

人間支援空間構築のためのテレリアリティーロボット技術の開発

Development of Tele-Reality Robot Technology for Construction of Human Support Space

2001003



研究代表者

慶應義塾大学 理工学部

准教授

桂

誠一郎

[研究の目的]

本研究では、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の削減を実現するため、人間や知的機械、ロボットシステムの間で感覚情報を伝送するリアルタイムネットワークを巡らすことによって、実際に空間的移動を伴わなくても授受すべきサービスを実現することを目的とする。多数の人間が多数の機械系と協調を取るような人間支援空間の構築は、高齢化社会における人間活動の活発化といった社会問題の面でも、モニタ・保守作業などの省力化と高度化といったインフラの充実化といった面でも、あるいは遠隔手術といった医療面の充実の面からも必要不可欠であり、「テレリアリティーロボット」技術の開発の意義は大きい。

[研究の内容、成果]

本研究では、図1に示すように「テレリアリティーロボット」という人間の感覚情報を遠隔地に伝送し、空間や時間を越えて再現を行うシステムがリアルタイムネットワークで結合された人間支援空間の構築を目的とし、以下のような研究計画に基づき研究を遂行した。

1. 「テレリアリティーロボット」の基本設計・試作

本研究では、将来の「テレリアリティー」を実現するためのマスタ・スレーブロボットとして、アクセル・ブレーキ・ステアリングインタフェースに力覚フィードバックを行うモバイルロボットの新しい遠隔操作システムの開発を行った。

特に、開発した「テレリアリティーロボット」は、遠隔地での人間の「知覚・行動」を再現するという新しいタイプのヒューマン・イン



図1 テレリアリティーに基づく人間支援空間

タフェースであり、視覚情報に加えて力覚情報のフィードバックが可能となっている。これまでの研究により、力覚情報の再現においてマスタ・スレーブシステムの双方に高精度なセンサを配置しても良い性能が得られないのは機構中の共振や摩擦が原因であり、実用化を妨げている一因となっていることを明らかにしている。そこで本研究では、人間との親和的な接触動作を実現するため、使用するアクチュエータをすべてダイレクトドライブモータとすることで、外乱オブザーバに基づいた力覚センサレスでの広帯域な触覚フィードバックを実現した。

開発したマスタコクピットは図2に示すようにステアリング部とアクセル・ブレーキからなるペダル部を備えている。また、スレーブ側は図3に示すように多自由度のモバイルロボットとして構成されている。モバイルロボットは3個の車輪にインホイールモータを導入しており、それぞれリニアモータによるアクティブサスペンションを装備している。さらに、前輪のステアリングにもダイレクトドライブモータを導入しており、ステアバイワイヤが実現可能になっている。このように、7自由度の構成とすることで、路面状況を多くのモータを使用してセンシングし、操作者にフィードバックすることが可能になっている。

マスタ・スレーブいずれもダイレクトドライ



図2 マスタコクピット

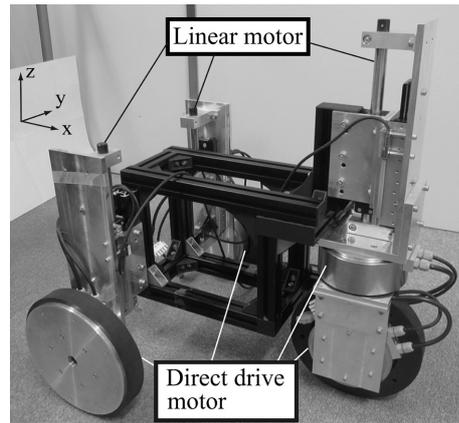


図3 多自由度モバイルロボット

ブモータを直結することで、遠隔地における作用・反作用の法則を人工的に再現し、あたかも遠隔地で作業しているような臨場感を得ることが可能になる。したがって、これまでの画像情報のみのフィードバックにおける作業の問題点を解決することができる。

2. 「テレリアリティーロボット」による触覚伝送制御系に関する基本設計

従来の遠隔操作システムでは、操作を行うマスタシステムと遠隔地で動作するスレーブシステムが同構造のものに対して主に開発が進められているため、本研究の目標を実現することは困難であった。本研究では、マスタシステムとスレーブシステムが異構造かつ異動作範囲のシステムに対しても実世界触覚フィードバックを実現するための双方向制御手法について新たに開発を行った。

提案手法では、マスタコクピットに搭載されているペダルインタフェースの角度情報によって多自由度モバイルロボットの並進速度を決定するという新しいバイラテラル制御系を構成している。バイラテラル制御系の目標式は以下のように表される。

$$\tau_m + \tau_s = 0 \quad (1)$$

$$\theta_m - \dot{\theta}_s = 0 \quad (2)$$

(1) 式は、マスタコクピットの操作トルクと多自由度モバイルロボットが路面から受ける反力

トルクの和をゼロにすることで、遠隔地間で人工的に作用・反作用の法則を実現することが可能になる。一方で (2) 式は、多自由度モバイルロボットの操作範囲を拡張するため、マスタコックピットのペダル位置と多自由度モバイルロボットの速度の差をゼロにするという目標式になっている。(2) 式の目標式は微分操作を含んでいるため、ダイナミカルモード変化を制御系に導入することで、異構造・異動作範囲を有するマスタ・スレーブシステムにおける力覚フィードバックが実現できる。

3. 人間支援空間の構築及び実機による実験・評価

開発したテレリアリティーロボットを使用して感覚フィードバック試験を行った。図 4 (a) にマスタシステムの角度応答およびスレーブシステムの速度応答を示し、図 4 (b) にペダルのトルク応答と車輪が受ける力応答を示す。図

4 より、提案手法により次元の異なる情報間での応答値の一致が達成されていることが確認できる。さらに、作用反作用の法則が遠隔地間でバイラテラル制御により実現されていることが分かる。

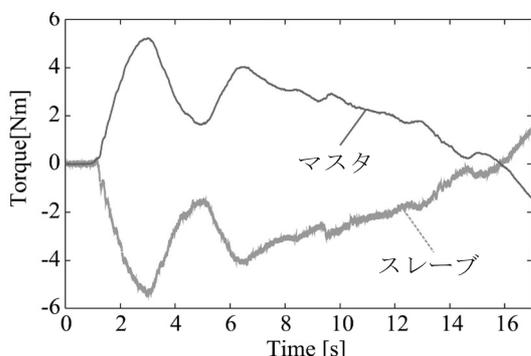
また、ハプティックデバイスをネットワーク環境内に分散配置して人間を適切なタイミングで支援するための人間支援空間の基本設計を行った。まずハプティック通信に適した伝送プロトコルの評価を行い、順序制御の有効性を確認するとともに、再送制御は不安定化の原因となることを明らかにした。また、ハプティックデバイスを使用して得られた人間の動作データについても解析を行い、デバイスを用いた支援をするために必要な動作データベースの構築についても検討を行った。

[今後の研究の方向、課題]

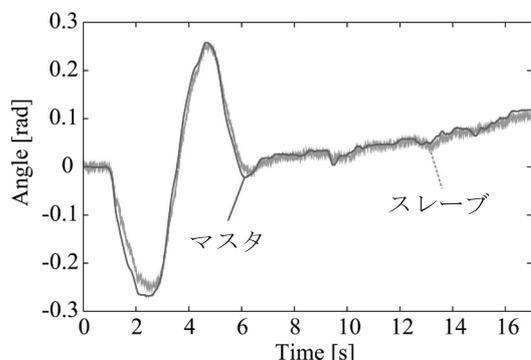
本研究では、視覚情報と触覚情報をリアルタイムで取得することが可能な「テレリアリティー」の基盤技術の開発に成功した。ネットワークを利用して遠隔操作を高臨場感で直観的に実現に伝送するための基本技術として使用可能であることを明らかにした。

実用化が期待される分野として、自動車のステアバイワイヤシステムに導入が考えられるばかりでなく、様々な機構のインタフェースを介した触覚通信・放送の実用化が期待される。特に、今後電気自動車化が進み、電気モータをインホイールモータとして用いることで、路面の情報を力覚センサレスで高精度に抽出し、地図上に路面の凹凸情報などをリアルタイムにマッピングすることが可能になる。この情報を GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) やカーナビゲーションシステムと連動して共有することで、安全・安心な ITS (Intelligent Transportation Systems: 高度道路交通システム) を構築することにつながる。

さらに、将来の触覚通信・放送の実現に関し



(a) マスタコックピットのペダル操作トルク・多自由度モバイルロボットの反力トルクの関係



(b) マスタコックピットのペダル位置・多自由度モバイルロボットの速度の関係

図 4 テレリアリティー実験結果

ては、ハプティックインタフェースに使用するためのアクチュエータに用いるリニアモータが相対的に大きなサイズになってしまうことが実用化に際して問題になることが予想される。今後、ハプティクスに特化したエネルギー変換技術を開発することで、さらなる装置の小型化が見込まれ、実用化・社会インフラとしての普及が期待される。

[成果の発表, 論文等]

論文発表

- [1] 渡部達人, 桂誠一郎: “モバイルロボットによる摩擦情報に基づいた路面環境の認識と分類”, 電気学会産業応用部門誌, Vol. 131-D, No. 3, pp. 357-363 (2011. 3)
- [2] Seiichiro Katsura, Wataru Yamanouchi, Yuki Yokokura: “Reproduction of Human Motion Based on Real-World Haptics,” IEEE Industrial Electronics Magazine. (査読中)
- [3] Wataru Yamanouchi, Seiichiro Katsura: “Mobile-

Hapto: Bilateral Haptic Interaction System Using a Mobile Robot,” IEEE Transactions on Industrial Electronics. (査読中)

他 13 編査読中

発表論文

- [1] Kazuki Nagase, Seiichiro Katsura: “Bilateral Control of Walking Haptic System,” 2011 Joint IEEE International Conference on Industrial Electronics & Southeastern Symposium on System Theory, ICIT-SSST11-Auburn, pp. 387-392 (2011. 3. 14-17)
- [2] Takahiro Kosugi, Seiichiro Katsura: “Experimental Investigation of Variable Scaled Bilateral Control,” 4th International Conference on Human System Interaction, HSI2011-Yokohama, pp. 250-255 (2011. 5. 19-21)

The Best Paper Award 受賞

- [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 (2011. 5. 19-21)

The Best Paper Award 受賞

他 国際会議 20 件, 国内会議 40 件