

イチゴ収穫ロボットの超音波センサに関する基礎研究

崔 永杰・小林 太一・永田 雅輝

宮崎大学農学部生産環境システム学講座

(2005年1月28日 受理)

Basic Study on Ultrasonic Sensor for Harvesting Robot of Strawberry

Yongjie CUI, Taichi KOBAYASHI, Masateru NAGATA

Division of Agricultural Environmental System, Faculty of Agriculture, University of Miyazaki

Summary : The vertical distance of the strawberry fruits was measured using ultrasonic wave in this research. The descent distance for the harvesting hand that could cut and hold the fruits through their peduncle was examined. The sample strawberries (*Fragaria x ananassa* Duch. variety "Akihime") were taken from a greenhouse farm in Miyazaki Kibana area.

The measured distance using the ultrasonic sensor had indicated consistently higher values than the true distance. The measurement difference S tended to become smaller as the degree of fruit ripeness progresses. The effects of shape confirmed A to be smaller than B .

Because the mean value of the measurement difference in the strawberry (at various sizes: M, L, 2L, 3L; degree of ripeness: 80% and 100%; and shape: A) during harvest time was 3.8 mm, a correction value of $\alpha = 3.8$ mm was selected. The descent distance that attains safe conditions for harvesting while the picking hand cuts and holds the fruits through their peduncle after applying a correction value α was decided to be 20 mm.

This time, the descent distance of the harvesting hand of the harvesting robot of strawberry can be effectively controlled using an ultrasonic sensor for distance measurements while applying a certain correction value.

Key words : Descent distance, Harvesting robot, Measurement difference, Strawberry, Ultrasonic sensor.

緒言

イチゴ (*Fragaria x ananassa*) の収穫期間は11月から翌年5月までの約6ヶ月間と長く、収穫作業は早朝から手作業で行われることから多大な手間と労力を必要とする。そこで、当研究室では労働負担の軽減、生産コストの低減および品質保

持を目的に、1998年からイチゴ収穫ロボットの開発研究が着手された(永田他 1999)。

研究中のイチゴ収穫ロボットは内成り栽培用で、2台のCCDカメラによる画像情報を用いて収穫適期のイチゴおよび果柄を検出し、果柄を把持・切断して収穫する直交軸型(XYZ軸)ロボット

である(永田他 2001). イチゴは畝面状態やサイズなどが影響して果柄の位置が必ずしも一定ではないので, 本ロボットでは果柄を把持・切断する摘採ハンドの降下距離の適正な制御を必要とする. すなわち, 摘採ハンドを降下しすぎると畝面のマルチフィルムを突き破り, 逆に降下が不足すると果柄を把持・切断ができないことになる. これまで, 筆者らは摘採ハンドの降下距離について, 光センサを用いて果柄の検出を検討してきたが, この方法では, 摘採ハンドの降下スピードの制限や反応時間の遅れなどに問題があった(永田他 2002).

そこで, 今回は超音波センサを用いて摘採ハンドの降下距離について検討した. これまで, 青果物の距離計測の研究例としてはナスの例があるが(森他 2003), イチゴの例はないことから, 超音波センサによるイチゴの距離計測について検討したので報告する.

材料および方法

1. 供試材料および計測装置

1) 供試イチゴ

供試イチゴは宮崎市木花地区でハウス栽培された品種‘章姫’を用いた. サイズはS, M, L, 2L, 3Lの5階級, 熟度は4分着色, 6分着色, 8分着色, 10分着色の4等級, 形状はAランク, Bラ

ンクの2等級とした.

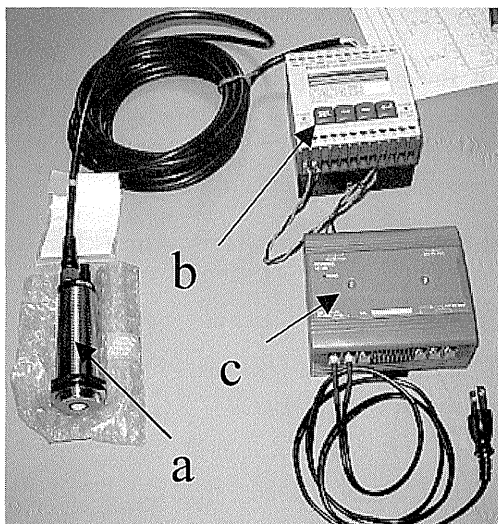
2) 超音波センサの概要および設定

Fig. 1. のように超音波センサ(KEYENCE社製 UD-310)は, センサ, アンプユニット, DC電源ユニットから構成される. 発信周波数は400 kHz, パルスは0.07 ms, 発信周期は15 ms, 平面に対する超音波センサの計測距離の表示分解能は1 mmであり, 温度補正機能を有している. 本実験では, 制御出力時の応答時間は4 Hzに設定し, 計測値は計測回数20回の平均値をアンプユニットから読み取った.

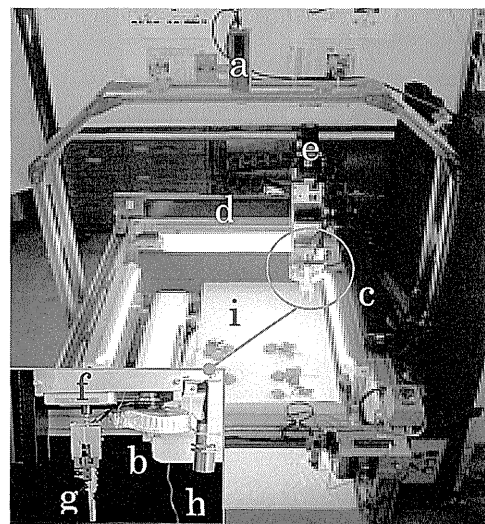
3) イチゴ収穫ロボットの概要と超音波センサの取付け位置

Fig. 2. は内成り栽培用のイチゴ収穫ロボットを示す. 位置決め用カメラ(a)は収穫エリアのイチゴ画像を取得する. 摘採用カメラ(b)は収穫するイチゴ画像を取得するためにX軸(c), Y軸(d)上を移動する. 摘採ハンド(g)はZ軸(e)上に取り付けた. センサ(h)は摘採ハンドの中心軸から170 mmの位置(X軸方向)で, 畝面(i)から270 mmの高さに畝面と垂直に取り付けた.

本ロボットによる収穫の手順は, まず, 位置決め用カメラで畝面のイチゴ画像をL*a*b*表色系で画像処理して, その位置を検出し, 収穫するイチゴの順番を決める. ここでイチゴの位置は赤い



(a) センサ
(b) アンプユニット
(c) DC電源ユニット



(a) 位置決め用カメラ (b) 摘採用カメラ
(c) X軸 (d) Y軸 (e) Z軸
(f) S軸 (g) 摘採ハンド
(h) 超音波センサ (i) 畝面モデル

Fig. 1. The ultrasonic sensor.

Fig. 2. The harvesting robot for strawberry.

着色部分の画像重心として求めた。次に、収穫の順番ごとに摘採用カメラがイチゴの真上（画像重心）に移動し、イチゴ画像から収穫する摘採ハンドの方向（S軸，ロスト角度）を決め、摘採ハンド（Z軸）を降下して果柄を把持・切断するものである。Table 1. は本実験におけるイチゴ収穫ロボットの画像処理の設定条件を示す。

2. 実験方法

1) 計測距離および補正值

(1) イチゴの熟度，サイズ，形状が計測距離に及ぼす影響

超音波センサによる計測は，Fig. 3. のように超音波センサ中心軸を各イチゴの画像重心に移動して，超音波センサによるイチゴの最高部位T点までの計測距離 L_1 を求めた。超音波センサの先端からイチゴの最高部位T点までの実測距離 L_2 は，畝面からセンサ先端までの距離 L （本実験では270 mmに設定）とイチゴのサイズ H から(1)式により求めた。本センサの計測範囲は，220～250

mmの距離においては半径35～40 mmの性能を持っていることから，センサの中心軸が最高部位Tを通らなくても，距離測定が可能である。ここで，超音波センサは放射した超音波が物体表面から反射して戻ってくる時間から距離計測を行なうので，物体が平面で滑らかな状態（平滑面）では1 mm単位で距離計測が可能であるが，曲面の場合は計測距離の補正が必要であると言われている（稲荷2002）。ビー玉，ピンポン玉，ゴルフボールを用いた予備実験の結果，曲面形状を持つこれらの物体では， L_1 は L_2 より少し長めの距離となり， $L_1 > L_2$ 関係となる。イチゴは曲面を持つことから，両者の差を超音波センサによる計測差 S として(2)式により求めた。

$$L_2 = L - H \quad (1)$$

$$S = L_1 - L_2 \quad (2)$$

なお，今回の実験では熟度，サイズ，形状が異なる34個のイチゴを供試して，畝面でのイチゴの配置は6パターンを設けて，それぞれ2回計測した。その計測データを用いてイチゴの熟度，サイズ，

Table 1. The condition of settings related to image data processing.

カメラ	型式	畝面からの高さ	絞り	照明（蛍光灯）	L*値	a*値	b*値
位置決め用	SONY DXC-151A	1210 mm	F5.6	20 W×4本（東芝）	25～65	20～70	-5～25
摘採用	ELMOEC-202 II	400 mm	F5.6	9 W×（松下）	10～80	20～70	-5～25

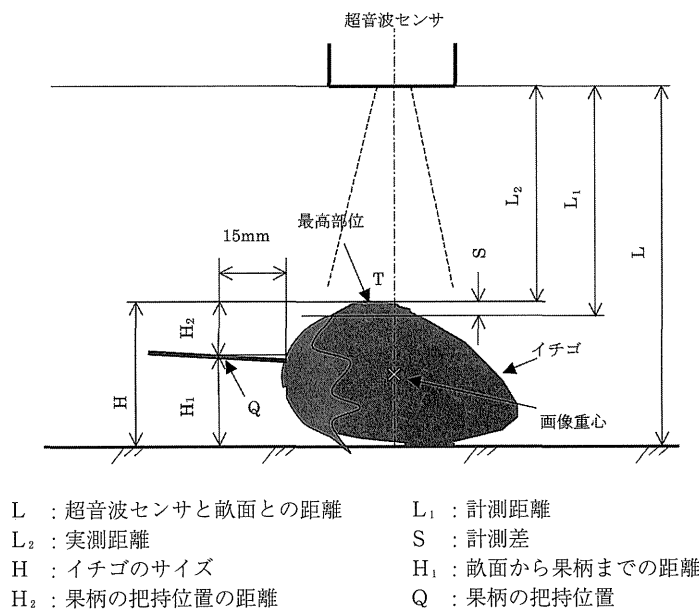


Fig. 3. The distance measurement of strawberry using an ultrasonic sensor.

形状が計測距離に及ぼす影響を分析した. Fig. 4. は実験に用いた配置の一例を示す. イチゴの向きは内成栽培の現場の状態を再現して配置した.

(2) 超音波センサによる計測距離の補正值

超音波センサは反射信号を受信できれば距離計測が可能だが, 対象物が平滑面でない場合は補正值を与えて使用する必要がある. そこで, 補正值の決定は収穫適期にあるイチゴ(熟度: 8分着色と10分着色, サイズ: M, L, 2L, 3L, 形状: A)を対象として取り扱うことにし, イチゴの計測差の平均値 \bar{S} および標準偏差 $S\sigma$ の結果から補正值を α として求めた.

2) 果柄の把持位置の距離と摘採ハンドの降下距離の決定

(1) 果柄の把持位置の距離

果柄の把持位置は, Fig. 3. において, ヘタから15 mm離れた地点Qにおける位置とし, \overline{TQ} の垂直距離を H_2 とし, H_2 は畝面から果柄までの距離 H_1 とイチゴのサイズ H とから, (3)式によりイチゴのサイズごとに求めた. H_1 は熟度, サイズ, 形状が異なる34個のイチゴをそれぞれに3回計測し, その平均値とした

$$H_2 = H - H_1 \quad (3)$$

(2) 摘採ハンドの降下距離の決定

Fig. 5. は摘採ハンドが果柄を把持・切断する場合の果柄まわりの関係図を示す. ここで, 摘採ハンドの先端Pの降下距離 L_3 (最高部位Tからの

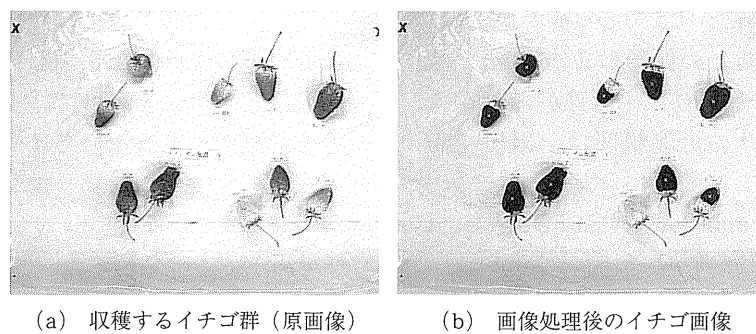


Fig. 4. An example of pattern of arrangement for strawberry.

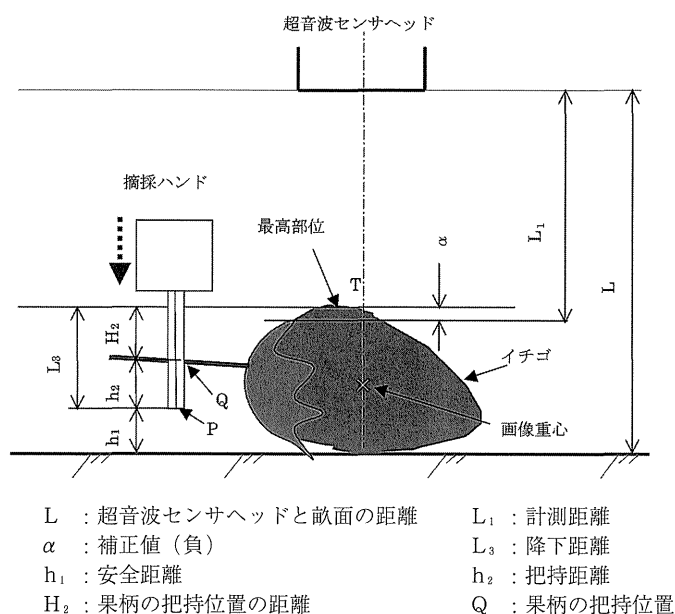


Fig. 5. The relationship between Safe distance and Taken distance.

垂直距離) を決定する条件は, Pが, (A) 果柄の把持位置Qより下方にあること, (B) 畝面の上方にあることとし, 次の条件式を満たすものとした.

(A) を満たす条件式

$$L_3 > H_2$$

よって $L_3 - H_2 > 0$ (4)

(B) を満たす条件式

$$L_3 + (L_1 - \alpha) < L$$

よって $L - (L_3 + (L_1 - \alpha)) > 0$ (5) となる.

なお, (A) の条件では, 摘採ハンドが果柄を十分に把持・切断するためにはPはQより3 mm以上に下がることとし, その垂直距離 \overline{QP} を把持距離 h_2 とする. (B) の条件では, 畝面の安全を確保(突き破りをさける)するために, Pと畝面との隙間を3 mm以上とすることにし, その距離を安全距離 h_1 とする.

よって, (4)式および(5)式の条件式は次のように扱った.

$$(4) \text{式より } L_3 - H_2 = h_2 \geq 3 \text{ (6)}$$

$$(5) \text{式より } L - (L_3 + (L_1 - \alpha)) = h_1 \geq 3 \text{ (7)}$$

上式の降下距離 L_3 はイチゴのサイズなどに影響される. 供試したイチゴのサイズは20~50 mm, 果柄の太さは0.5~2.5 mmであったため, L_3 を16~24 mmの範囲で, 把持距離 h_2 と安全距離 h_1 の関係を調べ, (6)式および(7)式を満足するイチゴ(適合率) から最適な降下距離 L_3 を求めた.

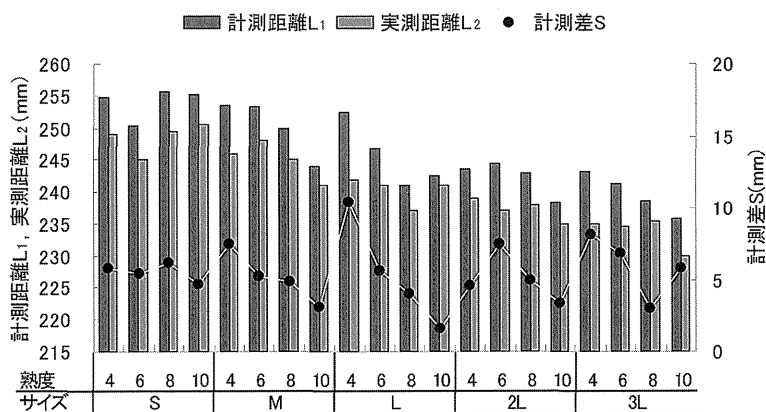
結果および考察

1. 計測距離および補正值

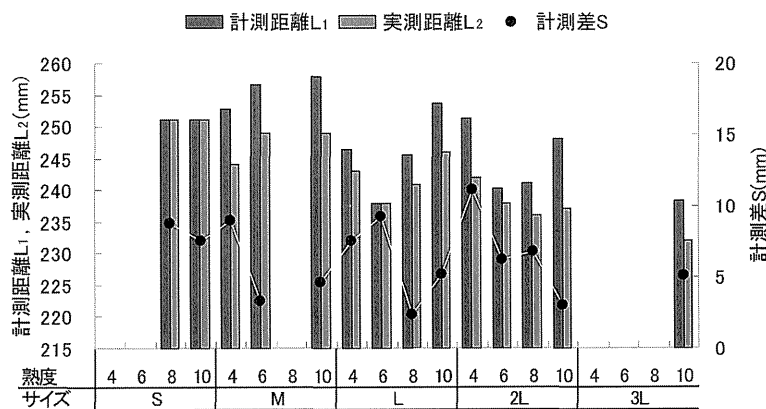
1) イチゴの熟度, サイズ, 形状が計測距離に及ぼす影響

Fig. 6. は計測距離 L_1 と実測距離 L_2 の結果を示す. 全ての供試イチゴにおいて L_1 が L_2 より大きかった. (2)式から求めた計測差 S はサイズや形状の影響よりも, 熟度の影響が強いと思われる.

そこで, 熟度の影響をFig. 7. でみると, 熟度が進むにつれて S は小さくなる傾向がみられ, 形



(a) 形状Aのイチゴ



(b) 形状Bのイチゴ

Fig. 6. The relationship between Measurement distance and True distance.

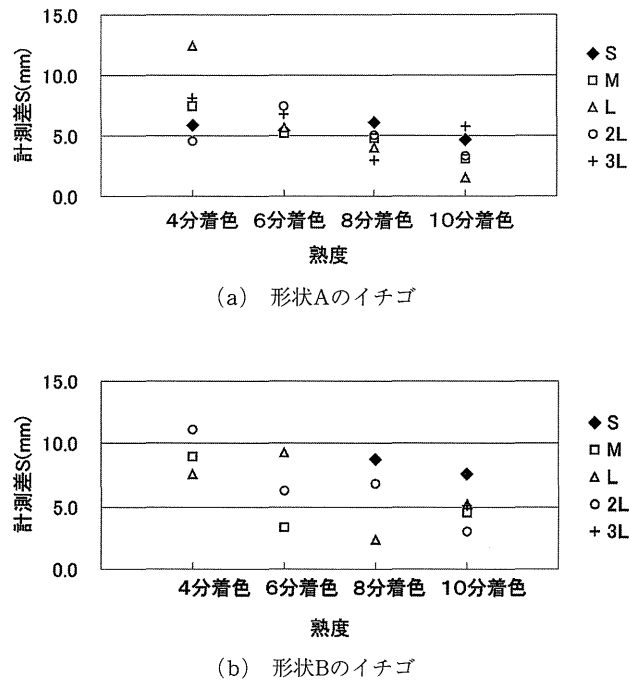


Fig. 7. The effects of carriage degree on measurement difference.

Tabl 2. The comparison of measurement difference when using correction value.

補正值	M	L	2L	3L
3.0 mm	1.0	-0.2	1.2	1.4
3.4 mm	0.6	-0.6	0.8	1.0
3.8 mm	0.2	-1.0	0.4	0.6
4.2 mm	-0.2	-1.4	0.0	0.2
4.6 mm	-0.6	-1.8	-0.4	-0.2

状AがBより計測差Sのばらつきは小さいことが確認された。

ここで、熟度とサイズの影響を分析すると、果頂部から赤く着色するので、熟度が進むと画像の重心位置はヘタ部に近くなること、また、小さなイチゴでは形状が球形に近くなり、大きいイチゴでは円錐形に近似することなどから、未熟果実の場合は、サイズが小さいイチゴが大きいイチゴよりSは小さい傾向を示す。形状の影響では形状Aは円錐形に近いが、形状Bは異形であることから、形状Bの計測差が不揃いになったといえる。

2) 超音波センサによる計測距離の補正值

補正值は収穫適期のイチゴ（熟度：8分着色と10分着色，サイズ：M, L, 2L, 3L, 形状：A）を対象として求めた結果，計測差の平均値 $\bar{S} = 3.8 \text{ mm}$ ，標準偏差 $S\sigma = 0.9 \text{ mm}$ となった。ここで補正值を求めるために3.8 mmを中心に，0.4 mm間

隔で3.0~4.6 mm範囲においてサイズごとの計測差Sを比較した結果，Table 2. のように3.8 mmの場合が各サイズでの計測差のばらつきが少ないことから，補正值 α は3.8 mmと決定した。

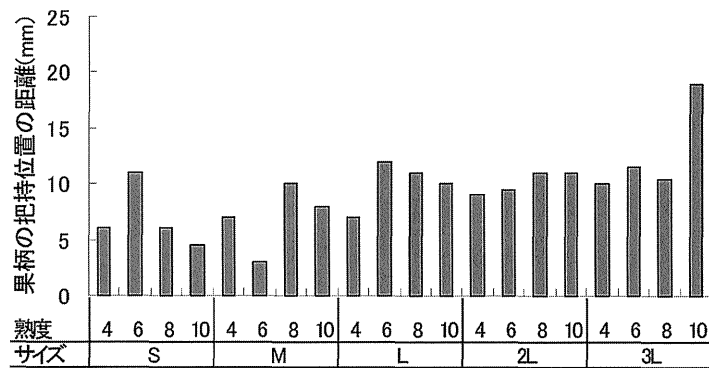
2. 果柄の把持位置の距離と摘採ハンドの降下距離の決定

1) 果柄の把持位置の距離

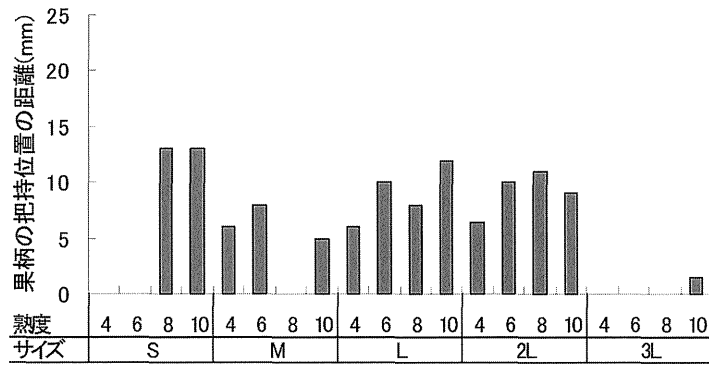
果柄の把持位置の距離 H_2 はFig. 8. に示すように，イチゴのサイズ，形状の影響が多少みられた。サイズが小さい場合には果柄の把持位置Qは直径の半分に近いが，サイズが大きくなるとサイズの半分より小さくなる傾向がみられた。

2) 摘採ハンドの降下距離の決定

補正值 $\alpha = 3.8 \text{ mm}$ を用いて，適切な降下距離を決定するために各降下距離における適合率を求めた結果，Table 3. のように h_1 を満足する条件



(a) 形状Aのイチゴ



(b) 形状Bのイチゴ

Fig. 8. The distance at a position where peduncle is harvested.

Table 3. The suitable ratio of safe distance and holding distance using descent distance.

イチゴ 降下距離	M				L				2L				3L				平均		
	8分着色		10分着色		8分着色		10分着色		8分着色		10分着色		8分着色		10分着色		h ₁	h ₂	
	h ₁	h ₂	h ₁	h ₂	h ₁	h ₂	h ₁	h ₂	h ₁	h ₂	h ₁	h ₂	h ₁	h ₂					
16 mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	8.3	100	85.4
17 mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	8.3	100	88.5
18 mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	8.3	100	88.5
19 mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	8.3	100	88.5
20 mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	58.3	100	94.8
21 mm	91.7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	83.3	99.0	97.9
22 mm	83.3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97.9
23 mm	58.3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	94.8
24 mm	16.7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	89.6

^{a)} 単位：%

^{b)} 判断基準：把持距離 $h_2 \geq 3$ mm, 安全距離 $h_1 \geq 3$ mm

のイチゴは、 L_3 が21 mm以上の時のサイズがM、熟度が8分着色以外では、全て適合率が100%となった。一方、 h_2 を満足する条件のイチゴは、 L_3 が21 mm以下の時のサイズが3L、熟度が10分着色以外では、全て適合率が100%となった。よって、降下距離が大きくなるほど小さいサイズのイチゴでは安全作業が不可能となる場合があり、逆

に、降下距離が小さくなるほど大きなイチゴでは摘採ハンドによる把持・切断が不可能になることが明らかになった。 h_1 と h_2 を同時に満足する条件(L_3)は今回の実験では得られなかったが、いずれか一方が満足される範囲は L_3 が20~22 mm範囲にあると判断された。しかし、ロボットによる収穫の安全性(畝面を突き破ることの回避)

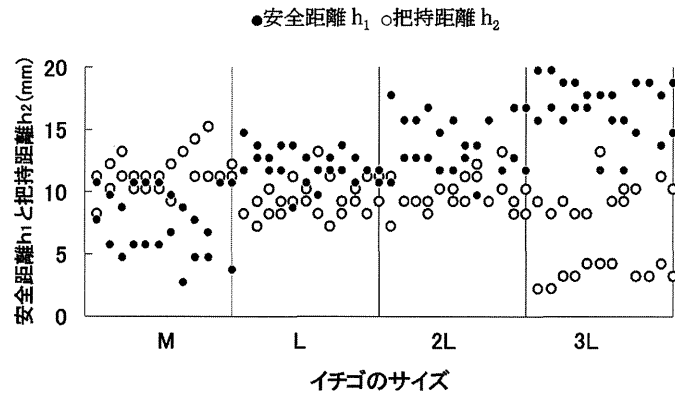


Fig. 9. The relationship between safe distance and holding distance at descent distance L_3 of 23 mm.

を重視すれば $L_3 = 20$ mm が適正であると決定した。

そこで、 L_3 を 20 mm とした時の各供試イチゴの h_1 および h_2 の結果を Fig. 9. に示す。Table 3. で h_2 が 100 % とならなかった 3 L の 10 分着色のイチゴは、 $3 > h_2 > 0$ の間にあるもので、これらのイチゴも h_2 は短い が 把持・切断できることが確認された。

以上により、超音波センサによるイチゴの距離計測は、計測差から求めた補正值を用いることで、イチゴ収穫ロボットにおける摘採ハンドの降下距離の制御に適用できることが確認された。

要約

本論文では超音波を用いてイチゴの距離計測を行い、果柄を把持・切断して収穫するための最適な摘採ハンドの降下距離について検討した。供試イチゴは宮崎市木花地区ハウス栽培の“章姫”品種を用いた。

超音波センサによる計測距離は実測距離より大きな値を示した。計測差 S は熟度が進むにつれて小さくなる傾向がみられた。形状の影響は A が B よりばらつきが小さいことが確認された。収穫適期のイチゴ (サイズ: M, L, 2L, 3L, 熟度: 8 分着色, 10 分着色, 形状: A) における計測差の平均値は 3.8 mm であった。よって、補正值 $\alpha = 3.8$ mm と決定した。補正值 α を用いて果柄を把持する条件と摘採ハンドの安全条件を満たす降下距離は 20 mm と判断された。

今回は、超音波センサによるイチゴの距離計測は、計測差から求めた補正值を用いることで、イチゴ収穫ロボットにおける摘採ハンドの降下距離の制御に適用できることが確認された。

キーワード: イチゴ, 計測差, 降下距離, 収穫ロボット, 超音波センサ。

謝辞

本研究は平成16年度学長裁量経費 (農工連携プロジェクト) の支援を受けた。供試イチゴはイチゴ栽培農家持原善伸氏に協力を頂いた。ここに感謝を申し上げる。

引用文献

- 稲荷隆彦 (2002) 基礎センサ工学. コロナ社. 東京. pp.168-175.
- 永田雅輝 (1999) イチゴ栽培の自動化に関する研究—収穫自動化の基礎研究—. 平成10年度共同研究成果報告書. 57-66.
- 永田雅輝・槐島芳徳・日吉健二・中島竜佑 (2001) イチゴ栽培の自動化に関する研究—収穫自動化の基礎研究—. 平成12年度共同研究報告会資料. 1-21.
- 永田雅輝・槐島芳徳・日吉健二・崔 永杰 (2002) イチゴの収穫システムの開発に関する研究. 第3報 高さ情報検出の理論について. 農業機械学会年次大会 61, 177-178.
- 森 茂彦・雁野勝宣・黒崎秀仁・有馬誠一・門田充司 (2003) V字型整枝されたナスを対象としたロボット収穫システム. 第2報 ナスの収穫実験. 植物工場学会誌 15(4), 211-216.