

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： パラサイトヒューマンネットによる五感情報通信と環境センシング・行動誘導

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):  
研究代表者

前田太郎(大阪大学大学院情報科学研究科 教授)

主たる共同研究者

大森 隆司(玉川大学脳科学研究所 教授)

岡田 昌史(東京工業大学大学院理工学研究科 准教授)

大山 英明((独)産業技術総合研究所知能システム研究部門 主任研究員)

雨宮 智浩(日本電信電話株式会社コミュニケーション科学基礎研究所 研究主任)

3. 研究実施概要

本研究は、パラサイトヒューマン(PH)による五感伝送技術という既存の技術とは全く異なるシーズ技術をベースとし、人から人への遠隔スキル伝送や行動支援を介して、ITC 社会がもたらす通信・先進センシング情報を活用することにより、エンドユーザーの行動を直観的・非言語的に直接的な支援サービスをもたらす手段を工学的に研究・開発することを目指したものである。研究の主軸となるパラサイトヒューマンによる五感伝送・環境計測・行動誘導の研究、および次世代パラサイトヒューマンの装置開発および行動伝達応用への具現化については、研究代表者らの阪大Gが担当した。具体的には、五感伝送技術の効率化・高度化を実現するために、装着者への感覚刺激と行動応答の心理物理計測を中心に定量的な数理モデルによる仮説と検証によって工学的な設計論化していくという基礎的研究方針を軸に、各種要素技術の開発・検証と、全体システムの評価・改善を進めた。各感覚要素の伝送技術については、特に前庭感覚と触覚・力覚の再現精度と視覚による身体誘導技術において特筆すべき改善が得られた他、時分割視覚重畳による融合感現象など、工学的応用だけでなく心理物理学的知見においても多くの成果が得られた。

また全体システムとしては、パラサイトヒューマン技術を社会実装向けに整理した View Sharing System を中心とした熟練者の行動スキルの抽出と記録・伝達によって、即時的な遠隔行動支援となるスキル伝達効果、また体験の記録と再生による追体験学習がもたらすスキル獲得効果について、心理物理的な解析と人間工学的な実証を進めた。この結果、基礎研究的な検証においては中国ゴマやテルミン演奏の操作スキルの伝送を実現した。社会実装を睨んでは、心肺蘇生法(CPR)の遠隔スキル伝達、および同技能の獲得実習の e-learning 化の検証について、同講習会を専門とする企業である MFA 社と協力して進め、その効果を実際の実技実習と同等のレベルまで高めることに成功した。この利用法については、東工大 G により、動力学的モデルに基づいて体格別の疑似目標値軌道による最適姿勢誘導手法の設計が行われた。また、公益財団法人東京防災救急協会救急事業本部の協力の元で、講習効果の検証も進めた。さらには NTT G により、携帯電話アプリによる誘導教示手法、並びにその Android アプリを Web 公開する等、多角的な側面からの社会実装を図った。

特に成功した社会実装としては、視覚の重畳提示による効果的なスキル獲得技術について、京都大学附属病院消化管外科との協力により開発した「腹腔鏡下術技スキルトレーサー“追いトレ”」が挙げられる。中間評価時には、「技術の独創性を活かしたシーズ的研究と、現実性の高い出口を目指した研究のバランス」をとるように助言を受けた。更に出口戦略に関しては「社会的ニーズを分析する人材の確保」と「出口戦略の選択と集中」が課題として指摘された。しかし、本技術の独創性が高すぎるために従来型の社会ニーズ分析と働きかけでは、事業者側・現場側の応用イメージが能動的な形で喚起出来ない事態である問題は容易に解決できなかった。そのような中、同年度中にテレビ報道されたスキル伝送技術を見た京都大学医学部付属病院消化器外科から、同技術を腹腔鏡下術技トレーニングに応用したいというオファーを受けることになった。これはシーズ研究の

社会実装において現場側のニーズと技術の利用イメージが能動的な形で明確である理想的な流れであり、スピード感をもった連携を実現することが出来た。これに対応して、社会実装の出口対象を絞るべしという指摘に関しても、リソース活用の問題から必然的に選択と集中を進めることになった。その学習効果については、同病院において実際のインターン実習に利用され、従来手法の 1/7 程度の所要時間で同程度の手早さと、それ以上の正確性を学習獲得することが可能であることが検証された。またこれらの成果は、関西医療機器開発・製造展において展示発表され、3 日間の期間中、初日だけで約 30 件の企業からコンタクトを求めるオファーを受ける等、関連業界から多くの反響を得た。

さらに、遠隔スキル伝達システムの応用としては、産総研 G によって過酷環境作業のためのウェアラブル行動誘導システムの試作も行われ、配管バルブ操作などの検証実験が行われた。この成果は国際的な評価を受け、Netexplo 2012 Award を受賞している。また、基礎研究の側面からは、ウェアラブルなパラサイトヒューマン技術を活用した運動誘導実験を通して得られた被験者の感覚運動応答データを元に、行動意図の時間分節性を仮定した定量的な数理モデルを構築することにより、行動意図の予測モデルと、それを活用した行動誘導の最適設計手法を提案することが出来た。阪大 G は、この分節性に基づく意識下運動応答の高い再現性を利用した「つもり制御」を提案し、多自由度ヒト型ロボット操縦において分節群からの 70%の推定率、脳波を用いた分節構造の推定などの成果を上げた。これらの応用としては、頭部運動の分節化による追従マーカ提示法の最適設計などの要素技術に還元されている。また玉川大 G からは、歩行すれ違い時の誘導応答の分析から歩行の分節性と、歩行位相中の誘導最適タイミングについて再現性の高いデータが得られた。この分節性の知見は、産総研 G により、パラサイトヒューマン技術を利用したテレグジスタンスロボットの操縦方法へと応用された。具体的には、従来からの課題であった操縦者の歩行動作入力へのロボット側の実時間応答不能問題を、分節化対応によってつもり制御手法を用いた分節化追従制御によって実現する手法へと応用展開されている。歩行誘導における社会的な安心安全には、個人のみならず集団に対する誘導支援が必要であるため、社会心理学の観点からモデル化を行うことで群体の歩行誘導という形で研究を進めた。まず産総研 G のエージェントシミュレータに端を発し、その後、東工大 G の流体モデル型の歩行群誘導モデルの形で、計算機シミュレーションと実歩行者群の挙動観察実験による比較と検証を進めた。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

新しいウェアラブルデバイスを利用したパラサイトヒューマン型の五感伝送・環境計測・行動誘導といった大変挑戦的なテーマである。自己同一感等新規性の高い理論に基づいた基礎技術レベルの実験にとどまらず、中間評価のコメントを受けて、より社会実装に注力した結果、CPR 救命講習への応用や内視鏡トレーニングへの応用を実現し、パラサイトヒューマン技術の社会実装を実現した点は高く評価できる。学術面に関しても、原著論文発表(国内誌 17 件、国際誌 8 件)、国際会議発表(45 件)、招待講演(国内会議 13 件、国際会議 7 件)、特許(国内出願 7 件、海外出願 2 件)等において、国際誌への投稿発表の比率をより高めることが期待されるものの、全体としては適切な数の成果が上がっている。

成果の中でまず特筆すべきは、装着者の感覚・運動情報を計測・記録し他者に遠隔伝送する五感伝送技術の高度化により、熟練者のスキルの抽出・記録・伝達と、熟練者の行動を追体験することによるスキル獲得支援を実現した点である。従来のスキル伝承の指導方法においては意識上で言語化しにくい行動上のスキルは漠然とした「見て学べ」という指示しかできず、その伝達の効率は高いものではなかった。この問題を改善するための手法として、本研究では全体の研究のプラットフォームとなる五感伝送型パラサイトヒューマンの設計・試作を進めるとともに、感覚伝送の各要素技術を複合させることにより得られる効果について、定量的に評価するための実験環境を構築した。その上で、各種感覚提示技術を用いて、複数の被験者間の感覚伝送実験、および協調作業実験を行うことにより、個対個のスキル伝送効果を検証した。

特に、視野合成を用いる技術開発に関しては新規性が高い。具体的には、視点共役型ビデオシースルー HMD を介した一人称視野の共有によって、自己の身体イメージへのオーナーシップ共有を生じさせることで二者間の動作誘導とスキル伝達を試みた。この視点共有を実現させるためには、二者間で頭部運動の協調動作

を行う必要が生じる。本研究では、相手の頭部姿勢を表すマーカを現実世界の映像に重畳させ、マーカの追従によって頭部運動を同期させるように提示系を設計した。この頭部運動の追従過程として、眼球運動が跳躍運動と追従運動があることになって、すなわち視点共有前の頭部位置キャッチアップ過程と、視点共有後の頭部速度追従による視覚フローの安定化過程という2つの段階を設定して、マーカおよび視野提示の切り替えの設計を提案実行した。これに加えて4極GVS(前庭電気刺激)を用い、運動情報を補強することによってより安定した頭部姿勢の追従を可能にした。この視野共有環境をベースに各種感覚伝送要素の組み合わせによる感覚伝送実験環境の構築と、それを用いた協調作業実験による解析・評価を重点的に行った。共有視野内での協調作業支援提示手法の評価法としては、一人称視野を共有・合成した2者間での上肢協調作業実験を行った。追従特性を解析した結果、位置を合わせる協調作業には、自他の区別が可能かつ互いの視覚情報を同時に提示する手法が効果的である一方で、速度を合わせる協調作業には、互いに相手のみの運動を提示する手法が効果的であることが判明した。この結果を適用することによって、先述の視野共有のための頭部追従系における相互視点切り替えシステムの設計・実現がなされた。

またこれに付随して、視野共有における時分割提示手法の提案と評価を行った。視野共有のための提示手法として、自他視野画像を同時に提示する「視野合成法」と、自他視野画像の一方のみを適宜切り替えて提示する「視野交換法」の効果を検討した結果、視野合成法を用いた場合の視野重畳提示において、小さな変位で複雑に重なっている指の追従を行う際の追従特性が悪化するケースが見られた。これは、多数の特徴点間の対応を取ろうとして、自分視野と他者視野への煩雑な注意の切り替えが追従特性を悪化させていることが考えられる。そこで、自他映像間の注意遷移を抑制しつつ追従を妨げない新しい手法として、自他視野画像を高速に切り替えて提示する「視野時分割法」を提案した。この手法は、自分の手である自己同一感を残しつつ、他者の手との融合感を生起させる新しい錯覚現象を利用したものであり、追従誤差を明確に認識しない(できない)状態で追従が可能になることが期待された。実験では、従来の視野合成法、交換法と、新提案の時分割法による視覚情報提示下で、指運動の追従課題を行わせた。その結果、時分割法による追従では、従来法に比べて位置追従誤差が小さくなることが分かった。また、この効果が得られる自他画像時分割提示の最適な周期・画像比率の範囲で、二つの手の間に運動印象が生起し、一つの手として認識されることも分かった。また、注意の切り替えを要せず、行動の連続性や随意性を保つことができる「時分割法」が二者間の協調動作に効果的であることを確認した。

社会実装面においては、視野合成法をベースに、前述のようにCPR救命講習や、内視鏡トレーニング等医療分野への具体的応用を実現した点、研究代表者が、オリジナル技術の創成から応用展開までをグループをよく束ねて進めてきた点等が高く評価できる。特に内視鏡トレーニングへの応用は、社会的な要請面においても、緊急性が高い。腔鏡用鉗子運動学習においては、通常のボックストレーナーというツールを用いて、モニタを覗きながら鉗子の操作を行うことで、ダミー臓器の切開や結紮を行うことで学習する。従来研究において熟練医がより高精度に手術を行うための提案は数多いが、熟練者を養成するという試みは少なく、医師不足の問題を解決する手段として、効率的なトレーニング技術の開発が医学系から求められている。既存技術では、リアルに近いシミュレータを構築しトレーニングを行うという手法を原点としてトレーニングシステムの構築が行われてきており、熟練者からの教示は言語的なものや、矯正的な力触覚に基づいていたため、学習のためには結局練習者が試行錯誤を行なっており、その結果として、癖のある不均一なスキルの習得になることが多い。本研究では、この問題を踏まえて、「感覚共有(通信)システム」、「錯覚を利用した誘導」を利用することで、矯正的でない自然で効率的なスキル伝達・スキル学習を提案した。一般的に用いられているボックストレーニングシステムは腹部に見立てた箱のなかに内視鏡カメラと鉗子を差し込み、カメラ画像をモニタで見ながら結紮作業などのトレーニングを行う。提案システムでは、内視鏡カメラの映像出力とモニタの間に画像処理装置(画像処理機能の高いPC)を経由するように構成した。画像処理装置は任意に動画を記録・再生でき、記録されたものとリアルタイム画像を任意のパラメタで合成・切替などの処理を行った。同システムを用いた効果について検証実験を行った結果、学習時間わずか一時間で、ほぼ同等の速度で作業ができるまで学習が進み、さらに独学で学んだもの比べて、熟練者の動きに近い軌道での学習ができているため、チェック項目の内容に対するエラー数が少ない結果となり、非常に効果的であることが実証された。

一方で、視野合成法以外に開発された「意識下活動を活用した歩行誘導手法」を始めとする多くの要素技術に関しては、社会実装の具体的なイメージまでたどり着けなかった点が残念である。本プロジェクトにおいて多くのグループから様々な要素技術が開発されていることを考えると、これらのグループからの出願も期待したい。

#### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

特に中間事業評価後に、社会実装に積極的に取り組んだ結果、京都大学医学部による活用や危険作業への適用の可能性等、社会的に高いインパクトのある応用ケース先を見つけて積極的に研究開発を進めた点は、高く評価できる。五感情報通信を提案し、動作できるレベルまで実現したインパクトは大きい。しかしその一方で、社会における活用へのインパクトという観点においては、既存のロボット技術との優位性が分かりにくく、整理が必要である。今後は、パラサイトヒューマン技術研究の基盤的な拡充と、社会実装の展開の両者を並走させることを期待する。

#### 4-3. 総合的評価

人間を抵抗感持たせずにスムーズに制御指示する技術は、ハードのみならず心理的な観点からの研究が必要である。この点において当研究は、脳波からの検討を始めており、今後の研究においても期待が持てる。社会実装の観点においても、技術指向であった研究代表者が、ニーズ指向にまで幅を広げて成長してきており、ハイレベルな成果がもたらされた。具体的には、新しい視野合成法を生み出し、その有用性を実証するとともにCPR 救命支援ツールや内視鏡手術学習支援ツール等、社会で重用される可能性の高い機器を開発することができた。一方で、パラサイトヒューマン技術の本質的な部分は、まだ応用レベルには至っておらず、他に開発された要素技術の社会実装がいまひとつ明確に出来なかった点は、改善すべき点である。