

博士論文

指と把持物体の変形を考慮した
物体把持に関する研究

金沢大学大学院自然科学研究科

システム創成科学専攻

学籍番号：1323122008

氏名：藤平祥孝

主任指導教員：渡辺哲陽

提出年月：2016年1月8日

目次

1. 序論	1
1.1. 研究背景.....	1
1.2. 把持安定性と把持耐力.....	2
1.3. 研究目的.....	5
1.4. 論文の構成.....	6
2. 指の変形が把持安定性に与える影響	8
2.1. はじめに.....	8
2.2. 半球状指での把持耐力の検証.....	9
2.2.1. 使用した指.....	9
2.2.2. 接触面積の検証.....	11
2.2.3. 把持耐力の検証.....	13
2.2.4. 考察.....	16
2.2.5. 問題点.....	17
2.3. 初期接触面を揃えての検証.....	19
2.3.1. 実験方法.....	19
2.3.2. 使用した指.....	21
2.3.3. 結果と考察.....	23
2.4. 指先端の変位の影響.....	27
2.4.1. 指の設計と実験方法.....	27
2.4.2. 結果と考察.....	28
2.5. 指の柔らかさと物体形状の影響.....	30
2.5.1. 実験方法.....	30
2.5.2. 使用した指と物体.....	31
2.5.3. 結果と考察.....	33
2.6. おわりに.....	36
3. 変形する物体の把持.....	37
3.1. シートマニピュレーション.....	38
3.2. 把持実験.....	40
3.3. 曲げ変形シートモデル.....	47
3.4. 把持耐力実験.....	55
3.4.1. 実験装置.....	55
3.4.2. 実験結果と考察.....	56
3.5. マニピュレーションの戦略.....	59
3.6. おわりに.....	61

4. 把持物体の変形を考慮した力覚提示	62
4.1. はじめに.....	62
4.2. 柔らかさ提示システム.....	63
4.2.1. スレーブの2軸力センサ内蔵グリップ.....	64
4.2.2. マスタの力覚提示機構.....	65
4.2.3. 力覚提示のための制御則.....	66
4.3. 感性評価実験.....	68
4.3.1. 実験概要.....	68
4.3.2. 用いたゼラチンの柔らかさ	69
4.3.3. 感性評価実験の結果と考察	71
4.4. おわりに.....	72
5. 結論	73
6. 参考文献.....	76

1. 序論

1.1. 研究背景

近年、人間社会で活動できるサービスロボットや医療ロボットが求められている。このようなロボットは人との接触や未知の物体を取り扱う環境に適応しなければならない。そこで、弾性体や流体を用いた柔らかい材料で構成されたロボットハンドや指が開発されている[1]–[8]。柔らかい材料を用いるメリットとして、人との接触時の安全性や親和性の高さ、未知の物体を扱うときの形状や位置の不確かさの吸収等が挙げられる。また、人間社会には多種多様な物体があり、把持・操作対象となる物体が柔らかい場面も多く存在する。これまで、工場等で使用されてきたロボットは剛体のように変形しない材料で構成され、把持物体も剛体とみなせるような硬く定形な物体が多かった。そのため、剛体同士の接触や微小変位の領域をベースとした把持の研究は多くなされてきた。しかし、柔らかい指や柔らかい物体で大きな変形が生じたときの把持に与える影響については分かっていないことが多い。この変形の影響を考慮した把持を行えることが次世代のロボットシステムには必要である。

本研究では、把持安定性に着目をして指や把持物体の変形の影響について調べる。多様な物体を把持するとき、把持計画[9]–[13]が必要となる。物体をどのように把持をするかといった把持計画を立てるときの指針となるのが、把持安定性である。把持安定性が最大となるように把持計画を立てることができれば、その把持計画が最適な計画であると言える。そのため、把持計画を立てるためには把持安定性が必要であり、これを評価することは重要である。指や把持物体の変形が把持安定性においてどのような役割を担っているのかが分かれば、柔らかい指や柔らかい把持物体が対象で大きな変形が生じる把持において最適な把持計画を立てることができる。従って、把持安定性における指や物体の変形の影響を明らかにすることが必要である。

把持安定性を考えるとき、指と物体との接触がどのような接触モデルであるか考える必要がある。滑らかな曲面を持った指と物体が一点にて接触するとき、以下の3つの接触モデル、①摩擦なし点接触、②摩擦あり点接触、③ソフトフィンガー型接触が一般的である[14]。接触点での指と物体の曲面に対する法線方向を接触法線と呼ぶ（以下、本論文での法線方向とはこの方向のことを指す）。従来、柔らかい指と物体との接触はソフトフィンガー型接触としてモデル化をされており、ソフトフィンガー型接触は単に摩擦あり点接触到接触法線周りの摩擦モーメントを加えただけである。これは、接触により物体が柔らかい指にめり込み、接触法線周りの回転に抵抗が生じることを摩擦モーメントで表している。

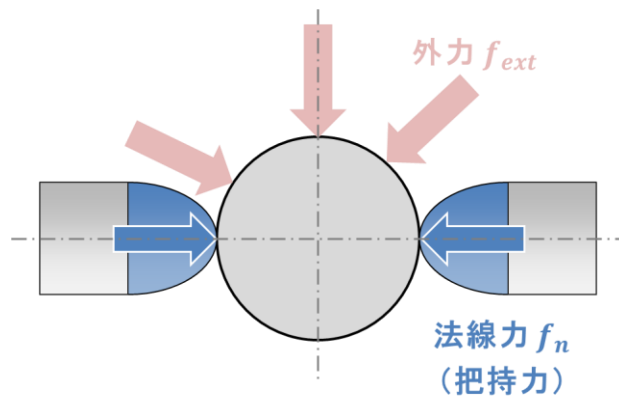
しかし、接触面上の方向（接触法線と直交する方向であり、以下、本論文での接線方向とはこの方向のことを指す）の指の変形が考慮されたものではない。そのため、指の接線方向の変形を考慮したモデルと把持安定性を提案する必要がある。指の柔らかさに着目をして力学的に解析しモデル化した試み[15]–[23]はあるが、後述する把持安定性の指標である把持耐力における指の変形の影響については明確となっていない。これが明らかとなれば、指の柔らかさに応じた最適な把持計画の立案だけでなく、把持の状況に応じて指の最適な柔らかさに制御することも可能になる。

次に、物体の変形がある場合の把持についてである。ここでは、変形のモードが遷移し物体の変形変化するシートマニピュレーションに着目をする。把持をするときのシートのモデル化や把持安定性の実験を通して物体の変形の影響について考察する。これまで、ロボット分野では、物体が変形する柔軟物体に関するマニピュレーションの研究が多く行われてきた[24]–[33]。これらの研究では、変形が遷移するような物体を対象としていない。本研究では、シートに座屈を生じさせ変形を遷移し、これを活用することを目指す。

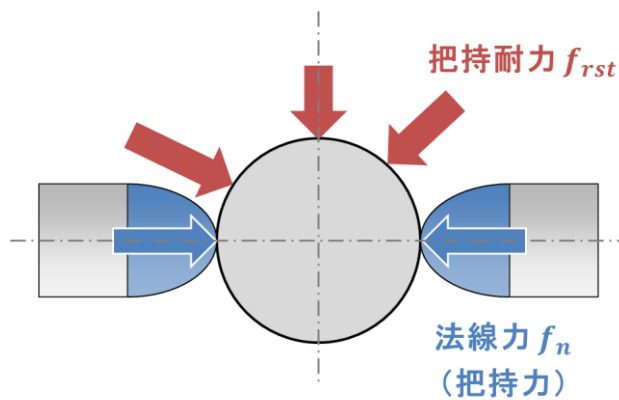
最後に、応用例として把持物体が変形するときの力覚提示装置の開発である。遠隔操作で物体把持を行うとき、指先の力覚の提示が重要である。そこで、把持物体の変形があるときの力覚提示装置の開発と評価を行った。

1.2. 把持安定性と把持耐力

把持安定性の評価指標として広く用いられるものの一つに把持耐力[9]がある。本研究では、この把持耐力に着目をして指と把持物体の柔らかさの役割を検証していく。把持耐力とは把持物体にある外力が負荷されたときに把持物体が指に対して相対運動を始めるときの力のことであり、把持が耐えることのできる外力ということで把持耐力と呼ぶ。図 1.2-1 に対向する 2 本指で円形の物体を把持したときの 2 次元平面での例を示す。対向する 2 本指での把持は多指ハンドでの把持の最もシンプルな構成である。そのため、本研究では、この構成に基づいた実験を行う。このとき、物体を把持するためには、対向する指の軸上で物体を把持するための力（把持力）を物体に負荷しなければならない。ここで、この軸上の力を本研究では法線力と定義する。



(a) 様々な方向の外力の負荷



(b) 様々な方向の外力にたいして耐えられる力（把持耐力）は異なる。

図 1.2-1 対向する 2 本指で物体を把持したときの例

把持耐力は外力の方向によって大きさが異なる（図 1.2-1 (b)）。これについて説明する。簡単のために図 1.2-1 で指と把持物体が剛体同士の場合で摩擦あり点接触をしている場合を考える。このとき、ある方向の外力が負荷されたときの物体に作用する力を図 1.2-2 に示す。指と物体の接触点では摩擦力が法線力と直交した方向に作用する。この向きを接線方向とする。外力は図 1.2-2 のように法線方向成分と接線方向成分に分解できる。今物体の並進運動にのみ着目すると、物体は指による幾何拘束で法線方向に動くことができない。そのため、外力の法線方向成分をいくら増やしても物体は動かない。一方で、物体が静止しているとき、接線方向成分は指と物体の接触点での摩擦力と釣り合っている。この接線方向成分が摩擦力を上回ったとき接線方向に物体は並進運動をする。このときの外力の値がその外力の方向での把持耐力である。この考え方を元にした法線力が同じときの外力の方向と把持耐力の関係の概略を図 1.2-3 に示す。法線方向の外力の把持耐力が最も大きく、接線方向の外力の把持耐力が最も小さくなることが分かる。よって、この最小値が大きいほど耐えられる外力が大きい

ので、把持安定性が高いと言えるため、この方向の把持耐力を知ることは重要である。本研究では、この最も把持耐力が小さくなる方向とその外力を接線方向と接線力と定義し、この接線力を対象に把持耐力を調べる。

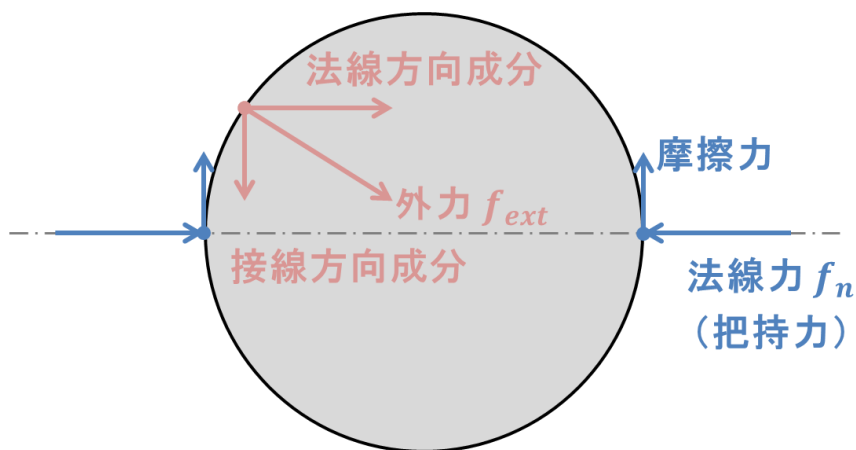


図 1.2-2 剛体同士の摩擦あり接触のときに物体に作用する力

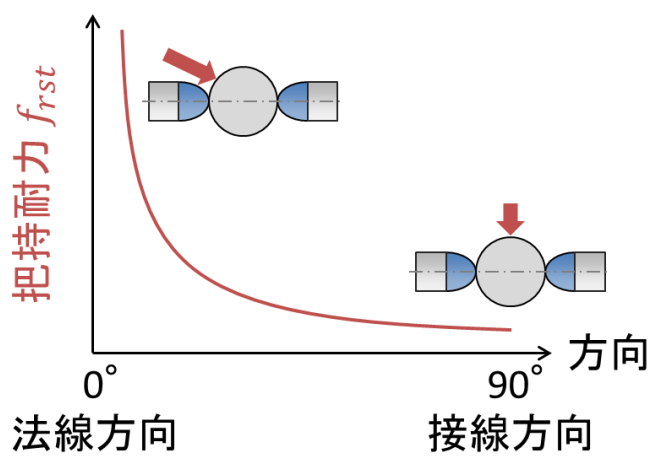


図 1.2-3 外力の方向と把持耐力の関係の概略

1.3. 研究目的

本研究では、指や物体の変形を考慮した把持を行える次世代のロボットシステムの構築を目指し、以下の3つのことを行う。

- ① 指の変形が把持安定性に与える影響の解明
- ② 物体の変形が把持に与える影響の解明
- ③ 把持物体が変形するときの力覚提示装置の開発

①指の変形が把持安定性に与える影響の解明では、剛体を柔らかい指で把持する場合を想定した把持耐力を検証する実験を行い、指の柔らかさによって生じる変形が把持耐力にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする。そして、その役割について考察を行う。次に、②物体の変形がある場合の把持についてである。ここでは、変形のモードが遷移し物体の変形変化するシートマニピュレーションに着目をする。把持をするときのシートのモデル化や把持安定性の実験を通して物体の変形の影響について考察する。そして、シートマニピュレーションの把持戦略の構築に役立つ。最後に、③把持物体が変形するときの力覚提示装置の開発する。そして、開発したシステムで力覚が提示できるのかの評価を行う。

1.4. 論文の構成

本論文の構成は次のようになっている。第 1 章では、研究の背景と目的、把持安定性として着目する指標である把持耐力の定義や本研究で用いる力の方向の定義について述べる。第 2 章では、把持安定性における指の変形の影響について、指の柔らかさを変えて行った把持耐力の検証実験を通して得られた結果を踏まえて述べる。第 3 章では、把持物体の変形が把持に及ぼす影響について、シートマニピュレーションを例にして述べる。ここでは、シートの把持実験や把持耐力の検証実験を行った。第 4 章では、応用例として把持物体が変形するときの力覚提示装置の開発を、手術支援ロボットを例にして述べる。把持中の力覚提示をするために開発したシステムとそのシステムの感性評価実験について述べる。

2. 指の変形が把持安定性に与える影響

2.1. はじめに

本章では、指の柔らかさが把持安定性（把持耐力）に与える影響について検証を行う。把持安定性と把持耐力との関係については前章で述べたとおりであり、指の柔らかさと把持耐力の関係について明らかにすることを目的とする。本研究では、把持耐力における法線力（把持力）の影響が最も少ない、法線力に直交な方向（接線方向）の把持耐力について考える。前章での把持耐力の定義に従い、指と物体との間に相対運動（滑り）が生じたときの接線方向の力と考え、これを計測した。様々な柔らかさの指を用いて、指の柔らかさが把持耐力に与える影響を実験的に明らかにする。

2.2. 半球状指での把持耐力の検証

まず、指先の柔らかさと把持耐力の関係を明らかにするために、ロボットの指先の形状として基本的な半球状の指先を用いて、その柔らかさを変化させたときの把持耐力と法線力との関係を調べる。

2.2.1. 使用した指

本実験では、4種類のシリコーン製の半球状（半径11[mm]）の指先を用意した。この4種類のシリコーン製の指先を柔らかい方から、S1, S2, S3, S4と呼ぶ。シリコーン製の指先は、信越シリコーン社製のシリコーンゴム母材と硬化剤を表2.2-1の割合で混合し、それを半球状の型に流し込み硬化させて作成した。用いたシリコーンゴムは母剤と硬化剤の組み合わせを変えることで柔らかさの異なるシリコーンゴムを作成できる。図2.2-1に作成した指を示す。

表 2.2-1 シリコーン配合表

指の種類	母剤	硬化剤	硬化剤の割合[%] (重量比)
S1	KE-1308	CAT1300	6
S2	KE-1308	CAT1300L-3	6
S3	KE-1316	CAT1300	10
S4	KE-1300T	CAT1300	10



図 2.2-1 作成した半球状指
(S4のみ固定部品が異なる)

シリコーン指先の柔らかさを圧縮試験により実験的に求めた。図2.2-2にそ

の圧縮試験装置を示す。指先を固定しその先端に平板を図 2.2-2 における水平方向の向きで押し込む。平板はフォースゲージに取り付けられており、このときの押し込み方向の力を計測できる。この押し込み方向の向きを指先の法線方向と、押し込む力を法線力と定義する。柔らかさは、このときの指先の押し込み量 Δd と法線力 f_n を用いて定義する。具体的には、以下に示す Kao らの式を用いて表す。

$$f_n = C \Delta d^\zeta \quad (2-1)$$

ここで、 C 、 ζ は材料係数である。図 2.2-3 に試験結果を示す。マーカーは試験結果、曲線は式(2-1)を用いた回帰曲線である。表 2.2-2 に最小二乗法で得られた各指の回帰曲線のパラメータを示す。図 2.2-3 から S1 から S4 になるにつれて、指の変形に必要な力が大きくなっていることが分かり、S1, S2, S3, S4 の順に硬くなっているということが分かる。

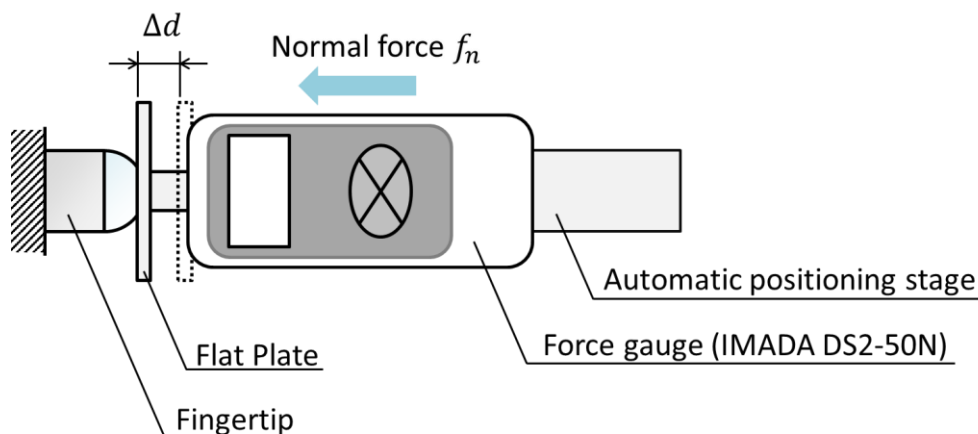


図 2.2-2 圧縮試験方法

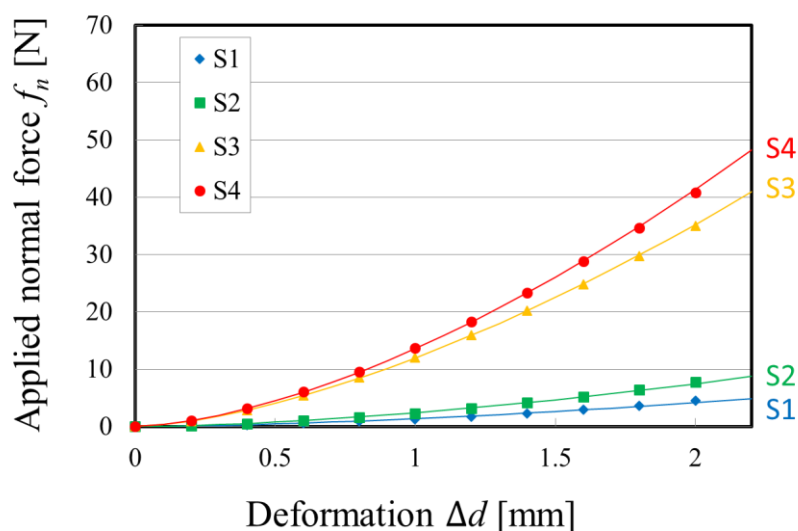


図 2.2-3 指先の変位量と法線荷重の関係.
回帰曲線は式(2-1)

表 2.2-2 図 2.2-3 の回帰曲線のパラメータ C , ζ の値

指の種類	C	ζ
S1	1.36	1.61
S2	2.40	1.64
S3	12.0	1.56
S4	13.6	1.61

2.2.2. 接触面積の検証

接触面積を計測するための実験装置の模式図と写真を図 2.2-4 と図 2.2-5 に示す。まず、指先にカラーインクを塗る。それをステージの上のシートに押し当てる。そして、シートには指先の接触面積に応じたインクの痕が残る。このインク痕（指の接触面積）の半径を測定する。実際に指を押し当てたときのインク痕を図 2.2-6 に示す。指先を押付ける荷重（法線力 f_n ）は、図 2.2-4 のように、指が設置されたリニアステージの上に重りをおし負荷する。負荷した法線力 f_n は 5[N], 10[N], 20[N], 30[N], 50[N] である。図 2.2-7 に実験結果を示す。ここで、マーカーは測定値、曲線は Xydas と Kao により提案された以下の式の回帰曲線である。

$$r = D f_n^\gamma \quad (2-2)$$

ここで、 r は指の接触面の半径、 D と γ は材料係数である。表 2.2-3 に最小二乗法により得られた材料係数を示す。この結果を見ると、指先が柔らかくなるにつれ、半径（接触面積）は大きくなっていることが分かる。

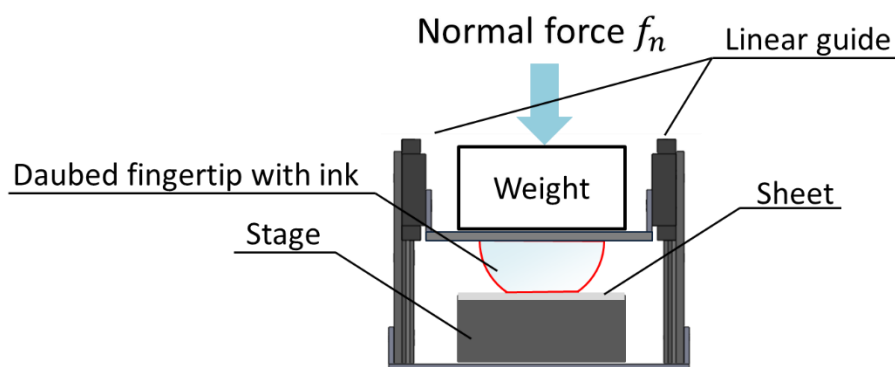


図 2.2-4 指先の接触面積の計測装置

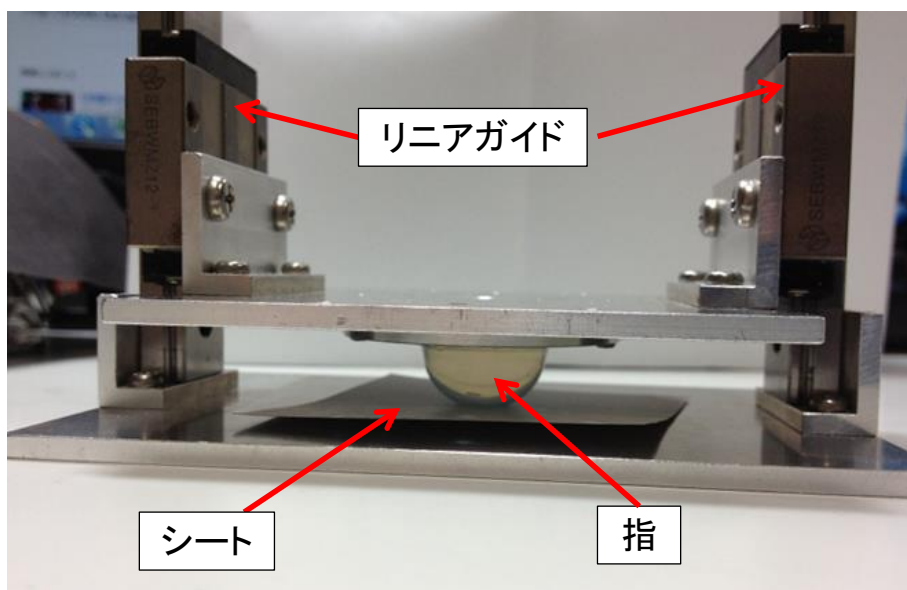


図 2.2-5 接触面積を計測するための実験装置の写真

5[N] 10[N] 20[N] 30[N] 50[N]



図 2.2-6 各指と法線力におけるインク痕の写真

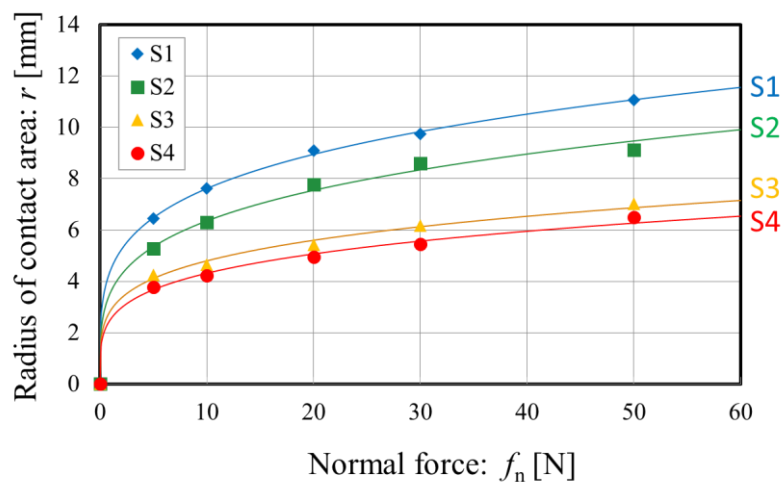


図 2.2-7 法線力と接触面の半径の指ごとの比較

表 2.2-3 図 2.2-7 の回帰曲線のパラメータ D , γ の値

指の種類	D	γ
S1	4.46	0.233
S2	3.59	0.248
S3	2.88	0.223
S4	2.53	0.232

2.2.3. 把持耐力の検証

図 2.2-8 と図 2.2-9 に実験装置の模式図と写真を示す。図 2.2-4 の実験装置に、水平方向のリニアステージを追加したものとなっている。ここで、指の押込み方向（法線方向）に対して直交する方向を接線方向とする。図 2.2-8 の場合、鉛直方向が法線方向で、水平方向が接線方向となる。この接線方向の力を接触面に負荷するために水平方向のリニアステージを追加した。この追加されたリニアステージはフォースゲージと接続されており、このフォースゲージは自動ステージに取り付けられている。フォースゲージとリニアステージの上面（ジュラルミン板）はバネを介して繋がっており、自動ステージを駆動することで指先とジュラルミン板との接触面に接線力を負荷することができる。バネを介することで自動ステージの駆動により負荷する接線力の急激な増加を防止する。法線力 f_n は、指先が取り付けられたリニアステージの上に重りを載せて負荷する。負荷する法線力は、0.5[kg], 1.0[kg], 2.0[kg], 3.0[kg], 5.0[kg]である。ただし、S4 に関してのみ、5.24[N], 10.24[N], 20.24[N], 30.24[N]である。これは、S4 のみ

指先を固定する部品が異なり，その分重量が増加したためである．自動ステージを一定速度で駆動しジュラルミン板を押し込んでいくと接線力が増加し，接触面で滑りが発生する．そのときの接線力を把持耐力として計測する．滑りの発生は指と接触面に付けた目印のずれにより検出する．それぞれの指ごとに 5 回計測を行った．

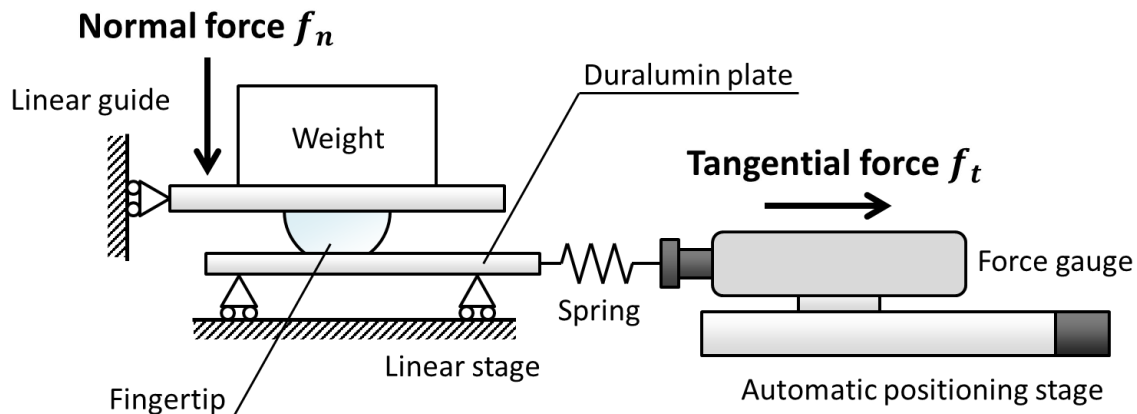


図 2.2-8 半球状指での把持耐力実験装置

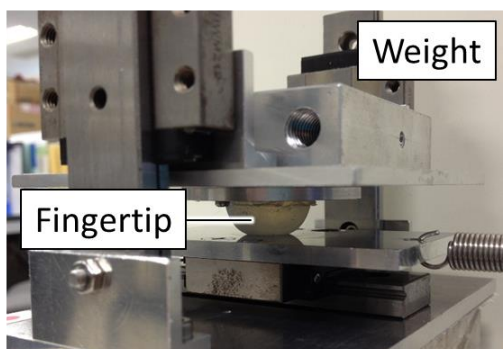
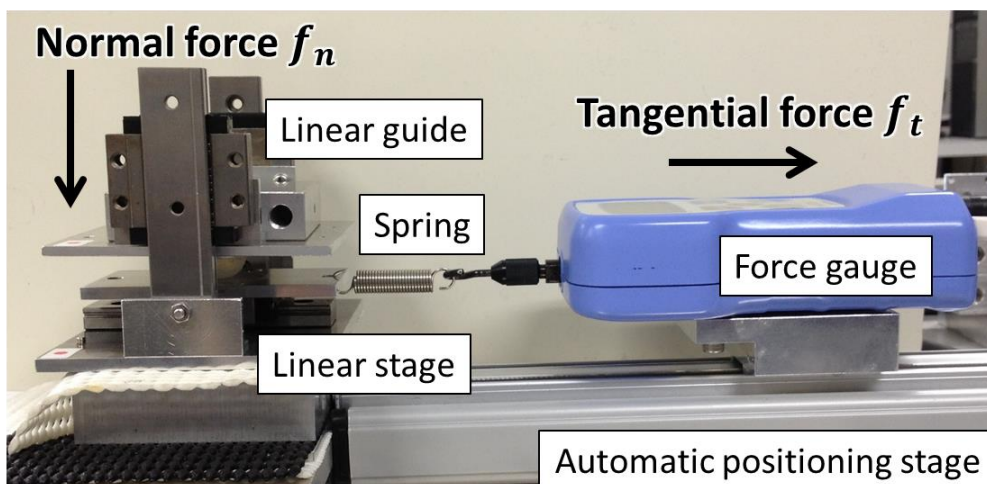


図 2.2-9 実際の実験装置

図 2.2-10 に結果を示す．ここで，マーカーは計測値，曲線はトライボロジーの理論に基づいて導出した式(2-7)の回帰曲線である．把持耐力は指先の硬さの増加と共に増加をしていくことが分かる

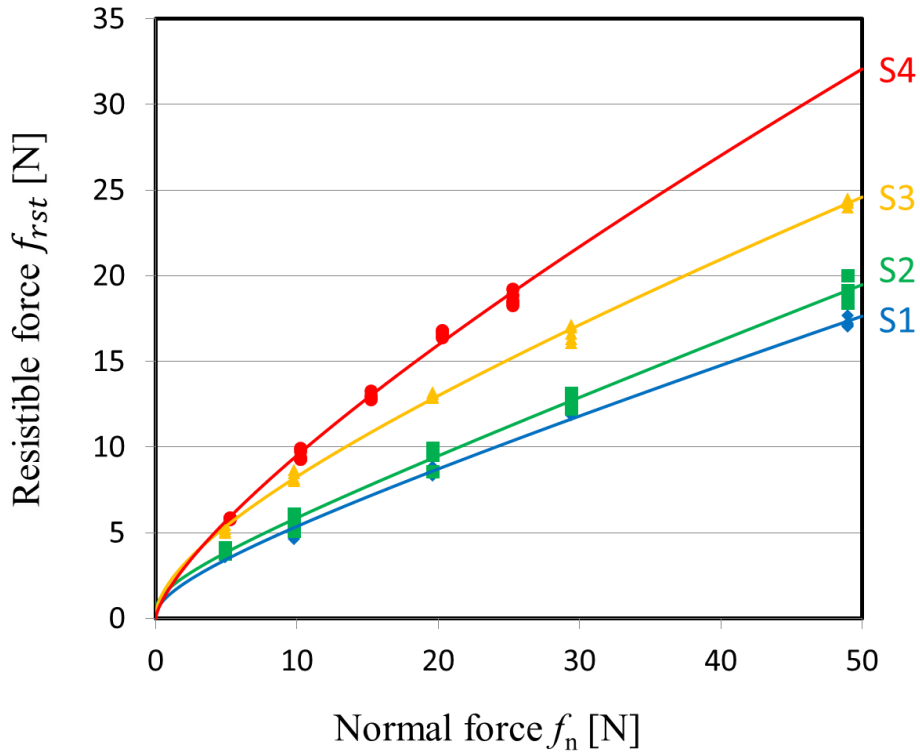


図 2.2-10 法線力と把持耐力の指ごとの比較

ここで，図 2.2-10 で用いた回帰曲線の式について述べる．これは，トライボロジーの理論より導出した法線力 f_n と最大静止摩擦力 f_t^{max} との関係式である．トライボロジーの理論より最大静止摩擦力 f_t^{max} は以下のように定義される．

$$f_t^{max} = sA_r \quad (2-3)$$

ここで， s は指とジュラルミンが接触している部分のせん断応力， A_r は真実接触面積（分子レベルで見たときに指とジュラルミンが接触している面積）である．材料がポリマー材（シリコーン）なら，せん断応力 s は，

$$s = s_0 + \alpha p_r \quad (2-4)$$

と表せる．ここで， p_r は真実接触面積 A_r における法線方向の平均圧力， s_0 と α は材料定数である．ここで，見かけの接触面積 A と A における法線方向の平均

圧力 p を考える．見かけの接触面積 A とは 2.2.2 項で計測した面積のことであり，分子レベルで見ると見かけの接触面積 A の一部のみが接触している．真実接触面積と見かけの接触面積に負荷される力はどちらも法線力 f_n であるので，それぞれの面の

$$f_n = p_r A_r = pA \quad (2-5)$$

という真実接触面積 A_r との関係が導ける．真実接触面積 A_r は法線方向の荷重 f_n が増えるにつれ増加する．その関係を $A_r \propto b f_n^a$ と仮定すると，

$$A_r = b f_n^a \quad (2-6)$$

と表せる．ここで， a と b は材料係数である．式(2-3)，(2-4)，(2-5)，(2-6) から，

$$f_t^{max} = \tau_0 f_n^a + \alpha f_n \quad (2-7)$$

が得られる．ここで， $\tau_0 = s_0 b$ である．この式は図 2.2-10 の回帰曲線の式である．

図 2.2-10 では式(2-7)の最大静止摩擦力 f_t^{max} を把持耐力 f_{rst} とし，回帰曲線を当てはめた．表 2.2-4 に図 2.2-10 の回帰曲線のパラメータ値と R^2 と RMSE (二乗平均誤差) の値を示す．この値は MATLAB の Curve Fitting Toolbox を使用して求めた．

表 2.2-4 図 2.2-10 の回帰曲線のパラメータ τ_0 ， a ， α の値
(R^2 : 決定係数，RMSE : 平均二乗誤差)

指の種類	τ_0	a	α	R^2	RMSE
S1	1.17	0.237	0.409	0.996	0.358
S2	1.49	0.297	0.290	0.994	0.457
S3	1.92	0.218	0.501	0.998	0.309
S4	1.61	0.175	0.683	0.994	0.397

2.2.4. 考察

真実接触面積 A_r と見かけ上の接触面積 A に注目し，式(2-7)を変形すると次式を得る．

$$f_t^{max} = s_0 \frac{A_r}{A} A + \alpha f_n \quad (2-8)$$

ここで， A_r/A は真実接触面積と見かけの接触面積の比である． A_r と A は f_n

のべき乗関数であるため、 A_r/A も f_n のべき乗関数となり、次のように定義できる。

$$s_0 \frac{A_r}{A} = b_0 f_n^{a_0} \triangleq \tau \quad (2-9)$$

これを、式(2-8)に代入し次式を得る。

$$f_t^{max} = \tau A + \alpha f_n \quad (2-10)$$

表 2.2-4 から $\tau_0 > \alpha$ がわかる。そこで、式(2-10)の $\tau A (= \tau_0 f_n^a)$ の項に着目する。式(2-9)の A_r/A は、指が硬いときほど大きい。それは、指が硬いほど見かけの接触面積 A が小さいため、局所圧力が高くなり真実接触面積 A_r が大きくなると考えられるからである。従って、式(2-9)で定義された τ は指の剛性の増加とともに大きくなる。上述したように、見かけの接触面積 A は指の剛性の増加に伴い減少する。そのため、式(2-9)における τ の影響が相対的に強いので、指の剛性の増加に伴い最大静止摩擦力は増えた。

2.2.5. 問題点

指の柔らかさにより把持耐力が異なる要因として、次の2つが考えられる

① 初期接触面積の違い

2.2.4 項で述べたように柔らかさによって接触面積が異なることが要因として挙げられる。2.2.4 項のトライボロジーの理論で用いた真実接触面積 A_r と見かけの接触面積 A は、接線力が負荷されていないとき ($f_t = 0$) の面積であり、これを初期接触面積とする。

② 接線力による指の変形量の違い

図 2.2-11 に S1 (柔らかい) と S4 (硬い) の初期状態 (接線力 $f_t = 0$) と滑りが発生したときの指の斜め横から撮影した写真を示す。これから、滑りが生じるとき、柔らかい指 (S1) の方が初期状態からの指の変形が大きいことが分かる。この変形により、柔らかい指では指とジュラルミン板との接触面での接触面積が初期接触面積から変化している。

今回の実験では、①と②両方の影響が含まれているため、実験結果からそれぞれの影響について独立して考察することができない。


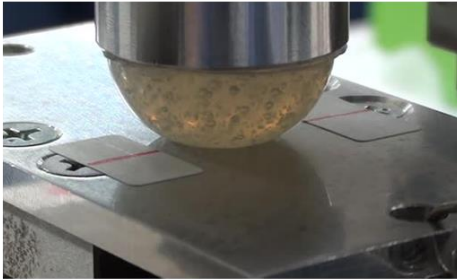
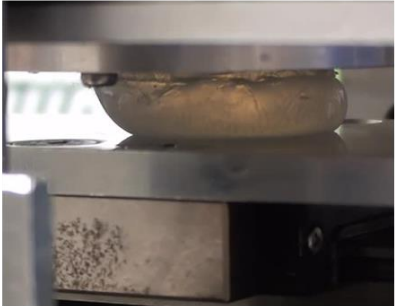
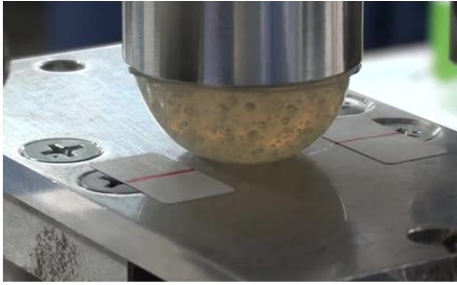
初期状態		
滑べったとき		
	S1 (29.43N)	S4 (30.24N)

図 2.2-11 初期状態（接線力=0）と滑ったときの指の様子
（ $f_n = 30[\text{N}]$ 近傍のとき）

2.3. 初期接触面を揃えての検証

2.2 節では、半球状の指を使用しており剛性によって初期接触面積（接線力 $f_t = 0$ のときの接触面積）が異なっていた。2.2 節の議論で摩擦力（把持耐力）は接触面積に依存することが示唆された。そこで、指の柔らかさごとに把持耐力が異なった要因が初期接触面積の違いか、接線力の負荷による指の変形の影響かどうかを明確にできなかった。そのため、本節では、初期接触面積の違いによる影響が出ないように指の形状を円筒形に変更して実験を行い、接線力の負荷による指の変形の影響について検証を行った。

2.3.1. 実験方法

図 2.3-1 図 2.3-1 実験装置の模式図に本実験で用いた実験装置の模式図を示す。図 2.3-2 はその実験装置の実際の写真である。この装置により平坦なアクリル板にシリコン製の指を一定荷重で押し付けつつ、アクリル板に接線方向の荷重を負荷し把持耐力の計測ができる。指の押し付けには垂直に設置された自動ステージを用いる。指は自作のロードセル（0～50N）を介してこのステージに取り付けられており、指の押し付け荷重（法線力）を計測・制御することができる。もう一つの水平に設置された自動ステージでアクリル板に接線方向の荷重（強制変位）を与える。このステージにはフォースゲージ（IMADA DS2-50N）が取り付けられており、接線方向の荷重（把持耐力）を計測することができる。リニアガイドによりアクリル板は支えられており、このリニアガイドの摩擦力は事前に計測してある（0.1[N]以下）。前節の実験では接線力が負荷されているときの指の接触面の変化の様子が観察できなかったもので、本実験では接触面の変化の様子を観察できるように透明なアクリル板を用いる（図 2.3-2）。接触面の様子はアクリル板の下に設置したカメラ（図 2.3-3）で撮影することができる。

実験手順は、まず、指をアクリル板に一定の荷重で押付ける。次に、水平に設置された自動ステージを 1[mm/s]の一定速度で駆動させフォースゲージを介しアクリル板に強制変位を与え、接線方向の荷重を負荷する。指とアクリル板との間に滑りが生じるまで接線方向の荷重を増加させ、この滑りが生じた時の接線方向の荷重を把持耐力として取得した。法線力は 1[N], 2[N], 5[N], 10[N], 15[N], 20[N]と変化させて、それぞれ 3 回ずつ実験を行った。

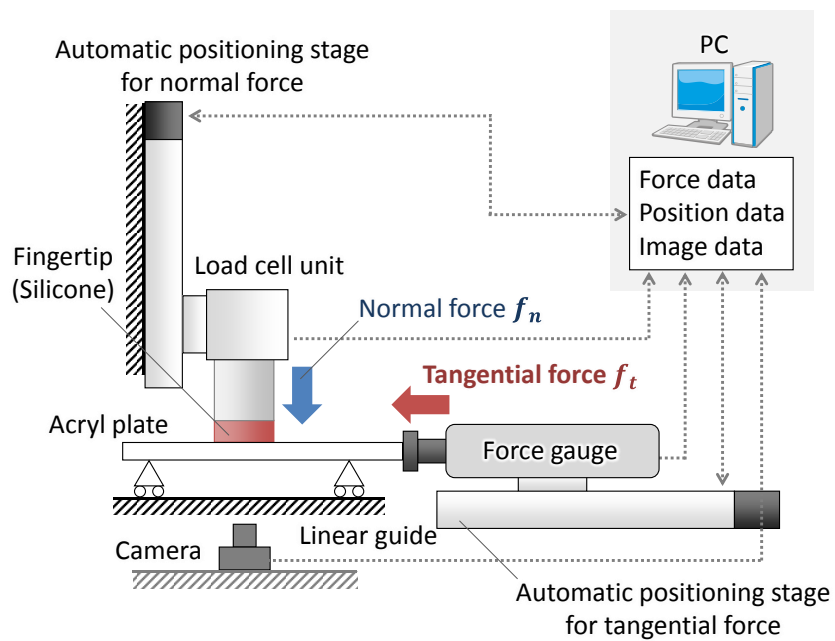
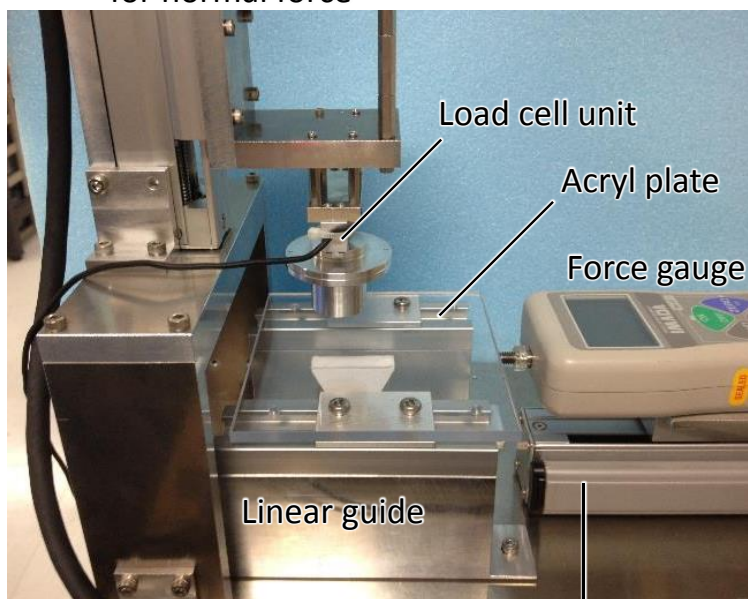


図 2.3-1 実験装置の模式図

Automatic positioning stage
for normal force



Automatic positioning stage
for tangential force

図 2.3-2 実際の実験装置の写真

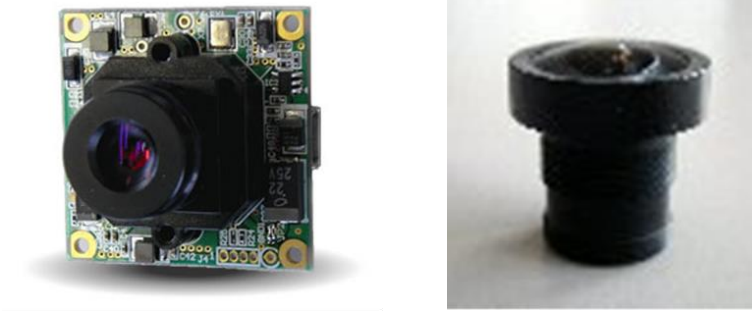


図 2.3-3 接触面撮影用カメラ MCM4303

2.3.2. 使用した指

本実験で用いた指を図 2.3-4に示す. 前節で用いた半球状指と同じ直径 22mm, 高さ 11mmの円筒形状となっている. 図 2.3-4 のように柔らかい方の指から S1 ~S4 と呼ぶことにする. なお, 表 2.2-1 の配合率の S1~S4 と対応していない. 本節の S1, S2, S3, S4 の配合率は表 2.2-1 の S2, S1, S4, S3 に対応する. 配合率が同じでも, 気泡の含有率や硬化時の温度等の製作過程の僅かな条件の違いで各配合率の柔らかさが前後することがある. さらに, 今回は接触面の観察をし易くするために, シリコーンゴム用の着色剤 (K-COLOR-R-20) で赤色に着色した.

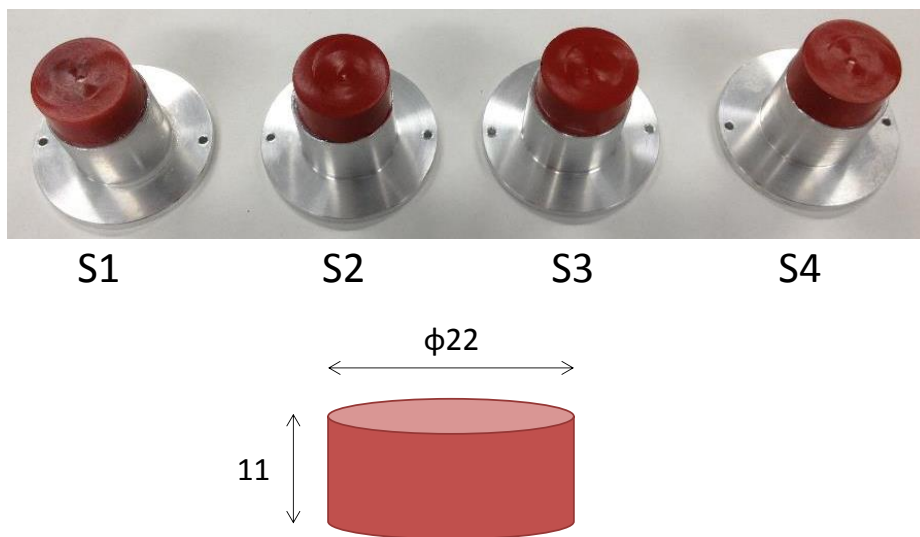


図 2.3-4 この実験で使用した円筒形シリコーン指

指の作成後, 指の剛性を計測するための圧縮試験を前節のように行った. 実験結果を図 5 に示す. マーカーは実験値であり, 曲線は式(1)を用いた回帰曲線で

ある．表 2.3-1 に最小二乗法で得られた各パラメータを示す．図 2.3-5, 表 2.3-1 から, S1, S2, S3, S4 の順番で硬いことが分かる．

図 2.3-6 に法線力 20[N]を負荷したときの S1 (柔らかい) と S4 (硬い) の接触面の画像を示す．このとき, S1 と S4 で 10%の差であった．半球状のときでは 83%の差であったので, 初期接触面の差を円筒形にすることで十分低減できたと考えられる．

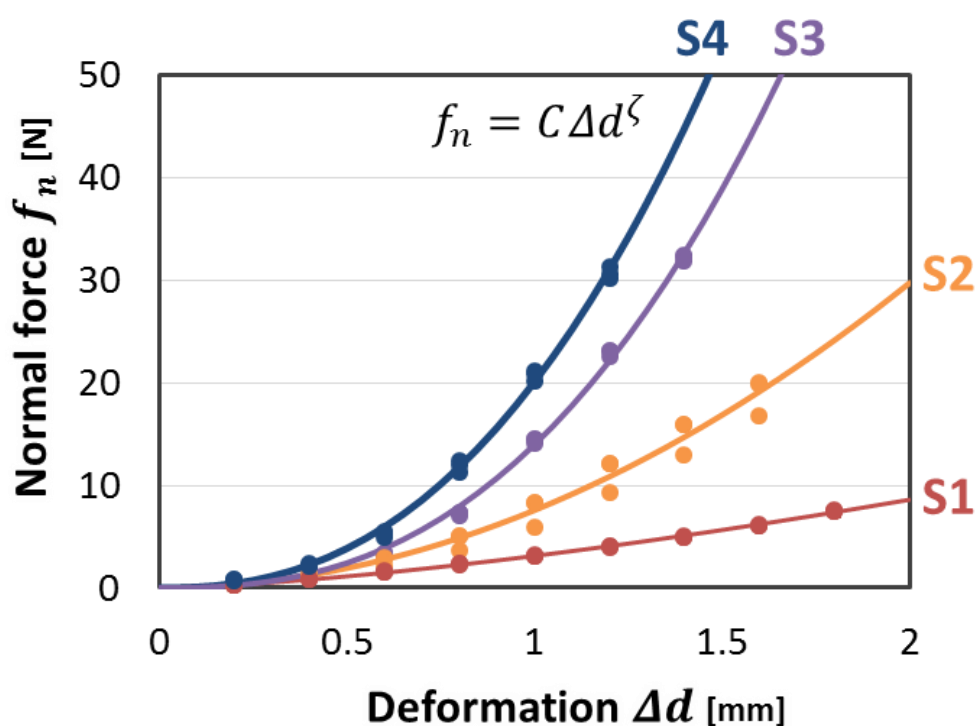


図 2.3-5 各指の変位と力の関係 (柔らかさ)

表 2.3-1 図 2.3-5 の回帰曲線のパラメータ C , ζ の値
(R^2 : 決定係数, RMSE: 平均二乗誤差)

指の種類	C	ζ	R^2	RMSE
S1	3.13	1.46	0.973	1.07
S2	7.58	1.97	0.998	0.107
S3	14.0	2.52	0.997	0.600
S4	20.1	2.39	0.997	0.575

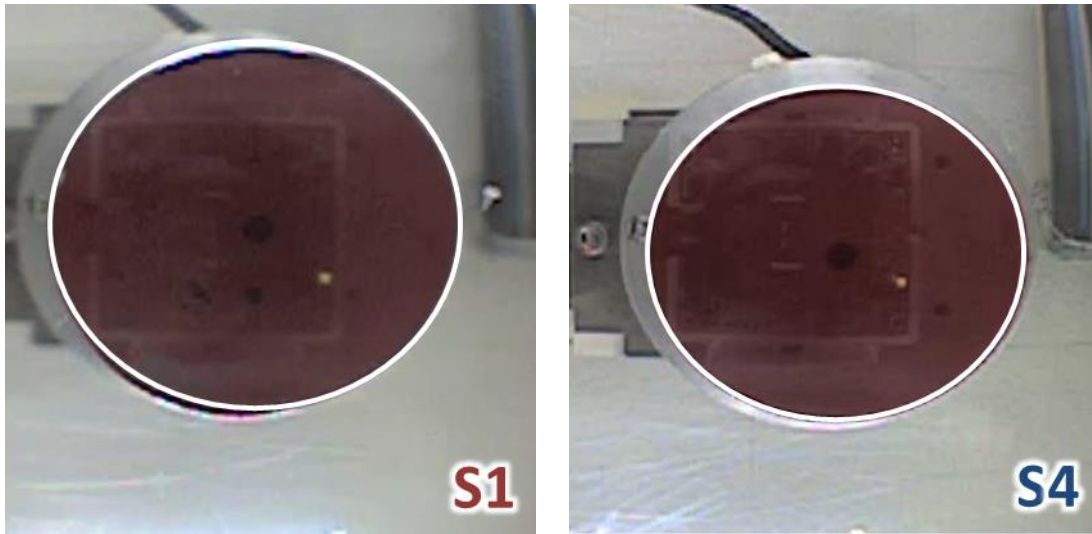


図 2.3-6 法線力 20[N]負荷時の S1 と S4 の接触面の画像.
(両者で 10%の差)

2.3.3. 結果と考察

図 2.3-7 に負荷した接線力の時系列データの 1 例として S1 のときの各法線荷重でのデータを示す. この図の赤矢印で示す最初のピークが, 指が滑り始める点である. このピーク値を把持耐力として取得する. このピーク値の後にスティック - スリップ現象が現れており, この図から滑りが生じていることが確認できる.

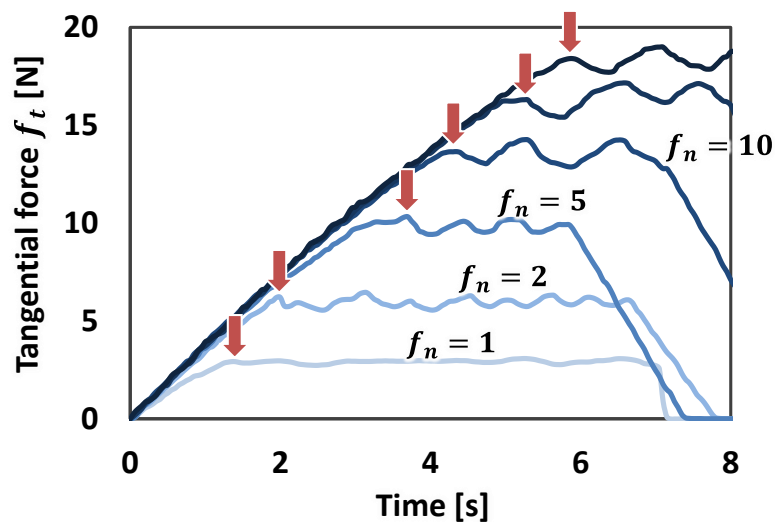


図 2.3-7 S1 における負荷した接線方向の荷重の時系列データ.
最初のピーク (赤矢印) を把持耐力として定義する.

図 2.3-8 にこの実験により得られた法線力 f_n と把持耐力 f_{rst} との関係を示す。マーカーは実験値であり、曲線は前節の式(2-7)を用いた回帰曲線である。各パラメータは MATLAB の Curve Fitting Toolbox を用いて求め、表 2.3-2 にその値をします。S4 において、法線力 15N でフォースゲージの計測可能範囲である 50N を超えたので、今回の実験では法線力 15N 以降のデータを取得できなかった。図 2.3-8 を見ると、前節と同様の結果（硬い指ほど大きな把持耐力）が得られたことが分かる。

図 2.3-9 に滑り出す瞬間の S1 と S4 の指とアクリル板との接触面の様子を示す。この実験では、円筒形指を使用しており初期接触面積はどの指においても同じである。図 2.3-9 を見て分かるように、滑り始めたときの接触面の形状、面積、位置は柔らかさによって異なっており、硬い指の方が初期状態からの変形が少ない。図 2.3-10 に滑り出す瞬間の指を横から撮影した写真を示す。これから、指が大きく曲げ変形をしており、接触面の変形はこの指の曲げ変形によるものである。指の変形による接触面積の変化が把持耐力の違いに影響を与えていることが分かった。

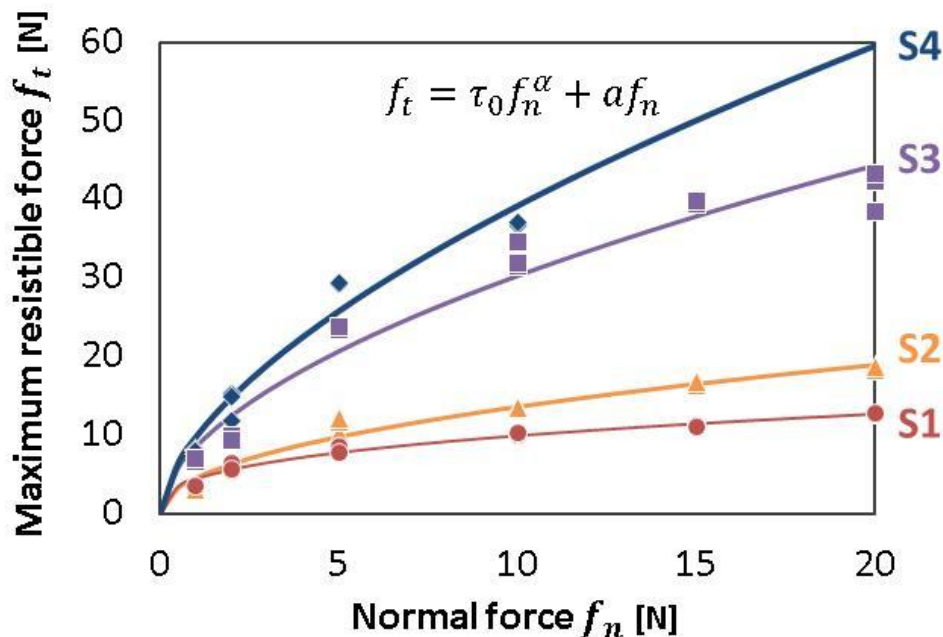


図 2.3-8 初期接触面積を揃えたときの指ごとの法線力と把持耐力の関係。
(S4 で 15[N] と 20[N] の法線力を負荷したとき、滑りが発生する前に接線荷重がフォースゲージの計測域を超えた。)

表 2.3-2 図 2.3-8 における回帰曲線の係数
 (R^2 : 決定係数, RMSE : 平均二乗誤差)

指の種類	τ_0	α	a	R^2	RMSE
S1	4.41	0.353	1.47×10^{-10}	0.977	0.483
S2	4.54	0.477	4.48×10^{-11}	0.966	1.10
S3	8.53	0.550	6.96×10^{-09}	0.962	2.90
S4	9.76	0.604	3.08×10^{-13}	0.951	2.75

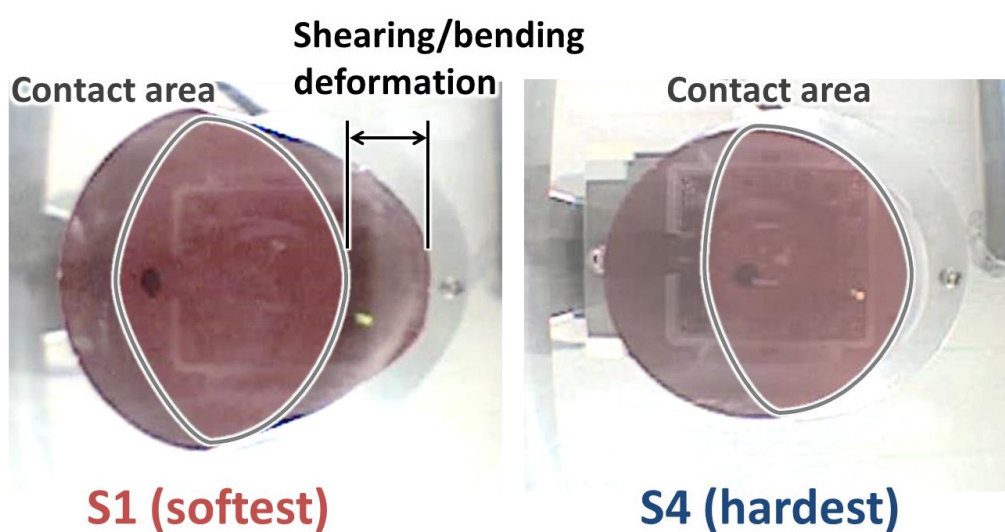


図 2.3-9 指とアクリル板との間で滑りが生じた瞬間の接触面の写真. 10[N]の法線力を負荷したときの S1 (最も柔らかい) と S4 (最も硬い) との比較.

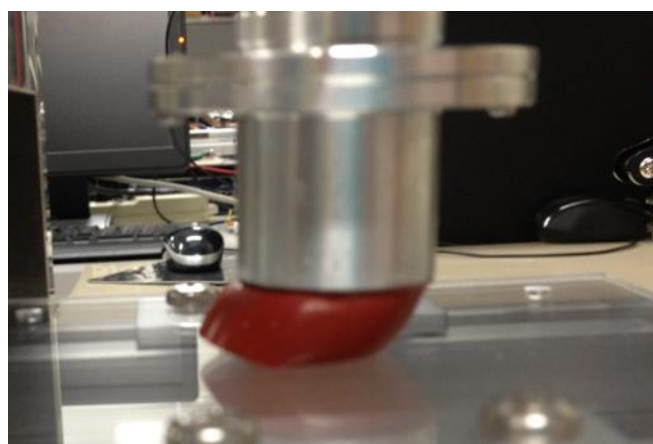


図 2.3-10 滑り出すときの横からの写真 (S1)

最後に、接線方向の変位の観点から実験結果を見ると、図 2.3-11 に示すように、柔らかい指 (S1) に比べ硬い指 (S4) では接線方向の変位が小さいところで滑り出している。つまり、柔らかい指は大きな強制変位 (接線方向の変位) に耐えられるが、硬い指 (S4) は小さい強制変位までしか耐えることができない。この結果より、力と変位どちらの負荷に耐えたいかによって、指の柔らかさを適切に選択すべきであることが分かった。

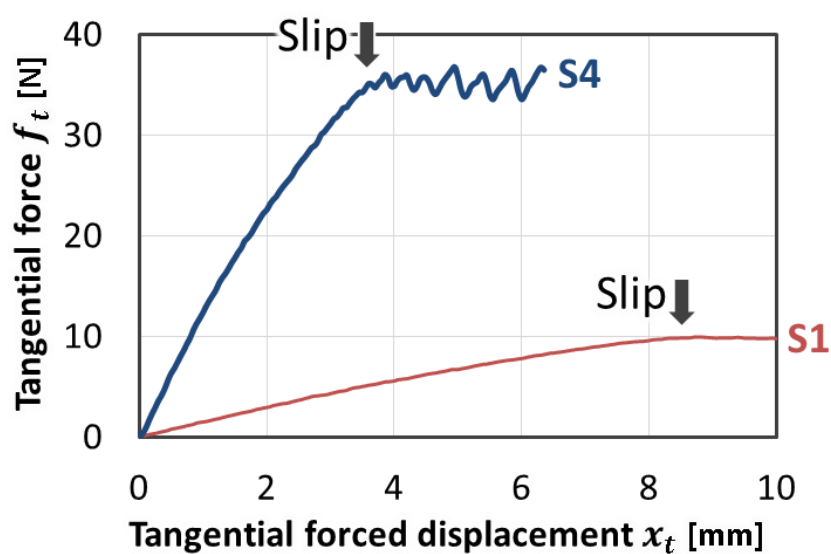


図 2.3-11 接線方向の強制変位と接線方向の荷重の比較.
(法線力 10[N] 負荷時の S1 と S4)

2.4. 指先端の変位の影響

2.3 節の実験結果から、指の変位による接触面積の変化が把持耐力に大きな影響を与えていることが分かった。そこで、本節では、指先端の変位に着目し、同じ接線力が負荷されたときの指先端の変位が同じ場合の実験を行った。もし、指先端の変位が把持耐力の違いの主要因なら、指先端の変位が同じ場合に把持耐力が同様になるはずである。実際の指とアクリル板との拘束条件は図 2.3-9 と図 2.3-10 を見て分かるように完全拘束ではなく接触している部分のみ拘束されている拘束状態であるが、ここでは計算を簡単にするために自由端拘束のときに接線力が負荷されたときの指先の変位を計算し、そのときの値が合うように指のサイズを設計する。

2.4.1. 指の設計と実験方法

指を固定端-自由端の片持ちはり（図 2.4-1）と考え指の変位を算出する。実際の指の変形は大変形であるが、大変形も微小変位の積み重ねであると考えられるので、微小変位が一致していればその大変形も近いものとなるはずである。この考えに基づいて、計算が簡単である微小変位が対象の Euler –Bernoulli のはり理論を用いて変位を算出し、この変位が合うように指のサイズを設計してみる。このときの、指先端の変位 δ_t は、

$$\delta_t = \frac{f_t l^3}{3EI} \quad (2-11)$$

となる。ここで、 E 、 I は指のヤング率と断面二次モーメントである。ここで、同一の接線力 f_t に対する指先端の変位 δ_t を合わせたいので、

$$\frac{\delta_t}{f_t} = \frac{l^3}{3EI} \quad (2-12)$$

と変形し、この式の δ_t/f_t が同じになるように指のサイズを求める。

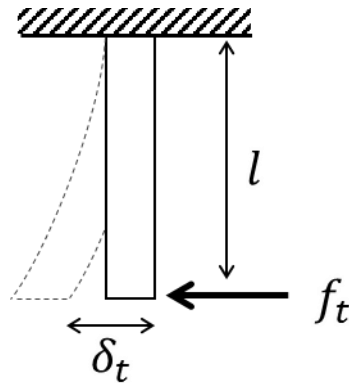


図 2.4-1 指のはりモデル

図 2.4-2 に式(2-12)に基づいてサイズを拡大した指を示す. 今回は, 指の素材は同一 (前節の S1) で直径を前節の 1.5 倍とする. このとき求めるべき指の寸法は指の長さ l のみとなる. 式(2-12)から l を求めると約 19[mm]となる. 実験方法と実験装置は前節のものと同様である. ただし, 負荷する法線力は 10, 20, 30, 40[N]である. 指の直径を大きくした分, 装置の幾何誤差 (指の面とアクリル板の面との平行度の誤差) の影響を受けやすくなり, 低い法線力のとき指の全面が接触しなかったため, 前節より大きな法線力の範囲となっている.

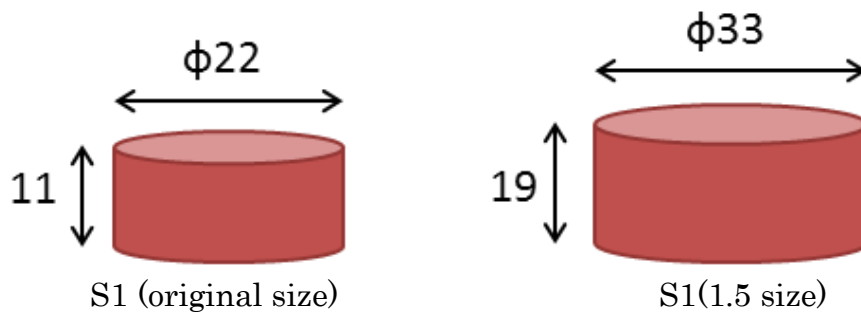


図 2.4-2 使用した指 (素材は前節の S1 のシリコンゴム).
(左: 前節の円筒形状, 右: 左と式(2-12)に基づいた指先端の変位が同じでサイズを拡大した指)

2.4.2. 結果と考察

図 2.4-3 に実験結果を示す. S1 (original size) は前節の結果 (三角のマーカ) である. S1 (1.5 size) は今回作成した指の実験結果 (丸のマーカ) である. 図を見て分かるように, 非常に近い結果を得られた. これより, 指先端の変位を

同一にした場合、把持耐力が一致することが確認された。従って、指先端の変位が把持耐力の違いを生む主要因と考えられる。

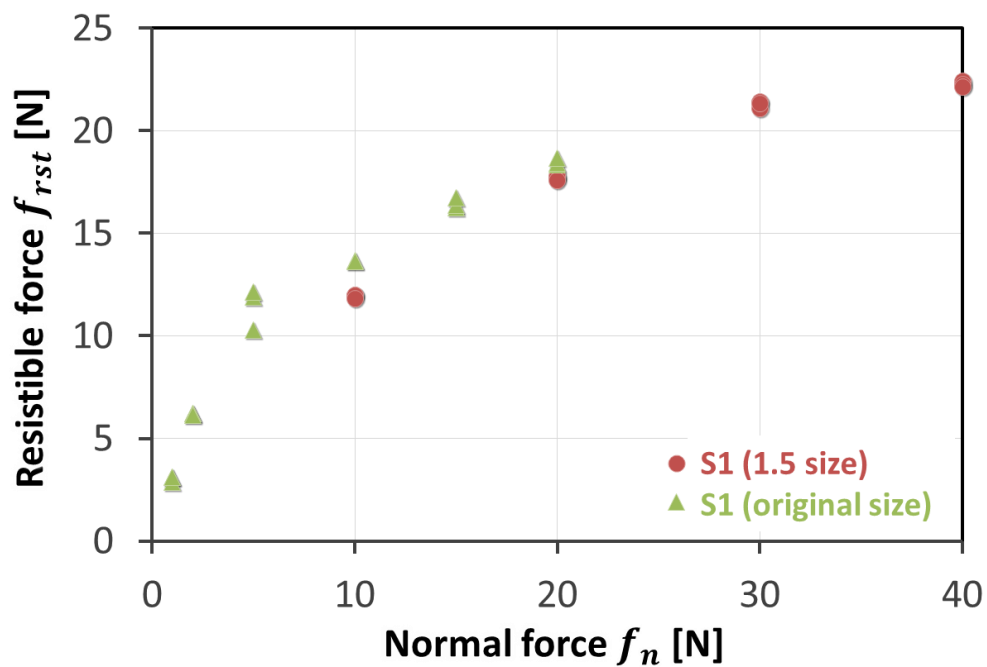


図 2.4-3 指の変位を同じにしたときの法線力と把持耐力の関係

2.5. 指の柔らかさと物体形状の影響

最後に、把持物体の形状により指の柔らかさと把持耐力の関係がどのように変化するのかについて実験的に調べた。前節までの接触面が平面の場合は、硬い（指先端の変位が少ない）ほど把持耐力が大きくなることが分かった。しかし、接触面が平面ではない場合は、柔らかい指と硬い指で把持耐力がどのように変化するのかについてよく分かっていない。そこで、形状の違う剛体の把持物体を柔らかさの異なる指で把持をしたときの把持耐力について調べた。

2.5.1. 実験方法

指先剛性と物体形状が最大耐力に与える影響を調べるための、実験装置の模式図を図 2.5-1 に示す。物体は対向する 2 本の指で把持される。把持力（法線力）はロードセルで計測し、位置決めステージで制御する。法線力の大きさは 2N とした。一方で、接線力は法線力に直交する方向から物体に与える。接線力計測用のフォースゲージを押し付けることで、接線力を負荷する。このフォースゲージは自動ステージに取り付けられている。自動ステージの移動速度は 5.0[mm/s] に設定し、接線力を負荷する。把持ができなくなる（物体が指に対して滑り出す）まで接線力を増加させる。そして、この時の接線力を把持耐力として計測する。これを 5 回ずつ、様々な 4 種類の指の柔らかさと 4 種類の物体形状で行う。

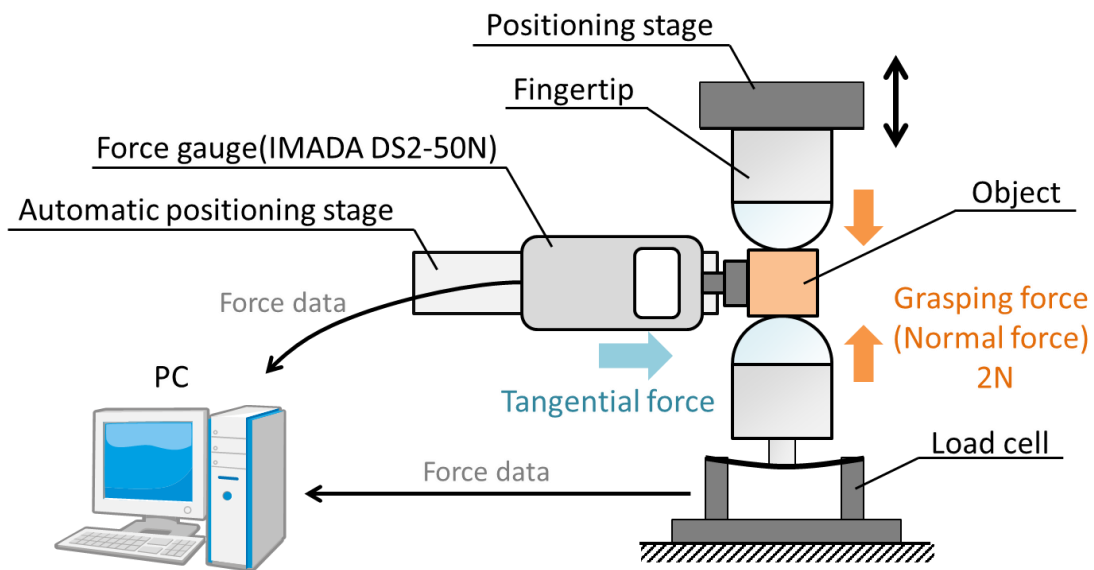


図 2.5-1 物体形状を変化させての把持耐力実験の装置の模式図

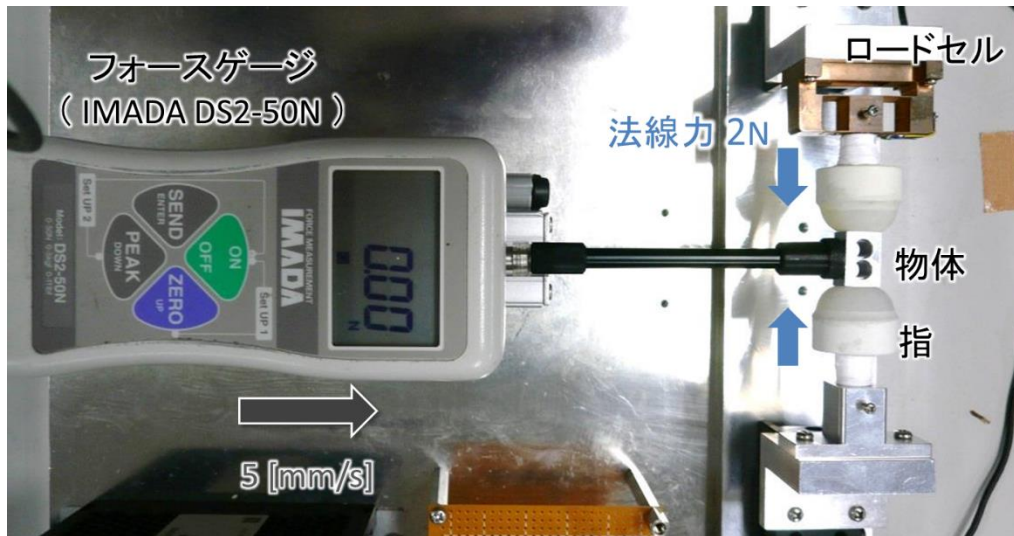


図 2.5-2 物体形状を変化させての把持耐力実験の様子

2.5.2. 使用した指と物体

把持物体を図 2.5-3 に示す．ロボットハンドは様々な表面状態を持つ物体を把持すると考えられる．これより，把持物体には指との接触面に様々な角度の角部がある物体を用意し，各角度の物体で指の柔らかさを変化させたときの把持力の変化を比較する．把持物体は 4 種類用意した，それぞれの接触面の角部角度は，(i) 180° (平面)，(ii) 150° ，(iii) 120° ，(iv) 90° である．材質はすべてジュラルミン製であり，重量は 3.0 [g] である．寸法はすべて同等であり，接触点間の距離が 16 [mm]，物体の接触面となる断面の幅と厚さは共に 10 [mm] となっている．

使用する指の構造を図 2.5-4 に示す．指の素材は信越シリコーン社製のシリコーンゴムを表 2.2-1 の配合率で用いる．ここでも，柔らかい指から順に S1, S2, S3, S4 と呼ぶ．ここでの S1~S4 は表 2.2-1 の S1~S4 と対応する．図 2.5-5 に図 2.2-2 の方法で調べた指の柔らかさを示す．マーカーは試験結果，曲線は式(2-1)を用いた回帰曲線である．に最小二乗法で得られた各指の回帰曲線のパラメータを示す．

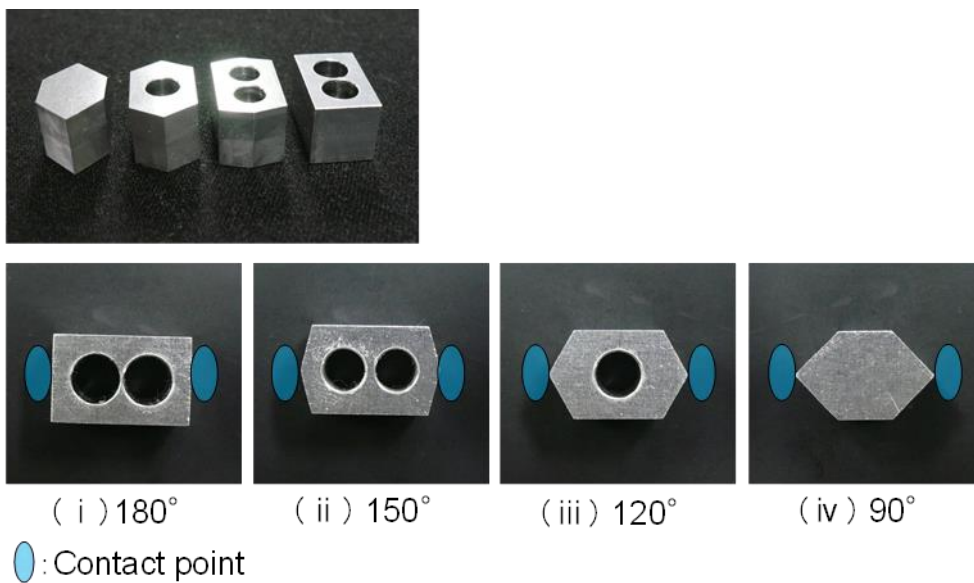


図 2.5-3 把持物体（接触面の角度が異なる）

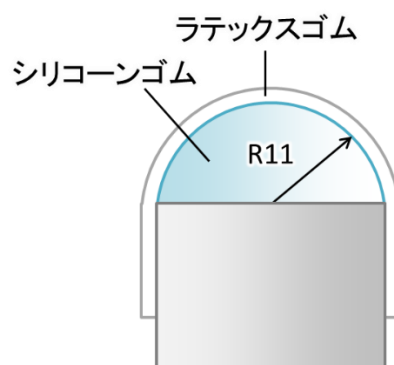


図 2.5-4 指の構造.
(シリコーンゴムの表面をラテックスゴムで覆う)

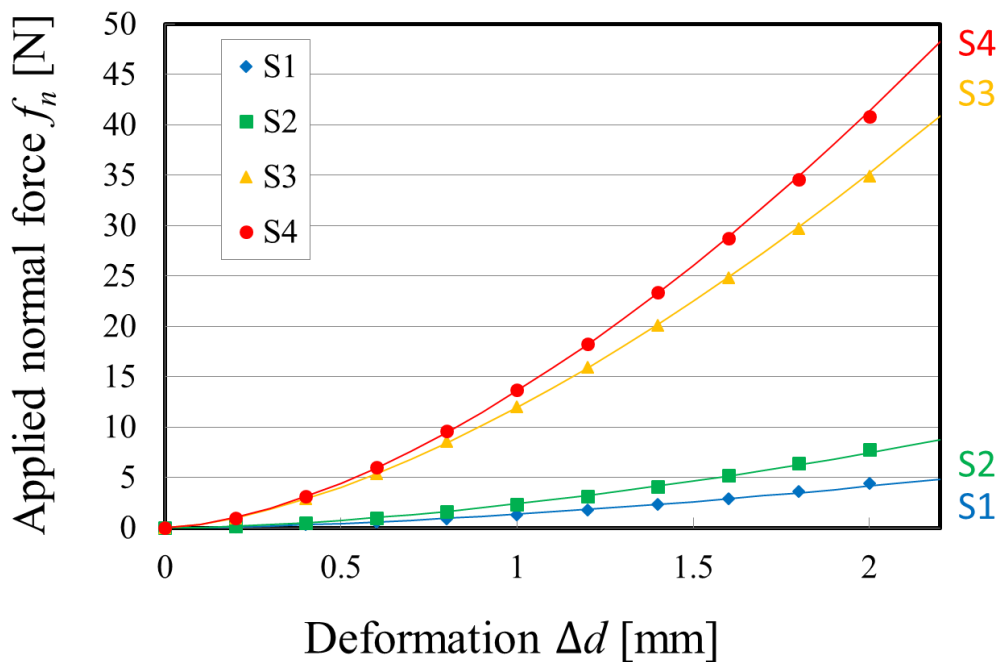


図 2.5-5 使用する指の柔らかさ

表 2.5-1 図 2.5-5 の回帰曲線のパラメータ C , ζ の値

指の種類	C	ζ
S1	1.30	1.77
S2	2.33	1.74
S3	12.0	1.54
S4	13.7	1.58

2.5.3. 結果と考察

S1～S4の指で実際に対象物を把持したときの様子を図 2.5-6 に示す。縦の列には上から下へ S1～S4、横の列には左から右へ図 2.5-3 の把持対象物 (i)～(iv) を用いた場合の指と対象物の接触部分の写真である。S1 の写真から柔らかい指は、対象物の表面形状に沿って指が変形し、包み込むように物体を把持していることが分かる。一方、S4 の写真から硬い指は、指の変形は非常に小さいことがわかる。この傾向は、接触面の角度が鋭角になるほど顕著に表れている。角度の小さい把持物体を把持した場合、指と把持物体の接触面積を比較すると、柔らかい指を用いた場合の方が硬い指を用いた場合よりも大きいので、把持物体の把持耐力は柔らかい指の方が大きくなると考えられる。

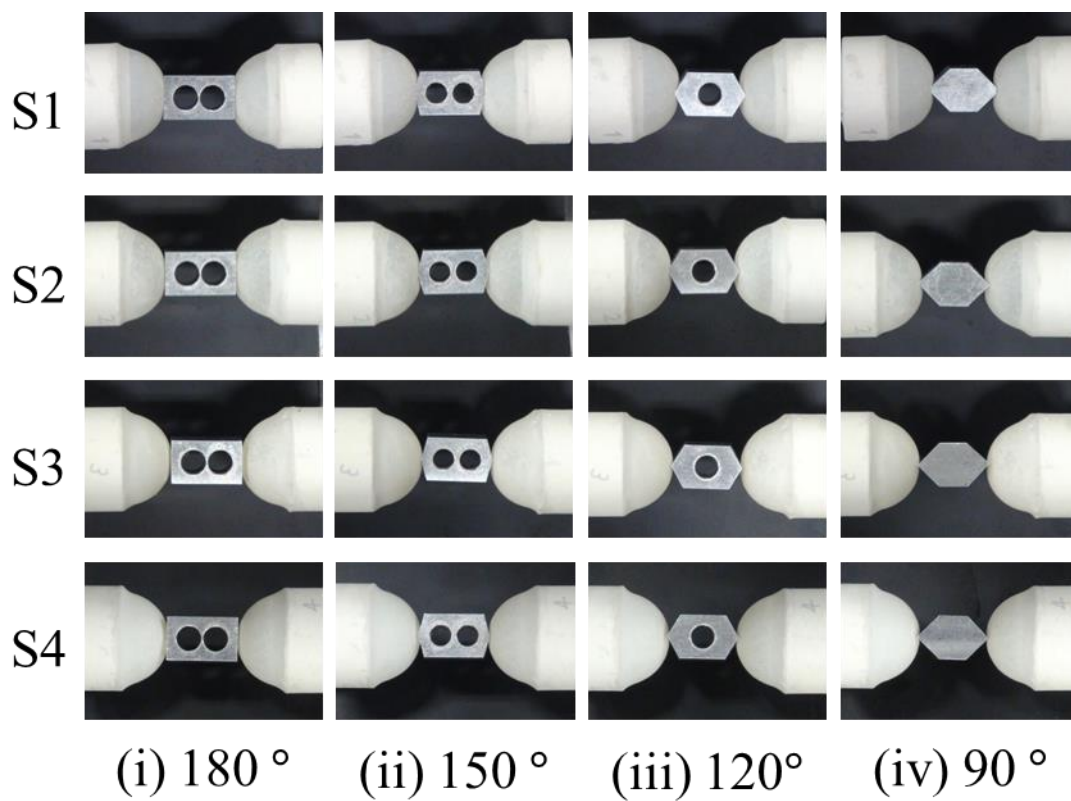


図 2.5-6 各指での把持物体ごとの把持している様子

図 2.5-7 に実験結果を示す．この図は把持物体ごとの各柔らかさの指の把持耐力を示している．このグラフの値は，5 回試行して測定した把持耐力を平均したものとなっている．また，標準偏差もエラーバーで示してある．図 2.5-3 (i) の物体を用いた場合，把持耐力が大きい方から S4, S3, S2, S1 の順となっている．すなわち，接触面が平面の場合は前節までの結果と同様に硬い指の方が把持安定性の面で優位であると言える．図 2.5-3 (ii) の物体を用いた場合，把持耐力が大きい方から S2, S1, S3, S4, の順となっている．図 2.5-3 (i) を用いた場合と比較すると，S1 と S2 の把持耐力に大きな差はないが，S3 と S4 は大きく低下しており，柔らかい指の方が把持安定性の面で優位である傾向がでている．図 2.5-3 (iii) と (iv) を用いた場合，把持耐力が大きい方から S1, S2, S3, S4 の順となっており，図 2.5-3 (iii) よりも (iv) のときの方が差は大きくなっている．図 2.5-3 (i) を用いた場合と比較すると，まったく逆の傾向が出ている．すなわち，指と物体との接触面の角度が鋭角になるほど，柔らかい指の方が把持安定性の面での優位性が大きくなると言える．

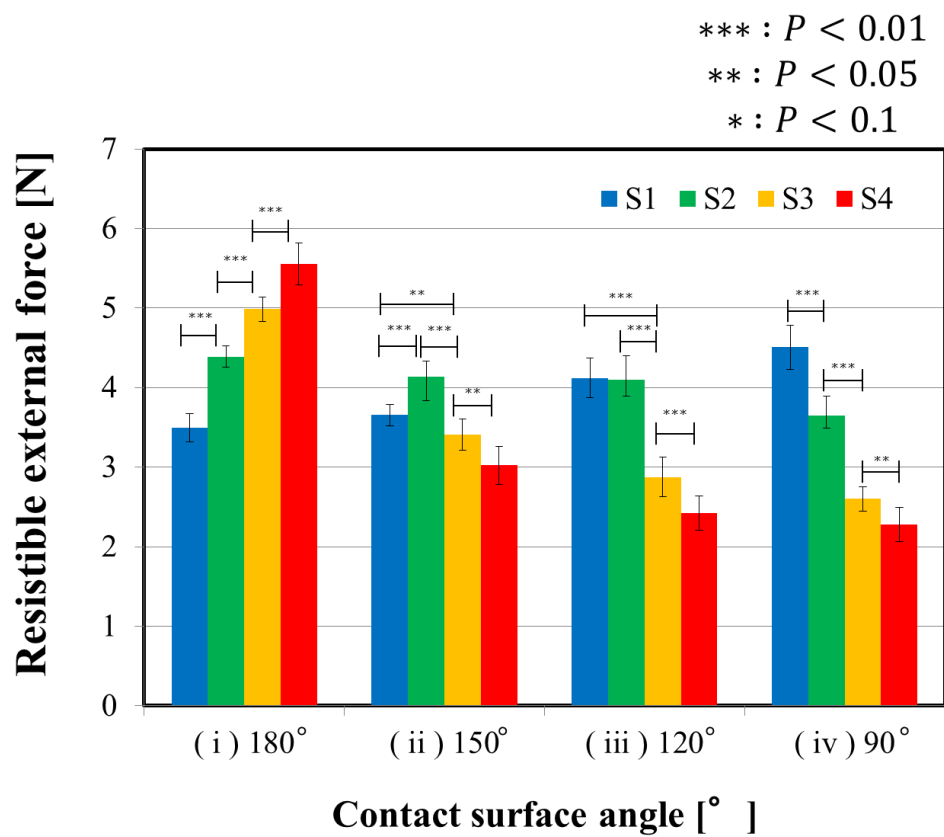


図 2.5-7 各指の把持物体ごとの把持耐力

2.6. おわりに

本章では、指の柔らかさが把持安定性（把持耐力）に与える影響について検証を行った。最初に、半球状の指を平面に押し当て検証を行ったところ、硬い指ほど把持耐力が高い結果が得られた。このような結果となった要因として、①初期接触面積（接線力が0のとき）の違い、②負荷された接線力による指の変形量の違いが考えられた。そこで、次の実験では、①初期接触面積の違いを低減し、②指の変形量の影響を見るために、初期接触面積が柔らかさに依存し難い円筒形の指を用いた。その結果は、半球状の指のときと同様の傾向（硬い指ほど大きな把持耐力）となった。これより、柔らかさの違いによって生じる指の変形量（先端の変位）の違いが把持耐力に大きな影響を与えたと考えられる。そこで、もしこれが正しければ、指先端の変位量が同じ指ならば把持耐力も同じとなるはずである。この仮説に基づいて指のサイズは異なるが指先端の変位が同じになるように設計した指を用いて実験を行った。なお、設計において同じとする指先端の変位として指が固定-自由端の片持ちはりとしたときの変位を用いた。この実験結果は、指先端の変位が同じものならば法線力と把持耐力の関係が同様になることが分かった。これらから、指の変形量が把持耐力に大きな影響を与えており、指の変形量が小さいほど把持耐力が大きくなるということが明らかとなった。この指の変形量は指の柔らかさや形状に依存する。

最後に、指と把持物体との接触面の形状が異なる場合での検証も行った。一般的に柔らかい指は把持物体の形状になじめ把持安定性（把持耐力）が大きくなると考えられているため、これについての検証を行った。物体の接触面に角を設けその角度を変化させた物体を対向する指で把持したときの把持耐力（指の対向軸に直交する方向）について検証した。この実験で、角度が鋭くなるにつれて硬い指の把持耐力は低下する一方で、柔らかい指の把持耐力はほとんど変化しないという結果が得られた。これは、柔らかい指ほど把持物体の形状になじむことで初期接触面積を維持することができたためである。

以上より、接触面が平面の場合では把持耐力は硬い指ほど大きくなる。これは、把持耐力は指の変形量に依存しており、硬い指ほど指の変形量小さいためである。しかし、把持物体との接触面の形状が変わると、硬い指ほど接触面の形状になじむことができず初期接触面積が減少し把持耐力も減少する。従って、接触面の形状によって、初期接触面積と指の変形量の影響の大きさが変わる。

3. 変形する物体の把持

前章では、指の柔らかさのみに着目をして把持安定性についての検証を行った。本章では、指の柔らかさに加え把持物体の柔らかさが把持安定性に与える影響について検証を行う。具体的な対象として、図 3.2-1 のように提案しているシートの辺を把持しシートの曲げ変形を利用したシートマニピュレーションに着目をする。このシートマニピュレーションではシートを座屈させ曲げ変形を起こす。把持物体であるシートは座屈前では剛体のように振る舞いほとんど変形しないが、座屈後（曲げ変形をした状態）は弾性体となる。このため、提案するマニピュレーションでの把持戦略（指の柔らかさを変化させる）を確立するためには、シートの力学モデルの構築と指と把持物体の柔らかさが把持安定性（把持耐力）に与える影響について検証する必要がある。

本章では、まず、提案するシートマニピュレーションの概要や従来のシートマニピュレーションとの違いについて説明をする。次に、シートの力学モデルの構築と指の柔らかさがシートの変形に与える影響を検証するための把持実験について述べる。その結果を基にシートの力学モデルを導出しその妥当性を検証する。最後に、把持耐力についての検証について述べ、これらの検証を通して得られた知見から指の柔らかさを変化させる把持戦略を提案する。

3.1. シートマニピュレーション

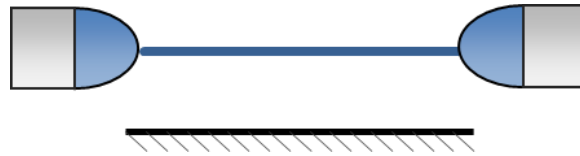
シート状の物体のマニピュレーションは幅広い分野で行われている。例えば、シート状のフィルムを貼り付ける作業などは、工業、医療、日常生活の分野で行われている。工場でのシートのマニピュレーションでは、既知の環境を想定しており、吸盤等を搭載した専用のハンドによりシートを吸着して行う。そこで、汎用的なハンドでシート状物体のマニピュレーションが行えるようになれば、ロボットの活躍の場は広がる。

図 3.2-1 に本研究で目指す汎用ロボットハンドによるシートマニピュレーションの一例を示す。本マニピュレーションでは、シートの縁を把持する。また、敢えてシートに曲げ変形を発生させこの変形をマニピュレーションに利用する。例えば、スマートフォンの画面に保護フィルムを貼る場合を考える。フィルムの平面を維持したまま画面に貼り付けようとする、指がフィルムと画面との接触を阻害するので貼り付けが難しい。フィルムを曲げたときに形成される凸部から貼り付けようすれば指が接触を阻害しなくなり貼り付けが容易となる。このようにシートの変形を活用したマニピュレーションを目指している。

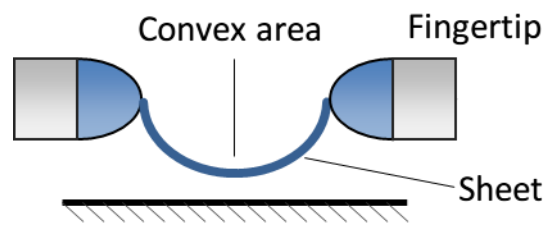
従来手法である吸着式に対する本シートマニピュレーションのメリットは次のように考えている。1つ目は、表面形状・状態の影響を受けにくいことである。吸着式の場合、吸着する面が基本的には凹凸のない面でなければならない。また、表面が濡れている場合は、表面の液体を吸引してしまい吸着できない等が考えられる。提案する手法では、シートの縁を把持するため、表面の形状や濡れなどの状態の影響を受けにくい。2つ目は、把持・操作の自由度が高いことである。一般的な吸着式ハンドは、特定の作業に特化して設計されている。本マニピュレーションは多指ハンドやグリップを用いるので、多様な作業に対応できる。

本研究のようなシートの曲げを活用したシートマニピュレーションを提案した研究は見当たらない。シートに似た物体として柔軟物体のマニピュレーションに関する研究は多くある[1]~[4]。特に、平井らはシートに近い形状である帯状物体が曲がったときの幾何学モデルを求めており[5]、また、その時のマニピュレーション方法についても提案している[6]。この研究では、本研究で提案するような変形を活用したマニピュレーションを提案してはいない。材料力学分野では、Amirbayat[7]ら、Byklum[8]らがそれぞれシートや板材の座屈に関するモデルを提案している。しかし、柔らかい指でシートを把持するような、柔らかい物体と接触したときの荷重とシートの変形については明らかとなっていない。

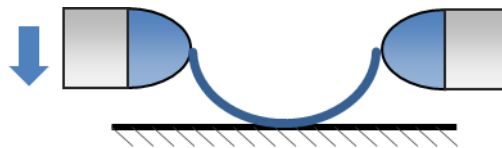
① Grasp



② Bend



③ Place



④ Release

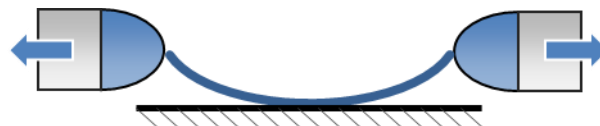


図 3-1 対象とするシートマニピュレーション
(シートの辺を把持し曲げ変形を利用する.)

3.2. 把持実験

シートの力学モデルを導くために行ったシートの把持実験について述べる。R力学モデルの構築には、シートの変形量と指がシートを圧縮する力（シートの厚みに直交する方向）との関係が必要となる。そこで、図 3.2-1 のような実験装置を用いてシートの把持実験を行った。実験装置は多指ハンドでの把持の構成として最も単純である対向する 2 本指での把持となる構成となっている。片側の指は固定してあり、もう一方の指を自動ステージにより駆動することで指間を開閉できる。これにより、指の中心に設置されたシートを圧縮する力を負荷することができる。この実験では、シートを圧縮する力がシートを把持する力（把持力）と一致する。シートが指の対向軸上となるように、シートの上下位置を調整するための台の上に置かれている。シートが圧縮され座屈により曲げ変形が発生するとき、シートの下側に台があるので今回の実験では必ず上に凸な曲げ変形となる。駆動側の指は自動ステージにロードセルを介して取付けられており、シート把持時の把持力（シートを圧縮する力）を計測できるようになっている。シートの変形の計測にはカメラを用いる。シートの材質は PET であり、サイズはスマートフォンの画面フィルムに近いサイズ（ $100 \times 70 \times 0.41$ mm）とした。

指の柔らかさによる違いがあるのかを確認するために、柔らかさの異なる 3 種類の指を用いて実験を行った。剛体（ABS 樹脂）、弾性体（シリコーンゴム）でそれぞれ作成した指と、弾性膜の中を流体（機械油 ISO VG 100）で満たした指（流体指^[1]）の 3 種類を用いた（図 3.2-2）。表面の状態（摩擦係数等）を合わせるために、各指の表面は同一のニトリルゴムで覆ってある。流体指は指の内圧を高くすることで指の柔らかさを制御することができる。今回の実験では、初期内圧が 3[kPa]と 6[kPa]の 2 つの場合で実験を行った。柔らかさは剛体指、弾性体指、流体指（6[kPa]）、流体指（3[kPa]）の順に柔らかくなっていく。

指を閉じていく速度は 3[mm/s]とし、各指で 3 回把持が成功するまで実験を行った。各指での成功率は、剛体指は 50% (3/6)、弾性体指は 37.5% (3/8)、流体指はともに 100% (3/3) であった。

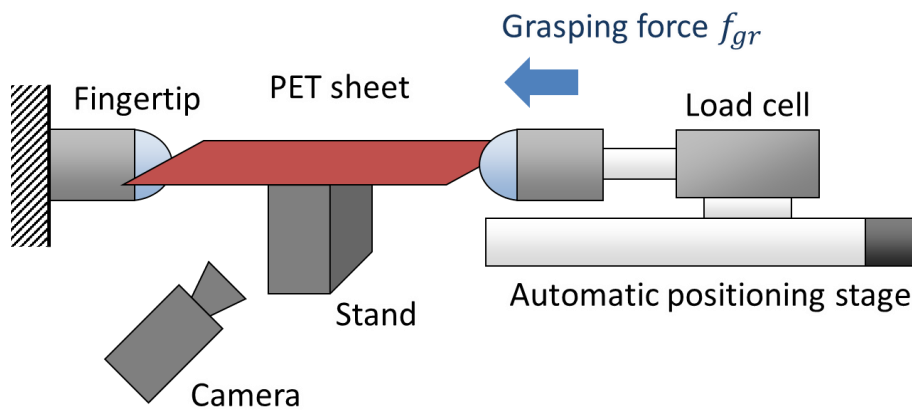


図 3.2-1 シート把持実験の装置の模式図

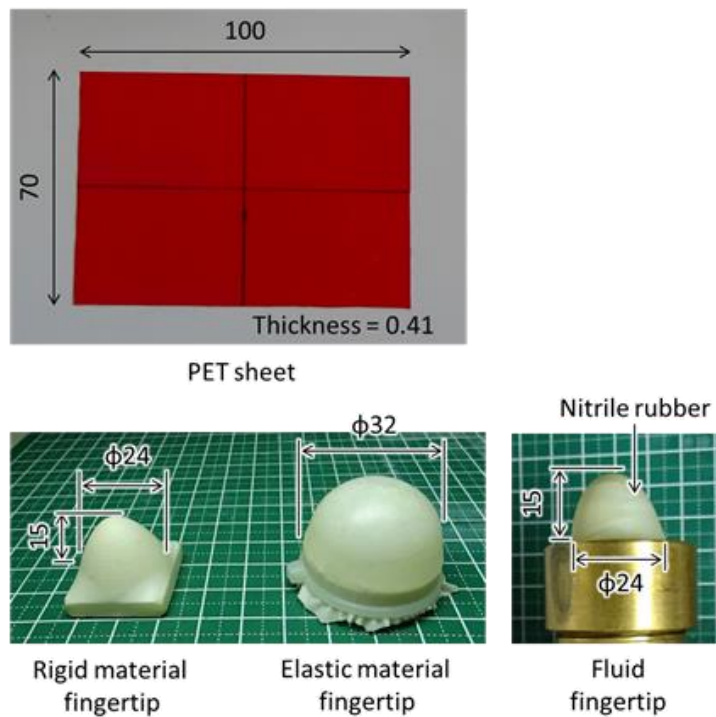


図 3.2-2 実験に使用したシートと指の写真

図 3.2-3 に初期内圧 3[kPa]の流体指のときの把持力 f_{gr} の時系列データと図 5 にその時のシートの変形の写真を示す. これらを見ると, $t = 5.67$ [s]で把持力がピーク (座屈荷重) に達するまで指が変形していることが分かる. 把持力のピーク (座屈荷重) 後は, 座屈によりシートの変形モードが変わりシートに曲げ変形が生じ (図 5 参照), 把持力が急激に低下する. このとき発生するシートの振動により把持力に小さな振動が生じる. その後, シートの曲げ変形による弾性で

把持力は増加していく．この振動が収まった点以降を座屈後，座屈荷重に達する以前を座屈前と定義する．この実験結果に基づいてシートの変形と把持力の関係を求める．

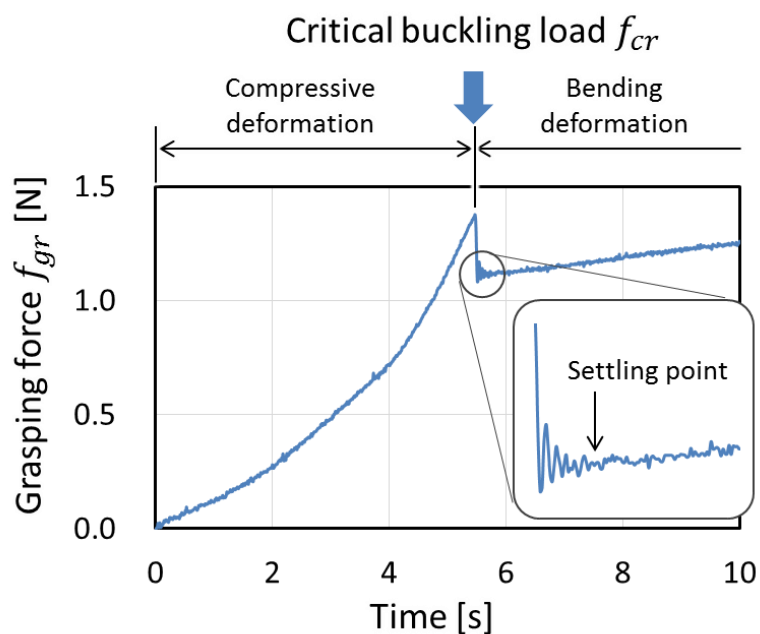


図 3.2-3 把持力 f_{gr} の時系列データ
(初期内圧 3[kPa]の流体指)

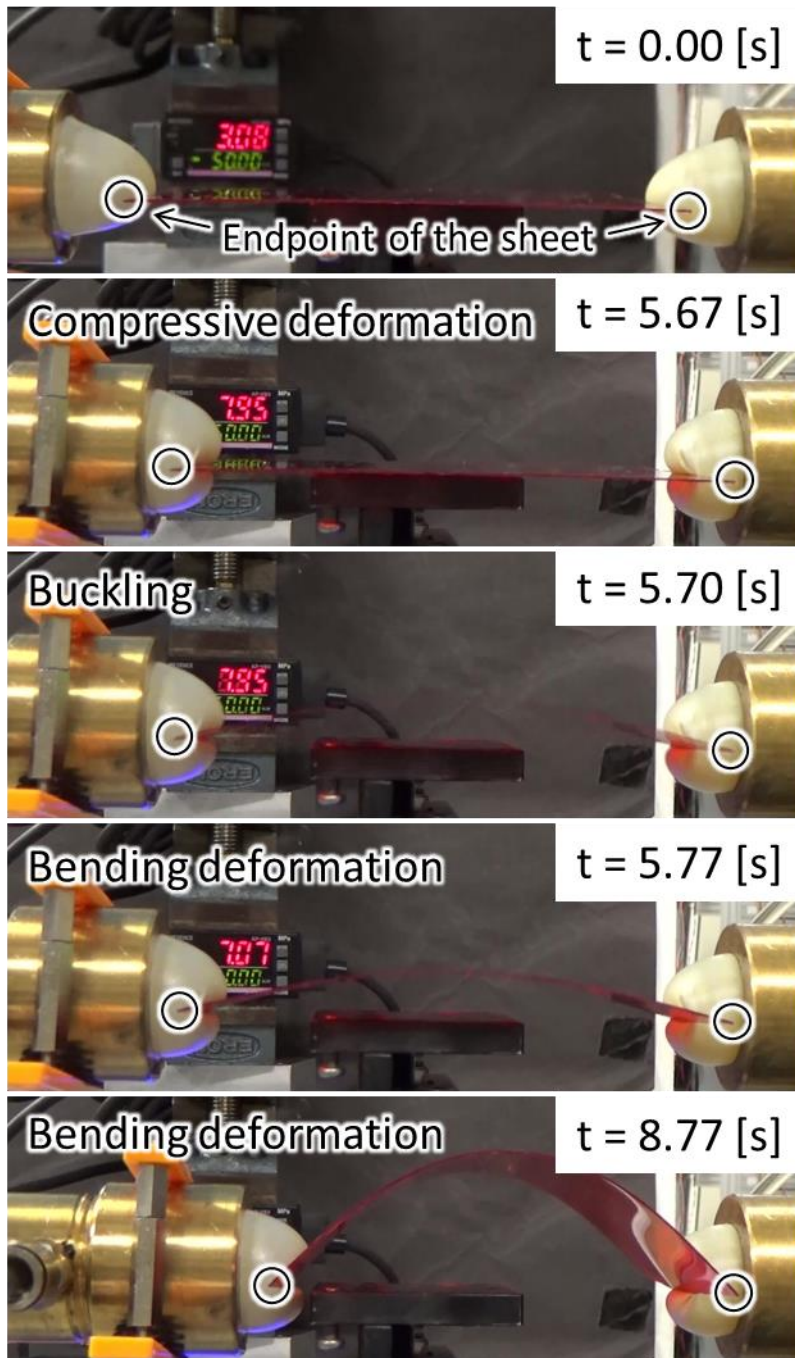


図 3.2-4 図 3.2-3 のときの実験の様子

図 3.2-5 に各指の把持力と指の変位量（指を押込んだ量）との関係を示す。剛体指，弾性体指，流体指（6[kPa]），流体指（3[kPa]）の順に座屈するまでの指の変位量が大きくなっていく。つまり，指が柔らかくなるにつれて，指の押込み（変位）に対して把持力の増加が緩やかになっている。座屈前のシートは指の対向軸方向にほとんど圧縮変形をしないため，剛体のように考えられる。そのため，剛体指のように非常に硬い指では，剛体同士の接触となり指の変位が直接シートの変位となり，把持力は急激に増加しすぐに座屈荷重へと達する。一方で，流体指のように柔らかい指では，指の変位が指の弾性により指の変形となり，把持力の上昇が緩和される。

硬い指では，小さな指の変位で把持力が座屈荷重に到達してしまうため，座屈前の把持力の細かい制御が非常に難しい。さらに，少しでも接触点にズレがあると，把持力が指とシートとの摩擦円錐から外れてしまい把持を失敗する。一方で，流体指のように非常に柔らかい指では，把持力の増加が緩やかであるため細かい把持力の制御がしやすい。また，接触点のズレは指が変形することで吸収されるので，把持力は摩擦円錐内となり把持を維持しやすい。

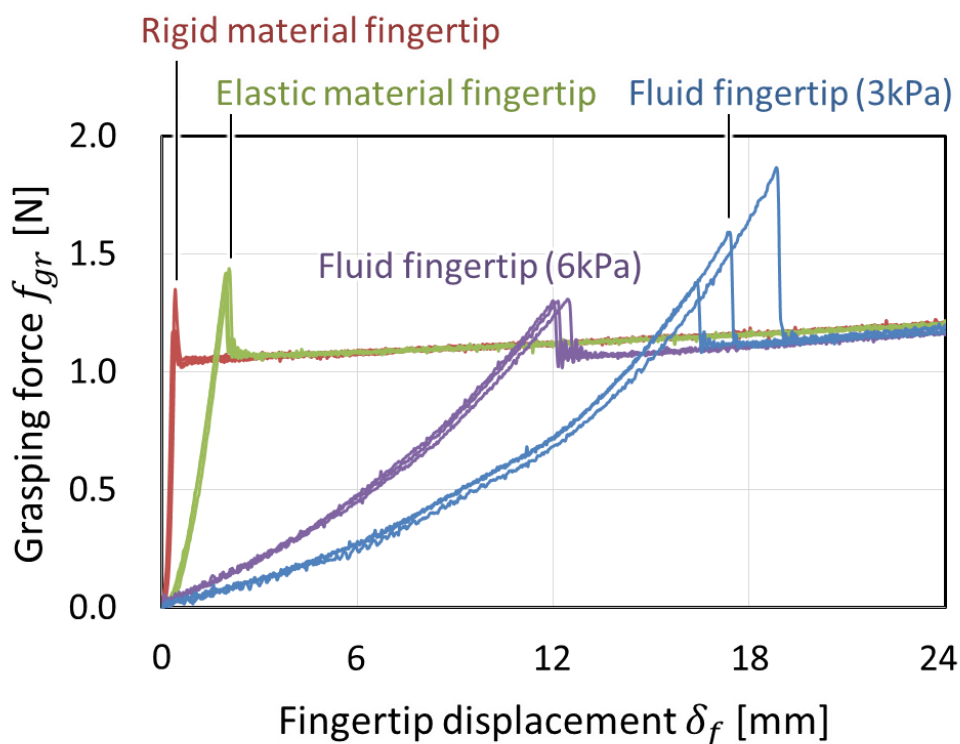


図 3.2-5 各指の把持力 f_{gr} と指の変位 δ_f との関係

図 3.2-6 に座屈直後の点 (把持力が座屈荷重に達した後の振動が収束した点) でのシート端点の変位の指ごとの比較を示す. シート端点の変位 δ_s と指の変位 δ_f の関係はシートと指の弾性をバネとしたモデルで表すと図 3.2-7 のようになる. 指の変形量 x_f をとすると, シート端点の変位 $\delta_s = \delta_f - x_f$ となる. シート端点の変位 δ_s は図 3.2-8 に示す丸で囲われた点をシートの端点として計測した. 柔らかい指ほどシート端点の変位 δ_s が大きいことが分かる. 柔らかい指ほど座屈荷重に達するまでの指の変位が大きいので, 座屈荷重に達したときの対向する指間の距離が狭くなり, シート端点間の距離が短くなる (シートの変位は大きくなる). よって, 座屈後のシートの変形が少なく把持したい場合は, シートの端点の変位が少なければ良いので硬い指を用いたほうが良いことが分かる.

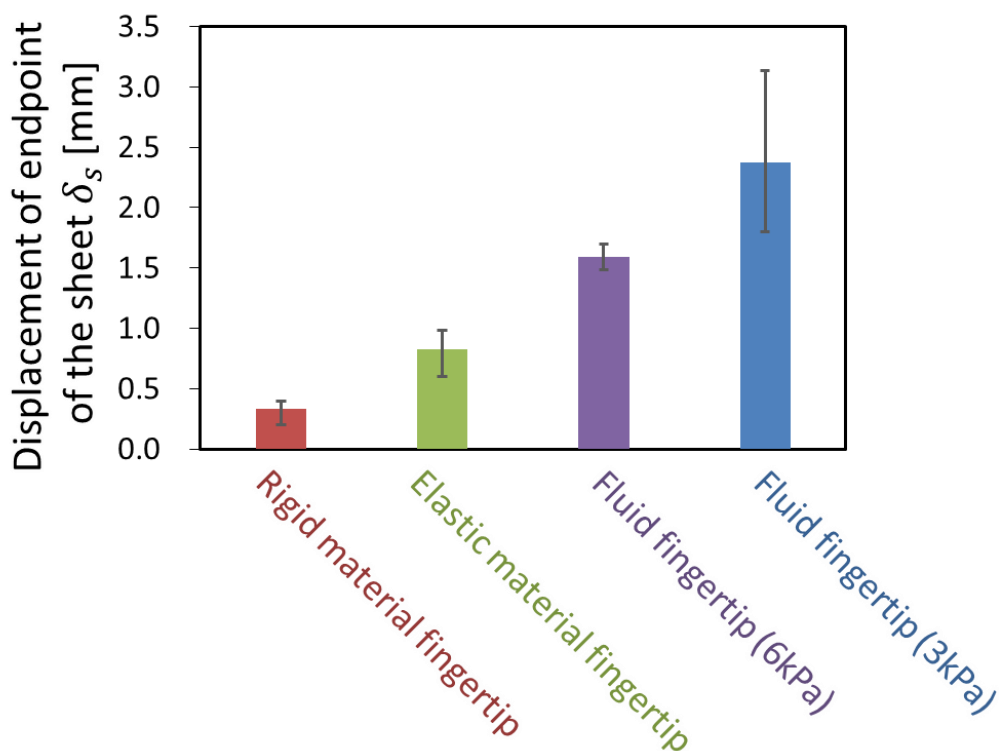


図 3.2-6 座屈直後のシート端点の変位 δ_s の指ごとの比較

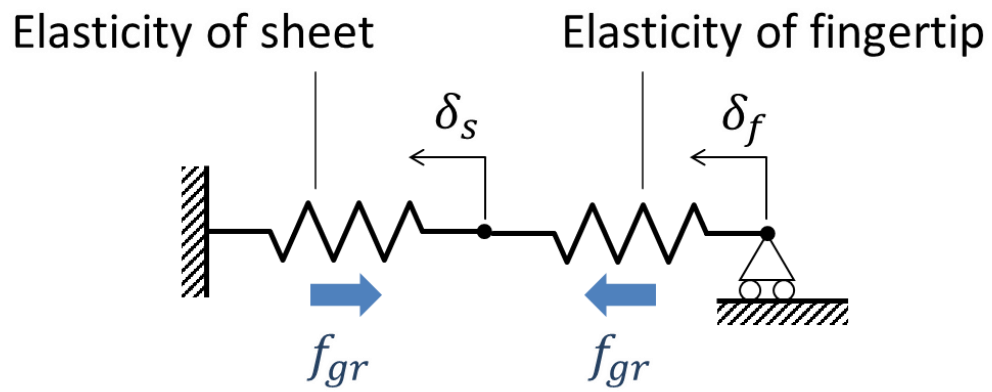


図 3.2-7 シート端点の変位 δ_s と指の変位 δ_f の関係



図 3.2-8 計測に使用したシートの端点

3.3. 曲げ変形シートモデル

前節の実験結果に基づいて、材料力学の曲がり梁の理論から把持時のシート
のモデルを導き、実験結果との比較を行いその妥当性の検討を行う。

まず、シートの二次元モデルを図 3.3-1 に示す。指とシートとの接触点を見
ると (図 3.2-4)、シートの回転が観察できるので、指とシートと接触点の拘束は
回転自由な拘束として扱う。今回の実験では、対向する 2 本の指でシートを把
持しているので、その対称性も考慮して図 3.3-1 のようなモデルとする。

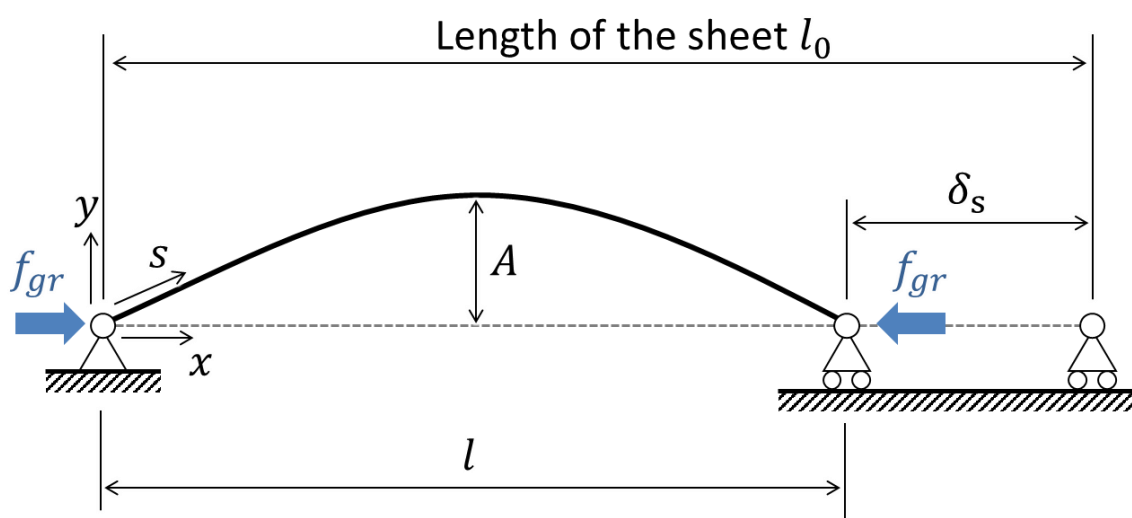


図 3.3-1 シートの二次元モデル

まず、シートの二次元モデルを図 3.3-1 に示す。指とシートとの接触点を見
ると (図 3.2-4)、シートの回転が観察できるので、指とシートと接触点の拘束は
回転自由な拘束として扱う。今回の実験では、対向する 2 本の指でシートを把
持しているので、その対称性も考慮して図 3.3-1 のようなモデルとする。

最初に、座屈荷重 f_{cr} (図 3.2-3 参照) を上記のモデルにオイラーの座屈理論
を適用し導出してみる。座屈荷重 f_{cr} は、

$$f_{cr} = \frac{\pi^2}{l_0^2} EI \quad (3-1)$$

となる。ここで、 l_0 はシートの長さ、 E はシートのヤング率、 I は断面二次モー
メントである。断面二次モーメントの平面は図 3.3-2 に示す平面である。

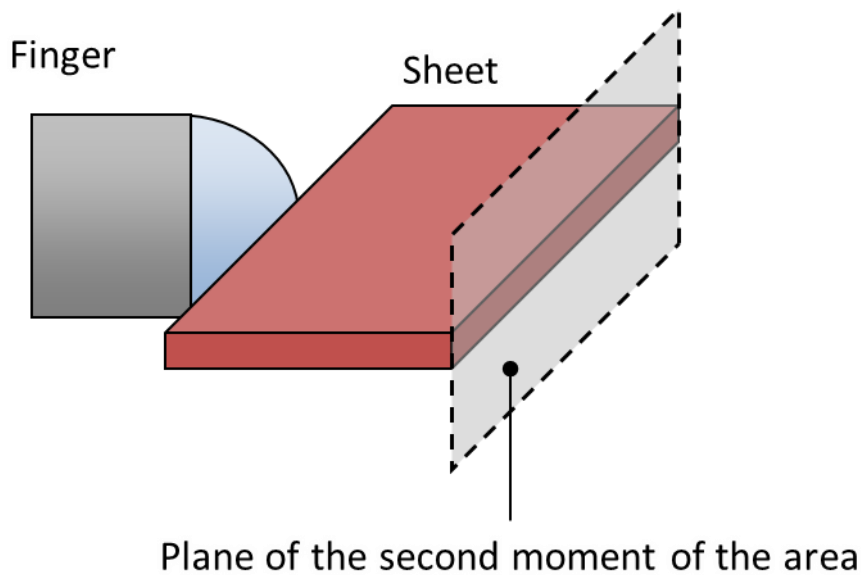


図 3.3-2 断面二次モーメントの平面

次に、座屈後に生じるシートの曲げ変形を導出する。座屈後のシートに生じる曲げモーメント $M(x)$ は図 3.3-3 のように曲げ変形が主であると考えると、

$$M(x) = f_{gr}y(x) \quad (3-2)$$

となる。ここで、 $y(x)$ は x でのシートのたわみである。ここで、シートを Euler-Bernoulli のはりと考えるとはりのたわみ方程式は、

$$EI \frac{d^2y(x)}{dx^2} = -M(x) \quad (3-3)$$

となる。式(3-2)、(3-3)から

$$EI \frac{d^2y(x)}{dx^2} + f_{gr}y(x) = 0 \quad (3-4)$$

を得る。シート両端での境界条件は $y(0) = y(l) = 0$ であり、シート中心のたわみ A をとすると、式(3-4)から、

$$y(x) = A \sin \frac{\pi}{l} x \quad (3-5)$$

を得られる。ここで、 l は端点間の距離である。従って、シートのたわみは \sin 関数で表すことができる。

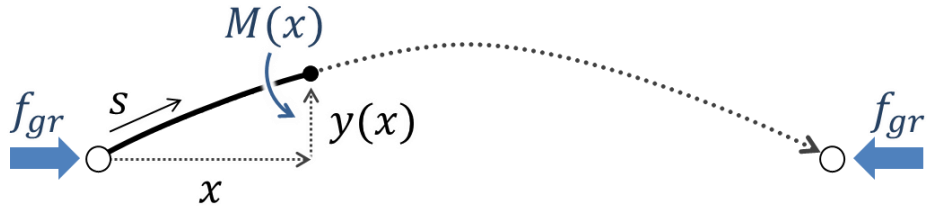


図 3.3-3 座屈後のシートに生じる曲げモーメント

次に、座屈後に生じるシートの曲げ変形を導出する。座屈後のシートに生じる曲げモーメント $M(x)$ は図 3.3-3 のように曲げ変形が主であると考え、

ここで、シート中心のたわみ A を求める。シートには圧縮変形が生じていないので、シートの曲げ変形形状の曲線の長さ S とシートの長さ l_0 は同じであるので、

$$l_0 = S = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{dy(x)}{dx}\right)^2} dx = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{A\pi}{l}\right)^2 \cos^2 \frac{\pi}{l} x} dx \quad (3-6)$$

という式が得られる。ここで、曲線の長さ S は微分幾何学から導出される。この式を数値的に解くことで A を得られる。

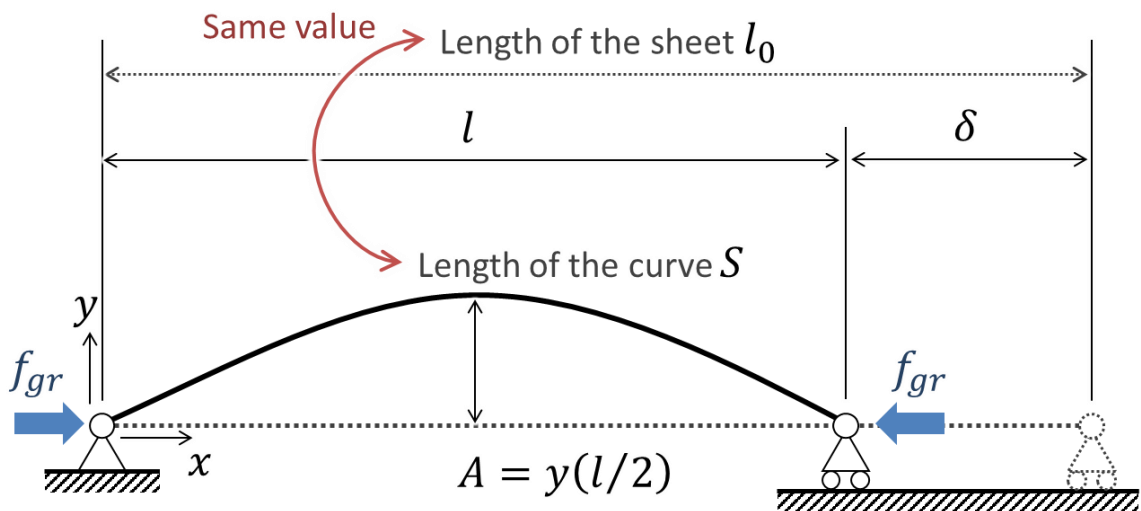


図 3.3-4 シートの長さ l_0 とシートの曲げ変形形状の曲線の長さ S

最後に、シート座屈後の把持力 f_{gr} とシート端点の変位 δ_s の関係を求める。まず、図 3.3-5 のように把持力が f_{gr} のが負荷されシート端点に変位 δ_s が生じ座屈後にシートが曲がりはりとなった状態を考える。この曲がりはりに Δf_{gr} 増加させた把持力を加えたとき、曲がりはりの端点の変位は $\Delta \delta_s$ 増加する(図 3.3-5 の上図)。これは、把持力 f_{gr} によって曲がりはりとなった状態とのとき

と同じ形状の曲がりなりに Δf_{gr} を負荷し端点に変位 $\Delta \delta_s$ が生じた場合と同様と考えられる (図 3.3-5 の下図). なぜなら, 把持力 f_{gr} は端点に変位 $\Delta \delta_s$ の増加に寄与しないためである. この曲がりなりのモデル (図 3.3-5 の下図) に基づいて把持力の増分 Δf_{gr} とそのとき生じる変位の増分 $\Delta \delta_s$ の関係をカスティリアノの定理を用いて求める.

カスティリアノの定理では, ある力を負荷した点の負荷した力の方向の変位は曲がりなりに蓄えられるひずみエネルギーを負荷した力で偏微分することで得られる. そこで, 座屈後に曲がりなりとなったシートに蓄えられるひずみエネルギーを求める. 曲げ変形の影響が主であると考えれば, 把持力を Δf_{gr} 増加させたときのひずみエネルギー ΔU は, 把持力の増分 Δf_{gr} によって曲がりなりに生じる曲げモーメント $\Delta M(x) = \Delta f_{gr} y(x)$ を曲がりなりの曲線に沿って積分することで得られる.

$$\Delta U = \int_0^s \frac{\Delta M(x)^2}{2EI} ds \quad (3-7)$$

ここで, s は曲がりなりの曲線に沿った座標系である. このひずみエネルギー ΔU を把持力の増分 Δf_{gr} で偏微分することで, 端点の変位 $\Delta \delta_s$ を求めると,

$$\Delta \delta_s = \frac{\partial \Delta U}{\partial \Delta f_{gr}} = \int_0^s \frac{\Delta M}{EI} \frac{\partial \Delta M}{\partial \Delta f_{gr}} ds \quad (3-8)$$

となる. この式に, 式(3-3), (3-5), (3-6)を代入し, Δf_{gr} について整理すると,

$$\Delta f_{gr} = \frac{EI \Delta \delta}{\int_0^l \left(A \sin \frac{\pi}{l} x \right)^2 \sqrt{1 + \left(\frac{A\pi}{l} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi}{l} x} dx} \quad (3-9)$$

という把持力の増分 Δf_{gr} とそのとき生じる変位の増分 $\Delta \delta_s$ の関係を得る.

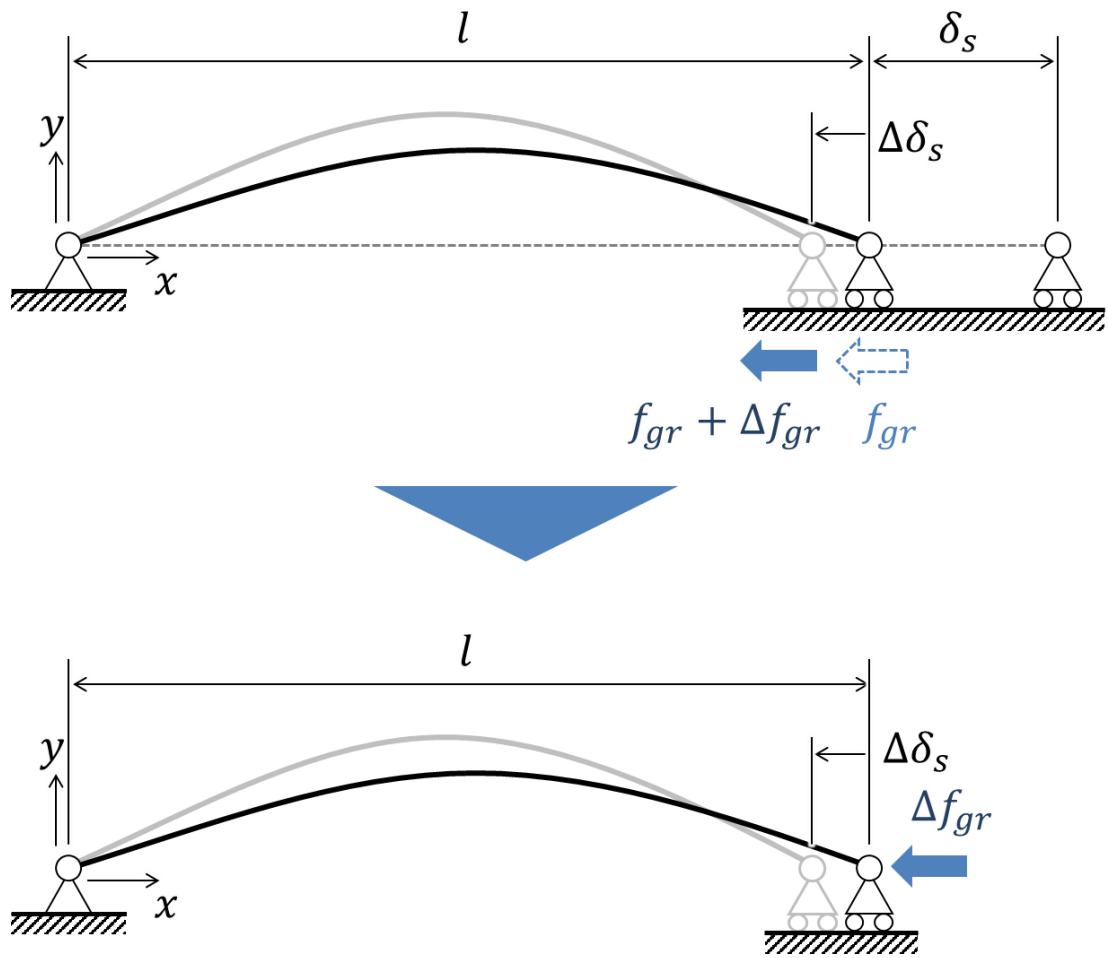


図 3.3-5 座屈後に曲がりはりとなったシートのモデル
 (座屈によって生じた曲がりはりと同じ形状の曲がりはりに Δf_{gr} を負荷し端点に変位 $\Delta \delta_s$ が生じたと考える)

関係式を導出できたので、数値計算を行い実験値と比較してみる。式(3-6)、(3-9)の積分項は数値積分をし、式(3-6)は最適化問題として A を求めた。これによって得られた A を用いて式(3-9)から Δf_{gr} を算出した。計算には MATLAB (MathWorks) を用いた。ヤング率 E は一般的な PET の値である 3[GPa] を、断面二次モーメントはシートの断面を長方形とし図 3.2-2 の値を用いて計算した。

図 3.3-6 に座屈荷重の理論値 (式(3-1)) と実験値との比較を示す。理論値と実験値が非常に近い値となっていることが分かる。よって、図 3.3-1 で提案した二次元モデルを用いるのは妥当である。また、指の柔らかさによる統計学的な違いは見られなかった。したがって、座屈荷重に関しては指の柔らかさの影響を受けないことが理論的、実験的に示された。

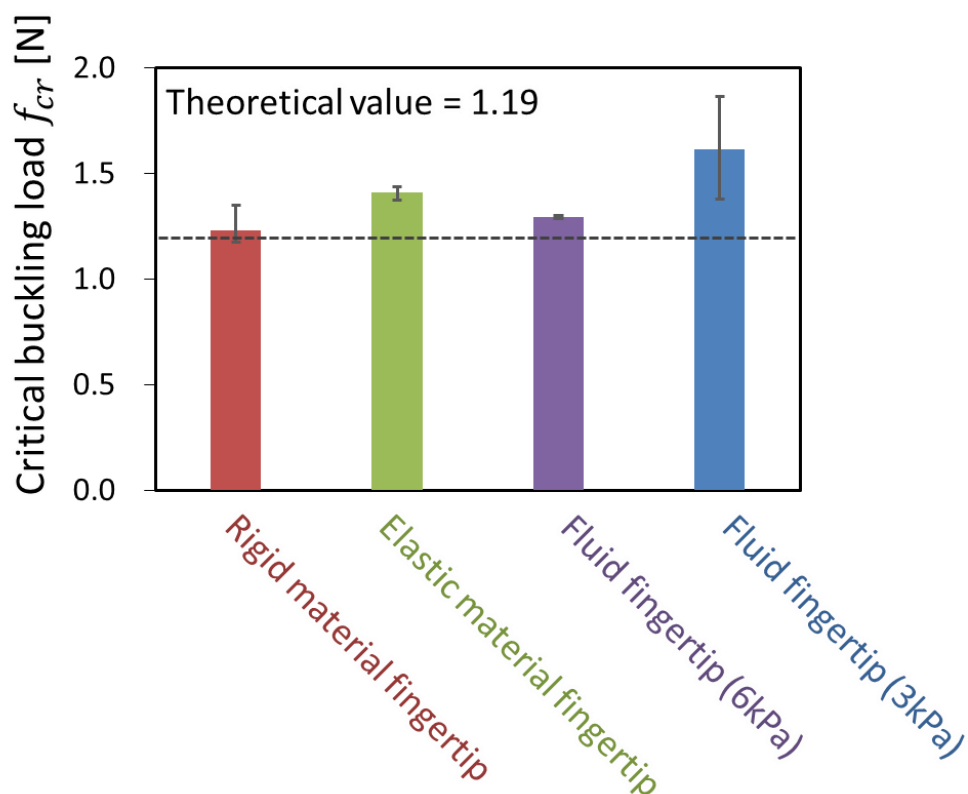


図 3.3-6 座屈荷重 f_{cr} の理論値と実験値との比較

図 3.3-7 にシート中心のたわみ量 A とシート端点の変位 δ_s の関係の理論値と実験値で比較したグラフを示す. 実験値は, 図 3.2-3 で示した座屈後の領域のデータからサンプリングしたものである, グラフを見ると, 理論値と実験値が非常に近い値となっている. つまり, 理論で仮定したように, 実際のシートでも圧縮変形は生じておらず曲げ変形が主であったということが分かる. また, シート中心のたわみ量 A とシート端点の変位 δ_s の関係は指の柔らかさに依存しないことも分かる. しかし, シート端点の変位 δ_s は指の柔らかさによって変わるものであるので, 指の変位とシート中心のたわみ量 A は柔らかさに依存する.

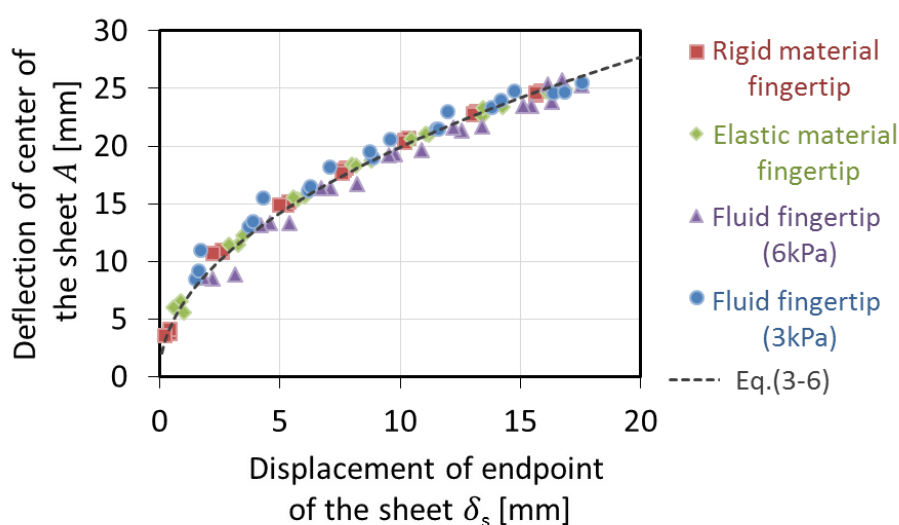


図 3.3-7 シート中心のたわみ量 A とシート端点の変位 δ_s の関係の比較

図 3.3-8 に座屈後（曲げ変形の領域）の把持力 f_{gr} とシート端点の変位 δ_s の関係の理論値と実験値の比較を示す。これは、図 3.2-3 で示した座屈後の領域のデータからサンプリングしたものである。理論値は、 δ_s を $\Delta\delta_s$ ごとに増加させ、 $\Delta\delta_s$ のステップごとに式(3-9)に代入し算出した Δf_{gr} を f_{gr} に加えていった。

実験結果を見ると、シート端点の変位の増加に対して把持力の増加が少ないことが分かる。つまり、把持力を増加させたい（把持耐力を増やしたい）ときに、シートマニピュレーションでは従来の手法[]のように指を閉じこんで把持力を増加させようとしても、意図した把持力の増加が得られないということを示している。理論値と実験値を比較すると傾きは近いが切片が異なる。この理由の一つは、断面2次モーメント I にあると考えられる。二次元平面でシートの変形を近似したが、実際には図 3.3-2 で示したシートの断面での変形がある。そのため、理想的な I の値（長方形の断面）と実際の I の値（円弧状の断面）に差がある。そこで、 I を実験値と理想的な理論値（点線）の差がなくなるように修正（1.71倍）して実験値と比較すると、近い計算結果となる。

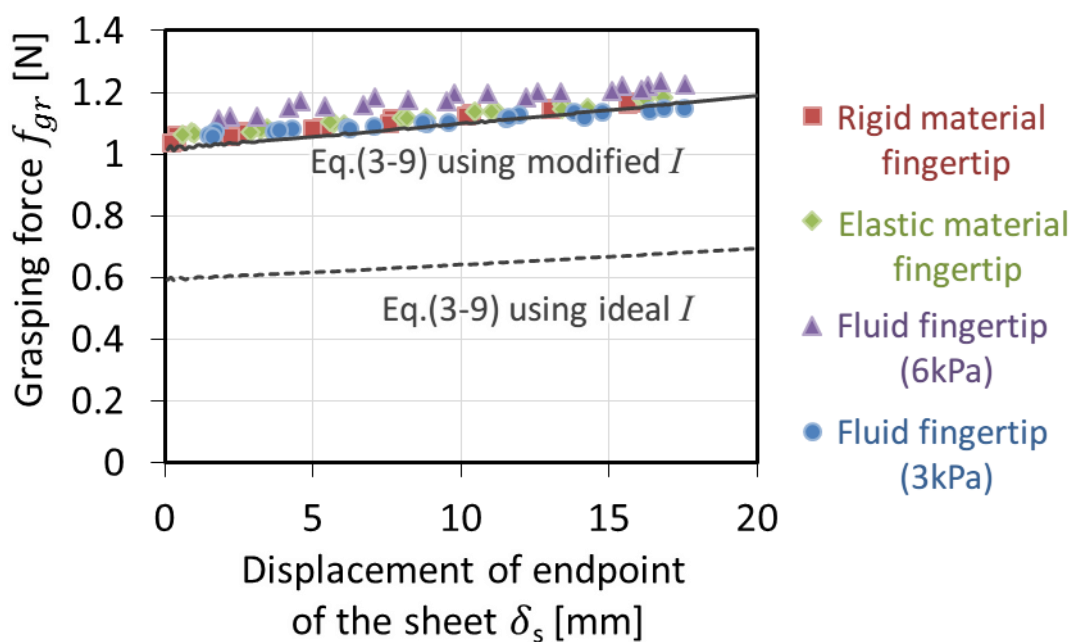


図 3.3-8 把持力 f_{gr} とシート端点の変位 δ_s の関係の比較

3.4. 把持耐力実験

柔らかい指で

3.4.1. 実験装置

図 3.4-1 に把持耐力実験の装置の模式図を示す。把持したシートに外力を負荷するための鉛直方向の自動ステージとその力を計測するためのフォースゲージを図 3.2-1 の把持実験の装置に加えた構成となっている。この実験で使用したシートと指は 3.2 節で示したものと同一である。今回の実験では流体指の初期内圧を 3[kPa]と設定した。実験手順は、指とシートが接触したところ ($f_{gr} = 0$) から指を水平方向に 5, 10, 15, 20, 25[mm]と押し込み、把持力 f_{gr} (前章の法線力に対応) を負荷する。その後、鉛直方向のステージを駆動させシートの中央に接線力 (法線力と直交する方向の力) をシートが落ちるまで与える。各指と各押し込み量で 3 回ずつ実験を行った。また、接線力を与えるときの移動ステージの速度は 1[mm/s]とした。

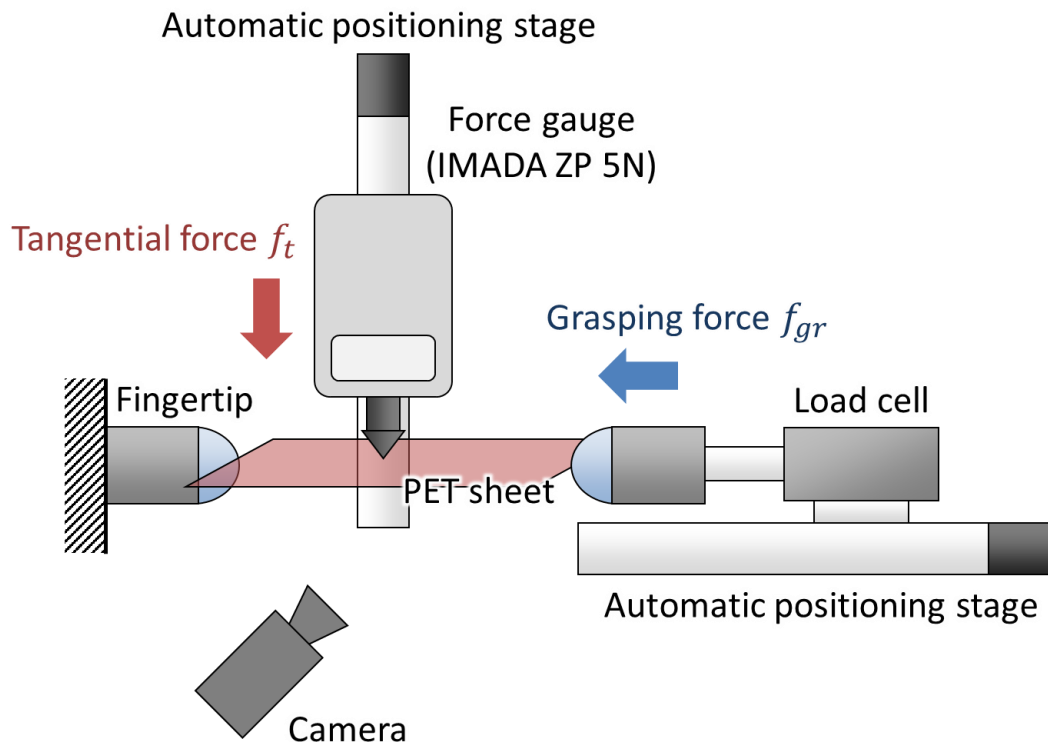


図 3.4-1 把持耐力実験装置の模式図

3.4.2. 実験結果と考察

図 3.4-2 に弾性体指，押し込み量 5[mm]のときの把持力の時系列データを示す．この図の 2[s]付近から接線力を負荷し始めた．接線力を負荷する前の把持力を初期把持力 f_{gr0} とする．接線力を増加させていくと把持力が低下していく．シートの中心に荷重が負荷されたことでシートのたわみが増え，シートの両端が中心方向へ引き込まれる．その結果，シートから指への押し込みが減少し把持力が低下する．その後，シートが滑り出すとき接線力の最大値に達し指から離れ把持が崩れる．このときの接線力の値を把持耐力 f_{rst} とする．図 3.4-3 に図 3.4-2 のときの実験の様子を示す．

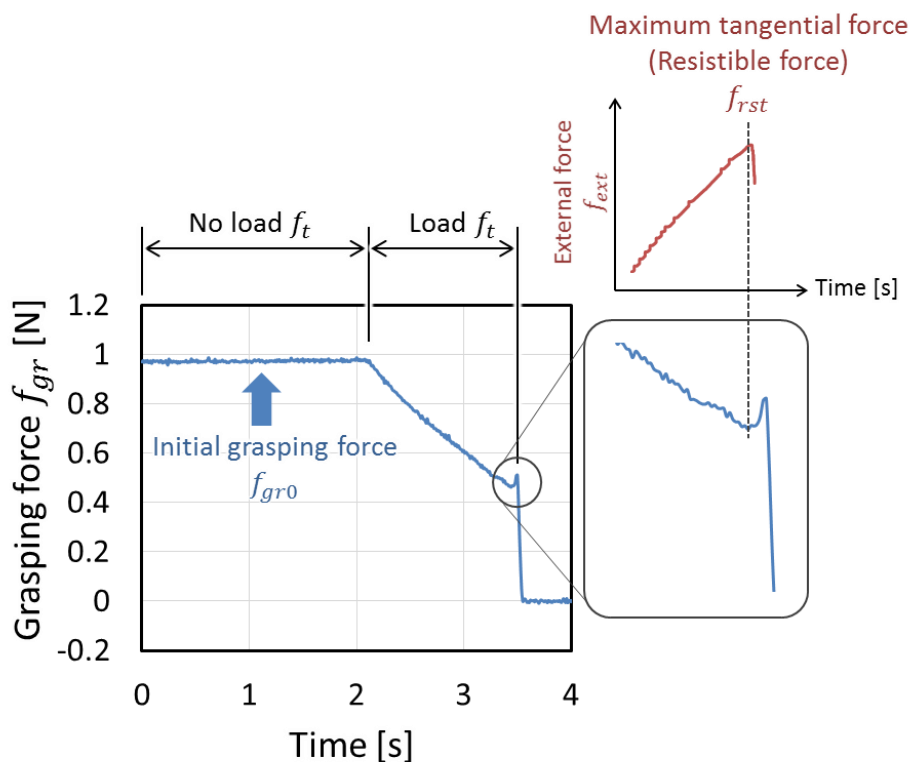


図 3.4-2 把持力の時系列データ
(弾性体指，押し込み量 5[mm])

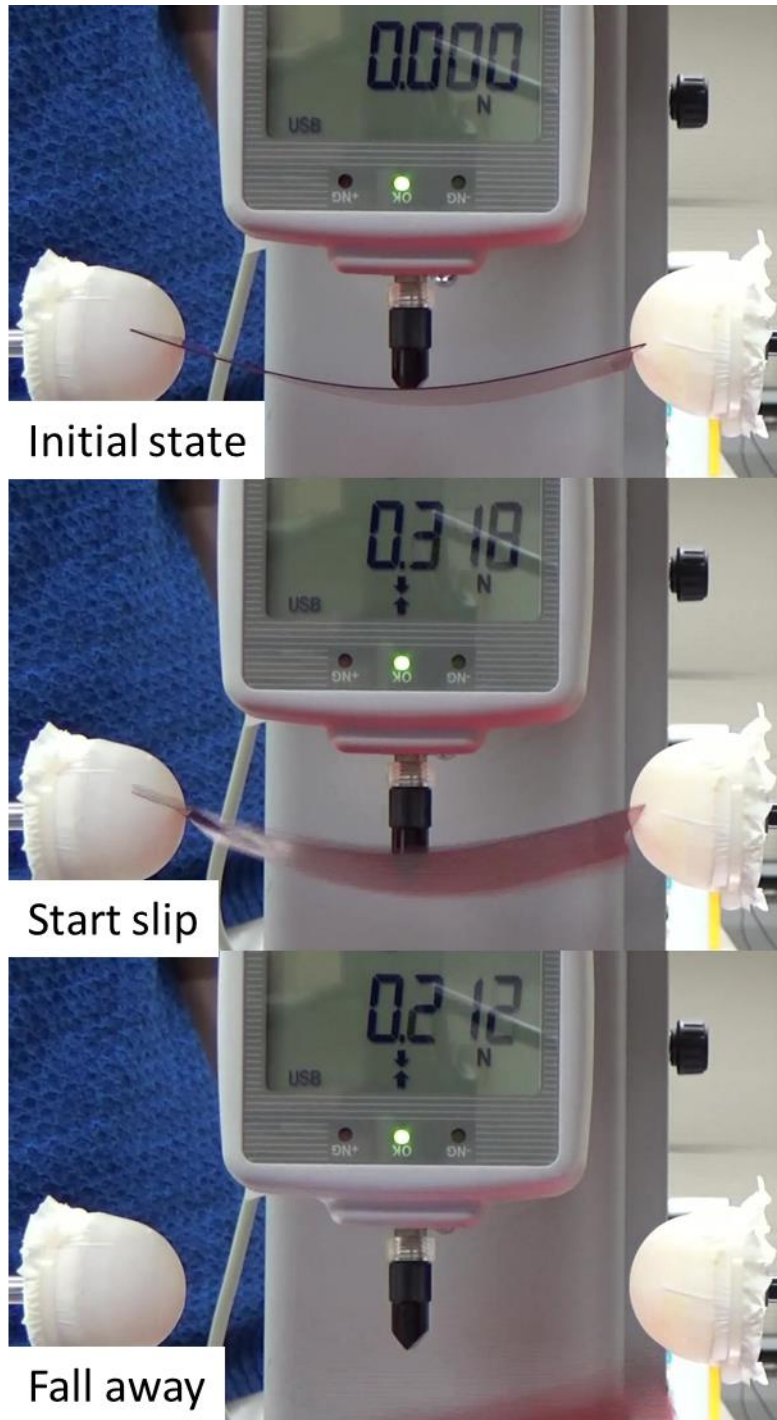


図 3.4-3 把持耐力実験の様子
(弾性体指, 押し込み量 5[mm])

各指での初期把持力 f_{gr0} と把持耐力 f_{rst} との関係を図 3.4-4 に示す。初期把持力 f_{gr0} の増加に対して把持耐力 f_{rst} の増加が流体指の方が小さい。一方で、剛体指の方がその増加率が高いことが分かる。図 3.2-5 で示したように、流体指（3kPa）では押し込み量が15～20[mm]の間で座屈が発生する。よって、流体指の結果には座屈前後のデータが含まれることに注意されたい。把持実験の結果（図 3.2-5）も考慮すると、剛体指は把持力の小さい領域での細かい把持力の制御をできないが、大きな把持耐力を発揮できる。一方で、流体指は把持力の小さな領域で細かく把持力を制御できるが、大きな把持耐力を発揮することができない。つまり、指の柔らかさによってそれぞれ長短所があり、作業に応じて選択する必要がある。また、硬い指の方が把持耐力が大きいという結果は2章での結果とも合致する。一方で、今回のシート把持のように把持物体の柔らかさが増える（座屈によって剛体に近かった物体が弾性を持つ）場合は、発揮できる把持力の領域が指の柔らかさによって異なる。これは、指の柔らかさによって物体の柔らかさが増える（座屈）する押し込み量が違うことに由来する。

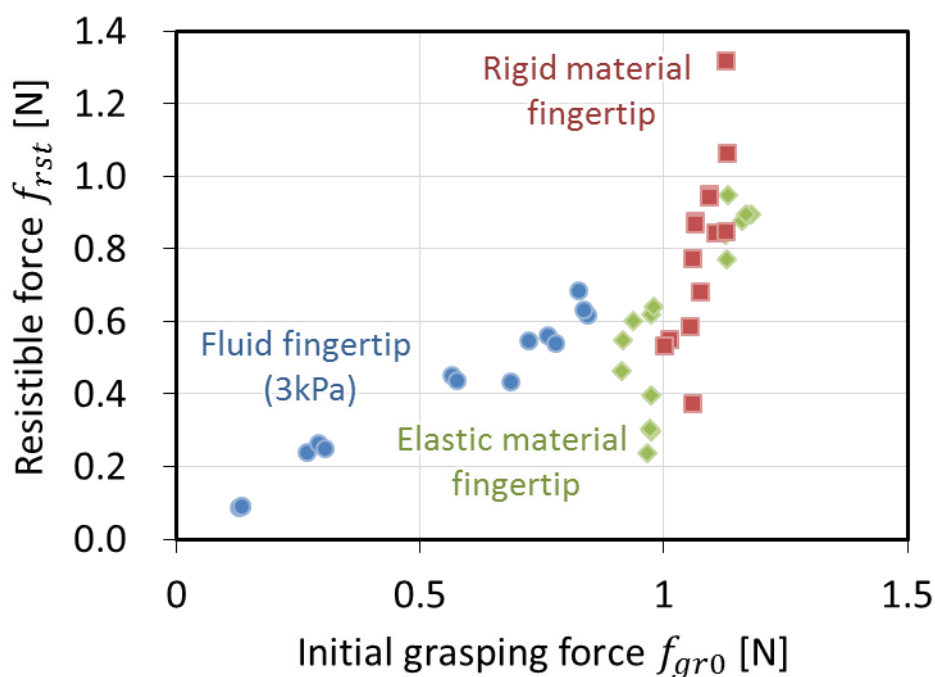


図 3.4-4 各指での初期把持力 f_{gr0} と把持耐力 f_{rst} との関係

3.5. マニピュレーションの戦略

前節までの把持実験と把持耐力実験の結果に基づいたシートマニピュレーションのための指の柔らかさを変化させる把持戦略の概要を図 3.5-1 に示す。まず、シートと接触するときは柔らかい指が良い。これは 3.2 節で述べたように柔らかい指は把持力の細かい制御がし易く、接触位置のズレを吸収できるためである。次に、シートを持ち運びするときは、外力（慣性力等）が作用する場合があるので、大きな把持耐力を発生できる硬い指が良い。シートを置くとき、接触時の衝撃が作用するので、これに耐えられるように大きな把持耐力を発揮できる硬い指が良い。最後に、曲げ変形したシートを放していくときは、細かく把持力や位置を調整できる柔らかい指が良い。

従って、シートマニピュレーションに剛性可変な指 $\square\square$ を用いることが望ましい。特に、流体指の内部に剛体部分を持った二層構造の指 \square は有用である。

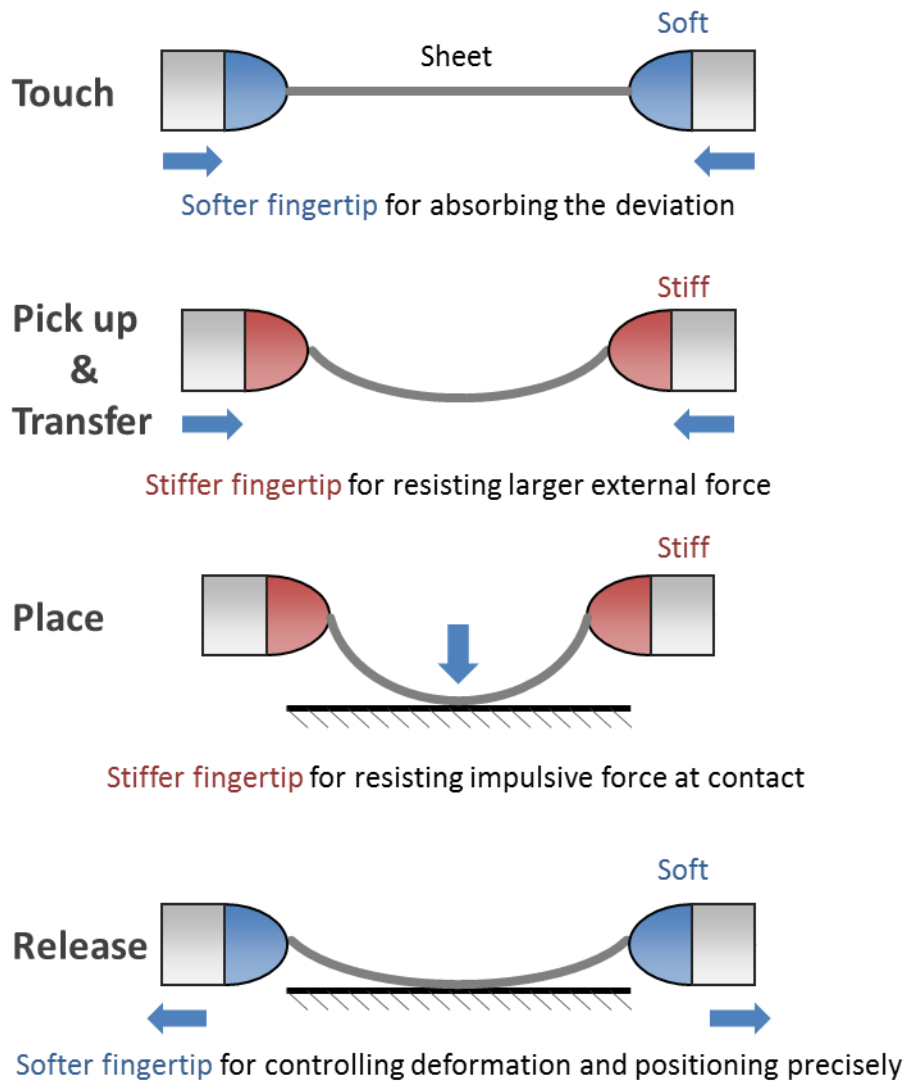


図 3.5-1 シートマニピュレーションのための
指の柔らかさを変化させる把持戦略

3.6. おわりに

本章では、指と把持物体の柔らかさが把持安定性に与える影響を検証するために、図 3.2-1 に示したようなシートの辺を把持しシートの曲げ変形を利用したシートマニピュレーションを具体的な例として取り上げた。このマニピュレーションを実現するために、シートの力学モデルの構築と把持耐力に着目をした把持安定性の検証を行った。実験・理論的にシート座屈後（曲げ変形中）のシートの両端の変位に対する把持力の増加率が小さいことが明らかとなった。この結果は、シートマニピュレーションにおいて、把持安定性（把持耐力）を向上させるために把持力を増加させたいとき、従来のように指を物体に押し込む戦略では把持力を増加させる効果が低いということの意味する。また、指の柔らかさごとに発揮できる把持力と把持耐力の領域に違いがあることが分かった。柔らかい指は、小さい把持力で把持でき把持力の細かい制御ができるが、大きな把持耐力を生み出せない。一方で、硬い指は、小さな把持力での把持は難しいが、より大きな把持力を生み出せる。この把持耐力の結果は、2章の結果と一致する。一方で、2章とは異なり、本章ではシートが座屈するため把持物体であるシートが剛体から弾性体に変化する。座屈前、把持物体（シート）は剛体に近いため、柔らかい指の場合には指側が変形する。この影響により、指の柔らかさによって発揮できる把持力の領域と把持耐力の領域が異なる。硬い指ほど、指が変形し難く少し指を押し込んだだけで座屈を起こすため、小さな把持力の領域で細かく把持力を調整することができない。

最後に、これらの結果を踏まえた指の柔らかさを変化させるシートマニピュレーションのための把持戦略を提案した。シートマニピュレーションの各作業に応じて適切な指の柔らかさに設定する。

4. 把持物体の変形を考慮した力覚提示

4.1. はじめに

本章では、把持安定性における把持物体の柔らかさを提示することの役割について考える。把持物体の柔らかさを提示する対象として手術支援ロボットに着目する。今回着目する手術支援ロボットは脳外科領域の内視鏡下手術を対象にする。脳外科領域の内視鏡下手術では、脳という他の部位に比べ非常に繊細な器官を扱うため、脳組織を把持するときの把持力の調整が重要となる。把持力を負荷し過ぎてしまうと脳組織にダメージを与えてしまうので、把持物体を落とさずに適切な把持力で摘むことが要求される。人は手先の感覚に頼り把持物体の柔らかさを認識して、適切な把持力に調整する。つまり、把持安定性における把持物体の柔らかさを提示することの役割とは、人が適切な把持力に調整するための情報を提示することである。しかし、内視鏡下手術では鉗子と呼ばれる細かい術具を使い把持するため、把持している組織等の柔らかさを術者は知覚することが難しい。

そこで、手術支援ロボットにより柔らかさの違いを術者に提示できれば、適切な把持力での把持を行うことができるようになり手術の安全性を高めることができる。また、正常組織と腫瘍組織では柔らかさが異なり、この違いを頼りに腫瘍領域を判別する場合がある。柔らかさの違いを提示することで、この判別の判断の支援を行うことも可能となる。

本章では、柔らかさを提示できる手術支援ロボットの開発を目的とし、開発したロボットとその感性評価実験について述べる。開発するロボットには、組織を把持したときの力覚を検知できるセンサ、検知した力覚に基づいた力覚を術者に提示する機構、力覚提示するための制御システムが求められる。次節では、これらについて述べる。その後、開発したシステムによって柔らかさの違いが識別できるのかを確かめるために行った感性評価について述べる。

4.2. 柔らかさ提示システム

図 4.2-1 に開発した手術支援ロボットの概要を示す。本ロボットはマスタ・スレーブ方式を採用している。マスタと呼ばれる操作装置を操作者（術者）が操作し、マスタの動作に追従するようにスレーブ（体内に挿入するマニピュレータ）を動作させる。このスレーブの先端のグリッパには 2 軸力センサ（図 4.2-2）が内蔵されており、物体を把持や引張ったときの力覚を検出することが可能である。このセンサにより検知した力覚情報に基づいてマスタの駆動トルクを決定し操作者に力覚情報を提示する。

柔らかさを提示する方法として、視覚、力覚（関節や筋肉に掛かる力の知覚）、皮膚感覚を用いたものが考えられる^[1]。今回、対象が内視鏡下の手術であり内視鏡の視野の制限と、柔らかさを術者が知覚するには提示情報を術者が見ていなければならないという制限があるため、視覚を用いた柔らかさの提示を採用しなかった。残る力覚と皮膚感覚では、皮膚感覚を用いた提示装置より力覚を用いた提示装置のほうが構成をよりシンプルにできるため、力覚を採用した。

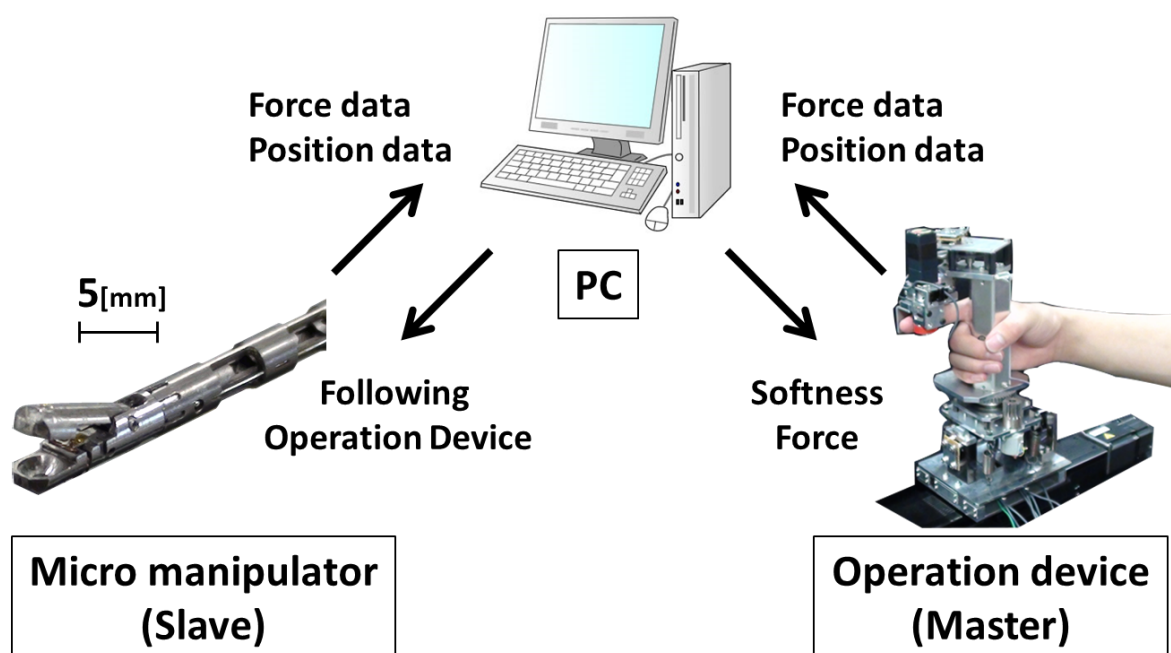


図 4.2-1 開発したマスタ・スレーブ方式手術支援ロボットの概要

4.2.1. スレーブの 2 軸力センサ内蔵グリッパ

図 4.2-2 に開発した 2 軸力センサを内蔵したグリッパを示す。この 2 軸力センサは平行平板構造を有しており、この部分把持したときの力（把持力）はこの部分の変形することで検出することができる。一方で、引張ったときの力（引張力）はグリッパのカップの根元にある平板部分が変形することで検出できる。把持力を検出するための平行平板と引張力を検出するための平板の変形はひずみゲージにより検出する。

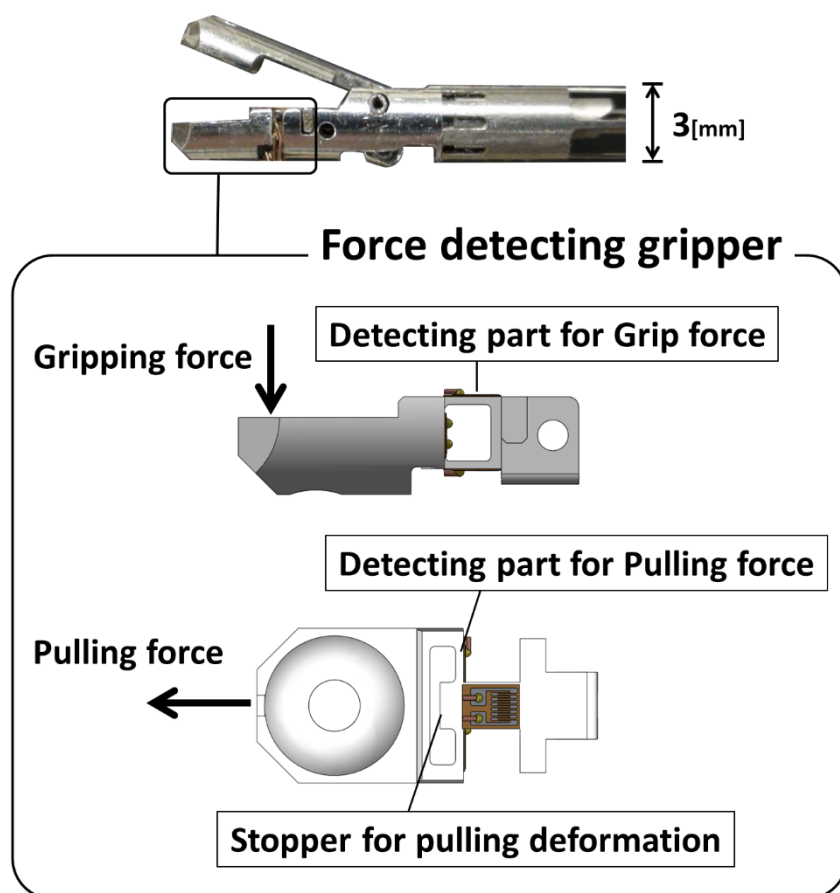


図 4.2-2 スレーブ先端のグリッパにある 2 軸力センサ

4.2.2. マスタの力覚提示機構

図 4.2-3 にはマスタのスレーブで検出した把持力を提示する機構を示す。術者はマスタのグリップを握り、人差し指にマスタの人差し指カバーを装着する。マスタのグリップの中には DC モーターがあり、このモーターの動力を動力伝達部と人がマスタに負荷する把持力を検出するための力センサを介して人差し指カバーを装着した人差し指に伝える。DC モーターの動力は次に示す制御則に従って決定する。

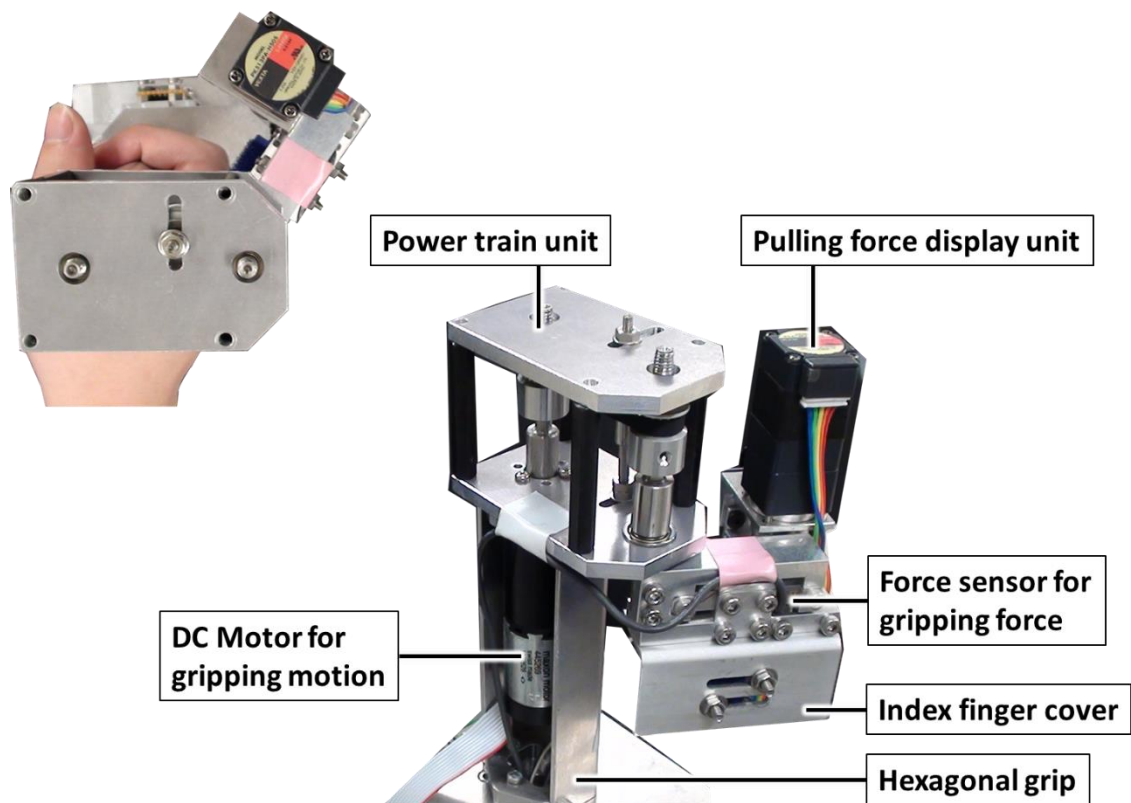


図 4.2-3 マスタの把持力提示機構

4.2.3. 力覚提示のための制御則

マスタ・スレーブシステムにおいて、スレーブはマスタに追従して動作し、スレーブでの力情報をマスタで再現するような制御をバイラテラル制御と呼ぶ。バイラテラル制御では、スレーブでの力をマスタで再現するための方式がいくつか提案されている。今回は、その中でも操作性の良い力帰還形をベースに用いる。また、実機のダイナミクスの改善のためにインピーダンス制御と組み合わせる。具体的には、図 4.2-4 に示すような制御モデルとなる。 M_m 、 D_m はマスタ実機の実際の質量とダンパ、 K_c 、 C_c はマスタとスレーブを仮想的につなぐバネとダンパ、 C_m 、 C_s はマスタとスレーブの仮想的なダンパ、 f_m 、 f_s はマスタを操作する力（操作力）とスレーブで検出した力、 x_m 、 x_s はマスタとスレーブそれぞれの位置、 s_p 、 s_f はスレーブの位置と力の拡大率である。この仮想的なバネ、ダンパに実機が従って動作するように制御するのがインピーダンス制御である。本制御システムでは、マスタに入力するトルク τ_m 、スレーブに入力する目標速度 \dot{x}_{sr} を、

$$\tau_m = K_f(f_m - s_f f_s) - C_m \dot{x}_m \quad (4-1)$$

$$\dot{x}_{sr} = \frac{C_c(\dot{x}_m - s_p \dot{x}_s) + K_c(x_m - s_p x_s)}{s_p C_s} \quad (4-2)$$

とする。ここで、 K_f は力のゲインである。式(4-1)は力のサーボ系になっており、スレーブでの力を再現するような入力トルクをとる。また、マスタの振動的な動作を抑制するために仮想的なダンパの項を追加してある。スレーブでの力が0のときは単純なパワーアシストとなる。ここで、マスタ実機の運動方程式は図 4.2-4 のモデルより、

$$f_m + \tau_m = M_m \ddot{x}_m + D_m \dot{x}_m \quad (4-3)$$

と表せる。この式に式(4-1)を代入し f_m について整理すると、

$$f_m = \frac{M_m \ddot{x}_m + (D_m + C_m) \dot{x}_m}{1 + K_f} + \frac{K_f}{1 + K_f} s_f f_s \quad (4-4)$$

となる。もし、 K_f を十分に大きくできれば、

$$f_m = s_f f_s \quad (4-5)$$

となり、マスタを操作する力、すなわち操作者に負荷される力とスレーブでの力が等しくなることが理論的に示された。

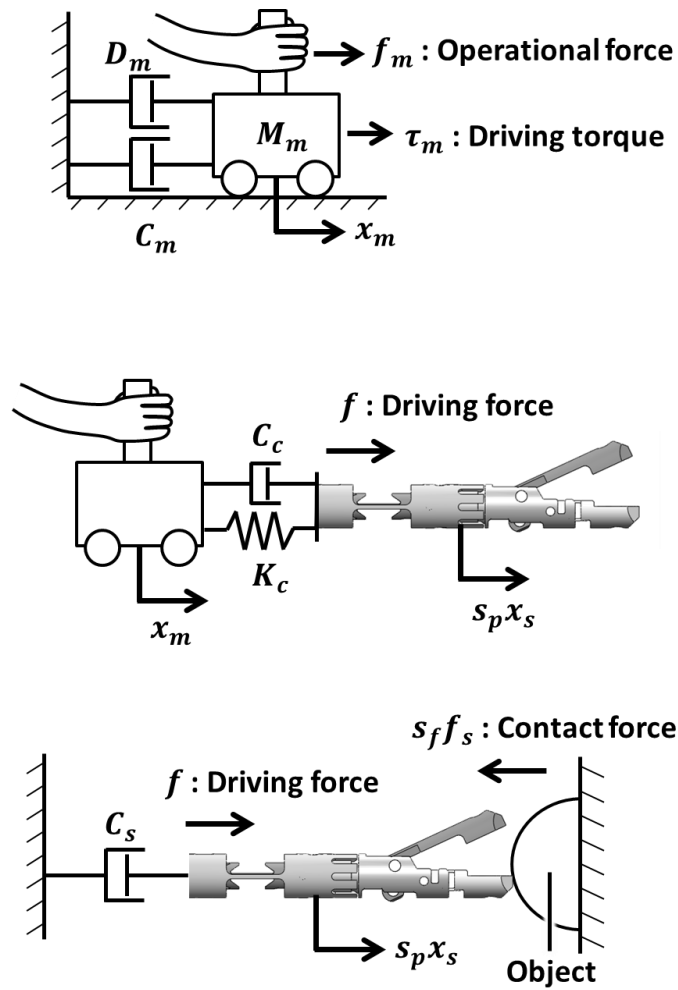


図 4.2-4 インピーダンス制御のモデル

式(4-2)は K_c , C_c によりスレーブがマスタに追従する位置サーボ系となっている。この仮想的なバネ・ダンパはローパスフィルタの役割も持ち、マスタを操作するときの手の振るえのような高周波成分をカットしてマスタの動きをスレーブに伝える。本システムでは、スレーブの駆動はステッピングモーターを用いている。定格トルク内であれば、ステッピングモーターは入力された位置・速度に従って動作するため、実機のダイナミクスに依らずモーターへの入力が出力される。そのため、図 4.2-4 のスレーブのモデルには実機のダイナミクスがない。図 4.2-4 のようにマスタとスレーブをつなげマスタに追従し、仮想的なダンパ C_s に従うような速度入力を求めると式(4-2)となる。

4.3. 感性評価実験

4.3.1. 実験概要

開発したシステムを通して操作者は柔らかさの違いを識別できるのか（柔らかさの違いを提示できているのか）を検証するために、感性評価実験を行った。この実験では、図 4.3-1 のように被験者にマスタを操作して、スレーブで脳組織を模した 2 種類の柔らかさのゼラチン（厚さ 3[mm]）を把持してもらう。スレーブのグリップの閉じる量が 20[deg] となるように、マスタに目印をつけておき、その目印を目標に操作者には操作をしてもらった。2 種類のゼラチンを把持後にどちらのゼラチンが硬かったか聞いた。被験者は 20 代の男性 6 人である。また、式(4-1)の力の拡大率の効果も確認するために、10、20 と倍率を変えて実験を行った。ゼラチンの種類、力の拡大率は被験者に伝えず、また、スレーブがゼラチンを把持している様子が見えないようにして実験を行った。

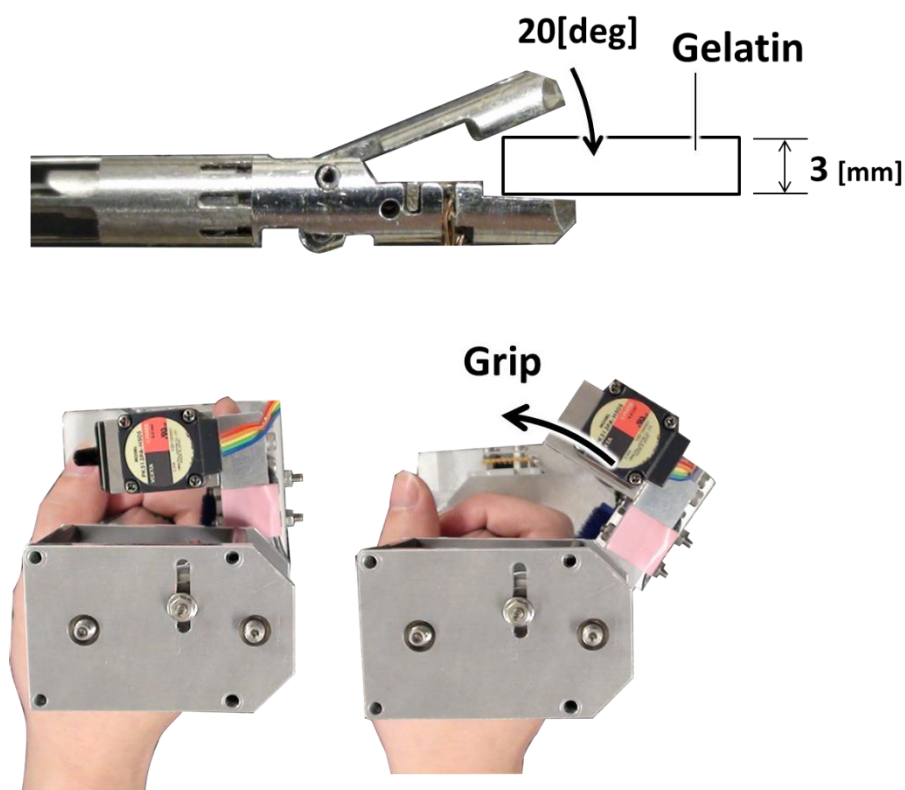


図 4.3-1 感性評価実験の概要
(柔らかさの違いを識別できるのか検証するための実験)

4.3.2. 用いたゼラチンの柔らかさ

用いるゼラチンは市販されている粉ゼラチンをお湯で溶いて冷やして固めたものである。ゼラチンの柔らかさは粉ゼラチンの量によって変えることができる。作成したゼラチンの柔らかさは図 4.3-2 に示す方法で計測する。まず、ゼラチン図 4.3-2 示すサイズブロックに切り出す。このブロックをブロックの側面と同じサイズの薄板が付いたフォースゲージを押込むことで荷重を負荷する。このときゼラチンが押し込み方向に動かないようにバイスとブロックを用いて固定する。このときの、押し込み量 δ と荷重 F からゼラチンの柔らかさ E_g を以下のように求める。

$$E_g = \frac{F t}{wh \delta} \quad (4-6)$$

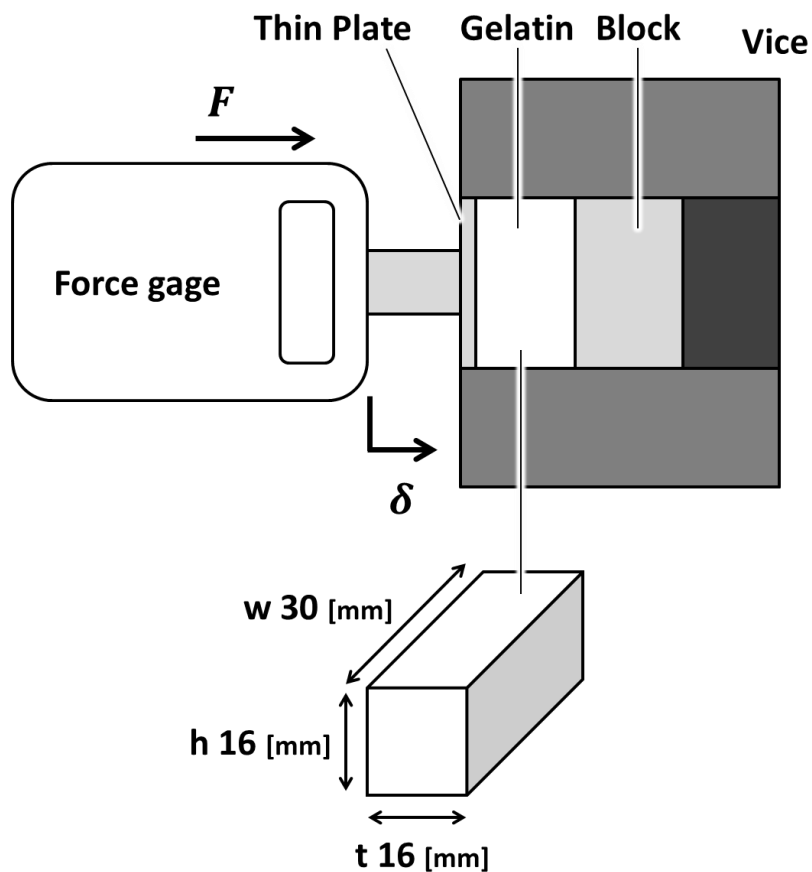


図 4.3-2 ゼラチンの柔らかさの計測方法

実際に用いた 2 種類のゼラチンの柔らかさを上述の方法により計測した結果を図 4.3-3 に示す. 柔らかいゼラチン α を, 硬いゼラチンを β とする. 文献 [] によれば, 脳組織の柔らかさは $10^4 \sim 10^5$ [Pa] 程度である. 今回, 用意したゼラチンはこの範囲に収まっており, 脳組織の柔らかさを模したものとなっている. また, 両者の柔らかさの違いは 4 [kPa] 程度と小さい.

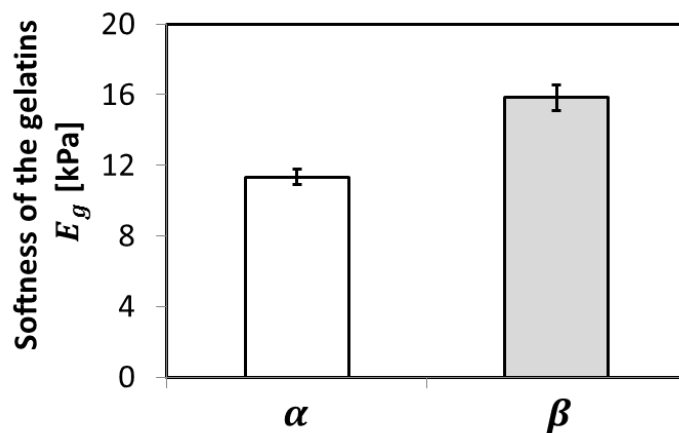


図 4.3-3 用意したゼラチンの柔らかさ

4.3.3. 感性評価実験の結果と考察

感性評価実験の結果を表 4.3-1 に示す．これを見ると拡大率が大きいほど正答率が向上していることが分かる．また，どちらの力の拡大率の方が識別しやすかったについて聞いたところ拡大率が 20の方が識別しやすかったと全員回答している．よって，本システムでは，力の拡大率を大きくすることで小さな柔らかさの違いを提示できることが実験結果より示された．

表 4.3-1 柔らかさを識別できるのかを検証した感性評価実験の結果
(α : 柔らかいゼラチン, β : 硬いゼラチン)

被験者	どちらが硬かった？		どちらの拡大率が 識別しやすかったか？
	拡大率：10	拡大率：20	
A	β	β	20
B	β	β	20
C	β	β	20
D	β	β	20
E	分からない	β	20
F	分からない	β	20

4.4. おわりに

本章では、把持安定性における把持物体の柔らかさを提示することの役割について考え、把持物体の柔らかさを提示できるシステムの開発をおこなった。把持物体の柔らかさを提示する対象として脳外科領域の内視鏡下手術支援ロボットに着目をした。このとき、把持安定性における把持物体の柔らかさを提示することの役割として、適切な把持力に調整するための情報の提示と考えられる。人は手先の感覚に頼り把持物体の柔らかさを認識して、安定な把持となるように適切な把持力に調整する。つまり、把持物体の柔らかさは人が安定な把持を行うための重要な情報の一つであるが、これまでの内視鏡下手術では把持している組織等の柔らかさを術者は知覚することが難しい。

そこで、柔らかさを提示できる手術支援ロボットの開発を行った。柔らかさを提示するために、組織を把持したときの力覚を検知できるセンサ、検知した力覚に基づいた力覚を術者に提示する機構、力覚提示するための制御システムを備えたマスタ・スレーブ方式のロボットを開発した。

また、開発したロボットで柔らかさの違いを識別できるのかを感性評価実験によって確かめた。この感性評価実験では 2 種類の脳組織の柔らかさに近いゼラチンを被験者に開発したシステムを通して把持してもらった。その結果、力の拡大率が大きいほど正答率が向上し、拡大率が大きい方が柔らかさの識別がしやくなるということが分かった。実験結果より、開発したシステムで小さな柔らかさの違いを提示できることが示された。

5. 結論

本研究では、指と把持物体の柔らかさが把持安定性においてどのような役割を果たしているのかについて検証を行い、その役割の一部を明らかにした。特に、把持安定性の評価指標の一つである把持耐力に着目をして検証を行った。

まず、指の柔らかさが把持安定性（把持耐力）に与える影響について検証を行い、指の柔らかさの役割として以下のようなことが明らかとなった。最初に、半球状の指を平面に押し当て検証を行ったところ、硬い指ほど把持耐力が高い結果が得られた。このような結果となった要因として、①初期接触面積（接線力が0のとき）の違い、②負荷された接線力による指の変形量の違いが考えられた。そこで、①初期接触面積の違いを低減し、②指の変形量の影響だけを見るために、初期接触面積が柔らかさに依存し難い円筒形の指を用いた実験を行った。その結果は、半球状の指のときと同様の傾向（硬い指ほど大きな把持耐力）となった。これより、柔らかさの違いによって生じる指の変形量（先端の変位）の違いが把持耐力に大きな影響を与えると考えられ、指先端の変位量が同じ指ならば把持耐力も同じとなるという仮説を立てられた。この仮説に基づいて指のサイズは異なるが指先端の変位が同じになるように設計した指を用いて実験を行ったところ、この仮説を証明するような実験結果が得られた。これらから、指の変形量が把持耐力に大きな影響を与えており、指の変形量が小さいほど把持耐力が大きくなるということが明らかとなった。この指の変形量は指の柔らかさや形状に依存するものである。最後に、指と把持物体との接触面の形状が異なる場合での検証も行った。この実験で、把持物体との接触面の角度が鋭くなるにつれて硬い指の把持耐力は低下する一方で、柔らかい指の把持耐力はほとんど変化しないという結果が得られた。これは、柔らかい指ほど把持物体の形状になじむことで初期接触面積を維持することができたためである。

次に、指と把持物体の柔らかさが把持安定性に与える影響を検証するために、シートの辺を把持しシートの曲げ変形を利用したシートマニピュレーションを具体的な例として取り上げた。このマニピュレーションを実現するために、シートの力学モデルの構築と把持耐力に着目をした把持安定性の検証を行い、指と把持物体の柔らかさの役割として以下のことが明らかとなった。実験・理論的にシート座屈後（曲げ変形中）のシートの両端の変位に対する把持力の増加率が小さいことが明らかとなり、シートマニピュレーションにおいて、把持安定性（把持耐力）を向上させるために把持力を増加させたいとき、従来のように指を物体に押し込む戦略では把持力を増加させる効果が低いことが分かった。また、指の柔らかさごとに発揮できる把持力と把持耐力の領域に違いがあることが分かった。柔らかい指は、小さい把持力で把持でき把持力の細かい制御ができるが、大きな

把持耐力を生み出せない。一方で、硬い指は、小さな把持力での把持は難しいが、より大きな把持力を生み出せる。この把持耐力の結果は、2章の結果と一致する。一方で、2章とは異なり、本章ではシートが座屈するため把持物体であるシートが剛体から弾性体に変化する。座屈前、把持物体（シート）は剛体に近いため、柔らかい指の場合には指側が変形する。この影響により、指の柔らかさによって発揮できる把持力の領域と把持耐力の領域が異なる。硬い指ほど、指が変形し難く少し指を押し込んだだけで座屈を起こすため、小さな把持力の領域で細かく把持力を調整することができない。

最後に、把持安定性における把持物体の柔らかさを提示することの役割について考え、把持物体の柔らかさを提示できるシステムの開発を行い、把持物体の柔らかさを提示する役割として以下のことが明らかとなった。把持物体の柔らかさを提示する対象として脳外科領域の内視鏡下手術支援ロボットに着目をした。このとき、把持安定性における把持物体の柔らかさを提示することの役割として、適切な把持力に調整するための情報の提示と考えられる。人は手先の感覚に頼り把持物体の柔らかさを認識して、安定な把持となるように適切な把持力に調整する。つまり、把持物体の柔らかさは人が安定な把持を行うための重要な情報の一つであるが、これまでの内視鏡下手術では把持している組織等の柔らかさを術者は知覚することが難しい。そこで、柔らかさを提示できる手術支援ロボットの開発を行った。柔らかさを提示するために、組織を把持したときの力覚を検知できるセンサ、検知した力覚に基づいた力覚を術者に提示する機構、力覚提示するための制御システムを備えたマスタ・スレーブ方式のロボットを開発した。また、開発したロボットで柔らかさの違いを識別できるのかを感性評価実験によって確かめた。この感性評価実験では2種類の脳組織の柔らかさに近いゼラチンを被験者に開発したシステムを通して把持してもらった。その結果、力の拡大率が大きいほど正答率が向上し、拡大率が大きい方が柔らかさの識別がしやくなるということが分かった。実験結果より、開発したシステムで小さな柔らかさの違いを提示できることが示された。

今後の課題は、例えば、指の変位量と把持耐力の関係のような知見を、実際の把持計画に組み込んでいけるようにモデル化していくことにある。それぞれの検証で指と把持物体の柔らかさの把持安定性（把持耐力）における役割は明らかとなったが、実際の把持計画や指の設計等に利用するに至っていない。今後は、これらの知見を利用してもらい易いようにモデル化をする必要がある。

6. 参考文献

- [1] H. Takeuchi and T. Watanabe, “Development of a multi-fingered robot hand with softness changeable skin mechanism,” *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*. pp. 1–7, 2010.
- [2] R. Maruyama, T. Watanabe, and M. Uchida, “Delicate grasping by robotic gripper with incompressible fluid-based deformable fingertips,” in *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, pp. 5469–5474.
- [3] “TWENDY-ONE.” [Online]. Available: <http://twendyone.com/index.html>. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [4] K. C. Galloway, P. Polygerinos, C. J. Walsh, and R. J. Wood, “Mechanically programmable bend radius for fiber-reinforced soft actuators,” in *2013 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 2013, pp. 1–6.
- [5] “Soft Robotics Inc.” [Online]. Available: <http://www.softroboticsinc.com/>. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [6] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. Zakin, H. Lipson, and H. M. Jaeger, “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 107, no. 44, pp. 18809–18814, Oct. 2010.
- [7] C. Laschi, M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador, and P. Dario, “Soft Robot Arm Inspired by the Octopus,” *Adv. Robot.*, vol. 26, no. 7, pp. 709–727, Jan. 2012.

- [8] C. H. Lin, T. W. Erickson, J. A. Fishel, N. Wettels, and G. E. Loeb, "Signal processing and fabrication of a biomimetic tactile sensor array with thermal, force and microvibration modalities," in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2009, pp. 129–134.

- [9] T. Watanabe and T. Yoshikawa, "Grasping Optimization Using a Required External Force Set," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 52–66, Jan. 2007.

- [10] C. Ferrari and J. Canny, "Planning optimal grasps," in *Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1992, pp. 2290–2295.

- [11] A. T. Miller and P. K. Allen, "GraspIt!," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 11, no. 4, pp. 110–122, Dec. 2004.

- [12] "OpenRAVE." [Online]. Available: <http://openrave.org/dev/>. [Accessed: 08-Jan-2016].

- [13] T. Tsuji and K. Harada, "graspPlugin for Choreonoid," *J. Robot. Soc. Japan*, vol. 31, no. 3, pp. 232–235, May 2013.

- [14] T. Yoshikawa, "Action and Intelligence. Foundations of Grasping and Manipulation. 3. Control.," *J. Robot. Soc. Japan*, vol. 14, no. 4, pp. 505–511, Aug. 1996.

- [15] I. Kao and M. R. Cutkosky, "Quasistatic Manipulation with Compliance and Sliding," *Int. J. Rob. Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 20–40, Feb. 1992.

- [16] I. Kao and F. Yang, “Stiffness and Contact Mechanics for Soft Fingers in Grasping and Manipulation,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 20, no. 1, pp. 132–135, Feb. 2004.
- [17] P. Tiezzi, I. Kao, and G. Vassura, “Effect of layer compliance on frictional behavior of soft robotic fingers,” *Adv. Robot.*, vol. 21, no. 14, pp. 1653–1670, Jan. 2007.
- [18] T. Inoue and S. Hirai, “Elastic Model of Deformable Fingertip for Soft-Fingered Manipulation,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 22, no. 6, pp. 1273–1279, Dec. 2006.
- [19] V. Anh Ho and S. Hirai, “Modeling and Analysis of a Frictional Sliding Soft Fingertip, and Experimental Validations,” *Adv. Robot.*, vol. 25, no. 3–4, pp. 291–311, Jan. 2011.
- [20] K. B. Shimoga and A. A. Goldenberg, “Soft Robotic Fingertips: Part II: Modeling and Impedance Regulation,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 15, no. 4, pp. 335–350, Aug. 1996.
- [21] N. Xydas, “Modeling of Contact Mechanics and Friction Limit Surfaces for Soft Fingers in Robotics, with Experimental Results,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 18, no. 9, pp. 941–950, Sep. 1999.
- [22] M. Ciocarlie, C. Lackner, and P. Allen, “Soft Finger Model with Adaptive Contact Geometry for Grasping and Manipulation Tasks,” in *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC’07)*, 2007, pp. 219–224.

- [23] T. Watanabe, “Softness effects on manipulability and grasp stability,” in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 1398–1404.
- [24] M. Shibata and S. Hirai, “Simultaneous Control of Position and Deformation of Viscoelastic Object-Positionability of a One-dimensional Viscoelastic Object-,” *J. Robot. Soc. Japan*, vol. 24, no. 7, pp. 873–880, Aug. 2006.
- [25] H. Wakamatsu, E. Morinaga, E. Arai, and S. Hirai, “Deformation modeling of belt object with angles,” in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 606–611.
- [26] H. Wakamatsu, E. Morinaga, E. Arai, and S. Hirai, “Path planning for belt object manipulation,” in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, pp. 4334–4339.
- [27] J. Ueda, R. Negi, and T. Yoshikawa, “Acquisition of a page turning skill for a multifingered hand using reinforcement learning,” *Adv. Robot.*, vol. 18, no. 1, pp. 101–114, Jan. 2004.
- [28] M. Moll and L. E. Kavraki, “Path planning for deformable linear objects,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 22, no. 4, pp. 625–636, Aug. 2006.
- [29] L. Sun, G. Aragon-Camarasa, S. Rogers, and J. P. Siebert, “Accurate garment surface analysis using an active stereo robot head with application to dual-arm flattening,” in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015, pp. 185–192.
- [30] Y. Yokokohji, “A Robot That Can Fold Origami Works,” *J. Robot. Soc. Japan*, vol. 31, no. 4, pp. 334–340, Jun. 2013.

- [31] Y. Kihara and Y. Yokokohji, “Skill Transfer to Robots using Statistical Feature of Direct Teaching Motion by a Human,” *J. Robot. Soc. Japan*, vol. 32, no. 9, pp. 832–841, Dec. 2014.

- [32] R. Katano, T. Gomi, T. Tomizawa, S. Kudoh, and T. Suehiro, “Realization of Five Types of Tabletop Knotting with Dual-Arm Robot,” *J. Robot. Soc. Japan*, vol. 33, no. 7, pp. 505–513, Oct. 2015.

- [33] T. Matsuno, T. Fukuda, and F. Arai, “Flexible rope manipulation by dual manipulator system using vision sensor,” in *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556)*, 2001, vol. 2, pp. 677–682.