

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 5 月 28 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006 ～ 2009
 課題番号：18380154
 研究課題名（和文）農作業自動化のための三次元画像認識に関する研究

研究課題名（英文）3-D image recognition for farm automation

研究代表者

藤浦 建史（FUJIURA TATESHI）
 大阪府立大学 ・ 生命環境科学研究科 ・ 教授
 研究者番号：00026585

研究成果の概要（和文）：この研究は、三次元視覚センサを用いて農業ロボットに必要な視覚情報を得ようとするものである。イチゴ収穫ロボットを対象とした実験では、赤、緑、青の3色のレーザービームを走査し、距離画像とカラー画像を得るもの、近赤外レーザを走査して距離画像を得るとともにカラーカメラでカラー画像を得るものを用いた。トマトを対象とした実験では、赤と近赤外のレーザービームを走査して、赤熟トマトと茎葉等の認識を行った。

研究成果の概要（英文）：Research on image recognition of 3-D image sensors was carried out for agricultural robots. For the strawberry-harvesting robot, two types of imaging system were used. One was a 3-D vision sensor that emitted laser beams of three different wavelengths (red, green and blue) to obtain a range image and a color image. And the other imaging system consisted of a color camera to get a color image and a 3-D vision sensor that emitted an infrared laser to get a range image. For a tomato-harvesting robot, a 3-D vision sensor was used that emitted an infrared laser beam and a red laser beam. Red tomato fruits, stems and leaves were recognized by the image from the vision sensor.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
総計	7,400,000	2,220,000	9,620,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業情報工学

キーワード：知能ロボティクス，計測工学，農業工学，園芸学

1. 研究開始当初の背景

水稲など土地利用型作物では機械化が早くから進んだのに対し、果菜類栽培では、目で見て判断しながら行う作業が多いため機械化は限定的である。その結果、例えばトマトでは10a当たりの労働時間が1800時間を超える状況にある反面、水稲では10a当たり30時間程度でさらに短縮が進むなど、土地利用型作物との差は増大する一方である。果樹や果菜類の生産現場では、長い労働時間が経営規模の制限要因になり生産性の向上を難しくしてきた。

本研究は、このような視覚判断を伴う農作業のうち、果菜類の収穫作業をロボット化するために必要な、実用的性能をもつ視覚認識技術を確認することを目指した。果菜類を扱うロボットの技術的課題として、対象が複雑な立体形状であり、葉や茎等の障害物を避けて作業しなければならないことがあげられる。また、視覚部は、照度、色温度、照射方向、背景などが変化する光条件下で、対象を高速・確実・精度良く認識する必要がある。農業ロボットの視覚部の研究では、二次元のカラーカメラを用いたものが多いが、光条件が変化する場所で立体的に存在する作物を対象とするため、確実に精度良く認識できない場合があり、ロボットによる自動化のためには三次元認識技術の開発が重要である。

2. 研究の目的

この研究は、農業ロボットによる農作業自動化のために必要な実用的性能をもつ高機能の三次元視覚センサの開発を行うとともに、得られた画像を処理して自動化に必要な情報を抽出する手法を確認することを目的としている。作業としてイチゴやトマトの収穫を対象として、三次元視覚センサの画像からロボット収穫に必要な情報を得ることを目指した。

対象とする作物は、複雑な立体形状で部位や熟度によってそれぞれの色を呈することから、作物の各部位や熟度を認識するために、三次元形状と色情報を併用する方法を用いた。三次元画像計測については、工業分野、放送分野、道路交通分野、医療分野等でも多くの研究が行われている。代表的なものに、レーザのスリット光を対象物上に走査して、違う位置においたビデオカメラにスリットの画像を入力して三角測量方式で立体形状を計測するものがある。しかし、ビデオカメラは変調光方式で使用できないため、強い日射がある野外などで使用するためには、外乱光対策が必要である。光レーダ法を用いて光の速度を基準に対象までの距離を計測する方法で、高速に距離画像を得るセンサの研究開発も行われており市販されているものもある。しかし、高

速な光の速度を基準とするので、距離の計測精度が十分でないか、野外の光環境で使えないものがほとんどである。

農業分野に使うためには、収穫適期の判定、細い果梗の認識、細かい花卉の認識、画像に明瞭なエッジがない果実等の形状計測、ロボットに搭載できるよう小型化することなど、厳しい条件が求められる。本研究では、レーザ光を走査する三次元視覚センサを用いて、三次元形状と色情報を同時に取得できる三次元視覚センサの開発を行うことを目指した。この三次元視覚センサは、小型で、野外の光環境でも使用でき、農業ロボットの視覚部として十分な精度の距離画像とカラー画像が得られるものとし、実際に作物の各部位や熟度を認識して、作業の自動化に必要な情報を抽出する。外乱光の影響を受けずに計測できるようにし、太陽光下での画像処理で問題になりやすい照度や色温度、逆光・順光などの光の方向に影響されずに画像入力が行えるものとする。

3. 研究の方法

果実収穫などの農作業を自動化するロボットの視覚部として、三次元視覚センサを試作して実験を行った。実験を行った三次元視覚センサは次の3種類である。

- ・赤緑青のレーザビームを走査する三次元視覚センサ
- ・カラーカメラと三次元視覚センサの併用
- ・近赤外と赤のレーザビームを走査する三次元視覚センサ

(1) 赤緑青のレーザビームを走査する三次元視覚センサ

この三次元視覚センサは、高設栽培されたイチゴを収穫するロボットの視覚部として用いることを想定して実験を行った。対象とするイチゴは立体形状であり、部位や熟度により異なる色を呈する。各部位や熟度を認識し、障害物を避けながら作業するため三次元情報と色情報を取得する三次元視覚センサを試作した。

イチゴ果実は、未熟な緑色から白く（白熟）なったあと赤く熟する（赤熟）。また、葉や花柄は緑色を呈する。ロボットによりイチゴを収穫するためには、収穫すべき赤熟果実の認識だけでなく、収穫時に障害物となる葉、花柄、未熟果実も認識して障害物を避けた収穫動作を行う必要がある。そのため、図1に示すように、赤、緑、青色のレーザビームを走査する三次元視覚センサとした。図2に光学系と信号の流れを示す。対象物の色情報を取得するため、レーザは赤色半導体レーザ（波長 658 nm, 光強度 0.84 mW）、緑色固体レーザ（波長 532 nm, 光強度 2.88 mW）、青色半導体レーザ（波長 405 nm, 光強度 10.7 mW）を使用し、ダイクロミックミラー等を用いて1本に重ね合

わせた。レーザの走査は図1のガルバノメータスキャナとステッピングモータで行い、ガルバノメータスキャナで垂直走査を行い

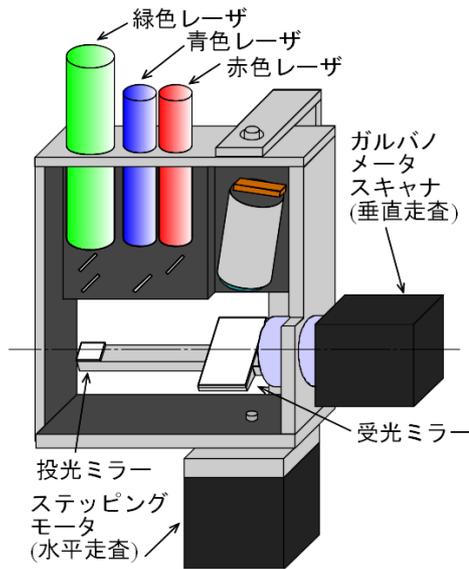


図1 赤緑青のレーザビームを走査する三次元視覚センサ

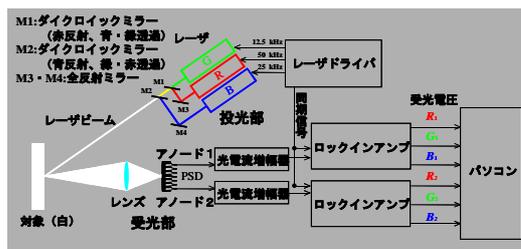


図2 光学系と信号の流れ

ながらステッピングモータで水平走査を行うことで対象を走査した。画素数は垂直 250 画素×水平 200 画素で、1 画面が 5 万画素で、1 画面走査に要する時間は、2.4 秒である。

対象からの反射光は、レンズによって PSD (位置検出素子) の受光面に結像させた。PSD の受光電流には、赤、緑、青色の反射光成分が含まれ、これらを別々に取り出すため、3 色のレーザは異なる周波数で点滅させた。点滅周波数は、50 kHz (赤色)、12.5 kHz (緑色)、25 kHz (青色) とした。

PSD の受光電流は、光電流増幅器で増幅するとともに電圧に変換した。得られた受光電圧には、太陽光などによる直流成分が含まれるため、直流成分を除去したあとレーザドライバからの点滅信号に同期させたロックインアンプにより、各レーザの点滅周波数に対応する成分を分離し、各色の受光電圧とした。

PSD には、2つのアノードがあり、各アノードの受光電流から赤・緑・青成分を分離したので $R_1, R_2, G_1, G_2, B_1, B_2$ の6種類の信号が得られる。これらをAD

変換してコンピュータに入力したあと、距離計算、カラー画像作成を行った。

PSD を用いた距離計算は、2つのアノード信号の比から三角測量方式で行うものである。この三次元視覚センサでは、ロックインアンプを用いて抽出したアノード1の三原色信号 (R_1, G_1, B_1) の和 A_1 とアノード2の三原色信号 (R_2, G_2, B_2) の和 A_2 の比を用いて距離を計算した。

(2) カラーカメラと三次元視覚センサの併用

上記(1)で述べた三次元視覚センサは、PSDのアノード1の三原色信号 (R_1, G_1, B_1) の和 A_1 とアノード2の三原色信号 (R_2, G_2, B_2) の和 A_2 の比を用いて三角測量方式で距離を計算するものである。三原色のレーザを用いるためカラー画像を得られる利点はあるが、葉などの緑色の部位は、

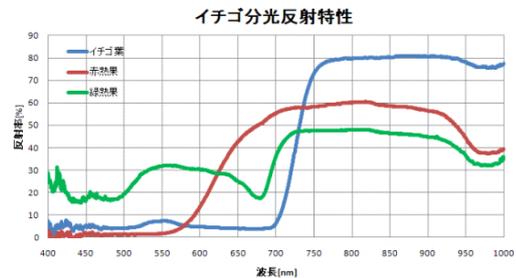


図3 イチゴの分光反射特性

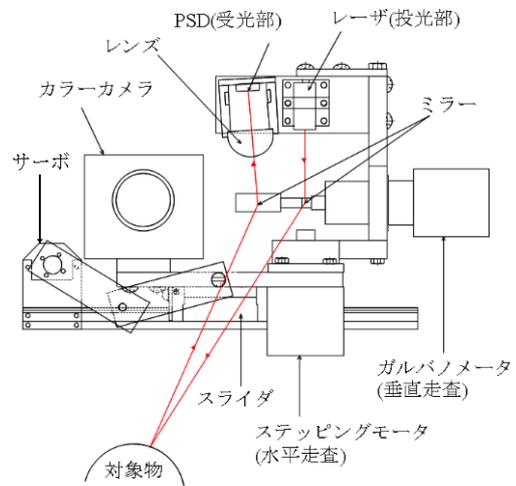


図4 カラーカメラと三次元視覚センサの併用

図3に示すように可視光の反射率が小さいため、赤、緑、青色の波長のレーザを走査した場合、反射光が小さくなり、両アノードの信号比から正確な距離を得にくい。

このため、カラーカメラと三次元視覚センサを併用する画像認識についても検討した。図4はカラーカメラと三次元視覚センサを併用する視覚システムを示す。カラーカメラと三次元視覚センサは、レール上を移動するスライド機構に取り付け、サーボ

モータを用いて左右に移動することにより、カラーカメラと三次元視覚センサは同じ視点から画像入力できるようにした。三次元視覚センサには、葉や果実の反射率が大きい 830 nm の近赤外を用いた。三次元視覚センサの垂直走査はガルバノメータスキャナにより、水平走査はステッピングモータにより行った。三次元視覚センサの画素数は、垂直 400 画素×水平 250 画素で、合計 10 万画素である。使用したカメラは、1280 × 960 画素の単板式カラー CCD カメラで、コンピュータとのインターフェースは IEEE1394 (Fire Wire) 式とした。

(3) 近赤外と赤のレーザービームを走査する三次元視覚センサ

この形式の三次元視覚センサを用いた実験では、トマト収穫ロボットの視覚部としての性能を検討した。イチゴのように緑色から白熟を経て赤熟する果実を対象とした認識では、赤熟果実と白熟果実を識別する必要があるため、上記(1),(2)のようにカラー画像が得られる三次元視覚センサを用いた。しかし、トマトのように白熟期を経ないで、緑色から赤色に変わるものでは、必ずしもカラー画像を得なくても赤熟果実の認識が可能である。図5にトマトの分光反射特性を示す。このような分光反射特性を

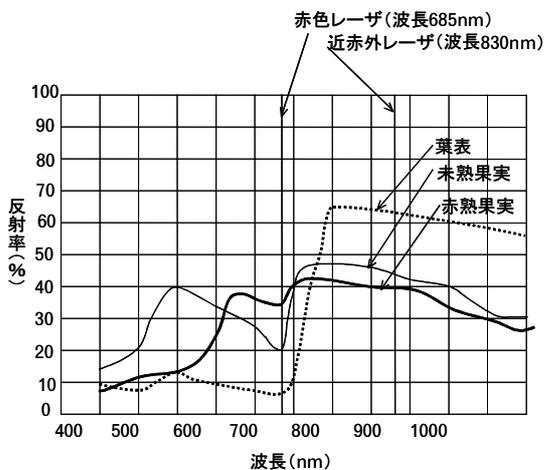


図5 トマトの分光反射特性

もとに、波長 830 nm の近赤外レーザーと、波長 685 nm の赤色レーザーを走査し、反射光を PSD で受ける三次元視覚センサとした。近赤外と赤色のレーザービームはコールドフィルタを用いることで同軸上に重ねて投光した。太陽光や蛍光灯などの環境光の影響を受けずに、近赤外と赤色レーザーの反射光成分を別々に計測するため近赤外を 48 kHz、赤色を 24 kHz の異なる周波数で点滅させた。光強度は、それぞれ 7.6 mW, 7.0 mW とした。対象からの反射光は PSD で受光し、レーザードライバからの点滅信号に同期させたロックインアンプにより、アノード1の

近赤外受光電圧、アノード2の近赤外受光電圧、アノード1と2の和信号に含まれる赤色受光電圧の3つの信号を抽出してコンピュータに入力した。そして、波長 830 nm のレーザーは、果実や葉によく反射することを利用して両アノードの信号比から三角測量方式で距離を計測した。また、葉や未熟果実は 685 nm の赤色レーザーの反射率が小さく、赤熟するとともに赤色レーザーの反射率が大きくなることを利用し、近赤外受光電圧(両アノードの合計)に対する赤色受光電圧(同)の比により、葉や未熟果実と赤熟果実を識別した。

4. 研究成果

(1) 赤緑青のレーザービームを走査する三次元視覚センサ

走査により、対象の三次元情報と色情報が計測可能か調べるため、イチゴ‘宝交早生’を対象に走査を行い、距離画像とカラー画像を作成した。また、走査結果より、イチゴ収穫ロボットの視覚部として、この3波長式三次元視覚センサの使用可能性を検討した。

図6のイチゴを走査して得られたカラー画像と距離画像を図7に示す。室内実験の結果で背景は黒い布、背景までの距離は 350 mm として走査した。赤丸内の果実は、白熟よりやや赤く色づき始めた未熟イチゴである。



図6 走査したイチゴ

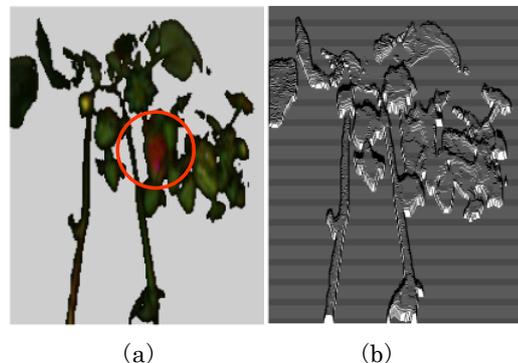


図7 イチゴのカラー画像と距離画像

イチゴの収穫作業をロボット化する際、果実の熟度判定、果柄の認識、収穫動作の軌道決定に必要な障害物の認識などが挙げ

られる。図3に示すイチゴの分光反射特性より、緑色レーザーの532 nmの波長において、未熟果では反射率が大きいに対して、赤熟果では反射率が小さい。図8は、走査で得られたカラー画像のうち、緑成分の濃度を画像化したものである。(a)の赤丸は図6に示した未熟果、(b)の赤丸は別に画像入力した赤熟果を示す。緑色反射率が小さい赤熟果では、未熟果に比べて緑色の濃度が小さかった。逆に赤成分の濃度は赤熟果で大きく未熟果で小さかった。このことより、果実の熟度判定は緑色の濃度と赤色の濃度を比べることによって可能と考えられた。この三次元視覚センサはカラー画像が得られるので果柄、葉、花を赤熟果と識別することも可能である。三次元視覚センサであるので、カラー画像だけでなく、距離画像も得られる利点があり、イチゴ収穫ロボットを制御する際には、赤熟果実以外を障害物と判断して、これを避けて目的果実を収穫する軌道を決定することが可能と考えられた。なお、実際のイチゴ収穫ロボットへ適用するためには、エンドエフェクタ、マニピュレータの形状や自由度をもとに障害物を避けて的確に収穫するよう画像処理プログラムを作成する必要がある。

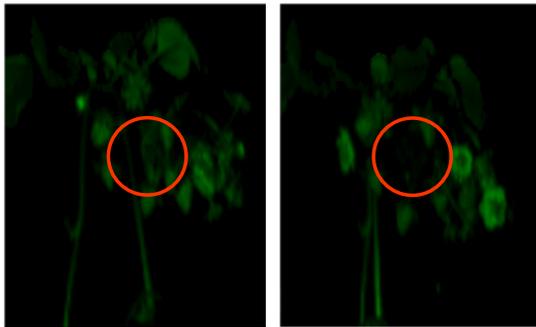


図8 緑成分の濃度

(2) カラーカメラと三次元視覚センサの併用

実験では、ビニルハウス内にパイプで組んだ栽培棚の上にプランタを置き、培地にはロックウールを用いて養液栽培したイチゴ‘章姫’を用いた。得られたカラー画像と距離画像の例を図9に示す。三次元視覚センサは(1)で述べた赤緑青のレーザービームを走査する三次元視覚センサに比べて画素数が大きいので、細い果柄も計測できている。

赤熟果実の認識は、カラー画像を用いて赤い画素を抽出することによって行った。赤熟果実の手前に果柄があり果実像が分断されることや小さい領域のノイズがでることがあるので、果実像に収縮、膨張処理を加えた。

果実の重なりが原因となり実際は複数の果実であるにも関わらず、赤色の領域が繋

がってしまうために1つの果実として誤認識されてしまうことがあった。このため、距離画像を用いて重なった果実の分離を試みた。実験の結果、2つの果実が前後に重なっている場合には距離画像を用いることにより個々に認識できたが、等距離にある果実が縦もしくは横に隣接している場合や、3つ以上の果実が領域中に含まれる場合には分離が困難であった。この改善案としては、カラー画像との併用、より高度な分類手法の適用が考えられる。



図9 カラー画像と距離画像

(3) 近赤外と赤のレーザービームを走査する三次元視覚センサ

近赤外と赤のレーザービームを走査する三次元視覚センサを用いた画像認識は、三次元視覚センサをミニトマトや中玉トマトを収穫するロボットに取りつけて行った。

ミニトマトの栽培ベッドが施設内を巡回移動する施設内で走査した画像を処理した結果を図10に示す。ミニトマトは白い支柱に誘引されており、赤熟した果房の上2葉まで摘葉されている。赤と近赤外の受光電圧の比を画素ごとに比較して、赤レーザーをよく反射する画素を抽出した。抽出した画素には赤熟果実だけでなく白い支柱も含まれるので、次に三次元形状によって支柱と赤熟トマトを区別した。トマトは房状に結実するため、赤い果実像が重なって見えることがあるが、ミニトマトや中玉トマトは光沢があり球形であるため、中央にレーザービームを当てたときに反射光がピークとなる。この性質を利用して像が重なった果実でも中央部が見える果実は、個々に認識可能であった。

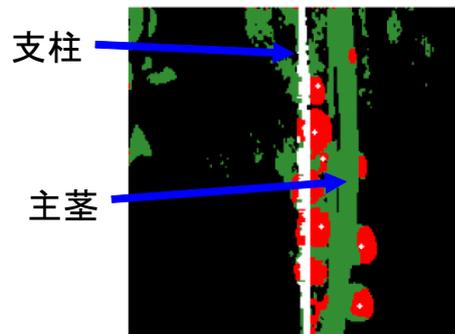


図10 ミニトマトの処理画像

ロボットにより収穫するためには、エンドエフェクタなどが、茎葉、支柱、ほかの

果実など、目的以外の障害物に衝突しないよう、マニピュレータの姿勢や軌道を決定する必要がある。ミニトマトや中玉トマトを対象とした実験は、実際のロボットに三次元視覚センサを取りつけて行ったので、用いたロボットのエンドエフェクタの形状やマニピュレータの自由度をもとに、収穫動作を行うために必要な空間を算出した。そして、距離画像を用いて、複数の収穫姿勢・経路を取った場合に通過する空間内の障害物の有無を、個々の目的果実、収穫姿勢・経路ごとに認識して、障害物が少ない収穫姿勢・経路を選択することが可能であった。

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6件)

- ① 藤浦建史, 和田光生, 西浦芳史, 池田英男, ほか3名, 移動型栽培施設のミニトマト収穫ロボット(第1報)ーロボットの概要と三次元画像認識ー農業機械学会誌, 査読有, 72巻2号, p.143~151, 2010
- ② 藤浦建史, 和田光生, 西浦芳史, 池田英男, ほか3名, 移動型栽培施設のミニトマト収穫ロボット(第2報)ー収穫実験ー, 農業機械学会誌, 査読有, 72巻2号, p.152~159, 2010
- ③ 藤浦建史, 三次元視覚センサをもつトマト収穫ロボット, システム/制御/情報, 査読無, 54巻4号, p.149~154, 2010
- ④ 篠原弘徳, 藤浦建史, 和田光生, 西浦芳史, 大橋義広, イチゴ収穫自動化のための三次元画像認識, 農業機械学会関西支部報, 査読無, 107号, p.46~49, 2010
- ⑤ 領内将之, 藤浦建史, 大橋義広, 和田光生, 西浦芳史, トマトの三次元画像認識, 農業機械学会関西支部報, 査読無, 106号, p.50, 2009
- ⑥ 藤田修司, 藤浦建史, 和田光生, 西浦芳史, 農作業自動化のための三次元カラー画像認識に関する研究, 農業機械学会関西支部報, 査読無, 103号, p.72~75, 2008

[学会発表] (計8件)

- ① 藤浦建史, 農業用ロボットのための三次元画像認識 View2009 ビジョン技術の実利用ワークショップ(精密工学会) 2009年12月4日パシフィコ横浜
- ② 藤浦建史, 大橋義広, 和田光生, 西浦芳史, 青山ゆみ, 三次元視覚センサをもつトマト収穫ロボット(1)ーロボットの概要と三次元認識ー, 農業環境工学関連学会 2009年合同大会, 2009年9月16日, 東京大学

- ③ 大橋義広, 藤浦建史, 和田光生, 西浦芳史, 青山ゆみ, 篠原弘徳, 三次元視覚センサをもつトマト収穫ロボット(2)ー収穫実験ー, 農業環境工学関連学会 2009年合同大会, 2009年9月16日, 東京大学

- ④ 藤浦建史, 和田光生, 西浦芳史, 大橋義広, 青山ゆみ, 領内将之, 三次元視覚センサをもつトマト収穫ロボット, 日本生物環境工学会 2009年福岡大会, 2009年9月7日, 九州大学

- ⑤ 篠原弘徳, 藤浦建史, 和田光生, 西浦芳史, 大橋義広, イチゴ収穫自動化のための三次元画像認識, 農業機械学会関西支部第121回例会, 2009年8月22日, 石川県立大学

- ⑥ 藤浦建史, 果実収穫ロボット, 日本生物環境工学会北海道支部シンポジウム「施設園芸技術の新展開」2009年4月24日かでの(札幌市)

- ⑦ 藤田修司, 藤浦建史, 西浦芳史, 和田光生, 澤田英宜, 3波長式三次元視覚センサの試作と基礎実験, 農業生産技術管理学会平成19年度年次大会, 2007年11月3日, 熊本県立大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.bioinfo.osakafu-u.ac.jp/~fujjura/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤浦 建史 (FUJIURA TATESHI)
大阪府立大学・生命環境科学研究科
・教授

研究者番号: 00026585

(2) 研究分担者

和田 光生 (WADA TERUO)
大阪府立大学・生命環境科学研究科
・助教

研究者番号: 10244667

(3) 連携研究者

該当なし