

3.6 レーザ計測による単木情報の解析

上空からのレーザ計測によって森林資源情報を得るためには、林冠や地形に係る3次元点群データを解析して必要なパラメータを抽出・分析することになる。本節で採用する解析手法はUAVレーザ計測に限らず、4章で扱う航空レーザ計測のデータ解析においても同様の手法である。

3.6.1 樹頂点の抽出手法

本業務では、東京電力株式会社とアジア航測株式会社で共同開発した樹頂点抽出技術（特許第4279894号）を用いてスギ樹冠の解析を行った。レーザ計測データから得られる林冠表面形状を表すDCHM (Digital Canopy Height Model) を作成して、以下の手順により単木の樹頂点を抽出した。データ解析の手順に沿って得られる一連の画像を図3.6.1に示す。

- ① DCHMから樹冠形状指数を計算する。樹冠形状指数とは、樹頂部の凹凸を表す指数で、凸部ほど高い値になり凹部ほど低い値をとる。梢端では凸状であり、樹冠縁は凹状となり、必ず単木ごとに高い値と低い値が含まれる。そのため樹冠形状指数を用いることにより画像上で単木を識別しやすくなる。
- ② 樹冠形状指数を用いて、樹冠部を抽出する。動的に決められる閾値以上のまとまりが樹冠部として抽出される。
- ③ 最後に樹冠部の中のDCHMを調べ、最もDCHMが高いメッシュの位置を樹頂点として抽出する。一つの樹冠に複数の凸部がある場合の過剰抽出を避けるため、樹頂点間の距離に制限値を設定し、制限値以下の樹頂点がある場合は、DCHMが最も高い点を樹頂点とする。

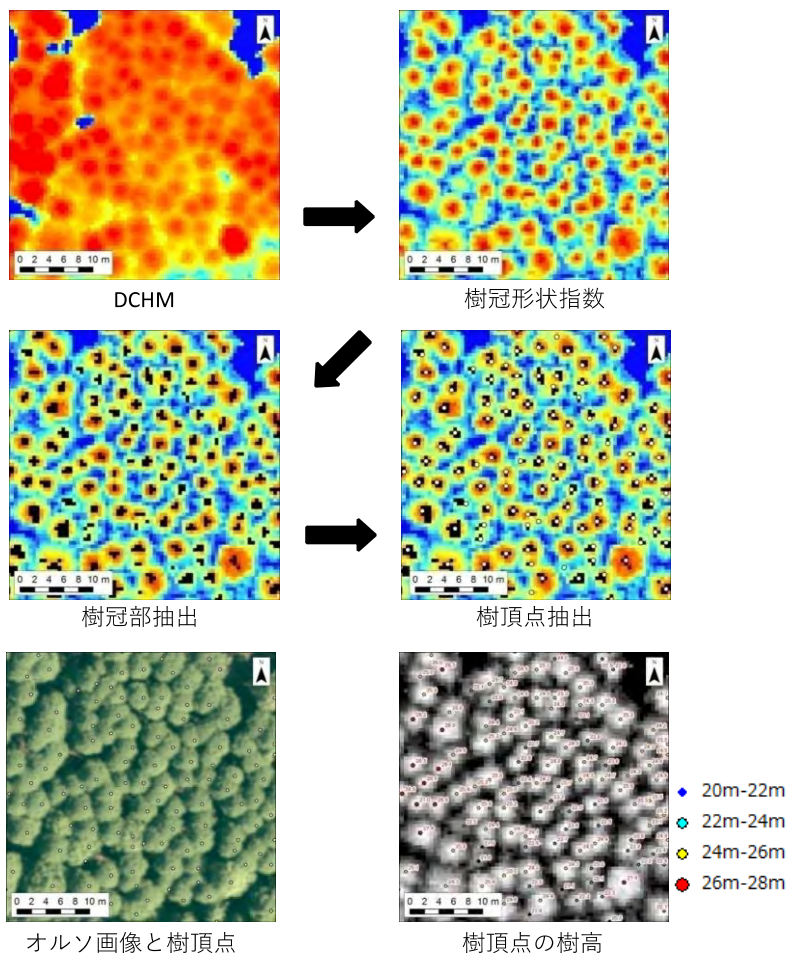


図3.6.1 樹頂点抽出に至るデータ解析の流れ

3.6.2 胸高直径の推定手法

(1) 胸高直径の推定手順

現地での円形プロット調査により平均胸高直径を算出する。一方、レーザ計測の樹冠高データ (DCHM) からは6つの項目 (樹冠投影面積、樹冠表面積、樹冠体積、樹高、樹冠長、樹冠長率) が得られる。そこで、平均胸高直径を目的変数、6つの項目を説明変数として、それらの組み合わせを試行して重回帰分析を行い、最も適合度の高い回帰式を胸高直径推定式として選択し、単木ごとの胸高直径を推定した。胸高直径推定式を誘導する概念を図3.6.2に示す。

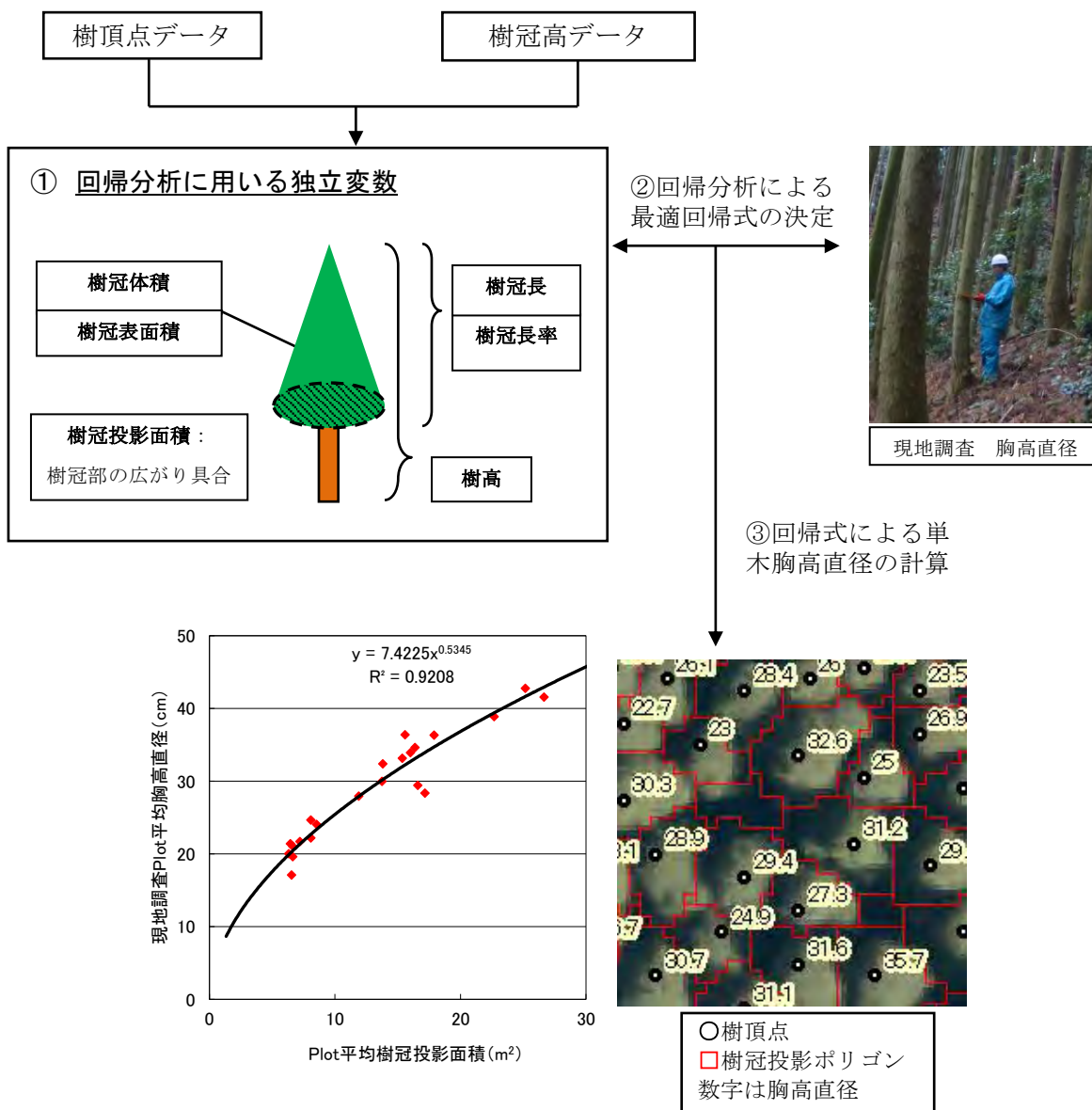


図3.6.2 胸高直径の推定方法

(2) 重回帰分析で使用する説明変数

抽出した樹頂点位置と樹冠形状指数画像をもとに樹冠投影ポリゴンの計算を行い、樹冠投影面積、樹冠長、樹冠長率を計算した。また、樹冠部を円錐形と仮定して樹冠表面積、樹冠体積を計算した。重回帰分析に使用する各説明変数の計算方法は以下のとおりである。

- ① 樹冠投影面積 (C_a) : 樹冠投影ポリゴンの水平投影面積 (m^2) を指す。抽出した樹頂点位置と樹冠形状指数画像をもとにwatershed (分水嶺) アルゴリズムを用いた処理で、単木レベルの樹冠投影ポリゴンを作成し、各ポリゴンの面積を算出した。watershed (分水嶺) アルゴリズムとは、数値の高低を山と谷に見立て、林冠を構成する各林木の境界を分割された分水界として領域区分するものである。樹冠投影ポリゴンの作成イメージを図3.6.3に示す。

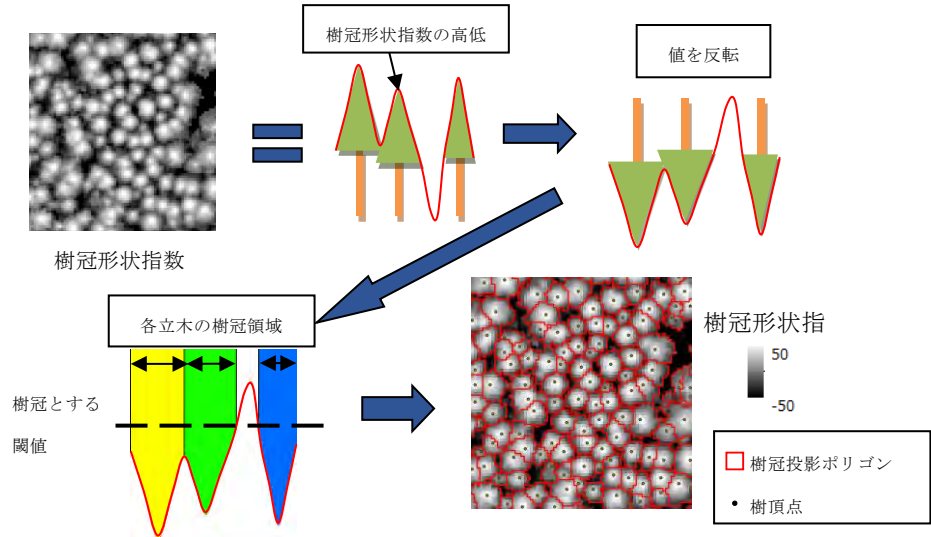


図3.6.3 樹冠投影ポリゴンの作成イメージ

- ② 樹冠長(C_h) : 樹冠投影ポリゴン内で最も低いDCHMの値と樹高 (h) との差である。イメージ図を図3.6.4に示す。

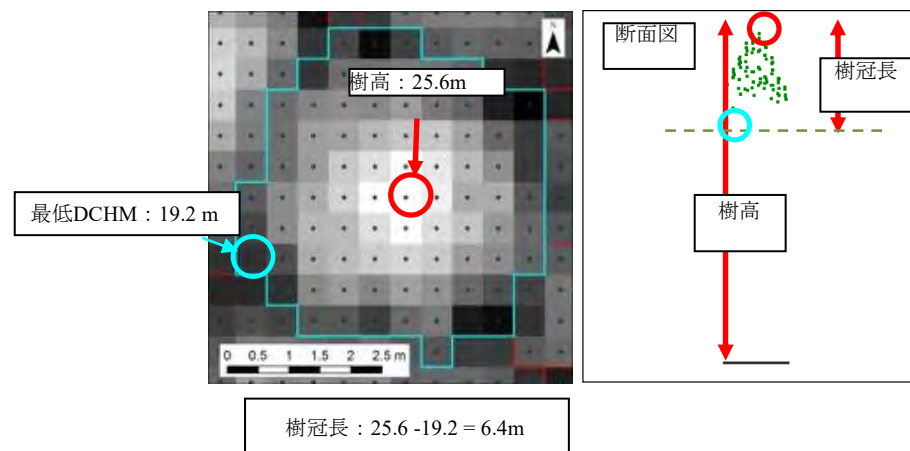


図3.6.4 樹冠長算出のイメージ

- ③ 樹冠長率 (C_p) : 樹冠長 (C_h) と樹高 (h) の比 (%) を指す。 $C_p = \frac{C_h}{h}$

- ④ 樹冠表面積 (A) : 樹冠形を円錐と仮定した扇形部分の表面積 (m^2) を指す (図3.5.6)。

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\theta}{360} \rho R^2 \\
 &= \rho r R \\
 &= \rho \sqrt{\frac{C_a}{\rho}} \sqrt{\frac{C_a + \rho Ch^2}{\rho}} \\
 &= \sqrt{C_a(C_a + \rho Ch^2)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2\pi R \frac{\theta}{360} &= 2\pi r \quad \text{より} \quad \frac{\theta}{360} = \frac{r}{R} \\
 C_a &= \pi r^2 \quad \text{より} \quad r = \sqrt{\frac{C_a}{\pi}} \\
 r^2 + Ch^2 &= R^2 \quad \text{より} \quad R = \sqrt{r^2 + Ch^2} = \sqrt{\frac{C_a}{\pi} + Ch^2} = \sqrt{\frac{C_a + \pi Ch^2}{\pi}}
 \end{aligned}$$

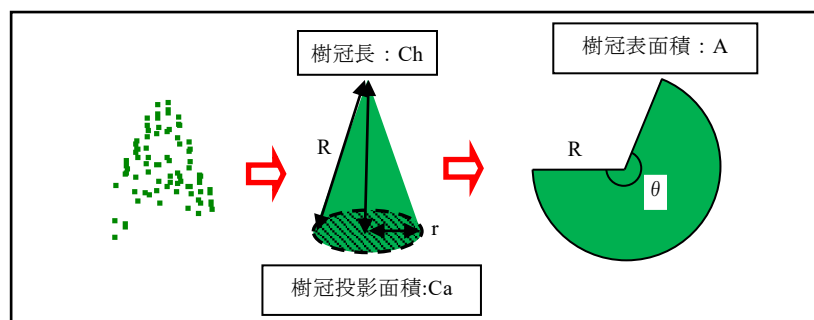


図3.6.5 胸高直径の推定方法

- ⑤ 樹冠体積 (V) : 樹冠の形状を円錐と仮定したときの、円錐の体積 (m³) を指す。

$$V = \frac{Ca \times Ch}{3}$$

(参考) 回帰分析の用語

補正 R² 値 : 回帰式を評価する場合、一般的に決定係数 R² 値が使用される。しかし重回帰分析において説明変数の数が違う場合、R² 値から式の良否を評価することはできない (説明変数の数が大きいほど R² 値は良好な値を示す)。このような説明変数の数の影響を取り除き、見かけ上の当てはまりの良さを差し引いた数値が補正 R² 値である。この数値が高いほど、回帰式から求められる予測値が目的変数に近く、回帰式の当てはまりが良いことを示す。自由度調整済決定係数ともいわれる。

RMSE : 2乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error)。回帰式から求められる予測値が真値からどの程度乖離しているかを示す。0に近い値であるほど誤差が小さいことを示す。

p 値 : 回帰分析の場合、目的変数と無関係である説明変数を加えても回帰式は作成される。例えば体重を目的変数とした場合、身長や腹囲等体重と関係がある説明変数の他に、視力という全く関係ない説明変数を加えて回帰分析すると、作成された回帰式に視力の係数も設定される。しかし、その係数は偶然その値になっただけで、視力と体重に関係があることを示しているわけではない。このような目的変数と説明変数の関係を判断するために p 値が用いられる。

p 値は、帰無仮説 (ある仮説に対して真逆の仮説) が成立する確率である。本解析では、目的変数である胸高直径と説明変数である樹高、樹冠投影面積等が無関係である確率を示している。p 値が小さければ、「目的変数と説明変数は無関係ではない」ことになり、目的変数と説明変数には関係があると判断することができる。この p 値の判断基準として、一般的に信頼度 0.05 (5%) 未満が用いられる。R² 値や、RMSE が回帰式から求められる予測値を評価するものに対し、p 値は回帰式の説明変数の使用の可否を判断するものである。

(3) 回帰分析による胸高直径推定式の決定

現地で計測した円形プロットごとの平均胸高直径 d (cm) を目的変数とし、レーザ計測で得られた 6 つの説明変数を組み合わせて次式のような回帰分析を行った。最も関係の強い変数を使用することで、平均胸高直径を推定する回帰式を求めた。6 つの変数は、樹高 h (m)、樹冠投影面積 C_a (m²)、樹冠長 C_h (m)、樹冠長率 C_p (%)、樹冠表面積 A (m²)、樹冠体積 V (m³) である。回帰式を求める際には、6 つの変数から強い関係が予想される変数の組み合わせ 10 パターンを試行して比較した。回帰式の基本型は、以下のべき乗式である。

$$d = a \times X_1^{\beta_1} \times X_2^{\beta_2} \times X_3^{\beta_3}$$

ただし、a : 定数、X1~X3 : 説明変数、β₁~β₃ : べき指数である。

胸高直径の推定に使用する回帰式を決定する際、まず説明変数の p 値がすべて 0.05 (5%) 未満である回帰式を選び、その中で R² 値が高く、RMSE が小さい式を選定する。すなわち、目的変数 (胸高直径の実測値) と説明変数 (樹冠投影面積、樹高等) の関係が強く、回帰式の当てはまりが良く、回帰式から求められる予測値 (胸高直径の推定値) と真値 (胸高直径の真値) の誤差が小さい回帰式を良好な胸高直径の推定式として選定した。回帰式の比較結果を表 3.6.1 に示す。

胸高直径の回帰式は、全ての変数の p 値が 5% 未満になるという点では回帰式 1~6 式の 6 つの式を暫定的な候補とした。しかし、基本的に回帰式に利用する説明変数は独立変数であり、相互に相関関係を持たないことが望ましい。このことを考慮すると、今回の解析に用いた 6 変数のうち、樹冠表面積や樹冠体積は、樹冠投影面積と樹冠長から円錐形に近似して算出したものであるため変数として適切ではない。また樹冠長率も樹冠長と樹高から算出されたものである。したがって複数の変数を組み合わせる場合は、変数相互間の依存関係を考慮した上で、適切な回帰式を選択する必要がある。

円形プロットによる調査では、調査区のうち平均的な箇所を調査を実施しているため現地調査結果と現地調査位置におけるレーザ解析結果によって作成した各変数 (樹高、樹冠長、樹冠長率、樹冠投影面積、樹冠表面積、樹冠体積) との相関が高いが、プロット範囲外で誤差を増大させる要因になりうる。補正 R² および RMSE を考慮し、また説明変数特性等を勘案した結果、胸高直径推定式として表 3.6.1 の 4 番目の式を採用した。

$$d = 3.816 \times Ca^{0.184} \times h^{0.526} \quad (Ca: \text{樹冠投影面積} \quad h: \text{樹高})$$

表 3.6.1 回帰式の比較結果

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正 R ²	RMSE
1	X ₁ 樹冠投影面積	18.798 ***	0.201 **			0.299	2.64
2	X ₁ 樹冠表面積	15.175 ***	0.194 ***			0.556	2.22
3	X ₁ 樹冠体積	19.922 ***	0.135 ***			0.521	2.44
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	3.816 **	0.184 ***	0.526 ***		0.612	1.95
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	5.911 ***	0.157 ***	0.347 **		0.664	1.86
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	6.738 ***	0.109 ***	0.376 **		0.655	1.99
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	18.602 ***	0.020	0.263 ***		0.582	1.98
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	14.060 ***	0.085	0.178 †		0.358	2.46
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	6.473 ***	0.086	0.350 *	0.151 †	0.661	1.77
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	3.266 **	0.094	0.502 ***	0.141 †	0.653	1.77
11	X ₁ 樹高	5.357 **	0.568 **	0.000	0.000	0.3418	2.56

† p 値 < 0.1 * p 値 < 0.05 ** p 値 < 0.01 *** p 値 < 0.001

(4) 材積推定の方法

上述した方法で算出された樹高および胸高直径に対して、関東地方スギ材積式（林野庁計画課編立木幹材積表）を適用して単木材積を計算した。これら材積は、単木（点）データの属性情報として付与した。使用したスギの材積式を以下に示す。

スギ 茨城、埼玉、千葉、東京、神奈川、山梨、静岡地方（東京営林局管内）

$$\log v = -4.172632 + 1.753904 \log d + 1.040853 \log h \quad (d: 4\text{cm以上})$$

$$\log v = -4.219069 + 1.849344 \log d + 1.008086 \log h \quad (d: 12\text{cm以上})$$

$$\log v = -4.211821 + 1.944187 \log d + 0.894801 \log h \quad (d: 32\text{cm以上})$$

$$\log v = -3.921218 + 1.600066 \log d + 1.075361 \log h \quad (d: 42\text{cm以上})$$

ただし、 v ：材積、 d ：胸高直径、 h ：樹高である。

3.7 単木解析結果と精度検証

現地調査で得た結果（立木本数、樹高、胸高直径、材積）とレーザ計測による解析結果を比較し、精度検証を行った。結果として、立木本数、樹高、胸高直径、材積のいずれにおいても高い精度で解析できたと考えられる。

(1) 立木本数の精度検証

現地調査結果とUAVレーザ解析結果の立木本数を比較した。上層木の立木本数のRMSEは0.58本であったが、全立木本数ではRMSEが0.98本であり、全立木本数の推定精度がやや低かったが、理由としては下層にある被圧木等のカウント漏れが考えられる。ただ、プロット内の立木本数が元々少ないため、1～2本の違いで誤差が大きく変わること留意すべきである。

表 3.7.1 立木本数の精度検証結果

調査プロット	現地調査上層木本数	UAVレーザ上層木本数	誤差率	現地調査全立木本数	レーザ解析全立木本数	誤差率
G01	12	11	-8.3	12	11	-8.3
G02	21	21	0.0	21	21	0.0
G03	21	20	-4.8	22	20	-9.1
G04	17	17	0.0	17	17	0.0
G05	13	13	0.0	13	13	0.0
G06	10	10	0.0	10	10	0.0
G07	18	18	0.0	18	18	0.0
G08	19	19	0.0	19	19	0.0
G09	25	25	0.0	25	25	0.0
G10	15	15	0.0	15	15	0.0
G21	22	22	0.0	22	22	0.0
G22	24	24	0.0	24	24	0.0
G23	27	27	0.0	27	27	0.0
G24	24	24	0.0	24	24	0.0
G25	18	18	0.0	19	18	-5.3
G26	22	24	9.1	22	24	9.1
G27	26	26	0.0	27	26	-3.7
G31	17	17	0.0	17	17	0.0
G32	13	13	0.0	14	13	-7.1
G33	12	12	0.0	13	12	-7.7
G34	16	15	-6.3	17	15	-11.8
G35	12	12	0.0	14	12	-14.3
G36	14	15	7.1	14	15	7.1
G37	14	14	0.0	15	14	-6.7
平均	18.0	18.0		18.4	18.0	
R			0.99			0.98
RMSE			0.58			0.98

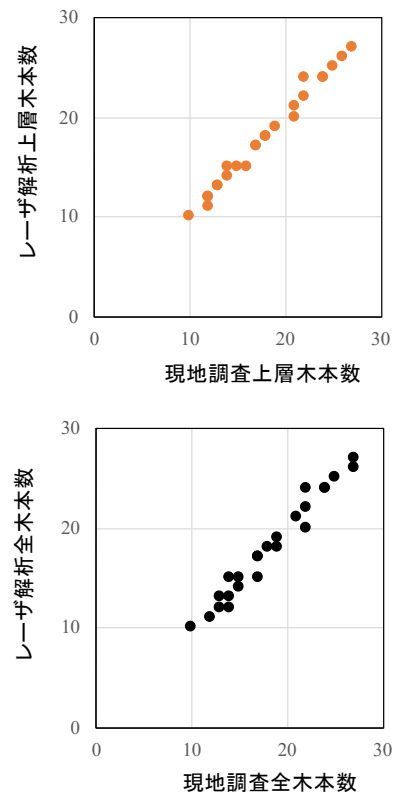


図 3.7.1 立木本数の精度検証

(2) 樹高の精度検証

現地調査結果とUAVレーザ解析結果のプロット平均の樹高を比較した。調査プロットによって誤差率が10%を越えるケースもあったが、24プロット全体のRMSEは1.42mと概ね妥当な精度で推定ができた。

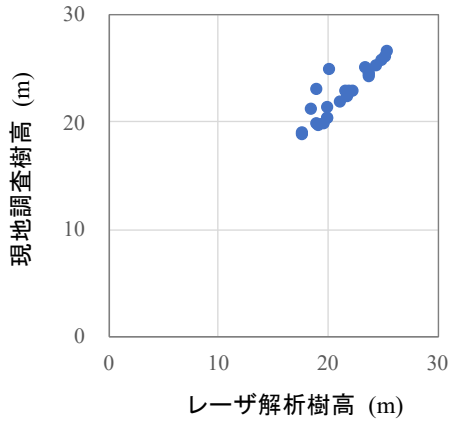


図3.7.2 樹高の精度検証結果

表3.7.2 樹高の精度検証結果

調査プロット	現地調査樹高(m)	レーザ解析樹高(m)	誤差率(%)
1	20.4	24.8	22
2	19.2	19.8	3
3	19.9	19.7	-1
4	19.3	19.5	1
5	19.2	23.0	20
6	18.7	21.1	13
7	20.1	20.3	1
8	20.1	21.3	6
9	17.9	18.9	6
10	20.1	20.3	1
11	25.6	26.5	4
12	25.5	25.9	2
13	24	24.5	2
14	24	24.3	1
15	24.6	25.2	2
16	21.3	21.7	2
17	22.1	22.7	3
18	22.5	22.8	1
19	23.9	24.1	1
20	21.9	22.8	4
21	25.1	25.7	2
22	23.6	24.9	6
23	17.8	18.7	5
24	22	22.3	1
平均	21.6	22.5	4.5
R			0.89
RMSE			1.42

(3) 胸高直径の精度検証

現地調査結果と回帰式により推定したプロット平均の胸高直径を比較した。調査プロットによって誤差率が10%を越える場合もあるが、全体としては誤差率4.5%、RMSEが1.95cmで推定された。

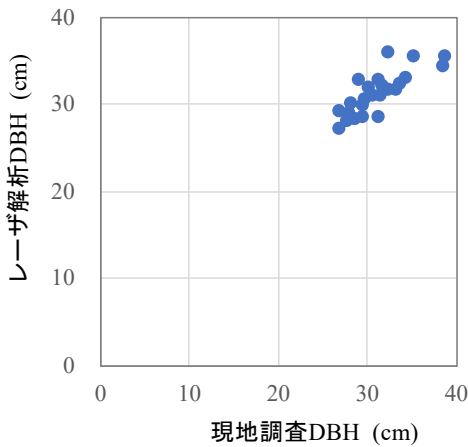


図3.7.3 胸高直径の精度検証結果

表3.7.3 胸高直径の精度検証結果

調査プロット	現地調査胸高直径	レーザ解析胸高直径	誤差率(%)
G01	32.7	35.7	9
G02	28.2	28.7	2
G03	27	28.8	7
G04	29.8	28.2	-5
G05	29.2	32.5	11
G06	32.6	31.3	-4
G07	28.4	29.8	5
G08	29.7	29.6	-0
G09	27	26.9	-0
G10	30	30.3	1
G21	31.4	32.4	3
G22	30.5	31.6	4
G23	30.9	30.8	-0
G24	31.8	30.6	-4
G25	33.9	32	-6
G26	28	27.8	-1
G27	28.9	28.1	-3
G31	33.5	31.3	-7
G32	38.8	34.1	-12
G33	34.6	32.7	-5
G34	38.9	35.3	-9
G35	35.5	35.1	-1
G36	31.5	28.3	-10
G37	31.9	31.9	0
平均	31.4	31.0	-1.4
R			0.89
RMSE			1.42