

|                |                                |                                                                                                          |                              |
|----------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| テーマ番号          | 1EP183                         |                                                                                                          |                              |
| プロジェクト<br>テーマ  | 和文                             | 深層学習を用いた全天球画像解析による森林資源量計測システムに関する研究                                                                      |                              |
|                | 英文                             | Research on the Forest Resource Measurement System by Omnidirectional Image Analysis using Deep Learning |                              |
| プロジェクト<br>メンバー | 4EP3-20 川崎 翔太 (Shota Kawasaki) |                                                                                                          | 4EP3-45 林 航希 (Kouki Hayashi) |
|                |                                | 指導教員                                                                                                     | 長田 茂美 教授                     |

**Abstract** The forest resources in Japan have grown mature as more than half of the forests planted after the World War II are now over 50 years old. However, stable timber supply has not been achieved in response to the domestic demand, and the wood self-sufficiency rate is only about 30%. For this reason, products that support the efficiency of forest resource measurement have been put on the market with the aim of improving the profitability and cost reduction of timber production. But these are still not widely used due to low convenience and high price. Therefore, in this study, CNNs (Convolutional Neural Networks) were used to process spherical images taken in the forest by a 360° camera for the purpose of creating an inexpensive but highly accurate forest resource measurement system that could be easily used by anyone. We proposed a system for timber volume and timber quality estimation in a forest using CNNs, and confirmed its usefulness by evaluation experiments.

**Keywords** forest resources measurement, deep learning, convolutional neural network, regression problem, omnidirectional image.

## 1. まえがき

我が国の森林資源は成熟し、人工林の多くは本格的な利用期を迎えている。しかし、昨今の木材価格の低迷により、伐採にかかるコストを差し引くと、林業事業体は十分な収益が得られない場合が多く、国産材の需要に応じた安定的な原木供給ができていない状況にある。そのため、木材生産の収益性向上、森林調査の大幅な省力化によるコスト削減を目指して、森林資源量の計測作業の効率化を支援する製品も市場に投入されてきているが、利便性や価格の面からまだ十分に普及するまでには至っていない。

本研究では、多大な労力を要する森林調査の大幅な省力化を実現するための研究開発の一環として、森林の全天球画像を対象に、深層学習を用いて、材積および材質の観点から、森林資源量を推定するシステムを提案する。

## 2. システム概要

### 2.1 材積推定システム

材積推定システムに対する実用的な性能要件として、100～1500 m<sup>3</sup>/ha の範囲の材積を誤差 10%以内で推定することが要求されている。

従来、当研究室では、全天球画像からの材積推定問題を分類問題として捉え、畳み込みニューラルネットワーク(CNN, Convolutional Neural Network)を用いて解くシステム<sup>[1]</sup>を提案している。このシステムでは、例えば、100～1500 m<sup>3</sup>/ha の全天球画像を 100 m<sup>3</sup>/ha の分解能で 14 クラスに分類することを学習した CNN が、未知クラスの全天球画像の材積を 100 m<sup>3</sup>/ha の分解能で推定できる。しかし、材積の推定問題を分類問題として扱っているがために、CNN がクラス間の材積の量的な順序関係などの定量的な関連性を捉えることは難しく、誤分類した場合には実測値(真値)と大きくかけ離れた材積を推定する可能性がある。

本研究では、この問題を解決し、推定精度の向上を図るために、全天球画像からの材積の推定問題を本来の回帰問題として捉え、1 つの出力ユニットをもつ CNN を用いた材積推定システムを提案する。図 1 に提案システムの概要を、また、表 1 に CNN の構造を示す。

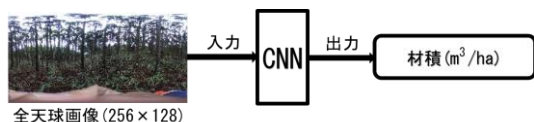


図 1 材積推定システムの概要

Fig. 1 The proposed timber volume estimation system.

表 1 CNN の構造 (材積推定システム)

Table 1 The structure of CNN.

| 層       | 入力ユニット        | 出力ユニット        | 活性化関数 |
|---------|---------------|---------------|-------|
| 畳み込み層1  | (256, 512, 3) | (64, 126, 96) | ReLU  |
| プーリング層1 | (64, 126, 96) | (30, 62, 96)  |       |
| 畳み込み層2  | (30, 62, 96)  | (30, 62, 256) | ReLU  |
| プーリング層2 | (30, 62, 256) | (14, 30, 256) |       |
| 畳み込み層3  | (14, 30, 256) | (14, 30, 384) | ReLU  |
| 畳み込み層4  | (14, 30, 384) | (14, 30, 384) | ReLU  |
| 畳み込み層5  | (14, 30, 384) | (14, 30, 256) | ReLU  |
| プーリング層3 | (14, 30, 256) | (6, 14, 256)  |       |
| 全結合層1   | 21504         | 4096          | ReLU  |
| 全結合層2   | 4096          | 4096          | ReLU  |
| 全結合層3   | 4096          | 1             | LU    |

### 2.2 材質推定システム

材質推定システムで扱う材質は、立木の幹の曲がり具合などから決められる A 材、B 材、C 材という丸太材質である。

本研究では、全天球画像から 3 つ出力ユニットをもつ CNN を用いて丸太材質 (A 材、B 材、C 材) の割合を推定する材質推定システムを提案する。図 2 に提案システムの概要を、表 2 に CNN の構造を示す。ここで、CNN の 3 つのユニットは、それぞれ、A 材、B 材、C 材の割合に対応する。

材質推定システムに対する実用的な性能要件は、それぞれの丸太材質の割合を誤差 10%以内で推定することである。

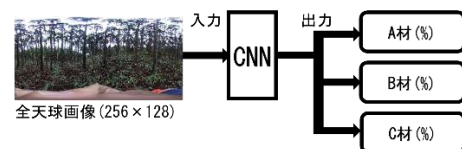


図 2 材質推定システムの概要

Fig. 2 The proposed timber quality estimation system.

表 2 CNN の構造 (材質推定システム)

Table 2 The structure of CNN.

| 層       | 入力ユニット        | 出力ユニット        | 活性化関数 |
|---------|---------------|---------------|-------|
| 畳み込み層1  | (128, 256, 3) | (59, 123, 96) | ReLU  |
| プーリング層1 | (59, 123, 96) | (29, 61, 96)  |       |
| 畳み込み層2  | (29, 61, 96)  | (29, 61, 256) | ReLU  |
| プーリング層2 | (29, 61, 256) | (14, 30, 256) |       |
| 畳み込み層3  | (14, 30, 256) | (14, 30, 384) | ReLU  |
| 畳み込み層4  | (14, 30, 384) | (14, 30, 384) | ReLU  |
| 畳み込み層5  | (14, 30, 384) | (14, 30, 256) | ReLU  |
| プーリング層3 | (14, 30, 256) | (7, 15, 256)  |       |
| 全結合層1   | 26880         | 4096          | ReLU  |
| 全結合層2   | 4096          | 4096          | ReLU  |
| 全結合層3   | 4096          | 3             | ReLU  |

### 3. システム評価

材積推定および材質推定の提案システムの有用性を確認するために、石川県内の7地区（「田岸」、「徳田大津」、「中島二部」、「穴水平野」、「上涌波」、「小松西俣」、「梨谷小山」）で撮影した全天球画像と、それに紐づけられた材積および材質の値からなるデータセットを用いて、材積および材質の推定精度の評価実験を行った。

材積は、全天球画像の撮影地点を中心とした半径 12.6m の円プロットの範囲内に存在する立木の材積を 3D スキャナにより求め、その数値を 1ha あたりの材積に換算したものである。また、材質は、全天球画像の撮影地点で石川県森林組合連合会の専門員が目視で判断した数値である。

#### 3.1 材積推定システム

提案システムの有用性を評価するために、合計 2873 枚の全天球画像とその材積からなるデータセットを用いて、従来システムとの材積の推定精度の比較評価実験を行った。表 3 に、学習データ数およびテストデータ数を示す。

評価実験では、従来システムの CNN と提案システムの CNN の各々に、学習データセットを与えて学習させ、CNN モデルを構築した後に、その CNN モデルを用いて、テストデータセットによる材積の推定を行った。

従来システムの学習データセットとしては、100~1500 m<sup>3</sup>/ha の材積をもつ全天球画像を 100 m<sup>3</sup>/ha ごとに 14 クラスに分類したものを用いた。この学習データセットを用いて、全天球画像と分類クラスとの対応関係を学習した CNN モデルを構築した後に、その CNN を用いて、テストデータセットを 14 クラスのいずれかに分類した。したがって、従来システムは 100 m<sup>3</sup>/ha の分解能（間隔）でしか材積を推定することができないため、その分類クラスが表す材積範囲の中間値を従来システムによる材積推定値と仮定して推定精度を評価した。例えば、従来システムが全天球画像を 100~200 m<sup>3</sup>/ha の分類クラスに分類したとするならば、150 m<sup>3</sup>/ha の材積と推定したことになる。

図 3 に、従来システムおよび提案システムによる材積推定値の散布図を示す。この結果から、提案システムは、従来システムに比べて、材積推定値が実測値から大きく外れるものが少ないことがわかる。また、表 4 に示すように、材積推定値と実測値との誤差に基づく 4 つの評価項目についても、従来システムと提案システムとの比較評価を行った。ここで、閾値とは、正解とみなす実測値と推定値との誤差の許容値である。こ

表 3 学習およびテストデータ数（材積）

Table 3 The number of data (timber volume).

| データ種類  | 材積 (m <sup>3</sup> /ha) |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      | 合計   |
|--------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
|        | 101                     | 201 | 301 | 401 | 501 | 601 | 701 | 801 | 901 | 1001 | 1101 | 1201 | 1301 | 1401 |      |
| 学習データ  | 78                      | 320 | 182 | 218 | 238 | 220 | 164 | 117 | 204 | 205  | 73   | 2    | 2    | 4    | 2027 |
| テストデータ | 32                      | 136 | 76  | 93  | 99  | 92  | 70  | 49  | 84  | 84   | 31   | 0    | 0    | 0    | 846  |
| 合計     | 110                     | 456 | 258 | 311 | 337 | 312 | 234 | 166 | 288 | 289  | 104  | 2    | 2    | 4    | 2873 |

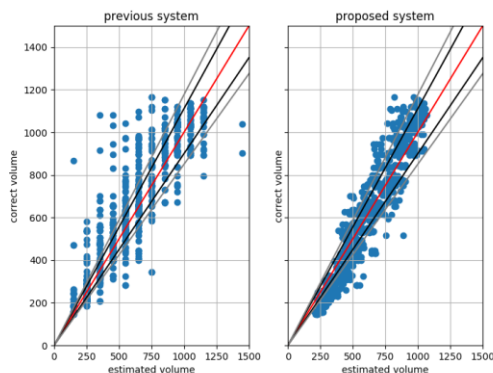


図 3 材積推定値の散布図

Fig. 3 The scatter plots of the estimated values.

の比較評価の結果についても、すべて評価項目において、提案システムの方が優れており、全天球画像からの材積推定を回帰問題として捉える提案システムの有用性を確認できた。

表 4 評価実験結果（材積）

Table 4 Result of evaluation experiment (timber volume).

| 評価項目                      | 従来システム | 提案システム | 差      |
|---------------------------|--------|--------|--------|
| 最大誤差 (m <sup>3</sup> /ha) | 730    | 373    | -357   |
| 累積誤差 (m <sup>3</sup> /ha) | 77243  | 64462  | -12781 |
| 閾値が10%の精度 (%)             | 45     | 46     | 1      |
| 閾値が15%の精度 (%)             | 62     | 64     | 2      |

#### 3.2 材質推定システム

提案システムの有用性を評価するために、合計 2665 枚の全天球画像とその材質からなるデータセットを用いて、材質の推定精度の評価実験を行った。材質データは、A 材、B 材、C 材という丸太材質の割合であり、例えば、全天球画像の撮影地点周辺に存在する A 材が 40%、B 材が 30%、C 材が 30%であれば、(40%, 30%, 30%)で表現されている。

表 5 に学習データ数およびテストデータ数を、表 6 に提案システムの材質推定精度を示す。ここで、閾値とは、正解とみなす丸太材質の割合の値と推定値との誤差の許容値であり、A 材、B 材、C 材のすべての割合が閾値以内であれば、推定値は正解とした。この結果から、改良の余地はあるものの、全天球画像からの材質推定システムの有用性は確認できた。

表 5 学習およびテストデータ数（材質）

Table 5 The number of data (timber quality).

| [A, B, C]    | 学習データ数 | テストデータ数 | [A, B, C]    | 学習データ数 | テストデータ数 |
|--------------|--------|---------|--------------|--------|---------|
| [0, 60, 40]  | 361    | 172     | [10, 50, 40] | 14     | 6       |
| [0, 50, 50]  | 285    | 130     | [0, 100, 0]  | 10     | 6       |
| [0, 40, 60]  | 218    | 113     | [5, 75, 20]  | 8      | 8       |
| [0, 70, 30]  | 197    | 95      | [0, 75, 25]  | 8      | 4       |
| [0, 10, 90]  | 175    | 79      | [10, 65, 25] | 8      | 4       |
| [0, 20, 80]  | 172    | 76      | [0, 90, 10]  | 8      | 6       |
| [0, 80, 20]  | 128    | 60      | [10, 90, 0]  | 6      | 4       |
| [0, 30, 70]  | 80     | 36      | [0, 95, 5]   | 4      | 2       |
| [10, 70, 20] | 54     | 30      | [0, 0, 100]  | 4      | 4       |
| [10, 60, 30] | 30     | 14      | [20, 50, 30] | 4      | 2       |
| [20, 60, 20] | 28     | 10      | [10, 80, 10] | 2      | 0       |

表 6 評価実験結果（材質）

Table 6 Result of evaluation experiment (timber quality).

| 評価項目          | 評価実験結果 |
|---------------|--------|
| 閾値が10%の精度 (%) | 78     |
| 閾値が15%の精度 (%) | 89     |

### 4. むすび

本研究では、深層学習を用いて、森林の全天球画像から材積および材質を推定する森林資源量計測システムを提案し、評価実験によりその有用性を確認した。今後も、データの拡充、評価・改良を継続し、実用的なシステムへと展開していく予定である。最後に、多大なるご支援を頂いている石川県農林研、石川県森連、㈱エイブルコンピュータの関係各位に感謝致します。なお、本研究は農研機構生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」の支援を受けて行ったものである。

### 参考文献

- [1] 根本航介, 川崎邦将, 松井康浩, 長田茂美, 寺本誠, 矢田豊, “深層学習を用いた全天球画像解析による森林資源量計測システムに関する研究,” 第 7 回中部森林学会大会, 510, 2017.

### 本プロジェクトに関する業績

- 1) 林航希, 川崎邦将, 松井康浩, 長田茂美, 北村俊平, 矢田豊, “深層学習を用いた全天球画像解析による森林資源量計測システムの提案,” 2019 年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会, F2-26, 2019.
- 2) 林航希, 川崎邦将, 松井康浩, 長田茂美, 村上良平, 矢田豊, “深層学習を用いた全天球画像解析による森林資源量計測システム-人工林材積・材質の推定-,” 第 9 回中部森林学会大会, 320, 2019.