

着生果実のデジタル画像を用いた回転体状果実体積のリモート計測法の開発

山本隆儀*・谷澤佳美

山形大学農学部 997-8555 鶴岡市若葉町

Development of a Remote Measuring Method for Volumes of Attached Fruits Like Rotational Bodies Using Its Digital Images

Takanori Yamamoto* and Yoshimi Yazawa

Faculty of Agriculture, Yamagata University, Tsuruoka, Yamagata 997-8555

Abstract

A remote measuring method for volumes of fruit like rotational bodies was developed using digital images, and the precision of this method was examined using detached fruits. Further, based on these principles, remote measurement of volumes of attached fruits in an apple cultivar and a pear were carried out seasonally using several types of field photography devices. Each coordinate on a fruit outline in a side photograph was read in pixel units along the fruit shaft using an image analysis program. The volume of each very thin rotational disk composed of each radius and one pixel thickness was calculated and totaled. Cavity volumes were similarly calculated from cavity outlines in other images photographed at a 45-degree angle. The latter was used to deduce the fruit volume from the former. The relations between the measured volumes and the remote measured volumes were fairly good in several cultivars of apple, pear and grape. Photography for remote measuring in the field became possible using a device that allowed regulation of the height and angle in simultaneous photographs from two directions and maintained the attitude of cameras at 45 degrees.

Key Words : apple, cavity volume, digital camera, pear, photographing device in field

キーワード : デジタルカメラ, 陥没部体積, リンゴ, セイヨウナシ, 野外撮影装置

緒 言

着生果実の大きさは、果実発育ステージなどの指標として、園芸学研究で頻繁に用いられる。通常、果実横径や果実長が用いられるが、果実体積も用いれば一層有用である。また、体積をベースとした果実の成長曲線、果実体積当たりの養水分濃度、果実の膨張・収縮過程、収穫果実の選別や包装・加工などの広範囲の研究にとって、着生果実の体積を入手することが強く望まれる。しかし、報告されている着生果実体積は果実横径や果実長などを用いた推定値がほとんどであり、器具を用いた体積の実測値は極めて少ない。また、そのリモート計測値も皆無である。本研究は着生果実の写真による果実体積リモート計測法の開発を目的とするが、本報では回転体状果実に限定した計測法の原理を考案するとともに、室内実験においてその計測精度を検討した。さらに、野外で用いる撮影装置を製作し、改良しながら、着生果実を対象にリモート計測を行ない、野外におけるリモート計測の可能性を検討したものである。

材料および方法

1. 回転体状果実体積のリモート計測法の原理、スケールの取り扱いおよび計測の具体的方法

リンゴの場合、果実を果実軸に対して垂直に切断してできる円盤（以下、スライス）の平均半径を用いて、その回転体体積を計算し、全スライス分を加算すれば、陥没部を無視したときの果実体積を求めることができる（第1図

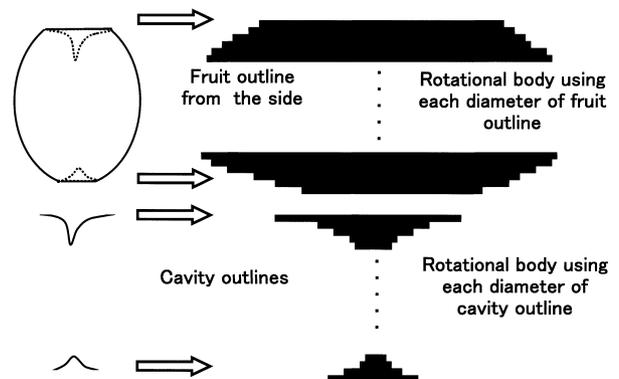


Fig. 1 A fruit volume or cavity volumes considered as sum total of each rotational body.

2008年3月6日 受付. 2008年5月22日 受理.

* Corresponding author. E-mail: yamamoto@tds1.tr.yamagata-u.ac.jp

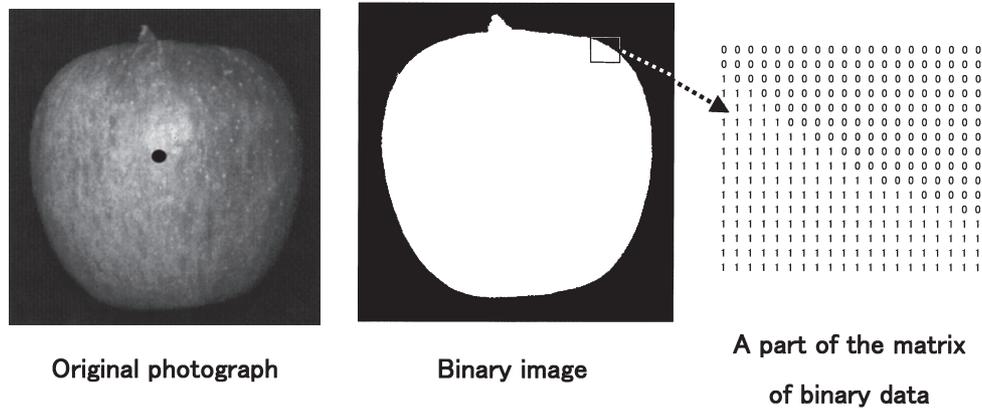


Fig. 2 A side photograph of an apple fruit (left), the binary image (middle) and a part of the matrix of the binary data (right). A circular plate in the left indicates a scale plate on the surface nearest the camera.

上). また, 陥没部空間を対象に同様なスライスを考え, その平均半径を用いて回転体体積を計算し, 全スライス分を加算すれば, 陥没部空間体積を求めることができる (第1図下). 前者から後者を差し引けば果実体積に等しくなる.

上記測定原理に立脚し, 一定の精度を有したリモート計測を行うには, 果実の写真画像から, 果実外形線と陥没部外形線の平面座標を画素単位に読み取り, それぞれの平均半径と1画素厚から作られる極めて薄いスライスの体積を計算することが必要である. そこで, 室内で以下の実験を行ない, 上記測定原理の有効性とこれに基づくリモート計測の可能性を検討した.

1) 撮影方法

撮影スタンドを用いて, 黒布を背景に, 果実軸 (回転軸) を縦方向にとり, デジタルカメラの視準線が回転体状果実の中心部を向くようにして真横から撮影した (第2図左). 野外撮影装置に搭載すべく, カメラには1/2.7型原色 CCD (総画素数は3.34メガピクセル) の撮像素子を有する軽量のスナップ写真用デジタルカメラ (ニコン, COOLPIX3100) を使用した.

2) 画像処理

画像処理解析ソフトウェア (デジモ, Image Hyper II) を用いて, その2値化画像を作成した (第2図中). さらに, 同ソフトウェアにより x 画素座標と y 画素座標からなる行列を作成した (第2図右). この行列は2値化画像の黒色部分が0, 白色部分が1 (あるいは255) からなる膨大なテキストファイルであった (以下, 2値データ行列). 2値データ行列のうち, 数値が0から1に変わる部分 (あるいは1から0に変わる部分) の x 画素座標と y 画素座標を自作コンピュータプログラム (以下, プログラム) により読み取り, 果実外形の左側 (あるいは右側) の平面座標を画素単位で計測した. 果実軸が写真縦枠に平行でなかったときには最初に画像の回転処理を施し, また, 撮影条件が不良なとき, あるいは, 果柄の除去には種々の画像処理を事前に施したが, これら処理の詳細については省略する.

3) スケールの取得

上記より半径の長さを画素数で表すことができたので, 半径の実長を得るには, これに1画素の実長 (以下, スケール) を乗じればよい. 果実最大半径 (r) が現れる果実最前面部に貼り付けた円形シール (以下, スケール板) がデジタルカメラの CCD 上に写ったときの直径を $S1$ とし, スケール板の実直径を $S1$ に相当する画素数で割り, 果実前面部における1画素の実長 (以下, 仮スケール) とした (第3図). ただし, 計測対象である果実外形線は果実中心を通るため (第3図), 仮スケールをそのまま用いることはできない. そこで, 同じ大きさのスケール板を果実外形線が通る平面上に設置したものと仮定し, その平面上のスケール (真のスケール) を計算した. CCD 上に写る被写体の大きさはレンズとの間の距離に反比例する関係から, このスケール板が CCD 上に写るときの直径を $S2$ とすれば (第3図), $S2/S1 = (WD - r)/WD$ の関係が成立した. ここで, WD

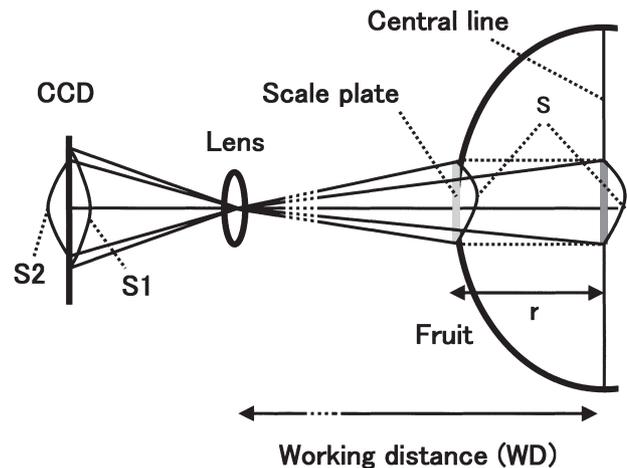


Fig. 3 The scale in a side photograph. r , S , $S1$ and $S2$ indicates the maximum fruit radius, the size of the scale plate, the size of the scale image on the CCD and that if the same scale plate was located at the central plane, respectively.

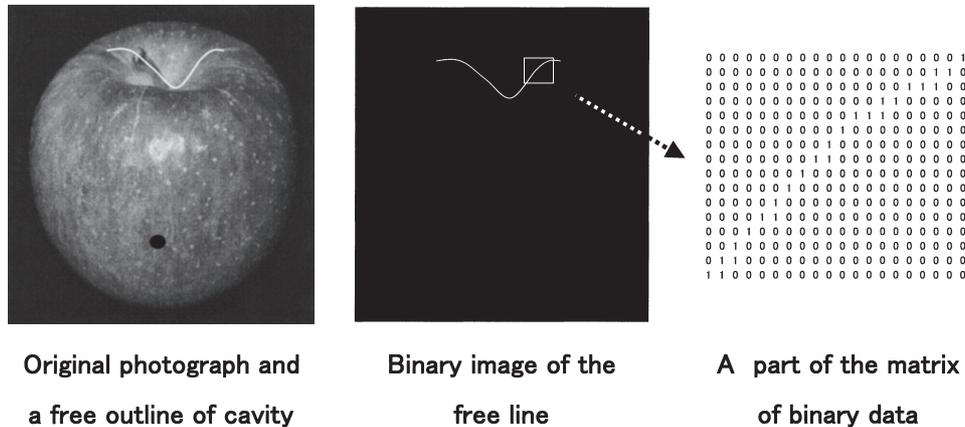


Fig. 4 An image of the stalk cavity in an apple photographed at a 45 degree angle and a free outline of the cavity (left), the binary image (middle) and part of the matrix of the binary data (right).

はレンズと果実中心の間の距離 (working distance) である (第3図). よって, 真のスケールは仮スケールの $WD/(WD - r)$ 倍になった. WD はその都度測定するか, あるいは, 撮影スタンドで一定に保った. ただし, 本実験では r を実測せず, 2 値データ行列から仮スケールのままで果実最大半径 (r^*) を計測したうえで, 仮スケールの $WD/(WD - r^*)$ 倍の値を真のスケールの近似値として用いた.

4) 体積の計算

真横写真における回転体体積を計算する自作のプログラム (以下, プログラム A) は, 2 値データ行列のほかに, パラメータとして WD , スケールおよび 2 値データ行列の行数と列数を入力するだけで, これ以降は以下のように自動計算を行った. すなわち, 2 値データ行列を果実軸に沿って 1 行ずつ読み込み, 外形線の左端と右端の x 画素座標を検出し, これらから算出した平均半径 (= 画素数 \times 真スケール) により, 1 枚の薄い回転体の体積を計算するとともにこれを累計しながら最終行まで上記計算処理を繰り返した (1 式).

$$V = \sum_{i=1}^n (P_i \times S^*)^2 \times \pi \times S^* \quad (1)$$

ここで, P_i は i 番目スライスの半径画素数, S^* は真スケールを示す. なお, 2 値データ行列の行数と列数はデジタルカメラの撮影時画素数によって異なった. また, 同プログラムは果実長 (FL) や最大径 (r) の出力も行った. 精度を高めるため, 上記とは 90 度異なる別の真横写真についても同じ計算処理を行い, 両体積を平均した.

5) 陥没部体積の計測

陥没部体積のリモート計測の場合, 撮影スタンド上に果実を傾けて置き, デジタルカメラの視準線が果実中心部を向くようにしながら, 果実軸に対して 45 度の角度で撮影した (第4図左). すなわち, こうあ部では 45 度見下ろし撮影, ていあ部では 45 度見上げ撮影であった (ただし, 果実先端部が下方を向く場合). いずれの場合も真横写真のときと同じ撮影距離を用いた. 次に, 果実外形線につながる陥

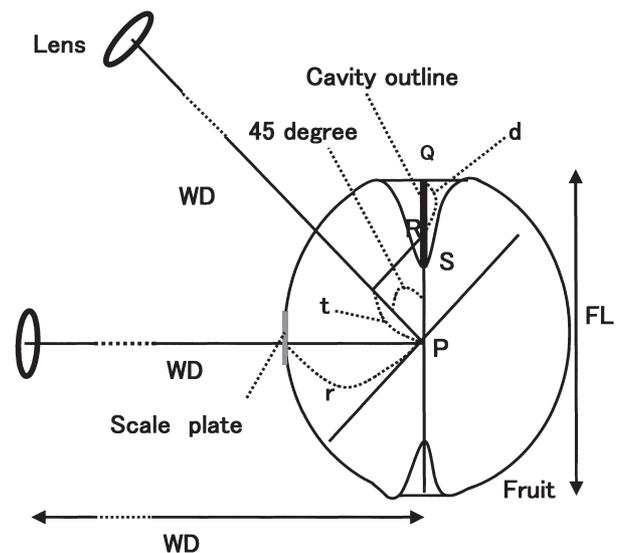


Fig. 5 The scale of the cavity image photographed at a 45 degree angle. WD , r , FL and P indicates the working distance, the maximum fruit radius, the fruit length and fruit center, respectively. d indicates depth at a point R on the free line of the cavity (QS), and was calculated by a program using the binary data.

没部表面部位を画面上で判断しながら, ペイント関連のソフトウェア (Microsoft (R), ペイント, Vers. 5.1) を用いて白色の陥没部外形線を写真画像上に書き加え (第4図左), さらに, 2 値化画像に変えた (第4図中). 次に, 真横写真のときと同じ要領で 2 値データ行列を作成した (第4図右). もう一つの自作プログラム (以下, プログラム B) が陥没部外形線 (白線) の位置を読み取るには, 各行左端から走査し始め, 数値が最初に $0 \rightarrow 1$ に変わった場所を左端としたうえで, 次に右端から走査し始め, 数値が最初に $0 \rightarrow 1$ に変わった場所を右端とした.

斜め撮影の場合でも, カメラ視準線は果実中心を向き, WD は真横撮影のときと同じであったので, 仮スケールには真横撮影のときに得られたものをそのまま用いた. しか

し、陥没部外形線とレンズとの間の距離は陥没線の深さによって変化することから(第5図)、スケールの取り扱いには真横撮影のときのようにはいかない。陥没部外形線QS(第5図の太い線)上の任意の1点Rとカメラ視準線に平行なレンズとの間の距離(WD-t)は点Rの深さ(d)によって異なり(第5図)、次式により計算できる。

$$WD-t = WD - (\text{線分 PQ の長さ} - d) \cos(45^\circ) \quad (2)$$

ここで、線分PQの長さは果実長(FL)の2分の1である(第5図)。dは2値データ行列を用いてプログラムBにより計算した。すなわち、最初に陥没部を取り囲む稜線部のy画素座標を読み取ったうえで、任意の点(R)のy画素座標を差し引いて、その点の深さとした。ただし、もともと45度の傾きで撮影したので、陥没部外形線は実際の深さより浅く写真に写っている。そこで、上記の計算値に $\sqrt{2}$ を乗じたものをdとした。上記のようにレンズから陥没部外形線上の任意の点までの距離が計算できたので、斜め撮影のときの真スケールは仮スケールを $(WD - (FL/2 - d) \cos(45^\circ)) / (WD - r)$ 倍にすればよい。ここで、WDは真横撮影のとき、rおよびFLはプログラムAによる計算のときに、それぞれ、入手されている。

上記のスケールの取り扱いを除けばプログラムの中味は真横写真の場合と同じであった。なお、陥没部体積は極めて小さかったので、本実験では、こうあ部とていあ部の体積計算は1果につき各1回とした。

2. 供試材料

2006年に山形大学農学部内実験果樹園栽植のアウトウの‘佐藤錦’、‘蔵王錦’および‘南陽’の3品種、リンゴの‘紅玉’、‘旭’、‘ふじ’、‘スターキング・デリシャス’および‘国光’の5品種、セイヨウナシの‘ラ・フランス’および‘パートレット’の2品種、ブドウの‘巨峰’および‘安芸クイーン’の2品種およびカキ‘平核無’から、各品種の果実生育に応じて約1か月間隔に果実を数個ずつ採取し、果実体積のリモート計測などの実験に用いた。このほか、果実以外の物体として、直径から体積が計算できる種々のサイズの球体(ガラス玉と合成樹脂製ボール)を用いた。

3. 回転体の評価方法

供試材料の回転体としての評価には等周不等式による円形度係数を用いた。円形度係数は $4\pi \times \text{面積} / \text{周囲長}^2$ の式で計算され、真円形の場合に最大値(=1)となり、細長い場合は0に近くなる。そこで、採取した果実から果実軸に沿って果実横断切片を作成した。この撮影画像を対象に、Image Hyper IIを用いて円形度係数を計算した。なお、横断切片数は基部側と先端部側を含め、その間をほぼ等間隔に4か所とり、合計6切片としたが、果実長の短いものはこれよりも少なくした。

4. リモート計測によらない体積の測定法(既存の手法)

既存の手法による体積の測定には、最初にリモート計測のための写真撮影を行った後に、測定対象によって以下の

3方法を用いた。

1) 直径を用いた球体積の推定

球体の体積はその3軸に沿った直径をデジタルノギスで測定し、平均半径(a)を求め、これを球体積式($V = 4/3a^3\pi$)に代入して計算した。

2) 液体置換法

成熟開始後のブドウ果粒の実体積はメスシリンダーによる液体置換法で測定した。液体には水道水を用いた。

3) 比重による推定

リンゴとセイヨウナシの果実および成熟開始前のブドウ果粒にはその重量を測定後、ステンレス製カミソリの刃2枚からなる裁断具により一定体積の果肉を数か所切り取り、秤量瓶で重さを測ることで平均比重をまず求め、次に、果実重量を平均比重で割ることで体積を求めた。

4) 回転楕円体と見なしたときの体積の推定

上記3方法のほかに、参考データとして果軸を回転軸とする回転楕円体と見なしたときの体積も計算した。すなわち、果実平均横径の半分(a)と果実長の半分(b)を用いて楕円球体積式($V = 4/3a^2b\pi$)により計算した。

5. 野外における着生果実体積のリモート計測方法

1) 計測方法

野外における、果実体積リモート計測の原理、スケールの取り扱い、画像処理および計算処理は1.に記した室内実験のものと同じである。ただし、野外用の撮影装置として、カメラの保持、WDの固定、45度斜め撮影のための姿勢保持、撮影バックの設置方法などの点で、室内実験と同じものを使用できない。そこで、このための撮影装置などを種々考案し、撮影の所要時間と労力を検討し、最終的に第6図に模式的に示した装置を作製した。カメラなどの保持には三脚を用いず、測定対象果実の近くの地面に1本の鉄製ポールを垂直に立て、その上に角ムッフを取り付けた。アルミアングル(またはアルミ板)を用いて1辺の長さがWDになるようにしたL字形基板を作製し(第6図左)、その一端を角ムッフに固定し、角度と高さを自由に換えられるようにした。また、L字形基板の両端にデジタルカメラを設置できるようにした。着生果実では果実軸が地軸に対して傾く場合が多かったので、L字形基板の傾斜角度調節により真横撮影を可能にした(第6図右)。また、錘糸付分度器を設置し、そのときの傾斜角度を読み取り、斜め45度見下ろし撮影あるいは斜め45度見上げ撮影の際の所要角度の計算に用いた(第6図右)。なお、果実が大きく写るほど計測精度が高いため、小さい果実にはWDを可能な限り短くした。本デジタルカメラの最小WDは30cmであったので、L字形基板の1辺の長さがこれより若干長い35cmを含む3段階のものを作製した。撮影時、果実の後ろに正方形をした黒布バックを張った。輪ゴムにクリップ2個を取り付け、一方のクリップを周辺の枝葉に固定し、他方のクリップで黒布バックを張った(第6図中)。あらかじめ黒布バックの中央に直線状の切れ込みを半分ほど入れ、果柄を

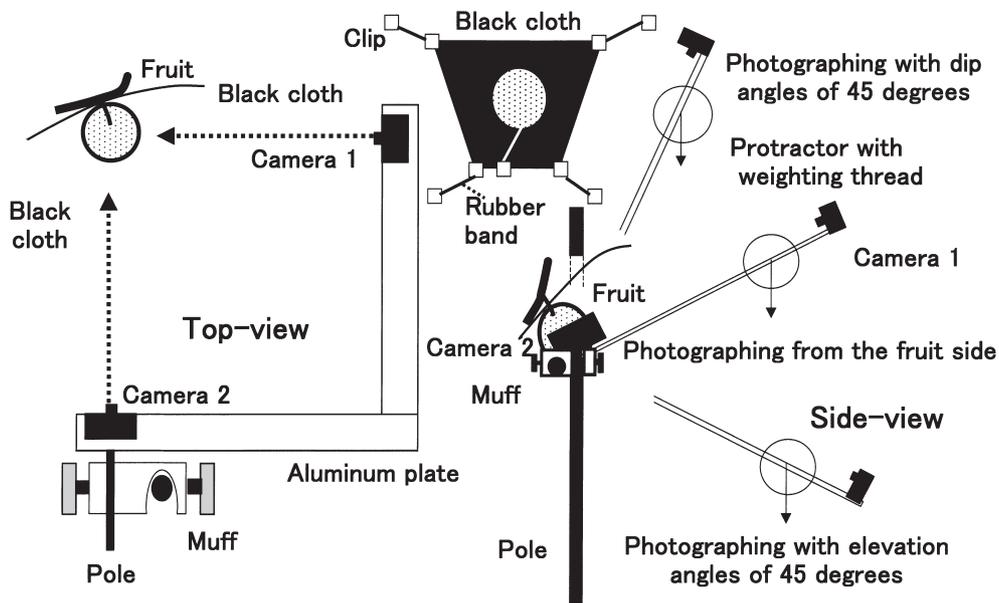


Fig. 6 The schema of a device for photographing attached fruits in the field.

通した後、あたかも襟元を閉じるように、切れ込み部分を閉じ、クリップで固定し、果実周辺の着生葉が見えなくなるようにした（第6図中）。

2) 葉果比を変えた着生果実のリモート計測

2007年に、2. に記した実験材料のうち、リンゴ‘ふじ’とセイヨウナシ‘ラ・フランス’各2樹を用い、いずれも6月下旬に4年生側枝に1.5 cm幅の環状はく皮を施し、いろいろな大きさの果実を得る目的で、葉果比が約10段階になるように摘葉処理を施した（各段階1側枝）。その後、20～25日間隔に同一着生果実（各側枝1個）の体積のリモート計測を行った。この測定とともに、デジタルノギスを用いて果実の胴部2か所の横径と果実長を測定した。さらに、4. 4) に記した方法で回転楕円体と見なしたときの体積を計算した。

結 果

1. 供試果実の回転体の評価

リンゴとセイヨウナシの各2品種およびカキとオウトウの各1品種における果実横断切片の円形度係数を第1表に示した。リンゴとセイヨウナシでは、幼果期の円形度係数はやや小さかったが、成熟期になるほど1に近くなった。また、果実の基部側と先端部側の横断切片は、胴部切片に比べて円形度係数は小さい傾向が認められた。第1表に示さなかったリンゴの他の品種についても同様の傾向が認められた。よって、リンゴとセイヨウナシは回転体状と見なされた。ブドウについては途中液果になったため、それ以降は横断切片を作成できず、円形度係数の測定をとりやめたが、外見上回転体状と見なされた（データ省略）。これに対し、オウトウでは幼果期の円形度係数はやや大きかったが、成熟期では逆に小さくなり、ほとんどの横断切片の円

形度係数は0.7台であったことから（第1表）、回転体状とは見なされなかった。また、カキの‘平核無’では、全期間を通して円形度係数はあまり大きくなく、特に、8月と9月上旬に円形度係数が一度減少し、その後やや増大したが（第1表）、総じて回転体状とは見なされなかった。

2. 体積のリモート計測値と既存の手法による計測値との関係

カキとオウトウを除く、全供試材料の体積のリモート計測値と液体置換法や比重による計測値を比較したところ、両者間にほぼ良好な関係が認められた（第7図）。ただし、品種によっては1:1の線上からやや外れたものも見られたので、供試材料別の回帰直線式（第2表）を検討したところ、球体、リンゴ全品種、セイヨウナシ‘ラ・フランス’およびブドウ‘安芸クイーン’の勾配値は1に近かったが、セイヨウナシ‘バートレット’とブドウ‘巨峰’の勾配値は1より少し外れた（第2表）。また、リンゴ全品種とセイヨウナシ‘ラ・フランス’の切片値は0から少し外れた。直線回帰式の決定係数（ R^2 ）はブドウ‘巨峰’を除き全て0.97以上であり（第2表）、総じてリモート計測値と実測値の間の直線的関係が認められた。

回転楕円体と見なして算出した体積と液体置換法や比重による体積計測値の関係は上記のリモート計測値の場合より総じて少し劣った（第2表）。

3. 野外における撮影装置の評価

野外用の撮影装置については随時改良しながら計測を行ったが、いずれの装置においてもリモート計測は可能であった。最初は三脚を用いたため、WDをその都度計測せねばならず、また、45度斜め撮影の際の角度調節が難しく、撮影には長時間を要した。次に用いた撮影装置はポールの使用、WDの固定、錘糸付分度器の設置などの点で第6図

Table 1 Seasonal changes in degrees of rotundity of fruit cross section at different positions along the fruit axis in the several cultivars. The smallest numeral and the largest numeral indicating position refer to the base and tip, respectively. Each degree of rotundity was the mean value of two samples at each position.

Fuji							Starking Delicious						
Date	1	2	3	4	5	6	Date	1	2	3	4	5	6
5/25	0.44	0.54	0.70	0.62	0.45	0.55	5/25	0.75	0.73	0.78	0.66	0.51	0.59
6/14	0.86	0.93	0.94	0.93	0.79	0.71	6/14	0.79	0.92	0.94	0.92	0.89	0.64
7/8	0.62	0.72	0.87	0.83	0.67	0.71	7/8	0.71	0.77	0.75	0.85	0.68	0.88
7/30	0.74	0.79	0.83	0.70	0.80	0.77	7/30	0.86	0.81	0.94	0.79	0.86	0.66
8/10	0.88	0.95	0.92	0.88	0.78	0.66	8/10	0.95	0.95	0.93	0.88	0.91	0.85
8/27	0.75	0.91	0.95	0.89	0.85	0.74	8/27	0.91	0.95	0.95	0.93	0.92	0.89
9/9	0.87	0.95	0.94	0.86	0.79	0.95	9/8	0.83	0.94	0.95	0.94	0.91	0.87
9/30	0.93	0.93	0.95	0.95	0.82	0.93	9/30	0.93	0.95	0.95	0.95	0.92	0.93
10/17	0.91	0.96	0.96	0.96	0.85	0.96							
10/30	0.87	0.95	0.96	0.93	0.95	0.90							
11/10	0.92	0.96	0.95	0.89	0.95	0.95							

La France							Bartlett						
Date	1	2	3	4	5	6	Date	1	2	3	4	5	6
6/23	0.55	0.66	0.75	0.85	0.77	0.53	6/23	0.75	0.81	0.87	0.86	0.78	0.63
7/12	0.60	0.65	0.70	0.78	0.81	0.70	7/14	0.77	0.89	0.89	0.88	0.83	0.83
7/30	0.73	0.81	0.88	0.89	0.85	0.87	7/30	0.71	0.83	0.86	0.81	0.74	0.80
8/9	0.72	0.83	0.91	0.78	0.83	0.71	8/9	0.78	0.91	0.91	0.91	0.87	0.77
8/28	0.88	0.90	0.88	0.90	0.82	0.88	8/28	0.80	0.90	0.81	0.87	0.81	0.73
9/6	0.78	0.92	0.94	0.94	0.93	0.85	9/4	0.95	0.95	0.93	0.91	0.94	0.74
9/30	0.80	0.93	0.95	0.92	0.90	0.71							
10/16	0.88	0.93	0.88	0.93	0.89	0.90							

Hiratanenashi						Satoh Nishiki				
Date	1	2	3	4	5	Date	1	2	3	4
7/16	0.81	0.70	0.83	0.87	0.72	5/22	0.84	0.87	0.80	0.85
7/30	0.78	0.84	0.75	0.85	0.64	6/14	0.74	0.63	0.79	0.77
8/10	0.88	0.76	0.76	0.76	0.86					
8/28	0.66	0.56	0.57	0.67	0.54					
9/5	0.61	0.64	0.72	0.75	0.66					
9/30	0.91	0.91	0.92	0.90	0.82					
10/17	0.93	0.94	0.94	0.87	0.88					
10/30	0.88	0.92	0.86	0.84	0.89					

にやや似ており、三脚の場合より所要時間は相当短縮した。しかし、L字形基板の一端のみにカメラを設置したので、2方向の真横撮影においては、ポール立て作業を2回行わねばならなかった。さらに、果実軸が地軸に対して傾斜しているときは、果実正面より90度異なる方向からの真横撮影写真には果実が傾いて写ったので、後で画像回転処理を必要とした。これに対して最終的な撮影装置(第6図)では、ポール立て作業は一度で済み、また、角ムッフ部分にもカメラを設置できたため、2方向からの真横写真にはいずれも果実がまっすぐ写った。この場合、2台のデジタルカメラを同時に設置すれば、所要時間はもっと短縮できた。

4. 葉果比の異なる‘ふじ’と‘ラ・フランス’における着生果実体積の経時的リモート計測結果

‘ふじ’と‘ラ・フランス’におけるリモート計測結果の一部を第8, 9図に示した。なお、継続計測中の果実の一部において収穫前落果が発生したため、計測回数は全処理区で揃わなかった。果実体積は果実長や果実直径の経時的変

化に似て、曲線状に変化したが、後2者の曲線は測定部位が測定のために異なることが多かったためか滑らかではなかった(第8, 9図)。また、楕円球体積式に代入して算出した値と体積リモート計測値の間には大きな違いが認められ、特に‘ふじ’で違いが目立った(第8, 9図)。さらに、葉果比が低いほど果実体積は小さかった(第8, 9図)。摘葉処理後約2か月半の間の果実横径(2方向)、果実長および楕円球体積値の増分と葉果比との間の相関係数は、両品種ともリモート計測値の場合より低かった(第3表)。

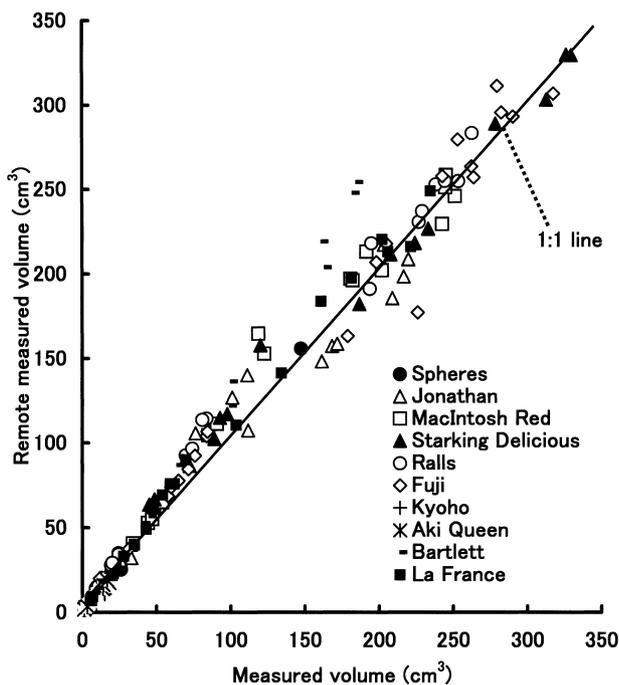
考 察

果実体積の計測方法を大別すると、1)採取果実を用いる実測法(破壊的測定法)、2)着生果実の直径や果実長などを用いる推定法、3)着生果実を対象とする携帯用計器による実測法、4)着生果実を対象とするリモート計測法がある。

上記のうち、採取果実を用いる実測法は、同一果実の継続測定が不可能であるとともに、果実体積の季節的変化な

Table 2 Relationships between the remote measured volume (y) and the measured volume (x) in several fruits and spheres, relationships between x and the calculated volume (v) using equation of ellipse sphere, and other information, viz. range of volume, method of volume measurement and range of specific gravity.

Objects	Equations of y using x	R ^{2z}	Equations of v using x	R ²	n ^y	Range of volume (cm ³)	Method of volume measurement	Range of specific gravity (gcm ⁻³)
Apples								
‘Fuji’	y = 0.97x + 9.98	0.98	v = 0.90x + 10.47	0.97	23	8.4–311.1	SG ^x	0.863–1.344
‘Starking Delicious’	y = 0.95x + 14.85	0.99	v = 0.89x + 13.98	0.99	17	16.2–337.5	SG	0.835–1.337
‘Jonathan’	y = 0.92x + 10.50	0.97	v = 0.87x + 10.78	0.97	19	8.0–222.3	SG	0.775–1.678
‘Ralls’	y = 1.00x + 10.51	0.97	v = 0.91x + 11.70	0.98	19	9.2–288.2	SG	0.886–1.521
‘McIntosh Red’	y = 0.98x + 13.27	0.98	v = 0.92x + 13.73	0.97	19	20.3–264.5	SG	0.803–1.309
Pears								
‘La France’	y = 1.03x – 6.16	0.99	v = 1.06x + 7.32	0.98	18	8.0–249.9	SG	1.011–1.842
‘Bartlett’	y = 1.34x + 1.11	0.99	v = 1.69x – 2.02	0.93	14	11.6–255.0	SG	1.359–1.739
Grapes								
‘Kyoho’	y = 0.83x + 1.24	0.90	v = 0.83x + 1.22	0.90	13	1.3–10.7	SG → LS ^w	1.421
‘Aki Queen’	y = 1.03x + 0.29	0.99	v = 1.02x + 0.25	0.98	13	1.5–18.8	SG → LS	1.616
Spheres	y = 1.06x – 0.89	0.99	v = 1.00x + 0.00	1.00	5	1.3–26.0	CSV ^v	
Total	y = 1.00x + 7.89	0.97	v = 0.96x + 10.42	0.92	160	1.3–337.5		

^z Coefficients of determination of formulas.^y Number of samples.^x Method using specific gravity.^w Liquid substitution method during maturation period.^v Calculated value using sphere volume equation.**Fig. 7** Relationships between the measured volumes and the remote measured volumes of the fruits in several cultivars and spheres.

どを調査するときは、実験処理区当たりの果実数を多く必要とする。

推定法は、上記の破壊的測定法による体積実測値と果実の代表的寸法の測定値を数多く入手することで、あらかじめ推定式を作成せねばならない。球や楕円球の体積計算式に経験的に得られたパラメータを組み合わせたものが多い

が、そのほかの工夫を凝らしたものもある。着生果実の継続的測定が可能であるが、計算式に用いられるパラメータが品種、時期、その他環境要因によって異なるなどの欠点がある。直径と果実長を用いたものは非常に多く、たとえば、甘果アウトウ (Muskovics ら, 2006), トウガラシ (Ngouajio ら, 2003), マスクメロン (Jenni ら, 1997) などがある。このほか、上記とやや似たものとしてリンゴ果実重量の推定法 (瀧下ら, 1993) がある。また、直径の代わりに周囲長を用いて推定したものにキュウリ (Marcelis, 1992) などがある。さらに、収穫後果実の等級分けに用いたものとして、上記の果実寸法に加えて果実投影面積を用いた推定法 (Khoshnam ら, 2007; Tabatabaefar・Rajabipour, 2005) がある。

着生果実を対象にする計器測定法には、約 40 年前に試作されたものとして、2 部分に分けられる容器に果柄部分を外に出しながら着生果実を閉じこめ、内部を満たした水量から果実体積を逆算するものがあったが (Dean ら, 1969), 同計器を用いた計測例はその後見当たらない。最近、これとほぼ同じ原理で、水の代わりに空気で満たす計器がチリーで試作され、着生したブドウ果房の体積が計測されている (Iraquen ら, 2006)。これらの携帯型計器の製品化と普及が望まれるところであるが、同時に樹種の違い、測定時期の違いに対する汎用性を具備することが肝要であると思われる。このほか、着生果実を水に入れ、浮力を精密天秤で測り、アルキメデスの原理により体積を計算する方法も考案されているが (Lang・Thorpe, 2005)、この場合はガラス室のような施設内測定に限定されると思われる。

本報に記した計測法は非破壊的かつ非接触式の果実体積測定法として最初のものと言える。ただし、果実以外の

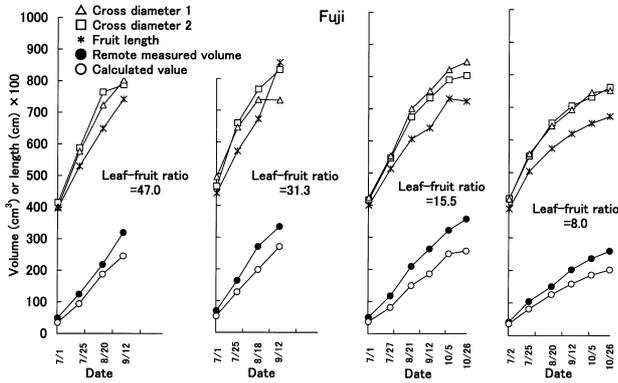


Fig. 8 Seasonal changes in the remote measured volumes, the lengths and the two cross sectional diameters of fruits on the lateral branches with different leaf-fruit ratios in 'Fuji' and the calculated values using the formula of the ellipsoidal sphere volume.

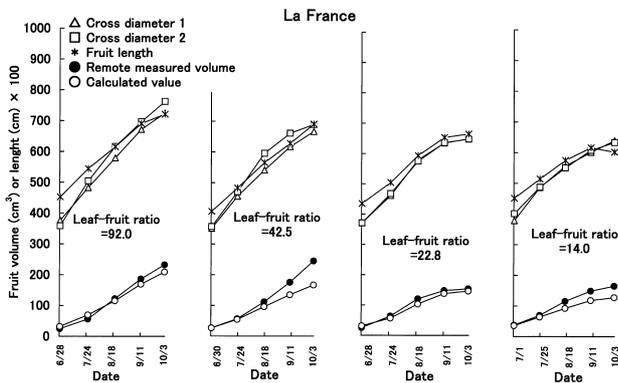


Fig. 9 Seasonal changes in the remote measured volumes, the lengths and the two cross sectional diameters of fruits on the lateral branches with different leaf-fruit ratios in 'La France' and the calculated values using the formula of the ellipsoidal sphere volume.

Table 3 The correlation coefficients (*r*) between the leaf-fruit ratios and the increments of the several parameters of fruit size 73 days after defoliation treatment in 'Fuji' and that 74 days after in 'La France'.

Parameters	Cultivars		Fuji		La France	
	<i>r</i>	<i>n</i> ^z	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>
Cross diameter 1	0.828** ^y	8 ^x	0.517	9 ^w		
Cross diameter 2	0.744* ^y	8	0.850**	9		
Fruit length	0.803**	8	0.334	9		
Volume as an ellipse sphere	0.888**	8	0.633	9		
Remote measured volume	0.905*** ^y	8	0.861**	9		

^zNumer of observations.

^y*,** and *** indicates significance at the 5%, 1% and 0.1% level, respectively.

^xEight stages in leaf-fruit ratio (2.0, 4.0, 8.0, 9.0, 15.5, 18.5, 31.3 and 47.0).

^wNine stages in leaf-fruit ratio (14.0, 16.4, 22.8, 23.0, 38.0, 42.5, 56.0, 66.0 and 92.0).

物体を対象にした3次元計測法やリモート計測法の開発の歴史は古く、また、これらによる計測は広く行われている(吉澤, 2007). 3次元座標を計測するので、体積も計算できる. 吉澤(2007)によると、これらの手法は一般に光3次元計測と呼ばれ、1) ポイント光方式とライン光方式、2) 画像プローブ方式、3) エリア計測方式、4) 顕微鏡による3次元計測などに大別される. 上記の光3次元計測は、工場における製品管理、金属加工業における金型づくり、医療現場における身体計測や歯型づくりなど、その範囲は極めて広く、多様である. ただし、その多くが、移動が容易でない精密機器を用いているため、生産ライン上に設置したり、設置場所に測定対象や人間を移動させて計測する. また、測定対象を移動したり、回転して計測する場合も多い. 従って、果樹園内を移動しながら着生果実の体積を測定するのにこれらを用いることは極めて困難であると考えられる. 本研究手法として用いたデジタル画像に画像処理解析を行うリモート計測法は、上記分類中、画像プローブ方式に属するものと言える. ほぼリアルタイム的に測定結果を出力する他方式に比べて、写真解析などを包含する画像プローブ方式には測定結果を得るまでにソフトウェアによる種々の処理を介在するなどの不便な点はない(吉澤, 2007). 本実験中、写真撮影後の画像処理やプログラム計算には一定の時間を必要とした. しかし、このことは着生果実という計測場所上の制約や、陥没部体積の計測などの特殊性に起因するものでやむを得ないものと思われる. また、上記計測作業は、習熟すれば誰にでもできるパソコンの単純作業でもある. ただし、なんらかの画像解析処理用のソフトウェアが必要であることを断っておきたい.

既存の手法による代表的な果実直径や果実長、あるいはこれらによる果実体積の推定値と比較して、本方法によるリモート計測値には、用いた品種に特有な果形や陥没部体積が反映するため、果実肥大に及ぼす葉果比の影響を最も鋭敏に捉えることができた(第3表)と考えられる. 仮に楕円球体積式による推定値とリモート計測値の比が、果実生育期間、さほど変わらなければ、前者だけで十分その目的を果たせる. 幼果期(5, 6月)のデータを含む'ふじ'の場合、この比の全期間平均値は約1.07であり、大きくなかったが(第2表)、7月以降の果実肥大最盛期および成熟期には急増し、最大1.44にまで達し(第8図)、果実生育期間を通して見ると大きく変動するものと考えられる. この理由として、リンゴ果実外形線は幼果期の卵形から次第に円形に変わり、さらに肥大が進むと樽形に変化するため(第2図の果実写真を参照)、リモート計測値と楕円球体積式を用いた推定値との較差が広がったことが考えられる. 'ラ・フランス'は丸みを帯びた瓶形を維持するため、果実生育期間を通して見ても、この較差は'ふじ'より小さかったものと考えられる(第9図). ただし、同品種の果実外形線の形はリンゴのように滑らかでなく、また、乱れ

やすく、果実によっては、この較差の大きいものも一部見られた(第9図)。

デジタル画像を用いる計測上の利点として、以下のことがあげられる。接触式長さ測定計器であるデジタルノギスの場合、その測定精度は通常0.01 mmであるが、これを用いて果実の長さ測定を行う場合、その測定点が限られる。デジタル画像を用いることにより、リモート計測を可能にし、計測点数が飛躍的に増大する。さらに、長さ測定精度もさほど低下しない。たとえば、対象果実がデジタルカメラ CCD (縦長:横長 = 3:2) の長辺の7割になるように撮影するとき、3.1メガピクセルのデジタルカメラで計測するときの長さ測定精度は5 cm 大の果実では0.034 mm、2 cm 大の果実では0.014 mmになる。また、6.1メガピクセルのデジタルカメラの長さ測定精度は5 cm 大の果実では0.024 mm、2 cm 大の果実では0.009 mmになる。最近では10メガピクセル台デジタルカメラも市販されているので精度はもっと高まる。セイヨウナシ果実横径の日変化量を0.5 mm 前後とし、長さ測定精度が0.01 mm 程度であれば、緒言に記した果実の膨張・収縮の日変化や時間変化の計測も不可能ではないだろう。この場合、撮影装置(第6図)を同じ場所に設置し、同一の果実を同一の視準線で継続撮影することで、本リモート計測法の誤差はかなり減少するのであろう。

既存の手法による室内実験の多くには比重による推定法を用いたため、比重誤差(カッター寸法の誤差、比重の果実内不均一分布、比重値そのものの大きな季節的变化)による影響は無視できない(第2表)。

本リモート計測法の主要な誤差源として、最初に、果実が理想的な回転体ではないこと(第1表)を強調したい。多くの果実で、切片が0 近くにならずに、たいてい、正值であった(第2表)理由として、効果ほど円形度係数が小さかったこと(第1表)が考えられる。この場合、回転体とはかけ離れたものを無理やり回転体と見なして計算すれば、計算値は過大評価をもたらす。さらに、‘パートレット’における回帰係数が約1.3になった(第7図、第2表)理由として、横断切片の円形度係数が大きくても、その特有な果実形から見て果実軸そのものが曲がりやすい場合には、リモート計測値が過大になることが考えられ、今後検討したい。

次に、真スケールの近似値を用いたことによるリモート計測値の過大評価は否定できない。材料および方法の3)に記したように、 $r^* \approx r \ll WD$ の関係から、本実験では簡便法として、 r^* を用いたが、このことによる真スケールに対する真スケール近似値の比は、たとえば、直径1 cm の果実を40 cm のWDで撮影したときでは1.012、直径4 cm の果実を60 cm のWDで撮影したときでは1.034になる。計算結果に直接響くだけに、この面での誤差をなくすには、果実最大半径 r はあらかじめデジタルノギスなどを用いて測定しておくことを勧めたい。

撮影や画像処理過程における誤差源として、低解像度デジタルカメラの使用、照明やバックの不良による2値化のときの不鮮明な境界とその手補正上の誤差、陥没線の引き方の誤差、撮影条件(レンズ焦点距離、ピント合わせ、撮影距離、絞りなど)による写真画像の不良(歪やボケ)などが考えられる。ブドウ‘巨峰’の回帰式の直線性が不良であった(第2表)理由は、黒色の背景に同系統の色を有する果粒を撮影したことによるもので、2値化画像が他の果実に比べて不鮮明であったためであり、背景色を変えることで改善できると考えられる。本実験使用のカメラがオートフォーカス機能に限られたため、写った果実外形線のボケによる影響も考えられる。改善策としては、1眼レフデジタルカメラでは、絞り優先でマニュアルフォーカスにより果実外形線にピントを合わせることであろう。また、本実験のようにオートフォーカス機能に限られた場合でも、可能ならぎりぎり広いフォーカスエリアを選択するか、あるいは、フォーカスロックで果実外形線にピントを合わせてから正規のカメラ位置に戻して撮影することが考えられる。ただし、1眼レフカメラを使用するときは、その重量に耐えられる撮影装置(第6図)が必要である。後者のフォーカスロック撮影ではポールを三脚に取り付け、カメラ位置の移動を容易にすることが必要であろう。写真画像の歪をもたらすレンズ焦点距離、撮影距離、絞りなどの撮影条件については、1眼レフデジタルカメラを用いて今後詳細に検討したい。

果実が理想的な回転体ではないことを除き、上記の多くの誤差は改善の余地があるものと考えられる。カキ‘平核無’やオウトウ品種のような非回転体状果実に対しては本方法は原理的に適用できない。そこで、筆者らは、現在、本方法とは全く異なる手法である立体写真測量法に基づく、非回転体状の果実をも対象にした新しい着生果実の体積のリモート計測法に取り組んでいる。

摘 要

着生した回転体状果実のデジタル写真画像を用いた果実体積のリモート計測法を考案し、その計測精度を検討するとともに、野外で用いる撮影装置の製作と着生果実を対象にしたリモート計測を行なった。果実の真横からの写真画像から、果実外形線の位置を果実軸に沿って画素単位に読み取り、それぞれの平均半径と1画素厚から作られる極めて薄い回転体スライスの体積をプログラム計算し、合計した。また、斜め45度の写真画像における陥没部(リンゴではこうあ部とていあ部)外形線から同様に陥没部空間体積を計算し、前者から後者を差し引き、果実体積とした。室内で、多くの回転体状果実を対象に体積のリモート計測を行ったところ、リモート計測値と実測値の間にほぼ良好な関係が認められた。ポールを地面に立て、その上に、高さや傾きが調節でき、かつ、同時2方向からの真横撮影および45度撮影を可能にする装置を取り付けることで、野外に

おける着生果実体積のリモート計測作業が容易になった。

引用文献

- Dean, A. E., J. Molitorisz and A. E. Mitchell. 1969. An instrument for measuring the volume of intact fruits. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 89: 30–33.
- Iraguen, V., A. Guesalaga and E. Agosin. 2006. A portable non-destructive volume meter for wine grape clusters. Meas. Sci. Technol. 17: N92–N96.
- Jenni, S., K. A. Stewart, G. Bourgeois and D. C. Cloutier. 1997. Nondestructive volume estimation for growth analysis of eastern-type muskmelon ovaries. HortScience 32: 342–343.
- Khoshnam, F., A. Tabatabaefar, M. G. Varnamkhasti and A. Borghai. 2007. Mass modeling of pomegranate (*Punica granatum* L.) fruit with some physical characteristics. Sci. Hort. 114: 21–26.
- Lang, A. and M. R. Thorpe. 2005. Xylem, phloem and transpiration flows in a grape: Application of a technique for measuring the volume of attached fruits to high resolution using ‘Archimedes’ principle. J. Exp. Bot. 40: 1069–1078.
- Marcelis, L. F. M. 1992. Nondestructive measurements and growth analysis of the cucumber fruit. J. Hort. Sci. 67: 457–464.
- Muskovics, G., J. Felföldi, E. Kovács, R. Porlaki and T. Kallay. 2006. Changes in physical properties during fruit ripening of Hungarian sweet cherry (*Prunus avium* L.) cultivars. Postharvest Biol. Technol. 40: 56–63.
- Ngouajio, M., W. Kirk and R. Goldy. 2003. A simple model for rapid and nondestructive estimation of bell pepper fruit volume. HortScience 38: 509–511.
- Tabatabaefar, A. and A. Rajabipour. 2005. Modeling the mass of apples by geometrical attributes. Sci. Hortic. 105: 373–382.
- 瀧下文孝・福田博之・工藤和典. 1993. リンゴ果実重の推定と理論曲線による生育特性の検討. 果樹試報. 25: 57–75.
- 吉澤 徹. 2007. 最新光三次元計測. 朝倉書店. 東京.