

2. 掘削機作業シミュレータの開発*

深谷 潔**, 梅崎重夫***, 呂 健****,
中村隆宏*****, 江川義之**

2. Development of Excavator Operation Simulator*

by Kiyoshi FUKAYA**, Shigeo UMEZAKI***, Jian LU****,
Takahiro NAKAMURA***** and Yoshiyuki EGAWA**

Abstract: In the field of the civil and construction work site, there are many accidents caused by construction machinery such as an excavator. Such machinery is operated by a person and the prevention of an accident is entrusted to the person. To take the safety measures knowing of operator's human factors is needed. Therefore to investigate the human factors of operators, the excavator simulator using virtual reality technology was developed.

The simulator should meet the following requirements.

- (1) The simulator should have the function of simulating accident situations, such as presence of a worker near the excavator. From this requirement the simulator should be a virtual reality system.
- (2) The simulator should have not only front view but also back view to investigate operator's attention to the back, because many accidents occurred in the rear of excavators.
- (3) The simulator should have the function giving a sense of motion, because the sense is important to operate an excavator.

Several plans such as the HMD system with a real excavator and the cabin on a turn table system were investigated, and following system has been developed.

The simulator is composed of the image system and the motion system. The image system is composed of the image generator (graphic workstation), eight video projectors and eight 120 inch sized screens which are arranged in heptagon and surround the operator. The graphic workstation performs other functions at the same time, such as the system control function and the input-output control function for operation levers. The motion system has an operator seat on its motion base and give a sense of motion to the operator.

The computer graphic images are made from 3D models. The simulator has two excavator models, medium sized one and small sized one. The views from their operator seat are different each other. It has several person models such as cooperation workers and walkers. They move about near the excavator. It has one work site model including an earth model which changes the shape corresponding the operation.

Keywords; Excavator simulator, Virtual reality

* 第3回 VR学会¹⁾, 第29安全工学シンポジウム²⁾で一部発表

** 機械システム安全研究部, 境界領域研究グループ Mechanical and Safety Research Division, Interdisciplinary Research Group

*** 機械システム安全研究部 Mechanical and Safety Research Division

**** 物理工学安全研究部 Physical Engineering Safety Research Division

***** 建設安全研究部, 境界領域研究グループ Construction Safety Research Division, Interdisciplinary Research Group

1. はじめに

第1章で述べたように、掘削機の災害が非常に多い。この掘削機を含む建設機械は運転者によって操作されるものであり、災害に対する人間要因の影響は大きい。すなわち、運転者の誤操作が直ちに事故を引き起こす可能性が高い作業形態であるため、ソフト的対策が事故防止に有効であり、運転者の挙動を解明することは、安全対策をたてる上から重要である。

ところで、一般に安全対策には機械設備の改善や安全装置の設置等のハード的なものと、作業システムの改善や教育訓練等の管理的・ソフト的な対策がある。

近年の安全対策は、災害防止の役割を人間に負わせるのではなく、機械設備側に負わせる方向にある。建設機械においても人間との接触防止のための接近センサ等が研究されている。しかし一般に、使いづらい安全装置を切るなどの現象が見られ、安全装置を有効なものにするためには人間特性を明らかにする必要がある。

このようなことを考慮すると、運転者の人間特性を解明することは、ソフト的な対策はもとより、ハード的な対策をたてる場合にも重要である。特に、事故時の人間特性を知ることは、人間に事故回避を依存するシステムにおいては欠かせない事項である。これを実験的に把握する必要があるが、実物を用いては危険が伴うため実行が困難である。そのためバーチャルリアリティ(VR)技術を用いて掘削作業のシミュレーションを行うシステムを開発した。

2. ショベル災害の特徴とシミュレータの要件

2.1 掘削機とその事故の特徴

掘削機及びその接触災害の詳細については、既に第1章で述べているが、シミュレータを作成する上で注目した点を以下に述べる。

掘削作業には、溝掘削など地面より低い部分の作業が少なくない。また、掘り進むに従って後退する必要がある。さらに、掘った土砂をトラックに積み込むなどの旋回動作が少なくない。そのため、前方のみならず、下方、側方、後方にわたる広い範囲に注意を払う必要がある。

バケットとバランスさせるため、カウンタウエイトがあり、また、カウンタウエイトは小旋回型の掘削機を除き旋回時には車体の幅よりはみ出す。そのため、事故の型としては、旋回時に後方で人と接触するものがあり、後方の安全確認を必要とするが、カウンタウエイトのために後方の視界が悪い。また、このことは、後退時に人と接触するという事故の原因ともなっている。

視界の悪さという問題点は、後方に限らない。地面を下に掘っていく場合等において、バケットが地面に隠れて見えなくなる場合がある。そのため溝の中などの視野外の人と接触する災害が少なくない。

また、事故とは関係ないが、掘削機の運転においては、視野以外にバケットの地面との接触による運転席の動揺等の情報が重要である。

2.2 シミュレータの要件

VR装置を用いて掘削作業のシミュレーションを行うために必要となる要件について、次に示す。

- (1) 人間と掘削機の接触などの現実であれば事故となる状況をシミュレートできる。
- (2) 各種の条件で掘削作業がシミュレートできる。
- (3) 前方、後方、下方、側方の画像をシミュレートできる。
- (4) 掘削機の動作に伴う体感を与える。
- (5) シミュレーションを有効とするために、ある程度以上のリアリティがある。
- (6) 実験装置として使用できる。すなわち、アイマクカメラ等の測定機器との併用及びシミュレーション経過の記録を行うことができる必要がある。
- (7) 実験者が、システムの変更を行える。

以上の要件をVRシステムとしての要件として見直すと、以下のようになる。条件(1)が必要であることは研究目的から明らかであるが、ここで考えている事故となる条件とは、バーチャルの人間が掘削機に接近するという状況を模擬することである。なお、今回の研究においては接触の問題を対象としていて、掘削機の転倒という問題は取り上げないが、この問題を扱うためには、運転席の傾斜の模擬が必要となる。

条件(2)は、人間の動作位置などの実験条件を変更できるということ、実験としては当然必要な機能である。そのため、実写の作業をビデオで撮影したものは使用しにくい。実際、ビデオの再生のように全く同じ状況しか模擬できないとしたら、被験者がその状況を覚えてしまうのでくり返して実験するには不適切である。ただしコンピュータグラフィック(CG)の場合でも、VR空間内の事物は事前に作っておく必要があり、作り方によっては、同じ行動を取れば同じ結果が得られる様にしなければならない。ランダムな因子を組み込むことが必要である。

条件(3)は、前節で述べたように、運転作業時に四方を見る必要があることから、必要となる。

また、条件(4)についても、前節で述べたように体感が重要なため、必要である。

条件(5)についても一般にリアリティの必要性は明ら

かである。実験が実際の作業の特性を何らかの形で反映していなければ、逆にこの実験の結果を実際の対策に反映させることはできない。この場合、実物のどのような点を反映させるべきかという点については、実験から何を得たいかということと関連して、一概には決まらない。また、この反映のさせ方が適当か否かについては難しい問題があり、別途検討する必要がある。ここでは、没入感を上げること及び立体視が可能であるということを中心とした。

条件(6)と(7)については、実験装置であることから当然必要となる。後者については、各種の実験に汎用的に使用するために必要となる。

3. VR技術の動向

3.1 表示手段

VRシステムを開発するためにVR技術の調査を行った。そのうちでも表示のための技術についての知識は後の節を理解するために必要であるので、概略を示す。

3.1.1 HMDシステム

VR技術に特有な表示手段としてヘッドマウントディスプレイ(HMD)がある。これは、着用者に上下左右を含む全周囲の視覚映像を提示することでバーチャル環境の中に入り込ませるための装置で、頭部に装着するヘルメットに両眼に画像を提示する2台の小型CRTや液晶パネルと、頭部の姿勢を検知するセンサーを取り付けたものである。センサーにより検知した頭部の位置と方向に合わせてバーチャル環境内部の視点を動かし、その視点に合わせた画像を提示することで、着用者がバーチャル環境の中にいるのと同様の視覚刺激を与えることができる。

バーチャル環境として、3次元立体モデルを作成し、その視点に合わせたコンピュータグラフィックス(CG)を表示する以外に、実際の環境でテレビカメラを動かしてそれを提示することで離れた場所にいることを模擬するトレイグシステムというものもある。

HMDの利点は全周囲の視覚情報を提示できることであるが、映像装置を組み込んでいて重いため頭を動かすと多少ずれたり、画像生成が人間の頭の動きに追従できないという欠点がある。また、表示されている物体は遠くにあるのに映像は目の前にあるため、眼の焦点位置と映像の位置が異なるという欠点や、表示される画像の視野角が小さいという欠点もある。これらの欠点は、技術の進歩により、装置の軽量化、高速な位置入力と高速な描画、レンズ等の光学機器の使用、液晶等の高精細化・大型化が可能となり、改善されてきている。

なお、HMDは左右の眼に別々のディスプレイを用いるので、立体表示が可能である。

3.1.2 プロジェクタ

表示手段として2つ目のものはビデオプロジェクタによるスクリーン投影がある。没入感を上げる一つの手段として大画面映像が用いられる。すなわち、視野の大部分を一連の映像で埋めることで、その映像の世界に入りこませることができる。映画のシネラマやアイマックスは、この効果を用いている。

単一のスクリーンによるものだけでなく、複数のスクリーンを組み合わせたり、凹面形の特殊なスクリーンを使用して視野の大部分を覆う方式も開発されている。

前者の例にCaveというシステムがある。これは、正方形のスクリーンで立方体を形成し、その中の手前の1面を除いた形態のシステムで、スクリーンのない面からVR画像を見る構成である。前方の視野すべてをVRの画像が占めるので、非常に没入感は大い。しかしながら、これを実現するためには、スクリーンの後方からVR画像を投影する必要がある、スクリーン室を中空に設けねばならず、極めて大掛かりになる。魅力のあるシステムであるが、後方の映像が得られない。今回の研究では、費用の点もさることながら、後方の視野を重視したので、採用しなかった。また、プロジェクタの能力の制約から、スクリーンの大きさには限界があり、動揺装置を入れるには適さなかった。

後者の例は半球スクリーンシステムがある。これは、前方に半球上のスクリーンを設置したシステムである。これも、視野の大部分をVR画像で占めるため没入感が大い。しかし、曲った球面に直線を投影して直線に見えるようにするためには視点位置に応じて歪んだCG画像を投影しなくてはならず、画像作成の計算負荷が大きく、滑らかな動画を生成するのが困難であった。

また、プロジェクタ方式においても立体投影が可能である。左右の視野の映像を別々に表示して液晶シャッター眼鏡等を用いて左右の目に別の映像を提示することで可能となる。

3.1.3 CRT

コンピュータのモニターを使用した表示装置である。プロジェクタの映像に較べて明るい映像を提示できるが、得られる画像の大きさに限界があり、小型のものしか得られない。従って、没入感の点で不利である。

この方式でも、液晶シャッター眼鏡等を使用することで立体表示も可能である。

4. VR システムの基本構想の検討

4.1 仮想化すべきものの検討

事故を起こしてみるという点では仮想化することは必須である。すなわち、人間とバケットや車体との接触は災害につながる部分であり、この部分を仮想化することが必要である。その場合、掘削機に近接する人間のいずれか一方がバーチャルのものであれば現実の事故とはならない。従って、バーチャル化するものの組み合わせとしては、リアルな掘削機にバーチャルな人間、バーチャルな掘削機にリアルな人間、バーチャルな掘削機とバーチャルな人間の3通りが考えられる。ただし、リアルな人間に作業者を演じさせることは実験の手間を考慮すると現実的ではなく、2番目の手段は適切ではない。

リアリティという点や、測定の意味付けという点では、実機に近い方が有利であり、一方、実験条件の再現性等の実験しやすさの点では、バーチャル化した方が有利である。なるべく実機に近いものから、何種類かのシステムについて検討した。それを示す。

4.2 検討したシステム

4.2.1 実機ベースシステム

リアリティという点では実物に勝るものはない。そのため、実機をベースにシミュレーションをできないかということを検討した。この場合、バーチャルに提示するものは近接して作業する作業員である (Fig. 1 参照)。

HMD の中に、透過型 HMD といって実物の映像とバーチャルの映像を重ね合わせて提示する機能を有するものがある。このようなものを用いて、実機作業を行い、人間を提示した場合の運転者の挙動を測定するという方法について検討した。これについては、リアル映像に重ねるバーチャル画像の輝度が低く、屋外用いる場合にはバーチャルな映像が非常に見にくいという点や、リアルな掘削機を用いる場合、同一の実験条件の再現が困難という点から見送った。

4.2.2 ターンテーブルシステム

ターンテーブルの上にキャビンに乗せて、バーチャルの環境を作成するシステムについて検討した。この場合、環境の提示には、窓の所にディスプレイを設置する方法 (Fig. 2 参照) と、ターンテーブルの周囲にスクリーンを設置してそこに提示する方法が考えられる。さらに、運転席のみをターンテーブル上に設置し、映像は HMD で提示するというシステムもあり得る。

この方法も、実際に運転席や映像装置を回転させよ

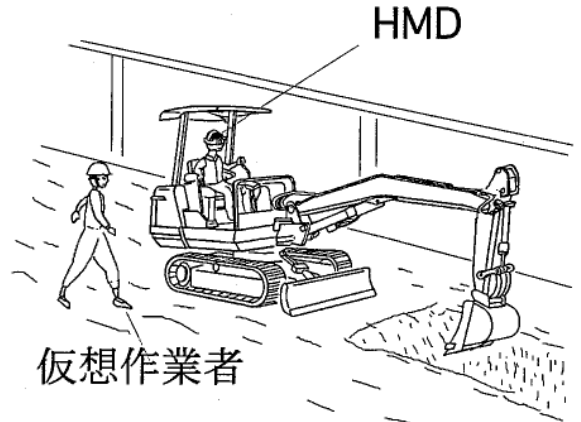


Fig. 1 Real excavator base system.
実機ベースシステム

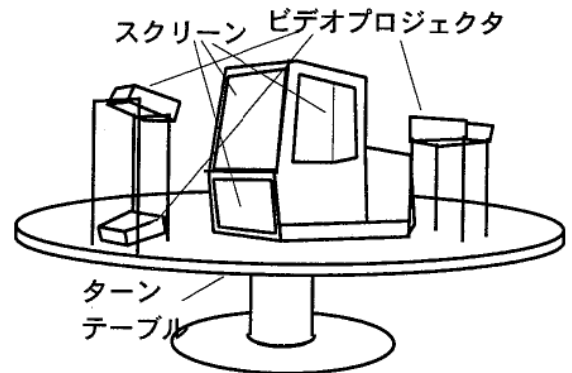


Fig. 2 Turn table system.
ターンテーブルシステム

うとする場合、掘削機の旋回速度にあわせようとする、出力の大きいモータが必要となること、実際に高速回転させると接触に対する安全性の確保が困難になるという点で断念した。HMD を使用するシステムでは、それほど大きなターンテーブルは必要ないが、HMD には前述のような欠点があり、さらにアイカメラが併用できないので、このシステムは採用しなかった。

4.2.3 揺動方式システム

ターンテーブルで回転速度を落として使用するという方式も考えられる。しかし、ターンテーブルのみでは傾斜が与えられない。旋回の体感についても現実ではなくシミュレートしようというのであれば、ターンテーブルより揺動台の方がよい。なぜなら、旋回だけでなく傾斜についても模擬体感を与えられる。

以上の検討の結果、体感の提示には動揺装置を用い、映像の提示には、運転席の周囲に配置したスクリーンを用いることにした。

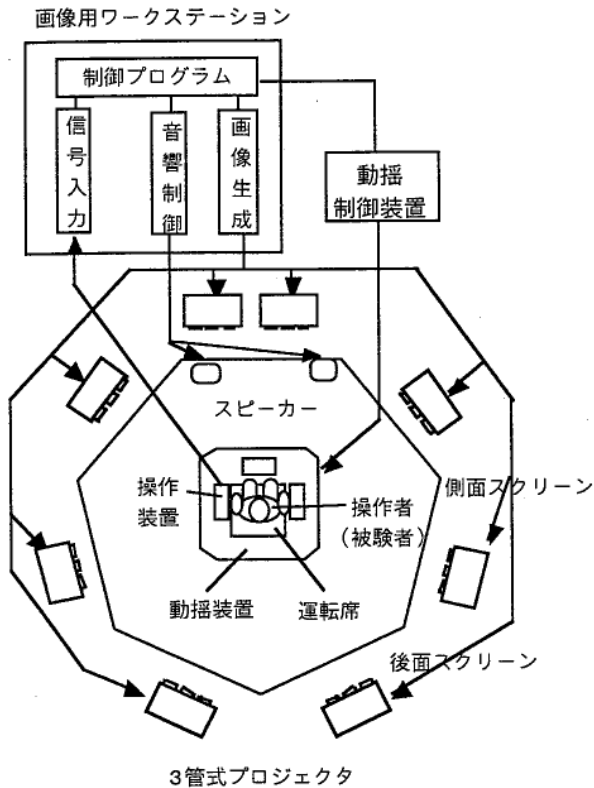


Fig. 3 Construction of VR excavator system.
開発したVR掘削機システムの構成

Table 1 Specifications of excavator simulator.
掘削機シミュレータの仕様

表示方式	スクリーン投影
投影方式	背面投影
スクリーン	120インチ×8面スクリーン
スクリーン配置	正7角形 (Fig. 3 参照)
解像度	640 × 480 / スクリーン
画像更新レート	毎秒 20 画面以上
操作装置	操作レバー (実機に類似)
運転席	動揺装置上に設置

5. VRシステムの概要

5.1 全体構成

以下に示す理由で、大型スクリーンによる映像システムと動揺機能を有する運転席によって掘削機シミュレータを構成した。映像はすべてコンピュータグラフィック(CG)によるバーチャルなものとした。この映像を生成する画像用ワークステーションで同時にシステムの制御を行う構成とした。その全体的な構成を Fig. 3 に示す。また、システムの仕様を Table 1 に示す。

Table 2 Specifications of motion base.
動揺装置の性能

可動範囲	
前後 (X 軸並進)	前 180mm 後 210mm
左右 (Y 軸並進)	左 185mm 右 185mm
上下 (Z 軸並進)	上 190mm 下 240mm
ロール (X 軸回り)	+17° -17°
ピッチ (Y 軸回り)	+19° -17°
ヨー (Z 軸回り)	+16° -16°
加速度	
前後 (X 軸並進)	4.9m/s ² (0.5G)
左右 (Y 軸並進)	4.9m/s ² (0.5G)
上下 (Z 軸並進)	4.9m/s ² (0.5G)
ロール (X 軸回り)	250°/s ²
ピッチ (Y 軸回り)	250°/s ²
ヨー (Z 軸回り)	250°/s ²
積載荷重	500 kg

5.2 VRハードウェア

5.2.1 映像システム

リアリティには、視野に占めるバーチャル空間の割合が大きく影響するので、視野角が大きくなるように120インチの大形スクリーンを上下2面左右各1面の4画面を用いて前方の画面を構成した。これには、立体視の機能を組み込み、遠近感の認知ができるようにした。

また、建設機械では旋回、後退等も多く、前方のみならず、側面・後方を注意する必要も多いので、側面・後方の視界を表示するスクリーンも設け、全周囲7角形で計8面のスクリーンを設けた (Fig. 4 参照)。ただし、全周囲を表示するときには、描画速度を確保するため立体視は行わない。

なお、動きが滑らかに見えるように描画速度は毎秒20画面以上となるようにした。

5.2.2 動揺システム

実際の建設機械と類似の操作装置と座席を設け、運転操作が可能ないようにした (Fig. 5 参照)。すなわち、走行を制御する2つのレバー付きペダル、アーム、ブーム、バケット、旋回を制御する2つの2自由度操作レバーを有し、これらの傾きは電氣的に制御用コンピュータに入力され、画像の動きに変換される。なお、この2自由度操作レバーは、先端に押しボタンを有していて実験時の被験者の応答を入力できる。

ショベルカーの運転においては、バケットの地面との接触に伴う運転席の動揺等の情報が重要であるので、これを模擬できるように運転席を動揺台の上に設置し、映像と同期して動揺できるものとした。また、この動揺機能を用いて旋回時の加減速をシミュレートする。

今回のシミュレーションでは、ショベルカーを中型と小型で切り替えるため、運転席のキャabinはバーチャルなものとしたが、現実感を向上させるために現実のキャabinを乗せる場合も考慮して、モーションベースの可搬重量は500 kgとした。この動揺装置の仕様をTable 2に示す。

また、掘削の作業そのものには関係ないが、実機に似せるために次のような機能を持たせてある。動作状態のまま掘削機から出ることを防止するために現実の掘削機には降車時には操作装置を無効にする安全装置を取り付けているが、本装置にも座席の横にレバーを配置し、レバーを上げていると動揺装置が働かないようにした。

さらに、動揺装置は現実には座席が揺れるため、激しく揺れた時に座席から落下しないようにシートベルトが設けられており、このシートベルトをロックしないと、動揺装置が働かないようになっている。

5.3 VRソフト

VRのソフトは、VRのハードウェアを操作するためのVRシステムプログラム、掘削機やダンプカー等の3次元モデルのデータ、掘削機の作業現場におけるモデルの挙動を制御するアプリケーションプログラムよりなる。

5.3.1 VRシステムソフト

VRシステムソフトは市販のものを用いた。

その主な特長を以下に示す。

- (1) 与えられた3次元データを用いて、バーチャルな世界を表示する機能を有する。
- (2) if-then 構造の独自のインタープリータ言語を有する。
- (3) 独自言語のプログラムにより画像の切り替えができる。
- (4) 立体プロジェクタ・HMD・データグローブなど様々な周辺機器にも対応できる。なお、操作レバーや操作ボタンの入力や操作盤の表示のために、特注でアナログ入力やデジタル入出力にも対応させた。

5.3.2 3次元モデル

VRシステムで表示させるオブジェクトのモデルであり、実験に必要な掘削機やダンプカー、作業環境を構成する地面や塀、近接作業者等を作成した。掘削機は小型 (Fig. 6 参照) と中型 (Fig. 7 参照) のものを各1台作成した。また、人物としては、手押し車で荷物を運搬する作業者、土管をかついで運搬する作業者、土を掘る作業者、合図をする作業者のほか、道路を歩行する親子の歩行者を作成した。これらを用いてスクリーンに投影される画像の一例を Fig. 8 に示す。

今回のモデルで特長となるのは、掘削される地面である。地面は掘削によって掘り広げられることが必要である。そのための手段として、

- (1) 土粒をモデル化する。
- (2) 前もっていくつかの掘削状態を作成しておいて掘削の進行と共に切り替える。
- (3) 変型可能なオブジェクトとして、掘削に伴って変型させる。

等の手段を検討した。(1)はオーソドックスな手法であるが、要素が多いため計算時間がかかり過ぎるので、実用的でない。(2)は画像が固定されるので操作によっては不自然な映像となり好ましくない。そのため、(3)のモデルを採用した。

これらは、高速で描画するために、リアリティが損なわれない範囲でできる限り単純化した。

さらに、一般にシミュレーションを行うために物体と物体の接触の判定が必要であるが、接触の判定には計算時間がかかるので、必要最低限のバケットと土の接触の判定とバケットと人物の接触の判定のみ行うようにした。

5.3.3 掘削機アプリケーション

VRシステムソフトの上で掘削機のアプリケーションソフトを開発した。掘削機のアプリケーションは、掘削機の動作のシミュレーションの他に作業環境のシミュレーション等の機能を有する。

前者は運転席からの操作に応じて掘削機のモデルのブーム、アーム、バケット等の各部が動いたり、掘削機のモデルの動作に応じて、動揺装置により動揺を加える機能である。掘削によって、地面がへこんでいく機能や、トラックの荷台や地面の上に掘った土の山ができる等の機能がある。なお、現在は、操作レバーとアーム等の動きの対応関係はJIS (ISO) で定められているが、かつてはメーカーごとに操作レバーと動きの対応が異なっていた。このシステムではどの操作方式にするかを自由に選択できる。

後者は、人間工学的実験のために、マーカーを提示したり、作業者が各種の作業を行う等を制御する機能である。何種類かの作業者があって、掘削機に接近したり、掘削機の近くで動いている。また、歩行者や車等もある。

この部分は、独自のインタープリータ言語の上で構築されていて、ユーザが自由に書き換えられるようになっている。これによって、自由に実験条件等の変更が可能となる。

6. おわりに

掘削機の運転作業をシミュレートするVRシステム

を開発した。このシステムは以下に示す特長を有する。

- (1) 全周囲の映像を提示できる。
- (2) 旋回やバケットの地面との接触等の操作に伴う体感を提示できる。
- (3) 正面映像は立体視できる。
- (4) 各社の操作方式が選択できる。
- (5) 中型と小型の掘削機が選択できる。

今後、このシステムを使用して、作業中の注視箇所や注視点の広がり等について解明していく予定である。また、これらに対する中型機と小型機の違いや、慣れていない操作方式による誤操作の可能性等についても

検討する予定である。

参考文献

- 1) 深谷 深, 梅崎重夫, VR技術を用いた掘削機シミュレータの開発, 第3回VR学会, pp. 321-322 (1988).
- 2) 深谷深他, 運転者の人間特性測定のための掘削機作業シミュレータの開発, 第23回安全工学シンポジウム, pp. 309-310 (1989).

(平成13年2月14日受理)



Fig. 4 Screens and driver's seat.
スクリーンと運転席



Fig. 6 The small sized excavator model.
小型掘削機モデル

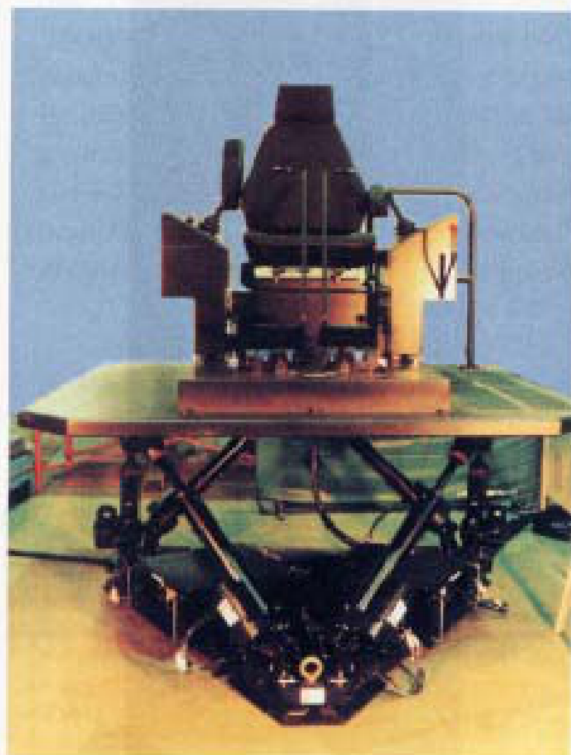


Fig. 5 Motion base.
動揺装置

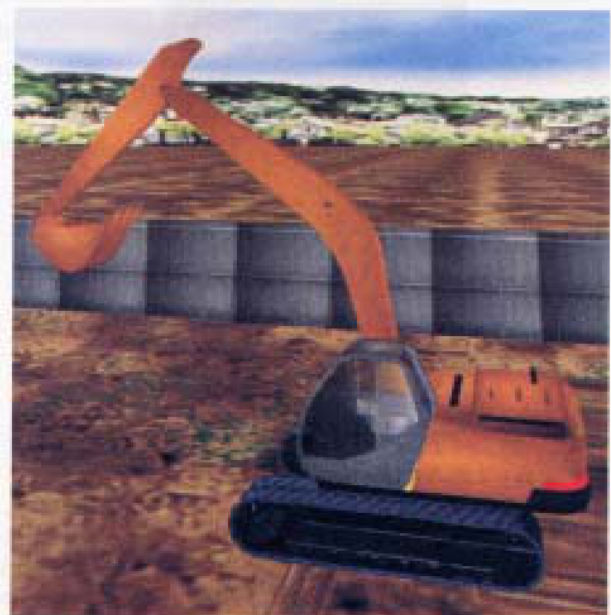


Fig. 7 The medium sized excavator model.
中型掘削機モデル



Fig. 8(a) The image of four front screens. (左図)
正面スクリーンの映像

Fig. 8(b) The image of rear and side screens. (右図)
後方側方スクリーンの映像

