

施工現場・重機へのアドホックネットワーク適用検討

The Study of Informationization Construction based on Ad Hoc Network Technology

高野晴之¹・江口義紀²・延命史雄³・清水淳史⁴・亀田貴之⁵

Haruyuki Takano, Yoshinori Eguchi, Fumio Enmei, Atsushi Shimizu, Takayuki Kameda

抄録： 施工現場からの監視映像の送信，現場事務所との音声通話などに必要な通信インフラ構築の一つの手段としてアドホックネットワーク (OLSR 方式) の適用を検討中である．ネットワーク構築・拡張・変更が容易というアドホックネットワークの特徴を，進捗に応じ地形・環境が刻々と変化する施工現場に適用することにより，容易に IT 環境の整備の実現，情報化施工への対応を目指す．

この実現に向け，土木工事現場におけるアドホックネットワークの実用性の検証・利用条件の把握を目的とした実証実験を行った．最大 5 つのアクセスポイントを経由し，現場事務所と重機に搭載した PC とを結ぶネットワーク構築，VoIP 音声通話ほかのアプリケーションを動作させ，その有効性を確認した．

キーワード： 情報化施工，アドホックネットワーク

Keywords : Informationization construction, Ad Hoc Network

1. はじめに

情報化施工とは施工の効率化や安全性向上を目的として，情報化技術を建設・土木施工に適用することと言う．具体的には工事進捗状況のデータ化・収集・分析やその結果に基づくリアルタイムの作業指示，画像・映像による施工現場の状況の監視・記録などを指す．情報化施工の実現により，工期短縮などの生産性の向上や，安全性の向上などが期待できるため，国土交通省主導のもと，現在全国の施工現場で実施が検討・推進されている．

情報化施工の実現には，施工現場からの情報収集や，施工現場の重機オペレータや作業員への情報配信のための情報通信ネットワークが必須となる．しかし，施工現場は進捗に応じ地形・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．

本事例報告では，上記要求条件を満たす「アドホックネットワーク」技術，およびそれを活用した情報化施工の実現のためのアイデア，その実現に向けた検証実験の結果について報告する．

2. 基盤技術としてのアドホックネットワーク

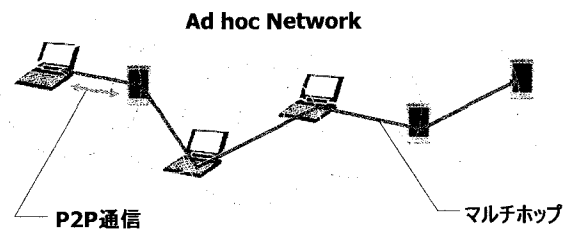


図-1 アドホックネットワーク概念図

(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の概念図を図-1に，特徴を下記に示す．

- ① 無線通信機能を持つ情報端末を近づけるだけで自動的にルーティング管理/制御を行うネットワークが構築可能 (プラグアンドプレイ)
- ② バケツリレー形式に通信を中継し，直接無線が届かない端末間でも通信可能 (マルチホップ)

(2) アドホックネットワークの適用案

アドホックネットワークは上記の特徴から，災害時や緊急時のネットワーク，一時的なイベント用のネットワークへの適用が考えられる．特に災害時には情報通信手段の確保が重要となるが，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．

1 : 非会員 (株)日立製作所 トータルソリューション事業部 ITS 推進センタ
(〒101-8608 東京都千代田区外神田一丁目 18 番 13 号, Tel : 03-4564-5908, E-mail : haruyuki.takano.hf@hitachi.com)

2 : 非会員 日立建機(株) 技術開発センタ

3 : 非会員 日立電子サービス(株) サービス事業本部 事業企画部

4 : 非会員 (株)日立製作所 システム開発研究所

5 : 非会員 (株)日立製作所 情報制御システム事業部

また自動車(車載端末)や歩行者(携帯電話, PDA)等, 移動する端末間でのネットワーク形成が容易なため, 将来的には ITS 分野における, 車々間通信や安全運転支援への適用が期待されている。

アドホックネットワークは, 必要に則した効率的なネットワーク構築・運用を可能にする。現状の一極管理から分散管理にシフトすることで設備投資や保守コストの低減が期待できるが, 情報流通やサービス提供においてはビジネスモデルが変化すると推測する。

(3) 標準化の動向

アドホックネットワークは 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。MANET WG では, 無線通信のハードウェア構成に依存しない, ソフトウェアでのルーティングに関して標準化を行っている。

ルーティングの方式としては, 以下2方式がある。

① Proactive 方式

端末間で経路表を定期的に交換・更新する。端末が高密度で存在・低速で移動するネットワーク向け。

② Reactive 方式

データ送信時に目的の端末を探索する。端末が低密度で存在・高速で移動するネットワーク向け。

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 Proactive 方式の一つ, OLSR (Optimized Link State Routing) を使用した。

3. アドホックネットワークの施工現場への適用案

前章の特徴からアドホックネットワークは, 「地形・状況の変化への柔軟な適応が必要」, 「工事期間内だけの一時的なネットワーク」という施工現場のネットワークへの要求条件を満たしている。

アドホックネットワーク技術を用いることにより, 施工現場のネットワーク構築は, アクセスポイントを適宜配置するだけで実現できる。例えばパイロンなどにアドホックネットワークの機能を搭載することにより, 工事区画を明示化すると同時にネットワークを構築するということも可能になる。また, アドホックネットワークの機能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が可能となる。重機が相互に進捗情報を交換することで, 現状把握と最適作業内容の判断がリアルタイムに行える。また重機の接近を通知・警告することで安全面をサポートするアプリケーションへの適用も期待できる。

トンネル内においては「センサによる温度・酸素・炭酸ガスなどの監視」「坑内作業員との音声通話」が

義務付けられている。アドホックネットワーク技術はこれらセンサ情報の伝送や音声通話のための汎用ネットワーク構築に利用できると考えられる。開削・掘進の状況に合わせて, 作業を停止させることなくアクセスポイントの追加のみで容易に切羽までのネットワークが伸張できる。

さらに, アドホックネットワークの無線技術として IEEE802. 11b などの無線 LAN 技術を適用した場合, VoIP 音声通話は携帯電話とは異なり, 「屋外からの電波が直接届かなくても利用可能」, 「個々の端末に発生する通信費が不要」というメリットがある。

4. 実証実験

(1) 実証実験の目的

前章にあげた様々なアプリケーションの実現に向け, 「施工現場におけるアドホックネットワークの構築・機能確認・利用条件把握」, 「アドホックネットワークの特性を活かした新たな施工モデルの立案」を目的とし, 実証実験を行った(実施時期: 2004 年 10 月の 5 日間)。主な検証項目は下記の通りである。

実験 1: 重機の姿勢・方向および端末間の距離が通信品質に与える影響の検証

実験 2: 特定エリアでのアドホックネットワークの構築および通信品質の検証

実験 3: 施工現場全体でのアドホックネットワークの構築および通信品質の検証

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

(2) 実験実施の前提条件

表-1, 表-2, および図-2 に本実験の前提条件を示す。

表-1 実験機器

	機器	員数
①	油圧ショベル	2
②	クローラキャリア (5km/h 以下で移動)	1
③	一般車輛 (現場監督用車輛として)	1
④	ノート PC (アクセスポイント/車載用など)	1 6
⑤	IEEE802. 11b 無線 LAN カード/アンテナ (市販品, 無指向性, 1ch 固定, 2Mbps or 5. 5Mbps で使用)	1 4

表-2 伝送データ種類

	データ種類	条件等
①	重機 GPS データ/測定時刻データ	1 秒毎
②	重機搭載のカメラ画像	JPEG, CIF
③	VoIP (音声ストリーミング)	64kbps
	MPEG (映像ストリーミング)	192kbps, 15Frame/sec

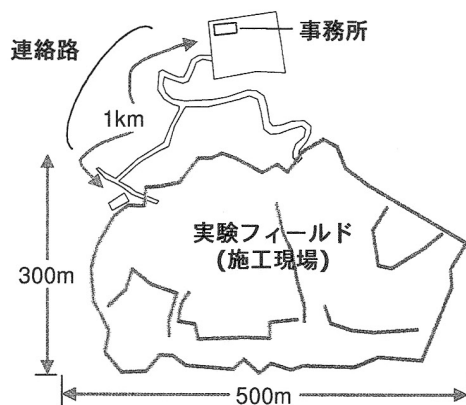


図-2 実証実験現場概念図

本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、このため無線通信が直接届かないエリアが存在する。図-2の実験フィールド内の実線は、無線通信を遮る地形の高低差を示している。

(3) 実証実験結果

(a) 実証実験 1

実験 1 では、通信する端末間の距離、および車載端末を搭載した油圧ショベルの姿勢や方向が通信に与える影響を検証した。

測定用 PC と油圧ショベルとの距離（50m 刻みに移動）、測定点から見た油圧ショベルの方向（前後左右）および姿勢（フロント上下）を変え、それぞれの状態での信号強度やビットレート等を測定した。最大通信速度を 2Mbps で固定し測定した結果を表-3 に示す。

この結果より油圧ショベルの測定点からの距離が最も近い測定点（50m）および最も遠い測定点（250m）の地点で、方向や姿勢の変化に対し信号強度は大きく変わるものの、通信速度の変化はわずかで、重機の方や姿勢は通信に殆ど影響を与えないことを確認した。

表-3 実験 1 測定結果

距離	姿勢	方向	Signal (dBm)	Packet Loss	Bitrate (Mbps)*
50m	フロント上	前	-61	0	1.53
		右	-67	0	1.52
	フロント下	前	-60	0	1.52
		右	-67	0	1.52
250m	フロント上	前	-75	0	1.51
		右	-72	0	1.51
	フロント下	前	-77	0	1.52
		右	-78	0	1.51

*2Mbps 固定、パケットサイズ 1.5kbyte、TCP で測定

(b) 実証実験 2

実験 2 では現場事務所から実験フィールドまでのネットワーク構築の可否およびその性能を検証した。

事務所～実験フィールドまでの連絡路に、5 台のアクセスポイントを隣接間で相互に見通せることを条件に、設置可能なスペースに適宜配置する。本実験でのアクセスポイントはノート 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されている（図-3 参照）

通信速度を 5.5Mbps に固定、データ伝送確認およびビットレートを測定した結果を図-4 に示す。本実験により、ホップ数が増えるごとに通信速度が低下することを確認した。この原因としては以下が挙げられる。

- ① 通信帯域をシェアする端末数の増加
- ② CSMA/CA の仕様など無線 LAN 特有の課題
- ③ パケット中継処理による遅延

上記複数の要因を考慮すると、ビットレートは概ねホップ数 N に反比例し低下することがわかっている¹⁾。本実験でも、ビットレート = $3.35/N$ (3.35 Mbps) は近接アクセスポイント間通信（ホップ数 1）のときのビットレートという理論値と、ほぼ同等のビットレートであることを確認した。通信速度の低下は、監視映像など比較的高画質が要求される動画の伝送などでは課題となる。この場合、より広帯域の無線通信 (IEEE 802.11g) などの利用が必要となる。

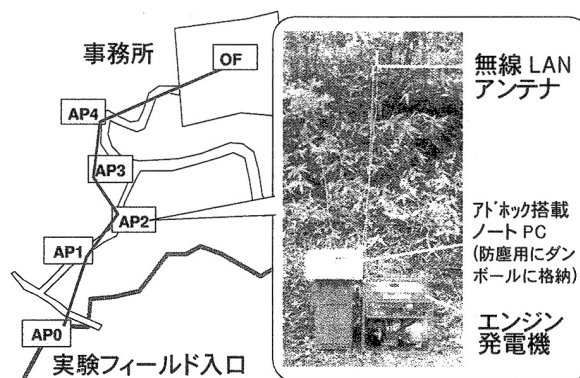
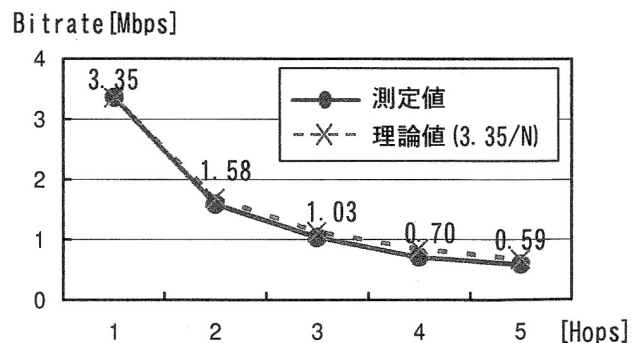


図-3 アクセスポイント設置状況



(5.5Mbps 固定、パケットサイズ 1.5kbyte、TCP で測定)

図-4 実験 2 測定結果

(c) 実証実験 3

本実験では実際の施工現場での利用を想定し、事務所と実験フィールド内で作業する重機とのデータの送受信を検証した。実際の現場での利用を想定し、下記2点を盛り込み、実用性の検証を行った(図-5参照)。

- ① 現場と重機間での連絡・作業指示用途として、TV 電話(64kbpsVoIP+192kbps MPEG)通信を実施
- ② アクセスポイントに異常があった場合でも通信が続けられるよう冗長性を確保

実験の結果、事務所から実験フィールド内の油圧ショベルまで7ホップのアドホックネットワークによる通信を実現した。但し、表-4の測定結果に示したとおり、12.4[ms]の伝送の遅延とパケットロス(64.9%)があり、アプリケーションの要求条件によっては、信頼性向上など更なる改良が必要となる。

VoIP 通話については、主観評価では実際の現場で使用されているトランシーバーと同等以上の実用的な音質での会話が確認できた。一方 TV 電話(MPEG 映像)については、ホップ数増加に伴うビットレート低下により、映像がコマ落ちするなどの現象が発生した。

また実験フィールド内を移動するダンプトラックなどの影響による自動的な通信ルートの切り替えも確認できた。データ経路は即時に切り替わるが、実際の通信の確立までには若干の遅延が確認された。特に本実験では VoIP では約 4 秒間通信が途絶えるなど、通信経路の変更がアプリケーションに与える影響は顕著であることがわかった。切り替え速度の向上などパラメータの調整のほか、アプリケーションとしての工夫も検討する必要がある。

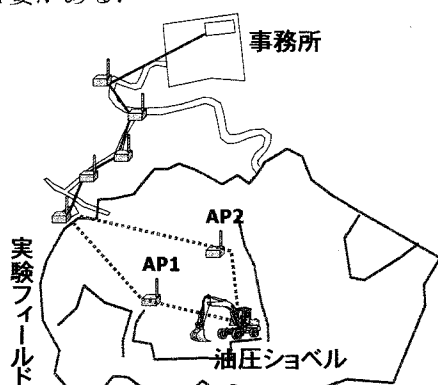


図-5 実証実験3構成図

表-4 実証実験3測定結果

伝送遅延時間[ms]		12.4
bitrate[Mbps]*	1st	0.57
	2nd	0.69
	3rd	0.78
パケットロス[%]		64.9
AP 切替時間[sec]**		4

* 5.5Mbps 固定、パケットサイズ 1.5kbyte、TCP で測定

** VoIP ストリーミング切断時間を実測

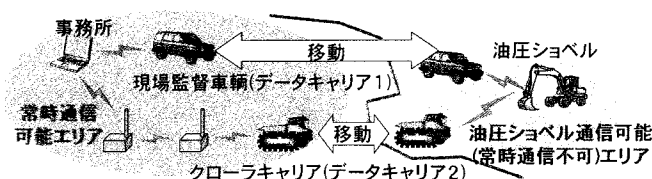


図-6 実証実験4概念図

(d) 実証実験 4

実際の現場においては、実験3のように必ずしも常に通信可能な範囲に重機や作業者が存在し、ネットワークが形成できるとは限らない。

本実験では常時通信ができないエリアで作業する重機との通信の実現を目指し、データを一時的に蓄積した移動体端末(「データキャリア」と呼ぶ)が、対象となる端末と通信可能な位置まで近づいてからデータを伝送することで通信を媒介する実験を実施した(図-6参照)。

実際の現場では、現場監視用の車両やダンプトラックなど複数の任意に移動する車両がデータキャリアとなることを想定している。従って、本実験では複数台のデータキャリアの到着時刻に因らず、すべてのデータが正常に送受できることも検証事項の一つとなる。

実験の結果、2台のデータキャリアが任意に走行しデータの蓄積・転送を繰り返したが、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者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。

5. 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情報化施工への適用についての検討と、その実用性を検証するための実証実験について報告した。

技術的な観点から、アドホックネットワークの施工現場への適用が有効であることがわかった。一方で「ホップ数の増加に伴う通信速度の低下」や「通信ルート変更時間のアプリケーションへの影響」などのアドホックネットワーク特有の課題も明確化した。今後はパラメータの調整・最適化等が必要と考える。

また運用面ではアクセスポイントへの電源供給の方法が大きな課題となる。

運用・サポートのビジネスモデルも含めて、今後検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日経 NET|WORK 編: IEEE802.11 無線 LAN, 日経 BP 社, 2005 年1月