

ユーザ観察に基づく  
大規模システム運転操作技能に関する研究  
Analysis of operation skill of large scale system  
based on user observation

○玉木 惟久, 松山 成男, 高橋 信  
Tadahisa Tamaki , Shigeo Matsuyama , Makoto Takahashi

東北大学  
Tohoku University

キーワード: 技能継承(Skill-inheritance),大規模システム(Large scale system) ,  
運転操作技能(Operation skill),ユーザ観察(User observation)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-904 東北大学大学院 工学研究科  
技術社会システム専攻 高橋(信)研究室 玉木 惟久,  
Tel./Fax. : (022)-795-7921, E-mail: tadahisa.tamaki@most.tohoku.ac.jp

## 1. 序論

2007 年問題と呼ばれた団塊世代の大量退職をきっかけに、熟練者の持つ技能を如何に次世代に継承するかという問題が提起されている<sup>1)2)</sup>。長年の経験により培われた卓越した技能はいわば資産ともいべきものであり、金属加工業や伝統工芸などでその継承が図られている。

この技能継承の問題は、製造業のみならず優れた運転操作技能を要求される各種のプラントや交通システムなどでも注目を集めている。特に石油化学プラントや原子力発電所などの大規模システムは社会に大きな利益をもたらす一方で、メキシコ湾原油流出事故や福島第一原発事故からも明らかのように、広域に甚大な影響を与える潜在的リスクを持っており、そのリスクを受容可能なレベルまで低くすることが求められている。

近年、これらの大規模システムにおいてはコンピュータ技術の進展の恩恵として、中央制御室に集約された情報をもとにシステム全体を管理する監視制御が広く普及している。また、製造や品質管理技術の向上により、プラントや発電所の個々

の構成機器の信頼性は大きく向上した。その結果、安全性の向上に加え、システム全体の効率的経済的な運用が進んでいる。しかしながら、コンピュータによる自動化と構成機器の高信頼性化は、運転員の日常業務を単純化し、トラブルの解決や回避を通じた技能の獲得機会、習熟機会を大きく減少させた。結果として、近年では若年運転員の操作技能獲得の遅れや技能低下が危惧されている。大規模システムの安全で安定的な運用には優秀な運転員が必要不可欠であり、熟練運転員の持つ技能を次世代に確実に継承していくことは重要な課題と言える。

しかしながら熟練者が長年の苦労や経験をもとに形成した技能を伝承するというのは容易なことではない。とりわけ技能継承を困難なものとしている一因に、熟練者自身が自らの技能を把握し体系化できておらず、暗黙知という形で知識が存在しているという点が挙げられる。暗黙知はいわゆる勘や技に代表されるような可視化や定量化が困難な知見であり、しばしば熟練技能の本質的な部

分を構成している。

今日までに採用されてきた代表的な技能継承手法には、知識のデータベース化やマニュアル化、OJT(On-the-Job Training)などがある。しかしながら、これらの手法は暗黙知の効率的な継承には適していないという問題や、技能の継承に長時間を要する、一度に多数への継承が難しいといった非効率さが指摘されており、暗黙知を継承が容易な形式知化する効率的な技能継承手法の開発が必要とされている。

従来の研究では、熟練者の技能を抽出する手法として、眼球運動観察<sup>[2][3]</sup>や操作ログ分析<sup>[4]</sup>などのユーザ観察手法が提案されその有効性が認められている。ところが、これらの手法は観察対象に対する身体的負担が大きく、対象の思考過程や意図が観察者の解釈に依存し正確に抽出できない場合がある。そこで本研究では、行動観察、ログ解析といった手法を組み合わせることで、技能者の意図や思考過程を含めたより詳細な技能の抽出の可能について検討を行っている。

以上のような背景に基づき、本研究ではユーザ観察に基づく詳細な熟練技能抽出の可能性を検証することを目的として研究を行っている。本稿においては、実験用加速器におけるイオンビームの輸送過程を対象に技能抽出実験を実施し、その結果を操作方針の構築に関係する戦略的技能と、実際に操作を行う際のコツに対応する操作技能の2つの観点に分け報告する。

## 2. 研究対象

本研究は、東北大学高速中性子実験室(Fast Neutron Laboratory : 以下 FNL)におけるイオンビーム輸送タスクを研究対象として行った。FNLでは様々な専門分野のユーザによって、材料照射やPIXE (Particle Induced X-Ray Emission) など多岐に渡る実験が行われている。本施設には専属の実験オペレータがいないため加速器システムについての理解が必ずしも十分でない実験担当者が自ら運転を行う必要がある。運転操作の教授は、基本的に運転マニュアルと熟練者による口頭指導によりなされている。ところが、円滑な運転操作にはかなりの習熟を必要としており、本質的な実験装置以外の加速器運転に係る操作負荷が非常に

大きいことが課題となっている。実験者の操作負荷低減には熟練者の技能継承が有効であると考えられ、本研究の目的である熟練技能の抽出手法の提案とその有効性の検証に適した環境であると考えた。

### 2.1 FNL の構成と運転操作

FNL は、最大加速電圧 4.5MeV のダイナミトロン加速器と 6 本のビームラインにより構成されている。Fig.1 に FNL システムの概要を示す。運転操作は、デュオプラズマ型イオン源からイオンビームを生成し加速するイオンビーム生成タスクと、生成されたビームを目的実験ポートに導き、そのビーム量と形状を最適化するイオンビーム輸送タスクに大別できる。これらの制御系は 2010 年までに改良が行われ、ほぼ全ての操作を PC 上のインタフェースと付属するロータリーエンコーダーを介して行うことが可能となっている。運転操作の様子とロータリーエンコーダーを Fig.2 に示す。イオンビーム生成タスクに関しては、イオン源の制御が一部自動化されるなど運転負荷が大きく低減されている<sup>[5]</sup>。一方で、イオンビーム輸送タスクは、操作対象となる多数のパラメータが複雑な相関性を持っており、単純な物理モデルに基づく自動化が非常に困難である。手動での操作は運転者の技能に大きく依存するため、運転経験の少ないユーザには大きな負担となっている。本研究ではこのイオンビーム輸送タスクについて操作負荷の低減を目指し、熟練技能の抽出対象と定めた。

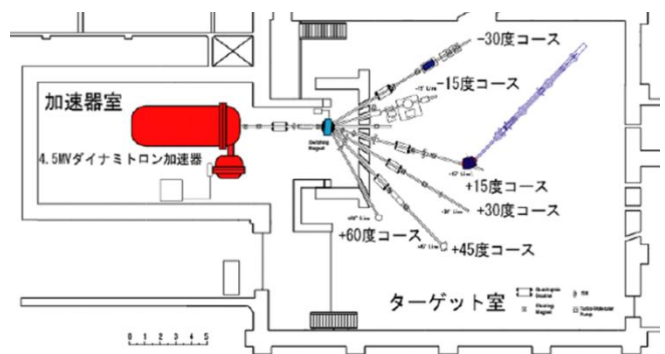


Fig.1. FNL システムの概要



(a). 運転操作の様子



(b). ロータリーエンコーダー

左上スイッチで、パラメータを決定し、右側の回転部でパラメータの増減を行う。

Fig.2 (a)運転操作の様子と(b)ロータリーエンコーダ

## 2.2 ビーム輸送系

イオンビーム輸送タスクは、インタフェース上で獲得した各パラメータの情報をもとにビームの状態を推定し、制御を加えることで各実験ポートへとビームを輸送し、目的とするビームの形状や位置、電流量といった条件を実現する過程である。本節ではその操作に係る重要なパラメータについて説明する。ビームライン上での各パラメータの位置関係を Fig.3 に示す。

- ① H.V (=High voltage) ビームの加速電圧  
ビームのエネルギーに相当し、通常、実験中は固定されている。
- ② Q-lens (=Quadpole-lens) 四重極レンズ  
2組の直行した電磁石によりビームの集束状態を調整することができる。後述の SW-Mag よりも上流に位置する 0-Q-1,0-Q-2 と、下流に位置する 1-Q-1,1-Q-2 が存在する。

③ STR(=Magnet steerer, ステアラー)  
磁場によって、ビームの軌道を偏向させる。ビームライン上に3か所存在し、左右にビームを曲げる L/R と、上下方向にビームを曲げる U/D がある。

④ SW-Mag (=Switching Magnet, 偏向磁石)  
磁場をかけることによってビームを偏向し、各実験ポートへと輸送する。最適な磁場強度(理論値)を PC 上の NMR Calculator によって計算することができる。

⑤ AP (=Aperture, アパチャー)  
中心部にビームを通す小径があり、AP に当たると電流が流れる。ビームの絞り具合や位置を確認するのに活用される。SW-Mag の上流の AP(0)、ターゲット近傍の AP(1)の2か所に設置されている。この値はビームの損失を意味するため、最小化することが望ましい。

⑥ TGT Current (=Target current, ターゲット位置でのビーム電流量)  
多くの実験では、この値を最大化することが要求される。

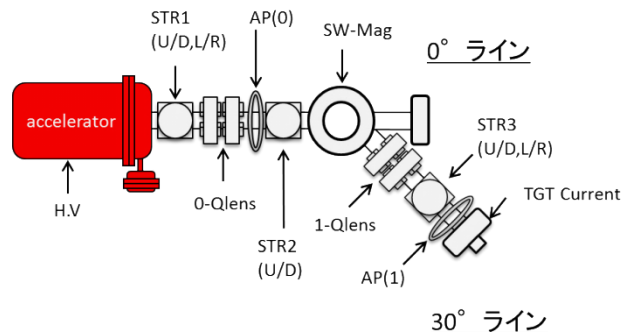


Fig.3 ビーム輸送系の構成

ユーザは H.V 値を固定しビームのエネルギーを一定とした上で、STR、Q-lens を調整し SW-Mag へとビームを輸送する。その後、SW-Mag の磁場強度を調整し目的の実験ポートへビームを輸送したのち、Q-lens、STR、SW-Mag を調整し、実験ポート内でビーム条件を最適化する。過去に類似の実験条件がある場合にはそのログを読み込み、ログに記録されているパラメータ設定から小さく変化させることで操作負荷を低減している。上流のパラメータの変動が下流のビーム状態に波及する、

過去ログ通りに制御を行っても完全に同じビーム状態を再現することができないといった本システムの特徴がこのタスクを複雑で困難なものとしている。

### 2.3 ユーザの分類

本システムのユーザはその習熟度に応じて初心者、中級者、上級者に大別できる。

#### ① 初心者

運転経験がないもしくは運転経験に乏しく、システムの構成や機器の位置など基本的な知識に関しても不十分な段階。中級者以上の指導がなくてはビーム輸送タスクを達成できない。主に使用経験が2年未満のユーザがこれに該当する。

#### ② 中級者

運転経験を蓄積し、マニュアルに記載されたレベルの知識を習得したことで、通常時の操作に十分習熟した段階。シビアな条件が求められる場合を除き、ビーム輸送タスクを単独で達成できる。主に使用経験が2年以上のユーザがこれに該当する。

#### ③ 上級者

豊富な運転経験を持ち、システムの構成、各パラメータの測定方法などにも精通している段階。シビアな条件でもビーム輸送タスクを達成できる。通常時はもちろん、異常発生時にも対応する能力を有する。施設管理を行っている教員がこれに該当する。

本研究では、上記の中級者を非熟練者、上級者を熟練者と呼ぶこととする。単独でのビーム輸送が困難な初心者は対象からは除外した。

## 3. ユーザインタビュー

具体的に抽出が必要とされる熟練技能を把握するために、利用経験や負荷を感じる操作、支援ニーズなどについてユーザ7名にインタビューを実施した。うち1名は熟練者であり、残り6名は非熟練者である。Table.1 にインタビュー対象者の詳細を示した。インタビューの結果、非熟練者に関してはビーム輸送タスクの中でも、実験条件に合致したビーム量、形状、位置を達成するビーム条

Table.1 インタビュー対象者一覧

	学年	利用経験	備考
1	M2	2年,20回弱	専門：原子力材料
2	M2	2年,20回弱	専門：核融合炉材料
3	M2	3年,10回以上	専門：核融合炉材料
4	M2	3年,20回程度	専門：放射線科学
5	M2	3年,10回程度	専門：放射線科学
6	D3	3年,20回以上	専門：放射線科学
7	教員	30年以上	施設管理者

件の最適化過程に係る運転負荷が大きいことが明らかになった。特にどのパラメータに着目し、操作をして最適化を進めていくべきかという方針を立てる能力が十分でない。その結果、操作が長時間に及び運転負荷が増大していることが明らかになった。また、Table.1 中の熟練者は施設管理者として、非熟練者に対する運転操作方法の教授や制御ソフトの開発にも従事している。指導者も務める立場から、ビーム輸送タスクに関して、経験に依存する操作が多く習熟度による技能の差が大きい、非熟練者は場当たりの操作をしているように見受けられるとの意見が得られた。

これらのインタビューの結果から、熟練技能の抽出が期待されるのは、ビーム状態を推定しそれをもとに操作方針を設定する過程である。これら過程に着目し熟練技能を抽出するため、ユーザ観察手法に基づく技能抽出実験を計画した。

## 4. 実験

### 4.1 実験手法

インタビューの結果をもとに、ユーザ観察に基づく技能抽出実験を行った。本システムにおける熟練技能は、不可視な状態にあるビームの状態を推定し、それをもとに次の操作方針を立てる技能（戦略的技能）と、実際に意図するビーム状態へとパラメータを調整する際のコツや技（操作技能）の2つに大別できると考えられる。戦略的技能と操作技能は厳密に二分できるものではなく、むしろ互いに密接な関係を持つと考えられる。したがって、熟練技能を抽出するには、双方を同時に捉える必要がある。そこで本実験では、実環境

下で被験者に課題タスクを与え、ユーザ観察手法を用いてその運転操作を評価することで熟練技能の抽出を行った。思考過程、意図と言った戦略的スキルに関する情報は、行動観察の一種である思考発話法を利用して収集した。思考発話法は、操作を行う際に被験者に考えたことや感じたことなどを自由に発言してもらい、その様子をビデオなどで記録し分析する手法である。同時に操作ログを取得することで、発言には現れない被験者の操作の癖や特徴の抽出を図った。加えて、運転操作の終了後にタスクの達成度などの主観的な情報の収集と、実験そのものの評価を目的としてアンケートを実施し、その情報に不足があれば追加でインタビューを行うこととした。

## 4.2 実験タスク

FNLの運転操作について、十分に習熟した熟練者1名、非熟練者2名を対象として技能抽出実験を行った。設定した課題タスクは、30°ビームラインにおけるTGT Currentの最大化である。TGT Currentの最大化とは、先述したビーム条件の最適化の一種である。簡単のため、イオンビーム生成系のパラメータは制御不可とし、2.2節に示した輸送系パラメータのみを制御させた。TGT Current  $\geq 2.0 \mu\text{A}$ 、AP(1)  $< 0.1 \mu\text{A}$  という条件を連続して10秒以上維持することをタスク達成条件に設定した。より普段の運転操作に近づけるため、初期条件として、実験条件と異なる加速電圧で30°ラインにビームを輸送した状態を過去ログとして与えた。被験者はこのログを読み込んだ後、ビーム状態を推定し、30°ポートへの輸送と、TGT Currentの最大化を行う。制限時間は60分間とし、制限時間内にタスクを達成できなかった場合でも操作を終了させた。また、運転操作終了後に主観的評価の収集のため先述のアンケートに回答させた。

## 4.3 実験結果と考察

本実験では、より短時間でタスクを終了した被験者ほど運転スキルが高いと考えられる。3名のタスク所要時間は、熟練者が8分05秒、非熟練者がそれぞれ60分00秒、13分50秒であった。所要時間に熟練者と非熟練者の間で明確な差があった

ことから、明らかに被験者間で運転操作スキルに差があると考えられる。実験の解析結果より、熟練者と非熟練者の間に見られた差異に関して、以下に戦略的スキルと操作スキルの観点に分けて結果を示し、考察を行った。

### 4.3.1 戦略的スキル

#### ● 操作方針に関して

3名の被験者がとった操作方針は大きく2つに分けられる。方針1は、タスク開始後、直接30°ポートへとビーム輸送を行い、TGT currentを最大化するというものである。熟練者、非熟練者1がこの方針を採った。方針2は、一度0°ポートでTGT Currentを最大化し、その後30°ポートへと輸送、TGT Currentを最大化するというものである。非熟練者2がこの方針を採った。ただし、非熟練者1は方針1を採り、直接30°ポートへビーム輸送したもののTGT Currentを最大化することができず、結局実験途中で方針2に転換した。熟練者と非熟練者の間で方針に違いが出た原因には、運転操作の教授が関係していると考えられる。本システムの運転操作の通常の手順としては、0°ポートで一度ビームを最適化し、その後目的実験ポートへと輸送し、目的ポート内でビームを最適化する2段階の輸送方法が教授される。したがって、非熟練者が0°ポートを経由したのは、教授された運転方法に則り方針を決定したからであると理解できる。それに対して、熟練者は0°ポートにおける最適化の過程を省略することで、タスクの所要時間を短縮していると考えられる。こうした手順のショートカットは、本システムに限らず一般的に習熟度の高いユーザの特徴でもある。したがって、実質的に両者の間には操作方針の違いは見られなかったと解釈される。

#### ● 非熟練者1の方針転換に関して

非熟練者1は、当初熟練者と同じ方針1を採ったものの、TGT Currentを最大化できなかったため、途中から方針を2に転換した。この過程について、ビデオ解析と実験後に行ったアンケート、インタビューをもとに分析し、考察した。

発話のビデオ分析から、非熟練者1はビームの状態をうまく把握できていないことが明らかになった。タスク開始後の操作として、パラメータを

変動させビームの位置を把握することから始めており、その後も操作中に次の操作内容を考え込むシーンが散見された。対照的に、熟練者は操作間で思考する時間が見られないことから、動的なビーム状態を瞬時に把握していると思われる。

非熟練者1に関して、ビーム状態を推定できていないことがアンケート中の主観的評価にも示されている。Fig.4に初期状態におけるビーム状態推定の主観的達成度評価を、Fig.5に初期状態における操作方針立案の主観的達成度評価を、Fig.6にタスク達成時間のビーム状態推定の主観的達成度依存を示した。達成度は1~5の整数5段階で主観的に評価し、5に近いほど達成度が高いことを表す。Fig.6より、初期条件におけるビーム状態推定の主観的評価とタスクの達成時間の間には負の相関が見られた。また、アンケート中には、詳細の不明な過去ログを与えられたことでかえって混乱したとの意見もあった。非熟練者1に関して、ビーム状態の推定の評価が低いにも関わらず、方針立案の評価が高い理由については、方針を運転経験に基づいて立てていたからであることがインタビューから明らかになった。

つまり、非熟練者1は不十分なビーム状態の推定に基づき、操作方針を設定したためにTGT Currentの最大化を達成することができず、方針の転換を余儀なくされたと考えられる。

以上から、戦略的技能に関する能力のなかでもビームの状態の推定能力は重要な要素となっていると考えられる。操作方針の立案能力は運転経験を蓄積によって形成が期待されるが、ビームの状態を正確に推定する能力が十分でない場合にはその有効性は限定的であると言える。

#### 4.3.2 操作技能

ビデオ解析とアンケートの解析により、熟練者と非熟練者の操作の間でロータリーエンコーダーの操作方法に違いが見られた。決定的な違いとして見られたのは制御値の一次保存機能の使用法である。本システムのロータリーエンコーダーには制御値を一時保存する機能(SAVE)、保存した制御値を読み込む機能(PLAY)がついている。

(Fig.2(b)参照) 非熟練者は各パラメータを操作し始める際に、制御値を一時保存した上でパラメ

ータを増減させ、操作がうまくいかない場合には保存値へと戻る。一方、熟練者はSAVE、PLAYをほとんど使用しなかった。タスク全体を通してSAVEを一度用いただけであり、PLAYに関しては一度も使用しなかった。これらの機能を使用しない理由について熟練者に対して行ったインタビューによると、熟練者は操作中にロータリーエンコーダーを回転させた回数を「右方向に2回転、3回転・・・」と脳内でカウントし、それに基づき操作前からどの程度変化させたかを把握していることが判明した。これは、基準となった値からどの程度パラメータを増減させたかを感覚的に把握したいという理由に加え、ビームライン全体でパラメータ間の相関を見ながらビームの流れを捉えるため、個々のパラメータを最適化することを意図して操作していないからである。この結果をもとに操作ログの解析を行った。

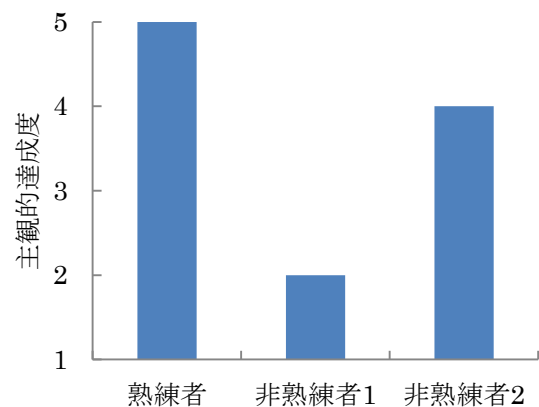


Fig.4 初期条件における各被験者のビーム状態推定の主観的達成度評価

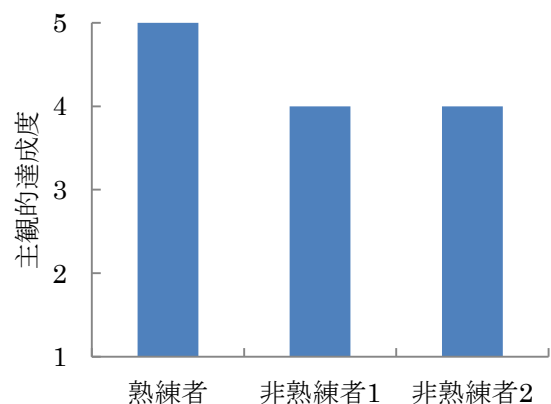


Fig.5 初期条件における各被験者の操作方針立案の主観的達成度評価

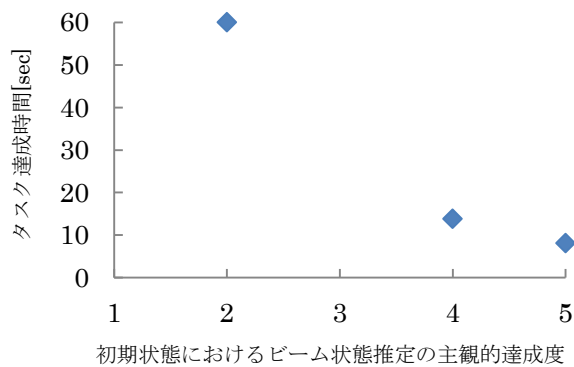


Fig.6 タスク達成時間のビーム状態推定の主観的達成度依存性

Fig.7(a),(b)に熟練者、非熟練者のSW-Magの操作ログを示した。熟練者は一時保存値に囚われずパラメータを大きく増減させることでビーム輸送に適した値を素早く見つけているが、非熟練者は保存した制御値近傍で熟練者に比べて小幅な操作をしており、うまく最適化できない場合に逐一保存した値に戻っていることが確認できた。そのため、同じパラメータの操作を繰り返すことになり、操作時間が長時間になってしまうと考えられる。熟練者からは、制御値の一時保存機能に頼るために感覚的にパラメータの変動を把握することができていないのではないかと指摘もあった。

以上から、操作技能の形成には感覚的にパラメータの変動を把握することが重要である可能性があり、非熟練者が多用する制御値の一時保存機能はその習得を妨げている可能性が示唆された。

## 5.結論

大規模システムの運転操作技能を対象に、詳細なユーザ観察手法にもとづき、熟練技能抽出の可能性を検証した。その結果、熟練者、非熟練者間で明確な技能差が確認された。また、戦略的技能、操作技能という2つの観点から考察を行い、戦略的技能に関して、ビーム状態の推定能力が重要な役割を果たしていることが示唆された。操作技能の形成には、パラメータの変動を感覚的に把握することが有効である可能性があり、現行システムに搭載された制御値の一時保存機能に依存することは非熟練者の技能形成を妨げる可能性がある。

実験後のアンケートではカメラによる監視のもと発話しながら操作を行うことに対して、負担を

感じたとの意見も得られた。また、熟練者が脳内で行っているという操作時のカウントが抽出できていないなど、実験手法に関してさらなる検討が必要である。

今後はさらに詳細な技能抽出のため、継続的に実験を行い、解析を進めていく予定である。



(a).熟練者の操作



(b).非熟練者1の操作

Fig.7 SW-Magの操作ログ

## 参考文献

- [1]森和夫,技術・技能伝承ハンドブック,JIPMソリューションズ,(2006).
- [2]五福明夫,プラント操作習熟への熟練者視線傾向の利用効果の実験的検討,ヒューマンインターフェイス学会誌,Vol.11,No.3,(2009).
- [3]五福明夫,運転スキル抽出のための注視点遷移パターンの分析手法とその模擬プラントへの適用,ヒューマンインターフェイス学会誌,Vol.14,No.2,(2012).
- [4]宮田圭介,建設機械の操作技能伝承手法の検討,ヒューマンインターフェイスシンポジウム論文集,pp.401-404,(2007).
- [5]橋本悠太郎,ダイナミトロン加速器自動制御システムの開発,東北大学大学院修士論文,(2009).