

2. 建設現場における無人化施工向け 無線 LAN システムのローミング技術と応用に関する検討

ローミング技術の紹介を中心にして

株式会社熊谷組
株式会社国際電気通信基礎技術研究所
独立行政法人国立高等専門学校機構東京工業高等専門学校

○ 畠本 浩伸
清水 聰
松林 勝志

1. はじめに

近年、建設業界では生産年齢人口の減少と就業者の高齢化が顕著であり、業界全体にとって重要な課題となっている。特に建設機械オペレータをはじめとする熟練技能者の不足が深刻化している。令和 6 年能登半島地震のような災害時に宿泊施設や交通インフラの損壊が発生した場合、土木作業員の確保が困難となることで、問題の深刻度が増している。加えて、2024 年 4 月から建設業界にも適用された働き方改革関連法により、時間外労働や休日出勤に対する規制が強化されている。

このような状況を受けて、国土交通省は 2024 年 4 月に「i-Construction 2.0」を策定し¹⁾、「建設現場のオートメーション化」を掲げている。具体的な目標として、2040 年度までに省人化を進め、現状と比べて生産性を 1.5 倍まで向上することが掲げられている。これに先立ち、2022 年 3 月には「建設機械施工の自動化・自律化協議会」が設立され、技術開発と普及の加速化が図られている。

技術開発については、災害復旧現場など、二次災害のリスクがある危険な場所での作業員の安全性が求められている。そのため、施工現場に対する無人化・自動化技術の導入は、安全性を確保しつつ、夜間作業や降雪・降雨による作業中断が多い状況下でも施工の継続性を確保し、工期の遅延を防ぐ目的がある^{2)~6)}。

無人化施工において建設機械の遠隔操作を行うためには、無線ネットワークが必要となる。現場においてのみ利用するためキャリアの無線ネットワークではなく、ローカルエリアネットワーク (LAN: Local Area Network) の構築に優れた Wi-Fi が利用されている。しかし、Wi-Fi を広い現場で移動する建機に実装した場合、「適切な基地局に接続されない」「切り替えに時間がかかる」という課題がある。

本検討では建設現場における無人化施工向け無

線 LAN システムのローミング技術と応用に関する検討を行うにあたり、3 つのアプローチを並行して進めている。

研究開発項目 (1) として、建設現場で使用されている無線 LAN の端末が、最適な基地局と接続できるように、ローミングの判断に必要なパラメータを抽出する Wi-Fi 利用環境モニタリング技術を確立する。後述の研究開発項目 (2) (3) と連携して様々な使用環境で評価し、本システムを実装していない場合に比べ、ローミングに要する平均的な基地局切替時間を低減する。

研究開発項目 (2) として、2 台の重機を運用する際の映像伝送に要する最大遅延時間が 400 msec となる場合に対して、ローミングポリシーを制御することによってアクセスポイント毎の通信負荷が平滑化され、200 msec (50% 低減) にすることを目指している。作業開始からの基地局に対する無線通信負荷状況を重機に搭載された GNSS の位置情報と関係づけながらモニタリングし、ローミングのためのパラメータを計算する。計算結果に基づいてアクセスポイントへの建設機械の接続数をローミングポリシーに基づいて制御されることを確認する。

研究開発項目 (3) として、ヘッドマウントディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) とモーションシミュレータを用い、重機オペレータの作業負荷を低減し、作業効率を高める遠隔操縦システムを実現する。オペレータの作業負荷に大きく関わるのは重機の応答のタイムラグと映像解像度である。(1) (2) により改善されたローミング環境及び新技術開発により、これまでの 0.5~1 秒のタイムラグを半減させ、映像の高解像度化を目標とする。

本稿では、2. においてシステムの概要としての無人化施工技術や遠隔操作システム、自動走行制御を示し、3. においてローミング技術について説

明する。4.においてはローミング技術を用いた数値シミュレーション結果について説明する。5.においては、作業負荷低減と作業効率向上を実現する遠隔操作を支えるカメラ制御技術について説明する。最後の6.において、今後の検討事項について説明する。

2. システム概要

2.1 建設現場における無人化施工技術

災害復旧で活用される無人化施工はオペレータによる遠隔操作と、システムによる自動走行制御を連携している。このコンセプトの根幹には、自動走行制御の全ての動作が遠隔操作をベースにする設計思想がある。これにより、万が一自動走行制御のシステムに不具合が発生した場合でも、即時にオペレータによる遠隔操作へと切り替えて作業を続行できる、信頼性と堅牢度の高いバックアップ体制が確保されている。

2.2 遠隔操作システム

建設機械の管理はすべて遠隔操作室に集約・完結させている。オペレータは安全な位置に配置された操作室から、リアルタイムで送られている現場の映像データを基に作業状況を正確に「見える化」しており、現場を俯瞰的に把握できるようになっている。この中央集権的な管理体制は、オペレータ1人が複数の建設機械の動作を同時に管理することを可能としており、省人化を実現している。

システム全体の運用を簡素化し、ICT (Information and Communication Technology) に強い専門の技術者のサポートなく、オペレータのみで操作可能なシステムを構築することで、実際の建設現場への導入を容易にしている。

2.3 自動走行制御

建設機械の自動走行制御を行うにあたり、「仮想レール方式」を採用している。これはまず人間が手本となる走行ルートをシステムに記憶し、その後、自動走行時に仮想レールに対して忠実に走行するという考え方である。

具体的には、最初にオペレータが遠隔操作で建設機械を運転する。この「教示運転」の際に、車両に搭載されたGNSS (Global Navigation Satellite System) やIMU (Inertial Measurement Unit) が位置と速度の情報を取得し、走行した経路を「教示経路」として車載コンピューターに記憶させる。オペレータが自動走行モードに切り替えることで、建設機械は記憶された仮想的なレールに沿って、教え込まれた通りの動きを正確に追従して走行する。この制御方法の利点として、現場の地形変化に合わせて容易に経路を再登録できる柔軟性と、熟練オペレータの運転技術をデジタルデータとして保存・再現することで、高い走行精度と生産性を

実現できる点にある。

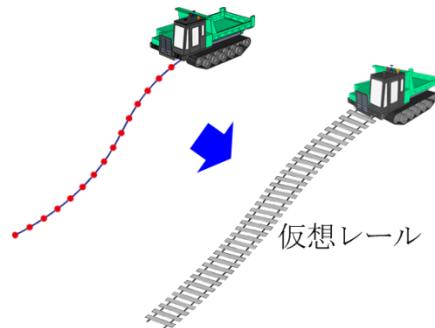


図-1 自動走行制御における仮想レール方式

3. ローミング技術

3.1 基本的なローミング技術とその課題

図-2に、基本的なローミングの概念を示す。ローミングとは無線LANの端末が接続先のアクセスポイント(AP: Access Point)を切り替える動作である。現在のWindows OSでもローミングの設定変更はできるが、接続先を切り替えるかどうかについて、電波品質が極端に悪くなった場合にのみ変更するか、あるいは継続的に電波品質をチェックして電波品質の良いアクセスポイントを探すことしかできない。

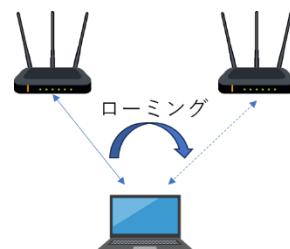


図-2 ローミング動作

現在のローミング技術では、切り替える際の受信信号電力の強度 (RSSI : Received Signal Strength Indicator) の基準が不明であり、切り替え時間に数秒かかる場合がある。そのため、建機の遠隔操作では使えない。単にRSSIだけでなく、基地局と端末の位置関係、基地局のトラフィック状況などを総合的に判断し、かつ短時間（目標200ms以下）で切り替えることが必要である。

ローミングの基準としてOSがRSSIしか判断材料としておらず、また切り替えに時間がかかるのは、新たなアクセスポイントとの接続に向けた認証プロセスに時間がかかるためである。これを改善するには、端末側でRSSI以外にGNSS情報やトラフィック情報も入手できるようにし、アプリケーション側で切替判断ができるような構成にする必要がある。

3.2 提案するローミング構成

図-3に、現在のローミング方式と目標とするローミング方式を比較する。現在のローミングの場合、ローミングの基準としてOSがRSSIしか判断材料としていない。APの切替に時間がかかるのは、新たなAPとの接続に向けた認証プロセスに時間がかかるからである。これを改善するには、端末側でRSSI以外にGNSS情報やトラフィック情報も入手できるようにし、アプリケーション側で切替判断ができるような構成にする必要がある。

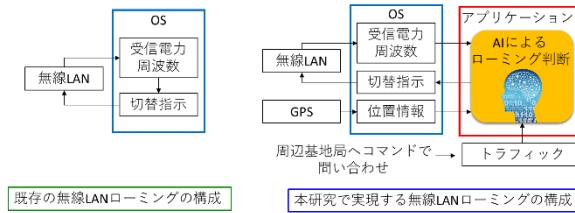


図-3 ローミング構成の比較

端末側にWi-Fiを2つ装備し、1つは最も条件に合うAPと接続して無線通信を行い、もう1つはローミングに備えて次に条件に合うAPに接続しておく。そして、AIから切り替え指示があればルーティングテーブルを書き換えることでローミングを実現する。

図-4に、ローミングの実験系を示す。つくば市にある熊谷組の技術研究所の実験ヤードに無線通信システムを構築して通信品質実験を行った。端末側のモバイルPCに小型PC（Raspberry Pi）を2台接続し、AP1とAP2へと常時接続している。

実験の結果、時刻、RSSI、緯度経度、トラフィック量など、パソコン側のローミングポリシーに必要な情報収集ができるることを確認した。別途、実施したローミング切替時間の計測では、従来は数秒かかっていたローミング時間が50ms以下で実現できることも確認できた。これは、2つのAPに常時接続を実施しているためである。

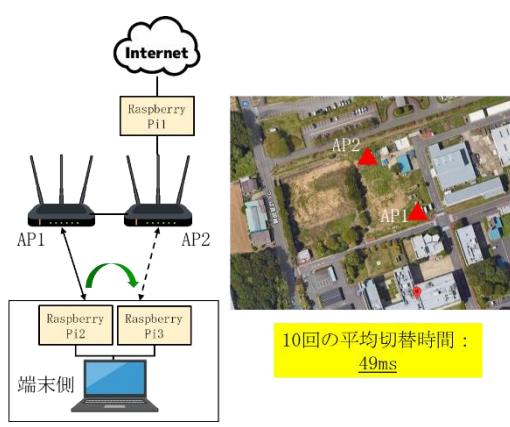


図-4 ローミングの実験系

4. 数値シミュレーション

4.1 シミュレーション環境

熊谷組の技術研究所における屋外実験ヤードの点群データを活用して、アクセスポイント2台に対する点群ごとの受信信号電力をシミュレーションで数値解析した。図-5に、技術研究所の点群データを示す。APを設置することで、各点群との距離を計算できる。

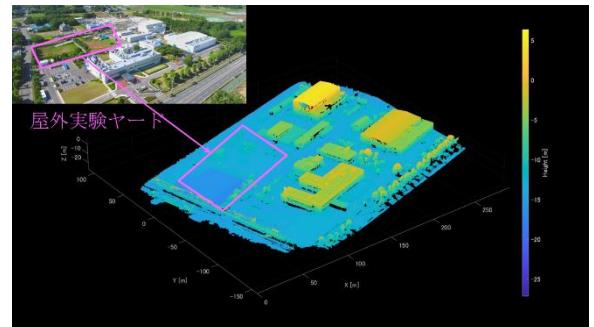


図-5 技術研究所の点群データ

表-1に、数値シミュレーションで利用する無線通信のパラメータを示す⁷⁾。無線LANで最も利用される2.4GHz帯と5.6GHz帯の周波数を利用している。ともに屋外で利用可能なチャネルである。パスロスは自由空間伝搬損失とし、距離および周波数の二乗に比例して損失が大きくなるものとしている。周囲の遮蔽の影響を示すシャドウイングは対数正規分布に従う受信信号電力の変動であり、標準偏差を屋外環境で用いられることが多い6dBとしている。また、瞬時変動については伸上ライス分布に従う変動とし、端末に届く直接波と反射波の電力比率を示すライス係数Kは0dBとしている。

表-1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	数値
搬送周波数	2.437GHz (6ch)
	5.6GHz (120ch)
送信電力	20dBm
パスロス	自由空間伝搬損失
シャドウイング	標準偏差 6dB
瞬時変動 (フェージング)	伸上ライス分布 (ライス係数 K=0dB)
ケーブル損失	6dB
雑音指数	10dB
アンテナ利得	2.14dBi (送受信)

図-6に、屋外実験ヤードにおけるAPの受信信号電力の一例を示す。周波数は2.4GHz帯であり、APに近い点群ほど受信信号電力のレベルが高くなる

ことがわかる。

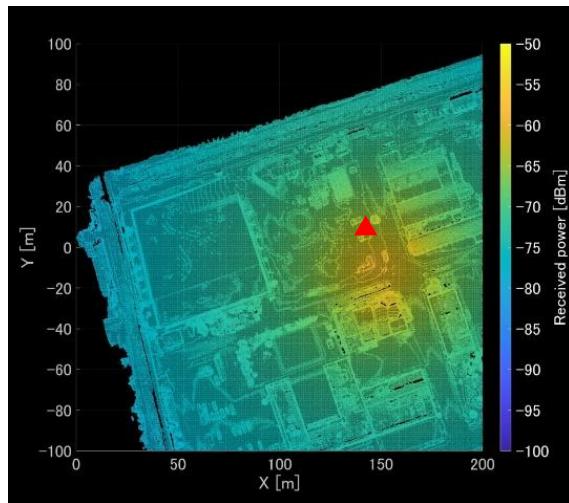


図-6 屋外実験ヤードと周辺の受信電力の一例
(2.4GHz)

4.2 ローミング技術に基づくシミュレーション

基本的なローミングポリシーを3つ検討した。

- (a) ランダムなアクセスポイントの選択：受信信号電力や位置を想定していない。
- (b) 受信信号電力ベースのアクセスポイントの選択：受信信号電力の高いアクセスポイントを選択する。
- (c) 位置情報に基づくアクセスポイントの選択：建設機械の位置を把握し、受信信号電力に関わらず位置の近いアクセスポイントを選択するようとする。

受信電力の瞬時変動をシミュレーション空間に組み込みつつ、実験ヤード内に2台の建設機械が配置されている想定にした。ローミングポリシー毎の理想スループットを累積分布特性(CDF)として確認した。

図-7、図-8に、2.4GHz帯と5.6GHz帯のスループットの累積分布特性となる。赤線が(a)、青線が(b)、黒線が(c)のローミングポリシーとなる。表-2に、累積分布特性の1%値と10%値の結果を示す。

図-7及び表-2より、2.4GHz帯においては位置情報に基づくローミングポリシーによって、建設機械の配置に依存するものの、累積分布の1%値や10%値に注目すると理想スループットの向上を確認できた。1%値と10%値において、受信信号電力ベースのローミングポリシー(b)のときよりも、位置情報を活用するローミングポリシー(c)の方が約18%と約32%高くなる。

図-8及び表-2より、5.6GHz帯においては位置情報に基づくローミングポリシーによって、建設機械の配置に依存するものの、累積分布の10%値に

注目すると理想スループットの向上を確認できた。10%値において、受信信号電力ベースのローミングポリシー(b)のときよりも、位置情報を活用するローミングポリシー(c)の方が約17%高くなる。

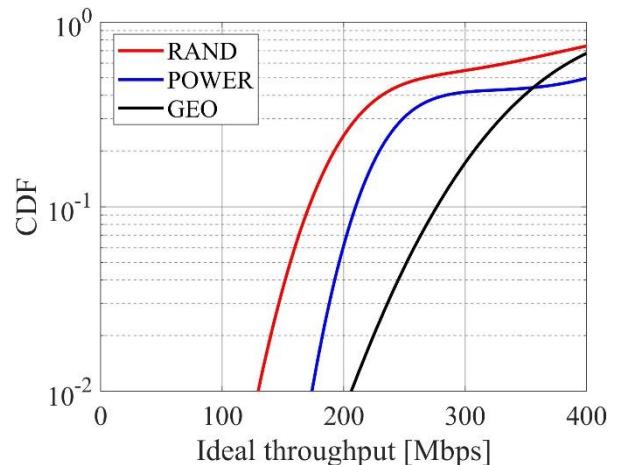


図-7 スループットの累積分布特性 (2.4GHz)

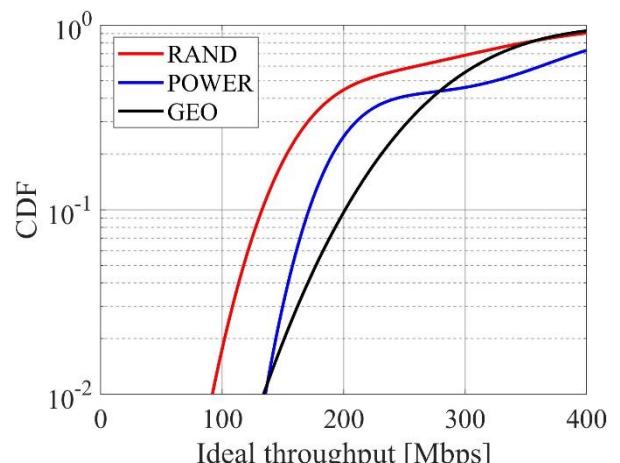


図-8 スループットの累積分布特性 (5.6GHz)

表-2 累積分布特性の結果

周波数	ポリシー	累積分布特性 [Mbps]	
		1%値	10%値
2.4GHz	a	130	171
	b	174	210
	c	206	277
5.6GHz	a	92	133
	b	136	171
	c	134	201

5. ローミング技術と統合予定の映像伝送技術

ローミング技術に合わせて、映像伝送技術との統合化を行う予定である。

4K全天球カメラで撮影した映像全体を操縦者側に送信し、HMD側でその一部を切り取ることで投影

しており、HMD 本来の性能よりも画質が低下してしまう問題があった。そこで、全天球カメラに代えて、パン・ズーム・チルトが可能な PTZ カメラを使用し、HMD を装着した操縦者が向く方向とカメラを連動させることで高画質な映像のまま HMD に配信することを実現する。以下の 3 点に関して研究成果を得ている。

5.1 2 種類の性質の異なる PTZ カメラの選定とソフトウェアによる遠隔制御の確立

特性の異なる 2 つのカメラを導入し、遠隔地からソフトウェアで制御する方法を確立した。

1 つは、監視カメラとして設計されたカメラであり、通信規格として ONVIF を採用する。そのため、ソフトウェア側からは ONVIF に準拠した信号を送信することでカメラを制御可能である。

もう一方は、ドローンや自律型ローバーなどのロボットに搭載されることを想定した PTZ カメラであり、独自の制御信号を Ethernet 回線上の UDP や TCP で送信することで制御する。この 2 種類のカメラは異なる用途で設計されており、両方を評価することで重機の遠隔操縦により適したカメラを採用する。この 2 種類の PTZ カメラに対してどちらもプログラムによる遠隔制御を実現し、システムから制御することが可能となった。

5.2 HMD が向く方向と PTZ カメラの方向を連動させる技術の確立

PTZ カメラに対して、操縦者が装着した HMD の方向と PTZ カメラの方向を連動させ動作させるシステムを開発した。HMD は海外製の製品を採用した。この HMD は外部にベースステーションを設置しない場合でも HMD 単体で向きを検出する機能を有しており、また映像の解像度も高いことが特徴である。HMD と PTZ カメラの連動は実現できており、カメラの映像を HMD に配信するシステムの開発に取り組んでいる。

5.3 PTZ カメラの方向を現在角から目標角に対して直線的に制御する技術の確立

PTZ カメラの制御に関する検証を進める中で、1 つのカメラにおいては、ある目標角度にカメラを回転させる際、パン方向とチルト方向がそれぞれ独立に最速で目標角度に到達するように制御されるため、目標角度に対して直線的に動作しないことが分かった。このような現象は ONVIF で制御される他の PTZ カメラでも起こりうる現象であると判断し、本研究ではカメラを現在角度から目標角度に向けて直線的に制御する制御方法を確立した。

6. まとめ

システムの概要としての無人化施工技術や遠隔操作システムと自動走行制御を示し、提案するローミング技術に基づくハードウェア構成について

説明した。さらに、ローミング技術を用いた数値ミュレーション結果により、位置情報ベースでのポリシーを使うことで累積分布特性の 10% 値において理想スループットの改善を確認できた。さらに、ローミング技術と統合する予定の作業負荷低減と作業効率向上を実現する遠隔操作を支えるカメラ制御技術について説明した。

以降の研究開発では、得られた情報を元に開発する AI のアルゴリズムを実装して、ローミングプラットフォームで評価することが目標である。またそのローミングのプラットフォームについては、令和 6 年度に開発した装置一式をフィールド実験に向けて、コンパクトな実装に改良する。

建設機械に対するローミング機能付き無線機の接続試験を行うために、熊谷組の屋外実験ヤードに建設機械（不整地運搬車）2 台を用意し（図-9）、ローミング機能付き無線機を搭載して 2 台の AP との通信を行う。位置情報に基づいて AP が切り替わることを確認しつつ、スループット並びに遅延測定を実施する。



図-9 使用予定の建設機械（不整地運搬車）

自動走行システムへの適用のために、ローミングポリシーに基づくアクセスポイントの選択をした上で、建設機械の自動走行システムを適用し、屋外実験ヤード上における自動走行の動作確認を行う。並行して PTZ カメラが撮影した映像をリアルタイムで HMD に表示するシステムを開発する。その後、実際に PTZ カメラを重機に搭載する方法を検討の上実装し、遠隔地から HMD による映像で遠隔操縦する実証実験を実施する。

この実証実験における評価の観点としては、(1) HMD の角度変化に対して PTZ カメラが追従するまでの遅延時間、(2) カメラで撮影した映像が HMD に表示されるまでの遅延時間、(3) HMD に表示される画像の画質、(4) 操縦者の操縦性、(5) ズームや、複数のカメラを用いて視点を切り替える機能などより操縦性を高める機能に関する考察、などの項目で検討を行う。

謝辞

本研究は国土交通省の建設技術研究開発助成制度
JPJ000094 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 国土交通省：「i-Construction 2.0」を策定しました～建設現場のオートメーション化による生産性向上（省人化）～，報道発表資料，2024年
- 2) 竹下嘉人・飛鳥馬翼・中須賀大樹：ネットワーク対応型無人化施工システムの盛土施工現場への適用，令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会，VI-115，2024年
- 3) 飛鳥馬翼・畠本浩伸・北原成郎・竹下嘉人：実施工現場における自動走行技術の評価－開発した2つのシステムの比較－，令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会，VI-116，2024年
- 4) 二村峻太・滝田真哉・西行和・飛鳥馬翼：令和6年能登半島地震におけるDXを活用した災害対応，令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会，VI-199，2024年
- 5) 二村峻太・高村忠勝・石山正太郎・飛鳥馬翼・天下井哲生・村上誠弥：令和6年能登半島地震における無人化施工の夜間導入とその評価，令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会，VI-1171，2025年
- 6) 飛鳥馬翼・高村忠勝・石山正太郎・二村峻太：令和6年能登半島地震における自動走行技術の導入とその効果，令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会，VI-1172，2025年
- 7) 三瓶政一：ワイヤレス通信工学，オーム社，2014年