

# 接触形状に基づく剪断力提示

2020年2月

大森隆哉



# 接触形状に基づく剪断力提示

大森隆哉

## 概要

近年、機械の扱う対象は硬い物体のみならず、柔らかい物体も含まれている。しかし、硬さ分布を有した柔軟物を扱う際、力を加えると変形量が異なることから、力を正確に伝えることができないという問題が存在する。特に、接触面に平行な力（剪断力）を与える際、滑りという現象が発生することによって、力を正確に伝えることができない。

本研究では、三つの末端効果器をサーボモータで駆動することによって硬さ分布を有する弾性体（足首ファントム）に剪断力を与える装置を開発する。三つの末端効果器の回転方向によって並進運動と回転運動を提示することが可能となる。また、末端効果器の形状を変化させることによって、末端効果器と弾性体との間に生じる滑りの影響を抑えることを目指す。

本実験では、三つの末端効果器が回転することによって、シリコン製の弾性体に対して剪断力を与えた際に生じる滑りの影響を調査した。弾性体の硬さに応じて、剪断力の最大値と滑りの影響がそれぞれ、曲率半径によって異なることが示唆された。また、剪断力の時間変化のモデルを作成し、固着領域および滑り領域における剪断力の増減を示した。さらに、足首の硬さ分布においては曲率半径を 40 mm から 60 mm へ大きくすることで、滑りの影響が小さくなることが示唆された。

キーワード：剪断力，滑り，硬さ分布，曲率半径，サーボモータ，皮膚変形

# Shearing force display based on contact shape

Ryuya Omori

## Abstract

In recent years, a machine handles not only hard objects but also soft objects. However, there is a problem that the force can not be accurately transmitted to the soft objects with stiffness distribution because their displacement is distributed in space when the force is applied to them. In particular, the force can not be accurately transmitted due to slip when a force parallel to the contact surface contact force, i.e. shearing force, is applied.

In this study, the author develops a device that applies shearing force without causing the slip by driving three end effectors with servo motors. The target is an elastic body with stiffness distribution, which models an ankle. It is possible to present both translational and rotational motions by rotating three end effectors. The author aims to reduce the slip between the end effector and the elastic body by changing the curvature of the effector.

In the experiment, the author investigated the influence of slip when applying shearing force to the silicone-made elastic phantom by rotating three end effectors. The results suggested that the maximum value of shearing force and the slip depend on the radius of curvature according to the difference in stiffness. The author simulated the time change of shearing force and showed the increase and decrease of shearing force in stick and slip areas. In addition, it was also suggested that the slip was reduced by increasing the radius of curvature from 40 mm to 60 mm in the stiffness distribution of the ankle.

**Keywords : Shearing force, Slip, Stiffness distribution,**

**Radius of curvature, Servo motor, Skin deformation**

# 目次

第1章	はじめに	1
第2章	剪断力提示と滑りの原理	3
2.1	剪断力と剪断ひずみ	3
2.2	摩擦と滑り	4
2.3	弾性体の接触面積と摩擦係数	6
2.4	動力伝達機構	9
2.5	皮膚剪断力提示装置	16
2.6	本研究の位置づけ	19
第3章	システムの要素	21
3.1	システムのブロック図	21
3.2	末端効果器	22
3.3	RCサーボモータの基本構造	22
3.4	DCモータの回転原理	23
3.5	PWM制御	24
3.6	三軸力センサ	26
第4章	剪断力提示システム	28
4.1	足首における装置の提示場所	28
4.2	剪断力提示装置	29
4.3	剪断力による運動提示	30
4.4	剪断力と回転角度の関係	33
4.5	滑りの発生原理	35
4.6	滑りの抑制方法	36

4.7 滑りと固着 . . . . .	37
<b>第5章 剪断力の評価実験</b>	<b>40</b>
5.1 滑り量一定時における剪断力の評価 . . . . .	40
5.2 足首ファントム装着時における剪断力の評価 . . . . .	47
<b>第6章 おわりに</b>	<b>55</b>
<b>謝辞</b>	<b>56</b>
<b>参考文献</b>	<b>57</b>
<b>業績</b>	<b>63</b>

# 目 次

1.1	装着型デバイスによるスポーツ能力の支援 . . . . .	2
2.1	物体の変形前と変形後の模式図 . . . . .	3
2.2	固体接触時の立体図 . . . . .	5
2.3	固体接触時の平面図 . . . . .	5
2.4	摩擦力 $f$ と外力 $F$ の関係 . . . . .	5
2.5	摩擦力 $f$ と時間 $t$ の関係 . . . . .	5
2.6	弾性体と剛体の接触機構 . . . . .	6
2.7	平面から見た弾性体と剛体の接触機構 . . . . .	6
2.8	歯車 . . . . .	9
2.9	ベルト . . . . .	10
2.10	ローラチェーン . . . . .	10
2.11	摩擦車 . . . . .	11
2.12	スライダクランク機構 . . . . .	11
2.13	ラックアンドピニオン . . . . .	12
2.14	板カム . . . . .	12
2.15	円筒カム . . . . .	13
2.16	直交スライダ機構 . . . . .	13
2.17	トグル機構 . . . . .	14
2.18	直動カム . . . . .	14
2.19	伸縮腕 . . . . .	15
2.20	DC モータによる皮膚剪断変形装置 . . . . .	16
2.21	ベルトによる皮膚変形装置 . . . . .	16
2.22	回転及び並進運動提示装置 . . . . .	17

2.23	垂直力及び剪断力提示装置	17
2.24	足首ハンガ	18
2.25	曲率半径が同じときのデバイスの動作	20
2.26	曲率半径を考慮したときのデバイスの動作	20
3.1	システムのブロック図	21
3.2	末端効果器の概要図	22
3.3	末端効果器の平面図	22
3.4	RC サーボモータの基本構造	23
3.5	DC モータの基本構造	23
3.6	DC モータの回転原理	24
3.7	PWM 制御方式 (デューティ比 $D = 25, 50, 75\%$ )	25
3.8	三軸力センサの概要図	27
3.9	ひずみゲージとホイートストンブリッジ回路	27
4.1	右足首と提示場所の関係	28
4.2	剪断力提示装置	29
4.3	前後左右の並進運動提示	30
4.4	斜め方向の並進運動提示	31
4.5	回転運動提示	32
4.6	末端効果器と物体の模式図	34
4.7	末端効果器と物体の平面図	34
4.8	回転時における押し込み量の変化	35
4.9	押し込み量の差 $d_0 - d$ と曲率半径 $R$ の関係	36
4.10	剪断力提示の立体図	37
4.11	剪断力提示の平面図	37
4.12	滑りと固着の領域	38
4.13	剪断力 $F_S$ と最大静止摩擦力 $\mu_s F_N$ の時間変化	39
5.1	測定対象	41
5.2	垂直力 $F_N$ と剪断力 $F_S$ の測定	41

5.3	最大剪断力と曲率半径の関係	42
5.4	ヤング率 57.3 kPa における剪断力と時間の関係 (測定対象: $S_A$ )	43
5.5	ヤング率 96.7 kPa における剪断力と時間の関係 (測定対象: $S_B$ )	44
5.6	ヤング率 141.7 kPa における剪断力と時間の関係 (測定対象: $S_C$ )	44
5.7	各ヤング率における最大剪断力と曲率半径の関係	45
5.8	各曲率半径における最大剪断力と曲率半径の関係	46
5.9	硬さ分布を有した足首ファントム	47
5.10	$z$ 軸方向から見た硬さ分布を有した足首ファントム	47
5.11	足首ファントムに剪断力提示装置を装着した図	48
5.12	末端効果器の時計方向の回転	49
5.13	末端効果器の反時計方向の回転	49
5.14	$O_A$ の剪断力と時間の関係	50
5.15	$O_B$ の剪断力と時間の関係	50
5.16	$O_C$ の剪断力と時間の関係	51
5.17	ヤング率 57.3 kPa における剪断力と滑りモデル ( $k_1 = 0.66, k_2 = 1.0$ )	52
5.18	ヤング率 96.3 kPa における剪断力と滑りモデル ( $k_1 = 0.66, k_2 = 2.0$ )	53
5.19	ヤング率 141.7 kPa における剪断力と滑りモデル ( $k_1 = 0.66, k_2 = 3.0$ )	53

# 表 目 次

5.1	各曲率半径における押し込み量 . . . . .	42
5.2	最大剪断力の平均値と標準偏差 . . . . .	43
5.3	二元配置分散分析の結果 . . . . .	45
5.4	各ヤング率における多重比較の結果 . . . . .	45
5.5	各曲率半径における多重比較の結果 . . . . .	46

# 第1章 はじめに

人類は機械を用いることによって、硬い物体に力を加えて、穴をあける、切断する、変形させるといった加工を行ってきた、また、加工のみならず、物体を移動させる手段として物体に力を伝えることも行われてきた。現代では、従来扱ってきた硬い材質のみならず、柔らかい材質までも扱うようになってきている [1-6]。柔らかい材質とは、手袋、マフラー、靴下といった衣類や、肉、魚、野菜といった食品など私たちの日常生活で溢れかえっている。また、頭、手、足といった生体組織もまた、柔らかく変形しやすい物から構成されている [1]。特に、人に力を与えることはスポーツなどの運動技能を高める上で必要とされている [7-11]。しかし、以上のような柔軟物には、硬さの分布特性を有しているため、力を与えるためには、硬さ分布を考慮することが必要とされる。例えば、硬さ分布を有した柔軟物を扱う際、力を加える場所によって変形量が異なることから、力を正確に伝えることができないという問題が存在する [1,12]。特に、接触面に平行な力（剪断力）を与える際、最大静止摩擦力より大きな力を与えると、接触面にずれが生じ、滑りという現象が発生する [13]。滑りが発生することによって、力を正確に伝えることができない。また、硬さ分布を有した物体に剪断力を与える際、硬さの違いによって滑りの影響が異なる。滑りが発生し、力を正確に伝えることができないと、自動車の横滑りや人の転倒、物の落下といった様々な問題が見られる。したがって、滑りを抑制することは力を伝える上で非常に重要な要素となる。

近年、ヒトに力を与える需要が高まっており、力を与えることによってユーザに方向を示す研究が盛んに行われている [14-21]。特に、剪断力をヒトに与える手段は方向を識別する上で有効であることが示されている [22,23]。しかし従来、皮膚に剪断力を与えることによって、手や腕の動かし方を教授する等、上肢を対象とした研究 [24-29] が行われている一方、下肢を対象とした研究は数少ない [30]。特に下肢は上肢よりも硬さ分布の偏りが大きい [31] ため、硬さ分布を考慮しないと滑りの影

響によって、与える力が減少する問題が生じる。本研究では、硬さ分布を有した弾性体に、滑りの抑制を考慮した剪断力を与える装置を開発する。硬さ分布を有した弾性体として足首が存在する。足首の内部には、脛骨と腓骨が存在しており、硬さ分布の偏りが大きいため力を伝えるのが困難な生体組織である [31]。剪断力を与える手法として、ユーザと接触する部分である三つの末端効果器をサーボモータで制御する。末端効果器は皮膚に力を与える提示部を示しており、末端効果器が回転することにより、皮膚に剪断力を与える。これにより、弾性体に並進運動と回転運動を提示することが可能となる。一つまたは二つの末端効果器では1自由度回転ないし1自由度並進の提示に制限される。また、足首の形状と脛骨の位置より、足首の前方向に末端効果器を配置することは適切ではない。これより、前後左右に四つの末端効果器を配置する構成は困難である。本研究では、硬さ分布を有した弾性体に剪断力を与える際、末端効果器の形状を考慮することにより、滑りの影響を抑える手法を提案する。本研究により、硬さ分布を有した生体組織に力を正確に伝えることが可能となる。力を正確に伝えることで、図 1.1 に示すように、ユーザはスポーツにおける適切な脚の運動方向を認識することができ、スポーツ能力の支援に貢献することが期待できる。

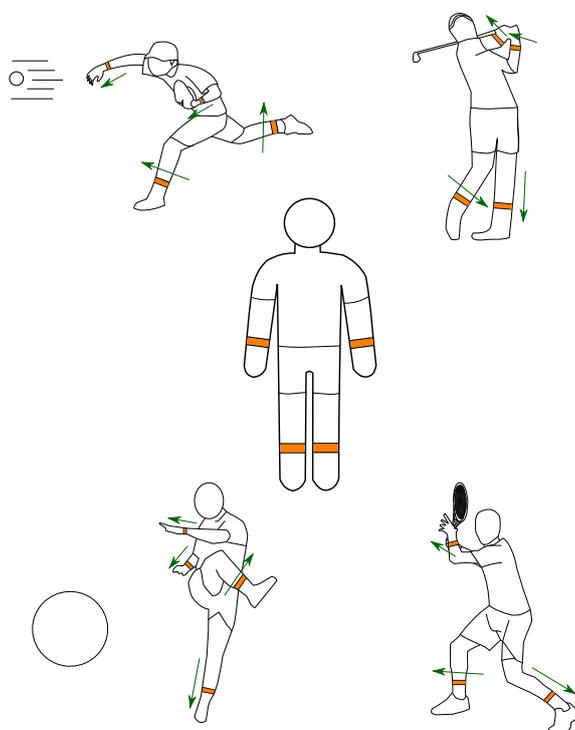


図 1.1: 装着型デバイスによるスポーツ能力の支援

## 第2章 剪断力提示と滑りの原理

本章では、まず初めに剪断力と剪断ひずみの関係について述べた後、剪断力を伝える伝達機構および提示装置について説明する。

### 2.1 剪断力と剪断ひずみ

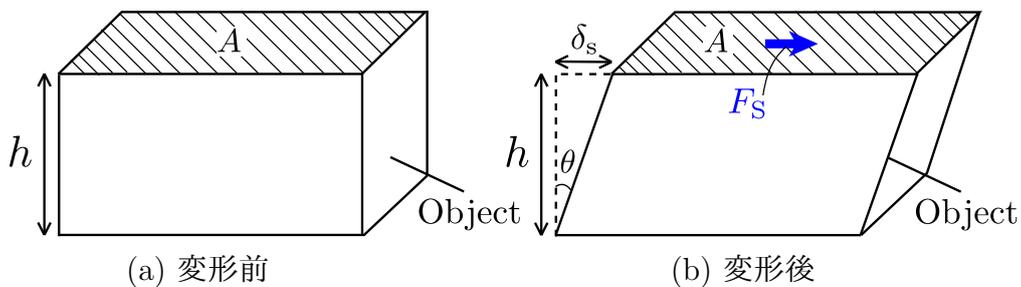


図 2.1: 物体の変形前と変形後の模式図

図 2.1 (a) は弾性体である物体に力を与える前の状態を示している。図 2.1 (b) に示すように、接触面積が  $A$  である物体の接触面と平行に働く力  $F_s$  を剪断力と呼ぶ。高さ  $h$  の物体に剪断力  $F_s$  を与えた場合、剪断ひずみ  $\gamma$  が生じる。剪断方向の変位が  $\delta_s$  である場合、剪断ひずみ  $\gamma$  は式 (2.1) で表される。

$$\begin{aligned}\gamma &\equiv \frac{\delta_s}{h} \\ &= \tan \theta\end{aligned}\tag{2.1}$$

また、接触面と垂直に働く応力とひずみの比である物体のヤング率を  $E$ 、垂直ひずみと剪断ひずみの比であるポアソン比を  $\nu$  とする。剪断力  $F_s$  の単位面積当たりの力である剪断応力  $\tau_s$  および剪断ひずみ  $\gamma$  との関係は式 (2.2) で表すことができる。

$$\tau_s = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma \quad (2.2)$$

したがって、剪断力  $F_S$  を与えるときの接触面積を  $A$  とすると、式 (2.3) で表すことができる。

$$F_S = \frac{EA}{2(1+\nu)} \tan \theta \quad (2.3)$$

## 2.2 摩擦と滑り

摩擦とは、接触している物体同士が相互に動くときに発生する現象である。摩擦を発生させる方法の一つとして円柱型の物体が回転する様子を考える。図 2.2 に示すように、荷重  $W$  の作用する円柱型の物体が、弾性体の床面と接触した状態で回転したとする。また、平面から見た様子を図 2.3 に示す。このとき、物体と床面の間には物体の運動方向と逆の方向に抵抗が生じ、この抵抗が運動を抑止する。互いに接触し、かつ相対運動をする二面間に平行な方向に働く抵抗を摩擦力と呼ぶ。図 2.4 は、荷重  $W$  を一定としたときの摩擦力  $f$  と外力  $F$  の関係を示している。外力  $F$  が 0 から  $F_{cr}$  までの範囲にあるときは、外力と摩擦力は等しくなり、物体は静止し続ける。外力  $F$  が  $F_{cr}$  に達したとき摩擦力は最大となる。この摩擦力  $f_s$  を最大静止摩擦力と呼ぶ。外力  $F$  が  $F_{cr}$  を超えると物体は滑り始める。このときの摩擦力  $f_k$  を動摩擦力と呼ぶ。動摩擦力  $f_k$  は、外力  $F$  の値によらず一定で、また一般に動摩擦力は最大静止摩擦力より小さい。また、摩擦力  $f_s$  を荷重  $W$  で除した値を最大静止摩擦係数  $\mu_s$  と呼び、式 (2.4) で表される [13]。また、摩擦力  $f$  は滑りが発生する前までは回転角度に依存することから、回転時間に比例して、大きくなる。摩擦力  $f$  と時間  $t$  の関係を図 2.5 に示す。  $t_s$  は最大静止摩擦力  $f_s$  における時間である。ただし、図 2.4 および図 2.5 は変形後の弾性体が元の状態に戻る角速度は考慮していない。角速度を考慮した詳細は 4.5 節で述べる。

$$\mu_s = \frac{f_s}{W} \quad (2.4)$$

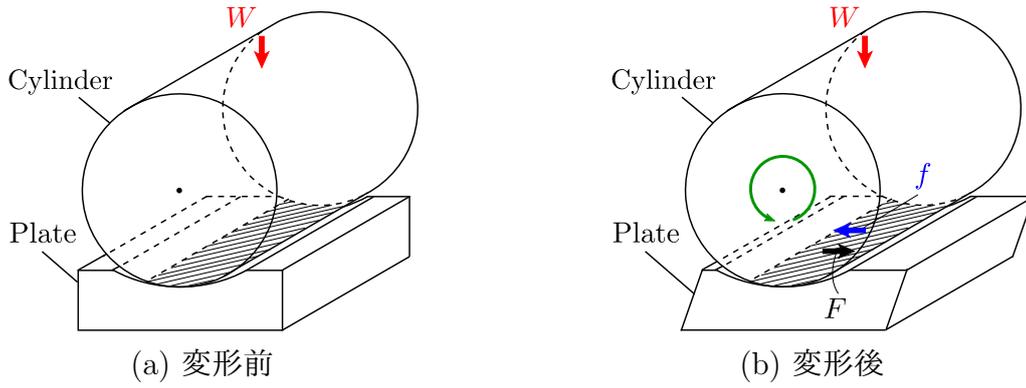


図 2.2: 固体接触時の立体図

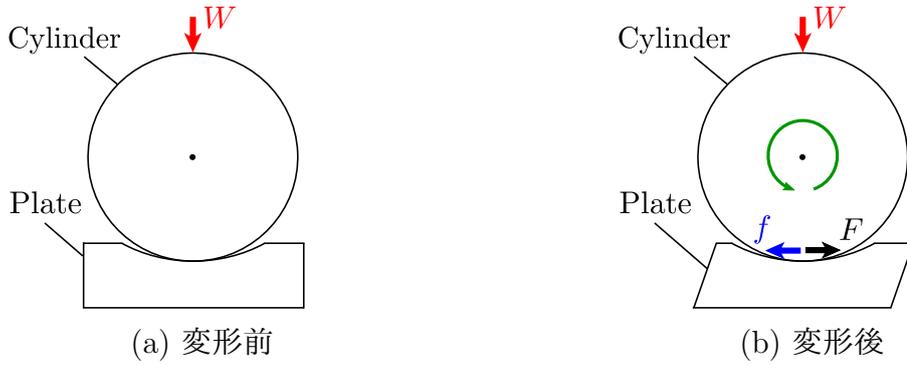


図 2.3: 固体接触時の平面図

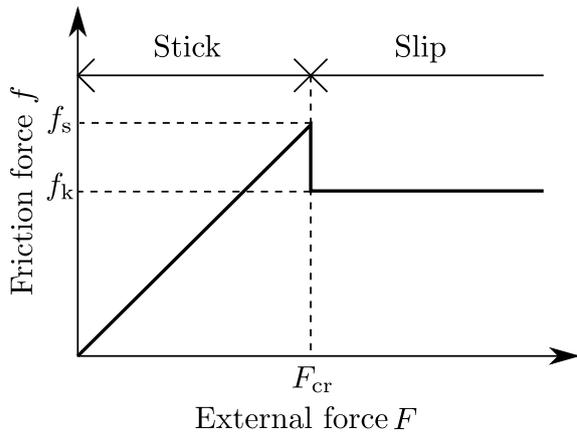


図 2.4: 摩擦力  $f$  と外力  $F$  の関係

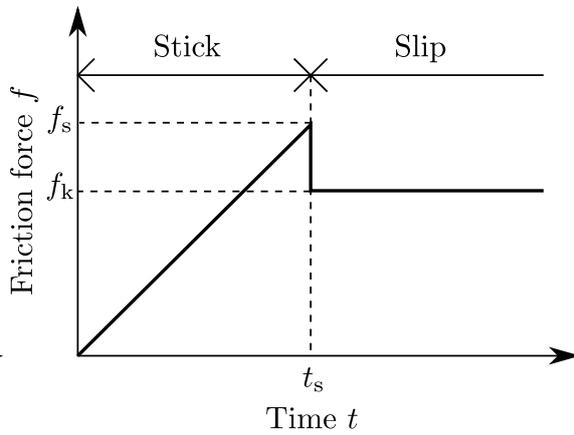


図 2.5: 摩擦力  $f$  と時間  $t$  の関係

## 2.3 弾性体の接触面積と摩擦係数

図 2.6 のように、弾性体と剛体が接触している機構を考える [47]. 物体の表面には粗さが存在するため、弾性体の表面を図 2.6 (a) のような形状とする. 弾性体と剛体を接触させ、接触面に垂直方向の荷重  $W$  および平行方向に働く力  $F$  を加えた状態を図 2.6 (b) に示す. 図 2.6 を平面から見た様子を図 2.7 に示す.

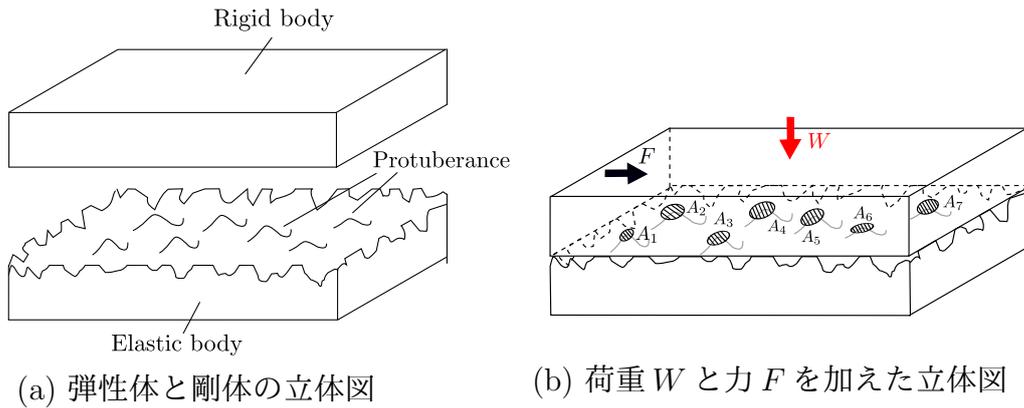


図 2.6: 弾性体と剛体の接触機構

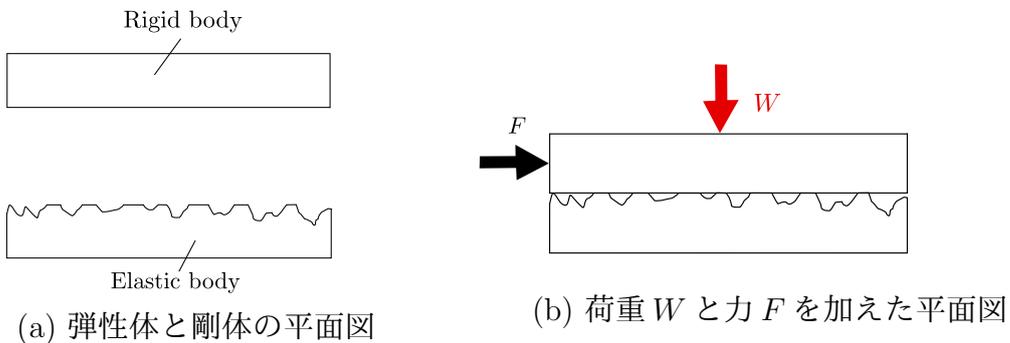


図 2.7: 平面から見た弾性体と剛体の接触機構

接触前の各突起は、荷重  $W$  で剛体に接触すると、その平均接触圧力  $\bar{p}$  により突起先端が変形して接触面  $A_i$  を形成する. この接触面の総和を実質接触面積  $A_s$  と呼ぶ. 実質接触面積  $A_s$  は、弾性体と剛体の接触する表面積で与えられるみかけの接触面積より、一般的にきわめて小さい. 各突起先端によって生成された接触面積  $A_i$  に力が与えられる. 接触面の数を  $m$ , 各突起が受ける荷重の総和の値  $W$  は式 (2.5) のように表すことができる.

$$W = \sum_{i=1}^m \bar{p} A_i \quad (2.5)$$

弾性体に力  $F$  が加えられたことにより，各接触面に剪断応力が生じる．外部から加えられた力  $F$  に対する反力として，剪断応力  $\tau_s$  が生じる．剪断応力  $\tau_s$  を一定とみなせるまで接触面積を分割していると仮定する．反力を  $f_s$ ，剪断応力の値を  $\tau_s$  とすると，式 (2.6) の関係が成り立つ [48]．

$$f_s = \sum_{i=1}^m \tau_s A_i \quad (2.6)$$

ここで，各突起の形状を半球状で同一の大きさであると仮定する．ヤング率  $E$ ，ポアソン比  $\nu$  の材料物性をもつ曲率半径  $r$  の半球状の突起が，荷重  $w$  で剛体の平面に押し付けられた際の，接触半径  $a$  はヘルツの弾性接触理論より

$$a = \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{3rw}{4} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.7)$$

と表される [47]．式 (2.7) より，平均接触面積  $\bar{A}$  は

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \pi a^2 \\ &= \pi \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{3rw}{4} \right)^{\frac{2}{3}} \end{aligned} \quad (2.8)$$

である．また，接触面の数が  $m$  であるので，荷重  $w$  は

$$w = \frac{W}{m} \quad (2.9)$$

と表すことができる．したがって，接触面積の総和  $A_s$  は式 (2.8), (2.9) より，式 (2.10) のように表すことができる．

$$\begin{aligned}
A_s &= \sum_{i=1}^m A_i \\
&= m\bar{A} \\
&= m\pi \left( \frac{1-\nu^2}{E} \frac{3rw}{4} \right)^{\frac{2}{3}} \\
&= m^{\frac{1}{3}}\pi \left( \frac{1-\nu^2}{E} \frac{3rW}{4} \right)^{\frac{2}{3}}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

式 (2.6), (2.10) より, 摩擦係数  $\mu$  は式 (2.11) のように表すことができる.

$$\begin{aligned}
\mu &= \frac{f_s}{W} \\
&= \frac{\tau_s A_s}{W} \\
&= \tau_s m^{\frac{1}{3}} \pi \left( \frac{1-\nu^2}{E} \frac{3r}{4} \right)^{\frac{2}{3}} W^{-\frac{1}{3}}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

## 2.4 動力伝達機構

本節では剪断力を物体へ与えるための動力機構について述べる。まず初めに回転運動から回転運動の変換について述べた後、回転運動から並進運動および並進運動から回転運動の変換について説明する。次に、並進運動から並進運動の変換について説明する。

### 2.4.1 回転-回転変換機構

#### 歯車

歯車は、伝動車の周囲に歯形を付けて動力伝達を可能にした機械要素である。図 2.8 に示すように、回転軸の周りに歯が付いており、2 軸の間に回転運動を伝える機構である [32]。歯車は回転時に振動・騒音が出やすい一方、速度伝達比が正確で、かつ大きな動力を伝達することが可能であるため、蒸気タービンなどで使用されている [33]。

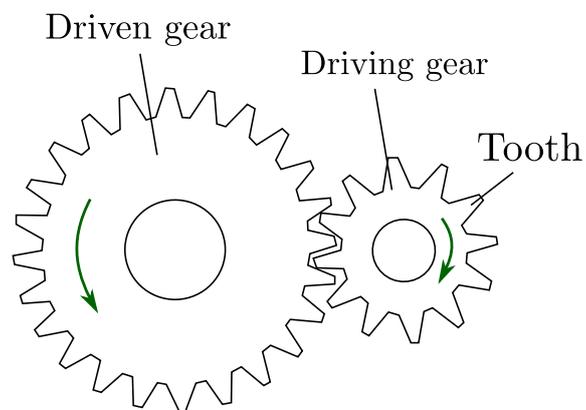


図 2.8: 歯車

## ベルト

図 2.9 に示すように、回転円盤の円周側面に平面状のベルトを巻き付けて動力を伝動する機構が存在する。ベルトと滑車の接触面に生じる摩擦力を用いた伝達方法である [34]。滑りにより、正確な速度伝達比が得られないが、安価であるという特徴を持つ [33]。プリンタヘッドの移動などに使用されている。

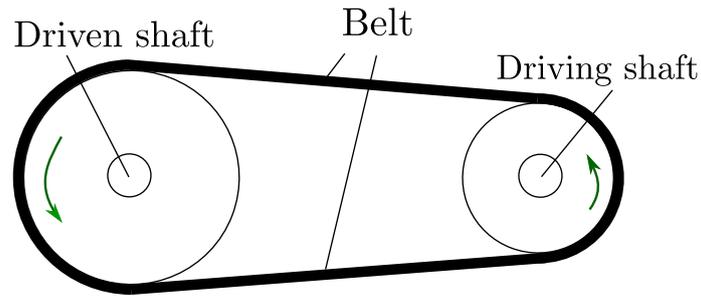


図 2.9: ベルト

## ローラチェーン

ローラチェーンは、図 2.10 に示すように、駆動装置や部品搬送システムなどに用いられる主要な伝達機械要素である。動力源に連結されたスプロケットに噛み込んだチェーンに、スプロケットによる駆動力が直接伝達される。歯車と同様に振動・騒音が出やすいが、ベルト駆動方式と比較すると、滑りが無視できる程小さいため伝達効率も高い [35]。自転車などで使用されている。

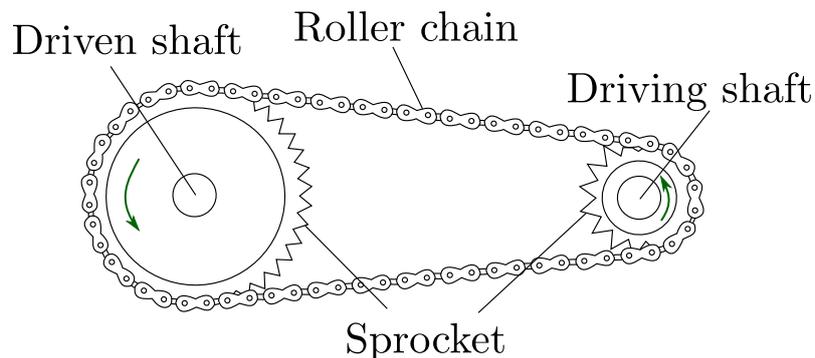


図 2.10: ローラチェーン

## 摩擦車

摩擦車は接触する二つの物体による摩擦力を利用した伝達方法である。例えば、図 2.11 のように、回転する円盤同士を接触させてその摩擦力により動力を伝達することができる [36]。振動や騒音が小さいという特徴を持つが、接点で生じる滑りの影響で、正確な動力を伝えることが困難である。変速機などで利用されている [33]。

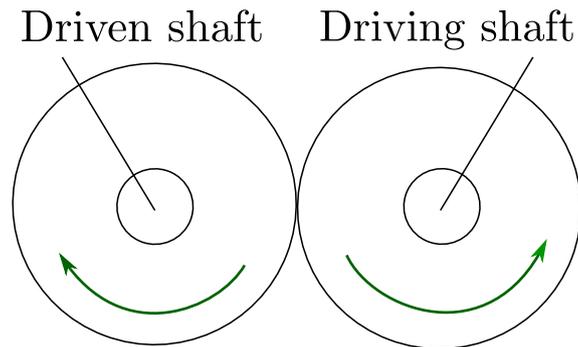


図 2.11: 摩擦車

## 2.4.2 回転-並進変換機構

### スライダクランク機構

上記のような回転運動から回転運動として動力を伝達する機構以外にも回転運動から並進運動および並進運動から回転運動として動力を伝達する機構が存在する。図 2.12 はスライダクランク機構と呼ばれ、スライダとクランクを接続棒で接続することによって回転運動から並進運動および並進運動から回転運動に変換することが可能である。自動車のエンジンなどで利用されている [37]。

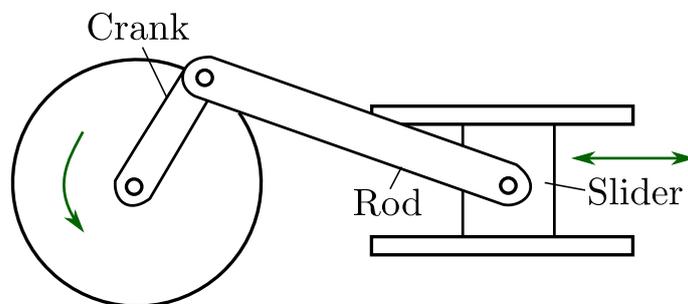


図 2.12: スライダクランク機構

## ラックアンドピニオン

ラックアンドピニオンは、図 2.13 に示すように、半径が無大となった歯車であるラックと通常の歯車を組み合わせた機構である。ピニオンによる回転運動がラックによる並進運動、もしくはラックによる並進運動がピニオンによる回転運動に変換される。自動車のステアリングなどに利用されている [38]。

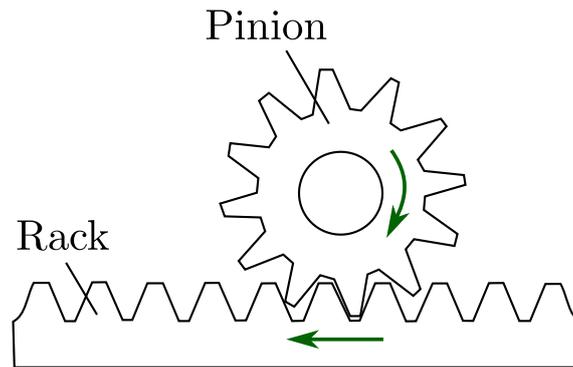


図 2.13: ラックアンドピニオン

## 板カム

板カムは、図 2.14 に示すように、曲線で囲まれた輪郭を持つ板であるカムが回転することによって、カムに接触するローラを介して、従動節が上下に並進運動を行う。内燃機関の吸排気弁の開閉などに利用されている [39]。

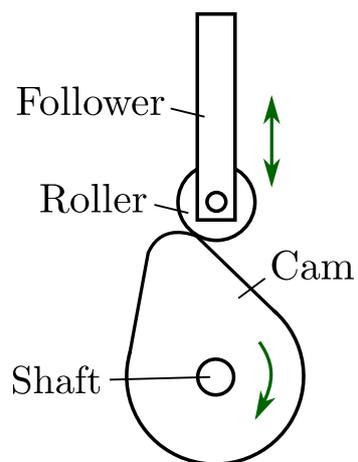


図 2.14: 板カム

## 円筒カム

円筒カムは、図 2.15 に示すように、円筒状のカムが回転することによって、従動節が左右に並進運動を行う。マシンなどに利用されている [39].

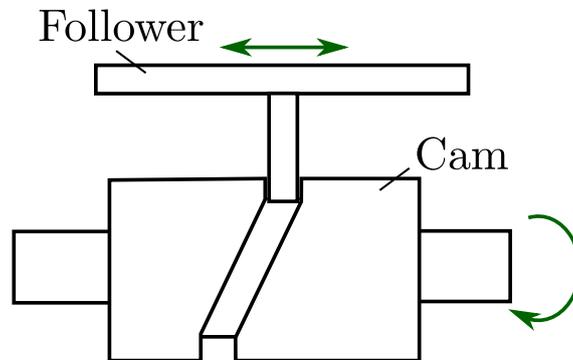


図 2.15: 円筒カム

### 2.4.3 並進-並進変換機構

#### 直交スライダ機構

二つの直交するスライダを組み合わせた直交スライダ機構を図 2.16 に示す。片方のスライダに並進運動を与えることによって、バネが接続されたもう片方のスライダが並進運動を行う。ミキサーなどで利用されている [40].

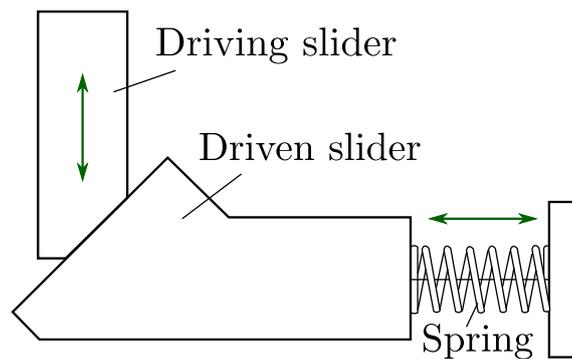


図 2.16: 直交スライダ機構

## トグル機構

トグル機構は図 2.17 に示すように、二つのリンクとスライダから構成され、二つのリンクの結合点である関節部分の並進運動からスライダの並進運動に変換することが可能である。電車のドアの開閉などで利用されている [37]。

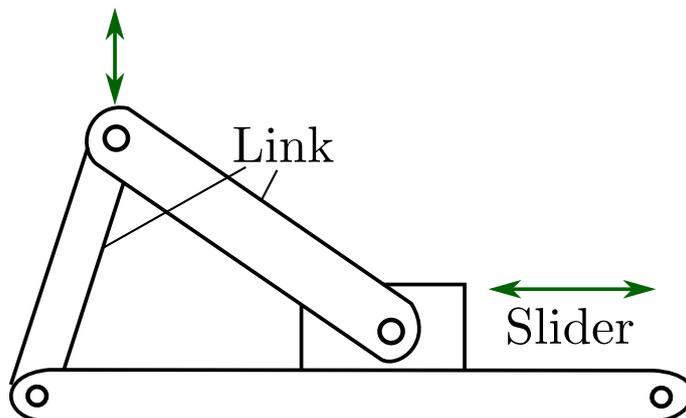


図 2.17: トグル機構

## 直動カム

並進運動から並進運動に変換するカムが存在する。このような機構を持った直動カムを図 2.18 に示す。カムを左右に往復させることによって、カムに接触するローラを介して、従動節が上下に並進運動を行う。自動切削工作機械などで利用されている [39]。

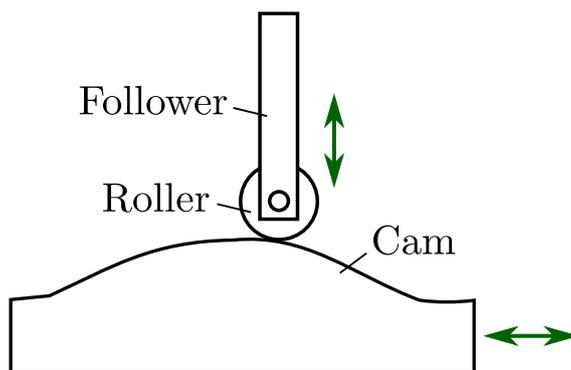


図 2.18: 直動カム

## 伸縮腕

伸縮腕は、二つのリンクが midpoint で接続されたクロスリンクが使用されている機構である。リンクの関節部分が上下に並進運動することによって接続されたリンクが左右に並進運動し、スライダが移動する仕組みである。玄関のドアなどで利用されている [38]。

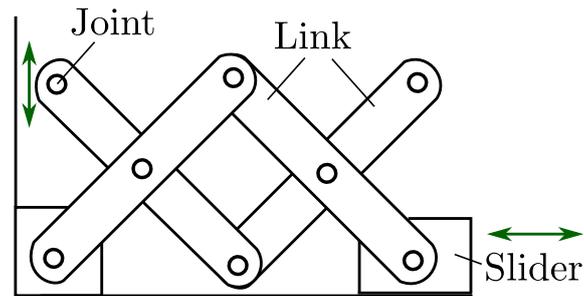


図 2.19: 伸縮腕

## 2.5 皮膚剪断力提示装置

皮膚に剪断力を与える従来研究を説明する。

図 2.20 のように、DC モータが接触子を回転させることによって、指先に左右の皮膚剪断変形を与えるデバイスが存在する。一方、図 2.21 は二つのモータの回転方向によって指先に垂直方向と剪断方向の力を与えるデバイスである。

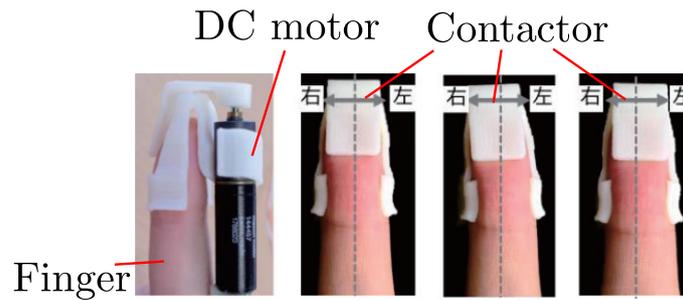


図 2.20: DC モータによる皮膚剪断変形装置 [41]

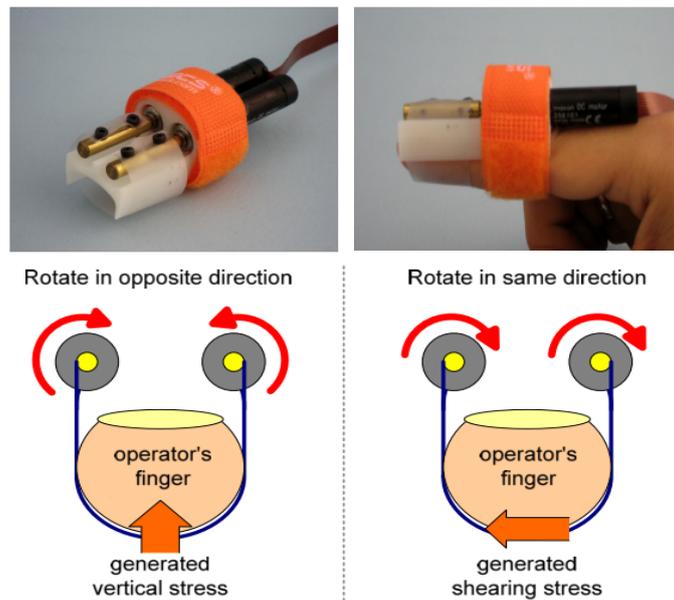


図 2.21: ベルトによる皮膚変形装置 [42]

図 2.22 は、四つの末端効果器の回転をサーボモータによって制御する構造となっている。対向する末端効果器が同じ向きに回転すると、腕に回転運動を提示し、逆向きに回転すると、腕に並進運動を提示することができる。図 2.23 は、M 字型の 5 節リンク機構を用いており、二つのサーボモータが同じ向きに回転すると皮膚に剪断力を提示し、逆向きに回転すると皮膚に垂直力を提示する装置である。

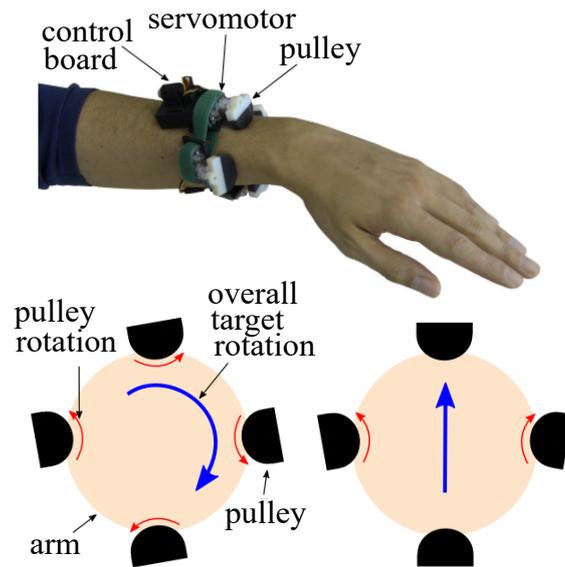


図 2.22: 回転及び並進運動提示装置 [43]

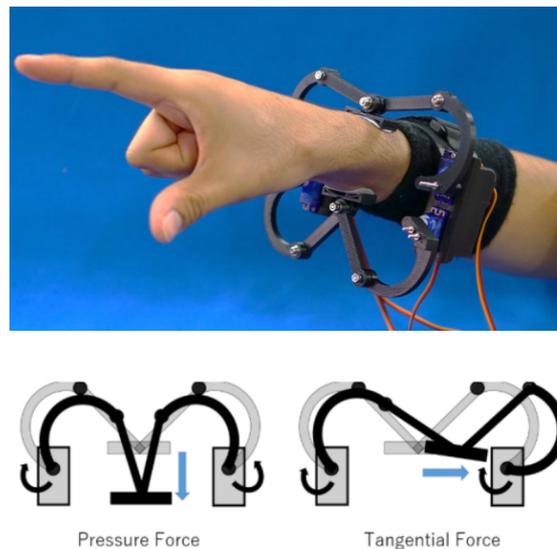


図 2.23: 垂直力及び剪断力提示装置 [44]

図 2.24 は針金製のハンガを足首に装着した際に生じる不随意的回旋運動を応用し、足首圧迫による足首回旋反応の研究を行った [45, 46]. 刺激手法は圧迫であるので、デバイスは小型であるが、1 自由度の回転のみの提示にとどまっております、足首の硬さ分布は考慮していない。

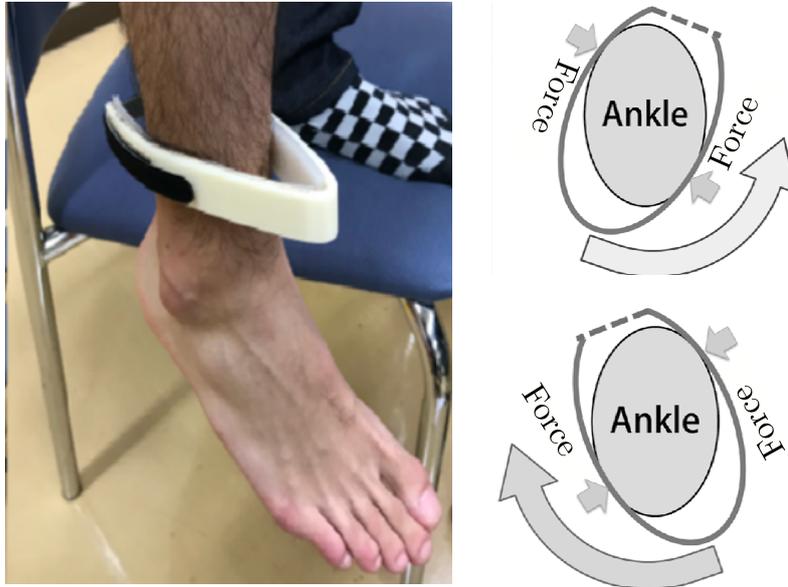


図 2.24: 足首ハンガ [30]

## 2.6 本研究の位置づけ

皮膚に剪断力を与える研究は従来から行われてきたが、主に上肢を対象としており、下肢を対象とした研究は数少ない。また、従来の剪断力提示は皮膚が持つ硬さ分布が考慮されていない。特に下肢は上肢よりも硬さ分布の偏りが大きいため、硬さ分布を考慮しないと滑りの影響によって、与える力が減少する問題が生じる。本研究では、硬さ分布を有した弾性体における滑りを抑制して、剪断力を与える装置の開発を目的とする。硬さ分布を有した弾性体として足首が存在する。三つの末端効果器を歯車を動力伝達機構としたサーボモータで制御することで、弾性体に並進運動と回転運動を提示することが可能となる。一つまたは二つの末端効果器では1自由度回転ないし1自由度並進の提示に制限される。また、足首の形状と脛骨の位置より、足首の前方向に末端効果器を配置することは適切ではない。これより、前後左右に四つの末端効果器を配置する構成は困難である。

硬さ分布を有した弾性体に剪断力を与える際、末端効果器の形状を考慮することにより、滑りの影響を抑える手法を提案する。本研究では末端効果器の曲率半径に着目し、弾性体の硬さに最適な末端効果器の曲率半径を求めることによって滑りを抑制して、最大の剪断力を与える。図 2.25 では三つの末端効果器の曲率半径が同じ場合であり、提示場所によっては滑りが発生する。一方、図 2.26 のように、提示場所の硬さに応じて曲率半径を変化させることによって滑りを抑制している。したがって、本研究により生体組織に力を正確に伝えることが可能となる。本システムの剪断力提示によって生じる皮膚の変形は図 2.1 に示すような弾性体の変形と仮定する。今回は滑り量を一定にしたときの曲率半径と剪断力の最大値との関係を調べる。また、足首ファントムを作製し、三つの末端効果器がそれぞれ剪断力を与えた際に生じる滑りの影響を調査する。

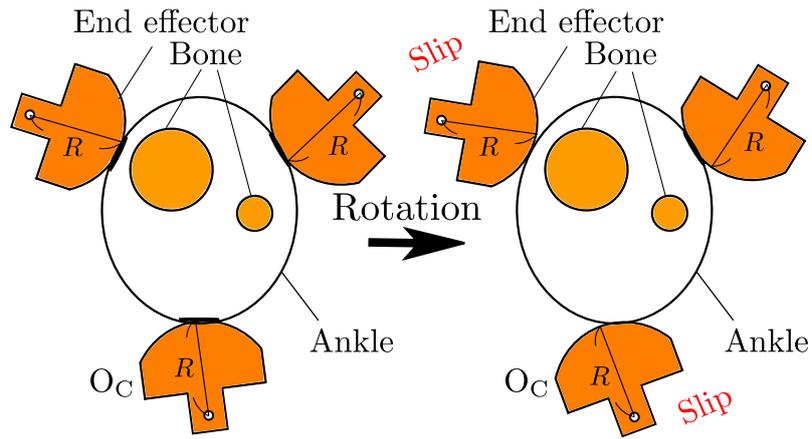


図 2.25: 曲率半径が同じときのデバイスの動作

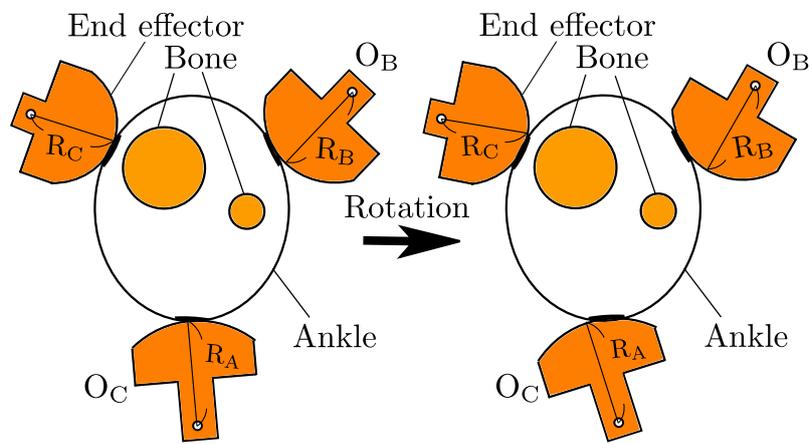


図 2.26: 曲率半径を考慮したときのデバイスの動作

## 第3章 システムの要素

本章では，まず初めにシステム全体のブロック図について述べた後，剪断力を与える要素である末端効果器およびRCサーボモータについて説明する．次に，剪断力を計測する装置である三軸力センサについて説明する．

### 3.1 システムのブロック図

本システムは，図3.1に示すように，皮膚に剪断力を与えるために末端効果器をPWMで制御したRCサーボモータによって回転させる．末端効果器の回転角度に応じて，皮膚に与える剪断力が変化する．

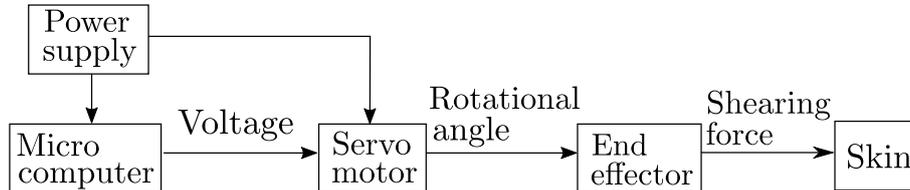


図 3.1: システムのブロック図

## 3.2 末端効果器

物体に力を与える際に、物体と接触する部分を末端効果器と呼ぶ。剪断力を与える際に使用する末端効果器は図 3.2 のような接触部分が円柱状となっている。また、平面から見た様子を図 3.3 に示す。図 3.2, 3.3 (a) のように末端効果器を物体に押し当て、図 3.2, 3.3 (b) のように末端効果器を回転させることによって物体に剪断力  $F_S$  を与えることができる。

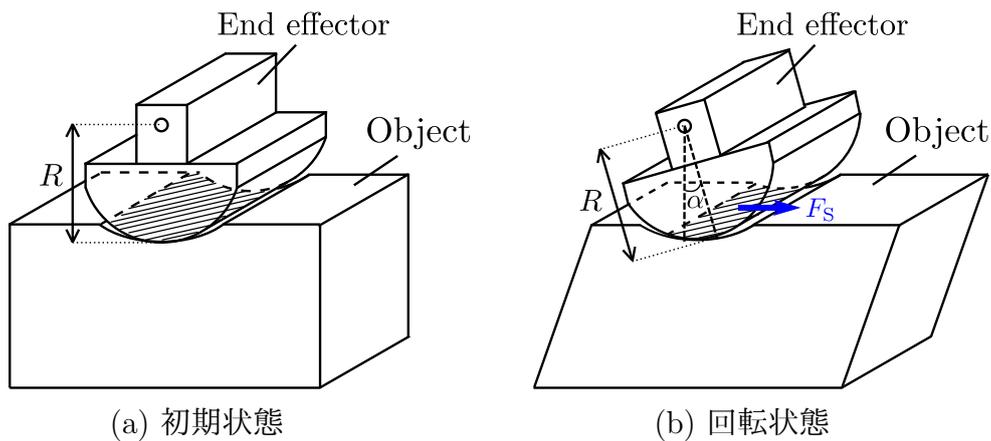


図 3.2: 末端効果器の概要図

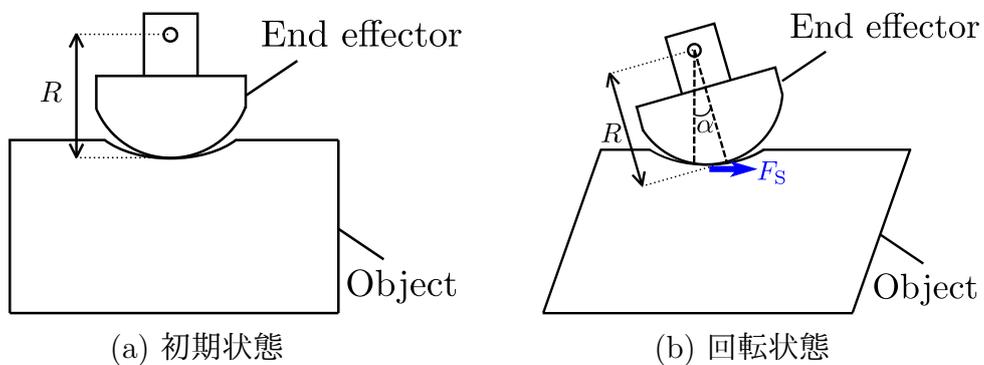


図 3.3: 末端効果器の平面図

## 3.3 RC サーボモータの基本構造

RC (Radio controlled) サーボモータは回転角度を制御するために使われる [52]。図 3.4 に示すように、RC サーボモータは、DC モータ、減速器、ポテンシオメータおよび制御回路から構成される。モータの現在の回転角度はポテンシオメータによっ

て電圧に変換され、誤差増幅器の入端子間の電位差が0になるように帰還される。入力回転角度であり、現在のモータの回転角度と比較した結果より、モータの回転方向が決定される [53].

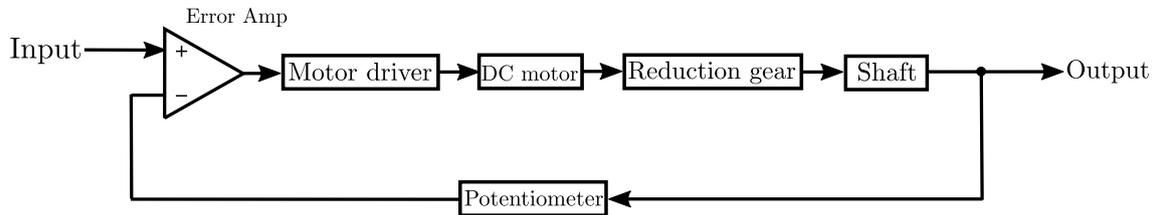


図 3.4: RC サーボモータの基本構造

### 3.4 DC モータの回転原理

DC モータは図 3.5 のように永久磁石、コイル、ブラシおよび整流子から構成されている。コイルは電流を通すことで磁界が発生し、鉄心に巻かれたコイルが励磁されることで両端に N 極と S 極が発生し、電磁石となる。また、電流の向きによって励磁される磁石の極は変化する。永久磁石と電磁石との間に生じる引力と斥力によって、連続的な回転運動を引き起こす [54].

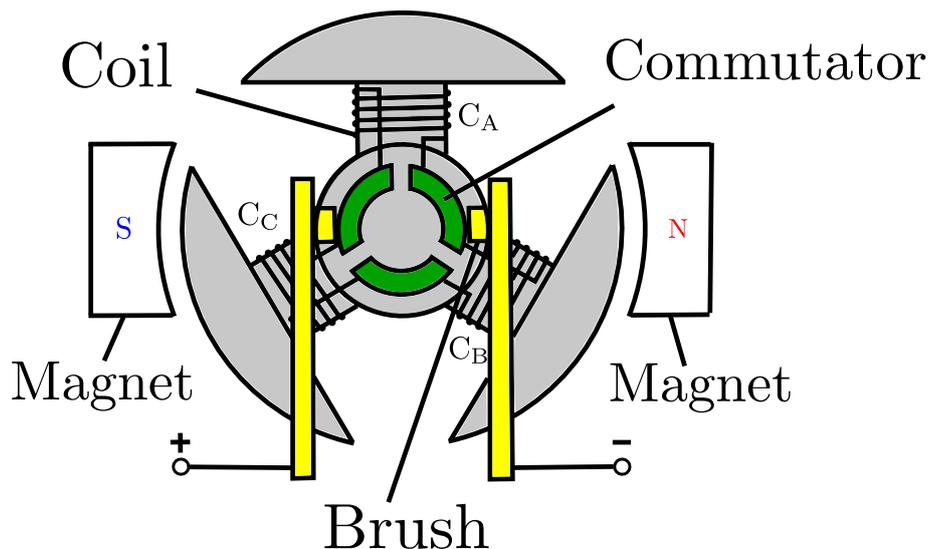


図 3.5: DC モータの基本構造

図 3.6 のコイル  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$  には整流子が接続されているため、矢印の方向に電流が流れる。図 3.6 (a) において、コイル  $C_A$  の磁石側には S 極が、コイル  $C_B$ ,  $C_C$  の磁石側には N 極が発生する。各コイルと永久磁石との間に引力および斥力が発生することにより、時計方向に 60 deg 回転する。時計方向に 60 deg 回転した後は図 3.6 (b) のようになる。図 3.6 (b) において、コイル  $C_A$ ,  $C_C$  の磁石側には S 極が、コイル  $C_B$  の磁石側には N 極が発生する。各コイルと永久磁石との間に引力および斥力が発生することにより、時計方向に回転する。図 3.6 (a) から時計方向に 60 deg 回転した状態は図 3.6 (b) になる。図 3.6 (b) から時計方向に 60 deg 回転した状態は図 3.6 (a) となるので、図 3.6 (a) と (b) の状態を繰り返すことにより、時計方向にモータが回転する。また、コイルに通す電流方向を反対に設定することにより、モータは反時計方向に回転する。

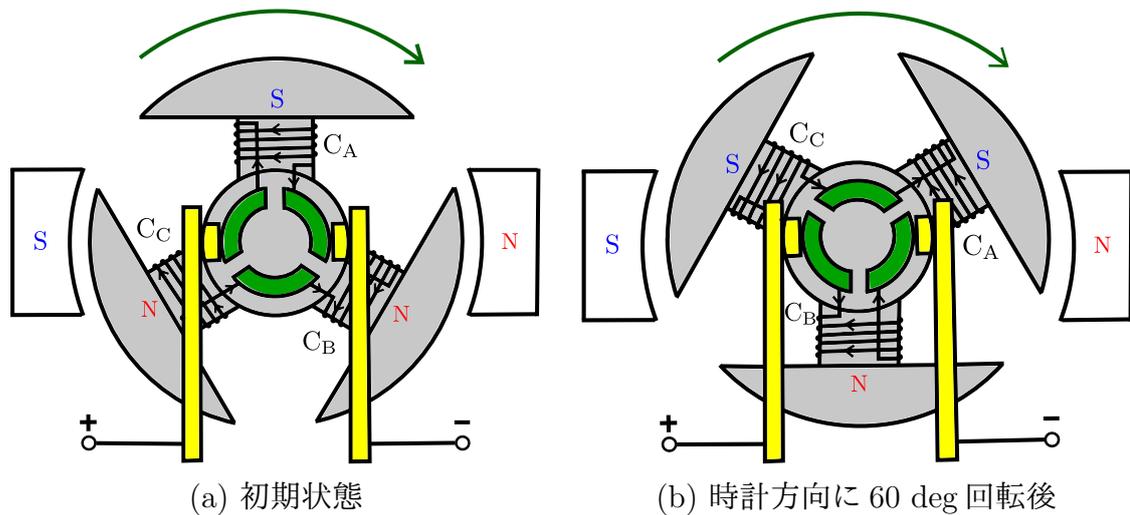


図 3.6: DC モータの回転原理

### 3.5 PWM 制御

RC サーボモータの角度は PWM(Pulse Width Modulation) 方式により制御される。図 3.7 のように、一定の周期  $T$  におけるパルス幅  $t_p$  の変化により、平均電圧  $\bar{V}$  を制御する方式である。デューティ比  $D$  は周期  $T$  に対するパルス幅  $t_p$  の割合であり、パルス波における電圧の最大値  $V_{\max}$  にデューティ比  $D$  を乗じることで平均電圧  $\bar{V}$  を求める。デューティ比  $D$  および平均電圧  $\bar{V}$  を式で示すと、式 (3.1), (3.2) となる。

$$D = \frac{t_p}{T} \quad (3.1)$$

$$\bar{V} = DV_{\max} \quad (3.2)$$

式(3.2)より、平均電圧 $\bar{V}$ はデューティ比 $D$ に比例するため、パルス幅 $t_p$ の変化に従い、平均電圧 $\bar{V}$ が変化する。パルス幅を平均電圧値に変換する回路を設けることにより、パルス幅の値がRCサーボモータの回転角度を決定する [54]。

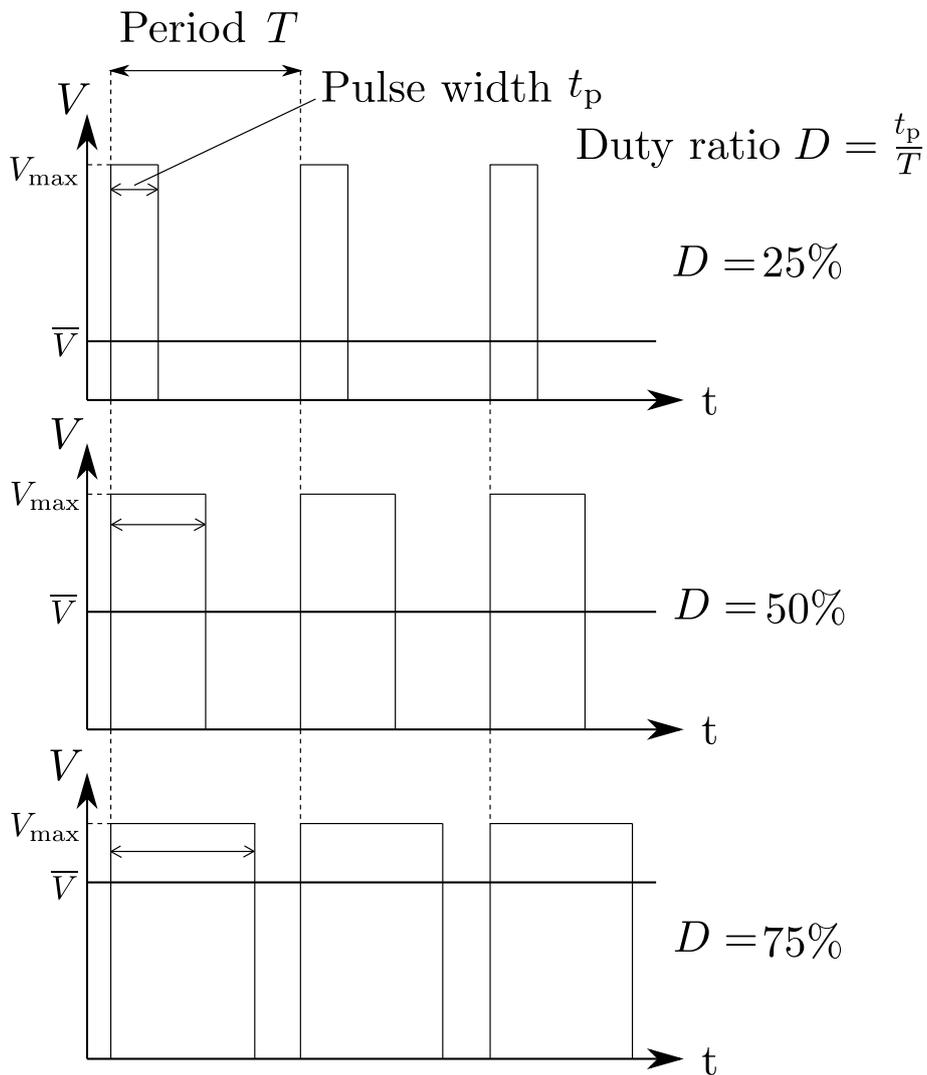


図 3.7: PWM 制御方式 (デューティ比  $D = 25, 50, 75\%$ )

### 3.6 三軸力センサ

三軸力センサとは，三軸方向の力の値を計測する装置である．図 3.8 に三軸力センサの概要を示す．本システムでは，垂直力  $F_N$  ( $z$  軸) と剪断力  $F_S$  ( $x$  軸) の値を計測するために使用する．力はひずみゲージの抵抗変化を読み取ることによって計測することができる [55]．ひずみゲージは，力を加えると抵抗が変化する物質であり，ひずみおよび比例定数をそれぞれ  $\varepsilon$ ,  $K$  とすると，抵抗の変化量  $\Delta Z$  と抵抗  $Z$  の比は

$$\frac{\Delta Z}{Z} = K\varepsilon \quad (3.3)$$

と表すことができる．また，図 3.9 のように，ホイートストンブリッジ回路を用いて抵抗の変化を電圧に変換する．また，温度変化による抵抗変化は十分小さいと仮定すると，出力電圧  $V_o$  は式 (3.4) のように表すことができる．

$$V_o = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} V_i \quad (3.4)$$

$Z_1$  の抵抗値を  $Z + \Delta Z$ ， $Z_2, Z_3, Z_4$  の抵抗値を  $Z$  とすると，出力電圧の変化量  $\Delta V_o$  は式 (3.5) と表すことができる．

$$\begin{aligned} \Delta V_o &= \frac{\Delta Z}{4Z + 2\Delta Z} V_i \\ &= \frac{1}{4} K\varepsilon V_i \quad (\Delta Z \ll Z) \end{aligned} \quad (3.5)$$

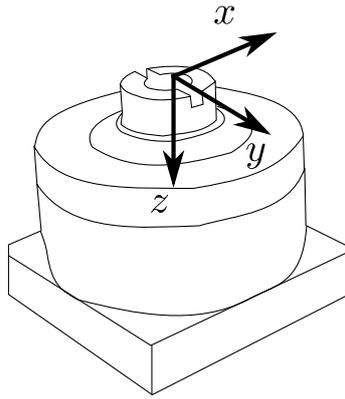


図 3.8: 三軸力センサの概要図

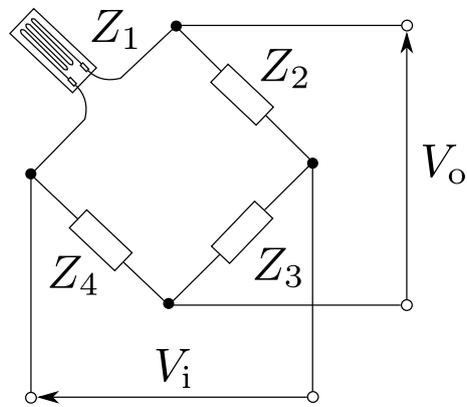


図 3.9: ひずみゲージとホイートストンブリッジ回路

## 第4章 剪断力提示システム

本章では、まず初めに足首における剪断力提示場所について述べた後、剪断力提示装置について説明する。次に、末端効果器の回転によって発生する運動の発生原理および滑りの抑制方法を説明する。

### 4.1 足首における装置の提示場所

剪断力の提示場所を右足首の断面図に表すと図4.1より、 $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ である。 $P_A$ はヒラメ筋の近くに位置し、 $P_B$ は長指伸筋の近くに位置する。また、 $P_C$ は脛骨の近くに位置する。以上のように、足首における皮膚の内部は様々な組織で構成されている。特に骨は皮膚表面からの見かけの硬さに大きく影響を及ぼす組織である。足首には脛骨および腓骨によって硬さに分布が生じる。硬さの違いが剪断力に影響を及ぼすため、末端効果器の形状を検討する必要がある。

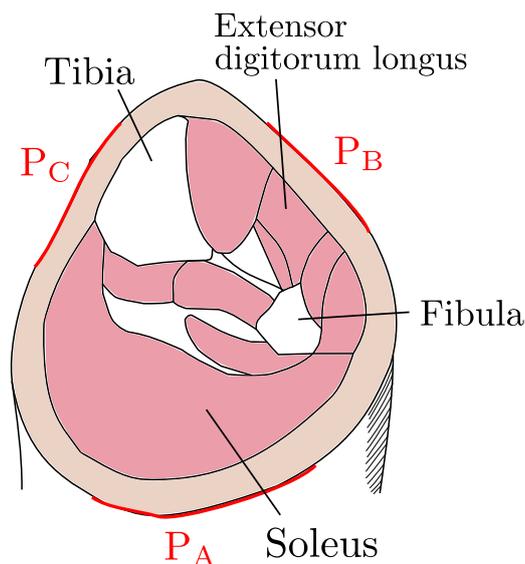


図 4.1: 右足首と提示場所の関係

## 4.2 剪断力提示装置

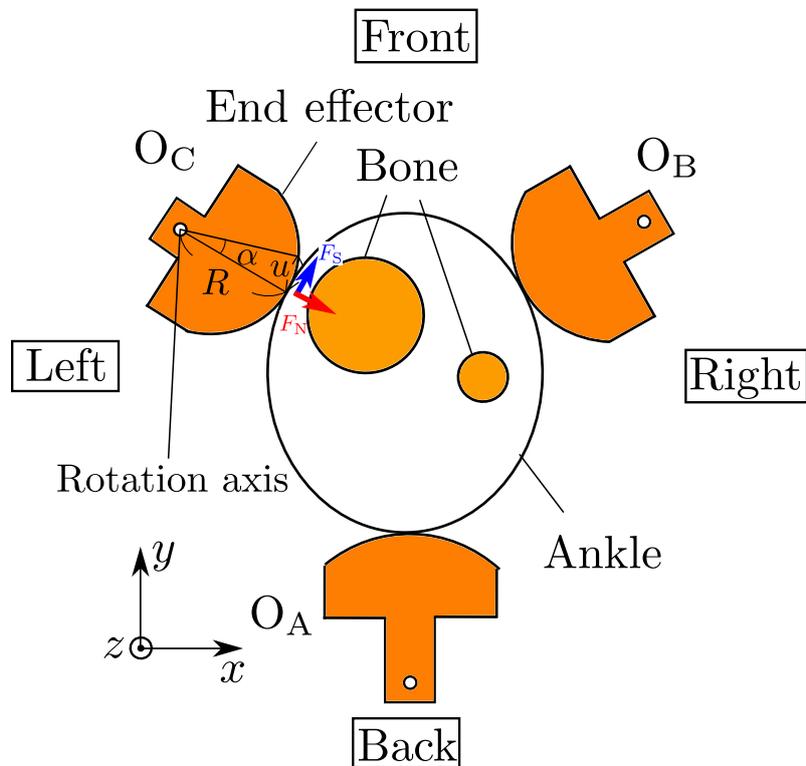


図 4.2: 剪断力提示装置

提案する剪断力提示装置の構成図を図 4.2 に示す。図 4.2 は  $z$  軸方向から見た様子  
を示している。剪断力提示装置は、三つの末端効果器  $O_A$ ,  $O_B$ ,  $O_C$  をサーボ  
モータで駆動する。末端効果器が回転することによって足首の皮膚に剪断力を提示  
する。末端効果器と弾性体との間に滑りが発生しない場合、末端効果器が皮膚に接  
触した状態で  $\alpha$  だけ回転すると、皮膚が  $u$  だけ変位し、

$$u = R\alpha \quad (4.1)$$

と表される。 $R$  は末端効果器の半径、 $\alpha$  は回転角度である。また、 $F_N$  および  $F_S$  は  
それぞれ、末端効果器が弾性体に与える垂直力および剪断力である。ここで示す皮  
膚の変形は 2.1 節の図 2.1 に示すような弾性体の変形と仮定する。

### 4.3 剪断力による運動提示

三つの末端効果器の回転を利用して剪断力を与えることによって、足首の並進運動と回転運動を提示することが可能となる。本節では、並進運動および回転運動を提示する際の三つの末端効果器の回転について説明する。

#### 4.3.1 並進運動

前後左右の並進運動における末端効果器の回転方向を図 4.3 に示す。末端効果器が皮膚を剪断する方向すなわち末端効果器と皮膚との間の接線方向に力を提示する。図 4.3 (a), (b) のように前後方向の提示においては、末端効果器  $O_A$  および  $O_B$  が回転し、末端効果器  $O_C$  は回転しない。図 4.3 (c), (d) のように左右方向の提示においては、回転方向の提示を同時に行わないように、末端効果器  $O_C$  は末端効果器  $O_A$ ,  $O_B$  それぞれの 2 倍の回転力を提示する。

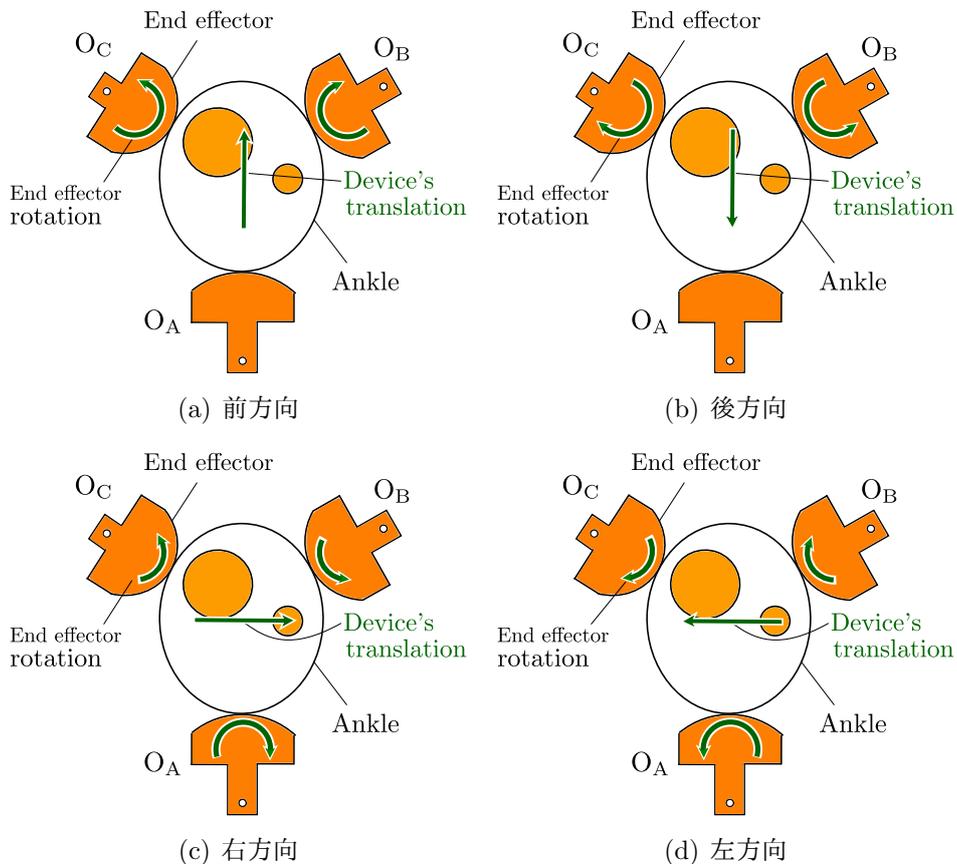


図 4.3: 前後左右の並進運動提示

斜め方向の並進運動においては，図 4.4 に示した末端効果器の回転により誘導することが可能である。

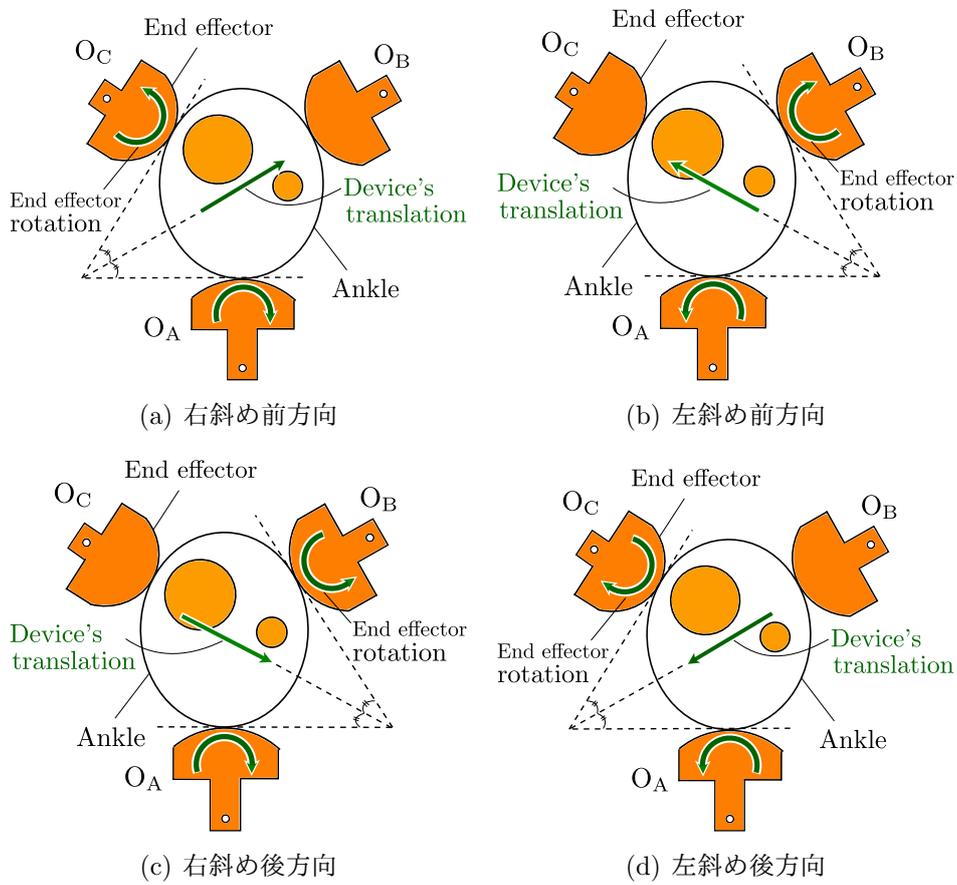


図 4.4: 斜め方向の並進運動提示

### 4.3.2 回転運動

時計方向の回転および反時計方向の回転運動における末端効果器の回転方向を図4.5に示す。三つすべての末端効果器が同じ方向に回転することによって、時計方向の回転および反時計方向の回転提示を行う。

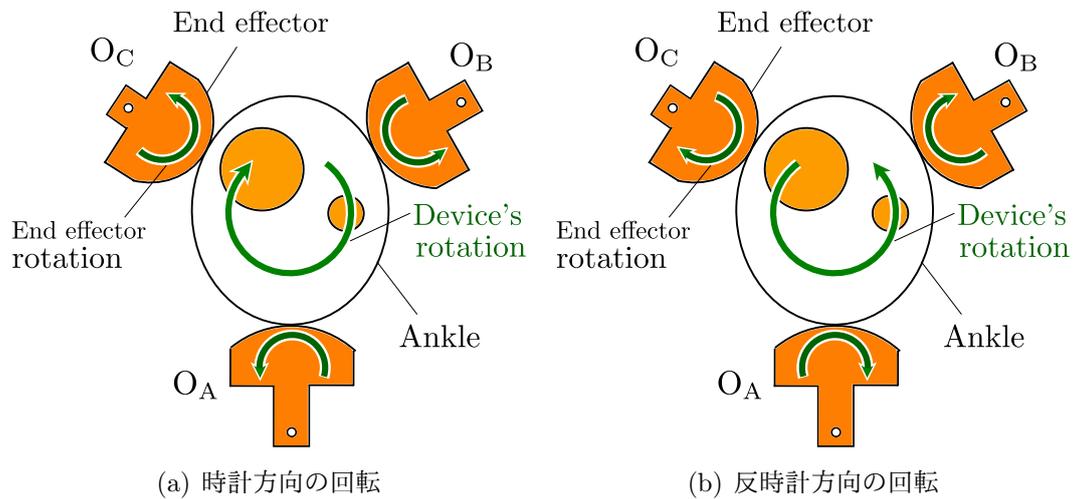


図 4.5: 回転運動提示

## 4.4 剪断力と回転角度の関係

図 4.6 のように末端効果器と弾性体との位置関係を示した模式図を考える。また、平面から見た様子を図 4.7 に示す。末端効果器を物体に押し当てた状態で剪断力を与える際、図 4.6 (b) のように末端効果器が  $\alpha$  だけ回転することによって、高さ  $h$  の直方体の物体に対して、剪断力  $F_S$  が与えられる。 $u$  は末端効果器の回転した変位を示しており、式 (4.1) で表される。回転軸と末端効果器の先端との距離を  $R$  とすると、剪断方向の変位  $\delta_s$  は

$$\begin{aligned}\delta_s &= h \tan \theta \\ &= R \tan \alpha\end{aligned}\quad (4.2)$$

であると仮定する。剪断方向に  $\delta_s$  だけ弾性体の変位したときの、剪断方向のひずみ  $\gamma$  は式 (4.3) と表される。

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{\delta_s}{h} \\ &= \frac{R}{h} \tan \alpha\end{aligned}\quad (4.3)$$

剪断ひずみ  $\gamma$  によって生じる剪断応力  $\tau_s$  は

$$\begin{aligned}\tau_s &= \frac{E\gamma}{2(1+\nu)} \\ &= \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{R}{h} \tan \alpha\end{aligned}\quad (4.4)$$

と表される [49]。剪断力  $F_S$  は剪断応力  $\tau_s$  に接触面積  $A$  を乗じた値である。弾性体のヤング率  $E$  およびポアソン比  $\nu$  は一定とする。したがって、式 (4.4) より、剪断力  $F_S$  と回転角度  $\alpha$  との関係は式 (4.5) で表すことができる。

$$\begin{aligned}F_S &= \tau_s A \\ &= \frac{EA}{2(1+\nu)} \frac{R}{h} \tan \alpha \quad \left(0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}\right)\end{aligned}\quad (4.5)$$

また、式 (4.5) より、角速度を  $\omega$ 、時間を  $t$  とすると、式 (4.6) で表される。

$$F_S = \frac{EA}{2(1+\nu)} \frac{R}{h} \tan \omega t \quad \left(0 \leq t \leq \frac{\alpha_t}{\omega}\right)\quad (4.6)$$

$\alpha_t$  は目標角度であり、末端効果器の回転後の角度を示している。

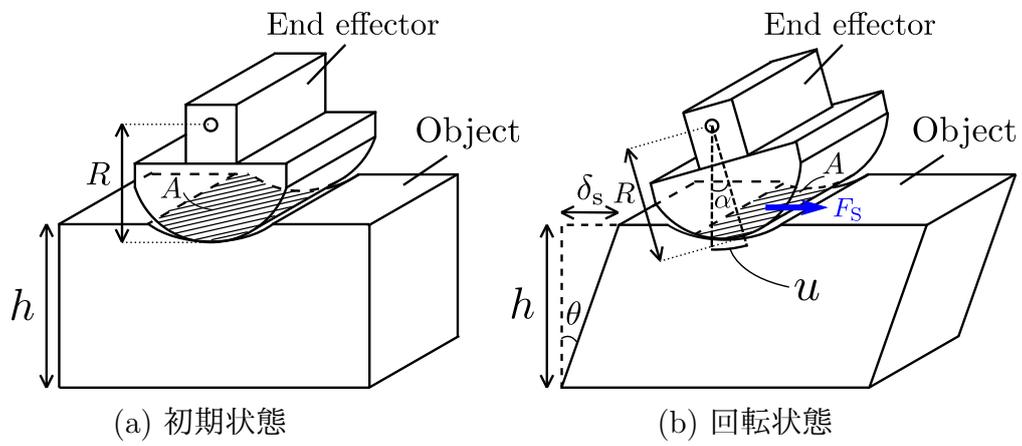


図 4.6: 末端効果器と物体の模式図

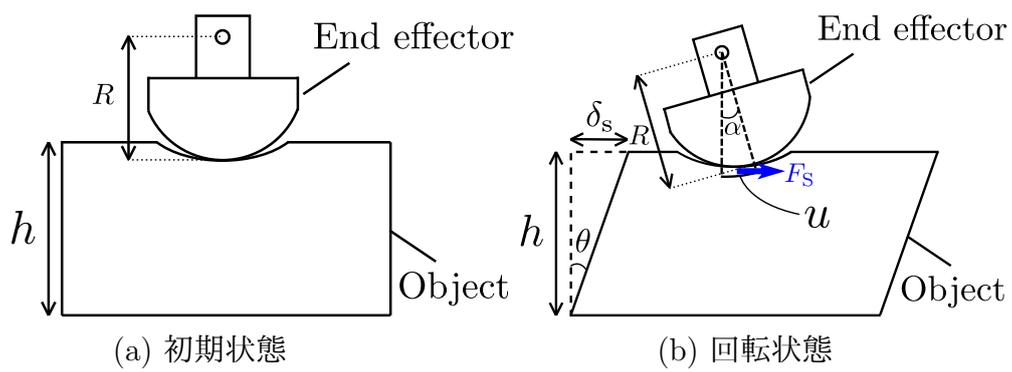


図 4.7: 末端効果器と物体の平面図

## 4.5 滑りの発生原理

末端効果器を弾性体に押し付け、末端効果器が回転した時の位置関係を図 4.8 に示す。末端効果器の回転角度  $\alpha$  が大きくなるに従い、式 (4.5) より、剪断力  $F_S$  は大きくなる。一方、回転角度  $\alpha$  の増加に従い押し込み量  $d_0$  が  $d$  まで小さくなるため、垂直力  $F_N$  は小さくなる。回転時における垂直力および剪断力をそれぞれ  $F_N$ ,  $F_S$  とすると、

$$F_S > \mu_s F_N \quad (4.7)$$

が成り立つ場合、滑りが発生する。 $\mu_s$  は最大静摩擦係数である。また、滑りによって生じる剪断力の時間変化は式 (4.6) を用いて、

$$F_S = \begin{cases} \mu_s F_N - \frac{EA}{2(1+\nu)} \frac{R}{h} \tan \Omega(t - t_s) & \left( t_s < t \leq t_k, t_s \leq \frac{\alpha_t}{\omega} \right) \\ f_k & (t > t_k) \end{cases} \quad (4.8)$$

と表される。 $\Omega$  は剪断力によって変形した後の弾性体が元の状態に戻る角速度を示している。 $t_s$  および  $t_k$  はそれぞれ最大静摩擦力  $f_s$  および動摩擦力  $f_k$  における時間である。一方、滑りが発生しない場合、末端効果器の回転後における剪断力の時間変化は

$$F_S = F_M \quad \left( t > \frac{\alpha_t}{\omega}, t_s > \frac{\alpha_t}{\omega} \right) \quad (4.9)$$

である。 $F_M$  は剪断力の最大値である。

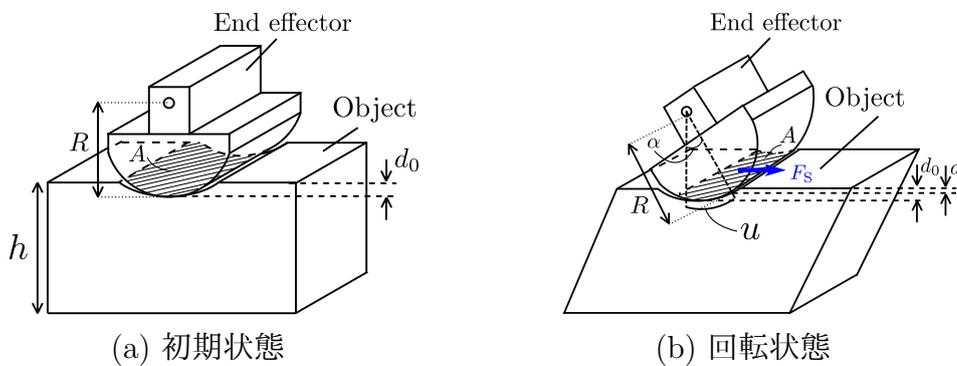


図 4.8: 回転時における押し込み量の変化

## 4.6 滑りの抑制方法

図 4.8 に示すように，末端効果器が回転した時の押し込み量  $d$  は回転する前の押し込み量  $d_0$  よりも小さくなる．押し込み量が  $d_0$  から  $d$  へ小さくなることによって，垂直力  $F_N$  が小さくなる．押し込み量の差  $d_0 - d$  は

$$\begin{aligned} d_0 - d &= R(1 - \cos \alpha) \\ &= R \left( 1 - \cos \frac{u}{R} \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

と表すことができる．式 (4.10) より，変位  $u$  を一定とし，末端効果器の曲率半径  $R$  を大きくすることを考える．変位  $u$  を 10 mm にしたときの押し込み量の差  $d_0 - d$  と曲率半径  $R$  の関係は図 4.9 となる．

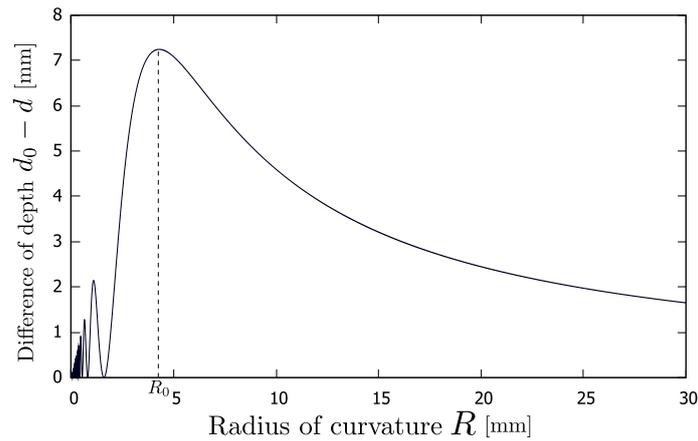


図 4.9: 押し込み量の差  $d_0 - d$  と曲率半径  $R$  の関係

$d_0 - d$  を  $R$  で微分した  $(d_0 - d)'$  が 0 になるときの曲率半径の最大値を  $R_0$  とする．図 4.9 より，曲率半径  $R$  が  $R_0$  より大きい場合，押し込み量の差  $d_0 - d$  は  $R$  の増加に従い，小さくなる．弾性体に与える変位  $u$  は末端効果器が 90 deg 回転したときに生じる変位よりも小さい必要があるため，

$$\frac{\pi}{2} R > u \quad (4.11)$$

が成り立つ．すなわち

$$R > \frac{2}{\pi}u > R_0 \quad (4.12)$$

であるので，曲率半径  $R$  は  $R_0$  より大きいとする．したがって，曲率半径  $R$  を大きくすることによって押し込み量の差  $d_0 - d$  を小さくすることができ，垂直力  $F_N$  の低下も抑えることができるため，式 (4.7) より，滑りを抑制することができる．

## 4.7 滑りと固着

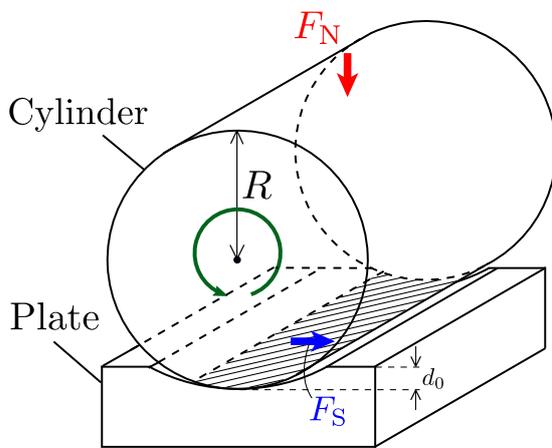


図 4.10: 剪断力提示の立体図

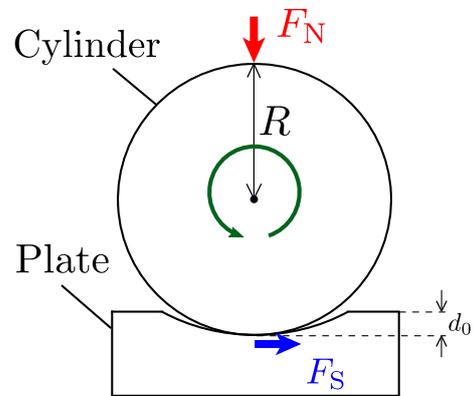


図 4.11: 剪断力提示の平面図

接触した物体間に滑りが生じ始めるのは接触面と接線方向あるいは平行な方向の力（剪断力  $F_S$ ）が接触面と垂直方向の力（垂直力  $F_N$ ）に最大静摩擦係数  $\mu_s$  を乗じた値よりも大きくなるのが条件である．したがって，物体が滑らない条件は式 (4.13) で表される．

$$\mu_s \geq \frac{F_S}{F_N} \quad (4.13)$$

図 4.10 に示すように，接触している物体をそれぞれ円柱型の剛体，立方体型の弾性体とする．円柱型の剛体が回転することにより，立方体型の弾性体に剪断力  $F_S$  を与えたとする．また，平面から見た様子を図 4.11 に示す．円柱を回転させる出力トルクを  $N$ ，回転軸からの距離を  $R$ （＝曲率半径）とすると，円柱を回転させたときに弾性体に与える剪断力  $F_S$  は

$$F_S = \frac{N}{R} \quad (4.14)$$

と表される [51]. 一方, 式 (2.11) より,  $W$  を  $F_N$ ,  $\mu$  を  $\mu_s$  と置き換えると,  $\mu_s F_N$  は

$$\mu_s F_N = \tau_s m^{\frac{1}{3}} \pi \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{3r}{4} \right)^{\frac{2}{3}} F_N^{\frac{2}{3}} \quad (4.15)$$

と表すことができる. また, ヘルツの弾性接触理論を用いると,  $F_N$  は

$$F_N = \frac{4}{3} \frac{E}{1 - \nu^2} R^{\frac{1}{2}} d_0^{\frac{3}{2}} \quad (4.16)$$

である [50]. 式 (4.16) を式 (4.15) に代入すると, 式 (4.10) より,

$$\begin{aligned} \mu_s F_N &= \tau_s m^{\frac{1}{3}} \pi r^{\frac{2}{3}} R^{\frac{1}{3}} \left( d_0 - R \left( 1 - \cos \frac{u}{R} \right) \right) \\ &= \tau_s m^{\frac{1}{3}} \pi r^{\frac{2}{3}} R^{\frac{1}{3}} (d_0 - R(1 - \cos \omega t)) \end{aligned} \quad (4.17)$$

と表すことができる. 以上より, 曲率半径  $R$  を変化させたときの固着領域と滑り領域を示すと図 4.12 のように表される.

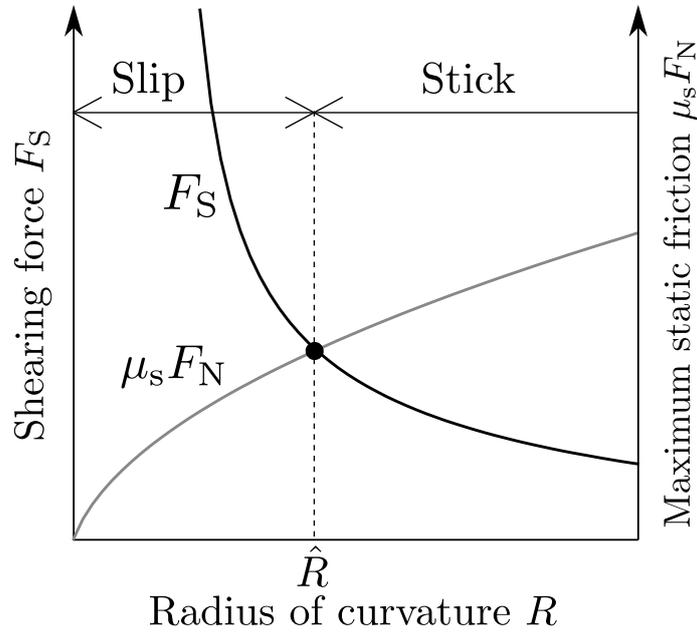


図 4.12: 滑りと固着の領域

以上より, 式 (4.13) のように滑りが生じない条件において, 式 (4.18) のように, 剪断力  $F_S$  が最大となるような曲率半径  $\hat{R}$  が決定できる.

$$\hat{R} = \max_R F_S \quad (F_S \geq \mu_s F_N) \quad (4.18)$$

また、式 (4.6), (4.8), (4.9), (4.17) より、固着領域および滑り領域における  $F_S$  と  $\mu_s F_N$  の時間変化は図 4.13 のように表される。図 4.13 (a) は滑りが発生する場合を示しており、図 4.13 (b) は滑りが発生しない場合を示している。図 4.13 (a) に示すように、剪断力  $F_S$  は  $\mu_s F_N$  より大きな値になると、滑り始めるため、剪断力  $F_S$  が  $F_M$  となった後、 $F_S$  は動摩擦力  $f_k$  まで減少し、その後一定の値となる。一方、図 4.13 (b) に示すように、剪断力  $F_S$  は回転後の時間  $\frac{\alpha t}{\omega}$  まで増加するが、値は  $\mu_s F_N$  以下であるため、滑りは発生せず、 $F_M$  で一定となる。

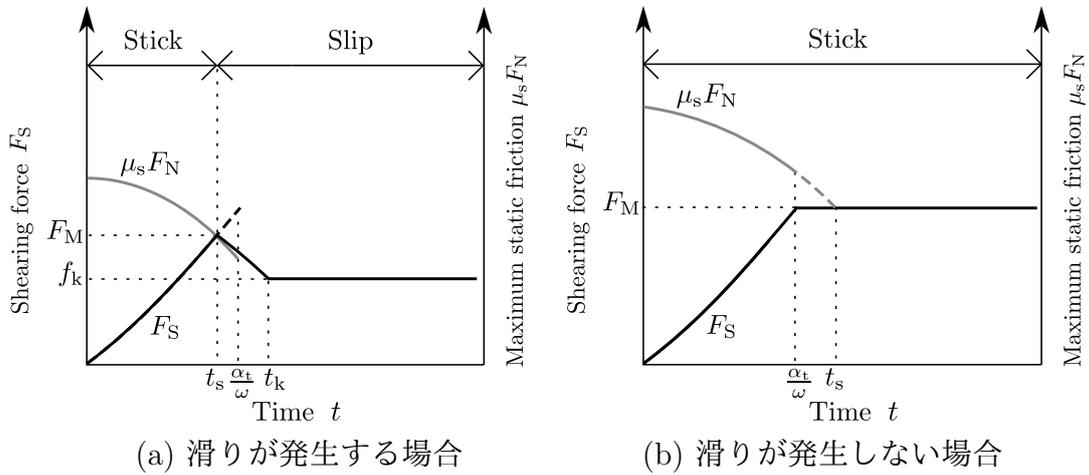


図 4.13: 剪断力  $F_S$  と最大静止摩擦力  $\mu_s F_N$  の時間変化

## 第5章 剪断力の評価実験

本章では、まず初めにデバイスを地面に固定したときの剪断力の時間変化を計測する。このとき、滑り量を一定とし、剪断力の最大値と曲率半径の関係を調査する。次に、硬さ分布を有した足首ファントムにデバイスを装着し、硬さ分布が剪断力に与える影響を調査する。

### 5.1 滑り量一定時における剪断力の評価

#### 5.1.1 実験目的

弾性体に剪断力を与える際、剪断力の最大値を大きくかつ滑りによる剪断力の減少を小さくする必要がある。本実験では、滑り量を一定にしたときの曲率半径と剪断力の最大値の関係を調査することにより、上記の二つの目的を達成可能な曲率半径について調べる。

#### 5.1.2 測定対象

剪断力を与える測定対象として、皮膚を模擬したシリコン (Smooth-On, Ecoflex 0020) を用いた。図 5.1 に示すように、シリコンは直方体  $S_A$  ( $60 \times 60 \times 20$  mm) に成型した。また、皮膚内部に硬い物体がある状況を模擬するため、直方体の PLA 樹脂のプラスチック素材 ( $30 \times 60 \times 10$  mm) をシリコン内に挿入した物体  $S_B$  および直方体の PLA 樹脂のプラスチック素材 ( $30 \times 60 \times 5$  mm) をシリコン内に挿入した物体  $S_C$  も用意した。圧縮試験機 (島津製作所, EZ-S) により、 $S_A$ ,  $S_B$  および  $S_C$  のヤング率はそれぞれ 57.3 kPa, 96.7 kPa, 141.7 kPa であることを確認した。

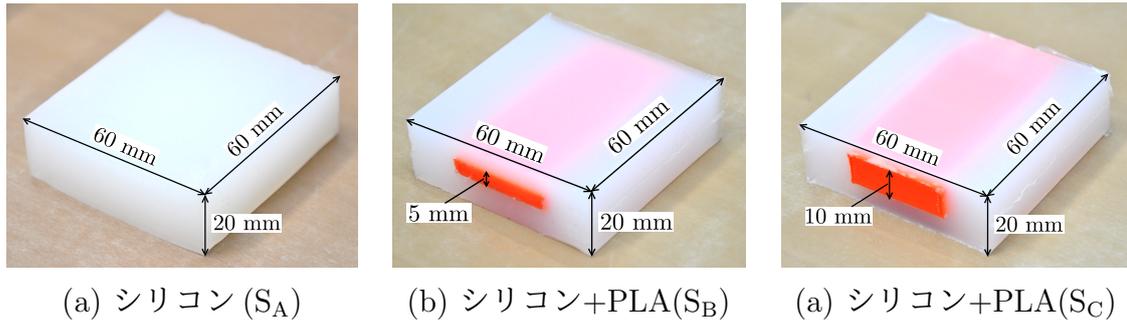


図 5.1: 測定対象

### 5.1.3 実験手順

図 5.2 に示すように、末端効果器に接続されたサーボモータを固定し、測定対象に末端効果器を押し当てた。また、末端効果器の表面にはニトリルゴムのシートを取り付けた。サーボモータの回転角度は PWM により制御し、回転速度は 1 秒間で 17.45 mm の変位を与えるように設定した。垂直力  $F_N$  と剪断力  $F_S$  は三軸力覚センサ（日本リニアックス社, MFS 20-025）を用いて、計測を行った。まず初めに、図 5.2 (a) のように、回転角度  $\alpha$  が 0 のときの垂直力  $F_N$  を測定した後、図 5.2 (b) のように、サーボモータを回転させたときのシリコンに与える剪断力  $F_S$  を測定した。垂直力  $F_N$  は 2.5 N となるように固定台の位置を調整し、押し込み量の測定も行った。AD 変換器の標本化周波数は 400 Hz に設定した。また、末端効果器の曲率半径は 40 mm, 50 mm, 60 mm とした。このとき、サーボモータの回転軸から、末端効果器とシリコンの接触面との距離は曲率半径と等しい。

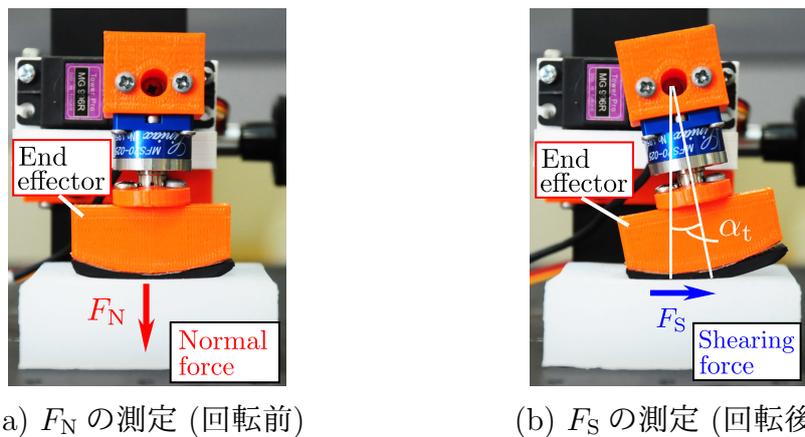


図 5.2: 垂直力  $F_N$  と剪断力  $F_S$  の測定

### 5.1.4 実験結果

#### 曲率半径と最大剪断力

最大剪断力と曲率半径の関係を図5.3に示す。末端効果器の剪断力を与える時間はそれぞれ400 ms, 600 ms, 800 msであり、回転変位に換算すると6.98 mm, 10.47 mm, 13.96 mmとなる。また、式(4.14)を基に最小二乗法で近似曲線を示した。

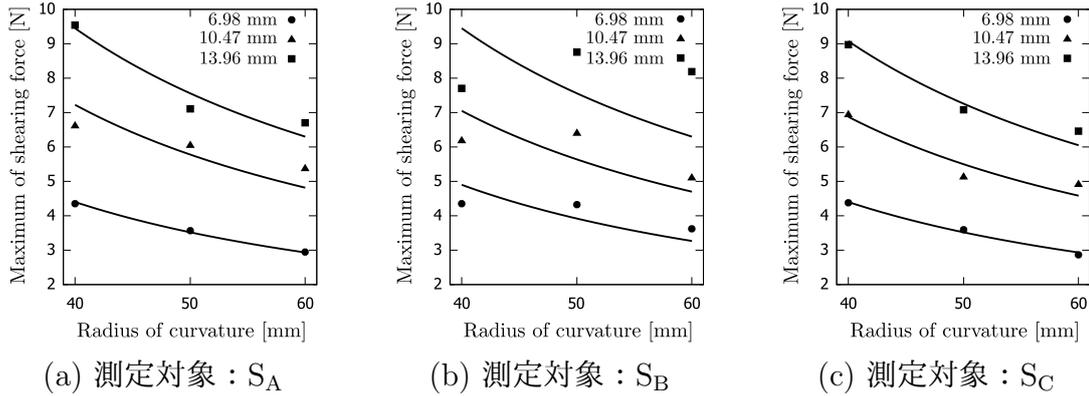


図 5.3: 最大剪断力と曲率半径の関係

#### 曲率半径と押し込み量

表 5.1 に各曲率半径における末端効果器の押し込み量を示す。測定対象  $S_A$ ,  $S_C$  では、曲率半径が大きくなるほど、押し込み量が小さくなることが確認できた。しかし、測定対象  $S_B$  では押し込み量の変化は見られなかった。

表 5.1: 各曲率半径における押し込み量

ヤング率 [kPa]	曲率半径 [mm]	押し込み量 [mm]
57.3 ( $S_A$ )	40	3.2
	50	2.5
	60	2.3
96.7 ( $S_B$ )	40	1.7
	50	1.7
	60	1.7
141.7 ( $S_C$ )	40	1.8
	50	1.7
	60	1.3

## 滑り量一定における剪断力

硬さの異なる弾性体に剪断力を与えたときの10回測定を行った最大剪断力の平均値と標準偏差を表5.2に示す。また、剪断力の時間変化を図5.4-5.6に示す。剪断力が最大値を示してから1秒間における剪断力の最小値が最大値の80%を初めて下回るとき、つまり滑りが顕著に現れたときを臨界条件と定義し、最大値の80%以上に収まる最大変位の条件での結果を示している。また、図5.4-5.6は10回評価を行い、表5.2より、最大剪断力が平均値に最も近い結果を示している。以上より、弾性体の硬さに応じて、各曲率半径における剪断力の最大値と滑りの影響が異なることが示唆された。

表 5.2: 最大剪断力の平均値と標準偏差

ヤング率 [kPa]	曲率半径 [mm]	平均値 [N]	標準偏差 [N]
57.3 ( $S_A$ )	40	6.47	0.25
	50	7.00	0.38
	60	7.94	0.35
96.7 ( $S_B$ )	40	4.15	0.15
	50	7.78	0.11
	60	8.11	0.17
141.7 ( $S_C$ )	40	5.98	0.37
	50	6.97	0.17
	60	7.60	0.61

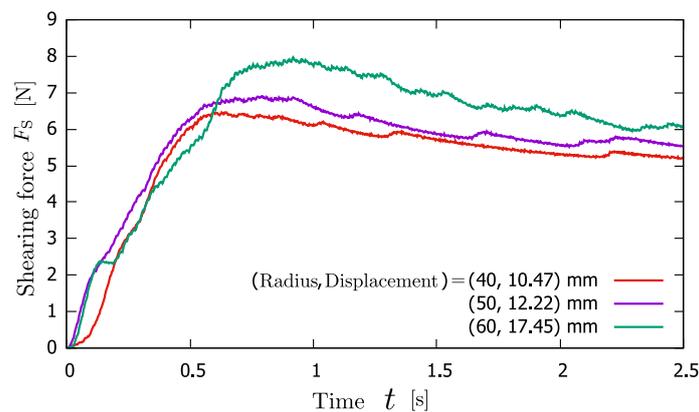


図 5.4: ヤング率 57.3 kPa における剪断力と時間の関係 (測定対象:  $S_A$ )

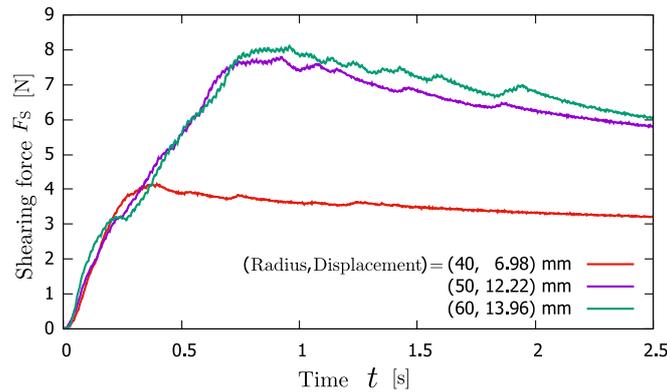


図 5.5: ヤング率 96.7 kPa における剪断力と時間の関係 (測定対象 :  $S_B$ )

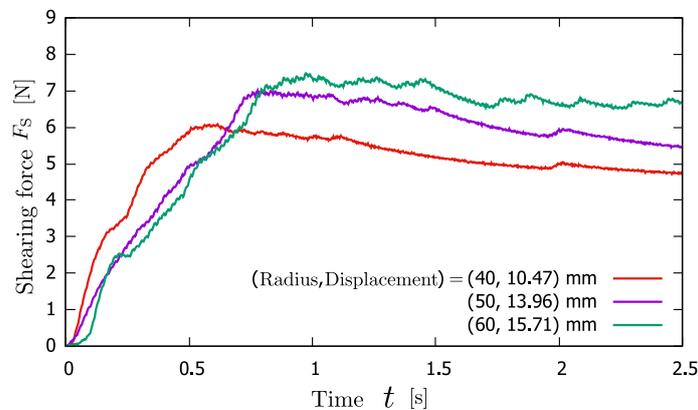


図 5.6: ヤング率 141.7 kPa における剪断力と時間の関係 (測定対象 :  $S_C$ )

ヤング率と曲率半径のそれぞれ3条件の組み合わせに対して、各10回の試行評価を行ったデータに二元配置分散分析を行った結果を表5.3に示す。表5.3より、ヤング率と曲率半径のそれぞれの要因が剪断力に影響することが有意水準1%で示された。したがって、ヤング率と曲率半径のそれぞれ3条件の組み合わせに対して、各10回の試行評価を行ったデータに Bonferroni 法を用いて多重比較を行った。表5.4は各ヤング率における曲率半径変化時の多重比較の結果であり、最大剪断力と曲率半径の関係は図5.7で表される。表5.5は各曲率半径におけるヤング率変化時の多重比較の結果であり、最大剪断力と曲率半径の関係は図5.8で表される。表5.4より、曲率半径 40 mm, 50 mm, 60 mm のいずれかにおいて有意水準1%で有意差が生じた。一方、表5.5より、曲率半径 40 mm, 50 mm のときではヤング率 57.3 kPa から 96.7 kPa の変化によって有意水準1%で有意差が生じた。しかし、曲率半径 60 mm の場合ではヤング率の変化によって有意差が生じないことが確認できた。

表 5.3: 二元配置分散分析の結果

要因	自由度	F 値	p 値
ヤング率	2	14.31	< 0.01
曲率半径	2	390.15	< 0.01
ヤング率 × 曲率半径	4	70.77	< 0.01

表 5.4: 各ヤング率における多重比較の結果

ヤング率 [kPa]	曲率半径 [mm]	t 値	p 値
57.3 ( $S_A$ )	40 - 50	-3.54	0.10
	50 - 60	-5.48	< 0.01
	60 - 40	10.34	< 0.01
96.7 ( $S_B$ )	40 - 50	-59.53	< 0.01
	50 - 60	-4.92	< 0.01
	60 - 40	51.86	< 0.01
141.7 ( $S_C$ )	40 - 50	-7.32	< 0.01
	50 - 60	-3.01	0.45
	60 - 40	6.84	< 0.01

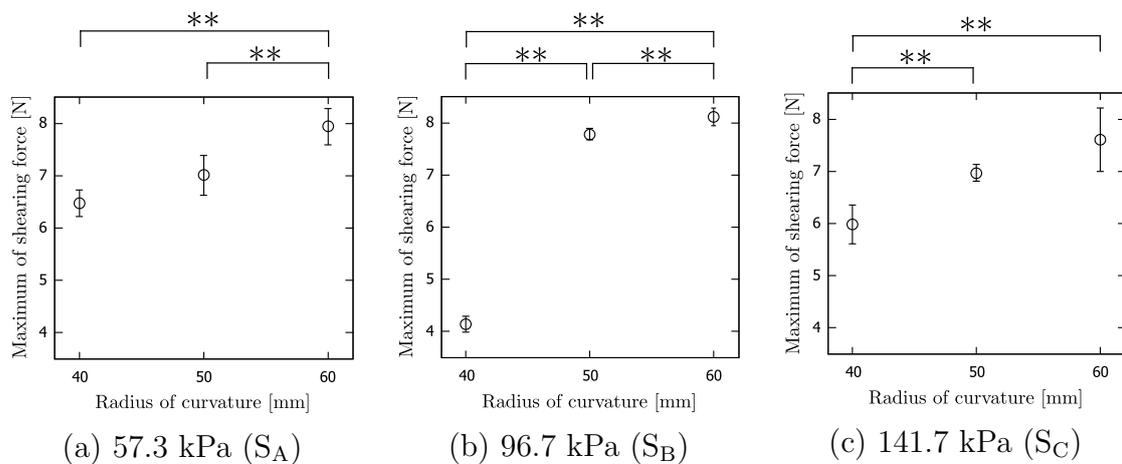


図 5.7: 各ヤング率における最大剪断力と曲率半径の関係 (\*\*:  $p < 0.01$ )

表 5.5: 各曲率半径における多重比較の結果

曲率半径 [mm]	ヤング率 [kPa]	t 値	p 値
40	57.3 (S <sub>A</sub> ) - 96.7 (S <sub>B</sub> )	23.98	< 0.01
	96.7 (S <sub>B</sub> ) - 141.7 (S <sub>C</sub> )	-13.69	< 0.01
	141.7 (S <sub>C</sub> ) - 57.3 (S <sub>A</sub> )	-3.32	0.16
50	57.3 (S <sub>A</sub> ) - 96.7 (S <sub>B</sub> )	-5.91	< 0.01
	96.7 (S <sub>B</sub> ) - 141.7 (S <sub>C</sub> )	12.39	< 0.01
	141.7 (S <sub>C</sub> ) - 57.3 (S <sub>A</sub> )	-0.26	1.00
60	57.3 (S <sub>A</sub> ) - 96.7 (S <sub>B</sub> )	-1.33	1.00
	96.7 (S <sub>B</sub> ) - 141.7 (S <sub>C</sub> )	2.40	1.00
	141.7 (S <sub>C</sub> ) - 57.3 (S <sub>A</sub> )	-1.43	1.00

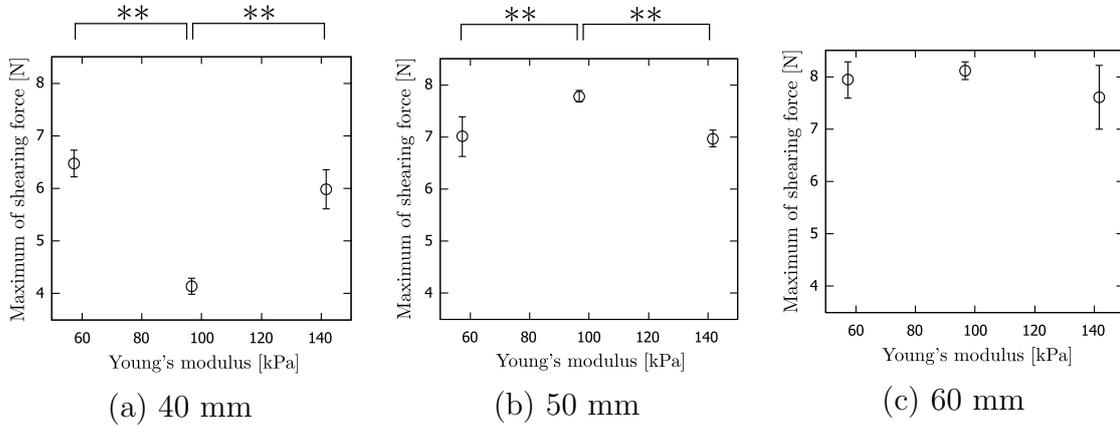


図 5.8: 各曲率半径における最大剪断力と曲率半径の関係 (\*\*:  $p < 0.01$ )

## 5.2 足首ファントム装着時における剪断力の評価

### 5.2.1 測定対象

図 5.9 に示すように，足首のモデルをシリコン（Ecoflex 0020）を用いて円柱型で作成した．また，足首の場所による硬さの違いを表すため，PLA 樹脂のプラスチック素材を円柱型で作製し，円柱内に挿入した．半径が異なる円柱はそれぞれ，脛骨と腓骨を表している．シリコンのヤング率は 82.74 kPa，PLA 樹脂のヤング率は 2346.5 MPa である．図 5.9 を  $z$  軸方向から見た様子を図 5.10 に示す．

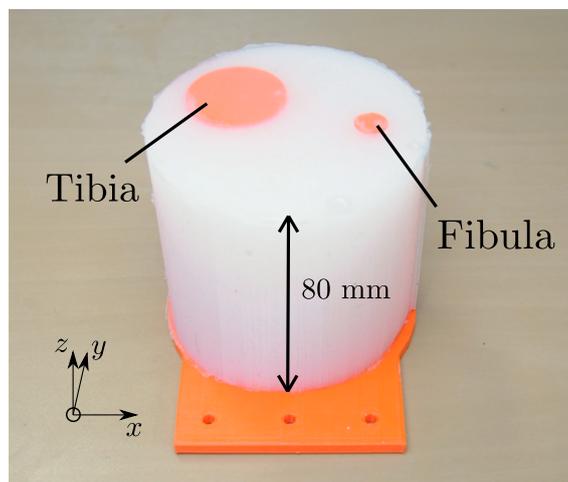


図 5.9: 硬さ分布を有した足首ファントム

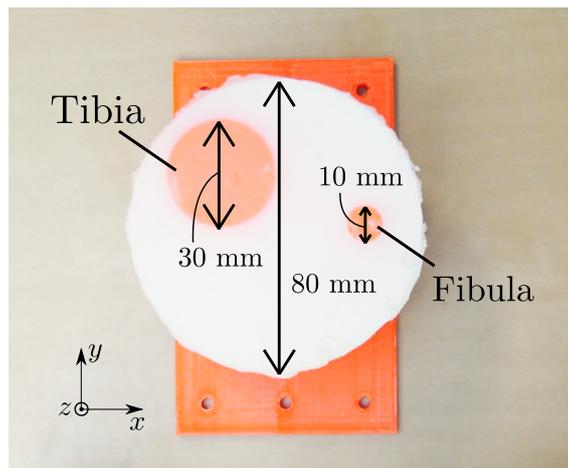


図 5.10:  $z$  軸方向から見た硬さ分布を有した足首ファントム

## 5.2.2 実験環境

図 5.9 に示した足首ファントムに剪断力を与える実験環境を図 5.11 に示す。末端効果器に接続されているサーボモータをフレームに固定し、三つのフレームをそれぞれ帯で締め付けることによって、末端効果器を足首ファントムに押し当てた。サーボモータの回転角度は PWM 方式によって制御した。また、垂直力と剪断力は末端効果器とサーボモータの間に接続している三軸力覚センサを用いて計測した。初期状態の垂直力  $F_N$  は 2.0 – 3.0 N の間で決定した。図 5.12 (a)–(c) のように、末端効果器を時計方向に回転させたときと、図 5.13 (a)–(c) のように、末端効果器を反時計方向に回転させたときの末端効果器  $O_A$ ,  $O_B$ ,  $O_C$  が足首ファントムに与えた剪断力の時間変化を調査する。また、サーボモータの回転速度は 1 秒間で 17.45 mm の変位を与えるように設定し、A-D 変換器の標本化周波数を 400 Hz に設定した。本実験では、末端効果器  $O_A$ ,  $O_B$ ,  $O_C$  の曲率半径は同じである。

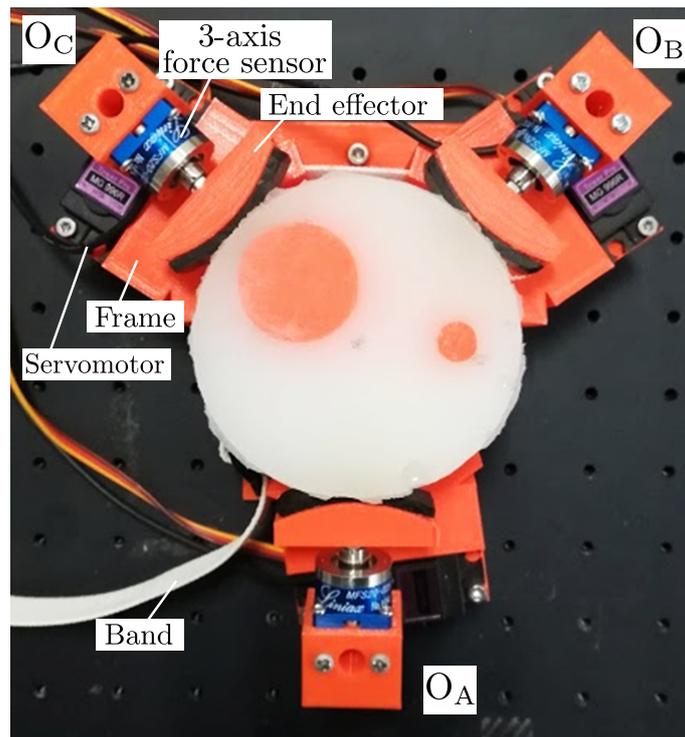


図 5.11: 足首ファントムに剪断力提示装置を装着した図

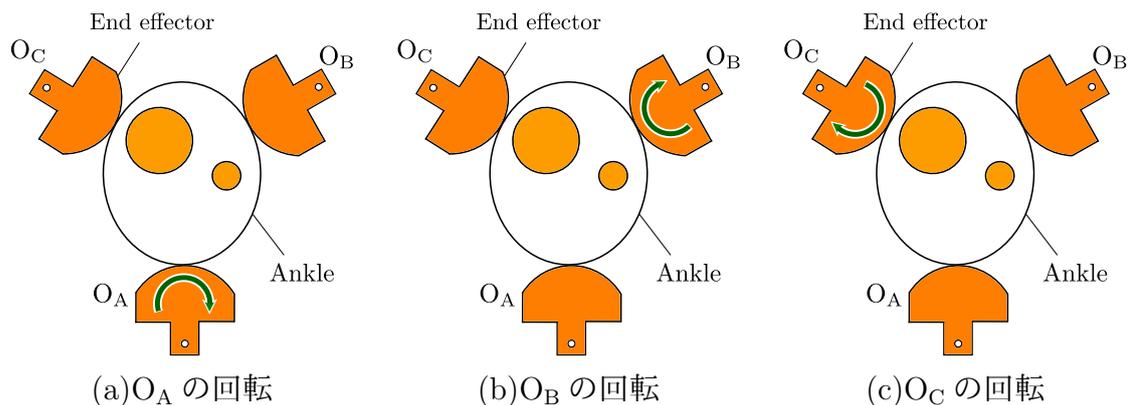


図 5.12: 末端効果器の時計方向の回転

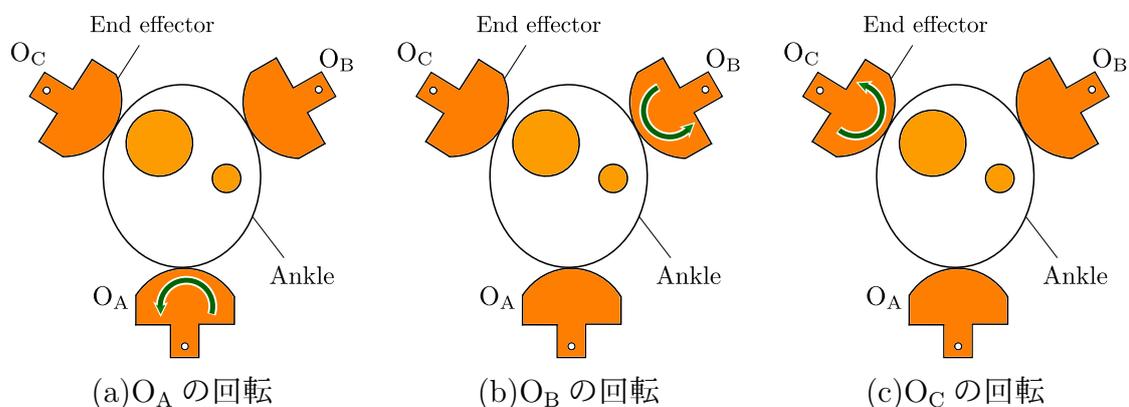


図 5.13: 末端効果器の反時計方向の回転

### 5.2.3 実験結果

足首ファントムに剪断力を与えたときの剪断力の時間変化を図 5.14 – 5.16 に示す。末端効果器の曲率半径は 40 mm, 50 mm, 60 mm としている。図 5.14 は末端効果器  $O_A$  が与える剪断力を示し、図 5.15 と図 5.16 はそれぞれ末端効果器  $O_B$ ,  $O_C$  が与える剪断力を示している。また、剪断力が最大値を示してから 1 秒間における剪断力の最小値が最大値の 80% を初めて下回るとき、つまり滑りが顕著に現れたときを臨界条件と定義し、最大値の 80% 以上に収まる最大変位の条件での結果を示している。足首ファントムの硬さ分布は  $O_C$ ,  $O_B$ ,  $O_A$  の順でその位置が硬くなっていることを自作の押し込み型硬度計による測定で確認した。 $O_A$ ,  $O_B$ ,  $O_C$  の提示場所におけるヤング率はそれぞれ、47.8 kPa, 58.5 kPa, 180.9 kPa であることを確認した。

図 5.14–5.16 より，それぞれの末端効果器の回転方向によって剪断力の時間変化が異なる結果となった．図 5.14 より，剪断力を与える対象が柔らかい場合，曲率半径を大きくすると，曲率半径が 40 mm, 50 mm の場合に比べて 60 mm の場合は最大剪断力が大きいため，滑りの影響が小さくなることが確認された．一方，図 5.15 より，剪断力を与える対象が硬くなると，剪断力の値が大きくなることが確認できた．しかし，内部に存在する PLA の影響が大きくなると，図 5.16 (b) のように滑りによる剪断力の低下が曲率半径 40 mm と 50 mm 場合で生じることが確認された．

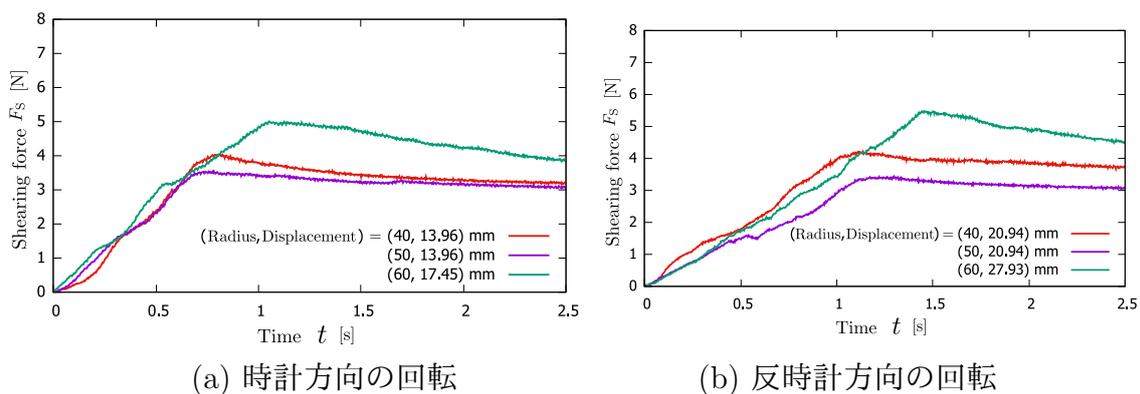


図 5.14:  $O_A$  の剪断力と時間の関係

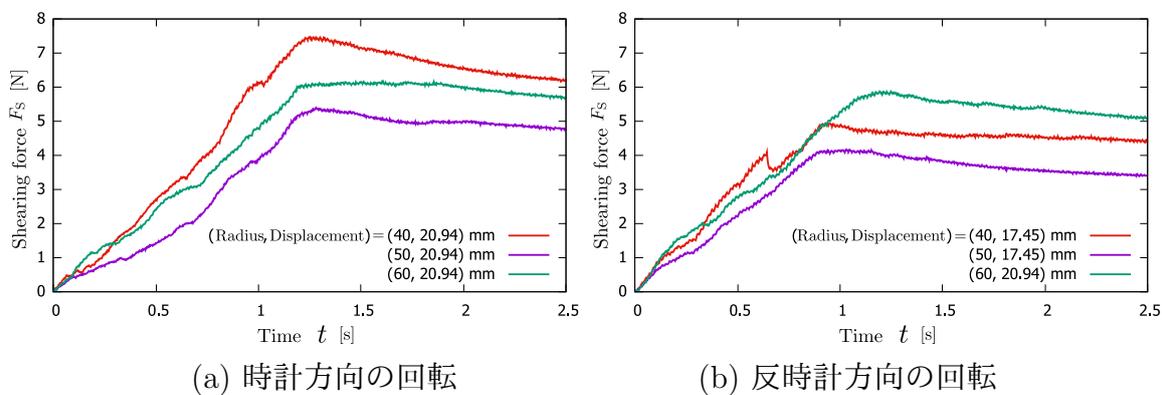


図 5.15:  $O_B$  の剪断力と時間の関係

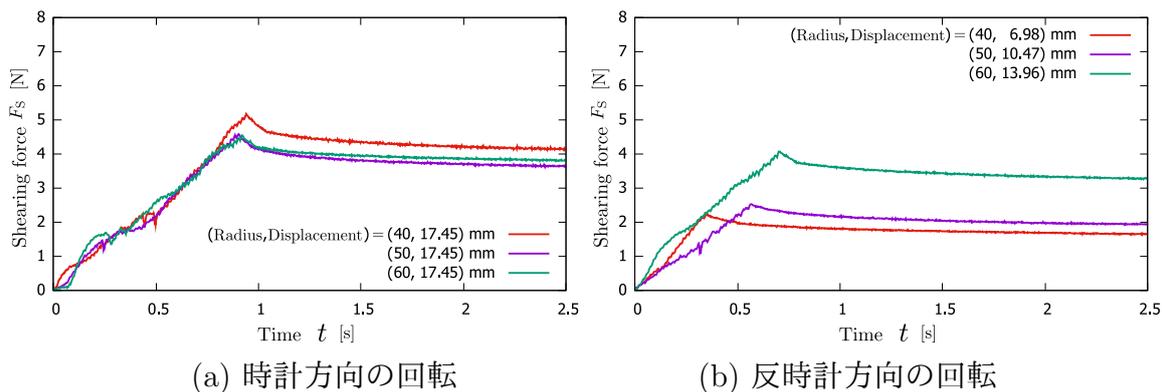


図 5.16:  $O_C$  の剪断力と時間の関係

## 5.2.4 考察

### 剪断力と滑りのモデル

末端効果器が弾性体に接触した状態で、目標角度  $\alpha_t$  まで回転する場合、初期状態から目標角度  $\alpha_t$  までの剪断力  $F_S$  は式 (4.6) より、

$$\begin{aligned}
 F_S &= \frac{EA}{2(1+\nu)} \frac{R}{h} \tan \omega t \\
 &= k_1 R \tan \omega t \quad \left(0 \leq t \leq \frac{\alpha_t}{\omega}\right)
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

と表すことができる。  $k_1$  は定数である。また、式 (4.8) より、最大静止摩擦力  $\mu_s F_N$  を超える剪断力  $F_S$  は滑りによって与えることはできないため、減少する。しかし、実際には剪断力は  $\mu_s F_N$  を超える場合が生じる。これは、式 (4.8) では、押し込み量  $d_0$  の点における垂直力の変化に着目しているため、実際の接触面全体の垂直力の低下は式 (4.8) ほど大きく変化しないからであると考えられる。したがって、式 (4.8) より、目標角度  $\alpha_t$  以降の剪断力の時間変化を式 (5.2) のように置き換える。

$$\begin{aligned}
 F_S &= F_M - \frac{EA}{2(1+\nu)} \frac{R}{h} \tan \Omega \left(t - \frac{\alpha_t}{\omega}\right) \\
 &= F_M - k_1 R \tan \Omega \left(t - \frac{\alpha_t}{\omega}\right) \quad \left(t > \frac{\alpha_t}{\omega}\right)
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

$F_M$  は剪断力の最大値である。角速度  $\Omega$  は、 $F_S$  が  $\mu_s F_N$  を超えたときの変位  $u_c$  より、弾性体に与えた変位  $u_t$  が大きくなるに従い、増加する性質を持つと仮定する。すなわち、弾性体に与えた変位  $u_t$  が滑りの発生する変位  $u_c$  よりも小さい場合は角速度

$\Omega$  は 0 となる。一方、静止摩擦係数  $\mu_s$  と垂直力  $F_N$  の積  $\mu_s F_N$  は式 (4.17) より、

$$\begin{aligned}\mu_s F_N &= \tau_s m^{\frac{1}{3}} \pi r^{\frac{2}{3}} R^{\frac{1}{3}} (d_0 - R(1 - \cos \omega t)) \\ &= k_2 R^{\frac{1}{3}} (d_0 - R(1 - \cos \omega t)) \quad \left(0 \leq t \leq \frac{\alpha_t}{\omega}\right)\end{aligned}\quad (5.3)$$

と表すことができる。  $k_2$  は定数である。  $k_2$  はヤング率  $E$  に比例すると仮定して計算している。式 (5.1)–(5.3) より、剪断力  $F_S$  の時間変化を図 5.17–5.19 に示す。図 5.17–5.19 はそれぞれ曲率半径  $R$  が 40 mm, 50 mm, 60 mm のときを示している。図 5.17 は図 5.4 に対応させたモデルである。また、図 5.18 は図 5.5 に対応し、図 5.19 は図 5.6 に対応している。  $F_S$  が  $\mu_s F_N$  より大きくなった場合、滑りが発生し、剪断力  $F_S$  が低下する。4.6 節より、曲率半径  $R$  が増加するに従い、滑り出す時間が遅くなり、剪断力を大きくすることができる。しかし、曲率半径  $R$  が異なると押し込み量  $d_0$  も異なることから、図 5.17–5.19 に示すように、  $\mu_s F_N$  の大小関係が異なる。したがって、滑り抑制に効果を示す曲率半径を決定するためには、押し込み量も重要な要素であると考えられる。また、本実験では曲率半径 60 mm が 40 mm, 50 mm よりも滑りを抑制できることが示唆されたため、曲率半径 60 mm の  $\mu_s F_N$  が最も大きくなるが、図 5.17–5.19 では一致していない。これは、定数  $k_2$  がヤング率  $E$  のみに依存するという仮定を置いているからであり、実際には他のパラメータも考慮する必要があると考えられる。

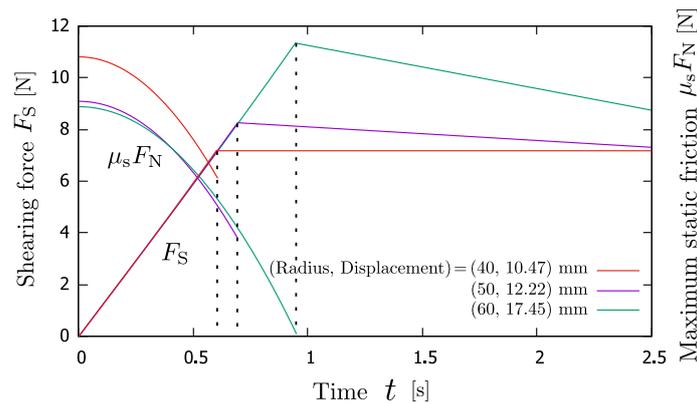


図 5.17: ヤング率 57.3 kPa における剪断力と滑りモデル ( $k_1 = 0.66, k_2 = 1.0$ )

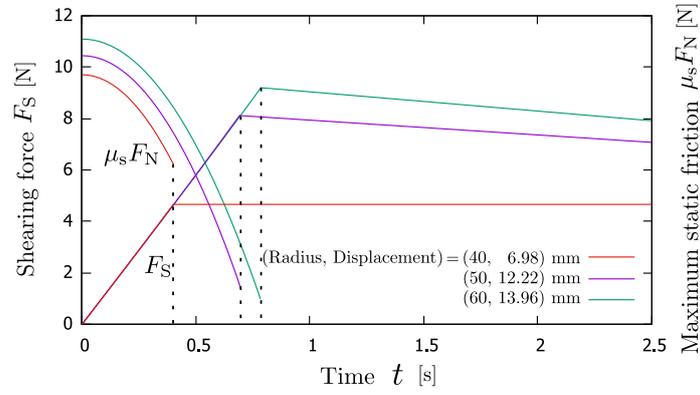


図 5.18: ヤング率 96.3 kPa における剪断力と滑りモデル ( $k_1 = 0.66, k_2 = 2.0$ )

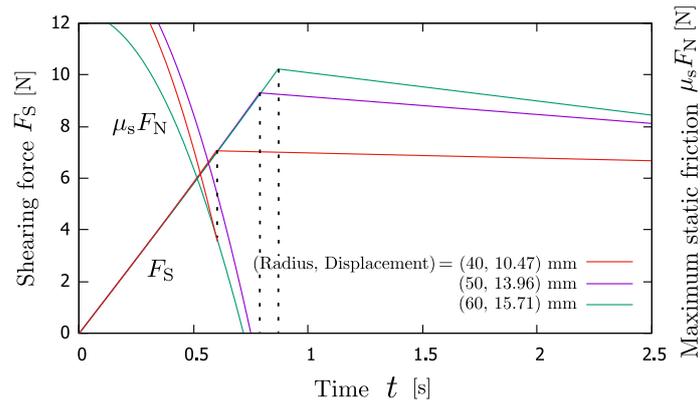


図 5.19: ヤング率 141.7 kPa における剪断力と滑りモデル ( $k_1 = 0.66, k_2 = 3.0$ )

## 滑り量一定時における剪断力の評価

図 5.4-5.6 より、末端効果器の曲率半径を変化させると、剪断力の最大値が変化し、滑りの影響も異なる。図 5.4-5.5 より、曲率半径が 60 mm のときの剪断力の最大値が最も大きく、滑りの影響も抑えられている。これは、曲率半径を 60 mm にすることにより、垂直力の低下を抑えることができたからであると考えられる。また、表 5.5 より、曲率半径 60 mm の場合はヤング率が変化することによる最大剪断力への影響が 40 mm, 50 mm よりも少ないと考えられる。したがって、本実験におけるヤング率の範囲内において、曲率半径 60 mm は 40 mm, 50 mm よりも最大剪断力が大きく、滑りを抑制することができたと考える。しかし表 5.4 より、曲率半径 60 mm に着目すると、ヤング率 141.7 kPa では曲率半径 50 mm との間において有意水準 1% で有意差が生じていない。これより、本実験におけるヤング率の範囲内では曲率半径を 40 mm から 60 mm へ大きくすることによって、最大剪断力が大きくなったが、ヤング率が 141.7 kPa から大きくなった場合では、曲率半径を大きくすることが必ずしも適切であるとは言えないことが示唆された。

## 足首ファントム装着時における剪断力の評価

剪断力提示装置を足首ファントムに装着した場合の実験結果において、図 5.14 のように、図 5.15, 5.16 と比べて提示部位が柔らかいと、曲率半径を大きくすることにより、曲率半径が 40 mm, 50 mm の場合に比べて 60 mm の場合の方が滑りを抑制できている。これは、図 5.1 のヤング率の範囲と足首ファントムのヤング率の範囲が同程度であるためと考えられる。一方、図 5.15 のように提示部位が硬くなると、滑りによって生じる剪断力の減少も大きくなるが、内部に存在する PLA の影響が小さいため、曲率半径が 60 mm の結果は時計方向および反時計方向いずれの回転においても、滑りの抑制が可能であることがわかる。また、図 5.16 のように、内部に存在する PLA の影響が大きくなると、反時計方向の回転において曲率半径 40 mm および 50 mm では滑りによる剪断力の減少が大きくなっている。これより、足首ファントムに装着した場合においても、曲率半径 60 mm の末端効果器が 40 mm, 50 mm よりも適していると考えられる。

## 第6章 おわりに

本論文では、三つの末端効果器をサーボモータにより駆動させることで、剪断力を提示する装置を提案した。第一に、剪断力を与える対象の硬さを変化させたときの最大剪断力を調べた。弾性体の硬さに応じて、剪断力の最大値がそれぞれ、曲率半径によって異なることを確認した。また、滑り量を一定にした時の剪断力の時間変化を調べたところ、ヤング率 57.3 kPa から 141.7 kPa の間では曲率半径を 40 mm から 60 mm へ大きくすることによって最大剪断力が大きくなることが確認できた。さらに、滑りが発生する場合および滑りが発生しない場合における剪断力の時間変化のモデルを作成し、固着領域と滑り領域における剪断力の増減を示すことができた。第二に、シリコンとプラスチックで作製した足首ファントムに剪断力提示装置を装着し、末端効果器の曲率半径を変化させたときの剪断力の時間変化を評価した。足首の硬さ分布を模したファントムにおいても曲率半径を 40 mm から 60 mm へ大きくすることで、滑りの影響が小さくなることが示唆された。以上より、三つの提示場所における剪断力を等しい値で与えることによって、足首に並進運動および回転運動を提示することが可能となる。足首に運動を提示することにより、適切な足の運動方向の精度を高めることが期待できる。

# 謝 辞

本研究は大阪大学 大学院基礎工学研究科で行った。

研究の機会および実験環境を提供していただき、研究についての考え方や本論文の執筆における添削など、多大なご指導をいただきました大阪大学大学院基礎工学研究科 大城理 教授に厚くお礼申しあげます。本論文の副査として様々なご指導を頂いた大阪大学大学院基礎工学研究科 小林秀敏 教授に感謝の意を表します。本研究を進めるにあたって、研究テーマの相談に乗っていただき、研究の方向性に関して多くのご指導をいただきました筑波大学システム情報系 黒田嘉宏 教授に心から深く感謝いたします。様々な視点から研究内容に関してご指摘いただき、また実験に関する多くの知識を与えていただきました東京大学大学院工学系研究科 吉元俊輔 講師に感謝申し上げます。研究の進捗に関して多くのご指摘、ご提案をいただきました大阪大学大学院基礎工学研究科 池田聖 准教授に拝謝申し上げます。研究やデモを進める際に相談に乗っていただきました大阪大学大学院基礎工学研究科 石塚裕己 助教に深謝申し上げます。学会参加の手続きや物品の購入にご助力いただきました秘書の 杉浦延予 氏に謝意を表します。

研究室の同期である池本尚生 氏, 許佳祜 氏, 坂口真央 氏, 澤井智紀 氏, 田畑亮 氏は研究や授業などの相談を通じて、知識を与えていただき、感謝いたします。研究室の後輩である内川亮介 氏, 大森崇史 氏には、指導する立場として多くのことを学びました。また、研究生の Karim Andi Annisa Salsabila IMRAN 氏とは2019年9月から研究生活を共に過ごしました。英語で話す機会が普段よりも多く、充実した毎日を過ごすことができ、感謝いたします。私の研究に関わる全ての方々に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 平井慎一. 柔軟物操作. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 136–139, 1998.
- [2] 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠. 高速多指ハンドと高速視触覚フィードバックを用いた柔軟紐の結び操作. 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 9, pp. 1016–1024, 2009.
- [3] 平井慎一. 柔軟物ハンドリング. システム制御情報学会誌, Vol. 44, No. 11, pp. 653–658, 2000.
- [4] 竹内博良, 胡摩心一郎, 佐野明人, 藤本英雄. インタラクティブな手術シミュレーションのための柔軟物操作モデリング. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp. 137–144, 2003.
- [5] 鷺見和彦. 柔軟物も取り扱える生産用ロボットシステムの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 10, pp. 1082–1085, 2009.
- [6] 内山勝. 自動車生産ラインにおける柔軟物取り付け作業の自動化. 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 10, pp. 1086–1086, 2009.
- [7] Richard A. Schmidt, 調枝孝治. 運動学習とパフォーマンス—理論から実践へ. 大修館書店, 東京, 1994.
- [8] Robert N. Singer, 松田岩男. 運動学習の心理学. 大修館書店, 東京, 1970.
- [9] 川村貞夫, 舌正史. スポーツ技術向上のためのVR. 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 7, No. 2, pp. 8–15, 2002.
- [10] Jan B.F. Van Erp, Ian Saturday, and Chris Jansen. Application of tactile displays in sports: where to, how and when to move. Proc. Eurohaptics, pp. 105–109, 2006.

- [11] 森園哲也, 井田瑞人, 和田隆広, 呉景龍, 川村貞夫. パラレルワイヤ駆動システムによるバーチャルテニスの試み. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 1, pp. 153–161, 1997.
- [12] 坂根茂幸, 石川友彦, 佐藤知正. 視覚と力覚のセンサフュージョンによる把持物体の接触位置の推定. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 5, pp. 33–40, 1994.
- [13] 橋本巨. 基礎から学ぶトライボロジー. 森北出版, 東京, 2006.
- [14] Adam J. Spiers, and Aaron M. Dollar. Design and evaluation of shape-changing haptic interfaces for pedestrian navigation assistance. *IEEE transactions on haptics*, Vol. 10, No. 1, pp. 17–28, 2016.
- [15] Sumner L. Norman, Andrew J. Doxon, Brian T. Gleeson, and William R. Provancher. Planar hand motion guidance using fingertip skin-stretch feedback. *IEEE transactions on haptics*, Vol. 7, No. 2, pp. 121–130, 2014.
- [16] Marco Aggravi, Florent Pausé, Paolo Robuffo Giordano, and Claudio Pacchierotti. Design and evaluation of a wearable haptic device for skin stretch, pressure, and vibrotactile stimuli. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 3, pp. 2166–2173, 2018.
- [17] Zhan Fan Quek, Samuel B. Schorr, Ilana Nisky, William R. Provancher, and Allison M. Okamura. Sensory substitution of force and torque using 6-DoF tangential and normal skin deformation feedback. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 264–271, 2015.
- [18] Joao Bimbo, Claudio Pacchierotti, Marco Aggravi, Nikos Tsagarakis, Domenico Prattichizzo. Teleoperation in cluttered environments using wearable haptic feedback. *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3401–3408, 2017.
- [19] Jean-Philippe Choiniere and Clement Gosselin. Development and experimental validation of a haptic compass based on asymmetric torque stimuli. *IEEE transactions on haptics*, Vol. 10, No. 1, pp. 29–39, 2016.

- [20] Julie M. Walker Heather Culbertson, Michael Raitor and Allison M. Okamura. Haptic orientation guidance using two parallel double-gimbal control moment gyroscopes. *IEEE transactions on haptics*, Vol. 11, No. 2, pp. 267–278, 2017.
- [21] 宮原寛和, 牧野泰才, 篠田裕之. ジャイロ効果による歩行時の足首回転制御に基づく進行方向誘導. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 9-12, 2016.
- [22] Karlin Bark, Jason W Wheeler, Sunthar Premakumar, and Mark R Cutkosky. Comparison of skin stretch and vibrotactile stimulation for feedback of proprioceptive information. *2008 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 71–78, 2008.
- [23] James Biggs and Mandayam A Srinivasan. Tangential versus normal displacements of skin: Relative effectiveness for producing tactile sensations. In *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 121–128, 2002.
- [24] Zhenkai Hu Chae-Hyun Yoon, Samuel Byeongjun Park and Yung-Ho Jo. Design of a haptic device with grasp and push–pull force feedback for a master–slave surgical robot. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, Vol. 11, No. 7, pp. 1361–1369, 2016.
- [25] Simona Casini, Matteo Morvidoni, Matteo Bianchi, Manuel Catalano, Giorgio Grioli, and Antonio Bicchi. Design and realization of the cuff-clenching upper-limb force feedback wearable device for distributed mechano-tactile stimulation of normal and tangential skin forces. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1186–1193, 2015.
- [26] Karlin Bark, Jason Wheeler, Pete Shull, Joan Savall, and Mark Cutkosky. Rotational skin stretch feedback: A wearable haptic display for motion. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 116–176, 2010.
- [27] Samuel B. Schorr, Zhan Fan Quek, Robert Y. Romano, Ilana Nisky, William R. Provancher, and Allison M. Okamura. Sensory Substitution via Cutaneous Skin

- Stretch Feedback. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 3, pp.2341–2346, 2013.
- [28] Edoardo Battaglia, Janelle P. Clark, Matteo Bianchi, Manuel G. Catalano, Antonio Bicchi, and Marcia K. O’Malley. The Rice Haptic Rocker: skin stretch haptic feedback with the Pisa/IIT SoftHand. *IEEE World Haptics Conference*, pp. 7–12, 2017.
- [29] Francesco Chinello, Claudio Pacchierotti, Nikos G Tsagarakis, and Domenico Prattichizzo. Design of a wearable skin stretch cutaneous device for the upper limb. *IEEE Haptics Symposium*, pp. 14–20, 2016.
- [30] 眞田華道, 小林優人, 中村拓人, 梶本裕之. 足首形状補完による足首ハンガー反射の効率化に関する研究. 日本バーチャルリアリティ学会論文集, pp. 1–4, 2018.
- [31] 越智淳三. 解剖学アトラス. 文光堂, 東京, 1981.
- [32] 小原歯車工業株式会社. 歯車 ABC 基礎編. 小原歯車工業, 埼玉, 2007.
- [33] 池田茂, 中西佑二. 絵ときでわかる機械設計. オーム社, 東京, 2006.
- [34] 小峯龍男. Mathematica によるメカニズム. 東京電機大学出版局, 東京, 1997.
- [35] 齊藤亮一, 野田尚昭, 佐野義一, 黄吟卅, 南健瑠, 枇榔優佳, 宋健. ローラチェーンの疲労強度解析と損傷評価. 設計工学, Vol. 54, No. 1, pp. 61–72, 2019.
- [36] 加藤康司. フリクシヨンドライブの基礎と応用. 精密工学会誌, Vol. 56, No. 9, pp. 1602–1606, 1990.
- [37] 平田宏一. マイコン搭載ロボット製作入門. CQ 出版社, 東京, 2005.
- [38] 井垣久, 中山英明, 川島成平, 安富雅典. 機構学. 朝倉書店, 東京, 1989.
- [39] 竹内靖, 坂東明夫. 自動車工学講座－機構学. 明現社, 東京, 1979.
- [40] 山田学. 直交スライダ機構. [https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1202/20/news005\\_2.html](https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1202/20/news005_2.html) 2019.12.22.

- [41] 柴原舞, ヤエムヴィボル, 佐藤克成, 梶本裕之. なぞり感提示における指腹部せん断変形の向きの影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No. 3, pp. 301–304, 2017.
- [42] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: Wearable haptic display to present virtual mass sensation. In *ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '07, 2007.
- [43] Francesco Chinello, Claudio Pacchierotti, Joao Bimbo, Nikos G Tsagarakis, and Domenico Prattichizzo. Design and evaluation of a wearable skin stretch device for haptic guidance. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 1, pp. 524–531, 2018.
- [44] Taha K Moriyama, Ayaka Nishi, Rei Sakuragi, Takuto Nakamura, and Hiroyuki Kajimoto. Development of a wearable haptic device that presents haptics sensation of the finger pad to the forearm. In *2018 IEEE Haptics Symposium*, pp. 180–185, 2018.
- [45] 佐藤未知, 田島逸郎, 橋本悠希, 梶本裕之. ハンガー反射の発生条件の検討. インタラクシオン 2009, pp. 69–70, 2009.
- [46] 今悠気, 中村拓人, 梶本裕之. ハンガー反射の歩行への影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 4, pp. 565–573, 2016.
- [47] 編集委員会. 入門講座 やさしいゴムの物理 補講 (4). 日本ゴム協会誌, Vol. 83, No. 4, pp. 109–116, 2010.
- [48] 加藤孝久, 益子正文. トライボロジーの基礎 培風館, 東京, 2004.
- [49] 三好俊郎. 有限要素法入門 改訂版. 培風館, 東京, 1978.
- [50] 谷充博, 佐久間淳, 篠宮将光. 球圧子の押込試験による軟材料の厚さと Young 率の計測. 日本機械学会論文集, Vol. 75, No. 755, pp.901–908, 2009.

- [51] 坪島茂彦, 中村修照. モータ技術百科. オーム社, 東京, 1982.
- [52] 東芝・小形モータ研究会. 制御用モータ技術活用マニュアル. 総合電子出版社, 東京, 1991.
- [53] Goldy Katal, Saahil Gupta, and Shitij Kakkar. Design and operation of synchronized robotic arm. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, pp. 2319–1163, 2013.
- [54] 石島勝. 小型 AC サーボ・モータの制御回路設計. CQ 出版社, 東京, 2009.
- [55] 中沢信明, 山田功, 松井利一. センサの基本と実用回路. コロナ社, 東京, 2012.

# 業績

- 国際発表

1. Ryuya Omori, Yoshihiro Kuroda, Shunsuke Yoshimoto, Hiroki Ishizuka, and Osamu Oshiro. A Wearable Skin Stretch Device for Lower Limbs: Investigation of Curvature Effect on Slip, IEEE World Haptics Conference 2019, TP1A.05, Tokyo, July 2019

- 国内発表

1. 大森隆哉, 黒田嘉宏, 吉元俊輔, 大城理. 下肢の動作誘導を目的としたせん断力の基礎評価実験, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2018, 2A2-02, 大阪, 2018 年 12 月
2. 大森隆哉, 黒田嘉宏, 吉元俊輔, 大城理. せん断力を用いた下肢誘導装置における提示部の検討, 第 63 回システム制御情報学会研究発表講演会, TS07-1-5, 大阪, 2019 年 5 月
3. 大森隆哉, 黒田嘉宏, 吉元俊輔, 石塚裕己, 池田聖, 大城理. 硬さ分布を考慮したせん断力提示, ハプティクス研究会 第 23 回研究会, HAP02, 兵庫, 2019 年 11 月

- その他

1. Ryuya Omori. Evaluation of Display Part in a Wearable Skin Stretch Device for Lower Limbs, Bioengineering Colloquium 2019, Osaka, July 2019
2. 大森隆哉. 滑りを抑制した弾性体へのせん断力提示 - 足首への適用の試み -, 河原研 - 大城研合同ゼミ, 大阪, 2019 年 9 月

- 受賞

1. 第 63 回システム制御情報学会研究発表講演会 2019, 学生発表賞