

氏名	侯 磊
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 872 号
学位授与年月日	平成 24 年 3 月 22 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	バーチャルリアリティ技術を用いた技能習得とその脳科学的解明に関する研究 (A Study on Skill Acquisition Using Virtual Reality Technology and Analysis Skill Training Based on Brain Activity)
論文審査委員	委員長 教授 綿貫 啓一 委員 教授 加藤 寛 委員 教授 佐藤 勇一 委員 教授 堀尾健一郎

論文の内容の要旨

現在、日本は団塊世代の定年や生産拠点の海外移転などで製造業に深刻な影響を与えている。また、就業者の高齢化と減少も深刻な問題なのである。これにより、熟練技能を必要とする基盤的技術産業の衰退が懸念されている。このことから、今後も付加価値の高い製品を作り出すためには熟練技能の伝承と作業者の負担を軽減する作業支援という二つの課題を解決することが不可欠である。この課題を解決する方法として、IT 技術を導入した技能伝承、作業支援の方法が検討されて、研究が進んでいる。本論文は、IT 技術の一つであるバーチャルリアリティ（VR）技術を用いた熟練技能学習ツールの開発及びバーチャルリアリティトレーニングを行ったときの技能習得効果を脳科学的に解明するとともに、ブレイン・マシン・インターフェイス（BMI）を用いた作業支援装置の開発について述べる。

本論文は、以下の構成としている。

1 章の緒言では、研究背景について述べ、技能伝承と作業支援の必要性についてまとめた。

2 章において、従来の技能伝承手法とその問題点、VR 技術を用いた技能伝承手法について述べる。熟練技能は個人の経験や体験に基づいているため、文章や図で表しにくく、伝達が非常に困難である。従来の技能伝承の手法として、OJT（On-the-Job Training）やビデオライブラリ、技術ドキュメントなどがある。これらの手法の中で、仕事を通して訓練する OJT は多くの現場で用いられている手法である。OJT において、時間的、空間的、資金的な制約があり、技能習得効果は教える側の能力に大きく依存するため、効率的な技能伝承を行うことが困難であるとされている。この問題点を解決する手法として、VR 技術を用いた作業訓練装置が提案されている。VR 技術は、実環境の刺激を人工的に作り出す技術であるが、実環境を完全に再現することは困難であり、違和感が生じる場合がある。そこで、本論文の 3 章と 4 章において、VR 技術を用いた技能学習ツールの開発とバーチャルトレーニングによる技能習得の解明について述べる。

3 章では VR 技術を用いた技能学習ツールの開発および評価について述べる。本研究では拡張現実感（AR）アプリケーションを簡単に構築できる ARToolkit を用いて図面学習ツールを構築した。このツールは、三面図を AR のマーカーとし、その上に製品の及び鑄造法案の 3 次元映像を表示するものとなっている。また、モー

ションキャプチャのデータをもとに作成したデジタルヒューマンを用いた熟練技能学習ツールの開発を行った。作業者の動きをモーションキャプチャで取得することで、正確な動きの3次元データを記録することが可能となる。構築した学習ツールについてアンケート評価を行ったところ、デジタルヒューマンを見ることで、作業者の動きを把握できたという結果を得た。これにより、VR技術を用いた技能学習ツールは有用であることが確認された。

4章では、バーチャルトレーニングの技能習得効果を解明するため、NIRSを用いた技能習得時の脳機能解析について述べる。はじめに、NIRSを用いて作業時の脳賦活反応を計測することが可能であるかどうかについて検討するための基礎実験として、ハンドル回し運動と重心移動運動時の脳賦活反応をそれぞれ計測し、解明した。ハンドル回し運動実験では、加工条件により前頭前野のoxy-Hbの変化傾向が異なることが確認できた。重心移動運動実験では、運動方向によって運動野の賦活部位が異なることが確認できた。これらの結果は、NIRSを用いて技能習得時の脳機能計測が可能であることを示した。

次に、旋盤加工作業を対象に、NIRSを用いてVR環境下と実環境下で作業を行ったときの脳機能計測を行った。VR環境下において旋盤加工作業を行った場合、oxy-Hbが増加し、特に運動野の側頭部と頭頂部で大きく増加した。実環境下での実験も同様の結果を示した。また、VR環境下と実環境下で、他人の作業を観察する場合より、自分で作業を行った場合でoxy-Hbが増加する結果となった。したがって、脳科学的には、自分で作業を行うことに訓練効果があることが分かった。また、VR環境下での実験結果と実環境下での実験結果が定性的に一致したことから、VR環境下での旋盤加工作業訓練は有用であることを確認できた。

5章では、作業者の負担を軽減するため、作業支援機器についての基礎的研究を述べる。従来の作業支援機器は煩雑な操作が必要なため、専門的な訓練が必要であり、作業しながら操作することが困難である。そこで、本研究ではより簡単かつ直感的な作業支援機器の開発のため、NIRSを用いたBMIを構築。NIRSで計測したA/Dサンプリングデータをヘモグロビンの値に変換し、これを用いて位置決め装置の制御を行った。動作確認実験を行ったところ、NIRSの信号により位置決め装置を制御することができた。実用的な作業支援機器にするため、装置の無線化が重要になってくる。そこで、NIRSと無線機器を利用した遠隔操作システムを構築した。NIRSの信号をATコマンドに変換し、これを用いて無線機器で対象となる装置を遠隔操作する。動作確認実験では、NIRSの信号を使ってLEDの点灯・消灯を遠隔操作することができた。これらの結果から、BMIを用いて作業支援機器の構築が可能であることが明らかになった。

このように、本論文はVR技術を用いた技能習得は有用であることを示したとともに、BMIを用いた作業支援機器の可能性について明らかにした。

論文の審査結果の要旨

現在、日本は団塊世代の定年や生産拠点の海外移転などで製造業に深刻な影響を与えている。また、就業者の高齢化と減少も深刻な問題なのである。これにより、熟練技能を必要とする基盤的技術産業の衰退が懸念されている。このことから、今後も付加価値の高い製品を作り出すためには熟練技能の伝承と作業者の負担を軽減する作業支援という二つの課題を解決することが不可欠である。この課題を解決する方法として、IT 技術を導入した技能伝承、作業支援の方法が検討されて、研究が進んでいる。本論文は、IT 技術の一つであるバーチャルリアリティ（VR）技術を用いた熟練技能学習ツールの開発及びバーチャルトレーニングを行ったときの技能習得効果を脳科学的に解明するとともに、ブレイン・マシン・インターフェイス（BMI）を用いた作業支援装置の開発について述べている。

本論文は、6章の構成となっている。

1章では、研究背景について述べ、技能伝承と作業支援の必要性についてまとめた。

2章では、従来の技能伝承手法とその問題点、VR 技術を用いた技能伝承手法について述べている。熟練技能は個人の経験や体験に基づいているため、文章や図で表しにくく、伝達が非常に困難である。従来の技能伝承の手法として、OJT（On-the-Job Training）やビデオライブラリ、技術ドキュメントなどがある。これらの手法の中で、仕事を通して訓練する OJT は多くの現場で用いられている手法である。OJT において、時間的、空間的、資金的な制約があり、技能習得効果は教える側の能力に大きく依存するため、効率的な技能伝承を行うことが困難であるとされている。この問題点を解決する手法として、VR 技術を用いた作業訓練装置が提案されている。VR 技術は、実環境の刺激を人工的に作り出す技術であるが、実環境を完全に再現することは困難であり、違和感が生じる場合がある。そこで、本論文の3章と4章において、VR 技術を用いた技能学習ツールの開発とバーチャルトレーニングによる技能習得の解明について述べる。

3章では、VR 技術を用いた技能学習ツールの開発および評価について述べている。本研究では拡張現実感（AR）アプリケーションを簡単に構築できる ARToolkit を用いて図面学習ツールを構築した。このツールは、三面図を AR のマークとし、その上に製品の及び鋳造法案の3次元映像を表示するものとなっている。また、モーションキャプチャのデータをもとに作成したデジタルヒューマンを用いた熟練技能学習ツールの開発を行った。作業者の動きをモーションキャプチャで取得することで、正確な動きの3次元データを記録することが可能となる。構築した学習ツールについてアンケート評価を行ったところ、デジタルヒューマンを見ることで、作業者の動きを把握できたという結果を得た。これにより、VR 技術を用い技能学習ツールは有用であることが確認された。

4章では、バーチャルトレーニングの技能習得効果を解明するため、NIRS を用いた技能習得時の脳機能解析について述べている。はじめに、NIRS を用いて作業時の脳賦活反応を計測することが可能であるかどうかについて検討するための基礎実験として、ハンドル回し運動と重心移動運動時の脳賦活反応をそれぞれ計測し、解明した。ハンドル回し運動実験では、加工条件により前頭前野の oxy-Hb の変化傾向が異なることが確認できた。重心移動運動実験では、運動方向によって運動野の賦活部位が異なることが確認できた。これらの結果は、NIRS を用いて技能習得時の脳機能計測が可能であることを示した。次に、旋盤加工作業を対象に、NIRS を用いて VR 環境下と実環境下で作業を行ったときの脳機能計測を行った。VR 環境下において旋盤加工作業を行った場合、oxy-Hb が増加し、特に運動野の側頭部と頭頂部で大きく増加した。実環境下での実験も同様の結果を示した。また、VR 環境下と実環境下で、他人の作業を観察する場合より、自分で作業を行った場合で oxy-Hb が増加する結果となった。したがって、脳科学的には、自分で作業を行うことに訓練効果があることがわかった。また、VR 環境下での実験結果と実環境下での実験結果が定性的

に一致したことから、VR 環境下での旋盤加工作業訓練は有用であることを確認できた。

5 章では、作業者の負担を軽減するため、作業支援機器についての基礎的研究を述べている。従来の作業支援機器は煩雑な操作が必要なため、専門的な訓練が必要であり、作業しながら操作することが困難である。そこで、本研究ではより簡単かつ直感的な作業支援機器の開発のため、NIRS を用いた BMI を構築し、NIRS で計測した A/D サンプリングデータをヘモグロビンの値に変換し、これを用いて位置決め装置の制御を行った。動作確認実験を行ったところ、NIRS の信号により位置決め装置を制御することができた。実用的な作業支援機器にするため、装置の無線化が重要になってくる。そこで、NIRS と無線機器を利用した遠隔操作システムを構築した。NIRS の信号を AT コマンドに変換し、これを用いて無線機器で対象となる装置を遠隔操作する。動作確認実験では、NIRS の信号を使って LED の点灯・消灯を遠隔操作することができた。これらの結果から、BMI を用いた作業支援機器の構築が可能であることが明らかになった。

6 章では、本論文のまとめを述べている。

以上のように、本論文は VR 技術を用いた技能習得は有用であることを示したとともに、BMI を用いた作業支援機器の可能性について明らかにしたものであり、論文の一部として査読付き学術論文が 4 編、国際会議講演論文が 9 編掲載されている。本論文は、工学的・工業的に極めて有用であり、博士（工学）の学位授与にふさわしいものであると判断する。