

# 画像解析による原木材積測定法の開発と年輪紋様の情報化に関する研究

瀬戸 亨一郎

## 目次

緒言	1
第1章 原木材積測定法の開発	2
第1節 はじめに	2
第2節 研究開発の概要	3
第3節 開発手順	4
第4節 実験1-1 二次元による原木木口面の把握	4
第5節 実験1-2 三次元による原木木口面の把握	9
第6節 実験1-3 ステレオ計測値のばらつき	16
第7節 実験1-4 ステレオ計測と従来法との比較	18
第8節 実験1-5 実際のフィールドテストでの比較	21
第9節 実用化について	28
第10節 原木流通システム	35
第2章 年輪紋様の情報について	38
第1節 はじめに	38
第2節 既存の研究と年輪紋様の情報化の目的と効果	38
第3節 実験2-1 木材の木口画像を正規化距離で比較	39
第4節 実験2-2 木材の木口画像から年輪の中心位置の測定①	42
第5節 実験2-3 木材の木口画像から年輪の中心位置の測定②	46
第6節 実験2-4 ハフ変換による補正した画像の正規化距離の変化	50
第7節 今後の課題	52
第3章 総括	54
参考文献	56
謝辞	57

## 緒言

材価低迷に悩む山林所有者は、山林を伐採しても伐採搬出経費と流通経費により再造林費を含めた収支は全くの不採算であるという現状がある。材価の回復ができないことも問題であるが、伐採搬出経費の削減と同じように流通経費の削減も山林所有者にとって大きな課題である。このため森林が放置されて荒廃し治山治水機能を失い、自然災害の頻発が憂慮されていることは、我々の日常生活を脅かす忌々しき問題であり、林業振興、ひいては生活環境保全のため、原木流通経費の削減による手取り収入の確保は急務である。また、一般の経済活動では、考えられないことだが、売主である山林所有者側が伐採現場の出荷時点において、数量・材積把握の主体性をもたず、第三者に従属している現状は改善されるべきである。

我が国の原木流通の主体は、原木市場や共販所を介して流通するという特異な流通ルートをとってきたが、原木市場や共販所は、取引の透明性を確保するなどの歴史的必然性もあり、高度成長期の時代から林業に貢献した時代もあった。しかし業界を取り巻く状況が根本的に変化した現代、日本林業発展の阻害要因になりかねない状況を招いている。

具体的には、原木市場や共販所での取引価格はスギ柱適材で1万円/m<sup>3</sup>前後だが、これに伐採・搬出・流通（運送、市場手数料）の経費がかかる。このうち林道端から市場までの運送経費は、1,500～2,000 円/m<sup>3</sup>、市場での販売手数料が 2,000～3,000 円/m<sup>3</sup>前後である。したがって伐採・搬出経費を 5,000～6,000 円/m<sup>3</sup>程度に抑えてようやく赤字を免れる。加えて原木市場から工場への運送経費もかかることから工場着単価は 11,000 円/m<sup>3</sup> 前後となる。この工場着単価でみると、直送した場合と比べ原木市場手数料と市場から工場への運送経費を合わせて 3,000～4,000 円/m<sup>3</sup> 前後が追加的に負担となる部分である。これは原木価格の約 3 分の 1 に相当するもので、海外の事例と比べると我が国の原木流通経費の削減余地がいかに大きいかがわかる。

国も新生産システム等の林業施策で市場外取引（※協定取引）の推進をめざしているが、原木市場や共販所には数量の把握と品質による仕分け機能があるため、この代替をいかに行うかが問題となっている。つまり原木の流通・取引において材積計測が必須であるが、現状では山元での材積計測システムが確立していないため、原木市場の選木機に付属する材積計測機を活用するか、人力測定しなければならない現状がある。市場外取引（※協定取引）の推進には山元での材積計測システムの構築が急務となっている。本研究によりこのような問題点を改善し、原木流通に掛かる経費と時間を削減するとともに、本システムを原木材積計測法のスタンダードとして普及させ、林業の採算性向上と健全な森林整備に貢献することを目的としている。

また、材積測定に伴い得た年輪画像は、伐採時間と位置情報を内包しているため、これを利用し木材の個体識別やトレーサビリティに応用できる可能性について研究した。木造建築に供される木材製品は、山林で数十年育てられた後、伐採・搬出・製材・乾燥・加工という一連の工程を経たのち、それぞれの建築現場において、更に数十年間の建築物としての役割を果たすことになる。再生可能資源として注目を集める木材ではあるが、木材の流通過程は複雑で、需要者側が

---

※協定取引とは山林所有者と需要者が、あらかじめ数量・品質・価格を決定し安定した取引をめざす取引で、量と価格の安定取引と流通コスト削減に効果がある。山林伐採現場から市場を通さず、工場直送することで、より大きなコスト削減効果をもたらす効果があるとされる。

その生産地を特定することは容易ではない。木材のトレーサビリティとしては、バーコードや IC タグを貼り付ける方法が研究されている現状がある。しかし運搬中のラベルの脱落・損傷や木材加工時において、その存在が無くなる問題点があり、信頼性の高いシステムとしての確立が困難な状況である。自然保護の観点からも木材の伐採に係る合法性や、認証制度は確立されつつあるが、食品業界と同じように林業・木材産業にも消費者が、安心して利用できる共通システムの実現が望まれている。本研究は、個々の木材に固有のものであり、経年変化が少なく、人の指紋と同じような木口面の年輪紋様に着目し、木材の個体識別に利用できる可能性について研究した。

## 第 1 章 原木材積測定法の開発

### 第 1 節 はじめに

林業の不採算性が憂えられて久しいが、採算性を問題とする前に、関係者のコスト管理に対する考え方が、他の産業と比べてあまりにも無頓着である例が多くみられる。日々の生産量の把握さえ完全にできず、かなりの時間の経過後に全体の生産量を把握している現状がある。しかも林業事業者が主体性をもって数量把握しているのではなく、共販所や原木市場等の第三者や、利害関係人である需要者側に請負業務や売買の数量計測を依存している事例さえある。これもそのほとんどが、材価低迷による不採算を言い訳にしているのだが、林業が主体性をもった産業として自立するには、まず山側が正確に低コストで日々原木の数量を把握することが必須条件である。このような材積測定業務を検知（けんち）業務という。

従来の方法は図 1-1 のように人が一本ずつ計測する人力検知の方法と、図 1-2 のように原木選木機を使用し、ゲートを一本ずつ通過させる時点で計測する方法があるが、大型であるため広い場所を必要とし、高価でありため、大規模な業者にしか普及していない。

また、最近の原木計測システムとしては、デジタル技術の発展により、デジタルノギスと丸太検収システムを連動させた計測システムが発売されているが、これは一本一本ノギスを当てて計測しなければならず手間がかかっている。

また川上（鳥取県林業試験場）ら<sup>1)</sup>によると、デジタルカメラを利用した画像処理による丸太材積簡易計測システムが開発されているが、これは画像の二次元処理であり、トラックに積んだままで計測することが可能だが、末口、元口の径級の違いは経験値から得た係数により算出した概数の算出である。丸太一本一本の計測を正確に行うことはできず、カメラと被写体との距離も拘束されるため、その運用や測定場所に制約がある。西岡<sup>2) 3)</sup>らによると、高性能林業機械のアタッチメント部分にカメラを搭載し、45 度の斜めから玉切り直後に撮影し、計測する研究がなされているが、チェーンソーオイル等の周辺環境が悪く実用化には制約がある。また、湯川（岩手大学）ら<sup>4)</sup>が同様の研究を行っているが、複数の原木を同時に測定することに制約があり、実用化までには至っていない。

この機器の開発普及により図 1-3 のように原木の流通経路の変化を促し、流通経費を削減すると共に販売管理や在庫管理を容易にすることにより林業の採算性向上と健全な森林整備に貢献することを目的とする。具体的には、全ての原木の径級をデジタルカメラにより撮影し、その画像をコンピュータ分析することにより原木の本数と材積を計測する可搬型の一連のシステムを開発し実用化した。

なお、今回は日本農林規格（JAS）による測定法に準拠することとし、実際の原木流通に即応できるもの为目标とした。



図 1-1 手作業による検知作業



図 1-2 選木機による検知作業

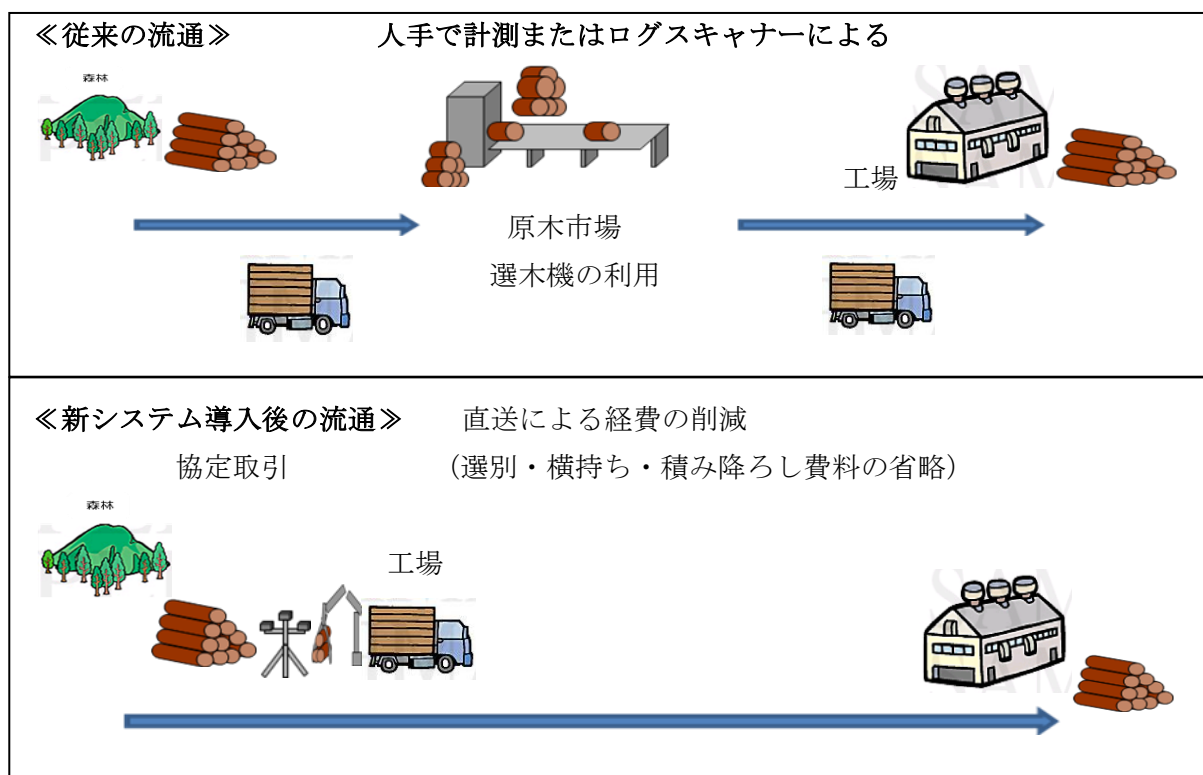


図 1-3 新システム導入前後の原木流通比較イメージ

## 第2節 研究開発の概要

本研究は、図 1-4 のように伐採現場でのトラック積み込み時に、運転手が操作する際に原木の本数・材積を計測しトラック一台分の明細を出力することができるシステムを開発することである。これにより売主である山林所有者は伐採現場から出材される段階で木材の明細を把握することが可能となる。伐採現場へは、トラックの運転手のみが行けば測定が可能となり、測定業務の効率化が期待される。また、買主の製材工場や合板工場は、トラックから降ろす過程で再度計測することにより明細通りかの確認が可能となり、工場の在庫管理が容易となる。

本研究による測定機は、三次元で原木を捉えるためカメラとの距離や角度に余裕があり、測定場所の制約が無く可搬性のため、伐採現場等のいかなる場所でも運用できる。

なおグラップルで掴む地点を測定地点としたのは、画像処理量による測定速度の調整と隣接する原木の影響を最小限にし、将来末口・元口を判別できる可能性を残すためである。

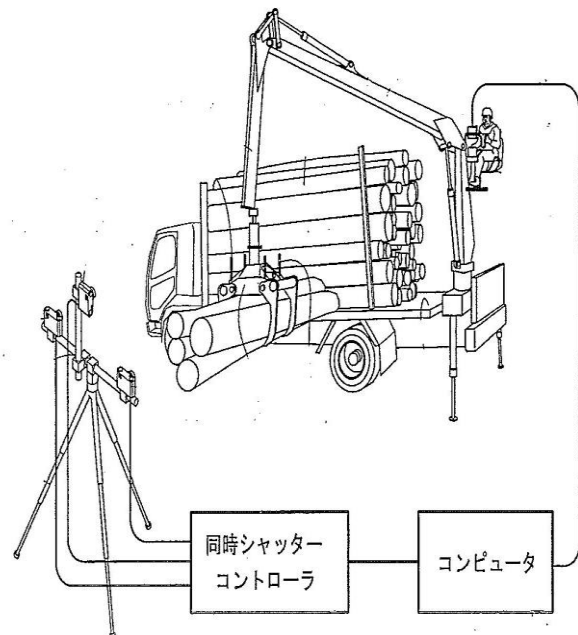


図 1-4 測定イメージ

## 第3節 開発手順

開発手順は、下記の通り 5 つの実験を行った。

実験 1 (二次元による木口面の把握)

- ・ 原木木口面の輪郭を捉えるエッジ処理

実験 2 (三次元による木口面の把握)

- ・ レンズによるひずみ補正処理
- ・ ステレオ計測による内接円の計測

実験 3 (ステレオ計測のばらつきの把握)

- ・ 測定の安定性の確認

実験 4 (ステレオ計測と従来法との比較)

- ・ 測定精度の確認

実験 5 (フィールドテストでの比較)

- ・ 環境への順応性の確認

以上の手順で開発を行った。

## 第4節 実験 1-1 二次元による木口面の把握

### 1-4-1 実験の目的

丸太の直径を計測するために必要となる、木材切断面の輪郭が画像から認識できるかを確認することを目的とした。

### 1-4-2 機材仕様

システムの仕様を満たすために必要となる機材のスペックは表 1-3 の通りで、図 1-5 のように 1 台のカメラで行った。

表 1-3 機材の仕様表

機材	必要スペック	個数	補 足
カメラ	カラー、130 万画素以上、USB2.0 接続、外部入出力付	1	民生用カメラではなく工業用カメラを使用(価格が安い・PC からの制御が容易・保守期間などを考慮)。 ストロボとステレオカメラとの同期が必要。 <u>参考:</u> ARTCAM-130MI □(アートレイ: <a href="http://www.artray.co.jp/">http://www.artray.co.jp/</a> )
レンズ	固定焦点、焦点距離 6mm、メガピクセルレンズ	1	固定焦点のほうが精度が良い。 6mm 以上の広角レンズ(画角が 45 度以上)でないと撮影範囲が満たせない。 <u>参考:</u> DF6HA-1B(FUJINON) <a href="http://www.fujinon.co.jp/ip/products/cctv/p_fa/fixedfocal/index.htm">http://www.fujinon.co.jp/ip/products/cctv/p_fa/fixedfocal/index.htm</a> )
ストロボ	光量 400W	1	どの程度の光量が必要か撮影を行い評価する必要がある。 <u>参考:</u> TWINKLE 04Ⅱ(コメント: <a href="http://www.comet-net.co.jp/">http://www.comet-net.co.jp/</a> ) MS-400N(PHOTO TOOLS: <a href="http://www.photo-tools.com/">http://www.photo-tools.com/</a> )
PC	ノート PC、USB2.0 ポート付	1	Fujitsu FMV-BIBLO NF/D50



図 1-5 実験 1 の撮影状況

### 1-4-3 評価用画像撮影

ストロボを照射した画像と照射していない画像で差分を求め、その領域から安定して輪郭が抽出できる撮影設定を調査した。

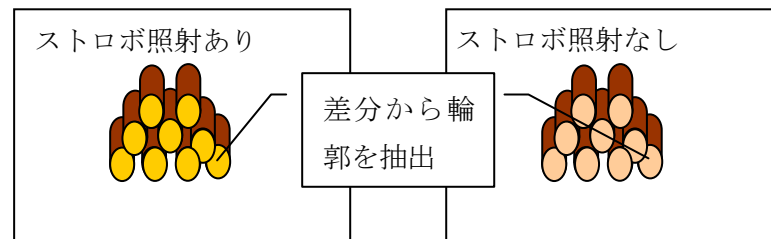


図 1-6 ストロボによる差分

以下の条件を変えて図 1-6 のように撮影を行うことで最適な設定を求めた。図 1-7 のように撮影はストロボ照射ありと照射なしの 2 枚を 1 セットとして撮影した。

- カメラ設定
  - ◇ ゲイン[Global Gain](5、10、20)
  - ◇ 露光時間[Exposure](1、25) : msec(1/1000,25/1000 秒)
  - ◇ ストロボ光量は“FULL”で固定
  - ◇ レンズ F 値(絞り)は最大限絞った状態で固定
- 環境条件
  - ◇ 天候(晴れ/曇り/雨)
  - ◇ 時間(朝/昼/夕方)
  - ◇ 日光方向(順光/逆光/その他)
  - ◇ 木材断面とカメラの角度(0 度、60 度) 条件 1
  - ◇ 木材断面とカメラの距離(150cm、250cm) 条件 2
  - ◇ 木材本数(2 本以上で木材が重なり合った状態。1) 条件 3

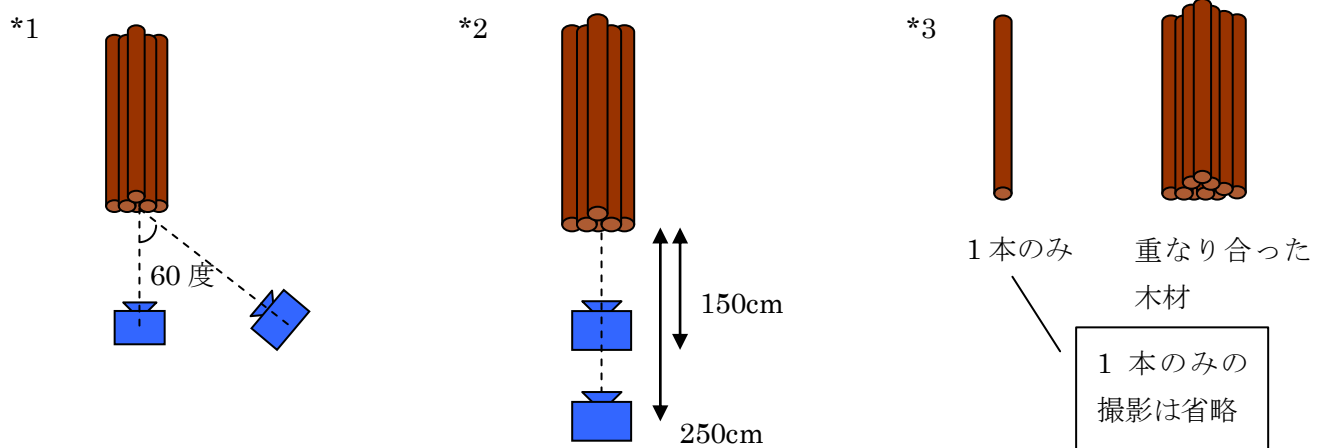


図 1-7 各条件による撮影



- 撮影した画像のファイル名は以下の通りとした。  
“[ゲイン(g)][露光時間(s)] [ストロボ照射(あり/なし)].bmp”  
例：ゲインが 5、露光時間が 1、ストロボ照射ありの場合は、“ゲイン 5-露光時間 1-ストロボあり.bmp”となる。
- 環境条件ごとフォルダを分けて画像を保存した。  
“[天候(晴れ/曇り/雨)][時間(朝/昼/夕方)][日光方向(順光/逆行/その他)][角度][距離]”  
例：天候が晴れ、時間が朝、日光方向がその他、角度が 30 度、距離が 150cm の場合は、“晴れ-朝-その他-30 度-150cm”となる。

#### 1-4-4 計測手順

1. 画像を撮影（図 1-8）
2. 輪郭抽出を評価（図 1-9）
3. 画像に問題があれば、再撮影を行う
4. 何回かやり取りを行った後に最終的な評価を行い、ステレオ 3 次元計測が可能かどうか含めて検討した



図 1-8 実験 1 で使用したカメラ・ストロボ・パソコン

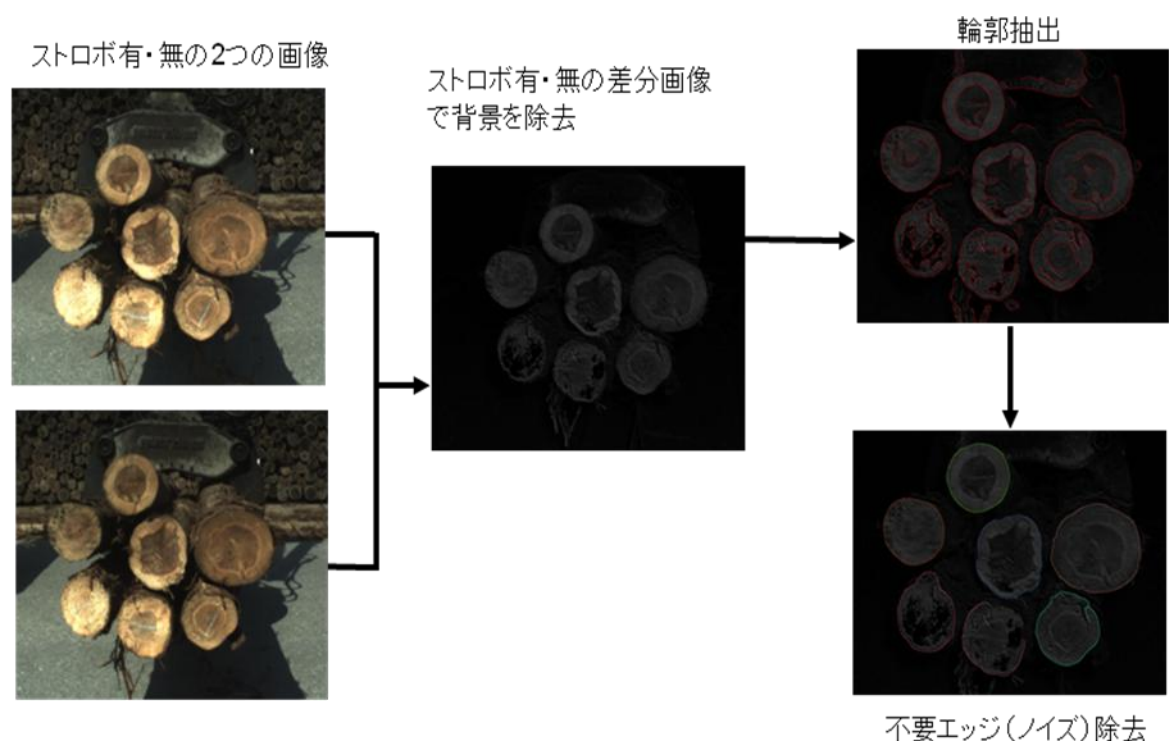


図 1-9 ストロボの有無による差分画像とエッジ処理

#### 1-4-5 結果と考察

撮影した画像に対して原木断面の輪郭を抽出した結果、検出できる場合とできない場合がある。検出できない場合の原因とその対策を表 1-4 に示す。

表 1-4 輪郭抽出問題点と課題

検出できない原因	対 策
差分画像のコントラストが低い	撮影パラメータを自動調整する機能を実装した撮影ツールを作成 カメラと原木の距離を調整して撮影
ストロボ有／無の画像上での位置ずれ	ストロボ有／無の撮影間隔を短縮するための撮影ツールの作成 原木の移動が小さくなってから撮影
原木木口面の位置、撮影角度による隠れ	カメラと原木木口面が正面となるように角度を調整して撮影
検出方法が不十分	木口面輪郭抽出方法の改良

## 第5節 実験 1-2 三次元による原木木口面の把握

### 1-5-1 実験目的

ステレオカメラ（照明を含む）の実験試作機を製作し、実験 1 で実証した輪郭抽出手法にステレオ法による輪郭の 3 次元計測演算を行うことで原木直径を算出できることと、被写体の傾きの影響を調べることを目的とした。

### 1-5-2 システム前提

図 1-10 のようにカメラ 2 台で行う。開発するシステムの仕様は表 1-5 の通りである。

表 1-5 システム仕様

測定対象木材サイズ	直径	10~100cm
測定範囲	幅	200cm
	高さ	200cm
	奥行き(カメラからの距離)	~250cm
精度	木材直径誤差	~1cm
測定器外形寸法	ステレオカメラ間距離	~100cm
測定器重量		~10kg

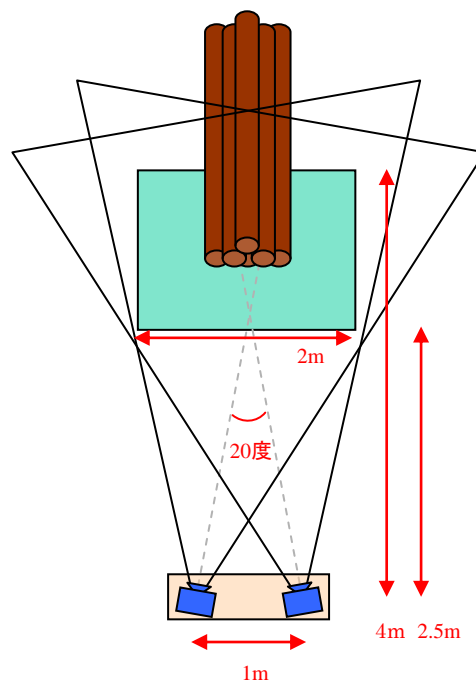


図 1-10 ステレオ計測の概念図

### 1-5-3 実験試作機

実験試作機はステレオカメラ、ストロボ、固定フレームから構成される（図 1-11）。

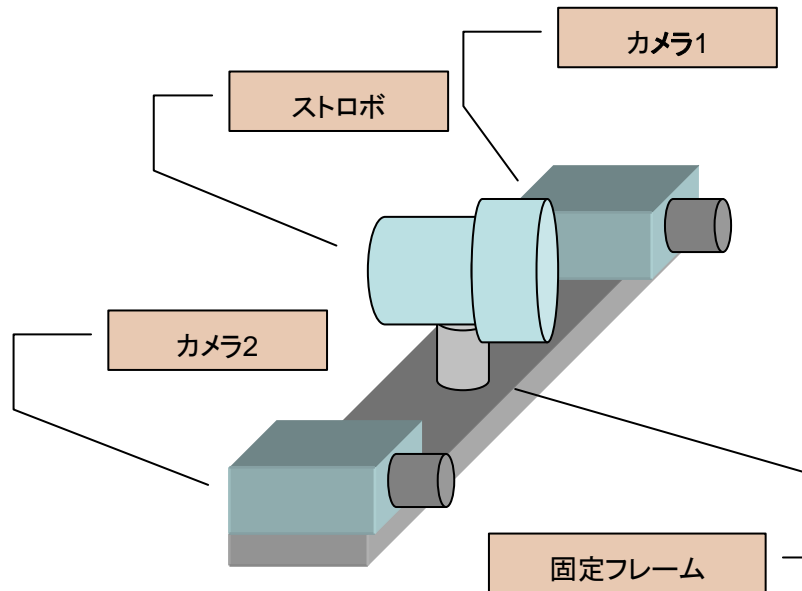


図 1-11 実験試作機構成

- カメラ
  - ◇ アートレイ 300 万画素 CMOS カメラ：ARTCAM300-STR11、USB2.0 接続、同時撮影、ストロボ制御機能つき
- レンズ
  - ◇ 固定焦点、焦点距離 6mm、メガピクセルレンズ
- ストロボ
  - ◇ コメット 400W ストロボ

### 1-5-4 計測精度

原木直径の誤差が 1cm 以内を目標とした。

### 1-5-5 計測範囲

カメラ間距離：1m

計測範囲：

奥行き方向：1.5m～2.5m

横、縦方向：2m

### 1-5-6 計測システム GUI



図 1-12 計測システム GUI

図 1-12 に計測システムを示した。

GUI 機能：

- ・ カメラ明るさ設定
- ・ 原木サイズ範囲設定
- ・ 新規計測
- ・ プレビュー
- ・ 終了

### 1-5-7 計測処理の流れ

- ・ ステレオカメラでストロボあり/なし画像撮影
- ・ 差分画像を作成
- ・ 差分画像からエッジ抽出、断面輪郭を探す
- ・ 輪郭の 3 次元計算
- ・ 輪郭の 3 次元点列から最大内接円直径計算

### 1-5-8 最大内接円の把握の実験

ホワイトボード上の紙片に楕円（最小直径 21.0 c m）を描きこれを計測した。また正対の場合と 45 度傾斜して計測し、傾斜が計測に与える影響を調べた。

#### 1-5-9 ステレオ計測法について

図 1-13 のように 2 台の視覚センサを用いて計測対象を異なる位置から観測し、各々の視線方向から三角測量の原理より計測対象までの距離を求める方法である。これは人間の両眼のように、あるがままの世界をそのまま観測する計測方法の代表であり、航空写真から地形の三次元計測などに利用されている。

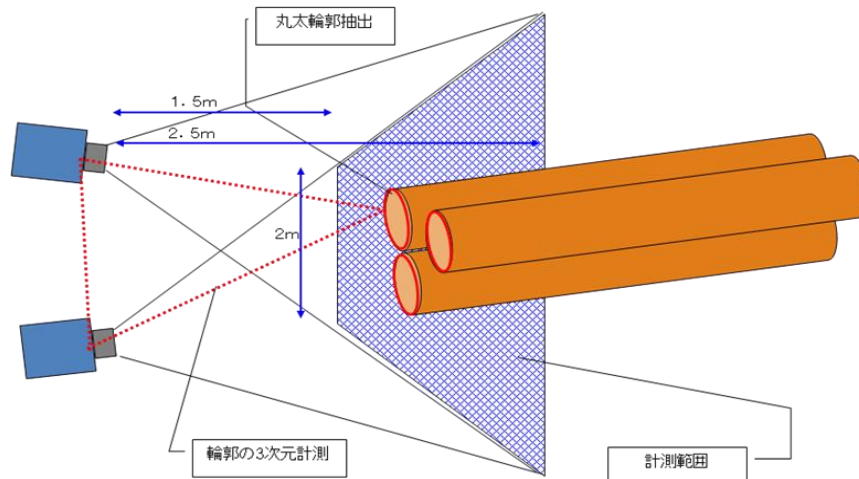


図 1-13 ステレオ画像法

本研究のような画像解析による類似の測定機器を見た場合、陸運局での車幅・車高・車長測定器のように他産業で既に実用化されたシステムがある。しかし、既製のシステムは明るさ等の条件が一定の屋内で、更に車輛の端にシールを貼るなどコンピュータが容易に認識し得るマーキングを施した上でなければ計測できず、使用環境・条件が著しく制限されている。このため、山林伐採現場という不安定な環境下において、しかも樹種や形状、木皮や汚れ等の付着と、様々に条件が変化する木材という天然有機物が対象では、既存のシステムのままでは応用できない。

下記の手順にて計測を行う。

- ① 図 1-14 のように左右のカメラにより原木木口面をステレオ撮影を行う。
- ② 図 1-15 のように画像から末口輪郭のエッジを抽出する。
- ③ 図 1-16 のように末口輪郭エッジの三次元情報を計算し、末口輪郭を三次元で把握する。
- ④ 図 1-17 で示す通り末口輪郭三次元結果から最大内接円を探し、末口最少径を計算する。
- ⑤ 図 1-18 のように輪郭エッジから楕円フィッティングしてフィッティングした楕円との差が大きいエッジを削除する。
- ⑥ 図 1-19 のように、年輪等による同心円の場合は小さい円のエッジを除去する。
- ⑦ 図 1-20 のように、エッジの勾配方向をチェックし、不要エッジを除去する。
- ⑧ 図 1-21 のように、末口の木口面形状を把握する。

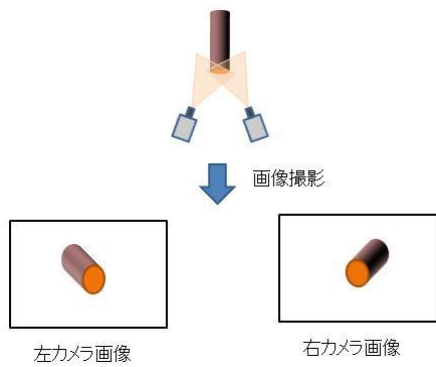


図 1-14 左右のカメラによる撮影状態

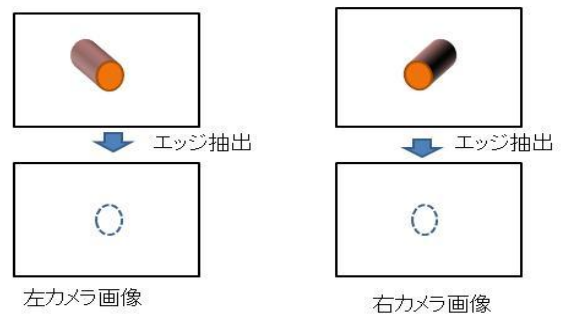


図 1-15 左右のカメラからエッジ抽出

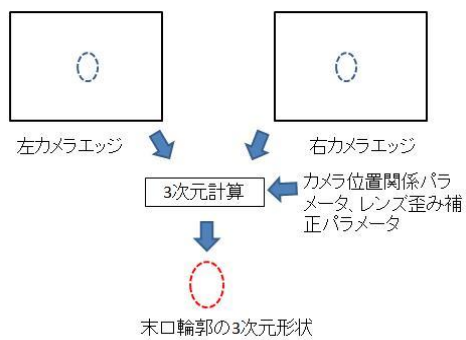


図 1-16 末口形状を三次元把握

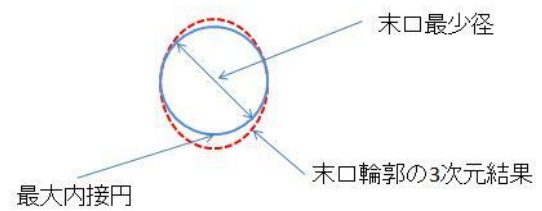


図 1-17 末口の最大内接円の抽出

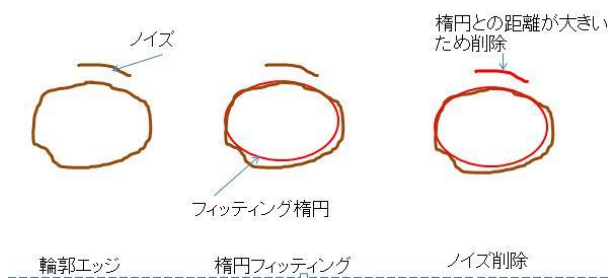


図 1-18 不要エッジ（ノイズ）の除去の例

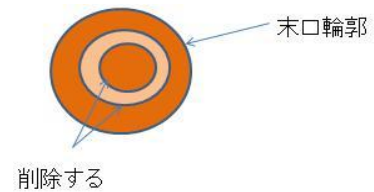


図 1-19 不要エッジ（同心円）の除去

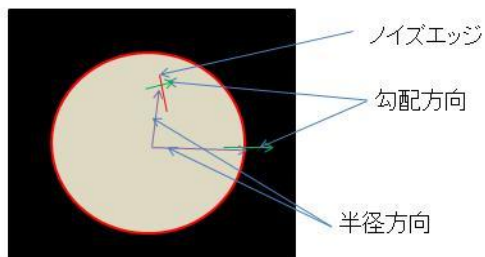


図 1-20 不要エッジ（ノイズ）の除去例



図 1-21 末口形状の把握



#### 1-5-10 補正の方法について

デジタルカメラは図 1-22 のように、被写体のカメラとの距離や傾斜によりひずみが発生するので、その補正が必要になる。測定範囲内で図 1-23 のような特製ボードを用いていろいろな距離と角度をできるだけ多く撮影しデータ化することによりカメラレンズの特性を調べ、測定誤差の軽減を図った。白点間の距離は一定であるので、カメラと被写体までの距離やカメラ画像による中央部と周辺部での違いと角度による違いを調べ、測定結果を補正する値を事前に調査しておき自動的に補正值を算出した。

なおこの技術は立命館大学工学部徐剛教授のご指導をいただき、株式会社三次元メディア（滋賀県草津市）の協力を得て行われたものであり、三次元計測の分野では既知の技術である。<sup>5) 6) 7)</sup>

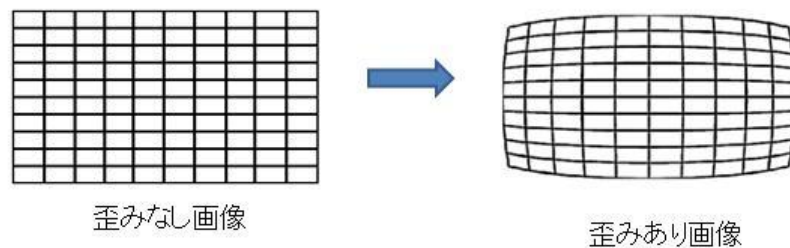


図 1-22 レンズによる歪みなし画像と歪みあり画像



図 1-23 補正に用いた特製パネル



#### 1-5-9 結果と考察

図 1-24 のように中央部に赤色の最大内接円と 21.1cm の直径を表示しているのが確認できた。これにより楕円の計測が、期待通りの最大内接円を計測することが分かった。撮影が正面であれば赤い最大内接円は正円となることが確認できた。

傾斜の影響は、図 1-25 と図 1-26 のように傾斜が大きくなるほど誤差が生じやすくなり、45 度を超えると測定不能となった。

撮影が斜めの面になれば赤い最大内接円は楕円になることが確認できた。

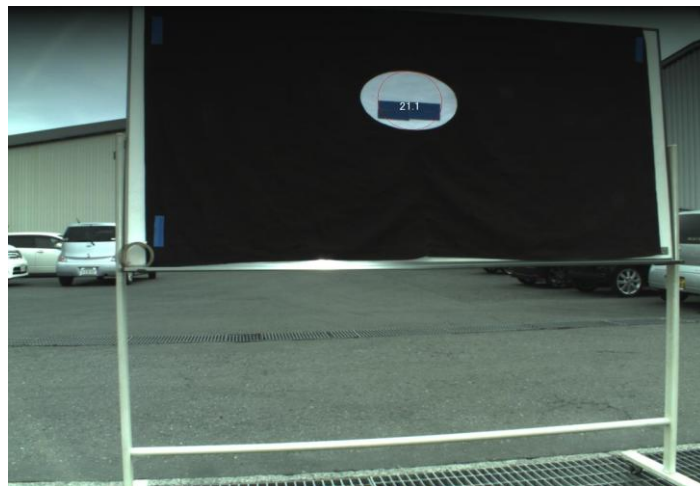


図 1-24 ホワイトボード上での楕円の測定



図 1-25 正面での撮影:内接円直径 53.3cm



図 1-26 斜め 45 度での撮影:内接円直径 53.6cm

## 第 6 節 実験 1-3 ステレオ計測による計測値のばらつき

### 1-6-1 実験目的

実験 2 で行った計測を複数回行うことで測定機の安定性を調べることを目的とした。

### 1-6-2 実験方法

計測対象と実験機を固定した状態で 10 回連続撮影してその計測結果のばらつきを評価した。

計測対象：

丸太の円盤 2 枚、直径の事前測定値：上：35.1cm, 下：35.3cm。

撮影画像：

図 1-27 にストロボ有の左右 2 台のカメラの映像を示した。

図 1-28 には連続して撮影したストロボなしの映像を示した。

この連続して撮影した図 1-27 と図 1-28 を差分し背景による影響や丸太の円盤を置いた椅子の影響を除き、図 1-29 の画像を得た。これから丸太の円盤の輪郭を把握する。

図 1-30 に示すようにステレオ計測で得たデータから得た円盤の輪郭に内接する最大円の直径をこの丸太の直径とした。



図 1-27 撮影画像(ストロボあり) (左：左カメラ、右：右カメラ)



図 1-28 撮影画像(ストロボなし) (左：左カメラ、右：右カメラ)



図 1-29 差分画像（左：左カメラ、右：右カメラ）

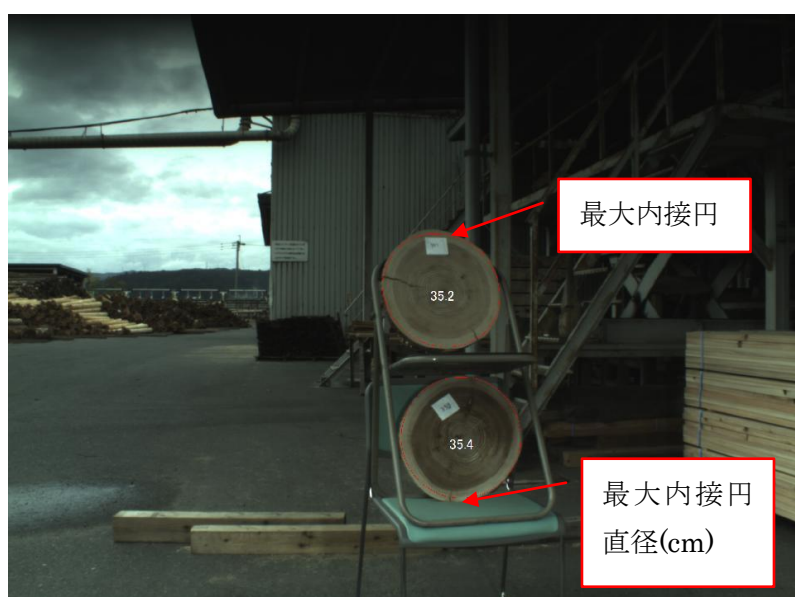


図 1-30 計測結果表示画像

### 1-6-3 結果と考察

表 1-6 のように、二つの円盤の計測した直径の最大変化範囲はともに 2mm、それぞれの平均値と事前測定値の差は 0.06cm と 0.08cm、最大誤差は 0.1cm であった。ばらつきの原因は、環境光の変化や画像のノイズなどの影響と考えられる。

但し、この円盤は表面をきれいに研磨しており、皮も無い状態であり条件は整っていた。

表 1-6 計測結果

計測回数	スライス 1 の 計測結果 (cm)	誤差 (cm)	スライス 2 の 計測結果 (cm)	誤差 (cm)
1	35.2	0.1	35.4	0.1
2	35.2	0.1	35.4	0.1
3	35.2	0.1	35.4	0.1
4	35.2	0.1	35.4	0.1
5	35.0	-0.1	35.4	0.1
6	35.2	0.1	35.4	0.1
7	35.0	-0.1	35.4	0.1
8	35.2	0.1	35.4	0.1
9	35.2	0.1	35.2	-0.1
10	35.2	0.1	35.4	0.1
最大	35.2	0.1	35.4	0.1
最小	35.0	-0.1	35.2	-0.1
最大-最小	0.2	0.2	0.2	0.2
平均	35.16	0.06	35.38	0.08
標準偏差	—	0.08	—	0.06

## 第 7 節 実験 1-4 ステレオ計測と従来法との比較

### 1-7-1 実験の目的

実際の丸太を実態のまま計測し、事前に測定した結果との誤差を評価した。

### 1-7-2 計測対象：丸太直径事前測定値：メジャーにて測定した。

### 1-7-3 計測結果 撮影状況を図 1-31、図 1-32、図 1-33、図 1-34、図 1-35、図 1-36 に示した。 表 1-8 に事前測定値とカメラ測定値の誤差をまとめた。

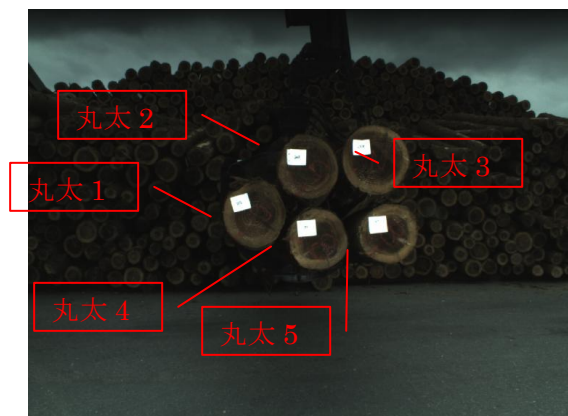


図 1-31 撮影状況



図 1-32 撮影画像(ストロボあり) (左 : 左カメラ、右 : 右カメラ)



図 1-33 撮影画像(ストロボなし) (左 : 左カメラ、右 : 右カメラ)



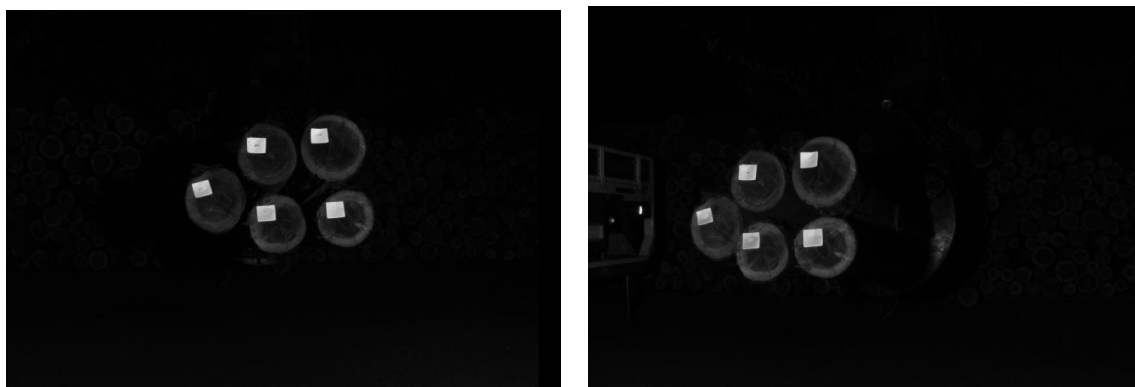


図 1-34 差分画像（左：左カメラ、右：右カメラ）



図 1-35 計測結果出力画像



図 1-36 計測結果を表示した GUI 画面

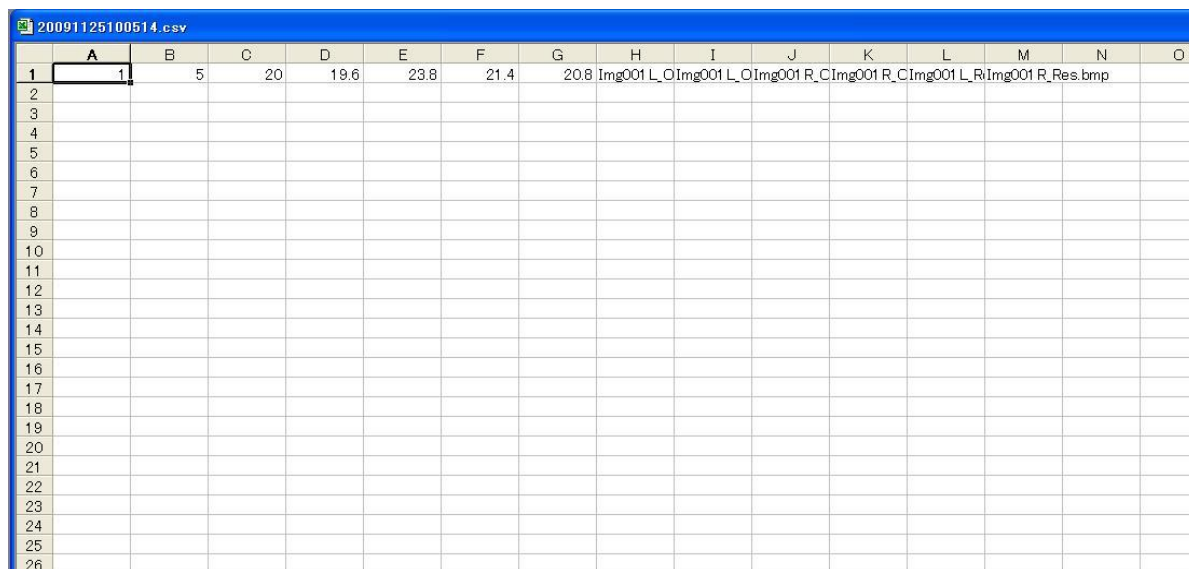
表 1-8 丸太直径計測結果

	丸太 1	丸太 2	丸太 3	丸太 4	丸太 5
事前測定値(cm)	21.2	20.5	23.5	19.5	19.7
カメラ測定値(cm)	21.4	20.8	23.8	20.0	19.6
誤差(cm)	0.2	0.3	0.3	0.5	-0.1

事前測定値とカメラによる測定値の相関係数  $r = 0.99$  であった。

#### 1-7-4 考察：

測定値との誤差は最大 0.5cm、最小 -0.1cm であり、要求精度を満たしている。また、GUI の機能である結果の表示、結果ファイルの出力が問題なく行われていることを確認した。(図 1-37)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	1	5	20	19.6	23.8	21.4	20.8	Img001 L_O	Img001 L_O	Img001 R_C	Img001 R_C	Img001 L_R	Img001 R_Res		
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															
24															
25															
26															

図 1-37 計算結果の csv ファイル内容

## 第 8 節 実験 1-5 実際のフィールドテストでの比較

### 1-8-1 実験の目的

測定本数を増やしてトラック 1 台分の原木を対象とした測定を行い、従来法との計測値を比較した。

### 1-8-2 計測条件

撮影が日光や林地の傾斜などの自然条件に左右されるため下記の条件で行った。

- ① 末口・元口は揃っている。
- ② 長さは揃っている。

### 1-8-3 実験内容

大分県林業試験場研究員 2 名による人力測定（皮込）とカメラによる測定の 2 通りにより、

大型トラック 1 台分の原木の末口最少径の測定を行い、その相関を調べた。

日時：2010 年 11 月 19 日 午後 1 時 天候 晴れ

場所：大分県日田市 (株)日田十条 (アスファルト舗装土場)

対象：スギ 長さ 3m 87 本 48 年生の国有林

#### 1-8-4 結果

表 1-9 にトラック 1 台分の原木末口最少径の計測結果の一覧を示した。実際の原木流通に即応できるように日本農林規格 (JAS) による測定法に準拠した。

表 1-9 トラック 1 台分 (87 本) の計測結果表

NO	測定値			径級区分(JAS)			測定値			径級区分(JAS)		
	人力	カメラ	差	人力	カメラ	差	人力材積	カメラ材積	差	人力材積	カメラ材積	差
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(m3)	(m3)	(m3)	(m3)	(m3)	(m3)
1	15.8	16.0	-0.2	14	16	-2	0.075	0.077	-0.002	0.059	0.077	-0.018
2	18.4	18.3	0.1	18	18	0	0.102	0.100	0.002	0.097	0.097	0.000
3	23.6	23.0	0.6	22	22	0	0.167	0.159	0.008	0.145	0.145	0.000
4	15.6	15.7	-0.1	14	14	0	0.073	0.074	-0.001	0.059	0.059	0.000
5	16.0	15.6	0.4	16	14	2	0.077	0.073	0.004	0.077	0.059	0.018
6	17.8	17.1	0.7	16	16	0	0.095	0.088	0.007	0.077	0.077	0.000
7	17.8	17.9	-0.1	16	16	0	0.095	0.096	-0.001	0.077	0.077	0.000
8	20.0	20.3	-0.3	20	20	0	0.120	0.124	-0.004	0.120	0.120	0.000
9	19.0	19.6	-0.6	18	18	0	0.108	0.115	-0.007	0.097	0.097	0.000
10	19.2	19.2	0	18	18	0	0.111	0.111	0.000	0.097	0.097	0.000
11	18.0	18.2	-0.2	18	18	0	0.097	0.099	-0.002	0.097	0.097	0.000
12	16.0	15.5	0.5	16	14	2	0.077	0.072	0.005	0.077	0.059	0.018
13	17.4	17.8	-0.4	16	16	0	0.091	0.095	-0.004	0.077	0.077	0.000
14	16.6	16.3	0.3	16	16	0	0.083	0.080	0.003	0.077	0.077	0.000
15	15.4	15.5	-0.1	14	14	0	0.071	0.072	-0.001	0.059	0.059	0.000
16	18.4	18.9	-0.5	18	18	0	0.102	0.107	-0.005	0.097	0.097	0.000
17	18.0	18.0	0	18	18	0	0.097	0.097	0.000	0.097	0.097	0.000
18	15.0	14.4	0.6	14	14	0	0.068	0.062	0.006	0.059	0.059	0.000
19	17.8	17.6	0.2	16	16	0	0.095	0.093	0.002	0.077	0.077	0.000
20	18.8	19.4	-0.6	18	18	0	0.106	0.113	-0.007	0.097	0.097	0.000
21	19.0	18.9	0.1	18	18	0	0.108	0.107	0.001	0.097	0.097	0.000
22	16.8	16.8	0	16	16	0	0.085	0.085	0.000	0.077	0.077	0.000
23	23.4	22.9	0.5	22	22	0	0.164	0.157	0.007	0.145	0.145	0.000



24	17.0	17.5	-0.5	16	16	0	0.087	0.092	-0.005	0.077	0.077	0.000
25	16.4	16.2	0.2	16	16	0	0.081	0.079	0.002	0.077	0.077	0.000
26	21.8	21.6	0.2	20	20	0	0.143	0.140	0.003	0.120	0.120	0.000
27	16.2	16.8	-0.6	16	16	0	0.079	0.085	-0.006	0.077	0.077	0.000
28	17.0	17.4	-0.4	16	16	0	0.087	0.091	-0.004	0.077	0.077	0.000
29	26.6	26.7	-0.1	26	26	0	0.212	0.214	-0.002	0.203	0.203	0.000
30	18.0	17.8	0.2	18	16	2	0.097	0.095	0.002	0.097	0.077	0.020
31	21.0	20.5	0.5	20	20	0	0.132	0.126	0.006	0.120	0.120	0.000
32	17.6	17.8	-0.2	16	16	0	0.093	0.095	-0.002	0.077	0.077	0.000
33	16.4	17.2	-0.8	16	16	0	0.081	0.089	-0.008	0.077	0.077	0.000
34	15.0	15.2	-0.2	14	14	0	0.068	0.069	-0.001	0.059	0.059	0.000
35	20.0	19.7	0.3	20	18	2	0.120	0.116	0.004	0.120	0.097	0.023
36	19.8	20.0	-0.2	18	20	-2	0.118	0.120	-0.002	0.097	0.120	-0.023
37	22.2	22.0	0.2	22	22	0	0.148	0.145	0.003	0.145	0.145	0.000
38	21.6	21.1	0.5	20	20	0	0.140	0.134	0.006	0.120	0.120	0.000
39	18.2	18.0	0.2	18	18	0	0.099	0.097	0.002	0.097	0.097	0.000
40	16.2	16.0	0.2	16	16	0	0.079	0.077	0.002	0.077	0.077	0.000
41	20.0	19.3	0.7	20	18	2	0.120	0.112	0.008	0.120	0.097	0.023
42	19.6	19.9	-0.3	18	18	0	0.115	0.119	-0.004	0.097	0.097	0.000
43	18.0	17.5	0.5	18	16	2	0.097	0.092	0.005	0.097	0.077	0.020
44	18.2	17.7	0.5	18	16	2	0.099	0.094	0.005	0.097	0.077	0.020
45	17.3	17.1	0.2	16	16	0	0.090	0.088	0.002	0.077	0.077	0.000
46	20.6	20.1	0.5	20	20	0	0.127	0.121	0.006	0.120	0.120	0.000
47	19.0	18.9	0.1	18	18	0	0.108	0.107	0.001	0.097	0.097	0.000
48	17.2	17.2	0	16	16	0	0.089	0.089	0.000	0.077	0.077	0.000
49	16.0	15.3	0.7	16	14	2	0.077	0.070	0.007	0.077	0.059	0.018
50	23.0	22.8	0.2	22	22	0	0.159	0.156	0.003	0.145	0.145	0.000
51	17.3	16.5	0.8	16	16	0	0.090	0.082	0.008	0.077	0.077	0.000
52	15.7	15.3	0.4	14	14	0	0.074	0.070	0.004	0.059	0.059	0.000
53	21.7	21.3	0.4	20	20	0	0.141	0.136	0.005	0.120	0.120	0.000
54	16.1	15.6	0.5	16	14	2	0.078	0.073	0.005	0.077	0.059	0.018
55	17.7	16.4	1.3	16	16	0	0.094	0.081	0.013	0.077	0.077	0.000
56	21.0	19.8	1.2	20	18	2	0.132	0.118	0.014	0.120	0.097	0.023
57	21.0	20.1	0.9	20	20	0	0.132	0.121	0.011	0.120	0.120	0.000
58	15.6	15.4	0.2	14	14	0	0.073	0.071	0.002	0.059	0.059	0.000

59	16.4	14.9	1.5	16	14	2	0.081	0.067	0.014	0.077	0.059	0.018
60	15.7	15.7	0	14	14	0	0.074	0.074	0.000	0.059	0.059	0.000
61	21.2	19.2	2	20	18	2	0.135	0.111	0.024	0.120	0.097	0.023
62	18.0	16.5	1.5	18	16	2	0.097	0.082	0.015	0.097	0.077	0.020
63	23.4	23.5	-0.1	22	22	0	0.164	0.166	-0.002	0.145	0.145	0.000
64	16.4	16.4	0	16	16	0	0.081	0.081	0.000	0.077	0.077	0.000
65	16.0	15.4	0.6	16	14	2	0.077	0.071	0.006	0.077	0.059	0.018
66	14.6	14.1	0.5	14	14	0	0.064	0.060	0.004	0.059	0.059	0.000
67	18.8	16.9	1.9	18	16	2	0.106	0.086	0.020	0.097	0.077	0.020
68	19.0	19.0	0	18	18	0	0.108	0.108	0.000	0.097	0.097	0.000
69	18.6	17.2	1.4	18	16	2	0.104	0.089	0.015	0.097	0.077	0.020
70	29.8	29.7	0.1	28	28	0	0.266	0.265	0.001	0.235	0.235	0.000
71	18.2	17.2	1	18	16	2	0.099	0.089	0.010	0.097	0.077	0.020
72	20.6	19.5	1.1	20	18	2	0.127	0.114	0.013	0.120	0.097	0.023
73	15.8	15.6	0.2	14	14	0	0.075	0.073	0.002	0.059	0.059	0.000
74	15.9	15.6	0.3	14	14	0	0.076	0.073	0.003	0.059	0.059	0.000
75	21.8	21.6	0.2	20	20	0	0.143	0.140	0.003	0.120	0.120	0.000
76	18.1	18.1	0	18	18	0	0.098	0.098	0.000	0.097	0.097	0.000
77	21.3	18.0	3.3	20	18	2	0.136	0.097	0.039	0.120	0.097	0.023
78	16.6	15.9	0.7	16	14	2	0.083	0.076	0.007	0.077	0.059	0.018
79	20.7	21.3	-0.6	20	20	0	0.129	0.136	-0.007	0.120	0.120	0.000
80	19.6	18.5	1.1	18	18	0	0.115	0.103	0.012	0.097	0.098	-0.001
81	20.2	20.2	0	20	20	0	0.122	0.122	0.000	0.120	0.120	0.000
82	17.5	16.8	0.7	16	16	0	0.092	0.085	0.007	0.077	0.077	0.000
83	18.0	16.4	1.6	18	16	2	0.097	0.081	0.016	0.097	0.077	0.020
84	19.6	19.3	0.3	18	18	0	0.115	0.112	0.003	0.097	0.097	0.000
85	22.6	21.5	1.1	22	20	2	0.153	0.139	0.014	0.145	0.120	0.025
86	15.1	14.7	0.4	14	14	0	0.068	0.065	0.003	0.059	0.059	0.000
87	19.6	19.5	0.1	18	18	0	0.115	0.114	0.001	0.097	0.097	0.000
計							9.226	8.897	0.329	8.363	7.956	0.407

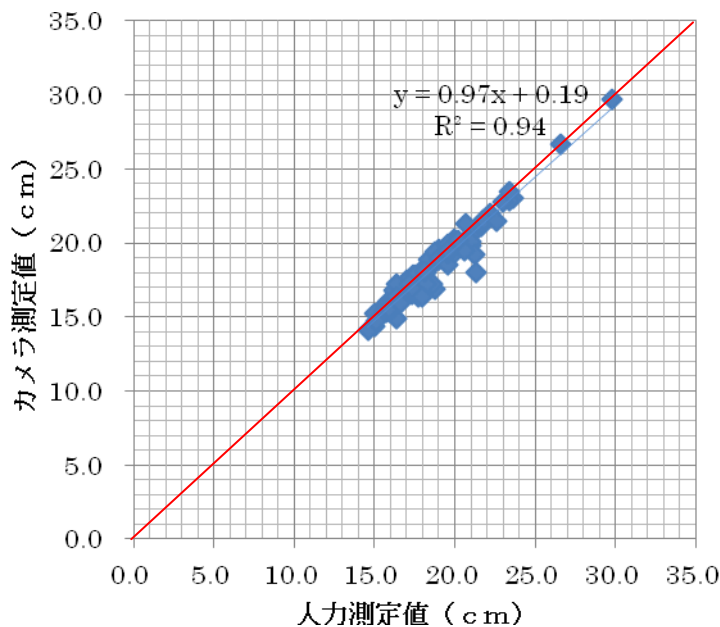


図 1-38 原木末口最少径の人力による測定値とカメラによる測定値の相関

#### 1-8-5 考察

- ① 人力による事前測定値とカメラによる測定値との測定結果は図 1-38 に示す通りで、相関係数は  $r = 0.94$  であった。誤差の最大値は  $3.3\text{cm}$  であり最小は  $-0.8\text{cm}$  平均は  $0.4\text{cm}$  であった。
- ② このデータをもとに JAS による材積計算を行うと、人力による事前計測値は  $9.2264\text{m}^3$ 、カメラによる計測値は  $8.897\text{m}^3$  であり差が  $0.329\text{m}^3$  であった。
- ③ JAS の径級区分による材積計算を行うと、人力による事前計算値が  $8.363\text{m}^3$ 、カメラによる計測値は  $7.956\text{m}^3$  であり差が  $0.407\text{m}^3$  であった。人力による測定値を 100% と仮定すると、カメラによる測定値は、95.1% となり、他の機械と比較しても遜色の無い程度の差異であった。
- ④ 木口面のきれいなものは相関関係が高いが、木口面に泥が付着したものや枝葉による異常値があった。
- ⑤ 木口面が変色したものに異常値があった。図 1-39、図 1-40、図 1-41、図 1-42 に例を示した。
- ⑥ 計測作業時間については、従来一台約 15 分程度の積込時間が、カメラで測定することにより 20 分程度になった。これは計測集計時間も含んでおり帳票の出力時間まで考えれば飛躍的な時間短縮が実現できることがわかった。
- ⑦ 従来の計測方法と比較しての優位性は、ポータブルで伐採現場等の屋外環境でも天候にかかわらず積込作業中に計測でき、余分な工程は不要で測定人によるところの計測値のばらつきも無く、取引の公正が確保され、伐採現場から製材工場等への直送が可能となる。また、買主側である工場等でも積み降ろし時に再度計測することにより納品チェックが容易で在庫管理ができる。
- ⑧ このシステムは山林所有者にとって原木の販売管理が容易になり、流通コストの低減により手取り収入が増加し、需要者側の情報を早く知ることができる可能性が高まる。一方、需要者側は在庫管理が容易になり、価格・品質・量の安定が図られ計画的な生産が可能となり工

場の大規模化や近代化に寄与できる可能性がある。また、林業の採算性の向上は再造林の可能性を高め持続性のある産業となり森林整備が進む等の社会的影響が期待される。

- ⑨ このシステムには検知機能はあるが原木の形状や品質による選別機能はない。よって山林土場または、工場側の土場で仕分けが求められる場合がある。



図 1-39 ストロボあり画像



図 1-40 差分画像



図 1-41 計測結果



図 1-42 閾値調整により改善された結果

#### 1-8-6 まとめ

計測システムを使って原木の計測実験を行い、原木直径サイズの自動計測、結果の表示、結果の出力など一連の処理が正しく行われていることが確認できた。<sup>6)</sup>

実験結果から計測の安定性や速度に対しては、高速化や撮影パラメータ自動調整機能や装置の大きさや変色丸太への対応等の課題があることがわかった。高速化の課題に対しては、アルゴリズムの改良や画像の明るさによる自動調整機能を追加し、小型化のためにはカメラ間隔を短縮する必要がある。変色丸太には、閾値の調整やコントラストの改善により計測システムの性能が改善されるため実用段階への移行が可能なシステムであることがわかった。

## 第9節 実験 1-6 実用機と他の測定法との比較

### 1-9-1 実用機

各課題についてそれぞれ対策をとることで、実用機の開発を行った。計測用の2台のカメラとモニター用のカメラの3台のカメラとストロボと図1-43で示すように、LAN接続されたパソコンと無線LANで接続されたリモート用パソコンと発電機で構成されている。設置作業は、作業者が一人で測定でき、システム全体を車両の助手席等に積載し移動できるものとした。

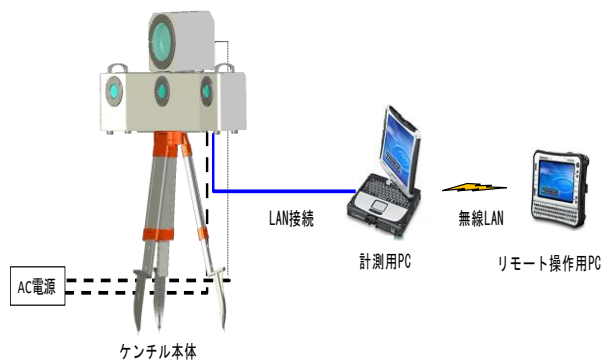


図 1-43 システムの構成



図 1-44 測定状況

小型で可搬性に優れ、伐採現場や中間土場、工場等、どのような場所でも測定可能であり、図1-44のようにトラックの運転手が積込作業を行いながらモニター画面を押すだけで、測定を行える簡単な操作性である。雨天等の悪天候の中でも、充分その精度を保つことができる。

要望があればトラックに積込み時と荷降ろし時に、それぞれ測定が可能であり、一台毎の明細が瞬時に出力される。これにより山側と工場側が、それぞれ対等の立場で測定でき、双方の数量を比較確認できるので信頼性を高めることができる。地域によっては、山積みした状態で測定作業を行い、明細を発行することが習慣化している場合があるが、輸送時に取りかけ在庫が発生することが多く、工場側としては移動を伴う、トラック毎の明細の方が入荷時に確認され安心できる。

なお、この測定は長さで末口・元口の向きがそろっているという条件の下で行うことができる。素材生産業者や運送業者への聞き取り調査では、この作業は、作業工程を前もって指示しておけば、特にコストアップにはならず、トラックの積載量に関しても、荷台の上半分と下半分で方向を区別すれば、ほとんど変化がなく、さらに受入の工場側にとっては、末口元口の方向がそろって入荷することは工場側のコストダウンにも寄与できることがわかった。<sup>7) 8)</sup>

測定時には図1-45のように、作業者・作業場所・作業種別・樹種・長さを入力する。測定作業者はグラップルの

図 1-45 測定条件の設定



運転者を想定しており、トラックの運転手等に作業ストレスをかけずに、測定ができるよう設計されている。また運転手にとっても積載材積を運ぶ前に知ることができるメリットがある。

パソコンのモニター画面には、図 1-46 に示す通り、原木の本数と最小径をmm単位で表示する。グラップルで 2～15 本位掴んだ状態で測定するため、計測回数も表示される。これらの数字をオペレーターが確認しながら測定し、何か不備がある場合はマーキングすることにより測定後、その測定写真が帳票と同時に出力され、あとで確認できる仕組みとなっている。最小径は末口面の端から、はみ出さない最大の正円を求めることにより求める。これを日本農林規格に従って換算し、図 1-47 に示す帳票を発行する。これによりトラック一台毎の明細が明らかになる。また自動的に測定開始時間と終了時間が表示される。また GPS 機能を持っているため測定位置の緯度・経度も表示でき、信頼性の高い帳票を発行することが可能である。



図 1-46 測定画面

計測位置	計測径	計測回数	計測結果
1	27.4	1	27.4
2	23.2	1	23.2
3	20.7	1	20.7
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
計測総本数		3	

図 1-47 出力帳票の例

## 1-9-2 実用機の効果

測定作業の測定精度や測定時間やコストダウンの効果については、平成 22 年度林業生産革新的取組支援事業で実証試験を行った。<sup>7) 8)</sup>

現場によってコストダウンの効果は異なるが、このシステムを利用すれば、図 1-48 のように従来型の原木市場等を経由する場合と比較すると、物流コストも含めて、2,000 円/m<sup>3</sup>～3,000 円/m<sup>3</sup>の経費減となった。これらの経緯を踏まえ、実用レベルをクリアしたので、現場での作業性を考慮した実用機の開発を行った。

一般に検知作業における請負金額は、業者への聴き取り調査によると 1 立法メートル当たり数百円といわれている。よって測定機導入に伴う費用は、作業量にもよるが、約 200 円/m<sup>3</sup> (5 年償却・5,000m<sup>3</sup>/年) と試算し、補助金等を利用すれば 2～3 年で投資効果がみられるものを目標とし

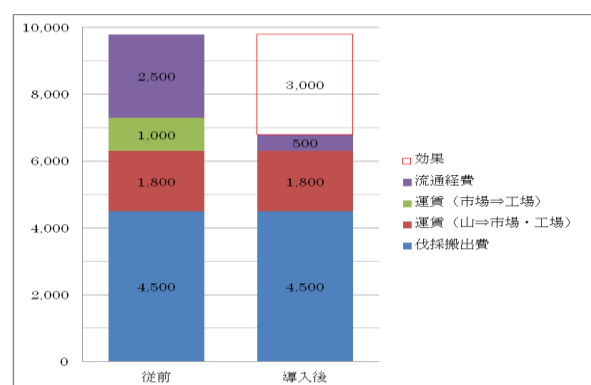


図 1-48 経費節減の例

た。

この測定機は単なる検知作業の合理化だけでなく、さらなる付加価値に応える可能性がある。測定機から出力されたデータは CSV ファイルに保存されるため、これを利用することにより複数の伐採現場や中間土場・工場等の場所ごとに原木の動きを正確にとらえることが可能となる。特に最近、その機能が重要視されている中間土場では、原木の入出荷を正確に管理し、固定された機械ではないので、土場が移動しても、容易に移動対応できる手法としての活用が期待される。

### 1-9-3 3通り（人力・選木機・カメラ）の測定法の比較

#### （1）概要

大型トラック 1 台分原木を末口に番号を付け、図 1-49、図 1-50、図 1-51 のように人力測定・選木機のスキャナー測定（以下 選木機測定）・カメラ測定の 3 通りの方法で測定し、1 本毎にその測定精度を比較する。なお人力測定には、大分県農林水産研究センター林業試験部の職員 4 名に協力いただいた。



図 1-49 カメラ検知状況



図 1-50 選木機スキャナー部

#### （2）内容

日時 平成 22 年 11 月 19 日 晴れ  
対象 スギ 大型トラック 1 台分 71 本 4m  
場所 日田市森林組合共販所  
使用機材 C 社製選木機 ・ 材積測定機 ・ グラップル付きトラック（15 t）



図 1-51 人力測定状況



## (3) 結果

表 1-10 3通りの測定法による測定値

no	①人力値			②選木機			③カメラ			測定値差	
	測定値	JAS 径級	材積	測定値	Jas 径級	材積	測定値	JA 径級	材積	①-②	①-③
	mm	cm	m <sup>3</sup>	mm	cm	m <sup>3</sup>	mm	cm	m <sup>3</sup>	mm	mm
124	245	24	0.230	248	24	0.230	234	22	0.194	-3	11
125	193	18	0.130	194	18	0.130	192	18	0.130	-1	1
126	228	22	0.194	236	22	0.194	227	22	0.194	-8	1
128	315	30	0.360	328	32	0.410	317	30	0.360	-13	-2
129	330	32	0.410	344	34	0.462	328	32	0.410	-14	2
132	235	22	0.194	244	24	0.230	240	24	0.230	-9	-5
133	215	20	0.160	232	22	0.194	221	22	0.194	-17	-6
134	290	28	0.314	296	28	0.314	289	28	0.314	-6	1
135	283	28	0.314	288	28	0.314	282	28	0.314	-5	1
137	221	22	0.194	236	22	0.194	237	22	0.194	-15	-16
138	218	20	0.160	228	22	0.194	227	22	0.194	-10	-9
139	284	28	0.314	312	30	0.360	307	30	0.360	-28	-23
140	205	20	0.160	210	20	0.160	212	20	0.160	-5	-7
141	195	18	0.130	206	20	0.160	204	20	0.160	-11	-9
142	218	20	0.160	246	24	0.230	257	24	0.230	-28	-39
145	215	20	0.160	218	20	0.160	219	20	0.160	-3	-4
146	192	18	0.130	198	18	0.130	201	20	0.160	-6	-9
147	209	20	0.160	226	22	0.194	233	22	0.194	-17	-24
150	260	26	0.270	272	26	0.270	262	26	0.270	-12	-2
151	300	30	0.360	316	30	0.360	302	30	0.360	-16	-2
152	293	28	0.314	298	28	0.314	290	28	0.314	-5	3
153	175	18	0.130	202	20	0.160	183	18	0.130	-27	-8
154	240	24	0.230	242	24	0.230	231	22	0.194	-2	9
155	290	28	0.314	310	30	0.360	293	28	0.314	-20	-3
157	181	18	0.130	192	18	0.130	186	18	0.130	-11	-5
158	205	20	0.160	210	20	0.160	196	18	0.130	-5	9
159	200	20	0.160	214	20	0.160	203	20	0.160	-14	-3
160	220	22	0.194	230	22	0.194	223	22	0.194	-10	-3
161	242	24	0.230	256	24	0.230	246	24	0.230	-14	-4
163	178	16	0.102	190	18	0.130	182	18	0.130	-12	-4
166	220	22	0.194	232	22	0.194	224	22	0.194	-12	-4

167	250	24	0.230	266	26	0.270	254	24	0.230	-16	-4
168	256	24	0.230	272	26	0.270	247	24	0.230	-16	9
169	178	16	0.102	200	20	0.160	182	18	0.130	-22	-4
170	230	22	0.194	238	22	0.194	221	22	0.194	-8	10
171	215	20	0.160	222	22	0.194	218	20	0.160	-7	-3
172	275	26	0.270	286	28	0.314	274	26	0.270	-11	1
173	301	30	0.360	324	32	0.410	307	30	0.360	-23	-6
174	315	30	0.360	332	32	0.410	316	30	0.360	-17	-1
175	320	32	0.410	340	34	0.462	328	32	0.410	-20	-8
176	263	26	0.270	276	26	0.270	259	24	0.230	-13	4
177	279	26	0.270	290	28	0.314	279	26	0.270	-11	0
178	210	20	0.160	224	22	0.194	217	20	0.160	-14	-7
179	200	20	0.160	220	22	0.194	212	20	0.160	-20	-12
180	308	30	0.360	322	32	0.410	305	30	0.360	-14	3
181	230	22	0.194	242	24	0.230	231	22	0.194	-12	-1
182	210	20	0.160	222	22	0.194	206	20	0.160	-12	4
184	267	26	0.270	284	28	0.314	264	26	0.270	-17	3
185	275	26	0.270	296	28	0.314	277	26	0.270	-21	-2
186	218	20	0.160	214	20	0.160	223	22	0.194	4	-5
187	270	26	0.270	284	28	0.314	276	26	0.270	-14	-6
188	215	20	0.160	228	22	0.194	219	20	0.160	-13	-4
189	278	26	0.270	298	28	0.314	292	28	0.314	-20	-14
190	235	22	0.194	250	24	0.230	240	24	0.230	-15	-5
191	255	24	0.230	270	26	0.270	255	24	0.230	-15	0
192	201	20	0.160	212	20	0.160	204	20	0.160	-11	-3
193	231	22	0.194	276	26	0.270	274	26	0.270	-45	-43
194	239	22	0.194	238	22	0.194	238	22	0.194	1	1
195	208	20	0.160	224	22	0.194	214	20	0.160	-16	-6
196	188	18	0.130	196	18	0.130	192	18	0.130	-8	-4
197	215	20	0.160	230	22	0.194	218	20	0.160	-15	-3
198	303	30	0.360	324	32	0.410	311	30	0.360	-21	-8
199	190	18	0.130	204	20	0.160	186	18	0.130	-14	4
200	205	20	0.160	226	22	0.194	210	20	0.160	-21	-5
201	206	20	0.160	244	24	0.230	241	24	0.230	-38	-35
202	258	24	0.230	266	26	0.270	256	24	0.230	-8	2
203	283	28	0.314	302	30	0.360	282	28	0.314	-19	1

204	300	30	0.360	320	32	0.410	310	30	0.360	-20	-10
205	253	24	0.230	264	26	0.270	255	24	0.230	-11	-2
206	228	22	0.194	236	22	0.194	223	22	0.194	-8	5
207	185	18	0.130	188	18	0.130	190	18	0.130	-3	-5
平均値(mm)										-13.6	-4.4
材積計(m <sup>3</sup> )			15.638			17.514			16.125		
%			100.0%			111.9%			103.1%		

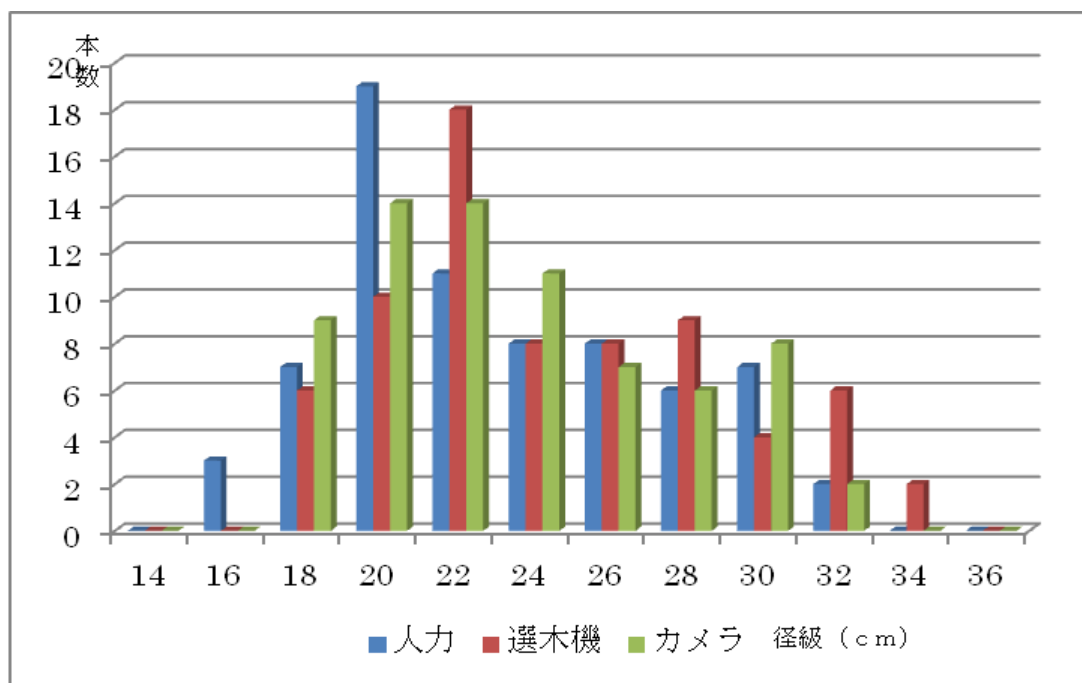


図 1-52 3通りの測定法による径級分布

#### (4) 考察

3通りの測定法による計測値は、表 1-10 の通りで、カメラ測定の方が選木機測定より人力測定による測定値に近いことがわかった。人力測定を 100% とすると、カメラによる測定値は 103.1% であった。選木機による測定値は、111.9% であり、カメラによる実用機の測定精度は、選木機によるものに劣らず、充分その能力を満たしていることがわかった。図 1-52 に測定法毎の径級分布をまとめた。径級分布は、人力検知が他の測定方法に比べ、若干小径の方にある傾向があった。

また、人力測定と選木機測定の相関図を図 1-53 に示し、相関係数は 0.96 であった。人力測定とカメラ測定の測定図を図 1-54 に示し、相関係数は 0.94 であった。選木機測定とカメラ測定の相関図を図 1-55 に示し、相関係数は 0.97 であった。

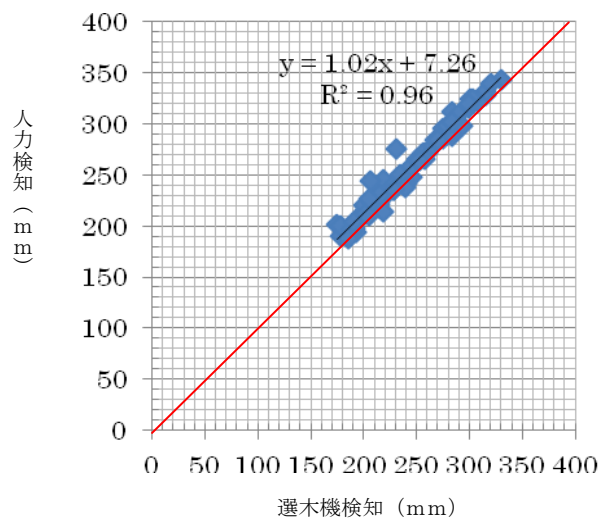


図 1-53 人力検知と選木機検知の相関図

人力検知と選木機検知との  
相関係数：0.96

数本の差の大きい値が見られる。

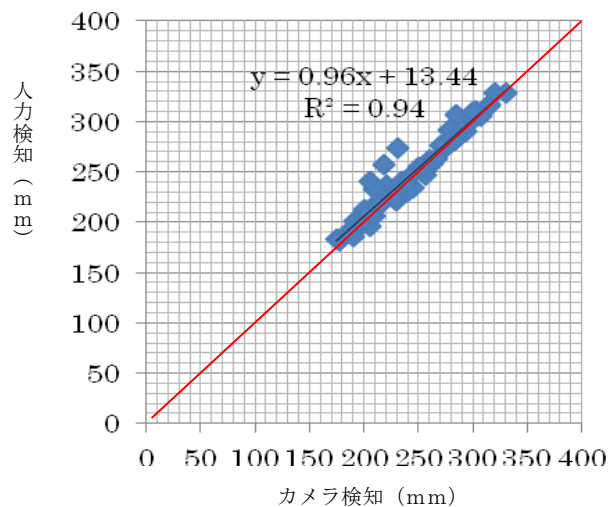


図 1-54 人力検知とカメラ検知の相関図

人力検知とカメラ検知との相  
関係数：0.94

数本の差の大きい値が見られ  
る。

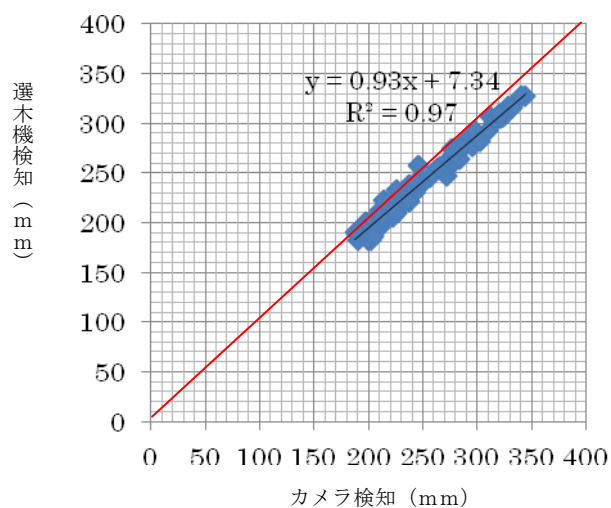


図 1-55 選木機検知とカメラ検知の相関図

選木機検知とカメラ検知の相関  
係数：0.97

3通りのなかで、機械測定同士  
のこの組み合わせの相関係数が最  
も大きく、差の大きい値が少な  
い。

## 第 10 節 原木流通管理システム

### 1-10-1 原木流通管理システムの概要

原木流通管理システムの概要を図 1-56 に示す。

原木流通は、図 1-57 のよう経路をたどるが、それぞれの場所で測定された測定値を全てネットでデータベース化し、測定場所ごとや時間毎の集計処理を行えるソフト開発を、図 1-58 のように行った。測定場所により積込み時と荷降ろし時に分けて測定値を集計している。

また撮影した画像データを保存し、いつでもどこでも再現可能とし、売買双方の立場で数量の確認を行うことができ、信頼性のある原木売買ができることを目的としている。データベースは、クラウド化することにより、従来法より低コストで安全に構築することが可能となった。

このシステムを導入することにより遠隔地の伐採現場の素材生産量の把握が、正確に効率よく行うことができるようになる。迅速なデータ収集により、素材生産業者や運送業者は生産性やコスト管理が容易に行うことができるようになる。特に多くの現場を管理する立場の者にとっては、遠隔地の作業進捗状況の把握を一元的に行えるので、作業費の精算や運賃精算等を迅速に行うことができ、林業のコスト管理が飛躍的に正確に行えることが期待できる。

出力画面には、図 1-59 のように地図上に伐採現場のマークが表示され、ここをクリックすると日毎の生産量が表として表示され、さらにグラフをクリックするとグラフ化される。

地図の縮尺は図 1-60 のように任意に変更され、日本全国の素材生産状況を指定した期間毎にリアルタイムで表示することが可能であり、行政区画（市町村や都道府県や森林管理局）ごとに管理することが可能となる。また縮尺を変更すれば、図 1-61 のように伐採現場を特定でき、伐採跡地や間伐作業の事業実施後の状況の把握が可能となる。また、これにより植林放棄林の発生を抑制できる可能性がある。

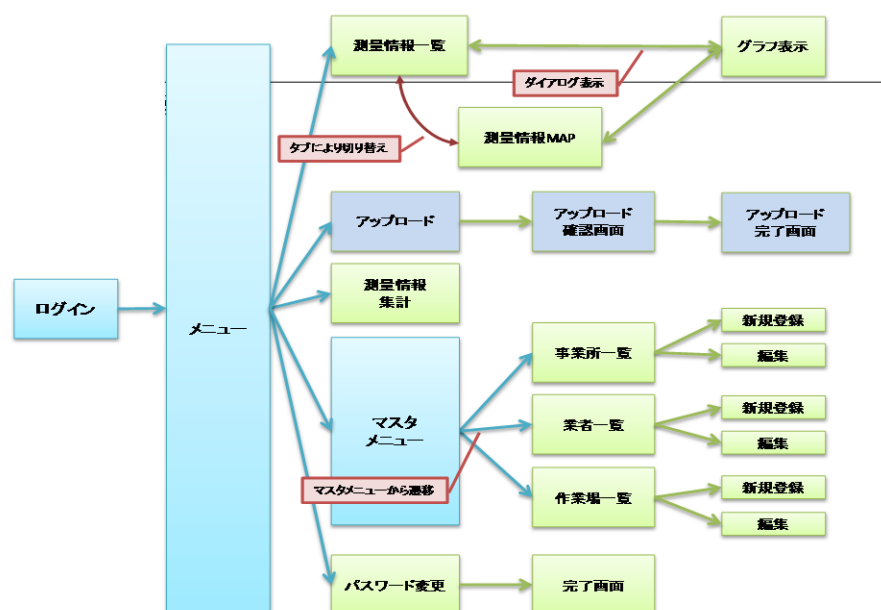


図 1-56 原木流通管理システムの仕組み

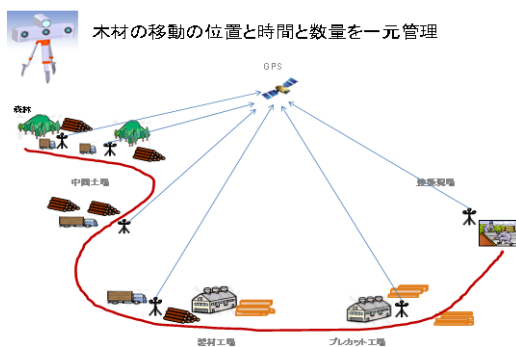
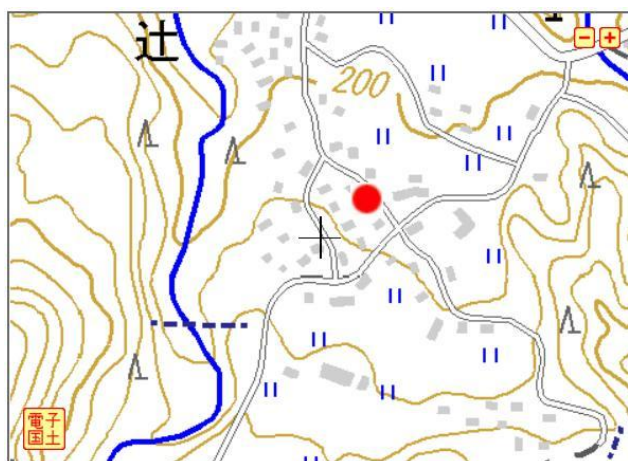


図 1-57 測定場所例（伐採現場・中間土場・工場） 図 1-58 原木流通管理システムの入力画面

<http://kenchil.com/login>



旧神金作業場

グラフ

作業日	積込		積降	
	本数	材積	本数	材積
2012/10/20			83	12.950
2012/10/22			184	17.647
2012/10/24			227	38.568
2012/11/05			68	11.998
2012/11/19			89	14.294
合計			651	95.457

図 1-59 出力画面の伐採現場のマークと表

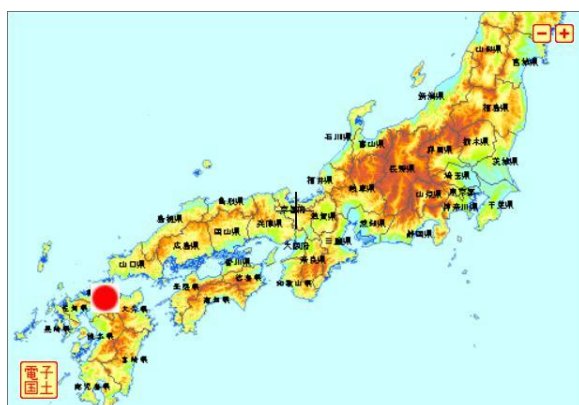


図 1-60 縮尺を変更し広域での生産状況の表示 図 1-61 指定地域の指定期間の生産状況の表示

### 1-10-2 原木流通管理システムの効果

このシステムが普及すれば林業事業体の生産性の向上と生産管理体制の構築に寄与できるだけでなく、素材生産業者や運送業者が伐採現場で、誰よりも早く数量を把握できるため、山側が主体性をもった売買や請負業務を行うことが可能となる。毎日の生産量を把握できれば、機械化によるコストダウン効果や作業工程の見直し等による工夫の効果が即時にわかり、その現場に最も適した作業工程を採用することが可能になり、効果の少ない場合は、迅速に他の作業方法を考案する等の対策をとることが可能となる。

また、このシステムが普及することにより、地域毎の素材生産量の把握が可能となり、行政区画毎の生産量等の農林統計調査等に利用できる可能性がある。

さらに地域の長級・径級毎の生産量が把握できるので、このデータを利用して小口の生産者が協力し、まとまった量として大口需要家への販売情報をもつことになり、有利な販売につながることも考えられる。図 1-57 に示すログイン画面より入力されるが、測定機毎のシリアル番号とパスワードで管理され、作業現場と営業所や本支店等での階層を付与することにより管理が、容易になるよう設計されている。<sup>9) 10)</sup>

このシステムの普及を進めるためには、実演会の実施や、実際に使用してみる機会を少しでも多く作る必要がある。そして林業業界全体の旧態依然とした古い慣習の打破を行わなければならない。単なる測定作業の効率化だけでなく、数量を早く正確に把握することが、山側に主体性を取り戻し、林業のコストの低減に、いかに役立つかを説得していかなければならない。

高性能林業機械等の導入により、遅れていた林業の世界も少しずつ近代化が進んでいる。しかし高額な投資に伴う収支を常に把握できる仕組みがなければ、危うい経営にならざるを得ない。林業事業体が規模の拡大を図るならば、その規模に応じた管理システムが必要になってくる。少なくとも毎日の生産量や月次での決算を必ず行わなければならない。そのためには、このような検知システムや原木流通管理システムが必ず必要である。他産業では当然のことが、できてないのが林業の世界である。なにも林業が特別なのではなく、「材価低迷で採算が合わない」と、言い訳のみを探す時代は終焉している。

また、材価の不安定さが、林業関係者に悪影響を与えているが、このシステムは、地域毎の原木需給状況の調査に利用の可能性が考えられ、適切な需給情報の共有により安定した原木の供給が可能となり、供給者だけでなく需要者にもメリットのあるシステムといえる。

このデータベースには、多くの林業情報が蓄積され続けるので、これを利用した新たなサービスを模索している。地域毎の蓄積と生産量と需要量との関連や、年輪画像を利用した個体識別やトレーサビリティへの応用への可能性など、楽しみな課題もあり、多くの林業を取り巻く課題の解決策のひとつになることを期待される。



## 第2章 年輪紋様の情報化について

### 第1節 はじめに

木造建築に供される木材製品は、山林で数十年育てられた後、伐採・搬出・製材・乾燥・加工という一連の工程を経たのち、それぞれの建築現場において、更に数十年間の建築物としての役割を果たすことになる。再生可能資源として注目を集める木材ではあるが、木材の流通過程は複雑で需要者側がその生産地を特定することは容易ではない。

木材のトレーサビリティとしては、バーコードや IC タグを貼り付ける方法が研究<sup>11) 12) 13)</sup>されている現状がある。しかし運搬中のラベルの脱落・損傷や木材加工時において、その存在が欠落する問題点があり、信頼性の高いシステムとしての確立が容易でないことが危惧される。自然保護の観点からも木材の伐採に係る合法性や、認証制度は確立されつつあるが、食品業界と同じように林業・木材産業にも消費者が、安心して利用できる共通システムの実現が望まれている。本研究は、図 2-1 のような木材の木口面の年輪紋様に着目し、これを情報化することにより人の指紋と同様に、個々の木材の個体認識等に利用する可能性について研究を行った。



図 2-1 木口面の年輪紋様

### 第2節. 既存の研究と年輪紋様の情報化の目的と効果

木材トレーサビリティの既存の研究としては、原木の土場での表示を伴った分別作業やバーコードや IC タグを貼り付けたものが散見される<sup>1) 2) 3)</sup>が、原木流通段階や加工工場での分別作業には相応の広さと労力が必要である。バーコードや IC タグは、加工を伴う工場では加工の妨げになるだけではなく、はがれや脱落を防ぐために張替え等の作業を行わねばならなくなり、信頼性を損ないかねない。このような問題点を解決し、より信頼性の高い仕組みを確立できないかを探ることを本研究の目的とした。年輪という木材固有のもので個体識別可能になれば、次のようなことが簡単に正確に可能となる。

- ・合法木材や認証木材の分別
- ・ウッドマイレージ等の正確な把握
- ・施主が自らの家屋に使用された木材の産地が把握できるため、いわゆる顔の見える住宅を建築するのも容易となる。
- ・産出された地点の跡地造林の状態を容易に調査可能となり、放棄林増加の抑制に役立つ。

具体的には、写真データを一連の繋がりとしてデータベース化することで、施主が建築現場の管柱の木口面の年輪をスキャニングすることにより各加工段階の場所と日時が検索でき、さらに伐採された場所や時間、所有者などのデータを得ることができるしくみを構築できることの一助になることを期待している。

このようなシステムを確立することによって、機械化の遅れている林業や木造建築の分野の近代化を図り、採算性の向上に寄与できるのではないかと、また新築家屋の家歴についても使用した木材の履歴を把握できる可能性を探り、木造住宅を建てる施主に対し安心感を供与できるしくみをつくるきっかけができるのではないかと考えた。まず、図 2-2 の様に木材流通の後半部分であり、木口面の比較的鮮明な製材製品の形状における乾燥材の木口面の年輪を情報化することに取り組んだ。



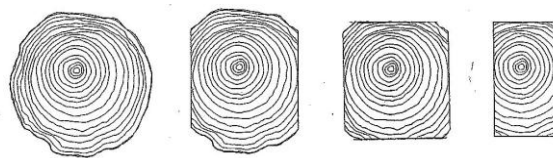


図 2-2 製材加工工程において切りだされた木口年輪紋様の変化

### 第 3 節 実験 2-1 木材の木口画像を正規化距離で比較

#### 2-3-1 目的

同一個体の木口断面の画像と別個体との木口断面の画像についてそれぞれの画像間の正規化距離（相互の写真の各ピクセルの輝度の差を二乗し、その和を求めた値）に着目し、その値による識別の可能性がないか調べることを目的とした。

#### 2-3-2 実験方法

1. スギ平角人工乾燥材（4mx120mmx240mm 2 本）の木口面を図 2-2 の様に撮影し、1024x2048 で抽出した。
2. 数値計算ソフトウェア「MATLAB」の関数「`rab2gray`」を用いて図 2-3 の様にグレースケールに変換する。
3. 図 2-4 に示すように、128x256 画素に縮小する。
4. 3x3 画像の平坦な窓関数を用いて平滑化する。（図 2-5）
5. 各画像を、最も黒に近い画素の値がゼロになるように、データの値を引き下げる。（図 2-6）
6. 各画像を、最も白に近い画素の値が 255 になるように、データの値を引き上げる。（図 2-7）
7. 図 2-8 のように同一材を 50cm 毎にカットした。
8. 7 断面の写真相互について、それぞれ同様の処理を施し、他の 6 枚との相互の写真について図 2-9 のように各距離を求め正規化距離とした。



図 2-2 トリミング

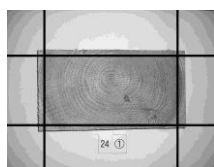


図 2-3 グレースケールへ変換

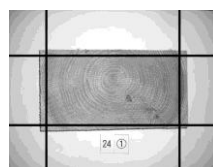


図 2-4 画素の縮小



図 2-5 画素の平滑化

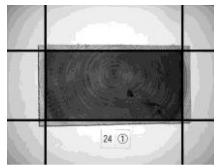


図 2-6 データ引下げ

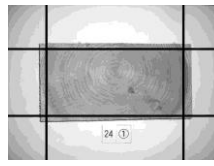


図 2-7 データの引上げ

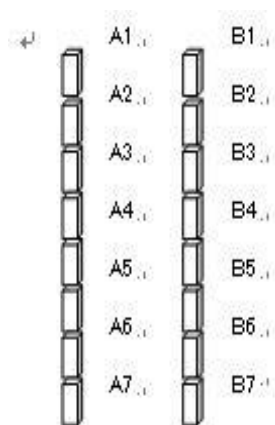


図 2-8 7ヶ所カット位置

なお画像 A と画像 B 間の正規化距離  $d'$  の求め方は次式とした。

$$d(A,B) = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (f(x,y) - g(x,y))^2$$

$$d' = \sqrt{d/mn}$$

$m$ =縦方向の画素数     $n$ =横方向の画素数

2 枚の同一画像を X 方向にずらすことによる正規化距離の変化の例を図 2-8 に示した。

同一画像の場合、正規化距離は一致する位置で当然ゼロとなり、左右にずれることにより急激に増大する。

### 2-3-3 結果と考察

A B 2 本の同一材の 7 ヶ所の位置による木口面の写真相互の正規化距離を表 2-1、2-2 にそれぞれ示した。

表 2-1 同一個体(A)を長さ方向に 7 ヶ所カットした木口面の画像間の正規化距離

平均値=37.6 標準偏差=10.0

No	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
A1	0.0	34.7	28.0	43.7	41.3	26.2	27.0
A2	34.7	0.0	32.8	61.1	58.2	35.0	35.6
A3	28.0	32.8	0.0	44.4	44.4	29.4	25.5
A4	43.7	61.1	44.4	0.0	28.8	42.0	43.9
A5	41.3	58.2	44.4	28.8	0.0	38.6	43.0
A6	26.2	35.0	29.4	42.0	38.6	0.0	26.0
A7	27.0	35.6	25.5	43.9	43.0	26.0	0.0

注)それぞれの各画像間の平均値と標準偏差はゼロでない右上半分の 21 個の値を用いた。

表 2-2 同一個体(B)を長さ方向 7 ヶ所カットした木口面の画像間の正規化距離

平均値=44.0 標準偏差=12.7

No	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
B1	0.0	39.8	44.4	36.2	47.6	28.7	52.5
B2	39.8	0.0	26.1	28.1	65.5	34.3	51.2
B3	44.4	26.1	0.0	25.8	69.0	36.6	51.3
B4	36.2	28.1	25.8	0.0	57.1	31.7	45.6
B5	47.6	65.5	69.0	57.1	0.0	57.0	43.5
B6	28.7	34.3	36.6	31.7	57.0	0.0	52.9
B7	52.5	51.2	51.3	45.6	43.5	52.9	0.0

注)それぞれの各画像間の平均値と標準偏差はゼロでない右上半分の 21 個の値を用いた。

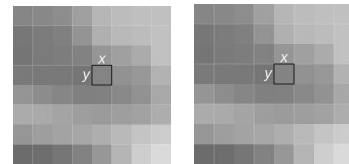


図 2-9 ピクセルの輝度の差

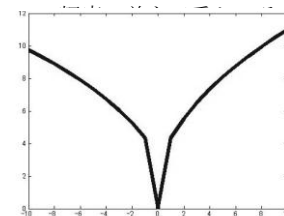


図 2-8 同一年輪画像における  
正規化距離の変化の例

同一の画像は、当然正規化距離が 0 となるが、同一個体の 50cm 毎の位置の違いによる影響が表 2-1 と表 2-2 のような距離として算出された。平角 A の木口画像と平角 B の木口画像間では、節の出現や年輪の変化が数値に現れていると考えられる。

次に、7ヶ所でカットした 2 本の別個体 (A B) の平角材について、それぞれの木口断面の画像相互の正規化距離を表 2-3 に示した。

表 2-3 別個体(A、B)の長さ方向7ヶ所カットした木口面の画像相互の正規化距離

平均値=55.9 標準偏差=13.4							
No	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
A1	51.1	60.0	62.3	53.3	33.7	56.6	31.3
A2	47.6	67.8	71.2	59.8	29.3	58.0	48.4
A3	52.5	64.8	67.0	58.4	37.0	59.6	36.1
A4	74.4	72.3	70.5	65.7	59.1	74.3	37.6
A5	72.2	71.1	69.2	63.1	55.7	73.3	35.7
A6	53.7	63.8	65.0	55.1	34.5	59.7	33.9
A7	53.4	64.7	67.2	58.0	35.5	59.5	34.5

注)AB 間の平均値と標準偏差は、49 個の全ての値を算出した。

判別閾値を求めるため、表 2-1 のゼロを除く右上 21 通りと表 2-2 のゼロを除く右上 21 通りと表 2-3 の 49 通りの合計 91 通りについて同一の材かどうかの誤判別確率を検討すると、表 2-4 の通り、正規化距離が 53 (256 階調の場合) 未満か以上で判別すると、表 2-1 で正規化距離 53 以上の値が 2 通り、表 2-2 で正規化距離 53 以上の値が 4 通り、表 2-3 で正規化距離が 53 未満の値が 15 通りであり、合計 21 通りとなった。表 2-4 によると判別閾値は、正規化距離 53 で識別すれば誤判別確率は 21/91 (23%) の確率で最も誤判別が少なく判別できた。

表 2-4 正規化距離による誤判別確率

距離	50	51	52	53	54	55	56	57	58
正判別数	68	68	69	70	68	68	66	65	65
誤判別数	23	23	22	21	23	23	25	26	26
誤確率	25%	25%	24%	23%	25%	25%	27%	29%	29%

#### 2-3-4 まとめ

- ①同一材の位置による年輪画像間の正規化距離と別個体の位置による正規化距離を得た。
- ②正規化距離を利用して同一材かどうかを判断するための閾値を求めることにより、ある程度の確率で判別できる可能性があることがわかった。
- ③問題点としては、同一材の曲がりの程度が正規化距離に影響を与える可能性が排除できないことがわかった。
- ③確実な判別には、単純な正規化距離の比較だけでは困難で、さらなる付加情報が必要であることがわかった。

## 第4節 実験2-2 木材の木口画像から年輪の中心位置の測定①

### 2-4-1 目的

実験1で同一個体にかかわらず、材の曲がりがあると正規化距離に影響があることが考えられる。木口面に年輪の中心があることを条件とすれば、その位置を画像から捕らえられれば、その位置も比較のパラメータになる可能性があり、また年輪中心周辺だけの画像間の正規化距離を比較することにより判別精度を高めることができないかを検討した。

### 2-4-2 実験方法

実験1で用いた画像を用い、年輪の中心位置を特定するために、テンプレートマッチングという手法を用いた。

テンプレートマッチングとは、図2-9のように画像の中から指定した画像と似ている位置を探すソフトである。市販のデジタルカメラのピントを中央部で合わせるのではなく、人物の顔の位置を判断し、その位置との距離にピントを合わせることで実用化した技術<sup>14)</sup>である。

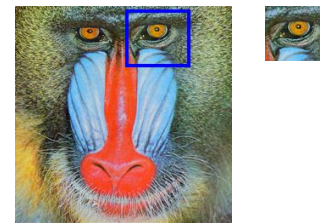


図2-9 テンプレートの例

1. 木口断面の画像と年輪の中心部を指定した画像としてテンプレートマッチングを試してみた。また、ノイズによる誤検出に対応するため、中央値フィルターを適用し白色の細かい点を平滑化した。
2. 図2-10、図2-11のようにサンプル画像に対して濃淡画像に変換を行い、白色の細かい点が判定に対してより誤差を大きくしていると考えられるので、対策として近傍画素の要素を並び替え中央値でスムージングを行った。

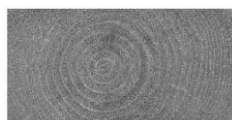


図2-10 フィルター適用後の画像

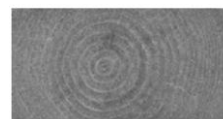


図2-11 濃淡画像に変換後の画像

3. 判定対象のサンプルは、10種類の角材から7か所の断面画像を採取した計70のサンプルと比較した。

目視により年輪の中心の位置を基準座標とし、計算座標との誤差がX、Y成分それぞれ20ピクセル以下の場合に一致と判定した。

4. 年輪の中心が一定の形状ではないため、3パターン（同一画像を含む）の形状を任意に選び、テンプレート画像として判定に使用した。

### 2-4-3 結果と考察

同一画像から（図 2-12）と他の画像から（図 2-13,図 2-14）得たサンプル画像の場合のテンプレートマッチングの中心位置の例を図 2-15 に示す。

同一の画像からサンプル画像を得た場合は、図 2-12 のように明確に一致することがわかった。また、他のサンプル画像とは図 2-15 のような結果となり、誤差 20 ピクセル以内の正答率は表 2-5 のように、2 割（16／70）程度であった。

サンプル画像とテンプレート画像が同一の場合の判定結果は目視の中心位置と一致するが、他の画像から取り出したテンプレートの位置は若干のずれが生じている。

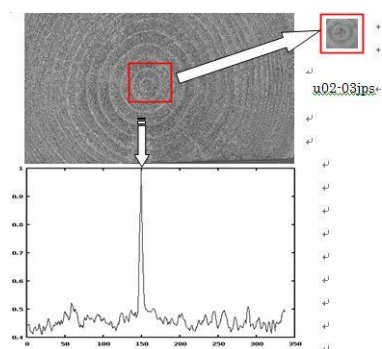


図 2-12 同一画像からのテンプレートの例

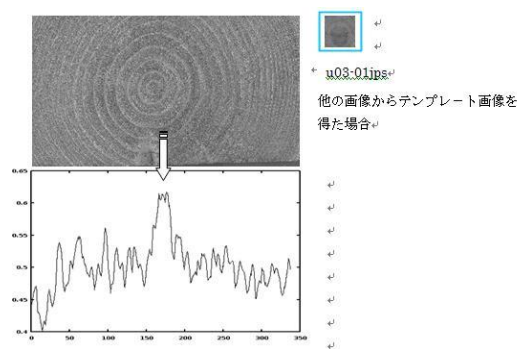


図 2-13 他の画像からのテンプレートの例

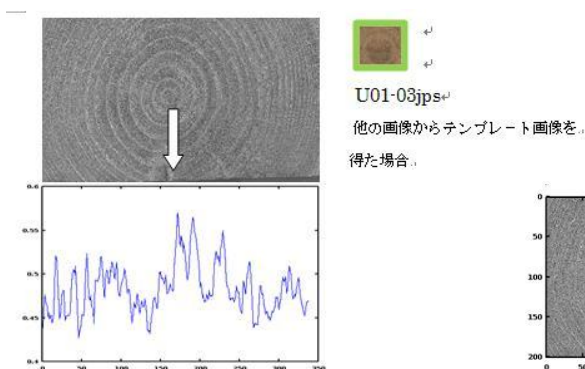


図 2-14 他の画像からのテンプレートの例

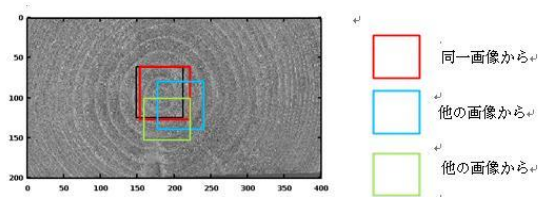


図 2-15 それぞれの表示位置

表 2-5 テンプレートによる基準座標と計算座標

No.	判定	基準座標		計算座標		誤差	
		X	Y	X'	Y'	X	Y
1	1	170	105	170	105	0	0
2	0	226	106	284	114	58	8
3	0	222	113	278	135	56	22
4	0	215	127	285	132	70	5
5	1	187	130	187	130	0	0

6	0	191	139	235	167	44	28
7	0	205	149	309	140	104	9
8	0	231	93	120	73	111	20
9	0	175	94	305	125	130	31
10	0	181	95	209	153	28	58
11	0	169	101	176	156	7	55
12	0	154	94	163	152	9	58
13	0	164	80	57	81	107	1
14	0	221	76	109	79	112	3
15	0	207	98	187	25	20	73
16	0	190	110	282	128	92	18
17	0	202	108	284	88	82	20
18	1	194	95	184	93	10	2
19	1	208	112	208	112	0	0
20	1	206	110	186	115	20	5
21	1	161	81	163	91	2	10
22	0	201	91	259	165	58	74
23	0	184	97	229	69	45	28
24	0	216	92	178	157	38	65
25	0	213	89	381	47	168	42
26	1	244	112	244	112	0	0
27	0	156	119	198	172	42	53
28	1	131	113	120	113	11	0
29	1	239	85	235	81	4	4
30	0	157	91	292	56	135	35
31	0	255	77	216	81	39	4
32	1	137	68	137	68	0	0
33	1	260	67	263	67	3	0
34	1	252	68	249	68	3	0
35	1	160	80	160	80	0	0
36	1	184	103	181	98	3	5
37	0	180	107	301	103	121	4
38	0	182	107	259	173	77	66
39	1	214	104	219	89	5	15
40	1	228	107	219	98	9	9
41	1	224	114	215	101	9	13

42	0	209	104	107	77	102	27
43	0	221	135	222	56	1	79
44	0	211	109	159	132	52	23
45	0	215	108	167	44	48	64
46	0	177	99	243	47	66	52
47	0	186	99	174	169	12	70
48	0	199	98	245	102	46	4
49	0	209	91	88	127	121	36
50	0	191	93	88	127	103	34
51	0	227	106	208	69	19	37
52	0	243	80	140	71	103	9
53	0	261	49	39	160	222	111
54	1	214	67	222	68	8	1
55	0	214	95	117	142	97	47
56	0	228	125	324	138	96	13
57	0	177	125	107	136	70	11
58	0	155	130	277	98	122	32
59	0	147	109	254	53	107	56
60	0	162	120	358	123	196	3
61	0	157	153	39	175	118	22
62	0	194	128	77	70	117	58
63	0	245	134	81	136	164	2
64	0	207	112	235	146	28	34
65	0	217	112	130	175	87	63
66	0	164	132	136	43	28	89
67	0	210	131	331	128	121	3
68	0	208	137	256	54	48	83
69	0	201	131	176	177	25	46
70	0	213	152	267	139	54	13

誤差 20ピクセル範囲内であれば一致(1)とすると2割(16/70)が一致

他の画像から得た場合は、複数のテンプレートがそれぞれ示した中心位置を平均化することにより、より確率の高い中心位置の特定が可能になる可能性が考えられる。

#### 2-4-4 まとめ

①特徴のあるテンプレートの特徴やその数により精度が向上することが予想され、適当なテンプレートの選択をいかにするかが課題である。

②テンプレートだけでは、大きく中心位置が外れる場合があり、年輪の中心位置を特定するのは確実性に欠け、識別率の向上が困難であることがわかった。



## 第5節. 実験 2-3 木材の木口画像から年輪の中心位置の測定②

### 2-5-1 目的

実験 2 のテンプレートマッチングより正確に年輪の中心を特定できる方法として、木口面の画像をハフ変換することにより、特定できないかを検討した。

ハフ変換は、画像から直線や円を検出する技法<sup>15)</sup>であり、通常の画像を二次元や三次元の空間に変換し、最も高い頻度の高い位置を求め、逆変換により直線や円を検出するものである。

円のハフ変換は、図 2-16 のように画像の中から円を検出する際に用いる。検出された円は中心座標と半径によって表され、検出する点が円周上でない場合においても、円を検出することが可能である。求められた円を利用して、位置決めを行うことができる。

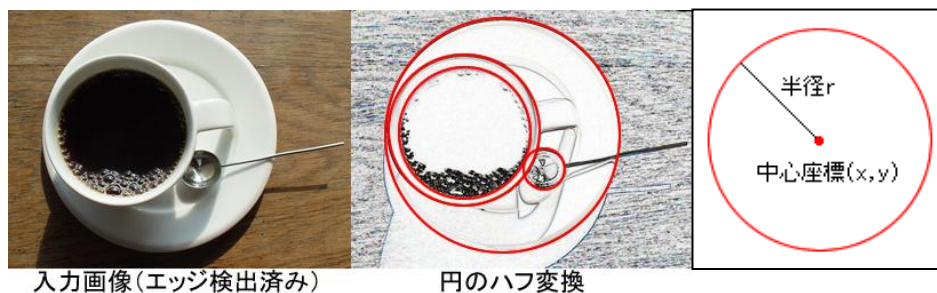


図 2-16 ハフ変換の例

年輪に関しては、年輪の中心を同心円状の図形の中心とみなした。同心円状の中心を判定する方法として、画像から円の特長を有する図形を判定し、その図形の中心座標を平均化した座標を求めることにより年輪の中心とした。ハフ変換により得られた半径  $r$  の円を構成するピクセル数（円を通るサンプルの直行座標  $(x, y)$  が見つかる数）に対し多い順にカウントし、このピクセル数に閾値を設けることによりノイズを除去した。

### 2-5-2 実験方法

得られた木目パターンに対して円のハフ変換を行い、各円の中心位置の集まりにより、その重心位置に対応する芯の位置を求めるためのアプリケーション（㈱バイオネット研究所制作）を利用した。

1. 実験 2 と同様に 70 画像（7 か所×10 本）の其々について、原画像に対し検証対象を選択する。（図 2-17 参照）
2. ローパスフィルタをかけて、ノイズの除去を行うためエッジ抽出ボタンをクリックし対象を選択した。（図 2-18 参照）
2. 特定の閾値を用いて画像を 2 値化し、木目パターンを抽出するため二値ボタンをクリックした。（図 2-19 参照）
3. 得られた木目パターンに対して円のハフ変換を行い、各円の中心位置の集まりより、その重心位置に対応する芯の位置を求めた。（図 2-20 参照）
4. 得られる芯の位置は、3.の閾値の値により変化するので、閾値を変化させながら、何点かの芯の位置を求めた。



図 2-17 画像の選択



図 2-18 エッジ抽出

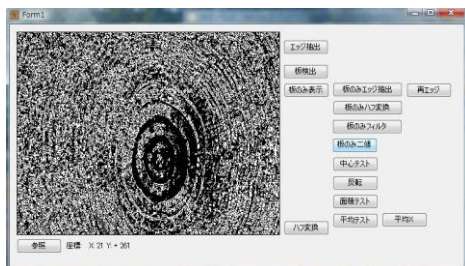


図 2-19 画像の二値化

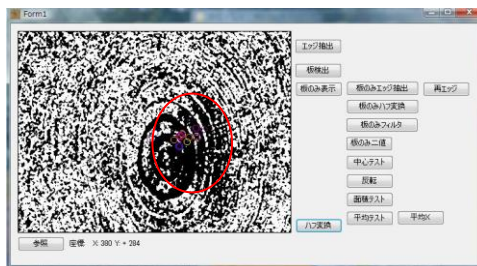


図 2-20 ハフ変換による中心位置

### 2-5-3 結果と考察

年輪の中心位置の精度については、ハフ変換したときに求まる計測座標と目視で求めた基準座標との差で求めた。

精度は、表 2-6 のように、約 6 割 (45/70) が期待した範囲の中に入っている。ハフ変換法による測定は、実験 2 のテンプレート・マッチング法より安定した年輪の中心位置の精度が得られた。テンプレート・マッチング法の場合は、年輪の中心から大きく外れる場合があったが、ハフ変換法は大きく外れることが少なく、外れても閾値の異なる複数点の計算結果に対し、多数決や、重心位置のアルゴリズムを用いることにより、大きな誤りを避けることができる可能性がある。

この結果、実験 2 のテンプレート・マッチング法より、ハフ変換法の方が年輪の位置を決めるアルゴリズムとして、より有効であると考えられた。

表 2-6 ハフ変換による基準座標と計算座標

No.	判定	基準座標		計算座標		誤差	
		X	Y	X'	Y'	X	Y
1	1	195	169	197	197	2	28
2	1	246	169	285	178	39	9
3	1	231	186	266	169	35	17
4	1	234	194	296	181	62	13
5	1	207	204	212	142	5	62
6	1	215	206	222	164	7	42
7	1	222	235	239	184	17	51
8	0	247	145	134	160	113	15

9	1	200	159	279	158	79	1
10	0	200	160	281	173	81	13
11	0	190	166	298	186	108	20
12	0	179	148	261	157	82	9
13	0	188	132	271	138	83	6
14	1	239	123	199	127	40	4
15	1	222	143	285	142	63	1
16	1	207	174	147	171	60	3
17	1	219	171	175	160	44	11
18	1	217	169	151	147	66	22
19	1	229	178	241	153	12	25
20	1	224	152	284	151	60	1
21	1	183	133	262	128	79	5
22	0	224	155	117	130	107	25
23	1	206	153	215	164	9	11
24	1	232	143	298	160	66	17
25	1	231	144	288	176	57	32
26	1	257	175	253	170	4	5
27	0	176	190	304	122	128	68
28	0	171	186	284	137	113	49
29	1	255	149	226	171	29	22
30	1	181	154	234	179	53	25
31	1	271	123	220	156	51	33
32	1	163	110	190	145	27	35
33	1	276	114	243	192	33	78
34	1	274	108	228	185	46	77
35	1	180	133	143	165	37	32
36	0	207	171	289	165	82	6
37	0	203	164	292	180	89	16
38	0	202	166	289	180	87	14
39	1	232	169	240	158	8	11
40	1	245	172	231	157	14	15
41	1	243	171	228	137	15	34
42	1	228	168	224	153	4	15
43	0	243	212	136	189	107	23
44	1	228	175	150	189	78	14

45	0	236	172	152	175	84	3
46	1	202	168	271	179	69	11
47	0	204	153	285	167	81	14
48	1	216	149	139	177	77	28
49	1	227	150	301	164	74	14
50	1	207	155	284	176	77	21
51	0	241	161	142	165	99	4
52	0	258	121	153	199	105	78
53	0	281	78	219	163	62	85
54	0	228	105	133	179	95	74
55	1	234	148	183	154	51	6
56	1	250	158	294	188	44	30
57	1	192	209	135	146	57	63
58	1	182	190	138	167	44	23
59	1	174	164	127	186	47	22
60	1	183	190	156	153	27	37
61	1	180	236	125	231	55	5
62	1	210	207	140	205	70	2
63	1	256	214	229	189	27	25
64	0	226	183	146	175	80	8
65	0	228	194	144	178	84	16
66	0	202	183	286	182	84	1
67	0	188	212	292	175	104	37
68	0	227	210	144	208	83	2
69	0	219	210	129	195	90	15
70	0	231	259	125	204	106	55

誤差80ピクセル範囲内であれば一致(1)とすると6割(45/70)が一致

#### 2-5-4 まとめ

- ① それぞれの画像のハフ変換を用いて示した位置を中心とした特定の矩形領域間の正規化距離を求めることにより、より個体認識の精度を上げられることが期待される。
- ② ハフ変換により年輪紋様を把握することができれば、製材工場における木取り作業に応用できる可能性も考えられる。

## 第 6 節. 実験 2-4 ハフ変換により補正した画像の正規化距離の変化

### 2-6-1 目的

ハフ変換により指定された位置を中心とした矩形領域の画像の正規化距離を調べることを目的とした。

### 2-6-2 実験方法

実験 3 で求めたハフ変換により得た中心位置周辺の画像を用いて実験 1 と同様に正規化距離を求め、非補正との誤認識率について比較を行った。

1. スギ平角人工乾燥材（4mx120mmx240mm 2 本）の木口面を写真 2-21 の様に撮影し、1024x2048 で抽出した。
2. 数値計算ソフトウェア「MATLAB」の関数「`rgb2gray`」を用いて写真 2-22 の様にグレースケールに変換する。
3. 実験 3 の様にノイズ除去後、二値化による木目パターンを抽出して円のハフ変換を用いて中心座標を特定し、図 2-23 のように特定された年輪を中心として 256x256 の矩形領域を抽出し、拡大した。
4. 図 2-24 に示す通り、3x3 画像の平坦な窓関数を用いて平滑化する。
5. 各画像を、最も黒に近い画素の値がゼロになるように、データの値を引き下げる。(図 2-25)
6. 各画像を、最も白に近い画素の値が 255 になるように、データの値を引き上げる。(図 2-26)
7. 実験 1 の様に、2 本の供試材を 50 c m 毎にカットした木口面の写真 7 枚をそれぞれ同様の処理を施し、他の 6 枚との相互の写真について各距離を求め正規化距離とした。
8. また、実験 1 と同様に、同一材を 50cm 毎にカットしその 7 断面の写真相互について正規化距離を求めた。



図 2-21 トリミング



図 2-22 グレースケールへ変換

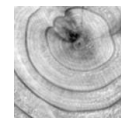


図 2-23 矩形領域を抽出し拡大

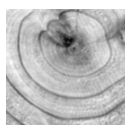


図 2-24 画素の平滑化

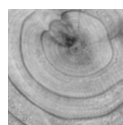


図 2-25 データ引下げ

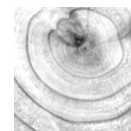


図 2-26 データの引上げ

### 2-6-3 結果と考察

年輪中心座標に対する特定矩形領域で比較した場合の、A B 2 本の同一材の 7 ヶ所の 50 c m の位置の違いによる木口面の写真相互の正規化距離を表 2-7 と表 2-8 にそれぞれ示した。平角 A の木口画像と平角 B の木口画像間では、節の出現や年輪の変化が数値に現れていると考えられる。

表 2-7 特定の矩形領域での画像相互の正規化距離(同一個体 A)

画像相互の正規化距離(d')				平均値	49.4	標準偏差	2.7
No	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
A1	0.0	44.3	45.9	50.3	47.0	50.4	51.1
A2	44.3	0.0	48.5	48.2	49.4	47.2	48.2
A3	45.9	48.5	0.0	49.6	45.2	54.7	51.8
A4	50.3	48.2	49.6	0.0	48.1	49.1	52.0
A5	47.0	49.4	45.2	48.1	0.0	50.9	51.6
A6	50.4	47.2	54.7	49.1	50.9	0.0	53.6
A7	51.1	48.2	51.8	52.0	51.6	53.6	0.0

注)それぞれの各画像間の平均値と標準偏差はゼロでない右上半分の 21 個の値を用いた。

表 2-8 特定の矩形領域での画像相互の正規化距離(同一個体 B)

画像相互の正規化距離(d')				平均値	43.3	標準偏差	4.7
No	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
B1	0.0	39.1	41.3	44.9	44.7	54.0	45.0
B2	39.1	0.0	36.9	39.8	38.3	46.1	38.5
B3	41.3	36.9	0.0	42.4	38.4	50.3	41.0
B4	44.9	39.8	42.4	0.0	43.2	49.0	42.2
B5	44.7	38.3	38.4	43.2	0.0	51.2	43.8
B6	54.0	46.1	50.3	49.0	51.2	0.0	39.7
B7	45.0	38.5	41.0	42.2	43.8	39.7	0.0

注)それぞれの各画像間の平均値と標準偏差はゼロでない右上半分の 21 個の値を用いた。

次に、7ヶ所で 50 c m毎にカットした 2 本の別個体 (A B) の平角材について、それぞれの木口断面の画像相互の正規化距離を表 2-9 に示した。

表 2-9 特定の矩形領域での画像相互の正規化距離(別個体 A,B)

画像相互の正規化距離(d')				平均値	72.2	標準偏差	9.9
No	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
A1	84.7	80.1	85.1	81.1	88.5	60.5	67.1
A2	76.5	72.6	78.4	72.9	81.2	56.6	60.2
A3	82.8	77.8	83.8	78.2	86.4	59.8	66.0
A4	71.3	67.2	71.6	68.4	75.2	51.9	55.3
A5	79.7	76.0	80.7	76.3	84.2	59.2	62.9
A6	72.3	67.2	72.0	68.4	74.9	51.9	55.5
A7	79.3	74.6	79.6	75.6	82.3	58.3	63.8

注)AB 間の平均値と標準偏差は、49 個の全ての値を算出した。

判別閾値を求めるため、表 2-7 のゼロを除く右上 21 通りと表 2-8 のゼロを除く右上 21 通りと表 2-9 の 49 通りの合計 91 通りについて同一の材かどうかの誤判別確率を検討すると、表 2-10 の通り、正規化距離が 55（256 階調の場合）未満か以上で判別すると、表 2-7 で正規化距離 55 以上の値が 21 通り、表 2-8 で正規化距離 55 以上の値が 21 通り、表 2-9 で正規化距離が 55 未満の値が 47 通りであり、合計 89 通りとなった。表 2-10 によると判別閾値は、正規化距離 55 で識別すれば誤判別確率は 2/91（2%）の確率で最も誤判別が少なく判別でき、補正前の実験 1 で求めた 21/91（23%）より判別率の向上が見られた。

表 2-10 補正後の正規化距離による誤判別確率

距離	50	51	52	53	54	55	56	57	58
正判別数	79	83	85	86	88	89	87	86	86
誤判別数	12	6	6	5	3	2	4	5	5
誤確率	13%	9%	7%	5%	3%	2%	4%	5%	5%

#### 2-6-4 まとめ

- ① 画像の正規化距離を用いて同一性を判断する手法は、ハフ変換を用いて年輪の中心位置周辺の矩形領域での画像を用いることにより誤判別確率が上がり、個体識別に有効な手段になりうる可能性があることがわかった。
- ② 最も誤判別の少ない正規化距離の閾値は 55 で判断するのが誤判別の確率が最も少なかった。
- ③ 今回の実験は、このような結果がでたが、供試材が 2 本と少なく、データ量が少ないので、さらに多くのサンプルを用いデータを収集し検討する必要がある。

### 第 7 節 今後の課題

年輪画像情報化によるトレーサビリティの実現ための予想される注意点や課題と対策についてまとめた。

- ① 木材は製材後、経時変化等により変形する可能性が有る、その為、年輪のパターンは製材時のパターンが、流通過程で数パーセントの変化が生じる可能性が有るので、この変化に対し対応できる必要が有る。木材の木口面にひび又は割れが生じた場合の対応も考慮する必要が有る。
- ② 木材製品の木口は通常、四角形の形となる。従って画像情報から作られる年輪パターン特徴データも四角形の情報を持つ。上下左右方向の自由度が有るため、コードのマッチングの為には、上下左右方向の自由度に依存しないコード化が望まれる。
- ③ また写真の画像面が木口面に対し平行でかつ正面から撮影される保証もないので、これに関してもコード化のアルゴリズムにて考慮される必要が有る。
- ④ 解像度の異なる画像に付いてもマッチングが保証できるように考慮する（マッチングに必要な最低解像度の数値化が必要）。
- ⑤ 木口の画像には、年輪のパターン以外に、画像の明暗、加工時の機械等による傷跡や節のパターン等が情報として含まれる。これらのうち、画像の明暗や傷跡等は、流通時の状況や研磨・加工等により変化する可能性が有るので、なるべく年輪や節等の木材本来が有する特徴を選択的



にコード化することが望ましい。

⑥ 製材時に取得した年輪画像から得られた年輪パターン特徴データと、流通過程で取得した年輪画像から得られた年輪パターン特徴データが完全に一致することを保証することができない場合は、両データ間の相関量を統計的な手法により計測し、その遠近関係から同一個体であることを判断する可能性を探ることも必要であろう。

⑦ 個体識別の検索時には、年輪パターン特徴データ以外の想定される場所や時間等の付属情報による絞り込みも可能とするべきで、検索結果として、複数の候補が見つかった場合には、一致度の高い順に、画像と付属情報を表示し、目視による画像比較及び付属情報より人間が判断できる機能も有することの必要性があることも考えられる。

なお、この論文の一部は、2012 年日本木材学会(札幌)で発表したものである。<sup>16)</sup>

### 第3章 総括

この研究の検知システム開発のきっかけは、平成18年から林野庁が行った新生産システムへの参画にあった。林野庁は、国産の木材を巡る環境が、日本の森林の所有規模が零細であり、また、木材を消費者に提供する生産・流通・加工の各段階も小規模・分散・多段階になっているため、需要者側が求める高品質な資材を、安定的に供給することが難しく、成熟ししつつある日本の森林を生かし、次世代に循環させていくことが困難になっている現状があるので、このような状況に対処するため、全国各地に「新生産システムモデル地域」を選定し、それらの地域において、川上から川下までの合意形成を促進し、森林施業や経営の集約化、協定取引の推進、生産・流通・加工のコストダウンを図り、ハウスメーカー等のニーズに応じた木材の安定供給を図ること等を通じて、地域材の利用拡大、森林所有者の収益向上、森林整備の推進を図っていくことを目的とした事業を推進した。

一見、新生産システムは、製材工場の大規模化が、その目的のように見えるが、それを支える林業の近代化も同様の目的とされた。このような事業を推進するに当たり、原木の協定取引の推進が、林業の採算性向上の中核的な条件とされた。しかし従来の取引を単に、伐採現場と工場を直送するだけでは、常に検知をどこで誰が行うかという問題が存在し、検知コストの問題だけでなく売買双方の相互信頼感の醸成がなかなかできない現状があった。このような協定取引を、安心感をもってコストの比較的にかからない条件で推進するためには、山側と工場側の共通の物差しとなる公正な検知システム開発が、必要不可欠であると感じた。

山側の森林所有者や素材生産業者が、数量を把握せず、利害関係人や第三者に測定させ、その測定値を丸呑みして原木の売買を行っている実態は、どうしても理解できない商慣習であった。旧態依然とした林業の実態を、なんとか他産業並みのレベルに上げるには、このような検知システムが必要と感じ、開発を行った。山側が、原木の数量把握が出来ない状態で、どんな高性能な林業機械を導入し、規模拡大を図っても、その経営は危ういものになりかねない。まして、一人親方的林業事業体が、規模拡大のため新規就労者を雇用し、複数の班編成を行い、複数の伐採現場において素材生産活動を営むには、それぞれを適正に管理する手法が必要となる。現場毎の迅速な計数管理が必要となるわけだが、そのためには素材生産数量の正確な把握は必須事項である。また、作業工程の見直し等の見極めは、日々の生産量の把握なしでは、実現できないはずである。

このような検知システムの測定データのデータベース化は、単に検知作業の効率化だけでなく、林業の採算性の向上に貢献でき、さらに素材生産業者の生産管理システムとしても利用でき、林業事業体の経営ツールとして健全化に貢献できる。

さらに、集計化されたデータベースは、行政にとっては、各種統計情報として利用でき、統計情報等の統合及び可視化し、共有、発信できる可能性がある。地域毎の素材生産量が迅速に把握可能となるので、これを普及することにより、全国レベルの木材需給に関するシステムとしての利用も考えられる。最近では、原木市況価格の変化が激しく、これが素材生産業者の安定的経営の阻害要因となっているため、全国的な原木需給調査を迅速に正確に把握し、適切な需給対策を即座に行うことが求められている。この検知システムが普及することにより、原木需給情報システムが構築され、民間の生産者及び需要者の自立的な生産、調達、取引を推進に役立つことを期待

する。

本研究は、プロトタイプの開発から各種のフィールド試験を行い量産用プロトタイプの開発を行った。同時に普及活動を行い、その成果として民有林において、原木売買における検知業務での利用実績が上がっている。また、国有林の一部で試験的導入が行われ、国有林のシステム販売の実績として利用され、その効果が確認されている。

また、間伐補助金制度の変更に伴い、算出基準が作業面積から出材された材積に変項になったこととともない、間伐補助金申請の添付資料として、この測定機の出力帳票を作業材積として認める県が現れた。これにより申請にかかる時間の短縮につながり、伐採現場から出材した時点でスムーズな間伐補助金申請が可能になり、特に年度末等の時間的余裕の無い申請に役立つことが期待される。

さらに最近、合法木材や各種認証材や間伐材等の発生由来を証明した発電用バイオマスの供給が求められているが、このような社会的要求に対し、このシステムが有効であると考えられる。伐採現場での検知作業で撮影された画像データが、伐採場所や時間情報を含有しているため、これを識別化できれば、正確で安価なトレーサビリティの確立のきっかけになり、食品業界と同様に、消費者から信頼される生産履歴の確立に貢献できる可能性がある。

原木の流通が可視化できれば、原木の生産履歴にも応用できる。本研究では、信頼性のあるシステムの構築のため固有の年輪紋様に着目し、情報化することで個体識別の可能性を研究した。工場での在庫管理には、バーコードやQRコードが利用されている現状があるが、これらには欠落やコストがかかる等の問題がある。年輪紋様が個体識別に利用できれば、安価で確実な製造年月日や品質の表示が出来ることになる。

本研究は、木材製品の木口面の年輪紋様の情報化するために正規化距離を用い、一定の成果を得たが、さらなる情報化により単なる工場内の在庫管理だけでなく、産出地が特定できれば、各流通段階で分別管理することなく、合法木材や認証材等の分別が簡単にできたり、木質バイオマス発電用の未利用材の発生由来の識別にも利用できる可能性がある。

山林の伐採現場から加工工場を経て、建築現場に至る一連の流れが捕捉できれば、施主が上棟時に木材の産出地を正確に把握できる可能性がある。これにより伐採跡地が特定できれば、再造林への関心が高まり植林放棄地の発生抑制にも役立つことが考えられる。また、自らが住む木造住宅に供されている木材の産出山林に対し、都市部の施主が林業への関心を高めることが期待される。一連の流れを完結させるには、克服せねばならない課題が多くあるが、本研究がその克服のきっかけとなることを期待する。

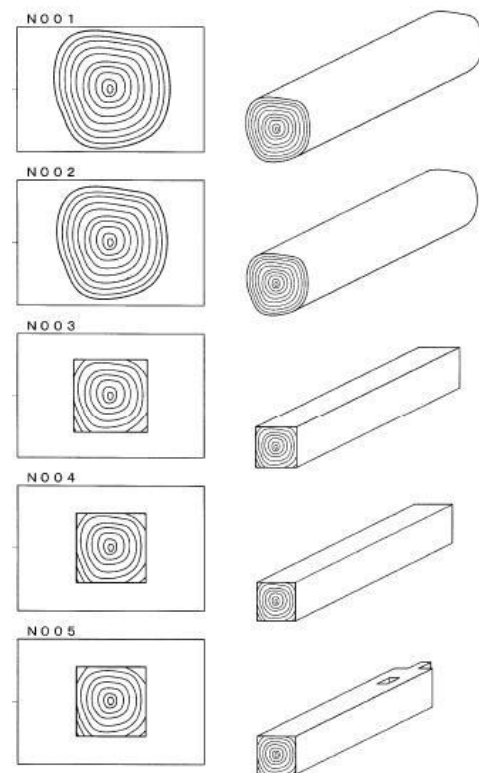


図 2-27 各加工工程における木口面の変化

## 参考文献

- 1) 川上敬介・木村実次・入澤宏・小谷章二・森田晃司(2009) 画像処理による丸太材積簡易計測システムの開発 (社) 日本木材加工技術協会 第 27 回年次大会報告集: 41-42
- 2) 西岡泰久(2010) 次世代型県産材供給システム現代林業 3: 1-6
- 3) 西岡泰久(2010) 「次世代型県産材供給システム」が目指すもの 機械化林業 2 25-29
- 4) 湯川俊浩、村井敦、荻原義裕(2010) 画像処理技術を用いた木材径/径分布の自動測定システムの開発 計測自動制御学会東北支部 第 257 回研究集会 257-6
- 5) 徐剛・辻三郎(1998) 三次元ビジョン 350PP 共立出版 東京
- 6) 吉澤 徹 (2006) 最新三次元計測 135PP 朝倉書店 東京
- 7) 一般式による最小二乗法 (円の最小二乗法) 画像処理ソリューション  
<<http://imagingssolution.blog107.fc2.com/blog-entry-16.html>>
- 8) Lars Petersson, Luke Fletcher Alexander Zelinsky, Nick Barnes, Fredric Amell, Towards Safer Roads by Integrations of Road Scene Monitoring and Vehicle Control. The international journal of Robotics Research, Vol25, No.1.(2006-1), 53-72
- 9) 瀬戸亨一郎、相馬智明、安藤直人(2011) 山元での原木材積の画像解析による測定法の開発 第 13 回木質構造研究会技術発表会技術報告集 13 57:58
- 10) 瀬戸亨一郎(2011) 平成 22 年度新生産システム推進対策事業林業生産流通革新的取組支援事業成果要約集 27:33 日本林業技士会
- 11) 瀬戸亨一郎 (2011) 新検知システムの導入及び輸送方法の見直しによる原木流通コストの低減 機械化林業 (社) 林業機械化協会 690 15:20
- 12) 瀬戸亨一郎、相馬智明、安藤直人(2011) 画像解析による原木材積測定機の実用化への取組 第 15 回木質構造研究会技術発表会技術報告集 15 27:28
- 13) 瀬戸亨一郎・相馬智明・安藤直人(2012) 新検知システムと原木流通管理システムの開発 木材工業 (社) 日本木材加工技術協会 8 349: 352
- 14) 田中万里子(2008) 木材トレーサビリティシステムに関する一考察 森林利用学会誌 289:292
- 15) 田中万里子(2010) 木材トレーサビリティと機械化 機械化林業 7 33~38
- 16) 株式会社 DCMC 木材トレーサビリティシステムマニュアル(2011) pp72 一般社団法人木を活かす建築推進協議会
- 17) 酒井幸市(2006) 画像処理とパターン認識入門 pp245 森北出版
- 18) 石立 喬(2005) Hough 変換による画像から直線や円の検出 CodeZine
- 19) 瀬戸亨一郎、相馬智明、安藤直人(2012) 第 62 回日本木材学会研究発表要旨集 (札幌) 190

## 謝辞

本研究を行うに当たり、適切なご指導・ご助言並びに研究環境を提供して下さった安藤直人教授に深く感謝申し上げます。また、研究全般にわたりご指導、ご助言をいただいた相馬智明助教に感謝申し上げます。お二人にはわざわざ遠路、大分までお越しになり、作業現場まで御覧になり適切なアドバイスをいただきました。

三次元計測に関し、適切なアドバイスをいただいた立命館大学理工学部徐剛教授並びにソフト開発を行っていただいた(株)三次元メディアの方々に感謝申し上げます。

光学的な技術の紹介や実験に際しましては、株式会社バイオネット研究所代表取締役新川逸郎様、津田美幸様、蓮見尚孝様には、並々ならぬご協力をいただきました。

また、研究開発費をいただいた大分県並びに実証試験を行っていただいた大分県農林水産研究センター林業研究部の皆さまはじめ、多くの方々のご協力があればこそ本研究が遂行できました。改めて深甚なる謝意を表します。

最後になりましたが、本研究の当初よりご指導いただき、主査としてご指導賜りました稲山正弘教授はじめ、太田正光教授、信田聡准教授、仁多見俊夫准教授には、論文作成に際し、的確な御指導・御助言を賜りました。ここに記してお礼申し上げます。