広角レンズを用いた直角2側面写真による密植わい性リンゴ樹の 樹形・葉群構造の計測

山本隆儀・伊藤博祐

山形大学農学部 997 鶴岡市若葉町

A Measurement of Tree Form and Canopy Structure of Densely Planted, Dwarf Apple Trees Using Two Sides Photographs Taken at Right Angle with Wide Angle Lenses

Takanori Yamamoto and Hirotsuke Itoh

Faculty of Agriculture, Yamagata University, Tsuruoka, Yamagata 997

Summary

Application tests of a system analyzing fruit tree forms and the canopy structures were conducted for densely planted, dwarf apple trees using lenses having focal lengths (FL) shorter than 50 mm and a fisheye lens.

1. Minimum distances possible to photograph various sizes of artificial subjects and an apple tree (central leader trained) were measured using 6 lenses ranging in focal length from 16 to 50 mm. With a cask strained fisheye lens (FL=16 mm), the distance could be reduced by one third or fourth of that in a standard lens (FL=50 mm).

2. The photographs taken by wide angle lenses had no distortion and gave successful results in the test by changing a parameter related to their perspective strengths (α).

3. Three methods to correct lens distortion were devised using data of a scale-picture in a film which was photographed by the fisheye lens (FL=16 mm); thus, their correction parameters were obtained. Outputs from the system with a subroutine program to diminish the effects of the distortion were compared among 3 methods. The results by the best method was comparable with that from another lens but different from the other two methods.

4. Using different lens angles, photographs of densely planted apple trees a) having various heights and widths, b) taken at different distances, and c) in orchards with several combinations of row and tree spaces were analyzed geometrically.

5. Our analysis reveal that system was applicable to densely planted, dwarf apple trees using super wide angle/ cask strained fisheye lenses.

緒 言

果樹の樹形や葉群構造の調査は、樹冠内光環境および樹体の光合成に関する研究においては欠かすことができないが (Charles-Edwards・Thorpe, 1976; Ferguson, 1960; Green・Gerber, 1969; Heinicke, 1969; 平野・菊池, 1989; Kappelら, 1983; Kikuchiら, 1994; Palmer・Jackson, 1977; Sucklingら, 1975; Verheij・Verner, 1973), その際葉面積指数や樹形の立体的把握などの効率的計測が必要とされる。樹形

や葉群構造および植物生態学的特性値の計測のためには現場で三次元グリッドを組み、枝の種類の記載や葉数や枝の分岐点の3次元座標の計測を手作業で行うことになるが、樹が大きいかもあって調査に長時間を要し、所用労力も多く (平野, 1972; Kikuchi, 1974), 多数の樹を用いて多くの項目を調査することは困難であった。筆者らは落葉後せん定前の地上部全枝の直角2側面写真を用いて上記の多数の項目を比較的容易に解析する「果樹の樹形・葉群構造簡易解析システム」(以下、「システム」と記す)を作成し (山本・畠, 1991; 山本・山口, 1989), このシステムからの葉量

の三次元分布データを樹冠内光環境、樹体光合成および果実生産性の解析に活用した（山本，1988；山本ら，1992，1993；山本・高野，1994）。本システムの使用レンズは標準レンズであるため，その対象は疎植果樹園に限定され，密植果樹園には適用できない．近年，わい化栽培による密植果樹園が増えているので，焦点距離のかなり短いレンズにより密植果樹園内の写真撮影が可能かどうか，その写真が本システム内で正常に使用できるかどうかについて検討を要する．そこで，本報は密植わい性リンゴ樹を標準および5種類の広角レンズを用いて撮影した直角2側面写真の枝座標読取方法，レンズの種類と枝座標読取方法の違いがシステム出力結果に及ぼす影響，および，栽植距離と撮影条件との関係について検討した．

材料および方法

1. 2側面写真の撮影方法

対象樹の主幹付近に3脚を用いてポールを垂直に立て（第1図上），人間の目の高さに目印を書き込み，直角2側面写真に共通な中心標識とした．2本の角材を直角に貼り合わせて作製したかぎ形（以下，「かぎ形」と記す）をこのポールの直下の地面に置き，気泡管（エビス社製，ハンディレベル2，AL-10）を用いて水平にした．かぎ形1辺の向く方向を磁針により32方角の精度で計測し，解析最終段階における樹列の方向に対応する座標系への変換パラメータとした．

ポールとカメラとの間の距離を測定するため，かぎ形の両辺の延長方向に5 cm 間隔に目盛をつけた鉄製の直パイプを水平に置き，2側面写真の撮影が終了するまでかぎ形，ポールおよび直パイプにはいっさい手を触れずにおいた．直パイプの真上にまたがるように撮影用3脚1台を置き，1眼レフカメラを取り付けて樹体全体が撮影でき，かつ，ポール上の中心標識が同一カメラのファインダーの焦点合わせ部分に来るように3脚の位置，高さおよびカメラの光軸方向を調整した．

3脚からいったんカメラを取り外し，カメラ取り付け台を原点として同取り付け台の傾きを地上座標系の2軸（撮影方向をZ軸，Z軸に垂直でかつ水平方向をX軸とした場合の2軸）にできるだけ平行になるように上記気泡管で調整した．再びカメラを取り付け，カメラ本体の平坦部でもう一度気泡管により2軸平行を確認あるいは微調整した後にポール上の中心標識が焦点合わせの中心に来るように3脚の高さを調節した．撮影後レンズ先端部とシャッタースピード表示環の間の中間点から糸で吊した錘を下げ，直パイプの目盛を読

Fig. 1. Upper : A diagram showing how to photograph 2 sides of an apple tree. A camera was set as follows : the photographic coordinates and the optic axis were as parallel as possible to the horizon and the lens aimed at a central mark on a pole near the trunk. The distance between the pole and a plumb bob from the lens was measured by a scale of an iron pipe. Lower : A diagram showing, using ellipses having a row space (a) as the major axis and a tree space (b) as the minor axis, of a relationship between a possible distance (R_{min} to R_{max}) for 2 sides photographs of a dwarf tree planted densely in an apple orchard. L_{max1} and L_{max2} indicate the maximum and possible length to photograph from the S point and the L point, respectively. θ indicates angle of field of a lens.

み取ってポールの中心標識とレンズとの間の距離とみなした．

撮影は汎用1眼レフカメラ（オリンパス光学株式会社製，OM 40）1台を用い，レンズはいずれもオリンパス光学株式会社製で，焦点距離 50 mm 標準レンズ，

と 35 mm 広角レンズ (S ズイコーオートズーム, $F=4$), 28 mm 広角レンズ (ズイコーオート W, $F=2.8$), 24 mm 広角レンズ (ズイコーオート W, $F=2.8$), 18 mm 広角レンズ (ズイコーオート W, $F=3.5$) および 16 mm 広角 (魚眼) レンズ (ズイコーオートフィッシュアイ, $F=3.5$), 合計 6 種類のレンズを用いた。16 mm 広角レンズは樽形歪曲魚眼レンズで、通常の円形魚眼レンズと異なり、画像の中心部分の歪みは小さいものの、周辺部において急に歪むことにより画角 180 度が実現され、かつ、撮影の主目的たる被写体の画像の自然さがある程度保たれる。

レンズの画角 (θ) は(1)および(2)式で計算される (山本, 1983)。

$$\theta = 2 \tan^{-1}(\alpha) \quad (1)$$

$$\alpha = W / (2 FL) \quad (2)$$

ただし、 W はフィルムの幅 (36 mm×24 mm フィルムでは 36 mm), FL は焦点距離, α は透視の強さである。しかし、カタログ表示の画角 (θ') はカタログ表示の FL を用いて(1)式および(2)式から計算される θ よりも約 7~10 度大きかった。薄型 1 枚レンズと異なり、カメラ用レンズは厚型レンズで、数枚で構成されるシステムレンズのためであると考え。本実験においては、この 2 個の画角 (θ あるいは θ') を(1)式に代入し逆算される 2 個の透視の強さ (α あるいは α') を用いてシステム運用を行った。

2. 撮影最短距離の調査

6 種類のレンズによる撮影可能な最短距離を調査する目的で、鉄パイプを組み合わせて樹高と樹幅を識別できるようにした物体を作製した。すなわち、カメラの撮影方向に垂直になるように「干」の字形に鉄パイプを組み合せ、中心部分から撮影方向とその逆方向に鉄パイプを水平に伸ばすように取り付けた。そして、鉄パイプ表面の各所に高さ、幅および奥行きを示すための標識をつけた。高さ:幅 (奥行き) の比率は、4.4 m:2.9 m, 3.9 m:2.6 m, 3.0 m:2.0 m, 2.4 m:1.6 m, および 2.0 m:1.3 m とした。人間の眼の高さにカメラを置いて、この比率と大きさに対応した標識がフィルム内にほぼいっぱい撮影できる距離 (被写体中心からの距離) を測定し、標準レンズを対照とした各レンズによる撮影最短距離の短縮効果を比較した。なお、撮影距離は「干」の字形の最上部とともにカメラ方向の手前にも伸びる鉄パイプ最上部をも撮影できる範囲とした。

3. 同一樹の各レンズによる撮影写真を用いた本システム運用比較試験およびリンゴ園地における撮影条件の調査

落葉後、せん定せずにしておいた 6 年生の M. 26 台主幹形仕立ての「王林」1 樹を 1993 年 12 月に根元から切断し、枯死させて保存し、翌春にその直角 2 側面写真を 6 種類のレンズにより撮影し、約 6.7 倍に印画紙に焼き付けた。デジタイザ (NEC, パーソナルタブレット) の読取領域軸と写真に写ったポールの立つ方向が正しく平行関係になるように印画紙を板上に貼り、各枝の分岐点、枝の端点およびこの 2 点にはさまれた枝上の 5 点 (分割点) の写真座標値を読み取り、システムへ入力して出力結果を比較した。なお、上記のデジタイザによる作業 (山本・山口, 1989) には、枝の種類の判別、ボールペン式座標指示器 (スタイラスペン) による枝をなぞる作業あるいは読取り洩れの多少などの点で個人差が生じるので、デジタイザ作業の練習を約 5 日間行ったうえで、6 組の写真すべてを同一の測定者が読み取った。樽形歪曲 16 mm 魚眼レンズによる写真座標にはレンズ歪みによる影響が大きく生じたので、このレンズによりフィルム中央部に撮影した物差の写真画像およびこの時の撮影距離とを用いて、歪み修正方法について解析し、修正方法のちがいによるシステム出力結果を比較検討した。

山形大学農学部付属農場 (高坂農場) のリンゴ園内のわい性台樹列 (5 m×2 m) において種々の高さや幅を有した樹を対象に、園地内で撮影できた樹の高さおよび幅と撮影距離との間の関係を調査した。また、密植果樹園の写真には隣接樹の枝が対象樹とほぼ同等に濃く写り、デジタイザによる枝座標の読取りが困難となるため、ベニヤ板、白色の木綿製布、緑色と青色のポリエステル製布の合計 4 種の撮影用背景資材 (バック) を用い、主幹形仕立てのための架線 (トレリス) のある場合と無い場合に分けて撮影し、実際の園地における撮影条件を検討した。

4. 種々の栽植距離における撮影可能距離および撮影可能樹高 (あるいは樹幅) の理論的計算

果樹の植え付け方式のうち長方形植えに限定して、楕円形に枝がほぼ伸びた状態を想定し、長軸長 = a および短軸長 = b からなる楕円形を配列した図をえがき (第 1 図下), 樹列間距離 (a) と樹間距離 (b) の比率 ($a:b$) を 11 段階に設定し、 a が 0.5 m から 10 m までの範囲について、レンズの有する画角と

に、撮影可能最長距離 (Rmax), 同最短距離 (Rmin) および撮影可能最大樹高 (あるいは樹幅) を計算した。

結果および考察

1. 4種類のレンズにより撮影した写真画像の特徴

第2図には4種類のレンズにより撮影した‘王林’1樹の2側面写真を組にして示した。各レンズとも、XY写真は同一の方位角度から撮影し、ZY写真はXY写真の場合より90度反時計針方向に回転した角度から撮影したが、樹の背景にある建物の直線状の陰影の曲り具合で判断できるように、樽形歪曲16mm魚眼レンズの場合(第2図G, H)、画像が周辺部で強く歪んだ。しかし、この周辺部の歪みは焦点距離が28mmおよび18mmの広角レンズによる写真(第2図C, DおよびE, F)にはほとんど見られず、標準レンズによる写真(第2図A, B)と同様に建物の陰影は直線状であった。なお、第2図に示さなかった焦点距離が35mmおよび24mmの写真でも同様であった。こ

のことから、樽形歪曲16mm魚眼レンズ以外の4種の広角レンズによる写真では中心投影の原理(山本, 1983)が保たれ、フィルムに写る大きさは距離に反比例するものと考えられ、本システムの中味を変更することなく、各レンズに特有な透視の強さ(α)のみ変更して、システムへの入力パラメータとすればよいものと考えられる。一方、樽形歪曲16mm魚眼レンズによる写真(第2図G, H)ではこのレンズ特有の歪みのため撮影距離と大きさとの間の反比例関係は成立しない。デジタイザによりこの写真から読み取った枝の平面座標データを樽形歪曲していないレンズで撮影したものと想定した場合のデータに修正する必要がある、この計算を自動的に行うサブルーチンプログラムの追加が必要である。

2. 各レンズによる撮影距離の短縮効果

6種類のレンズによる5段階の異なる大きさの物体の撮影可能距離(第1表)は、標準レンズに対して、焦点距離35mm広角レンズの約70%から、18mm広

Fig. 2. Photographs at 2 angles of an 'Ohirin' apple tree using several lenses with different focal lengths (FL). A, B : standard lens (FL=50 mm). C, D : wide angle lens (FL=28 mm). E, F : super wide angle lens (FL=18 mm). G, H : cask strained fisheye lens (FL=16 mm).

Table 1. Minimum distances, m, between the camera equipped with lenses of different focal lengths and subjects of several sizes made with iron pipes.

Sizes of subjects Height×Width×Depth (m×m×m)	Focal length					
	16mm (Fisheye)	18mm	24mm	28mm	35mm	50mm
4.40×2.92×2.92	2.15	3.72	4.70	5.18	6.33	9.05
3.90×2.60×2.60	1.93	3.05	3.65	4.47	5.60	7.90
3.00×2.00×2.00	1.52	2.03	2.63	3.13	3.94	5.22
2.40×1.60×1.60	1.26	1.67	2.20	2.60	3.03	4.04
2.00×1.32×1.32	1.06	1.50	1.75	1.97	2.55	3.56

角レンズの約40%まで短縮された。樽形歪曲16mm魚眼レンズによる撮影距離は18mm広角レンズよりも一段と短く、標準レンズに対する割合は5段階の大きさの被写体を通じて約23%から約30%の範囲にあった(第1表)。なお、上記の測定結果は縦長の被写体をカメラを縦にして36mmフィルムに撮影した(以下、「縦撮り」と記す)場合の値である。ただし、縦撮りでは人間の眼の高さの位置にカメラを置いているため、フィルムの長辺に沿った下半分の多くが地面で占められるのに対し、横長の被写体をカメラを横にして撮影する(以下、「横撮り」と記す)場合には横方向の長辺の中央にカメラを設定できるので、縦撮りの場合よりフィルム内の無駄が無く、第1表の撮影距離より短くなる。

3. 樽形歪曲16mm魚眼レンズ写真画像の歪み修正パラメータ

樽形歪曲16mm魚眼レンズによる写真(第2図G, H)と同一の被写体が、樽形歪曲を有しないと想定された16mmレンズ(以下、「非樽形16mmレンズ」と記す)ではどのように写るかについて、以下に示す1), 2) および3) の3個の仮定に立って推計し、これに基づく修正方法を検討した。すなわち、樽形歪曲16mm魚眼レンズにより物差を撮影し、これを原フィルムとし、1) 原フィルムの中心部分の物差1目盛の長さが非樽形16mmレンズ撮影フィルムの場合には全面に均等分布すると見なして平面座標を計算し、これと原フィルムの平面座標との間の関係を求める。原フィルム中心点の物差1目盛のフィルム上の長さをkmmとし、同フィルム中心を0(原点)とした場合の任意の目盛線(P点)のy座標をYmmおよび目盛数をqとすれば、非樽形16mmレンズで撮影したと想定したフィルム上のP点のy座標(Y'mm)はkqmmに等しいと考えられる(x座標についても同様)。同様な関係を36mmフィルム内に写っている広

Fig. 3. Relationships between distances from the center in a film-picture photographed by the cask strained fisheye lens (FL=16 mm) and that photographed by a non-fisheye lens with same focal length according to the 3 correcting methods (1), 2) and 3)).

範囲の目盛線について調査し、YとY'の間の関係曲線式(変換式)を算出し(第3図の1)), この式中のパラメータを用いてシステム稼働の初期段階でデータの自動変換を行う。

2) 物差を撮影した際の撮影距離(d mm)を記憶しておき、この距離から非樽形16mmレンズで撮影したと想定した場合のフィルム上に写る目盛線の平面座標を中心投影の原理を用いて計算し、これと原フィルム上の目盛線の平面座標との間の関係を求める。1)の場合と同様に、原フィルム内に写っている任意の目盛線(P点)のy座標をY mm, その目盛線(1 mm長の目盛として)をqとし、このP点を非樽形レン

ズで撮影すると想定し、その y 座標を Y' mm で示せば $Y' = 16 q/d$ になる。同様な関係を広範囲の目盛線について調査し、 Y と Y' の間の関係式を算出した (第3図の2))。

3) カタログ表示のレンズ画角は(1)および(2)式により計算される画角より約7~10度大きかったので、中心投影の原理の中で使う画角を10度大きくした。その他の点は2)の方法と同じである (第3図の3))。

第3図の横軸は上記の原フィルムの中心から全放射方向に取った距離であり、縦軸は非歪曲16 mm レンズで撮影すると想定したフィルム上の距離 (修正後距離) である。原フィルム中心からの距離の増大に伴い、修正後距離の推定曲線は3本とも滑らかな増大曲線であったが、3次までのべき多項式のパラメータ (偏回帰係数) は互いに異なった (第3図)。また、第3図からも判読できるように、魚眼のため画角が180度で写った原フィルムの画像を焦点距離16 mmの広角レンズとしての110度前後の画角の画像に変換する関係から、原フィルムの中心点から約13~14 mm 以上離れ

た所に写った点は、修正後のフィルムの中心点からフィルム幅半分の長さ以上離れてしまう。これを避けるためには、樽形歪曲16 mm 魚眼レンズで撮影する際は、ファインダーの視野の長辺いっぱいには撮影せず、約78%の範囲に収めて撮影すればよい。

4. 写真解析による樹形構造

斜めの太い枝から細い枝が多数発生する樹冠の写真 (2側面写真) であるから、1方向の写真には写るが、他方向の写真には写らない枝が存在する。したがって、各写真の枝のデータ群の中には互いに相手のいないデータがそれぞれ存在し、本システムのプログラムにおける枝の同一性判定ルーチンの最終段階で、残ったデータが強制的に結合させられ、異常な3次元座標値を有した枝を作図出力する。通常システム運用では、これをできるだけ除外するトラップを作動させるので出力結果へのこのような枝の出現は最小限になる。ただし、ここでは広角レンズなどの影響の現れ方やその修正方法を検討する目的から上記のトラップを作動させずに出力させた樹形図を示した (第4図)。第4図

Fig. 4. Printer outputs of tree form without trapping errors from the system using photographs by 6 lenses with different focal lengths (A : 50 mm, B : 35 mm, C : 28 mm, D : 24 mm, E : 18 mm and F : 16 mm, cask strained fisheye) and that corrected by methods 1), 2) and 3) using the photographs by the cask strained fisheye lens (G, H and I), respectively, at the same side angle. Arrows indicate an identical lateral branch. Vertical bars indicate 50 cm.

はXY写真撮影方向から見た側面樹形図のプリンタ出力結果である。樹の周辺部に孤立した上記の異常出力枝を除けば、標準レンズ（第4図A）と、35 mm, 28 mm, 24 mm および 18 mm の焦点距離の広角のレンズを用いた樹形の出力結果（第4図B, C, D および E）のいずれも太い枝の上下関係、水平位置の関係および形状はほぼ似ていた。しかし、樽形歪曲 16 mm 魚眼レンズ写真に対する修正処理を施さなかった場合には、枝の形、長さ、傾きおよび位置の点で上記のものと異なった（第4図F）。第4図は縮小されているため細い枝の比較は困難であるが、たとえば矢印で示す1本の側枝の位置は第4図A～Eのそれと大きく異なった。第4図のG, H および I は、それぞれ、樽形歪曲の修正方法の1), 2) および 3) に対応した出力結果である。H および I では上記の矢印で示す側枝の位置がFのそれと似ていたが; G ではA～Eの方に似ていた。樹形図の作図以外のいくつかの計測項目について3個の修正方法からの出力値と50 mm, 35 mm, 28 mm, 24 mm および 18 mm の5個のレンズからの出力値の平均とを比較すると（第2表）、長さに関連する項目値（樹高、枝長）の多くで1)の方法と2)あるいは3)の方法との間に差が認められ、また、5個のレンズからの平均値に対して1)の方法からの出力値が最も近かった。新梢数、2年生枝数あるいは葉面積指数（LAI）の差は全体を通じて小さかった。以上の傾向から、3つの修正方法のうち1)が最も良好であると判断された。そして、これより以下の結果は1)

の修正方法に限定して示した。

全体を通じてカタログ表示の画角から逆算した透視の強さを用いた結果より、カタログ表示の焦点距離から計算した透視の強さを用いた方が結果は良好であったので、本報の樹形および樹冠形の出力図はすべて後者の場合に限定して示した。

上記のトラップを作用させた場合の樹冠形および樹形の作図結果をXY写真撮影方向から見た側面樹冠形図（第5図上）、上面から見た樹形図（第5図中）およびZY写真撮影方向から見た側面樹形図（第5図下）に示した。また、第3表に立体図や分布図以外の本システムの計測項目について、6種のレンズからの出力値の平均値に対する、各レンズからの出力値の偏差率（%）を示した。大部分の項目の偏差率が±数%内にあった。一部の10%を越える偏差率の発生原因は写真測量法上の誤差やシステムに特有な誤差によるものであろうが、レンズの画角が大きく変わるたびに死角に入る枝が入れ替わることの影響も考えられる。

なお、焦点距離が同じでもレンズにより性能が異なることも考えられるが、今回の実験では同一焦点距離のレンズを各1台ずつ用いた。

5. 栽植距離、レンズの画角、撮影可能距離および撮影可能な樹幅（樹高）との間の相互関係

撮影のための足場確保にとって最も有利な撮影方向は、同一列間内における2側面撮影では樹列方向に対して45度と135度の2方向の、対象樹両側の列間に

Table 2. Several biometrical outputs without trapping errors of a 'Ohrin' tree from the system using image data by 3 methods to correct the strain of a cask strained fisheye lens (FL=16mm) and the mean values of the other 5 lenses.

Biometrical items	Output (Correcting method)			Mean of outputs of 5 lenses	Sd ^z
	1)	2)	3)		
Tree height (cm)	308	352	374	320.2	21.7
LAI	3.65	3.47	3.45	3.568	0.211
Total length ^y					
Trunk (cm)	164.3	180.9	184.0	177.2	10.7
LB (cm)	1009	1117	1132	1035.2	8.9
BB (cm)	1910	2069	2196	1914.8	162.9
Shoots (cm)	7027	7653	7711	7131.8	183.8
Total number					
BB	80	78	80	77.6	6.3
Shoots	388	390	388	364.0	18.6

^z Standard deviation of outputs of the 5 lenses.

^y LB: Lateral branches, BB: Biennial branches.

Table 3. Percent deviation of several biometrical outputs of a 'Ohrin' tree using each lens to the mean of that using 6 lenses from the system with the trapping errors.

Biometrical items	Deviations (%) (Focal length)						Mean
	16mm	18mm	24mm	28mm	35mm	50mm	
Tree height	- 3.79	13.82	- 3.79	- 5.06	2.53	- 3.79	316cm
E-W width ^z	-12.09	2.56	5.49	- 1.90	5.49	- 0.39	273cm
S-N width ^z	- 9.44	5.66	- 3.40	1.88	8.67	- 3.40	265cm
LAI	15.32	- 7.78	- 5.65	- 1.78	-1.68	1.61	4.09
EUV ^y	-21.73	7.45	9.54	10.93	2.36	- 5.75	4.31m ³
Total length ^x							
Trunk	- 5.57	6.89	2.75	0.57	-0.34	- 4.25	174cm
FSB+SSB	- 9.05	2.74	1.21	4.34	2.28	- 1.53	780cm
LB	- 3.88	6.47	- 1.77	0.81	-1.10	- 0.52	1043cm
BB	- 7.70	3.81	10.51	- 0.42	3.71	- 9.91	1727cm
Shoots	- 4.07	6.66	0.14	1.43	-2.05	- 1.85	6834cm
Total number ^x							
BB	0.95	- 3.13	13.23	2.31	-1.77	-11.32	73
Shoots	3.41	1.51	- 7.58	- 1.24	-1.24	5.10	362

^z E: East, W: West, S: South, N: North.^y External unavailable volume.^x FSB: First scaffold branches, SSB: Secondary scaffold branches, LB: Lateral branches, BB: Biennial branches.

またがる撮影では樹列方向に対して45度および315度の2方向となる。ここでは前者について論ずる。対象樹の楕円中心点をO、長軸方向の右側極点をPとし、Oを通り樹列方向に対して45度の直線が隣列樹の楕円に交差する点をしとする(第1図下)。線分OL上に点Sが存在し、 $\angle OSP$ が画角(θ)の半分になる場合、 $OS \leq OL$ ならば、OLが撮影最長距離(Rmax)、OSが撮影最短距離(Rmin)となり、RmaxとRminの間で撮影が可能である。OS>OLであれば撮影不可能になる。撮影可能な場合、線分OS(あるいは線分OL)に対する点Oを通る垂線が、画角(θ)を挟角として左右等しい角度で点Sあるいは点しから下ろされた2辺で切り取られる長さがフィルムに写る最大長であり、それぞれLmax1あるいはLmax2とする。上記のOLとOSの長さあるいは切り取られた垂線の長さなどを第6図に画角ごと表した。28mm広角レンズ(画角=75°, 第6図A)ではa/bの値が10/7.5より大きい時、および24mm広角レンズ(画角=84°, 第6図B)ではa/bの値が10/6より大きい時は撮影不可能となる(図中未表示)。また、35mm広角レンズと50mm標準レンズでは、第6図に示したaとbの範囲では、いずれも撮影不可能であった。なお、樽形歪曲16mm魚眼レンズでは画角=180°となりLmax1とLmax2が図中に表示できなかったの

で画角=175°の場合として示した(第6図D)。

樹列間距離(a)あるいはこれと樹間距離(b)との比(a/b)と撮影可能距離(RminあるいはRmax)との間の関係は第6図から直読できる。撮影可能な最大樹高あるいは最大樹幅の判定は少し複雑であるが、フィルムに写る最大長(Lmax1あるいはLmax2)から対象樹の樹幅(W)と樹高(H)の比を用いて以下のように算出する。W/H>1のときはカメラは横撮り、W/H<1のときは縦撮りになる。この場合、W/H>3/2のときはLmax1(あるいはLmax2)がそのまま、また、2/3<W/H<1の範囲ではLmax1(あるいはLmax2)の2/3の長さが撮影可能最大樹幅となる。他方、1<W/H<3/2の範囲およびW/H<2/3の場合にはLmax1(あるいはLmax2)は撮影可能最大樹高を計算するためのパラメータにすぎない。なぜならば、カメラの高さが立った人間の眼の高さ(EH)に等しいとすれば、Lmax1(あるいはLmax2)/2+EHが撮影可能最大樹高となるからである。Lmax1(あるいはLmax2)/2-EHの分だけ対象樹が写らず、通常、地面のみになる。眼の高さが1.5mで4mの樹をフィルムいっぱい撮影しようとするれば、地面のみの部分の1mを加えた合計5mがLmax1(あるいはLmax2)になる。さらに、3で記したように樽形歪曲16mm魚眼レンズの際には、上記のことに加え、フィル

Fig. 5. Display outputs with trapping errors from the system using photographs by 6 lenses having different focal lengths (A : 50 mm, B : 35 mm, C : 28 mm, D : 24 mm, E : 18 mm and F : 16 mm cask strained fisheye with correction of 1). Upper : Tree crown forms with a side angle of view. Middle : Tree forms with the top angle of view. Lower : Tree forms with another side angle of view. Vertical bars indicate 50 cm.

Fig. 6. Calculated minimum distance to photograph a tree (R_{min} , a broken line), the maximum ones (R_{max} , solid lines) of several ratios (row space : tree space, namely, a : b), maximum length possible to photograph from each with R_{min} (L_{max1} , a broken line) and that with each R_{max} (L_{max2} , solid lines) against row spaces (a) in several angles of field of lens (A : 75°, B : 84°, C : 100° and D : 175°). Ratios of row space to tree space for 11 lines (a-k) are shown in the left part of the figure. Absence of solid line in A and B means that the photographing was impossible.

ム長辺 (36 mm) の約 78% 以内に対象樹を収め撮影することが必要となる。

これらのことを考慮すれば、樽形歪曲 16 mm 魚眼レンズ (第 6 図 D を参考) では密植園地でも撮影可能なことを、また、18 mm 広角レンズ (画角=100°, 第 6 図 C) でも撮影可能な園地が多くあることを示唆している。

第 7 図は 5 m × 2 m 植えの密植園地内の種々の大きさ (樹高および樹幅) の樹を調査した結果であり、樽形歪曲 16 mm 魚眼レンズで実際に撮影できた撮影距離 (横軸) と樹高 (あるいは樹幅, 縦軸) との関係を示している。樽形歪曲の修正の都合上、フィルム長辺 (36 mm) いっぱいに撮影せず、中心よりおよそ 78% 以内に収まるように撮影した時、樹高 > 最大樹幅の樹では○印で樹高を表記し、最大樹幅 > 樹高の樹では●印で最大樹幅を表記した。第 6 図の D (樽形歪曲 16 mm 魚眼レンズの場合) の樹列間距離 (横軸) が 5 m の座標と R_{min} の直線および R_{max} の (a) の直線直下部 (a : b = 10 : 4 のところ) とが交差する点の縦軸座標値は、それぞれ、約 1.8 m および約 3.6 m であった。すなわち、a : b = 5 : 2 の栽植距離で樹冠が楕円形に広がりきった状態では、最短撮影距離が約 1.8 m、

Fig. 7. Observed maximum distances (R_{max}) possible to photograph dwarf, densely planted apple trees (row space = 5 m, tree space = 2 m) having various tree heights (○) and tree widths (●).

最長撮影距離が約 3.6 mであることを理論的に示したものであるが、第 7 図の●印の横座標（実際の撮影距離）はこの範囲に収まった。○印は樹高>樹幅の樹で、撮影の邪魔になる横枝が少なかったために第 6 図の R_{min} =約 1.8 m より短いところで撮影できたことを示す。この調査園で 18 mm 広角レンズで撮影する場合、 R_{min} =約 3.3 m と R_{max} =約 3.8 m の間の撮影範囲が与えられるが（第 6 図 C）、第 7 図の実際に撮影できた距離（横座標）から判断すると、撮影のための足場確保は多くの樹で困難といえる。ただし、 $L_{max} 1$ と $L_{max} 2$ は約 8 m なので、被写体の大きさの制限は実質的に生じない。

バックに関しては、ベニヤ板、白色布のいずれも晴天下では枝の陰影が映り、デジタイザの判別作業が困難であった。逆光方向か、曇天日に撮影するのが良い。また、バックの色の効果は白黒写真の場合には顕著でなかった。

摘 要

「果樹の樹形・葉群構造簡易解析システム」を密植果樹園にも適用する目的で、標準レンズおよび焦点距離の異なる 5 種類の広角レンズにより撮影した樹体の 2 側面写真を用いて樹形構造の解析方法を検討した。

1. 鉄パイプで作製した被写体モデルや主幹形仕立てのリング樹について種々のレンズによる撮影試験を行ったところ、標準レンズに比較して樽形歪曲 16 mm 魚眼レンズは撮影可能距離を約 $1/3 \sim 1/4$ に短縮できた。

2. 焦点距離が 18 mm 以上の広角レンズにより撮影した写真には目立った歪みが認められなかったことから、透視の強さのみ変更することによりシステム運用が可能と考えられ、これらの写真からの枝のデータを用いてシステムを運用し、ほぼ良好な結果が得られる修正方法を明らかにした。

3. 樽形歪曲 16 mm 魚眼レンズにより撮影した物差の写真をもとに 3 個の歪曲修正方法を検討した。得られた修正パラメータを用いて同レンズにより撮影した樹体の写真についてシステムを運用したところ、このうち、1 つについてはほぼ良好な結果を得た。

4. 密植果樹園を想定して、樹列間距離と樹間距離との種々の組み合わせ、種々のレンズの画角、撮影可能な距離および樹の大きさ（幅と高さ）との間の関係を理論的に解析し、密植果樹園への上記システムの適用条件を明らかにした。

5. FL=18 mm の広角あるいは樽形歪曲 16 mm 魚

眼レンズを用いることにより、密植果樹園における本システムの運用が可能になった。

引用文献

- Charles-Edwards, D. A. and M. R. Thorpe. 1976. Interception of diffuse and direct-beam radiation by a hedgerow apple orchard. *Ann. Bot.* 40 : 603-613.
- Ferguson, J. H. A. 1960. A comparison of two planting system in orchards as regards the amount of radiation intercepted by the trees. *Netherland J. Agr. Sci.* 8 : 271-280.
- Green, B. A. and J. E. Gerber. 1969. Radiant energy distribution in citrus trees. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 90 : 77-85.
- Heinicke, D. R. 1969. The micro-climate of fruit trees. II. Foliage and light distribution patterns in apple trees. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 83 : 1-11.
- 平野 暁. 1972. カンキツの葉量とその分布. (第 8 報) 自然形樹の樹形と葉の空間分布モデル. 園学要旨. 昭 47 春:12-13.
- 平野 暁・菊池卓郎. 1989. 果樹の物質生産と収量. 増収技術の基礎理論. 農文協. 東京.
- Kappel, F., J. A. Flore and R. E. C. Layne. 1983. Characterization of the light micro-climate in four peach hedgerow canopies. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 108 : 102-105.
- Kikuchi, T. 1974. Growth and structure of the shoot system of apple trees as characterized by the frequency distribution of shoot lengths. *Bull. Fac. Agri. Hirosaki Univ.* 23 : 27-59.
- Kikuchi, T., Y. Shiozaki, T. Asada and O. Arakawa. 1994. Light and fruit distribution within a canopy of 'Fuji' apple trees trained to a traditional open-center system in Japan. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 62 : 761-768.
- Palmer, J. W. and J. E. Jackson. 1977. Seasonal light interception and canopy development in hedgerow and bed system apple orchard. *J. Appl. Ecol.* 14 : 539-549.
- Suckling, P. W., J. A. Danies and J. T. A. Procter. 1975. The transmission of global and photosynthetically active radiation within a dwarf apple orchard. *Can. J. Bot.* 53 : 1428-1441.
- Verheij, E. W. M. and F. L. J. A. Verner. 1973. Light studies in a spacing trial with apple on a dwarfing and a semi-dwarfing rootstock. *Scientia Hort.* 1 : 25-42.
- 山本隆儀. 1988. 果樹における葉面放射の樹冠内分布推定シミュレーションモデル. 山形大学紀要（農学）. 10 : 583-612.
- 山本隆儀・畠 良七. 1991. 果樹の樹形・葉群構造の季節的変化解析システム. 山形大学紀要（農学）. 11 : 343-373.
- 山本隆儀・石嶋幸夫・鈴木計恵子. 1992. 同一樹齢のカキ '平核無' の葉群構造, 日当たり及び果実生産性

- の同一園地内分布及びこれらに関する諸形質の相互関係. 山形大学紀要 (農学), 11 : 501-521.
- 山本隆儀・佐藤吉雄・舟生卓磨・石嶋幸夫・鈴木計恵子. 1993. カキ '平核無' 樹の推定純光合成速度および果実生産性との関係. 園学雑. 62 : 27-39.
- 山本隆儀・高野隆志. 1994. 同一樹齢のリンゴのマルバカイドウ台 'ふじ' の葉群構造, 日当たり及び果実生産性の同一園地内分布及びこれらに関する諸形質の相互関係. 山形大学紀要 (農学), 12 : 31-50.
- 山本隆儀・山口恵理. 1989. 果樹の樹形・葉群構造の簡易解析システム—二側面写真画像を用いた新システムの開発—. 山形大学紀要 (農学), 10 : 869-901.
- 山本 強. 1983. The 3 Dimensional Computer Graphics. p. 23-24. CQ 出版 KK. 東京.