

3. 掘削機の小型危険体験シミュレータの開発*

深谷 潔** 中村隆宏**

3. Development of a Small Sized Simulator to Simulate Hazards in Excavator Accidents*

by Kiyoshi FUKAYA** and Takahiro NAKAMURA**

Abstract; A large excavator simulator for research was developed, and the research on the operator's actions was done. On the basis of these experiences, a small PC based simulator was developed for the safety training. This simulator has a front screen with 6 planes, 8 projectors, a driver's seat on a motion base, and PCs that generate CG images and control the system. A set of 4 projectors is used to project 4 images to 6 planes for one-eye, and 2 sets of projectors are used for stereoscopic viewing. The aim of the simulator is to give simulated experiences of excavator accidents. A turnover accident in driving on a slope, in loading to the truck and in running over uneven surfaces can be experienced.

The performance of the small simulator was evaluated in comparison with the large simulator. Occupied area of the system is considerably reduced. The brightness of screen images is improved and the images can be seen with illumination, which means this system can be used in an ordinary meeting room. There is some defect in uniformity of the brightness of screen images because of the complexity of the projection, that is, projections with 8 projectors to 6 planes. The ratio of the area of the projection image in the visual field is nearly same as that of the large simulator. The degree of freedom of the motion base is reduced from 6 to 2, but the expressive effect is sufficient for this content.

The performance of the new characteristics of the small simulator was also evaluated. The simulator has flexibility in the projection system, that is, capability of reduction of projectors. A projection system of 2 images is possible, but the expressive effect will be reduced. The system is portable, because it can be disassembled, but it is difficult.

Keywords; Excavator, Accidents, Simulator, Simulated Experience

1. はじめに

フェールセーフやフェールプルーフ等の機械設備によって災害を防止する手段が普及してきているが、自動車の運転のように事故防止を人間に委ねられているシステムは少なくない。これらのシステムにおいては、システムを運用する人間の知識や技量が災

害を防止できるか否かに大きな影響をもたらす。従って、災害回避のための教育訓練が必要となる。

当研究所では、大型の研究用の掘削機シミュレータを開発して、その運転者の挙動の研究を行ったが、その経験を生かして掘削機の安全教育用のシミュレータを開発したので、これについて以下に紹介する。

* 本研究の一部は、第9回VR学会(平成16年9月9日)¹⁾、第37回安全工学研究発表会(平成16年11月25日)²⁾、第13回交通・物流部門大会(平成16年12月3日)³⁾、等⁴⁾で発表済みである。

** 境界領域・人間科学安全研究グループ Interdisciplinary and Human Science Safety Research Group

2. シミュレータの目的と意義

2.1 安全教育のためのシミュレーションの例

昔からあるシミュレータとしてパイロットの訓練に使用するフライトシミュレータや、原子力プラント・化学プラントのオペレータの訓練用プラントシミュレータがある (Fig.1, Fig.2参照)。

フライトシミュレータは、飛行機の機種ごとにシミュレータがあり、飛行場・飛行コースごとのデータを持っていて、新しい機種やコースについての学習に用いられている。正常な飛行以外に、天候不良や故障時等の対応を訓練するためにも用いられている。

原子炉の運転を行うオペレータの訓練用シミュレータでは、原子力プラントについての基礎知識や基本的な運転操作についての教育訓練の他、事故時の対処方法の訓練にも使用されている。

これらのシミュレータは、通常の作業時の操作方法等を教育訓練することが重要な目的の一つであるが、それ以外に故障等の異常時のシミュレーションが可能であり、その対処の訓練を行うことができる。

自動車運転教習所にも、運転シミュレータが導入されていて、車の陰からの子供の飛び出しや、交差点での急な右折車の出現等の危険な状況の体験学習がおこなわれている。近年では、運転席を動揺装置の上に設置して、運転操作時の加速度までもシミュレーションできるものも開発されている。

その他、航空機の管制業務のシミュレータや、操船シミュレータ等が開発・活用されている。

正常時のシミュレーションだけではなく、異常時のシミュレーションに特化したシミュレータもある。消防研究所で開発した避難シミュレータは、ビル内部の火災の状況をシミュレートするもので、映像だけではなく実際に発煙筒で作成した煙を流すことでリアリティの向上を図っている。

2.2 安全教育のためのシミュレーション

シミュレータではないが、安全教育にシミュレーションが使用されている。

身近な例では、消防訓練や避難訓練は消火作業や避難行動のシミュレーションである。文書等により、頭だけで知るのではなく、行動と結びつけて体で覚えることに意味がある。

実際に自分で行うわけではないが、疑似事故を見せる安全教育もある。マネキンを高所から落下させたり、単管パイプのような長尺材を真ん中でのみ把持するような不適切な玉掛けで荷を持ち上げてこれ



Fig. 1 A flight simulator.
フライトシミュレータの例



Fig. 2 A nuclear power reactor simulator.
原子炉シミュレータの例

を落下させたりして、作業者に危険性を示す事例がある。これらは、実物によるものであり、その分迫力はあるが、危険性も少なくない。

また、重機（掘削機、締固め機）においては、実機を用いた体験型教育が行われている。例えば、掘削機においては、重い荷物を吊ったバケットを伸ばすなどにより、クローラが浮くことを体感させることが行われている。これも、多少の危険性を伴う。

2.3 シミュレータを使用する意義

安全の訓練においてこのようなシミュレータを活用することの利点を以下に示す。

1) 事故となるような危険な状況を再現でき、また、事故を体験できる。

人間は知っているか知らないか、経験しているか経験していないかで、異常事態への対応能力に大きな差が出ると考えられる。従って、事故の疑似体験は、現実の事故を避ける上で有効と思われる。

2) 失敗が許される。

実際に物を落とすようなシミュレーションも有効であるが、危険を伴う。バーチャルなシミュレータでは、この危険を避けられる。従って、より踏み込んだ危険状況のシミュレーションも可能となる。また、その対処に失敗しても何度でもやり直せる。

3) 同じ条件を再現できる。

条件を同じにすることができるので、何度でも同じ条件で繰り返し練習できる。また、訓練効果の評価のためには、訓練材料は同一であることが必要である。

4) 条件の設定変更が容易である。

濡れた地面と乾いた地面では地面の滑りやすさが異なる。乾いた地面は水を撒けば濡れた地面になるので、この順番でなら2つの地面の走行を実際に体験することができるが、逆順では極めて困難である。シミュレーションでなら、地面の摩擦係数を切り替えることで、滑りやすい地面と滑りにくい地面の切り替えは容易である。

5) 種々の条件を相対的に安価に用意できる。

斜面の走行においては、斜面の角度によって転倒の危険性は異なる。実機において、幾つかの角度の斜面を用意するためには広い面積が必要であるが、VRを用いたシミュレーションにおいてはモデルさえ用意すれば、どのような角度の斜面も可能となる。

6) 操作記録の再現が可能である。

教育において復習は有効であるが、疑似危険体験においても、操作結果を見直して問題点を把握することが重要である。

実機を用いて操作体験を行う場合、その操作記録をとることは必ずしも容易ではない。実機の動きや操作をビデオ等で記録することは可能であるが、視点は限定される。一方、VRによるシミュレーションならば、操作を記録しておけば、運転席からの映像のみならず機外からの映像を再現して見ることも可能である。

2.4 掘削機シミュレータの意義

建設業において重機（建設機械）による災害は、墜落災害について多い（Fig.3参照）。なかでも掘削機による災害は重機災害の半数以上になる（Fig.4参照）。このように災害が多い掘削機であり、自動車と同様に事故防止が運転者に委ねられている部分が多い。さらに、危険再認識教育の対象ともなっている機種である。これらのことを考慮して、掘削機の災害を疑似体験できる安全教育用災害シミュレータを開発した。

3. 小型訓練用掘削機シミュレータの設計

3.1 研究用大型シミュレータの概要⁵⁾

小型訓練用シミュレータの元となった大型の研究用掘削機シミュレータの概要を述べる。

120インチの大型スクリーンを7角形となるように配置し、運転者の全周囲の視野画像が得られるようにした（Fig.5参照）。これは、掘削機の後部で作業

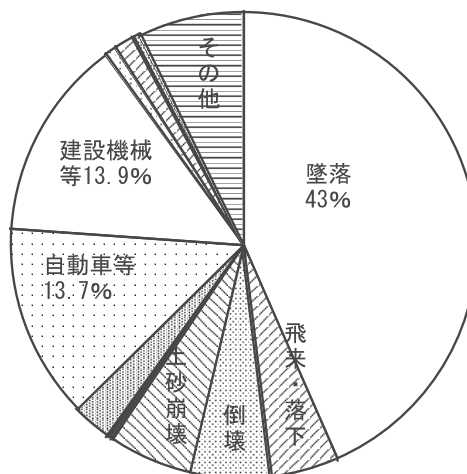


Fig. 3 Kinds of fatal accidents in construction industry. 建設業における死亡災害の種類 (平成15年)

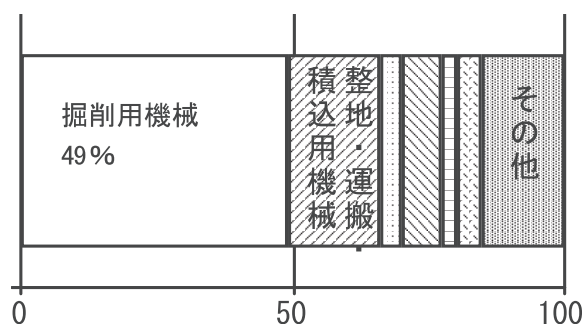


Fig. 4 Kinds of machinery involved in fatal accidents. 建設機械等の機械の種類別死亡災害 (平成15年)



Fig. 5 Large size simulator. 大型シミュレータの外観

者を挟圧する災害が多いため、運転者の後への注意状況を調べるためである。また、地面を掘る作業を行うために、正面については、上下2面のスクリーンから構成した。また、投影方式は、背面投影とし、被験者・実験者の影が投影されないようにした。

運転席には、実機と類似した操作レバー等を設置し、実機と同様の操作で映像上の掘削機の操作が行えるようにした。また、運転席は動揺装置の上に設置して、バケットの地面接触時の車体の傾き等を模擬した。

また、投影する映像の生成、レバー等の操作の入力及び動揺装置の制御には、グラフィックワークステーションを使用した。

3.2 小型シミュレータの設計方針

大型のシミュレータは、非常に大きなスペースと外光の遮断を必要とするので、設置には特別な部屋が必要となる。また、複数のスクリーンへの統合された投影が必要であるが、そのためには、高価なグラフィックワークステーションを必要とする。また、運転席をのせているモーションベースは高機能ではあるが、大きいので、全周囲スクリーンとともに大型化の原因となっている。この3点は、同種のものを導入する上での障害となる。教育訓練用として広く導入されるために、この3点を中心に変更を加え、他の機能はできる限り踏襲するという方針で、設計しなおした。

設計方針としては、基本的な方式は大型のものを踏襲するが、一部機能を削減することで小型化を計るものである。さらに、小型化の利点を生かして、所外の事業所等へ持ち込んで使用することについても配慮した。また、同種のものを導入し易くするために、予算に応じて簡略化した構成も可能となるシステムをめざした。具体的には、以下の方針を設定した。

- (1) 疑似危険の提示は、視覚と体感による。
- (2) 視覚情報の提示は、スクリーン方式とする。
- (3) 体感の提示は、運転席の動揺機能と操作機能による。
- (4) 立体視を可能とする。
- (5) 大型機で開発したコンテンツを移行する。
- (6) 設置スペースは3m×3m×2.5m以内とする。
- (7) PCベースのシステムとする。
- (8) 動揺装置は簡略化する。
- (9) スクリーンの視野角が水平120度、鉛直70度以上とする。
- (10) 可搬性を持たせる。
- (11) システム構成が柔軟に変更可能とする。

4. 小型訓練用掘削機シミュレータ

4.1 小型システムの概要

前述の設計方針に基づき、小型シミュレータを開発した。大型のものからの変更箇所は(6)から(9)であるが、大型のものと比較した主要な仕様をTable 1示す。(10)については、組み立て式とした。(11)については後述する。

Table 1 Comparison between large size simulator and small size simulator.

大型シミュレータと小型シミュレータの比較

	Large (大型)	Small (小型)
Space (大きさ)	13×12×4m	3×3×2.5m
Graphic Generator (画像生成装置)	Graphic WS	PC
Number (台数)	1	9
Motion base (動揺装置)	6axis (6軸)	2axis (2軸)
Pitch (ピッチ)	-19° ~17°	-15° ~15°
Roll (ロール)	-17° ~17°	-15° ~15°
Screen (スクリーン)	8 planes (8面)	6 planes (6面)
Configuration (配置)	Surrounding (全周囲)	Front (正面)
Projector (プロジェクタ)	CRT	DLP
Luminance (輝度)	900lm	1000lm
Number (数)	8	8
Projection method (投影方式)	Rear projection (背面投影)	Front Projection (正面投影)



Fig. 6 Small size simulator.

小型シミュレータの外観

4.2 ハードウェアの構成

本システムは、制御用PC、画像生成用PC、プロジェクタ、前面スクリーン、運転席よりなる。(Fig.7参照)

1台の画像生成用PCで1つのプロジェクタ用の画面を生成する。制御用PCは、画像生成用PCの制御とともに、運転席の制御出力や操作レバーの入力の制御

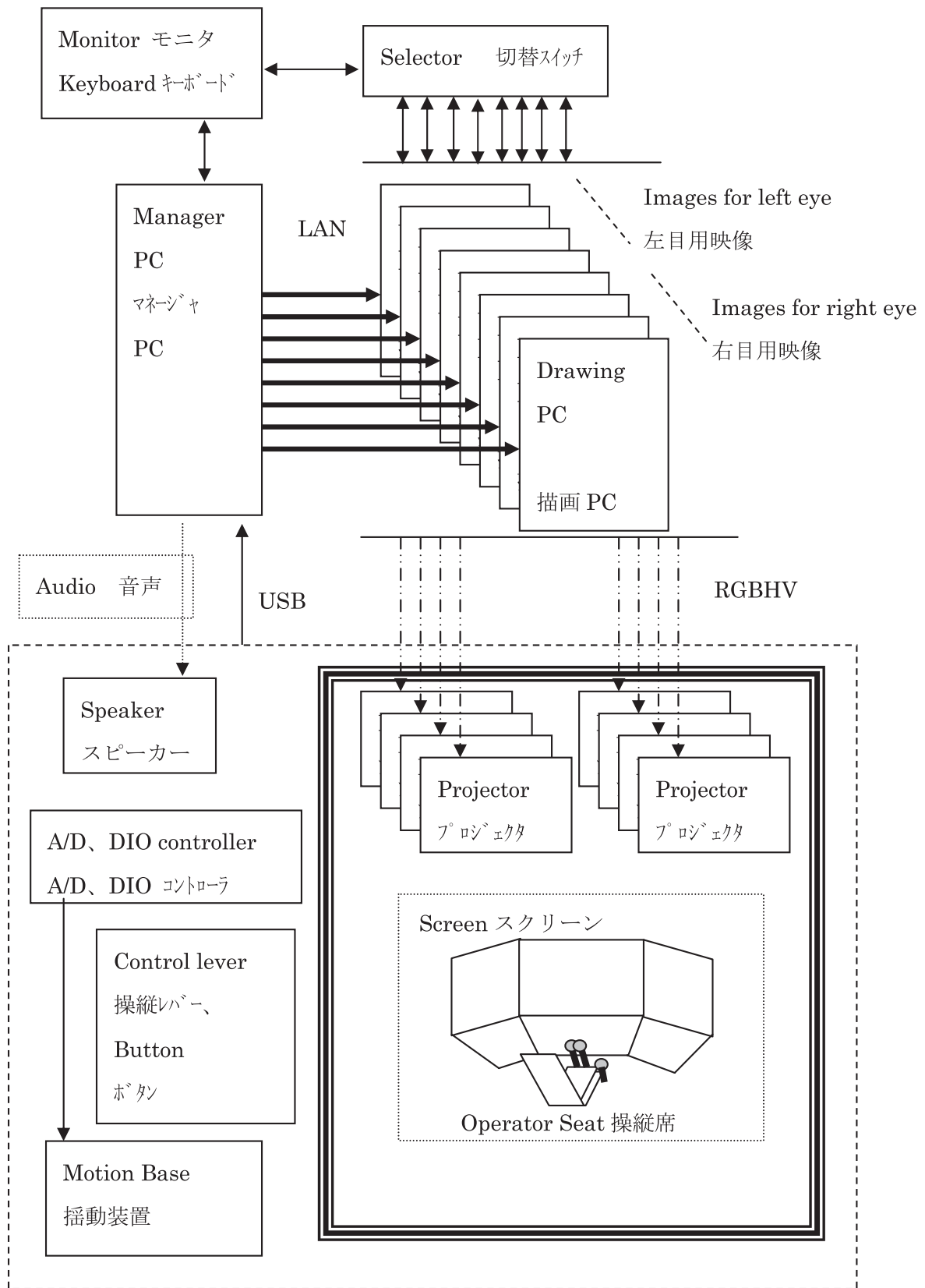


Fig. 7 Block diagram of the small size simulator.
小型シミュレータのシステム構成

を行っている。さらに、転倒に関連して車体の安定性の計算も行っている。

以前の研究から、運転者はほとんど前面しか見えていないことが分かっているので、スクリーンは前面のみとした。ただし、視野角を確保し、かつ、全体の大きさを小さくするために、スクリーンの左右と下側を運転者に対して折り曲げた6面のスクリーンとした(Fig.6, Fig.8参照)。このスクリーンに4台のプロジェクタで投影しているが、詳細については後述する。なお、本システムでは、2組(合計8台)のプロジェクタを用いて、それぞれの組で右目用と左目用の映像を投影することで立体視を可能としている。

また、運転席には2軸の傾斜機能を付け、傾斜地の走行時の体感のシミュレーション等を可能となるようにした。



Fig. 8 Projection system.
投影システムの概要

4.3 コンテンツの概要^{6) 7)}

掘削機の災害には、大きく分けて接触災害と転倒災害、飛来落下災害、その他がある。このうち、接触災害が約半分、転倒災害が約1/3位を占める。本シ



Fig. 9 Slope running and upset accident.
斜面走行作業と転倒災害

Fig. 10 Loading and upset accident.
積込み作業と転倒災害

ミュレータでは、主に転倒災害シミュレーションを行っている。(Fig.9, Fig.10 参照)

転倒災害は、斜面を走行したり、重い荷物を吊ったりする他、地盤が崩れたりすること等が原因である。本シミュレータでは、急な斜面を走行したり、斜面の障害物に乗り上げたりした場合に転倒する。正常な走行と危険な走行が可能のように、斜面の角度が連続的に変化していて、なだらかな斜面と急な斜面が作ってある。また、斜面に障害物としていくつかの切り株を配置してあって、乗り上げることができる

接触災害は、大きなカウンタバランスを持つための後方視界の不足と、カウンタバランスの旋回時の車幅からはみ出し、および、下方掘削時にバケットが視野外に出ることが大きな原因である。基本的に、被害者は視野外にいて、一旦接近されたらほとんど気づきようがない。そのため、本シミュレータでは、接触に関しては、旋回時等にバケットや車体後部を当てる場合にとどめている。

転倒災害は、斜面を走行したり、重い荷物を吊ったりする他、地盤が崩れたりすること等が原因である。本シミュレータでは、急な斜面を走行したり、斜面の障害物に乗り上げたりした場合に転倒する。正常な走行と危険な走行が可能のように、斜面の角度が連続的に変化していて、なだらかな斜面と急な斜面が作ってある。また、斜面に障害物としていくつかの切り株を配置してあり、乗り上げることができる。また、雨を降らすことができるが、そのときの水たまりでは地面の摩擦係数を少なくして滑り易くしている。

掘削機のトラックへの積み込み作業もできるようにしてあり、道板からの外れると転倒する。トラックの積み込み時には、バケットで車体を支えることが必要であり、そのため、バケットで地面やトラックの荷台を押し下げると、車体が持ち上げられるが、これをシミュレートする機能を有している。

さらに、吊り荷作業時に、重い吊り荷の場合、アームを伸ばすとモーメントが大きくなって転倒する。吊り荷の重さによって転倒の危険性が異なるので、その重さは別途設定できるようになっている。

また、地面の一部に大きな段差を設け、乗り出し過ぎるとそこから転落する。これらの転倒現象は、リアルタイムに安定性の計算を行い、重心が支持面から出ると転倒するようにしている。

また、機種として中型の掘削機 (Fig.9, Fig.10参照) と小型の掘削機 (Fig.11参照) が使用可能である。



Fig. 11 Small size excavator model.
小型掘削機の外観

4. 小型システムの評価

4.1 設計方針に対する評価

前述した通り、できる限り大型シミュレータの性能を落とさずに移植することをめざした。ただし、小型化とPC化のために必要ならば、機能を削った。一方、小型化の利点を生かすために、可搬性を持たせることを試みた。また、民間企業で、このシミュレータをもとにしたシミュレータの導入をすることを想定しているが、その場合に予算と場所の制約からこのシステムを簡略化することも考慮した。

これらについて、以下に説明する。

4.2 投影方式

大型のものは、素直に1つのスクリーンに対して1つのプロジェクタで投影しているが、今回開発したものは、プロジェクタの数を少なくするため4つのプロジェクタを用いて、6面のスクリーンに投影している。そのため、1つのプロジェクタで2つのスクリーンにまたがって投影することになる。このため、スクリーンの折り曲げを考慮して、画像生成の段階で映像を歪ませたり、明るさを変更したりすることが必要となる。画像の接続はうまくいっているが、スクリーンの継ぎ目の明るさの均一性に多少の問題が出ている。スクリーンの明るさが角度に依存するため、両側面のスクリーンの明るさは頭部を動かすと変わる。運転席に着座しているためこのシミュレーションではそれほど頭部の位置が動くわけではないが、どの頭の位置でも均一の明るさにすることは不可能である。従って、違和感を与えない程度に調整できればよいこととした。

スクリーンの視野に対する割合は、魚眼レンズによる画像の面積比で見ると、48%から42%に低下している。しかし、Fig.12に見られるようにスクリーンの配置が視野に対して下に分布していて、かつ、表示内容が上を見る必要がないものであるため、体感上はむしろ広く感じる。

立体視の性能については、向上している。大型のものでは遠景と近景の区別はつくが、中遠景同士の遠近の区別はつきにくかった。小型のものでは、近景から遠景までの遠近感がより明瞭に感じられる。これはスクリーンが近くなったことと、画面の解像度が向上したためと思われる。立体視のための奥行き情報は、スクリーン上での右目用の映像と左目用の映像の位置のずれによって与えられる (Fig.13参照) が、目とスクリーン間の距離以上の中遠景の物体については、映像のずれはスクリーンが遠くなるほど小さい。大型のものではスクリーンが遠いうえに解像度が低いので細かな映像のずれを十分表現できなかつたものと思われる。

プロジェクタの明るさが同等であり、かつ、スクリーンが小さくなったので、映像の輝度が向上した。従来ものではすべての照明を消さないと画像が白けて見づらかったが、今回のものは、一部の照明が点いても見られる。このことは、窓のない特別な部屋の必要性がなくなり、カーテン等を用いれば会議室のような部屋でも使えることを意味している。

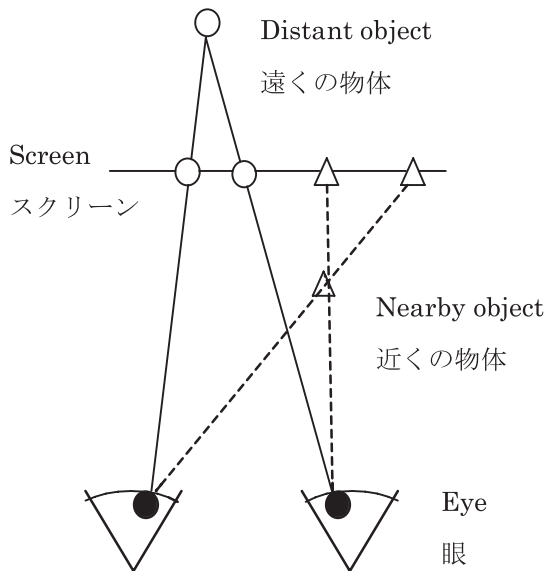


Fig. 13 Principle of stereo view.
立体視の原理

4.3 動揺装置

運転席が動揺することで、体感が得られるようにしてある。斜面走行における車体の傾斜や、旋回時の加速度をシミュレートすることができる。フライトシミュレータのように運転席とスクリーンをいっしょに動揺させることがベストであるが、大型掘削機シミュレータではスクリーンはそのまま運転席のみを動揺させることで、傾斜面走行では十分な迫力が得られている。小型掘削機シミュレータでもその方式を踏襲した。

大型のシミュレータでは上下左右前後の移動と、左右の回転、左右・前後への傾斜の6軸の能力があった



Fig. 12a Front screen images of the large size simulator.
大型シミュレータの前方スクリーン



Fig. 12b Screen images of the small size simulator.
小型シミュレータのスクリーン

ものが、左右前後の傾斜の2軸しかなくなったので、表現力の可能性の減少は明らかである。この影響について、このコンテンツを対象にして検討した。

このシミュレーションにおいて動揺装置を用いるのは、バケットの地面との接触による車体の傾き、走行時の車体の傾き、回転時の加速度のシミュレート、運転時の車体の振動の4つである。これらのシミュレーションにおける必要な機能を見てみる。2種類の車体の傾きのいずれも、前後左右の傾きがあればよく、2軸で間に合う。回転では回転が必要な気がするが、回転中心はキャビンの外に有り前後の加速度に近い。従って、前後の傾斜で表現できる。そもそも回転時の加速度はそれほど大きくないため動いたという感覚を与える程度でよいので、2軸でも十分表現できる。振動は上下や左右の移動で表現するのが素直と思うが、動きが微小なため、前後左右の傾斜でも振動が感じられた。

4.4 システム構成簡略化の検討³⁾

このシステムはプロトタイプであり、最大限の性能をめざしたが、予算や必要性によって、シミュレータの規模を縮小できるようにすることを配慮した。1つのPCで1つのプロジェクタの投影画像を生成しているので、投影画像を削減することでプロジェクタと同時にPCの数も減らせる。一番投影画像削減効果が高いものは、立体視をやめることで、プロジェクタが半減できる。

さらに画面の構成を変更することで、Fig.14のように、4つの投影画像を用いたシステムから、2つの投影画像を用いて縦または横に投影する簡易化したシステムも可能となるよう考慮した。

ハードウェアの構成としては投影画像2つのシステムも可能であるが、視野角が狭くなるため、このコンテンツにおいて、シミュレーションとして問題が生じないかどうかを検討した。

掘削機のクローラは下側のスクリーンに投影されるが、横2面の場合は、これが表示されないことになる。そのため、車体の向きが不明となる。上部のキャビンを回転した状態で走行すると、どちらに向かって移動するか事前には分からないことになる。

また、掘削のシミュレーションにおいては、地面が見えることが必須であるので、このコンテンツに対しては、横2面は不向きである。

傾斜地を走行する場合の車体の傾きをシミュレートするため、運転席を傾斜させるとともに画像を傾けている。以前の大型スクリーンのようにスクリーンの視野に占める割合が大きい場合には、運転席を傾斜させなくても傾斜を感じる。

斜面に直角に走行する場合には、正面の画像は見上げるか見下ろすものになるが、水平線がスクリーンと平行になると、傾斜の程度に関する視覚の手がかりが乏しくなる。このとき左右の画像は水平線が傾いたものになるので、左右の画像があると傾斜感の手がかりになる。縦2面の場合にはこの手がかりが失われることになる。従って、この場合のできることはかなり制

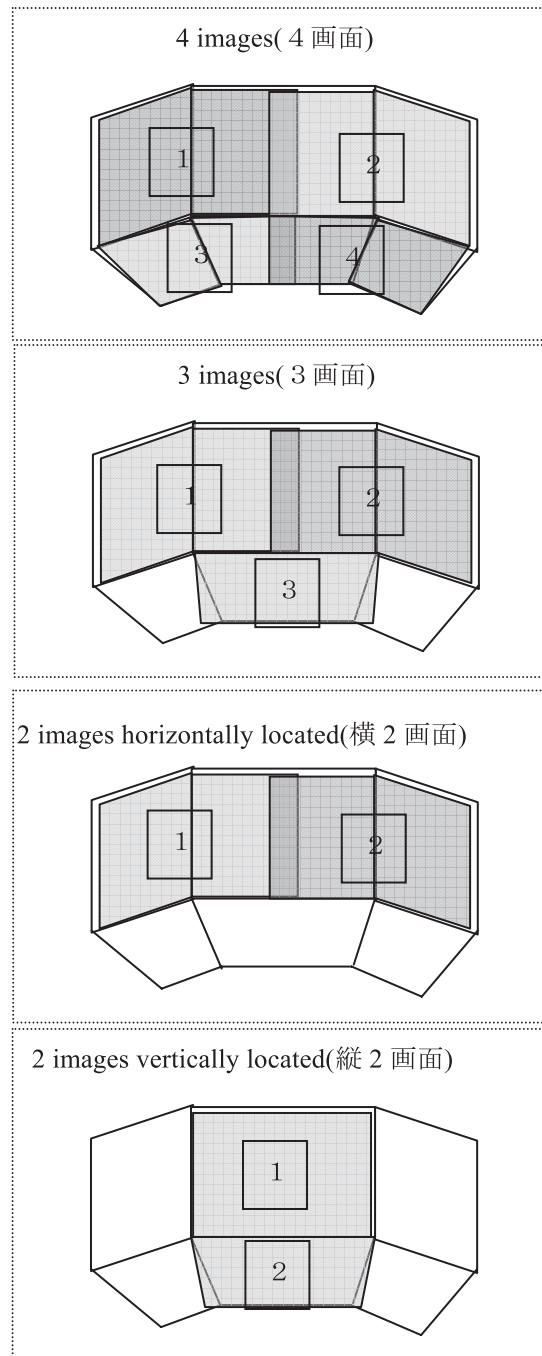


Fig. 14 Projection methods according to the number of projectors.

プロジェクタの数に応じた投影方式

限されると思われる。

以上の検討から、今回のシミュレーション内容に対しては、少なくとも3つの投影画像が必要と思われる。

4.5 可搬性

本装置は、大型シミュレータと異なり一カ所に固定するのではなく、事業所に持って行って多くの作業者に体験してもらうことも想定して、可搬性についても配慮した。システムは、PCラック、スクリーン及び架台、プロジェクタ及びその架台、運転席という別々の要素からなり、相互に固定してはいない。また、架台はいくつかに分解できる。その意味で、運搬可能ではある。

しかし、システムを移動させると、プロジェクタとスクリーンの相対位置が変化するので、調整が必要である。調整の手間を軽減するために調整用のグリッドパターンは用意してあって、グリッドがつながるように画像を調整するシステムとなっている。しかし、この調整は、かなりの技量が必要であり、ユーザ自身で行うことは困難である。従って、現状では分解して運ぶことは、ユーザレベルではできない。移動できるようにするためには、地震体験車のように、装置一式をトラックの荷台に載せて使用する等の別の工夫が必要かもしれない。

5. おわりに

実験研究のために、大型の掘削機シミュレータを開発し、また、これをベースに教育訓練用の小型シミュレータを開発した。このシミュレータ及びこの報告がシミュレータを安全教育に活用することに役立てば幸いである。

参考文献

- 1) 深谷 潔, 中村隆宏, 万年園子: 可搬型掘削機災害シミュレータの開発, 日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集, pp.275-276 (2004)
- 2) 深谷 潔, 中村隆弘, 万年園子: 掘削機シミュレータ, 第37回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.31-36 (2004)
- 3) 深谷 潔, 中村隆弘, 万年園子: 掘削機災害小型シミュレータの開発, 第13回交通・物流部門大会講演論文集, pp.263-264 (2004)
- 4) 深谷 潔, 掘削機災害防止のための危険体験シミュレータ, 安全工学, 44-4, pp.257-262 (2005)
- 5) 深谷潔, 他: 掘削機作業シミュレータの開発, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-NO.23, pp.7-14 (2001)
- 6) 深谷 潔, 中村隆宏, 万年園子: 掘削機災害シミュレータの開発, 日本バーチャルリアリティ学会第7回大会論文集, pp.131-132 (2002)
- 7) 深谷潔, 他: 掘削機災害シミュレータの開発, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-NO.28, pp.91-100 (2003)

(平成17年10月27日受理)