

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686037

研究課題名(和文) 多自由度システムエネルギー変換に基づく超微細行動空間基盤の構築

研究課題名(英文) Development of Ultrafine Action Space Based on Multi-Degree-of-Freedom Systems-Energy Conversion

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、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多自由度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、加速度ベースバイラテラル制御の性能を最大限に発揮するためのハードウェア・ソフトウェア統合技術の開発を行った。このピコスケールハプティクス技術基盤により、カスケーリング、位置スケーリングをそれぞれ10万倍まで増大させたマクロ・マイクロバイラテラル制御を達成することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Goal of this research was to develop fundamentals of multi-degree-of-freedom pico-scale haptics that is the interface between human-action space and ultrafine-action space. In particular, we developed an integration technology of the hardware and software to obtain the maximum performance of an acceleration-based bilateral control. As a result, macro-micro bilateral control with hundred-thousandfold scaling for both force and position was achieved by the pico-scale haptics fundamentals.

研究分野：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：システムエネルギー変換 電気機器工学 ハプティクス モーションコントロール 電機統合システム  
力触覚

1. 研究開始当初の背景

実世界の力触覚を伝送する技術はハプティクスとして発展を遂げている。特に加速度ベースのバイラテラル制御により、透明性の高い力触覚伝送が可能になることが明らかにされている。これは、遠隔地で作用-反作用を再現するための力制御とマスタースレーブの同期を取るための速度制御を理想的な状態で統合することが可能であるからに他ならない。

このように、ハプティクスは遠隔地に力触覚を伝送するための基本技術であるが、近接距離に置かれたマスタースレーブにスケールリング付きのバイラテラル制御を導入すれば、人間が通常行うことができないような微細作業を支援することが可能になる。微細作業下での力触覚再現は超精密加工のための生産分野や医療分野などへの応用が期待されている。

しかしながら、実際にバイラテラル制御に高いスケールリングを導入する際には、信号とノイズの切り分けが問題となっていた。特に摩擦によるノイズの除去には信号処理系のみならず、機構面、電力変換器を含めた統合デザインが必要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、実世界ハプティクスの基本技術であるバイラテラル制御に関する研究を応用し、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多自由度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。具体的には図1に示すように、3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システムエネルギー変換技術の検討を行い、超微細行動空間からの力触覚フィードバックのための総合デザイン方法論の導出を目指して研究を推進した。さらに、ピコスケールハプティックシステムの試作機を用いた微粒子、微生物のマニピュレーション試験ならびに、金属表面の微細な凹凸を判定するなぞり試験を行い、超微細行動に必要な力触覚フィードバック性能について検証を行った。

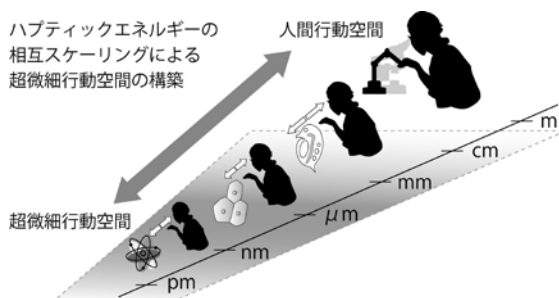


図1 多自由度ピコスケールハプティクスがもたらす超微細行動空間

3. 研究の方法

(1) 平成24年度

① ピコスケールシステムエネルギー変換技術の検討

研究の第一ステップとして、ピコスケールシステムエネルギー変換技術の検討を行った。本研究では、これまでに開発したオブザーバに基づく超広帯域なシステムエネルギー変換をピコスケールへと拡張するために、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・コギングレスのダイレクトドライブモータを用いたシステムを開発した。特に、ノイズ除去のためのフィルタに基づく信号処理技術を導入し、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 ピコスケールマニピュレーション用アクチュエータ部の設計検討

システムエネルギー変換を組み込んだピコスケールマニピュレーションを実現するためのアクチュエータ部の検討を行った。本研究では、摩擦やバックラッシュといった非線形性の強い外乱が非常に少ないリニアモータと空気軸受けをアクチュエータ部に採用した。

(2) 平成25年度

① ピコスケールモーションコントロール技術の検討

コアレス・コギングレスのダイレクトドライブモータと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を統合したピコスケールハプティックシステムのためのモーションコントロール技術の検討を行った。一般的にセンサの分解能が高くなればなる程、信号とノイズの区別がつきにくくなるため、加速度制御の達成が困難になる。この問題に対して、本研究ではセンサノイズを確率的な外乱と捉え、ノイズのモデル化ならびに外乱オブザーバの新しい設計手法を提案した。

② ピコスケールハプティクス技術の検討

平成25度はさらにピコスケールの力触覚を拡大して操作者にフィードバックし、微細マニピュレーションを支援するためのピコスケールハプティクス技術について検討を行った。

(3) 平成26年度

人間行動空間と超微細行動空間の結合性について操作性及び力触覚再現性の観点から検討を行った。特に、伝達スケールリングを導入し、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多自由度システムを試作し、性能の評価を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) ピコスケールシステムエネルギー変換技術

超微細環境からの力触覚フィードバックを実現するためには、バイラテラル制御の性能を最大限に発揮するための実装方法が重要となる。特に実際の環境では、摩擦やバックラッシュ、量子化誤差などといった非線形性の強い外乱が顕著にシステムに影響を与えるという問題点がある。

そこで本研究では、ピコスケールハプティクス特有の問題となる様々な外乱を考慮に入れた新しい設計方法論の提案を行った。特に、図2に示すようなピコスケールハプティックシステムを試作し、精密な動作が要求される多自由度でのピコスケール力触覚フィードバックを達成した。

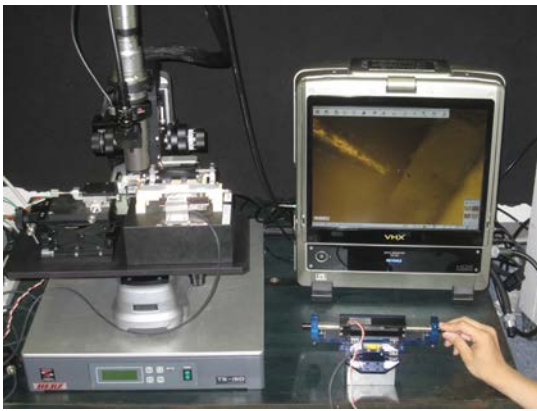


図2 開発したピコスケールハプティックシステム

##### (2) ピコスケールモーションコントロール技術

ピコスケールハプティクスは接触対象の力触覚情報をスケールアップして増幅することにより、操作者に微小な環境からの力触覚フィードバックを可能にする。しかしながら、スケールアップにより微細なノイズも外乱として増幅され、力触覚の鮮明な伝達が不可能になるばかりでなく、システム全体が発振し不安定化するおそれがある。本研究では、機械的な外乱の低減に加え、信号処理による外乱低減手法の開発を行った。

##### ① 入力飽和を考慮したシステム安定化技術

スケールアップを大きくすることによって、システムが出力できる最大値よりも大きな入力が入力される入力飽和という現象が起こる。入力飽和が起こることにより、リミットサイクルと呼ばれる振動的で不安定な応答につながる。

本研究では、スライディングモード制御に基づく入力飽和の安定化手法を導入し、効果の検証を行った。本手法は、入力飽和が起こっていない場合は精密な動作を実現するための制御器が機能する一方で、入力飽和が起きている場合は飽和現象の安定化制御器が

機能するものである。この2つの制御手法は自動で切り替わるため、サーボ性能を損なうことなく、入力飽和時におけるシステムの安定性を確保することが可能であることを確認した。

##### ② 微細外乱のオンライン同定技術

ピコスケールハプティクスでは、高いスケールアップを実装するため、摩擦力や重力等の外乱の補償が重要な課題となる。試作したピコスケールハプティックシステムでは、空気軸受けを採用することにより、駆動部の摩擦力を低減することに成功している。しかしながら、空気軸受けに供給される空気の圧力がわずかに変動することで、その誤差が大きな外乱として作用してしまう。したがって、空気の圧力変動を補償するためには、瞬時に同定して補償するための信号処理技術が必要である。

本研究では、数列の線形予測手法である加速法を導入することで、瞬時に外乱を予測して補償することに成功した。

##### (3) ピコスケールハプティクス技術

上記ピコスケールモーションコントロールに基づく加速度制御を援用したバイラテラル制御系により、透明性の高いピコスケールハプティクスの実現が可能になることを基礎試験により確認した。また実際の微細マニピュレーションを想定し、粗動モードと微動モードをシームレスに実現するための新しい次元変換スケールアップ手法の提案を行った。

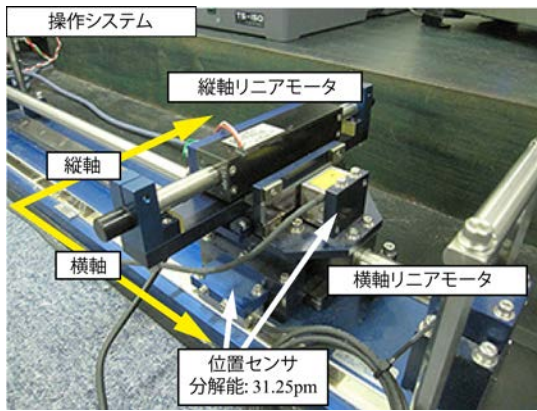
また、ピコスケールの信号を効率良く抽出するため、スケールアップに伴う量子化誤差についてマルチレベルデルタシグマ変調を用いた手法を新たに提案し、高い補償効果を有することを確認した。結果として、力スケールアップ、位置スケールアップをそれぞれ10万倍まで増大させたマクロミクロバイラテラル制御を構築することに成功した。

##### (4) 多自由度微細マニピュレーション試験

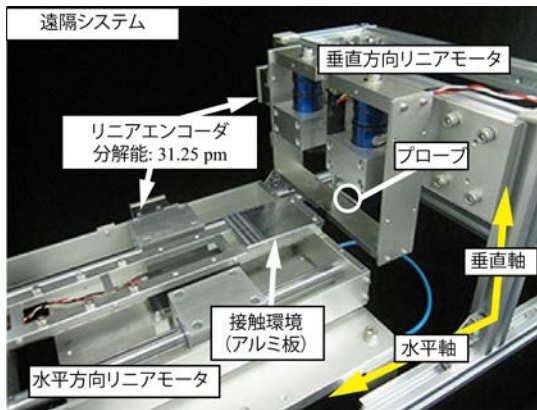
本研究では、微細な凹凸をなぞった際の力触覚情報を操作者に伝える多自由度微細マニピュレーション試験を行い、性能の検証を行った。図3に示すマスタは水平面方向への自由度を有しており、スレーブは垂直面方向への自由度を有している。

多自由度ピコスケールハプティックシステムを用いることで、通常人間が実際に感じるができない微小な凹凸をなぞった際に生じる振動を操作者に呈示することが可能になる。試験において、接触を行う試料としてアルミ板を用いた。このアルミ板にはNCフライス盤による表面加工を施している。表面加工をする際に送り速度を変えることで加工精度を変化させており、表面の凹凸に微細な違いが存在している。





マスタ部



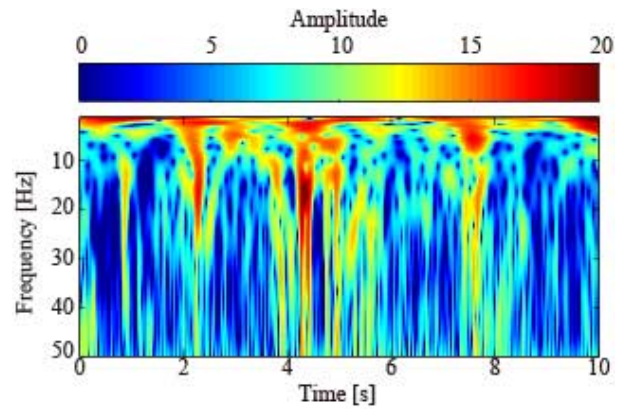
スレーブ部

図3 開発したシステムの構成

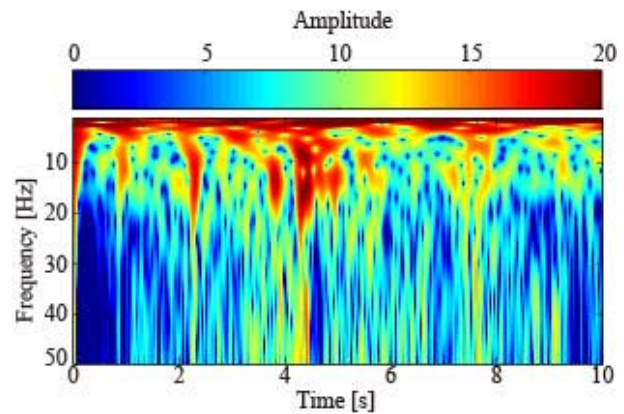
表面走査により得られた力触覚情報はハプトグラフを用いることにより可視化し、比較を行った。ウェーブレット変換によって得られたハプトグラフを図4に示す。0秒から2秒、および8秒から10秒では、凹凸の細かい面を走査しており、2秒から8秒では凹凸の荒い面を走査している。このように、凹凸の細かさが変化することにより、ハプトグラフも変化することが確認できる。

凹凸の細かい面では、力触覚情報には低周波成分が多く含まれていることがわかる。一方で荒い面では低周波成分に加えて高周波成分が増幅されていることがわかる。以上より、本研究にて開発した多自由度超微細マニピュレーションシステムを用いることで、微細環境の力触覚伝達および解析が可能になることを確認した。

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は、今後工学に限らず多分野での発展にも大きく寄与することが期待される。そこで、図5に示すような実際の微生物を用いた力触覚伝達の実現性を確認した。本研究で開発した超微細マニピュレーションシステムにより、微生物や細胞のような微小な接触対象もあたかも実際に手でつまむように操作することが可能となり、今後の産業に大きな変革をもたらす技術となることが期待される。



押し込み方向



なぞり方向

図4 凹凸をなぞった際のハプトグラフ



図5 微生物を使用した試験

#### (5) まとめ

上記の研究成果については、IEEE ICM2015ならびに IEEJ SAMCON2015 等でスペシャルセッションを設け、国際的に研究成果を発信した。特に IEEJ SAMCON では、微細環境のなぞり動作について実機展示を伴う発表を行い、成果を直接体験して頂く機会を得た。

以上のように、本研究の実施により人間の身体性のスケーリングに関するさまざまな知見を得ることができた。この知見は縮小方向だけでなく拡大方向にも応用が可能であり、今後身体性拡張に基づく行動支援への応用が期待される。

## 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 34 件)

(1) Fumito Nishi, Seiichiro Katsura:  
“Nanoscale Motion Control Using Composite Filter for Disturbance Observer,” IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 4, No. 2, pp. 98-104, March, 2015.  
(査読有り)  
DOI: 10.1541/ieejjia.4.98

(2) Takami Miyagi, Seiichiro Katsura:  
“Analysis and Modeling Based on Cepstrum for Haptic Presentation Considering Frequency Features of Vibration in Rubbing Motion,” IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 4, No. 2, pp. 74-82, March, 2015.  
(査読有り)  
DOI: 10.1541/ieejjia.4.74

(3) 宮城 貴己, 桂 誠一郎: “センサレス力覚制御のための周波数領域における摩擦補償フィルタの設計”, 精密工学会誌, Vol. 80, No. 8, pp. 792-798, August, 2014.  
(査読有り)  
DOI: 10.2493/jjspe.80.792

(4) Yosuke Mizutani, Seiichiro Katsura:  
“Analysis, Modeling, and Compensation of Friction for Scaled Bilateral Control,” IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 3, No. 4, pp. 344-349, July, 2014.  
(査読有り)  
DOI: 10.1541/ieejjia.3.344

(5) Takahiro Kosugi, Shunsuke Yajima, Eiichi Saito, Seiichiro Katsura:  
“Mode Switching Bilateral Control for Master-Slave Systems with Different Motion Areas,” IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 2, No. 5, pp. 232-241, September, 2013.  
(査読有り)  
DOI: 10.1541/ieejjia.2.232

[学会発表] (計 106 件)

(1) Fumito Nishi, Eiichi Saito, Seiichiro Katsura: “Bilateral Transmission of Rubbing Motion into Ultra-fine Environments,” The 1st IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, SAMCON2015-NAGOYA, No. IS6-3, pp. 1-6, March 9, 2015.

(2) Fumito Nishi, Seiichiro Katsura:  
“Ultrafine Manipulation Considering Input Saturation Using Proxy-based Sliding Mode Control,” IEEE International Conference on Mechatronics, ICM2015-NAGOYA, pp. 538-543, March 6, 2015.

(3) Masaki Takeya, Seiichiro Katsura:  
“A Reduction Method of Stochastic Disturbance Based on Resonant Filter in Macro-Micro Bilateral Control System,” The 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON '14-DALLAS, pp. 2663-2668, October 29, 2014.

(4) Yosuke Mizutani, Seiichiro Katsura:  
“Macro-Micro Bilateral Control System without Position Limitation,” The 13th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, AMC2014-YOKOHAMA, pp. 693-698, March 14, 2014.

(5) Yosuke Mizutani, Seiichiro Katsura:  
“Achievement of High Scaling Gain Macro-Micro Bilateral Control System,” The 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON '13-VIENNA, pp. 4053-4058, November 10, 2013.

[その他]

アウトリーチ活動情報

ひらめき☆ときめきサイエンス「さわって楽しむミクロの世界！」の実施

ホームページ

慶應義塾大学 理工学部 桂研究室

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

研究者情報データベース

<http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/172/0017141/profile.html>

## 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