

油圧ショベルのイージーオペレーション化のための 操作装置

中野 栄二・久武 経夫

法面仕上げのような、熟練オペレータが油圧ショベルを用いて両手で行う高度な作業を、非熟練者が片手で容易に行えるようにした「モノレバー操作装置」を用いたシステムにおいて、さらに操作部、制御部、作業部をモジュール化し、またこれに3次元シミュレータをモジュールの一つとして付加することで、遠隔無人化施工に適し、システム構成が柔軟性に富む「インテリジェント油圧ショベルシステム」を構築した。オフセット付きの油圧ショベルに適するモノレバー操作装置と、本体旋回角度センサを新たに開発した。本報文では、このモノレバー方式の原理、特徴、応用などについて述べる。

キーワード：油圧ショベル，モノレバー装置，遠隔操作，バイラテラル制御，3次元作業シミュレータ

1. はじめに

本報文で紹介する研究は、独立行政法人科学技術振興機構の委託を受け、東北大学大学院情報科学研究科・中野研究室とシステムテクニカル株式会社が共同で行ってきた。また、本研究の基盤となるモノレバー方式は、山崎建設の委託を受けた研究開発プロジェクトにおいて筆者らの一人、中野により提案されたものである。

建設機械の中における油圧ショベルが占める割合は、我が国の場合、一貫してじりじりと増加しつつあるが、最近、その傾向が欧米や他の国々にも見られるようになってきた。このように油圧ショベルが重用される理由は、油圧ショベルを用いた作業が汎用性と柔軟性に富むことにある。そしてこの油圧ショベルの汎用性と柔軟性は、もっぱら本体-ブーム-アーム-バケットと連なる腕構造からくる。すなわち、腕構造の先端にバケットやグリッパなどの作業体がついているため、もしこれをうまく操ることができれば、非常に広範な動作や作業が可能となることによる。

この柔軟性の源となる腕構造は、接続リンク構成であるため、複数の関節角度をうまく操作してやりさえすれば先端のバケットやグリッパの動きは自由自在である。しかしその反面、たとえばバケットで法面仕上げや直線引きを行うには、いくつかの関節を同時にうまく操作してやる必要があるため、操作に長年の熟練を要し、しかも両手を使って行う必要がある。

これに対して、片手で操作でき、熟練を要しない

「モノレバー方式」が提案されている。コンピュータによる演算と制御を用いるこの方式では、レバーを動かすその動きがほぼそのままバケットの動きとなるため、オペレータのモノレバー操作感とバケット動きが合致するとともに、精度を要する法面仕上げなども容易に可能となる。また、バケットにかかる荷重や反力がオペレータにフィードバックされるため、熟練者が長年の経験からようやく五感で感じることの出来る微妙な操作感覚が、非熟練者でも比較的容易に感じることができる。

これらが総合的に作用して、たとえ全くの初心者がいきなり操作しても、ふつうの操作はもちろん、これまで熟練者でようやく達成できた各種の精密作業を容易に行うことができるのである。

このモノレバー方式のもう一つの特徴は、その可搬性と遠隔操作性にある。すなわち、モノレバー装置を通信で結ぶことにより、オペレータはコックピットから離れて作業現場を覗きながら操作したり、数百メートル離れたところから遠隔操作することが可能である。そのためには、モノレバーでの操作だけでなく、操作を支援するためのリアルタイム描画装置や、自由に視点を操作できる遠隔カメラの設置が有効である。

また、モノレバー装置は片手で操作できるため、もう片方の手でこの遠隔カメラの操作を行えば、これまで二人以上の操作者が必要だった作業が一人ですむことになり、しかもバケットなどを操作する本人が遠隔カメラも操作できるため、より自由自在な遠隔無人施工が可能となる。

2. モノレバーシステムの原理

市販のショベルは、2本のレバーによって操作されている。その操作法は各関節自由度において、油圧シリンダの油圧弁のオンオフを運転台の操作レバーの両手を用いた操作によって、各シリンダの制御弁をOn/Offすることにより行っている。

したがって、法面仕上げや平面引きなど、同時に複数のレバーを動かす必要があり、高精度を要する高度な操作（図-1）を行うためには、長年の熟練を必要とする。

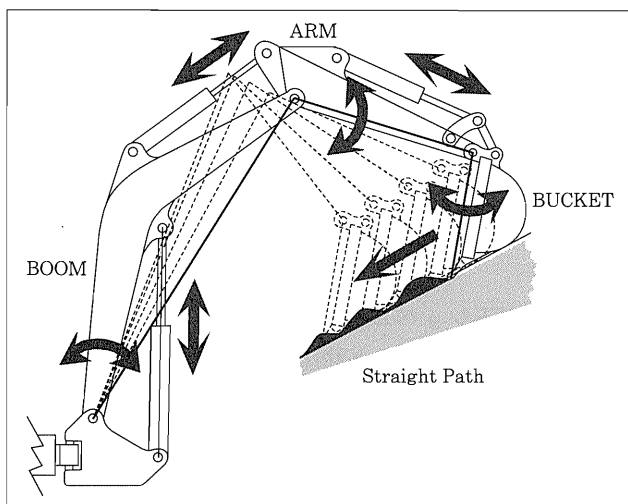


図-1 法面引き時（三つのシリンダを同時に動かす）

これに対して、片手で操作でき、熟練を要しない「モノレバー方式」が中野ら¹⁾により提案された（中野，奥田：「油圧ショベルの操作性向上のための手動操作装置」，特許第2824167号，1998年9月）。

一方、このような直感型の操作装置に対して宮田²⁾は、操作性の向上にはベテランを超える生産性が必要であるとして、ベテラン並みの性能が出せる機械にしかすぎないならば、ベテランを連れてくれば済むと述べている。たしかにモノレバー方式はコンピュータ制御を基盤においているため、制御型の切替え弁や関節角度センサ、外力フィードバックのための圧力センサが必要となるなど、コストアップの要因がある。また、電気制御弁を介するため従来のマシンの操作性と異なる操作特性があり、熟練者にはかえって操作しにくい感触が得られることもあろう。

しかし、現実には熟練者が不足し、各現地作業所では、作業の進行スケジュールに合わせた熟練者の確保に頭を悩ませている。また、ちょうど自動車の運転におけるギアチェンジがマニュアル操作からオートマチック

クに移行してきたように、モノレバーなどで高度な操作が誰でも簡単にかつ容易にできるようになるだけでなく、熟練者にとっても安全性や利便性が大幅に向上する。これらを勘案すると、建設作業全体の生産性や安全性が大幅に向上することが予想される。さらに、農業や園芸、畜産などの、力の要る作業が数多くありながらこれまでほとんど油圧ショベルが普及していない現場にも、家族全員が簡単に利用できるパワフルマシンとしての普及が見込める。

このモノレバー方式では、操作者の片手の動作がそのままバケットの動きに反映されるなど、イーゾオペレーションにつながる以下のような多くの特徴がある¹⁾。

- ・直感的な入力装置である
- ・高精度を要する直線動作を容易に実現可能である
- ・操作者が席を離れることができる
- ・作業反力を感じるができる

モノレバー方式では、レバーの操作量は、ショベル先端の位置ではなく、速度に対応している。このモノレバー方式におけるモノレバーの操作とバケットの動きとを対比した図を図-1に示す。

モノレバー方式以外では、関節構造が油圧ショベルと同構造のワンレバー方式³⁾の入力装置が考案されているが、このワンレバー方式でモノレバー方式と比較して欠点とされるのは、動作領域が大きく取れないという点である。通常のマスタ・スレーブと違い、油圧ショベルではマスタとスレーブのスケールが非常に異なる。そのため、手元の限られた動作領域をショベルの大きな作業領域に対応させるためにスケールの変換を施すが、そうするとショベルに微細な動きをさせることが難しくなる。また、誤ってレバーに触れて大きくレバーが動いてしまった時などは、ショベルは大きく動いてしまうことになり、危険である。

モノレバー方式では、マスタ操作量をショベルの速度に対応させることで、マスタ側に大きな動作領域が不要で、操作者は腕を比較的小さく動かすだけで済み、負担が少ない。

モノレバー以外の速度入力型の方式については、加藤ら⁴⁾が力フィードバックが可能なジョイスティックによる方法で研究を進めている。しかし、一般のジョイスティックは操作自由度が2であるため、そのままショベルの全自由度を操作するには両手で2本のジョイスティックを用いて操作せざるをえない。また、油圧ショベルにはバケットを上下に駆動する操作が頻繁にあるが、通常ジョイスティックでは上下駆動操作ができないため、操作の直感性に欠けるとともに、両

手が占有されてしまう。

(1) モノレバー装置

モノレバー装置は垂直 (y) と水平 (x) の回転とレバー (ϕ) の回転の自由度を持ち、各自由度にロータリエンコーダとサーボモータが取り付けられている。

モノレバー方式では、図-2に示すように、レバーを前後 (x) に動かすと油圧ショベルのバケットが前後に動き、レバーを上下 (y) に動かすとバケットが上下に動くという直感的な操作が可能である。また、直線モードに切換え、その直線の角度を入力してやることで、自動的にバケットは法面との適切な角度を保ったまま法面にそった動きをする。したがってオペレータは、法面の角度を気にすることなく、レバーを手前に引けばバケットは手前側に斜面を下ってくる。このように、熟練度と関係なく高精度を要する操作が誰でもできるのである。

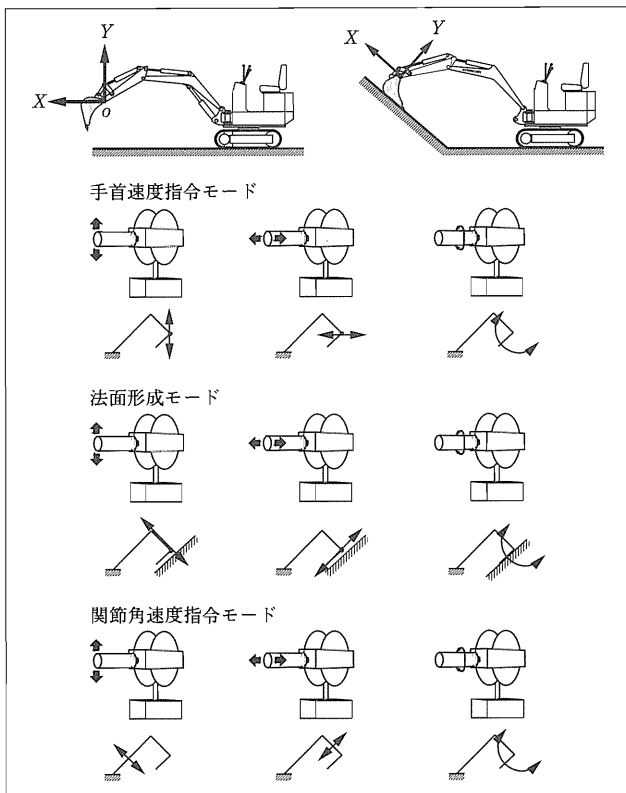


図-2 油圧ショベルとモノレバーの動きの関係

操作レバーに触れて機械が動くことを防ぐロック装置がショベルに装備されている⁵⁾ことからわかるように、作業領域を調べるためにエンジンをかけたまま操作者が席を離れることがよくある。このような使い方ができるように、モノレバーは静的な安定性を保つよう設計されている。静的な安定性が保たれていることで、操作者が支えていなくてもレバーが自重で動い

てしまうことがなく、操作者はレバーを離して安全に席を離れることができる。また、レバーの重さを支える必要がないため、操作者の疲労を軽減することにもつながる。

なお、最近の油圧ショベルの中では、境界に沿った作業が容易にできるように、ブームの一部が横方向に動く自由度が追加されたものが見られる。

図-3に、このようなオフセット付きの油圧ショベルの操作にも対応できるモノレバー操作装置を示す。

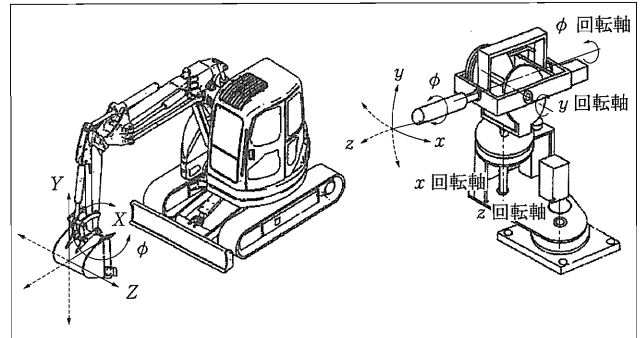


図-3 オフセット付き油圧ショベルの操作に適したモノレバー装置

(2) 油圧ショベルの改造

モノレバーシステムと油圧ショベルを結合するには、市販の油圧ショベルに改造を施す必要がある (図-4)。

まず、コンピュータ制御するために、機械式のオン・オフバルブではなく、電気信号で制御されるバルブが必要である。そのため機械制御式の油圧アクチュエータに電磁比例弁を追加する等の改造を行って、電気信号での制御を可能にする必要がある。

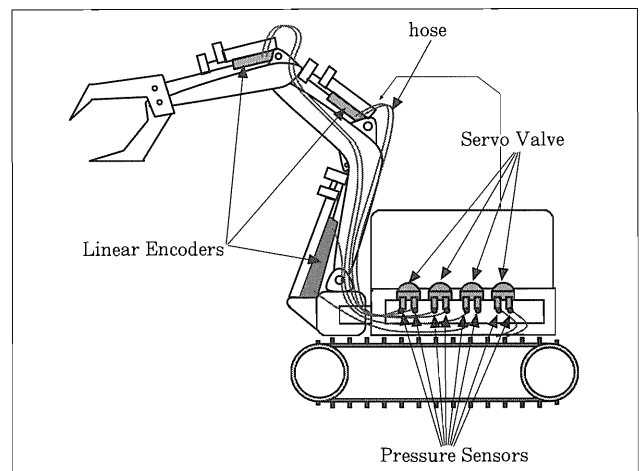


図-4 ショベルの改造部

また、ショベルの関節角を得るためにシリンダにリニアエンコーダを取付けるか、または関節にロータリエンコーダを取付けることや、ショベルの作業反力を計測するためにシリンダ両側に圧力センサを取付ける

ことも必要である。

(3) バイラテラル制御システム

バイラテラル制御とは、操縦型ロボットシステムにおいて、操作者がロボットに指令を送ることに加え、作業反力などの情報を操作者にフィードバックすることができるような双方向の制御方式のことである。操作する際、マスタにスレーブの反力が伝わると、操作者は力感覚のある操作が可能になり、目視情報と併用することでより繊細な作業ができるようになる(図-5)。

モノレバーシステムでは、シリンダの圧力センサで計測した油圧ショベルの作業反力をマスタのモータで再現することで操作者にフィードバックしている(図-6)。

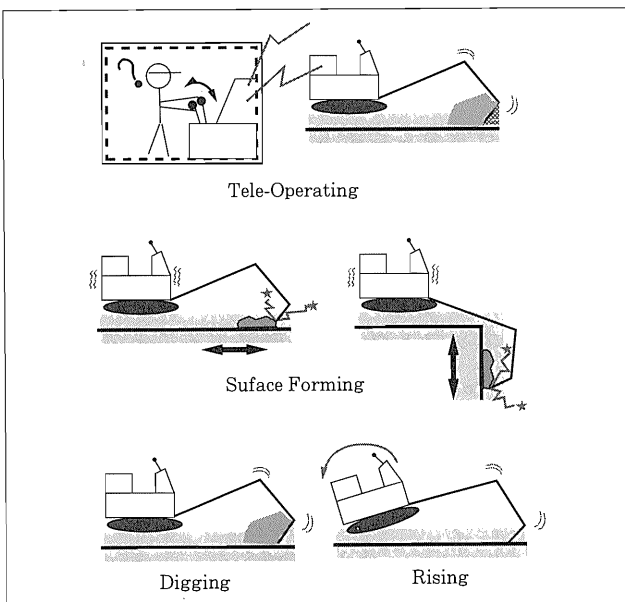


図-5 外力フィードバックのある操作

3. 遠隔操作のための支援システム

悪環境下や、人の入り込めない場所での無人化施工のために、無線技術が使用されている。倒壊の恐れのある建物で行う作業や、地雷除去などの危険な作業を安全に行うため遠隔操作は必要である。

無人施工時、遠隔地の操作者はカメラによる映像を頼りに機械の操縦を行う。このとき、固定されたままのカメラからの映像では、作業中見えにくい箇所があり、視点変更のためにカメラを動かせるような工夫がなされる。

従来、この視点変更のために、機械操縦の手を休めるか、カメラ操作専用の要員を配置するかしていた。

モノレバーの導入によって、両手が必要であったショベルの操縦から片手が開放され、右手で操作装置、左

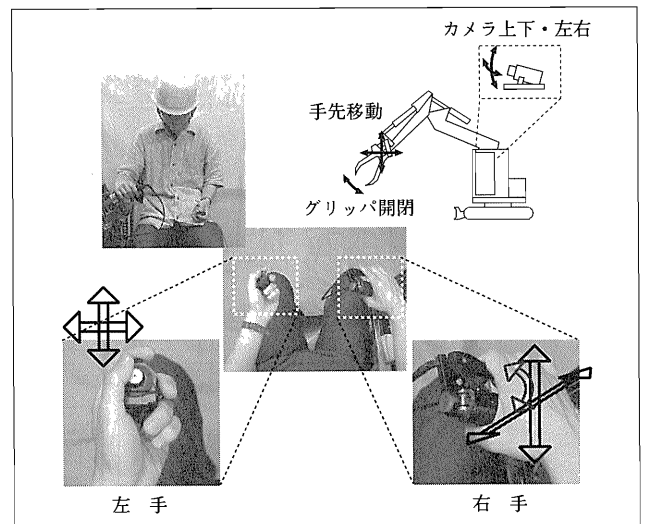


図-7 右手で操作装置、左手でカメラ

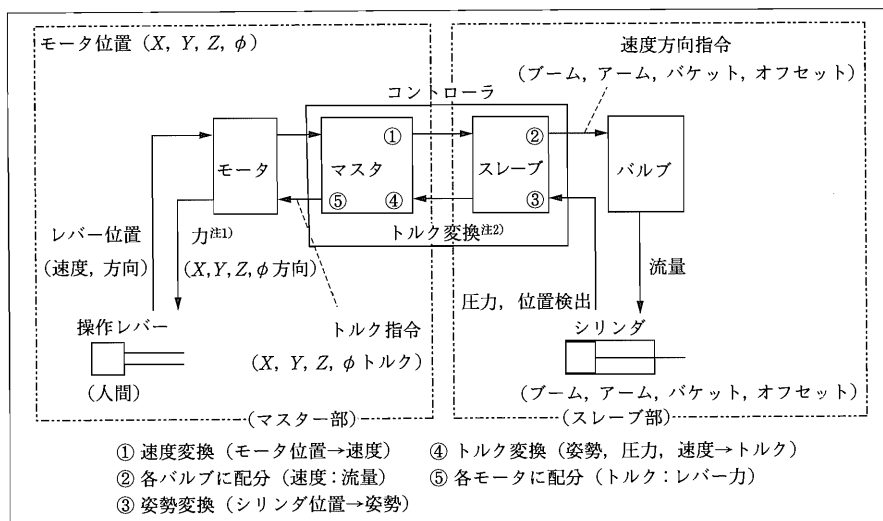


図-6 モノレバーシステムの信号フロー

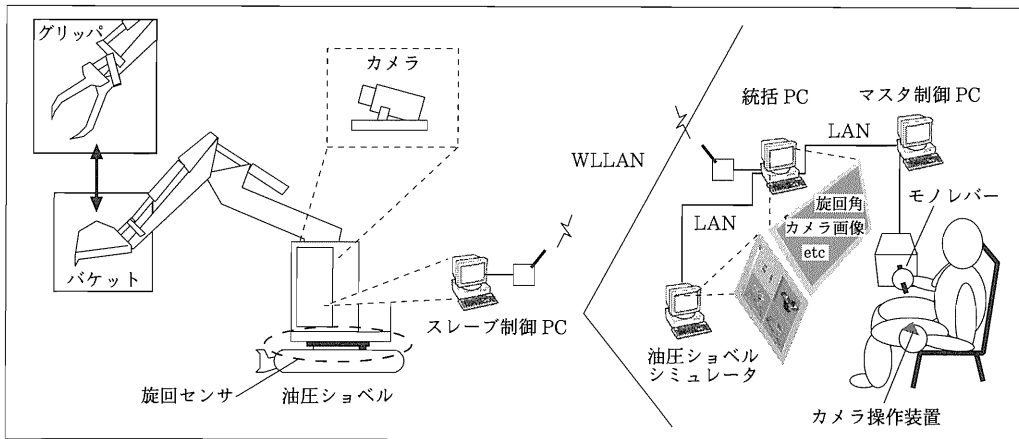


図-8 無線モノレバーシステムと周辺装置

手でカメラシステムの制御を同時に行う（図-7，図-8）ことができるため、作業の効率化を図ることができる。

このように遠隔操作に対するモノレバーシステムのメリットは大きい。このメリットを活かすべく、遠隔操作を目標とする開発を進めてきた。そこで遠隔操作に対応すべく、TCP/IP プロトコルによる、モジュール化された制御ソフトウェアを開発した⁶⁾。

(1) システムのモジュール化

ソフトウェアをマスタ、スレーブ、ブレインの三つのモジュールに分け、それぞれのモジュールは、

TCP/IP プロトコルに従って通信する構造とした（図-9）。

このモジュール化には二つの意味がある。一つは従来技術であるが、コンピュータを分散させることができるという意味である。各モジュールは別々のコンピュータ上で動作させることができるので、マスタ制御（モノレバー）を担うコンピュータとスレーブ制御（油圧ショベル）を担うコンピュータを分散させ、独立させることができる。

このように TCP/IP を用いたコンピュータネットワークとしてソフトウェアを構築することで、拡張が容易にできる。例えば有線と無線の切替は、イーサ

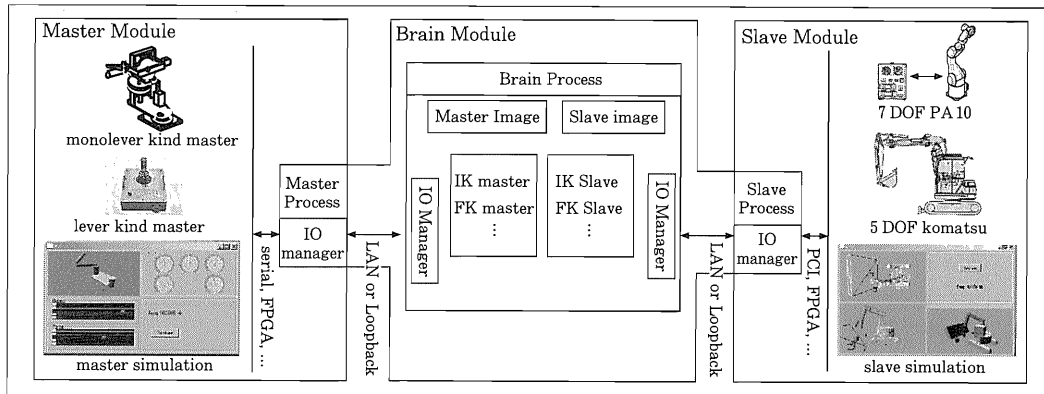


図-9 モジュール化されたシステム

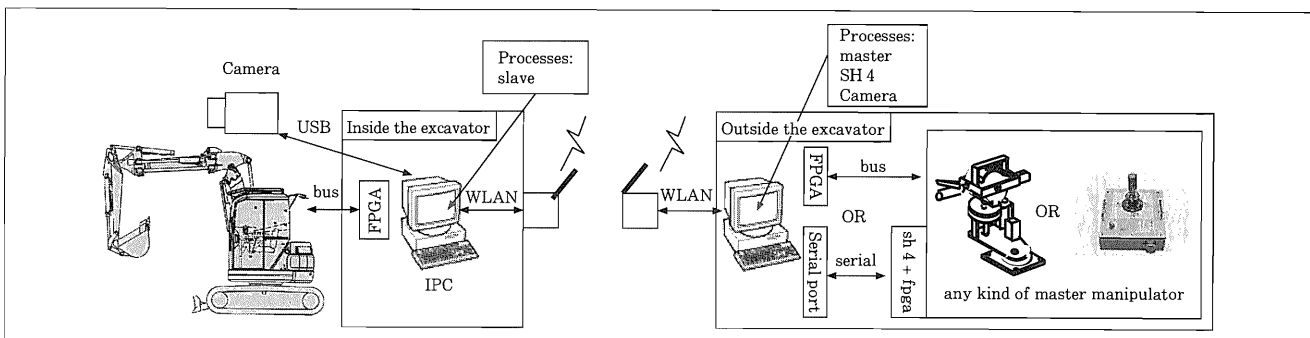


図-10 TCP/IP による遠隔操作

ネットケーブルの替わりに無線 LAN を用いるだけで可能になる (図-10)。

もう一つは、情報処理を独立に行うという意味のモジュール化であり、モノレバーシステムによく適合する。モノレバーシステムは、マスタとスレーブの構造が全く異なり、このようなシステムは異構造マスタ・スレーブシステム⁷⁾と呼ばれる。

異構造マスタ・スレーブにおいては、角度や力などの情報は一般化された共通の座標系に変換してからマスタとスレーブの間でやりとりがなされる。この共通の座標系で情報をやりとりする部分がブレンモジュールである。

マスタモジュールとスレーブモジュールの通信をブレンモジュールが仲介することにより、マスタモジュールおよびスレーブモジュールは、相手であるスレーブ及びマスタの構造を気にする必要がない。したがってモジュール化されたモノレバーシステムでは、ブレンモジュールの一部を変更するだけで、容易に様々な構造のマスタとスレーブを接続することができるようになっている。例えばスレーブとして三菱重工業製の汎用アーム PA 10 を接続することが可能である。

本研究ではモジュールの一つとして、シミュレータも開発した。開発したシミュレータは、グラフィック表示可能なリアルタイム 3D シミュレータであり、シミュレータ内の仮想的作業現場環境との接触力を計算し、実際のショベルと同様な力フィードバックを行うことができる。

このシミュレータもモジュールとして構築されているので、他のモジュールと同様、接続や切り換えが容易にできる。シミュレータを油圧ショベルの代わりに用いることで、作業の事前練習、非熟練者の教育・訓練(速度指令型の操作には若干の慣れが必要)などがオフラインで容易に行える。また、ソフトウェア開発も効率的に行うことができる。

さらにこのシミュレータをディスプレイ装置として、油圧ショベルを使っての作業時に併用することで、オペレータは油圧ショベルの動きをあらゆる角度から眺め、確認することができる。そのため、安全性、作業効率などが著しく向上するとともに、オペレータの疲労を軽減することができる。

(2) 旋回角度センサ

遠隔操作において、車両の移動を伴う場合、旋回体の向きを知ることは重要なことである。

従来、上部に旋回機構を有する油圧ショベルの旋回角度の計測には、旋回軸受の端部にロータリエンコー

ダを装着する方法が一般的であった。しかし、この方法には装着する際に上下機構を分離し、分解するという大掛かりな作業が伴っていた。そのため、現在市場にあるショベルに旋回角度センサを装備することは大変困難であった。そこで、機体を分解せずに取付けることができる旋回角度センサを開発した(図-11)。

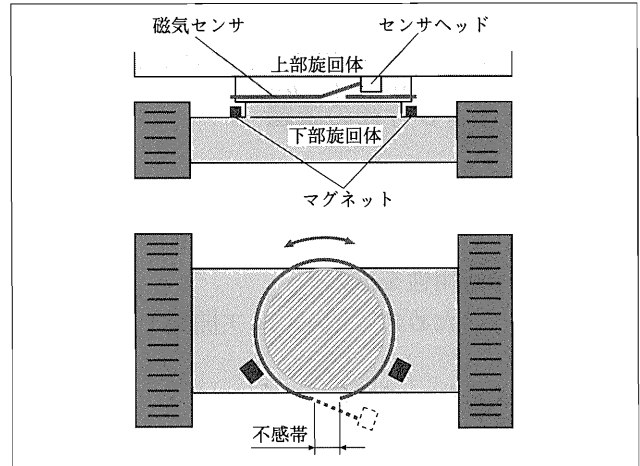


図-11 旋回角度センサ

リア変位センサを円形利用し、不感帯の生じる重ね合わせ部についてはソフト処理を行うことで、新しい概念の高精度な旋回角度センサが実現した。

このセンサは、油圧ショベルの上下部構造間(スィベルジョイントおよび旋回軸受ケース外側)に装着される。油圧ショベルの上下部機構を分離せずに後付け可能なセンシングシステムであるため、市販のショベルに容易に旋回角度センサを取付けることが可能となり、取付け工費の削減と納期の短縮が実現される。

リア変位センサは、センサヘッドからマグネットまでの距離を計測することができる。このセンサを上部旋回体に巻付け、マグネットを下部走行体に配置することで、上部旋回体と下部走行体との相対的な角度を検出することができる。センサの端部で不感帯の領域が生ずるが、この問題にはマグネットを2個配置し、計測値により使い分けることで対処できる。

建設業界で建設機械の無人化、自動化が検討されているなかで、このセンサは建設機械市場拡大の一役を担うものと期待される。

4. 把持機構の開発

モノレバーシステムの応用として、バケットの代わりにグリッパを取付けた油圧ショベルが考えられる。

この作業機は、建設リサイクル法で義務づけられた分別解体などに使用されるが、グリッパの把持力を制

御できれば、再利用可能なものの非破壊ハンドリングが実現する可能性がある。また、解体後の回収作業においても、対象物を視覚によって識別するのみならず、剛性を力覚によって検知して識別することが可能であれば、分類が容易になる。

詳細は省略するが、本研究ではグリッパを使用しての把持や破碎などの作業に合わせた操縦桿およびグリッパの開発を行った。

5. 結言および今後の課題

中野らが提案したモノレバーシステムを踏まえ、

- ・操作部、制御部、作業部の独立化を図ることでシステムの汎用性を拡大
- ・遠隔操作のためのソフトウェア開発とセンサ開発の提案

について述べた。

今後の課題は、

- ・グリッパの搭載も可能にしたシステムで多くの作業に適した操作しやすいインテリジェント油圧ショベルを形成すること
- ・非破壊ハンドリングの観点から定量的に評価すること

である。油圧ショベルに搭載し、フィールドテストを行うことにより、効果を検証したい。また、提案したイーザーオペレーションのための基本システムは、他のさまざまな分野へ応用が可能である。新たな分野への応用と、それに伴う基本システムの改良も今後の課題である。

JCMA

《参考文献》

- 1) E. Nakano, N. Tsuda, K. Inoue, K. Kayaba, H. Kimura and T. Matsukawa: Development of an Advanced Way of Improvement of the Maneuverability of a Backhoe Machine, *9th ISARC*, pp.215-222, June 3-5, 1992, Tokyo, Japan
- 2) 宮田圭介: オペレータの感性を意識した建設機械の操作性設計 (特集感性に基づく機械工学), 日本機械学会誌, 102-965, pp. 233-234, 1999
- 3) 江川, 生田, 小関: 油圧ショベルのワンレバー式操縦システムの開発, 628,
- 4) 加藤, 山田, 武藤: 遠隔操作建設ロボットシステムのマスク・スレーブ制御 (第2報: 重力補償による多関節アームへの拡張), 日本フルードパワーシステム学会論文集, 34-4, pp. 85-91, 2003
- 5) 田中利昌: 油圧ショベル (人と自然に優しい建設機械<特集>—最近の土工機械およびクレーンに見る操作性, 居住性, 安全性などの向上), 建設の機械化, No.517, pp.18-20, 1993
- 6) E. Rohmer, T. Takahashi and E. Nakano: Modular platform for a bilateral master/slave manipulator for hydraulic machines, *ECECONF 2003*, November 2003, Cebu, Philippines
- 7) E. Nakano and T. Arai: Bilateral master-slave manipulator with different configurations, Japanese patent (pending), No.S 59-63984, 1984

【筆者紹介】



中野 栄二 (なかの えいじ)
東北大学大学院
情報科学研究科
教授



久武 経夫 (ひさたけ つねお)
システムテクニカル株式会社
社長