水稻画像のマッチング手法の開発

A Matching Algorithm for Rice Plant Images

串田 圭司*, 吉野 邦彦*, 山路 永司*

Keiji KUSHIDA, Kunihiro YOSHINO, Eiji YAMAJI

Abstract : Abstract : 3-D measurement of rice canopy is effective for growth analysis, photosynthesis evaluation, and reflectance modeling. But, digital measurement has been hardly carried out because 3-D measurement of plant canopy is difficult.

In this paper, past studies on stereo matching are reviewed and it is shown that not only information of similarity but also that of continuity is necessary in order to match each point of rice vertical images. Therefore, a new matching algorithm for rice plant images is proposed. The algorithm is based on recognition of the top of a leaf and a following outline of the leaf. Rice 3-D shape was measured precisely with this algorithm.

1. はじめに

植物群落の立体的な構造の計測は、生長解析、光合成能の評価など植物群落そのものを知るために必要である。さらに、リモートセンシングによる生育状態把握の研究においても必要不可欠である¹⁾。従来、その計測は農学、植物形態測定分野では、層別刈り取り法、ポイント法、投影法など測定に労力を要する測定法²⁾によっていた。これらの方式については、労力を軽減し、迅速に厳密な立体的な構造の考察を行う計測手法の開発が必要である。

これに対し測量、工業、医療分野では、3次元デジタル計測法として、ステレオ写真測量による方法(ステレオ写真法)、アクティブステレオ法、レーザによる方法、CT スキャンによる方法などが使われてきた³⁾。しかしそれらの方法は、ステレオ写真法を除いては複雑な設備を要するため、野外で植物群落のように比較的大きなものを測定するには不便である。

以上の背景のもとで本研究は、今まで植物の立体構造の複雑さのために困難⁴⁾であるとされてきたステレオ写真法におけるデジタルマッチングを、水稻の鉛

直画像に適用するためのデジタルマッチングアルゴリズムを提案し、水稻個体群の3次元デジタル計測を行うものである。

2. 既往の画像マッチングによる3次元計測法の水稻への適用性

デジタルマッチングは、ステレオ写真による地形図作成、動画画像の解析などの目的で研究開発されてきた。これらは、画像相関法によるマッチングと特徴マッチングに分けられることが多いが、両者の併用が最近の研究では注目されてきている。ところで、ほとんどの既往のマッチング手法は、そのアルゴリズムを次の4つの段階に分けることができる。

①画像の前処理 (pre-processing)

エッジの強調や Gaussian フィルタによるフィルタリングなどが行われる。人間の目の生理的な機能を応用した Marr-Poggio マッチングでは何段階かのフィルタリング⁵⁾が行われる。これによると相似性による対応点決定精度を向上させる効果がある。

②マッチングのために用いる点 (candidate) の選択
画像中の全ての点についてマッチングを行うことは、計算時間の問題のほか、マッチングが難しい点によって生じる誤差が大きくなるなどの問題がある。そのため、エッジ上の点や、ゼロクロッシングの点を選

* 東京大学農学部

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 33, No. 3, 1994

択することが行われる。なお、マッチングに用いられなかった点は、④の画像の再構築の段階で処理される。

③相似性 (similarity) と連続性 (continuity) の評価

対応点を決定するために利用できる情報は、対応点近傍の画像の相似性と対応点の集合の各画像内および3次元的な連続性の2つに分けることができる。

相似度の指標としては、相関係数や絶対値のほかエッジの傾きなども用いられる。地形の写真測量においては、一般に面積相関法が用いられる⁶⁾。

連続性の考慮は対応点決定の際用いられる場合と、全対応点決定後、補正として用いられる場合⁷⁾がある。前者の一例である弛緩法は、ある点と対応点であるという確率をその近傍の点のそれとの比較によって更新していくというものである。

相似性と連続性の両者を取り入れた評価関数を用いたダイナミックプログラミングによる評価⁸⁾も開発されている。また、画像認識の分野では、直方体や円柱の認識とそれらの形状によるマッチングも取られる⁹⁾。

④画像の再構築 (reconstruction)

この段階では、②の段階でマッチングのための候補点として選択されなかった点および対応が得られなかった点の奥行きを、対応が得られた点の奥行きから、何らかの内挿法により推定することが行われる。そして全体画像として再構築する¹⁰⁾。

以上のようなマッチング手法を、水稻画像に適用するに当たっては、次のような問題点がある。

問題1) 対応点における相似性が小さい

水稻の鉛直画像のように、奥行き方向の変位がフィルム面方向に比べて大きいステレオ画像では、左右の投影歪みが大きい。例えば、基線比を r 、個葉の傾きを α 、個葉の方位角を ϕ (基線と平行な時 $\phi=0$)とする。個葉は、左右カメラから等距離の所に位置し、標定計算は正確に行われたと仮定すると、左右画像でのこの個葉の輪郭線の傾きのずれ θ は、

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{r \tan \alpha \sin \phi}{2 - r \tan \alpha \cos \phi}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{r \tan \alpha \sin \phi}{2 + r \tan \alpha \cos \phi}\right) \quad (1)$$

となる。ここに、 $\alpha=75$ (度)、 $r=1/6$ 、 $\phi=90$ (度)とすると、 $\theta=35$ (度)と大きくずれることになる。

このため、水稻個葉の輪郭に相当する点では、対応点であっても、エッジの傾きが一致しない。

また、水稻個葉内部のテクスチャは相似性が大きいので、回転に対する保存量を用いてもマッチングが難しい。

このように相似性による評価を、水稻内各点について行うのは難しい。

問題2) 不連続性が大きい部分が多く存在する。

水稻部分と土壌部分、及び異なった個葉が、3次元的に不連続であるため、その部分で画像の再構築ができない。しかも奥行きの差が大きいので、同一相関窓内に両者が含まれているときには、それぞれ別の相関窓に含まれる部分と対応することが多い。これは、問題1)にも影響を及ぼす。

3. 葉エッジマッチング法のアルゴリズム

本論文で提案する水稻画像のマッチングの新しい方法である葉エッジマッチング法、すなわち個葉の先端の対応とそれに続く個葉の輪郭のエッジとしての認識によって、対応点を求める手法について、以下に説明する。

3-1 マッチングの考え方

先に検討した問題1)を解決するためには、相似性より連続性に重きを置く必要がある。しかし、連続性だけでは対応点は決定できず、いくつかの点での相似性によるマッチングが必要である。相似性によって対応できる点としては、個葉の先端を選ぶ。個葉の先端の認識は先述の投影による歪みの影響を受けない量によって行うことができる。また、十分解像度を高めれば、異なる個葉の先端は異なるラインに存在することから区別できる。

そして、連続性の判断が比較的容易な個葉の輪郭線をマッチングの対象とする。この方法ではすべての候補点については、相似性による評価を行わないため、弛緩法やダイナミックプログラミングによる方法の意義は薄い。個葉内部の各点の高さはそれに最も近い個葉の輪郭の高さにほぼ等しいと言えるから、直接マッチングせず、内挿により再構築する。

個葉の輪郭線を連続性によりマッチングするためには、個葉の重なり部における輪郭線の接続の判定と、輪郭線の追跡においてノイズの影響を受けないことが求められる。そこで、輪郭線をエッジとして抽出し、さらにそれを細線化することによって得た線セグメン

トの分岐点，交差点における接続の判定を行う。エッジ検出オペレータのみによる輪郭線抽出によると，輪郭線の途切れが生じるため，最尤法により水稻部分を他の部分から分離することを用いる。

また，問題2)を解決するために水稻部分と土壌部分を切り離して扱う。本研究においては，土壌部分の情報は必要ないから水稻部分のみ取り出してマッチングすればよい。個葉と個葉の重なりによって生じる不連続部分についても，それを認識し，連続する単位ごとに分離すればよい。これは問題1)の接続の判定への対策と両立する。

3-2 マッチングのアルゴリズム

本マッチング手法のアルゴリズムは，次の仮定に基づいている。

仮定1) 偏位修正画像において，各個葉の先端はそれぞれ異なるライン（エビポーラ線¹¹⁾）上にある。

仮定2) 個葉の輪郭線は濃度変化の大きい部分としてのエッジと一致する。

仮定3) 個葉の輪郭線は十分滑らかである。

これらは，写真撮影の照明条件，スキャナーの解像度に留意すると，一般にほぼ成り立つと考えられる。

マッチングのアルゴリズムのうち，分岐点の処理を図1に，個葉の先端の認識とそれに続く輪郭線の追跡を図2に模式的に示す。また，図3にマッチングのフローの概略を示すが，詳細は次の通りである。

(1) 対応点の1次元探索のため，左右画像の対応点が同一ライン上に存在するよう，偏位修正を行う。原画像から偏位修正画像へリサンプリングする時には，バイリニア法を用いた。

(2) 最尤法により，水稻部分を他の部分から分離する(写真1)。水稻，明るい土壌，暗い土壌など数個のカテゴリーを設定し，正しく分類できるまで試行錯誤を行う。ここでは，Erdas社のソフトウェアを用いた。

(3) 微小面積のかたまりをノイズとして除去する。

(4) 左右画像水稻部分における平均，分散が一致するよう，線形式による濃度補正を行う。

(5) 水稻部分のエッジを抽出する。ここでは，Prewittのオペレータ¹²⁾を用いた。ノイズが小さくなるようなしきい値を設定する。

(6) エッジの細線化処理を行なう(写真2)。ここではHilditchの方法¹³⁾を用いた。

(7) 線画像のセグメント化により，分岐点，交差点を抽出し，これらが連結点となるように隣接する連結点において分離を行う(図1)。この際，個葉の輪郭線を接続した状態で保つため，仮定3)により，最も滑らかなものを分離する。その判断は次のアルゴリズムに従う。ただし，線セグメント上の画素を1画素と呼ぶ。以下分岐点であるとして説明を行う(図4参照)。交差点であっても同様である。

i) 分岐点Pは3つの隣接する画素(a, b, c)を持っている。これらにおいて分岐点から5連結以上の線セグメントにAなどのラベルをつける。また分岐点から5番目の画素を便宜的に端点と呼び a_1 などとする。同一のラベルの線セグメントが画素を共有することはあるが(図4のC)，異なるラベルでは画素を共有しないようにする。

ii) $f(S, T)$ は分岐点Pとその周りの任意の線セグメントS, Tの端点 s_i, t_i によって作られる角の大きさを表すとする。ただし $0 \leq f(S, T) \leq \pi$ である。Pの周りのすべての線セグメントについて見たとき， $f(S, T)$ の最大値をとる線セグメントを連続と判断し，他の線セグメントをPから分離する。図4ではA-Cの組が連続と判断され，線セグメントBをPから分離する。

(8) 左画像において，ライン番号の小さい方から大きい方へと個葉の先端を探索する。先端の認識は，「連結点であり，上下どちらかのライン上の点とは連結しないが，他の側では少なくとも2ライン異なる点まで連結する点」によって行う。先端として認識する点の例を図5に示す。

(9) 右画像同一ライン（エビポーラ線）上で個葉の先端の探索を行ない，対応づけを行う(図2)。高さの範囲から限定できる部分について行う。先端に相当する点が見つかり仮定1)に基づき，これを対応点と決定する。同一ライン上に個葉の先端が存在しないときには，誤差を考慮して上下数画素まで探索する。

(10) 左右画像の対応した点と連結する2つの線セグメント各点の対応付けを行う。すでに決定された対応点と連結する線セグメント上にあり，しかも左右画像において，同一ラインにある点を次々に対応点として決めていく。対応点が決まった線セグメント上の点は，探索から除く。左右どちらかの追跡中の線セグメントが途切れたり，ラインが小さくなる方へが延びて行く時や高さが高くなる傾向を持つ（個葉の先より茎に近

図1 分岐点の処理

図2 葉の先端の認識とそれに続く輪郭線追跡による対応点の決定

図3 葉エッジマッチング法のアルゴリズム

図4 分岐点の処理例

図5 認識される先端の例

左画像

右画像

写真1 水稻部分の抽出

左画像

右画像

写真2 葉の輪郭線の細線化

写真3 水稻各部分の高さ

い方が高い) 時には追跡を止め、再び左画像のライン番号の小さいラインから探索を始める。

今度は逆にライン番号の大きい方から小さい方へ探索をし、まだ対応されてない点について、同様に対応点の決定を行う。

(11) 局所的なノイズなどによって輪郭が途切れる場合を考えて、個葉の先端に相当しない点を起点に持つエッジについても対応点の探索、決定を行う。

(12) (2)で水稻部分に分類された各画素について、既に高さが決定している個葉輪郭線上にある画素の内、最も近いものの高さをその高さとして与える。

4. 実際の画像による実験

4-1 写真撮影

東京大学農学部構内のライシメータで水稻(コシヒカリ)を栽培した。株と株の間隔は、30cm×30cmとした。生育期間中に、35mm一般カメラ(非計測用カメラ、レンズ焦点距離28mm)によって鉛直方向からの写真撮影を行なった(図6)。被写体までの距離H=約2.8m、基線長B=約0.7m、基線比約1/4とした。基準点は、上段8点、下段8点、計16点を、撮影対象の周りを囲むようにして設けた。水稻の生長に伴い基準点の位置を変えた。基準点の地上座標を、これらを写し込む1組の写真を取る度に、セオドライト、レーザーレベルによる測量によって求めた。

写真撮影によって得た左右写真はデジタル的に処理するため、スキャナーでデジタル画像化した。1画素が写真フィルム上の0.017mmに相当するようにした。基準点の画像座標は人間がモニター上でより読みとる。

4-2 標定計算

標定計算は自作のプログラムを用いた。このプログラムにおいては6つの外部標定要素の他に主点の位置ずれ、放射方向歪曲収差によるレンズディストーション、フィルムの平面度の歪みといった11の内部標定要素も考慮した¹⁴⁾。

作成した標定要素計算プログラムの検証には、基準点の他4点の検証点を設けた6月25日撮影の画像を用いた。ただしこの検証では、1画素が写真フィルム上の0.068mmに相当するようにした。カメラの焦点距離 $f=28\text{mm}$ と座標測定精度 $\sigma_p=0.068\text{mm}$ を式(2)、(3)に

代入して平面位置精度 σ_{xy} 、奥行き精度 σ_z を求めると次のようになる。

$$\sigma_{xy} = (H/f) \cdot \sigma_p = 6.8\text{mm} \quad (2)$$

$$\sigma_z = (H/f) \cdot (H/B) \cdot \sigma_p = 27.2\text{mm} \quad (3)$$

表1に6月25日撮影した画像中の検証点、基準点における誤差の評価を示す。検証点における最小二乗誤差と式(2)、(3)による精度はほぼ等しい。このことから作成した標定計算プログラムは有効であるといえる。

各写真の解析では精度を高めるために、スキャナーの座標測定精度を4倍に高め、0.017mmとした。標定計算における基準点平均二乗誤差を表2に示す。地上座標誤差は、X、Y、Z成分を順に示す。画像上誤差が座標測定精度を高める前の結果に反し、1画素より小さくなっているのは、画像が十分鮮明でなかったことによると考えられる。

4-3 マッチング状況の評価

6月25日と7月16日の写真画像を用いて本手法の実験を行った。6月25日の処理の様子は写真1、写真2に既に示した。

各画像中の1株についてのマッチング状況を表3に示す。原画像において実際の対応点を求めるのは極めて困難である。そこで、輪郭線に注目した目視によって得た、細線化画像における対応と本手法によって得た対応とを比較した。これらが異なる場合は、誤って対応した点として数えた。細線化画像における対応は厳密には、原画像における対応と異なるため、表3で正しくマッチングされた点としているものも微妙に誤差を含む。この誤差はデジタル化、標定計算、輪郭線抽出に伴うものである。ただし、ここで誤って対応した点としたものの誤差に比べて、はるかに小さい。

表3によると、マッチングの候補点の内約7割がマッチングされた。6月25日の画像ではその内の約9割、7月16日の画像では約8割が、細線化画像との比較において、正しくマッチングされている。候補点の内、マッチングされなかった点が存在するのは、隠蔽部分の影響や輪郭線抽出に伴う誤差によるものと考えられる。対応点を誤った主な原因は、輪郭線の追跡の途切れであった。6月25日より7月16日の方が誤ってマッチングされた点数が多いのは、個葉と個葉が重なる部分の割合が大きくなるためであると考えられる。

図6 撮影方法

表1 標定計算の誤差の評価

	X成分	Y成分	Z成分
基準点平均二乗誤差	3.7	3.2	10.8
検証点平均二乗誤差	5.8	7.7	24.8
デフォーカ化より予想される誤差	6.8	6.8	27.2

(単位: mm)

表2 標定計算における基準点の平均二乗誤差

		6月25日	7月16日
外部標定要素のみ (画素数)	左画像	2.88	2.76
	右画像	3.25	2.93
外部および内部標定要素 (画素数)	左画像	2.39	2.31
	右画像	2.17	2.24
地上座標 (mm)		(5.8, 4.7, 14.4)	(5.4, 6.4, 15.0)

表3 マッチングの誤差

	6月25日	7月16日
画像のサイズ (画素×画素)	200×370	400×340
マッチングに用いた点数	1543	4075
マッチングされた点数	1063	3193
誤ってマッチングされた点数	145	668

図7 計算による葉輪郭線の投影図

表4 各株の最高位点における高さ算出の誤差 (6月25日)

	実測値	計算値	誤差
a	420	443	-23
b	370	400	-30
c	420	454	-34
d	495	487	8
e	475	438	37
f	425	458	-33
g	382	372	10
h	430	420	10
i	415	466	-51

(単位: mm)

また、各株の高さの実測値と計算値との差を表4に示す。各株で最も高い位置にある個葉の先端の高さをものさしで測り、実測値とした。また、高さを測った個葉の先端に相当する左画像上画素において、本手法で得た高さを計算値とした。これによると3次元座標算出が正確に行われているといえる。

偏位修正済み左画像上で、本手法によって得た6月25日水稻各部分の高さを表したものを写真3に示す。

さらに、対応点の得られた各画素に相当する3次元

座標を Y-Z 平面, X-Z 平面に投影したものを図 7 に示す。

5. 結論と課題

5-1 結 論

水稻などの植物のステレオ画像のマッチングは難しいといわれていたが、まずそれを行う際の問題点を整理した。既往のステレオ画像マッチングは、画像の前処理、用いる点の選択、相似性の評価、連続性の評価、画像の再構築からなる。これらのうち相似性の評価を水稻鉛直画像全体について行うのは困難であり、また不連続部分が多く存在するために、その認識が必要であることを示した。

このことを考慮して、新しく葉エッジマッチング法を提案した。このアルゴリズムは個葉の先端の対応と、それに続く個葉の輪郭のエッジとしての認識によって、エピソード線を利用して対応点を求めるというものである。さらに、この手法を実際の画像に適用してマッチング状況を評価した。この結果、水稻のような複雑な形状を持つ対象のマッチングが可能になったと言える。この手法は、水稻ばかりでなく複雑な構造を持つ植物の生長解析、光合成能の評価のほか、リモートセンシングによる生育状態把握の研究に利用できると考えられる。

5-2 今後の課題

今後の課題として次の 3 点を挙げる。

1) 隠蔽部分の処理

実際には隠蔽部分の問題があり、仮定 2) が厳密には、成り立たない。この解決のためには、線図形の特徴に着目し、隠蔽部分を推定するアルゴリズムの開発が求められる。

2) 他の個葉の陰となる個葉の取扱い

本アルゴリズムでは他の個葉の陰となる個葉は取り扱っていない。

近赤外域の波長帯では個葉を透過する割合が高いため、赤外写真によれば、他の個葉の陰になる個葉の輪郭線もエッジとして抽出、マッチングすることもでき

ると考えられる。

3) 個葉の先端のマッチング精度の向上

本手法の精度は個葉の先端のマッチング精度によるところが大きい。これを向上させるためには一画素に相当する実際の大きさを十分小さくすること、また、それに応じた標定計算の精度を高めることが重要である。

なお、写真のディジタイズの際には堂満一成氏 (NHK) 作成のユーティリティプログラムを使わせて頂いた。ここに感謝致します。

(受付 1994.1.11, 受理 1994.5.20)

参 考 文 献

- 1) Asrar et al.: Theory and applications of optical remote sensing. (Wiley) pp. 142-143, 1989.
- 2) R.B. Mineni et al.: A Review of the Theory of Photon Transport in Leaf Canopies. Agr. and fore. Meteorol. 45, 8-23, 1989.
- 3) 井口征士ほか: 「三次元画像計測」(昭晃堂), p.13-14, 1990.
- 4) 大政謙次ほか: 「植物の計測と診断」(朝倉書店), p.165, 1990.
- 5) W.E.L. Grimson: Computational experiments with a feature based stereo algorithm. IEEE Trans. PAMI-7(1), 17-34, 1985.
- 6) 森忠次, 服部進, 内田修: 分割画像ごとの相関法による空中写真からの自動図化. 写真測量とリモートセンシング 24(1), 13-22, 1985.
- 7) R. Mohan, G. Medioni, R. Nevatia: Stereo error detection, correction, and evaluation. IEEE Trans. PAMI-14(2), 113-120, 1989.
- 8) S.T. Barnard, W.B. Thompson: Disparity analysis of images. IEEE Trans. PAMI-2(4), 333-340, 1980.
- 9) H. Maitre, W. Luo: Using models to improve stereo reconstruction. IEEE Trans. GE-14(2), 269-277, 1992.
- 10) S.J. Dickinson, A.P. Pentland, A. Rosenfield: 3-D shape recovery using distributed aspect matching. IEEE Trans. GE-14(2), 174-198, 1992.
- 11) 服部進, 森忠次: 計算機によるステレオマッチング手法と自動相関機の現況. 写真測量とリモートセンシング 25(1), pp.21, 1986.
- 12) 田村秀行ほか: 「コンピュータ画像処理入門」(総研出版), pp.122, 1985.
- 13) 前掲 12) pp.83, 1985.
- 14) 日本写真測量学会: 「解析写真測量」改訂版, 1986.