

40. 施工現場・重機へのアドホックネットワーク適用検討

株式会社日立製作所 トータルソリューション事業部 ○高野 晴之
日立建機株式会社 技術開発センタ 小倉 弘
株式会社日立製作所 システム開発研究所 清水 淳史

1. はじめに

近年、土木・建築の施工現場や重機に情報技術を適用し、施工の効率化や安全性向上を図る「情報化施工」が注目されている。具体的には工事進捗状況や作業結果をデータ化し、収集・分析や、その結果に基づくリアルタイムの作業指示・出来高管理を行うと共に、画像・映像による施工現場の状況の監視・記録などを行うものである。

国土交通省が、低入札工事における品質確保のため「発注者によるモニタカメラの設置・監督」および「受注者からの撮影ビデオの提出」を義務付けるなど、特に施工の信頼性や安全が重視されている昨今、情報化施工は必要不可欠な取組みといえる。

情報化施工の実現には、施工現場内、および施工現場と現場事務所を結ぶ情報通信ネットワークが必須となる。しかし施工現場は工事の進捗に応じ地形・状況が刻々と変化するため、有線・無線を問わず固定ネットワークの常時敷設が困難であることが予想される。このような環境におけるネットワークは、拡張性や柔軟性に富んでいることが望まれる。

本報告では、上記要求条件を満たす「アドホックネットワーク技術」、施工現場における実用性を検証するための「実証実験」、および「情報化施工への適用可能性」について報告する。

2. アドホックネットワークの概要

2.1 アドホックネットワークとは

アドホックネットワーク (Ad hoc Network) とは“その場限りのネットワーク”という意味をもち、大きく以下2つの特徴を有する。(図-1 参照)

- (1) 無線通信機能を持つ情報端末を近づけるだけで自律的にネットワークが構築される(プラグアンドプレイ)

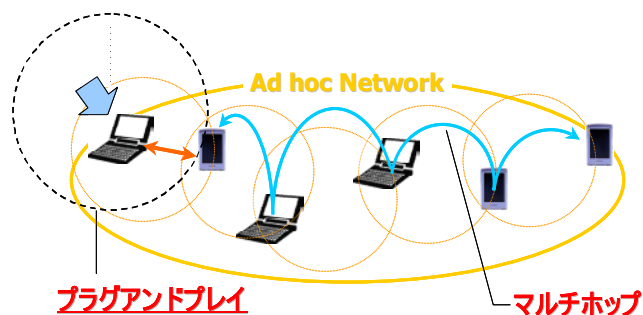


図-1 アドホックネットワーク概要

- (2) 直接無線通信が届かない(距離が遠い/見通しが利かない)端末にも、近隣の端末を経由しパケットリレー形式に通信を中継する(マルチホップ)

すなわちアドホックネットワークは、利用環境に応じた、効率的なネットワーク構築・運用を可能にする技術といえる。ネットワーク管理が、現状の一極集中から分散型にシフトするため、設備投資や保守コストの低減が期待でき、情報流通やサービス提供のビジネスモデルに大きな変化をもたらすと推測される。

2.2 アドホックネットワークの標準化動向

アドホックネットワークは、インターネット技術の標準化機関 IETF (Internet Engineering Task Force) の MANET WG (Mobile Ad hoc NETWORKS Working Group) で標準化が進められている技術である。

アドホックネットワークのルーティングの方式は大別して「Proactive 方式」「Reactive 方式」の2方式がある。本実験では施工現場という限定されたエリアにおいて、移動速度の遅い重機への適用を考慮し、高密度に存在する端末が低速で移動する環境に適した「Proactive 方式」の中の一つである、OLSR (Optimized Link State Routing) 方式を採用した。

2.3 アドホックネットワークの適用分野

アドホックネットワークは、一時的なイベント用のネットワーク、災害時や緊急時のネットワークへの適用が検討されている。また、移動する端末同士の通信にも適しているため、車車間の通信や、携帯端末(PDA や携帯ゲーム機など)間のコミュニケーションなどへの適用も検討されている。

特に情報通信手段の確保が重要となる災害時には、既存の固定ネットワークに障害が発生した場合でも、アドホックネットワーク機能を持つ端末(以下、「アドホック端末」と呼ぶ)を適宜設置するだけで代替ネットワークが構築可能である。総務省主導の下「首都圏直下地震発生時の帰宅困難者等の避難誘導に資するアドホック無線ネットワークの構築に関する調査検討会」が発足されるなど、その実用化が期待されている。

2.4 施工現場へのアドホックネットワークの適用

施工現場のネットワークに求められる要件は、以下の4つに整理できる。

- (1) 地形や状況の変化に柔軟に対応可能なこと(機器の位置やアンテナの調整の手間が少ないこと)。
- (2) 作業員間の意思疎通や、施工現場の安全監視のために必要な、音声・画像などの大容量なコンテンツを含む、多様な情報の伝送が可能なこと。
- (3) 作業の妨げにならないよう常時接続であること。
- (4) 施工費用低減のため、通話料金やパケット利用料の費用負担が少ないこと。

アドホックネットワークは、これらの要件を満たすことが可能な技術である。

例えばトンネル工事においては、開削・掘進の状況に合わせて、アドホック端末を追加設置するだけで、作業を停止させることなく容易に切羽(トンネル施工の最深部)までのネットワークが伸張できる。またアドホック端末を重機に搭載することにより、重機同士が近づくだけで通信し、相互に進捗情報を交換することが可能となる(図-2 参照)。

本報告では、アドホックネットワークの無線方式として IEEE802.11g などの無線 LAN を前提としてい

るので、音声や映像、テキストデータなど、様々な情報可能である。また、携帯電話と異なり「携帯電話の電波が届かないエリアでも利用可能(通信用の基地局設置が容易)」,「個々の端末に発生する通信費が不要」という利点がある。

今後は各種センサ技術と組合せ、施工現場の「見える化」、すなわち作業の効率や安全性の視覚化・数値化が進められると予想されるが、無線 LAN の使用を前提とするアドホックネットワークは、これらセンサ情報の通信にも活用可能である。

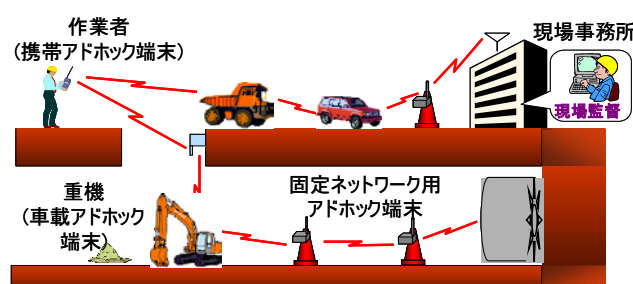


図-2 施工現場への適用イメージ

3. 実証実験について

3.1 実証実験の目的

アドホックネットワーク技術の施工現場・重機への適用検証のため、実証実験を2回実施した。以下にその実験について報告する。

3.2 実験の前提条件

表-1、表-2、および図-3に実証実験の前提条件を示す。

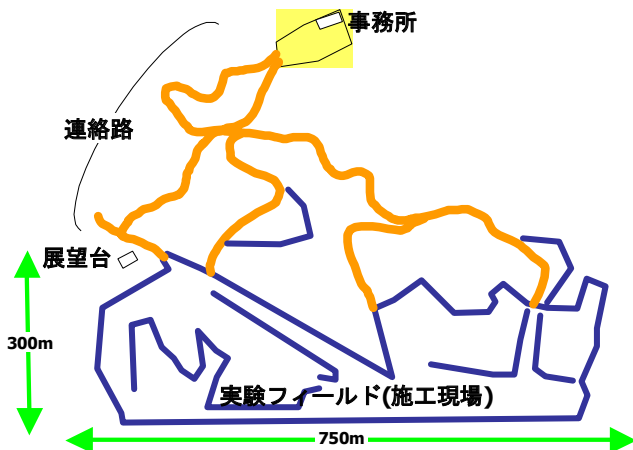
表-1 実験機器

#	機器	備考・仕様など
①	現場機材	油圧ショベル
②	現場機材	クローラキャリア
③	現場機材	一般車両
④	端末・無線機器	汎用車載 PC
⑤	端末・無線機器	ノート PC
⑥	端末・無線機器	小型コントローラ※
⑦	端末・無線機器	IEEE802.11b 無線 LAN カード/アンテナ

※ 施工現場に設置可能な Linux 搭載の制御端末(試作機)

表－２ 伝送データ種類

#	データ種類	条件等
①	重機 GPS データ	1 秒毎に計測
②	カメラ画像	JPEG フォーマット, CIF サイズ
③	TV VoIP (音声)	64kbps
	電話 MPEG (映像)	192kbps, 15Frame/sec



図－３ 実証実験現場概念図

実証実験を行った現場は、実験フィールド(施工現場)、現場事務所およびその間を結ぶ連絡路で構成される。連絡路は複雑に湾曲した林道であり、見通し距離は短い。また実験フィールドは高台や掘削跡など、地形に大きな高低差があり、見通しがきかないため無線通信が直接届かないエリアが存在する。なお過去２回にわたる実験において、実験フィールド(施工現場)内の地形は大きく変化しており、図－３は２度目の実験時の地形を示している。また、現場事務所および実験フィールドを結ぶ連絡路は、ほとんど変化がない。

４．第１期：基礎実証実験¹⁾

4.1 実験概要

第１期の実験は「施工現場におけるアドホックネットワークの基本機能の確認」「ネットワーク構築とその利用条件把握」を目的とした、基礎的な実証実験である。実施時期は２００４年１０月の５日間、主な検証項目は下記のとおりである。

実験１：重機と測定用端末との１対１通信の実施

および通信品質の検証

実験２：施工現場内固定ネットワークの構築および通信品質の検証

実験３：施工現場全体(移動体含む)でのアドホックネットワークの構築および通信品質検証

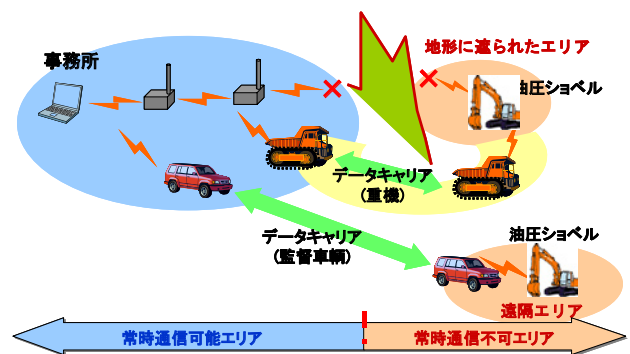
実験４：常時通信ができないエリアで作業する重機との通信実験

4.2 第１期実験の主な結果

第１期の実験により、大きく以下４点のことが確認できた。

- (1) 油圧ショベルの姿勢(方向／フロント上下)に大きく依存せず、ほぼ一定の伝送速度を確保可能。
- (2) 最大６Hopのアドホックネットワーク(＝送信元を含む、６つのアドホック端末を経由するアドホックネットワーク)を構築。伝送速度はホップ数に反比例する、という経験則を得る。
- (3) 施工現場内の重機と事務所間で VoIP による音声通信と、映像通信を実現。音声はトランシーバより高品質、映像は相手の顔や重機の動作状態が視認できる程度。
- (4) 移動する重機などに搭載したアドホック端末にデータを一時蓄積し、対象となる重機に近づいてから、データを送受信する(以下、「データキャリア」と呼ぶ)ことで、地形に遮られたエリアや遠隔エリアなど、常時通信ができない重機との情報通信を実現。(図－４)

以上の結果から、施工現場におけるアドホックネットワークの有効性が確認された。



図－４ データキャリアの考え方

一方、技術的課題も下記のとおり整理できた。

- (1) アドホック端末として移動体が含まれる場合、頻繁にルート変更が発生し、ネットワークとしての通信安定性が低い。
- (2) 遮蔽物(ダンプの通過など)により、通信ルート変更が生じるが、そのルート切り替え時のアプリケーション(VoIP時)の再接続に最低4秒を要する。

5. 第2期：応用実証実験

5.1 実験概要

第1期実験では、アドホックネットワークの施工現場への適用可能性を検証すると同時に、技術的課題も整理できた。これをふまえ、第2期の実験の目的として以下2つを設定した。

- (1) 情報化施工への適用可能性の検証
- (2) 第1期実験の技術的課題の改善確認

(1)については、実際の施工現場で利用される製品・システムを想定し、実用化に向け、機器・アプリケーションの具体的な必要機能の洗い出しを行った。(2)については、ルート切り替え等に伴う切断から再接続までの時間の短縮化のために、アドホック制御信号の発信周期の最適化を行った。

実験実施時期は2005年11月の5日間、主な検証項目は下記のとおりである。

- 実験1：重機の稼働情報(燃料残、水温等)の取得
- 実験2：移動体を媒介としたデータ送受信
- 実験3：重機・作業員の作業エリアの把握

5.2 第2期実験の主な結果

- (1) 情報化施工への適用可能性の検証

① 実験1

実験1では、油圧ショベルに搭載したアドホック端末で、油圧ショベルの「燃料残量」「稼働時間(アワメータ)」「水温」の情報を取得し、ネットワークを経由し、現場事務所に送信する実験を行った。

油圧ショベルの稼働情報を把握することは幾つかのメリットが考えられる。例えば施工現場の視点で見れば、燃料切れによる重機の停止などを未然に防ぎ、稼働効率を上げることができる。また重機メ

ーカ/レンタル会社の視点で見れば、メンテナンス時期の事前スケジュールリングや部品の在庫最適管理に役立つ情報として活用できる。

今回、現場事務所～施工現場内油圧ショベルまで6Hopのアドホックネットワークを構築し、現場事務所で油圧ショベルの稼働情報を受信する実験を行った。この結果、ほぼリアルタイムに油圧ショベルの稼働情報を収集することができた(図-5参照)。

今後は取得すべきデータの精査や、そのデータの分析等により、施工現場向けの重機管理アプリケーションや、重機メーカー/レンタル会社向けの予防保守アプリケーションに適用していく方針である。

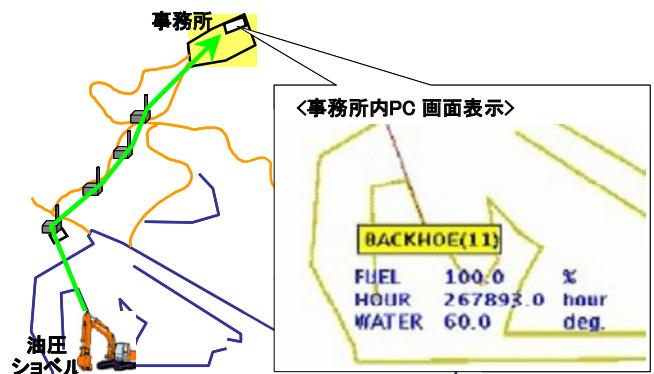


図-5 重機稼働情報取得実験

② 実験2

第1期実験では「移動する重機を媒介としたデータ送受信(データキャリア)」の基礎的実験を実施した。第2期実験では、現実の施工現場での利用シーンを想定し、下記2種類の実験を行った。

- (a) 2台のデータキャリアが任意に走行し、1台の油圧ショベルに対しデータの蓄積・転送を繰り返す
- (b) 1台のデータキャリアが、2台の油圧ショベルに対し、データの蓄積・転送を繰り返す

本実験では、通信プロトコルに改良を加え、短時間でデータキャリアとのデータ送受信が行えるようにした。アプリケーション面では、ブラウザに表示できるようにするなど、実際の利用を考慮した汎用性の高いアプリケーション設計としている。

実験の結果、いずれの場合においても、現場事務

所～油圧ショベル間の正常なデータ送受信を確認した。地形などに遮られた、直接通信できないエリアの作業員や重機に対する通信にはデータキャリアが有効であり、アドホックネットワークの特徴が活かせる適用事例と考える。

③ 実験3

実験3では重機・作業員の、作業エリアを把握する実験を実施した。

アドホックネットワーク機能を持った車載端末や作業員用 PDA など(以下、「移動体端末」)が、定位置に設置されたアドホック端末(以下、「固定端末」)に近づくと、その固定端末では、近づいた移動体端末からの強い電波強度を観測できる。換言すれば、ある固定端末において、電波強度が強く観測される移動体端末は、その固定端末の近くに存在していることを意味している。すべての固定端末が受信している電波強度を観測することで、対象となる移動体端末が、どの固定端末付近に存在するか、すなわち作業エリアが把握できると想定した。

実験の結果、環境条件等により電波強度が安定しないため、瞬間的にはエリアを特定できない場合もあったが、2～3 秒間の電波強度を観測することで、該当移動体端末の位置を半径数十m 範囲程度で把握できた。概略ではあるが、リアルタイムな作業員や重機の位置把握に活用できると考えられる(図-6 参照)。

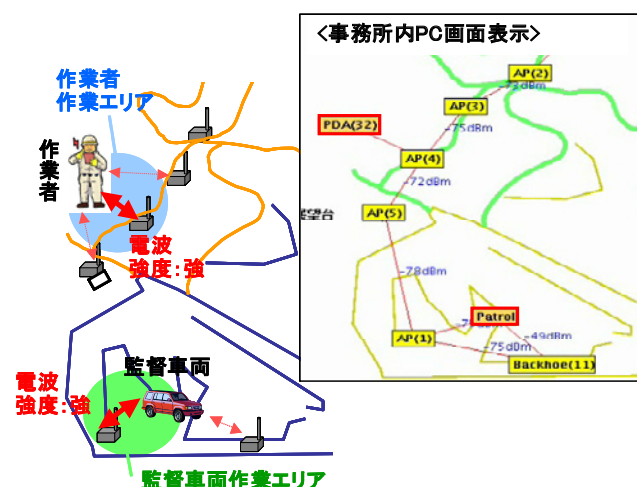


図-6 電波強度による位置把握実験

測位に関していえばGPS データの利用が考えられるが、本取組みは「GPS の届かない地下、特にトンネル工事などにおいても概略位置の把握が可能である」という特徴を有している。トンネル工事では「作業員との音声通信手段」「酸素や有毒ガスなどのセンサ情報」などの情報取得が義務付けられているため、それらの情報通信のためのネットワーク敷設が必須となるが、本機能を組み込んだアドホックネットワークならば、ネットワークインフラを構築すると同時に、作業員の概略位置が把握可能である。

今後は実用化に向け、三点測量の適用や、電波強度の強弱により表示位置の調整を行うなど、位置測定精度の向上が考えられる。

(2) 技術的課題の改善確認

第2期の実験では、第1期の「ルート変更によるアプリケーション再接続までの時間短縮」という技術的課題を解決すべく、改善を行った。

今回採用したアドホックルーティング方式である OLSR 方式は、各アドホック端末がアドホック制御信号(ルーティングテーブルなどの情報)を一定周期ごとに送受信している。

本実験ではこの制御信号の発信周期を短く設定した。これにより、ある端末との通信が途絶えた場合でも、通信が途絶えたことを端末がすぐに認識し、通信の相手先を別の通信可能な端末に切り替えられる。

但し、アドホック制御信号の発信周期が短いほど通信帯域が圧迫され、本来流すべき通信に影響を与えるため、データ種別に応じた最適化が必要となる。

第1期の実験時はこの各端末のアドホック制御信号発信周期を、OLSR 方式標準の 2000[msec]としていたが、第2期の実験では 500[msec]と 1/4 に短縮した。この結果、第1期実験時は VoIP による音声通信の再接続までの時間は最低 4 秒だったが、今回の実験では、再接続までの時間は 2 秒未満と、短縮が確認できた。また今回の実験で設定した、アドホック制御信号発信周期 500[msec]でも、標準設定(2000[msec])時と同様、主観評価ではトランシーバより高品質の音声通話が実現できた。今後は音声品

質を維持したまま、更に発信周期を短くし、再接続までの時間を短くするなど、アプリケーションに応じて最適なパラメータ設定をしていく方針である。

また、第1期の実験ではアドホックネットワークに移動体端末を含む場合、頻繁にルート変更が発生し、通信が安定しないという現象を確認した。今回採用した OLSR 方式は、各端末に優先度を設定し、この優先度に順じてネットワーク構成を決定する機能を有する。今回の実験では、ネットワークの安定性向上のために、固定端末を優先したネットワーク構築を行ったが、この設定とネットワークの冗長性とはトレードオフの関係にある。施工現場の機器構成ごと、最適なパラメータ設定を見出していく必要がある。例えば「油圧ショベルは状態(一定箇所にとどまり作業中／別の現場に移動中)に応じて優先度を変更する」、「平均移動速度が速い監督車両よりも、遅い重機の優先度を高くする」など細かな調整で、冗長かつ、より安定したネットワークの実現が期待できる。

(3) その他の第1期実験からの改善点

第1期実験時の固定ネットワーク用アドホック端末はノート PC、無指向性アンテナ(地上よりおよそ 2m の高さに設置)、エンジン発電機で構成した。

第2期実験では、実際の施工現場での利用を想定し、「小型で可搬性に優れる」「設置・起動が容易」という特徴を有する、Linux 搭載の小型制御端末(以下、「小型コントローラ」と呼ぶ)の試作機を、固定アドホック端末として利用した(図-7 参照)。

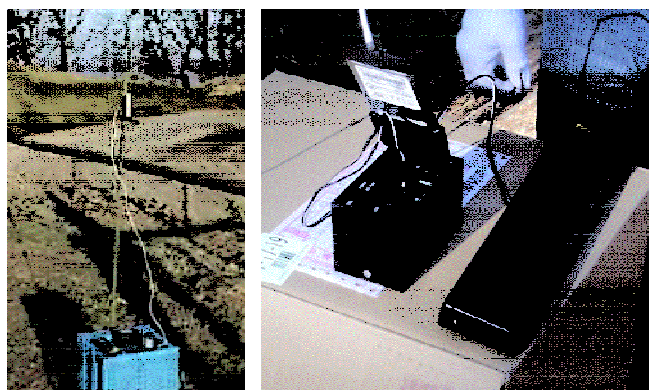


図-7 固定アドホック端末(小型コントローラ)

本実験に利用した小型コントローラはアドホック端末として十分機能し、また設置から稼働までが簡易な作業で実現できることも検証できた。

固定アドホック端末設置における最重要課題は電源供給の方法である。本実験では、小型コントローラをノート PC 用バッテリーで稼働させたが、活動時間に限界がある。実運用で固定ネットワークとして常時稼働させるべく、太陽電池と組み合わせるなど、電源確保について現在検討中である。

6. おわりに(課題と今後の進め方)

本論文では、アドホックネットワークの概要と、その施工現場や重機への適用可能性、およびその検証のための実証実験について報告した。

アドホックネットワークの施工現場や重機への適用が有効であることがわかり、また具体的なアプリケーションについても、一部有効性が検証できた。

現在、アドホックネットワークの情報化施工への適用の第一歩として「アドホックネットワーク利用施工管理システム」のプロトタイプシステムの仕様を検討している。本システムを、実際の施工現場で試験稼働させ、詳細パラメータの調整・最適化を行い、実用化につなげていく方針である。

但し「ホップ数の増加に伴う通信速度の低下」など、アドホックネットワーク特有の課題は、運用面でのカバーが必要な面もあり、SLA(Service Level Agreement)の考え方や、運用・サポートのビジネスモデルも含めて、検討していく予定である。

また、アドホックネットワークを、今後必須となる情報化施工のためのネットワークとして活用させることはもちろん、そのほかの応用分野にも活用範囲を広げていく予定である。

参考文献

- 1) 高野, 江口, 延命, 清水, 亀田: 「施工現場・重機へのアドホックネットワーク適用検討」, 土木学会 第30回情報利用技術シンポジウム, 2005年10月