

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：16201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656172

研究課題名(和文)機能集積化微小気流アレイによる「本物志向の触感覚提示」への挑戦

研究課題名(英文)A challenge to realize multi-functional integrated microfluidic array device for real haptic information display

研究代表者

高尾 英邦 (Takao, Hidekuni)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：40314091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「触覚」と「触感」を同時に複数提示する高次元の触感覚提示技術の実現を目指し、新原理に基づく冷覚提示を含めた各種提示機能を集積化した触感覚再現デバイスの開発に挑戦した。1. マルチジェット型ベンチュリを用いた冷覚提示機構の開発、2. 振動覚提示に向けた圧力回路用バルブ、3. 振動覚発生用流体圧力回路の設計と製作、4. 高次元触感覚提示デバイスの実現、5. 触感覚再現に向けた提示データの体系的取得を目指して研究を推進し、本技術の確立に向けて重要な基盤となる研究成果を得ることができた。本研究を通じて、「触覚」と「触感」を同時提示可能な新しいデバイスの実現に有益な指針を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new technology to display haptic information including "contact force distribution" and "surface texture" has been developed, and integrated device with various tactile display elements such as air-flow jet array and sense of cool display based on a new principle have been fabricated. The detailed topics of the study are as following, 1) Development of sense of cool display based on multi-jet venturi, 2) Microvalve development for pressure circuit for tactile display, 3) Design and fabrication of pressure vibration circuit, 4) Realization of Multi-functional tactile display, 5) Systematic research of tactile sense reproduction. During the project period, various kinds of new technology and devices have been realized. They will be a basic of the new technology to display haptic information including "contact force distribution" and "surface texture".

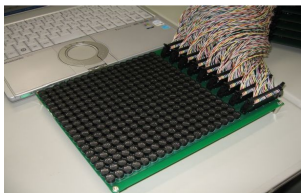
研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロ・ナノメカトロニクス 触覚 ディスプレイ

### 1. 研究開始当初の背景

近年、触覚を通じた機械操作のインターフェース技術が重要性を増している。この触覚インターフェースにおいては、触れた対象の情報を取得する「触覚センサ」が重要である一方、操作している人間に対して触覚を伝える「提示技術」も同等に重要である。今日ある触覚提示技術を大別すると、物体表面の物理形状を提示する「触覚提示」と、手触り感のみを提示する「触感提示」の2つに分類される。図1は代表的な触覚と触感提示機構の先端研究事例である。一方、人間の指先は対象の形状と同時に手触り感を取得して脳へシグナルを送ることから、より本物に近い触覚情報を再現するには、「触覚」と「触感」の双方を含む「触感覚」として同時に提示される必要がある。また、指先で無意識に行なっている材質判別(金属、プラスチック等の識別)には、「ひんやり」した感覚として指先の冷覚を刺激することが、目指す高い次元の触感覚再現で重要な役割を果たすと考えられる。触覚と触感の同時提示が可能なディスプレイ技術は今日も未だ実現されておらず、実物同様の触感覚の再生を指先で試みるためには、ハードウェアを含む新しい提示機構の実現が急がれる。また、手触り再現で重要な効果的「冷覚」提示についても、現状で十分な技術が存在していないことから、新規の開発が必要である。



(a) 超音波力覚提示 (東大)



(b) ゲルによる触感提示 (東北大)

図1 「触覚・触感提示」の先端的研究事例

### 2. 研究の目的

本研究では、力覚を中心とする従来の触覚提示技術の限界を打破すべく、指先の力覚と同時に冷覚・振動覚・温覚を刺激可能な複合型の高機能触覚提示デバイス実現を目的とする。触覚提示のための情報伝達媒体として、「圧力」、「振動」、「温暖」、「冷却」の情報を同時に伝達可能な空気流に着目し、これらを精密に制御して高密度で噴射可能な微小ノズルアレイを形成する。特に、人間が物を触るときに利用する「冷覚」と「振動」の同時提示を可能とすることで、対象の材質や表面性状を綿密に表現可能な「本物を志向する触覚再現機能」を世界で初めて実現する。「凸凹」「ざらざら」などの物理性状に「ひんや

り」「しっとり」などの温度質感を加えた、新しい触覚提示の世界を創出することで、各種の新規応用に対する可能性の扉が開かれるものと期待される。

本研究では、「触覚」と「触感」を同時に複数提示する高次元の触覚提示技術の実現を目指し、新しい原理に基づく冷覚提示を含めた各種提示機能を集積化した触覚再現デバイスの開発に挑戦する。従来にない複合多次元の触覚情報を提示可能とすることで、これまで未開拓の新しい触覚提示の領域へ踏み込み、体系的に評価した実験結果から、提示に有効な技術的指針を得る。

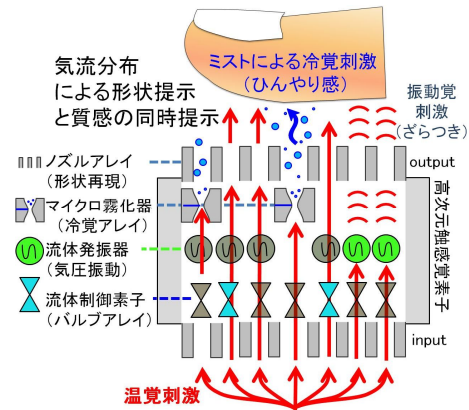


図2 高密度気流による触覚再現

図2は、本研究で実現する高次元触覚再生デバイスの概念である。MEMS技術で高密度に集積化された気流変調ノズル機構を利用し、各ノズルの気流を伝達媒体として、形状(圧覚)、粗さ(振動覚)、表面温度(温覚)、熱伝導率(冷覚)の空間分布を生成する。各情報を気流に重ね合わせて指先表面に提示し、「高次元の触覚」を再現する。指先が有する触覚受容器を全種類同時に刺激可能な触覚提示技術は現存しておらず、本分野の研究に新しい境地を切り開くものと期待される。また、本研究では冷覚提示にベンチュリで生成した微小ミストの気化冷却を提案しており、効果的な微小領域の冷却を実現する。空解像力の高い局所冷却実現は、超精密加工やバイオ技術など、多方面分野への展開も期待できる。

### 3. 研究の方法

本研究では、本物志向の高次元触覚再生を目指している。空気流を情報伝達媒体として触覚の多次元同時提示を行うという前例のないコンセプトを提案し、それを実現するためのデバイス機構を独自に開発する。この誰にも試されたことのないアイデアを創出し、実験で検証し、それらをバランスよく組み合わせる統合化システムに作り上げる必要がある。これは複雑な問題のパズル全体に含まれるピース(要素)を一つ一つゼロから作り上げるような研究であり、当然、多くの困難と失敗も予想される。提示情報の伝達媒体である各気流に対して 1.力覚を刺激

するための気流圧の制御（流速の制御）、2. 振動覚を刺激するための気流振動（圧力振動生成）、3. 温覚を刺激するための気流の高速温度制御（温調機構）、4. 冷覚を刺激するための気体冷却機構（液体ミスト生成）を各微細ノズル内に高密度で集積化する。

本研究は2年間の計画である。初年度（平成24年度）においては、高次元触感覚提示に必要となる各種触覚受容器の刺激要素で特に重要な「冷覚」と「振動覚」提示の流体アクチュエータ技術を確立する。一体形成が可能な製作工程を用いて、独立した触覚提示要素としての機能性と性能を満たす水準のデバイス実現を目標とする。開始次年度（平成25年度）においては、確立された各触覚提示要素を統合化するシステム化の研究を行い、高次元触感覚提示が可能な集積化デバイスの実現を行う。その後、実現したデバイスを用いて、複合的な情報提示による触感覚の再現について、様々な角度から提示情報データを取得して、進むべき開発方向の指針を得る。具体的な研究項目は以下ようになる。

#### (1) マルチジェット型ベンチュリを用いた冷覚提示機構の開発

これまで、我々の研究で、ベンチュリ効果を用いたマイクロミスト生成機構が高い表面冷却能力を示すことが明らかとなった。一方、高次元触感覚提示における冷覚刺激を実現する上では、様々な流速に変化する気流に対して、気化による冷却効果を一定に保つ必要性が生じてくる。そこで、揮発性（冷却効果）の異なる複数の液体を適宜混合可能なマルチジェット型ベンチュリ霧化器の開発を行い、力覚提示と独立したパラメータとして冷却効果の制御が可能な機構を新たに実現する。また、複数の液体混合比を変化させることで、冷却効果を連続可変する。H24年度にはベンチュリにおける液体混合比の連続制御機構を新規に開発することで、冷却能力を気流速と独立して制御可能な冷覚提示機構を実現する。

#### (2) 振動覚提示に向けた圧力回路用バルブ

気流の振動を用いた振動覚提示の実現に向けて、我々が開発した圧力増幅回路の利得と負性抵抗特性を活用した不安定回路を形成し、圧力発振回路を実現する。これまでの研究で、可動部の寸法を変化させれば、流体の出力抵抗を「正」から「負」へと自在に変化できることを見いだした。圧力発振器の確実な実現に向けて、負性抵抗性を示すマイクロバルブの安定的な形成条件と、その設計技術を確立してゆく。

#### (3) 振動覚発生用流体圧力回路の設計と製作

トランジスタ型マイクロバルブの集積化が進み、回路規模が大きくなるに伴い、発振回路を含む空気圧集積回路の設計が困難と

なる。また、流路をアレイ状にして複数の流体発振機を組み合わせるためには、それぞれの回路の干渉を考慮した大規模な回路設計を実施する必要性が生じてくる。そこで、大規模化に強い半導体集積回路の設計環境を空気圧力集積回路設計に活用する。構築した設計環境を用い、バルブの負性抵抗を用いた流体圧力回路を設計・製作する。

#### (4) 高次元触感覚提示デバイスの実現

「冷覚」「振動覚」提示要素に加えて、「温覚（ヒーター加熱）」と「力覚（流量制御）」の機能をすべて統合化した高次元の触感覚提示デバイスを実現する。その設計においては、気流速の変化に伴う必要加熱量や圧力振動振幅の変化など、考慮が難しい問題も含まれている。理論計算と実験の比較による試行錯誤を繰り返しながら、適切な能力を組み合わせた多次元の提示機構を集積化してゆく。研究期間2年目においては、流路ごとに圧力発振回路やヒータ機構、流量制御用マイクロバルブを組み合わせた高密度集積化デバイスとして実現する。

#### (5) 触感覚再現に向けた提示データの体系的取得

形成された集積化デバイスにより、各触覚要素をほぼ独立に制御した触感覚情報提示が可能となる。各要素の影響量を連続的に変化させ、それぞれの独立要素が指先の感覚に与える効果、また、それぞれを独立に与えた場合と組み合わせた場合の感じ取り方の違いなど、これまでの触覚提示技術では検証が不可能であった領域の検証を実施する。各種刺激の同時提示により、これまでになかった本物志向の触感覚実現に向けた提示技術の開発指針を得ることを目標とする。

### 4. 研究成果

#### (1) マルチジェット型ベンチュリを用いた冷覚提示機構の開発

微小領域の局所冷却において、ベンチュリ効果を用いたマイクロミスト生成機構が高い表面冷却能力を示す。高次元触感覚提示における冷覚刺激を実現する上では、様々な流速に変化する気流に対して、気化による冷却効果を一定に保つ必要性が生じてくる。そこで、揮発性（冷却効果）の異なる複数の液体を適宜混合可能なマルチジェット型ベンチュリ霧化器の開発を行い、力覚提示と独立したパラメータとして冷却効果の制御が可能な機構を新たに実現した。図3は実現したマルチジェット型のベンチュリを動作させている様子である。3種類の液体を気体とともに流路内で混合し、射出することに成功した。製作したマルチジェット型ベンチュリは、複数の流体を一つの微小流路内で良好に混合噴霧できる可能性を示した。また、複数の液体混合比を変化させることで、冷却効果



を連続可変できることを実験で示した。液体混合比の連続制御機構を新規に開発することで、冷却能力を気流速と独立して制御可能な冷覚提示機構を実現した。

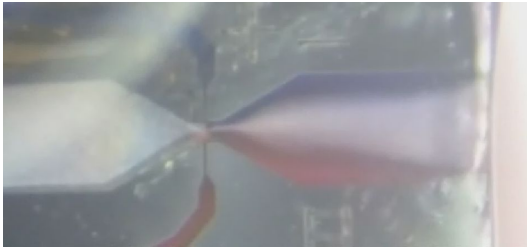


図3 3種類の液体を混合噴霧可能なマイクロベンチュリの動作

### (2) 振動覚提示に向けた圧力回路用バルブ

気流振動を用いた指先への振動覚提示機構の実現に向けて、圧力発振に応用できる微小バルブ構造の設計と試作を行った。圧力発振器の確実な実現に向けて、大変位駆動と単純な製作工程の両立が可能な新しいスライド型バルブ駆動を提案し、人間の振動覚刺激に十分な速度で追従できるマイクロバルブの形成条件と、その設計について検討を実施した。その結果、並行駆動型で十分な駆動速度を確保できるマイクロバルブの試作に成功し、良好な流量変調特性を実測によって確認することができた。図4は実現したバルブの写真である。

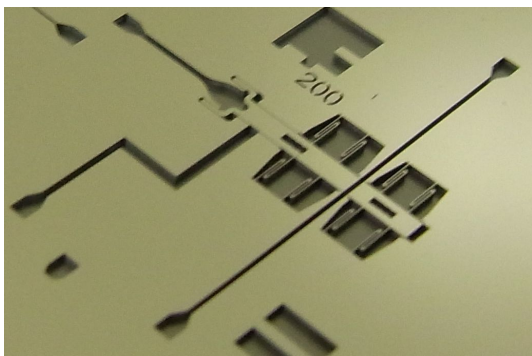
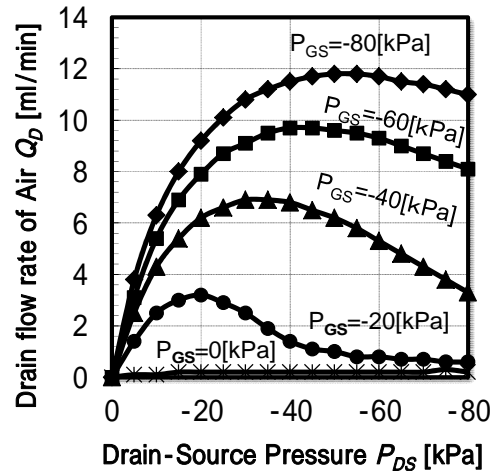


図4 実現したスライド型マイクロバルブ

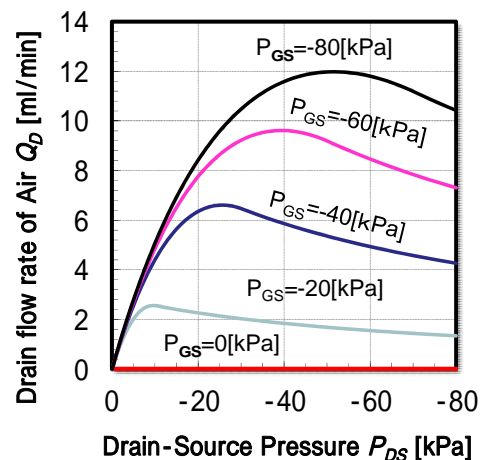
### (3) 振動覚発生用流体圧力回路の設計と製作

本研究において、空気圧力集積回路設計に電子回路シミュレータを活用する技術を確認した。具体的には、電圧を気圧、電流を気流として考え、バルブのリークを含めたモデルをMOSFETのSPICEモデルをベースとして構築し、SPICEをベースとする回路シミュレータ上でのバルブ動作、ならびに、複数のバルブを組み合わせた流体回路の動作検証を進めた。図5a,bはそれぞれ、実測されたバルブの流量制御特性と、電子素子になぞらえたモデル解析の結果である。非常に精度良く流量特性をモデリングすることに成功しており、本モデルを用いて精密な圧力回路の動

作特性解析を行うことができた。



(a) バルブの流量特性実測結果



(b) バルブのSPICEモデル

図5 バルブの実測特性と計算機モデル

本技術を用いて、複数のバルブを組み合わせた回路の圧力伝達特性の解析を行うことができ、製作した回路の圧力伝達特性評価結果との高い一致を得られることが確認できた。本技術を適用し、種々の圧力生成回路実現につなげる見通しが得られた。

### (4) 高次元触覚提示デバイスの実現

これまで開発した「冷覚」「圧力」分布の提示要素をすべて統合化した高次元の触覚提示デバイスを実現した。提示に適切な能力を有する提示機構を集積化し、ベンチュリアレイとノズルアレイを複数組み合わせたアレイ状デバイスの形で形成した。形成された集積化デバイスにより、各触覚要素をほぼ独立に制御した触覚情報提示が可能となった。流量分布を連続的に変化させ、それぞれの独立要素が指先に与える力分布や独立して制御可能な空間的解像度を評価した結果、流路ピッチと同様の800ミクロンピッチでの圧力分布提示が可能であった。図6は水

面に圧力分布を提示した実験の様子であり、精密な力覚分布を提示できている様子が示されている。

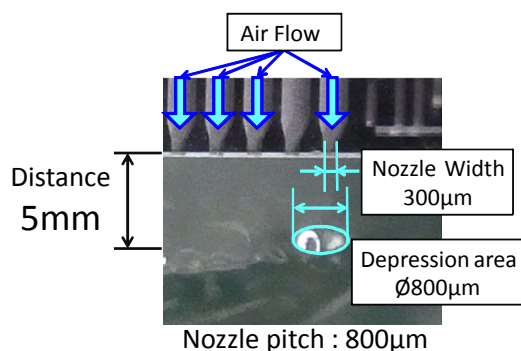


図6 水面への力覚提示実験

また、さらなる素子の微細加工を進めて、最終的には320ミクロンまで提示間隔を精細化した。圧覚に加えて、冷覚と温覚の同時刺激を実現したことで、これまで評価されていなかった触感覚提示の評価が可能になったといえる。また、これまでに開発したマルチジェットベンチュリを集積した高次元触感覚提示デバイスを製作し、複合触覚の同時提示実験を行うことができた。

#### (5) 触感覚再現に向けた提示データの体系的取得

製作した高次元触感覚提示デバイスにより、力覚と冷覚の同時提示実験を行った。その結果、微小な突起形状と冷却材の同時提示は、材質感を伴う新しい感覚を覚えるという被験者からの意見などが得られた。本デバイスを用いて、様々な提示条件に対する被験者多数の意見をもとにして分析を重ねることで、新しい触感覚提示の可能性が追求できるとの見通しを得ることができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

H. Yamasaki, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, H. Takao, Patternable Atmospheric-Pressure Plasma Jets with Gas Discharge in Microfluidic Channel Array, Proceedings of The 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS2013), pp. 205-208, 2013.

〔学会発表〕(計7件)

山崎秀貴・寺尾京平・鈴木孝明・下川房男・高尾英邦, 320µm ピッチの流路を有するシリコン大気圧プラズマアレイデバイス, 平成26年電気学会全国大会, 愛媛大学, 2014年3月18日~3月20日

Hidekuni Takao, Patternable Atmospheric-Pressure Plasma Jet Array Generated by an Integrated Microfluidic Device, 6th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2014), 名城大学, 2014年3月03日~3月05日

Hidekuni Takao, Integrated Silicon MEMS Technology and Novel Functional Sensor Devices, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2013), シェラトン札幌, 2013年11月05日~11月08日

岡勇作, 篠崎亮輔, 寺尾京平, 鈴木孝明, 下川房男, 高尾英邦, 可動 MEMS デバイスへの光学素子垂直自動アライメント技術, 平成25年電気学会全国大会, 名古屋大学, 2013年03月20日~2013年03月22日

山崎秀貴, 寺尾京平, 鈴木孝明, 下川房男, 高尾英邦, 微小流路内放電を用いる MEMS 大気圧プラズマアレイデバイス, 第29回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 北九州国際会議場, 2012年10月22日~10月24日

荒井将崇, 寺尾京平, 鈴木孝明, 下川房男, 大平文和, 高尾英邦, 混合噴射機能を持つマルチジェット型ベンチュリ噴霧器と力覚・冷覚複合提示ディスプレイへの応用, 第29回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 北九州国際会議場, 2012年10月22日~10月24日

高尾英邦, 大平文和, 新機能創出にむけた集積化シリコン MEMS 技術とその応用, 第30回レーザセンシングシンポジウム, オリビアン小豆島, 2012年09月06日~09月07日

〔図書〕(計1件)

高尾英邦, 異種機能集積化ハンドブック 第14章 集積化 MEMS センサ実現のための回路設計, CMC 出版, 2012年

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

高尾 英邦 (TAKAO Hidekuni)

香川大学・工学部・教授

研究者番号: 40314091

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

