

Study on Object Grasping taking into Consideration Deformation of Fingertips and Grasped Object

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/45371

This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0
International License.



指と把持物体の変形を考慮した
物体把持に関する研究

Study on Object Grasping taking into
Consideration Deformation of Fingertips and
Grasped Object

金沢大学大学院自然科学研究科

システム創成科学専攻

藤平祥孝

Abstract

In recent years, service robots and medical robots which can work in human society is required. In human society, these robots deal with unknown object and contact with humans. Therefore, the robot hands and fingers which are composed soft material have been developed. One of the advantages of using soft material are safety and affinity for human. On the other hand, the dynamics at the contact points is complicated because the deformation of soft robots and objects is large when the force is applied. It is necessary for the next generation robotic systems to perform grasping taking deformation of fingertips and grasped object into consideration.

In this study, firstly, the effect of the deformation of the fingertips on grasping was examined by a focus on grasp stability. Grasp stability is a metrics utilized in grasp planning. This metrics is required in order to optimize grasp planning corresponding to the softness of fingertips. Next, as the grasping when the object is deformed, we focused on the sheet manipulation that the deformation mode changes. The effect of the deformation of the object on grasping is presented through modeling a bent sheet and investigation of grasp stability. Finally, a force feedback device when grasped object is deformed was developed. It is important to display force-sense at the fingertips when grasping an object by remote control. Therefore, we developed the force feedback system and evaluated the developed system when the grasped object is deformed.

第1章 序論

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．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．

そこで，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 物体の変形がある場合の把持戦略と把持安定性
- 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：多様な物体を把持するとき，把持計画が必要となる．物体をどのように把持するかといった把持計画を立てる時の指針となるのが，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．本研究では，把持安定性の評価として把持耐力を用いて，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．

②物体の変形がある場合の把持戦略と把持安定性：これまで，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が，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．そこで，本研究では，変形のモードが遷移し物体の変形が変化するシートマニピュレーションに着目し，シートに座屈による変形の遷移を起こさせ，これを活用したマニピュレーションを目指す．そのために必要となる把持をするときのシートのモデルや把持

安定性を，実験を通して構築・検証し，シートの変形が把持に与える影響について明らかにする．

③把持物体が変形するときの力覚提示装置の開発：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，把持物体が変形するときの力覚提示装置の開発を行う．また，開発したシステムで力覚が提示できるのかについての評価も行う．

第2章 指の変形が把持安定性に与える影響

本章では，指の変形が把持安定性に与える影響について検証を行う．把持安定性の評価において把持耐力は重要な指標である．そこで，把持安定性として把持耐力に着目をし，把持耐力と法線力の関係にどのように指の変形が影響するのかを調べる．特に，ここでは，対向する2本指で物体を把持（最小構成な把持形態）したときに把持耐力が最小となる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．ある法線力が負荷されているとき，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を把持耐力としこれを計測する．指の変形を変化させるために様々な柔らかさの指を用いて，指の変形が把持耐力に与える影響を実験的に検証し明らかにする．

図1に本実験で用いた実験装置の模式図を示す．これは，2本の対向した指での物体把持を模した実験装置となっている．2本の対向した指での物体把持の力学的対称性を考慮すると，1本の指を法線方向が拘束された物体に押付けた状態と一致する．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を行う．

図2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．S1～S4の順に硬い指，つまり変形が少ない指である．図2を見ると，硬い指ほど大きな把持耐力が得られた．図3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（接線力を負荷していないとき）はどの指においても同様の円形である．図3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．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明らかとなった．

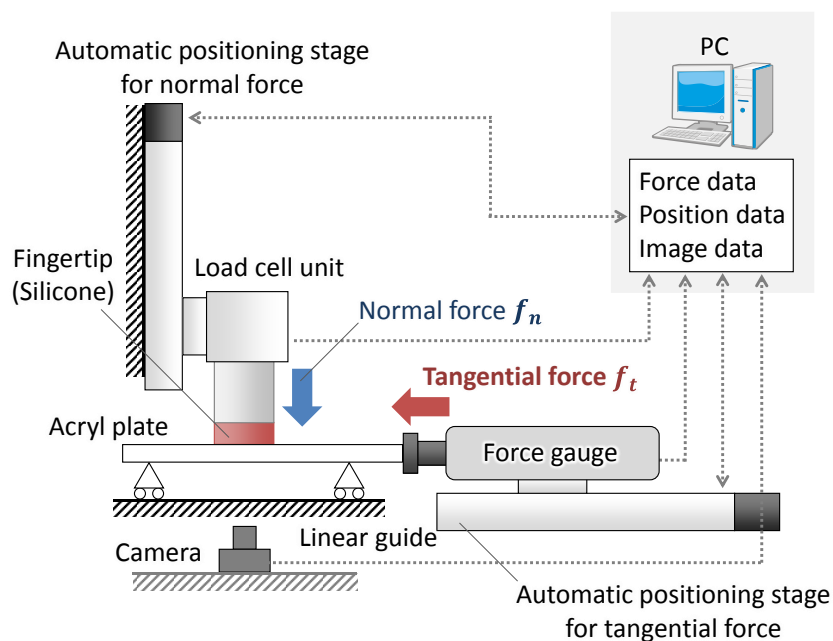


図 1 実験装置の模式図

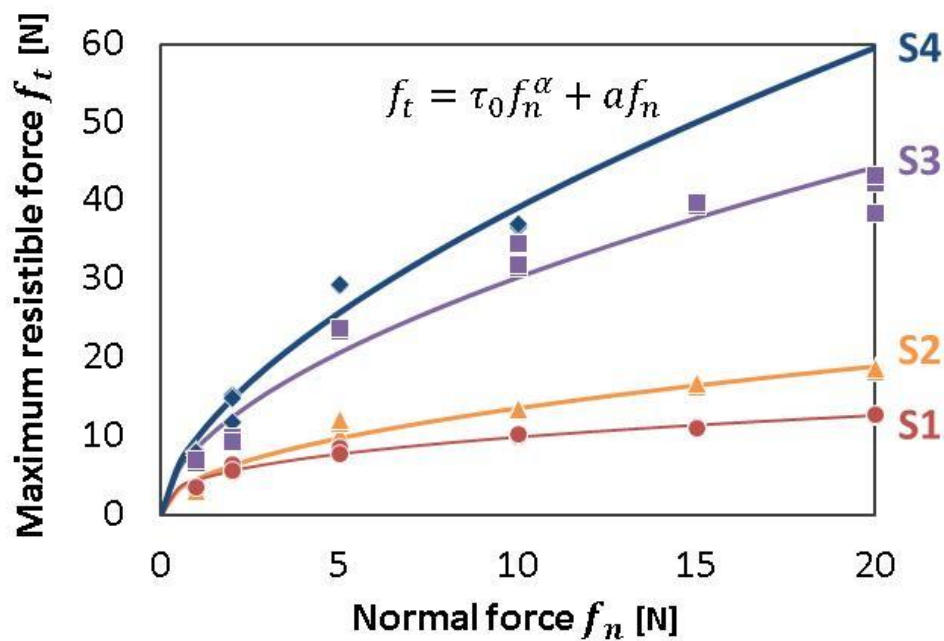


図 2 指の柔らかさごと法線力と把持耐力の関係.
(S4 で 15[N] と 20[N] の法線力を負荷したとき、滑りが発生する前に接線荷重がフォースゲージの計測域を超えた.)

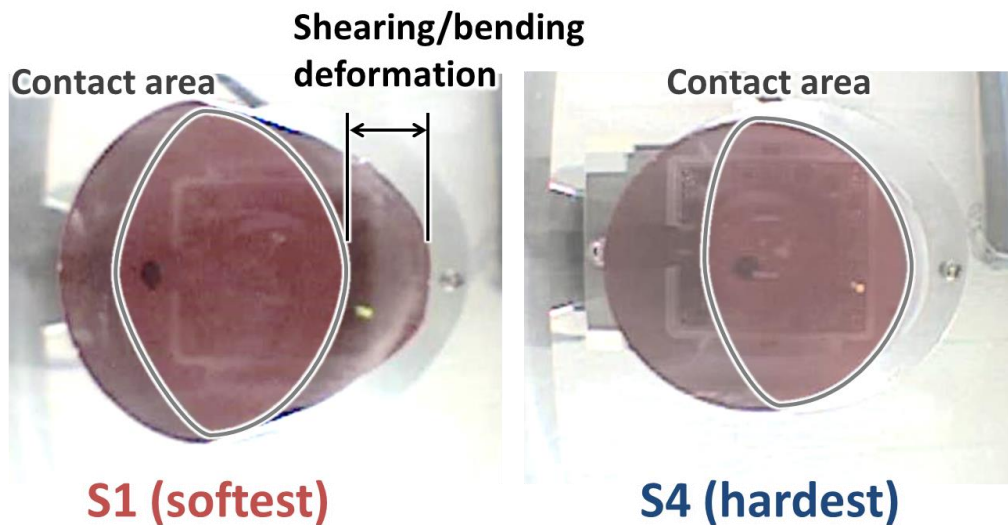


図 3 指とアクリル板との間で滑りが生じた瞬間の接触面の写真．10[N]の法線力を負荷したときの S1（最も柔らかい）と S4（最も硬い）との比較．

本章では、指の変形が把持安定性（把持耐力）に与える影響について、対向する 2 本指での把持を模した実験を指の柔らかさを変えて行い検証をした．このとき、接線方向の指の変形量の影響を見るために、初期接触面積が指の柔らかさに依存し難い円筒形の指を用いた．その結果は、接線方向の変形が少ない指ほど大きな把持耐力となった．これらから、指の変形量（接線方向の変位量）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．

第3章 変形する物体の把持

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 4 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。

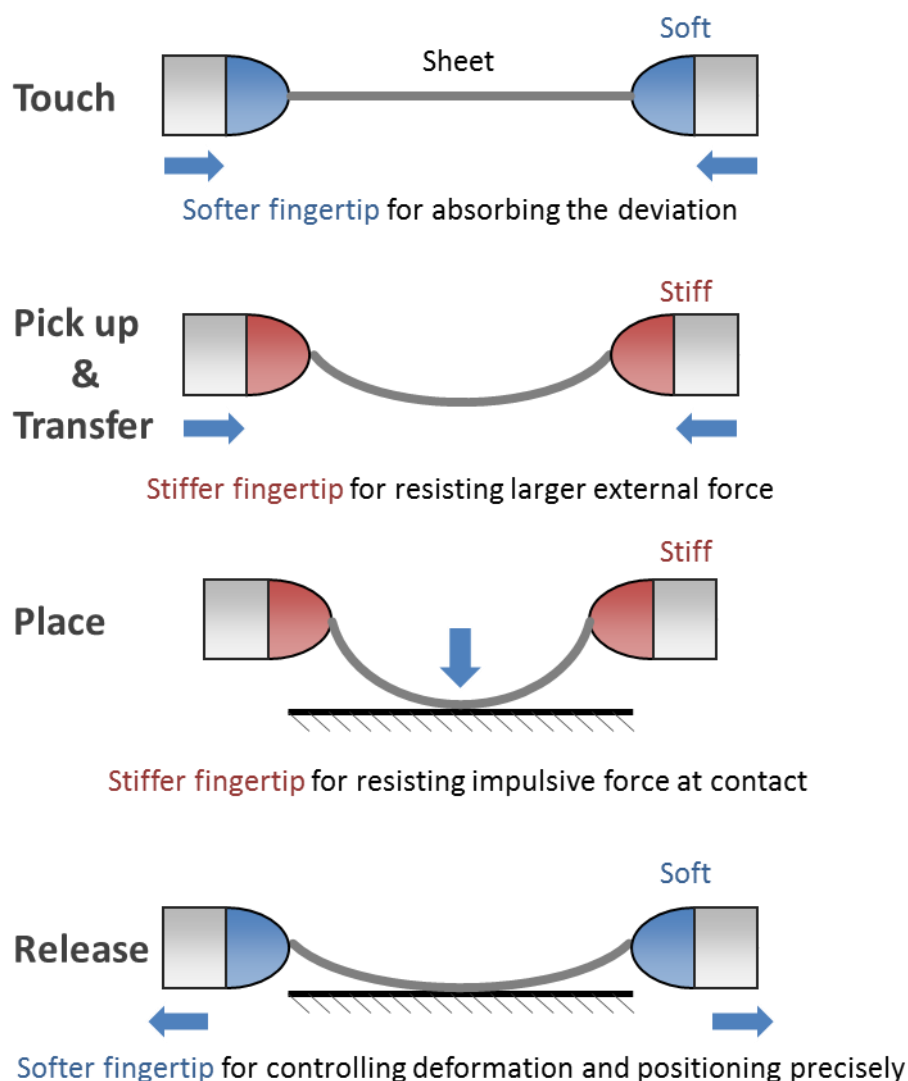


図4 対象とするシートマニピュレーション
(シートの辺を把持し曲げ変形を利用する。本章で得られた知見を考慮し、作業ステップごとに指の柔らかさを変える。)

曲げて把持したときのシートを図5に示すような2次元モデルとして考える．このときのポテンシャルエネルギーを考え，これに摂動法を適用することで，把持力 f_{gr} とシート端点の変位 δ_s の関係を求めることができた．図6に実験値と提案するモデルから算出した理論値を示す．これより，提案モデルから算出した理論値と実験値が近いことが分かり，提案モデルで記述できることが示された．

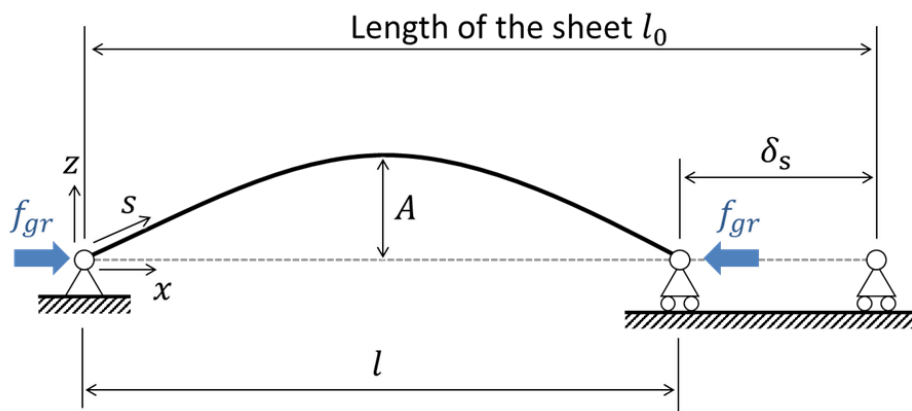


図5 曲げて把持したときのシートのモデル

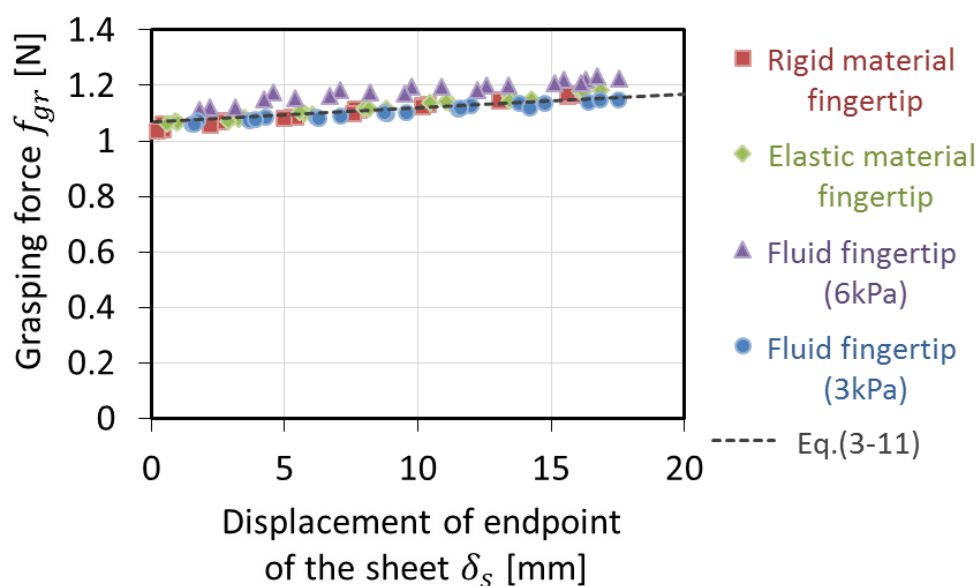


図6 把持力 f_{gr} とシート端点の変位 δ_s の関係の比較．
(点線は本論文で導出したモデルに基づく理論値)

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を意味する。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（図4）も提案した。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。

第4章 把持物体が変形するときの

力覚提示装置の開発

本章では、脳外科領域の内視鏡下手術を対象とする手術支援ロボットに着目する。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。しかし、内視鏡下手術では鉗子と呼ばれる細い術具を使い把持するため、把持しているときの力覚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力覚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るので、この違いを頼りに腫瘍領域を判別する場合がある。提示された力覚から柔らかさの違いを認識できれば、この判別の判断を支援することも可能となる。

本章では、力覚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。

図 5 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．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．

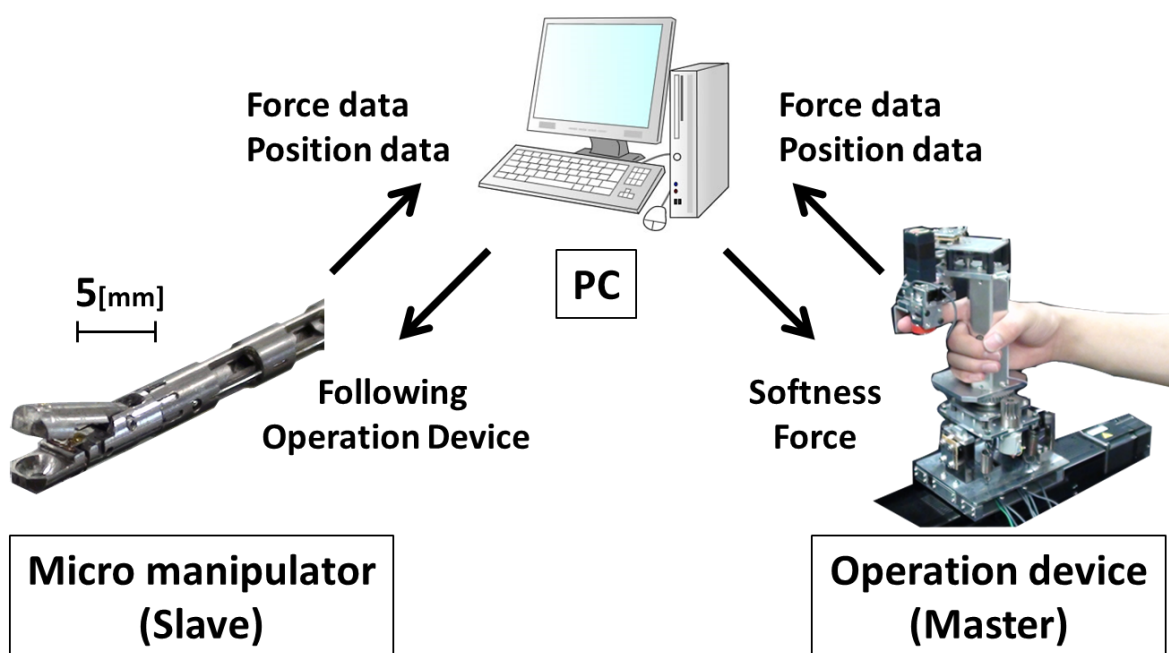


図 5 開発したマスタ・スレーブ方式手術支援ロボットの概要

開発した手術支援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，制御システムでの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実験により示された．この実験結果

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。

第5章 結論

本研究では、指と把持物体の変形と把持との関係に着目をして、把持安定性の検証等を行った。特に、把持安定性の検証では、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、指の変形が把持安定性（把持耐力）に与える影響について検証を行った。指の接線方向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。硬い指ほど大きな把持耐力となった。これより、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。

次に、把持物体の変形がある場合の把持戦略と把持安定性について調べた。ここでは、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、把持物体の変形が遷移するシートマニピュレーションでは、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。これから、従来のように把持安定性（把持耐力）を向上させるために指を物体に押込む戦略では、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、脳外科領域の内視鏡下手術を対象とする手術支援ロボットに着目し、力覚提示装置の開発を行った。人は手先の感覚に頼り、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、手先での間隔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ときの力覚を術者は知覚することが難しい。そこで、力覚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，指の変形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くことにある．指と把持物体の柔らかさの把持安定性（把持耐力）に及ぼす影響は明らかとなったが，実際の把持計画や指の設計等にご利用までに至っていない．今後は，これらの知見を利用した把持計画やマニピュレーション手法を提案していくことが必要である．

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

指と把持物体の変形を考慮した物体把持に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 システム創成科学専攻

(2) 氏 名 ふりがな 藤平 祥孝

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に対し、平成28年 2月 1日に第1回論文審査委員会を開催し、提出された学位論文について詳細に検討した。平成28年2月1日に口頭発表を実施し、その後、第2回論文審査委員会を開催し、慎重に審議した結果、下記の通り判定した。

本論文は、人間への親和性がある次世代ロボットシステムの実現を目指し、その核となる下記の技術について研究を行った。ロボットハンドに搭載される指には、衝撃吸収や対象物形状の不確かさの吸収を目的に、変形を許容した柔らかさが求められる。本論文では、接触面において接線方向の外力が作用した場合、接線方向の変形量が小さいほど大きな物体保持力（把持耐力）が得られることを明らかにした。対象物体に変形が生じる場合として、シートをロボットハンドで把持・運搬するケースを取り上げ、その把持解析を行った。シートモデルの導出を行い、ロボットハンドの指先でシート変形量（押し付け量）を増加させても把持力がほとんど増加しないことを明らかにした。応用例として、把持対象の物体が大きく変形する脳神経外科手術に着目し、術者にその変形量（剛性）を伝達することができるロボットシステムを開発した。

以上の結果は、次世代ロボットハンドシステムの実現に関して有益な知見や手法を示しており、工学的に大きな貢献といえ、博士（工学）の学位に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定（いずれかに○印） 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士（ 工 学 ）