

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K06317

研究課題名(和文) ロボット三原則を実現する安全かつ効率的な農業ロボットシステムの開発

研究課題名(英文) Agricultural robot system to realize the three laws of robotics

研究代表者

門田 充司 (Monta, Mitsuji)

岡山大学・環境生命科学学域・教授

研究者番号：80239714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、センシングシステム、危険度の算出、ロボット制御の3要素から構成されるシステムにより、安全かつ効率的な農業ロボットシステムを実現することを最終目標としている。三次元距離センサを用いて人体の検出実験を行った結果、人間の位置や移動速度、移動方向を良好に検出することができた。また、コンピュータシミュレーションによるロボット制御では、危険度の値に応じてロボットアームは速度を変化させた。実際のロボットアームを用いた制御実験を行った結果、人間の動きに応じたロボット制御が可能であることが確認された。さらに、作業効率を数値化することで、両者の関係を定量的に把握することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スマート農業の推進により無人車両やアーム型のロボット開発においては、作業性能や精度は高いレベルに達しているものが多いが、その安全性が普及へのハードルとなっている。農業は対象物、作業の複雑さや多様性から、製造業で見られるようなロボットだけによる無人の完全自動化は今後も行われず、人間とロボットが協調して作業を行うことが想定されるため、人間に対する安全性の担保が必須となる。本研究では、これまで研究されてきたロボット技術を更に発展させ、普及に結びつける技術を付加するところに学術的・社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this research is to realize a safe and efficient agricultural robot system by using a system consisting of three elements: a sensing system, a calculation of danger level, and robot control. Experimental results of human body detection using a three-dimensional distance sensor showed that the robot was able to detect the human's position, moving speed, and direction of movement well. In the robot control by computer simulation, the robot arm changed its speed according to the value of the danger level. The results of the control experiment using the actual robot arm confirmed that the robot can be controlled according to human movements. Furthermore, quantifying the work efficiency made it possible to quantitatively understand the relationship between the two.

研究分野：農業工学

キーワード：農業ロボット 安全性 作業効率 センシングシステム 危険度

### 1. 研究開始当初の背景

近年、無人走行車両やアーム型の農業ロボット開発においては、作業性能や精度は高いレベルに達しているものが多いが、その安全性が普及へのハードルとなっている。ロボットの使命は、人間に代わって目的の作業を達成することであるが、人間に対する安全性はもちろんのこと、ロボット自身も自己防衛しながら、安全かつ効率の良い作業を実施しなければならない(ロボット三原則)。そのためには、ロボットがリアルタイムで外界の状況を把握しながら、自らの行動を決するシステムが必要となる。

### 2. 研究の目的

これまでも、農業ロボットの安全システムに関する研究(引用文献①～⑤)は行われてきたが、外界センサによる検出時間や検出範囲などに問題があったため、高速かつ精度の高いロボット制御が困難であった。そこで本研究では、人間や周囲の情報を短時間で正確に検出できる外界センシングシステムの開発および危険性の数値化、さらにはその場の状況に応じたロボット制御を実現する安全かつ作業効率の良い農業ロボットシステムの開発を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、施設や栽培管理方法が規格化されており、機械やロボットの導入に適したオランダ発祥のフェンロ式(ダッチライト式)大規模トマト温室で稼働する収穫ロボットを研究対象として想定する。

外界センシングシステムとしては、ロボットアーム(以下、アーム)の作動領域周辺とロボットの周囲数メートルの領域を検出する二種類を設定する。アーム周辺のセンシングにおいては、作業対象(収穫対象果実)の認識とそれ以外の部位や障害物などを識別・位置検出する。ロボット周辺のセンシングにおいては、作業中のロボットに接近する人間の動きを検出する。センシングシステムから得た情報とロボットの状態(アームの位置や移動方向など)から危険度を算出し、ロボットの動きを制御する。これにより、安全性と作業効率のバランスを取りながら、与えられた作業を遂行するロボットシステムを構築する。

### 4. 研究成果

#### (1) ロボットシステム

図1にロボットシステムの概要を示す。センシングシステムには、カラー画像と三次元距離情報を収集可能なMicrosoft社のAzure Kinectを用い、ロボットの周囲に存在する物体や人間の動きを検出した。センシングシステムで得た情報とアームの状態(速度、移動方向など)を基に危険度関数によって危険性の程度を数値化し、その値に応じてアームの速度を制御する。アームには三菱電機の6軸垂直多関節ロボットRV-2FRを用いた。

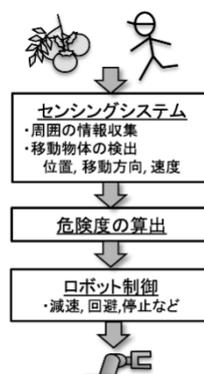


図1 ロボットシステムの概要

#### (2) 危険度および作業効率の数値化

危険性の程度を数値化するために、危険度関数  $D_i$  を定義した。アーム先端には鋭利な部品を有するロボットハンド(以下、ハンド)が装着される場合が多い。また、人間の頭部は最も保護されるべき部位であり、手先は可動範囲が大きいので、これらの位置をパラメータに取り入れた。 $L_1, L_2$  は、ロボットアーム先端部分と人間の頭部および近い方の手先との距離であり、これらの数値が小さいほど危険度は上昇する。 $k_i$  は係数である。 $\alpha, \beta$  は任意の作業中にアームが移動する範囲(作業領域)および構造上、アームが移動可能な範囲(作動領域)に基づく変数である。図2はウエスト関節を $60^\circ$ 往復旋回させながらアーム先端が回転関節から $0.5\text{ m}$ 離れた直線上を往復移動している範囲を作業領域、アーム先端が到達しうる範囲を作動領域として示している。いずれの領域も人間との接触の危険性を含むので、これらの領域に人間の代表点(頭部)が侵入するとアームを停止させることとした。また、頭部がこれらの領域外にあっても、手先が侵入する状況も考えられるため、 $\alpha, \beta$  は領域の周囲 $1\text{ m}$ から徐々に危険度を上昇させることとした。パラメータ  $L$  を含む項のみを用いた危険度関数  $D_1$ 、それに  $\alpha$  を加えた  $D_2$ 、さらに  $\beta$  を加えた  $D_3$  の3種類を設定して比較した。

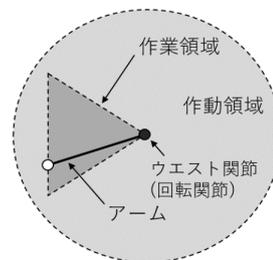


図2 作業領域と作動領域

$$D_1 = \frac{k_1}{L_1^2} + \frac{k_2}{L_2^2} \dots (1)$$

$$D_2 = \frac{k_1}{L_1^2} + \frac{k_2}{L_2^2} + \alpha \dots (2)$$

$$D_3 = \frac{k_1}{L_1^2} + \frac{k_2}{L_2^2} + \alpha + \beta \dots (3)$$

安全性と作業効率を比較するため、危険度関数  $D_1 \sim D_3$  における制御において、いずれかの関数でアームが減速を開始した時点からすべてのアームが初期速度に戻るまでを計測時間  $s$  として設定した。その間の危険度の累積値  $\Sigma D_i$  を求め、計測時間で除した値  $\Sigma D_i/s$  を安全性の指標とした。危険度の値が大きくなるほどアームは速度を落とすため、 $\Sigma D_i/s$  の値が大きいほど安全性を確保しているといえる。また、同一の計測時間内におけるアーム先端の移動距離を各危険度関数において求め ( $x_1 \sim x_3$ )、減速せずに作業を継続した場合の移動距離  $x_0$  で除した値  $x_i/x_0$  を作業効率の指標とした。この値が大きいほど計測時間内にアーム先端が移動した距離が長いので、作業効率も高いことになる。

### (3) コンピュータシミュレーション

大規模トマト生産施設での作業を想定し、アーム先端が作物列に沿って 0.5 m の直線距離を速度 0.25 m/s で往復移動する動作を想定した。シミュレーションにおいては、危険度が 100 を超えればアームを停止させ、25 から 100 の範囲では減速させることとした。3 種類の危険度関数を比較するために、同じ人間の動きを再現した。

人間が 1.0 m/s の速度で移動 (①→⑤) し、ロボットの近傍の果房に対して立ち止まって作業を行う状況を想定したシミュレーション結果 (代表的な点のみをプロット) の一例を表 1 と図 3 (アームの位置は危険度関数  $D_1$  の場合) と表に示す。◆が人間の頭、●が手先であり、○はアーム先端をそれぞれ表している。人間の接近に伴い、②では  $L_1, L_2$  の値が小さくなったため、いずれの危険度関数においても 25 を超え、その結果、アームは減速を開始した。さらに④からは、 $D_2$  および  $D_3$  に  $\alpha$  や  $\beta$  の値が加算されたため、アームの速度は  $D_1$  に比べ小さな値となった。⑤では全ての関数において危険度が 100 を超えたので、アームが停止した。実験の結果、危険度関数の設定に応じたアームの制御が可能であることが示唆された。また  $D_1, D_2, D_3$  の順で安全性を確保するために、

表 1 シミュレーションによる危険度の比較

No.	人間(頭) (X,Z) [m]	危険度					アーム先端速度 [m/s]		
		$D_1$	$D_2$	$D_3$	$\alpha$	$\beta$	$D_1$	$D_2$	$D_3$
①	(-0.3, 3.0)	9.9	9.9	9.9	0	0	0.25	0.25	0.25
②	(-0.3, 2.0)	26.7	26.7	26.7	0	0	0.24	0.24	0.24
③	(-0.3, 1.5)	55.6	55.6	55.6	0	0	0.14	0.14	0.14
④	(-0.3, 1.2)	96.2	101.1	113.8	4.8	12.9	0.01	0.00	0.00
⑤	(-0.3, 1.0)	170.4	170.4	199.9	24.8	29.9	0.00	0.00	0.00

ロボットが停止した時間はより長くなった。安全性とトレードオフの関係にある作業効率は、危険度関数  $D_1$  (0.304),  $D_2$  (0.297),  $D_3$  (0.280) の順に小さくなった。

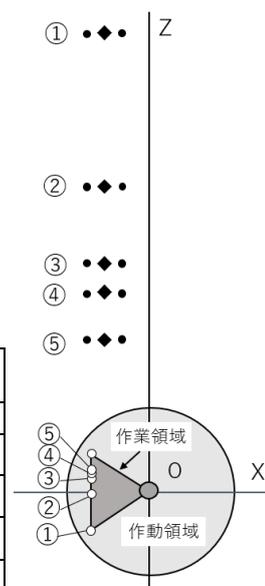


図 3 シミュレーション結果例

### (4) ロボット制御実験

今回用いたセンシングシステムでは人間の計測に 0.2 秒程度を要する。その間にも人間がロボットに接触する可能性があると考え、直近約 1 秒間の人間の移動速度の平均値を用いて移動位置を予測し、 $L_1$  に反映した (位置補正)。

実験はコンピュータシミュレーションの場合と同様、大規模トマト生産施設内での作業を想定して行った。3 種類の危険度関数を比較するため、人間がロボットに接近する動作は予めセンシングシステムで取得し、位置補正を行った同一の移動データを用いてアームを制御した。収穫動作を想定して、ロボットはウエスト関節から 0.35 m 離れた直線上 0.5 m を作物列に沿ってアーム先端が往復移動を繰り返すこととし、危険度が 25 を超えると、その値に応じてアームを減速し、100 を超えると停止させた。

実験結果の一例を表 2 と図 4 に示す。この例は、0.25 m/s の速度で作業を行っている

表 2 ロボット制御による危険度の比較

No.	人間(頭) (X,Z) [m]	危険度					アーム先端速度 [m/s]		
		$D_1$	$D_2$	$D_3$	$\alpha$	$\beta$	$D_1$	$D_2$	$D_3$
①	(0.1, 2.6)	16	16	16	0	0	0.25	0.25	0.25
②	(0.2, 2.2)	21	21	21	0	0	0.25	0.25	0.25
③	(0.0, 1.7)	31	31	31	0	0	0.23	0.23	0.23
④	(0.1, 1.3)	43	43	60	0	17	0.19	0.19	0.14
⑤	(0.0, 0.9)	61	93	152	32	57	0.13	0.03	0.00
⑥	(0.0, 0.7)	85	142	225	52	77	0.05	0.00	0.00

ロボットに人間が果実で満杯になったコンテナを回収するために接近 (①→⑥) した後に停止し、手を前に伸ばした状況を想定した動作である。○が人間の頭、●が手先

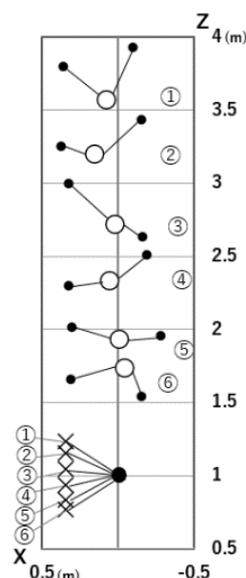


図 4 制御結果例

を表している。いずれの危険度関数の場合においても、その値が 25 を超えるとアームが減速を開始した。危険度関数  $D_2$ ,  $D_3$  においては⑤から $\alpha$ の値が加算され、さらに  $D_3$  では④から $\beta$ が加算されたため危険度の値が上昇し、減速および停止となった。危険度関数  $D_1$  から  $D_3$  の順に危険度が大きくなるに従い、安全を確保するためにロボットアームの減速、停止時間が長くなった。安全性の指標  $\Sigma D_i/s$  は  $D_1$  (540),  $D_2$  (638),  $D_3$  (856) の順に大きくなり、一方作業効率は  $D_1$  (0.46),  $D_2$  (0.44),  $D_3$  (0.39) の順に小さくなった。

#### (5) 安全性と作業効率の比較

ロボット制御実験における危険度関数ごとの安全性と作業効率を表 3 に示す。①はコンテナを回収するためにロボットに人間が接近して手を伸ばした状況、②は人間がロボットの近くの果房に近づき、立ち止まって作業を行う状況を想定した場合である。

①においては、危険度関数  $D_1$  から  $D_3$  の順に危険度の累積値は大きくなり、それにとまってアームの減速、停止時間が長くなり安全性を確保した一方、作業効率は低下していった。②においては、危険度関数の  $\alpha$  や  $\beta$  の値が上昇する位置で人間が立ち止まって作業を行ったため、 $D_2$  や  $D_3$  は①の場合に比べて大幅に低下した。

表 3 安全性と作業効率の比較

① コンテナ回収			② ロボット近傍での作業		
	安全性 ( $\Sigma D_i/s$ )	作業効率 ( $x_i/x_0$ )		安全性 ( $\Sigma D_i/s$ )	作業効率 ( $x_i/x_0$ )
$D_1$	540	0.46	$D_1$	422	0.41
$D_2$	638	0.44	$D_2$	547	0.32
$D_3$	856	0.39	$D_3$	719	0.21

#### (6) おわりに

本研究は、安全かつ作業効率の良い人間協調型ロボットシステムの開発を目標に、外界センシングシステム、危険度の算出、ロボット制御の 3 つの要素から成るシステムを構成し、コンピュータシミュレーションならびに実機を用いてその有効性を確認した。三次元距離センサを用いた人体検出においては、移動中の人間の頭部や各関節の座標を良好に検出することができたため、頭部と手先の座標を危険度関数のパラメータに含めた。実機による実験においては、センシング時間を考慮したロボット制御を行うため、人間の位置を補正した。危険度関数によって安全性の程度を数値化するとともに、安全性とトレードオフの関係にある作業効率に関しても、任意の時間内にアーム先端が移動した距離を基に数値化した。危険度関数においては、検出範囲の異なる 3 種類を設定し、安全性と作業効率を比較した。実験の結果、人間とロボットの距離によって変化する危険度関数の値に応じてアームは速度を変化させ、安全性を確保することが確認された。また、3 種類の危険度関数による安全性と作業効率を定量的に比較することができた。今後は、複数の人間検出やアームの回避動作の導入、走行部も含めたロボット作業、安全性と作業効率の最適化の検討などを行い、ロボットシステムをさらにブラッシュアップすることが望まれる。

#### <引用文献>

- ① 門田充司, 近藤 直: 農業用ロボットのマン・マシン協調システム(第 1 報) - マニピュレータを対象とした危険度の算出 -, 農業機械学会誌, 61(2), 1999, 81-90
- ② 門田充司, 近藤 直, 中司憲持: 農業用ロボットのマン・マシン協調システム(第 2 報) - マニピュレータ作業空間における人間のセンシングシステム -, 農業機械学会誌, 61(2), 1999, 91-100
- ③ 門田充司, 近藤 直: 農業用ロボットのマン・マシン協調システム(第 3 報) - 人間を対象とした棚栽培における極座標マニピュレータの制御実験 -, 農業機械学会誌, 61(3), 1999, 73-81
- ④ 門田充司, 鐘ヶ江修司, 毛利建太郎, 難波和彦, 近藤 直: 人間協調型農業用ロボットの外界センシングシステム(第 1 報) - レーザ距離計を用いた検出基礎実験 -, 植物工場学会誌, 14(1), 2002, 49-55
- ⑤ 門田充司, 鐘ヶ江修司, 毛利建太郎, 難波和彦, 近藤 直: 人間協調型農業用ロボットの外界センシングシステム(第 2 報) - 人間の識別とマニピュレータの障害物回避制御 -, 植物工場学会誌, 14(2), 2002, 104-111

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 塩釜愛, 門田充司, 難波和彦
2. 発表標題 農業ロボットの安全システムに関する研究 ロボット制御シミュレーションによる危険度の検討
3. 学会等名 関西農業食料工学会 第145回例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 為国のどか, 門田充司, 難波和彦
2. 発表標題 農業ロボットの安全システムに関する研究 危険度関数の検討
3. 学会等名 関西農業食料工学会 第149回例会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塩釜愛, 門田充司, 難波和彦
2. 発表標題 農業ロボットの安全システムに関する研究 危険度関数に基づくロボットアームの制御
3. 学会等名 関西農業食料工学会 第149回例会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	難波 和彦  (Namba Kazuhiko)  (90263623)	岡山大学・環境生命科学学域・准教授    (15301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------