

## 時系列画像処理によるイネの葉の成長運動の可視化

海野将範† 七夕高也‡ 宮村(中村)浩子†  
齋藤隆文† 篠村知子‡  
†東京農工大学 大学院生物システム応用科学府  
‡(株)日立製作所 中央研究所

本研究では、イネの生長を直上から記録した時系列画像から葉の生長特性を可視化し、解析することを試みる。植物の網羅的解析では数ヶ月に及ぶ生長の観察が必要とされるが、本研究においては直上からイネを観察した際に見られる成長運動に着目し、座標変換および時空間平面への投影により葉の成長運動の軌跡を2次元上に可視化する。これにより発芽誘導からの時間による葉の運動パターンの変化、日周変動、および回旋運動等を観察することができた。

## Visualization of Growth and Development in Rice Leaves by Image Processing

Masanori UNNO†, Takanari TANABATA‡, Hiroko Miyamura NAKAMURA†,  
Takafumi SAITO†, Tomoko SHINOMURA‡  
†Graduate School Bio-Applications and Systems Engineering,  
Tokyo University of Agriculture and Technology  
‡Hitachi Central Research Laboratory

In this paper, we present visualization and analyzing method for growth and development of rice leaves from image series taken right above a rice plant. To observe growth pattern of plants for more than two months, we pay attention to the growth and development that was observed above. The tracks of the leaf growth are visualized in two dimensions image using coordinate transform method, then generating to the spatiotemporal image. As a result, we observed many important biological events such as the growth movement pattern according to time from the germination inducement, the circadian rhythm, and the root-tip rotation.

### 1. 緒言

画像処理技術を用いた計測処理および可視化技術は非破壊、非接触、高速化、自動化が可能であるという特徴から、プリント基板などのパターン検査や高速道路の交通量計測、指紋認証など多くの分野で応用されている。植物生態学や植物発生学などの分野においても、例えばリモートセンシングを用いた植生の可視化等で実用化されている[1]。

植物の品種ごとの違いや遺伝子機能を網羅的に解析するためには、葉面積や伸長速度など植物個体レベルでの観察や計測方法が必須となる。しかし直接計測では膨大な量のサンプルを計測するために多大な手間がかかるだけでなく、データを時系列で観察しなければ得られない情報などを見逃すおそれもある。七夕らの研究では数十個体の初期生育時のイネの生長を自動記録するためのシ

ステムを提案し、伸長のタイミングや根の回旋パラメータなどの生長情報を取得することに成功している[2].

時系列画像群から植物の生長データを取りだす試みとしては様々な手法がある。清水らによる、植物の特徴を画像処理によって自動的に認識する手法[3]や、宮村らによる最小値投影法により培地内の根の生長を可視化する手法[4]、さらに平藤らによるオプティカルフローを使い生長ベクトル量を抽出する手法[5]などがある。清水らの手法では個々の画像を個別に認識するため、特定の特徴の時間変化は取れるが、領域に対応させた情報は取り出すには更なる工夫を要する。また宮村らの手法では、抽出対象が固定されている条件のもとで処理を行っているため、対象が風などの影響で動く場合は考慮していない。平藤らの手法は画像全体から運動ベクトル量を抽出することができるが、ノイズが含まれる環境で細かな成長運動を抽出するのは難しい。

そこで本研究では時空間断面画像を使った手法に着目する。この手法は、各画像から画素値を元に1ラインずつ取り出し積層するという単純な手法を用いて可視化し、観察は主に人間の視覚能力に委ねている。そのため、例えば照明や撮影環境の変化などによりノイズが混入しても人間の認識能力で補うことができる。これにより、自然科学の分野で応用が利きやすい。過去にショウジョウバエの胚の成長の可視化[6]、河川の流速計測[7]、結晶の生成過程の可視化[8]などにおいて使われおり、植物学においても発芽直後の生長過程を可視化するなどで使われている[9].

本研究では栄養成長期のイネの葉の成長運動に着目し、葉の時系列的な運動情報の可視化を行う。本稿では植物体の直上から撮影した画像をもとに、時空間断面画像を用いて葉の運動を可視化する手法を提案する。

## 2. 撮影環境

イネの生育および撮影は、人工気象室内で行う。人工気象室とは温度、光、湿度などを自由に設定でき、様々な植物に適した疑似環境を作ることができる実験装置である。人工気象室内部に4鉢のイネを設置し、長日条件(14時間光照射 30℃, 10時間消灯 25℃)にて生育を行う。

撮影にはDVC社製のDVC-1312C(1300×1030pixel)を用いて30分間隔で行う。消灯時も撮影を続けるが、2時間ごとに照明を短時間点灯させ撮影している。また画像処理による植物領域の抽出を容易に行うため、背景用には暗幕を設置する。人工気象室内部の床には空気循環用の穴が無数に開いているため、図2のように床から空間を空けて設置し、通風性を確保している。以上の条件で撮影を行い、発芽誘導後20日目から79日目までの画像に対して処理を行う。

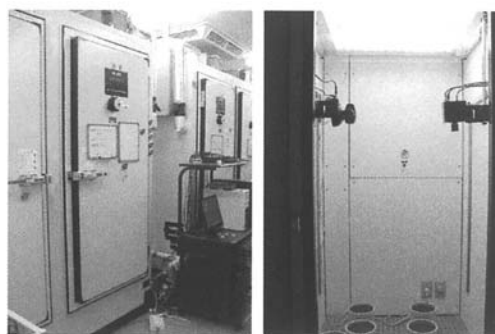


図1 人工気象室



図2 撮影概念図

### 3. 時空間断面画像による可視化

#### 3.1 座標変換

直上から撮影されたイネの画像を観察すると、イネの葉は中央から外側に広がる形で生長し、互いに葉が重なりあわないように位置を調整して運動を繰り返していることがわかる。この運動の性質を利用して、座標変換により画像を変形する(図3)。

原画像を、植物体を中心とした極座標画像とすると、原画像内においての座標は $(r_i, \theta_j)$ になる。変換後画像を直角座標画像として座標を $(x_{ij}, y_{ij})$ とした時、この座標の関係式は以下ようになる。

$$\begin{cases} x_{ij} = r_i \cos \theta_j \\ y_{ij} = r_i \sin \theta_j \end{cases}$$

このとき変換後の画像の下部は植物体の中心に、上部は植物体の外側に相当する画像が生成される。このようにして作成された画像内ではイネの葉は画像の下から上に伸び、葉の運動はx軸方向の動きとして観察される。

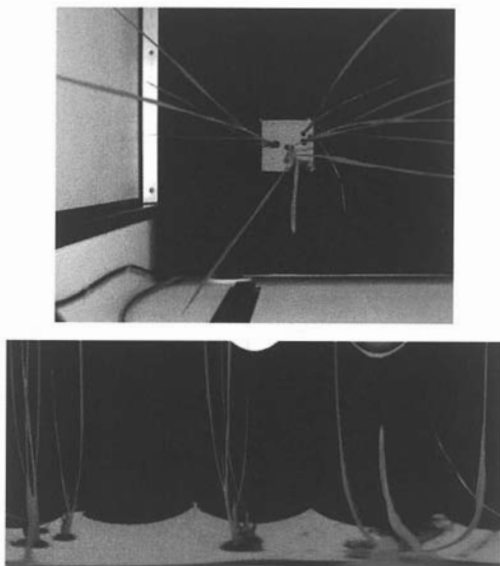


図3 原画像と座標変換後の画像

#### 3.2 時空間断面画像

映像や時系列画像など3次元データを2次元上に投影する方法のひとつとして時空間断面画像を使う手法が挙げられる。これは個々の時系列画像1枚ごとに1ライン抽出し、時間軸に沿って垂直もしくは水平に積層することで得られる画像である。この画像を作成する際、各画像からラインを抽出する方法は様々あるが、代表的なものはx軸やy軸に平行にスキャンする方法である。

座標変換によって得られた画像群に対し、 $r=200\text{pixel}$ の位置でスキャンを行い垂直に積層し、時空間断面画像の作成を行う。この画像を観察するとイネの葉の運動を一枚の画像として表現することができる。

完成した時空間断面画像をアルファブレンディングによりグリッド線と合成し定量解析を容易にする。時空間断面画像に横方向のみの Gaussian フィルタ( $\sigma=1.0$ )を作用させ、トーンカーブによりアルファ画像を作成する。グリッド線の画像と時空間断面画像をアルファブレンディングによって合成したものが図4である。

#### 3.3 植物体の抽出

植物体の背景に暗幕を設置したことにより植物体の抽出を容易に行うことができる。座標変換により変形を行った画像に $\sigma=1.0$ で Gaussian フィルタを作用させノイズを軽減し、グレースケール化を行い、経験的に求めた閾値4で2値化処理することで植物部分をマスク化して抽出する。

植物体を抽出した画像を元に植物体の端点部分を抽出する。任意の最下段のラインにおける植物体部分の領域を上方向に延長し、途中で途切れるもしくは抽出を行う最上段ラインまで到達した座標を画像ごとに記録しておく(図5)。なお、このときにある閾値以下の長さの葉はノイズとして除去し、過抽出を避ける。ここでは3pixel以下の長さの葉

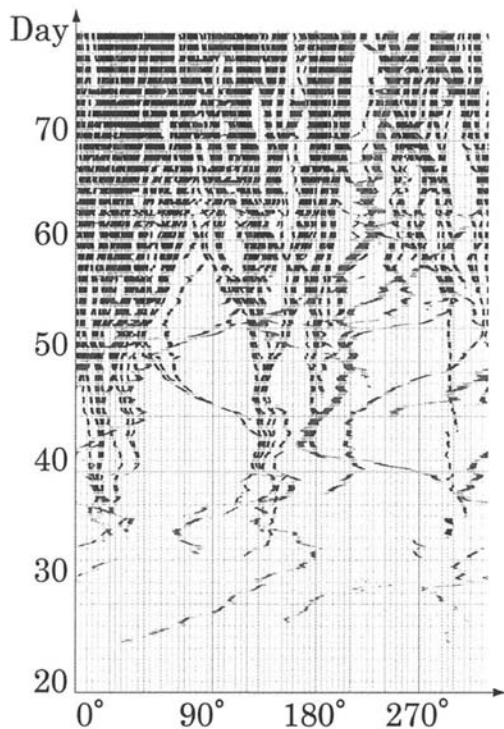


図 4 時空間断面画像

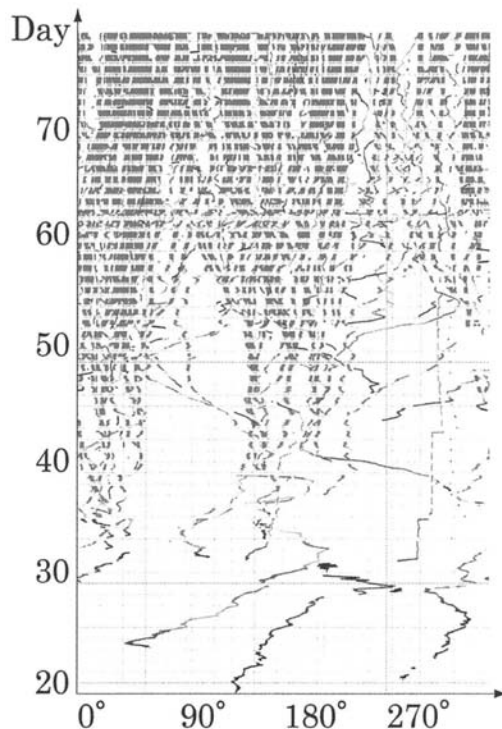


図 6 抽出した端点を可視化

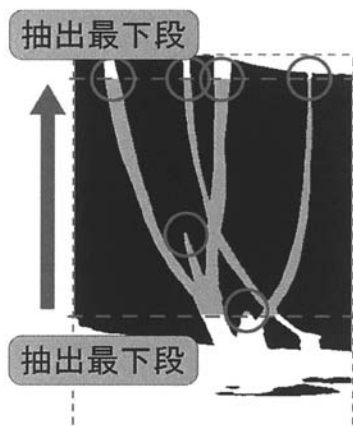


図 5 端点抽出の概念図

を除去している。

記録した端点の座標は、時間軸近傍で可能なものは接続し、消灯時のデータの無い部分を補間し、これらを時空間断面画像と同じ要領で可視化する。抽出された端点の高さ情報を擬似カラーで表現したものが図 6 である。

### 3.4 時空間断面画像ビューワ

3.2 項および 3.3 項において植物の成長運動を可視化することができたが、運動を解析する際に原画像および原画像内の葉との対応関係がわかりづらくなることが多い。そこで可視化画像と原画像群を対応付けるビューワの製作を行い、解析を容易にする。

ビューワでは可視化画像と原画像のウィンドウを 2 つ用意し、可視化画像用のウィンドウにフォーカス状態で '+'、'-' キーで可視化画像の拡大、縮小、ドラッグで画像の移動、右クリックで対応する原画像の呼び出しを行うことができる。

これにより可視化画像内で葉の動きを追いかける際、原画像と併用することで解析が容易になっただけでなく、可視化画像内での事象が原画像ではどのようなになっているのかを対話的に確認できる。

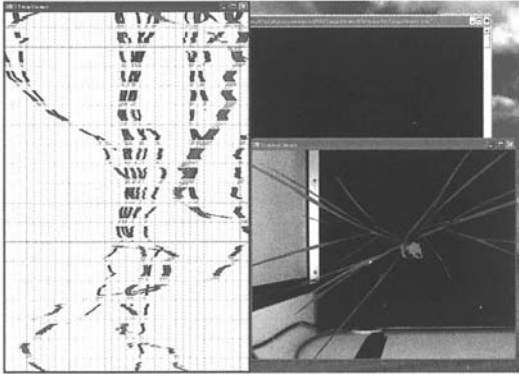


図 7 時空間断面画像ビューワー

#### 4. 考察

可視化画像とビューワーにより以下の事象が観察された。

- ・ 葉の動きのパターンの変化

葉の成長運動は発芽誘導からの日数により変化する。20～32 日目における分げつ前段階では葉は全領域に行き渡るように動き、32～40 日目にかけて主要分げつの分げつが始まると葉の動きは活発になる。これは第3分げつまで活発に動き、40 日目以降は安定期に入る。安定期では葉の領域は一旦2方向に別れた後、徐々に間を埋めるように広がっていくことがわかる。

- ・ 葉の日周変動

葉が運動によりある方向に移動する際、移動は常に一定方向に向かっているわけではなく、多くはある程度移動すると反対方向におよそ 2~3 度程戻るといったパターンを繰り返しながら進んでいる(図 8)。反対方向への力が加わるのは1日周期であり、そのピークは主に正午付近に観察された。これはイネにおける日周変動である可能性が示唆される。

- ・ 葉の発生による分げつの微震

分げつ単位での葉の動きを観察すると、分げつごとにまとめて周期6日、振幅3度程度の微震を観察することができる(図 9)。これは葉の発生周期が6日であることとよく関連している[10]。

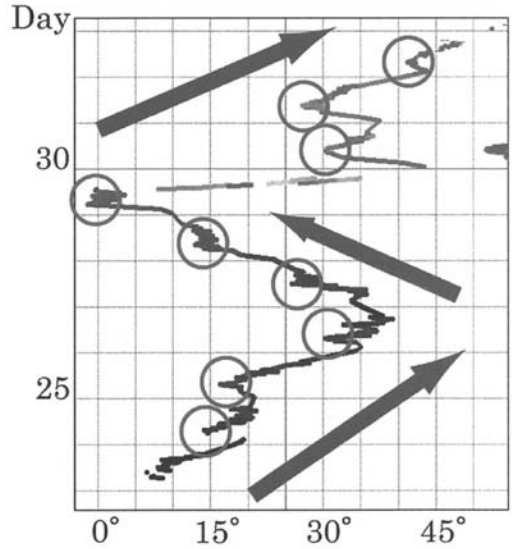


図 8 葉の日周変動

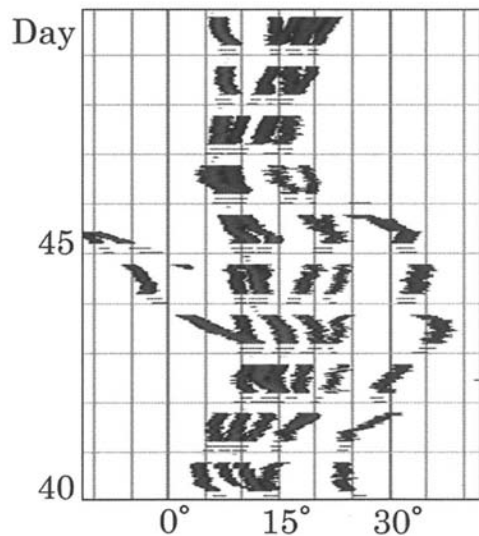


図 9 分げつの微震運動

- ・ 分げつ直後の回旋運動

分げつ直後の分げつ内の葉の運動を観察すると、3日の間に一旦反時計回りに40度動いた後、時計回りに70度と非常に大きな角度を伴う運動が観測された(図 10)。これは植物特有の成長運動であるところの回旋運動だと思われる。

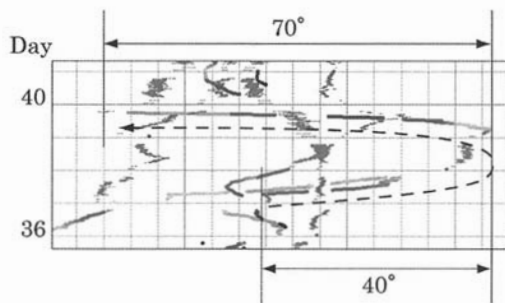


図 10 回旋運動

以上のように時空間断面画像により成長運動の定量的な解析を行うことができる。直接観察や画像に対しての目視による観察が困難な 5 度以下の運動や、一日程度で大きく動いてしまうような運動の解析も行うことができることから、本手法は有効であると思われる。

## 5. 結言

本稿では栄養成長期のイネを直上から撮影した画像をもとに、時空間断面画像を用いて葉の成長運動を可視化する手法の提案し、解析された成長運動を述べた。

今後の課題としては、1 サンプルの時系列画像を取得するための時間及び空間コストの削減が上げられる。また網羅的解析を行うにあたって、多くのサンプルを処理することになるであろうが、その際の解析結果を如何に統合するかもまた課題のひとつである。

## 参考文献

- [1] 高木幹雄, 下田陽久 監修, 「画像解析ハンドブック」, 東京大学出版会, 1991 年
- [2] 七夕高也, 篠村知子, 個体レベルの成長計測のためのイメージングシステム, *Plant Morphology*, Vol.16, No.1, 2004 年 12 月.
- [3] H. Shimizu, and R. D. Heins, Computer-Vision-Based System for Plant Growth Analysis, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol.38, No.3, pp.959-964, 1995.
- [4] 宮村(中村)浩子, 七夕高也, 斎藤隆文, 篠村知子, イネの根の時系列生長画像の解析と生長過程の可視化, 情報処理学会 グラフィックスと CAD 画像電子学会 Visual Computing 合同シンポジウム 2005 予稿集, pp.221-226, 2005 年
- [5] M. Hirafuji et al., MATE: Multi-purpose Artificial Terrestrial Ecosystem for CELSS and Indoor Greenery, *IFAC Agricontrol 2000, Proceedings of Modeling and Control in Agriculture, Horticulture and Post-Harvest Processing*, 2000.
- [6] P. Janardhan, M. Hebert, and K. Ikeuchi, The Space-Time Map Applied to Drosophila Embryogenesis, *Proceedings of the IEEE Workshop of Biomedical Image Analysis*, pp.144-153, June 1998.
- [7] 椿涼太, 藤田一郎, 時空間断面画像を利用した河川表面流速計測法, 土木学年次学術講演会公演概要集, 第 2 部, Vol.56, pp.320-321, 2001 年
- [8] 中谷浩之, Z. Salvador, 宇田幸弘, 古川義純, 氷結晶の振動成長にともなう不凍糖タンパク質の拡散と偏析, 宇宙利用シンポジウム 予稿集, 第 22 回, pp.18-21, 2006 年
- [9] 柴崎裕一, 宮村(中村)浩子, 斎藤隆文, 時空間画像解析に基づくイネの初期成長過程の可視化, 画像電子学会ビジュアルコンピューティングワークショップ 2004, 2004 年
- [10] H. Shimizu, T. Ishizuka, T. Tanabata, M. Takano, N. Inagaki, and T. Shinomura, Growth Analysis of Tillering Stage in Phytochrome-deficient Rice Mutant Using Auto Digital Imaging System, *Plant and Cell Physiology*, Vol.46, 2005