

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成24年 3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2011

課題番号：23650099

研究課題名（和文） ピコスケールハプティクスがもたらす超微細行動空間

研究課題名（英文） Hyperfine Action Space by Pico-Scale Haptics

研究代表者

桂 誠一郎（KATSURA SEIICHIRO）

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：00401779

研究成果の概要（和文）：

本研究では、実世界空間と超微細行動空間を結ぶ界面となるピコスケールハプティクス技術の開発を行った。この中で、身体性拡張の根幹技術であるバイラテラル制御技術に基づき、超微細行動空間から力覚を呈示するピコスケールハプティック呈示システムの開発に世界で初めて成功した。特に、ピコスケールでの力覚センシングについて超高分解能エンコーダによる加速度センシングを基本とした力覚センサレス手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

This research develops pico-scale haptic technology which is the interface between real-world space and hyperfine action space. We have succeeded in realization of pico-scale haptic representation which has force feedback ability from the hyperfine action space based on bilateral control technique which is the fundamental of physical extension. Especially, pico-scale force sensing method has been developed based on acceleration sensing by an ultrahigh-resolution encoder.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：ハプティクス，感覚行動システム，行動空間，ピコスケールサーボ

電機統合システム，双対性，システムエネルギー変換，バイラテラル制御

1. 研究開始当初の背景

現在、遠隔地からの触覚情報を伝達する研究は世界中で行われており、World Haptics や Haptic Symposium といったハプティクス（触覚学）関連の国際会議の開催数も近年急増している。しかしながら、多くの研究は遠隔地の状況がシミュレートされるバーチャルリアリティ技術に止まっており、実世界における触覚伝送については実現されていない。これは触覚情報が実世界における「作用・反作用の法則」に支配される双方向性を有する感覚情報であるため、聴覚や視覚と異なり再現に遅れを許さないからである。

双方向性を有する感覚情報の再現には、双対性を有する2つのパラメータを同時に伝送して制御する必要がある。特に触覚の場合は位置と力を同時に制御する必要があるが、従来研究の多くがインピーダンス制御を導入した手法に止まっていた。このような手法では位置と力を理想的な状態を実現することは不可能であり、双方が妥協された状態で再現されるため、結果として触覚再現の精度が低下していた。

このような背景の下で、研究代表者はこれまでの研究において、直交座標変換を導入することにより双対性を有する位置と力を理想的な状態で制御できることを明らかにしており、実世界ハプティクス基盤の開発に成功している。

実世界ハプティクスは遠隔地に鋭敏な触覚情報を伝送することを可能にする基本技術であるが、近接距離に置かれたマスタースレーブシステムにスケーリング付きの制御を導入すれば、人間が通常行うことができないような微細作業を実現することが可能になる。微細作業支援を行うための力覚フィードバックは、超精密加工を行う生産加工分野のみならず、脳外科のような外科医療分野からも実現の要望が多く上がっている。

研究代表者はこれまでに、実世界ハプティクス技術を微細作業支援に応用する際に、アクチュエータ駆動のためのエネルギー変換部の周波数帯域が高性能実現において決定的な役割を果たすことを明らかにしてきた。特に、外乱オブザーバに基づく構成により、鋭敏な力覚の再現に不可欠な広帯域情報の抽出（DC～10 kHz）と再現（DC～1 kHz）に成功している。さらなる超微細行動空間基盤の構築のためには、これに特化したまったく新しいシステムエネルギー変換技術が必要不可欠であるとの認識に達しており、本研究提案の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究は、研究代表者の実世界ハプティクスに基づいた微細触覚再現に関する研究を踏まえ、人間行動空間と超微細行動空間のインタフェースとなる世界初のピコスケールハプティクス基盤を構築することを目的として行われた。具体的には、1年間の研究期間において、ピコスケールハプティクスに特化したロボットシステムの設計方法論の確立ならびに、超微細行動空間からの力覚フィードバックの基本原理の導出を目的に行われた。さらに、試作したピコスケールハプティック呈示システムを用いて微生物や微粒子のマニピュレーション試験を行い、超微細行動に必要な力覚フィードバック性能を操作性および触覚再現性の観点から評価を行った。

3. 研究の方法

(1) 方法の概要

研究代表者は、これまでに受けた科研費の成果により、図1に示すように顕微鏡下において砂糖一粒を掴んだ感触をスケーリングして手元にフィードバックすることに世界で初めて成功している。開発したシステムは微小のリニアモータをピンセットの駆動部に導入することにより、力覚の再現を可能にしている。また10 nmの分解能での位置計測を行っており、マイクロオーダーでの力覚センシングが可能になっている。



図1 開発に成功したマイクロハプティクスによる砂糖一粒の把持動作

本研究では、実世界ハプティクスの根幹技術であるバイラテラルコントロール技術に基づき、図2のように超微細行動空間からの力覚を呈示するピコスケールハプティック呈示システムの開発を行った。

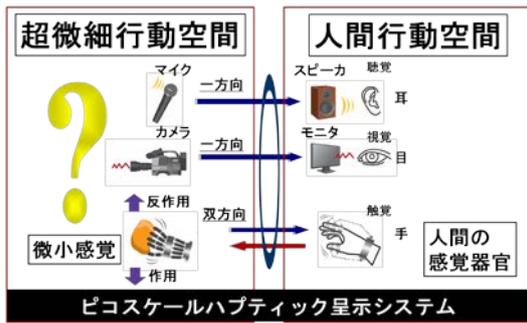


図2 人間行動空間と超微細行動空間のインタフェース

図3に示すように、人間行動空間は実世界における「作用・反作用の法則」に支配されているため、作業の微細化には限界がある。バイラテラルコントロール技術を用いることにより、作用・反作用間にスケーリングを導入することが可能になる。

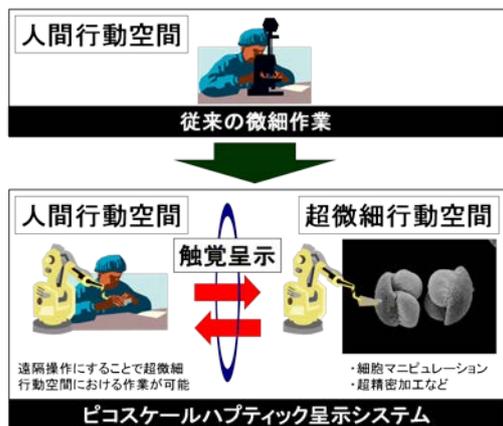


図3 バイラテラルコントロール技術により実現される作用・反作用スケーリング

超微細な力覚フィードバックの実現には、これまでの設計論とはまったく異なるアクチュエータ設計技術、高性能サーボ技術およびロボットシステムとしての統合理論が必要不可欠であることを明らかにしており、本研究ではピコスケールサーボのための新しい設計方法論について検討を行った。特に、ピコスケールでの力覚センシングは超高分解能エンコーダによる加速度センシングを基本とした力覚センサレス手法を新たに開発する必要があるため、アクチュエーション技術、モーションコントロール技術、システム化技術までに亘る総合デザイン手法について研究を展開した。

(2) 年度ごとの研究方法

本研究では、平成23年度において以下の3つの研究項目について遂行した。

① ピコスケール力覚センシング技術の開発

ピコスケールサーボの実現にあたっては、いかに精度良くサーボ情報を取得できるかが鍵になる。本研究では、まず研究の第一ステップとして世界最高レベルのピコスケール力覚センシング技術を開発した。研究代表者はこれまでにオブザーバ理論に基づいて力覚センサレスでの超広帯域な力覚検出を行うための基本原理を明らかにしてきた。このオブザーバベースのセンサレス力覚検出手法はモータへの指令電流と加速度変化に基づいて力覚センシングを行うため、加速度計測がその精度に大きく影響を与えることとなる。

本研究では、ピコスケールの加速度変化を抽出するために、31ピコメートルクラスの分解能を持つリニアエンコーダとコアレス・コギングレスのリニアアクチュエータを用いたシステムを構成した。特に、ピコレベルの信号を抽出するため、S/N比向上を行うための信号処理に格段の配慮をするとともに、得られた力覚情報の分解能や周波数特性の観点から評価を行った。

② ピコスケールハプティック呈示システムの開発

鋭敏な力覚呈示を実現するためには、広帯域かつ低遅延なデジタル制御系が必要であることは既に示されているものの、従来のリアルタイムシステムでは必要な帯域が得られず、ピコスケールハプティクスに適用することが困難である。特に、ピコスケールのエンコーダ情報の取得にはギガヘルツオーダーでの信号処理が不可欠であり、専用ハードウェアによる制御演算処理の高速化が必要である。専用ハードウェアを構築することにより、無駄なプロトコル変換部を省くことができ、処理遅延を低減できる。また、制御演算の並列度の向上による高速化も期待できる。

このように、アクチュエーションからオブザーバに基づいた制御系設計、さらにはその実装までを含む総合デザインにより、世界初となるピコスケールハプティック呈示システムの開発を行った。

③ 超微細マニピュレーションの試験・評価

試作したピコスケールハプティック呈示システムにより、超微細マニピュレーション試験を行い、人間行動空間と超微細行動空間の結合性を操作性及び力覚再現性の観点から評価を行った。特に、力覚伝達スケーリングを導入し、人間行動空間・超微細行動空間に対して双方向のインタラクションをリアルタイムに提供可能なシステムを構築した。

以上のように、本研究により人間行動空間と超微細行動空間とをハプティック呈示システムにより双方向結合することで、人類は超微細行動空間という新たな行動空間を手に入れることが可能になる。このインパクトを世界に発信するために国際会議での成果発表を行い、本研究の意義と成果を広く社会に配信し、共有する機会を創出した。

4. 研究成果

本研究では、実世界空間と超微細行動空間を結ぶ界面となるピコスケールハプティクス技術の開発を行った。この中で、身体性拡張の根幹技術であるバイラテラルコントロール技術に基づき、超微細行動空間から力覚を呈示するピコスケールハプティック呈示システムの開発に世界で初めて成功した。超微細な力覚フィードバックの実現のため、本研究においてピコスケールサーボに特化した新しい設計方法論について検討を行った。特に、ピコスケールでの力覚センシングは超高分解能エンコーダによる加速度センシングを基本とした力覚センサレス手法の開発について新たに開発を行った。

(1) ピコスケール力覚センシング技術の開発

本研究では、ハプティックシステムのピコスケールでの加速度変化を抽出するために、図4に示すようなシステムを開発した。位置の計測には31.25ピコメートルの超高分解能を持つリニアエンコーダを用いた。またアクチュエータ部にコアレス・コギングレスのリニアアクチュエータを採用し、ピコスケール力覚センシングを実装した。開発したシステムは機構にも配慮を行っており、空気軸受けを使用することで駆動部の摩擦を極力減らしている。

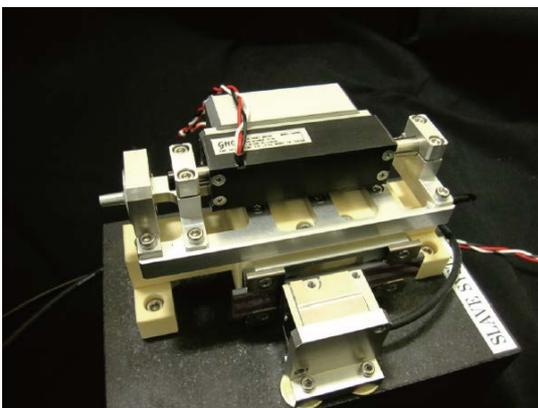


図4 開発したピコスケール力覚センシングシステム

(2) ピコスケールハプティック呈示システムの開発

ピコスケールのエンコーダ情報の取得には高速な信号処理技術が不可欠であり、専用ハードウェアによる制御演算処理も含めた高速化が必要である。本開発システムのエンコーダは512nmの信号をインタフェースユニットにおいて16,384分割処理して超高分解能の情報に変換しているため、シリアル通信を介して取得する必要がある。そのため、図5に示すような専用の制御システムを新たに構築することにより、信号処理の高速化ならびに高分解能のセンサデータの処理に基づいたピコスケール制御系を実現した。

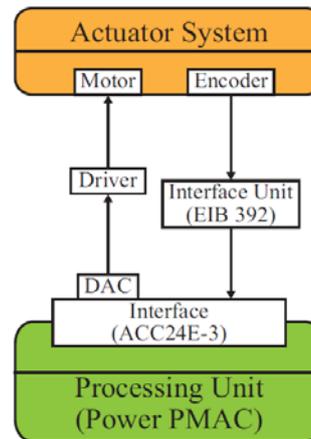


図5 ピコスケールハプティック呈示システム用制御システムの構成図

(3) 微細マニピュレーション試験

本研究で開発したピコスケールハプティック呈示システムを用い、原子間力顕微鏡等で行われている表面走査の試験を行った。試料として紙やすり(図6)とアルミ板(図7)を用いた。

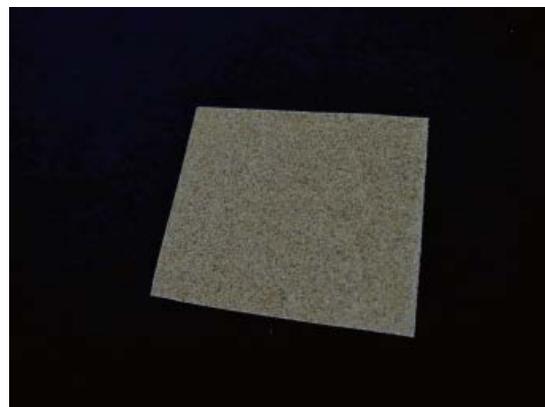


図6 表面走査試験に用いた試料(紙やすり)



図7 表面走査試験に用いた試料（アルミ板）

試料の表面を走査した際の力覚情報はハプトグラフを用いて可視化し、比較を行った。ハプトグラフは「ハプト」（ギリシャ語で「触る」の意味）と「グラフ」（図）を結合させた新しい概念であり、抽出された触覚データの定量的な評価ならびに直感的な呈示を可能にしている。ウェーブレット変換に基づいて周波数解析を行いハプトグラフに変換したものをそれぞれ図8、図9に示す。

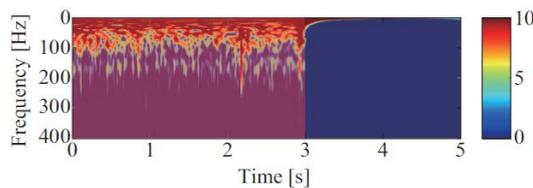


図8 紙やすりをなぞった際のハプトグラフ

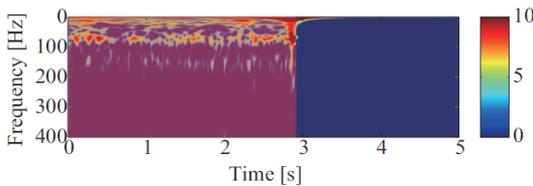


図9 アルミ板をなぞった際のハプトグラフ

図8、図9ともに横軸に時間を縦軸に周波数を取り、色が青から赤に変わるほど力が大きく加えられていることを示している。図8および図9より、接触環境が変わることで、ハプトグラフの表示のされ方に違いがあることが確認できる。具体的には、紙やすりの場合は触覚データに低周波成分が多く含まれているのに対し、アルミ板の場合は80 Hz付近に特徴的な周波数が含まれていることが確認された。

このように、本開発システムを用いた表面走査試験より、微細環境における接触動作の解析が可能になることを確認した。

(4) 接触環境情報の再構築手法の開発

本研究では、得られた微細環境における接触環境情報をデジタルデータとして保存し、メディアとして共有するために必要となる空間マッピング手法についても新たに開発を行った。

① 分布定数モデルによる再構築手法

従来の研究では、主に接触環境情報の取り扱いについては集中定数系で解析を行ってきたが、微細環境のモデルへと拡張することが困難であることが指摘されている。本研究では分布定数理論に基づき、無限次数で表現される接触環境情報の再構築手法について検討を行った。分布定数モデルは無限個の質量がバネ要素とダンパ要素で結合されたモデルであり、環境情報の特徴を正確に記述することが可能である。

② 論理モデルによる再構築手法

上記の分布定数モデルを用いることで、接触環境の精密なモデル化は達成されるが、入力に対して受動的な応答しか返すことができない。そこで、論理記述を含む接触環境情報の再構築手法についても検討を行った。

図10に構築した論理モデルによる接触環境のモデル化の一例を示す。ここでは、弾性変形(S1)から塑性変形(S2)、破壊(S3)と入力の状況に応じて環境が変化する様子をグラフ理論の有向グラフを用いて記述している。アクチュエータの位置 x_M が環境位置 x_{env} より押し込んだ場合に塑性変形が起きるとし、運動エネルギー U が限界値 U_{env} を超えると破壊が起きるとしている。また塑性変形中は入力方向の正負や変形後の環境位置 x_a より外側か内側かについても判定を行うことで、実際の現象に近い形で接触環境情報を保存することが可能である。

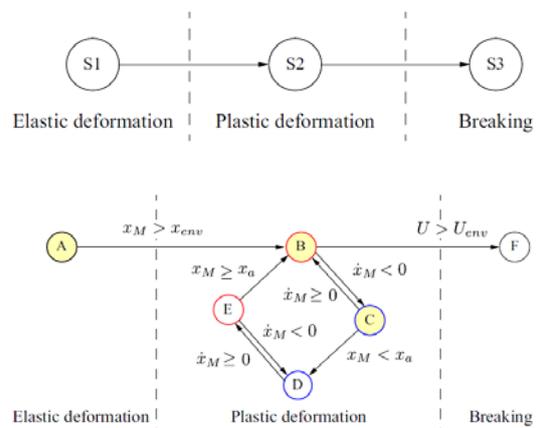


図10 論理モデルによる接触環境のモデル化

(5) まとめ

本研究では、前人未到となる超微細行動空間からの力覚フィードバックを力センサレスで実現するという研究提案を行っており、基本原理となるピコスケールサーボ原理が与える学術面、技術面でのインパクトは非常に大きい。上記の研究成果は2件の査読付き論文に結実するとともに、3件の学会発表を行い、成果の普及に努めた。

今後は、図11に示すような超微細作業を支援するコクピットを実現することにより、革新的医療技術の開発による人間のQOL向上や生産技術分野における超ナノレベルでの加工技術の開発も期待できる。究極的には、原子一粒を手でつまんで操作することが可能になると考えられ、デバイス分野や材料分野といった他の学問領域におけるブレークスルーも期待でき、波及効果も計り知れない。また本研究の成果を多自由度系に拡張することにより図12に示すような超微細行動空間という新しい行動空間を手に入れることが可能になり、ピコスケールハプティクスを核とした巨大な産業が立ち上がる可能性も予想できる。



図11 超微細マニピュレーションの実現

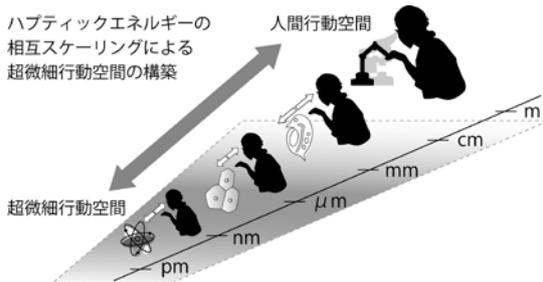


図12 超微細行動空間の獲得

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2件)

- (1) Hiroyuki Nagai, Seiichiro Katsura:
“Positive Feedback of Reaction Force

for Environmental Embedded Haptic System,”

The 12th International Workshop on Advanced Motion Control, AMC2012-SARAJEVO, March 25-27, 2012. (査読有)

- (2) Takuma Shimoichi, Seiichiro Katsura:
“Identification and Compensation of Disturbance for Real-World Haptics,”
The 12th International Workshop on Advanced Motion Control, AMC2012-SARAJEVO, March 25-27, 2012. (査読有)

[学会発表] (計3件)

- (1) 永井 裕之, 下市 拓真, 桂 誠一郎:
“バイラテラル制御における伝達性の解析”,
第54回自動制御連合講演会, No. 2G302, pp. 1328-1331, 11月19-20日, 2011.
発表場所: 豊橋
発表日: 2011年11月20日

- (2) Hiroyuki Nagai, Seiichiro Katsura:
“Evaluation System of Rubbing Motion Using a Haptic System,”
電気学会産業計測制御研究会, IIC-12-159, Vol. 8, pp. 19-24, 3月6-7日, 2012.
発表場所: 横浜
発表日: 2012年3月7日

- (3) 永井 裕之, 桂 誠一郎:
“ピコスケールハプティクスのためのハプティックシステムの構築”,
平成24年電気学会全国大会, Vol. 4, pp. 366-367, 3月21-23日, 2012.
発表場所: 広島
発表日: 2012年3月22日

[その他]

ホームページ

<http://www.katsura.sd.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
桂 誠一郎 (KATSURA SEIICHIRO)
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号: 00401779

- (2) 研究分担者
該当なし

- (3) 連携研究者
該当なし