

## 自然な両手持持操作を実現する高解像度力覚提示装置の提案 Proposal of a High-Definition Haptic Device for Both Hands Grasping Operations

赤羽 克仁<sup>†</sup>  
Katsuhito Akahane

### 1. はじめに

本研究では、両手を用いた自然な把持操作を可能にするため、ワイヤ駆動型力覚提示装置を用いて、高速な更新周波数を実現する高解像度力覚提示システムを提案する。両手双方の力覚提示装置には、自然な把持操作を可能にする 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置を用いた。複数の力覚提示装置に対して、Unity3D により構成された剛体物理シミュレーションを伴う VR 世界での力覚提示が可能な環境構築を目指した。力覚提示装置専用の物理シミュレータを導入し、マルチレートによる力覚レンダリングを実現することにより、力覚提示装置が複数存在する環境においても、安定性と忠実性を両立した質の高い力覚提示環境を実現するシステムを提案する。

VR 世界の操作を直感的に可能にするヒューマンインターフェイスの構築が重要になっている。特に、力のフィードバックを有する力覚提示装置の開発が盛んである [1,2,3,4,5,6,7]。本研究では、両手で自然な把持操作を可能にする高解像度力覚提示装置について述べる。力覚提示装置を用いて対象物を操作する際に、現実世界で操作者が物体を両手多指で操作する際に行う把持を力覚提示装置において実現する。剛体などの操作には並進と回転の 6 自由度の力覚提示装置が必要であるが、この把持操作を実現するために、把持操作の 1 自由度をエンドエフェクタに加えることで実現する。この 7 自由度の力覚提示装置を両手に配置し、両手を用いた自然な把持操作を可能にする両手操作環境の構築を目指す。

本研究では、図 1 のような自然な把持操作を実現する 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置 [2] を 2 台用いたシステム (図 2) を提案する。この装置は、エンドエフェクタ全体の位置・姿勢の 6 自由度の力覚提示のみならず、物を掴む際に行う把持を 1 自由度として力覚提示を可能にする。ワイヤ (糸) は押すことができないので、N 自由度の力覚提

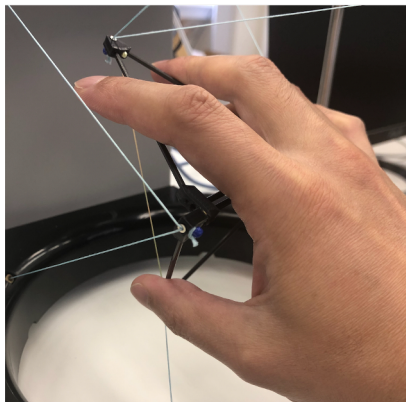


図 1 自然な把持操作環境



図 2 両手操作環境

示装置を構築する為には  $N+1$  以上の糸でエンドエフェクタを駆動する必要がある。提案する装置では 8 本の糸により、7 自由度の力覚提示を実現している。

また、更新周波数の高速化は装置の安定性と忠実性に対し、重要な要素である [8,9]。本研究では、力覚提示装置専用のコントローラ 2 台及び、剛体物理シミュレーション専用の物理演算サーバを構築し、これらをネットワークで結合することで、それぞれの処理に応じて機能分散させ、安定で高速な更新周波数を実現した。

### 2. 提案手法

提案する高解像度力覚提示装置のシステム構成を図 3 に示す。力覚提示装置固有の処理には、糸長から操作者が操作するエンドエフェクタの位置・姿勢計算、司令提示力を各糸の張力に分配する張力分配計算がある。また、VR 物体とエンドエフェクタを結合する 6 自由度のバーチャルカップリングを行う計算がある。これらの処理は力覚提示の忠実性と安定性に重要な役割を果たし、安定で高速な更新周波数の実現が必要である。力覚提示装置とバーチャルカップリングによって結合される VR 物体に関する物理シミュレーションの更新周波数も重要である。VR 世界のシミュレーションを力覚提示装置と同等の更新周波数で実現できれば良いが、VR 世界の規模などにより困難である。そこで、バーチャルカップリングによって双方の更新周波数の違いを吸収し、安定した結合を実現することを目指す。一方、視覚提示のための描画処理に必要な物理シミュレーションは、力覚提示装置が求めるほどの更新周波数は必要なく、ビデオレート (60Hz) 程度の更新周波数が実現できれば映像提示可能である。VR 世界的设计は Unity3D を用いて行う。VR 世界の中で剛体物理シミュレーションの対象物となる物体については、物体の幾何学的情報および物理特性に関する情報を開始時に Open Dynamics Engine で構築した物理演算サーバに送りシミュレーションを行う。物理演算を力覚提示装置のために実行する専用の物理演算サーバを構築した (図 3)。

<sup>†</sup> 広島工業大学 Hiroshima Institute of Technology

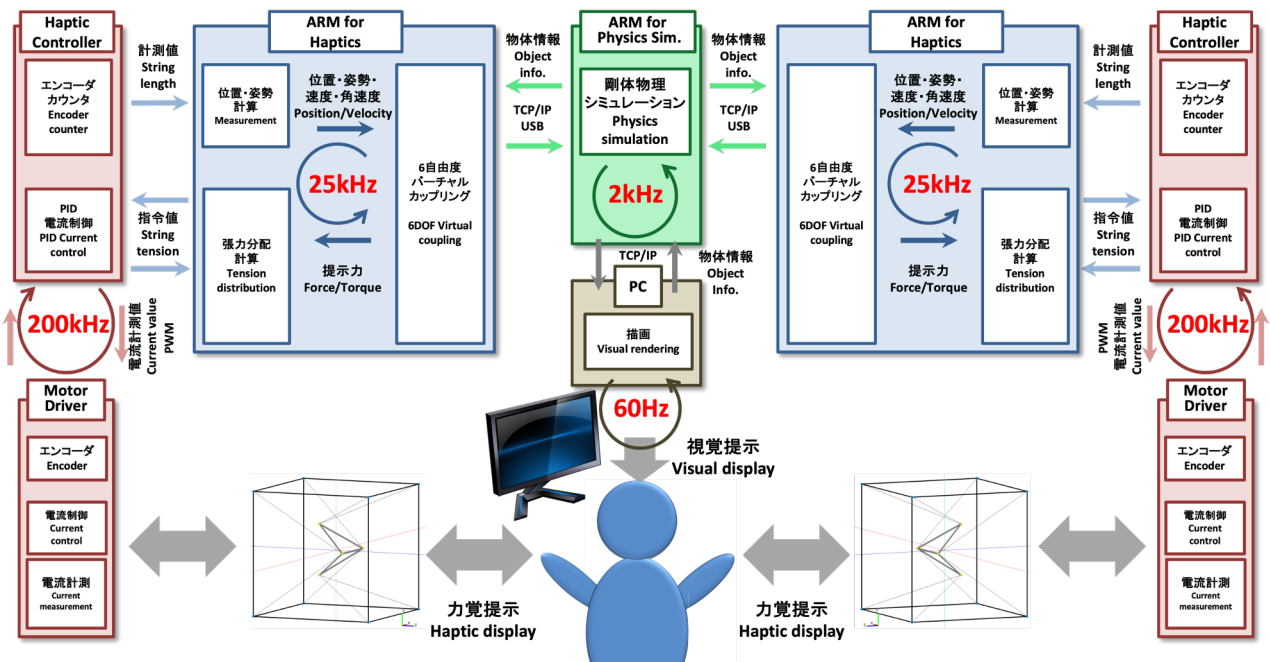


図 3 システム構成図

### 3. システム構成

糸を駆動するための専用のモータドライバを開発し、FPGA を搭載するハプティックコントローラから DC モータの電流制御を行うことで糸の張力を制御する。力覚提示装置固有の処理を行うコントローラには Raspberry Pi 4 Model B を用いて 25kHz の更新周波数を実現した。この Raspberry Pi ベースのコントローラは両手それぞれの力覚提示装置に配置し処理を機能分散することで高い更新周波数を実現している。また、FPGA と Raspberry Pi 間の通信は SPI により通信している。剛体物理シミュレーションを行う物理サーバーには Raspberry Pi 4 Model B を用いて 2kHz の更新周波数を実現した。2 台の力覚提示装置固有の処理を行う Raspberry Pi と物理サーバーの通信には Ethernet を用いて UDP 通信により実現した。また、物理サーバーは VR 世界の規模に応じて様々な構成が可能であり、PC や PC クラスタを利用したシステム構成も可能である。視覚提示を行う PC は MacBook Pro を用いた。Unity3D により C# 言語からソケット通信により UDP 通信を物理サーバーと行う。システムの実行開始時に Unity3D は物理シミュレーションに必要な VR 世界の全ての情報を物理サーバーに転送する。物理サーバーは送られてきた情報をもとに VR 世界をサーバー内に構築しシミュレーションを開始する。物理サーバーは力覚提示装置から送られてくる情報を用いて剛体物理シミュレーションを行う。描画 PC は更新によって得られる VR 物体の位置・姿勢情報を受け取る

### 4. まとめ

両手で自然な把持操作を可能にする高解像度力覚提示装置を提案した。Unity3D で構築した VR 世界を力覚提示装置のために専用開発した物理シミュレータ上で実行し、高速で安定した物理演算の更新周波数を実現した。両手双方の力覚提示装置のための高速な更新周波数の実現を可能と

する機能分散によって安定で忠実性の高い高解像度力覚提示環境の構築を実現した。

### 謝辞

本研究は科研費 JP20K11916 の助成を受けたものです。東京工業大学名誉教授佐藤誠先生に感謝する。

### 参考文献

- [1] 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘:"空間インタフェース装置 SPIDAR の提案", 電子情報通信学会論文誌 Vol.J74-D-2, p.887-894 (1991)
- [2] 赤羽克仁:"自然な把持操作を実現する 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の開発", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 25 巻, 4 号, p.356-365 (2020)
- [3] P. Lambert and J. Herder:"A novel parallel haptic device with 7 degrees of freedom," 2015 IEEE WHC, Evanston, IL, p.183-188 (2015)
- [4] S. Perreault, A. Talasz, A. L. Trejos, C. D. W. Ward, R. V. Patel and B. Kiai: A 7-DOF haptics-enabled teleoperated robotic system: Kinematic modeling and experimental verification; 2010 3rd IEEE RAS ¥& EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, Tokyo, p.906-911.(2010)
- [5] Dongjin Huang, Pengbin Tang, Xianglong Wang, Tao Ruan Wan, Wen Tang: New haptic syringe device for virtual angiography training; Computers ¥& Graphics, Volume 80, P.97-103 (2019)
- [6] B. Gonenc and H. Gurocak: Haptic interface with hybrid actuator for virtual needle insertion and tissue cutting; 2012 IEEE Haptics Symposium, Vancouver, BC, p.451-455 (2012)
- [7] Pepley DF, Yovanoff MA, Mirkin KA, Miller SR, Han DC, Moore JZ:"Integrating Cadaver Needle Forces Into a Haptic Robotic Simulator." ASME. J. Med. Devices. (2017)
- [8] 赤羽克仁, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠, "10kHz の更新周波数による高解像度ハプティックレンダリング", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.9, no.3, pp.217-226 (2004)
- [9] 赤羽克仁, 小池康晴, 佐藤誠, "安定性と忠実性を両立させる高解像度力覚レンダリングの開発", 情報処理学会論文誌, vol.48, no.3, pp.1316-1325 (2007)