

令和元年5月27日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K07478

研究課題名(和文) 超高解像度パノラマ画像による簡易森林計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of simple forest measurement system by ultra high resolution panoramic image

研究代表者

山本 一清 (Yamamoto, Kazukiyo)

名古屋大学・生命農学研究科・准教授

研究者番号：40262430

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ステレオ撮影した超高解像度(ギガピクセル)パノラマ画像(複数の望遠画像を合成したパノラマ画像)を利用した簡易森林計測システムの開発を目的として、その基盤となる望遠ステレオ画像によるプロットスケールの3次元計測技術について研究を行った。手法としては、民生用ステレオカメラを使った簡易的な樹木の3次元計測システムのプロトタイプ及び森林内のUAV撮影により得られた画像群から、Semi-Global Matching手法及びSfM(Structure from Motion)手法を用いた手法を提案し、これらの手法により立木位置及び胸高直径の簡易推定が可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、回転雲台を利用したステレオカメラ及びUAVによる撮影画像群から簡易的に森林内の3次元解析を行い、立木位置及び胸高直径を推定するシステムについて研究を行った。近年、地上レーザーを利用した森林計測に関する研究が行われているが、現状では高価な機器であり、普及については多くの課題を残す。しかし、本研究で明らかにした手法は、安価かつ容易に森林計測を実施できる新たな手法であり、学術的な価値は大きいものと考えられる。さらに、今後本研究の成果を利用した新たな測定機器を開発することも可能であり、その基盤的な成果として本研究の社会的価値は大きいものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, for developing a simple forest measurement system using ultra-high-resolution (gigapixel) panoramic images (panoramic images combining multiple telephoto images) captured in stereo photography, we researched three-dimensional measurement analysis technique and then individual tree extraction technique from the ultra-high-resolution (gigapixel) panoramic images. As a method, Semi-Global Matching method and SfM (Structure from Motion) method are used for a group of images obtained by a prototype of a simple three-dimensional tree measurement system using a commercial stereo camera and by UAV within a forest. We suggested that the methods presented in this study is useful to detect the positions and DBHs of individual trees within a forest.

研究分野：森林計測学

キーワード：画像解析 ステレオ画像 森林 立木位置 テンプレートマッチング

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、航空機 LiDAR 観測とともに、地上レーザー・スキャナによる森林計測技術の研究が行われ、その有効性が示されつつある。しかし、地上レーザー・スキャナは高額で、誰もが容易に利用できる状況にはない。一方、近年モーター駆動と自動シャッターにより一定角度で水平・垂直方向にカメラを回転させながら撮影できる自動回転雲台により、望遠で撮影した画像群をつなぎ合わせて超高解像度(ギガピクセル)パノラマ画像を撮影する技術が安価かつ容易に利用できるようになった。これに、3Dカメラに代表されるような簡易にステレオ画像を撮影できる機器や複数の自動雲台を組み合わせることにより、地上レーザー・スキャナ程の広範囲の計測は困難であっても、プロットスケール程度であれば遥かに安価かつ容易な3次元計測技術の開発が可能であると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、ステレオ撮影した超高解像度(ギガピクセル)パノラマ画像(複数の望遠画像を合成したパノラマ画像)を利用した簡易森林計測システムの開発を目的として、その基盤となる望遠ステレオ画像によるプロットスケールの3次元計測技術、立木個体抽出技術、樹幹形状計測技術に加え、全天空距離画像によるLAI及び光環境推定技術の開発を目指す。

### 3. 研究の方法

#### 1) 3Dカメラを用いた写真測量

これまで検討してきたTemplate Matching手法を画像内全域に展開し、森林内の三次元点群の計測を行ったが、出力された三次元点群はノイズがあまりに多く、点群中の立木抽出が困難であると考えられた。そのため、本研究ではステレオ画像による樹木の自動抽出手法として、画像取得、ノイズフィルタリング、視差計算、全天空三次元投影、三次元モデルからの樹木位置推定の5段階のプロセスで構成する新たな手法を考案した。

本研究では、2017年9月4日に名古屋大学大学院生命農学研究科附属稲武フィールド内の2撮影点からステレオ広角撮影した145枚及び115枚の画像群からにより解析を行った。なお、ステレオカメラはFinePix REAL 3D W3(富士フイルム株式会社)を使用し、撮影時には同ステレオカメラを自動回転雲台GigaPan EPIC100(GigaPan Systems)に固定し、水平360°方向の撮影を自動化した。ステレオカメラでは左レンズで撮影した“左画像”と右レンズで撮影した“右画像”がステレオペア画像として保存される。このステレオペア画像のうち、左画像を基準に解析を進めた。

ノイズフィルタリングでは左画像を使用し解析を行った。“エッジ”と呼ばれる画像中での濃淡が急変する画素の密度情報が樹幹/非樹幹の判定に有効であることに着目し、ノイズフィルタリング用のマスク画像を作成した。なお、このノイズフィルタリングを施し、使用する領域の制限した画像に対して次の行程である視差計算を行った。

視差計算では、Semi-Global Matchingによる対応点抽出結果から視差を算出し、画素位置に視差情報が格納された“視差画像”を取得した。

全天空三次元投影ではこの視差画像から取得される視差情報を深度に変換するモデル式の導出を行った。また、この深度について、撮影時のカメラの水平方向・垂直方向角度をもとに一つの座標系(平面直角座標系)に統合した。

以上の行程で作成した樹幹部の三次元モデルをもとに、樹木の位置推定を行った。樹幹部の三次元モデルを再投影した場合には樹木に相当する三次元点は同一の平面上の位置に高密度で投影される。この行程では、三次元点が高密度に投影されている位置を樹木推定位置として自動抽出し、その樹木推定位置から三次元モデルの精度の評価を行った。

#### 2) 森林内 UAV 撮影画像による森林計測手法の開発



図1. 森林内 UAV 撮影画像から生成された3次元モデル

近年 UAV (無人航空機) と SfM (複数枚の画像から対象の 3 次元形状を復元する技術) を併用した測量 (以下 UAV-SfM 測量とする) の森林計測への応用が検討され始めた。森林を対象とした UAV-SfM 測量では、森林を上空から撮影したものが大半占めており、森林内を対象にした先行事例は報告されていない。本研究では UAV-SfM 測量を用いた森林内調査の可能性を明らかにすることを目的とし UAV で森林内を撮影した画像を用い、立木検出方法について検討を行った。

UAV には Phantom 3 Professional (DJI 社製)、SfM ソフトウェアには PhotoScan Professional (Agisoft 社製) を使用した。三重県林業研究所試験林を対象地とし、UAV を林内で飛行させ撮影した画像から、SfM ソフトウェアを用いて林内の 3 次元構造を復元 (図 1) し、立木検出を行った。立木検出は、1 m 間隔のコンターから、4 m 間隔のコンター + 傾斜角 80° 以上の部分から、3 次元モデルの点群分類から抽出するという 3 手法で行い、それぞれ立木検出率を比較・検討した。さらに、得られた 3 次元構造 (点群) から、胸高 (1.3m) 位置における点群を抽出し、円推定による胸高直径推定システムを開発し、その推定精度についても検討を行った。

#### 4. 研究成果

##### 1) 3D カメラを用いた写真測量

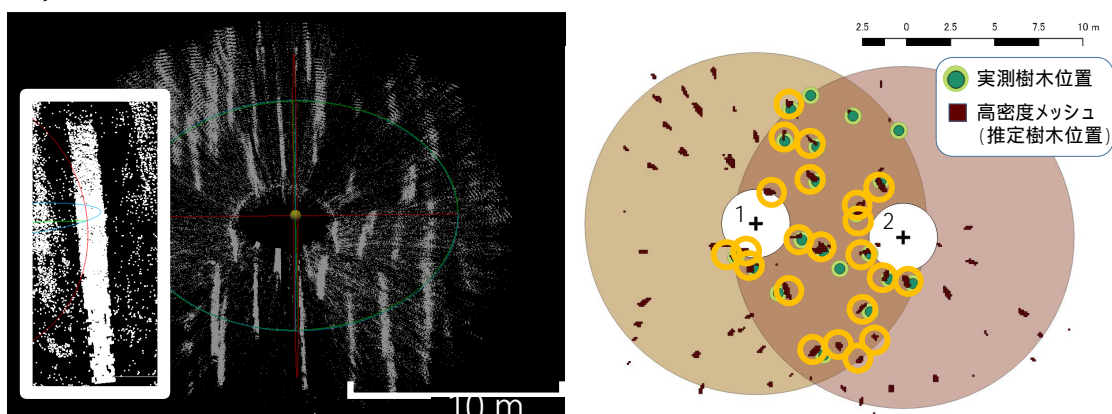


図 2. ステレオカメラ画像から生成された 3 次元モデル及び立木検出結果

本研究では、民生用ステレオカメラを使った簡易的な樹木の三次元計測システムのプロトタイプを提案した。

画像取得では、民生用の自動回転雲台を用いて撮影を自動化することで、撮影対象範囲を拡張することができることが示された。ノイズフィルタリングでは、画像中の対象物の輪郭線に相当するエッジの密度を樹幹領域と非樹幹領域 (下草や樹木の枝葉など) の判定項目として利用することができることが示された。また、全天空三次元投影 (図 2) では、それぞれの画像に対して撮影点からの水平・垂直方向角度による幾何補正を行うことで、異なる撮影点から取得した三次元モデルの統合が可能であることを示した。また、三次元樹幹部モデル (図 2) 作成にあたって、ステレオ画像への SGM を用いた対応点抽出が良好であることを示した。このモデルから 10 m の範囲内での樹木の位置推定が可能 (図 2) であることを明らかにした。

##### 2) 森林内 UAV 撮影画像による森林計測手法の開発

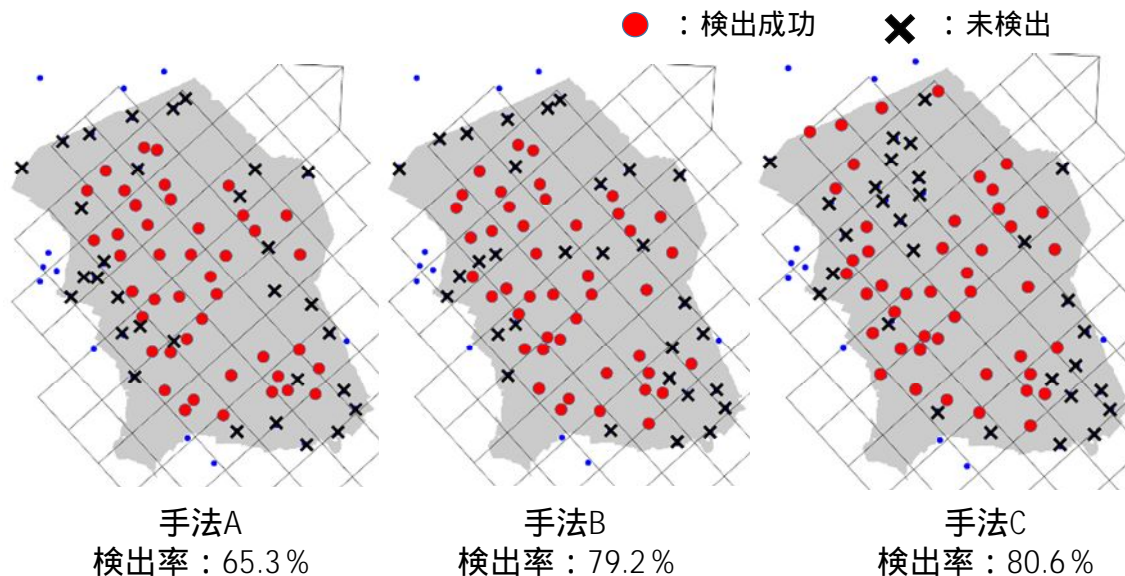


図 3. 森林内 UAV 撮影画像による立木検出結果

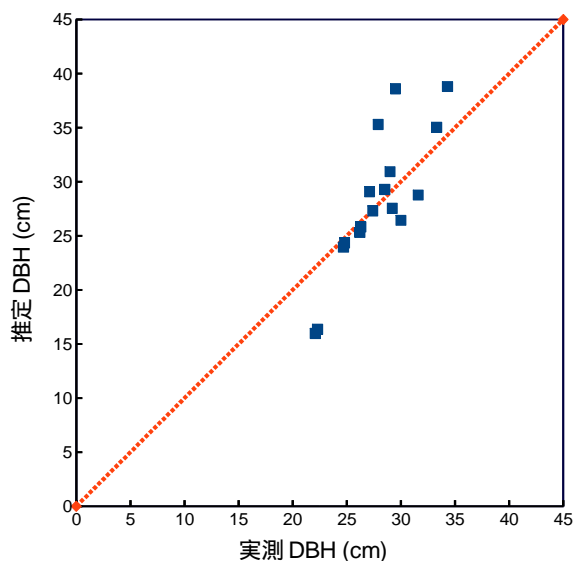


図4 . DBH 推定結果

全体的な立木検出結果(図3)については、本研究で提案した3手法では が最も高精度であった。 、 では誤検出が多く、 ではコンター幅が広く対象立木ではない低木が誤検出されたこと、 では点群分類の際に一部の低木や倒木の点群を分類できていなかったためであると考えられる。また、 、 は結果に判読者による差が生じやすいという課題がある。

一方、すべての手法で撮影範囲の外縁部では中心部に比べ立木検出率が低い結果となった。これは外縁部では対象立木を多方向から撮影できていないため3次元形状を復元できなかったためであると考えられる。また、地形の影響で画像重複率が低くなっている部分が見られた。しかし、立木検出率は の80.6%と十分な検出率であると考えられた。以上のことから、森林内 UAV 撮影画像による

UAV-SfM 測量は簡易的な森林内調査法として有効な手法であると考えられた。

さらに、DBH 推定結果(図4)のとおり、精度良く推定できた個体がある一方、大きな誤差を生じていた個体も見られた。これは、立木位置と撮影位置の関係から、胸高周囲全体に点群が形成されるわけではないため、抽出した点群からの胸高直径推定に誤差が生じたものと考えられ、撮影方法も含め、今後のさらなる検討が必要と考えられた。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8件)

中武修一・山本一清・吉田夏樹・山口 温・宇野女草太、航空機 LiDAR による単木樹種分類手法の開発、日本森林学会誌、査読有、100 巻、2018 年、pp. 149-157

Inoue A, Sato M, Shima H, Maximum size-density relationship in bamboo forests: Case study of *Phyllostachys pubescens* forests in Japan、Forest Ecology and Management、査読有、Vol. 425、2018 年、pp. 138-144

Inoue A, Miyazawa Y, Sato M, Shima H, Allometric Equations for Predicting Culm Surface Area of Three Bamboo Species (*Phyllostachys* spp.)、Forests、査読有、Vol. 9、2018、pp. 295-295

Inoue A. and Shima, H, Survival time of Princess Kaguya in an air-tight bamboo chamber、Forma、査読有、33 巻、2018、pp. 1-5

Inoue A., Shimada M., Sato M. Shima H, Estimation of culm volume reduction factors in five bamboo species (*Phyllostachys* spp.)、査読有、Journal of Forestry Research、Vol. 29、2018 年、pp. 1-10

Inoue A. and Sakamoto M., Comparing the methods for quantifying the culm surface area of bamboo, *Phyllostachys pubescens*、Ecological Research、査読有、Vol. 32., 2017、pp.445-450

山本一清、航空機 LiDAR による森林計測手法、レーザー研究、査読有、44 巻、2016、pp. 326-330

Inoue A. and Nishizono T, Conservation rule of stem surface area: a hypothesis、European Journal of Forest Research、査読有、Vol. 134、2015、pp.599-608

[学会発表](計 29件)

山本一清・中武修一・吉田夏樹・山口 温・宇野女草太、航空機 LiDAR による樹木個体樹種分類手法の汎用性評価、第 130 回日本森林学会大会、2019 年、朱鷺メッセ

成田修平・山本一清、UAV による間伐施業評価法の開発、第 130 回日本森林学会大会、2019 年、朱鷺メッセ

越河一樹・溝上展也・山本一清・井上昭夫、地上レーザースキャナのための樹高推定の理論の構築、第 130 回日本森林学会大会、2019 年、朱鷺メッセ

井上昭夫・佐藤太裕・島 弘幸、モウソウチク林における密度管理図の調製、第 130 回日本森林学会大会、2019 年、朱鷺メッセ

岩附慶大・山本一清、航空機 LiDAR による簡易林相区分評価法の開発、第 8 回中部森林学会大会、2018 年、信州大学

成田修平・山本一清、UAV による列状間伐施業評価法の開発、第 8 回中部森林学会大会、

2018 年、信州大学

末松直輝・太田徹志・溝上展也・井上昭夫・吉田茂二郎・北里春香・草野秀雄・甲斐博文・大政康史、地上レーザースキャナーを用いた立木の計測における誤差要因についての検討、第 74 回九州森林学会大会、2018 年、琉球大学

井上昭夫・佐藤太裕・島 弘幸、正形数と形状指数、第 74 回九州森林学会大会、2018 年、琉球大学

山崎浩司・山本一清、地上レーザによる森林計測精度の評価、第 129 回日本森林学会大会、第 129 回日本森林学会大会、2018 年、高知大学

井上昭夫・佐藤太裕・島 弘幸、竹林の自己間引き、第 129 回日本森林学会大会、2018 年、高知大学

井上昭夫・西園朋広、樹幹表面積に基づく林分密度の表現、2017 年度森林計画学会秋季発表会、2017 年、京都府立大学

井上昭夫・西園朋広、樹幹表面積に基づく林分密度指標の提案、第 73 回九州森林学会大会、2017 年、長崎ウエスレヤン大学

三谷綾香・山本一清、ステレオ画像を用いた樹木位置計測の自動化手法の検討、第 128 回日本森林学会大会、2017 年、鹿児島大学

中武修一・山本一清・宇野女草太・吉田夏樹・山口温、航空機 LiDAR による樹木個体の樹種分類精度評価、第 128 回日本森林学会大会、2017 年、鹿児島大学

山本一清・山下翔之・中武修一・三谷綾香・島田博匡、森林内調査における UAV の有効性の検討、第 128 回日本森林学会大会、2017 年、鹿児島大学

山下翔之・山本一清、UAV (小型無人航空機) と SfM (Structure from Motion) を用いた森林内調査法の検討、第 6 回中部森林学会大会、2016 年、三重大学

山崎浩司・山本一清・宇野女草太・吉田夏樹・都竹正志、航空機 LiDAR による単木誤検出評価法の検討、第 6 回中部森林学会大会、2016 年、三重大学

山本一清・三谷綾香・中武修一、簡易 3D カメラ計測システムの開発、第 127 回日本森林学会大会、2016 年、日本大学生物資源科学部

三谷綾香・山本一清、3D カメラによる簡易森林計測システムの開発 自動回転雲台による立木位置図推定手法の検討、第 127 回日本森林学会大会、2016 年、日本大学生物資源科学部

三谷綾香・山本一清、3D カメラによる簡易森林計測システムの開発 -光学倍率による距離推定精度の差異について-、第 5 回中部森林学会大会、2015 年、静岡大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：井上 昭夫

ローマ字氏名：INOUE, Akio

所属研究機関名：熊本県立大学

部局名：環境共生学部

職名：教授

研究者番号(8桁)：80304202

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。