L システムを用いたヒマワリの形状モデリング

武田知己・平野高司・浦野慎一・堀口郁夫

(北海道大学大学院農学研究科)

A Geometric Model of Sunflower Plants Using L-system

Tomomi TAKEDA, Takashi HIRANO, Shin-ichi URANO and Ikuo HORIGUCHI

(Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, 060-8589 Japan)

Abstract

Canopy structure of crops is an important factor determining the radiation environment of the canopy. Although many researchers have dealt with foliage distribution by using a probability density function, studies that reproduce a spatial distribution and spatial form of foliage in 3 dimensional (3D) space have only recently been reported. In this study, we developed a geometric model by using L-system to reproduce the form of sunflower plants in 3D space. The model consists of frame and leaf models. In order to obtain functions to illustrate the frame model, positions of nodes, leaf bases, and leaf tips were measured from photographs of sunflower plants taken at five different stages in a growing season, and lengths of internode, petiole and leaf were determined. Moreover, lengths of five lateral veins, and divergence angle between midrib and fifth lateral vein were measured.

Growth curve of internode and petiole could be expressed as a logistic function of step number in L-system. Leaves elongated as a function of petiole length. Zenith angle of petiole decreased with step number from 1 to 7, and then stabilized at about 35° . Leaf zenith angle was related to petiole zenith angle. Divergence angles between successive leaves differed in different phyllotaxis. In distichous phyllotaxis, divergence angle was 180° between the leaves at the same node, and 90° between the leaves at successive nodes. On the other hand, in alternate phyllotaxis, divergence angle was about 135° . Leaf expansion could be related to increase in leaf length.

In conclusion, the geometric model using L-system successfully reproduced the growth of sunflower plants with increase in node number.

Key words: Geometric model, Growth curve, L-system, Sunflower.

キーワード: L システム, 形状モデル, 生長曲線, ヒマワリ

1. はじめに

作物群落に入射した放射は、作物群落と土壌表面による散乱を受け、一部は作物群落と土壌表面に吸収され、残りは作物群落上へと反射される。作物群落に吸収された放射は、作物群落の乾物生産量と関係があるため、生育モデルなどに利用される。一方、作物群落によって反射された放射は、作物群落の生理的・構造的な情報を含んでいるため、リモートセンシングなどに利用される。

作物群落が存在する地表面での放射伝達過程は、作物群落の構造と光学的性質によって決定される。

作物群落に関するこれまでの研究は、作物群落を葉群の確率密度分布として扱ったものが多く見られる (Fukai and Loomis, 1976; Ross, 1981; Kimes and Kirchner, 1982)。これに対して、コンピュータのグラフィック機能の向上により、作物の三次元形状を再現する研究が見られるようになってきた。作物の三次元形状を再現し、葉を面データとして表すことができれば、レイトレーシングやラジオシティ法 (Borel *et al.*, 1991) の利用が可能になる。これにより、若い葉や成熟した葉、

あるいは葉の着生位置など、個葉レベルで葉の生理的・物理的性質を考慮することが可能となり、生育モデルやリモートセンシングに利用する際に、より詳細な放射環境の推定が可能になる。三次元形状を再現したモデルには、3D デジタイザを使って作物の形状を直接測定した研究 (Ivanov *et al.*, 1995; Sinoquet *et al.*, 1998) や、L システム (Lindenmayer, 1968) の生長アルゴリズムを用いて作物の形状を再現した研究 (Room *et al.*, 1996) が挙げられる。L システムは、作物の地上部だけでなく根系 (Sakae, 1994) の分岐構造をモデリングすることができるため応用範囲がひろい。

これまでに発表された形状モデルは、ある時期における形状を再現したものが多く、生育期間を通して形状の変化を測定した研究はあまり見られない。そこで本研究では、生長段階の異なる作物の形状を再現するために、生長するヒマワリ (*Helianthus annuus* L.) の形状を定期的に測定し、得られた生長曲線を L システムのパラメータとして与えることによって形状モデルの作成を試みた。

2. 材料と方法

2.1 ヒマワリの生長パターン

L システムは、作物の節間、葉、花などの各器官を構成単位 (モジュール) と考え、生長を記述した書き換え規則に従ってモジュールを生成したり書き換えたりする。一連の書き換え規則に従ったステップを繰り返すことで、複雑な作物の形状を再現することが可能である。本研究では、形状モデルを骨格部分と葉面部分に分けて考え、それぞれに L システムを適用した。

はじめに骨格部分の生長パターンについて見ていく。実験に用いたヒマワリ (かがやき種) は、分岐構造を持たない 1 本の主茎からなり、主茎の節部に葉柄と葉をつける。葉序について見ると、生育初期では 1 つの節部に葉を 2 枚つける対生葉序を示し、その後、1 つの節部に葉を 1 枚つける互生葉序へと変わっていく。また、対生葉序の部分では、節部につく 2 組の葉柄と葉は同時に生長する。こうした特徴を考慮し、節間、節部につく葉柄と葉で構成されるシュートを 1 つの生長単位と考えることにした。以後、同一個体においてシュートを識別するために、根元部分から上に向かって数えたシュートの順番をシュート番号と定義する。L システムはステップを 1 回実行するごとに、新しいシュートを生成し、既に生成されているシュートをそれぞれ 1 ステップ生長させる。なお、骨格部分では、節間、葉柄、葉を直線で表すことにする。

次に葉面部分の生長パターンについて見ていく。葉の

形状は、中央脈の長さ (葉長) が短いときは縦に長い形状となり、生長がすすむに従って縦方向と横方向に拡大してハート形へと変化していく。そこで、中央脈をはさんで両側に線対称な 10 本の側脈を考え、葉基部と、中央脈、側脈の先端を結んでできる 12 角形の平面で葉面部分を近似することにした。中央脈と側脈の長さや脈間の角度を変えることで葉の形状変化を再現する。

2.2 実験

実験は 2000 年に北海道大学附属第一農場 (43°04'N, 141°20'E) で行い、骨格部分の形状変化を写真測量で求め、葉面部分の形状変化を圃場からサンプリングした葉を測定することで求めた。

骨格部分の測定 2000 年 5 月 23 日に、ヒマワリの苗を 100 個体移植用ポットで栽培し、子葉が出そろった 6 月 6 日に 36 個体を選んで駄温深鉢 (9 号、直径 27 cm、深さ 22 cm) に移植した。移植後、鉢の間隔を 40 cm にとり、6×6 群落で正方格子状に配置した。このとき、鉢の配列が東西方向と南北方向に一致するようにし、鉢の土壌表面が圃場の土壌表面と同じ高さになるように鉢を地表面より低い位置に設置した。

測定は、生育状況を考慮して 1 週間から 2 週間おきに 6/13, 6/20, 7/2, 7/13, 7/24 の 5 回、それぞれ正午頃に行った。測定時に、6×6 群落の中央に位置する 4 個体を取り出し、1 個体ずつ回転テーブルの上に乗せてデジタルカメラで写真撮影を行った。このとき、全ての葉が写るように鉢を回転させながら複数方向から撮影を行った。撮影後、画像をパソコンに取り込み、写真測量用のアプリケーションである Photo Modeler Pro (Eos Systems Inc.) を用いて三次元解析を行い、節部、葉の基部、葉の先端の三次元座標を求めた。さらに、各三次元座標から、節間長、葉柄長、葉長、葉柄仰角、葉仰角、葉柄方位角、葉方位角を計算した。方位角は、北を 0°として時計回りに計算した (Fig. 1a)。

葉面部分の測定 骨格部分の測定用に用意した移植用ポットから 36 個体選び、6 月 6 日に 6×6 の正方格子群落になるように、株間 40 cm で圃場に直播きした。

測定は、圃場に直播きしたヒマワリを 7 月 9 日に 4 個体サンプリングして全ての葉について行った。葉基部と葉基部から葉の輪郭へ引いた接線が葉の輪郭と交わる点までを結ぶ線分を考え、中央脈とこの線分がなす角度を 5 等分する線分を用意することで 5 本の側脈を決定した (Fig. 1b)。以後、中央脈から近い側脈の順に、側脈 1、側脈 2、…、側脈 5 とし、中央脈と側脈 5 のなす角度を葉の開度と定義する。こうして決定した側脈 1 から側脈 5 の長さや中央脈の長さ、葉の開度を測定した。

Fig. 1. Elements of plant models. (a) Frame model and (b) Leaf model. θ_p : petiole angle of elevation, θ_l : leaf angle of elevation, ϕ : leaf azimuth angle, l_i : internode length, l_p : petiole length, l_l : leaf length (midrib length), l_{v_m} : length of lateral vein m ($=1, 2, 3, 4, 5$), ψ : divergence angle of leaf.

3. 結 果

3.1 ヒマワリの生長

節間長 最後の測定を行った 7/24 の時点でヒマワリは生長途中にあったので、5 回の測定で節間の伸長が終了した節だけを選び、各測定日の節間長を伸長が終了したときの節間長で標準化し、ステップ数との関係を示した (Fig. 2)。シュート 1 と 2 の節間は、ステップ 2 から 3 で急激に伸長し、ステップ 4 でほぼ伸長を終了した。シュート 3 から 10 の節間では、シュート 1 と 2 に比べて伸長速度が遅く、ステップ 8 前後で伸長が終了した。これらの関係を表すために、生長曲線の 1 つであるロジスティック曲線を用いた。

$$l_i^* = 100.0 / \{1 + 1570 \exp(-3.0s)\},$$

(シュート 1, 2)

$$l_i^* = 100.0 / \{1 + 28.8 \exp(-0.77s)\},$$

(シュート 3 から 10) (1)

ここで、 l_i^* (%) は標準化した節間長、 s はステップ数を表す。ステップ 1 と 2 の生長曲線における RMSE (平均二乗誤差の平方根) は 3.89% であり、ステップ 3 から 10 の生長曲線における RMSE は 5.45% だった。

節間長の最大値とシュート番号との間に関係は見られず、ばらつきが大きかったため平均をとって節間長の最大値を求めたところ 3.48 cm となり、分散が 0.92 cm となった。従って、ステップ数 s の節間長は次式によって求められた。

$$l_i = 3.48 l_i^* \quad (2)$$

ここで、 l_i (cm) は節間長を表す。

葉柄長 節間長の推定と同様に、各測定日における葉柄

Fig. 2. Growth curve of internode normalized by maximum internode length. Symbols represent measurement in shoot number 1 and 2 ($\diamond$), and from 3 to 10 ($\blacklozenge$). Curves represent estimation in shoot number 1 and 2 (solid line), and from 3 to 10 (dashed line).

Fig. 3. Growth curve of petiole normalized by maximum petiole length. Measured ($\diamond$) and estimated (solid line) growth curve in shoot number from 4 to 9.

Fig. 4. Petiole length in each shoot number. Symbols indicate three different plants, and each value is the maximum among the measurements in five days.

長を伸長が終了したときの葉柄長で標準化し、ステップ数との関係を求めた (Fig. 3)。生長曲線は、節間長のと看と同じロジスティック曲線で表すことができた。

$$l_p^* = 100.0 / \{1 + 25.0 \exp(-0.6s)\}, \quad (3)$$

(シュート 4 から 9)

ここで、 l_p^* (%) は標準化した葉柄長を表す。シュート 4 から 9 で、葉柄の生長曲線と節間の生長曲線は同じ傾向を示し、節間と葉柄はほぼ同時に伸長していることが分かった。なお、シュート 1 から 3 は葉柄の枯死によりデータを得ることができなかったため、シュート 4 から 9 の生長曲線を代用することにした。

Fig. 4 に、個体別に求めたシュート番号と各葉柄における葉柄長の最大値との関係を示す。葉柄長の最大値は、生育後期において下層の葉柄が枯死したり、後で測定した葉柄長の方がそれ以前に測定した葉柄長より長い場合があったため、5 回の測定で最も大きな値が得られた日の葉柄長を採用した。なお、測定した 4 個体のうち、1 個体は 4 回しか測定ができなかったため図から除外してある。Fig. 3 から分かるように、上層にある葉柄は伸長途中にあり、伸長が終了するまで約 14 ステップかかることから逆算して考えると、シュート 7 から 9 までの葉柄長は伸長が終了したと考えることができる。また、シュート 1 から 6 までは葉柄長が直線的に増加している。そこで、シュート 1 から 6 までは葉柄長の最大値をシュート番号との直線回帰で推定し、それ以降は回帰式のシュート 6 における長さを用いて推定した。

$$l_{p_{\max}} = 2.08n - 0.55, r^2 = 0.88 \quad (\text{シュート 1 から 6})$$

$$l_{p_{\max}} = 11.93, \quad (\text{シュート 7 以降}) \quad (4)$$

ここで、 $l_{p_{\max}}$ (cm) は節間長の最大値を、 n はシュート番号を表す。従って、葉柄長はステップ数 s とシュート番号 n の関数となり、次式によって求められた。

$$l_p = l_{p_{\max}} \cdot l_p^* \quad (5)$$

Fig. 5. Relation between leaf length and petiole length. Curve expresses regression equation.

Fig. 6. Relation between petiole zenith and step number. Symbols represent measurement in step number from 1 to 8 (◆), and from 9 to 20 (◇). Solid line represent estimation for all shoot numbers.

ここで、 l_p (cm) は葉柄長を表す。

葉長 全ての測定日を通して、葉柄長と葉長の間には対数関係が見られた (Fig. 5)。そこで葉柄長の対数をとって葉長の推定式を求めた。

$$l_l = 6.14 \ln(l_p + 1.00), r^2 = 0.88 \quad (6)$$

ここで、 l_l (cm) は葉長を表す。

葉柄仰角 Fig. 6 に、ステップ数と葉柄仰角の関係を示す。葉柄仰角は、ステップ数が少ない発生初期では大きく、ステップ数が増えるに従い減少していき、やがてほとんど変化しなくなる傾向がみられた。そこで、ステップ 1 から 7 まではステップ数との直線回帰から推定し、ステップ 8 以降は一定として葉柄仰角を推定した。

$$\theta_p = -4.04s + 64.15, r^2 = 0.34 \quad (\text{ステップ数 1 から 7})$$

$$\theta_p = 34.05, \quad (\text{ステップ数 8 以降}) \quad (7)$$

ここで、 θ_p (°) は葉柄仰角を表す。

葉仰角 葉柄仰角と葉仰角の関係を Fig. 7 に示す。ばらつきは大きい、葉仰角は葉柄仰角とともに増加する傾向がみられたので、直線回帰して葉仰角を推定した。

$$\theta_l = 1.4 \theta_p - 52.4, r^2 = 0.61 \quad (8)$$

Fig. 7. Relation between leaf zenith and petiole zenith. Solid line represents regression equation.

ここで, θ_l (°) は葉仰角を表す。

葉柄と葉の方位角 葉柄の方位角と葉の方位角の関係を調べたところ, 両者はほぼ等しかったので葉柄と葉は同じ方位角を持つと考え, 葉の方位角で代表することにした。Fig. 8 に, 連続するシュート番号での葉の方位角差を示した。ただし, 対生葉序部分では, 同じ節部に着生する 2 枚の葉についても方位角差を求めた。

対生葉序部分を見ると, 同じ節部に着生する 2 枚の葉の方位角差は約 180° となり, 連続する節部での葉の方位角差は約 90° となった。互生葉序部分では, 下位の葉との方位角差は約 135° だった。

葉の形状 Fig. 9 に, 葉長と葉の開度の関係を示す。開度は葉長とともに大きくなっていく傾向がみられたので, 両者の関係を直線で回帰した。

$$\varphi = 0.36l_l + 46.9, r^2 = 0.42 \quad (9)$$

ここで, φ (°) は葉の開度を表す。

Fig. 10 に, 葉長と 5 本の側脈の長さとの関係を示す。5 本の側脈はいずれも葉長とともに直線的に増加していった。

$$\begin{aligned} l_{v_1} &= 0.71l_l, r^2 = 0.98 \\ l_{v_2} &= 0.58l_l, r^2 = 0.96 \\ l_{v_3} &= 0.45l_l, r^2 = 0.94 \\ l_{v_4} &= 0.34l_l, r^2 = 0.89 \\ l_{v_5} &= 0.18l_l, r^2 = 0.78 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで, l_{v_i} ($i=1, 2, 3, 4, 5$) (cm) は Fig. 1 に示した 5 本の側脈の長さを表す。

3.2 形状モデルの作成

3.2.1 L システムの書き換え規則

実験結果にもとづき, ヒマワリの骨格部分と葉面部分を L システムの書き換え規則に準じて表現すると以下のようなになる。書き換え規則の文法については, L システムで慣例的に使われている演算子があるが, そのような演算子を使って書くとは煩雑になるため, 本論文では日本語で説明することにする。詳しい書き換え規則と演算

Fig. 8. Divergence angles of successive leaves in distichous phyllotaxis (◇) and alternate phyllotaxis (◆). In the distichous phyllotaxis portion, the angle between two leaves at the same node is also shown.

Fig. 9. Relation between divergence angle of leaves and leaf length. Measurement (◇) and Estimation (solid line).

Fig. 10. Relation between length of lateral veins and leaf length. Symbols represents lateral vein in 1/5 (◆), 2/5 (◇), 3/5 (×), 4/5 (▲), 5/5 (△) divergence angle of leaf.

子については, Prusinkiewicz *et al.* (1997) を参考にさせていただきたい。

骨 格 部 分

初期状態: 新しいシュートを生成するための頂端が定義される。

プロセス 1: 対生葉序の場合のみ本プロセスを実行。頂端が、節間、2つの葉柄、2つの葉に置き換えられ、新たに生成された節間の先端に新しい頂端を再定義する。同時に、節、葉柄、葉の伸長方向を、式 (7), (8) と葉柄と葉の方位角の規則性から決定する。

プロセス 2: 互生葉序の場合のみ本プロセスを実行。頂端が、節間、1つの葉柄、1つの葉に置き換えられること以外はプロセス 1 と同じ処理を行う。

プロセス 3: プロセス 1 あるいは 2 で新たに生成された節間と既に生成されている節間の長さを、式 (1), (2) に従って決定する。

プロセス 4: プロセス 1 あるいは 2 で新たに生成された葉柄と既に生成されている葉柄の長さを、式 (3) から (5) に従って決定する。

プロセス 5: プロセス 1 あるいは 2 で新たに生成された葉と既に生成されている葉の長さを、式 (6) に従って決定する。

プロセス 1 から 5 までの一連の処理を 1 つのステップとし、ステップを繰り返すことによってヒマワリの骨格部分を形成することができる。

葉 面 部 分

初期状態: 葉の中央脈と、中央脈に線対称な左右 10 本の側脈の頂端が定義される。

プロセス 1: 骨格部分のプロセス 5 と同様に、式 (6) に従って中央脈の長さ (葉長) を決定する。

プロセス 2: 式 (9) に従って葉の開度を求め、中央脈に線対称な左右 10 本の側脈 l_{vi} ($i=1, 2, 3, 4, 5$) の伸長方向を $i/5 \cdot \varphi$ として決定する。

プロセス 3: 式 (10) に従って、中央脈に線対称な左右 10 本の側脈の長さを決定する。

プロセス 1 から 3 までの一連の処理を 1 つのステップとし、全ての葉についてステップを繰り返すことでヒマワリの葉面部分を形成することができる。

葉面部分は、1 枚の葉ごとにそれぞれ定義され、骨格部分で新たに葉が生成されるたびに、新しい葉面部分の書き換え規則が開始される。

3.2.2 形状モデル

L システムの書き換え規則に従って作成した葉長 8 cm と 16 cm のヒマワリの葉を Fig. 11 に示す。葉長の

Fig. 11. Shapes of sunflower leaves.

増加とともに側脈の長さが増加していき、葉面部分の面的な広がりが増現できている。

Fig. 11 に示した葉面部分を、ヒマワリの骨格部分に組み込むことでヒマワリの形状モデルを作成した (Fig. 12)。Fig. 12a, b はそれぞれ、10 ステップ後と 15 ステップ後のヒマワリの形状を再現しており、いずれもシュート番号 4 までを対生葉序として計算している。横から見た様子を 10 ステップ後と 15 ステップ後で比較すると、茎の上部にある節間、葉柄、葉の伸長が大きく、茎の下部では伸長が止まったためにほとんど変化していない様子が再現されている。また、上から見た様子で比較すると、10 ステップ後に比べて 15 ステップ後のほうが、葉と葉の間を埋めるようにして、茎から離れた場所まで葉を展開している様子が再現されている。

3.3 形状モデルの検証

形状モデルが実際のヒマワリを再現していることを検証するために、実際に圃場で測定したヒマワリの葉柄長、葉長を推定式 (4), (6) と比較し、また、葉面部分から求めた葉面積を実際に測定した葉面積と比較した。葉柄長と葉長は、本研究で対象としたヒマワリと同じ“かがやき種”を用い、1994 年に定規を使って測定したもので、葉面積は、“かがやき種”に加えて大型の“ロシア種”と小型の“矮性種”を使用し、それぞれ 1999 年、1996 年、1999 年に圃場でサンプリングした葉の面積を直接測定したものである。

Fig. 13a に、異なる日に測定した葉柄長の実測値と式 (4) で推定した葉柄長の最大値を示す。生育時期が早かったため、伸長途中にある上層の葉柄は長さが短いですが、下層における葉柄長の最大値では推定式で求めた回帰式とよく一致している。Fig. 13b は葉柄長と葉長の関係を表しており、葉長は式 (6) で求めた推定式に従って葉柄長とともに増加している。RMSE は 1.86 cm で、式 (6) の RMSE (=1.68 cm) に近い値となった。

Fig. 14 に、葉長と葉面積の関係を示す。なお、形状モ

Fig. 12. Shapes of sunflower plants illustrated by the geometric model.

Fig. 13. (a) Relation between shoot number and petiole length with 12 leaves (◆) and 15 leaves (◇) plant. Line estimated maximum petiole length from shoot number 1 to 6 estimated eqn. (4). (b) Relation between petiole length and leaf length. Curve is regression estimated eqn. (5).

Fig. 14. Comparison of leaf area between estimation with leaf model (solid curve) and measurements of three different sunflower cultivars. Kagayaki cv. (◇), Russia cv. (◆) and Waisei cv. (×).

デルから計算される葉長の最大値は 15.6 cm なので、測定値からは 15.6 cm より長い葉の葉面積を除外して示してある。Fig. 14 から、モデルの葉面積は、実際の葉面積をよく再現しており、品種による違いはほとんど見られなかった。RMSE は、“かがやき種”，“矮性種”，“ロシア種”でそれぞれ，24.3, 5.5, 12.2 cm²，全体では 9.9 cm²となった。また，葉長が大きくなるに従い誤差も大きくなった。

4. 考 察

本研究では、ヒマワリの骨格部分を測定するために写真測量用のアプリケーションである Photo Modelre Pro を使用した。Photo Modelre Pro を使うことにより、写真測量に必要なカメラ座標やカメラの方向といった標定要素を自動で計算してくれるため、三次元座標の解析にかかる労力を軽減することができた。

植物の各器官の乾物重や長さの時間変化は、生育初期に指数的に増加し、その後直線的に増加し、やがて一定の値に向かって漸近する S 字曲線で表されることが多い (Hunt, 1982)。本研究でも、S 字曲線の 1 つであるロジスティック曲線で節間と葉柄の生長曲線を推定することができた。

節間長の最大値を決定するために平均値を用いたが、ばらつきが大きかった。そこで平均値からの偏差をとって分布の正規性を調べたが、95% の信頼度で正規性は棄却された。同様にばらつきの大きかった葉柄仰角の測定値と推定式との偏差をとって正規性を調べたが、95% の信頼度で正規性は棄却された。誤差を生じる根本的な原因に、群落内で個体間に相互遮蔽が生じるため、光条

件の違いで局所的に生育が異なることが考えられる。また、測定にともなう誤差として、写真測量の際に風の影響で個体や葉が揺れるため、異なる方向から撮影した写真が完全に同じ座標を参照していないことが考えられる。

葉柄仰角については、ステップ数 1 から 7 まですべてに相関が見られたが、それ以降は決定係数がゼロに近く、まったく相関が見られなかった。誤差の原因として、既に述べた局所的な光条件の違いや測定による誤差の他に、日周運動の影響で茎の南側と北側で仰角が異なることが考えらるが (Shell and Lang, 1975; Shell and Lang, 1976), 葉柄仰角と葉柄方位角との相関を調べた結果、はっきりとした関係は見られなかった。

葉の方位角は、互生葉序部分で約 135° だった。この角度は、フィボナッチ級数の隣り合う数の比 (1: 1.62) で 360° を分割したときの角度 (約 137°) に近い。一般に、螺旋葉序はフィボナッチ級数で表されることが知られており、この関係は上下での葉の重なりが小さく、効率の良い葉序として知られている (Niklas, 1988)。本研究で求めた葉序の分岐角度にもこの関係が認められた。

形状モデルの作成においてシュート番号 4 まですべてを対生葉序としたが、実際に測定した 4 個体で対生葉序を示したのは、シュート番号 3 まですべてが 1 個体、シュート番号 4 まですべてが 2 個体、シュート番号 5 まですべてが 1 個体だった。測定個体数が少ないため統計的な処理を行えなかったが、今後検討する必要がある。

形状モデルの検証で、葉柄長、葉柄長から推定される葉長、そして葉面積の推定が実測値とよい一致を示した。はじめに述べたように、作物群落における放射伝達過程は作物群落の構造と関係があり、特に葉は放射の伝達に対する寄与が大きい。形状モデルによって葉面の空間分布を再現できたことにより、個葉レベルで遮断される放射を推定することが可能となり、個々の葉の生育段階による放射特性などを考慮した放射伝達モデルの開発が可能になると考えられる。

5. ま と め

L システムを用いて、骨格部分と葉面部分で構成されるヒマワリの形状モデルを作成した。骨格部分は、写真測量で得られたヒマワリの三次元データをもとに、節、葉柄、葉の生長曲線と、葉柄と葉の仰角と方位角に関する規則性を求め、これらを L システムのパラメータとして与えることで作成した。葉面部分は、サンプリングした葉から、葉の形状変化を中央脈と側脈の長さで開度で表し、面データとして作成した。

節間長と葉柄長の生長曲線は、シュート番号の関数と

してロジスティック関数で表すことができた。葉長と葉柄長のあいだには対数関係が見られた。葉柄仰角はステップ 7 までは、ステップ数とともに小さくなるが、その後変化しなくなった。葉仰角は葉柄仰角とともに増加した。葉方位角は葉序の違いにより、規則性に違いが見られた。対生葉序部分では、同じ節部に着生する 2 枚の葉の方位角差は約 180° で、連続する節部での葉の方位角差は約 90° となった。一方、互生葉序部分では、連続する節部での葉の方位角差は約 135° となった。葉の形状変化を、葉長に関連づけて再現することができた。葉長から推定した葉面積を実測値と比較した結果、両者はほぼ一致した。

本研究では、生長段階の異なるヒマワリの葉を、面データとして三次元空間内に再現することができた。これにより、複雑に葉が分布した空間における放射環境のシミュレーションが可能になる。

References

- Borel, C. C., Gerstl, A. W. and Powers, B. J., 1991: The radiosity method in optical remote sensing of structured 3-d surfaces. *Remote Sens. Environ.*, **36**, 13-44.
- Fukai, S. and Loomis, R. S., 1976: Leaf display and light environments in row-planted cotton communities. *Agric. Meteorol.*, **17**, 353-379.
- Hunt, R., 1982: *Plant growth curves*. Edward Arnold Pubs., London, pp. 121-146.
- Ivanov, N., Boissard, P., Chapron, M. and Andrieu, B., 1995: Computer stereo plotting for 3-D reconstruction of a maize canopy. *Agric. For. Meteorol.*, **75**, 85-102.
- Kimes, D. S. and Kirchner, J. A., 1982: Radiative transfer model for heterogeneous 3-d scenes. *Appl. Opt.*, **21**, 4119-4129.
- Lindenmayer, A., 1968: Mathematical models for cellular interactions in development II. Simple and branching filaments with two-sided inputs. *J. Theor. Biol.*, **18**, 300-315.
- Niklas, K. J., 1988: The role of phyllotactic pattern as a "developmental constraint" on the interception of light by leaf surfaces. *Evolution*, **42**, 1-16.
- Prusinkiewicz, P., Hanan, J., Hammel, M. and Mech, R., 1997: L-systems: from the theory to visual models of plants. In *Plants to ecosystems: Advances in Computational Life Sciences*, Vol. 1 (ed. by Michalewicz, M. T.). CSIRO Pubs., Melbourne, pp. 1-27.
- Room, P. M., Hanan, J. S. and Prusinkiewicz, P., 1996: Virtual plants: new perspectives for ecologists, pathologists and agricultural scientists. *Trends Plant Sci.*, **1**, 33-38.

- Ross, J., 1981: *The radiation regime and the architecture of plant stands*. Junk W. Pubs., The Hague, pp. 12–35.
- Sakae, S., 1994: Modelling the branching growth fractal pattern of the maize root system. *Plant Soil*, **165**, 339–347.
- Shell, G. S. G. and Lang, A. R. G., 1975: Description of leaf orientation and heliotropic response of sunflower using directional statistics. *Agric. For. Meteorol.*, **15**, 33–48.
- Shell, G. S. G. and Lang, A. R. G., 1976: Movements of sunflower leaves over a 24h period. *Agric. For. Meteorol.*, **16**, 161–170.
- Sinoquet, H., Thanisawanyangkura, S., Mabrouk, H. and Kasemsap, P., 1998: Characterization of the light environment in canopies using 3d digitising and image processing. *Ann. Bot.*, **82**, 203–212.