

農産物生育診断への画像形態認識技術の応用例

庄野 浩 資

Three Dimensional Image Measuring System for Shape Information of Plants

Hiroshi SHONO

Leaf tip angle is known as a significant index of inner water potential status of growing plant. However, it is very difficult to measure that of all foliages manually. Efficient measuring method is necessary. In this paper, a new method of image measurement of leaf tip angle for small foliage and an application program which realized this method were summarized. Using the characteristic of textural feature, the method of measuring three dimensional distribution of leaf tip angle was developed. First, fundamental availability of this method was confirmed with simulated images which contain a lot of small three dimensional disks distributed in a cubic area. As a result, an outline of three dimensional distribution of tip angle was reconstructed properly from images taken from several directions. Second, practical availability of this method was studied with images of real plants. Consequently, this method can detect inner water potential status properly.

Key words: precision agriculture, precision farming, optimum cultivation, image measurement, image processing, machine vision

作物栽培において、葉の形状的特徴に関する情報が、静的には作物の遺伝的特性を、また動的には体内の即時的な生理状態を適切に反映することは、経験の長い栽培者に限らず、一般の栽培者においても十分認知された事実であろう。たとえば、静的な情報として、品種固有の作物形状を生育段階別に二次元パターン化したいわゆる「草型」がある。草型は、作物の受光効率すなわち光合成の能力を左右する大きな要因であり、栽培管理において畝や個体間隔の最適化をはかるために重要な情報となる。岡ら^{1,2)}は、水稻の新旧品種間の草型の特徴を画像解析手法を用いて定量化している。

動的な情報としてはさまざまなものが考えられるが、とくに葉の萎れとして認知される葉傾斜角は、作物の水分状態の適否を端的に反映する重要な情報と考えられている。実際、トマトやメロンに代表される果菜類作物の栽培現場において、栽培者が肉眼で確認した葉の萎れから灌水の必

要を判断したり、逆に苗質を整えるために灌水を控えるなどする一連の水管理作業は、最終的な収量と品質の双方に影響するきわめて重要な作業であって、栽培者が最も神経をつかう作業とされている。したがって、栽培者が高品質な作物栽培を実現するためには、圃場規模の作物の葉の萎れを定期的に確認することが不可欠となるが、現実的には、人的労働力の制約のために十分に励行されているとはいいがたい。しかも、水管理の参考となりうる葉の萎れの程度はわずかであり、それを認識する感度は、経験により修得される個人的技量に大きく依存するため、未熟練者が水管理を誤る危険性は決して小さくない。結果的に、理想的な水管理による高品質作物栽培の実現は、いわゆる「篤農家」とよばれる少数の熟練栽培者に限られているのが現状である。このため、高品質作物栽培の普及のためには、まず、葉の傾斜角などの有用な形状情報を効率的かつ安定的に計測する実用的手法の開発が不可欠と考えられる。

現状において、三次元形状を計測する一般的な手法としては、まず、2方向から撮影した画像上の同一点の視差情報から三次元座標情報を取得するステレオ画像法、さらには、平面拡散させたレーザー光を物体表面に照射して、その投影像から三次元座標情報を取得する光切断法、また、プロープで物体表面を直接的になぞることにより三次元座標情報を取得する三次元ディジタイザーによる方法、などがある。これらの計測法は、人体や自動車などの工業製品のように、表面が連続する単純な形状の物体に対しては適用性が高い。しかし作物の葉群は、多数の葉で構成される複雑多様な形状の複合体であり、その表面は不連続きわまりない。しかも、互いに不規則に重なり合うために、表からはみえない隠蔽された葉も多数存在する。上述の計測法は、現状でも葉表面の詳細な三次元座標を計測することは可能であるが、傾斜角を知るために多数の点の座標を計測するのは効率的とはいいがたいし、何より膨大な座標情報の集合から個々の葉を分離抽出するというきわめて煩雑で難しい処理を避けることができない。さらに、現状では隠蔽された葉群を計測することは困難である。このため現状では、これらの計測法を葉群に適用することは必ずしも適切とはいいがたい。

熟練栽培者は、視点を適宜変えるなどの自然な工夫を自在に凝らし、隠蔽された葉群の形状を見定めている。さらには、個々の葉よりはむしろ10数枚程度の局所的な葉群に視点を広げ、その中に含まれる葉のおおまかな状態をマクロに観察することにより情報の確度と作業効率の双方を高めている。いいかえれば、熟練栽培者は、情報の空間解像度を犠牲にしながらも効率的に葉の形状を観察していると考えられ、この作法に習うと、少なくとも水管理上は個々の葉の形状計測に多大な労力をかける必要性はさほどないといえよう。

本研究では、熟練栽培者の実現する葉群形状の経験的計測作法を1つの手本としつつ、葉傾斜角の効率的な画像計測手法の開発を進めている³⁻⁵⁾。本研究により、作物の水ストレスを自動的に検知するシステムが実現され、誰にでも適切な水管理作業が励行可能となれば、高品質作物栽培の普及のための一助となりうると期待している。

1. テクスチャー特徴量に基づく葉傾斜角の画像計測手法

近距離から葉群を撮影して得られる画像には、さまざまな形状の葉が複雑に重なりあい、テクスチャーとよばれる二次元的模様として記録されている。この画像から個々の葉を抽出し、それらの形状的特徴を逐一計測するのは技術

的に難しいが、葉群がマクロに描くテクスチャーの特徴は、既存のテクスチャー解析手法を用いれば比較的容易に解析可能である。したがって、逆にこの特徴から、葉群の形状的特徴を再現する処理を実現すれば、計測単位が小規模な葉群となるために空間解像度の低下は避けたいが、面倒な葉の分離処理を回避可能となり大変都合がよい。

具体的な画像解析処理の手順は以下のようである。まず、対象となる作物を多方向から撮影し、複数の画像を得る。この際必要となる画像の枚数は、作物の葉序や葉群の複雑さに依存し、単純な構造の葉群ならば1枚で十分な場合もありうるが、複雑な葉群であればそれだけ枚数は増える。次に、各画像を適当な大きさの小区画に分割し、それぞれの小区画にテクスチャー解析手法を施し、「くさび状特徴量」を求める。本特徴量は、対象画像の二次元離散スペクトル空間を、その原点を中心とする複数のくさび状領域に分割し、それぞれの領域内でパワーを合計したものである。この際、各領域はテクスチャーの方向と1対1に対応しているため、最も合計値の大きな領域に対応する方向がテクスチャーの方向となる。

概略的に、葉は楕円面と考えられるため、これを正面から撮影した画像のくさび状特徴量には明確なピークが存在しない。一方、これを横方向から撮影した画像には、葉面が線状に写るため、くさび状特徴量にその傾きに対応する明確なピークが現れる。したがって、葉群の撮影機会を増やし、横を向く葉がより多く画像内に含まれるように配慮すれば、葉傾斜角はくさび状特徴量を通じて効率的に知ることができる。一方向からの撮影画像だけで葉傾斜角を得ることも可能であるが、このままでは葉群の三次元座標は不明であるし、また隠蔽されたり正面を向いた葉群は計測外なので、いわば仮の傾斜角でしかありえない。

ここまでの作業で、各撮影角度ごとに仮の傾斜角の二次元分布が得られるが、最終的には、全撮影角度でこれらを三次元的に統合し、真の傾斜角を算出する処理が必要となる。この作業は、熟練栽培者が視点を適宜変えて隠蔽された葉を発見し、その形状を認知する作業に相当すると考えられる。

本研究では、葉傾斜角を三次元的に再構成する処理方法として、画像再構成法の基本的原理である逆投影法を用いている。逆投影法は、医療診断装置としてよく知られるCT (computed tomography) やMRI (magnetic resonance imaging) などの断層画像撮影装置の基本原則として知られる。図1に、逆投影法の概要を示し、その原理を簡単に説明する。まず計算機内に、葉群の三次元構造に対応する三次元配列を準備する。最終的にこの配列の各要素には、

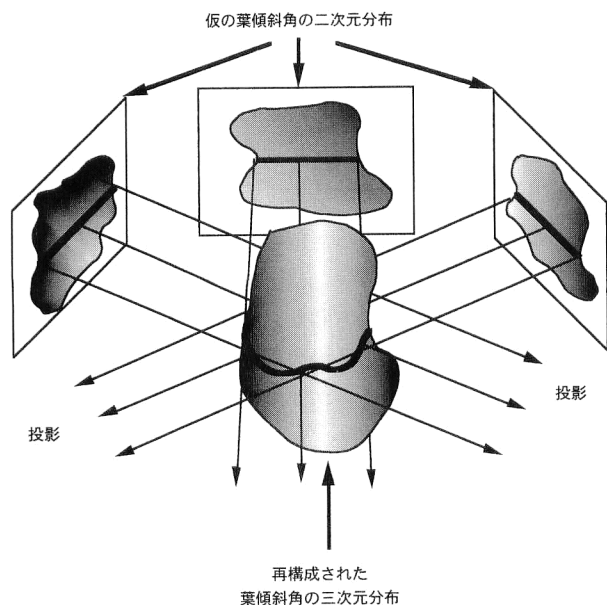


図1 逆投影法の原理。

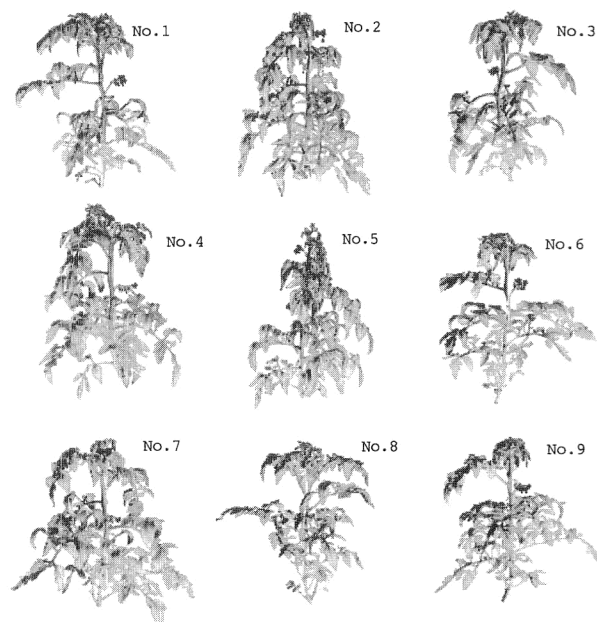


図3 供試トマト苗の正面画像。

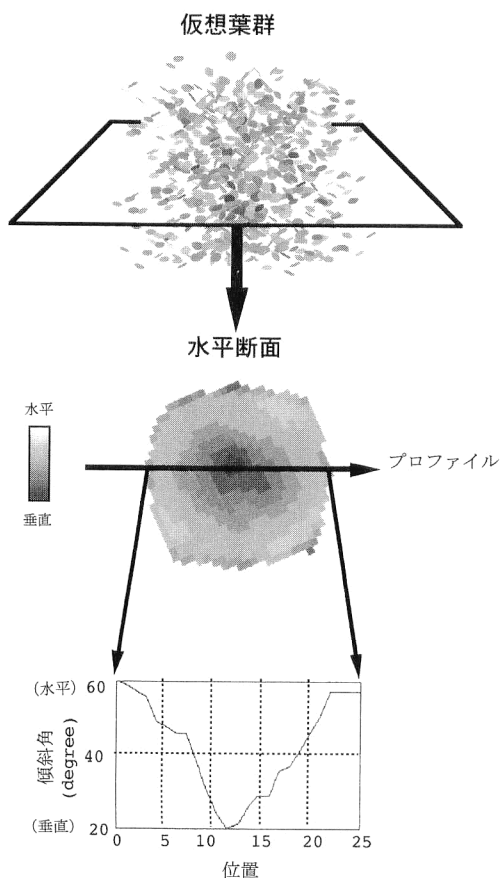


図2 模擬葉群による葉傾斜角の三次元再構成例。

その位置に対応した真の葉傾斜角が格納される。次に、仮の葉傾斜角の二次元分布をそれぞれの撮影角度に対応する角度で本配列に正射影的に投影する。この際、投影光の明るさは仮の葉傾斜角に相当し、投影光が通過したすべての

配列要素に、仮の葉傾斜角が加算される。以上の操作を全撮影角度で行うことにより、三次元配列に葉傾斜角の三次元分布が再構成される。

1.1 模擬画像を用いた有効性の検討

ここでは、本手法で実際に葉傾斜角が計測されるのか否かその有効性を検討する。材料として、あらかじめ傾斜角の分布状況が判明している模擬葉群画像を作成した。

平均傾斜角が20度、40度および60度とそれぞれ異なる3種類の小円盤群を同軸の3層をなすように作成し、さらに、この複合群を、水平方向から45度間隔で撮影すると想定した模擬画像（合計8枚）を透視変換式に基づき作成した。図2の上部に正面画像を示す。さらに、図2の中および下部に、画像群から得られた仮の葉傾斜角からその三次元分布を再構成した結果を、水平断面による二次元分布で示す。図2に明らかなように、再構成像は3層の小平面群の平均傾斜角の配置状況を反映している。

1.2 葉群画像による有効性の検討

1章1節の結果から、本手法を用いて葉傾斜角の三次元分布の計測を行うことは十分可能であると考えられる。しかし、ここでのモデル葉は、湾曲などの変形のない一様な形状の理想的な小円盤であるため、さらに実際の葉群画像における有効性の確認が必要である。そこで次に、実際のトマト葉群画像を用い、本手法の有効性を検討する。

使用したトマト苗はビニールハウス内で栽培した定植後から約1か月の9個体であり、本葉の展開数は平均約16枚程度である。画像は、各個体をそれぞれ45度間隔の8方向から撮影した。図3に各個体の正面画像を示す。

本手法を適用した結果、葉傾斜角の三次元分布は縦 49 (個)×横 49 (個)×奥行き 49 (個) の大きさの三次元配列として求められた。さらに、葉傾斜角の三次元分布を内側から 3 層に、さらに高さ方向に 6 段に集約した。

葉傾斜角の変動係数は、上部と下部との間で大きな傾向の違いがあった。生長点を含む上部では、外層において最も高い変動係数を示した。これは、今回の供試材料においては、表面付近の葉群ほど供試材料間の形状の違いをよく表現していたことを示している。一方、下部では、外層の変動係数は上部とほぼ同程度であったが、内層の変動係数はそれ以上の高さを示した。これは上部とは逆の結果である。

今回の供試材料においては、図 3 にみられるように、下部の葉群が三角形型を呈するものと逆三角形型を呈するものの 2 グループに分かれていた。三角形型のグループでは下部の葉群の外層付近において下方への垂れがめだつ一方、内層、中層ではその傾向はみられなかった。逆三角形型のグループでは下部の葉群の密度が低く、各層ごとの葉傾斜角の傾向の差は明確ではなかった。この両者の違いにより、結果的に内層、中層の葉傾斜角の供試材料間でのばらつきが高くなったと理解できる。またこの結果は、葉傾斜角の正しい計測結果を得るためには各層ごとの葉傾斜角をべつべつに計測する必要のあることを示唆している。既存の計測手法では、内部の葉群を計測することは困難であることから、ここに本手法の有用性が認められる。

2. 葉群形状の画像計測アプリケーションの開発

2.1 システム開発の概要

本手法の開発初期段階では、処理の全体を基本的な単位に分割し、それぞれを UNIX 上の C 言語を用いて独立したモジュールとしてプログラム化していた。この際、事前知識の不足する第三者が利用する際の利便性を考え、各モジュール間のデータ入出力形式を統一するなど、仕様の一貫性に配慮したが、依然、第三者が利用するには敷居の高さを否定できない。

そこで、研究の次の段階として、事前知識の不足する第三者にも本手法の利用が可能となるアプリケーションプログラムの開発を進めている。この開発には、ハードウェアに Macintosh (MacOS9 以上) を用い、開発ソフトウェアとしては、Windows と Macintosh の双方で動作可能な実行形式を作成するオブジェクト指向型拡張 Basic 言語を用いている。また、本システムのテキストチャー解析の実行には二次元 FFT 演算を多用し、実機に相当の計算負荷がかかるため、実用上十分な処理速度を得るためには、高速

かつ大容量メモリーを装備したマシンで実行することが前提となる。

本システムは、基本的にクライアント-サーバー型のネットワークアプリケーションとして設計されている。すなわち、クライアント側では、栽培者の指定する作物の画像群に本手法を適用し、葉傾斜角などの形状情報を計算する。さらに、その結果から、萎れの程度などの生育状態の判定結果を求めてサーバー側に送信する。現状では、サーバープログラムは単純なデータベース機能しか有していないが、将来的にはその機能を向上させ、各地域から送られてきた作物の画像から収集した作柄情報に、気象情報、市況情報などの周辺情報を加え、インターネット上で公開可能とすることなどを見据えている。

2.2 クライアントプログラムの概要

本システムの利用者がサーバープログラムの存在を意識する機会はほとんどないが、クライアントプログラムは利用者とシステムとの直接的な接点であるから、その使いやすさはシステム全体の実用性評価に影響する。そこでクライアントプログラムの開発に際しては、マニュアルレス運用が可能ないように最大限配慮している。

クライアントプログラムは、画像計測処理を実行する主体であるが、実機の処理能力が低い場合は、画像計測処理をより処理能力の高いサーバー側に負担させることも可能となるよう配慮している。

クライアントプログラムの主な特徴は以下の 3 点である。

- 1) 使用者が必ずしも操作方法に精通しているとは限らないために、キーボード操作を避け、マウスとメニュー選択だけで処理が進められるように配慮した。
- 2) 計測システムの無人運用を考慮し、定時自動計測およびサーバーへの自動通報を可能とした。
- 3) 計測結果の最終判定ルーティンとしてニューラルネットワークエンジンを搭載することにより、異種作物間の形状差を柔軟に吸収し、対応可能品種を拡大しただけでなく、本システムを葉群形状の計測以外の用途に用いることが可能となった。たとえば、二次元の航空画像を対象にした森林地帯の植生調査、一般圃場の雑草繁茂領域あるいは病虫害発生領域の抽出などへの応用を検討中である。

次に、実際の動作画面を使用してクライアントプログラムの機能説明を行う。

図 4 に本プログラムの起動画面を示す。画面左上には、現在のニューラルネットワークの構造の概略が示され、画面右上には対象画像が表示される。解析可能な画像の大き

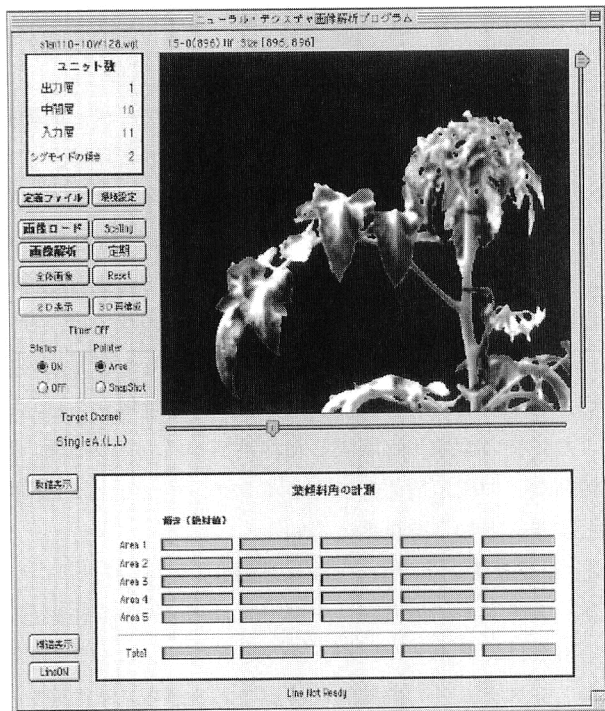


図4 クライアントプログラム起動画面。

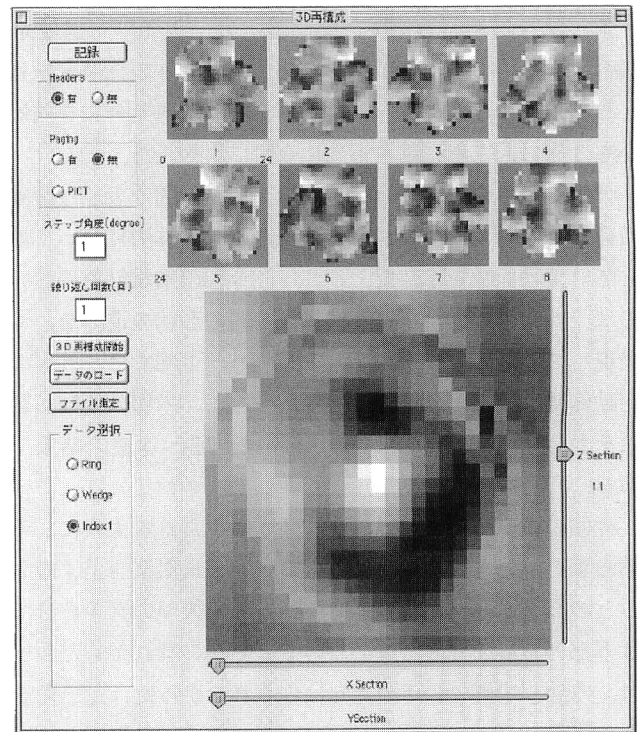


図6 トマト苗における葉傾斜角の三次元再構成例。

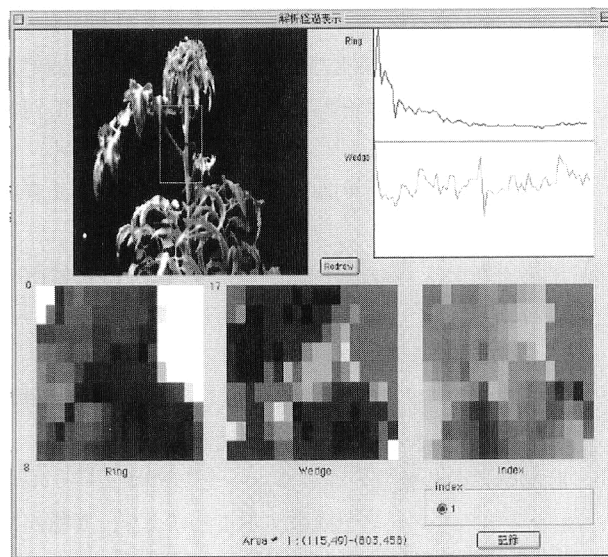


図5 画像解析における実行経過表示画面。

さに制限はないが、枠内に納まりきらない画像は、上下および左右のスライダーによるスクロール表示となる。画面下部には、ニューラルネットワークのテーマ名が、その下には画像計測の結果が棒グラフで示される。例として、ニューラルネットワークにトマトの葉群画像と人間が判定した萎れの程度を教師データとして学習させ、「トマトの萎れ判定システム」と命名すれば、テーマ名には当該名が、棒グラフには対象画像の萎れの程度の判定結果が表示さ

れる。

次に、実際の画像解析の様子を説明する。図5に、葉の萎れを判定する領域を選択し、判定を実行した場合の解析経過を表示する画面を例示する。本システムでは、くさび状特徴量に加え、テクスチャーを構成する物体の大きさを反映する「リング状特徴量」を使用している。経過画面の左上には、テクスチャー解析が施される画像の区画が示され、右上には、その結果求められた各テクスチャー特徴量が表示される。経過画面の下段には、各テクスチャー特徴量と、ニューラルネットワークによる判定結果が、それぞれ二次元表示される。

図6は葉傾斜角の三次元再構成処理の実行画面である。画面右上には、仮の葉傾斜角の二次元分布が各撮影角度ごとに表示される。さらに、各種計算パラメーターを指定した後、処理を実行させると葉傾斜角が三次元的に再構成される。再構成された結果は、画面右下に各座標面による切断面として二次元表示される。この際、切断面の位置は、画面横のスライダーを移動させることで任意に調節することが可能である。図6の例では、トマト葉群の葉傾斜角の再構成結果が、水平切断面として表示されている。ここでは、中心茎が真ん中付近の明るい部分として示され、さらにその周りに同心円状の三次元構造が確認できる。

本プログラムは、遠隔地のサーバーに画像データや計測結果を自動送信する機能に加え、現在の各種設定値を参

照・変更する機能、ニューラルネットワーク定義ファイルを参照・設定する機能など、サーバーからの遠隔操作に応える機能を有している。

2.3 水ストレス検知システム構築のための基礎実験

本システムを用いて、トマト苗の水ストレスを葉傾斜角の変動を通じて検知するシステムの構築が可能であるか実験的に検討した。具体的には、本システムを用いてリアルタイムに計測した葉傾斜角と、別途計測した水ポテンシャルとの間の相関性を解析した。実験は、遮光した室内に農業用透明被覆材による小型温室を設置し、内部に人工光源を設置して合計2反復行った。

材料として、前日の定期灌水を控えることにより人工的な水ストレス状態を再現したトマト苗を準備し、これらに実験開始と同時に灌水した後、プレッシャーチャンバーによる小葉の水ポテンシャル計測と、葉群画像の同時撮影を20分間隔で定期実行した。実験は水ポテンシャルがほぼ平衡状態に達するまで約4時間継続した。その後、葉群画像を本システムにおいて画像解析することにより、三次元的に求めた葉傾斜角をもとに形態指標を作成し、水ポテンシャルとの相関性を検討した。

結果として、水ポテンシャルと形態指標との相関係数は、0.7~0.9の間で推移した。このため、本システムが求めた葉傾斜角に基づく形態指標は水ポテンシャルとの相関性が高く、トマト苗の灌水時期を定量的に判断するための補助的指標として十分機能しうると考えられる。

現在、本研究では、計測手法とアプリケーションプログラムの開発を経て、より具体的な水ストレス検知システムの実用化実験に取り組んでいる。これまでの実験結果の検討から、可視画像情報に加えて近赤外分光情報を援用することにより、さらに確度の高い計測が可能との感触を得ている。現状では、デジタルカメラなどで簡単に撮影でき

る可視画像情報とは異なり、近赤外分光情報を得るためのセンサーはきわめて高価である。このため、このような複合的計測システムを実現するためには、計測波長を限定するなどしてコストを大幅に低減した新型センサーなど、新たなセンシングデバイスの開発が不可欠と考えられる。

教育・研究機関で開発されたシステムを、実際の栽培現場に普及させるためには、学術雑誌への研究成果の投稿などの従来の方法に加え、インターネットを利用した一般公開など、より効果的な公知方法を検討する必要がある。また現状では、システム内部のニューラルネットワーク定義ファイルや、画像データ、さらには画像解析の結果などの各種データフォーマットは非公開の独自形式である。本システムが容易に陳腐化しないように、実用上の寿命を確保するためには、XML (extensible markup language) などの汎用書式に基づいたデータフォーマットや、プログラムソースを完全公開するなどして、システムの透明性を向上させ、第三者が容易に開発過程に参加できるようなオープンな環境を用意する必要があると考える。

文 献

- 1) M. Oka and K. Hirata: "An application of computer image analysis for characterization of plant type in rice cultivars," *Jpn. J. Breed.*, **38** (1988) 449-458.
- 2) M. Oka and K. Hirata: "Comparison of plant type between new and old rice cultivars using computer image analysis," *Jpn. J. Breed.*, **58** (1989) 232-239.
- 3) 庄野浩資: "テクスチャ特徴量に基づく葉傾斜角の画像計測手法の提案とその有効性の検討", *生物環境調節*, **33** (1995) 197-207.
- 4) 庄野浩資, 佐瀬勘紀: "トマト作物体を対象とした葉傾斜角と概略的形状の3次元画像計測", *生物環境調節*, **34** (1996) 75-85.
- 5) 本條 毅, 庄野浩資: "画像処理と3次元デジタイザによる葉面傾斜角の測定", *農業気象*, **57** (2001) 101-106.

(2002年6月4日受理)