

SfM-MVS システムによる DSM 体積を用いた植物体変化量の推定における課題

Issues of Estimating the Change of Plants' Volume, Calculated with DSM Produced by SfM-MVS Systems

浅野悟史 *・西前 出 **

Satoshi ASANO and Izuru SAIZEN

要旨：本研究の目的は、植物体の変化量を非破壊的に推定する上で、SfM-MVS システムによって出力される DSM と、これを用いた植物体の体積の推定における課題を明らかにすることである。アラカシの伐採萌芽株を 3D モデル化した実験により、高精度の DSM データを得ることができた。これを用いてサーフェスの体積を推定したが、形状の特徴によって過大評価を招くことが明らかになった。3 次元データの出力形式の多様化が望まれる。

キーワード：DSM, 植物体変化推定, SfM-MVS

Abstract： This paper aims to examine the issues of estimating the change of plants' volume, calculated with DSM which is led by "Structure from Motion-Multi View Stereo" (SfM-MVS systems). The 3D model of a resprouting stub of *Quercus glauca* read out sensitive DSM, however the plants' volume calculated with the DSM could be overestimated, because of plants' figure. More multifaceted output form of 3D modeling is expected.

Key Words： DSM, estimating the change of plants, SfM-MVS systems

はじめに

植物の成長を把握するパラメータとして、農学および生態学の分野では、乾燥重量と時間の関数による指数である相対成長速度 (Relative Growth Rate: *RGR*) などが用いられてきた (長嶋, 2009)。これはサンプルとして植物遺体を用いる破壊的な手法であり、同一個体や同一組織を継続してモニタリングすることが不可能となる。また、リモートセンシングにおいて巨視的に植生を捉える際に用いられる植生指数 (Normalized Difference Vegetation Index: *NDVI*) は、衛星データを用いて非接触的にモニタリングできるものの、林冠部などの表面の把握に留まり、中間階層や林床の植生変化を把握することはできない。また、森林環境の保全や、林業の分野において、航空レーザー・スキャナーを用いて林冠高や森林断面の把握、森林バイオマスの推定が非破壊的に行われているが (今西, 2012)、これらは高いコストを要し、個体レベルの詳細な変化の把握には不向きである。個体レベルの植物体変化を非破壊的に、低コストでモニタリングする手法は未発達な段階にある。

近年、写真測量技術の発達により、さまざまな物体の

形状が遠隔的に、詳細に把握されている。これまで専用カメラによって撮影したステレオ写真から生成されていたオルソ画像が、家庭用デジタルカメラの複数枚の写真をバンドル調整することで簡単に得られるようになった (内山ほか, 2014a)。これを応用して、一般にドローンと呼ばれる小型 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) に取り付けられたデジタルカメラの画像から、アクセス困難な場所の詳細な地形 (小花和ほか, 2014)、災害による地形変化の把握 (内山ほか, 2014a) が行われている。これらを可能にしているのが、複数の写真の撮影位置を推定する技術、および画像内の共通部位を抽出し立体像を 3 次元復元する SfM-MVS (Structure from Motion-Multi View Stereo) システム¹⁾である。

筆者らは SfM-MVS システムを用いることで、個体レベルの植物体変化を非破壊的に把握することができるのではないかという着想を得て本研究を行った。本稿では SfM-MVS システムによって出力される DSM (Digital Surface Model) を用いた植物体の推定体積について検証し、その応用可能性と課題を明らかにする。

* 総合地球環境学研究所

** 京都大学大学院地球環境学堂

1. 研究の方法

1. 1 対象とした植物

本研究では植物体の3次元モデリングの対象としてアラカシ *Quercus glauca* の伐採萌芽株を用いた。アラカシは、日本において最も広い領域をもつ植生帯である暖温帯の構成樹種である(大野, 2005)。

1. 2 実験の方法

実験は大きく分けて、(i) 写真の撮影、(ii) PhotoScanを用いた3Dモデルの作成、(iii) DSM体積の推定という3段階からなる。デジタルカメラ COOLPIX AW100 (Nikon社)を用いて、萌芽株の全周および上方から撮影した。図1の例では複雑な形状をした萌芽先端部にかけて多くの写真を撮影した。また、写真に写っている範囲が隣の写真の範囲と60%以上重なるようにすることが推奨されている²⁾。予備実験として、アラカシの伐採萌芽株を撮影し、同一株を撮影した20枚、30枚、50枚、70枚、90枚の各セットをPhotoScanで処理し、推定された点群数が最も多かった50枚を本研究の撮影枚数として採用した。また、写真のf値は3.9、焦点距離は35mm

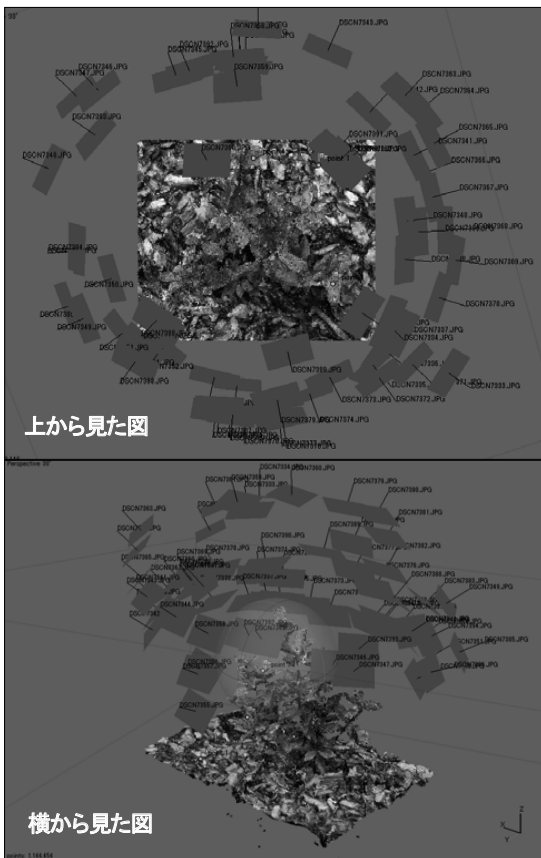


図1 推定された撮影位置(四角がカメラ位置を示す)

(35mmフィルムカメラにおける35mmレンズと同等の画角)である。AW100は35mmフィルムやAPSCサイズのデジタル一眼レフカメラに比べてセンサーサイズが小さいため(1/2.3型CMOS, 1,600万画素)、被写界深度が相対的に深くなる。そのため、一眼レフカメラでは開放値に近いf3.9でも十分な深度が得られる。AW100は光学ズーム機能を搭載したデジタルカメラである。本実験では、焦点距離が35mmになるようズームした。35mmとしたのは周辺部の歪みを極力小さくし、かつ50枚の写真で対象物の全周を撮影するためである。なお、歪み補正ソフトのAgisoft Lens (Agisoft社)を用いてすべての写真の歪みを補正してPhotoScanに投入した。

得られた写真をPhotoScan Professional 1.1.6 (Agisoft社)で処理し、DSM (Digital Surface Model; 物体を直上から捉えた高さデータ)³⁾を得た。この過程を図2に示す。GCP (Ground Control Points) はローカル座標を用い、植物体の頂点を含む3点の相対座標を入力した。その際、伐採株の最下部に原点(0, 0, 0)を設定し、最小単位を1mmとして頂点付近、および中間点を設置した。各点には「+」を印刷した標識を貼り付けた(ただし、原点のみ分かりやすいように対角状に塗り分けている)。鳥瞰図の作成(Build Mesh)の際、PhotoScanではArbitraryモードとHeight Fieldモードが用意されている。Arbitraryモードは複雑な形状の建物や物体の3D出力を行うための3次元データを作成する。一方、Height FieldモードはXY平面上の各点に対し、最も大きい1個のZ座標値のみを格納した2.5次元データとなり、対象物は柱体の集合で表現され、地形の把握などに適している。植物体の形状を復元するにはArbitraryモードが適しているが、本研究はDSMデータから算出される体積について議論することを目的としているため、2.5次元データ作成を行うHeight Fieldモードで鳥瞰図を作成した。統一条件としてDSMの解像度を1mmとし、GeoTiffデータで出力した。予備実験で得られた点群、柱体、およびDSMを諧調表現した図

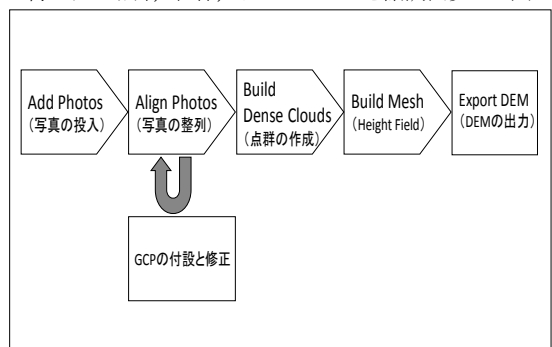


図2 DSM出力の過程

をそれぞれ図3, 図4, 図5に示す。

DSM から ArcGIS 10.2 (ESRI 社) を用いてサーフェスの体積を算出した (「DSM 体積」とする)。このときの基準面は高さ 0, つまり原点を含む平面とし, この平

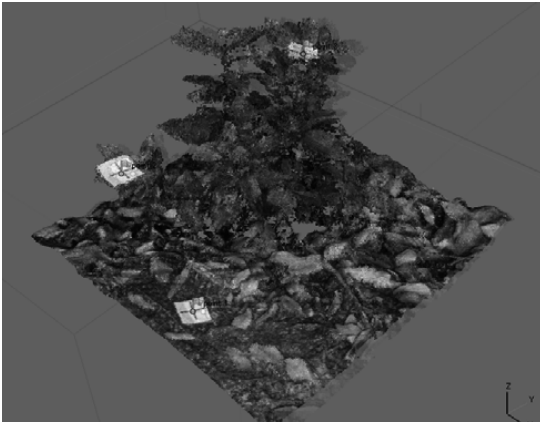


図3 Arbitrary モードで作成される 3次元モデル

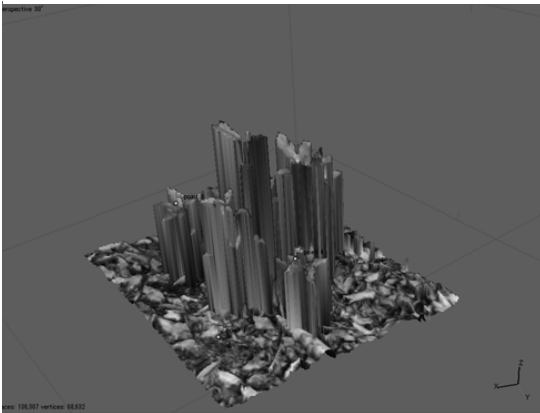


図4 Height Field モードで作成される柱体

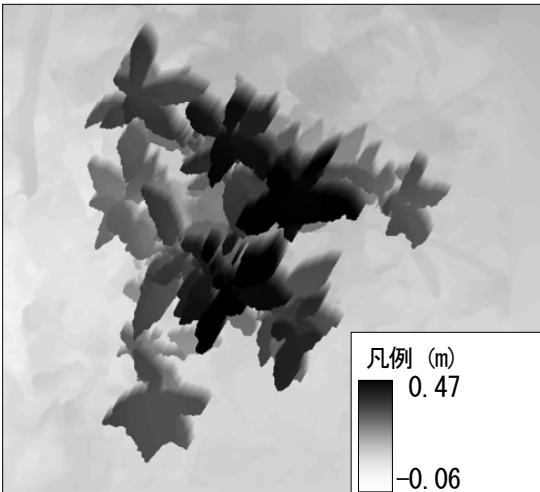


図5 DSMより諧調表現した直上からみた萌芽株

面より高い位置にある DSM データのみを計算の対象とした。

1. 3 DSM体積の精度検証

DSM 体積と実際の植物体の体積との差を検討するために, 水量換算体積との比較を行った。4 本のアラカン萌芽枝を用意し植木鉢に挿した疑似萌芽株を作成した (写真1)。これを水平面に置き, 鉢の上縁を, 原点を含む基準面とした。分岐した萌芽が 10 本, 基準面から上に出ている。この状態を「初期状態」とし, 1. 2で述べた方法で 3次元モデルを作成した後, 高さが徐々に低くなるように萌芽枝を剪定し, その都度 3次元モデルを作成した。各剪定を終えた疑似萌芽株の 3次元モデル(点群)を図 6~9 に示す。また, 各段階で剪定した萌芽枝を水中に沈めた際の水面高の変化から体積を計測した (以下, 水量換算体積とする)。剪定は 3 回に分けて行い, 疑似伐採株の水量換算体積と各段階で得られた DSM 体積の比較を行った。

2. 結果

図 10 は, それぞれの手法で得られた体積の実数値を比較したものである。除去 (植物体が全くない状態) を除くすべての段階で DSM 算出体積が水量換算体積を上回り, 初期状態および剪定 1 の段階ではその差が著しい。

そこで, 体積推定の 2つの手法ごとに, 各剪定間の差分をとったものが図11である。DSM 算出体積において, 体積の誤差が大きかった剪定 1 と誤差の小さかった剪定 2 の間の「第 2 段階」で大きな差がみられる。

次に 2つの手法によって得られた体積推定値の変化率の違いをみるため, 以下の 2つのモデルから変化率を調べた (図 12 および図 13)。

$$\text{比率①} : (V_n - V_{n-1}) / V_0 \quad (1)$$

$$\text{比率②} : (V_n - V_{n-1}) / V_{n-1} \quad (2)$$



写真1 疑似萌芽株 (初期状態)

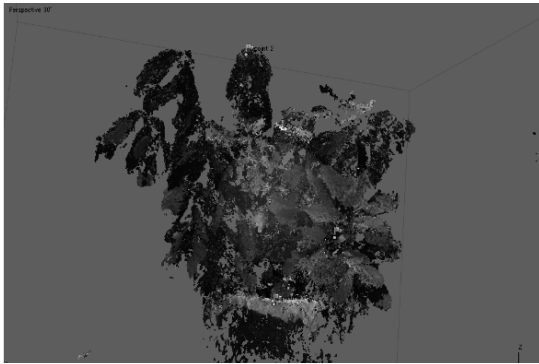


図6 「初期状態」の点群モデル



図7 「剪定1」の点群モデル

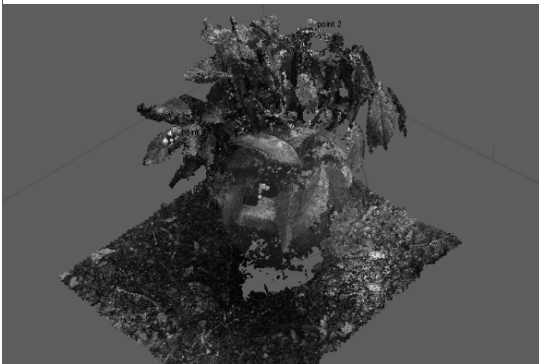


図8 「剪定2」の点群モデル

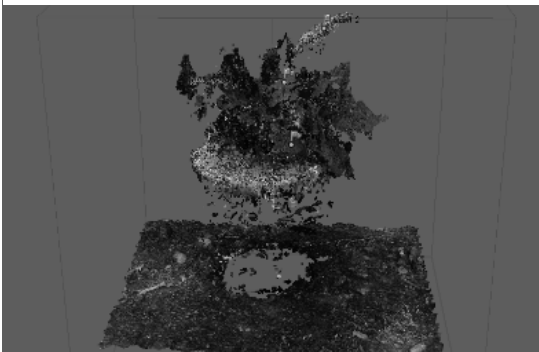


図9 「剪定3」の点群モデル

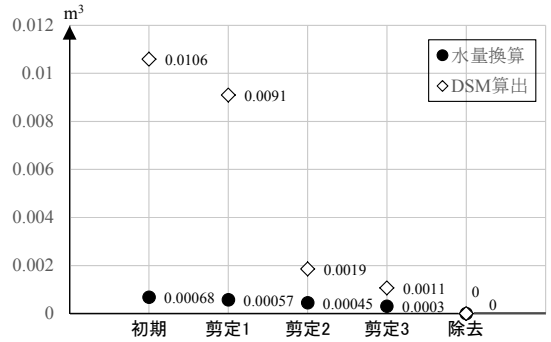


図10 2つの手法による体積推定値

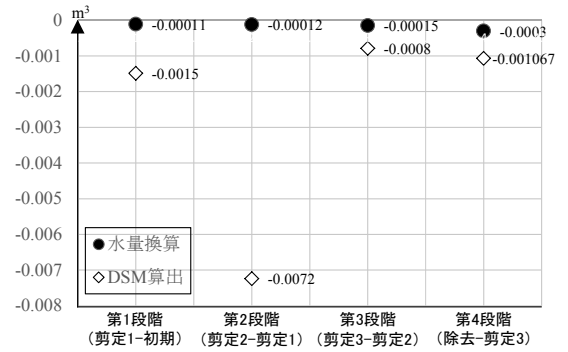


図11 各剪定間の体積推定値の差分

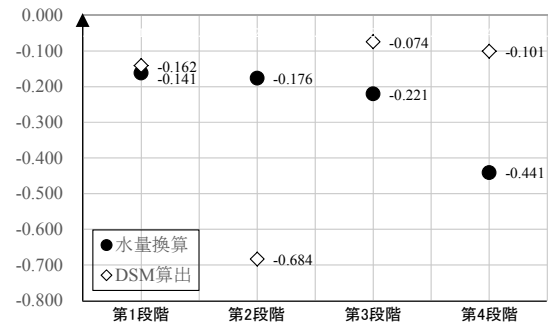


図12 比率①「 $(V_n - V_{n-1}) / V_0$ 」

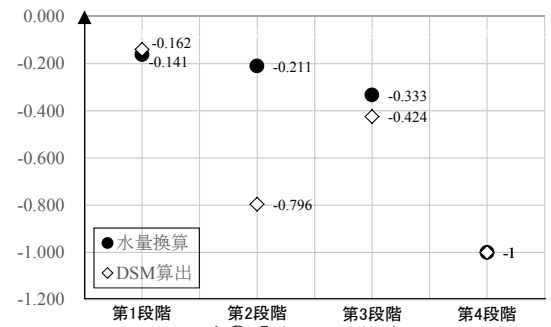


図13 比率②「 $(V_n - V_{n-1}) / V_{n-1}$ 」

V_n は n 回目剪定時の体積、 V_0 は初期状態の体積を示す。DSM 体積と水量換算体積の比率の差には、大きなばらつきがあることが読み取れる。

3. 考察

3. 1 植物体の DSM データ

本研究では、写真測量技術である SfM-MVS システムを用いて植物の個体レベルの DSM データを得た。その結果、高精細な樹冠図を得ることができた (図 5)。詳細な樹冠図の作成が写真の撮影と 3D モデリングによって可能であるといえる。このことは、航空レーザー・スキャナーなどの既存の林冠図の作成手法に比べて低コストで作成できるほか、林冠が閉じている場合の林床でも写真さえ撮影可能であれば樹冠図の作成ができることを示唆している。また、樹冠図の解像度が 1mm 以下 (予備実験のデータでは 0.4mm で出力可能、本実験ではこれを 1mm に統一して出力) であることは詳細な樹冠図の作成に寄与すると考えられる。GIS ソフトによって等高線も記入でき、応用可能性が高い。

一方、枝葉が入り組んでいる場合、その内部構造を SfM-MVS システムの 3 次元モデルで再現することは難しい。特に、2.5 次元の DSM データは最高点のみ拾い上げるため、上に向かって広がる形状をした植物の形状再現には不向きであるといえる。こうした植物の 3 次元復元には Arbitrary モードを用いた立体像の作成が適しているが、DSM として出力すると、Height Field モードでの出力結果と変わらないものになってしまう。

つまり、植物体の DSM データは任意の階層において樹冠図を作ることができる点で応用可能性は高いが、植物体を立体的に再現する目的での利用には注意を要する。

3. 2 DSM 体積の精度

植物体の DSM データの応用可能性を探るため、本研究では植物の変化を体積で評価することを試みた。本実験では剪定という人為的な変化の前後での体積変化を DSM 体積および水量換算体積によって数値化した。DSM 体積は「初期」～「剪定 3」の 4 試料において、いずれも水量換算体積より大きな値を示した。これは Height Field モードで作成した柱体の体積と水量換算体積との差が大きく、DSM 体積が過大評価されたものであることを示している。初期および剪定 1 という、より植物体が繁茂している状態で差が大きいことから、実際の体積変化より、植物体の形状変化が DSM 体積変化に大きな影響を与えることを示している。つまり、DSM 体積の精度は対象物の形状、枝葉の粗密によって大きく異なると考えられる。今回は高さを低くするように剪定

を行ったため、剪定が進み株高が低くなるにつれて 2 つの体積推定値の間の差が小さくなった。

次に式(1)および式(2)の 2 つのモデルから変化率を検証した。しかし、どちらのモデルにおいても、DSM 体積が過大となった「剪定 1」と、株高が下がり 2 つの体積推定値の差が小さくなった「剪定 2」の間における「第 2 段階」において、DSM 体積と水量換算体積の間に差を生じている。また、比率①では初期状態にあたる V_0 が過大評価された DSM 体積において、さらに第 3 段階、第 4 段階において、水量換算体積から推定される変化率に比べ差が大きくなっている。

以上のことから、DSM 体積は実際の体積より常に大きく評価してしまうことが示唆され (図 10)、またその誤差率は変動するものであると考えられる (図 11)。誤差率は植物体の形状によって異なり、本実験で用いたアラカシの伐採萌芽のように一部の枝が勢い良く伸びた植物体の体積推定には不向きであるといえる。比率を用いた指標についても、データの誤差率が一定でない以上、比率の大小比較を行うことはできないと判断される (図 12, 図 13)。

なお、植物体の変化としてまず想定される「成長」については、本研究の結果から十分議論することができないため、今後の研究課題としたい。

3. 3 SfM-MVS システムの課題

本研究では DSM データの応用可能性について、主に体積の推定に用いることを想定して検証を加えたが、SfM-MVS システムのアウトプットとして Arbitrary モードで作成される 3 次元モデルがある。PhotoScan の仕様では 3 次元データの用途は Adobe Acrobat Reader による表示や 3D プリンタによる立体出力にとどまっている。複雑な 3 次元データを基にした体積推定値の出力機能の開発が進むことを期待したい。

PhotoScan の登場によって SfM-MVS システムが身近なものとなり、地形学 (内山ほか, 2014b) や防災の分野 (楠本・番上, 2015; 井上ほか, 2014) を中心に盛んに研究が行われている。UAV の価格の低下により UAV に搭載したカメラによるデータの取得が研究されている一方で、SfM-MVS で作成された 3 次元モデルをどう出力するかといった技術革新と研究の発展が望まれる。

おわりに

本研究では、これまで重量指標が用いられてきた植物体の変化を把握する新たな方法として、写真測量技術を用いた非破壊的な体積推定手法を検討した。本研究で用いた PhotoScan によって出力される DSM データは、常に

植物体の実際の体積より大きい推定値を与え、植物体の形状によって、ときに体積を過大に推定した。この誤差を考慮した比率による指標も、誤差率の大きさが一定でないため有効とはいえなかった。一方、植物体の樹冠図を個体レベルで詳細に描画できる応用可能性も明らかになった。今後は、点群として表示される植物体の複雑な3次元モデルを、どのように定量化するかという課題に取り組んでいきたい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって、調査のサポートをしていただいた京都大学大学院地球環境学舎(当時) 夏目宗幸氏、ならびに助言をいただいた金沢大学大学院人間社会環境研究科 小倉拓郎氏、および千葉大学環境リモートセンシング研究センター 小花和宏之氏に謝意を表す。

脚 注

- 1) 本研究で用いた商用ソフトウェア、PhotoScan Professional を用いた既往研究では単に「SfM」と表記している場合がみられるが、SfMはカメラ位置を推定する技術のみを指し、PhotoScan Professionalのアウトプットであるオルソ画像やDSMはMVSの結果を利用しているため(Furukawa *et.al*, 2010)、本稿では「SfM-MVSシステム」と記す。
- 2) 株式会社オーク, Agisoft PhotoScan Standard edition. <<http://www.oakcorp.net/photoscan/>>, 2015.9.22 参照
- 3) PhotoScanのアイコン表示ではDEM(Digital Elevation Model)だが、DEMは通常地形の標高を示し、地形を扱わない本研究では不適切と考えDigital Surface Model(DSM)と表現している。

引用文献

- Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M., and Szeliski, R. (2010) Towards Internet-scale Multi-view Stereo. "In Computer Vision and Pattern Recognition", pp.1434~1441, IEEE, USA.
- 今西純一(2012) 宇宙や空から地上を3次元で観測するリモートセンシング.『景観の生態史観 攪乱が再生する豊かな大地』(森本幸祐 編), pp.84~85, 京都通信社, 京都市.
- 井上 公・内山庄一郎・鈴木比奈子(2014) 自然災害調査のためのマルチコプター空撮技術. 防災科学研究所研究報告, 81, 61~98.
- 楠本 博・番上勝久(2015) UAV(無人飛行装置)の災害調査への利用: 試行段階から実用段階への移行と今後の課題. 建設機械, 51(9), 26~30.
- 長嶋寿江(2009) 植物のサイズと成長: 成長解析. 低温科学, 67, 113~118.
- 小花和 宏之・早川 裕之・ゴメス クリストファー(2014) UAV空撮とSfMを用いたアクセス困難地の3Dモデリング. 地形, 35(3), 283~294.
- 大野啓一(2005) 日本の照葉樹林の概要. 『図説 日本の植生』(福嶋

司・岩瀬 徹 編), pp.18~19, 朝倉書店, 東京.

内山庄一郎・井上 公・鈴木比奈子(2014a) SfMを用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. 防災科学研究所研究報告, 81, 37~60.

内山庄一郎・中田 高・井上 公・熊原康博・杉田 暁・井筒 潤・後藤秀昭・福井弘道・鈴木比奈子・谷口 薫(2014b) 小型UAVとSfMソフトウェアを用いた断層変位 地形把握の試み—根尾谷断層水鳥断層崖を例に—. 活断層研究2014(40), 35~42.