

# 没入型仮想共有環境システムにおける熟練技能伝承用 力覚および触覚呈示装置の開発

## Development of Force Feedback and Haptic Devices for Knowledge Acquisition and Job Training in the Immersive Virtual Environment

綿貫 啓一（工学部機械工学科・教授）

Keiichi WATANUKI Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

### 1. はじめに

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の技術産業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。今後も高付加価値製品設計・製造を行うためには、基盤技術や熟練技能の伝承、および知識の創出が不可欠となっている。

このような背景のもと、我々の研究グループでは、国内有数の産業集積地域である埼玉県川口市の鋳物関連企業と共同で、マルチメディアとバーチャルリアリティ（VR：Virtual Reality）技術を応用した鋳造技能伝承と知識創出のための枠組みとこの枠組みに沿った熟練技能伝承システムを提案してきている<sup>1), 2)</sup>。効率的な技能伝承、知識創出を行うためには、鋳造に関わる知識の体系化やその知識を効果的に呈示する必要がある。このため、我々の研究グループでは文書などの形式知はマルチメディアを利用して効率的に獲得し、技能などの暗黙知はVR技術を利用した立体視システムにおいて、実際の現場作業の視覚的な疑似体験を通じ獲得することのできるシステムを開発してきている。しかしながら、鋳造技能の獲得には、視覚的な体験だけでなく、工具や製品の重量感や触り心地、音、臭い、色、温度などが自身の作業によってどのように変化するかを体験することが重要である。

そこで本報告では、特に現場作業における力覚に注目し、従来から提案しているVR空間を用いた立体視システムと連携して使用することで視覚的な効果のみならず鋳造技能における力覚を体得することが可能な力覚呈示装置の開発事例について述べる。

### 2. 場の共有による技能伝承

技能伝承を行うために、考慮すべき点として「場」を挙げることができる。ここで述べる「場」とは、いわゆる物理的な場所だけではなく、特定の時間・空間、あるいは「関係」の空間を意味している。つまり、「場」とは「相互関係」のことである。この「場」、つまり「相互関係」のあり方として、「創出場 (Originating Ba)」、 「対話場 (Dialoguing Ba)」、 「システム場 (Systematizing Ba)」、 「実践場 (Exercising Ba)」の4つに分類することができ、(1) 創出場：個人的かつ直接的相互関係によって規定される場、(2) 対話場：集団的かつ直接的な相互関係によって規定される場、(3) システム場：集団的かつ間接的な相互関係によって規定される場、(4) 実

践場：個人的かつ間接的な相互関係によって規定される場、である。

技能伝承において特定の時間・空間における「場」を共有することは非常に重要である。具体的には、高度な技能を有する熟練技能者と作業をともにすることなどが挙げられる。このように「場」を共有することで、五感から得られる知識だけでなく、「その場にいなければわからない情報」といった貴重な知識を獲得することが可能になる。このように「場」の共有は技能伝承において非常に有益なことと言える。

しかし、このような「場」の共有による技能伝承には以下に挙げるような問題点がある。

(1) 「場」の共有には、時間的・空間的・規模的な制約があることから限界があり、効率的に技能伝承を行うことができない。

(2) 伝承・継承する人材の素質に負う部分が大きく、膨大な時間を必要とする。現在のような時間的・資金的・人間的な制約の中で技能伝承を行わなければならない状況では難しい部分がある。

本報告で述べる没入型仮想共有環境システムなどを活用することで、これらの問題点を部分的に克服することができ、これらのシステムにより、擬似的、仮想的な「場」の共有を促進させることができ、技能伝承において非常に有益であると考えられる。

### 3. 鋳造熟練技能者の知識とその獲得プロセス

#### 3.1 鋳造技能者に求められる知識

鋳造製品は多くのプロセスを経て製造される。特に溶解、造型、型合わせ、注湯、型バラシなどの鋳造現場作業では、鋳造に関する知識だけでなく、重量感や触り心地、音、臭い、色、温度など、いわゆる五感を駆使した熟練技能が求められる。図1は、造形工程の「突き固め」と呼ばれる作業の様子を示したものである。図2に突き固めの模式図を示す。突き固め作業は、金枠や木枠に投入された時硬性の砂をスタンプと呼ばれる突き棒で素早く突き固める作業で、鋳型の強度を確保するために行われる。時硬性の砂が硬化を始める前に、枠内の砂の充填度を高め、かつ、砂の密度が均一になるよう迅速に行わなければならない。さらに、注湯時において、溶湯を注いだ際に型崩れせず、冷却時に発生するガスを放出することが求められている。図3は突き固め作業時に棒の先端部に加わる力を示したもので、この力が突き棒を通じて反力として作業者の手に返される。熟練技能者は、突き棒を通して手に返ってくる反力やモーメントにより砂の状態や木型の有無を知覚し、突き固める位置や棒に加える力、周期、ストロークなどを調整している。このような知識は文

書やデータで伝えることの困難ないわゆる「暗黙知」であり、鑄造現場においては、実際の作業経験を通じてのみ獲得できる知識である。

### 3.2 形式知と暗黙知

知識は、大きく「形式知」と「暗黙知」の2つに分類することが可能である<sup>3)</sup>。形式知とは、「文章・図表などの形式言語で表すことができる知識」、「客観的で一般的な法則に基づく知識」などと定義することができ、いわゆる「技術」がこれに相当する。一方、暗黙知とは、「文章・図表などで明示的に表しにくい知識」、「主観的で個人的な経験・体験に基づく知識」と定義でき、いわゆる「技能」がこれに相当する。鑄造現場作業には、前述の突き固めだけでなく、塗型、型合わせ、注湯など、経験と勘に頼る作業が数多くあり、このよ



Fig.1 Ramming with a stamp

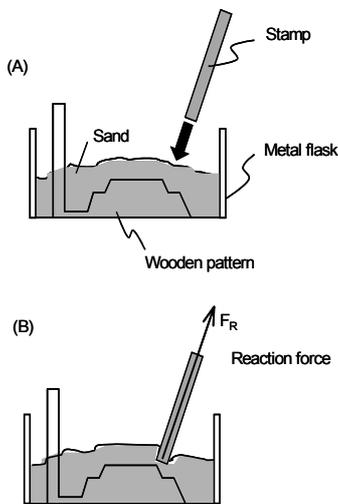


Fig.2 Schematic diagram of ramming

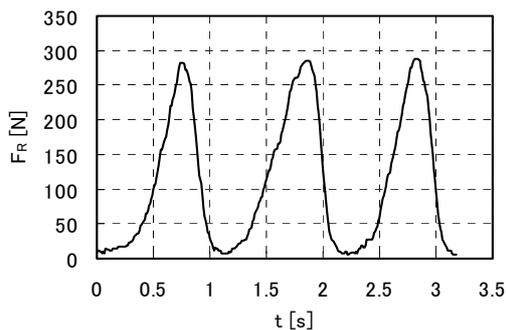


Fig.3 Load of a stamp

うな暗黙知の存在が技能獲得を困難にしている要因となっている。

### 3.3 SECI モデル

ナレッジ・マネジメントの活動モデルの一つとして SECI モデルがある<sup>4)</sup>。これは、知識は4つの知識変換プロセス、(1) 共同化 (Socialization), (2) 表出化 (Externalization), (3) 連結化 (Combination), (4) 内面化 (Internalization) を通じて暗黙知と形式知との間の相互作用から創造されるという概念である。SECI は4つの知識変換プロセスの頭文字をとったものである。このプロセスを鑄造現場における技能の獲得プロセスに対応させると、(1) 共同化は技能者が OJT や現場作業を通じて、問題意識を明確化し、暗黙知を認識するプロセス、(2) 表出化は社内文書や技術文書などにより鑄造技能に関する形式知を獲得するプロセス、(3) 連結化は技能者が表出化のプロセスで得た種々の知識を総合し、獲得すべき技能に対する自分なりのイメージを創造するプロセス、(4) 内面化は技能者が、作り上げたイメージに基づいて行動・学習することで鑄造技能を自分のものにしていくプロセス、と考えられる。

## 4. 熟練技能伝承システム

### 4.1 熟練技能伝承システムの概要

本研究グループでは、SECI モデルの各知識変換プロセスでマルチメディアや VR 技術を利用し知識獲得を効率的・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4は熟練技能伝承システムおよび VR 空間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。ここでは、(2) 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、(3) 連結化をユーザが映像などから、形式知と暗黙知が連携した形で提示される知識を獲得するプロセス、(4) 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もとに、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き換える。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なかで、新たな

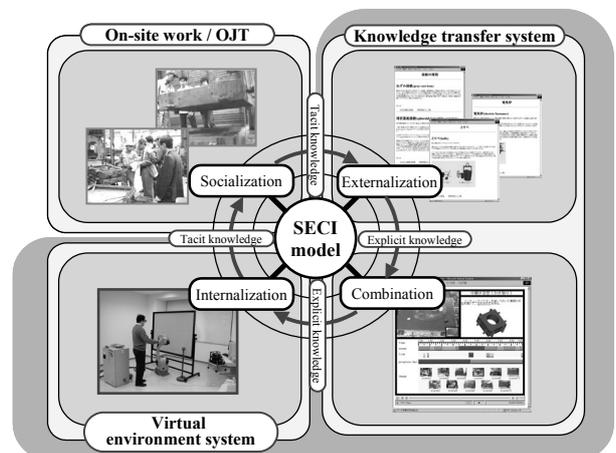


Fig.4 SECI model and knowledge transfer system

知識創造が可能になり、また新たな暗黙知を獲得できるようになる。

### 4.2 VR空間を利用した鋳造技能獲得

図5に背面投影型2面偏光立体視システムの外観を、図6にシステムの概寸を示す。本システムは、本研究グループが技能伝承を目的として独自に開発したもので、知識獲得プロセスの内面化フェーズで使用することができる。スクリーン毎に2つのプロジェクターを使用して、左右の視差をつけた映像を表示する。左右の映像に偏光を加え、偏光メガネを併用することで、体験者は視差のついた映像を左右独立に見ることができ、これにより、立体的な映像を体験することができる。80インチのスクリーンを2つ縦に並べることで、縦方向の没入感を向上させている。これは、鋳造現場の作業が、周囲を見渡すことよりも下を見下ろす作業が多く、横方向よりはむしろ縦方向の広がり表現することが求められるためである。偏光メガネにはヘッドトラッキング装置が取り付けられており、体験者の視点位置がフィードバックされ、視点位置に応じた映像がリアルタイムで表示される。本システムを技能獲得の視覚的な「場」の提供に活用することで、鋳造技能獲得における問題点を部分的に克服することができると考えられる。

## 5. 鋳造技能獲得のための力覚呈示装置の開発

### 5.1 VR空間への力覚呈示装置の導入

技能の獲得には、視覚的な体験だけでなく、工具や製品の重量感や触り心地、音、臭い、色、温度などが、自らの作業の結果としてどのように変化するかを体験することが重要である。本報告では立体視システムによるVR空間の視覚的な効果に加え、現場作業の力

覚を表現するためにVR空間に力覚呈示装置を導入する。特に鋳造造形工程の突き固め作業に注目し、突き固め作業における力覚を表現するための力覚呈示装置を開発した<sup>5)~14)</sup>。

### 5.2 力覚呈示装置の開発

図7に力覚呈示装置とその可動範囲を示す。表1に仕様をまとめる。本装置はエンドエフェクタを含めると5自由度の円筒座標ロボットで、アームとエンドエフェクタの接続部(A点)に取り付けられた力覚センサにより検知された力覚とポテンショメータにより検知された位置情報をフィードバックして3つのモータを駆動し、力覚を呈示する。図8にエンドエフェクタを示す。本エンドエフェクタは、突き固め作業で使用する突き棒に相当し、力覚呈示装置との接続部(A点)から体験者の手に反力を伝達し、また、体験者から加えられる力はエンドエフェクタを通じて接続部に伝達され、接続部の力覚センサにより検知されて制御装置にフィードバックされる。

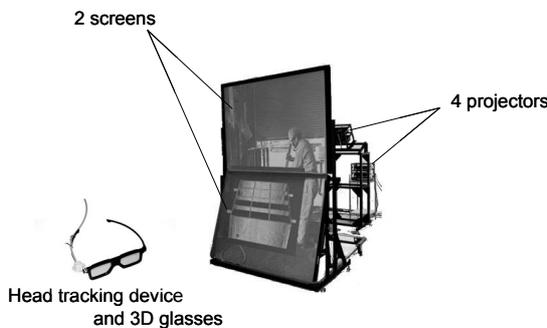


Fig.5 Our proposed virtual reality system

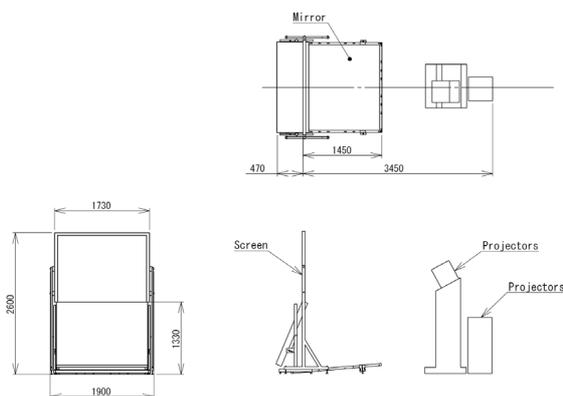


Fig.6 Outline of virtual reality system

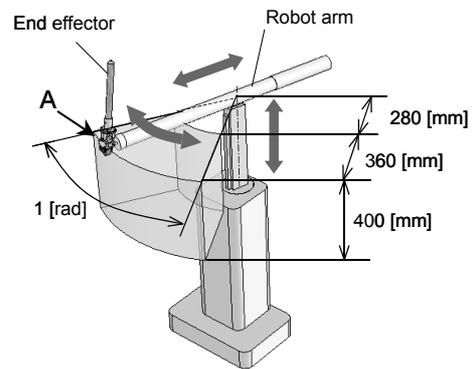


Fig.7 Work space of haptic device

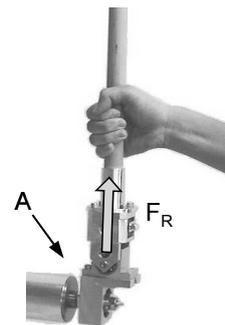


Fig.8 End effector

Table 1 Specification of haptic device

有効自由度	5
消費電力	500 [W]
位置分解能	$4 \times 10^{-6}$ [m]以下
擬似環境慣性	2 [kg]
力覚感度	0.01 [N]
最大呈示力覚	250 [N]
最大擬似硬度	$5 \times 10^4$ [N/m]
最大速度	1.0 [m/s]
最大減速度	50 [m/s <sup>2</sup> ]

### 5.3 内部モデル

図9に力覚呈示装置のハードウェアブロック図を示す。力覚呈示装置は専用の制御装置を持ち、外部機器とはイーサネット（100Base/T）を介して接続することができる。本システムでは、PCの表示する立体視映像と力覚呈示装置の呈示する力覚とがこの通信を使用して同期化される。力覚呈示装置のコントローラはPC側が呈示する映像とは別に力覚呈示用の内部モデルをもっており、体験者が加えるエンドエフェクタへの力とこの内部モデルとの相互作用により、エンドエフェクタへの反力を決定する。突き固め作業を表現する場合には、体験者がエンドエフェクタを操作することによって図3で示した反力が返されるように内部モデルを作る必要がある。また、視覚モデルと力覚モデルはそれぞれに座標系を持つため、この整合性を保つように内部モデルを構成する必要がある。図10は、視覚モデルと力覚呈示装置の内部モデルを模式的に表現したものである。金枠の部分は、VR空間内で視覚モデルの金枠と一致する位置に内部モデルを作成し、この内部モデルと内部モデル上のエンドエフェクタの位置との衝突判定を行って、衝突した場合にはエンドエフェクタがそれ以上動かなくなるように制御する。砂の部分は、内部モデルでは薄い層状の膜のようなモデルを幾重にも重ね、各層でエンドエフェクタと衝突判定を行い、ある一定以上の力が加わった場合には反力を0とする制御を行う。層状モデルは単体では、ある一定以上の力で突き抜けるような感覚を呈示し、これが層状に多数集まることで、砂を突くザクザクという感覚が表現される。

### 5.4 力覚呈示を伴うVR空間内での技能獲得

図11に本報告で開発した力覚呈示装置による突き固め作業の体験の様子を示す。VR空間内に表示される鑄造現場の立体視映像と連携して、力覚呈示装置から突き固めの反力が体験者の操作の結果として返され、視覚だけでなく力覚を体験できる。

### 6. おわりに

本報告では、鑄造熟練技能獲得を効率的・効果的に行うため、VR空間で使用可能な力覚呈示装置を開発事例について述べた。従来から提案しているVR空間を用いた3次元立体視システムに、新たに力覚呈示装置を連携することで、視覚的な体験だけでなく、工具・製品重量や各作業工程での力覚の体験が可能となり、鑄造熟練技能の獲得が促進される。

### 参考文献

- 綿貫啓一, 小島一恭, 没入型仮想共有環境システムを用いた鑄造熟練技能の内面化, 日本設計工学会 2003年度秋季研究発表講演会講演論文集, pp.57-60, 2003.
- 綿貫啓一, 荒巻利彦, 高橋悠介, マルチメディア技術を用いた熟練技能伝承システムにおける暗黙知と形式知の連携, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会—2002宇都宮—講演論文集, 020-2, pp.227-228, 2002.
- M. Polanyi, The Tacit Dimension, Routledge and Kegan Paul, pp.3-25, 1966.
- I. Nonaka, The Knowledge-Creating Company, Harvard Business Review, pp.96-104, 1991.
- 綿貫啓一, マルチメディアおよびバーチャルリアリティ技術を用いた設計・製造知識獲得のためのe-Learningシステムの開発, シミュレーション, Vol.23, No.2, pp.97-108, 2004.
- K.Watanuki, Knowledge Creation and Transfer for Advanced Technical Skills Using Immersive Virtual Environment, Proceedings of the 2nd International Conference on Business & Technology Transfer (ICBTT 2004), pp.92-97, 2004.
- 綿貫啓一, 小島一恭, 可搬型仮想共有環境システムによる鑄造製品設計支援, Design Symposium 2004 講演論文集, pp.271-274, 2004.
- 綿貫啓一, 小島一恭, 可搬型仮想共有環境システムによる鑄造方案の知識獲得および内面化, 日本機械学会 2004年度年次大会講演論文集, Vol.4, No.04-1, pp.181-182, 2004.
- 綿貫啓一, 製造業における技術・技能の伝承および知識創出, 日本機械学会 2004年度年次大会講演資料集, Vol.8, No.04-1, pp.211-212, 2004.
- 綿貫啓一, 小島一恭, VR空間における鑄造技能獲得のための力覚呈示方法の検討, 日本設計工学会平成16年度秋季研究発表講演会講演論文集, pp.79-82, 2004.
- 綿貫啓一, 小島一恭, 可搬型仮想共有環境におけるコンテンツ呈示方法と学習効果, ヒューマンインタフェース学会ヒューマンインタフェースシンポジウム 2004 論文集, pp.339-342, 2004.
- 綿貫啓一, 小島一恭, VR空間における可視化モデル呈示方法とその没入感・現実感への効果, 日本機械学会第14回設計工学・システム部門講演会講演論文集, No.04-38, pp.384-387, 2004.
- 綿貫啓一, 没入型仮想共有環境システムによる設計・製造知識の獲得および職人技の伝承, 2005年情報学シンポジウム講演論文集, pp.137-144, 2005.
- 綿貫啓一, VRによる匠の技の伝承, 日本機械学会関東支部第11期総会講演会講演論文集, No.050-1, pp.11-14, 2005.

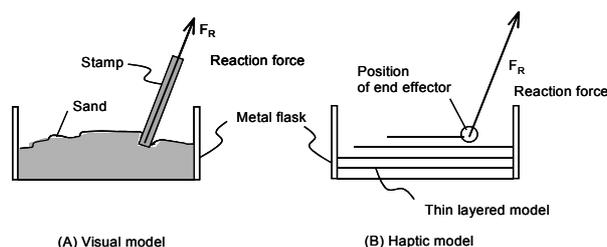


Fig.10 Internal model

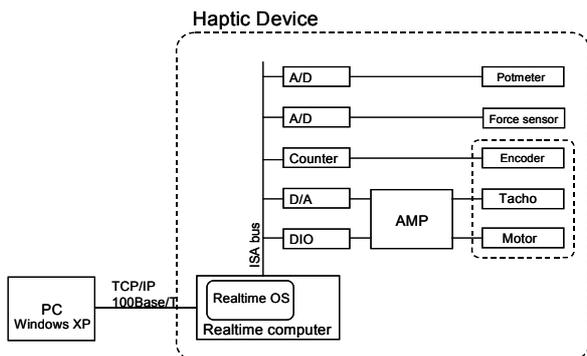


Fig.9 Block diagram of haptic device



Fig.11 Use of our proposed system