



# 教師の憑身体を用いた遠隔技能伝承の提案と ワークショップの実践

鈴木嵩茂<sup>1)</sup>, 児玉大樹<sup>1)</sup>, 中村拓人<sup>1)</sup>, 鳴海拓志<sup>1)</sup>, 雨宮智浩<sup>1)</sup>, 葛岡英明<sup>1)</sup>

Takashige Suzuki, Daiki Kodama, Takuto Nakamura, Takuji Narumi, Tomohiro Amemiya, Hideaki Kuzuoka

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1,

{takashige, d.kodama, n.takuto, narumi, amemiya, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 合気道など身体接触を伴う技能の伝承を遠隔化する時、現存する触力覚デバイスでは現実に十分近い刺激提示をできない課題がある。本研究では生徒への触力覚提示役として生身の人間(依代)を利用し、依代を教師が遠隔から操作(憑依)して技能を教える手法を提案する。本報告では、手法の実現・検証に向けて情報収集を行うため、技能の指導経験者を対象に開催するワークショップについて紹介する。

**キーワード:** 教育・訓練, テレプレゼンス, 触覚, 憑身体, 暗黙知

## 1. はじめに

伝統芸能や伝統工芸の分野において、技能伝承の際に伝えられている明文化されていない知識は暗黙知と呼ばれる。暗黙知伝承の難しさは、文化芸術推進基本計画 [1] において「他者と共感し合う心を通じて意思疎通を密なものとし、人間相互の理解を促進する」ことが文化芸術の価値として挙げられ、技能を単にアーカイブするだけでは暗黙知の一部が損なわれてしまうと想定されていることから伺える。そのため暗黙知は従来、徒弟制度や対面での訓練を通して伝えられてきた [2, 3]。しかし、過疎化・少子高齢化・新型コロナウイルス感染拡大に伴う活動制限など数々の障害により、参加者を集めて対面で長期間の訓練を行うことが困難になり、様々な技能において深刻な後継者不足が起きている [4]。そのため、対面訓練と同等の効果を遠隔で再現し、どこからでも参加可能にすることで、暗黙知の伝承の空間的制約を打破する技術の開発が求められている。

技能訓練を遠隔で再現する試みでは、触力覚提示技術の活用が研究されてきた。しかし現状では、対面で本物の人間に触れるような触力覚を遠隔で完全に再現できた例は無い。再現が困難な要因には、人間が他者から受け取る触力覚は多岐に及ぶのに対し、現存する触力覚提示デバイスは提示可能な触力覚の種類や強度と重量や大きさ、安全面などにトレードオフがあり、対人接触を再現できる実用的なデバイスが実現されていないことが挙げられる。

VR 体験中の触力覚提示をデバイスの制約を受けず再現する手法として、人を用いる方法が提案されている [5]。これらの手法は人が発揮できる力や人が備え持つ判断力・バランス力を活用し、VR 空間内で物体と接触するという機械で実現するには高度な技術を要する体験を人力で再現している。一方で、人が人に接触する体験を人で再現する手法は十分に検討されていない。そのような手法が実現できれば、遠隔地にいる技能の教師が、生徒と共にいる第三者の

身体(憑身体)を操作することで、暗黙知伝承に必要な人間ならではの感覚を生徒に提示できる可能性がある。

本報告では、対面の技能訓練で人が提示していた触力覚を遠隔でも再現することを目標に、教師の憑身体を用いた遠隔技能伝承を提案し、ワークショップにより提案手法の開発に必要な情報を収集する方法を述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 技能伝承における「わざ」

伝統芸能での暗黙知を含む伝承内容を調査したものとして、生田の「わざ」の研究 [2] がある。生田によれば、伝承されている「わざ」には、表面的な動作である「形」だけでなく、師匠や他の弟子、使用している道具などと稽古や日常生活で関わりながら「形」を自らのものとし、自ら主体的に「形」を創り出せるようになることが含まれている。

また林部・雨宮 (2007) [3] では、伝統工芸の技能伝承に欠かせない「強い学習意欲と何年にもわたる修行に耐える固い意志」のために「相互の信頼と愛情に支えられた『師弟相伝』関係」が必要であると報告されている。加えて渡部 (2007) [6] では、神楽の伝承をデジタル化する試みの中で師弟関係から「価値」や「空気」が継承されることの重要性が指摘されている。以上より、技能伝承にはその営みに関わる構成員間の関係性が重要な役割を果たしていると考えられる。技能伝承の遠隔化にあっても、遠隔化が人間関係に与える影響やそれによる技能学習への影響を明らかにすることは重要な課題といえる。

### 2.2 VR での技能訓練

VR を技能の訓練に用いた多数の先行研究の内、全身の動きを対象にした例として Yang ら (2002) の Just Follow Me (JFM) がある [7]。JFM では、VR 空間内で書道をする利用者のアバタと重なるよう、書道家の正しい動作を半透明アバタで提示し、利用者は一人称視点から自分の姿勢と正解を比べながら学習ができる。Yang らは、JFM の利

用が現実で従来通り行われる訓練と同等以上の学習効率を与えうることを示し、映像提示の質を向上させることで効果改善が期待されると予測した。

同じく一人称視点で訓練の補助を行う手法として、融合身体を用いる手法が提案されている [8]。融合身体 [9] は、2人の利用者が両者の身体運動の加重平均を反映した1つのアバタに没入する方式であり、これを用いると融合された運動に過度な行為主体感が生じること、アバタを通じて運動意図が伝達される効果があることが示唆されている。こうした特性を活用し、教師と生徒が融合身体を用いて技能訓練に取り組むことで、教師から生徒への身体技能の転移を行うことが目指されている。伊東らは、融合身体とJFMを利用し、教示に合わせて腕を動かすリズムゲーム型のタスクを行かせたところ、手法の違いによる学習効果の差は確認できなかったことを報告し、実験参加者の持つ運動経験に応じて効果的な手法が異なる可能性を示唆している [8]。このことから、訓練の遠隔化に際しても利用者の過去の運動・訓練経験に応じて適切な手法が異なる可能性があり、利用者の特性を踏まえた手法の考慮が必要であることが伺える。

### 2.3 アクチュエータとしての他者の身体の利用

VR体験の中での感覚を再現するために、人間の機動力や判断力を有効活用した先行研究が存在する。Cheng らは、VR体験者の姿勢を機械の代わりに人間を用いて制御するHaptic turkを提案した [5]。Haptic turkでは、VR体験者の身体を支える器具を一人ないしは複数の他者が把持し、予め用意された指示に従って動かさせることによって、高価な大型機械であるモーションプラットフォームを使わずに複雑な身体姿勢制御が可能になる。

また人がリアルタイムに他者を操作する先行研究も存在する。笠原らは、現場の作業員を遠隔から専門家が支援する手法として、人が他の人の環境に没入して動作の誘導などを行うJackInというインタラクションを提案している [10]。

しかし、Chengらの手法においてVR体験者に刺激提示を行う他者は、道具を用いた間接的な接触のみを行い、直接VR体験者に触れる条件は検討されていない。また笠原らも道具を扱う作業のみで検証が行われているため、人との接触を伴う動作については未検討である。人同士の接触では、接触位置以外に筋肉の緊張や反射反応など、知覚される情報が道具と比べ増える。人との多様な接触体験をリアルタイムで指示・提示できるか、検討の必要がある。

## 3. 教師の憑身体を用いた遠隔技能伝承

本章では関連研究を踏まえ、技能伝承の営みを遠隔化する際、人に触れられる体験を再現するために第三者を利用する手法を提案し、その課題点について述べる。

### 3.1 手法の概要と参加者の役割

提案手法を用いた遠隔技能伝承に必要な構成員は、教師と生徒、そして触力覚の提示役を担う「依代」の3名である。教師は伝承する技能の熟練者であり、従来通りの伝達手法を心得ている人を指す。提案手法では、生徒に対して従来通りの指導を遠隔からVR/ARを介して試み、生徒に

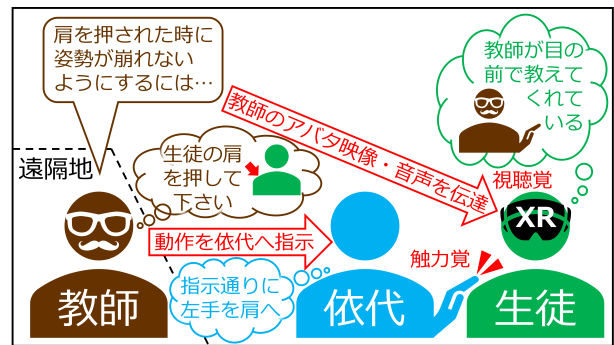


図 1: Sensei Possession の利用例

触れる必要のある場面では依代に別途指示を行い、自分の代役を果たしてもらう。

生徒は技能を伝承される人であり、手取り足取りの指導が必要な、技能を練習した経験が僅かまたは皆無の状態とする。VR/ARを介して教師の指導を受けながら、触力覚も依代により提示されるため、教師と対面で訓練した場合と同等の体験ができると期待される。(図 1)

依代は、教師の指示に従い生徒に対して適切に触れ、力を加えることとなる。ただし、この役割が要求する技能または役の熟練度は明らかになっていない。

以上の三役により、教師が遠隔から依代に憑依し、その身体(憑身体)を用いて指導を行っている生徒が認識する、という状況が作り出される。本研究では、この手法を「教師の憑身体を用いた遠隔技能伝承」(Sensei Possession, 以下 SP)とし、技能伝承に及ぼす効果を検討する。

### 3.2 Sensei Possession の意義

SPの意義は、対面の訓練が遠隔で再現されることにある。既存の技能伝達に関する研究では、動きの教師と生徒は一对一であることが多く、伝達の達成度評価は動作の再現度で測られている [8]。しかし伝統技能などの「わざ」の伝承では、表面的な動作の再現は目標として不十分であり、周囲の環境などに応じ柔軟かつ主体的に動けることが求められる [2]。よって従来の対面訓練で周囲環境を感じながら学ばれた暗黙知にも注目する必要がある。動作のみを抽出する研究方法では「わざ」の伝承効率の向上はおろか、伝承の達成に至れない可能性がある。この問題は、暗黙知を調査し補助教材化することで解決の可能性があるが、多種多様な暗黙知に通ずる教材化手法の研究は困難である。

一方で SP は教師が遠隔地にいる依代の身体に憑依するというテレプレゼンス技術の一種であり、任意の対面訓練の再現を目指す手法である。すなわち、対面訓練のみが伝承を許す暗黙知について事前に調べる必要がない点で、SP は応用性が高いと言える。加えて、教師と依代の間で交わされる情報は容易に観察・記録ができることから、SP の利用者自身が対面訓練で伝承される暗黙知を明らかにできる可能性がある。

最後に、文化の多様性の維持 [1] へも SP が貢献できることを述べる。遠隔で技能伝承を試みる先行研究では、動作の再現精度を評価手法に用いることが一般的である。しかし、効率的に動作を伝承する手法を技能の伝承にそのまま



用いることは、指導方法の画一化、文化の多様性を破壊することに他ならない。SPは依代が教師の指示を反映することの効率化を図るが、指導方法への介入はなされないため、多様な伝統の維持活動を補助することが可能である。

### 3.3 SPの課題

SPを研究する上では、憑身体の操作手法の開発が第一に必要となる。教師が依代に出す可能性のある指示を想定し、円滑な意思伝達を可能にしなければならない。またSPにおいて教師は、生徒への指導と依代への指示を並行して行うため、認知負荷の高い手法は使用が難しい。指示の内容として考えられる身体的位置・速度・力の時間変化について、重要な項目が優先的に伝達される手法を先行研究から選定、または別途開発しなければならない。

さらに伝承活動におけるSPの効果を計測するためには評価手法が必要となる。評価すべき指標としては暗黙知の先行研究に挙げられていた項目が候補に挙げられる他、技能特有の指標や、遠隔での指導の中で発見される指標が存在する可能性がある。SPの性質を今後明らかにする上で、技能の伝承が成立したか、あるいは伝承に必要な訓練環境の要素が再現されたかを判断する指標の作成は不可欠である。

## 4. ワークショップによる知見収集

### 4.1 ワークショップの目的

前章ではSPを実現するための課題として、依代の操作手法および伝承の評価手法の開発が必要であると述べた。依代の操作手法を開発するには、以下への解が必要である。

**Q1**：教師が依代に指示したいと思う動作の内、成否を検証するのに適したものは何か？

**Q2**：動作の指示がしやすい・しにくい手法は何か？

指示を目指す動作が定まることで、指示手法の評価を行うことが可能になる。また伝承の評価手法開発に関しては、

**Q3**：技能伝承のために訓練環境内のどの要素を再現すべきか？

を調べる必要がある。再現すべき要素を明らかにすることで、各要素の再現度からSPの評価を行うことが可能となる。

上記の問題を明らかにするため、本研究では対面での訓練を重視する技能の実践者を対象に情報収集を行う。しかし、従来通りの対面訓練のみを実践してきた人は、暗黙知が何を媒体にして伝承されているのか意識する必要が無い。他方、現代普及しているビデオ通話等を用いた遠隔訓練の経験がある人も、思いつくであろう技能伝達を妨げている要因はビデオ通話で再現できない要素であり、既にVR関連技術が再現に成功している要素と重複するため有意義な意見収集が難しい。よって本研究では、技能の実践者を対象に、事前の遠隔訓練の経験に関わらず先行研究にあるVRやトラッキング技術を体験して貰い、最新の遠隔訓練手法の経験者となった上での意見を集めるワークショップを行う。

### 4.2 体験設計

ワークショップには、技能の指導経験を持つ教師役1名と生徒役1名に、ワークショップの進行を行う監督者2名

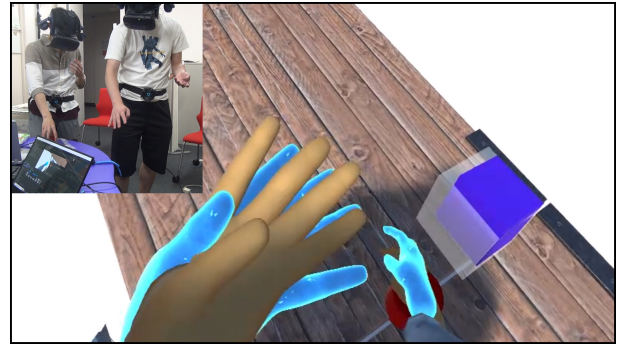


図2: ワークショップで力センサを使う様子

を加えた計4名が参加する。ワークショップ中に教師役と生徒役は、VRを用いた遠隔での技能伝承の既存手法を体験する。すなわち、ここでの教師役と生徒役はSPにおける役割と異なり、動作を伝える役と、伝えられる役となる。

VRの映像提示にはHTC VIVE Pro 2(HMD)を用いる。手はHTC VIVE Pro 2のハンドトラッキング機能で検出し、指を用いた技能にも対応できるようにした。全身動作は、HMDと手の位置計測に加え、HTC VIVEトラッカーを両足、腰に装着してトラッキングしたデータから、逆動力学計算(IK)によって求めた。HMDに表示する内容はUnityを用いて処理した。

教師役と生徒役が体験する手法は、(a)同一のVR空間に教師役、生徒役がそれぞれアバタを使い居合わせる手法、(b)別々のVR空間においてJFMのように一人称視点からもう一人の姿勢と自分の姿勢を比較できる手法、(c)融合身体においてアバタの制御率を教師と生徒がそれぞれ50%となるようにした手法の計3種類である。いずれの手法においても教師役と生徒役は互いを直接触ることができないが、ワークショップを同室で行う関係上、言葉は直接交わすことができるものとした。また既存のVR空間ならではの特徴として物理法則に囚われず物体を空中に固定できる点を考慮し、指示に利用可能な矢印記号を、随時HTC VIVEコントローラを操作してVR空間の任意の位置に配置できる機能も利用可能とした。

以上の手法が比較できるよう、動作を伝達するタスクとして、事前に用意した一連の動作を監督者から教師役のみ伝え、生徒役が動作を再現できるよう指示する課題を用意した。伝える動作は、運動系部活動の指導者が姿勢の手本を示す状況や生徒に触れて動作の補正を行う状況を想定し、力センサに触れて特定の直線または回転方向に力を加える上で、トラッキングされている部位が一致するように足、腰、およびセンサに触れる手の位置を指定したものである。

力センサ(ワコーテックの6軸力覚センサ WEF-6A200-4-RCD)は机上に固定してVR空間の同形状のCG物体と現実の座標が一致するように設置した。また教師役がいるVR空間内には力センサの測定値を元に移動・回転・色が変わる立方体を表示し、教師役または生徒役が力センサに触れた際に力の方向と大きさが分かるようにした。(図2)

(c)の融合身体では、指のトラッキングという先行研究には無かった要素を反映するために、融合身体の指の姿勢を計

算する方法を新しく提案する。本研究で用いた Unity のハンドトラッキングは、HMD 前方に付属する深度カメラから指の関節位置を片手につき 21 箇所推定し、手の 3D モデルへ反映する、HTC VIVE 公式 SDK の標準機能である。ここで用いられている手の 3D モデルは、人間の手の骨を模したボーンを内包し、固定長のリンクを持つマニピュレータのようにになっている。よって手の姿勢はリンク間の関節の角度によって一意に定めることが可能であり、融合身体の計算にも関節角を用いることにした。教師役と生徒役のトラッキングされた手モデルにおける任意の関節角をそれぞれクォータニオン  $q_t, q_s \in \mathbb{R}^4$  とすると、融合身体の手関節角  $q_{co}$  は、教師役の制御率  $w = 0.5$  を用いた球面線形補間として

$$q_{co} = \frac{\sin(w\phi)}{\sin\phi} q_t + \frac{\sin\{(1-w)\phi\}}{\sin\phi} q_s \quad (1)$$

と計算される。ただし、 $\phi$  は  $q_t, q_s$  の内積  $\langle q_t, q_s \rangle$  を用いて  $\phi = \arccos\langle q_t, q_s \rangle$  と求められる角度である。融合身体の他の部位に関して、頭と手首の角度は先行研究 [8] と同様 (1) 式で計算し、頭、手首、腰、足のトラッキングされた位置ベクトル  $p_{co} \in \mathbb{R}^3$  は、教師役と生徒役の位置  $p_t, p_s$  から

$$p_{co} = wp_t + (1-w)p_s = \frac{p_t + p_s}{2} \quad (2)$$

と計算する。

以上の体験に加え、全身の動きを指示する際に利用できる可能性のある既存の触力覚提示技術も一部を体験できるようにし、訓練の補助または障害になるか否かの意見を集める。雨宮らの考案した牽引力錯覚提示装置 [11] や、Yemらの提案する腕の誘導装置 [12] を参考にして製作した手首の皮膚を変形させるデバイスを体験できるようにした。

ワークショップの最後には、体験した手法に関する意見、指示の成否判定がしやすい動作に加え、伝統的な対面訓練で重要であるとされていた要素 [2, 3, 6] についての意見と付け足すべき要素の有無をアンケート形式で調査する。

### 4.3 仮説

ワークショップを実施する前に技能の指導経験を持たない学生 6 人を対象として、融合身体のみを体験できるパイロットテストを行った結果、仮説

**H1** : SP の検証用には、ゆっくりと力の強弱を調整するような動作が提案される。

**H2** : 融合身体は教師の動きも誘導する効果があるため教師役から悪影響を懸念する意見が出る一方、手法 (a) は現実にもっと近く、自身の姿勢を把握しやすいことから好まれる。

**H3** : 教師と生徒が意思疎通を行う上で重要となる顔の表情の再現を希望する意見が出る。

を得た。技能の指導経験を持つ実践者を教師役に据えるワークショップ内では上記の仮説を検証すべく、アンケートに加えて口頭でも意見を求める。

## 5. おわりに

本研究では、従来対面で行われてきた技能伝承の営みを遠隔化する際、人同士が触れ合う体験の再現を行う手法と

して、生徒に対し教師の代わりに力触覚提示を行う第三者、教師の憑身体の利用を提案した。また、憑身体を用いる遠隔技能伝承の実現に向けて必要となる情報を収集するため開催するワークショップの設計を紹介した。

今後は対面での訓練が重視されてきた技能の指導経験を持つ人を対象に上記のワークショップを開催し、憑身体の実現に必要な課題を明確にし、実装を進める必要がある。

**謝辞** 本研究の一部は科研費 基盤研究 (S)(19H05661) および JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2013) の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] 文化庁, 平成 30 年 3 月 6 日閣議決定. 文化芸術推進基本計画—文化芸術の「多様な価値」を活かして, 未来をつくる—(第 1 期). pp. 1–101, 2018.
- [2] 生田久美子. 「わざ」から知る. 東京大学出版社, 2007.
- [3] 林部敬吉, 雨宮正彦. 伝統工芸の『わざ』の伝承: 師弟相伝の新たな可能性. 酒井書店, 2007.
- [4] 公益財団法人群馬県教育文化事業団. 令和 3 年度伝統文化継承事業 ぐんまの伝統芸能アンケート調査結果報告書. pp. 1–54, 2022.
- [5] L.P. Cheng, et al. Haptic turk: A motion platform based on people. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, p. 3463–3472. Association for Computing Machinery, 2014.
- [6] 渡部信一. 日本の「わざ」をデジタルで伝える. 大修館書店, 2007.
- [7] U. Yang, et al. Implementation and evaluation of just follow me: An immersive, vr-based, motion-training system. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Vol. 11, pp. 304–323, 2002.
- [8] 伊東亮太, 小川奈美, 鳴海拓志, 廣瀬通孝. 融合身体を用いた身体スキル伝達に関する基礎調査. 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 1–4, 2020.
- [9] R. Fribourg, et al. Virtual co-embodiment: Evaluation of the sense of agency while sharing the control of a virtual body among two individuals. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 27, pp. 4023–4038, 2021.
- [10] 笠原俊一, 暦本純一. Jackin: 一人称視点と体外離脱視点を融合した人間による人間のオーグメンテーションの枠組み. 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 4, pp. 1248–1257, 04 2015.
- [11] 雨宮智浩, 安藤英由樹, 前田太郎. 知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 47–57, 2006.
- [12] V. Yem, et al. *Development of Wearable Outer-Covering Haptic Display Using Ball Effector for Hand Motion Guidance*, Vol. 277, pp. 85–89. 06 2015.