

委託試験成績（令和4年度）

担当機関名 部・室名	地方独立行政法人青森県産業技術センター 農林総合研究所 スマート農業推進室
実施期間	令和4～5年度【新規】
大課題名	V 情報処理等先端技術の活用による高生産システムの確立
課題名	ロボットトラクターによる完全無人走行に向けた道路走行の実証
目的	スマート農業技術レベル3の実現に向け、「経路マッチングソフト」を導入し、無人道路走行が可能となったロボットトラクターが、待機場所から目的圃場まで走行し、目的圃場で農作業を行い、待機場所まで帰還することが可能か検証する。また、障害物対応についても検証する。
担当者名	主任研究員 千葉 祐太
<p>1. 試験場所</p> <p>農林総合研究所内道路及び圃場（青森県黒石市田中）</p> <p>(1) 道路：待機場所から圃場もしくは圃場間をつなぐ道路、コンクリート舗装、横幅約4～7m。私有地であるため一般車両の往来はほとんどなく、道路を封鎖して試験可能。</p> <p>(2) 圃場：ロボットトラクターの自動操舵機能が活用可能な大区画圃場（1ha規模）。圃場に入場時の畦畔の傾きは、圃場により異なり0～20°程度。</p> <p>2. 試験方法</p> <p>(1) 供試機械名</p> <p>「経路マッチングソフト」を導入したロボットトラクター</p> <p>ア. 「経路マッチングソフト（開発：ヤンマーアグリジャパン(株)）」</p> <p>オペレーターが走行した経路を記録し、ロボットトラクターに走行経路としてティーチングするソフトウェア。これにより、ロボットトラクターの無人道路走行が可能となる。</p> <p>イ. ロボットトラクター（ヤンマーアグリジャパン(株)製）</p> <p>型式：YT4104A（ホイール仕様）、104馬力、車体幅1,850mm</p> <p>(2) 試験条件</p> <p>I. 道路走行の精度検証</p> <p>ア. 基本条件</p> <p>1) 基準経路：供試機械をオペレーターの操作で「待機場所→目的圃場→待機場所」の経路で走行し、これを「経路マッチングソフト」に記憶</p> <p>2) 作業経路：圃場内の耕起作業の経路を作成</p> <p>3) 1)と2)を組み合わせ、供試機械に①～③を無人で作業</p> <p>①基準経路を基に、待機場所から目的圃場まで無人道路走行</p> <p>②作業経路を基に、目的圃場で無人で耕起作業</p> <p>③基準経路を基に、目的圃場から待機場所まで無人道路走行</p> <p>イ. 各試験条件</p> <p>(2) - I - ア. 基本条件に従い、2種の道路走行経路で試験を実施。</p> <p>1) 試験1：出発と帰還場所が同じ経路（図1）</p> <p>①経路1-1：待機場所から約90m直進し、90°右折し、目的圃場に入場</p> <p>②作業1：目的圃場（約1ha）で無人耕起作業</p> <p>③経路1-2：目的圃場から①と同じ経路で待機場所に帰還</p> <p>・試験日時：明条件は2022年6月20日の9～14時に実施、天候は晴れで、視認性は良好。暗条件は2022年10月26日の19～21時に実施、天候は晴れで、視認性は不良。</p> <p>・無人道路走行の速度は明条件が直進、カーブともに5km/h、暗条件はカーブのみ3km/hとした。</p> <p>2) 試験2：圃場2筆を作業する経路（図2）</p> <p>①経路2-1：待機場所から約150m直進→90°右折→約50m直進→90°左折→約90m直進</p>	

→90°左折→目的圃場 1 に進入

②作業 2-1：目的圃場 1（約 1ha）で無人耕起作業

③経路 2-2：目的圃場 1 から出て 90°右折→約 5m 直進→90°左折→約 100m 直進
→90°左折→約 90m 直進→90°左折→目的圃場 2 に進入

④作業 2-2：目的圃場 2（約 1ha）で無人耕起作業

⑤経路 2-3：目的圃場 2 から出て 90°右折→約 5m 直進→90°右折→約 150m 直進
→90°左折→約 150m 直進→待機場所に帰還

・試験日時：2022 年 10 月 22 日の 9～16 時に実施、天候は晴れ。

・無人道路走行の速度は直進が 5km/h、カーブは 3km/h とした。

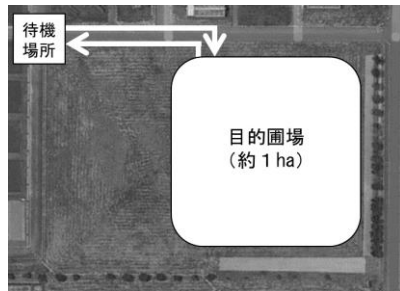


図 1. 試験 1 の道路走行経路

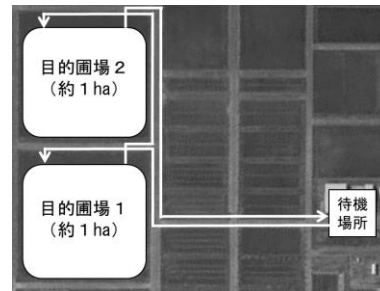


図 2. 試験 2 の道路走行経路

ウ. 調査項目

1) 無人道路走行の精度検証

供試機械に RTK-GNSS ロガー（榊ギョロマン社製）を装着し、道路走行中の位置情報を 1 秒間隔で経時的に記録した。これから、基準経路に対する無人区の誤差を算出した。

誤差の算出には GIS ソフトウェア（ArcGIS pro、Esri ジャパン社製）を使用した。基準経路の GPS ログの各記録ポイントを線でつなぎ、走行軌跡を線形化した。これに対し、無人道路走行の GPS ログポイントから基準経路の走行軌跡の最近傍までの距離を測定し、全ログポイントの平均値を誤差とした（図 3）。これを無人道路走行の全経路について、3 回行った。

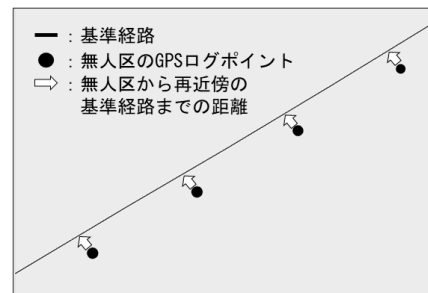


図 3. 基準経路に対する無人区の誤差の算出方法

II. 障害物対応

ア. 固定障害物（図 4）

供試機械の出発地点から直線で 50m に固定障害物を設置。障害物は大サイズ（円柱状、高さ 835×直径 580mm、ポリエチレン製）（以下、障害物大）と小サイズ（円錐状、高さ 705×底面直径 380mm、ポリエチレン製）（以下、障害物小）を使用。

イ. 移動障害物（図 5）

十字路から直線で 50m 先に供試機械の出発地点を設置。供試機械が十字路から 10、5、3、1m の地点に到達した際に、障害物を供試機械に対し横方向に移動させる。障害物はア. 固定障害物の大サイズの下部に車輪付きの台座、中央部にロープを取付け、担当者が人力で引き、移動させた。移動障害物は高さ 1,000×直径 580mm。

ウ. 試験日時

明条件：2022 年 10 月 26 日の 14～16 時に実施、天候は晴れ。視認性は良好。

暗条件：2022 年 10 月 26 日の 19～21 時に実施、天候は晴れ。視認性は不良。

エ. 調査項目

供試機械の速度は 10～2km/h までは 1km/h ずつの 9 段階に 1.5、1km/h の 2 段階を加え

た計 11 段階とした。調査は障害物に対し自動停止できるか遠観調査し、自動停止した場合は障害物から供試機械の先端部分までの距離を測定した。これを各速度で 3 回行い、3 回全て停止した場合に、自動停止を行ったと判断した。

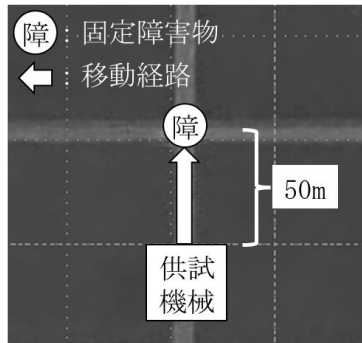


図 4. 固定障害物の試験方法

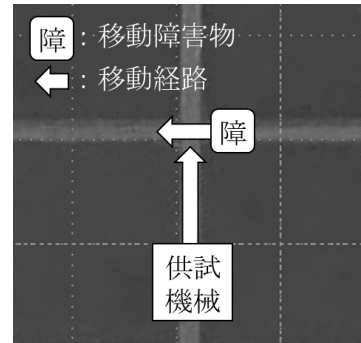


図 5. 移動障害物の試験方法

3. 試験結果

(1) 道路走行の精度検証

1) 無人道路走行を利用した作業

試験 1、2 ともに無人道路走行を利用して、待機場所から目的圃場までの移動、目的圃場での作業、目的圃場から待機場所へ帰還の一連の行程が無人で可能であった (図 6、7)。無人道路走行時の速度は直進、カーブのそれぞれについて供試機械のタブレットで 1~10km/h の範囲で変更可能であった。また、無人道路走行から圃場内での無人作業への切替えは手動で行う必要があった。

2) 無人道路走行の精度

無人道路走行は、概ね基準経路に沿った走行を行った (図 8)。しかし、カーブの行程で、基準経路に対して大回りをするように走行した (図 9)。そのため、直進時に比べ、カーブでは基準経路に対し誤差が大きくなった。

試験 1 では、経路 1-1 の直進の誤差が 1.4~18.2cm でカーブは 17.2~45.4cm (図 10)、経路 1-2 は直進が 0.0~14.9cm でカーブは 14.1~70.8cm (図 11) だった。試験 2 では、経路 2-1 の直進の誤差が 0~22.2cm、カーブは 13.9~68.6cm (図 12)、経路 2-2 の直進は 0~18.9cm でカーブは 8.9~97.5cm (図 13)、経路 2-3 の直進は 0.1~20.5cm でカーブは 14.0~95.3cm (図 14) だった。

直進、カーブを含む無人道路走行全体の誤差 (平均±標準偏差、以下同様) は試験 1 の経路 1-1 では 19.0cm±4.0、経路 2-2 は 16.0cm±3.1 で、試験 2 では経路 2-1 が 13.9cm±1.6、経路 2-2 は 22.7cm±1.6、経路 2-3 は 14.9cm±1.5 であった (表 1)。

3) 無人道路走行の道路からの逸脱

試験 2 の経路 2-2 において、目的圃場 1 から道路へ移動する際に道路からの逸脱が予想される場面があり、緊急停止を行った。要因は基準経路のカーブの行程を道路の端まで使って回るように作成し、無人道路走行がカーブを大回りで行うため、道路を端から外に逸脱した経路で走行したためであった。経路 2-2 の基準経路のカーブを小さく回るように再作成したところ、無人道路走行の際に逸脱することはなかった。

4) 暗条件における無人道路走行の精度

経路 1-1 について暗条件での無人道路走行を行った。その結果、明条件と同様に基準経路に従った走行を行った (図 15)。また、カーブを大回りし、カーブ時の誤差が大きくなる傾向も同様であった (図 16)。暗条件による誤作動などはなかった。基準経路に対する誤差は 13.3cm±1.3 であった (表 1)。

(2) 障害物対応

1) 固定障害物

最高速度の 10km/h から 1km/h までの順に、自動停止する速度を調査したところ、障害物大では明、暗条件ともに 10km/h で自動停止し、障害物までの距離は両条件とも 2.0m±0.4 であった。障害物小では明条件で 6km/h で自動停止し、障害物までの距離は 1.3m±0.5 で

あった。暗条件では 5km/h で自動停止し、距離は $0.6\text{m} \pm 0.3$ となり、明条件よりも自動停止する速度が遅く、距離も 1m 以下と短かった。暗条件で 1m 以上の距離で自動停止した速度は 4km/h で、距離は $1.2\text{m} \pm 0.4$ だった。

2) 移動障害物

障害物の飛出し位置 10m では、明、暗条件ともに最高速度である 10km/h で自動停止し、障害物までの距離は両条件とも $1.9\text{m} \pm 0.3$ だった。

障害物の飛出し位置 5m では、明条件が 7km/h で自動停止し、距離は $1.0\text{m} \pm 0.2$ で、暗条件が 6km/h で停止し、距離は $1.2\text{m} \pm 0.5$ で、暗条件の方が自動停止する速度が遅かった。

障害物の飛出し位置 3m では、明条件が 5km/h で自動停止し、距離は $0.4\text{m} \pm 0.1$ で 1m 以下となり、4km/h では $1.5\text{m} \pm 0.1$ で 1m 以上となった。暗条件は 4km/h で自動停止し、距離は $0.8\text{m} \pm 0.2$ で 1m 以下となり、3km/h では $1.5\text{m} \pm 0.2$ で 1m 以上となった。また、飛出し位置 5m と同様に、暗条件の方が明条件より自動停止する速度が遅かった。

障害物の飛出し位置 1m では、明、暗条件ともに 1.5km/h で自動停止し、明条件の距離は $0.2\text{m} \pm 0.0$ 、暗条件の距離は $0.3\text{m} \pm 0.0$ であった。また、最低速度の 1km/h では明条件の距離は $0.5\text{m} \pm 0.1$ 、暗条件の距離は $0.3\text{m} \pm 0.1$ であった。

4. 主要成果の具体的データ

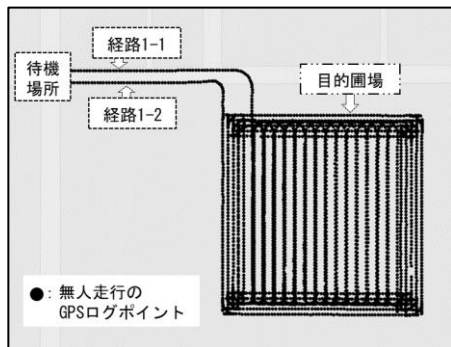


図 6. 試験 1 における無人道路走行と無人圃場作業の軌跡

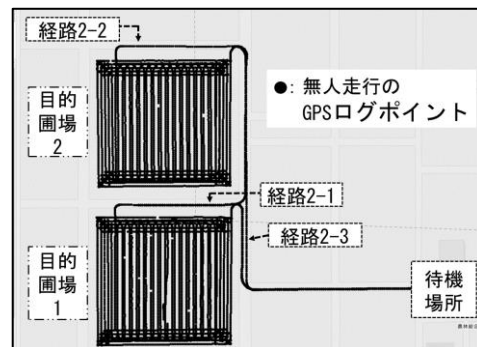


図 7. 試験 2 における無人道路走行と無人圃場作業の軌跡

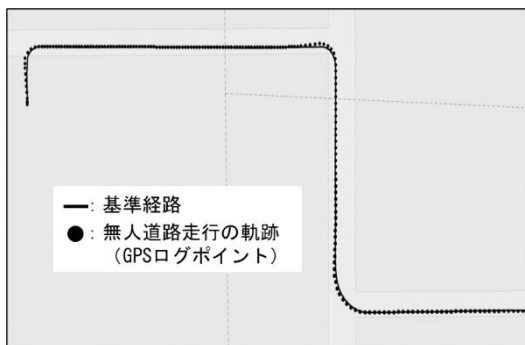


図 8. 基準経路及び無人道路走行の軌跡
注) 代表例として経路 2-2 を示す

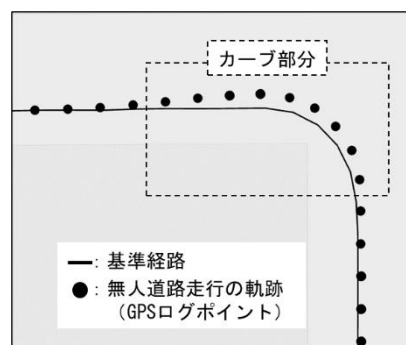


図 9. 図 8 のカーブ部分の拡大図

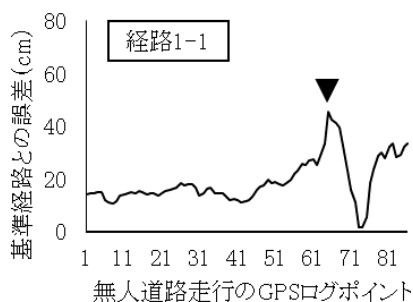


図 10. 経路 1-1 の基準経路との誤差の変動
注) ▼はカーブの地点を示す (図 11-14 同様)

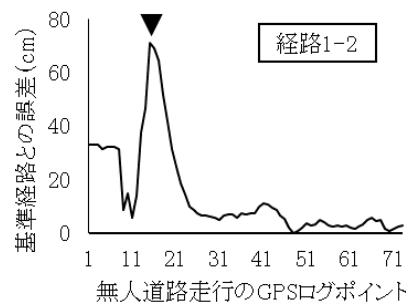


図 11. 経路 1-2 の基準経路との誤差の変動

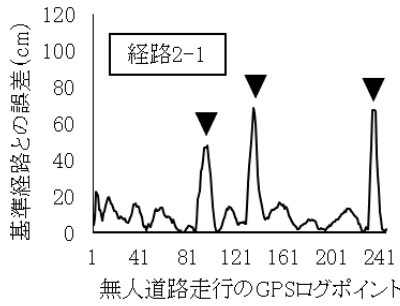


図 12. 経路 2-1 の基準経路との誤差の変動

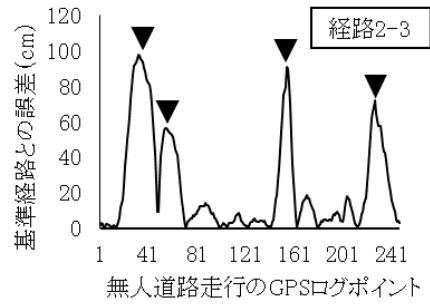


図 13. 経路 2-2 の基準経路との誤差の変動

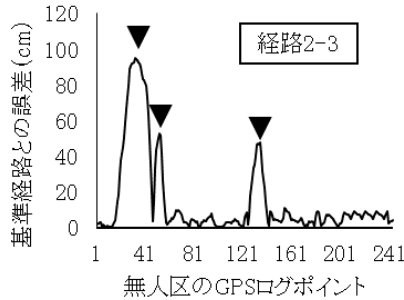


図 14. 経路 2-3 の基準経路との誤差の変動

表 1. 無人道路走行における基準経路との誤差

光条件	経路	誤差 (cm)
明条件	経路 1-1	19.0 ± 4.0
	経路 1-2	16.0 ± 3.1
	経路 2-1	13.9 ± 1.6
	経路 2-2	22.7 ± 1.6
	経路 2-3	14.9 ± 1.5
暗条件	経路 1-1	13.3 ± 1.3

注 1) 誤差は 3 回平均 ± 標準偏差

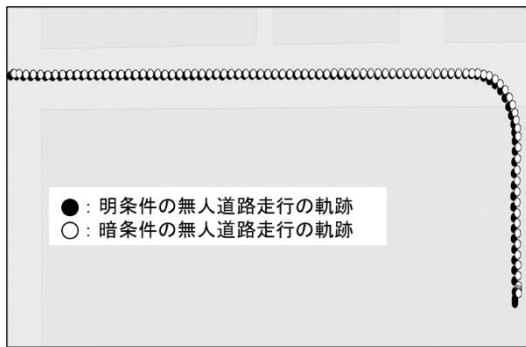


図 15. 経路 1-1 における明条件と暗条件での無人道路走行の軌跡

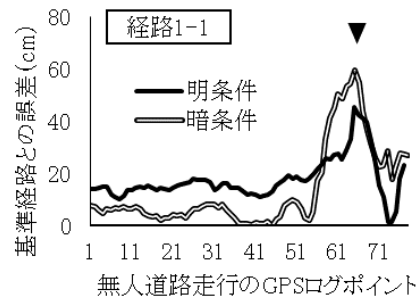


図 16. 経路 1-1 の明条件および暗条件での基準経路との誤差の変動

表 2. 固定障害物に対し、自動停止した走行速度と障害物までの距離

障害物の大きさ	光条件	自動停止した走行速度	障害物までの距離 (m)
障害物大	明条件	10km/h	2.0 ± 0.4
	暗条件	10km/h	2.0 ± 0.4
障害物小	明条件	6km/h	1.3 ± 0.5
		4km/h	1.2 ± 0.4
	暗条件	5km/h	0.6 ± 0.3

注 1) 障害物大: 円柱状、高さ 835 × 直径 580mm
 2) 障害物小: 円錐状、高さ 705 × 底面直径 380mm
 3) 明条件: 晴れの 13-16 時に実施。視認性は良好 (表 3 同様)。
 4) 暗条件: 晴れの 19-21 時、視認性は不良 (表 3 同様)

表 3. 移動障害物に対し、自動停止した走行速度と障害物からの距離

移動障害物の飛出し位置	光条件	自動停止した走行速度	障害物からの距離 (m)
10m	明条件	10km/h	1.9 ± 0.3
	暗条件	10km/h	1.9 ± 0.3
5m	明条件	7km/h	1.0 ± 0.2
	暗条件	6km/h	1.2 ± 0.5
3m	明条件	5km/h	0.4 ± 0.1
		4km/h	1.5 ± 0.1
	暗条件	4km/h	0.8 ± 0.2
1m	明条件	3km/h	1.5 ± 0.2
		1.5km/h	0.2 ± 0.0
	暗条件	1.5km/h	0.3 ± 0.0

注 1) 移動障害物: 円柱状、高さ 1,000 × 直径 580mm
 2) 移動障害物の飛出し位置は供試機械の先端からの距離

5. 経営評価

社会実装前の技術のため、利用経費を算出できず、経営評価は行えなかった。

6. 利用機械評価

圃場までの運搬に作業が必要というロボット農機の課題を解決できる技術である。この技術が社会実装されれば、スマート農業技術レベル3（遠隔監視下での無人状態での自動走行）の実現に貢献できると考えられる。

7. 成果の普及

社会実装前の技術であるため、普及についてはなし。

8. 考察

(1) 無人道路走行の実用性について

試験1における圃場1筆、試験2における圃場2筆の、無人道路走行を含む無人作業が実証できたことから、実用性があると考えられた。ただし、無人道路走を行うには走行技術のほか、圃場の進入口や農道の基盤整備や法整備などを行う必要があると思われる。

(2) 障害物の対応について

無人道路走行でも、これまでロボットトラクターに装備されてきた障害物探知機能を利用しており、ISO 18497:2018の試験障害物が基準となっている。無人道路走行では基準の試験障害物よりも小さい障害物や人の飛出しといった想定外の障害物が予想される。そのため、スマート農業技術レベル3の実現には遠隔監視技術の導入など、道路走行用の障害物探知機能の確立が必要と思われる。ただし、試験2のような圃場間移動が実証できており、無人道路走行する経路の封鎖など必要な措置を講じた上で、農道を走行して隣接または近接圃場への移動から社会実装していくことも有効であると考えられる。

(3) 無人道路走行時の速度について

経路1-1では明条件が暗条件よりも誤差が大きかった。これはカーブ時の速度が明条件の方が速いことに起因すると考えられた。また、障害物が1m先から飛び出しても、1.5km/hの速度なら安全対策が可能だった。そのため、現時点では8-(2)に記載した農道移動などを行う場合に、なるべく遅い速度で無人道路走行することも有効だと思われる。

9. 問題点と次年度の計画

(1) 問題点

3-(1)-3)に示したとおり、カーブを大回りで走行するため、基準経路のカーブの作成時はカーブ時の角度を小さくするなど、対応が必要である。

(2) 次年度の計画

これまで、一人のオペレーターが複数台のロボット農機を運搬を含んだ作業を実証した事例はほとんどない。次年度は、「経路マッチングソフト」を導入したロボットトラクターと有人トラクターの協調作業、または作業員一人で2台の「経路マッチングソフト」を導入したロボットトラクターを監視し、保管場所からの運搬と圃場作業までが無人で可能か検証する。

10. 参考写真



明条件での無人道路走行



暗条件での無人道路走行



固定障害物小での自動停止