

## 論文

市販デジタルカメラを用いた材積測定システムの開発<sup>\*1</sup>福永寛之<sup>\*2</sup>

福永寛之：市販デジタルカメラを用いた材積測定システムの開発 九州森林研究 67：15－20，2014 現在，原木流通の現場では，コスト削減のために山土場から製材工場への直送の取組が行われている。直送では山土場検収が必要となるが，現状では人力による検収となり，労力や時間の問題，測定結果の客観性や再現性の問題などが発生し，直送へなかなか移行出来ない状況にある。そこで，改善策の1つとして，画像処理手法を活用した測定システムを開発した。このシステムは，市販のデジタルカメラを活用し，はえ積みした丸太を撮影した1枚の画像の中の木口面を抽出し，直径や材積を測定するシステムである。現時点において，撮影条件を整えれば，はえ積みした原木の木口の9割程度を抽出し，抽出した個々の丸太直径を±2cm程度，総材積±2m<sup>3</sup>程度で測定することが可能となった。

なお，材積測定法はJAS規格によるものとした。

キーワード：山土場検収，画像処理，材積測定システム，市販デジタルカメラ，はえ積み丸太

## I はじめに

平成21年度に策定された「森林・林業再生プラン」では，施業の集約化や路網の整備，人材育成を軸にして，効率的かつ安定的な林業経営基盤づくりを進めるとともに，木材の安定供給と利用に必要な体制を構築する（林野庁，2013）とされ，現在，全国でこれらに向けた取り組みが実施されている。このうち，原木流通の現場においては，流通コストの低減のため，原木市場を介さず，山土場から製材工場へ直接販売し輸送する「直送」の取り組みが行われている。原木価格などにもよるが，原木市場を介して取引を行うと，山土場から原木市場までの輸送費に1,500円/m<sup>3</sup>程度，市場手数料+はえ積み料に1,500円/m<sup>3</sup>程度，合計3,000円/m<sup>3</sup>程度の経費がかかるが，直送を行うと，検収費用のみで2,000円/m<sup>3</sup>前後の経費削減が可能となると考えられる。

しかしながら，直送を行う場合，山土場での検収は素材生産者などが人力で実施することとなる。これには多くの時間と労力が必要となる。また，相対取引となるので，製材工場等の需要者がこの測定結果を信用して本格的な取引を行うまでに長期間を要するなどの課題も発生している。このような状況から，各地で行われている直送への取組が一部を除き本格的な取組になっていないと思われる。このようなことから，直送の推進には，山土場で簡易に実施可能であり，かつ，事後でも測定結果の確認や検証が可能な材積測定手法の開発が急務となっている。

本研究では，これらの課題を解決するため，新たな材積測定システムを開発し，直送にかかる経費や労力の削減及び材積測定の客観性確保により，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ものである。

新たな材積測定システムとして新生産システムの革新的取組事業においては，デジタルカメラで撮影したはえ積み画像をCADソフト上で手動計測する丸太検収手法（株式会社松島木材センター，2008）やデジタルカメラで撮影した画像を色情報による木

口面抽出とエッジ抽出を組み合わせる丸太直径を計測する手法（愛知県森林組合連合会，2009）などが提案されている。最近では，測定場所を固定し，差分画像による木口面抽出と画像計測を自動で行う丸太材積簡易計測システム（川上ほか，2011）や計測専用機器を用い，差分画像と三次元認識を活用した材積自動測定システム（瀬戸ほか，2011）などが提案されている。経費と労力の低減と客観性確保を勘案すると，上述のようなデジタルカメラやコンピュータなどを用いた画像処理による自動測定が妥当であると考えられる。しかしながら，利用面から考えると，林道や作業道などの脇や山土場など任意の場所での撮影を可能とし，システム使用者への負担（操作面，導入経費面）を出来るだけ軽減することが求められていることから，システムは一般的な機器を用い，一般的な使用方法で，かつ，解析・測定処理は可能な限り自動処理であるほうが望ましい。また，技術面から考えると，朝夕・日中，晴・曇・雨，林外・林内，順光・逆光など，光条件が一定でない任意の場所で撮影した画像から一定の精度で木口の形状を抽出できる画像処理手法を用いる方が望ましい。

そこで，本研究では，デジタルカメラやコンピュータなどは市販されている一般的な機器を使用し，任意の場所で撮影した1枚のはえ積み丸太の単画像から直径及び材積を測定するシステムを開発することとした。

## II 開発したシステムの概要

本研究で開発したシステムを用いた材積測定時ののはえ積み丸太撮影方法と同例を図-1，図-2に示す。当システムは単画像中の木口面を抽出し，その最小径を測定し三角比で実寸換算する仕組みである。しかし，正しく木口直径を測定するには図-1に示すように，はえ積み丸太に正対して撮影し，その撮影距離を正確に測定する必要がある。そのため，図-2のように，三脚でカメラを固定し，カメラがぶれないようにして撮影する必要がある。

<sup>\*1</sup> Fukunaga, H. : Development of log volume measurement system using a commercial digital camera.

<sup>\*2</sup> 鹿児島県森林技術総合センター Kagoshima Pref. Forestry Technology Ctr., Kamo, Kagoshima 899-5302, Japan.

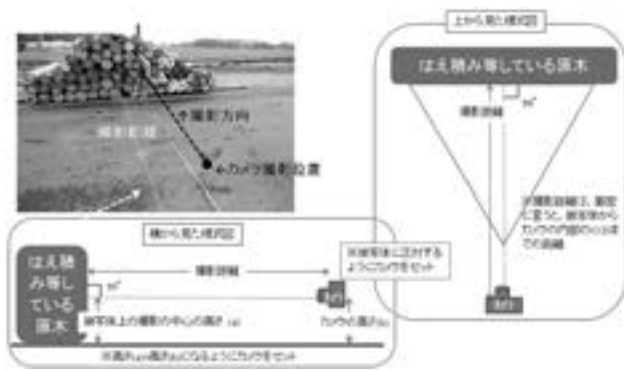


図-1. 当システムのはえ積み丸太撮影方法



図-2. 当システムではえ積み丸太撮影例

システムで行う測定処理を、図-3に示す。本システムの開発に当たっての課題は、

- ①市販デジタルカメラで撮影した単画像から測定される木口直径の精度の確認
- ②光環境の異なるいろいろな単画像の木口面を一定精度で自動的に認識・抽出する方法の検討

である。これらの点について、①の精度の確認には実験1を、②の認識・抽出方法の検討には実験2を、完成したシステムの精度確認には実験3を行った。

### Ⅲ 方法

#### 実験1 撮影画像から得られる木口直径の測定精度の把握

市販デジタルカメラが材積測定機器として利用可能かどうかを確認するため、図-4のように測定対象として24cmの真円を設定し、撮影距離と焦点距離を変化させ、撮影した。撮影画像から、その実寸直径を手作業で測定し、その測定値（撮影画像測定値）と実寸とを比較した。なお、メーカーや機種異なる4種のデジタルカメラを用いて行い、デジタルズームは使用せず光学ズームのみ使用し、実寸直径の換算には撮影距離は実測値を、焦点距離は画像のExifデータを用いた。

#### 実験2 木口面抽出手法の確立

本システムでは写真1枚から測定対象となる木口の直径を測定することとなる。コンピュータを用いて自動的に測定対象を測定する場合、一般的に測定対象と測定対象外の2つに分けた2値化

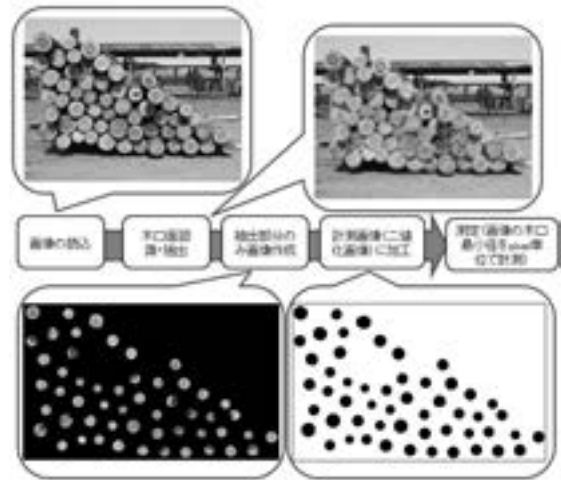


図-3. システム測定処理フロー

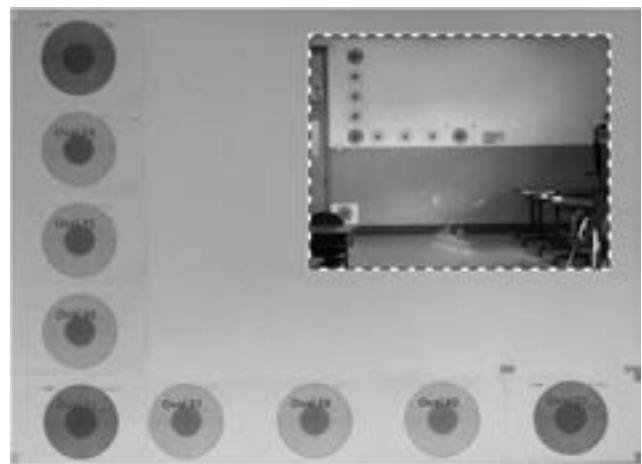


図-4. 撮影画像測定値と実寸との比較の実験  
※図は撮影画像の一部を拡大したもの。図中破線囲み部分が、撮影画像全体（撮影距離3.46m、焦点距離4.24mm）

画像を計測画像として作成する必要がある。計測用2値化画像が作成できれば、最小径などの測定（特徴量の抽出）は既存のフリーソフト等を活用することで可能となる。実験2では、はえ積み撮影した画像から撮影された木口面全数を可能な限り正確に抽出する画像処理手法の探索、及び画像中の木口面の抽出実験を行った。

#### 実験3 構築した材積測定システムの測定精度の把握

実験1及び2を踏まえ、直径と本数を測定し、材積を算出する材積測定システムを開発した。Visual C++, OpenCVを用いて画像処理プログラムを作成し、直径測定にはフリーソフトのImage J, Exifデータ抽出にはフリーソフトのExifDataViewを活用し、これらのプログラムやソフトをExcelVBAでコントロールし、Excelに測定結果を集計等するシステムとした。このシステムを用いて撮影画像測定値を測定し、はえ積み丸太の直径を人力測定した実寸直径との比較を行い、システムの測定精度の検証を行った。なお、材積測定法は日本農林規格（JAS）によるものとした。

表-1. 測定値と実寸の誤差 (焦点距離で整理)

| メーカー・機種・画像<br>解像度 (pxl)<br>/ 撮影距離 (cm) | 対象円 (24.0cm) と計測値との差 |            |            |               |  |
|--|----------------------|------------|------------|---------------|--|
|  | 平均<br>(cm)           | 最大<br>(cm) | 最小<br>(cm) | 最大-最小<br>(cm) |  |
| Canon IXY 10S 4320×3240                |                      |            |            |               |  |
| 4.30                                   | 0.43                 | 1.04       | -0.96      | 2.00          |  |
| 9.00                                   | 1.63                 | 1.94       | 1.32       | 0.62          |  |
| 21.50                                  | -1.38                | -1.30      | -1.52      | 0.21          |  |
| CASIO EX-ZS100 4320×3240               |                      |            |            |               |  |
| 4.24                                   | 0.07                 | 0.26       | -0.16      | 0.41          |  |
| 17.45                                  | 0.45                 | 0.66       | 0.21       | 0.44          |  |
| 53.00                                  | -2.21                | -1.97      | -2.64      | 0.67          |  |
| CASIO EX-ZS150 4608×3456               |                      |            |            |               |  |
| 4.24                                   | 0.37                 | 0.51       | 0.15       | 0.36          |  |
| 17.45                                  | -0.04                | 0.26       | -0.19      | 0.45          |  |
| 53.00                                  | -1.52                | -1.21      | -1.98      | 0.77          |  |
| FUJIFILM F600EXR 4608×3456             |                      |            |            |               |  |
| 4.40                                   | -1.32                | -0.86      | -1.85      | 1.00          |  |
| 17.30                                  | -2.36                | -1.96      | -2.64      | 0.68          |  |
| 57.50                                  | -1.86                | -1.82      | -1.90      | 0.09          |  |
| 62.30                                  | -1.38                | -1.36      | -1.39      | 0.03          |  |

(注) 撮影距離は3.46, 4.00, 5.98, 7.99, 9.42mの5種で撮影

表-2. 測定値と実寸の誤差 (撮影距離で整理)

| メーカー・機種・画像<br>解像度 (pxl)<br>/ 撮影距離 (cm) | 対象円 (24.0cm) と計測値との差 |            |            |               |  |
|--|----------------------|------------|------------|---------------|--|
|  | 平均<br>(cm)           | 最大<br>(cm) | 最小<br>(cm) | 最大-最小<br>(cm) |  |
| Canon IXY 10S 4320×3240                |                      |            |            |               |  |
| 3.46                                   | 0.14                 | 0.91       | -0.73      | 1.64          |  |
| 4.00                                   | 0.03                 | 1.01       | -0.96      | 1.97          |  |
| 5.98                                   | 0.57                 | 0.67       | 0.22       | 0.45          |  |
| 7.99                                   | 0.67                 | 0.84       | 0.54       | 0.30          |  |
| 9.42                                   | 0.74                 | 1.04       | 0.45       | 0.59          |  |
| CASIO EX-ZS100 4320×3240               |                      |            |            |               |  |
| 3.46                                   | 0.14                 | 0.25       | 0.11       | 0.14          |  |
| 4.00                                   | -0.05                | 0.14       | -0.16      | 0.30          |  |
| 5.98                                   | 0.08                 | 0.08       | 0.08       | 0.00          |  |
| 7.99                                   | 0.14                 | 0.14       | 0.14       | 0.00          |  |
| 9.42                                   | 0.01                 | 0.26       | -0.10      | 0.36          |  |
| CASIO EX-ZS150 4608×3456               |                      |            |            |               |  |
| 3.46                                   | 0.38                 | 0.51       | 0.31       | 0.20          |  |
| 4.00                                   | 0.31                 | 0.33       | 0.15       | 0.18          |  |
| 5.98                                   | 0.40                 | 0.40       | 0.40       | 0.00          |  |
| 7.99                                   | 0.33                 | 0.33       | 0.33       | 0.00          |  |
| 9.42                                   | 0.42                 | 0.42       | 0.42       | 0.00          |  |
| FUJIFILM F600EXR 4608×3456             |                      |            |            |               |  |
| 3.46                                   | -1.04                | -0.86      | -1.22      | 0.36          |  |
| 4.00                                   | -1.61                | -0.98      | -1.85      | 0.87          |  |
| 5.98                                   | -1.37                | -1.02      | -1.58      | 0.56          |  |
| 7.99                                   | -1.33                | -1.06      | -1.52      | 0.46          |  |
| 9.42                                   | -1.26                | -0.93      | -1.41      | 0.48          |  |

(注) 焦点距離はそのデジタルカメラの最も広角側の距離で撮影

| メーカー・機種             | 焦点距離 (mm) |
|---------------------|-----------|
| CASIO ZS100及び ZS150 | 4.24      |
| Canon IXY 10S       | 4.30      |
| FUJIFILM F600EXR    | 4.40      |

#### IV 結果と考察

##### 実験1 撮影画像から得られる木口直径の測定精度の把握

対象円(24cm)を撮影距離を3.46, 4.00, 5.98, 7.99, 9.42mの5種と焦点距離を広角, 中間, 望遠の3種で撮影した。真値(24cm)と測定値との差について, 焦点距離別を表-1に, 撮影距離別を表-2に示す。なお, 撮影した画像の解像度は, カメラの最高解像度で撮影している。



図-5. 抽出処理前画像  
※実際の抽出処理前画像は, フルカラー画像

焦点距離について, CASIOのZS100及びZS150の場合, 広角側(焦点距離が短い)では誤差は最大0.5cm程度と少なく, 誤差の幅(誤差の最大値と最小値との差)も0.5cm弱と少ないが, 望遠側では3cm弱の誤差が生じた。一方Canon IXY 10SやFUJIFILM F600EXRでは傾向が異なり, Canon IXY 10Sは広角側で1cm程度の誤差, 誤差の幅は2cm程度, FUJIFILM F600EXRは広角側で2cm程度の誤差, 誤差の幅は1cm程度と大きい。

撮影距離について, CASIOのZS100及びZS150は0.5cm以内の誤差で収まっているが, Canon IXY 10Sは1cm程度, FUJIFILM F600EXRは2cm程度の誤差を生じた。

はえ積み丸太の材積を測定する場合, 多くの丸太を1枚の画像に収めるため, 広角側を使用して撮影することとなる。また, はえ積みを撮影する場所は, 伐採現場や林道・作業道などで, 撮影距離を長くとれない場合が想定されるので, この場合も広角側で撮影することとなる。また, 誤差の幅が少なく, 誤差の発生傾向が一定している方が誤差の補正をかけやすい。

このようなことから, 今回は, 広角側で測定誤差が小さく, かつ, その誤差の幅の少ないデジタルカメラCASIO EX-ZS100及びZS150を用いてシステムを開発することとした。

##### 実験2 木口面抽出手法の確立

1枚の画像から対象となる領域を抽出する手法として一般的には,

- ①色情報を基にするもの … 色抽出など
- ②形情報を基にするもの … Hough変換, blob抽出など
- ③特微量を基にするもの … Haar-Like, LBPなど

などが挙げられる(Gary Bradski and Adrian Kaehler, 2008; 永田雅人, 2009; 長尾智晴, 2011)。

今回, ①についてはHSV表色系での抽出を行い, ②についてはHough変換での抽出を試みた。両者とも未抽出や誤抽出が多い結果となった。抽出結果について抽出前の画像を図-5に, 抽出結果を一例ずつ図-6, 図-7に示す。未抽出, 誤抽出が多い原因は, はえ積み画像が野外の画像であり, 多くのノイズを含むためと考えられる。①の場合, 木口面の色を肌色~茶色として抽出するが, 木口面以外にも肌色~茶色を持つものがあり, これら



も同時に抽出されたり、或いは、影のある・なしで光環境が異なるため、同じ木口でも画像上では異なる色になり、抽出できたり、できなかったりする場合がある。②の場合、画像全体をエッジ抽出し、そのエッジから「円らしきもの」を抽出するが、木口面は真円ではないため、円と認識されず、また、たまたま円に近い状態となったものが存在し、円と認識される場合が想定される。このように①及び②は、抽出結果が安定しないため、木口面抽出の主たる方法には適さないことが判明した。

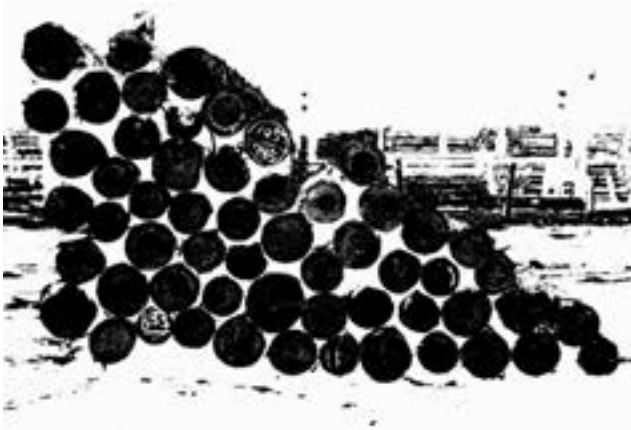


図-6. HSV 表色系の色抽出結果  
※抽出部分が黒，抽出部分以外が白の2値化画像



図-7. Hough 変換 (円) による抽出結果  
※抽出部分は円で囲む。

③について、一般的にはデジタルカメラやデジタルビデオカメラの「顔認識」、「笑顔認識」などの呼称で実用化されている手法である。本研究ではLBPでの抽出を試みた。LBPは画像の特徴量分類の一手法としてT. Ojalaが1994年に提案された手法であり、画像の局所的な特徴を手がかりに抽出でき、画像の照明変化の影響を受けにくいのが特徴である(放送大学, 2012)。局所特徴量の算出及びLBP画像の作成過程を図-8に示す。この局所特徴量を基に画像中を検索し対象物(本研究では木口面)を抽出するが、この検索をコンピュータに自動的にに行わせるため、局所特徴量を収集・解析し、重みづけ、閾値、その他のパラメータを調整して作成したアルゴリズムである検出器を作成する。この過程を機械学習といい(Gary Bradski and Adrian Kaehler, 2008)、この機械学習もコンピュータを用いる。本研究では、正解画像として、個々の木口の画像を約9,000枚と不正解画像として、はえ積丸太の背景となる森林や山土場の画像(但し、木口面が画像中に映り込んでいないもの)を約5,000枚用いて、検出器作成を行った。この検出器を用いて木口面抽出を行った結果の例を図-9、図-10に示す。なお、この検出器1つを作成する機械学習には、OpenCVに付属のプログラムとパソコン(CoreI3 2.1GHz, Memory 2.0 GB)を用いて約1,500時間(2ヶ月程度)の時間を要した。



図-9. LBP による抽出結果1  
※抽出部分は円で囲む

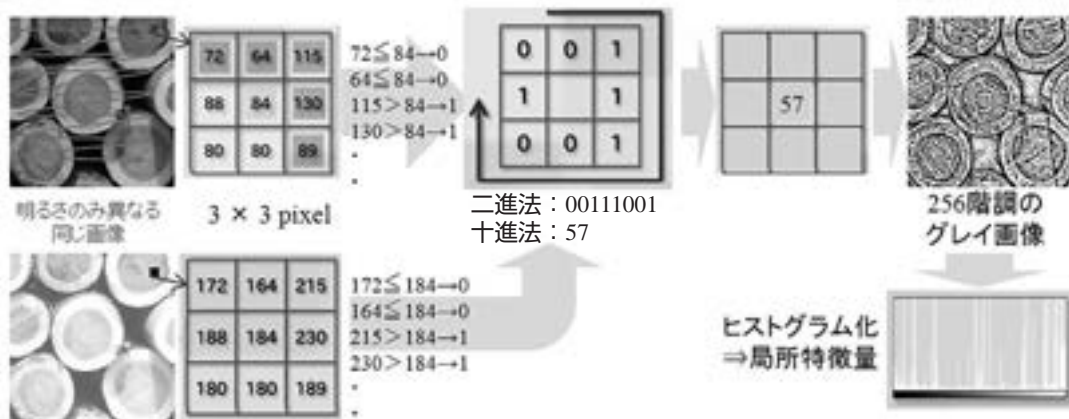


図-8. 局所特徴量の算出及びLBP画像の作成過程

完成した検出器を用いて、はえ積み写真中の木口の抽出試験を行った。木口数は延 600 本で、部分的に影になった木口やドロなどが付着した木口、はえ積みの周辺部の木口 60 本が未抽出となったが、誤抽出はなく、約 9 割の 560 本の木口が抽出された。部分的に影になった場合やドロなどで木口が汚れた場合、局所特徴量が増えるため抽出できないと考えられるが、はえ積み丸太周辺部の木口が抽出されない理由としては、検出器作成で使用した木口画像の質及び量に問題があると思われる。

以上の結果から、本研究では、木口抽出の主たる方法として最も成績の良い LBP を、部分的な修正に HSV 表色系の色抽出を用いて、計測画像を作成することとした。

### 実験 3 作成した材積測定システムの測定精度の把握

作成したシステムを用いて、実際のはえ積み丸太を対象として、システム全体が正常に動作するかの確認を行うとともに実測値とシステム計測値の精度把握を行った。

なお、今回の実測値は、撮影画像からの手作業による測定値を実測値とした。これは、通常のはえ積み丸太の木口面は一平面に揃わず、奥行方向にズレており、人力検収の実測値と比較すると、この奥行方向のズレで生じる誤差が、システムの測定誤差に含まれるおそれがあるためである。但し、はえ積み丸太の人力検収の測定値と画像を用いた手作業による測定値の誤差について、実験で用いた一部の丸太で検証を行ったが、材積測定において特に問題となる誤差は、ほとんど確認されなかった。

木口直径の実測値と当システムの計測値について、回帰分析した結果、図-11 及び表-3 に示すとおり、高い相関が見られ、誤差は  $\pm 2\text{cm}$  (95% 信頼区間) となったが、多くのシステム計測値が過大計測となった。この過大計測は、計測画像作成に用いている色抽出処理が影響したと考えられる。LBP 処理した段階の抽出画像には、木口面の背景などが部分的に写り込んでおり、この背景などの除去に当システムでは色抽出処理を用いている。この手法は、前述したとおり、撮影時の光環境に影響され抽出処理精度がばらつく。このため、除去できなかった背景部分などは 2 値化画像中の計測対象に含まれることとなり、結果、システム計測値が過大計測になっていると思われる。この背景の除去処理の改良は今後の課題である。

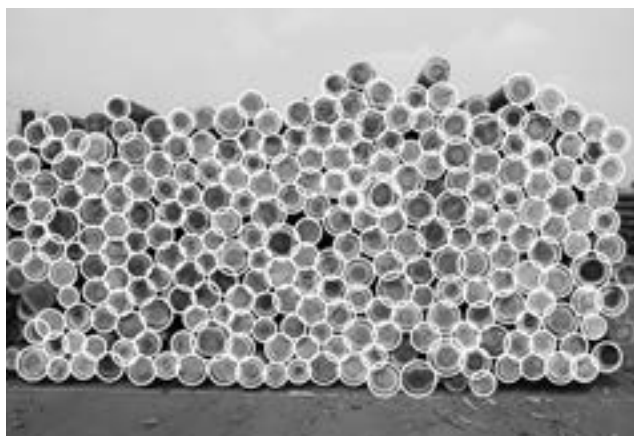


図-10. LBP による抽出結果 2  
※抽出部分は円で囲む。

また、総材積の推定精度を算出した結果を表-4 に示す。山工場では撮影距離が大きくとれず、3~4m 程度になる。この状況下で、はえ積み丸太を撮影した場合、その総材積は  $20\text{m}^3$  程度となることが多い。よって、表-4 では、システム計測値がそれぞれ 10~40cm の丸太が材積  $20\text{m}^3$  となる本数のはえ積みを想定した場合の総材積の推定精度を計算した。この結果、総材積の推定精度は  $20 \pm 2\text{m}^3$  (95% 信頼区間) となることが分かった。

以上の結果、直径精度は  $\pm 2\text{cm}$  であることから、本システムは丸太から角材を一本取りするような製材工場向けの測定に用いることは難しいが、合板工場やチップ工場向けの測定には使用可能であると思われる。

なお、当システムは、この回帰式で計測値を補正したものを測定値として出力し、また、未抽出の丸太は、手で修正可能で、この修正結果も含めてシステムでは検知表を作成する。元末混在のはえ積みに対しては、細り表から調整した元末換算率を基に材積を推定することも可能としている（この場合は、末口径が測定値となるため、本数と総材積のみの検知表を作成する）。

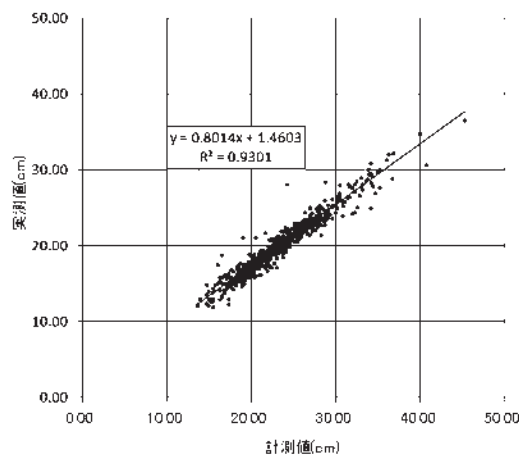


図-11. システム計測値と実測値の関係

表-3. システムの計測値と(実測の)予測値

| 計測値<br>(cm) | (実測の)<br>予測値<br>(cm) | 標準誤差  | $t_{0.95}$ | 信頼区間<br>(cm)    | 95%   | 誤差<br>( $\pm$ cm) |
|-------------|----------------------|-------|------------|-----------------|-------|-------------------|
| 10          | 9.474                | 1.051 | 1.964      | 7.409 ~ 11.540  | 2.065 |                   |
| 12          | 11.077               | 1.049 | 1.964      | 9.016 ~ 13.138  | 2.061 |                   |
| 14          | 12.680               | 1.048 | 1.964      | 10.622 ~ 14.738 | 2.058 |                   |
| 16          | 14.283               | 1.046 | 1.964      | 12.228 ~ 16.338 | 2.055 |                   |
| 18          | 15.886               | 1.045 | 1.964      | 13.833 ~ 17.939 | 2.053 |                   |
| 20          | 17.488               | 1.044 | 1.964      | 15.437 ~ 19.540 | 2.052 |                   |
| 22          | 19.091               | 1.044 | 1.964      | 17.040 ~ 21.142 | 2.051 |                   |
| 24          | 20.694               | 1.044 | 1.964      | 18.643 ~ 22.745 | 2.051 |                   |
| 26          | 22.297               | 1.044 | 1.964      | 20.246 ~ 24.348 | 2.051 |                   |
| 28          | 23.900               | 1.045 | 1.964      | 21.847 ~ 25.952 | 2.052 |                   |
| 30          | 25.502               | 1.046 | 1.964      | 23.448 ~ 27.557 | 2.054 |                   |
| 32          | 27.105               | 1.047 | 1.964      | 25.049 ~ 29.162 | 2.057 |                   |
| 34          | 28.708               | 1.049 | 1.964      | 26.648 ~ 30.768 | 2.060 |                   |
| 36          | 30.311               | 1.051 | 1.964      | 28.247 ~ 32.375 | 2.064 |                   |
| 38          | 31.914               | 1.053 | 1.964      | 29.846 ~ 33.982 | 2.068 |                   |
| 40          | 33.517               | 1.055 | 1.964      | 31.443 ~ 35.590 | 2.073 |                   |

※(実測の)予測値は、回帰式を用いてシステム計測値を補正したもので、現場で使用いただくシステムでは、この予測値をシステムの測定値として出力する。

表-4. 材長4m, 総材積20m<sup>3</sup>のはえ積み丸太をシステムで測定した場合のシステム測定値の精度

| システム計測値 (cm)   | 回帰による推定値 (cm) | 標準誤差  | t <sub>0.95</sub> | 信頼区間 (cm) | 95% | (± cm) | 原木本数 (本) | 推定値 (m <sup>3</sup> ) | 信頼区間 (m <sup>3</sup> ) | 95%             |                    |        |
|--|---------------|-------|-------------------|-----------|-----|--------|----------|-----------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------|
| 10   | 9.474         | 0.133 | 1.964             | 9.213     | ~   | 9.736  | 0.261    | 558                   | 20.035                 | 18.945 ~ 21.156 |                    |        |
| 12   | 11.077        | 0.116 | 1.964             | 10.850    | ~   | 11.304 | 0.227    | 408                   | 20.025                 | 19.213 ~ 20.854 |                    |        |
| 14   | 12.680        | 0.099 | 1.964             | 12.486    | ~   | 12.874 | 0.194    | 311                   | 20.001                 | 19.395 ~ 20.617 |                    |        |
| 16   | 14.283        | 0.082 | 1.964             | 14.121    | ~   | 14.444 | 0.162    | 246                   | 20.073                 | 19.622 ~ 20.530 |                    |        |
| 18   | 15.886        | 0.067 | 1.964             | 15.753    | ~   | 16.018 | 0.132    | 199                   | 20.087                 | 19.755 ~ 20.423 |                    |        |
| 20   | 17.488        | 0.055 | 1.964             | 17.381    | ~   | 17.596 | 0.107    | 164                   | 20.063                 | 19.818 ~ 20.310 |                    |        |
| 22   | 19.091        | 0.046 | 1.964             | 19.000    | ~   | 19.182 | 0.091    | 138                   | 20.119                 | 19.928 ~ 20.311 |                    |        |
| 24   | 20.694        | 0.045 | 1.964             | 20.606    | ~   | 20.782 | 0.088    | 117                   | 20.042                 | 19.872 ~ 20.212 |                    |        |
| 26   | 22.297        | 0.051 | 1.964             | 22.197    | ~   | 22.396 | 0.100    | 101                   | 20.085                 | 19.906 ~ 20.265 |                    |        |
| 28   | 23.900        | 0.062 | 1.964             | 23.778    | ~   | 24.021 | 0.122    | 88                    | 20.106                 | 19.902 ~ 20.311 |                    |        |
| 30   | 25.502        | 0.076 | 1.964             | 25.353    | ~   | 25.652 | 0.150    | 77                    | 20.032                 | 19.797 ~ 20.267 |                    |        |
| 32   | 27.105        | 0.092 | 1.964             | 26.925    | ~   | 27.286 | 0.181    | 69                    | 20.278                 | 20.008 ~ 20.549 |                    |        |
| 34   | 28.708        | 0.109 | 1.964             | 28.494    | ~   | 28.922 | 0.214    | 61                    | 20.109                 | 19.811 ~ 20.410 |                    |        |
| 36   | 30.311        | 0.126 | 1.964             | 30.063    | ~   | 30.559 | 0.248    | 55                    | 20.213                 | 19.883 ~ 20.544 |                    |        |
| 38   | 31.914        | 0.144 | 1.964             | 31.631    | ~   | 32.196 | 0.283    | 50                    | 20.370                 | 20.011 ~ 20.732 |                    |        |
| 40   | 33.517        | 0.162 | 1.964             | 33.199    | ~   | 33.834 | 0.318    | 46                    | 20.670                 | 20.280 ~ 21.064 |                    |        |
|  |               |       |                   |           |     |        |          |                       | 最大値                    | 20.280          | ~                  | 21.156 |
|  |               |       |                   |           |     |        |          |                       | 最小値                    | 18.945          | ~                  | 20.212 |
| 注1) 直径がシステム計測値 (10~40cm, 2cmごと) となった丸太が20m <sup>3</sup> になる本数集まったのはえ積み |               |       |                   |           |     |        |          |                       | 18.5m <sup>3</sup>     | ~               | 21.5m <sup>3</sup> |        |
| 注2) 材積の95% 信頼区間は, それぞれのシステム計測直径について95% 信頼区間の最小値あるいは                    |               |       |                   |           |     |        |          |                       | (-1.5)                 |                 | (+1.5)             |        |
| 注3) 本表は, 総材積を推定する場合 (母集団の推定) である。単木の直径の推定 (予測) する場合は, 異なる              |               |       |                   |           |     |        |          |                       |                        |                 |                    |        |

#### IV おわりに

本研究で開発した材積測定システムの木口面の抽出率は9割程度で, 抽出した木口の直径測定精度は±2cmとなり, 画像から手作業で読み取れる精度±0.5cm程度や2cm括約には及ばないものとなった。今後は, LBPの抽出率及びその抽出精度の向上, 過大な計測誤差の改善, より正確な計測画像を作成する方法を検討する予定である。また, 今回は南九州スギ材を対象としたが, ヒノキや広葉樹など他の樹種への適用も検討する必要がある。さらに, 今回は当システムで使用するデジタルカメラを限定したが, 他のカメラも使えるようにパソコン側でキャリブレーションを行い画像補正する機能などを追加できないか検討する必要がある。

#### 謝辞

本研究開発を行うに当たり, 御協力を頂きました。鹿児島県森林組合連合会, 曾於地区森林組合, 鹿児島県庁, それぞれの関係者の皆様に心より感謝の意を表します。

#### 引用文献

武林野庁 (2013) 平成25年度版 森林・林業白書. p.9. 一般社団法人 全国林業改良普及協会.

株式会社 松島木材センター (2008) 平成19年度林業生産流通革新的取組支援事業実施報告書「製材工場から見た低コストによる素材生産と流通システムの実証」. 47 pp.

愛知県森林組合連合会 (2009) 平成20年度林業生産流通革新的取組支援事業実施報告書-大規模製材工場等への直送体制の確立と山土場での間尺の省力化-. 27 pp.

川上敬介・藤田亮・入澤宏・木村実次・森田晃司・小谷章二 (2011) 木材工業 Vol. 66, No. 2 : 58-61.

瀬戸亨一郎・相馬智明・安藤直人 (2011) 東京大学農学部演習林報告, 125 : 45-70.

Gary Bradski and Adrian Kaehler (2008) Learning OpenCV, (訳) 松田晃一 (2009) 詳解 OpenCV-コンピュータビジョンライブラリを使った画像処理・認識-. 609 pp, 株式会社オライリー・ジャパン.

永田雅人 (2009) 実践 OpenCV 画像処理&解析. 275 pp, 株式会社カットシステム.

長尾智晴 (2011) C言語による画像処理プログラミング入門~サンプルプログラムから学ぶ~. 239 pp, 株式会社昭晃堂.

放送大学 (2012) 放送大学ホームページ 放送大学オープンコースウェア テレビ授業科目一覧 デジタル情報の処理と認識 ('12) 第15回 画像特徴の計算と応用 : <http://ocw.uj.ac.jp/tv/1554573/15.html> (2012年12月参照).

(2013年11月20日受付; 2014年3月11日受理)