

可搬型 VR システムと力覚呈示装置との連携による
鋳型の造型作業時におけるクレーン操作の技能伝承*綿貫啓一^{*1}, 小島一恭^{*1}, 西村啓典^{*2}Knowledge Transfer of Crane Operating Skill on Creating a Mold
Using Portable VR System and Force Feedback DeviceKeiichi WATANUKI^{*3}, Kazuyuki KOJIMA and Keisuke NISHIMURA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Saitama University,
255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

In recent years, decreasing skilled workers have become a big problem in our country. Therefore a method or system is necessary in which unskilled workers can obtain high level skills such as crane operation on creating a mold efficiently. Since OJT (On-the-Job Training) is one of the main methods of knowledge transfer and job training, however it is limited due to decreasing young workers and aging of skilled workers. In this paper, the VR-based training system for crane operation is shown. We conduct the experiment that trialists use the system. As a result, the effectiveness of the VR-based training system for a crane operation is considered.

Key Words: Education Engineering, Skill, Casting, Human Interface, Virtual Reality

1. 緒 言

日本の製造業においては、生産拠点の海外移転による産業の空洞化が産業集積地域に深刻な影響を与え、特にこれまで製造業を支えてきた基盤的技術において、熟練技能の衰退が懸念されている。また、高齢社会の到来、若者の製造業離れの社会現象などにより、後継者難などが生じ、日本の製造業の将来に危機的状況をもたらしている。近年では、熟練技能者の減少に伴い技能伝承を行う機会や場が喪失され、技能伝承が必ずしも円滑に行われなくなっていることが懸念されている。従来は技能伝承として、技術文書、ビデオライブラリ、OJT (On-the-Job Training: 職場内訓練) などにより行われてきた。特に、OJTは五感を最大限に活用して、現場における視覚や力覚を直接体験できる訓練手法であるため、利用している企業は多いが、教育には非常に時間がかかり、教える側の能力に大きく依存し、危険を伴う場合が多いなどの問題があり、OJTを用いた技能伝承が必ずしも効率的に行

われているとはいえない。この問題の解決策の一つとして、われわれの研究グループでは、VR空間を技能教育の場として利用する技能伝承支援システムを提案してきている⁽¹⁾。本システムは、立体視映像により呈示される現場作業の視覚情報と、操作パネルによる視覚情報への働きかけにより作業の疑似体験を行い、技能伝承を支援するものである。しかしながら実際の作業では、視覚情報のみならず作業中の押す・抑えるといった力覚情報も、技能の獲得に大きく関与していると考えられる。

そこで本論文では、従来の技能伝承支援システムと力覚呈示装置を連携させることにより、視覚情報とともに力覚情報を呈示するとともに、力覚呈示装置を介して、呈示される情報に相互作用を及ぼすことのできるシステムを提案する。また、鋳造作業のうち、特にクレーンを用いた型合わせ作業を取上げ、被験者による実験を行って、VRを用いた技能教育において、視覚情報と力覚情報を連携した場合の効果について検討する。

2. 鋳造工程の型合わせ作業

図1に鋳造製品製造プロセスを示す。鋳造製品は一般的に、(1)鋳造方案、(2)溶解、(3)造型、(4)型合

* 原稿受付 2006年4月28日。

^{*1} 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)。^{*2} 学生員, 埼玉大学大学院理工学研究科[現:三菱電機(株)].
E-mail: watanuki@mech.saitama-u.ac.jp

わせ、(5)注湯、(6)型ばらしなどのプロセスで製造される⁽²⁾。その中でも造型工程は、製品の形状や品質に直接影響する作業であり、熟練技能者の勘やコツが特に要求される工程である。造型作業はさらに、砂込め、突き固め、塗型、型合わせなどの工程があり、それぞれの作業において勘やコツが要求される。図2は型合わせと呼ばれる作業で、クレーンを操作して、数百

キロ～数トンの重量をもつ上型と下型を合わせる作業である。これだけの重量物を、職人はクレーン操作と手で押す感覚のみから、ダボとダボ穴、中子に注意しながら上型と下型がずれることのないよう、丁寧に合わせていく。この作業が未熟で上下の型を合わせる際に、型を中子に接触させたり、型どうしを擦ったりすると、中子の破損や鋳砂のはく離が生じ、欠陥を引き起こす恐れがある。このような熟練の要する作業を、現在では、日常業務において経験を積み重ねたり、熟練者の作業を観察することで修得しているため、訓練のための機会が少ないという問題がある。このため、このような現場作業を短時間に効率良く修得できるような方法やシステムが望まれている。

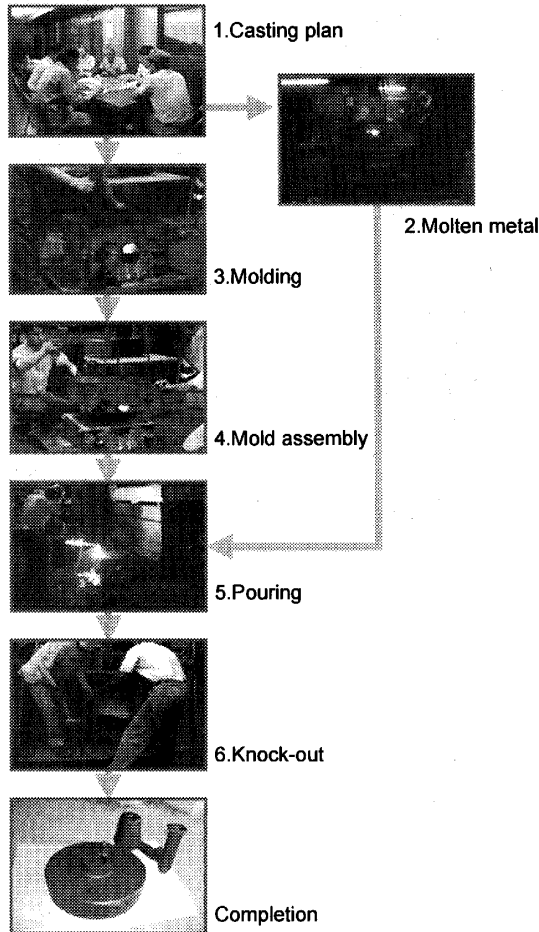
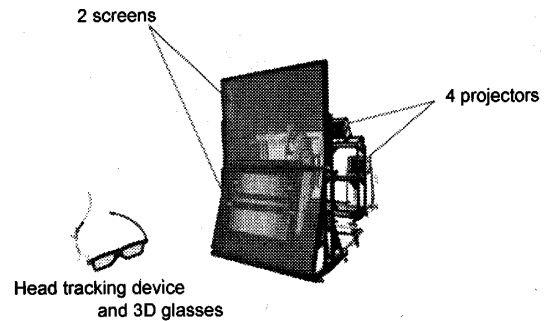
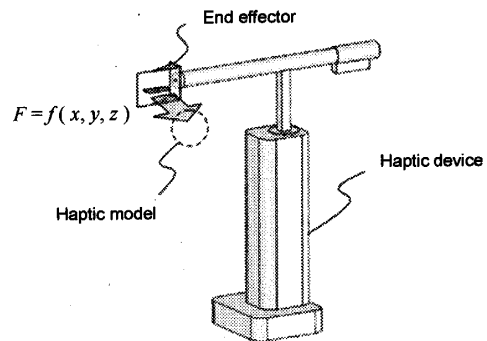


Fig. 1 Casting process



(a) VR system



(b) Force feedback device

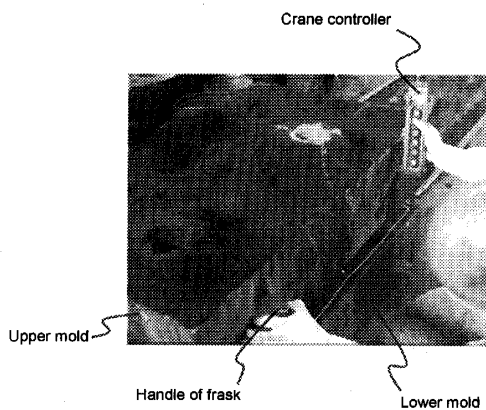
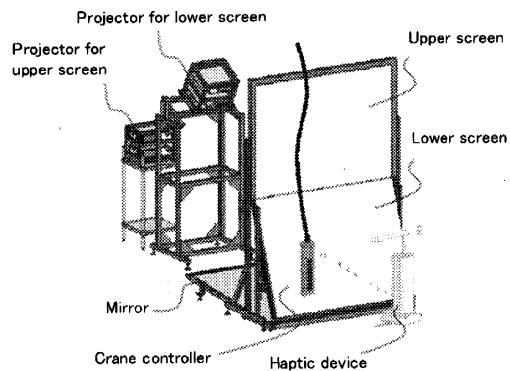


Fig. 2 Example of matching operation



(c) Outline of our proposed system

Fig. 3 Knowledge transfer system

3. 技能伝承支援システム

本研究グループでは、マルチメディアや VR 技術を利用して、知識獲得を効率的・効果的に行うための熟練技能伝承システムを開発してきている。図 3 に本システムの概略を示す。本システムは、立体視映像を表示するための 2 枚の大形スクリーンとヘッドトラッキング装置、力覚呈示装置および操作ボタンで構成されている。各スクリーンには、それぞれのスクリーンに対して二つのプロジェクタを使用し、左右の視差のついた映像に偏光を加えて投影する。使用者はこの映像を偏光メガネを通して見ることで、立体視映像として認識することができる。また使用者の視点位置は、ヘッドトラッキング装置によりシステムにフィードバックされ、リアルタイムで使用者の視点にあった映像を表示することができる。さらに、力覚呈示装置を介して表示された、立体視映像からの反力を返すことが可能である。このシステムにより、新人など経験を十分に積んでいない者が危険を伴わずに、繰返し現場作業に近い経験を得ることができる。表 1 は力覚呈示装置の仕様である。本装置は、水平方向と垂直方向に 2 軸と、垂直方向を回転軸とした 2 自由度をもち、内部にもつ力覚モデルとの位置情報から、ロボットアームの先端に力覚を呈示するものである。この力覚モデルの位置と、立体視システムで呈示する立体視モデルの位置を合わせることで、力覚と視覚を連携して使用者に呈示する。

図 4 は、熟練技能伝承システムおよび VR 空間⁽³⁾を利用したシステムの活用例を、SECI (Socialization, Externalization, Combination, Internalization: 組織的知識創造)モデルの知識変換プロセスに対応させたものである⁽⁴⁾⁽⁵⁾。ここでは、表出化をユーザがマルチメディアを応用した熟練技能伝承システムを活用して、文章や技術データなどから形式知を獲得するプロセス、連結化をユーザが映像などから、形式知と暗黙知⁽⁶⁾が連携した形で呈示される知識を獲得するプロセス、内面化をユーザが技能伝承システムから得られた知識を基に、VR 空間内での疑似体験を通じて自分のものにしていくプロセスと置換える。表出化および連結化の過程では熟練技能伝承システムを活用し、内面化の過程では VR 空間を活用しながら、知識を自分のものにしていく中で新たな知識創造が可能になり、また新たな暗黙知を獲得するようになる。

Table 1 Specification of haptic device

Workspace	width 0.36[m] × height 0.4[m] × 1.0[rad]
Position resolution	4×10^{-6} [m]
Force degrees of freedom	3 (x, y, z)
Maximum output force	250 [N]
Refresh frequency	2500 [Hz]
Interface	100/10 Mbit Ethernet

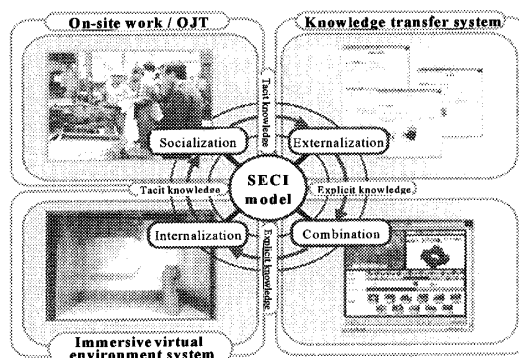


Fig. 4 SECI model and our proposed system

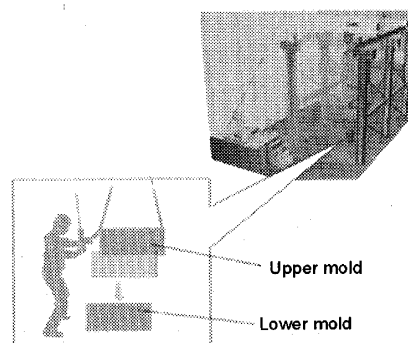


Fig. 5 Three-dimensional stereoscopic model

4. クレーン作業の力覚モデルと視覚モデル

クレーン作業は、数百キロ～数トンの重量の上型をクレーンのワイヤでつり、クレーンの操作盤を使用して上下左右前後に上型を移動し、床に置かれている下型と合わせる作業である。クレーンでの移動の際に上型は振り子の運動をするとともに、使用者の手で加えられる加振力によって運動が変化する。力覚呈示装置では、制御装置の性能と制御周期の関係から、クレーンと型の物理モデルを完全に表現することができないため、ばね-マス-ダンパ系で表現される簡易的な力覚モデルを作成する。振り子運動の周期や減衰は、元の

物理モデルに合致するように各パラメータを決定する。クレーンの操作盤による型の移動の表現は、力覚モデルで使用するばね-マス-ダンパ系の原点を移動することで表現する。垂直方向の力覚モデルは、単純にばね-マス-ダンパ系で表現することができないため、クレーンを操作した瞬間にばねの力覚モデルのパラメータを変化させて、慣性的な動きを抑える処理を加えた。これにより体験者は、力覚呈示装置のワークスペース内においては、クレーンを用いた作業に似た力覚情報を得ることができる⁽⁷⁾。

一方、視覚モデルは図5に示すような、工場内の床に積み上げられた鋳型の上に型合わせの作業対象となる下型と、クレーンからつった上型のモデルを配置した。体験者は上型と上型のダボ、下型と下型のダボ穴、下型内部に配置された中子を視覚情報として確認することができる。また、視覚的に呈示される上型側面の取っ手と力覚呈示装置のエンドエフェクタの取っ手の位置を合わせることで、視覚情報と力覚情報の整合性を保っている。

5. 訓練時の力覚情報の必要性に関する検証

ある動作の知覚は、おもに視覚情報と運動感覚が同時に用いられているが、視覚のほうが運動感覚に対して優位性をもっており、訓練時に漫然と反復練習を繰り返した場合には、視覚情報に依存した形で動作の修得がなされることが示されている⁽⁸⁾。このことは、実際の作業でも意識しなければ、視覚情報に依存した動作の修得がなされてしまうため、熟練技能支援システムにおいて、視覚情報のみによる現場作業の訓練を行う場合には、より視覚情報に依存した形で暗黙知が形成

される可能性がある。作業時における微妙なコントロールには、視覚情報だけでなく運動感覚の一つである力覚情報が必要とされ、これに注意を向けることで、効率的な技能の修得が可能となると考えられる。

そこで、VR空間での訓練においても、体験者が獲得する作業の知識が視覚情報に依存してしまうことを、実験によって検証した。この実験では、10名の被験者に対して、VR空間内において鋳造で使用する上型を、視覚情報としてのみ呈示された場合に、呈示された上型の重量を推測するというものである。表2に各被験者の推測結果を示す。回答者が視覚情報から判断した下型の重量は10 kg から1 000 kg までと幅広く、実際の質量である100 kg 程度と判断できた回答者はわずかだった。このことからVR空間内で訓練を行う際に、視覚情報だけでは実際の作業とは異なった知識を獲得してしまい、技能の暗黙知が実際とは異なった形で修得されてしまう可能性がある。

6. 作業実験

本論文では、VR空間内の訓練において視覚情報のみの場合、視覚情報と力覚情報を連携させた場合の訓練効果の相違を検討するため、クレーンを用いた型合わせ作業を被験者に行ってもらい、作業時間と作業の正確さについて調べた。

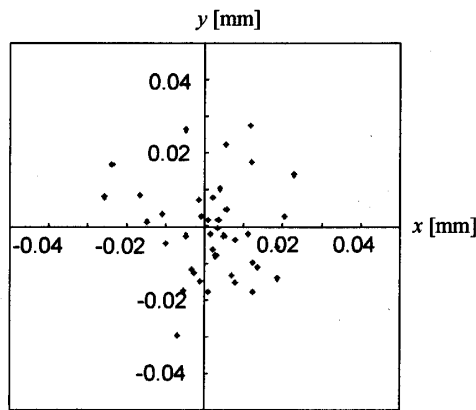
鋳造に関する知識に乏しい被験者8名に、VR空間内でクレーン操作盤のボタン操作により、上型を移動して下型に合わせる作業を行ってもらい、型合わせ開始から完了までの時間、型合わせ完了時の上下の型の位置決め誤差を測定した。被験者8名をグループA、グループBの2グループに分け、グループAは始めの5回の型合わせ作業を視覚情報のみで、数時間に残りの5回を視覚情報と力覚情報を連携させて行い、計10回の作業を行った。また、グループBはグループAの逆の手順で作業を行った。事前に被験者には作業内容と作業時の注意点を説明し、作業中は被験者に指示を与えず自分自身の判断で作業を行わせた。

図6(a)に被験者8名が視覚情報のみ呈示される状況で、下型のダボ穴に上型のダボを入れる際に生じた位置決め誤差を示す。また図6(b)は、視覚情報と力覚情報を連携させた場合の位置決め誤差を示す。これらの結果から、視覚情報のみの場合に比較して力覚情報があるときは、位置決め精度が向上していることが確認できる。また、 x 軸方向(左右方向)のばらつきは、 y 軸方向(奥行方向)のばらつきに比べて少ないことが確認できる。

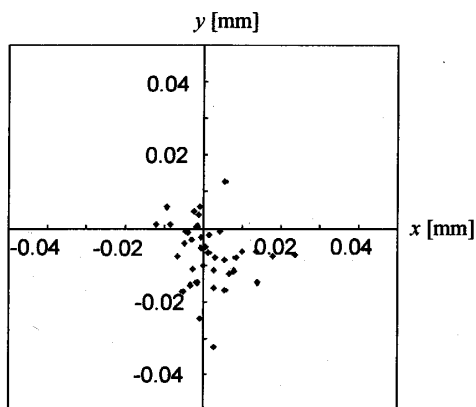
図7は、作業途中で型を中子やダボと接触させた回

Table 2 Results of questionnaire

Examinee	Estimated weight of upper mold
A	100[kg]
B	10 [kg]
C	10 [kg]
D	200 [kg]
E	30 [kg]
F	300 [kg]
G	200 [kg]
H	80 [kg]
I	1000 [kg]
J	200 [kg]



(a) Visual information



(b) Visual and force feedback information

Fig. 6 Results of positioning errors

数の平均を示す。実際の作業では、ダボや中子が破損した段階でやり直さなければならないが、本実験では接触してしまっても最後まで作業を行うものとした。この結果、ほとんどの被験者が、視覚情報と力覚情報を連携させた場合のほうが、ダボや中子の接触回数が少ないことが確認できる。

図 8 は各被験者が作業の完了までに要した時間の平均値を示す。すべての被験者が、視覚情報と力覚情報を連携させた場合のほうが作業時間が短いことが確認できる。

図 9 は作業時の上型の中心点の移動軌跡を、下記 4 例について示したものである。

- (a) 視覚情報のみの場合において、接触回数が最も多く、かつ時間を要した例
- (b) 視覚情報のみの場合において、接触がなく所要時間も少ない例
- (c) 力覚情報がある場合において、接触回数が最も多く、かつ時間を要した例
- (d) 力覚情報がある場合において、接触がなく所要時間も少ない例

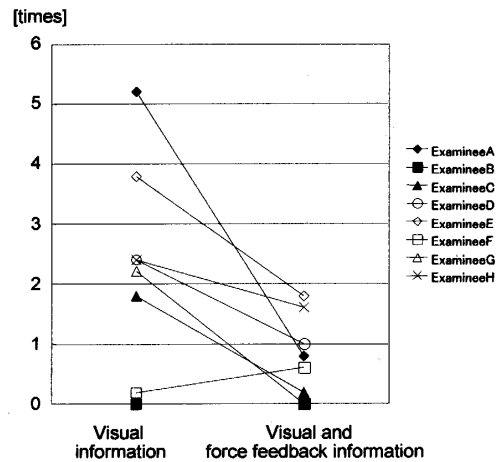


Fig. 7 Contact times of dowels or cores

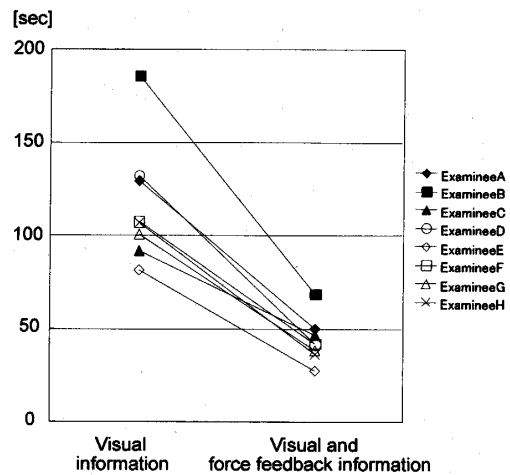


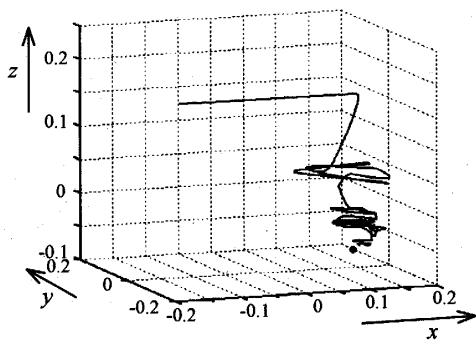
Fig. 8 Operation times

(a)や(c)の場合と比べて、(d)は力覚情報があることで位置決めの際に上型の揺れを抑え、時間を短縮することができていたものと考えられる。しかし、(c)の例のように力覚情報を得ても、うまく作業ができない被験者もいた。これは、(c)の例の被験者が視覚情報にのみ注意を向けてしまっているためと考えられる。

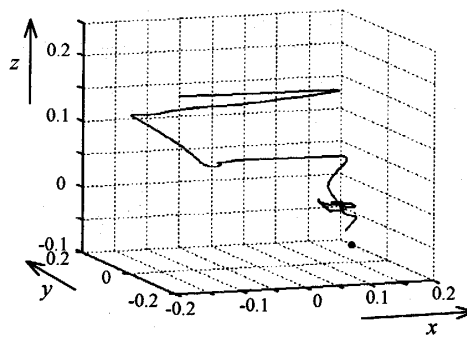
以上のことから、VR 空間内におけるクレーンを用いた型合わせ作業について、力覚情報を連携させることで、VR 空間内の作業においては作業の精度やスピードを向上することが確認できた。また、実際の作業と同様に、視覚情報や力覚情報を頼りに作業できることは、VR 空間内の作業でも力覚情報に注意を向ける訓練が行うことができ、本システムが技能教育を効果的に支援できるシステムであると考えられる。

7. 結 言

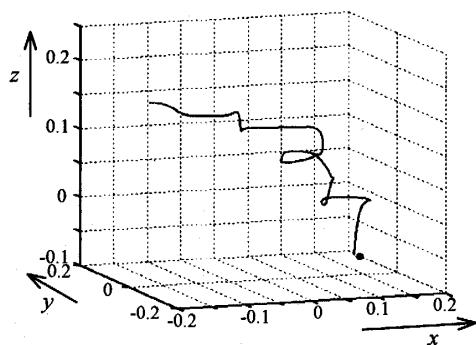
本論文では、力覚呈示装置を従来の技能伝承支援シ



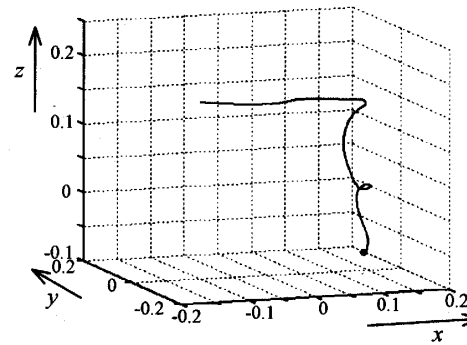
(a) An example of poor performance with visual information



(c) An example of poor performance with visual information



(b) An example of good performance with visual information



(d) An example of good performance with visual and force feedback information

Fig. 9 Trajectories of matching operations

システムと連携させ、視覚情報と力覚情報を同時に体験することができる VR 空間を構築し、VR 技術を用いた技能教育において、視覚情報と力覚情報を連携した場合の効果について検討した。

その結果、VR 技術を用いた技能教育の際に、視覚情報と力覚情報を連携させることは重要であることがわかった。

なお、本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)次世代ロボット実用化プロジェクトプロトタイプ開発支援事業、科学研究費補助金基盤研究(C)(16560112)、日産科学振興(財)理科・環境教育助成、マザック(財)研究助成によるものである。

文 献

(1) Watanuki, K. and Kojima, K., Internalization of Knowledge for Technical Skills in Immersive Virtual Environment, *Proceedings of the Human Interface Symposium 2003*, (2003-10), pp. 639-642.

(2) Japan cast iron foundry association, *Chutetsu imono no chuuzouhouan no kangaekata* (in Japanese), (1971), p. 50, Corona Publishing Co., Ltd.

(3) Cruz-Neira, C. et al., Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, *Proceedings of SIGGRAPH '93*, (1993-8), pp. 135-142.

(4) Nonaka, I. and Teece, D., *Managing Industrial Knowledge*, (2001), p. 13, Sage Publications.

(5) Nonaka, I., The Knowledge-Creating Company, *Harvard Business Review*, (1991), pp. 96-104.

(6) Polanyi, M., *The Tacit Dimension*, (1966), p. 3, Routledge and Kegan Paul.

(7) Watanuki, K. et al., Development of Knowledge Transfer System for Crane Operation Skill on Creating a Mold, *Proceedings of Technology and Society Division of the Japan Society of Mechanical Engineers*, No. 05-86 (2005-12), pp. 29-32.

(8) Matsuda, I. and Sugihara, T., *Undou shinrigaku nyuumon* (in Japanese), (1997), Taishukan Publishing Co., Ltd.