

令和2年度 修士学位論文
釣竿を用いた力覚提示装置の開発

学籍番号 1930088

内藤 大樹

情報理工学研究科 情報学専攻

主任指導教員 梶本 裕之 教授

指導教員 小泉 直也 助教

提出日 令和3年1月25日(月)

概要

力覚は物体との接触時に物体の存在感を感じる重要な感覚である。人間は指先を使って物体に対し押下や把持などの操作を行うと、指先を介して物体の形状や重さ等を知覚できる。そこでバーチャリアリティの分野では、指先で感じる力覚を再現する力覚提示装置の開発が盛んに行われている。近年では、ゲーム機のコントローラに力覚フィードバックを返す機構を備えたものが増えており、力覚提示装置が一般家庭に普及し始めている。

これまで開発されてきた力覚提示装置はデバイスの固定方法や装着方法により、様々な種類に分類できる。デバイスを机や壁に固定する設置型は、強い力をユーザに提示できるが、力覚提示可能な領域が狭いという問題がある。また、設置型のデバイスにはロボットアームで構成されたものが多く、剛体棒が空間中を動くため、ユーザの視界の妨げやロボットアームとの接触による危険性が問題である。それに対し、ユーザの身体にデバイスを取り付ける装着型はワークスペースが広く、ユーザは自由に動いて利用できる。一方で、装着型で力覚を提示すると、意図した部位への力覚の反力が装着部に発生してしまう課題がある。さらに、自由度の高い操作を実現するためにデバイスが大型化、複雑化して、デバイスの重量からユーザに負担を与えてしまう問題もある。

力覚提示の問題を解決する方法の1つとして、糸を用いる手法が提案されている。設置型の問題に対して、糸が細いという特徴からユーザの視界を妨げることなく安全に力覚提示が可能である。一方で、装着型に対しては糸が軽量であるため、糸を身体に装着してもユーザに負担を与えない。さらに、簡単な構造で糸を牽引する装置を構成できるという利点もある。したがって、糸を用いる手法は力覚提示の多くの問題を解決できる。しかし、糸を用いることで新しい問題が生じてしまう。使用する糸の本数が少ない場合、実現できる力覚提示の自由度が低い。それに対し、複数本の糸を用いる場合は多方向の力覚を再現できるが、糸同士が干渉しワークスペースが制限される問題がある。以上から、糸を用いる手法では少ない糸で多方向の力覚を再現できることが望ましい。

本論文では、少ない糸で広範囲に多方向の力覚を提示できる装置の開発を目的とする。この目的を達成するために、釣竿を用いた力覚提示装置を提案する。そして、提案装置の制御方法を開発し、提案装置の時間特性や提示できる最大の力、ワークスペースの広さについて評価する。

まず、釣竿を使って広範囲に力覚を提示できる力覚提示装置を設計した。提案装置を設置型で構成することで、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ができた。釣竿は1本の糸で獲物を釣りあげるため、釣竿から出る1本の糸を指先に取り付けることで身体と糸の干渉を抑制できた。また、釣竿は軽量でありながら釣竿のしなりによって強い力を生成できるため、釣竿を支える基部にパン・チルト機構を備えて釣竿の姿勢を制御することにした。これにより、指先に強い力を提示しながら高速に力の方向を変えることが可能となり、広範囲に多方向の力覚を提示できると考えた。

提案装置を制御するために、糸の牽引方向を用いたフィードバック制御を提案した。しかし、糸の振動によって指先を一定方向に牽引することは困難であることが分かった。そこで、提示し

たい力の方向を鉛直方向に限定し、フィードフォワード制御で動作する制御システムを検討した。まず、提示したい力の強さと指先の位置を入力情報、糸の巻き取り力と釣竿の角度を出力情報とした制御システムを考案し、入出力情報の関係を調査した。得られた関係を制御システムに導入して動作確認を行った結果、提示したい力の強さと実際に生じる力の強さが一致しないことが確認された。この結果から、出力情報である糸の巻き取り力が釣竿と糸の間に生じる摩擦力の影響を受けていると考えた。次に、出力情報の糸の巻き取り力を糸の巻き取り量に変更した制御システムを提案し、同様に入出力情報の関係を調査した。得られた結果を制御システムに組み込んで動作確認を行ったところ、提示したい力の強さと実際に生じる力の強さがほとんど一致することが確認された。従って、提案装置を制御するための制御システムとして、提示したい力の強さと指先の位置を入力情報、糸の巻き取り量と釣竿の角度を出力情報とした制御システムが適切であることが分かった。

デバイス評価の時間特性では、複数の波形を提案装置に入力し、そのときの出力波形を記録した。その結果、入力波形に対して約 0.3 秒の遅延でその波形が出力されることが確認された。提示できる最大の力とワークスペースの広さについては、釣竿のしなりを再現した数学モデルを使用して解析した。その結果、提示できる最大の力はデバイスから一定の距離までは同じピーク値であり、その距離を超えると最大の力が弱くなることが確認された。また、ワークスペースは解析結果をグラフに描画することで可視化した。

以上により、釣竿を用いた力覚提示装置は広いワークスペースを持ち、指先のみの力覚提示を可能とするデバイスであることが検証された。

目次

第1章	序論	9
1.1	研究背景	9
1.2	研究目的	11
1.3	本論文の構成	11
第2章	関連研究	12
2.1	力覚提示手法の基本構成	12
2.2	力覚提示装置の分類	13
2.2.1	設置型	13
2.2.2	装着型	14
2.2.3	遭遇型	16
2.3	糸を用いた力覚提示装置	17
2.3.1	糸を巻き取る手法	17
2.3.2	糸をねじる手法	19
2.3.3	糸を実物体に取り付ける手法	20
第3章	提案手法	21
3.1	デバイス構成	21
3.2	システム構成	24
第4章	制御システム	27
4.1	従来手法との違い	27
4.2	提案手法1：糸の方向ベクトルを用いたフィードバック制御	27
4.3	提案手法2：巻き取り力、釣竿の角度を出力とするフィードフォワード制御	29
4.4	計測1：提案手法2における入出力情報の関係調査	29
4.4.1	計測目的	29
4.4.2	計測環境	29
4.4.3	計測手法	32
4.4.4	計測結果	33
4.4.5	動作確認	37
4.4.6	考察	38
4.5	計測2：2つの入力情報と釣竿の角度の関係調査	40
4.5.1	計測目的	40
4.5.2	計測手法	40
4.5.3	計測結果	41
4.5.4	動作確認	44
4.5.5	考察	44
4.6	釣竿の特性を解析するシミュレーション	45

4.7	計測 3 : 2 つの入力情報と糸の巻き取り力の関係調査	50
4.7.1	計測目的.....	50
4.7.2	計測手法.....	50
4.7.3	計測結果.....	50
4.7.4	動作確認.....	53
4.7.5	考察.....	54
4.8	計測 4 : 2 つの入力情報と糸の巻き取り量の関係調査	59
4.8.1	計測目的.....	59
4.8.2	計測手法.....	59
4.8.3	計測結果.....	61
4.8.4	動作確認.....	64
4.8.5	考察.....	65
第 5 章	デバイス評価.....	68
5.1	入力信号に対する応答性	68
5.2	提示可能な力の強さ.....	73
5.3	ワークスペースの広さ	74
5.4	既存デバイスとの比較.....	76
第 6 章	結論	77
6.1	本論文のまとめ.....	77
6.2	今後の展望	78
謝辞		79
関連発表		80
参考文献		81
付録		86

目次

図 1.1	PHANToM[4].....	9
図 1.2	CyberGrasp[5].....	10
図 2.1	バーチャル空間内における知覚サイクル[9]	12
図 2.2	ロボットアームで構成された設置型デバイス[2]	13
図 2.3	物体の把持に着目した装着型デバイス[20].....	14
図 2.4	手全体を覆う装着型（外骨格型）デバイス[24].....	15
図 2.5	ドローンを用いた遭遇型デバイス[29]	16
図 2.6	糸を巻き取る手法を用いた設置型デバイス[9].....	17
図 2.7	糸を巻き取る手法を用いた装着型デバイス[39].....	18
図 2.8	ゴムの弾性と糸を巻き取る手法を組み合わせた装着型デバイス[42]	19
図 2.9	糸をねじって力を生成する TSA モジュール[46].....	19
図 2.10	TSA モジュールを用いた装着型デバイス[47]	20
図 2.11	釣竿を用いて 2 人のユーザに同時に VR 体験を提供するシステム[53]	20
図 3.1	提案装置の外観.....	21
図 3.2	提案装置のパン・チルト機構.....	22
図 3.3	サーボモータの選定で使用したぬいぐるみ	22
図 3.4	釣竿がぬいぐるみを持ち上げる前の様子.....	23
図 3.5	釣竿がぬいぐるみを持ち上げた様子	23
図 3.6	システムの全体図	24
図 3.7	OptiTrack のマーカが付いた指サック	24
図 3.8	デバイス用のマーカ.....	25
図 3.9	OptiTrack Trio のセンシングエリア[54]	25
図 3.10	提案手法で指先に力覚を提示している様子	26
図 4.1	OptiTrack のマーカを糸に取り付けた様子	28
図 4.2	糸の方向ベクトルを用いたフィードバック制御の概要図	28
図 4.3	計測環境.....	30
図 4.4	計測で使用した錘	30
図 4.5	糸の牽引力を計測した電子天秤	31
図 4.6	糸の牽引方向を確認するための Web カメラ	31
図 4.7	Web カメラで撮影された糸と Unity 内で描画する赤線が一致したときの様子	32
図 4.8	計測環境と計測データの対応.....	33
図 4.9	リール部のモータの Duty 比と釣竿の角度の関係.....	34
図 4.10	リール部のモータの Duty 比と糸が錘を牽引した力の強さの関係	34
図 4.11	入出力情報の関係	34
図 4.12	糸の牽引力と糸巻き取りモータの Duty 比に関する回帰曲線と計測データの比較	35

図 4.13	釣竿の角度と糸巻き取りモータの Duty 比に関する回帰曲線と計測データの比較	36
図 4.14	動作確認の様子	37
図 4.15	提示したい力の強さと実際に生じた力の強さの関係	38
図 4.16	60cm に錘を置いて提示したい力の強さに 2.5N を指定したときの様子	39
図 4.17	提示したい力の強さと実際に糸が錘を牽引した力の強さの比較	39
図 4.18	入出力情報の関係	40
図 4.19	提示したい力の強さと釣竿の角度の関係	41
図 4.20	提示したい力の強さと実際に糸が錘を牽引した力の関係	41
図 4.21	釣竿の角度と提示したい力の強さに関する回帰曲線と計測データの比較	43
図 4.22	提示したい力の強さと実際に糸が錘を牽引した力の関係	44
図 4.23	シミュレータで釣竿を描画した様子	46
図 4.24	Unity 上で釣竿を再現するために必要なパラメータを調整している様子	47
図 4.25	釣竿先端にかかる力の強さと釣竿の角度の関係	48
図 4.26	釣竿の角度と提示したい力の強さに関する回帰曲線と解析結果の比較	49
図 4.27	リール部のモータの Duty 比と指先に提示したい力の強さの関係	51
図 4.28	提示したい力の強さと実際に糸が錘を牽引した力の関係	51
図 4.29	提示したい力の強さと糸巻き取りモータの Duty 比に関する回帰曲線と計測データの比較	52
図 4.30	提示したい力と実際に糸が牽引した力の強さの関係 (提示したい力を強くする場合)	53
図 4.31	提示したい力と実際に糸が牽引した力の強さの関係 (提示したい力を弱くする場合)	54
図 4.32	入出力情報の関係	55
図 4.33	糸巻き取りモータの Duty 比を指定して動作させた様子	57
図 4.34	糸の巻き取り量を指定して動作させた様子	58
図 4.35	計測環境と計測データの対応	60
図 4.36	糸の放出量を 0cm と定義するときの錘の設置場所	60
図 4.37	糸の放出量を 0cm に設定している様子	60
図 4.38	糸巻き取りモータの糸の放出量と指先に提示したい力の強さの関係	62
図 4.39	提示したい力の強さと実際に糸が錘を牽引した力の強さの関係	62
図 4.40	提示したい力の強さと糸巻き取りモータの糸の放出量に関する回帰式と計測データの比較	63
図 4.41	提示したい力と実際に糸が牽引した力の強さの関係 (提示したい力を強くする場合)	64
図 4.42	提示したい力と実際に糸が牽引した力の強さの関係 (提示したい力を弱くする場合)	65
図 4.43	提案装置を上から見た図	66

図 4.44	最終的な制御システムの全体図	67
図 5.1	ロードセルを用いた力計測装置	68
図 5.2	ステップ入力に対する出力波形	69
図 5.3	ステップ入力に対する糸の放出量の変化.....	70
図 5.4	ステップ入力に対する糸の放出量の変化 (PID 制御のパラメータの調整後)	70
図 5.5	ステップ入力に対する出力波形 (PID 制御のパラメータの調整後)	71
図 5.6	ステップ入力を反転した波形に対する出力波形.....	72
図 5.7	Sin 波の入力信号に対する出力波形.....	72
図 5.8	提案装置が提示できる最大の力と指先の位置の関係.....	73
図 5.9	提示する力の強さと釣竿の先端位置の関係	74
図 5.10	最大の力を提示するときの釣竿の先端位置	75
付図 1	釣竿を x 軸から角度 β まで立たせて先端に集中荷重 P が鉛直方向に作用したときの様子[56].....	86
付図 2	釣竿の構造[56]	86
付図 3	釣竿を寝かせた状態で先端に集中荷重 P が作用したときの様子[56].....	86

表目次

表 5.1 提案装置と既存デバイスの性能比較	76
------------------------------	----

第1章 序論

1.1 研究背景

現在、安価で入手可能なヘッドマウントディスプレイ（以下、HMD）の普及から、バーチャルリアリティ（以下、VR）技術が私たちの生活に浸透しつつある。HMDはユーザに立体的な映像を提示すると共に、頭部の動きに合わせてディスプレイに映る映像を変化させるシステムであり、視覚と聴覚の刺激によってユーザはバーチャル空間への没入感を感じることができる。感覚提示装置はHMDのような視覚情報と聴覚情報を提示する装置だけでなく、ものを触ったときに感じる力覚を再現する力覚提示装置も存在する。力覚は物体との接触時に物体の存在感を感じる重要な感覚であり[1]、人間は力覚情報を基に接触した物体の形状や硬さ、重さ等を知覚できる。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を実物体のように操作できる[2][3]。従来の力覚提示装置として、3D Systems社のPHANToM[4](図1.1)やCyberGlove System社のCyberGrasp[5](図1.2)がある。これらは法人向け、医療向けに設計された装置であり、利用できるユーザは限られていた。しかし近年では、Sony社のDual Sense[6]のような力覚を提示する機構を内蔵したコントローラが発売されており、一般家庭でも力覚提示を用いたVRアプリケーションを体験できるようになった。今後はゲームに限らず、様々な用途で力覚提示装置を利用できる機会が増加すると考えられる。



図 1.1 PHANToM[4]

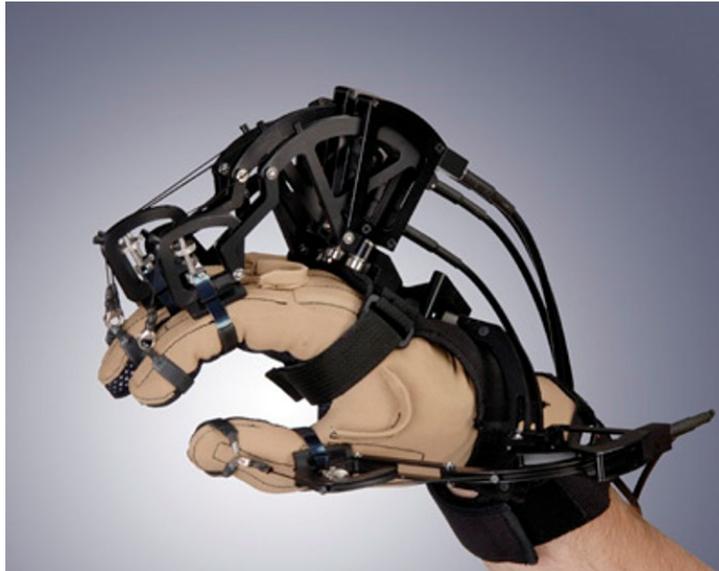


図 1.2 CyberGrasp[5]

従来の力覚提示装置はデバイスの固定方法や装着方法により、様々な種類に分類できる[7]. デバイスを机や壁に固定する設置型は、デバイスを把持する、あるいは力覚の提示部位にデバイスの一部を装着するだけでよいから、ユーザに負担を与えない. また、デバイスが机や壁に固定されているため、強い力の生成が可能となる. しかし、設置型は設置場所を中心とした領域内のみで力覚を提示することができないため、ワークスペースが狭いという問題がある. また、力覚提示可能な領域はデバイスの大きさに依存する. そのため、例えば図 1.1 のようなロボットアームで構成されたデバイスの場合、大きなワークスペースを実現するためにそれと同等の剛体棒でデバイスを構成すればよい. しかし、剛体棒が動く領域も合わせて大きくなるため、危険性が増すと同時に、ユーザの視界を妨げてしまう問題がある. 別の種類として、ユーザの身体にデバイスを身に着ける装着型がある. 装着型はユーザがデバイスを装着した状態で自由に動くことを可能とするため、ワークスペースが広い. しかし、意図した部位に力覚を提示した場合、力覚の反力がデバイスの装着部に発生してしまう問題がある. さらに、実世界における力覚を忠実に再現するためにデバイスが大型化、複雑化してしまい、デバイスの重量からユーザに疲労感を与えてしまう問題もある. 以上から、ユーザに負担を与えず、広範囲に自然な力覚を提示できる力覚提示手法が求められる.

そこで、力覚提示の問題を解決する 1 つの方法として、糸の牽引力を利用する手法が提案されている[8]. ユーザの視界を妨げてしまう問題は糸が細いという特徴から解決された. また、ユーザに負担を与えてしまう問題に対しては糸が軽量である特徴から解決され、安全なシステムを構築できる. さらに、糸を牽引する装置を簡単に作成できる利点を持っている. 以上から、糸を用いる手法は従来の力覚提示装置が持つ多くの問題を解決できる. しかし、糸を用いる手法を採用しても、設置型の問題点であるワークスペースが狭いこと、装着型の問題点である意図した部位以外で力が発生してしまうこと、の 2 つの問題を解決できていない. また、糸を用いることで新たな問題が発生する. 1 本の糸で力を生成する場合、糸を牽引する方向が固定されていると 1 方向の力のみ提示可能であり、再現できる力覚の自由度が低い. それに対して、複数本の糸で提示部位を同時に牽引する場合、多方向の力覚を再現できるが、糸同士が干渉してワークスペースが

制限される問題がある。よって、糸を用いる手法では少ない糸の本数で多方向の力覚を再現できることが望ましい。

1.2 研究目的

前節の背景から、少ない糸の本数で広範囲に多方向の力覚を提示できる新しい装置を開発することを目的とし、釣竿を用いて広範囲に指先に力覚を提示できるデバイスを提案する。釣竿の先端から出る糸を指先に結び、リールで糸を巻き取ることで指先に力覚を提示する。また、実際の釣りにおいて、釣糸に獲物がかかったときユーザが手前に釣竿を引き上げるように、提案手法でも指先に力覚を提示する際は糸の巻き取りと釣竿の姿勢を同時に制御する。この手法を用いることで、糸を完全に任意の方向に牽引できない（例えば下向きの力を出せない）という制約はあるものの、指先に力覚を提示できる範囲という意味では広範囲なワークスペースを持つ手法であると考えている。本論文では、提案システムの構成を示すとともに、制御方法の開発、デバイス評価を行う。

1.3 本論文の構成

本論文は本章を含む全 6 章からなる。第 2 章は本論文に関する力覚提示装置について述べる。第 3 章は釣竿を用いた力覚提示装置の基本構成とシステムの概要について述べる。第 4 章は提案装置の制御システムについて述べる。第 5 章は提案装置の時間特性やワークスペースの広さ等のデバイス評価を行う。第 6 章は本論文のまとめと今後の展望について述べる。

第2章 関連研究

2.1 力覚提示手法の基本構成

佐藤ら[9]は人間が実世界で物体を操作したときの感覚情報の流れを分析し、実世界で感じる感覚をバーチャル空間で再現するのに必要な感覚情報の伝達手法について提唱した(図 2.1)。これは人間が手を使って物を操作する場合を想定している。以下は人間が物体を操作するときの手順である。

1. 操作したい物体を見る。
2. 目で対象物との位置関係を確認しながら手を目標位置まで動かす。そして、物体との接触を感じた時点で手の移動を止める。
3. 指先を動かして物体を操作する。

以上の流れを考えると、物体を見ることで物体の状態や位置を確認し(視覚情報)、手を使って物体との接触を知覚するとともに物体に加える力の強さを認識する(触覚、力覚情報)。そして、物体を操作したいときは指先に力を入れる(手の制御情報)。これらの情報は人間が実世界で物体を操作するときに必要な情報であり、バーチャル空間内で再現すべき情報となる。視覚情報はディスプレイを通してバーチャル空間内の映像をユーザに提示する。触覚情報を提示するためには指先の位置情報が必要であり、バーチャルな物体との相対位置を求めて指先に力学的な刺激を提示すればよい。バーチャルな物体に触れているときはユーザの手の動きを制限するために手の制御情報が必要となる。手の制御情報がユーザの動きに対して抗うように作用すれば、ユーザに力覚情報を伝えることができる。よって、バーチャルな物体を操作する体験を実現するためには、視覚情報を提示する映像表示装置、手の動きを検知する位置計測装置、手の動きを制限する運動制御装置、そして各情報を算出する計算機が必要である。

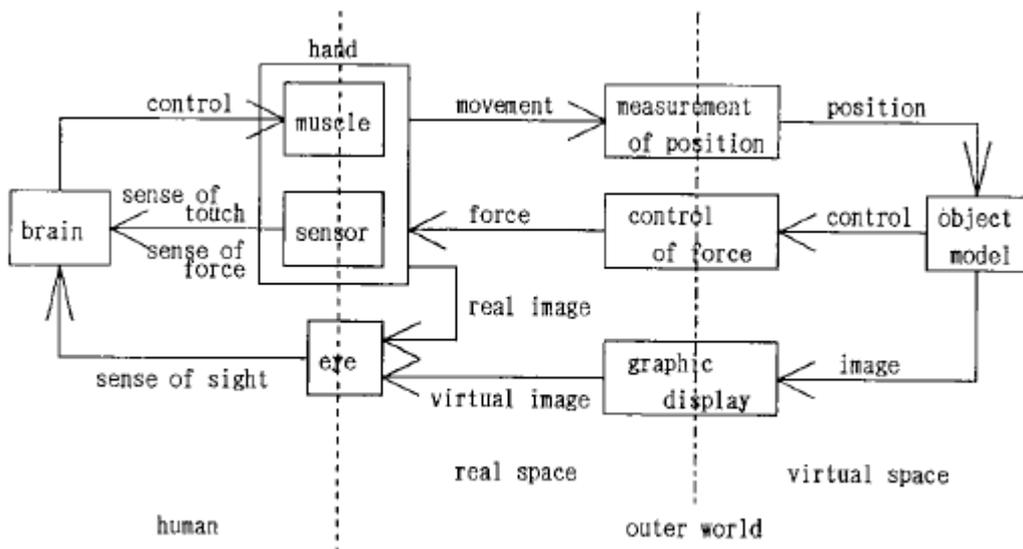


図 2.1 バーチャル空間内における知覚サイクル[9]

2.2 力覚提示装置の分類

これまで開発されてきた力覚提示装置はデバイスの固定方法や装着方法により、様々な種類へ分類できる。本節では代表的なデバイスを示しながら分類ごとの特徴を述べる。

2.2.1 設置型

設置型はデバイスを机や壁に固定した状態でユーザに力覚を提示する手法である[10][11][12]。第1章で述べた PHANToM[3] (図 1.1) はシリアルリンクのロボットアームで構成されており、机に固定される。ユーザはロボットアームの先端部に位置するペン型のエンドエフェクタを把持して力覚を知覚する。PHANToM は長期にわたり開発が進んでおり、デスクトップで利用できるように小型化した PHANToM OMNI[13]はその一種である。また、PHANToM の先端をペン型から指サック型に変更したものもあり、Flying PHANToM[14]は2基のロボットアームを使用して親指と人差し指に力覚を提示する装置である。Barnaby らの Mantis[2]もロボットアームで構成されているため PHANToM と同様の力覚提示手法になるが、軽量かつ手頃な価格で入手できるロボットアーム型のデバイスを実現した。また、デスクトップで利用する形態、広範囲に力覚を提示する形態、両手に力覚を提示する形態、小型で移動可能な形態、背中に背負って力覚を提示する形態、の5つの形態で利用することを可能としている(図 2.2)。

設置型のデバイスは机等に固定されていることから、強い力をユーザに提示できる。しかし、実世界でユーザが移動する場合、デバイスが一か所に固定されているため、ユーザの行動範囲が限定される。つまり、設置型のデバイスは提示できる力の範囲が狭いという特徴がある。

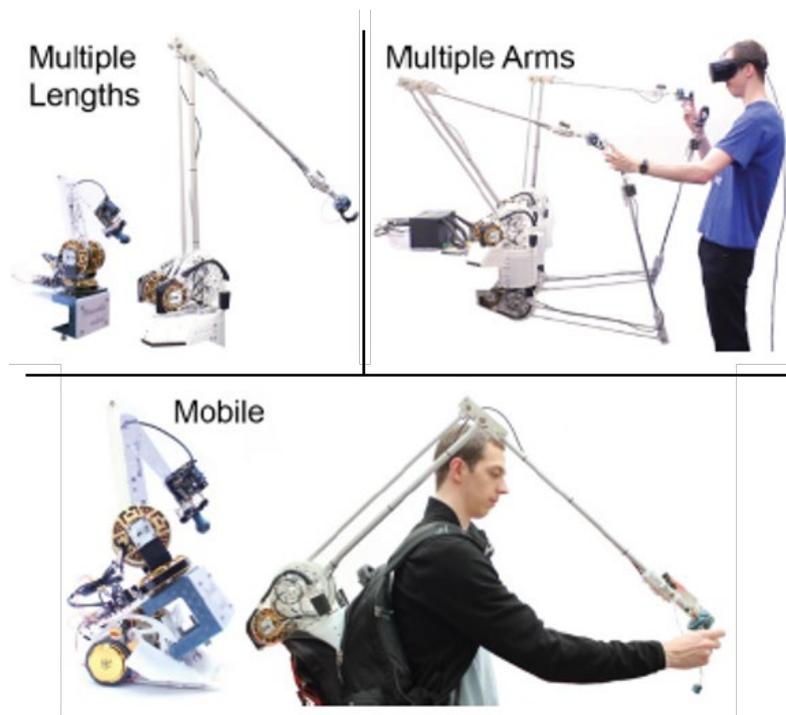


図 2.2 ロボットアームで構成された設置型デバイス[2]

2.2.2 装着型

装着型はデバイスをユーザの身体に身に着けて力覚を提示する手法である[15][16][17]。Wolverine[18]や Grability[19]は指先に取り付ける軽量のデバイスであり、親指とそれ以外の指を棒で接続して構成されている。親指を基準に残りの指は棒をスライドして動かすことができ、バーチャルな物体に触れたときに指先に搭載したアクチュエータがブレーキをかけることで物体の把持を再現できる。これらのデバイスは指同士が棒で接続されているため、各指を自由に動かすことはできない。物体の把持を再現する他のデバイスとして、空気袋を使用した PuPoP[20]がある(図 2.3)。PuPoP は手のひらに装着して、空気袋を膨らませることでバーチャルな物体の把持を再現するシステムである。そして、指先にデバイスを装着していないため、各指を自由に動かすことが可能である。しかし、空気袋の空気圧をエアポンプで調整するため、エアポンプの装着が必要となる。

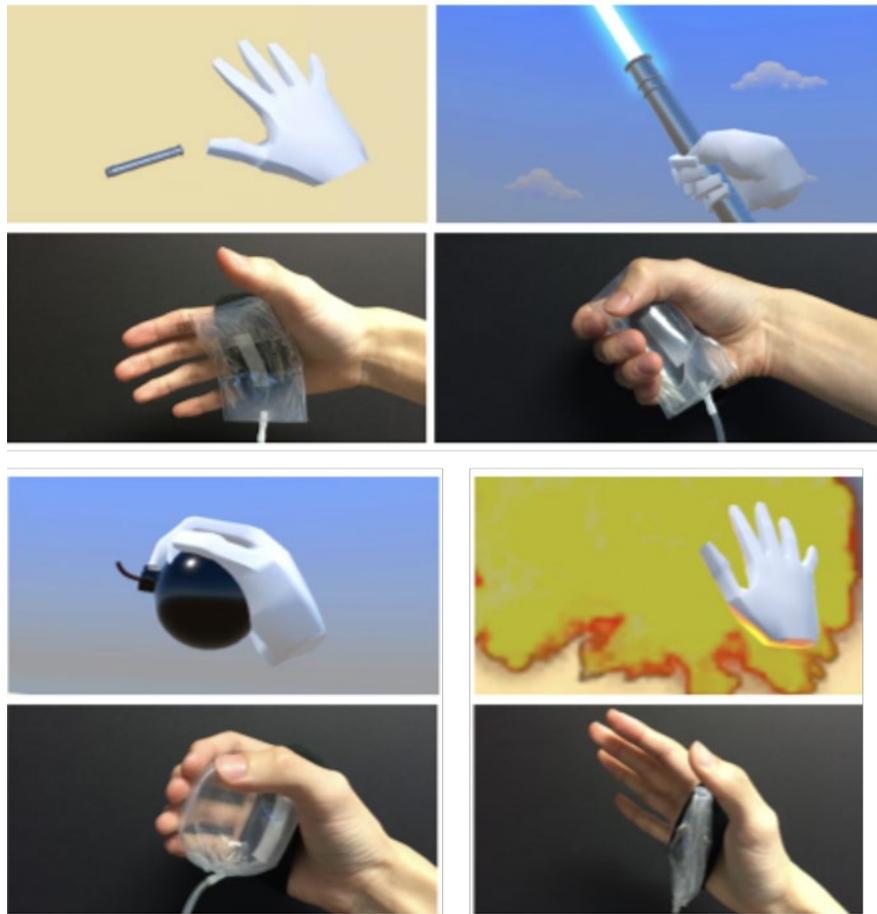


図 2.3 物体の把持に着目した装着型デバイス[20]

装着型には指や手の甲を覆う外骨格型デバイスがある[21][22]。CyberGrasp[5]は外骨格型デバイスの1つであり、5本の指だけでなく手の甲や手首も同時に装着するシステムである(図 1.2)。指先がバーチャル空間内の物体に触れると、指先に繋がっている糸を巻き取って後方に引っ張ることで力覚を提示する。それぞれの指に動作するアクチュエータが備わっているため、各指に対して個別に力覚を提示できる。また、指先だけでなく手首の動きに合わせて物体の衝突感を再現するため、CyberGrasp と PHANTOM のようなロボットアームを組み合わせた CyberForce[23]が開発されている。CyberGrasp, CyberForce のどちらも法人向け、医療向けに設計された装置であるため、一般家庭で利用することは困難である。また、正確な力制御を行えるが、複雑な構造をしているため、サイズの大きさに問題がある。これらの問題を解決するため、Xiaochi ら[24]は小型のアームで各指を引っ張る手法を取り入れることでコンパクトな構造を実現し、軽量で安価な外骨格型デバイスを開発した(図 2.4)。

装着型の力覚提示装置の特徴は、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。また、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課題がある。さらに、物体の把持に着目している Wolverine や PuPoP などはユーザの能動的な動作に対して力覚を提示することが可能だが、受動的な力覚をユーザに提示することはできない。

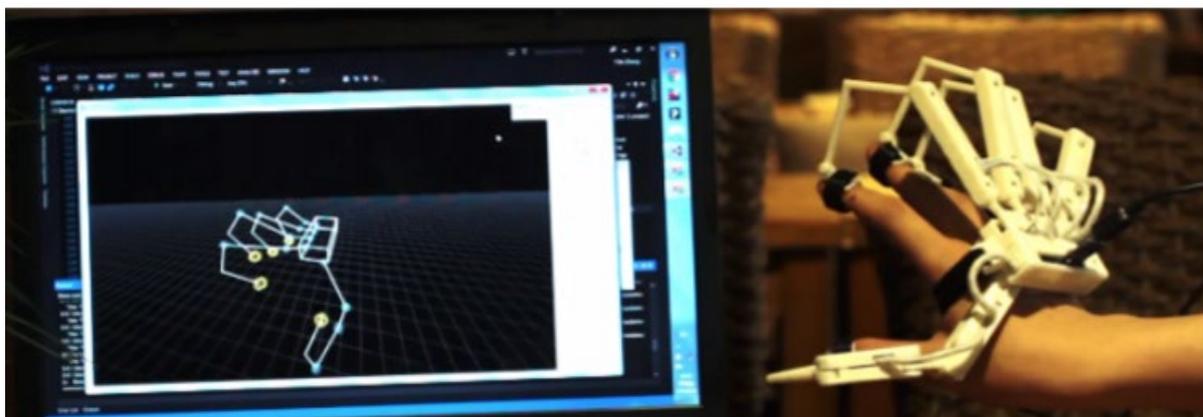


図 2.4 手全体を覆う装着型(外骨格型)デバイス[24]

2.2.3 遭遇型

遭遇型はユーザの動きに合わせてデバイスを動かして力覚を提示する手法である[25][26]. 遭遇型の力覚提示装置は, Vonach らが開発した VRRobot[27]や Fedoseev らが開発した TeslaMirror[28]のようなロボットアームを使用したデバイスがある. これらはユーザの手の動きに合わせてロボットアームを動かし, バーチャル空間内のユーザの手が物体と接触したと同時にロボットアームをユーザの手に接触させて力覚を提示するシステムである. VRRobot はアームの先端に板を取り付けており, バーチャルな壁を再現できる. しかし, 先端に取り付けた板のみでバーチャルな物体を表現する必要があり, 板で再現できる物体には限りがある. それに対し, TeslaMirror はロボットアームの先端部に平面を自由に変形させる機構を備えており, 平面に凹凸をつけることで複数の物体の形状を表現することが可能である. ロボットアームを使用すると設置型のように力覚を提示できる領域が制限される. そこで, 設置しないデバイスとしてドローンを使用したシステム[29][30]が開発されている (図 2.5). ドローンは空間を自由に動き回ることができるため, 装着型のようにユーザは自由に動きながら利用できる. しかし, 空中に浮かぶドローンでは強い力を生成することが困難であり, 提示できる力に限りがある.

遭遇型は設置型や装着型のようにあらかじめデバイスの把持や装着が不要であり, 実世界における物体との衝突感を再現していることから, より自然な力覚提示が可能である. 一方で, 力覚を提示しないときは, ユーザと接触しないようにデバイスを遠ざける必要があり, ユーザの動きを予測できるシステムの構築が困難である.

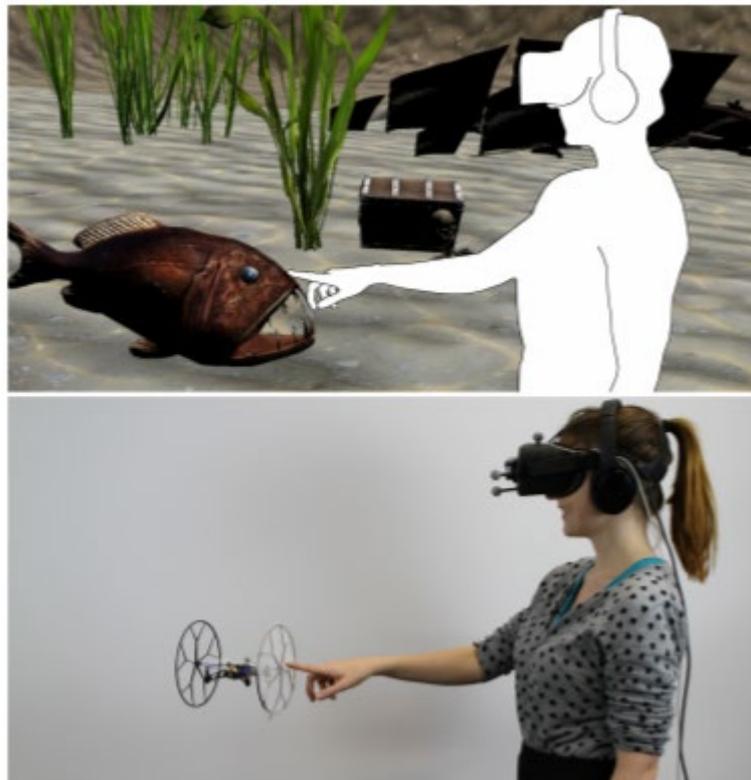


図 2.5 ドローンを用いた遭遇型デバイス[29]

2.3 糸を用いた力覚提示装置

力覚提示手法の1つに糸を用いる手法があり、糸の使用方法においても様々な種類がある。本節では、代表的な3つの糸を使った手法について述べる。

2.3.1 糸を巻き取る手法

糸を巻き取る手法とは、糸を巻きつけたプーリを回転させ、糸の巻き取りによって生じる糸の牽引力を力覚として提示する手法である。この手法を取り入れた設置型の力覚提示デバイスとして、SPIDAR[9] (図 2.6) 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。しかし、設置型のデバイスであることから、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は長期に渡り開発が続いており、様々な種類が存在する[8][31][32]。設置型の問題である力覚提示可能な領域が狭い問題に対しては、糸の巻き取り装置をユーザが移動可能な領域を確保できる位置に設置した Scalable-SPIDAR[33]が提案されている。また、複数の糸を用いるというSPIDARの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、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[34]が提案されている。しかし、Scalable-SPIDARについては大がかりな装置になってしまい、SPIDAR-MFは多指への対応時の糸の干渉が主眼である。少ない糸で力覚提示を実現するために、1本の糸でユーザの指に力覚を提示する SPIDAR-S[35]が提案されている。SPIDAR-Sはスマートフォンに取り付けて利用するデバイスであり装着型のように利用場所は制限されないが、1本の糸のみを使用するため、SPIDARに比べ自由度が低い。

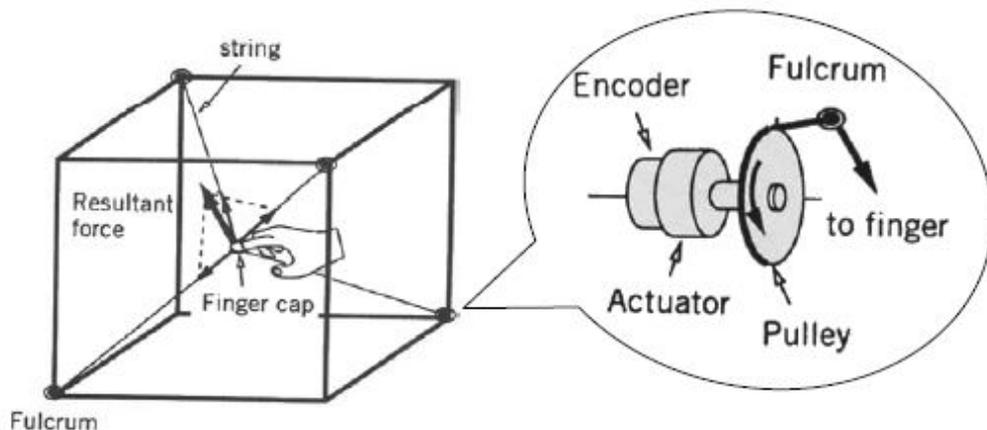


図 2.6 糸を巻き取る手法を用いた設置型デバイス[9]

糸を巻き取る手法を使ったデバイスは SPIDAR のような設置型に限らず、装着型デバイスも多く開発されている。Bonivento らの WireMan[36]や Hirose らの HapticGEAR[37]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。HapticSphere[38]は HMD に糸巻き取りモータを固定し、1 本の糸で人差し指に力覚を提示するシステムである。Fang らの Wireality[39]は HapticSphere のように 1 本の糸で提示部を牽引する手法を取り入れているが、5 本の指だけでなく手全体や手首も同時に複数本の糸で牽引することで、手のひらでバーチャルな物体に触れる VR 体験を実現した(図 2.7)。糸は軽量であるため、デバイスの重量でユーザに負担を与えてしまう装着型デバイスにとって糸を用いることは有益な手段の 1 つといえる。しかし、モータで糸を巻き取るため、モータの回転によって装着部に振動が発生してしまう。また、HapticSphere や Wireality のような 1 本の糸で一か所の部位に力覚を提示する手法では、指や手を伸ばす方向以外の力覚提示は不可能である。



図 2.7 糸を巻き取る手法を用いた装着型デバイス[39]

ゴムのような弾性体を用いた力覚提示手法が提案されている[40]。さらに、糸の代わりに弾性体を巻き取るデバイスも存在し、弾性体の変形によって生じる弾性力を利用して強い力をユーザに提示できる。ExoInterfaces[41]は弾性のあるベルトを手首に、ベルトを巻き取るモータを上腕に装着し、ベルトを巻き取ることで手首に強い力を提示できる装置である。Tsai らの ElasticVR[42]は糸とゴムを組み合わせた装置であり、ゴムを固定して糸を巻き取ることでゴムの弾性力を生成し、ゴムの固定を解除するとともに糸の巻き取りを緩めることでユーザに衝撃感を提示できる(図 2.8)。弾性体を用いた装置は小型でありながら強い力を生成できる特徴を持つが、装着型デバイスの問題に大きく影響してしまう。

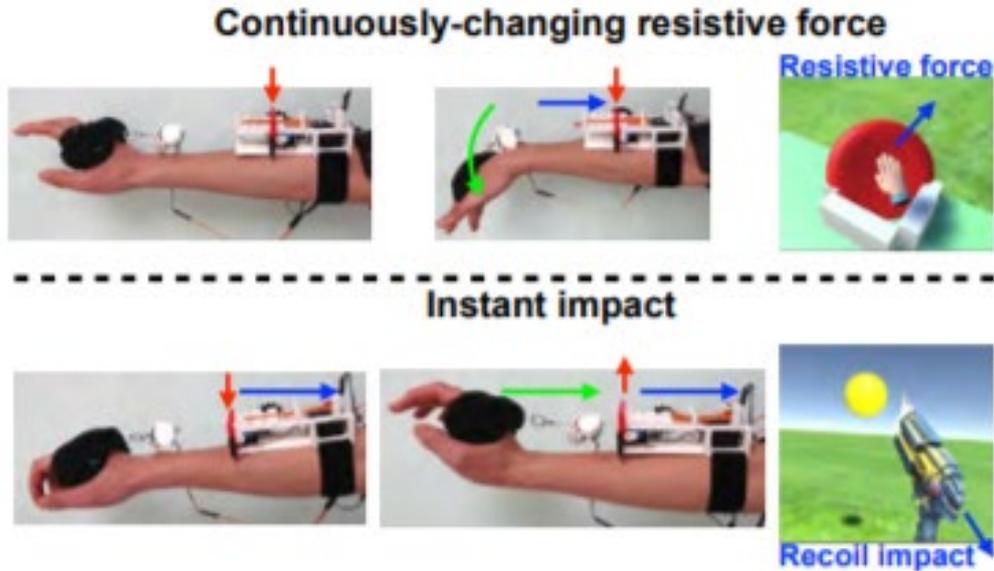


図 2.8 ゴムの弾性と糸を巻き取る手法を組み合わせた装着型デバイス[42]

2.3.2 糸をねじる手法

糸をねじる手法は、モータで糸をねじることで力を生成する手法である[43][44]. Palli らはモータの軸と物体を糸でつなぎ、モータの回転から糸をねじることで、モータの回転運動を物体の直線運動に変換する Twisted String Actuation (以下, TSA) モジュール (図 2.9) を提案した [45][46]. Hosseini ら[47]は TSA モジュールを肩に取り付け、TSA モジュールに繋がった糸を前腕に装着し、TSA モジュール内のモータを回転させることで前腕に力覚を提示するシステム(図 2.10)を提案した. また, Hosseini らは TSA モジュールを外骨格型デバイスに応用した ExoTen-Glove[48]を開発し、外骨格型デバイスの問題点である重量や生産コストを削減できるシステムを提案した.

TSA モジュールは安価で軽量な装置であり、低トルクのモータでも力を生成できる. しかし、モータの回転と糸のねじれによって生じる力の強さとの間には非線形な関係があるため、TSA モジュールを搭載したデバイスの制御が困難である. また、糸のねじりと解きを繰り返すと摩擦によって糸が切れる可能性があり、TSA モジュールに利用する糸の寿命が問題となる.

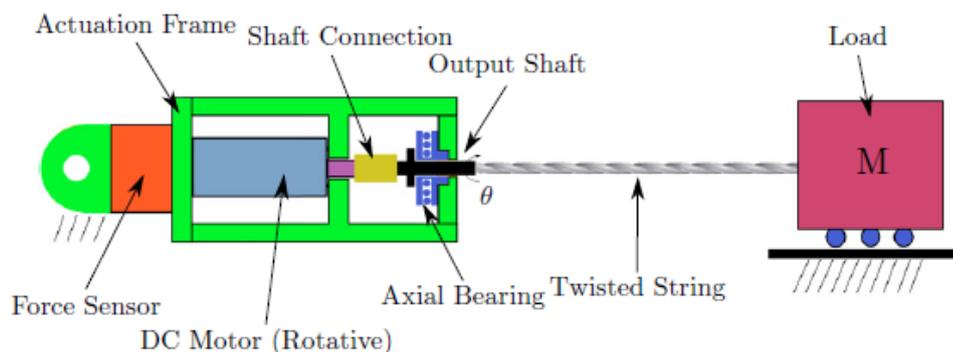


図 2.9 糸をねじって力を生成する TSA モジュール[46]



図 2.10 TSA モジュールを用いた装着型デバイス[47]

2.3.3 糸を実物体に取り付ける手法

糸を実物体に取り付けて、実物体の動きから糸を通じてユーザに力覚を提示する手法である。MoveVR[49]は移動型ロボットを VR 体験に取り入れるシステムであり、ロボットに糸を取り付けて、ロボットの移動により糸を牽引することでユーザに力覚を提示する。また、際田ら[50]が提案したシステムは、移動型ロボットに真空機構を搭載し、真空機構でロボットを床面に吸着させることでより強い力を生成するシステムである。さらに、糸を取り付ける実物体は人間が担ってもよい。人間がアクチュエータとなり、VR 体験者の周りで実物体を動かしてバーチャル空間を再現する手法が提案されている[51][52]。この手法を取り入れた Cheng らのシステム[53]は、2 人のユーザの内 1 人は釣竿を、残りの 1 人は釣竿の先端から出る糸を持ち、お互いが引っ張ることで 2 人同時に VR 体験を提供できるシステム (図 2.11) である。糸を実物体に取り付ける手法では糸と障害物が干渉することを防ぐため、ユーザと実物体の間に障害物が入り込まない環境が必要である。

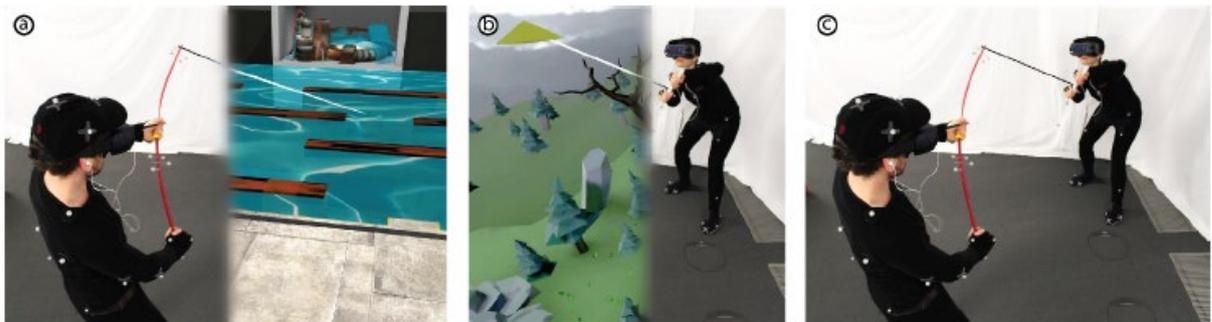


図 2.11 釣竿を用いて 2 人のユーザに同時に VR 体験を提供するシステム[53]

第3章 提案手法

本章では1本の糸で広範囲に多方向の力覚を提示できる設置型の力覚提示装置を提案する。

3.1 デバイス構成

本論文で提案するデバイスを図 3.1 に示す。デバイスに組み込んだ釣竿の先端から基部までの長さは 1.12m、重さは 14.8g である。釣竿の糸を巻き取るリールは、DC モータ (maxon, 135079, 10W) にプーリを取り付けることで再現した。リールに DC モータを使用することで、糸の巻き取りを PWM 制御にて制御する。また、使用する DC モータには光学式エンコーダが内蔵しており、モータの回転数からプーリの糸の巻き取り量を算出できる。



図 3.1 提案装置の外観

釣竿を用いて多方向の力覚を提示するために、釣竿を支える台座に2台のサーボモータを搭載し、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(図 3.2)。本デバイスを開発する上で、組み込むサーボモータの選定を行った。図 3.3 に示す約 32.5g のぬいぐるみと釣竿の糸を結び(図 3.4)、ピッチ軸方向に回転するサーボモータを駆動させて釣竿を動かすことができたサーボモータを選ぶことにした。そして、12V で 72kg・cm のトルクを出力するサーボモータ(JX Servo, C70 Digital Servo, 92W)を使用した場合、図 3.5 のようにぬいぐるみを持ち上げることができたため、本論文ではこのサーボモータをデバイスに組み込んだ。

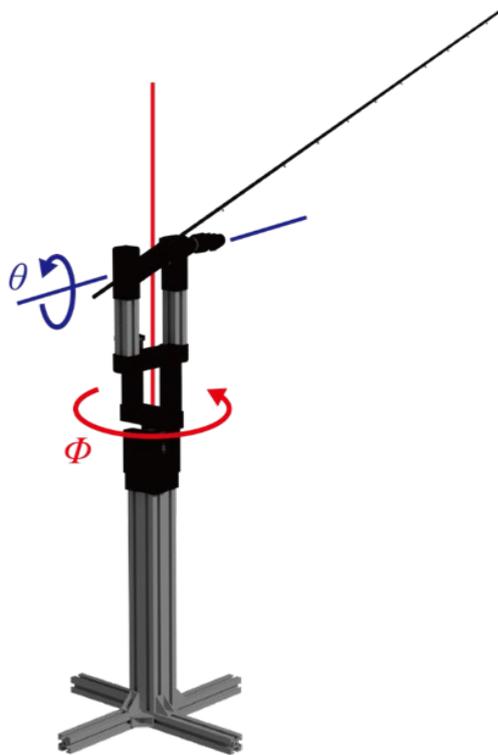


図 3.2 提案装置のパン・チルト機構



図 3.3 サーボモータの選定で使ったぬいぐるみ

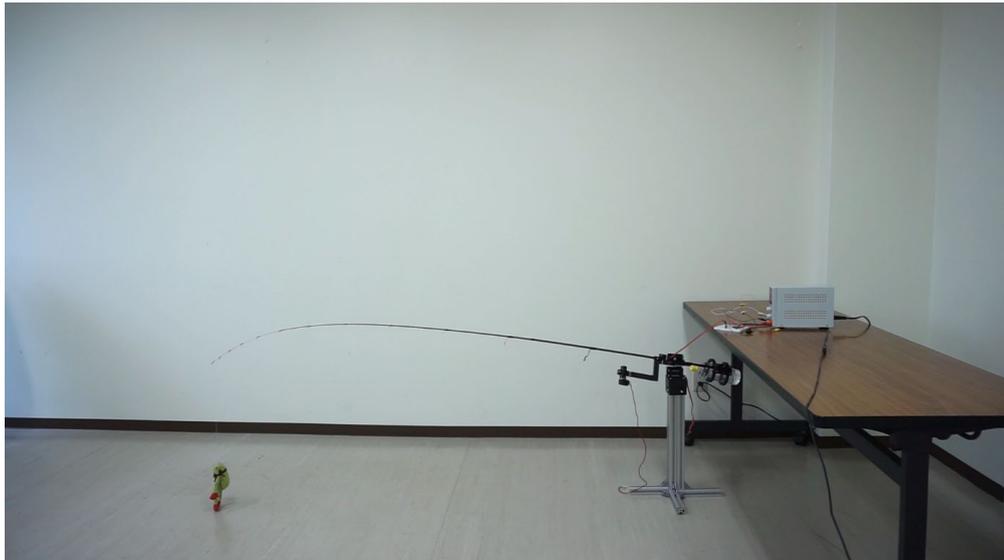


図 3.4 釣竿がぬいぐるみを持ち上げる前の様子



図 3.5 釣竿がぬいぐるみを持ち上げた様子

設置型の力覚提示装置として釣竿を用いることで 3 つの効果を得られると考えられる。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装置と比較すると、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 low 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から計算されるトルクが働く。釣竿は先端に負荷がかかると変形するため、しなりの効果から釣竿の長さは等価的に短くなり、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。

3.2 システム構成

図 3.6 にシステムの全体図を示す。本システムにおいて、ユーザは釣竿から出る糸を結んだ指サック (図 3.7) を指先に取り付けるだけでよい。ユーザにバーチャル空間を映像として提示し、映像内にはユーザの指も提示する。実空間の指先の動きと映像内のバーチャルな指の動きを同期させ、バーチャル空間の物体にバーチャルな指が触れたときにリール部の糸を巻き取る。また、同時に釣竿の姿勢を制御することで、指先に力覚を提示する。

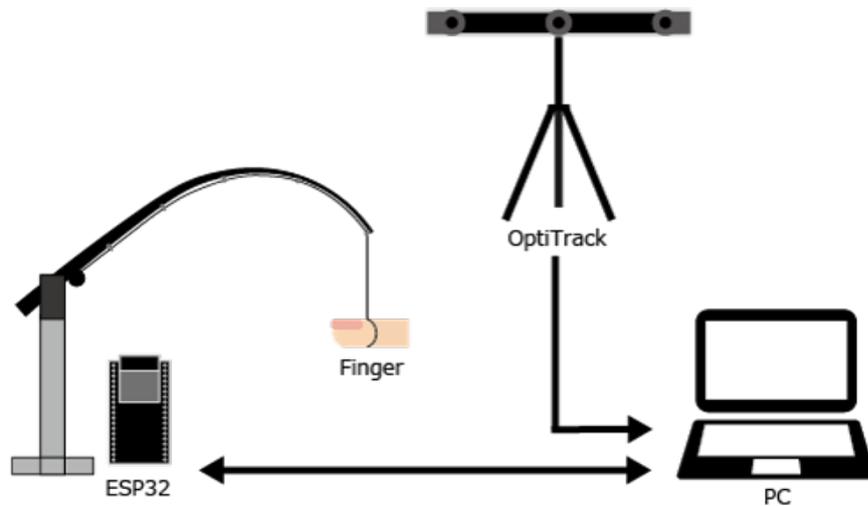


図 3.6 システムの全体図

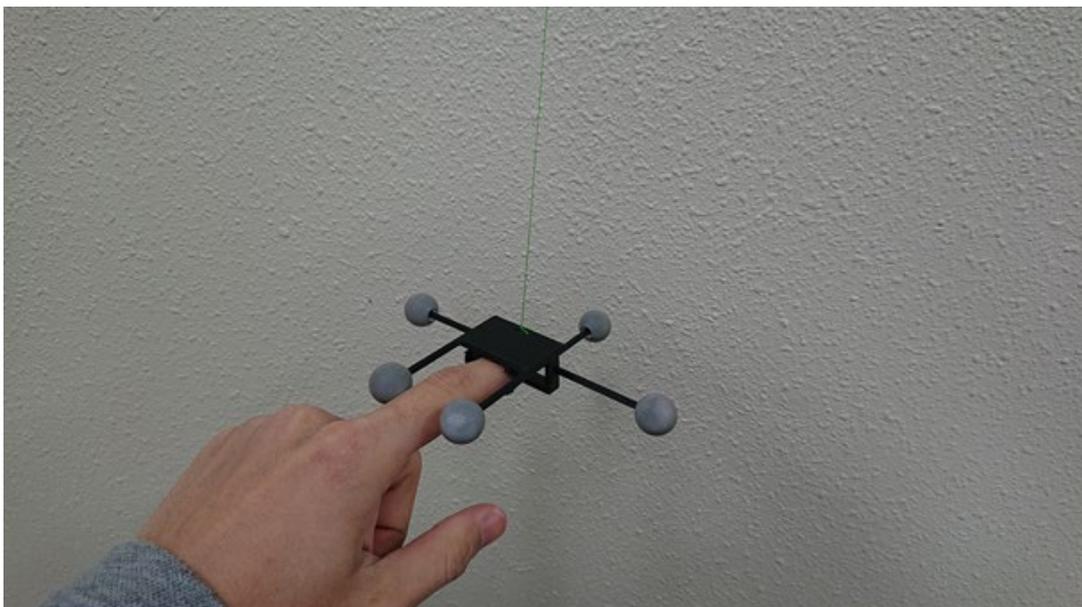


図 3.7 OptiTrack のマーカが付いた指サック

提案手法では指先の位置情報を検出する必要があるため、提案装置の周辺に光学式モーションキャプチャ (OptiTrack, V120: Trio) を設置している。そのため、指サックに OptiTrack のマーカを取り付けている (図 3.7)。また、デバイスと指先の位置関係を算出するため、デバイスにも OptiTrack のマーカを取り付けている (図 3.8)。

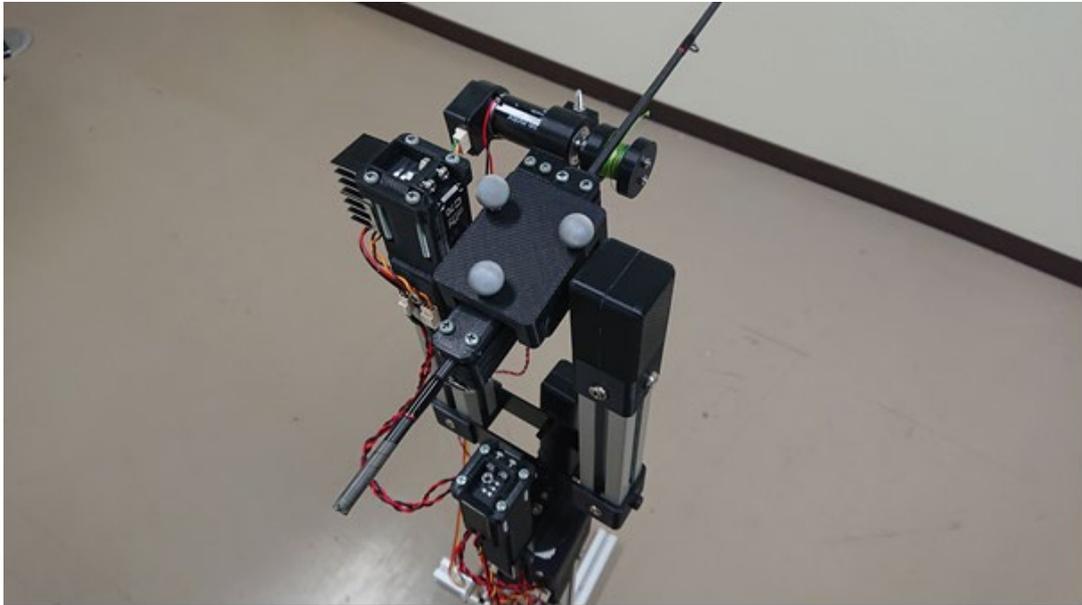


図 3.8 デバイス用のマーカ

OptiTrack は対象物までの距離によってトラッキングできる領域が変化する (図 3.9) [54]。デバイスに搭載している釣竿の全長は 1.12m であるため、釣竿全体をトラッキングエリア内に収めるためには、OptiTrack をデバイスから約 2m 離す必要がある。

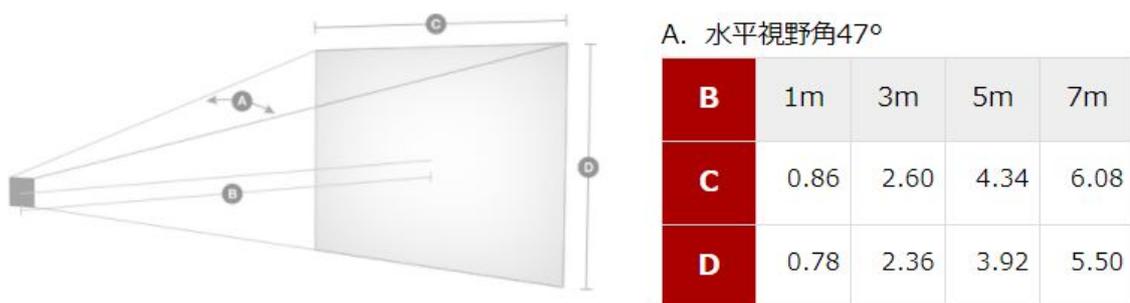


図 3.9 OptiTrack Trio のセンシングエリア[54]

ユーザに提示する映像は Unity で作成する。OptiTrack からユーザの指先と提案装置の位置情報を PC に送る。そして PC 上で提案装置と指先の位置関係を算出し、映像内の適切な位置にバーチャルな指を表示する。バーチャル空間の物体とバーチャルな指が接触した場合、PC からマイコンにリール部の DC モータの制御量と釣竿を支える 2 台のサーボモータの制御量を送信する。その後、マイコン内で各モータを制御しユーザの指先に力覚を提示する。提案装置の詳細な制御方法については次章で述べる。以上のシステム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。図 3.10 は実際に指先に力覚を提示している様子を示す。

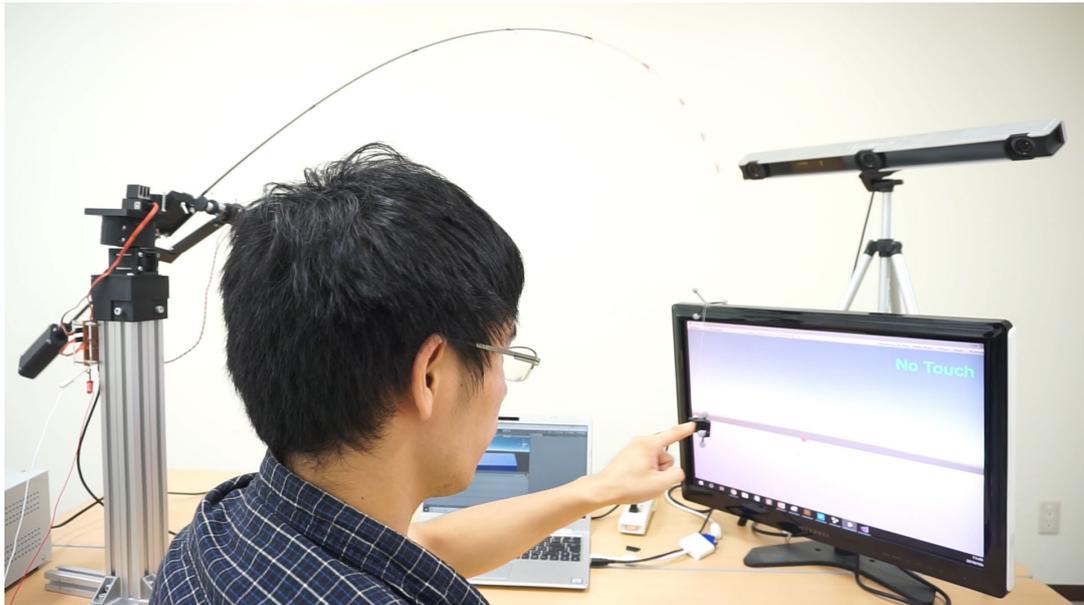


図 3.10 提案手法で指先に力覚を提示している様子

第4章 制御システム

本章では提案装置の制御方法について述べる．ここでは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．

4.1 従来手法との違い

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．本論文で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鉛直方向に牽引する．そのため，OptiTrack から検出される指先の位置情報が制御システムの入力情報になる．本デバイスを VR 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．本論文では指先に取り付けた糸が常に真上に牽引する場合を扱う．

シリアルリンク型の力覚提示装置の場合，特に PHANToM (図 1.2) [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提示装置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，提案装置は釣竿を用いているため，しなりを考慮した計算式を立てることが必要となる．松村ら[55]や大槻ら[56]は釣竿の大たわみ変形を解析するための数学的モデルを作成し，力学的特性および基本的変形挙動を明らかにした．この数学的モデルを使用すれば，糸が指先を鉛直方向に牽引するための最適な釣竿の角度を導出することが可能だが，計算が複雑であり演算処理も多くリアルタイム性に欠けている．また，数学モデルは釣竿の先端に負荷がかかった場合で考えられており，ロッドガイドに糸を通った本来の釣竿を想定していない．そのため，糸の巻き取りによって生じる牽引力は計算できない．

以上のことから，釣竿のしなりが指先に提示する力と関係する提案装置において，しなりを考慮した計算式を立てリアルタイムに最適解を求めることが今のところ困難である．そこで，シリアルリンク型の力覚提示装置のようなデバイスの構造を基にした計算式を必要とせず，指先の動きや提示したい力をリアルタイムに読み込み，最適に動作する制御手法を提案する．

4.2 提案手法 1：糸の方向ベクトルを用いたフィードバック制御

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する．OptiTrack のマーカを指サックだけでなく糸にも取り付け (図 4.1)，糸の方向ベクトルを求める．そして，図 4.2 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．

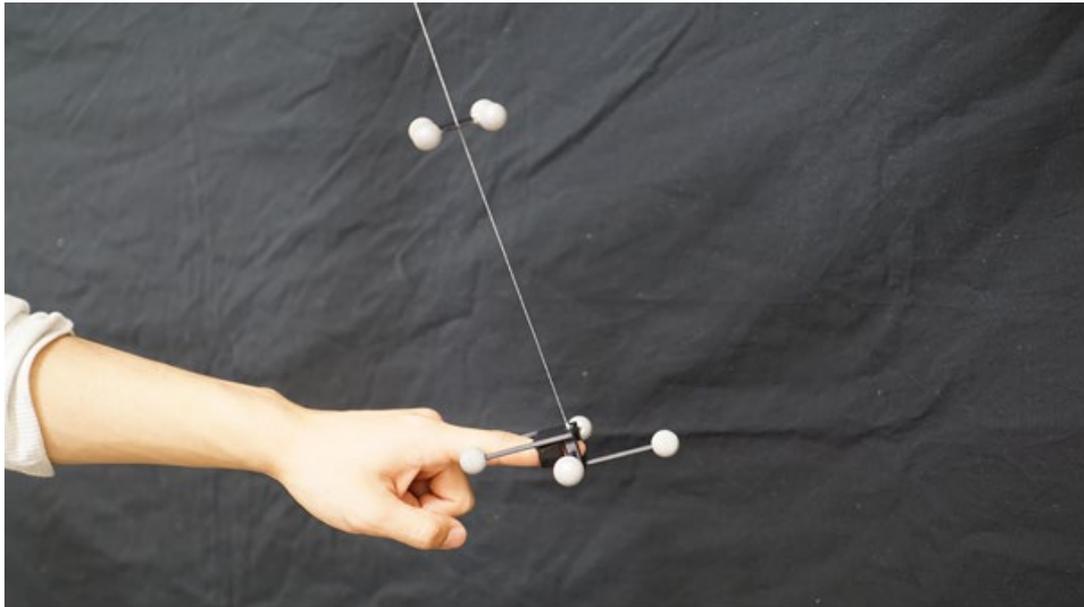


図 4.1 OptiTrack のマーカを糸に取り付けた様子

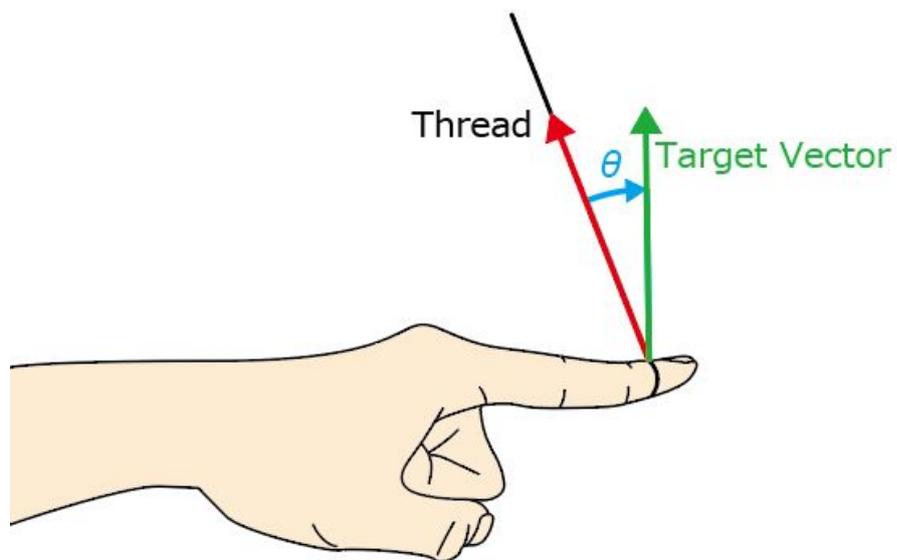


図 4.2 糸の方向ベクトルを用いたフィードバック制御の概要図

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1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。したがって、糸の方向ベクトルを介するフィードバック制御で力を一定方向に牽引することは現時点では困難である。

4.3 提案手法 2：巻き取り力、釣竿の角度を出力とするフィードフォワード制御

前節で、糸の方向ベクトルを目標ベクトルに一致させるフィードバック制御で釣竿の制御を行うことは困難であることが分かった。そこで、フィードフォワード制御で釣竿を制御することを提案する。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。ただし、本論文において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、指先の位置情報と糸の巻き取り力、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。次節ではこれらの情報の関係について計測を行う。

4.4 計測 1：提案手法 2 における入出力情報の関係調査

4.4.1 計測目的

指先の位置と糸を巻き取るモータへの Duty 比指令値、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計測し、指先を動かしても常に鉛直方向に牽引する制御を実現する。

4.4.2 計測環境

計測環境を図 4.3 に示す。提案装置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約 1.25kg の錘 (図 4.4) を取り付ける。指先に取り付ける指サックと同様に、錘にも OptiTrack のマーカを取り付ける。釣竿の角度は床と平行な状態を 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 (図 4.5)。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様に調整する。このとき、糸の牽引方向が地面に対して垂直であるかを判断するために Web カメラを電子天秤の前に設置した (図 4.6)。Web カメラが撮影した映像を Unity に表示し、映像の上に垂直方向に赤線を引いて、赤線と映像に映る糸が重なったときを鉛直方向に牽引している状態と定義した (図 4.7)。

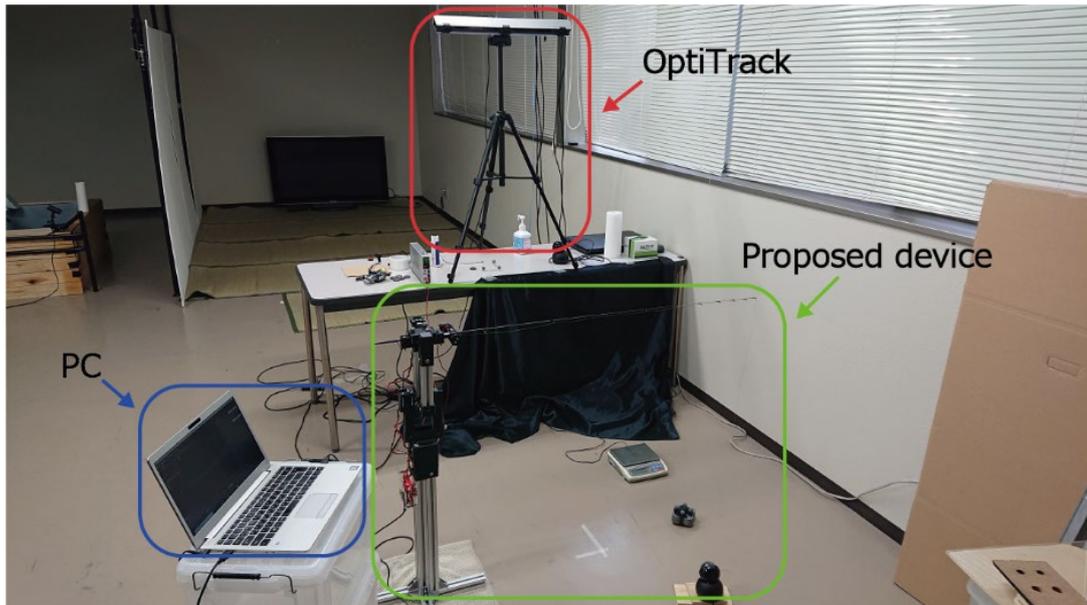


図 4.3 計測環境



図 4.4 計測で使した錘



図 4.5 糸の牽引力を計測した電子天秤



図 4.6 糸の牽引方向を確認するための Web カメラ

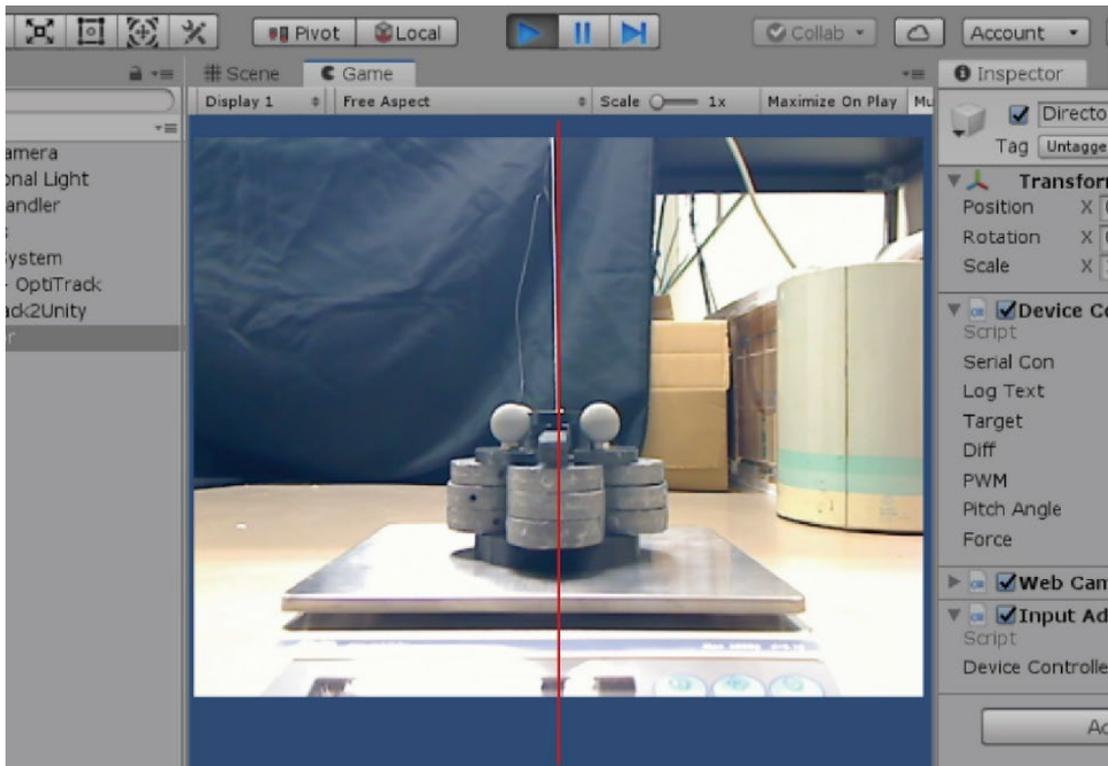


図 4.7 Web カメラで撮影された糸と Unity 内で描画する赤線が一致したときの様子

4.4.3 計測手法

本計測では図 4.8 に示す、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 DC モータの Duty 比 d 、釣竿のピッチ軸方向の角度 θ 、糸が錘を牽引する力 f を記録する。

本計測に取り掛かるとき、釣竿の先端に糸が絡まり、釣竿が破損した。また、計測時には予備の釣竿がなかったため、本計測では破損した釣竿を使用した。破損したことにより釣竿の長さは 112cm から 97cm になった。釣竿を支える台座の構造上、デバイスから最も近く錘を設置できる位置が 30cm であった。そこで、デバイスの位置を原点として 30cm, 40cm, 50cm, 60cm, 70cm, 80cm, 90cm の場所に錘を設置した。各位置で糸を巻き取る DC モータの Duty 比を 5% から 25% の間を 5% ずつ変化させて、その後に糸が錘を垂直に牽引するように釣竿の角度を調整した。リール部の DC モータは Duty 比が 5% 以上になると回転し始めるため、Duty 比を 5% から計測することとした。また、リール部の DC モータに 25% 以上の Duty 比を設定してピッチ軸方向に回転するサーボモータを駆動させたとき、サーボモータが発熱し釣竿を支えることができなかった。そこでサーボモータの発熱に対応するため、サーボモータに放熱板を取り付けた。放熱板を取り付けたことにより 25% では釣竿を支えることができるようになったが、30% 以上の場合は変化がなかった。そのため、Duty 比の計測範囲を 5% から 25% までとした。位置を固定して 5 種類の Duty 比の指令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。

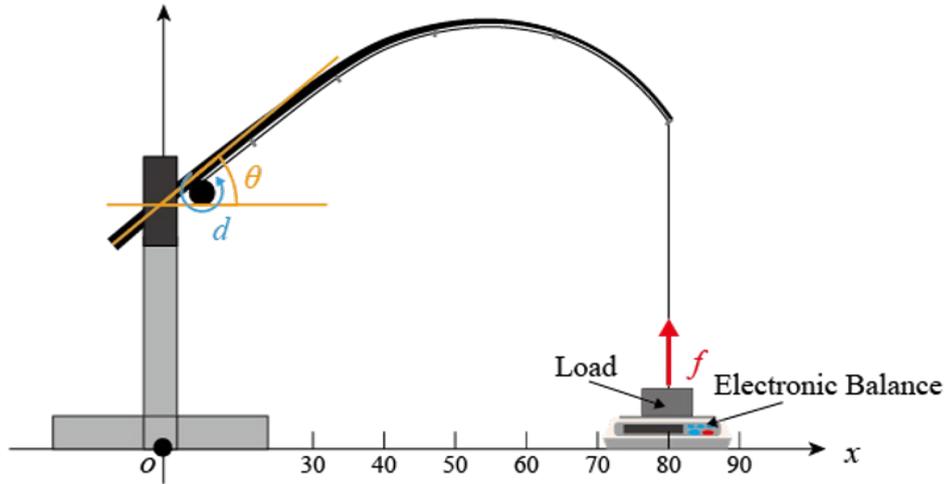


図 4.8 計測環境と計測データの対応

4.4.4 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 DC モータの Duty 比 d 、釣竿のピッチ軸方向の角度 θ の関係を図 4.9 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 4.10 に示す。各図において、グラフ内の色は錘の設置場所を示す。

図 4.9, 図 4.10 において錘を 90cm に設置したときのデータは 3 点だけである。また, 70cm, 80cm に錘を設置したときは 4 点のデータを記録できた。これらの地点は他の位置に比べ、計測できたデータ数は少ない。理由は、これらの位置に錘を設置して糸巻き取りモータの Duty 比を高くしたとき、釣竿の先端が錘の真上に位置する（糸が錘を鉛直方向に牽引する）釣竿の角度が見つからなかったからである。したがって、70cm, 80cm, 90cm に錘を設置したとき、糸が鉛直方向に牽引できていない場合は各データの計測を行っていない。

前項で述べた通り、糸巻き取りモータに高い Duty 比を指定したい場合、釣竿を支えるサーボモータが発熱し制御できなくなる問題があった。図 4.10 から提案装置が出力した力の最大は約 3N であると読み取れる。サーボモータに放熱板を取り付けたことで 25% の Duty 比を指定しても釣竿が倒れ込むことはなかったが、負荷をかけ続けた場合は発熱によりサーボモータを制御できなくなる可能性がある。そのため、提案装置が出力できる最大の力は 2.5N であると考えべきである。

提案するフィードフォワード制御は指先の位置 x と提示したい力の強さ 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 θ を求める。ここで考えられる入出力情報の関係を図 4.11 に示す。図 4.10 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 (糸の巻き取り力) を求め (図 4.11 中の A)、次に図 4.9 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 θ を求める (図 4.11 中の B) という流れで処理の手順を決めた。

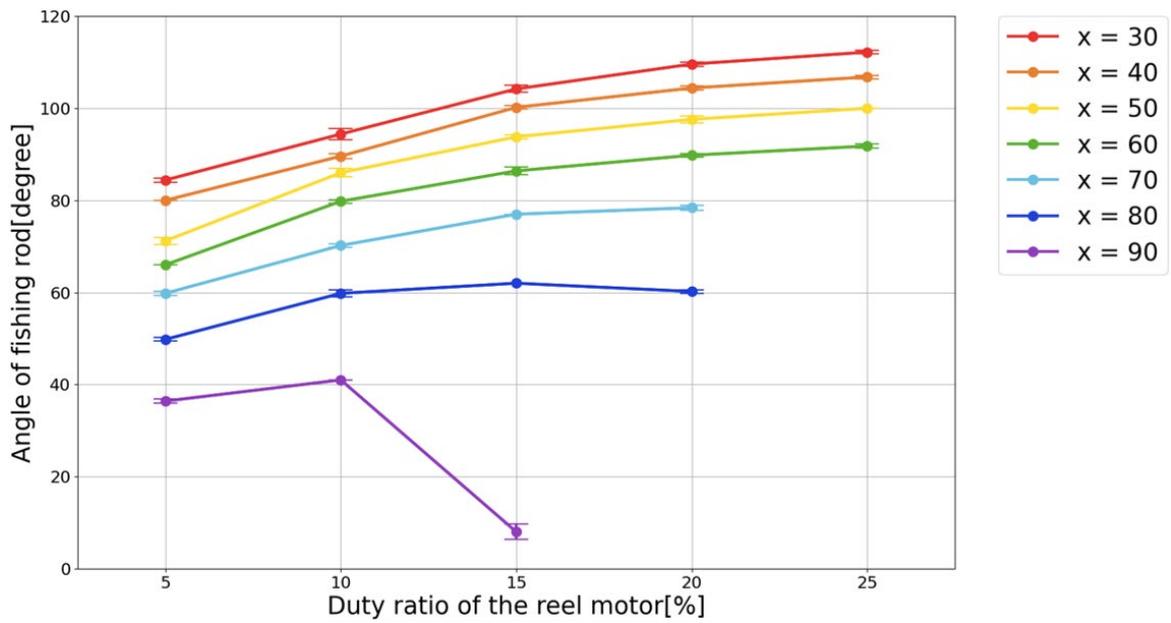


図 4.9 リール部のモータの Duty 比と釣竿の角度の関係

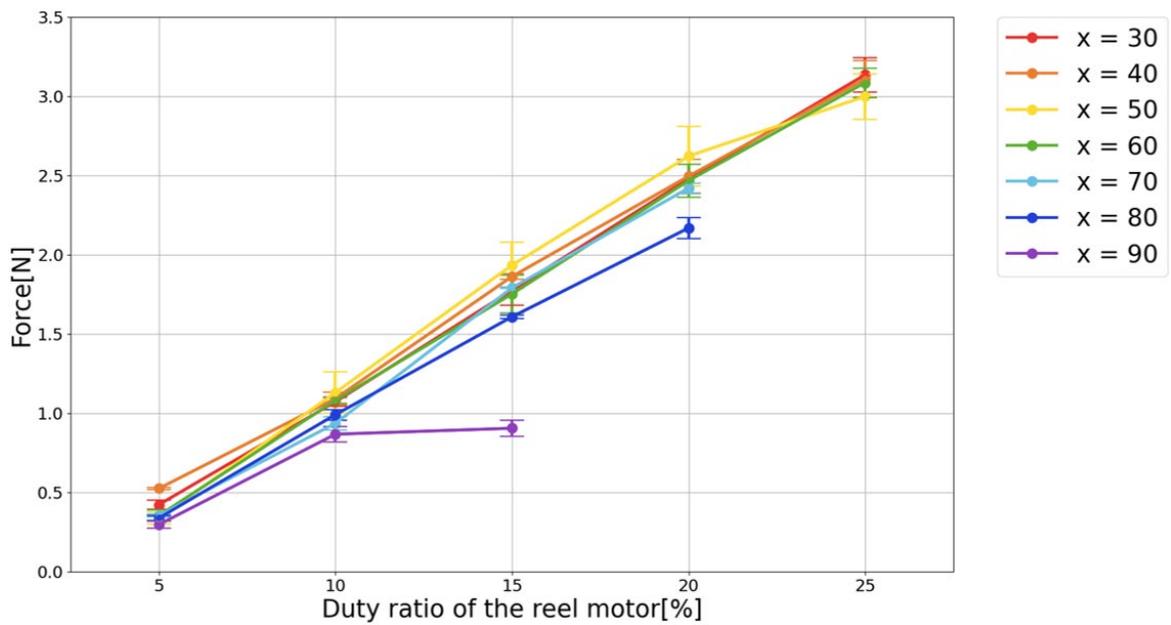


図 4.10 リール部のモータの Duty 比と糸が錘を牽引した力の強さの関係

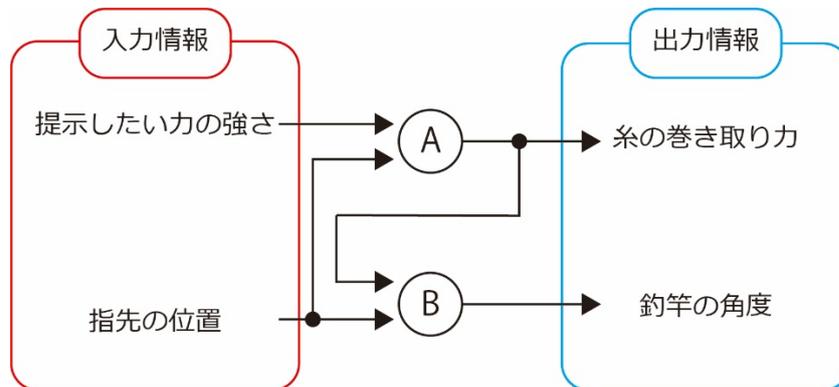


図 4.11 入出力情報の関係

以上の手続きを実現するために、図 4.9、図 4.10 の計測データから最小二乗法による回帰式を求めた。図 4.12、図 4.13 に求めた回帰式による回帰曲線と 30cm、40cm、50cm、60cm の 4 つの位置で得られた計測データを同時に示す。図 4.12 では x と f から d を、図 4.13 では x と d から θ 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。

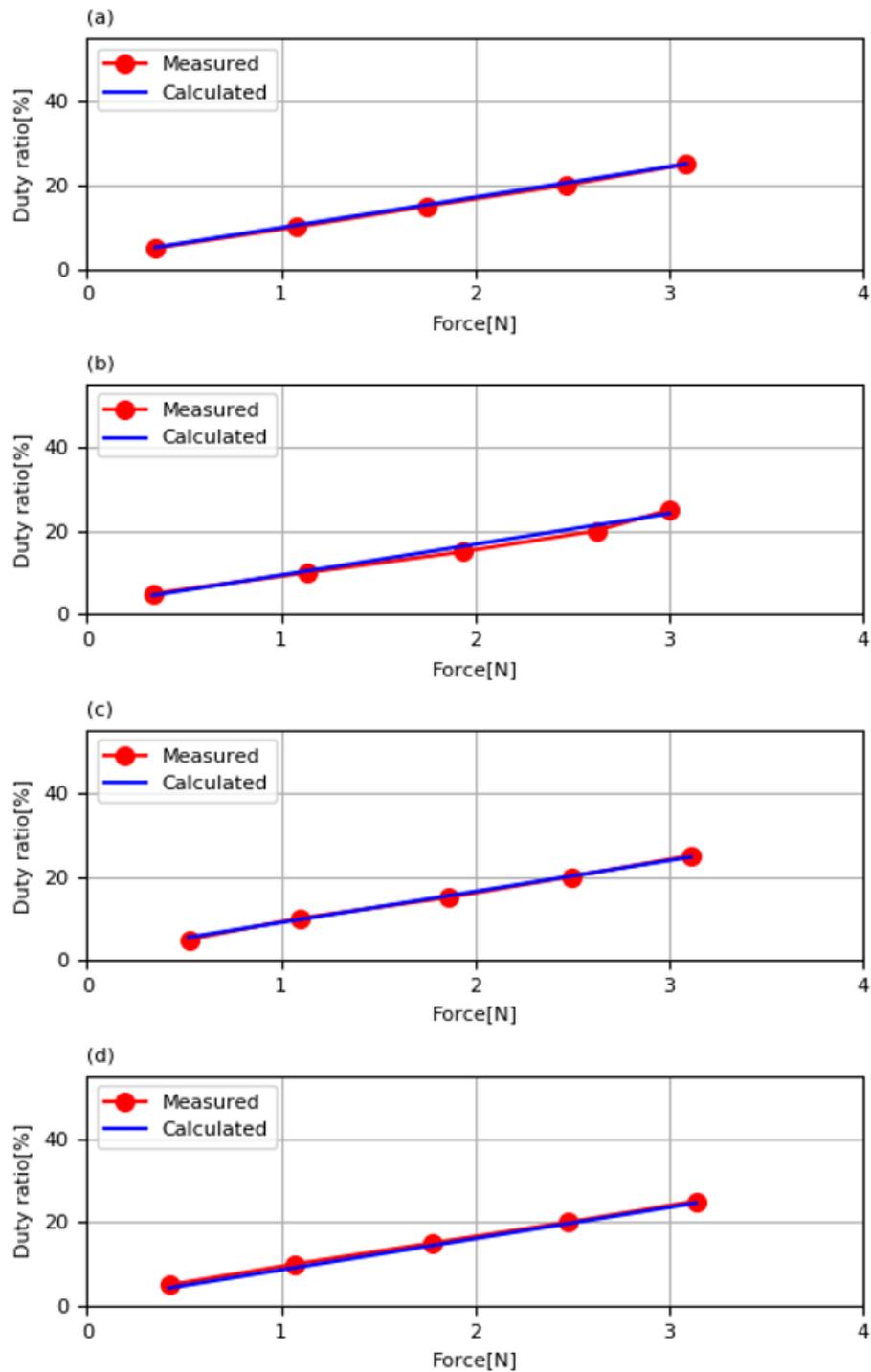


図 4.12 糸の牽引力と糸巻き取りモータの Duty 比に関する回帰曲線と計測データの比較
 (a) $x = 60\text{cm}$ (b) $x = 50\text{cm}$ (c) $x = 40\text{cm}$ (d) $x = 30\text{cm}$

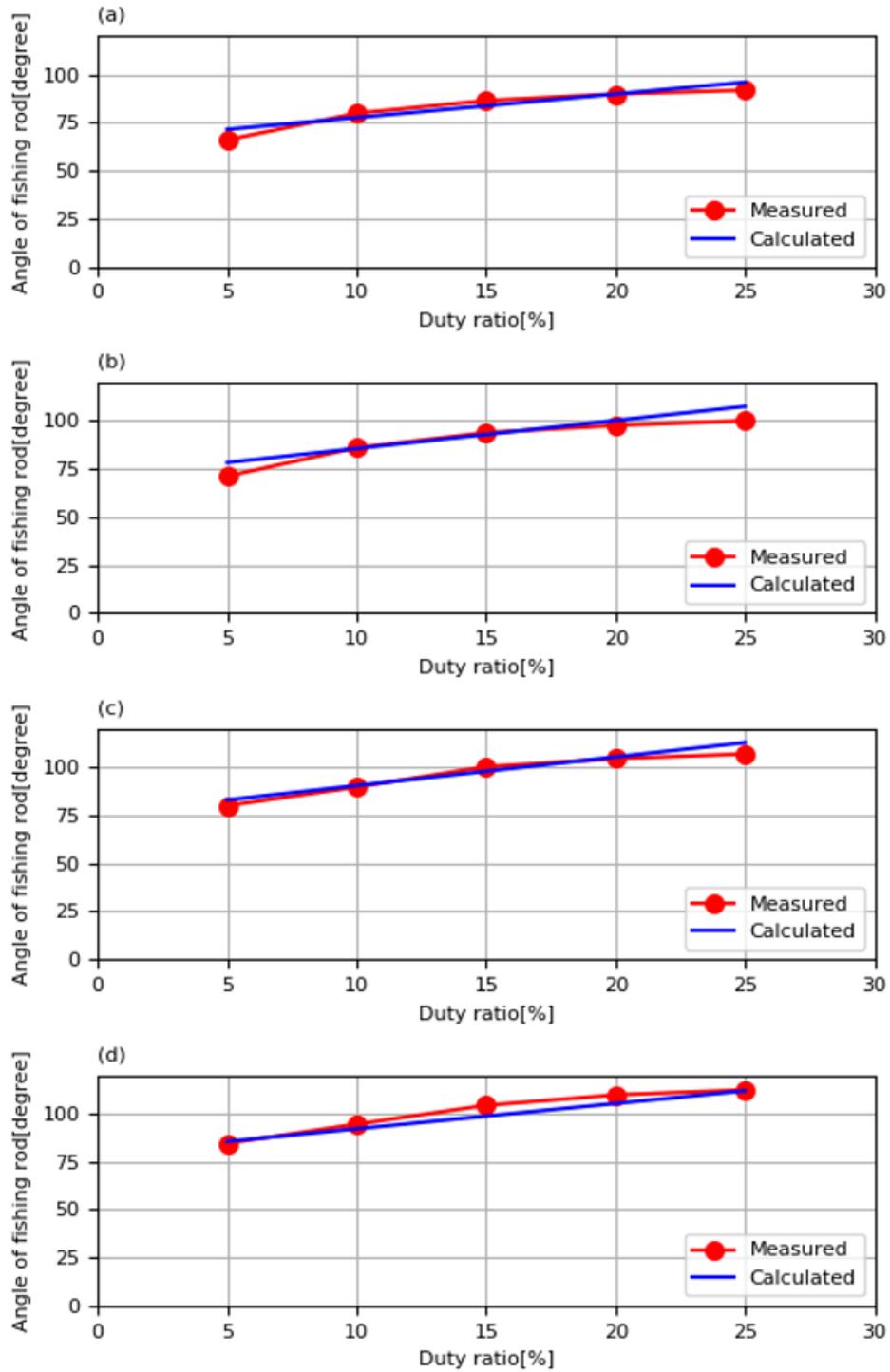


図 4.13 釣竿の角度と糸巻き取りモータの Duty 比に関する回帰曲線と計測データの比較
 (a) $x = 60\text{cm}$ (b) $x = 50\text{cm}$ (c) $x = 40\text{cm}$ (d) $x = 30\text{cm}$

4.4.5 動作確認

前項で得られた回帰式をフィードフォワード制御に組み込み、実際に提案装置の動作確認を行った。まず、本論文では指先に提示する力の方向を鉛直方向に限定しているため、指先を動かしても常に糸が鉛直方向に牽引できるかについて確認した。ここでは、実際に糸を指先にとりつけ、指先を左右に動かすことで装置の挙動を観察した。その結果、指先に 0.5N 以下の力を提示させた場合、常に糸が指先を真上に牽引している様子が確認できた。図 4.14 に提示する力の強さを 0.5N に固定して指先を動かしている様子を示す。図 4.14 を見ると、所望のフィードフォワード制御が実現していることが分かる。(図 4.14 では糸が分かりにくい、釣竿の先端と指との間に糸が張られている。) しかし、 0.5N を超える力を提示しようとした場合、糸が指先を常に鉛直方向に牽引する様子が確認できなかった。

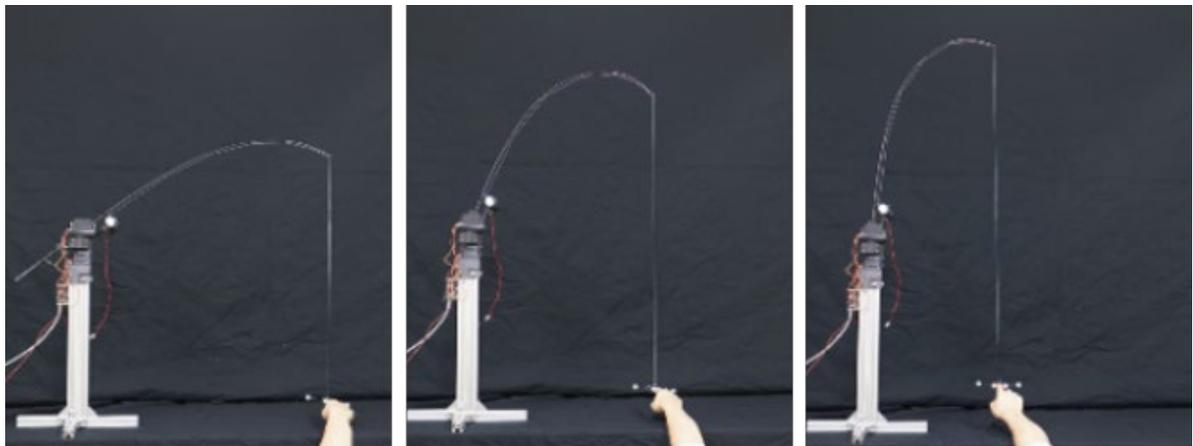


図 4.14 動作確認の様子

次に、指先に提示したい力の強さが実際に指先に提示されているかについて確認した。ここでは指先ではなく本節の計測同様に錘を使用して、電子天秤の出力の変化から糸が錘を牽引する力の強さを計測した。前項の計測結果から提案装置が生成できる最大の力が 2.5N であると分かったため、本計測では 0.5N から 2.5N までの 0.5N 刻みで提示したい力を設定し、そのときの実際に生じる糸の牽引力を記録した。また図 4.12, 図 4.13 と同様に、計測位置は 30cm , 40cm , 50cm , 60cm の 4 つの位置を対象とした。

計測結果を図 4.15 に示す。本計測では提示したい力の強さを入力値とし、実際に指先に生じる力の強さを出力値とする。そして本計測において、入力値と出力値が一致することが理想である。図 4.15 を見ると入力値が 0.5N のとき、出力値は約 0.5N であるため、理想の結果が得られている。しかし、入力値を強くしていくと出力値は入力値と大きく異なっていることが読み取れる。

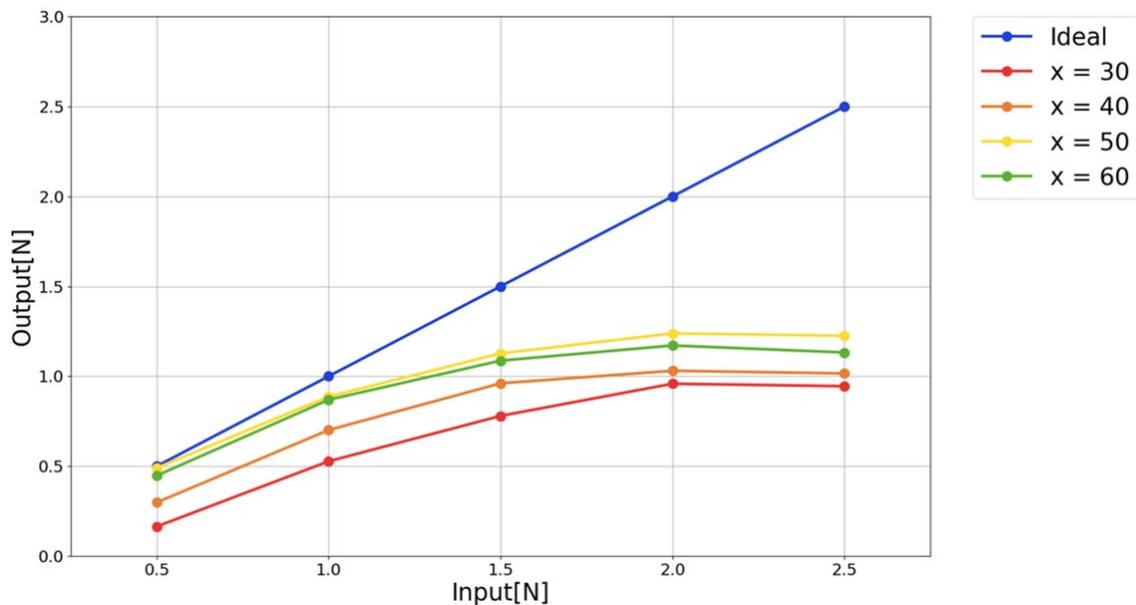


図 4.15 提示したい力の強さと実際に生じた力の強さの関係

4.4.6 考察

図 4.15 の入力値と出力値の比較において、入力値を大きくすると出力値と入力値の差が大きくなってしまいう原因として、糸が鉛直方向に牽引できていなかったことが考えられる。指先を左右に動かして常に鉛直方向に牽引するかについて確認した際、0.5N 以下では糸が鉛直方向に牽引している様子が確認できた。そして、図 4.15 においても 0.5N を入力したとき、約 0.5N の力で錘を牽引していることが確認できた。それに対し、0.5N 以上の力を入力値とした場合、鉛直方向に牽引できなかったことを確認した。図 4.16 は錘をデバイスから 60cm 離れたところに置き、2.5N の牽引力を入力値としたときの様子である。図 4.16 の糸の牽引方向を見ると、糸が鉛直方向に牽引できていないことが分かる。また、図 4.15 から 2.5N の入力値に対する実際に生じる糸の牽引力は約 1N であったことが読み取れる。したがって、提示したい力を正しく出力するには正確に糸を鉛直方向に牽引させる必要がある。

前項の動作確認は計測データから導出された回帰式をフィードフォワード制御に組み込んで行ったものである。そこで、フィードフォワード制御に組み込んだ回帰式を確認すると、図 4.12 と図 4.13 のどちらも計測データによくフィッティングできている。しかし、図 4.13 のほうでは少し計測データとずれが生じていることが読み取れる。そのため、計測データとずれがある回帰式をフィードフォワード制御に組み込んだことで、強い力を入力しても糸が鉛直方向に牽引しなかったと考えられる。そこで図 4.12 の回帰式を図 4.11 中の A に組み込んだ状態で、釣竿の角度は直接指令値を入力し、提示したい力と実際の糸の牽引力の違いは図 4.13 の回帰曲線のずれから生じることを確認した。錘の設置場所を 60cm とし、錘に提示したい力の強さを 0.5N から 2.5N までの 0.5N 刻みで変化させて、糸の牽引方向が鉛直方向になるように釣竿の角度を調整した。そして、実際に生じた糸の牽引力を記録した。この結果を図 4.17 に示す。図 4.17 を見ると、糸を鉛直方向に牽引できるように釣竿の角度を正確に調整すれば、提示したい力の強さと出力となる力の強さが一致することが確認できた。以上より、釣竿の角度に関する回帰曲線の導出に問題があると考えた。

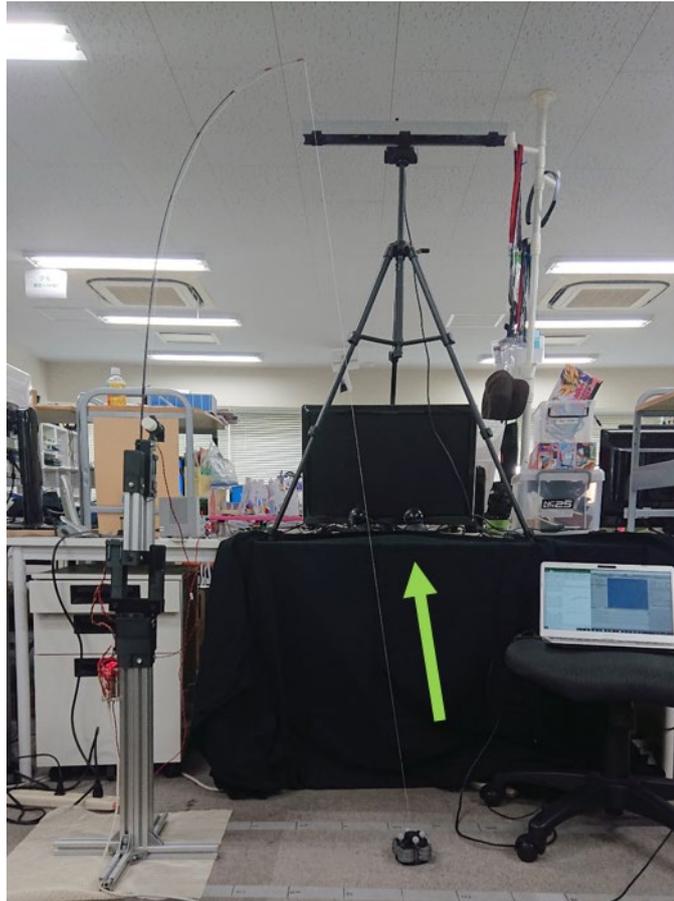


図 4.16 60cm に錘を置いて提示したい力の強さに 2.5N を指定したときの様子

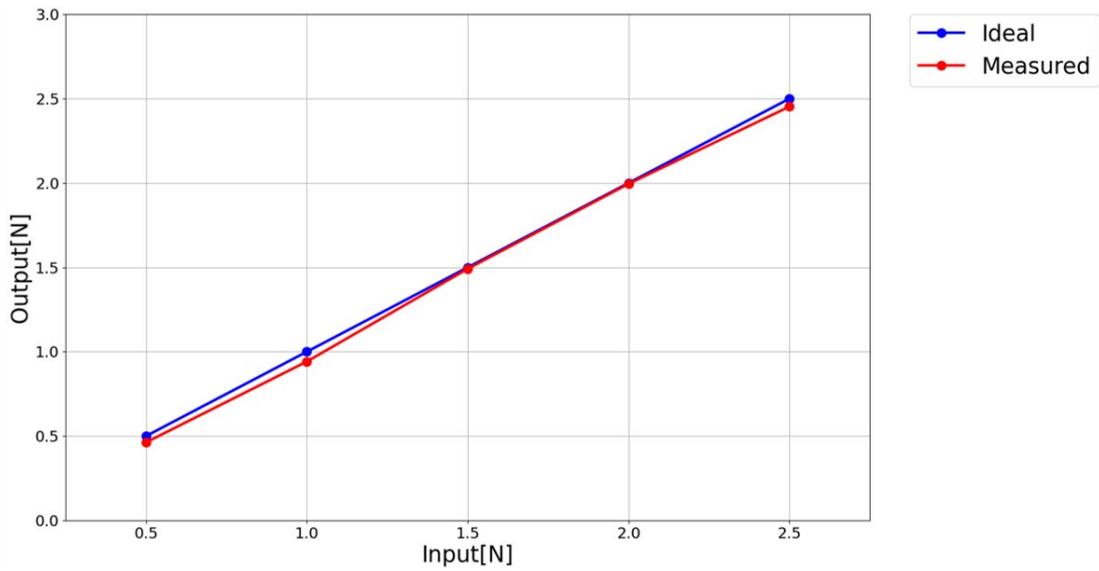


図 4.17 提示したい力の強さと実際に糸が錘を牽引した力の強さの比較

また、図 4.11 の入出力情報の関係も問題があると考えられる。図 4.11 中の A は 2 つの入力情報を受け取り、適切な糸の巻き取り力（糸巻き取りモータの Duty 比）を導出する関係にある。それに対して、図 4.11 中の B は A の出力結果と入力情報である指先の位置から釣竿の角度を導出する。本節では、図 4.11 中の A は図 4.12 の回帰式を当てはめた。図 4.12 は計測データと回帰曲線に大きな差は見られなかった。しかし、計測データでは扱わなかった 2 つの入力情報の組み合わせを与えたとき、導出した糸の巻き取り力が必ず最適な値であるとはいえない。したがって、図 4.12 から得られた糸の巻き取り力が最適な値でない場合、その値が図 4.11 中の B に渡され、正確に糸を鉛直方向に牽引できない原因になる。そこで、図 4.11 中の A と B のどちらも 2 つの入力情報を受け取り、各関係で出力情報を導出する図 4.18 の関係を提案する。次節では、図 4.18 中の A に図 4.12 の回帰式を組み込んで B の関係を計測する。

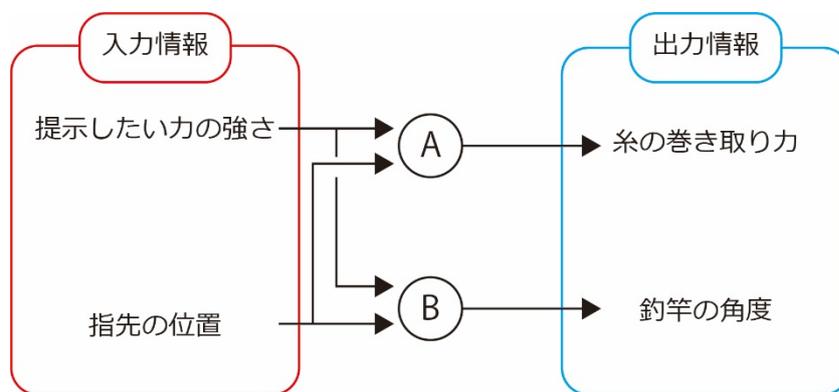


図 4.18 入出力情報の関係

4.5 計測 2 : 2 つの入力情報と釣竿の角度の関係調査

4.5.1 計測目的

指先に提示したい力の強さと指先の位置、釣竿の姿勢の関係を計測し、提示したい力の強さと実際に糸が指先を牽引する力の強さが一致する制御を実現する。

4.5.2 計測手法

本計測では図 4.8 に示す、錘が鉛直方向に牽引されているときのデバイスから錘までの距離 x 、指先に提示したい力の強さ f_{in} 、釣竿のピッチ軸方向の角度 θ 、実際に糸が錘を牽引する力 f_{out} を記録する。本計測の環境は 4.4.2 項と同様である。

本計測ではデバイスの位置を原点として 30cm から 90cm までの 10cm 刻みに錘を配置した。指先に提示したい力の強さを 0.25N から 2.5N までの間を 0.25N ずつ変化させて、その後に糸が錘を鉛直方向に牽引するように釣竿の角度を調整した。提示したい力の強さは前節の計測結果より 2.5N までとした。錘の位置を固定して 10 種類の提示したい力の強さに対する釣竿の角度の計測を 5 回繰り返した。最終的に得られた釣竿の角度と実際に糸が錘を牽引する力の平均値を計測結果とした。

4.5.3 計測結果

計測で得られたデータから、錘の設置場所 x 、指先に提示したい力の強さ f_{in} 、釣竿のピッチ軸方向の角度 θ の関係を図 4.19 に示す。また、錘の設置場所 x 、指先に提示したい力の強さ f_{in} 、実際に糸が錘を牽引する力 f_{out} の関係を図 4.20 に示す。各図において、グラフ内の色は錘の設置場所を示す。

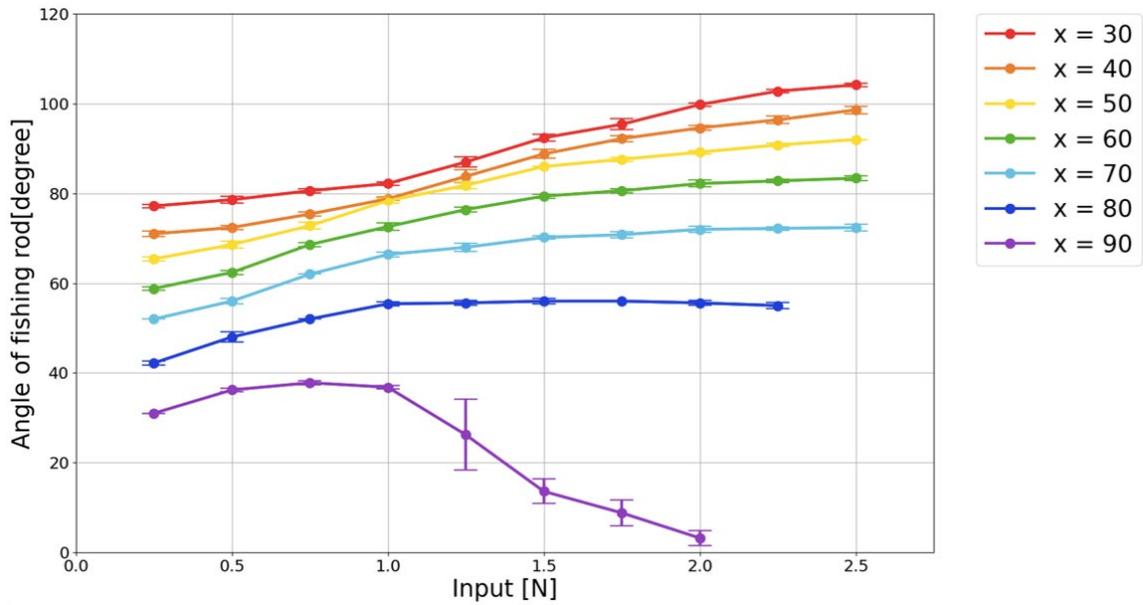


図 4.19 提示したい力の強さと釣竿の角度の関係

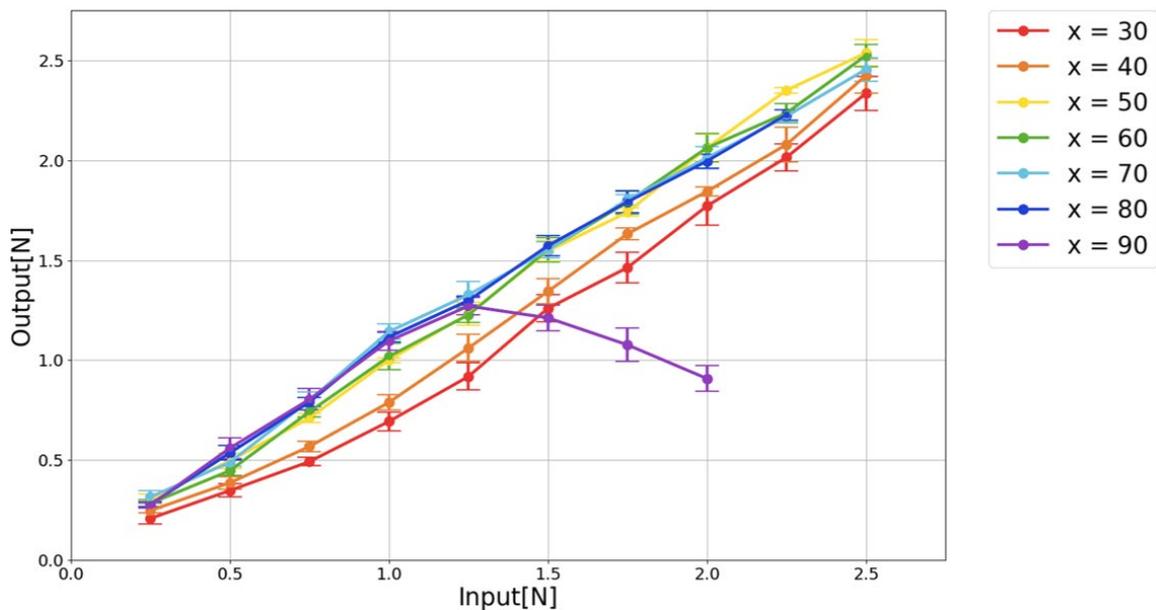


図 4.20 提示したい力の強さと実際に糸が錘を牽引した力の関係

図 4.19 の関係は前節の計測で得られた図 4.9 と似た形状をしている。また、糸が鉛直方向に牽引するように釣竿の角度を調整した結果、図 4.20 では多少のばらつきはあるが、提示したい力に対して相応の力が出力されていることが確認できる。ただし、錘を 90cm に設置した場合、提示したい力を 1.5N 以上に指定すると、提示したい力と実際に生じる糸の牽引力の間に大きな違いが表れていることが確認できる。

図 4.19, 図 4.20 において錘を 80cm に設置して提示したい力の強さを 2.5N に指定したとき、糸が鉛直方向に牽引する釣竿の角度が見つからなかった。また同様に、90cm に設置して提示したい力の強さを 2.25N 以上に設定したときも対応する釣竿の角度が見つからなかった。

ここで前節と同様に図 4.19 の計測データから最小二乗法による回帰式を求めた。図 4.21 に求めた回帰式による回帰曲線と 30cm から 80cm で得られた計測データを同時に示す。図 4.21 を見ると、回帰曲線と計測データの間には差が生じていることが読み取れる。

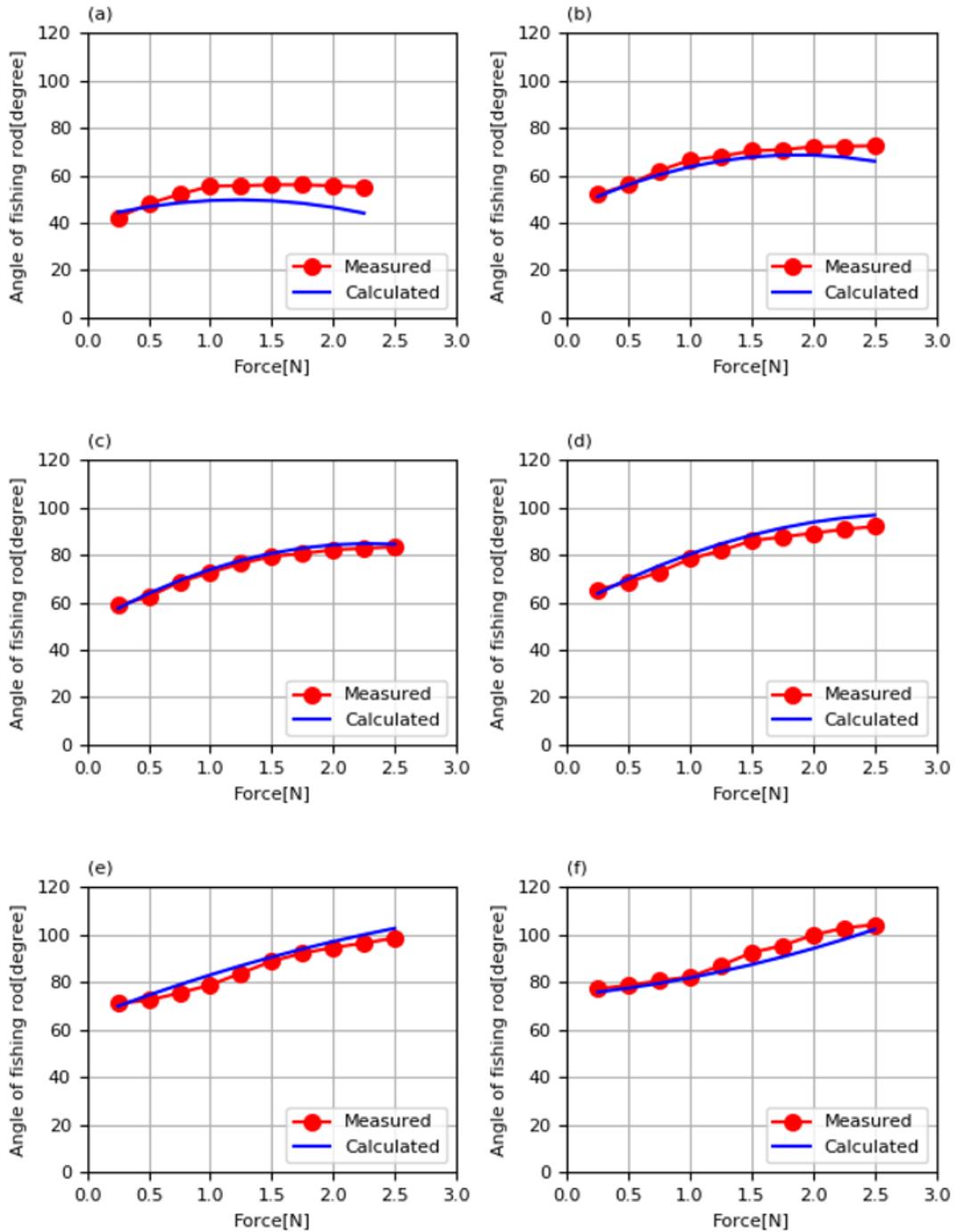


図 4.21 釣竿の角度と提示したい力の強さに関する回帰曲線と計測データの比較

(a) $x = 80\text{cm}$ (b) $x = 70\text{cm}$ (c) $x = 60\text{cm}$

(d) $x = 50\text{cm}$ (e) $x = 40\text{cm}$ (f) $x = 30\text{cm}$

4.5.4 動作確認

前節で得られた図 4.12 の回帰式を図 4.18 中の A に、本計測で導出した回帰式を図 4.18 中の B に当てはめ、提示したい力と実際に生じる糸の牽引力が一致するかについて確認を行った。計測手法と同様に錘を 30cm, 40cm, 50cm, 60cm に設置し、提示したい力の強さを 0.5N から 2.5N の間を 0.25N ずつ変化させた。そして電子天秤を使用して、実際に生じる糸の牽引力を記録した。

図 4.22 は得られたデータをプロットしたグラフである。錘に提示したい力の強さを入力値とし、実際に錘に生じた糸の牽引力の強さを出力値とした。図 4.22 において入力値と出力値が一致する線形的な関係が表れることが望ましいが、入力値が大きくなるにつれて出力値との差も大きくなっていることが読み取れる。また、図 4.22 は前節で得られた図 4.15 と似た結果となっている。

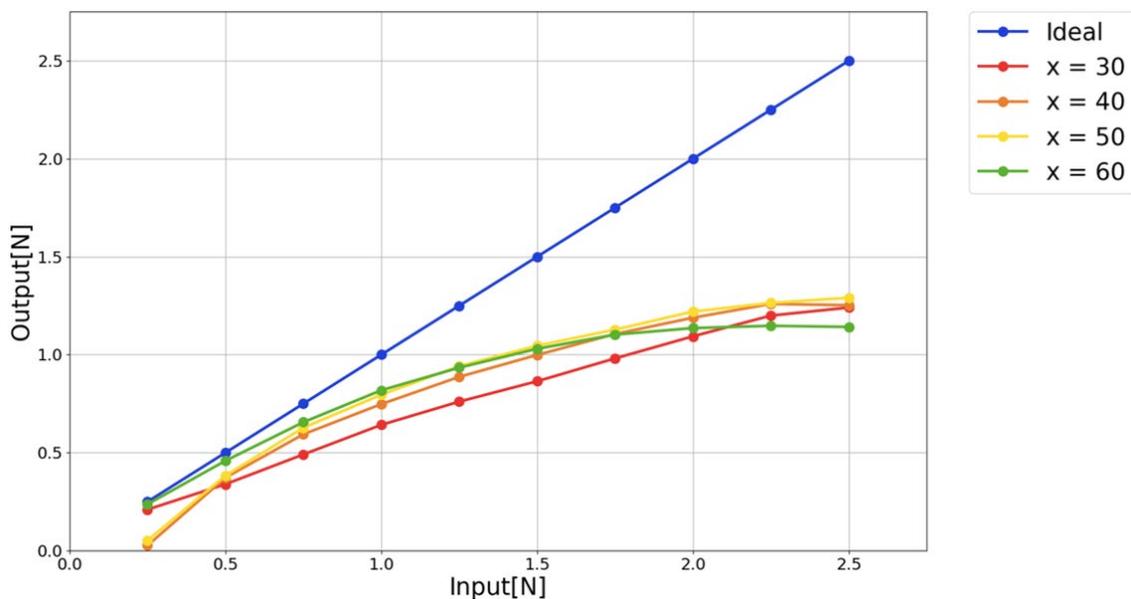


図 4.22 提示したい力の強さと実際に糸が錘を牽引した力の関係

4.5.5 考察

図 4.20 の計測結果で、錘を 90cm に設置したとき、提示したい力の強さが 0.25N から 1.25N の間は実際に生じた力が増加傾向にあるが、1.25N 以上の入力値を与えた場合は出力値が減少傾向にあることが読み取れる。さらに、90cm に錘を置いた場合は提案装置が生成できる最大の力は 1.25N であることも読み取れる。前節の計測結果である図 4.10 においても、錘の設置場所が 90cm のとき、リール部の Duty 比が 10% を超えると実際に生じる力が変化していないことが分かる。これらの結果から、錘の位置がデバイスから遠い位置にあるほど釣竿が生成できる鉛直方向の最大の力が弱くなると考えられる。また、最大の力を超える力を提示した場合、実際に生じる糸の牽引力の強さは弱くなると考えられる。

動作確認において、入力値を大きくしたとき出力値との差が大きくなってしまった原因として、糸が鉛直方向に牽引できていなかったことが考えられる。動作確認を行ったとき、糸の牽引方向を確認すると、入力値が小さいときは比較的垂直に糸が牽引していたが、入力値が大きくなると

図 4.16 のように糸が傾いたまま牽引していた様子を確認した。4.4.6 項の考察では糸が正確に鉛直方向に牽引できなかったことが入力値と出力値の間に差が生じた原因と考えた。そのため、本計測で得られた結果も同様に、糸の牽引方向に問題があると考えられる。今回の計測は 4.4.6 項の考察から、釣竿の角度を導出する回帰曲線の改善を目的に、提示したい力の強さ、指先の位置、釣竿の角度の関係を計測することとした。そして、今回得られた図 4.22 は入力値と出力値が一致する関係ではなかった。しかし、図 4.15 の結果と比較すると図 4.22 では入力値と出力値が線形的な関係にあることが読み取れ、入力値と出力値の関係が少し改善されたことが分かる。

図 4.15 と図 4.22 に違いが表れた理由は 2 つ考えられる。1 つめは、制御システムの入出力情報の関係を変更したことである。図 4.15 のときは、提示したい力の強さと指先の位置からリール部のモータの Duty 比を導出し、導出した Duty 比と指先の位置から釣竿の角度を求めた(図 4.11)。この関係では最初に導出する糸巻き取りモータの Duty 比によって釣竿の角度が決まるため、最適な Duty 比を導出できなければ釣竿の角度に影響を与えてしまう問題があった。それに対して図 4.22 の場合、出力情報となる糸巻き取りモータの Duty 比、釣竿の角度のどちらも入力情報となる指先に提示した力、指先の位置から導出する関係(図 4.18)にある。図 4.11 のような 1 つの出力情報と 1 つの入力情報から残りの出力情報を求める関係ではないため、図 4.22 は図 4.15 より少し改善されたと考えられる。2 つめは、計測対象は異なるが、計測するデータ数を増やしたことが理由として考えられる。前節の計測では、錘の設置場所を 7 箇所とし 5 種類の Duty 比の指令値を与えて、糸が鉛直方向に牽引する釣竿の角度の計測を 5 回繰り返した。最終的に得られたデータの平均値を算出し、グラフにプロットした結果が図 4.9 である。図 4.9 を見ると、データのプロット数は 31 点である。それに対し、今回の計測は 7 箇所に錘を設置し 10 種類の提示したい力の強さを入力し、糸が鉛直方向に牽引する釣竿の角度を計測した。各々の位置、提示したい力に対して 5 回の計測を行い、平均値をグラフ化した結果が図 4.19 である。図 4.19 では 67 点のデータをプロットしていることが分かる。計測するデータ数が多いほど、導出される回帰式は各データの関係性を表現しやすくなる。以上から、計測するデータ数を増やしたことで、図 4.13 よりも正確な回帰式(図 4.21)が導出できたと考えられる。

提示したい力の強さと実際に糸が牽引する力の強さの関係が改善されたことを踏まえ、さらに釣竿の角度に関するデータを増やして、より正確に釣竿の角度を算出できる回帰式を求める。今回の計測手法と同様にして調査するデータ数を増やせばよい。しかし、今回の計測に 6 時間かかっており、さらにデータ数を増やすと長時間にわたる計測になってしまう。4.1 節で大槻ら[56]が釣竿の特性を調査するため、数学モデルを作成したことを述べた。この数学モデルを使用すれば、糸の牽引力と同等な釣竿の先端にかかる力、釣竿の角度、釣竿の先端位置の関係を解析することができる。次項では釣竿の数学モデルを使用して、釣竿の特性を解析するシミュレーションについて述べ、シミュレーションによって導出される提示したい力の強さ、指先の位置、釣竿の角度の関係を述べる。

4.6 釣竿の特性を解析するシミュレーション

大槻ら[56]が報告した数学モデルを Unity 上で解析し、釣竿の変形を再現した。図 4.23 にシミュレータが動作している様子を示す。図 4.23 のゲームシーン内に表示されている黒い線が解析結果で得た釣竿の形状である。釣竿の変形を解析する上で、釣竿の全長、釣竿の根元断面の直径、

釣竿の先端断面の直径，ヤング率を指定する必要がある．大槻らが実験で使用したパラメータを使用し，大槻らの実験結果と Unity 上のシミュレーション結果を比較して，シミュレーションが正しく動作していることを確認した．

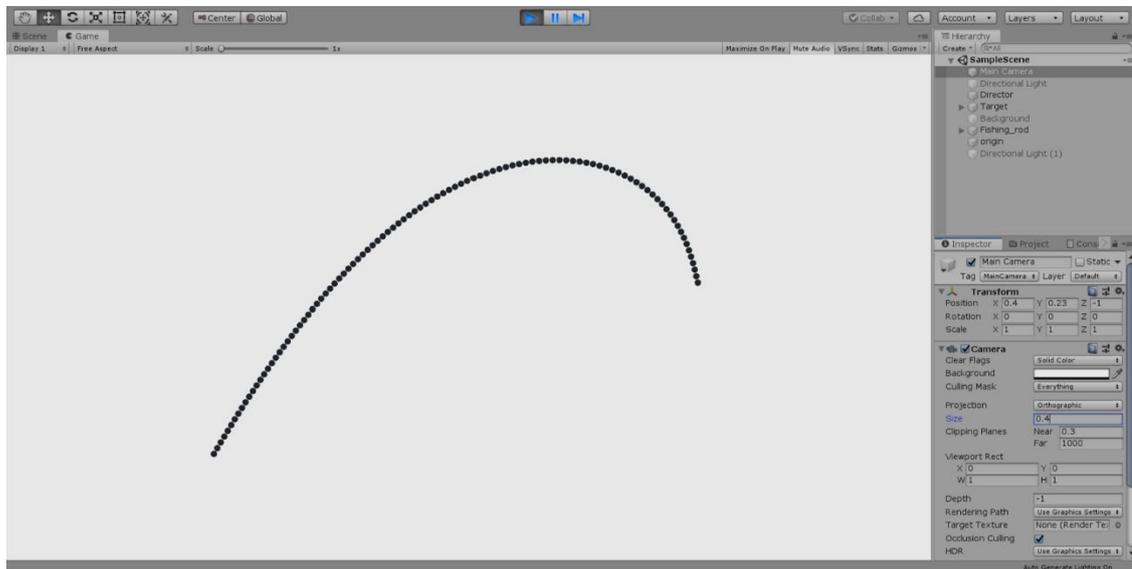


図 4.23 シミュレータで釣竿を描画した様子

本論文で使用している釣竿をシミュレータで再現するには，釣竿の全長，釣竿の根元断面の直径，釣竿の先端断面の直径，ヤング率の 5 つのパラメータの選定が必要である．本来であれば，各パラメータの値は実際の釣竿から計測して得られる．実際に使用している釣竿からパラメータを測定して，得られた情報をシミュレータに設定し解析を行ったが，解析結果が実際の釣竿の変形と一致しなかった．そこで錘を取り付けた状態の釣竿を撮影し，Unity で再現する釣竿の形状が撮影画像に写っている釣竿の形状と一致するようにパラメータを調整した．図 4.24 は撮影した釣竿と Unity 上で生成される釣竿を並べて比較しながらパラメータを調整している様子を示す．図 4.24 中の左が提案装置に用いている釣竿であり，右が Unity で生成した釣竿である．その結果，釣竿の全長が 1.12m，釣竿の根元断面の直径が 6.45mm，釣竿の先端断面の直径が 1.09mm，ヤング率が 29.9GPa としたとき，本物の変形に近い釣竿を Unity 上で再現することができた．

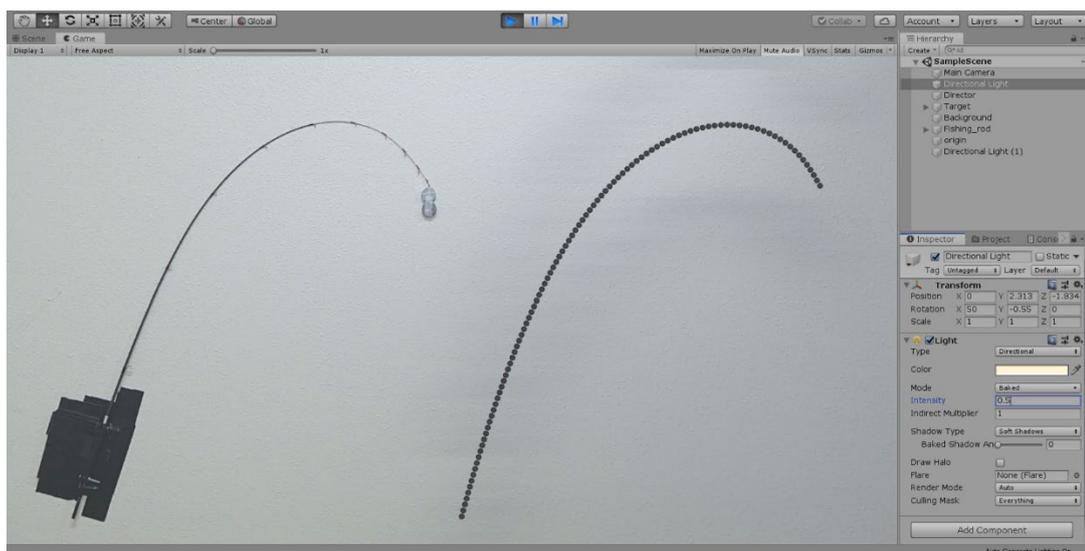


図 4.24 Unity 上で釣竿を再現するために必要なパラメータを調整している様子

作成したシミュレータは釣竿のモデルから非線形微分方程式を立て、Runge-Kutta-Gill 法を使用して数値解析を行っており、解の導出に時間がかかる。そのため、シミュレータそのものを提案手法に組み込むことはできない。そこで、シミュレーションを通して、これまで導出していた釣竿の角度に関する回帰曲線を求めることにする。シミュレータを使用すれば、4.5.5 項で述べたデータ数の増加の問題に対応できる。

シミュレーションで釣竿の先端にかかる力の強さ、釣竿の先端位置、釣竿の角度の関係を解析し、解析結果から回帰式を導出すれば、図 4.18 中の B の関係が得られる。釣竿の先端にかかる力は提案装置における糸の牽引力の反力であり、同等の強さであると考えられる。また、これまでの計測では錘の位置を記録していたが、糸が鉛直方向に向いたときは錘の真上に釣竿の先端があるため、シミュレーションでは釣竿の先端位置を記録する。釣竿の先端にかかる真下方向の力の強さを 0N から 2.5N の間を 0.1N ずつ変化させて、釣竿の先端が釣竿の根元の位置を原点として 30cm から 95cm までの 5cm 間隔に位置したときの釣竿の角度を記録した。

解析で得られた釣竿の先端にかかる力、釣竿の先端位置、釣竿の角度の関係を図 4.25 に示す。最終的にグラフにプロットできたデータ数は 338 点である。これはデータ数が 67 点であった 4.5.3 項の図 4.19 より約 5 倍多い。また、図 4.25 のグラフの波形は、これまで計測結果である図 4.9 と図 4.19 の波形に似ていることが分かる。そして、図 4.25 の結果から最小二乗法による回帰式を求めた。図 4.26 に求めた回帰式による回帰曲線と 30cm から 55cm までの 5cm 間隔で得られたシミュレーション結果のデータを同時に示す。図 4.26 をみると、回帰曲線がシミュレーション結果のデータによくフィッティングしていることが読み取れる。次節では、図 4.18 中の B に図 4.26 の回帰式を組み込んだ入出力情報の関係を構築し、図 4.18 中の A にあたる関係について再度計測を行う。

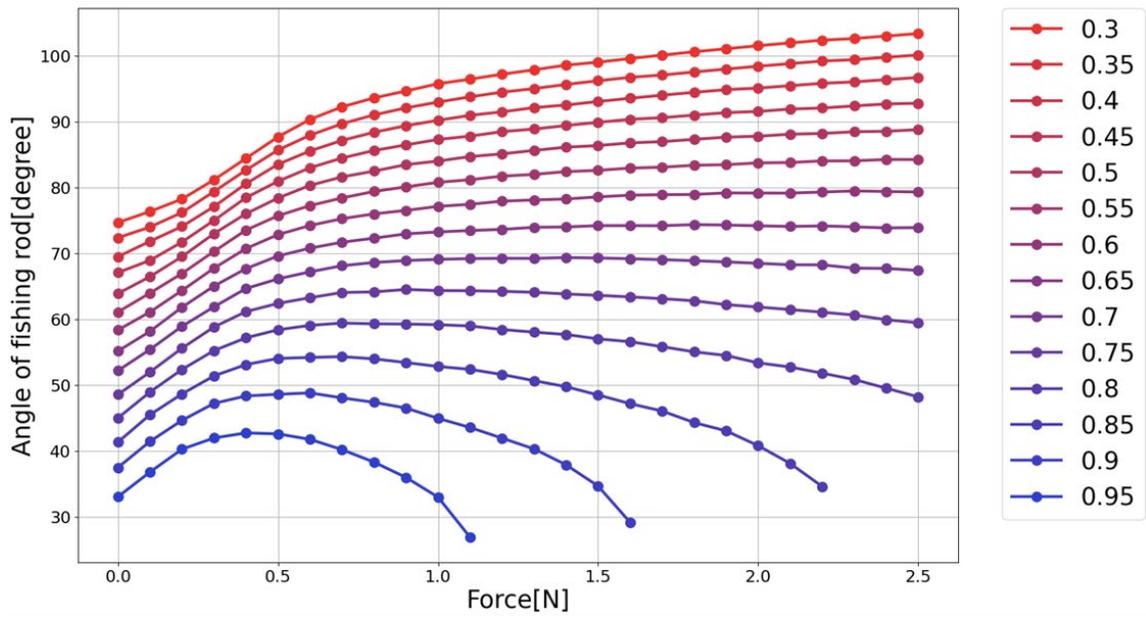


図 4.25 釣竿先端にかかる力の強さと釣竿の角度の関係

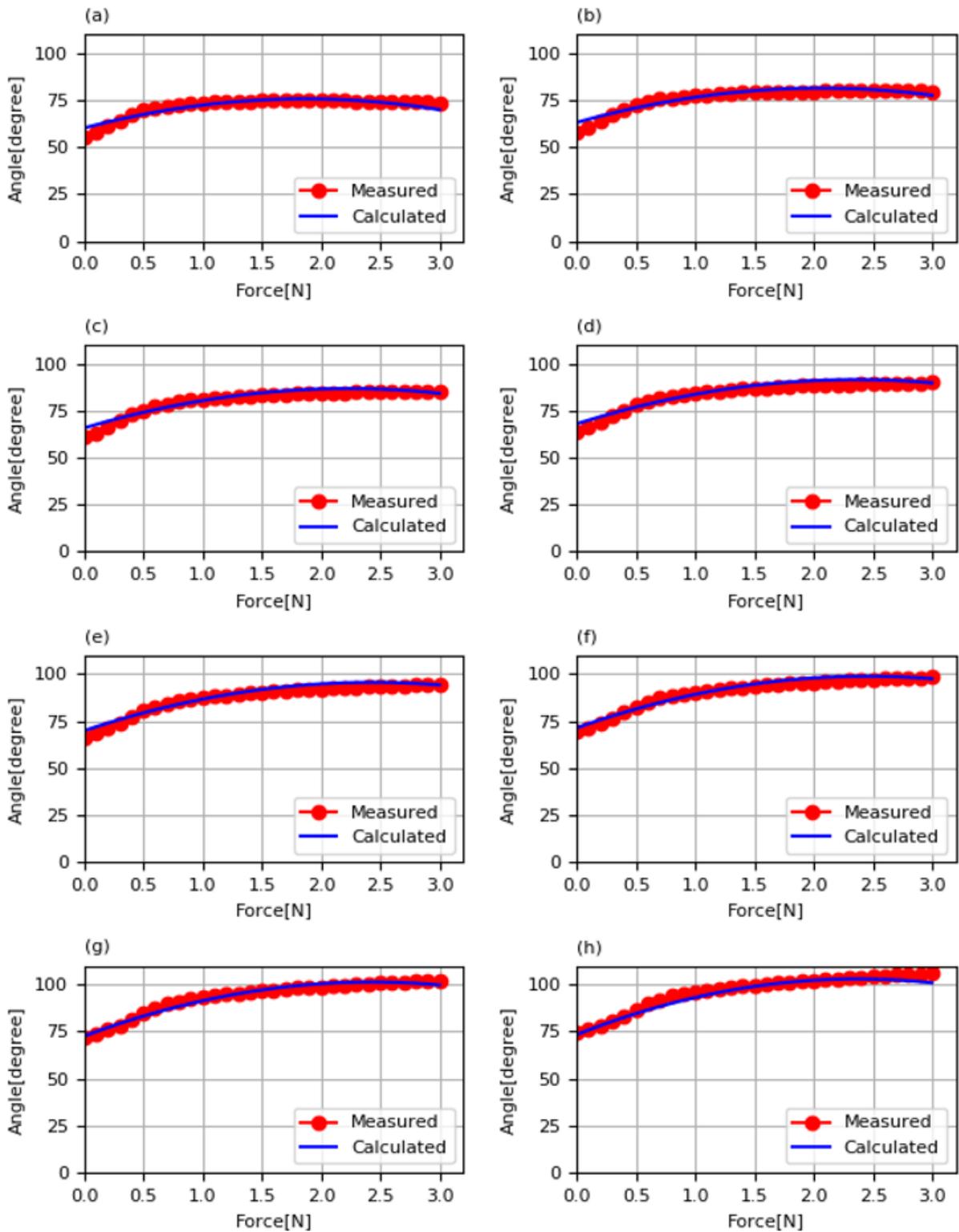


図 4.26 釣竿の角度と提示したい力の強さに関する回帰曲線と解析結果の比較

- (a) $x = 30\text{cm}$ (b) $x = 35\text{cm}$ (c) $x = 40\text{cm}$ (d) $x = 45\text{cm}$
 (e) $x = 50\text{cm}$ (f) $x = 55\text{cm}$ (g) $x = 60\text{cm}$ (h) $x = 65\text{cm}$

4.7 計測 3 : 2つの入力情報と糸の巻き取り力の関係調査

4.7.1 計測目的

指先に提示したい力の強さと指先の位置、糸の巻き取り力（糸巻き取りモータの Duty 比）の関係を計測し、提示したい力の強さと実際に糸が指先を牽引する力の強さが一致する制御を実現する。

4.7.2 計測手法

これまでの計測は釣竿の角度に焦点を当てていたため、糸の牽引方向を基準に計測を行っていた。本計測では糸の巻き取り力に注目するため、実際の糸の牽引力を基準に計測を行った。今回は図 4.8 に示す、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 DC モータの Duty 比 d 、指先に提示したい力の強さ f_{in} 、実際に糸が錘を牽引する力 f_{out} を記録対象とし、 f_{in} と f_{out} が一致したときに各データを記録する。本計測の環境はこれまでの計測と同様である。

本計測では装置の位置を原点として錘を 30cm から 90cm までの 10cm 刻みに錘を配置した。指先に提示したい力の強さを 0.5N から 2.5N の間を 0.5N 刻みで指定し、その後糸の牽引力が提示したい力の強さと一致するようにリール部の DC モータの Duty 比を調整した。錘の位置を固定して 5 種類の提示したい力の強さに対する糸巻き取りモータの Duty 比の計測を 5 回繰り返した。最終的に得られた糸巻き取りモータの Duty 比と実際に糸が錘を牽引する力の平均値を計測結果とした。

4.7.3 計測結果

計測で得られたデータから、錘の設置場所 x 、指先に提示したい力の強さ f_{in} 、糸の巻き取りを制御している DC モータの Duty 比 d の関係を図 4.27 に示す。また、錘の設置場所 x 、指先に提示したい力の強さ f_{in} 、実際に糸が錘を牽引した力の強さ f_{out} の関係を図 4.28 に示す。各図において、グラフ内の色は錘の設置場所を示す。

図 4.27 の関係は 4.4 節の計測で得られた図 4.10 と似た形状をしている。また、本計測では糸の牽引力と提示したい力の強さが一致したときに各データの記録を行っている。図 4.28 を見ると糸の牽引力と提示したい力が一致したときにデータを記録していることが確認できる。そのため、図 4.27 の計測データを回帰式で表すことができれば、提示したい力の強さを指先に提示可能だと予想できる。

図 4.27、図 4.28 において錘を 90cm に設置して提示したい力の強さを 1.5N 以上に指定した場合、実際に生じる糸の牽引力が提示したい力の強さと一致する糸巻き取りモータの Duty 比が見つからなかった。この結果から、4.5.5 項で考察した錘の設置位置が提案装置から遠いほど提示できる最大の力が小さくなることは正しいといえる。

本計測で得られたデータを基に、糸の巻き取り力を算出できる回帰式を最小二乗法で求めた。最小二乗法で用いたデータは、錘の設置位置、指先に提示したい力の強さ、糸巻き取りモータの Duty 比である。図 4.29 に求めた回帰式による回帰曲線と 30cm から 80cm で得られた計測データを同時に示す。図 4.29 を見ると、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。

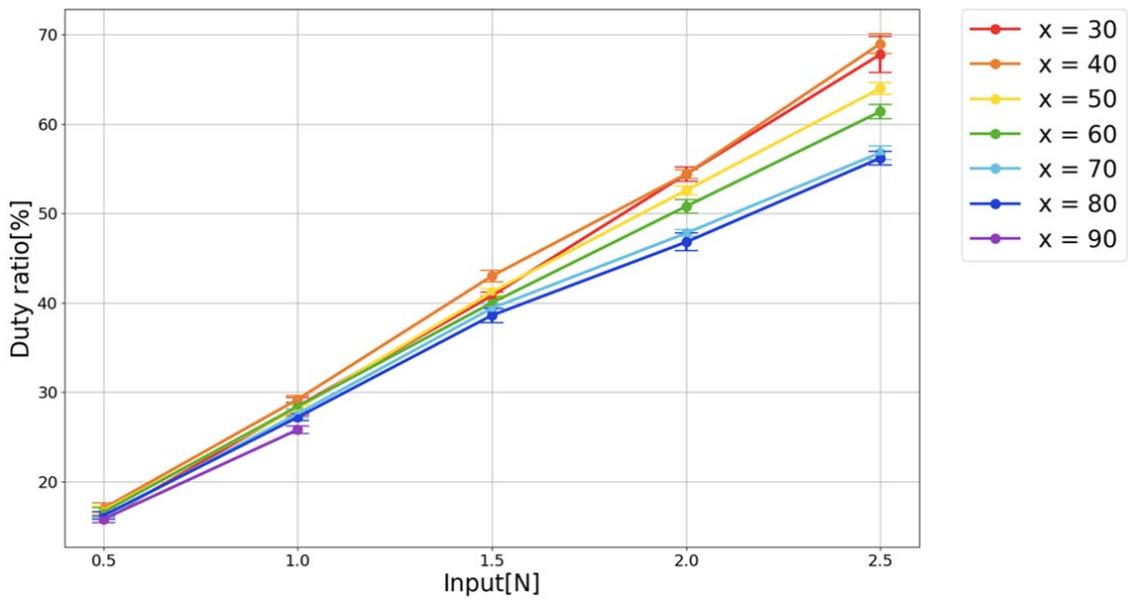


図 4.27 リール部のモータの Duty 比と指先に提示したい力の強さの関係

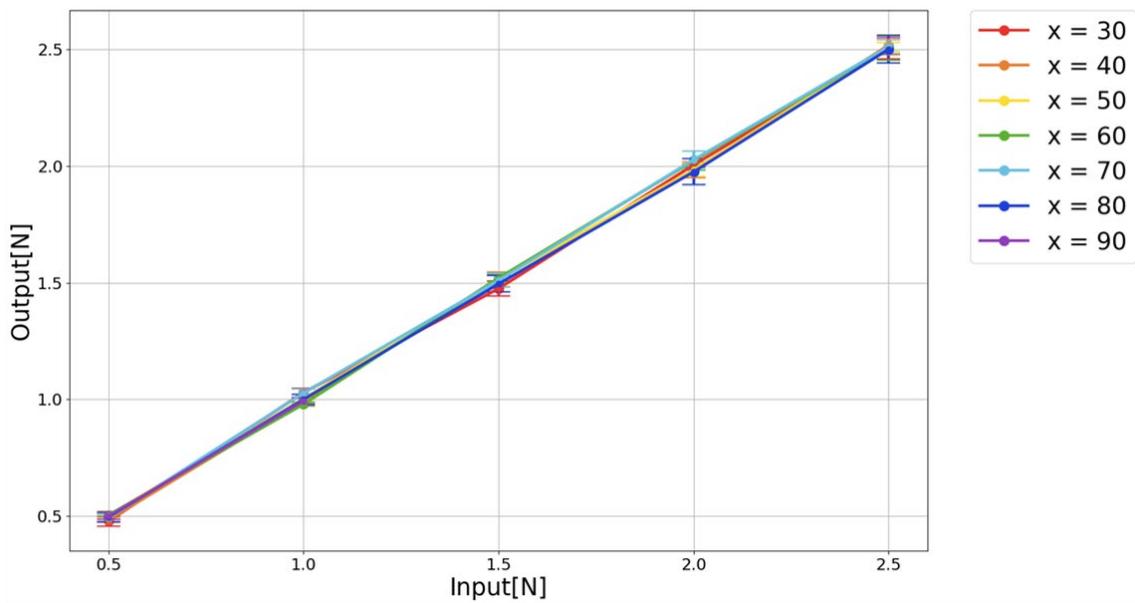


図 4.28 提示したい力の強さと実際に糸が錘を牽引した力の関係

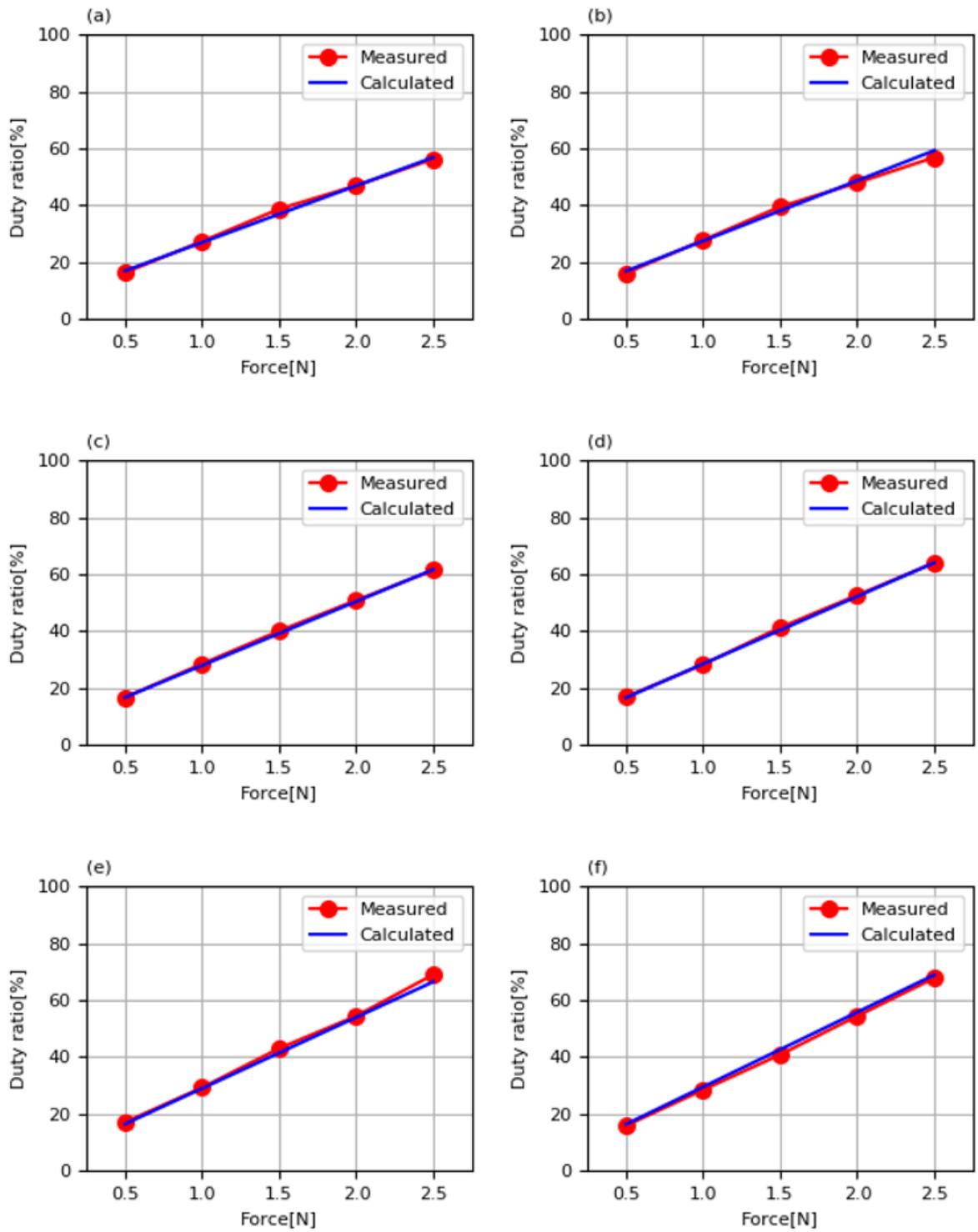


図 4.29 提示したい力の強さと糸巻き取りモータの Duty 比に関する回帰曲線と計測データの比較

- (a) x = 80cm (b) x = 70cm (c) x = 60cm
 (d) x = 50cm (e) x = 40cm (f) x = 30cm

4.7.4 動作確認

本計測で得られた回帰式を図 4.18 中の A に、4.6 節で述べたシミュレーションから得られた図 4.26 の回帰式を図 4.18 中の B に当てはめ、提示したい力の強さと実際に糸が牽引する力の強さの関係を調査した。提案装置の位置を原点として 30cm, 40cm, 50cm, 60cm の場所に錘を設置し、提示したい力の強さを 0.5N から 2.5N の間を 0.25N ずつ変化させた。そして電子天秤を使用して、実際に生じた糸の牽引力を記録した。

図 4.30 は動作確認で得られたデータをプロットしたグラフである。錘に提示したい力の強さを入力値とし、実際に錘に生じた糸の牽引力の強さを出力値とした。入力値と出力値が一致する線形的な関係が表れることが望ましく、図 4.30 を見ると入力値と出力値の間には理想的な関係にあることが読み取れる。これは、これまでの計測で得られた図 4.15 や図 4.22 と比べると大きく改善されたといえる。

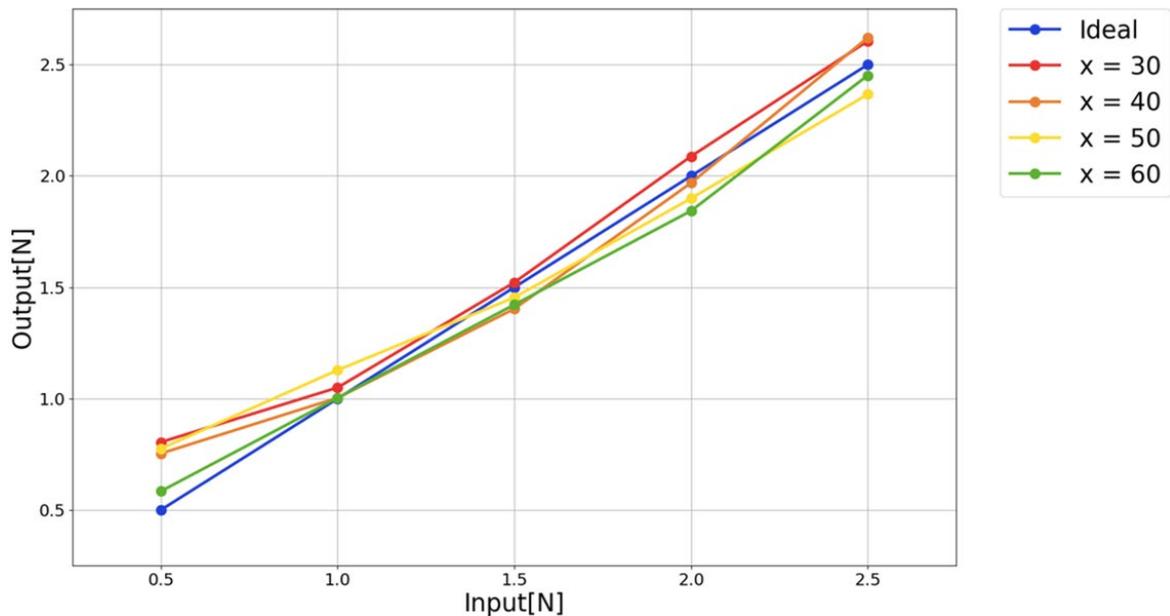


図 4.30 提示したい力と実際に糸が牽引した力の強さの関係（提示したい力を強くする場合）

これまでの動作確認では錘を固定した後、入力値を 0.5N から始め、0.5N ずつ増加させながら出力値の計測を行った。そして、図 4.30 のように入力値と出力値が一致することを確認した。しかし、動作確認を行っている中で入力値を大きな値から小さな値に変更したとき、出力値が入力値と一致しないことがあった。そこで今度は、デバイスの位置を原点として 30cm, 40cm, 50cm, 60cm の場所に錘を設置し、入力値を 2.5N から始め、0.5N ずつ減少させながら出力値の計測を行うことにした。

図 4.31 に入力値を減少させて計測したときの結果を示す。図 4.30 と同様に、錘に提示したい力の強さを入力値とし、実際に錘に生じた糸の牽引力の強さを出力値とした。図 4.31 を見ると、入力値と出力値が一致する関係にないことが読み取れる。また、入力値を小さくしても出力値が小さくならないことも確認できる。さらに、ばらつきが生じているが、各位置の計測データからなるグラフ波形が互いに似ていることも読み取れる。

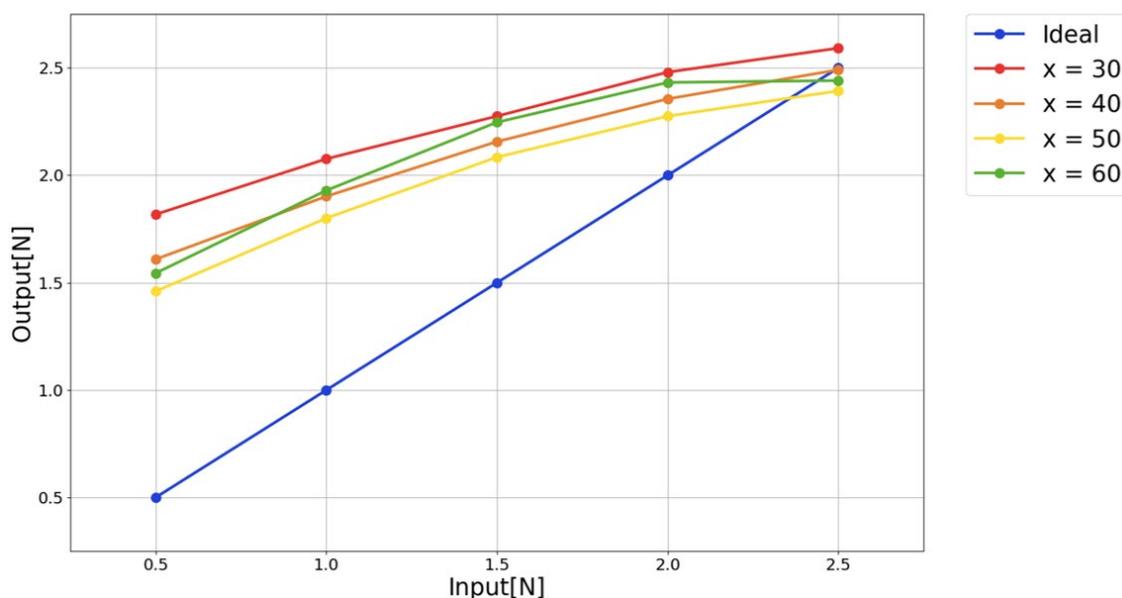


図 4.31 提示したい力と実際に糸が牽引した力の強さの関係（提示したい力を弱くする場合）

4.7.5 考察

図 4.18 中の B にシミュレーション結果である図 4.26 の回帰式を導入して、糸の巻き取り力について 4.4 節と同様の計測を行うことで、図 4.30 の入力値と出力値が一致する関係が得られた。また、今回の計測では糸の牽引方向を基準にして計測を行っていないが、動作確認の際に糸の牽引方向を確認すると、糸がほとんど鉛直に向かって牽引している様子が確認できた。これまでの計測における動作確認では、糸が鉛直方向に牽引できていなかったため入力値と出力値が一致していないと考えていた。シミュレーションで得られた図 4.26 を使用したことで、鉛直方向に糸が牽引するようになり入力値と出力値が一致するようになったと考え、図 4.18 中の B に図 4.26 の回帰式を導入することは最適であるといえる。

動作確認では入力値を大きくしていく測定方法と入力値を小さくしていく測定方法の 2 種類で出力値を記録した。そして、入力値を大きくしていく場合は図 4.30 のように入力値と出力値が一致する関係が得られたが、入力値を小さくしていく場合では図 4.31 のような入力値と出力値が一致しない関係となった。入力値の増減によって出力値の変化の様子に違いがあらわれた原因に、糸と釣竿のロッドガイドの間に生じる摩擦が影響していると考えられる。そこで、摩擦の影響を考慮すると、図 4.18 の関係に摩擦力の情報を加える必要がある。しかし、摩擦力を計測するためには糸が通るロッドガイドに力センサを取り付けることになり、糸の巻き取りに影響を与える可能性がある。また、各ロッドガイドにセンサを取り付けると、提案手法で述べた釣竿が軽量であることの利点を活かさなくなる。そのため、摩擦力の情報を加えた制御システムを開発することは困難である。

そこで、摩擦力に影響されない手法を 2 つ考えた。1 つは、ロッドガイドと糸の間に生じる摩擦を抑える方法である。釣りでは糸の放出を滑らかにして糸を遠くへ飛ばすために、ロッドガイド上に生じる摩擦を低減させるシリコンスプレーを釣竿や糸に吹き付けている。そこで、使用している釣竿と糸にも同様にシリコンスプレーを吹きかけたが摩擦力の低減が見られなかった。また、4.4 節の計測から先端が破損した釣竿を使用しており、その釣竿の先端のロッドガイドは破損

によって本来釣竿の先端にあるトップガイドではなかった。そこで、新品の釣竿に交換し摩擦力の変化を確認したが、摩擦力の低減が見られなかった。

2つめは、出力情報を糸の巻き取り力ではなく、糸の巻き取り量にする手法である。制御システムの出力情報を糸の巻き取り力とした場合、摩擦力の影響を受けてしまう。それに対し、糸の巻き取り量であれば、糸を巻き取る力ではなく糸を巻き取る長さであるため、ロッドガイドに生じる摩擦力を考慮しなくてよい。さらに、糸巻き取りモータのエンコーダを使用すれば、現在の糸の巻き取り量を検出することができ、糸の巻き取り量に関してフィードバック制御を組み込むことができる。ここで新しい入出力情報の関係を図 4.32 に示す。入力情報はこれまで変わらず、指先に提示したい力の強さと指先の位置になる。それに対して、出力情報は釣竿の角度と糸の巻き取り量である。釣竿の角度の導出方法は図 4.18 と同様である。糸の巻き取り量に関して、図 4.32 中の A の関係から目標となる糸の巻き取り量を算出した後、算出した値を目標値としてフィードバック制御系に入力する。糸巻き取りモータのエンコーダから現在の糸の巻き取り量を算出し、目標値との偏差を PID 制御に渡す。PID 制御から得られる操作量を糸巻き取りモータの Duty 比として動作させ、最終的に糸の巻き取り量を制御量とする。

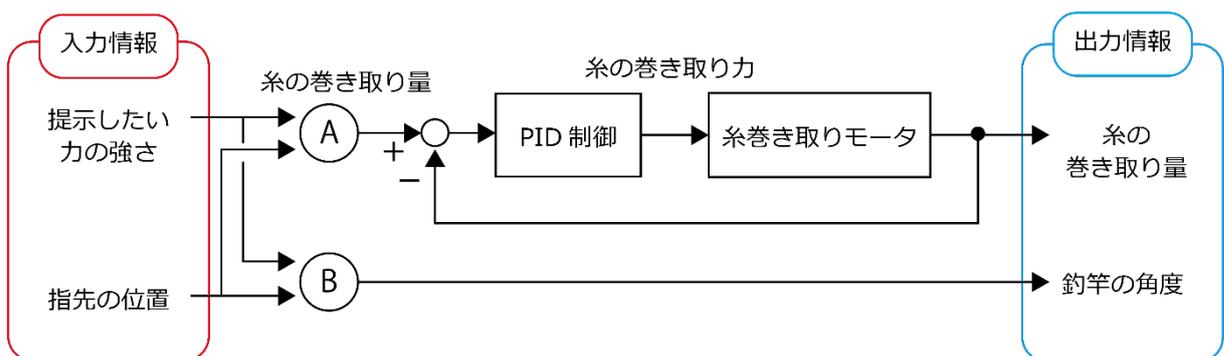


図 4.32 入出力情報の関係

糸の巻き取り量の有効性を確認するため、従来の糸の巻き取り力で制御する手法と新たに提案する糸の巻き取り量で制御する手法の 2 つの方法を提案装置に組み込んで動作を比較する。どちらの手法でも釣竿の角度を 70 度に固定した。そして、制御対象となる糸の巻き取り力、または糸の巻き取り量は直接指令値を指定した。

まず、糸の巻き取り力で制御した場合の提案装置の動作を図 4.33 に示す。動作を確認する前は糸の巻き取り力であるリール部の DC モータの Duty 比を 5% に指定していた。これはリール部の DC モータが回転し始める Duty 比である。その状態から Duty 比を 30% に指定した (図 4.33 (a))。次に釣竿を大きく変形させるために Duty 比を 50% まで高くした (図 4.33 (b))。そして、再度 Duty 比を 30% に戻した (図 4.33 (c))。Duty 比を高くすることで図 4.33 (a) から図 4.33 (b) のように釣竿が大きく変形することを確認した。対して、Duty 比を低くすると図 4.33 (b) と図 4.33 (c) のように釣竿の変形に違いがあらわれないことも確認した。Duty 比の増減によって釣竿のしなり方に違いがあることは図 4.30, 図 4.31 の結果からも分かる。

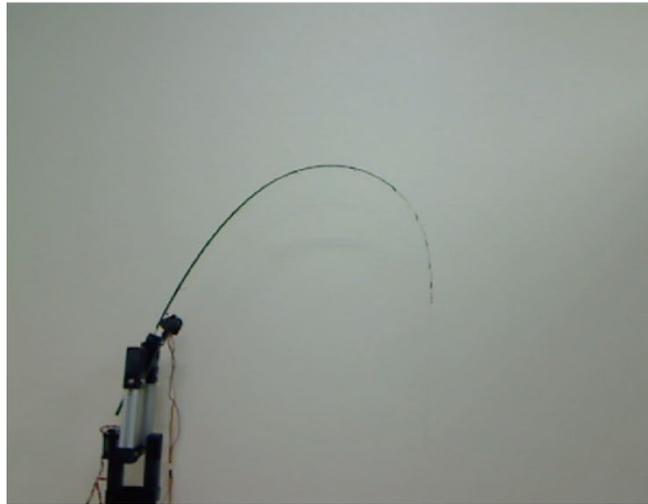
次に糸の巻き取り量で制御した場合の提案装置の動作を図 4.34 に示す。糸の巻き取り量で制御するため、巻き取り量が 0cm となる基準を定義する必要がある。ここでは錘を床に設置し、釣竿が曲がっていない状態で糸が張っているときの糸の巻き取り量を 0cm と定義した。その状態から糸を巻き取る長さを 40cm に設定した (図 4.34 (a))。次に釣竿を大きく変形させるために糸の巻き取り量を 110cm まで増やした (図 4.34 (b))。そして、再度糸の巻き取り量を 40cm に設定した (図 4.34 (c))。糸を巻き取る長さを増やすことで図 4.34 (a) から図 4.34 (b) のように釣竿が大きく変形することを確認した。また、糸の巻き取り量を減らすと、図 4.34 (b) から図 4.34 (c) のように釣竿が直線形状に戻る方向へ変形することも確認した。さらに、同じ巻き取り量を指定している図 4.34 (a) と図 4.34 (c) を比較すると、釣竿が同じ形状に変形していることが分かる。これは同じ Duty 比を指定した図 4.33 (a) と図 4.33 (c) の比較で見られなかった結果である。

以上から糸の巻き取り力を出力情報とせず、糸の巻き取り量を出力情報として定義するほうが有効である。次節では、図 4.32 中の B に図 4.26 の回帰式を組み込んだ入出力情報の関係を構築し、図 4.32 中の A にあたる関係を計測する。

(a)



(b)



(c)

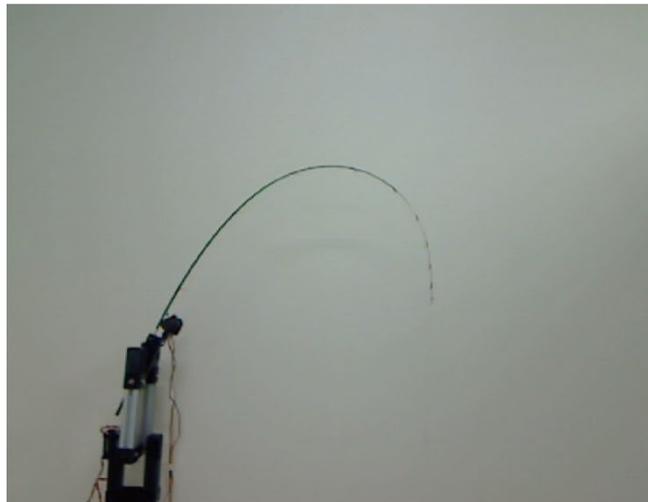
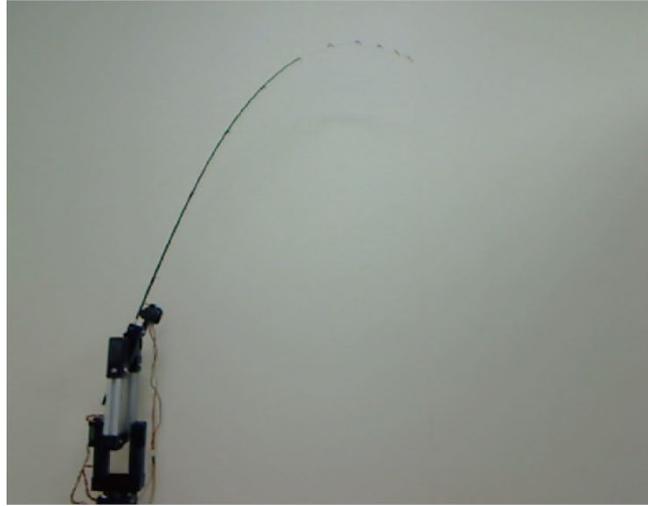


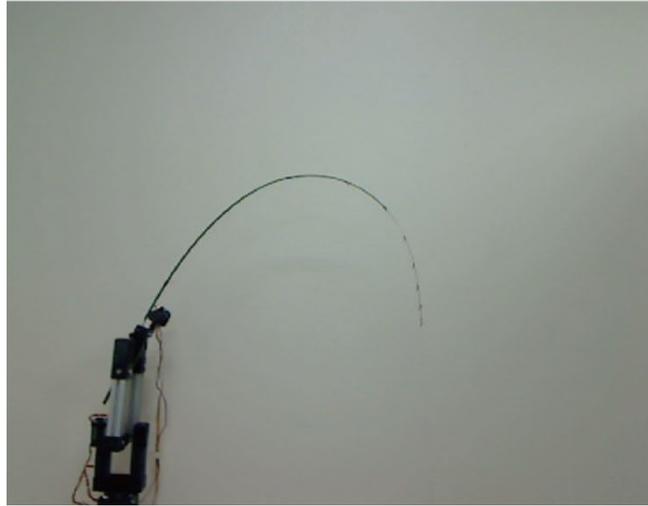
図 4.33 糸巻き取りモータの Duty 比を指定して動作させた様子

(a) 30%を指定したとき (b) 50%を指定したとき (c) 再度 30%を指定したとき

(a)



(b)



(c)

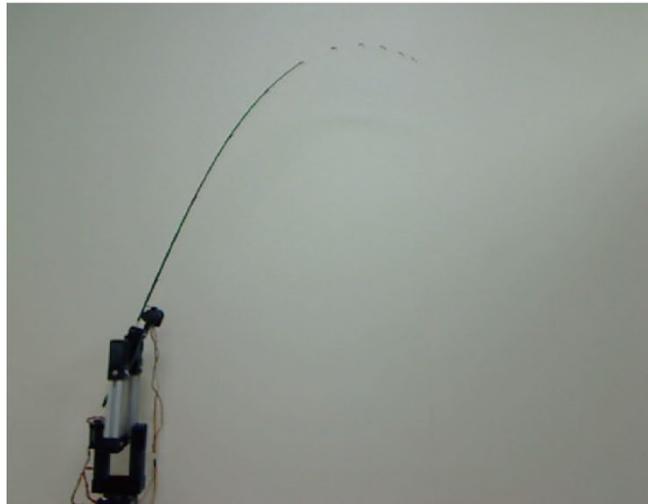


図 4.34 糸の巻き取り量を指定して動作させた様子

(a) 40cm を指定したとき (b) 110cm を指定したとき (c) 再度 40cm を指定したとき

4.8 計測 4 : 2 つの入力情報と糸の巻き取り量の関係調査

4.8.1 計測目的

指先に提示したい力の強さと指先の位置、DC モータが糸を巻き取る長さの関係を計測し、提示したい力の強さと実際に糸が指先を牽引する力の強さが一致する制御を実現する。

4.8.2 計測手法

計測環境は図 4.3 と同様である。本計測では図 4.35 に示す、デバイスから錘までの位置 x 、リール部のモータが糸を巻き取る量 l 、指先に提示したい力の強さ f_{in} 、実際に糸が錘を牽引する力 f_{out} を記録対象とし、 f_{in} と f_{out} が一致したときに各データを記録する。

本計測ではデバイスの位置を原点として錘を 30cm から 100cm までの 10cm 間隔に錘を設置する。4.7.5 項の考察で、提案装置に取り付ける釣竿を交換したため、釣竿の全長が 112cm となった。そこで今回は錘を装置から 100cm 離れた位置に設置したときの計測も行った。指先に提示したい力の強さを 0.5N から 2.5N の間を 0.5N 刻みで指定し、その後糸の牽引力が提示したい力の強さと一致するように糸を巻き取る長さを調整した。糸の巻き取り量は DC モータ内に内蔵されたエンコーダを使って算出する。エンコーダから得られる値はプーリの回転量であるため、その回転量とプーリの直径から糸の巻き取り量を求める。プーリの直径を固定値にすると、プーリの回転で糸を巻き取った、または放出したとき直径の長さが変わり求める糸の巻き取り量に影響を与えると考えられる。しかし、今回使用している糸の厚みは 0.3mm であり釣竿の全長に対してとても短いため、直径の長さの変化は無視することにした。

糸の巻き取り量を記録するために 0cm となる基準を決める必要がある。そこで、釣竿がしなっていない状態を作るために糸巻き取りモータが出力できる最小の力で糸を巻き取り、釣竿の先端位置と錘に糸が結んである箇所が重なったときに糸の巻き取り量が 0cm であると定義した。そのため、デバイスの高さと同様な台を用意し、図 4.36 のように錘を台の上に乗せて糸の巻き取り量を 0cm に設定した。図 4.36 の状態で糸の巻き取り量を 0cm に設定し、図 4.35 のように床に設置した電子天秤の上に錘を乗せるため、プーリから糸が放出されることが考えられる。そのため、本計測では糸の巻き取り量ではなく、糸の放出量として記録する。

錘の位置を固定して 5 種類の提示したい力の強さに対する糸巻き取りモータが放出した糸の長さの計測を 5 回繰り返した。また図 4.37 のように、各試行の前に糸の放出量を 0cm に設定した。最終的に得られた糸巻き取りモータの糸の放出量と実際に糸が錘を牽引する力の平均値を計測結果とした。

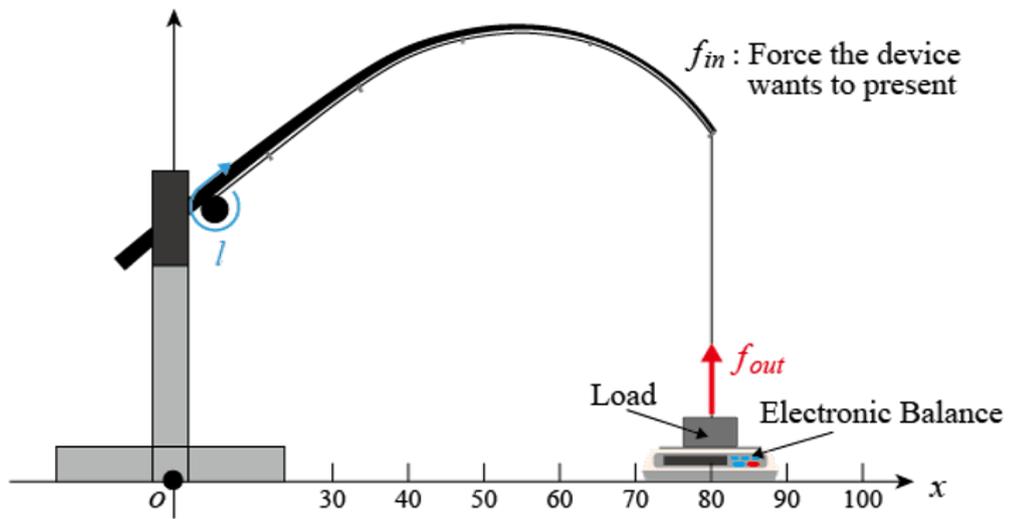


図 4.35 計測環境と計測データの対応

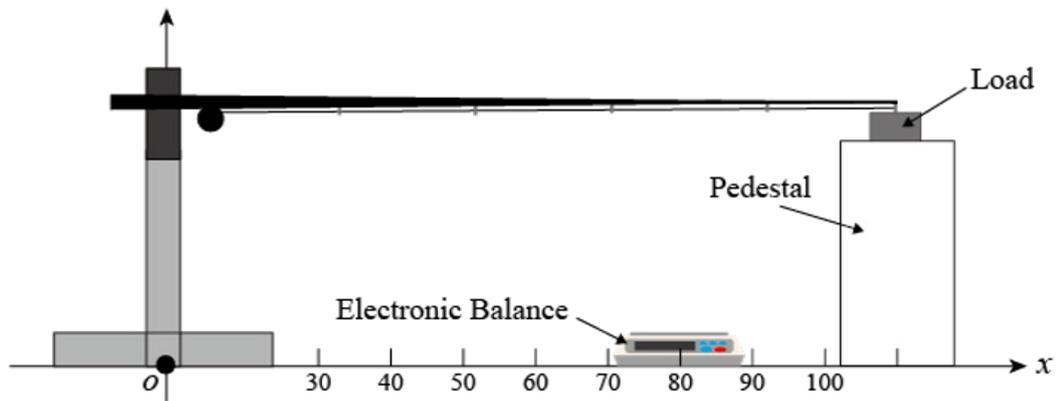


図 4.36 糸の放出量を 0cm と定義するときの錘の設置場所



図 4.37 糸の放出量を 0cm に設定している様子

4.8.3 計測結果

計測で得られたデータから、錘の設置場所 x , 指先に提示したい力の強さ f_m , 糸巻き取りモーターが糸を放出した長さ l の関係を図 4.38 に示す. また, 錘の設置場所 x , 指先に提示したい力の強さ f_m , 実際に糸が錘を牽引した力の強さ f_{out} の関係を図 4.39 に示す. 各図において, グラフ内の色は錘の設置場所を示す.

本計測では提示したい力の強さと実際に錘に生じる糸の牽引力の強さが一致したときに各データを記録した. 図 4.39 を見ると提示したい力と糸の牽引力が一致していることから, 図 4.38 は入出力の力が一致するときの糸の放出量を表していることが分かる. また, 図 4.39 ではグラフ上に 1 本の線しか確認できないが, これは計測データが重なっているためである. 錘の設置場所に対して, 提示したい力を強くすると, 糸の放出量が減っていることが分かる. 糸の放出量が減少したとき, その減少量はプーリが糸を巻き取った長さに値する. つまり, 図 4.38 では提示したい力を強くすると, 糸の放出量の減少から糸を巻き取っていると読み取れる. 実際の釣竿を考えると獲物を釣り上げるとき, 釣竿を傾けると同時に糸を巻き取って強い力を出す. したがって, 本計測で得られた図 4.38 は実際の釣りの動きと一致する.

図 4.38, 図 4.39 において錘を 100cm に設置したときのデータは 1 点しか存在しない. また, 90cm に錘を設置したとき 3 点のデータを記録できた. これらの地点は他の位置に比べ, 得られたデータ数が少ない. これは 4.7.3 項で述べた錘の設置位置を装置から遠ざけるほど提案装置が錘に出力できる最大の力が弱くなることに関係している.

本計測で得られたデータを基に, 糸の放出量を算出できる回帰式を最小二乗法で求めた. 本計測で求めたい関係は, 錘の設置場所, 指先に提示したい力の強さ, 糸の放出量の関係である. 図 4.40 に求めた回帰式による回帰曲線を示す. また図 4.38 の計測結果から, 30cm から 80cm に錘を設置したときの計測データも図 4.40 に示し, 回帰曲線と計測データの比較を行っている. 図 4.40 を見ると, 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.

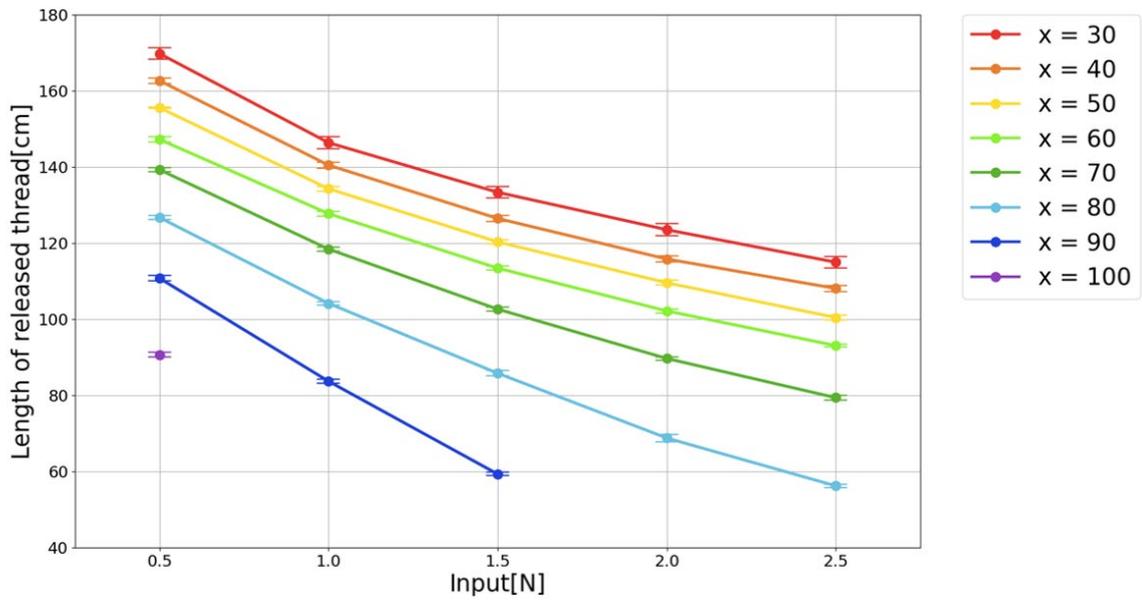


図 4.38 糸巻き取りモータの糸の放出量と指先に提示したい力の強さの関係

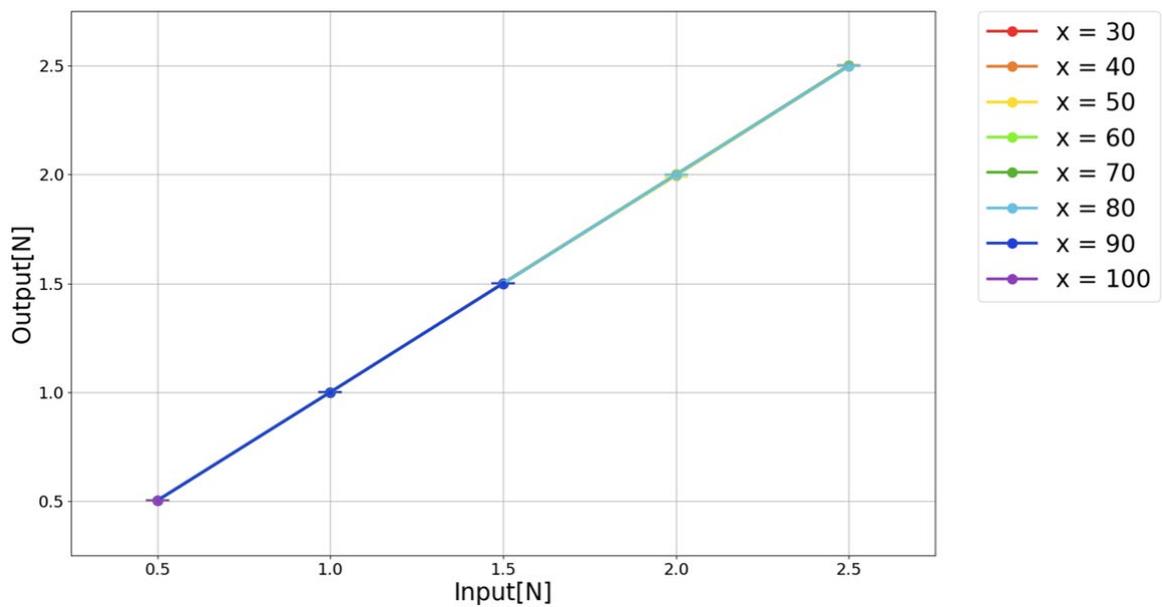


図 4.39 提示したい力の強さと実際に糸が錘を牽引した力の強さの関係

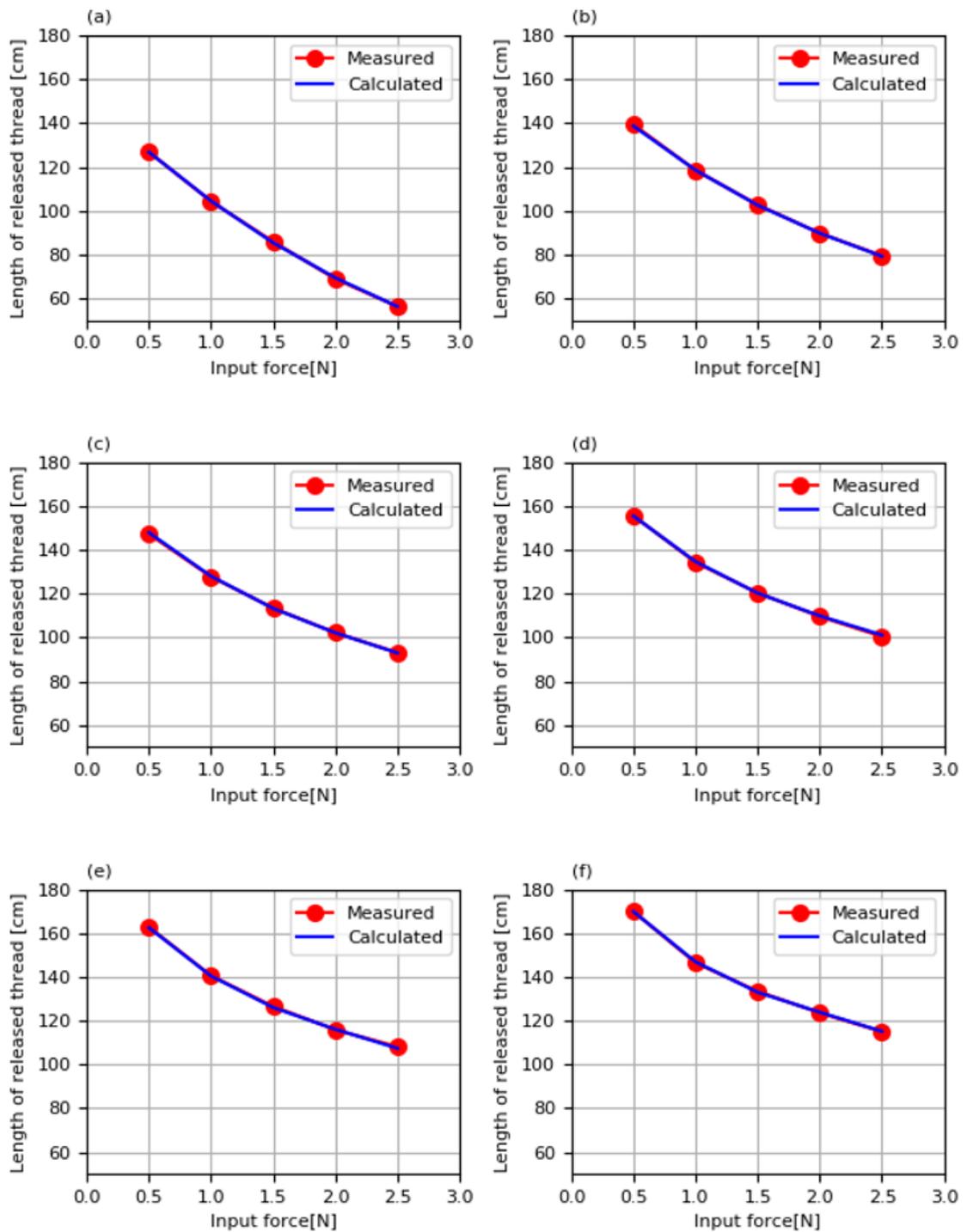


図 4.40 提示したい力の強さと糸巻き取りモータの糸の放出量に関する回帰式と計測データの比較

(a) $x = 80\text{cm}$ (b) $x = 70\text{cm}$ (c) $x = 60\text{cm}$

(d) $x = 50\text{cm}$ (e) $x = 40\text{cm}$ (f) $x = 30\text{cm}$

4.8.4 動作確認

図 4.40 の回帰式を図 4.32 中の A に, シミュレーションで得られた図 4.26 の回帰式を図 4.32 中の B に当てはめ, 提示したい力の強さと糸の牽引力の強さが一致するかについて確認した. 4.7.4 項では提示したい力を強くしていく場合と弱くしていく場合の 2 条件で動作確認を行った. 今回も同様に 2 条件で動作確認を行う. デバイスの位置を原点として 30cm, 40cm, 50cm, 60cm の場所に錘を設置し, 提示したい力の強さを 0.5N から 2.5N の間を 0.5N ずつ変化させた. 電子天秤に錘を乗せ, 糸の牽引力による電子天秤の出力値の変化から糸の牽引力の強さを記録した.

まず, 提示したい力の強さを強くしていく条件で得られた計測データを図 4.41 に示す. 錘に提示したい力の強さを入力値とし, 実際に錘に生じた糸の牽引力の強さを出力値とした. 図 4.41 を見ると, 入力値が小さいときは出力値と入力値が一致する関係にあることが読み取れる. また, 入力値が大きいとき, 出力値が入力値より小さくなっていることも読み取れる. さらに, 錘をどの位置に設置しても, 入力値を大きくすれば出力値も大きくなるという線形的な関係にあることが分かる.

次に, 提示したい力の強さを弱くしていく条件で得られた計測データを図 4.42 に示す. 図 4.42 の縦軸, 横軸は図 4.41 と同じである. 図 4.42 を見ると, 図 4.41 でみられるグラフの形状と似ている. 入力値が小さいほど出力値は入力値と一致し, 入力値が大きいと出力値は入力値より小さくなっていることが確認できる. さらに, 錘をどの位置に設置しても, 入力値を小さくすれば出力値も小さくなるという線形的な関係にあることも確認できる.

今回は 2 種類の条件で動作確認を行ったが, どちらの条件でも糸が錘を鉛直方向に牽引している様子が確認できた.

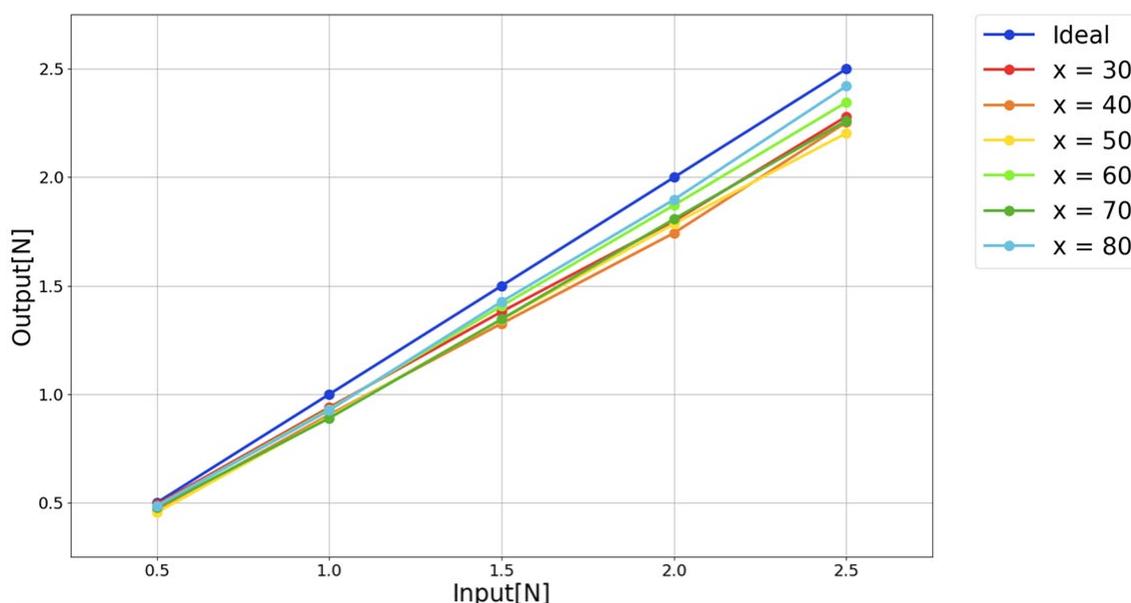


図 4.41 提示したい力と実際に糸が牽引した力の強さの関係 (提示したい力を強くする場合)

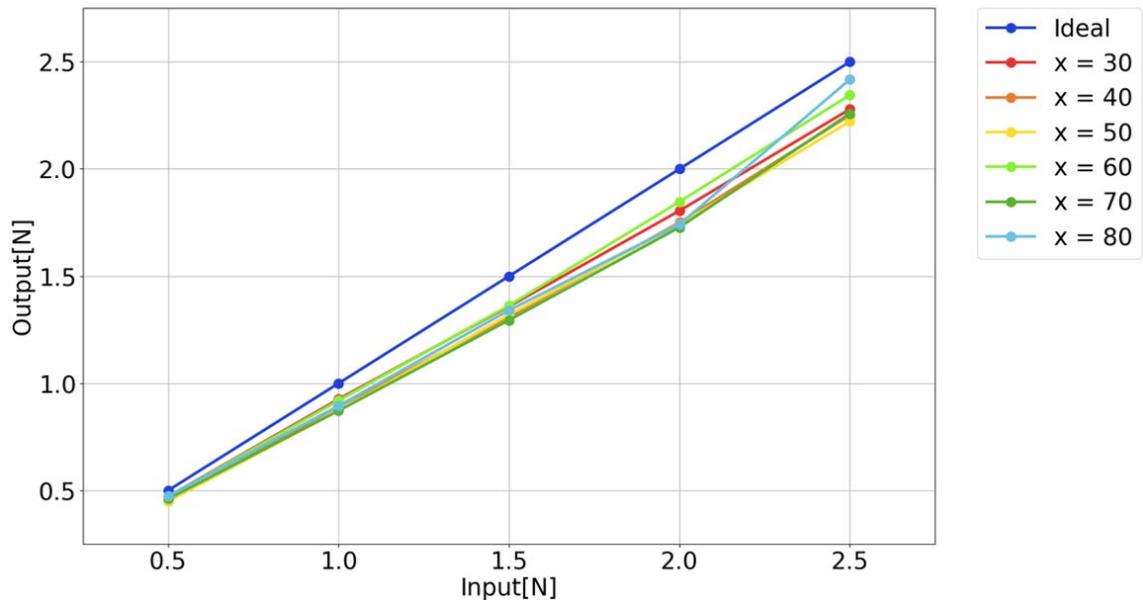


図 4.42 提示したい力と実際に糸が牽引した力の強さの関係（提示したい力を弱くする場合）

4.8.5 考察

提案装置で実現すべきことは、提示したい力の強さと実際に糸が指先を牽引する力の強さが一致することである。図 4.41, 図 4.42 を見ると、どちらも提示したい力の強さと実際に糸が指先を牽引する力に違いが見られた。違いが表れた原因として、釣竿の角度を求める関係にシミュレーション結果を用いたが、シミュレータが完璧に釣竿を再現できておらず、実際の釣竿との違いからずれが生じたと考えられる。また、糸の巻き取りと放出を繰り返すと糸の巻き取り量にずれが生じてしまうことも原因の 1 つと考えられる。しかし 4.7.4 項の動作確認と比較すると、提示したい力の強さと実際に糸が指先を牽引する力の強さの関係が大きく改善されたことが読み取れる。前節では図 4.30 と図 4.31 が得られ、図 4.30 は出力値が入力値と比較的一致していることが確認できた。しかし、図 4.31 は出力値が入力値より大きな値をとっており、最終的に入力値を大きくして設定した値と小さくして設定した値が同じでも出力値は異なるという結果であった。今回の動作確認で得られた図 4.41, 図 4.42 は似た形状をしているため入力値の増減方法に関わらず、ある入力値に対して一定の出力値が得られている。したがって、図 4.32 の関係を持つ今回の制御システムのほうが指先に提示したい力を制御しやすいシステムであるといえる。

本計測で得られた結果から、提案装置の入力情報として指先に提示したい力の強さと指先の位置情報を渡す。そして、図 4.32 の関係から、A に当てはめた図 4.40 の回帰式で糸の放出量を算出し、B に当てはめた図 4.26 で釣竿の角度を求め、糸巻き取りモータとピッチ軸方向に回転するサーボモータを制御する。以上の制御システムで提案装置を制御すればよいことが分かった。

最終的に図 4.32 の入出力情報の関係で提案装置を制御できるようになったが、糸の放出量を出力情報とすることで、指先の高さについて考慮する必要がある。提案装置を VR アプリケーションに実装した場合、指先は空間内を自由に動かせることが理想である。本計測では錘を床に設置した電子天秤の上において糸の放出量を記録した。さらに、動作確認においても錘を床に設置することで図 4.41, 図 4.42 の結果が得られた。そのため、現在の制御システムでは力を提示したい対象物が床にない場合に対応できない。そこで高さ情報について考える。

現在の制御システムでは提示したい力の強さと指先の位置が入力情報である。位置情報はデバイスからの距離を指しているため、床に設置した錘を高くしても入力情報が変化することはない。そのため、錘を床に設置していたときは糸の牽引により糸が張っている状態でも、錘の位置を高くすれば糸がたるみ、提示したい力の強さを出力することはできない。この問題を解決する手法として、制御システムの入力に床からの高さ情報を加える方法が考えられる。現在の制御システムでは、錘を床に設置して糸が張っている状態から錘を高くすると、入力情報が変化せず糸の巻き取り量が変化しないため、糸に余裕ができてたるんでしまう。そこで糸のたるみを抑えるため、上方向に移動した分、糸の巻き取り量を増やせばよい。これまでの計測では錘に **OptiTrack** のマーカーを取り付けることでデバイスからの距離を検出することができた。**OptiTrack** から得られる位置情報は高さ情報も含まれているため、図 3.6 のシステム構成図に指先の高さを検出する新しい装置を追加する必要はない。また、**OptiTrack** を使用する上で原点を決める必要があり、これまでの計測では提案装置が床に接している地点を原点に設定していた。**OptiTrack** から得られる位置情報は、事前に設定した原点を中心としたデータである。デバイスが床に接している位置を **OptiTrack** の原点に設定していると、**OptiTrack** で検出される高さ情報は床からの高さになる。そのため、**OptiTrack** から得られる高さ情報をそのまま制御システムに渡すだけでよい。以上から、現在の制御システムの入力に床から指先までの高さ情報を追加し、その情報を糸の巻き取り量に加算することで指先の高さに対応できる。

さらに、提案装置に組み込んだヨー軸方向に回転するサーボモータを制御することで、ワークスペースを拡張できると考える。これまでの計測ではピッチ軸方向に駆動するサーボモータだけを取り上げていたため、現在の提案装置のワークスペースは図 4.35 のような xy 平面上に限られる。提案装置の釣竿を支える基部は 2 基のサーボモータを用いたパン・チルト機構で設計されている。そこで、釣竿の傾きを制御するピッチ軸方向に駆動するサーボモータだけでなく、ヨー軸方向に駆動するサーボモータを制御すれば、広範囲なワークスペースが実現できると考えられる。図 4.43 のように、ヨー軸方向に駆動するサーボモータの回転角度 ϕ は xz 平面上の指先の座標に三角関数を用いることで導出できる。

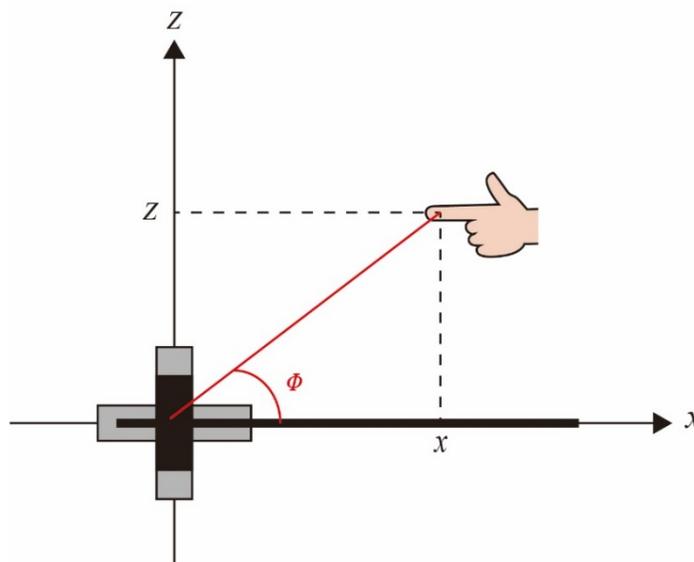


図 4.43 提案装置を上から見た図

以上から、広範囲なワークスペースを実現し、任意の力を指先に提示する制御システムを図 4.44 に示す。入力情報は指先に提示したい力の強さと指先の 3 次元の位置情報になる。出力情報は糸の巻き取り量、釣竿の角度、ヨー軸方向に駆動するサーボモータの回転角度である。糸の巻き取り量は指先に提示したい力の強さとデバイスから指先までの距離を図 4.40 の回帰式に渡し、回帰式から得られる値に床から指先までの高さを加えることで導出できる。釣竿の角度は図 4.26 の回帰式に指先に提示したい力の強さとデバイスから指先までの距離を与えることで求めることができる。ヨー軸方向に駆動するサーボモータの回転角度は図 4.43 のように xz 平面上の指先の座標に三角関数を用いることで算出できる。

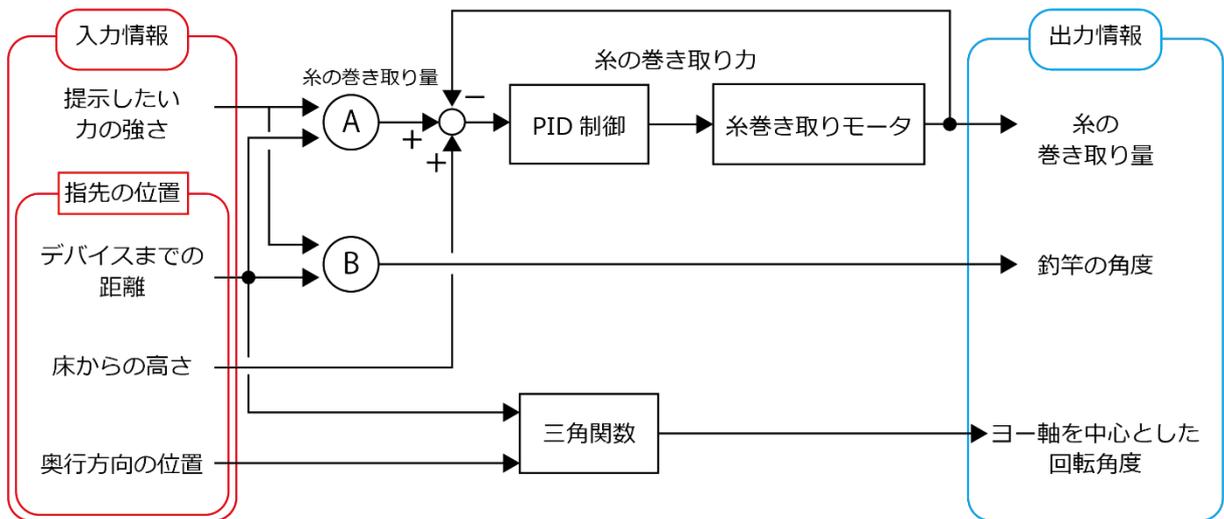


図 4.44 最終的な制御システムの全体図

第5章 デバイス評価

本章では第4章で述べた制御システムを用いて提案装置の性能について調査する。ここでは入力信号に対する応答性、提示可能な力の強さ、ワークスペースの広さについて述べる。

5.1 入力信号に対する応答性

図4.44より、提案装置の入力情報は指先に提示したい力の強さと指先の位置情報である。ここでは指先の位置情報を固定し、提示したい力に時間的に変化する信号を与え、出力信号を計測する。本来は指先に力覚を提示するが、本計測では第4章の計測と同様に錘を使用して出力信号を計測する。錘の設置位置はデバイスの位置を原点として70cm離れた場所とする。第4章の計測では糸の牽引力を記録するため、正確で安定して重さを計測できる電子天秤を使用した。しかし、使用した電子天秤は1秒間に約10回の計測を行う装置であるため、時間変化に対する糸の牽引力を調査することに不向きであった。そこで、ロードセルを使って糸の牽引力を調査することとする。ロードセルを用いた力計測装置を図5.1に示す。

本計測では3種類の入力波形に対する出力波形を計測した。1つめの波形は、ステップ入力の波形である。計測を開始してから10秒間は0.1Nの力を指定し、その後の10秒間は2.5Nの力を指定した。2つめの波形は、1つめのステップ入力の波形を反転させたものである。最初の10秒間は2.5Nの力を指定し、その後の10秒間は0.1Nの力を指定した。3つめの波形は、Sin波である。測定を始めてから5秒間は1.3Nの力を指定し、その後は1.3Nを基準として振幅が1.2N、周波数が0.3HzのSin波を20秒間入力した。Sin波の周波数はHosseiniらが開発したExoTen-Glove[48]を参考にした。提案装置では0Nを指定することはできるが、これは糸が錘を牽引していない状態である。そのため、釣竿の先端が振動すると糸が先端に絡まりやすく、絡まった状態で糸が錘を牽引しようとする、先端が破損してしまう恐れがある。そこで常に糸が張っている状態を作るために、本計測では0.1Nを入力信号の最小の力とした。

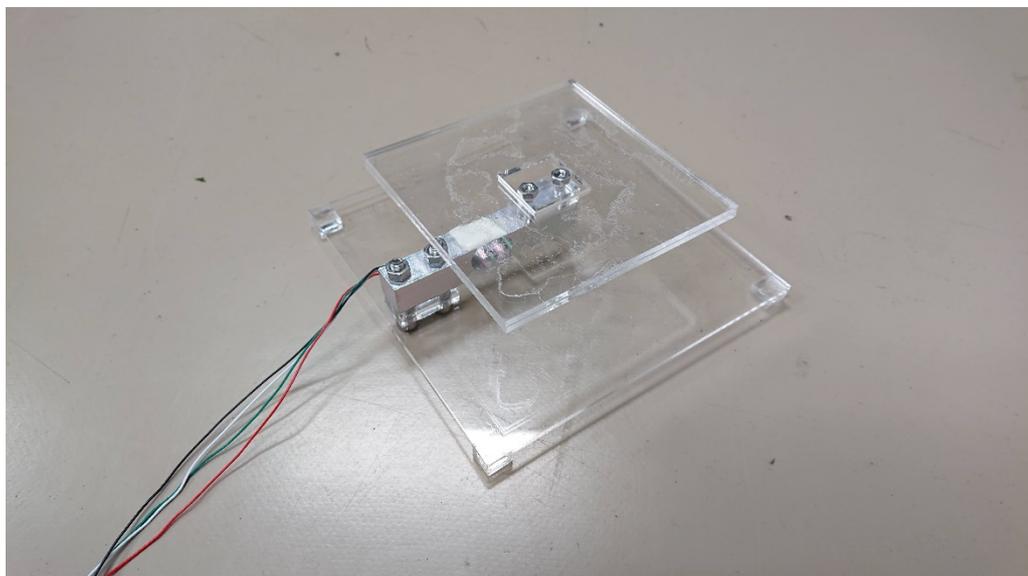


図 5.1 ロードセルを用いた力計測装置

ステップ入力に対する出力波形を図 5.2 に示す。赤線は入力波形を示し、青線は出力波形を示す。図 5.2 を見ると、出力波形にオーバーシュートが生じていることが確認できる。オーバーシュートが生じた原因として 2 つ考えられる。1 つめは、釣竿の変形が出力波形に影響を与えていることが考えられる。2 つめは、図 4.44 の PID 制御のパラメータが適切ではなかったことが考えられる。そこで、PID 制御のパラメータが適切かどうかを確認するため、糸の放出量における入力信号と出力信号の波形を比較した (図 5.3)。図 5.3 を見ると、糸の巻き取り量に関してもオーバーシュートが生じていることが確認できた。つまり、PID 制御のパラメータが適切でないといえる。そこで、PID 制御のパラメータを調整し、糸の放出量における入力信号と出力信号の波形を再度比較した (図 5.4)。図 5.4 を見ると、出力波形からオーバーシュートが消えていることが確認できる。よって、PID 制御のパラメータを調整して最適な値を見つけることができた。

PID 制御のパラメータを調整した後、ステップ入力に対する出力波形を再度計測した (図 5.5)。PID 制御のパラメータ調整の効果が実際に生じる糸の牽引力の波形にあらわれ、図 5.2 で見られたオーバーシュートを抑えることができた。このことから、糸の放出量を制御している PID 制御の安定性が糸の牽引力の波形に影響を与えることが分かった。入力信号が変化するとき、出力信号は入力信号に追従するように変化しているが、入力信号と出力信号にずれが生じている。これは 4.7.4 項で得られた図 4.41, 図 4.42 より、提示したい力の強さと実際に糸が牽引する力が一致していないためである。また、図 5.4 では出力波形が入力波形に対して 0.3 秒の遅延があることが確認できる。この遅延の長さは ExoTen-Glove で発生する遅延の長さと同じである。

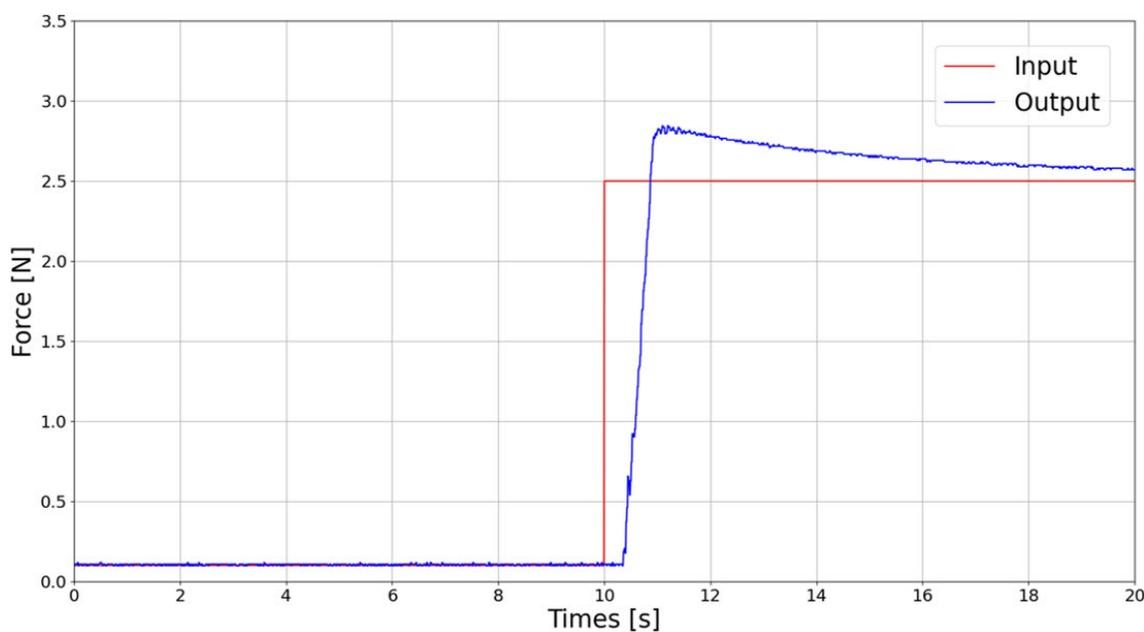


図 5.2 ステップ入力に対する出力波形

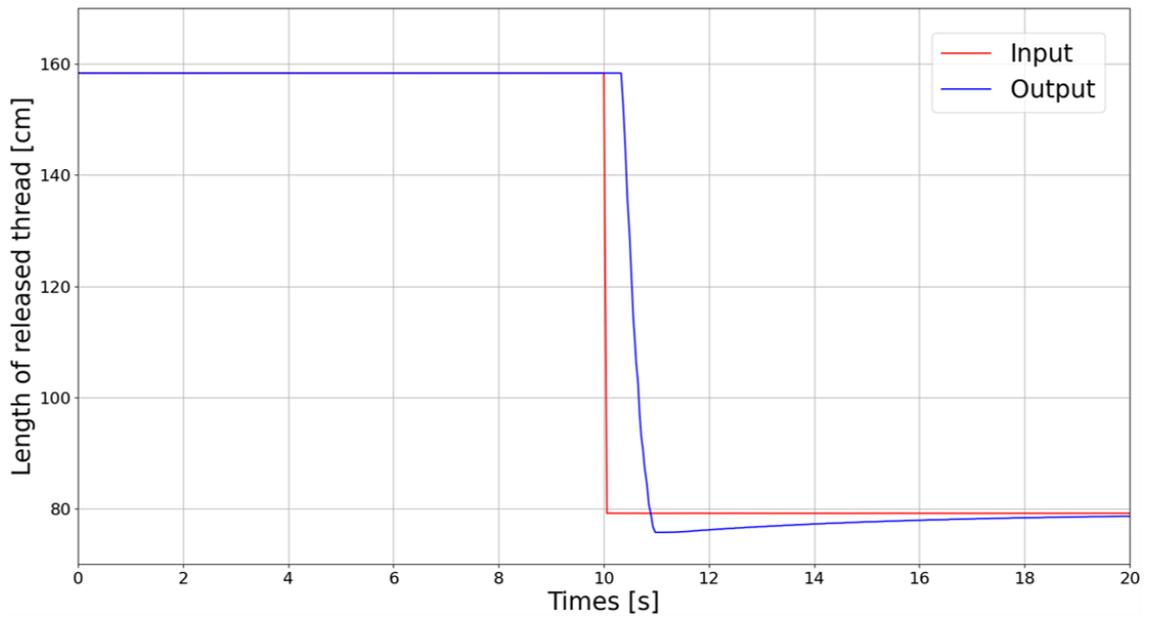


図 5.3 ステップ入力に対する糸の放出量の変化

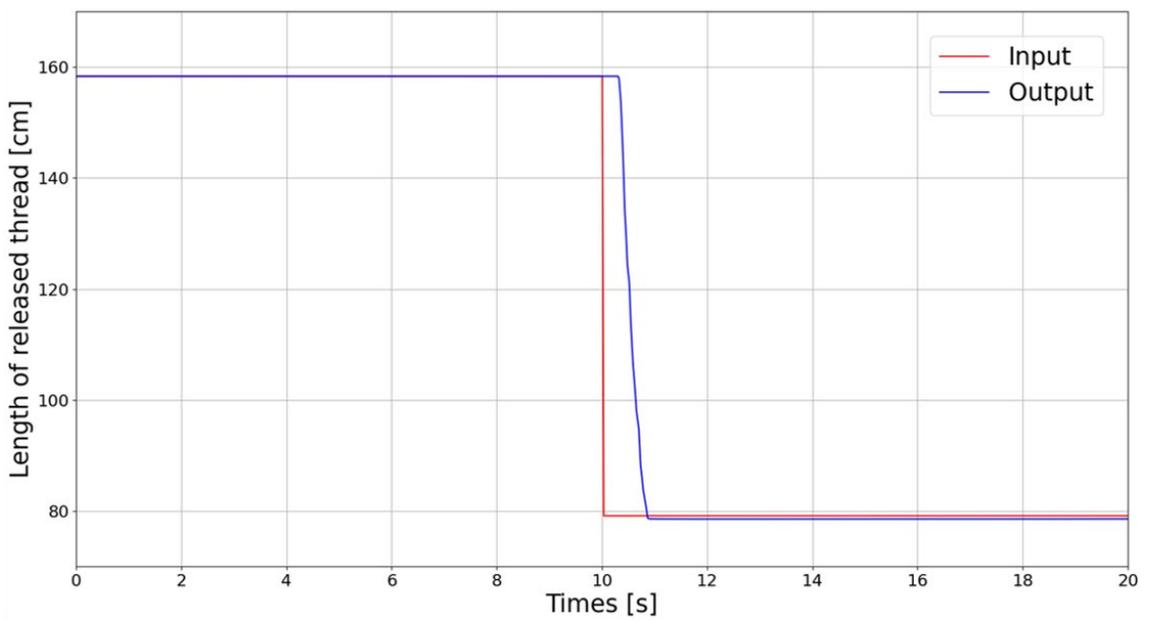


図 5.4 ステップ入力に対する糸の放出量の変化 (PID 制御のパラメータの調整後)

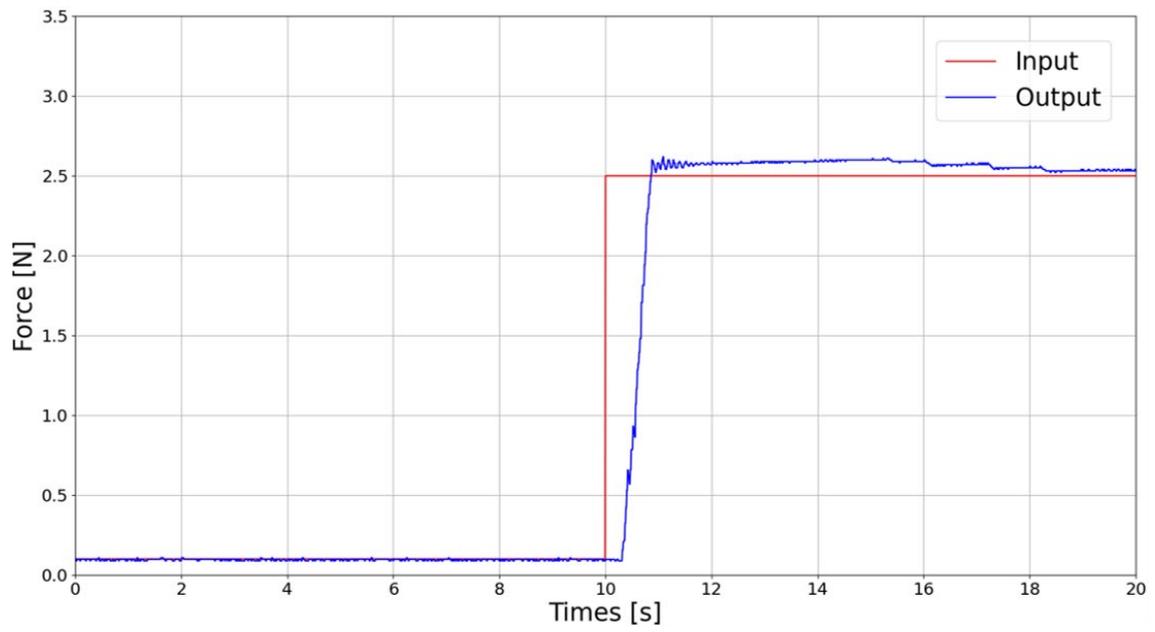


図 5.5 ステップ入力に対する出力波形 (PID 制御のパラメータの調整後)

ステップ入力を反転した波形を入力したときの出力波形を図 5.6 に示し、Sin 波を入力したときの出力波形を図 5.7 に示す。図 5.5, 図 5.6 において定常状態であるにもかかわらず出力波形が微小に振動していることが読み取れる。これはロードセルの計測データにノイズを含んでいるからである。そのため、図 5.7 ではノイズの影響によって出力波形が少し乱れている。計測データのノイズをきれいに除去できれば、出力波形は入力波形と同じ形状になると予想できる。また、図 5.6, 図 5.7 の出力波形は図 5.5 と同様に入力信号に対して 0.3 秒の遅延がある。

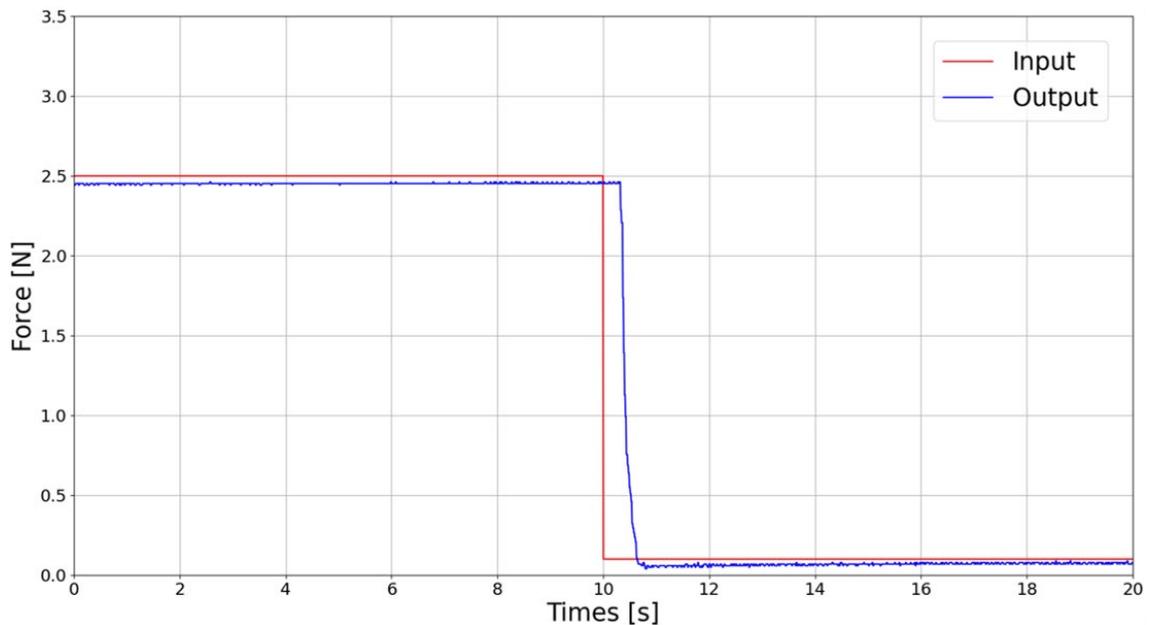


図 5.6 ステップ入力を反転した波形に対する出力波形

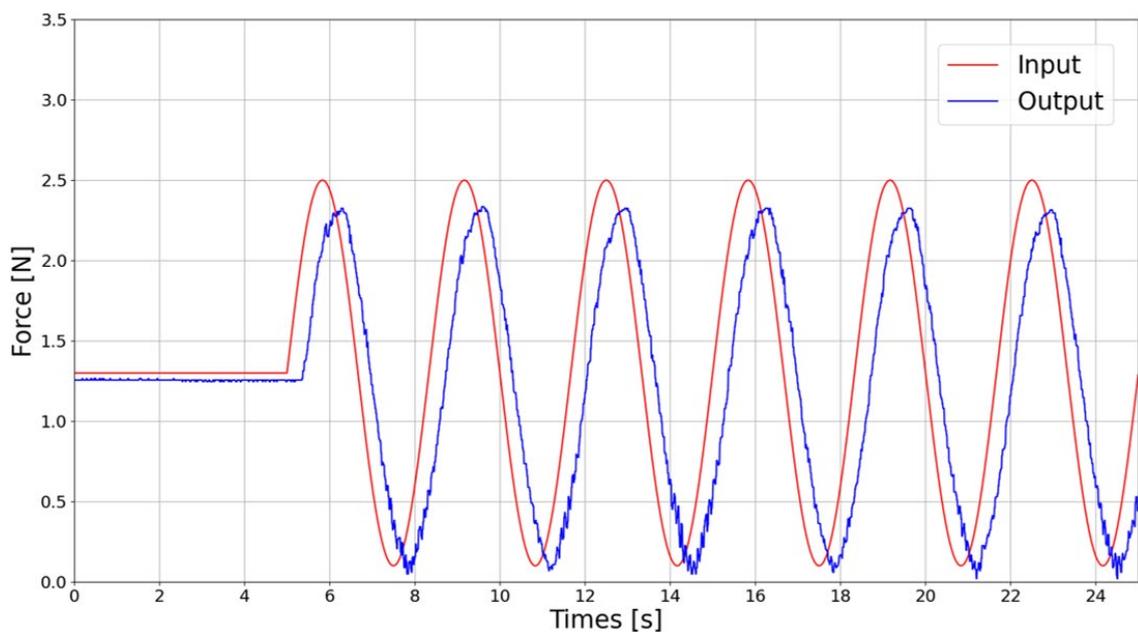


図 5.7 Sin 波の入力信号に対する出力波形

5.2 提示可能な力の強さ

4.5.5 項の考察で、指先の位置がデバイスから遠い位置にあるほど釣竿が生成できる鉛直方向の最大の力が弱くなると考えた。そのため、指先の位置によって提示できる最大の力が変化すると考えられる。そこで、4.6 節で述べたシミュレータを使用し、指先の位置と提示できる最大の力の関係を調査する。

シミュレータでは釣竿の先端位置を求めることができる。第 4 章の計測において指先の位置情報はデバイスから指先までの距離とした。シミュレータでは指先の位置情報を釣竿の根元から先端までの距離に置き換えることができる。そこで、釣竿の先端位置が根元を基準に 0cm から 110cm までの範囲で 5cm 間隔の位置にあるときに出力できる最大の力を解析した。

解析結果を図 5.8 に示す。第 4 章の計測を通して、提案装置が出力できる最大の力は 2.5N であることが分かった。シミュレーションを行うと、釣竿の先端が根元に近づくほど釣竿が生成できる最大の力が強くなり、先端が 80cm 以内の位置にあるときは 2.5N を超える力を生成できることが分かった。そこで、シミュレーション結果で 2.5N 以上の力が記録された 80cm 以内のデータに関しては最大の力を 2.5N としている。図 5.8 を見ると、指先の位置がデバイスから遠ざかるほど指先に提示できる最大の力が弱くなっていることが確認できる。よって、4.5.5 項の考察は正しいといえる。

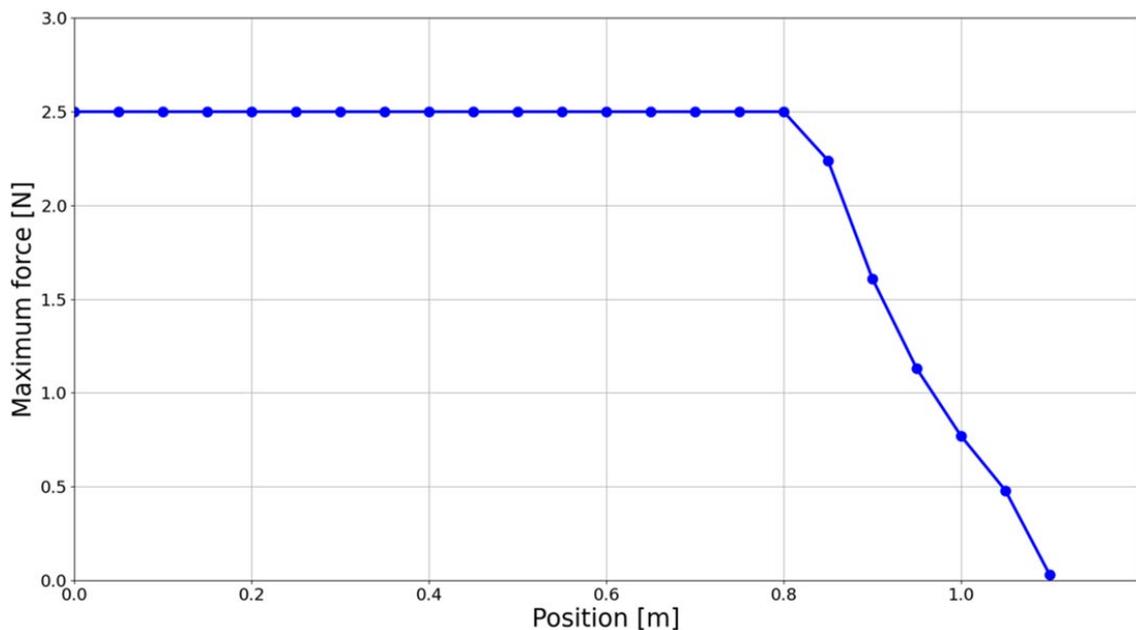


図 5.8 提案装置が提示できる最大の力と指先の位置の関係

5.3 ワークスペースの広さ

釣竿は指先に提示する力の強さが大きくなるほど大きく変形する。そのため、提示する力の強さによって指先を自由に動かせる領域が変化する。そこで、釣竿が変形しても自由に指先を動かすことができる領域について調査する。

指先を自由に動かせる領域とは釣竿と接触しない領域である。指先が牽引されている状態で上方向に指先を動かしていくと、いずれ釣竿の先端と接触してしまう。そのため、釣竿の先端位置が分かれば、指先を自由に動かせる領域を求めることができる。そこで、4.6節で述べたシミュレータを使用して、釣竿の先端位置を解析する。4.6節のシミュレータは釣竿の先端にかかる鉛直方向の力を指定することで、その力によって変形した釣竿の形状を求めることができる。シミュレータには釣竿の先端にかかる力を指定するが、この力は指先に提示する力の反力と一致する。

まず、指先に提示する力の強さによって釣竿の先端座標がどのように変化するかについて解析した。釣竿の先端にかかる力（指先に提示する力の反力）を0Nから2.5Nまでの間を0.5N刻みで設定し、先端座標のx成分が30cmから100cmまでの5cm間隔の位置にあるときのy成分を記録した（図5.9）。図5.9を見ると、指先に強い力を提示するほど、釣竿の先端座標が低くなっていることが分かる。この結果から図5.8を基に、指先の位置に対する提示可能な最大の力を与えたときの床から釣竿の先端までの高さが指を自由に動かせる領域の境界になると考えられる。

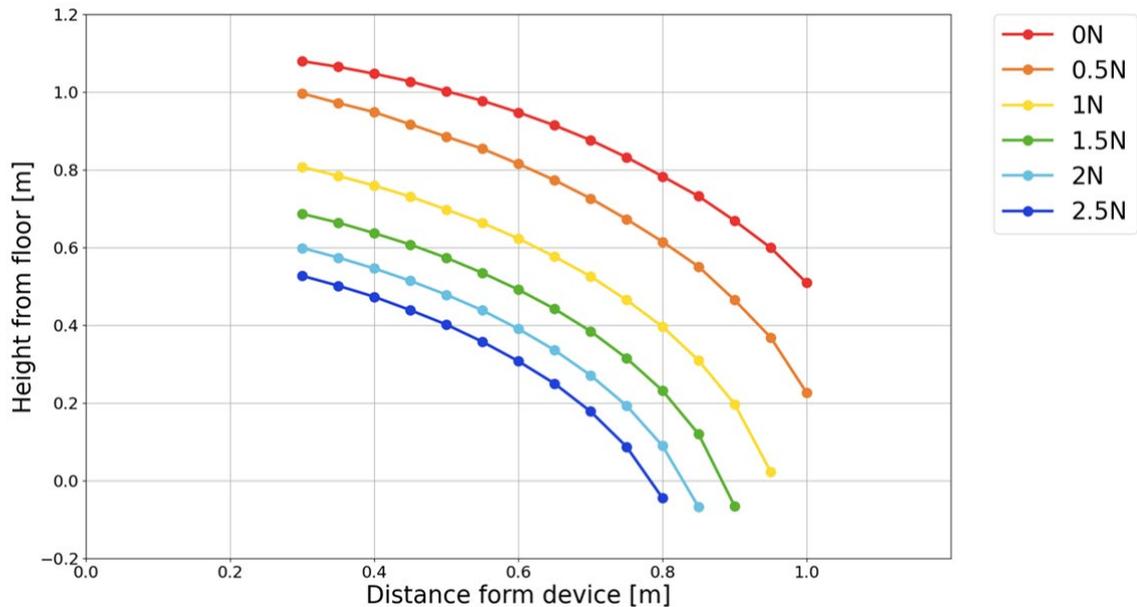


図 5.9 提示する力の強さと釣竿の先端位置の関係

そこで、図 5.8 で得られた各位置の最大の力をシミュレータに入力して釣竿の先端座標を解析した(図 5.10)。図 5.10 のグラフは指先に常に最大の力を提示させたときに釣竿の先端が移動する軌道である。よって、図 5.10 のグラフよりも下の範囲が指先を自由に動かせる領域になる。図 5.10 を見ると、デバイスの位置を原点に 85cm までは釣竿の先端が滑らかな曲線を描くように動くことが読み取れる。そして、85cm よりも遠い位置では直線状の軌道を描いている。85cm で釣竿の先端の軌道が変化した原因は、85cm の辺りが提示可能な最大の力が変化する位置だからである。図 5.8 を見ると、デバイスの原点から 80cm までの範囲は提示可能な最大の力がピーク値の 2.5N を表しており、80cm を超えると提示可能な最大の力が弱くなっている。よって、提示可能な最大の力とワークスペースの間には関係があると考えられる。つまり、提案装置が提示できる最大の力のピーク値が変化すると、指先を自由に動かせるワークスペースの領域が変化することが考えられる。

4.8.5 項で提案装置の最終的な制御システムが図 4.44 になると述べた。図 4.44 では提案装置のワークスペースを拡大するために、ヨー軸方向に回転するサーボモータを制御システムに導入した。よって、ヨー軸方向に回転するサーボモータを考慮すれば、図 5.10 に示した 2 次元の領域を 3 次元領域に拡大できる。使用しているサーボモータは 180 度に回転できるため、提案装置のワークスペースは最終的に図 5.10 の y 軸を中心に 180 度回転させたときの領域である。

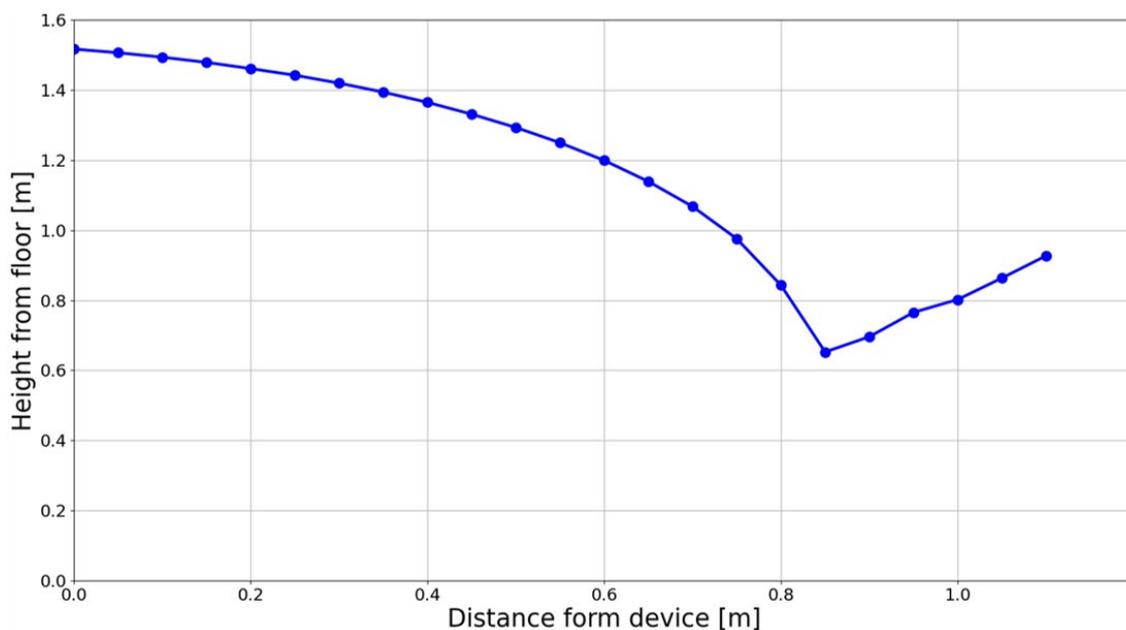


図 5.10 最大の力を提示するときの釣竿の先端位置

5.4 既存デバイスとの比較

本節では提案装置の性能を評価するため、既存デバイスの性能と比較する。Barnabyら[2]は開発した Mantis の性能を評価するために既存デバイスとの比較を行った。比較対象とした力覚提示装置は、2 種類の Mantis (広範囲に力覚を提示する形態, デスクトップで利用する形態), HapticMaster[10], 3D Systems 社[4]の Phantom Premium 3.0, Phantom Premium 1.5, の 5 つである。また、比較した項目は力覚提示の分解能, 提示できる最大の力, バックドライブ時に生じる摩擦トルク, 剛性, ワークスペースの広さ, の 5 つである。そこで、Barnaby らの性能評価を参考に、本論文の提案装置と 2 種類の Mantis (広範囲に力覚を提示する形態を Mantis large, デスクトップで利用する形態を Mantis desktop とする), HapticMaster の 4 つを比較対象とし、提示できる最大の力とワークスペースの広さについて比較する。3D Systems 社が販売している Phantom シリーズのワークスペースに関して、Phantom Premium 3.0 は肩を軸とした空間, Phantom Premium 1.5 はひじを軸とした空間[57]として性能を公開しており、デバイスが力覚を提示できる空間の総体積を表していない。そのため、本節の比較では Phantom Premium 3.0 と Phantom Premium 1.5 を比較対象としていない。

表 5.1 に提案装置と 3 つの既存デバイスに関する最大の力とワークスペースの広さを示す。提案装置のワークスペースは図 5.10 の結果を y 軸回りに半回転してできる空間であり、積分でワークスペースの広さを導出した。表 5.1 を見ると、提案装置のワークスペースは Mantis desktop と HapticMaster より広く、Mantis large のワークスペースより狭いことが確認できる。提案装置のワークスペースは Mantis desktop のワークスペースに対して約 22 倍の広さであるため、図 3.10 のようにデスクトップで使用することを考慮すると、提案装置は広範囲なワークスペースを持っているといえる。提示可能な最大の力に関して、提案装置は既存のデバイスより最も弱いことが確認できる。提案装置の最大の力が 2.5N になってしまった原因は 4.4.4 項から釣竿を支えるサーボモータにある。糸が 2.5N より強い力で指先を牽引すると釣竿を支えるサーボモータが発熱して釣竿を支えることができなくなる。糸が 2.5N の力で指先を牽引したとき、サーボモータが発熱せずに釣竿を支えることができたため、提案装置の最大の力が 2.5N であると考えた。よって、提案装置が提示できる最大の力は釣竿を支えるサーボモータの性能に依存することが分かる。そこで、釣竿を支えるサーボモータを高性能なモータに交換すれば、提案装置が提示できる最大の力が強くなると考えられる。

表 5.1 提案装置と既存デバイスの性能比較

	Proposed device	Mantis large	Mantis desktop	HapticMaster
Maximum force(N)	2.5	26	14.5	100
Workspace(L)	2494	5100	116	80

第6章 結論

6.1 本論文のまとめ

本論文では少ない糸の本数で広範囲に多方向の力覚を提示できる新しいデバイスの開発を目的として、釣竿を用いた力覚提示装置を提案した。そして、提案装置の制御方法を開発、評価を行った。

釣竿から出る1本の糸をユーザの指先にとりつけ、リール部のモータで糸を巻き取ると同時に釣竿の姿勢を制御することで指先に力覚を提示する装置を提案した。力覚提示装置に釣竿を用いることで、糸と身体の干渉を抑制できる、低トルクのモータでも高速に釣竿の姿勢を制御できる、釣竿のしなり自体が強い力を指先に提示できる、の3つの効果が得られると考えた。

提案装置を制御するために、糸の牽引方向を用いたフィードバック制御を提案したが、糸の振動によって指先を一定方向に牽引することは困難であることが分かった。そこで、指先に提示したい力が鉛直方向である場合を例にとり、フィードフォワード制御で動作する制御システムを検討した。まず、指先に力覚を提示するために指先の位置情報が必要であるため、指先の位置情報は制御システムの入力情報になると考えた。また、バーチャル空間のオブジェクトの柔らかさを再現するには提示する力の強さを変化させる必要があるため、指先に提示する力の強さも入力情報になると考えた。これらの情報を制御システムに入力したとき、指先を鉛直方向に牽引しながら、指先に提示したい力を実際に提示する制御を実現するため、出力情報の選定を行った。

まず、出力情報としてリール部のモータによる糸の巻き取り力と釣竿の角度を出力情報とした制御システムを考えた。そこで、入出力情報の関係を計測し、計測データから回帰式を求めた。求めた回帰式を制御システムに組み込んで動作確認を行うと、提示したい力を強くしていく場合と弱くしていく場合では、最終的に指定する強さが同じでも実際に提示される力の強さに違いが表れることを確認した。これは釣竿のロッドガイドと糸の間に生じる摩擦力が影響していると考えた。

次に、出力情報をリール部のモータによる糸の巻き取り力から糸の巻き取り量に変更した制御システムを提案した。先程と同様に、入出力情報の関係を計測して回帰式を導出し、得られた回帰式を制御システムに組み込んで動作確認を行った。糸の巻き取り量を出力情報としたことで、釣竿のロッドガイド上に生じる摩擦力の影響を受けなくなり、提示したい力の強さを自由に変更しても、最終的に指定する強さが同じであれば、実際に提示される力の強さは一定になることを確認した。よって、提案装置を適切に制御するシステムは、指先の位置情報と提示したい力を入力し、糸の巻き取り量と釣竿の角度を出力とする制御システムであることが分かった。また、床から指先までの高さ、指先の奥行方向の位置に対して簡単な計算を制御システムに導入することで、広範囲なワークスペースを実現できると考えた。

最終的に得られた制御システムを提案装置に組み込んで、入力信号に対する応答性、提示可能な力の強さ、実現できるワークスペースの広さについて調査した。応答性に関しては、入力波形に対して約0.3秒の遅れで同形状の波形が出力されることを確認した。提示可能な力の強さとワークスペースの広さについてはシミュレーションを使ってグラフ化することができた。

6.2 今後の展望

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、4.8節で得られた制御システムが提示したい力の方向に対応できるように改良する必要がある。提示したい力の方向は入力情報である提示したい力の強さに関連するため、制御システムの新たな入力情報になると考えられる。本論文で提案した力覚提示装置は、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。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。

また、指先に提示したい力の方向を入力したとき、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について調査する必要がある。

さらに、提案装置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っていない。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、提案装置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が必要である。

謝辞

本論文の執筆にあたり，終始適切な助言を頂きました梶本先生，小泉先生に厚く感謝申し上げます。また，梶本研究室の皆様にも多くのご支援を頂きました。心より感謝いたします。

私は高専専攻科からの進学で梶本研究室に配属しました。初めて梶本研究室に足を踏み入れたときは，研究室の学生が全員優秀で，自分は修士を修了できるのかと悩みと焦りで苦しい日々が続きました。また，配属と同時に一人暮らしを始めたので，生活面でも凄く不安がありました。しかし，研究室で活動が始まると早々に先輩方から声をかけていただき，少しずつ研究室の空気に慣れていきました。また，同期の学生も私をすぐに受け入れてくれて，ご飯に誘って頂いたり，遊びに行ったりと親睦を深め，毎日楽しく過ごせるようになりました。私の兄弟や他大学の友人と研究室の雰囲気について話したことがあり，他の研究室と比べて梶本研究室はすごく学生同士仲のいい研究室であることを感じました。さらに，梶本先生，小泉先生も学生思いでご指導していただけることも他の研究室と大きな違いでした。このような恵まれた環境だからこそ，私は2年間研究に励むことができたと思っています。本当に感謝の気持ちでいっぱいです。また，私を支えてくださった家族にも深く感謝しております。

2年間という短い期間でしたがお世話になりました。

関連発表

査読付き国際学会発表

- (1) Daiki.Naito, Hiroyuki.Kajimoto: Haptic Display Using Fishing Rod, Eurohaptics 2020 Conference, 2020.9 6-9. Leiden, Netherlands, Online (Best Demo Award)

国内発表

- (2) 内藤大樹, 梶本裕之: 釣竿を用いたハプティクスデバイスの開発, 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2019.9 11-13. 東京大学 本郷キャンパス
- (3) 内藤大樹, 梶本裕之: 釣竿を用いた力覚提示デバイスの制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2020.5 27-29, 金沢, オンライン

参考文献

- [1] Aoki, T., Mitake, H., Keoki, D., Hasegawa, S., Sato, M.: Wearable haptic device to present contact sensation based on cutaneous sensation using thin wire. In: Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, pp.115-122, 2009.
- [2] Barnaby, G., Roudaut, A.: Mantis: A Scalable, Lightweight and Accessible Architecture to Build Multiform Force Feedback Systems, In: Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.937-948, 2019.
- [3] Massie, T. H., Salisbury, J. K.: The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects, In: Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, pp.295-300, 1994.
- [4] Phantom Premium, 3D Systems, Inc., <https://ja.3dsystems.com/>
- [5] CyberGrasp, CyberGlove Systems Inc., <http://www.cyberglovesystems.com/>
- [6] DualSense, Sony Interactive Entertainment Inc., <https://www.playstation.com/>
- [7] 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, pp.1-12, 2019.
- [8] Sato, M.: Development of string-based force display: SPIDAR, In: 8th international conference on virtual systems and multimedia, p. 1034-1039, 2002.
- [9] 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.
- [10] Van der Linde, R. Q., Lammertse, P., Frederiksen, E., Ruiters, B.: The HapticMaster, a new high-performance haptic interface, In: Proc. Eurohaptics 2002, pp.1-5, 2002.
- [11] Martin, S., Hillier, N.: Characterisation of the Novint Falcon haptic device for application as a robot manipulator, In: Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), pp.291-292, 2009.
- [12] Pacchierotti, C., Chinello, F., Malvezzi, M., Meli, L., Prattichizzo, D.: Two finger grasping simulation with cutaneous and kinesthetic force feedback. In: International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, pp.373-382, 2012.
- [13] Silva, A. J., Ramirez, O. A. D., Vega, V. P., Oliver, J. P. O.: Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability, In: 2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA). IEEE, pp.193-198, 2009.
- [14] Barrow, A. L., Harwin, W. S.: High bandwidth, large workspace haptic interaction: Flying phantoms, In: 2008 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. IEEE, pp.295-302, 2008.

- [15] Minamizawa, K., Fukamachi, S., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S.: Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation, In: ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies, pp.8-es, 2007.
- [16] Murakami, T., Person, T., Fernando, C. L., Minamizawa, K.: Altered touch: miniature haptic display with force, thermal and tactile feedback for augmented haptics, In: ACM SIGGRAPH 2017 Posters, pp.1-2, 2017.
- [17] Kovacs, R., Ofek, E., Gonzalez Franco, M., Siu, A. F., Marwecki, S., Holz, C., Sinclair, M.: Haptic PIVOT: On-Demand Handhelds in VR, In: Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.1046-1059, 2020.
- [18] Choi, I., Hawkes, E. W., Christensen, D. L., Ploch, C. J., Follmer, S.: Wolverine: A wearable haptic interface for grasping in virtual reality, In: 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, pp.986-993, 2016.
- [19] Choi, I., Culbertson, H., Miller, M. R., Olwal, A., Follmer, S.: Grability: A wearable haptic interface for simulating weight and grasping in virtual reality, In: Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.119-130, 2017.
- [20] Teng, S. Y., Kuo, T. S., Wang, C., Chiang, C. H., Huang, D. Y., Chan, L., Chen, B. Y.: Pupop: Pop-up prop on palm for virtual reality, In: Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.5-17, 2018.
- [21] Sato, K., Minamizawa, K., Kawakami, N., Tachi, S.: Haptic telexistence, In: ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies, pp.10-es, 2007.
- [22] Hinchet, R., Vechev, V., Shea, H., Hilliges, O.: Dextres: Wearable haptic feedback for grasping in vr via a thin form-factor electrostatic brake, In: Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.901-912, 2018.
- [23] CyberForce, CyberGlove Systems Inc., <http://www.cyberglovesystems.com/>
- [24] Gu, X., Zhang, Y., Sun, W., Bian, Y., Zhou, D., Kristensson, P. O.: Dexmo: An inexpensive and lightweight mechanical exoskeleton for motion capture and force feedback in VR, In: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1991-1995, 2016.
- [25] Huang, H. Y., Ning, C. W., Wang, P. Y., Cheng, J. H., Cheng, L. P.: Haptic-go-round: A Surrounding Platform for Encounter-type Haptics in Virtual Reality Experiences, In: Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1-10, 2020.
- [26] Tachi, S.: A construction method of virtual haptics space. In: Proc. of the ICAT'94 (4th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence), p. 131-138, 1994.
- [27] Vonach, E., Gatterer, C., Kaufmann, H.: VRRobot: Robot actuated props in an infinite virtual environment, In: 2017 IEEE Virtual Reality (VR). IEEE, pp.74-83, 2017.
- [28] Fedoseev, A., Tleugazy, A., Labazanova, L., Tsetserukou, D.: TeslaMirror: Multistimulus Encounter-Type Haptic Display for Shape and Texture Rendering in VR, In: ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies, pp.1-2, 2020.

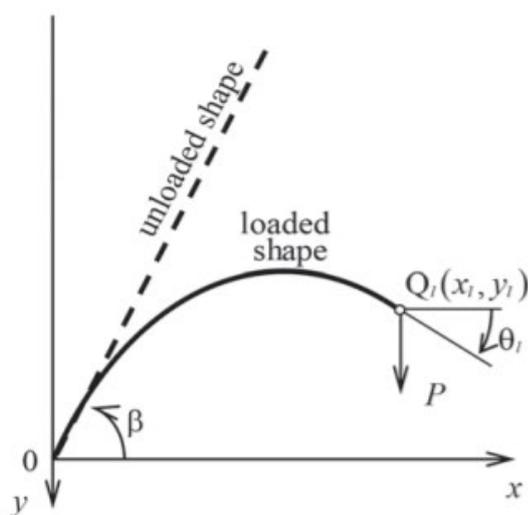
- [29] Hoppe, M., Knierim, P., Kosch, T., Funk, M., Futami, L., Schneegass, S., Henze, N., Schmidt, A., Machulla, T.: VRHapticDrones: Providing haptics in virtual reality through quadcopters, In: Proceedings of the 17th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, pp.7-18, 2018.
- [30] Yamaguchi, K., Kato, G., Kuroda, Y., Kiyokawa, K., Takemura, H.: A non-grounded and encountered-type haptic display using a drone. In: Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction, pp.43-46, 2016.
- [31] Kim, S., Hasegawa, S., Koike, Y., Sato, M.: Tension based 7-DOF force feedback device: SPIDAR-G, In: Proceedings IEEE Virtual Reality 2002. IEEE, pp.283-284, 2002.
- [32] WALAIRACHT, S.: A new haptic display for both-hands-operation: SPIDAR-8, In: Proc. IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, pp.569-572, 1999.
- [33] 佐藤誠: 等身大仮想環境におけるマルチモーダルインタラクション, 映像情報メディア学会技術報告 24 巻 71 号 一般社団法人 映像情報メディア学会, pp.57-62, 2000.
- [34] Liu, L., Miyake, S., Akahane, K., Sato, M.: Development of string-based multi-finger haptic interface SPIDAR-MF, In: 2013 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT). IEEE, pp.67-71, 2013.
- [35] Ma, S., Toshima, M., Honda, K., Akahane, K., Sato, M.: SPIDAR-S: A Haptic Interface for Mobile Devices, In: International Symposium on Smart Graphics. Springer, Cham, pp.203-206, 2015.
- [36] Bonivento, C., Eusebi, A., Melchiorri, C., Montanari, M., Vassura, G.: WireMan: A portable wire manipulator for touch-rendering of bas-relief virtual surfaces, In: 1997 8th International Conference on Advanced Robotics. Proceedings. ICAR'97. IEEE, pp.13-18, 1997.
- [37] 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 IEEE Virtual Reality 2001, pp.123-129, 2001.
- [38] Wang, C. H., Hsieh, C. Y., Yu, N. H., Bianchi, A., Chan, L.: HapticSphere: Physical support to enable precision touch interaction in mobile mixed-reality, In: 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp.331-339, 2019.
- [39] Fang, C., Zhang, Y., Dworman, M., Harrison, C.: Wireality: Enabling Complex Tangible Geometries in Virtual Reality with Worn Multi-String Haptics, In: Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1-10, 2020.
- [40] Achibet, M., Girard, A., Talvas, A., Marchal, M., Lécuyer, A.: Elastic-Arm: Human-scale passive haptic feedback for augmenting interaction and perception in virtual environments, In: 2015 IEEE Virtual Reality (VR), pp.63-68, 2015.
- [41] Tsetserukou, D., Sato, K., Tachi, S.: ExoInterfaces: novel exoskeleton haptic interfaces for virtual reality, augmented sport and rehabilitation, In: Proceedings of the 1st Augmented Human International Conference, pp.1-6, 2010.

- [42] Tsai, H. R., Rekimoto, J., Chen, B. Y.: Elasticvr: Providing multilevel continuously-changing resistive force and instant impact using elasticity for vr, In: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1-10, 2019.
- [43] Shoham, M.: Twisting wire actuator, 2005.
- [44] Gaponov, I., Popov, D., Ryu, J. H.: Twisted string actuation systems: A study of the mathematical model and a comparison of twisted strings, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 19, pp.1331-1342, 2013.
- [45] Palli, G., Natale, C., May, C., Melchiorri, C., Wurtz, T.: Modeling and control of the twisted string actuation system, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 18, pp.664-673, 2012.
- [46] Scarcia, U., Moriello, L., Pepe, A., Palli, G., Melchiorri, C.: Design of a twisted-string actuator for haptic force rendering, IFAC-PapersOnLine 51, pp.479-485, 2018.
- [47] Hosseini, M., Sengül, A., Pane, Y., De Schutter, J., Bruyninck, H.: ExoTen-Glove: A Force-Feedback Haptic Glove Based on Twisted String Actuation System, In: 2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), pp.320-327, 2018.
- [48] 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). IEEE, pp.115-120, 2017.
- [49] Wang, Y., Chen, Z., Li, H., Cao, Z., Luo, H., Zhang, T., Ou, K., Raiti, J., Yu, C., Patel, S, Shi, Y.: MoveVR: Enabling Multiform Force Feedback in Virtual Reality using Household Cleaning Robot, In: Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1-12, 2020.
- [50] 際田直樹, 池田尚登, 嵯峨智: 全方向自立移動車と真空機構による力覚提示手法の検討, ハプティクス研究会 第23回研究会, 2019.
- [51] Cheng, L. P., Lühne, P., Lopes, P., Sterz, C., Baudisch, P.: Haptic turk: a motion platform based on people, In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.3463-3472, 2014.
- [52] Cheng, L.P., Roumen, T., Rantzsch, H., Köhler, S., Schmidt, P., Kovacs, R., Jasper, J., Kemper, J., Baudisch, P.: Turkdeck: Physical virtual reality based on people, In: Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp.417-426, 2015.
- [53] Cheng, L. P., Marwecki, S., Baudisch, P.: Mutual human actuation, In: Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.797-805, 2017.
- [54] OptiTrack V120: Trio, Acuity Inc., <https://www.optitrack.jp/>
- [55] 松村志真秀, 神保泰雄: 釣竿の力学的特性と機能に関する研究, 精密機械, No.49, pp.1195-1201, 1983.
- [56] 大槻敦巳, 竹内稔朗: 高度復元ばね特性の非線形解析 (釣竿の大たわみ変形), はね論文集, No.64, pp.15-21, 2019.

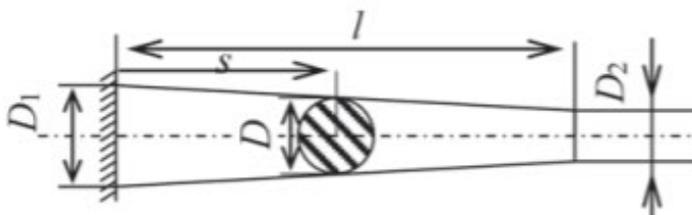
[57] Phantom Premium, 日本バイナリー株式会社, <http://www.nihonbinary.co.jp/>

付録

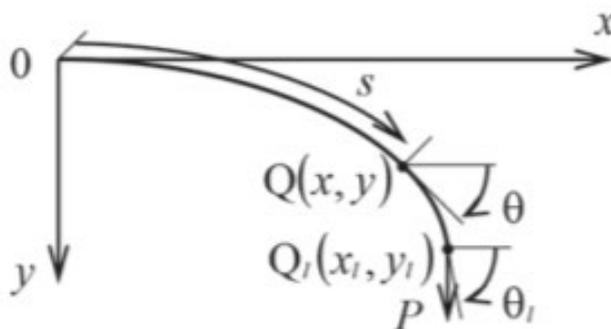
大槻ら[56]が報告した数学モデルの導出過程を述べる. まず, 数学モデルの導出で必要となる変数を定義する. 付図 1 は釣竿の先端に集中荷重 P が鉛直方向に作用したときの釣竿の変形を示したものである. ここで, x 軸から釣竿の根元までの角度を β とする. 付図 2 は釣竿の構造を表しており, 釣竿の全長を l , 釣竿の根元断面の直径を D_1 , 釣竿の先端断面の直径を D_2 と定義する. 付図 3 では付図 1 の角度 β が 0 度の状態を表しており, 釣竿の根元から任意点 $Q(x, y)$ までの円弧の長さを s , 任意点 $Q(x, y)$ におけるたわみ角度を θ とする. 最後に, 釣竿の曲率半径を R , 曲げモーメントを M , 釣竿の縦弾性係数 (ヤング率) を E , 断面二次モーメントを I と定義する.



付図 1 釣竿を x 軸から角度 β まで立たせて先端に集中荷重 P が鉛直方向に作用したときの様子[56]



付図 2 釣竿の構造[56]



付図 3 釣竿を寝かせた状態で先端に集中荷重 P が作用したときの様子[56]

ここから釣竿の変形を解析する数式を導出する．曲げモーメント M ，釣竿の曲率半径 R の間には以下の関係式が成り立つ．

$$M = \frac{EI}{R} \quad (1)$$

また，曲率半径 R は

$$\frac{1}{R} = -\frac{d\theta}{ds} \quad (2)$$

と表すことができる．そのため，式(1)，(2)から次式が導出される．

$$\frac{M}{EI} = -\frac{d\theta}{ds} \quad (3)$$

次に，付図 3 上の任意点 $Q(x, y)$ における断面二次モーメント I を導出する．断面二次モーメントは物体の形状によって用いる公式が異なる．釣竿の断面は円形であるため，ここでは円形に対応した断面二次モーメントの公式を使用する．次式は円形の直径を d としたときの断面二次モーメント I を求める式である．

$$I = \frac{\pi}{64} d^4 \quad (4)$$

付図 3 上の任意点 $Q(x, y)$ における断面二次モーメントを導出するためには任意点 $Q(x, y)$ の断面の直径 D を求める必要がある．付図 2 のように，釣竿は根元から先端にかけて断面積が小さくなることを考慮すると，任意点 $Q(x, y)$ における断面の直径 D は

$$D = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{D_2}{D_1} \right) \frac{s}{l} \right\}^4 D_1 \quad (5)$$

と表すことができる．そのため，式(4)に式(5)を代入することで次式が導出される．次式に含まれる I_1 は釣竿の根元における断面二次モーメントである．

$$I = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{D_2}{D_1} \right) \frac{s}{l} \right\}^4 I_1, \quad I_1 = \frac{\pi}{64} D_1^4 \quad (6)$$

さらに，任意点 $Q(x, y)$ における曲げモーメント M は

$$M = -P(l - x) \quad (7)$$

で求めることができる．

以上より，式(3)，(6)，(7)から釣竿の変形を解析する基本式は

$$E \left\{ 1 - \left(1 - \frac{D_2}{D_1} \right) \frac{s}{l} \right\}^4 I_1 \frac{d\theta}{ds} = P(l - x) \quad (8)$$

と表すことができる．ここで 2 つの無次元変数，無次元長さ η ，無次元荷重 α を定義する．

$$\eta = \frac{s}{l}, \quad \alpha = \frac{D_1 P l^2}{D_2 E I_1} \quad (9)$$

また，任意点 $Q(x, y)$ の座標は

$$x = s \cdot \cos \theta, \quad y = s \cdot \sin \theta \quad (10)$$

と表すことができ，両辺を s で微分すると

$$\frac{dx}{ds} = \cos \theta, \quad \frac{dy}{ds} = \sin \theta \quad (11)$$

となる。よって、式(8)の両辺を s で微分して式(9), (11)を代入することで、次式の非線形微分方程式が得られる。

$$\left\{1 - \left(1 - \frac{D_2}{D_1}\right)\eta\right\}^4 \frac{d^2\theta}{d\eta^2} - 4\left(1 - \frac{D_2}{D_1}\right)\left\{1 - \left(1 - \frac{D_2}{D_1}\right)\eta\right\}^3 \frac{d\theta}{d\eta} = -\frac{D_2}{D_1}\alpha \cos\theta \quad (12)$$

大槻らは式(12)の非線形微分方程式から解を求めるために、数値解析手法である Runge-Kutta-Gill 法を採用した。また、Runge-Kutta-Gill 法で解を求めるため、以下の境界条件を設けている。式(13)の条件は釣竿の根元を表しており、式(14)の条件は釣竿の先端を表している。

$$\eta = 0, \quad \theta = \beta \quad (13)$$

$$\eta = 1, \quad \frac{d\theta}{d\eta} = 0 \quad (14)$$

したがって、式(13), (14)の条件のもと、Runge-Kutta-Gill 法を用いて式(12)の解を導出することで釣竿の変形を解析できる。