慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	実世界ハプティックエネルギー変換に基づく人間支援空間基盤の構築
Sub Title	Development of fundamentals for human support space based on real-world haptic energy conversion
Author	桂, 誠一郎(Katsura, Seiichiro)
Publisher	
Publication year	2012
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2011.)
JaLC DOI	
Abstract	人間にとって安全で豊かな生活を支援し、生活に伴う工ネルギー消費削減を実現することを目的とし、人間も含む分散システムの間に感覚情報を統合したリアルタイムネットワークを巡らせるという新しい人間支援空間基盤の構築について研究を行った。本研究では4年間の研究期間の中で、実世界ハプティックエネルギー変換技術と感覚フィードバック制御を統合した身体装着型ハプティックデバイスの設計方法論ならびに遠隔地での行動代行を実現するためのハプティック制御技術の開発に成功した。
Notes	研究種目：若手研究(A) 研究期間：2008～2011 課題番号：20686019 研究分野：工学 科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_20686019seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様式Ｃ－１９

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）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：若手研究（Ａ）
研究期間：2008～2011
課題番号：２０６８６０１９
研究課題名（和文）　実世界ハプティックエネルギー変換に基づく人間支援空間基盤の構築
研究課題名（英文）　Development of Fundamentals for Human Support Space Based on Real-World Haptic 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

研究成果の概要（和文）：
人間にとって安全で豊かな生活を支援し、生活に伴うエネルギー消費削減を実現することを目的とし、人間も含む分散システムの間に感覚情報を統合したリアルタイムネットワークを巡らせるという新しい人間支援空間基盤の構築について研究を行った。本研究では4 年間の研究期間の中で、実世界ハプティックエネルギー変換技術と感覚フィードバック制御を統合した身体装着型ハプティックデバイスの設計方法論ならびに遠隔地での行動代行を実現するためのハプティック制御技術の開発に成功した。

研究成果の概要（英文）：
This research aims realization of safety and rich life-support for a human and reduction of energy and develops fundamentals for human support space which has real-time network. The network can transmit physical sensations among human and systems. We have succeeded in realization of design method for a wearable haptic device and haptic control technique, which integrate real-world haptic energy conversion and sensation feedback control.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2008 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2009 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2010 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2011 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総　計	19,100,000	5,730,000	24,830,000

研究分野：工学
科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器
キーワード：人間支援システム，人間支援空間，実世界ハプティクス，
システムエネルギー変換，電気機器工学，電機統合システム，
モーションコントロール，産業電子

１．研究開始当初の背景

現在、人間支援を行うためにロボットなどの電機統合システムを通して力・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）関連の国際会議数も近年急増している。特に海外ではＭＩＴのタッチラボやロンドンのインペリアルカレッジなどで力・触覚の再現を中心とするハプティックディスプレイに関する研究が盛んに行われており、数々の研究成果が報告されている。しかしながら、これらの研究はモデルベースの手法であるために、遠隔地の状況がコンピュータ内でシミュレートされるヴァーチャルリアリティの延長技術に留まっており、実世界における環境モデルの動的な構築やその管理については考慮されていない。しかしながら、人間支援の観点からは実世界の力・触覚情報を遠隔地で人工再現させる技術が不可欠であり、実世界ハプティクスの発展が強く望まれている。

このような背景の下で、研究代表者の桂はこれまでの研究において、世界に先駆けて鋭敏な触覚情報を再現するためには広帯域な力制御が不可欠であることを明らかにしている。特に、センサを使用しない広帯域な力覚センシング手法を開発するとともに、リニアモータをアクチュエータとして用いることにより、機械伝達部における摩擦や共振の影響が少ないため、広帯域な実現が可能になることを実証してきた。

研究代表者は同時に、これらの実世界ハプティクス基盤技術を人間支援に応用する際に、ハプティックデバイス自体の持つ基本的性能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、電力変換部および電流制御部の周波数帯域が重要であることを確認しており、エネルギー変換技術の人間支援に特化したまったく新しい設計方法論が必要不可欠であるとの認識に達した。そこで、このような学術的背景に基づき、人間支援空間基盤を構築するための実世界ハプティックエネルギー変換技術を開発するという本研究提案の着想に至った。

２．研究の目的

現代社会では交通手段が発達しているため、人間は空間的に点在しているのみならず、その分布は時間と共に複雑にしかも速く変化する。個人個人にとっては、サービスを授受するために混雑した環境を通過しなくてはならない。このような環境は前もって十分に細部まで予測することができず、精密な数理モデルを事前に与えることは困難である。現状では大量の移動を伴う様々な活動は、道路、交通機関、建築物、あるいは自然内において大きな混乱を引き起こすと同時に多量のエネルギー消費につながっている。このような環境は非構造環境と呼ばれ、人間のＱＯＬ向上を考えるとその整備が必要不可欠である。

本研究では次世代の人間支援空間基盤を構築するため、実世界における複合感覚情報をリアルタイムにフィードバックすることが可能なプラットフォーム技術の確立を目的として研究を行った。このようなプラットフォームを分散配置し、実時間複合感覚フィードバックネットワークとして統合することで、実際の移動を伴うことなくあたかも遠隔地に存在しているような感覚で個人個人の作業を遂行できる新しい人間支援空間を提供することが可能になる。

３．研究の方法

(1) 方法の概要

本研究では、従来の研究代表者の実世界ハプティクスに関する研究を踏まえ、図１のように人間も含む分散システムの間に感覚情報を統合したリアルタイムネットワークに基づいた人間支援空間基盤を構築することを目的として研究を行った。

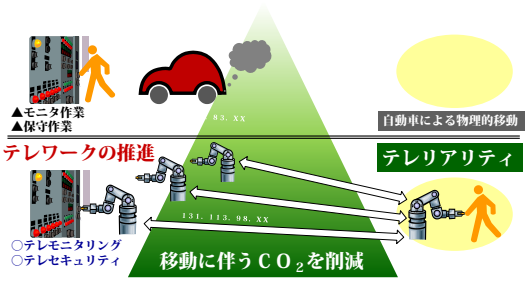

図１ 人間支援空間の概念図

研究期間の前半の２年間で実世界ハプティックエネルギー変換を高効率に実現するためのプラットフォーム技術を確立した。過去の研究より、アクチュエータをダイレクトドライブモータに絞り、その駆動に最適なインバータなどの電機エネルギー変換システムの人間支援に特化した広帯域な設計方法論を明らかにした。さらに研究期間の後半の２年間では、前半の２年間で確立したプラットフォーム技術を身体装着型ハプティックデバイスに実装し、人間支援に必要な感覚フィードバック性能を時間透明性および空間透明性により評価を行った。

(2) 年度ごとの研究方法

本研究は、これまでに受けた科研費の成果により確立した実世界ハプティクスの根幹技術である双方向モーションコントロール技術に基づき、感覚情報をフィードバックする身体装着型ハプティックデバイスの開発を行った。高性能な力・触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電機エネルギー変換理論が必要不可欠であることをこれまでの研究により明らかにしており、本研究によりまったく新しいハプティックエネルギー変換の広帯域実現のための設計論が明らかになった。

図 2 に示すように、従来の半導体電力変換技術ならびにベクトル制御技術が主に電源からの電気エネルギーを高力率で機械エネルギーへと変換することに焦点が当てられていたのに対し、図 3 に示すようなハプティックエネルギー変換は、電機統合システムに作用するハプティックエネルギーを効率よく（他の）電気統合システムを用いて再現させる新しい双方向のエネルギー変換手法として定義される。

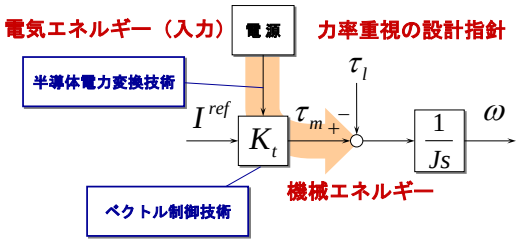

図 2　従来の電機エネルギー変換

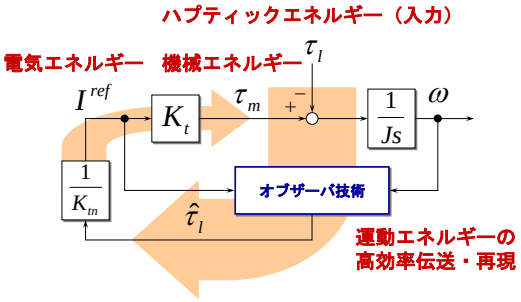

図 3　ハプティックエネルギー変換

図 3 に示すようなハプティックエネルギー変換を遠隔地の電気統合システム間で双方向に行うことにより、触覚のように双方向性を有する感覚情報の伝送が可能になる。図 4 のような双方向ハプティックエネルギー変換を行う際には、ネットワークを介して情報を伝送した場合の総合的な帯域や遅延についても考慮する必要がある。

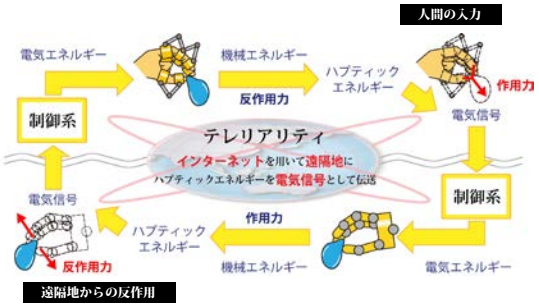

図 4 双方向ハプティックエネルギー変換

① 平成 20 年度

ハプティックエネルギー変換を高効率に実現するには、広帯域かつ低遅延な制御系・通信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、高性能な感覚フィードバックを得ることが困難である。広帯域化と低遅延化を実現するためには、専用ハードウェアを用いて制御演算処理を高速化する必要がある。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。具体的には、制御の 1 イタレーションに必要な時間を最新プロセッサとリアルタイムＯＳを用いた場合よりも短縮することに成功した。

平成 20 年度では、この様にして構築したハプティックエネルギー変換器と広帯域アクチュエーション技術を統合することで、人間支援に特化した高効率のハプティックエネルギー変換プラットフォームの開発を行った。

② 平成 21 年度

平成 21 年度は、まずハプティックエネルギー変換プラットフォーム要素技術を 6 自由度 12 軸腕装着型ハプティックデバイスに導入し、エネルギー変換部の性能評価を行った。さらに、人間に感覚フィードバックを行うためのリアルタイムネットワークを構築し、そのネットワーク上で人間・環境に対して双方向かつ有用な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の開発を行った。

③ 平成 22 年度

平成 22 年度は、3 自由度 6 軸脚装着型ハプティックデバイスを試作し、歩行動作における人間と実世界の結合性を時間透明性および空間透明性の観点から評価を行った。実世界と環境空間をハプティックデバイスにより双方向結合すれば、人間世界と実世界の接面が飛躍的に拡大することが期待される。

さらにインターネットを用いて大規模なシステムを構築するために、ハードリアルタイム制御・双方向安定性の確保が可能な結合方式・ルーティングといった要素技術についても検討を行った。

④　平成 23 年度

平成 23 年度は、平成 21 年度および平成 22 年度に試作した腕装着型ハプティックデバイスと脚装着型ハプティックデバイスを人間支援空間基盤としてネットワーク上に統合した。

さらに、研究期間の最終年度には得られた成果を社会に還元するために複数の国際会議でスペシャルセッションの企画を行うとともに、研究成果広報用パンフレットの配布により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

(1) ハプティックエネルギー変換プラットフォームの開発

ハプティックエネルギー変換を高効率に実現するため、広帯域な電流制御を実現するインバータを設計した。さらにアクチュエータ部、インバータ部、モーションコントロール部を総合したハプティックエネルギー変換の広帯域化、高効率化を実現するための基本手法について開発を行った。また、ハプティックエネルギー変換器に基づき、人間および環境からのハプティックエネルギーを抽出・再現するための広帯域アクチュエーション技術の基本設計を行った。

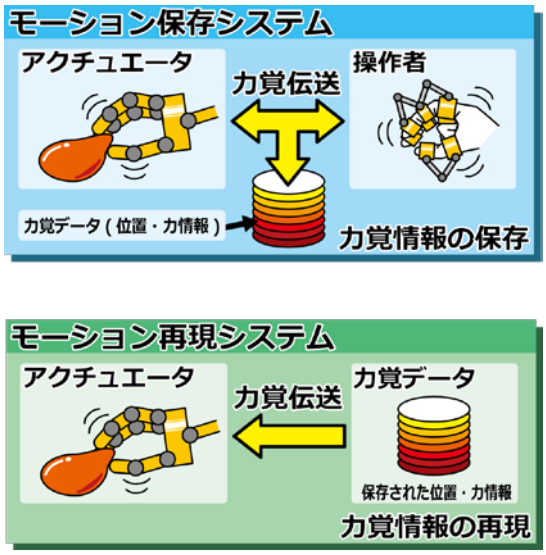

図 5 モーションコピー理論

この広帯域アクチュエーション技術を導入したハプティックエネルギー変換プラットフォームは、図 5 に示されるモーションコピー理論に基づき、人間の動作を効率よく抽出し、ディジタル保存・再生することが可能であることを明らかにした。

(2) 身体装着型ハプティックデバイスの開発

ハプティックエネルギー変換プラットフォーム要素技術を身体装着型ハプティックデバイスに導入し、エネルギー変換部の性能評価を行った。さらにさまざまな機構の間で感覚フィードバックを行うためのリアルタイムネットワークの構築を目指し、ネットワーク上で人間・環境に対して双方向かつ有用なインタラクションをリアルタイムに提供可能な人間支援システムの検討を行った。具体的には、異構造ハプティックデバイス間での双方向力覚フィードバックに成功した。

また、図 6 に示すようなスレーブシステムを開発し、人間のフレキシブルな手指動作を代行するための制御手法について開発を行った。



図 6 手指動作の代行

(3) 移動型ハプティックデバイスの開発

身体装着型ハプティックデバイスと双方向でハプティックエネルギー変換を行い、遠隔地で作業を行うための移動型ハプティックデバイスの基本設計を行った。具体的には、ペダル型マスタシステムと 6 自由度二足歩行型スレーブシステム間でバイラテラル制御を構成し、歩行動作の遠隔再現と床反力フィードバックを得ることに成功した。

特に、マスタースレーブシステム間で透明性を確保するバイラテラル制御とスレーブ側で独自に環境適応を行うための零空間制御をバランス良く実現することで安定した歩行動作が実現可能であることを明らかにした。



図 7 二足歩行型スレーブシステム

(4) 実世界ハプティクスに基づく人間支援空間の基本設計

ハプティックデバイスをネットワーク環境内に分散配置して人間を適切なタイミングで支援するための人間支援空間の基本設計を行った。まずハプティック通信に適した伝送プロトコルの評価を行い、順序制御の有効性を確認するとともに、再送制御は不安定化の原因となることを明らかにした。

また、ハプティックデバイスを使用して得られた人間の動作データについても解析を行い、デバイスを用いた支援をするために必要な動作データベースの構築についても検討を行った。本研究では、図 8 に示すような筆型ハプティックデバイスを用いて「永」の字を執筆し、執筆者ごとの動作の違いについて比較を行った。隠れマルコフモデルに基づいて人間動作をモデル化することで、定量的な動作検索が可能になることを明らかにした。



図 8 筆型ハプティックデバイス

この動作データベースを今後拡張していくことで、図 9 に示すような熟練者のスキルを遠隔地でトレーニングする遠隔教育システムやハプティックトレーニングシステムの実現へとつなげることが期待される。



図 9 ハプティックトレーニングシステム

(5) まとめ

本研究では、人間支援に特化した実世界ハプティックエネルギー変換プラットフォーム技術と身体装着型ハプティックデバイスによる感覚フィードバック基盤技術の総合デザイン方法論の確立に成功した。特に、時々刻々と変化する環境情報を感覚情報として人間にフィードバックし、人間支援を行うような次世代の社会システムが、実世界ハプティックエネルギー変換を高効率に行う電機統合システム群により実現されることを明らかにした。さらに、本研究で得られた成果を図 10 に示すような「テレリアリティ」という新しい概念として提唱することに成功した。



図 10 テレリアリティの実現

今後は、本研究で開発した基盤技術を産業化へ結びつけることにより、ロボットの感覚機能の拡張や自動車、遠隔操作といったマン・マシンインターフェイスに画期的な性能改善が予想されるだけでなく、スキル獲得やスキル教育、ｅビジネスへの展開、新しいハプティックディスプレイによるハプティック通信やハプティック放送などの巨大な産業が立ち上がる可能性も予想できる。またこのような人間の感覚に基づいて環境情報を構造化し支援を行う社会システムの実現により、人間のＱＯＬ向上につながると同時に生活に必要なエネルギー削減も期待できる。

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 37 件）

(1) Wataru Yamanouchi, Seiichiro Katsura: “Tele-Operation of a Mobile Haptic System Using Dynamical Modal Transformation,” 電気学会産業応用部門誌, Vol. 132-D, No. 3, pp. 315-321, March, 2012. （査読有）

(2) 森光 英貴, 桂 誠一郎: “熱外乱オブザーバによるペルチェ素子の 2 自由度ロバスト温度制御”, 電気学会産業応用部門誌, Vol. 131-D, No. 7, pp. 967-973, July, 2011. （査読有）

(3) Seiichiro Katsura, Yuichi Matsumoto, Kouhei Ohnishi: “Shadow Robot for Teaching Motion,” Robotics and Autonomous Systems Journal, Vol. 58, No. 7, pp. 840-846, 2010. （査読有）

(4) Chowarit Mitsantisuk, Seiichiro Katsura, Kiyoshi Ohishi: “Force Control of Human-Robot Interaction Using Twin Direct-Drive Motor System Based on Modal Space Design,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 4, pp. 1383-1392, April, 2010. （査読有）

(5) 永瀬 一貴, 桂 誠一郎: “力帰還型マルチラテラル制御に基づく歩行力覚フィードバック制御”, 電気学会産業応用部門誌, Vol. 130-D, No. 3, pp. 351-359, March, 2010. （査読有）

〔学会発表〕（計 43 件）

(1) Yoshihiro Ohnishi, Seiichiro Katsura: “Recognition and Classification of Human Motion Based on Hidden Markov Model for Motion Database,” The 12th International Workshop on Advanced Motion Control, AMC2012-SARAJEVO, March 25-27, 2012.
発表場所: サラエボ
発表日: 2012 年 3 月 25 日

(2) Hidetaka Morimitsu, Seiichiro Katsura: “Experimental Evaluation of Disturbance Observer-Based Heat Inflow Estimation Method,” SICE 2011 Annual Conference, SICE 2011-TOKYO, pp. 1069-1074, September 13-18, 2011.
発表場所: 東京
発表日: 2011 年 9 月 14 日

(3) Hiroyuki Nagai, Seiichiro Katsura: “Environmental Embedded Haptic System Based on Modal Transformation,” 4th International Conference on Human System Interaction, HSI2011-YOKOHAMA, pp. 262-267, May 19-21, 2011.
発表場所: 横浜
発表日: 2011 年 5 月 20 日

(4) Takumi Ishii, Seiichiro Katsura: “Articulated Multilateral Control for Haptic Broadcasting System,” The 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON ’10-PHOENIX, pp. 1866-1871, November 7-10, 2010.
発表場所: フェニックス
発表日: 2010 年 11 月 10 日

〔その他〕

(1) 受賞（計 13 件）

① The Best Paper Award of the 4th HSI2011
② The Best Paper Award of the 13th EPE-PEMC08
③ 矢崎学術賞 奨励賞
④ 電気学会 優秀論文発表賞 2 件
⑤ 電気学会産業計測制御技術委員会 優秀論文発表賞 4 件
⑥ SICE Annual Conference Finalists of International Award 2 件
⑦ 三井住友海上福祉財団賞

(2) 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