

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23710040

研究課題名（和文）航空機及び地上レーザー計測データを用いた森林資源シミュレーション開発

研究課題名（英文）Development of forest resource simulation using airborne and terrestrial laser

研究代表者

加藤 顕 (KATO AKIRA)

千葉大学・大学院園芸学研究科・助教

研究者番号：70543437

研究成果の概要（和文）：国内外の環境政策において、森林域における二酸化炭素吸収機能が注目されており、シミュレーションソフト（InVEST）を用いてその炭素動態をモニタリングすることができる。本研究では森林資源量を最も詳細に把握できる航空機レーザーと地上レーザーを用いて森林資源量のシミュレーションを行い、結果を比較した。その結果、立木密度の把握が結果に大きく影響していた。立木密度を正確に把握できる地上レーザーを実用的に利用普及することで、より現実的なシミュレーションを行えるようにすることが今後の課題である。

研究成果の概要（英文）：Domestic and international environmental policy requires biomass monitoring over forested area. There is a software named InVEST available to simulate the carbon change to predict the future forest condition. In this study, airborne and terrestrial laser are used as the input data for InVEST and the simulation results from two different input data are compared. As a result, stem density is the key factor to influence the simulation result. Therefore, terrestrial laser obtains the most accurate stem location should be practically used for biomass monitoring.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境影響評価・環境政策

キーワード：レーザー、カーボン、モニタリング、バイオマス、LiDAR、材積、3次元、リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

京都議定書から始まった二酸化炭素排出量取引では、世界の森林域での炭素量蓄積が大きく注目されるようになった。近年では、REDD（森林減少・劣化からの温室効果ガス排出削減）の動きも活発になり、特に炭素蓄積が多い熱帯林での正確な炭素動態モニタリングが重要な課題となってきた。森林域での炭素動態モニタリングには、現存量と蓄積量の把握が必要で、国家間で競って新しい衛星リモートセンシングセンサー技術開

発、モニタリング手法の確立を行っている。我が国でもこの世界の動きに乗り遅れないためにも、モニタリング技術の開発が急務の課題となっている。例えば、オーストラリアでは政府が主導で、炭素を算出するソフト（National Carbon Accounting System）の開発を進めている。その一方で、名古屋で開かれた COP10（生物多様性条約第 10 回締結国会議）では、都市部及び、その近郊林で野生生物の保全が大きな問題となっている。これらの大きな流れから、森林を様々な目的に応じて

利用していかなければならない状況にある。

このような世界の動きと連動して、本研究対象地である千葉県山武市では市所有林(48ha)で木質バイオマス利用のために森林整備を行っている。しかし、森林利用に関して将来のビジョンは定まっていない。

地域住民が意思決定するには、客観的なデータとともに、意思決定に関する解析手法が必要である。そこで WWF, The Nature Conservancy, 米国スタンフォード大学が共同で InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) と呼ばれるソフトを開発し、誰でも ArcGIS (ESRI 社)上で様々な目標設定し、将来の土地利用変化をシミュレーションができるようになった。しかし、扱えるデータに限界があったため、低～中解像度データによる広域なシミュレーションしかできなかった。近年、航空機レーザーデータのように高解像度のデータが取得可能となり、容量の大きいデータを用いた詳細なシミュレーションが行えるようになった。都市部、都市近郊林ではその土地の経済的価値ばかりが先行しているため、生物多様性や森林の持続可能な資源利用を考慮した開発が必要である。本研究では、様々な土地利用が混在する都市部または都市近郊林で、最も詳細に土地利用変化が把握できる高解像度データを用いたシミュレーションを行い、その結果の有効性を検討する。

2. 研究の目的

世界の炭素市場の動きと相応し、地域のバイオマス利用が活発となってきている。しかし、都市近郊林では、様々な土地利用が想定されるため、地域住民による意思決定が難しい。その意思決定に必要な客観的な判断資料と将来の状況を予測できるソフトの開発が望まれている。本研究は、InVEST と呼ばれるソフトを用いて、高精度レーザーデータによるシミュレーション結果の有効性を検討する。

3. 研究の方法

(1) 現地調査

本研究対象地は針葉樹主体の千葉県山武市と落葉広葉樹主体の東京都西部にある東京都公園野山北・六道山公園である。千葉県山武市では市所有林で都市近郊林として今後の森林モニタリングが必要な場所であり、野山北・六道山公園は、典型的な里山林である。山武市は、銘木サンプスギ (*Cryptomeria japonica*) の生産地であったが、長い間管理放棄されたため、非赤枯性溝腐病(*Phellinus*

punctatus (Fries) Pilát)が蔓延している。

落葉広葉樹が主体の野山北・六道山公園は、全体で約 200ha ある。東京都が定期的に行伐・下刈り等を行っている。

針葉樹林では平成 22 年 8 月～9 月に、落葉広葉樹林では平成 23 年 8 月～9 月、24 年 8 月～9 月に現地調査を行い、毎木データを取得した。調査方法としては調査区として 20m x 20m のプロットを設置し、樹種・樹高・胸高直径・樹冠長・枝下高・樹木位置を、プロット内 2m 以上の樹木すべて毎木調査を行った。プロット設置の選定は、対象地で様々な森林状況を把握できるように、各対象地で 30 プロットをランダムに設定した。毎木調査は、樹高、枝下高は測高計 (Haglof Vertex III) によって計測、樹木位置は、トータルステーション (Ushikata Teo-Ray130) によって測量し、高精度 GPS (Trimble GeoXT) によって取得した GPS の位置を基準に、樹木位置に座標付け (ジオリフェレンス) を行った。

針葉樹林対象地では、スギ (*Cryptomeria japonica*) とヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) が優占している。広葉樹林対象地では、コナラ (*Quercus serrate*) が優占している。

(2) 航空機レーザー

航空機レーザーデータは、平均 15 点/m² もの高密度で、針葉樹対象地では平成 22 年 7 月 18 日に、広葉樹対象地域では平成 23 年 11 月 5 日にデータ取得を行った。1 つのレーザー照射に対して多くのレーザー反射を収集できる full waveform センサーを用いたため、高密度データを効率良く取得することができた。

(3) 地上レーザー

航空機レーザーは上空からのレーザー照射するため、樹冠上部からのレーザー反射が多く、幹部や林内まで上空から十分にレーザー計測できない。高密度でデータ取得を行っても航空機レーザーでは樹木幹部形状を把握するには限界があった。よって本研究では航空機レーザーを取得した同じ対象地で、地上レーザーを用いて樹木の計測を行った。地上レーザーデータは、千葉県山武市で平成 22 年 10 月 20 日に、広葉樹対象地域では、平成 24 年 4 月 25 日に広域を 50m 間隔でセンサーを複数箇所設置し、高密度でデータ取得を行った。

(4) 航空機レーザーによる解析手法

50cm 解像度のグリッドを対象地全域で派生し、各グリッド内における点の最大値を樹冠上部とし、最小値を地面として DSM (Digital Surface Model) と DTM (Digital Terrain Model) を作成した。DSM と DTM の差分から

DCM(Digital Canopy Model)を作成した。DCMは樹冠高を表す。作成されたDCMから凹凸を自動判別するアルゴリズムを作成した。DCMの表面で凸部を自動で抽出して樹木位置とし、その場所のDCM値を樹高とした。

従来のバイオマス算出方法は、材積が基準であり、樹高と胸高直径から樹木幹材積式を用いて算出する。航空機レーザーデータを用いれば、樹高計測は正確に計測できるが、材積式を利用するには胸高直径を計測する必要がある。本研究では、航空機レーザーデータのみから得られる樹高と立木密度に注目し、樹高と胸高直径ではなく、樹高と立木本数から材積を算出する手法を確立した。

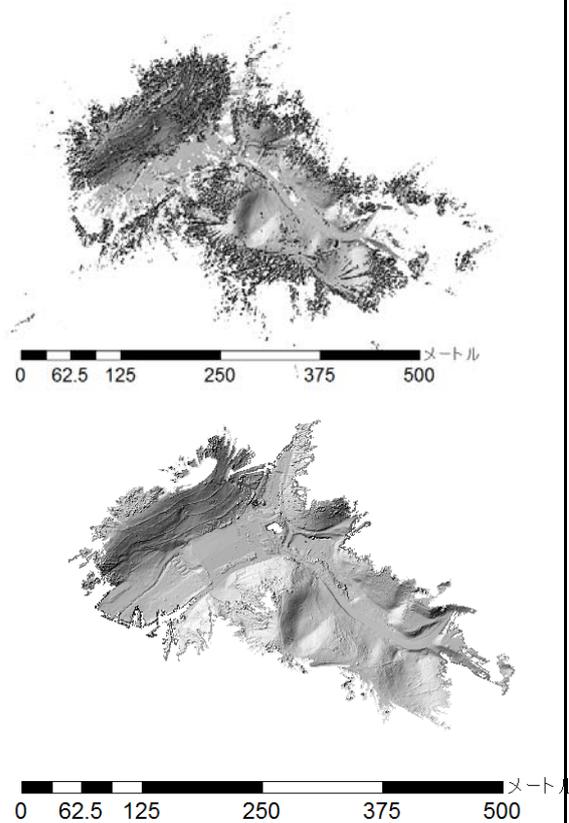


図1. 地上レーザーによるDTM作成（上図：ノイズ処理前のDTM、下図はノイズ処理後のDTM、地上レーザーだけでも詳細な地形図を作成することができる。）

(5) 地上レーザーによる解析手法

航空機レーザーとは異なり、地上レーザーによるデータ取得では、地面からのレーザー反射点を予め分類していない。そのため地表面を自動で分類するアルゴリズムを開発し、DTMを作成した（図1）。

地上レーザーデータ全体の点群から樹木

幹部の点群を自動で抽出した（図2）。その樹木幹部の点群から胸高での高さで輪切りにし、胸高幹断面積を自動測定（図3）し、胸高直径とした。樹高の計測も行った。

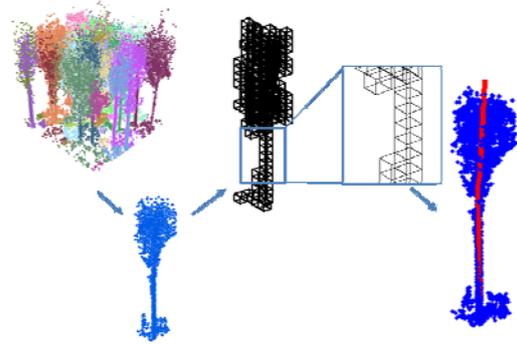


図2. 地上レーザーによる解析手法の概念図（点群から単木単位でのデータを抽出し、自動で幹部を抽出する過程を示す）。

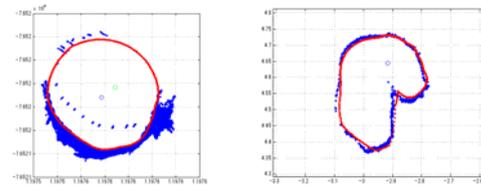


図3. 地上レーザーから胸高断面積の算出（青色点：胸高幹横断面のレーザー点群、赤色点：点群から幹断面を再現した結果、左図：データが欠損していても胸高断面積を算出できるように幹部を再現するアルゴリズムを開発した。右図：複雑な幹形状にも対応したアルゴリズムである）

(6) シミュレーション結果

森林モニタリングのシミュレーションはInVEST(Natural Capital Project)のソフトを用いた。解像度5mのグリッドデータを作成し、取得した航空機と地上レーザーから材積を各グリッド内で集約した。そのデータを入力値としてInVESTに入力し、2つの異なる手法から得られるシミュレーション結果を比較した。

4. 研究成果

(1) 航空機レーザーによる解析結果

航空機レーザーより作成されたDCMより樹木位置図を作成するためにDCMの凹凸を利用して樹頂点を自動で判別し、判別された樹頂点を基に樹高と立木密度を把握した（図4）。

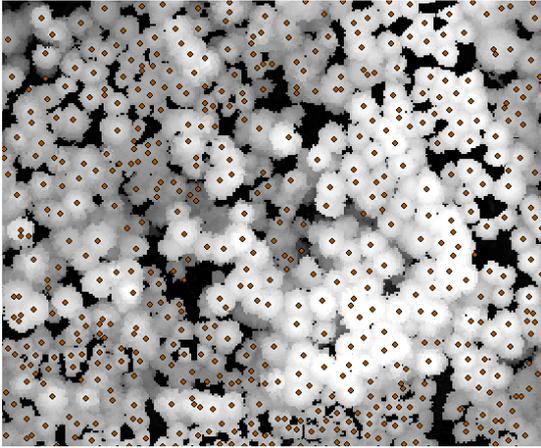


図 4. 航空機レーザーから自動で樹頂点を把握した結果 (点が自動判別された樹頂点を表し、背景は DCM)

航空機レーザーからの解析結果を現地調査で毎木調査したデータと比較した結果 (図 5)、針葉樹は樹高計測が正確に行えるが、立木密度は過小評価されることがわかった。広葉樹では樹高と立木密度ともに、針葉樹よりも正確に測定することが困難であった。

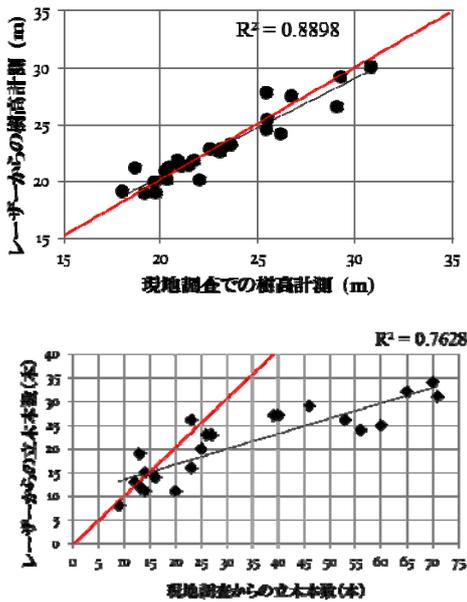


図 5. 針葉樹林における航空機レーザーによる樹高計測 (上図) と立木密度 (下図) の結果検証 (赤色線は 1 対 1 の対応線)

(2) 地上レーザーによる解析結果

地上レーザーによる樹高計測と胸高直径計測を現地調査で取得したデータと比較した (図 7)。地上レーザーによる計測は、96% の精度で樹木位置を把握でき、航空機レーザーよりも正確に樹木幹部形状を取得でき

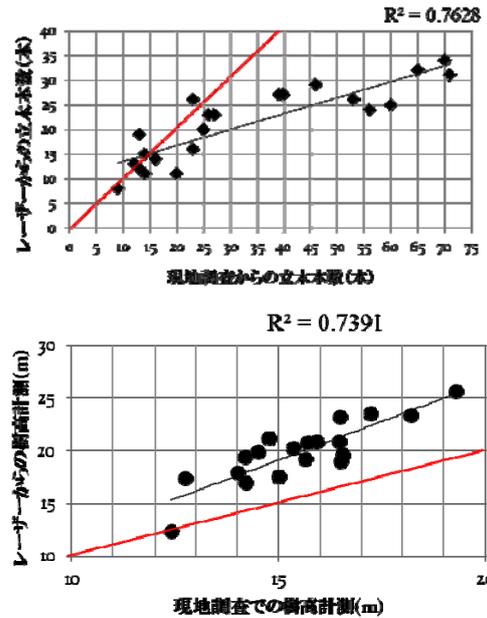


図 6. 広葉樹林における航空機レーザーによる樹高計測 (上図) と立木密度 (下図) の結果検証 (赤色線は 1 対 1 の対応線)

た。さらに、樹高計測では RMSE が 0.53m、胸高直径では RMSE が 1.53cm もの精度で計測することができた。

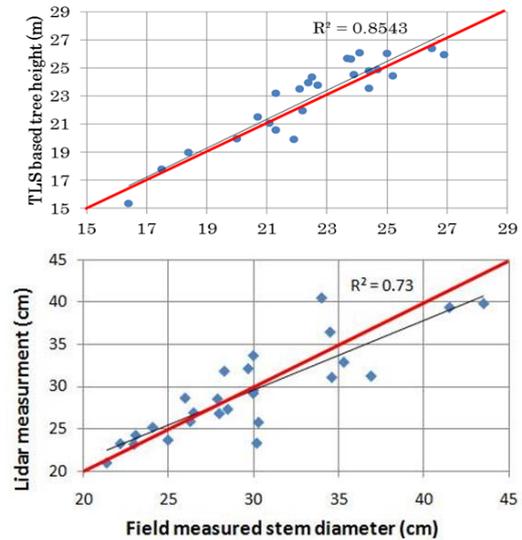


図 7. 地上レーザーによる樹高計測 (上図) と胸高直径 (下図) の結果検証 (赤色線は 1 対 1 の対応線)

(3) シミュレーション結果の比較

樹木幹部の位置と形状を確実に取得できる地上レーザーと、幹部まで判別できないが、樹冠形状を主体に広域を効率よくデータ取得できる航空機レーザーによる解析結果を

入力値として InVEST によるシミュレーション結果を図 8 に示す。図 8 より、航空機レーザーと地上レーザーでは使用する入力データの精度の違いがシミュレーション結果に影響を及ぼしたことがわかる。立木密度が結果に最も影響を及ぼしていた。

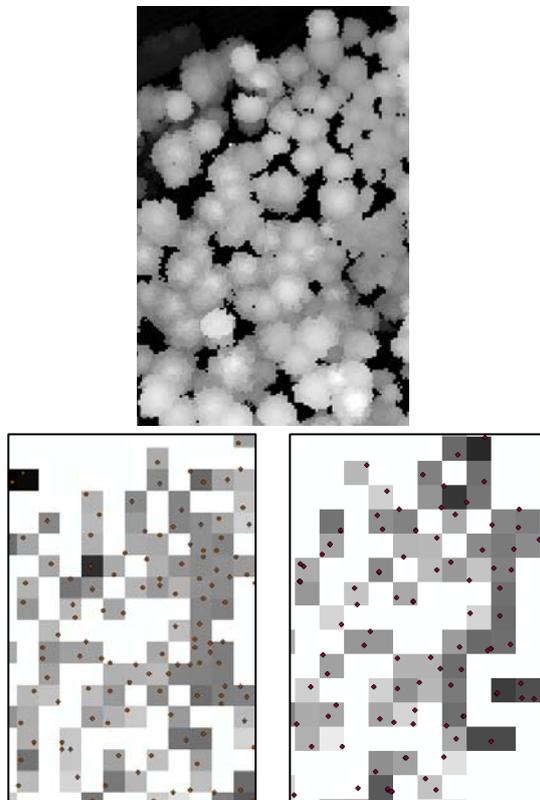


図 8. 同じ場所で、航空機レーザーと地上レーザーによる入力データで InVEST をシミュレーションした結果、結果が同じ色になっていない。(上図：シミュレーションを行った対象地、左下図：航空機レーザーによるシミュレーション結果、右下図：地上レーザーによるシミュレーション結果、白くなるに従い炭素蓄積量が増加する場所を表す。図中の点は各レーザーデータから得られた樹木位置)

本研究では、最も詳細に森林状況を取得できる航空機レーザーと地上レーザーを用いて森林の構造データを取得し、その解析結果を InVEST の入力値として森林資源のシミュレーションを行った。異なるレーザーデータによるシミュレーション結果を比較すると、立木密度が最も結果に影響していた。よって立木密度をより正確に把握できる地上レーザーが森林資源量把握には有効であり、効率の良いサンプリングのために地上レーザーのセンサー設置方法を今後検討する必要がある。

本研究では地上レーザーによるこれまで確立していなかった解析手法を確立することができた。シミュレーション自体のアルゴリズムの改良も必要であるが、より高解像度

データを利用促進する際は、地上レーザーの様により正確に計測できる手法が、より現実的シミュレーションに必要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- ① Kato A., Morgenroth, J., Kelbe, D., Gomez, C., van Aardt, J.A. (2013) Ground truth measurement of trees using terrestrial laser for satellite remote sensing, IEEE IGARSS 2013 (In Press). (査読有)
- ② 林 敏樹、加藤 顕 (2012) 地上レーザーを用いた外来抽水植物のマッピング, 日本緑化学会誌 38(1), pp. 250-253 (査読有)
- ③ 根本 光、加藤 顕、小林達明 (2012) 航空機レーザー測量を用いた異なるスケールアプローチでのスギ・ヒノキ林材積の推定、日本緑化学会誌 38 (1), pp. 79-84 (査読有)
- ④ Kato,A., Watanabe,M., Yamaguchi,Y., Kobayashi,T. (2012) Detecting seasonal change of deciduous trees using ALOS PALSAR and airborne lidar, IEEE IGARSS 2012 IEEE International, pp. 1656-1659 (査読有)
- ⑤ 加藤 顕、小林達明、有村恒夫、福田聖一 (2011) 法面緑化地での車載レーザー利用のためのシミュレーション開発, 日本緑化学会誌 37 (1) pp. 96-101 (査読有)
- ⑥ Kato,A., Watanabe,M., Kobayashi,T., Yamaguchi,Y., Iisaka, J. (2011) Monitoring Forest Management Activities Using Airborne Lidar and ALOS PALSAR, IEEE IGARSS 2011 IEEE International, pp. 2318-2321 (査読有)

〔学会発表〕(計 20 件)

- ① Kato A., Watanabe, M., Morgenroth, J., Gomez, C., Field tree measurement using terrestrial laser for radar remote sensing, The 4th Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, September 2013, Tsukuba, Japan (アクセプト)
- ② Kato A., Morgenroth, J., Kelbe, D., Gomez, C., van Aardt, J.A., Ground truth measurement of trees using terrestrial laser for satellite remote sensing, IEEE IGARSS 2013, July 2013, Melbourne Australia (アクセプト)
- ③ 加藤 顕、小林達明、車載レーザーを用いた樹木調査法、平成 25 度年次学術講演会、日本写真測量学会、2013 年 5 月 21 日 東京大学生産技術研究所
- ④ Kato A., Ishii, H., Kobayashi, T., Above-ground Biomass Estimation of Trees using Terrestrial Laser, International Symposium on Remote Sensing, 17th May 2013, Makuhiari Seminar House, Japan
- ⑤ 加藤 顕、石井弘明、梅木 清、大澤 晃、吉田俊也、小林達明、地上レーザーを用いた

樹木構造把握、第124回日本森林学会、2013年3月26日、岩手大学

⑥ Kato, A., Kobayashi, T., Automatic reconstruction of tree stem using terrestrial lidar, Silvilaser 2012, 18th Sept. 2012, Vancouver Canada

⑦ Kato, A., Watanabe, M., Yamaguchi, Y., Kobayashi, T., Monitoring forest biomass change by ALOS PALSAR and airborne lidar, ForestSAT 2012, 12th Sept. 2012, Oregon USA

⑧ Kato, A., Watanabe, M., Yamaguchi, Y., Kobayashi, T., Detecting seasonal change of deciduous trees using ALOS PALSAR and airborne lidar, IEEE IGARSS 2012, 24th July 2012, Munich Germany

⑨ 加藤 顕、衛星データのグラントゥルースとしてのレーザーデータ利用、第52回(平成24年度春季)学術講演会、日本リモートセンシング学会、2012年5月24日 東京大学生産技術研究所

⑩ 加藤 顕、小林達明、地上レーザーを用いた木質バイオマス計測、平成24年度年次学術講演会、日本写真測量学会、2012年5月22日 東京大学生産技術研究所

⑪ 阿部 航、加藤 顕、スギ材積算における溝腐病の影響について、第123回日本森林学会、2012年3月29日、宇都宮大学

⑫ 加藤 顕、地上型3Dレーザーキャナーによる木質バイオマス計測、第123回日本森林学会、2012年3月28日、宇都宮大学

⑬ Kato, A., Kobayashi, T., Umeki, K., Quantifying ecosystem services using laser remote sensing, 日本生態学会第59回大会、第5回東アジア生態学会連合大会 2012年3月19日、龍谷大学

⑭ Kato, A., Moskal, L.M., Kobayashi, T., Efficient and accurate measurement of stem volume using terrestrial lidar, AAG Annual Meeting, 28th Feb. 2012, New York Sheraton Hotel, New York USA

⑮ Kato, A., Moskal, L.M., Kobayashi, T., Effect of scan coverage on stem diameter measurement using terrestrial lidar, Silvilaser 2011, 17th October 2011, University of Hobart, Australia

⑯ 加藤 顕、小林達明、有村恒夫、福田聖一、法面緑化地での車載レーザー利用のためのシミュレーション開発、第42回日本緑化工学会大会、2011年9月12日 千葉大学

⑰ Kato, A., Watanabe, M., Kobayashi, T., Yamaguchi, Y., Iisaka, J. "Monitoring Forest Management Activities Using Airborne Lidar and ALOS PALSAR" IGARSS 2011, 27th July 2011, Vancouver Convention Center, Canada

⑱ 加藤 顕、小林達明、有村恒夫、福田聖一、車載レーザーキャナーを用いた植生状況

把握、平成23年度年次学術講演会、日本写真測量学会、2011年5月24日 東京大学生産技術研究所

⑲ 加藤 顕、小林達明、航空機レーザーとハイパースペクトルを用いた病害木判定技術の開発、平成23年度年次学術講演会、日本写真測量学会、2011年5月24日 東京大学生産技術研究所

⑳ Kato, A., Kobayashi, T., Moskal, L.M., Evaluating Ecosystem Services of Urban Forest using LiDAR, AAG Annual Meeting, 13th April 2011, Seattle Convention Center, Seattle USA

[産業財産権]

○出願状況(計4件)

名称：魚眼画像データ作成プログラム及びLAI算出プログラム

発明者：加藤 顕

権利者：千葉大学

種類：特願

番号：PCT/JP2013/59456号

出願年月日：2013年3月29日

国内外の別：海外

名称：魚眼画像データ作成プログラム及びLAI算出プログラム

発明者：加藤 顕

権利者：千葉大学

種類：特願

番号：2013-020951号

出願年月日：2013年2月5日

国内外の別：国内

名称：三次元測定対象物の形態調査方法

発明者：加藤 顕

権利者：富士設計株式会社、千葉大学

種類：特願

番号：2011-227165号

出願年月日：2011年10月14日

国内外の別：国内

名称：表面再現方法及び表面再現プログラム

発明者：加藤 顕

権利者：千葉大学

種類：特開

番号：2011-123776号

公開年月日：2011年6月23日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 顕 (KATO AKIRA)

千葉大学・大学院園芸学研究科・助教

研究者番号：70543437