

第4章 果樹園内の果実群の三次元位置計測に関する実験

4.1 目 的

前章で得られた簡易キャリブレーションによるスケール係数 α_d の適用性を調べるため、リンゴ園で収穫期の果実群を対象にステレオ視計測法による三次元位置の測定に関する実験を行った。なお、ステレオ画像の画像処理は、筆者らが開発した左右画像合成方式を一部改良して行ったので、その概要を以下に述べる。

4.2 左右画像合成による距離測定法

(1) 測定原理 2台のカメラ(L, R)が図4.1のように、直交座標XYZ軸上の原点Oを挟んで平行に置かれたステレオ視計測法の場合(X軸を両カメラのレンズ中心を通る線上, Y軸を垂直方向, Z軸をシステム視軸方向とする), 本手法では, 左右両カメラの共通視野空間内の断面がカメラの撮像面上に相似形で再現されると考える。

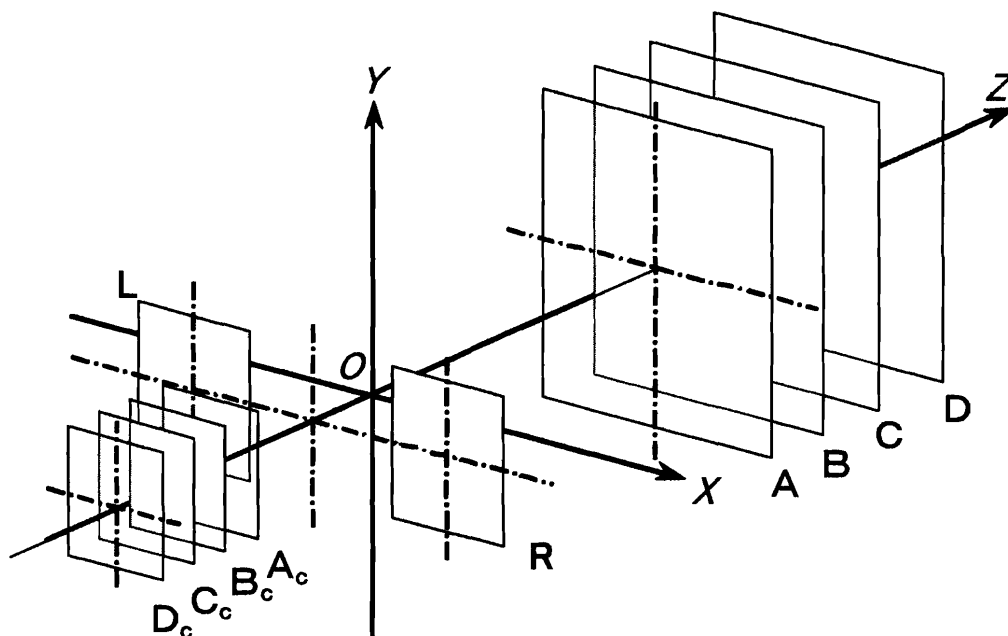


図4.1 左右画像合成方式によるステレオ視計測法の概念

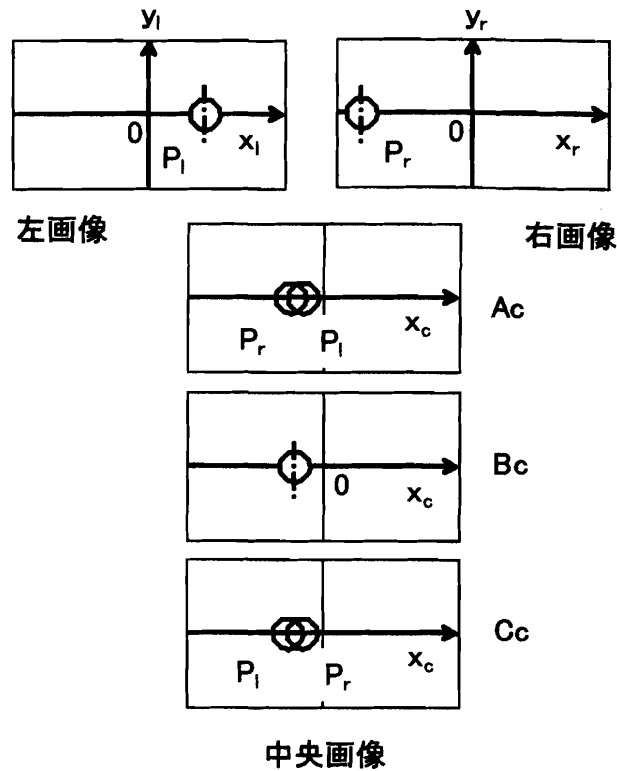


図4.2 中央画面における合成像の重なり状態

カメラ撮像面の中心を原点とする座標を (ξ, η) で表し、左右のカメラをそれぞれ添字 l, r で示すと、共通視野空間にある物体 P の座標 (X, Y, Z) は次式で求められる(単位は mm)。

$$\left. \begin{aligned} X &= (a/2) \cdot (\xi_l + \xi_r) / \Delta \xi \\ Y &= a \cdot \eta_l / \Delta \xi = a \cdot \eta_r / \Delta \xi \\ Z &= f \cdot a / \Delta \xi \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

$$\Delta \xi = \xi_l - \xi_r \quad (4.2)$$

ここで、 f は焦点距離 $[\text{mm}]$ 、 a は左右両カメラの光軸間隔 $[\text{mm}]$ 、 ξ_l, ξ_r は各撮像面上における P の投影点、 $\Delta \xi$ は撮像面上の視差 $[\text{mm}]$ 。上式より、 X, Y, Z は $\Delta \xi$ と反比例の関係にある。

空間座標の原点 O から P までの距離 L $[\text{mm}]$ は、式(4.1)の結果を用いて次式で算出される。

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (4.3)$$

次に、実際に画像処理の対象になる左右のモニタ画面上の座標 (x, y) と視差 s は、いずれも単位が画素で整数なので、以下の式で表される。

$$\left. \begin{aligned} x_l &= \alpha_d \cdot \xi_l, & x_r &= \alpha_d \cdot \xi_r \\ y_l &= \alpha_d \cdot \eta_l, & y_r &= \alpha_d \cdot \eta_r \\ s &= x_l - x_r = \alpha_d \cdot \Delta \xi \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

ただし、 α_d は撮像面に対するモニタ画面のスケール定数[画素/mm]で、3章で検討した結果から次式で表される。

$$\alpha_d = c_0 + c_1 \cdot x_c + c_2 \cdot x_c^2 + c_3 \cdot y_c + c_4/s + c_5/s^2 \quad (3.13)$$

以上より、ステレオ視計測法によって空間座標を算出する際に、式(4.1)で視差 s （撮像面では $\Delta \xi$ ）を用いるため、左画像の x_l （同 ξ_l ）に対応する x_r （同 ξ_r ）を右画像の中から探し出すことが必要になる。

左右のカメラの共通視野空間は、両カメラの光学的位置関係で一意に定まるので、同空間内で両カメラに対して同時に存在する断面は一つだけである。そこで、前述のようにその視野空間が両カメラに共通な断面群の配列で構成されていると考え、 P はそれらのいずれかの断面と交差するか、又はその近辺に存在することになる。断面群の配列を XY 平面に平行にとると、 P の三次元座標は、その共通断面群の中から P が存在する断面を探し出し、その断面上の位置を特定することによって得ることができる。この方法は、式(4.1)を用いるものの、 P に関する左右画像の対応づけが上述の断面に関する拘束条件のもとで行われる点で、従来の対応づけの方法と異なる。

本研究では、物体 P が交差する断面を探すため左右画像を中央で合成する「左右画像合成法」を採用する。これは、左右カメラにおける共通断面を、中央視点 C から XYZ 座標の原点 O を通して見る場合に相当する。中央合成画像の座標 (x_c, y_c) は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} x_c &= (x_l + x_r)/2 \\ y_c &= y_l = y_r \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

逆に、中央合成画像の座標を用いると、左右各画像の x 座標は、式(4.4)と(4.5)より

次のように表される.

$$\left. \begin{aligned} x_l &= x_c + s/2 \\ x_r &= x_c - s/2 \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

同様に, 空間内の P の座標は, 上式と式(4.1), (4.2), 及び(4.4)より次式で求められる.

$$\left. \begin{aligned} X &= a \cdot x_c / s \\ Y &= a \cdot y_c / s \\ Z &= \alpha_d \cdot f \cdot a / s \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

式(4.7)より, $s (>0)$ を一定として中央画像上を走査すれば, Z が一定のため XY 平面に平行な Z 断面を探索したことになる. その断面が P と交差すれば, 交差部分の X , Y 座標はそれぞれ中央画像上の座標 x_c , y_c に比例する. すなわち共通視野内の物体は, 中央画像上では中央視点 C から単眼で見た場合と同様の方向に存在することになる.

一方, s 一定の Z 断面(視差距離断面と呼称)が物体 P と交差すれば, 中央画像上では図 4.2 の B_c のように, 左右画像内の物体像 P_l と P_r が重なり合う. その断面が P の前後にある場合には, 同図 A_c や C_c のように両者の物体像がずれることになる. すなわち, 左画像内の物体像と右画像内物体像の重なり状態を, 視差距離断面ごとに重ね合せた中央合成画像で調べることによって, その視差距離断面における物体の有無と, その位置座標(X , Y , Z)を同時に知ることができる.

この手法では, 重なり状態の判別の適否が物体の探索性能を左右する. 本研究ではその判別のため, 中央合成画像の鮮明さを次の方法で調べるものとした.

(2) 合成画像の作成と鮮明さの判定方法

本研究では, 自然光条件下における物体の識別や認識では色特徴の利用が有効なことを踏まえ, 左右画像の合成並びに物体像の重なり状態の判定処理は, 三原色 RGB(各濃度 8 bit)による色特徴表現を基本として以下のように行った.

1) 左右画像の合成方法 左右画像の合成に当たっては, まず注視する距離を決めてその距離に最も近い視差距離断面を中心とした前後区間を探索範囲に設定する. 次にそ

の区間内にある視差距離断面群について順次合成を行う，という手順を採用する．

すなわち，注視距離を Z_g ，視差の間隔（視差刻みと呼称）を δ [画素] として， Z_g の前後合計 n 個の視差距離断面について中央合成画像を作成する場合，前から k 番目 ($k=0 \sim n-1$) の視差 s_k と視差距離 Z_k は， Z_g に関する視差を s_g とすると次のように求められる．

$$s_g = \alpha_d \cdot f \cdot a / Z_g \quad (4.8)$$

$$s_k = s_g + \delta \cdot \{(n+1)/2 - k\} \quad (4.9)$$

$$Z_k = \alpha_d \cdot f \cdot a / s_k \quad (4.10)$$

Z_k の断面の中央画像における座標 (x_{ck}, y_{ck}) の画素の色特徴は，式(4.6)で規定される左右各画像の座標の画素内容で決まる．

ところで，鮮明さの判定法には色分散を調べる方法があるが，単に左右画像を重ね合わせただけではその値が大きく変化することはなく判別が難しい．そこで，本研究では，物体像の重なり of のずれ（位置ずれ）を色特徴のずれ（色ずれ）として容易に判別できるように，合成画像の偶数行 y_{ck} を左画像の偶数行 y_{lk} から，奇数行を右画像の奇数行 y_{rk} から，それぞれ交互に抜き出して順に配列することにした．すなわち，

$$\left. \begin{array}{l} y_{ck} \text{ が偶数のとき, } x_{lk} = x_{ck} + s_k/2, \\ y_{ck} \text{ が奇数のとき, } x_{rk} = x_{ck} - s_k/2 \end{array} \right\} \quad (4.11)$$

2) 中央合成画像の鮮明さの判定 上述の方法によれば，左右画像の物体像が適切に重なったとき，偶数行と奇数行の画素の色特徴が最も近似するため水平間の色ずれが最小になり，鮮明なカラー画像になる．重なり of の位置ずれが増加するに従い，水平間の色ずれが増して横縞状の領域が拡大し，画像の鮮明さが低下する．そこで，鮮明さを次式のように，上下方向の画素に関する RGB 濃度の分散 σ_c で表す．

$$\sigma_c = \Sigma \{(r_k - r_a)^2 + (g_k - g_a)^2 + (b_k - b_a)^2\} \quad (k=0 \sim m-1) \quad (4.12)$$

ここで， r, g, b はそれぞれ R, G, B の濃度， m は上下方向の画素数，添字 a は m 個の平均を示す．式(4.12)より，左右画像の重なり状態が σ_c の大小で表され，色ずれが最も少ないとき σ_c が最小になる．ただし，重なり to 広がりがある場合や形状が局部的に

類似する場合などには、その部分の重なりが適切な対応でないときにも σ_c が小さくなる。その対策のため、各画素に関する平均分散 σ_{cave} を、その画素の周囲8方向の画素の σ_c を平均することによって求め、その値が最小になる視差距離断面がPに最も近いものと推定して測定距離とみなす。

(3) 処理手順

本手法による距離計算プログラムの概要を図4.3に、その処理手順を図4.4に示す。はじめに、ステレオ視システムの位置と方向を決め、ズーム値を設定して撮影し、左右画像とカメラ制御データをコンピュータに入力する。次に、前処理としてRGB信号のフィルタ処理のあと、左画像について色特徴(ここでは色相)による領域分割を行い、およその果実領域を抽出する。その中で左右画像の共通視野となる果実領域について注目点と走査範囲を決め、注視距離と視差刻みを設定する。その注視距離を中心にその前後の複数の視差距離断面で中央合成画像を作成する。次に、各中央合成像の全画素について、上下方向のRGB濃度分散を求め、水平・垂直・斜め方向の平均分散を算出した後、各断面間で座標が同じ画素について σ_{cave} を比較し、その値が最小になる視差距離を選定す

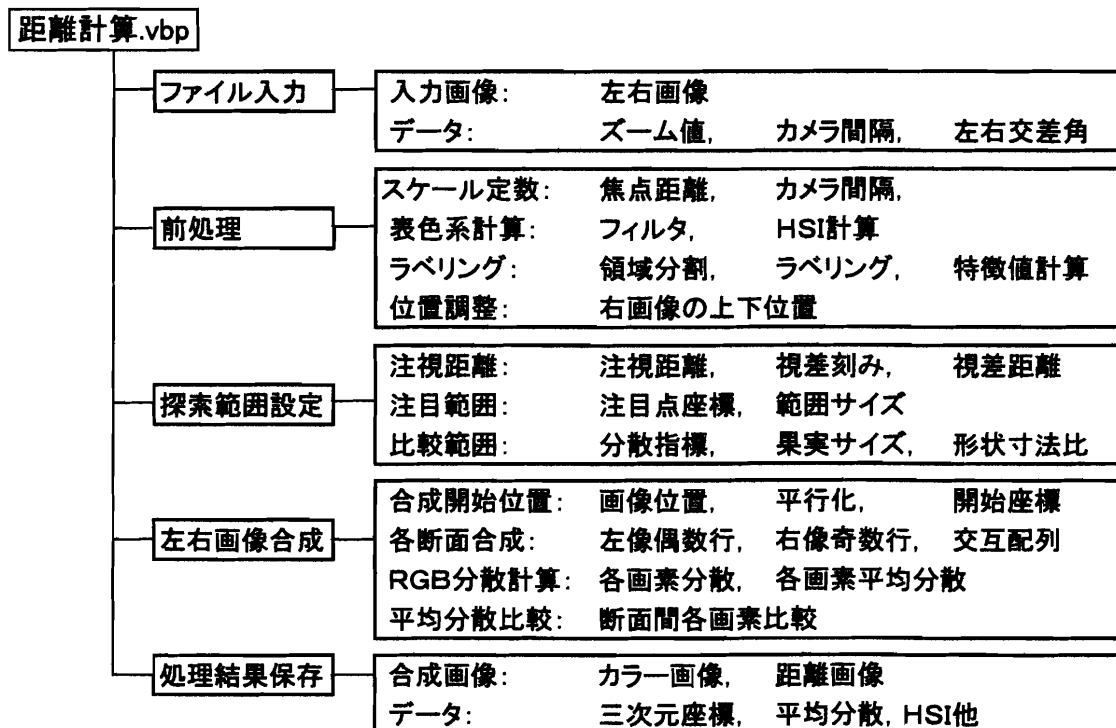


図4.3 距離計算プログラムの概要

る。その結果、中央合成画像の各画素の色特徴と X Y Z 座標及び距離が決定され、中央視点 C から見たカラー画像と距離画像が同時に得られる。

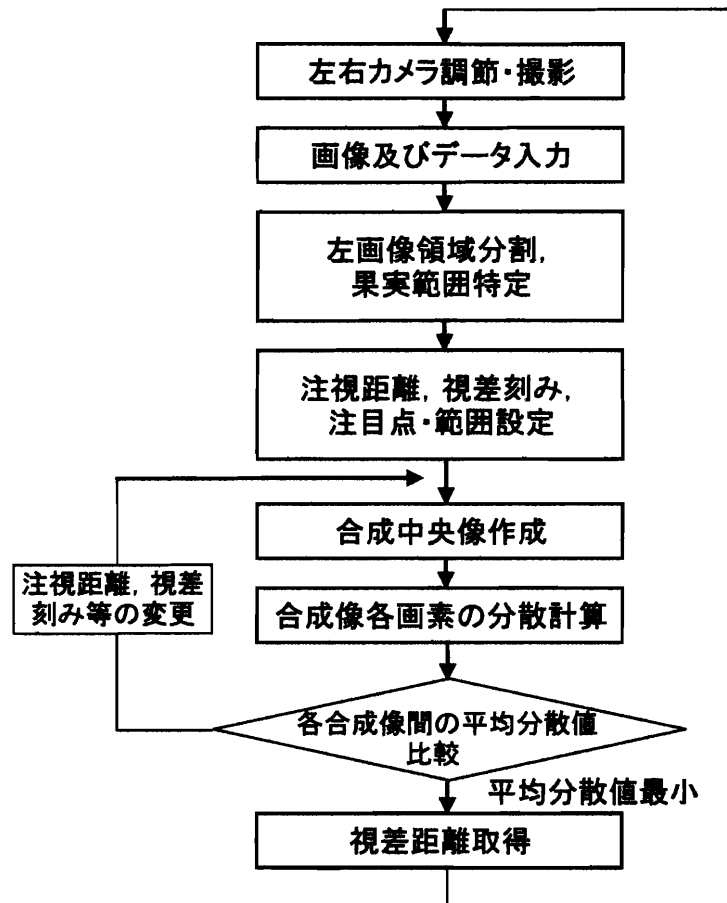


図4.4 処理手順の概要

4.3 リンゴ園の果実群に対する適用例

本節では、簡易キャリブレーション結果を用いた上述の手法が実際にリンゴ園の果実画像に適用された場合に、その測定精度がどのようなになるかを調べることを目的として実験を行った。すなわち、合成像のずれと鮮明さを指標に用いた場合、式(3.13)で得られた α_d による視差距離が実際の距離とどのような関係にあるか検討する。

(1) 実験方法

a. 供試対象 収穫期の10月下旬から11月上旬にかけて弘前大学附属農場で、ふじと王林を対象に撮影実験を行った。ふじの外観性状は、大きさ(胴直径×高さ)が84×78 mm(50個平均)で、着色状態は通常の熟した赤色系であった。王林は、大きさが83×75

mm(30 個平均)で、着色は黄色味が周囲葉に比較してやや強い黄緑色系で、周囲葉との識別は比較的容易であった。対象果実画像例を図 4.5 に示す。



(a) ふじ



(b) 王林

図 4.5 対象果実画像例

b. ステレオ視システム 第2章の試作システム I を供試した。三脚カメラ台に固定した2台の CCD カラーデジタルカメラ(有効画素数 400 万画素, 光軸間隔 200 mm)とノートパソコンで構成し, パソコンによる制御方式とした。解像度 2272×1704 画素, RGB 濃度 24 ビットとし, パソコンのハードデスクに JPEG 形式で保存した。距離校正には前

章までと同様レーザ距離計の値を用いた。

c. 実験条件と方法 果実の密集した範囲を選び、撮影距離を約 1~4m, カメラ焦点距離 f を 7.1~21.3 mm 間の 4 段階とした。撮影は、晴天・順光のもとで、露出、ホワイトバランス、合焦を自動調節とし、果実群が左右各画像中央の共通視野に入るように、システム位置を調整して行った。撮影画像をパソコンに取り込みハードデスクに保存した。ズームはパソコンから手動で制御して設定し、フォーカス、露出、ホワイトバランスはいずれも自動調節機能を利用した。カメラ前端から各果実表面までの距離をレーザ距離計で測定し校正值とした。

左右画像の中央合成処理は、図 4.6 に示す処理画面で行った。注視距離、視差刻み、

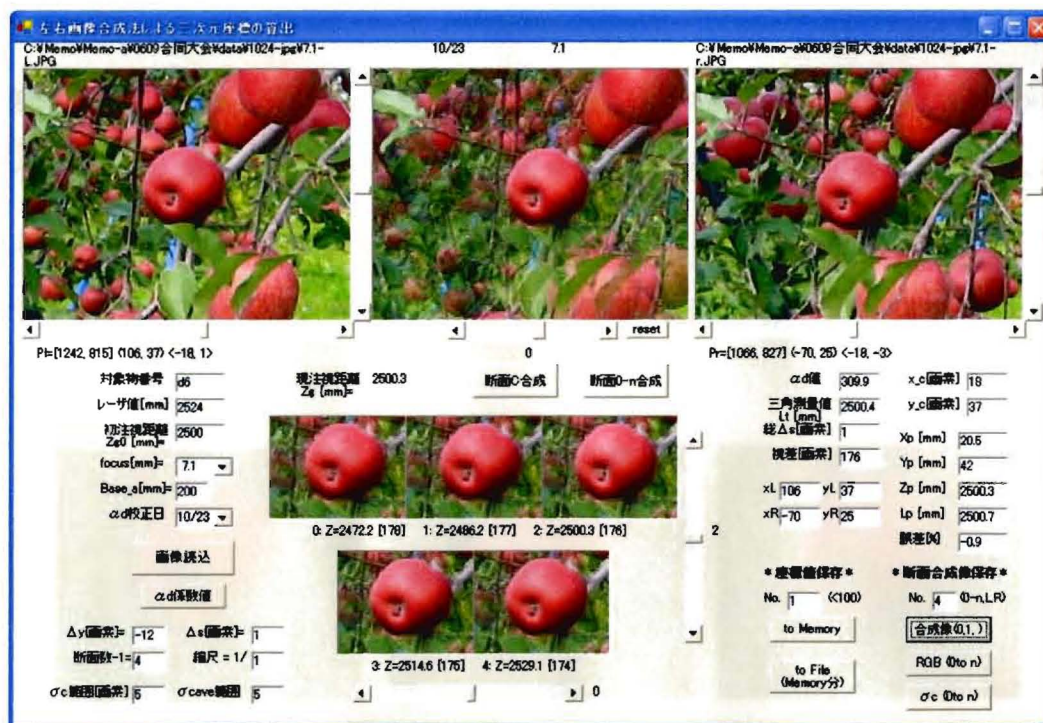


図4.6 距離計算の処理画面例

注目点及び範囲、分散計算範囲等の各設定値を指定した後、左画像と右画像の対応点を目視で検出して合成像を作成する手順を、対象の果実が最も鮮明になるまで繰り返して実行することにより、その空間座標を得た。

(2) 実験結果と考察

1) 中央合成画像の重なり状態 撮影した果実像の合成例を図 4.7 に示す。対象果実は、距離 2,524 mm の位置から焦点距離 7.1 mm で撮影したもので、注視距離を 2,500 mm とし、果実のほぼ中央を注目点として処理した。同図のように、中央部分の鮮明さが最良のもの(横縞模様が最小)は、視差距離 2,500.3 mm であり、そこから ± 1 画素のずれの範囲では左右の輪郭の内側にわずかに横縞が現れる程度で、ほとんど変化が見られなかった。ずれが ± 2 画素以上になると、左右の輪郭付近における横縞模様が明確になり、色ずれの確認ができるようになった。

2) 果実群の測定距離誤差 各視差距離断面で合成した果実像が最も鮮明になる断面を選定する方法で各果実の距離を推定し、レーザ距離に対する誤差を百分率で示したのが図 4.8 と図 4.9 である。ふじに関する距離誤差は図 4.8 のように、約 2.5m まで、焦点距離 7.1~21.3 mm のいずれの場合も $\pm 2\%$ 以内、それ以上 4 m までは $\pm 4\%$ の範囲内にあった。王林の場合は図 4.9 果実表面の着色上の特徴が明確でなかったため、ふじの場合より誤差がやや増加した。これらの結果は、使用目的の観点から所要精度をほぼ満たしており、本手法による計測システムが収穫果実の距離測定に利用可能なことを確認した。

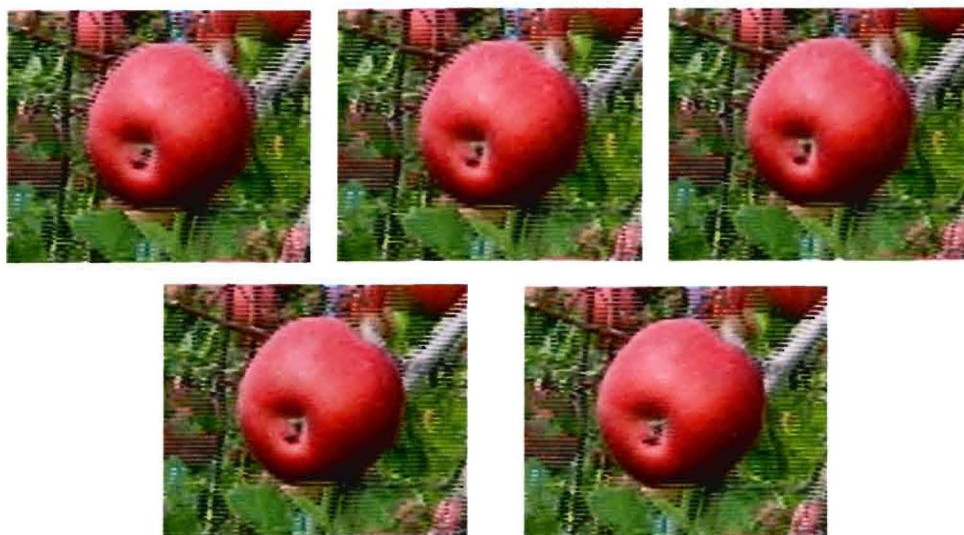


図4.7 中央合成像の重なり状態の例

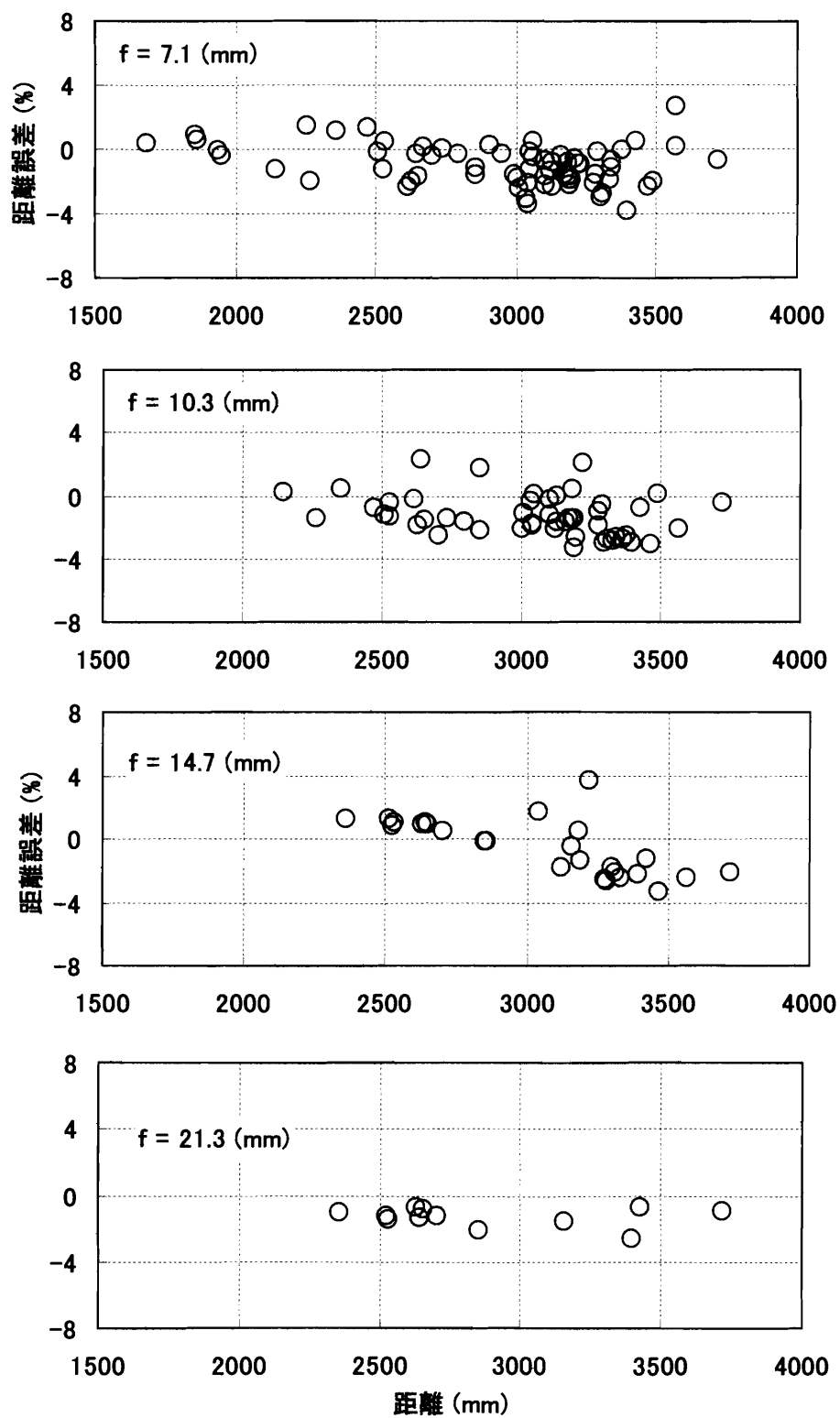


図4.8 リンゴ園での距離誤差(ふじ)

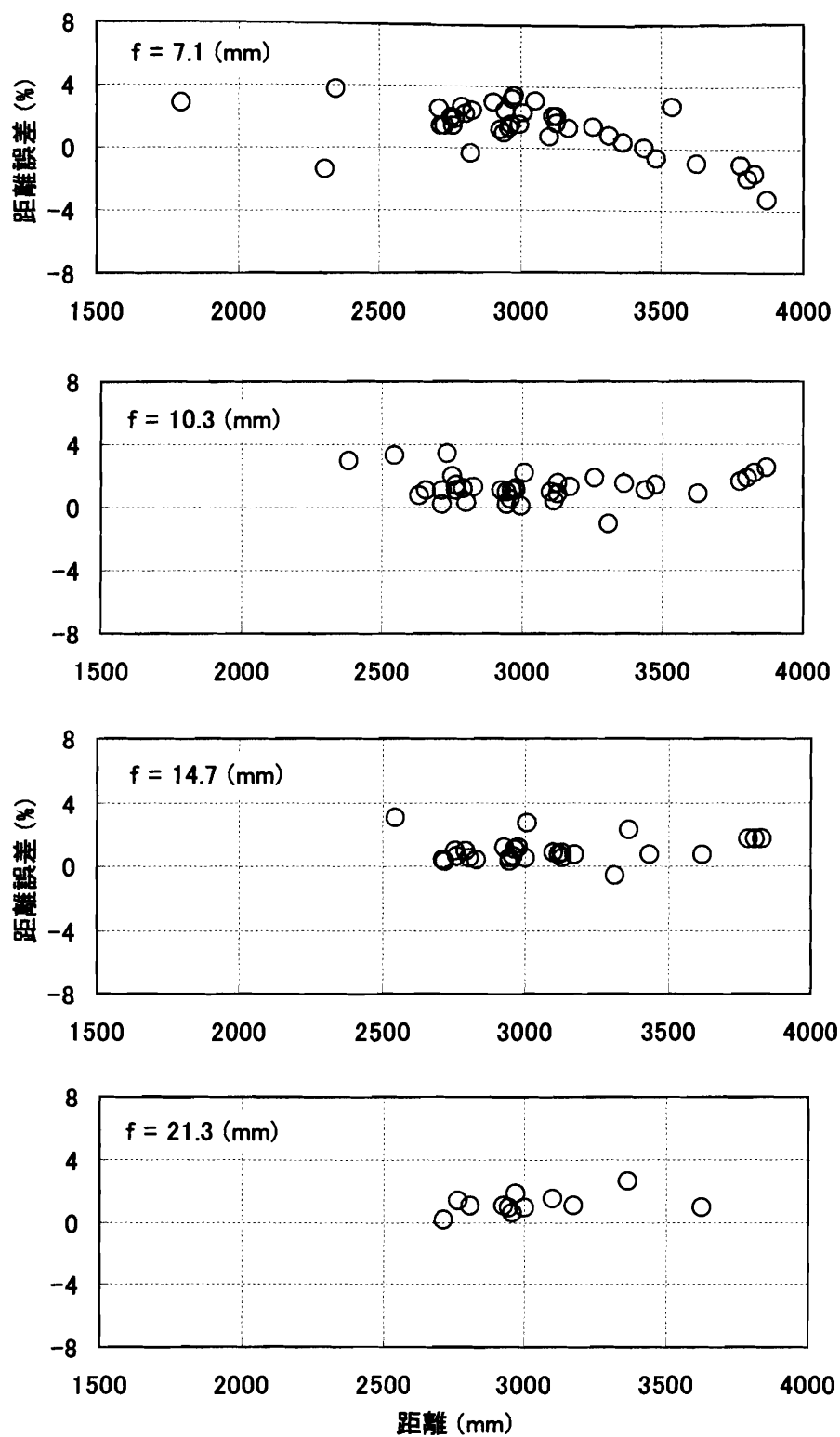


図4.9 リンゴ園での距離誤差(王林)

第5章 ステレオ合成像のRGB濃度分散特性と距離精度に関する実験

5.1 目的

本手法の測定処理の流れは図5.1(a)で示される。測定誤差は、①左右画像の合成時、②RGB濃度分散 σ_c による合成像の鮮明さ(水平行間の色ずれ)の検出時、及び③RGB濃度平均分散 σ_{cave} による左右画像の重なり状態(位置ずれ)の検出と比較・判定時にそれぞれ発生する可能性がある。その場合の主な要因としては同図(b)のような項目が挙げられ、各処理との関係は矢印で示すようになる。

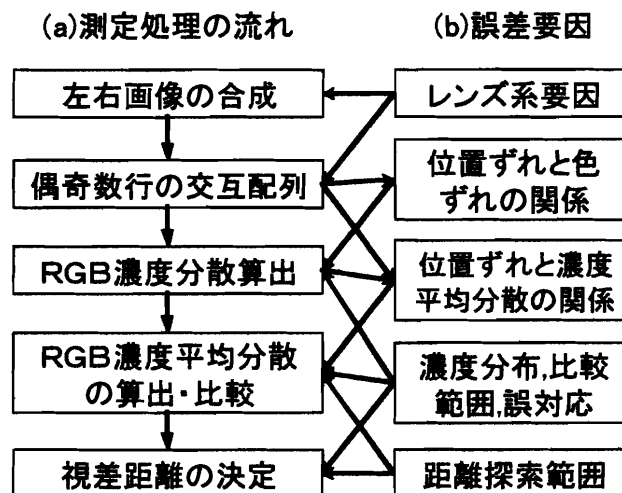


図5.1 本手法における距離測定の誤差要因

上述のうち、①の左右画像の合成時に関する誤差要因は、視差距離断面ごとの合成範囲が左右両画像の左右、上下、斜め方向に関して適切かどうかに関係し、カメラの配置状態、レンズ系の光軸方向、光学倍率など機械的な因子によって影響される。合成画面上では左右両画像の水平行(エピポーラ平面)による交互配列に影響が現れ、左右方向や上下方向の配列状態が不適切になる。これらの要因のうちレンズ収差の影響とその改善策については第3章で述べた。

②の合成像における鮮明さの検出は、 σ_{cave} の大きさを比較することによって行われるが、位置ずれと色ずれの相関が低い場合にも誤差要因として影響する。対象画像領域の

濃度分散の分布状態や σ_{cave} の計算範囲も影響を及ぼす要因となる。

③の左右画像の重なり状態の検出は、色ずれだけでなく対象物の位置ずれも検出するものであり、②と同様位置ずれと色ずれ及び σ_{cave} との関係がそれぞれ相関が高くない場合に誤差の発生要因になり得る。同時に RGB 濃度分布や σ_{cave} 計算時の比較範囲によっても影響される。距離探索範囲の設定が過大なときには、偽像の発生による誤差も懸念される。

以上から、本手法において距離測定値が一義的に決定され、誤差を抑制するためには、合成像の位置ずれに伴う色ずれを σ_c によって確実に検出できるとともに、位置ずれと σ_{cave} の間にある比例関係を利用して、 σ_{cave} が最小値へ急速に収束する条件を見出すことが重要である。そこで本章では、画像処理因子が σ_{cave} の収束性と距離精度に及ぼす影響を把握するため、とくに視差刻みと σ_{cave} との関係を中心に検討した。

5.2 実験方法

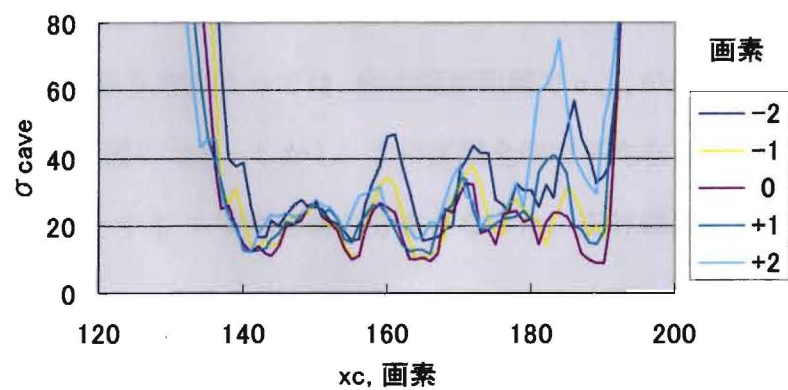
前章の方法で取得したふじと王林のステレオ画像を対象に画像分析を行った。左右画像の合成処理条件は、レーザ距離計の測定値を注視距離に、対象果実の周囲 320×240 画素を注目範囲にそれぞれ設定し、視差刻み δ を 2~40 画素、RGB 濃度分散の計算範囲を上下 4 画素、断面数を 5~9 個とした。合成果実像の鮮明さの判定には水平方向 4 画素分の RGB 濃度分散値合計 σ_{cave} を用いた。なお、画像処理時間を短縮するため、左右各画像に対する 2 値化、エッジ検出、領域分割等の前処理は実施しなかった。

5.3 実験結果と考察

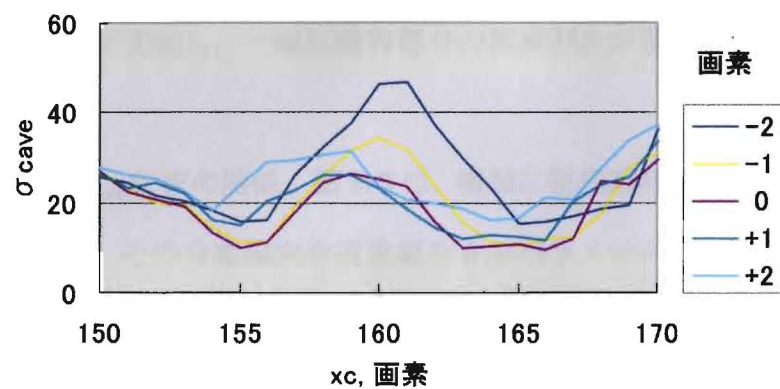
(1) 合成像の x 軸上における σ_{cave} 分布 ふじ果実画像の合成処理過程における σ_{cave} の分布例を図 5.2 に示す。同図(a)の対象果実は太陽光が直射時のもので、撮影距離は 2,525 mm であった。図中の白線部分に関する σ_{cave} の分布例を同図(b)に示す。褐色線は左右両果実像の重なりが一致した時のものである。 σ_{cave} は果実像内部では 100 以下の凹型となり、輪郭付近では内部と外部の色較差のため 300~500 に急増している。果



(a) 中央合成果実像(ふじ)



(b) x軸上の σ_{cave} の分布(果実像白線部分)



(c) 白線部分の果実領域内を拡大

図5.1 合成処理過程における σ_{cave} の分布例

実像の周囲では水平間の色ずれのため横縞模様がみられ、上下方向の画素に関する RGB の各濃度差が 30~60 のため、 σ_{cave} は 300~1500 程度変化し変動が顕著である。次に、1 視差刻み分だけ前後の視差距離における分布を見ると、黄色線(前方側)と濃緑線(後方側)で示すように、両線とも果実像中央では褐色線に近似しており距離の違いの影響があまり現れなかった。合成像の輪郭付近では増加割合が大きくなったが、これは左右両画像の位置ずれによる水平間の色ずれが増加するとともに、計算範囲に占める輪郭外側の画素の割合が、輪郭に近い部分ほど急激に大きくなるためである。

同図(c)は、果実像領域内の σ_{cave} 分布を拡大して見たものである。左右画像の重なりが一致したときの σ_{cave} は、変動しており、他に比べて常に最小というわけではない。このため、注目点の取り方によっては、他の視差距離で σ_{cave} が最小になることもある。これが距離誤差の原因になる。しかし、この区間全体で平均をとると重なりが一致したときの σ_{cave} を最小とする V 字形形状の分布となった。王林画像の場合もほぼ同様の分布傾向であった。

以上のように、程度の差はあるものの、ふじ、王林とも果実像内部やその周囲の明度、色相及び彩度に濃度差があれば、 σ_c は色ずれのため増加し、左右画像の重なり状態の判別が可能であった。 σ_{cave} は、計算範囲に占める輪郭部分と輪郭の内外の画素割合、及び σ_c の分布状態で変化し、一般に輪郭部分の画素割合が多くなるほど増大する傾向となった。

(2) 視差刻みと σ_{cave} 収束の関係 図 5.3 は、横軸に視差距離 Z_s 、縦軸に果実像中央の画素の σ_{cave} を取り、その分布傾向を視差刻み δ をパラメータとして見たものである。対象果実は図 5.2 と同じものである。 $\delta=10$ のとき距離探索範囲は 2.0~3.3 m であり、 σ_{cave} は 2.0 m 付近から急減して 2,500 mm 付近で最小値約 200 となり、その後急増して 7,000~11,000 となる V 字型の変化をした。 $\delta=20$ のとき距離探索範囲は 1.7~4.7 m と拡大するが、最小値とその発生距離及び変化傾向とも $\delta=10$ の場合と類似した。 δ が 30 及び 40 の場合は、探索範囲はさらに拡大するが、最小値、変化傾向とも δ がそれ以下の場合と同様であった。なお、 δ と距離探索範囲の関係は、注視距離が 2,500 mm で距

距離断面を9個とした場合、図5.4の通りであった。すなわち、 $\delta=30$ のとき最前部の距離断面は約1.4 m、最後部は約6.2 mとなり、その探索範囲は4.8 mである。 δ を増加させるに従い最後部の距離断面が後方に移動する割合が増すので、探索範囲も急増する。

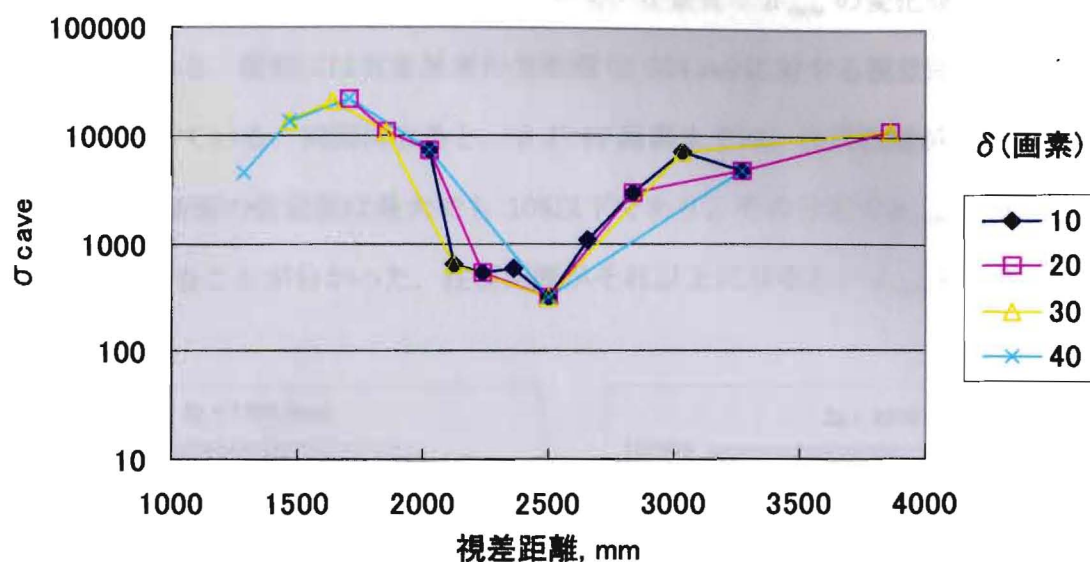


図5.3 視差距離と σ_{cave} の関係
(視差刻みをパラメータとした場合)

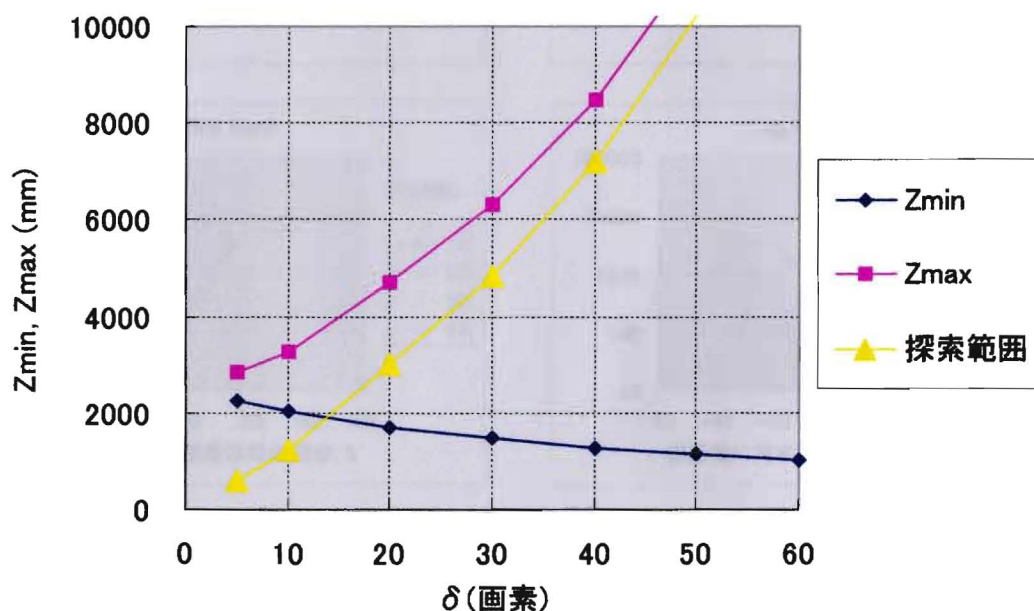


図5.4 δ と距離探索範囲との関係

(3) 距離断面位置が σ_{cave} 分布に及ぼす影響 前述のように、本研究の手法ではステレオ視空間を複数の断面で区切り、その断面に投影された果実像を中央画面上で合成して

その鮮明さから当該果実に最近の断面距離を検出する方式を採用している。したがって、対象果実と最近断面の位置が離れると、合成像における重なり的一致度が少なくなるので、 σ_{cave} の最小値が増大することが予想される。そこで、注視距離 Z_g と δ を変化させることによって、対象果実と最近断面の位置関係を変えて σ_{cave} の変化傾向を調べた結果が図 5.5 である。横軸には対象果実の実距離 (2,524 mm) に対する視差距離の差の割合を百分率で示している。同図によると、 δ が 40 画素までは、注視距離が 1,700~2,500 mm のとき最近断面の位置差は最大でも 10%以下であり、その付近で σ_{cave} が最小値 200~500 に収束することが分かった。注視距離がそれ以上になると、 σ_{cave} 最小値が 7,000

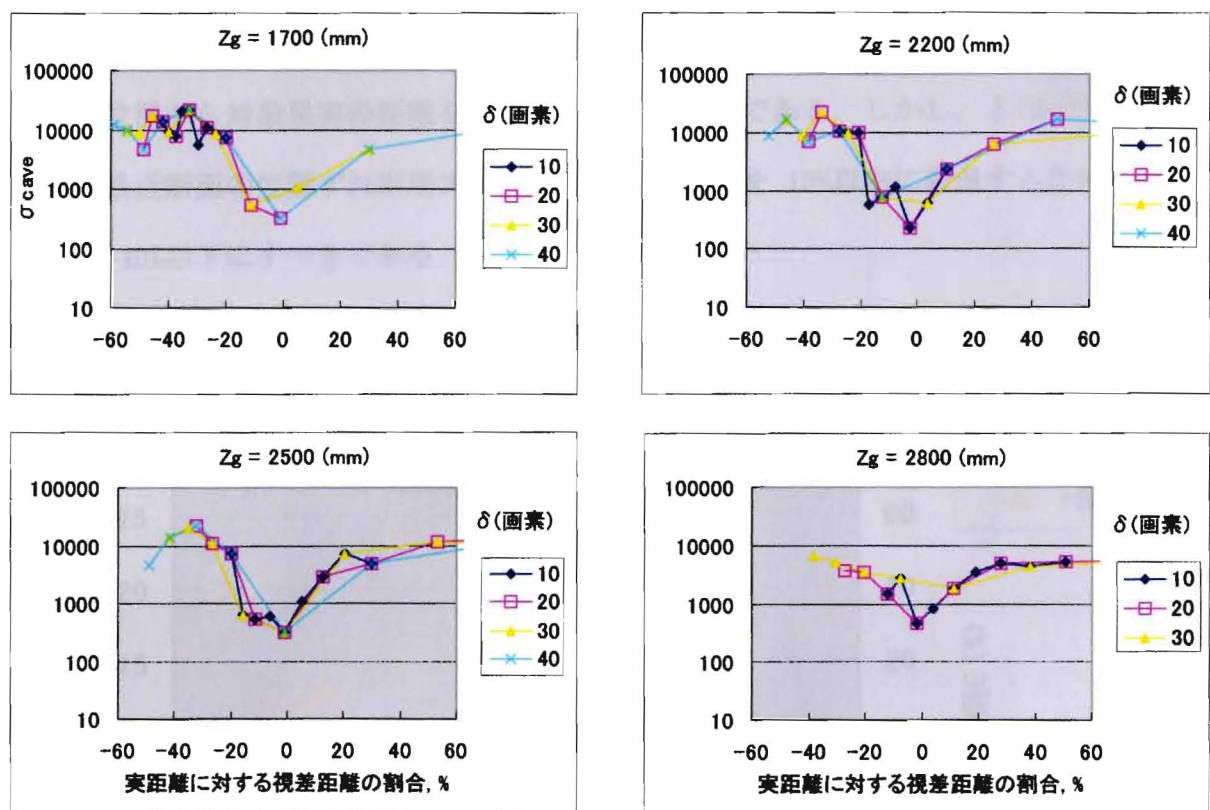


図5.5 実距離・視差距離の割合と σ_{cave} の関係
(注視距離と視差刻みをパラメータとした場合)

~11,000 まで増加するようになり、最小値への収束が不十分であった。このように、最近断面の位置ずれが 10%以下であれば σ_{cave} の最小位置から果実距離の推定が可能である。

(4) 果実像直径と視差刻みの比が距離誤差に及ぼす影響 δ が大きくなると、果実像直径 d が小さいほど左右果実像の重なり合う機会が減少する。そのため、最近断面の位置ずれが $\pm 10\%$ 内に入る確率が小さくなるので、 δ の上限は d も考慮して決定する必要がある。図 5.6 は横軸に δ/d を、縦軸に最近断面の位置ずれの百分率を取って両者の関係を見たものである。図中最前部の距離断面を一侧、最後部を+側とし最近距離に対する百分率で示してある。最近断面の位置ずれは、同図のように δ/d とともに増加し、その比が 40 %以上になると 10%以上になることが分かった。したがって、 δ は d の 40%以下にすべきである。

以上をまとめると、 δ の設定条件が距離計測に及ぼす影響は、 δ を増すほど距離測定範囲が増大し、 δ がある限度までは σ_{cave} が最小値に収束する変化傾向となるので、その発生位置から対象果実の距離を推定することが可能である。しかし、 δ/d が増加すると、最近断面の位置ずれが増大するので、距離誤差を 10%以内に確保するためには、 δ/d を 40%以下にすべきである。

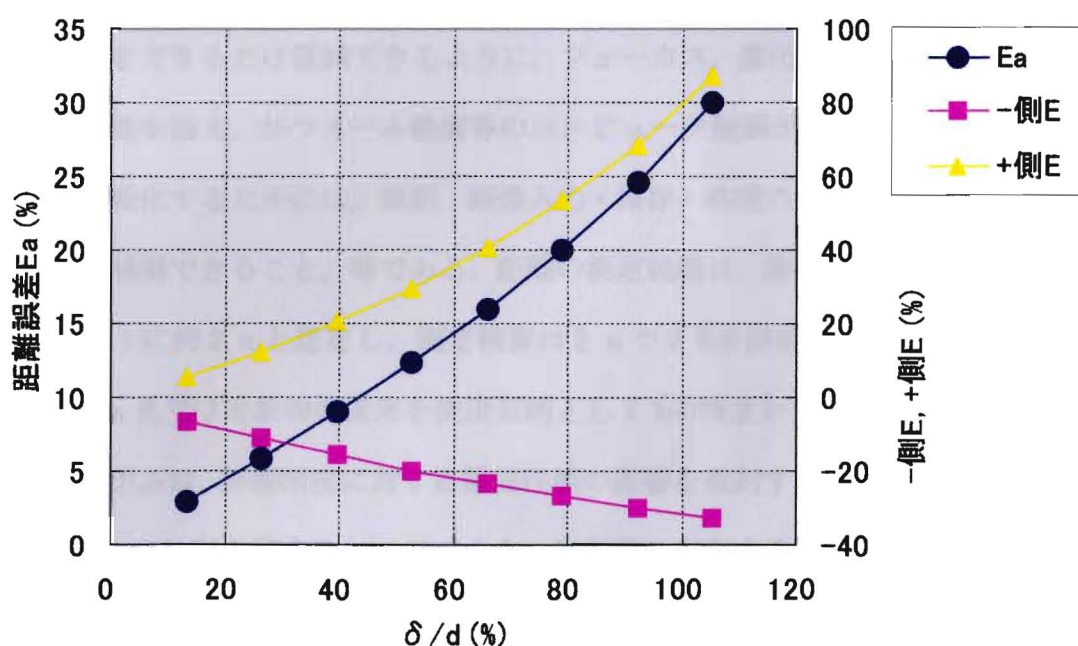


図5.8 δ/d と距離誤差の関係 ($Z_p=2500\text{mm}$)

第6章 総 括

本研究は、ステレオ画像法による三次元位置計測システムを、ほ場栽培の果実の個体管理に利用するため、自動計測時の位置精度向上と、より簡便に利用できるようにするための画像処理法の改善を目指すものである。主に次の2点について究明することを目的とした。①ステレオ画像法を簡便かつ所要精度で利用可能にするための手順を確立すること、及び②ステレオ合成像の鮮明さ判定基準と対象物の識別及び位置精度との関係を究明すること。

1. ステレオ視システムの試作（第2章要旨）

本研究では、ステレオ視計測システムをリンゴ園での栽培管理と収穫作業の機械化・自動化における計測センサとして使用することを目的とし、その要件として次の点に留意した。すなわち、左右2台のカメラが同一の規格と性能を持ち、かつ両者が適切な配置状態であること、撮影像の色特徴や形状特徴の再現性が良好で、対象物の遠近や照明環境の影響をできるだけ軽減できるように、フォーカス、露出、ホワイトバランス等の自動調節機能を備え、かつズーム機構等のコンピュータ制御が可能なこと、また、一連の作業を自動化するためには、撮影・画像入力・保存・処理の各操作がコンピュータプログラムで制御できること、等である。距離の測定範囲は、機械等による作業範囲をカバーできるように約2 mと想定し、測定精度は2 mで2 %を許容限度に設定した。また、2 m以上4 mまでは対象物の探索を使用目的とし5 %の精度を目安とした。

試作システムは、計測精度に対する撮像性能の影響を検討するため画像解像度の高いCCD デジタルカメラを備えたシステムⅠと、対象物の存在する空間に焦点を絞ることが可能なパン・チルト機構を備えたネットワークカメラによるシステムⅡの2台を供試対象にした。

2. キャリブレーションの簡便化に関する検討（第3章要旨）

農業分野用として屋外でステレオ視計測を行う場合には、測定距離範囲を広く取り、かつ条件によってズーム調節が必要になることが多い。そのためキャリブレーションでは、左右それぞれのカメラに関する距離関係式を個別に実験で求め、両者の結果をもとにシステムの距離式を決定する方法が有効である。この際、カメラのレンズ収差によって発生する撮影画像の歪みの補正処理も必要になるが、多大の処理時間を要するので実用上問題となっていた。

そこで補正処理を必要としない簡便なキャリブレーションの方法として、撮影画像のスケール係数 α_d を中央合成画面上の座標との関係で求める方式を考案した。 α_d に関する実験を行って、重回帰分析により回帰式を決定した結果、重相関係数が全実験範囲で約 0.990 となり、極めて高い相関関係で表された。距離誤差は、撮影距離 1,160~3,230 mm の範囲で座標位置や距離に関係なく概ね 0 % の上下に散らばり、 ± 1 % 間に止まった。そこで、本研究ではその回帰式を使用することにした。

3. 果樹園内の果実群の三次元位置計測に関する実験（第 4 章要旨）

簡易キャリブレーションで得られたスケール係数 α_d の適用性を調べるため、リンゴ園で収穫期の果実群を対象にステレオ視計測法による三次元位置の測定に関する実験を行った。その結果、ふじに関する距離誤差は約 2.5 m まで、焦点距離 7.1~21.3 mm のいずれの場合も ± 2 % 以内、それ以上 4 m までは ± 4 % の範囲内にあった。王林の場合は果実表面の色特徴が明確でなかったため、ふじの場合より誤差がやや増加した。これらの結果は、使用目的の観点から所要精度をほぼ満たしており、本手法による計測システムが収穫果実の距離測定に利用可能なことを確認した。

4. ステレオ合成像の RGB 濃度分散特性と距離精度に関する実験（第 5 章要旨）

本手法において距離測定値が一義的に決定され、誤差を抑制するためには、合成像の位置ずれに伴う色ずれを RGB 濃度分散 σ_c によって確実に検出できるとともに、位置ずれと RGB 濃度平均分散 σ_{cave} の間にある比例関係を利用して、 σ_{cave} が最小値へ急速に収束

する条件を見出すことが重要である。そこで、画像処理因子が σ_{cave} の収束性と距離精度に及ぼす影響を把握するため、とくに視差刻みと σ_{cave} との関係を中心に第4章で取得したふじと王林のステレオ画像を対象に画像処理に関する実験的検討を行った。その結果、 δ の設定条件が距離計測に及ぼす影響は、視差刻み δ を増すほど距離測定範囲が増大し、 δ がある限度までは σ_{cave} が最小値に収束する変化傾向となるので、その発生位置から対象果実の距離を推定することが可能である。しかし、 δ/d (d : 果実像直径) が増加すると、最近断面の位置ずれが増大するので、距離誤差を 10 %以内に確保するためには、 δ/d を 40 %以下にすべきであることが分かった。

参考文献

1. 張 樹槐・高橋照夫・福地 博・孫 明・寺尾日出男：赤外線熱画像によるリンゴの検出に関する研究(第4報)ー左右ステレオ画像によるリンゴ果実までの距離の計測. 農機誌 61(6):125-130, 1999.
2. Cochran, S. D. and G. Medioni: 3-D Surface Description from Binocular Stereo. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence 14(10):981, 1992.
3. Faugeras, O: Stratification of Three-Dimensional VisionーProjective, Affine and Metric Representations. J. Optical Society of America 12(3):465-484, 1995.
4. 藤浦建史・浦 元信・川村 登・並河 清：果樹園用収穫ロボットの研究. 農機誌 52(2):35-42, 1990.
5. 福永邦雄・笠井 保：ステレオ画像法とその応用. システムと制御 30(4):220-227, 1986.
6. Grimson, W. E. L.: Computational experiments with a feature based stereo algorithm. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-7(1):17-34, 1985.
7. 井口征士・佐藤宏介：三次元画像計測. 1章, 昭晃堂, 東京, 1995.
8. 伊藤正弥・砂川義隆：距離計測システムにおける, 大深度測定化と高分解能化の両立. 計測自動制御学会論文集 34(8):884-889, 1998.
9. 徐 剛・辻三郎：3次元ビジョン. 7章, 共立出版, 東京, 1998.
10. Kanade, T: Development of a video-rate stereo machine. Proc.'94 ARPA Image Understanding Workshop 549-558, 1994.
11. 孫 明・高橋照夫・戸次英二：画像処理による収穫時のリンゴ果実の識別(第1報). 農機誌 59(4):53-60, 1997.
12. 孫 明・高橋照夫・張 樹槐・戸次英二：画像処理による収穫時のリンゴ果実の識

- 別(第2報). 農機誌 60(5):75-82, 1998.
13. 孫 明・高橋照夫・張 樹槐・戸次英二: 画像処理による収穫時のリンゴ果実の識別(第3報). 農機誌 60(6):79-87, 1998.
 14. Sun, M., T. Takahashi, S. Zhang, E. Bekki: Matching Binocular Stereo Images of Apples by Genetic Algorithm. Agric. Engng J. 8(2):101-117, 1999.
 15. 田島譲二・岩川正人: Rainbow Range Finder による距離画像取得. 電子情報通信学会論文誌 J73-D-II(3):374-382, 1990.
 16. 高橋照夫・陳浩: 農業用ロボットハンドのための接近動作制御則について(第2報) — 視点座標と基本動作パターンを利用した制御則. 農機東北支報 40:55-60, 1993
 17. 高橋照夫・張 樹槐・孫 明・福地 博: 線要素パターン検出方式の画像処理による線の形状判別. 農機東北支報 43:49-54, 1996
 18. Takahashi, T., S. Zhang, M. Sun, H. Fukuchi: New method of image processing for distance measurement by a passive stereo vision. ASAE paper No. 983031: 1-7, 1998.
 19. 高橋照夫・張 樹槐・福地 博・戸次英二: 両眼ステレオ視によるリンゴ園果実の距離計測(第1報)左右画像合成による距離測定方式. 農機誌 62(1):89-99, 2000
 20. 高橋照夫・張 樹槐・福地 博・戸次英二: 両眼ステレオ視によるリンゴ園果実の距離計 測(第2報)対応問題画像の分析と対策. 農機誌 62(3):94-102, 2000
 21. 高橋照夫・張 樹槐・福地 博・戸次英二: 両眼ステレオ視によるリンゴ園果実の距離計 測(第3報)画像入力条件が距離精度に及ぼす影響. 農機誌 62(6):108-115, 2000