高機能携帯電話端末における樹高測定ソフトウェアの開発

伊藤 拓弥^{*1}・榮澤 純二¹・矢野 宣和¹・松英 恵吾¹・内藤 健司¹

本研究では、iPhone にて樹高測定を行うためのソフトウェアを開発した。iPhone をはじめとするスマートフォンは加速度センサを搭載した機種があり、デバイスの傾きを測定することができる。この加速度センサを使い三角法の原理を応用することで、iPhone にて樹高測定が可能である。また iPhone は優れたユーザインタフェースを有するため、測定データの保存管理、編集、集計、表示ができる。この機能を利用することで、内業を行うことなく測定データを測定直後の現場にて即座に集計、表示させることが可能である。また iPhone は携帯電話回線や無線 LAN によって測定データを転送することができる。これらの機能によって森林調査の作業効率を大幅に向上させることができると考えられる。

キーワード：樹高測定, iPhone, スマートフォン, 測高器, 携帯電話

Takuya Itoh,^{*1} Junji Eizawa,¹ Nobukazu Yano,¹ Keigo Matsue,¹ and Kenji Naito¹ (2010) Development of Software to Measure Tree Heights on the Smartphone. J. Jpn. For. Soc. 92: 221-225. In this study, we developed software to measure tree heights with the iPhone. A smartphone such as the iPhone sometimes has an accelerometer, by which the inclination of the device can be measured. Therefore, you can measure tree heights using an iPhone with an accelerometer, applying the principles of trigonometry. iPhones have excellent user interface, making it possible to manage, display, edit and calculate the measuring data. Thus, it is not necessary to input and calculate the measuring data on a personal computer after measuring. Moreover, the measuring data can be transmitted using wireless LAN or cellular phone circuit. Thus, productivity of field surveying in forests can be improved by using software to measure tree heights on an iPhone.

Key words: tree height measurement, iPhone, smartphone, hypsometer, cellular phone

I. はじめに

森林調査において測高器は最も重要な測定機器の一つであり、これまでさまざまな測定方法や測高器が研究開発されてきた。最も基本的な樹高の測定方法として、相似三角形や三角法を用いた方法があり、この方法を応用した測高器として、Christen 測高器、Weise 測高器、BLUME-LEISS 測高器が広く知られている（嶺，1940；大隅，1957；石川ら，2002）。これらは簡易な測定方法でありながら、実用的な測定機器として広く使われてきた。ただしこれらの測高器は、対象木に対し任意点からの樹高測定はできず、定められた距離からの測定が必要であった。Spiegel Relaskop を用いた樹高測定では、長さが既知のポールを用いることにより対象木までの距離測定を必要とせず任意点からの測定が可能であった（今永，1987）。ただし測高器に樹高は表示されず、測定した複数の高低角の記録と樹高の計算を行う作業が必要であった。最近では Haglöf 社（Sweden）の Vertex（宮本ら，2000）、Laser Technology 社（USA）の TruPulse や Impulse、Measurement Devices Ltd. 社（UK）の LaserAce など、超音波やレーザーによる距離測定と傾斜センサによる角度の測定を用いた測高器が主流となっている。超音波やレーザーを用いた距離測定により対象木からの距離に依存せず任意の点からの測

定が可能となったこと、傾斜センサを用いた角度の測定で測定値の計算処理と表示がデジタル化したことから、作業効率は格段に向上した。

一方で、スマートフォン（Smartphone）と呼ばれる高機能携帯電話端末が近年一般化してきている。スマートフォンは特長として、通信と携帯性を兼ね備えた一般の携帯電話の機能に加え、パソコンや携帯情報端末（Personal Digital Assistant：PDA）のように高機能で多種多様なアプリケーションが利用可能で、優れたユーザインタフェース（User Interface：以下 UI）を持ち、携帯電話回線のみならず無線 LAN を利用した通信を行う機能を備えている。機種によっては加速度センサを搭載しており、デバイスの傾きを測定することが可能である。また、アプリケーションの開発仕様が公開されている場合、オペレーティングシステム（Operating System：以下 OS）の機能を利用したネイティブアプリケーションの開発が可能である。このため加速度センサを搭載したスマートフォンにおいて、Christen 測高器や Spiegel Relaskop、Vertex などの樹高測定原理を応用し、測定対象木の根元と梢端の高低角をデバイスの傾き角から計算するソフトウェアを開発することで、スマートフォンのみでの樹高測定が可能である。

スマートフォンにおいて樹高測定を行うことの利点として、傾斜センサを用いた従来の測高器の利便性に加え、携

^{*} 連絡先著者（Corresponding author）E-mail：ihypsometer@taakkum.com

¹ 宇都宮大学農学部 〒350-8505 宇都宮市峰町 350（Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, 350 Mine-machi, Utsunomiya 350-8505, Japan）

（2009 年 12 月 24 日受付；2010 年 4 月 28 日受理）

帯電話や無線 LAN を利用した測定データの転送が可能であること、測定データの管理、保存、表示、編集が容易であることがあげられる。既存の測高器においても樹高測定は電子化されているが、データを扱う上での柔軟性、操作性はそれほど高くない。これに対し、スマートフォンでは優れた UI によって測定データを調査地ごとに分けて管理することや、対象地の名前や測定日等のプロット情報、また胸高直径やメモ書きといった対象木ごとの付加情報を併記することが実現可能であり、ソフトウェアにおけるデータの操作性は高い。また、測定データを携帯電話や無線 LAN の通信により転送することができるため、樹高測定の際に紙野帳を使用する必要がなくなり、石川ら (2002) の指摘する測高器からの値の読み間違えによる誤差、紙野帳記入時およびパソコンへの入力時にかかる時間とミスを削減することができ、作業効率を大幅に向上するとともに人為的誤差を減らすことが可能である。さらに、スマートフォン上のソフトウェアにてデータの集計を実行することで、内業を行うことなく測定直後の現場にて測定データの集計値を知ることができる。つまり、樹高測定から測定結果の保存と管理、データ集計とその表示を、他の機器を使うことなく、即座にすべてをスマートフォン一つで行うことができる。その上、もともと携帯電話として携行するよう設計されているスマートフォンは通常百数十グラムと軽く持ち運びに優れているため、森林調査における利便性は高く、スマートフォンにおける樹高測定ソフトウェア開発の意義は大きいといえる。

本研究では、加速度センサを搭載したスマートフォンにおいて、樹高測定ソフトウェアを開発した。開発のポイントは、スマートフォンによる樹高測定を実現することの他、測定値、付加情報の管理、入力、編集ができること、測定値の集計とその表示、データの転送が可能であることである。また開発したソフトウェアを用いて実際に樹高測定を行い、その有効性の検証を行った。ソフトウェアは、優れた UI を持ちアプリケーションの統合開発環境が提供されている Apple 社 (USA) の iPhone で動作するものを開発した。

II. 樹高測定ソフトウェア開発

1. ソフトウェア開発環境

本研究における樹高測定ソフトウェアは、Apple 社の提供する iPhone で動作するものを開発した。iPhone は優れた UI を有するスマートフォンとして世界数十カ国で提供されており、日本では 2008 年 7 月から利用可能となっている。また iPhone で動作する多種多様なソフトウェアが、Apple 社の iPhone ソフトウェア配布専用サイト (App Store) から配布されている。

iPhone は加速度センサを搭載していてかつ、iPhone のソフトウェア開発仕様とソフトウェア統合開発環境が Apple 社より提供されているため、本研究で目的とする樹高測定ソフトウェアの開発が実現可能である。また

iPhone の有する UI を利用することで、測定データの管理、編集、集計、表示、転送機能の実装と高い操作性の実現が容易である。

樹高測定ソフトウェアのプログラムの作成およびビルドは、Apple 社の iMac (OS: Mac OS X Snow Leopard, Ver.10.6.2) において実行し、iPhone OS 3.1.2 で動作するものを作成した。開発言語は Objective-C である。Objective-C は、Apple 社が Mac OS X のためにフレームワークの Cocoa とともに開発を行った言語である。特に iPhone では、iPhone の優れた UI の機能を実現するための Cocoa Touch というフレームワークが用意されている。

2. 樹高測定原理

三角法にもとづき、測定点から対象木の根元と梢端までの高低角および水平距離を測定することで、樹高が算出可能である。前述のとおり iPhone には加速度センサが搭載されているため、デバイスを用いて対象物を視準すれば、視点から対象物までの高低角を得ることができる。しかし iPhone はレーザや超音波を発することができないため、それらを用いて視点から対象木までの水平距離を求めることができない。そこで本研究における樹高測定ソフトウェアでは、Spiegel Relaskop と同様に、対象木の根元に既知の高さのポールまたは測定補助者を立て、その下端と上端までの高低角を測定することにより、対象木までの水平距離を算出し樹高を求めることとした。図-1 に樹高測定原理の模式図を、式(1)~(4) に計算式をそれぞれ示す。

$$l = \frac{h}{-\tan a + \tan b} \quad (1)$$

$$A = \begin{cases} -l \tan a & (a < 0) \\ l \tan a & (a \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$C = \begin{cases} -l \tan c & (c < 0) \\ l \tan c & (c \geq 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$H = \begin{cases} |A + C| & (a < 0 \cap c < 0) \cup (a \geq 0 \cap c \geq 0) \\ A + C & (a < 0 \cap c \geq 0) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 H 、対象木の樹高 (m)； h 、ポールの高さ (m)； l 、対象木までの水平距離 (m)； a 、ポールの下端までの高低角 (°)； b 、ポールの上端までの高低角 (°)； c 、対象木の梢端までの高低角 (°)； A 、根元から視点までの高さ； C 、視点から梢端までの高さである。高低角 a 、 b 、 c は、水平

図-1. 樹高測定原理の模式図

を基準として上向きを正、下向きを負とする。

3. ソフトウェアのインタフェースと機能

iPhone を用いて樹高を測定する際に最も問題となるのがターゲットの視準方法である。当然ながら iPhone のデバイス自体は樹高を測定するために設計されておらず、視準のためのスコープも付いていない。そのため今回開発したソフトウェアでは、図-2 のように iPhone を持ちデバイスの縁をガイドとしてターゲットを視準することとした。

この視準方法をもとに、図-3 のように測定画面の設計を行った。まず測定値入力のためのボタンであるが、iPhone にはテンキーや QWERTY キーボード等ソフトウェア操作のための物理ボタンはなく、代わりにマルチタッチスクリーンを採用しているため、測定のための入力ボタンを位置も大きさも自由に作成することが可能である。そのため、図-2 に示した視準方法とその持ち方に合致するように、図-3 (A) の (1), (2) のようにボタンの配置を決定した。次に、測定した数値は、図-3 (A) の (3) のように高低角、対象木までの水平距離、樹高の一覧を表示するように設計した。これは、測定に誤りがないか一目で確認できるようにするためである。誤りがないと確認した樹高は保存を実行した後、図-3 (A) の (4) のように通番とともに表形式で表示するようにした。これにより、測定値の一覧を参照することが可能である。また保存した樹高には、おのおの DBH およびメモを付加入力できる野帳機能を搭載した (図-3 (B))。この機能によって各立木の詳細情報を樹高とともに保存管理ができると同時に、後述する集計機能にも利用することが可能である。

図-2. iPhone によるターゲットの視準方法
(A) 持ち方, (B) 視準方法

図-3. 樹高測定ソフトウェアのインタフェース

(A) 測定画面のインタフェース：(1) 入力ボタン、(2) やり直しボタン、(3) 測定値確認表示、(4) 測定値一覧、※(3)の「Height of friend」は図-1における「ポール」にあたる。(B) DBH、メモ入力画面、(C) 調査地情報入力画面、(D) 集計値表示画面。

上記測定値は、調査地ごとに保存するようソフトウェアを設計した。調査地ごとのメタ情報として、プロット名、調査地名、測定日、測定者、プロット面積を入力できるようにした (図-3 (C))。またこの調査地ごとにまとめられた樹高、DBH、プロット面積から、平均樹高、平均 DBH、胸高断面面積合計、林分材積、本数と本数密度を集計、表示させるようにした (図-3 (D))。さらにこれら測定値と集計値は電子メールにてパソコンへ転送できるようにした。この測定データの保存管理機能と集計表示機能、転送機能によって、測定値の紙野帳への記入とパソコンへの入力の必要がなくなり、作業時間の短縮、現地調査における測定データの統計情報の即座の確認、転送したデータを用いたより高度な解析の実施等、作業効率と利便性の大幅な向上が期待される。

III. 樹高測定ソフトウェアの精度検証

1. 測定精度検証方法

開発した樹高測定ソフトウェアの実用性を検証するため、実際に iPhone を用いて樹高測定を行った。iPhone の対照測定として TruPulse200 を用いて同じ対象木の樹高を測定し、それぞれの測定結果を比較した。測定は、宇都宮大学農学部附属船生演習林内のスギ、ヒノキより樹高の低いものから高いものまでランダムに選出し、iPhone と TruPulse200 それぞれ 1 回ずつ測定を行った。各立木に対する測定者の立ち位置は、iPhone と TruPulse200、いずれを使った場合も同じ場所とした。ポールは測定補助者の身長で代替し、その長さ (身長) は 1.77 m であった。

ここで、前述したように iPhone を用いてターゲットを視準しデバイスの縁と視線とを一致させることは難しい。しかしこの視準の際に生じるデバイスのわずかな傾きの誤差が、樹高の測定精度に大きく影響することが内藤 (1990) や石川ら (2002) の指摘から予測された。この誤差を抑制するため、iPhone にスコープを取り付け測定を行った。スコープは、図-4 のように市販のストローを iPhone のデバイスの上部に取り付けることで代用した。

また iPhone の測定結果の対照とする TruPulse200 の測

図-4. iPhone と代用スコープの例

定結果にも測定誤差が含まれる可能性があるため、試験林における測定とは別途、高さが既知である物を対象とした測定検証も行った。対象物は一般的に設置されている送電線の鉄塔とした。測定は、まずボールの長さの対象物までの水平距離を一定とし、対象物の高さを変える、つまり高低角のみを変化させ、高低角の変化に伴う精度の違いについて検証を行った。対象とする高さは、低いものから高いものまで、9.4, 18.9, 28.3, 37.7 m の 4 パターンとした。対象物までの水平距離は 20 m, ボールの長さは 2.0 m とした。次に、対象物の高さの対象物までの水平距離は固定しボールの長さを変える、つまりボールの長さに起因する水平距離測定精度の変化について検証を行った。Spiegel Relaskop の樹高測定においてもボールの長さが水平距離測定精度に影響することが指摘されており（今永, 1987; 梶原, 1974）、高低角による精度の変化とは別途検証を行う必要があると考えられる。そこで、対象物の高さを 18.9 m, 対象物までの水平距離を 20 m とし、ボールの長さが 2.0, 1.5, 1.0, 0.5 m の 4 パターンについて検証を行った。

2. 測定精度検証結果

図-5 に iPhone, TruPulse200 それぞれの測定値を比較した結果を示す。表-1 には、TruPulse200 の測定結果をもとに対象木を 5 m ごとに区分し算出した RMSE と百分率 RMSE を記す。ここで RMSE とは、TruPulse200 の測定結果に対する iPhone の測定結果の差の二乗平均平方根（Root Mean Square Error: RMSE）、百分率 RMSE は TruPulse200 の測定結果に対する誤差の割合の二乗平均平方根である。また表-1 に、測定時の各立木における梢端までの高低角（図-1 における高低角 c ）と水平距離について、樹高区分ごとにその範囲を記す。

表-1 より RMSE は、10 m 未満の樹高に対しては 1 m 未

表-1. iPhone と TruPulse200 の高さごとの測定結果の比較

区分	対象木 本数	RMSE (m)	百分率 RMSE (%)	高低角 c の範囲 (°)	対象木までの 水平距離の範囲 (m)
5~10 m	8	0.48	5.58	16.40~37.63	7.53~15.34
10~15 m	22	1.62	10.81	11.12~47.12	8.18~15.42
15~20 m	16	1.38	2.54	15.60~46.21	10.53~19.28
20~25 m	9	2.01	16.67	27.88~48.14	13.85~18.41
25~30 m	6	4.84	21.28	33.25~46.87	20.55~21.48

図-5. iPhone と TruPulse200 の測定結果の比較

満、樹高 20 m までは 1.5 m 前後、20~25 m は 2.0 m, そして 25 m を超えると 4 m を超える結果となった。図-5 のグラフにおいても、対象とする樹高が低い場合にはプロットされた点が $y=x$ の直線付近に位置し比較的誤差が小さく、樹高が高くなるほど点がばらつき誤差が大きくなるという傾向を示した。その要因として、測定対象の樹高が高くなるとともに梢端を視準する際の高低角が大きくなったことが影響していると想定されるが、本研究では測定時に梢端を視準する際の高低角が大きくなりすぎないよう測定者から対象木までの距離を十分保つよう配慮している。表-1 の高低角 c の範囲をみると、樹高とともにその範囲が高低角の大きい側にシフトしているわけではないため、梢端を視準する際の高低角がすべての誤差要因とは言い難い。むしろ表-1 の対象木までの水平距離が樹高とともに大きくなっており、対象木までの水平距離が樹高の測定結果に影響した可能性が考えられる。

この結果をみる限り、iPhone による樹高測定は対象木の樹高が 25 m を超える場合は測定誤差が大きくなるといえるが、図-5 の結果には TruPulse200 による測定誤差も含まれている可能性があるため、一概に樹高 25 m 以上における iPhone の測定精度が悪いとはいえない。また誤差要因についても、高低角による影響であるか、水平距離が要因となっているのか、詳しく分析する必要がある。

そこで、試験林における測定とは別途、高さが既知である鉄塔を対象とした検証測定を行った。表-2 に、高さの異なる鉄塔に対しボールの長さの対象物までの水平距離を一定にしたときの測定結果と、測定者の視点の高さを 1.5 m としたときの梢端までの高低角（図-1 における高低角 c ）を示す。表-3 には、対象物の高さの対象物までの水平距離は固定し、ボールの長さのみを変えた場合の測定結果と、図-1 における高低角 b , a を表-2 と同様に測定者の視点の高さを 1.5 m とし算出した結果を示す。なお、いずれの測定も 5 回ずつ実施した。

表-2 の高さおよび高低角の RMSE より、対象物の高さが高くなり高低角が増加すると測定精度が低下することが示された。高さの百分率 RMSE と標準偏差も同様に高さとともに増加する傾向が認められた。バイアスを見ると、樹高が高くなるにつれ過小評価となることがうかがえる。これらの結果から、既存の樹高測定方法と同様、高低角が大きいほど樹高測定精度は低下する傾向にあることがわかった。

表-2. 高さごとの測定精度の違い

対象物の高さ (m)	高さ			高低角	
	RMSE (m)	百分率 RMSE (%)	バイアス (平均誤差) (m)	高低角 c (°)	RMSE (°)
9.4	0.7	7.9	-0.5	21.6	1.41
18.9	1.4	7.4	-0.4	41.0	1.64
28.3	2.9	10.1	-1.9	53.3	2.52
37.7	3.0	8.1	-2.7	61.1	3.36

高低角 c は図-1 と対応し、対象物までの水平距離を 20 m, ボールの長さを 2.0 m, 測定者の視点を 1.5 m とし算出した。

表-3. 異なるボールの長さにおける測定精度の違い

ボールの長さ (m)	高さ	水平距離	高低角				
	RMSE (m)	RMSE (m)	高低角 b (°)	高低角 a (°)	$b-a$ (°)	高低角 b の RMSE (°)	高低角 c の RMSE (°)
2.0	1.4	1.79	1.43	-4.3	5.7	1.16	1.34
1.5	3.7	4.70	0.00	-4.3	4.3	1.96	1.62
1.0	2.9	3.29	-1.43	-4.3	2.9	0.76	0.81
0.5	5.9	6.68	-2.86	-4.3	1.4	0.80	0.73

対象物の高さは全て 18.9 m とした。また高低角 b , a は図-1 と対応し, 対象物までの水平距離を 20 m, 測定者の視点を 1.5 m とし算出した。

次に, 表-3 の高さおよび水平距離の RMSE より, ボールの長さが短くなるとともに測定誤差が増加するという結果となった。この結果から Spiegel Relaskop と同様, ボールの長さが長い方が良い精度が得られるといえる。表-3 に示したとおり, 高低角 b , a をみると, ボールの長さが短くなるほどその差分は小さくなり, 水平距離 20 m, ボールの長さ 0.5 m の場合その差はわずか 1.4° となる。これに対し高低角 b , a の RMSE が 1.0° 前後であり, ボールの長さが小さいほど水平距離測定精度への影響が大きいことがうかがえる。また, ボールの長さが小さくなることは, 測定対象物までの距離が長くなることとも関連する。より高い対象物を測定する場合, 対象物までの距離を長くすることで高低角の増加による精度低下を抑制することができるが, ボール上下端の高低角の差が小さくなることによる水平距離測定精度の低下が考えられる。

以上の結果から, iPhone による樹高測定では, 従来の測高器と同様に測定対象の高さが高くなるほど測定精度が低下するということがわかった。特に今回採用した iPhone による測定方法では, Spiegel Relaskop と同様, ボールの長さ, 対象物までの水平距離も測定精度に影響を及ぼすことがわかった。このため今回開発したソフトウェアによる樹高測定では, ボールの長さが長いほど良い精度で樹高を求めることができるといえ, 特に測定対象物までの水平距離が長い場合はボールの長さが重要となる。本研究の結果から正確な数値を断定することはできないが, 梢端までの高低角は 50° 以内, ボールの長さは水平距離の 10 分の 1 以上という設定が, 測定時の一つの目安になると考えられる。また iPhone によるターゲットの視準では市販のストローをスコープとして代用したが, そもそも携帯電話端末として製作されている iPhone ではやはり視準が難しいため, 今後この視準方法には改良の余地があるといえる。

IV. お わ り に

森林の詳細な情報を得る手段として現地調査は欠かせないものであるが, その実施には多くの時間と手間がかかることが最大の欠点である。そのため, 森林情報を整備するためにも現地調査の効率を高めることは非常に重要であり, その手段の一つとして, 大隅 (1960) のように作業自体を検討するとともに, 測定機器の研究開発は有効であると考えられる。これまではデータを取得する測定器とその

データの処理, 集計を行うパソコンとが別々でなおかつ手書きの紙を媒体としていたため, 測定後データの入力や整理に手間と時間を要し, 即座にその結果を知ることができなかった。この問題は本研究で開発したソフトウェアによって解消され, 一つのスマートフォンのみでデータの取得と集計を同時に行うことが可能となり, 森林調査の効率を高めることができると考えられる。

スマートフォンのソフトウェアはネットワークを介し容易にアップデートが可能である。そのため本研究で開発した樹高測定ソフトウェアも, ユーザの要望などを取り入れ, 改修と機能強化によって, より利便性の高いソフトウェアへ発展させていくことができる。たとえば, 今回開発したソフトウェアではプロット面積については別途測定した値を用いる仕様となっているが, iPhone に搭載されている GPS や電子コンパス機能等を用いて測量が可能となれば, 別途測量機器を用意することなく iPhone のみでプロットの面積や位置情報を取得することが可能となる。また今回開発したソフトウェアの集計機能では, 毎木調査法のみのも想定となっているが, 標本木法や至近木法など多様な調査法に対応した集計機能を追加することで, より多くの場面での利用が可能となる。今後も森林調査の効率化を目的として, スマートフォンにおける樹高測定ソフトウェアの機能向上を目指す。

なお, 本研究で開発した iPhone 用樹高測定ソフトウェアは, 「iHypsometer」として Apple 社の iPhone ソフトウェア配布専用サイト, App Store から提供されており, 同じく Apple 社が提供する iPhone および iPod touch の各シリーズにて利用可能となっている。

引用文献

- 今永正明 (1987) シュビーゲル・レラスコープ. (森林計測学講義. 大隅真一編著, 養賢堂). 63-71.
 石川善朗・伊藤達夫 (2002) 樹高測定の誤差について. 京都府大演習林報 46: 5-7.
 梶原幹弘 (1974) シュビーゲルレラスコープによる樹冠の測定について. 日林誌 56: 105-107.
 嶺 一三 (1940) 簡易測高器の數種に就て. 日林誌 22: 100-104.
 宮本麻子・福田未来・西園朋広 (2000) 超音波測高器「VERTEX III」を用いた計測. 森林航測 191: 8-10.
 内藤健司 (1990) ブル・メライスによる固定試験林の樹高測定誤差について. 宇大演報 26: 77-83.
 大隅真一 (1957) BLUME-LEISS 測高器. 日林誌 39: 146-149.
 大隅真一 (1960) 林分材積調査の時間分析. 京都府大学報・農学 12: 87-97.