

# 建設機械の操作性評価に関する研究

## －操作シミュレータの設計－

新 谷 裕 和\*

### A study on operation performance of construction machinery

#### － Design of operation simulator －

Hirokazu Araya

It is very important for construction machinery to evaluate the operation performance before shipment. We have designed a simulator for operating construction machinery. This simulator consists of computer system and levers. The computer system simulates dynamics of construction machinery and displays its motion according to lever operations. Using this simulator, we can easily and efficiently evaluate operating quality of construction machinery with skillful operator's sensuousness.

#### 1. はじめに

油圧ショベル、ラフテレンクレーンなどの建設機械はオペレータが運転席で操作レバーを操作することにより、作業を行う多自由度操作機械である。操作性は建設機械の重要な要素であり、メーカーでは設計時、出荷などに操作性の入念な評価を行っている。構造・強度評価については、コンピュータシミュレーションによる事前評価が定着化している。一方操作性評価については、コンピュータシミュレーションによる運転時の挙動評価などが報告されている<sup>[1]</sup>が、最終的には、熟練オペレータによる評価に頼らざるを得ないのが、現状である。この場合、評価毎に実機の改造が必要であり、コスト面、開発期間面でメーカーに大きな負担になっている。

そこで、筆者等は、熟練オペレータの感性を生かしながら、手軽に操作性の事前評価ができる建設機械操作シミュレータを開発してきた<sup>[2]</sup>。これまで開発してきたシミュレータはワークステーションとパソコンを組み合わせたシステムであったが、本研究においては、パソコンのみで構成できるシステムを設計した。本報告では、その設計思想について述べる。

#### 2. シミュレータの構成

Fig. 1 に本研究で最終的に目指している建設機械操作シミュレータの概念図を示す。オペレータは実機と同様の操作入力装置（操作レバー）を操作し、画面上に表示された建設機械を動作させる。この時、画面上には様々な情報を提示することができる。実機に搭乗した時と同じようなキャブからの画面（図中の左下）、遠隔操縦をイメージしたような機械全体を見たような画面（同左上）、内部状態をモニタリングしたグラフ（同右上）、あるいは、アクチュエータ等の位置姿勢を直接数値で示したもの（同右下）などである。

これらの画面は、それぞれを単独で表示したり、あるいは、Fig. 1 の様に複数の情報を同時に表示すること

---

\* 原子力技術応用工学科

もできる。画像情報は通常のパソコンのディスプレイ上のみではなく、大画面へのプロジェクタ、3次元表示が可能なHMD (Head Mount Display) などへの表示も可能とする。

操作入力装置には一般的な(電気)ジョイスティックの他、キーボードやマウスあるいはゲーム用のパッドも使用する。

本報告で述べるシステムはパソコンとしてDELL社製のDimension8300 (CPU:Pentium4 2.8GHz、メモリー:1GB RAM)、操作入力としてゲーム用のパッドを用いたが、必要に応じてCPU、メモリー、グラフィックボードなどのアップグレードや、操作入力装置の変更が容易になるような、ソフトウェア構成とした。

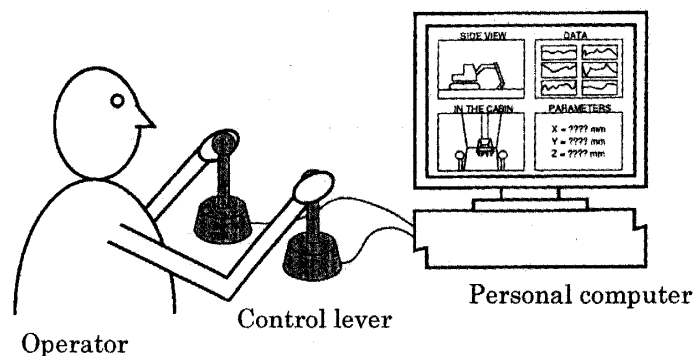


Fig1. Concept of simulator

### 3. グラフィックモデル

グラフィックモデルとは建設機械を3次元CG (Computer Graphics) で表示するための機能である。モデル作成には旧シリコングラフィック社が開発した3次元グラフィックライブラリーであるOpen Inventorを用いている。Open Inventorは3次元のシーン(静的な3次元形状)の構築、表示にとどまらず、時間管理も可能であり、動的なシーンの記述も可能である。また、キーボード、マウス等の入力デバイスともリンクが可能である。Open Inventorはインターネット上の3次元空間構築言語のVRML (Virtual Reality Modeling Language) のバージョン1の基礎となった規格であり、VRMLへの変換も容易である。以下に油圧ショベルを例として、モデリング方法を述べる。

モデリング方法としては、Open Inventorが持つ標準の図形を組み合わせで構築するのが最も手軽であるが、ややリアリティに欠けるところがある (Fig. 2)。

そこで、3次元CG作成プログラム(Strata Studio Pro. 1.0)を用いて部品毎に作図し、そのデータをOpen Inventorフォーマットに変換し、その後Open Inventorを用いて油圧ショベルとして組立てモデル化した。なお、シリンダやリンク部品は形状が単純な部品は標準の図形を用いた。Fig3.に複雑な部品の例として油圧ショベルのバケットおよびブームを、そ

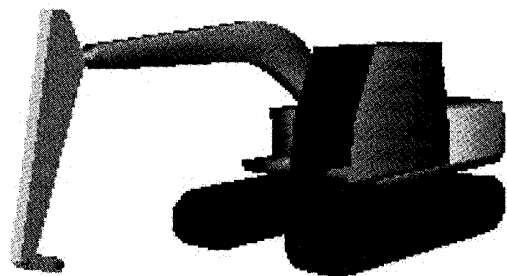


Fig.2 Simple model of hydraulic shovel

これらの部品を組立て油圧ショベルとした完成図を Fig. 4 に示す。

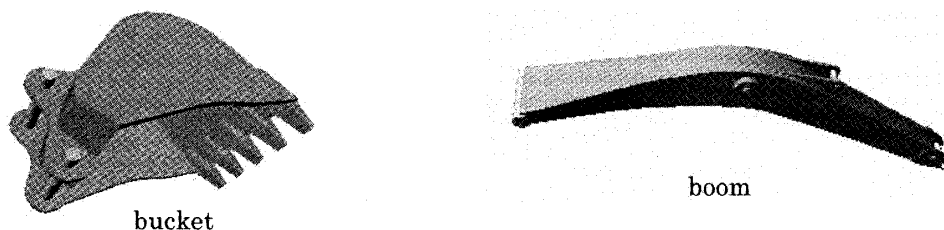


Fig.3 Models of components

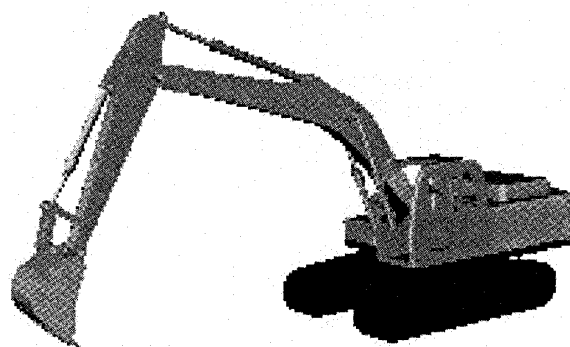


Fig.4 Detail model of hydraulic shovel

ところで、Open Inventor では IGES 5.1、VDA-FS、STL ASCII、DXF R14 等の CAD 中間ファイルに対するコンバートが可能である。そこで、これらの中間ファイルに対応している CAD でグラフィックモデルを作成することもできる。

#### 4. ダイナミックモデル

建設機械の動特性を記述する数値モデルがダイナミックモデルである。建設機械のダイナミックモデルは大別すると力学系数値モデル、油圧系の数値モデルおよびリンクの関係式からなる<sup>[3]</sup>。ここでは、大型油圧ショベルの力学系数値モデルを例として挙げる。

Fig. 5 において、各アタッチメントを剛体と仮定とすると、Lagrange の運動方程式より次式をえる。

$$\begin{aligned}
 & J_{11} \ddot{\theta}_1 + J_{12} \cos(\theta_1 - \theta_2) \ddot{\theta}_2 + J_{13} \cos(\theta_1 - \theta_3) \ddot{\theta}_3 + J_{12} \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2^2 + J_{13} \sin(\theta_1 - \theta_3) \dot{\theta}_3^2 \\
 & - K_1 \sin \theta_1 = \tau_1 \\
 & J_{12} \cos(\theta_1 - \theta_2) \ddot{\theta}_1 + J_{22} \ddot{\theta}_2 + J_{23} \cos(\theta_2 - \theta_3) \ddot{\theta}_3 - J_{12} \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1^2 + J_{23} \sin(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_3^2 \\
 & - K_2 \sin \theta_2 = \tau_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & J_{13} \cos(\theta_1 - \theta_3) \ddot{\theta}_1 + J_{23} \cos(\theta_2 - \theta_3) \ddot{\theta}_2 + J_{33} \ddot{\theta}_3 - J_{13} \sin(\theta_1 - \theta_3) \dot{\theta}_1^2 + J_{23} \sin(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_2^2 \\
 & - K_2 \sin \theta_3 = \tau_3 \quad (1)
 \end{aligned}$$

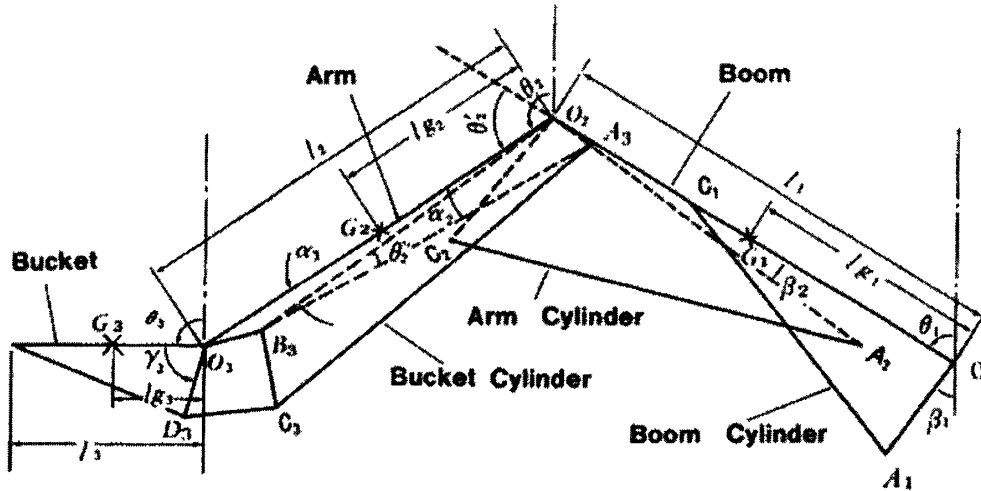


Fig.5 Model of large hydraulic shovel

ここに、  $J_{11} = m_1 l_{g1}^2 + (m_2 + m_3) l_1^2 + I_1$

$$J_{12} = m_2 l_1 l_{g2} + m_3 l_1 l_{g3}$$

$$J_{13} = m_3 l_1 l_{g3}$$

$$J_{22} = m_2 l_{g2}^2 + m_3 l_2^2 + I_2$$

$$J_{23} = m_3 l_2 l_{g3}$$

$$J_{33} = m_3 l_{g3}^2 + I_3$$

$$K_1 = (m_1 l_{g1} + m_2 l_1 + m_3 l_1) g$$

$$K_2 = (m_2 l_{g2} + m_3 l_3) g$$

$$K_3 = m_3 l_{g3} g$$

$g$  = 重力加速度

なお、 $\theta_i$  は関節角、 $\tau_i$  は供給トルク、 $l_i$  はアタッチメントの長さ、 $l_{gi}$  は支点と重心間の距離、 $m_i$  はアタッチメントの質量、 $I_i$  は重心まわりの慣性モーメントである ( $i=1-3$  はそれぞれブーム、アーム、バケットを意味する)。

本来のダイナミックモデルをシミュレータで正確に表現するためには、上記大型油圧ショベルの例で示した数値モデルの微分方程式を解いていく必要がある。しかし、操作シミュレータの場合リアルタイム性が要求されるため適度な近似が要求される。そこで、今回のモデルでは、レバー操作のアクチュエータ（油圧シリンダの伸びと油圧モータの回転角度）速度への変換をむだ時間+1次遅れで近似した。今後はコンピュータの性能の向上を念頭において、上記数値モデルを順次近似モデルに取り込んでいく。

## 5. リアルタイム動作

本シミュレータの最大の特徴は、オペレータのレバー操作に従って、建設機械の表示モデルがリアルタイムで動作することである。この機能を実現させるためには①操作レバーの状況をリアルタイムに取り込む②グラフィックモデルとダイナミックモデルを時間的にうまくリンクさせる、必要がある。以下にその方法について述べる。

### 5.1 操作状況の取込み

今回入力装置としては、4方向の操作自由度を持つアナログ入力付きのゲーム用パッドを使用した。パッドの操作状況はUSB経由でパソコンに取り込む。通常、Windowsでプログラムを組む場合、入力装置からの入力は、イベントとしてウインドウ・プロシージャに通知される。この方法だと、イベント・キューにメッセージが溜まってしまうと、入力がリアルタイムに処理できない場合が発生する。

そこで、マイクロソフト社より提供されている DirectX 9.0b SDK のなかにある Directinput を利用した<sup>[4]</sup>。このプログラムを用いると、任意のサンプリング周期で、パッドの操作状況をパソコンに取り込むことが可能となる。

### 5.2 グラフィックモデルとダイナミックモデルのリンク

グラフィックモデルで使用している Open Inventor には時間を管理するオブジェクト（クラス）があり、ダイナミックモデルで発生するデータをこの機能を用いてグラフィックモデルに反映する。ブームを例に具体的に述べる。ダイナミックモデルで発生するブームシリンダの速度からその時間におけるシリンダの長さ  $l$  を求め、Fig. 6 に示すリンク機構に基づき式(2)(3)によりブームの回転角度  $\theta$  およびブームシリンダの回転角度  $\alpha$  を求め、その時間におけるブームおよびブームシリンダの表示位置を決定する。

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{l_0^2 + c^2 - l^2}{2cl_0} \right) - \delta - \gamma \quad (2)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{l_0^2 - c^2 - l^2}{2cl} \right) - \delta \quad (3)$$

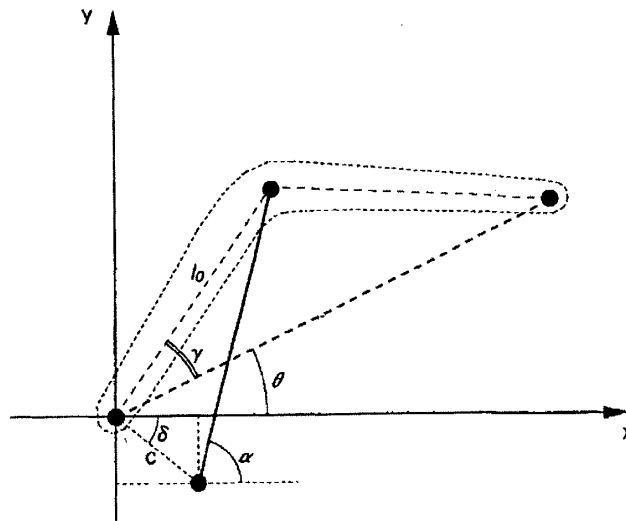


Fig.6 Link of boom

同様にアーム、アームシリンダ、バケット、バケットシリンダおよびアップパー部など時間によって変化を生じる部分の表示位置を決定する。

## 6. おわりに

建設機械など人間が操作するタイプの機械では、商品化にあたり、機械特性の事前評価が非常に重要な課題になっている。本報告では熟練オペレータの感性を生かしながら、手軽に操作性の事前評価ができるパソコンをベースとした建設機械操作シミュレータの設計思想について述べた。今後はこの設計思想に基づいた操作シミュレータを完成させ、実際の建設機械の評価に活用を図って行くと共に、他の操作型機械のシミュレータへ発展させていく。

## 参考文献

- [1] 頭井, 井上, 井村, 藤川 : リンク構造のシミュレーションに関する研究; 機械学会論文集 C, Vol. 52, No.483, pp.2814-2821 (1986)
- [2] 新谷, 今西 他 : 建設機械操作シミュレータの開発; ヒューマンインターフェースシンポジウム 2002 論文集, pp.351-352 (2002)
- [3] H.Araya and M.Kagoshima : "Semi-automatic Control System for Hydraulic Shovel" Automation in Construction, Vol.10, No.4, pp.477-486 (2001)
- [4] 大川, 大澤, 登, 成田 : [書籍版]DirectX 9 実践プログラミング, 工学社, 2004

(平成17年11月28日受理)