

6. 掘削機オペレータの眼球運動と注視行動*

中村隆宏** , 深谷 潔** ,
万年園子***

6. Eye Movement and Fixation in the Excavator Operation*

by Takahiro NAKAMURA**, Kiyoshi FUKAYA**,
and Sonoko MANNEN***

Abstract : The simulator is a remarkable tool for safety education and training, and it is considered to be useful as an experimental approach as well. Nakamura et al. (2001) measured eye movement of excavator operators through the experiment using the simulator. They discussed the fundamental factors to acquire visual information, which affect the useful field of view, such as experiences, mode of the operating levers, and so on.

However, there is some difficulty to consider the observed behaviour in the experiment using the simulation to that in the real situation. Because the simulation is consists of artificial environment, even if it contains the advanced reality, so the subjects distinguish easily the simulation and the actuality.

From these points, it is necessary to understand the differences between the result of experiment using the simulator and that using real machinery. Through such examination, it will be possible to confirm the validity of the simulation.

In this study, eye movement measurement was carried out using real excavator (actual-condition) (N=2). As a contrast, the data of the experiment using the simulator (simulation-condition) was used (N=4). Some fundamental factors to acquire visual information were compared and discussed, such as the extent of eye movement, saccadic distance, fixation duration, frequency of fixation to each object, and so on. As the result, several common aspects were found between both experimental conditions.

Even if the obtained results were limited to visual information factors, the validity of the simulation would be confirmed, and the utility value of the simulator as an experimental equipment would increase.

Keywords ; Eye movement, Visual information, Simulation

* 日本人間工学会第42回大会(2001)において一部発表

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

*** 科学技術振興事業団 重点研究支援協力員 Supporting Staff for Priority Research, Japan Science and Technology Corporation

1. はじめに

建設労働災害の中でも、建設機械が関係する災害は重大な結果につながりやすい、という特徴を有する。これは、建設機械が人力を遥かに凌ぐエネルギーを発生させ作業の効率化・省力化を実現する一方で、そのエネルギーが人間に対して向けられてしまうことがあるためである。

掘削機による災害は「周辺作業員被災型」と「オペレータ被災型」に二分される。前者については、「挟まれ・巻き込まれ」「激突され」といった災害が主であり、掘削機を操作するオペレータが周辺の作業環境に存在する危険対象を的確に認識し回避行動を行うことで、災害発生の可能性を大幅に低減することが可能なはずである。こうした点に着目し、これまでに、眼球運動の測定ならびにターゲット検出課題を通じ、掘削時・積込時と旋回時の眼球運動の特徴と差異、操作時の主たる注視対象、およびターゲット検出パフォーマンスに影響を及ぼす要因等について検討が行われている¹⁾。

しかし、これらは、掘削機シミュレータを使用した実験に基づいて検討された結果である。シミュレーションは実験手法として、あるいは教育・訓練手法として様々な長所を有する反面、重要な問題点とも言える特徴を有している。本研究においては、実機を用いた測定結果と比較しながら、シミュレーション実験の妥当性について検討する。

2. 実験データの扱いと解釈

2.1 シミュレーション実験に基づくデータについて

シミュレーションは、作業環境において生起する行動を再現し観察することが比較的容易でありながら、可能な限り実験的な条件を統制し安全性を確保する方法の一つである。従って、あくまで疑似的・人工的に再現される環境であるため、シミュレーションにおいて生起する行動は現実場面において生起する行動に対しどの程度妥当であるのか、といった疑問が常に付きまとう。

近年のコンピュータ技術の進展に伴い、高いリアリティを実現するシミュレータの技術的な水準は向上している。しかし一方で、シミュレーションの実用化が最も進展しているフライトシミュレータを例に挙げれば、リアリティ（迫真性）が異なっても訓練成果に影響が認められず、むしろ高度なリアリティはマイナスの効果をもたらす、とする報告もある²⁾。また、逆さめがね・左右逆転めがねを用いた変換視研究においては、VR（Virtual Reality）における臨場感を物理

的に忠実に再現する必要はないことが示唆されている³⁾。経験的には、シミュレーションの妥当性はリアリティの高度化に伴い高まると理解されがちであるが、このような研究知見からは、シミュレーションにおけるリアリティの重要性はさほど高いものではないことが示唆される。

一方、シミュレーション実験において生起する反応を、実際場面において生起する反応と同一視することは可能であろうか。シミュレーション体験には少なからず感覚の不一致（sensory conflict）が伴い、体験者は現実場面における体験とシミュレーションにおける体験の差異を明確に認識することが可能である。さらに、シミュレーション体験であるという認識は、実験において観察対象となる行動に関連した「安全態度」や「客観的危険体験」などの動機付けを歪める可能性がある。

現実場面において人間が処理する情報（または処理を必要とする情報）については、その質・量とも、必ずしも厳密に把握されてはいない。そのため、シミュレーションにおけるリアリティはどの程度必要であり、またどの程度であれば十分であるのか、について一概に判断することは極めて困難であり、同時に、シミュレーション実験において観察される行動を、現実場面における行動と同一視することには問題がある。

こうしたことから、シミュレーション場面と実際場面のそれぞれで観察される行動にどのような違いがあるのか、その違いはどの程度であるのかについて把握しておく必要がある。仮に両者が全く同一でなかった場合においても、その違いを把握することによって、シミュレーションの利用可能性を検討することが可能となる。

こうした観点から、本研究においては、掘削機シミュレータを利用した眼球運動測定実験（以下、シミュレーション実験とする）と実機を使用した同様の眼球運動測定実験（以下、実機実験とする）を比較し、シミュレーション実験の妥当性について検討を行う。（シミュレーション実験の詳細については、参考文献1）を参照のこと）

2.2 眼球運動に関する実験データについて

純然な眼球運動のみのデータ解析に際しては、自由な頭部運動を被験者に許容することによって測定データには反射性成分である前庭動眼反射が混入するため、頭部の非動化が不可欠である⁴⁾。しかし、本研究で対象とする掘削機操作においては、操作に伴い何らかの頭部運動を生じることが通常であり、頭部運動を制限することは、被験者に極めて不自然な状態で通常

の操作を求めることになり、シミュレーションのリアリティを損なう恐れがある。

北濱ら⁵⁾は、被験者に迷路探索課題を課し、その際の眼球運動、頭部運動、身体の移動軌跡を測定した。その結果、被験者間に差が見られるものの、雁行路通過時の視線、頭部、身体の動きは、探索方向を繰り返すにつれて次第に連続性をもち対応することを示している。こうした結果は、一連の人間の行動を捉えようとする場合においては、むしろ頭部運動の許容が妥当であることを示唆するものである。

こうした検討をもとに、本研究におけるシミュレーション実験では、被験者に自由な頭部運動を許容した状態で測定を行った。本研究においては、シミュレーション実験によって得られた眼球運動データと実機実験によるデータの比較を行う目的から、実機実験においてもシミュレーション実験の方針を踏襲した。すなわち、実機実験の場合もシミュレーション実験の場合と同様に、測定される眼球運動はオペレータの行動を包括的に捉えた場合の「視覚情報獲得行動」という一側面を表わしており、被験者の自由な頭部運動と併せて「何を、どのように見ていたか」を測定した結果となる。これらは記述的な検討にとどまらざるを得ない部分もあるため、純粋に眼球の動きのみを捉えたデータと直接比較することは出来ないものの、シミュレーションにおける行動と実際の行動の比較・検討を行う上で必要であり、シミュレータの今後の利用可能性を探る上で有用なデータを得ることが可能となる。

3. 実機による眼球運動測定実験

3.1 目的

シミュレーションによる眼球運動測定実験の結果がシミュレーション状況に特有のものであるか否かを検討するため、実機による掘削作業状況を対象とした「実機実験」を行う。シミュレーション実験と同様に眼球運動の測定を行い、両者の比較を通じてシミュレーション実験の妥当性を検討する。

3.2 実験方法

3.2.1 被験者

実験に参加した被験者は合計4名(D,G,H,N)であった。全員が掘削機操作の資格を有し、日常的に掘削機を用いた作業に従事するオペレータであった(平均年齢:36.3歳 SD=8.8, 平均経験年数7.5年 SD=5.3)。被験者Dは眼鏡を使用しており、他の3名の裸眼視力は正常であった。実験は2日間にわたり実施され、両日とも2名ずつが実験に参加した。

3.2.2 実験を実施した掘削作業現場

実験は、産業安全研究所(東京都清瀬市梅園)内に設けられた実験場で行われた。周囲に木立が立つ林の中であったが、掘削機の高さを検討した上で、支障なく作業を行うことが出来る空間を確保可能な場所を選んだ。

シミュレーション実験との比較・検討を行うため、可能な限り類似した位置関係となるように、掘削機正面に掘削地点、掘削機の左手にダンプトラックを配置した。掘削機の右手には、アイマークカメラのキャリブレーションに使用する仮設スクリーンを設置した。この仮設スクリーンはキャリブレーション時およびアイマーカーの確認時のみ展開され、眼球運動測定の際には収納された。Photo.1およびFig.1に、実験が行われた掘削作業現場の状況を示す。被験者は、キャリブレーションの際には上部旋回体をおよそ90°右旋回させ、展開された仮設スクリーンに正対した。掘削作業においては、正面の掘削地点を掘削した後、およそ90°左旋回し、左手に停車するダンプトラックの荷台に積込みを行った。

3.2.3 実験データの記録

シミュレータ実験と同様に、眼球運動の測定にはアイマークレコーダー(NAC EMR-8)を使用した。視野レンズには水平画角62°のレンズを使用し、両眼計測を行った。被験者の視野映像およびアイマーク座標データは、デジタルビデオカセットレコーダー(SONY GV-D900)を用いてミニデジタルビデオテープに記録した。データ記録状況の確認、およびアイマークレコーダーのキャリブレーションには、デジタルビデオカセットレコーダー(SONY GV-D900)に搭載された5.5型液晶モニターを用いて行った。ビデオテープには、視野映像およびアイマーク座標データとともに、エレクトリックコンデンサーマイクロホン(SONY ECM-T145)およびマイクロホンミキサー



Photo.1 The excavation site of experiment executed
実験が行われた掘削作業現場

(SONY MX-50)を用いて実験状況の音声を記録した。実験データの記録状況をFig.2に示す。

3.2.4 実験手続き

実験手続きの大まかな流れを、Fig.3に示す。

初めに、被験者に対して実験の目的等に関する説明を行った。次に、被験者に質問紙を配布し、氏名、年齢、オペレータ経験年数、習熟したレバー操作方式等に関して回答するよう求めた。質問紙に回答した後、被験者は1人ずつ実験に参加した。被験者は、運転席に着座しシートベルトを着用した後、エンジンを始動した。次に、実験現場に設置された仮設スクリーンに正対するよう、旋回操作を行うことを求められた。およそ90°の左旋回を行い仮設スクリーンに正対した後、被験者の眼と仮設スクリーンの間に障害物がないようにするため、作業装置（ブーム、アーム、バケット）を上方に上げる操作を行った。指示された操作を行った後、被験者は掘削機のエンジンを停止した。

続いて被験者には、アイマークレコーダーのヘッドユニットが装着された。眼球像位置の調整を行った後、アイマークのキャリブレーションを行った。キャリブレーションには、レーザーポインターの代わりに、先端を黄色に着色したポールを使用した。これは、通常のキャリブレーションのようにレーザーポインターで注視点を指示した場合には、周囲の明るさのために、指示された点を認識することが出来なかったためである。キャリブレーションの際は、ポールの先端を仮設スクリーン上で移動させながら9つの位置（キャラクタ）を示し、被験者がポールの先端で示された位置を注視することによって行う「FIX方式」で行った。実験者が示すべき9つの位置はモニター上にキャラクタとして示されるが、レーザーポインターの代わりにポールを使用したため、キャリブレーション作業を2名の実験者によって行った。実験者Aがモニター上でキャラクタの位置を確認しながら対応する仮設スクリーン上の位置を実験者Bに指示し、実験者Bは指示された位置をポールの先端で示した。被験者は、合図があったらポールの先端を注視したまま手元のキャリブレーションスイッチを押すこと、キャリブレーションの最中なるべく頭を動かさないこと、示された点を目の動きだけで追うこと、等を求められた。仮設スクリーンは、こうした方法でキャリブレーション時の注視点を指示する際に、指示する空間の奥行きが大きく変動しないようにするために設けた。すなわち、キャリブレーション時の視距離と測定時の視距離を出来る限り等しくすることによって、被験者の実際の注視点と視野映像中に表示されるアイマーカーとの「ずれ」を極力排除するためである。したがって、被験者から仮

設スクリーンまでの距離は、掘削作業を行う際の被験者からダンプトラックの荷台までの距離を考慮して設定されている。Photo.2に、キャリブレーションの実施状況を示す。

キャリブレーションが正常に行われたと判断された後、視野映像およびアイマーク座標データ、音声情報の記録が開始され、被験者は仮設スクリーン上で移動するポールの先端を注視するよう求められた。同時に実験者Bは、ポールを仮設スクリーンで上下左右方向にゆっくりと動かした。実験者Aは被験者の注視点を表わすアイマーカーがポール先端とどの程度一致しているか、をモニターで確認することで、キャリブレーションの正確性を判断した。アイマーカーと注視点が正しく対応していない、と判断された場合には、繰り返しキャリブレーションを行った。

キャリブレーションの後、被験者に対し教示を行った。教示では、実験の目的は掘削作業中の眼球運動の測定であること、なるべく自然に、普段と同じように操作を行うこと、実験者の指示と合図に従って操作を行うこと等を伝えた。被験者は、掘削機正面の地面を掘削し、左手に停車したダンプトラックの荷台に積込みを行うよう求められた。実験者から被験者に対し指示が与えられ、掘削作業が開始された。被験者は、ダンプトラックの荷台の8割程度に土砂が積載されるまで、掘削作業を繰り返し行った。作業回数にしておよそ10回程度であった。Photo.3～6に、測定中の作業状況を示す。

作業を終了した後、測定中に被験者の注視点を表わすアイマーカーがずれなかったか、ずれたとすればどの程度かを判断するための確認作業を行った。掘削機右手に展開された仮設スクリーンに正対するよう、被験者に旋回操作を行うことを求め、さらに、被験者の眼と仮設スクリーンの間に障害物がないようにするため、作業装置（ブーム、アーム、バケット）を上方に上げる操作を指示した。指示された操作を行った後、被験者は掘削機のエンジンを停止した。実験者Bがポールを仮設スクリーンで上下左右方向にゆっくりと動かし、被験者は、頭部を動かさずにそのポールの先端を注視するよう求められた。実験者Aは被験者の注視点を表わすアイマーカーがポール先端とどの程度一致しているか、をモニターで確認することで、「ずれ」の程度を判断した。この間も、ビデオレコーダーによるデータの記録を継続した。「ずれ」が認められた場合、この「ずれ」の程度を、分析の段階で適切な注視点座標を判断する際の修正量の目安として利用した。引き続き有効なデータの収集を行うには「ずれ」が大きすぎると判断された場合には、次の試行に備えて再

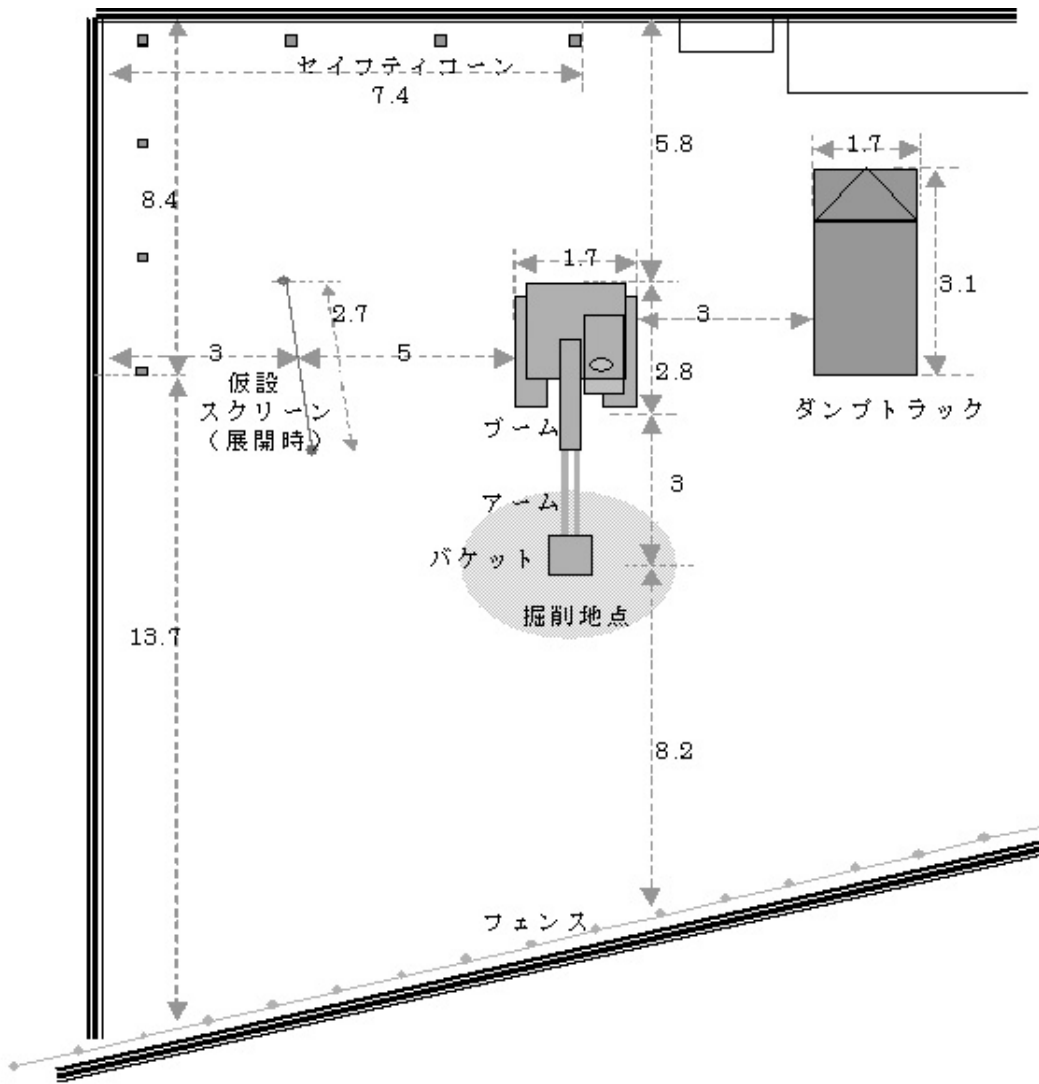


Fig.1 Excavated field (overlook)
 実験が行われた掘削作業現場 (平面図 単位: m)

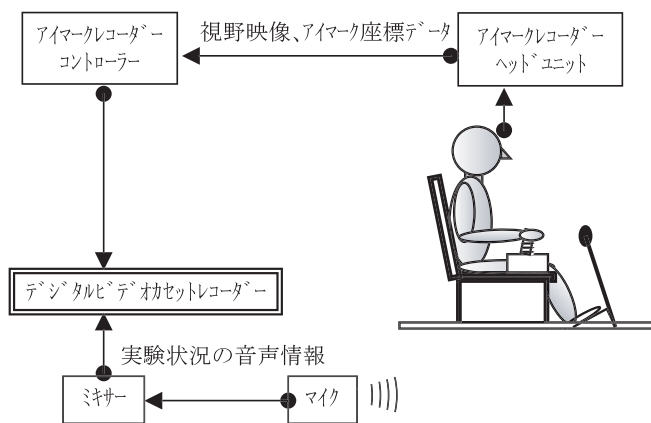


Fig.2 Data recording
 データの記録状況

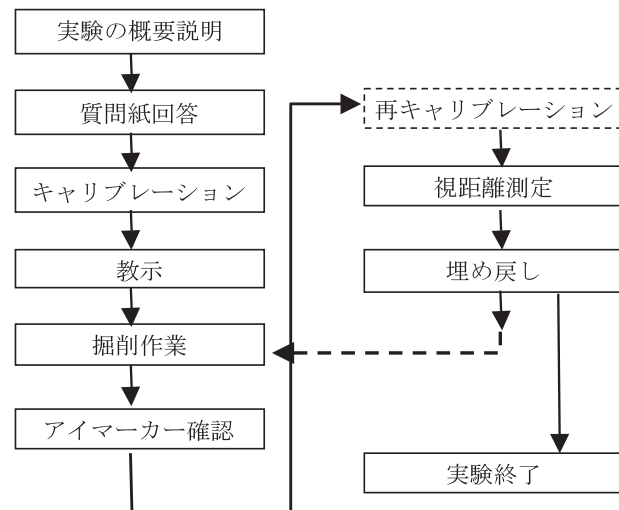


Fig.3 Procedure of the experiment
 実験の主な手続き



Photo. 2 The way of eye mark calibration
キャリブレーションの実施状況

びキャリブレーションを行った。

その後、オペレータの位置から仮設スクリーンおよびダンプトラックの荷台までの視距離の測定を行った。これは、次の埋め戻し作業の際に掘削機とダンプトラックを移動する必要があるため、再び作業を開始する際の両者の位置関係を把握するためであった。

視距離測定の後、掘削地点を復旧する作業を行った。実験者がダンプトラックをおよそ1~1.5メートル後退させ、荷台に乗せられた土砂をダンプした。被験者は掘削機を操作し、掘削前の状態になるべく近づけるよう掘削地点の埋め戻し作業を行った。

掘削地点をほぼ掘削前の状態に復旧した後、再び掘削作業を行い、順次アイマーカー確認、視距離測定、埋め戻し、という一連の作業を、およそ1~2回繰り返した。但し、被験者から休憩の要求があった場合にはこの限りではなかった。

3.2.5 実験に使用した掘削機とダンプトラック

実験に使用した掘削機は、日立建機株式会社製「Landy KID EX-40UR」(機械総重量約4トン)であった。また、実験に使用したダンプトラックは、三菱自動車工業株式会社製「Canter 2t ダンプトラック」であった。

3.2.6 操作レバーと掘削機の動きの対応

レバーの操作方式に関しては、被験者G, H, Nにとっては習熟したものであった。被験者Dにとっては慣れていないものであったため、測定に先立ち操作練習を行った。

3.3 分析方法

3.3.1 分析用テープの作成

実験データのうち、視野映像、アイマーカー座標データ、および音声情報はデジタルビデオテープに記録した。分析の際には一時停止、コマ送り等の操作を頻繁に行うため、ビデオテープの摩耗や損傷の恐れがある。そのため、分析に不要な部分を除き、別なデジタルビデオテープに複製した。複製されたビデオテープを



Photo.3 Work situation(beginning)
作業状況(掘削開始時)



Photo.4 Work situation(excavating)
作業状況(掘削中)



Photo.5 Work situation(left turning)
作業状況(左旋回)



Photo.6 Work situation(loading)
作業状況(積み込み)

「分析用テープ」としてビデオによるデータ解析に使用した。

3.3.2 注視点座標の測定モニター

分析用テープを再生し、注視点座標の測定を行った。被験者の注視点をあらかずアイマーカーは視野映像の中にスーパーインポーズされるため、ビデオ画像に記録されたアイマーカーの動きをたどることによって注視点の変位を判断した。注視点の変位状況を数値的に捉えるため、分析用モニターの画面を等間隔に1972分割（水平方向に58分割、垂直方向に34分割）し、中心を原点として、視野画像中に表示されるアイマーカーの位置をx軸（水平方向；-29～+29 n.d.）とy軸（垂直方向；-17～+17 n.d.）の座標軸で表現した。モニター画面の分割は、無色透明なクリアシートに縦横1cm毎に罫線を引き、分析モニターに粘着テープで固定することで行った。視野映像との関係から、座標値の絶対値「1」は視角にして約1.13°であった。被験者は自由に頭部運動を行うため、視野映像中に表示されるアイマーカー（注視点）座標の絶対値は意味を持たないが、アイマーカーが視野映像の画角に入っている場合には、頭部運動量を除く相対的な眼球運動量を求めることが可能であった。

3.3.3 アイマーカー座標と注視点座標の対応

実機実験においても、注視点とアイマーカーの「ずれ」を完全に除去することは出来なかった。これは、測定中に何らかの外乱によって生じたものではなく、機器の測定範囲の限界であると考えられる。そのため、シミュレーション実験において採用された手法に準じて、「キャリブレーション後」「測定前」「測定後」のそれぞれでアイマーカーと注視点の一致の程度を判断した際の映像記録から修正の必要性および修正量を判断し、さらに分析モニター上で測定されるアイマーク座標にこれらの修正を加えることで、注視点座標を求めた。こうした手続きは、「ずれ」が比較的小さく、かつ「ずれ」の程度や方向がほぼ一定である場合のみ適用され、有効データとした。

3.3.4 分析対象の選定

実験は屋外で行われたため、室内実験では生じにくい問題が発生した。まず、キャリブレーション作業において注視点を指示する際、レーザーポインターの代わりにポールを使用せざるを得なかったことから、実験者2名が連携を図りながらも通常より時間と手間がかかった。そのため、被験者にとってはキャリブレーションそのものが大きな負担となり、個人差はあるものの、キャリブレーション中に頭部を動かしてしまい最後まで調整を行うことが出来ないケースが見受けられた。

また、実験当日は天候も良く、日差しに恵まれていたが、一方で、コントラストが強かったため、日差しの角度によっては周辺の反射物を介してアイマーク検出ユニットのセンサーレンズにノイズ成分が入り込み、結果としてキャリブレーションが行えない、あるいは正確な眼球の変位を測定出来ない、といった現象が生じた。こうした原因によって有効なデータとならなかった試行は、分析対象から除外した。

このように、アイマーカー座標と注視点座標の対応、キャリブレーションと測定の精度を基準として分析対象に採用されたものは、2名の被験者（G,H）のデータであった。さらに、相互に比較・検討をおこなうため、それぞれ1回目の試行のうち、最初から5回目までの積み込み作業を分析対象とした。Table 1に、分析対象データの一覧を示す。いずれも眼鏡等は使用しておらず視力は正常であった。

Table 1 Analyzed data of real machinery operation
実機実験の分析対象として採用されたデータ

被験者	年齢（歳）	経験年数（年）
G	41	2
H	44	12

3.3.5 データ分析

分析対象となったデータに関しては、「分析用テープ」でアイマーカーと注視点の対応を確認し、修正が必要となる範囲と修正量を求めた。また、座標値を求めるための対象となる眼（右眼または左眼）を判断した。

分析の際に記録された内容は以下の通りである。

- ・ビデオフレーム番号（時分秒フィールド）
 - ・対象となる眼に関する分析用モニター上のアイマーク座標（x軸，y軸）
 - ・操作内容（掘削，左旋回，積み込み，右旋回）
 - ・注視対象
- 操作内容は、以下の基準に従って4項目に分類した。
- ・掘削：作業開始もしくは右旋回終了時から、掘削を行い左旋回を開始するまで
 - ・左旋回：掘削終了後左旋回を開始してから旋回を終えるまで
 - ・積み込み：左旋回終了後、積み込みを行い右旋回を開始するまで
 - ・右旋回：積み込み終了後、次の掘削のために右旋回を開始してから旋回を終えるまで
- 注視対象の分類は、以下の項目に従って行った。

- ・バケット
- ・アーム
- ・掘削地点
- ・荷台（ダンプトラックの荷台）
- ・積載土（前の作業時に荷台に積み込まれた土砂）
- ・フェンス
- ・地面（掘削地点以外）

上記の分類に当てはまらない「ピラー」「ブーム」「道路」「旋回方向の先読み」等については、「その他」として分類し、その内容を備考欄に記録した。

また、以下の3項目のいずれかに当てはまる場合には、アイマーカーを分析モニター上で確認出来ないため、それぞれの内容に応じて分類した。

- ・瞬き
- ・飛越運動（ある対象への注視点停留が2フレーム = 2/30秒未満）
- ・視野映像画角外への変位

「分析用テープ」の映像をアイマーカーの座標値を読み取るための「分析用モニター」に再生した。テープを1フレーム（1/30秒）ずつコマ送りし、フレーム毎に上記の項目について分類、記録を行った。記録したアイマーカーの座標値に、事前に判断した「ずれ」の範囲と程度に基づいて修正を加え、「注視点座標」を求めた。同時に、前述の分類に従い「注視対象」が判断された。「瞬き」「視野映像画角外への変位」等により注視点座標を求めることが出来ない場合には、確認可能であった直前の座標値と同一とみなした。

3.4 実機における眼球運動測定結果

3.4.1 注視点座標値の変化と飛越距離

シミュレーション実験との比較・検討を行うにあたりまず注目されたのは、「どの程度の眼球運動が行われているか」であった。シミュレーション実験の結果からは、

- ・x軸（水平方向）成分に関しては旋回操作時に大きく変化し、他の操作時には滑らかな推移を示す
- ・y軸（垂直方向）成分に関しては操作内容による違いは僅かであり、x軸（水平方向）成分ほど変化が大きい
- ・飛越距離に関しては、いずれも旋回操作時に比較的大きな飛越が見られる

といった点が確認されている。実機実験に関しても同様に、注視点座標値の変化を時系列にしたがって示し、その変化を検討することとした。Fig.4～6に、被験者Gに関する眼球運動分析結果ならびに操作内容を示す。これは、1回目の試行のうち、最初の積み込み作業

を対象とした結果である。Fig.4には眼球運動のx軸（水平方向）成分の変化を、Fig.5にはy軸（垂直方向）成分の変化を、Fig.6には飛越距離の変化を示す。なお、Fig.4において、プラス側は被験者からみて正面より右方向、マイナス側は正面より左方向を示し、Fig.5においてプラス側は被験者からみて正面より上方、マイナス側は下方を示している。

x軸（水平方向）成分の変化（Fig.4）については、左右への旋回時に変化が大きく、掘削および積み込み時においては滑らかに推移している。対してy軸（垂直方向）成分の変化（Fig.5）については、時折20°程度の变化もみられるものの、x軸（水平方向）成分ほど操作内容による違いが認められない。飛越距離の変化（Fig.6）に関しては、x軸（水平方向）成分の変化と同様に、左右への旋回時に40～50°の大きな飛越運動が観察される。こうした特徴は作業1回目から5回目にかけて共通しており、同様に、もう一方の被験者Hについても共通であった。

これらの結果はシミュレーション実験の結果と共通する内容であり、シミュレータの操作状況においても実機の操作状況においても、眼球運動のx軸（水平方向）成分、y軸（垂直方向）成分および飛越距離の変化に関して概ね違いはない、と判断される。

3.4.2 操作内容毎の注視点座標値の変化量

次いで、x軸（水平方向）成分とy軸（垂直方向）成分の変化量について、1回目の操作を対象に被験者毎に操作内容毎の平均値を求めた。算出方法はシミュレータ実験の場合と同様である。Fig.7にはx軸（水平方向）成分について、Fig.8にはy軸（垂直方向）成分について、それぞれ1フレームあたりの変化量が示される。

x軸（水平方向）成分に関しては左右への旋回時に1.0～2.0°の値を示しているのに対し、掘削・積み込み時には1.0°以下の場合はほとんどであり、操作内容によって異なる傾向を示す。y軸（垂直方向）成分に関しては、いずれの操作内容に関しても概ね0.4°～1.0°程度であり、x軸成分ほど操作内容による違いが見られない。これらはいずれも、シミュレーション実験において認められた傾向に一致するものである。分散分析（二元配置、繰り返しなし）の結果、x軸（水平方向）成分に関しては被験者間に有意な差は見られず（ $F(1,3)=1.13, n.s.$ ）、操作内容によっても有意な差は見られなかった（ $F(1,3)=8.84, n.s.$ ）。y軸（垂直方向）成分に関しても同様に、被験者間に有意な差は見られず（ $F(1,3)=11.7, n.s.$ ）、操作内容にも有意な差は見られなかった（ $F(1,3)=2.26, n.s.$ ）。

Fig.9は、分析対象となった2名の被験者に関して、

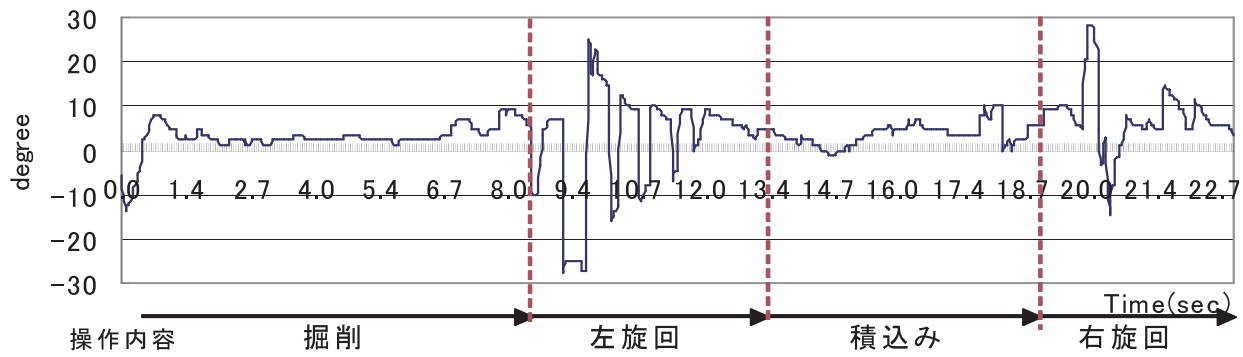


Fig.4 Change of horizontal element (sub.G 1st : actual-condition)

眼球運動のx軸(水平方向)成分の変化 (被験者G 作業1回目:実機操作)

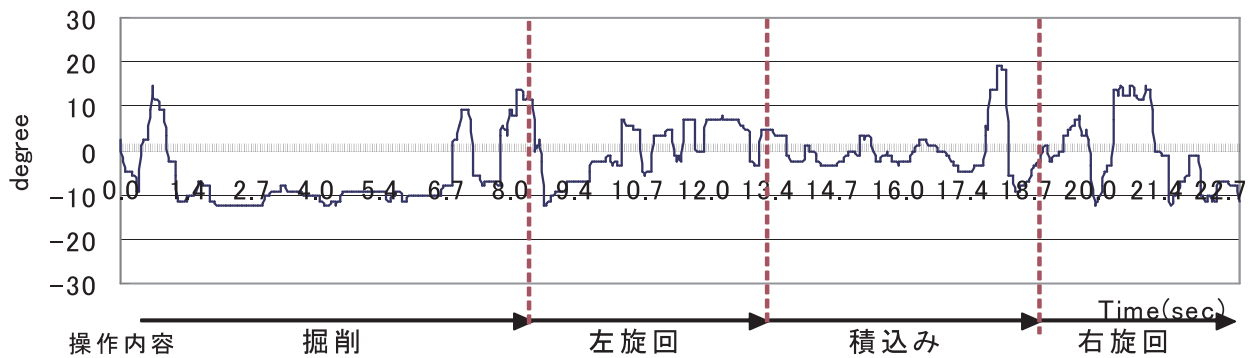


Fig.5 Change of vertical element (sub.G 1st : actual-condition)

眼球運動のy軸(垂直方向)成分の変化 (被験者G 作業1回目:実機操作)

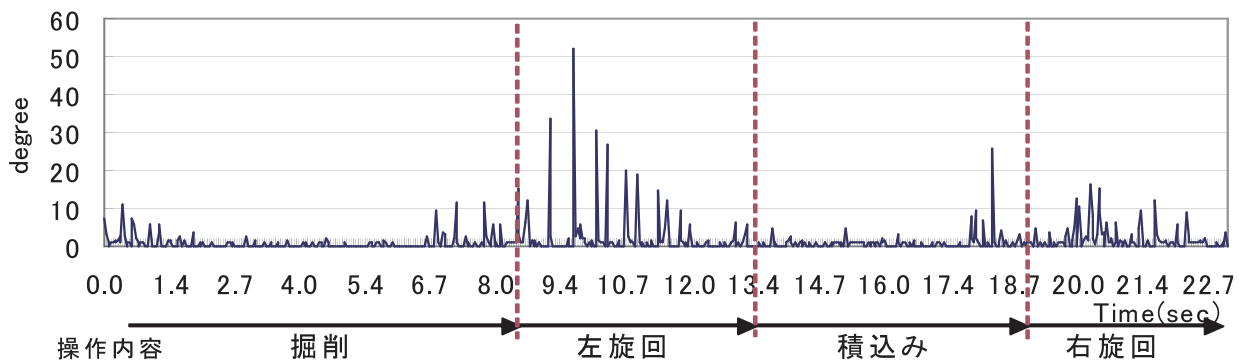


Fig.6 Change of saccadic distance (sub.G 1st : actual-condition)

飛越距離の変化 (被験者G 作業1回目:実機操作)

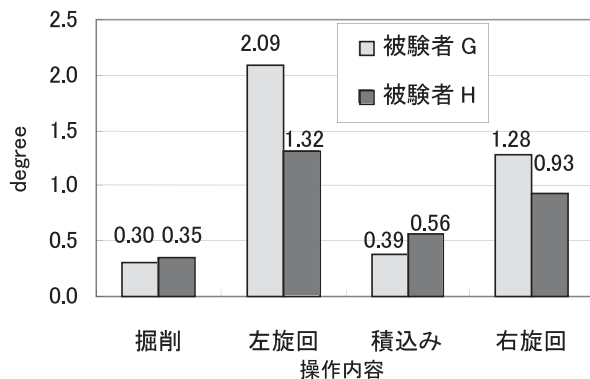


Fig.7 Extent of abscissa per 1/30sec in each operation (1st)
x軸(水平方向)成分の1フレーム(1/30秒)
あたりの変化量 操作1回目

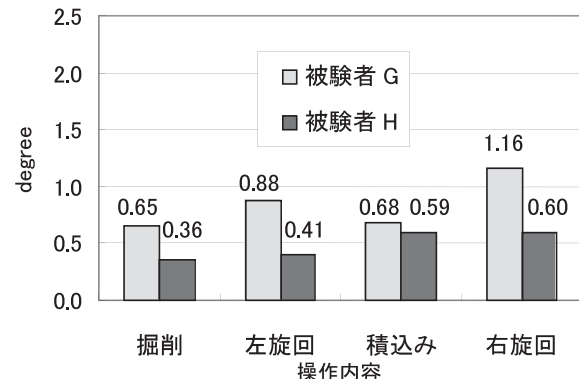


Fig.8 Extent of ordinates per 1/30sec in each operation(1st)
y軸(垂直方向)成分の1フレーム(1/30秒)
あたりの変化量 操作1回目

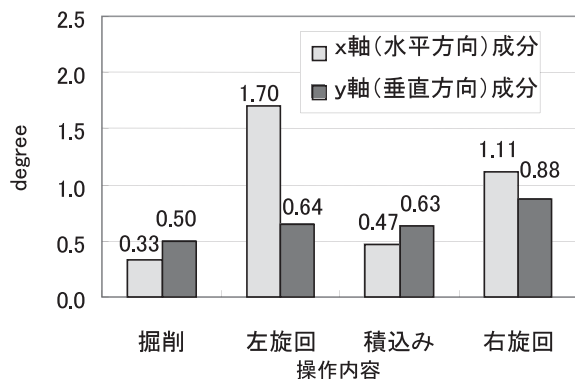


Fig.9 Average extent of eye-movements (1st : actual-condition)
眼球運動の平均変化量
 (実機 操作 1 回目 : 2 名分平均)

1 回目の作業におけるデータから x 軸成分, y 軸成分のそれぞれについて注視点座標値の平均を求めたものである。左旋回時の x 軸成分が 1.70 と大きな値を示しており, 次いで右旋回時の x 軸成分が 1.11 となっている。それに対し掘削・積込みに関してはそれぞれ 0.33, 0.47 であり, 旋回操作において x 軸成分の変化量が多いことが示される。y 軸成分に関しては x 軸成分ほど違いが見られないが, 右旋回時に関しては, 他の操作と比べて幾分高い値が示されている。分散分析の結果, x 軸成分と y 軸成分の間に有意な差は見られず ($F(1,3)=0.67, n.s.$), 操作内容に関して有意な差は見られなかった ($F(3,3)=1.53, n.s.$)。

4. シミュレーション実験と実機実験の比較

これまでの結果から, 操作内容別にみた x, y 両軸成分の傾向はシミュレーション実験と実機実験においてほぼ同じ傾向が示されている。しかし, これらはあくまで記述的な説明において類似した傾向が認められるにすぎないため, 相互に比較可能な観点から更に詳しく検討を行い, シミュレーション実験の妥当性について検討する。

4.1 注視点座標の変化量

比較・検討を行うにあたり, シミュレーション実験 (分析対象被験者: 4 名) において得られたデータを「シミュレーション群」, 実機実験 (同: 2 名) により得られたデータを「実機群」として, それぞれ 1 回目の作業を対象に平均値を求めた。Fig.10 に, 操作内容別にみた x 軸 (水平方向) 成分の 1 フレーム (1/30 秒) あたりの変化量が, Fig.11 には操作内容別にみた y 軸 (垂直方向) 成分の変化量が示す。操作内容毎の変化, あるいはシミュレーション群と実機群の類似性に関しては前述の通り概ね共通した傾向が認められているが, 両者の違いを確認するために, x 軸, y 軸の

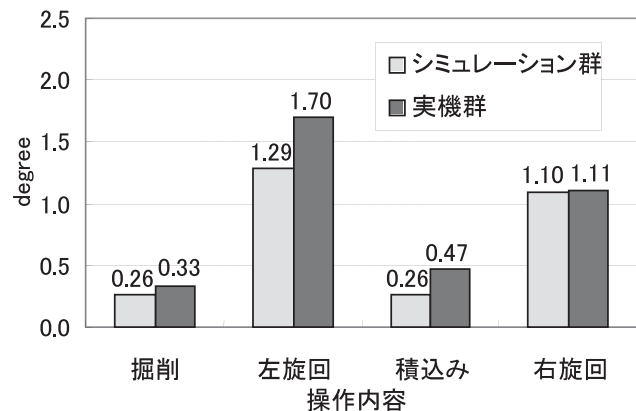


Fig.10 Extent of abscissas per 1/30sec in each condition
x 軸 (水平方向) 成分の 1 フレーム (1/30 秒) あたりの変化量シミュレーションと実機の比較
 操作 1 回目

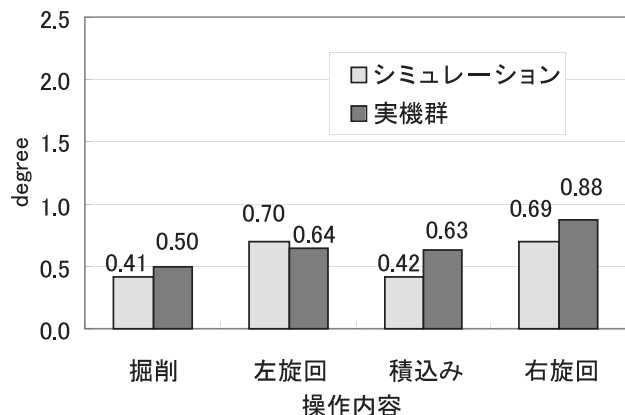


Fig.11 Extent of ordinates per 1/30sec in each condition
y 軸 (垂直方向) 成分の 1 フレーム (1/30 秒) あたりの変化量シミュレーションと実機の比較
 操作 1 回目

それぞれに関して分散分析 (二元配置, 繰り返しなし) を行った。その結果, x 軸成分に関しては, シミュレーション群と実機群の間に有意な差はみられなかったが ($F(1,3)=3.81, n.s.$), 操作内容に関しては有意な差がみられた ($F(3,3)=41.66, p < .01$)。y 軸成分に関しては, シミュレーション群と実機群の間に有意な差は見られず ($F(1,3)=3.09, n.s.$), 操作内容に関する有意な差は見られなかった ($F(3,3)=5.67, n.s.$)。

4.2 操作内容別平均飛越距離

次に, 眼球運動の停留時を除き, 飛越運動が認められた場合の飛越距離の平均値をそれぞれの群について求めた。これは, それぞれの被験者の平均値をもとに群の平均値としたものである。Table 2 および Fig.12 に, シミュレーション群と実機群の操作内容別平均飛越距離を示す。

分散分析 (二元配置, 繰り返しなし) の結果, シミ

Table 2 Saccadic distance of each operation in each condition
シミュレーション群と実機群の操作内容別飛越距離（単位：度）

操作内容	掘削	左旋回	積込み	右旋回
シミュレーション群	1.75	4.04	2.06	4.01
実機群	2.22	4.20	2.36	3.02

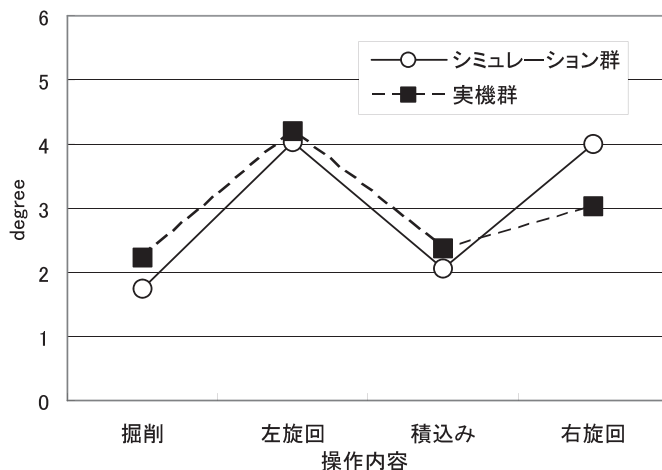


Fig.12 Saccadic distance of each operation in each condition
シミュレーション群と実機群の操作内容別飛越距離

シミュレーション群と実機群の間に有意な差はみられなかった ($F(1,3)=0.001, n.s.$) が、操作内容に関してはわずかに有意な差が見られる結果となった ($F(3,3)=9.58, p<.1$)

4.3 注視点の分布状況

これまでの結果から、操作内容および時間的な推移に伴う眼球運動の変化については確認することが可能であるが、その変化がどの程度の範囲に及んでいるかに関しては明らかではない。すなわち、注視点が斜め方向に変位した場合には、x軸（水平方向）成分、y軸（垂直方向）成分ならびに飛越距離にその変化が現れるものの、三者の対応関係を直感的に理解することは困難である。そのため、操作内容毎に注視点の座標値をプロットした分布図を基に、眼球運動の空間的な変化に着目した。分布図の原点(0,0)はアイマークカメラの視野映像中心を表わし、被験者毎に若干異なってはいるものの、およそ被験者から見た前方視野中心に対応する。相互に比較・検討を行うため、シミュレーション群・実機群とも、各被験者の1回目の作業を対象とした。

Fig.13～16に、実機群の注視点分布状況を、Fig.17

～20にシミュレーション群の注視点分布状況を示す（Fig.13及び17は掘削時、Fig.14及び18は左旋回時、Fig.15及び19は積込み時、Fig.16及び20は右旋回時）。操作内容毎の分布範囲を比較した場合、掘削時（Fig.13,17）と積込み時（Fig.15,19）の分布状況は類似しており、比較的注視点がまとまっている。それに対し、左右への旋回時における分布状況は明らかに異なる傾向を示しており、注視点は主に横方向に広く分布する。また、旋回時を比較した場合でも、左旋回時（Fig.14,18）には分布が横方向に広がるのに対し、右旋回時（Fig.16,20）には横方向に広がりつつも縦方向への広がりも示している。但しその方向は、概ね左上から右下にかけて、である。実機群とシミュレーション群で分析対象となった被験者数が異なっており、さらに被験者によっては必ずしも注視点座標原点が視野中心と一致しないことから、両者の分布座標は全く同一ではないが、操作内容毎の注視点分布範囲については、実機群とシミュレーション群で概ね共通した傾向にあると言える。

4.4 注視点分布状況の定量的把握

注視点分布範囲を定量的に把握し比較を可能とするためには、比較するデータ数を同一にする必要がある。そのため、各被験者のそれぞれの操作内容において中間に位置する3秒間のデータを抽出し、その間の注視点のx軸座標、y軸座標に関する最大値および最小値を求め、それぞれの軸の分布範囲とした（Fig.21参照）。

こうした手続きを踏まえ、操作内容毎に各被験者のx軸（水平方向）、y軸（垂直方向）の分布範囲を求め、さらにシミュレーション群、実機群のそれぞれについて平均値を求めた。前述の、それぞれの軸の「変化量」は注視点座標がどの程度変化したか、といった内容を表わしていたのに対し、このようにして求められた分布範囲は、それらの変化がどの程度の範囲において行われたか、を示す指標となる。

Fig.22に注視点のx軸（水平方向）分布範囲、Fig.23にy軸（垂直方向）分布範囲を示す（なお、Fig.22は水平方向の分布を示すため、敢えて図を変更している）。

x軸（水平方向）に関しては、左右への旋回時に極めて広い範囲にわたり分布することが示されるのに対し、掘削・積込みにおいては極めて限られた範囲に限られている。y軸（垂直方向）に関しては、x軸のように操作内容による極端な違いは見られないものの、やはり左右への旋回時において、分布は広い範囲にわたっている。

分散分析の結果、x軸（水平方向）の分布範囲に関

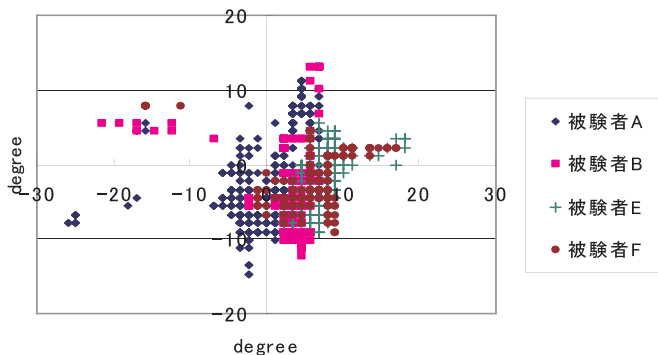


Fig.13 Range of fixation points in excavating(simulation)
掘削時の注視点分布状況(シミュレーション)

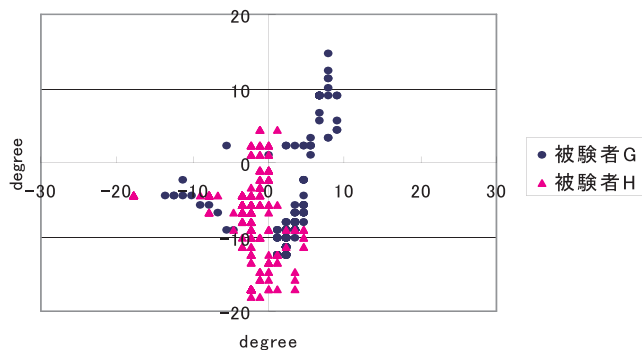


Fig.17 Range of fixation points in excavating (real-m.)
掘削時の注視点分布状況(実機群)

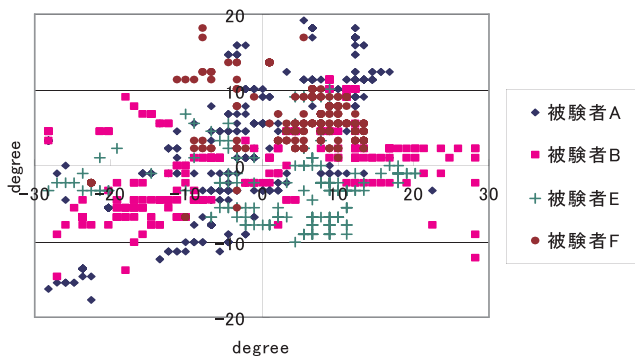


Fig.14 Range of fixation points in left-turn (simulation)
左旋回時の注視点分布状況(シミュレーション群)

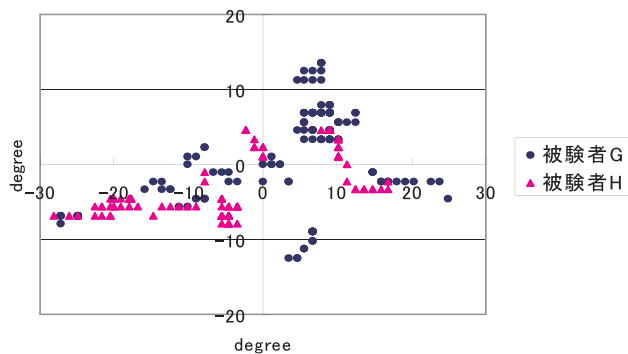


Fig.18 Range of fixation points in left-turn (real-m.)
左旋回時の注視点分布状況(実機群)

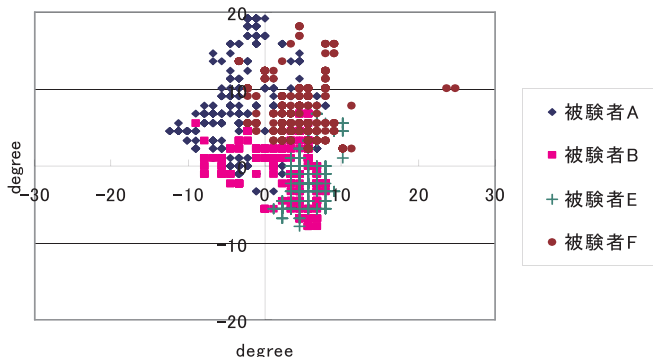


Fig.15 Range of fixation points in loading (simulation)
積み込み時の注視点分布状況(シミュレーション群)

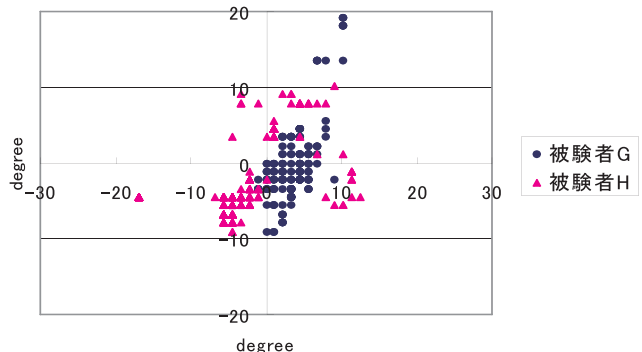


Fig.19 Range of fixation points in loading (real-m.)
積み込み時の注視点分布状況(実機群)

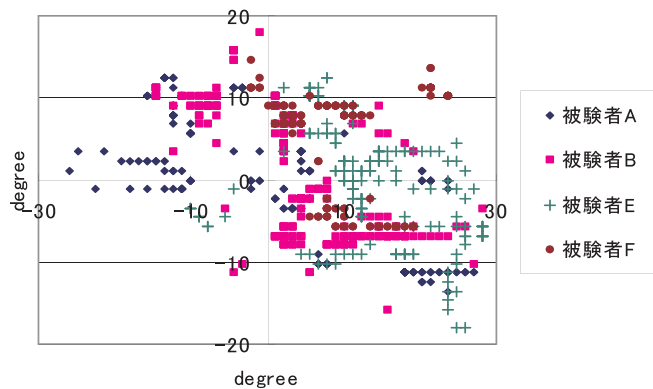


Fig.16 Range of fixation points in right-turn (simulation)
右旋回時の注視点分布状況(シミュレーション群)

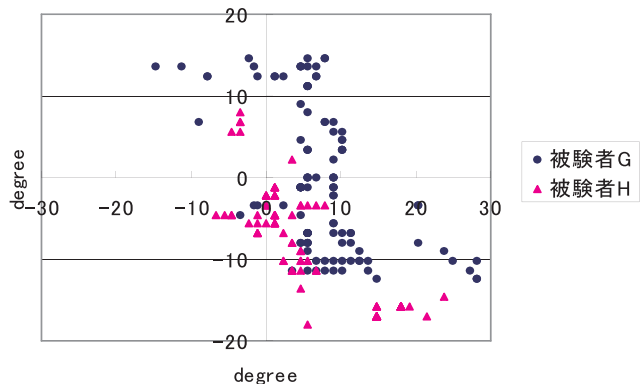


Fig.20 Range of fixation points in right-turn (real-m.)
右旋回時の注視点分布状況(実機群)

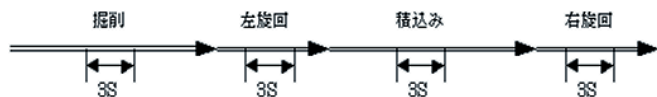


Fig.21 Sampling data to compare the extent of fixation points
注視点分布範囲比較のために抽出されたデータ

それぞれの操作のなかで中間に位置する3秒間の注視点座標から最大値・最小値をもとめ、X軸・Y軸の分布範囲とした。各被験者の1回目の作業を対象とした。

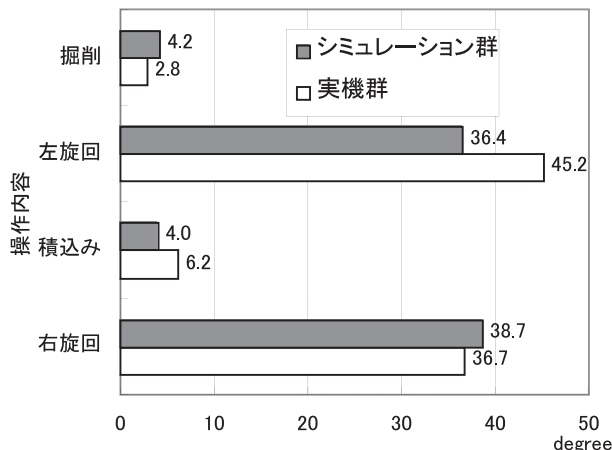


Fig.22 Extent of fixation points inter 3s in each operation : abscisas
注視点の分布範囲：水平方向

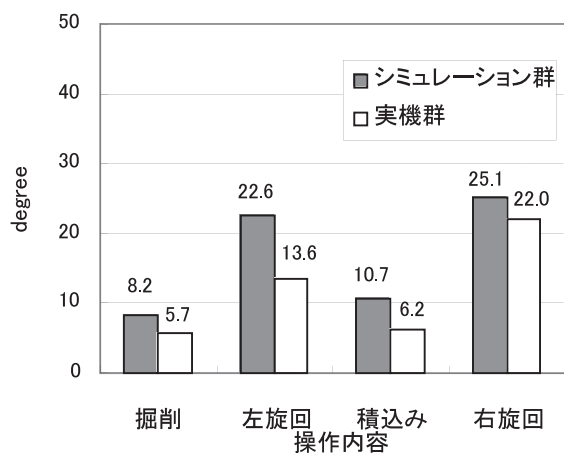


Fig.23 Extent of fixation points inter 3s in each operation : ordinates
注視点の分布範囲：垂直方向

しては、実機群とシミュレーション群の間に有意な差はみられなかったが ($F(1,3)=0.60, n.s.$)、操作内容に関しては有意な差がみられた ($F(3,3)=67.15, p<.01$)。y軸 (垂直方向) の分布範囲に関しては、シミュレーション群と実機群との間に有意な差はみられなかったが、($F(1,3)=0.05, n.s.$)、操作内容に関して有意な差がみられた ($F(3,3)=29.05, p<.05$)。

4.5 掘削作業中の注視対象

「どの程度の眼球運動が行われているか」について確認された次の段階として、「掘削作業中にオペレータはどのような対象を見ているのか」といった点に注目した。こうした点を明らかにするため、ビデオ映像分析の際に注視点座標とともに記録された「注視対象に関する分類」が利用された。

4.5.1 注視対象の分類

注視対象に関する分類を確認すると、「その他」を含め以下の9項目となる。

- ・バケット
- ・アーム
- ・掘削地点
- ・荷台 (ダンプトラックの荷台)
- ・積載土 (前の作業時に荷台に積み込まれた土砂)
- ・送電線 (シミュレーション実験のみ)
- ・フェンス
- ・地面 (掘削地点以外)
- ・その他 (ピラー, ブーム, 道路, 旋回方向の先読み, 等々)

上記の他に、注視対象が確認できない以下の3項目については、それぞれの内容に応じて分類が行われた。

- ・瞬き
- ・飛越運動 (ある対象への注視点停留が2フレーム = 2/30秒未満)
- ・視野映像画角外への変位

これらの分類に基づき、1フレーム (1/30秒) ずつ分析用テープをコマ送りし、修正された注視点の位置から注視対象を判断した。

注視点の「停留」については、分析モニター上で読み取られた座標値 (1目盛りはおおよそ 1.13°) が2フレーム (2/30秒) 以上変化しない、という基準を満たすものに限られ、2フレーム未満の場合には「飛越運動」とみなした。

4.5.2 注視対象別注視回数の割合

これらの手続きを踏まえ、1作業あたりにある対象を何回注視したか、という「注視対象別注視回数の割合」を求めた。割合として算出した理由は、単に「注視回数」のみを求めた場合、その値は作業時間に依存する可能性があるためである。そのため、1作業あたりの注視回数の合計を「1」とし、それぞれの注視対象毎にその割合を求めることとした。但し、それぞれの注視対象が持つ意味性を重視し、「ある対象から別な対象に注視点が移動した」と判断された場合にのみ注視回数は「1回」とカウントされ、注視点の移動が認められた場合であっても同一の注視対象内であれ

ば、連続して注視しているものと判断された。

シミュレーション群と実機群の比較を行うため、各被験者の1回目、3回目、5回目の作業を対象として各被験者の注視回数を求め、それぞれの群毎に合計した上で、対象毎の注視回数の割合を求めた。Fig.24に、シミュレーション群および実機群の「注視対象別注視回数の割合」を示す。

最も注視される回数が多いのは、シミュレーション群、実機群のいずれにおいても「バケット」であった。他の対象に対してはいずれも割合は小さく、「バケット」に対する注視回数の半数にも満たない。一方、シミュレーション群と実機群を比較した場合、両者ともほぼ同じ傾向にあることが伺える。割合が最も高かったバケットに対する注視回数（シミュレーション群44.4%、実機群40.7%）と、バケット以外の注視対象に対する注視回数（シミュレーション群55.6%、実機群59.3%）を基に²検定を行った結果、両群の間に有意な差はみられなかった（ $\chi^2(1)=1.22, n.s.$ ）

4.5.3 注視対象に対する注視時間の割合

次に、ある対象に対する注視がどの程度の時間にわたって行われているか、を検討するために、「注視対象別注視時間の割合」を求めた。これは、注視点の停留が確認されたフレーム数の合計と注視対象毎に分類されたフレーム数の合計との関係から算出される（1フレーム=1/30秒）。

「注視回数の割合」と同様、各被験者の1回目、3回目、5回目の作業を対象として各被験者の注視時間（フレーム数）を求め、それぞれの群毎に合計した上で、対象毎の注視時間の割合を求めた。Fig.25に、シミュレーション群および実機群の「注視対象別注視時間の割合」を示す。

まず注目すべきは、注視時間の5割以上を「バケット」が占めている点である。シミュレーション群においては63.4%、実機群においては53.3%の注視が「バケット」に対して行われている。それに対し他の対象に対する注視時間は短く、「バケット」に対する注視時間の半分にも満たない。「バケット」以外で比較的多くの注視時間が割かれる対象は、「掘削地点」「荷台」「積載土」等であるが、いずれも掘削操作もしくは放荷操作の際の目標となる地点である。「注視時間の割合」に関しても、シミュレーション群と実機群は概ね同じ傾向にある。両群の違いを客観的に捉えるため、割合が最も高かったバケットに対する注視時間（シミュレーション群63.4%、実機群53.3%）とバケット以外の注視対象に対する注視時間（シミュレーション群36.6%、実機群46.7%）に二分し²検定を行ったところ、両群の間に有意な差がみられた（ $\chi^2(1)=141.7, p<.01$ ）

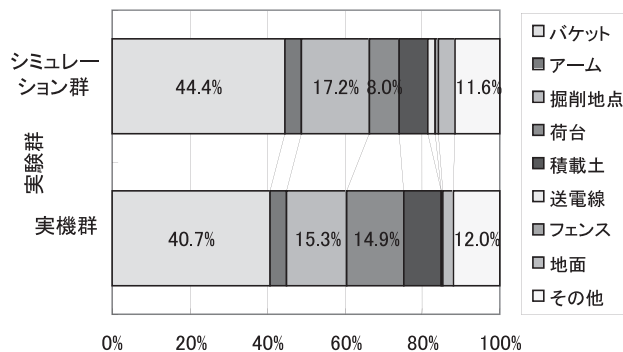


Fig.24 Frequency of fixation to each object
注視対象別注視回数の割合

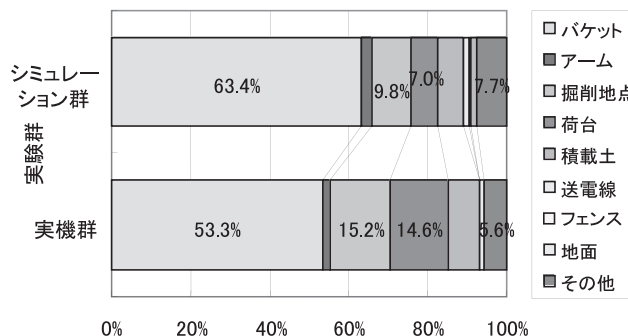


Fig.25 Fixation duration to each object
注視対象別注視時間の割合

4.6 1注視あたりの注視時間

いずれの注視対象であっても、1回あたりの注視が持続する時間が等しいのであれば、前述の「注視回数の割合」と「注視時間の割合」はほぼ等しくなるはずである。しかしながら、両者の間には幾分違いが認められた。すなわち、同じく1回の注視であっても、対象によって注視が持続する時間が異なることを意味する。これらの違いを明らかにするため、引き続いて「1注視あたりの注視時間」が求められた。

「注視対象別注視回数の割合」「注視対象別注視時間の割合」と同様、各被験者の1回目、3回目、5回目の作業を対象としたが、作業回数毎にバラツキがあるため1回の作業あたりの平均を求め、さらにそれぞれの群の平均を求めた。Fig.26にシミュレーション群および実機群の「1注視あたりの平均注視時間」を、さらにFig.27に「注視対象別1注視あたりの平均注視時間」を示す。

「1注視あたりの平均注視時間」は、シミュレーション群では574msec、実機群では488msecであった。t検定の結果、両群の間に有意な差は見られなかった（ $t(16)=0.07, n.s.$ ）。

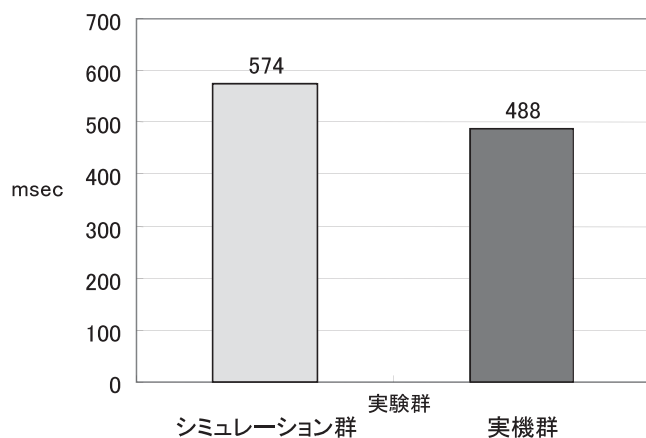


Fig.26 Fixation duration per a fixation
一注視あたりの平均注視時間

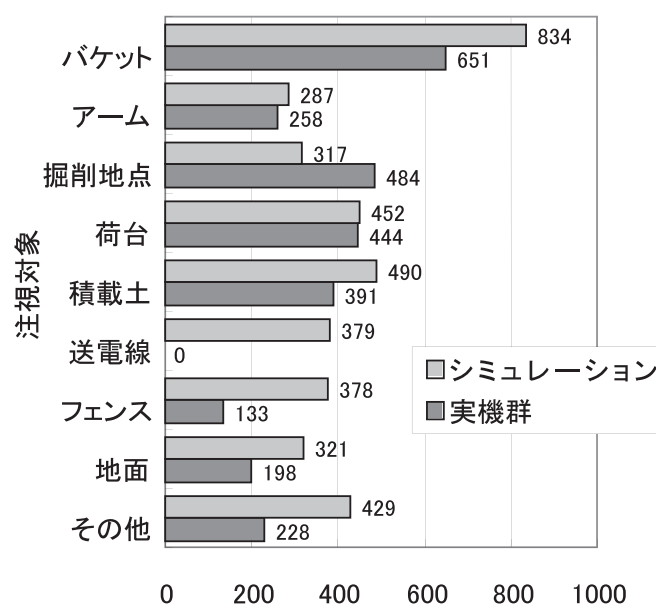


Fig.27 Fixation duration per a fixation to each object
注視対象別一注視あたりの注視時間

1注視あたりの平均注視時間を注視対象別に見た場合、「掘削地点」に関してシミュレーション群では317msecであるのに対し実機群では484msec、及び「フェンス」に関してシミュレーション群では378msecであるのに対し実機群では133msecと開きがあるものの、他の項目に関しては大きな差が見られない。また、いずれの群においても「バケツ」に対する1注視あたりの注視時間が長く、シミュレーション群で834msec、実機群で651msecとなっている。実機群においては実験条件の関係から、送電線というカテゴリーが存在しないため、送電線以外の項目に関して分散分析を行った。その結果、シミュレーション群と実機群との間に有意な差は見られなかったが ($F(1,7)=3.72, n.s.$), 注視対象に関して有意な差がみられた ($F(7,7)=5.98, p<.05$)。

4.7 操作内容別・注視対象別注視回数の割合

これまでの飛越距離の変化、あるいは注視点分布状況に関しては、操作内容毎に異なる傾向があることが確認されている。従って、操作内容に着目して、同様にシミュレーション群と実機群の比較を試みることにした。

Fig.28～31に、操作内容別・注視対象別にみた注視回数の割合を示す。これまでの分析と同様、各被験者の1回目、3回目、5回目の作業を対象として各被験者の注視回数を求め、それぞれの群毎に操作内容別に合計した上で、対象毎の注視回数の割合を求めた。操作内容の分類を行わなかった場合の注視回数の割合を求めた。

操作内容の分類を行わなかった場合の注視回数の割合 (Fig.24参照) に関しては、両群の間に大きな差は見られなかったものの、操作内容別の内訳をみると幾分違いが見られる。最も大きな割合を占めている「バケツ」に関しては、作業内容毎に多少のばらつきがあり、掘削の際に高い割合を占めているのに対し、左右への旋回の際にはいずれも下がっており、しかもシミュレーション群において違いが著しい。また、「掘削地点」に関しては、掘削及び右旋回の際に15～35%程度の値を示すのに対し、左旋回及び積込みの際にはいずれも0%である。それに対し、「荷台」に関しては左旋回、積込みの際に比較的大きな割合を占めているものの、掘削の際は0%、右旋回の際にも値は小さい。同様に「積載土」に関しては、積込みの際に20%を超えており左旋回時に7～15%であるものの、他の操作においては僅かな割合を占めるに過ぎない。

こうしたことから、操作内容によって増減はあるものの「バケツ」に対する注視回数ももっとも多い一方で、「バケツ」以外の注視対象に関しては、操作内容毎に大きく異なることがわかる。こうした傾向はいずれの群においても共通である。

一方、両群の間で特に違いが目立つのは「荷台」に対する注視回数の割合である。特に「積込み」時には、シミュレーション群13.7%に対し、実機群27.6%、「左旋回」にはそれぞれ21.1%、35.7%と開きが大きい。こうした違いの背景には、作業状況の違いが考えられる。荷台の高さと被験者の視点の高さとの関係は、シミュレーション実験の場合ほぼ同じであったのに対し、実機実験の場合、被験者の視点が幾分高い位置にあり、荷台を斜めに覗き込むことが出来る程度であった。視野カメラの映像に占める「荷台」の面積が広い分、注視点座標の微妙な判断が必要となった際に「荷台」とカウントされることになったと考えられる。

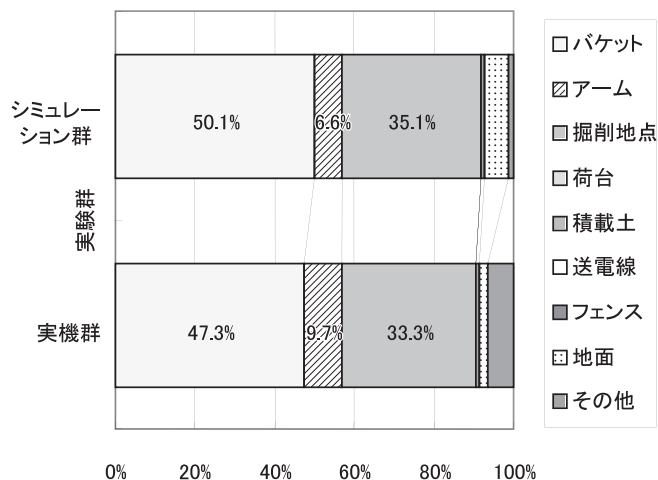


Fig.28 Frequency of fixation to each object : cxcavating
操作内容別(掘削)・注視対象別注視回数の割合

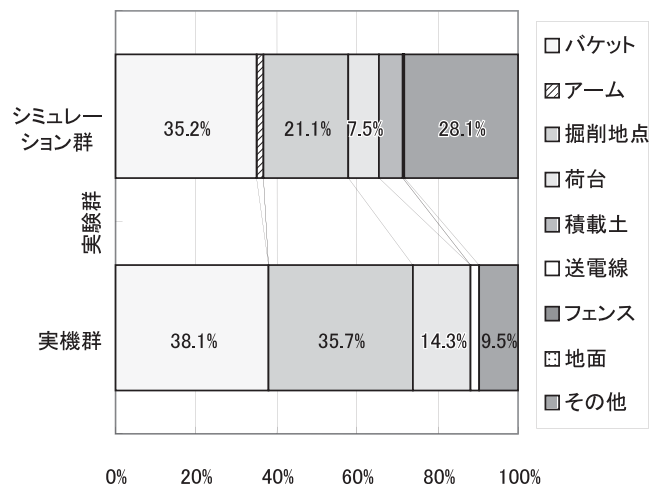


Fig.29 Frequency of fixation to each object : left-turn
操作内容別(左旋回)・注視対象別注視回数の割合

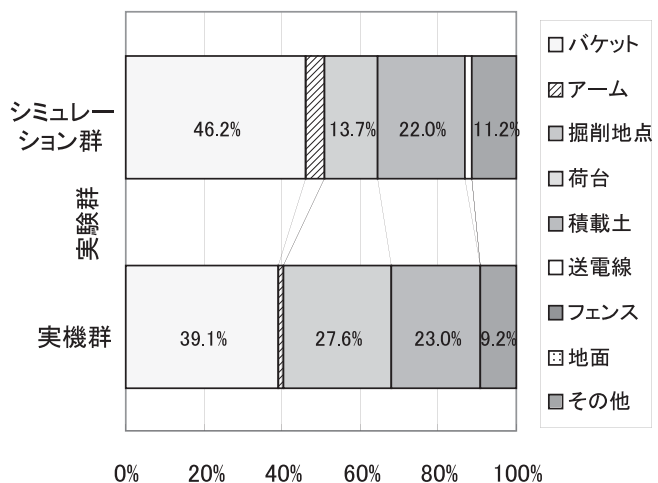


Fig.30 Frequency of fixation to each object : loading
操作内容別(積み)・注視対象別注視回数の割合

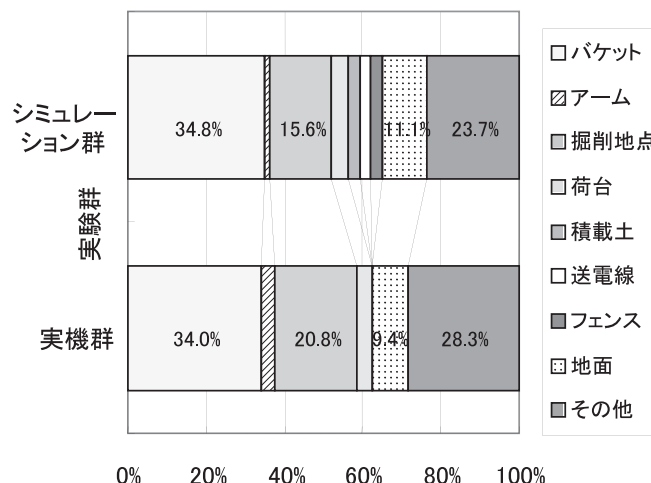


Fig.31 Frequency of fixation to each object : right-turn
操作内容別(右旋回)・注視対象別注視回数の割合

注視対象の分類をバケットとバケット以外の項目に二分し、それぞれの操作内容毎に²検定を行ったところ、いずれの操作内容に関しても、両群の間に有意な差はみられなかった(掘削： $\chi^2(1)=0.24, n.s.$ 、左旋回： $\chi^2(1)=0.13, n.s.$ 、積み： $\chi^2(1)=1.36, n.s.$ 、右旋回： $\chi^2(1)=0.01, n.s.$)

4.8 操作内容別・注視対象別注視時間の割合

注視回数に続いて、注視時間についても同様に比較を試みる。Fig.32～35に、操作内容別・注視対象別にみた注視時間の割合を示す。これまでの分析と同様、各被験者の1回目、3回目、5回目の作業を対象として各被験者の注視時間(フレーム数)を求め、それぞれの群毎に合計した上で、対象毎の注視時間の割合を求めた。

大まかには、注視回数の割合に関する結果を同じ傾向にあるといえる。しかし、注視回数の割合と比べ、「バケット」に対する注視時間の割合は高くなっており、特にシミュレーション群に関しては掘削、積みの際と左右への旋回の際では、差が際立っている。

「バケット」以外の項目に関しても、注視回数の割合と同様の結果となっており、また、両群の違いについてもほぼ同じ結果が得られている。「荷台」に対する注視時間の割合が、両群の間で大きく異なる点も、その原因は荷台の高さと被験者の視点の高さとの関係によるものと推測される。同一の記録データから注視回数と注視時間に焦点をあてて集計したものであるため、傾向が似通ってくるのは当然であるが、「注視回数の割合」と「注視時間の割合」の値が異なる点に関しては、さらに議論が必要であろう。

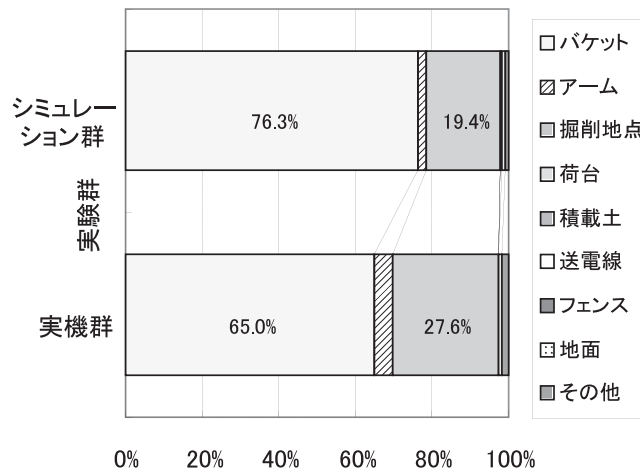


Fig.32 Fixation duration to each object : excavating
操作内容別(掘削)・注視対象別注視時間の割合

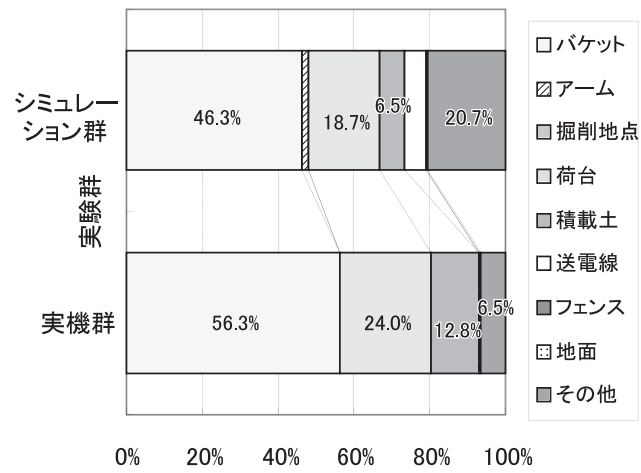


Fig.33 Fixation duration to each object : left-turn
操作内容別(左旋回)・注視対象別注視時間の割合

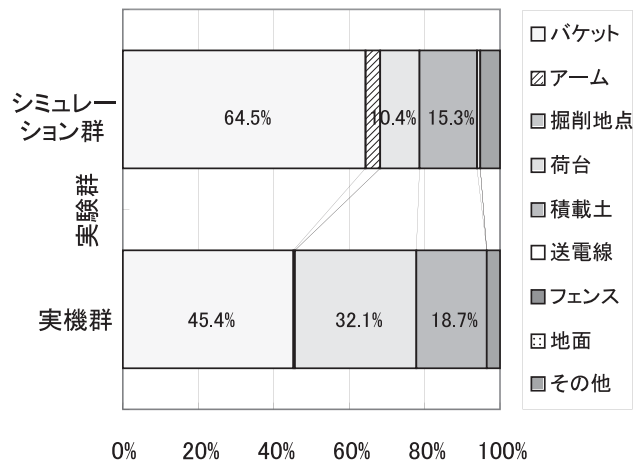


Fig.34 Fixation duration to each object : loading
操作内容別(積み)・注視対象別注視時間の割合

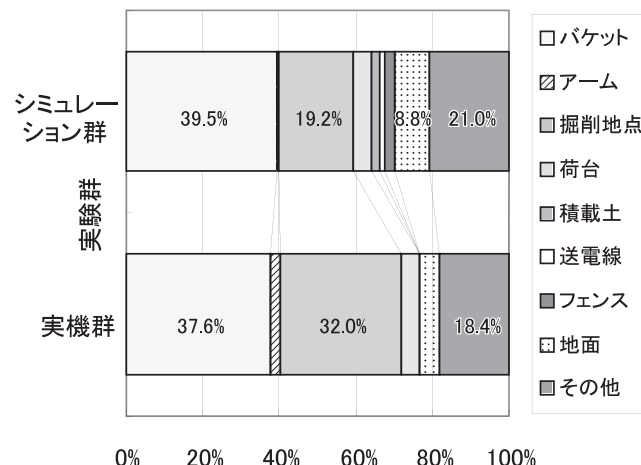


Fig.35 Fixation duration to each object : right-turn
操作内容別(右旋回)・注視対象別注視時間の割合

注視対象の分類をバケットとバケット以外の項目に二分し、それぞれの操作内容毎に²検定を行った。その結果、掘削においてはシミュレーション群と実機群との間に有意な差がみられ(²(1)=81.52, p<.01), 同様に、左旋回(²(1)=20.70, p<.01), 積み込み(²(1)=159.42, p<.01)において有意な差がみられた。一方で、右旋回に関しては有意な差はみられなかった(²(1)=0.75, n.s.)

一方、一連の作業を操作内容によって分割した場合、操作内容の区分と一連続注視の区分は一致せず、現段階では正確な「1注視あたりの注視時間」を求めることが出来なかった。注視対象毎の連続注視時間を直接測定する等、異なる方法での分析が今後の課題となる。

5. 論議

5.1 シミュレーション実験と実機実験

シミュレーション実験と同様に実機を用いた眼球運動の測定を行い、分析結果を比較した結果、両者の間には共通点が見出された。

眼球運動のx軸(水平方向)成分に関しては、いずれの被験者に関しても旋回操作時に大きく変化し、他の操作時においては滑らかな推移を示した。y軸(垂直方向)成分に関しては、操作内容によって極端に変化することはなく、x軸成分ほど変化が大きくなかった。また、飛越距離はx軸(水平方向)成分と同様に、旋回操作時に集中して比較的大きな飛越運動が観察さ

れた。これは、操作内容別にみた注視点座標の変化量、平均飛越距離の比較からも裏付けられる。また、注目すべきは、シミュレーション実験によって得られた結果と実機実験によって得られた結果に差が見られなかった点である。

操作内容別に注視点分布状況を求め、被験者間で相互に比較を行ったところ、掘削時・積込み時には共通して注視点の分布範囲はまとまり、左右への旋回時とは異なる傾向を示した。旋回時には主に横方向に広がるものの、右旋回時には加えて縦方向への広がりがみられた。こうした傾向は、それぞれの操作時間の中間に位置する3秒間をサンプリングし、分布範囲を求めた場合においてより顕著に現れる。そして、こうした観点から行われたシミュレーション実験と実機実験の比較においても、差がみられなかった。

注視対象別に注視回数の割合、及び注視時間の割合を検討した結果、いずれにおいても「バケット」に対するこれらの割合が最も高く、注視回数に関しては約4割、注視時間に関しては約6割を占めることとなった。また、シミュレーション群と実機群との間に大きな違いは見られなかった。

注視対象別にみた1注視あたりの注視時間に関しても、バケットに対する注視がもっとも長く、これまでと同様の傾向を示した。分類項目によってはシミュレーション群と実機群との間に違いがあったものの、概ね両者は似通った傾向にあることが確認された。

注視回数、注視時間を操作内容別に検討した場合、シミュレーション群と実機群の間には幾分違いが見られている。特に「荷台」に関する違いが目立つ結果となったが、実験状況の差異による影響の可能性もあるため、実験状況の設定に課題を残す形となった。一方で、特に「バケット」以外の注視対象に関しては、操作内容によって注視行動が大きく異なっており、今後の分析方針及び検討に大きな示唆を与えるものである。

5.2 掘削作業における視覚的重要情報

掘削機の操作における視覚情報獲得行動に関しては、作業装置の一部であるバケットが重要な役割を果たしているように思われる。

市川、梅村⁶⁾は、滑空機操縦の際の眼球運動を測定した。飛行経験が3時間程度の被験者Aは、計器への注視割合が52.9%であったのに対し、飛行経験105時間の被験者Eは15.0%であった。飛行経験が多い被験者は、計器（速度計）を注視することが少なく、むしろ機首部分を注視することが多いことを報告している。その理由は、滑空機は機首の上げ下げによる速度

制御が重要であり、習熟者は機首と地平線の関係から機体姿勢をチェックし速度を制御するのに対し、未熟練者は計器に頼るためである、という。これは、観察者にとって重要な情報が積極的に獲得されている例であると考えることが出来る。また、どのような情報を重要であると評価するか、という選択に、経験的な要因が絡んでいることを示すものである。

この意味で、飛越距離、注視点の分布状況、注視対象等々、操作内容によって違いがみられる点は、一連の作業の中での「視覚的重要情報」に対応したものと考えることが出来る。すなわち、オペレータにとって第一に重要なのは、自らの操作内容をモニタリングするための「作業装置」の位置情報である。作業装置の中でも特に「バケット」は操作する掘削機の先端部であり、最も動きが激しく、作業精度に直接関わる部分である。さらに、どのような操作を行っても、その操作内容は必ずバケットの動きとして反映される。従って、作業全体を通じて「バケット」への注視が増える結果となると考えられる。

バケット以外の重要な情報は、掘削操作においては掘削すべき「掘削地点」であり、積込み操作においては正確な放荷を行うための「荷台」、及び放荷地点の目標となる「積載土」であるため、注視回数、注視時間とも増加する。これらの作業においては、重要な情報となる対象物と「バケット」が近接しているため、これらの注視対象間を注視点が行き来しても、注視点の分布範囲が広がることはなく、大きな飛越運動も生じにくい。

積込みを行うための左旋回時には、オペレータにとってはダンプトラックの「荷台」の位置情報が重要であり、旋回しながら度々その位置を確認することとなる。二回目以降の積込みにおいては、「積載土」が次の積込みの目標地点として利用される。「荷台」も「積載土」も被験者の視点から水平方向でやや下に位置する程度なので、「バケット」と「荷台」または「積載土」を交互に注視する結果、注視点の分布状況は横方向に広がることとなる。

それに対し右旋回の際には、次の掘削に備え掘削すべき「掘削地点」の位置が重要な情報となる。「掘削地点」は地面と同じ高さであり、被験者の目線より下に位置する。「放荷」を終えたバケットの位置は荷台より高い位置にあり、被験者の目線からやや上に位置する。操作内容をモニタリングするために「バケット」を注視しつつ、旋回しながら度々「掘削地点」の位置を確認することになるため、視野の左上から右下にかけて注視点の分布状況は広がることとなる。

このようにして行われる視覚的な情報獲得行動が反

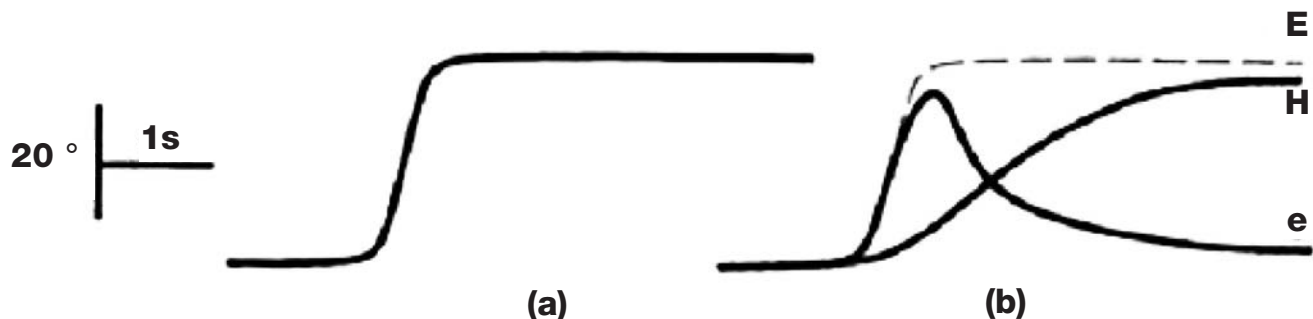


Fig.36 Comparison between saccade and fixation
 飛越と注視の比較
 Morasso, P. et al. (1973) より . 一部改変)

映され、これまで検討されてきた飛越運動、注視点分布状況、注視回数、注視時間といった分析結果につながったものと考えられる。こうした「視覚的重要情報」と注視点の関係はあくまで推測に過ぎず、現時点では具体的な裏付けとなるデータは存在しない。今後、操作内容による違いとともに、注視対象に対するオペレータの注意配分状況を探ることが出来れば、何がオペレータにとって重要な情報であるのか、といった疑問を明らかにすることが可能であろう。

5.3 眼球運動と頭部運動

一方で、シミュレーション実験においても実機実験においても、被験者には自由な頭部運動を許容しつつ計測を行った。それにも関わらず、飛越距離や注視点分布状況が操作内容によって全く異なる傾向を示すなど、興味深い結果を得ることが出来た。古賀⁴⁾によれば、例えば、右斜め上 30° に位置する何らかの対象を見る場合、まず飛越運動を行い第3眼位でその対象を捕捉する行動が先行し、その直後に頭部をその対象に向けた大まかな動作が生じる。その後、頭部の動きを補償するため眼球は再度調整運動を行い、結果として対象に向けられた頭部の中の第1眼位で視対象を固視する、という。また、Morasso, P. et al.⁷⁾は、何らかの対象を視覚的に捉える際の頭部運動と眼球運動の関係を次のように図示によって説明している (Fig.36)。上記のグラフの横軸は時間、縦軸は角度を示す。(a)で示される動きは、頭部を固定した状態で突然ターゲットが現れた場合の飛越運動を示している。(b)に示されるのは、頭部運動が自由な状態での飛越運動eと頭部運動Hである。点線で示されるEは、eとHの和であり、(a)とほぼ同一であることが分かる。

頭部運動を許容した状態で行われる眼球運動の測定は、上図のeに対して行われるものであるが、視線を向けた先からどのような情報を取り入れるか、といった観点からは、問題はないと考えられる。従って、厳密に眼球の動きのみを把握する「眼球運動測定」とは異なる意味で、被験者に頭部運動を許容する測定方法も有用であると考えられる。

5.4 シミュレーション実験の妥当性

今回の実験においては、被験者の「シミュレータ酔い」、キャリブレーション時の不具合、測定範囲外のアイマーカーの「ずれ」等、様々な理由から分析対象を絞り込まざるを得ず、結果として比較を行うのに十分な数のデータを得ることが出来なかった。また、シミュレーション実験と実機実験の被験者は同一であることが望まれたが、上記のような理由から、理想的な測定を行うことは出来なかった。そのため、極めて大まかな比較・検討にとどまざるを得なかったことは事実であるが、その一方で、こうした数少ないデータに基づく検討であっても、シミュレーション群と実機群との間には概ね共通する傾向が認められていることは確かである。今回の実験で課題として課せられた掘削作業においては、「シミュレーション」と「実機」という違いに関わらず視覚的な情報獲得行動のストラテジーは共通であり、シミュレーション実験によって得られる結果は妥当であると考えることが出来る。

参考文献

- 1) 中村隆宏, 深谷 潔, 呂 健, 江川義之, 輿水ヒカル, 掘削機操作における眼球運動と有効視野, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS - SRR - NO.23, pp.15-34

- 2) F・H・ホーキンス：ヒューマンファクター
航空の分野を中心として，黒田 勲 監修，
石川好美 監訳，成山堂，1992
- 3) 下條信輔：逆さめがねからバーチャルリアリティ
へ，牧野達郎編，知覚の可塑性と行動適応，プレ
ン出版，3-16，1998
- 4) 古賀一男：眼球運動実験ハンドブック，労働科学
研究所出版部，1998
- 5) 北濱 亨，三浦利章，岡崎甚幸，篠原一光，田村仁志，
松井裕子：迷路探索歩行時の注視と歩行に関する
研究，人間工学，Vol. 35，NO. 3，1999
- 6) 市川 博，梅村 守：滑空機操縦者の視線移動に
関する実験的検討，人間工学，Vol.33，NO.4，1997
- 7) Morasso,P. Bizzi, E. & Dichgans, J. : Adjustment of
Saccade Characteristic During Head Movements,
Experimental Brain Research. 16, 492-500, 1973

(平成15年2月24日受理)