

# 釣竿を用いた力覚提示デバイスの制御

## Control of Haptic Display Using Fishing Rod

○学 内藤 大樹 (電通大)

梶本 裕之 (電通大)

Daiki NAITO, The University of Electro-Communications, naito@kaji-lab.jp  
Hiroyuki KAJIMOTO, The university of Electro-Communications

We have proposed a grounded haptic display that can widely present the force sensation using fishing rod. The display incorporates a fishing rod to present the force sensation at the user's fingertip using a thread being reeled from the tip of the fishing rod. This device requires conversion from the position of the user's fingertip and magnitude of the force to necessary winding force of the thread and the posture of the fishing rod. In this paper, we developed a control method and evaluated it by considering a case wherein the force to be presented is exerted in the vertical direction.

**Key Words:** Virtual reality, Human interface, Haptic display, Fishing rod

### 1. はじめに

バーチャルリアリティの分野において、人間が実世界で感じる感覚を再現する感覚提示装置の研究が盛んに行われている。バーチャル空間の物体の存在感を向上させるため、力覚提示は重要な要素である[1]。

力覚提示装置はユーザの動きを正確に追跡し、必要な力を指先や道具に提示するシステムである[2]。力覚提示装置を用いることで、ユーザはコンピュータが作り出すバーチャルなオブジェクトに触れる感覚を感じることができる[3][4][5]。空間の任意の地点に任意方向の力を提示するためには、まず考えられる基本的な構造はシリアルリンクのロボットアームを用いるもので、PHANTOM[4]はその代表である。一方で大きなワークスペースを実現するには、ワークスペースと同等の長さの剛体棒が空間中を動くシステムとなり、危険性を増すと同時に、剛体の棒の末端に力を発生させるために基部に大出力のモータが必要となる。別の構造として SPIDAR[5]のように糸による牽引を用いたものが考えられる。しかしワークスペース全体を覆う形で糸の巻き取り装置を多数設置しなければならず、大きなワークスペースを実現するには大掛かりな装置が必要となる。

そこで、我々は広いワークスペースを実現するために、釣竿を用いて広範囲に指先に力覚を提示できる新たなデバイスを提案する(図1)。釣竿から出ている糸を指に取り付け、糸の巻き取り力を制御することで指に力覚を提示する。釣竿の基部にはパン・チルト機構を備える。釣竿は軽量であるため、比較的出力の低いモータでも高速に姿勢を制御することができる。糸を完全に任意の方向に牽引できない(例えば下向きの力は出せない)という制約はあるものの、指を動かし、力の大きさを提示できる範囲という意味では広いワークスペースを持つ手法であると考えられる。

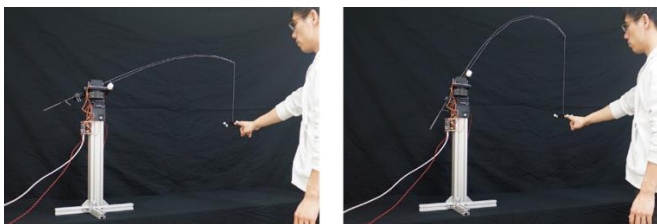


Fig. 1 (left) Overview of device; (right) fishing rod is bent

本稿では提案システムの構成を示すと同時に、提示したい力が鉛直方向である場合を例にとり、制御方法を開発、評価する。

### 2. 関連研究

ここでは特に糸を用いた力覚提示デバイスについて述べる。糸を用いた力覚提示デバイスは大きく分けて装着型と設置型に分ける。

装着型は、デバイスをユーザの身体に装着して力覚を提示する手法である。装着型の力覚提示デバイスは、Hirose らの HapticGEAR[6]や Hosseini らが開発した糸のねじれによるアクチュエータを利用したデバイス[7]がある。HapticGEAR はバックパック型デバイスであり、デバイスから出る 4 本の糸を巻き取り制御することで力覚を提示できる。対して、Hosseini らが開発したデバイスは肩に取り付け、内蔵したモータの回転から糸をねじることで力覚を提示するデバイスである。装着型の力覚提示デバイスの特徴は、デバイスを身体に装着しているため、力覚の提示可能範囲が広くユーザが自由に動きながら使用できる。しかし、デバイスを身体に装着する手間がかかってしまうことや装置の重量からユーザに負担を与えてしまう問題がある。さらに、身体に装着したデバイスで力覚を提示すると、意図した部位へ力覚の反力が装着部で発生してしまうという課題がある。

それに対して、設置型はデバイスを壁や床に固定し力覚を提示する手法である。設置型の力覚提示デバイスとして、SPIDAR[5]が挙げられる。SPIDAR の基本構成はキューブ型フレームとその頂点の 4 つのモータであり、各モータで巻き取る 4 本の糸の結合部をユーザの指に取り付け力覚を提示する。設置型の力覚提示デバイスは、デバイスが身体から離れて設置されており、意図した部位への力覚の反力を受けることがないため、強い力を生成することが可能である。しかし、デバイスは一か所に固定されるため、提示できる力の範囲が制限されてしまう問題がある。さらに、SPIDAR は複数本の糸を使用していることから、複数の力の方向を表現できるが、糸同士の干渉の問題から指先の動作範囲が限定される。SPIDAR は長年にわたり開発が続いており、様々な種類が存在する[8]。複数の糸を用いるという基本構成から生じる提示可能範囲が狭くなるという課題に対しては、1 本の糸でユーザの指に力覚を提示する SPIDAR-S[9]や回転可能なフレーム構造を用いることで手首のひねりに対応した SPIDAR-MF[10]が提案されている。しかし、SPIDAR-S については多自由度、広範囲の力覚提示は想定しておらず、SPIDAR-MF は多指への対応時の糸の

干渉防止が主眼であった。

以上より、糸を用いた力覚提示装置に要求される点は、意図した部位以外への力の発生を抑える、体と糸の干渉を抑える、広範囲に力覚を提示する、の3つである。我々が提案した力覚提示デバイスは、上記の3つの要求を満たしている。装着型の欠点である意図した部位以外への力の発生を抑えることは、デバイスを設置型で構成することで解決した。次に、身体と糸の干渉を抑えるために、釣竿から出る1本の糸を用いることで要求を満たした。最後に、装着型の利点である広範囲に力覚を提示することに対して、釣竿本体を支える台座を駆動させるという方法で実現した。

### 3. デバイス構成

本研究で提案するデバイスを図1に示す。釣竿から出る糸をユーザの指先に取り付ける。そして、釣竿の糸を巻き取るために、リール部にDCモータ(maxon, 135079, 10W)を取り付け、PWM制御にて制御している。釣竿を用いて多方向の力覚を提示するため、釣竿を支える台座に2台のサーボモータ(JX Servo, C70 Digital Servo, 92W)を搭載し、ピッチ軸、ヨー軸で回転するパン・チルト機構となっている。指先の位置はデバイスの周辺に設置した光学式モーションキャプチャ(OptiTrack, V120: Trio)で検出する。このため、指先部にはOptiTrackのマーカを取り付ける。以上のデバイス構成で指先に取り付けた糸の巻き取りと釣竿の姿勢を制御して指先に力覚を提示する。

力覚提示の手法として釣竿を用いることで3つの効果が得られる。1つめは、糸と身体との干渉を比較的少なく抑えることができる効果である。釣竿から出る1本の糸のみでユーザの指先に力覚を提示するため、複数本の糸を用いる力覚提示デバイスと比較すると、糸と身体の接触や糸同士の干渉を抑えることが可能である。また1本の場合は、糸の張る方向が指先に加える力の方向と一致するため、複数の糸による力の分解を考える必要がない単純さも利点として挙げられる。

2つめは、釣竿が軽量であるため、比較的低トルクのモータでも高速に釣竿の姿勢を制御できる効果である。高速に釣竿の姿勢を制御できると、指先に提示する力の方向も高速に変更することが可能となる。

3つめは、釣竿のしなり自体が強い力を指先に提示できる効果である。釣竿の姿勢を制御するモータに釣竿の長さや糸の張力から計算されるトルクが働くが、釣竿のしなりは釣竿の長さを等価的に短くする働きを持つため、強い力を必要とする場合には必要なトルクを抑えることができる。

### 4. 制御方法

指先に取り付けた糸が常に真上に牽引する制御について考える。我々が提案するデバイスは指先の位置を検出して、糸の巻き取りと釣竿の姿勢を制御することで指先に取り付けた糸を垂直方向に牽引する。そのため、指先の位置は制御システムの入力情報になる。本デバイスをバーチャルリアリティのアプリケーションに導入する上で、バーチャル空間内のオブジェクトに接触したかどうかを判断し、提示する力の強さを変化させる必要がある。さらに、バーチャルなオブジェクトに適した柔らかさを表現するには提示する力の強さを変化させることは重要な要素である。すなわち、指先に提示する力の方向および強さが、デバイス制御によって実現すべき目標となる。今回は簡単のため力の方向が真上の場合を扱う。

シリアルリンク型の力覚デバイスの場合、特にPHANTOM[4]等のインピーダンス型の制御では、今回の状況と同様にエンドエフェクタの位置が入力、提示する力の方向と

大きさが実現すべき目標である。通常のシリアルリンク型の力覚デバイスはリンク機構自体が変形することはないため、順キネマティクス計算によりエンドエフェクタの位置を計測し、逆ダイナミクス計算によりモータに必要なトルクを求めることが容易である。それに対して、提案するデバイスは釣竿のしなりが指先に提示する力と関係し、しなりを考慮した計算式を立てることが今のところ困難である。

そこで我々はまず、力の目標ベクトルと現在の糸の方向ベクトルとの差分を小さくするフィードバック制御について検討した。OptiTrackのマーカを指先だけでなく糸にも取り付け、糸の方向ベクトルを求める。図2に示すように、実際の糸のベクトルと目標ベクトルとの角度の差分からフィードバック制御を介して釣竿の姿勢を制御することができると考えた。

しかし実際にフィードバック制御を介して動作させると、糸が振動してしまう問題が生じた。この原因の一つは、OptiTrackの計測周期が120Hzであり、糸自体の振動周期に近く、フィードバック制御が困難であることが挙げられる。さらに糸の長さや張力は動的に変化するため糸の固有振動数も動的に変化する。

以上より、フィードバック制御で釣竿の制御を行うことは現時点では困難である。そこで、我々はフィードフォワード制御で釣竿を制御することとした。前述の通り、提案するデバイスにおける計測情報は指先の位置であり、目標値は指先に提示する力の強さと方向である。今回は力の方向を一定としている。これらの情報を入力したときに、糸の巻き取り力と釣竿の角度が出力情報として得られることが望まれる。このためには、指先の位置と糸の巻き取り力、釣竿の姿勢、糸の巻き取り力と釣竿の姿勢によって生じる力の関係を調査する必要がある。次章ではこれらの情報の関係について計測を行う。



Fig. 2 (left) Overview of feedback control; (right) actual situation

## 5. 計測

### 5.1 計測方法

本計測では、図3上の指先の位置 $x$ と糸を巻き取るモータへのDuty比指令値 $d$ 、釣竿の姿勢 $\theta$ 、糸の巻き取り力と釣竿の姿勢によって生じる力 $f$ の関係を計測する。提案デバイスは釣竿から出る糸を指先に取り付けることを想定しているが、本計測は指の代わりに1.2kgの錘を取り付ける。釣竿の角度は地面と平行な状態を0度と定義している。糸が錘を牽引する力を計測するため、錘を電子天秤に乗せて計測を行う。計測を行う前に電子天秤を起動させて錘の重量を記録し、糸で錘を引っ張ったときの電子天秤の出力の変化から牽引力を計算する。計測の際には、釣竿の姿勢と糸の巻き取り力を変化させ、錘に取り付けている糸が地面に対して垂直となるように調整した。本計測では、錘が垂直に牽引されているときのデバイスから錘までの距離 $x$ 、糸の巻き取りを制御しているモータのDuty比 $d$ 、釣竿のピッチ軸方向の角度 $\theta$ 、糸が錘を牽引する力 $f$ を記録する。

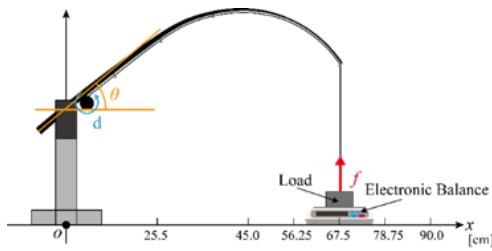


Fig. 3 Measurement environment

デバイスの位置を原点として 22.5cm, 45.0cm, 56.25cm, 67.5cm, 78.75cm, 90.0cm の場所に錘を設置した。そして、各位置で糸を巻き取るモータの Duty 比を 10%から 100%の間を 10%ずつ変化させて、その後糸が錘を垂直に牽引するように釣竿の角度を調整した。また、リール部のモータは Duty 比が 5%以上になると回転し始めるため、各位置で Duty 比が 5%の場合も計測している。位置を固定して 11 種類の Duty 比の値に対する釣竿の角度の計測を 5 回繰り返した。最終的に釣竿の角度と糸が錘を牽引する力の平均値を計測結果とした。

## 5.2 計測結果

得られた計測データから、錘の設置場所  $x$ 、糸の巻き取りを制御しているモータの Duty 比  $d$ 、釣竿のピッチ軸方向の角度  $\theta$  の関係を図 4 (a) に示す。また、錘の設置場所  $x$ 、リール部のモータの Duty 比  $d$ 、糸が錘を牽引する力  $f$  の関係を図 4 (b) に示す。

図 4 (a), (b) において錘を 90cm に設置したときのデータは 1 点しか存在しない。本研究で使用している釣竿の全長は 90cm であり、Duty 比が 5% のときがリール部のモータが回転し始める(釣竿がしなり始める)最小の Duty 比である。

錘を 78.75cm と 22.5cm に設置したときの計測データは錘を 67.5cm から 45.0cm に置いたときに得られた計測データよりもプロット数が少ない。錘を 78.75cm に設置した場合は Duty 比が 40% 以上になると垂直方向に牽引するための釣竿の姿勢が見つからなかった。また、錘を 22.5cm に設置した場合は Duty 比が 20% を超えると釣竿がピッチ軸方向だけでなく、ロール軸方向にも曲がり始めた。ロール軸方向に曲がってしまうと糸を垂直方向に牽引できていないため、30% 以上の Duty 比は計測していない。

提案するフィードフォワード制御は指先の位置  $x$  と提示した力の強さ  $f$  が与えられる情報であり、それらの情報から必要な糸巻き取りモータの Duty 比  $d$  と釣竿の姿勢  $\theta$  を求める。図 4 (b) を基に、指先の位置  $x$  と提示する力の強さ  $f$  を入力として糸巻き取りモータの Duty 比  $d$  を求め、次に図 4 (a) を基に指先の位置  $x$  とモータの Duty 比  $d$  から釣竿がとるべき姿勢  $\theta$  を求めるという流れで処理の手順を決めた。

以上の手続きを実現するために、図 4 の計測データから最小二乗法による回帰式を求めた。図 5 と図 6 に求めた回帰式による回帰曲線と複数の場所で得られた計測データを同時に示す。図 5 では  $x$  と  $f$  から  $d$  を、図 6 では  $x$  と  $d$  から  $\theta$  を得る回帰曲線を示しており、回帰曲線が計測データをよく表していることが読み取れる。

実際にフィードフォワード制御による動作確認を行った。図 7 に動作確認の様子を示す。ここでは力の強さを固定して指先を動かした。図 7 を見ると、指先を動かしても常に糸が指先を真上に牽引している様子が分かり、所望のフィードフォワード制御が実現していることがわかる(図 7 では糸がわかりにくい、釣竿の先端と指との間に糸が張られている)。

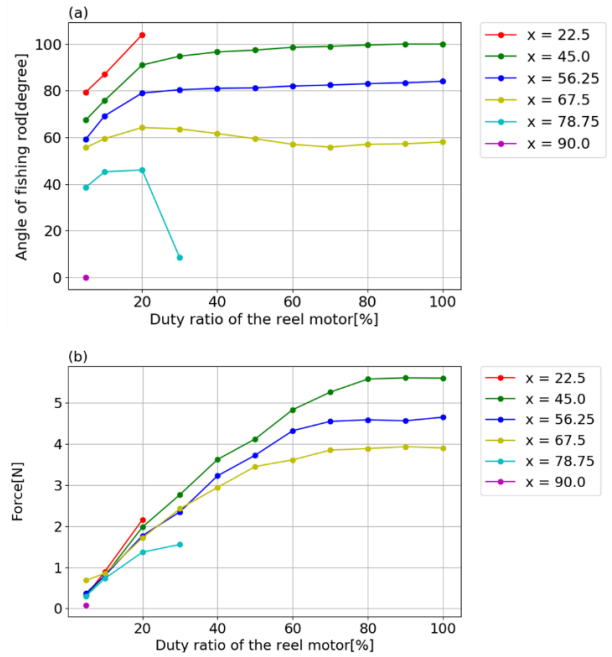


Fig. 4 Measurement results: (a) relationship between duty ratio of motor winding the thread and attitude of fishing rod; (b) relationship between duty ratio of motor winding the thread and pulling force of the thread

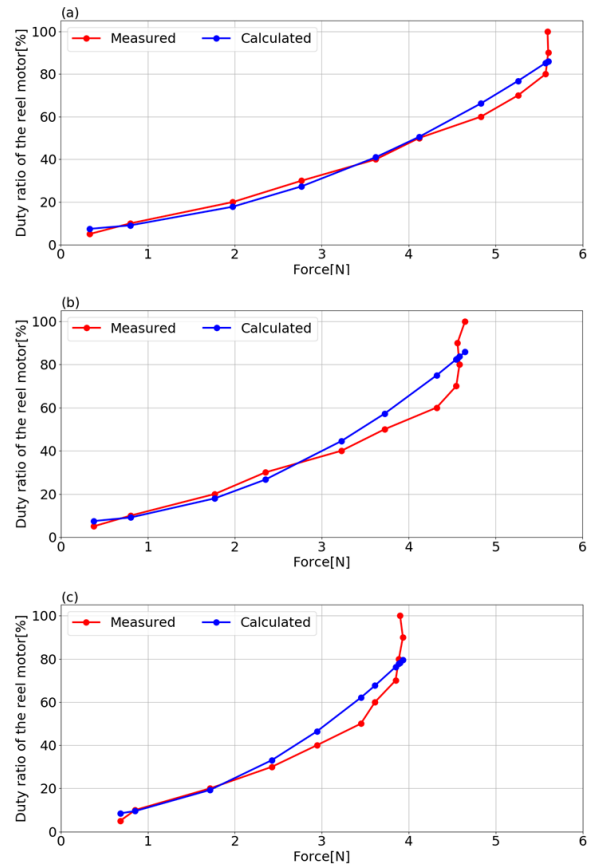


Fig. 5 Comparison of regression curves with measurements of thread pulling force and force winding the thread: (a)  $x=45.0\text{cm}$ ; (b)  $x=56.25\text{cm}$ ; (c)  $x=67.5\text{cm}$

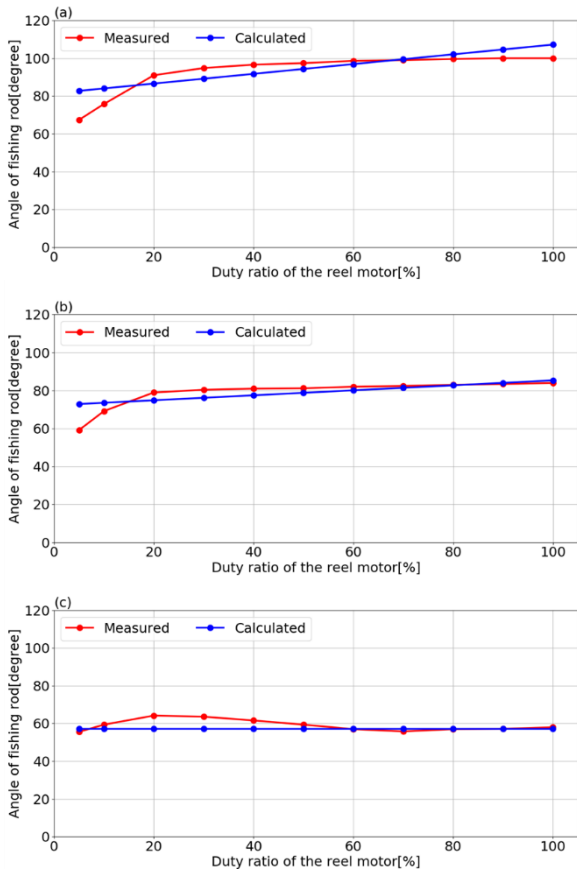


Fig. 6 Comparison of regression curves with measurements of force winding the thread and posture of fishing rod: (a)  $x=45.0\text{cm}$ ; (b)  $x=56.25\text{cm}$ ; (c)  $x=67.5\text{cm}$

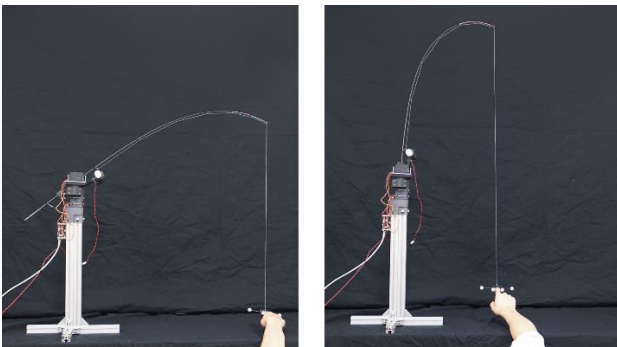


Fig. 7 Validation of control; the fingertip is continuously pulled in vertical direction with the same amount of force

## 6. おわりに

本論文では、釣竿を用いた力覚提示デバイスを提案した。また、提案したデバイスにおける指先を垂直方向に牽引する制御方法について検討した。指先の位置、糸の巻き取り力、釣竿の姿勢、糸が指先を牽引する力を計測することで、各データの関係を調査した。計測データを基に回帰曲線を求め、デバイスの制御に組み込むことで、指先を動かしても常に指先を垂直方向に牽引することが可能となった。

本論文では指先を垂直方向に牽引する制御に焦点を置いた。しかし、これは一例であり、実際にアプリケーションに導入することを考えると、指先をあらゆる方向に牽引することが可

能な制御が必要である。つまり、計測した指先の位置、糸の巻き取り力、釣竿の姿勢、糸が指先を牽引する力に加えて、糸が牽引する方向も同時に計測し、5つのデータの間係を求めなければならない。また、本デバイスを用いてあらゆる方向に力を提示できるようになると、提示したい力の方向が新たに入力情報として加わる。提示したい力の方向を本デバイスに指定したとき、正確に指定した方向へ指先を牽引することが可能かは分かっていない。正確に指定した方向へ指先を牽引することが不可能であった場合、どの程度力覚の知覚に影響するかを調査する必要がある。今後は、指先の位置、糸の巻き取り力、釣竿の姿勢、糸が指先を牽引する力、糸が牽引する方向の5つのデータの間係を調査し、多方向に力を提示できるように改良する。

デバイスに関しては、釣竿を支える台座に2台のサーボモータを用いてパン・チルト機構を実現した。本論文では指先を垂直方向に牽引する制御を開発したが、あらゆる方向の力を指先に提示するためにはロール軸方向の回転も必要である。従って、釣竿を支える台座にサーボモータを1台追加し、3自由度に回転する機構に改良する。

さらに、本計測から提案したデバイスで表現できるバーチャルなオブジェクトの柔らかさは分からない。釣竿がしなるため、板を触ったときに感じる硬さの表現は困難であると考えられる。そこで、本デバイスが表現できるバーチャルなオブジェクトの柔らかさについても調査する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP18H04110 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 青木孝文, 三武裕玄, 長谷川晶一, 佐藤誠, "ワイヤによる皮膚感覚刺激を用いた指先装着型接触感提示デバイス", TVRSJ Vol.14, No.3, pp.421-428, 2009.
- [2] Seifi, H., Fazlollahi, F., Oppermann, M., Sastrillo, J.A., Ip, J., Agrawal, A., Park, G., Kuchenbecker, K.J., MacLean, K.E.: Haptipedia: Accelerating Haptic Device Discovery to Support Interaction & Engineering Design. In: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2019.
- [3] Barnaby, G., Roudaut, A.: Mantis: A scalable, lightweight and accessible architecture to build multiform force feedback systems. In: UIST 2019 - Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2019.
- [4] Jarillo-Silva, A., Dominguez-Ramirez, O.A., Parra-Vega, V., Ordaz-Oliver, J.P.: PHANToM OMNI haptic device: Kinematic and manipulability. In: CERMA 2009 - Electronics Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2009.
- [5] 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 D-II, Vol. J74-D-II, No.7, pp.887-894, 1991.
- [6] Hirose, M., Hirota, K., Ogi, T., Yano, H., Kakehi, N., Saito, M., Nakashige, M.: HapticGEAR: The development of a wearable force display system for immersive projection displays. In: Proceedings - Virtual Reality Annual International Symposium, 2001.
- [7] Hosseini, M., Meattini, R., Palli, G., Melchiorri, C.: Development of sEMG-driven assistive devices based on twisted string actuation. In: 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2017, 2017.
- [8] Sato, M.: Development of string-based force display: SPIDAR. Proc. Eighth Int. Conf. Virtual Syst. Multi Media VSMM., 2002.
- [9] Ma, S., Toshima, M., Honda, K., Akahane, K., Sato, M.: SPIDAR-S: A haptic interface for mobile devices. In: Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2017.
- [10] Liu, L., Miyake, S., Akahane, K., Sato, M.: Development of string-based multi-finger haptic interface SPIDAR-MF. In: Proceedings of 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence, ICAT 2013, 2013.