

ボクセルモデルを用いた  
森林における太陽光反射シミュレーション  
Simulation of reflected sunlight using a voxel model in a forest

高知工科大学大学院  
工学研究科基盤工学専攻  
社会システム工学コース  
国土情報処理工学研究室

学籍番号 1215059

藤原 匠

指導教員 高木方隆

副指導教員 西内裕晶

論文副審査 赤塚慎

2019年3月9日

## 論文要旨

地球の環境問題が深刻化する近年, 全球スケールでの正確な地球環境のモニタリングが求められている. 全球を広域かつ周期的に把握するには, 地球観測衛星によって取得する衛星画像を利用することが有効である. 衛星画像は, 地球観測衛星が観測した放射輝度 (主に太陽光の反射) を画像化したものである. 衛星画像は研究機関によって処理され, 様々な物理プロダクトとして取得することができる. プロダクトの有用性を証明するには, 精度検証が重要である. 精度検証の基本は, 物理量を直接比較することであるが, プロダクトの中には, 直接的に検証が困難な場合もある. 間接的に検証を行う手法として, 大気情報と土地被覆情報を組み合わせた物理モデルにレイトレーシングを適用し, 衛星が観測する放射輝度を逆推定する手法が用いられる. しかし, 使用されている森林のモデルが DSM(Digital Surfaces Model) などの簡易的なモデルであることや, 検証サイトのように管理された森林をモデル化している. 地域によっては, 複雑な森林構造になっている場合もあるため, 簡易的な形状に置き換えると, 実際の森林から乖離し, 逆推定の精度に信頼性が失われることとなる. 複雑な森林構造も再現することのできるモデルからのプロダクトの検証手法が求められる.

複雑な森林の 3 次元構造を反映させることのできるモデルの一つにボクセルモデルが挙げられる. ボクセルモデルとは, 空間を微小立方体に区切り, 各立方体に属性を付与したモデルである. また, 各ボクセルには, 葉面積や幹材積など様々な物理量を属性に付与することも可能である. つまり, ボクセルモデルを用いることで衛星画像のプロダクトの検証が行えることが期待できる. 現在, ボクセルモデルとレイトレーシングを組み合わせ, 放射輝度を逆推定するシミュレーター (FLiES) が開発されている. FLiES は様々な研究で使用されているが, 樹木の形状が円柱や円錐形などの簡易的な形状に限定されている. そこで本研究では, 衛星画像シミュレーションのための, 森林構造を再現したボクセルモデルを用いた, レイトレーシング適用可能性の検討を行った. 対象とする森林は, 常緑針葉樹林, 常緑広葉樹林, 落葉期の落葉広葉樹林とした. 本研究では, レイトレーシングにより太陽光の反射をシミュレートし, 空撮画像の明度を再現した. レイトレーシングの手法として, 常緑針葉樹林, 常緑広葉樹林では Shadow と Shade を, 落葉期の落葉広葉樹林では散乱断面積を用いた. 空撮画像を用いた理由は, シミュレーションの結果に大気による影響を避けるためである. また, 明度とシミュレーションした太陽光の反射割合の相関係数により検証を行った. 今回 10cm のボクセルモデルから 10cm 分解能の画像をシミュレートした. その後, 画像の分解能を 50cm, 100cm, 150cm, 200cm と変化させていき, 相関係数を算出した.

シミュレートした結果, それぞれの森林において最大の相関係数は, 常緑広葉樹林では 0.384, 常緑針葉樹林では 0.748, 落葉広葉樹林では 0.671 を示した. 常緑広葉樹林において相関係数が低くなった原因には Shadow のシミュレートの精度が低いことが考えられた. 今後相関係数を向上させるためには, ボクセルの属性に Shadow 割合や天空率などを追加する必要があると考えられる.

## Abstract

Currently, accurate monitoring technology for global environment is an important issue. Land observation satellites is valid for monitoring of global environment. Satellite imagery has radiance information as an attribute. Satellite imageries were processed by research institutes and provided to users as products. The products of satellite imagery are used in many research fields. To verify accuracy of the products, inverse estimation for radiance is applied by ray tracing using physical model. The physical model is combined atmosphere and landcover. Usually, surface model has been used as a landcover. However, surface model can't represent complex structure of a forest.

Voxel model is one suitable model that can represent three dimensional complex structures of a forest. Voxel model is the data model to represent three-dimensional space with a small cube. The small cube called voxel can be stored various physical quantities for example, leaf area, woody material volume and so on. Voxel model of the forest stored physical quantities will be expected to verifying products of satellite imagery. Nowadays, simulator for radiance using a voxel model and ray tracing has developed. The simulator called FLiES (Forest Light Environmental Simulator). FLiES has used many researchers, but shape of the tree was used simple geometry such as a cylinder, a conical shape, or the like. In this research, brightness of aerial images was simulated by ray tracing of sunlight using a voxel model. The test area was selected evergreen broad-leaf forests, evergreen needle-leaf forest and deciduous broad-leaved forest in the deciduous period. At evergreen broad-forests and evergreen needle-leaf forest, shadow and shade was simulated. At deciduous broad-leaved forest, scattering cross section was simulated. The reason for using aerial images is to avoid the influence by the atmosphere. Firstly, aerial images with resolution of 10 cm were simulated from a voxel model with a size of 10cm. Next, resolution was downsampled to 50cm, 100cm, 150cm and 200cm. Finally, correlation coefficient of simulated images and aerial images was calculated in each resolution.

As a result, the correlation coefficient was 0.384 at evergreen broad-leaf forests, 0.748 at evergreen needle-leaf forest and 0.671 at deciduous broad-leaved forest. At present, simulation method of shadow and shade was used surface of voxel model. To improve the correlation coefficient, shadow ratio and sky view factor should be stored in all voxel as attribute.

# 目次

論文要旨	i
Abstract	ii
1 序論	1
1.1 背景	1
1.2 ボクセルモデル	2
1.3 先行研究	3
1.4 研究目的	4
2 ボクセルモデルを用いた太陽光反射シミュレーション方法	5
2.1 本研究における太陽光反射シミュレーション	5
2.2 シミュレーションのフロー	7
2.3 点群取得に用いる使用機材・ソフトウェア	8
2.3.1 ドローン	8
2.3.2 SfM ソフトウェア	8
2.3.3 地上型 LiDAR	9
2.4 手法開発に使用した仮想樹木	10
2.5 ボクセル化と属性の付与	10
2.5.1 空撮 SfM から取得した点群のボクセル化	10
2.5.2 地上型 LiDAR から取得した点群のボクセル化	11
2.5.3 散乱断面積の付与	12
2.6 画像投影	13
2.6.1 焦点距離の設定	13
2.6.2 反射光の計算方法	15
2.6.2.1 着葉樹の場合	15
2.6.2.2 落葉樹の場合	17
2.7 検証画像への変換と検証手法	18
2.7.1 検証画像への変換	18
2.7.2 検証手法	18
3 常緑広葉樹林への適用結果	19
3.1 対象地域	19
3.2 常緑広葉樹林における計測と解析のフロー	19
3.3 点群の幾何精度	20
3.4 検証画像	21
3.5 シミュレーション結果	22
3.5.1 分解能 10cm	22
3.5.2 分解能 50cm から分解能 200cm	23
3.6 考察	24
4 常緑針葉樹林への適用結果	25
4.1 対象地域	25

4.2	常緑針葉樹林における計測と解析のフロー	25
4.3	点群の幾何精度	26
4.4	検証画像	27
4.5	シミュレーション結果	28
4.5.1	分解能 10cm	28
4.5.2	分解能 50cm から分解能 200cm	29
4.6	考察	30
5	落葉広葉樹林への適用結果	31
5.1	対象地域	31
5.2	落葉広葉樹林における解析と計測のフロー	31
5.3	点群の幾何精度	32
5.3.1	空撮 SfM	32
5.3.2	地上型 LiDAR	33
5.4	検証画像	34
5.5	シミュレーション結果	35
5.5.1	分解能 10cm	35
5.5.2	分解能 50cm から分解能 200cm	36
5.6	考察	37
6	結論	38
	参考文献	39
	謝辞	41

## 図目次

図 1	ボクセル化のフロー	2
図 2	FLIES	3
図 3	センサーに入射する放射照度	4
図 4	人工衛星の観測イメージ	5
図 5	着葉している樹木の反射光の計算イメージ	6
図 6	落葉している樹木の反射光の計算イメージ	6
図 7	ボクセルモデルを用いた太陽光反射シミュレーションのフロー	7
図 8	ドローンの外観	8
図 9	地上型 LiDAR の外観	9
図 10	使用した仮想樹木	10
図 11	空撮 SfM により取得した点群のボクセル化のイメージ	10
図 12	LiDAR により取得した点群のボクセル化のイメージ	11
図 13	散乱断面積の計算フロー	12
図 14	散乱断面積の付与イメージ	13
図 15	カメラ位置と対象物との位置関係	13
図 16	焦点距離の設定フロー	14
図 17	着葉樹の場合の反射光のイメージ図	15
図 18	光源・視点の位置関係	16
図 19	散乱断面積のイメージ図	17
図 20	画像座標と地上座標の対応	18
図 21	中後入地区の位置図	19
図 22	常緑広葉樹林における計測と解析のフロー	19
図 23	中後入地区のオルソフォトと基準点位置図	20
図 24	常緑広葉樹林の抽出した画像	21
図 25	常緑広葉樹林の検証画像	21
図 26	常緑広葉樹林 シミュレート画像	22
図 27	常緑広葉樹林 検証点位置図	22
図 28	常緑広葉樹林 検証点におけるシミュレーション結果と明度の散布図	22
図 29	常緑広葉樹 分解能 50cm	23
図 30	常緑広葉樹 分解能 100cm	23
図 31	常緑広葉樹 分解能 150cm	23
図 32	常緑広葉樹 分解能 200cm	23
図 33	常緑広葉樹林での各分解能におけるシミュレーション結果と明度の散布図	24
図 34	松尾峠の位置図	25
図 35	常緑針葉樹林における計測と解析のフロー	25
図 36	松尾峠におけるオルソフォトと基準点位置図	26
図 37	常緑針葉樹林の抽出した画像	27
図 38	常緑針葉樹林の検証画像	27
図 39	常緑針葉樹林 シミュレート画像	28
図 40	常緑針葉樹林 検証点位置図	28
図 41	常緑針葉樹林 検証点におけるシミュレーション結果と明度の散布図	28

図 42	常緑針葉樹	分解能 50cm	29
図 43	常緑針葉樹	分解能 100cm	29
図 44	常緑針葉樹	分解能 150cm	29
図 45	常緑針葉樹	分解能 200cm	29
図 46	常緑針葉樹林での各分解能におけるシミュレーション結果と明度の散布図		30
図 47	落葉樹林における計測と解析のフロー		31
図 48	落葉期の松尾峠におけるオルソフォトと基準点位置図		32
図 49	地上型 LiDAR 設置位置		33
図 50	落葉広葉樹林の抽出した画像		34
図 51	落葉広葉樹林の検証画像		34
図 52	落葉広葉樹林	地上型 LiDAR シミュレート画像	35
図 53	落葉広葉樹林	地上型 LiDAR 検証点位置図	35
図 54	落葉広葉樹林	地上型 LiDAR 検証点におけるシミュレーション結果と明度の散布図	35
図 55	落葉広葉樹	地上型 LiDAR 分解能 50cm	36
図 56	落葉広葉樹	地上型 LiDAR 分解能 100cm	36
図 57	落葉広葉樹	地上型 LiDAR 分解能 150cm	36
図 58	落葉広葉樹	地上型 LiDAR 分解能 200cm	36
図 59	落葉広葉樹林での各分解能におけるシミュレーション結果と明度の散布図		37

## 表目次

表 1	陸域標準プロダクト (GCOM-C) . . . . .	2
表 2	FLIES の入力パラメータ (マニュアルより一部抜粋) . . . . .	3
表 3	カメラの仕様 . . . . .	8
表 4	地上型 LiDAR の仕様 . . . . .	9
表 5	中後入地区における基準点の RMSE . . . . .	20
表 6	中後入地区における検証点の RMSE . . . . .	20
表 7	松尾峠における基準点の RMSE . . . . .	26
表 8	松尾峠における検証点の RMSE . . . . .	26
表 9	2018 年 11 月 30 日の松尾峠における基準点の RMSE . . . . .	32
表 10	2018 年 11 月 30 日の松尾峠における検証点の RMSE . . . . .	32
表 11	各 LiDAR 計測位置で幾何補正に使用した基準点の最大誤差 . . . . .	33



# 1 序論

## 1.1 背景

地球の環境問題が深刻化する近年、全球スケールでの正確な地球環境のモニタリングが求められている。全球を広域かつ周期的に把握するには、地球観測衛星によって取得する衛星画像を利用することが有効である。衛星画像は、地球観測衛星に搭載されたセンサが観測した放射輝度を画像化したものである。1972年にアメリカ航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration)(以下,NASA)が地球観測衛星として打上げたLandsatを始め、現在では様々な国や研究機関が地球観測衛星を打ち上げ地球観測を行っている。衛星画像は研究機関によって処理され、処理レベルに応じ、放射輝度からプロダクトに変換される。プロダクトの中には物理プロダクトも提供されている。特に重要なプロダクトが、単位地表面積あたりの葉の片面の総面積で定義される葉面積指数(Laef Area Index)(以下,LAI)である。LAIは、グローバル生態系モデルのBiome-BGC[1],Sim-CYCLE[2],ORCHIDEE[3]などの重要なパラメータの一つである。これらのモデルは、パラメータを用いて植物の二酸化炭素の固定量等を推定し、気候の変化や気温上昇の予測を行なうものである。つまり,LAIの推定精度が、地球温暖化の現状把握や今後の対策にも影響を与えと言え。しかし、小林(2008)[4]は,LAIは地域ごとに詳細にみると,LAIの絶対値や季節変化に大きな誤差が存在する場合もあると指摘しており、推定精度に課題が残っている。

日本においても、宇宙航空研究開発機構が地球環境変動観測ミッション(GCOM:Global Change Observation Mission)を進めており、2017年に気候変動観測衛星(GCOM-C)を打ち上げた。GCOM-Cは多波長光学放射計(Second generation Global Imager)(以下,SGLI)を搭載しており、これまでの衛星よりも広域の波長を詳細な波長分解能で観測することができるためプロダクトへの期待も大きい。表1に例としてGCOM-Cによって提供予定である陸域標準プロダクト[5]を示す。LAIに加え、地上部バイオマス、植生ラフネス指数、カゲ指数といった新たなプロダクトも追加されていることがわかる。GCOMのサイエンスプラン[6]では、「陸分野のプロダクトには、植物生産やバイオマスとその変動を捉え、気候変動予測、農業や水循環、災害分野での貢献が期待されている。特にSGLIでは、陸域大気補正の向上により派生する、植生指数の精度向上や多方向観測によりバイオマスや土地被覆分類の精度向上が期待される。」と記されている。

プロダクトの有用性を証明するには、精度検証が重要である。精度検証の基本は、物理量を直接比較することであるが、プロダクトの中には、直接的に検証が困難な場合もある。そのような場合は、大気情報と土地被覆情報を組み合わせることにより、衛星が観測する放射輝度を逆推定する手法により検証が行われている。大気の情報を得るには、衛星が観測した大気の状態での放射伝達式を解く必要がある。現在は、放射伝達式を解くためにMODTRAN(MODerate resolution atmospheric TRANsmission)や6S(Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum vector code)と呼ばれるプログラムが開発されている。しかしながら、プログラムに入力するパラメータは詳細でなければならず、衛星観測時の対象地域の気象情報がリアルタイムで観測されていなければ、大気の情報を得ることは難しい[7]。土地被覆情報には、森林のモデルが用いられる。GCOM-Cでは、プロダクトの検証サイトにて森林をモデル化し、レイトレーシングや放射伝達モデルを用いることでプロダクトの検証を行っている[8][9]。しかし、使用されている森林のモデルが簡易的な形状であることや、検証サイトのように管理された森林をモデル化している。そのため、小林(2008)[4]の指摘にあるような問題点は残っている。地域によっては複雑な森林構造になっている場合もあるため、簡易的な形状に置き換えてしまうと、実際の森林から乖離してしまい、逆推定の精度に信頼性が失われることとなる。つまり、複雑な森林構造を再現したモデルからのプロダクトの検証手法が求められる。

表 1 陸域標準プロダクト (GCOM-C)

プロダクト	定義
大気補正済陸域反射率	大気中の気体分子やエアロゾル粒子による光の散乱・吸収の効果を除去し地表相当の反射率に補正したもの(雲検知含む).
植生指数	植生の被覆や活性などを示す指数
地上部バイオマス	植生の地上部の乾燥重量
植生ラフネス指数	SGLI の多方向観測による植生の立体構造の違いを示す指数
カゲ指数	スペクトル情報を用いた植生の陰影の割合を示す指数
光合成有効放射吸収率	植生が吸収する光合成有効放射 (PAR) の割合
葉面積指数	単位面積あたりの植生の葉の片面の総面積
地表面温度	地表面の温度

## 1.2 ボクセルモデル

通常、森林のモデルは、LiDAR(Light Detection And Ranging) や SfM(Structure from Motion) などの要素技術を用いて取得した点群を元に作成される。しかし、取得した点群は、空間的に不均質なデータとなっているため、DSM(Digital Surface Model) などのサーフェスモデルに変換し処理されることが多い。DSM とは、点群を XY 平面で格子状に分割し、各格子に、点群の座標平均値などを付与したモデルである。DSM に変換した場合、森林の樹冠構造は表現することができるが、樹木の 3 次元構造までは再現することができない。そこで、複雑な森林の 3 次元構造を反映させることのできるモデルの一つにボクセルモデルが挙げられる。ボクセルモデルは、空間を微小立方体に区切り、各立方体に属性を付与したモデルとなるため、3 次元構造を再現することができる。また、各ボクセルには、葉面積や幹材積など様々な属性を付与することも可能である。図 1 にボクセル化のフローを示す。Hosoi ら [10] は、一本の樹木に対して複数の箇所から地上型 LiDAR にて点群を取得し、ボクセルモデルを用いて葉面積密度 (Leaf Area Density)(以下、LAD) や LAI を計測している。実測結果と比較しても、最大で 17% 最小で 0.7% の推定精度となっている。中井ら [11] や Songa ら [12] は、航空 LiDAR を用いて取得した点群をボクセル化することで、複数の樹木の LAD 分布の推定を行っている。つまり、森林の様々な物理量を反映させることができるため、衛星画像のプロダクトの検証も行えることが期待できる。さらに、ボクセルモデルを用いることで、森林内の熱環境や流体のシミュレーションへの応用も期待できる。

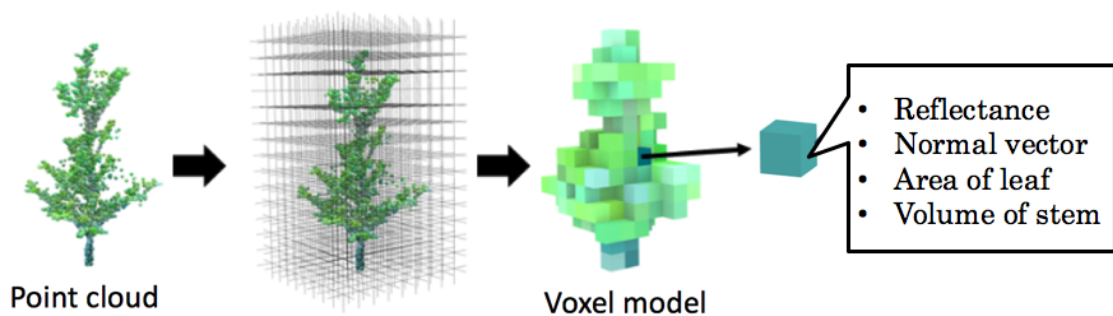


図 1 ボクセル化のフロー

### 1.3 先行研究

Kobayashi ら [13] はボクセルモデルを用いた 3 次元植生放射伝達モデル (Forest Light Environmental Simulator)(以下,FLiES) を開発した.FLiES は大気パラメータと植生のパラメータ (表 2) をチューニングし, モンテカルロ法を用いてモデルをレイトレーシングすることで放射物理量をサンプリングする (図 2). 主に,LAI や光合成有効放射量などを逆推定することができる. 小林は FLiES を用いて, 針葉樹林における分光反射率と LAI の関係性についての研究 [14] や, アラスカの黒トウヒ林にて, 衛星画像の空間分解能と光合成有効放射吸収率の関係についての研究 [15] を行っている. さらに, 着葉期の落葉針葉樹林のカラマツを対象に牧ら [16] が, 着葉期の落葉広葉樹のケヤキを対象に押尾ら [17] が FLiES を用いて, 林内の光環境の推定を試みている. この他にも FLiES を利用した研究事例は多い. しかし,FLiES の植生パラメータで選択可能な樹木の形状は, 円錐, 円柱, 回転楕円体のいずれかの形状に限定される. また, 樹冠内部は二つの領域に分割されており, 外側の領域には葉のみが分布し, 内部の領域には枝などの非同化器官のみが含まれている [18]. つまり現状の FLiES では, 枝の形状を反映させることができないため, 落葉期の落葉広葉樹林への適用が難しいことがわかる.

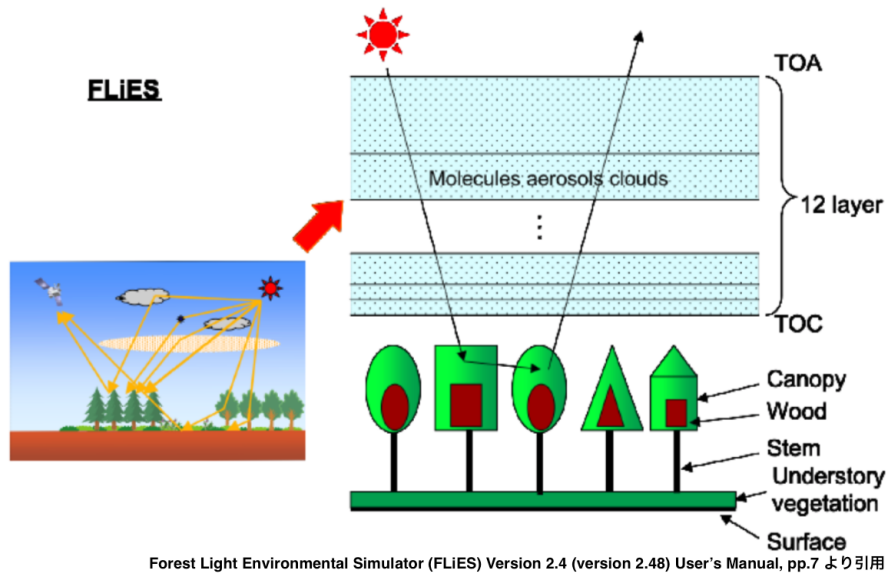


図 2 FLiES

表 2 FLiES の入力パラメータ (マニュアルより一部抜粋)

パラメータ	定義
np	シミュレーションで用いるモデル光子の総数
dif	大気的全入射光に対する散乱光の割合
stype	地表面モデルの選択
rtype	大気プロファイルの選択
atype	大気エアロゾルタイプの選択
lr,lt,ult,str,sor	それぞれ順番に, 樹冠部の葉の反射率・透過率, 林床植生の反射率・透過率, 幹の反射率, 土壌の反射率.
u	葉面積密度. 樹種グループがある場合. 樹木グループ毎にインプットする.
gLAI	林床植生の LAI
BAD	枝面積指数. 樹種グループがある場合. 樹木グループ毎にインプットする.

## 1.4 研究目的

これまでに、高性能なセンサを搭載した様々な地球観測衛星が打ち上がっており、全球を対象に衛星画像を用いた自然環境のモニタリング技術が向上している。現在では、衛星画像から算出したプロダクトを用いて地球温暖化や気温上昇などのシミュレーションも行なっている。プロダクトの検証には、大気情報と土地被覆情報を組み合わせることにより、衛星が観測する放射輝度をピクセル単位でシミュレーションする手法が用いられる。しかしながら、検証が十分に行われていないプロダクトも存在する。特に、森林のモデルに DSM などの簡易的なサーフェスモデルが用いられていることや、検証が限られた検証サイトのみにより行われている場合が多い。そこで、実際の森林の形状に近い、複雑な森林構造を反映させることのできるボクセルモデルを用いたシミュレーションが必要であると考えられた。特に、ボクセルモデルを用いれば、物理量を反映させた森林の3次元構造を再現することができるため、衛星画像のプロダクトや自然環境のシミュレーションへも応用が可能であると期待できる。

FLiES では、ボクセルモデルとモンテカルロ法を用いたレイトレーシングにより様々な物理量を推定している。しかし、樹木の形状が円錐・円柱・回転楕円体のいずれかの形状に限定している。また、枝や幹などの構造を反映させることができないため、落葉期の落葉広葉樹林への適用に至っていない。そこで本研究では、衛星画像シミュレーションのための、森林構造を反映させたボクセルモデルを用いたレイトレーシング適用可能性の検討を行う。検討項目は以下の3点である。様々な森林へ対応するためにも、対象とする森林は、針葉樹林、常緑広葉樹林、落葉期の落葉広葉樹林とした。

- 森林構造の再現に必要なボクセルモデルの構築方法
- ボクセルモデルを用いたレイトレーシングの方法
- ボクセルモデルの空間分解能とシミュレートする画像の分解能の関係

本研究では、レイトレーシングにより太陽光(直達光)の反射をシミュレートし、空撮画像の明度を再現する。本来であれば、衛星が観測する放射輝度には、図3のように様々な光が入射するが、本研究では直達放射照度を対象とした。また、空撮画像を用いた理由は、シミュレーションの結果に大気による影響を避けるためである。精度検証には、明度とシミュレーションした太陽光の反射割合の相関係数を用いる。誤差量により精度を検証すべきであるが、画像を波長ごとのデータに変換するのは困難であったため、相関係数を用いる。

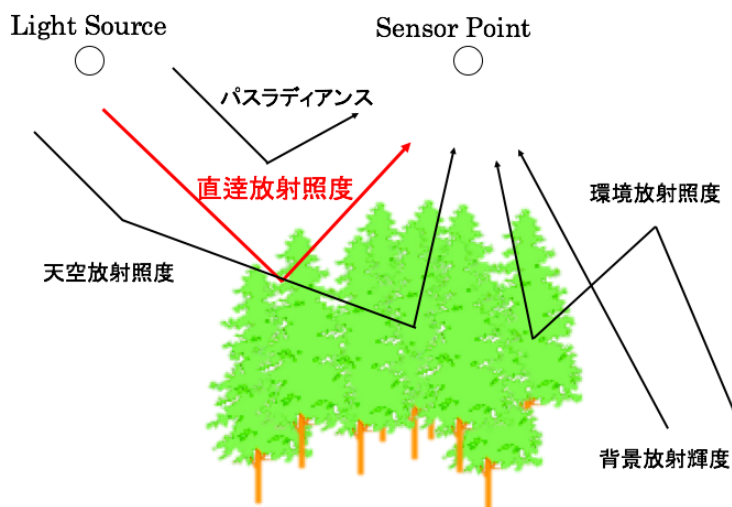


図3 センサーに入射する放射照度

## 2 ボクセルモデルを用いた太陽光反射シミュレーション方法

### 2.1 本研究における太陽光反射シミュレーション

人工衛星に搭載されている光学センサやドローンに搭載されているカメラは、図4のように、地物に反射した太陽光の反射を観測している。そのため、カメラで撮影した時刻のカメラ位置・カメラの姿勢・光源情報・土地被覆情報がわかれば、観測時の太陽光の反射をボクセルモデルを用いてピクセル単位でシミュレートできると考えた。本研究において、太陽光の反射とは、地物に反射した直達光(放射発散度)の割合を指す。

本研究では、着葉している樹木(常緑樹、落葉広葉樹林の着葉期)においては、図5のように葉の法線ベクトルを用いることで太陽光の反射割合を計算した。しかし、落葉している樹木の場合、ボクセル内の法線ベクトルが様々な方向を向いていると考えられたため、同様の手法で太陽光の反射割合を計算することはできない。そこで、落葉している樹木では、図6のように散乱断面積の考え方を用いることで、太陽光の反射割合を計算した。

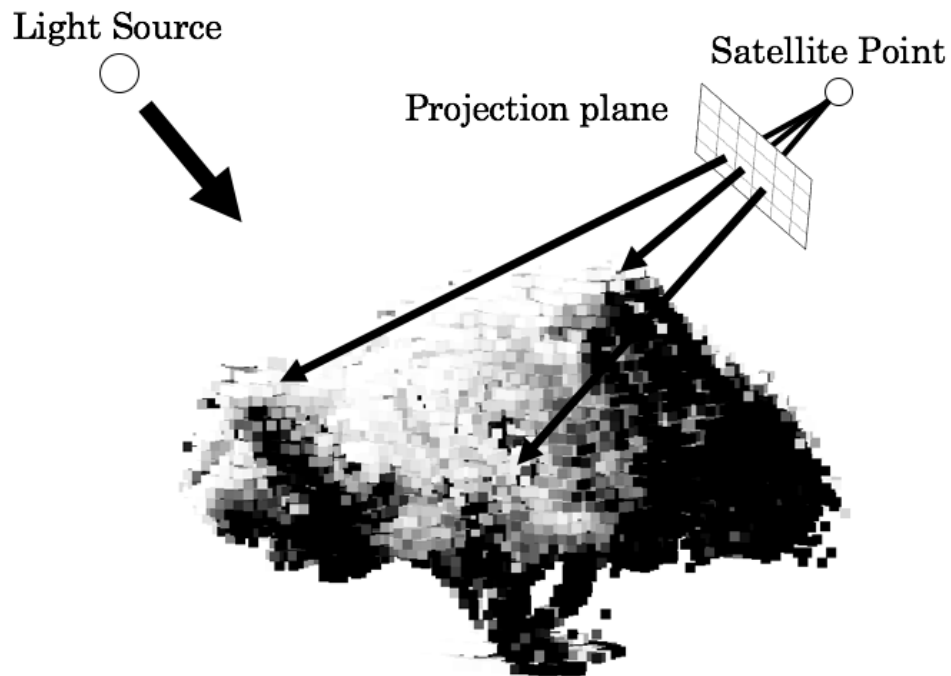


図4 人工衛星の観測イメージ

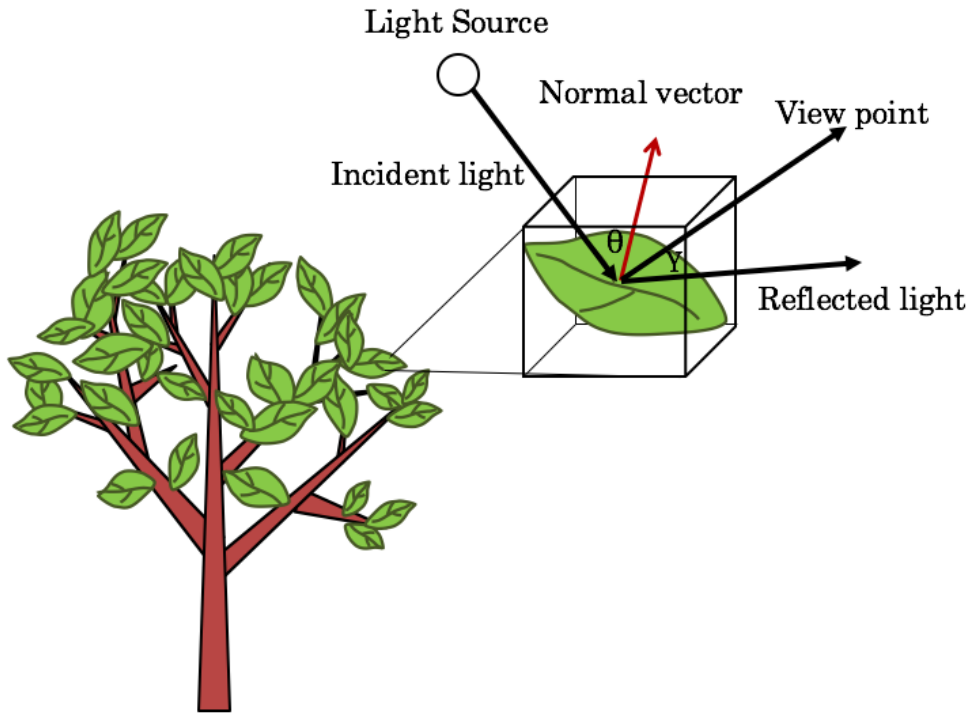


図5 着葉している樹木の反射光の計算イメージ

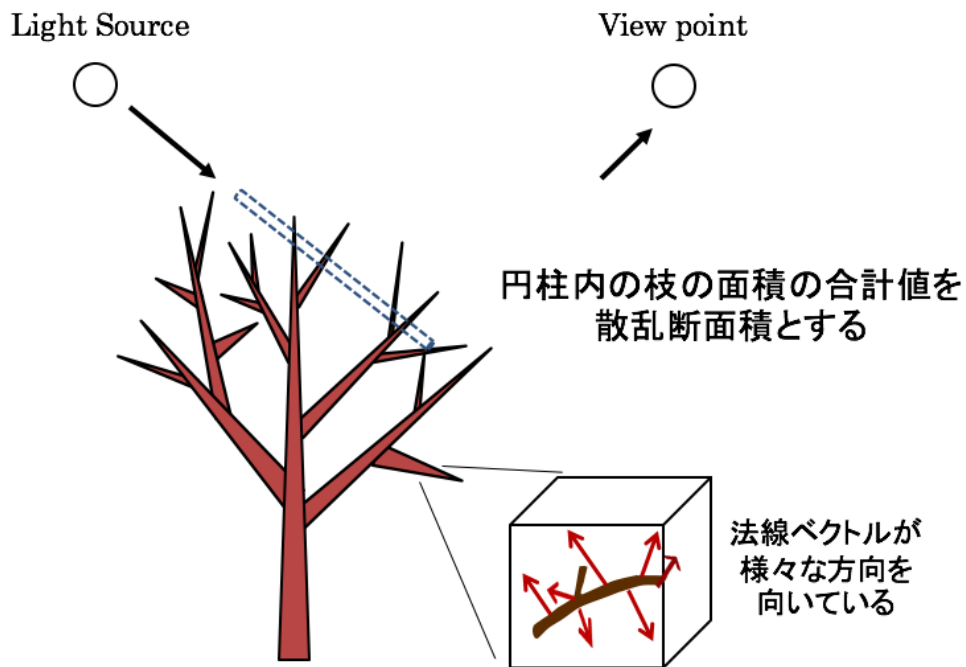


図6 落葉している樹木の反射光の計算イメージ

## 2.2 シミュレーションのフロー

レイトレーシングにより太陽光の反射を計算するにあたり、法線ベクトルや散乱断面積をボクセルの属性として与える必要がある。図7のシミュレーションのフローに従い、ボクセルに属性を追加し、レイトレーシングを行う。まず、対象物の点群を取得する。今回、着葉している樹木においては、ドローンからの空撮 SfM により点群を取得した。落葉している樹木については、地上型 LiDAR を用いて点群を取得した。枝や幹などの三次元構造を空撮 SfM のみでは十分に取得することができないと考えたためである。次にボクセルモデルの作成を行う。今回のボクセルモデルのサイズは 10cm とし、属性には法線ベクトルや地物の面積を付与する。地物の面積とは、ボクセル内の葉や幹の面積である。次に光源の位置を決め、散乱断面積を属性として与える。最後に、カメラ位置を決め、レイトレーシングを用いて太陽光の反射シミュレーションを行う。

なお、光源の位置を取得するために、プログラミング言語 Python のライブラリである PyEphem を用いた。PyEphem は、観測者の位置と時刻を入力することで任意の軌道要素を持つ天体の位置 (方位角, 天頂角) を取得することができる。本研究では、カメラで撮影した時刻と撮影地点を入力し太陽の位置を取得する。

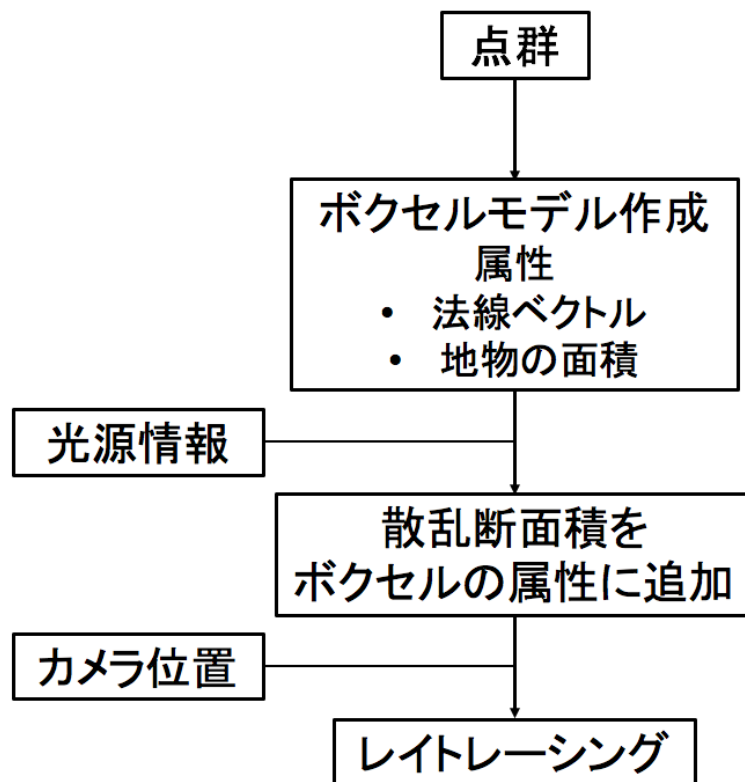


図7 ボクセルモデルを用いた太陽光反射シミュレーションのフロー

## 2.3 点群取得に用いる使用機材・ソフトウェア

### 2.3.1 ドローン

使用するドローンは DJI 社製の INSPIRE2 である. 外観を図 8 に, 搭載したジンバルカメラの仕様を 3 に示す. 動画モードで撮影を行う.



図 8 ドローンの外観

表 3 カメラの仕様

本体	ZENMUSE X5S
センサー	CMOS,4/3” 有効画素数,2,080 万画素
視野角	72 度
焦点距離	15mm
動画品質	4K: 3840 × 2160

### 2.3.2 SfM ソフトウェア

SfM とは Structure from Motion の略称であり, 複数枚の画像からカメラ撮影位置を推定し, 3 次元形状を復元することのできる要素技術の一つである. 本研究では, SfM ソフトウェアには, Agisoft Photoscan Professional Ver.1.4.4(以下, PhotoScan) を使用した. PhotoScan Professional は, 航空写真から高解像度の DEM(Digital Elevation Model) データおよびテクスチャー付きのポリゴンモデルと GCP(Ground Control Point) を含む 5cm 以内の精度を持ったオルソフォト出力 (歪みの無い正投影写真) を生成する事ができる非常に強力なソフトウェアである [20]. 画像から 3 次元のモデルを復元する目的で様々な分野にて利用が行われている. 出力する点群には, 座標の他にも, 色情報, 法線ベクトルも付与することができる. 本研究ではドローンに搭載したカメラから取得した画像を用いて空撮 SfM を行う.

PhotoScan では, 「Align photos」にて点群を作成した後, 「Build dense point cloud」にて点群の生成密度を指定することができる. これらの項目の設定には, 「Lowest」・「Low」・「Middle」・「High」・「Highest」とあるが, 画像の質や天候によってモデルの品質は左右されるため, 解析するときに経験的に決めている.



### 2.3.3 地上型 LiDAR

地上型 LiDAR は、レーザー光を計測対象物に照射し、反射光を計測することで、対象物までの距離、角度、三次元座標、反射強度等を取得することができる。本研究で使用したのは TOPCON 社製の GLS-1500 である (図 9)。使用を表 4 に示す。



図 9 地上型 LiDAR の外観

表 4 地上型 LiDAR の仕様

項目	GLS-1500
有効計測距離	500m(ロングレンジモード)
計測視野	70度(水平方向)×360度(鉛直方向)
スポットサイズ	6mm以下(1-40m時),約16mm(100m時)
点間隔	最小1mm(20m時)
レーザークラス	クラス1
波長	1535nm

## 2.4 手法開発に使用した仮想樹木

手法開発に使用した仮想樹木は、地上型 LiDAR にて取得したヤマモモ (常緑広葉樹) の点群を用いた。(図 10) 取得した点群は、反射強度を用いて葉と幹に分類 [21] しており、図 10 に葉を緑で、幹を茶色で示している。



図 10 使用した仮想樹木

## 2.5 ボクセル化と属性の付与

点群は、空間的に不均質であるため、ボクセル化を行う。今回の研究では、空撮 SfM と地上型 LiDAR にて取得した点群から、ボクセルサイズが 10cm のボクセルモデルを作成する。しかし、それぞれの取得方法では、取得できる点群密度が異なる。空撮 SfM により取得した点群の点群密度は、 $10^3 \text{cm}^3$  で約 1 点ほどだが、地上型 LiDAR にて取得する点群の密度は、設置箇所からの距離に依存するため非常にまばらである。そこで、ボクセル化する手法を点群を取得する手法により変えることとした。また、ボクセルに付与する属性についても説明する。

### 2.5.1 空撮 SfM から取得した点群のボクセル化

空撮 SfM により取得した点群をボクセル化するときには、点群を 10cm の立方体で区切り、立方体内の点群からボクセルの属性を求めた。属性には、面積 ( $100 \text{cm}^2$ )、平均の法線ベクトル、光源方向のボクセル数とした (図 11)。面積を  $100 \text{cm}^2$  としたのはボクセルの底面が葉で覆われていると仮定したためである。

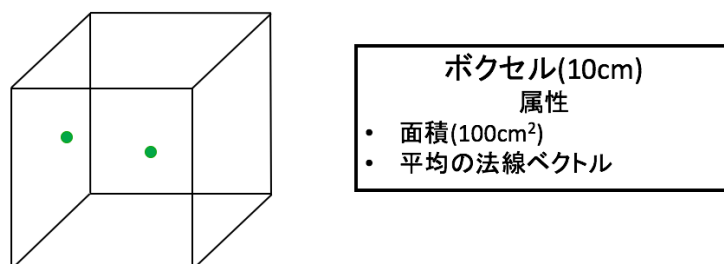


図 11 空撮 SfM により取得した点群のボクセル化のイメージ

## 2.5.2 地上型 LiDAR から取得した点群のボクセル化

LiDAR により取得した点群をボクセル化するときには、まず点群の空間的分布の均質化を 1cm 単位で行った。均質化後の点群の属性には、葉か幹かの分類と面積 ( $1\text{cm}^2$ )、平均の法線ベクトルとした。面積を  $1\text{cm}^2$  としたのは、レーザーのスポットサイズが 1cm 程度であるためである。その後、点群を 10cm の立方体で区切り、立方体内の点群からボクセルの属性を求めた (図 12)。ボクセルの属性には、地物の面積の総和とした。

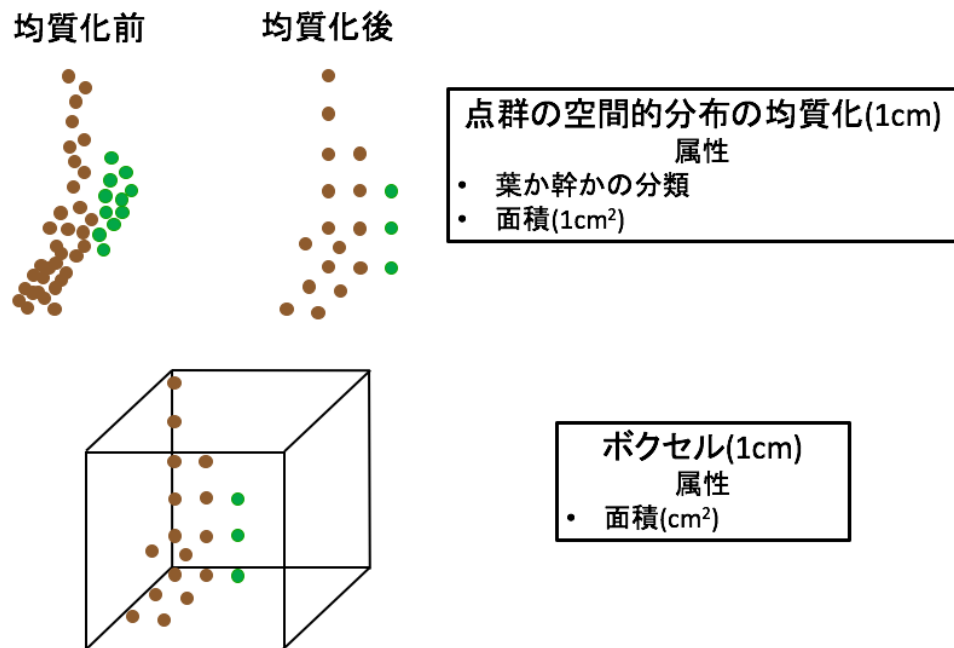


図 12 LiDAR により取得した点群のボクセル化のイメージ

### 2.5.3 散乱断面積の付与

散乱断面積を簡易的に算出するために、今回の研究では、あるボクセルの光源方向に存在するボクセル内の面積を用いることができるのではないかと考えた。

光源方向に存在するボクセル内の面積付与方法は、あるボクセルから光源まで円柱を発生させ、円柱内にボクセルの中心が存在するボクセルを抽出し、属性である面積の総和を付与した。円柱の半径は、ボクセルの外接球の半径とした。計算フローを図 13 に示す。また、図 14 に散乱断面積の付与イメージを示す。LiDAR により取得した点群から作成したボクセルの場合、図 14 のように樹冠だけでなく、枝や幹などの 3 次元構造を反映させることができると考えられる。

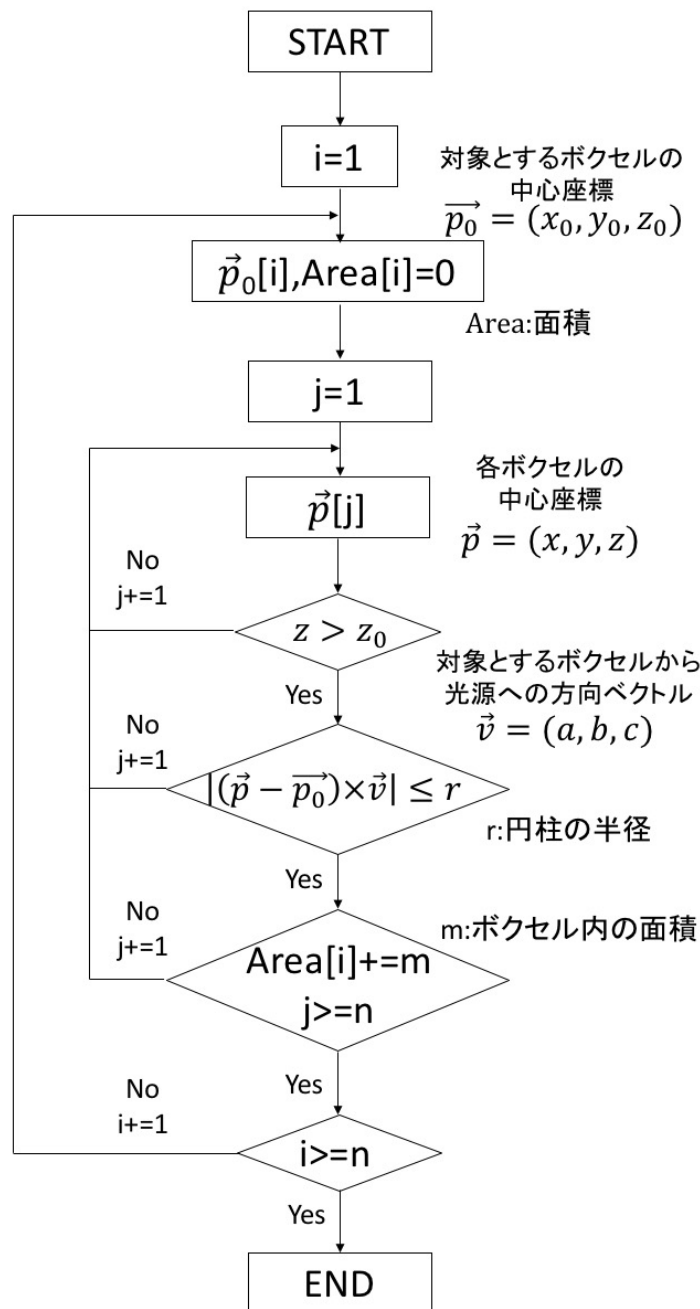


図 13 散乱断面積の計算フロー

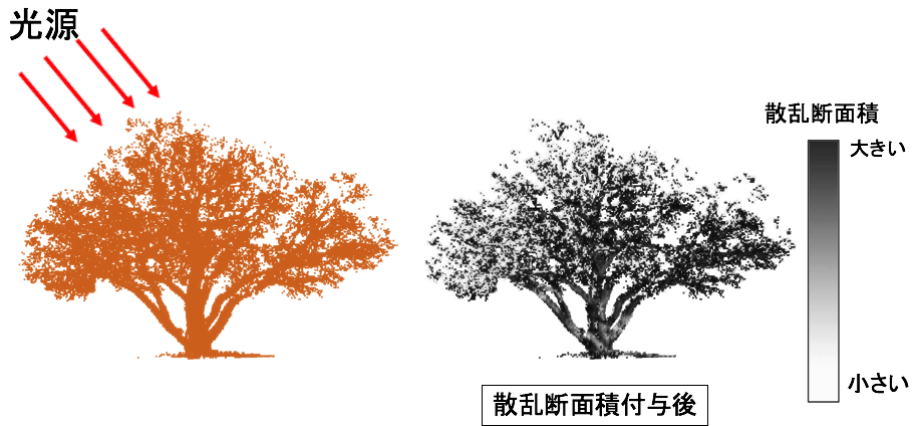


図 14 散乱断面積の付与イメージ

## 2.6 画像投影

### 2.6.1 焦点距離の設定

カメラ位置と投影面、地上座標の関係を図 15 に示す。カメラにより撮影した画像との相関を分析するため、画像の投影方法には中心投影を用いる。そのため式 1 に示す共線条件式を用いた。共線条件式を計算する際に重要となるパラメータは、カメラ位置  $(x_o, y_o, z_o)$ 、焦点距離  $(c)$ 、カメラの回転角  $(\omega, \phi, \kappa)$  である。これらのパラメータは、ドローンにより撮影した画像から点群を作成する際に使用するソフトである PhotoScan から出力する。しかし出力されるパラメーターには誤差が含まれているため補正する必要がある。全てのパラメータを補正するには作業が煩雑になるため、今回は焦点距離のみ補正することとした。フローを図 16 に示す。

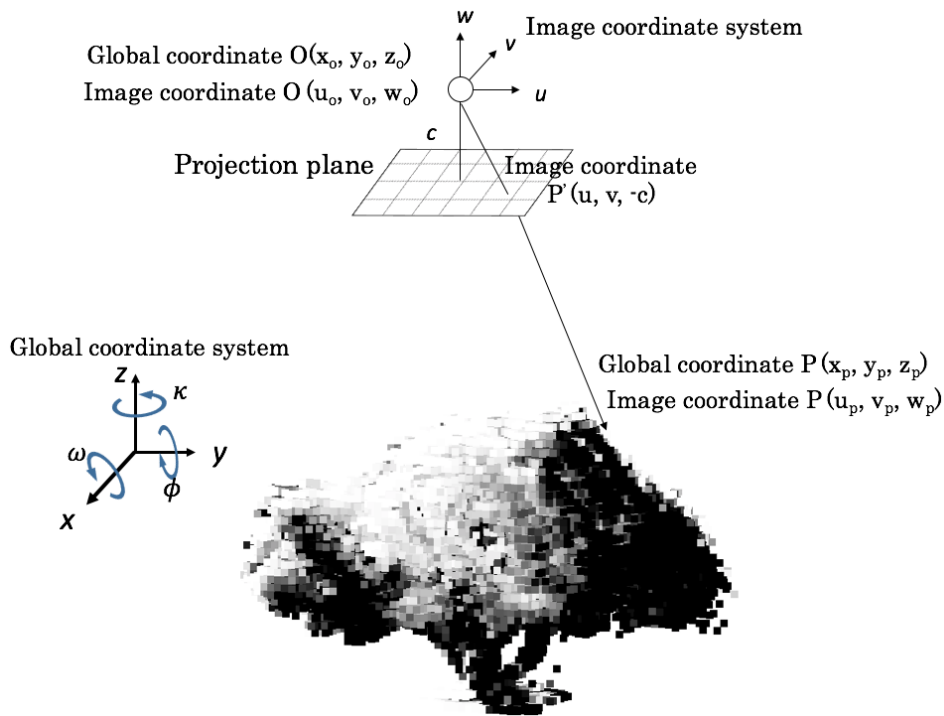


図 15 カメラ位置と対象物との位置関係

$$\left. \begin{aligned} u &= -c \frac{a_{11}(x - x_0) + a_{12}(y - y_0) + a_{13}(z - z_0)}{a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) + a_{33}(z - z_0)} + u_0 \\ v &= -c \frac{a_{21}(x - x_0) + a_{22}(y - y_0) + a_{23}(z - z_0)}{a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) + a_{33}(z - z_0)} + v_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

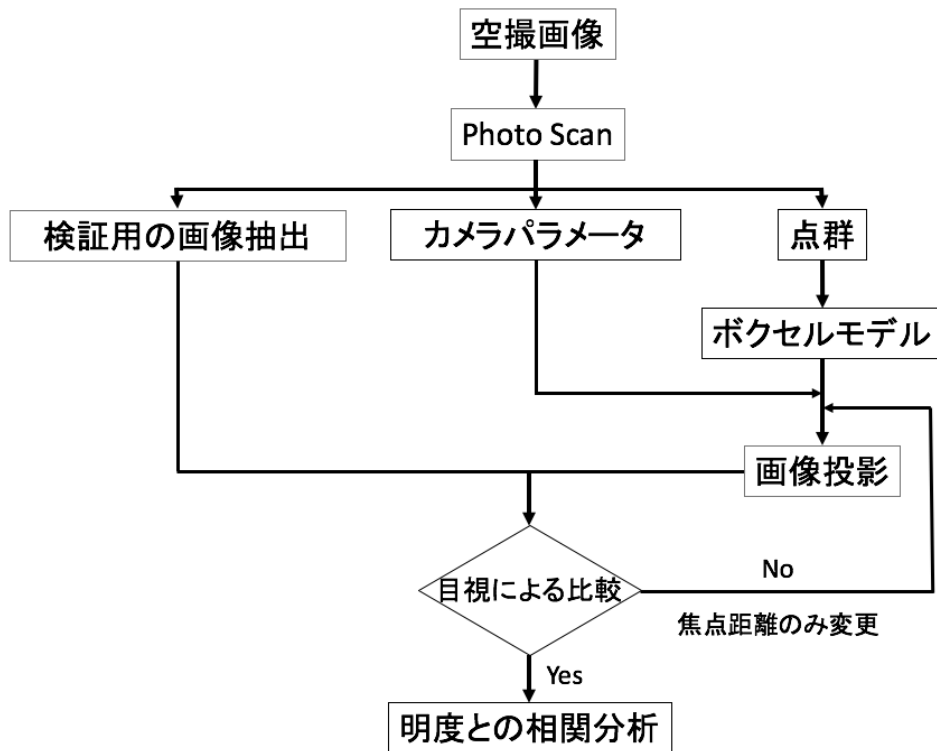


図 16 焦点距離の設定フロー

## 2.6.2 反射光の計算方法

光源からの遮蔽状況の付与時と同様に、まず、カメラ位置から各ピクセルに円柱を発生させ、円柱内にボクセルの中心が存在するボクセルを抽出する。次に最もカメラ位置に近いボクセルに対し、反射光を計算する。

### 2.6.2.1 着葉樹の場合

ボクセル内が葉の場合 (図 17), Shadow と Shade を用いて反射光を計算する。計算式を式 4 に示す。式 4 は, Phong の Shade モデル [19] を簡易化したものである。Phong の Shade モデルとは, 図 18 のように光源の位置, 光源の当たる面の向き (法線ベクトル), 観測する視点の位置関係から観測する明るさを求めるものである。Phong の Shade モデルは式 5 のように表すことができ, 直達光の拡散反射光, 直達光の鏡面反射光, 環境光, を式 6~式 8 のように計算することで反射光を求めるものである。しかし, 本研究では画像の明度との相関を分析するため, 拡散反射係数, 直達光, 反射率は 1 とし, 天空光は 0 とした。この場合, 最大値が 1 となる直達光の拡散反射光と鏡面反射光を計算することとなり, 反射割合の最大値が 2 となる。そこで, 式 4 に示すように, 2 で除すことで反射光の最大値を 1 とした。ボクセルが光源から完全に遮られている時, 反射光は 0 とする。Shadow の判断は, 光源方向に葉がある時, つまり光源方向にボクセルが一つでもあれば完全に遮蔽されているとした。

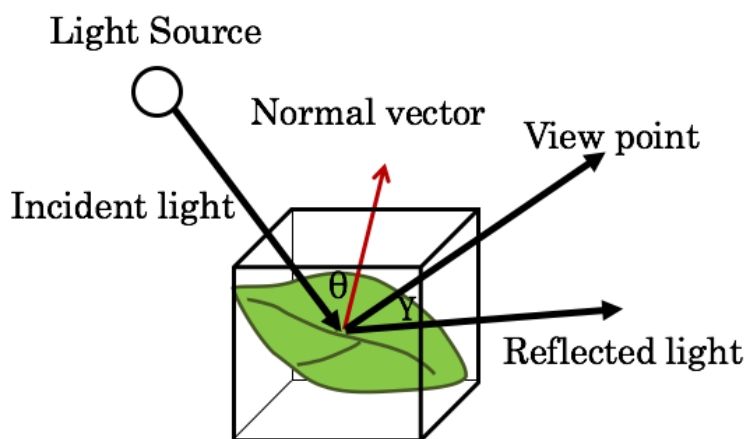


図 17 着葉樹の場合の反射光のイメージ図

$$L \propto \frac{1}{2}(1 - Shadow)Shade \quad (4)$$

$L$ :直達光の反射割合

$Shadow$ : 1 or 0

$Shade$  :  $(\cos \theta + \cos \gamma)$

$\theta$ :光源と法線ベクトルのなす角

$\gamma$  反射光と視点のなす角

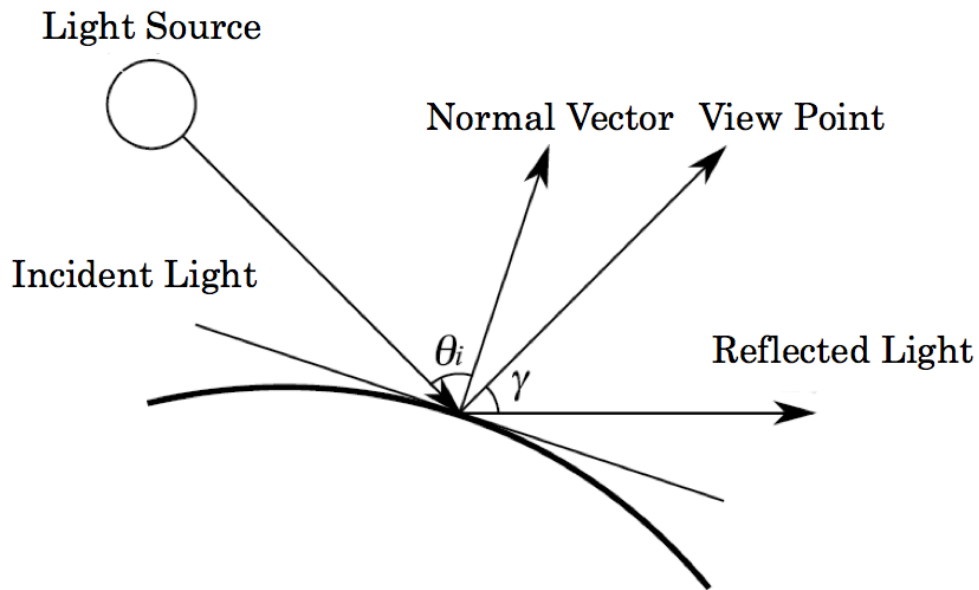


図 18 光源・視点の位置関係

$$L = L_d + L_r + L_c \quad (5)$$

$L$ :放射発散度 ( $w/m^2$ )

$L_d$ :直達光の拡散反射光 ( $w/m^2$ )

$L_r$ :直達光の鏡面反射光 ( $w/m^2$ )

$L_c$ :環境光の反射光 ( $w/m^2$ )

$$L_d = R_d L_{in} \cos \theta_i \quad (6)$$

$$L_r = L_{in} \omega(\theta_i) \cos \gamma \quad (7)$$

$$L_c = L_a R_d \quad (8)$$

$R_d$ :拡散反射係数

$L_{in}$ :直達光 ( $w/m^2$ )

$\theta_i$ :入射光と物体の法線ベクトルとの角度

$\omega(\theta_i)$ :反射率

$\gamma$ :反射光と視点の角度

$L_a$ :天空光 ( $w/m^2$ )



### 2.6.2.2 落葉樹の場合

ボクセル内が枝の場合, ボクセル内の法線ベクトルのバラツキは大きくなり面として機能しないため, Shading の計算は困難となると考えられた. そこで, 落葉している樹木の反射光の計算に, 散乱断面積を利用できるのではないかと考えた. 散乱断面積の考え方を図 19 に示す. 面積が大きいほど, 対象とするボクセルの反射光は小さくなり, 反射割合と反比例の関係があると考えた (式 9).

$$L \propto \frac{1}{P} \quad (9)$$

$L$ : 直達光の反射割合  
 $P$  散乱断面積

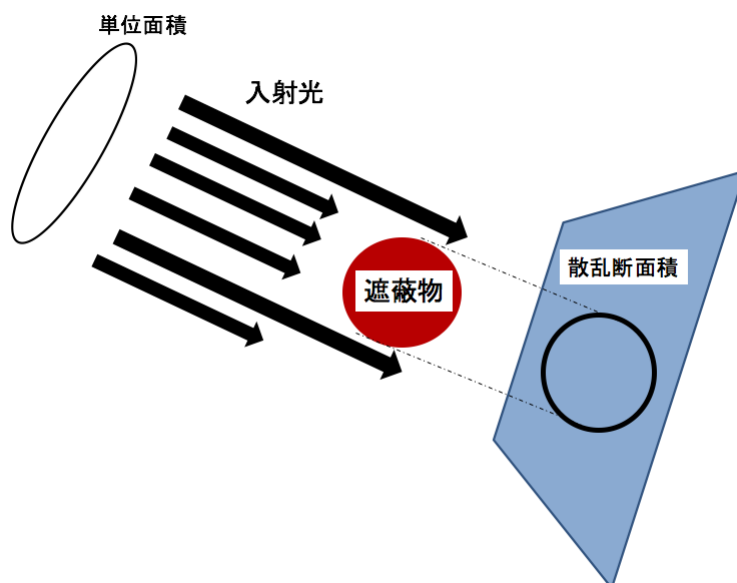


図 19 散乱断面積のイメージ図

## 2.7 検証画像への変換と検証手法

### 2.7.1 検証画像への変換

まず、空撮画像の分解能を計算する。通常、画像座標系と地上座標系とは異なる。しかし、共線条件式を用いたため、各ピクセルと地上座標との対応付けは図 20 のようになる。よって、式 10 を用いることで、空撮画像の U 方向と V 方向の分解能を求めることができる。次に U 方向と V 方向の分解能を 10cm にリサンプリングを行う。ボクセルのサイズが 10cm であるため分解能も 10cm とした。求めた  $U_{reso}$ ,  $V_{reso}$  で 10cm を除することで、リサンプリングする際に必要なピクセル数がわかる。リサンプリングには平均値を用いる。最後に明度への変換を OpenCV の機能を用いて行い、検証画像とする。

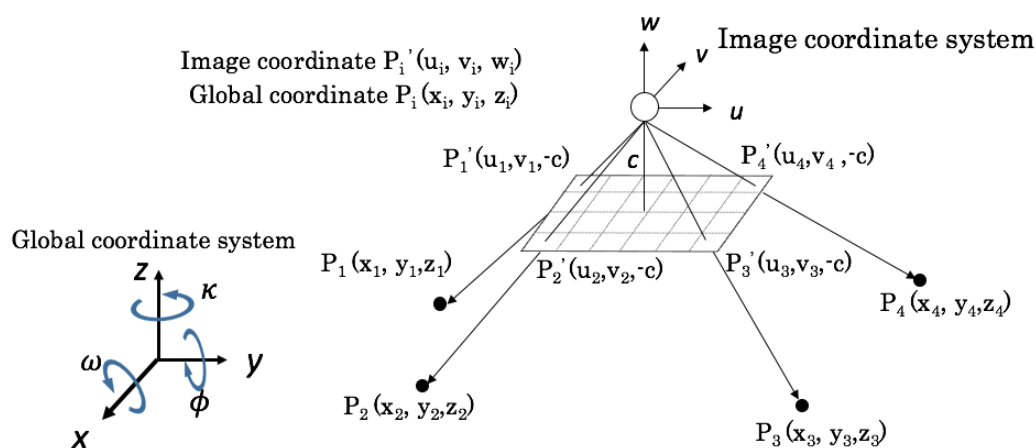


図 20 画像座標と地上座標の対応

$$U_{reso} = \frac{\sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2}}{(u_4 - u_1)} \quad (10)$$

$$V_{reso} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{(v_2 - v_1)}$$

$U_{reso}$ : U 軸方向の分解能

$V_{reso}$ : V 軸方向の分解能

$(x, y)$ : 地上座標

$(u, v)$ : 画像座標

### 2.7.2 検証手法

検証には、分解能 10cm の時と、50cm~200cm の時に分けて行う。分解能が 10cm のときは検証点(ランダムに選んだ 60 点)にて比較し、それ以上の時は全ピクセルで比較を行う。分解能を 50cm~200cm に変換するときも平均化を用いる。

### 3 常緑広葉樹林への適用結果

#### 3.1 対象地域

この章では, 図 21 に示す, 高知県香美市土佐山田町中後入地区の常緑広葉樹林に太陽光反射シミュレーションを適用した.

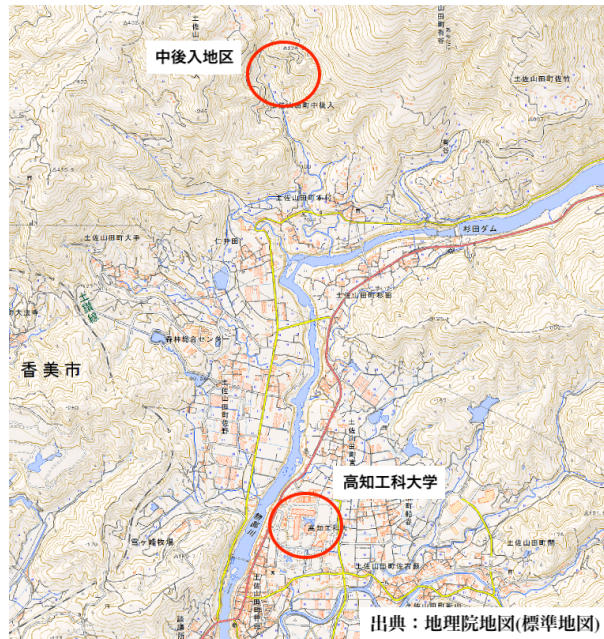


図 21 中後入地区の位置図

#### 3.2 常緑広葉樹林における計測と解析のフロー

図 22 に計測と解析のフローを示す. まず, ドローンに搭載したカメラにより空撮を行う. その後, SfM により点群を作成しボクセルモデルの作成, 太陽光反射シミュレーションを行う. また, 検証用の画像を抽出し, 明度画像の作成を行う. 空撮時期は, 2018 年 4 月 23 日である.

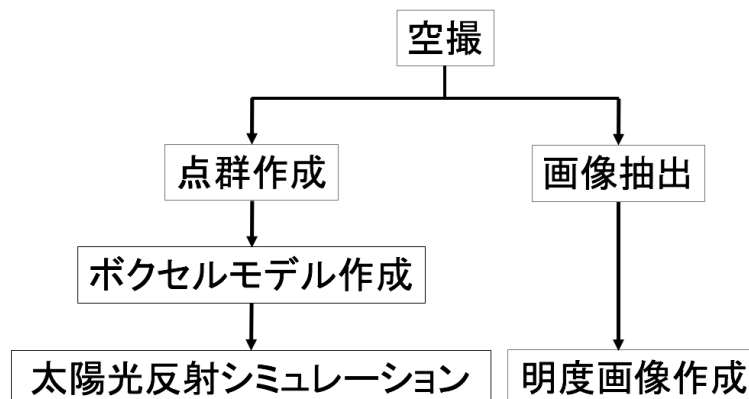


図 22 常緑広葉樹林における計測と解析のフロー

### 3.3 点群の幾何精度

空撮した画像を PhotoScan に入力し、点群の作成を行う。「Align photos」は Middle、「Build dense point cloud」は High に設定した。出力したオルソフォトと幾何補正に使用した基準点の位置図を図 23 に示す。また、基準点には P1,P3,P4,P5 を使用し、検証点には P2 を使用した。基準点の誤差を表 5 に検証点の誤差を表 6 に示す。



図 23 中後入地区のオルソフォトと基準点位置図

表 5 中後入地区における基準点の RMSE

X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	XY(cm)	合計 (cm)
0.88	3.20	4.67	3.32	5.73

表 6 中後入地区における検証点の RMSE

X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	XY(cm)	合計 (cm)
1.31	1.76	1.79	X2.20	2.84

### 3.4 検証画像

空撮画像から抽出した画像を図 24 に示し, 分解能が 10cm の検証画像を図 25 に示す.



図 24 常緑広葉樹林の抽出した画像



図 25 常緑広葉樹林の検証画像

### 3.5 シミュレーション結果

#### 3.5.1 分解能 10cm

ボクセル内が全て葉であると仮定し、シミュレートした画像を図 26 に示す。また、検証点の位置を図 27 に示し、検証点での明度とシミュレーション結果の散布図を図 28 に示す。

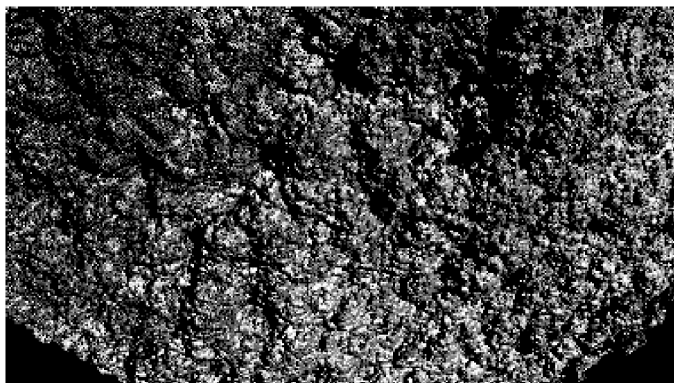


図 26 常緑広葉樹林 シミュレート画像

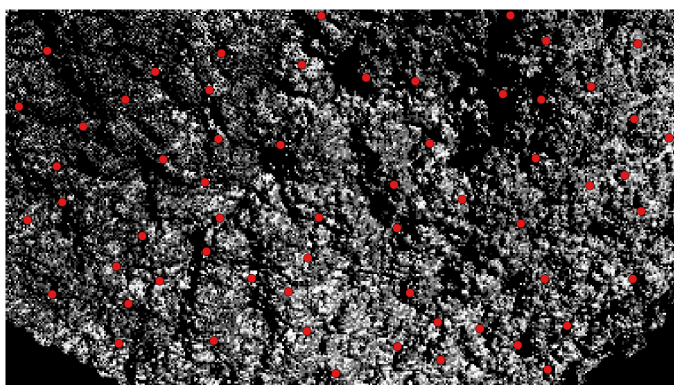


図 27 常緑広葉樹林 検証点位置図

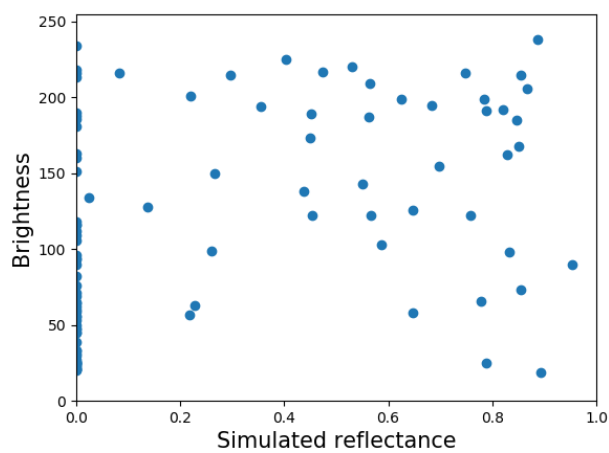


図 28 常緑広葉樹林 検証点におけるシミュレーション結果と明度の散布図

### 3.5.2 分解能 50cm から分解能 200cm

分解能が 10cm のシミュレート画像から、平均化を用いて分解能を 50cm から 200cm まで変化させた画像を図 29 から図 32 に示す。また、それぞれの分解能における、シミュレートした放射発散度と明度との関係を図 33 に示す。

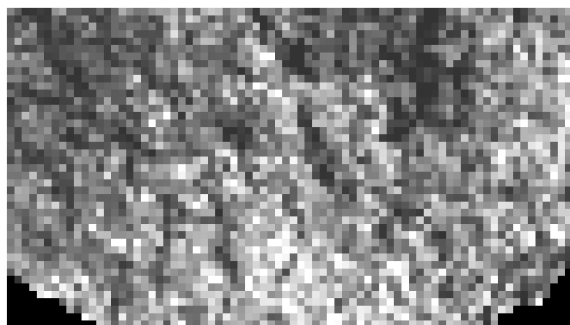


図 29 常緑広葉樹 分解能 50cm

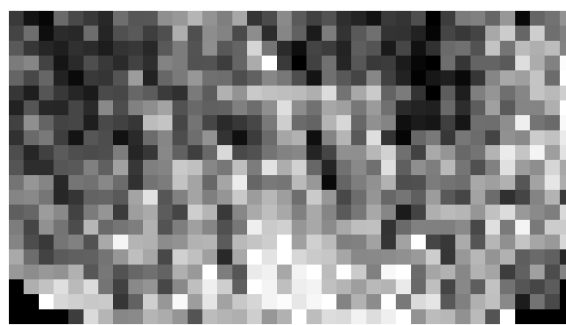


図 30 常緑広葉樹 分解能 100cm

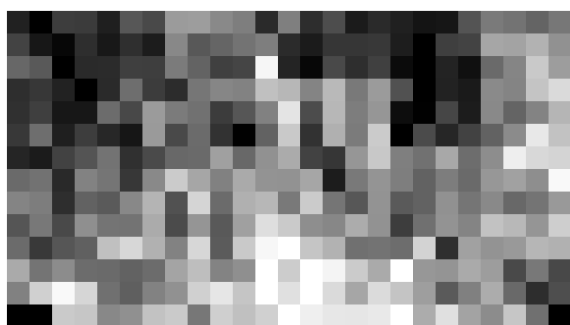


図 31 常緑広葉樹 分解能 150cm

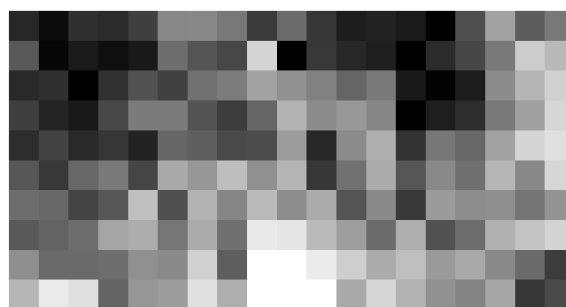


図 32 常緑広葉樹 分解能 200cm

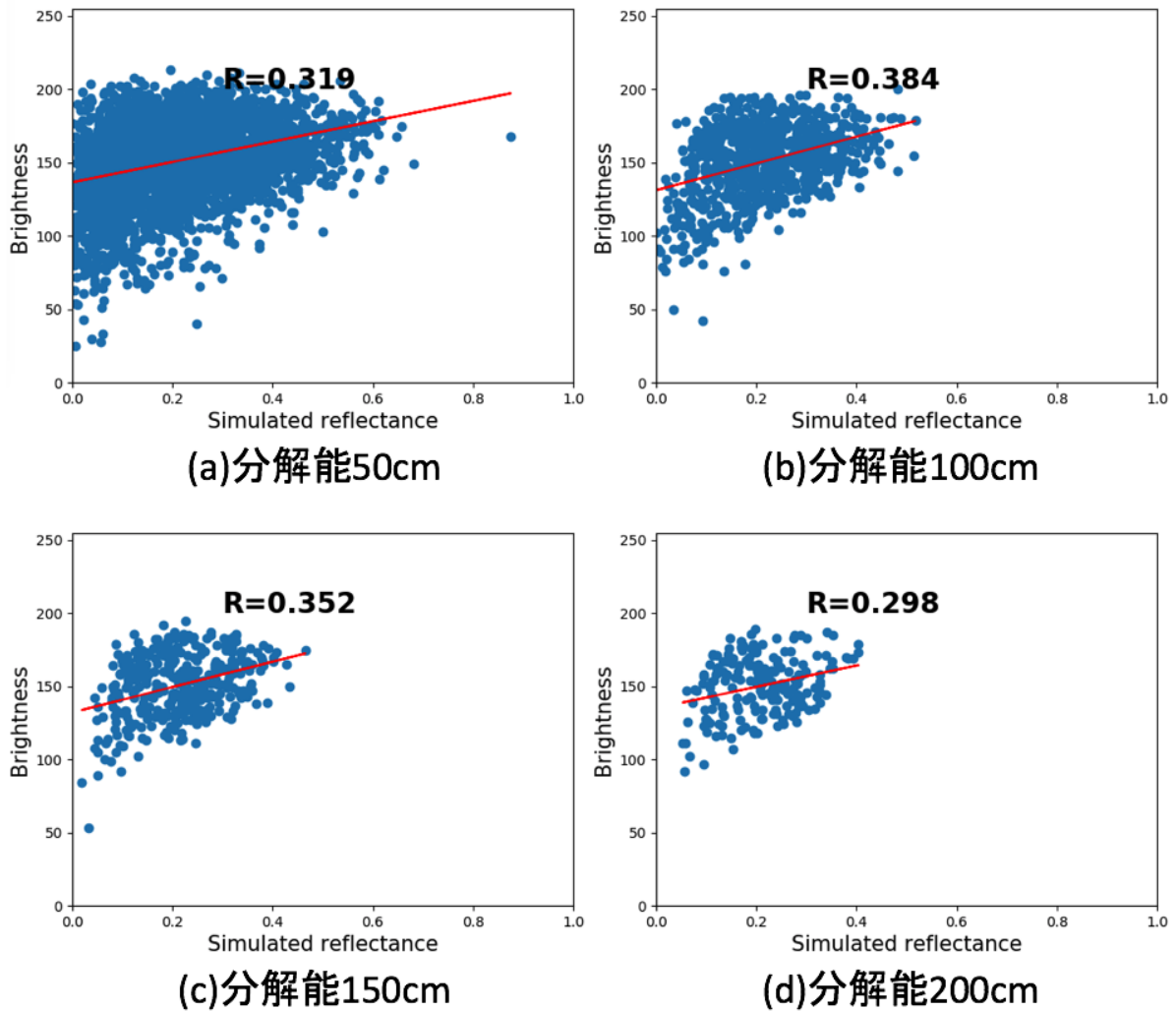


図 33 常緑広葉樹林での各分解能におけるシミュレーション結果と明度の散布図

### 3.6 考察

分解能が 10cm のシミュレート画像と検証画像を比較すると,Shadow が大きく算出されている.Shadow は 2 値化して付与しているが,割合を計算する必要があると考えられる.特に,葉の重なりにより生じる小さな Shadow をシミュレートする必要がある.また,分解能を下げるにつれ,相関係数は高くなっていくことが予想されたが,今回は分解能が 100cm の時に最大値を示している.Shadow の計算を改善することで,相関係数も高くなるのか再度検討する必要がある.



## 4 常緑針葉樹林への適用結果

### 4.1 対象地域

この章では, 図 34 に示す, 高知県香美市香北町谷相地区の常緑針葉樹林に太陽光反射シミュレーションを適用した。



図 34 松尾峠の位置図

### 4.2 常緑針葉樹林における計測と解析のフロー

常緑針葉樹林における計測と解析のフローは,3章で行った常緑広葉樹林に行なったフローと同じである(図 35). 空撮時期は,2018年10月25日である。

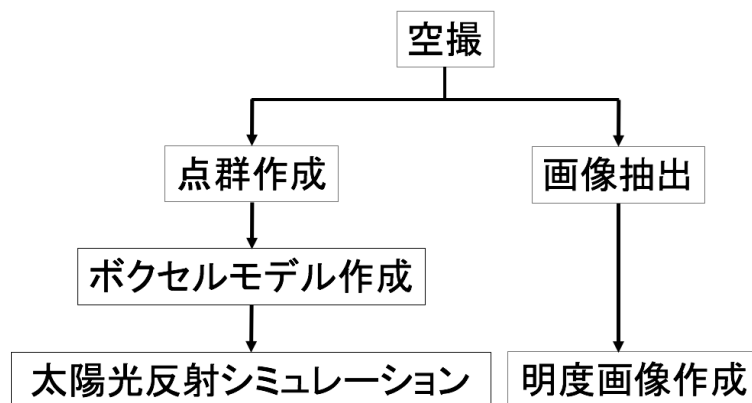


図 35 常緑針葉樹林における計測と解析のフロー

### 4.3 点群の幾何精度

空撮した画像を PhotoScan に入力し、点群の作成を行う。「Align photos」は Middle、「Build dense point cloud」も Middle に設定した。出力したオルソフォトと幾何補正に使用した基準点の位置図を図 36 に示す。また、基準点には M-0,M-1,M-2,M-3,M-5 を使用し、検証点には M-4 使用した。基準点の誤差を表 7 に検証点の誤差を表 8 に示す。



図 36 松尾峠におけるオルソフォトと基準点位置図

表 7 松尾峠における基準点の RMSE

X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	XY(cm)	合計 (cm)
3.01	2.00	2.33	3.62	4.30

表 8 松尾峠における検証点の RMSE

X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	XY(cm)	合計 (cm)
6.40	5.12	1.29	8.20	8.30

#### 4.4 検証画像

空撮画像から抽出した画像を図 37 に示し, 分解能が 10cm の検証画像を図 38 に示す.



図 37 常緑針葉樹林の抽出した画像

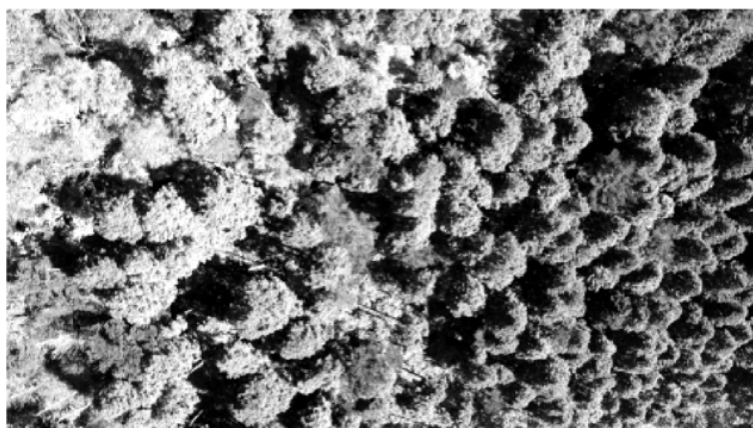


図 38 常緑針葉樹林の検証画像

## 4.5 シミュレーション結果

### 4.5.1 分解能 10cm

ボクセル内が全て葉であると仮定し、シミュレートした画像を図 39 に示す。また、検証点の位置を図 40 に示し、検証点での明度とシミュレーション結果の散布図を図 41 に示す。

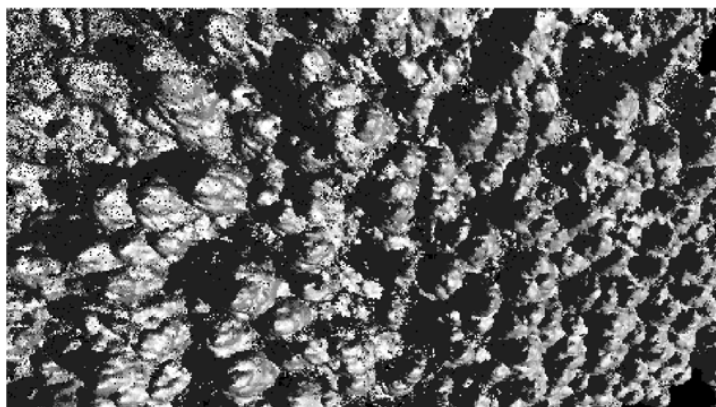


図 39 常緑針葉樹林 シミュレート画像

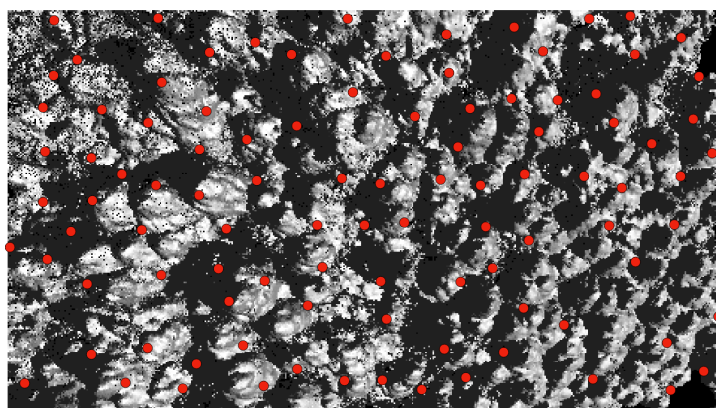


図 40 常緑針葉樹林 検証点位置図

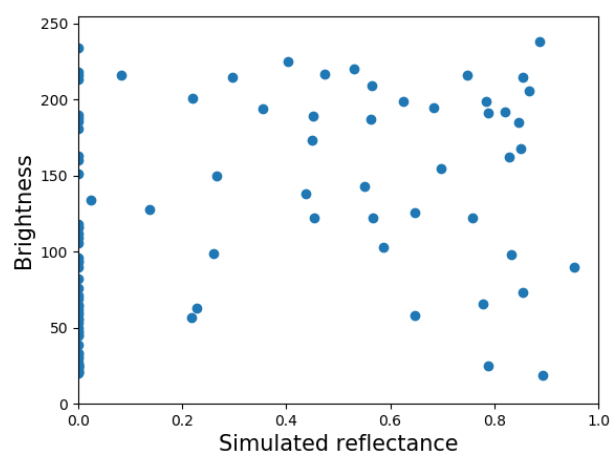


図 41 常緑針葉樹林 検証点におけるシミュレーション結果と明度の散布図

#### 4.5.2 分解能 50cm から分解能 200cm

分解能が 10cm のシミュレート画像から、平均化を用いて分解能を 50cm から 200cm まで変化させた画像を図 42 から図 45 に示す。また、それぞれの分解能における、シミュレートした放射発散度と明度との関係を図 46 に示す。



図 42 常緑針葉樹 分解能 50cm

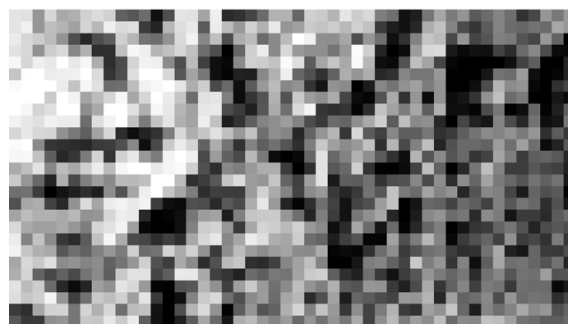


図 43 常緑針葉樹 分解能 100cm

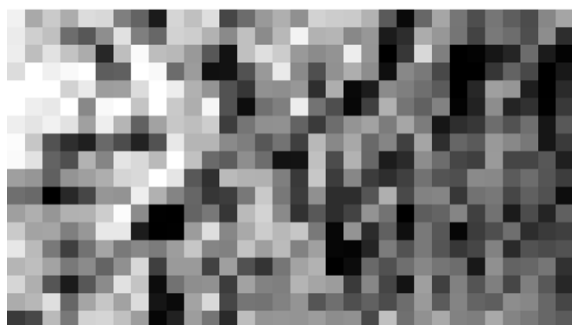


図 44 常緑針葉樹 分解能 150cm

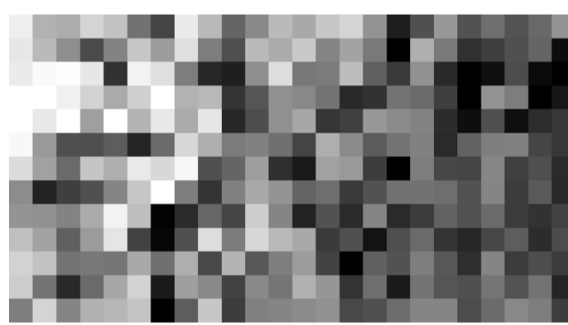


図 45 常緑針葉樹 分解能 200cm

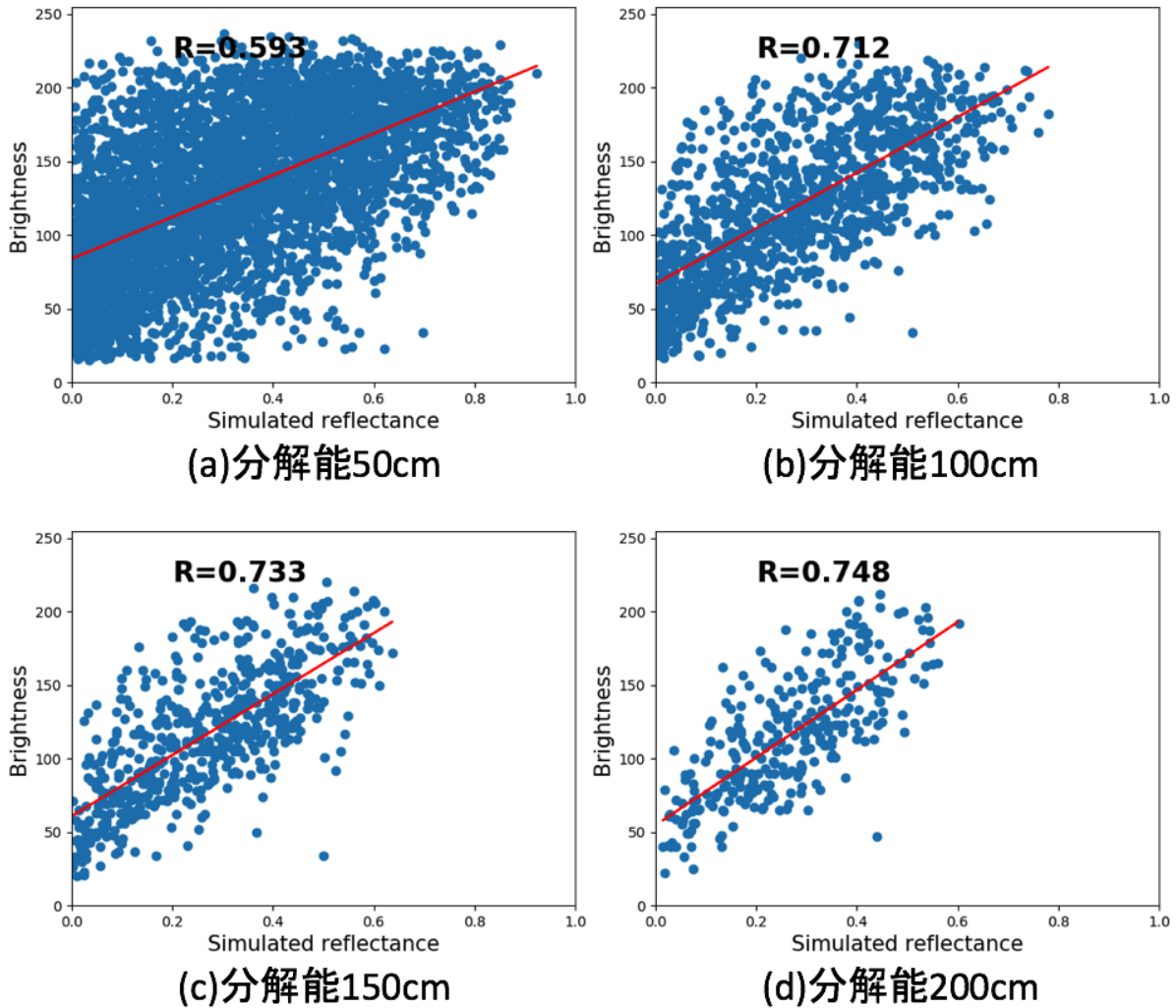


図 46 常緑針葉樹林での各分解能におけるシミュレーション結果と明度の散布図

#### 4.6 考察

分解能 10cm でシミュレートした画像と検証画像を比較すると,Shadow の位置や大きさが一致している部分が多く見受けられた. そのため, 分解能を下げると相関係数も高くなる傾向を示した. 今後,Shadow をさらに詳細にシミュレートした時に相関係数がどの程度向上するか検証していく.

## 5 落葉広葉樹林への適用結果

### 5.1 対象地域

この章では,4 章と同じ対象地域の松尾峠にて, 落葉期の落葉広葉樹林に太陽光反射シミュレーションを適用した.

### 5.2 落葉広葉樹林における解析と計測のフロー

図 47 に落葉広葉樹林における計測と解析のフローを示す. 点群の取得方法にはドローンによる空撮 SfM と, 地上型 LiDAR を用いて取得した. その後,LiDAR を用いて取得した点群からボクセルモデルを作成し, 太陽光反射シミュレーションを行った. また, 検証用の画像を抽出し, 明度画像の作成を行う. 空撮時期は,2018 年 11 月 30 日である.

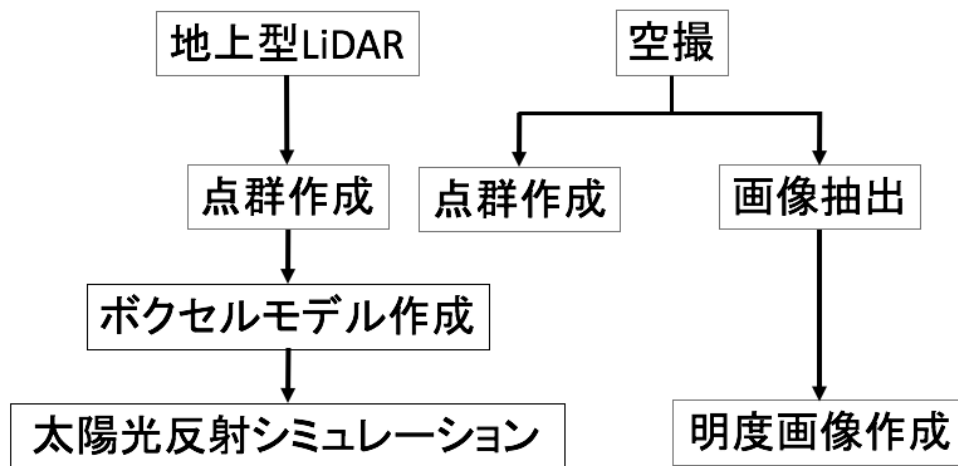


図 47 落葉樹林における計測と解析のフロー

### 5.3 点群の幾何精度

#### 5.3.1 空撮 SfM

空撮した画像を PhotoScan に入力し、点群の作成を行う。「Align photos」は Middle、「Build dense point cloud」も Middle に設定した。出力したオルソフォトと幾何補正に使用した基準点の位置図を図 48 に示す。また、基準点には M-0,M-1,M-2,M-3,M-5 を使用し、検証点には M-4 を使用した。基準点の誤差を表 9 に検証点の誤差を表 10 に示す。

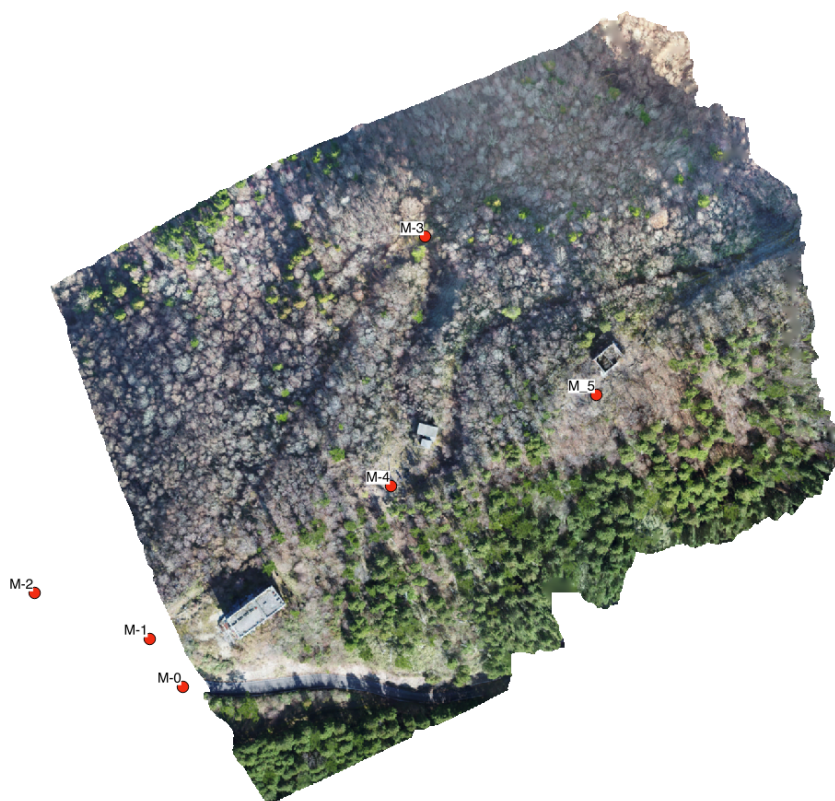


図 48 落葉期の松尾峠におけるオルソフォトと基準点位置図

表 9 2018 年 11 月 30 日の松尾峠における基準点の RMSE

X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	XY(cm)	合計 (cm)
2.37	2.62	1.46	3.54	3.83

表 10 2018 年 11 月 30 日の松尾峠における検証点の RMSE

X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	XY(cm)	合計 (cm)
4.00	3.97	0.42	5.64	5.65



### 5.3.2 地上型 LiDAR

地上型 LiDAR の設置位置を図 49 に示す。地上型 LiDAR は 12 箇所に設置し観測している。L1～L4 は 2018 年 11 月 2 日、L5～L9 は 2018 年 11 月 20 日、L10～L12 は 2018 年 11 月 30 日に観測を行っている。観測条件を同じにするため、本来であれば同一日に観測するのが望ましいが、天候や計測時間の問題から、複数の日にちに渡って観測を行なった。計測する際のサンプリング間隔は全て同じ設定にしており、高度角、水平角ともに 0.1 度になっている。また、図 49 には取得した点群密度を 10cm グリッドで表示しており、最大で約 150 点ほどであった。各計測位置で幾何補正に使用した基準点の最大誤差を表 11 に示す。

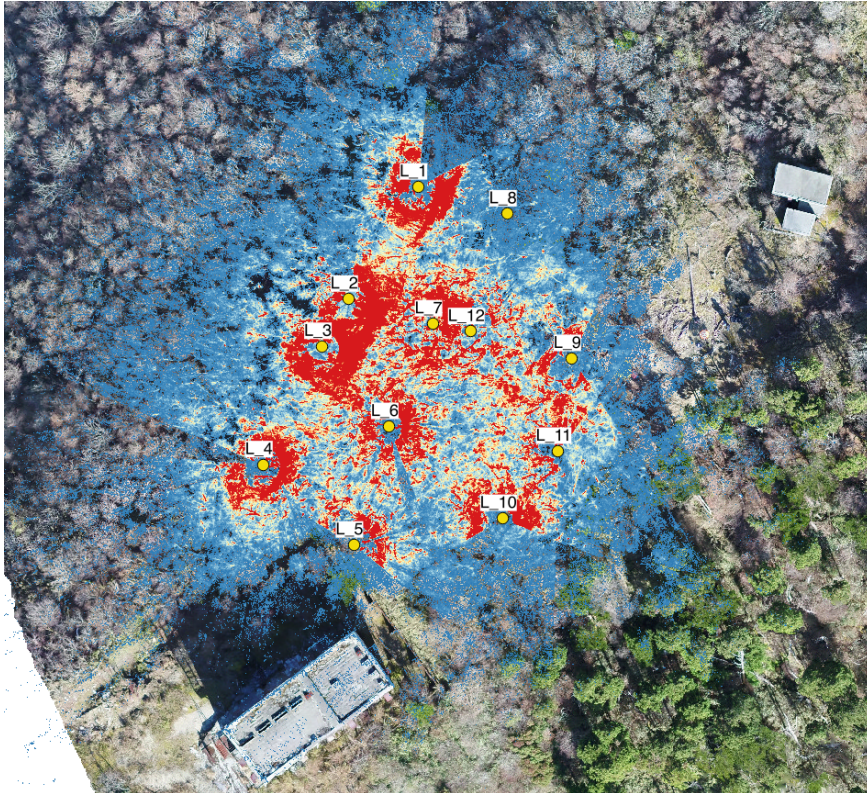


図 49 地上型 LiDAR 設置位置

表 11 各 LiDAR 計測位置で幾何補正に使用した基準点の最大誤差

Name	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)
L1	2.2	3.9	1.3
L2	2.6	3.1	1.2
L3	2.3	3.1	0.9
L4	2.4	3.4	1.2
L5	3.2	2.3	1.1
L6	2.3	2.9	1.5
L7	2.8	2.3	1.5
L8	1.8	3.3	1.3
L9	2.8	2.7	1.5
L10	2.9	1.0	1.1
L11	3.0	2.2	2.9
L12	0.6	1.9	0.3

## 5.4 検証画像

空撮画像から抽出した画像を図 50 に示し、分解能が 10cm の検証画像を図 51 に示す。



図 50 落葉広葉樹林の抽出した画像



図 51 落葉広葉樹林の検証画像

## 5.5 シミュレーション結果

図 49 に示したように、地上型 LiDAR の設置箇所付近では十分な点群密度で取得することができているが、離れるにつれて点群密度が小さくなっていることがわかる。そのため、検証画像全体をシミュレートすることは困難であった。そこで、検証は目視にて点群密度の高いエリアを選択し、ランダムサンプリングした点にて行うこととした。

### 5.5.1 分解能 10cm

シミュレートした画像を図 52 に示す。また、検証点の位置を図 53 に示し、検証点での明度とシミュレーション結果の散布図を図 54 に示す。



図 52 落葉広葉樹林 地上型 LiDAR シミュレート画像



図 53 落葉広葉樹林 地上型 LiDAR 検証点位置図

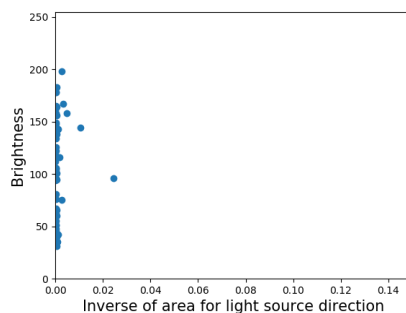


図 54 落葉広葉樹林 地上型 LiDAR 検証点におけるシミュレーション結果と明度の散布図

### 5.5.2 分解能 50cm から分解能 200cm

分解能が 10cm のシミュレート画像から, 平均化を用いて分解能を 50cm から 200cm まで変化させた画像を図 55 から図 58 に示す. また, それぞれの分解能における, シミュレートした反射割合と明度との関係を図 59 に示す.



図 55 落葉広葉樹 地上型 LiDAR 分解能 50cm



図 56 落葉広葉樹 地上型 LiDAR 分解能 100cm

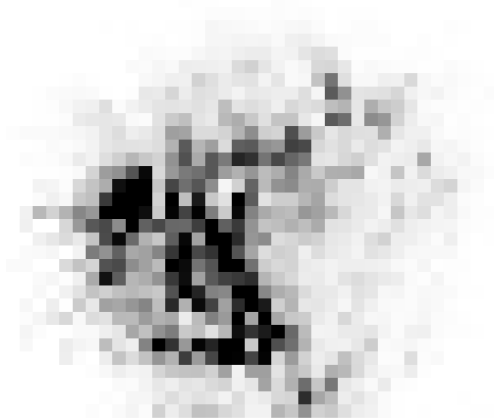


図 57 落葉広葉樹 地上型 LiDAR 分解能 150cm

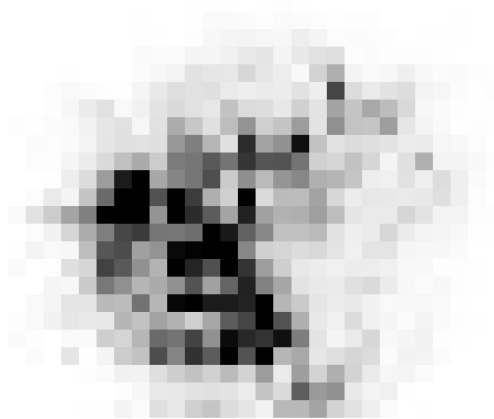


図 58 落葉広葉樹 地上型 LiDAR 分解能 200cm

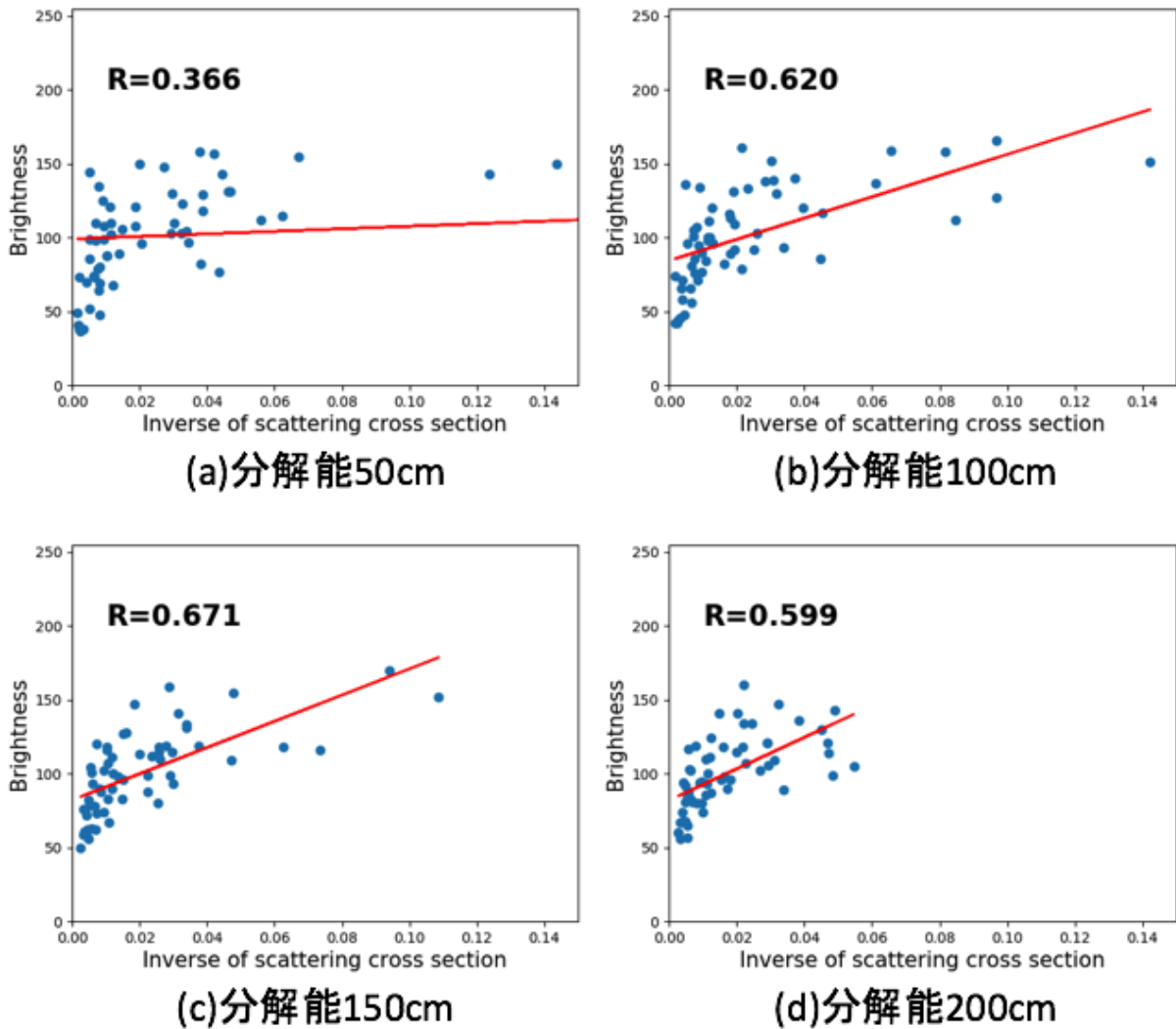


図 59 落葉広葉樹林での各分解能におけるシミュレーション結果と明度の散布図

## 5.6 考察

分解能 10cm でシミュレートした画像と検証画像を比較すると、概ね明度と反射割合が一致している部分が見受けられた。しかしながら、対象範囲の点群を均質に取得することはできなかったため、検証に用いることのできた画素は少ない。今後点群を密に取得するには、ドローンに LiDAR を搭載することができれば可能であると考えられる。

## 6 結論

本研究では、衛星画像シミュレーションのための、森林構造を反映させたボクセルモデルを用いたレイトレーシング適用可能性の検討を行なった。以下に、検討項目についての考察をまとめる。

- 森林構造の再現に必要なボクセルモデルの構築方法

着葉している樹木では空撮 SfM を、落葉している樹木では地上型 LiDAR を用いることで点群を取得し、森林の三次元構造を反映させたボクセルモデルを構築することができた。

- ボクセルモデルを用いたレイトレーシングの方法

着葉している樹木では、葉の法線ベクトルを、落葉している樹木では、散乱断面積用いて太陽光の反射割合と空撮画像の明度との相関係数を計算した。10cm のボクセルモデルから、まず分解能が 10cm のシミュレート画像を作成し、分解能を 50cm, 100cm, 150cm, 200cm とダウンサンプリングし、相関係数を算出した。それぞれの樹林において最大の相関係数は、常緑広葉樹林では 0.384, 常緑針葉樹林では 0.748, 落葉広葉樹林では 0.671 を示した。常緑広葉樹林で相関係数が低くなった原因として、Shadow が過剰に判定されていたためと考えられる。Shadow は 1 か 0 かに 2 値化しているため、Shadow の割合を計算することや透過率を与えることが求められる。Shadow の割合には、葉の重なりが生じる小さな Shadow をシミュレートすることやボクセルごとの天空率を与える必要がある。葉の透過率に関しては、スペクトルライブラリー [22] を用いて対応することが可能であると考えられる。

- ボクセルモデルの空間分解能とシミュレートする画像の分解能との関係

常緑針葉樹林では、分解能を上げていくと相関係数も高くなる傾向を示し、分解能が 2m で相関係数が 0.748 となった。杉野ら [23] が行なった研究では、実際の衛星画像の輝度値の標準偏差内でシミュレートするためには、少なくとも 1/50 ピクセルの精度の DSM が必要であるとしていた。つまり、分解能を下げるにつれ、相関係数も高くなる必要があるが、常緑針葉樹林以外では同様の結果は得られなかった。今後レイトレーシングの手法を改良することができれば、相関係数も高くなると考えられる。

今後、それぞれの項目で生じた課題を改善し、相関を向上させることができれば、誤差量でも評価する必要がある。また、今回の研究では、直達光のみシミュレーションの対象としたが、天空光や環境光なども考慮する必要がある。さらに今回は、ドローンに搭載したカメラが取得した画像をシミュレートしたため、大気の影響は無視できたが、衛星画像のシミュレーションにあたっては、大気の影響が大きくなる。よって、放射伝達を考慮したシミュレーションを行っていく必要もある。

## 参考文献

- [1] S. W. Running and J. C. Coughlan, A general model of forest ecosystem processes for regional applications, I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes, *Ecological Modeling*, 42, pp.125-154,1988
- [2] A. Ito and T. Oikawa, A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE) : A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation, *Ecological Modelling*, 151, pp. 143-176, 2002
- [3] Krinner, G., N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudre, J. Ogee, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch, and I. C. Prentice(2005), A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES*, VOL.19,GB1015, 2005
- [4] 衛星データから推定されたグローバル葉面積指数プロダクトの定義, 不確かさ, 検証方法, *日本リモートセンシング学会誌*, Vol.28, No.1, 2008
- [5] GCOM-C プロダクトとアルゴリズム,  
[https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM\\_C/data/product\\_std\\_j.html](https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/data/product_std_j.html)(2018/12/19 アクセス)
- [6] GCOM サイエンスプラン Ver1.3, 2010 年,  
[https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM\\_C/resources/files/GCOM.SP.JPN.v.1.3.pdf](https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/resources/files/GCOM.SP.JPN.v.1.3.pdf)(2018/12/20 アクセス)
- [7] 高木方隆, 国土を守る技術の基礎-地理空間情報技術者を目指す人のために-, 公益社団法人 日本測量協会, pp. 257-258, 2014
- [8] Koji Kajiwara, Yusaku Ono, Yoshiaki Honda, GCOM-C Vegetation Roughness Index product Algorithm Theoretical Basis Document Version 2.0, GCOM-C Biomass product,  
[https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM\\_C/data/files/Kajiwara\\_ATBD\\_AGB\\_VRI.2.0.pdf](https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/data/files/Kajiwara_ATBD_AGB_VRI.2.0.pdf)(2018/12/20 アクセス)
- [9] 小野祐作, GCOM-C1/SGLI LAI 推定アルゴリズム,  
[https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM\\_C/data/files/Ono\\_Y\\_ATBD.pdf](https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/data/files/Ono_Y_ATBD.pdf)(2018/12/20 アクセス)
- [10] Fumiki Hosoi, Kenji Omasa, Voxel-Based 3-D Modeling of Individual Trees for Estimating Leaf Area Density Using High-Resolution Portable Scanning Lidar, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 44, NO. 12, 2007
- [11] 中井洋平, 細井文樹, 秋山幸秀, 大政謙次, 航空機及び可搬型スキャニングライダーを用いたケヤキ群落の葉面積密度分布の推定, *Eco-Engineering*, 21 (1), pp. 9-14, 2009.
- [12] Y. Song, M. Maki, J. Imanishi and Y. Morimoto : Voxel-based estimation of plant area density from airborne laser scanner data, *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning*, Calgary, Canada, XXXVIII-5/W12, pp. 209-212, Aug. 2011
- [13] Kobayashi, H. and H. Iwabuchi, A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape, *Remote Sensing of Environment*, 112, 173-185. 2008
- [14] 小林秀樹, 針葉樹における分光反射率と葉面積指数の関係 : 森林の三次元構造とクランピングの影響, *日本リモートセンシング学会誌*, 28(4), 350-356, 2008
- [15] Kobayashi H., R. Suzuki, S. Nagai, T. Nakai, Y. Kim, Spatial scale and landscape heterogeneity effects on FAPAR in an open canopy black spruce forest in interior Alaska, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Volume 11 , Issue 2, 564-568, 10.1109/LGRS.2013.2278426, 2014
- [16] 牧 雅康, 高橋厚裕, 岡野哲郎, 小熊宏之, 可搬型 3 次元レーザーキャナと放射伝達モデルを用いた林床光環境の推定手法の開発, *リモートセンシング学会誌*, Vol.32, No.2, pp.77-87, 2012

- [17] 押尾晴樹, 浅輪貴史, 梅干野晁, 宮坂聡, マルチリターン航空機 LiDAR データと植生放射伝達モデルによる都市緑化樹木の日射遮蔽効果の計量化, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.35, No.1, pp.10-23, 2015
- [18] Forest Light Environmental Simulator (FLiES) Version 2.4 (version 2.48) User' s Manual, pp. 8, [http://flies.sakura.ne.jp/FLiES\\_v2.48.tar.gz](http://flies.sakura.ne.jp/FLiES_v2.48.tar.gz)(2018/12/22 アクセス)
- [19] Bui Tuong Phong, Illumination for computer generated pictures, Communications of the ACM, Vol.18, Issues 6, pp.311-317, 1975
- [20] PhotoScan Professional Edition, <https://oakcorp.net/agisoft/professional/>(2018/12/24 アクセス)
- [21] 藤原匠, 赤塚慎, 高木方隆, ボクセルモデルを用いた PAR 推定手法, 写真測量とリモートセンシング, Vol.57, No.1 .pp.4-12, 2018
- [22] Hibiki M. Noda, Takeshi Motohka, Kazutaka Murakami, Hiroyuki Muraoka, Kenlo Nishida Nasahara, Reflectance and transmittance spectra of leaves and shoots of 22 vascular plant species and reflectance spectra of trunks and branches of 12 tree species in Japan, Ecological Research, Vol.29, Issues.2, pp.111-111, 2014
- [23] 杉野恭平, 高木方隆, 分解能を異にする表面形状データを用いた衛星画像シミュレーションにおける輝度値の精度, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.3, .pp.191-199, 2016



## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導くださった高木方隆教授からは、研究の面白さ・難しさを教えていただきました。特に、現場でのデータ取得では、事前の機材の準備の大切さや、想定外の事案が発生した時の対応能力の大切さを学びました。また、学外で研究発表の場を提供して頂いたため、様々な先生方や学生と出会うことで、自分の研究の立ち位置を知る良い経験となりました。特に、東京大学生産技術研究所の竹内先生・長崎大学の森山先生からは、自身の研究に興味をもって頂くことや、研究へのアドバイスを頂くことができました。自身の進路においても大きな影響を受けました。

副指導教員である西内先生、論文副審査員である赤塚先生にも研究だけでなく、様々なことを教わりました。特に、今後、東京大学生産技術研究所の博士課程に進学するにあたっての相談を何度もさせて頂きました。また赤塚先生には、自身が修士一年の時まで高木研究室の助教を勤めていたということもあり、技術的な指導や解析方法を丁寧に教えていただきました。

研究室のメンバーにも多くのサポートをしてもらいました。本研究に欠かすことのできないドローンを用いた3次元測量では、村井さんに何度もドローンを操縦していただき、本当にありがとうございました。研究室の後輩にも、機材の運搬や測量など様々な場面で手伝ってもらい助かりました。また、非常に個性にあふれたメンバーであったため毎日楽しく過ごすことができました。

最後に、高知工科大学で学ぶ機会の提供や、支援して頂いている家族に感謝いたします。