

電磁力による力覚提示が可能な非接触遭遇型ハapticインターフェース

Noncontact Encounter-type Haptic Interface capable of force presentation by electromagnetic force

16B00340 青山 裕良 (AOYAMA, Yura)

指導教員 只野 耕太郎 (TADANO, Kotaro)

Abstract

A grounded haptic interface is used for the master of the conventional master-slave system, and this interface can present external force by controlling the torque of each joint. However, having mechanical friction not only hinders the operator's precise operation, but also makes it difficult for the user to feel the presented external force because the user always receives a frictional force. Furthermore, if the friction is large, it may be a cause of operator fatigue. On the other hand, in the non-grounded haptic interface, the friction force can be zero because there is no contact with the outside. However, there is a problem that external force can not be presented with an non-grounded device alone. Therefore, the purpose of this study is the development of a non-grounded haptic interface that can present external forces in all directions in a wide range. In order to achieve this, we propose a Noncontact Encounter-type Haptic Interface using electromagnetic force. In the proposed system, a force sense is presented by the electromagnetic force acting between a magnetic stylus and a coil array in which a plurality of coils are arranged concavely. In addition, since the robot arm mounted with the coil array at the tip follows the stylus, the same maximum presentation force can be output regardless of the position of the stylus within the movable range of the robot arm. One of the technical elements required to construct the proposed system is to generate the desired remote force by coil current control. In this report, we aimed at generating a remote force in a specified direction and magnitude on a stylus, manufactured an apparatus, and conducted experiments. The experimental results show that the force can be generated in the specified direction and magnitude, and the goal is achieved.

Keywords : Haptic Interface, Master-Slave, Noncontact Encounter-type, Magnetic Stylus, Electromagnetic Force

1. 緒 言

1.1 研究背景

1.1.1 マスタ・スレーブシステム

ロボットの操作方式の1つにマスタ・スレーブ方式がある。これは、マスタを操作する人間の動きを操作指令として、スレーブを動かす方式である。図1に示されるIntuitive Surgical Inc.の開発した手術支援ロボットのda Vinciは、マスタ・スレーブシステムの一例であるが、他にも、宇宙ロボットやレスキューロボットなど多岐にわたる分野でマスタ・スレーブ方式のロボット開発が進められてきた。

マスタ・スレーブシステムの制御方法のうち、マスタからスレーブに操作指令を一方的に送る制御のことをユニラテラル制御という。これに対し、スレーブ側の力覚情報をマスタ側にフィードバックしながら行う制御をバイラテラル制御という。バイラテラル制御では、スレーブ側から送られる力覚情報をユーザに出力するマスタが必要になるが、このときマスタとして用いられる装置のことをハapticインターフェースという。

1.1.2 ハapticインターフェース

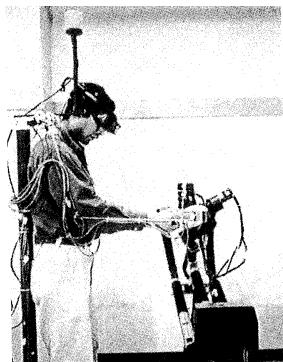
マスタ・スレーブシステムのマスタとして用いられるハapticインターフェースのほとんどは、床や机に設置して使用される接地型ハapticインターフェースである。接地型ハapticインターフェースの例として、3D Systems Inc.の開発した3D Systems Touchを図2に示す。接地型ハapticインターフェースは、各関節のトルクを制御することで、外力を提示できる。一方、機械的な摩擦を有することが問題点として挙げられる。この摩擦は、引っ掛かりによってユーザの精密な操作を阻害するだけでなく、ユーザが常に摩擦



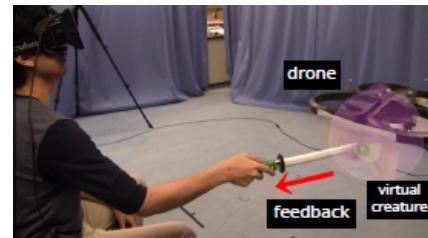
Fig. 1 da Vinci (Intuitive Surgical Inc., 2019)



Fig. 2 3D Systems Touch (3D Systems Inc., 2019)



(a) Control with Manipulator (平田他, 1996)



(b) Control with Drone (Yamaguchi et al., 2016)

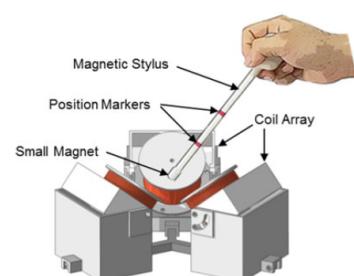
Fig. 3 Encounter-type Haptic Interface



(a) Air-jet type (Sodhi et al., 2013)



(b) Ultrasound type (Carter et al., 2013)



(c) Electromagnetic type (Tong et al., 2018)

Fig. 4 Haptic Interface using remote force

力を受けた状態となるために、提示される微細な外力を感じにくい。さらに、摩擦が大きい場合には、ユーザの疲労の原因にもなり得ると考えられる。この機械的な摩擦の影響は、制御を工夫することで、ある程度低減することが可能である。しかし、実際には非線形摩擦などが存在するために、摩擦の影響をゼロにすることは不可能である。

一方、外部との接触がない非接地型ハapticインターフェースでは摩擦の影響をゼロにすることができる。その反面、非接地デバイス単体では外力を提示できないという問題がある。そこで、非接地デバイスとは別に外力提示用のデバイスを用意することで、外力の提示を目指す研究がされてきた。

例えば、図3に示す遭遇型ハapticインターフェースはその一例と言える。遭遇型とは、接触子が常に非接地デバイスを追従し、必要に応じてユーザと接触子を遭遇させ、外力を提示する方式のことである。遭遇型の先行研究として、図3(a)のように接触子の位置をマニピュレータによって制御する研究(平田他, 1996)や、図3(b)のようにドローンを用いて制御する研究(Yamaguchi et al., 2016, Abdullah et al., 2017)が挙げられる。しかし、これらは接触子方向に引っ張る力を提示できることや、提示開始時に必ず擊力が伝達されてしまうなどの問題から、マスタとしての利用に向かない。

遭遇型以外の非接地型ハapticインターフェースにおける外力提示手法として、図4に示されるような、遠隔力を利用した研究がある。Disney Researchの設計した図4(a)のAIREAL装置(Sodhi et al., 2013)は、圧縮空気圧場によって提示するエアジェット型だが、力の伝達が遅く、没入感の高い力覚提示には向かない。Carterらの設計した図4(b)のハapticディスプレイ(Carter et al., 2013)は、集中超音波の放射圧によって提示する超音波型だが、超音波は届く距離が短く、人体への影響についても不安がある。Tongらの設計した図4(c)の外科用手術シミュレータのマスタシステム(Tong et al., 2016, 2018)は、電磁力によって提示する電磁型だが、コイルが平面上に固定されているため、コイル付近でなければ力覚提示できない。

以上でまとめたように、外力提示を可能とした非接地型ハapticインターフェースをマスタ・スレーブのマスタとして利用するには課題が残っている。

1.2 研究目的

前述した背景を踏まえ、全方向の外力を広い範囲で提示可能な非接地型ハapticインターフェースの開発を研究目的として設定する。仮に、この目的を満足するインターフェースを手術ロボットに適用すれば、以下のような効果が期待できる。

- 摩擦による引っ掛けりがなく、精密な作業が可能。
- 通常操作時にスタイルスにかかる力をゼロにできるため、微細な提示力も感受できる。
- 長時間の手術でも疲れにくい。

上記の目的のために、本研究では非接触遭遇型ハapticインターフェースを提案する。このシステムは、第1.1.2項で説明した遭遇型と電磁型を組み合わせた新規のハapticインターフェースである。ユーザの持つスタイルスに対し、遠隔力発生装置から遠隔力を発生させることでハaptic情報を提示する。また、遠隔力発生装置をロボットアームの先端に搭載し、常にスタイルスと遠隔力発生装置が一定の相対位置を保ちながら遭遇を続けることで、広い範囲での力覚提示を可能とする。

提案するシステムを構築し、その有効性を実験により検証する。なお、本報告書の目標については別途設定し、第2.2節で述べることとする。

1.3 本報告書の構成

本報告書の構成について、各章の概要を以下に述べる。

第1章では、本研究の背景および目的を述べた。

第2章では、本研究で提案する非接触遭遇型ハapticインターフェースについての概要を説明した後、システムを構築するために必要な技術をまとめる。

第3章では、非接触遭遇型ハapticインターフェースの一部となるコイルアレイを試作する。

第4章では、ユーザの持つスタイルスに指定した力を発生させるコイル電流を計算する。

第5章では、第3章で試作したコイルアレイに、第4章の計算結果を適用することで所望の力が提示できることを実験から確認し、その結果および考察を記述する。

第6章では以上をまとめ、今後の課題について示す。

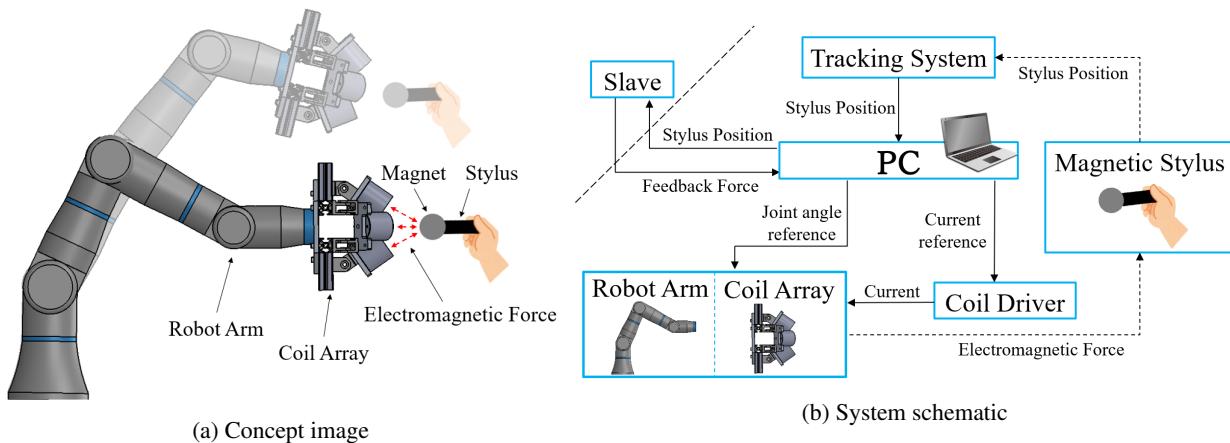


Fig. 5 Noncontact Encounter-type Haptic Interface

2. 非接触遭遇型ハapticインターフェースの提案

2.1 全体システム概要

提案する非接触遭遇型ハapticインターフェースのコンセプトイメージを図 5(a) に、システム概略図を図 5(b) に示す。

提案するシステムでは、力覚提示のために遠隔力を用いるが、本研究では遠隔力の中でも引力・斥力をともに発生可能な電磁力を採用する。複数のコイルからコイルアレイを構成し、コイル電流を制御することで、ユーザーの手持する磁石付きスタイラスに全方向の力を発生させることができる。さらに、コイルアレイをロボットアームの手先に搭載することで、ロボットアームの可動範囲内であれば、スタイラスがどの位置でも同じ最大提示力を出力可能である。

スタイラス-コイルアレイ間の相対位置は、トラッキングシステムから取得したスタイラスの座標と、順運動学で求まるロボットアームの手先座標から算出される。この算出された相対位置が変わらないように、ロボットアームがスタイラスを追従する。しかし実際には、スタイラスの動きに対して、ロボットアームは少し遅れて追従する。したがって、複数のコイルに流す電流は、スタイラス-コイルアレイ間の相対位置のずれを考慮して制御される必要がある。

2.2 システム構築に必要な技術

本システムを構築するにあたり、必要になる技術として、以下の 3 つが挙げられる。

- 1) コイルアレイを構成する複数のコイルに流す電流を制御することで、ユーザーの手持するスタイラスに、指定した指定した方向・大きさの電磁力を発生させる。
- 2) トラッキングシステムにより、スタイラスを高速で位置センシングする。
- 3) コイルアレイを搭載したロボットアームで、できる限り遅れなくスタイラスを追従する。

上記の技術要素を組み合わせ、非接触遭遇型ハapticインターフェースを構築・評価することを本研究の目的としているが、本報告書では 1) の電磁力制御に関して、スタイラス-コイルアレイ間の相対位置を固定した状態で達成することを目標とする。

3. コイルアレイの試作

3.1 コイルアレイの役割と設計パラメータ

本章では非接触遭遇型ハapticインターフェースの一部となるコイルアレイを試作する。コイルアレイは、スタイラスに所望の並進力を発生させる役割を持ち、そのコイル配置は重要となる。まず配置するコイルの数は、並進 3 自由度の力を制御するために最低でも 3 つ必要であるが、本研究では 4 つとした。設定したコイル数をもとに設計したコイルアレイの図面を図 6 に示す。

コイルは直径 60 mm の丸型電磁石 (フジタ社製, FSGP-60) を使用し、コイル半径 r は既知として扱う。そのため、コイルアレイ製作に必要な設計パラメータは、図 6 のコイル角度 θ およびコイル-軸交点間距離 l とな

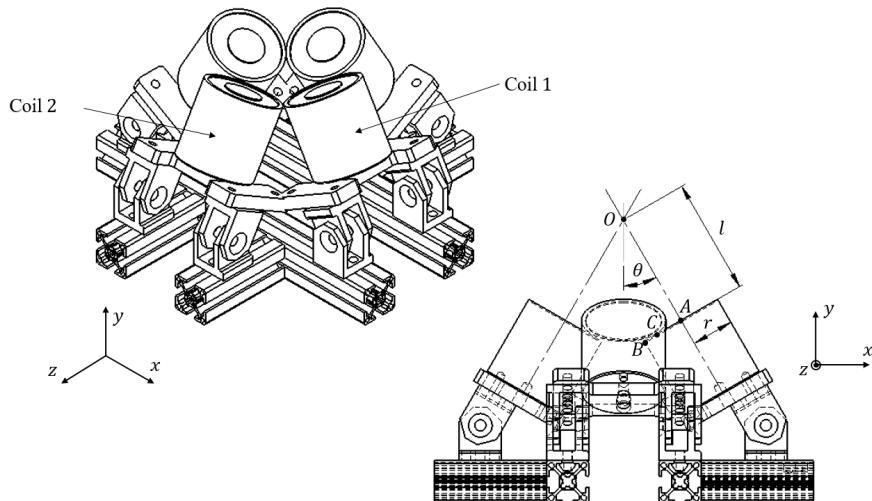


Fig. 6 Drawing of Coil Array

る。ここで、 l は磁石-コイル間距離に相当する。なぜならば、コイルアレイはロボットアームに搭載され、点 O と磁石の中心が一致するようにスタイルスを追従するためである。

コイル角度が θ の場合、 l が最小となるのはコイル同士が接触する状態の時である。本来、 θ と l は独立であるが、最大提示力の観点から、磁石-コイル間距離をできるだけ小さくすることが望ましいため、コイル同士が接触する条件を加えると、 l が θ の関数 $l(\theta)$ として求まる。したがって、決定すべきパラメータは θ のみとなる。

以降、第 3.2 節で $l(\theta)$ を計算し、第 3.3 節で θ を実験的に決定する。そして、決定した θ をもとに、実際に試作したコイルアレイを第 3.4 節で示す。

3.2 コイル角度 θ とコイル-軸交点間距離 l の関係

コイル同士が接触するという拘束条件のもとで、 l を計算し、 $l(\theta)$ を求める。図 6 の点 A はコイル 1 の上面中心点、点 B はコイル 1 の上面下端点、点 C はコイル 1 とコイル 2 の接觸点を表し、これらを用いて l を計算する。

コイル 1 の軸方向単位ベクトル n_1 は、

$$n_1 = \begin{bmatrix} n_{1x} \\ n_{1y} \\ n_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

である。ここで、 \overrightarrow{AB} を ϕ 回転させて、 \overrightarrow{AC} に一致させる。 n_1 回りの回転行列 $R_n(\phi)$ は、ロドリゲスの回転公式より、

$$R_n(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi + n_{1x}^2(1 - \cos \phi) & n_{1x}n_{1y}(1 - \cos \phi) - n_{1z}\sin \phi & n_{1x}n_{1y}(1 - \cos \phi) - n_{1z}\sin \phi \\ n_{1x}n_{1y}(1 - \cos \phi) - n_{1z}\sin \phi & \cos \phi + n_{1x}^2(1 - \cos \phi) & n_{1x}n_{1y}(1 - \cos \phi) - n_{1z}\sin \phi \\ n_{1x}n_{1y}(1 - \cos \phi) - n_{1z}\sin \phi & n_{1x}n_{1y}(1 - \cos \phi) - n_{1z}\sin \phi & \cos \phi + n_{1x}^2(1 - \cos \phi) \end{bmatrix} \quad (2)$$

であるので、

$$\overrightarrow{AC} = R_n(\phi)\overrightarrow{AB} \quad (3)$$

$$= R_n(\phi) \begin{bmatrix} -r\cos \theta \\ -r\sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

が成り立ち、 \vec{OC} は以下のように求まる。

$$\vec{OC} = \vec{OA} + \vec{AC} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} l \sin \theta \\ -l \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} + R_n(\phi) \begin{bmatrix} -r \cos \theta \\ -r \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

\vec{AC} はコイル 1 およびコイル 2 の軸を含む平面上にあるので、係数 a, b を用いて、

$$\vec{AC} = an_1 + bn_2 \quad (7)$$

と表される。式(7)を ϕ について解けば、以下のように計算される。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\cos \theta} \right) \quad (8)$$

また、 \vec{OC} は xz 平面を y 軸回りに -45° 回転させた平面上にあるので、係数 c, d を用いて、

$$\vec{OC} = c \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

と表される。式(9)を l について整理すれば、

$$l = \frac{r(\sin \phi + \cos \theta \cos \phi)}{\sin \theta} \quad (10)$$

が得られる。

以上、式(8)および式(10)より、 $l(\theta)$ が求まり、 θ を決定すればコイルアレイのコイル配置が確定できる。

3.3 コイル角度の実験的決定

3.3.1 実験目的

コイルアレイの設計パラメータである θ を実験的に決定する。決定のための条件として以下の 2 つを設定した。

1 つは、全方向の力を提示するために、発生する力のスタイラス軸方向およびそれに垂直な方向の成分が偏りを持たないこと。もう 1 つは、できるだけ大きな力を提示するために、第 3.2 節で求めた $l(\theta)$ をなるべく小さくすることである。

3.3.2 実験装置

実際に設計・製作を行った実験装置を図 7(a)に、実験装置のハードウェアシステムを図 7(b)に示す。

コイルには直径 60 mm, 定格電圧 90 V, 定格電流 0.18 A, 最大吸着力 1100 N の丸型電磁石(フジタ社製, FSGP-60)を使用した。また、磁石には直径 20 mm, 表面磁束密度 650 mT, 吸着力 5.0 kg のポール型ネオジム磁石(二六製作所社製, NB006)を使用し、その材質は N-35 であった。

Torobo Arm の位置制御によって、コイルと磁石の相対位置を調整する。位置調整したコイルに流す電流はプログラマブル安定化電源装置(TEXIO 社製, PSW-360M160)から供給される。この際、制御コンピュータから電源装置へ送信される指令電流はソケット通信で送信される。コイルの生成する磁場によって磁石が受ける磁力はスタイラスの下部に取り付けられた 6 軸力センサ(BL AUTOTEC 社製, MICRO 4/30-A)により測定する。この力センサのアナログ入力は IO ボードを用いて取得する。IO ボードと Ethernet で接続され、通信を行う制御コンピュータ(東芝社製, Dynabook-B65/J)は、OS に Ubuntu 18.04 LTS を採用し、制御周期は 1ms とした。

なお、図 7(a)の磁石は、着磁方向とスタイラスの軸方向が一致するように取り付けられているため、コイルの角度が小さいほどスタイラスの軸方向の力が発生し、角度が増加するに連れてスタイラスの軸に垂直な方向に力が発生する。

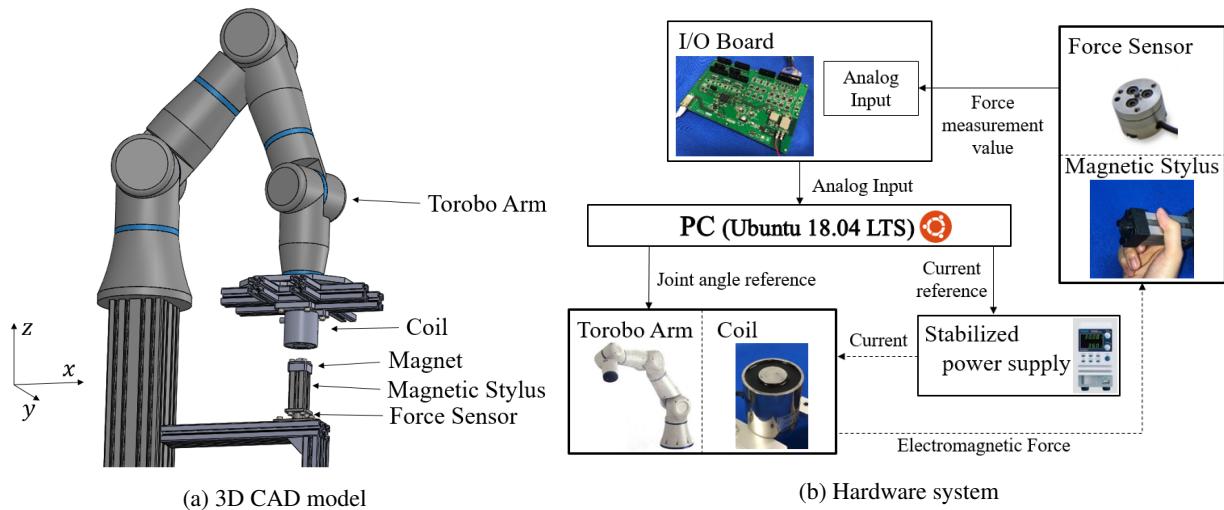


Fig. 7 Experimental apparatus for coil angle determination experiment

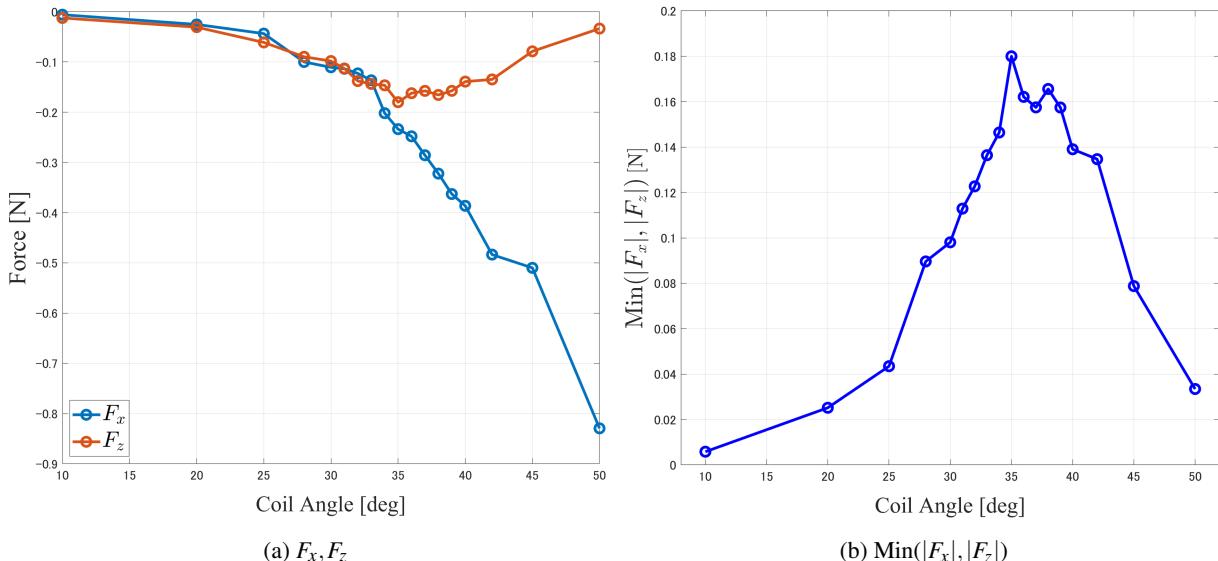
3.3.3 実験方法

実験手順は以下の通りとする。

- 1) コイル角度 θ を適当な値に決め、式 (10) よりコイル-磁石間距離 $l(\theta)$ を計算する。
- 2) コイルの位置・姿勢が、 y 軸回りに角度 θ 、磁石からの距離 l となるように、Torobo Arm を動かす。
- 3) コイルに定格電流 0.18A の電流を流し、力センサの値を記録する。
- 4) コイル角度を変更しながら、1)~3) の操作を繰り返す。
- 5) 各角度での測定値のうち、 $|F_x|$ と $|F_z|$ の小さい値のみをプロットする。

3.3.4 実験結果

実験手順 1)~4) で測定した力センサの値を図 8(a) に示す。図 8(a) の各コイル角度 θ において、 $\text{Min}(|F_x|, |F_z|)$ をプロットしたグラフを図 8(b) に示す。図 8(b) はスタイルス先端の磁石に対し、全方向に出せる最低の力を意味している。つまり、 $\theta = 35^\circ$ において x 方向および z 方向に少なくとも 0.18N の並進力を出力できることが分かる。


 Fig. 8 Force in the case of θ, l

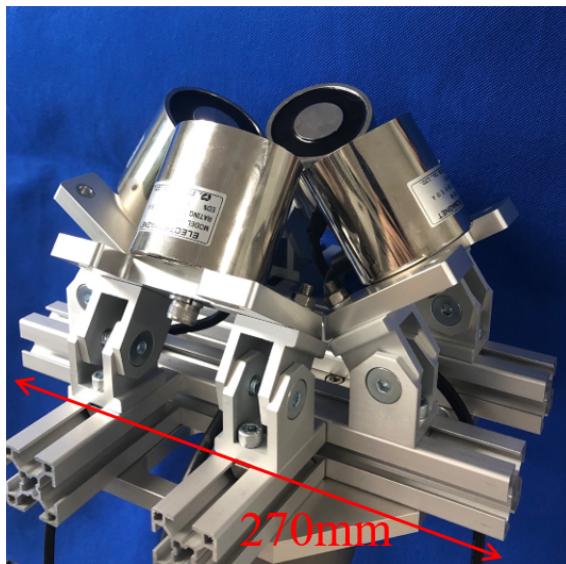


Fig. 9 Prototype Coil Array

3.4 試作したコイルアレイ

図 8(b) よりコイル角度を 35 度と決定し、実際に試作したコイルアレイの写真を図 9 に示す。

4. ユーザへの提示力制御

4.1 提示力とコイル電流の関係

コイルアレイを構成する 4 つのコイルに流す電流を制御することで、磁石付きスタイラスに指定した方向・大きさの力を提示する。そこで、ユーザに力 \mathbf{F} を与える電流 $\mathbf{I} = [I_1, I_2, I_3, I_4]^T$ を求める。ただし、 I_i ($i = 1, 2, 3, 4$) は 4 つのコイルそれぞれの電流である。

コイルアレイが磁石付きスタイラスに与える力 \mathbf{F} は、係数行列 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$ を用いて、

$$\mathbf{F} = \mathbf{AI} \quad (11)$$

で計算される。 \mathbf{F} は並進 3 自由度の力であり、4 つのコイルで制御するには 1 自由度冗長である。そこで、電流の 2 乗和 $|\mathbf{I}|^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2$ が最小という条件を付加する。よって、評価関数 $V(\mathbf{I})$ は、

$$V(\mathbf{I}) = \mathbf{I}^T \mathbf{I} \quad (12)$$

と置ける。この評価関数 $V(\mathbf{I})$ を式 (11) のもとで極小化する解を、ラグランジュ乗数 $\boldsymbol{\lambda}$ を用いて求める。ラグランジュ関数を、

$$V(\mathbf{I}, \boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{I}^T \mathbf{I} + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{F} - \mathbf{AI}) \quad (13)$$

とすると、極小点で $\frac{\partial V}{\partial \mathbf{I}} = 0$ から、

$$2\mathbf{I} - \mathbf{A}\boldsymbol{\lambda}^T = 0 \quad (14)$$

$$\therefore \mathbf{I} = \frac{1}{2} \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (15)$$

が成り立つ。また、 $\frac{\partial V}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = 0$ より、

$$\mathbf{F} - \mathbf{AI} = 0 \quad (16)$$

が成り立つ。式 (15) を式 (16) に代入すると、

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \mathbf{AA}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (17)$$

$$\therefore \boldsymbol{\lambda} = 2(\mathbf{AA}^T)^{-1} \mathbf{F} \quad (18)$$

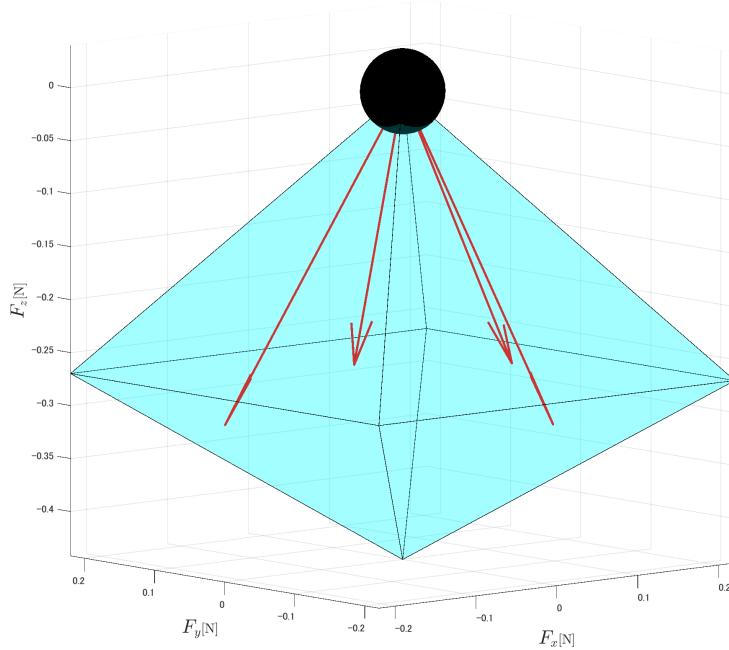


Fig. 10 Space that contains the vector of feedback force that can be provided

となり、式(18)を式(15)に代入することで、以下のように \mathbf{I} が計算される。ただし、 \mathbf{A}^+ は \mathbf{A} の擬似逆行列である。

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}^T (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{F} \quad (19)$$

$$= \mathbf{A}^+ \mathbf{F} \quad (20)$$

したがって、式(20)で計算された電流 \mathbf{I} は式(12)の評価関数を最小とする解であり、この電流を各コイルに流すことで、ユーザに力 \mathbf{F} を提示できる。

4.2 ユーザに提示可能な力ベクトル

式(11)の係数行列 \mathbf{A} は、電流と力センサの測定値から実験的に定まる。また、本研究で使用したコイルの定格電流より、 $0.0 \text{ A} \leq I_i \leq 0.18 \text{ A}$ である。したがって、提示力 \mathbf{F} の取り得る範囲が式(11)より計算できる。 \mathbf{F} を、磁石中心を始点とする力ベクトルとして考えれば、ベクトルの終点が取り得る範囲は図 10 に示す水色の八面体で表すことができる。なお、図 10 の黒い球は磁石を表し、赤いベクトルは提供可能な力ベクトルの例をいくつか描いたものである。

本研究ではコイルの電流を安定化電源装置で供給したため、電流の向きを変えることができず、図 10 が示すように全方向の力を発生できない。しかし、H ブリッジ回路などにより電流を反対方向に流す機能を実装することで、非接触遭遇型ハaptic インターフェースに必要な全方向の力覚提示が可能となる。

5. 磁石付きスタイラスへの提示力制御実験

5.1 実験目的

第 4.1 節で計算した式(20)で与えられる電流 \mathbf{I} を各コイルに流すことで、図 10 のベクトル空間内の任意の力ベクトルを出力できることを確認する。

ある力の指令値を与えた場合の力センサの測定値を確認することで、静特性を評価する。また、指令値を増加させながら測定した結果と、減少させながら測定した結果を比較し、ヒステリシス特性についても確認する。

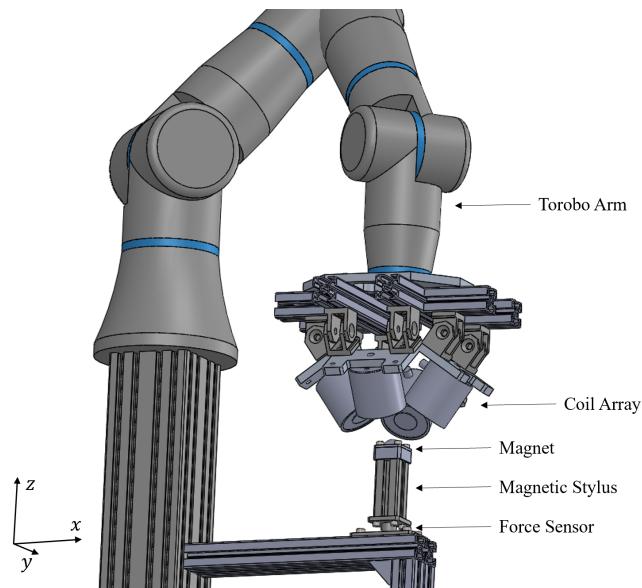


Fig. 11 Experimental apparatus for presentation force control experiment

5.2 実験装置

図 7(a) のコイルを取り外し、代わりに第 3 章で試作したコイルアレイを取り付けることで図 11 のような実験装置を製作した。

実験開始時に Torobo Arm を動かし、磁石の位置がコイル軸交点に一致するように調整する。このとき、コイルアレイに配置するコイルの角度は 35 度としたため、式 (10) から磁石-コイル間距離は 68 mm である。

5.3 実験方法

実験手順を以下の通りとする。

- 1) $[0, 0, -1]^T$ の方向に、力の指令値を 0.0N から 0.8N まで 0.1N ずつ増加させ、それぞれの指令値に対する測定値を記録する。
- 2) 続けて、指令値を 0.8N から 0.0N まで 0.1N ずつ減少させ、ヒステリシス特性について確認する。
- 3) 横軸を指令値、縦軸を測定値として結果をプロットし、傾き 1 の直線を指標として、指令した通りの提示力を得られているかを確認する。
- 4) 1)～3) の実験を $[1, 0, -2]^T$ の方向についても同様に行う。

5.4 実験結果

$[0, 0, -1]^T$ 方向に力の指令値を変化させた場合について、 z 方向の測定結果を図 12 に示す。黒い実線は指令値と測定値が一致していることを意味する傾き 1 の直線であり、黄色の背景は図 10 から求まる提示可能範囲の領域を示している。この提示可能範囲は、図 10 の $[0, 0, -1]^T$ 方向の範囲であり、 $-0.45 \text{ N} \leq F_{\text{ref } z} \leq 0.0 \text{ N}$ と求まる。図 12 より、測定値が実線近くにプロットされており、提示可能範囲において指令した方向・大きさの力を発生できていると言える。また、指令値を増加させた場合の測定値を赤丸、減少させた場合の測定値を青丸で表示しており、ヒステリシスがほぼないことを確認できる。

同様に、 $[1, 0, -2]^T$ 方向に力の指令値を変化させた場合について、 z 方向の測定結果を図 13(a) に、 x 方向の測定結果を図 13(b) に示す。提示可能範囲は、図 10 の $[1, 0, -2]^T$ 方向の範囲であり、 $-0.32 \text{ N} \leq F_{\text{ref } z} \leq 0.0 \text{ N}$, $0.0 \text{ N} \leq F_{\text{ref } x} \leq 0.16 \text{ N}$ と求まる。図 13(a) および図 13(b) より、提示可能範囲において指令値通りの力を発生できていることが確認された。

以上の結果より、本報告書の目標であった所望の遠隔力を発生できることを確認した。

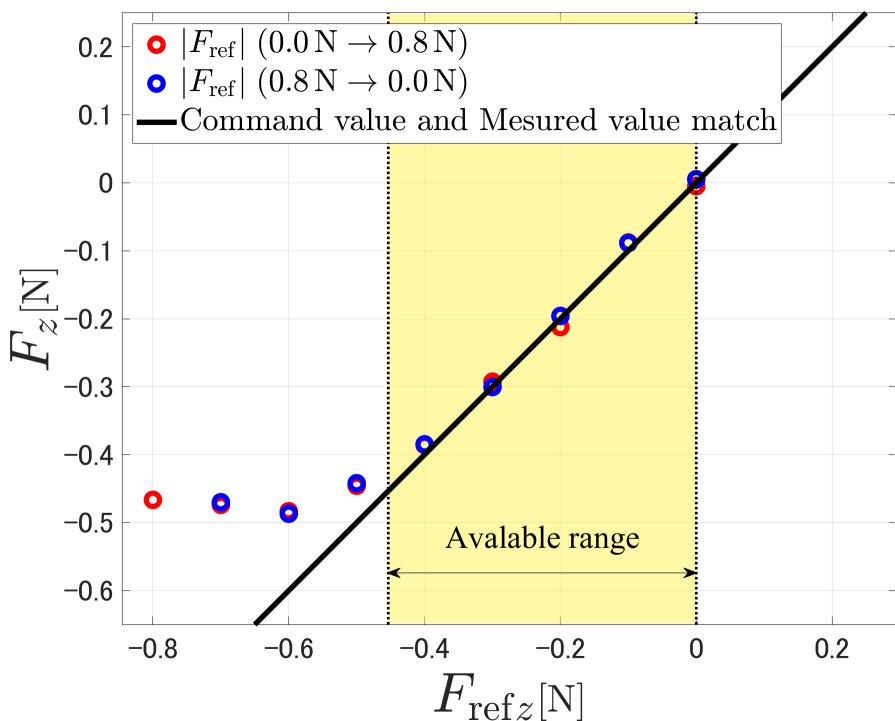
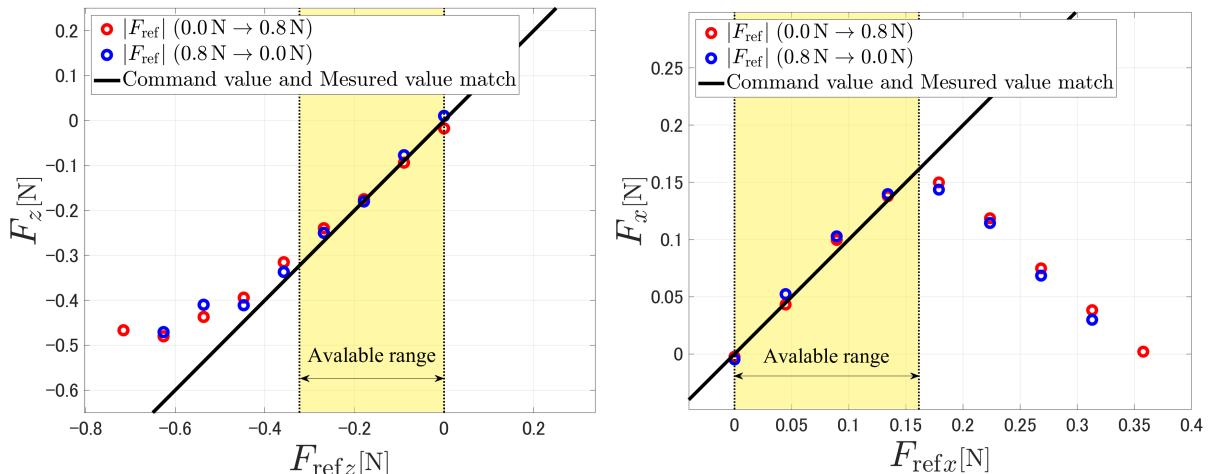

 Fig. 12 F_z when changing the force command value in the $[0, 0, -1]^T$ direction

 (a) Comparison of command value and measured value of F_z (b) Comparison of command value and measured value of F_x

 Fig. 13 \mathbf{F} when changing the force command value in the $[1, 0, -2]^T$ direction

6. 結 言

6.1 本報告書のまとめ

非接地型ハプティックインターフェースは、従来のマスター・スレーブのマスターとして用いられてきた接地型ハプティックインターフェースの機械的な摩擦の問題を解決する反面、ハプティック情報を提示できないという課題がある。そこで、全方向の外力を広い範囲で提示可能な非接地型ハプティックインターフェースの開発を目標とし、その手段として、非接触ハプティックインターフェースを提案した。

提案したシステムを構築するために必要な技術要素の1つとして、コイル電流制御によるスタイルスへの提示力制御が挙げられる。そこで本報告書では、指定した方向・大きさの力をスタイルスに発生させることを目標として、装置を作成し、実験を行った。実験は、直径60 mmの丸型電磁石と直径20 mmのネオジム磁石を用いた。コイル-磁石間距離が68 mmの条件では、最大0.45 Nの指定した並進力を発生でき、目標を達成した。

6.2 今後の課題

今後の課題として、本報告書で述べてきた提示力制御に関する課題と、全体の課題がある。まず、全体の課題を以下に示す。

- ロボットアームでスタイラスを追従し、力覚提示装置として機能することを確認し、提案するシステムの有効性を示す。
- マスター・スレーブシステムのマスターとして非接触遭遇型ハapticインターフェースを適用する。

また、提示力制御に関する課題を以下に示す。

- 磁石がコイル軸交点からずれた状態においても、指定した力を正確に提示できるようにする。
- 本報告書では静特性評価を行ったが、動特性の評価に関しても行う。
- 電流の方向を切り替えることで、全方向の力を提示可能にする。
- より大きなフィードバック力を提示するために、コイル配置を変更する。
- 3次元電磁界解析による理論をもとに、システムの最適化を図る。

文 献

3D Systems Inc. 3D Systems Touch. <<https://ja.3dsystems.com/>>. (参照日 2019年7月31日).

Muhammad Abdullah, Minji Kim, Waseem Hassan, Yoshihiro Kuroda, and Seokhee Jeon. An Encountered-Type Kinesthetic Haptic Interface with Controllable Force Feedback: Initial Example for 1D Haptic Feedback. *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '17*, , No. October, (2017), pp. 115–117.

Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram Subramanian. UltraHaptics : Multi-Point Mid-Air Haptic Feedback for Touch Surfaces. *Proc. UIST 2013*, (2013), pp. 505–514.

Intuitive Surgical Inc. da Vinci Robotic Assisted Surgical Systems. <<https://www.intuitivesurgical.com/jp/s.php>>. (参照日 2019年7月31日).

Rajinder Sodhi, Ivan Poupyrev, Matthew Glisson, and Ali Israr. AIREAL: Interactive Tactile Experiences in Free Air. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, (2013).

Qianqian Tong, Zhiyong Yuan, Mianlun Zheng, Weixu Zhu, Guian Zhang, and Xiangyun Liao. A novel magnetic levitation haptic device for augmentation of tissue stiffness perception. (2016), pp. 143–152.

Qianqian Tong, Zhiyong Yuan, Xiangyun Liao, Mianlun Zheng, Tianchen Yuan, and Jianhui Zhao. Magnetic Levitation Haptic Augmentation for Virtual Tissue Stiffness Perception. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 12, (2018), pp. 3123–3136.

Kotaro Yamaguchi, Ginga Kato, Yoshihiro Kuroda, Kiyoshi Kiyokawa, and Haruo Takemura. A Non-grounded and Encountered-type Haptic Display Using a Drone. , No. October, (2016), pp. 43–46.

平田 亮吉, 野洋 星, 前田 太郎. The Virtual Reality Society of Japan NII-Electronic Library Service A Force and Shape Display for Virtual Reality System. (1996).

謝 辞

本研究を行うにあたり、指導教員として研究・開発活動全般において熱意あるご指導を賜りました只野 耕太郎 淄教授に深く感謝申し上げます。

研究室の先輩方には技術面・生活面で大変お世話になりました。同期の植松君は時間に追われながら研究を進める苦しい時間を共に乗り越えることができました。また、秘書のお二方のサポートにより、研究を円滑に進めることができました。皆様に厚く御礼申し上げます。

最後に、温かく見守り支えて下さった両親に深く感謝し、本研究の謝辞とさせて頂きます。

令和1年8月