手法を使用することにより、実在する環境のみならず、仮想的に生成した環境を含む任意の光源下での受光量推定が可能である。そこで4章に示す実験において撮影した環境画像の1つ(図16)と、仮想的に球の天頂にのみ点光源を配置した環境画像(図17)を入力として受光量を計算しヒートマップで表示した。光源が複数存在する環境では遮蔽物がない上段の葉面上の頂点の受光量が大きく赤く表示されている一方で、遮蔽がある下段の葉面上の点や法線が上向きでない面に隣接する頂点の照度が相対的に小さく緑で表示されている。また点光源のみの環境では上段の葉の影が下段の葉に落ちていることがわかる。

6. まとめ

本研究では植物の光合成における光の利用効率を最大化するための剪定方法を推定するシステムを考案し、そのうち光合成量を評価するための受光量の計算方法として Visibility Map を応用したレイトレーシング手法を提案した。シミュレーションの精度を評価するために、実環境で撮影した真値全方位画像と三次元モデルから生成したシミュレーション画像の比較実験を行った。比較的単純な形状をもつ植物にある光源を与えたとき、直接光および直線的な透過光のみを追跡し、反射や拡散を無視した場合、受光量計算の相対誤差の平均は2.28%であることがわかった。また計算した受光量を三次元モデルに投影し可視化するプログラムを作成した。ただし三次元復元には撮影を含め多大な時間を必要とし、複雑な形状をもつ植物の葉一枚一枚の形状を正確に復元することは困難である。そのため、短時間かつ容易に、植物の正確な三次元モデルを生成することが求められる。今後は、葉の標準的な形状や反射・透過率、枝の生え方などの植物に関する事前知識を用いた三次元復元の手法を考えていきたい。また、より実環境に近い

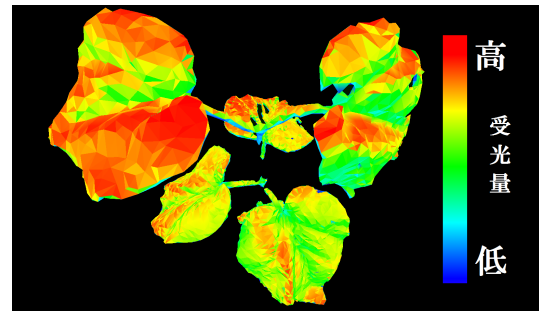


図 16 実環境光源により計算した受光量のヒートマップ

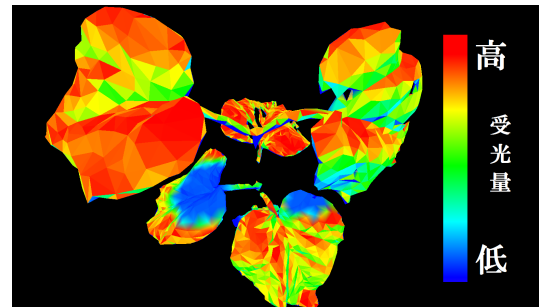


図 17 仮想点光源により計算した受光量のヒートマップ

環境や屋外の環境、より複雑な相互被陰をもつ植物に対しても有効であるかどうかを検証し、実用に足る剪定システムを作り上げていきたい。

参考文献

- [1] 秋田重誠, 田中市郎. 高酸素濃度下における気孔の反応およびその光合成速度に及ぼす影響. 日本作物学会紀事, Vol. 48, pp. 470-474, 1979.
- [2] 小島孝之, 田口光夫. 密閉型光合成測定装置の製作と光合成速度の測定. 農業機械学会誌, Vol. 56, pp. 165-166, 1994.
- [3] 白石真一, 熊同銓, 白石美樹夫, 北崎真紀子. ブドウ属植物の光合成速度に及ぼす光強度の影響. 九州大学農学部学藝雑誌, Vol. 51, pp. 103-109, 1997.
- [4] 園池公毅. クロロフィル蛍光と吸収による光合成測定. 低温科学, Vol. 67, pp. 507-524, 2009.
- [5] 柴田和雄. 光と植物. 培風館, 1982.
- [6] 三輪正幸. 剪定もよくわかる おいしい果樹の育て方. 大日本印刷株式会社, 2014.
- [7] 丹羽蒼一郎. 庭木・花木・小果樹の整枝と剪定. 日東書院, 2003.
- [8] C. Tomasi and T. Kanade. Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 9, No. 2, pp. 137-154, Nov. 1992.
- [9] B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley, and A. Fitzgibbon. Bundle adjustment—a modern synthesis. In *Proceedings of ICCV Workshop on Vision Algorithms 1999*, pp. 298-372, 1999.
- [10] 満上育久. 私の研究開発ツール—第16回—bundler: Structure from motion for unordered image collections. 映像情報メディア学会誌, Vol. 65, No. 4, pp. 479-482, 2011.
- [11] S. Agarwal, N. Snavely, I. Simon, S. M. Seitz, and R. Szeliski. Building rome in a day. In *Proceedings of 2009 IEEE 12th International Conference on Computer*

- Vision*, pp. 72–79, 2009.
- [12] N. Snavely, S. M. Seitz, and R. Szeliski. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 80, pp. 189–210, 2008.
 - [13] S.M. Seitz, B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein, and R. Szeliski. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In *Proceedings of 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 519–528, Jun. 2006.
 - [14] C. Wu. Towards linear-time incremental structure from motion. In *Proceedings of 2013 International Conference on 3D Vision*, pp. 127–134, 2013.
 - [15] Y. Furukawa, B. Curless, S. M. Seitz, and R. Szeliski. Towards internet-scale multi-view stereo. In *Proceedings of 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1434–1441, 2010.
 - [16] Y. Furukawa and J. Ponce. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 32, No. 8, pp. 1362–1376, 2010.
 - [17] M. Jancosek and T. Pajdla. Multi-view reconstruction preserving weakly-supported surfaces. In *Proceedings of 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3121–3128, 2011.
 - [18] J. Heller, M. Havlena, M. Jancosek, A. Torii, and T. Pajdla. 3d reconstruction from photographs by cmp sfm web service. In *Proceedings of 2015 14th IAPR International Conference on Machine Vision Applications*, pp. 30–34, 2015.
 - [19] Y. Wei, L. Kang, B. Yang, and L. Wu. Applications of structure from motion: a survey. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, Vol. 14, No. 7, pp. 486–494, 2013.
 - [20] M. J. Westoby, J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey, and J.M. Reynolds. ‘structure-from-motion’ photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, Vol. 179, pp. 300–314, 2012.
 - [21] A. S. Glassner. *An introduction to ray tracing*. Elsevier, 1989.
 - [22] J. T. Kajiya. The rendering equation. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH ’86*, Vol. 20, pp. 143–150, 1986.
 - [23] L. Wang, W. Wang, J. Dorsey, X. Yang, B. Guo, and H. Shum. Real-time rendering of plant leaves. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH ’05)*, Vol. 24, pp. 712–719, 2005.
 - [24] S. M. Seitz, Y. Matsushita, and K. N. Kutulakos. A theory of inverse light transport. In *Proceedings of 2005 Tenth IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 1440–1447, 2005.
 - [25] P. Debevec. Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH ’98*, 1998.
 - [26] J. F. Blinn and M. E. Newell. Texture and reflection in computer generated images. *Communications of the ACM*, Vol. 19, pp. 542–547, 1976.