

61. 無人化施工向 自動化ラジコンブルドーザの開発

コマツ：*山本 茂・松下 重則
中田 和志

1. はじめに

建設の機械化の究極の姿は、
知能化された機械による無人施
工である。これに対して現在実
用化されている施工方法は、ラ
ジオコントロール等による遠隔
運転である。しかし、建設機械
を遠方から目視して運転する場
合、搭乗運転時に比べて作業状
況が把握しにくいので適切な運
転操作をすることが難しい。ま
た、運転操作に神経を使う必要



写真1 D375AR-2自動化ラジコン車

があるため、オペレータの疲労が大きく遠隔運転は搭乗運
転と比較して作業効率の著しい低下を招くのが普通であっ
た。

これに対し、ここに紹介するD375AR自動化ラジ
コンブルドーザは、運転操作の自動化システムを搭載した世
界初のブルドーザである。集中力と熟練を要する運転操作を自動化システムが担当するので、オペレー
タの負担が著しく軽減される。搭乗運転時はもちろん遠隔運転時にも、従来車における熟練オペレータ
搭乗運転時と同程度の作業効率を長時間維持することが可能となった。

表1 D375AR-2主要諸元

運転整備重量	64.5 t o n
定格出力	532 P S
ブレード容量 (SAE)	22.6 m ³
最大けん引力 (F2)	51.5 t o n
通信周波数	429MHz帯

2. 開発のねらい

現状のブルドーザの遠隔運転は、30m程度の距離から地勢や車両の外観的な動きのみを目で視察し
て行われている。さらに遠方から操縦する場合には、車載カメラによる映像を見ながらの運転操作にな
る。このため作業状態が把握しにくく、見えない地形変化や土質に対応した運転操作をすることができ
なかつた。また、ブルドーザの運転は、視覚による情報だけでなくエンジン音変化などによる聴覚や、
車体傾斜、振動、加速度などの感覚的な情報を総合して行われる。これらの情報が不十分な遠隔運転の
場合には、施工地形、土質の微妙な変化に応じた車速や作業機姿勢のコントロールが難しかった。

この点を補うため、最近では立体画像や作業音などによる仮想現実感（バーチャルリアリティー）を
オペレータに与えるシステムも実用化されつつあるが、運転に必要な情報を十分に補完しているとは言
えず、また運転操作に熟練と集中力の継続が必要であるため、オペレータの疲労度が大きく搭乗運転時

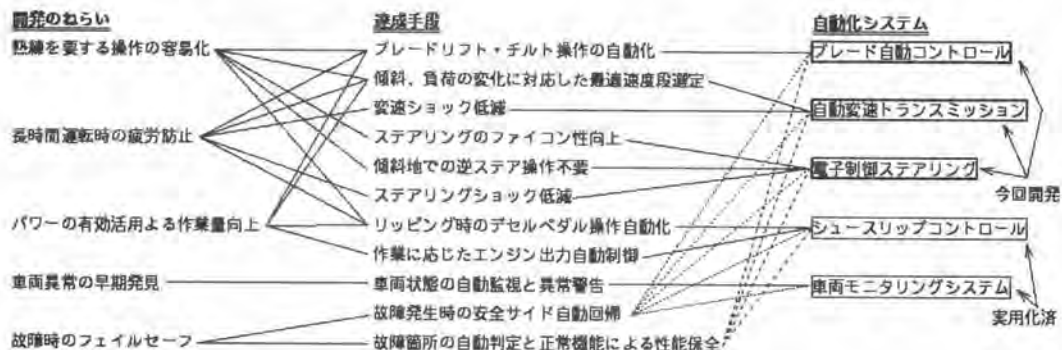


図1 D375AR開発コンセプト

のような作業効率が得られていないのが現状である。

また、ブルドーザ特有の問題として、急傾斜地の降坂中に旋回する場合、曲がろうとする逆方向にステアリング操作しなければ、車重の影響のために反対に旋回してしまう現象がある。傾斜の度合いが良く分からない遠隔運転の場合には、作業効率を低下させるだけでなく危険でもある。通常のステアリング操作もオン・オフ的なぎくしゃくした旋回しかできなかった。

これらの問題点を解決するため、本開発機では図1に示すように、**①**運転操作の容易化、**②**オペレータの疲労防止、**③**作業量の向上を開発コンセプトに掲げた。搭乗、遠隔運転の別、オペレータ技量の差によらず、熟練オペレータ搭乗運転並の作業効率を達成することがそのねらいである。このコンセプトを具現化するため、次のような目標をおいて運転操作の自動化システムを開発した。

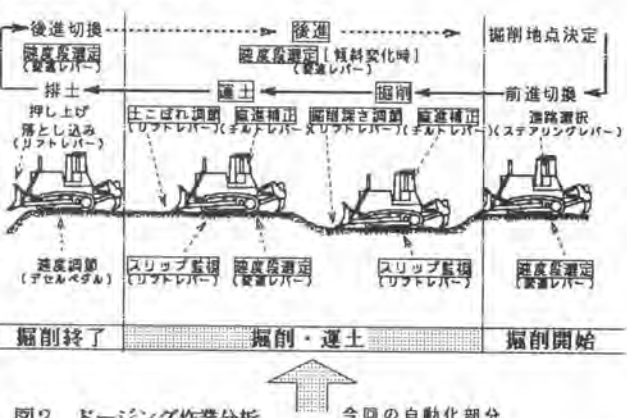


図2 ドーzing作業分析 今の自動化部分

- ブルドーザのドーzing作業のうち、図2に示す掘削・運土の部分の運転操作を自動化する。具体的には、負荷、地形の変化に応じてブレードの上下方向の高さ（リフト）、左右方向の傾き（チルト）およびトランスミッションの速度段を自動コントロールする。性能的には熟練オペレータによる現行機の搭乗運転に対し、搭乗、遠隔運転の双方で同等以上の作業量を発揮するものとする。
- ステアリングの操作性を向上する。傾斜角など、走行状況によってステアリング油圧特性を変え、レバーの操作方向に滑らかに旋回可能なものとする。これにより、図2に示す掘削・運土以外の部分でも操作の容易化による作業効率の向上をねらう。

3. 開発技術の概要と評価・考察

誰でも簡単に作業効率の良い遠隔運転ができるという開発のねらいを実現するため、今回、つぎのような技術を開発した。

(3-1) ブレード自動コントロールシステム

ブレード自動コントロールは掘削・運土作業時のレバー操作を自動化したもので、図3のような特長

①先進のブレード自動コントロール

- ・集中力と熟練を要するレバー操作が不要
- ・オペレータの疲労を抑え、何時間でも高い作業効率を維持
- ・作業量はベテランオペとほぼ同等

自動制御 ブレードリフト…負荷コントロール
ブレードチルト…前進コントロール

操作方法 作業方向に走り、掘削開始地点で作業機レバーのボタンを押す。マニュアル介入操作優先

レバー操作回数(熟練オペ搭乗、30m、19/26)

ブレードリフト	15	85
ブレードチルト	2	38
変速	12+6	90%減
ステアリング	5	
TOTAL	315	134

②乗用車感覚の自動変速トランスミッション

- ・電子モジュレーションによる、変速ショック、トルク切れの解消
- ・適切な速度段の自動選択によるエンジンパワーの有効活用
- ・ノブボタンによる変速モードのフィンガーコントロール

変速点、モジュレーション選択パラメータ
車速、牽引力、傾斜、エンジン開度、変速モード

変速モード 作業3モード、自走1モード

自動変速	変速時のショック(G)	
	自動変速	現行車
F1→F2	0.1	0.8
F2→F1	0.2	1.2
R3→F1	0.3	1.5

③抜群の操作性・電子制御ステアリング

- ・油圧電子制御によるファイコン性の良い、滑らかな旋回
- ・傾斜角判断による油圧制御や坂道の逆ステアリング操作不要
- ・モジュレーション自動選択によるショックレスステアリング

レバー⇄油圧特性選択パラメータ
傾斜角
モジュレーション特性選択パラメータ
負荷
傾斜角
車速
エンジン開度

④ソフトモジュレートラジコン

- ・操作指令をモジュレーション、ガク突きのないスムーズな操縦
- ・自動化システムの支援による乗車時と同レベルの作業効率
- ・車両モータとの連携による車体異常の早期発見

ラジコン仕様
特定小電力マルチ方式：法定出力10mW
電波到達距離：約100m(仕様値)
300m以上(実力値)
信号タイプ：オン・オフ形式20ch

ソフトモジュレーション
ステアリング指令、作業機上下指令

図3 自動化システムの特長

を持つ世界初の実用化システムである。ブルドーザに搭載した各種センサにより、ブレード姿勢、牽引力、車体傾斜、進行方向などを検出し、コンピュータ処理でブレードを自動的に動かすものである。

ドーピング時、オペレータはブレードに適当な土量を保ちながら掘削・運土するように、地面の傾斜、掘削跡坪形状の滑らかさ、シューズリップなどを考慮に入れてブレードリフト(上下)操作を行っている。本システムでは図4のように、負荷(牽引力)一定制御をベースに、傾斜補正、平滑補正、スリップ補正をファジイ的に融合させて、熟練オペレータに匹敵する作業性能を達成している。地形、土質の変化に対応して所定の掘削・運土量を保ちながら、かつ掘削跡を滑らかにして凹凸を残さないようにすることが本開発で最も苦労した点である。

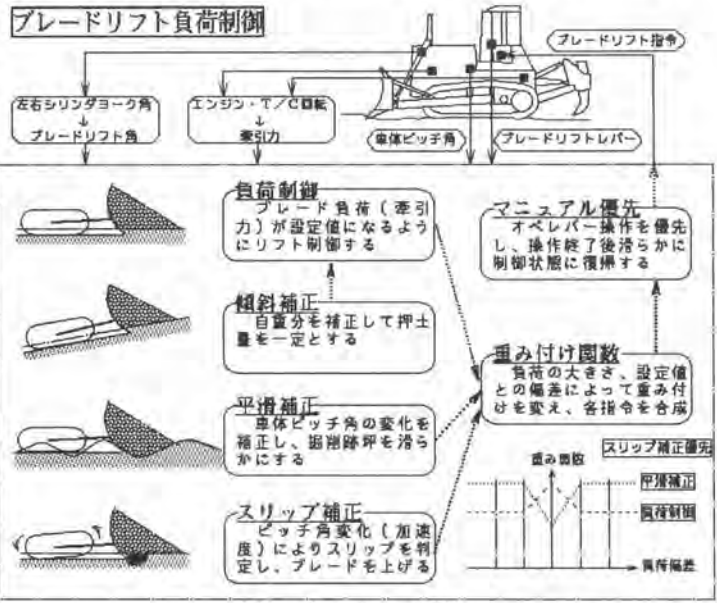


図4 ブレードリフト制御

また、ドーピング時にブレードの負荷が左右均等でなくなると車両の進行方向が曲がってしまう。通常、ブルドーザなどの装軌式車両は、左右のクローラに速度差をつけることによって旋回を行うが、重掘削での旋回では外側クローラがスリップしてしまい、ステアリングによる方向修正ができなくなる。

そこで熟練オペレータはブレードチルト（左右傾斜）角を変化させ、左右の掘削抵抗を調整することによって進行方向をコントロールする。本システムでは図5のようにこの操作を自動化し、ブレードチルトによる直進制御を実現している。

本システムによって、図3のように搭乗運転時のレバー操作回数が90%低減され、自動化の効果が発揮されている。搭乗運転だけでなく遠隔運転においてももちろん、オペレータの負担を軽減して疲労による作業効率の低下を防ぎ、熟練オペレータと同等レベルの作業量が確保されて、開発のねらいがほぼ達成されたとと言える。

（3-2）自動変速トランスミッションシステム

従来のブルドーザはスプリング式バルブを用いた変速制御機構が主流であったため、変速時に動力伝達が遮断される。このためクラッチ係合時のショックが大きく、押し土中は車両が一旦停止してしまうという欠点があった。また、オペレータによる手動変速であるため、不適切な変速タイミングによるパワーロスが生じていた。これに対し、図3のような特長を持つ自動変速システムは、トランスミッション各クラッチの油圧の上昇特性を電子制御することによって

ブレードチルト直進制御

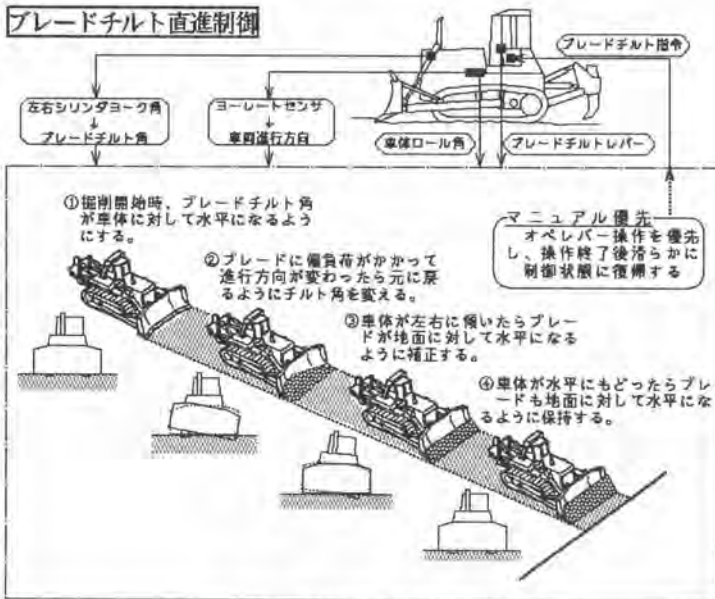


図5 ブレードチルト制御

これらの問題を解消し、作業効率の向上に寄与するものである。

図6は本開発機の自動変速システムの概念を示している。ブルドーザはエンジンの燃料供給量をほぼ一定にして作業する場合が多いので、車速に応じて有効出力が最大となる速度段が自動的に選択される。

自動変速トランスミッション

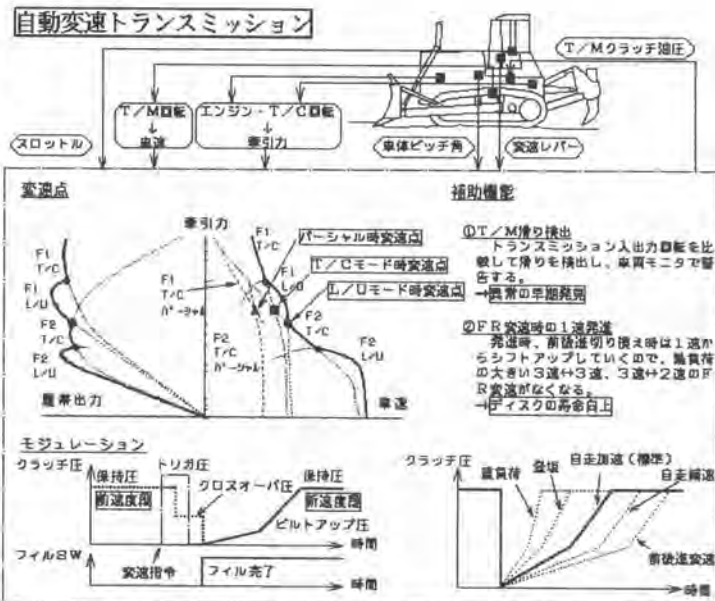


図6 トランスミッション制御

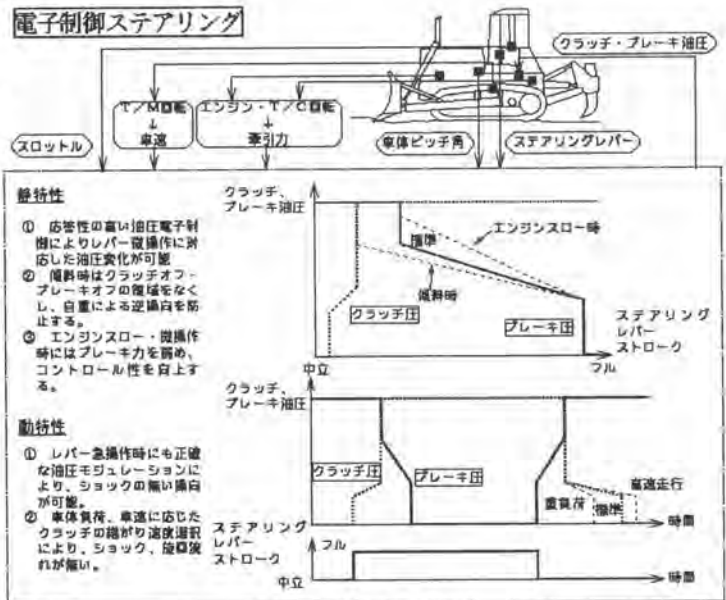
変速時には、変速前の速度段の油圧を保持しながら次の速度段のクラッチ室に油を速くフィル（充滿）させる手法によって、動力遮断が解消される。また、走行状態に応じた油圧上昇特性の選択により、変速ショックがほとんど感じられないレベルになっている。

本システムにより、最適シフトポイントで自動的に変速がおこなわれるので、搭乗運転、遠隔運転両方においてオペレータの負担が軽減され、エンジンパワーの有効活用による作業量の向上が達成された。特に、作業に登坂、降坂が含まれる場合や、長距離運土作業の場合に効果を発揮する。

(3-3) 電子制御ステアリングシステム

図3に示す電子制御ステアリングは自動変速トランスミッションと同様、応答性に優れた電気-油圧変換アクチュエータを用い、走行状態に応じてステアリング油圧上昇・下降特性を変化させて滑らかな旋回を可能とするステアリングシステムである。

図7のように、車体傾斜（ピッチ角）をセンサで判断して降坂中の旋回では油圧特性を変化させて動力遮断域を作らないので、スプリング式バルブを持つ従来のブルドーザで必要だった



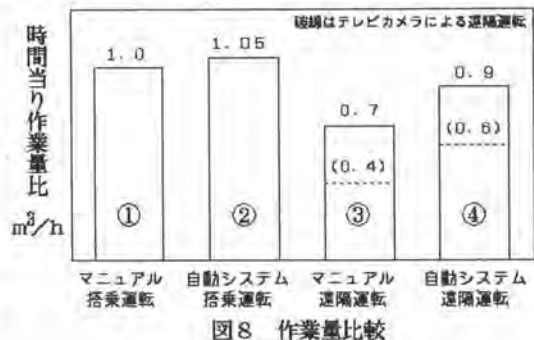
逆ステアリング操作が不要となり、レバー操作通りの確実で滑らかな旋回が可能となっている。

搭乗運転ではもちろん遠隔運転でも、熟練を要する運転操作を自動化し、操作性を上げて作業効率を向上させている。

4. 開発の効果

これまで述べてきた3つの自動化システムによって、従来車と比較して長時間運転しても疲労の少ない自動化ブルドーザが実現した。搭乗運転、遠隔運転のいずれでもブルドーザの運転操作には高い技量が必要とされるが、本システムの支援により経験の浅いオペレータでも熟練オペレータに匹敵する作業が可能となる。特にブルドーザ周囲の作業状態をオペレータが十分把握できない遠隔運転時は、本システムの使用によってはるかに簡単で効率の良い作業が実施できる。

時間当たり作業量を比較したデータを図8に示す。図中の実線は砂質土30mをまっすぐ15回



繰り返し押しスロットドージングの、熟練オペレータによるデータである。搭乗運転の場合、従来機①に対して本開発機②は5%の作業量改善がみられた。約30m離れた目視による遠隔運転の場合、従来機③に対して本開発機④は約30%増の作業量を得られた。また、従来機による搭乗運転①と比較した場合、従来機による遠隔運転③では30%減、本開発機による遠隔運転④では10%減の作業量であった。図中破線は約100m離れた場所からテレビカメラの画像を観察しながら遠隔運転した場合の参考値である。それぞれの施工現場は土質、施工方法が異なるため一概には言えないが、本開発機④は従来機③に比べて約50%増の作業量を得られると見込まれる。

また、遠隔運転による岩盤地でのドージング作業やリッピング作業の場合には、従来から実用化されているシユースリップコントロールシステムがエンジン出力を自動制御する。シユースリップの低減に著しい効果が期待され、これまで不可能だった岩盤地での遠隔運転も本開発機では可能となった。

5. 開発技術の発展的応用と今後の課題

今回、自動化が達成されたのは、図2に示すドージング作業のうち、掘削・運土の部分である。ブルドーザの自動運転、完全無人化を目指すには、さらに掘削開始、終了部分の自動化が必要である。ブルドーザの場合は、この掘削開始、終了部分の地形が作業の進行と共に変化し、そのつど地形、土質を確認する必要があるのが難しい点が多い。

一人のオペレータがマルチオペレーション（崖面垂直面レーザ・地磁気センサシステム案）

一人のオペレータがラジコン装置により、数台のブルをコントロールする。個々のブルは自動で前後進し、1レーンのドージングを設定回数繰り返す。レーンチェンジ、リッピング等はオペレータがマニュアル操作して行う。

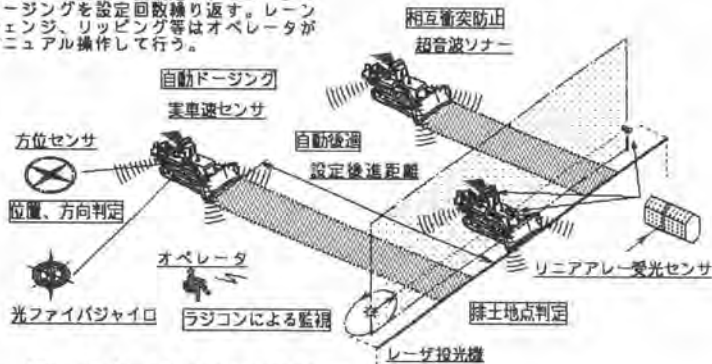


図9 完全無人化施工へのアプローチ

位置計測技術と画像認識技術を組み合わせた外界の認識手法と、施工知識のAI（人工知能）化などのさらなる技術開発が必要と考えられる。

次のステップとしては、今回開発した自動化システムと、レーザ、方位センサ等による位置計測技術とを組み合わせた、図9のようなマルチオペレーションシステムが実現可能と考えられる。一人のオペレータが複数の機械を操作するようになれば、遠隔運転における施工効率が飛躍的に向上することが期待される。

6. おわりに

ここに紹介したD375AR-2自動化ラジコンブルドーザは、雲仙普賢岳の無人化試験施工で稼働したものである。開発のねらい通りの性能を十二分に発揮し、効率の良い遠隔作業ができた。また、ブレード自動コントロールシステムは、搭乗運転仕様としてユーザに納入し、性能に関して高い評価を得た。本開発機の今後の活躍を期待している。

最後になりましたが、普賢岳無人化試験施工でお世話になった方々を始め、関係各位にこの場をかりて深くお礼を申し上げます。