

ロボット農業の高度化のための技術的 条件等に係る調査検討報告書 概要版

平成30年3月

ロボット農業の高度化のための技術的 condition 等に係る調査検討会

目次

1. 調査検討の概要
2. ロボット農業の現状と課題
3. ロボット農業の高度化に必要な技術的条件等
 3. 1 400MHz帯各種業務用データ専用デジタル波を利用するRTK-GNSSシステム
 3. 2 ロボットトラクターの状態観測データの伝送
 3. 3 ロボットトラクターへの制御データの伝送
 3. 4 圃場の各種情報データの伝送
4. ロボット農業の高度化に適したシステム構築の提言
5. 技術的条件案の策定

1. 調査検討の概要

調査検討の背景と目的

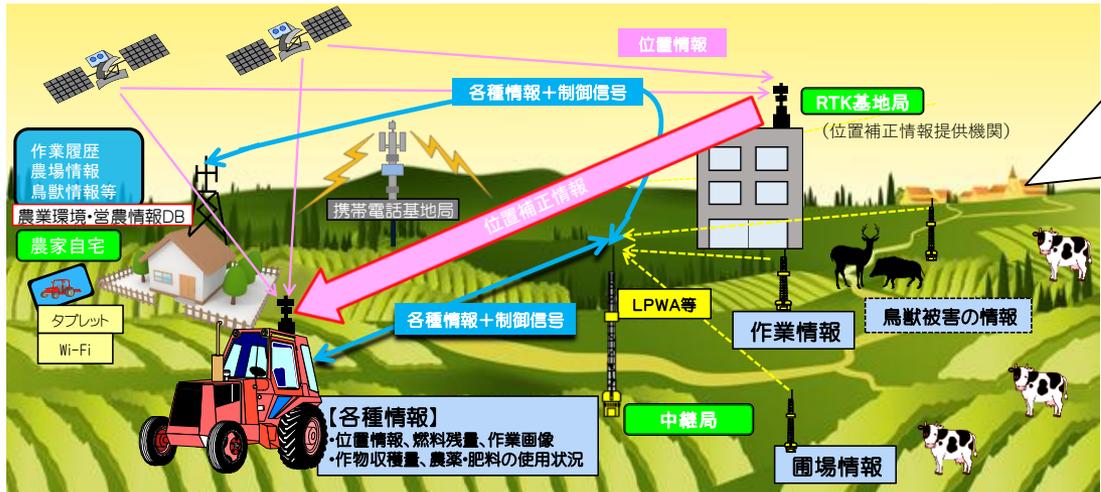
- 近年、北海道の主要産業の一つである農業は、営農戸数の減少、就業者の高齢化による労働力不足が課題となっている。このような課題の解決に向け、無人化によるロボット農業が注目されており、地域及び研究機関からは、ロボットトラクターの安全な自律走行の確保や、農作業の省力化・効率化を図るため各種データの自動観測・収集等をはじめとするロボット農業の高度化に適したシステムの構築について強い要望が寄せられている。
- このようなことから、本調査検討会では、農業分野での利活用を見据え、400MHz帯各種業務用データ専用デジタル波等を利用するRTK-GNSSシステム等について、伝送距離と誤差精度、伝送方式、必要とするチャンネル数及び占有周波数帯幅等の必要な技術的条件やシステム構成について検討を行い、ロボット農業の高度化に適したシステムの構築について提言し、電波の有効利用の促進に資することを目的として調査検討を実施した。

調査検討項目

- ロボット農業の現状と課題
- ロボット農業の高度化に必要な技術的条件等
 - 400MHz帯各種業務用データ専用デジタル波を利用するRTK-GNSSシステム
 - ロボットトラクターの状態観測データの伝送
 - ロボットトラクターへの制御データの伝送
 - 圃場の各種情報データの伝送
- ロボット農業の高度化に適したシステム構築の提言
- 技術的条件案の策定

2. ロボット農業の現状と課題

農業分野においては、農業生産の深刻な労働力不足及び農業を基幹産業としている地方経済の疲弊と人口減、また農業大規模化への対応が喫緊の課題となっている。
 このような課題の解決に向け、無人化によるロボット農業が注目されており、その実現において電波は重要な技術要素となっている。



ロボット農業における電波利用

- 圃場において想定される電波利用
GPSに代表されるGNSS (全地球測位システム) の位置補正情報を送信して行うロボットトラクターの稼働
- 圃場と農家等との間で想定される電波利用
 - ✓ センサーによるロボットトラクターの状態観測データ(燃料残量、農薬・肥料の使用量等)の送信
 - ✓ ロボットトラクターの制御データの送信
 - ✓ 圃場の各種データ等の通信

位置補正情報の伝送

今後の準天頂衛星の本格稼働も睨み、様々な圃場環境におけるロボット農業に必要な精度や安定性を満足する測位や通信方式の検証が求められる。

ロボット農業の発展ステップ

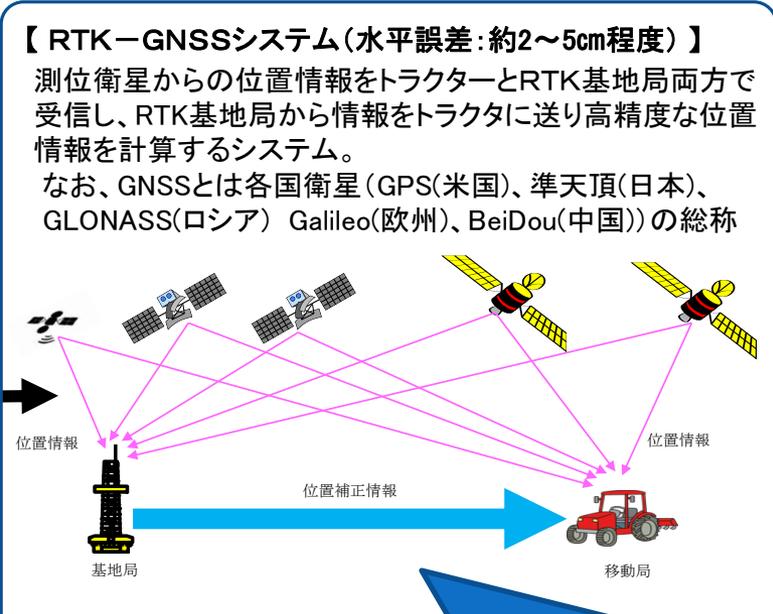
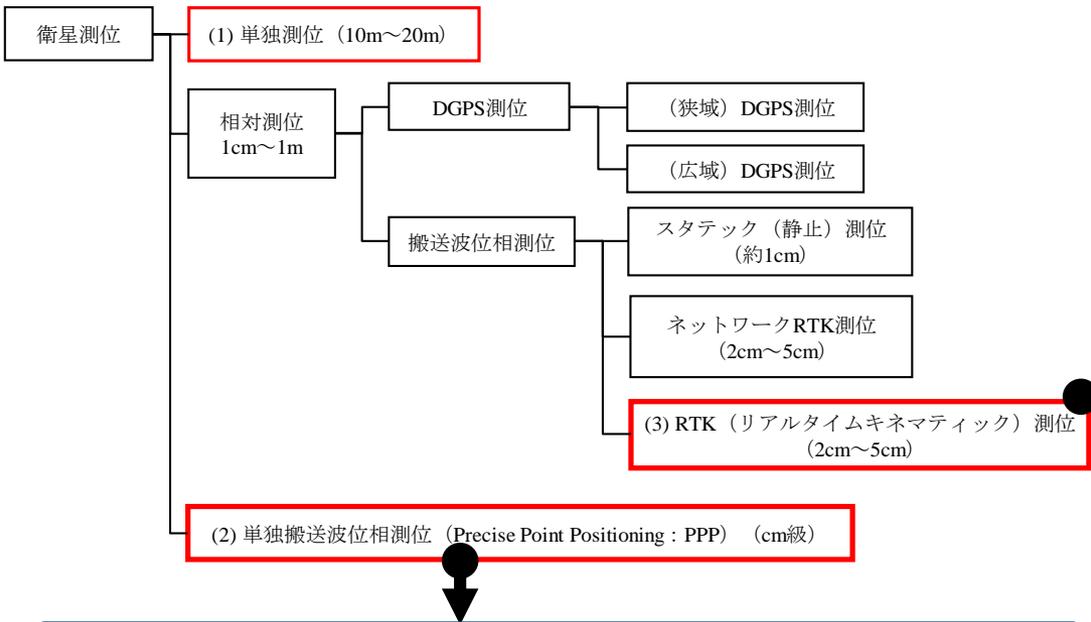
1. 現在 (市場導入または検証段階)
 - 「オートステアリングシステム」
人がトラクターに搭乗しての手放し運転支援
 - 「有人-無人協調作業システム」
人による圃場での安全性確保のもとでのロボットトラクター稼働
2. 近い将来 (2020年代。これまでにない大規模・低コスト生産実現)
 - 「無人作業システム」

ロボットトラクター状態観測データ・制御データ、圃場データの伝送

圃場と農家間での遠距離通信を行う必要がある。様々な通信要件を満足する通信方式やシステムについて、地域の圃場がキャリアサービスエリア外となりうる状況や経済性の観点含め、検証が求められる。

3. 1 400MHz帯各種業務用データ専用デジタル波を利用するRTK-GNSSシステム (1/3)

農業トラクターの自動化運転においては、RTK-GNSSシステムの利用により数cm単位の高精度な作業が可能となっており、位置補正情報の送信には、無線機器の低廉化に有利な4値FSK方式を採用し、送信速度4800bpsで400MHz帯各種業務用無線局が主に利用されている。但し、当該システムの現行送信速度では今後、谷間地域等を走行する際には精度が得られない場合がある。



【 準天頂衛星システム (水平誤差: 約12cm) 】

ロボット農業への適用にあたっては、今後以下の検討が必要

- 今後開始される測位補強信号(L6)の活用により、どの程度の精度が確保され、ロボット農業に適用可能か。
- 地域によっては地盤自体が年数センチ動いていることから、地殻変動等の地域特有の補正が必要な場合はRTKとの併用が必要。

【利用上の課題】

谷間地域等ではトラクター側の可視衛星数が少なくなり、このトラクター側の可視衛星と対応するよう、基地局から衛星数に制限をかけず位置補正情報を送信する状況において、今後の準天頂衛星等の本格稼働による衛星数増加のもと、現行の送信速度4800bpsでは十分な位置補正情報が送れない状況にある。

3. 1 400MHz帯各種業務用データ専用デジタル波を利用するRTK-GNSSシステム (2/3)

トラクターが谷間地域等を走行する場合においても、高精度を確保するためには、RTK基地局からできるだけ多くの位置補正情報を送信することが必要。しかしながら、現行の400MHz帯各種業務用データ専用デジタル波の送信速度「4800bps」では十分なデータを送ることができないため、送信速度を2倍の「9600bps」にすることで課題解決を図ることとし、岩見沢市で実証試験を実施した。



実験試験局仕様
 (位置補正情報送信機)
 ・電波の型式: 8K30 F1D
 ・周波数: 367.6125MHz
 ・空中線電力: 5W/2W
 ・送信速度: 9600bps
 ・実効レート: 3400bps

また、RTK-GNSS受信機は
 ニコン・トリプルSPS855
 を用いた
 (RTKデータフォーマット:
 CMRx 400B/秒)

実証試験場所(岩見沢市郊外:北西部)

◆ 実証試験の概要

【試験手順】

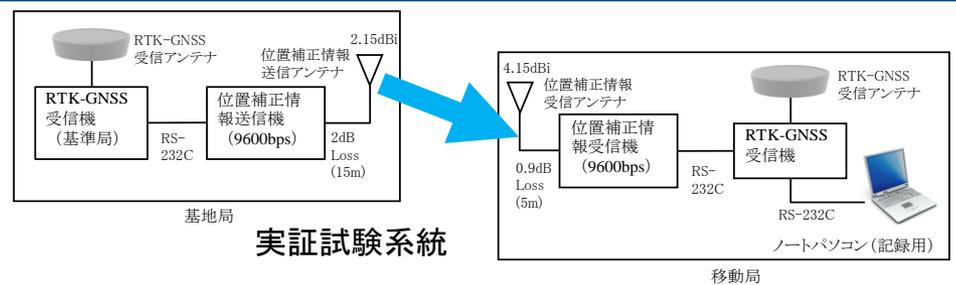
- RTK基地局を岩見沢市北村支所に設置し、送信速度9600bpsの実験試験局によって、位置補正情報データを対象エリアに送信。
- RTK受信機を搭載した車輛を走行させ、各測定ポイント①～⑦において測位の可否を確認。

【試験結果】

- ①～③までは2Wの出力で受信し正常に測位できた。④で測位できなかったが出力5Wとすることで改善した。
- ⑤の地点(RTK基地局から11.64km)まで正常な測位を確認できた。

【まとめ】

- 送信速度を2倍の「9600bps」に向上させることで10km程度の範囲で精度が確保されており、有効に機能していることを確認。
- 2倍の「9600bps」にする(占有周波数帯幅を2倍に拡張する)ことで送信する位置補正情報が2倍となり、受信帯域幅も2倍となったことから受信感度が3dB悪化するが、設備大型化の観点より、空中線高より送信出力増力での対応が適当であることを確認。



実証試験システム

3. 1 400MHz帯各種業務用データ専用デジタル波を利用するRTK-GNSSシステム

(3/3)

400MHz帯各種業務用データ専用デジタル波を利用するRTK-GNSSシステムについては、その他、主に以下の検討を行った。

◆ 補正データ量の検討

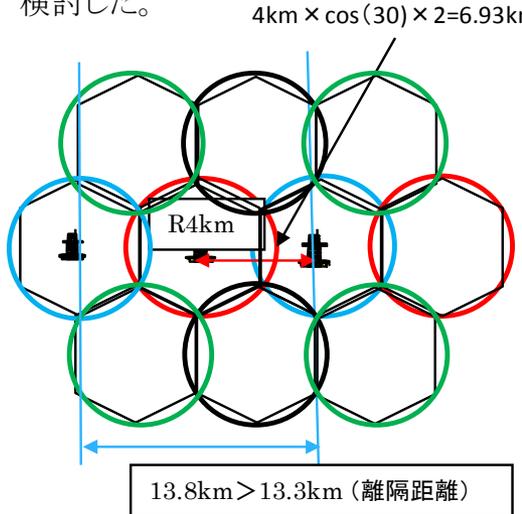
○ RTKのプロトコルにおける各種パラメータ(捕捉衛星数、補正データフォーマット)の設定による実機検証を行い、400MHz帯無線機送信速度とRTKフォーマットの利用区分について、以下にまとめた。

RTKフォーマット	4800 bps	9600 bps	備考
CMRx 400Bリミット3周波マルチ衛星受信	◎	◎	現行無線機でも利用可能。
CMRx リミットなし3周波マルチ衛星受信	△	◎	現行無線機では場合によってはエラーが発生する可能性がある。
RTCM3.2 3周波マルチ衛星受信	×	○	現行4800bpsの無線機では対応は難しい。9600bpsでは将来QZSS等が本稼働した場合、データ量が増大することから、無線の伝送容量不足によりパケットエラーが発生する可能性があるが、補正衛星数の制限設定で対応することは可能と考えられる。
RTCM3.2 3周波GPS+GLONASS 2種衛星	△	◎	現行無線機では場合によってはエラーが発生する可能性があるが、補正衛星数の制限設定で対応することは可能と考えられる。

※RTCM3.2: 標準的なRTKフォーマット
 ※CMRx: ニコン・トリプル固有フォーマット(RTCMに比べて送信データの圧縮率が高い)

◆ 混信保護比、繰り返し距離等の検討

- 400MHz帯各種業務用無線局の周波数(352.0875~352.1125MHz及び352.2875~352.3125MHzの6.25kHz間隔の合計10波)に対して、今回検討における2波束ねで2倍の帯域を利用した場合の、同一周波数及び隣接周波数における干渉及び繰り返し距離等について検討した。
- 計算結果より、同一周波数における離隔距離は9.3km、隣接周波数における離隔距離は0.3km(奥村・秦カーブ: 開放地)となった。
- 上記離隔距離を踏まえて、繰り返し周波数の検討においては、基地局からのサービスエリア4kmの場合のゾーン構成を検討した。



同一周波数の繰り返し利用は、基地局とトラクターの利用距離+同一周波数の他基地局のトラクターに対する離隔距離より、4km+9.3km=13.3kmとなり、同一周波数を利用する基地局同士は13.3km以上離隔する必要があります。

4波による正六角形ゾーン構成でサービスエリア4kmの円を描くと、基地局間は $4\text{km} \times \cos(30) \times 2 = 6.93\text{km}$ 、一つ飛びでの基地局間の距離は13.82kmとなり、同一周波数を利用する基地局の離隔距離は13.3km以上となる。

3.2 ロボットトラクターの状態観測データの伝送

／3.3 ロボットトラクターへの制御データの伝送 (1/2)

ロボットトラクターの状態観測データ及び制御データについて、必要なデータ項目と通信要件の整理を行った。

1. ロボットトラクターの状態観測データ伝送【ロボットトラクター → 農家自宅】

	伝達項目	内容	通信要件		
			必要データ量	更新レート	許容遅延
一般データ項目	1 位置情報		通常: 100kbyte/日 異常時: 60kbyte/回	通常: 1min イベント発生時 (異常時): 即	機械情報の配信になるので、許容という範疇のものではない。(このデータを用いてリアル制御するものではないので)
	2 アワーメータ	エンジン稼働累計時間			
	3 エンジン回転数	エンジン回転数			
	4 バッテリー電圧	バッテリー電圧			
	5 本機搭載センサー	走行部、作業機部、エンジン部、他			
	6 本機搭載スイッチ	走行部、作業機部、エンジン部、他			
	7 作業状態情報	作業開始、作業終了時間			
	8 異常情報	各種異常情報(エラー、警報)			
固有のデータ項目	1	ロボトラ作業開始	通常: 100kbyte/日 異常時: 60kbyte/回	通常: 1min イベント発生時 (異常時): 即	機械情報の配信になるので、許容という範疇のものではない。(このデータを用いてリアル制御しない)
	2	ロボトラ作業停止			
	3	障害物検知信号			
	4	作業機の制御信号			
	5 センサー情報	車体四方の物体(人体)の接近	数バイト×4(四方センサー)	異常時のみ	
	6 前方映像	リアルタイム映像	(※)	常時	安全のため、限りなくリアルタイム
	7 後方映像	リアルタイム映像	(※)	常時	
	8 通信基地局との通信情報	リアルタイム位置情報確認	緯度・経度データ、高さ(cm) またはXYZ座標	1秒	一般的な遅延
	9 電波関係の通信状態情報	通信状態のリアルタイム監視		10秒	一般的な遅延
	10 地形情報	段差などの状況監視	±30~50cm	10秒	一般的な遅延
	11	肥料使用量 (車速: 2~3m/s、散布量: 100kg/反、 散布幅: 24m)	肥料の散布量 残量の監視	80~150kg 2000kg	5~8秒

◆ 映像データ
「6 前方映像」「7 後方映像」
の伝送に必要な送信速度
→市場製品動向等より、
約200kbps必要と見積
(QVGA 画質で2カメラ使用)

(※)映像伝送に必要な送信速度の例

画質(画素数)	フレーム数	推奨送信速度
QVGA (320×240)	15	96kbps以上
VGA (640×480)	15	182kbps以上
XGA (1024×768)	15	220kbps以上
HD (1280×720)	5	256kbps以上
HD (1280×720)	30	1.3Mbps以上
フルHD (1920×1080)	60	2.8Mbps以上

◆ 映像以外の全データに係る
必要なデータ量
→全体で176bitあれば伝送
可能と見積

2. ロボットトラクターへの制御データ伝送【農家自宅 → ロボットトラクター】

	伝達項目	内容	通信要件		
			必要データ量	更新レート	許容遅延
制御データ	停止信号など	停止信号は1バイトで十分。プリアンブル、フレームシンク、識別符号、制御信号、CRC	128bit	発生都度	1秒以内

◆ 制御データ
→約128bit必要と見積
(停止信号を想定すると、1byteで十分。その他、プリアンブル、フレームシンク、識別符号、制御信号、CRCを合わせると送信データ全体で約128 bit)

3.2 ロボットトラクターの状態観測データの伝送

／3.3 ロボットトラクターへの制御データの伝送 (2/2)

ロボットトラクターの状態観測データ及び制御データの通信要件に対して、想定される通信方式の候補の中から、(実証試験の結果も踏まえて)適合する通信方式を評価した。

汎用無線システム

無線方式	周波数帯	送信速度	無線変調方式	送信出力	伝送距離	キャリアセンス・送信時間制限	費用	備考
センサーネット	920MHz	100kbps	GFSK	20mW	800m	有	小	特定小電力
無線LAN	2.4/5GHz	54Mbps	QPSK/16QAM/64QAM	8mW/MHz	100m	無	中	
地域BWA	2.5GHz	10Mbps	OFDM	5W	～10km	無	大	基地局経由
業務/簡易無線	400MHz	4.8kbps	FM・ $\pi/4$ DQPSK・4値FSK	5W以下	10km	無	小	

LPWA(Low Power Wide Area)

無線方式	周波数帯	送信速度	無線変調方式	送信出力	伝送距離	キャリアセンス・送信時間制限	費用	備考
LoRaWAN	920MHz	300～50kbps	チャープ変調	20mW	14km	有	小	伝送時間(公称値: 12Bbyte0.8秒) 特定小電力
SIG-FOX	920MHz	100bps	DBPS	20mW	36km	有	12B/分 1000/y	特定小電力、事業者契約 伝送時間(公称値: 12Bbyte6秒)
Wi-SUN	920MHz	50k～400kbps	FSK	20mW	1km	有	小	特定小電力
SONYLPWA	920MHz	80bps	$\pi/2$ BPSKチャープ	20mW	36km	有	不明	特定小電力、移動体に利用可 伝送時間(公称値: 12Bbyte6秒)
Wi-FiHaLow	920MHz	150kbps	OFDM	20mW	1km	不明	不明	IEEE 802.11ah: 将来
RPMA	2.4GHz	40kbps	DS	10mW	8km	不明	不明	将来

セルラー系・商用システム

無線方式	周波数帯	送信速度	無線変調方式	送信出力	伝送距離	キャリアセンス・送信時間制限	費用	その他
NB-IOT	-	20kbps	OFDM	100mW	-	無	不明	将来
LTE Cat-1	-	10Mbps	OFDM	0.2～	-	無	不明	将来
LTE Cat-M	-	200k～20Mbps	OFDM	0.2～1W	-	無	不明	将来

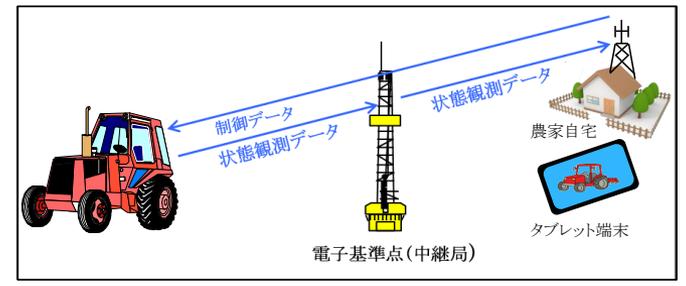
■ ロボットトラクター制御データの伝送(適合する通信方式)

- 移動しているロボットトラクターを短時間(1秒内)で確実に停止させる必要があることから、農家から圃場への長距離直接伝送が可能な通信方式の内、免許局で確実な通信回線が確保できる**一般業務用無線**の利用が適当。

■ ロボットトラクター状態観測データの伝送(適合する通信方式)

- **映像データ:**
送信速度や伝送距離を考えると、**地域BWA、携帯電話**の利用が適当。
- **その他の状態観測データ:**
1. **圃場から農家への長距離直接伝送(10km程度)の場合**
実証試験の結果も踏まえ**業務/簡易無線**の利用が適当。
2. **中継伝送を利用する場合**
地域BWA、携帯電話、業務/簡易無線(中継機能設計が必要)の利用が適当。

参考: ロボットトラクターと農家間で行う通信のイメージ



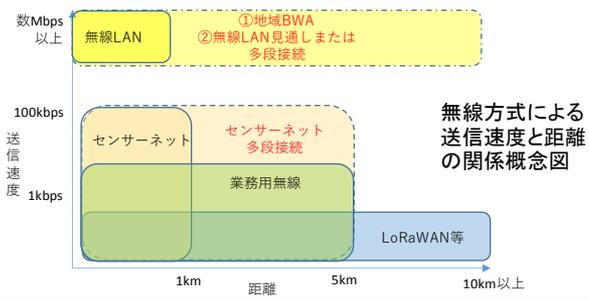
3.4 圃場の各種情報データの伝送

ロボットトラクターと同様に、圃場の各種データについて、必要なデータ項目と通信要件について整理を行うとともに、想定される通信方式候補の中から、適合する通信方式を評価した。

- **圃場データとしては、以下のとおり分類**
 - ①作業情報(農機具動態等に関する情報)
 - ②センシング情報(天候・土壌・肥料等の農業に関する情報、)
 - ③外因情報(鳥獣被害・危険動物・不審者等に関する情報)
 - ④その他の情報
- **データ収集頻度については以下を想定**
 - A: 頻度小(数回/1日イベント発生時伝送等)
 - B: 頻度中(定時伝送、ポーリング)
 - C: 頻度大(画像等)



- 「伝送情報及び通信要件」を右図のとおり整理
- データ収集シーケンス(個別呼出・一括呼出・連続送信)や伝送フォーマットを仮定し、必要な伝送データ量を試算
- 求められる通信距離・送信速度・許容遅延などの要件より、3.2/3.3で示した通信方式から適合する通信方式を評価



伝送情報及び通信要件

区分	項目・内容・用途	伝送量	通信頻度	許容遅延
作業情報	農機具動態・作業状況(GPS・画像)	接点~500kbps程度	A:作業時は常時	リアルタイム
	作業者位置(GPS)	数百bit		リアルタイム許容
センシング情報	気象観測(気温、湿度、雨雪量、積雪深、風向、風速等)	32ビット(各情報)	B,C: 定時・イベント発生時	許容
	スプリンクラー作動、ハウス開閉、ファン稼働	接点情報		許容
	水門開閉	接点情報		リアルタイム
外因情報	危険動物検出	接点情報	A:常時	リアルタイム
	外柵センサー	接点情報		リアルタイム
	監視カメラ	2.4k~500kbps		リアルタイム
	土砂崩れ等	32ビット(各情報)		リアルタイム
その他	各種センサー制御情報(上り)	接点~100kbit程度	B,C: 定時・イベント発生時	リアルタイム

圃場データ伝送情報に対する適合無線方式

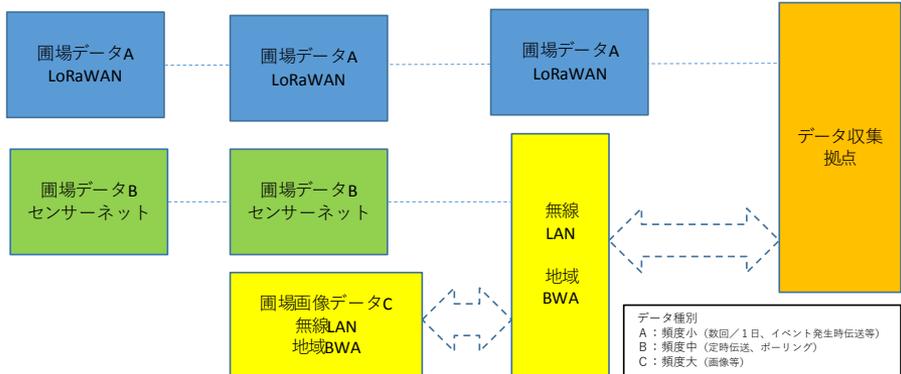
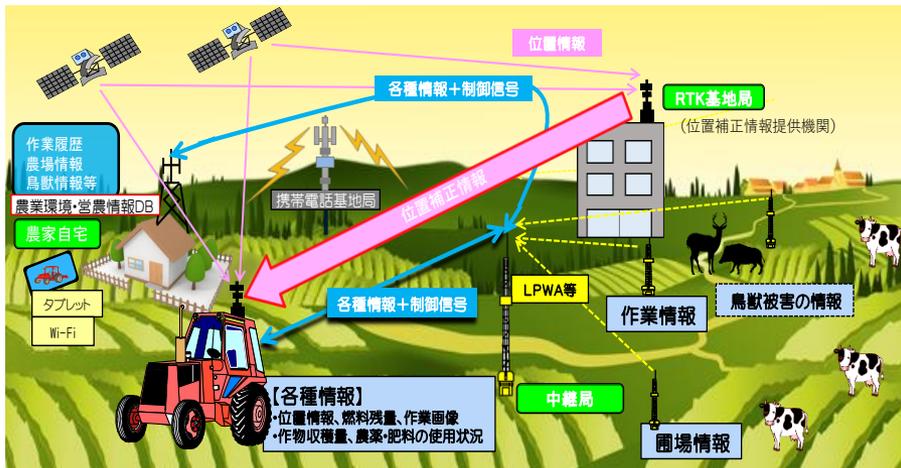
圃場のセンサー情報収集のための業務/簡易無線・LoRaWAN・センサーネットワーク(中継接続)に加えて、監視画像・IP伝送等の高速データ伝送に対応可能な携帯電話・無線LAN・地域BWAと複合したシステムが望ましい。

圃場の各種情報データに対する通信方式の適合評価

無線方式	作業情報(画像)	作業情報	圃場データ	外因情報	監視情報	監視カメラ(画像)	その他併用(見守り等)	備考
センサーネットワーク	×	○	○	○	○	×	○	
LoRaWAN	×	○	○	○	○	×	△	
業務/簡易無線	×	×	○	○	○	×	×	
無線LAN	○	○	○	○	○	○	○	
地域BWA	○	○	○	○	○	○	○	

4. ロボット農業の高度化に適したシステム構築の提言

位置情報に係わる実証評価及びロボットトラクター・圃場に係わるデータ伝送要件の評価より、圃場ブロードバンド整備の必要性を提起するとともに、事業展開が困難な地方部を中心とした公設民営型のネットワーク構築(圃場ブロードバンド構築の行政支援)を提言。



●位置補正情報データの伝送について、RTK-GNSSシステム等に係る検討結果は以下のとおり。

■位置補正情報データの伝送

- ・現行の400MHz帯各種業務用無線の送信速度を向上させ(占有周波数帯幅を現在の2倍に拡張)、有効に機能することを確認。準天頂衛星システムは、今後の本格稼働によりどの程度の精度が確保され、ロボット農業に適用可能かを検討していくことが必要。

●ロボットトラクター状態観測データ等の伝送について、適合する通信方式の検討結果は以下のとおり。

■ロボットトラクター状態観測データの伝送

- ・映像データ: 地域BWA、携帯電話
- ・状態観測データ: 業務/簡易無線、地域BWA、携帯電話

■ロボットトラクタ制御データの伝送

- ・業務/簡易無線(一般業務用無線)

■圃場各種情報データの伝送

- ・センサー情報収集: 業務/簡易無線、LoRaWAN、センサーネットワーク
- ・監視画像・IP伝送等の高速データ伝送: 携帯電話、地域BWA、無線LAN

- 地方部での通信事業者によるブロードバンドサービスの実施は経済性から困難な状況がありうる。
- 行政からの支援のあり方として、デジタルデバイド解消/地域経済活性への寄与/安全・安心な地域社会構築に向けた社会基盤、といった利用名目のもとでの、公設民営型のネットワーク構築が求められる。

5. 技術的条件案の策定

実証試験結果を踏まえ、400MHz帯を用いる「RTK-GNSS位置情報補正データ伝送用無線機」の技術的条件案を以下で定めた。

■ 一般的条件

- 使用周波数帯: 335.4MHz ~ 470MHz
- 周波数の数: 12.5kHzステップで4周波が必要(セル設計において最小で4周波必要)

(案1) 1MHz帯域内で4周波を確保。

(案2) 現在6.25kHzステップで制度化されている周波数のワイドバンド化

3.125kHzオフセットとして352.090625MHz、352.103125MHz、352.290625MHz、352.303125MHzを中心周波数としての合計4波

(案3) 現在6.25kHzステップで制度化されている周波数のワイドバンド化

現行周波数.の中で12.5kHzステップで検討

● 変調方式

現行、狭帯域デジタル通信方式の無線局の無線設備規則の範囲で準用する。

● 通信方式: 単信・単向・同報通信方式

現行、狭帯域デジタル通信方式の無線局の無線設備規則の範囲で準用する。

■ 無線設備の技術的条件

● 送信装置

ア. 周波数の許容偏差

将来、9600bpsで不足となり更にデータ量が必要になることを考慮して2倍の19200bpsを考慮する。

送信速度が毎秒8kビットを超え16kビット以下の変調信号を使用するもの

(ア) 1W以下のもの: ±100万分の2以内 / (イ) 1Wを超えるもの ±100万分の1.5以内 とすることが望ましい。

イ. 占有周波数帯幅

チャンネル間隔が12.5kHzのもの 11.5kHz (設備規則別表第2号(第6条関係)第37項に準拠する。)

ウ. スプリアス発射又は不要発射の強度の許容値

設備規則別表第3号(第7条関係)第19項に準拠する。

エ. 空中線電力及びその許容偏差

(ア) 空中線電力: 上限規定なし(但し、証明規則第2条第25号の4において50W以下のものが証明規則の対象)

(イ) 許容偏差+20% -50%(無線設備規則 第14条)

オ. 隣接チャンネル漏洩電力

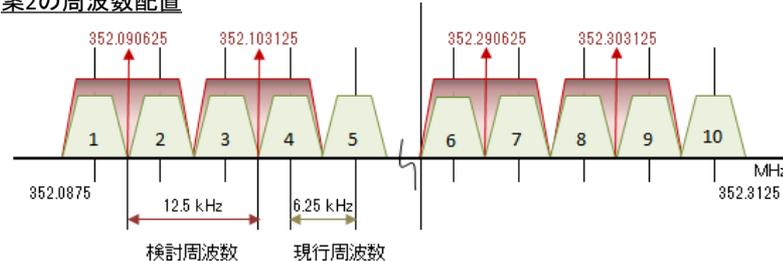
(ア) 四値デジタル変調の場合は、次の値であること: チャンネル間隔が12.5kHzのものにあつては、搬送波の周波数から12.5kHz離れた周波数の(±)Rの帯域内に輻射される電力が、搬送波電力より55dB以上低い値又は32μW以下の値であること。ただし、一ワット以下の無線局の場合は45dB以上低い値であること。(無線設備規則 第57条の3)

(イ) 一六値デジタル変調の場合は、次の値であること: チャンネル間隔が12.5kHzのものにあつては、搬送波の周波数から一二・五kHz離れた周波数の(±)Rの帯域内に輻射される電力が、搬送波電力より55dB以上低い値又は32μW以下の値であること。ただし、一ワット以下の無線局の場合は45dB以上低い値であること。(無線設備規則 第57条の3)

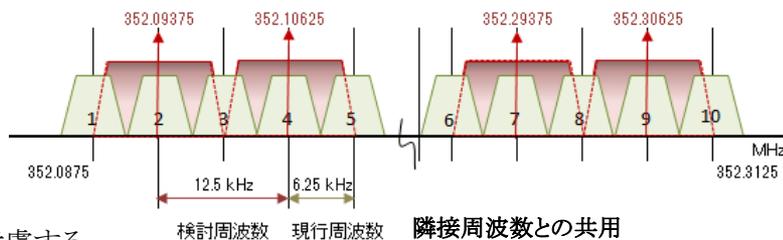
- 受信装置 現行、狭帯域デジタル通信方式の無線局の無線設備の規定を準用する。

■ その他の技術的条件 現行、狭帯域デジタル通信方式の無線局の無線設備の規定を準用する。

案2の周波数配置



案3の周波数配置



隣接周波数との共用

共用対象となる現行システムが4値FSK (6.25kHz) の場合には、「周波数の数」における案2の5ch及び10chに4値FSK (12.5kHz希望波) を数値上配置できず (※)、周波数配置においては留意が必要である。

(※)「小電力の無線システムの高度化に必要な技術的条件について」のうち「小電力を用いる自営系移動通信の利活用・高度化方策に係わる技術的条件」に関する一部答申(平成14年9月30日付 情報通信技術分科会諮問第2009号)の情報通信審議会 情報通信技術分科会 小電力無線システム委員会報告(平成20年3月26日)より