

実世界情報システムプロジェクト ～ V R 研究グループ システム情報第七研究室～ (実世界感覚情報の遠隔再構築とその医療応用)

満洲邦彦 鈴木隆文
情報理工学系研究科 システム情報学専攻

竹内昌治
情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 (生産技術研究所)

概要

本研究は、機械系に加えられた各種の物理的刺激を、操作者である生体に感覚情報として伝達し再構築するシステムの開発を目標とするものである(図1)。このシステムは、遠隔医療システム等におけるマスタ・スレーブシステムでの触覚フィードバックとして利用できるだけでなく、義手表面における機械的刺激の情報を、触圧感覚情報として伝達し、装着者の感覚神経に直接入力することにより、あたかも自分の手であるかのような、(代替感覚ではない)自然な感覚を生成する技術にそのまま応用可能なものである(図2)。これらのシステムを実現するためのキーテクノロジーとしては、下記の3つの技術が挙げられる。

1. 実世界感覚情報取得のためのセンサ技術：生体と同等の感度・空間分布で、外部実世界の感覚関連情報を取得しうるセンサ技術
2. 感覚情報の再構築・呈示技術：生体の感覚受容器や神経系への刺激により、機械系が検出する実情報空間と生体の脳内に構築される感覚情報空間との間で情報の自然な受け渡しを可能とする技術
3. 生体と機械系で情報空間を共有するための神経インタフェース技術：生体の神経系と外部情報機器との間で直接的な情報入出力を行う技術



図1：遠隔医療システムにおける触覚フィードバック

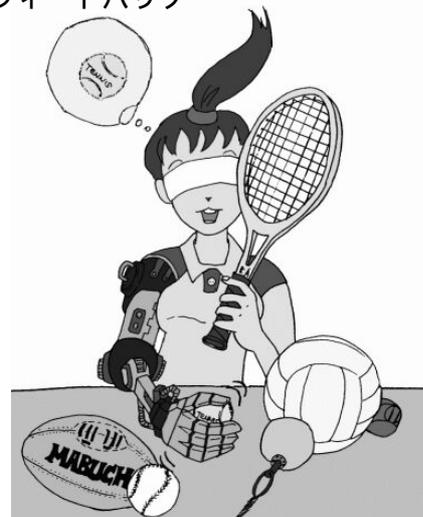


図2：触覚機能を備えた義手システム

本グループでは、これらのキーテクノロジーの研究を総合的に行っているが、本稿では特に、2) 感覚情報の再構築・呈示技術と、3) 生体と機械系で情報空間を共有するための神経インタフェース技術について報告を行う。

1 感覚情報の再構築・呈示技術

概要

本研究は、感覚神経線維への直接の情報入力によって、人工的な触覚を生成し、触覚機能を有する義肢といった応用の実現を目的とするものである(図3)。これまでに、マイクロニューロプログラム法及び微小刺激法を用い、覚醒状態のボランティアを被験者として研究を行ってきた。マイクロニューロプログラム法とは、針型の神経電極を、先端部が神経束内に到達するように経皮的に刺入して神経信号の計測を行うものであり、先端部の微小な領域を除いて絶縁コーティングが施されているため、位置の調整により単一の神経線維の信号の計測が可能となる。この方法を神経刺激に利用するものが微小刺激法である。我々は通常、タングステン製の軸径 120 μm の電極を使用し、前腕部(手首付近)からの刺入により正中神経を対象として研究を行っている。正中神経の支配領域は、第一指から第四指と手掌部の主に手の平側の領域である。これまでに、a) 皮膚の感覚受容器に刺激を加えた際に生じる神経信号の解析、そして逆に、b) 人工感覚を生じさせるために必要な(神経線維に入力すべき)電気刺激パルス列の解析、c) 触覚呈示義肢システムの試作、d) 多チャンネル化(複数ユニットの刺激)に関する検討、e) 触覚フィードバック機能を備えた遠隔ロボット

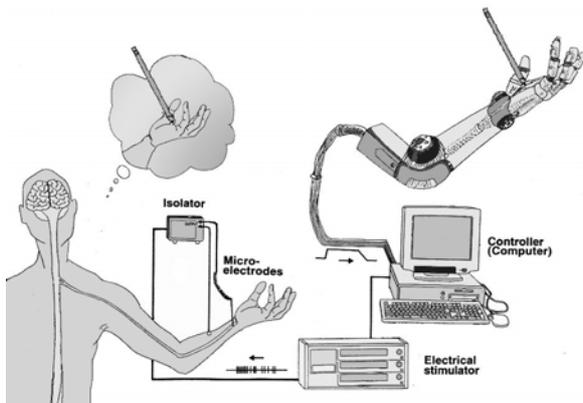


図3: 触覚情報を生体に呈示するシステムの概念図

トハンド操作システムの試作を行ってきた。

単一ユニットにおけるコーディング規則解明

我々はまず、皮膚の機械的感覚受容器から中枢神経系に信号を伝達している求心性の単一感覚神経線維(遅順応I型)にパルス状の電気刺激を加えることによって触覚を生じさせ、刺激の強度、周波数、パターンなどと、生じる感覚の種類、強度、領域などとの関連を解析した。刺激電圧値を、単一ユニットのみを刺激する値に固定した上で、パルス間隔(パルス周波数)と生成される人工的な触覚(圧覚)の強度との関係を詳細に求めた。この結果、刺激パルス周波数と、生成される触覚(この場合は圧覚)との間に、一般的に図4のような関係があることを示した。

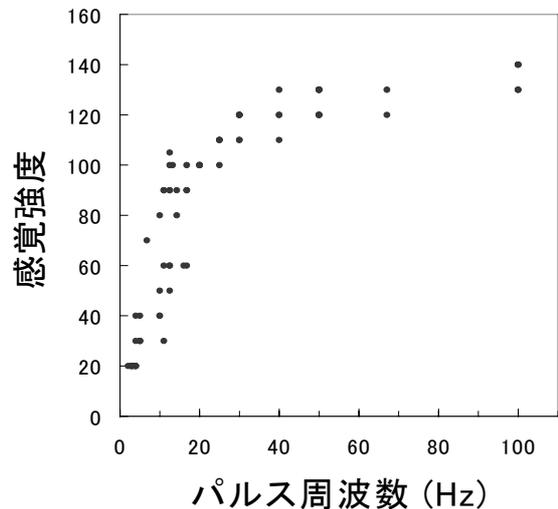


図4: 感覚神経線維への電気刺激パルス周波数と生成される触覚強度の関係

触覚呈示義肢システムの試作

この成果を利用して、触覚呈示義肢システムの試作を行った。このシステムでは義手(木製の模型で代用)表面に触覚センサを装着し、触覚センサからの触覚情報を、上記の研究で求めた刺激パルス-生成感覚強度の関係を利用してリアルタイムで適切な刺激信号に変換して、被験者の感覚神経に入力した。その結果、義手表面に加えられた機械的刺激の変化を、被験者に、自分の手の対応する部位での生成圧覚の変化として呈示することに成功した。

多チャンネル化に関する検討

触覚呈示システムにおいて、より自然な触覚を実現するためには、独立して刺激する神経線維（機械受容ユニット）の本数と種類を増やしていき、刺激ユニットの適切な組み合わせ（時空間的なパターン）を求めることが必要であると考えられる。実際、遅順応型ユニットの単一の刺激によって生成される感覚は、点ではなく直径数mmの円盤状で、かつ刺激の開始と終了の判別が難しい圧感覚が生じている。そこで我々は次に、2個の機械受容ユニットへの同時刺激によって生成される感覚の時間的特性、空間的特性について検討を行った。手技上の問題が原因で（2本の針電極を調整し、2個のユニットに対して同時に、単一ユニット刺激ができるような状態を維持することが難しい）、成功した実験数は少ないものの、これまでのところ、2ユニットの同時刺激においては、我々が期待したような非線形な現象（生成感覚の空間的特性の鋭敏化など）は生じないという結果となっている。

触覚フィードバック機能を備えたロボットハンド遠隔操作システム

これまでの研究成果をふまえ、触覚フィードバック機能を備えたロボットハンド遠隔操作システムの開発を行った。システムは、操作者の把持動作を計測するサイバークロブ、サイバークロブの指令により把持動作を行う多指ハンドシステム、多指ハンドの表面に装着した触覚センサ（感圧ゴム型）、そして触覚神経を直接刺激する微小電極を用いた感覚提示システム、およびこれらをネットワークで接続する各種制御用計算機システムから構成される（図5）。

操作者（駒場リサーチキャンパス）の右手に装着したサイバークロブからの情報によって、遠隔地（本郷キャンパス）のロボットハンドが操作され、ロボットハンドの指表面に装着した触覚センサからの情報は、リアルタイムで上記実験で得られたパルス周波数 - 呈示感覚強度の関係に従って適切な刺激パルスに変換されて、装着者の正中神経内に刺入したタングステン微小針電極によって、単一の感覚神経線維を刺激し、装着者に触覚が呈示された。評価実験の結果、本システムでは、遠隔地のロボットハンドの指表面への機械的刺激が、ある程度の時間遅れを伴いつつも被験者に触覚として呈示可能であることが示された

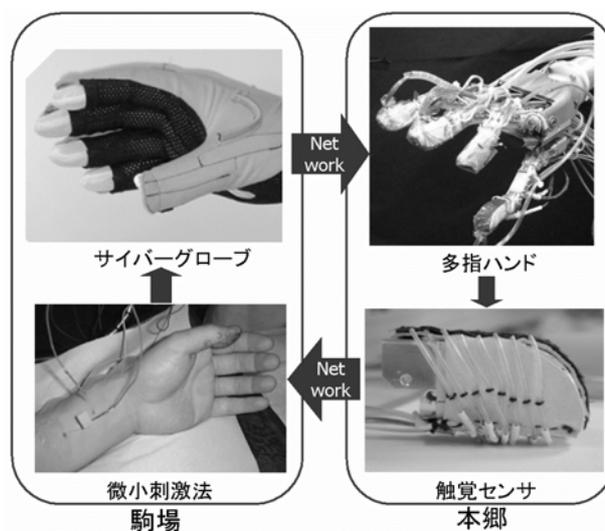


図5：触覚フィードバック機能を備えたロボットハンド遠隔操作システム

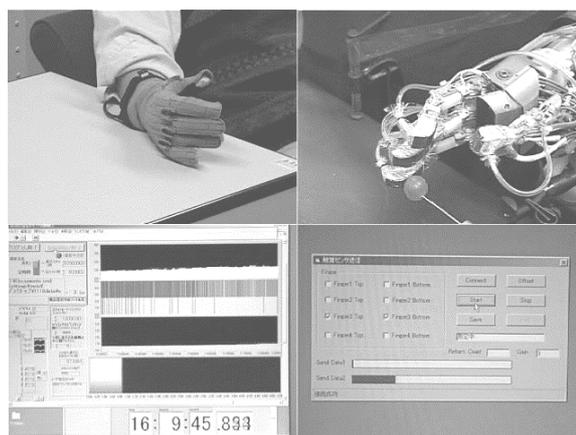


図6：評価実験の様子（左上：被験者右手に装着したサイバークロブ、右上：ロボットハンド、左下：触覚センサ出力が増加[グラフ上段]するに従って、パルス頻度[中段]も増し、被験者の感じた感覚強度[下段]も上昇する。右下：触覚センサの出力）

（図6）。また、物体の把持などの運動も成功することができた。

2 神経インタフェース技術

背景

生体の神経系と外部機器との間で直接の情報入出力を行うことによって、従来不可能とされてきた様々な応用が可能となる。例えば感覚神経に情報を入力することによって、聴覚、視覚などの感覚を人工的に生み出すことが可能であるし、逆

に、運動神経の情報によって義肢を、また、自律神経系の情報によって人工臓器を制御することも可能となる。このような応用を実現するためには、長期間安定して、究極的には個々の神経線維に対して情報の入出力を可能とするデバイスの開発が必要不可欠である。我々は、これまでに、様々な種類の神経電極を開発してきた。その中には、神経束中の多数の神経線維を計測対象とするカフ型の神経電極や、神経束を切断した上で、再生軸索を電極孔に誘導することによって安定した計測を図る神経再生型電極などがある。一方、神経束や大脳皮質に対して多チャンネルの信号計測を目的とする神経電極として、剣山型の電極が提案されているが、従来のものは製法上の問題から、電極針も電極基板も硬い構造であり、柔軟な神経組織の動きに追従できずに、計測対象の神経線維からの「ずれ」や、侵襲の原因となっていた。また剣山を構成する個々の電極針上に多数の計測点を配置するためには、非常に複雑な製造工程をふむ必要があった。これらの問題点を一挙に解決し、低侵襲かつ長期間安定した信号入出力が可能な神経電極を開発するために、柔軟な高分子フィルムを基板とした剣山型の電極を試作したので報告する。

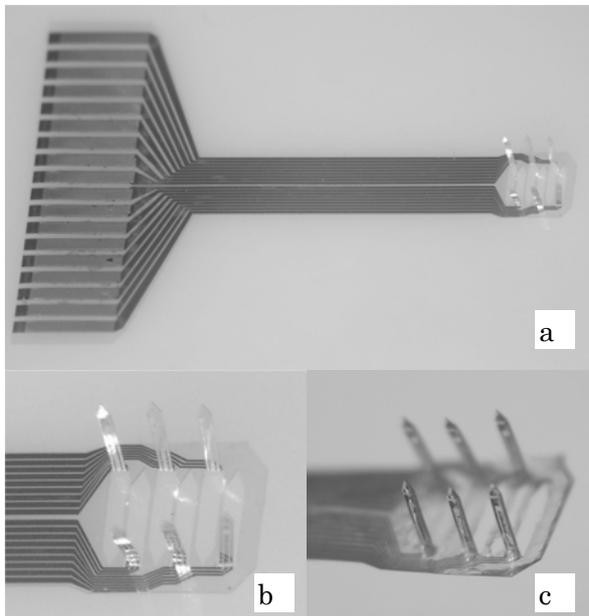


図7：開発したフレキシブル神経電極の写真。各電極針は、長さ1.2 mm、幅160 μm 、であり、3個の計測点(20 \times 20 μm^2)を200 μm 間隔で有する。a) 電極の全体図 b) 先端部の拡大図 c) 刺入のためのPEGコーティング後の写真

柔軟神経電極

この電極は、生体適合性の良好な高分子であるパリレンによって金属配線層を挟み込んだ構造となっており、先端部で電極針（刺入部）を折り曲げるにより、立体的な構造となる。各電極針は3個の計測点(20 μm \times 20 μm)を有している。6本の電極針全体で18個の計測点を有する。この電極針は、長さ1.2mm、幅160 μm 、厚さは10 μm であり、このままでは柔軟性が高すぎ神経束に刺入することができないため、刺入時に、ポリエチレングリコール(PEG)をコートすることによって、強度を一時的に高めて使用する。PEGは生体内で急速に溶解するため、柔軟性はすぐに回復する。電極の写真を図7に、PEGコートによる刺入方法についての概念図を図8に示す。

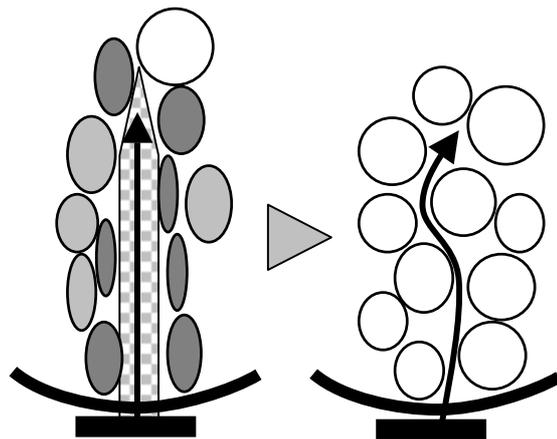


図8：電極刺入方法の概念図。柔軟な電極針にPEGをコートすることによって、刺入に必要な強度を得る。PEGは神経組織内で急速に溶解するため、刺入後すぐに柔軟性を回復する。

3 まとめ・今後の展望

実世界感覚情報の遠隔再構築とその医療応用を実現するためのキーテクノロジーの中で、特に感覚情報の再構築・呈示技術、及び、生体と機械系で情報空間を共有するための神経インタフェース技術について報告を行った。今後、これらの研究を進めるとともに、実世界感覚情報取得のためのセンサ技術とも統合する形で、研究を進めていく予定である。