

爪色力センサ

2015 年 3 月

豆野 裕信

爪色力センサ

豆野 裕信

概要

本研究では、指腹部と対象物の間に機器を装着しない指先接触力計測を実現するために、爪の各部位の色が指腹部に加わる力の大きさや方向に応じて赤から白まで変化することに着目して、爪色から指先接触力を推定することを目的とする。手法としては、可視光 LED とフォトダイオードを爪側に複数設置することで爪表面の色分布を計測し、色計測と同時に加速度センサによる指姿勢の推定を行い、指姿勢毎の力の推定式を用いて力の大きさと方向を推定する方法を提案する。

提案手法の実現のために、まず三つの LED と四つのフォトダイオードと加速度センサが組み込まれたデバイスを作製した。次に、作製したデバイスの三つの LED から同波長域の光を入射しつつ色の異なる対象物を用いて反射光を計測したところ、対象物の色により四つのフォトダイオードの出力が変化したため、各フォトダイオードにおいて対象物による反射光強度の違いを計測可能であることが確認された。さらに、デバイスを指の爪に装着して、加速度センサの出力から指姿勢を推定しつつ、三軸力覚センサに指で 10 N の剪断力を順次 4 方向に加えることによる各フォトダイオードの出力を計測することで、被験者毎に指姿勢毎に指先接触力とフォトダイオード出力との較正を行った。そして、較正結果に基づいた指姿勢毎の推定式を導出し、指姿勢毎に指先接触力の推定が可能なシステムを構築した。結果として姿勢や力の方向により精度は異なるものの、約 10 N の力が計測可能で誤差が 1～3 N であることを確認し、指腹部と対象物の間に機器を装着しない指先接触力計測が可能であることがわかった。

キーワード：力センサ、爪色計測、LED、フォトダイオード、指先接触力

Nail Color Force Sensor

Hironobu Mameno

Abstract

In this study, the author focuses on the color change of nail site from red to white with the magnitude and direction of the force applied to the finger pad and estimates fingertip contact force from nail color. As a method, the author measures color distribution of the nail surface by using LEDs and photodiodes and estimates finger posture by using acceleration sensor. From nail color and finger posture, the author calculates the magnitude and direction of the force without any device between the object and the finger pad by using the estimation equation.

First, the author fabricated a device which has three LEDs and four photodiodes and acceleration sensor for the realization of the proposed method. Then, the author measured reflected light intensity of different colored objects while radiating the light of the same wavelength using three LEDs. In addition, the author attached the device to the fingernail to determine the estimation equation by measuring the output of the photodiodes when four directional shearing forces were added to the three-axis force sensor. From the result of calibration for each individual between force and the output of photodiodes, the author derived the estimation equation for each finger posture and became possible to estimate the fingertip contact force in each posture. As a result, although the accuracy depends on the finger posture and force direction, it was confirmed that this system can measure force of 10 N with 1-3 N error and fingertip contact force measurement without any device between the object and the finger pad is possible.

Keywords : force sensor, nail color measurement, LED, photodiode, fingertip contact force

目 次

第1章	はじめに	1
第2章	指の構造と力計測	3
2.1	指の構造と機能	3
2.2	指の力計測	8
第3章	指先接触力の推定手法	14
3.1	提案システムの概要	14
3.2	爪色計測手法	16
3.3	指姿勢推定手法	21
3.4	指先接触力の推定手法	23
第4章	指先接触力の推定	27
4.1	作製したデバイスの概要	27
4.2	色計測実験	33
4.3	指先接触力とフォトダイオード出力との較正	36
4.4	指姿勢毎の推定精度検証実験	46
4.5	指姿勢変化時の指先接触力推定実験	50
4.6	様々な動作の指先接触力推定実験	52
4.7	道具使用時の指先接触力推定	55
第5章	おわりに	58
	謝辞	59
	業績	60
	参考文献	61

目 次

1.1	様々な力解析	2
2.1	指先の断面図	3
2.2	指先の内部構造	4
2.3	各剪断力印加時の爪色変化	4
2.4	指先の変形	5
2.5	手指の動作	6
2.6	身近な道具や用具操作の例	7
2.7	三軸触覚センサ	8
2.8	圧計測が可能な鉗子	9
2.9	フレキシブル触覚センサ	9
2.10	筋電位を用いた力計測	10
2.11	リストバンド型筋電計測デバイス	10
2.12	指先変形の計算	11
2.13	カメラによる爪色計測	12
2.14	爪センサ	13
3.1	剪断力と押下力	14
3.2	システム構成	15
3.3	爪色計測手法	16
3.4	デバイスの構造	16
3.5	装着した際の外観	17
3.6	LED の駆動回路	18
3.7	フォトダイオードに流れる電流の読み出し回路	19
3.8	フォトダイオードの I - V 特性	19

3.9	フォトダイオード出力と力の関係	20
3.10	指姿勢	21
3.11	加速度センサの使用法	22
3.12	較正方法	26
4.1	配線図	27
4.2	爪色分布の変化	28
4.3	姿勢により異なる爪色変化	28
4.4	デバイスの外観	29
4.5	計測部位と対応するフォトダイオード	29
4.6	デバイスの固定	30
4.7	使用した素子、センサ	31
4.8	使用素子、センサの各特性	32
4.9	使用したカラーチャート	33
4.10	CMYK 表現法で用いられる色	33
4.11	色計測実験の様子	34
4.12	計測対象	34
4.13	各フォトダイオードの出力変化	35
4.14	力の加え方	36
4.15	実験の様子	37
4.16	各固定台の外観	38
4.17	固定台の使用法	38
4.18	各固定台使用時の指姿勢の推移	39
4.19	各指姿勢における出力	41
4.20	姿勢による出力の違い	41
4.21	較正用のフォトダイオード出力を用いた推定	44
4.22	同一姿勢の較正結果に基づく推定結果の例	47
4.23	異なる姿勢の較正結果に基づく推定結果の例	49
4.24	被験者 A の推定結果	50
4.25	被験者 B, C による推定結果の例	51

4.26 異なる被験者の校正結果に基づく推定結果の例	51
4.27 動作1の推定結果	52
4.28 動作2の推定結果	53
4.29 使用した粘着テープ	55
4.30 実験の様子	55

表 目 次

4.1	使用した抵抗	32
4.2	使用した機器	38
4.3	$\theta=0$ deg 時の各回帰係数	42
4.4	各決定係数	42
4.5	誤差の平均値	45
4.6	F_x の誤差の平均値	48
4.7	F_y の誤差の平均値	48
4.8	F_z の誤差の平均値	48
4.9	各試行における最大値と最小値の差	57

第1章 はじめに

人は古来より様々な動作を学び、駆使することで生活を送ってきた。人の動作は、生理現象などの無意識に行う動作や、意識的に自身の身体を用いて行う動作など多数存在する [1][2]。意識的な動作には手指の動作も含まれており、道具を扱う際には手順や指の動き、力加減といった様々な要素が必要となる [3][4]

指先動作の定量的な評価のために、力計測を含む指先の動作解析は多く行われている [5][6]。しかし力計測はセンサに対して力を加えて計測する手法が一般的であるため、対象物にセンサを組み込むことなく指先接触力の計測を行うことができれば、様々な状況における指先動作の解析が可能となる [7]。すなわち、スポーツにおけるボールなどの道具の最適な使用方法の解析や、医療における医療機器の操作などの細かい指制御の必要な動作の教育、または様々な道具のユーザビリティ評価につながると考えられる [8][9]。

道具操作における指先接触力を計測対象とする場合、指先と対象物の接触状態を維持するために、指腹部にデバイスを装着することなく計測を行う必要がある [10]。上記の制約を考慮して指腹部と対象物の間に何も装着せずに力の計測を行った研究としては、カメラにより爪色変化を計測した研究 [11] や、近赤外 LED(Light Emitting Diode) とフォトダイオードを用いて爪側から指先の血量を計測した研究 [12] などがある。しかし、前者では指の爪を常にカメラに向ける必要があり、道具操作という点においては使用時に動きの制限が生じる。また後者では近赤外光を体内に入射するため、生体内における散乱により計測を行う部位以外の血量情報も取得してしまうという問題がある。

本研究では、手の動きに制限を生じさせず、また指先の皮膚感覚を損なわない指先接触力計測を実現するために、指腹部と対象物の間にデバイスを装着せずに可視光LEDとフォトダイオードを爪側に設置することで生体内の散乱の影響を受けない爪表面での色計測を行い、得られた色分布から指先接触力の大きさと方向を推定することを目的とする。提案する計測手法は将来的に図 1.1 に示すように、様々な部位の力解析手法がある中で指先の力計測の一般的な手法となることを目指す。

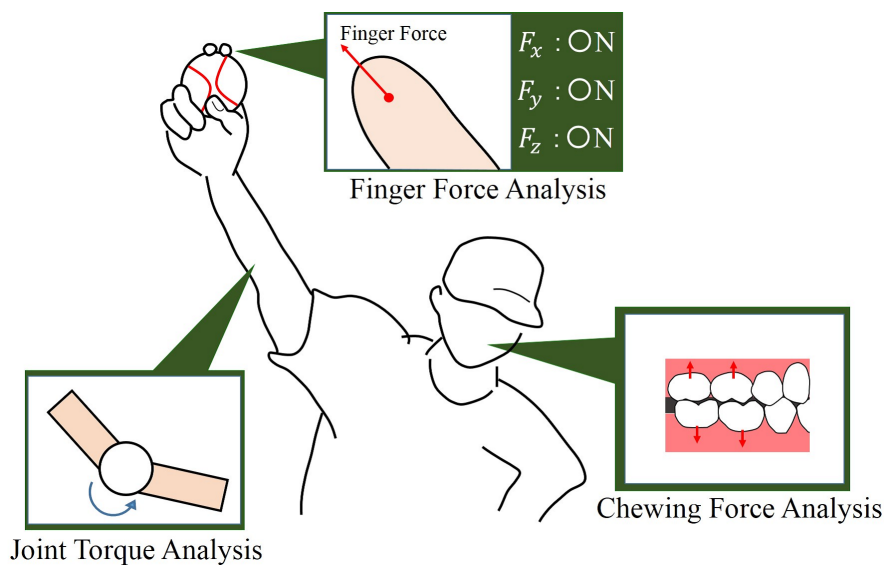


図 1.1: 様々な力解析 [13][14]

第2章 指の構造と力計測

本章では、人の手指の構造や機能と、指先接触力を計測する従来の手法について説明する。

2.1 指の構造と機能

本節では、人の手指の構造と機能について述べる。

2.1.1 指の構造

図 2.1 に指先の断面構造を示す。人の手指は、手の末端部にある突出部であり、通常片手に 5 本ある [15]。手指の先端部である指先は、骨格、皮下組織と皮膚、爪で構成される [16]。

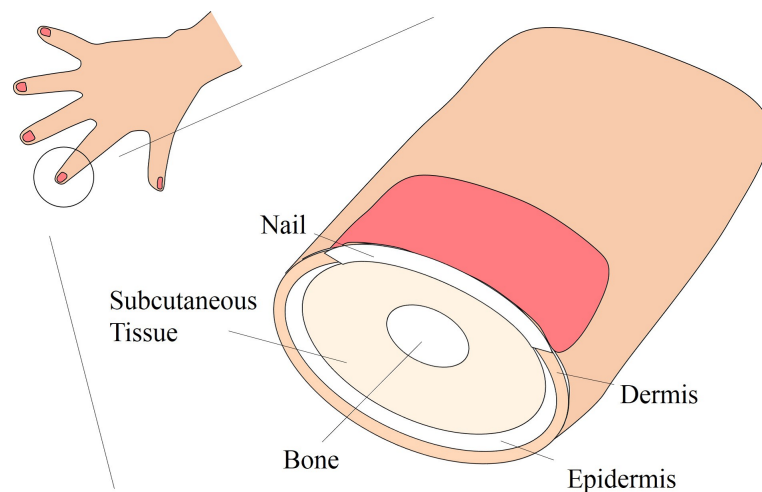


図 2.1: 指先の断面図

指の断面は楕円形状であり、骨を覆うように、皮下組織、真皮、表皮が層構造を形成する [17]。指先における真皮、表皮の厚みはそれぞれ約 0.75 mm、1.0 mm である [18]。指腹部における皮下組織と皮膚は多機能な触覚センサとしての役割を持ち、また柔軟であることから、作業状況に応じた接触摩擦力の調節や、物体表面上の微小構造の検出が可能となる。一方、爪は高い硬度を持つことから指先を保護する役割や、一点に集中して力を加える機能を併せ持つ [19][20]。

図 2.2 に指先の内部構造を示す。指先には、骨格、皮下組織と皮膚、爪以外に血管と毛細血管が存在し、複雑に配置されて爪下に血液を供給する [21]。指先に力を加えると、力が作用する部位が弾性的に変形し、その後変形により毛細血管が圧迫されて外力印加領域外へ血液が流出することで爪色に変化する [22]。毛細血管の変形により血液が流出する時間は数百 μs ～数十 s であるため、力を加えてから爪色に変化するまでには時間遅れが生じる [23]。また上下左右に剪断力を加えた際には、爪下の骨により圧迫される毛細血管の部位が異なるため、例えば図 2.3 に示すような赤から白への色変化が見られる [24]。爪色の変化と指先に加わる力とは密接な関係があり、剪断力の方向により色変化が異なるため、爪の局所的な色変化を捉えることは力の方向を推定する上では重要である。

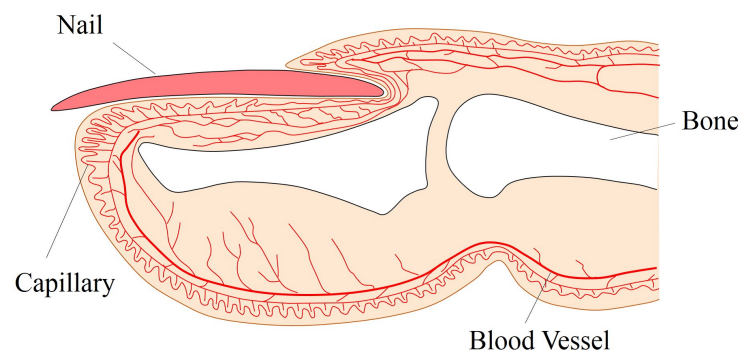


図 2.2: 指先の内部構造

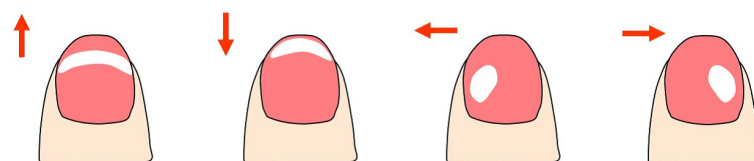


図 2.3: 各剪断力印加時の爪色変化

また指先は弾性体と見なすことができ、物体と接触する際は図 2.4 に示すように水平方向に伸張する [25]。伸張量は力に応じて大きくなるという関係がある [5]。

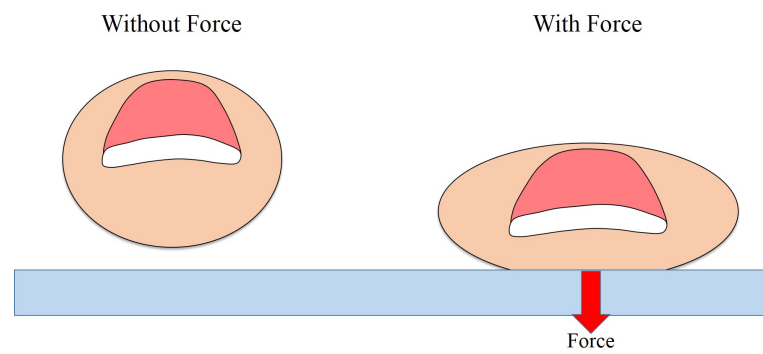


図 2.4: 指先の変形

2.1.2 指の動作

把握動作

手指の動作は、圧排動作と把握動作に分けられ、把握動作は図 2.5 に示すように、「かぎ型握り (Hook Grip)」、「掴み (Precision Grip)」、「握り (Power Grip)」、「つまみ (Pinch Grip)」の四通りに分類される [26]。

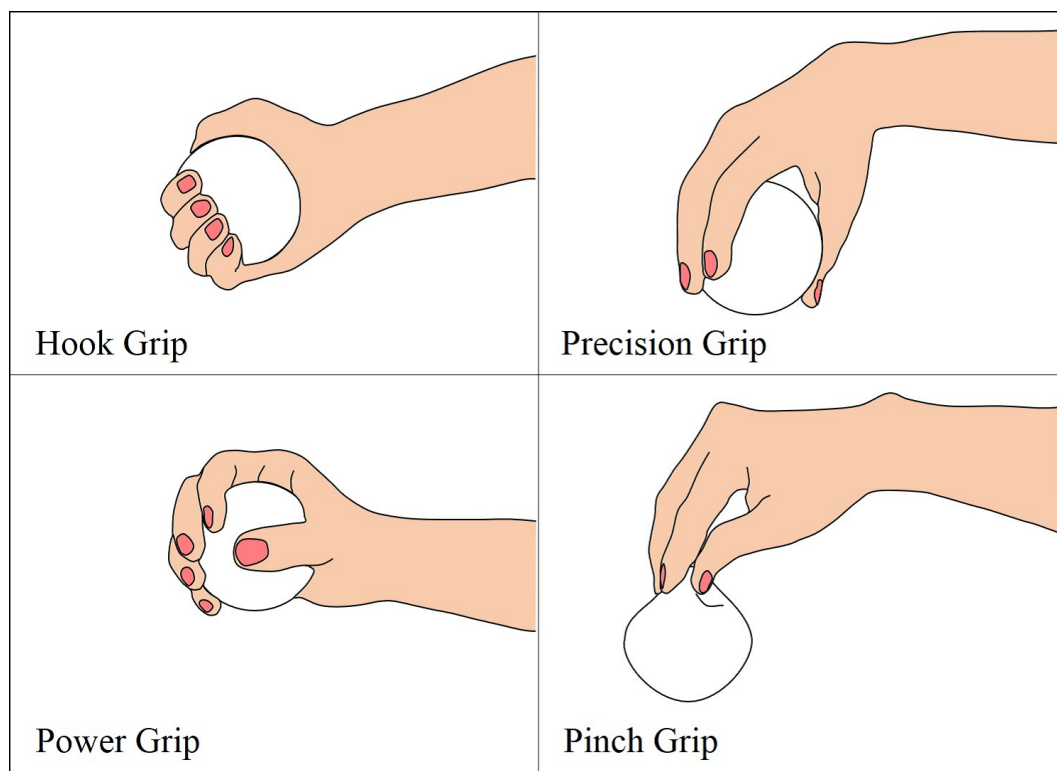


図 2.5: 手指の動作

図 2.5 の「かぎ型握り」は母指対立を行わない把握動作で猿の特徴的動作であり、「掴み」、「握り」、「つまみ」に見られる母指対立運動は人が物を握る上では欠かせない運動である [27][28]。また「掴み」、「握り」は強く頑丈な固定を得て、対象物を正確に把握する際の動作である。一方、「つまみ」は指腹部を利用した精巧な動作であり、精密な作業における道具操作時に多く見られる。

道具操作における指先運動

人は指腹部の精巧な動きを用いて、筆記用具や食器、スポーツ用品など様々な道具や用具の操作を行っている [29]。図 2.6 に、身近な道具や用具の例を示す。

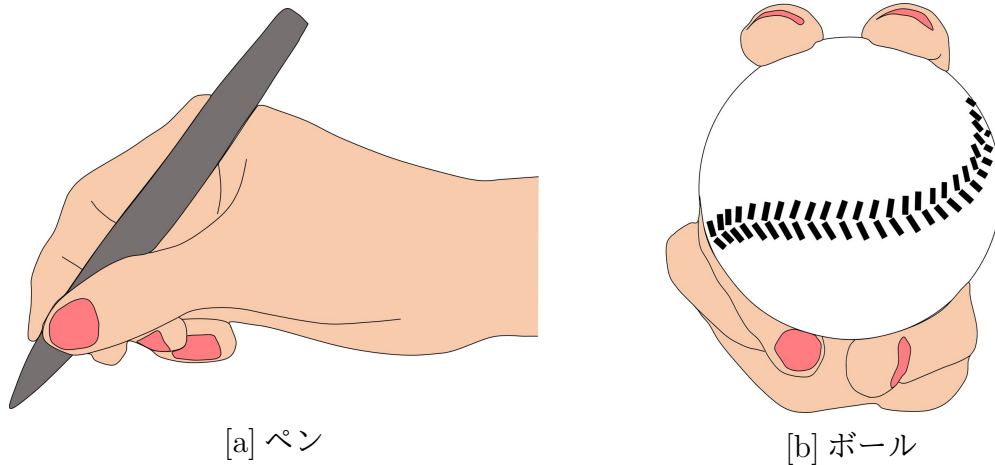


図 2.6: 身近な道具や用具操作の例

ペンは文字や図形を描くために使用する用具であり、ボールは球技や遊戯などに用いる用具である。両者とも、描画点や対象物の位置から、状況に応じた力で物体を把持しながら目標の位置まで移動させるという行為により使用され、正確に扱うためには指腹部における皮膚感覚や深部感覚が必要となる [30]。したがって、道具操作においては指腹部から得られた感覚を元に指先の運動制御を行っているため、指腹部と物体とは直接接触する必要がある [31]。また指腹部に加える力はベクトルであるため、道具操作における指先の運動を解析するには、指先接触力の大きさと方向を計測する必要がある。

2.2 指の力計測

指先と物体の間に生じる力学的現象は、スポーツ分野や医療分野で多く研究が行われている [32]。本節では、指先が物体と接触した際の、接触面に与える力、指先の変形、爪色の変化を用いた指先接触力の計測手法について述べる。

2.2.1 接触面に与える力を用いた計測

指先が対象物との接触面に対して与える力は、圧力センサや力触覚センサを用いて圧力や剪断力を取得することで計測可能となる。伊藤らは、ロボットハンドにおいて三軸触覚センサが必要不可欠であることから、図 2.7 に示すように歪ゲージを受感素子として用いた三軸触覚センサを開発した [33]。伊藤らの作製したセンサは構造が単純であるため、製作が容易であるという利点がある。

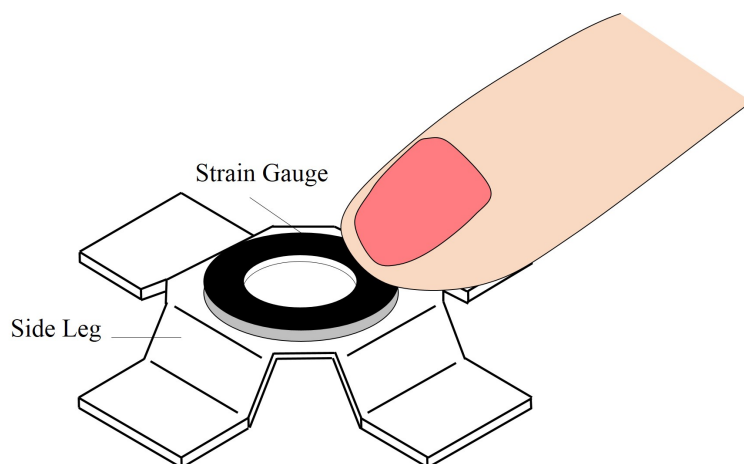


図 2.7: 三軸触覚センサ ([33] を改変)

また吉田らは、へら型内視鏡鉗子を切断して、両断端の間に伊藤らの開発した小型三軸触覚センサを取り付け、図 2.8 に示す先端の圧計測が可能な鉗子を作製した [34]。吉田らの作製した鉗子により、剥離中の鉗子先端に加わる作用力の計測が可能となり、剥離操作における技能分析が可能となった。

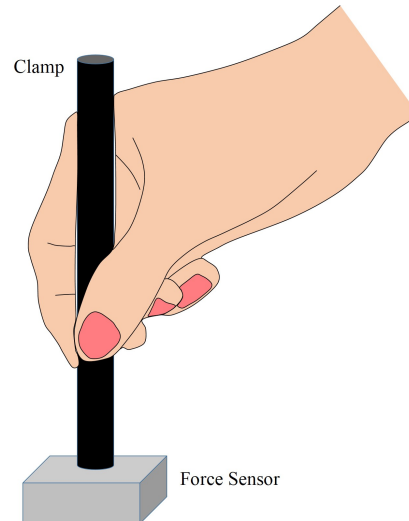


図 2.8: 圧計測が可能な鉗子 ([34] を改変)

大村らは、手や指の力を柔軟に計測するため、図 2.9 に示すようにフレキシブル基板 (Sensor sheets) を用いた手袋型の触覚センサを開発した [35]。大村らの開発した触覚センサには圧力センサ (Sensor elements) が手全体を覆うように組み込まれているため人の手の圧力分布の測定を容易に行うことが可能となったが、手全体をフレキシブル基板が覆うことから、皮膚感覚を損なうという問題がある。

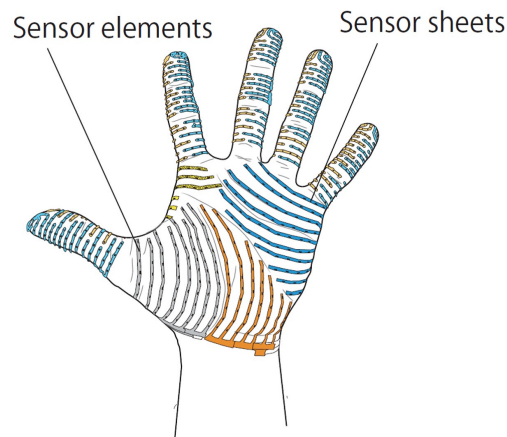


図 2.9: フレキシブル触覚センサ [35]

2.2.2 筋電位を用いた計測

指先を動作させる際、脳の活動状態を表す生体信号である筋電位が生じる。筋電位は表面電極により計測することが可能である。小川らは図 2.10 に示すように、腕に複数の表面電極を張り付けて筋電位から指先の力を推定した [36]。しかし力の方角による筋電位発生が分類が困難であることから、一軸方向の力しか推定できないという問題がある。

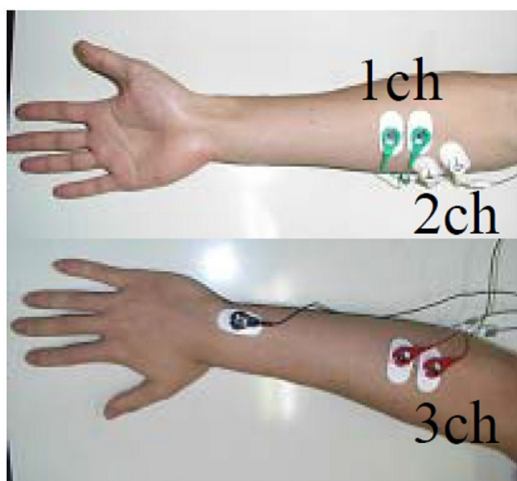


図 2.10: 筋電位を用いた力計測 [36]

また牧野らは図 2.11 に示すようにアームバンド型の柔軟なデバイスによる筋電計測を行い、指先に加わる負荷の推定を行った [37]。牧野らの研究は力の大きさを考慮した入力インタフェースとして用いることが可能である。

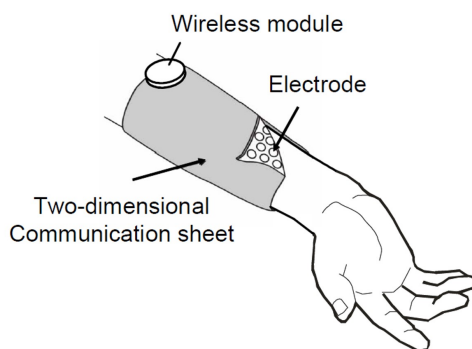


図 2.11: リストバンド型筋電計測デバイス [37]

2.2.3 指先の変形を用いた計測

指先の水平方向の変形量と加わる力に相関があることから、多田らは図 2.12 に示すように指腹部に点で模様を描画し、各点の移動距離をカメラにより計測することで指先変形の計測を行い、指先の力を推定するシステムを考案している [38]。

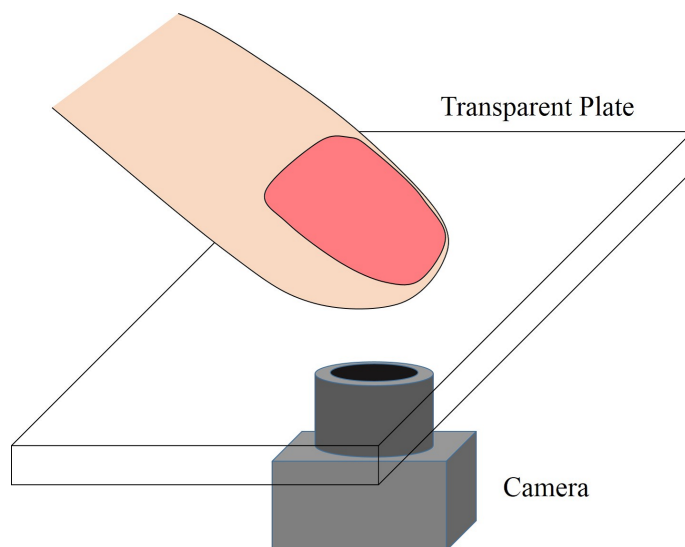


図 2.12: 指先変形の計測 ([38] を改変)

多田らの研究により、異なる外力および摩擦条件での把持動作計測が可能となった。しかし、指腹部に点による模様を描画していることから、指腹部の点を視認することの可能な透明な対象物以外では計測することができず、様々な道具を操作する際の力計測には適していない。

2.2.4 爪色の変化を用いた計測

小川らは、図 2.13 に示すように、カメラ視野内に存在する手指の画像から 1 本の指の指先領域の爪色を抽出することで、指先押下推定および押下方向推定を行っている [11]。しかし、カメラに常に手の甲を向けている必要があるため使用時に動きに制限が生じてしまい、道具操作における指先接触力の推定には適していない。

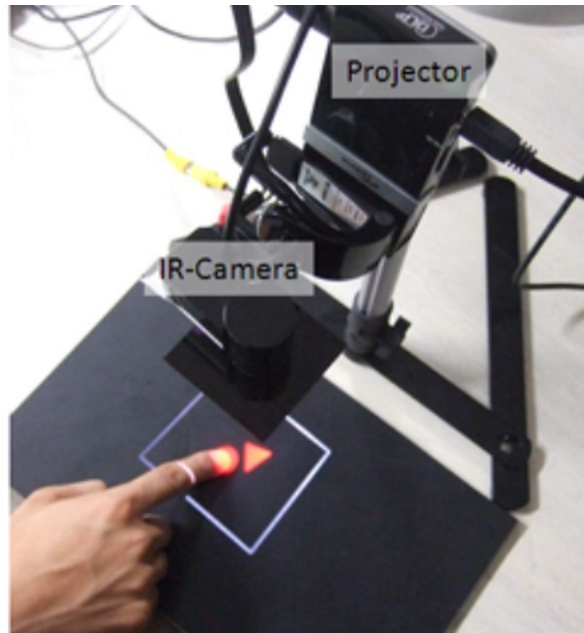


図 2.13: カメラによる爪色計測 [11]

また Mascaro ら [12] は、LED とフォトダイオードが組み込まれた爪センサを作製し、LED から近赤外光を爪内部に入射することで、フォトダイオードから得られる出力から血量を推定している。Mascaro らの作製したセンサは指腹部に何も装着せず計測することが可能なため、道具操作における指先感覚を損なうことなく力を推定することが可能である。しかし、生体に近赤外光を入射することにより体内で散乱した光をフォトダイオードが受光してしまうという問題がある。また Mascaro らはフォトダイオードの出力を用いて指先が対象に接触する直前の指姿勢を推定しているが、指先が接触した後の指姿勢の推定は行っていない。

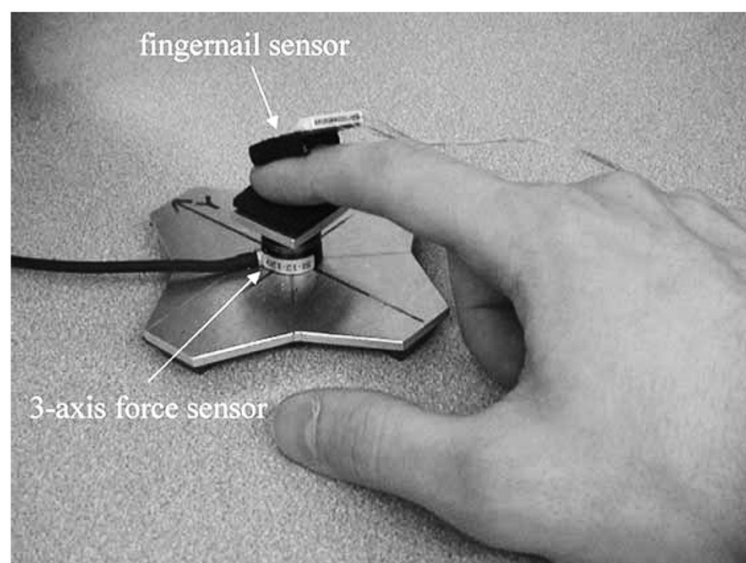


図 2.14: 爪センサ [12]

本研究では、指腹部と対象物の間に機器を装着しない指先接触力計測を目指すため、爪上に固定するデバイスにより指先接触力の推定を行う。作製するデバイスは導線により他の機器と接続されるが、本研究では十分長い導線を用いるため手は自由に動かすことが可能である。また本研究では体内で散乱した光をフォトダイオードが受光することを防ぐために、近赤外光よりも波長が短い可視光を用いて体内への入射を軽減し、爪表面の色を計測する。またデバイスに加速度センサを取り付けることで、指先が対象に接触している間でも指姿勢の推定が可能なシステムを構築する。

第3章 指先接触力の推定手法

本章では、提案システムの概要、爪色計測手法、指姿勢の推定手法、指先接触力の推定手法についての説明を行う。

3.1 提案システムの概要

本節では提案するシステムの概要について述べる。

3.1.1 指先接触力

指先と対象物が接触している際に力学的な作用により発生する対象物の接触面に加わる力を指先接触力と定義し、図 3.1 に示すように、 $+x$, $-x$ 方向に加わる指先接触力を右剪断力と左剪断力、 $+y$, $-y$ 方向に加わる指先接触力を前剪断力と後剪断力、 $-z$ 方向に加わる接触力を押下力と定義する。

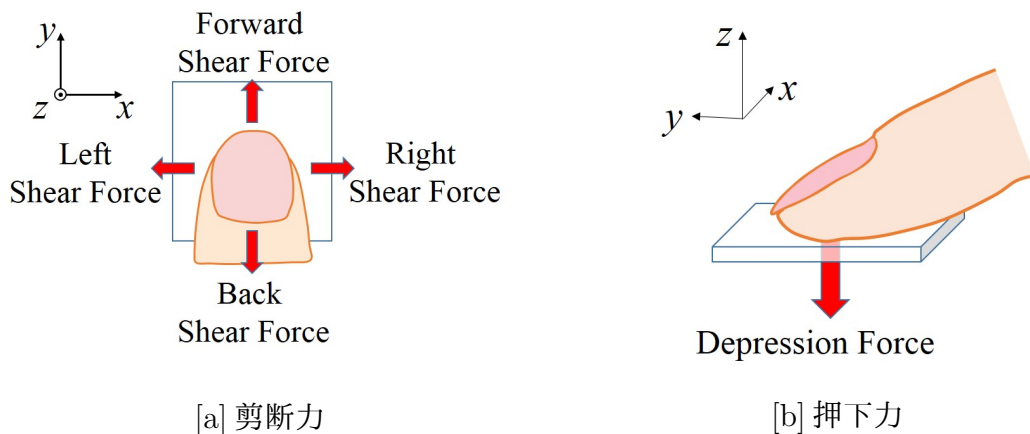


図 3.1: 剪断力と押下力

3.1.2 システム構成

2.1.1 節で述べたように、指先接触力と爪色には密接な関係があるため、爪色の分布を計測することで指先接触力の推定を行う。爪色は光を用いて計測し、得られた光量情報を入力として指先接触力とフォトダイオード出力の校正結果に基づいた推定を行い、最終的に指先接触力の各軸成分を出力することを目的とする。図 3.2 にシステム構成を示す。

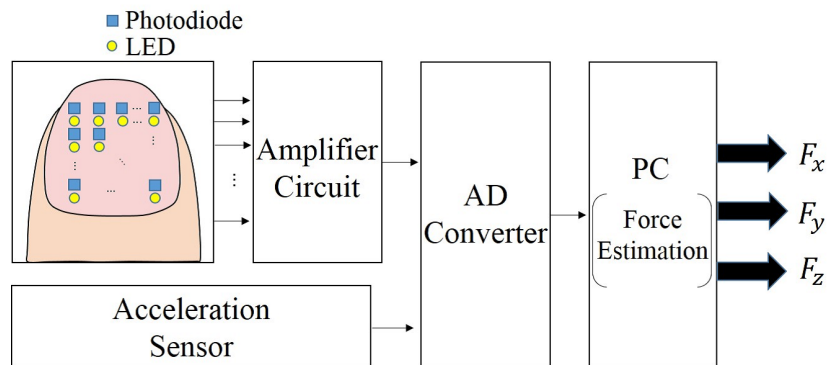


図 3.2: システム構成

図 3.2 に示すように、各フォトダイオードから得られた出力を増幅し、AD 変換を行った後に PC に値を取り込む。また指姿勢に依存する指先と対象物との接触部位により爪色変化が異なるため、加速度センサにより得られた出力を基に指姿勢を推定し、その姿勢に応じた推定式を用いて力の推定を行う。

3.2 爪色計測手法

本研究では、図 3.3 に示すように、LED とフォトダイオードが複数組み込まれたデバイスを用いて爪色の変化を検出する。

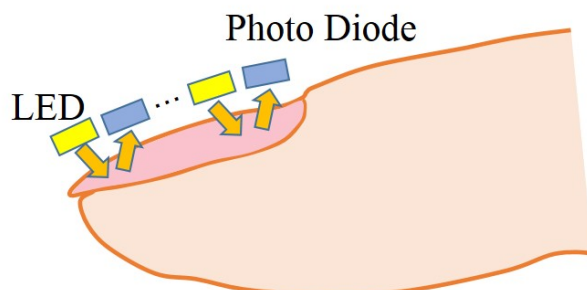


図 3.3: 爪色計測手法

指先に力を加えると、加えた力の強度に応じて爪色が赤色から白色まで変化し、赤色波長域以外の LED 光の反射光強度が大きくなるためフォトダイオードの出力が大きくなる。したがって、フォトダイオードにより反射光強度を計測し、その出力変化を爪色の変化として扱う。

3.2.1 デバイスの設計

本研究では表面実装用の基板を用いて図 3.4 に示す爪色計測デバイスを作製する。

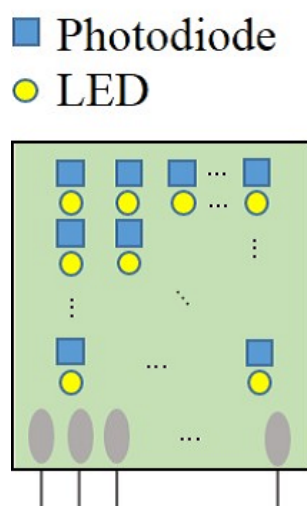


図 3.4: デバイスの構造

本デバイスは、色変化の見られる爪の複数点での色計測を目的とするため、複数のLEDとフォトダイオードを設置する。表面実装によりデバイスを作製するため、爪と接する側である裏面にLEDとフォトダイオードを設置し、表面にLED回路用の抵抗を設置する。また本デバイスは爪上に装着し、十分長い導線で電源やAD変換器と接続されることから、手を自由に動かすことが可能である。図3.5に、デバイスを装着した際の外観を示す。

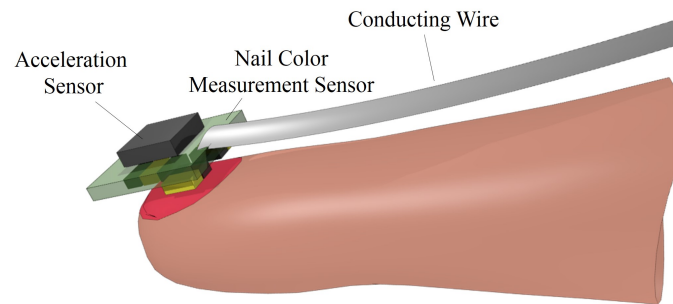


図 3.5: 装着した際の外観

3.2.2 回路構成

LED の駆動回路

LED の駆動回路を図 3.6 に示す。抵抗 R_1 は後段の回路を集約させるためにデバイスの基板上に設置する。

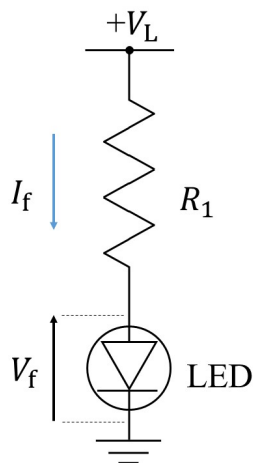


図 3.6: LED の駆動回路

直流電源により LED を光らせるためのエネルギーを供給し、電源と LED との間に直列に抵抗 R_1 を接続することで、無制限に電流が流れないようにする。 R_1 の値は、電源電圧を V_L 、LED の順方向電圧を V_f 、電流を I_f とすると以下の式になる [39]。

$$R_1 = \frac{V_L - V_f}{I_f} \quad (3.1)$$

フォトダイオードに流れる電流の読み出し回路

フォトダイオードに流れる電流の読み出し回路を図 3.7 に示す。

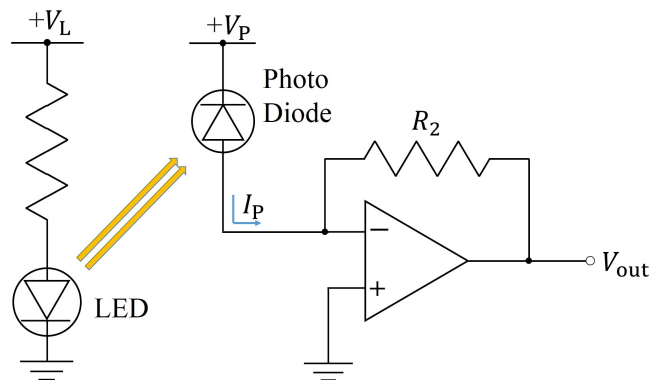


図 3.7: フォトダイオードに流れる電流の読み出し回路

フォトダイオードは光検出器として働き、 I - V 特性は図 3.8 で表される [40]。フォトダイオードの動作点は、オペアンプの反転入力端子が仮想短絡により $0V$ であるため、 I - V 特性の電圧が $-V_P$ である A 点となる。暗闇では通常の整流ダイオードと同じであるが、光が照射されると光の強度に従い I - V 特性を示す曲線が縦軸の負の方向へ平行移動し、動作点が A 点から B 点に移動するため電流が流れる。

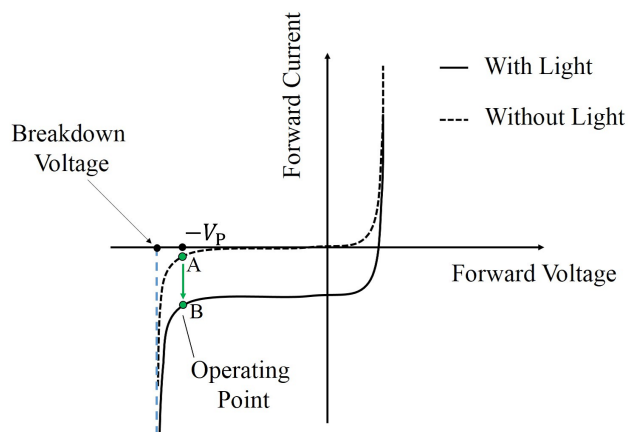


図 3.8: フォトダイオードの I - V 特性

フォトダイオードの受光電流は図 3.7 に示す回路を用いて電圧に変換する。抵抗 R_2 は信号を増幅する役割を持ち、出力電圧 V_{out} はフォトダイオードに流れる電流 I_P 、抵抗 R_2 を用いて、

$$V_{\text{out}} = -I_P R_2 \quad (3.2)$$

と表される。本回路は反転増幅となっているため、赤色以外の光を入射した際に爪色が力により赤から白に変化すると反射光強度が大きくなり出力が負の方向へ変化する。

フォトダイオード出力と力との関係は図 3.9 に示すように非線形であり、飽和領域を考慮して本研究では約 10 N までの力の推定を行うことを目指す。

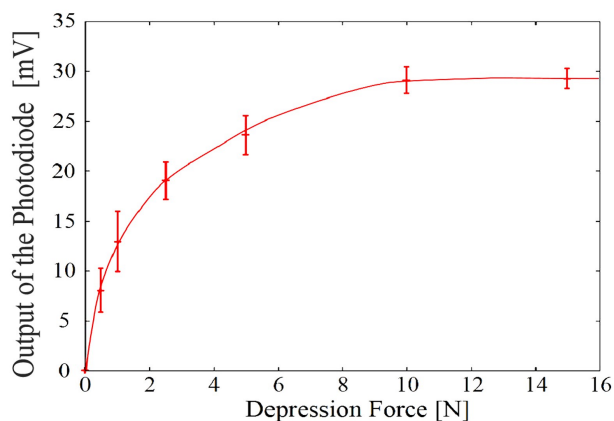


図 3.9: フォトダイオード出力と力の関係

3.3 指姿勢推定手法

本研究では、加速度センサを用いて指姿勢の推定を行う。

3.3.1 指姿勢

本研究では、指姿勢を図 3.10 に示すように、水平な対象物に対する爪の角度と定義する。

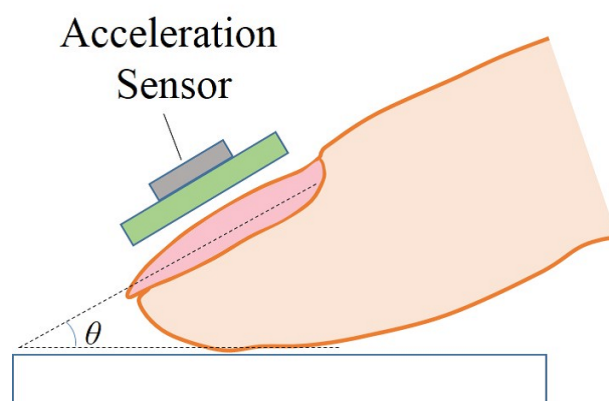


図 3.10: 指姿勢

指姿勢の推定には、内部にバネとおもりが搭載されており、おもりの位置の変化量から加わる加速度を検出することが可能である加速度センサを爪に対して平行に装着するデバイスに取り付け、センサから得られる加速度の重力成分を用いる。

3.3.2 重力加速度を用いた姿勢推定

本研究では、加速度センサにより得られる重力加速度の y' 軸成分から角度 θ を求める。加速度センサの傾きが θ の時、加速度センサの y' 軸方向には図 3.11 に示すように重力加速度 g の y' 成分 $g \sin \theta$ が加わる。

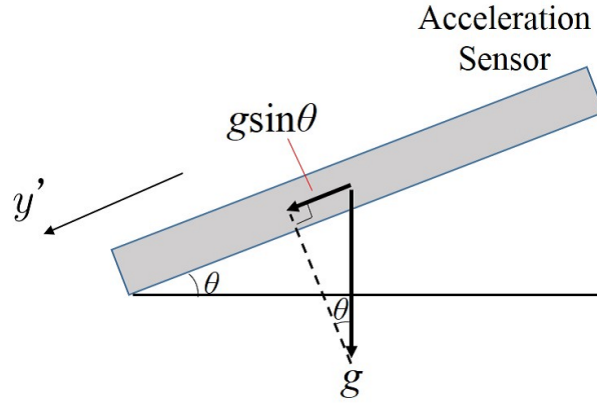


図 3.11: 加速度センサの使用法

その際、加速度センサの感度を C とすると、得られる出力電圧 V_a は以下の式で表される [41]。

$$V_a = Cg \sin \theta + V_b \quad (3.3)$$

感度は加速度センサに加わる加速度と出力電圧との比を表す値であり、単位は $V/(m/s^2)$ である。 V_b は $\theta=0 \text{ deg}$ の時の出力電圧とする。 $\theta=0 \text{ deg}$ 、 90 deg の時の出力電圧を測定し、それぞれの出力電圧から Cg と V_b を算出する。式 (3.3) を変形して得られる以下の式にそれぞれの値を代入することで θ を求める。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{V_a - V_b}{Cg} \right) \quad (0 \text{ deg} < \theta < 90 \text{ deg}) \quad (3.4)$$

3.4 指先接触力の推定手法

本節では、複数のフォトダイオードより得られる出力の時系列データから指先接触力を推定するための手法について述べる。

3.4.1 多項式回帰分析

本研究では、 N 個のフォトダイオードの出力を増幅した後にデジタル変換して得られる電圧 $V_1, \dots, V_N$ から指先接触力を推定するために、力の大きさ F を目的変数、フォトダイオードの出力を説明変数として扱う。フォトダイオード出力と力との関係には飽和領域が存在するため指数関数による近似が好まれるが、本研究では各説明変数がどの程度推定に寄与しているのかを容易に検証可能とするために多項式回帰分析を行う。多項式の次数は、必要以上に高くすると過学習に陥る可能性があるため、二次までとする。以下に F_x とフォトダイオード出力との関係式を示す。

$$F_x = a_{x0} + a_{x1}V_1 + \dots + a_{xN}V_N + a_{x(N+1)}V_1^2 + a_{x(N+2)}V_1V_2 + \dots + a_{xq}V_N^2 \quad (3.5)$$

$q+1$ が説明変数の個数で q は $N(N+3)/2$ と表され、提案手法では $N=4$ であるため $q=14$ であり、 F_x は以下の式で表される。

$$F_x = a_{x0} + a_{x1}V_1 + a_{x2}V_2 + a_{x3}V_3 + a_{x4}V_4 + a_{x5}V_1^2 + a_{x6}V_1V_2 + a_{x7}V_1V_3 \\ + a_{x8}V_1V_4 + a_{x9}V_2^2 + a_{x10}V_2V_3 + a_{x11}V_2V_4 + a_{x12}V_3^2 + a_{x13}V_3V_4 + a_{x14}V_4^2 \quad (3.6)$$

$\mathbf{V}$ を $[1, V_1, V_2, \dots, V_N, V_1^2, V_1V_2, \dots, V_1V_N, V_2^2, V_2V_3, \dots, V_4^2]$ の転置行列として F_x を三次元に拡張して行列表記すると以下の式となる。

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{x0} & a_{x1} & \dots & a_{x14} \\ a_{y0} & a_{y1} & \dots & a_{y14} \\ a_{z0} & a_{z1} & \dots & a_{z14} \end{pmatrix} \mathbf{V} \quad (3.7)$$

推定の際には式の右辺の行列の要素で表される各回帰係数を決定する必要がある。

重回帰分析

複数の変数からなるデータにおいて、特定の一変数を他の変数で説明する手法を回帰分析といい、他の変数が複数個ある場合を重回帰分析という。本節では、一個の目的変数 F_x と十五個の説明変数 $1, V_1, V_2, \dots, V_4^2$ との関係を求めるために、目的変数

と説明変数が n 個の時系列データを持つ場合、つまり目的変数が F_{xi} ($i = 1, \dots, n$)、説明変数が $V_{1i}, V_{2i}, \dots, V_{4i}^2$ ($i = 1, \dots, n$) で表される場合を考える。複数の変数間の関係进行分析するために、分析対象となる目的変数と各説明変数を結び付ける、

$$F_{xi} = a_{x0} + a_{x1}V_{1i} + a_{x2}V_{2i} + \dots + a_{x14}V_{4i}^2 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3.8)$$

という重回帰方程式と呼ばれる線形な数式モデルを設定する。 $a_{x0}, a_{x1}, \dots, a_{x14}$ は回帰係数と呼ばれる定数である [42]。

また目的変数の実測値を $\hat{F}_{xi}$ 、回帰方程式による予測値を F_{xi} 、残差 e_{xi} とすると、 i 番目のデータにおける実測値、予測値、残差の関係式は以下の式で表される。

$$e_{xi} = \hat{F}_{xi} - F_{xi} = \hat{F}_{xi} - (a_{x0} + a_{x1}V_{1i} + a_{x2}V_{2i} + \dots + a_{x14}V_{4i}^2) \quad (3.9)$$

回帰方程式に含まれるパラメータの決定は、残差の総量を最小化する方法や残差の二乗の総量を最小にする方法が考えられるが、前者では残差が正と負となり相殺する可能性があるため、後者の最小二乗法を用いて以下の式に示す総量 Q を最小にすることで行う [43]。

$$Q = \sum_{i=1}^n e_{xi}^2 = \sum_{i=1}^n \{\hat{F}_{xi} - (a_{x0} + a_{x1}V_{1i} + a_{x2}V_{2i} + \dots + a_{x14}V_{4i}^2)\}^2 \quad (3.10)$$

次に、以下の式のように Q を $a_{x0}, b_{x1}, \dots, b_{x14}$ で順次偏微分して 0 とした連立方程式を解く。

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_{x0}} = -2 \sum_{i=1}^n \{\hat{F}_{xi} - (a_{x0} + a_{x1}V_{1i} + a_{x2}V_{2i} + \dots + a_{x14}V_{4i}^2)\} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_{x1}} = -2 \sum_{i=1}^n V_{1i} \{\hat{F}_{xi} - (a_{x0} + a_{x1}V_{1i} + a_{x2}V_{2i} + \dots + a_{x14}V_{4i}^2)\} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial Q}{\partial a_{x14}} = -2 \sum_{i=1}^n V_{4i}^2 \{\hat{F}_{xi} - (a_{x0} + a_{x1}V_{1i} + a_{x2}V_{2i} + \dots + a_{x14}V_{4i}^2)\} = 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

これらの連立方程式により回帰係数が求まり、 F_y と F_z についても同様に考えることができる。

また重回帰分析の回帰方程式の精度を表す指標として決定係数 K があり、以下の

式で表される。

$$K = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{F}_{xi} - F_{xi})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{F}_{xi} - \overline{\hat{F}_{xi}})^2} \quad (3.12)$$

決定係数は残差の二乗和を実測値の分散で割ったものを1から引いた値であり、1に近いほど相対的な残差が少なく回帰方程式の精度が高いことを示す。

本研究では指先接触力の推定を行う際に、推定式の各回帰係数を決定するために指先接触力とフォトダイオード出力との較正を事前に行う。

3.4.2 被験者毎の較正方法

本研究では、爪色から指先接触力の方向と大きさを推定するために、図 3.12 に示すように作製したデバイスと三軸力覚センサを用いて指先接触力と各フォトダイオードの出力との較正を行う。被験者により力の加え方が異なると考えられるため、較正は被験者毎に行う。

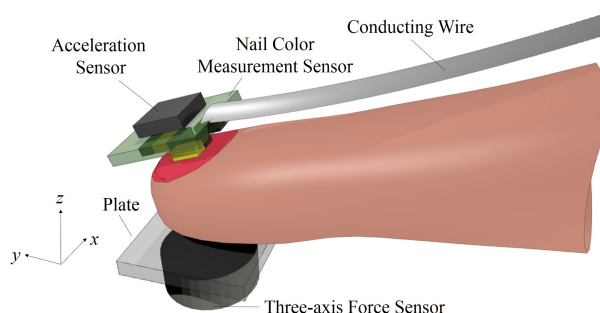


図 3.12: 較正方法

作製したデバイスと三軸力覚センサを用いることで、デバイスによる各フォトダイオードの出力と、センサによる指先接触力 (F_x, F_y, F_z) が同時に計測できるため、上記の手法により爪色を変化させた際のフォトダイオードの出力と指先接触力との関係を求めることができる。また三軸力覚センサには板を取り付けて力を作用させる部分を平面とし、実験を行う際には部屋を暗くして環境光による影響を軽減させる。

指先接触力とフォトダイオード出力との較正では剪断力と各フォトダイオードの出力との関係を得るために、力覚センサに指先を接触させて剪断力を前 (+y)、左 (-x)、後 (-y)、右 (+x) の順に加えた際の時系列データを用いてフォトダイオードの出力を取得する。本手法により得られた被験者毎の指先接触力と各フォトダイオード出力の関係により、多項式回帰分析の各係数を決定し、指先接触力の推定を行う。また上記の較正を指姿勢の角度毎に行い、角度に応じた推定式を算出する。

第4章 指先接触力の推定

本章では作製したデバイスの概要、色計測実験結果、較正結果、指姿勢毎の推定精度の検証結果、指姿勢変化時の指先接触力の推定結果、評価実験結果について述べる。

4.1 作製したデバイスの概要

本研究では、Cadsoft Computer 社のプリント基板 CAD ソフトである EAGLE を使用して、計測部位にフォトダイオードが設置されるように爪上に固定する爪色計測デバイスを設計した。作製したデバイスの配線図を図 4.1 に示す。

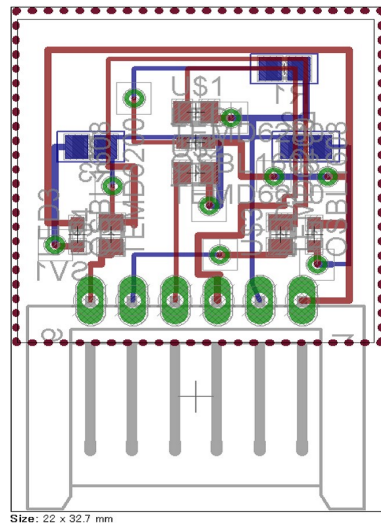


図 4.1: 配線図

爪色は無負荷の状態では全面が薄い赤色であり力を加えると最も圧迫される部位が一番白く変化する。 xy 平面において任意の力ベクトルを表現できるようにするために、図 4.2 に示す前後左右の剪断力を加えた際の爪色画像を取得し、各方向において色変化が見られた四ヶ所を計測部位と決定した。図中の黒色の楕円は色変化が確認された部位、数字は力の大きさ (N) を示す。

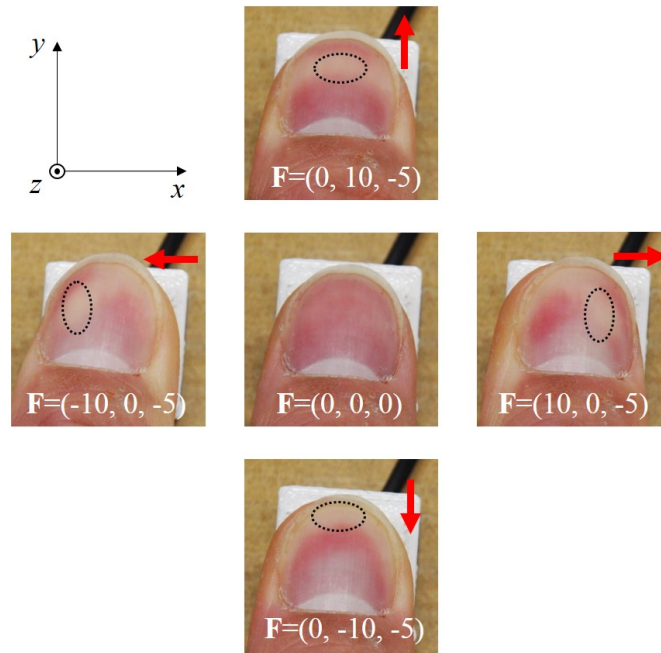


図 4.2: 爪色分布の変化

また図 4.3 に、例として異なる姿勢において左剪断力を加えた際の爪色画像を示す。下図により姿勢により爪色変化が異なることが確認された。

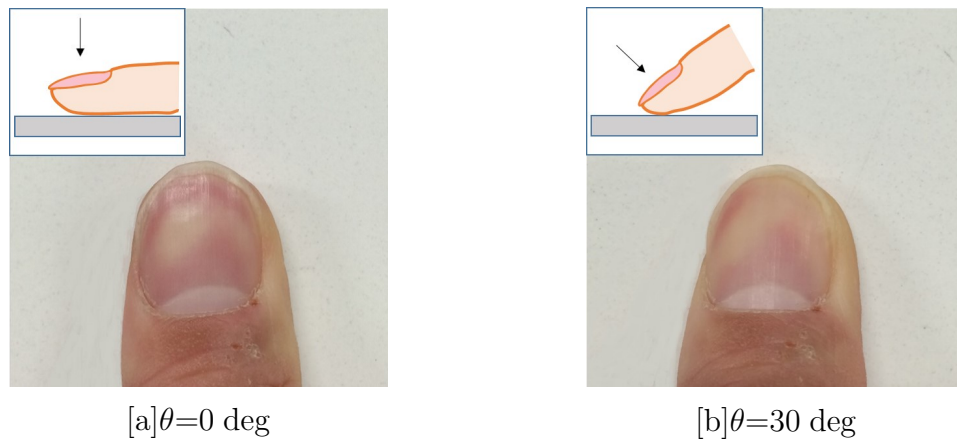


図 4.3: 姿勢により異なる爪色変化

設計した基板に表面実装用のLED、フォトダイオード、抵抗を取り付けたデバイスの外観を図 4.4 に示す。

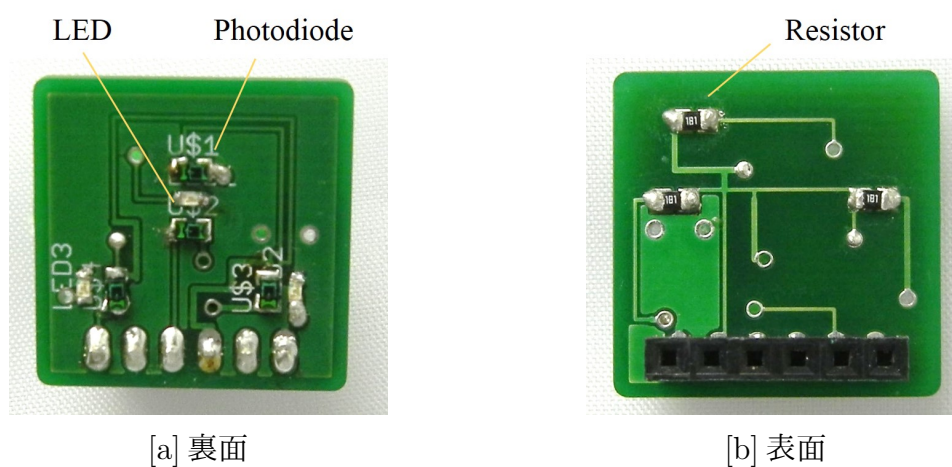


図 4.4: デバイスの外観

また図 4.2 で決定した計測部位四ヶ所をそれぞれに対応するように四個のフォトダイオードを設置した。各フォトダイオードの名称はそれぞれ P_1 , P_2 , P_3 , P_4 とする。

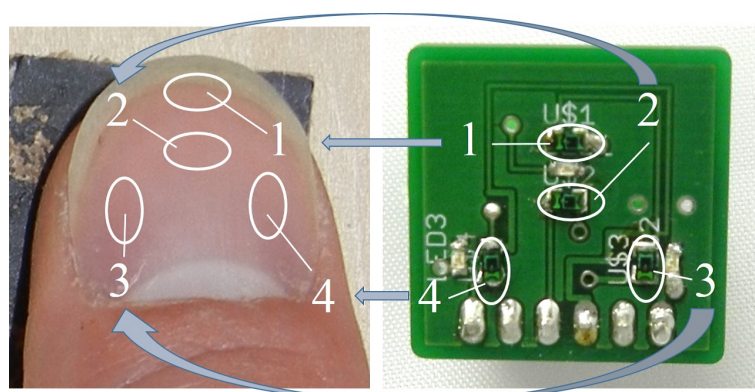
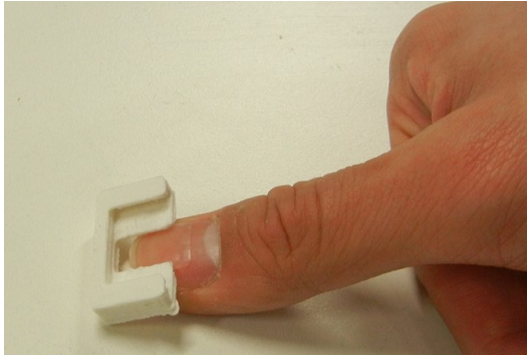
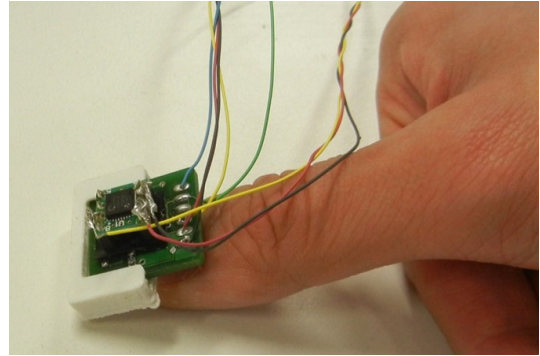


図 4.5: 計測部位と対応するフォトダイオード

デバイスは、図 4.6 に示すデバイスを爪上に固定するための装置を爪に両面テープで貼り付け、固定装置に取り付けることで固定する。固定装置は 3D プリンタを用いて作製した。



[a] 装着前



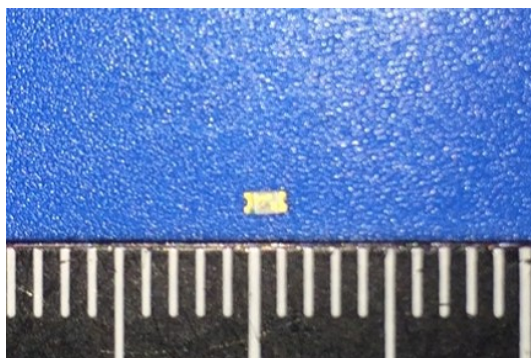
[b] 装着後

図 4.6: デバイスの固定

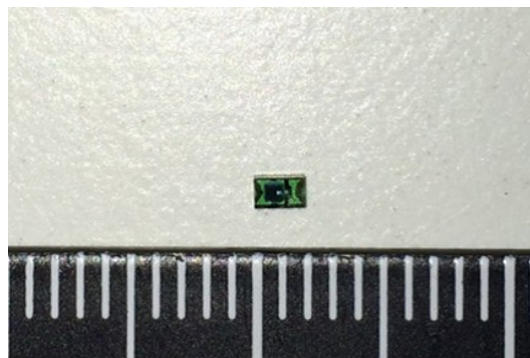
固定装置は爪に直接付着しているため、指先動作時に爪とデバイスの相対的な位置関係を維持することが可能である。

使用した素子、センサ

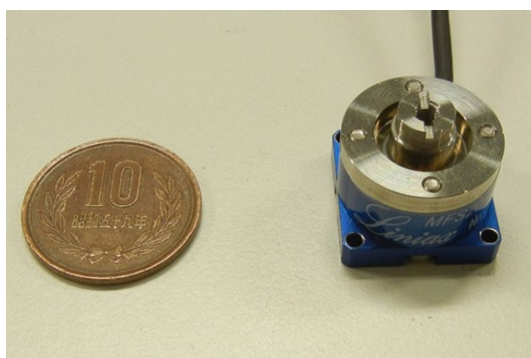
作製したデバイスや実験に用いた LED、フォトダイオード、三軸力覚センサ、加速度センサの外観を図 4.7 に示す。



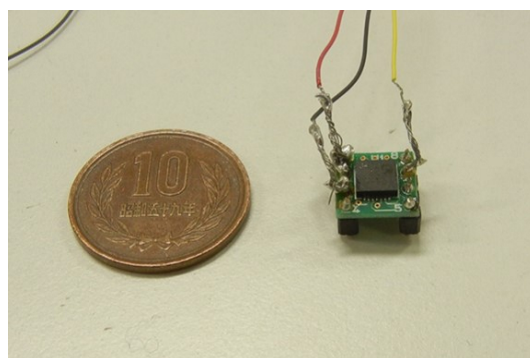
[a] チップ型 LED (OSBL1608C1A)



[b] チップ型フォトダイオード
(TEMD6200FX01)



[c] 三軸力覚センサ (MFS20-025)



[d] 加速度センサ (KXR94-2050)

図 4.7: 使用した素子、センサ

LED、フォトダイオードの外形寸法はそれぞれ $1.6\text{ mm} \times 0.8\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$ 、 $2.0\text{ mm} \times 1.25\text{ mm} \times 0.85\text{ mm}$ である。LED が発する光の波長は爪の赤色から白色への変化において大きな反射光強度の差が確認された青色波長域の約 470 nm とし、フォトダイオードのピーク感度波長は約 540 nm で青色波長域の光を計測可能なものとした。LED とフォトダイオードの指向性を示す感度が 50% となる指向角半値幅は共に 60 deg である。力覚センサは二軸のモーメントと一軸方向の力を測定することができ、測定可能な最大値は M_x 、 M_y が $250\text{ N} \cdot \text{mm}$ 、 F_z が 50 N である。加速度センサは計測可能軸数が三軸で、感度は $1\text{ V}/(\text{m}/\text{s}^2)$ である。

LED、フォトダイオードの指向角と、力覚センサの出力特性を図 4.8 に示す。

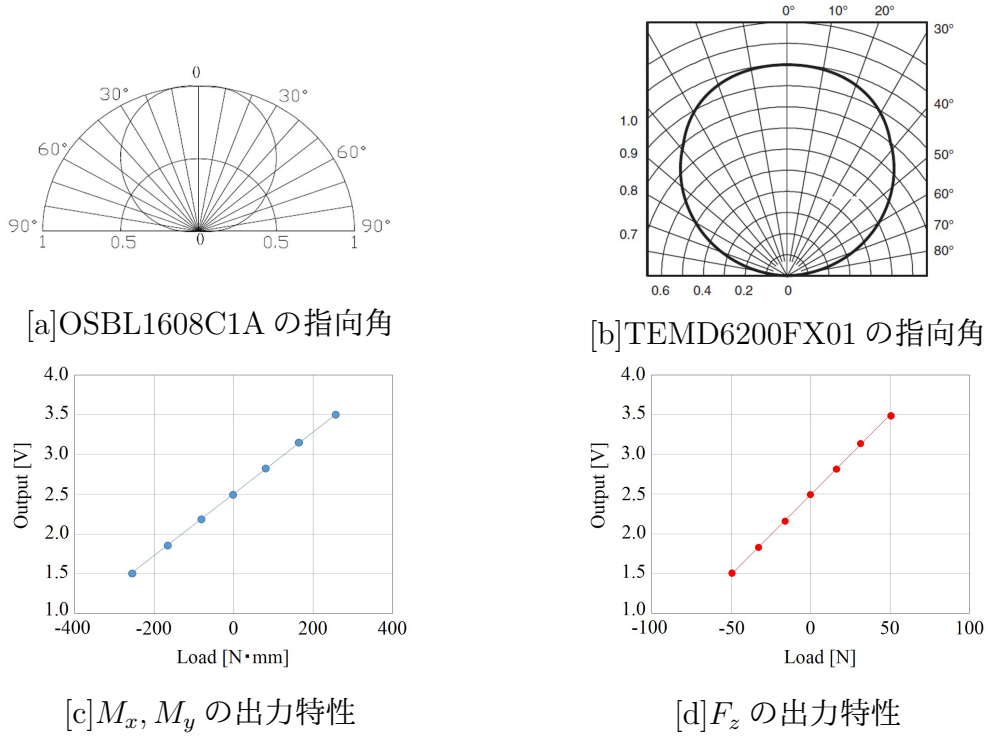


図 4.8: 使用素子、センサの各特性

また使用した抵抗の詳細を表 4.1 に示す。

表 4.1: 使用した抵抗

素子名	記号	値	単位
LED 回路の抵抗	R_1	180	Ω
フォトダイオード回路の抵抗	R_2	1	M Ω

R_1 は LED の駆動回路に用いた抵抗であり、本研究で用いる LED の上限電流が 60 mA であるため、50 mA 程度を流すことを目的とし、電源電圧 12 V、順方向電圧 3.5 V、順方向電流 50 mA を式 (3.1) に代入することで値を決定した。 R_2 は、フォトダイオードの読み出し回路に用いた抵抗であり、フォトダイオードの出力を十分認識が可能となる値に設定した。また本研究のアナログ回路で増幅された信号は PCI-3523A(インターフェース社) を用いてサンプリング周波数 1 kHz、量子化数 12 bit で離散信号に変換した。本研究で行う指の動作は約 3 秒で一周期の運動をするためサンプリング周波数 1 kHz は十分であり、フォトダイオードの出力変化は 0.2 V 程度であるため量子化数 12 bit は十分であると考えられる。

4.2 色計測実験

作製したデバイスにより対象物の色の違いを計測可能であることを確認するため、図 4.9 に示す大日本インキ化学社製の CMYK カラーチャートを用いて反射光強度を計測する実験を行った。CMYK とは色の表現法の一つであり、シアン、マゼンタ、イエロー、ブラックの四成分の割合によって色を表現しており、カラーチャートには上記四色の割合を様々な組み合わせた色が掲載されている [44]。図 4.10 に CMYK 表現法で用いられる四つの色を示す。



図 4.9: 使用したカラーチャート

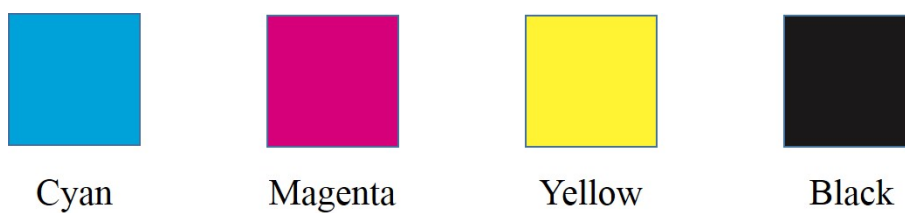


図 4.10: CMYK 表現法で用いられる色

計測対象は図 4.10 から最も爪色に近いと考えられるマゼンタとし、シアン、イエロー、ブラックの成分は含まないマゼンタの割合が 0～100 % まで、20 % ずつ変化する赤色から白色への変化を模した六通りの色で計測を行った。図 4.11 と図 4.12 に、実験の様子と計測対象を示す。デバイスをカラーチャートの上に置いてデバイスを駆動させ、図中の矢印の方向に移動させることで六つの対象の計測を行う。

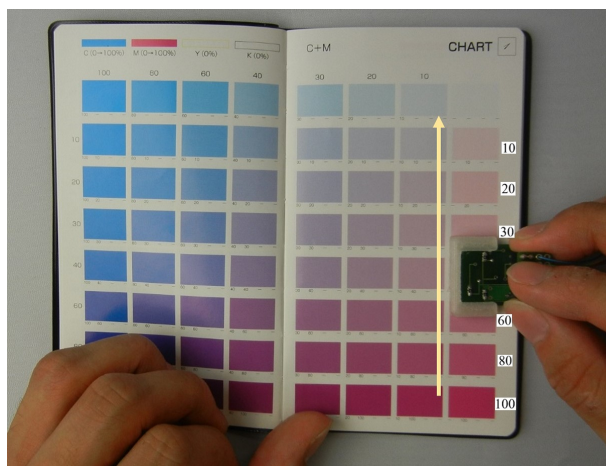
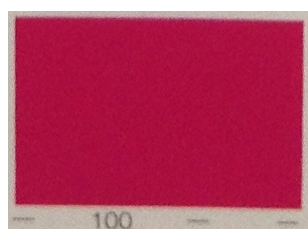
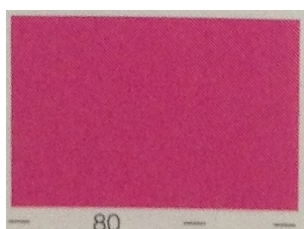


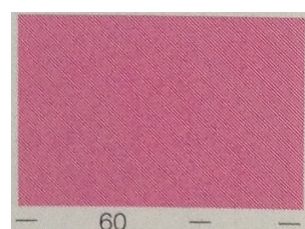
図 4.11: 色計測実験の様子



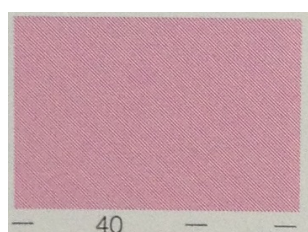
[a]100%



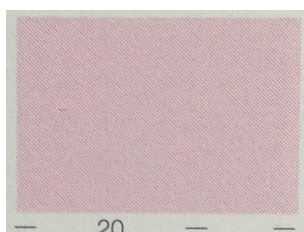
[b]80%



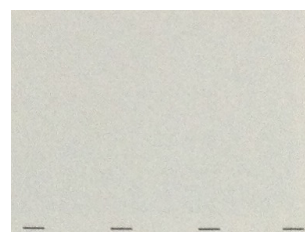
[c]60%



[d]40%



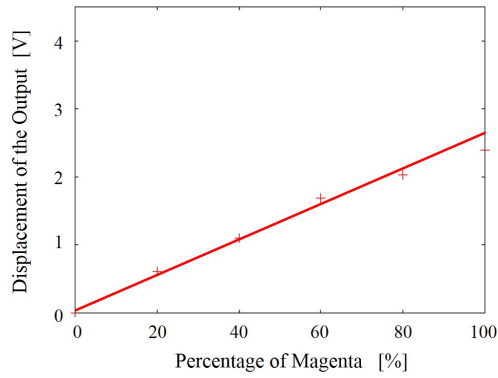
[e]20%



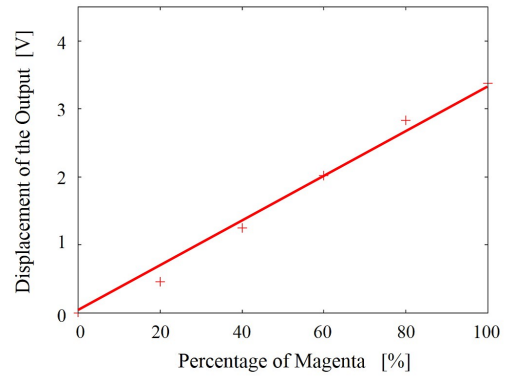
[f]0%

図 4.12: 計測対象

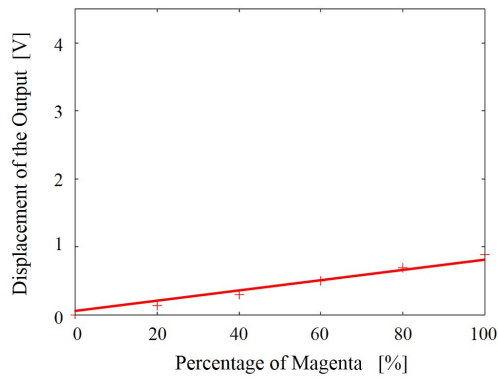
対象物の色によりフォトダイオードの出力が異なることを確認するために、色計測実験により得られたマゼンタの割合と各フォトダイオードの出力との関係を図 4.13 に示す。図 4.13 の縦軸はマゼンタが 0 % の時の出力との差を示す。



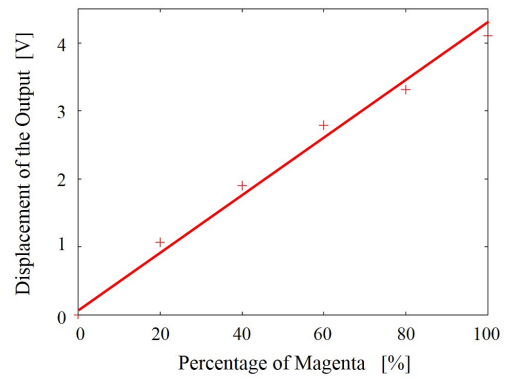
[a] P_1 の出力変化



[b] P_2 の出力変化



[c] P_3 の出力変化



[d] P_4 の出力変化

図 4.13: 各フォトダイオードの出力変化

図 4.13 より、マゼンタの割合に応じて各フォトダイオードの出力が増加していることがわかる。フォトダイオードの個体差からそれぞれ出力変化の絶対量は異なるが、本研究で作製したデバイスを用いることで、赤から白への色変化を計測可能であることが確認された。

4.3 指先接触力とフォトダイオード出力との校正

本節では、作製したデバイスと三軸力覚センサを用いた指先接触力の方向と各フォトダイオードの出力の対応関係の調査実験と、その結果について述べる。

4.3.1 実験内容

本実験では、被験者毎に前後左右の剪断力を加えた際の各フォトダイオード出力の計測を行う。まず、部屋を暗くして環境光による影響を軽減させ、作製したデバイスを爪上に固定し、三軸力覚センサの上に指を乗せて図 4.14 に示すように指先でセンサに対して約 10 N の剪断力を前、左、後、右の順に加える。この一連の動作を 0 deg, 5 deg, 10 deg, 15 deg, 20 deg, 25 deg, 30 deg の各指姿勢毎に行い、各フォトダイオードの出力を時系列データとして取得する。

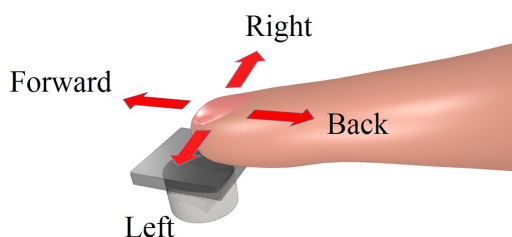


図 4.14: 力の加え方

本研究の実験の様子を図 4.15 に示す。

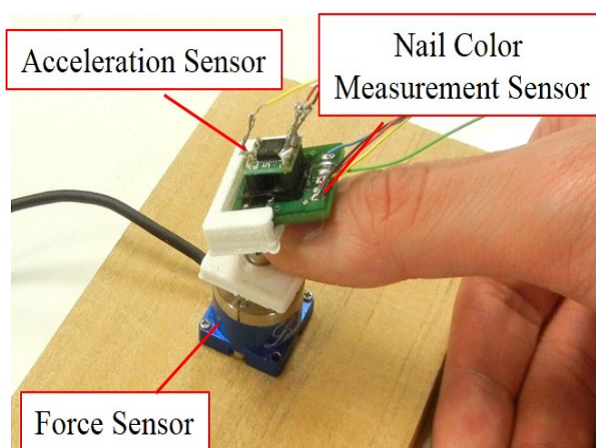


図 4.15: 実験の様子

また本研究において使用した機器を表 4.2 に示す。

表 4.2: 使用した機器

機器名	型番
電源	TEXIO PW18-3AD
オシロスコープ	IWATSU DS-5106
A/D 変換器	PCI-3523A

指姿勢の固定方法

指先で力を加える際には姿勢のずれが生じるため、指姿勢を固定するために 3D プリンタで角度が 5 deg, 10 deg, 15 deg, 20 deg, 25 deg, 30 deg となる三角柱の固定台を作製した。図 4.16, 4.17 に作製した固定台の外観を示す。

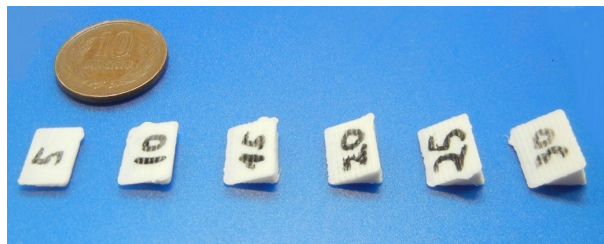


図 4.16: 各固定台の外観



[a] 固定台装着の様子



[b] 指を固定台に乗せた様子

図 4.17: 固定台の使用方法

0 deg 以外の指姿勢で実験を行う際には、力覚センサの板に固定台を取り付けることで指姿勢を固定することが可能である。各固定台を使用した際に加速度センサの出力から推定した指姿勢の推移を図 4.18 に示す。

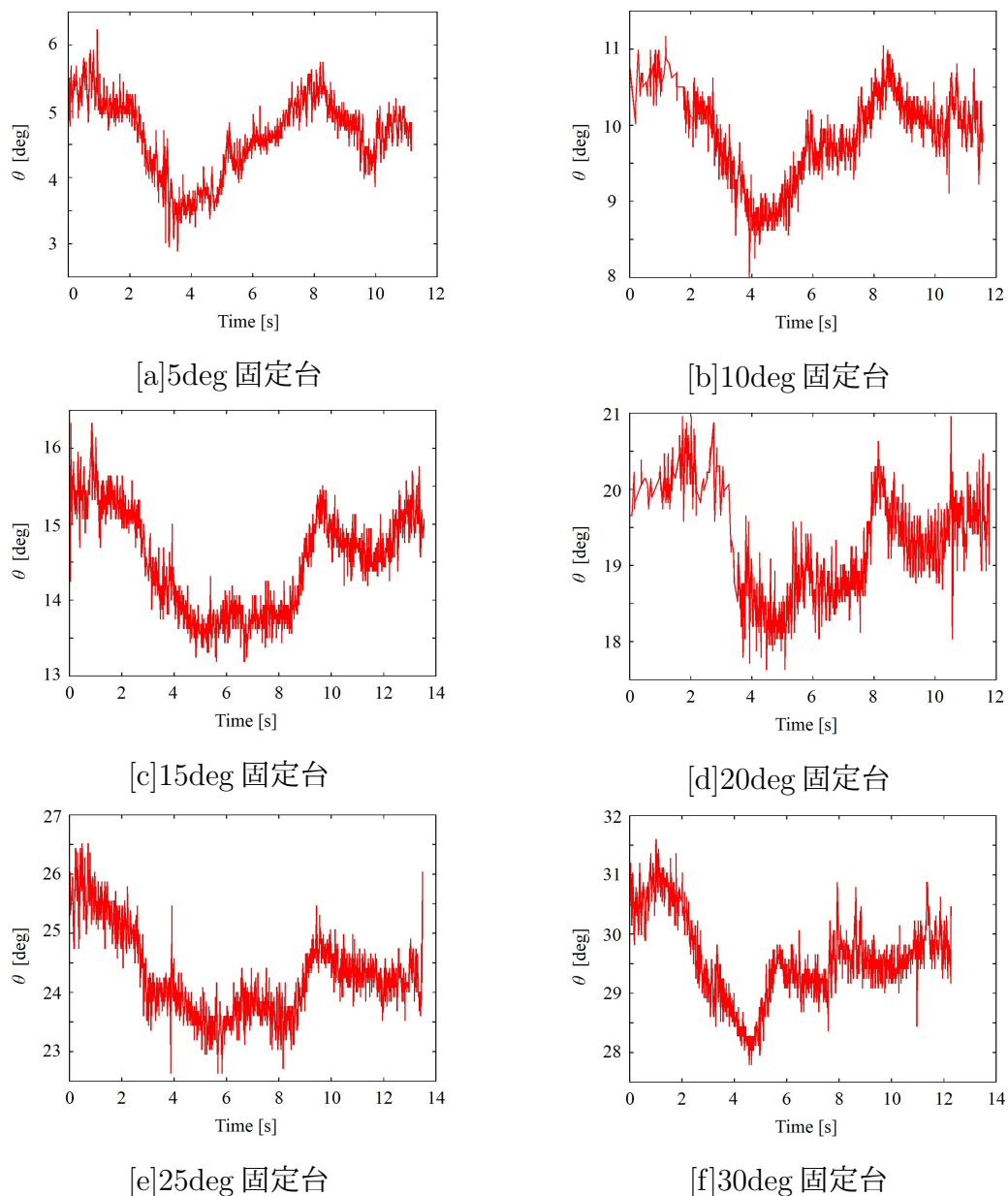
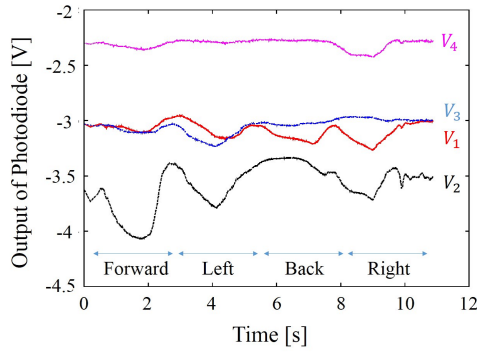


図 4.18: 各固定台使用時の指姿勢の推移

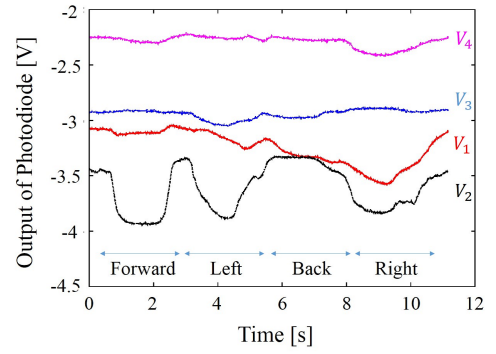
各固定台使用時の指姿勢は目的の角度に対して最大誤差が 2.5 deg 以下となった。各指姿勢の間隔は 5 deg であるため、作製した固定台によって指姿勢が重複することなく使用可能であると考えられる。

4.3.2 較正に用いた時系列データ

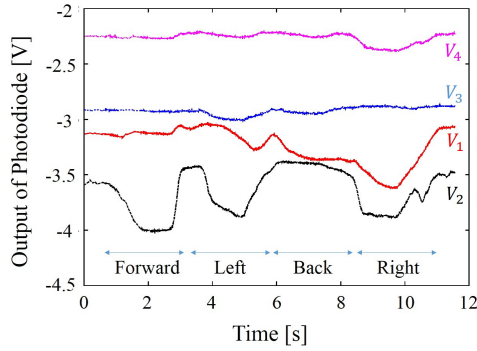
各固定台使用時の、一人の被験者における指先接触力とフォトダイオード出力との較正により得られた各フォトダイオードの出力を図 4.19 に示す。いずれも赤色が P_1 の出力 V_1 、黒色が P_2 の出力 V_2 、青色が P_3 の出力 V_3 、紫色が P_4 の出力 V_4 を表す。



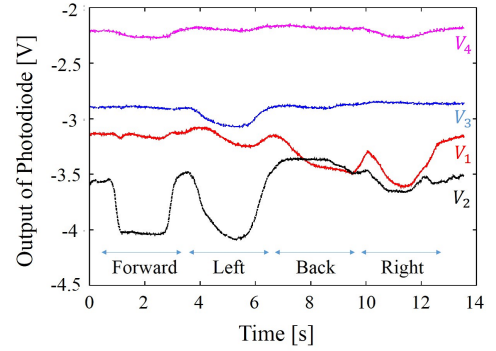
[a] 固定台未使用時の出力



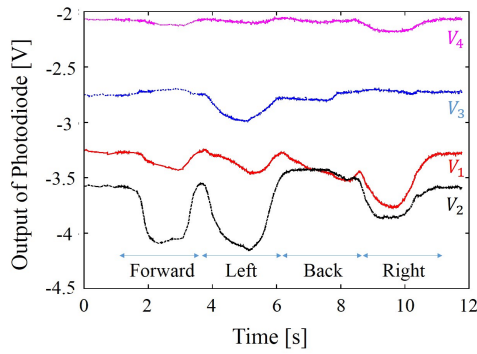
[b] 5 deg 固定台使用時の出力



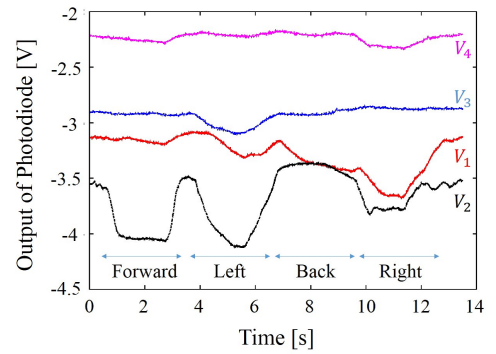
[c] 10 deg 固定台使用時の出力



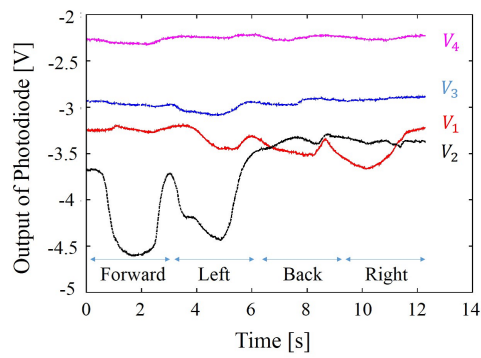
[d] 15 deg 固定台使用時の出力



[e] 20 deg 固定台使用時の出力



[f] 25 deg 固定台使用時の出力



[g]30 deg 固定台使用時の出力

図 4.19: 各指姿勢における出力

また図 4.20 に、0 秒 (無負荷状態) でのフォトダイオード出力と約 1.5 秒 (前剪断力最大時)、約 4 秒 (左剪断力最大時)、約 6.5 秒 (後剪断力最大時)、約 9 秒 (右剪断力最大時) でのフォトダイオード出力との差を各姿勢毎に算出した結果を示す。

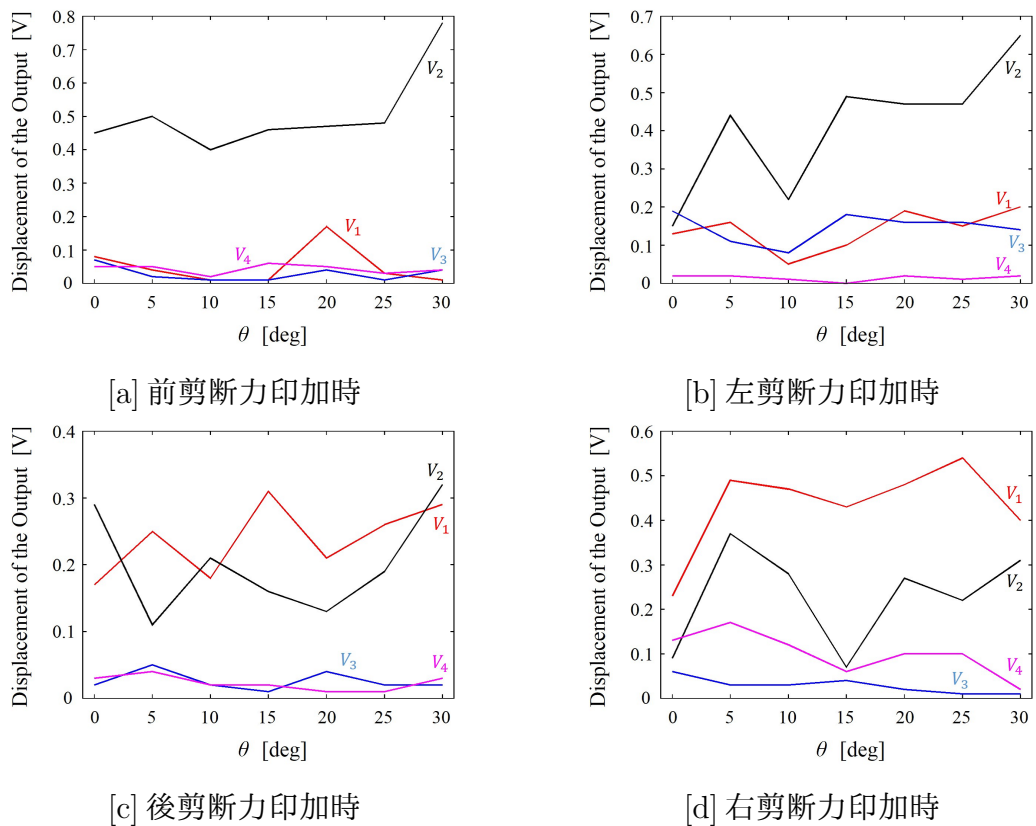


図 4.20: 姿勢による出力の違い

図 4.20 の結果からわかるように、固定台の角度により各フォトダイオードの出力が不規則に変化することが確認された。また $\theta=0$ deg 時の較正により得られた各回帰係数を表 4.3 に示す。

表 4.3: $\theta=0$ deg 時の各回帰係数

	0	1	2	3	4	5	6	7
a_x	-508	4.36	-38.3	-190	-174	-0.51	11.7	2.83
a_y	134	-11.2	45.7	1.97	1.61	0.54	-5.17	-0.30
a_z	-38.5	-24.9	-29.4	37.5	-15.1	-0.24	1.44	-3.72

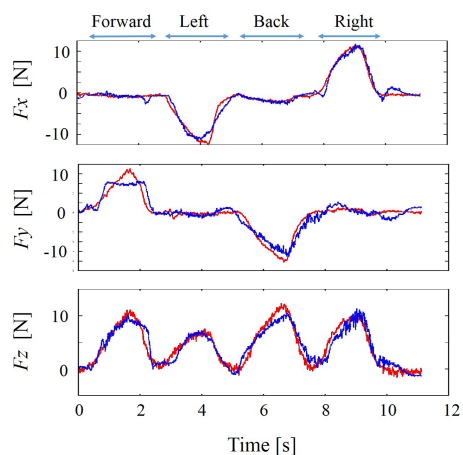
	8	9	10	11	12	13	14
a_x	-16.5	1.31	-20.6	-9.37	-8.82	-41.6	5.06
a_y	0.81	-5.61	14.6	13.4	-2.03	1.54	1.95
a_z	-8.06	3.29	-12.1	-8.80	19.7	-14.3	18.1

また各フォトダイオードの結果を用いて多項式回帰分析を行った結果の F_x, F_y, F_z それぞれにおける決定係数を表 4.4 に示す。表中の角度は固定台の角度を示す。

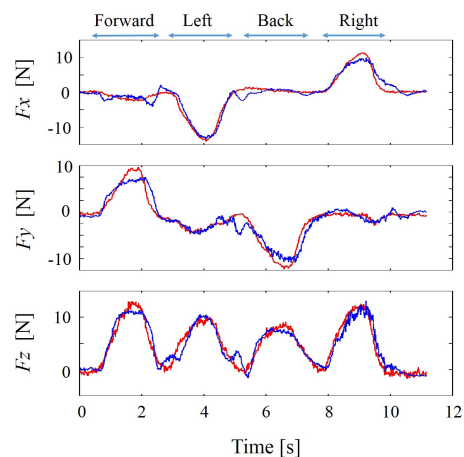
表 4.4: 各決定係数

	F_x	F_y	F_z
0 deg	0.95	0.87	0.83
5 deg	0.93	0.89	0.88
10 deg	0.96	0.92	0.90
15 deg	0.92	0.90	0.84
20 deg	0.95	0.92	0.83
25 deg	0.97	0.88	0.90
30 deg	0.88	0.91	0.81

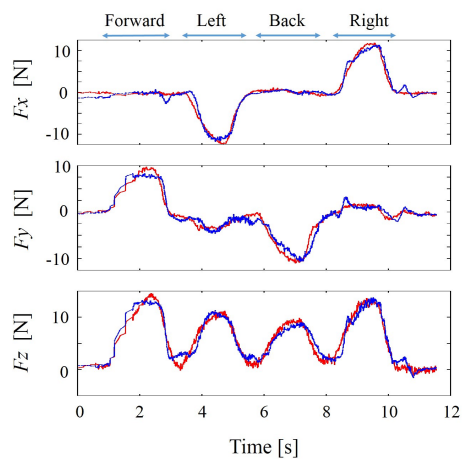
表 4.4 の数値はいずれも 1 に近いため精度の高い推定式が導出できたと考えられるが、定量的な推定精度の評価を行うために較正に用いた時系列データを用いて指先接触力の推定を行った。図 4.21 に、指先接触力とフォトダイオード出力との較正に用いた力覚センサの測定値 (赤線) と、その較正結果から算出した力の推定値 (青線) を示す。



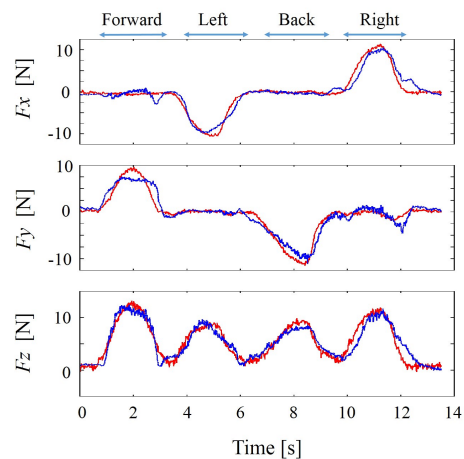
[a] 固定台未使用時



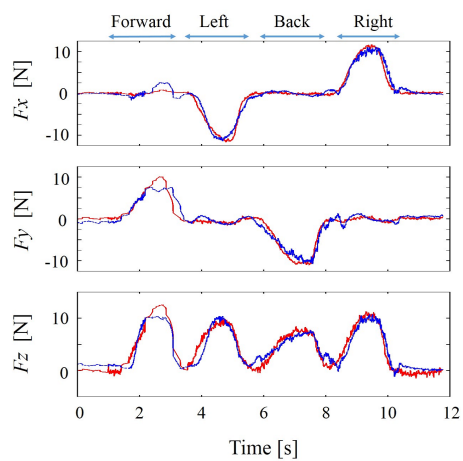
[b] 5 deg 固定台使用時



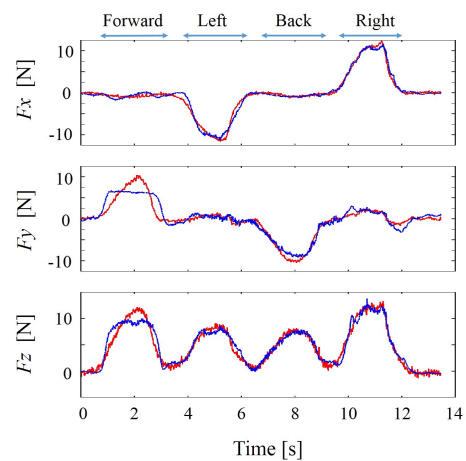
[c] 10 deg 固定台使用時



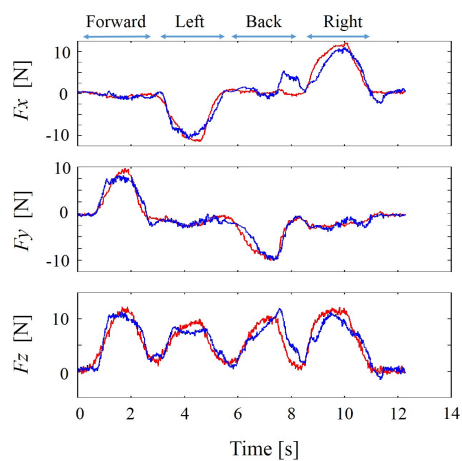
[d] 15 deg 固定台使用時



[e] 20 deg 固定台使用時



[f] 25 deg 固定台使用時



[g] 30 deg 固定台使用時

図 4.21: 校正用のフォトダイオード出力を用いた推定

較正用の時系列データを用いた推定での F_x, F_y, F_z それぞれにおける誤差の平均値 (N) を表 4.5 に示す。表中の角度は固定台の角度を示す。

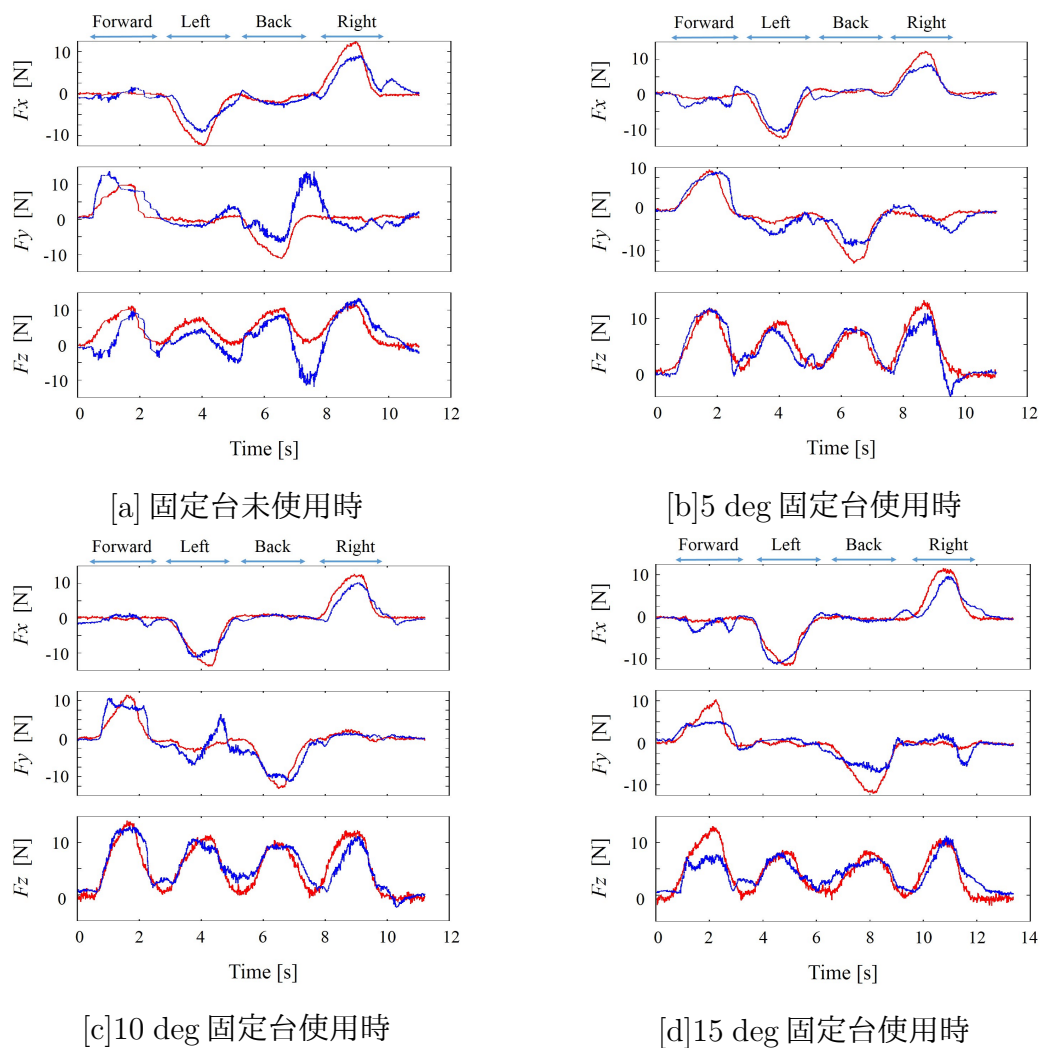
表 4.5: 誤差の平均値

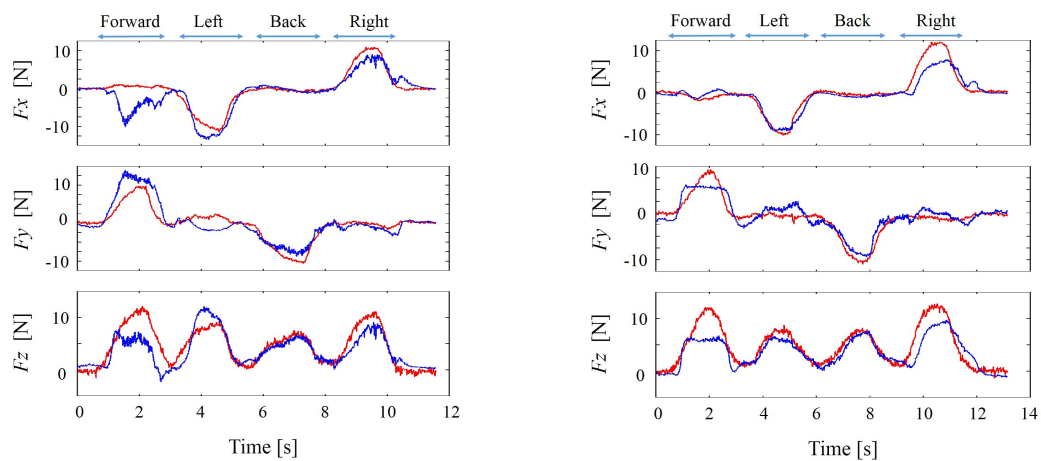
	$F_x(N)$	$F_y(N)$	$F_z(N)$
0 deg	0.62	1.13	1.18
5 deg	0.92	0.94	1.23
10 deg	0.62	0.79	1.10
15 deg	0.80	0.92	1.16
20 deg	0.64	0.66	1.25
25 deg	0.49	0.93	0.85
30 deg	1.09	0.69	1.48

表 4.5 の結果より、較正用の時系列データを用いて推定を行った場合は最大約 10 N の力に対して約 1 N の誤差となることがわかった。

4.4 指姿勢毎の推定精度検証実験

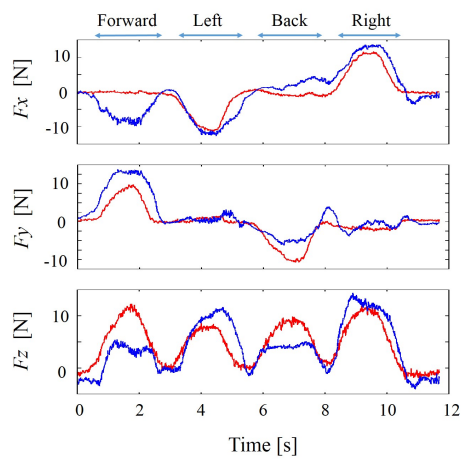
指姿勢毎の推定精度の検証を行うために、指先接触力とフォトダイオード出力との較正に用いた各剪断力印加時の時系列データとは別に、一人の被験者における新たに各指姿勢において5回ずつ計測を行った際の時系列データを用いて、同一姿勢の較正結果に基づく推定式による指先接触力推定を行った。図 4.22 に各指姿勢での推定結果を示す。





[e] 20 deg 固定台使用時

[f] 25 deg 固定台使用時



[g] 30 deg 固定台使用時

図 4.22: 同一姿勢の較正結果に基づく推定結果の例

推定結果の定量的な評価を行うために、各姿勢毎の推定式を用いて推定した際の誤差の平均値を求めた。表 4.6～4.8 に F_x , F_y , F_z それぞれにおける誤差の平均値を示す。表中の θ の固定台使用時の時系列データを、 θ_e の固定台使用時の校正結果を用いて推定した結果であり、赤文字が同一姿勢の校正結果に基づく推定の結果である。

表 4.6: F_x の誤差の平均値

$\theta \backslash \theta_e$	0 deg	5 deg	10 deg	15 deg	20 deg	25 deg	30 deg
0 deg	1.39	2.49	5.17	4.46	5.84	6.22	9.40
5 deg	4.38	1.39	3.37	4.02	5.40	6.84	8.82
10 deg	3.86	2.24	1.28	2.58	4.42	5.86	6.56
15 deg	5.56	5.21	4.79	1.15	8.24	8.28	8.64
20 deg	14.8	14.2	13.0	10.9	1.71	10.2	12.2
25 deg	6.86	7.24	6.68	5.95	7.02	1.10	5.60
30 deg	4.58	4.32	3.98	3.71	3.82	2.94	2.82

表 4.7: F_y の誤差の平均値

$\theta \backslash \theta_e$	0 deg	5 deg	10 deg	15 deg	20 deg	25 deg	30 deg
0 deg	2.29	4.06	5.27	7.84	5.24	5.83	3.82
5 deg	2.98	1.60	3.54	4.48	4.81	5.24	4.02
10 deg	4.41	3.21	1.67	5.52	5.26	4.98	3.84
15 deg	10.4	9.60	9.57	1.45	9.42	9.62	9.48
20 deg	16.8	16.4	15.8	16.0	1.63	12.8	10.8
25 deg	14.8	14.6	12.2	14.8	10.8	1.25	3.34
30 deg	12.4	13.2	8.84	8.47	7.27	5.87	1.95

表 4.8: F_z の誤差の平均値

$\theta \backslash \theta_e$	0 deg	5 deg	10 deg	15 deg	20 deg	25 deg	30 deg
0 deg	3.25	4.13	8.22	7.04	7.02	6.88	7.18
5 deg	3.88	1.90	5.75	6.26	5.88	6.24	7.04
10 deg	5.22	4.64	1.90	4.94	6.64	6.55	7.36
15 deg	11.2	8.98	7.72	2.11	8.64	9.22	12.8
20 deg	16.2	13.6	14.2	12.4	2.11	14.2	14.8
25 deg	14.3	14.4	12.8	13.2	10.8	1.96	8.34
30 deg	13.8	13.6	11.7	8.26	6.98	6.58	3.23

異なる姿勢の校正結果に基づく推定の例として、誤差が小さくなった 10 deg の固定台使用時の時系列データを 5 deg の固定台使用時の校正結果を用いて推定した結果と、5 deg の固定台使用時の時系列データを固定台未使用時の校正結果を用いて推定した結果を図 4.23 に示す。

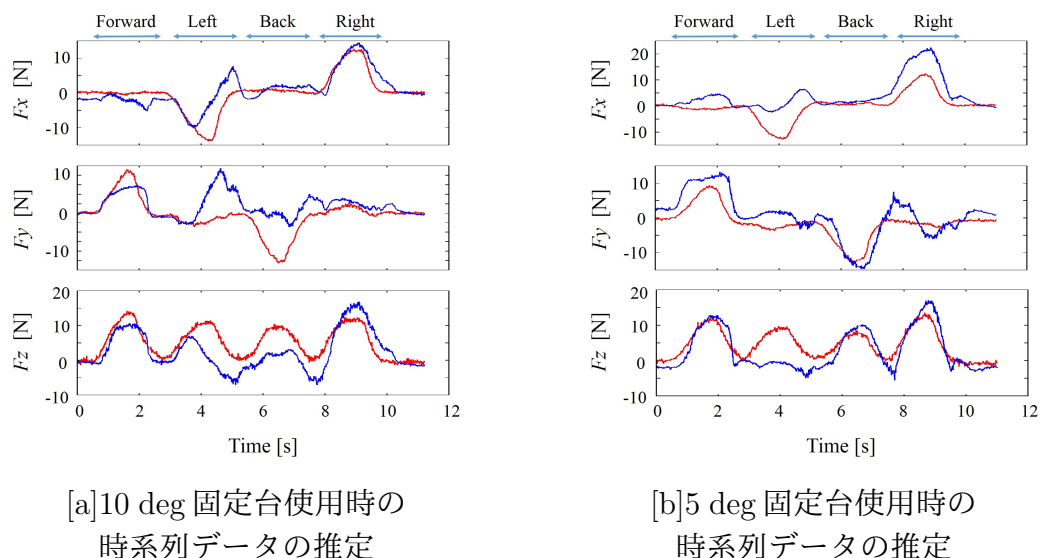


図 4.23: 異なる姿勢の校正結果に基づく推定結果の例

結果として、各姿勢において同一姿勢の校正結果に基づく推定式が最も精度が良いことがわかり、指先接触力の推定を行う際には同一姿勢の推定式を用いる必要性があると考えられる。異なる姿勢の校正結果に基づく推定では 10 N を上回る誤差も見られるが、剪断力を加えた際に推定値が大幅に測定値を上回る、または推定値が測定値に対して正負が反転するといったことが原因である。

また F_x , F_y においては誤差が約 1 N となる姿勢があることがわかり、姿勢や力の方向毎に推定精度に違いがあることが分かった。デバイスのサイズや力覚センサに取り付けてある板の大きさの都合上、30 deg 以上の角度での推定はデバイスと板が少し接触してしまうため困難であるが、本実験により方向により指先接触力とフォトダイオード出力との校正を行う際にデバイスを装着し、そのままの状態であれば指先接触力の推定が可能であることがわかった。

4.5 指姿勢変化時の指先接触力推定実験

4.4節の結果を考慮し、固定台を使用せずに各剪断力を加える際に指姿勢を動的に変化させ、指姿勢の推定と同時に姿勢毎の推定式を用いて指先接触力の推定を行った。被験者は3名で試行は5回行った。推定式は5 deg 毎に導出した離散的なものであるため、推定の際は指姿勢 θ を範囲として含む二つの推定式を用いて線形補間を行った。例として被験者 A の2回の試行において推定した指姿勢と指先接触力を図4.24に示す。

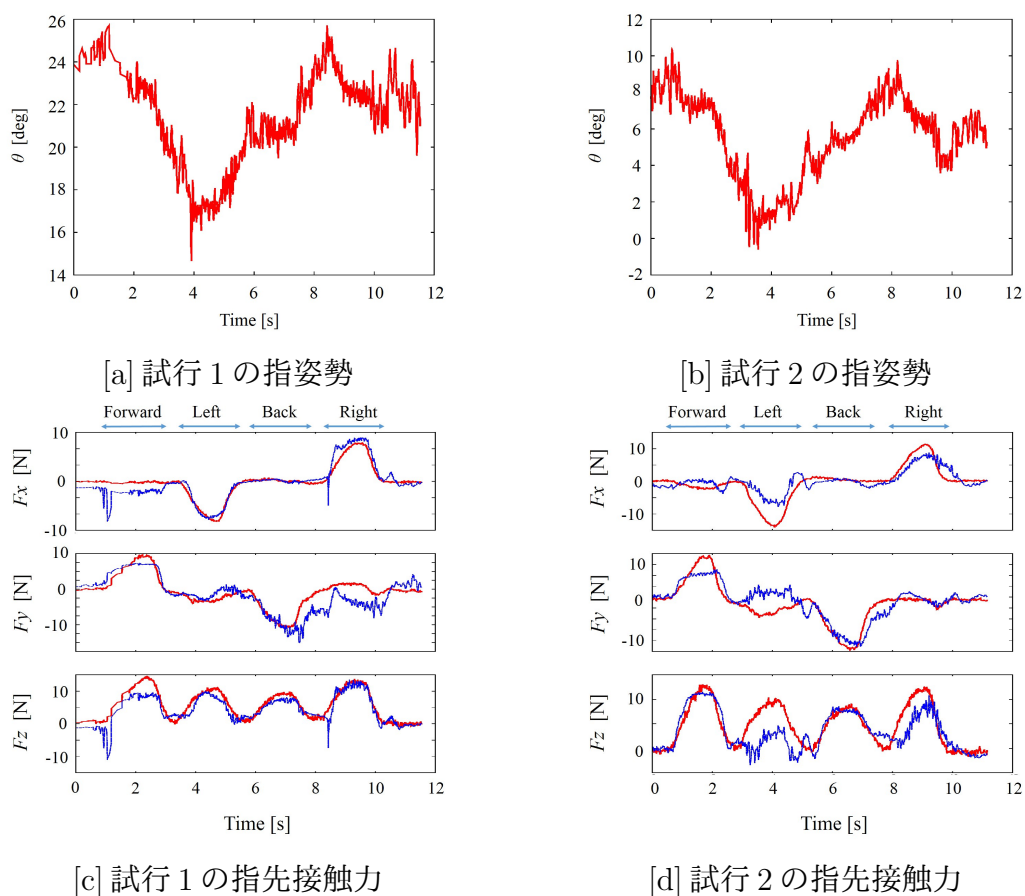


図 4.24: 被験者 A の推定結果

また被験者 B, C における指先接触力の推定結果の例を図 4.25 に示す。

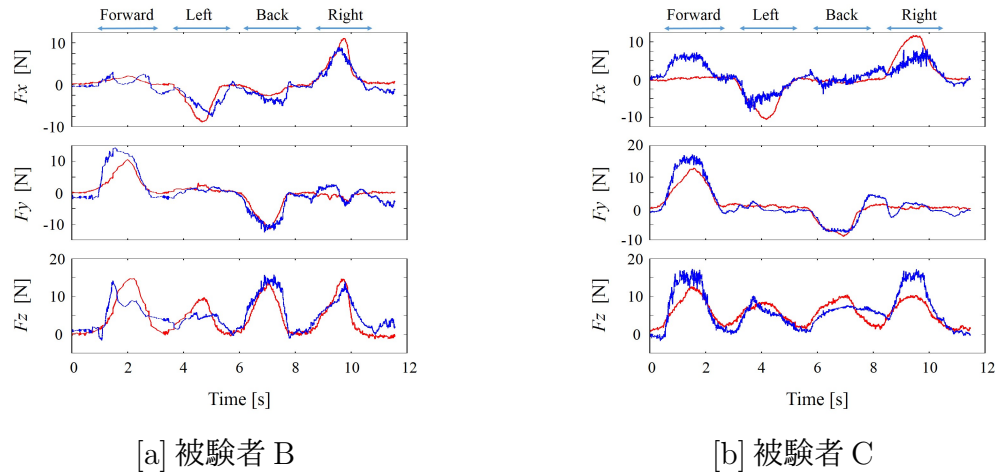


図 4.25: 被験者 B, C による推定結果の例

結果として、被験者 A, B, C の F_x , F_y , F_z それぞれにおける誤差の平均値 (N) を算出した結果、被験者 A が 1.69, 2.23, 2.34、被験者 B が 1.30, 1.62, 2.67、被験者 C が 2.12, 1.73, 2.80 となった。本実験の結果より被験者毎に推定精度に差はあるが、最大約 10 N の力に対して誤差が 1~3 N であることが確認された。

次に異なる被験者の較正結果に基づく指先接触力推定を行った例として、被験者 B の較正結果に基づく推定式で被験者 C の指先接触力を推定した結果を図 4.26 に示す。

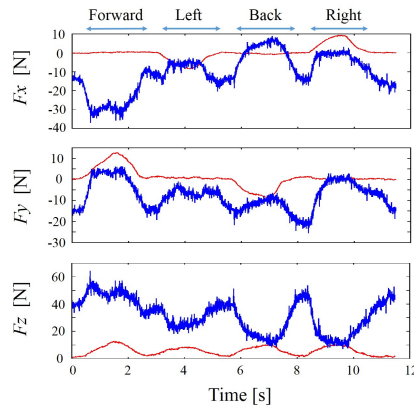


図 4.26: 異なる被験者の較正結果に基づく推定結果の例

図 4.26 の結果より誤差の平均値 (N) を算出した結果、 F_x が 14.5, F_y が 8.6, F_z が 25.4 となり同一被験者の較正結果に基づく推定と比較すると誤差が大きくなったが、被験者により力の加え方が異なることに起因すると考えられる。

4.6 様々な動作の指先接触力推定実験

較正時とは異なる動作における推定精度を検証するために、静止状態から約 10 N の押下力を瞬時に加えて除く動作 (動作 1) と、静止状態から約 10 N の剪断力を瞬時に加えて数秒後に瞬時に除く動作 (動作 2) における指先接触力推定を行った。また上記の実験は $\theta=0$ deg で試行を行った。また図 4.27 と図 4.28 に動作 1、2 における推定結果と各時刻における誤差を示す。図の赤線がセンサにより得られる測定値、青線が作製したデバイスによる推定値である。

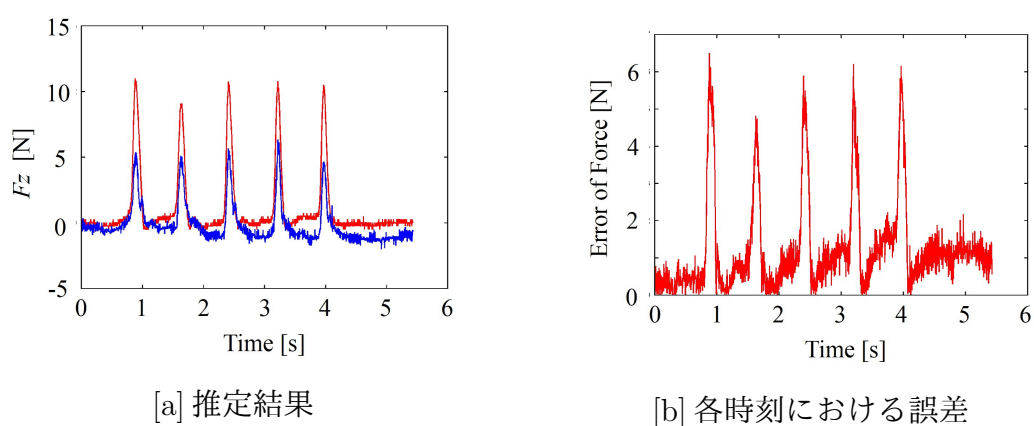
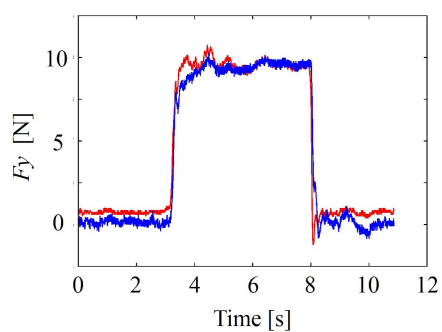
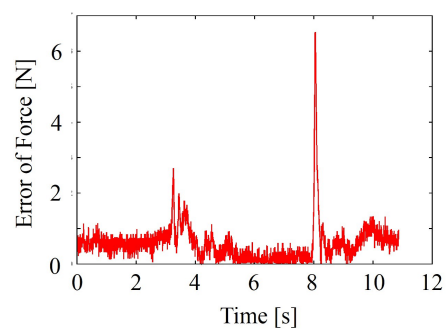


図 4.27: 動作 1 の推定結果

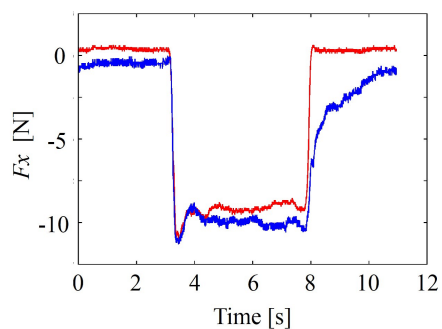
図 4.27 の結果より、押下力が加わっていない時の誤差は 2 N 以下であるが、押下力を加えた時には誤差が約 6 N となった。フォトダイオードの出力が飽和することにより誤差が大きくなるが、立ち上がりの時刻は一致しているため十分押下力を検出できていると考えられる。



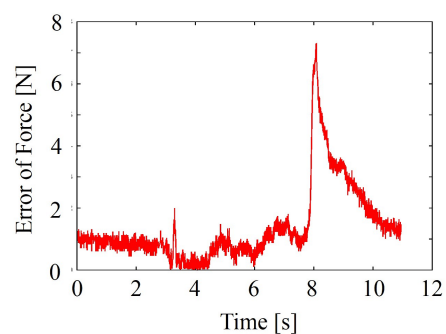
[a] 前剪断力印加時の推定結果



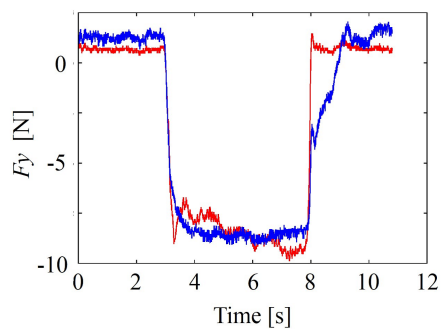
[b] 前剪断力印加時の各時刻における誤差



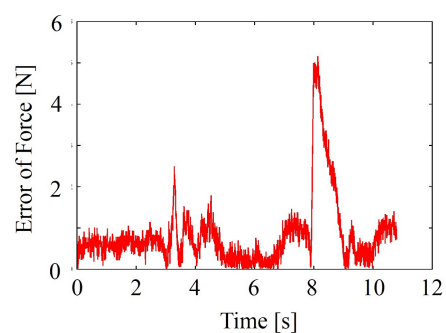
[c] 左剪断力印加時の推定結果



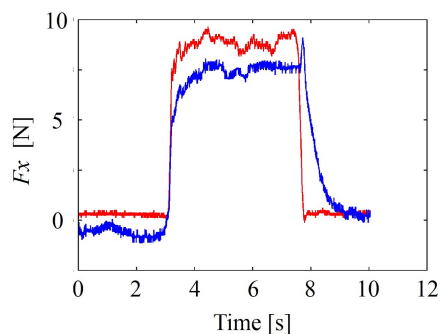
[d] 左剪断力印加時の各時刻における誤差



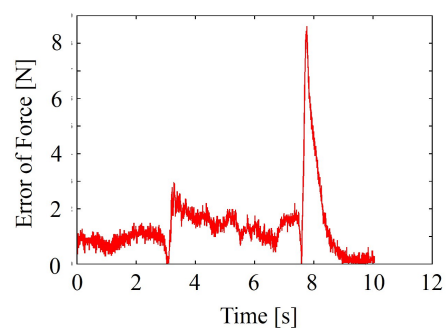
[e] 後剪断力印加時の推定結果



[f] 後剪断力印加時の各時刻における誤差



[g] 右剪断力印加時の推定結果



[h] 右剪断力印加時の各時刻における誤差

図 4.28: 動作 2 の推定結果

図 4.28 の結果より、全ての方向において定常状態においては誤差が 3 N 以下であり、剪断力を加える時と除く時において誤差が 5~8 N と大きくなることが確認された。また前剪断力を取り除く時には推定に時間遅れは確認されなかったが、その他の剪断力を取り除く時には時間遅れが確認された。前剪断力を取り除く際の V_2 の応答速度が速いことと、表 4.3 に示す V_2 と関係のある回帰係数 a_2 、 a_6 、 a_9 、 a_{10} 、 a_{11} が他の係数と比較すると大きいことに起因すると考えられる。上記の結果より瞬時に力を加えるまたは除く動作でなければ較正と異なる動作においても指先接触力の推定が可能であることが確認された。そのため実際の道具を使用する際にも本システムは使用可能であると考えられる。

4.7 道具使用時の指先接触力推定

本システムが日常生活における指先の道具操作において実用可能であることを検証するために、2.1.2の「つまみ」動作により扱うことが可能であるヘラを用いて平面に粘着した物体を剥がす動作を行う際の指先接触力を推定した。ヘラには加速度センサを取り付け、作製したデバイスに組み込まれた加速度センサと共に使用することでヘラを使用する際の親指のヘラに対する相対的な指姿勢を推定した。被験者は3名で実験を行い、粘着した物体としてはテープを用いた。使用した三種類の大きさの粘着テープ (20 mm×20 mm, 10 mm×10 mm, 5 mm×5 mm) と実験の様子を図4.29、図4.30に示す。

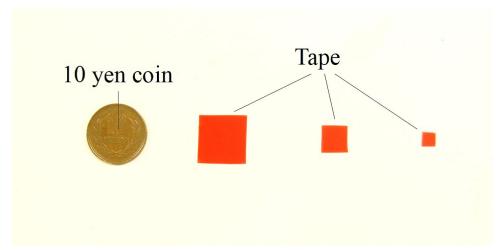


図 4.29: 使用した粘着テープ

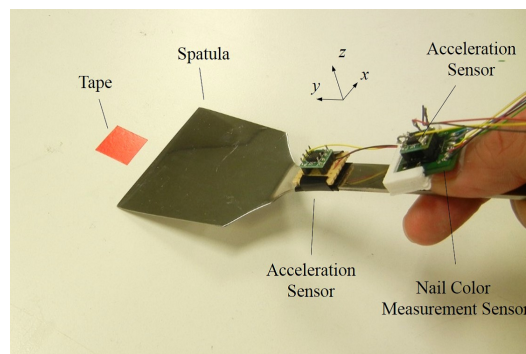


図 4.30: 実験の様子

被験者三名の各試行において推定した指先接触力の推移を図 4.31 に示す。図 4.31 の結果より F_y と F_z の時間変化は類似しているため、ヘラを机に押し当てつつ、剥離する物体の方向に力を加えていることが確認された。

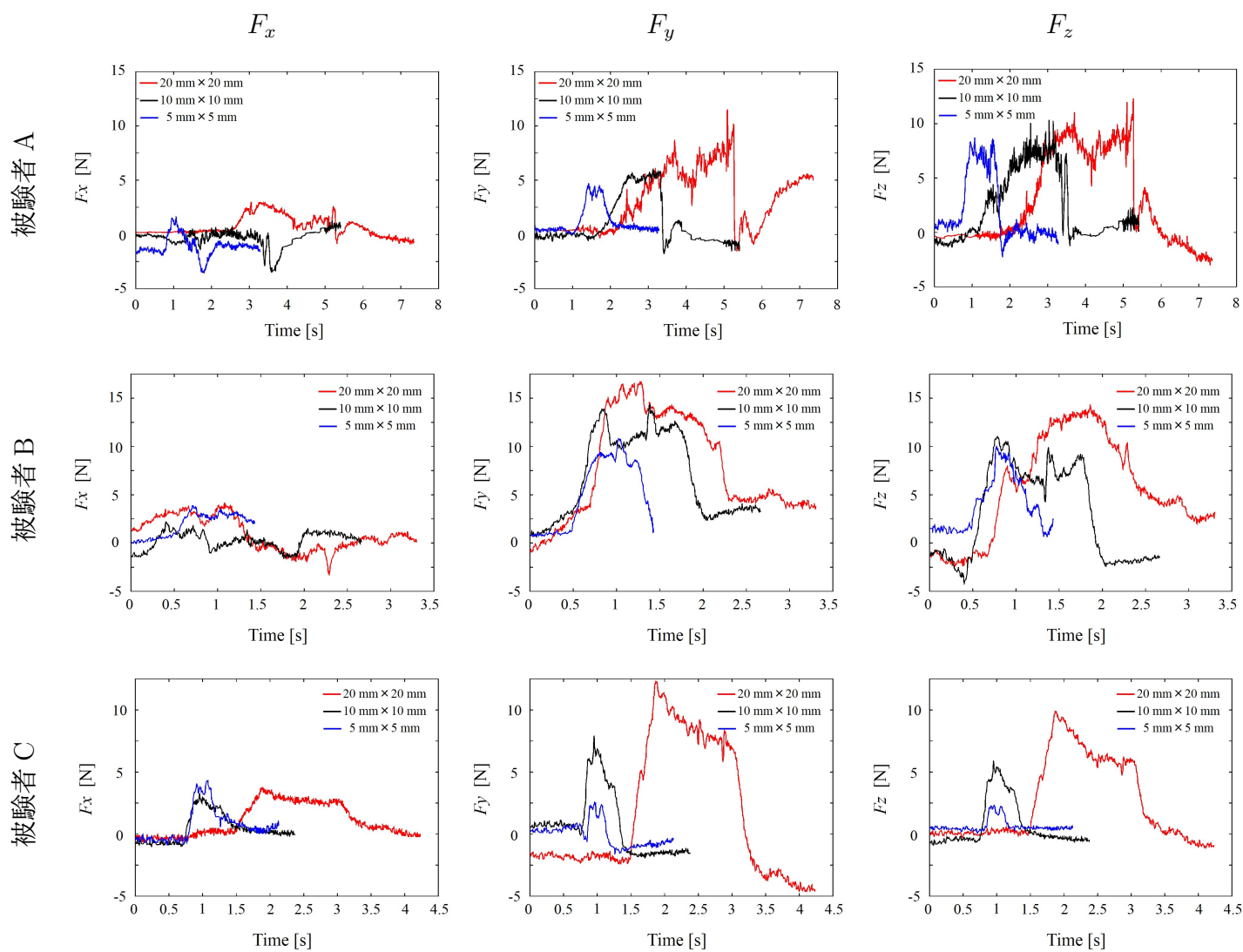


図 4.31: 推定結果

また表 4.9 に各試行毎の推定値の最大値と最小値の差を示す。

表 4.9: 各試行における最大値と最小値の差

		20 mm×20 mm	10 mm×10 mm	5 mm×5 mm
A	F_x	4.1	4.5	5.5
	F_y	13.1	7.8	4.9
	F_z	15.3	11.5	10.3
B	F_x	7.3	3.6	3.9
	F_y	17.6	13.5	11.2
	F_z	15.5	15.2	10.3
C	F_x	3.6	4.3	5.1
	F_y	17.5	10.1	4.2
	F_z	12.2	6.4	2.5

表 4.9 の結果より、テープが大きくなるにつれて推定した F_y , F_z の最大値と最小値の差が大きくなっていることがわかる。またテープの大きさが 20 mm×20 mm と 5 mm×5 mm の試行における、全被験者の各指先接触力の最大値と最小値の差の平均と標準偏差を図 4.32 に示す。

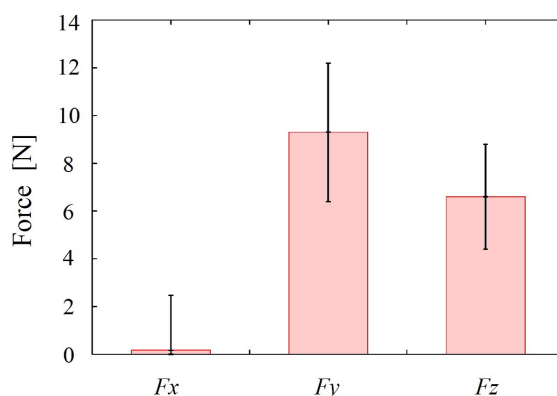


図 4.32: 試行毎の最大値と最小値の差の関係

また図 4.32 の結果より、 F_x の変化量は F_y , F_z に比べて小さいことがわかる。 F_y と F_z を比較すると、各試行間の最大値と最小値の差は F_y の方が大きいため、粘着力に対応して変化させているのはヘラの進行方向の力であり、テープを剥離する際にはヘラの進行方向の力を大きくする必要があるということが推測される。以上の結果より、粘着力と剥離に必要な力との関係を表現できていると考えられるため、作製したデバイスにより道具操作時の指先接触力の推定が可能であることを確認した。

第5章 おわりに

本研究ではLEDとフォトダイオードを組み込んだデバイスと三軸力覚センサを用いて、爪色変化による反射光の変化と指先接触力との対応関係を調査し、爪色変化により指先接触力が推定可能であることを確認した。また加速度センサをデバイスに組み込むことで、指姿勢毎の力推定が可能なシステムを構築した。結果として姿勢や力の方向により精度は異なるものの、最大約10 Nの力が推定可能であり、誤差が1～3 Nであることを確認した。また本研究のシステムにより、指腹部と対象物の間に機器を装着することなく、道具操作時の指先接触力を定量的に解析可能であることを確認した。

謝 辞

本研究は大阪大学大学院基礎工学研究科で行ったものである。

私は2013年の10月から本研究を進める上で、研究内容を決めるにあたり何度も本研究室の先生方や学生と相談させていただきました。また私が研究について悩んでいる時には家族にも相談させていただき、様々な人々に支えられていることを再認識しました。まずは本研究室と関わりのある全ての人に深く感謝致します。

本研究を行う上で、実験環境や研究の機会を与えて頂くと共に、本稿の的確な添削やご指導を頂きました、大阪大学大学院基礎工学研究科大城理教授に篤く御礼申し上げます。また本研究をまとめるにあたり副査として御指導頂きました大阪大学大学院基礎工学研究科田中正夫教授に深く感謝致します。また毎週のミーティングや日常生活で研究の進め方を助言して下さり、個人的な悩みや質問に対しても的確な解答や方針を与えて下さった、大阪大学大学院基礎工学研究科井村誠孝准教授に心から感謝致します。またプログラミングや研究者としての姿勢のご指導をして頂いた大阪大学サイバーメディアセンター黒田嘉宏准教授、笑いを交えながら学生の考えを理解しながら研究についての考えをご指導して頂いた京都大学医学部附属病院浦西友樹助教、一番年齢が近いこともあり親身になって研究のアドバイスをして頂いた大阪大学大学院基礎工学研究科吉元俊輔助教に感謝の意を表します。

また日頃より気軽に話して頂き、親身になって研究の相談に乗って頂いた、大城研究室の先輩である三宅正夫氏、簗岡亮氏、井手口裕太氏、加藤雄樹氏に御礼申し上げます。最後に、互いに励まし合い困難を共に乗り越えてきた同期と後輩に感謝致します。

本研究における被験者実験は、大阪大学大学院基礎工学研究科 人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認(25-13)を得て行ったものである。

業 績

- 国内発表

1. 豆野 裕信, 井村 誠孝, 浦西 友樹, 黒田 嘉宏, 大城 理, “爪側からの光計測による指先の押下力推定”, 電気学会全国大会, 3-044, pp.62, 愛媛, 2014 年 3 月
2. 豆野 裕信, 井村 誠孝, 浦西 友樹, 吉元 俊輔, 大城 理, “爪色分布の変化に基づく指先接触力の方向推定”, 日本生体医工学会大会, O1-15-5, 宮城, 2014 年 6 月
3. 豆野 裕信, 井村 誠孝, 浦西 友樹, 吉元 俊輔, 大城 理, “光計測を用いた爪装着型指先接触力センサ”, 電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティックス研究会, MBE2014-55, pp.21-24, 大阪, 2014 年 10 月

- その他

1. 豆野 裕信, “爪色分布の変化に基づく指先接触力の推定”, 生体工学領域交流会, 大阪, 2014 年 7 月

参考文献

- [1] 猪飼哲夫, 辰濃尚, 宮野佐年. 歩行能力とバランス機能の関係. リハビリテーション医学, Vol. 43, No. 12, pp. 828–833, 2006.
- [2] 桶谷哲哉, 加藤光博, 高野博史, 中村清実. 瞬きと脳波および皮膚電位との相関解析による居眠り判定基準の検討. 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティックス, Vol. 107, No. 72, pp. 17–20, 2007.
- [3] 成田智恵子, 遠藤淳司, 越野哲史, 近藤香菜, 下出祐太郎, 来田宣幸, 濱田泰以. 粉筒による蒔絵粉蒔き動作定量化のための要素の抽出. 日本人間工学会誌, Vol. 49, pp. S176–S177, 2013.
- [4] 白鳥貴亮, 中澤篤志, 池内克史. モーションキャプチャと音楽情報を用いた舞踏動作解析手法. 電子情報通信学会論文誌, Vol. 88, No. 8, pp. 1662–1671, 2005.
- [5] 仲谷正史, 川副智行, 豊田成人, 木下智史, 和田潤. 指の変形に注目したウェアラブル接触力センサシステムの検討. 日本機械学会論文集, Vol. 2010, pp. 1A1–C22(1)–1A1–C22(3), 2010.
- [6] 中村仁彦, 山崎友敬. 反射行動の重ね合わせ理論とその多指ハンドの反射的把握動作への応用. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 448–459, 1997.
- [7] 杉本千佳, 長井宏和, 江副亮介, 保坂寛, 佐々木健, 板生清, 龍田成示. ウェアラブルセンサによる行動認識システムの開発. 日本時計学会誌, Vol. 51, No. 197, pp. 1–12, 2007.
- [8] 高橋佳三, 阿江通良, 藤井範久. 野球のピッチングにおける手および指の動きとボール速度増加の関係. 日本バイオメカニクス学会, Vol. 4, No. 2, pp. 116–124, 2000.

- [9] 末永貴俊, 飯野恵秋, 黒田知宏, 大城理, 千原國宏. 遠隔超音波画像診断におけるプローブ操作教示システム. 電子情報通信学会論文誌, Vol. 83, No. 1, pp. 324–332, 2000.
- [10] 齋藤健治, 井上一彦, 渡辺正和, 井上伸一, 酒井淳一. 野球投球におけるボールリリース時の爪ひずみと接触力の計測. 名古屋学院大学論集, Vol. 1, No. 1, pp. 35–46, 2012.
- [11] 小川修平, 岩井大輔, 佐藤宏介. 多指の爪色画像計測によるマルチタッチ入力とアバターハンド操作. 第55回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 257–258, 2011.
- [12] S. Mascaro and H. Asada. Measurement of Finger Posture and Three-Axis Fingertip Touch Force Using Fingernail Sensors. IEEE Trans. Robot. Automat. Vol. 20, No. 1, pp. 26–35, 2004.
- [13] 豊田浩行. 咀嚼力の三分力動態に関する基礎的研究. 大阪歯科学会, Vol. 54, No. 2, pp. 88–102, 1991.
- [14] 大橋正洋, 江原義弘, 島田勝英, 前田淳一, 片野由香里, 佐藤房郎. モデル計算による立ち上がり動作時の関節トルク計測: 妥当性および問題点の検討. 日本リハビリテーション医学会誌, Vol. 27, No. 2, pp. 107–113, 1990.
- [15] 遊佐博幸, 兵庫明, 関根慶太郎. 基準抽出による2次元平面上における手形状認識. 電子情報通信学会論文誌, Vol. 80, No. 5, pp. 1209–1220, 1997.
- [16] 小澤一史, 千田隆夫, 高田邦昭. トートラ解剖学. 丸善株式会社, 東京, pp. 399–401, 2007.
- [17] 吉本忍. 手織機の構造・機能論的分析と分類. 国立民族学博物館研究報告, Vol. 12, No. 2, pp. 315–447, 1987.
- [18] 前野隆司, 小林一三. ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係. 日本機械学会論文集, Vol. 63, No. 607, pp. 881–888, 1997.

- [19] 村上剛司, 長谷川勉. 器用な多関節多指ロボットハンドのための柔軟被覆と爪を有する指先. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 5, pp. 616–624, 2004.
- [20] 井上貴浩, 平井慎一. 半球型ソフトフィンガを有する最小自由度2指回転関節ハンドによる準静的把持・操り動作. 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 8, pp. 945–953, 2006.
- [21] R. Wolfram-Gabel and H. Sick. Vascular Networks of the Periphery of the Fingernail. *Journal of Hand Surgery*. Vol. 20, No. 4, pp. 488–492, 1995.
- [22] 八高隆雄, 迫田睦子, 山本圭治郎, 杉内肇, 山本和良. 指先への力の作用と爪の色変化との関係. 機械力学・計測制御講演論文集, Vol. 2002, p. 78, 2002.
- [23] 内田亮平, 水田知宏, 東森充, 金子真. 回復時定数に着目した虚血ダイナミクスの評価と指先への応用. 計測自動制御学会論文集, Vol. 45, No. 9, pp. 484–490, 2009.
- [24] Y. Sun, M. John, and S. Mascaro. Estimation of fingertip force direction with computer vision. *IEEE Trans. Robotics*. Vol. 25, No. 6, pp. 1356–1369, 2009.
- [25] 津島秀成, 杉山陽二. 製品使用時における指の変形と負荷に関する研究. 技術論文, No. 35, pp. 32–34, 2009.
- [26] 加藤友紀子, 吉野宏志, 加藤象二郎. 筋電図からみた手指動作に関する研究. 瀬木学園紀要, No. 4, pp. 102–106, 2009.
- [27] 藤原知. 人体解剖学序説. 医歯薬出版, 東京, pp. 180–183, 1974.
- [28] 津吹桃子, 渡邊修, 来間弘展, 松田雅弘, 池田由美, 妹尾淳史. 手指対立運動における視覚的フィードバックの影響—機能的 fmri による大脳賦活の検討—. 理学療法科学学会, Vol. 22, No. 2, pp. 189–193, 2007.
- [29] 福田健悟, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行. 先端部が着脱可能な新しい道具型デバイス. 情報処理学会第71回全国大会, Vol. 2, No. 2, pp. 163–164, 2009.
- [30] 加藤一郎. 人間の手足の制御. 学献社, 東京, pp. 83–86, 1970.

- [31] 岡田徳次. 細密な物体操作のための指運動の解析. 計測自動制御学会論文集, Vol. 16, No. 4, pp. 597–602, 1980.
- [32] 井上貴浩, 平井慎一. 柔軟指による把持物体の姿勢制御. 日本機械学会論文集, Vol. 75, No. 757, pp. 2537–2546, 2009.
- [33] 伊藤彰人, 辻内伸好, 小泉孝之, 大島裕子. ロボット指のための小型触覚センサの開発. 日本機械学会論文集, Vol. 72, No. 721, pp. 2721–2726, 2006.
- [34] 吉田健志, 黒田嘉宏, 鍵山善之, 黒田知宏, 木下秀文, 松田公志, 大城理. 三軸力覚センサを用いた圧計測内視鏡鉗子の試作. 生体医工学シンポジウム 2008 講演予稿集, pp. 205–212, 2008.
- [35] 大村吉幸, 鷺坂隆志, 長久保晶彦, 國吉康夫, 尾崎和之. フレキシブル基板に埋め込まれた小型・柔軟触覚センサ. 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, pp. AC3L2–2, 2011.
- [36] 小川卓哉, 前田雄介, 福井邦雄, 宮田なつき. 筋骨格系を考慮した筋電からの指先力推定. 精密工学会学術講演会講演論文集, pp. 57–58, 2009.
- [37] 牧野泰才, 篠田裕之, 岡田明正. 二次元筋電パターンを計測する柔軟体インタフェース. 電気学会研究会資料. MSS, マイクロマシン・センサシステム研究会, pp. 17–22, 2006.
- [38] 多田充徳, 柴田智広, 今井正和, 小笠原司. 人の把持力制御メカニズム研究のための指先変形と把持/負荷力の同時計測装置の開発. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-D-II, No. 6, pp. 1033–1044, 2001.
- [39] 家村道雄, 帆足孝文, 中原正俊, 小山善文, 坂井栄治, 奥高洋, 西嶋仁浩. 入門電子回路. オーム社, 東京, pp. 7–10, 2006.
- [40] 石田哲郎, 清水東. 半導体素子. コロナ社, 東京, pp. 142–155, 2005.
- [41] 木藤伸宏, 島澤真一, 弓削千文, 奥村晃司, 菅川祥枝, 吉用聖加, 井原秀俊, 三輪恵, 神谷秀樹, 岡田恵也. 加速度センサを用いた変形性膝関節症の歩行時下腿運動の解析. 情報処理学会研究報告, Vol. 31, No. 1, pp. 86–94, 2004.

- [42] 涌井良幸. 実習多変量解析入門. 技術評論社, 東京, pp. 72–80, 2011.
- [43] 中村永友. 多次元データ解析法. 共立出版, 東京, pp. 33–38, 2009.
- [44] 耒代誠仁, 齋藤恵, 蜂谷大翼, 中川正樹, 馬場基, 渡辺晃宏. 木簡解読支援システムの基本設計と試作. 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, pp. 215–220, 2004.