

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 26 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21780238

研究課題名（和文）農作業行動のモデル化を核とした知的作業支援可能なユビキタス作業空間の構築

研究課題名（英文）Construction of Ubiquitous Workspaces Capable of Intelligent Working Assistance by Modeling Agricultural Working Behavior

研究代表者

森尾 吉成（MORIO YOSHINARI）

三重大学・大学院生物資源学研究科・准教授

研究者番号：90273490

研究成果の概要（和文）：

本研究では、農作業支援ロボットが作業者を自律支援するために必要な要素技術として、1) 農作業者の位置ならびに 8 つの作業姿勢を、一台の首振りカメラを用いて、検出可能距離が約 40 m、距離分解能が約 1 m、サンプリング周波数が 30 Hz で検出する作業者追跡システム、2) 農作業の代表的な基本動作を、確率モデルを用いて認識する動作認識システム、3) 選別作業に有用な情報を作業者に自動提示する選別情報自動提示システム、4) 自律走行車両が走行すべき走行路を自動検知するシステム、の 4 つシステムの開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we developed the four systems: (1) a worker tracking system capable of detecting worker position and eight worker postures with a sampling rate of 30 Hz, with a sensing resolution of about 1 m and with a sensing range of about 40 m using single Pan-Tilt-Zoom camera; (2) a fundamental working gestures recognition system using stochastic model; (3) an automated grading information displaying system for worker assistance; (4) an automated driving route detection system for an autonomous vehicle.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：農作業知的支援、作業者追跡、作業動作認識、情報自動提示、走行路検知、画像処理

1. 研究開始当初の背景

IT 化や自動化が進む規格化された工場とは異なり、農作業現場は、コスト面や作業の複雑性から、大半の作業が機械化されておら

ず、安全性についても、毎年 400 件近くもの死亡事故が発生する状況にある。重大事故を誘発しない労働環境の整備が求められるが、急傾斜地における農道など、インフラの

整備は容易ではなく、労働時間の管理や健康管理も作業者個人の責任に頼っているのが現状である。本研究に至った経緯は、著者自身が高い作業品質を追求する両親の農業経営（平成3年日本農業大賞受賞）環境の中で育ち、農家の子供が、細かな指示を受けずに両親の行動に合わせて、作業の要所を要領よく手伝う作業支援が、作業効率の向上、作業負荷の軽減、さらには、作業者のモチベーション向上や、安全安心につながるゆとりの創出にもつながることを、身をもって経験してきたことにある。本研究を着想した際も実際の農作業を手伝っている最中である。

2. 研究の目的

農作業環境を取り巻く深刻な状況を、これまでになく新しい視点から改善を行う方法として、我々の研究では、両親の背中が語るものを子供が感じ取るように、農作業ロボットが作業者の行動から非言語的に発せられるメッセージを理解することによって、作業者の行動を見守り、気を利かせて作業を支援するユビキタス作業空間を構築することを最終目標とした。

本研究期間では、畝立てされた圃場において、作業者が収穫作業や運搬作業を行う場面を想定し、農作業ロボットが作業者の作業行動を理解しながら、作業を支援するタイミングや支援する内容を判断するために実装されるべき基本機能として、1) 作業者の行動をリアルタイムに追跡する機能、2) 農作業の基本動作を認識する機能、3) 作業に有用な情報を映像や音声でリアルタイムに作業者に提示する機能、4) 農作業ロボットが圃場内外で自走するために、走行路を自動検知する機能、の4つの機能を開発した。

3. 研究の方法

(1) リアルタイム作業追跡機能の開発

圃場内の作業者を、リアルタイムに追跡するために、図1(a)に示すように、カメラには、Pan角ならびにTilt角の駆動速度、可動範囲がそれぞれ、Pan角が秒速 300° 、 $\pm 100^\circ$ 、Tilt角が秒速 125° 、 $\pm 25^\circ$ であり、Zoom値が光学10倍まで制御可能な首振りカメラ

(Sony EVI-D100)を使用し、さらに、作業者を見失うことなく確実に追跡するために、図1(b)に示すように、一辺10cmの正方形の形をした青マーカと赤マーカを一対としたカラーマーカを、赤と青の配色パターンを変えながら、胸部、背部、左右の上腕部の4箇所に着けた専用の作業服を使用した。

首振りカメラが、作業者を画面中央に、一定の大きさで捕捉し続けるために、首振りカメラに接続された画像入力ボード(Matrox Morphis MOR/4VD)から取得したRGB情報をもとに、カラーマーカの赤色と青色の境界付

近で尤度を高く出力するparticle filterを設計し、カラーマーカの中心座標、カラーマーカの長軸方向の長さ、図1(b)に示されているカラーマーカの8通りの傾きを、それぞれリアルタイムに検出できる画像処理システムを構築した。

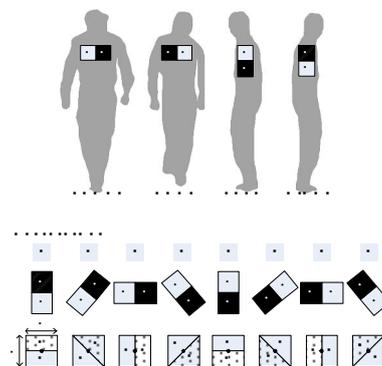
Particle filterの設計では、画像中に胸部あるいは背部のカラーマーカとともに、上腕部のマーカが同時に撮影された場合には、首振りカメラが胸部あるいは背部のマーカを、上腕部よりも優先的に追尾させる仕様とし、particle filterを2種類設計した。一つ目のparticle filterは、胸部と背部のカラーマーカが左右上腕のマーカよりも尤度が高く出力されるように設計し、二つ目のparticle filterは、逆に、左右上腕のマーカが胸部や背部よりも尤度が高く出力されるように設計した。首振りカメラは、一つ目のparticle filterによって検出されるマーカを、常に画像中央に捕捉するように制御される。

カラーマーカを画像中央に捕捉するために必要な首振りカメラのPan角とTilt角は、particle filterによって検出されたカラーマーカの中心座標から計算し、PID制御を用いて、Pan角とTilt角を制御した。首振りカメラのズーム値は、画像中におけるカラーマーカの長軸方向の長さが、あらかじめ決めた30ピクセルに維持されるように、ON-OFF制御によって制御した。

作業通路内の作業者の位置は、通路入り口



(a) 作業追跡用 Pan-Tilt-Zoom カメラ



(b) 赤青カラーマーカ付き作業服と8通りのマーカ姿勢

図1 作業者の姿勢と位置を検出するための赤青カラーマーカと8通りの作業姿勢

に設置した首振りカメラから作業員までの距離、首振りカメラのPan角とTilt角を用いて計算した。カメラから作業員までの距離の推定には、カラーマーカの大きさを画像中に一定に維持するために制御されたズーム値を利用し、カメラから作業員までの距離とズーム制御値の関係を表現する校正式を、あらかじめ実験により求めておくことによって、ズーム値から距離を推定した。ズームが下限を下回る領域、あるいはズームが上限を上回る領域においては、画像中のカラーマーカの大きさを利用し、作業員までの距離と画像中のマーカの大きさの関係を表現する校正式をあらかじめ実験により求めておくことによって、画像中のマーカの大きさから距離を推定した。画像中のカラーマーカの大きさの推定値に含まれるノイズ、ならびに、推定した距離に含まれるノイズは、カルマンフィルタを設計して濾過した。

追跡すべき対象が1人ではなく、複数存在する場合の追跡方法についても検討を行い、一つの作業空間に、2人以上の作業員が同じカラーマーカ付きの作業服を着用して存在している状況においても、それぞれの作業員を追跡できるようにするため、2台目の首振りカメラを導入し、同一画面に映る2人の作業員に対して、画面に向かって最も左端に位置する作業員を優先的に追跡するparticle filterと、向かって最も右側に位置する作業員を優先的に追跡するparticle filter、の2種類のparticle filterを新たに設計することによって、2台の首振りカメラが、2名以上の作業員の中から画面両端の2人の作業員を選択的に追跡するシステムを開発した。さらに、作業員だけではなく、農業機械や別の農業ロボットの動きも追跡できるようにするため、直径48cmで、高さ20cmの円筒形の紙材表面を、赤色と青色で、上下均等にストライプ状に色付けした新しいカラーマーカを開発した。作業員だけではなく、農業機械を優先的に追跡できるparticle filterも新たに設計することによって、1台の首振りカメラが、追跡すべき対象を、作業員と農業機械とを任意のタイミングで切り替えできる追跡システムを開発した。

実際の圃場において、追跡機能が実装された首振りカメラを設置する際には、カメラを、作業通路の入り口に設置することによって、作業員が通路内を往復する様子、右旋回、左旋回、屈伸動作をしながら畝に正対して作業を行う様子がリアルタイムに観察できるようにした。

背丈の高い作物に遮蔽され、カメラが作業員を観察できない状況や、作業員の素早い動作がカメラのサンプリング周波数では追従できない状況においても作業員を追跡できるように、新たな追跡方法として、重さ20g

の無線通信可能な一体型3軸加速度センサ・3軸ジャイロセンサを、胸部、左右手首、左右足首の5箇所に取り付け、作業員の5つの部位の動きを、500Hzで収集するシステムも開発した。

(2) 農作業の基本動作認識機能の開発

農作業ロボットに、作業内容を理解し、作業を支援するタイミングを自ら判断させる機能を実装するために、確率モデルの一つである隠れマルコフモデルを用いて、農作業に頻出する旋回動作、屈伸動作、腕の曲げ伸ばし動作の3つの基本動作を認識するシステムを開発した。

動作認識システムの開発では、首振りカメラを使って作業員の行動を追跡する場合と、3軸加速度センサ・3軸ジャイロセンサを使って作業員の行動を追跡する場合の、2種類のシステムを開発した。首振りカメラを使う場合、作業員の動作を表現する特徴ベクトルは、particle filterが検出した作業員の姿勢情報と、首振りカメラのPan角とTilt角の制御量を使って構成した。一方、3軸加速度センサ・3軸ジャイロセンサを使う場合の特徴ベクトルは、一つのセンサから出力される3つの加速度と3つの角速度の6種類の出力値を、5センサ分並べて構成した。

学習データの収集は、一つの動作につき、複数の被験者を用意し、被験者毎に所定の動作を複数回行うことによって収集した。隠れマルコフモデルの学習過程は、すべての学習データを使ってモデルを設計する第1モデル設計段階、第1モデル設計段階で認識できなかったデータのみを使って、新たなモデルを設計する第2設計段階、さらに、認識できなかったデータに対しては、第3設計段階へと進め、一つの学習動作のすべての学習データに対して安定して認識するために必要な隠れマルコフモデルを複数作成した。

(3) 音声と映像を用いた農作業情報提示機能の開発

農作業に有用な情報を音声や映像を用いて作業員に提示する機能の開発では、旋回動作、屈伸動作、腕の曲げ伸ばし動作、の3つの基本動作を認識する隠れマルコフモデルを使って、作業員が地面に置かれた重量物を持ち上げる瞬間、左右に旋回する瞬間、左右の腕を動かして収穫動作を行った瞬間に、映像と音声で認識したことを作業員に通知する情報提示システムを開発した。重量物を持ち上げる動作に対しては、特に作業の支援を申し出る音声を通知し、音声を聞いた作業員への心的影響を検討した。

さらに、卓上に置かれた農産物の長さや3次元形状を自動計測し、計測結果を映像や音声で作業員に案内するシステムも構築するこ

とによって、作業効率や作業精度に及ぼす影響を検証した。農産物の長さの計測では、作業者の指先にカラーマーカを取り付け、卓上の計測点からカラーマーカまでの3次元距離を、3台のカメラを用いたステレオ視によって計測し、農産物の長さを映像と音声で提示するシステムを開発した。農産物の3次元形状の計測では、特にイチゴをサンプル果実として、イチゴ表面の瘦果を全周に渡って抽出し、一つ一つの瘦果の3次元座標を、3台のカメラを用いたステレオ視によって計測し、イチゴの3次元形状と、果実の主軸の向きの推定結果を、映像により作業者に提示するシステムを開発した。

(4) 農作業ロボットを案内するための作業通路検知機能の開発

農作業ロボットを搭載した車両が、作業者を追従しながら自走する際に必要となる、走行路を自動検知する画像処理システムを開発した。走行路を検知するために、畝と作業通路の曖昧な境界をより明確に表現するための分離度フィルタを設計し、さらに、車両が向かうべき方向を、消失点を探索することによって検知するアルゴリズムを開発した。

4. 研究成果

(1) リアルタイム作業追跡機能の検証結果

間口 30 m 奥行き 47 m の屋外実験圃場の中央に位置する一本の畝間作業通路の入り口に、首振りカメラを1台設置し、片道約 38 m で往復移動しながら3種類の作業を行う1人の作業者の位置とカラーマーカの姿勢を検出する実験を行った。3種類の作業は、1) 作業通路内を途中で立ち止まることなく時速約 3.6 km で往復歩行する歩行作業

(Walking), 2) 1 m 置きに立ち止まり、身体を左手の畝に向け、立位姿勢のまま左手と右手を1秒間に1回の速さで前方に2回曲げ伸ばしする往復作業を、時速約 0.8 km の移動速さで行う立位姿勢作業 (Standing), 3) 身体を左手の畝側に向け中腰姿勢を維持しながら1 m 横移動し、座位姿勢をとった後に左手と右手を1秒間に1回の速さで前方に2回曲げ伸ばしする往復作業を、時速約 0.7 km の移動速さで行う座位姿勢作業 (Sitting), の3つである。

図2は、検出した作業者の移動軌跡を、首振りカメラのカメラ座標 (x, y, z) の xz 平面で描画した結果である。開発した追跡システムは、3種類の作業のいずれにおいても、一度も追尾に失敗することはなく、画像中央に作業者を捕捉し続けることができた。作業者の追跡距離の限界値は約 40 m、作業者の位置分解能は約 1 m であり、2 m を大きく超える例外的な誤差を発生することはなかった。カラーマーカの姿勢の検出においても、不自然な姿勢を検出することなく、3種類の作業に特徴的なマーカの姿勢を安定して検出できる結果が得られた。実験を通して、作業者の位置と姿勢は、約 30 Hz のサンプリング速さで検出できる結果が得られた。

然な姿勢を検出することなく、3種類の作業に特徴的なマーカの姿勢を安定して検出できる結果が得られた。実験を通して、作業者の位置と姿勢は、約 30 Hz のサンプリング速さで検出できる結果が得られた。

一つの屋内作業空間に、同じカラーマーカ付き作業服を着用した3人の作業者が、頻繁に接近、交差を繰り返す状況において、2台の首振りカメラを用いて2人の作業者を追跡した実験では、設計した particle filter は効果的に機能し、左追跡用カメラと右追跡用カメラの2台の首振りカメラは、左手と右手の作業者を区別しながら追跡できる結果が得られた。さらに、同じ屋内作業空間において、カラーマーカ付き作業服を着用した作業者1人と、作業者とは異なる円筒形カラーマーカを取り付けた台車が近接、交差を行う状況において、1台の首振りカメラが追跡対象を作業者と車両とで切り替えながら追跡した実験では、設計した particle filter は効果的に機能し、首振りカメラは、同一画面に映る2種類の異なるカラーマーカを識別し、作業者と台車を任意のタイミングで切り替えながら追跡できる結果が得られた。

無線通信型3軸加速度・ジャイロセンサを作業者の5つの部位に取り付けて、作業者の動きを追跡するシステムでは、屈伸、旋回、歩行、の動作を行う作業者の身体の動きを 500Hz で安定して収集できる結果が得られた。

(2) 農作業の基本動作認識機能の検証結果

屋内作業空間において、首振りカメラが作業者を追跡しながら、旋回動作、屈伸動作、腕の曲げ伸ばし動作の、3種類の動作を認識した実験では、設計した隠れマルコフモデルは効果的に機能し、3種類の動作を、動作が完了するタイミングで安定して認識できる結果が得られた。

5つの無線通信型3軸加速度・ジャイロセンサを作業者に取り付けて追跡しながら、屈伸、旋回、歩行、の動作を認識した実験では、

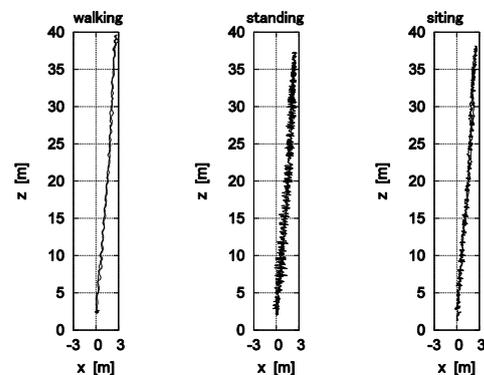


図2 歩行—立位—座位作業時に検出された、カメラ座標系における作業者の位置

あらかじめKL展開によって作成した固有空間を用いて、3種類の動作の違いが識別できる結果が得られた。500 Hz のサンプリング周波数で得られた動作データを、隠れマルコフモデルを用いて認識した結果については、常に安定した結果は得られなかったが、サンプリング周波数が 30 Hz の首振りカメラを用いた動作認識方法よりも、高感度で認識できる結果が得られた。

(3) 音声と映像を用いた農作業情報提示機能の検証結果

屋内作業空間に、カラーマーカ付き作業服を着用した1人の作業者が進入し、重量物を搬出する作業に対して、あらかじめ隠れマルコフモデルに学習させた旋回動作、屈伸動作が検出された瞬間に、作業者に、映像と音声で支援を提示した実験では、情報を提示するタイミングや提示する情報の種類を状況に合わせて最適化する必要はあったものの、重量物を持ち上げる屈伸動作や、重量物を持ち上げて振り向く旋回動作に合わせて、動作認識システムから映像と音声で提示される結果が得られ、作業が作業ロボットによって見守られている安心感を、被験者に与えた。

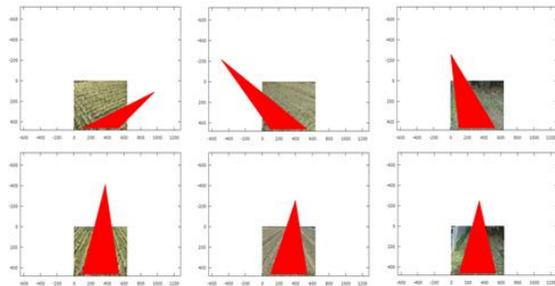
卓上に置かれた農産物の長さを自動計測し、その結果を映像や音声で作業者に案内した実験では、数千本のキュウリを選別する選別作業において、開発したシステムが、作業時間を短縮させるとともに作業精度を向上させ、作業負荷ならびに精神的負担を軽減させる効果があった。イチゴの3次元形状を果実表面の瘦果の3次元座標を計測することによって再構築した実験では、他のサンプルの形状と比較できるイチゴの絶対的な3次元形状を獲得することができ、推定した果実の主軸方向を作業者に提示することができた。果実の主軸方向の推定に失敗する場合もあったが、主軸方向が作業者に提示されることによって、作業者がパック詰めした果実の姿勢を評価するシステムに利用できる可能性を示すことができた。

(4) 農作業ロボットを案内するための作業通路検知機能の検証結果

圃場内の作業通路ならびに圃場外の車両走行通路を撮影したビデオ映像に対して作業通路を検知した実験では、枕地付近などの複数の作業通路が交差する通路分岐点を除いた、検知すべき作業通路が一方に揃う状況において、図3に示すように、開発した通路検知システムは、効果的に機能し、作業通路の境界が曖昧なサンプルに対しても、通路境界線が消失点に向かう方向を良好に検出できる結果が得られた。



(a) 作業通路 63 サンプル



(b) 通路検知結果の一例

図3 圃場内作業通路ならびに圃場外通路検知用サンプルと検知結果一例

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16件)

① 森尾吉成, 井樋謙太朗, 川津匡量, 豊島亮, 大西達也, 村上克介, 農作業知的支援のためのPTZカメラを用いた作業者位置姿勢検出システムの開発, 農業機械学会誌, 査読有, 74巻4号, 2012, 掲載決定.

② 牧野光男, 森尾吉成, 村上克介, 自律走行車両ガイダンスのための走行路検知アルゴリズムの開発, 農業機械学会関西支部報, 査読無, 112号, 2012, 掲載確定.

③ 大西達也, 森尾吉成, 村上克介, 農作業知的支援のための作業基本動作認識システムの開発, 農業機械学会関西支部報, 査読無, 111号, 2012, 53-56.

④ 浅野 諭, 森尾吉成, 村上克介, 山本聡史, 瘦果を標識点としたイチゴの3次元形状計測システムの開発, 農業機械学会関西支部報, 査読無, 111号, 2012, 49-52.

⑤ 森尾吉成, 農作業行動理解機能を有するロボット視覚システムの開発, 農業機械学会

関西支部報, 査読無, 109号, 2011, X-XV.
⑥ 服部 洋明, 森尾吉成, 村上克介, 複数
作業者同時利用可能な農産物長さ自動計測
システムの開発, 農業機械学会関西支部報,
査読無, 109号, 2011, 22-25.

〔学会発表〕(計 19 件)

① 森尾吉成, 豊島亮, 服部洋明, 柴田一徳,
中村顕斗, 松野いずみ, 村上克介, 農作業
者行動理解機能を有するロボット視覚シス
テムの開発, 農業機械学会第 70 回年次大会,
2011 年 9 月 27 日, 弘前大学.

② 森尾吉成, 岡崎 由, 川津匡量, 山田有
作, 浅野 諭, 大西達也, 村上克介, 農作
業者行動理解による知的作業支援システ
ムの開発, 農業機械学会第 69 回年次大会,
2010 年 9 月 15 日, 愛媛大学.

③ 森尾吉成, 村上克介, 他 6 名, 作業者行
動追跡による知的作業支援システムの開
発, 農業環境工学関連学会 2009 年合同
大会, 2009 年 9 月 17 日, 東京大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森尾 吉成 (MORIO YOSHINARI)

三重大学・大学院生物資源学研究科・准教
授

研究者番号 : 90273490