

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 嵯峨 智

本論文は「触力覚を伴う作業の記録と再生に関する研究」と題し、5章からなる。作業には、軌道情報のみならず力情報がともなうが、従来、作業の「記録」に於いては映像に撮るなど軌道情報の記録が主となっていた。また、作業を学習のため教示する「再生」に於いても、受動的に力情報を提示する場合が多かった。本論文では、Active Touch とよばれる触覚の能動性に着目し、この特徴を生かしながら力を記録し再生して作業を伝える手法と、機械的なインピーダンスで環境を表現する手法について、一点での接触が可能な場合について提案し、また、一点での接触を仮定できない場合の作業の記録の手段として、広がりを持つ接触状態を精細に計測する手法についても提案して、実験によってそれらの有効性を示し、道具を用いる作業の学習という将来の新しい分野への発展の道を拓いている。

第1章「作業の記録と再生」は緒言で、本論文で扱う作業を主体と客体との力のやりとりと定義し、学習についてこれまでの知見について整理した後、作業の学習とは何かを具体的な例を通して論じている。また、作業の学習において記録再生すべき情報として力を用いることの妥当性について論じ、作業の中でも道具を使用する作業に限定して考えるとしている。さらに道具の中でも特に「客体との接触点を制約しつつ、客体への力の伝達を目的として主体の延長として働き、それ自身は作業中に大きく変化せず、かつ作業中に主体から離れないもの」を作用子と定義して、本論文では、この作用子を用いた作業の記録、再生の新しい方法を提案しその効果を実証するとして、本研究の目的と立場と意義とを明らかにしている。

第2章は、「力情報を用いた記録と再生」と題し、力情報を用いて作業を記録し再生するシステムを構築する手法として、作業者の主体性を重視する Haptic Teaching を提案し、実験システムを構築し、実験を通してその効果を検証している。提案法は、作業を教示するのに、書道の携手のように受動的な状態で力を教示したり、あるいは、ロボットなどで記録した力をそのまま再生し、それに手をそえ受動的に学習したりするという方法ではなく、主体たる人間の能動性を重視した方法である。具体的には、作用子から記録した力が逆方向に生じるようにして、主体が記録した力と同じ力を発生して作用子に与えることにより軌道を再現するという方法であり、これまでの学習で実現が難しかった力情報と位置情報の同時提示を実現している。このための力覚提示手法とし、前述の記録者の力情報の逆提示に加え軌道に対して垂直の方向には一種のテンプレートの役割をする Virtual Fixtures を利用している。システムを構成し、実験を通じて、この方法により、形状に加え力覚の学習も可能であることを確かめ、力覚教示における主体的動作が有効であることを示している。具体的には、従来方法と提案方法を用いて、新しい文字の軌道とそれに沿った力の学習を行い、それらの学習効果を比較している。記録者の情報を正解とし、それを作業者が何度か試行を繰り返し学習する。記録者情報と作業者情報の時間的整合性をとるため、記録者、作業者のそれぞれの動作から得られる位置情報に基づき DP マッチングを行い、得られたマッチングパス上での位置及び力の平均誤差を試行ごとに算出している。その結果、学習後の法線水平方向、および接線方向の力情報は、両者とも、従来手法に比べ、提案手法のほうが、記録からの誤差率にして 0.1 程度低い誤差を示しており、提案手法による学習の効果が顕著であるとしている。このデータの信頼性を検

証するため接線方向成分に関するデータを分散分析し、有意差検定を行ったところ、6 回目のデータから、 $F = 4.35$  となり、両学習手法の効果に危険率5%で有意な差があることがわかる。同様に法線水平方向成分  $F = 4.46$ 、位置誤差  $F = 12.26$  となり、それぞれ危険率 5%と 0.5%で有意差があると結論している。

第3章は「力の作用反作用を用いた再生システム」と題し、力の作用反作用を用いた再生システムとして、簡易な作業シミュレータを構築する手法について検討し、実験を通して環境再現性を検証している。これまで作業シミュレータというと、一つ一つの作業ごとに異なるシミュレータシステムが存在し、それぞれの環境を提示するシミュレータシステムの構築には、プログラミングを含め、多くの時間を費やすことが日常であった。そこで、これまで作成が困難であった、視覚と力覚を用いた学習のための作業環境の再現手法として、環境を機械インピーダンスの記録と再生で構築するという簡便な手法を提案している。提案手法では、視覚情報については、記録される映像情報を、能動的な動作をトリガとして再生することで再現する。力覚については、記録された情報から環境のインピーダンスを再構成する。提案方法に基づいて、実際にシミュレータを構築し、速度変化に関して再現性のあるインピーダンス情報が得られていること、力覚についてはバーチャル環境における各インピーダンス情報が再現されていることを確認している。具体的には、粘性流体中の力覚再現性を確認するため、平均速度に基づくデータからインピーダンス情報を再構成し、移動速度をさまざまに変更したときの力覚と、実際の環境中で移動速度をさまざまに変更したときの力覚を比較している。その結果、実際の粘性環境において 100 [mm/s] から 500 [mm/s] までの操作速度で測定した反力の結果と、約 100 [mm/s] で移動した際に取得した情報からインピーダンス情報を算出し、構築されたバーチャルなシミュレーション環境において 100 [mm/s] から 500 [mm/s] までの操作速度で測定した反力の結果との傾向の類似性を確認している。なお、同様の結果が、摩擦板上での筆記作業についても得られている。

第4章は「作業における精細な接触情報の記録」と題し、接触を一点で近似できない作業についての記録が可能となるように作業における精細な接触情報の記録を目指し、広がりをもつ接触の計測が可能でセンサシステムを提案し、そのプロトタイプシステムを作成して、その可能性を実証している。提案しているセンサは、既知の平面パターンを接触面で反射させ、それをカメラで撮像し、接触面の変形によるパターンの変形から触覚情報を計測するという方式である。光てこを用いることにより変形を精度よく検出し、変形可能な鏡面として透明なシリコンゴムと空気との境界を用いることで、カメラの解像度を十分に生かした、反射像を利用した触覚センサを構成している。幾何光学と適切な近似を用いたシミュレーションにより、提案する触覚センサにより、得られる画像からの反射面の形状の復元が可能であることを示した後、実際にシリコンゴムによる試作機を制作し、反射面の形状復元が可能であることを示している。解像度に関しては、通常の人間の 0.1 [mm]の高さ変位の知覚には及ばないものの、提案手法によるプロトタイプセンサでは 0.2 [mm] の高さ変位を定量化できることを示している。なお、光てこの原理を用いているので、カメラの設置場所を遠ざけるほど変位を増幅可能になっているため、さらに感度が向上できるとしている。

第5章「結論」は結語で、本論文の結果をまとめ、今後を展望している。

以上これを要するに、道具を用いる作業の新しい記録と再生の手法を幾つか提案して、それらについて理論的な考察を行い、実際の装置を試作し、実験的に評価することで、それらの有効性について明らかにし、道具を用いた作業の学習への新しい可能性を拓いたものであって、計測工学及びシステム情報学に貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。