

## リモートセンシングによる光合成研究のための樹冠形状の3次元化

東京大学 生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター  
遠藤 貴宏\*

### 1. はじめに

リモートセンシングは、対象物からの電磁波エネルギーである反射あるいは放射を計測することによって、対象の大きさ、形、物性を取得する技術である。具体的には、対象から返ってくる分光特性によって、分類、定性、定量を行っている<sup>1)</sup>。

形状の計測に関するリモートセンシング技術は、近年、様々な電磁波エネルギー帯、リモートセンサの組合せにより、個体スケールから広域スケールまでの計測が可能になりつつある。広域スケールの場合、2006年1月24日に日本が打ち上げた陸域観測衛星 ALOS (Advanced Land Observing Satellite) に搭載されたパンクロマチック立体視センサ (PRISM) は、広域の地表面形状の情報を取得可能である<sup>2,3)</sup>。また、現在全球レベルのデータが利用できるデータセットとしては、スペースシャトルに積み込んだ C バンドレーダを利用して作成された 90 m の空間解像度の SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission) と Terra 衛星に搭載された ASTER センサ (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) の前方視、直下視、後方視の3方向の画像を利用して作成された 15 m の空間解像度の ASTER 全球3次元地形データ (ASTER GDEM) がある。また、航空機スケールの場合、従来からある航空写真による3次元化とは別に、レーザ光線を測距装置として利用した LiDAR (Light Detection And Ranging) が利用でき、植生や個体の形状を計測することが可能である<sup>4,5)</sup>。ただし、画像取得型のリモートセンサデータは、特に、広域スケールの場合、地表を計測することが難しいため DEM (Digital Elevation Model) ではなく地上を被覆している対象の DSM (Digital Surface Model) であると考えた方がよい。

広域スケールの形状の推定ならば、上述した画像取得型のリモートセンシングデータが利用できる。しかしながら、個体スケールにおいて、分光特性を利用しクロロフィルや窒素などの生化学成分の定性、定量を行う場合や立地環境ごとに樹冠領域を推定する場合には、植生の形状の影響を考慮しなければならない。

そこで、本稿では、個葉から個体、群落まで光合成に関する変数をスケールアップするために必要な植生の形状に関するリモートセンシング研究に注目する。はじめに、形状が分光特性に与える影響を明らかにした上で、能動型センサ<sup>1)</sup>である航空機 LiDAR による植生の形状に関する筆者の研究事例を述べる。

### 2. 形状の影響

個葉スケールのリモートセンシングでは、分光特性

表1 AOTF型ハイパースペクトルイメージャの主要諸元

General	
Wavelength	500 ~ 1000 nm
Number of bands	101 bands (5 nm is selected)
Wavelength resolution	5 nm >
Exposure time	Variable
Optical system	
Lens mount	Nikon AF mount
Lens	Ai AF Nikkor ED 14mm F2.8D, (Nikon, Japan)
Measurement distance	1m ~ ∞
AOTF	
Type	TVA-100 model, (Brimrose corp., USA)
Wavelength resolution	Variable 5 nm (800 nm)
CCD camera	
Type	BS-30L model, (Bitran corp., JPN)
Field of view	34° (Variable)
CCD element	Sony ICX074AL, (SONY, Japan)
Pixels@Lines	1360@1024
Bits	16 bits

\* 連絡先 E-mail: tendo@iis.u-tokyo.ac.jp

<sup>1)</sup> 能動型センサ (active sensor) とは、対象物に向けて電磁波を照射し、対象物で反射された電磁波を収集するセンサ。

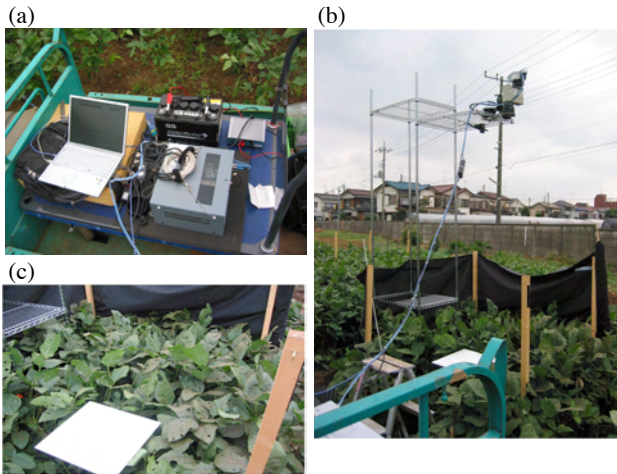


図1 ハイパースペクトルイメージ装置の概観とダイズ群落の計測概況

(a) ハイパースペクトルイメージ装置の概観、(b) ダイズ群落の計測概況、(c) ダイズ群落の生育状況。ダイズ群落が風で揺れるのを防ぐために、黒い布でダイズ群落を囲った。

からクロロフィルや窒素などの生化学成分の定性、定量を行っている。しかしながら、個体や群落スケールでは、形状の影響により生化学量とは無関係に分光特性が変化するため、個葉スケールで推定された分光特性と生化学量との関係をそのまま利用することはできない。

そこで、形状の分光特性への影響を時空間的に解析するため、鉛直上方からの計測が容易かつ形状が複雑な農作物としてダイズ (*Enrei* (艶麗)) を選び、研究室で開発したハイパースペクトルイメージ装置を用いて、2004年11月4日に西東京市にある東京大学農学部農場のダイズ群落で分光特性の時空間変化を計測した。計測対象としたダイズ群落は、7月4日に播種し、個体齢は131日、高さは約90 cmであった。利用したハイパースペクトルイメージ装置は、音響光学チューナブルフィルタであるAOTF (Acousto-Optic Tunable Filter) を分光素子として利用した装置である。AOTFに超音波振動を与えると回折する波長を変化させる特徴があり、本装置は、500 nm から1000 nm までの波長帯を5 nm 間隔で対象物の分光特性を画像として計測することができる。表1にハイパースペクトルイメージ装置の主要諸元を示す。図1 (a) にハイパースペクトルイメージ装置の概観、図1(b)にダイズ群落の計測概況、図1 (c) にダイズ群落の生育状況を示す。

計測として、ダイズ群落を8時30分から約1時間ごと

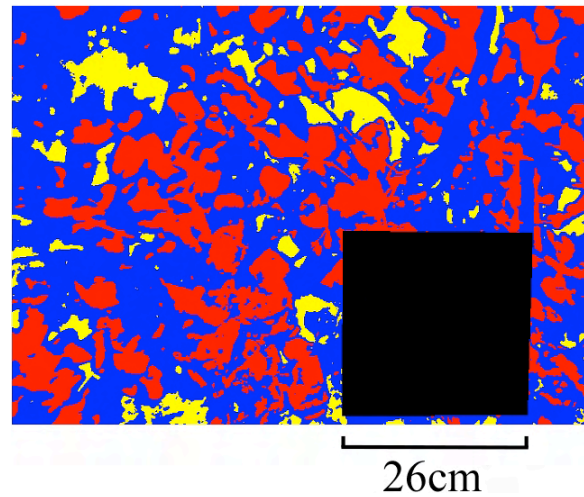


図2 SAM法によりミクセル分解を行った時刻12:30における光環境別の葉領域および影と土壌領域の空間分布結果の一例。

赤色は、直達光が当たった領域、青色は、直達光が当たらない領域、黄色は、影と土壌の領域を示す。計測値を反射率へ変換するために用いた標準白色板の領域を黒色で示す。

に定点観測を行い、分光特性を面的に取得した。ただし、16時を過ぎると太陽高度が低くなったため、16時10分まで計測した。解析として、はじめに、ハイパースペクトルイメージ装置で取得された放射量未補正の値を正規化するために、ダイズ群落とともに計測した標準白色板の値を用いて反射率へ変換した。次に、ミクセル分解手法の一つであるSAM (Spectral Angle Mapper) 法を用いて、解析領域の画素を直達光が当たる画素、直達光が当たらない画素そして影と土壌の画素の3つに分類した。その後、分類区分ごとに全画素中に占める画素数の割合を計算し、得られた結果をそれぞれの面積率とした。一方、分類区分ごとに各画素の分光特性の平均を計算し、それぞれの平均分光反射率とした。図2に時刻12時30分における光環境別の葉領域および影と土壌領域の空間分布結果の一例を示す。図3にそれぞれの面積率の時系列変化と太陽高度との関係、そして、図4に時刻12時30分におけるダイズ群落の葉領域の光環境別平均分光反射率と影と土壌領域の平均分光反射率を示す。

図2が示すように、直達光が当たる葉領域、直達光が当たらない葉領域そして影と土壌の領域は、空間的に不均一に存在した。しかしながら、図3が示すように、太陽高度がピークとなる11時半付近から2時間程度、それぞれの面積率の変化は、小さいことが分かった。この結果は、直達光の当たる葉領域と当た

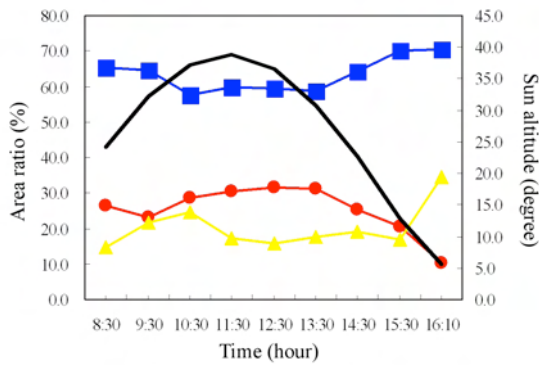


図3 ダイズ群落における光環境別葉領域および影と土壤領域の面積率の時系列変化と太陽高度との関係

●：直達光の当たる葉領域の面積率、■：直達光が当たらない葉領域の面積率、▲：影および土壤領域の面積率、—（実線）：太陽高度。

らない葉領域は、時空間的に変化するが単位面積当たりの割合として考えるとほぼ一定と仮定できる時間帯が存在することを示している。つまり、西東京市の農場におけるダイズ群落の形状は、特定の日射条件（時刻）に対して卓越した形状をしているのではなく、日中の日射を平均的に利用できる形状をしていると考えられる。一方、葉の日射状況には群落の形状が大きく影響するため、生化学成分の量に大きな変化が起こっていないにも関わらず葉領域の分光特性は大きく変化する（図4）。一般的に、分光特性から生化学量を推定する際に用いられる方法は、特定波長における分光反射率の比演算値、分光反射率の一次もしくは二次微分値が利用される場合が多い<sup>6,7)</sup>。しかし、この結果は、受動的センサ<sup>2)</sup>を利用し個体や群落スケールの計測をする場合、個葉スケールで成り立っていた分光特性からクロロフィルや窒素などの生化学成分を定性、定量する推定式を利用できないことを示している。そのため、形状の影響による分光特性の変化を考慮しなければ、分光特性から生化学成分の定性や定量が困難であることを示している。

従って、個葉スケールの知見に基づいて、個体や群落スケールの光合成に関する研究を進めるためには、植生の形状を取得する技術が必要であることが分かる。

### 3. 航空機 LiDAR 計測

空間情報計測分野において、広域の対象物の形状を

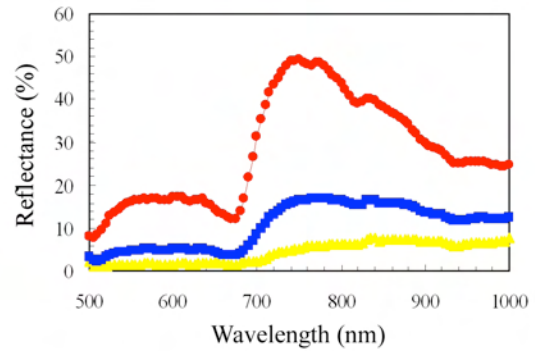


図4 時刻12:30におけるダイズ群落の葉領域の光環境別平均分光反射率と影と土壤領域の平均分光反射率

●：直達光の当たる葉領域の平均分光反射率、■：直達光が当たらない葉領域の平均分光反射率、▲：影と土壤領域の平均分光反射率。

計測するリモートセンシング技術は、間接的手法と直接的手法の2つがある。間接的手法は、異なる計測位置から同一対象を計測した2枚の画像を用いて3次元化する方法であり、直接的手法は、レーザ光線のような測距技術を用いて3次元化する方法である<sup>1,9)</sup>。

形状が複雑な植物をより詳細に3次元化する場合、直接的手法が間接的手法より適している。何故ならば、2章で述べたように、間接的手法に分類される人工衛星もしくは航空機搭載型の受動型センサは、計測時に太陽光などの光源を必要とする。そのため、対象が植生のような複雑な形状の場合、計測時の幾何学的条件と植生の形状により影などの不可視領域が発生し、その領域の3次元化ができないという問題が発生する。例えば、日本のスギ林などの針葉樹林の場合、樹冠の北側が不可視領域となる。一方、直接的手法である能動型センサ、特に、レーザ光線を利用する地上型のレーザプロファイラや航空機LiDARは、近年、単位面積当たりに多くのレーザ光線を照射できるようになり、高速、高精度かつ広域的に植生の形状を取得することができるようになりつつある<sup>9)</sup>。航空機LiDARは、GPSと慣性計測装置により位置と姿勢情報が既知のとなったレーザ発信機からレーザ光線を対象物に向けて照射し、対象物で反射して戻ってきた散乱光を受信機で受信する。受信した散乱光の反射強度が設定した閾値を超えた場合、その時刻および位置と姿勢情報とから、空間上の対応する位置に点を生成する<sup>9)</sup>。図5にレーザパルス密度

<sup>2)</sup> 受動型センサ (passive sensor) とは、太陽光の反射および対象物から放射される電磁波を収集するセンサ。

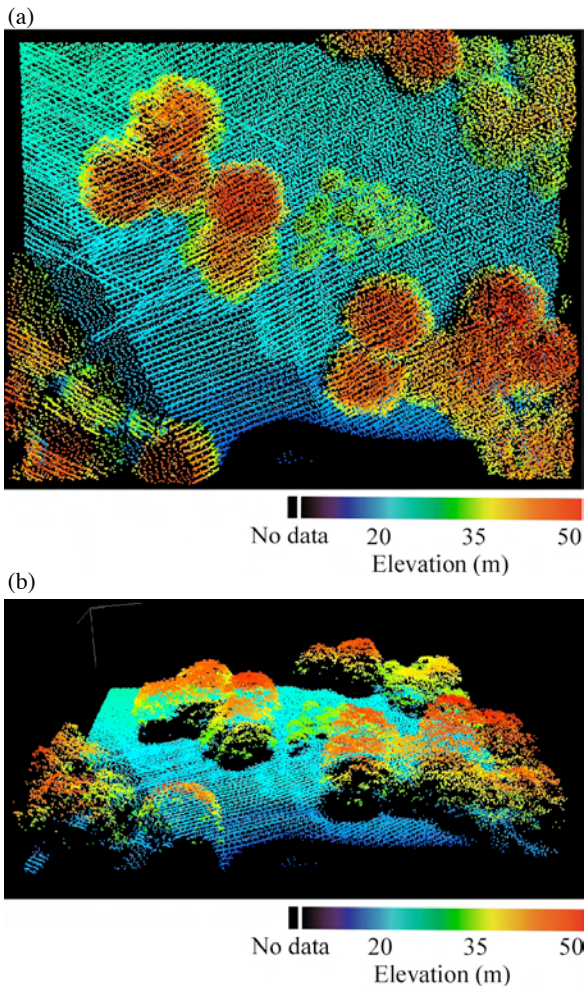


図5 航空機 LiDAR による代々木公園の計測結果の一部  
 レーザパルス密度は、6 点/m<sup>2</sup>。(a) 鉛直方向からの視点 (方位角 0 度、仰角 -90 度)、(b) 斜めからの視点 (方位角 0 度、仰角 -30 度)。点群の色は、標高を示す。

6点/m<sup>2</sup>で計測した代々木公園の計測結果の一部を示す。

図5が示す通り、樹冠領域には受動型センサで発生するような不可視領域は存在せず、レーザ光線が樹冠表面と地上から返ってきているのが分かる。また、レーザパルス密度 6 点/m<sup>2</sup>でも、個体の樹冠形状が分かる。高レーザパルス密度で計測した航空機LiDARデータは、詳細な樹冠形状の再構築ができることから、光合成の場としての樹冠領域を推定するだけでなく、光合成に必要な日射量のシミュレーションのための入力変数や分光特性の補正のための形状情報として利用できる可能性がある。

#### 4. 樹冠形状に関する研究

航空機LiDAR計測によって得られた点群データを樹冠領域や形状情報として利用するためには、樹冠上の

点群を面に変換する必要がある。複数点からの面の作成は、一般的に TIN (Triangulated Irregular Network) 手法を用いて DSM 化される。例えば、群落として特定期間の樹冠領域に当たる積算日射量ポテンシャルを推定する目的ならば、この TIN 化された DSM データに対して、時系列レイトレーシング法もしくはラジオンティ法を適用することにより求めることできる。一方、個体スケールで積算日射量ポテンシャルを推定するためには、まず、個体の樹頂点を探索し、個体の樹冠領域を決定する必要がある。個体の樹頂点と樹冠領域を決定する手法には、画像と LiDAR データとを利用する手法、画像のみを利用する方法、LiDARデータのみを利用する方法の3つがある<sup>10-12)</sup>。ただ、実際の処理としては、入力データを写真のようなラスタデータに変換し処理する手法とベクターデータであるLiDARの点群をそのまま利用する方法の2通りがある。ラスタデータとして処理する手法は、航空写真もしくはLiDARデータをはじめにラスタライズし、その後、ローカルマキシマムフィルターを適用し個体の樹頂点を推定する。次に、樹頂点をシード点としてウォーターシェッド法を適用し領域分割することによって樹冠領域を決定する。一方、ベクターデータとして処理する手法は、点の空間分布と高さ値を利用して、個体の樹頂点を推定する。次に、樹頂点付近の単位面積当たりのレーザパルス密度の変化もしくはTINの傾斜の変化を計算することによって樹冠領域を決定する。

どちらの手法も、樹頂点の推定精度は高いが、樹冠領域の推定において、樹冠の大きさが計算領域内で均一ならば精度は高く、樹冠の大きさが不均一だと精度は低いという傾向がある<sup>12)</sup>。この原因は、推定した樹冠のマージ方法が確立していないことに由来する。例えば、小さい樹冠を精度高く推定しようとすると、大きな樹冠に存在する枝の固まりを樹冠として抽出するため過大推定となる。その一方、大きな樹冠を正確に推定しようとすると、小さな樹冠が抽出されず過小推定となる。ただ、科学技術の進歩に伴い単位面積当たりのレーザパルス密度がより増加することが予測されているため、今後、樹冠形状がより詳細に計測されるはずである。そのため、樹冠領域を推定する精度も向上することが期待される。

#### 5. 樹冠形状近似

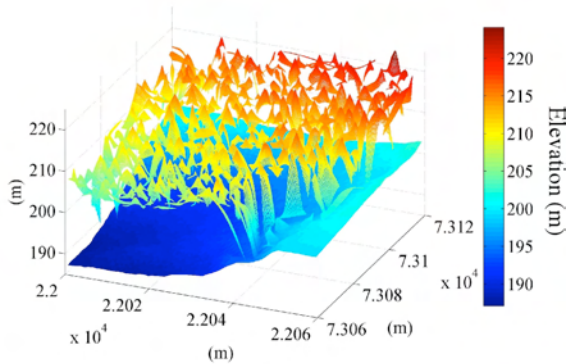


図6 LiDARデータから推定したスギ林の南東側林縁木の3次元樹冠形状近似結果と数値標高モデル (DEM)

図は、斜めからの視点 (方位角 20 度、仰角 -35 度)。x 軸、y 軸の数値は、ユニバーサル横メルカトル座標系での位置を示す。z軸の数値は、標高を示す。

前章で述べた通り、個体の樹冠領域を精度高く推定する技術はまだ開発段階であるが、今後、科学技術の進歩に伴って樹冠領域を精度高く推定できる可能性が高い。そのため、近い将来、立地環境ごとに個体スケールの樹冠形状を評価できる可能性がある。そこで、樹冠形状を数学的に3次元近似することによって、立地環境ごとに個体スケールの樹冠形状を客観的に評価できるか検討を行うため、2004年8月11日から12日にかけて青森県七戸町にある林齢44年のスギ林をレーザーパルス密度 11.1 点/m<sup>2</sup> という条件で計測を行った。図6にスギ林の南東側の林縁木に注目して個体ごと樹冠形状を3次元近似した結果を示す。樹冠形状の3次元近似は、Shengらが提案した円錐型に適した樹冠形状近似モデルを修正した式を利用した<sup>13)</sup>。

スギ林南東側の樹冠形状は、地表面まで樹冠が達している一方、林内の樹冠は小さい (図6)。林縁木の樹冠形状から、林内に風が侵入しないよう南東側の樹冠が厚くなるように施業が行われていることが推察される。この推察は、スギ林を管理している青森県十和田市上十三地区森林組合で行った施業方法に関するヒアリング結果と一致していた。

まだ開発段階ではあるが、個体ごとの樹冠形状近似結果は、葉領域の総面積や任意の風向に対する樹冠投影面積などを推定できるだけでなく、立地環境、樹冠形状および樹高との関係に基づいた成長量予測や風倒危険度予測のための入力変数になる可能性があるかと期待している。

## 6. おわりに

現在、我々が利用できるリモートセンシングセンサは、実験室スケールから全球スケールまでほぼ揃っているとと言える。個葉スケールおよび大陸スケールにおける光合成に関する変数の推定手法は確立されたと考えられる一方、形状の影響を考慮しなければならない個体および群落スケールの手法は、まだ検討する必要がある。近年、形状を取得する手法は、科学技術の進歩に伴って急速に進化している。まだ、世界の数カ国に限定されるが、航空機LiDARについてもウェーブフォーム型という対象からの反射強度を連続的にスペクトルとして計測可能な新しいセンサの利用が可能になりつつある。このセンサは、樹冠内部の構造を計測できると期待されており、樹冠の厚さが航空機LiDARで計測可能な時代が到来しつつあるのかも知れない。今後は今以上に、詳細かつ広域の立地環境に即した陸域生態系に関する変数の推定が求められるであろう。そのためには、形状の影響を考慮した推定手法の開発が必要であり、そのためにも生態系研究分野と空間情報計測分野との更なる協働を期待したい。

## 謝辞

岡山県農林水産総合センター 生物科学研究所植物レドックス制御・研究グループ 小川健一博士には、本誌に出版する機会を与えていただいた。記してここに感謝の意を表します。

Received November 16, 2010, Accepted November 26, 2010, Published December 31, 2010

## 引用文献

1. 日本リモートセンシング研究会編 (2004) 改訂版 図解リモートセンシング, 社団法人 日本測量協会, 東京.
2. 田口仁, 遠藤貴宏, 沢田治雄, 安岡善文 (2009) ALOS/PRISMによる森林域におけるDigital Canopy Modelの抽出, 写真測量とリモートセンシング 48, 78-81.
3. 真屋学, 新名恭仁, 内田修, 村田雄一郎 (2009) ALOS/PRISM画像の標定精度と地物判読の評価, 写真測量とリモートセンシング 48, 59-63.
4. 平田泰雅 (2007) 航空機レーザー扫描仪によ

- る森林計測とその動向, 森林計画誌 41, 1-12.
5. 田口仁, 遠藤貴宏, 安岡善文 (2008) LiDAR点群データを用いた樹冠形状モデルに基づく単木樹冠抽出および樹高推定, 日本リモートセンシング学会誌 28, 331-341.
  6. 藤原栄朋, 遠藤貴宏, 米川智司, 安岡善文 (2005) ハイパースペクトルイメージング計測を用いた植物の水ストレスの評価手法に関する研究, 生産研究 57, 4, 390-393.
  7. 遠藤貴宏, 米川智司, 安岡善文 (2001) ハイパースペクトルイメージングを用いた個葉の生化学パラメタの面的推定に関する研究, 日本リモートセンシング学会 第31回学術講演会論文集, 245-246.
  8. 斉藤和也 監修, (2008) 図解 航空レーザ計測, 財団法人 日本測量調査技術協会, 東京.
  9. 葛岡成樹, 新井康平 (2001) レイトレーシングを用いた樹木モデルの評価, 日本リモートセンシング学会 第31回学術講演会論文集, 13-14.
  10. Koch, B., Heurich, U., Weinacker, H. (2006) Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72, 357-363.
  11. Mei, C., Durrieu, S. (2004), Tree Crown Delineation from Digital Elevation Models and High Resolution Imagery, *Proc. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXVI 8/W2. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8W2/mei.pdf> (30 April 2010)
  12. Endo, T., and Sawada, H. (2010) Development of an Individual Tree Crown Delineation Method using LiDAR Data, *Proc. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXVIII 8, 675-678.
  13. 田口仁, 遠藤貴宏, 安岡 善文 (2008) LiDAR点群データを用いた樹冠形状モデルに基づく単木樹冠抽出および樹高推定, 日本リモートセンシング学会誌 28, 331-341.

### 3D Reconstruction of Crown Shapes for Photosynthesis Research using Remote Sensing

Takahiro Endo\*

International Center for Urban Safety Engineering, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo