レンジ画像による孤立木樹冠の高精度計測

星 仰¹⁾・大谷秀一¹⁾

1) 茨城大学工学部 hoshi@cis.ibaraki.ac.jp

摘要: 従来、奥行き情報を抽出するのに2測点から観測していたが、計測用レーザスキャナは対象物体の3次元データを単測点から抽出できる特徴を備えた装置である。この装置を用いて複測点から孤立木葉の表面積とその容積を高精度に算出することを試みる。レーザスキャナより抽出されたレンジ画像から木の断面図を作成してイチョウ (*Ginkgo biloba* Linne) の断面積を求める。また、イチョウのキャノピーとその容積を樹冠直径と樹冠長で換算したときの係数値を示す。
キーワード: レーザスキャナ, レンジ画像, イチョウ, キャノピー, 容積測定, 樹冠測定

1. はじめに

能動式センサのプロファイラは航空機用のものであったが、近年地上用プロファイラの開発がなされ、初期にはVision分野で研究されてきた¹⁾。人の目にやさしい装置が生産されるようになった頃から、わが国では建造物⁴⁾、都市空間²⁾、地上測量⁷⁾への応用がなされている。この地上用プロファイラは測量学分野の分類ではノンミラー方式の測距儀になるが、プロファイラは高速走査式のため、前方の調査物体に対して格子状にデータサンプリングでき、かつ各画素単位に3次元位置情報を抽出できる特徴がある。このため従来の測量では1点ごとに観測したデータを入力操作して、かつその間にあるオブジェクトの位置を補間法で近似しなければならなかった。本研究では、野外において地上用プロファイラ装置(レーザスキャナ)とコンピュータを連動させ、リアルタイムで高速処理にてレンジ画像を生成するシステムを用いる。このシステムを用いると、今まで測定困難であった不定形物体の計測が可能であることから、森林資源分野に役立てることを目的とする。この目的のために歴史的に希少価値のあるイチョウ (*Ginkgo biloba* Linne) を選定する。3次元データが収集でき、かつ計測評価が可能のように孤立木を計測対象に選定する。そして、イチョウの葉で覆われている表面積の算出と全葉で包含される空間の容積の高精度算出を試みる。この孤立木全葉の表面積と容積の算出誤差を求めることにより、レンジ画像利用の実用性が明らかにでき、この実験計測の孤立木の樹冠直径や樹冠長と関係づける。

2. 地上用プロファイラ

航空機用プロファイラは、計測波長に当初可視光線から長い波長の電波までを用いていたが、近年赤外線レーザーレーダが使用される傾向にあり、地上用プロファイラに応用され微弱なレーザーレーダ光でも数100 mの測距が可能になってきている。地上用プロファイラは測量分野の測距儀のようにミラーを使用して高精度化と遠距離計測化も可能であるが、簡便な利用として前方にミラーを設置することなく、そのオブジェクトまでの距離と反射率を計測することができる。また、測距儀が単点単位の計測であるに対して、プロファイラは走査式のためレーザーレーダ光の往復の時間から斜距離 d が算出され、レーザーレーダ光の発信方向から水平角 α と鉛直角 β を算出できる。この α , β , d を地上の3次元座標系にデータ変換することによって、3次元座標 x , y , z と反射率 μ が求められる。現在市販されている地上用プロファイラはレーザスキャナともいう。このレーザスキャナを測定対象距離に応じて近距離計測と遠距離計測に分類することができる。この研究では野外のオブジェクト計測を目標にしているので、市販されている主な遠距離計測のレーザスキャナ装置の仕様を表1にまとめた。

物体調査計測のスキヤニング角(走査角)は、これまでの写真や画素を念頭に置いてあり $40^\circ \times 40^\circ$ 程度が標準であるが、 $80^\circ \times 360^\circ$ の広域測定用もある。計測時間は1フレーム当たり20秒程度の高速なものから15分程度の低速・高精度の機種がある。このため特殊な場合を除き、計測対象は静的物体に限定される。レーザーレーダ光の強度が強いと肉眼に危険なことから、微弱レーザーレーダでの計測研究が行われ1990年代後半になって危険性の少ないレーザーレーダ装置が市販されるようになってきた。レーザークラスは人間の眼に入っても危険のないものをクラス1として眼に危険なクラス2, 3もあるが、クラス3になると遠距離計測が可能となる特徴がある。測定誤差も、 $e = \pm 5 \sim \pm 25 \text{ mm}$ で3次元位置を計測できる。測距用波長帯は緑から近赤外の範囲の波長帯が実用化している。現在のところ近赤外波長帯が、100~1,000 mまでの遠距離計測に適している。電源部は室内用と野外用とがある。野外用の12Vは車のバッテリーが使用できる。レーザスキャナの本体は10~21 kgの範囲で軽量化が進んでいる。

表-1 主な地上型レーザスキャナの仕様

メーカー	パルステック	オブテック	サイラック	リーグル	リーグル	リーグル
形式	TDS-130L, f	ILRS-30	Cyrax2,500	LPM-25HA	LMS-Z210	LMS-Z420
測定範囲 [m]	3~10, (30)	~350	1.5~50	2~80	2~350	2~1,000
測定精度 [mm]	±5~±10	---	±4	±8	±25	±10
垂直走査 [度]	40, 180	40	40	±150	80	80
水平走査 [度]	90, 360	40	40	±180	333	360
レーザ波長	赤 (685nm)	---	緑	近赤外	近赤外	近赤外
レーザクラス	2, 3R	---	2	1	1	1, 3R
電源 [DC]	100V	---	---	11~18	11~18	12~28
重量 [kg]	12	12	20.5	9.5	13	14.5
寸法 [cm ³]	67×24×35	30×30×20	40×33×63	25×30×37	43.5×21φ	46.3×21φ

本研究の計測実験には、重量の軽い運搬性、中距離用（計測範囲：2~350 m）で眼にやさしいクラス 1 のレーザミラースキャナとして Rieggle 社製の Laser Mirror Scanner LMS-Z210 型を選定した。この LMS-Z210 レーザミラースキャナは、電子光学式の距離測定器とビームスキャンニング機構によって正確な距離測定に基づいた物体の表面を画像計測する装置である。距離測定モジュールは赤外波長のパルスの飛行時間測定を駆使して、赤外パルスを送信する。この赤外パルスは平行レーザ光にしてから投光レンズを通して発射される。前方のオブジェクトのターゲット面で反射した一部が反射信号として受光レンズを介して受光フォトダイオードにヒットする。送信パルスと受信パルスの時間間隔 Δt を水晶クロック周波数でカウントする。計算された計測距離データは出力部に渡される。

レーザミラースキャナの機構の内部操作は、距離計測のために平行レーザ光の方向を変化させることである。スキャンニング機構は高速に走査し、標準で 1 秒当たり 20 ライン走査できる性能を有し 1 ラインに数 100 の画素が取り込めるように設計されている。

画素で構成する画像は、計測されたラインで形成される。この画像は濃淡画像で表示され、画素単位に 3 次元位置測定値を備えているためレンジ画像、距離画像、3 次元画像（3D イメージ）とも呼ばれている。走査駆動とその範囲は、標準設定の場合、野外オブジェクトに向かって右上から縦下方向にスキャンを開始し、仰角+40° から俯角-40° を 1 走査で行い右から左までの横方向に 444 走査を行う。縦 1 走査当たり 444 測定するため約 20 秒で 1 フレーム 444×444 (= 197,136) 点のサンプリングを行うことができる⁸⁾。

また、RBG 画像を別途抽出するセンサが内蔵されているので、レンジ画像抽出と同時に RBG 画像も抽出できる。

3. 孤立木葉の表面積と容積の算出法

樹木の形状は種別によって異なるが外形を定めるには胸高直径（枝振り）、樹冠、樹高などを要素としている。一般の樹林は隣接木があり、樹木形状を多方向から観測することが困難な場合が多く、一方向からの外形を使用すること多い。

近年の地球環境問題の 1 つに CO₂ の分布量の増大が問題となっている中で森林の存在の重要性が再認識されており、樹木の高精度計測法が不可欠である。これらの状況を踏まえ、この研究では樹木観測地点を 3 方向から計測し、樹木を非対称物体計測として取り上げることにした。次に、各方向からの樹木の外形から樹木形状要素を算定するが、レンジ画像の特性を生かして撮影方向の x 軸に対して Δx ごとに樹木をスライスした断面画像を作成し、これらの各断面面積 A_i ($i=0 \sim n$) から、樹木の表面積 S とその全葉とその内部の空間を含む容積 V を算定する。各断面画像では葉の外形を閉合させることから、式(1)のトラバース測定の倍横距法を適用する。また、表面積 S は外形エッジで結合される曲線を $f(x)$ としたとき、表面積 S は式(2)から求められる。さらに、 $f(x)$ で囲まれる容積 V は、式(3)となる。

$$2A_i = \sum (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i) \quad (i=0, 1, \dots, n) \dots (1)$$

$$S = 2\pi \int_a^b f(x) \sqrt{1 + \{f'(x)\}^2} dx + A_0 \dots (2)$$

$$V = \int_a^b f(x) dx \dots (3)$$

上式の S , V は回転体の関係式のため左右対称のものに適用されるものであるから、断面形状での面積 A_i ($i=0 \sim n$) は非対称で算出し、これを同値の円形に変形して、半径 r_i を算出してから円錐台の関係式を適用する。この変換以外にも等高線法や角柱近似なども考えられるので、円錐台変換以外の算出も行い、考察で評価する。具体的な容積算定には以下の展開式(4)~(6)を用いる。

$$V_r = \frac{l}{3} \sum_{i=0}^{n-1} (s_i + s_{i+1} + \sqrt{s_i s_{i+1}}) \dots (4)$$

$$V_k = \frac{l}{3} \{s_0 + s_n + 4(s_1 + s_3 + \dots + s_{n-1}) + 2(s_2 + s_4 + \dots + s_{n-2})\} \dots (5)$$

$$V_c = \frac{l}{2} \{s_0 + s_n + 2(s_1 + s_2 + \dots + s_{n-1})\} \dots (6)$$

$$S_{mean} = \frac{1}{2} \{s_1(\theta_1 + \theta_3) + s_2(\theta_1 + \theta_2) + s_3(\theta_2 + \theta_3)\} \dots (7)$$

$$V_{mean} = \frac{1}{2} \{v_1(\theta_1 + \theta_3) + v_2(\theta_1 + \theta_2) + v_3(\theta_2 + \theta_3)\} \dots (8)$$

イチョウを1方向から観測すると約半分の表面積と容積が算出されるので、各方向から求めた S_i ($i=0\sim3$) と V_i ($i=0\sim3$) から式(7), (8)の値により、孤立木全葉の総表面積 S_{mean} と総容積 V_{mean} を近似算定する。

4. レンジ画像による孤立木の計測実験

イチョウの孤立木を3方向から調査して、全方位からの形状を把握する。レーザスキャナを設置する位置を P_{0i} ($i=1\sim3$) とするとオブジェクトまでの距離 D_i ($i=1\sim3$) と撮影方向への夾角 θ_i ($i=1\sim3$) は、図-1, 表-2 のようになる。

測点 P_{0i} からレンジ画像を抽出するには、レーザスキャナ装置を三脚台に設置して円形気泡管でほぼ水平に保ち、次に、オブジェクトの樹木がほぼ中央に来るように撮影基準を決めてからスキャンを開始する。各画素にはオブジェクトの反射率 μ と距離 (x, y, z) の情報を保持する。測点から規則的にサンプリングすると直線上のものが遠近によっては多少歪みを生じてくるので、平面幾何関係を保持するには2次元画像に変換する。これをレンジマッピングという。一般にCADで用いる正面図、立面図、側面図を作成できる平面投影アルゴリズムを開発する。この研究ではレンジ画像は抽出方向に x 軸を定める計画であるから、 yz 平面のレンジマップ (u, v) 系を準備する。レンジマップが各軸方向に断面抽出が容易である特徴を生かして^{1,2)}、全葉の空間を x 軸方向に Δx ごとにスライス画像とし、葉の外形の輪郭線を抽出する。

5. レンジ画像計測結果

レーザスキャナを用いて、3方向からの測長 $OP_0 \approx 21.7$ m からイチョウを画像計測し、樹木の樹冠直径 l_y 、樹冠長 l_z を求めた。この結果を表-3に示す。この孤立木(イチョウ)の地上1.2 mでの実測周長は $l=2.07$ m、胸高直径は $d_r=66$ cmである。

次に、測点 P_{0i} から樹冠外形と接する位置と孤立木中心の偏差を参考にしてスライス幅は $\Delta x=20$ cm に定めた。そして、画像処理によって図-2に示したスライスレンジ画像が得られた。この画像から図-3のような輪郭抽出をして、その面積 A_i を倍横距法の式(1)より算出した。

この結果と式(2)の展開式を用いて、各測点ごとにイチョウの表面積 S_i ($i=1\sim3$) を算出した。さらに、式(4)~(6)

図-1 測点の配置

表-2 オブジェクトとレンジ画像装置の設置位置の関係

測点	撮影距離	夾角
P_{01}	$P_1=23.00\text{m}$	$\theta_1=75^\circ$
P_{02}	$P_2=21.80\text{m}$	$\theta_2=135^\circ$
P_{03}	$P_3=20.40\text{m}$	$\theta_3=150^\circ$

表-3 イチョウ葉の表面積と容積

測点	測長 l_x	樹冠直径 l_y	樹冠長 l_z
P_{01}	23.0m	5.16m	11.17m
P_{02}	21.8m	5.97m	11.44m
P_{03}	20.4m	5.03m	11.58m
平均	21.7m	5.39m	11.40m

図-2 スライスレンジマップ

図-3 スライス断面の輪郭抽出

表-4 イチョウの表面積と容積

測点	表面積 S [m^2]	円錐台近似 V_r [m^3]	等高線法 V_k [m^3]	角柱近似 V_c [m^3]
P_{01}	31.57	66.81	66.93	67.33
P_{02}	35.50	82.58	82.73	82.67
P_{03}	33.32	69.94	70.07	69.34
平均	33.47	73.11	73.24	73.11

を用いて円錐台近似容積 V_r 、等高線法による容積 V_k 、角柱近似容積 V_c を求めた。この結果を表-4に示す。

なお, P_{0i} ($i=1\sim3$) における S , V 値と式(7), (8)から孤立木イチョウの総表面積 $S=66.82\text{ m}^2$, 総容積 $V_{rmean}=145.30\text{ m}^3$, $V_{kmean}=145.57\text{ m}^3$, $V_{cmean}=145.20\text{ m}^3$ を算定した。

6. 考察および結論

胸高直径 $D_r=66\text{ cm}$ のイチョウの孤立木をレーザスキャナにて, 3方向から約 $OP_0\approx 21.7\text{ m}$ 隔てて観測した。イチョウの樹冠直径の平均は $l_y=5.39\pm 0.29\text{ m}$ となり, 樹冠長は $l_z=11.40\pm 0.12\text{ m}$ の結果を得た。3方向からの偏差の中で最大のものを求めたところ, 樹冠直径では $\Delta l_{y\max}=0.94\text{ m}$, 樹冠長では $\Delta l_{z\max}=0.41\text{ m}$ となった。この中で樹冠直径に対する方向の相違による偏差が大きい点が注目される。

次に, 孤立木イチョウの葉が覆う表面積は $S=33.46\pm 1.14\text{ m}^2$ となり, 一方向からの観測結果では約 $\varepsilon=1.97\text{ m}^2$ の偏差が発生し, 平均値に対しても $\varepsilon_m=\pm 1.14\text{ m}^2$ 生じた。このことから, キャノッピ算出を1方向からしたとき, 数 cm^2 単位の評価は困難といえる。

さらに, 孤立木イチョウの葉で覆われている容積の算出については3種の近似式を用いた。この結果, 表-4のように円錐台近似式では $V_r=73.11\pm 4.82\text{ m}^3$, 等高線法近似式では, $V_h=73.24\pm 4.83\text{ m}^3$, 角柱近似式では, $V_c=73.11\pm 4.81\text{ m}^3$ となり, 3方向からの誤差が $\pm 4.8\text{ m}^3$ 程度からすると近似法別では 0.13 m^3 の偏差となり問題は少なく, 撮影方向の誤差の方が大きい。

1画素単位の現地対応面積が $7\times 7\text{ cm}^2$ になることから, 1画素以内となり, 画像処理面からも推定誤差量が妥当なものといえる。これらのことから, レーザスキャナによるレンジ画像からのレンジマップを用いれば不定形オブジェクトでも1画素以内の誤差に納まるという結論に達した。このことから, 樹冠直径と樹冠長より葉で覆われる表面積と容積の概算も論議できると思われる。以上のことから本研究の成果をまとめると次のようになる。

- 1) イチョウのキャノッピやこれに係る容積の算出は3方向から, レーザスキャナで計測すれば全容が把握できる。
- 2) 孤立木を1方向のみから計測するとイチョウのように対称的に見える樹木でも樹冠直径 l_y で5%, 樹冠長 l_z で1%の偏差を生じる。
- 3) 本研究のイチョウのキャノッピ(表面積)は, $S=33.47\pm 1.14\text{ m}^2$ となり1方向観測では約3.4%の偏差を生じた。
- 4) キャノッピの容積 S の算出に3種の近似式を用いたが, 近似式による算出値の偏差は約 $\Delta S_1=0.2\%$ であり, 方向観測の偏差が $\Delta S_2=6.6\%$ であることから, いずれの近似式も使用可能といえる。しかし, 輪郭線抽出が少し面積が大きくなる傾向にあることから, 葉で覆われた容積 V

の算出には円錐台近似の利用を推奨する。

- 5) 樹木の表面積 S の算出には樹冠直径 l_y と樹冠長 l_z が用いられているので, この2変数で S と V を推定するときの係数とその範囲を求めた。この結果, $S=a_l y l_z$, $V=b_l y^2 l_z$ に対して a , b の係数は $a=0.545(0.525\leq a\leq 0.57)$, $b=0.221(0.20\leq b\leq 0.24)$ となった。
- 6) 実存する樹木の状態をモデル化するには従来, ステレオマッチング技術を用い, 少なくとも2方向観測を必要としていた。この研究のレンジ画像を用いると観測方向数を半減できるので, 樹林を含む仮想空間の表現力が広がり, 高速化できる。

今後は実験事例を増やして, 係数 a , b の取り得る範囲を樹齢別に算定すると共に, 他の種樹へ研究を広げる予定である。また, VRML言語によるレンジ画像の3D表示による仮想空間を生かした研究と並行して^{5,6)}, 広域林分構造の計測や樹冠率の研究とも関連づける予定である³⁾。

引用文献

- 1) Curless, B. and Levoy, M. (1996) A volumetric method for building complex models from range images. SIGGRAPH 96 Conference Proc. : 303-312.
- 2) 趙 卉菁・柴崎亮介 (2000) 地上据え置き型レーザレンジスキャナーを利用した3次元都市空間データの自動構築手法に関する研究, 写真測量とリモートセンシング, 39(2) : 54-63.
- 3) 林 真智・沼田洋一・小熊宏之・山形与志樹 (2001) リモートセンシングデータを利用した林分構造の計測, 写真測量とリモートセンシング, 40(3) : 41-46.
- 4) 星 仰 (2000) ノンミラー・レーザレーダ画像データの3D計測誤差とその応用, 土木学会関東支部技術講演集, IV-3 : 570-571.
- 5) 星 仰・米倉和彦・本島 学 (2001) 距離画像用基本モジュールの開発, 情報処理学会第61回全国大会講演論文集, 4L-05 : 171-172.
- 6) 星 仰・阿久津功朗 (2002) 距離画像による建物のワイヤフレーム要素の抽出, 情報科学技術フォーラム FIT'02, J-36 : 273-274.
- 7) 国土交通省国土地理院 (2001) 地上型スキャン式レーザ測距儀による斜面地形計測・解析技術の開発の作業報告書, 1 : 33-67.
- 8) RIEGL (1999) LMS-Z210 技術資料および取り扱い説明書, Riegl Japan Ltd., 1(17) : 1-53.

(2003.7.10 受理)