

NAIST-IS-DT9961018

博士論文

人の把持運動における指先固着率に基づく  
触覚情報処理モデルの提案と検証

多田 充徳

2002年 3月 15日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

多田 充徳

審査委員： 小笠原 司 教授  
西谷 紘一 教授  
湊 小太郎 教授

# 人の把持運動における指先固着率に基づく 触覚情報処理モデルの提案と検証\*

多田 充徳

## 内容梗概

触覚は力覚，圧覚，痛覚，温覚等が複合的に作用する感覚であり，その情報処理機構に関しては未だ解明されていない点が多い．そのため，多くの潜在的アプリケーションが存在するにも関わらず，現段階で商業的に実用化されているのは，接触力/接触圧センサや，形状/力覚ディスプレイのように，触覚のプリミティブな機能を代行するものでしかない．これに対し，高度な触覚応用を実現するためには，人の高次機能に伴う触覚情報処理機構を詳細にモデル化する必要がある．

本研究は，触覚を必要とする代表的な動作であり，かつ日常生活の基本的な動作でもある物体の把持運動に焦点を当てる．そして，人が“把持”を遂行する上で，どのような触覚情報が本質的に重要であるのかをモデル化する．具体的には，弾性力学より導出された弾性体接触モデルを議論し，独自に開発した指先接触計測装置を用いた心理物理実験を行う．

はじめに，弾性体接触理論に基づく議論を行い，指先の接触をモデル化する．接線方向力を加えられる弾性体の接触面には，局所的な滑り（初期滑り）が周辺から生じる．そして，この現象が把持力制御と密接な関係を持つことが示唆されている．本研究では，接触領域に対する固着領域（滑りが生じていない領域）の割合を固着率と定義する．これは，弾性体の接触状態を表すスカラパラメータである．つまり，等しい固着率を持つ弾性体は，接触力と摩擦係数に関らず，等しい滑り余裕を持つという特徴がある．

次に，人の固着率知覚可能性を検証するため，その変化に伴う弾性体内歪みエネルギー密度とその速度場の変化を計算する．これは，人の触覚受容器の応答と皮

\* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 博士論文, NAIST-IS-DT9961018, 2002年3月15日.

膚内歪みエネルギー密度との間に高い相関が示唆されているからである。その結果、歪みエネルギー密度の空間微分が滑り領域の空間変化を、歪みエネルギー密度の時間差分の空間微分が滑り領域の時間変化を特徴的に表すことが確認された。これは、人の指先接触状態知覚可能性を示唆する。

以上の結果を鑑み、指先固着率に基づく把持力制御仮説を提案する。人の把持力は、把持物体に関わらず同程度 (1.2 ~ 1.4) の安全率を持つことが示唆されているが、本研究では把持力制御を行うための触覚情報として指先固着率に着目する。固着率が一般化された滑り余裕を表すため、それが同程度の値に落ち着くように把持力を制御すれば、いかなる物体に対しても適切な把持力が実現できるからである。この仮説は、人の把持に関する従来知見と矛盾しないだけでなく、ロバストな把持運動を合理的に説明する。

最後に、この仮説を検証するため、把持運動中の指先固着率の計測実験を行う。実験では、被験者に質量と摩擦係数がランダムに変化する計測装置の持ち上げ運動を繰り返し行うよう指示する。つまり、装置条件に不慣れな状態から習熟するまでの固着率と把持/負荷力の推移を計測する。その結果、条件に関わらず数回の試行を経れば、固着率が同程度の値に落ち着くことが確認された。

以上の結果は、固着率と等価な情報が触覚受容器で知覚可能であり、かつ実際の把持においても固着率が同程度の値に落ち着くことを表す。つまり、提案する把持力制御仮説を強く支持する。また、この結果は、ロボティクスや VR において、リアルな遠隔操作を実現するために検出/呈示すべき触覚情報を特定する上で有効な指針となる。

## キーワード

把持運動，弾性体接触，初期滑り，固着率，触覚情報処理，把持力制御

# Proposition and Investigation of the Touch Processing Model in Human Grasping based on the Stick Ratio within a Fingertip \*

Mitsunori Tada

## Abstract

Since the sense of touch is combined with kinesthetic, pressure, pain and warm sensations, very little is known about the mechanisms of touch. Thus, in spite of the many possibilities, present applications such as contact force/contact pressure sensors and shape/force displays are no more than replacements of the primitive functions in touch. Hence, to realize effective touch applications, the mechanisms of touch concurrent with higher functions in human must precisely be modeled.

In this research, grasping motion, typical and fundamental action entailing the touch sensations in a daily life, is investigated, and essential touch information necessary to accomplish the “grasping” is modeled. Concretely, a fingertip contact model derived from the elastic theory is discussed, and psychophysical experiments are carried out with an original touch measurement device.

First, a fingertip contact is modeled using the theory of an elastic contact. In a contact interface of a tangentially loaded elastic sphere, partial slip (incipient slip), suggested to have explicit relations with the grip force control, occurs from the peripheral. In this research, the stick ratio, defined as the ratio of the stick region (area without slip) to the contact region, is introduced. This is a scalar parameter indicating the generalized contact state of an elastic sphere. That is, the slip margins of elastic spheres are exactly the same regardless of the contact force and friction, if the spheres have same stick ratio.

---

\* Doctor's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT9961018, March 15, 2002.

Next, since the high similarity between the receptor response and the subcutaneous strain energy density (SED) is reported, changes in the SED resulting from changes in the stick ratio are simulated to investigate the stick ratio sensibility of human. The results demonstrate that the space derivation of the SED and its velocity distinctively indicate the spatial change and temporal change in the slip region, which suggest the contact state sensibility of human.

Then, the grip force control hypothesis based on the stick ratio is proposed. The grip force is reported to have similar (1.2 ~ 1.4) safety margin regardless of the grasped object. So, the stick ratio is hypothesized as a major tactile information in grasping. Since the stick ratio is a generalized slip margin, proper grip force can be realized just converges the stick ratio in a similar value. This hypothesis not only contradict the conventional knowledge related to the grasping, but rationally explains the robustness of the human grasping.

Finally, measurement of the stick ratio during grasping are carried out to show the validness of the hypothesis. In the experiments, subjects are asked to lift up and down the device with its weight and friction randomly changed, repeatedly. So, the transition of the stick ratio and the grip/load force from inexperienced to well experienced situations can be observed. The results demonstrate that the stick ratio converges to a similar value after several trials regardless of the condition.

These results suggest that the stick ratio can be detected by receptors within a skin, and it converges to a similar value in human grasping. That is, they strongly support the proposed hypothesis. Also, they can provide efficient guidelines in robotics and VR to determine the essential touch information to be detected and displayed in order to realize the realistic tele-operations.

**Keywords:**

Grasping motion, Elastic contact, Incipient slip, Stick ratio, Touch processing, Grip force control

# 目次

第1章 緒論	1
1.1. 研究の背景	1
1.1.1 触覚関連技術の可能性と現状	1
1.1.2 視/聴覚情報伝達における人の機能モデルの重要性	3
1.2. 従来の触覚関連研究の問題点	5
1.2.1 心理学的視点から見た触覚	5
1.2.2 生理学的視点から見た触覚	6
1.2.3 工学的視点から見た触覚	6
1.3. 研究の目的	7
1.3.1 触覚における機能モデル構築の可能性	7
1.3.2 研究の目的	8
1.4. 問題解決への基本戦略	10
1.5. 期待されるインパクト	11
1.5.1 心理/生理学におけるインパクト	12
1.5.2 工学におけるインパクト	12
1.6. 本論文の構成	13
第2章 把持機能モデル構築のための触覚解析法の意義	15
2.1. 本章の趣旨	15
2.2. 触覚の伝達過程に基づく触覚関連研究の分類	15
2.3. 指や関節の特性に着目した研究	17
2.3.1 バイオメカニクスとロボティクスにおけるアプローチ	17
2.4. 手の使用形態に着目した研究	20

2.4.1	リハビリテーション医学におけるアプローチ	20
2.4.2	ロボティクスにおけるアプローチ	20
2.5.	指先接触力に着目した研究	21
2.5.1	認知心理学におけるアプローチ	21
2.5.2	ロボティクスにおけるアプローチ	23
2.6.	触覚受容器に着目した研究	26
2.6.1	神経生理学におけるアプローチ	26
2.6.2	バイオメカニクスにおけるアプローチ	28
2.6.3	ロボティクス/VR におけるアプローチ	28
2.7.	脳活動に着目した研究	30
2.8.	把持機能モデル構築のための触覚解析法の意義	31
2.8.1	従来研究の問題点	31
2.8.2	機能モデル構築のための触覚解析法の位置付け	31
2.8.3	機能モデル構築のための触覚解析法の特徴	34
2.9.	本章の結論	35
<b>第3章</b>	<b>弾性体接触理論に基づく固着率の提案</b>	<b>37</b>
3.1.	本章の趣旨	37
3.2.	モデル化の前提条件	38
3.3.	接触面内圧力分布のモデル化	40
3.3.1	Hertz 理論に基づく法線方向圧力分布のモデル化	40
3.3.2	初期滑り現象の定性的説明	41
3.3.3	Cattaneo 理論に基づく接線方向圧力分布のモデル化	42
3.4.	解析解の重ね合わせによる滑り量と応力/歪み場の計算	45
3.4.1	半無限弾性体表面変位の解析解とその重ね合わせ	46
3.4.2	半無限弾性体内応力場の解析解とその重ね合わせ	47
3.5.	解析の妥当性検証	49
3.5.1	計算された初期滑り量と境界条件との比較	49
3.5.2	計算された応力場と数値解析結果との比較	53
3.5.3	計算された応力場と有限要素解析結果との比較	57



3.6.	弾性体接触状態を代表する固着率の提案	58
3.7.	本章の結論	62
<b>第4章</b>	<b>固着率と把持/負荷力の同時計測装置の開発</b>	<b>63</b>
4.1.	本章の趣旨	63
4.2.	計測装置の必要機能	64
4.3.	提案する計測手法	65
4.3.1	計測手法の概要	65
4.3.2	接触面計測の概要	66
4.3.3	接触力計測の概要	67
4.3.4	装置加速度計測の概要	68
4.4.	画像処理アルゴリズム	68
4.4.1	画像処理アルゴリズムの概要	68
4.4.2	メッシングアルゴリズム	69
4.5.	計測システムの構成	72
4.5.1	ハードウェア構成	72
4.5.2	ソフトウェア構成	74
4.6.	計測装置の性能評価	76
4.7.	計測装置を用いた指先接触面計測	79
4.7.1	指先の Stroking (部分滑り)	79
4.7.2	指先の Stroking (全滑り)	80
4.7.3	指先の Twisting	81
4.8.	本章の結論	82
<b>第5章</b>	<b>指先接触面内で発生する初期滑り現象の検証</b>	<b>85</b>
5.1.	本章の趣旨	85
5.2.	シミュレーション/実験の目的	86
5.3.	シミュレーションの設定	87
5.3.1	モデルの設定	87
5.3.2	解析条件の設定	88

5.4.	計測の設定	89
5.4.1	実験装置の構成	89
5.4.2	実験条件の設定	90
5.5.	負荷力の変化に伴う初期滑りの変化	92
5.5.1	シミュレーション結果	92
5.5.2	計測結果	96
5.6.	摩擦係数の変化に伴う初期滑りの変化	102
5.6.1	シミュレーション結果	102
5.6.2	計測結果	105
5.7.	シミュレーション/実験結果の考察	109
5.8.	本章の結論	110
<b>第6章</b>	<b>歪みエネルギー密度に基づく固着率知覚可能性の検証</b>	<b>113</b>
6.1.	本章の趣旨	113
6.2.	シミュレーションの目的	114
6.3.	触覚受容器の特性と側抑制	114
6.3.1	触覚受容器の種類と配置	114
6.3.2	メルケル盤 (SA I) の特性	117
6.3.3	マイスナー小体 (FA I) の特性	119
6.3.4	神経回路網に存在する側抑制回路	119
6.4.	シミュレーションの設定	120
6.4.1	モデルの設定	120
6.4.2	解析条件の設定	121
6.5.	シミュレーションの結果	122
6.5.1	メルケル盤深さでの歪みエネルギー密度分布	122
6.5.2	マイスナー小体深さでの歪みエネルギー密度分布	125
6.6.	シミュレーション結果の考察	131
6.7.	本章の結論	131

第7章	指先固着率に基づく把持力制御仮説の提案と検証	135
7.1.	本章の趣旨	135
7.2.	指先固着率に基づく把持力制御仮説の提案	135
7.2.1	指先接触モデルと指先接触	135
7.2.2	把持運動における固着率の意味	136
7.2.3	固着率に基づく把持力制御仮説の提案	137
7.3.	実験の目的	138
7.4.	実験の設定	139
7.4.1	計測装置の設定	139
7.4.2	データ処理	141
7.4.3	実験の手順	141
7.5.	質量が変化するときの計測結果	142
7.5.1	把持力と負荷力の関係	142
7.5.2	固着率の推移	143
7.6.	摩擦係数が変化するときの計測結果	147
7.6.1	把持力と負荷力の関係	147
7.6.2	固着率の推移	147
7.7.	指先固着率に基づく把持力制御仮説の検証	151
7.8.	本章の結論	154
第8章	結論	155
8.1.	本研究における問題の設定	155
8.2.	本研究における解法の設定	156
8.3.	本研究の具体的成果	157
8.3.1	各章の成果のまとめ	157
8.3.2	全体のまとめ	160
8.4.	課題と今後の展開	162
8.4.1	本研究の残した課題	162
8.4.2	今後の展開	163

参考文献	167
著者研究業績	183
謝辞	187
付録	191
A. 弾性定数とその相互変換 . . . . .	191
B. Hamilton の解析解 . . . . .	192
B.1 簡略化のために定義される関数 . . . . .	192
B.2 法線方向の放物面状圧力が加わるときの弾性体内応力場 . . . . .	193
B.3 接線方向の放物面状圧力が加わるときの弾性体内応力場 . . . . .	195
C. 一般化された弾性体接触理論における固着率 . . . . .	199
C.1 法線方向圧力分布の一般化 . . . . .	199
C.2 接触領域形状の一般化 . . . . .	201
D. 開発した計測装置の組み立て図 . . . . .	204
E. 指紋パターンを用いた高精度初期滑り計測 . . . . .	207
E.1 指紋撮像装置 . . . . .	207
E.2 フロー推定アルゴリズム . . . . .	209
E.3 マスク画像の作成 . . . . .	209
E.4 粗いフロー推定と誤り検出/修正 . . . . .	209
E.5 詳細なフロー推定と妥当性の検証 . . . . .	213
E.6 推定したフローより得られる情報 . . . . .	215
索引	219

# 目 次

2.1	触覚の伝達過程	16
2.2	人の把持力制御の特徴	22
2.3	摩擦円錐の概念	24
2.4	ロボットの把持力制御の特徴	25
2.5	触覚関連研究における本研究の位置付け	32
3.1	接触解析に用いる弾性球モデル	39
3.2	Hertz の理論に基づく接触面内法線方向圧力分布	41
3.3	初期滑り発生の模式図	43
3.4	Cattaneo の理論に基づく接触面内接線方向圧力分布	45
3.5	$x$ 軸方向滑り量に対する $y$ 軸方向滑り量	50
3.6	解析解の重ね合わせによる初期滑り計算結果	52
3.7	重ね合わせ解法と数値的解法で計算されたミーゼス応力の比較	55
3.8	重ね合わせ解法で計算された初期滑りが生じている時のミーゼス 応力	56
3.9	重ね合わせ解法と有限要素法で計算された歪みエネルギー密度分布 の比較 (浅層部)	59
3.10	重ね合わせ解法と有限要素法で計算された歪みエネルギー密度分布 の比較 (深層部)	60
3.11	弾性体接触と剛体接触	61
4.1	計測手法の概念図	66
4.2	指先に描画されたドットパターン	67

4.3	メッシング操作の過程	71
4.4	画像処理の過程	72
4.5	計測装置の構成	73
4.6	計測装置の外観	74
4.7	計測システムのソフトウェア構成	75
4.8	可視化プログラム display による指先変形と接触力の可視化	77
4.9	指先に接線方向力を加えている時の処理画像 (局所滑り)	80
4.10	指先に接線方向力を加えている時の処理画像 (全滑り)	81
4.11	指先に回転力を加えている時の処理画像	82
5.1	シミュレーションの設定	88
5.2	計測システムの構成	89
5.3	計測システムの外観	91
5.4	計測の設定	91
5.5	負荷力が変化する条件で計算された初期滑り	94
5.6	負荷力が変化する条件で計算された $y$ 軸上の $x$ 軸方向滑り量	95
5.7	負荷力が変化する条件で計測された初期滑り (被験者 A)	97
5.8	負荷力が変化する条件で計測された $y$ 軸に平行で接触中心を通る線上での $x$ 軸方向滑り量	99
5.9	負荷力が変化する条件で計測された固着率	101
5.10	摩擦係数が変化する条件で計算された初期滑り	103
5.11	摩擦係数が変化する条件で計算された $y$ 軸上の $x$ 軸方向滑り量	104
5.12	摩擦係数が変化する条件で計測された初期滑り (被験者 A)	106
5.13	摩擦係数が変化する条件で計測された $y$ 軸に平行で接触中心を通る線上での $x$ 軸方向滑り量	107
5.14	摩擦係数が変化する条件で計測された固着率	108
6.1	無毛部皮膚における機械受容単位	116
6.2	無毛部皮膚における機械受容単位と触覚受容器の対応	116
6.3	メルケル盤の応答分布と歪みエネルギー密度分布の比較	118

6.4	側抑制神経回路	120
6.5	シミュレーションの設定	121
6.6	各受容器深さにおける歪みエネルギー密度分布 ( $\mu = 0.8$ )	123
6.7	各受容器深さにおける歪みエネルギー密度分布 ( $\mu = 0.4$ )	124
6.8	メルケル盤深さにおける歪みエネルギー密度分布	126
6.9	メルケル盤深さにおける歪みエネルギー密度分布の空間微分	127
6.10	負荷力増分が 0.1 (N) のときのマイスナー小体深さにおける歪み エネルギー密度速度分布	129
6.11	負荷力増分が 0.2 (N) のときのマイスナー小体深さにおける歪み エネルギー密度速度分布	130
6.12	負荷力増分が 0.1 (N) のときのマイスナー小体深さにおける歪み エネルギー密度速度分布の空間微分	132
6.13	負荷力増分が 0.2 (N) のときのマイスナー小体深さにおける歪み エネルギー密度速度分布の空間微分	133
7.1	計測装置の外観	140
7.2	質量が変化するときの把持力と負荷力の関係 (被験者 A)	144
7.3	質量が変化するときの不慣れな状態での固着率と把持/負荷力のプ ロファイル (被験者 A)	145
7.4	質量が変化するときの慣れた状態での固着率と把持/負荷力のプ ロファイル (被験者 A)	146
7.5	摩擦係数が変化するときの把持力と負荷力の関係 (被験者 A)	148
7.6	摩擦係数が変化するときの不慣れな状態での固着率と把持/負荷力 のプロファイル (被験者 A)	149
7.7	摩擦係数が変化するときの慣れた状態での固着率と把持/負荷力の プロファイル (被験者 A)	150
7.8	不慣れな状態と慣れた状態での固着率の変化	152
C.1	指数の変化による接触面内圧力分布の変化	200
C.2	接触領域が楕円になったときの固着領域と滑り領域	202

E.1	指紋の撮像に使用する計測装置 . . . . .	208
E.2	入力画像とそれらの差画像 . . . . .	208
E.3	マスク画像の作成 . . . . .	210
E.4	粗いフロー推定と誤り検出結果 . . . . .	211
E.5	計算された滑りベクトルに対するラプラシアン の計算結果 . . . . .	212
E.6	詳細なフロー推定結果 . . . . .	214
E.7	フロー推定の妥当性検証結果 . . . . .	215
E.8	指紋稜線の動きの推定 . . . . .	216
E.9	指先接触面の滑り-固着状態の時間変化 . . . . .	216



# 表 目 次

1.1	現時点で実用化されている触覚関連技術 . . . . .	2
2.1	解析手法に関する従来研究との比較 . . . . .	35
3.1	初期滑りの計算に用いた弾性球モデルと境界条件 . . . . .	53
3.2	ミーゼス応力の計算に用いた境界条件 . . . . .	53
3.3	初期滑り発生時のミーゼス応力の計算に用いた境界条件 . . . . .	54
3.4	歪みエネルギー密度の計算に用いた指モデルと境界条件 . . . . .	57
4.1	センサと計測装置のサイズ . . . . .	75
4.2	設定可能な質量/摩擦条件 . . . . .	75
4.3	サンプリング周波数 . . . . .	76
4.4	計測精度 . . . . .	78
5.1	シミュレーションで使用する弾性球モデルの設定 . . . . .	87
5.2	3 軸ステージの仕様 . . . . .	90
5.3	負荷力が変化する境界条件 . . . . .	92
5.4	負荷力が変化する条件で計算された固着率 . . . . .	96
5.5	摩擦係数が増加する境界条件 . . . . .	102
5.6	摩擦係数が増加する条件で計算された固着率 . . . . .	105
6.1	触覚受容器の種類と特徴 . . . . .	117
6.2	シミュレーションで使用する弾性球モデルの設定 . . . . .	121
6.3	メルケル盤の発火頻度シミュレーション条件 . . . . .	125
6.4	マイスナー小体の発火頻度シミュレーション条件 . . . . .	128

7.1	質量が変化する計測条件 . . . . .	140
7.2	摩擦係数変化する計測条件 . . . . .	140
7.3	固着率の有意性の検証 . . . . .	151

# 第1章 緒論

## 1.1. 研究の背景

### 1.1.1 触覚関連技術の可能性と現状

触覚は、一見すると外界との物理的接触を伝えるだけの、原始的かつ単純な情報伝達手段に思える。しかし実際は、日常生活を送る上で他の感覚には代行できない極めて重要な役割を担っている。そして、このような優れた触覚情報処理能力のおかげで、我々は実世界と柔軟に触れ合い、環境に関する豊富な情報を取得できるようになる。また、このような物理的接触を伴う感覚は、来るべき高度ネットワーク化社会において、聴覚、視覚に次ぐ第三の遠隔情報伝達チャンネルとなることが期待されている [1]。これは、遠隔操作 [2] や遠隔医療 [3] などの具体的なアプリケーションを思い浮かべれば容易に想像がつくであろう。つまり、触覚情報を伝達する上で主要な要素技術となる、触覚センサや触覚ディスプレイの開発に対する社会的期待は大きい。

ここで、触覚なくしては遂行し得ない日常生活における運動を考える。また、本論文ではこのような運動を“触運動 (Touch Motion)” と呼ぶ。

- 身の回りにあるさまざまな物体を持ち上げる際、その質量や表面摩擦係数に応じて把持力を適切に制御する能力
- 物体表面の肌理、温度のように、視覚情報だけでは知り得ない情報を、指先の能動的ななぞり運動により知覚する能力
- 暗い部屋の中で蛍光灯のスイッチを探す動作のように、暗がりを手探りで進み、目的の物を探し当てる能力

表 1.1 現時点で実用化されている触覚関連技術

対象	実現されているデバイス
触覚を検出する技術	単純な ON-OFF スイッチ，硬度センサ，温度センサ， (多軸) 力センサ，(分布) 圧力センサ
触覚を呈示する技術	ピンアレイを用いた形状ディスプレイ， 小型アームを用いた力覚ディスプレイ

- 鋭い針先などが皮膚に押し当てられたときに，痛みを感じるにより，皮膚の侵害を未然に防ぐ能力
- 高温物体が皮膚に押し当てられたときに，その温度を検出することにより，皮膚の侵害を最小限に防ぐ能力

このように，触覚は力覚，圧覚，痛覚，温覚等が複合的に作用することで，日常生活のさまざまな局面において，必要十分な接触検出能力を人に提供する。しかし，このような触運動に伴い行われる触覚情報処理の具体的メカニズムに関しては，未だ解明されていない点が多い。これは，前述のように触覚が原始的かつ単純な情報伝達チャンネルと見なされていること，そして触覚が複数感覚の複合的作用により生じられることによる。

そして，このような触覚をとりまく現状のため，将来的には重要な情報伝達手段となることが期待されているにも関わらず，現段階で商業的に実用化されている触覚応用技術は，表 1.1 に列挙されるように，そのプリミティブな機能を代行するものでしかない。そして，このような触覚センサ/ディスプレイは，接触圧や接触力といった限定された接触現象を正確に検出/呈示するには必要十分な性能を発揮するが，遠隔操作や遠隔医療で必要となる複合的触覚情報（つまり，触感）の検出/呈示を行うことは難しい。

では，高度な触覚情報の検出/呈示を実現するためには，どのようなアプローチが必要になるのであろうか？次節以降，視/聴覚情報処理研究を例にこの問題を考える。これは，視/聴覚情報の検出/呈示に関しては既に幅広いアプリケーション

ンが存在するため，示唆に富む情報が得られると考えたからである．

### 1.1.2 視/聴覚情報伝達における人の機能モデルの重要性

人の視/聴覚情報処理に関する研究の発展には，光学 (Optics) や音響学 (Acoustics) のような物理現象を記述するための基礎理論と，心理学や生理学において実験的に示される人の運動/生理モデルという 2 つの要素が不可欠となる．なぜなら，これらを統合することにより，視/聴覚情報を用いた人の“機能 (Function)”を数学的にモデル化でき，結果としてそのような機能を実現するために本質的に重要となる視/聴覚情報が明確になるからである．つまり，基礎理論だけでは人の情報処理を考慮しない議論となり，運動/生理モデルだけでは人の情報処理の断片的な現象しかモデル化できないのに対し，これらを相補的に統合することで，目で見て，耳で聞くという機能と，それらを実現するために行なわれる情報処理との関係が明らかになる．本論文では，このように数学的に記述し得る機能実現のための人の情報処理モデルを“機能モデル (Function Model)”と呼ぶ．そしてこのモデルは，工学におけるアプリケーション開発において，不可欠な理論的開発指針となる．つまり，ある機能を実現する上で本質的に重要な視/聴覚情報が明確になるため，その機能を模倣するという工学問題がそれらをいかに検出/呈示すれば良いかという点に帰着される．

例として，視覚関連デバイスについて考えてみる．一般に流通している視覚ディスプレイには，電子ビームと蛍光膜を組み合わせたもの (CRT ディスプレイ) や，発光素子と液晶シャッタを組み合わせたもの (LCD ディスプレイ) がある．このように，呈示するための機構こそ全く異なるものの，その背景には“赤”，“緑”，“青”の 3 原色の組合せで全ての色を表示するという共通した呈示機能がある．そして，この呈示機能の妥当性は，3 原色が網膜上に存在する 3 種類の光受容器に対応するという生理学知見に裏付けられる [4]．また，この原理が明らかになれば，視覚センサに必要な機能が可視光スペクトルを 3 原色に分解することになることは容易に想像が付く．ただし，このような視覚センサにも CCD や CMOS のように複数の検出機構が存在することは周知の事実である．

これは，よりリアルな視覚情報を呈示するための立体テレビに関しても同様に

成り立つ。つまり、立体テレビには偏光メガネ式、バリア式（スリットを用いた方法）、レンチキュラー式（カマボコ型レンズを用いた方法）のように様々な呈示機構があるが、その根底には左右の目に視差を含んだ画像を別々に結像させるという共通した呈示機能がある。そして、この呈示機能の妥当性は、視差画像から3次元情報を再構成するという、人の両眼立体視のメカニズムに裏付けられるのである。

一方、聴覚関連デバイスについて考えてみる。聴覚ディスプレイには、空気振動を介して音声を聴覚受容器に伝達するスピーカや、耳骨の振動を介して音声を聴覚受容器に伝達する骨伝導スピーカがあるが、これらに共通する呈示機能は可聴域の振動を聴覚受容器に伝達することである。また、聴覚センサにも空気振動を記録するマイクと、骨の振動を用いる骨伝導マイクがあるが、いずれも人から発せられる振動を空気や骨といった媒体を経て記録するという点では共通した検出機能を持つ。

このように、視/聴覚関連技術に関しては、

1. 工学応用を必要たらしめるニーズ
2. 物理現象を記述するための基礎理論
3. 実験的に示される人の運動/生理モデル
4. 工学応用を実現するための技術

という4つの条件がバランス良く存在する。つまり、基礎理論と運動/生理モデルを統合することにより、人の機能モデルが構築されているため、社会的ニーズを具現化するために検出/呈示すべき情報が明確となり、それを実現するための様々な方法が考案される。そして、健全な市場原理に基づき技術の革新と淘汰を繰り返した結果、極めて規模の大きい市場が形成されたのではなかろうか。

また、以上の視/聴覚関連の応用では“機能”というレベルでは模倣がなされているものの、それを実現するための“機構”は人に倣ったものではなく、経済的観点から最良の方法が選択されていることに注意しなければならない。つまり、工学における生体模倣の本質は“機構”ではなく“機能”の模倣であり、そのためにも詳細な機能モデルが必要となるのである。

## 1.2. 従来の触覚関連研究の問題点

従来より、触覚や触運動を取り扱った研究は様々な分野で行われている。例えば、心理学では指先接触力に着目した把持/なぞり運動解析が、生理学では触覚受容器のモデル化が、そして工学ではロボットハンドの制御理論や触覚センサ/ディスプレイの開発が行われている。つまり、心理学では運動モデル、生理学では生理モデルが構築され、工学では触覚技術の応用が試みられていることになる。

本節では、触覚の対象を機械受容（皮膚の物理的な変形により生じる感覚）に限定し、それに関する機能モデルの構築という観点から従来研究が持つ問題点を明確にする。ただし、対象を機械受容に限定するため、ここでの“機能モデル”とは把持運動やなぞり運動がいかに関現されているのかに関するモデルとなる。

### 1.2.1 心理学的視点から見た触覚

心理学における心理物理実験の基本的な計測手法/対象は、力センサを用いた指先力の計測であった。

具体的には、精密把持（母指と示指を用いた摘み上げ運動）において、指先力を摘み力である“把持力 (Grip Force)”と、持ち上げ力である“負荷力 (Load Force)”に分解する（把持/負荷力の定義に関しては3章を参照されたい）。そして、様々な質量や表面摩擦係数を有する物体を把持するときの、把持力と負荷力の関係が詳細に解析された結果、人の把持力が物体の特性に応じて適切に制御されていることが明らかになった [5]。つまり、軽い物体はより弱い力で、滑り易い物体はより強い力で把持することになる。そして、このような適切な把持力制御を実現するためには、触覚（特に機械受容覚）入力が不可欠であることが示唆されている [6]。

このような知見は、人が加える把持力の特徴を明らかにするという意味では重要である。しかし、計測されているのが指先接触力という断片的な触覚情報だけであり、人の適切な把持力制御という機能が触覚情報を用いてどのように実現されているのかに関しては明確に言及されていない。つまり、人の把持運動における断片的な運動モデルは提案されているものの、把持運動という機能がモデル化

されているとは言えない。

### 1.2.2 生理学的視点から見た触覚

生理学では、触覚受容器の応答特性や、様々な刺激に対する触覚受容器の応答が詳細に調べられている。その結果、人の無毛部皮膚内には、順応性と受容野の異なる 4 種類の機械受容器単位が存在しており、解剖学的にはそれぞれが別々の触覚受容器に対応することが明らかになった [7]。また、指先に形状の異なる剛体を押し付けた時の受容器応答や [8]、把持運動中の受容器応答も計測されており [9]、触覚受容器が押し付けられる物体形状や把持運動のフェーズに応じて特徴的に求心性神経インパルスを発射することが明らかになっている。

このような知見は、人の触覚受容器の応答特性をモデル化し、様々な刺激に対する実際の応答を明らかにするという意味では重要である。しかし、与えられた刺激があまりに単純であるため、把持やなぞり運動といった日常生活における人の機能と即座に結び付けることは難しい。

また、把持運動中の受容器応答も調べられてはいるが、それらが実際に適切な把持力制御という機能を実現する上で、どのような意味を持つのかに関しては明確にモデル化されていない。つまり、生理学においても、触覚受容器の応答モデルや把持運動に伴う断片的な生理モデルは提案されているが、把持やなぞり運動といった人の高次機能に対する一貫した数理モデルを構築するには至らない。

### 1.2.3 工学的視点から見た触覚

工学では、ロボットハンドを用いた把持/操り理論の構築や、触覚センサ/ディスプレイの開発が行われている。

ロボットハンドでは、指先と物体との点接触を仮定し、その点における接触力に着目した把持/操りの理論が構築されている [10, 11]。点接触という仮定を置いたため、数学的には美しい理論体系が完成されているものの、実用的にロバストな把持運動を行うには至らない。一方、触覚センサ [12] や触感ディスプレイ [13, 14] も多数開発されているが、それらの検出対象と呈示方針の多くは、ある



アプリケーションに特化したアドホックなものが多く、一般的な触感検出/呈示の実現に結び付くものではない。

このように工学では人の触覚や触運動を模倣し、それを工学応用する試みが多数行われている。しかし、触運動に関する機能モデルが未だに確立されておらず、ある機能を実現するために本質的に重要な触覚情報が明らかにならないため、いずれの研究にも問題を簡単にするための非現実的な仮定/前提条件やアドホックなアプローチが含まれている。そして、それらの多くは未だに実用化されるには至らない。

## 1.3. 研究の目的

### 1.3.1 触覚における機能モデル構築の可能性

1.2 節で述べた問題点を踏まえ、1.1.2 節で考察した視/聴覚における人の機能モデルの構築とその工学応用に必要なプロセスを、触覚研究に対し適用する。

工学応用を必要たらしめるニーズ 将来実現されるであろう高度ネットワーク化社会では、視/聴覚メディアだけでなく、触覚メディア [1] を介しての情報通信が期待される。そして、ここでの触覚情報とは、接触の有無や接触力といったプリミティブな情報ではなく、遠隔物体の質感、操作感といった複合的な触覚情報でなければならない。つまり、触覚情報を伝達する上で主要な要素技術となる、触覚センサや触覚ディスプレイの開発に対する社会的ニーズは大きい。

物理現象を記述するための基礎理論 視覚では光学、聴覚では音響学が物理現象を記述するための基礎理論であった。一方、触覚の生起要因が外界との物理的接触に伴い接触面内に発生する機械的負荷や温度の分布であること、そして人の指先が弾性を有することを考えると、触覚に関する物理現象を記述するための基礎理論は弾性体力学 (特に、弾性体接触の力学) や伝熱学となる。

実験的に示される人の運動/生理モデル 心理/生理学では、様々なアプローチで触覚や触運動に関する研究が行なわれている。しかしそれらの多くは、把持運動中の指先接触力の計測や、単純な刺激に対する触覚受容器応答のモデル化である。つまり、断片的な触覚情報だけを計測する研究や、日常生活における触覚刺激とは異なる条件で実験を行う研究が多い。当然このような知見は、人の運動や感覚の特徴をモデル化するという意味で重要なモデルとなる。しかし、基礎理論とリンクさせ触覚に関する人の機能モデルを構築するには至らない。

工学応用を実現するための技術 触覚に関する人の機能モデルが未だに構築されていないため、ニーズを具現化するために必要な触覚情報が明確になっていない。ただし、現状でも既存の力センサを備えたロボットハンドで把持/操りを行うための制御理論や、特定の触感を検出/呈示するための触覚センサ/ディスプレイは構築されている。しかし、前者はセンサの制約が大きいだけでなく、人の機能よりはむしろ機構を模倣することに重点が置かれている。つまり、指先に力センサを備えた多リンク機構で物体を操るにはどのような戦略を立てれば良いのかをボトムアップに議論している。一方、後者は論理的な検出/呈示指針を持たずアドホックなアプローチを取るものが多い。そして、双方とも実用的に使用できるとは言い難いのが現状である。

### 1.3.2 研究の目的

前節で述べたように、触覚研究にも物理現象を記述するための基礎理論と、断片的な運動/生理モデルは存在している。しかし、これらが統合され、触運動機能の実現という一つの枠組で議論されることがないため、未だに人の機能モデルが構築されていない。逆に、これらを包括的に取り扱うための基盤が用意されれば、触運動に対しても視/聴覚情報処理と同様に機能モデルを提案することができるであろう。

そこで、本研究では以下の目的を設定する。

人が“把持”という機能を遂行する上で、どのような触覚情報が本質

的に重要で、それをを用いてどのように適切な把持力を実現しているのかに関する機能モデルを提案し、実験的に検証する

ここで、研究の対象として把持運動を選んだのは、それが触覚を必要とする代表的運動であり、かつ日常生活の基本的運動でもあるため、将来的に触覚技術の応用を考えるとときや、より深く触覚情報処理機構を探求するときに重要な要素技術となり得ると考えたからである。ただし、本研究では問題を簡単にするため、以下の2点の前提条件を設ける。

- 問題が把持運動であるため、対象とする触覚を機械受容覚と力覚に限定する。つまり、温覚や痛覚は考慮しない。また以下では、機械受容覚のことを触覚と呼び(狭義の触覚)、力覚とは区別する。
- 物体の器用な操りでは、触覚によるフィードバック制御よりも運動学習によるフィードフォワード制御の影響が大きい。そこで、対象とする把持運動を母指と示指を用いた単純な摘み運動に限定する。また以下では、この摘み運動のことを把持運動と呼ぶ(狭義の把持運動)。

このように、把持運動という機能をモデル化できれば、前述のような工学応用を行う際の理論的指針を得ることができる。つまり、把持運動を遂行する上でどのような触覚情報が本質的に重要であるのかが明らかになるため、それを模倣するために触感を検出/呈示するという工学問題に対し、トップダウンにアプローチすることができる。

一方、心理/生理学において人の把持力制御機構をより深く探求する時も、把持の機能モデルが構築されていれば、指先力や触覚受容器応答といった断片的な現象の意味を明確にすることができる。つまり、このような分野においても、計測された運動/生理データを評価する際に、トップダウンにアプローチすることができる。

以上より、本研究で掲げる研究目的を達成することは、触覚技術の工学応用を考える上で重要であるだけでなく、より深く人の触覚情報処理機構を理解するためにも重要であると言える。具体的にどのような戦略で問題解決を目指すのかについては次節で説明する。

## 1.4. 問題解決への基本戦略

結局のところ問題は，触覚における物理現象記述のための基礎理論（本研究では機械受容感覚と力覚に限定するため，弾性体力学となる）と断片的な運動/生理モデルとの統合，機能モデルの導出，機能モデルの検証をどのように行えば良いかという点に集約される．そこで，解法の糸口を得るため接触情報の知覚経路を考える．

指先が外界に触れると，皮膚は変形し接触領域は空間的広がりを持つ面となる．同時に皮膚内応力場は接触面内の圧力（変位）分布の変化に応じ，時空間的に変化する．皮膚内に存在する触覚受容器は，この皮膚内応力場の変化に応じ求心性神経インパルスを発射する．つまり，この時点で接触情報が符号化されることになる．

このように，全ての触覚情報は指先接触面における境界条件の変化に起因する皮膚内応力（歪み）場の時空間的变化として触覚受容器に伝達される．ここで，接触面内の圧力（変位）分布や皮膚内の応力分布は，弾性体力学を用いれば極めて明確に定量化出来る指標である．また，触覚受容器が皮膚内応力場の変化に応じ求心性インパルスを発射することを考えると，それらを触覚受容器応答と等価な情報と見なすこともできる．このように，皮膚変形に着目すれば，弾性体力学に基づく理論展開が容易にできるだけでなく，触覚を議論する上で必要十分な情報が取得できる．しかし，現実には接触面内の圧力分布を密に計測することや，弾性体内の応力場を直接計測することは技術的困難を伴う．

一方で，接線方向力を受ける弾性体の接触面には，“初期滑り（Incipient Slip）”と呼ばれる局所的な滑り（変形）が発生することが知られている [15]．そして，この情報は指先接触面における境界条件の変化という意味で，接線方向圧力分布と等価な情報となる．そこで本研究では，把持という機能に付随する触覚情報処理をモデル化/検証するための手段として，弾性体接触理論に基づく指先接触モデルの構築と，カメラを用いた指先接触面の初期滑り計測を提案する．

具体的には次のように研究を進める．従来より指先力や受容器応答に関する運動/生理モデルが提案されているが，弾性体接触理論を用いて指先の接触をモデ

ル化することで，指先変形とそれらの関係を数学的に記述できるようになる．なぜなら，接触領域の圧力を積分したものが指先力であり，接触領域における境界条件の変化に起因する皮膚内応力場の変化が触覚受容器応答に相当する情報となるからである．そして，運動/生理モデルの特徴を鑑み，把持力制御に伴う触覚情報処理の機能モデルを提案する．さらに，そのモデルを検証するための手段として，把持運動中の指先接触面内に発生する初期滑りの計測を行う．

この初期滑り計測に基づく検証法は，次の 3 点において妥当性を主張できるものである．

- 指先接触面に生じる (局所的な) 滑りが，人の把持力制御と密接な関係を持つことが既に示唆されている [9] ．
- 剛体と接触する弾性体に接線方向力が加わると，法線方向圧力分布はあまり変化しないのに対し，接線方向圧力 (変位) 分布は大幅に変化する [15] ．つまり，把持運動において境界条件の変化は接線方向が支配的となる ．
- 把持という機能の究極的な目的が物体を滑らさず，かつ握り潰さないことであることを考えると，指先接触面にどの程度滑りが生じているかという情報は，把持という機能と直結した現象であると言える ．

また，この手法はカメラを用いた計測であるため，触覚入力と等価な情報の時空間的变化を非侵襲に計測できるだけでなく，発生する滑り分布の効率的かつ高精度な計測ができるという大きな利点がある ．

以上より，本研究では弾性体接触理論に基づく指先接触モデルの構築と，指先接触面に発生する初期滑り計測という 2 つの方法で，把持運動 (把持力制御) という機能に付随する触覚情報処理のモデル化を目指す ．

## 1.5. 期待されるインパクト

本研究は，人が把持運動という機能を遂行する上で，どのような触覚情報が本質的に重要で，それを用いてどのように適切な把持力を実現しているのかをモデ

ル化する．本研究で得られる知見は，以下のように人の触覚情報処理を探求する時も，触覚技術の応用を考える時も大きなインパクトを与え得るものである．

### 1.5.1 心理/生理学におけるインパクト

指先接触面に発生する現象をモデル化することで，従来研究で提案されている運動/生理モデルと指先接触との関連を明確にすることが出来る．その結果，断片的な現象の記述でしかない個々の運動/生理モデルを，把持機能の実現という流れの中で，なぜ発生し，どのような意味を持つ現象であるのかを明確に意味付けすることができる．つまり，断片的な現象を積み上げることで(ボトムアップに)人というシステムを推定するのではなく，システムが機能を遂行する際に行う情報処理の概要が分かった上で個々の現象を解釈すれば良いため，それらが機能実現においてどのような意味を持つのかをより深く理解できるようになる．

このように，把持運動に伴う触覚情報処理モデルが構築できれば，人の触覚情報処理をより深く探求する際にトップダウンにアプローチすることができる．このため新たな知見の獲得が期待できる．

### 1.5.2 工学におけるインパクト

従来より行われているロボットハンド，触覚センサ，触覚ディスプレイの研究はそれぞれ，既存のセンサを用いて把持運動を行うにはどのような戦略をとれば良いか，開発したセンサが把持機能遂行の上でどのように使えるか，開発したディスプレイを使いどのような触感を生成することができるかを考えるものが多かった．つまりボトムアップなアプローチでの開発が多かったと言える．

一方，機能モデルが構築できれば，把持という機能を実現するために不可欠な触覚情報が明らかになる．つまり，工学において触覚センサ/ディスプレイを構築するときに，どのような情報を検出/呈示すれば良いのかを明確にすることができる．このため，そのような情報検出/呈示をどのような機構で実現すれば良いかを考えることが，この分野における主要な問題となる．

つまり，把持運動に伴う触覚情報処理モデルが構築することにより，ロボット

ハンドを用いた把持力制御だけでなく，把持運動に伴う触覚情報の検出/呈示という問題に対しても，トップダウンにアプローチできるようになる．

## 1.6. 本論文の構成

本論文は以下の 8 章より構成される．

第 1 章: 緒論 本研究の位置付け，目的，基本戦略そして触覚関連研究に与え得るインパクトを明確にした．

第 2 章: 把持機能モデル構築のための触覚解析法の意義 従来より数多く行われてきた触覚や触運動に関する研究を，触覚の伝達過程という観点から整理/分類し，各々の研究の位置付けを明確にする．そして，機能モデル構築におけるそれらの限界を指摘した上で，本章で提案したアプローチ，つまり弾性体接触理論に基づく指先接触のモデル化と，カメラを用いた指先接触面初期滑り計測の意味と特徴をより明確にする．

第 3 章: 弾性体接触理論に基づく固着率の提案 弾性体接触理論に基づく考察を行い，弾性球の接触面に発生する初期滑りと呼ばれる現象をモデル化する．また，初期滑りの発生量とそれに伴い変化する弾性内の応力場を計算するための手法を示す．そして，初期滑りの発生を代表するスカラパラメータとして固着率を提案する．

第 4 章: 固着率と把持/負荷力の同時計測装置の開発 本研究で掲げた問題に対する解法の要となる，固着率と把持/負荷力の同時計測装置の構成を説明しその性能を評価する．この章で構築する計測装置は，指先接触状態に着目した把持運動の解析を可能にするという意味で，新規/独創性に富む物である．

第 5 章: 指先接触面内で発生する初期滑り現象の検証 接線方向力を加えた指先に発生する現象と，同様の境界条件で弾性球モデルの接触面に発生する現象を比較し，指先の接触面に生じる現象が弾性体接触理論で良く説明でき

ることを示す．この章で得られる実験結果は，指先でも弾性体接触理論に基づく記述が適用できる（つまり 3 章で構築した指先接触モデルが妥当である）ことを意味する．

第 6 章: 歪みエネルギー密度に基づく固着率知覚可能性の検証 固着率の変化に伴う弾性体内の歪みエネルギー密度分布と，その速度分布の変化を計算し，固着率と等価な情報が弾性体内応力場の変化として検出し得ることを示す．人の触覚受容器が，皮膚内歪みエネルギー密度の変化に応じて応答することを考えると，この章で得られるシミュレーション結果は，指先の接触状態（固着率）の変化が触覚受容器で間接的に知覚可能であることを示唆する．

第 7 章: 指先固着率に基づく把持力制御仮説の提案と検証 ここまでの章で行った，実験/シミュレーション結果を総合し，指先固着率に基づく把持力制御仮説を提案する．そして，この仮説を検証するために開発した装置を用いる把持運動中の指先固着率計測実験を行う．その結果，装置の条件に関わらず，繰り返し試行を行ううちに固着率が同程度の値に落ち着くことが明らかになった．この実験結果は，提案する把持力制御仮説を強く支持する．

第 8 章: 結論 本論文を結ぶ．本研究を通して得られた知見を総括し，今後の展開/可能性を述べる．



# 第2章 把持機能モデル構築のための 触覚解析法の意義

## 2.1. 本章の趣旨

本章では、従来より行われてきた触覚/触運動関係の研究を、触覚の伝達過程という観点から整理/分類し、各々の研究の成果と位置付けを明確にする。また、触運動に伴う触覚情報処理をモデル化するにあたり、本質的に重要な情報を考察するとともに、従来研究が持つ限界を指摘する。そして、人の把持運動に伴う触覚情報処理をモデル化するための手法として1章で提案した、弾性体接触理論に基づく指先接触のモデル化と、カメラを用いた指先接触面初期滑り計測の意義を明確にする。

## 2.2. 触覚の伝達過程に基づく触覚関連研究の分類

人の手が、器用な操作を行うための運動器官として重要であることは言うまでもないが、その器用さは手の感覚器官としての側面に大きく依存する。つまり、手の機能はそれ自身もつ運動器官としての機能と、触覚が持つ感覚器官としての機能の密なカップリングの上に成り立つと言える。従来より、工学、医学、心理学、生理学などの様々な分野で触運動を対象とした研究が行なわれている。本節ではこれら従来研究を、触覚の伝達過程という観点より整理/分類する。ただし、ここでの触覚の伝達過程とは、次のような流れを指す。

弾性を有する人の指先が触運動により物体と接触すると、指先に反力が加わると同時にその近傍の皮膚が変形する。結果として指先は空間的広がりを持つ“面”で物体と接触することになる。そして、指先の

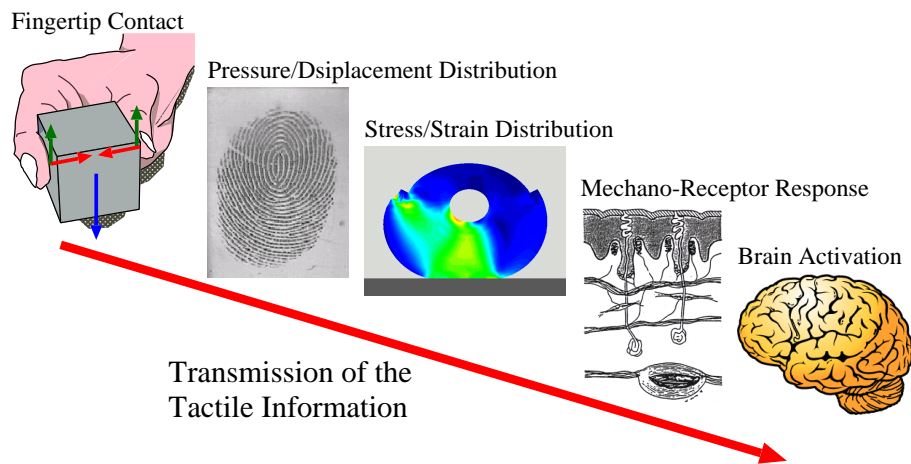


図 2.1 触覚の伝達過程

運動パターンの変化は接触面内の圧力分布（指先接触状態）に動的な変化をもたらす。

指先接触状態の動的な変化により，皮膚内の応力/歪み場も動的に変化する．人の触覚受容器は皮膚内に存在しており，その近傍の応力/歪み場の変化に応じて求心性神経インパルスを発射するため，この段階で指先接触状態が触覚情報として符号化される．そして，受容器で神経インパルスに変換された触覚情報は体性感覚野に入り，最終的に人はある種の触感を感じる．

図 2.1 は，このような触感伝達の過程を模式的に表すものであり，図中に描かれている項目は左より，触運動により指先に発生する力，指先接触面（指紋画像），指断面での皮膚内応力分布，触覚受容器の配置，人の脳を表す．

このような触感の伝達過程に基づき，ここでは従来研究を以下の 5 レベルに分類する．ただし，この分類は触感の伝達過程にのみ着目しているため，同一レベルに異なる分野の研究が混在していることに注意されたい．また，この分類を見るだけで，触覚や触運動に関する研究が様々なアプローチで行われていることが理解できる．

指先皮膚特性に着目した研究 バイオメカニクスにおける指先摩擦特性の計測，指先皮膚粘弾性特性の計測，指関節スティフネスの計測．ロボティクスにおける人の指と似たような動的特性を持つロボット指の開発．など．

手指の使用形態に着目した研究 リハビリテーション医学における手形状に基づく把持形態分類．ロボティクスにおける手形状計測装置の開発．など．

指先力に着目した研究 認知心理学における指先接触力（把持/負荷力）に着目した把持運動解析．ロボティクスにおける器用な把持運動実現のための把持/操り理論の構築．など．

触覚受容器に着目した研究 神経生理学における触覚受容器応答計測法の開発，触覚受容器応答特性の解明，客観的触覚知覚特性のモデル化．バイオメカニクスにおける主観的触覚知覚特性のモデル化．ロボティクス/VRにおける触覚センサ/ディスプレイの開発．など．

脳活動に着目した研究 脳神経科学における触運動中の脳活動の計測．など．

以下に，各レベルの具体的内容，それに伴い明らかになった知見，そして触運動の機能を理解することを考えたとき，そのようなアプローチの持つ限界を簡潔に説明する．

## 2.3. 指や関節の特性に着目した研究

はじめに，指先特性の計測に関する研究について概観する．このような研究はバイオメカニクスやロボティクス等の工学分野において行われており，双方とも人の指先特性の計測とその模倣が目的となっている．

### 2.3.1 バイオメカニクスとロボティクスにおけるアプローチ

外界と直接的に触れ合う指先皮膚や指関節の特性を調べることは，古くからバイオメカニクスにおける主要な研究テーマの一つであった．つまり，研究の対象

が把持運動でも、触感知覚でも外界との接点となる指先皮膚や指関節の特性を調べることが重要だったのである。

まずはじめに指先皮膚の摩擦特性に関する研究を説明する。金属であれば接触面積や法線方向力に関わらず、限界摩擦力を法線方向力で割った値、つまり摩擦係数がほぼ一定の値となることが知られている [16]。そして、この現象はクーロンの法則として、一般的な剛体接触のモデル化に広く用いられる。しかし、弾性体の接触ではこのような法則は成り立たない [17]。これは人の指先でも同様であり、実際指先に対する法線方向力が変化すると、接触面積が変化するため、みかけの摩擦係数も大幅に変化することが明らかになっている [18]。具体的には、接触力が小さいときは摩擦係数が大きく、接触力が大きくなるに従い急激に減少したのち、ほぼ一定の摩擦係数に落ち着く。そして、把持力が小さいときほどみかけの摩擦係数が大きいという人の指先の摩擦特性は、ロバストな把持運動の実現に不可欠であると考えられている [19]。

また、皮膚の材料特性に関しても詳細に調べられている。その結果、微小変形域では線形性を仮定しても差し支えない（つまり、弾性係数を定数と考えることができる）ものの、変形が大きくなるに従い材料的非線形性が無視できなくなることが明らかになっている [20, 21]。また、同様に微小変形を仮定すれば、皮膚を非圧縮と見なせる。つまりポワソン比をほぼ 0.5 と考えてよい。

一方ロボティクスにおいても、人の優れた把持の技量を真似るためには、人の指と似たような動的特性を持つロボット指を開発することが重要であるとの考えに基づき、指先の摩擦特性 [19]、指が様々な姿勢をとったときの指先（皮膚と関節を含む）スティフネス [22]、指先皮膚の接線方向のスティフネス [23] が詳細に解析されている。そして、人の指先と似たような動的特性を持つロボット指として、層状弾性体に覆われた剛体棒を基本構造とした指が試作されている [19]。このロボット指の構造を考えると、人の指先の材料/動的特性の決定要因として、骨や爪だけでなく、皮膚の層状構造が大きな役割を担っていることが推察される。

以上の研究の多くは、皮膚を一様な材質とみなし、全体としての等価な材料特性を計測したり、バネ-ダンパモデルを仮定した動的特性の同定を行っている。しかし、人の皮膚表面には指紋構造があり、皮膚内部には表皮、真皮、皮下組織と

いう層状構造を有している．そして，層間の境界も滑らかではなく，指紋パターンに対応した突起構造があることが知られている（図 6.2 に指先皮下組織の断面図が示されているので参照されたい）．

このような複雑な構造が皮膚の動的特性や触感知覚特性に影響を与えることは容易に想像できる．実際，皮下構造の影響を考慮するため，皮膚を層構造を有する弾性体でモデル化し横波の伝搬をモデル化した研究や [24]，皮下組織の構造が触覚知覚の感度に与える影響を有限要素法で検証した研究もある [25, 26, 27]．後者の解析では，指紋構造を有することにより指紋稜線ごとに局所的な応力集中が発生し，結果として受容器の感度向上に貢献するという知見を得ているが，これは人の触覚情報処理を考える上でも非常に興味深い．

また，指先接触の詳細な解析を行う上では，このような複雑な皮下構造の各部位の材料特性を個別に同定することが重要になる．先の研究では，鮮死体の指先断面に対し，押し込み量と反力を同時に計測することで各部位の材料特性を同定していたが [25]，これは一般的に行える手法でないだけでなく，*in vivo* での計測が出来ないという欠点がある．一方で，触診の機械化などの医療応用を目的として，体内に存在する臓器材料特性の非侵襲同定が様々な方法で試みられている．例えば，表面に強制変位を与えた弾性体に対し超音波や MRI を用い変位画像を撮像した上で，材料特性を数値的に再構成する方法 [28, 29]，表面に強制振動を与えた弾性体中を伝わる弾性波の波長を MRI で可視化し，その情報から材料特性を推定する方法も研究されている [30, 31]．現段階では，指先のような微小かつ複雑な構造に適用することは難しいが，皮下組織特性の非侵襲計測法としては極めて有効であると思われる．

本論文では以上のような指先特性に関するモデルを“材料モデル (Material Model)”と呼ぶ．このように，指先の摩擦特性や皮膚の材料特性を明らかにし，モデル化することは，指先接触をモデル化する上で極めて重要な基礎データとなる．しかし，指の材料モデルを明らかにするだけでは，触運動という人の機能を直接的に理解し，モデル化することはできない．

## 2.4. 手の使用形態に着目した研究

次に，把持運動における手の使用形態（手の形状）に着目した研究について説明する．このような研究は医学やロボティクスで行われており，前者ではリハビリテーションにおける手の機能評価のための使用形態の分類，後者では手形状計測装置の開発を目的としている．

### 2.4.1 リハビリテーション医学におけるアプローチ

リハビリテーション医学では古くから手の使用形態に着目した把持運動の分類が行われている．例えば Napier は，把持の形式を決めるのは物の形や大きさではなく，作業目的であると指摘した [32]．具体的には，把持を“握力把持 (Power Grip)”と“精密把持 (Precision Grip)”の 2 タイプに大別した．しかし，この分類法はすぐれた系統性を示しているが，大分類であるため具体性が十分でない．一方，より実用的な分類として実験的方法に基づく手形分類も行われている [33]．つまり，身の回りにある 100 種類の物品を被験者に把握してもらい，それを手形状という観点より 14 種類に分類している．

なお，本研究で計測の対象となる母指と示指を用いた把持運動は，前者の分類では精密把持，後者の分類では並列軽屈曲把持または指尖把持に分類される．いずれにしても，日常生活で頻出する手の使用形態の一つである．

このように，リハビリテーション医学では幾つかのアプローチで手形状分類が行われている．しかし，注目しているのが見かけの手形状だけであり，実際の運動中にどの程度の力を発生しているか，そしてその力がどのように制御されているかに関しては言及されていない．つまり，機能モデルの構築は行われていない．

### 2.4.2 ロボティクスにおけるアプローチ

先のリハビリテーション医学における研究では，手形状の計測にはスチルカメラを，接触領域の計測には事前に墨を塗付した物体表面から手に転写される墨領域を用いていた [33]．一方工学ではこのような実験手順を自動化し，さらに接触

面内圧力分布の計測もできるシステムが開発されている [34, 35, 36] . このシステムは , 手袋状の指関節角計測装置と圧力計測装置を装着しなければならないという欠点があるものの , 人の作業分類には効果的なツールとなる .

## 2.5. 指先接触力に着目した研究

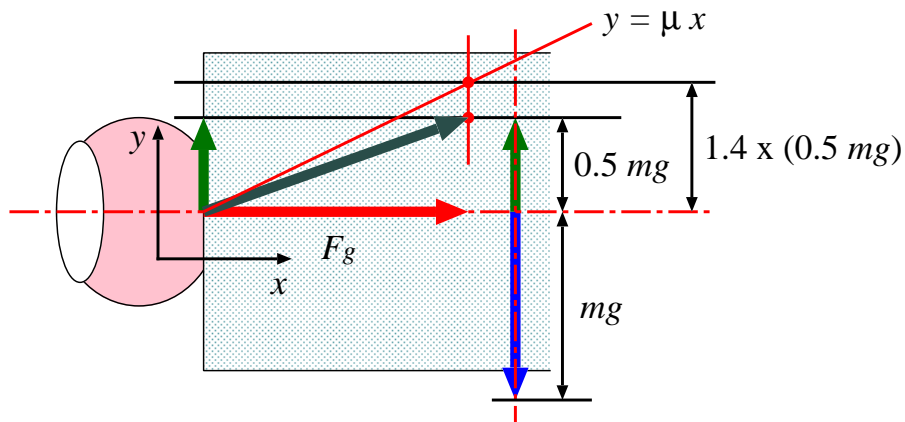
指先接触力に着目した研究は大きく 2 つに分類することができる . 一つは , 心理学における指先接触力 (把持/負荷力) に着目した把持運動解析であり , もう一方はロボティクスにおける , 器用な把持/操りのための指先接触力プランニングに関する研究である . また , 前者が人の把持運動のモデル化を目的としているのに対し , 後者は様々な局面で物体を操ることができるロボットハンドの実用化を目指している .

### 2.5.1 認知心理学におけるアプローチ

心理学では様々な実験条件における把持/負荷力の計測に基づく , 把持運動解析が行われている .

例えば , Johansson の研究グループでは , 様々な質量/摩擦条件下で把持運動を行う際の把持力と負荷力の関係を詳細に調べられており , 人の把持力が物体を持ち上げるのに必要な最低限の力の 1.2 ~ 1.4 倍程度の安全率を持つという興味深い結果を得ている [5, 6] . つまり , 把持力は物体に関わらずほぼ一定の安全率を持つことになる . そして , このような適切な把持力制御を行うためには , 触覚情報が不可欠であり , 特に指先接触面に生じる滑り情報が重要であることが示唆されている [9] . また , 把持/負荷力と同時に触覚受容器の応答を計測した結果 , 各々の触覚受容器 (詳しくは 2.6.1 節で説明する) はその応答特性に応じて把持運動の特定のフェーズでのみ求心性神経インパルスを発射することが明らかになっている [37] .

これら一連の知見は , 触覚情報 , 特に指先接触面に生じる滑りが把持力制御に不可欠であり , 結果として人は適切な把持力を発生することができるようになる



Grip Force Control in Human [Johansson1984]

図 2.2 人の把持力制御の特徴

ことを示唆する。また，図 2.2 に人が発生する把持力の特徴を模式的に表す。ただし，図中で物体は 2 本の対向する指に摘み上げられており（図中には左半分しか描かれていない），その物体の質量を  $m$ ，重力加速度を  $g$  としたときの  $mg$  と把持力  $F_g$  との関係が図示されている。人は摩擦係数  $\mu$  や  $mg$  が未知であったとしても，把持力  $F_g$  を適切に制御できるが，これは人の触覚情報処理能力の高さを示唆する。

以上の研究では，本研究でモデル化する母指と示指を用いた摘み運動を対象とし，指先力に着目した運動解析を行っている。一方，より一般的な把持運動を扱った研究もある。例えば，指先トルク（把持力まわりのモーメント）の変化に対する把持力制御や [38]，母指，示指，中指の 3 本の指を用いた摘み上げタスクにおける把持力と負荷力の関係 [39, 40] を論じた研究もある。そして，いずれの場合も単純な摘み上げタスクと同様に，把持力とトルク，または把持力と負荷力の間には密なカップリングが存在することが明らかになっている。

また，把持力制御とは異なるが，指先力に着目し対象物の固さ知覚特性を解析した研究や [41]，把持物体の外観の変化に対する手形状の変化，そしてそれに伴う把持力の変化を扱った研究 [42]，形状の変化に起因する重さ知覚の錯覚につい



て扱った研究 [43]，あらかの異なる物体に対しなぞり運動を行う時の指先力の特徴を調べた研究 [44] もある．

本論文ではこのような指先力に着目した把持力のモデルを“運動モデル (Motion Model)”と呼ぶ．このように，人が発生する指先力の特徴を知ることは触運動をモデル化する上で極めて重要な知見である．実際，以上の研究により人が物体に応じて適切に把持力を制御していることが明らかになり，またこのような把持力制御を行うには触覚情報が不可欠であることが示唆されている．しかし，指先力という断片的な情報しか計測されておらず，実際に触覚情報をどのように利用して適切な把持力を実現しているのかはモデル化されていない．つまり，指先力に着目した運動モデルは提案されているものの，触覚情報処理の具体的メカニズムに踏み込んだ機能モデルは構築されていない．

## 2.5.2 ロボティクスにおけるアプローチ

心理学のように人を直接調べるというアプローチとは一線を画すが，ロボティクスではロボットハンド [45, 46]，把持戦略 [10, 11, 47, 48] や触覚センサ [12, 49] に関する研究が盛んに行われている．しかし，提案されている把持力制御アルゴリズムは，人のそれとは大きく異なる．

基本的に，ロボットハンドは剛体で構成されており，その指先には 6 軸力センサが設置されている．つまり，指先の接触力を検出することができる．また，ロボットハンドの把持戦略は，指と物体とが点接触することを前提としているものが多い．

ここで，指先が加える法線方向の力を  $F_g$ ，指先と接触面との間の摩擦係数を  $\mu$  とすると，滑りを発生させない指先力の存在可能領域は，図 2.3-(a) のように，接触点を頂点とした円錐内に限定される．つまり，図 2.3-(b) のように，指先力が円錐内に存在していれば，接線方向力が限界摩擦力より小さくなるため，指先に滑りは生じない．一方，図 2.3-(c) のように，指先力が円錐外に出ると，接線方向力が限界摩擦力より大きくなるため，指先に滑りが生じる．この円錐は“摩擦円錐 (Friction Cone)”と呼ばれ，ロボットハンドで指先力プランニングをするための重要な概念となっている．

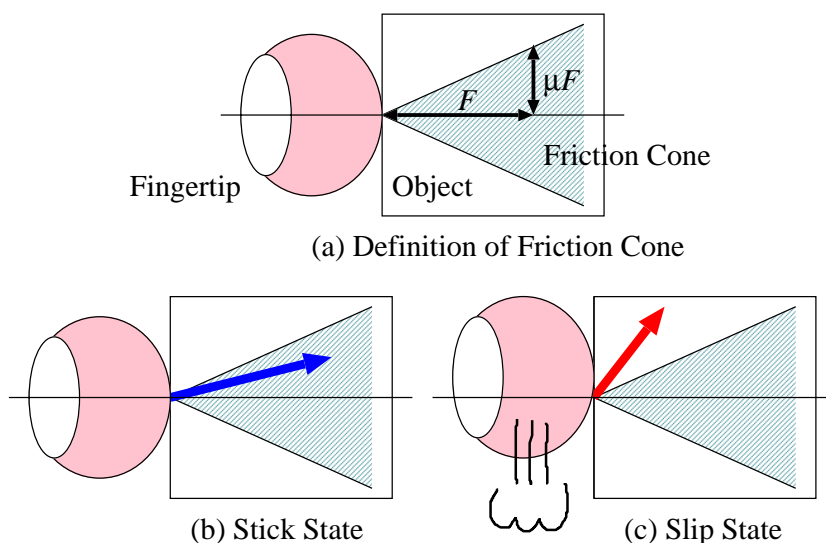


図 2.3 摩擦円錐の概念

そもそも，指先で発生できる力には上限があるため，摩擦円錐は閉じた空間となる．そして，この範囲内に存在し，ある評価基準を満たす指先力を求めることが，最適把持力のプランニングとなる．ここで，代表的な 2 つの手法を例に，具体的プランニング法を説明する．一つは，物体保持力を発生させるのに必要な指先力の集合内で，摩擦円錐の境界から最も遠い点を最適把持力とする方法 [10] であり，もう一つは，先の指先力集合の中で安全率を見積もった摩擦円錐に最も近い点を最適把持力とする方法 [11] である．各々の把持力計画法の模式図を図 2.4-(a)，(b) に示す．ただし，図中で物体は 2 本の対向する指に摘み上げられており（先の例と同様に図中には左半分しか描かれていない），その物体の質量を  $m$ ，重力加速度を  $g$  としたときの  $mg$  と把持力  $F_g$  の関係が図示されている．図 2.2 に示した人の把持力の特徴と比べると，その計画法には大きな違いがあることが理解できる．また，このような方法で最適把持力を計算するためには，物体の質量  $m$  と表面摩擦係数  $\mu$  の正確な検出が不可欠となる．この点でもロボットの把持戦略は人のそれとは大きく異なることが予想される．

このように最適把持力計算のためには摩擦係数の検出が不可欠であるが，その

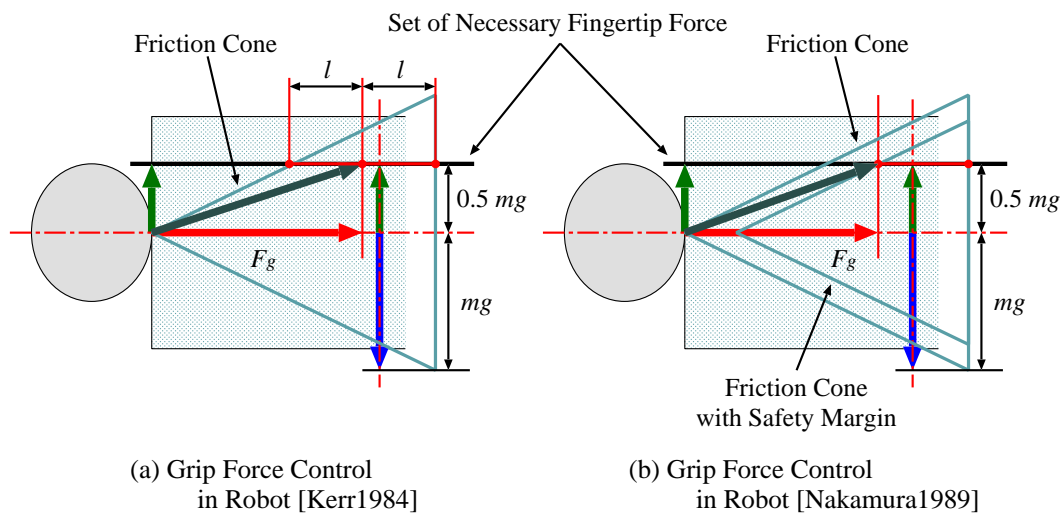


図 2.4 ロボットの把持力制御の特徴

方法として物体の滑りを利用したオンライン推定法が提案されている [50] . しかし, 安定な把持を実現するために不安定な滑りを故意に発生させなければならないという自己矛盾を含んでおり, 一般的な方法とはなっていない. 以上で説明した点接触を仮定したロボットハンドの把持/操りの理論は [51, 52, 53] が詳しい.

また, 最近ではロボットハンドの指先力制御においても, 人の特徴に学ぶというアプローチが試みられている. 具体的には, 人の皮膚のように弾性を有するロボット指を用いた制御理論の構築に関する研究 [54] や, 人の物体操作中の指先力を計測し, それをロボットハンドの指先力制御に適用するという研究もある [55] .

以上, ロボティクスでは剛体接触理論に基づく把持力制御法が開発されている. しかし, ロボットハンドの把持制御法は人のそれとは大きく異なる. これは, ロボット工学の目的が人の機能を模倣することであるにも関わらず, ロボットハンド研究においては機構の模倣が先行したこと (つまり, 人の手と同じような小型多リンク機構を用い, 把持/操りを行うというアプローチが先行した), そしてロボットハンドに搭載できるセンサの機能に制約があったことが理由として挙げられる. しかし, 機能モデルを提案することで適切な把持力制御に不可欠な触覚情報が明らかになれば, そのような情報を検出可能な触覚センサの開発, それを用

いた把持力制御戦略の構築といったように，従来とはアプローチの異なる展開が期待できる．

## 2.6. 触覚受容器に着目した研究

触覚受容器に着目した研究は大きく 3 つに分類することができる．具体的には，神経生理学における客観的触覚知覚特性のモデル化，バイオメカニクスにおける主観的触覚知覚特性のモデル化，そして工学における触覚検出/呈示装置の開発である．

### 2.6.1 神経生理学におけるアプローチ

Hagbarth らは，微小電極を用いて，人の触覚受容器からの求心性神経インパルスを記録する方法（微小神経電図 (Microneurography)）を開発した [56, 57]．その後この方法を用いた単一神経繊維発射の解析が盛んに行われるようになり，人の触覚受容器の特性が明らかになった．

特に手掌部について詳しく調べられているが，その結果，人の指先無毛部における機械受容単位は，皮膚に加えられた機械的刺激に対する応答特性と，皮膚上での受容野の形態より以下の 4 種類に分類できることが明らかになっている [58, 59]

速順応 I 型 (FA I : Fast Adapting Type I) 皮膚に加えられた機械的押し込みの速度成分に対応した応答，受容野は直径数ミリメートルで境界は鮮明

速順応 II 型 (FA II : Fast Adapting Type II) 皮膚に加えられた機械的押し込みの加速度成分/振動に対応した応答，受容野は大きく境界は不鮮明

遅順応 I 型 (SA I : Slowly Adapting Type I) 皮膚に加えられた機械的押し込みの速度 + 変位成分に対応した応答，受容野は直径数ミリメートルで境界は鮮明

遅順応 II 型 (SA II : Slowly Adapting Type II) 皮膚に加えられた機械的押し込みの変位成分に対応した応答，受容野は大きく境界は不鮮明

そして，それぞれ解剖学的には FA I がマイスナー小体，FA II がパチニ小体，SA I がメルケル盤，SA II がルフィニ終末に対応すると言われている [60, 7] .

このように，個々の受容器の特性が明らかになると，次はこれら触覚受容器で高次の接触情報がどのように符号化されているかを調べるのが研究の中心となる．具体的には，指先に接触する物体の形状 [61, 62, 63, 64]，軟らかさ [65]，表面で発生する滑り [66] の変化が，触覚受容器の応答に与える影響が詳細に調べられている．

また同時に，触覚受容器の応答特性をより詳細にモデル化するため，皮膚内の材料力学的指標と受容器の応答の関連を調べるという研究も行われている．例えば，指先に楕状剛体が接触したときの，メルケル盤の発火頻度分布が計測されているが [8]，それが皮膚内の歪み分布 [67] や，歪みエネルギー密度分布 [68, 69] と極めて高い相関を持つことが報告されている．つまり，SA I 受容器は変形により蓄えられるエネルギーに比例した神経インパルスを発射するとモデル化することができる．

以上の研究の多くは，固定された指先に対し様々な物体を押し付けるという手順で行われている．しかし，実際に指先が外界と接触するときは，人が能動的に指を動かすことの方が多い．このような受動的な接触と能動的な接触が人の触感知覚に与える影響も調べられており，能動的に指を動かした方が細かい情報を知覚可能であることが示されている [70, 71, 44, 72] . この実験結果は，人の触感知覚には自己受容感覚 (Proprioception) も重要な意味を持つことを示唆する．

以上，微小神経電図についての解説記事としては，[73, 74, 75] が詳しい．特に [74] では，皮膚感覚を中心とした解説が行われている．一方，受容器の特性についての解説記事は [76, 77] が詳しい．

本論文では以上のように触覚受容器に着目したモデルを“生理モデル (Neural Model)”と呼ぶ．このように受容器の応答特性を知ることは触運動をモデル化する上で極めて重要である．実際，これら生理学的研究の成果として人の触覚受容器の分布や特性が明らかになっている．しかし，このような研究における実験設

定の多くは，固定された指先に対して様々な物体を押し付けるというものであり，実際に人が行う触運動とは異なるものが多い．このため，生理モデルから直接的に人の機能モデルを導出することは困難である．

## 2.6.2 バイオメカニクスにおけるアプローチ

生理学的研究では，接触情報が触覚受容器の応答とどのように結び付くかという客観的な接触知覚を取り扱っていたのに対し，心理学やバイオメカニクスにおいては，人がある種の接触情報をどの程度知覚できるかという，主観的な触覚知覚が調べられている．

有名な研究としては，Weinstein による二点弁別閾の研究がある [78]．この研究では，体の様々な部位における二点弁別閾が調べられており，指先が最も狭いことが明らかになっている．また，刺激の定位能に関しても調べられているが，これも同様に指先が最も優れると言われている．これは，触覚受容器の分布が最も密な場所が指先であることを考えると，妥当な結果である．

また，指先における振動知覚特性を扱った研究 [79]，方向知覚特性を扱った研究 [80, 81]，テクスチャのある表面知覚特性を扱った研究 [82] もある．さらに，本研究では対象外としたが，人の痛覚受容特性を弾性体力学を用いた皮膚変形シミュレーションに基づきモデル化した研究もある [83, 84]．

このような研究により，人の主観的な触覚知覚特性がモデル化されている．しかし，生理学的実験と同様に，固定された指先に対して様々な物体を押し付けるという実験設定が多く，直接的に機能モデルと結び付けることは難しい．

## 2.6.3 ロボティクス/VR におけるアプローチ

ロボティクス/VR では，様々な接触状態を検出するための触覚センサ，人の触覚受容器を刺激し仮想的な触感を生起させるための触覚ディスプレイに関する研究が盛んに行われている．

触覚センサの研究においては，皮膚のように弾性を有する構造に対する関心が高まっている．研究の初期においては，既存のセンサ表面に弾性体のカバーをつ

けるという単純な方法でそのようなセンサが開発されていた。しかし，弾性体カバーをつけることにより，センサの感度に悪影響を及ぼす（弾性体のローパスフィルタ特性により感度が低下する）ことも報告されている [85]。つまり，弾性は環境や人と柔軟に触れ合うためには重要であるが，それ自身が感度の低下を引き起こすため，積極的な導入理由には成り得なかった。

しかし，最近では弾性体内の応力場変化そのものを検出することで，弾性が持つ特徴を最大限に生かすことができる触覚センサも開発されている。例えば，弾性体内の微小な空洞に超音波を送信し，外力による空洞変形に起因する共鳴周波数の変化を検出することで，空洞近傍の主応力を計測するセンサや [86, 87, 88, 89]，弾性体表面の局所的な滑りの発生による応力場の変化を，弾性体内に複数埋め込まれた歪みゲージで検出するセンサ [90, 91] が開発されている。また，前者は摩擦係数 [92] や滑り余裕 [93] の検出，分布型センサへの拡張 [94] といった応用が行われているのに対し，後者はロボットハンドを用いた把持力制御 [95] への応用が行われている。以上のセンサは，人の触覚受容器のように弾性体内応力場の変化を検出するという意味で，人の把持力制御機構を考える上でも示唆に富む。

また，このようなアプローチとは異なるが，振動により初期滑り/滑りを検出するセンサ [96, 97, 98] や，指先に描画したドットを指の内側に固定したカメラから計測することで指先接触面に発生する滑りや変形を計測できるセンサ [99] も開発されている。

一方，触覚ディスプレイの研究の初期においては，ピンアレイを用いた形状呈示 [100] や，振動呈示 [101] が研究の中心であった。また，接触面に様々な刺激を与えることで，触感を呈示する手法も研究されている。具体的には，接触面に振動モードの異なる弾性振動波を与えることで触感を変化させる方法 [102] や，接触面における圧力分布を空気圧を用い変化させることで触感を変化させる方法 [103] などが提案されている。また，市販の力覚ディスプレイを用い，対象物体の摩擦特性を力覚を通じて疑似的に呈示するという試みも行われている [104, 105]。しかし，以上の手法はアプリケーションに特化した呈示法であり，一般的な触覚ディスプレイとはなり得ない。

一方，最近では受容器を選択的に刺激するというアプローチで，呈示すべき触

感に依存しない一般的な触覚ディスプレイに関する研究も行われている．具体的には，皮膚表面の振動モードを変化させることで各受容器を選択的に刺激する方法 [106] や，皮膚表面に境界条件の異なる振動を与えることにより深さ方向に異なる受容器を刺激する方法 [13] そして，電気刺激パターンを変化させることにより，各受容器を選択的に刺激する方法 [14] が考案されている．以上の方法は，原理的には任意の触感を生起し得るという意味で，極めて汎用性の高いアプローチであると言える．

以上のように，工学では触感を検出/呈示するための様々な手法が考案されている．しかし，その多くは特定のアプリケーションでしか使えないアドホックな検出/呈示法である．一方近年では，皮膚弾性に着目した触覚センサや，受容器を選択的に刺激することで汎用的に使える触覚ディスプレイの研究も行われている．しかし，ある機能を実現するための触覚センサを構築するためには，その機能を実現するために不可欠な触覚情報が明らかにならねばならず，汎用的に触感を呈示するためには接触面における境界条件または触覚受容器応答分布と触感との対応を明確する必要がある．つまり，触覚情報処理の機能モデルは弾性に着目した触覚センサや汎用的な触覚ディスプレイの実現のためにも不可欠なモデルとなる．

## 2.7. 脳活動に着目した研究

近年，fMRI を用いた脳機能解析が盛んに行われている．この手法の利点は脳活動を非侵襲に計測出来る点にあるが，当然触運動を議論する上でも有効な手法となる．

たとえば，指の運動 [107]，把持形態の変化 [108] に対する脳の活動部位の変化が計測されている．また，触覚に関しては，触覚に電気刺激を与えた時の [109] 脳活動や，指同士が触れ合ったときの脳活動が計測されている [110] ．



## 2.8. 把持機能モデル構築のための触覚解析法の意義

### 2.8.1 従来研究の問題点

バイオメカニクスや心理/生理学では、様々なアプローチで触覚や触運動に関する研究が行なわれている。しかし、いずれも皮膚の材料特性の同定、触運動中の指先力の計測や、単純な刺激に対する触覚受容器応答特性のモデル化といったように、断片的な触覚情報だけを計測していたり、日常生活での触覚の使用形態とは異なる刺激を与えていた研究が多い。当然、このような知見は人を様々なレベルで特徴付けるという意味で、重要な材料/行動/生理モデルとなる。しかし、基礎理論とリンクさせて触運動の機能モデルを構築するには至らない。

このように、人の触運動に伴う機能モデルが未だ構築されていないため、工学応用を具現化する際に本質的に重要な触覚情報も明確にならない。ただし、工学では既に力センサを備えたロボットハンドで把持/操りを行うための研究や、限定された触感を検出/呈示するための触覚センサ/ディスプレイに関する研究が行なわれている。しかし、前者は人の機能ではなく機構を模倣することに重点が置かれ、またセンサの制約も大きいため実用的に使えるとは言い難い。また、後者の多くは論理的検出/呈示指針を持たず、アドホックなアプローチを取るものが多い。

また、以上に列挙した従来研究の多くは互いに独立した分野の研究として、個別に行われていた。

### 2.8.2 機能モデル構築のための触覚解析法の位置付け

本研究の位置付けを図 2.5 に示す。従来研究では触運動に関する“材料モデル”、“運動モデル”そして“生理モデル”が構築されており、また触運動の工学応用も盛んに行われている。しかし、これらは分野の異なる研究の中で個別に提案されたものである。つまり、図 2.5 の Present Status のように、現在の触運動に関するモデルやその工学応用は独立して存在する。

一方、触運動に関する“機能モデル”を構築するためには、物理現象を記述す

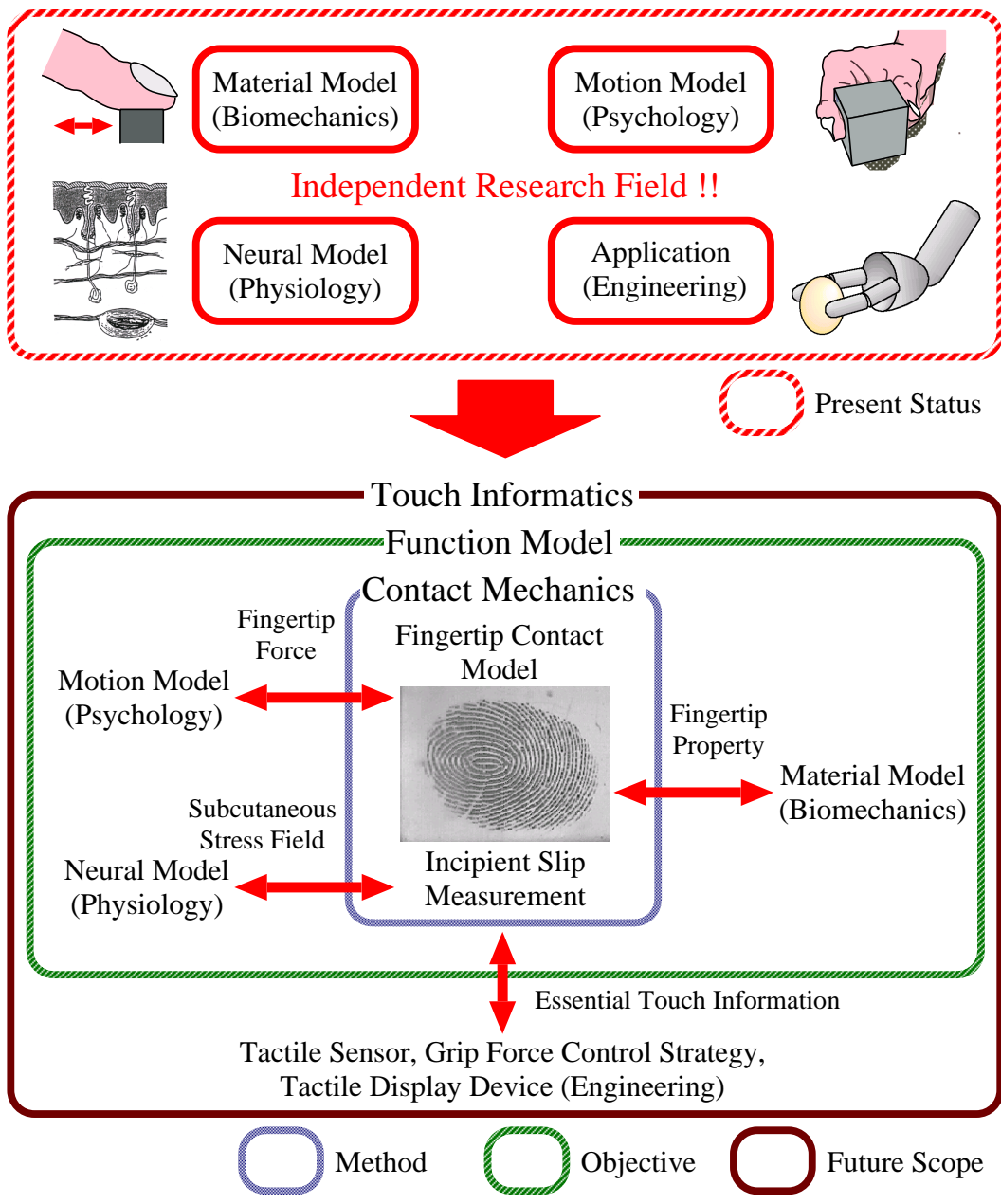


図 2.5 触覚関連研究における本研究の位置付け

るための基礎理論と、実験的に示される材料/運動/生理モデルを統合する必要がある。この問題に対し、本研究では材料モデルと弾性体接触理論を用い指先の接触をモデル化し、運動/生理モデルと指先変形との関係を数学的に記述することを試みる。この方法は、指先接触モデルと従来モデル（材料、運動、生理モデル）との間に以下の 3 つの関わりが存在するため妥当となる。

- 指先接触をモデル化するためには指先の材料特性、つまり材料モデルが不可欠である。
- 指先接触面内の圧力の総和が指先力であるため、運動モデルとの関連が明確になる。
- 指先接触面の圧力分布に起因して皮膚内に生じる応力場の変化が、触覚受容器応答に相当する情報となるため、生理モデルとの関連が明確になる。

そして、運動/生理モデルの特徴を鑑み触運動に伴う触覚情報処理の機能モデルを提案した上で、その妥当性を触運動中に発生する初期滑りの計測で検証する。この検証方法は以下の 2 点において妥当性を主張できる。

- 剛体と接触する弾性体に接線方向力が加わる時は、接線方向の境界条件の変化が支配的となる。つまり、初期滑りに着目すれば、指先接触面における境界条件の変化と等価な情報が計測できる。
- 触覚情報は、指先接触面における境界条件変化に起因する皮膚内応力場の時空間的变化として触覚受容器に伝達される。つまり、接触面の境界条件の変化（初期滑りの発生）は、触覚入力と等価な情報と考えることができる。

また、問題を把持運動解析に絞ったとしても、この検証方法は以下の 2 点において妥当性を主張できるものである。

- 指先接触に生じる局所的な滑りが人の把持力制御と密接な関係を持つことが既に示唆されている [9]。

- 把持の目的は物体を滑らせないことである．このため，接触面内に発生する局所的滑りが，把持という機能と密接な関係を持つことは容易に想像できる．

つまり，本研究は図 2.5 の Method のように指先接触のモデル化と計測という 2 つの方法で，図 2.5 の Objective のように触運動の機能モデルを提案することを目的とする．そして，この研究を行うことで，従来独立して存在していた材料，運動，生理モデルが包括的に統合される．

また，提案される機能モデルは，工学応用を考える上でも極めて重要である．つまり，触運動を検出/呈示するための触覚センサ/ディスプレイを構築する際，どのような触覚情報が本質的に重要であるのかを明確にすることが出来るため，センサ/ディスプレイ構築の問題をトップダウンに扱うことができる．

つまり本研究を行うことで，従来独立性の強かったバイオメカニクス，心理学，生理学，工学分野の研究を，触運動の機能レベル探求という観点から一つにまとめることが出来る．そして，触覚情報処理に対するこのような学際的アプローチを“触情報学 (Touch Informatics)”と呼ぶ．つまり，図 2.5 の Future Scope が本研究が目指す究極的な将来展開である．

### 2.8.3 機能モデル構築のための触覚解析法の特徴

最後に，本研究で提案するアプローチの触覚計測法としての利点を述べる．表 2.1 に，2.2 節に示した触覚関連研究のうち，特に本研究と関連が深いものと本研究で提案するアプローチとの関係，そして各々のアプローチで行われていた計測手法の特徴をまとめる．本研究では指先接触面や皮膚内応力分布に着目するため，“指先の接触”と“触覚受容器の応答”の間に位置する(表中の枠内)．また，“侵襲性”はモデル構築のために行う計測の侵襲性を，“対象”は計測対象となる指標が時空間的に変化する触覚情報のうち，どちらの軸に沿う情報であるのかを表す．

バイオメカニクスにおける材料モデルは，指先力や指先変形の計測により構築されるため，計測は非侵襲である．しかし，構築されるのが皮膚材料特性に関す

表 2.1 解析手法に関する従来研究との比較

現象	分野	モデル	侵襲性	対象
指先の特性	バイオメカニクス	材料モデル	非侵襲	—
指先の接触	心理学	運動モデル	非侵襲	時間
接触面内の圧力分布 皮膚内の応力分布	触情報学	機能モデル	非侵襲	時空間
触覚受容器の応答	生理学	生理モデル	侵襲	時間
体性感覚野の活性化	脳科学	生理モデル	非侵襲	空間

るモデルであるため、対象はどちらでもない。心理学における運動モデルは、力センサを用いた指先力の計測に基づき構築されるため計測は非侵襲であり、同様の理由で計測対象は時間変化となる。生理学における生理モデルは、神経繊維に微小な針を指すことで神経インパルスを計測する微小神経電図に基づき構築されるため計測は侵襲となる。また、同時に計測できるのが幾つかの受容器応答でしかないため、対象はやはり時間変化となる。最後に脳科学における生理モデルは、fMRI 等を用いるため計測は非侵襲となる。しかし、時間軸方向には十分な解像度が得られるとは言えず、対象は空間変化のみとなる。

一方、本研究で提案する計測手法は CCD カメラを用いた微小な滑りの計測である。つまり、触覚と等価な情報を非侵襲に、かつその時空間的变化を計測することができる。これは、従来の手法にはない大きな特徴である。触覚の本質が、指先接触面に加わる負荷の時空間変化であることを考えると、それと等価な情報の時空間変化を非侵襲に計測できる点は特筆に値する。

## 2.9. 本章の結論

本章では、従来より数多く行われてきた把持運動関係の研究を、触覚の伝達過程という観点から整理/分類し、各々の研究の成果と位置付けを明確にした。また、把持運動に伴う触覚情報処理をモデル化するにあたり、従来研究が持つ限界

を指摘するとともに，それを行う上で本質的に重要な現象を考察した．そして，人の把持運動に伴う触覚情報処理をモデル化するための方法として1章で提案した，弾性体接触理論に基づく指先接触のモデル化と，カメラを用いた指先接触面計測の意義と従来研究の中での位置付けを明確にし，それが従来知見を包括的に扱うための基盤と成り得ることを示した．

# 第3章 弾性体接触理論に基づく 固着率の提案

## 3.1. 本章の趣旨

本章では，論文を通して行われる一連の議論を理解する上で不可欠となる，弾性体接触の特性とその力学について説明する．

まず初めに，弾性球が任意の力で剛体平板に押しつけられるときに，弾性体と平板の接触領域内に発生する圧力分布を，弾性体接触理論に基づきモデル化する．弾性体の接触では，“初期滑り (Incipient Slip)” と呼ばれる剛体接触には見られない特有の現象が発生することが知られているが，ここで提案するモデルは，これを考慮したものになっている．

次に，モデル化された圧力分布を用い，任意の接触条件下で接触領域に生じる初期滑り量と，弾性球内部に生じる応力/歪み場の計算法を示す．先にモデル化された圧力分布は法線/接線方向共に，放物面状圧力の線形和として表される．また，半無限弾性体表面に放物面状圧力分布が加わったときの弾性体表面変形や，弾性体内の応力場は解析的に求められている．ここで提案する計算法は，表面変形量と弾性体内の応力場に関する解析解を，圧力分布に応じて適切に重ね合わせることで実現される．また，この計算法の妥当性は，初期滑り量に関しては境界条件との比較を行うことで，応力/歪み場に関しては，数値的に計算された弾性体内応力場と比較することで示される．

最後に，弾性体接触状態を代表するパラメータとして“固着率 (Stick Ratio)” を提案する．これは，接触領域に対する固着領域 (初期滑りが生じていない領域) の割り合いとして定義される．そして，弾性体の滑りに対する余裕 (滑り余裕) を一般的に表す指標となる．つまり，等しい固着率を持つ弾性体は，接触力や接触

面摩擦係数に関わらず，等しい滑り余裕を持つことが保証される．把持運動の究極的な目的が，物体を滑らせず，かつ破壊しないように把持力を適切に制御することであることを考えると，把持運動中の滑り余裕の変化を知ることは，人の把持機能をモデル化する上で極めて示唆に富むと考えられる．

## 3.2. モデル化の前提条件

本研究では，親指と示指を用いた単純な摘み運動を計測/解析の対象とする．人の指は，爪や骨を含む複雑な構造を有するが，本章で提案する指先接触モデルでは議論を簡単にするため，弾性球の剛体平板に対する接触を前提とする．また，人の指先の摩擦係数が法線方向力に依存することは前述したが，本研究で計測の対象となる法線方向力はそれが安定する範囲に存在するため，摩擦係数は一定であるものと仮定する．

解析に用いる弾性球モデルを図 3.1 に示す．図中のベクトルのように，“把持力 (Grip Force)” は物体表面に対し垂直方向に加えらるる摘み力であり，“負荷力 (Load Force)” は物体を持ち上げるために働く重力と反対方向の力である．このモデルでは， $x, y$  軸で張られる平面が剛体平板であり， $z$  軸は内向き（つまり，平板から弾性体に向かう方向）垂線方向となるよう定義されている．ただし，原点は弾性球と剛体平板が最初に接触する点にあるものとする．つまり， $z$  軸は球の中心を通ることになる．また，把持力は  $-z$  軸方向の力，負荷力は  $x$  軸方向の力と定義される．本論文を通して，把持力は  $F_g$ ，負荷力は  $F_l$  と表される．同様に，指と物体との間の摩擦係数，弾性体の半径，縦弾性係数，横弾性係数，ポワソン比はそれぞれ， $\mu, R, E, G, \nu$  とする．なお， $E, G, \nu$  は相互に独立なパラメータではないが，これらの従属関係については付録 A で説明する．一方，接触領域において，負荷力方向の端点近傍を“接触開始端 (Contact Beginning Edge)”，それと反対方向の端を“接触終了端 (Contact Ending Edge)” と呼ぶ．

先に定義された負荷力は，指と把持物体との間の摩擦により発生する持ち上げ力であり，本研究では対向する 2 本の指による摘み動作を前提とするため，物体の質量を  $m$ ，重力加速度を  $g$  とすると，把持物体が静止，または等速運動をし



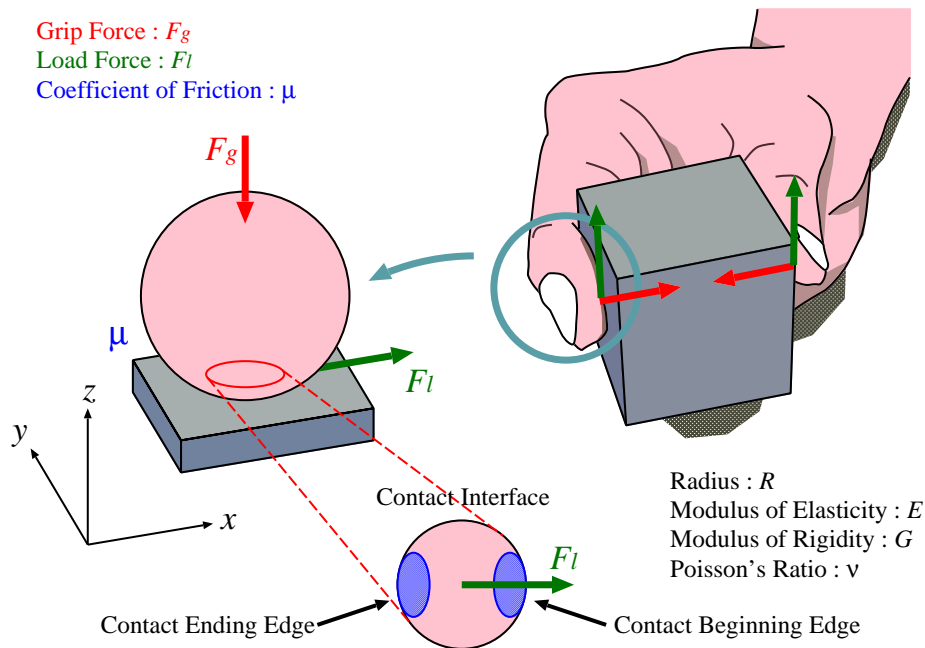


図 3.1 接触解析に用いる弾性球モデル

ているときの負荷力は常に式 (3.1) を満たす .

$$F_l = \frac{mg}{2} \quad (3.1)$$

ここで , 滑らせることなく安定に物体を把持するためには , 把持力と負荷力の間に常に式 (3.2) が常に成り立たなければならない . また , 以下の議論ではこの式の左辺を把持力の安全率と呼ぶが , この定義は自明であろう .

$$\frac{\mu F_g}{F_l} > 1 \quad (3.2)$$

詳しくは 7 章で述べるが , 人が把持運動を行うときはこの値が 1.2 ~ 1.4 程度の値となることが知られている [5] . つまり , 人はどのような物体を把持する時も , ほぼ一定の安全率を持つ適切な把持力を発生していると言える . また , 本章で行う解析は式 (3.2) が成り立つ場合のみを考える . つまり , 指と物体との間に相対的な変位が発生しない状況だけが議論の対象となる .

### 3.3. 接触面内圧力分布のモデル化

本節では，弾性体が任意の接触力で剛体平板に押しつけられた時に，接触面内に発生する圧力分布を弾性体接触理論に基づきモデル化する．3.3.1 節では，Hertz の理論に基づき法線方向圧力分布をモデル化する．3.3.2 節では，法線方向圧力分布を考慮し初期滑り現象の定性的な説明を試みる．3.3.3 節では，Cattaneo の理論に基づき接線方向圧力分布をモデル化する．

#### 3.3.1 Hertz 理論に基づく法線方向圧力分布のモデル化

はじめに，接触領域内での法線方向圧力分布を考える．弾性球の変形が球自身の大きさに比べて十分微小である状況では，法線方向圧力分布として Hertz の理論 [111] が適用できる．この理論によると，弾性球の接触領域は円形となる．ここで，把持力を  $F_g$  とすると，そのときの接触半径  $r_c$  は式 (3.3) で表される．

$$r_c = \left( \frac{3}{4} F_g R \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right) \right)^{1/3} \quad (3.3)$$

一方，接触領域内の圧力分布  $f_g$  は式 (3.4) で表される．ただし，半径  $R$ ，縦弾性係数  $E$ ，ポワソン比  $\nu$  が定数であるとする．式 (3.3) より把持力  $F_g$  と接触半径  $r_c$  は従属となるが，3.3.3 節における表記を簡単にするため，以下では弾性体表面圧力/変位と弾性体内応力を  $F_g$ ， $r_c$  そして位置  $(x, y)$  (応力の場合は  $(x, y, z)$ ) の関数とする．

$$f_g(F_g, r_c, x, y) = \frac{3}{2} \frac{F_g}{\pi r_c^2} \left( 1 - \frac{x^2}{r_c^2} - \frac{y^2}{r_c^2} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

式 (3.4) より接触領域内の圧力が，中心で最大 ( $f_0 = 3F_g/2\pi r_c^2$ ) となる放物面状に分布することが理解できる．また， $F_g = 2\pi/3$ ， $r_c = 1$  であるとき (つまり， $f_g = (1 - x^2 - y^2)^{1/2}$ ) の圧力分布を図 3.2 に示す．

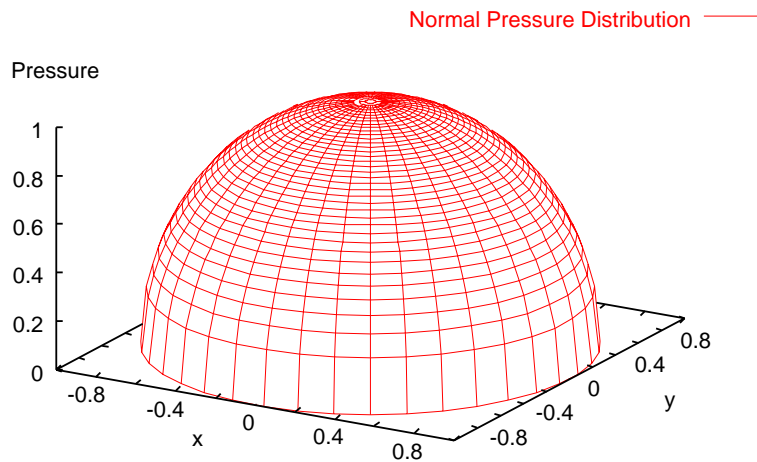


図 3.2 Hertz の理論に基づく接触面内法線方向圧力分布

### 3.3.2 初期滑り現象の定性的説明

Hertz 理論では接線方向力が考慮されていないが，試行的に弾性球に接線方向力を加える．クーロン摩擦を仮定すると，接触領域内での位置  $(x, y)$  にある任意の点は，その点に加わる接線方向力が  $\mu f_g(F_g, r_c, x, y)$  以内であれば固着状態を保ち，それ以上になると限界摩擦力以上の接線方向力が加わるため，滑りが生じる．ここで，法線方向圧力分布が放物面となることを考えると，接触領域の周辺ほど接線方向力に対する拘束が弱く，中心に近いほど拘束が強くなる．つまり，弾性球に接線方向力を加えると，拘束の弱い接触領域周辺付近から，局所的な滑りの発生が期待できる．この時，滑りが生じる領域を“滑り領域 (Slip Region)”，滑りが生じない領域を“固着領域 (Stick Region)”と呼ぶ．

さらに接線方向力を増加させ続けると，滑り領域は中心に向かって伝搬する．そして，最終的に全接触領域が滑り領域となると，弾性球は平板に対して相対的に滑りはじめる．このように，相対的な滑りの前に発生する局所的な滑りは，“初期滑り (Incipient Slip)”と呼ばれる．これは，弾性体接触特有の現象である．

次に，滑りと固着のメカニズムをより詳細に考える．図 3.3 は， $x$  軸と  $z$  軸を含む平面で弾性球を切断した断面であり，初期滑りの発生を模式的に表す．接線

方向力を加えることにより，接触面から十分離れた領域には一様な変位  $u$  が発生する．つまり，弾性球内の点  $D_c$  は  $D'_c$  に， $D_b$  は  $D'_b$  に移動する．もし全接触面が固着状態を保てば，接触領域を含み  $z$  軸に平行な円筒で切り取られる弾性球中には，一様なたわみが生じることになる．

しかし実際は，接触領域中心付近にある点  $C_c$  は，摩擦による拘束で固着状態を保つことができるのに対し，接触領域境界付近にある点  $C_b$  は接線方向力が摩擦による拘束を上回るため，滑りが発生する．そして，その滑りにより変位  $s$  が生じる．

結局，変形前の弾性球中の直線  $C_c-D_c$  と  $C_b-D_b$  は接線方向力により， $C_c-D'_c$  と  $C_b-D'_b$  へとたわむ．しかし，初期滑りの発生により， $C_b-D'_b$  のたわみが若干開放され  $C'_b-D'_b$  へと変化する．このように，初期滑りが発生している弾性体中のたわみ分布は不均一であることが理解できる．

また，法線方向圧力分布の等高線が接触領域の同心円となることを考えると，滑り-固着領域の境界線も接触領域の同心円になることが期待できる．さらに，滑りはたわみを解放する方向に発生するため，その方向が負荷力の方向と一致することが予想される．

### 3.3.3 Cattaneo 理論に基づく接線方向圧力分布のモデル化

滑り領域と固着領域における境界条件（つまり，弾性球表面内の圧力または変位分布）を考える．

滑り領域では，接線方向圧力分布はクーロンの法則で与えられる．つまり，法線方向圧力分布に摩擦係数をかけたものが接線方向圧力分布となる．さらに，滑りの方向と圧力の方向が一致するという条件も加わる．以上の 2 点をまとめると，滑り領域における境界条件は，式 (3.5) で与えられる．

$$\begin{cases} \|f_l(F_g, r_c, x, y)\| = \mu f_g(F_g, r_c, x, y) \\ \frac{f_l(F_g, r_c, x, y)}{\|f_l(F_g, r_c, x, y)\|} = \frac{s(F_g, r_c, x, y)}{\|s(F_g, r_c, x, y)\|} \end{cases} \quad (3.5)$$

ただし， $f_l$  は接触領域内の点  $(x, y)$  に加わる接線方向力ベクトルを， $s$  はその点

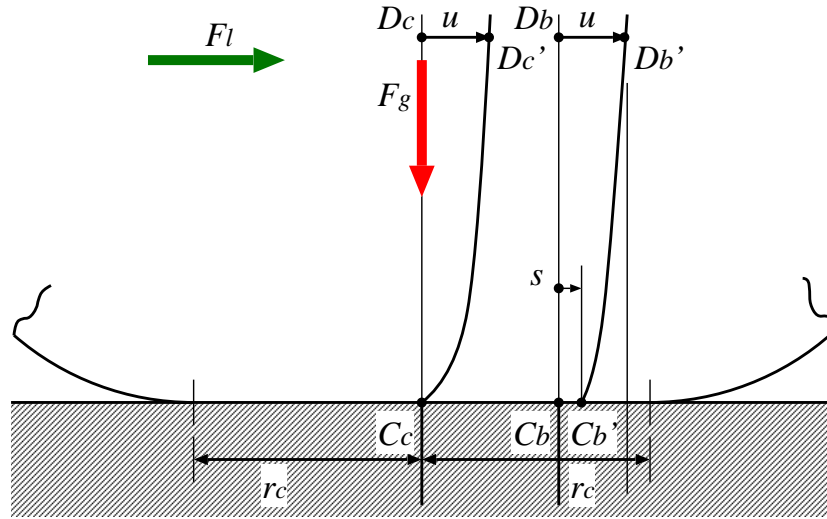


図 3.3 初期滑り発生の模式図

での滑りベクトルを表す．

一方，固着領域では接線方向力が最大静止摩擦力より小さくなければならない．さらに，固着領域の無限遠点では一様な変位  $u$  が生じ，弾性球と平板の間に滑りが生じないという拘束条件が加わる．以上の 3 点をまとめると，固着領域における境界条件は，式 (3.6) で与えられる．

$$\begin{cases} \|f_l(F_g, r_c, x, y)\| < \mu f_g(F_g, r_c, x, y) \\ \mathbf{u}(F_g, r_c, x, y) = \text{const} \\ \mathbf{s}(F_g, r_c, x, y) = (0, 0)^T \end{cases} \quad (3.6)$$

しかし，式 (3.5) と，式 (3.6) で与えられたのは不等式を含む暗 (implicit) な境界条件であり，これら 2 条件から直ちに  $f_l$  を決定することはできない．

一方，Cattaneo はこれらの暗な境界条件を矛盾無く満たす陽 (explicit) な境界条件を導出している [15]．これは， $x$  軸方向 (つまり負荷力方向) の圧力分布を 2 つの放物面の線形和で表し， $y$  軸方向の圧力分布を 0 とするものである．具体的には，圧力分布  $f_l$  は，式 (3.7) で与えられる半径  $r_c$  の接触領域全体に対する圧力  $f_{l1}$  と，式 (3.8) で与えられる半径  $r_s$  の固着領域のみに対する圧力  $f_{l2}$  の線形

和として，式 (3.9) と表される．

$$f_{l1}(F_g, r_c, x, y) = \mu f_g(F_g, r_c, x, y) \quad (3.7)$$

$$f_{l2}(F_g, r_c, x, y) = \mu f_g\left(-\left(\frac{r_s}{r_c}\right)^3 F_g, r_s, x, y\right) \quad (3.8)$$

$$\mathbf{f}_l(F_g, r_c, x, y) = \begin{cases} (0, 0)^T & \sqrt{x^2 + y^2} > r_c \\ (f_{l1}(F_g, r_c, x, y), 0)^T & r_s \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq r_c \\ (f_{l1}(F_g, r_c, x, y) + f_{l2}(F_g, r_c, x, y), 0)^T & \sqrt{x^2 + y^2} < r_s \end{cases} \quad (3.9)$$

式 (3.8) によると  $f_{l2}$  は把持力が  $-(r_s/r_c)^3 F_g$  で接触半径が  $r_s$  となる時の圧力分布に  $\mu$  を掛けることで定義されるが，実際に計算すると式 (3.10) を得る．

$$f_{l2}(F_g, r_c, x, y) = -\mu \frac{r_s}{r_c} \frac{3F_g}{2\pi r_c^2} \left(1 - \frac{x^2}{r_s^2} - \frac{y^2}{r_s^2}\right) \quad (3.10)$$

つまり  $f_{l2}$  は最大圧力が  $f_{l1}$  と比べ  $-r_s/r_c$  倍であり，また接触半径が  $r_s$  であるときの圧力分布とみなすことができる．この時の  $x$  軸方向圧力分布を図 3.3 と同じ断面より表した模式図を，図 3.4 の太実線で示す．ただし図中上の網掛けは，図中下の網掛けで表される  $f_{l2}$  に切り取られる領域を表す．また， $x$  軸方向の圧力分布を接触領域内で積分した結果が負荷力  $F_l$  と等しくなることを考慮すると， $F_l$  と  $f_{l1}$ ， $f_{l2}$  の間には式 (3.11) が成り立つ．

$$\begin{aligned} F_l &= \int_0^{r_c} 2\pi r f_{l1}(F_g, r_c, r) dr - \int_0^{r_s} 2\pi r f_{l2}(F_g, r_c, r) dr \\ &= \mu F_g \left(1 - \frac{r_s^3}{r_c^3}\right) \end{aligned} \quad (3.11)$$

ただし，この式中では  $f_{l1}$  と  $f_{l2}$  を位置  $(x, y)$  ではなく，中心からの距離  $r$  の関数として表している．さらに，固着領域の半径  $r_s$  は式 (3.11) より，把持力  $F_g$ ，負荷力  $F_l$ ，摩擦係数  $\mu$ ，接触半径  $r_c$  を用いて，式 (3.12) と表すことができる．

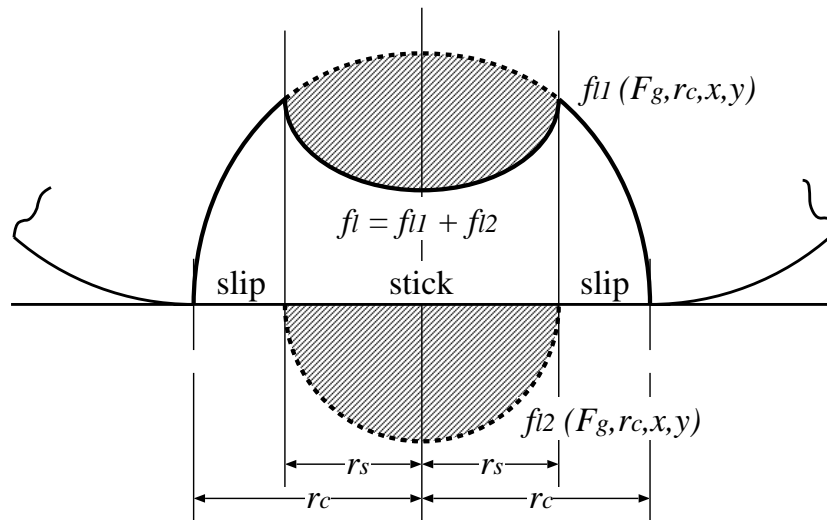


図 3.4 Cattaneo の理論に基づく接触面内接線方向圧力分布

$$r_s = r_c \left( 1 - \frac{F_l}{\mu F_g} \right)^{1/3} \quad (3.12)$$

### 3.4. 解析解の重ね合わせによる滑り量と応力/歪み場の計算

本節では，モデル化された圧力分布を用い，任意の接触条件下で接触領域に生じる初期滑り量と，弾性球内側に生じる応力/歪み場の計算法を説明する．3.4.1 節では，弾性体表面に放物面状圧力分布が加わったときの，弾性体表面変位の解析解と，その重ね合わせ法を示す．また，3.4.2 節では，同様に放物面状圧力分布が加わったときの，弾性体内に生じる応力場の解析解と，その重ね合わせ法を示す．なお，これらの解析解は半無限弾性体に対するものであり，厳密には弾性球に関する計算ではないことに注意されたい．

### 3.4.1 半無限弾性体表面変位の解析解とその重ね合わせ

Johnson らは，半無限弾性体に法物面状圧力分布が加わったときに，弾性体表面に発生する変位をポテンシャル論に基づき求めている [112]．具体的に，半無限弾性体に負荷力  $F_l$ ，接触半径  $r_c$  の放物面状接線方向圧力分布が加えられたときの，弾性体表面の任意の位置  $(x, y)$  に生じる変位を，式 (3.13) から式 (3.16) に示す．ただし，式 (3.13) と式 (3.14) が接触面内に生じる  $x, y$  方向の変位を，式 (3.15) と式 (3.16) が接触面外に生じる  $x, y$  方向の変位を表す．

$$u_x^{in}(F_l, r_c, x, y) = \frac{3F_l}{64Gr_c^3} \left( 4(2 - \nu)r_c^2 - (4 - \nu)y^2 - (4 - 3\nu)x^2 \right) \quad (3.13)$$

$$u_y^{in}(F_l, r_c, x, y) = \frac{3F_l}{64Gr_c^3} 2\nu xy \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} u_x^{out}(F_l, r_c, x, y) = & \frac{3F_l}{16\pi Gr_c^3} \left( (2 - \nu) \left( (2r_c^2 - (x^2 + y^2)) \arcsin \left( \frac{r_c}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. r_c \sqrt{x^2 + y^2} \left( 1 - \frac{r_c^2}{x^2 + y^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) + \right. \\ & \left. \frac{1}{2} \nu \left( (x^2 + y^2) \arcsin \left( \frac{r_c}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) + (2r_c^2 - (x^2 + y^2)) \right) \right. \\ & \left. \left( 1 - \frac{r_c^2}{x^2 + y^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{r_c}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \right) \left( \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} u_y^{out}(F_l, r_c, x, y) = & \frac{3F_l \nu}{16\pi Gr_c^3} \left( (x^2 + y^2) \arcsin \left( \frac{r_c}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) + \right. \\ & \left. (2r_c^2 - (x^2 + y^2)) \left( 1 - \frac{r_c^2}{x^2 + y^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right. \\ & \left. \left( \frac{r_c}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \right) \left( \frac{xy}{x^2 + y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Cattaneo の理論によると，接線方向圧力分布は，2 つの放物面， $f_{l1}$  と  $f_{l2}$  の和として表された．つまり，図 3.4 のような接線方向圧力分布が加わった時の，



弾性対表面変位を計算するには、 $f_{l1}$  と  $f_{l2}$  によって生じる表面変位を足し合わせればよい。ただし、 $f_g$  による変位は  $z$  軸方向が支配的になるのでここでは考慮しない。

固着領域における表面変位  $\mathbf{u}_{stick}$  は、 $f_{l1}$  によりその内側に生じると変位と、 $f_{l2}$  によりその内側に生じる変位の和となる。つまり、式 (3.17) のように表される。

$$\mathbf{u}_{stick}(F_g, r_c, x, y) = \begin{pmatrix} u_x^{in}(\mu F_g, r_c, x, y) + u_x^{in}\left(-\left(\frac{r_s}{r_c}\right)^3 \mu F_g, r_s, x, y\right) \\ u_y^{in}(\mu F_g, r_c, x, y) + u_y^{in}\left(-\left(\frac{r_s}{r_c}\right)^3 \mu F_g, r_s, x, y\right) \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

一方、滑り領域における表面変位  $\mathbf{u}_{slip}$  は、 $f_{l1}$  によりその内側に生じると変位と、 $f_{l2}$  によりその外側に生じる変位の和となる。つまり、式 (3.18) のように表される。

$$\mathbf{u}_{slip}(F_g, r_c, x, y) = \begin{pmatrix} u_x^{in}(\mu F_g, r_c, x, y) + u_x^{out}\left(-\left(\frac{r_s}{r_c}\right)^3 \mu F_g, r_s, x, y\right) \\ u_y^{in}(\mu F_g, r_c, x, y) + u_y^{out}\left(-\left(\frac{r_s}{r_c}\right)^3 \mu F_g, r_s, x, y\right) \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

以上で求めた、 $\mathbf{u}_{stick}$  と  $\mathbf{u}_{slip}$  は半無限弾性体の無限遠点を基準とした表面の変位である。一方、本章で計算すべき対象は初期滑り量であり、これは固着領域を基準とした相対的変位とみなすことができる。つまり、最終的に初期滑りによる滑りベクトルの分布  $\mathbf{s}$  は式 (3.19) となる。

$$\mathbf{s}(F_g, r_c, x, y) = \begin{cases} (0, 0)^T & \sqrt{x^2 + y^2} > r_c \\ \mathbf{u}_{slip}(F_g, r_c, x, y) - \mathbf{u}_{stick}(F_g, r_c, x, y) & r_s < \sqrt{x^2 + y^2} < r_c \\ \mathbf{u}_{stick}(F_g, r_c, x, y) - \mathbf{u}_{stick}(F_g, r_c, x, y) & \sqrt{x^2 + y^2} < r_s \end{cases} \quad (3.19)$$

なお、本節で行った初期滑り計算法の妥当性は 3.5.1 節で示す。

### 3.4.2 半無限弾性体内応力場の解析解とその重ね合わせ

Hamilton らは、半無限弾性体に放物面状圧力分布が加わったときの、弾性体内の応力場をポテンシャル論に基づき求めている [113]。つまり、弾性体表面に  $F_g$

の法線方向力，または  $F_l$  の接線方向力が加わったときの，弾性体内の任意の位置  $(x, y, z)$  における応力テンソルの 6 要素， $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  が与えられる．ここで，初期滑り量と同様に境界条件に応じた適切な重ね合わせを行えば，任意の接触状態での弾性体内応力場を求めることができる．なお，各応力要素の具体的表現に関しては付録 B を参照されたい．

Hertz の理論によると法線方向圧力分布は放物面  $f_g$  で，Cattaneo の理論によると接線方向圧力分布は，2 つの放物面， $f_{l1}$  と  $f_{l2}$  の和として表されていた．つまり，図 3.2 のような法線方向圧力分布と，図 3.4 のような接線方向圧力分布が加わった時の，弾性体内応力場を計算するには， $f_g, f_{l1}$  と  $f_{l2}$  によって生じる応力場を足し合わせればよい．

ここで，接触半径  $r_c$  で，法線方向力  $F_g$  の放物面状法線方向圧力分布が加わる時の弾性体内の位置  $(x, y, z)$  における応力テンソルを  $\sigma_g(F_g, r_c, x, y, z)$ ，接線方向力  $F_l$  の放物面状接線方向圧力分布が加わるときの弾性体内の位置  $(x, y, z)$  における応力テンソルを  $\sigma_l(F_g, r_c, x, y, z)$  とすると，結果として弾性球に法線方向力  $F_g$ ，接線方向力  $F_l$  が加えられたときの，弾性体内位置  $(x, y, z)$  における応力テンソル  $\sigma$  は，式 (3.20) で表される．ただし， $\mu F_g/F_l > 1$  であり，また式中に  $F_l$  が明示的に出て来ないが，これは  $r_s$  に暗に含まれることに注意されたい．

$$\sigma(F_g, r_c, x, y, z) = \sigma_g(F_g, r_c, x, y, z) + \sigma_l(\mu F_g, r_c, x, y, z) - \sigma_g\left(\left(\frac{r_s}{r_c}\right)^3 \mu F_g, r_s, x, y, z\right) \quad (3.20)$$

また，本研究では考慮しないが， $F_l = 0$  または， $\mu F_g/F_l < 1$  の場合の応力場は式 (3.21) で与えられる．

$$\sigma(F_g, r_c, x, y, z) = \begin{cases} \sigma_g(F_g, r_c, x, y, z) & F_l = 0 \\ \sigma_g(F_g, r_c, x, y, z) + \sigma_l(\mu F_g, r_c, x, y, z) & \frac{\mu F_g}{F_l} \leq 1 \end{cases} \quad (3.21)$$

また，式 (3.22) で定義されるフックの法則を用いれば，応力テンソル  $\sigma$  を歪みテンソル  $\varepsilon$  に変換することができる．

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)) \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)) \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \\ \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} \\ \gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx} \end{cases} \quad (3.22)$$

本節で行った計算法の妥当性は 3.5.2 節と 3.5.3 節で示す。

### 3.5. 解析の妥当性検証

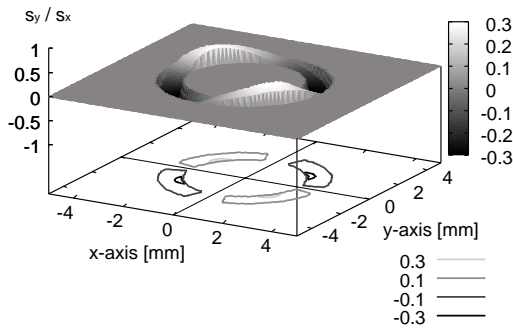
本節では，前節までに示した初期滑り量と，弾性体内応力/歪み場計算法の妥当性を考察する．具体的には，前者に関しては計算された滑り分布と，式 (3.5) と式 (3.6) で定義された暗な境界条件を比較することで検証する．また，後者に関しては計算された応力場と，ポテンシャル論に基づき数値的に計算された弾性体内ミーゼスの相当応力分布，有限要素法で計算された弾性体内ミーゼスの相当応力分布とを比較することで妥当性を検証する．

#### 3.5.1 計算された初期滑り量と境界条件との比較

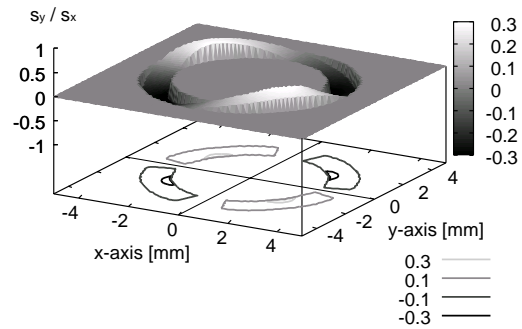
3.3 節では，滑り領域，固着領域における境界条件がそれぞれ，式 (3.23) と式 (3.24) と表されることを示した．本節では，3.4.1 節で示した重ね合わせ法がこれらの暗な境界条件を満たすことを示す．

$$\begin{cases} \|\mathbf{f}_l(F_g, r_c, x, y)\| = \mu f_g(F_g, r_c, x, y) \\ \frac{\mathbf{f}_l(F_g, r_c, x, y)}{\|\mathbf{f}_l(F_g, r_c, x, y)\|} = \frac{\mathbf{s}(F_g, r_c, x, y)}{\|\mathbf{s}(F_g, r_c, x, y)\|} \end{cases} \quad (3.23)$$

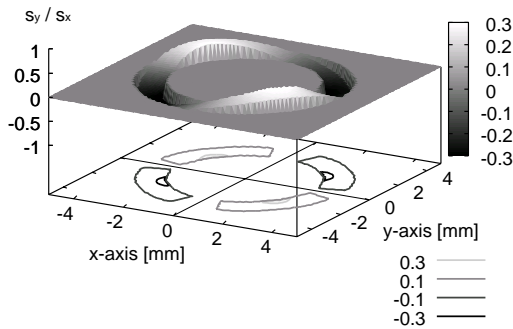
$$\begin{cases} \|\mathbf{f}_l(F_g, r_c, x, y)\| < \mu f_g(F_g, r_c, x, y) \\ \mathbf{u}(F_g, r_c, x, y) = \text{const} \\ \mathbf{s}(F_g, r_c, x, y) = (0, 0)^T \end{cases} \quad (3.24)$$



(a) 条件 A



(b) 条件 B



(c) 条件 C

図 3.5  $x$  軸方向滑り量に対する  $y$  軸方向滑り量：ただし，接触領域外や固着領域のように  $s_x = 0$  となる領域は 0 としている．

図 3.4 より，Cattaneo の理論で与えられた，滑り，固着領域における圧力境界条件が，式 (3.23) と式 (3.24) の最上式を満たすことは自明である．

一方，滑り領域内の滑りベクトルは，式 (3.19) の 2 番目の式で与えられるが，このときの  $x$  軸方向の滑り量に対する  $y$  軸方向の滑り量（つまり  $s_y/s_x$ ）をプロットしたグラフを図 3.5 に示す．ただし，計算には表 3.1 に列挙する 3 条件（条件 A, B, C）を用いており，接触領域外や固着領域のように  $s_x = 0$  となる領域では  $s_y/s_x = 0$  としている．

3.3.2 節では滑りの方向が負荷力の方向（この場合  $+x$  軸方向）と一致することを予測したが，グラフより第 1, 3 象限における滑りは  $-y$  方向成分を，第 2, 4

象限における滑りは  $+y$  方向成分を持つことが理解できる。また、どの条件でも  $x$  軸方向の滑り量に対する  $y$  軸方向の滑り量がほぼ  $\pm 0.3$  程度に収まっていることがグラフより確認できる。つまり、 $y$  軸方向の滑り量は  $x$  軸方向の滑り量の 30% 以下でしかない。

Cattaneo の理論では、 $y$  軸方向の圧力分布が一様に 0 になると仮定した。また、式 (3.23) では、圧力の方向と滑りの方向が一致するものとしている。つまり、理論的に滑りベクトルは  $x$  軸方向成分しか持たないことになる。一方、解析解の重ね合わせで計算された滑りベクトルは  $y$  軸方向成分も持つ。しかし、その大きさは、最大  $x$  軸方向成分の 30% であり、決して微量であるとは言えないが式 (3.23) の第 2 式を概ね満たす結果である。

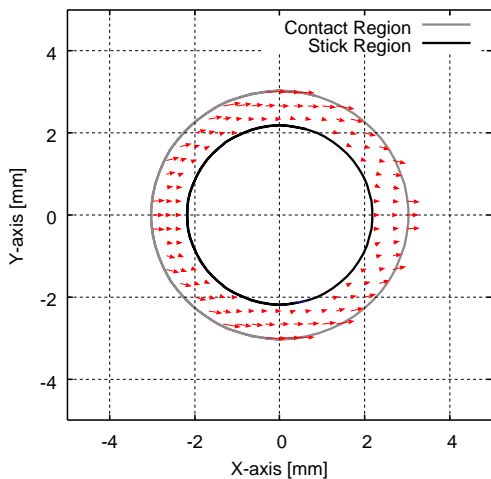
一方、無限遠点に対する固着領域の変位は、式 (3.17) で与えられるが、実際に計算すると、式 (3.25) を得る。

$$\mathbf{u}_{stick}(F_g, r_c, x, y) = \begin{pmatrix} -\frac{3F_l(r_c^2 - r_s^2)(\nu - 2)}{16r_c^3 G} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

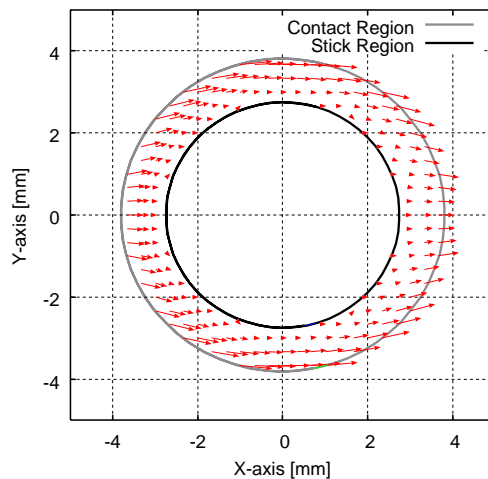
この式より、固着領域の絶対変位  $\mathbf{u}_{stick}$  が定数となる（つまり、弾性体表面の位置に依存しない）ことが分かる。つまり、式 (3.24) の第 2 式を満たす。また、固着領域内の滑り量は式 (3.19) の上式で与えられるが、これは恒等的に 0 となる。つまり、式 (3.24) の第 3 式も満たすことが確認できた。

以上より、提案する初期滑り計算法を用いて計算された初期滑り量は、滑り、固着領域における境界条件を良く満たすことが確認できた。実際に表 3.1 に列挙する 3 つの境界条件で計算した初期滑り量のシミュレーション結果を、図 3.6 に示す。なお、各々の図において、滑りベクトルは 2 倍表示されている。また、外側の円は接触領域の境界を、内側の円は滑り領域と固着領域の境界を表す。

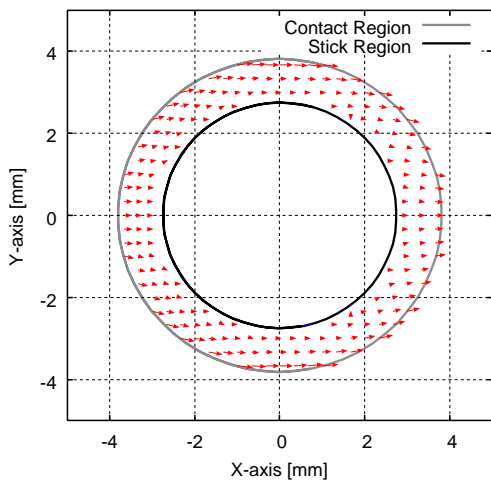
図 3.6 より、滑りベクトルの大きさが固着領域境界から接触領域境界に近づくにつれ徐々に大きくなることが分かる。また、滑りの方向はほぼ  $x$  軸方向（負荷力方向）を向いているが、固着領域を取り巻くような  $y$  軸方向成分も持つことが理解出来る。これは、図 3.5 に示した通りである。



(a) 条件 A



(b) 条件 B



(c) 条件 C

図 3.6 解析解の重ね合わせによる初期滑り計算結果：ただし，滑りベクトルは 2 倍表示されており，外側の円は接触領域の境界を，内側の円は滑り領域と固着領域の境界を表す。

表 3.1 初期滑りの計算に用いた弾性球モデルと境界条件

条件名	半径	縦弾性係数	ポワソン比	把持力	負荷力	摩擦係数
A	8.0 [mm]	0.5 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.48	3.0 [N]	1.5 [N]	0.8
B	8.0 [mm]	0.5 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.48	6.0 [N]	3.0 [N]	0.8
C	8.0 [mm]	0.5 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.48	6.0 [N]	1.5 [N]	0.4

表 3.2 ミーゼス応力の計算に用いた境界条件

条件名	接触半径	ポワソン比	把持力	負荷力	摩擦係数
D	1.0	0.3	$2\pi/3$	0	—
E	1.0	0.3	$2\pi/3$	$\pi/6$	0.25
F	1.0	0.3	$2\pi/3$	$\pi/3$	0.5

### 3.5.2 計算された応力場と数値解析結果との比較

本節では、提案した方法で計算した弾性体内ミーゼスの相当応力分布と、Mindlinらによりポテンシャル論に基づき数値的に計算されたミーゼスの相当応力分布 [114, 115] を比較する。なお、ミーゼスの相当応力は、式 (3.26) で定義される。これは、塑性力学において材料の降伏状態を評価するために用いられる指標である。

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (-\sigma_x + \sigma_z)^2}{6} + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2} \quad (3.26)$$

比較は、表 3.2 に列挙される 3 つの条件で行う。ただし、これらの条件は接触半径と最大接触圧に関して無次元化されている。つまり、接触半径が 1.0 であり、把持力が  $2\pi/3$  であるため、最大接触圧  $3F_g/2\pi r_c^2$  も 1.0 となる。これは、式 (3.27) のような法線方向圧力分布を意味する。

$$f_g(F_g, r_c, x, y) = \frac{3}{2} \frac{F_g}{\pi r_c^2} \left(1 - \frac{x^2}{r_c^2} - \frac{y^2}{r_c^2}\right)^{1/2} = (1 - x^2 - y^2)^{1/2} \quad (3.27)$$

表 3.3 初期滑り発生時のミーゼス応力の計算に用いた境界条件

条件名	接触半径	ポワソン比	把持力	負荷力	摩擦係数
G	1.0	0.3	$2\pi/3$	$\pi/12$	0.25
H	1.0	0.3	$2\pi/3$	$\pi/6$	0.5

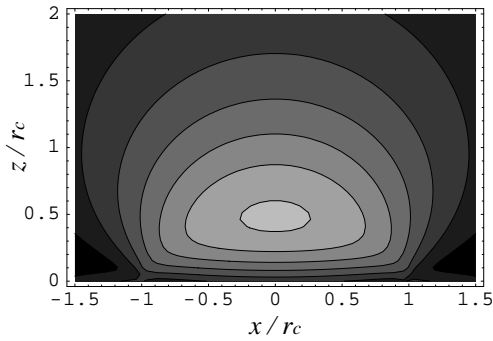
各条件における計算結果を図 3.7 に示す。ただし，この図は， $x-z$  軸を含む平面で弾性球を切断したときの，切断面におけるミーゼス応力の分布を等高線で表す。また，等高線の色とミーゼス応力値との対応は図 3.8-(c) のカラーマップを参照されたい。図中で，横軸は  $x$  軸，縦軸は  $z$  軸であるが，無次元化されているためそれぞれ  $x/r_c$ ， $z/r_c$  となる。一方，等高線は最大接触圧  $f_0 = 3F_g/2\pi r_c^2$  で無次元化された相当応力  $\sigma_{eq}/f_0$  となる。

図 3.7 を見れば明らかのように，解析解の重ね合わせによる計算結果 (a)，(c)，(e) と同条件での数値計算結果 (b)，(d)，(f) が極めて良く一致することが理解できる。ただし，この解析条件 E と F は， $\mu F_g = F_l$  となるため，弾性体に完全な滑りが生じている状況である。

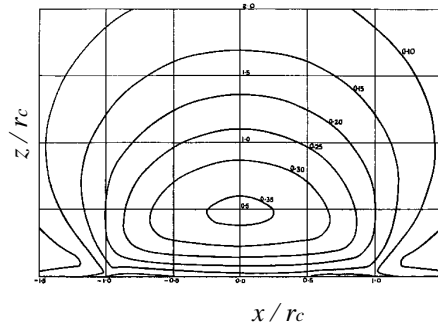
このように，従来は弾性球に完全な滑りが生じている状態での解析しか行われていなかったが，本章で提案した手法を用いれば，表 3.3 に列挙されるように，局所的な滑りしか生じていない状況での応力場も計算することが出来る。ただし，これらの条件も先程と同様に接触半径と最大接触圧に関して無次元化されている。各々の条件における計算結果を，それぞれ図 3.8-(a)，(b) に示す。図 3.7 の (a) から (c)，(a) から (e) への遷移過程をそれぞれ図 3.8 の (a) と (b) で可視化できていることがわかる。

以上より，重ね合せ解法の結果と，数値解析の結果が極めて良く一致することが示せた。これは，重ね合せ解法が妥当であることを意味する。

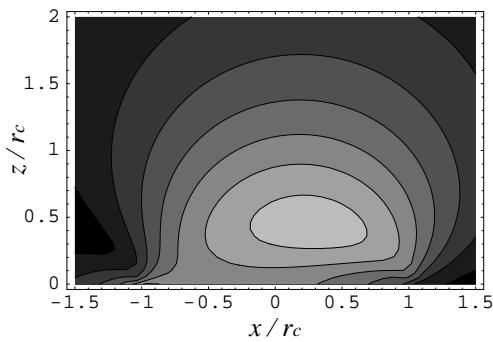




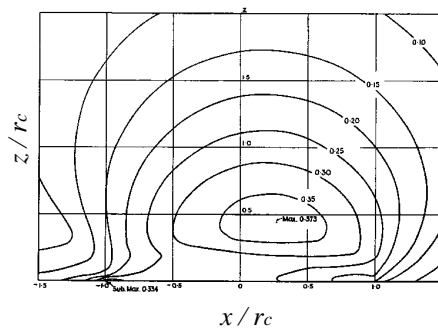
(a) 条件 D (重ね合せ法)



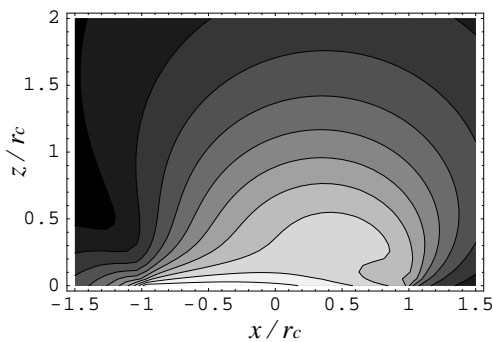
(b) 条件 D (数値解法)



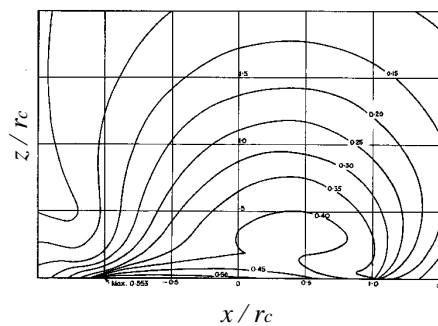
(c) 条件 E (重ね合せ法)



(d) 条件 E (数値解法)

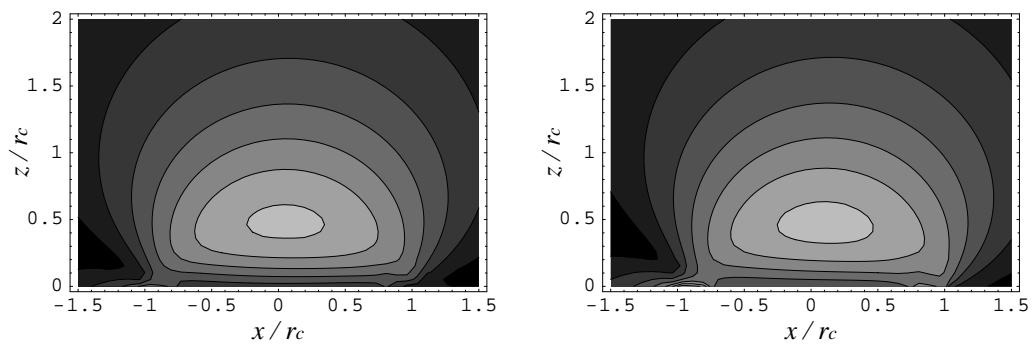


(e) 条件 F (重ね合せ法)



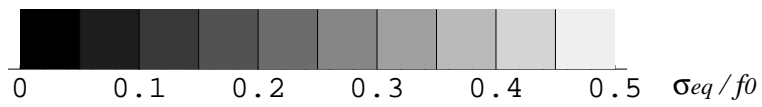
(f) 条件 F (数値解法)

図 3.7 重ね合わせ解法と数値的解法で計算されたミーゼス応力の比較：ただし，横軸は  $x/r_c$ ，縦軸は  $z/r_c$ ，等高線は  $\sigma_{eq}/f_0$  を表す．



(a) 条件 G

(b) 条件 H



(c) 等高線と応力値と対応を表すカラーマップ

図 3.8 重ね合わせ解法で計算された初期滑りが生じている時のミーゼス応力：ただし，横軸は  $x/r_c$ ，縦軸は  $z/r_c$ ，等高線は  $\sigma_{eq}/f_0$  を表す．

表 3.4 歪みエネルギー密度の計算に用いた指モデルと境界条件

条件名	縦弾性係数	ポワソン比	把持力	負荷力	摩擦係数
$I_{ana}$	0.5 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.48	1.5 [N]	0.0 [N]	1.0
$I_{fem}$	0.136 ~ 0.034 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.48	0.12 [N]	0.0 [N]	1.0
$J_{ana}$	0.5 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.48	1.5 [N]	-1.5 [N]	1.0
$J_{fem}$	0.136 ~ 0.034 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.48	0.12 [N]	0.12 [N]	1.0

### 3.5.3 計算された応力場と有限要素解析結果との比較

本節では，提案した方法で計算した弾性体内ミーゼスの相当応力分布と，有限要素法で数値的に計算された [25, 26, 27] ミーゼスの相当応力を比較する．

なお本章で行われた議論の基礎となる，Hertz の理論と Cattaneo の理論は，弾性体の微小変形を前提としているのに対し，ここで参照する前野らにより行われた有限要素解析は大変形を考慮している（つまり，構造的な非線形性を考慮している）ことに注意されたい．

重ね合わせ解法と有限要素解析の境界条件を表 3.4 に示す．ただし，条件名の添字 *ana* は解析解の重ね合わせを，*fem* は有限要素解析を表す．また，条件 I は把持力しか加わらないのに対し，条件 J では負荷力も加わる．有限要素解析の縦弾性係数に幅があるのは，皮下組織の部位に応じて値を変えているためであり，重ね合わせ法の負荷力が負の値になるのは，有限要素解析での境界条件に合わせるためである．

解析に使用するモデルの外形は次のようになる．有限要素解析では，長径 16 [mm]，短径 8 [mm] の楕円を基本に，指紋，皮下組織（層構造），骨と爪構造を考慮したモデルに対し，平面歪みを仮定した 2 次元接触解析を行っている．一方，重ね合わせ解法のモデルは有限要素モデルの曲率とほぼ等しくなるよう， $R = 8$  [mm] の弾性球とした．

解析結果を図 3.9 と図 3.10 に示す．ただし，各々のグラフにおいて，左列は重ね合わせ解法による結果の  $x-z$  平面での切断面を，右列は有限要素解析による

結果を表す．また，図 3.9-(a)，(b) と (c)，(d) はそれぞれ，弾性体表面から 0.4 [mm]，0.75 [mm] の浅層部，図 3.10-(a)，(b) と (c)，(d) はそれぞれ，弾性体表面から 1.1 [mm]，2.5 [mm] の深層部における歪みエネルギー密度の分布を表す．これらは，皮膚中に存在する 4 種類の触覚受容器深さ（詳しくは 6 章を参照されたい）に対応する．さらに，全ての図において左右対称なグラフは接線方向を加えないとき（表 3.4 の I 条件），非対称なグラフは接線方向を加えたとき（表 3.4 の J 条件）の結果を表す．

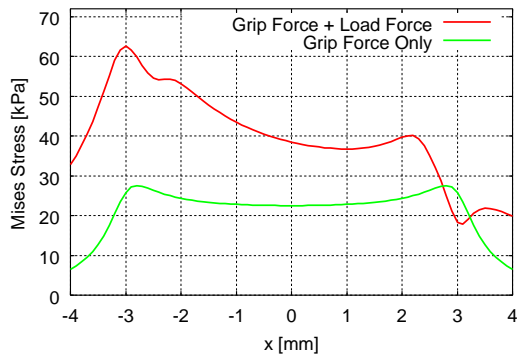
図 3.9 と図 3.10 より，重ね合わせ解法により得られた結果と，有限要素解析により得られた結果は，レンジが異なるものの似たようなプロファイルを持つことが分かる．つまり，接線方向力が加わる時は左側（この解析では接線方向力が  $-x$  軸方向に加わるため，接触開始端側となる）に応力が傾くこと，そして接線方向の有無に関わらず，深くなるに従い応力分布が不鮮明になることが理解できる．後者は，弾性体のローパスフィルタ特性を考えれば，容易に理解できる現象である．なお，図 3.9-(b) が折線状グラフになっているのは，有限要素モデルが指紋構造を考慮したものであり，指紋稜線ごとに局所的な応力集中部が発生するからである．

以上より，提案する重ね合せ解法による応力場の計算が十分妥当であることが示せた．

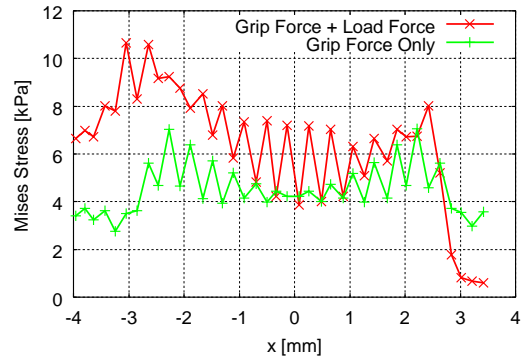
### 3.6. 弾性体接触状態を代表する固着率の提案

本章で行った一連の議論より，弾性体接触の持つ特徴が明らかになった．つまり，図 3.11 のように，剛体接触では，固着状態か滑り状態のどちらかの状態にしか取り得ないため，負荷力が限界摩擦力を越えた瞬間に突如滑りが生じるのに対し，弾性体接触では初期滑り現象の発生により固着状態から滑り状態へと連続的に遷移するという特徴がある．

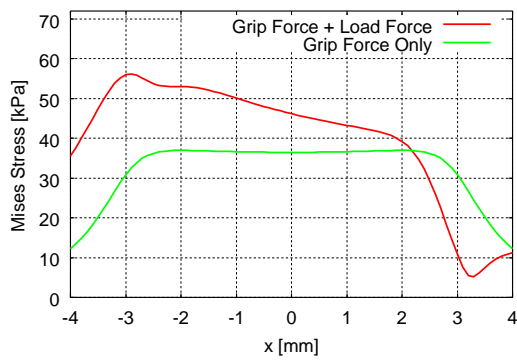
本論文では，このような滑り-固着状態の遷移が機能モデル検証のための計測対象となる．しかし，この情報は結局のところ接触面における滑りベクトル分布の時間変化であり，極めて大きな自由度を持つ．このため，様々な条件下で計測され



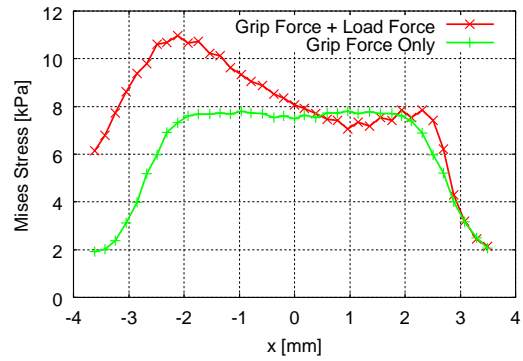
(a) 重ね合せ法 ( $z = 0.4$  [mm])



(b) 有限要素法 ( $z = 0.4$  [mm]) [25]

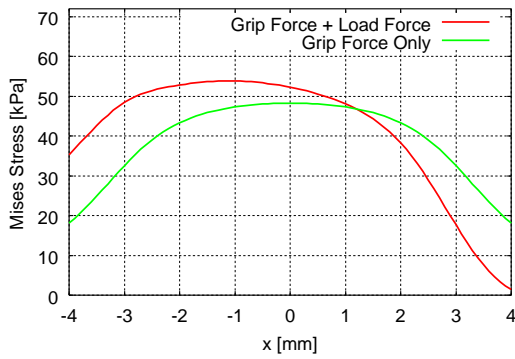


(c) 重ね合せ法 ( $z = 0.75$  [mm])

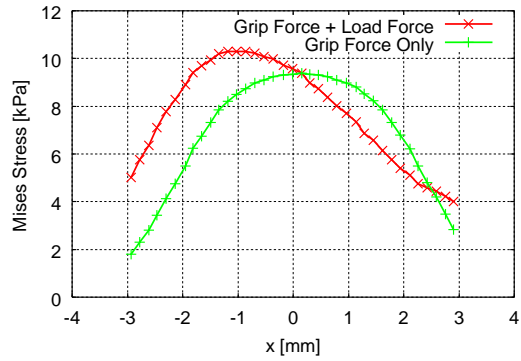


(d) 有限要素法 ( $z = 0.75$  [mm]) [25]

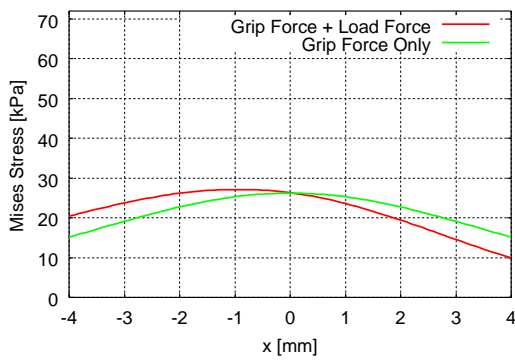
図 3.9 重ね合わせ解法と有限要素法で計算された歪みエネルギー密度分布の比較 (浅層部)



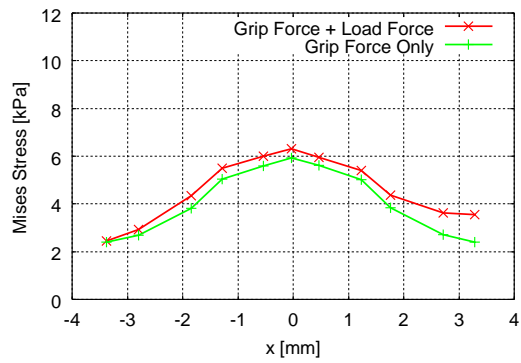
(a) 重ね合せ法 ( $z = 1.1$  [mm])



(b) 有限要素法 ( $z = 1.1$  [mm]) [25]



(c) 重ね合せ法 ( $z = 2.5$  [mm])



(d) 有限要素法 ( $z = 2.5$  [mm]) [25]

図 3.10 重ね合わせ解法と有限要素法で計算された歪みエネルギー密度分布の比較 (深層部)

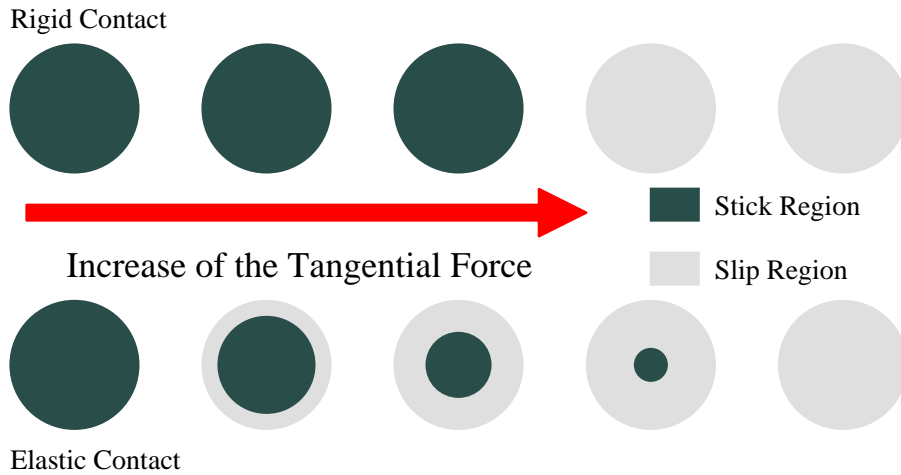


図 3.11 弾性体接触と剛体接触

る初期滑りを直接的に比較することは困難を伴う．そこで本研究ではこのような滑り-固着状態の遷移過程を代表するパラメータとして，“固着率 (Stick Ratio)”を提案する．固着率の定義は，接触領域に占める固着領域の割合である．つまり式 (3.28) と表される．

$$s = \frac{\pi r_s^2}{\pi r_c^2} \quad (3.28)$$

ここで，式 (3.28) に，式 (3.12) を代入すると，固着率は式 (3.29) と表される．

$$s = \left(1 - \frac{F_l}{\mu F_g}\right)^{2/3} \quad (3.29)$$

この式を見れば明らかなように，固着率は，把持力  $F_g$ ，負荷力  $F_l$ ，摩擦係数  $\mu$  の関数となる．これは，固着率には弾性体の接触状態を規定する上で必要なパラメータが全て含まれることを意味する．つまり，固着率は弾性体接触状態を代表するパラメータとみなすことができる．

一方で，固着率は弾性体の滑り余裕を直接的に表す指標にもなる．つまり，固着率の定義には把持の安全率の逆数  $F_l/\mu F_g$  のみが含まれるため，いかなる接触

力や接触面の摩擦係数をもつ弾性体でも，固着率が等しければ，滑り余裕も等しいという興味深い特徴を持つ．

把持というタスクの究極的な目的が，物体を滑らせず，かつ物体を破壊しないように把持力を適切に制御することであることを考えると，把持運動中の滑り余裕の変化を計測することは，把持という機能をモデル化する上で本質的に重要であると考えられる．このため，4章で開発する計測装置は人の把持運動中の固着率の計測を目的とする．さらに，5, 6, 7章で行う計測/シミュレーションでは，固着率に注目した議論を展開する．

### 3.7. 本章の結論

本章では，論文中で行われる一連の議論を理解する上で不可欠となる，弾性体接触の特性とその力学について詳述した．

まず始めに，Hertz の理論と，Cattano の理論を併用し，任意の接触力で押しつけられた弾性体の接触領域内に生じる圧力分布をモデル化した．このモデルは初期滑りの発生を考慮したものになっている．

モデル化された圧力分布は，法物面状圧力の線形和として表される．また，半無限弾性体に法物面状法線/接線方向圧力分布が加わる時の，弾性体表面変位と，弾性体内応力/歪み場は解析的に求めることができる．つまり，これら解析解を接触面内圧力分布に従い適切に重ね合わせることで，任意の接触状態での初期滑り量と弾性体内応力/歪み場の計算が可能となる．また，この計算法の妥当性は，境界条件との比較や数値的な接触解析結果との比較を行うことで示された．

最後に，弾性体接触状態を代表するスカラパラメータとして固着率を提案した．これは，接触領域に対する固着領域の割合として定義される．そして，滑りに対する一般的な余裕を表すだけでなく，弾性体の接触状態を代表するパラメータとも成り得ることが分かった．

本章で行った議論は弾性球の Hertz 接触を仮定していたが，圧力分布や接触領域形状を一般化しても固着率に関する議論は変わらない．このような弾性体接触の一般化に関しては付録 C を参照されたい．



# 第4章 固着率と把持/負荷力の 同時計測装置の開発

## 4.1. 本章の趣旨

3章で行った弾性体接触理論に基づく議論では，弾性体の接触状態を代表するパラメータとして固着率を導入し，それが一般的な滑り余裕を表す指標となることが分かった．つまり，いかなる接触力や接触面の摩擦係数をもつ弾性体でも，固着率が等しければ，滑り余裕も等しいという興味深い特徴を持つ．本章では，把持運動中の指先固着率の計測を行うために開発した計測装置のハードウェア/ソフトウェア構成について述べる．

まず初めに，開発する計測装置に求められる必要機能を明確にする．これは，計測装置を設計/製作する上で重要な指針となる．

次に，計測手法の概要を説明する．本章で開発する装置は，固着率，把持/負荷力，計測装置の動きを同時に計測することができる．つまり，カメラを用いた接触面計測，力センサを用いた接触力計測，加速度センサを用いた装置加速度計測を同時に行う．また，接触面計測のための画像処理に関しては独自のアルゴリズムを構築したため詳細に説明する．

次に，計測装置のシステム構成を説明する．計測装置は先に説明した3つの指標が同時に計測できるにも関わらず小型/軽量であり，成人であれば母指，示指で摘み上げることができる（本研究の計測対象である精密把持で持ち上げることが可能である）．把持運動中のすべての計測データは，画像処理ボード/AD変換ボードを通してホストPCに取り込まれる．また，以上のシステム構成におけるこの装置の計測能力，計測精度も検証する．

最後に，実際に開発した装置を用い幾つかの指先接触状態で初期滑りを計測し

た結果を示し，この装置が有効に機能することを確認する．

## 4.2. 計測装置の必要機能

本節では，計測装置に求められる必要機能について考察し，それらを明確にする．

本章で開発する計測装置の目的は，人が自然な把持運動を行う際に，把持力と負荷力の動的な変化（これらは，一般に人が加える把持力と，対象物の持ち上げスピードに依存して変化する）に伴い，動的に変化する指先固着率を計測することである．つまり，固定された指に対して計測装置を動かすというパッシブな実験設定では本質的に意味がない．

また，計測装置を手袋状に実装し [34, 35, 36]，それを手に装着することで計測を行うことも考えられるが，把持対象物体と被験者の指先との間が，指先の皮膚弾性を損なうほどの物体で遮断されては計測の意味がない．

つまり，計測装置内に全センサを内蔵し，被験者がその装置を自由に持ち上げることができるという構成が望ましい．以上をまとめると，計測装置の構造に関しては，以下の 2 つの機能が必要となる．

1. 計測装置内に全てのセンサが内蔵されていること
2. 被験者が実際に持ち上げ可能な計測装置であること

また，本研究で計測すべき情報は，指先固着率に加え，接触面に加えられる接触力（つまり，把持/負荷力），そして計測装置の動きの 3 つの指標である．つまり，装置の計測対象に関しては以下の 3 つの機能が必要となる．

3. 接触面内に生じる微小な滑りを計測し，固着率が計算可能であること
4. 指先に加わる接触力を計測し，把持/負荷力が計算可能であること
5. 装置の動きを計測し，持ち上がった瞬間が識別可能であること

更に，さまざまな条件下での計測を行うためには，装置の特性が変更可能でなければならない．つまり，計測装置の付加機能に関しては以下の 2 つの機能が必

要となる。

6. 計測装置の質量が可変であること
7. 計測装置の表面摩擦係数が可変であること

以上の 7 点が，本研究で必要な計測装置に求められる必要機能である．以下，これらの仕様を満たす計測装置の構成について詳細な説明を行う．

### 4.3. 提案する計測手法

本節では計測手法の概要を説明する．計測対象は，指先固着率，把持/負荷力，計測装置の動きであるが，それぞれ，カメラを用いた接触面計測，力センサを用いた接触力計測，加速度センサを用いた装置加速度計測により実現する．

#### 4.3.1 計測手法の概要

計測方法の概念図を図 4.1 に示す．計測装置は 6 軸力センサ，それに片持ちで支えられたアクリル板，そしてアクリル板の裏側（計測装置の内側）に設置された CCD カメラより構成される．また，装置内には加速度センサが設置される．接触面内に発生する微小な滑りの計測にはカメラを用いるため，アクリル板は透明でなければならない．また，アクリル板の側方より可視光を照射するため，アクリル板と指との接触領域は錯乱光を発する．これを利用すれば接触領域の識別が容易に行える．

被験者の指先には微小ドットのマトリクス状パターン（以下，ドットパターンと呼ぶ）が描画されており，把持運動中は装置内の CCD カメラより各ドットのトラッキングを行うことで，指先接触面内の滑り-固着状態を識別する．この画像処理の概要に関しては，4.3.2 節で説明する．

また，把持面は 6 軸力センサに支持されているため，接触面に加わる力が計測できる．接触力計測の概要に関しては，4.3.3 節で説明する．さらに，加速度センサの情報より，計測装置が持ち上がる瞬間を特定することができる．加速度計

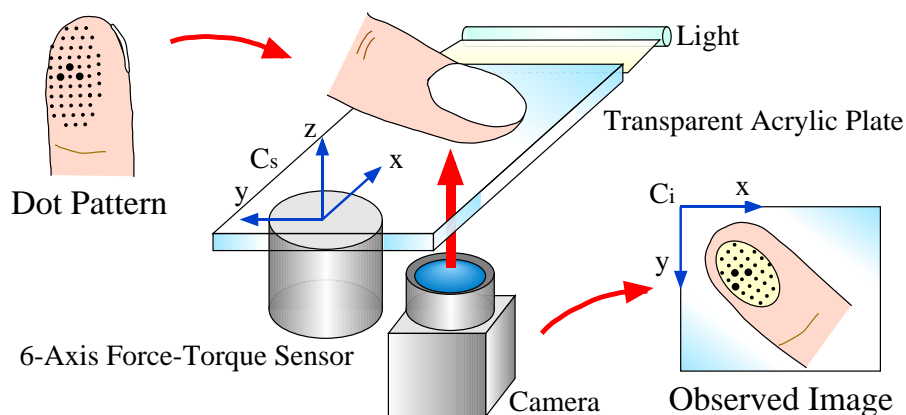


図 4.1 計測手法の概念図

測の概要に関しては，4.3.4 節で説明する．

#### 4.3.2 接触面計測の概要

指先接触面内の滑り-固着状態を識別するためには，時系列画像中で対応点を求め，その移動量を計算する必要がある．本研究では指腹部に描いたドットパターンを対応点抽出の際の画像特徴とする．指紋のように人が生来持っているパターンを画像特徴として用いるのが理想的であるが，特徴点となる分岐や終端が 20 [points/cm<sup>2</sup>] 程度しか存在せず，その分布も一様ではないため [116]，信頼性，リアルタイム性の高い計測を行うことは困難であると考えドットパターンを採用することにした（ただし，将来的には指紋パターンを用いた計測に移行する予定である．このような将来展開に関しては 8 章が，指紋パターンを用いた計測に関しては付録 E が詳しい）．実際の指先に描画されたドットパターンを図 4.2 に示す．ドットは直径約 0.8 [mm] 程度であり，約 1.2 [mm] 間隔で縦横に並んでいる．

ドットパターンに対する画像処理では，中心ドットを基準として縦横方向を順に特定し，基準ドットからの相対的位置が等しいドットを対応ドットと見なすという戦略を取る．この際，基準となる中心ドットと縦横軸方向を一意に特定できるように，パターンを中心ドットの左，右と上のドットは，他より大きく描画する．

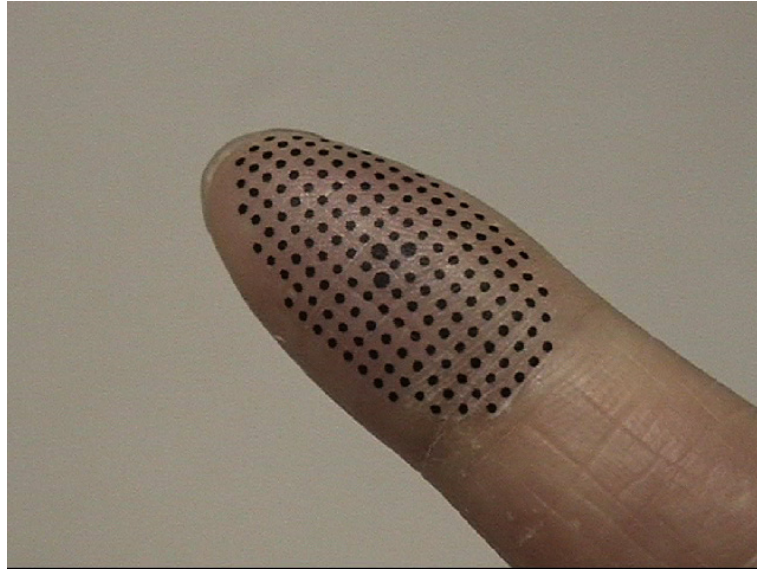


図 4.2 指先に描画されたドットパターン

画像処理に関するより詳細な説明は 4.4 節で行う。

### 4.3.3 接触力計測の概要

把持面は 6 軸力センサで支持されている。ここで、把持面には 1 本の指しか接触せず、把持面を構成するアクリル板が、図 4.1 で定義されるセンサ座標  $C_s$  の  $x, y$  軸で張られる平面上に存在すると仮定すれば、把持力ベクトル  $F_g$ 、負荷力ベクトル  $F_l$  は式 (4.1) のように計算出来る。ただし、式 (4.1) において  $f_i$  は力センサで計測される  $i$  軸方向の分力、 $e_i$  は  $i$  軸方向の単位ベクトルを表す。

$$\begin{cases} \mathbf{F}_g = -f_z \mathbf{e}_z \\ \mathbf{F}_l = f_x \mathbf{e}_x + f_y \mathbf{e}_y \end{cases} \quad (4.1)$$

また、本研究では特に参照されることはないが、接触面での法線方向周りモーメント  $M_z$ 、及び接触位置  $(x_c, y_c)$  は式 (4.2) で計算できる。ただし、式 (4.2) において、 $m_i$  は力センサで計測される  $i$  軸周りのモーメントである。

$$\begin{cases} M_z = -xf_y + yf_x + m_z \\ x_c = -\frac{m_y}{f_z} \\ y_c = -\frac{m_x}{f_z} \end{cases} \quad (4.2)$$

#### 4.3.4 装置加速度計測の概要

計測装置加速度に関しては，重力方向加速度のみを計測対象とする．なぜなら，本研究では母指と示指を用いた精密把持が計測対象となり，計測装置の運動が上下方向のみに限定されるため，把持運動中には重力方向の加速度が最も顕著に変化するからである．

### 4.4. 画像処理アルゴリズム

本節では，接触面計測のための画像処理アルゴリズムに関して詳細に説明する．はじめに，アルゴリズムの概要を説明し，次に画像処理中で行われるドットパターンの再構成法を説明する．

#### 4.4.1 画像処理アルゴリズムの概要

計測装置に設置された CCD カメラより，指先に描画されたドットをトラッキングすることで，指先接触面における滑り-固着状態を識別する．なお，本節で行う処理は，被験者の指先が装置と接触している間はリアルタイムに行う必要がある．つまり，画像処理アルゴリズムは高速性に配慮しデザインされている．

相関演算に基づくテンプレートマッチングで各ドットをトラッキングすることも考えられるが，追跡すべきドットの形が全て等しく，密に配置されているため，正確かつ高速な追跡が困難となる．そこで本研究ではラベリングによりドット的位置と面積を求め，それらに対しドット配置の再構成（本研究では，この操作をメッシングと呼ぶ）を施すことで相対的位置関係を復元するというアプローチをとる．具体的には，以下の 4 つの手順で画像処理を行う．

1. 接触領域より発せられる錯乱光を手がかりに接触領域を特定する
2. 抽出された接触領域に対し 2 値化，ラベリングを行い，接触領域内に存在する全ドットの位置と面積を求める
3. ドット位置と面積をもとにメッシングを行い，ドットの配置を再構築する
4. 接触面内のドットは把持物体表面に拘束されるという拘束条件を用い，センサ座標  $C_s$  におけるドットの 3 次元位置を計算する

なお，接触領域抽出を高速に行うため，手順 1. の接触領域の特定は 0.5 倍に縮小した画像に対して行う．また，手順 2. の 2 値化閾値はクラス（白領域と黒領域）間分散とクラス内分散の比を最大にするよう決定する．以上の 4 つの処理のみで，滑りの発生で変形するドットパターンのトラッキングが可能となる．これは，本研究では，以下の 2 点において問題を単純化しているからである．

- 接触領域が発光しているため，2 値化処理のみで接触領域，ドット及び背景領域に分割することができる．
- 皮膚（弾性体）の変形が連続であるため，滑りの発生によりドットの相対的配置が変化することはない．

そして，この一連の処理で計測された時系列ドット位置情報を比較することで，ドット近傍が滑り状態であるのか，固着状態であるのかを識別することができる（つまり，時系列的にドット位置を比較して，それが変化していたら滑り状態，変化していなかったら固着状態とみなすことができる）．さらに，この情報を用いれば指先接触面の固着率を計算することが出来る．なお，手順 3. で行うメッシングのアルゴリズムに関しては，次節で説明する．

#### 4.4.2 メッシングアルゴリズム

滑りの発生により指先接触面内が変形することを考えると，ドットパターンの中心と基底ベクトル対を求め，その線形和上の近傍でドットを探索するという方法では，正しいドット配置の再構成は期待できない．

そこで，本研究では接触面の中心付近では変形しにくく，周辺にいくほど変形が大きくなるという弾性接触の特徴を利用し（このような弾性接触の特徴に関する説明は 3.5.1 節を参照されたい），次のようなメッシングアルゴリズムを考案した．前提として，指の腹には縦方向に  $2m + 1$  個，横方向に  $2n + 1$  個のドットが描画されているとする．また，図 4.2 に示されるように中心ドットの右，左，及び上のドットは他より大きく描画されている．

はじめに 2 値化，ラベリングを行いドットの位置と面積を抽出した上で，面積の大きい 3 ドットを特定する．また，次の 3 条件を満たすよう  $x, y$  軸を定める．

1.  $x$  軸は 3 つのドットより構成される 3 角形の最も長い辺上にとる
2.  $y$  軸は  $x$  軸に直交し，残り（最も長い辺を構成しない）のドット上を通る．このとき，そのドットの  $y$  座標の値は正となる
3.  $x$  軸と  $y$  軸は右手系を成す

そして，中心ドットを基準として  $x$  軸方向に  $i$ ， $y$  軸方向に  $j$  個目のドットの位置を  $r_{i,j}$  と表す．つまり，この段階で  $r_{1,0}$ ， $r_{-1,0}$  及び  $r_{0,1}$  が決定されたことになる．図 4.3-(1) はこの段階を表す．

次に， $r_{0,0}$  及び  $r_{0,-1}$  の推定位置  $r_{0,0}^e$ ， $r_{0,-1}^e$  を式 (4.3) により求める．つまり，ドットがほぼ等間隔に並んでいることを利用し，未定であるドット位置を近傍ドット位置の線形和として近似的に求める．

$$\begin{cases} r_{0,0}^e = (r_{1,0} + r_{-1,0}) / 2 \\ r_{0,-1}^e = r_{0,0} + (r_{0,0} - r_{0,1}) \end{cases} \quad (4.3)$$

そして，抽出されたドットのうちそれぞれの推定位置の最も近くにあるドットを  $r_{0,0}$ ， $r_{0,-1}$  とする．図 4.3-(2) はこの段階を表す．

次に， $r_{i,0}$  ( $i = -2 \cdots -m, 2 \cdots m$ ) の推定位置  $r_{i,0}^e$  を式 (4.4) を満たすよう計算する．

$$\begin{cases} \angle (r_{i,0}^e - r_{i-1,0}) \cdot (r_{i-1,0} - r_{i-2,0}) = \\ \quad \angle (r_{i-1,0} - r_{i-2,0}) \cdot (r_{i-2,0} - r_{i-3,0}) \\ \|r_{i,0}^e - r_{i-1,0}\| = \|r_{i-1,0} - r_{i-2,0}\| \end{cases} \quad (4.4)$$



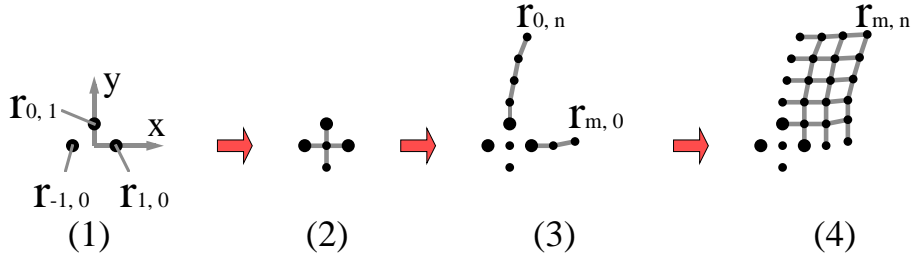


図 4.3 メッシング操作の過程

ただし， $\angle v_1, v_2$  はベクトル  $v_1$  から  $v_2$  への回転角度を表す．つまり，滑りの発生によるドット列の変形を考慮しながら，次のドット位置を推定することになる．そして，前ステップと同様に推定位置の最も近くにあるドットを  $r_{i,0}$  とする．この処理は  $r_{0,j}(j = 2 \cdots n, j = -2 \cdots -n)$  に対しても同様に行われる．図 4.3-(3) はこの段階を表す．

最後に， $r_{i-1,j} - r_{i-1,j-1}$  及び  $r_{i,j-1} - r_{i-1,j-1}$  を局所的なドットパターンの基底ベクトル対とみなし， $r_{i,j}(i = -1 \cdots -m, 1 \cdots m, j = -1 \cdots -n, 1 \cdots n)$  の推定位置  $r_{i,j}^e$  を式 (4.5) で求める．

$$r_{i,j}^e = r_{i-1,j-1} + (r_{i-1,j} - r_{i-1,j-1}) + (r_{i,j-1} - r_{i-1,j-1}) \quad (4.5)$$

そして，同様に抽出されたドットのうち， $r_{i,j}^e$  に最も近いドットを  $r_{i,j}$  とする．図 4.3-(4) はこの状態を表す．

なお，以上の処理において，現在探索中のドットの 8 近傍に存在するドットのうち，既に決定されているドット間の軸に沿った距離の平均を基準距離と定義する．そして，推定ドット位置から基準距離の 0.25 倍の長さを半径とした円内にドットが存在しない場合は，その軸方向のドット探索を打ち切る．

一般にドットパターンの基底ベクトルを一意に定めることは難しいが，本章で提案したトラッキング手法では，基準となる 3 ドットを描画することでこの問題を回避している．また，変形するドットパターンに対してもロバストなメッシングが可能になるよう，弾性接触の特徴を考慮したアルゴリズムを考案している．

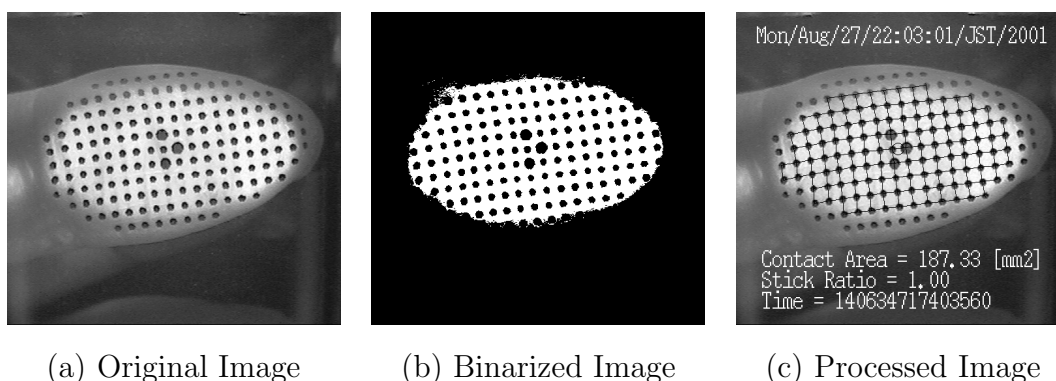


図 4.4 画像処理の過程

つまり，最初は変形の少ない接触領域中心付近のドット位置を決定し，その後中心から周辺に向かって基底ベクトル対を変更しながらドットを再構成するという手法としている．

実際に図 4.4-(a) のような元画像に対し，本節で提案した画像処理を適用した結果を図 4.4 に示す．ただし，図 4.4-(b) は 2 値化画像を，図 4.4-(c) は処理結果画像を表す．

## 4.5. 計測システムの構成

本節では，構築した計測装置のシステムの構成をハードウェア，ソフトウェアの両面より説明する．計測装置は小型/軽量であり，成人であれば母指，示指で摘み上げることができる．また，把持運動中のすべての計測データは，画像処理ボード /AD 変換ボードを通してホスト PC に取り込まれる．

### 4.5.1 ハードウェア構成

指先接触面を計測するために構築した計測装置の構成を図 4.5 に，その外観を図 4.6 に示す．本研究では，母指と示指による精密把持の計測を対象とするため，計測装置は透明アクリルチャンネルで構成された 2 つの把持面を持つ．右側のア

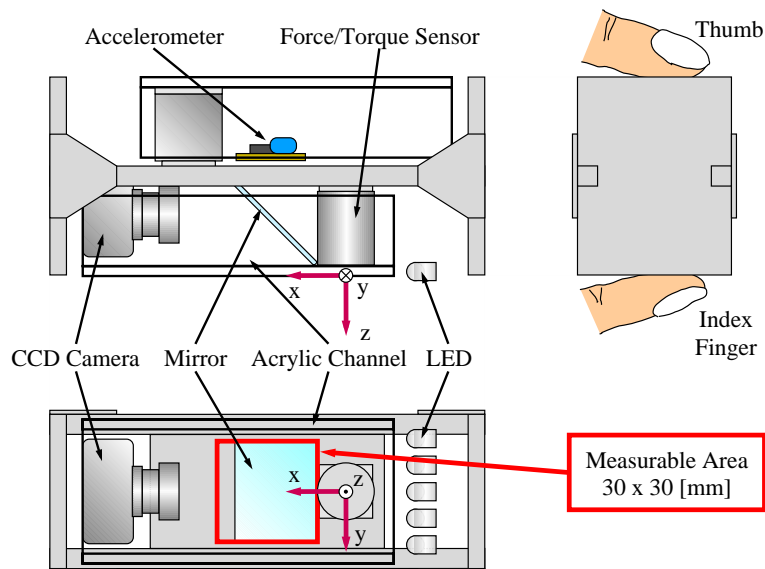


図 4.5 計測装置の構成

クリルチャンネルは 6 軸力センサ (nano 4/5-s15: BL-Autotec 製) に片持ちで支持される。一方，装置左側には加速度センサ (ADXL-202: Analog Devices 製) が設置される。

また，右側のアクリルチャンネル内側には小型 CCD カメラ (CK-200: Keyence 製)， $\pi/4$  [rad] の角度を持つよう設置された鏡，及びアクリルチャンネル側方より可視光を照射するための高輝度白色 LED が設置される。この構成で，アクリルチャンネル表面の  $30 \times 30$  [mm] 程度の領域が観察可能になる。また，カメラと鏡を含む光学系は全てアクリルチャンネルに固定されるため，力センサ自身の微小な変形や，力センサを支点としたアクリルチャンネルの微小な変形は画像計測に影響しない。

さらに，高さ 20 [mm] の空間が装置下部に用意されており，ここに任意の質量の負荷を挿入することで，装置の質量を変化させることができる。同様に，装置表面にワセリンや透明ゴムを塗付することにより，装置表面の摩擦係数も変化させることができる。

使用した CCD カメラ，力センサ，加速度センサ及び開発した計測装置の寸法

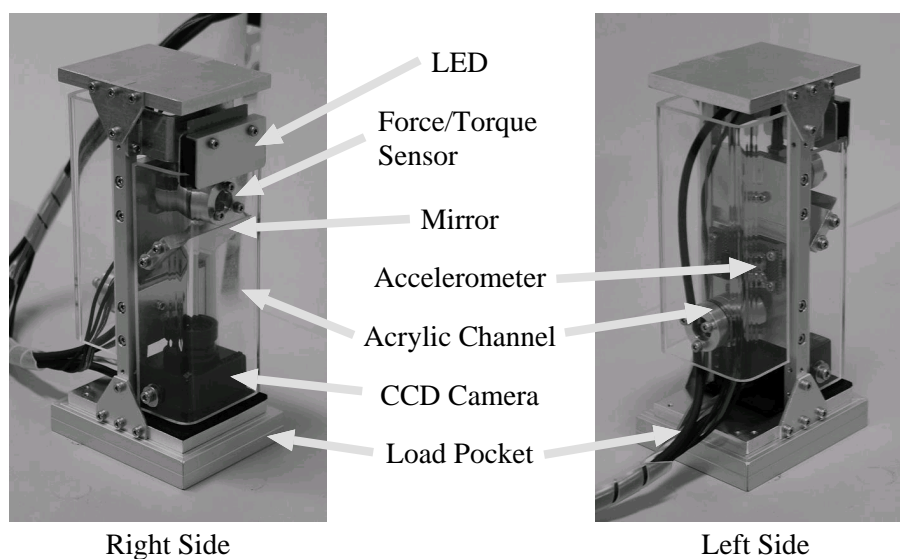


図 4.6 計測装置の外観

を表 4.1 に示す。カメラ，力センサ，加速度センサ共に小型軽量のものを使用しているため，計測装置も同様に小型軽量であり，被験者は無理無く精密把持を行うことができる。

また，本装置で設定可能な質量，摩擦係数の条件を表 4.2 に列挙する。ただし，表中の摩擦係数は概算値であり，実験結果を解析する際は被験者ごとに個別に推定された値を用いる。

なお，本節で構築した計測装置の組み立て図を付録 D に記載する。

#### 4.5.2 ソフトウェア構成

計測のためのソフトウェア構成を図 4.7 に示す。実験装置は計測とデータ処理を行うためのホスト PC に接続される。ホスト PC は PentiumIII 500 [MHz] を 2 つ備えており，OS として Linux2.2.14 及び RT-Linux2.0 がインストールされている。さらに，画像処理ボード (IP5000:日立製)，AD 変換ボード (AD12-64:Contec 製) をそれぞれ 1 枚ずつ内蔵している。

表 4.1 センサと計測装置のサイズ

	サイズ	質量
6 軸力センサ	$\phi 17 \times 22H$ [mm]	35 [g]
CCD カメラ	31.2W $\times$ 15.2D $\times$ 25.4H [mm]	25 [g]
加速度センサ	30W $\times$ 18D $\times$ 10H [mm]	10 [g]
計測装置	59W $\times$ 46D $\times$ 130H [mm]	270 [g]

表 4.2 設定可能な質量/摩擦条件

対象	設定可能な条件
質量	300 [g] , 600 [g] , 900 [g]
摩擦係数	0.4 (ワセリン) , 0.8 (アクリル板) , 1.8 (透明ゴム)

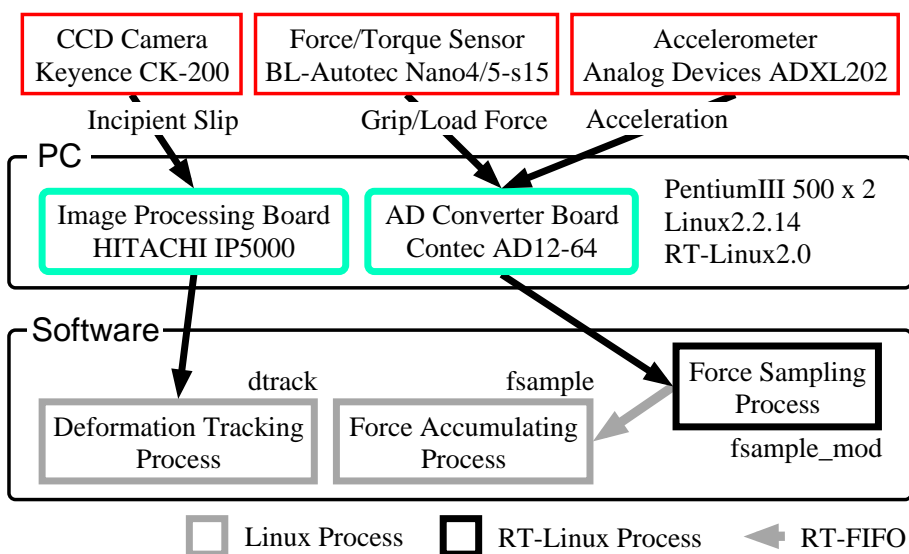


図 4.7 計測システムのソフトウェア構成

表 4.3 サンプリング周波数

計測項目	計測周波数
初期滑り	30 [Hz]
接触力，装置加速度	100 [Hz]

4.4 節で説明した画像処理のうち，縮小，2 値化，ラベリング等は IP5000 で実行される．また，それ以外のメッシング，3 次元座標の計算等はホスト PC の CPU で実行する．具体的には，Linux プロセスとして実行される dtrack において，全ての画像処理が行われる．また，処理結果はデータファイルとして保存される．指先に 150 点程度のドットが描画されていたとしても，リアルタイム（つまり，30 [Hz] で）に画像処理を行うことが可能である．

一方 4.3.3 節と 4.3.4 節で説明した接触力と装置加速度のサンプリングは AD12-64 で行う．直接 AD 変換ボードにアクセスするのは RT-Linux モジュールである fsample\_mod であり 100 [Hz] でサンプリングを実行する．また，得られたデータは RT-FIFO を通して Linux プロセスである fsample に送られ，データファイルとして保存される．RT-FIFO を用いたデータの通信を行うのは，RT-Linux モジュールから直接システムコールを利用することが出来ないからである．fsample は fsample\_mod に対し，サンプリング開始/停止等の指示を与える機能もある．

また，dtrack や fsample と共有メモリを介して通信する display を実行することで，以上の計測結果をディスプレイ上にリアルタイムに表示することができる．display による可視化結果を図 4.8 に示す．

## 4.6. 計測装置の性能評価

本節では 4.5 節で構築した計測装置の計測能力を評価し，本研究で行う一連の実験に使用するために十分な性能を備えていることを示す．

はじめに各計測対象のサンプリング周波数の一覧を表 4.3 に示す．これらは 4.5 節で説明した通りである．

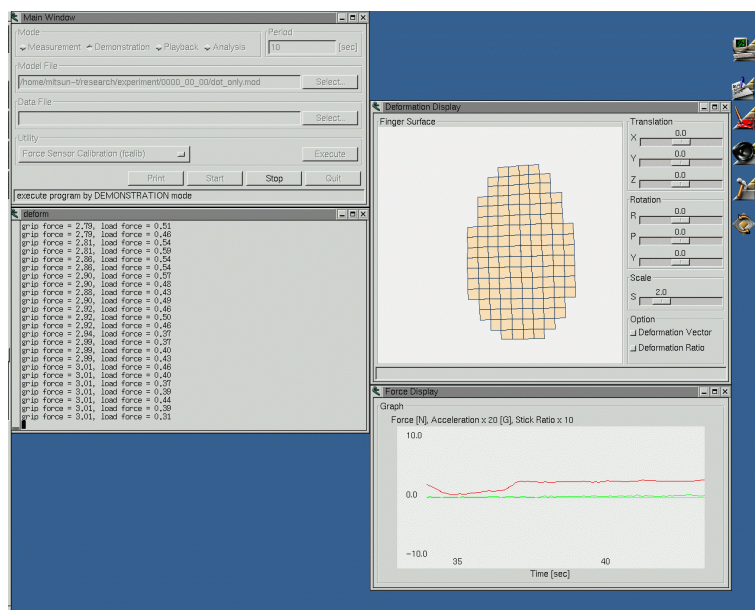


図 4.8 可視化プログラム display による指先変形と接触力の可視化

次に、各計測対象の計測精度を表 4.4 に示す。ただし、表中の“基準”とは誤差評価に用いた基準となるドット、負荷、加速度を表す。また、各計測対象は次のようにキャリブレーションとその後の誤差評価を行った。

#### 指先接触面画像処理

キャリブレーション 計測装置表面から 0, 5, 10 [mm] 離れた場所にキャリブレーションボード (5 × 5 のドットパターンが印刷された 25 × 25 [mm] 程度の平板) を順次平行に設置し、各位置での画像中のドット重心位置を計算する。一方、以上のドットのセンサ座表  $C_s$  での 3 次元位置は既知であり、これらをピンホールカメラモデルに適用し、カメラパラメータ (3 × 4 の行列) を最小自乗法で求める。

精度評価 先に使用したキャリブレーションボードには、位置が既知でキャリブレーションに使用しないドットも描画されている。はじめに、キャリブレーション

表 4.4 計測精度

計測項目	基準	平均誤差	標準偏差
画像処理	半径 0.8 [mm] のドット	0.02 [mm]	0.006 [mm]
把持力 ( $x = 0$ [mm])		0.10 [N]	0.015 [N]
把持力 ( $x = 20$ [mm])	9.8 [N] の負荷	0.09 [N]	0.015 [N]
負荷力 ( $x = 0$ [mm])		0.07 [N]	0.006 [N]
加速度	1.0 [G] の重力加速度	0.02 [G]	0.006 [G]

ションボードが装置表面から 0 [mm] に設置されているときに，このドットの画像中での位置を計測する．そして，キャリブレーションで計算したカメラパラメータと  $z = 0$  [mm] という拘束条件を用い，そのドットの 3 次元座標を計算する．最後に，この計算結果と実際のドット位置とを比較する．

#### 指先接触力計測

キャリブレーション センサに付属のキャリブレーションマトリクスを使用し，力とモーメントを計算する．

精度評価 質量が既知である負荷を把持面に与え，センサ出力より計算される力と負荷の質量を比較する．ただし，把持力に関しては，アクリルチャンネルの影響が大きく出ることが予想されるため， $x = 0$  [mm]， $x = 20$  [mm] の 2 ヶ所で評価を行う．

#### 装置加速度計測

キャリブレーション 重力加速度を 1.0 [G] と仮定し，加速度センサを平板状で上方向と下方向に向けたときの出力より補正係数を算出する．

精度評価 平板状で横方向 (加速度を検出する軸が平板と平行になる方向) に向けた時の出力と，実際の加速度 (この場合重力が働かないので 0.0 [G] となる)



を比較する．

指先変形の計測は，5，7章で述べる計測実験において負荷力方向に 0.6 [mm] 程度の滑りが発生していることを考えると，十分な計測精度であると言える．また，指先変形計測周波数は 30 [Hz] であるが，指のなぞり運動で発生する全滑りのように大きな振動を伴う現象ではなく，準静的な変形が支配的となる局所滑りを計測対象としているため問題は無い．

また，把持/負荷力の計測に関しても，5，7章で述べる計測実験において，把持/負荷力が 1.5 [N] 以上であることを考えると，把持運動計測を行うだけの十分な精度があると言える．また，把持力における 2 つの評価点の結果を比較すると，アクリルチャンネルの影響がほとんど出ていないことが分かる．これは，アクリル板を“コ”の字型に曲げることで剛性を高めているためである．

一方，加速度の計測に関しても 7章で述べる計測実験において持ち上げ時の加速度が 0.2 [G] 程度であることを考慮すると，十分な計測精度であると言える．

以上より，本論文で開発した計測装置は，人の把持動作に伴う初期滑り現象を計測するのに十分な機能と性能を備えていると言える．

## 4.7. 計測装置を用いた指先接触面計測

本節では，構築した計測装置を用い予備的に行った指先接触面計測結果を示す．ただし，計測は固定された装置に対し，指先を能動的に押しつけることで行われており，計測の際に行った動作は，Stroking (部分滑り)，Stroking (全滑り)，Twisting (部分滑り) の 3 種類である．また，ここではカメラを用いた初期滑り計測だけを行う．

### 4.7.1 指先の Stroking (部分滑り)

指先に並進運動を与え始めたときの時系列処理画像を図 4.9 に示す．ただし，ここでは把持運動における負荷力と同様に，横方向 (画像中で上から下方向) に並進力を加えている．また，処理画像中で黒線で結ばれたドットは正しくトラッ

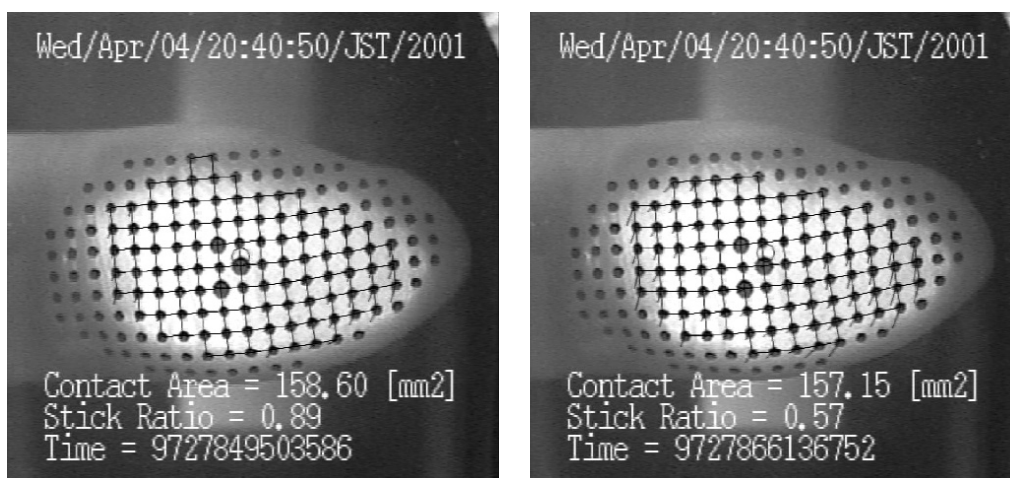


図 4.9 指先に接線方向力を加えている時の処理画像 (局所滑り) : ただし , 接線方向力は画像下向きに加えられている

キングが行われており , それ以外のドットは接触領域内に存在しないため処理されていない . ドットから伸びている独立した黒線は , 10 倍に拡大したドットの滑り方向を表す .

画像を見れば分かる通り , 指先には相対的な滑りは生じていない . つまり , 固着率 (Stick Ratio) はいずれの画像においても 0 より大きな値となっている . また , フローの分布を見ると接触領域周辺付近程大きな滑りが生じることが分かる . この結果は , 3 章で行った弾性体接触理論に基づく初期滑り量の計算結果と定性的に一致する . また , 指先で発生する初期滑りと理論的に予測される初期滑りの詳細な比較は 5 章で行う .

#### 4.7.2 指先の Stroking (全滑り)

4.7.1 節の状態から , 更に並進力を与え続けると指先に相対的な滑りが発生する . 図 4.10 がその時の処理画像であるが , フローが全てのドットから延びていること , そして固着率が 0 となることより全滑りの発生が確認できる . このような状況では , 指の動きが高速になるため , 30 [Hz] の画像処理では完全に計測で

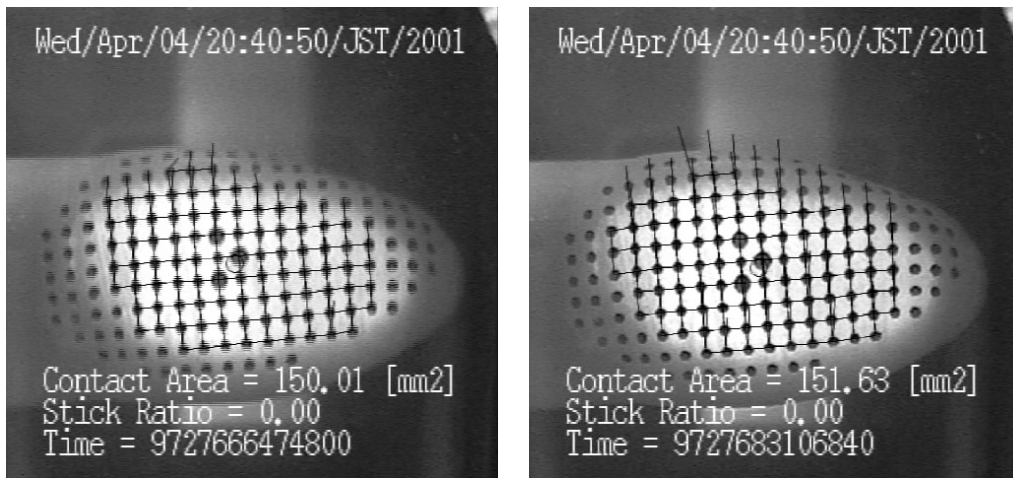


図 4.10 指先に接線方向力を加えている時の処理画像 (全滑り) : ただし , 接線方向力は画像下向きに加えられている

きない可能性がある . しかし , そのような状況での計測は本節で構築した計測装置の対象外である .

### 4.7.3 指先の Twisting

最後に , 指先にトルク (回転力) を加えている時の時系列処理画像を図 4.11 に示す . 回転方向の力を加えても , 初期滑りと等価な現象が発生することが確認できる . つまり , 中心付近では滑りが生じないのに対し , 周辺付近では滑りが発生する . また , 周辺部ほど滑りベクトルが大きくなるという結果も , 3 章で行った議論との類似性を考慮すれば容易に理解できる . ただし , この場合は接線方向力が回転方向になるため , 発生する滑りベクトルも回転方向になる .

実際 , 剛体に押し付けられた状態で , トルクを加えられる弾性球の挙動もモデル化されているが [117, 118] , Cattaneo の理論と同様の理由により , 接触領域周辺から局所的な滑りが生じることが示されている .

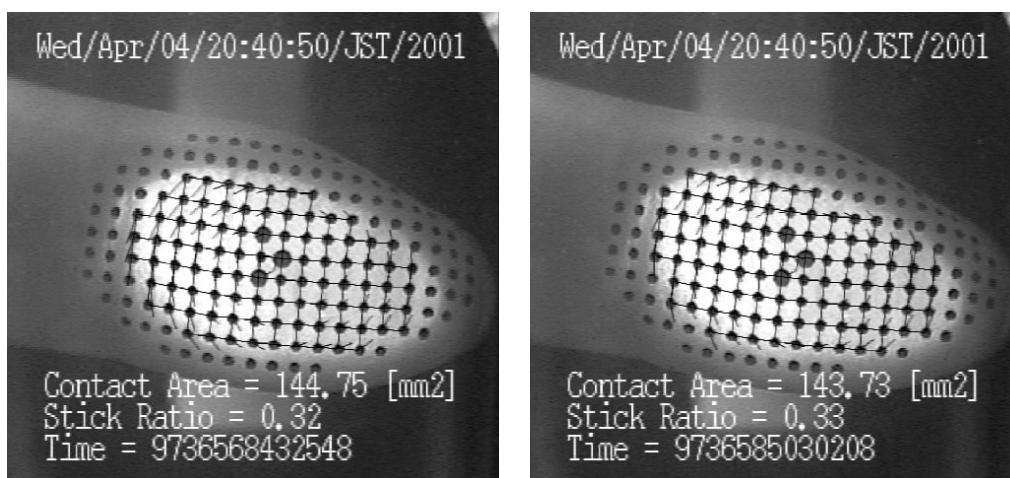


図 4.11 指先に回転力を加えている時の処理画像：ただし，トルクは接触中心近傍を中心として時計周りに加えられている

#### 4.8. 本章の結論

本章では，計測装置に求められる必要機能を明確にした上で，実際に開発した計測装置のハードウェア，ソフトウェア構成に関する説明を行った．計測装置は，カメラを用いた指先接触面計測，力センサを用いた指先接触力計測，加速度センサを用いた装置加速度計測を行うことにより，固着率，把持/負荷力，計測装置の動きを同時に計測することができる．

また，装置の計測精度を評価した結果，本論文で対象とする初期滑りを計測するために十分な計測能力を有していることが分かった．

最後に，異なる接触状態を与えた指先接触面の計測結果を示し，この装置が有効に機能することを示した．つまり，指先に接線方向力を加えた時の初期滑りの発生は，3章で述べた弾性体接触理論に基づく予測と定性的に一致するものであった．また，指先にトルクを加えたときにも初期滑りと等価な現象が発生することを確認した．この場合滑りの方向は回転方向になるが，中心付近に固着領域が存在し，接触領域周辺ほど滑りが大きいという2点において初期滑りと等しい傾向を持つ．

なお，本章で構築した計測装置の組み立て図を付録 D に記載する．



# 第5章 指先接触面内で発生する 初期滑り現象の検証

## 5.1. 本章の趣旨

本章では、3章に説明した方法で算出される初期滑りと、4章で構築した計測装置を用い実際に人の指先で計測される初期滑り発生の傾向を比較する。そして、人の指先が剛体平板と接触し接線方向力を加えられる際の挙動が、弾性体接触理論による説明と定性的に一致することを示す。ただし、初期滑り量ではなくその傾向を比較するのは、シミュレーションと実験が完全に同一の設定で行えないためである。

まずはじめに、3章に説明した方法で、弾性球に生じる初期滑り量を計算する。シミュレーションの設定は、同一の把持力/摩擦係数で負荷力を変化させる場合と、同一の把持/負荷力で摩擦係数を変化させる場合の2通りを用意する。そして、それぞれの条件において、境界条件の変化により滑りベクトルの分布がどのように変化するかを計算する。

次に、4章で説明した計測装置と、高精度位置決めが可能な3軸ステージを組み合わせ構築した計測システムの構成を説明する。本システムでは、3軸ステージに15度の角度で固定された人差し指を、計測装置に対し押し付けることで、指先に任意の把持/負荷力を加える。そして、そのときに発生する初期滑りは、装置内に固定されたカメラより計測される。

最後に、構築した計測システムを用い、静的負荷に対する初期滑りの計測を行う。計測はシミュレーションの設定と同様に、同一の把持力/摩擦係数で負荷力を変化させる場合と、同一の把持/負荷力で摩擦係数を変化させる場合の2つの条件で行う。そして、計測された初期滑りベクトルの分布とシミュレーション結

果を比較し，弾性体接触理論による指先接触モデルが実際に人の指先で発生する現象を十分説明できることを示す．

## 5.2. シミュレーション/実験の目的

3章で展開した議論では，等方弾性体で構成された球を指先モデルとして使用した．そして，法線方向圧力分布として Hertz の理論を，接線方向圧力分布として Cattaneo の理論を適用することで，初期滑りの発生を定量的に説明した．また，初期滑りが発生する弾性体の接触状態を，滑り余裕という観点より代表するパラメータとして，固着率を提案した．このように，3章の議論では単純化された指モデル/接触モデルを使用したため，弾性体の接触に関して極めて見通しの良い指標を得ることが出来た．

しかし，実際の人の指先には爪や骨のように物性が異なる部位があるだけでなく，皮下組織にも層状構造がありそれぞれ異なる弾性係数を持つことが知られている．つまり，人の指先は先の弾性球モデルに比べ，複雑な材料特性と構造を持つ．このため，3章で行った一連の議論より得られた弾性体接触に伴う現象が，人の指先接触においてもそのまま成り立つとは限らない．

そこで本章では，3章に示した方法で算出される初期滑りベクトルの分布と，4章で構築した計測装置を用い，実際に人の指先で計測される初期滑り分布とを比較する．そして，人の指先接触面で発生する現象が，弾性体接触理論で予測される現象と定性的に一致することを示す．また，固着率に関しては定量的な比較を行う．6章と7章では，把持運動に伴う触覚情報処理を固着率に基づき解析/モデル化するが，このような議論を行うためには，人の指先接触面で発生する現象が弾性体接触理論で良く説明できるという前提が必要となるからである．

ここで，初期滑り量ではなく，初期滑り発生の傾向を比較するのは，シミュレーションと実験の設定が完全に同一にはならないからである．つまり，シミュレーションにおけるモデル形状は球であるため，接触領域が円形となるのに対し，指先では縦方向（つまり，根元から指先への方向）に曲率が小さいため，その接触領域は楕円に近い形状となる．このため，単純に初期滑り量の比較を行うことは



表 5.1 シミュレーションで使用する弾性球モデルの設定

対象	記号	使用される値
半径	$R$	8.0 [mm]
縦弾性係数	$E$	0.5 [N/mm <sup>2</sup> ]
ポワソン比	$\nu$	0.48

出来ない．また，本研究では被験者ごとの厳密な弾性係数の同定は行なわない．このため，シミュレーションと被験者の縦弾性係数/ポワソン比には，差異が生じる．一方，3章の式 (3.13) から式 (3.16) を見れば明らかなように，初期滑り量はこれら弾性係数に依存する（式中では横弾性係数とポワソン比との関係で表されるが，縦/横弾性係数とポワソン比のうち独立な変数は2つである．詳しくは付録 A を参照のこと）．このため，初期滑り量の定量的比較には意味がなくなる．以上の理由により，初期滑りに関しては，厳密な値を比較することは行わず，単に同一条件内での大小関係が一致するかを比較するにとどめる．

一方，固着率に関しては理論的に計算される値と，計測された値を比較する．これは，付録 C に示すように，接触領域形状や接触領域内圧力分布を一般化した弾性体接触を仮定したとしても3章で導出した固着率に関する議論が成り立つからである．また，固着率は式 (5.1) で定義されるため，弾性係数に依らないパラメータである．

$$s = \left(1 - \frac{F_l}{\mu F_g}\right)^{2/3} \quad (5.1)$$

## 5.3. シミュレーションの設定

### 5.3.1 モデルの設定

シミュレーションに用いる弾性球モデルを，表 5.1 に示す．

ただし，これらのパラメータはそれぞれ以下の理由により決定する．半径は，

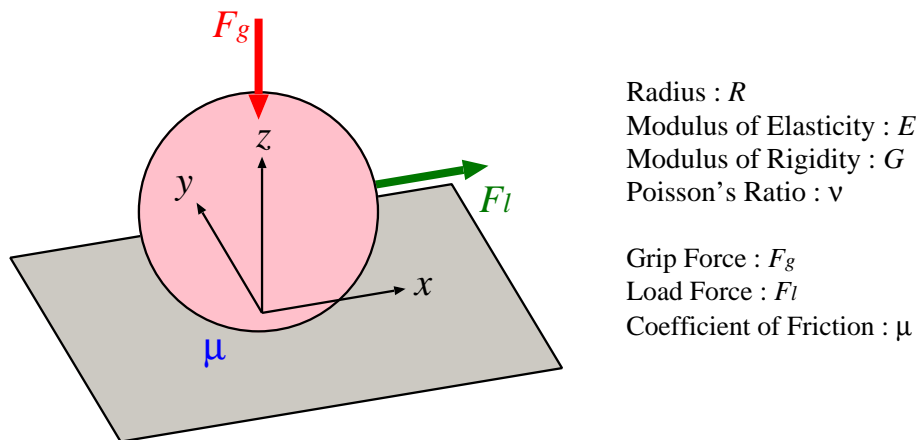


図 5.1 シミュレーションの設定

指先の横方向（つまり，指根本から指先方向とは直交する方向）の曲率とほぼ同一 [25] になるよう 8.0 [mm] と設定する．また，指先の縦弾性係数は様々な研究で調べられているものの，個人差も多く代表的な値を設定することは難しい．そこで，本研究では縦弾性係数を 0.5 [N/mm<sup>2</sup>] と設定する．一方，人の指先はほぼ非圧縮とみなしても差し支えないことが知られているためポワソン比は 0.48 と設定する．

### 5.3.2 解析条件の設定

解析の設定を図 5.1 に示す．接触面となる平板は  $x$ - $y$  軸で張られる平面と一致しており， $-z$  軸方向に無限にのびる．また，5.3.1 節で定義された弾性球モデルは，初期状態において原点で平板と接触するよう設置される．さらに，弾性球と平板間の摩擦係数は  $\mu$  とする．

弾性球にはこの状態から  $-z$  軸方向の法線方向力（把持力） $F_g$  を加え，次いで  $x$  軸方向の接線方向力（負荷力） $F_l$  を加える．

シミュレーションは，把持力/摩擦係数が一定で負荷力が変化する場合と，把持/負荷力が一定で摩擦係数が変化する場合の 2 つの設定で行う．初期滑りの発

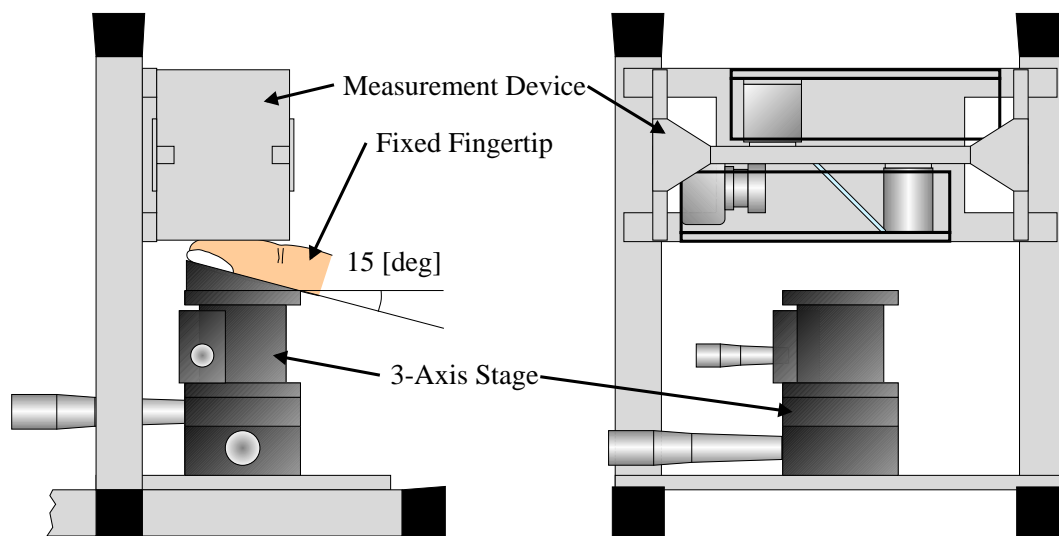


図 5.2 計測システムの構成

生メカニズムを考えると，滑りベクトルが負荷力方向を向くことが予想される．具体的な境界条件と，その条件における計算結果は 5.5 節と 5.6 節で説明する．

## 5.4. 計測の設定

### 5.4.1 実験装置の構成

本章で用いる計測装置の概要を図 5.2 に示す．この装置は，4 章で構築した初期滑り計測装置と，高精度位置決めが可能な 3 軸ステージ (TSD-405C: シグマ光機製) より構成される．このステージの仕様を表 5.2 に示す．

また，3 軸ステージ上には 15 度の角度を持つ指固定板が設置されている．そして，被験者の指先をこの板上に固定し，3 軸ステージを計測装置に対してスライドさせることで，任意の力を指先に加える．

実際に被験者の手が指固定板に固定された状態での装置外観を図 5.3 に示す．指固定板と被験者の手は，指の根元と手首に設置されたベルトと，指裏側に接着された両面テープで強固に固定される．このため，接線方向力を加えたとしても，

表 5.2 3 軸ステージの仕様

要素	仕様
サイズ	40W × 40D × 61 ± 3H (つまみを除く)
質量	550 [g]
耐荷重	88.3 [N]
移動量	$x, y$ 軸: ±6.5 [mm], $z$ 軸: ±3.0 [mm]

指先が回転することはほとんどない。

なお，本章で構築した計測装置の組み立て図を付録 D に記載する。

#### 5.4.2 実験条件の設定

計測の設定を図 5.4 に示す。計測装置の原点は 4 章で設定したものに従うため，接触面（計測装置表面）は  $x$ - $y$  軸で張られる平面となる。またこの平面の外向き法線が  $z$  軸方向となる。また，装置座標系の原点は力センサ中心と一致するため，実際に指先が接触する領域の中心は  $x = 20$  [mm]， $y = 0$  [mm] 近傍となる。

指固定板が装置に対して 15 度で固定されているため，指先も同様に計測面に対して 15 度で接触する。また，指先は  $y$  軸方向を向く。

指先にはこの状態から  $-z$  軸方向の法線方向力（把持力） $F_g$  を加え，次に  $-x$  軸方向の接線方向力（負荷力） $F_l$  を加える（負荷力を加える方向がシミュレーションとは逆であることに注意されたい）。

計測はシミュレーションと同様，把持力/摩擦係数が一定で負荷力が変化する場合と，把持/負荷力が一定で摩擦係数が変化する場合の 2 つの設定で行う。また，計測では負荷力が  $-x$  軸方向に加えられるため，初期滑りも  $-x$  軸方向に発生することが予想される。具体的な境界条件とその条件での計測結果は 5.5 節と 5.6 節で説明する。

ただし，摩擦係数は被験者ごとに個別に推定する。具体的には，以下の手順で摩擦係数の推定を行う。はじめに被験者に計測装置を掴み上げ空中で保持しても

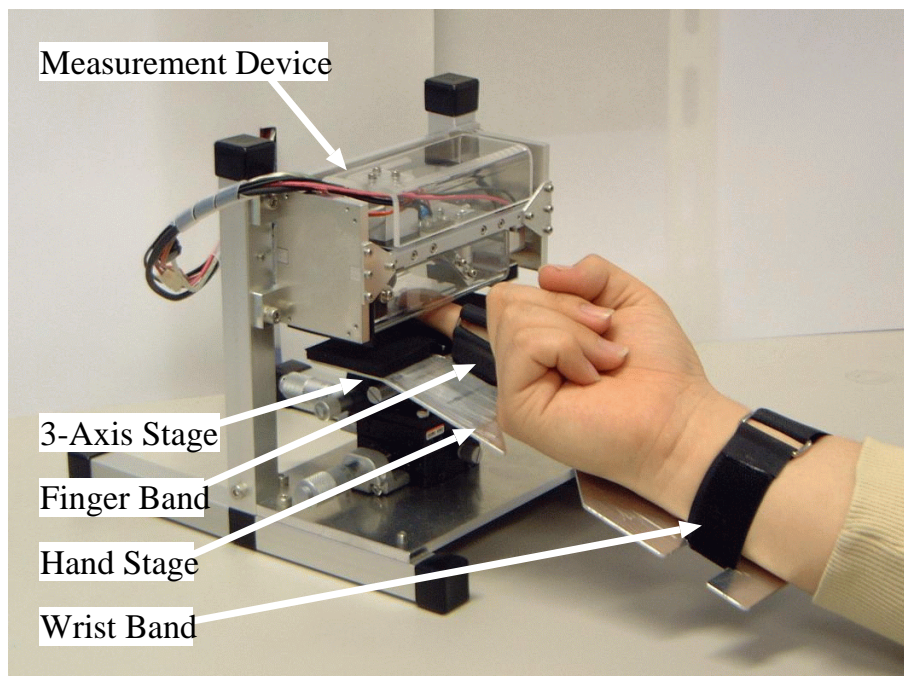


図 5.3 計測システムの外観

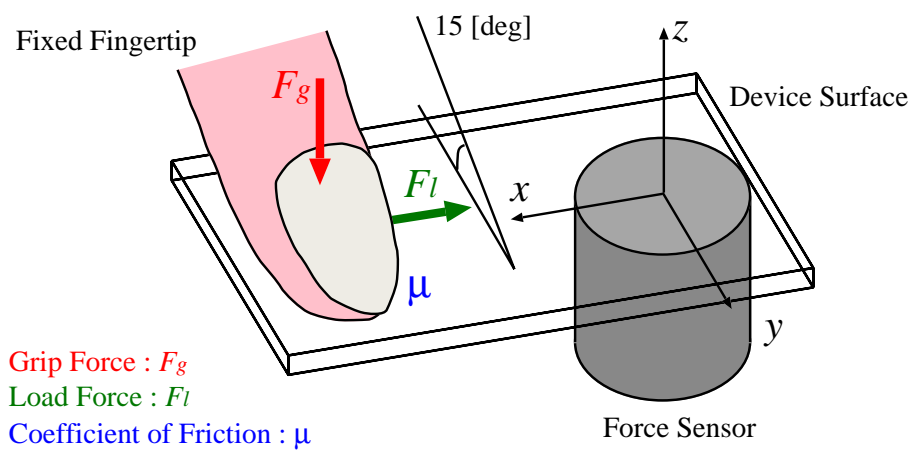


図 5.4 計測の設定

表 5.3 負荷力が変化する境界条件

条件名	把持力	負荷力	摩擦係数
LOAD-SMALL	3.0 [N]	1.0 [N]	0.8
LOAD-NORMAL	3.0 [N]	1.5 [N]	0.8
LOAD-LARGE	3.0 [N]	2.0 [N]	0.8

らう．そして，この状態から徐々に把持力を減少させるよう指示し，物体が滑る瞬間の把持力  $F_g^{slip}$  と負荷力  $F_l^{slip}$  より式 (5.2) で摩擦係数  $\mu$  を算出する．ここで，装置が滑る瞬間は加速度センサ情報より特定する．

$$\mu = \frac{F_l^{slip}}{F_g^{slip}} \quad (5.2)$$

なお，この実験には 3 名の右利き男性が参加しており，それぞれ A, B, C と呼ぶ．また 1 つの設定に対し，10 回の繰り返し計測を行った．

## 5.5. 負荷力の変化に伴う初期滑りの変化

### 5.5.1 シミュレーション結果

本節では，把持力/摩擦係数を一定に保ち，負荷力のみを変化させる設定でのシミュレーション結果を示す．

シミュレーションに使用する境界条件を表 5.3 に示す．また，以下の説明でこれらの条件を参照するときは条件名を用いる．

はじめに，各条件で計算された初期滑りをフローを用いて可視化した結果を図 5.5 に示す．ただし (a), (b), (c) はそれぞれ，LOAD-SMALL, LOAD-NORMAL, LOAD-LARGE 条件でのシミュレーション結果を示しており，各々の図中で外側の円は接触領域の境界を，内側の円は固着領域と滑り領域の境界を表す．また，どの条件でもフローは 5 倍で表示されている．

この結果より，全条件に共通する初期滑り発生の傾向として以下の 3 点が明らかになる．

1. どの条件でも，初期滑りは接触領域中心近傍では発生せず，その周辺近傍で同心円状に発生する
2. どの条件でも，固着領域境界から接触領域境界に近づくほど滑りベクトルが大きくなる
3. どの条件でも，滑りベクトルの方向は負荷力の方向とは完全に一致せず，固着領域を避ける流線方向の傾きを持つ

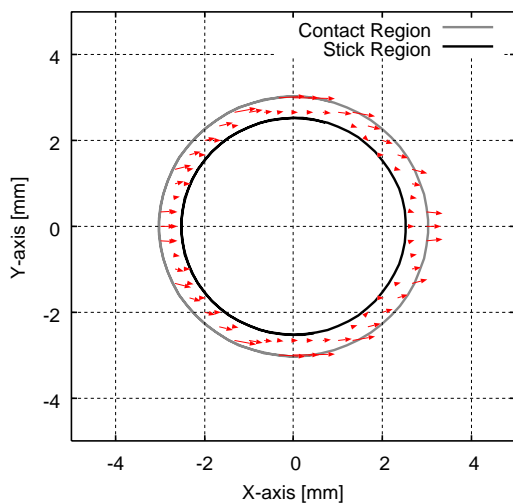
1. と 2. は，3 章で説明した初期滑り発生のメカニズムを考えれば直観的に理解できる結果である．また，3. に関しては，負荷力に直交する方向の圧力分布を 0 とする Cattaneo の理論と完全に一致しない．しかし，3 章で行った初期滑り計算法の妥当性検証では，負荷力に直交する方向の滑り量が，負荷力方向の滑り量の 30 % 程度でしかないことが明らかになった．これは，無視できる程微小な値ではないが Cattaneo の理論を概ね満たす結果であると言える．

一方，各条件間を比較すると以下の 2 点が明らかになる．

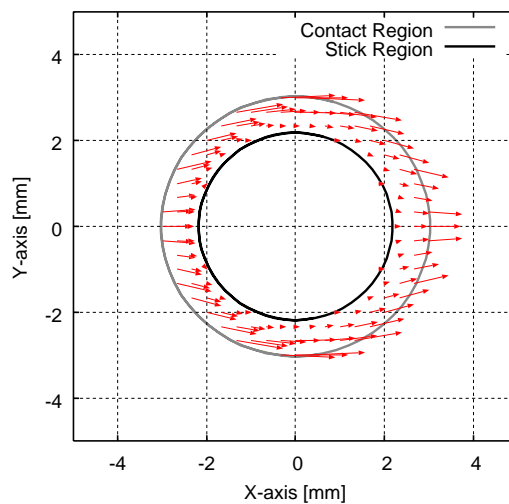
4. 負荷力が大きくなる程，滑り領域が接触中心に向かって拡大する．つまり固着率が減少する
5. 負荷力が大きくなる程，同一位置における滑り量が大きくなる

以上の 2 点に関しても，初期滑りの発生原理を考えれば直観的に理解出来る結果である．

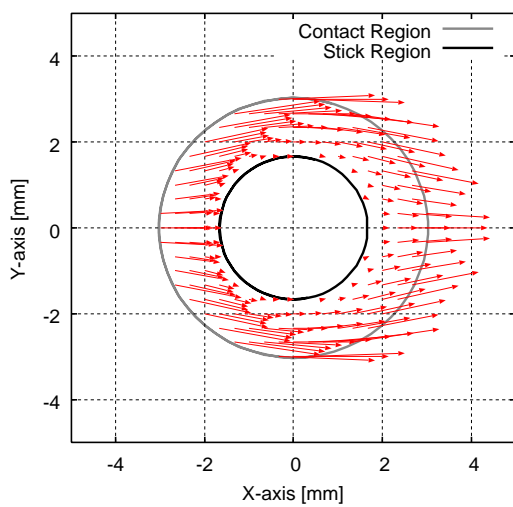
また，滑りベクトルの分布とその大きさをより明確に比較するため，接触領域の重心を通り負荷力に垂直な線分上での，負荷力方向の滑り量を考える．これは，この線分上で最大の滑りが発生し，かつ線分が接触領域中心を通るため固着領域が必ず含まれるからである．つまり，この線分上の滑り分布は，滑りが全く生じない領域から，最大滑りが生じる領域までを含むため，その変化を最も良く表すことになる．本シミュレーションにおける座標軸の設定と加える力の方向を考えると，ここでは  $y$  軸上で  $x$  軸方向の滑り量変化を比較することになる．



(a) LOAD-SMALL 条件



(b) LOAD-NORMAL 条件



(c) LOAD-LARGE 条件

図 5.5 負荷力が変化する条件で計算された初期滑り：ただし，各々の図中で外側の円は接触領域の境界を，内側の円は固着領域と滑り領域の境界を表す．また，横軸は  $x$  軸 ([mm])，縦軸は  $y$  軸 ([mm]) を表す．



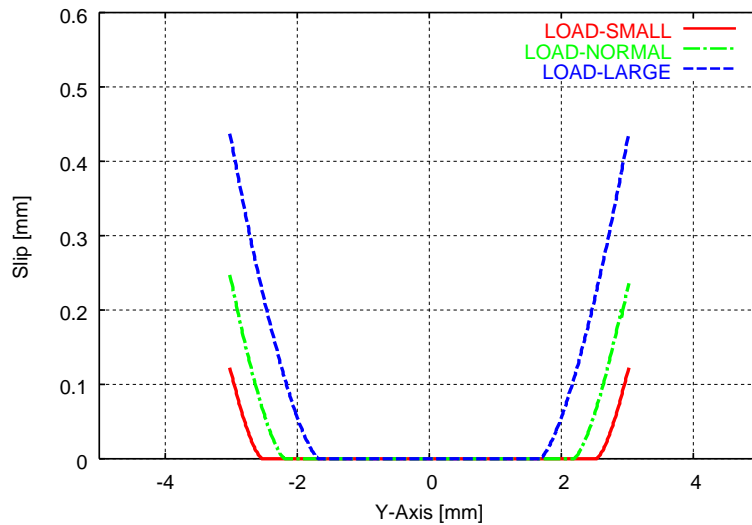


図 5.6 負荷力が変化する条件で計算された  $y$  軸上の  $x$  軸方向滑り量：ただし，各々のグラフは上から LOAD-LARGE，LOAD-NORMAL，LOAD-SMALL 条件での計算結果を表す．また，横軸は  $y$  軸 ([mm]) を，縦軸は滑り量 ([mm]) を表す．

各条件における計算結果を 1 つのグラフにまとめたものを，図 5.6 に示す．どのグラフも，中心が平らになったアルファベットの“M”状のプロファイルを持つが，上から LOAD-LARGE，LOAD-NORMAL，LOAD-SMALL 条件での計算結果を表す．また，このグラフにおいて，左右に存在する線が引かれていない区間が接触領域外を，中心付近の平らな区間が固着領域を表す．

このグラフより，以下の 2 点が明らかになる．

6. どの条件でも，接触領域は変化しない．これは把持力が変化しないため当然の結果である
7. どの条件でも，滑り量変化の傾きはほとんど変化せず，滑り領域の開始点が接触中心に近づくことで滑り領域と滑り量が増える

一方，式 (5.1) より，各条件での固着率は表 5.4 のように計算される．

表 5.4 負荷力が変化する条件で計算された固着率

条件名	固着率
LOAD-SMALL	0.8763
LOAD-NORMAL	0.6167
LOAD-LARGE	0.3967

### 5.5.2 計測結果

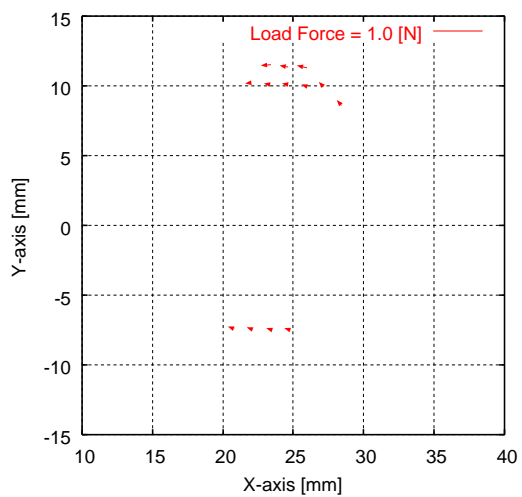
本節では、把持力/摩擦係数を一定に保ち、負荷力のみを変化させる設定での計測結果を示す。なお、計測に使用する境界条件は、5.5.1 節のシミュレーションにおいて用いた条件 (表 5.3) と同一である。

はじめに、被験者 A で計測された初期滑りを 5 倍に拡大したフローを用いて表した結果を図 5.7 に示す。ただし (a), (b), (c) はそれぞれ、LOAD-SMALL, LOAD-NORMAL, LOAD-LARGE 条件での計測結果を表す。また、負荷力が  $-x$  軸方向に加えられるため、初期滑りの方向もシミュレーションとは逆になることに注意されたい。

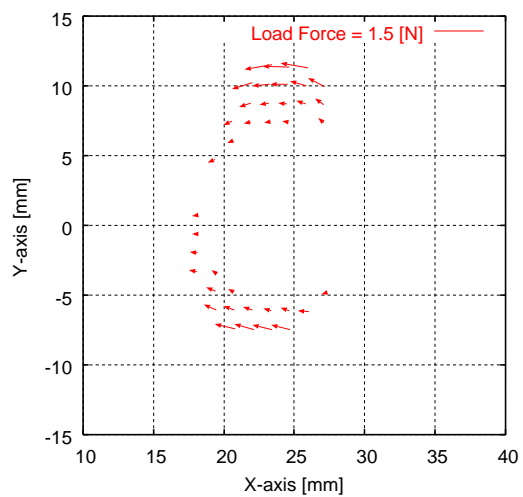
この図より、どの条件にも共通する初期滑り発生の傾向として以下の 4 点が明らかになる。

1. どの条件でも、初期滑りは接触領域中心近傍では発生せず、その周辺近傍で発生する
2. どの条件でも、固着領域境界から接触領域境界に近づくほど滑りベクトルが大きくなる
3. どの条件でも、滑りベクトルの方向は負荷力の方向とは完全に一致せず、固着領域を避ける流線方向の傾きを持つ
4. どの条件でも、接触領域の左右の端 (接触開始端と終了端) では滑りが発生しにくい (特に接触終了端では滑りベクトルがほとんど観測されない)

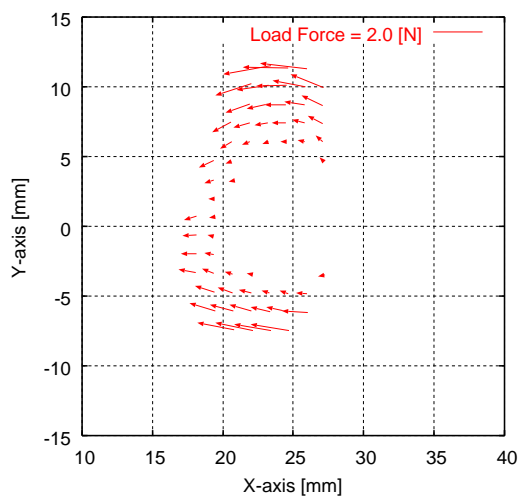
1. と 2. に関しては、3 章で説明した初期滑りの発生原理を考えれば直観的に



(a) LOAD-SMALL 条件



(b) LOAD-NORMAL 条件



(c) LOAD-LARGE 条件

図 5.7 負荷力が変化する条件で計測された初期滑り (被験者 A): ただし, フローは 5 倍に拡大されている.

理解できる結果であると同時に，5.5.1 節で行ったシミュレーション結果と一致する．また，3. に関しては，Cattaneo の理論と完全に一致するものではないが，シミュレーション結果とは似た傾向を持つ．一方，最後の 4. はシミュレーションでは確認できない現象であるが，発生要因として以下の 2 点が考えられる．

- 指に対し横方向に負荷力が加わる場合，皮膚が大きく変形する．つまり，負荷力が増加する過程で，接触開始端では接触していなかった皮膚が巻き込まれるのに対し，接触終了端では接触していた皮膚が排出される．このため，負荷力を加える前後での対応を取ることができず，滑りとして計測されない．
- 指先が強固に固定されているにも関わらず，微小な回転接触が生じるため見かけの滑りが小さくなる．このため，滑りが計測されにくい．

しかし，指が強固に固定されていることを考えると，上記 4. は大変形により発生する現象であると考えられる（実際，付録 E では縦方向に負荷力を加えたときの滑り領域が可視化されるが，この場合横方向ほど大きく変形しないため，滑り領域は同心円状に広がる）．

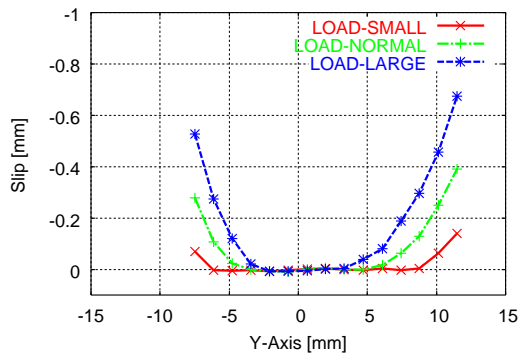
一方，条件間を比較すると以下の 2 点が明らかになる．

5. 負荷力が大きくなる程，滑り領域が接触中心に向かって拡大する．つまり固着率が減少する
6. 負荷力が大きくなる程，同一位置における滑り量が大きくなる

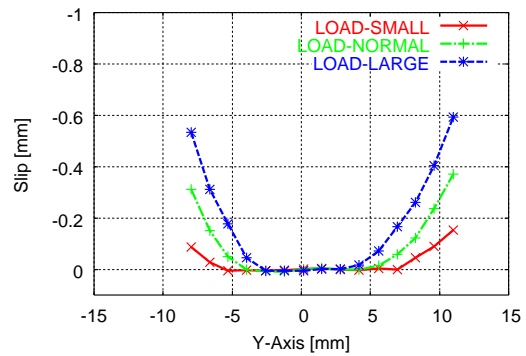
以上の 2 点も 5.5.1 節で行ったシミュレーション結果と一致するものである．

また， $y$  軸に平行で接触領域重心に最も近いドット列で計測された  $x$  軸方向の滑り分布を図 5.8 に示す．ただし，縦軸が負の値となるのは，負荷力が  $-x$  軸方向に加えられているためである．また，シミュレーション結果と比較し易くなるよう  $y$  軸を反転させている．

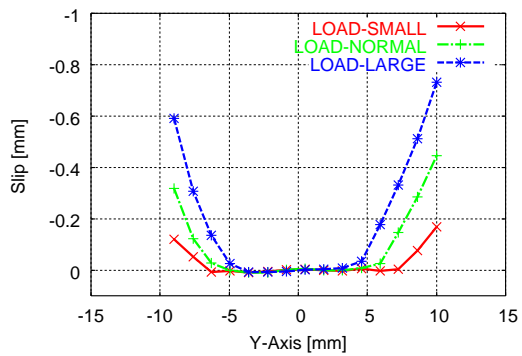
シミュレーションと同様，どのグラフもアルファベットの “M” のようなプロファイルを持が，上から LOAD-LARGE，LOAD-NORMAL，LOAD-SMALL 条件での計測結果を表す．また，このグラフにおいて，左右に存在する線が引かれ



(a) 被験者 A



(b) 被験者 B



(c) 被験者 C

図 5.8 負荷力が変化する条件で計測された  $y$  軸に平行で接触中心を通る線上での  $x$  軸方向滑り量：ただし，各々の線は上から LOAD-LARGE，LOAD-NORMAL，LOAD-SMALL 条件での計測結果を表す．

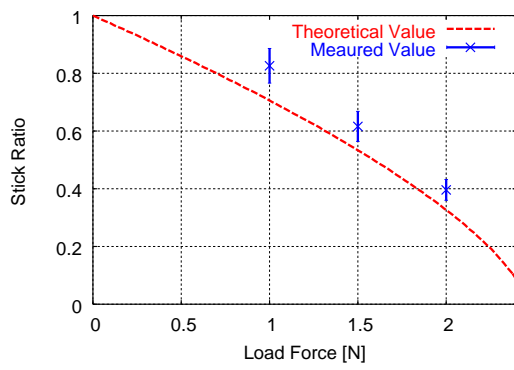
ていない区間が接触領域外を，中心付近の平らな区間が固着領域を表す．このグラフより，以下の 4 点が明らかになる．

7. どの条件でも，接触領域は変化しない．これは把持力が変化しないため当然の結果である
8. どの条件でも，滑り領域の開始点が接触中心に近づくことで滑り領域と滑り量が増える
9. どの条件でも，滑り量は指根本側より指先側の方が大きい ( $y$  軸方向が指先方向となる)
10. どの被験者でも，条件間での大小関係は保存されるものの，絶対的滑り量には差が出る．

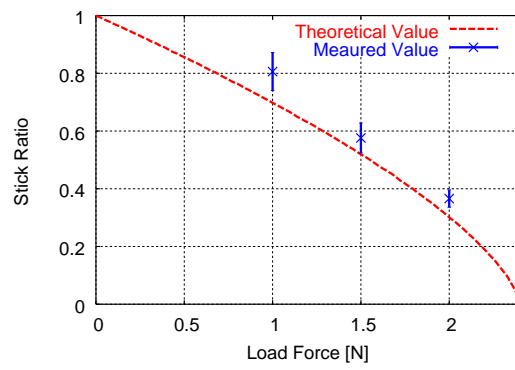
7. と 8. は 5.5.1 節で行ったシミュレーションと一致する．また，9. は指先部と指根本部の曲率の違いにより発生するものと考えられる．つまり，指先側では押し付け量が少なく，摩擦による拘束も小さくなるため大きな滑りが発生する．一方 10. は，被験者の指先形状/指先材料特性の違いを反映するものである．

また，計測された初期滑り情報より算出した固着率と，式 (5.1) で計算される固着率の理論値を図 5.9 に比較する．

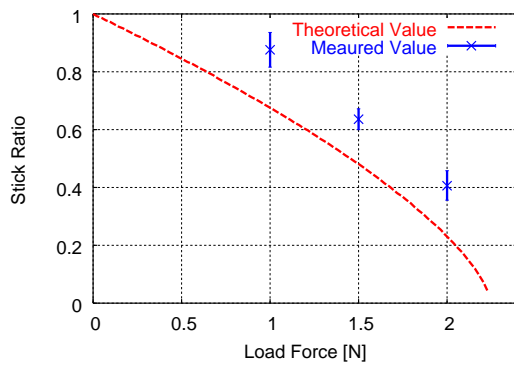
どの条件/被験者でも，計測された固着率は理論値よりも大きな値となる．これは接触開始/終了端でフローが計測されない理由と関係がある．つまり，実際は滑りが発生している部位があるにも関わらず，巻き込み/排出を伴う大変形により滑り領域と見なされない．このため，結果として見かけの固着率が高く計算される．しかし，どの被験者でも一定量のシフトを考えれば，計測値と理論値は極めて良く一致する．これは，固着率が縦弾性係数やポワソン比といった弾性係数に依存しない (式 (5.1) より明らかである) だけでなく，接触領域形状や接触領域内圧力分布にも依存しない (付録 C を参照のこと) 指標であるためだと考えられる．



(a) 被験者 A



(b) 被験者 B



(c) 被験者 C

図 5.9 負荷力が変化する条件で計測された固着率

表 5.5 摩擦係数が変化する境界条件

条件名	把持力	負荷力	摩擦係数
FRICITION-SMALL	3.0 [N]	1.0 [N]	0.4
FRICITION-NORMAL	3.0 [N]	1.0 [N]	0.8
FRICITION-LARGE	3.0 [N]	1.0 [N]	1.8

## 5.6. 摩擦係数の変化に伴う初期滑りの変化

### 5.6.1 シミュレーション結果

本節では、把持/負荷力を一定に保ち、摩擦係数のみを変化させるという設定でのシミュレーション結果を示す。

シミュレーションに使用する境界条件を表 5.5 に示す。ただし、各条件での摩擦係数は、4 章で構築した計測装置で設定可能な値を選んでいる。また、以下の説明でこれらの条件を参照するときは、先程と同様に条件名を用いる。

はじめに、各条件において計算された初期滑りを 5 倍に拡大したフローを用いて可視化した結果を図 5.10 に示す。ただし、(a)、(b)、(c) はそれぞれ、FRICITION-SMALL、FRICITION-NORMAL、FRICITION-LARGE 条件でのシミュレーション結果を示しており、各々の図中で外側の円は接触領域の境界を、内側の円は固着領域と滑り領域の境界を表す。

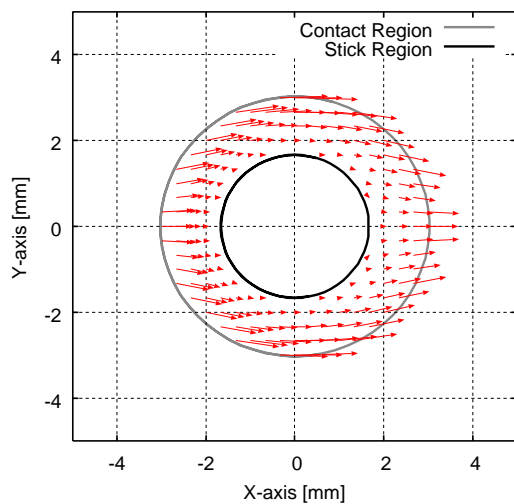
各条件に共通する特徴は 5.5.1 節で列挙したものと同様である。一方、条件間を比較すると以下の 2 点が明らかになる。

1. 摩擦係数が小さくなるほど、初期滑り領域が接触中心に向かって拡大する
2. 摩擦係数が小さくなるほど、初期滑り量が大きくなる

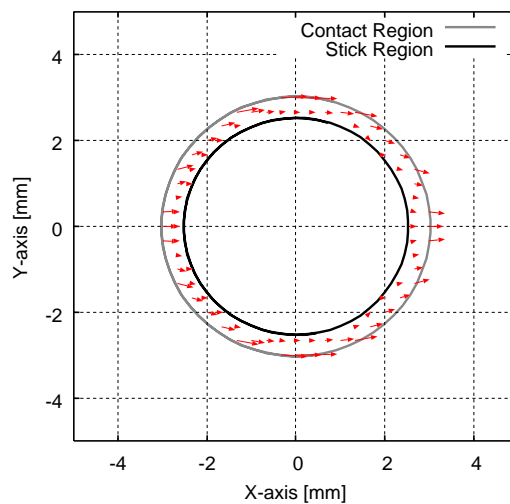
以上の 2 点は初期滑りの発生原理を考えれば容易に理解できる。

また、各条件における  $y$  軸上の  $x$  軸方向滑り量を 1 つのグラフにまとめたものを、図 5.11 に示す。5.5.1 節の結果と同様に、左右に存在する線の引かれてい

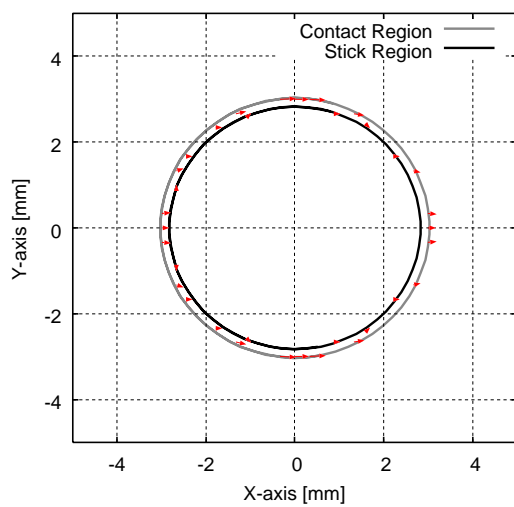




(a) FRICITION-SMALL 条件



(b) FRICITION-NORMAL 条件



(c) FRICITION-LARGE 条件

図 5.10 摩擦係数が変化する条件で計算された初期滑り：ただし，各々の図中で外側の円は接触領域の境界を，内側の円は固着領域と滑り領域の境界を表す．また，横軸は  $x$  軸 ([mm])，縦軸は  $y$  軸 ([mm]) を表す．

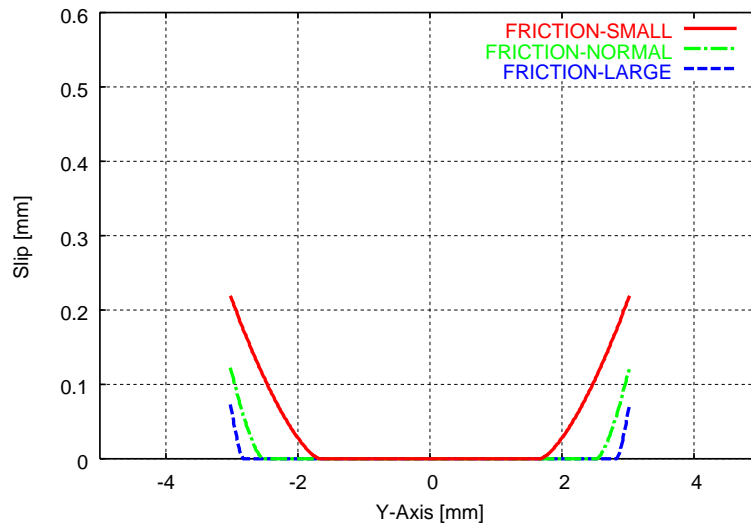


図 5.11 摩擦係数が変化する条件で計算された  $y$  軸上の  $x$  軸方向滑り量：ただし，各々のグラフは上から FRICTION-SMALL，FRICTION-NORMAL，FRICTION-LARGE 条件での計算結果を表す．また，横軸は  $y$  軸 ([mm]) を，縦軸は滑り量 ([mm]) を表す．

ない区間は接触領域外を，中心付近の平らな区間は固着領域を表す．

このグラフより以下の 2 点が明らかになる．

3. どの条件でも，接触領域は変化しない．これは把持力が変化しないため当然の結果である
4. どの条件でも，摩擦係数が小さくなるほど滑り量変化の傾きは緩やかになるが，滑り領域の開始点が中心に近付くことで全体として滑り領域と滑り量が増える

一方，式 (5.1) より，各条件での固着率は表 5.6 と計算される．表 5.4 と表 5.6 を比較すれば明らかなように，LOAD-LARGE 条件と FRICTION-SMALL 条件は，指先接触力と摩擦係数が異なるにも関わらず固着率が等しい．しかし，図 5.6 と図 5.11 を比較すると LOAD-LARGE 条件の方が滑り量が大きくなることが分

表 5.6 摩擦係数が変化する条件で計算された固着率

条件名	固着率
FRICITION-SMALL	0.3028
FRICITION-NORMAL	0.6981
FRICITION-LARGE	0.8723

かる．つまり同一固着率であったとしても負荷力が大きい程滑り量も大きくなる．

### 5.6.2 計測結果

本節では，把持/負荷力を一定に保ち，摩擦係数のみを変化させるという設定での計測結果を示す．なお，計測に使用する境界条件は，5.6.1 節の表 5.5 で設定したシミュレーション条件と同一である．

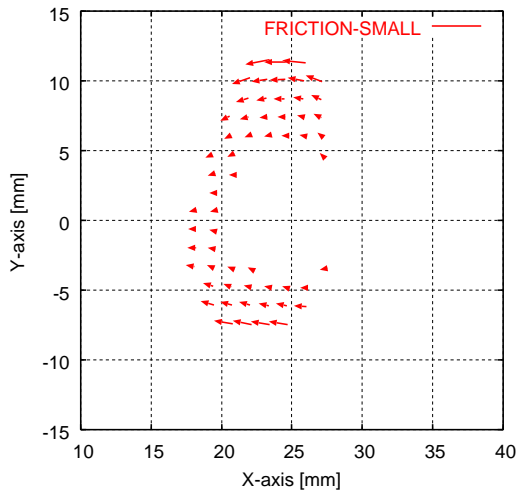
はじめに，被験者 A で計測された各条件における初期滑りを 5 倍に拡大したフローを用いて可視化した結果を図 5.12 に示す．ただし (a)，(b)，(c) はそれぞれ FRICITION-SMALL，FRICITION-NORMAL，FRICITION-LARGE 条件を表す．

各条件に共通する傾向は 5.5.2 節において負荷力を変化させる条件で得られた結果と同一である．そして，条件間を比較すると明らかになる点は 5.5.2 節におけるシミュレーション結果と同一である．

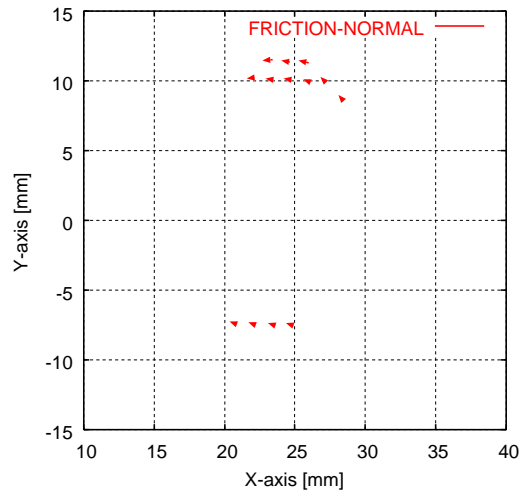
また， $y$  軸に平行で，接触領域重心に最も近いドット列で計測された  $x$  軸方向の滑り分布を図 5.13 に示す．5.6.1 節におけるシミュレーション結果と同様，左右に存在する線の引かれない区間が接触領域外を，中心付近の平らな区間が固着領域を表す．

このグラフより明らかになる特徴は，5.6.2 節におけるシミュレーション結果と同様である．また，滑り量が指根本側より指先側において大きいという点も 5.5.2 節における計測結果と同様である．

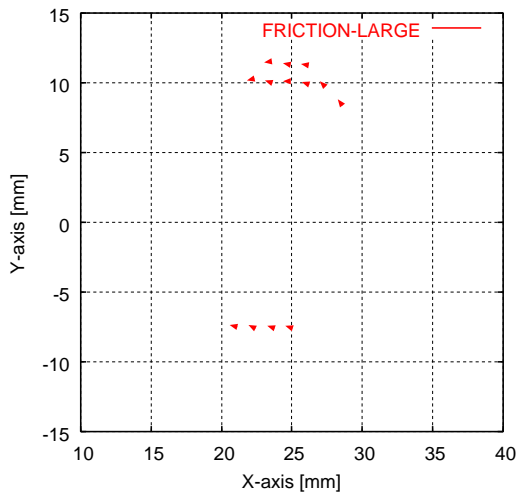
一方，計測された初期滑り情報より算出される固着率と，式 (5.1) で計算される理論値との比較を図 5.14 に示す．



(a) FRICITION-SMALL 条件

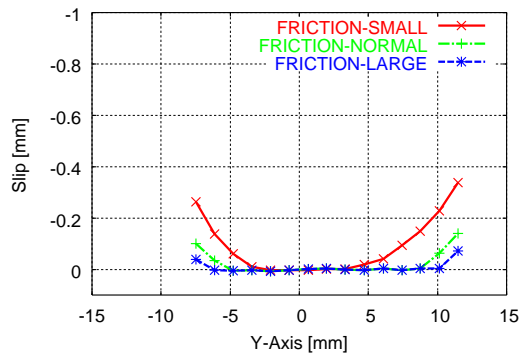


(b) FRICITION-NORMAL 条件

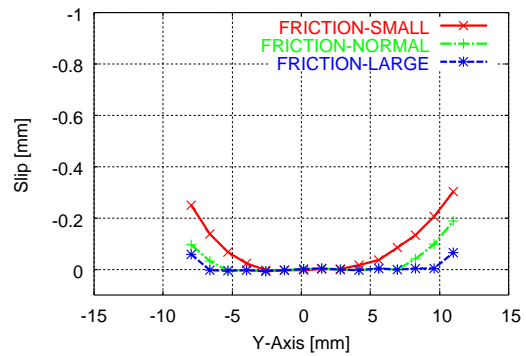


(c) FRICITION-LARGE 条件

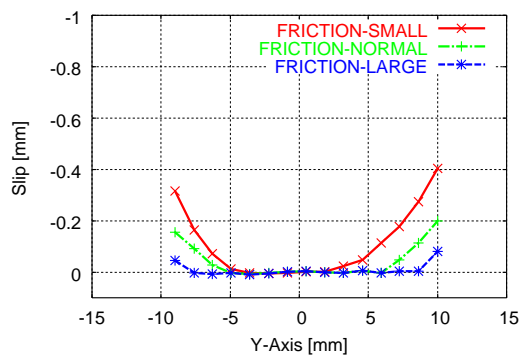
図 5.12 摩擦係数が変化する条件で計測された初期滑り (被験者 A) : ただし, フローは 5 倍に拡大されている .



(a) 被験者 A

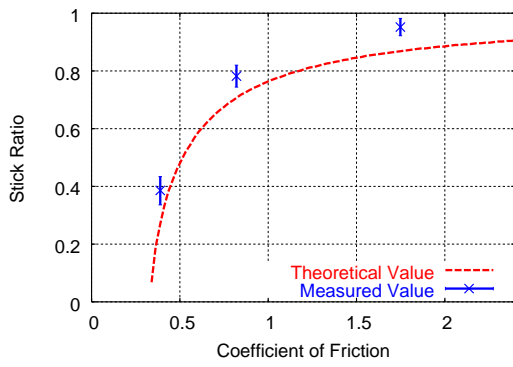


(b) 被験者 B

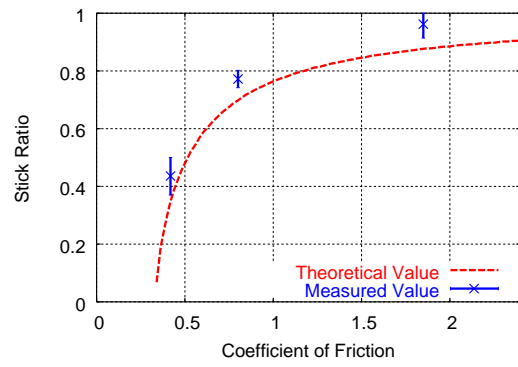


(c) 被験者 C

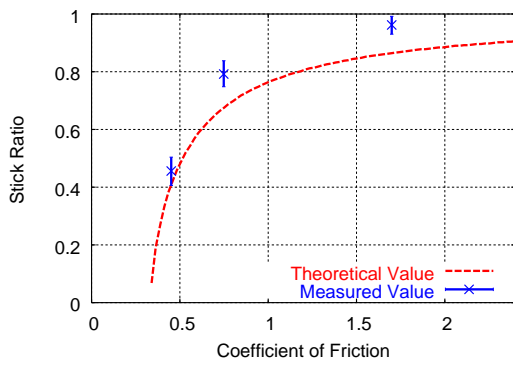
図 5.13 摩擦係数が変化する条件で計測された  $y$  軸に平行で接触中心を通る線上での  $x$  軸方向滑り量：ただし，各々の線は上から FRICITION-SMALL，FRICITION-NORMAL，FRICITION-LARGE 条件での計測結果を表す。



(a) 被験者 A



(b) 被験者 B



(c) 被験者 C

図 5.14 摩擦係数が増加する条件で計測された固着率

5.5.2 節で行った実験と同様に，計測された固着率は理論値よりも全体的に大きい．しかし，どの被験者でも一定量のシフトを考えれば，計測値と理論値は極めて良く一致する．これは，固着率が縦弾性係数やポワソン比といった弾性係数に依存しない (式 (5.1) より明らかである) だけでなく，接触領域形状や接触領域内圧力分布にも依存しない (付録 C を参照のこと) 指標であるためだと考えられる．

また，5.6.1 節で，FRICITION-SMALL 条件と LOAD-LARGE 条件では等しい固着率を持つと書いたが，図 5.14 と図 5.9 を比較すると，実験でもほぼ等しい値となることが分かる．しかし，図 5.13 と図 5.8 を比較すると，計測される滑り量は LOAD-LARGE 条件の方が大きくなることが分かる．この現象も，シミュレーション結果と良く一致するものである．つまり，固着率が同一でも負荷力が大きい程滑りベクトルは大きくなる．

## 5.7. シミュレーション/実験結果の考察

以下にシミュレーション結果と実験結果に共通する特徴を列挙する．

1. どの条件でも，初期滑りは接触領域中心近傍では発生せず，その周辺近傍で発生する
2. 固着領域境界から接触領域境界に近づくほど滑りベクトルが大きい
3. どの条件でも，滑りベクトルの方向は負荷力の方向とは完全に一致せず，固着領域を避ける流線方向の傾きを持つ
4. 負荷力が増加または，摩擦係数が減少すると，滑り領域の開始点が接触中心に近づくことで滑り領域と滑り量が増える
5. 固着率が同一でも，負荷力が大きい程全体の滑り量は大きい

以上の結果は，3 章で提案した指先接触モデルが，実際に人の指先で発生する現象を十分説明し得ることを示す．

一方，人の指先だけに見られる特徴は以下の 3 点となる．

6. 接触領域の左右の端 (接触開始端と終了端) では滑りが発生しにくい
7. 固着率は同条件のシミュレーションに比べ高い

8. 滑り量は指根本側より指先側の方が大きい

6. と 7. は人の指先が大変形するため皮膚の巻き込み/排出が発生すること，8. は指先の曲率が場所によって変化することが理由として挙げられる．なお，これらの点は指先接触モデルでは考慮されていない．

また，被験者間で滑り量を比較すると，条件間での大小関係は保存されるものの，絶対的滑り量には差が出るという結果となった．これは，各被験者の指先材料特性と指先形状が異なるからである．しかし，固着率に関してはどの被験者も理論値と良く一致する．これは，固着率が弾性係数，接触面形状，接触面内圧力分布に依存しない指標であるからである．

以上より，指先材料特性や指先表面形状に起因する点を除けば，人の指先で発生する現象が弾性体接触理論で極めて良く予測できることが示せた．

## 5.8. 本章の結論

本章では，3 章に説明した方法で算出される初期滑りと，4 章で構築した計測装置を用い実際に人の指先で計測される初期滑り発生の傾向を比較し，人の指先が剛体平板と接触し接線方向力を加えられる際の挙動が，弾性体接触理論により予測できることを示した．

シミュレーション/実験の設定は，同一の把持力/摩擦係数で負荷力を変化させる場合と，同一の把持/負荷力で摩擦係数を変化させる場合の 2 通りを用意した．そして，それぞれの条件において，境界条件の変化により滑りベクトルの分布がどのように変化するかを計算/計測した．

これらの結果は，初期滑り分布の傾向，負荷力に垂直で接触領域の重心を通る直線上での負荷力方向の滑り量分布，そして固着率の 3 点で比較された．その結果，前 2 者に関しては定性的に，後者に関しては定量的に一致することを確認した．しかし，指先材料特性や指先形状のように，指先接触モデルで考慮されていない点は，シミュレーションと計測結果に差異が生じた．

この章で得られたシミュレーション/実験結果は，指先で発生する現象が，弾性体接触理論で極めて良く予測できることを意味する．



なお，本章で構築した計測装置の組み立て図は付録 D に記載する．



# 第6章 歪みエネルギー密度に基づく 固着率知覚可能性の検証

## 6.1. 本章の趣旨

本章では 3 章に示した，基本解の重ね合わせに基づく弾性体内応力場の計算法を用い，弾性球が様々な接触状態に置かれたときの接触面直下の応力場の変化を計算する．そして，触覚受容器における指先接触状態（固着率）の知覚可能性を検証する．

はじめに，シミュレーションの目的を明らかにする．3 章では，弾性体の接触状態を代表するパラメータとして，固着率を提案した．しかし，これはあくまで弾性体表面で発生する現象を代表するパラメータであり，その変化により弾性体内の受容器深さの応力場がどのように変化するかは明らかになっていない．そこで，本章で行うシミュレーションでは，固着率の変化に伴う弾性体内応力場変化を計算し，固着率の変化が弾性体内の応力分布に与える影響を検証する．

次に，従来研究で明らかになっている触覚受容器の配置とその特性を説明する．人の触覚受容器は 4 種類に分類される．具体的には，皮膚の浅層部と深層部にそれぞれ速順応型と遅順応型の 2 種類の受容器が存在する．また，浅層部の受容器の受容野が狭いのに対し，深層部の受容器の受容野は広いという特徴を持つ．本研究では浅層部の受容器にのみ着目する．また，それらの応答を推定するための材料力学的指標として，歪みエネルギー密度 (SED) に着目する．

最後に指先接触状態知覚可能性検証のためのシミュレーションを行う．シミュレーションに用いるモデルは，5 章で用いた弾性球と同一である．そして，モデルに対しいくつかの境界条件を設定し，その時の弾性球内歪みエネルギー密度分布と，その時間微分を計算する．更に人の神経回路に存在する側抑制効果を考慮し，

それらの空間微分を計算した結果，歪みエネルギー密度の空間微分が滑り領域の空間的広がりを，歪みエネルギー密度速度の空間微分が滑り領域の時間的広がりを特徴的に表すことが分かった．

## 6.2. シミュレーションの目的

3章で定義した固着率は，一般的な弾性体接触状態を表すパラメータである．つまり，剛体と接触する弾性体の接触力と表面摩擦係数に関わらず，固着率が等しければ滑り余裕が等しいという特徴がある．このため，固着率は人の把持力制御と密接な関係を持つことが予想される．

しかし，人の触覚受容器は皮膚内に存在するため，直接的に指先接触面の滑り-固着状態を検出することはできない．従来研究では，初期滑り領域が広がることで，弾性体内剪断歪み場が特徴的に変化することが有限要素解析で示されている[90]．しかし，この研究では受容器の特性は考慮せず，単に剪断歪み場の変化を計算したに過ぎない．

そこで，本章では3章に示した基本解の重ね合わせに基づく弾性体内応力場の計算法と，皮膚内に存在する4種類の触覚受容器の応答特性を踏まえ，様々な接触状態に置かれた指先モデルにおいて，触覚受容器応答に相当する材料力学的指標を計算する．更に，計算した材料力学的指標と，感覚神経系に存在する神経回路網の特性を考慮し，指先接触面の滑り-固着状態が触覚受容器でどのような情報に変換されるのかを推定する．そして，人の触覚受容器で指先固着率と等価な情報を知覚し得るか否かを検証する．

## 6.3. 触覚受容器の特性と側抑制

### 6.3.1 触覚受容器の種類と配置

Hagbarthらは，微小電極を用いて人の触覚受容器からの単一求心性神経インパルスを記録する方法（微小神経電図 (Microneurography)）を開発した．その後，

この方法による単一神経インパルスの解析が盛んに行われるようになり，人の触覚受容器の特性が明らかになった．特に人の手掌部について詳しく調べられているが，その結果，人の指先無毛部における機械受容単位は，皮膚に加えられた機械的刺激に対する応答特性と，皮膚上での受容野の形態より以下の 4 種類に分類できることが明らかになった．

速順応 I 型 (FA I : Fast Adapting Type I) 皮膚に加えられた機械的押し込みの速度成分に対応した応答，受容野は直径数ミリメートルで境界は鮮明

速順応 II 型 (FA II : Fast Adapting Type II) 皮膚に加えられた機械的押し込みの加速度成分/振動に対応した応答，受容野は大きく境界は不鮮明

遅順応 I 型 (SA I : Slowly Adapting Type I) 皮膚に加えられた機械的押し込みの速度 + 変位成分に対応した応答，受容野は直径数ミリメートルで境界は鮮明

遅順応 II 型 (SA II : Slowly Adapting Type II) 皮膚に加えられた機械的押し込みの変位成分に対応した応答，受容野は大きく境界は不鮮明

各機械受容単位の応答を模式的に表したものを図 6.1 に示す．ただし，各受容器単位に共通した台形状のグラフは皮膚の押し込み量を表し，その下に書かれたパルス列が受容器の発火頻度を表す．FA I, FA II がそれぞれ機械刺激の速度，加速度成分に応答し（つまり押し込み量が変化する間，または押し込み速度が変化する点のみでインパルスが発射される），SA I, SA II がそれぞれ機械刺激の速度 + 変位，変位成分に応答する（つまり，変位が持続する間はインパルスが発射される）ことが理解できる．

また，各機械受容単位はそれぞれ異なる触覚受容器に対応する．具体的には，FA I がマイスナー小体，FA II がパチニ小体，SA I がメルケル盤，SA II がルフィニ終末に対応している．それぞれの受容器の皮膚内における配置を図 6.2 に示す．マイスナー小体とメルケル盤が皮膚の表層部に存在するのに対し，パチニ小体とルフィニ終末は深層部に存在する．また，以上の受容器の特性と配置を表 6.1 にまとめる．

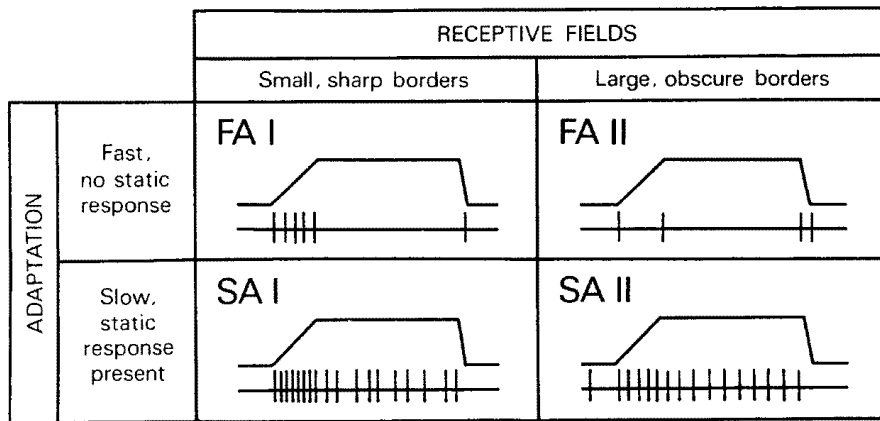


図 6.1 無毛部皮膚における機械受容単位 ([7] より転載)

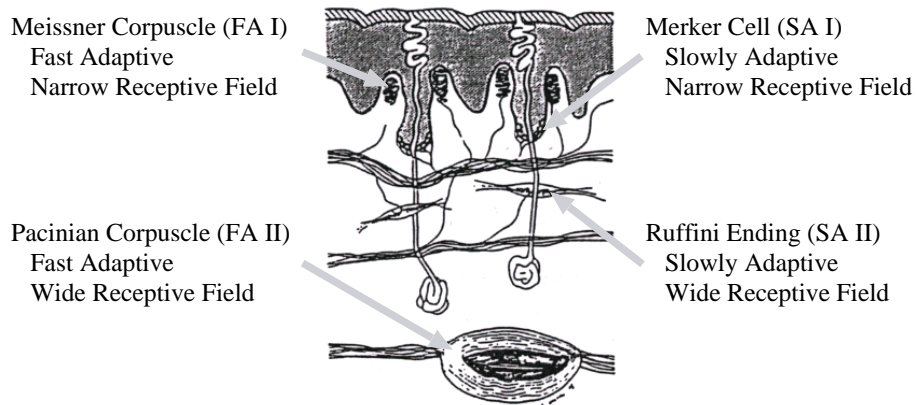


図 6.2 無毛部皮膚における機械受容単位と触覚受容器の対応 ([60] より転載/修正)

表 6.1 触覚受容器の種類と特徴

受容器名	受容単位	応答対象	深さ	密度
マイスナー小体	FA I	速度	0.4 [mm]	140.5 [points/cm <sup>2</sup> ]
パチニ小体	FA II	加速度	2.5 [mm]	21.3 [points/cm <sup>2</sup> ]
メルケル盤	SA I	変位 + 速度	0.75 [mm]	70.2 [points/cm <sup>2</sup> ]
ルフィニ終末	SA II	変位	1.1 [mm]	9.2 [points/cm <sup>2</sup> ]

本章のシミュレーションは、固着率が皮膚内応力場にどのような影響を与えるのかを検証することを目的とする。しかし、深層部の受容器は密度が低く、受容野も広いため、接触面で発生する初期滑りのような微細な情報を検出することは難しいと考えられる。実際、3章で応力場の重ね合せ計算法の妥当性を示すために行った、各受容器深さでのミーゼス応力の計算結果 (図 3.9 と図 3.10) をみると、深層部でのミーゼス応力は弾性体のローパスフィルタ特性の影響で、表層部でのそれと比べ不鮮明なプロファイルとなることが分かる。また、深層部では接線方向力の有無に関わらずミーゼス応力の分布がほとんど変化しないことも理解できる。

そこで、本研究では分布密度が高く、受容野も狭い表層部の触覚受容器応答にのみ着目する。以下、表層部に存在する受容器であるメルケル盤とマイスナー小体の応答特性をより詳しく説明した後、人の感覚神経回路に存在する側抑制効果について述べる。

### 6.3.2 メルケル盤 (SA I) の特性

メルケル盤に関しては、実際に計測された受容器応答と、その時の皮膚内応力場との関係が詳しく調べられている [8, 67, 68, 69]。これは、メルケル盤が遅順応型受容器であり、静的な負荷が加わる間は等しく応答し続けるため、受容器応答の計測が容易であったこと。そして、静的負荷に対する応力場の計算を行えばよいから、解析が容易だったことが理由として挙げられる。

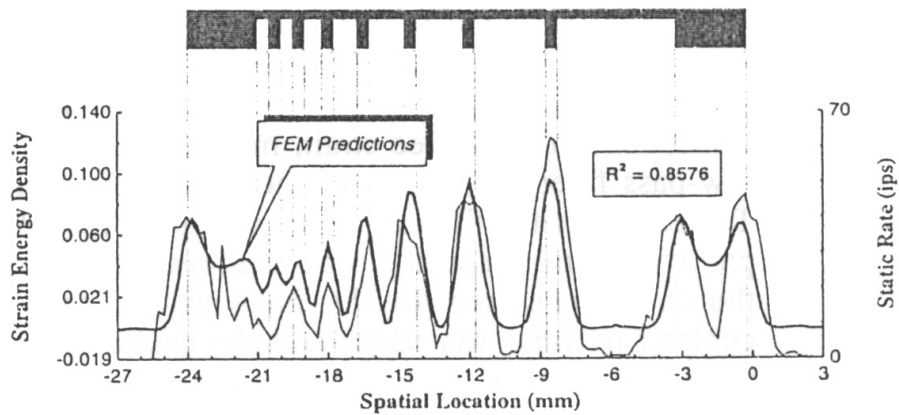


図 6.3 メルケル盤の応答分布と歪みエネルギー密度分布の比較 ([69] より転載)

具体的には，Phillips らは指先に櫛状剛体（櫛の形状に関しては，図 6.3 を参照されたい）を押し付けた時のメルケル盤の応答分布を計測し [8]（実際は応答分布を一度に計測するわけではなく，櫛型剛体を指先上で順に走査させた時に，着目する特定の受容器の応答を重ね合わせることで応答分布を推定している），それが弾性体内の剪断歪み分布と高い相関があることを示した [67]．ただし，この解析での剪断歪み分布は，半無限弾性体に点接触が生じた時の弾性体内歪み場を，櫛状物体の凸部の配置に応じて重ね合わせるにより計算されている．

一方，Srinivasan らは同じ問題に対し有限要素解析を適用し，同様にメルケル盤の応答分布が，指モデル内の歪みエネルギー密度分布と高い相関があることを示した [69]．図 6.3 に櫛形剛体，計測されたメルケル盤の応答分布，そして有限要素解析により計算された歪みエネルギーの分布を示す．Phillips らが計測したメルケル盤の応答分布が，歪みエネルギー密度の計算に基づく予想と究めて良く一致することが理解できる．

ただし，歪みエネルギー密度 (Strain Energy Density) は，式 (6.1) で定義される．これは，単位面積あたりの歪みエネルギー（物体がその位置を変えず，変形することにより物体内に蓄えられるエネルギー）を表す指標である．



$$W = \frac{1}{2E} \left( (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) - 2\nu (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) \right) + \frac{1}{2G} (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (6.1)$$

前者の解析で使用された剪断歪みが座標系に依存する指標であるのに対し，後者の解析で使用された歪みエネルギー密度はスカラーパラメータであるため座標系の取り方に依存しない．このため，受容器応答を考える上ではより妥当な材料力学的指標であると考えられる．そこで，本研究ではメルケル盤の発火頻度がその近傍の歪みエネルギー密度に比例するものと仮定する．

### 6.3.3 マイスナー小体 (FA I) の特性

前節で説明した通り，メルケル盤の応答に関しては詳細な生理モデルが構築されている．一方，マイスナー小体に関して受容器応答と皮膚内応力場との関係を定量的に論じた研究はない．これは，マイスナー小体が速度 + 加速度検出器であり，モデル化のためには受容器応答と指先変形の動的過程を論じなければならなかったからであろう．

本研究では，マイスナー小体が速度検出器である点に注目し，その発火頻度が歪みエネルギー密度分布の時間変化に比例するものと仮定する．ただし，3章で提案した解析解の重ね合わせによる応力場の計算法では静的な解析しか行うことが出来ない．このため，シミュレーションでは速度の代わりに接触状態変化に対する時間差分を計算し，近似的に速度とみなす．

### 6.3.4 神経回路網に存在する側抑制回路

図 6.4 は興奮性ニューロンと抑制性ニューロンより作られる特異な構造の一つを単純化したものである．図 6.4-(a) は反回性側抑制回路と呼ばれ，興奮性ニューロンの出力が抑制性ニューロンを介して，同じグループ内の近隣の興奮性ニューロンを抑制する形式の回路である．これに対し図 6.4-(b) は興奮性ニューロンへの興奮性入力がつながる介在ニューロンを通じて同じグループの近隣の興

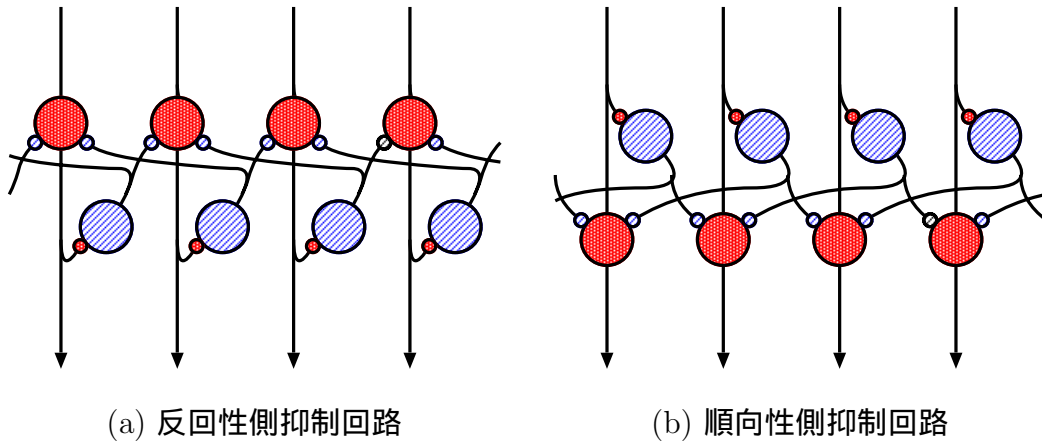


図 6.4 側抑制神経回路

奮性ニューロンを抑制する回路であり，順向性側抑制回路と呼ばれる．

反回性側抑制回路が Hartline によりカブトガニの複眼で最初に発見されて以降 [4]，それが脊椎動物の視覚神経系，聴覚神経系，皮膚の触覚神経系を始め感覚神経系に普遍的に存在する神経回路網であることが明らかになっている．この回路は，外部からの感覚情報パターンの空間的微分を行うことができる．

そこで，本研究では計算した歪みエネルギー密度，又は歪みエネルギー密度の時間差分を空間的に微分したものを，メルケル盤とマイスナー小体からの最終的な応答分布と仮定する．

## 6.4. シミュレーションの設定

### 6.4.1 モデルの設定

シミュレーションに用いる弾性球モデルの設定を，表 6.2 に示す．これは，5 章で行った解析におけるモデルと同一である．

また，解析の設定を図 6.5 に示す．接触面となる平板は  $x-y$  軸で張られる平面と一致しており， $-z$  軸方向に無限にのびる．また，先に定義された弾性球モデルは，原点で平板と接触するように設置される．弾性球と平板との間の摩擦係数

表 6.2 シミュレーションで使用する弾性球モデルの設定

対象	記号	使用する値
半径	$R$	8.0 [mm]
縦弾性係数	$E$	0.5 [N/mm <sup>2</sup> ]
ポワソン比	$\nu$	0.48

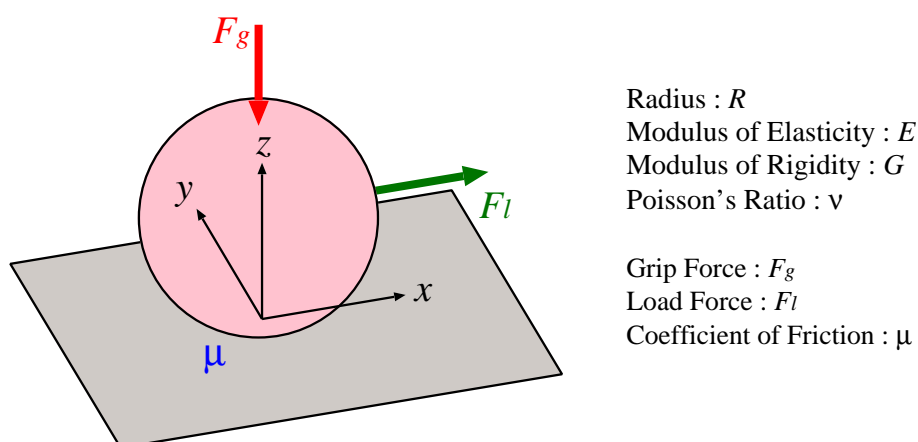


図 6.5 シミュレーションの設定

は  $\mu$  とする．弾性球にはこの状態から  $-z$  軸方向の法線方向力 (把持力)  $F_g$  を加え，次いで  $x$  軸方向の接線方向力 (負荷力)  $F_l$  を加える．なお，具体的な境界条件は，その条件での計算結果と併せ 6.5 節で説明する．

#### 6.4.2 解析条件の設定

固着率の知覚可能性を検証するためには，様々な接触力と摩擦係数でシミュレーションを行う必要がある．しかし，3 章で提案した弾性体内応力場の計算は，場の線形性を仮定している．つまり，境界条件が変化したとしても，結果として計算される応力場にはトポロジカルな変化しか現れない．

実際に，把持力  $F_g = 4.0$  [N]，負荷力  $F_l = 1.5$  [N]，摩擦係数  $\mu = 0.8$  と，把持力  $F_g = 8.0$  [N]，負荷力  $F_l = 1.5$  [N]，摩擦係数  $\mu = 0.4$  という二つの条件下で計算した弾性体内歪みエネルギー密度分布をそれぞれ図 6.6 と図 6.7 に示す．ただし，各図において (a) から (d) は，それぞれ  $z = 0.4, 0.75, 1.1, 2.5$  [mm] での歪みエネルギー密度分布を表す．これらは，6.3.1 節で説明したマイスナー小体，メルケル盤，ルフィニ終末，パチニ小体が存在する深さに対応する．また，各図中で外側の円筒は接触領域の境界を，内側の円筒は固着領域の境界を表す．

弾性体内の深部ほど，場の変化が不鮮明となるという特徴は，3 章で説明した有限要素解析の結果と一致するだけでなく，弾性体のローパスフィルタ特性 [85] を考えても容易に理解できる結果である．また，図 6.6 と図 6.7 を比較すると，どの深さにおける歪みエネルギー密度分布にもトポロジカルな変化しか現れないことが理解できる．

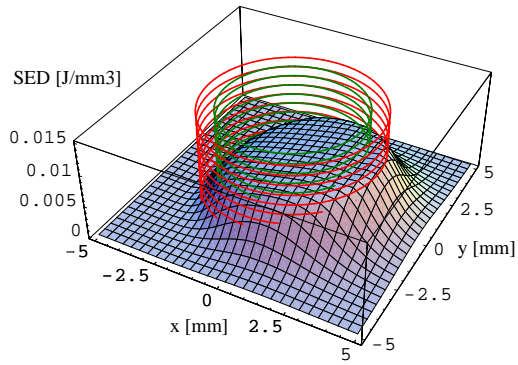
そこで，本章で行うシミュレーションでは，把持力と摩擦係数はそれぞれ， $F_g = 4.0$  [N]， $\mu = 0.8$  で固定し，負荷力  $F_l$  を変化させたときのメルケル盤，マイスナー小体深さでの歪みエネルギー密度分布を計算する．また，グラフは滑り-固着領域と，歪みエネルギー密度分布との関係が分かり易いよう， $x-z$  軸を含む平面での切断面をプロットする．

## 6.5. シミュレーションの結果

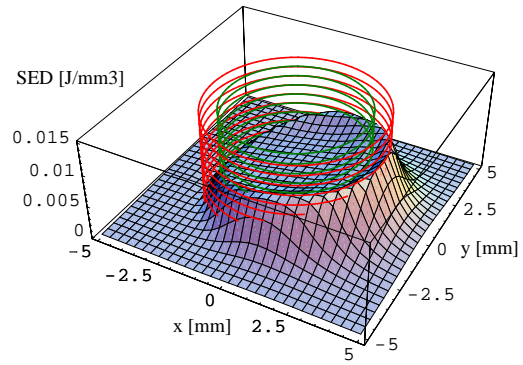
### 6.5.1 メルケル盤深さでの歪みエネルギー密度分布

固着率の変化に対するメルケル盤の発火頻度分布を推定するため，表 6.3 に列挙する 4 つの条件で歪みエネルギー密度分布を計算する．つまり，固着率が徐々に小さくなるときの，弾性体内歪みエネルギー密度分布の変化を計算することになる．ただし，メルケル盤を対象とするため，分布を計算する深さは  $z = 0.75$  [mm] である．また，以下の説明で各条件を参照するときは条件名を用いる．

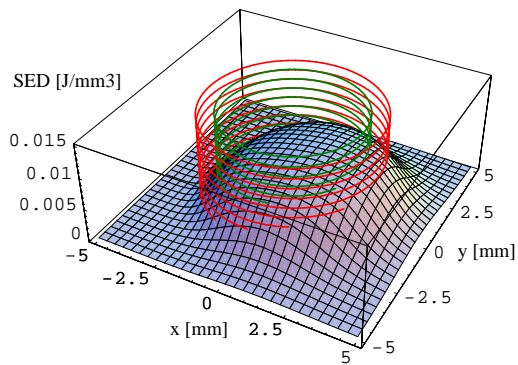
図 6.8 に各条件での計算結果を示す．ただし，各々の図中で両端の直線は接触領域の境界を，内側の 2 本の直線は固着領域の境界を表す．図より，負荷力が大きいほど歪みエネルギー密度が一様に大きなピークとなることが分かる．また，負



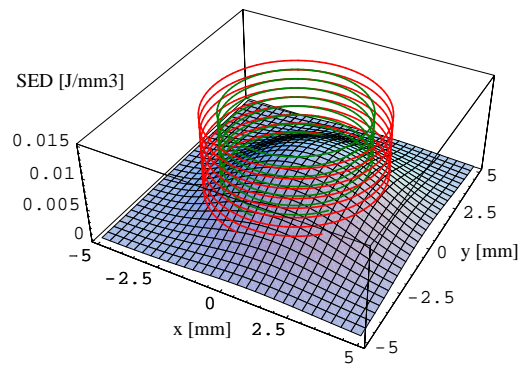
(a) マイスナー小体 ( $z = 0.4$  [mm])



(b) メルケル盤 ( $z = 0.75$  [mm])

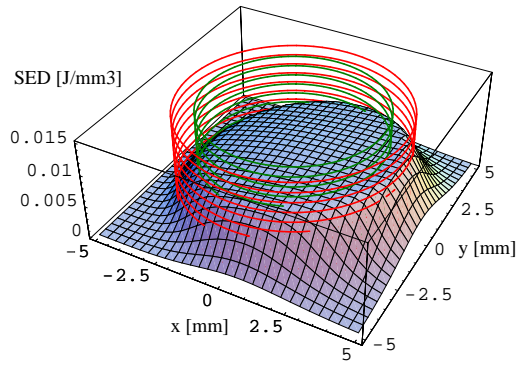


(c) ルフィニ終末 ( $z = 1.1$  [mm])

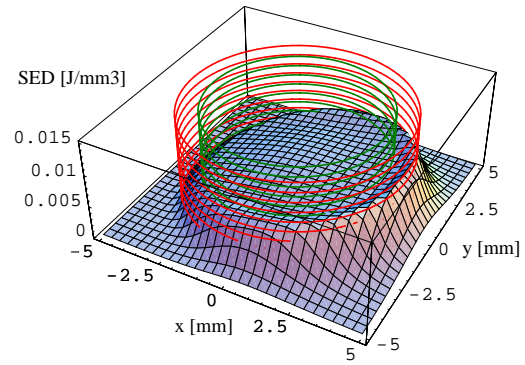


(d) パチニ小体 ( $z = 2.5$  [mm])

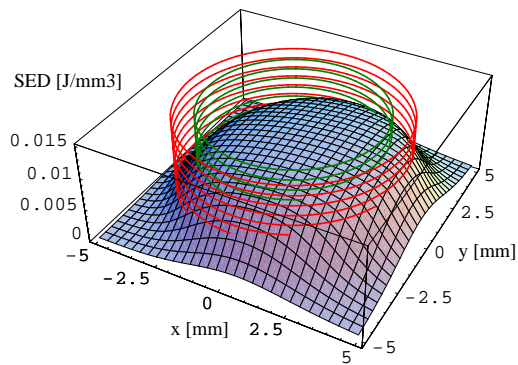
図 6.6 各受容器深さにおける歪みエネルギー密度分布 ( $\mu = 0.8$ ) : ただし, 右下方向の軸は  $x$  軸 ([mm]), 右上方向の軸は  $y$  軸 ([mm]), 上方向の軸は歪みエネルギー密度 ( $[J/mm^3]$ ) を表す. また, 外側の円筒は接触領域の境界を, 内側の円筒は固着領域の境界を表す.



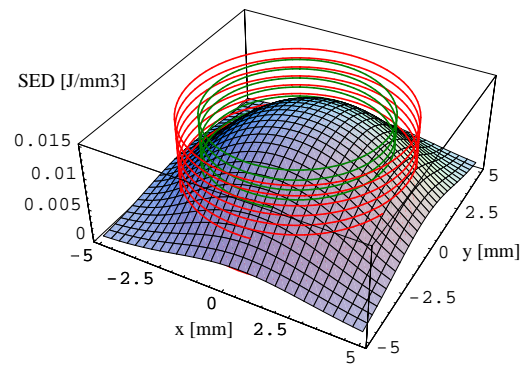
(a) マイスナー小体 ( $z = 0.4$  [mm])



(b) メルケル盤 ( $z = 0.75$  [mm])



(c) ルフィニ終末 ( $z = 1.1$  [mm])



(d) パチニ小体 ( $z = 2.5$  [mm])

図 6.7 各受容器深さにおける歪みエネルギー密度分布 ( $\mu = 0.4$ ) : ただし, 右下方向の軸は  $x$  軸 ([mm]), 右上方向の軸は  $y$  軸 ([mm]), 上方向の軸は歪みエネルギー密度 ( $[J/mm^3]$ ) を表す. また, 外側の円筒は接触領域の境界を, 内側の円筒は固着領域の境界を表す.

表 6.3 メルケル盤の発火頻度シミュレーション条件

条件名	深さ	把持力	負荷力	摩擦係数
A	0.75 [mm]	4.0 [N]	1.0 [N]	0.8
B	0.75 [mm]	4.0 [N]	1.5 [N]	0.8
C	0.75 [mm]	4.0 [N]	2.0 [N]	0.8
D	0.75 [mm]	4.0 [N]	2.5 [N]	0.8

荷力が小さいときにはあまり顕著でないが、それが増大するに従い接触開始端に顕著なピークが現れる。

一方、図 6.9 に図 6.8 の空間微分を示す。ただし、先程と同様に各図中で両端の直線は接触領域の境界を、内側の 2 本の直線は固着領域の境界を表す。図をみれば明らかなように、どの条件でも滑り領域の範囲内に顕著なピークが発生することがわかる。これは、メルケル盤において滑り領域の空間的広がりと同様な情報が符号化可能であることを示唆する。

### 6.5.2 マイスナー小体深さでの歪みエネルギー密度分布

マイスナー小体の発火頻度を推定するため、表 6.4 に列挙する 8 つの条件で、歪みエネルギー密度分布を計算する。ここで、マイスナー小体は速度検出受容器であるため、歪みエネルギー密度の時間変化を計算する必要がある。しかし、3 章で提案した方法では静的な接触解析しか行うことができない。そこで、本節では微小時間における準静的な変化を仮定した計算を行う。具体的には、表 6.4 に示される基準となる条件と、負荷力変化量を設定し、変化前後での差分を時間変化量で割ったものを歪みエネルギー密度の速度とみなす。本節で設定する条件では、負荷力の増分が 0 より大きいため、固着率は減少方向に向かう。また、把持力を変化させないのは、接触面積の変化に伴う弾性体内歪みエネルギー密度の変化を考慮しないようにするためである。つまり、純粋に固着率の減少に伴う歪みエネルギー密度分布の変化を計算することが出来る。

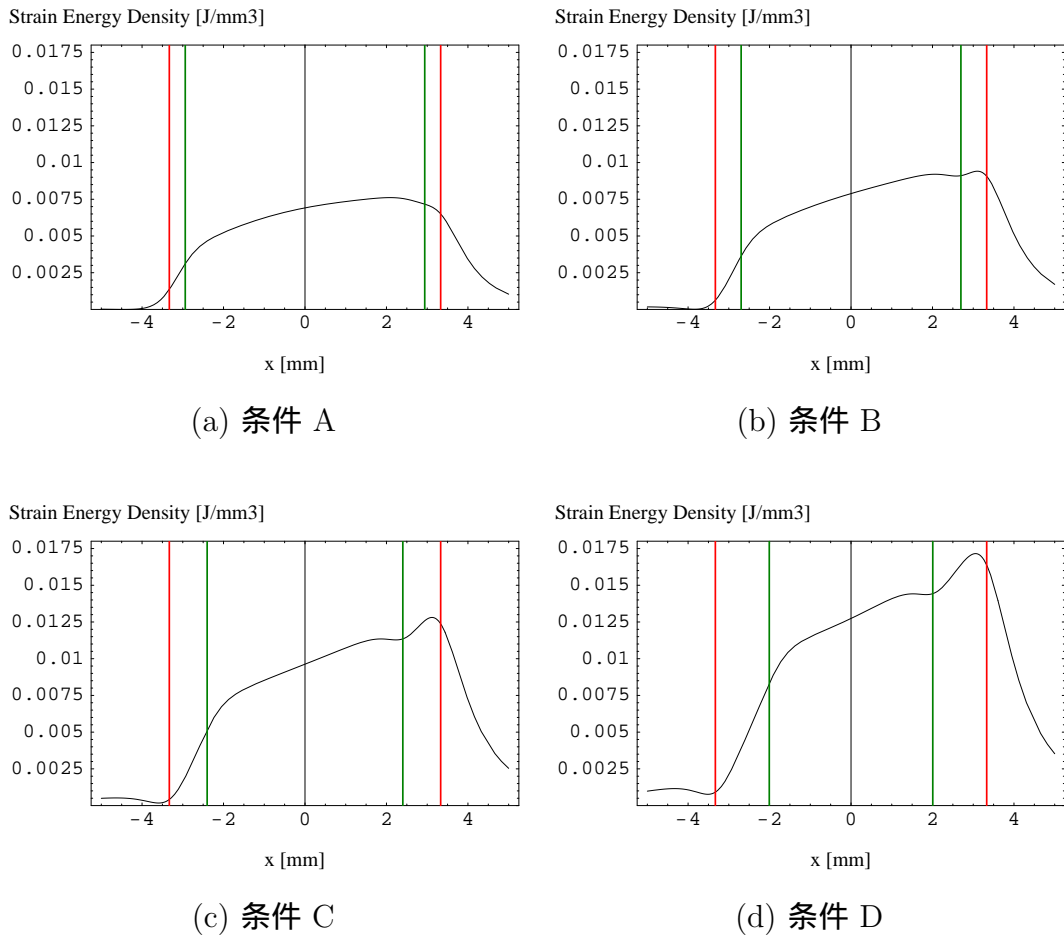
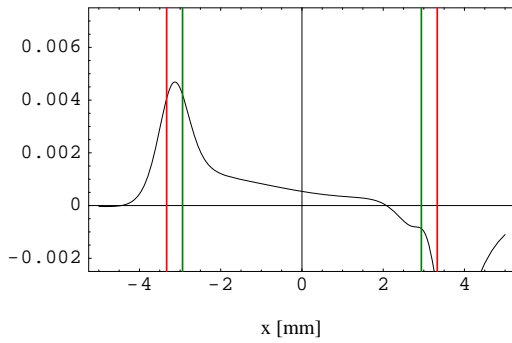


図 6.8 メルケル盤深さにおける歪みエネルギー密度分布：ただし，横軸は  $x$  軸 ([mm])，縦軸は歪みエネルギー密度 ( $[J/mm^3]$ ) を表す．また，両端の直線は接触領域の境界を，内側の直線は固着領域の境界を表す．

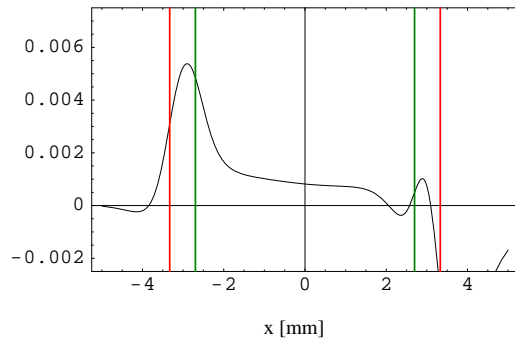


Space Derivation of the Strain Energy Density [J/mm<sup>4</sup>]



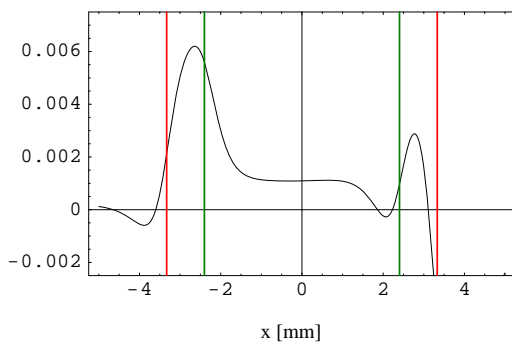
(a) 条件 A

Space Derivation of the Strain Energy Density [J/mm<sup>4</sup>]



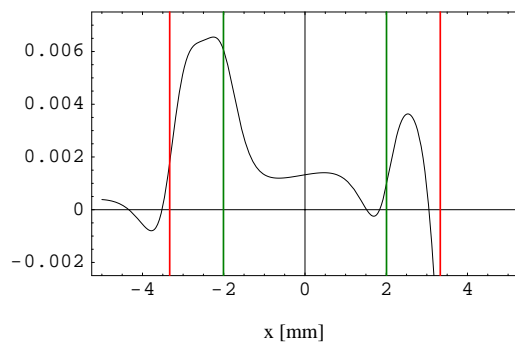
(b) 条件 B

Space Derivation of the Strain Energy Density [J/mm<sup>4</sup>]



(c) 条件 C

Space Derivation of the Strain Energy Density [J/mm<sup>4</sup>]



(d) 条件 D

図 6.9 メルケル盤深さにおける歪みエネルギー密度分布の空間微分：ただし，横軸は  $x$  軸 ([mm])，縦軸は歪みエネルギー密度 ([J/mm<sup>3</sup>]) を表す．また，両端の直線は接触領域の境界を，内側の直線は固着領域の境界を表す．

表 6.4 マイスナー小体の発火頻度シミュレーション条件

条件名	深さ	把持力	負荷力	負荷力増分	時間増分	摩擦係数
E	0.4 [mm]	4.0 [N]	1.0 [N]	0.1 [N]	0.01 [s]	0.8
F	0.4 [mm]	4.0 [N]	1.5 [N]	0.1 [N]	0.01 [s]	0.8
G	0.4 [mm]	4.0 [N]	2.0 [N]	0.1 [N]	0.01 [s]	0.8
H	0.4 [mm]	4.0 [N]	2.5 [N]	0.1 [N]	0.01 [s]	0.8
I	0.4 [mm]	4.0 [N]	1.0 [N]	0.2 [N]	0.01 [s]	0.8
J	0.4 [mm]	4.0 [N]	1.5 [N]	0.2 [N]	0.01 [s]	0.8
K	0.4 [mm]	4.0 [N]	2.0 [N]	0.2 [N]	0.01 [s]	0.8
L	0.4 [mm]	4.0 [N]	2.5 [N]	0.2 [N]	0.01 [s]	0.8

また，負荷力変化量が 0 より小さくなる条件も考えられるが，弾性体接触の不可逆性（つまり，ある接触状態から等しい値だけ負荷力が増減したとしても，接触状態が元に戻る訳ではない）を考えると設定する意味は薄い．そこで本研究ではこのような状況は考慮しない．

ただし，マイスナー小体を対象とするため，分布を計算する深さは  $z = 0.4$  [mm] であり，以下の説明で各条件を参照するときは条件名を用いる．

図 6.10 と図 6.11 にそれぞれ E から H, I から L 条件でのシミュレーション結果を示す．ただし，各図中で両端の直線は接触領域の境界を，内側の 2 本の直線は固着領域の境界を表す．図より，基準となる負荷力が大きいほど，歪みエネルギー密度速度も一様に大きなピークとなることがわかる．また，基準となる負荷力が同一でも，負荷力の増分が大きい程大きなピークとなる．さらに，各滑り領域内には単峰性のピークが，固着領域内には双峰性のピークが発生することがわかる．

一方，図 6.12 と図 6.13 にそれぞれ図 6.10 と 図 6.11 の空間微分を示す．ただし，先程と同様に各々の図中で両端の直線は接触領域の境界を，内側の 2 本の直線は固着領域の境界を表す．図より明らかなように，どの条件でも滑り領域と固着領域の境界付近に顕著なピークが発生することが分かる．また，負荷力の変化

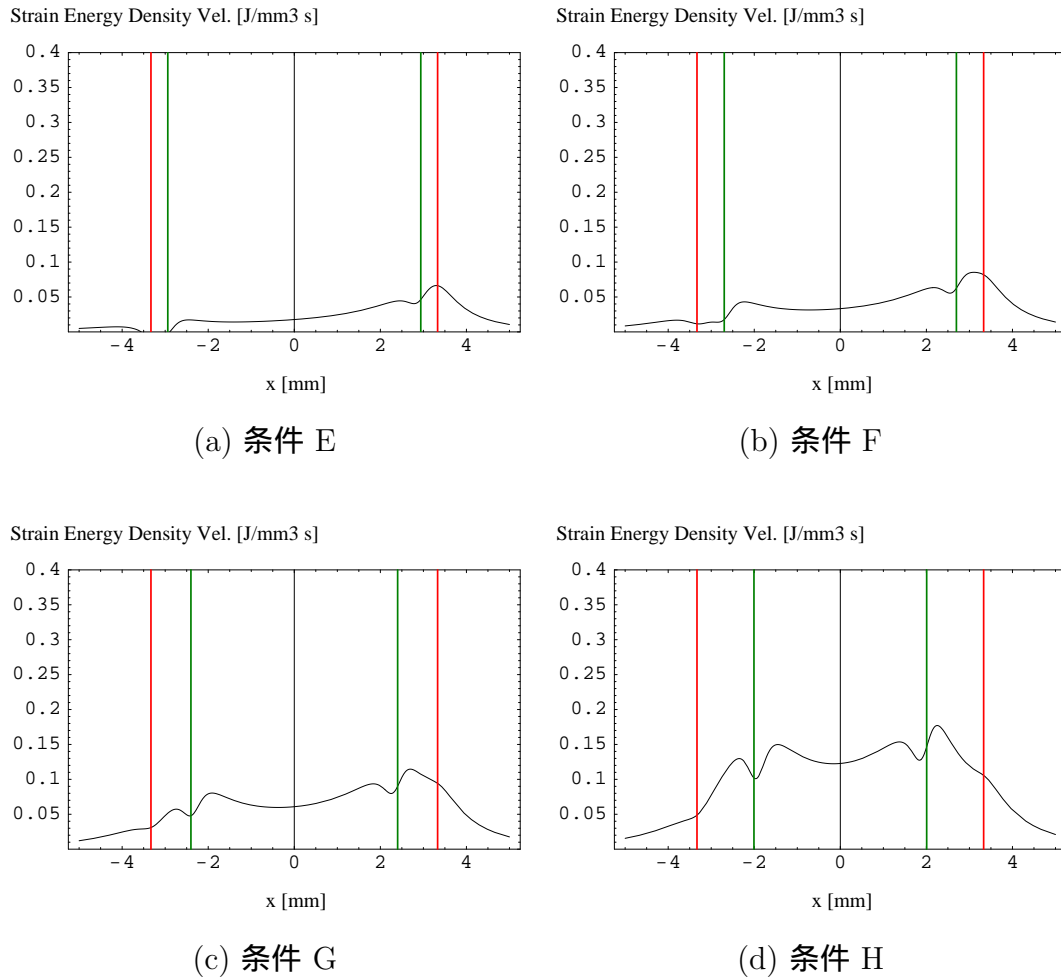


図 6.10 負荷力増分が 0.1 [N] のときのマイスナー小体深さにおける歪みエネルギー密度速度分布：ただし，横軸は  $x$  軸 ([mm])，縦軸は歪みエネルギー密度 ([J/mm<sup>3</sup>]) を表す．また，両端の直線は接触領域の境界を，内側の直線は固着領域の境界を表す．

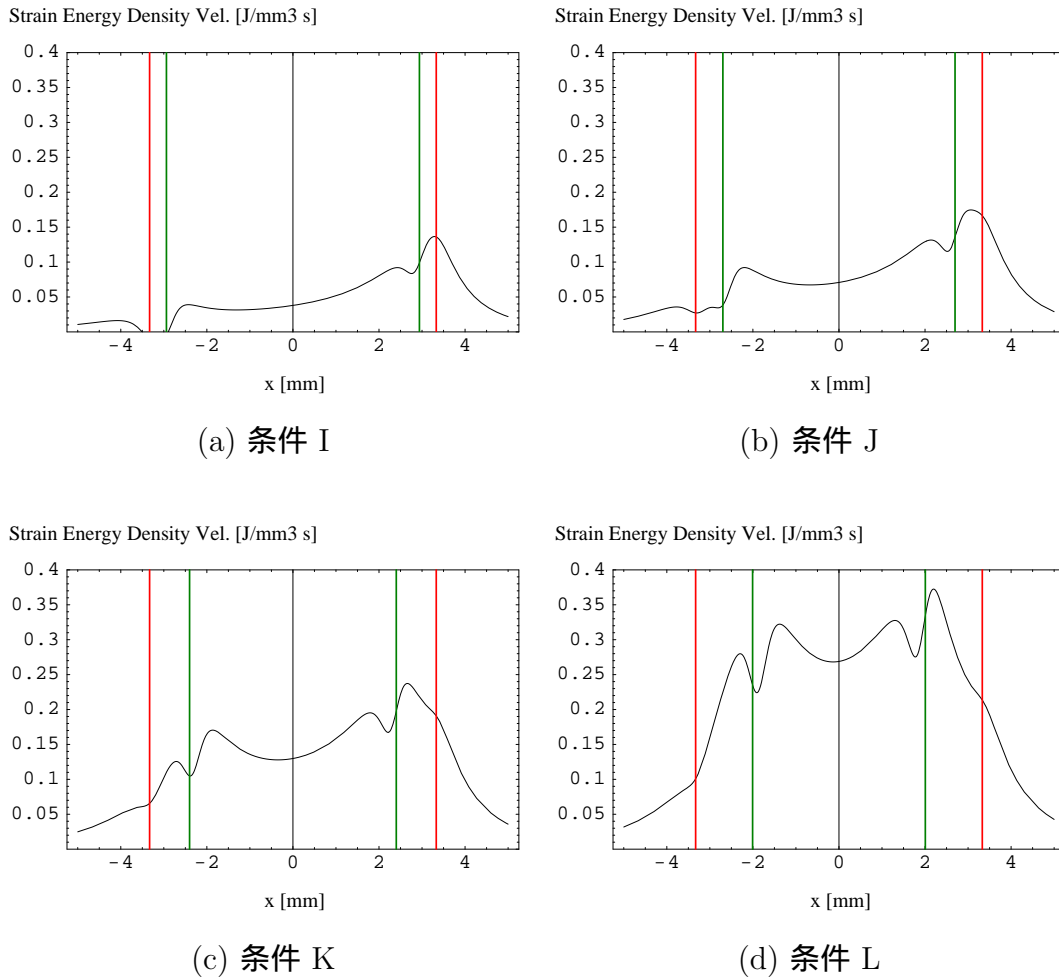


図 6.11 負荷力増分が 0.2 [N] のときのマイスナー小体深さにおける歪みエネルギー密度速度分布：ただし，横軸は  $x$  軸 ([mm])，縦軸は歪みエネルギー密度 ([J/mm<sup>3</sup>]) を表す．また，両端の直線は接触領域の境界を，内側の直線は固着領域の境界を表す．

が大きい程ピークも大きくなる．これはマイスナー小体において滑り領域の時間的広がりと同価な情報を符号化可能であることを示唆する．

## 6.6. シミュレーション結果の考察

本章で行ったシミュレーション結果より，メルケル盤深さにおける歪みエネルギー密度の空間微分が滑り領域の空間的広がりを，マイスナー小体深さにおける歪みエネルギー密度速度の空間微分が滑り領域の時間的広がりを特徴的に表すことが明らかになった．

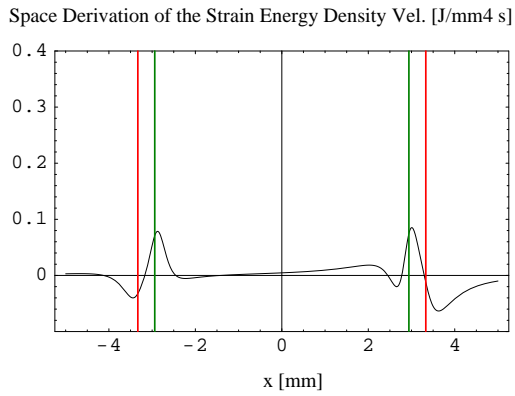
つまり，メルケル盤ではある時点で発生している滑り領域の空間的広がりを，マイスナー小体ではある時点で発生している滑り領域の時間的広がりと同価な情報を知覚できる可能性が高い．この結果は，人の触覚受容器でも固着率に代表される指先接触状態と同価な情報を知覚し得ることを示唆する．

## 6.7. 本章の結論

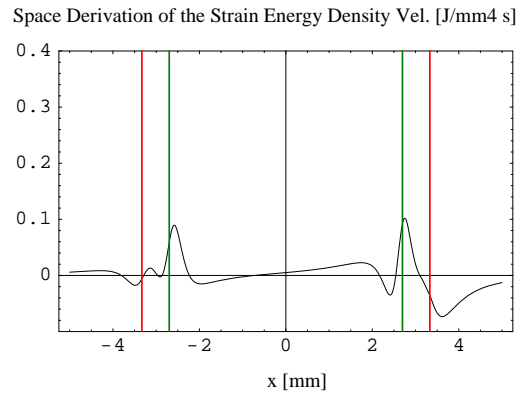
本章では 3 章に示した，解析解の重ね合わせに基づく弾性体内応力場の計算法を用い，固着率の変化に伴う弾性体内歪みエネルギー密度分布と，その速度分布の変化を計算し，固着率と同価な情報が皮膚内に存在する触覚受容器で知覚し得ることを示した．

歪みエネルギー密度に着目したのは，メルケル盤の応答と皮膚内歪みエネルギー密度との間に高い相関が示唆されているからである [68]．また，マイスナー小体は機械刺激の速度成分に応じて求心性神経インパルスを発射することが知られているため [60]，歪みエネルギー密度の時間差分も計算した．そして，人の神経回路が持つ側抑制効果を考慮し，これらの空間微分を計算した結果，メルケル盤近傍の歪みエネルギー密度は滑り領域の空間的広がりを特徴的に表し，マイスナー小体近傍の歪みエネルギー密度の時間差分は滑り領域の時間的広がりを特徴的に表すことが確認された．

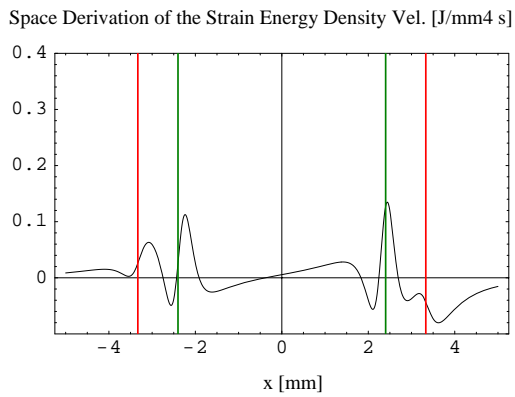
この章で得られたシミュレーション結果は，指先の固着率（接触状態）の変化



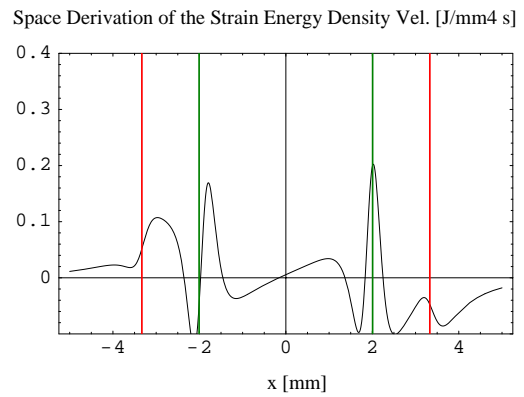
(a) 条件 E



(b) 条件 F

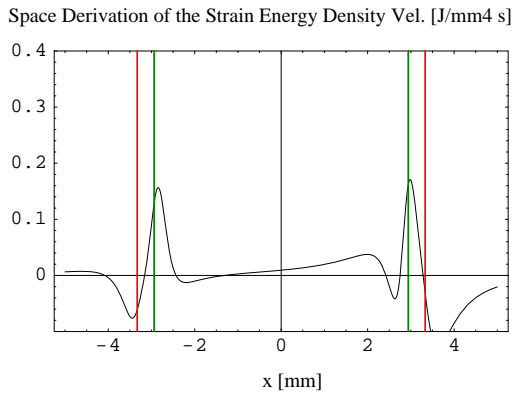


(c) 条件 G

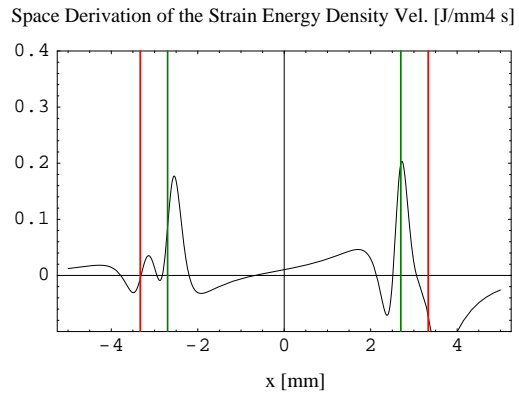


(d) 条件 H

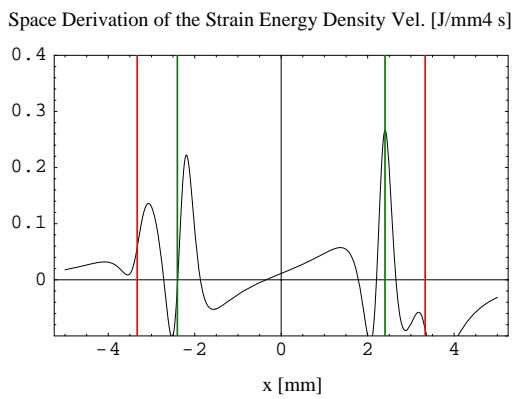
図 6.12 負荷力増分が  $0.1 \text{ [N]}$  のときのマイスナー小体深さにおける歪みエネルギー密度速度分布の空間微分：ただし，横軸は  $x$  軸 ( $[\text{mm}]$ )，縦軸は歪みエネルギー密度 ( $[\text{J}/\text{mm}^3]$ ) を表す．また，両端の直線は接触領域の境界を，内側の直線は固着領域の境界を表す．



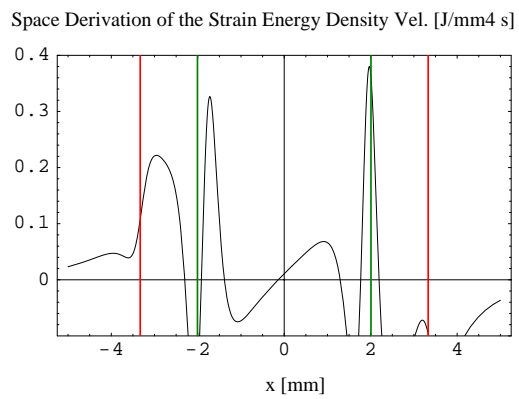
(a) 条件 I



(b) 条件 J



(c) 条件 K



(d) 条件 L

図 6.13 負荷力増分が 0.2 [N] のときのミスナー小体深さにおける歪みエネルギー密度速度分布の空間微分：ただし，横軸は  $x$  軸 ([mm])，縦軸は歪みエネルギー密度 ([J/mm<sup>3</sup>]) を表す．また，両端の直線は接触領域の境界を，内側の直線は固着領域の境界を表す．

が触覚受容器で間接的に知覚可能であることを示唆する．

なお，本章で使用した，放物面状圧力分布が加わるときの弾性体内応力場の解析解を付録 B に記載する．



# 第7章 指先固着率に基づく把持力 制御仮説の提案と検証

## 7.1. 本章の趣旨

本章では、3章で提案した固着率の意味と5,6章で行った実験/シミュレーション結果を踏まえ、把持という機能を実現するための触覚情報処理モデルを提案し、その妥当性を検証する。

はじめに、把持力制御における固着率の意味を明確にする。そして、最終的に固着率が等しい値に落ち着くように把持力を制御すれば、物体の特性に関わらず一定の安全率での把持運動が実現できる点に着目し、固着率知覚に基づく把持力制御仮説を提案する。この仮説は従来の把持運動に関する知見と矛盾しないだけでなく、ロバストな把持力制御を合理的に説明する。

更に、この仮説を検証するために4章で開発した計測装置を用い、異なる質量/摩擦係数を持つ物体を把持する時の固着率と把持/負荷力の計測実験を行う。そして、実験条件に不慣れな状態での計測結果と、その条件に十分慣れた状態での計測結果を比較することで、様々な条件下で行う把持運動において固着率がどのように遷移するのかを明らかにする。

## 7.2. 指先固着率に基づく把持力制御仮説の提案

### 7.2.1 指先接触モデルと指先接触

3章では弾性体接触理論に基づく考察を行い、固着率と呼ばれるスカラパラメータを導入した。これは、接線方向力を受ける弾性体において、接触領域に対する

固着領域の割合として定義される．ここで，法線方向圧力分布が Hertz の理論に，接線方向圧力分布が Cattaneo の理論に従うと仮定すると，固着率  $s$  は式 (7.1) と表すことが出来る．

$$s = \left(1 - \frac{F_l}{\mu F_g}\right)^{2/3} \quad (7.1)$$

またこの式は，法線方向圧力分布が一般化された場合（圧力分布が  $1/2$  乗ではなく  $n$  乗で表されるとき）や，接触領域形状が一般化された場合（接触領域が楕円であるとき）でも成り立つことが証明されている（詳しくは付録 C を参照のこと）．

実際 5 章では，楕円に近い接触領域となる人の指先において，負荷力と摩擦係数が変化する際の初期滑り分布を計測した．その結果，指先で発生する初期滑りの傾向は弾性体接触理論で説明出来るものであり，初期滑り情報より算出される固着率は，式 (7.1) と定量的に一致することが明らかになった．つまり，3 章で構築した指先接触モデルは，実際に人の指先で発生する現象を説明するだけの十分な能力を備える．

## 7.2.2 把持運動における固着率の意味

次に，固着率と把持運動との関係を考察する．式 (7.1) を見れば明らかなように，固着率の定義と，理論解に基づく表現は極めて単純である．しかし，把持運動との関連を考えると，固着率（初期滑り分布）の持つ 3 つの重要性が明らかになる．

- 把持の究極的な目的が物体を滑らさず，かつ握り潰さないことであることを考えると，指先接触面にどの程度の滑りが生じているのかという情報は，把持という機能と直結する現象である．
- 一般に接触状態を記述するためには把持力  $F_g$ ，負荷力  $F_l$ ，摩擦係数  $\mu$  が必要であるが，固着率はこの 3 つのパラメータの関数となる．つまり固着率は弾性体の接触状態を代表する指標とみなすことが出来る．

- 滑りに対する安全率は最大静止摩擦力を接線方向力で割ることで求められる。つまり、 $\mu F_g / F_t$  となるが、固着率はこの逆数だけを含む。つまり、固着率は弾性体の一般的な滑り余裕を表す指標であると言える。このため、接触力や摩擦係数が異なっていたとしても、固着率が等しければ滑り余裕も等しくなる。

ここで、人が空間-時間的に変化する指先の接触状態に応じ、適切に把持力制御を行うことを考えると、把持運動中に動的に変化する固着率は把持運動における重要な触覚入力となり得る。実際、6章で行ったシミュレーション結果は、人の触覚受容器で指先接触状態（固着率）と等価な情報を知覚し得ることを示唆する。一方、十分に把持経験を積んだ物体に対する人の把持力は常に1.2～1.4程度の安全率を持つと言われている。ここで、固着率が一般的な滑り余裕を表すことを考えると、十分に慣れた物体に対する把持運動では、指先固着率が常に同程度の値に落ち着くことが予想される。

### 7.2.3 固着率に基づく把持力制御仮説の提案

7.2.2節の考察では、十分に慣れた物体に対する把持運動では、把持力が同程度の安全率を持つと同時に、指先固着率（指先接触状態）も同程度の値に落ち着くことを予想した。

現段階では、この2つの現象の因果関係を明らかにすることは出来ない。つまり、何らかの触覚情報を用い適切な把持力を実現した結果、指先固着率が同程度の値となるのか、指先固着率が同程度の値になるように把持力を制御した結果、適切な把持力が実現されるのかを特定することは出来ない。しかし、以下の4つの知見は、後者の可能性が高いことを示唆する。

- 触覚を麻痺させるとそれ以前ほど適切な把持力制御が出来なくなる [119]。これは触覚入力が適切な把持力制御に重要な役割を持つことを示唆する。
- 指先接触面に生じる局所的な滑りが人の把持力制御と密接な関係を持つことが示唆されている [5]。

- 6章におけるシミュレーションによると，弾性体内歪みエネルギー密度分布は，接触面で発生する滑り領域の空間/時間的広がりに応じ特徴的なパターンとなる．
- 人の触覚受容器は，皮膚内応力場やその時間的变化に応じて求心性神経インパルスを発射する．つまり固着率に代表される指先接触状態が人に知覚される可能性は高い．

そこで，本章では把持運動における触覚情報処理モデルとして“指先固着率に基づく把持力制御仮説”を提案する．これは，いかなる物体を把持するときも，固着率のような指先接触状態を知覚することで適切な把持力を実現しているとする仮説である．つまり，不慣れな物体を把持する際に固着率が過小であれば把持力を増加方向に修正し，逆に過大であれば減少方向に修正する．そして，このような調整を数度繰り返すうちに，その物体に対する内部モデルが獲得され，適切な把持力を加えることができるようになる．

この仮説は，従来研究で明らかになった人の把持力制御の特徴を極めて合理的に説明する．また，詳しくは 7.7 節で述べるが，把持運動に関する様々な特徴も良く説明する．

### 7.3. 実験の目的

7.2.3 節で提案した把持力制御仮説を仮定すれば，様々な物体を適切な把持力で摘み上げることができるという人の優れた把持機能を，極めて合理的に説明することができる．しかし，これは従来研究で提案された運動/生理モデルと，本論文の 3, 5, 6 章の結果より推察された仮説であり，これを裏付ける実験データは存在しない．そこで，本章ではこの仮説の妥当性を検証するための心理物理実験を行う．

つまり，本節で行う実験では，4章で開発した計測装置を用い，以下の 2 点に着目した把持運動計測を行う．

- 異なる質量/表面摩擦係数を持つ物体を，不慣れな状態から繰り返し把持す

るときの把持力の安全率の推移

- 異なる質量/表面摩擦係数を持つ物体を，不慣れな状態から繰り返し把持するときの固着率の推移

実験の初期においては被験者が計測条件に不慣れであるため，把持力の安全率と固着率ともに条件により異なる値となる．しかし，同一条件で試行を繰り返すうちに固着率の知覚に基づく修正が入り，把持力の安全率/固着率ともに同程度の値に落ち着くことが予想される．

次節では，具体的な実験手順と実験設定を説明する．

## 7.4. 実験の設定

### 7.4.1 計測装置の設定

本実験で使用する計測装置の外観を図 7.1 に示す．本章で行う実験は被験者の自由な把持運動の計測となる．つまり，5 章で行った実験のように，固定した計測装置に対し指先を強制的に押し付けるという設定ではなく，机上に置かれた計測装置を被験者に摘み上げてもらうという設定となる．このため，装置の構成自体は 4 章で説明したものと変わらない．装置の構成に関する詳細は 4 章を参照されたい．

実験に用いる計測条件を表 7.1 と表 7.2 に示す．前者は摩擦係数が一定 (0.8) で装置質量が変化する条件であり，後者では逆に装置質量が一定 (300 [g]) で摩擦係数が変化する条件である．

ただし，各表中の摩擦係数は概算値であり，安全率の計算等の解析を行う際は被験者ごとに個別に推定された摩擦係数値を用いる．具体的には，以下の手順で摩擦係数の推定を行う．はじめに被験者に計測装置を摘み上げ空中で保持してもらう．そして，この状態から徐々に把持力を減少させるよう指示し，物体が滑る瞬間の把持力  $F_g^{slip}$  と負荷力  $F_l^{slip}$  より式 (7.2) で摩擦係数  $\mu$  を算出する．ここで，装置が滑る瞬間は加速度センサ情報より特定する．

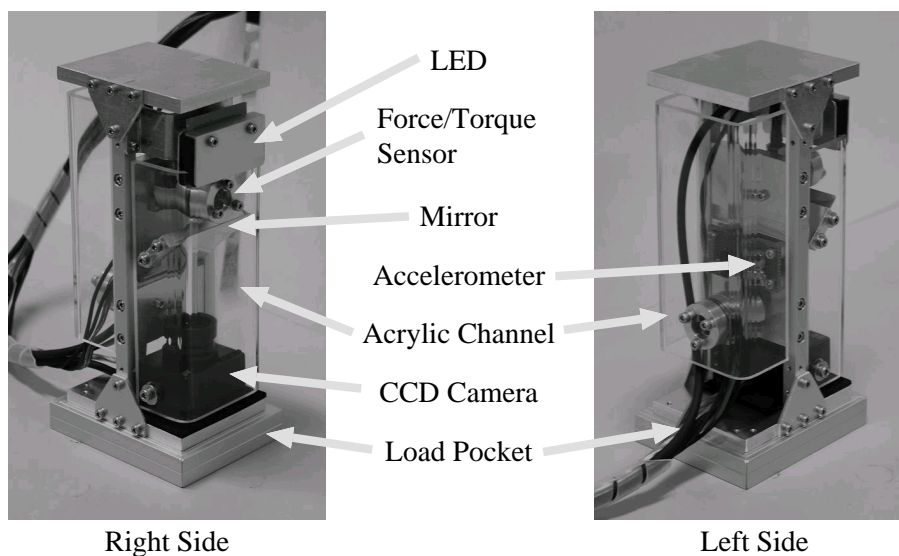


図 7.1 計測装置の外観

表 7.1 質量が変化する計測条件

条件名	装置質量	摩擦係数
LOAD-SMALL	300 [g]	0.8
LOAD-NORMAL	600 [g]	0.8
LOAD-LARGE	900 [g]	0.8

表 7.2 摩擦係数が変化する計測条件

条件名	装置質量	摩擦係数
FRICITION-SMALL	300 [g]	0.4
FRICITION-NORMAL	300 [g]	0.8
FRICITION-LARGE	300 [g]	1.8

$$\mu = \frac{F_l^{slip}}{F_g^{slip}} \quad (7.2)$$

これ以降，文章中で各条件を参照する時は表中の条件名を用いる．なお，表 7.1 と表 7.2 には全部で 6 つの条件が記載されているが，実際は LOAD-SMALL 条件と FRICTION-NORMAL 条件が同一であるため 5 条件となる．

## 7.4.2 データ処理

4 章で構築した装置はリアルタイムに固着率を計測することができる．しかし，本章で行う実験では計測された初期滑りデータよりオフラインに固着率を計算する．これは，人の把持運動では 5 章の実験や 6 章のシミュレーションのように把持力と負荷力が独立に増加するのではなく，持ち上げの過程で双方が協調しながら増加するからである．つまり，把持運動中の指先接触面をリアルタイムに計測するだけでは，固着率を計算するために必要な基準となるドット配置を特定することが出来ない．

具体的な計算方法は以下のようにになっている．

1. 計測された初期滑りデータより指先接触面積の最大値を計算する．そして，その面積の 80 % に達した時刻を基準時刻とする．
2. 基準時刻におけるドット配置を基準とし，それ以降の時刻におけるドット配置との比較を行い，位置変化が計測精度以下のドットを固着ドットとする．
3. 各時刻において，全固着ドットを含む領域の面積  $a_{stick}$  を求める．同様に全ドットを含む領域の面積  $a_{all}$  を求め最終的に  $a_{stick}/a_{all}$  をその時刻での固着率とする．

## 7.4.3 実験の手順

実験は，被験者が実験の手順には十分に慣れた状態を保ちつつ，各実験の条件には徐々に慣れていくという相反する状況を実現するために以下の手順で行う．各被験者に指示される基本的なタスク（以下基本タスクと呼ぶ）は，机上に置

かれた計測装置を利き腕の母指と示指でなるべく垂直に摘み上げ、3 秒程度で再び机に戻すことである。このとき、計測装置は初期位置から約 100 [mm] 程度持ち上がるが、被験者には敢えて持ち上げ量を指示することはせず、被験者自身のリズムでタスクを遂行してもらう。これは、持ち上げ量を明示的に指示することにより、被験者に位置決めタスクという負担をかけることを避けるためである。そして、この一連の動作の間に指先接触面に発生する初期滑り、指先が加える把持/負荷力そして装置の垂直方向加速度を計測する。

一連の実験の間、被験者には各条件が最低 2 度ずつ無作為な順序で設定される。また、ある条件が設定されている間に、上記基本タスクを 20 回連続して行うよう指示する。そして、最終的に各条件において一番最後に行った 20 回の基本タスクをその条件での計測データとする。さらに、ある条件での 20 回の計測データに対し、最初の 5 回の試行の平均をその条件に不慣れな状態での計測データ、最後の 5 回の試行の平均をその条件に慣れた状態での計測データとする。

ただし、条件間には十分長いインターバルを取るため、前試行の影響はないものと考えて差し支えない。また、実験条件はランダムに変化するが、それに伴い計測装置外観が変化することはない。このため、被験者はある条件での初回試行の前に視覚情報を用いて計測条件を推測することは出来ない。つまり、以上の手順に従えば、ある条件に不慣れな状態から十分慣れるまでの推移を計測することが出来る。

この実験には 3 名の右利き男性が参加しており、各被験者の利き手の人差し指腹部には全 167 点のドットが描画されている。また、以降の説明では各被験者を A, B, C と呼ぶ。

## 7.5. 質量が変化するときの計測結果

### 7.5.1 把持力と負荷力の関係

被験者 A で計測された、質量が変化する条件での把持力と負荷力の関係を図 7.2 に示す。ただし、点線は初回試行時、実線は慣れた状態での計測結果を表す。また、下の直線は把持力の安全率が 1.0 であるときの把持/負荷力の関係を、上



の直線は安全率が 2.0 であるときの把持/負荷力の関係を表す。つまり、計測される把持/負荷力の関係が下の直線より下の領域に入ると  $\mu F_g < F_l$  となり、指先は把持物体に対して相対的に滑ることになる。

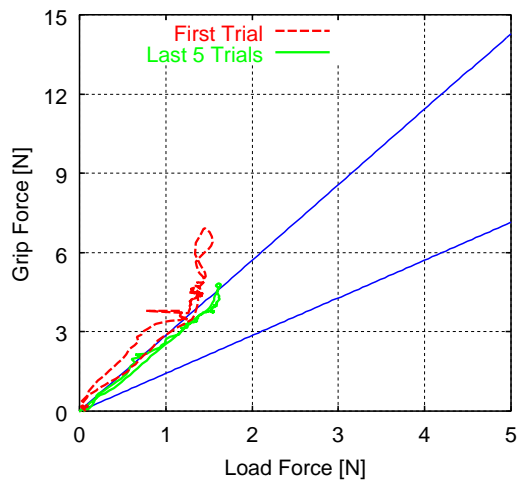
グラフを見ると、LOAD-SMALL 条件と LOAD-NORMAL 条件では、不慣れた状態での把持力が慣れた状態のそれよりも大きくなることが分かる。また、慣れた状態での把持/負荷力の関係がほぼ安全率 2.0 の直線上に重なるのに対し、不慣れた状態では直線からのばらつきが大きい。逆に LOAD-LARGE 条件では、不慣れた状態の方が把持力が小さいものの直線性はあまり変化しない。

以上をまとめると、どの条件でも慣れた状態では把持力の安全率がほぼ 2.0 であるのに対し、不慣れた状態ではばらつきがあることが理解できる。なお、慣れた状態での安全率は、従来知見より大きな値となるが [6]、条件の変化に関わらずほぼ一定であるという点では定性的に一致する。

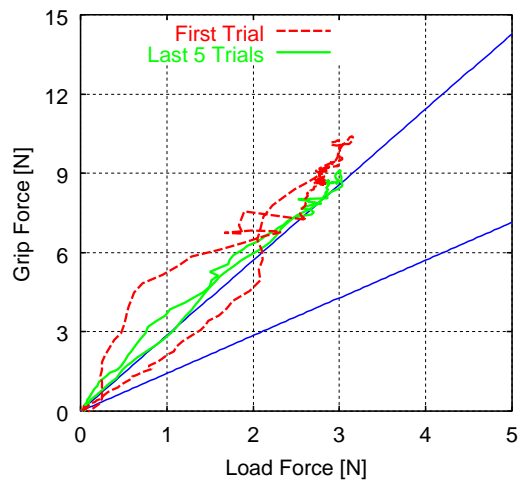
## 7.5.2 固着率の推移

被験者 A で計測された質量が変化する条件での、固着率と把持/負荷力の推移を図 7.3 と図 7.4 に示す。ただし、前者は不慣れた状態、後者は慣れた状態での計測結果を表す。また、各グラフにおいて、エラーバー付のグラフが固着率、点線が把持力、実線が負荷力を表す。

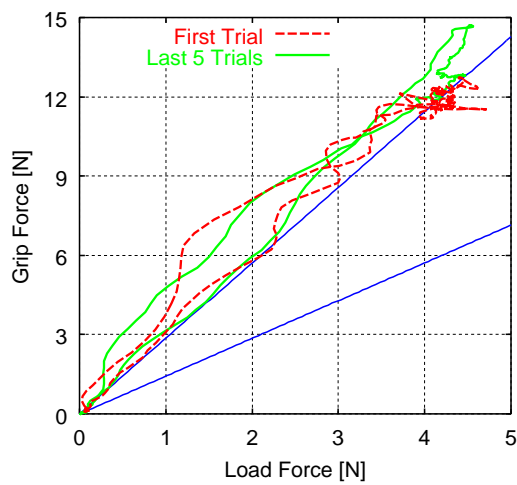
これらのグラフを比較すれば明らかなように LOAD-SMALL 条件と LOAD-NORMAL 条件における不慣れた状態での固着率は 0.9 程度と高い値に落ち着く。これは 7.5.1 節で述べたように、これらの条件の不慣れた状態では把持力の安全率が高いことを考えると容易に理解できる。一方、どの条件でも試行を繰り返し慣れた状態になると、固着率が 0.6 程度の値に落ち着くようになる。



(a) LOAD-SMALL 条件

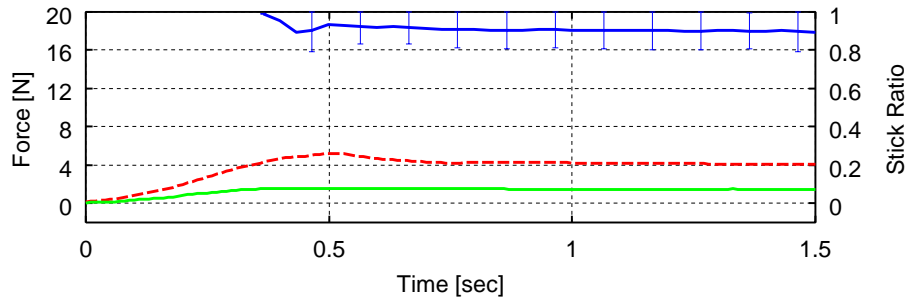


(b) LOAD-NORMAL 条件

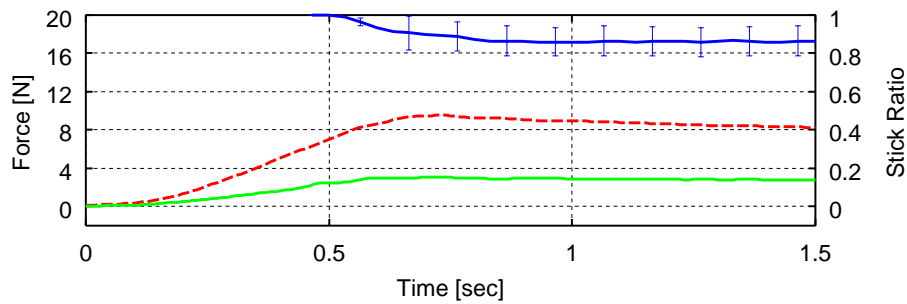


(c) LOAD-LARGE 条件

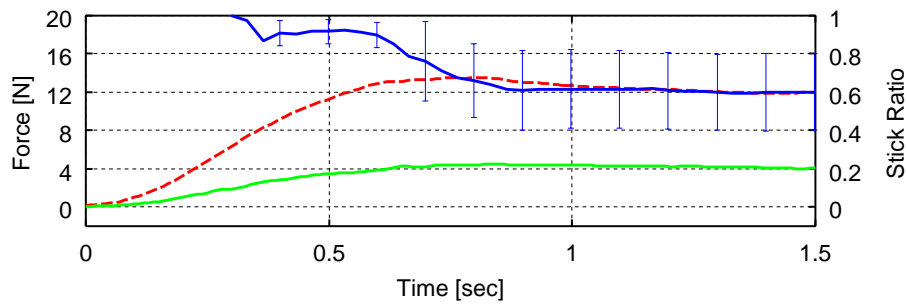
図 7.2 質量が変化するときの把持力と負荷力の関係 (被験者 A) : ただし, 下の直線は安全率が 1.0 である把持力と負荷力の関係を, 上の直線は安全率が 2.0 である把持力と負荷力の関係を表している .



(a) LOAD-SMALL 条件

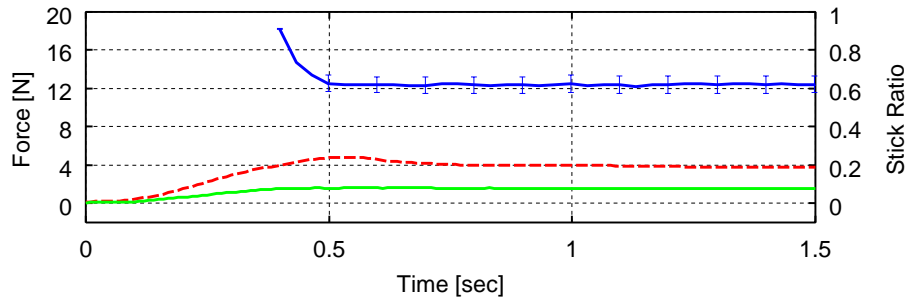


(b) LOAD-NORMAL 条件

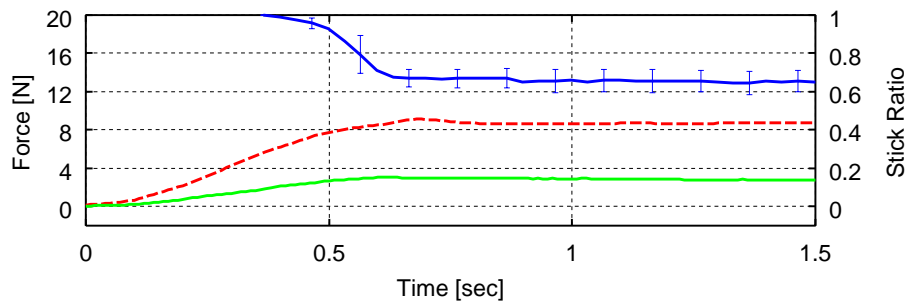


(c) LOAD-LARGE 条件

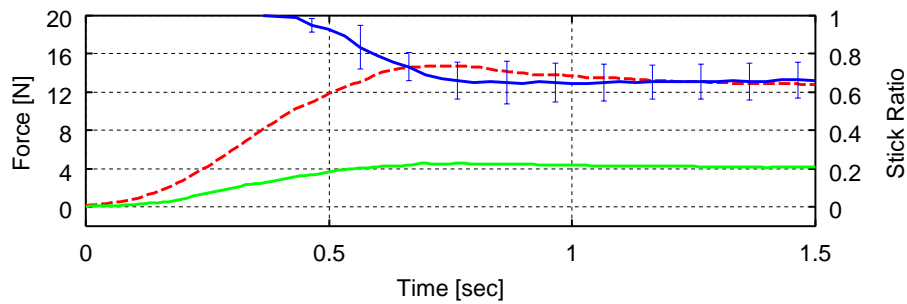
図 7.3 質量が変化するときの不慣れな状態での固着率と把持/負荷力のプロファイル (被験者 A): ただし, 各グラフにおいて, エラーバー付のグラフが固着率, 点線が把持力, 実線が負荷力を表す.



(a) LOAD-SMALL 条件



(b) LOAD-NORMAL 条件



(c) LOAD-LARGE 条件

図 7.4 質量が変化するときの慣れた状態での固着率と把持/負荷力のプロファイル (被験者 A): ただし, 各グラフにおいて, エラーバー付のグラフが固着率, 点線が把持力, 実線が負荷力を表す.

## 7.6. 摩擦係数が変化するときの計測結果

### 7.6.1 把持力と負荷力の関係

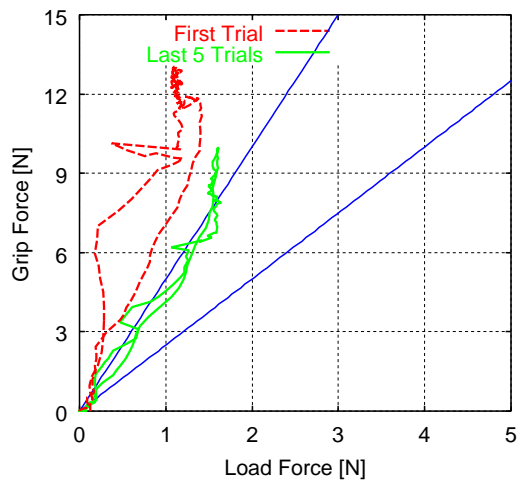
被験者 A で計測された，摩擦係数が変化する場合での把持力と負荷力の関係を図 7.5 に示す．ただし，点線は初回試行時，実線は慣れた状態での計測結果である．また，下の直線は把持の安全率が 1.0 である時の把持/負荷力の関係を，上の直線は安全率が 2.0 である時の把持/負荷力の関係を表す．

グラフより FRICTION-SMALL 条件では，不慣れた状態での把持力が慣れた状態でのそれに比べ，大幅に大きくなることが分かる．しかし，どの条件でも試行を経るにつれ，安全率がほぼ 2.0 となる．7.5.1 節における実験結果と同様に，この値は従来の知見より大きな値である [6]．しかし，条件が変化しても安全率がほぼ一定であるという点では定性的に一致する．

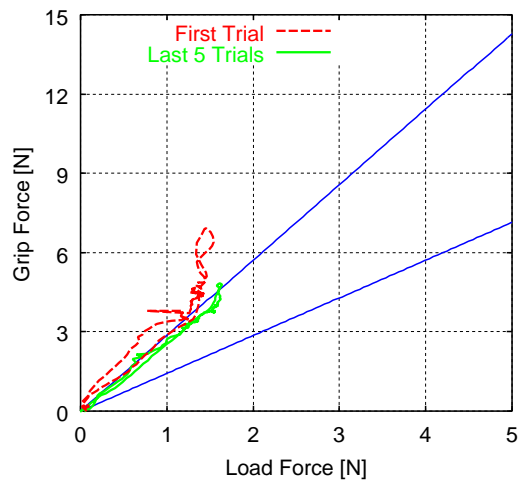
### 7.6.2 固着率の推移

被験者 A で計測された摩擦係数が変化する場合での，固着率と把持/負荷力の推移を図 7.6 と図 7.7 に示す．ただし，前者は不慣れた状態，後者は慣れた状態での計測結果を表す．また，各グラフにおいて，エラーバー付のグラフが固着率，点線が把持力，実線が負荷力表す．

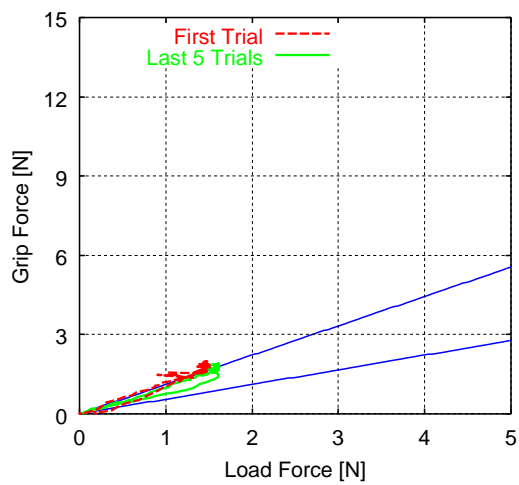
これらのグラフを比較すれば明らかなように，FRICTION-SMALL 条件における不慣れた状態での固着率は 0.2 程度と極めて低い値となる．これは，物体が全滑りに近い状態に置かれたことを意味する．7.6.1 節における把持/負荷力の関係で，把持力のみが急激に増加するのは，低い固着率に対応するためであると考えられる．一方 FRICTION-NORMAL 条件と FRICTION-LARGE 条件における不慣れた状態での固着率は 0.8 から 0.9 と高い値となる．しかし，試行を重ね慣れた状態になるとどの条件でも固着率が 0.6 から 0.7 程度の値に落ち着くことが分かる．



(a) FRICITION-SMALL 条件

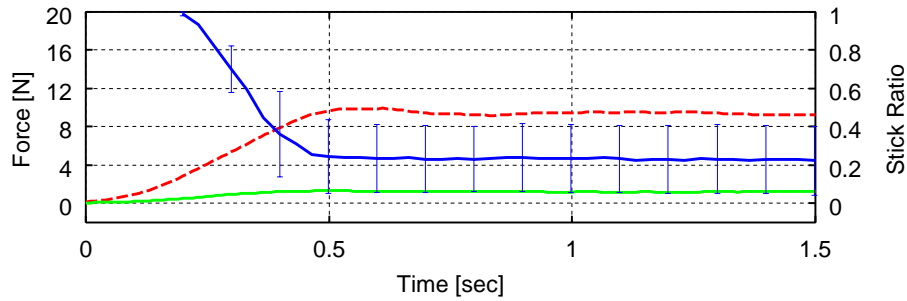


(b) FRICITION-NORMAL 条件

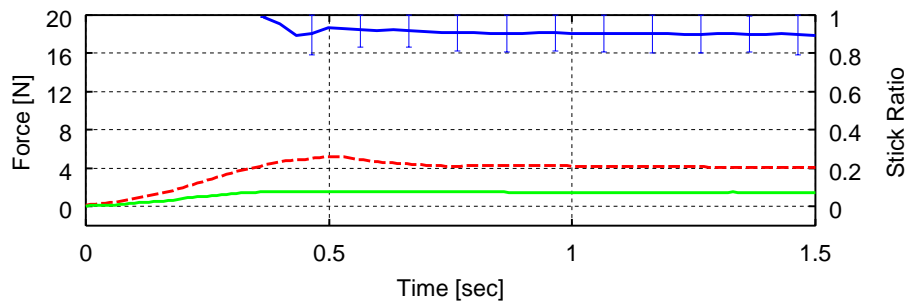


(c) FRICITION-LARGE 条件

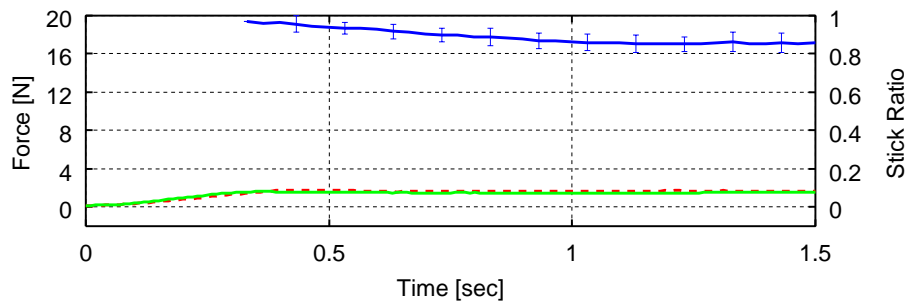
図 7.5 摩擦係数が変化するときの把持力と負荷力の関係 (被験者 A) : ただし , 下の直線は安全率が 1.0 である把持力と負荷力の関係を , 上の直線は安全率が 2.0 である把持力と負荷力の関係を表す .



(a) FRICITION-SMALL 条件

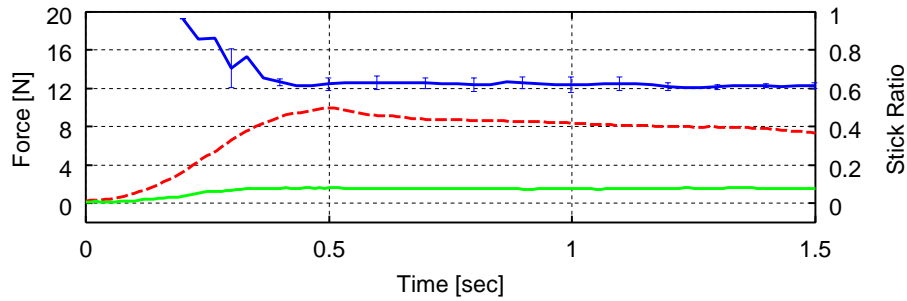


(b) FRICITION-NORMAL 条件

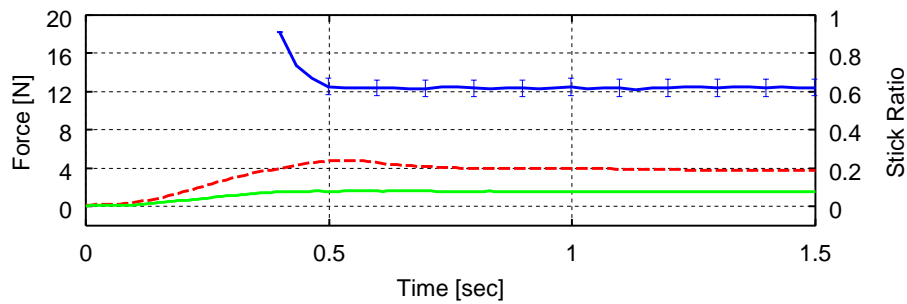


(c) FRICITION-LARGE 条件

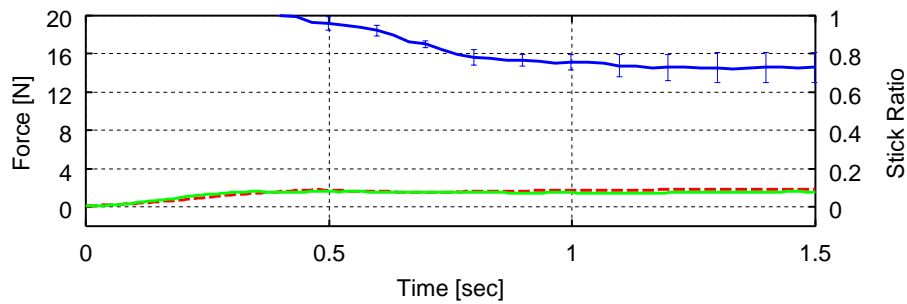
図 7.6 摩擦係数が変わるときの不慣れな状態での固着率と把持/負荷力のプロファイル (被験者 A): ただし, 各グラフにおいて, エラーバー付のグラフが固着率, 点線が把持力, 実線が負荷力を表す.



(a) FRICITION-SMALL 条件



(b) FRICITION-NORMAL 条件



(c) FRICITION-LARGE 条件

図 7.7 摩擦係数が変化するときの慣れた状態での固着率と把持/負荷力のプロファイル (被験者 A) : ただし, 各グラフにおいて, エラーバー付のグラフが固着率, 点線が把持力, 実線が負荷力を表す.



表 7.3 固着率の有意性の検証

被験者	不慣れな状態	慣れた状態
被験者 A	**	NS
被験者 B	**	NS
被験者 C	**	NS

\*:  $P < 0.05$ , \*\*:  $P < 0.01$ , NS: Not Significant

## 7.7. 指先固着率に基づく把持力制御仮説の検証

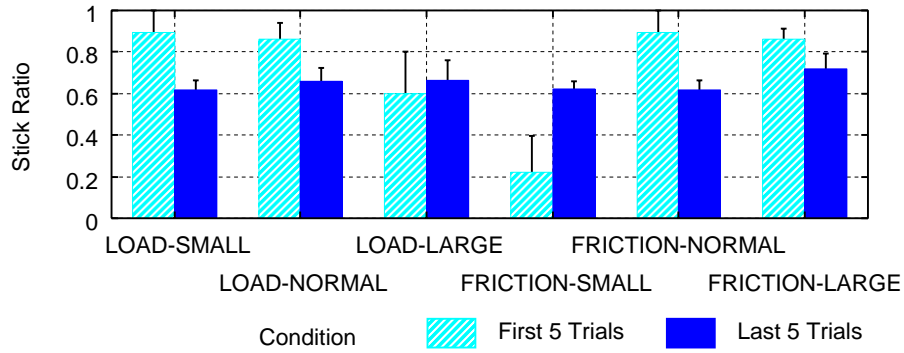
7.5 節と 7.6 節における実験の結果、どの被験者でも十分に慣れた状態では把持力の安全率が 1.9 ~ 2.1 程度になることが確認された。一方、全被験者の不慣れな状態と慣れた状態での固着率を図 7.8 に示す。ただし、図の (a), (b), (c) はそれぞれ被験者 A, B, C に対応し、各条件において左が不慣れな状態、右が慣れた状態を表す。

図を見れば明らかなように、どの被験者でも不慣れな状態では固着率が大きく異なるのに対し、慣れた状態ではほぼ 0.6 ~ 0.7 程度の値に落ち着くことが分かる。また、不慣れな状態と慣れた状態における各条件の固着率の母平均値に差があるといえるか否かを、一元配置分散分析を用い検証した結果を表 7.3 に示す。

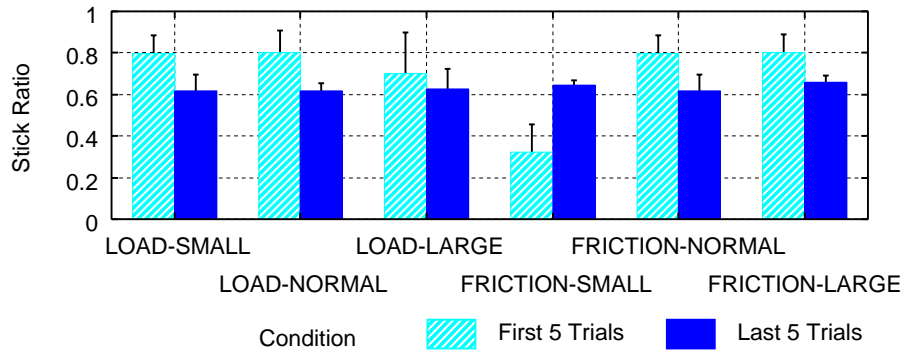
表より、不慣れな状態ではどの被験者の固着率にも条件間に 1% 水準で有意な差があることが分かる。一方、慣れた状態での固着率には有意な差が認められない。以上の検証結果より提案する仮説の妥当性が完全に示せるわけではない。しかし、計測条件に関わらず試行を繰り返すうちに固着率に有意な差がなくなるという実験結果は、提案する仮説を強く支持する。

また、この仮説は以下の 3 点のような、把持運動に関する様々な特徴を合理的に説明する。

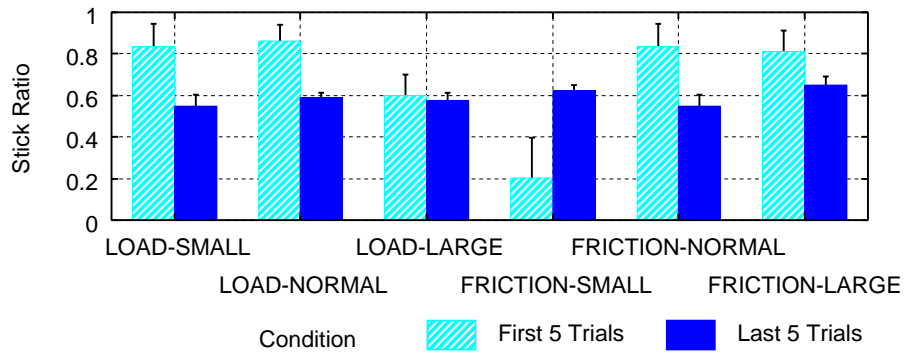
- 触覚情報のフィードバックには 100 [ms] 以上の時間遅れが存在するにも関わらず [9]、未知物体を完全に滑べらせることはない。つまり、固着率のよ



(a) 被験者 A



(b) 被験者 B



(c) 被験者 C

図 7.8 不慣れな状態と慣れた状態での固着率の変化

うな滑りの前兆を知覚し、把持力を修正している可能性は高い。

- 発汗により指先の摩擦係数が動的に変化したとしても、人は適切な把持力を発生することができる。つまり、摩擦係数を独立に知覚している可能性は低い。
- Size-Weight Illusion により、重さ知覚に錯覚が起きていたとしても、適切な把持力を発生することができる [43]。つまり、主観的に知覚される質量が把持力制御に用いられる可能性は低い。

ただし、この仮説は人が固着率（指先接触状態）の知覚だけで把持力制御を行うことを主張するものではない。つまり、把持力が過小で指と物体との間に相対的な滑りが生じると、固着率ではなくパチニ小体による振動検出が把持力制御における支配的要因となると考えられる。実際、把持運動には反射機構も存在する言われている [9]。また、触覚を麻痺させた被験者を用いた把持運動計測結果は、力覚等の深部受容感覚と過去の経験だけでもある程度の把持力制御ができることを示唆する [119]。ただし、これはあくまで“ある程度の把持力制御”であり、精緻な把持制御を行うためには触覚情報が不可欠となる。一方、十分に経験を積んだ物体に対する把持運動の際は、過去の運動経験に基づくフィードフォワード制御が主要な要因となることも示唆されている [120, 121]。

つまり、本章で提案する仮説は、把持対象物体に対する内部モデル獲得の過程で行われるフィードバック制御を対象とする。

本研究で提案した指先固着率に基づく把持力制御モデルは、把持運動の究極的な目的が過小な把持力で物体を滑らさず、かつ過大な把持力で物体を破壊しないことであることを考えると、極めて明解な機能モデルとなる。また、ロボットハンドを用いた把持力制御や、遠隔操作における触感検出/呈示といったアプリケーションにおいて、検出/呈示すべき情報が明確になるため、工学応用の主要な問題は固着率をいかに検出/呈示すれば良いかという点に帰着される。これは、本研究で設定した課題の汎用性、そして本研究で提案した解法の妥当性を示すものである。

## 7.8. 本章の結論

本章では 3 章で提案した固着率と，5 章と 6 章で行った実験/シミュレーション結果を踏まえ，適切な把持力制御という優れた機能を実現するための触覚情報処理モデルとして，指先固着率に基づく把持力制御仮説を提案し，4 章で構築した計測装置を用いてその妥当性を検証した．

固着率は指先接触状態を代表するパラメータであるだけでなく，一般的な滑り余裕を表すという特徴がある．つまり，接触力や摩擦係数が異なる場合でも，固着率が等しければ滑り余裕も等しい．また，固着率と等価な情報が触覚受容器で知覚可能であることが 6 章のシミュレーションで示唆されている．つまり，固着率に着目すれば，いかなる物体を把持する時も同程度の安全率を持つ把持力を発生するという人の優れた機能を合理的に説明することができる．

本章では把持力制御に伴う触覚情報処理モデルとして，指先固着率に基づく把持力制御仮説を提案した．これは，固着率に代表される指先接触状態が一定の値に落ち着くように力を制御することで，適切な把持力が実現されるとする仮説である．

そして 4 章で構築した計測装置を用い，異なる質量と摩擦係数を持つ物体を把持する時の固着率と把持/負荷力の計測実験を行った結果，どの被験者でも実験条件に十分慣れた状態では，固着率の値に有意な差がなくなることが確認された．この実験結果は提案する仮説を強く支持する．

一方，提案するモデルは触覚技術の工学応用を考える時も極めて示唆に富む．つまり，ロボットハンドを用いた把持力制御や，遠隔操作における触感検出/呈示といったアプリケーションにおいて，本質的に重要な触覚情報が固着率である可能性が高いことが明らかになった．このため，それをどのような機構で検出/呈示するかを考えることが，工学応用における主要な問題となる．

以上のように，本研究で提案した固着率に基づく把持力制御モデルは，把持という機能を極めて明解にモデル化しているだけでなく，工学応用においても不可欠な知見となる．これは，本研究で設定した課題の汎用性，そして本研究で提案した解法の妥当性を示すものである．

## 第8章 結論

### 8.1. 本研究における問題の設定

本研究では，工学における触覚応用技術の必要性和，心理/生理学における触覚情報処理機構探求の普遍性を踏まえ，把持運動に伴う触覚情報処理のモデル化を課題として掲げた．ここで研究の対象を把持運動としたのは，それが触覚を必要とする代表的運動であり，かつ日常生活の基本的運動でもあるため，将来的な触覚技術の応用や，触覚情報処理機構の探求を考えるとときに不可欠なモデルとなり得ると考えたからである．

しかし，人の手指に関しては従来より多くの研究成果が報告されている．具体的にはバイオメカニクスでは指の特性に着目した“材料”モデルが，心理学では，指先力に着目した“運動”モデルが，そして生理学では受容器応答に着目した“生理”モデルが提案されている．一方，本研究では把持運動に伴う触覚情報処理を“機能”レベルでモデル化することを提案した．なぜなら，人を機能レベルで理解することにより，把持運動を模倣する工学応用を考える時も，人の情報処理機構をより深く探求する心理/生理学的研究を行う時も，問題に対してトップダウンなアプローチで臨むことができるようになると思ったからである．

つまり，従来の触覚応用技術は，センサの制約の上に構築された把持/操りの理論や，アドホックな方法で実現された触感呈示のように，ボトムアップに開発されていた．しかし，本研究を行うことにより，把持運動を行う上で本質的に重要な触覚情報を明確にすることができる．そして，そのような触覚情報を検出/呈示するにはどのような機構を開発すればいいか，という点が触覚応用技術における主要な問題となり，技術の実現に向けてトップダウンにアプローチすることができるようになる．

一方、従来の心理/生理学的研究では、断片的な現象をモデル化し、それを積み上げることで人という情報処理システムを推定しようとしていた。つまり、情報処理機構の理解という問題に対しボトムアップにアプローチしていたと言える。しかし本研究を行い、触覚情報処理機構を機能レベルでモデル化できれば、個々の現象の意味がより明確になるだけでなく、結果として様々なレベルでのモデルを包括的に統合し、より詳細な機能モデルの提案を行うことができる。つまり、触覚情報処理機構の理解という問題に対しトップダウンにアプローチすることができるようになる。

以上より、本研究で掲げた問題は、人の触覚情報処理機構の探求と、触覚技術の応用という2つの異なる分野において、極めて本質的なモデルを提供し一般性の高い応用が期待できる。

## 8.2. 本研究における解法の設定

設定した課題に対する解法として、弾性体接触理論に基づく指先接触のモデル化と、指先接触面に発生する初期滑りの計測という2つの手法を提案した。

従来より運動、生理レベルで人の把持運動がモデル化されているが、指先接触をモデル化することにより、指先変形とそれらモデルとの関係を数学的に記述できるようになる。つまり、指先接触をモデル化することで、機能のモデル化に必要な基礎理論と運動/生理モデルの統合が行える。そして、運動/生理モデルの特徴を鑑み、把持力制御に伴う触覚情報処理のモデルを提案した。一方、提案するモデルを検証するための手段として、実際の人の指先接触面に発生する初期滑りの計測を提案した。この手法は以下の2つの特記すべき特徴がある。

- 触覚情報は指先接触面における圧力(変位)変化に起因する皮膚内応力(歪み)場の時空間的变化として触覚受容器に伝達される。つまり、この手法を用いれば、触覚入力と等価な情報の計測ができる。
- 計測装置としてカメラを用いるため、触覚と等価な情報の時空間的变化を非侵襲に計測することができる。

つまり，本研究で提案した解法は，把持運動に伴う触覚情報処理を機能レベルでモデル化するという問題に対処するだけの十分な妥当性を持つ．また，触覚入力と等価な情報の時空間的变化を非侵襲に計測できるという優れた特徴を持つため，把持運動に限らず一般的な人の触覚情報処理を探求するために十分な能力を備えると考えられる．

## 8.3. 本研究の具体的成果

### 8.3.1 各章の成果のまとめ

本研究では，弾性体接触理論に基づき導出された指先接触モデルと，従来の運動/生理モデルを統合することで，適切な把持力制御に必要な触覚情報をモデル化した．さらに，独自に開発した触覚計測装置を用いた心理物理実験を行い，提案する機能モデルを検証した．以下に，各章において具体的に得られた成果をまとめる．

#### 弾性体接触理論に基づく固着率の提案 (第 3 章)

弾性体接触理論に基づく考察を行い，弾性球の接触面に発生する初期滑りと呼ばれる現象をモデル化した．また，初期滑りの発生量とそれに伴い変化する弾性体内の応力場を，解析解の重ね合わせにより計算する手法を示した．

初期滑りは，弾性体の接触に特有の現象であり，人の把持力制御と密接な関係を持つと言われている [5]．しかしその実態は滑りベクトルの分布であり，極めて大きな自由度を持つ．このため，その発生度合を単純に比較することは難しい．そこで，初期滑りの発生を代表するスカラパラメータとして，固着率を提案した．これは，接触領域に対する固着領域の割り合いとして定義される．また，等しい固着率を持つ弾性体は，接触力や接触面の摩擦係数に関わらず，等しい滑り余裕を持つという特徴がある．つまり，固着率は接線方向力を受ける弾性体の接触状態を代表するパラメータであるとみなすこともできる．

この章で提案した固着率は，本論文を通して指先の接触状態を評価するための

指標として用いられた。

#### 固着率と把持/負荷力の同時計測装置の開発 (第 4 章)

8.1 節で述べた問題に対する解法の要となる、固着率と把持/負荷力の同時計測装置を開発し、その性能を評価した。

計測装置は、カメラを用いた接触面計測、力センサを用いた接触力計測、加速度センサを用いた装置加速度計測を併用することで、固着率、把持/負荷力、計測装置の動きの同時計測を可能にする。また、この装置は、59W × 46D × 130H [mm]、270 [g] と小型・軽量であり、被験者は無理なく摘み上げることができる。また、装置下部に負荷を挿入したり、装置表面を油、透明ゴム等でコーティングすることで、装置質量/表面摩擦係数も変化させることができる。これらは、異なる装置条件において、自然な把持運動の計測を行うために極めて重要な機能である。また、画像処理は 30 [Hz]、力と加速度のサンプリングは 100 [Hz] で行うことができる。これは、初期滑りの計測には十分な能力である。

この章で構築した計測装置は、指先接触状態に着目した把持運動解析を可能にするという意味で、新規/独創性に富む。

#### 指先接触面内で発生する初期滑り現象の検証 (第 5 章)

指先に発生する初期滑りの計測結果と、同じ境界条件で弾性球に発生する初期滑りのシミュレーション結果との比較を行い、指先の接触に伴う現象が弾性体接触理論による予測と定性的に一致することを確認した。

実験は 3 軸ステージ上に固定された指先を、計測装置に対して任意の力で接触させるという設定で行った。また実験条件として、法線方向力/摩擦係数を一定に保ち接線方向力を変化させる場合と、接触力を一定に保ち摩擦係数を変化させる場合の 2 つを用意した。各条件での計測/シミュレーション結果は、負荷力に垂直で、接触領域の重心を通る直線上での負荷力方向の滑り量と、固着率に関して比較された。これは、滑り量の変化がこの線上で最大となり、また固着率が初期滑りの発生を代表する指標であるからである。比較の結果、計測された滑り領



域の広がりや滑り量の変化は、シミュレーションと似たような傾向を示すことが確認された。また、計測された固着率も計算値とほぼ一致する。

この章で得られた実験結果は、4章で構築した弾性体接触理論に基づく指先接触モデルが、実際の指先で発生する現象も良く説明できることを意味する。

#### 歪みエネルギー密度に基づく固着率知覚可能性の検証 (第6章)

接触状態(固着率)の変化に伴う弾性体内歪みエネルギー密度分布と、その速度分布を計算し、固着率と等価な情報が弾性体内応力場の変化として知覚し得ることを示した。

歪みエネルギー密度に着目したのは、メルケル盤の応答と皮膚内歪みエネルギー密度との間に高い相関が示唆されているからである[68]。また、マイスナー小体は皮膚変形の変位成分に応じて求心性神経インパルスを発射することが知られているため[60]、歪みエネルギー密度の時間差分も計算する。そして、人の神経回路が持つ側抑制効果を考慮し、これらの空間微分を計算した結果、メルケル盤近傍での歪みエネルギー密度の空間微分は滑り領域の空間的広がりを、マイスナー小体近傍での歪みエネルギー密度の時間差分の空間微分は滑り領域の時間的広がりを特徴的に表すことが確認された。

この章で得られたシミュレーション結果は、指先の接触状態(固着率)の変化が皮膚内に存在する触覚受容器で間接的に知覚可能であることを示唆する。

#### 指先固着率に基づく把持力制御仮説の提案と検証 (第7章)

ここまでの実験/シミュレーション結果を踏まえ、指先固着率に基づく把持力制御仮説を提案した。これは、適切な把持力制御を行うための触覚入力として、指先接触状態(固着率)に着目した触覚情報処理モデルである。そして、この仮説を検証するため4章で開発した計測装置を用いた把持運動中の指先固着率計測実験を行った。

人の把持力は、把持物体に関らず同程度の安全率を持つといわれている[6]。つまり、普段何気なく行っている把持運動であるが、実際は極めて適切な制御が行

われている。また、このように適切な把持力制御を行うためには触覚入力が必要で、特に接触面に生じる滑り情報が重要であることが示唆されている。そこで、把持力制御を行うための触覚入力として、指先固着率に着目した。3章で述べた通り、固着率は一般化された滑り余裕を表すため、それが常に同程度の値に落ち着くように把持力を制御すれば、いかなる特性を持つ物体に対しても適切な把持力を実現できる。また、固着率は接触面で生じる現象を表す指標であるが、6章で行ったシミュレーション結果は、触覚受容器でもそれと等価な情報が知覚可能であることを示唆する。そして、この把持力制御仮説は、人の把持力に関する従来の知見と矛盾しないだけでなく、ロバストな人の把持運動を合理的に説明する。

検証実験では、質量または摩擦係数がランダムに変化する計測装置用の持ち上げ運動を、1つの条件につき20回繰り返し行うよう被験者に指示した。つまり、装置条件に不慣れな状態から習熟するまでの固着率と把持/負荷力の推移が計測できる。その結果、どの条件でも数回の試行を行うことで、条件に関わらず固着率が同程度の値に落ち着くことが確認された。つまり、試行の初期においては物体の特性が分からず、適切な把持力を加えることが出来ないため固着率が条件によりばらつくのに対し、試行を繰り返すうちに固着率を適切な値に落ち着かせるよう把持力に修正が入り、結果として数回の試行で適切な把持力を実現できるようになると考えられる。

この章で得られた実験結果は、提案する把持運動における触覚情報処理モデルを強く支持する。つまり、固着率に代表される指先接触状態が、把持力制御を行うための主要な触覚入力である可能性は高い。

### 8.3.2 全体のまとめ

本研究は、人の把持運動に伴う触覚情報処理を機能レベルでモデル化することを課題として掲げた。そして、一連の議論を展開した上で、指先固着率に基づく把持力制御仮説を提案し、独自に開発した計測装置を用いた検証実験を行った。

この仮説は以下の4点において、把持運動に関する従来の知見を合理的に説明する。

- 指先接触に生じる局所的な滑りの知覚が人の把持力制御に不可欠であることが示唆されている [5] .
- 触覚情報のフィードバックには大きな時間遅れが存在するにも関わらず，物体を完全に滑べらせることはない [9] . つまり，固着率のような滑りの前兆を知覚している可能性は高い .
- 発汗により指先の摩擦係数が動的に変化したとしても，人は適切な把持力を発生することができる . つまり，摩擦係数を独立に知覚している可能性は低い .
- Size-Weight Illusion により，重さ知覚に錯覚が起きていたとしても，適切な把持力を発生することができる [43] . つまり，主観的に知覚される質量が把持力制御に用いられている可能性は低い .

また，把持運動の究極的な目的が過小な把持力で物体を滑らさず，かつ過大な把持力で物体を破壊しないことであることを考えると，この仮説は極めて明解な機能モデルとなっている .

ただし，この仮説は人が固着率の知覚だけで把持力制御を行っているとは主張するものではない . つまり，把持力が過小で指と物体との間に相対的な滑りが生じると，固着率ではなくパチニ小体による振動検出が把持力制御における支配的要因となると考えられる . 実際，把持運動には反射機構も存在する言われている [9] . また，触覚を麻痺させた被験者を用いた把持運動計測結果は，力覚と過去の経験だけでもある程度の把持力制御ができることを示唆する [119] . ただし，これはあくまで“ある程度の把持力制御”であり，精緻な把持制御を行うためには触覚情報が不可欠となる . また，十分に経験を積んだ物体に対する把持運動の際は，過去の運動経験に基づくフィードフォワード制御が主要な要因となることも示唆されている [120, 121] .

一方，提案するモデルは触覚技術の工学応用を考える時も極めて示唆に富む . つまり，ロボットハンドを用いた把持力制御や，遠隔操作における触感検出/呈示といったアプリケーションにおいて，本質的に重要な触覚情報が固着率である

可能性が高いことが明らかになった．このため，それをどのような機構で検出/呈示すれば良いのかを考えることが，工学応用における主要な問題となる．

以上のように，本研究で提案した固着率に基づく把持力制御モデルは，把持という機能を極めて明解にモデル化しているだけでなく，工学応用においても不可欠な知見となる．これは，本研究で設定した課題の汎用性，そして本研究で提案した解法の妥当性を示すものである．

## 8.4. 課題と今後の展開

### 8.4.1 本研究の残した課題

本研究を構成する知見/技術は多岐に渡る．つまり，弾性体の接触/変形を論じるための弾性体力学，指先接触面計測のための画像処理，受容器特性推定のための神経生理学（本研究では従来の知見を参照したにすぎないが），そして検証実験として心理物理実験が行われた．

このため，個々の部分を見るといささか単純過ぎるモデル化であることは否めない．つまり，弾性球を用いた接触モデルでは人の指先接触面における現象を完全に説明することはできず，初期滑り計測では画像処理を簡単にするためにドットパターンを画像特徴として利用した．また，受容器応答モデルは弾性体内歪みエネルギー密度にのみ着目した単純なモデルである．

ただし，これらは本研究で提案したアプローチの限界を示すものではない．なぜなら，本研究で得られた一連の成果は全体として見ると極めて明解な議論となっており，研究の目的である“把持運動に伴う触覚情報処理の機能モデル提案”に対する足掛かりは十分に掴めたと言えるからである．つまり，本研究で行われた計測/解析/モデル化をより詳細に行うための手段を確立すれば，将来的により高度な触覚情報処理の機能モデル構築が可能となる．

また，本研究で提案したモデル化アプローチの利点をより明確に示すためには，得られたモデルをとり入れた把持力制御法，触覚センサ/ディスプレイの開発が必須となる．

以上を踏まえ，本研究の今後の展開として，より詳細な機能モデルの構築と触

覚応用技術への展開という 2 つの可能性について述べる。

#### 8.4.2 今後の展開

人の触覚情報処理機構を，より詳細に計測/解析/モデル化するために必要な今後の展開を以下にまとめる．これらは，本研究で提案した指先接触モデルの構築と指先接触面計測を発展させるものである．なお，以下の説明のうち指先接触面の計測に関しては既に研究が進んでいるため，その概要を付録 E に記載する．

**指先接触のモデル化** 本研究で構築した指先接触モデルは，弾性体接触理論に基づく極めて単純なものであった．これは，解析解の計算により見通しの良い議論が行えるという利点がある反面，実際の指が持つ複雑な構造と，皮膚が持つ複雑な材料特性を考慮することができないという欠点がある．今後は，有限要素法などの数値解析法を用いた詳細な接触解析の実現が望まれる．そのためには，皮膚の材料特性の同定，指紋や皮下組織の構造を含む詳細な 3 次元指モデルの作成，効率的な接触解析アルゴリズムの開発が必要となる [122]．

**指先接触面の計測** 本研究で提案した計測手法では，指の腹に描画したドットパターンを画像特徴として用いた．これは，画像処理が単純化されるという利点がある反面，計測密度がドットの間隔に依存するという欠点がある．一方，人の指先には指紋が備わっており，このパターン変化に対して画像処理を施すことで，より高精度な指先接触面計測が期待できる．具体的には，指紋パターンの変化をオプティカルフロー推定のような画像処理手法で計測することになる．また，指紋パターンと触覚受容器の配置には一定の関係があるため，指紋パターン変化の計測が触覚受容器応答を考える上で，本質的に重要な皮膚変形であることが予想される．なお，指紋パターンを用いた初期滑り計測に関しては付録 E でその概要を説明する．

**受容器のモデル化** 触覚の本質は時空間的に変化する指先接触状態を，指先に多数分布する触覚受容器からの神経インパルスとして時空間的に符号化する

点にある。つまり，詳細な触覚情報処理モデルの構築には受容器応答分布の計測が不可欠となる。しかし，微小神経電図では，一度に多数の受容器応答を計測することはできない。つまり，今後は数値シミュレーションで応答分布を推定することが必要となろう。具体的には，ある境界条件下で数値的に計算される皮膚内応力場と，同じ境界条件を指先に与えた時の受容器応答を比較し，詳細な受容器応答モデルを構築する。そして，この応答モデルと先に計算した皮膚内応力分布より，触覚受容器応答分布を推定することになる。つまり，受容器モデルを構築するためにも，詳細な指先接触のモデル化が不可欠となる。

脳活動との同時計測 近年，fMRI を用いた脳機能解析が盛んに行われている。この手法の利点は脳活動を非侵襲に計測出来る点にある。そしてこの手法は，高次触覚情報処理を議論する上でも極めて有効である。しかし，fMRI 内には力センサ等の金属部品を持ち込むことが出来ない [123]。一方，指先力は運動モデルを構築する上で重要な情報であり，また触運動による脳活動を客観的に評価するためにも不可欠な情報である。つまり，高次触覚情報処理を議論するためには脳活動と指先力の同時計測が不可欠となる。そして，それを実現するためには強磁場内でも使用可能な力センサを開発しなければならない。特に，磁場の影響を受けず，かつ撮像に影響を与えないためには光を利用した力センサが有効であろう [124, 125, 126]。また，様々な条件で実験を行うためには，MRI 環境下で使用可能なアクチュエータの開発も重要になる [127, 128]。

一方，触覚関連技術の工学応用について考える。本研究で提案した機能モデルは，触覚センサや触覚ディスプレイの開発のように直接的な工学応用を目指すものではない。しかし，本研究で得られた固着率に基づく把持力制御モデルは，工学応用を行う上での理論的指針となり得る。具体例を以下に列挙する。

触覚センサ 本研究では，適切な把持力制御を行うための触覚入力として，指先接触状態 (固着率) に着目したモデルを提案した。このモデルは，触覚センサを構築する上で極めて示唆に富む。つまり，把持力制御を行う上で本質

的に重要な触覚情報が明らかになったため、触覚センサの開発における主要な問題は固着率をいかに検出すれば良いかという点に落ち着く。ただし、これは人の触覚受容器のように多数の検出素子を用いることを奨励するものではない。なぜなら、なるべく少ない検出素子で固着率と等価な情報を検出できる方が信頼性、頑健性の上では有利であろうし、工学としても妥当なアプローチであるからである。前述の通り、重要なのは人の“機構”を模倣することではなく、“機能”を模倣することなのである。

**把持力制御** 従来のロボットハンドは指先と物体の点接触を仮定し、質量と摩擦係数という2つの独立したパラメータを検出することで適切な把持力制御を実現していた。一方、固着率を検出可能な触覚センサが実現されれば、それを一定の値に落ち着かせるという極めて単純な戦略だけで、把持力を適切に制御することができる。

**触覚ディスプレイ** 触覚ディスプレイに関しては、2つの可能性が考えられる。一つは指先接触状態に着目する方法であり、もう一つは受容器応答分布に着目する方法である。つまり、前者では触感を等価な指先接触状態として機械的に呈示し、後者ではそれを等価な受容器刺激として電氣的に呈示する。しかし、いずれの場合でも本研究で提案した触覚情報処理の機能モデルが重要になる。例として把持物体が滑り落ちそうな感覚の呈示を考える。この場合、接触状態に着目する方法では固着率の減少を呈示すれば良く、受容器応答分布に着目する方法では固着率の減少に伴う皮膚内歪みエネルギー密度の変化を呈示すれば良い。このように、ある触感を呈示するために必要な触覚情報が明らかになるため、それをどのような機構で実現すれば良いかという点に問題を絞ることができる。

## おわりに

本論文が触覚研究の中で一つの方向性を示すのみならず、そのような研究を包括的に議論する場を与えることにより、触覚基礎研究/触覚応用技術の今後の発展を促すことができるのであれば、筆者にとって最大の喜びである。





## 参考文献

- [1] 中島誠一. 触覚メディア. インプレス, 1999.
- [2] Susumu Tachi. Real-time remote robotics - toward networked telexistence. *Computer Graphics and Applications*, Vol. 18, No. 6, pp. 6–9, 1998.
- [3] M. Mitsuishi, S. Tomisaki, T. Yoshidome, H. Hashizume, and K. Fujiwara. Tele-micro-surgery system with intelligent user interface. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1607–1614, 2000.
- [4] Gordon M. Shepherd. *Neurobiology*. Oxford University Press, 1994.
- [5] G. Westling and R.S. Johansson. Factors influencing the force control during precision grip. *Experimental Brain Research*, Vol. 53, pp. 277–284, 1984.
- [6] R.S. Johansson and G. Westling. Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Experimental Brain Research*, Vol. 56, pp. 550–564, 1984.
- [7] A.B. Vallbo and R.S. Johansson. Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Human Neurobiology*, pp. 3–14, 1984.
- [8] John R. Phillips and Kenneth O. Johnson. Tactile spatial resolution ii. neural representation of bars, edges, and gratings in monkey primary afferents. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 46, No. 6, pp. 1192–1203, December 1981.

- [9] R.S. Johansson and G. Westling. Signals in tactile afferents from the fingers eliciting adaptive motor responses during precision grip. *Experimental Brain Research*, Vol. 66, pp. 141–154, 1987.
- [10] J. Kerr and B. Roth. Analysis of multifingered hands. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 4, pp. 3–17, 1986.
- [11] Y. Nakamura, K. Nagai, and T. Yoshikawa. Dynamics and stability in coordination of multiple robotics mechanisms. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 8, No. 2, pp. 44–61, 1989.
- [12] R.S. Fearing. Tactile sensing mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 3, pp. 3–23, 6 1990.
- [13] 浅村直也, 横山望, 篠田裕之. 選択刺激子による触感の呈示. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 15–18, 1998.
- [14] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 館暲. 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J84-D-II, No. 1, pp. 120–128, 1 2001.
- [15] C. Cattaneo. Sul contatto di due corpi elastici: Distribuzione locale degli sforzi. *Rendiconti dell' Accademia Nazionale dei Lincei*, Vol. 6, pp. 342–349, 434–436, 474–478, 1938.
- [16] F.P. Bowden and D. Tabor. *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford University Press, 1950.
- [17] A. Schallamach. The load dependence of rubber friction. In *The Proceedings of the Physical Society*, Vol. B, pp. 657–661, 1952.
- [18] 山羽和夫, 高野英彦, 尾崎省太郎. 人間の指の物理的特性. バイオメカニズム, Vol. 27, pp. 27–36, 1975.

- [19] H.Y. Han, A. Shimada, and S. Kawamura. Analysis of friction on human fingers and design of artificial fingers. In *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3061–3066, 1996.
- [20] 岡久雄. 皮膚力学特性の計測とその評価. *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 16, No. 3, pp. 181–187, 1992.
- [21] 岡久雄, 入江隆. 皮膚軟部組織のモデル化のための生体定数. *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 17, No. 4, pp. 216–222, 1993.
- [22] Hyun-Yong Han and Sadao Kawamura. Analysis of stiffness of human fingertip and comparison with artificial fingers. In *Proceedings of IEEE International Conference on System Man Cybernetics*, pp. 800–805, 1999.
- [23] Nobuaki Nakazawa, Ryojun Ikeura, and Hikaru Inooka. Characteristics of human fingertips in the shearing direction. *Biological Cybernetics*, Vol. 82, pp. 207–214, 2000.
- [24] J.M. Pereira, J.M. Mansour, and B.R. Davis. The effects of layer properties on shear disturbance propagation in skin. *Transactions of the ASME Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 113, pp. 30–35, 2 1991.
- [25] 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿. ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係. *日本機械学会論文集 (C編)*, Vol. 63, No. 607, pp. 247–254, 3 1997.
- [26] 小林一三, 前野隆司. ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (第2報, 動的接触解析手法および移動する平面と指の接触解析結果. *日本機械学会論文集 (C編)*, Vol. 64, No. 628, pp. 268–275, 12 1998.
- [27] 小林一三, 前野隆司. ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (第3報, 凹凸を有する面と指の接触解析結果. *日本機械学会論文集 (C編)*, Vol. 65, No. 636, pp. 289–295, 8 1999.
- [28] A. R. Skovoroda, S. Y. Emelianov, and M. O'Donnell. Tissue elasticity reconstruction based on ultrasonic displacement and strain images. *IEEE*

- Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 42, No. 4, pp. 747–765, 1995.
- [29] Thomas L. Chenevert, Andrei R. Skovoroda, and Matthew O’Donnell. Elasticity reconstructive imaging by means of stimulated echo MRI. *Magn Reson Med*, Vol. 39, pp. 482–490, 1998.
- [30] 松田哲也, 菅幹生. MR elastography. *日本磁気共鳴医学会雑誌*, Vol. 20, No. 6, pp. 291–301, 2000.
- [31] 菅幹生, 湊小太郎, 松田哲也, 大城理, 千原國宏, 太田信, 堤定美, 小森優, 高橋隆, 岡本淳, 滝沢修. MR elastography. *Medical Imaging Technology*, Vol. 18, No. 6, pp. 769–776, 11 2000.
- [32] J. R. Napier. The prehensile movements of the human hand. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, pp. 902–913, 1956.
- [33] 鎌倉矩子, 大村道子, 石井晴美, 三星文子, 三浦頼子. 健常手の把握形式—分類の試み—. *リハビリテーション医学*, Vol. 15, No. 2, pp. 65–82, 1978.
- [34] Makoto shimojo, Sigeru Sato, Yoshikazu Seki, and Akihiko Takahashi. A system for simultaneous measuring grasping posture and pressure distribution. In *Proceeding of the IEEE International Conference of Robotics and Automation*, pp. 831–836, 1995.
- [35] Shunji Shimizu, Makoto Shimojo, Shigeru Sato, and Yoshikazu Seki. The relation between human grip types and force distribution pattern in grasping. In *IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 286–291, 1996.
- [36] 下条誠, 清水俊治, 佐藤滋, 関喜一. 把持力の計測. *可視化情報学会誌*, Vol. 17, No. 65, pp. 6–11, 1997.

- [37] R.S. Johansson and G. Westling. Coordinated isometric muscle commands adequately and erroneously programmed for the weight during lifting task with precision grip. *Experimental Brain Research*, Vol. 71, pp. 59–71, 1988.
- [38] Hiroshi Kinoshita, Lars Backstrom, J. Randall Flanagan, and Roland S. Johansson. Tangential torque effects on the control of grip forces when holding objects with a precision grip. *Journal of Neurophysiology*, pp. 1619–1930, 1997.
- [39] J. Randall Flanagan, Magnus K.O. Burstedt, and Roland S. Johansson. Control of fingertip forces in multidigit manipulation. *Journal of Neurophysiology*, pp. 1706–1717, 1999.
- [40] Magnus K.O. Burstedt, J. Randall Flanagan, and Roland S. Johansson. Control of grasp stability in humans under different frictional conditions during multidigit manipulation. *Journal of Neurophysiology*, pp. 2393–2405, 1999.
- [41] Kinya Fujita and Yasuhiro Oyama. Control strategies in human pinch motion to detect the hardness of an object. In *Proceedings of IEEE International Conference on System Man Cybernetics*, pp. 682–686, 1999.
- [42] 福田浩士, 福村直博, 片山正純, 宇野洋二. ヒトの把持運動制御における対象物認知と把持形状生成. 信学技報, 第 NC97-129 巻, pp. 215–222, 1998.
- [43] J. Randall Flanagan and Michael A. Beltzner. Independence of perceptual and sensorimotor predictions in the size-weight illusion. *Nature neuroscience*, Vol. 3, No. 7, pp. 737–741, 2000.
- [44] 赤松幹之, 貞本洋一. 表面あらかさ判別における触運動の役割. 人間工学, Vol. 125, No. 3, pp. 183–191, 1989.
- [45] J.K. Salisbury, et al. Articulated hands: Force control and kinematic issues. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 4–17, 1977.

- [46] S.C. Jacobsen, J.E. Wood, D.F. Knutti, and K.B. Biggers. The utah/m.i.t dextrous hand : Work in progress. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 21–50, 1984.
- [47] K. Nagata, T. Keino, and T. Omata. Acquisition of an object model by manipulation with a multifingered hand. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1045–1051, 1996.
- [48] Tsuneo Yoshikawa. Virtual truss model for characterization of internal forces for multiple finger grasps. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 5, pp. 941–947, 10 1999.
- [49] Thomas H. Speeter. Three-dimensional finite element analysis of elastic continua for tactile sensing. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 1, pp. 1–19, 2 1992.
- [50] 山田陽滋. 把持までのセンシング戦略その2: 滑りと静摩擦係数の検出～表面粗さ情報の取得. *日本ロボット学会誌*, Vol. 11, No. 7, pp. 959–965, 10 1993.
- [51] 吉川恒夫. 把持と操りの基礎理論 1. 受動拘束と能動拘束. *日本ロボット学会誌*, Vol. 13, No. 7, pp. 950–957, 10 1995.
- [52] 吉川恒夫. 把持と操りの基礎理論 2. 指先力. *日本ロボット学会誌*, Vol. 14, No. 1, pp. 48–54, 1 1996.
- [53] 吉川恒夫. 把持と操りの基礎理論 3. 制御. *日本ロボット学会誌*, Vol. 14, No. 4, pp. 505–511, 5 1996.
- [54] Nguyen Pham, Thuc Anh, and Suguru Arimoto. Control of physical interaction between a deformable finger-tip and a rigid object. In *Proceedings of IEEE International Conference on System Man Cybernetics*, pp. 812–817, 1999.

- [55] 永田和之, 齋藤史倫. 人間の手作業分析のための把握データ入力装置の開発. 第5回知能メカトロワークショップ講演予稿集, 2000.
- [56] K.E. Hagbarth and A.B. Vallbo. Mechanoreceptor activity recorded percutaneously with semi-microelectrodes in human peripheral nerves. *Acta Physiol. Scand.*, Vol. 69, pp. 121–122, 1967.
- [57] K.E. Hagbarth and A.B. Vallbo. Afferent response to mechanical stimulation of muscle receptors in man. *Acta Soc. Med. Upsal.*, Vol. 72, pp. 102–104, 1967.
- [58] R.S. Johansson. Tactile sensibility in the human hand: Receptive field characteristics of mechanoreceptive units in the glabrous skin area. *Journal of Physiology*, Vol. 281, pp. 101–123, 1978.
- [59] R.S. Johansson and A.B. Vallbo. Tactile sensibility in the human hand: Relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. *Journal of Physiology*, Vol. 286, pp. 283–300, 1979.
- [60] R.S. Johansson and A.B. Vallbo. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *TINS*, pp. 27–32, January 1983.
- [61] R.H. LaMotte and M.A. Srinivasan. Tactile discrimination of shape: Responses of slowly adapting mechanoreceptive afferents to a step stroked across the monkey fingerpad. *Journal of Neuroscience*, Vol. 7, No. 6, pp. 1655–1671, 1987.
- [62] R.H. LaMotte and M.A. Srinivasan. Tactile discrimination of shape: Responses of rapidly adapting mechanoreceptive afferents to a step stroked across the monkey fingerpad. *Journal of Neuroscience*, Vol. 7, No. 6, pp. 1672–1681, 1987.
- [63] M.A. Srinivasan and R.H. LaMotte. Tactile discrimination of shape: Responses of slowly and rapidly adapting mechanoreceptive afferents to a step

- indented into the monkey fingerpad. *Journal of Neuroscience*, Vol. 7, No. 6, pp. 1682–1697, 1987.
- [64] R.H. LaMotte and M.A. Srinivasan. Cutaneous neural codes for shape. *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, Vol. 72, pp. 498–505, 1994.
- [65] M.A. Srinivasan and R.H. LaMotte. Tactual discrimination of softness. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 73, No. 1, pp. 88–101, 1995.
- [66] M.A. Srinivasan, J.M. Whitehouse, and R.H. LaMotte. Tactile detection of slip: Surface microgeometry and periperal neural codes. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 63, No. 6, pp. 1323–1332, 1990.
- [67] John R. Phillips and Kenneth O. Johnson. Tactile spatial resolution iii. a continuum mechanics model of skin predicting mechanoreceptor responses to bars, edges, and gratings. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 46, No. 6, pp. 1204–1225, December 1981.
- [68] K. Dandekar and M.A. Srinivasan. A 3 dimensional finite element model of the monkey fingertip for predicting responses of slowly adapting mechanoreceptors. In *Proceedings of ASME Bioengineering Conference*, pp. 257–258, 1995.
- [69] M.A. Srinivasan and K. Dandekar. An investigation of the mechanics of tactile sense using two-dimensional models of the primate fingertip. *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 118, pp. 48–55, 1996.
- [70] Alan W. Freeman and Kenneth O. Johnson. A model accounting for effects of vibratory amplitude on responses of cutaneous mechanoreceptors in macaque monkey. *Journal of Physiology*, Vol. 323, pp. 43–64, 1982.
- [71] John R. Phillips and Kenneth O. Johnson. Neural mechanisms of scanned and stationary touch. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 77, No. 1, pp. 220–224, 1985.



- [72] H.E. Wheat, A.W. Goodwin, and A.S. Browning. Tactile resolution: Peripheral neural mechanisms underlying the human capacity to determine positions of objects contacting the fingerpad. *Journal of Neuroscience*, Vol. 15, No. 8, pp. 5582–5595, August 1995.
- [73] 間野忠明. Microneurography (i). *臨床脳波*, Vol. 25, No. 7, pp. 493–500, 1983.
- [74] 間野忠明. Microneurography (ii). *臨床脳波*, Vol. 25, No. 8, pp. 564–571, 1983.
- [75] 間野忠明. Microneurography (iii). *臨床脳波*, Vol. 25, No. 9, pp. 629–638, 1983.
- [76] 岩村吉晃. ヒト触覚受容器の構造と特性. *日本ロボット学会誌*, Vol. 2, No. 5, pp. 54–60, 10 1984.
- [77] 宮岡徹. ヒトの触覚情報処理. *トライボロジスト*, Vol. 40, No. 6, pp. 500–505, 1994.
- [78] S. Weinstein. Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality. In D.R. Keushalo and Charles C. Thomas, editors, *Skin Senses*, chapter I11, pp. 195–222. Springfield, 1972.
- [79] Ronald T. Verrillo, Anthony J. Fraioli, and Robert L. Smith. Sensation magnitude of vibrotactile stimuli. *Perception & Psychophysics*, Vol. 6, No. 6A, pp. 366–372, 1969.
- [80] Esther P. Gradner and Bradley F. Sklar. Discrimination of the direction of motion on the human hand: A psychophysical study of stimulation parameters. *Neurophysiology*, Vol. 71, No. 6, pp. 2414–2429, 6 1994.
- [81] Hakan Olausson, Johan Wessberg, and Naoyuki Kakuda. Tactile directional sensibility: Peripheral neural mechanisms in man. *Psychophysics*, Vol. 866, pp. 178–187, 2000.

- [82] Graham D. Lamb. Tactile discrimination of textured surfaces: Psychophysical performance measurements in humans. *Journal of Physiology*, Vol. 338, pp. 551–565, 1983.
- [83] 赤松幹之. 皮膚弾性モデルによる痛覚受容の計算機シミュレーション. *医用電子と生体工学*, Vol. 22, No. 3, pp. 30–37, 6 1984.
- [84] 山田陽滋, 杉本旭. 人間の痛覚耐性値の評価. *日本ロボット学会誌*, pp. 57–60, 1995.
- [85] Makoto Shimojo. Spatial filtering characteristic of elastic cover for tactile sensor. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 287–292, 1994.
- [86] Shigeru Ando and Hiroyuki Shinoda. Ultrasonic emission tactile sensing. In *Proceedings of IEEE Control Systems*, pp. 61–69, 1995.
- [87] Hiroyuki Shinoda and Shigeru Ando. Intelligent architecture for tactile sensor. *Sensors and Materials*, Vol. 7, No. 4, pp. 301–310, 1995.
- [88] 寺田夏樹, 篠田裕之, 安藤繁. 多モード音響共鳴を用いたテンソルセル触覚センサ. *計測自動制御学会論文集*, Vol. 33, No. 4, pp. 234–240, 1997.
- [89] Hiroyuki Shinoda, Kenichi Matsumoto, and Shigeru Ando. Acoustic resonant tensor cell for tactile sensing. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3087–3092, 1997.
- [90] 前野隆司, 小林一三, 河合隆志, 平野雄一. 曲面状弾性体の内部ひずみ分布検出に基づく把持力制御法. *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol. 64, No. 620, pp. 142–149, 4 1998.
- [91] 河合隆志, 平野雄一, 前野隆司. 把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発. *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol. 64, No. 627, pp. 156–162, 11 1998.

- [92] 佐々木晋哉, Wong Huey Sheong, 中村克彦, 篠田裕之. 接触瞬間に摩擦係数を検出する触覚センサ. In *Proceedings of SICE*, pp. 339–340, 1999.
- [93] 佐々木晋哉, 松本賢一, 吉富隆博, 篠田裕之. 共鳴型テンソルセルによる滑り予知触覚センサ. In *Proceedings of SICE*, pp. 411–412, 1999.
- [94] Hiroyuki Shinoda and Hideki Oasa. Wireless tactile sensing element using stress-sensitive resonator. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, Vol. 5, No. 3, pp. 258–265, 9 2000.
- [95] 前野隆司, 広光慎一, 河合隆志. 曲面状弾性フィンガの固着・滑り分布推定に基づく把持力の制御. *日本ロボット学会誌*, Vol. 19, No. 1, pp. 91–99, 1 2001.
- [96] Marc R. Tremblay and Mark R. Cutkosky. Estimating friction using incipient slip sensing during a manipulation task. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 258–265, 2000.
- [97] 森田裕之, 山田陽滋, 梅谷陽二. ロボットハンドのための指紋を備えた滑り振動覚センサ. 第3回ロボティクスシンポジア, pp. 89–94, 1998.
- [98] Yamada Yoji, Morita Hiroyuki, and Umetani Yoji. Vibrotactile sensor generation impulsive signals for distinguishing only slipping state. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 844–850, 1999.
- [99] Nicola J. Ferrier and Roger W. Bockett. Reconstructing the shape of a deformable membrane from image data. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 19, No. 9, pp. 795–816, 9 2000.
- [100] 下条誠, 篠原正美, 福井幸男. 3次元触覚ディスプレイにおける提示ピン配置密度と形状判別特性. *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol. J80-D-II, No. 5, pp. 1202–1208, 1997.

- [101] Charles H. Rogers. Choice of stimulator frequency for tactile arrays. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol. MMS-11, No. 1, pp. 5–11, 1970.
- [102] 奈良高明, 柳田康幸, 前田太郎, 舘暲. 弾性波動を用いた皮膚感覚ディスプレイ. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 3, No. 3, pp. 89–97, 1998.
- [103] Giulio Ambrosi, Antonio Bicchi, Danilo De Rossi, and Enzo Pasquale Scilingo. The role of contact area spread rate in haptic discrimination of softness. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 305–310, 1999.
- [104] 星野洋, 平田亮吉, 前田太郎, 舘暲. 仮想蝕空間における物体形状の実時間提示法. *日本ロボット学会誌*, Vol. 15, No. 6, pp. 868–877, 9 1997.
- [105] A. Nahvi, J.M. Hollerbach, R. Freier, and D.D. Nelson. Display of friction in virtual environments based on human finger pad characteristics. In *Proceedings of ASME Dynamic Systems and Control Division*, pp. 179–184, 1998.
- [106] Hiroyuki Shinoda, Naoya Asamura, and Naruyuki Tomori. Tactile feeling display based on selective stimulation to skin mechanoreceptors. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 680–686, 1998.
- [107] Guang H. Yue, Jing Z. Liu, Vlodek Siemionow, Vinoth K. Ranganathan, and Thian C. Ng. Brain activation during human finger extension and flexion movements. *Brain Research*, Vol. 856, pp. 291–300, 2000.
- [108] H. Henrik Ehrsson, Anders Fagergren, Tomas Jonsson, Goran Westling, Roland S. Johansson, and Hans Forssberg. Control activity in precision-versus power-grip tasks; an fmri study. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 83, No. 1, pp. 528–536, 2000.

- [109] Maxwell Boakye, Sean C. Huckins, Nikolaus M. Szeverenyi, Bobby I. Taskey, and Charles J. Hodge. Functional magnetic resonance imaging of somatosensory cortex activity produced by electrical stimulation of the median nerve of tactile stimulation of the index finger. *Journal of Neurosurgery*, Vol. 93, pp. 774–783, November 2000.
- [110] Johan Martijn Jansma, Nick F. Ramsey, and Rene S. Kahn. Tactile stimulation during finger opposition does not contribute to 3d fmri brain activity pattern. *NeuroReport*, Vol. 9, pp. 501–505, 1998.
- [111] H. Hertz. Über die berührung fester elastischer Körper (on the contact of elastic solid). *J. reine und angewandte Mathematik*, Vol. 92, pp. 90–243, 1882.
- [112] K.L. Johnson. Surface interaction between elastically loaded bodies under tangential forces. In *Proceedings of Royal Socience A*, Vol. 230, pp. 531–549, 1954.
- [113] G.M. Hamilton. Explicit equations for the stresses beneath a sliding spherical contact. In *Proceedings of Instn. Mech. Engrs.*, pp. 53–59, 1983.
- [114] R.D. Mindlin. Compliance of elastic bodies in contact. *Journal of Applied Mechanics*, pp. 259–268, September 1949.
- [115] G.M. Hamilton and L.E. Goodman. The stress field created by a circular sliding contact. *Journal of Applied Mechanics*, pp. 371–376, June 1966.
- [116] R. Cappelli, D. Maio, and D. Maltoni. Modelling plastic distortion in fingerprint images. In *Proceedings of Advances in Pattern Recognition*, pp. 369–376, 2001.
- [117] J.L. Lubkin. The torsion of elastic spheres in contact. *Journal of Applied Mechanics*, pp. 183–187, June 1951.

- [118] M. Hetenyi and Jr. P.H. Mcdonald. Contact stresses under combined pressure and twist. *Journal of Applied Mechanics*, pp. 396–401, September 1958.
- [119] Hager-Ross C. and Johansson R. S. Nondigital afferent input in reactive control of fingertip forces during precision grip. *Experimental Brain Research*, Vol. 110, pp. 131–141, 1996.
- [120] Gordon A. M., Westling G., Cole K. J., and Johansson R. S. Memory representations underlying motor commands used during manipulation of common and novel objects. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 69, pp. 1789–1796, 1993.
- [121] Jenmalm P. and Johansson R. S. Visual and somatosensory information about object shape control manipulative fingertip forces. *Journal of Neuroscience*, Vol. 17, pp. 4486–4499, 1997.
- [122] 貝野彰彦. 皮膚内部歪み分布に着目した有限要素指モデルによる人の物体把持解析. Master's thesis, 奈良先端科学技術大学院大学, 2001.
- [123] Kiyoyuki Chinzei, Ron Kikinis, and Ferenc A. Jolesz. Mr compatibility of mechatronic devices: Design criteria. In *Proceedings of MICCAI, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1679, pp. 1020–1031, 1999.
- [124] Shigeo Hirose and Kan Yoneda. Robotic sensors with photodetecting technology. In *Proceedings of International Symposium on Industrial Robots*, pp. 271–278, 1989.
- [125] Shigeo Hirose and Kan Yoneda. Development of optical 6-axis force sensor and its signal calibration considering non-linear interface. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 46–53, 1990.
- [126] 佐々木晋介. fMRI 内でも使用可能な光学式 2 軸力センサの開発. Master's thesis, 奈良先端科学技術大学院大学, 2002.

- [127] Ken Masamune, Etsuko Kobayashi, Yoshitaka Masutani, Makoto Suzuki, Takeyoshi Dohi, Hiroshi Iseki, and Kintomo Takakura. Development of an MRI-compatible needle insertion manipulator for stereotactic neurosurgery. *Journal of Image Guided Surgery*, Vol. 1, pp. 242–248, 1995.
- [128] Kiyoyuki Chinzei, Nobuhiko Hata, , Ferenc A. Jolesz, and Ron Kikinis. Mr compatible surgical assist robot: System integration and preliminary feasibility study. In *Proceedings of MICCAI Lecture, Notes in Computer Science*, Vol. 1935, pp. 921–930, 2000.
- [129] P.J. Vermeulen and K.L. Johnson. Contact of nonspherical elastic bodies transmitting tangential forces. *Journal of Applied Mechanics (BRIEF NOTES)*, pp. 338–340, June 1964.
- [130] M.D. Bryant and L.M. Kerr. Rough contact between elastically and geometrically identical curved bodies. *Journal of Applied Mechanics*, pp. 345–352, June 1982.





# 著者研究業績

## 論文誌

1. 多田 充徳, 柴田 智広, 今井 正和, 小笠原 司. “人の把持力制御メカニズム研究のための指先変形と把持/負荷力の同時計測装置の開発”, 電子情報通信学会論文誌, J84-D-II, pp.1033–1044, 2001.
2. 近野 敦, 多田 充徳, 長嶋 功一, 稲葉 雅幸, 井上 博允. “人間型多指ハンドの開発および手探りによる未知物体の把握実験”, 機械学会論文集 C 編, 65 巻, 638 号, pp.188–193, 1999.

## 国際会議

1. Mitsunori Tada, Tomohiro Shibata and Tsukasa Ogasawara. “Proposition and Investigation of the Grip Force Control Hypothesis based on the Stick Ratio of a Fingertip Contact Interface –Toward Dexterous Manipulations with Humanoid Robots–”, In Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids2001), pp.149–155, 2001.
2. Mitsunori Tada, Masakazu Imai and Tsukasa Ogasawara. “Development of Simultaneous Measurement System of Incipient Slip and Grip/Load Force”, In Proceedings of IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction (ROMAN2000), pp.57–62, 2000.
3. Mitsunori Tada, Masakazu Imai and Tsukasa Ogasawara. “Simultaneous Measurement System of Incipient Slip and Grip/Load Force –Toward Dex-

- trous Manipulations using Robot Hand Covered with Elastic Sensors”, In Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids2000), 71.PDF, 2000.
4. Mitsunori Tada, Taketoshi Mori and Tomomasa Sato. “Grasping of Unknown Objects Based on a Continuous Estimation of Relation between Finger Position and Contact Position”, In Proceedings of International Conference on Advanced Robotics (ICAR’99), pp.67–73, 1999.
  5. Atsushi Konno, Koichi Nishiwaki, Ryo Furukawa, Mitsunori Tada, Koichi Nagashima, Masayuki Inaba and Hirochika Inoue. “Dexterous Manipulations of Humanoid Robot Saika”, In Preprints of Fifth International Symposium on Experimental Robots (ISER’97), pp.46–57, 1997.
  6. Atsushi Konno, Mitsunori Tada, Koichi Nagashima, Masayuki Inaba and Hirochika Inoue, “Development of a 3-Fingered Hand and Grasping Unknown Objects by Groping”, In Proceedings of IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP’97), pp.72–77, 1997.

## 全国大会

1. 多田 充徳, 柴田 智広, 小笠原 司. “指先接触面の固着領域率に基づく人の物体把持力制御仮説”, 日本神経回路学会第 11 回全国大会講演予稿集 (JNNS2001), pp.223–224, 2001.
2. 多田 充徳, 栗田 雄一, 小笠原 司. “指紋を用いた高精度初期滑り計測のためのフロー推定法”, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集 (RSJ’01), pp.593–594, 2K14, 2001.
3. 多田 充徳, 柴田 智広, 小笠原 司. “指先接触面の固着領域率に基づく物体把持力制御仮説の提案と検証”, 第 16 回生体・生理工学シンポジウム講演予稿集 (BPES2001), pp.323–326, 2001.
4. 多田 充徳, 貝野 彰彦, 柴田 智広, 今井 正和, 小笠原 司. “初期滑り計測に基づく人の把持動作解析 –初期滑りの発生と皮膚内応力 / 歪み分布の関係–”,

- ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演予稿集 (Robomec'01), 1P1-H2, 2001.
5. 多田 充徳, 貝野 彰彦, 今井 正和, 小笠原 司. “皮膚変形に着目した人の把持動作計測 -把持物体の違いに対する皮膚変形と把持力変化の関係-”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (RSJ'00), 3 巻, pp.1011-1012, 2000.
  6. 多田 充徳, 今井 正和, 小笠原 司. “皮膚変形と把持 / 負荷力の同時計測装置の開発”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (RSJ'00), 3 巻, pp.1009-1010, 2000.
  7. 多田 充徳, 松本 吉央, 今井 正和, 小笠原 司. “初期滑りのリアルタイム計測 -人の把持力制御メカニズムに迫る-”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演予稿集 (Robomec'00), 1P1-78-129, 2000.
  8. 栗田 雄一, 多田 充徳, 小笠原 司. “人間の把持力計画解析のための指筋電と把持 / 負荷力の同時計測”, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2001 講演論文集, pp.313-318, 2001.
  9. 栗田 雄一, 多田 充徳, 今井 正和, 小笠原 司. “指紋を用いた物体把持における初期滑りの計測”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演予稿集 (Robomec'01), 1P1-H3, 2001.
  10. 多田 充徳, 森 武俊, 佐藤 知正. “接触位置変化の連続的推定に基づく未知物体把持の実現”. 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (RSJ'99), 1 巻, pp.179-180, 1999.
  11. 佐藤 知正, 多田 充徳, 森 武俊. “触覚センサを有する多指ハンドの開発とその把持戦略”, 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (RSJ'98), 2 巻, pp.867-868, 1998.
  12. 佐藤 知正, 多田 充徳, 石川 剛, 森 武俊. “ロボティックルームにおける人間支援作業 -視覚と触覚を用いた指示物体の取り渡し-”, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (RSJ'97), 2 巻, pp.371-372, 1997.
  13. 多田 充徳, 今野 敦, 長島 功一, 吉池 孝英, 稲葉 雅幸, 井上 博允. “接触情報に基づく未知物体の把持”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'97 講演予稿集 (RoboMec'97), A 巻, pp.451-452, 1997.

## 受賞

1. 計測自動制御学会 生体・生理工学部会 研究奨励賞, “指先接触面の固着領域率に基づく物体把持力制御仮説の提案と検証”. 2001年8月.

# 謝辞

本論文に書き記した一連の研究は，筆者が奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 博士後期課程在学中に，ロボティックス講座（小笠原研究室）において執り行われたものです．この研究は多くの方々のお力添えにより実現することができました．ここでお礼を申し上げたいと思います．

本学 情報科学研究科 小笠原 司 教授は，未熟で理想だけが先行していた筆者を博士後期課程の学生として受け入れて下さいました．そして，筆者のアイデアを最大限尊重して頂き，必要な研究環境を滞りなく整えて頂いたため，研究をスムーズに行うことが出来ました．直観的な着想から研究を立ち上げ，何とか本論文を執筆することができたのも，ひとえに小笠原教授の忍耐強いお力添えがあったからだと思います．ありがとうございました．

本学 情報科学研究科 西谷 紘一 教授には，工学としての本研究の位置付けを明確にするにあたり，貴重なご助言，ご指摘を頂きました．これらは，今後研究を展開していく上でも常に念頭に置かなければならないことだと思います．ありがとうございました．

本学 情報科学研究科 湊 小太郎 教授には，本研究をまとめるにあたり，数々のご助言，ご指摘を頂きました．また，本研究とは直接結び付きませんでした，MRE に関する様々な情報もご教授頂きました．ありがとうございました．

本学 情報科学研究科 今井 正和 助教授（現 鳥取環境大学 教授）には，研究会などで多くの鋭いご質問を頂きました．研究の位置付けと論理的裏付けを明確にすることができたのも，先生の質問によるところが大きいと思います．ありがとうございました．

本学 情報科学研究科 松本 吉央 助手（現 奈良先端科学技術大学院大学 助教授）

には、画像処理手法に関する様々な知識をご教授いただきました。画像処理に関する知識がほとんどなかった筆者が、何とか画像計測システムを構築できたのも、松本助手のおかげだと思います。また、学会発表前には懇切丁寧なご指導、ご助言を頂きました。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 中村 恭之 助手には、研究の取りまとめ方のように一般に軽視されがちな部分について様々な知識を御教授いただきました。この知識は今後研究を進めていく上でますます重要になると思います。ありがとうございました。

国際電気通信基礎技術研究所 柴田 智広 氏には、本研究を遂行する上で示唆に富む多くのアドバイスを頂きました。特に接触のモデルの重要性を指摘して頂いたことは、本研究の論理的根拠を明確にする上で非常に意味のあるものになりました。また、氏の幅広い興味と、柔軟な発想、そして研究に対する真摯な姿勢にはいつも関心させられたものです。ありがとうございました。

慶応義塾大学 前野 隆司 助教授には、本研究で計測対象となった初期滑り現象に関して、示唆に富む知見を直接/間接的にご教授頂きました。先生が先見的に初期滑り現象の重要性を指摘して下さいましたことは、本研究の方向付けを行う上で大変意味のあるものでした。ありがとうございました。

マサチューセッツ工科大学 M. A. Srinivasan 教授には、接触面計測の重要性を示唆して頂き、また指紋を用いた接触面計測の可能性を指摘して頂きました。また、先生の研究室で行われている触覚情報処理に対する総合的アプローチは、私の研究を進める上で大きな目標となりました。ありがとうございました。

ウメオ大学 R. S. Johansson 教授には、接触計測に伴う諸問題とその解決法、そして私のアプローチとは異なる接触面計測の可能性を示唆して頂きました。ありがとうございました。

大阪大学 木下 博 助教授には、接触計測に伴う諸問題とその解決法、Microneurography の可能性について御教授頂きました。これらの知見は今後より詳細な計測を行い、一般的な触覚情報処理を探求する上で不可欠になると思います。ありがとうございました。

カーネギーメロン大学 金出 武雄 教授には、機能という観点から人の情報処

理をモデル化することの工学的重要性をご指摘頂きました。本研究におけるアプローチを従来研究と明確に切り分けることができたのも、先生の本質をついた御指摘があったからだと思います。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 貝野 彰彦 君 (現 Sony) には、有限要素法を用いた接触解析を行って頂きました。筆者の研究方針が明確でない時期であったため、なかなか有益なアドバイスができませんでした。何とか一通りの解析ができるようになりました。ここで培った知見は、今後より詳細な接触解析を行う上で貴重なノウハウとなると思います。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 栗田 雄一 君には、指紋を用いた初期滑り計測の研究立ち上げの際に様々な画像処理手法を試して頂きました。これは、今後より詳細な接触面解析を行う上で不可欠な手法になると思います。また、研究室における数少ない把持研究仲間として、人の把持/触覚に関するディスカッションをしていただきました。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 佐々木 晋介 君には、光学式力センサを開発して頂きました。泥臭い作業が多かったとは思いますが、一連の試行錯誤を通して、物作りの面白さを再認識することができました。また、このセンサは今後、皮下組織の固さ推定、脳機能の解析といった幅広い分野において、不可欠なデバイスとして広く使われることになると思います。ありがとうございました。

また、筆者が在学中、研究生活/日常生活を様々な面で支えて頂いた本学 情報科学研究科 ロボティクス講座の卒業生、在学生の皆様へ感謝致します。また、研究生活/物品購入などが滞り無く行えるよう配慮して下さいました歴代秘書の方々に感謝致します。

最後に物心両面で筆者の学生生活を支えてくれた両親と妻ひかるに深く感謝し、論文の結びとしたいと思います。





# 付録

## A. 弾性定数とその相互変換

断面積が  $A$  の金属棒を力  $F$  で引っ張ると力に応じ棒は伸びる．ここで，応力  $\sigma = F/A$  と歪み  $\varepsilon$  の関係を調べると，力  $F$  を 0 から徐々に上昇させると応力と歪みがほぼ線形の関係を示すことが分かる．つまり，式 (A.1) が成り立つ．

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{A.1})$$

ここで，比例定数  $E$  は縦弾性係数と呼ばれる．また，棒が縦方向に伸びると横方向には縮みが生じるが，この割り合いを表すパラメータがポワソン比  $\nu$  である．一様かつ等方な材料であればその材料特性をこの 2 つのパラメータだけで表現することができる．つまり，材料特性を表す指標には，剪断方向の強さを表す横弾性係数  $G$  や，一様圧縮による体積歪みを表す体積係数  $K$  が存在するが，これらは  $E$  と  $\nu$  を用いてそれぞれ式 (A.2)，式 (A.3) のように表すことができる．

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{A.2})$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (\text{A.3})$$

本論文のシミュレーションでは縦弾性係数  $E$  とポワソン比  $\nu$  の値しか示されていないが，横弾性係数  $G$  や体積係数  $K$  の値は必要に応じてこれらの式より計算される．

## B. Hamilton の解析解

半無限弾性体に放物面状法線/接線方向圧力が加わったときの弾性体内応力場に関し，Hamilton ら [113] が求めた解析解を示す．

ただし，以下の式で法線方向力は  $P$ ，接線方向力は  $Q$ ，接触半径は  $a$  である．また，上添字 *body*，*axis*，*out*，*in* はそれぞれ，弾性体内， $z$  軸上，弾性体表面 ( $z = 0$ ) の接触領域外，弾性体表面 ( $z = 0$ ) の接触領域内における応力を表す．

### B.1 簡略化のために定義される関数

$$A = r^2 + z^2 - a^2 \quad (\text{B.1})$$

$$S = \sqrt{A^2 + 4a^2z^2} \quad (\text{B.2})$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (\text{B.3})$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (\text{B.4})$$

$$M = \sqrt{\frac{S + A}{2}} \quad (\text{B.5})$$

$$N = \sqrt{\frac{S - A}{2}} \quad (\text{B.6})$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{a}{M}\right) \quad (\text{B.7})$$

$$G = M^2 - N^2 + zM - aN \quad (\text{B.8})$$

$$H = 2MN + aM + zN \quad (\text{B.9})$$

$$M_0 = \sqrt{r^2 - a^2} \quad (\text{B.10})$$

## B.2 法線方向の放物面状圧力が加わるときの弾性体内応力場

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^{body} = & \frac{3P}{2\pi a^3} \left( (1 + \nu) z\phi + \frac{1}{r^2} \left( \frac{y^2 - x^2}{r^2} \right. \right. \\ & \left. \left( (1 - \nu) Nz^2 - \frac{1 - 2\nu}{3} (NS + 2AN + a^3) - \nu Mza \right) \right. \\ & \left. \left. - N(x^2 + 2\nu y^2) - \frac{Mx^2 za}{S} \right) \right) \quad (\text{B.11}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}^{body} = & \frac{3P}{2\pi a^3} \left( (1 + \nu) z\phi + \frac{1}{r^2} \left( \frac{x^2 - y^2}{r^2} \right. \right. \\ & \left. \left( (1 - \nu) Nz^2 - \frac{1 - 2\nu}{3} (NS + 2AN + a^3) - \nu Mza \right) \right. \\ & \left. \left. - N(y^2 + 2\nu x^2) - \frac{My^2 za}{S} \right) \right) \quad (\text{B.12}) \end{aligned}$$

$$\sigma_{zz}^{body} = \frac{3P}{2\pi a^3} \left( -N + \frac{azM}{S} \right) \quad (\text{B.13})$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy}^{body} = & \frac{3P}{2\pi a^3} \left( \frac{xy(1 - 2\nu)}{r^4} \left( -Nr^2 + \frac{2}{3}N(S + 2A) \right. \right. \\ & \left. \left. - z(zN + aM) + \frac{2}{3}a^3 \right) + \frac{xyz}{r^4} \left( -\frac{aMr^2}{S} - zN + aM \right) \right) \quad (\text{B.14}) \end{aligned}$$

$$\tau_{yz}^{body} = \frac{3P}{2\pi a^3} \left( -z \left( \frac{yN}{S} - \frac{yzH}{G^2 + H^2} \right) \right) \quad (\text{B.15})$$

$$\tau_{yz}^{body} = \frac{3P}{2\pi a^3} \left( -z \left( \frac{xN}{S} - \frac{xzH}{G^2 + H^2} \right) \right) \quad (\text{B.16})$$

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^{axis} &= \sigma_{yy}^{axis} \\ &= \frac{3P}{2\pi a^3} \left( (1 + \nu) \left( z \arctan \left( \frac{a}{z} \right) - a \right) + \frac{a^3}{2(a^2 + z^2)} \right)\end{aligned}\quad (\text{B.17})$$

$$\sigma_{yy}^{axis} = \frac{3P}{2\pi a^3} \left( (1 + \nu) \left( z \arctan \left( \frac{a}{z} \right) - a \right) + \frac{a^3}{2(a^2 + z^2)} \right)\quad (\text{B.18})$$

$$\sigma_{zz}^{axis} = \frac{3P}{2\pi a^3} \left( \frac{-a^3}{a^2 + z^2} \right)\quad (\text{B.19})$$

$$\tau_{xy}^{axis} = \tau_{yz}^{axis} = \tau_{zx}^{axis} = 0\quad (\text{B.20})$$

$$\sigma_{xx}^{out} = \frac{3P}{2\pi a^3} \left( \frac{(1 - 2\nu)(x^2 - y^2)a^3}{3r^4} \right)\quad (\text{B.21})$$

$$\sigma_{yy}^{out} = \frac{3P}{2\pi a^3} \left( \frac{(1 - 2\nu)(y^2 - x^2)a^3}{3r^4} \right)\quad (\text{B.22})$$

$$\sigma_{zz}^{out} = 0\quad (\text{B.23})$$

$$\tau_{xy}^{out} = \frac{3P}{2\pi a^3} \left( \frac{2a^3 xy(1 - 2\nu)}{3r^4} \right)\quad (\text{B.24})$$

$$\tau_{yz}^{out} = \tau_{zx}^{out} = 0\quad (\text{B.25})$$

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^{in} &= \frac{3P}{2\pi a^3} \left( \frac{1}{r^2} \left( \frac{y^2 - x^2}{r^2} \left( \frac{1 - 2\nu}{3} \left( (a^2 - r^2)^{\frac{3}{2}} - a^3 \right) \right) \right) \right. \\ &\quad \left. - (x^2 + 2\nu y^2) (a^2 - r^2)^{\frac{1}{2}} \right)\end{aligned}\quad (\text{B.26})$$

$$\sigma_{yy}^{in} = \frac{3P}{2\pi a^3} \left( \frac{1}{r^2} \left( \frac{x^2 - y^2}{r^2} \left( \frac{1 - 2\nu}{3} \left( (a^2 - r^2)^{\frac{3}{2}} - a^3 \right) \right) - (y^2 + 2\nu x^2) (a^2 - r^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right) \quad (\text{B.27})$$

$$\sigma_{zz}^{in} = \frac{-3P}{2\pi a^3} (a^2 - x^2 - y^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.28})$$

$$\tau_{xy}^{in} = \frac{3P}{2\pi a^3} \left( \frac{xy(1 - 2\nu)}{r^4} \left( -Nr^2 + \frac{2}{3}N(S + 2A) - z(zN + aM) + \frac{2}{3}a^3 \right) + \frac{xyz}{r^4} \left( -\frac{aMr^2}{S} - zN + aM \right) \right) \quad (\text{B.29})$$

### B.3 接線方向の放物面状圧力が加わるときの弾性体内応力場

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^{body} = & \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( -x \left( \frac{\nu}{4} + 1 \right) \phi + \frac{axM}{r^4} \left( \left( \frac{3}{2} - \frac{2x^2}{r^2} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. (S\nu - 2A\nu + z^2) + \frac{x^2 z^2}{3} + \frac{7\nu r^2}{4} - 2\nu x^2 + r^2 \right) \right. \\ & \left. + \frac{xzN}{r^4} \left( \left( \frac{3}{2} - \frac{2x^2}{r^2} \right) \left( -\frac{S}{6} (1 - 2\nu) - \frac{A}{3} (1 - 2\nu) \right. \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{2} (z^2 + 3a^2) \right) + \frac{a^2 x^2}{S} - \frac{\nu r^2}{4} - \frac{7r^2}{4} \right) \\ & \left. + \frac{4a^3 xz}{3r^4} \left( \frac{3}{2} - \frac{2x^2}{r^2} \right) (1 - 2\nu) \right) \quad (\text{B.30}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}^{body} = & \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( -\frac{3\nu x \phi}{4} + \frac{axM}{r^4} \left( \left( \frac{1}{2} - \frac{2y^2}{r^2} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. (\nu (S - 2A + r^2) + z^2) + \frac{y^2 z^2}{S} + \frac{3}{4} \nu r^2 \right) \right. \\ & \left. + \frac{zxN}{r^4} \left( \left( \frac{1}{2} - \frac{2y^2}{r^2} \right) \left( -\frac{S}{6} (1 - 2\nu) - \frac{A}{3} (1 - 2\nu) \right) \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{z^2}{2} - \frac{3}{2}a^2) + \frac{a^2y^2}{S} - \frac{3}{4}\nu r^2 - \frac{r^2}{4}) \\
& + \frac{4}{3} \frac{a^3zx}{r^4} \left( \frac{1}{2} - \frac{2y^2}{r^2} \right) (1 - 2\nu) \Big) \tag{B.31}
\end{aligned}$$

$$\sigma_{zz}^{body} = \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( \frac{zxN}{2r^2} \left( 1 - \frac{r^2 + z^2 + a^2}{S} \right) \right) \tag{B.32}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{xy}^{body} = & \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( \frac{y}{2} \left( \frac{\nu}{2} - 2 \right) \phi + \frac{ayM}{r^4} \left( \frac{x^2z^2}{S} + \nu((S - 2A) \right. \right. \\
& \left. \left. \left( \frac{1}{2} - \frac{2x^2}{r^2} \right) - 2x^2 + \frac{r^2}{4} \right) + \frac{r^2}{2} + z^2 \left( \frac{1}{2} - \frac{2x^2}{r^2} \right) \right) \\
& + \frac{yzN}{r^4} \left( \left( \frac{1}{2} - \frac{2x^2}{r^2} \right) \left( (2\nu - 1) \left( \frac{S}{6} + \frac{A}{3} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{z^2}{2} - \frac{3a^2}{2} - \frac{r^2}{2} \right) + \frac{r^2\nu}{4} + \frac{a^2x^2}{S} - \frac{y^2}{2} - \frac{3x^2}{2} \right) \\
& + \frac{4a^3yz}{3r^4} \left( \frac{1}{2} - \frac{2x^2}{r^2} \right) (1 - 2\nu) \Big) \tag{B.33}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{yz}^{body} = & \frac{3Q}{2\pi a^3} \frac{xyz}{2r^4} \left( aM \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{S} \left( \frac{z^2}{2} - \frac{3a^2}{2} - \frac{r^2}{2} \right) \right) \right. \\
& \left. + \frac{zN}{2} \left( -3 + \frac{1}{S} (5a^2 + z^2 + r^2) \right) \right) \tag{B.34}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{zx}^{body} = & \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( \frac{3z\phi}{2} + \frac{azM}{r^2} \left( 1 + \frac{x^2}{r^2} - \frac{x^2}{S} \right) + \frac{N}{r^2} \right. \\
& \left( -\frac{3}{4}(S + 2A) + z^2 - \frac{3}{4}a^2 - \frac{1}{4}r^2 \right. \\
& \left. \left. + \frac{z^2}{2} \left( \frac{1}{2} - \frac{2x^2}{r^2} \right) \right) \right) \tag{B.35}
\end{aligned}$$

$$\sigma_{xx}^{axis} = \sigma_{yy}^{axis} = \sigma_{zz}^{axis} = \tau_{xy}^{axis} = \tau_{yz}^{axis} = 0 \tag{B.36}$$

$$\tau_{zx}^{axis} = \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( -a + \frac{3}{2}z \arctan\left(\frac{a}{z}\right) - \frac{az^3}{2(a^2 + z^2)} \right) \quad (\text{B.37})$$

$$\sigma_{xx}^{out} = \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( -x \left( 1 + \frac{\nu}{4} \right) \phi + \frac{axM_0}{r^4} \left( -\nu M_0^2 \left( \frac{3}{2} - \frac{2x^2}{r^2} \right) + \frac{7\nu r^2}{4} - 2\nu x^2 + r^2 \right) \right) \quad (\text{B.38})$$

$$\sigma_{yy}^{out} = \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( -\frac{3}{4}\nu x \phi + \frac{axM_0}{r^4} \left( \nu a^2 \left( \frac{1}{2} - \frac{2y^2}{r^2} \right) + \frac{3}{4}\nu r^2 \right) \right) \quad (\text{B.39})$$

$$\sigma_{zz}^{out} = 0 \quad (\text{B.40})$$

$$\sigma_{xy}^{out} = \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( \frac{y}{2} \left( \frac{\nu}{2} - 1 \right) \phi + \frac{ayM_0}{r^4} \left( -\nu M_0^2 \left( \frac{1}{2} - \frac{2x^2}{r^2} \right) - 2\nu x^2 + \frac{\nu r^2}{4} + \frac{r^2}{2} \right) \right) \quad (\text{B.41})$$

$$\tau_{yz}^{out} = \tau_{zx}^{out} = 0 \quad (\text{B.42})$$

$$\sigma_{xx}^{in} = \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( -\frac{\pi x}{2} \left( \frac{\nu}{4} + 1 \right) \right) \quad (\text{B.43})$$

$$\sigma_{yy}^{in} = \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( -\frac{3\pi\nu x}{8} \right) \quad (\text{B.44})$$

$$\sigma_{zz}^{in} = 0 \quad (\text{B.45})$$

$$\tau_{xy}^{in} = \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( \frac{\pi y}{4} \left( \frac{\nu}{2} - 1 \right) \right) \quad (\text{B.46})$$

$$\tau_{yz}^{in} = 0 \tag{B.47}$$

$$\tau_{zx}^{in} = \frac{3Q}{2\pi a^3} \left( - (a^2 - r^2)^{\frac{1}{2}} \right) \tag{B.48}$$



## C. 一般化された弾性体接触理論における固着率

### C.1 法線方向圧力分布の一般化

本節では，一般化された法線方向圧力分布を仮定しても，3章で行った固着率に関する議論が成り立つことを示す．なお，本節で用いる変数は，基本的に3章と同じ定義となっている．

3章で述べた弾性体接触理論は，全て Hertz の理論に基づいた議論であった．つまり，接触半径が  $r_c$  の時，接触面内の圧力分布  $f_g$  は式 (C.1) となる．

$$f_g(F_g, r_c, x, y) = \frac{3F_g}{2\pi r_c^2} \left(1 - \frac{x^2}{r_c^2} - \frac{y^2}{r_c^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.1})$$

このように，Hertz の理論における圧力分布は右辺の  $1/2$  乗により，放物面となることが分かる．また，この理論は基本的に剛性の高い弾性体の微小変形による接触現象を良く説明することが知られている．

一方，より一般的な弾性体接触を説明するための試みも行われている．この場合，先の  $1/2$  は  $0$  より大きく  $1/2$  以下である任意の実数  $n$  で置き換えられる．そして， $n$  の値により，様々な弾性体の接触を説明できることが実験的に示されている．ここで，法線方向圧力分布の接触領域内での積分が， $F_g$  と等しくなることを考慮すると，一般的な圧力分布は，式 (C.2) となる．また， $n$  を  $1/5$  から  $1/2$  まで変化させたときの圧力分布変化を図 C.1 に示す．ただし，この図は  $n = 1/2$  で無次元化された圧力分布を基準とし，それ以外の条件では圧力の総和と接触半径が基準圧力分布と等しくなるようにプロットされている．また，各条件でプロットされているのは，圧力分布を  $y = 0$  となる平面で切断した断面である．

$$f_g(F_g, r_c, x, y) = \frac{(2n+2)F_g}{2\pi r_c^2} \left(1 - \frac{x^2}{r_c^2} - \frac{y^2}{r_c^2}\right)^n \quad (\text{C.2})$$

次に，式 (C.2) に対して，Cattaneo の理論を適用する．3章の議論にならうと，接触領域全体の接線方向圧力分布  $f_{l1}$  は式 (C.3) となる．

$$f_{l1}(F_g, r_c, x, y) = \frac{(2n+2)\mu F_g}{2\pi r_c^2} \left(1 - \frac{x^2}{r_c^2} - \frac{y^2}{r_c^2}\right)^n \quad (\text{C.3})$$

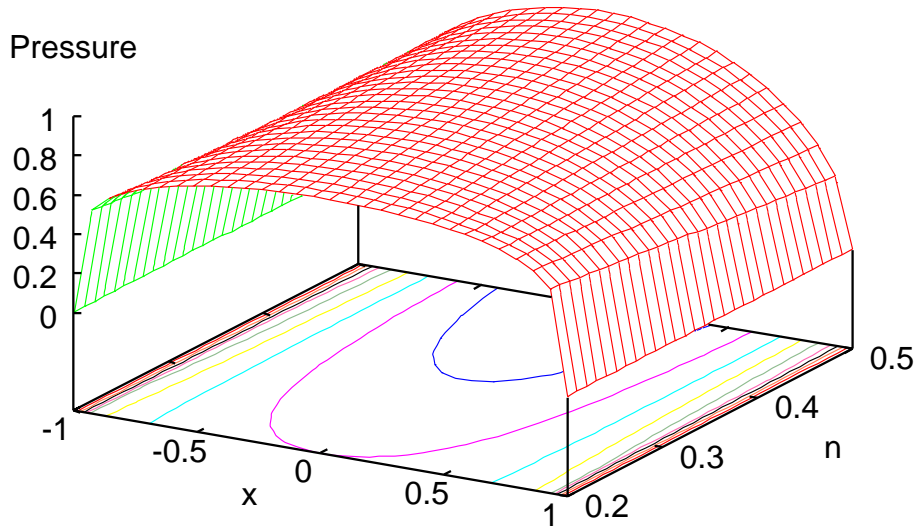


図 C.1 指数の変化による接触面内圧力分布の変化

一方，固着領域のみに加算される圧力分布  $f_{l2}$  は，式 (C.4) となる．

$$f_{l2}(F_g, r_c, x, y) = -\frac{r_s(2n+2)\mu F_g}{r_c 2\pi r_c^2} \left(1 - \frac{x^2}{r_s^2} - \frac{y^2}{r_s^2}\right)^n \quad (\text{C.4})$$

ここで，接触面内での接線方向圧力分布の積分が， $F_l$  と等しくなることを考慮すると，式 (C.5) が成り立つ．

$$\begin{aligned} F_l &= \int_0^{r_c} 2\pi r f_{l1}(F_g, r_c, r) dr + \int_0^{r_s} 2\pi r f_{l2}(F_g, r_c, r) dr \\ &= \mu F_g \left(1 - \frac{r_s^3}{r_c^3}\right) \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

ただし，ここでの  $f_*(F_g, r_c, r)$  は  $f_*(F_g, r_c, x, y)$  を中心からの距離  $r$  の関数として表したものである．一方，固着率の定義は接触領域に対する固着領域の割合であるので，固着率  $s$  は式 (C.5) より式 (C.6) と表すことができる．

$$s = \left(1 - \frac{F_l}{\mu F_g}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (\text{C.6})$$

これは、3章で得た式と同一である。つまり、弾性体接触における接触面内圧力分布を一般的に考えたとしても、固着率の定義は変わらず、それを一定にするだけで適切な把持力を実現し得るという議論には影響がないことが証明できた。

一方、3章で行った初期滑り量の計算と、弾性体内応力場の計算では  $n = 1/2$  としていたため、圧力分布を一般化すると計算結果に差異が生じる。しかし、圧力分布はどの条件でも滑らかな山形であり、結果として生じる初期滑りや応力分布も  $n = 1/2$  の場合と似た傾向を持つことが予想される。そこで本研究では、これらの計算に関しては Hertz の理論に従い  $n = 1/2$  の結果で代表させることとした。

## C.2 接触領域形状の一般化

本節では、一般化された接触領域形状（楕円形）を仮定しても、3章で行った固着率に関する議論が成り立つことを示す。ただし、説明を簡単にするため  $n = 1/2$  とするが、一般的に  $n$  の場合でも議論には差し支えないことに注意されたい。なお、本節で用いる変数は3章と若干異なるので適宜説明する。

滑らかな表面形状を持つ弾性体の接触領域は、一般的に楕円に近い形状になることが知られている（この特殊な場合が円形の接触領域である）。ここで、法線方向力を  $F_g$ 、接触領域の長径を  $r_{lc}$ 、短径を  $r_{sc}$  とおく。ただし、長径の方向を  $x$  軸、短径の方向を  $y$  軸、法線方向力と逆方向を  $z$  軸とする。ここで、法線方向圧力分布  $f_g$  は Hertz の理論に従い、式 (C.2) で表される。

$$f_g(F_g, r_c, x, y) = \frac{3F_g}{2\pi r_{lc} r_{sc}} \left(1 - \frac{x^2}{r_{lc}^2} - \frac{y^2}{r_{sc}^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.7})$$

次に、限界摩擦力以下の  $x$  軸方向接線力  $F_t$  が加わると仮定し、式 (C.7) に対して Cattaneo の理論を適用する。つまり、接触領域と同心楕円状の固着領域を仮定し、その長径を  $r_{ls}$ 、短径を  $r_{ss}$  とする。ただし、同心楕円状であるため  $r_{lc}$ 、 $r_{sc}$ 、 $r_{ls}$ 、 $r_{ss}$  の間には、式 (C.8) が成り立つ。そして、この値を  $\alpha$  とおく。また、この状況の模式図を図 C.2 に示す。

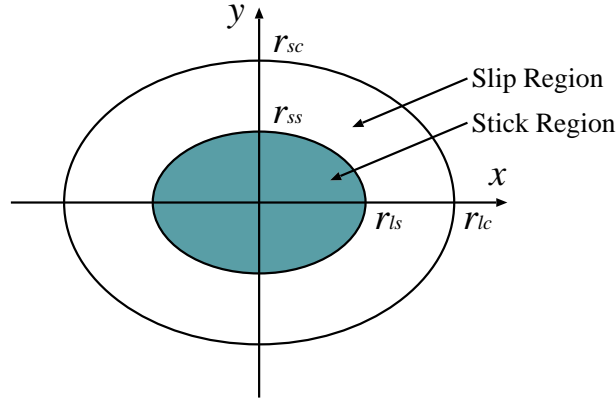


図 C.2 接触領域が楕円になったときの固着領域と滑り領域

$$\frac{r_{ls}}{r_{lc}} = \frac{r_{ss}}{r_{sc}} \quad (\text{C.8})$$

3章における議論と同様に，接触領域全体の接線方向圧力分布  $f_{l1}$  は式 (C.9) となる．

$$f_{l1}(F_g, r_c, x, y) = \frac{3\mu F_g}{2\pi r_{lc} r_{sc}} \left(1 - \frac{x^2}{r_{lc}^2} - \frac{y^2}{r_{sc}^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.9})$$

一方，固着領域のみに加算される圧力分布  $f_{l2}$  は式 (C.10) と表される．

$$f_{l2}(F_g, r_c, x, y) = -\alpha \frac{3\mu F_g}{2\pi r_{lc} r_{sc}} \left(1 - \frac{x^2}{r_{ls}^2} - \frac{y^2}{r_{ss}^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.10})$$

ここで，接触面内での接線方向圧力分布の積分が， $F_l$  と等しくなることを考慮すると，式 (C.11) が成り立つ [129, 130]．

$$\begin{aligned} F_l &= \int_{\text{contact}} f_{l1}(F_g, r_c, x, y) ds + \int_{\text{stick}} f_{l2}(F_g, r_c, x, y) ds \\ &= \mu F_g (1 - \alpha^3) \end{aligned} \quad (\text{C.11})$$

ただし， $\int_{\text{contact}} ds$  は接触面内での積分を， $\int_{\text{stick}} ds$  は固着領域面内での積分を表す．

一方，固着率の定義は接触面積に対する固着面積の割合であるので，式 (C.11) より，固着率  $s$  は式 (C.12) と表すことができる．

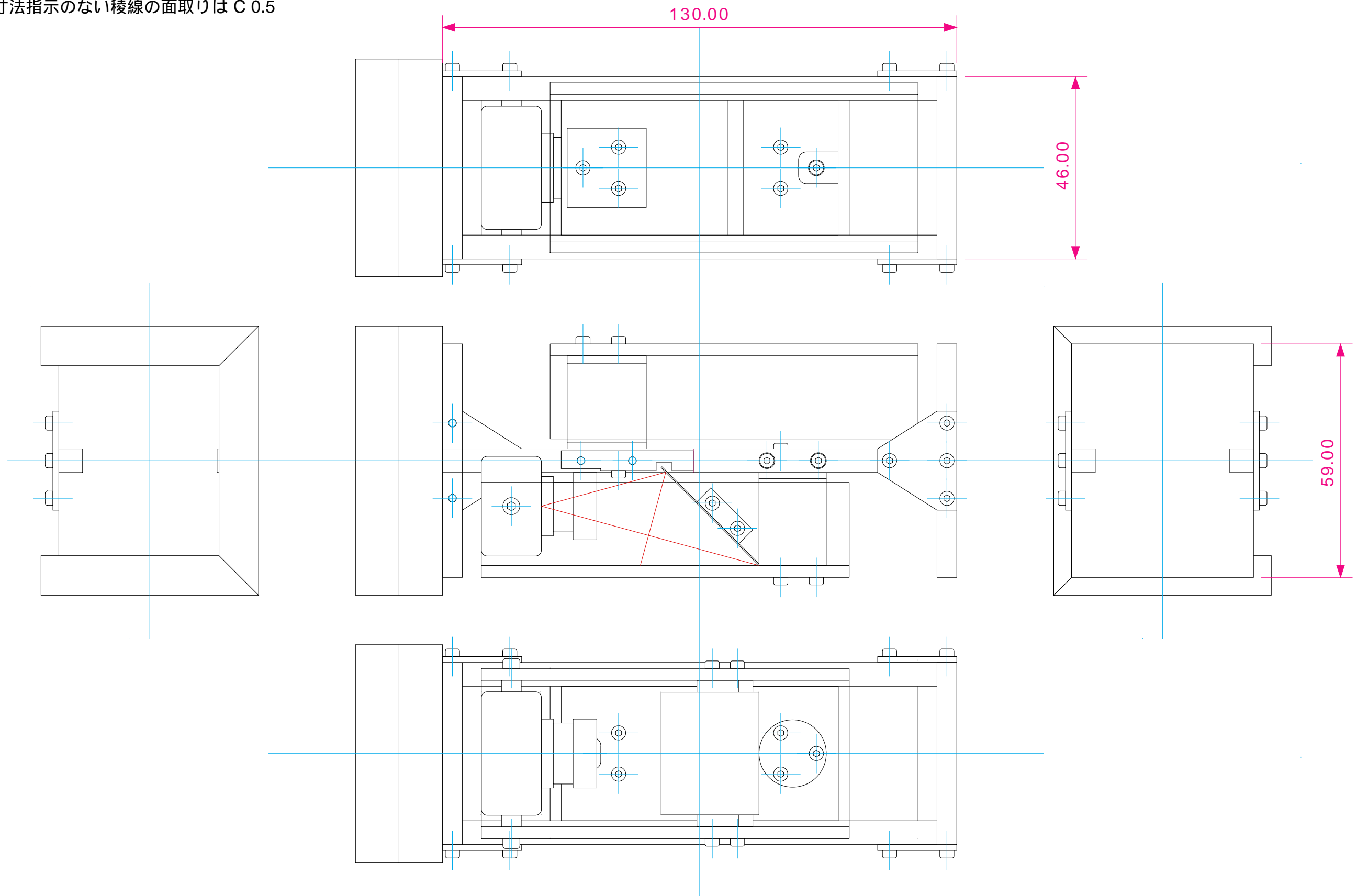
$$s = \frac{\pi r_{ls} r_{ss}}{\pi r_{lc} r_{sc}} = \alpha^2 = \left(1 - \frac{F_l}{\mu F_g}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (\text{C.12})$$

これは，3 章で得た式と同一である．つまり，弾性体接触における接触領域の形状を一般的に考えたとしても，固着率の定義は変わらず，それを一定にするだけで適切な把持力を実現し得るという議論には影響がないことが証明できた．

## D. 開発した計測装置の組み立て図

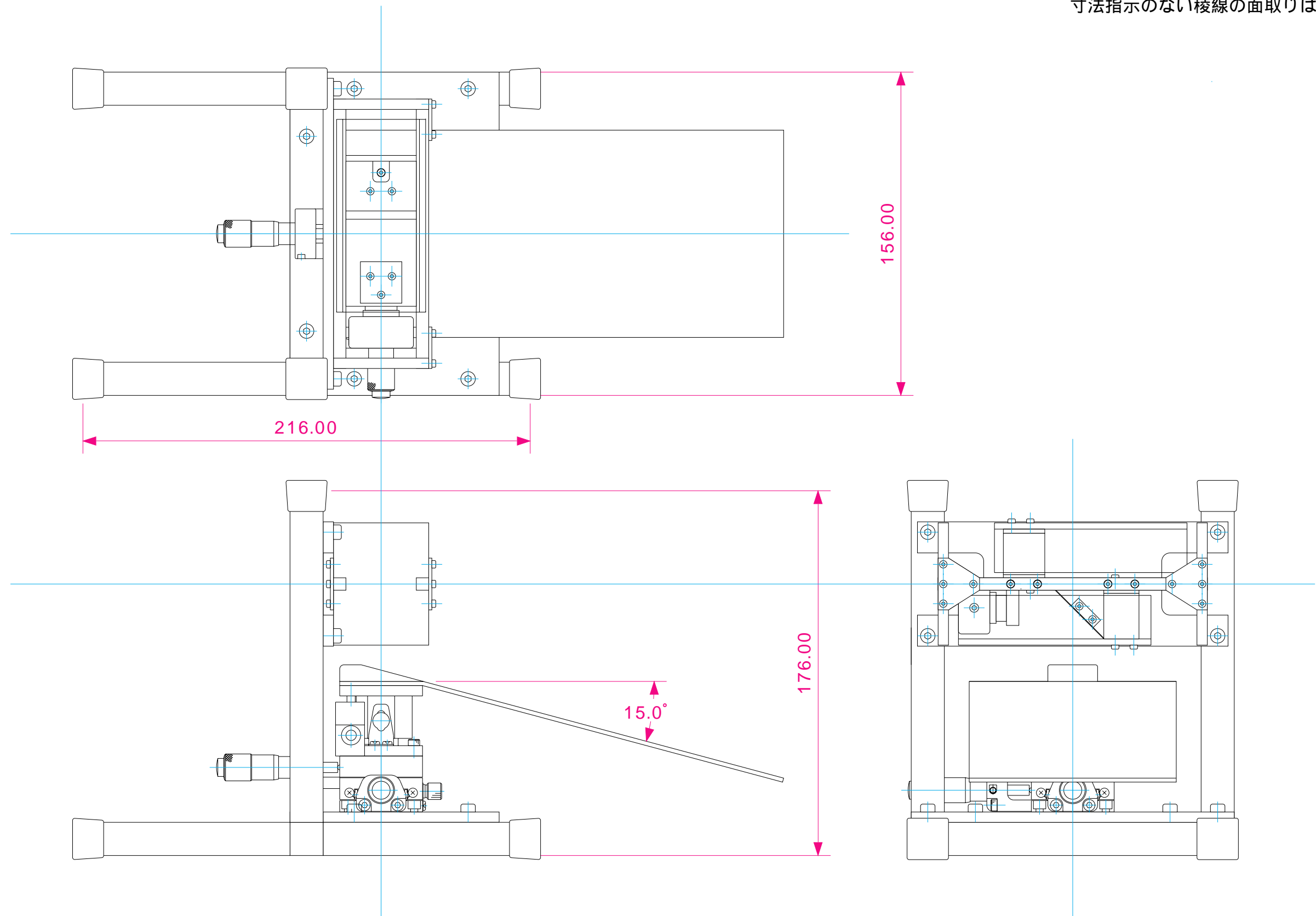
4章で説明した計測装置と、5章で説明したステージの組み立て図を以下に示す。

寸法指示のない稜線の面取りは C 0.5



装置名	縮尺	製図
初期滑り計測装置	1 / 1	多田

寸法指示のない稜線の面取りは C 0.5



装置名	縮尺	製図
指固定台	1 / 2	多田



## E. 指紋パターンを用いた高精度初期滑り計測

本研究で提案した指先接触面計測手法は，画像処理を単純化するため指の腹にドットパターンを描画する必要があった．このため，初期滑りの計測密度はドット間隔に依存する．一方，人の指先には生来指紋が備わっており，このパターンに対してオプティカルフロー推定のような画像処理を適用すれば，より高精度な指先接触面計測が期待できる．また，指紋パターンと触覚受容器の配置には密接な関係があるため，指紋稜線の動きは触覚情報処理を議論する上で本質的な皮膚変形であることも予想される．

本節では，指紋を用いた指先接触面計測の具体的手順を説明する．ただし，説明は基本戦略と幾つかの計測例にとどめ，精度評価等に関しては言及しない．

### E.1 指紋撮像装置

図 E.1 に指紋撮像装置の外観と内部構造の模式図を示す．この装置は，市販の指紋認証装置 (指パス mini: オムロン製) の光学系と，小型 CCD カメラ (CK-200: Keyence 製) の CCD 基板を組み合わせることで構成される．

この計測装置に指先を接触させ，縦方向 (指先から根本への方向，図 E.1-(b) の矢印方向) に徐々に動かしたときの 2 枚の時系列画像を図 E.2-(a)，(b) に示す．簡単な装置であるが鮮明な指紋画像を撮像できることが分かる．また，指紋パターンのうち暗い領域 (光が吸収されている) が稜線，明るい領域 (光が反射されている) が谷線を表す．図 E.2-(a)，(b) の差画像を図 E.2-(c) に示す．接触領域の中心付近に見える黒い領域が固着領域に対応すると考えられる (指紋パターンが変化しないため差分が 0 となる)．また，指紋が接線方向力と同一方向に走っている領域でも，みかけの指紋パターンがほとんど変化しないため，差分が出にくい．このため，中心より少し上の左右の領域でも差画像は黒くなる．つまり，単純に差分を計算するだけでも，おおまかな滑り-固着状態の識別はできるものの，指の運動と指紋パターンの方向次第では，固着領域なのか指紋の方向が接線方向力と一致する領域なのかを識別することができない．

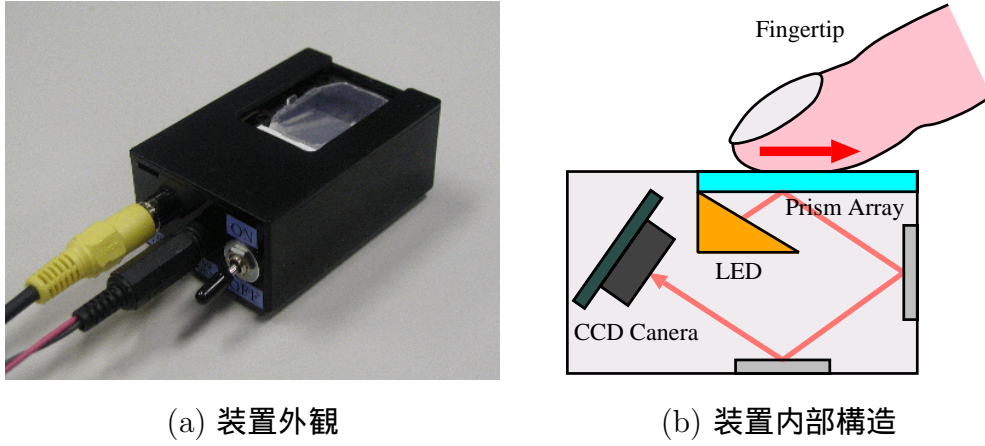


図 E.1 指紋の撮像に使用する計測装置

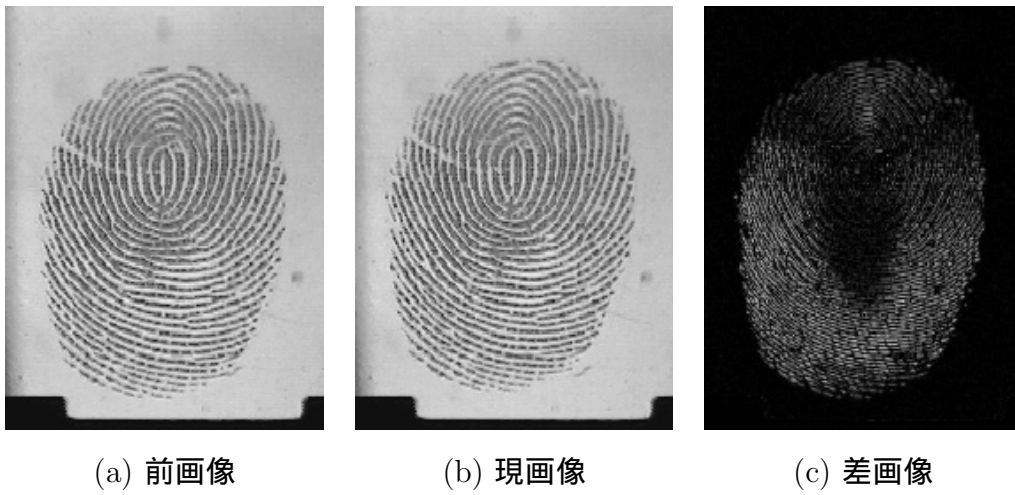


図 E.2 入力画像とそれらの差画像

## E.2 フロー推定アルゴリズム

本節で提案する画像処理手法の全体の流れを以下に示す．

マスク画像の作成 指紋画像に対し，2 値化，膨張，収縮，ラベリングを行い接触領域を抽出する．

粗いフロー推定 テンプレートマッチングに基づくフロー推定を行い，大まかな速度分布を求める．

誤り検出/修正 推定された速度場にラプラシアンフィルタを適用し，推定誤りを検出/修正する．

詳細なフロー推定 修正された速度ベクトル終点近傍に新たな探索領域を設定し，サブピクセルでテンプレートマッチングを行う．

以下，各々の具体的内容を説明する．

## E.3 マスク画像の作成

図 E.3 にマスク画像作成の手順を示す．ただし，(a) は図 E.2-(b) を 2 値化して 4 近傍の膨張を 5 回施したものであり，(b) は (a) に対して 4 近傍の収縮を 5 回施した処理画像である．また，(c) は (b) にラベリングを施し，最も面積の大きい領域を抽出した図であるが，最終的にほぼ接触面に相当する領域が抽出できていることが分かる．

以下で説明する画像処理はここで抽出された領域に対してのみ行う．

## E.4 粗いフロー推定と誤り検出/修正

次に，先の図 E.2-(a)，(b) に対し，テンプレートマッチングに基づくオプティカルフロー推定をした結果を図 E.4-(a)，(b) に示す．ただし，(a) はフローのノルムを図 E.4-(d) に示されるカラーマップで変換して表示してあり，(b) はフローをベクトルで表示している．また，入力画像は  $240 \times 180$  [pixel] で，テンプレ

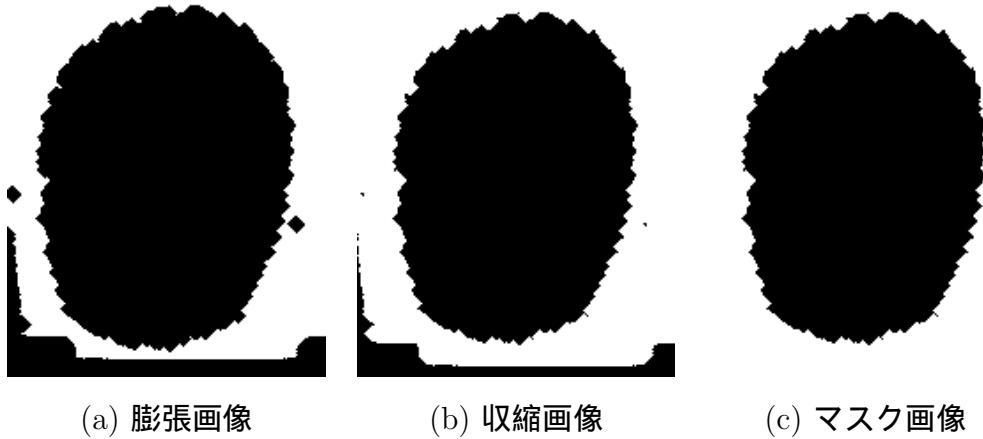


図 E.3 マスク画像の作成

トは  $16 \times 16$  [pixel] , 探索領域は  $24 \times 24$  [pixel] (テンプレートより上下左右に 4 ピクセル大きい領域) , 探索ステップは 16 [pixel] とした . 中心付近の固着領域ではフローが検出されず , そこから周辺へ向かうに従い , 徐々にフローが大きくなるという特徴は , 3 章で理論的に求め , 5 章で実際に計測した初期滑りの傾向と一致する .

この計算で , 概ね正しいフローの推定が行われたように思えるが , 図 E.4-(b) に赤線で示したフローは明らかに誤って推定されている . なぜなら , 本来滑らかに変化するはずの滑り場が急激に変化しているからである . そこで , フロー推定の誤りを検出するための評価基準として ,  $x, y$  軸方向フローのラプラシアン<sup>1)</sup>の自乗和  $L_s$  を用いる (ただし , 画像中で  $x$  軸は右方向 ,  $y$  軸は下方向であり , 原点は左上頂点となる) . つまり ,  $x$  軸方向に  $i$  番目 ,  $y$  軸方向に  $j$  番目のマス目 (先の探索ステップが 1 つのユニットになるため , ピクセルではなく敢えてマス目と呼ぶ) で推定されたフローを  $(u_{i,j}, v_{i,j})$  とすると , その場所での  $L_s$  は , 式 (E.1) で計算される .

$$L_s = \left( \frac{1}{12} (u_{i-1,j-1} + u_{i+1,j-1} + u_{i-1,j+1} + u_{i+1,j+1}) \right)$$



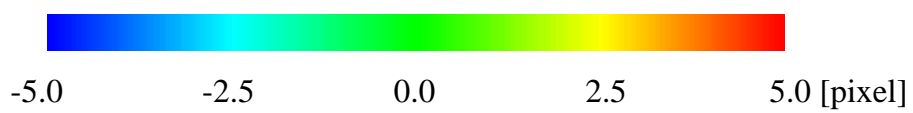
(a) 粗いフロー  
(ノルム表示)



(b) 粗いフロー  
(ベクトル表示)



(c) ラプラシアン



(d) フロー変換用カラーマップ

図 E.4 粗いフロー推定と誤り検出結果

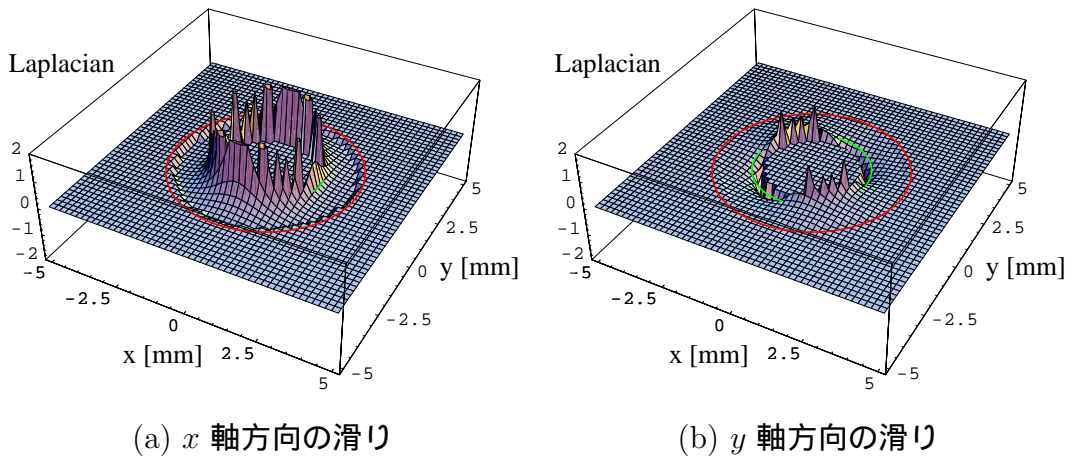


図 E.5 計算された滑りベクトルに対するラプラシアン計算結果：ただし，右下方方向の軸は  $x$  軸 ([mm])，右上方方向の軸は  $y$  軸 ([mm])，上方方向の軸はラプラシアンを表す．また，外側の円は接触領域を，内側の円は固着領域を表す

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{6} (u_{i-1,j} + u_{i+1,j} + u_{i,j-1} + u_{i,j} - u_{i,j})^2 \\
 & + \left( \frac{1}{12} (v_{i-1,j-1} + v_{i+1,j-1} + v_{i-1,j+1} + v_{i+1,j+1}) \right. \\
 & \left. + \frac{1}{6} (v_{i-1,j} + v_{i+1,j} + v_{i,j-1} + v_{i,j}) - v_{i,j} \right)^2 \quad (E.1)
 \end{aligned}$$

つまり， $L_s$  の値が 0 より十分に大きい場合，フローが滑らかに変化していない可能性が高い．このため，そこでのフローが誤推定されているとみなす．実際，5 章の LOAD-LARGE 条件 (詳しくは表 5.3 を参照をされたい) で計算される各軸方向滑りベクトルに対するラプラシアンを計算すると図 E.5 を得るが，滑りベクトルが不連続に変化する固着領域の境界以外では，ラプラシアンがほぼ 0 となることが理解できる．つまり，この手法は初期滑りに伴う滑り場の計測において，滑りベクトル推定の誤りを抽出するのに適した方法であると言える．

図 E.4(c) の赤矩形は  $L_s$  が 5.0 以上となる領域を表すが，図 E.4(b) に指摘したフロー推定の誤りを正しく検出できていることが分かる．そして，この部位のフローを修正する際もラプラシアンを利用する．つまり，誤推定位置における滑りベクトルを，周りで推定された滑りベクトルの線形和として近似する．具体的

には式 (E.2) を計算する .

$$\begin{cases} u_{i,j} = \frac{1}{12} (u_{i-1,j-1} + u_{i+1,j-1} + u_{i-1,j+1} + u_{i+1,j+1}) \\ \quad + \frac{1}{6} (u_{i-1,j} + u_{i+1,j} + u_{i,j-1} + u_{i,j}) \\ v_{i,j} = \frac{1}{12} (v_{i-1,j-1} + v_{i+1,j-1} + v_{i-1,j+1} + v_{i+1,j+1}) \\ \quad + \frac{1}{6} (v_{i-1,j} + v_{i+1,j} + v_{i,j-1} + v_{i,j}) \end{cases} \quad (\text{E.2})$$

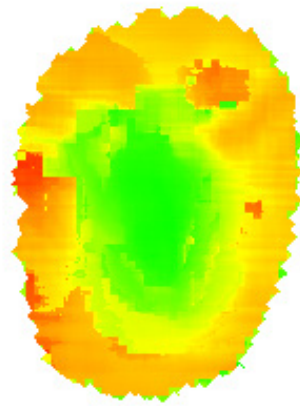
## E.5 詳細なフロー推定と妥当性の検証

以上の方法で修正したフローの終点を中心とした新たな探索範囲を設定し , 詳細なフロー推定を行う . 図 E.6-(a) から (d) に推定されたフローを示す . ただし , (a) はフローのノルム表示 , (b) はフローのベクトル表示 , (c) は  $x$  軸方向フローのノルム表示 , (d) は  $y$  軸方向フローのノルム表示である . また , この計算では , テンプレートは  $8 \times 8$  [pixel] , 探索領域は  $12 \times 12$  [pixel] (先に推定されたフロー終点を中心とした領域) , 探索ステップは 2 [pixel] とし , フロー推定を行った後にサブピクセル化処理を施している . また , フロー変換用カラーマップは , 先と同様に図 E.4-(d) を用いた .

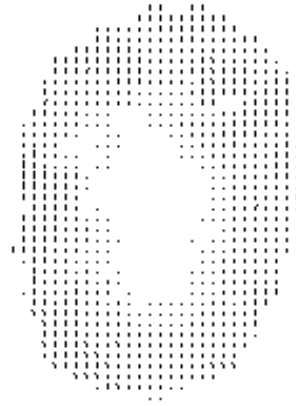
図 E.6-(a) より , 固着領域がほぼ接触領域の同心円状に存在することが理解できる . これは , 3 章における接触モデルや , 付録 C で示された一般化接触モデルの知見と一致する . 一方 , 5 章における初期滑り計測では , 固着領域が接触終了端に寄る傾向が見られた . これは , 本節では指に対し縦方向に負荷力を加えたため , 巻き込み (大変形) の影響が小さいのに対し , 5 章では横方向に負荷力を加えたため , 大変形の影響が大きいからである .

また , 図 E.6-(c) , (d) から明らかなように , 接線力方向 ( $-y$  軸方向) の滑りは場所によって大幅に変化するが ,  $x$  軸方向にはほとんど滑りが発生していないことが理解できる . このような初期滑り発生の傾向は 3 , 5 章で得られた結果と定性的に一致するものである .

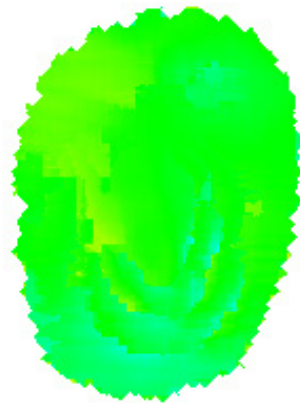
最後に , 図 E.7-(a) , (b) , (c) に現画像 (図 E.2-(b) と同一) , 前画像とフロー情報から推定した現画像 , 現画像と推定された現画像との差画像を示す . 本実験で使用した画像の解像度が低いため , 差画像には量子化誤差によるノイズが見受け



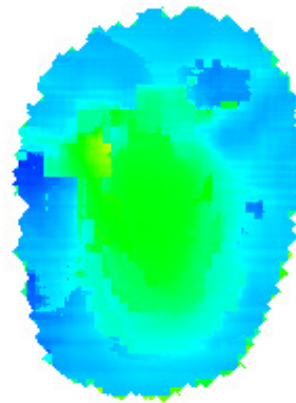
(a) ノルム表示



(b) ベクトル表示



(c)  $x$  軸方向の滑り



(d)  $y$  軸方向の滑り

図 E.6 詳細なフロー推定結果



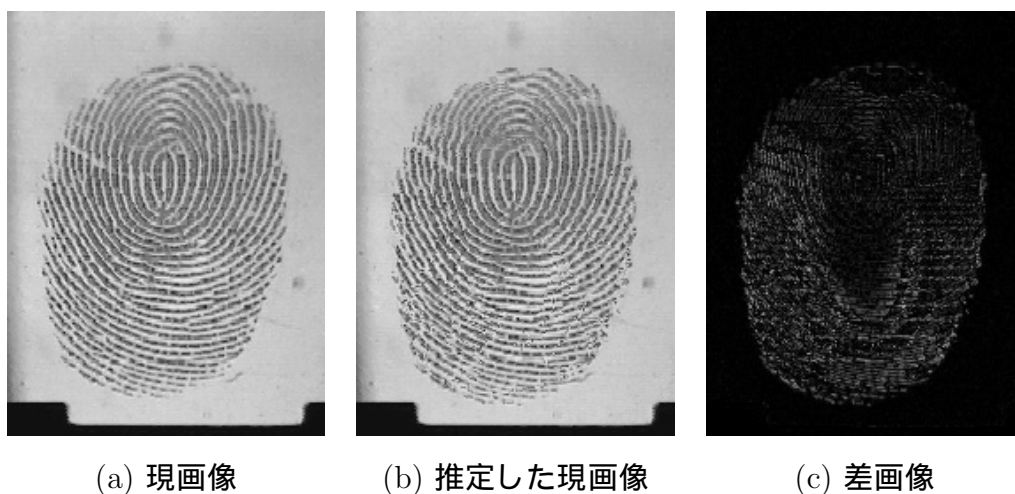


図 E.7 フロー推定の妥当性検証結果

られる．しかし，本節で説明した単純なフロー推定法だけで概ね正しい滑り場が推定できていることが分かる．

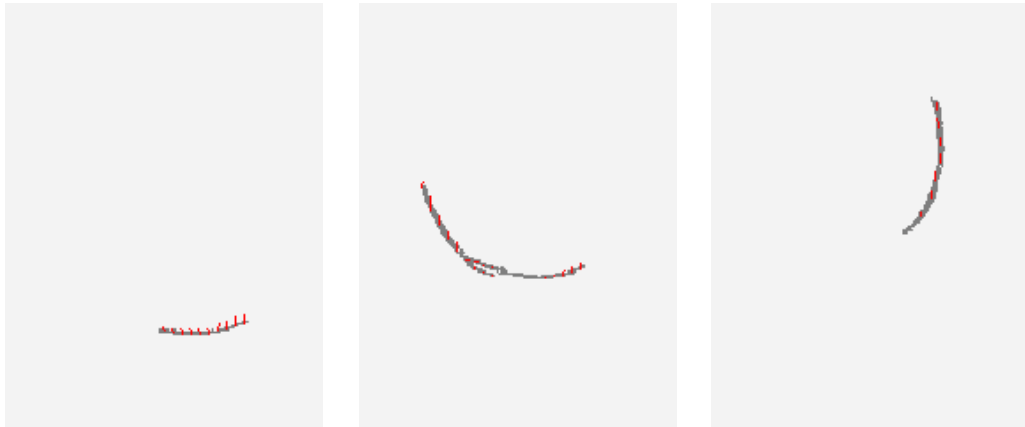
## E.6 推定したフローより得られる情報

以上の処理で推定した滑り場からは，様々な情報を抽出することができる．

例えば，図 E.8-(a)，(b)，(c) はある指紋稜線とその中心線上での滑りベクトルを可視化したものであるが，これより任意の時刻での任意の指紋稜線の動きベクトルを知ることができる．指紋パターンと触覚受容器の配置には密接な関係があることを考えると，このような情報は人の触覚情報処理を議論する上で本質的に重要な情報となることが予想される．

また，連続した画像に対し推定した速度場を時系列状に表示すると，図 E.9 の様に指先接触面内の滑り-固着状態の遷移を可視化することが出来る．本研究では，このような情報が把持力制御を議論する上で極めて有効であることを示したが，同様になぞり運動などに伴う一般的な触感知覚を議論する上でも本質的な情報を含むものと予想される．

今後は，本節で提案した滑りベクトル推定アルゴリズムを改良し，推定精度を



(a) 稜線動きベクトル 1 (b) 稜線動きベクトル 2 稜線動きベクトル 3

図 E.8 指紋稜線の動きの推定

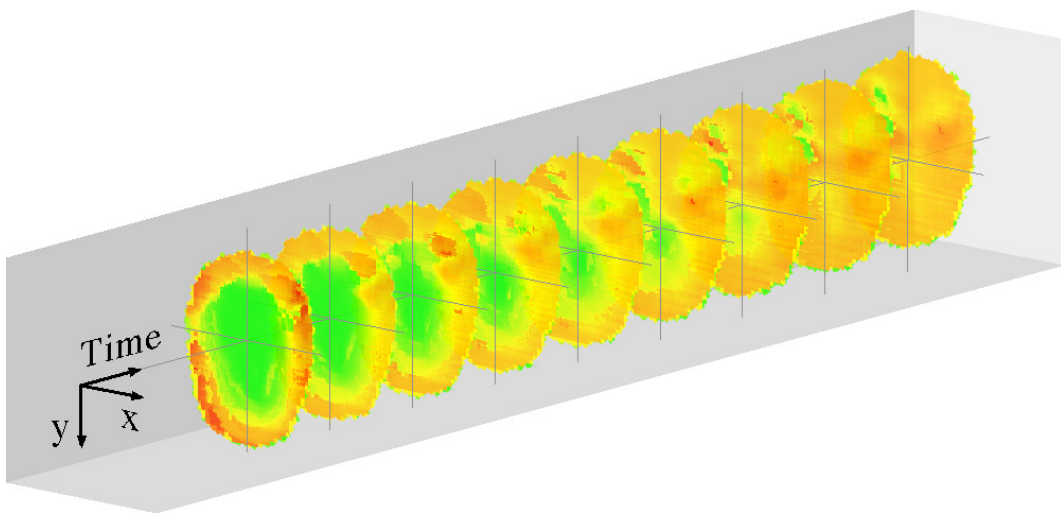


図 E.9 指先接触面の滑り-固着状態の時間変化

評価する．そして，指先接触面計測というアプローチを，人の機能に伴う触覚情報処理モデルの構築/検証手法として確立する．



# 索引

- FA I, 26, 115
- FA II, 26, 115
- SA I, 26, 115
- SA II, 26, 115
- 握力把持, 20
- 運動モデル, 23
- カッタネオの理論, 46
- 機械受容, 5
- 機能モデル, 3
- 狭義の触覚, 9
- 狭義の把持運動, 9
- 固着率, 61
- 固着領域, 41
- 材料モデル, 19
- 自己受容感覚, 27
- 順回性側抑制回路, 120
- 初期滑り, 10, 41
- 触運動, 1
- 触情報学, 34
- 滑り領域, 41
- 精密把持, 20
- 生理モデル, 27
- 接触開始端, 38
- 接触終了端, 38
- 把持力, 38
- パチニ小体, 27, 115
- 反回性側抑制回路, 119
- 微小神経電図, 26, 114
- 歪みエネルギー密度, 118
- 負荷力, 38
- フックの法則, 48
- ヘルツの理論, 40
- マイスナー小体, 27, 115
- 摩擦円錐, 23
- ミーゼスの相当応力, 53, 57
- メルケル盤, 27, 115
- ルフィニ終末, 27, 115