

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25660198

研究課題名(和文)高指向性超音波放射圧を利用した非接触受粉システムの開発

研究課題名(英文)Development of non-contact pollination system using high directional ultrasonic radiation pressure

研究代表者

清水 浩 (SHIMIZU, HIROSHI)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：50206207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：ハチによる受粉の代替技術として超音波放射圧を利用した人工受粉装置の開発に関する基礎的な研究を実施した。具体的な成果としては、イチゴの花の三次元座標を画像処理によって抽出し、ピンポイントで超音波を放射するシステムを開発した。スキャン方式に比較して、意図したとおりの作業時間短縮が可能であることを確認した。耐久性に関しては、冷却ファンを装着することで現場を想定した隔日程度の連続運転ができること、また人工光型植物工場施設とグリーンハウスでの受粉作業を行ない、実用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Basic research on the development of artificial pollination apparatus using the ultrasonic radiation pressure as an alternative technology of pollination by bees was carried out. We developed an image processing system for extracting three-dimensional coordinates of strawberry flower and ultrasonic pollination system for emitting ultrasonic waves towards a flower. Compared to the scanning method, it was confirmed faster work time is as expected. For durability, it was the continuous operation, which we assumed every the other day, was attained using cooling fan. Pollination work in plant factory with artificial light and greenhouse was carried out, and the usefulness of this system was confirmed.

研究分野：植物環境工学

キーワード：施設園芸・植物工場 超音波 受粉システム

## 1. 研究開始当初の背景

アメリカではすでに数年前からミツバチが突然姿を消すという現象が確認されているが、我が国でも一昨年頃から同様の報告がされ始めた。自然受粉によって栽培されている露地作物としてはニンジン、カボチャ、ナス、トマトなどの野菜からリンゴ、イチゴ、メロン、スイカなどの果実に至るまで大変な数に達している。一方、温室栽培でも受粉作業の軽労化の観点からマルハナバチやミツバチなどによる受粉が行なわれているが、これらのハチを供給する養蜂業者でもハチの生産が激減している。このようにハチの大量失踪という現象は農業に甚大な影響を及ぼす可能性を秘めている。本研究は、受粉作業をハチなどの昆虫に頼らず指向性の高い超音波を用いて花のみ振動させるという物理的な操作で受粉させる方法の開発を目的としており、将来の農業の基盤技術の一つと位置付けられる。また申請者はすでに音波を用いての受粉に関する研究を実施しているが、音波では波としてのエネルギーが十分ではなく、振動子と花の距離を数 cm まで近づけなければ共振が発生せず、温室などの現場での実用性が難しいことが明らかとなり、高い指向性を持ち、音響振動の加速度エネルギーが強大な超音波に着目した。

## 2. 研究の目的

本研究は、ハチによる受粉の代替技術として、物理的な手法による受粉技術の提案を行なうが、植物は接触や振動によるストレスを感じ成長が抑制されることから、植物の花の固有振動数の振幅変調をかけた高指向性の超音波を花に向けて照射し、超音波の音響放射圧によって花のみを共振させ

花粉を飛散させる非接触受粉装置の開発を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では画像処理技術を利用して、イチゴの花の三次元座標を取得し、そこにピンポイントで超音波を照射し花を加振することで花粉を飛散させ、自家受粉するシステムを開発する。使用した三次元カメラは Real Sense 3D Camera でカラーカメラ、赤外線カメラ、距離センサを搭載している。カラーカメラの解像度が 1920×1080、距離センサの解像度が 640×480、有効認識距離が 20 cm ~ 120 cm である。赤外線カメラの解像度は 640×480 となっている。このカメラと超音波授粉装置を組上げた写真を図 b1 に示す。画像処理によってイチゴの花を認識するため、イチゴの花とイチゴの葉の色のヒストグラムを比較した。植物工場で撮影したイチゴの画像(図 b2)から花と葉を抜き出し(図 b3, b4)、それぞれのヒストグラムを作成したところ、赤色(R 値)のヒストグラムに大きな差が見られた(図 b5)。そこで、カラー画像から R の値だけ抽出し、閾値を設け二値化し、花と葉を区別することとした。花と葉のヒストグラムの違いのみを利用して花を認識しているので、花のヒストグラムと同じようなヒストグラムを持つ領域があれば、その領域も花と認識してしまうという問題がある。実際、図 b2 の上部に葉が白くなっている領域が多く観察される(ハレーション)が、この部分は花のヒストグラムと近く、誤認識してしまうことがあった。そこで赤外線カメラの画像を用いて、このハレーション部分を除去することとした。図 b2 のハレーションは栽培用の LED の光が鏡面反射して発生している。赤外線画像にはこの LED の光は映らないので、図 b2 で LED 光が原因となって発生しているハレーションの領域は濃度値が小さく黒くなる。カラー画像をグレ

一スケールした画像と赤外線画像の濃度差が大きい領域はハレーションであるとして認識できる。図 b6 に画像処理プログラムのフローチャートを示す。

また、本システム全体（画像入力部分と超音波放射部分）としての精度を評価した。本システムでは一定以上の大きさの白い領域を花として認識するので、精度測定では白色の円形的を疑似花として利用した。まず黒い板に白色の的（直径 20 mm）を貼り、次に板を水で満たしたトレイに沈め、波紋によって振動点が視認できるようにし、各的を加振して実際に揺れた場所と的とのずれを測定した（図 b7, b8）。奥行の誤差に関しては波紋から読み取ることができないので、照射された超音波に手をかざし最も力が強くなっている点を焦点と判断した。的は  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  の範囲に縦横 10 cm 間隔で合計 25 か所設置した。ただし、トレイにすべての的が入りきらなかったため、的を上下にずらし 2 回ずつ実験を行うことで、振動可能範囲全域を測定したものとした。的は上から 1 列, 2 列, ..., 5 列, 左から a 行, b 行, ..., e 行というように番号を付けた（図 b9）。また、装置と対象の距離による精度の差を調べるため、この距離を 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm の 4 通りに変化させ実験を行った。20 cm 未満ではカメラが対象との距離を認識することができず、50 cm 以上は超音波集束装置の加振可能範囲外なのでこのような 4 水準を設定した。

#### 4. 研究成果

イチゴの花の抽出に関しては、取込画像の中にある花の数を人間がカウントした数を母数とし、花の抽出プログラムで認識した花の数の割合を求めた。母数 58 に対してプログラムで認識できた花の数は 48 となり、認識率は 82.8%であった。認識されなかった花が 17%ほどあり、実用化のためにはさらなる改善が必要である。この

17%の花を認識できなかった原因は花の向きである。今回のプログラムでは RGB の色情報を用いて花を識別しているが、栽培用 LED の強い光が葉面にあたり光が、画像濃度値が飽和した状態で映り込んでしまうハレーションも花と同じ白色になってしまうため、白い領域の画素数に関する範囲を設定した。つまり、今回の画像取込の設定条件のときにイチゴの花の画素数を予め決めておいた。この値をあまり小さくすると、小さいハレーションもイチゴの花として認識してしまうため、この値をある程度の画素数以上に設定したが、イチゴの花が横を向いているときは、正面を向いているときよりも画素数が非常に少なくなってしまうため、イチゴの花として認識されなかった。

また、花の検出ミスではないが、逆にハレーションをイチゴの花として認識してしまう場合もあった。こちらは花が検出できなかったわけではないが、実際にこのハレーションの箇所にも超音波を放射するという作業をするために全体の作業時間が長くなってしまいうという欠点がある。

いずれのミスの原因もハレーションであるので、今後はハレーションを低減するための対策が必要である。具体的には PL フィルタをレンズの前に装着することが考えられるが、今回使用したカメラレンズに合うサイズのものがなかったため本プロジェクトの期間中に対応できなかった。またシャッタースピードを速くすることでカメラに取り込まれる光量を低減することができるが、今回使用した 3 次元カメラはシャッタースピードをコントロールする機能を有していなかった。今後はフィルタやシャッタースピードに関する対策を行ない、花の認識率を向上させる予定である。

精度測定を行ったところ、水面にははっきりとした波紋が確認されたので、この波

紋の中心点からの中心点までの距離を測定した(図 b10)。

装置と的との距離が 20cm の場合では、誤差は最大でも 10mm に収まった(表 b1)。超音波の焦点径が 20mm なので、目標の点を揺らすことが十分に可能な精度であるといえる。ただし、対象とカメラの距離が近いいためカメラの範囲外となる的が多くなり、加振できる的が少なくなった。検出範囲が上方に偏っているのはカメラが超音波収束装置の上部に搭載されており、下方を撮影できないためである。

距離 30cm の場合では 20cm の場合よりも誤差が大きくなったが 20mm 以内には収まった(表 b2) 20cm の場合と同様に検出範囲が狭く 6 か所の的しか検出できなかった。

距離 40cm の場合では、誤差は 20mm 以内に収まり、20cm や 30cm の場合よりの的の検出範囲が広がった(表 b3)。しかし、装置から距離が遠い検出領域の境界付近では、超音波の放射圧が小さくなり水面があまり揺れなかった。また、1 列、5 列および a 行の誤差が大きくなっていることから、装置との距離が離れるほど誤差が大きくなるということがわかる。これは、カメラの位置と超音波収束装置の位置の違いから生じる誤差が、距離を増すにつれて増幅しているからであると考えられる。これを改善するためには、カメラと超音波収束装置の角度をそろえ、カメラから超音波収束装置への座標系の補正をより正確に行う必要がある。

距離 50cm の場合では誤差が非常に大きくなり 30mm を超す部分もあった(表 b4)。40cm の場合と比べて水面の揺れがさらに小さく、放射圧も弱くなっていることがわかった。

以上の結果より、40cm までの距離であれば、目標値の 15 mm 以内の誤差であり、目標値の 10 mm をほぼ達成できることが明らか

となった。

このようにカメラの設置位置の関係で超音波が放射できる縦方向の全範囲を画像として取込むことができなかったが、図 b2 に示すように現場での取込画像ではイチゴの株全体が撮影されており、現実的な問題はなかった。また、現場での装置と花の距離は 30cm 前後であった(図 b2 の撮影時)。

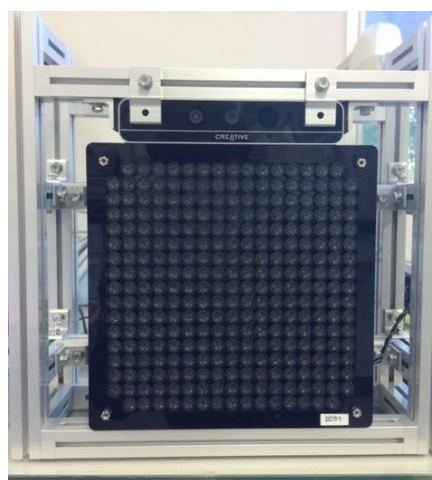


図 b1 RealSense 3DCamera を搭載した超音波授粉装置



図 b2 人工光型植物工場にて撮影したイチゴの画像



図 b3 イチゴの花



図 4 イチゴの葉

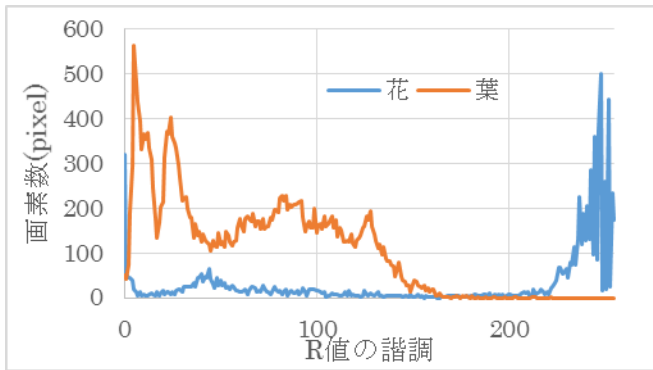


図 b5 イチゴの花と葉の R 値のヒストグラム

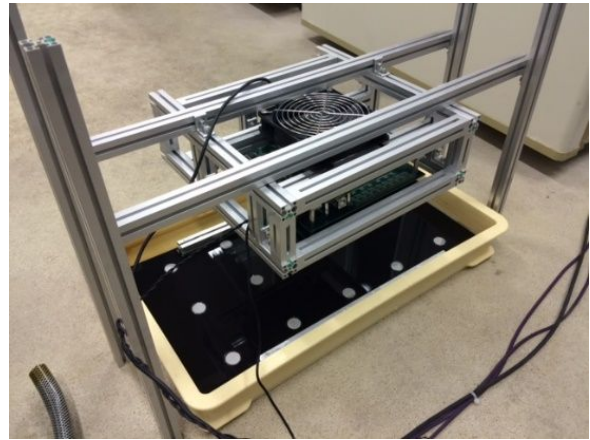


図 b7 精度測定実験のセットアップ

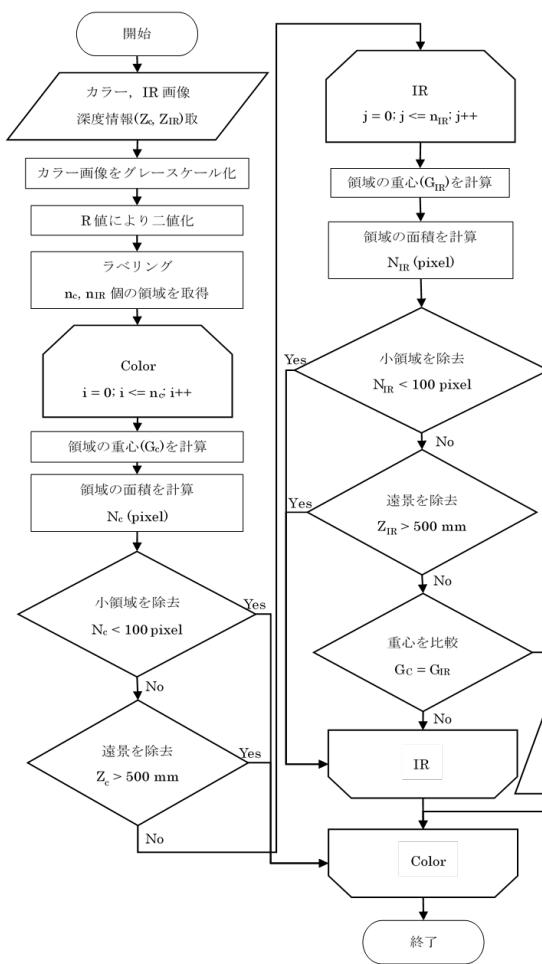
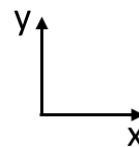
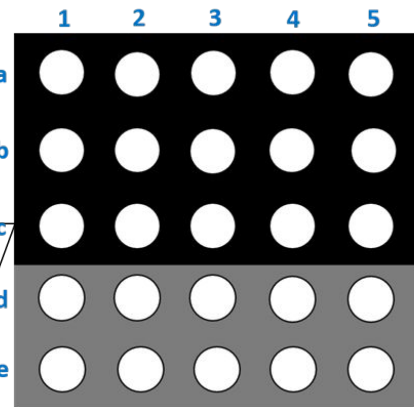


図 b6 画像処理プログラムのフローチャート



図 b8 精度実験のために擬似花として使用した白色のマト



Zは奥行方向を正とした

図 b9 的に対して割り振られた番号と精度測定の方法

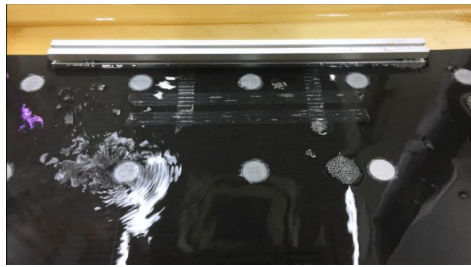


図 b10 精度測定中の様子(左下のマトを加振)

表 b1 精度測定実験の結果 (20cm)

(表中の単位: mm)

	1	2	3	4	5
a	N.D	(+2, 0, 0)	(+1, 0, 0)	(+5, -7, 0)	N.D
b	N.D	(+1, 0, 0)	(+1, -2, 0)	(+7, -5, 0)	N.D
c	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
d	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
e	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D

表 b2 精度測定実験の結果 (30cm)

	1	2	3	4	5
a	N.D	(+10, -5, 0)	(+1, +1, 0)	(+1, -2, -10)	N.D
b	N.D	(+7, -5, 0)	(+7, -5, 0)	(0, 0, 0)	N.D
c	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
d	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
e	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D

表 b3 精度測定実験の結果 (40cm)

	1	2	3	4	5
a	(+10, +3, -15)	(+6, 0, -15)	(+8, -1, -10)	(+5, +1, -15)	(+10, -8, -10)
b	(+10, 0, -15)	(+3, +2, -5)	(+8, 0, 0)	(+9, -5, -10)	(+4, -1, -15)
c	(+7, 0, -10)	(+5, -5, 0)	(+3, -5, 0)	(+2, -5, -5)	(0, -3, -10)
d	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
e	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D

表 b4 精度測定実験の結果 (50cm)

	1	2	3	4	5
a	(+20, -15, -20)	(+10, -12, -5)	(+12, -10, -5)	(+10, -12, -5)	(+5, -2, -10)
b	(+15, 0, -20)	(+10, -7, -8)	(+10, -7, -5)	(+15, -12, -10)	(0, -11, -20)
c	(+25, -5, -20)	(+15, -11, -15)	(+10, -10, -5)	(0, -12, -10)	(-10, -2, -10)
d	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
e	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D

( )内の3つの数字は左からそれぞれ x 軸, y 軸, z 軸方向の誤差 (mm) を表している.

誤差 10 mm 未満ならば緑, 10 mm 以上 20 mm 未満ならば黄, 20 mm 以上 30 mm 未満ならば橙, 30 mm 以上ならば赤でマークした.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

— Hiroshi SHIMIZU, Takayuki

HOSHI, Kenji NAKAMURA ,  
Development of a Non-contact Ultrasonic  
Pollination Device , Environmental  
Control in Biology 査読有 , 53 , 2015 ,  
85-88

[https://www.istage.ist.go.jp/article/ecb/53/2/53\\_85/pdf](https://www.istage.ist.go.jp/article/ecb/53/2/53_85/pdf)

DOI: 10.2525/ecb.53.85

[学会発表](計3件)

— Hiroshi SHIMIZU , Development of  
Ultrasonic Pollination System , 2015  
High-level International Forum on  
Protected Horticulture , Shouguang,  
China , 4/19-22, 2015

— Hiroshi SHIMIZU , Takayuki HOSHI,  
Kenji NAKAMURA , Development of  
Ultrasonic Pollination System , XXXVI  
CIOSTA & CIGR Section V Conference  
2015, St. Petersburg, Russia, 5/26-28,  
2015

— 清水 浩, 星 貴之, 中村謙治,  
超音波受粉装置の開発, 日本生物環境工学  
会 2015 宮崎大会, 9/8-11, 2015

[図書](計0件)

[産業財産権]  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]  
なし

## 6. 研究組織

(1)研究代表者  
清水 浩 (SHIMIZU, Hiroshi)  
京都大学・農学研究科・教授  
研究者番号: 50206207

(2)研究分担者  
なし

(3)連携研究者  
なし