

# 建設機械の知能化, ネットワーク化と情報化施工

## —無線ネットワーク, シミュレーションを駆使した施工の統合管理システム—

中野 栄二・久武 経夫

土木施工は、計画、設計の段階で確定出来ない不確かな要素を包含していること、施工対象の位置等が常に変化すること、施工機械の操縦方法（オペレータ技量）により生産性に大きな差異が生じること等の理由から、現場データに基づき定量的な管理を行う情報化施工や自動化にこれまでは馴染まない領域とされてきた。

オペレータ技量の問題に対処するために、筆者らは作業装置を模した動きと作業負荷に応じて操作力が変化する操縦桿（モノレバー）、自動掘削システム、作業装置の操作部（マスタ）と作業部（スレーブ）の稼働シミュレーション等の開発を行った。これらの機能を具備した知能型建設機械は、モジュール化したマスタとスレーブ間をTCP/IPプロトコルに従って通信する構造とした。

TCP/IPプロトコルの採用によって、建設機械がネットワークの端末と位置づけられることとなり、機械の稼働に係わる情報の共有を通じて、1台の機械の最適運転から機械群の最適化が容易に行える環境が整った。

本報文では、現場から離れた操作室から建設機械を操作する無人化施工における情報ネットワークの構築、シミュレーション等に基づく最適操縦の実現等、情報の高度利用並びに、施工機械をネットワークの端末に位置づけた究極の情報化施工を提案する。

キーワード：情報化施工, 土工機械, 知能型建設機械, モノレバー, 無線LAN, メッシュ・ネットワーク, シミュレーション, 統合管理システム

### 1. はじめに

機械土工の分野で、電子化された情報を基に施工を最適化する情報化施工を実現するためには、施工機械の操縦や作業機の動きの定量的な把握と解析が前提である。この要件に合致した土工機械として知能型建設機械がある。情報化機械土工においては、知能型建設機械に施工現場全体を統括して最適な施工を行うため機械群最適管理、出来高・出来形管理、施工品質管システムが付加される。表一1に、知能型建設機械と情報

化機械土工の機能構成を示す。

センサやコンピュータで知能化された建設機械群を有線・無線ネットワークで連携することによって、情報の相互利用やフリート（機械群）シミュレーション

表一2 油圧ショベルの知能化の手順例

操縦装置（マスタ）		情報変換部 情報伝送部	機 能	開発水準
遠隔操作室 （外部から 遠隔操縦）	運 転 席 （機械に搭乗）			
	操縦桿	機械的接合	作業装置の全 自動化例	汎用建設機械 ベース
	操縦桿の集約	機械的接合	片手で直感的 な操縦	初期のモノレ バー
	知能型操縦桿	電子制御/モ ノレバー	+ 負荷帰還, 半自動施工	実験段階の モノレバー
遠隔操縦		+ 無線伝送	遠隔操縦化	無人化施工
知能型操縦桿		+ 無線LAN	+ ネットワー ク化	Conet 2003で デモ展示
+ 情報変換部, シミュレータ		+ 無線LAN	任意の機械を 操縦可	研究室段階の モノレバー
+ 機械群統合 管理機能		+ 無線LAN	機械群の最適 化管理	高度情報化 施工
自動化モード 設定装置		自律化	全自動施工	情報化との機 械群制御融合

注：機械的な接合方式：操縦桿と油圧制御弁間の信号伝送路のリンク構造を避けるための電気化の例はある

知能型操縦桿：走行と作業装置操作を1本の操縦桿（モノレバー）に集約、ボタンスイッチ等による半自動等の機能選択等を可能とした操縦桿

情報変換部：機械的接合→頭脳モジュール（自律）

表一1 知能型建設機械と情報化機械土工の機能構成

機能モジュール	機 能 分 担
操 作 部 （マスタ）	非熟練者が片手で容易に機械の操縦・半自動化操作を行える高機能操縦桿（モノレバー装置）
作 業 部 （スレーブ）	作業装置、走行装置、作業装置位置・作業反力・機械姿勢計測センサ
頭 脳 部 （ブレイン）	マスタ、スレーブ間情報の高速/リアルタイム処理 機械の動態解析を通じた出来高・出来形管理、施工品質管理
シミュレータ	リアルタイム3D表示シミュレータ（マスタ&スレーブ）、最適化と表示
ネットワーク	TCP/IPプロトコルによる有線・無線ネットワーク
機 械 群 最 適 管 理	機械群（フリート）管理シミュレーション、施工手順最適化、機械群最適連係

注：表中の太線部が知能型建設機械の基本機能である

等、現場全体を一体化し、客観化・総合化された情報を通じて、最適施工手順、個々の機械の最適操作方法や半自動運転等が可能となる。

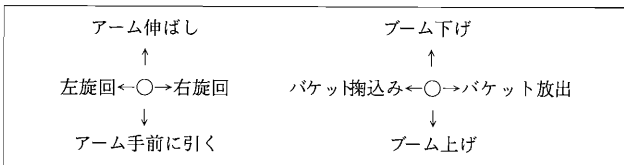
表—2に、油圧ショベルを例とした建設機械操縦の知能化の手順を示す。

## 2. 建設機械の知能化

### (1) 「モノレバー」による操縦の容易化と半自動化

#### (a) 「モノレバー」の仕組みと機能

汎用油圧ショベルの作業装置は、図—1に示したように、2本の操作レバーでブーム、アーム、バケット用の3本の油圧シリンダを伸縮することによって作業装置の位置決めを行っている。シリンダの伸縮によっ



図—1 油圧ショベルの操縦桿

て、径が変化する円弧を組合わせてバケットを直線に動かす操作等は至難である。

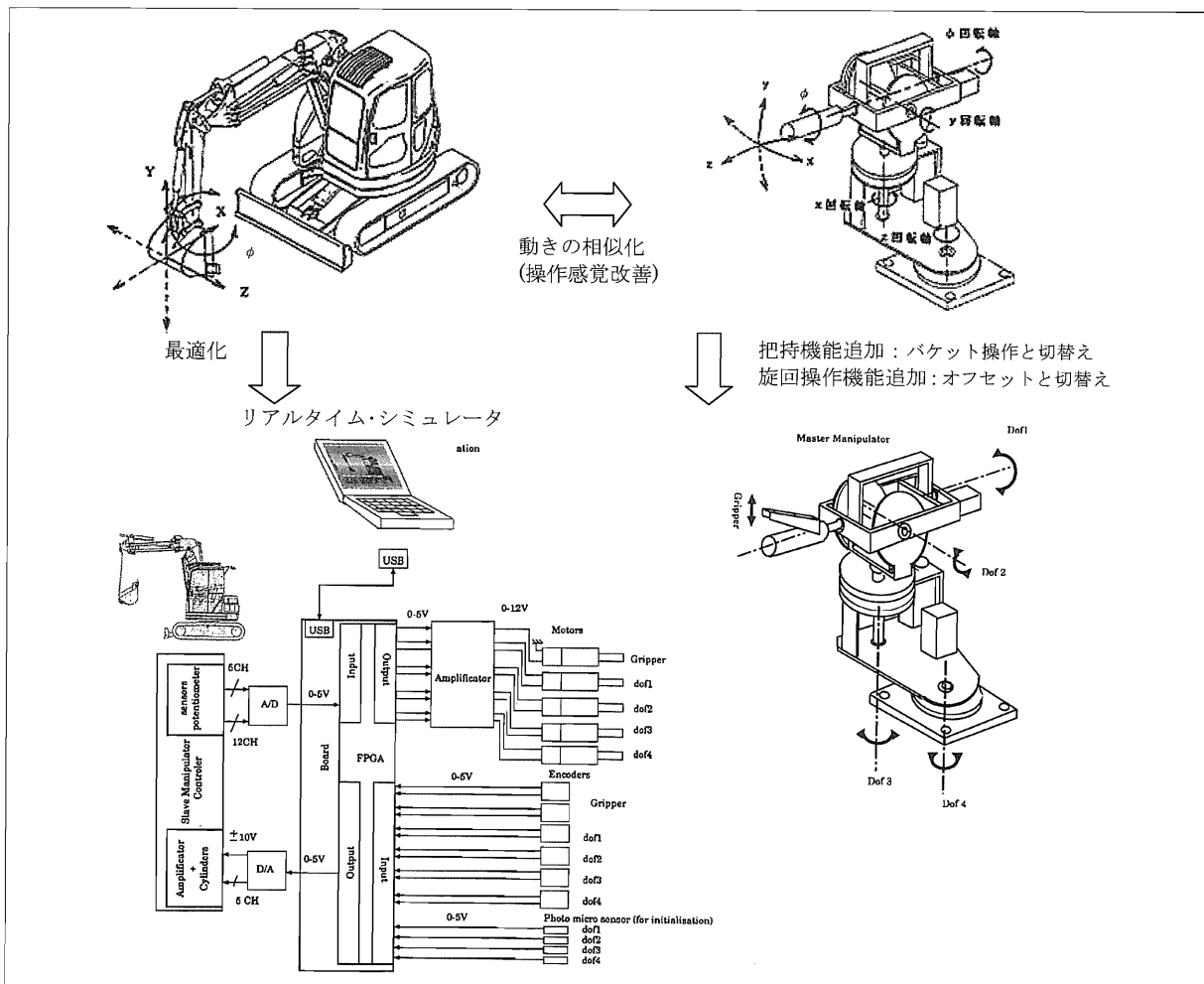
図—2の「モノレバー（高機能操縦桿）」は、バケットの上下、前後、左右の動きを模した動きをする操作装置で、図中のφ軸を廻すとその方向と角度に応じてバケットが掴込み、放出をする。

開発した「モノレバ型操縦装置」の操縦桿（図—2中のφ）は、バケットに加わる負荷（掴込み量）に応じた操作反力が生じる。掘削位置、掘削経路、掘削領域や繰返し作業の設定などの作業に併わせて作業装置を自動的に動かすための設定ボタンも用意されている。半自動操作によって、法面、平面、立孔などを正確、効率的に施工できる。

#### (b) 作業装置先端部の位置及び作業反力認識の手法

実験用機械には、作業装置先端部の位置や機械の姿勢を認識するために、表—3のセンサを装備、図—3の制御系が構築されている。

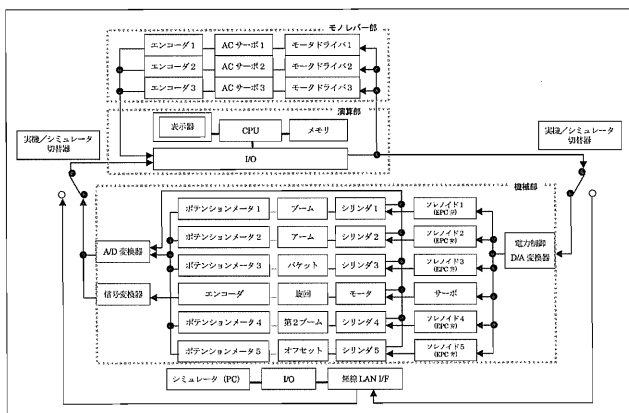
表—3センサの出力に基づいた作業装置（バケット）と作業対象の位置を図—4に示した。図中の斜線で示



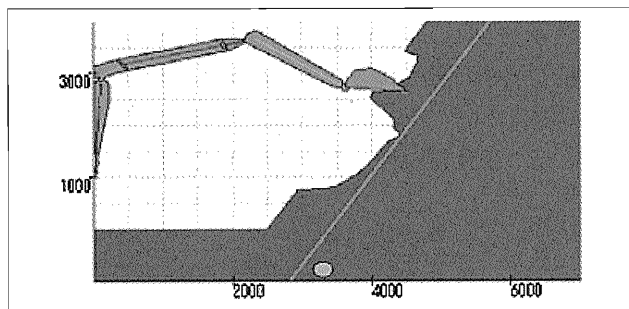
図—2 モノレバーの構造と機能展開

表—3 搭載センサ仕様例

計測対象	装着部位	センサ種別	計測原理	定格	分解能	製造者
作業装置 先端部 位置計測	バケットシリンダ	ストロークセンサ	ストロークセンシングシリンダ	最大 2,500 mm	0.5 mm	コマツゼノア(株)
	アーム基部	角度センサ	回転型ポテンショメータ	0~180°	0.5%	日本電産コバル電子(株)
	オフセットブーム基部	角度センサ	ポテンショメータ	0~180°	0.5%	日本電産コバル電子(株)
	第1ブーム基部	角度センサ	ポテンショメータ	0~180°	0.5%	日本電産コバル電子(株)
	第2ブーム基部	角度センサ	ポテンショメータ	0~180°	0.5%	日本電産コバル電子(株)
旋回角度	上部旋回体下部	旋回角度	磁歪による超音波振動の誘起	360° (磁歪線長: 3 m)	0.01 mm	エムティーエスセンサーテクノロジー(株)
作業反力	油圧系	圧力センサ		24.5 MPa		
車体姿勢	車体中心部	傾斜センサ	磁石付きばね振子	±30°/2軸	±1%FS	(株)マコメ研究所

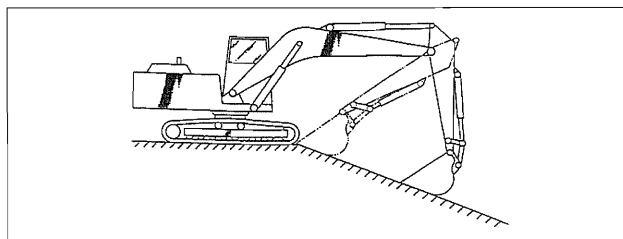


図—3 モノレール制御系統図

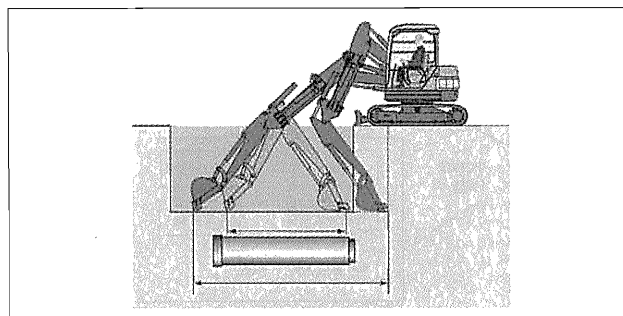


図—4 作業軌跡表示→半自動掘削

したのが整形目標と現地形の表示である。中央下部の楕円部が埋設物の位置を示し、作業装置が接近すると、回避指示を行う。掘削起点と終点指示による自動掘削



図—5 法面整形工事

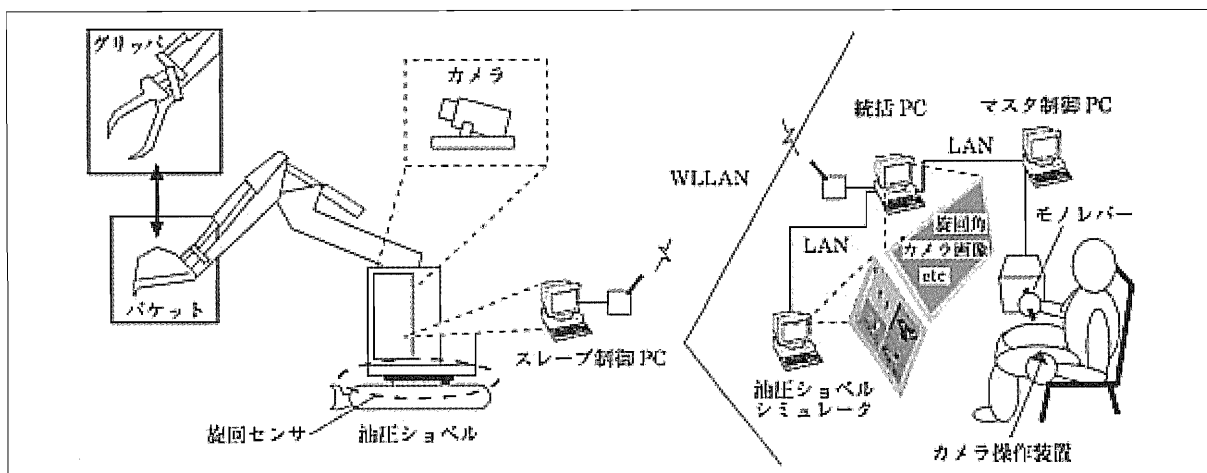


図—6 管埋設工事 (出典: コマツ PC 58 SS カタログ)

機能も有している。地形は作業装置先端位置情報により常時更新される。

図—4 に示した機能の用途として、実験を行った立孔掘削のほか、図—5 の管埋設工事、図—6 の法面整形工事等が想定される。

(c) 2.3 マスタ/スレーブ分離とネットワーク化  
図—7 に、操作部 (マスタ)、作業部 (スレーブ)



図—7 無線モノレール装置と周辺機器

をモジュール化し、モジュール間の通信を TCP/IP プロトコル (LAN) としたネットワーク対応の知能型建設機械を示す。LAN の採用によりシステムの拡張性が高まると同時に、標準化され潤沢に供給されている通信系、データ処理系の情報資産の活用が可能となる。

また、ブレン部への指示やブレンの知能化によって、機械の最適な操縦と運用が可能となる。前節のマスタとスレーブの関係は固定であるが、図-7 以降の知能化された機械の場合には、オペレータによるマスタとスレーブの組合せ設定によって、積み込み機械とダンプトラック、遠隔操縦の場合のカメラ車の移動等、ネットワーク中の任意の機械を選択操縦できる。図-8 に操作対象機械切替え例を示す。

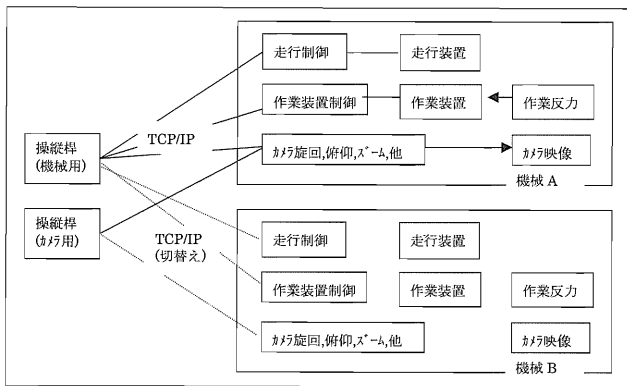
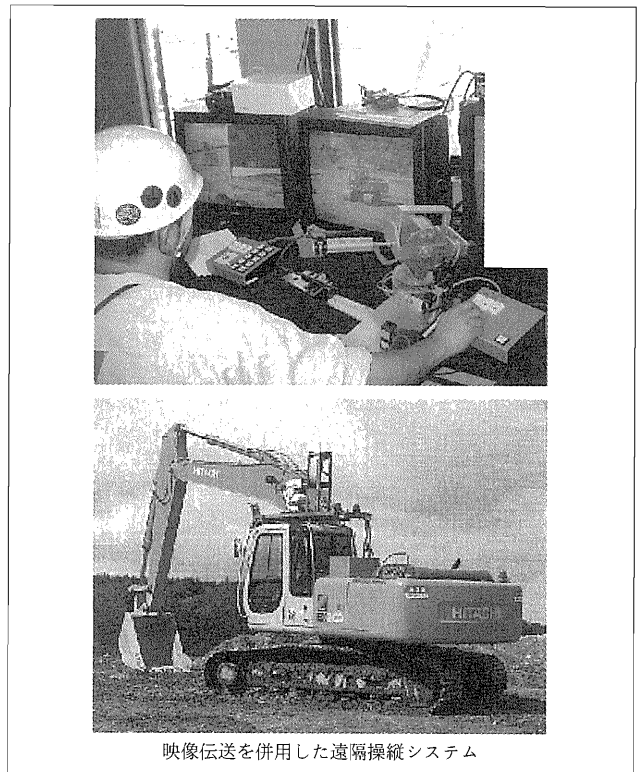


図-8 2台の建設機械の切替え操縦



映像伝送を併用した遠隔操縦システム

写真-1 遠隔操縦

ワーク内の任意の機器と機械の操縦を行える。従来は機械毎に固有の操縦桿を手繰っていたが、機能スイッチの切替えで同一操縦桿で操作可能となる。片手運転が可能で、双腕型機械の制御も容易である。

(d) ブレンモジュールの追加 (ネットワークのインテリジェント化)

モノレバーシステムは、操作部、制御部、作業部の各々にセンサやコンピュータを持たせた分散系システム (モジュール) となっている。この制御部に、角度や力の情報を共通の座標系に変換するブレンを付加し、無線ネットワークを通じて連携した建設機械群の統合的な制御、管理を行う高度な情報化施工が実現する。機械や作業装置の位置情報の分析によって、現場

- 遠隔操縦装置の知能化によって、
  - ・積み込み機械をダンプトラックのオペレータが操縦する
  - ・右手で機械の遠隔操縦をしながら右手で機械搭載カメラ操作を行える (写真-1)。
  - ・操作対象機械をカメラ車に切替えてカメラ車を必要な位置に移動する
- など、作業手順に合わせて1人のオペレータがネット

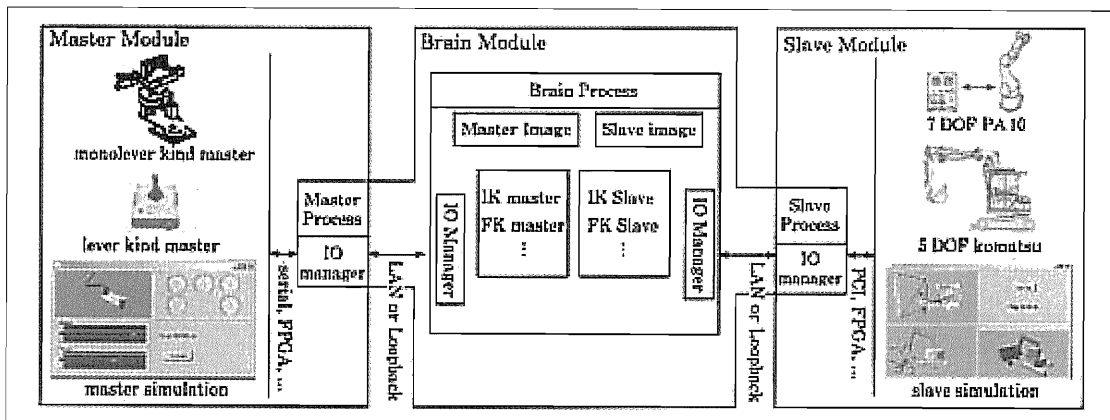


図-9 モジュール化されたシステム

全体の地形なども知ることができる。

オペレータは、操作対象機械に連動したシミュレータ画像の誘導に従って最適な操縦を行うことが可能となるばかりか、機械の動きをあらゆる角度からながめて最も運転しやすい方向から運転操作を行うことができる。図—9 に、モジュール化されたシステムを例示した。

(2) 「モノレバー型操縦装置」に想定される活用例

モノレバー操縦装置は、

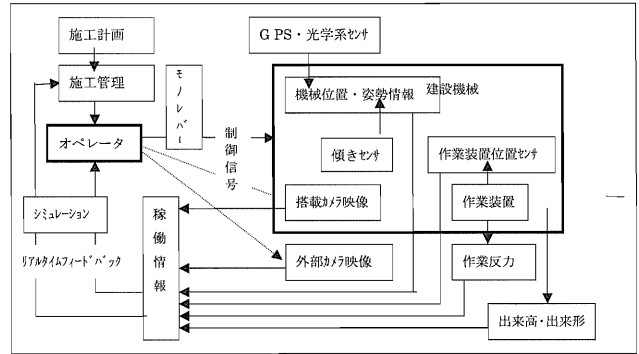
- ・ 操縦桿と作業装置の動きの相似化による操作感覚の改善を通じた運転技量の補完
- ・ 操縦桿の多機能化による作業装置の片手操作の実現
- ・ 遠隔操縦
- ・ 軌跡制御（半自動）
- ・ 操作量把握
- ・ 機械と同一の動きや作業目標を表示するシミュレーション（擬似）画像

等の機能を包含している。表—4 に、想定される活用事例と要求機能例を示した。

3. ネットワーク化による施工の統合管理

(1) 無線 LAN を用いた無人化施工による施工現場の統合管理

建設機械の操縦を行う場合に必要な制御情報、映像情報、位置等の情報を統合管理を行うことができれば、機械施工と情報化施工の融合が可能となる。図—10 に、機械の遠隔操縦を行う場合に必要な情報を統合した情報化施工のイメージを示す。



図—10 建設機械を中心とした情報化施工への展開

表—4 「モノレバー型操縦装置」に想定される活用事例と要求機能

対象作業	評価等	期待される導入成果、機能	付加される機能	求められる要素技術						開発課題、実績、ほか
				技量補完	片手操作	遠隔操縦	軌跡制御	擬似画像	操作反力	
作業全般（操縦の容易化）		未熟練者が熟練者並みの作業	初心者が簡単に操縦できる操縦桿	○					○	挿入コスト 市場の理解
作業装置の半自動化		効率化	遠隔操縦介入 操作反力で制御				○		△	微調整
法面整形、直線仕上げ		効率化、高精度化	未熟練操縦者の支援				○			図—5、図—6
立孔掘削、テレスコピック		容易、効率化、掘削土削減	同一鉛直軸を反復昇降				○		△	モノレバー実験例有
遠隔操縦（マスタ/スレーブの分離）		片手でカメラ操作、作業量の確認	作業機械とカメラの同時操作		△	○		△	○	写真—1、図—7
非搭乗型水中バックホウ		作業装置と相似操作、作業反力情報	水中トモグラフィ 機器調節要		○	○		○	○	ワンレバーでの実験例有り
作業装置の全自動化		省人化	地形と作業対象の認識				○			機械の移動
バックホウ浚渫船、揚土船、ほか		操作の容易化、効率化	半・全自動化システム		○		○		○	全自動化システム導入例有り
ハンドリングマシン	搭乗運転又は遠隔操縦	移動領域管理	工場内の重量物ハンドリング軌陸車輛	○					○	
		架線との干渉防止	軌陸車輛	○			○			
		正確な設置	ブロック積み、土嚢設置、構造物の設置、スクラップ処理等用特殊把持装置		○					○
		型枠設置（堰堤等）		△			○			
破碎装置、家屋解体等		部材損傷防止	リサイクル化のための対象物による把持力制御				○		○	自由度を増す（図—2）
コンクリート・モルタル吹付け、塗装、他		自由な動き、高精度化	対象壁に垂直に吹付け、反復動作の自動化		○		○		○	
多自由度作業機械（ロッククライミングマシン等）		1人運転、操作の容易化	複数の操縦桿の協調制御		○		○			図—8、図—9
双腕型機械			複数操縦桿の協調制御		○					
道路開鑿用バックホウ（ライフラインの埋設）		ライフライン、損傷防止	バケット先端負荷検知					△	○	触覚感度の向上

注：○：必須な機能，△：必要に応じて付加する機能

表一五 SS デジタル無線の多目的利用による無人化施工例

無線仕様	伝送情報	研究主体	実施年	文献
多重双方向無線 (対向2組)	ブレーカ装備の油圧ショベルと搭載2カメラの制御, 2映像伝送, GPS システム,	国土交通省雲仙/(株)大本組	1998	4
多重双方向無線 (対向1組)	油圧ショベルと搭載1カメラの制御, 1映像伝送	国土交通省関東地整	2001	3
無線 LAN	複数周波数帯を用いた無線 LAN 上で複数機械と搭載カメラ制御, 映像伝送	五洋建設(株) (技術審査), ほか	2003	2
有線 LAN (無線 LAN 試行)	操縦系と無人化施工支援情報の統合とシミュレーション等を用いたシステムの開発	東北大学	2003	1
有線・無線 LAN (サーバ機能付き)	7 台の建設機械, 2 台のカメラ車を有線と複数周波数帯無線 LAN で制御	国土交通省関東地整/矢沢川無人化施工	2004	
メッシュ型無線 LAN (サーバ機能付き)	複数の建設機械, 搭載カメラ, カメラ車等の無人化施工現場の実現 (現場に応じた柔軟なシステム構築)	千葉工業大学 (株)インロッド・ネット	2006	1

注：文献欄の数字は文末の参考資料の番号を示す

建設機械の遠隔操縦を行う場合に、操縦者と機械間で合理的に情報の受授を行う手法に関しては、表一五の SS デジタル無線系の多目的利用例に示されるように、多くの研究・試行例がある。

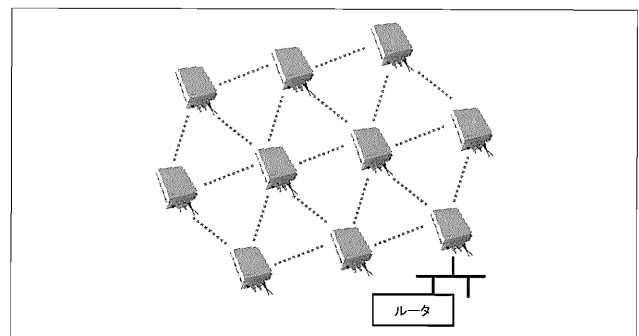
(2) メッシュ型無線 LAN を用いた施工機械

表一五の「有線・無線 LAN (サーバ機能付き)」に示した無線 LAN による施工現場の統合管理システムでは、映像系情報は無線 LAN のネットワークから除外された。情報容量の大きな映像の場合は、移動中にアンテナ切替えを行う際にネットワークとの遮断時間等が問題となったためである。

複数の高速無線 LAN アクセスポイントにより網構造 (メッシュ・ネットワーク) を形成することによって、複雑な現場地形、錯綜した機械の動きに対応できる。メッシュ・ネットワークは、ホップに伴う通信性能の低下を最小限に留めるためにマルチ無線構造を

しており、ユーザアクセス用に 1 ch, バックボーン用の上り方向に 1 ch, 下り方向に 1 ch 使用できる。複数周波数の電波を重層的に用いることによって、切れ目の無い無線伝送空間を形成できる。

機器は、ベース (電源)、ネットワークサーバ、無線、アンテナの 4 種類のモジュールに分割されている。必要に応じて無線モジュール、アンテナモジュールを



図一〇 メッシュ・ネットワーク

表一六 無線 LAN 仕様

項目	仕様		備考
	従来仕様	提案仕様	
<b>(1) 無線部</b>			
無線機規格	IEEE 802.11 b	IEEE 802.11 b/g/j	
出来高・出来形管理, 施工品質管理変調方式	スペクトラム直接拡散方式	スペクトラム直接拡散, 直交周波数分割多重方式	
空中線電力	10 mW/MHz 以下	10 mW/MHz 以下	802.11 b/g
周波数帯	2.4~2.497 GHz (13 ch)	2.4~2.497 GHz (13 ch) 4.90~5.10 GHz (7 ch)	
画像同時使用チャンネル数 (1 筐体)	1 ch	3 ch (2.4~2.497 GHz) 3 ch (4.90~5.10 GHz)	802.11 b/g 802.11 j
伝送速度 Mbps	1, 2, 5.5, 11	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	802.11 j/g
有線 LAN 部 I/F	10/100 Base-T	10 Base-T/100 Base-TX	
使用環境	-10°C ~ +50°C	-30°C ~ +55°C	
保存環境		-50°C ~ +85°C	
<b>(2) 電源部</b>			
電源	AC 100 V ± 10%	AC 100 V ± 10%	
<b>ネットワークサーバ部</b>			
セキュリティ	有り	有り	
通信管理	有り	通信データ管理システム開発要	情報化施工への展開



増設する構造となっている。アンテナモジュールには最大3個のアンテナが装着可能である。

図-10に、メッシュ・ネットワークの概念、表-6に従来型と比較した仕様例、図-11に、表-5の「有線・無線LAN（サーバ機能付き）」例の現場にメッシュ・ネットワーク型無線システムを導入した場合の無線系統図を例示した。

#### 4. おわりに

TCP/IPプロトコルの採用によって、建設機械がネットワークの端末と位置づけられることとなり、機械の稼働に係わる情報の共有を通じて、1台の機械の最適運転から機械群の最適化が容易に行える環境が整った。

1994年に始まった、長崎県雲仙・普賢岳の防災工事以来、遠隔操縦型建設機械を用いた無人化施工が全国で150件採用された。無人化施工の実現により、従来は機械の運転室に孤立して搭乗していたオペレータが、遠隔操作室で同僚と肩を並べ、相談をしながら現場の機械を操作している。本報文ではこの情報の共有を更に高度化するための仕組みを提案した。読者の参

考になれば筆者らの望外の喜びである。

JCMA

#### 《参考文献》

- 1) 中野栄二・久武経夫：油圧ショベルのイーゾオペレーション化のための操作装置，建設の施工企画，pp.16-22，2005.02
- 2) 杉本英樹：無線LANを用いた無人化土工システムの開発，建設物価 臨時増刊，pp.29-34，2003.01
- 3) 小笠原 保・持丸修一：統合無線システム，建設の機械化，pp.55-59，2002.03
- 4) 藤沢秀行：SS デジタル無線による無人重機制御，公開講座 建設の最新無線技術，建設無線協会，1999.11

#### 【筆者紹介】



中野 栄二（なかの えいじ）  
千葉工業大学  
未来ロボテックス学科  
学科長  
工博



久武 経夫（ひさたけ つねお）  
株式会社インロード・ネット  
代表取締役

## 建設工事に伴う 騒音振動対策ハンドブック

「特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準」（環境庁告示）が平成8年度に改正され、平成11年6月からは環境影響評価法が施工されている。環境騒音については、その評価手法に等価騒音レベルが採用されることになった等、騒音振動に関する法制度・基準が大幅に変更されている。さらに、建設機械の低騒音化・低振動化技術の進展も著しく、建設工事に伴う騒音振動等に関する周辺環境が大きく変わってきている。建設工事における環境の保全と、円滑な工事の施工が図られることを念頭に各界の専門家委員の方々により編纂し出版した。本書は環境問題に携わる建設技術者にとっては必携の書です。

#### ■掲載内容：

- 総論 （建設工事と公害，現行法令，調査・予測と対策の基本，現地調査）
- 各論 （土木，コンクリート工，シールド・推進工，運搬工，塗装工，地盤処理工，岩石掘削工，鋼構造物工，仮設工，基礎工，構造物とりこわし工，定置機械（空気圧縮機，動発電機），土留工，トンネル工）
- 付録 低騒音型・低振動型建設機械の指定に関する規程，建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法，建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法の解説，環境騒音の表示・測定方法（JIS Z 8731），振動レベル測定方法（JIS Z 8735）

#### ■体 ■定

裁：B5判，340頁，表紙上製  
価：会 員 5,880円（本体 5,600円） 送料 600円  
非会員 6,300円（本体 6,000円） 送料 600円  
・「会員」本協会の本部，支部全員及び官公庁，学校等公的機関

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館） Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289