

自律施工技術基盤 OPERA を 活用した機械土工の 生産性向上に関する共同研究報告

(1) 重機の遠隔操作および 自動制御のための 無線通信保護機能の開発

令和7年10月

国立研究開発法人土木研究所
株式会社 I H I

Copyright © (2025) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

自律施工技術基盤 OPERA を 活用した機械土工の 生産性向上に関する共同研究報告 (1) 重機の遠隔操作および 自動制御のための 無線通信保護機能の開発

要 旨 :

本研究は、無人化施工現場における移動ロボット制御のための無線通信保護機能と通信状態表示機能の開発を目的とする。無人化施工の経験者や有識者へヒアリングを行い、現場の無線通信における課題を抽出した。また、通信切断や通信性能低下が作業の安全性や効率に与える影響を軽減するため、通信状態をリアルタイムで監視し、切断予兆を検知する機能を提案した。またこれらの機能を試作しテストフィールドで検証した結果、通信遅延やパケットロス、受信信号強度などの指標を基に通信状態を評価し、性能低下の予兆を検知し警告を発するシステムの有効性を確認した。これにより、切断回避行動や自律復旧行動の実現可能性を示した。今後はさらなるデータ収集と検証を進め、通信障害時のロボットの自律的な動作を目指す。

キーワード：無人化施工、無線通信、移動ロボット、通信保護、通信切断予兆検知、ダウンタイム短縮

自律施工技術基盤 OPERA を活用した機械土工の
生産性向上に関する共同研究報告
(1) 重機の遠隔操作および自動制御のための
無線通信保護機能の開発

目次

はじめに	1
1. 序論	3
2. 遠隔操縦ロボット用無線通信システムのニーズ分析	5
2.1. 無人化施工における無線通信システムに関する課題のヒアリング	5
2.2. ヒアリング結果	5
2.3. 非機能要求の分析	5
3. 通信状態表示機能	7
4. 通信状態表示機能の試作	8
4.1. 試作システム構成	8
4.2. 設置環境	8
4.3. 計測方法	10
4.4. 計測結果	10
5. 結論	16
6. 研究成果	16
6.1 発表論文	16
参考文献	16
SUPPORTING ONLINEMATERIALS	17

はじめに

近年日本が直面している人口減少・少子高齢化の影響を受け、建設業においても熟練技能者の高齢化と若年労働者の減少による人材不足の深刻化と、それによる生産能力の大幅な低下が危惧されている。この建設業の生産能力低下は、安全・安心な暮らしを支える社会資本の整備・維持が今後滞る危険性に繋がることから、抜本的な解決が求められている。

国土交通省が2024年4月に策定した*i-Construction 2.0*では、上記建設業の問題点を解決するために2040年度までに建設現場の省人化3割、生産性向上1.5倍、および魅力ある建設現場の実現を目標に掲げており、その目標の達成手段の一つとして、建設現場のオートメーション化、すなわち自動施工技術の実現が挙げられている。

(国研)土木研究所では令和4年度～9年度にかけての第5期中長期計画における主要研究の一つとして、「建設生産性向上のための自動施工技術基盤の整備・活用に関する研究」を実施しており、大学や民間企業による自動施工技術の研究開発の促進を目標とした自動施工技術基盤(OPERA)の開発・整備を行っている。そこで整備したOPERAを活用した自動施工・遠隔施工システム開発を、大学や民間企業と共に行うため、公募型の本共同研究を行うものとした。

公募の結果、下記の機関とそれぞれ共同研究を実施した。

- (1) 株式会社 IHI：令和4年9月～令和7年3月
- (2) 株式会社奥村組：令和4年9月～令和7年3月
- (3) 株式会社加藤組・ORAM株式会社：令和4年9月～令和7年3月
- (4) 酒井重工業株式会社：令和4年9月～令和8年3月（予定）
- (5) 早稲田大学：令和4年9月～令和8年3月（予定）
- (6) 清水建設株式会社：令和4年9月～令和8年3月（予定）
- (7) ハイテクインター株式会社・株式会社ジツタ中国・株式会社中電工：
令和4年9月～令和9年3月（予定）
- (8) 日立建機株式会社：令和4年9月～令和9年3月（予定）
- (9) 株式会社フジタ・株式会社DeepX：令和4年9月～令和9年3月（予定）

本共同研究は上記機関がまとまって一つの研究を行うのではなく、それぞれが土研と個別に共同研究を行った。また、上記の通り研究期間についても機関ごとに異なる。従って各個別の共同研究に関する報告書についてもまた、それぞれ個別に作成することとした。

本報告書は、株式会社 IHI と行った個別共同研究の成果について報告するものである。

本個別共同研究の研究担当者

所属		氏名
国立研究開発法人 土木研究所	技術推進本部 先端技術チーム 上席研究員 (現在：技術推進本部 総括研究監)	山口 崇
	技術推進本部 上席研究員 (特命事項担当)	橋本 毅
	技術推進本部 先端技術チーム 主任研究員	遠藤大輔
	技術推進本部 先端技術チーム 主任研究員	山内元貴
	技術推進本部 先端技術チーム 専門研究員	阿部太郎
株式会社 IHI	技術開発本部 技術基盤センター 制御・センシング技術部 主幹研究員	金島義治
	技術開発本部 統合開発センター 開発企画部 主任研究員	山崎峻一
	産業システム・汎用機械事業領域 ライフサイクルビジネス推進部 主査	渋川文哉
	技術開発本部 技術基盤センター 制御・センシング技術部 副主任研究員	安 承一
	技術開発本部 技術基盤センター 制御・センシング技術部 研究員	野崎優介

1. 序論

屋外で稼働する作業機械の無人化のニーズが高まっている。著者らはこれまで様々な屋外作業機械の遠隔操縦化や自動運転機能を開発してきた[1]、[2]、[3]、[a]、[b]。屋外作業機械の遠隔操縦や自動運転では無線通信システムの活用が不可欠である。特に無人化施工¹のようにカメラ映像を活用して遠隔操縦する場合、無線通信は高度な機能・性能が要求される。図1に移動ロボットの遠隔操縦に関する無線通信の機能要求図を示す。

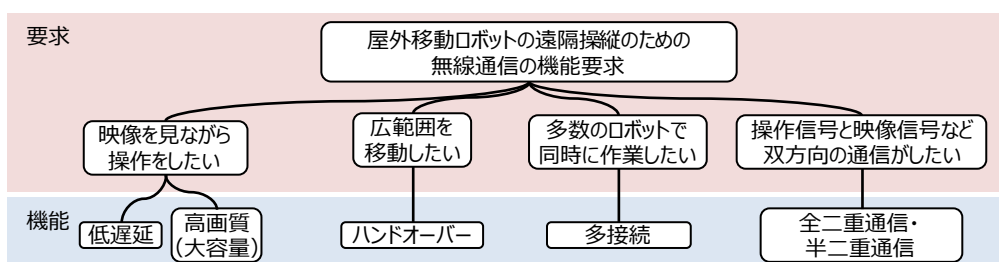


図 1 Requirement diagram (functional)

主に4つの要求からなり、5つの機能により実現する。カメラ映像による遠隔操作室からの遠隔操縦では低遅延が必須となり、できるだけ高画質を伝送するための大容量通信が求められる。また、ロボットの移動距離が大きい場合に対応するためには、通信中継局をハンドオーバーする通信が必要になる。多種多数の作業ロボットが共同で作業にあたる場合は、通信中継局1つに対し多数のロボットが接続できる必要がある。操作信号などの遠隔操作室からロボットへの信号と、ステータスやカメラ映像などのロボットから遠隔操作室への双方向の通信も求められる。

これらの要求をふまえた無人化施工における典型的な現場イメージを図2に示す。オペレータは、遠隔操作室から通信中継局を経由して無線通信で接続された重機（ロボット）を、複数のカメラの映像を見ながら操作する。このような運用を行うにあたり、実際には様々な問題が発生する。

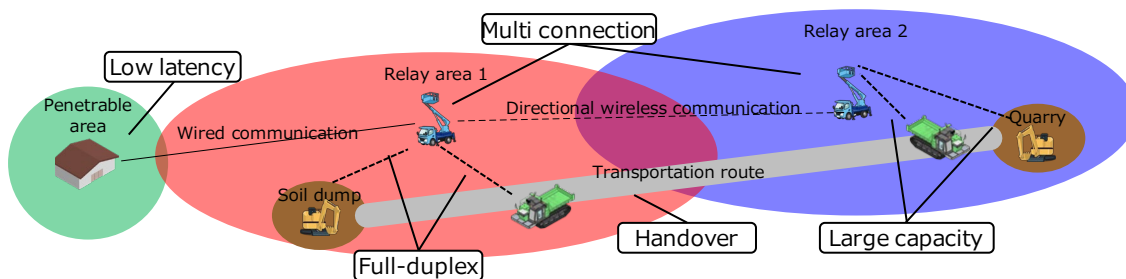


図 2 Unmanned construction site image

¹ 人間が現場に入らず、遠隔操縦等で無人化された機械を用いて作業する工法

例えば筆者らは、遠隔操縦型半水中重運搬ロボットの開発プロジェクト[4]、 [5]、 [6]において、同様の構成で現場実証を行い、その中で多くの無線通信トラブルとそれによる作業の中断を経験した[7]。

建設・土木の現場では作業環境が日々刻々と変化する。そのため前日には無かった構造物や地形変化に伴う電波の遮蔽などにより必要な通信性能を発揮できない場合がある。多くの場合通信中継局のアンテナ配置や姿勢を工夫して通信が切れにくくなるよう試行錯誤している。しかし、運搬のような広域の移動作業を含む場合、その対応が難しく予兆なく通信切断が発生することが多くなる。

この課題に対して、例えば吉田らは、確率モデルを利用して通信遅延を高精度に予測する方法を提案している[8]、 [c]。

一方、筆者らは通信の状態を示す指標を常時モニタしオペレータへ提示・警告することで、通信の切断を回避する行動をとれると考え、通信状態表示機能を開発した。

本報ではまず2章で、建設土木の無人化施工現場における通信状態表示機能のニーズについて建設・土木の業界関係者にヒアリングした結果を述べる。3章では通信状態表示機能のコンセプトを示す。4章では3章で提案した通信状態表示機能の試作結果を示す。

2. 遠隔操縦ロボット用無線通信システムのニーズ分析

2.1. 無人化施工における無線通信システムに関する課題のヒアリング

建設・土木現場における遠隔・自動作業機械のための無線通信システムについてヒアリングによりニーズを確認した。対象は共同研究に参加している、建設業、機械のメーカー、通信業、スタートアップ、大学など無人化施工の実施やシステムの研究・開発を行っている9団体である。

ヒアリング方法については、以下の項目について質問する形で自由にディスカッションを行い、共通する事項について抽出した。

- ・ 無線システムを現場で運用する際のトラブル経験や課題はあるか。
- ・ 無線通信のトラブル防止・不具合軽減などの通信安定化へのニーズはあるか。
- ・ 通信の安定化以外にも無線システムに要求したい機能や性能はあるか。

2.2. ヒアリング結果

ヒアリングから抽出した無線通信のトラブルに関する共通認識と課題を有効回答数の多い順に表1に示す。

表 1 Common understanding and issues

No.	共通認識と課題
a	無人化施工の現場での無線通信のトラブルの深刻性について理解できる
b	無線通信トラブルを防止・不具合を軽減するしくみは重要である
c	通信機の陳腐化や生産中止の対応に苦勞する
d	トラブルの原因切り分けが難しい
e	ネットワークの負荷や周囲の電波状況などの通信の状態を把握したい

結果 a、b より、通信トラブルの深刻性や不具合軽減のニーズは業界の共通認識であることを確認した。また、通信機自体の陳腐化対応やトラブル復旧、通信状態の把握など、通信の性能・品質以外にも共通した非機能要求があることを確認した。

これらの共通事項以外にも無線通信システムに関して抽出した要求事項を以下に列挙する。

- ・ スイッチ投入のみで運用開始可能なパッケージ化
- ・ 業界全体での標準化
- ・ 国外でも使用可能な無線通信の国際規格の採用
- ・ 設計値も含めた通信状態の表示（接続台数やトラフィック等）
- ・ 標準化とセキュリティの両立
- ・ 現場投入前のシミュレーション

2.3. 非機能要求の分析

2.2 節で抽出した通信への要求事項とそれを実現する機能やサービスとの関係を図 3 の要求図に整理する。

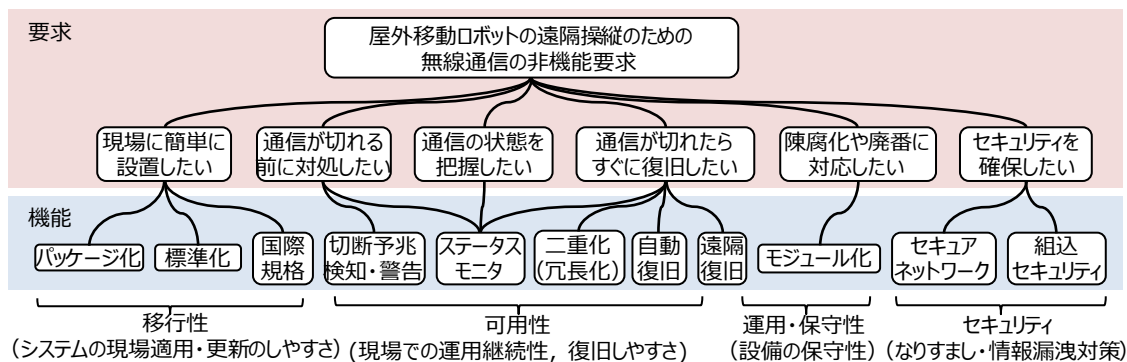


図 3 Requirement diagram of (non-functional)

これらの要求を 6 大非機能要求の観点で分類すると表 2 のようになる。この中で、特に要求される事項およびそれを実現する機能が最も多いのは可用性である。そこで、システムを運用し続けるという観点でも特に重要な可用性を高める機能として通信状態表示機能を提案する。

表 2 Correspondence with 6 major non-functional requirements

非機能要求	要求事項
移行性	パッケージ化 標準化 国際規格
可用性	通信状態把握 (ステータスモニタ) 切断予兆検知・警告 通信切断復旧 (自動・遠隔) 二重化 (冗長化)
運用・保守	モジュール化 (陳腐化・廃番対応)
拡張性	— (多接続として機能要求に列挙)
セキュリティ	通信セキュリティの確保
環境性	— (今回のヒアリングでは該当無し)

3. 通信状態表示機能

無線通信の切断を予防し、また切断した際に早期に復旧するための通信状態表示機能のコンセプトを述べる。本機能は無線通信の性能指標と、それらに影響を与える指標を、ロボット側装置に取り付けた装置が計測し、遠隔操作室側へ集約し、オペレータへ提示する。計測する指標は以下のとおりである。

通信性能に影響する要素

- ・ 通信遅延：遠隔操作室ーロボット間の通信遅延
- ・ パケットロス率：遠隔操作室ーロボット間の通信パケットロス率
- ・ 通信速度（スループット）：遠隔操作室ーロボット間の通信速度
- ・ 受信強度：ロボット側の通信機の信号の受信強度
- ・ S/N 比：ロボット側の受信信号の S/N 比
- ・ 通信中継局との距離：通信を中継している通信中継局との距離

また、これらの指標について、閾値処理することで通信の切断の予兆を検知し、強調して表示することでオペレータへ警告する。

通信状態表示機能を実現するシステム構成を図 4 に示す。

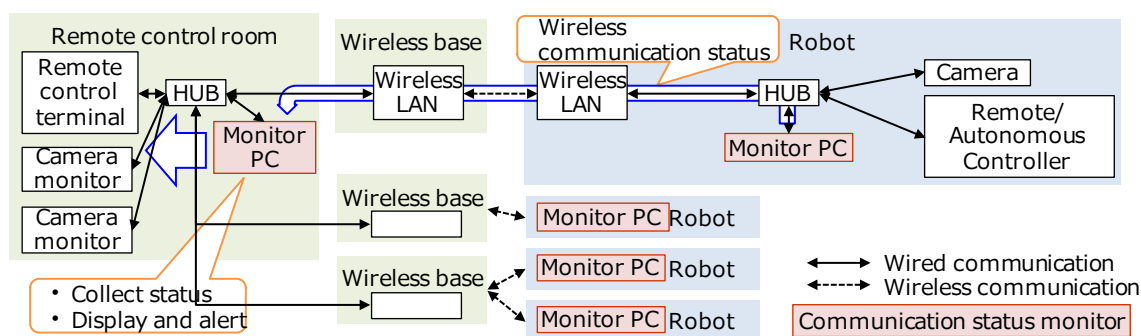


図 4 Concept of wireless communication status monitor function for mobile robot tele-operation

通常の遠隔操縦システムの構成に加え、遠隔操作室側およびロボット側のネットワーク内に Monitor PC を接続し、無線通信機の通信状態を常時取得し遠隔操作室側へ情報を集約し、オペレータへ提示する。通信性能低下が発生すると、オペレータは通信状態表示システムから警告を受け、作業経路の変更や通信設備の設定変更を行うことで、無線通信が切断し運用が中断することを避けることが可能になる。

4. 通信状態表示機能の試作

4.1. 試作システム構成

通信状態表示機能を実現する最小構成の試作を行い、土木研究所のテストフィールド²にて通信状態表示機能および切断予兆検知機能の動作を確認した。使用した各機器の仕様を表 3 に、試作システムの構成を図 5 に示す。本構成では通信状態のデータ（遅延、パケットロス、受信強度、SN 比）をロボット側モニタ PC が遠隔操作室側モニタ PC へ集約し自動で記録する。

表 3 The specs of prototype experiment equipment

装置	メーカー	型式
ロボット側モニタ PC	Raspberry Pi	Model 4B
遠隔操作室側 PC	Iiyama	STYLE-15FH123-i7-UCSXM
遠隔操作室無線中継器	Rajant	BreadCrumb FE1
テストフィールド・ロボット側無線中継器	Rajant	BreadCrumb ES1

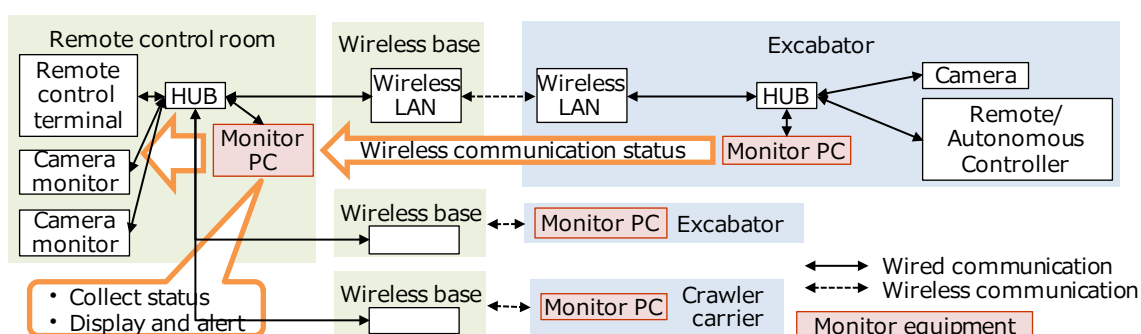


図 5 Prototype system on the test field

4.2. 設置環境

テストフィールド既存の遠隔/自動ロボットである、バックホウ 1、バックホウ 2、クローラキャリアそれぞれにロボット側モニタ PC を設置した。またテストフィールド内の遠隔操作室内に遠隔操作室側モニタ PC を設置した。テストフィールド内の無線通信設備として、遠隔操作室屋上および、テストフィールド内の 2 地点の計 3 地点に無線 LAN 通信機の通信中継局があり、ロボット側にも無線 LAN 通信機が搭載されている。

²土木研究所 つくば中央研究所 建設機械屋外実験施設（別名称：建設 DX 実験フィールド） [d]

無線通信機は Rajant 社製の Bread Crumb シリーズを使用しており、メッシュネットワークを構成している。本通信機の特徴として 2.4GHz と 5GHz の通信を同時に使用しており、通信機が内部でどちらのスループットが良いかを自動で判断し通信する。また、メッシュネットワークについても、どの通信機をホップして通信するかは、通信機独自のコスト計算アルゴリズムに基づいてリアルタイムに切り替えながら伝送する仕様である。各機器の配置を図 6 に、外観を図 7 に示す。

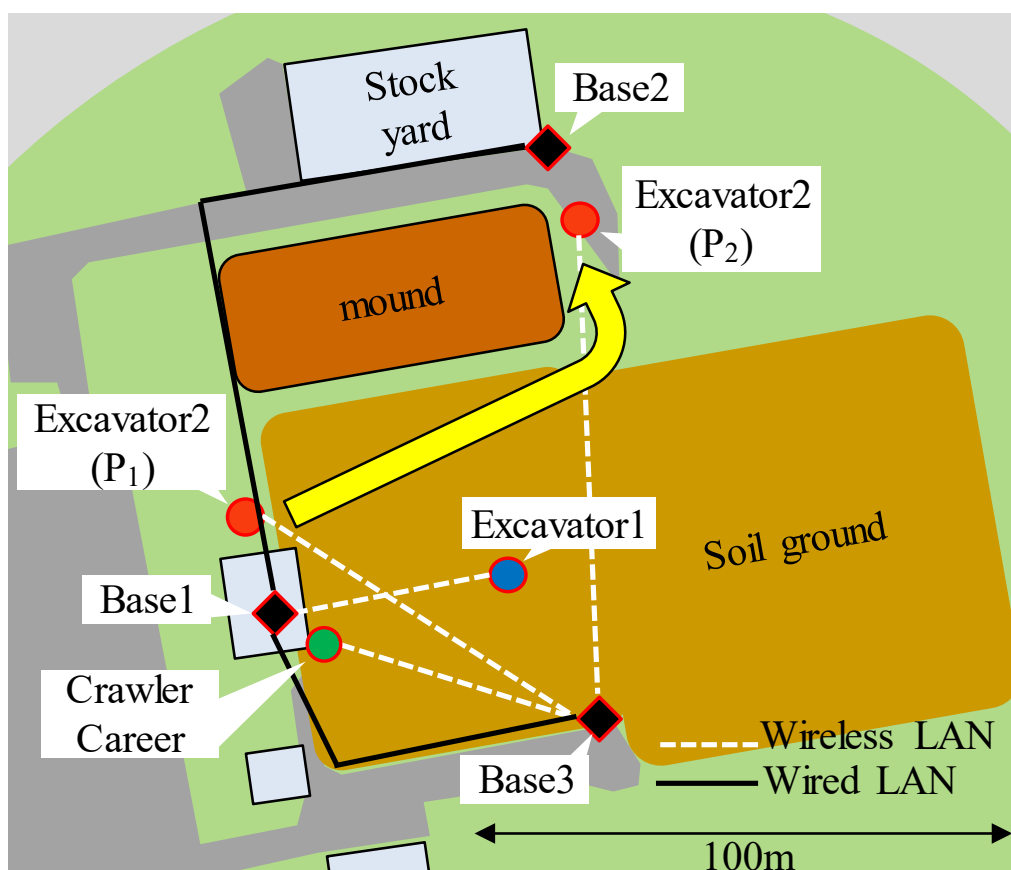


図 6 Experimental equipment positions

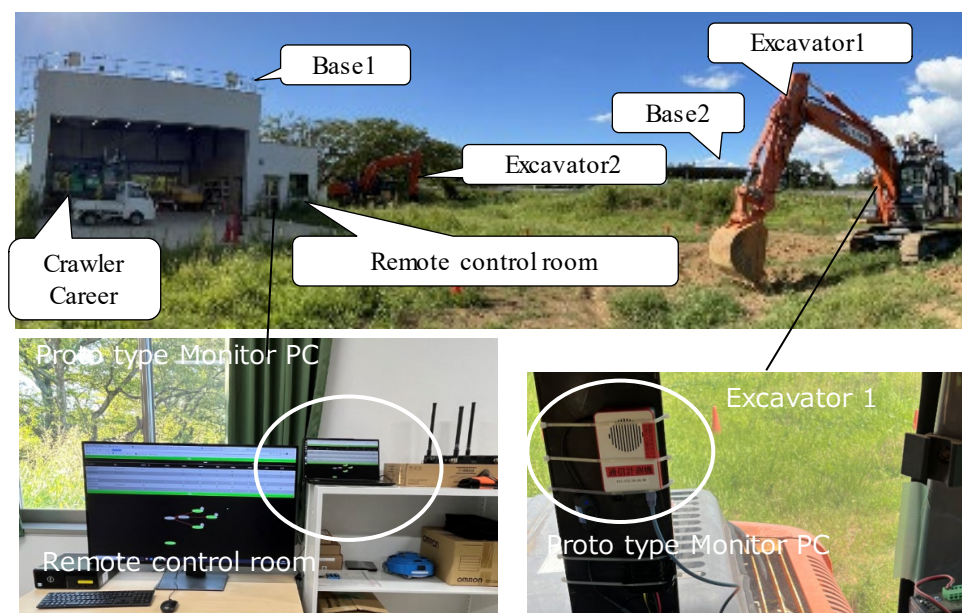


図 7 Experimental equipment and environment outlook.

4.3. 計測方法

データ計測はバックホウ 2 の位置を変えて 2 通り計測した。まずバックホウ 2 が P_1 の地点で停止している状態で 40 分間計測し、次に P_2 地点へ移動し停止した状態で 40 分間計測した。各通信性能の評価指標と計測方法は以下のとおりである。

- ・ 遅延[ms] : Linux 標準の Ping コマンドを用いて計測する。1 秒に 1 回実行する。10 回毎に平均値と最大値についても監視する。長いほど通信状態が悪い。
- ・ パケットロス[%] : 遅延計測の際に 1000ms 以上のものをカウントする。10 回分の Ping データをまとめて[%]で示す。多いほど通信状態が悪い。
- ・ 受信強度 (RSSI) [dBm] : 無線通信機が計測しており、指定のプロトコルで問合せして取得する。低いほど通信状態が悪く、通信アンテナ間の距離が大きいか、遮蔽が疑われる。
- ・ SN 比[%] : 無線通信機が計測しており、指定のプロトコルで問合せして取得する。低いほど通信状態が悪く、受信強度が高いにも関わらず本指標が悪い場合は電波干渉が疑われる。受信強度と SN 比については、2.4GHz と 5GHz の 2 種類が計測可能である。

4.4. 計測結果

監視機能の表示例を図 8 と図 9 に示す。それぞれ P_1 と P_2 での計測時の結果である。

画面上段に通信中継局側およびロボット側の無線 LAN 通信機のステータス一覧が表示されている。画面下段にはロボットが接続している通信中継局が図示されている。ただし、各ノードの位置は実フィールドの配置と対応せず自動で整列される。

切断予兆検知と警告機能については、各評価指標を閾値に基づき「正常」、「性能低下」、「切断予知」、「通信切断」の 4 段階で判定し文字色を変化させてオペレータに警告する。今回設定した評価指標と閾値の例を表 4 に示す。

表 4 communication status and criteria

Evaluation Criteria	Communication status (Color)			
	Normal (Green)	Degrade (Yellow)	Caution (Red)	Disconnect (Black)
Delay [ms]	—	≥ 1.0	≥ 2.0	≥ 3.0
Packet loss [%]	—	≥ 5	≥ 20	≥ 40
RSSI [dBm]	—	≤ -70	≤ -85	≤ -100
S/N [%]	—	≤ 40	≤ 30	≤ 20

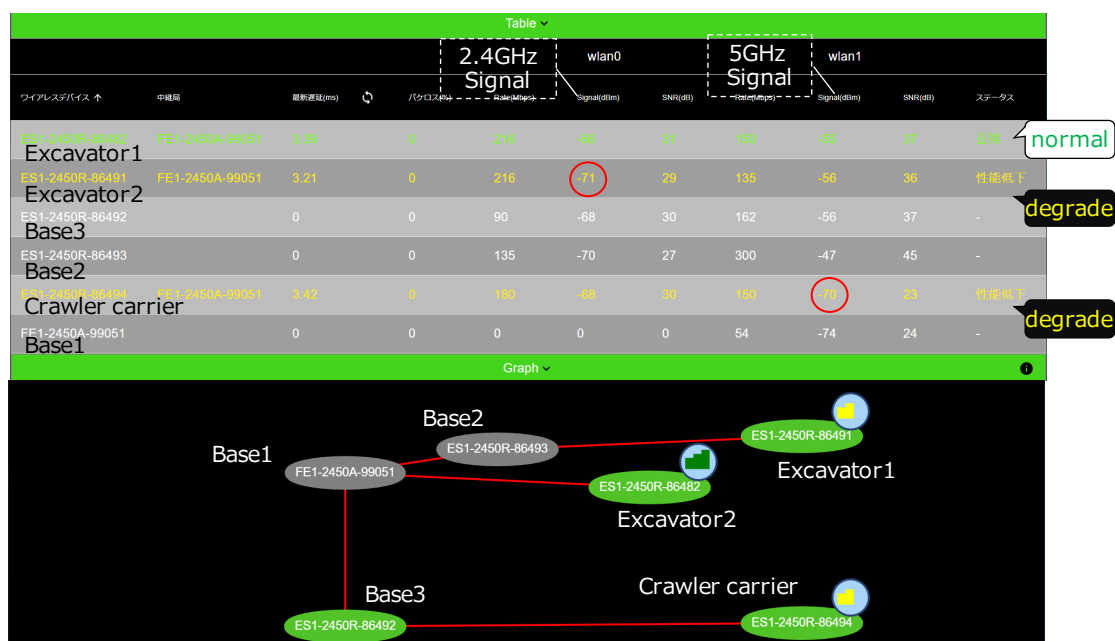


図 8 Status monitor prototype example 1 (Result at P1)

図 8 の例では、バックホウ 2 およびクローラキャリアの受信強度が「性能低下」の範囲に入っているため文字色が緑（正常）から黄（性能低下）に変わり警告を示している。

る。次に図 9 では、P₂に移動した後の計測では、「性能低下」に判定されていた値が正常範囲内に収まったことがわかる。本結果から、試作システムによって通信保護機能のうち通信状態監視と切断予兆検知のための通信ステータスおよび閾値判定による警告が期待通りに表示されることを確認した。

次に各通信ステータスの計測例を示す。今回はバックホウ 2 の移動前後の指標の変化に着目して分析する。移動前の位置を P₁、移動後の位置を P₂ とする。

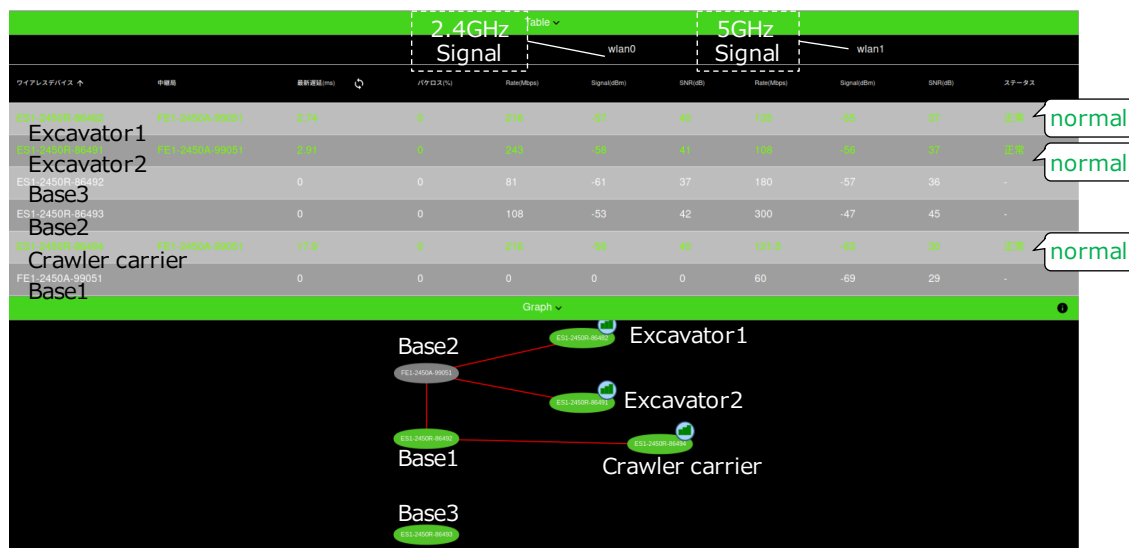


図 9 Status monitor prototype example 2 (Result at P₂)

遅延の計測結果を図 10 に示す。P₁ よりも P₂ のほうが比較的大きな遅延が少ないことが確認できる。100ms 以上の遅延の発生回数は P₁ が 46 回に対して P₂ は 0 回であった。

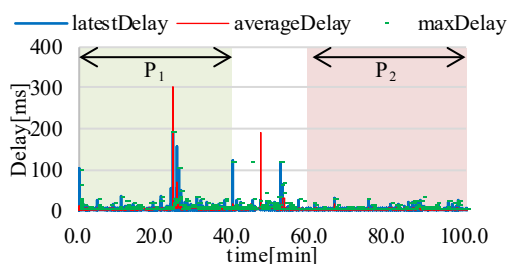


図 10 Delay

パケットロスの計測結果を図 11 に示す。遅延同様、P₁ よりも P₂ のほうが比較的大きなパケットロスが少ないことが確認できる。30%以上のパケットロスの発生回数は P₁ が

12 回に対して P_2 は 0 回であった。

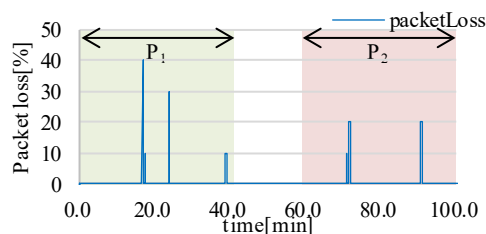


図 11 Packet loss

受信強度の計測結果を図 12 に示す。わずかであるが、 P_1 期間より P_2 期間のほうが比較的受信状態が良いことが確認できる。2.4GHz が -61dBm 、5GHz が -63dBm であったのに対して P_2 では、2.4GHz が -58dBm 、5GHz が -56dBm であった。移動中の 5GHz の受信が 0 となっているのは、バックホウ 1 など他の機械にも同様の傾向が見られたため、おそらく DFS³ が発生しその後復帰に時間がかかったためと思われる。

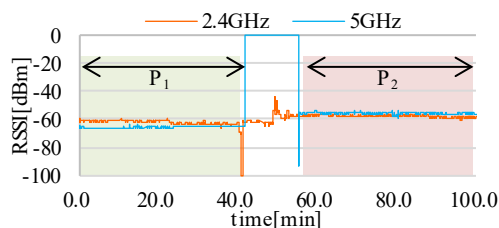


図 12 RSSI

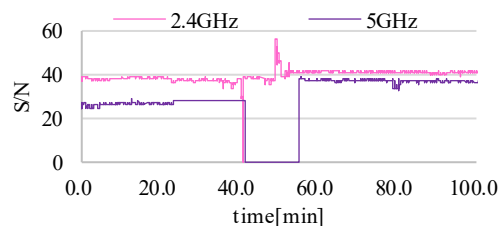


図 13 Signal to noise ratio

S/N の結果を図 13 に示す。受信強度と同様の傾向を示している。 P_1 期間よりも P_2 期間のほうが比較的信号の状態が良いことが確認できる。 P_1 期間の平均で 2.4GHz が

³ 航空レーダー等への干渉回避のため一時的に電波の発信を止める機能。屋外対応の 5GHz の無線機器に搭載が義務付けられている。

37.5GHz が 26 であったのに対して P₂ では、2.4GHz が 41.5GHz が 37 であった。移動中の傾向も受信強度と同様である。

これらの結果から、平均的な傾向として受信強度や SN 比などの電波の状況を表す指標と、遅延やパケットロスなどの通信の品質を示す指標の傾向が一致することを確認した。

今後、より詳細な通信状態の悪化再現試験を行うことで、各指標から無線通信の切断予兆を検知できる可能性を示した。

5. 結論

本研究では、機械土工の生産性向上について現場で重要となる無線通信システムの安定性向上を目的として、通信状態表示機能の開発および試作システムの検証を行った。まず、建設・土木業界関係者へのヒアリングを通じて、現場での無線通信における課題やニーズを把握した。その結果、通信の安定性向上に対する強いニーズが確認されるとともに、通信状態の可視化や切断予兆の検知機能が重要であることが明らかになった。

これを受けて、通信状態表示機能を試作し、土木研究所のテストフィールドにて性能検証を実施した。試作システムでは、遅延、パケットロス、受信強度、S/N比などの通信指標をリアルタイムで計測・表示し、閾値判定による警告機能を提供した。試験の結果、これらの通信指標が通信状態の変化を適切に反映し、切断予兆の検知に有効であることが確認された。

今後はさらなるデータ取得や検証を進め、無線通信切断の予兆検知精度を向上させるとともに、ロボットの自動的な切断回避行動や自動復旧機能の実現を目指していく。

6. 研究成果

6.1. 学術講演

[A] 渋川, 山崎, 金島, 村上, 「移動ロボット制御のための無線通信保護システムの開発」, 第29回ロボティクスシンポジウム, 3B3, 2024

6.2. 発表論文

[B] Shibukawa, Yamazaki, Kaneshima, Murakami, Endo, Hashimoto, Yamauchi, “Development of Wireless Communication Status Monitor Function for Mobile Robot Tele-Operation”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 36 No. 2 pp. 365-374. doi: 10.20965/jrm.2024.p0365(2024)

参考文献

- [1] 埜, 山崎, 他, “バックホウ向け簡易遠隔操縦装置ロボ QS の開発” *IHI 技報*, Vol. 58, No. 3, 2018.
- [2] 村上, 金島, 他, “遠隔操作型半水中重運搬ロボットの開発とフィールド試験による検証 ～SIP/遠隔操作による半水中作業システムの実現～”, 第19回建設ロボットシンポジウム, OS-2, 2019.
- [3] 渡邊, 佐藤, 他, “計測精度指標を用いた GNSS とスキャンマッチングのセンサフュージョンによる自己位置推定” 第36回ロボット学会学術講演会, 1P1-03, 2018.
- [4] 村上, 金島, 他, “遠隔操作型半水中重運搬ロボットの開発とフィールド試験による検証”, 第19回建設ロボットシンポジウム, P1-15-2, 2019.
- [5] S. Yuta, “Development of a Remotely Controlled Semi-Underwater Heavy Carrier Robot for Unmanned Construction Works.” *J. Disaster Res.*, Vol. 12 No. 3. Pp. 432-445., 2017.
- [6] 渋川, 渡辺, 他, “遠隔操作型半水中重運搬ロボット (CASTOR) におけるオペレータ支援機能の開発”, 第24回知能メカトロニクスワークショップ, IMEC_220, 2019.
- [7] 渋川, 渡辺, 他, “遠隔操作型半水中重運搬ロボットの実フィールドにおける無線強度計測”, *ROBOMECH2018*, 2A2-C03, 2018.
- [8] H. Yoshida, T. Kumagai, and K. Satoda, "Dynamic State-Predictive Control for a Remote Control System with Large Delay Fluctuation," 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Jan. 2018.
- [9] 渋川, 他, “移動ロボット制御のための無線通信状態監視機能の開発”, 建設ロボットシンポジウム, 2023.

SUPPORTING ONLINE MATERIALS

- [a] 簡易遠隔操縦装置「ロボ QS®」, <https://www.iic-hq.co.jp/products/P-02-02/> [Accessed September 8, 2023]
- [b] IHI and JFE Steel to Demonstrate Automated Transport System to Verify and Enhance Practicality of Traffic-Control Methods for Site Vehicles and Pedestrians, https://www.ihi.co.jp/en/all_news/2022/industrial_general_machine/1198164_3492.html [Accessed September 8, 2023]
- [c] 遠隔からのロボットの高精度なリアルタイム制御（適応遠隔制御技術）, https://jpn.nec.com/rd/tg/smc/research/adaptive_remote_control.html [Accessed September 8, 2023]
- [d] 施設紹介 | 先端技術チーム 国立研究開発法人 土木研究所 -PWRI-, <https://www.pwri.go.jp/team/advanced/facilities.html> [Accessed September 12, 2023]
- [e] 施設紹介 | 先端技術チーム 国立研究開発法人 土木研究所 -PWRI-, <https://www.pwri.go.jp/team/advanced/facilities.html> [Accessed September 12, 2023]
- [f] metageek.com Understanding RSSI | Acceptable Signal Strengths https://learn.microsoft.com/ja-jp/windows/win32/api/wlanapi/ns-wlanapi-wlan_association_attributes?redirectedfrom=MSDN [Accessed December 8, 2023]
- [g] wireless-nets.com | How to: Define Minimum SNR Values for Signal Coverage