JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

| | |
|---|---|
| Title | マーカベース光学式触覚センサを用いた人型ロボットフィンガーの開発と把持動作への応用および検証 |
| Author(s) | 友水, 豪志 |
| Citation | |
| Issue Date | 2026-03 |
| Type | Thesis or Dissertation |
| Text version | ETD |
| URL | https://hdl.handle.net/10119/20579 |
| Rights | |
| Description | Supervisor: HO, Anh Van, 先端科学技術研究科　, 博士 |

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

**博士論文**

# マーカベース光学式触覚センサを用いた人型ロボットフィンガーの開発と把持動作への応用および検証

友水豪志

主指導教員 HO Anh Van

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術専攻
[情報科学]

令和 8 年 3 月 (学位授与年月)

## ABSTRACT

This dissertation aims to demonstrate the multifunctionality of a vision-based tactile sensor (VBTS) that mimics the human finger structure nail, bone, flexible skin and thereby establish the utility of anatomical imitation for VBTS design. The human finger exhibits a highly optimized morphology rarely observed in other species. In robot fingers employing tactile sensors based on electrical principles, mimicking this structure has been reported to enable diverse capabilities, including detection of minute steps, manipulation of thin objects, and reorientation (rotation) using the finger pad.

In recent years, vision-based tactile sensors that capture internal images of the skin with an embedded camera have gained attention for their ability to observe contact phenomena at high resolution. However, the benefits of mimicking finger structure within this modality have not been systematically verified.

Building on a design that integrates a hard nail and skeletal support with a compliant skin, this study conducts an integrated evaluation of VBTS functionalities enhanced holding force, enlarged contact area, stress concentration, detection of fine asperities, and grasping of thin objects.

First, we established stable fabrication methods for a With-Nail VBTS (w-VBTS) incorporating nail and bone, and a Without-Nail VBTS (wo-VBTS) with bone only, and performed comparative experiments on holding force, contact area, and internal marker deformation. Consistent with previous work, w-VBTS exhibited greater holding force and contact area than wo-VBTS. Moreover, when a flat surface was pressed onto the sensors at various angles analogous to the contact area tests differences emerged in internal marker deformation trajectories, and w-VBTS reached the target load more quickly. This suggests that the nail suppresses excessive skin deformation and promotes efficient load transfer.

Next, we devised a robust process for fabricating a new Nail-Bone VBTS (NB-VBTS) with an internal support where nail and bone are integrated, closer to the human finger anatomy, and compared it to a Bone-VBTS (B-VBTS) with only bony support of identical size. We conducted experiments on contact area, detection of fine asperities, and manipulation of thin objects. As with the w/wo results, NB-VBTS achieved a larger contact area, and the findings underscored the importance of material selection for reproducing human-like skin mechanics. In the fine-asperity detection experiments, NB-VBTS produced the ideal frequency peak at the fingertip for asperities spaced down to 1 mm, whereas B-VBTS did not. This outcome is attributed to localized concentration of contact force at the nail tip, indicating a structural advantage of NB-VBTS in detection performance. Furthermore, leveraging a single VBTS with data-driven force estimation from internal markers, we achieved grasping of thin objects including those of ISO/IEC 7810 ID-1 size, an ability seldom reported for conventional VBTS.

Taken together, the results consistently show across multiple independent metrics that mimicking human finger structure confers functional advantages to VBTS.


**Keywords:** Vision based tactile sensor, Computer Vision, Bio inspired fingertip structure, Thin object grasping, Deep learning

## 論文要旨

本論文の目的は, 人間の指の構造 (爪・骨・皮膚) を模倣したビジョンベース触覚センサ (VBTS) の機能的優位性を実証し, 指構造の模倣が VBTS に有効であることを示すことである.

人間の指は, 他の生物にほとんど見られない高度に最適化された構造を有し, 従来の電気的原理に基づく触覚センサを用いたロボットフィンガでも, この構造の模倣により微小段差の検知, 薄い物体の操作, 指腹部における姿勢変更 (回転) など多様な機能が報告されてきた.

一方, 近年は, スキン内部に組み込んだカメラでスキン内部画像を取得し, 接触現象を高解像度に観測するビジョンベース触覚センサが注目を集めているが, この方式において指構造の模倣がもたらす利点は体系的に検証されていない.

本研究では, 硬い爪と骨構造および柔軟なスキンからなる構造設計に基づき, VBTS の機能的優位性 (保持力増大, 接触面積増大, 応力集中, 微小突起の検知, 薄い物体の把持) を評価した. まず, 爪と骨構造を備える With-Nail VBTS (w-VBTS) と, 爪を持たず骨構造のみを備える Without-Nail VBTS (wo-VBTS) を安定的に作製し, 保持力・接触面積・内部マーカ変形の比較実験を実施した. その結果, 先行研究の傾向と整合的に, w-VBTS は wo-VBTS に比べ保持力および接触面積が大きくなる傾向を確認した. さらに, 接触面積比較実験時と同様に平面を様々な角度で w/wo-VBTS に押し当てた時の内部マーカの変形量を比較したところ, マーカ変形過程に差が見られたことに加えて, w-VBTS の方が目標荷重に早く到達することが分かり, これは爪構造による過度なスキンの変形を抑制し効率的な荷重伝達をもたらす可能性が示唆された. これらの結果より, w/wo-VBTS のような簡易的な人の指の構造模倣においても従来より知られている爪構造による柔軟なスキンの幾何的拘束性を再現でき得る可能性を示せた.

次に, w-VBTS よりも人間の指により近い, 爪と骨が一体化した内部支構造を持つ新しい Nail-Bone VBTS (NB-VBTS) を安定的に作製する方法を確立し, 比較対象として骨の内部支持構造を持つ Bone-VBTS (B-VBTS) を用いて, 接触面積・微小突起検知・薄い物体操作実験をおこなった. 結果として, 接触面積は w/wo-VBTS で得られた結果と同様に爪構造を備えた NB-VBTS の方が大きな接触面積を得られることが実験から示されたとともに, 人間と同様の爪構造による柔軟なスキンへの機械的特性を再現するには材料選定が重要であることも同時に結果が得られた. また, 微小突起検知実験では NB-VBTS では爪先で最小 1mm 間隔の微小突起における理想周波数ピークの検出が可能であったが, B-VBTS では検出が難しい結果となった. これは NB-VBTS の爪先における接触力の局所集中が起因すると考えられ NB-VBTS 検知性能に対して, 指構造の模倣による機能的優位性が示された. さらに, 単一の NB-VBTS と内部マーカのデータ駆動型力推定により, 従来の VBTS では報告の少ない薄い物体 (ISO/IEC 7810 - ID-1 規格サイズ) の把持を実現した.

以上より, VBTS においても指構造の模倣は機能的優位性を与えることを, 複数の独立な指標で一貫して示した.

# 目次

**第 1 章 緒論** **1**
1.1 人間の知覚 . . . . . 1
1.2 人間の触覚機能 . . . . . 2
1.3 ロボットにおける触覚機能の重要性 . . . . . 3

**第 2 章 関連研究** **4**
2.1 人間の指の構造と機能的役割 . . . . . 4
2.2 人工指に関する先行研究 . . . . . 6
2.3 電気系素子を用いた触覚センサとヒト型触覚指センサ . . . . . 7
2.4 Vision Based Tactile Sensor のセンシング原理とロボットフィンガーへの応用例 . . . . 11
2.4.1 センシング原理に基づく VBTS の分類 . . . . . 11
2.4.2 TacTip 方式のロボットフィンガー . . . . . 11
2.4.3 GelSight 方式のロボットフィンガー . . . . . 13
2.4.4 本研究の位置づけ . . . . . 14
2.4.5 論文構成 . . . . . 15

**第 3 章 本研究における手法と貢献** **16**
3.1 接触面積比較実験における事前測定 . . . . . 17
3.1.1 接触面積の測定方法 . . . . . 17
3.1.2 換算式の導出 . . . . . 18
3.1.3 接触面積の測定結果の解析方法 . . . . . 20
3.2 マーカトラッキング手法 . . . . . 21
3.2.1 先行研究におけるマーカ検出・追跡手法について . . . . . 22
3.2.2 学習ベースのマーカ検出・追跡手法について . . . . . 25
3.2.3 本研究におけるマーカ検出・追跡方法 . . . . . 26
3.2.4 w/wo-VBTS におけるマーカ検出・追跡方法 . . . . . 27
3.2.5 NB/B-VBTS におけるマーカ検出・追跡方法 . . . . . 30
3.2.5.1 YOLOv8n のファインチューニング . . . . . 30
3.2.5.2 ハンガリアン法に基づくマーカ追跡 . . . . . 31
3.2.5.3 テンプレート情報に基づくマーカ初期位置決め . . . . . 33
3.2.5.4 マーカ検出・追跡手法の貢献と課題 . . . . . 34

**第 4 章 プロトタイプ型: w-VBTS における機械的および光学的評価** **35**
4.1 手法 . . . . . 35
4.1.1 センサデザイン . . . . . 35

4.1.2 透明骨構造と柔軟スキンの作成 . . . . . 36
4.2 実験内容 . . . . . 38
4.2.1 保持力比較 . . . . . 38
4.2.1.1 保持力比較実験の実験環境・手法 . . . . . 38
4.2.1.2 保持力比較実験の結果と考察 . . . . . 39
4.2.2 接触面積比較 . . . . . 41
4.2.2.1 接触面積比較実験の環境・手法 . . . . . 41
4.2.2.2 データ解析 . . . . . 41
4.2.2.3 接触面積比較実験の結果 . . . . . 41
4.2.2.4 接触面積比較実験の考察 . . . . . 43
4.2.3 平面接触時のマーカ変形量の比較 . . . . . 44
4.2.3.1 マーカ変形量比較実験の環境・手法 . . . . . 44
4.2.3.2 マーカの形状定量化 . . . . . 45
4.2.3.3 データ解析 . . . . . 47
4.2.3.4 マーカ変形量比較実験の結果と考察 . . . . . 47
4.3 プロトタイプ型: w-VBTS の実験結果の考察 . . . . . 57
4.4 プロトタイプ型: w-VBTS の実験結果における結論 . . . . . 58

**第 5 章 爪骨構造一体型: NB-VBTS による微小な段差・物体把持に関する評価研究 59**
5.1 手法 . . . . . 59
5.1.1 センサデザイン . . . . . 59
5.1.2 透明骨構造と柔軟スキンの作成 . . . . . 61
5.2 実験内容 . . . . . 62
5.2.1 柔軟スキン材料の評価 . . . . . 62
5.2.2 接触面積比較 . . . . . 64
5.2.2.1 接触面積比較実験の環境・手法 . . . . . 64
5.2.2.2 データ解析 . . . . . 65
5.2.2.3 接触面積比較実験の結果 . . . . . 65
5.2.2.4 接触面積比較実験の考察 . . . . . 67
5.2.3 微小突起検知実験 . . . . . 68
5.2.3.1 微小突起検知実験環境 . . . . . 68
5.2.3.2 マーカ変位量の算出方法 . . . . . 69
5.2.3.3 フォーストルクセンサとマーカ変位の周波数解析 . . . . . 69
5.2.3.4 微小突起検知実験結果 . . . . . 70
5.2.3.5 微小突起検知実験の考察 . . . . . 80
5.2.4 薄い物体把持実験 . . . . . 81
5.2.4.1 データ取得環境 . . . . . 81
5.2.4.2 データセット作成 . . . . . 83
5.2.4.3 多層パーセプトロン (MLP) の構成と学習方法 . . . . . 85
5.2.4.4 多層パーセプトロン (MLP) の学習結果と評価 . . . . . 86
5.2.4.5 薄い物体把持実験環境 . . . . . 95
5.2.4.6 薄い物体把持実験の条件 . . . . . 96
5.2.4.7 薄い物体把持実験の結果 . . . . . 98

5.2.4.8 薄い物体把持実験の考察 . . . . . 102
5.3 爪骨構造一体型: NB/B-VBTS の実験結果の考察 . . . . . 103
5.4 爪骨構造一体型: NB/B-VBTS の実験結果における結論 . . . . . 103

**第 6 章 全体の考察と結論** **105**
6.1 考察 . . . . . 105
6.1.1 設計と製作 . . . . . 105
6.1.2 マーカ検出と追跡 . . . . . 105
6.1.3 w/wo-VBTS による保持力・接触面積 (NB/B-VBTS 含めて議論)・マーカ変形量比較実験 . . . . . 106
6.1.3.1 保持力 . . . . . 106
6.1.3.2 接触面積 (NB/B-VBTS 含めて議論) . . . . . 106
6.1.3.3 マーカ変形量比較実験 . . . . . 106
6.1.4 NB/B-VBTS による微小突起検知・薄い物体把持 . . . . . 106
6.1.4.1 微小突起検知実験 . . . . . 106
6.1.4.2 薄い物体把持実験 . . . . . 107

**第 7 章 今後の課題** **108**

**謝辞** **109**

**本研究に関する業績** **110**

**参考文献** **111**

# 図目次


2.1 ヒト指先の爪周囲構造 . . . . . 4
2.2 先行研究で提案された様々な人工指 . . . . . 6
2.3 電気的原理別の触覚センサ実例 (抵抗式/圧電式/静電容量式). . . . . 8
2.4 人の指の構造を模倣した従来式ロボットフィンガー. . . . . 10
2.5 カメラベース触覚センサ (VBTS) の代表的なセンシング原理. . . . . 11
2.6 TacTip 方式のロボットフィンガーの例およびセンサ構造の改良に寄与する研究例. . . . 12
2.7 GelSight 方式のロボットフィンガーの例. . . . . 14

3.1 本研究の実験内容の外観 . . . . . 16
3.2 本研究の VBTS と平面との接触面積測定環境 . . . . . 17
3.3 接触面積比較実験の流れ . . . . . 18
3.4 w-VBTS の接触面画像および解析経過の例 . . . . . 18
3.5 接触面積 $(pix)$ を $(mm^2)$ に換算するために用いた基準画像 . . . . . 19
3.6 接触面積 $(pix)$ を $(mm^2)$ に換算するために用いた基準画像 . . . . . 20
3.7 マーカを用いた VBTS の先行研究 . . . . . 24
3.8 学習ベースの手法によるマーカ検出の例 . . . . . 25
3.9 提案する VBTS のマーカ内部カメラ画像の例 . . . . . 26
3.10 NB-VBTS における色フィルタによるマーカ検出失敗例 . . . . . 26
3.11 アノテーションに使用した画像の例 . . . . . 27
3.12 元画像とノイズ付与と幾何変換後の例 . . . . . 28
3.13 YOLOv8n の学習推移（200 エポック） . . . . . 28
3.14 w/wo-VBTS におけるマーカ検出と追跡の流れ . . . . . 29
3.15 NB/B-VBTS における YOLOv8 の学習データ (画像) の例 . . . . . 30
3.16 Roboflow UI の画像 . . . . . 31
3.17 YOLOv8n の学習推移（100 エポック） . . . . . 32
3.18 NB/B-VBTS におけるマーカ検出と追跡の流れ . . . . . 33
3.19 NB-VBTS におけるマーカ ID 割り当て結果 . . . . . 33

4.1 生体模倣型 VBTS の模式図 . . . . . 35
4.2 w-VBTS のサイズ . . . . . 36
4.3 透明な骨構造の生成過程 . . . . . 36
4.4 柔軟スキンの製作工程と w-VBTS の断面図 . . . . . 37
4.5 マーカ作成用モールドの構造 . . . . . 37
4.6 保持力比較の実験環境 . . . . . 38
4.7 保持力比較に用いた試験片のサイズ . . . . . 39

4.8 保持力比較実験の結果 . . . . . 39
4.9 先行研究で示された幾何的拘束と本研究の比較図 . . . . . 40
4.10 接触面積測定の実験環境 . . . . . 41
4.11 接触面積測定結果 . . . . . 42
4.12 内部マーカ変形解析に用いた接触角度・位置と対応マーカー . . . . . 44
4.13 マーカー変形測定環境 . . . . . 45
4.14 マーカー画像例 . . . . . 45
4.15 マーカ大きさ定量化の処理例 (切り出し—二値化—輪郭描画) . . . . . 46
4.16 マーカ検出パイプラインの出力例 . . . . . 47
4.17 20° におけるフレームごとのマーカ形状変化量および荷重推移. . . . . 49
4.18 30° におけるフレームごとのマーカ形状変化量および荷重推移. . . . . 50
4.19 40° におけるフレームごとのマーカ形状変化量および荷重推移. . . . . 51
4.20 50° におけるフレームごとのマーカ形状変化量および荷重推移. . . . . 52
4.21 60° におけるフレームごとのマーカ形状変化量および荷重推移. . . . . 53
4.22 共通最終フレーム (20°) における w-VBTS と wo-VBTS のマーカ変形量の比較. . . . . 54
4.23 共通最終フレーム (30°) における w-VBTS と wo-VBTS のマーカ変形量の比較. . . . . 55
4.24 共通最終フレーム (40°) における w-VBTS と wo-VBTS のマーカ変形量の比較. . . . . 55
4.25 共通最終フレーム (50°) における w-VBTS と wo-VBTS のマーカ変形量の比較. . . . . 56
4.26 共通最終フレーム (60°) における w-VBTS と wo-VBTS のマーカ変形量の比較. . . . . 56
4.27 40°, 60° におけるフレームごとのマーカ ID19 の形状変化量および荷重推移. . . . . 57

5.1 NB/B-VBTS の外観図. . . . . 60
5.2 NB/B-VBTS の寸法. . . . . 60
5.3 NB-VBTS のスキンレイヤーと各部位の名称 . . . . . 61
5.4 NB/B-VBTS の透明骨構造と柔軟スキンの作製方法. . . . . 62
5.5 引張試験の測定環境. . . . . 63
5.6 各種材料における引張試験結果. . . . . 64
5.7 接触面積測定の実験環境. . . . . 65
5.8 接触面積比較実験結果. . . . . 66
5.9 微小突起構造検知実験環境. . . . . 68
5.10 微小突起構造の各試料. . . . . 69
5.11 微小突起間隔 8 mm における平滑化処理結果. . . . . 71
5.12 微小突起間隔 4 mm における平滑化処理結果. . . . . 71
5.13 微小突起間隔 2 mm における平滑化処理結果. . . . . 72
5.14 微小突起間隔 1 mm における平滑化処理結果. . . . . 72
5.15 微小突起間隔 0.5 mm における平滑化処理結果. . . . . 73
5.16 微小突起間隔 8 mm における PSD 算出結果. . . . . 73
5.17 微小突起間隔 4 mm における PSD 算出結果. . . . . 74
5.18 微小突起間隔 2 mm における PSD 算出結果. . . . . 74
5.19 微小突起間隔 1 mm における PSD 算出結果. . . . . 75
5.20 微小突起間隔 0.5 mm における PSD 算出結果. . . . . 75
5.21 B-VBTS の微小突起間隔 8 mm における平滑化処理結果. . . . . 76
5.22 B-VBTS の微小突起間隔 4 mm における平滑化処理結果. . . . . 76

5.23 B-VBTS の微小突起間隔 2 mm における平滑化処理結果. . . . . 77
5.24 B-VBTS の微小突起間隔 1 mm における平滑化処理結果. . . . . 77
5.25 B-VBTS の微小突起間隔 8 mm における PSD 算出結果. . . . . 78
5.26 B-VBTS の微小突起間隔 4 mm における PSD 算出結果. . . . . 78
5.27 B-VBTS の微小突起間隔 2 mm における PSD 算出結果. . . . . 79
5.28 B-VBTS の微小突起間隔 1 mm における PSD 算出結果. . . . . 79
5.29 NB-VBTS の爪先部のマーカ変位量データ取得環境. . . . . 81
5.30 爪先部のインデンター接触 3 パターン. . . . . 82
5.31 画像座標系におけるマーカのフレーム間変位 $(dx, dy)$ と 距離 $r$ の定義. . . . . 82
5.32 NB-VBTS におけるデータ取得フローチャート. . . . . 83
5.33 条件別のマーカー変位標準偏差 $(\sigma_{dx}^{(i)}, \sigma_{dy}^{(i)}(c))$ の分布と全体中央値. . . . . 85
5.34 条件ごとのマーカー変位スケール（$\sigma_r$）と $\beta$ 代表値 . . . . . 85
5.35 MLP (381 × 190) の学習曲線 . . . . . 87
5.36 MLP (381 × 190 × 95) の学習曲線 . . . . . 87
5.37 MLP (381 × 190 × 95 × 47) の学習曲線 . . . . . 87
5.38 MLP 構成差による力推定精度の比較 . . . . . 89
5.39 MLP 構成差による未知データに対する力推定精度の比較 (Contact Point : 1/3). . . . . 91
5.40 MLP 構成差による未知データに対する力推定精度の比較 (Contact Point : 2/3). . . . . 92
5.41 MLP 構成差による未知データに対する力推定精度の比較 (Contact Point : 3/3). . . . . 93
5.42 薄い物体把持実験の実験環境. . . . . 95
5.43 実験に用いる薄い物体. . . . . 96
5.44 薄い物体把持のフローチャート. . . . . 96
5.45 把持開始高さ調整のイメージ. . . . . 98
5.46 $T = 1$ mm の把持時における時系列データと把持成功時の図. . . . . 99
5.47 $T = 2$ mm の把持時における時系列データと把持成功時の図. . . . . 99
5.48 $T = 3$ mm の把持時における時系列データと把持成功時の図. . . . . 100
5.49 $T = 4$ mm の把持時における時系列データと把持成功時の図. . . . . 100
5.50 $T = 5$ mm の把持時における時系列データと把持成功時の図. . . . . 101
5.51 $T = 5$ mm の把持時における時系列データと把持成功時の図. . . . . 101
5.52 $T = 3\,, 4$ mm の把持失敗時における時系列データ. . . . . 102

# 表目次


1.1 手の触覚受容神経の分布 (Johansson ら [1] より抜粋) . . . . . 3

3.1 参照円による面積換算の結果 . . . . . 19
3.2 Pixel–mm$^2$ 換算の検証（ブロック試験片と黄色テープ） . . . . . 20

4.1 各試験片の把持 (Distance) のパターン . . . . . 39
4.2 1N および 2N の押し付け力における接触面積に対する Shapiro–Wilk 検定結果 (p 値) . . 42
4.3 3N および 4N の押し付け力における接触面積に対する Shapiro–Wilk 検定結果 (p 値) . . 43
4.4 異なる押付力および接触角条件における w-VBTS と wo-VBTS の Welch の t 検定結果 (p 値) . . . . . 43

5.1 5 種類の柔軟材料の混合比と光学特性 . . . . . 63
5.2 荷重 5N 時の Ecoflex 00-50, Ecoflex 00-10 における接触面積値に対する Shapiro–Wilk 検定の結果 (p 値) . . . . . 66
5.3 荷重 5N 時の Solaris & Slacker, Gel における接触面積値に対する Shapiro–Wilk 検定の結果 (p 値) . . . . . 67
5.4 接触荷重 5N で異なる材料および接触角条件における NB-VBTS と B-VBTS の Welch の t 検定および Mann–Whitney U 検定の結果 (p 値) . . . . . 67
5.5 微小突起構造を持つ試料における理想周波数 . . . . . 70
5.6 理想と実測の PSD 周波数の比較、および距離誤差 . . . . . 75
5.7 MLP 構成一覧 . . . . . 86
5.8 力推定モデルの回帰特性と誤差指標 (3 手法の比較) . . . . . 88
5.9 Contact Point 別の力推定モデルの回帰特性と誤差指標 (CP=1/3) . . . . . 94
5.10 Contact Point 別の力推定モデルの回帰特性と誤差指標 (CP=2/3) . . . . . 94
5.11 Contact Point 別の力推定モデルの回帰特性と誤差指標 (CP=3/3) . . . . . 94
5.12 厚さ・Z 高さ・閾値と成否の一覧 . . . . . 97
5.13 厚さ・Z 高さ・閾値と成功回数 . . . . . 98

# 第1章

# 緒論

## 1.1　人間の知覚

人間は, 五感 (視覚, 聴覚, 触覚, 味覚, 嗅覚) を組み合わせて外界の様々な物理・化学的現象 (光, 音, 圧力, 温度, 化学分子など) を知覚し, その情報を神経系を介して脳に伝達する, 高度な知覚システムを有している. この知覚システムは, 外界の事象を単独の感覚で処理するのではなく, 複数の感覚を統合的に利用して環境を理解するマルチモーダル知覚機構を構成している. 例えば, 視覚情報と聴覚情報を組み合わせることで空間の奥行や距離を正確に把握したり, 嗅覚や味覚を組み合わせることで食品の安全性や嗜好を判断できる. これらの感覚情報は, 脳内神経ネットワークを通じて多層的に処理・統合されることで, 人間は環境の中で自身の位置や行動を柔軟に制御することが可能となっている.

このマルチモーダル知覚機構の働きにより, 人間は多くの人ごみのなかでも他者と衝突せずに歩行したり, 複雑な味付けを調整して料理を楽しんだり, 壊れやすい物体を壊さずに取り扱うといった, 極めて高度な感覚運動を実現している. これらの能力は, 単なる感覚器の反応ではなく, 知覚情報の「統合」, 「予測」, 「学習」に基づく知的行動と考えられ, 人間の神経系の精緻さが実現している. ここで, アリストテレス以来の五感の分類は, 現代の生理学では厳密な定義上の差異や「平衡感覚」などの追加の感覚が指摘されるものの, 本論文では便宜上, 人間の主要な外界認知機能として (視覚・聴覚・触覚・味覚・嗅覚) を中心に議論を進める [2].

- **視覚**

  人間は, 目の網膜で光刺激を受け取り, その信号を視神経を介して脳の視覚野で処理することで「見る」ことを可能にしている. 視覚情報は, 形状・色・距離・運動など多次元の特徴を同時に解析する. これにより, 例えば信号機の色を識別して横断歩道を渡るタイミングを判断するなどの, 行動判断の手がかりを提供する.

- **聴覚**

  人間は, 耳で空気の振動 (音波) を鼓膜と蝸牛で機械的エネルギーとして感受し, その振動数や強度, 方向を検知することで音を知覚している. 聴覚は, 言語の理解や空間把握, 危険回避などにおいて重要であり, 例えば, 自動車のクラクション音を聞いて危険を察知することが可能である.

- **触覚**

  人間は, 皮膚に存在する感覚受容器を通じて, 圧力や温度, 痛みなど多様な刺激を感じ取る. 触覚は物体との直接的な接触を通して硬さや粗さ, 形状を知覚するだけでなく, 心地よさなどの安心感という

感情にも関与する. 例えば, 熱いコーヒーカップを持った時の温度感覚や, 柔らかい毛布に触れた際の心地よさを得ることができる.

- **味覚**

  人間は, 舌の味蕾を通じて, 甘味・塩味・酸味・苦味・うま味を感じ取り, 食物の種類や安全性を判断することが可能である. これによって, 塩辛いスープを飲んで味を調整したり, 甘いケーキを食べて幸福感を感じたりできる.

- **嗅覚**

  鼻腔の嗅覚受容器が空気中の微小な分子を感知し, 脳でにおいとして認識する感覚である. 記憶や感情にも強く結びつき, 焦げたにおいで火事に気付いたり, 香水の香りで人を思い出すことができる.

このような五感のうち, 最も広い感覚受容面積を持つのは触覚であり, つま先から頭部に至るまで, 身体のあらゆる部位に感覚受容器が分布しており, 感度の差はあるものの全身が外界との境界面として機能している. 一方で, 視覚・聴覚・味覚・嗅覚の感覚器官はすべて頭部に集中している. したがって, 触覚は人間の身体全体を通して環境と直接的に相互作用する唯一の感覚であり, 身体の存在を空間内で実感させる「身体性 (embodiment)」を支える根幹的機能といえる. ここでの身体性とは, 人間が身体を通じて外界と相互作用することにより知覚や認知をおこなうという性質である. すなわち, 触覚は外界を理解するための感覚であると同時に, 「自分自身の身体を認識するための感覚」でもある.

## 1.2 人間の触覚機能

人間の触覚は, 単なる刺激の受容器官にとどまらないことは前セクションで述べたが, 力制御・滑り検知・物体識別・温冷感知など, 多様な知覚と運動制御機能を担う複雑なシステムである. 人間の場合, 特に物体を手で操作する時の機能は多くの感覚受容器 (レセプター) によって, 様々な刺激を知覚して中枢神経系へ伝達され力制御を自動的におこなっている. Johansson ら [3] の研究では, 母指と人差し指による把持 (ピンチグリップ) において, 指先皮膚の感覚入力が「把持力」と「荷重力」の協調制御に不可欠であることを実験的に示している. また, 滑りやすさの異なる物体 (サンドペーパー, スエード, シルク) を把持する実験を通じて, 皮膚感覚が自動的な力制御に関与していることも実験的に報告している. Ingvars ら [4] の研究では, 人間の指先は力の方向情報が触覚神経群によって符号化され,*SA-I/II* および *FA-I* 神経 (表 1.1) は異なる方向バイアスを示すと実験的に示している. これはすなわち, 人間の指先には方向選好性を持つセンサネットワークが埋め込まれており, タイプ別の方向バイアスを組み合わせることで, 力ベクトルの向きを脳が読み取ることを可能にし, その情報が把持安定化 (滑り回避) や物体姿勢制御に使われると解釈できる.
このように, 人間の手は複数の感覚受容器の働きにより, 豊かな触覚情報を取得し巧みな物体操作を可能としている.

表 1.1: 手の触覚受容神経の分布 (Johansson ら [1] より抜粋)

| 分類 | 名称／構造 | 主な役割 | 反応特性 | 主な分布部位 |
|---|---|---|---|---|
| **FA-I** | | | | |
| （速順応 I 型） | マイスナー小体 | 動的な皮膚変形やすべりを検知。表面の動きやテクスチャ変化を感知。 | 高周波（5–50 Hz）、速順応。 | 指先や手掌中央部に高密度。 |
| **SA-I** | | | | |
| （遅順応 I 型） | メルケル細胞 | 静的圧力や形状・エッジの検出。微細な空間構造の認識。 | 低周波（<5 Hz）、遅順応。 | 指腹・指先に集中。 |
| **FA-II** | | | | |
| （速順応 II 型） | パチニ小体 | 高周波振動（40–400 Hz）や瞬時の衝撃を感知。遠隔の機械的刺激にも反応。 | 速順応、静的圧力に鈍感。 | 手掌深部や皮下組織に分布。 |
| **SA-II** | | | | |
| （遅順応 II 型） | ルフィニ終末 | 皮膚の伸展・張力・手の形を感知。関節角度や皮膚の緊張を検出。 | 低動的感度、遅順応。 | 指の側面・関節部・手の縁に分布。 |

## 1.3 ロボットにおける触覚機能の重要性

ロボットとは, 環境を感知し, 計算に基づき自律的に現実世界で行動を実行できる機械と定義される [5]. その中でもコボット (協働ロボット) は, 人間と同じ空間・時間を共有し, 安全に共同作業を行うことを目的に設計されたロボットである. 近年では, 人間社会で活動できるサービスロボットや医療ロボットが求められている [6]. ロボットに多種の対象物に対して多様な作業を実行させるためには, 現在提案されてきている産業用ロボットやヒューマノイドロボットに対して, 以下の機能を付加する必要があると考える.

- 人間が所望とする作業を推測するためのヒューマンインタフェース
- 対象物を高精度に認識する視覚情報認識
- 対象物との相互作用を安定かつ繊細に実現するための触覚機能の取得と活用
- 対象物操作に至るまでの最適な経路探索および動作プランニング

これらのロボットでの実現には様々なセンサと多彩な要素技術を組み合わせる必要がある. センサの例としては, カメラ, マイクロホン, LiDAR, 触覚センサ などが挙げられる. また, 要素技術の例としては, 音声認識, ビッグデータ, 人工知能, モバイルおよびクラウド技術, バイオメトリクスなどが挙げられる. さらに, これらの機能の中でも特に触覚機能は, ロボットと対象物の物理的相互作用に直接関与するため, 操作タスクにおける制御性を根幹から支える重要な役割を担う. また, 触覚機能は単なる知覚情報ではなく, 操作タスクにおける制御点 (Control point) を規定して, 予測と補正の枠組みで行動相を結びつける役割を果たす [7]. ここでの制御点の例としては, 指が物体に接触した瞬間, 把持した物体が支持面 (テーブルなど) から離れた瞬間, 把持した物体が支持面に再接触した瞬間が挙げられる. ここでの行動相とは, 手指を伸ばして対象物に近づける段階, 指が対象物に触れ, 支持面にかかっている重量を持ち上げるための力を加え始める段階, 対象物が支持面から離れて持ち上がる段階, 物体を支持面に置いて手を離す段階が挙げられる. このように, ロボットが物体の操作タスクを遂行するためには, ロボットと物体の接触情報を知覚することが極めて重要であると考えられる.

# 第 2 章

# 関連研究

この章では, ヒトの指の構造を生理学的側面および工学的側面からの研究事例を示し, ヒトの指構造の機能性について示す. また, 従来の電気的な現象を応用した様々な触覚センサの先行研究を挙げ, その特性と課題について示した後, これらの電気的な現象に基づく触覚センサをロボットフィンガーへ応用した既存研究における課題について示す. 最後に本研究の位置づけを, 既存のカメラベースの触覚センサ (Vision Based Tactile Sensor : VBTS) の先行研究を取り上げながら示す.

## 2.1 人間の指の構造と機能的役割

このセクションでは, 人間の指の構造について, 生理学と工学の両面から行われてきた先行研究を取り上げ, 以降のヒトの指の構造を模倣することの背景を示す. 爪はアルファケラチン製の爪板で, 指の背側遠位端を覆う (図 2.1). 霊長類のかぎ爪 (claws) が爪 (nail) に置き換わったことは, 霊長類における高度な手指の巧緻性の出現と関連している一方, 霊長類でかぎ爪が発達しているマーモットのような種の場合は, 一般に手指の巧緻性が顕著に低い. 一方, 人間の指先の平らな爪は, 指腹の柔軟な組織と爪の間で受容器を圧迫することで, 指腹の感覚知覚を高めている役割や, 非常に敏感な指先を保護する役割や, 体温調節機能を担っている [8]. 生理学的には, 爪は (1) 硬い支持基盤として指腹 (しふく) の柔らかな皮膚

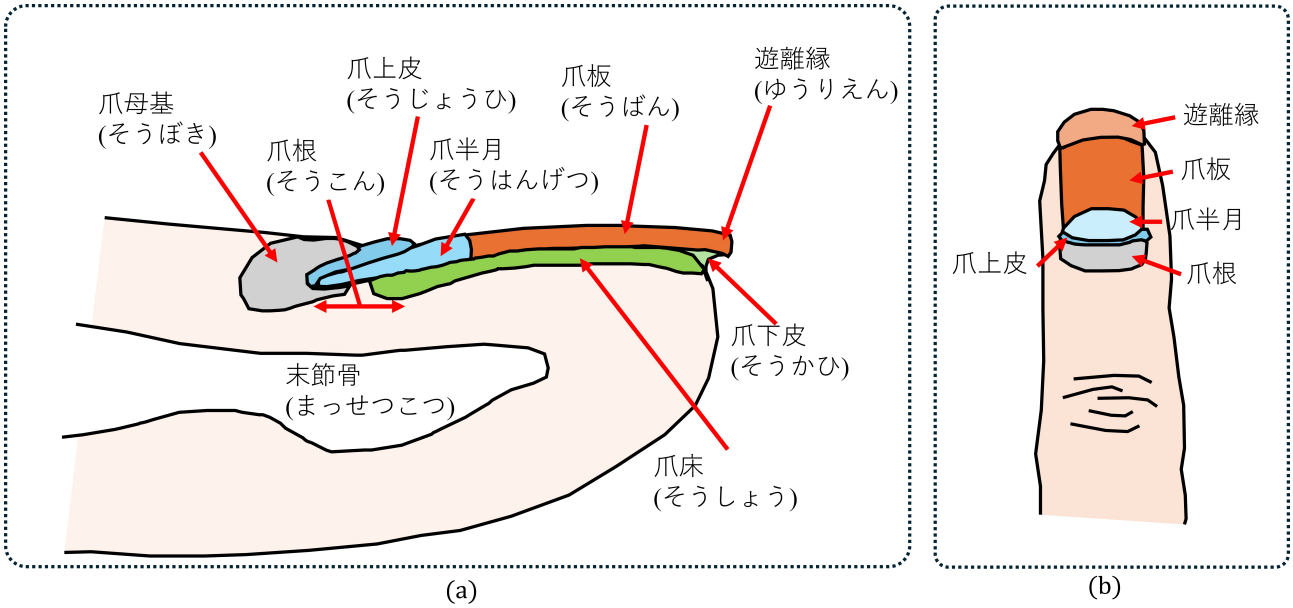



図 2.1: 爪板 (橙), 爪床 (緑), 爪下皮 (先端部), 末節骨 (白) など主要部位を示す. 爪板は近位側で爪根の下に入り込み, 遠位に向かって前進しながら爪床と密着する.

を裏打ちし, 触覚感度を高め小物体操作時の滑りを抑制し, (2) 能動的な触覚器として爪床・爪縁の受容器により触刺激の空間定位を可能にしている. Shirato ら [9] は物体操作における最適な爪の長さが不明であることを問題として, 爪先から 2mm 突出した場合と 0mm の場合で物体操作における巧緻性の比較実験をおこなった. その結果, 小物体 (球, 立方体) のつまみ上げ操作や薄い物体のすくいあげ操作時には, 爪先から 2mm 突出している方が, 操作完了までの時間が短くなったと報告している. また, メカニズムの仮説として爪周辺の受容器への力伝達を 2mm 突出した爪部が助長していることを主張している. Longo[10] らは皮膚上の 2 点を同時に触られたとき, 2 つの刺激として区別できる最小の距離の「二点弁別」よりも更に高次な知覚に関する実証が欠落していることを課題として指摘した. そこで, Longo[10] らは被験者の爪上に $3 \times 3$ の 9 点を描き, その点を木製の棒 (先端 1mm) で約 1 秒間, 爪床が白くなるまでの刺激および, 親指に 15g の von frev 法で押圧を厳密に制御して, マウスカーソルで被験者自身の指のどこに刺激が加わったか回答してもらい, 統計的に評価する実験をおこなった. その結果, 有意水準を大幅に上回る精度で爪上の刺激の位置を定位できることを報告している. Ingvars ら [11] は, 爪側縁部には力の向きを感じる受容器群が多数分布し, 実用レベルの押圧 (4 N) でも力の方向を安定に符号化することを報告している. さらに, 横方向成分が増すほど方向感度が高まり, 集団として全方位の力ベクトルを推定可能である報告している.

これらのことから, 爪には物体把持時の安定化に寄与することに加えて, 爪先, 爪側縁部, 爪板表面においても触覚機能が存在し, 指全体での巧みな物体操作に寄与していることがうかがえる. このような人間の緻密な指の構造と機能を工学的に模倣しようとする先行研究も存在する. 次のセクションでそれらを示す.

## 2.2　人工指に関する先行研究

ここでは, ヒトの指の構造を模倣した人工指を用いて, ヒトの指の構造的特徴, 機能を実験的に報告されている先行研究を示し, 工学的側面からヒトの指の模倣することの機能的優位性をレビューする.
Han ら [12][13] は, 人間の指腹の非線形特性を実測し, 人工指 (図 2.2) と比較した. 接触角度と接触面積, 平均圧力がスキンの剛性にどうかかわるかを人間の腹部で実測し [12], その知見に基づき, 人工指の設計を材料特性と接触面圧の 2 軸で最適化可能であることを示した. さらに [13] では人間の指腹部の静止摩擦の実測に基づき, 最大静止摩擦力モデルを提案し, その知見を用いて人工指 (爪あり/なし) を設計評価している. その結果, 人工指でも爪要素の追加と外皮硬さの調整により人に近い摩擦応答が得られ, 微小把持での滑り抑制に有効であることを示した. Tiezzi ら [14] は, 内部に剛体構造をもつ半球ソフト指先 (図 2.2) で, 層厚とスキンの硬さが法線, 接線, ねじり剛性と滑り耐性に与える影響を準静的実験 (運動の慣性・加速度の影響を無視) で定量化しスキンの厚さ設計が性能 (初期剛性, 自己硬化の強さ, 滑り耐性など) のチューニングの要であることを示唆している. また, Kumagai ら [15][16] は, 柔軟なスキンと骨構造を備えた人工指 (図 2.2) における爪構造の有無の差分によって, 引抜試験時の試験片に対する幾何拘束性に差が生じることを実験的に示した. その結果, 爪構造ありの人工指の方が爪構造なしの人工指よりも物体の保持力が大きくなることを実験的に報告している. Marco ら [17] は, 骨・内部軟組織・皮膚・爪の多層指先を作成し (図 2.2), 圧子試験と 3D-FEM で非線形剛性と接触面積を人間の指に近づけた (FEM 平均誤差 7%). ロボットハンド実験で引き抜き力が最大+96%（三指で+177%）となり, 柔軟層＋爪が把持安定を大幅に高めることを示した. また, 提案した多層型の生体模倣 (バイオミメティック) 指先は, ヒト型ロボットハンドの把持安定性を高めると同時に外観 (審美性) を改善し得ると結論付けている.

総括すると, 骨格・軟部層・表皮・爪の相互作用を踏まえた人工指における生体模倣は, 初期柔らかさと荷重依存の自己硬化, そして滑り耐性の両立および軟部組織の幾何拘束による安定把持に有効であると考えられる. これは人工指/ロボットハンドの保持力・接触安定の実測・FEM の双方で確認されている. あわせて, 電気素子を応用した触覚指センサ (例：静電容量・抵抗膜・圧電・磁気) においても, ヒトの皮膚形状の模倣, 層構成や表層硬度, 爪相当構造の導入など、生体模倣の設計原理を取り込む動向が見られる.

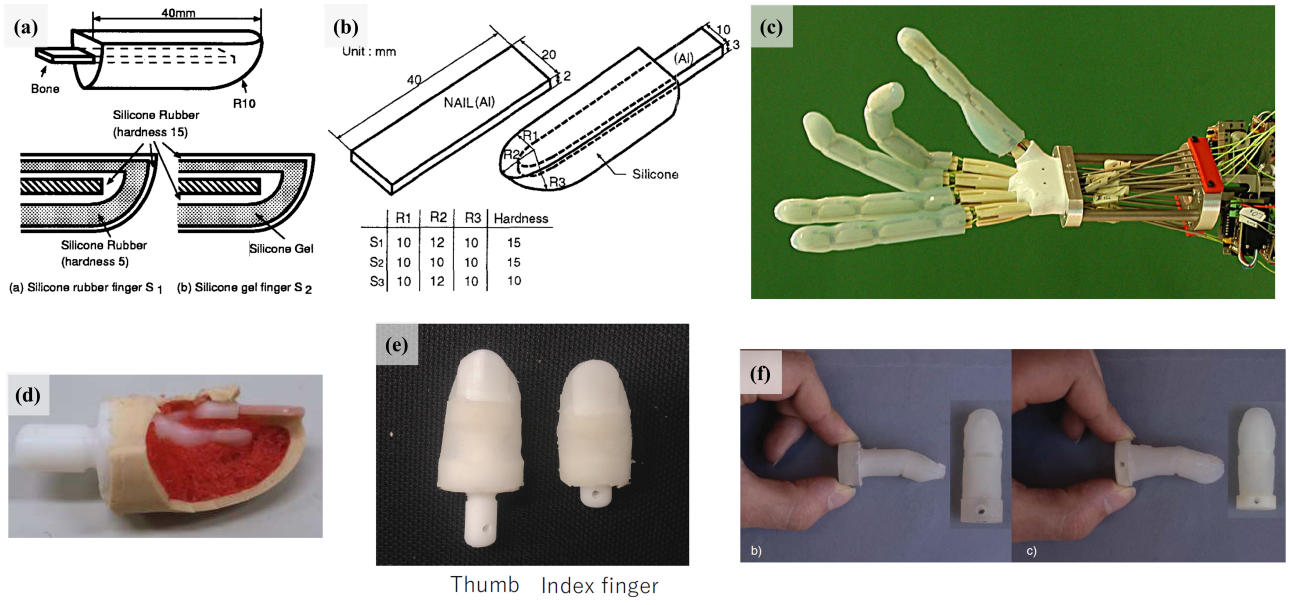



図 2.2: 先行研究で提案された様々な人工指. (a)-(b)：Han ら [12], [13] の人工指, (c)：Tiezzi ら [14] の人工指, (d)-(e)：Kumagai ら [15], [16] の人工指, (f)：Marco ら [17] の人工指.

## 2.3 電気系素子を用いた触覚センサとヒト型触覚指センサ

従来の電気的現象 (抵抗, コンデンサ, 圧電など) を応用した触覚センサは多く提案されてきている (図 2.3). Noda ら [18] は, 直立型ピエゾ抵抗カンチレバーをシリコンから成る弾性体内部に直交配置し,

$$\frac{\Delta R}{R} = D_\tau \, \tau$$

の線形関係 ($D_\tau$, $\tau$ はそれぞれ感度定数と剪断力) でせん断応力の X/Y 成分を直接計測することが可能なセンサを提案した. シリコン内部にカンチレバー機構を直行配置することで, 従来のせん断力測定におけるセンサよりも単純な計算で推定することを可能としている (図 2.3-(a)). 変形量と抵抗値の変化量は線形に変化し ($R^2 = 0.984$), せん断力と抵抗値も −5–5kPa の範囲で線形に変化しており ($R^2 = 0.996$), $0°, 30°, 60°, \ldots, 330°$ の 12 方向 (30° 刻み) に 2.45kPa の荷重条件で方向誤差 4° かつ大きさ誤差 10% であった. しかし, カンチレバー機構上のピエゾ素子の抵抗値は外部光の影響に敏感であることや, センシングエリアが大きくなるにつれて必要となるカンチレバー機構は増加し, 内部配線が複雑化する. また, 論文内で示されている製造方法も複雑であり, 同機構を曲面に適用することや, センシング面積を拡大することは困難と考えられる.

Zhan ら [19] は, Single-Walled Carbon Nanotube (SWNT) とティッシュ紙を用いた低コストな抵抗型柔軟圧力センサを提案した (図 2.3-(b)). SWNT がティッシュ繊維の隙間に含浸して導電ネットワーク (電極) を形成することで, 圧縮で電極間の結合が増えて電流が増加, 荷重が取り除かれるとともとともに電流値が減少する. センサ面積は 11mm × 11mm (電極部) であり, 検出可能レンジは 0.004–1.42N と小さな力から 1N 近くまでを微小な消費電力で測定可能であり, 弱い接触や脈波のセンシングに適している. ただし, ロボットの指先に応用することを考えると 1 ユニットが 11mm × 11mm と大きいことやセンシング可能域が 0.004–1.42N と狭いことから, ロボットの指先への応用には課題が残る.

Teshigawara ら [20] は, 感圧導電ゴム (Pressure Conductive Rubber : PCR) の圧縮したまません断方向への荷重を加えることで抵抗値が上昇するという特性を利用し, $6 \times 6 \times 0.5$mm サイズで, 薄型のすべり検知センサを提案した. 材料特性の評価試験では 0.01mm の微小なせん断量でも高感度に応答し, せん断時の速度に応じて非線形な応答特性があることを確認している. また, すべり検出実験では滑り開始約 0.3 s 前の兆候を取得し, すべり防止実験ではセンサで得られる電圧値の微分値における閾値,

$$\left| \frac{dV}{dt} \right| > 5\,\mathrm{V/s}$$

触発時に押し付け強さを強くすることで, 滑りを抑制するという簡易制御で 50, 100, 150 g の横荷重下でも滑り防止を実現した. しかし, この PCR センサは感圧面が微小でロボットの指先全体を網羅するには内部電極の煩雑性が懸念される (図 2.3-(c)).

Dahiya ら [21] は, 人の指先触覚に着想を得た「指先用」触覚センサを提案した (図 2.3-(d)). 指先用の高密度触覚アレイセンサを Microelectrode arrays (MEA:32 素子で構成) と Piezoelectric Oxide Semiconductor Field Effect Transistors (POSFET:25 素子で構成) の 2 方式で試作し、piezoelectric polymer film (PVDF-TrFE) による力 - 電圧変換を Field-Effect Transistor (FET) で読み出す構成で比較実験がおこなわれた. MEA 方式では 15 Hz かつ 0.02—4 N の法線荷重で動作することを確認し, 約 20 % のクロストークが生じる. 一方, POSFET 方式は 20 Hz・0.15–5 N で良好な線形応答 (約 49 mV/N) を示し, その結果, 1 mm 程度の空間分解能で, 人間の指先に近い空間・時間特性を確認した. ただし, この触覚センサは柔軟性に欠けており曲面への使用は難しく, センシング領域が小さいためセンシング領域の大規模化には不向きである.

Lee ら [22] は, サイズ $16 \times 16$ で分解能 1mm の柔軟モジュールを Polydimethylsiloxane (PDMS) で安定的に作成する方法を提案しており (300$\mu$mm 厚で均一性 3.5%), 上下電極と空気ギャップからなるセルで容量変化を利用する設計を示した (図 2.3-(e)). 結果として, 上部 PDMS が薄いほど高感度で, 470$\mu$mm 膜で 3%/mN（小変位域）を得た一方, 約 40 mN で飽和することを報告した. また, 提案されたモジュールは曲面への追従性があるが, 作成方法が多段階式で複雑である.

Ji ら [23] は，微細構造 PDMS を誘電体とする $8 \times 8$ 容量型触覚アレイを 4 パターン作製し, 0–10 N で感度を体系的に比較した (図 2.3-(f)). ピラミッド構造の誘電体かつ配置のピッチは 150$\mu$m が最適で, 0–1 N 域で感度 35.9%/N を示し, 1 N 超で飽和傾向がみられた. また, 提案した静電容量式触覚センサをロボット前腕に実装し, $\leq 10$ ms の触覚フィードバックにより障害物回避を実証しているが, やはり製造方法は複雑である.

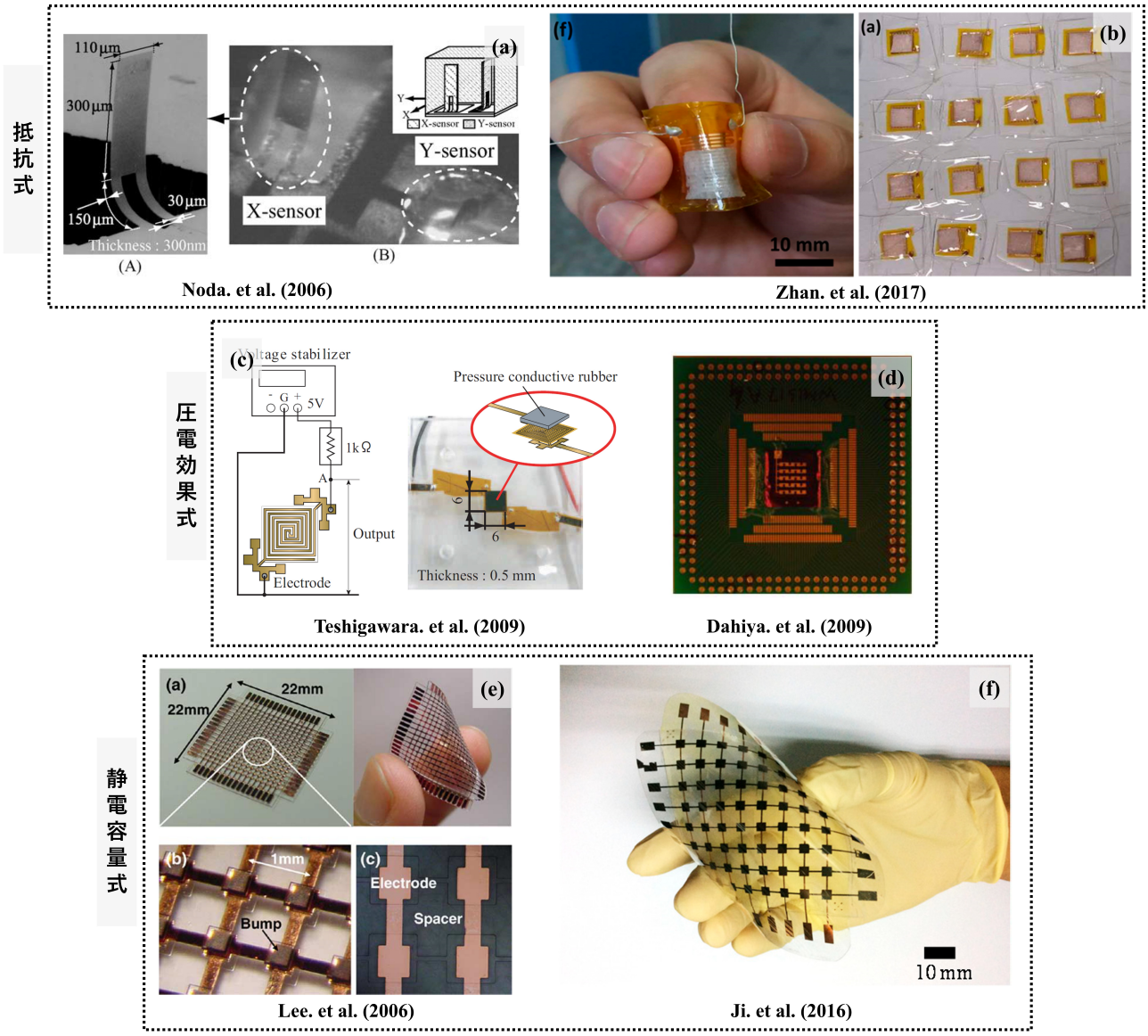



図 2.3: 電気的原理別の触覚センサ実例 (抵抗式/圧電式/静電容量式).
図は文献 [18] [19] [20] [21] [22] [23] より転載.

これらの他にも, これまでに多くの電気的現象を応用した触覚センサは多く報告されている [24]. 加えて, 従来のロボットフィンガーでは電気的現象を応用した触覚センサが採用されてきており, 積極的にヒ

トの指の構造 (爪, 骨, 柔軟なスキン) を模倣したロボットフィンガーの研究事例も報告されてきている.

Murakami ら [25] の研究では, 柔軟な皮膚と硬い爪構造およびアルミ製の円筒と半球を組み合わせた内部支持物を骨構造とするロボットフィンガーを提案している (図 2.4-(a)). 骨構造内部に 6 軸のフォーストルクセンサを固定して, 指先に加わる力とモーメントを計測し接触位置推定に使用し, 爪の固定部にはひずみゲージを用いて, 爪にのみ作用する力を計測できる. 指腹部で物体を約 2 N の力で押すと, 6 軸のフォーストルクセンサの測定から求める接触点の座標が, 実際の接触位置から 0.5 mm 以内に一致し, 爪構造の先端ではサブミリ段差 0.09 mm の検出を爪構造からひずみゲージへの力の伝搬によって可能としている.

Fishel ら [26] は, 従来のロボットフィンガーでは接触面近傍に脆弱なセンサ素子を配置している方式に対して, 堅牢性と感度の要請に応えるべく剛体コアにすべてのセンサ (ピエゾ抵抗式ブリッジ圧力センサ, 温度センサ) を収め, 外側を柔軟な皮膚で覆い, 両者の間を導電性・非圧縮性流体で満たして人の指腹に似た柔らかさを実現したロボットフィンガー (BioTac) を提案している (図 2.4-(b)). これを用いて, Fishel らは, マウスボタンのクリックとリリースのような微小な振動および, 0.422 mg のはんだ球 (直径 0.45 mm) による微小な落下衝撃が BioTac で 100 % 検出され, 人間の検出率は約 45 % であり, 人間を上回る振動感度を達成している.

Matsuno ら [27] は, ポリウレタン製の軟質ボディの中に, 薄いアルミ板 (厚さ約 100 $\mu$m) を芯材として埋設し, そのアルミ板の上にひずみゲージ (48 mm × 24 mm) を 3 枚貼り付けて配列化した構造 (爪構造) から構成されるロボットフィンガーを提案している (図 2.4-(c)). 動作原理は, 指表面で受けた接触力が軟質ボディ内で内部圧力となって芯材のアルミ板をたわませ, そのたわみ量がひずみゲージの抵抗変化として読み出されるというものである. これにより, 接触力の大きさとその分布を推定でき, 指先の大変形・高摩擦という利点を活かしつつ, 薄板 (CD ケースなど) の持ち上げのようなタスクを安定に制御できることを報告している.

Or ら [28] は, 人間指に近い連続曲率形状のスキンから成るロボットフィンガー (図 2.4-(d)) と「円柱」と「半球」を組み合わせた単純な形状スキンから成るロボットフィンガーにおいて, 接触面積の比較実験 (荷重と角度を変える) をおこない, Allegro Hand での物体操作評価をおこなった. 接触面積に関しては, 人間の指に近しいロボットフィンガーの方が単純形状のロボットフィンガーよりも一貫して大きくなった. これにより, Allegro Hand を用いた物体操作評価 (押し出しおよび) においても成功率が向上した報告がある.

Kim ら [29] は, ヒトの指先に近い曲率半径 7mm (図 2.4-(e)) を採用し, 薄型かつ柔軟な抵抗式のストリップ型分布力センサを内蔵し, 37 個のセンサ ($\varnothing$2mm) を用いて空間分解能 4mm のロボットフィンガーを提案している.

Xu ら [30] の研究では, 自己発電信号と多方向触覚センシングを実現するソフト磁気電気指 (SMF : Soft Magnetoelectric Finger) を提案している (図 2.4-(f)). SMF は, 5 本の液体金属 (Liquid Metal : LM) コイルを含む柔軟スキンで覆われた「指」と, 磁石を内蔵した「指骨」の 2 部で構成される. 外力により LM コイルを貫く磁束が変化し, 多様な誘導電圧がリアルタイムに生成・取得されることで, さまざまな方向の力を検出でき, ヤング率の異なる 6 種類の一般的物体 (スポンジ, 段ボール, 発泡スチロールなど) を 97.46% の精度で識別が可能であることを報告している.

Zhuowei ら [31] は, ひずみゲージとコンタクトマイクを統合することで, 指先は静的力と動的相互作用の双方を捉えるマルチモーダルセンシングを可能にするロボットフィンガーを提案している (図 2.4-(g)). ひずみゲージによる力推定は平均二乗誤差 (MSE) を 15 $\mathrm{N}^2$ を達成した. また, コンタクトマイクを用いた 7 個のサンプル (発泡プラスチック, 銅テープ, 粗い布など) のテクスチャの分類精度は 95.49% で分類可能と報告している. 他にも電気的な現象を利用した触覚センサをロボットフィンガーに応用した研究

事例は多く報告されている．しかし, これらの多くのロボットフィンガーは, 製造方法が複雑で作製難易度が高いことや, 実装する素子の数によって触覚の位置分解能が制限されること, 専用基盤を作製するなどのコスト的な課題が挙げられる．また, 内部配線が複雑になることでメンテナンスがしにくくなることや, シリコン内部にセンサが埋め込まれているものの間接的に荷重をセンサ本体が受けることによる堅牢性の懸念も課題として考えられる．

このように従来のロボットフィンガーには上述のような課題が存在したが, 近年カメラベースの触覚センサが, 先に挙げた課題を解決する触覚センサとして注目を集めている．次の節でカメラベースの触覚センサの構造やセンシング原理に関して, 先行研究を挙げて本研究の位置づけを明確に示す．

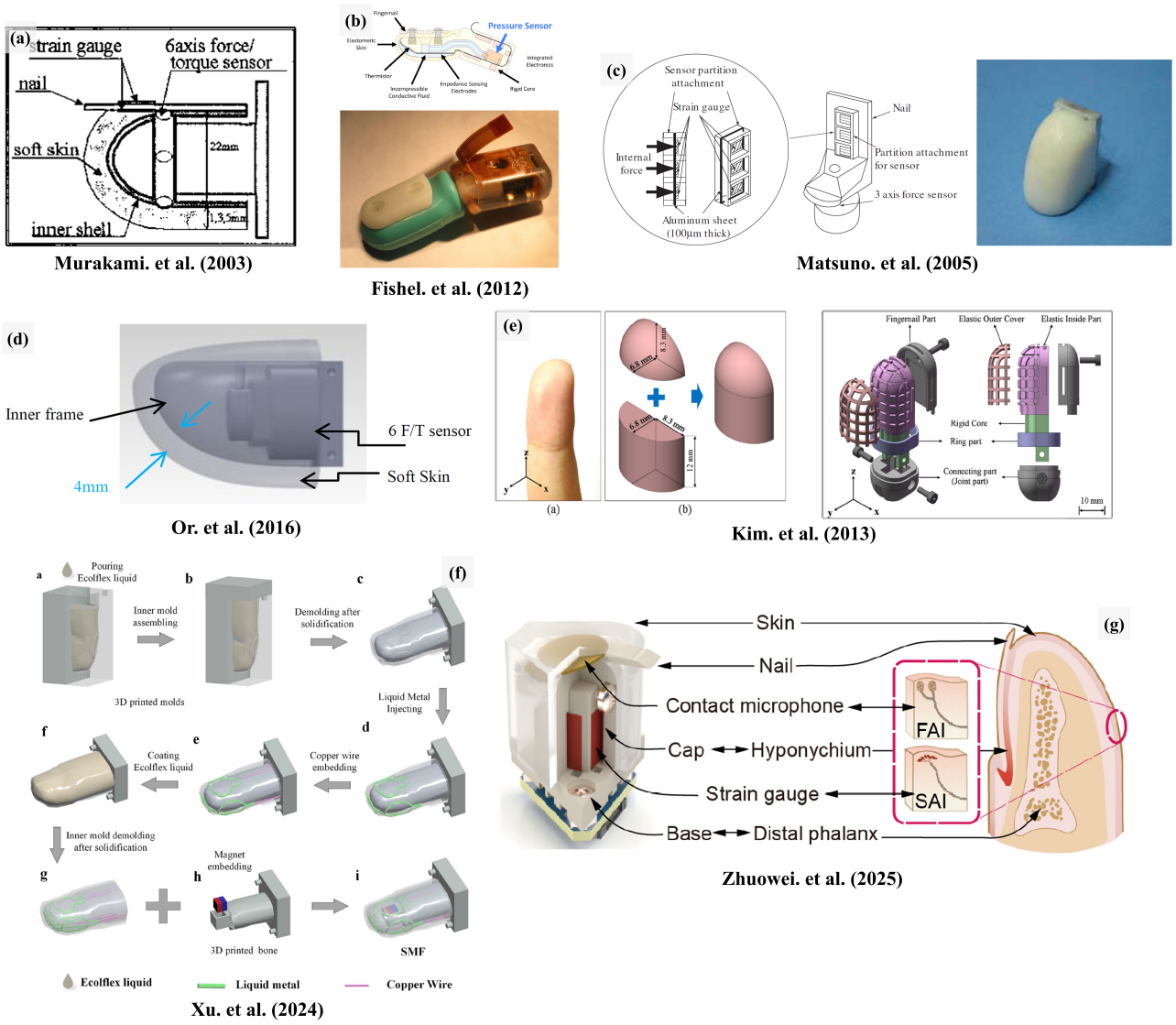



図 2.4: 人の指の構造を模倣した従来式ロボットフィンガー．
図は文献 [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] より転載．

## 2.4 Vision Based Tactile Sensor のセンシング原理とロボットフィンガーへの応用例

本章節は, カメラベース触覚センサの構成と検出原理に関する関連研究を体系的に整理し, 既存知見との関係ならびに本研究の独自性・貢献を示すことを目的とする. 特に, 本研究ではヒトの指の構造を模倣することによる, 多機能性の獲得を実証することにあるため, 既存の VBTS のセンサ構造 (外形, スキン形状) を整理する.

### 2.4.1 センシング原理に基づく VBTS の分類

VBTS は, センシングの原理に基づき, 大別してマーカベース方式 [32] と, 陰影 (フォトメトリック) ベース方式 [33] に分類される (図 2.5). 前者は弾性体内部に配置したマーカ (ピン等) の画素位置変位を追跡してスキン変形場を推定するのに対し, 後者は多方向照明と全反射条件の変化を利用して, 接触により生じる表面法線や接触形状の分布を輝度勾配として復元する. これら二方式は, 位置分解能・実装容易性・計算負荷・スキンの柔軟性・耐久性の観点で特性が異なり, アプリケーション要件に応じて選択される.

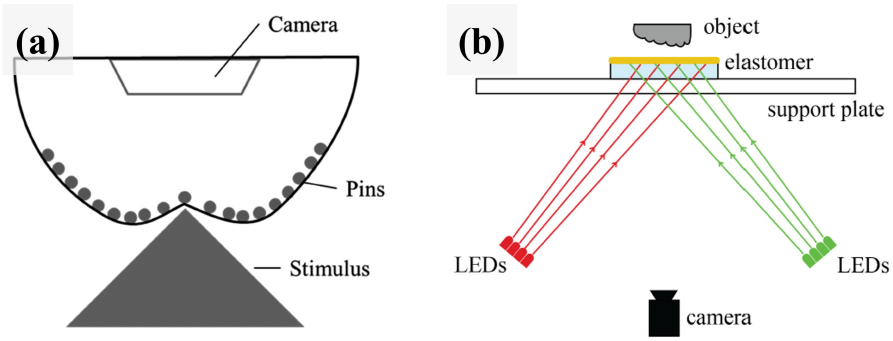



図 2.5: カメラベース触覚センサ (VBTS) の代表的なセンシング原理. (a) : マーカベース方式 [32], (b) : フォトメトリックベース方式 [33]

### 2.4.2 TacTip 方式のロボットフィンガー

TacTip とは, ピン構造の上部を白色に塗ったマーカが柔軟なスキンの内部に配置されており, 外部からの接触に応じてスキン内部のマーカ位置が変化し (図 2.5), その変化量をスキン内部に設置してあるカメラで撮影し, 画像情報をコンピュータで処理をすることでスキンにかかっている力の大きさや接触位置の同定が可能となるセンシング方式を取っているセンサである. このスキン内部にマーカを付与した方式のロボットフィンガーはこれまでに多数報告されてきており, 様々なユースケースも実験的に示されてきている.

Benjamin ら [34] は, GR2 グリッパというオープンソースな 2 指ロボットハンドのそれぞれの指に TacTip を統合した (図 2.6). マーカの動きのデータに基づくベイズ推定により, 円柱 ($\phi$20–35 mm) を 2 指で挟みながら目標軌道に沿って回転させて, 平均姿勢誤差 5° 未満の再配向を達成している.

Pastell ら [35] は, TacTip 系のフィンガチップを 3 指のロボットハンドに統合した (図 2.6). 触覚画像から得る接触位置と接触力を用いて指腹のロール・ピッチ角を推定し把持を調整することで, 把持対象の物体 (ルービックキューブ／円筒缶／ボトル) との接触面積が増え，接触力の重心が指腹中央に寄るという成果を報告している.

Alex ら [36] も同様に, 3 指ロボットハンドの各指先に TacTip 系の触覚センサを統合し (図 2.6), 触覚画像データを用いて, 3D-CNN(空間・時間情報) を学習し, 26 物体の分類で 93% の正解率および把持成功予測では 95% を達成している. Alex らの研究では, 既存の 3 指ロボットハンドの指先に TacTip 系の触

覚センサを統合するために, センサの小型化を設計指針の新規性の 1 つとして挙げている. しかし, Alex らのセンサにおいても, 扱っている物体は比較的大きめのもの (ボールやボトルなど) に限られている.

Nathan ら [37] は, DIGIT[38](後述する GelSight 同様の光学センサ) をベースに TacTip 型スキンを組み合わせた DigiTac を提案している (図 2.6). 触覚情報に基づく物体の面追従において, 提案している DigiTac および TacTip センサは曲面に対して滑らかに追従できた (追従誤差 0.6–1.2 mm) が, Digit に関してはセンサの構造およびスキンの摩擦特性の要因から安定した追従がおこなえなかったことを報告している. ただし, 著者らはそれぞれの触覚センサには長所短所があることを研究を通じて示唆している.

また, Lee ら [39] はこれまでの一様に規則正しく並んだマーカパターンは触覚情報取得に有利に働くが, センサ設計の自由度の制約になっていることを課題として挙げ, ランダムなマーカパターンの VBTS を試作し (図 2.6), 接触推定精度について報告している. 1 mm 刻みに動作可能な治具による評価の結果から, 相対誤差が $x = 2.508\%$, $y = 2.632\%$, $z = 4.99\%$ と報告している. センサ設計の自由度を今後変え得る独創的な研究と考える.

Fen ら [40] は, 透明スキンとピン構造のマーカを備えた, 視覚と触覚を 1 台で取得可能な ViTacTip を提案しており, GAN によるモダリティの切り替え (マーカ除去, マーカ強調) を可能としている (図 2.6). Lee や Fen らの研究は, スキンの設計を見直すことで設計自由度の向上や, マルチモーダルなセンシングへの貢献をしている.

これら以外にも多くのマーカ式のカメラベースの触覚センサは提案されてきており [41][42], マーカを柔軟なスキンに埋め込んだカメラベースの触覚センサも提案されてきている [43].

これらのマーカベースの触覚センサは, 比較的大きめの物体に対しては安定して把持および操作するための仕組み (アルゴリズムや設計) が積極的に研究されてきていると考える. しかし, 小物体の把持や物体操作に関してはマーカベースの触覚センサは研究事例が少ない. 一方, Gelsight 系の触覚センサでは近年, 小物体の把持や操作に関する研究報告がなされてきている.

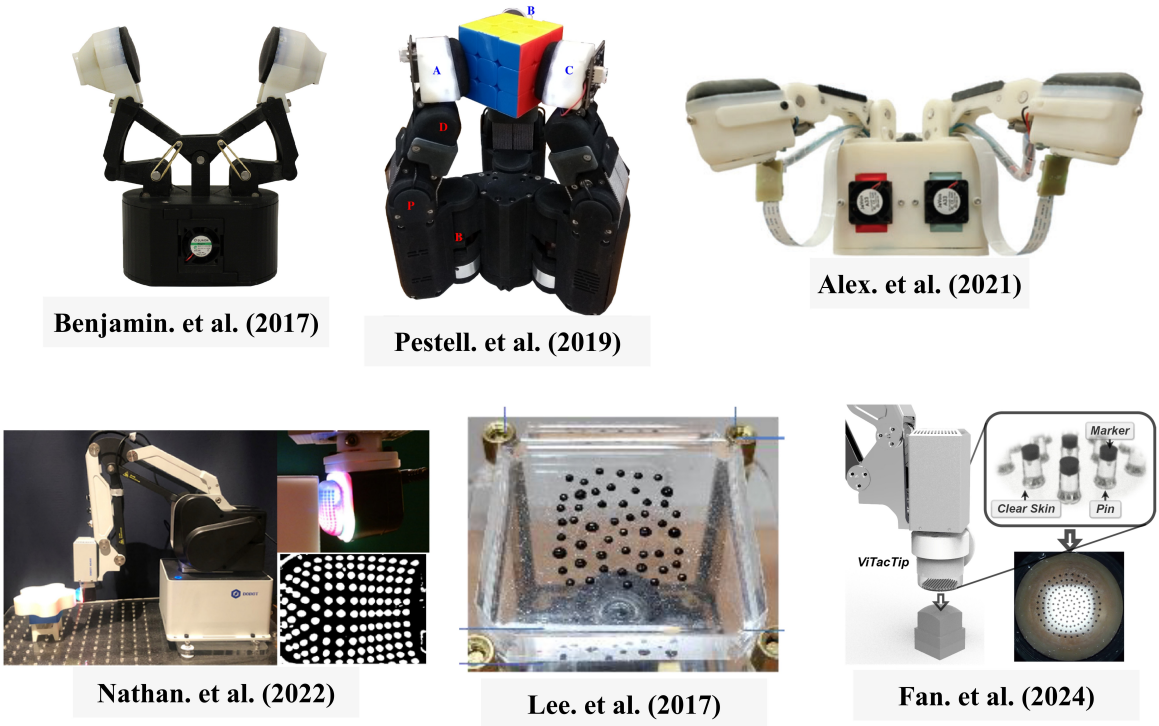



図 2.6: TacTip 方式のロボットフィンガーの例およびセンサ構造の改良に寄与する研究例. 図は文献 [34], [35], [36], [37], [39], [40] より転載.

### 2.4.3 GelSight 方式のロボットフィンガー

GelSight 方式のセンサは, 反射シリコン塗料と指向性の照明を用い, フォトメトリックステレオを適用して高解像度の 3D 接触幾何情報を取得することが可能な触覚センサである. ロボットは, これらの接触幾何情報や接触力の情報を様々なタスクに活用することが可能である. 幾何情報は, 材料識別や把持調整, 姿勢推定, 輪郭追従, ボール操作などに有効とされてきている. 接触幾何と力を組み合わせることで, 滑り検出や, 固さ計測, ケーブル操作なども可能となっている.

Wang ら [44] の研究では, Gelsight[33] のセンサ構造はロボットの指先への搭載には適していないことを指摘し, コンパクトで人間の指のように薄く細い形状の Gelsight Wedge という GelSight 式の触覚センサを提案している (図 2.7). センサ構造を小型化しつつ, 接触している物体の姿勢推定を可能としている. ただし, センシング面が平面であるため物体を回転させる動作時では, 接触領域が減少してしまう課題が残っていた. これに対して, センシング面をよりヒトの指の構造に近づけた Gelsight 式のセンサが提案されている. Romero ら [45] は, センサ形状を丸型 (指腹部のみ) へと改良し (図 2.7), 物体操作の巧緻性には指先の形状が重要であることを物体操作実験を通して述べている. Allegro Hand の 2 指 (親指と人差し指) を用いて, 様々な物体 (マウス, 球, ヨーヨーなど) を目標位置へ転がす実験をおこない 100 試行中 99 試行で所望の接触領域への制御転がしに成功している. 同様に Lin ら [46] は, ヒトの指に近い曲面を指先の腹部にもつカメラベースの触覚センサ GelFinger を提案している (図 2.7). GelFinger の内部カメラを機構制御 (回転) することで複数枚の画像を取得し, 15cm$^2$ の広域触覚画像を一度に取得することを可能としている.

一方, ロボットフィンガー全周において触覚センシングをおこなうことの重要性を確保するために, GelSight 系のセンサ原理を応用した新しい触覚センサも報告されている. Sun ら [47] は接触情報 (力と位置) と画像情報の学習により親指形状の全周面で方向性力マップを出力するソフト触覚センサ Insight を提案した (図 2.7). 位置 0.4 mm, 力 0.03 N, 方向 5° の精度を達成し，最大 5 領域までの同時接触について位置・法線力・せん断力を独立に推定できる. また, 筆者らはセンサスキンの内部に骨格構造を導入しており, これはスキン層の中央ではなく内面側に寄せると力感度が向上することや, 柔軟スキンにおける高荷重に対する局所性を保ちつつ高荷重に耐える役割があることを述べている.

同様に Azulay ら [48] は, ロボットフィンガーの全周におけるセンシングの重要性に着目し, 全周をセンシング可能で接触位置, 法線力, ねじりを含む接触状態を高精度に推定できる AllSight を提案している (図 2.7). 柔軟スキンの内部支持物に透明なシェル構造を用いており, 最大耐荷重 15N と Sun らの設計 (2N まで) よりも大きな力を計測可能としている. また, Azulay ら [48] は初めてゼロショットで使える全周センシング可能なカメラベースの触覚センサを提案している. このように, 従来のセンシングエリアの制約を設計から見直し, 内部支持物をスキン内部または下部に挿入することで耐荷重性を実現し, GelSight 式のセンシング原理を適用して触覚情報の取得を可能としてきている [49][50].

しかし, 依然として小さな物体操作に適したカメラベースの触覚センサについては報告数が少なく, 2024 年に小さな物体の操作タスクに着目した研究事例が報告され始めた. Won ら [51] は, 日常的な小物体の巧緻把持は, ロボットにとって依然として複雑な課題であると捉え, 人間の指先の感覚皮膚および硬い爪に着想を得て, カメラベースの触覚センサと外付けの爪構造を統合した DenseTact-Mini を提案している (図 2.7). この DenseTact-Mini は, 静電気力やファンデルワールス力などの付着力を用いるタップ把持, 滑り接触を利用する爪把持および 2 指の柔軟指腹部における物体把持の 3 手法について評価をおこない, 微小ナットや細長い物体に対する把持成功率が 90% を超えている.

また, Zhou ら [52] は, 複数指を備えたロボットハンドは精密で複雑な操作を実行できる一方で、その多自由度に由来する冗長性が制御の不要な複雑化を招くことを課題として, 2 指かつ 5DoF の GelSight 搭載のグリッパの設計を提案している (図 2.7). グリッパ先端部に爪構造を外付けで設置することで小物体へ

の適応性を高めている. 実際, 国際規格のクレジットカードサイズに近い $54 \times 85.5 \times 0.8\text{mm}(H \times W \times T)$ のすくい上げと挿入タスクで 100% の成功率を報告している.




図 2.7: GelSight 方式のロボットフィンガーの例. 図は文献 [44], [45], [46], [47], [48], [51], [52] より転載.

しかし, 外付けのハードウェアである爪構造は把持戦略時に考慮する余分な要素になることや, 従来の高解像度で触覚情報の取得が可能なカメラベースの触覚センサにおける, シンプルなセンサ構造を阻害してしまっていると考える. 一方, 人間の指先はこれらのような構造 [51] [52] を取っておらず, 爪構造, 骨構造, 柔軟なスキンからなる指先形状が最適化されており, 小さな物体操作を可能としている. これらを踏まえて, 本研究の位置づけを次に示す.

### 2.4.4 本研究の位置づけ

これまで盛んに研究が続けられてきたカメラベースの触覚センサには, 長所と短所がある. 例えば, GelSight 系のセンサは細かな物体のテクスチャのセンシングが可能で, マーカを付与することで力場のセンシングも可能となる. しかし, センシング面での摩擦力が強く摩耗しやすいことや, スキンが硬いものが多い.

一方, TacTip 系のセンサは GelSight 系のセンサに比べてセンシング面が柔軟かつ低摩擦であることから, 物体表面を滑らかになぞることも可能である. しかし, 細かな物体のテクスチャの認識は難しい.

また, TacTip 系と GelSight 系のセンサの研究の流れにも異なる点が見られる. 先に詳述したように, GelSight 系の触覚センサにおいては, センサ構造の改良の必要性に着目し多くの研究が報告されてきた.

しかし, マーカベースの触覚センサでは依然として, 単純な半球と円柱構造を組み合わせたセンサ構造や, センシングエリアが平面なセンサ構造が主であり, センサ構造の改良が GelSight 式ほど盛んにおこなわれてきていない. 加えて, マーカベースの触覚センサを応用した細かな物体操作に関する研究事例は少ない.

一方, 従来の電気系の素子を用いた触覚センサを応用したロボットフィンガーでは, フィンガーの形状に関してヒトの指の構造から積極的に着想を得た設計思想が組み込まれている. 実際, ヒトの指の構造は巧緻な物体操作を可能とする要素が多く組み込まれているため有用に働く.

そこで今一度, カメラベースの触覚センサにおいてもヒトの指の構造に着想を得た, センサ設計の思想を取り入れることの機能的優位性を本研究として実証したいと考える. では, GelSight 式と TacTip 式のどちらのセンシング原理を採用して研究を進めるのか. GelSight と TacTip は, いずれも内部照明されたスキンを撮像するという共通点がある一方, 作製難度・弾性・堅牢性・摩擦・接触特徴への感度が異なるため, 実運用での挙動は大きく異なる. 我々は, よりヒトの指の構造におけるスキンの柔らかさを追求する場合, TacTip 系のようにマーカベースのセンサ設計が適していると考える. また, GelSight 系のセンサ構築には複雑な光路設計を考慮する必要があるため, 設計難易度が TacTip 系よりも高くなる.

本研究の目的は, 身体生理学, 工学, 情報科学といった分野横断的な知見を有機的に統合し, それらをカメラベース触覚センサの設計と機能実現に反映させることで, カメラベース触覚センサを備えたロボットの巧緻な操作能力の向上に寄与することである.

### 2.4.5 論文構成

本論文の構成を以下に簡潔に示す. 第 3 章では, 本研究でおこなったそれぞれの実験において共通して用いている手法について詳細に示している. 具体的には, 統計検定の適用方法およびマーカの検出と追跡方法について示している. 第 4 章では, 本研究でプロトタイプと位置付けている w/wo-VBTS の作製方法や詳細寸法, 保持力の比較実験, 接触面積の比較実験, 平面接触時のマーカ変形量の比較実験の詳細について示している. 第 5 章では, 爪構造と骨構造を一体化してプロトタイプの w-VBTS よりも小型な NB-VBTS の作成方法や詳細寸法, 接触面積の比較実験, 微小突起検知実験, 薄い物体把持実験の詳細について示している. 第 6 章では, 全体の考察を述べ, 第 7 章では, 今後の課題を示す.

# 第 3 章

# 本研究における手法と貢献

この章では, 本研究で用いた平面への接触面積比較実験時の実験手順, 統計解析手法および, マーカ検出と追跡手法について示す. 本研究では, 図 3.1 に示す実験をおこなった. まず, プロトタイプ型として簡易的に爪構造を備えた “With-Nail VBTS (w-VBTS)” と爪構造を備えていない “Without-Nail VBTS (wo-VBTS)” を作成した. 作成方法およびセンサ構造については 4.1.2 に詳細に示す. この w/wo-VBTS を用いて, 保持力の比較実験, 接触面積比較実験, およびマーカ面積比較実験をおこなった.

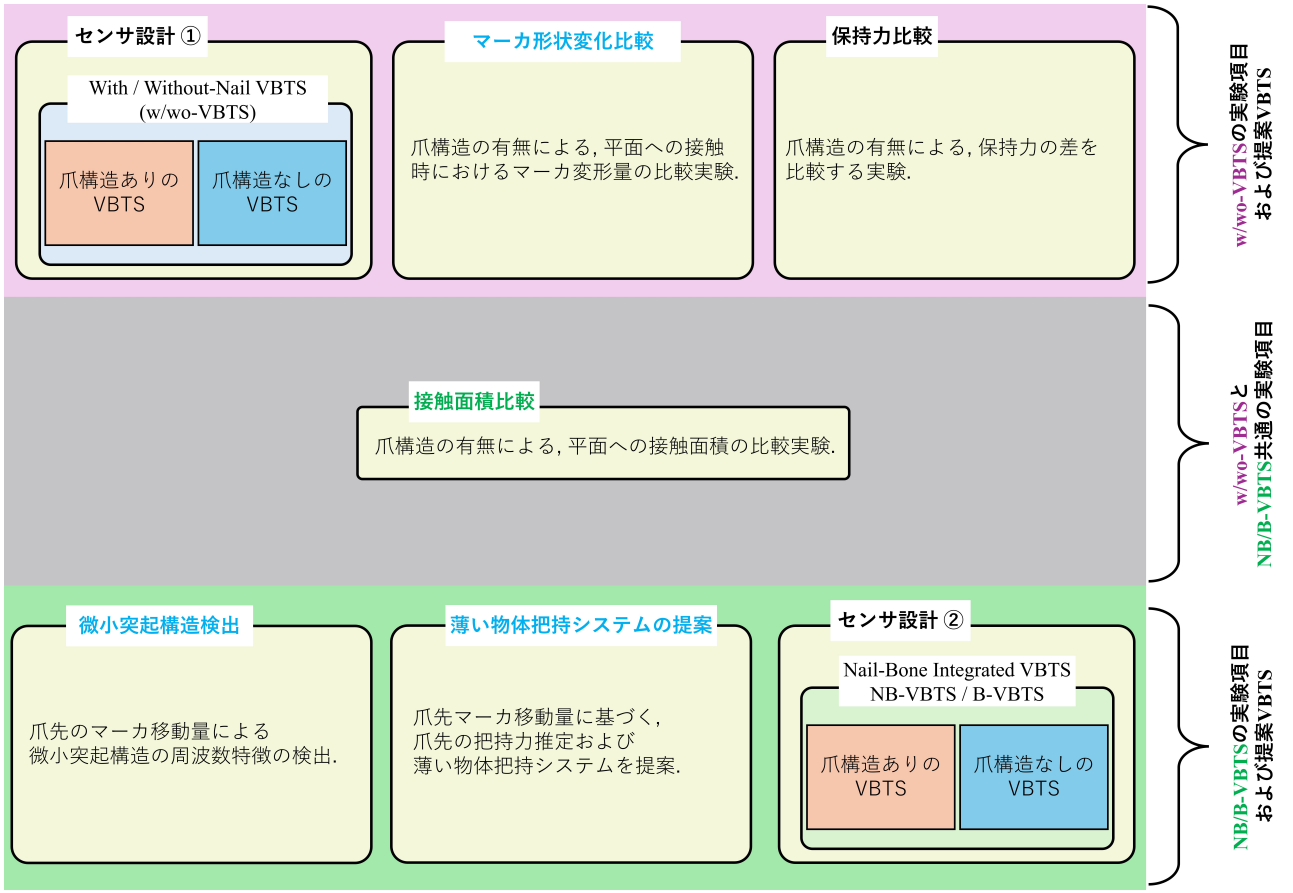



図 3.1: 本研究の検証内容の外観図

さらに, 爪先での物体操作やテクスチャを検知する機能性を検証するため, 爪構造と骨構造を一体化した, w/wo-VBTS よりも小型かつ, 爪構造による機能性を拡張した “Nail-Bone Integrated VBTS (NB-VBTS)” を作成した. 爪構造を備えていない VBTS を “Bone VBTS (B-VBTS)” として比較対象とした. NB/B-VBTS を用いて, 接触面積比較実験および本センサ特有の機能検証である “微小突起構造検出”, “

薄い物体把持” の実験をおこなった. ここで, 図 3.1 の接触面積比較は w/wo-VBTS および NB/B-VBTS で同様の手法で実験および解析をおこなった. また, マーカ面積変化比較, 微突起構造の検出, 薄い物体把持の実験は同様の手法でマーカの検出と追跡をおこなっている. このことから, 以降に接触面積比較実験の手法, マーカ検出と追跡手法について詳細に示す.

## 3.1 接触面積比較実験における事前測定

本研究では, 提案する VBTS と平面との接触面積の測定には図 3.2 に示す実験装置を用いた. 図 3.2 - (a) に示すように, 荷重試験機にフォースゲージを取り付ける. フォースゲージの先端に平らなアクリル板 (以降平面とする.) と小型カメラを備えた “Measurement Box (以降 MB とする)” を取り付ける. さらに, 接触面積の比較実験では平面と提案する VBTS との接触角度は図 3.2 - (a) の $\theta$ で示すように, 平面に対する垂直線と VBTS の中心軸とのなす角を接触角度と定義する. MB には透明なアクリル板を小型カメラ (ELP-USB8MP04AF-V72) が撮影できるようになっている (図 3.2 - (b)). 接触面積の比較実験の流れを図 3.3 に示す. 提案する VBTS の平面接触画像の取得のタイミングは, フォースゲージで得られる測定値が接触荷重閾値に達した時に取得することとした. 詳細な閾値情報に関しては, 4.2.2.1 と 5.2.2.1 で示す. また, 取得した接触面の画像を GNU Image Manipulation Program (GIMP) を用いて手動で測定しており, 3.1.1 で詳細な測定方法を示す. GIMP を用いて測定した接触面の値 (pix) を換算式を用いて $mm^2$ の単位に変換する. 換算式の導出過程について, 3.1.2 に示す. 単位を pix から $mm^2$ に変換する目的は, ピクセル単位よりも直感的に理解しやすいことと, 今後の研究に接触面積とマーカ変位量の関係から, 接触面積の推定をおこなうことを目的としている. 単位を $mm^2$ に換算した結果に対して, 平均と標準偏差によるデータの可視化および検定手法を適用した. 検定手法の選定方法については, 3.1.3 に示す.

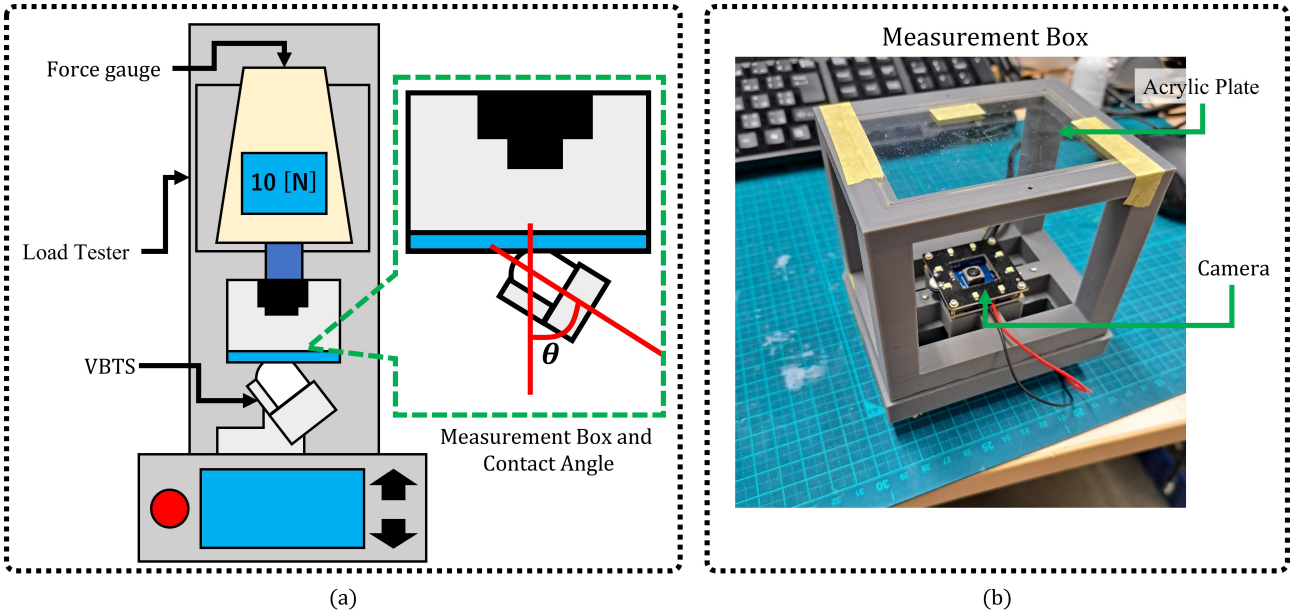



図 3.2: 本研究の VBTS と平面との接触面積測定環境. (a) : 接触面積測定環境の略図; (b) : 接触面積測定に用いる Measurement box.

### 3.1.1 接触面積の測定方法

MB で取得した w-VBTS と平面との接触面の例を図 3.4 に示す. w-VBTS と平面の接触面の箇所で色が異なっていることが見て取れる (図 3.4 - (a)). このような画像データを GIMP にインポートして, 接触

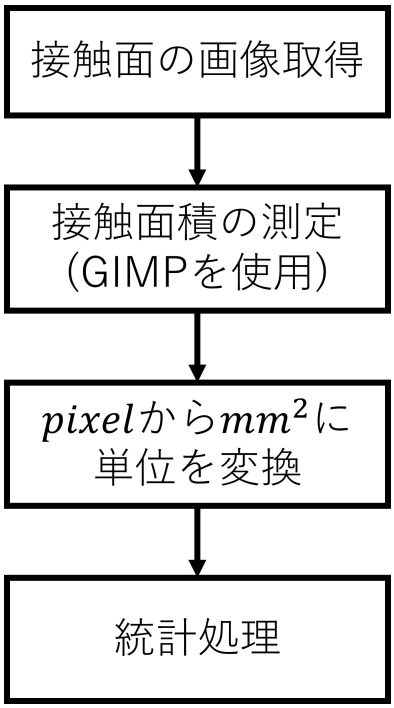



図 3.3: 接触面積比較実験の流れ.

面が視認しやすいようにコントラストを調整する (図 3.4 - (b)). 最後に, GIMP の自由選択機能で接触範囲を手動で選択することで, 選択範囲内の総ピクセル数が算出される (図 3.4 - (c)). このピクセル数を接触面積の測定値 pix として用いる.

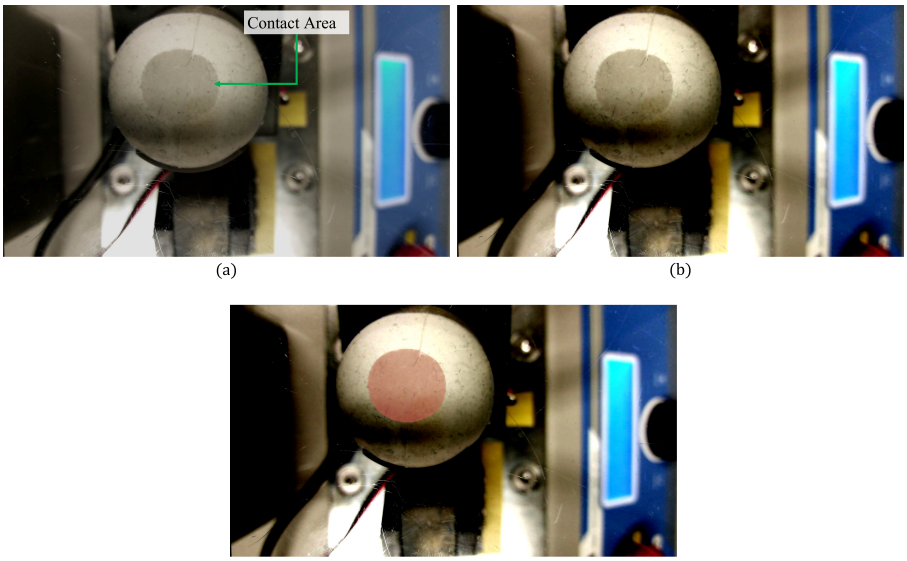



図 3.4: w-VBTS の接触面画像および解析経過の例. (a) : MB で取得した VBTS と平面の接触画像; (b) : コントラストを調整した結果画像; (c) : 接触範囲の選択

### 3.1.2 換算式の導出

ここでは, 3.1.1 で測定した接触面積 (pix) を $mm^2$ 単位 へと換算するための単位換算式の導出方法を示す. MB のアクリル板に図 3.5 に示すような矩形試験片 (20×30 mm) と半径 20mm の参照円を接触させ

表 3.1: 参照円による面積換算の結果

| **Circle** (r=20 mm / $\pi$=3.14159) | |
|---|---|
| Circle Area [mm$^2$] | 1256.636 |
| Measured Circle Area [pix] | 741,449 |
| Convert pix to mm$^2$ | 1257.375 |

て撮影する. 図 3.5 - (a) で示す円の面積値 ($mm^2$) を表 3.1 の 1 行目に, 3.1.1 で示した手法で測定した面積値 ($pix$) を 2 行目に示す.

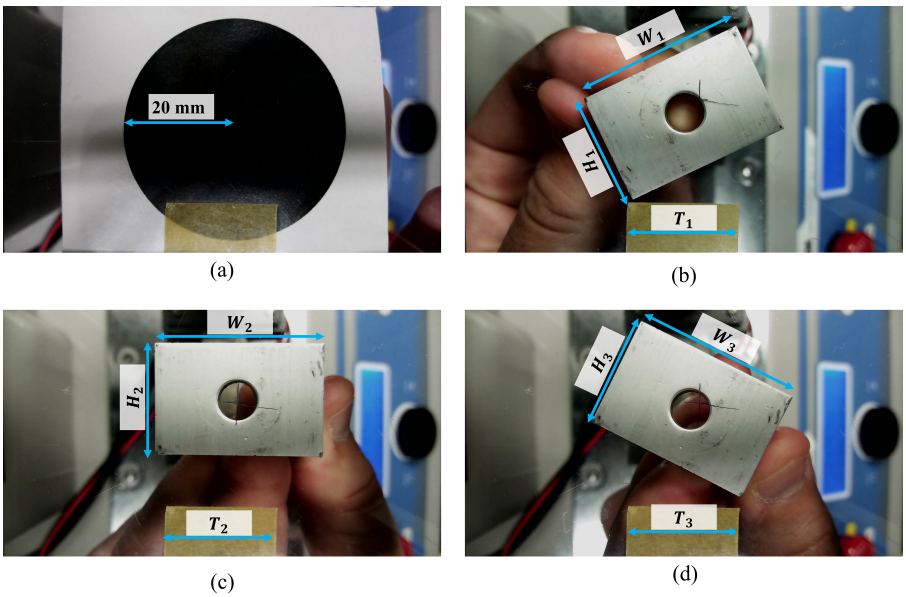



図 3.5: 接触面積 ($pix$) を ($mm^2$) に換算するために用いた基準画像. (a) : 半径 $20mm$ の参照円; (b) - (d) : 矩形試験片の各視点での幅 $W_i$, 高さ $H_i$, 幅 $20mm$ のテープ.

次に, 図 3.5 の (b) から (d) で示した, 矩形試験片 (20×30 mm) に対して, 3.1.1 で示した手法で測定した面積値および各辺の長さ (pix) を表 3.2 の 6 行目から 8 行目に示す. ただし, 表 3.2 の 1 行目から 5 行目までに示すのは, 試験片とテープそれぞれの長さ (図 3.5 内の W,H,T) および矩形試験片の面積の真値である. ここで, テープの実寸が 20mm であるのに対して, GIMP での測定長さの平均値 ($T_\mu$) は, 485.667 pix であった (表 3.2 - 5 行目). このことから, 1 pix あたりの長さ (mm) を式 3.1 より算出した. また, 1 pix あたりの面積値 mm$^2$ を式 3.2 より算出した. このことから, GIMP で取得した面積値 (pix) は換算式 3.3 によって mm 単位に換算する.

$$s_{\mathrm{mm/px}} = \frac{20}{T_\mu} \approx 0.04118 \quad [\mathrm{mm/px}] \tag{3.1}$$

$$A_{\mathrm{px}} = \left(s_{\mathrm{mm/px}}\right)^2 \approx 0.001695 \quad [\mathrm{mm}^2] \tag{3.2}$$

$$S_{\mathrm{mm^2}} = S_{\mathrm{pix}} \times A_{\mathrm{px}} \tag{3.3}$$

式 3.3 を表 3.1 の 2 行目の面積値 (pix) に適用した結果が, 表 3.1 の 3 行目に示す値で, 真値との誤差は -0.739 mm$^2$ であった. この結果を基に, 表 3.2 の 8 行目に示す面積値 (pix) を mm$^2$ 単位へ換算した結

表 3.2: Pixel–mm$^2$ 換算の検証（ブロック試験片と黄色テープ）

| No | Specimens/Tape | mm , pix | (b) | (c) | (d) | average | std |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Block | H [mm] | 20 | | | | |
| 2 | Specimens | W [mm] | 30 | | | | |
| 3 | (mm) | Area [mm$^2$] | 600 | | | | |
| 4 | Yellow Tape | Width [mm] | 20 | | | | |
| 5 | | Width [pix] | 486 | 486 | 485 | 485.667 | 0.4714 |
| 6 | Block | H [pix] | 488 | 487 | 488 | 487.667 | 0.4714 |
| 7 | Specimens | W [pix] | 735 | 742 | 740 | 739 | 2.943 |
| 8 | (pix) | Area [pix] | 363,479 | 364,660 | 361,292 | 363143.7 | 1395.276 |
| 9 | | Converted Area Unit pix to mm$^2$ | 616.400 | 618.402 | 612.691 | 615.831 | 2.366 |

果を表 3.2 の 9 行目に示す.

真値との誤差は平均で 15 mm$^2$ ほどであるが, この原因としては 3.1.1 で示した手法に起因する微小な測定誤差や, 式 3.1 の導出に用いた, テープの測定誤差 ($T_\mu$) が挙げられる. 一方で, 画素単位における面積値とメートル単位での面積値の大小関係は換算式 3.3 の適用では変わらないことや, 画素単位の面積比較だと実環境における接触面積の大きさを想定しにくいため, 本手法により接触面積の比較評価をおこなう.

### 3.1.3 接触面積の測定結果の解析方法

ここでは, 3.1.2 で取得した w-VBTS および wo-VBTS の接触面積 (mm$^2$) を比較するために統計検定を適用する. 以下に, その適用手順を示す.

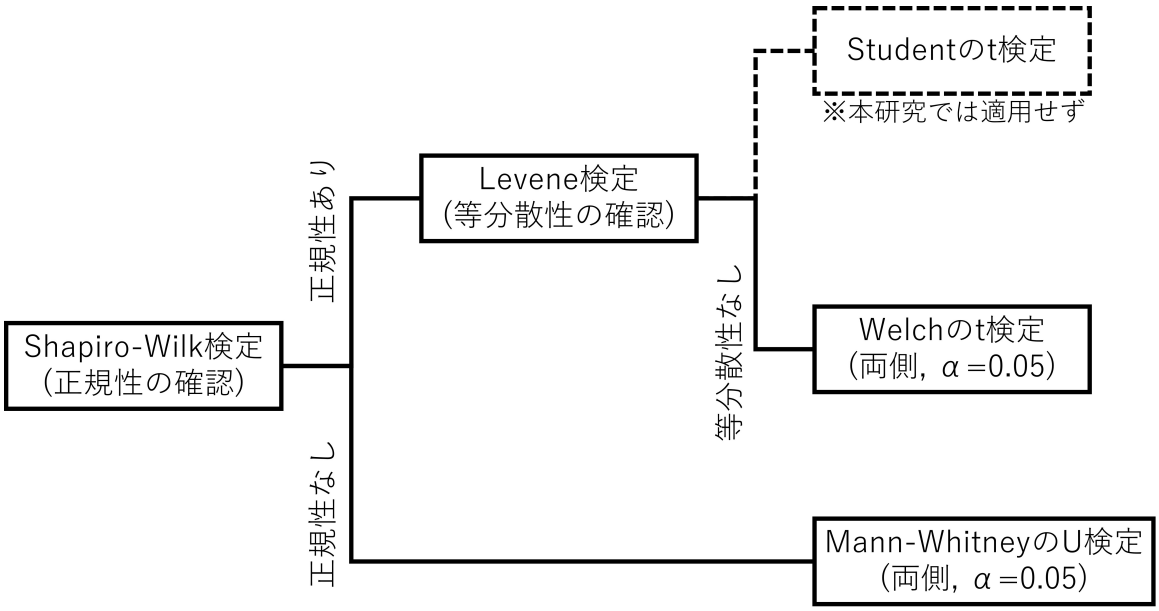



図 3.6: 各群ごとに Shapiro-Wilk で正規性を判定し, 正規性が満たされる比較には等分散性の評価を行わずに Welch の t 検定を適用した. 正規性が満たされない場合は Mann-Whitney の U 検定を用いた (両側, $\alpha = 0.05$)

本研究では, 爪構造の多機能性の一指標として接触面積の増加を評価対象としている. MB に対して接触角度および接触荷重を複数条件で試行して取得した接触面積値に対して, 各条件ごとに図 3.6 の検定フローに従って解析をおこなう. 具体的には, まず正規性 (Shapiro-Wilk 検定) および等分散性 (Levene) を確認する. ただし, 比較検定については等分散性の有無にかかわらず Welch の t 検定を採用する. 以下に, それぞれの検定における帰無仮説 (H0) を示す (例として w/wo-VBTS を取り上げる).

- **Shapiro–Wilk 検定**

  H0: 各条件・各群 (w-VBTS, wo-VBTS) の接触面積値のデータは正規分布に従う.
  各条件において w-VBTS および wo-VBTS のデータに対し Shapiro-Wilk 検定 ($\alpha = 0.05$) を実施し, “正規性の有無 (H0: データが正規分布に従う)” を評価した.

- **Levene 検定**

  H0: 同一条件下の w-VBTS と wo-VBTS の接触面積値の母分散は等しい.
  両群が正規分布に従っている比較については, 更に Levene 検定により “等分散性の有無 (H0: 母分散は等しい)” を評価することがある. しかし, 本研究では, 2 群比較における分散の不等性に対して頑健であり, 等分散下でも検出力低下が小さいという性質から, 正規性満たされる比較においては等分散性の事前検定をおこなわず, 既定で Welch の t 検定 (両側, $\alpha = 0.05$) を適用した. 理由は, 事前の等分散性の検定 (Levene 検定) による分岐は, 標本数が少数の場合不安定となり, 最終的な検定選択に起因する誤り率の揺らぎや解釈の複雑化を招く可能性があるためである.

- **Welch の t 検定**

  H0: 同一条件下の w-VBTS と wo-VBTS の接触面積値の母平均は等しい.
  Shapiro-Wilk 検定で正規性が確認された比較に対しては Welch の t 検定 (両側, $\alpha = 0.05$) を適用し, 平均の等しさを検定した.

- **Mann-Whitney の U 検定**

  H0: 同一条件下の w-VBTS と wo-VBTS の接触面積値の確率分布が等しい.
  Shapiro-Wilk 検定で正規性が棄却された比較については Mann-Whitney の U 検定 (両側, $\alpha = 0.05$) を用いて, 確率的優越の検定をおこなった.

最後に, 多条件の二群比較における家族内誤り率 (FWER) を制御するため, Bonferroni 補正を適用した. w-VBTS と wo-VBTS の比較は角度 (20°–60°) ×荷重 (1–4 N) の 20 比較を 1 ファミリーと定義し, $\alpha^* = 0.05/20 = 0.0025$ を最終判定のしきい値とした. NB-VBTS と B-VBTS の比較は角度 (50°–70°) × 材料 (Ecoflex 50, Ecoflex 10, Gel, Solaris+Slacker) の 12 比較を 1 ファミリーと定義し, $\alpha^* = 0.05/12 = 0.004167$ を最終判定の閾値とした. 検定は正規性が満たされる場合は, Welch の t 検定, 満たされない場合は Mann-Whitney の U 検定 (いずれも両側) を用い, 得られた p 値を $\alpha^*$ と比較して有意性を判定した.

## 3.2 マーカトラッキング手法

ここでは, これまで報告されてきている VBTS の内, マーカ検出および追跡方法について言及している論文をいくつか引用しながら, 従来の VBTS におけるマーカ検出と追跡手法を取り上げる. 特に, 引用する VBTS を 3 つのグループ (FingerVision 系, TacTip 系, GelSight/GelSlim 系) に分けて, それぞれにお

けるマーカ検出および追跡方法について比較する. これにより, 後述の本研究が提案するセンサにおけるマーカ検出・追跡方法の提案背景への理解を助けるものとする. 本研究では, 提案する VBTS のマーカの検出と追跡に YOLOv8 を使用しており, 詳細な検出・追跡手法については 3.2.4 と 3.2.5 で説明する.

### 3.2.1 先行研究におけるマーカ検出・追跡手法について

ここでは, 従来の VBTS を 3 つのグループに分けて, それぞれの先行研究でマーカの検出および追跡について詳細に言及している研究を用いて従来手法として示す. 以下に代表的なマーカベースの VBTS におけるマーカ検出および追跡手法に関して示す.

- **FingerVision 系におけるマーカ検出と追跡**

  FingerVision 系では, OpenCV の SimpleBlobDetector でマーカ検出およびフレーム間でのマッチング処理による追跡をおこなっている.
  Yamaguchi ら [53] は, 透明で柔軟なスキン内部にマーカ (直径 1mm の黒色マイクロプラスチックビーズ) を埋め込むことで, スキン表面のマーカ変位に基づく接触力場推定と近傍もしくは把持物体の視覚情報をカメラ情報から取得することが可能なセンサ (FingerVision) を提案しており, マーカの検出に OpenCV の SimpleBlobDetector を用いている. Yang ら [54] は, センシング面に多層構造 (3 層のシリコン層とアクリル板) を採用することで FingerVision を生体模倣的に拡張し, マーカ変位量から接触面を再構成し, その情報をもとに押し付けた物体により生じる表面の変形分類を高精度に実現している. マーカの検出に Yamaguchi ら [53] と同様に OpenCV の SimpleBlobDetector を適用しつつ, Cyclic Detection Method というマーカ検出の堅牢性を高める独自の手法を提案している. Cyclic Detection Method は既知のマーカ総数 (121 個) に達するまで, SimpleBlobDetector 内の閾値を多段的に変更し, 閾値調整でも検出できなかったマーカについては, 線形補間により欠落フレーム内のマーカ推定をおこなう手法である. また, 追跡は初期位置と現在のフレームにおける各マーカの変位ベクトルを算出している. Boris ら [55] は, OpenCV の SimpleBlobDetector で球状マーカの (x,y, サイズ) を取得し, 各マーカにカルマンフィルタをかけてフレーム間対応を安定化し, 変位ベクトルを高精度に算出している.

  このことから, FingerVision 系では, 透明なシリコン内部に埋め込まれた大きさ不変のマーカビーズに対して, OpenCV の SimpleBlobDetector の適用と追加の追跡手法によって, マーカの検出と追跡を実現している (図 3.7).

- **TacTip 系におけるマーカ検出と追跡**

  TacTip 系では, OpenCV を用いた色フィルタおよび輪郭抽出によるマーカ検出とフレーム間でのマッチング処理による追跡をおこなっている.
  Benjamin ら [34] [56] は, Yale 大学の OpenHand プロジェクトで公開されている Model M2 および GR2 グリッパー に統合した TacTip 式の触覚センサをそれぞれ提案しており, センサ内蔵のカメラはスキン内部画像を 20fps で取得し, OpenCV を用いてフィルタ処理と二値化処理後に輪郭検出を適用することでマーカピンの中心座標を抽出している. また, 前フレームにおけるピン集合に対する最短距離 (近傍) 割り当でそれぞれのピン ID を維持している. ただし, 所定半径内に対応するピン ID が見つからない場合は, 前フレーム位置で補間することで欠測と ID の入れ替わりを防止している. 同様の手法は, 他の TacTip を用いた研究におけるマーカ検出と追跡にも適用されている [57][58]. これは TacTip 系のセンサにおいては背景色が黒色 (スキンの色), マーカ部が白色かつピン構造なため大

きさがほとんど不変かつ, もともと二値画像に近い画像取得が可能なことから, 基本的な画像処理の適用とフレーム間補正で安定したマーカの検出と追跡が可能であると考えられる (図 3.7).

- **GelSight/GelSlim 系におけるマーカ検出と追跡**

  GelSight 系では, Blob 検出とフレーム間でのマッチング処理により追跡をおこなっている.
  Ian ら [59] は, 小型で堅牢かつ製作がこれまで複雑であった GelSight の製作課題を克服しつつ, 接触面の深度再構成 (既知の球面形状の再構成など) および剪断力, 初期滑りの検知に対してマーカを用いることで可能としている. 特に VBTS のセンサにおける剪断力と初期滑りの検知はマーカに帰属する機能である. その中で, マーカの検出と追跡方法については, 内蔵のカメラでスキン内部のマーカ画像を取得し, まず二値マスク画像を生成している. このマスク画像を用いて, マーカ画像から背景を分離し, 各マーカの中心座標を検出している. また, マーカのフレーム間移動ベクトルを追跡することで剪断力と初期滑りへの検知へ応用している. さらに, Achu ら [60] は, 2 指の内面 (各関節 2 個) に複数の GelSight とマイク, 3 軸加速度計, 赤外線センサ (IR センサ) を統合したロボットハンドを提案している. これにより, GelSight センサによる力場の計測, 2 指によるドライバーツールのロール制御, マイクで取得した音響データに基づくテクスチャ判別, IR センサによる熱感知というマルチモーダルなセンシングを可能としている. その中で, GelSight のスキン内面にレーザー加工で刻印されたマーカのカメラによる検出方法は RGB 画像に色フィルタを適用することでブロブ検出をおこない, マーカの重心を算出している. 追跡に関しては, 枝刈り付き深さ優先探索 (Depth First Search) を適用しマーカの欠落や過剰検出された場合は, どれが誤検出か推定し補間している (図 3.7).

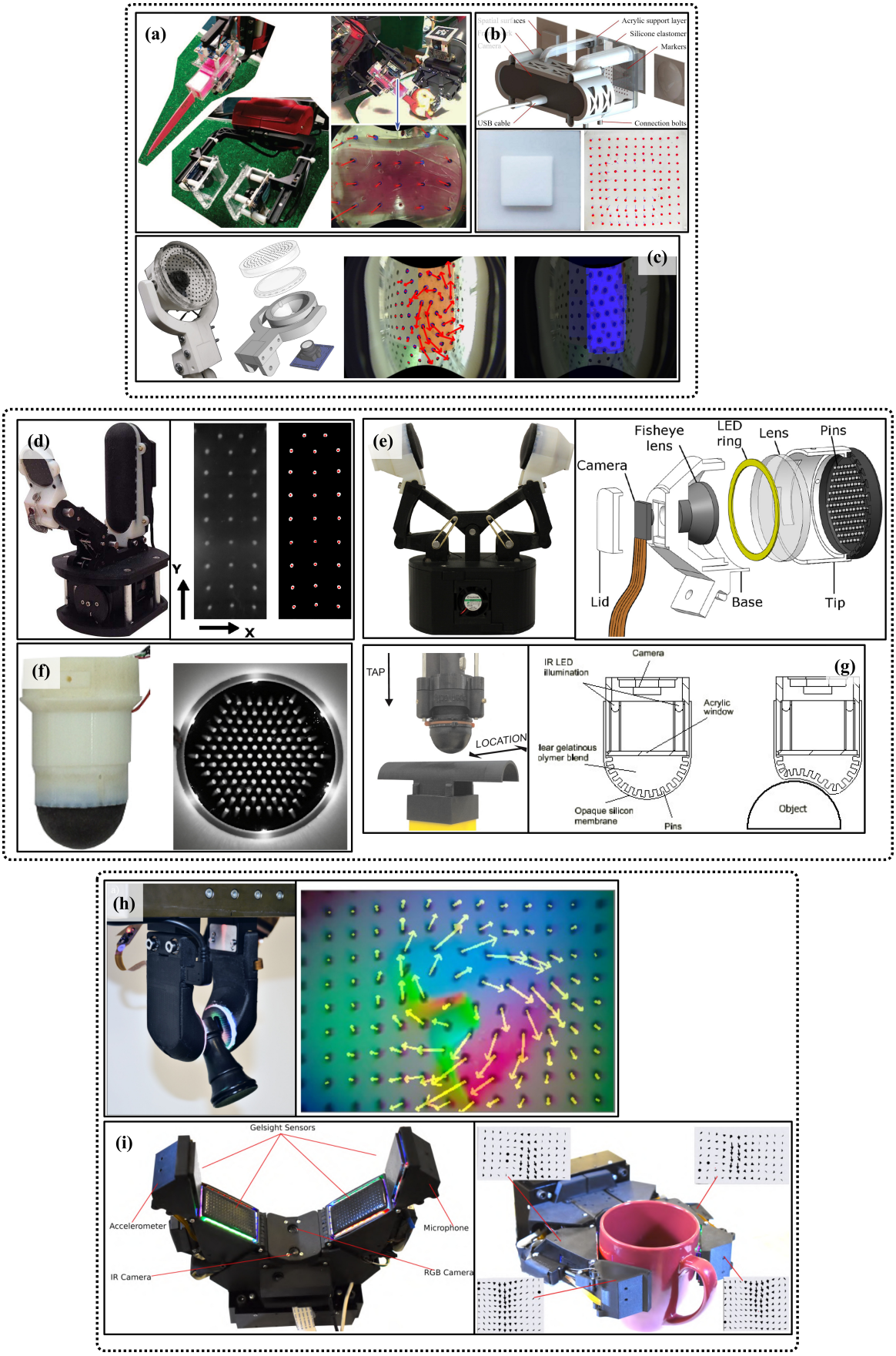



図 3.7: マーカベースの VBTS の例. (a) : Yamaguchi ら [53] の研究, (b) : Yang ら [54] の研究, (c) : Boris ら [55] の研究, (d), (e) : Benjamin ら [56] [34] の研究, (f), (g) : Nathan ら [57][58] の研究, (h) : Ian ら [59] の研究, (i) : Achu ら [60] の研究.

### 3.2.2　学習ベースのマーカ検出・追跡手法について

3.2.1 で代表的な色変換とフレーム間のマッチング処理に基づくマーカの検出と追跡方法について示したが, Liu ら [61] は学習ベースの手法“Marknet-MRE (Marker Rationality Evaluator)” を適用することでリアルタイム性を維持したマーカの検出方法を提案している (図 3.8). 主な処理内容は画像を $S \times S$

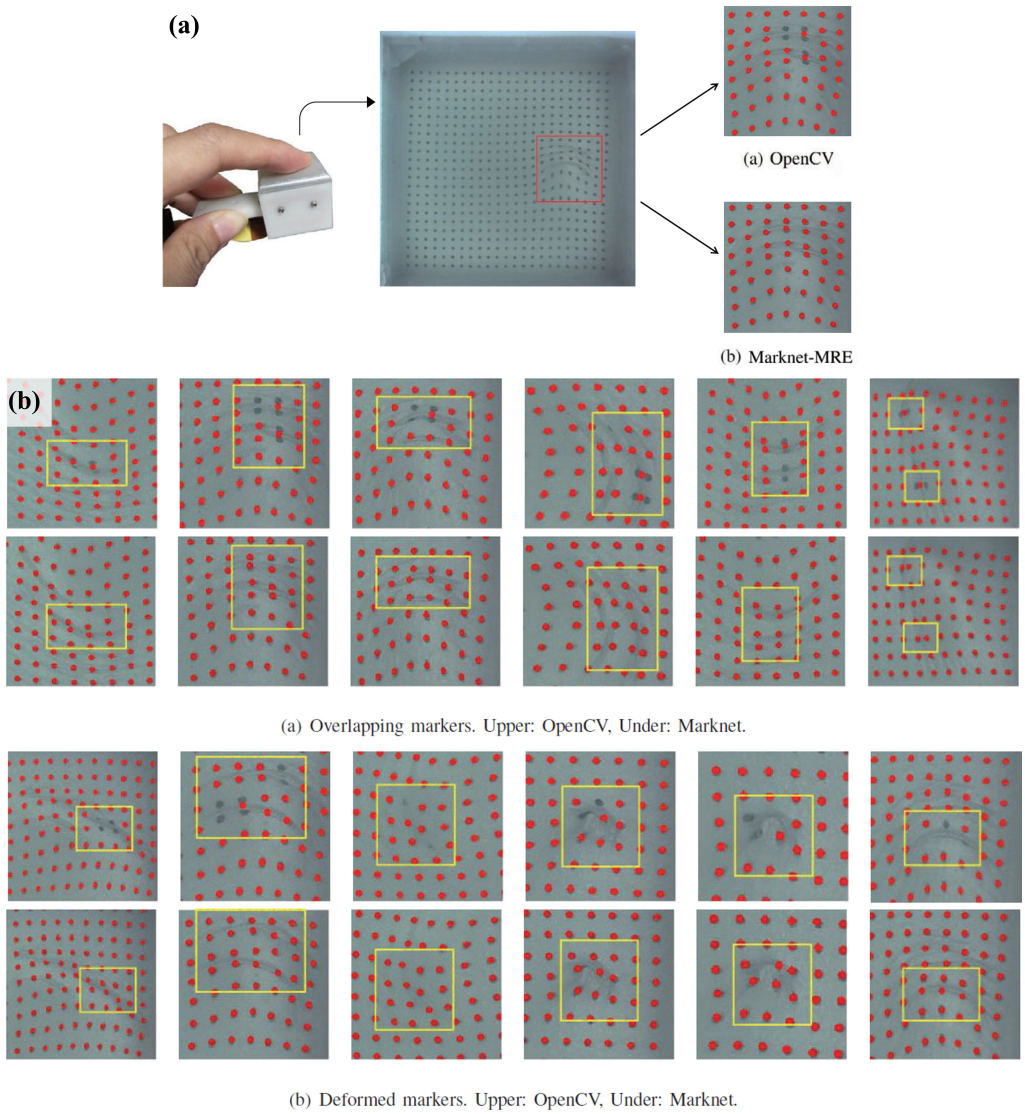



図 3.8: 学習ベースの手法によるマーカ検出の例. (a): Blob 検出手法と Marknet-MRE による検出の比較, (b): マーカ同士の重なりとマーカの大変形が生じている時の各手法の検出比較図

グリッドに分割し, 各グリッドで $m$ 個の候補点の座標と信頼度を回帰している. この提案手法は, 既存の OpenCV の Blob 検出手法および YOLOv3 (アンカーサイズ調整済み) と比較実験を行い, マーカの検出精度 (precision/recall) と損失 (loss) で評価された. その結果, Hard セットと位置付けているマーカの大変形や重なり等がある難しい例では, OpenCV による検出が 51.58% / 18.08%, YOLOv3 による検出が 75.96% / 51.29% に対して Liu らの Marknet は 93.85% / 67.53% の精度を報告している. このように学習ベースの手法はスキンの大変形が生じたり, マーカ同士の重なりが発生しうる際には有効な手法であることがうかがえる. また, Liu ら [61] の報告では YOLOv3 を比較手法として用いられていた. YOLOv3 はアンカーベースの手法を採用していることから, 検出対象のオブジェクトのスケールやアスペクト比の事前設計にズレがあると誤検出, 未検出が生じることが懸念される. 一方, YOLOv8 [62] は

Ultralytics 社によって 2023 年 1 月に公開された YOLO シリーズの 1 つであり, アーキテクチャ改良とアンカーフリー化により汎用性と性能を高め, 小さな物体に関しても検出が可能となっている [63].

### 3.2.3 本研究におけるマーカ検出・追跡方法

本研究で提案する VBTS の内部カメラにより取得される画像の例を図 3.9 に示す. まず, 図 3.9 - (a) に示す VBTS において色フィルタによるマーカ検出を試みた. w-VBTS, wo-VBTS のスキンは先行研究と異なり完全透明でないことやマーカの位置によって内部 LED 光が透明な骨構造に反射することで, マーカと光の反射の重なりや, VBTS の作製における誤差 (組付けやスキンの色味の調合差), それぞれのマーカの色味が若干異なることにより, 毎回色フィルタのパラメータを調整する必要があることに加えて, マスク処理をする対象領域もセンサの組み立て誤差によって異なってくる. このことから, 各種実験を通して単一の色フィルタによるマーカ検出方法は多くの実験過程における作業負担のことから適切な手法ではないと考えた. また, NB-VBTS ではより顕著に内部光の照射量が場所によって異なり (図 3.9 - (b)),

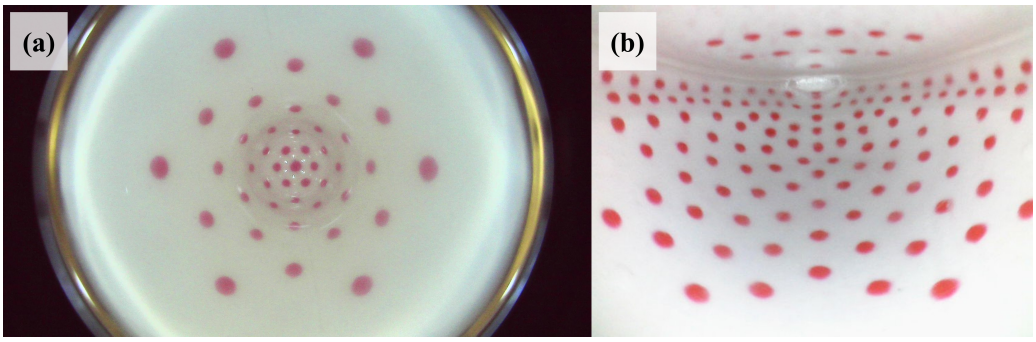



図 3.9: 提案する VBTS のマーカ内部カメラ画像の例. (a) : w/wo-VBTS の内部カメラ画像, (b) : NB-VBTS の内部カメラ画像.

NB/B-VBTS の作製における誤差によってセンサごとに HSV 色空間のパラメータの調整だけではマーカの検出が困難であった (図 3.10). そこで, 本研究では学習ベースでマーカを安定して検出することを目的として, YOLOv8 を用いることにした. 以降の 3.2.4 と 3.2.5 に本研究で提案する 2 種類の VBTS それぞれにおけるマーカ検出および追跡方法について示す.

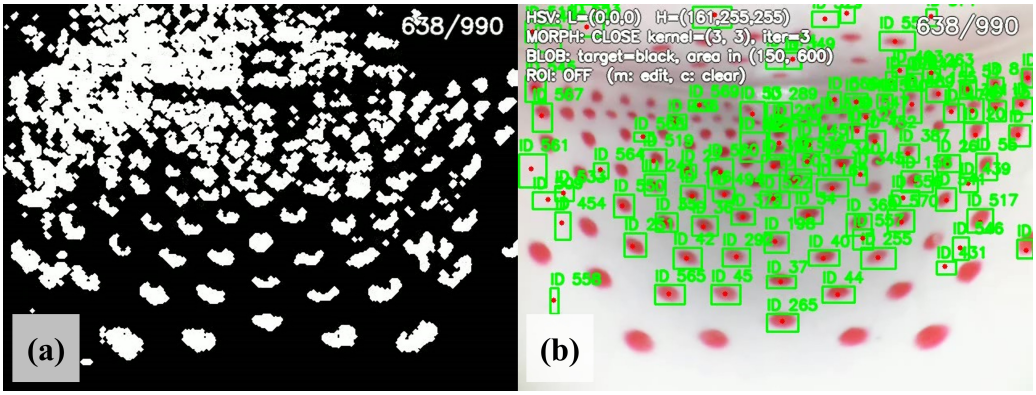



図 3.10: NB-VBTS における色フィルタによるマーカ検出失敗例. (a) : 色フィルタ→バイナリ処理→ノイズ除去, (b) : Blob 検出結果.

### 3.2.4 w/wo-VBTS におけるマーカ検出・追跡方法

本研究では, マーカの検出と追跡のために, 事前学習済み YOLOv8n をファインチューニングして用いる. YOLOv8n の「n」は, 「nano」の略称であり, パラメータ数・計算量が最小な小規模なモデルとなっている. 学習の設定は, 初期重みを yolov8n.pt[62], 入力画像サイズを $640 \times 640$, バッチサイズを 16, エポック数を 200, 初期学習率を 0.01 とした. また, 学習データとして, 図 3.11 に示すような非接触および接触状態の画像データを取得するために, センサの柔軟なスキンの表面を指圧しながら動画を撮影して, その動画からランダムにフレームを抽出してアノテーション画像として用いた. アノテーション済み画像は，訓練用 68 枚・評価用 17 枚の計 85 枚である. 本研究では, YOLO 形式に対応したグラフィカルな画像アノテーションツールである LabelImg[64] を使用した. ただし, 後述する NB/B-VBTS のアノテーションツールは Roboflow Annotate（Roboflow, Inc.）[65] を用いている. アノテーション済み画像

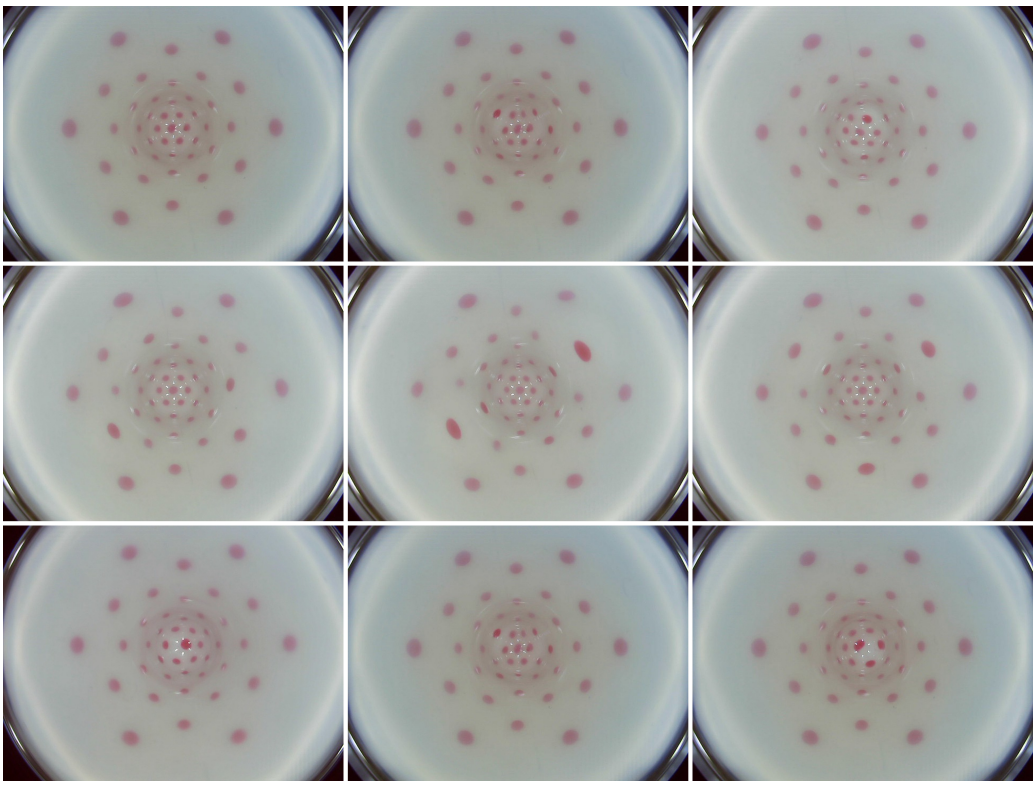


図 3.11: アノテーションに使用した画像の例.

データに水平方向・垂直方向の画像幾何変換やノイズ付与によるデータ拡張 (data augmentation) を施した (図 3.12). データ拡張適用後は, 訓練用 10,465 枚と評価用 2,617 枚の計 13,082 枚となった. 拡張後のデータセットを用い, 事前学習重み yolov8n.pt を初期値としてファインチューニングした. その結果を図 3.13 に示す. すべての損失は単調に減少し 60–80 エポック付近で収束, precision と recall は 0.99 付近, mAP50 は約 0.99，mAP50–95 は約 0.80 に到達している. また, 学習 - 検証間の乖離が小さく, 顕著な過学習は見られない.

次に, 本研究で提案する w/wo-VBTS におけるマーカ検出と追跡の流れは図 3.14 に示す処理によっておこなう. 最初に, マーカそれぞれに対する初期 ID の割り当てをおこなう. w/wo-VBTS 内部カメラの動画フレームを取り出し, 初期フレームを非接触画像として定義する. 学習済み YOLOv8n モデルを用いてそのフレーム内のマーカを検出する (図 3.14-(b)). 検出された各マーカのバウンディングボックスは, 左上座標 $(x_1^{(i)}, y_1^{(i)})$ と右下座標 $(x_2^{(i)}, y_2^{(i)})$ で与えられる (図 3.14-(c)). マーカ中心座標 $(x_c^{(i)}, y_c^{(i)})$

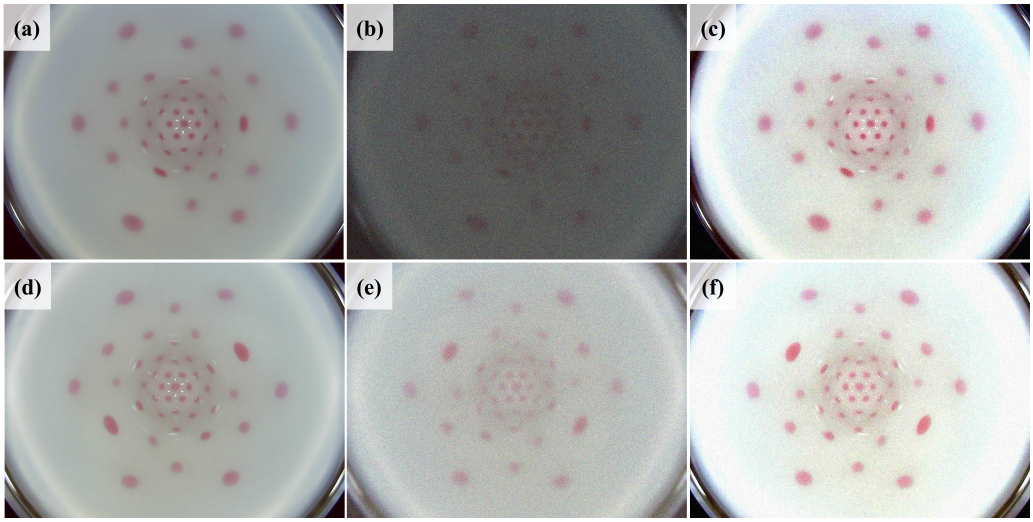



図 3.12: 元画像とノイズ付与と幾何変換後の例. (a)：元画像, (b)-(c)：ノイズ付与結果の例, (d)：元画像, (e)-(f)：幾何変換とノイズ付与結果の例.

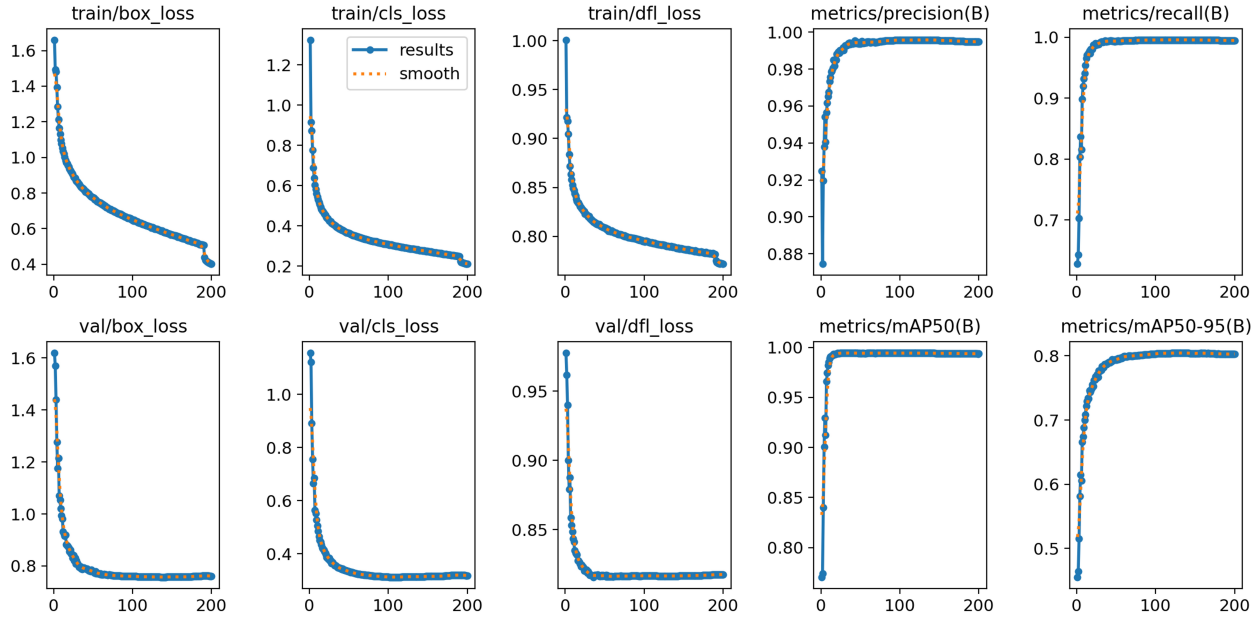



図 3.13: YOLOv8n の学習推移（200 エポック）．上段：学習損失（`train/box_loss`, `train/cls_loss`, `train/dfl_loss`），下段：検証損失と検証指標（`val/box_loss`, `val/cls_loss`, `val/dfl_loss`, precision(B), recall(B), mAP50(B), mAP50–95(B)）．実線は各エポック値，破線は平滑化曲線.

は式 (3.4) で定義する．ここで $i \in \{0, 1, \ldots, 42\}$ はマーカ番号を表す.

$$x_c^{(i)} = \frac{x_1^{(i)} + x_2^{(i)}}{2}, \qquad y_c^{(i)} = \frac{y_1^{(i)} + y_2^{(i)}}{2}. \tag{3.4}$$

読み込んだフレームの中心座標は，フレームの幅 $(W)$ と高さ $(H)$ に基づき式 (3.5) で算出する.

$$x_0 = \frac{W}{2}, \quad y_0 = \frac{H}{2}. \tag{3.5}$$

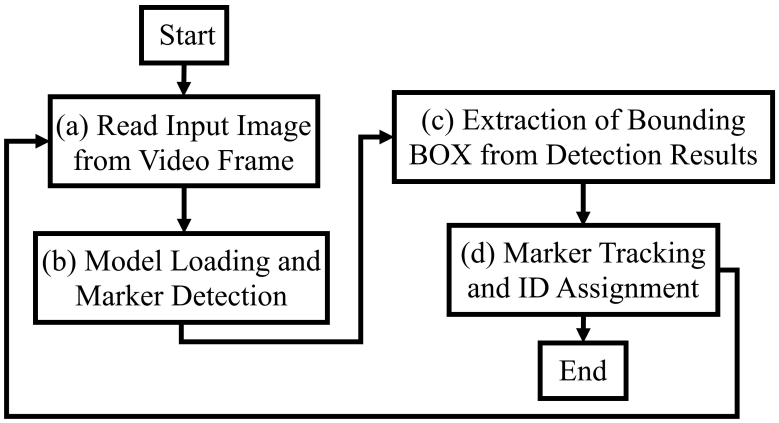



図 3.14: w/wo-VBTS におけるマーカ検出と追跡の流れ.

各マーカ中心 $(x_c^{(i)}, y_c^{(i)})$ とフレーム中心 $(x_0, y_0)$ とのユークリッド距離 $d_i$ は式 (3.6) で算出する.

$$\begin{aligned} d_i &= \sqrt{(x_c^{(i)} - x_0)^2 + (y_c^{(i)} - y_0)^2} \\ &\big(i = 0, 1, 2, \ldots, 42 \text{ (Number of Markers)}\big). \end{aligned} \tag{3.6}$$

フレーム中心から各マーカ中心への角度 $\theta_i$ を式 (3.7) で定義する. 式 (3.7) の符号付角度は $[0, 2\pi)$ の範囲に正規化する.

$$\begin{aligned} \theta_i &= \Big(\arctan\big(\frac{y_{ci} - y_0}{x_{ci} - x_0}\big) + 2\pi\Big) \mod 2\pi, \\ &\big(i = 0, 1, 2, \ldots, 42 \text{ (Number of Markers)}\big). \end{aligned} \tag{3.7}$$

各検出マーカについて $(d_i, \theta_i)$ を計算し, この結果を基にまず距離 $d_i$ (内側から外側へ) , 次いで角度 $\theta_i$ (時計回り) でマーカの検出順序をソートする. ソート後, 識別のために各マーカへソートされた順に ID を付与する.

次に, フレーム間での同一マーカの追跡方法について示す. 現在のフレーム内の各マーカの中心座標を $c_i = (x_i, y_i)$ , 前フレームにおける各マーカの中心座標を $p_j = (x_j^{'}, y_j^{'})$ とし, 前フレームで各マーカに付与された一意の ID を $\mathrm{ID}_j$ とする. 現在のフレームのマーカ中心 $c_i$ と前フレームのマーカ中心 $p_j$ とのユークリッド距離 $d_{ij}$ を式 (3.8) で算出する.

$$\begin{aligned} d_{ij} &= \sqrt{(x_i - x_j')^2 + (y_i - y_j')^2}, \\ &\big(i = 0, 1, 2, \ldots, 42 \text{ (Number of Markers in Current Frame)}\big), \\ &\big(j = 0, 1, 2, \ldots, 42 \text{ (Number of Markers in Previous Frame)}\big). \end{aligned} \tag{3.8}$$

ここで, $d_{ij}$ に対して閾値 $T$ (本研究では $T = 20pix$) を用いて, 各 $c_i$ について $d_{ij} \leq T$ を満たす前フレームの候補の中でユークリッド距離が最小のマーカ $p_{j^*}$ を選び, 現在のフレームにおける対応マーカ

として採用する (式 (3.9)).

$$p_{j^*} = \arg\min_{j \in J} \{ d_{ij} \mid d_{ij} \leq T \}. \tag{3.9}$$

前フレームで既に他の現在フレームのマーカに割り当てられた ID は再利用しない.

**条件 1:** もし $d_{ij^*} \leq T$ を満たす前フレームのマーカ $p_{j^*}$ が存在する場合, 現在のフレームの $c_i$ は $p_{j^*}$ と対応付けられ, 同じ ID ($\mathrm{ID}_{j^*}$) が付与される.

**条件 2:** 前フレームに $d_{ij} \leq T$ を満たすマーカが存在しない, あるいは最小距離が閾値 $T$ を超える場合, $c_i$ は新規のマーカと見なされ, 新しい ID が付与される.

このようにして, 現在のフレームと前フレーム間のマーカ同士の距離に基づく対応関係を確立し, 同一マーカを連続フレーム間で正確に追跡しながら一意の ID を維持することを可能としている (図 3.14-(d)). 実際, 本研究においては w/wo-VBTS のマーカ検出と追跡時に新しい ID が付与されることはなく, マーカ面積の変化量定量化実験がおこなえた.

### 3.2.5 NB/B-VBTS におけるマーカ検出・追跡方法

ここでは, 3.2.4 と同様に YOLOv8 を用いて NB/B-VBTS 内部マーカの検出および追跡の処理内容について詳述する. また, YOLOv8 を NB-VBTS 用にファインチューニングした結果を示す.

#### 3.2.5.1 YOLOv8n のファインチューニング

NB/B-VBTS においても, マーカの検出と追跡のために, 事前学習済み YOLOv8n をファインチューニングする. 学習の設定は, 初期重みを yolov8n.pt [62], 入力画像サイズを $640 \times 640$, バッチサイズを 16, エポック数を 100, 初期学習率を 0.01 とした. また, 学習データとして, 図 3.15-((a)〜(c)) に示すような非接触および接触状態の画像データを取得するために, センサの柔軟なスキンの表面を指圧しながら動画を撮影して, その動画からランダムにフレームを抽出してアノテーション画像として用いた.

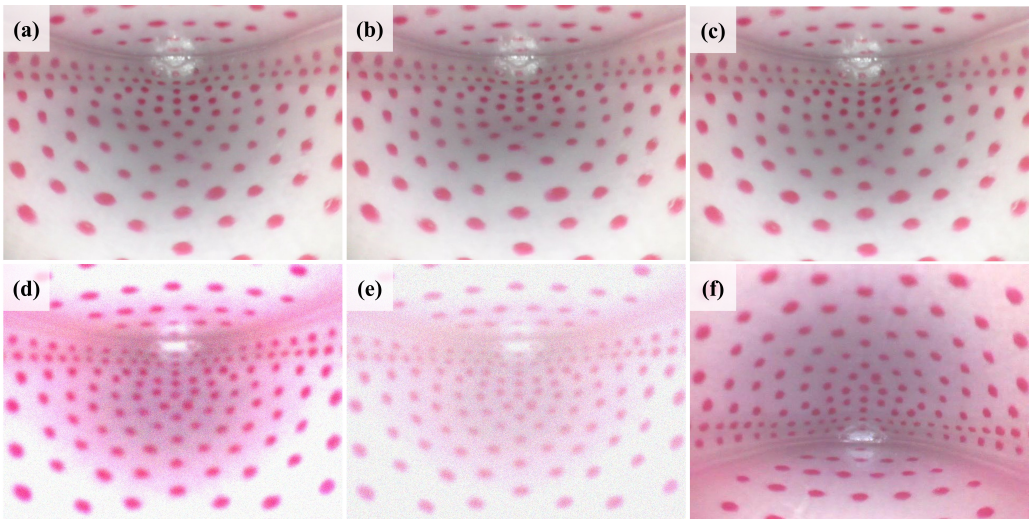



図 3.15: NB/B-VBTS における YOLOv8 の学習データ (画像) の例. (a)-(c) : アノテーションに使用した画像の例, (d)-(e) : ノイズ付与および幾何変換+ノイズ付与後の画像の例

アノテーション済み画像は，訓練用 101 枚・評価用 25 枚の計 126 枚である. また, NB/B-VBTS のアノテーションツールは, グラフィカルな画像アノテーションツールである Roboflow Annotate（Roboflow, Inc.）[65] を使用した. Roboflow Annotate は, アノテーションプロセスが LabelImg に比べて容易かつ

迅速であるため, 1 フレーム内のマーカ数が 127 個 (w/wo-VBTS は 43 個) と多い NB/B-VBTS においてはこちらを採用した. アノテーション済み画像データに水平方向・垂直方向の画像幾何変換やノイズ付与によるデータ拡張を施した (図 3.15 (d)-(e)). データ拡張適用後は, 訓練用 5,453 枚と評価用 1,350 枚の計 6,803 枚となった. 拡張後のデータセットを用い, 事前学習重み yolov8n.pt を初期値としてファインチューニングした. その結果を図 3.17 に示す. 検出性能は最終的に precision=0.95, recall=0.93, mAP50=0.96, mAP50–95=0.72 に到達した. 訓練・検証間の乖離は小さく顕著な過学習は認められない. 一方で mAP50–95 が相対的に低いことから, 高 IoU しきい値における境界精度には改善の余地は残る (損失重み・アノテーション精度の見直し等).

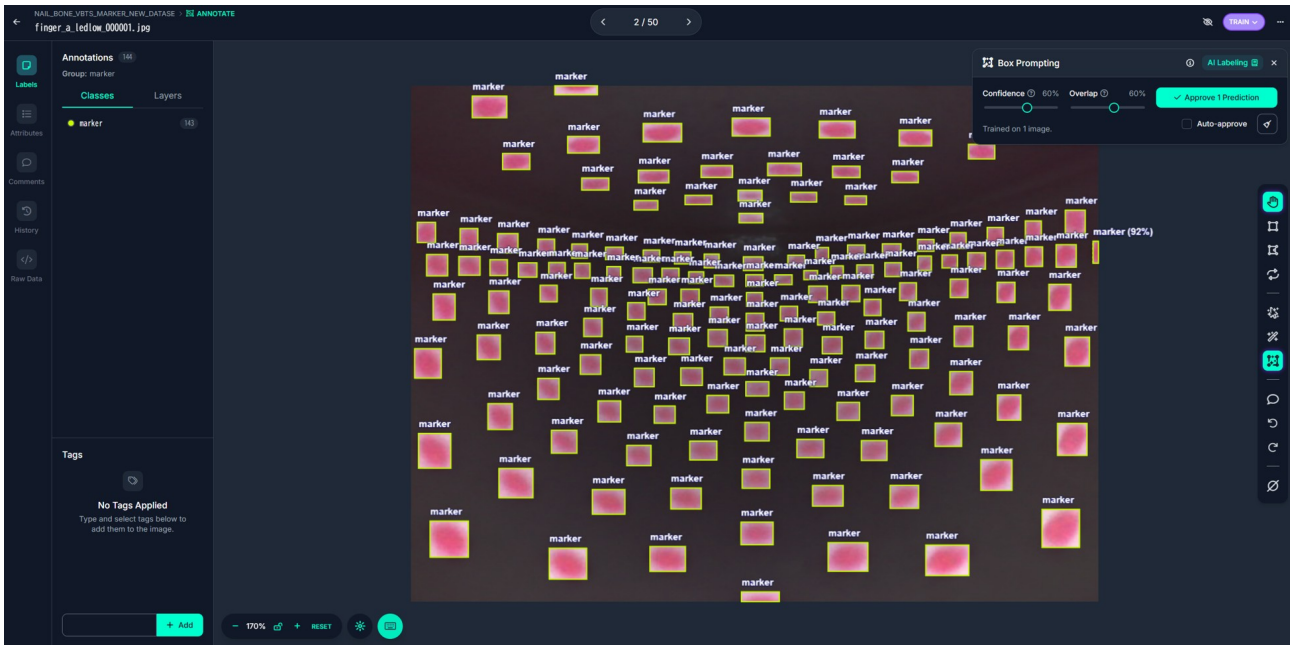



図 3.16: Roboflow UI の画像 [65]

#### 3.2.5.2 ハンガリアン法に基づくマーカ追跡

次に, NB/B-VBTS におけるマーカ検出と追跡の流れは 図 3.14 と同様の流れであるが, 追跡は異なる方法を用いている. 追跡方法には単純なユークリッド距離情報に基づくソート処理ではなく, ハンガリアン法を用いることで YOLOv8 が検出したマーカをどの既存 ID に割り当てるかを, 総距離が最小になるように全体における最適な組み合わせを割り当てられる手法を用いた. 背景としては, w/wo-VBTS に比べて NB-VBTS のマーカ数は多く, カメラの画角からマーカ同士が近づくことにより, 単純なユークリッド距離情報に基づくソート処理では, マーカ ID の誤配置が懸念されるためである. フレーム $t \in \{0, 1, 2, \dots\}$ において, 物体検出器 (YOLOv8) により得られたマーカ中心の検出集合 (式 3.10 ) を得る.

$$\mathcal{D}^t = \left\{ \boldsymbol{d}_j^t \in \mathbb{R}^2 \,\middle|\, j = 1, \dots, M_t \right\}. \tag{3.10}$$

ここで $\boldsymbol{d}_j^t = \left[ d_{j,x}^t, d_{j,y}^t \right]^\top$ は, 時刻 $t$ に検出された $j$ 番目 の 2 次元画素座標を表し, $M_t$ は時刻 $t$ のマーカ検出数である. 直前フレームで維持している追跡点 (ID 付与済み) 集合を式 3.11 とし,

$$\mathcal{P}^{t-1} = \left\{ \boldsymbol{p}_i^{t-1} \in \mathbb{R}^2 \,\middle|\, i = 1, \dots, N_{t-1} \right\}. \tag{3.11}$$

$\boldsymbol{p}_i^{t-1} = \left[ p_{i,x}^{t-1}, p_{i,y}^{t-1} \right]^\top$ は, 時刻 $t-1$ における ID $i$ の推定位置, $N_{t-1}$ は時刻 $t-1$ のマーカ数である.

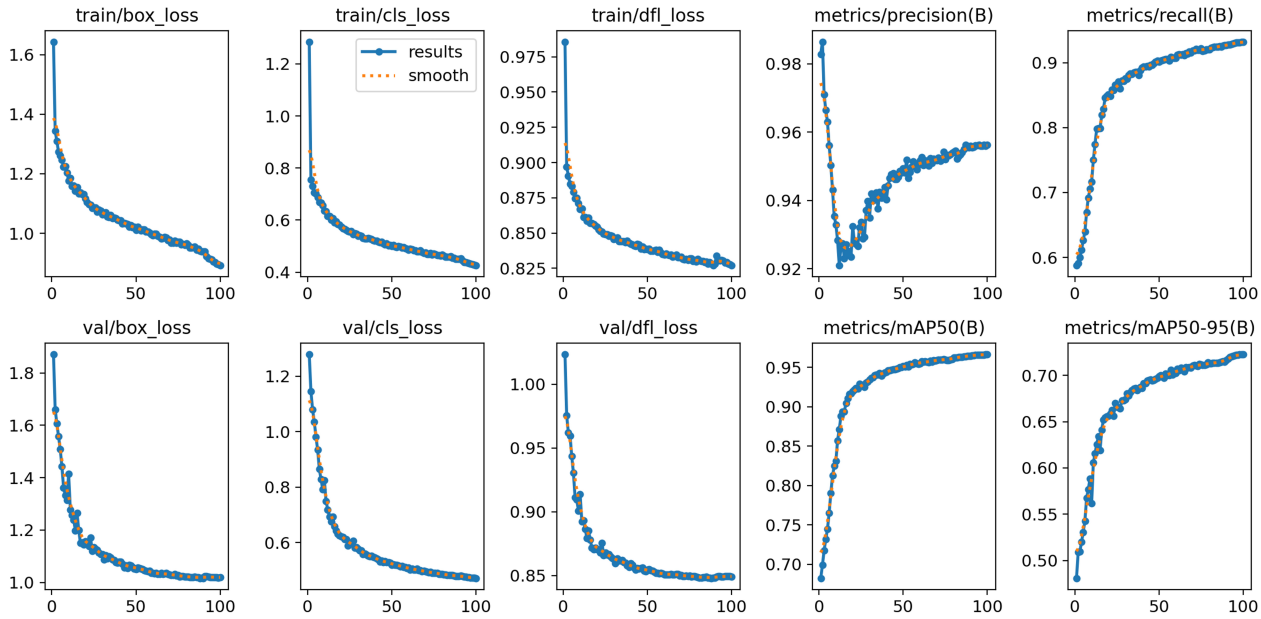



図 3.17: YOLOv8n の学習推移（100 エポック）．上段：学習損失（`train/box_loss`, `train/cls_loss`, `train/dfl_loss`），下段：検証損失と検証指標（`val/box_loss`, `val/cls_loss`, `val/dfl_loss`, precision(B), recall(B), mAP50(B), mAP50–95(B)）．実線は各エポック値，破線は平滑化曲線．

対応付けのために，ユークリッド距離に基づくコスト行列 $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{N_{t-1} \times M_t}$ を式 3.12 で定義する．

$$C_{ij} = \left\| \boldsymbol{p}_i^{t-1} - \boldsymbol{d}_j^{t} \right\|_2 = \sqrt{\left(p_{i,x}^{t-1} - d_{j,x}^{t}\right)^2 + \left(p_{i,y}^{t-1} - d_{j,y}^{t}\right)^2}. \tag{3.12}$$

ここで $C_{ij}$ は「ID $i$ を検出結果の $j$ に割り当てる」際のコスト (距離) を表す．一対一の対応付けはハンガリアン法 [66] により，式 3.13 の総コスト最小化問題を解くことで，写像 $a : \{1, \ldots, N_{t-1}\} \to \{1, \ldots, M_t\}$ を求める．

$$\min_{a} \sum_{i=1}^{N_{t-1}} C_{i\,a(i)} \tag{3.13}$$

$a(i)$ は ID $i$ に割り当てられた検出のインデックスである．得られた対応関係に対して所定の $\tau = 20[pix]$ として，距離閾値判定をおこなう (式 3.14)．

$$\begin{aligned} \text{(Valid match) } & C_{i,\,a(i)} \leq \tau, \\ \text{(Mismatch) } & C_{i,\,a(i)} > \tau. \end{aligned} \tag{3.14}$$

有効対応が得られた ID $i$ は現在のフレームにおける検出マーカにて更新し (式 3.15)，不一致または最適な組み合わせが存在しなかった場合が 200 フレーム続いた際には，新しい ID を割り当てることにした．

$$\boldsymbol{p}_i^{t} = \boldsymbol{d}_{a(i)}^{t} \quad (\text{if } C_{i,\,a(i)} \leq \tau). \tag{3.15}$$

これらによって，頑健なマーカ追跡をおこなっている (図 3.18-(d))．

#### 3.2.5.3　テンプレート情報に基づくマーカ初期位置決め

w/wo-VBTS の検出されたマーカへの初期 ID 割り当ては, 3.2.4 に示したように, 画像中心から各マーカまでの距離および角度情報に基づいてソート処理をおこなうことで ID を割り当てた. 同様に, NB/B-VBTS を用いた微小突起検知実験でも初期マーカ ID の割り当ては同様の手法を用いた.

しかし, NB-VBTS の薄い物体把持の実験におけるマーカへの初期 ID 割り当て方法については, 画像中心からマーカ検出位置までの距離および角度情報に基づくソート処理ではなく, テンプレート情報 (ID, 座標情報) に基づく割り当てをおこなっている (図 3.18-(c)).

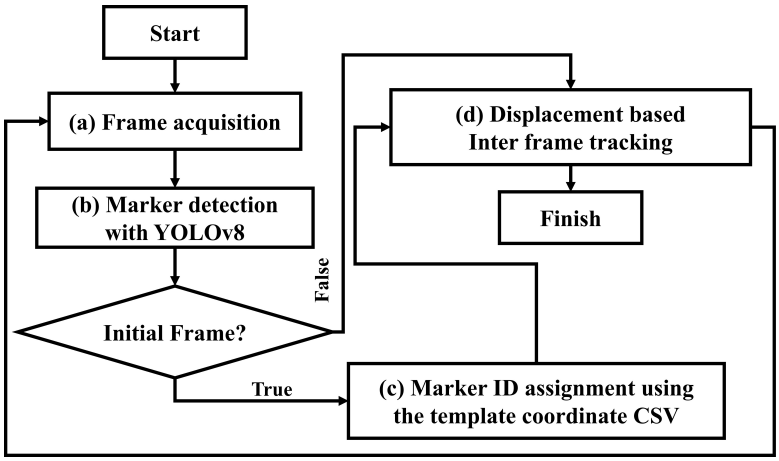



図 3.18: NB/B-VBTS におけるマーカ検出と追跡の流れ.

これにより, マーカの位置をより規則的に配置することが可能となり, 接触データの解析時 (特に学習データの収集) にマーカ位置の同定が容易になるため, 本手法を実装している. (図 3.19) に $(d_i, \theta_i)$ に基づいて ID 割り当てをおこなった結果と, テンプレート情報に基づく ID 割り当て結果を示す.

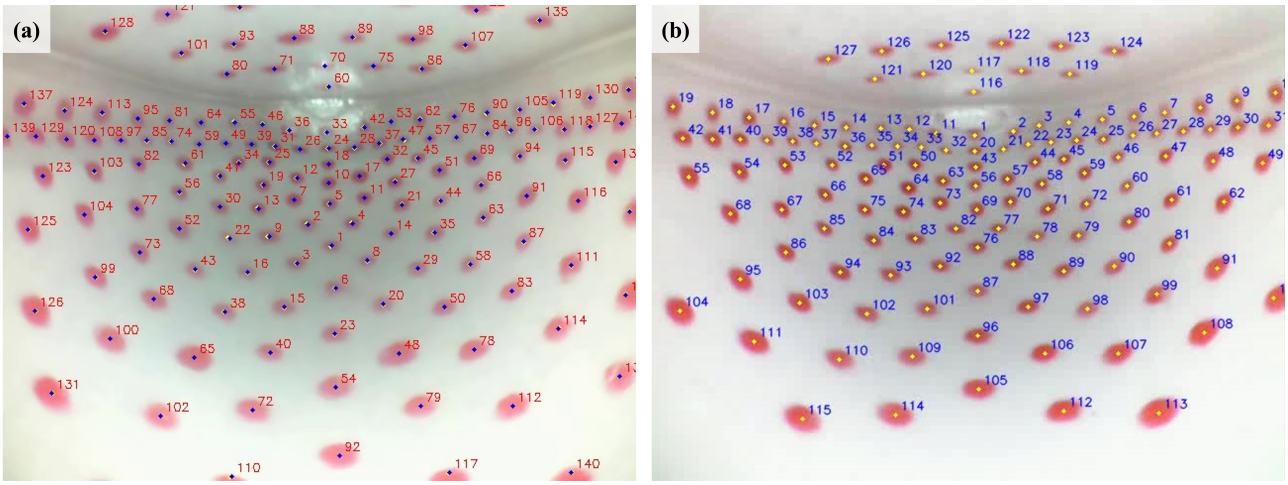



図 3.19: NB-VBTS におけるマーカ ID 割り当て結果. (a) : $(d_i, \theta_i)$ に基づいた ID 割り当ての結果, (b) : テンプレート情報 (ID, 座標情報) に基づく ID 割り当ての結果.

$(d_i, \theta_i)$ に基づいて ID 割り当てをおこなった結果図 (図 3.19-(a)) では画像内の中心から外側に向かってかつ時計回りにマーカ ID が割り当てられていることがわかる. 一方, テンプレート情報に基づく ID 割り当て結果図 (図 3.19-(b)) では画像中心から左右に向かって ID が割り当てられている. また, (図 3.19 -(a)) と (図 3.19 -(b)) でマーカ数が異なっているのは, 組み立て誤差や NB-VBTS の設計誤差などによ

り, マーカがカメラ画角内に映り込まない場合が発生することがあり, これは NB-VBTS の薄い物体把持の実験時の学習データ取得において問題となるため, カメラ画角内に安定してキャプチャできるマーカのみを配置するようにしたためである. 以上のマーカ検出および追跡結果を用いて各種実験をおこなった.

#### 3.2.5.4 マーカ検出・追跡手法の貢献と課題

本研究では, YOLOv8 を用いてマーカ検出と追跡を行うことで, マーカの大変形やセンサ作製時の組み立て誤差, 材料調合のばらつき, 研磨不足などに起因し得る外乱が存在する環境下でも, 少なくとも本研究で実施した一連の実験条件の範囲において, 検出と追跡が大きく破綻しないことを確認した. w/wo-VBTS における平面接触時の内部マーカの面積比較実験と, NB/B-VBTS を用いた微小突起検知実験では, マーカ ID の新規割り当ては発生せず, 実験を通して同一マーカの対応付けを維持したままデータを取得できた. さらに, NB-VBTS の爪先部での薄い物体把持実験では, 追跡手法としてハンガリアン法を新たに採用しているが, 学習データの収集時および学習済みの回帰モデルを用いた薄い物体把持実験時のいずれにおいても, 新しい ID の割り当てや追跡の顕著な破綻は確認されなかった.

これらの観察結果から, 従来の色空間変換に基づく手法や単純なデータ駆動型追跡手法ではマーカ同士の重なりや大変形により追跡が困難となる状況であっても, 本研究で採用した検出器と追跡手順の組み合わせにより, 少なくとも本研究の実験設定においては, 安定したマーカ検出および追跡が得られる可能性が示唆された. したがって, 接触に伴うマーカ変位量を測定する上で, 本手法は実験上の実用性を有する手法になり得る. ただし, 本研究では外乱 (組み立て誤差, 材料調合のばらつき, 研磨不足) に対する頑健性を定量指標で評価したわけではなく, 上記はあくまで実験遂行の過程で観察された範囲に基づく記述である. 加えて, 処理速度の課題が残る. NB-VBTS の爪先部での薄い物体把持実験における処理速度は, ハンガリアン法を含む現在の実装で約 15 FPS にとどまっている. この処理速度は, 本研究で対象とした準静的な薄い物体把持や押し付け動作を扱ううえでは実用上許容範囲内である一方で, 今後の課題となる高速な滑り検知やダイナミックなインハンド操作を対象とするには十分とは言えない. 例えば, Dong ら [67] は, GelSlim というマーカが付与された GelSight 系の平面構造から成るロボットフィンガーを用いて, フレーム間のマーカ移動量に基づく初期滑り検出器を提案している. 摩擦係数や質量, 形状といった物体の事前情報を用いることなく, 並進滑りと回転滑りの両方の検出が可能となっており, その処理速度は約 24 Hz と報告されている. 今後は, 高フレームレートカメラの導入やネットワークおよびトラッキングアルゴリズムの軽量化が課題として残る.

# 第 4 章

# プロトタイプ型: w-VBTS における機械的および光学的評価

## 4.1 手法

本節では爪構造と固い骨および柔軟なスキンを備えた VBTS(w-VBTS) の作成方法について示す.

### 4.1.1 センサデザイン

本研究で提案するセンサ設計は, ヒトの指先の多層構造 (爪, 骨, 柔軟な皮膚) を模倣したものであり, 図 4.1 にそのイメージ図を示す. 提案する w-VBTS は, 柔軟なスキン, 骨構造, カメラユニット, および爪構造の 4 つの要素から構成される. スキンはシリコーンゴム (Ecoflex 00-10, Smooth-on Inc., PA, USA) 製の柔軟素材で構成され, その内部には同じシリコン素材を赤色に着色したマーカが埋め込まれている (生成方法は後述する). スキンの下には樹脂製の剛体骨構造が完全に接着されている.

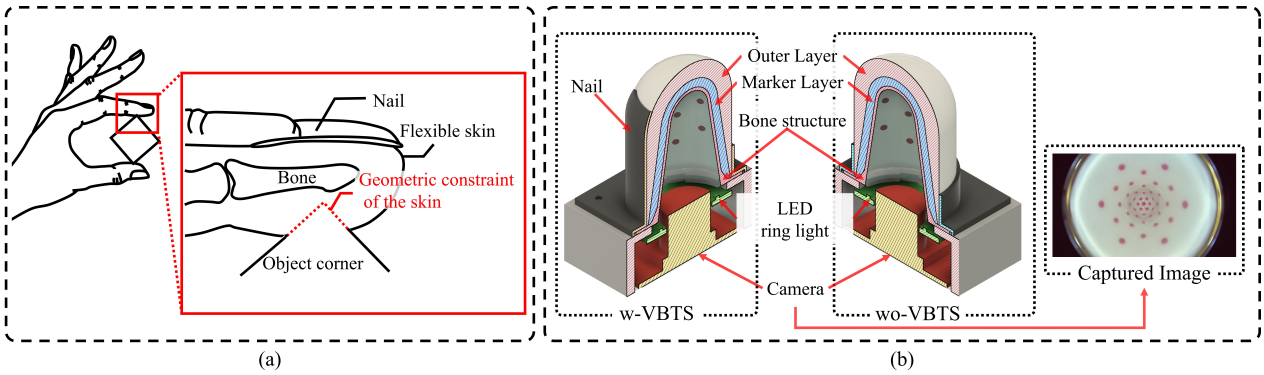



図 4.1: 生体模倣型 VBTS の模式図. (a) : 把持時におけるヒト指先の幾何的拘束; (b) : 爪構造あり／なし (w/wo-VBTS) の断面図と, マーカを含む撮像例.

図 4.2 に w-VBTS の外観および詳細寸法を示す. 柔軟なスキンの外形は, 半球と円筒を組み合わせた形状である. 断面 (図 4.2 - (a)) では, 外層の曲率半径は ($R = 16\,\mathrm{mm}$), マーカ層の曲率半径は ($R = 10.7\,\mathrm{mm}$), マーカ層と骨構造の厚さはラベル (1) から (4) で示されているように, それぞれ 2.7 mm と 1.0 mm である. 円筒部の高さは 28.3 mm(8), 爪の厚さは 1.0 mm(6), 爪先端の傾斜角は 30°(7) である. 上面図 (図 4.2-(b)) より, 爪のスキンに対する被覆角は 90° (9), カメラユニットの外形寸法は 47 mm × 47 mm(10), 爪底部のサイズは 43 mm × 43 mm(11) である. 爪側からの側面図 (図 4.2-(c)) では, 接触可能な円筒部の長さは 18.3 mm (12), キャップの高さは 9.0 mm(13), 爪構造底部の高さは 2.0 mm (14), カメラユニットの高さは 18.3 mm(15) である.

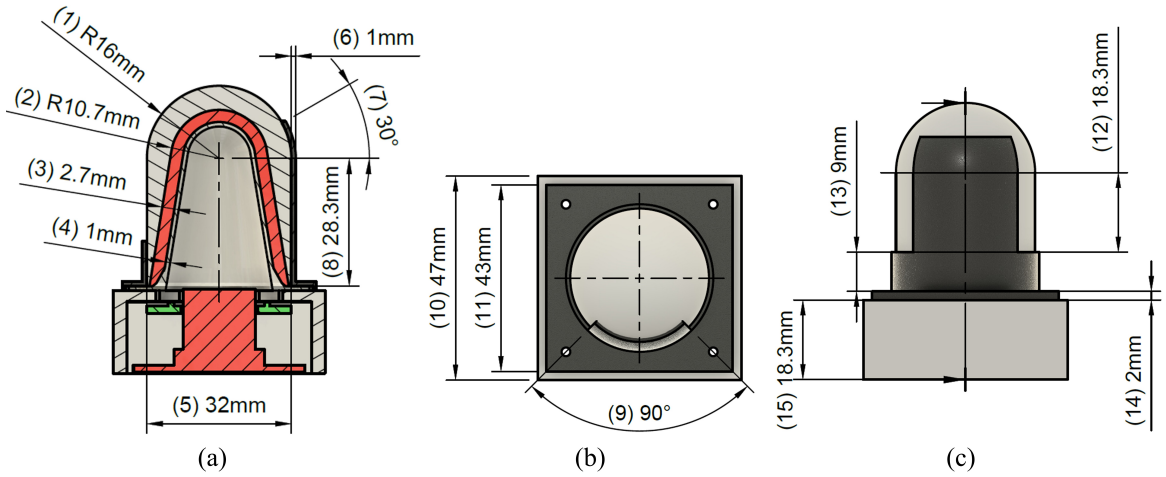



図 4.2: w-VBTS のサイズ. (a) : センサの断面図; (b) : センサトップからの図; (c) : 爪構造側からの図.

### 4.1.2 透明骨構造と柔軟スキンの作成

ここでは w-VBTS の透明な骨構造と柔軟なスキンの作成方法を示す. 骨構造は Form 3 用の Clear Resin V4 (Form 3) で積層造形した後, 3M 製スポンジ研磨パッド (図 4.3 (1) - (6)) および Hynzework 製研磨コンパウンド (図 4.3 (7) - (9)) によって順次研磨し, 最終的に透明性を獲得した (図 4.3 (10)).

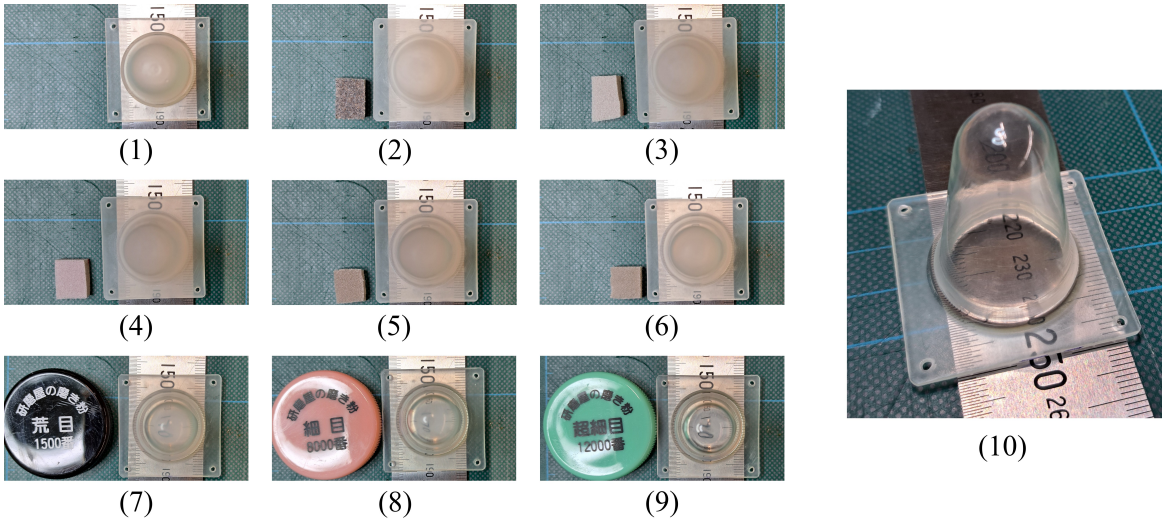



図 4.3: 透明な骨構造の生成過程. (1) : 造形直後; (2) ～ (6) : 3M スポンジ研磨パッド (5081–5085) で順次研磨; (7) ～ (9) : Hynzework 研磨コンパウンド (#1500, #8000, #12000) で仕上げ, (10) : 最終透明化.

続いて, 柔軟なスキンは, マーカ層と外層からなる 2 層構造である. 図 4.4 - (b) は Gray Resin V4 (Form 3) で作成したマーカ製作用モールドに透明な骨構造を取り付けた状態を示す. ここで, 図 4.5 はマーカ作成用モールドの寸法を示し, 断面にはマーカ生成用の半球突起が配置されている. 半球突起の配置パターンは, 図 4.5 - (b) で示すように 9 個 (中心含む) の半球突起が配置される場合と, 図 4.5 - (c) で示すような 7 個 (中心含む) の半球突起が配置される場合の 2 パターンであり, 図 4.5 - (a) に示すように 30° 間隔で交互に配置される. このマーカ作成用モールドに, Ecoflex 00-10 PartA と PartB (1:1) を十分に混合し脱泡して, 工作用シリンジでモールドに注入した後, 硬化させて取り出す. マーカモールドの半球突起上の溝構造がマーカ層に形成され, この溝構造に赤色顔料 ($< 3\,\mathrm{wt}\%$) を Ecoflex 00-10 PartA と

PartB (1:1) に加えて, 十分に混合し脱泡したのち, 工作用注射針 (TOUFEIYUAN, China) を取り付けた工作用シリンジを用いて，溝構造に注入する (図 4.4 - (c))．各注入後, ホットエアーリワークステー

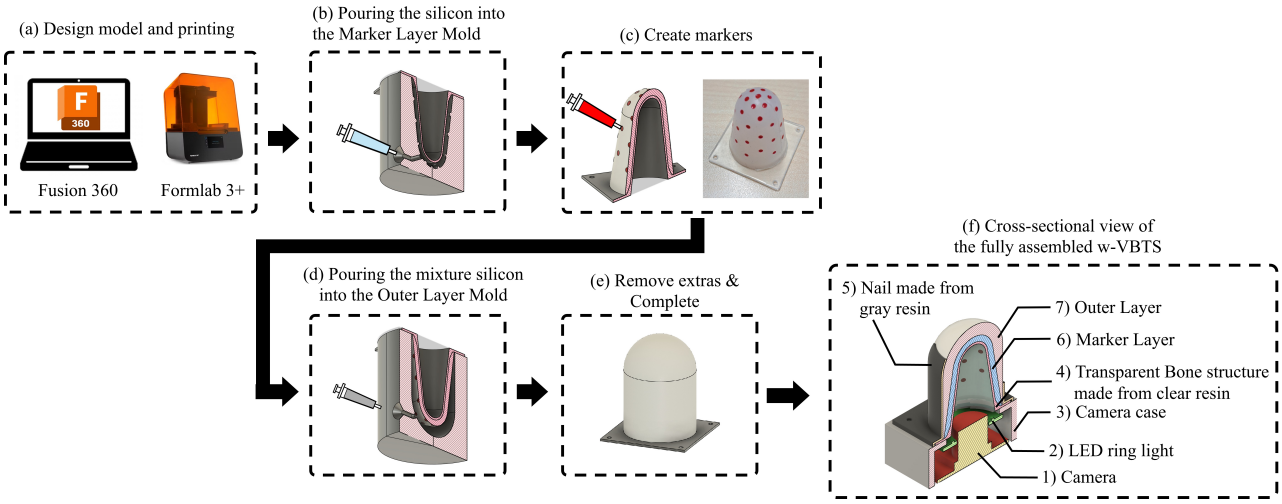



図 4.4: 柔軟スキンの製作工程と w-VBTS の断面図. (a) Fusion 360 による設計と Formlab 3+を用いた 3D プリント, (b) マーカ層製作用モールドへシリコンの注入, (c) マーカの形成, (d) 外層製作用モールドへシリコンの注入, (e) 不要部分の除去をして完成, (f) 完成した w-VBTS の断面図.

ション (SMD868) を用いて 100 °C で 5 秒間程度加熱し, マーカ材料の硬化を促進した．次に最外層の作成をおこなう．図 4.4 - (d) に示すように，マーカ層と一体化した透明骨構造を最外層作成用モールドに取り付けた．最外層の材料として Ecoflex 00-10 (Part A:Part B = 41 g:41 g) に白色顔料 (Silic-Pig White, 2.46 g) および黒色顔料 (Bright Coat Black, 1.0 g) を使用した．黒色顔料は外光を遮断するために混合した．脱泡によって気泡を除去した後，作成した最外層用の灰色のシリコーンをシリンジで外層モールド用に注入した。シリコーンが硬化した後, モールドを慎重に取り外すことで, 柔軟なスキンと骨構造が一体化した w/wo-VBTS 用の指先 (図 4.4 - (e)) が完成する．

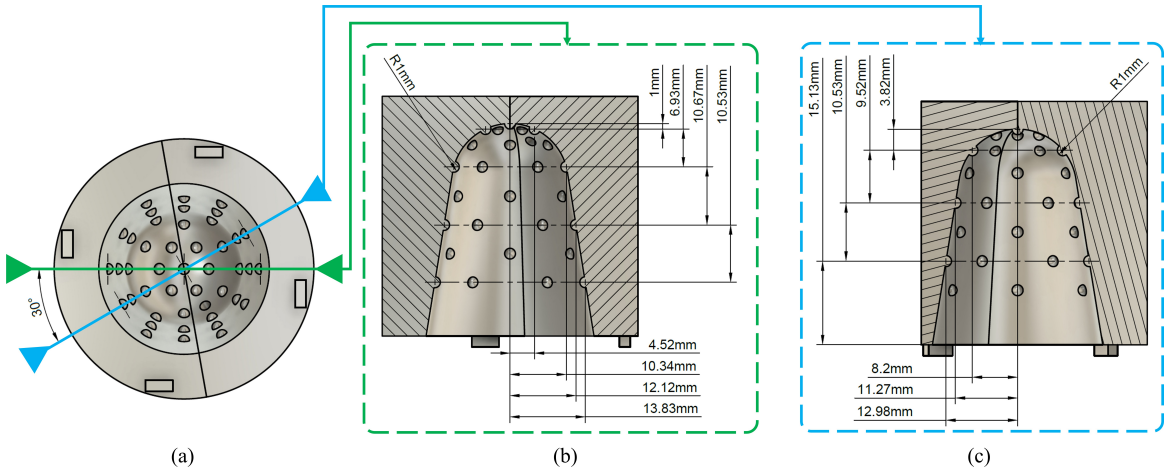



図 4.5: マーカ作成用モールドの構造. (a) マーカモールドの上面からの図, (b) 断面図 (マーカ数 9 個), (c) 断面図 (マーカ数 7 個).

最後に, 図 4.4 - (f) に示すように, 製作した骨構造と柔軟なスキンを一体化した指先部を, カメラ (ELP FHD06HL180), および LED ライト基板を内蔵したケース上部に取り付けた. 図 4.4 - (f) に示すセンサは, 爪構造を有する w-VBTS であり, 一方の wo-VBTS は爪構造を持たない構造のことを意味する.

## 4.2 実験内容

本研究では, w/wo-VBTS を用いて 3 つの実験を実施した. まず, 人間の指構造の模倣が物体把持に寄与することを示した先行研究 [12][15][16][28] の実験環境を参考に, 保持力および接触面積に関する比較実験を行った. さらに, 我々が今回提案する VBTS は内部のカメラにより, スキン内部のマーカ変形量を画像情報として取得することが可能である. そこで, 接触面積比較実験時と同一条件下で内部マーカの変形および接触荷重の推移が w-VBTS と wo-VBTS でどのような傾向差を示すのか評価をおこなった. 本セクションでは, 上述の実験内容について示す.

### 4.2.1 保持力比較

このセクションでは, 爪構造の有無による物体保持力の比較方法を示す. 本実験の目的は, w/wo-VBTS の設計において先行研究 [15][16] のように, 柔軟なスキンに対して爪構造による幾何的拘束が働き, w-VBTS の方が wo-VBTS よりも保持力が大きくなる傾向を示すことの再現が得られるか確認することである. ただし, 本研究における「保持力 (Holding Force)」とは, ロボットハンド先端に取り付けた w/wo-VBTS が物体を把持した状態で, その物体を上方向に引き挙げた際に発生する下向きにはたらく抵抗力とする.

#### 4.2.1.1 保持力比較実験の実験環境・手法

本実験では, UR5e ロボットアーム (Universal Robots, Denmark) を使用し, その先端にフォーストルクセンサ (FT 300-S, Robotiq, Canada) およびロボットハンド (2F-140, Robotiq, Canada) を取り付けた. 更に, 提案する w/wo-VBTS をロボットハンドの先端部に鉛直下方向から 45° の角度で固定した (図 4.6 - (a)). ロボットハンドのグリッパ部を最大限に開いた状態とした際, w-VBTS 間の距離は 98 mm であり, カメラケース (図 4.4 - (f-3)) とロボットハンドのジョイント間の距離は 120 mm である.

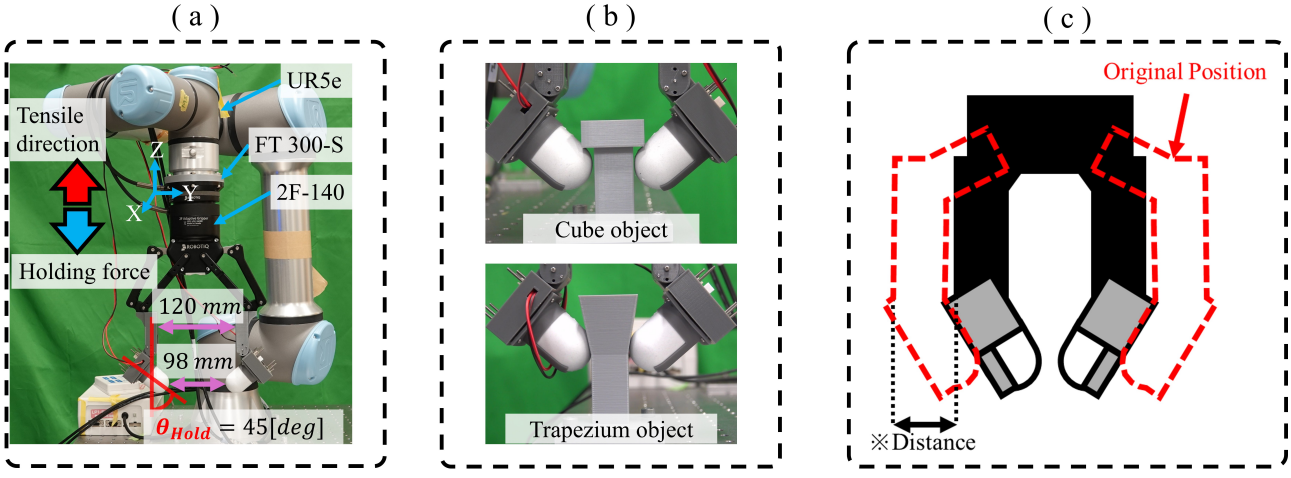



図 4.6: 保持力比較の実験環境. (a) 保持力比較実験の外観, (b) 試験片と w-VBTS の外観, (c) 試験片把持時のハンド移動部の定義.

保持力の比較には, 図 4.6 - (b) に示すような, 「立方体型 (Cube)」, 「台形型 (Trapezium)」の 2 種類の物体を用いて保持力を比較した. 各試験片の詳細な寸法は 図 4.7 に示す. また、各試験片に対して、ロボットハンド先端に搭載した w/wo-VBTS を表 4.1 に示す 2 種類の把持パターンを実施した。ここで, 表 4.1 に記載の「Distance」とは、ロボットハンドを全開状態とした初期位置からの変位量として定義し, この変位の概念を図 4.6 - (c) に示す。引き上げ動作においては, Z 軸正方向への移動速度をメーカー既定値 1500 mm/s の 10% に設定した (内部安全マージン非公開設定値を含む).

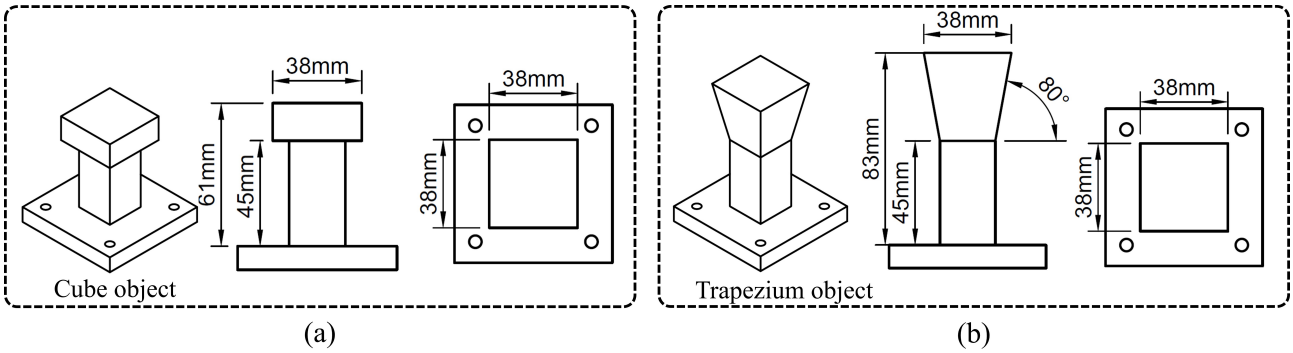



図 4.7: 保持力比較に用いた試験片サイズ. (a) 立方体型試験片のサイズ, (b) 台形型試験片のサイズ.

表 4.1: 各試験片の把持 (Distance) のパターン

| | Cube objects | | Trapezium objects | |
|---|---|---|---|---|
| Distance [mm] | 55.1 | 59.6 | 61.9 | 66.5 |

#### 4.2.1.2 保持力比較実験の結果と考察

w-VBTS と wo-VBTS の保持力比較実験の結果を図 4.8 に示す. それぞれの実験試行において 5 回ずつ測定をしており, 図 4.8 の棒グラフは 5 回分の平均と標準偏差を意味している. 本結果から, w-VBTS の

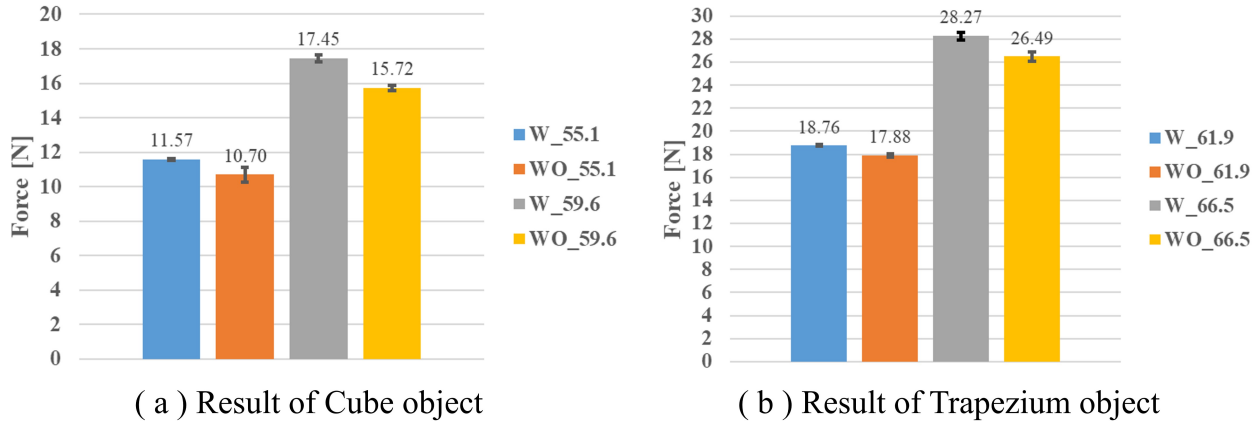



図 4.8: 保持力比較実験の結果. (a) 立方体型試験片における保持力比較の結果, (b) 台形型試験片における保持力比較の結果, 棒グラフは平均値, エラーバーは標準偏差を意味する.

方が wo-VBTS よりも高い保持力を示す傾向があることが明らかになった. 具体的には, 立方体試験片におけるロボットハンドの把持パターン (表 4.1) のいずれにおいても w-VBTS の方が大きな保持力を示した. 台形型試験片においても把持パターン (表 4.1) のいずれにおいても w-VBTS の方が大きな保持力を示した. 表 4.1 で示したように, 試験片それぞれに 2 パターンの把持を本研究では適用したが, 把持力が大きくなる (Distance の値が大きくなる) につれて, 保持力も顕著に w-VBTS の方が大きくなっていることが図 4.8 から見て取れる. この結果は, Kumagai ら [15][16] が Ecoflex 00-10 を用いて, 爪構造の有無によって保持力に差が生じることを示した先行研究の結果と類似した傾向が得られた. 具体的には, Kumagai ら [16] は, Ecoflex 00-10 で作成された硬い爪構造ありの人工指先では, 平均で 3.4N を示し, 爪構造がない人工指先では平均で 1.1N と報告している (詳細な実験条件は省略する). 一方, 我々は簡易的な硬い爪構造を柔軟なスキンに外付けすることで w-VBTS の保持力が wo-VBTS よりも大きくなる結

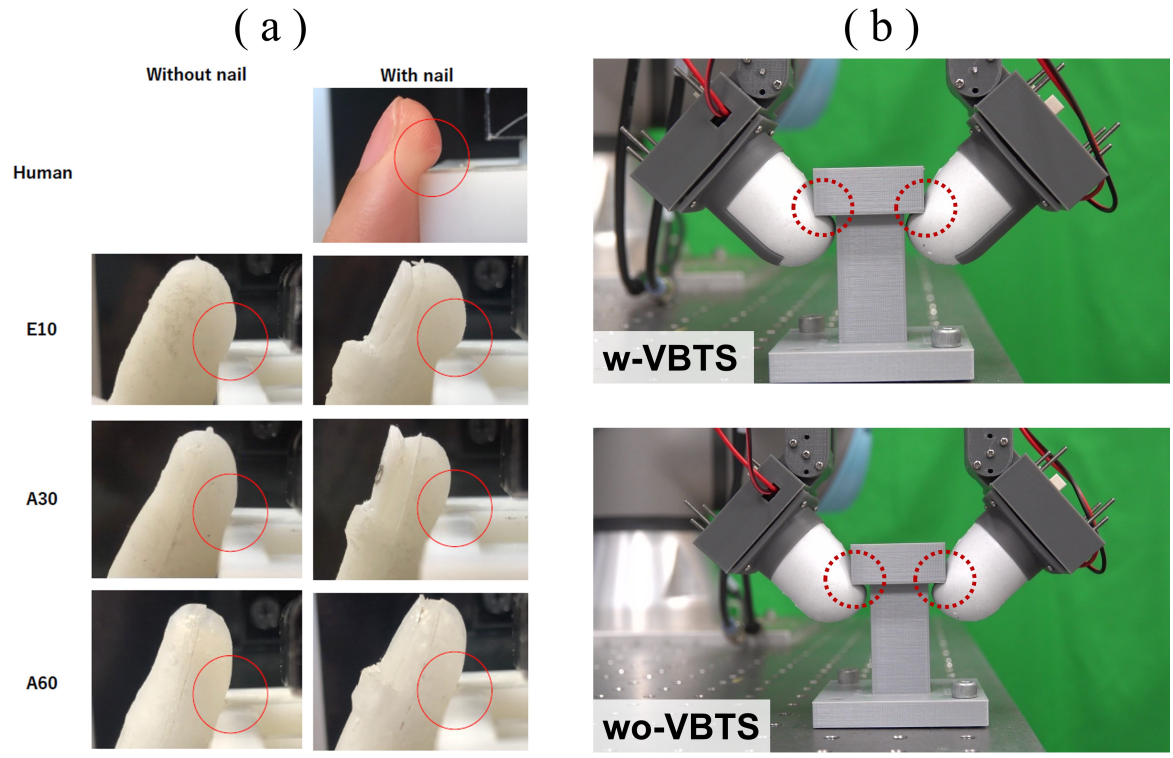



図 4.9: 先行研究で示された幾何的拘束と本研究の比較図. (a) Kumagai らの研究 [16] で柔らかい指ほど接触物体に沿って指先が変形し, 幾何的拘束を形成している図, (b) 本研究の保持力比較実験における幾何的拘束が生じている可能性が示唆される箇所.

果を得た. このことから, 本実験結果は簡易的な w-VBTS でも爪構造の柔軟なスキンへの幾何的拘束を形成していることが示唆できると考える.

#### 4.2.2　接触面積比較

このセクションでは, 提案する w/wo-VBTS において, 爪構造が接触面積に与える影響を評価した実験内容について示す. 本実験の目的は, w/wo-VBTS の設計において, 柔軟なスキンに対して爪構造による幾何的拘束が働き, w-VBTS の方が wo-VBTS よりも接触面積が大きくなる傾向を示すことの再現が得られるか確認することである.

##### 4.2.2.1　接触面積比較実験の環境・手法

本実験では, w/wo-VBTS を様々な角度で平面に押し当てた際の接触面積の差を比較する. 実験環境を図 4.10 に示す。測定スタンド (MX2-500N, IMADA CO., LTD) に, フォースゲージ (ZTA-50N, IMADA CO., LTD), Measurement Box (MB), および提案する w/wo-VBTS を取り付けた. MB にはアクリル板と小型カメラ (LPUSB8MP04AF-V72) が含まれる. MB はフォースゲージ上に取り付けられ, w/wo-VBTS に向けて下降させ, 小型カメラがアクリル板と w/wo-VBTS の間の接触領域を撮影する (図 4.10-(b) 参照). 加える力は 1 から 4 N を 1 N 刻みの 4 パターンとし，接触角 ($\theta_{contact}$) は 20° から 60° を 10° 刻みの 5 パターンで変化させた.

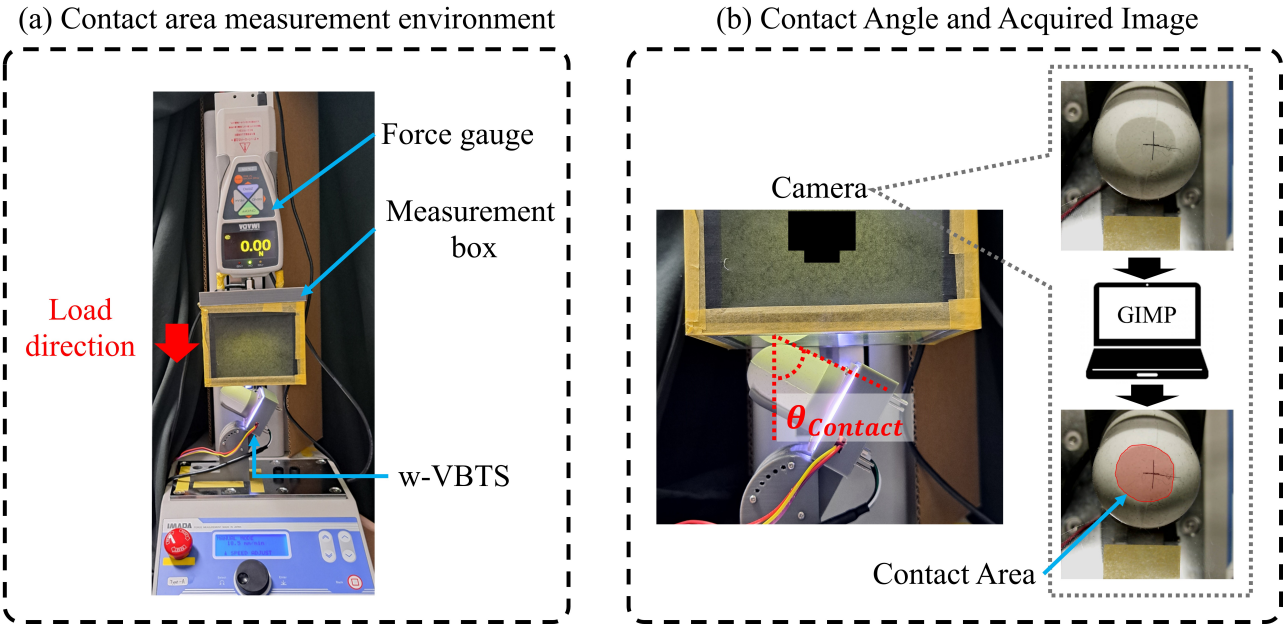



図 4.10: 接触面積測定の実験環境. (a)：測定装置, (b)：Measurement box で取得した接触面画像の例

##### 4.2.2.2　データ解析

MB で取得した接触面の画像データを 3.1.1 で示したように GIMP を用いて手動で接触範囲を選択する. GIMP を用いて接触面積 (pix) を抽出し, その値を式 3.3 の $S_{\mathrm{pix}}$ に代入する. (mm) 単位に換算した接触面積の値を用いて, 3.1.3 項で示した流れで統計検定をおこなった.

##### 4.2.2.3　接触面積比較実験の結果

w/wo-VBTS における各条件 (接触角, 押し付け力, 爪構造の有無) は式 4.1 で表す. ここで, $c$ は爪構造の有無 ($c$ : w, wo), $\theta_{contact}$ は接触角度 ($\Theta_{contact}$ : 20, 30, 40, 50, 60 [deg]), $f$ は押し付け力 ($F$ : 1, 2, 3, 4 [N])

を意味する．

$$\{(c,\ \theta_{Contact},\ f)\,|\,c \in C,\ \theta_{Contact} \in \Theta_{Contact},\ f \in F\} = S_{c,\theta_{Contact},f}. \tag{4.1}$$

w-VBTS と wo-VBTS の接触面積の測定結果を図 4.11 に示す．各点は 10 試行の平均を表し，エラーバーは標準偏差を示す．これらの図 4.11 に見られる傾向として，w-VBTS は wo-VBTS より大きな接触面積を示すことが見て取れる．図 4.11-(a) から (d) に示した傾向に統計的に有意な差があるのかを判断するために 3.1.3 項で示した手順に従い検定をおこなった．まず，各条件 (例：$S_{c,\theta_{\mathrm{contact}},f}$) のデータに対して正規性を確認するため Shapiro-Wilk 検定を実施した．その結果を，各条件の p 値として表 4.2 と表 4.3 に示す．すべての条件 (例：$S_{c,\theta_{\mathrm{contact}},f}$) において，10 サンプルのデータセットは正規性を満たしていた (有意水準 $\alpha = 0.05$)．その後，群間分散の不等性に頑健な Welch の t 検定を用いて，w-VBTS と wo-VBTS の接触面積差を検定した ($\alpha = 0.05$)．その結果，20 条件中 15 条件で有意差が認められ，Bonferroni 補正後 ($\alpha^* = 0.0025$) も 7 条件有意が維持された．補正により有意数は減少したが，残存した有意条件 (7 条件) は「爪構造が接触面積を増大させる」ことを支持する強い証拠であると考えられる．

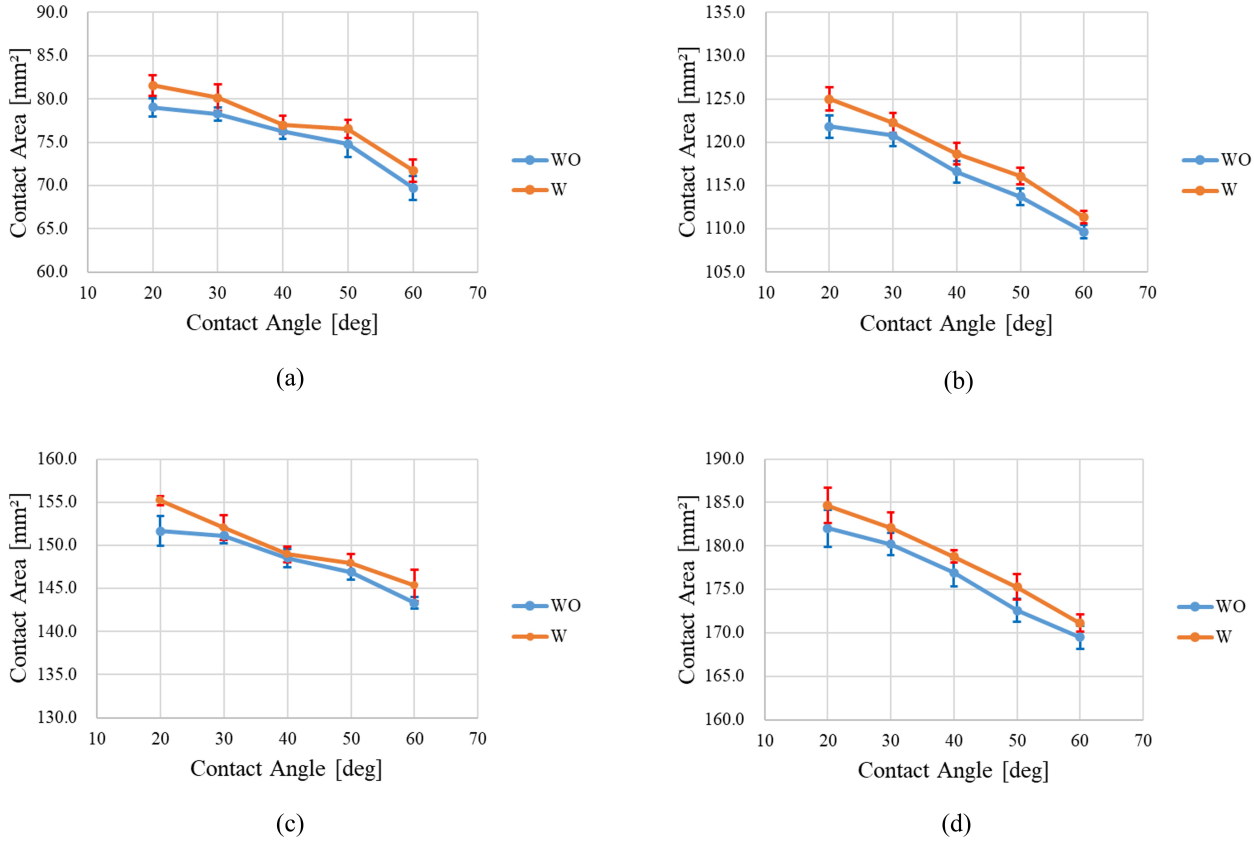



図 4.11: 接触面積測定結果．(a)：測定装置，(b)：Measurement box で取得した接触面画像の例

表 4.2: 1N および 2N の押し付け力における接触面積に対する Shapiro–Wilk 検定結果 (p 値)

| F[N] | 1 | | | | | 2 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Theta_{Contact}$[deg] | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| W | 0.41 | 0.67 | 0.46 | 0.19 | 0.73 | 0.47 | 0.67 | 0.84 | 0.27 | 0.38 |
| WO | 0.67 | 0.53 | 0.80 | 0.22 | 0.31 | 0.54 | 0.32 | 0.88 | 0.91 | 0.87 |

表 4.3: 3N および 4N の押し付け力における接触面積に対する Shapiro–Wilk 検定結果 (p 値)

| F[N] | 3 | | | | | 4 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Theta_{Contact}$[deg] | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| W | 0.13 | 0.76 | 0.24 | 0.94 | 0.31 | 0.55 | 0.39 | 0.90 | 0.47 | 0.71 |
| WO | 0.17 | 0.40 | 0.54 | 0.69 | 0.92 | 0.34 | 0.93 | 0.51 | 0.88 | 0.72 |

表 4.4: 異なる押付力および接触角条件における w-VBTS と wo-VBTS の Welch の t 検定結果 (p 値). 有意水準 $\alpha = 0.05$ では 20 条件中 15 条件が有意であり, Bonferroni 補正 ($m = 20$, $\alpha^* = 0.0025$) 後は 7 条件が有意のまま残った. 赤色セルは $\alpha = 0.05$ で非有意，黄色セルは Bonferroni 補正後も有意，無着色セルは $\alpha = 0.05$ では有意だが補正後は非有意であることを示す.

| | 20 [deg] | 30 [deg] | 40 [deg] | 50 [deg] | 60 [deg] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 [N] | $0.74 \times 10^{-3}$ | $0.56 \times 10^{-2}$ | 0.16 | $0.73 \times 10^{-2}$ | $0.57 \times 10^{-2}$ |
| 2 [N] | $0.36 \times 10^{-3}$ | $0.42 \times 10^{-1}$ | $0.24 \times 10^{-2}$ | $0.13 \times 10^{-2}$ | $0.14 \times 10^{-2}$ |
| 3 [N] | $0.49 \times 10^{-3}$ | 0.18 | 0.59 | $0.36 \times 10^{-1}$ | $0.13 \times 10^{-1}$ |
| 4 [N] | $0.51 \times 10^{-1}$ | $0.62 \times 10^{-1}$ | $0.68 \times 10^{-2}$ | $0.41 \times 10^{-3}$ | $0.71 \times 10^{-2}$ |

#### 4.2.2.4 接触面積比較実験の考察

補正後に閾値未満となった条件を含めても, 図 4.11 に示すように w-VBTS はほぼ全条件で wo-VBTS より大きな接触面積を示した. これは, 爪構造が柔軟スキンに幾何学的拘束を与え, アクリル板との実効接触領域を拡大するためと考えられる. 一方, 先行研究 [17][28] では, 先端形状が滑らかに湾曲した指先または平らに近い形状のほうが, 円柱と半球の単純複合形状より接触面積が大きくなることが報告されている. 実際, 人間の指のスキン形状も単純な円柱と半球を組み合わせた形状とはなっていない. 本研究のスキン形状は単純な円柱と半球を組み合わせて簡素化しているため, 全条件で統計的有意差の出現に至らなかった可能性がある. 今後は先行研究に近い曲率設計をスキン形状に導入することで, w-VBTS と wo-VBTS の面積差がさらに顕在化することが期待される.

#### 4.2.3　平面接触時のマーカ変形量の比較

本節では, 爪構造が内部マーカーの変形に影響するかどうかを判断するため, 平面に対する接触角を変化させた条件下で w-VBTS と wo-VBTS の比較実験をおこなった. 図 4.12 に示すように, 接触角を変化させながら平面 (MB) を w/wo-VBTS に押し当てた. 図 4.12 は，固定した VBTS に対して平面の角

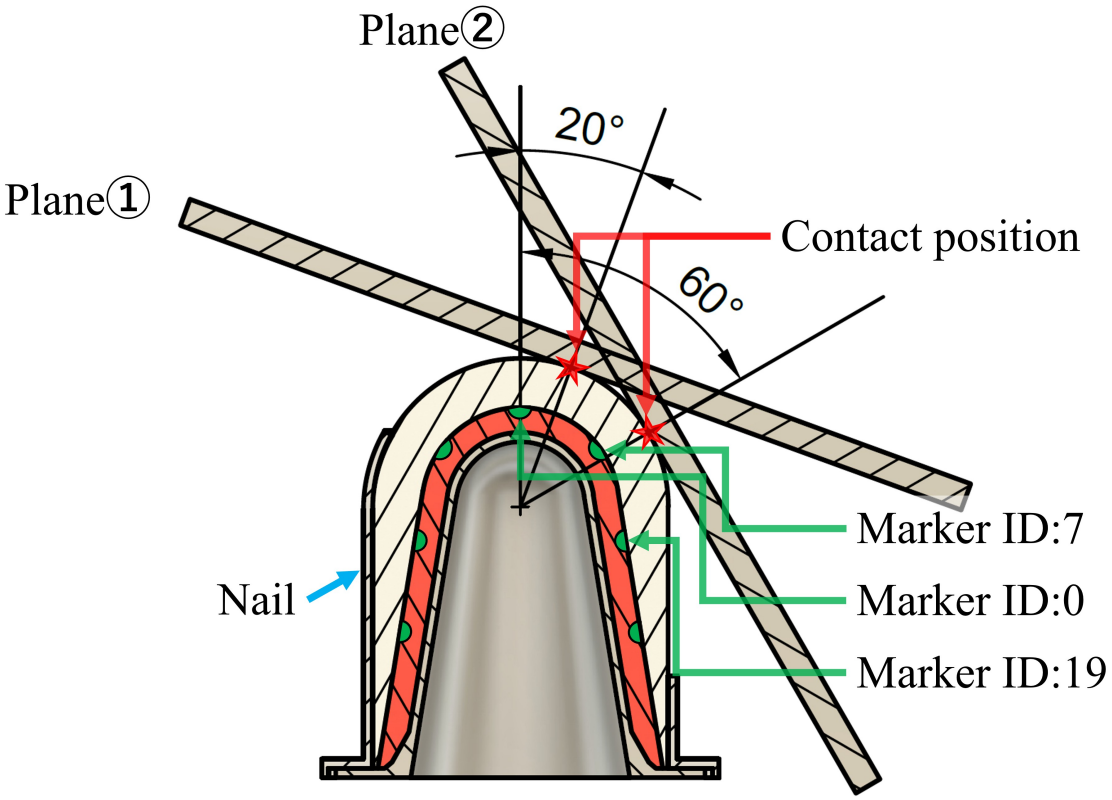



図 4.12: 平面に対する異なる接触角（20°, 60°）での w-VBTS の接触条件. w-VBTS を固定したまま, 平面の傾きを変更した. 変形解析に用いた接触位置と対応マーカー（Marker ID0，ID7，ID19）を強調表示している。

度を変えた状況を形式的に示しており，これは図 4.10-(b) に示す「平面を固定し VBTS を回転させた」条件と同じ状況である. 図 4.12 には, 爪構造と代表的なマーカー位置 (マーカ ID) , および異なる接触角での接触点を示している. 接触角が 20° (図 4.12 の Plane①) のとき，接触点はマーカー ID 0 付近となる. 接触角が 60° (図 4.12 の Plane②) のとき，接触点はマーカー ID 7 付近となる. つまり, 接触角度を 20° から 60° まで 10° 刻みで増加させると, 接触点はマーカー ID 0 から ID 7 および ID 19 の方向へ徐々に遷移する. これらにおける, 爪構造の有無において内部マーカの形状変化の過程にどのような差異が生じるのか定量することで, 爪構造によるマーカへの影響が確認できる.

##### 4.2.3.1　マーカ変形量比較実験の環境・手法

このセクションでは, w/wo-VBTS におけるマーカー形状変形を比較するための実験環境を図 4.13 に示す. 鉛直方向に動作するリニアステージ (KXB12200-5-J，SURUGA SEIKI CO.,LTD.) と w/wo-VBTS を光学実験台上に設置した. フォースゲージ (ZTA-5N，IMADA CO.,LTD.) をリニアステージに取り付け, そのフォースゲージの先端部に MB を搭載した。PC は, ステージの下降距離 (mm), 下降中の経過時間 (s)，フォースゲージからの力情報 (N), および VBTS 内部カメラの動画を収集する. 本実験では, リニアステージは 1 mm/s で下降し，フォースゲージが 4 N に達した時点で下降を停止し, 各種の

データ収集を終了した. さらに, 接触角は 20° から 60° を 10° 刻みで調整し各接触角で実験を実施した. VBTS 内部カメラで取得する動画フレームの例を図 4.14 に示す. 本研究では, マーカーの検出と追跡に YOLOv8[62] を用いた. 詳細な検出と追跡方法は, 3.2.4 項に示す.

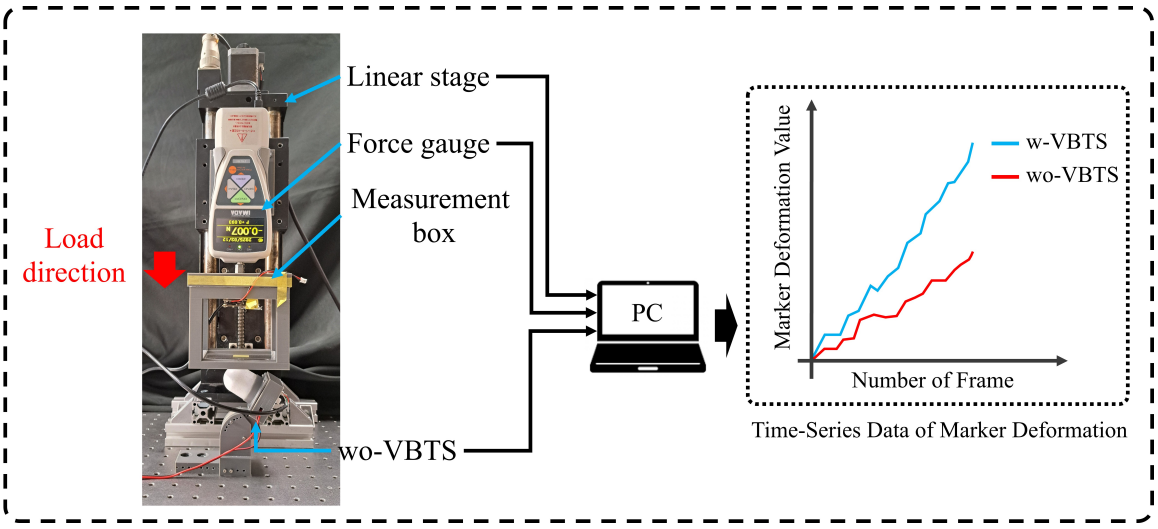



図 4.13: マーカー変形測定環境. w/wo-VBTS におけるマーカー変形の時系列グラフ比較をおこなう.

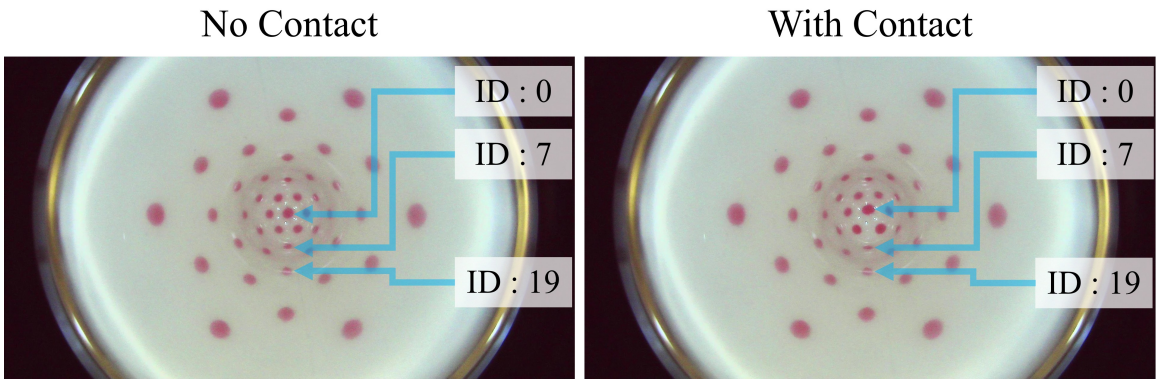



図 4.14: マーカー画像例. 左：非接触, 右：接触あり, $\theta = 20[deg]$

#### 4.2.3.2 マーカの形状定量化

ここでは, 検出・追跡されたマーカに対する形状の定量方法について詳述する. 各フレームに対して YOLOv8 でマーカ候補のバウンディングボックス (BBOX) を検出し, BBOX で切り出した局所画像に対し (図 4.15-(a) 行), (1) グレースケール変換, (2) ガウシアン平滑化, (3) 大津の二値化 [68] , (4) オープニング (クロス型 $5 \times 5$ カーネル) を適用してノイズを低減する. ここで黒色画素がマーカになるよう白黒を反転した二値画像 (4.15-(b) 行) から外部輪郭を抽出する (4.15-(c) 行). マーカが分断される場合に備え, 最大輪郭 (面積最大) と, すべての輪郭点の凸包 (分断片の統合) の両方を評価し, 後述の円形度基準を満たす方 (滑らかさが改善し, かつ面積の過大化が許容範囲内の場合に統合を採用) を採用する. 滑らかさの指標として式 4.2 に示す円形度を定義する. ここで, 式 4.2 の $A$ は候補輪郭の面積値 pix, $P$ は候補輪郭の周囲長 pix とする.

$$C = \frac{4\pi A}{P^2}. \tag{4.2}$$

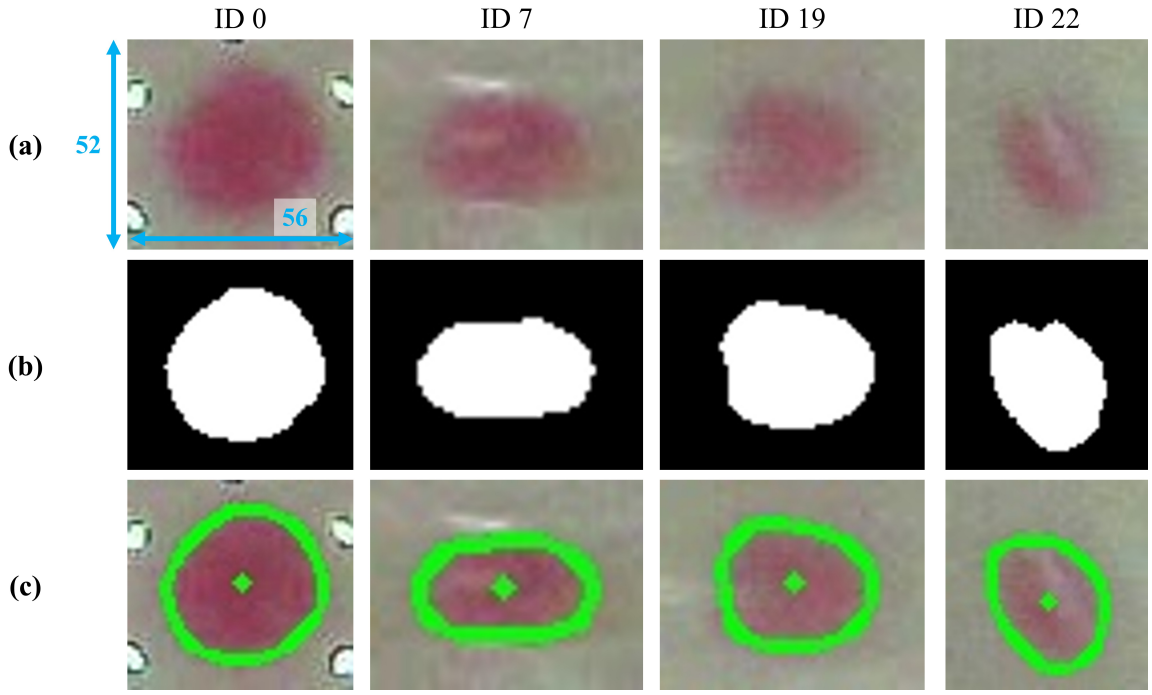



図 4.15: マーカ大きさ定量化の処理例 (切り出し—二値化—輪郭描画).
(a)：バウンディングボックスで切り取った局所画像, (b)：マーカ領域候補のバイナリ画像, (c)：マーカの輪郭検出後の画像.

面積最大の輪郭を $A_L, P_L, C_L$ (最大輪郭の面積・周長・円形度), 全分断片の凸包を $A_U, P_U, C_U$ (分断片凸包の面積・周長・円形度) とすると, 式 4.3 の採否判定を満たすとき統合した領域を採用する.

$$C_U \geq C_L + \Delta C_{\min} \quad \cap \quad A_U \leq \gamma A_L. \tag{4.3}$$

ただし,

- $\Delta C_{min} > 0$ : 円形度改善の最小閾値 (0.05)
- $\gamma > 1$ : 統合後面積の許容倍率 (2 倍)

を満たさない場合は最大輪郭を採用する. 採択された輪郭に対し, 面積 $A$ と周長 $P$ を算出し, 式 4.4 で単純かつロバストな大きさ $S$ を用いる. ここで, 式 4.4 の $S$ はマーカ大きさ, $A$ は黒色領域内の面積 (pix), $P$ は周囲長さ (pix) を意味する.

$$S = A + P. \tag{4.4}$$

図 4.16 は, YOLOv8 で検出したマーカの BBOX 内におけるマーカ画像を前処理し, 輪郭（緑）と重心（黄）を求めて，面積 ($A$), 周長 ($P$), 円形度 ($C$) を算出して定量化した結果を示す. 図 4.16 の (a) は初期フレームと (b) は接触進行後フレームを示している. これらの処理は ID ごとおよび, フレームごとに CSV に保存される. 以上の方法でマーカの形状を定量化し, 解析をおこなう.

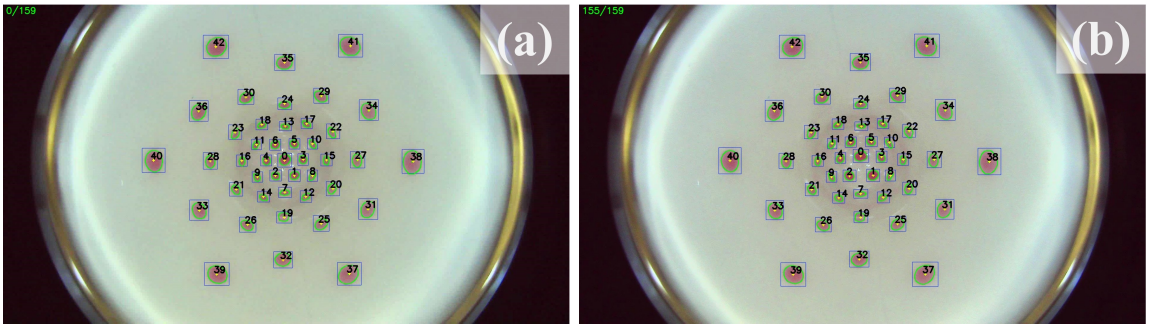



図 4.16: マーカ検出パイプラインの接触角度 20°, w-VBTS における出力例 (バウンディングボックス: 青色／輪郭: 緑色／重心: 黄色).

#### 4.2.3.3 データ解析

測定は, $\theta_{contact} \in \{20°, 30°, 40°, 50°, 60°\}$ の条件で w/wo-VBTS それぞれ 10 試行分実施した. 接触荷重は, Z 軸リニアステージを 1mm/s の速度で降下させ, フォースゲージで得られる値が 0 から 4 [N] まで増加するまで降下させた. その時の動画を w/wo-VBTS 内部カメラで撮影し, 動画の各フレームで面積変化量 (初期フレームにおける面積との差) を算出する.

本研究では, w-VBTS と wo-VBTS の同一条件下で取得したマーカ大きさ系列データ (CSV ファイル) から, 指定マーカ ID (0, 7, 19) のフレーム時系列を抽出し, 全試行で値が揃うフレームのみを対象に平均値と不偏標準偏差 ($\pm 1\sigma$) を算出して可視化した. 各系列は初期フレーム値でオフセット (差分) 正規化し, 試行間の初期差を除去した. さらに, 各試行の最終フレーム番号の最小値を共通の最終フレームとし, その時点のオフセット値の平均 ± 標準偏差も併記した（図中の縦破線）. 可視化は, 平均値の折れ線とその周囲の塗りつぶし帯 ($\pm 1\sigma$) によっておこなった.

#### 4.2.3.4 マーカ変形量比較実験の結果と考察

ここでは, フォースゲージ先端に取り付けた MB を w-VBTS および wo-VBTS に対して, 印加力が 4N に到達するまで 1mm/s の一定速度で押し当て, その時のマーカ形状変化の定量結果 (ID:0,7) および共通最終フレームにおけるマーカ変形量の結果を示す.

MB と w/wo-VBTS の接触角は 20° から 60° まで 10° 刻みで変更した. 以下にそれぞれの接触角度における, フレーム毎のマーカ形状変化量, 接触荷重推移および全マーカの共通最終フレームにおけるマーカ変化量の結果について詳述する.

- **接触角度 20° におけるマーカ形状変化および荷重推移の比較**

  w-VBTS と wo-VBTS 間で顕著な差が見受けられる.
  w-VBTS のマーカ ID0 (図 4.17-(a)) は 100 フレーム以降に変形が緩やかに増加した. しかし, wo-VBTS ではそのような増加傾向は見られなかった. マーカ ID7 (図 4.17-(b)) は両構成で同程度の変形を示した. 接触荷重量の増加は双方で滑らか (図 4.17-(c)) であったが, w-VBTS は wo-VBTS より早く目標荷重に到達 (w-VBTS は 153 フレーム, wo-VBTS は 209 フレーム) し, 爪構造が皮膚変形を拘束して荷重伝達を促進したことが示唆される.

- **接触角度 30° におけるマーカ形状変化および荷重推移の比較**

  w-VBTS と wo-VBTS 間で顕著な差が見受けられる.
  ID0 および ID7 の変形 (図 4.18-(a), (b)) は w-VBTS と wo-VBTS で概ね類似していたが, 接触荷

重量は w-VBTS でおよそ 50 フレームから増加 (図 4.18-(c)) し，wo-VBTS は約 70 フレームまで緩やかであった．これは爪構造が皮膚変形を拘束し, 荷重伝達を加速したことを示唆する．

- **接触角度 40° におけるマーカ形状変化および荷重推移の比較**

  w-VBTS と wo-VBTS 間で顕著な差が見受けられない．
  ID0 と ID7(図 4.19-(a), (b)) は両条件でほぼ同一の変形を示し, 共通最終フレームもほとんど同じタイミングであった (wo-VBTS: 193, w-VBTS: 197)．また, 力の軌跡も w-VBTS と wo-VBTS とで重なっており (図 4.19-(c)), 爪構造の影響は大きくないことが示唆される．

- **接触角度 50° におけるマーカ形状変化および荷重推移の比較**

  w-VBTS と wo-VBTS 間で顕著な差が見受けられる．
  w-VBTS のマーカ ID0 (図 4.20-(a)) は 100 フレーム以降に減少傾向にあるが, wo-VBTS では 150 フレーム以降に減少が見られる．ID7(図 4.20-(b)) は w-VBTS では wo-VBTS よりも早い段階で, 増加傾向を示している．また, 接触荷重量は, w-VBTS においては 150 フレームで 4 N に到達し (図 4.20-(c))，wo-VBTS(197 フレーム) よりも, 早い段階で目標荷重に到達している．これは爪構造が皮膚変形を拘束し, 荷重伝達を促進したことを示唆する．

- **接触角度 60° におけるマーカ形状変化および荷重推移の比較**

  w-VBTS と wo-VBTS 間で顕著な差が見受けられない．
  ID0 と ID7 (図 4.21-(a),(b)) は両条件でほぼ同一の変形を示し, 共通最終フレームもほとんど同じタイミングであった (w-VBTS: 197，wo-VBTS: 193)．また, 力の軌跡も w-VBTS と wo-VBTS とで重なっており (図 4.21-(c)), 爪構造の影響は大きくないことが示唆される．

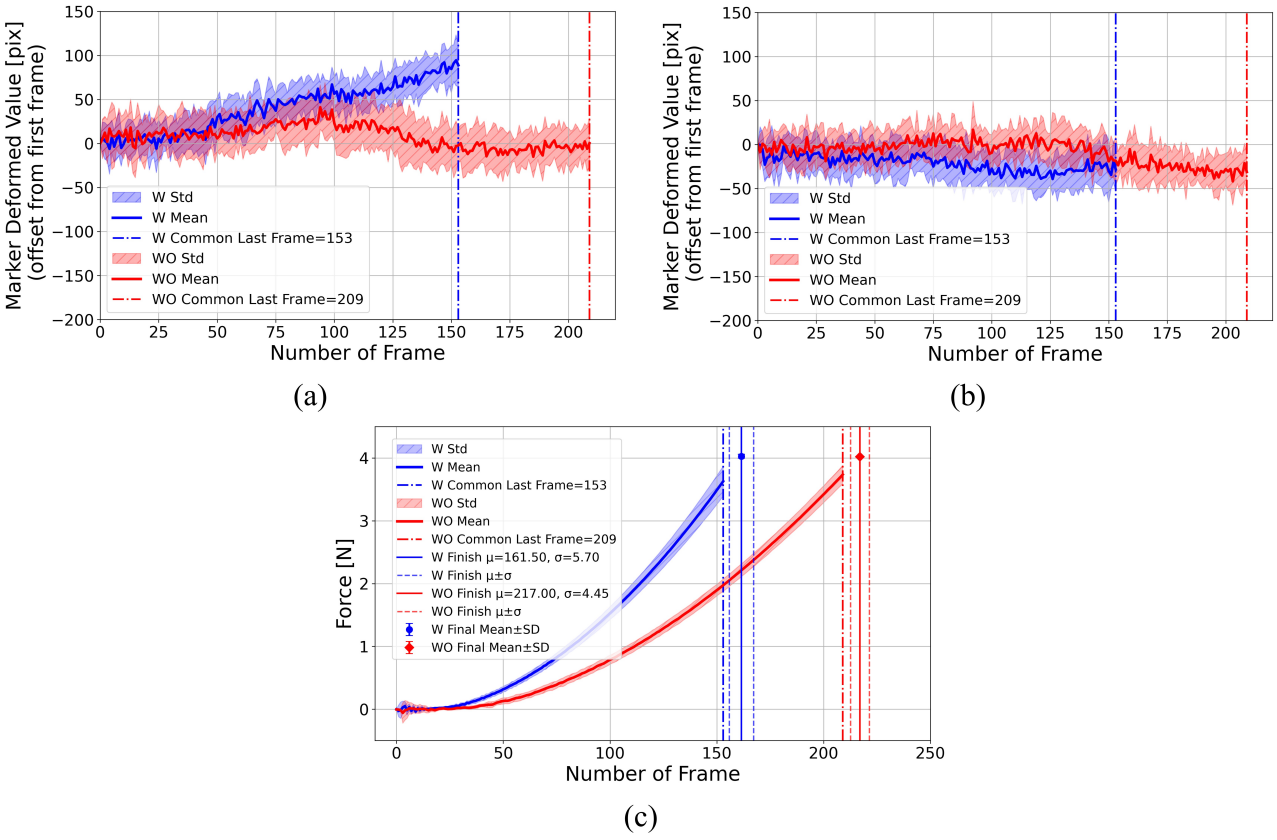



図 4.17: 20° におけるフレームごとのマーカ形状変化量および荷重推移. (a)：マーカ ID0 の形状変化量, (b)：マーカ ID7 における形状変化量, (c)：フレーム毎の荷重量の推移.

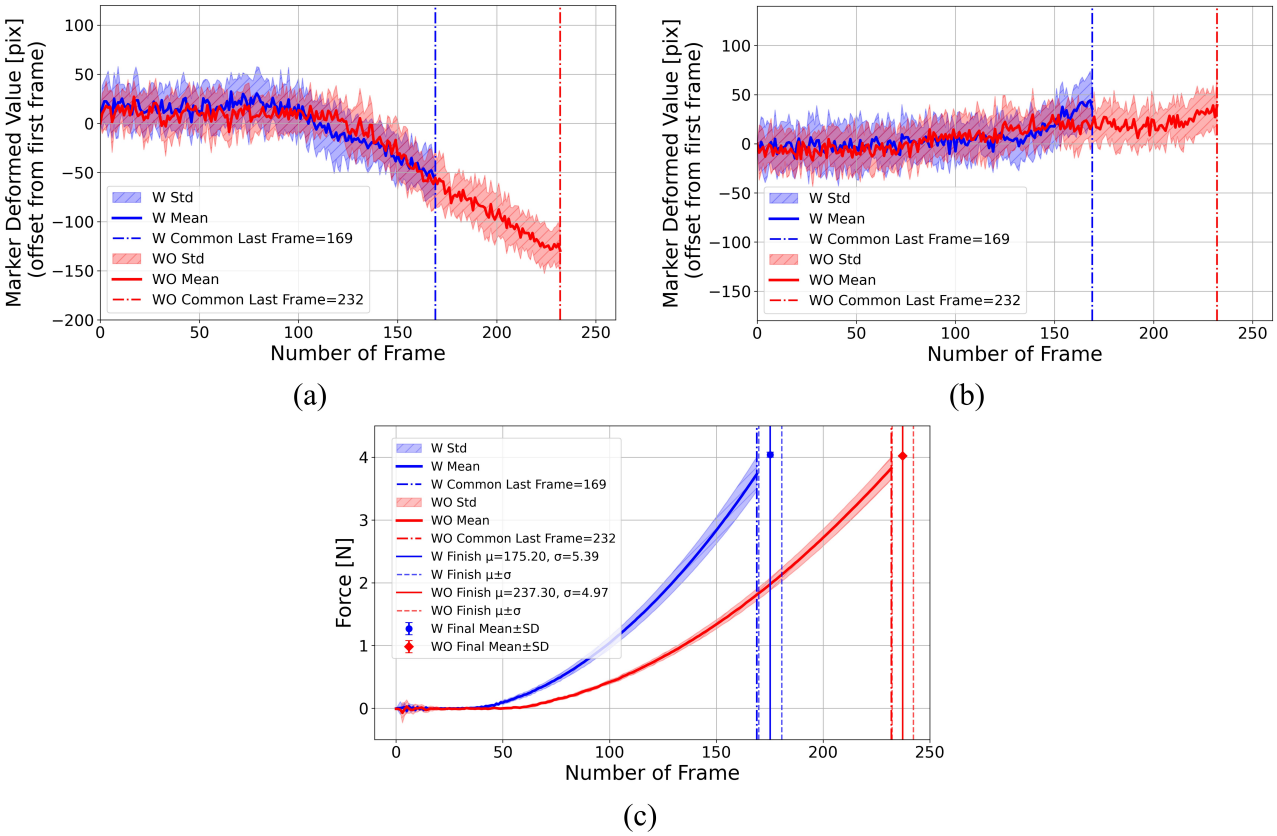



図 4.18: 30° におけるフレームごとのマーカ形状変化量および荷重推移. (a)：マーカ ID0 の形状変化量, (b)：マーカ ID7 における形状変化量, (c)：フレーム毎の荷重量の推移.

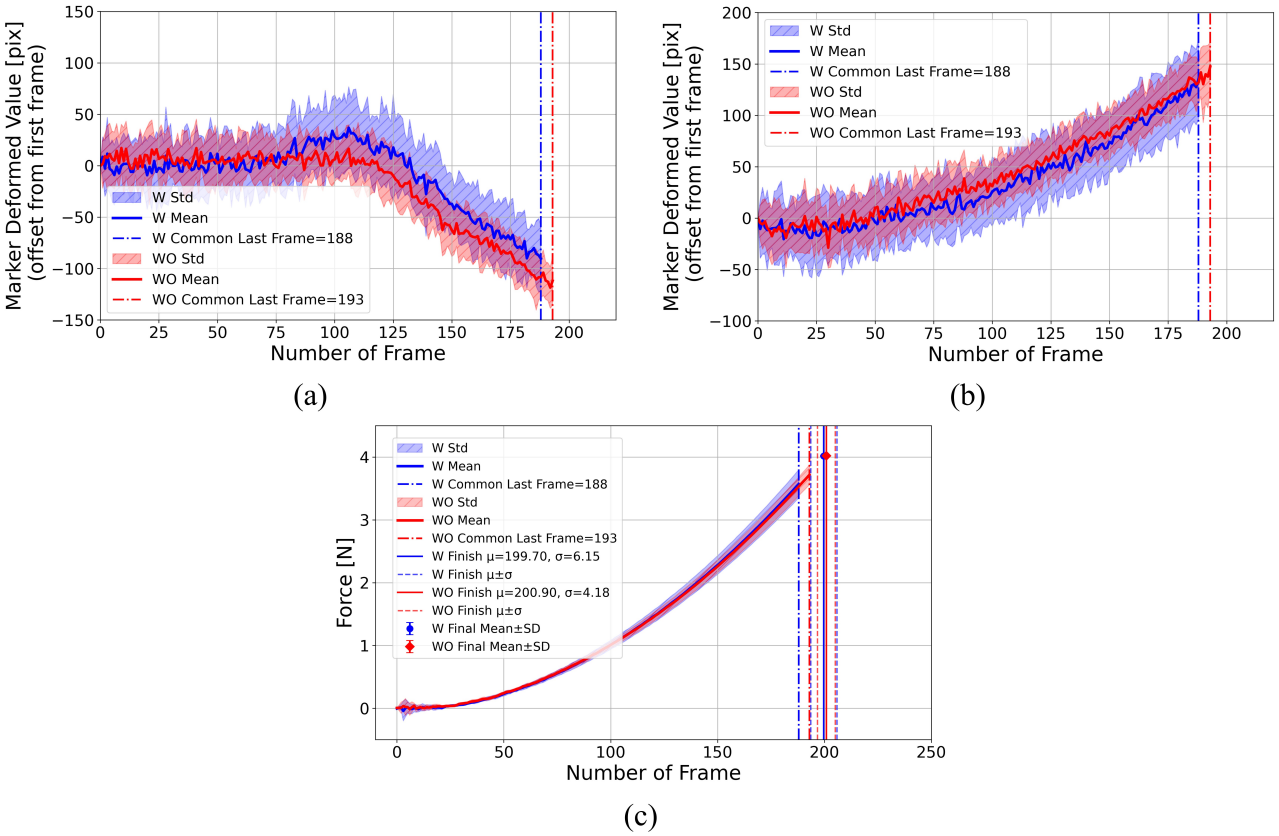



図 4.19: 40° におけるフレームごとのマーカ形状変化量および荷重推移. (a)：マーカ ID0 の形状変化量, (b)：マーカ ID7 における形状変化量, (c)：フレーム毎の荷重量の推移.

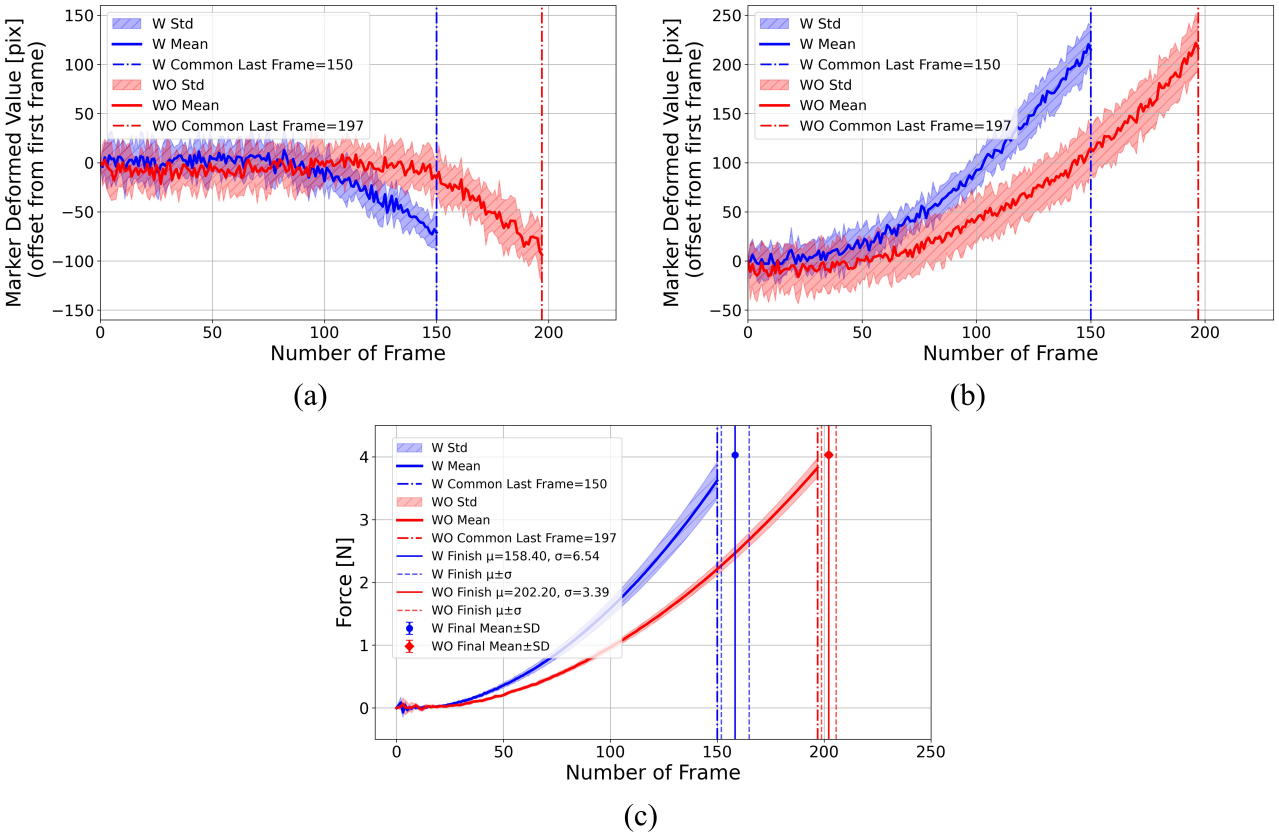



図 4.20: 50° におけるフレームごとのマーカ形状変化量および荷重推移. (a)：マーカ ID0 の形状変化量, (b)：マーカ ID7 における形状変化量, (c)：フレーム毎の荷重量の推移.

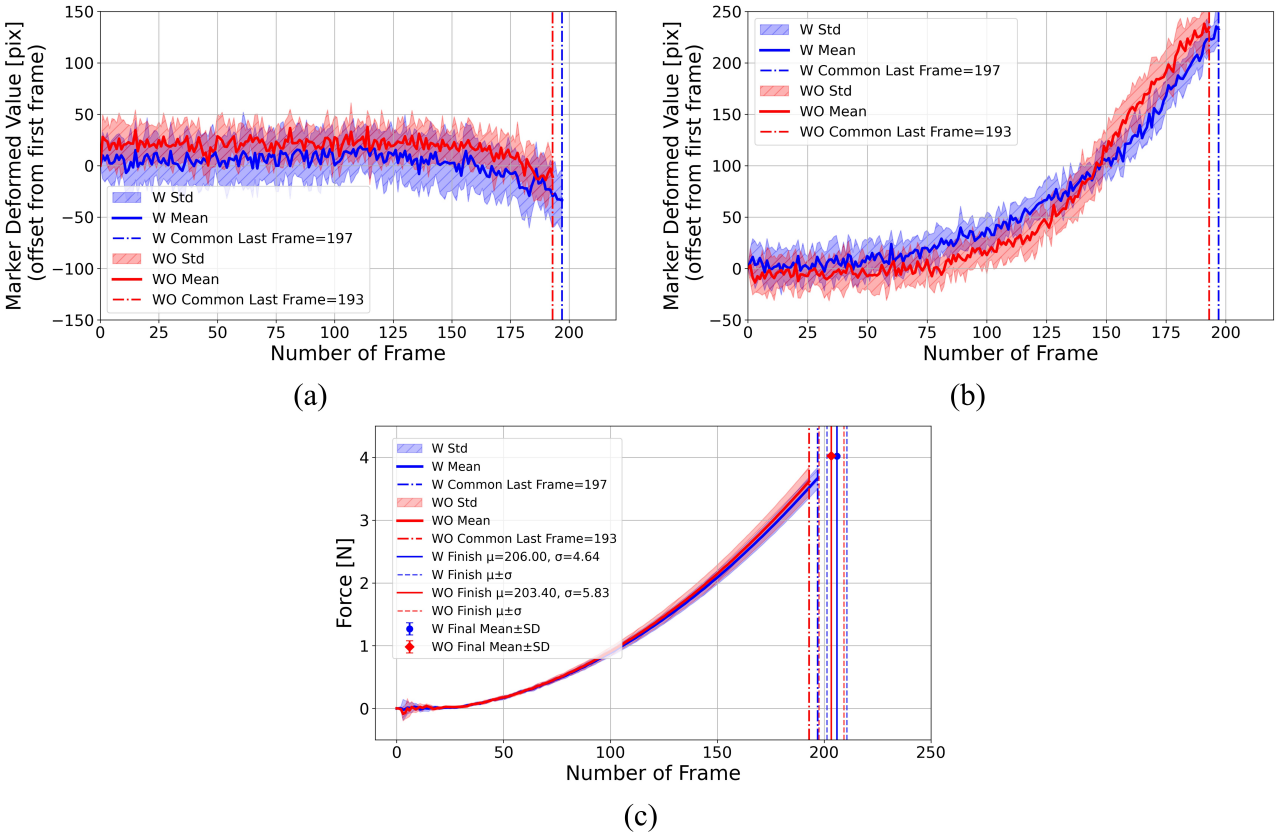



図 4.21: 60° におけるフレームごとのマーカ形状変化量および荷重推移. (a)：マーカ ID0 の形状変化量, (b)：マーカ ID7 における形状変化量, (c)：フレーム毎の荷重量の推移.

さらに, 図 4.22–4.26 は, 各接触角条件における各マーカ ID の共通最終フレームでの変形量の比較を示す. 変形は, 初期フレームのマーカ面積と共通最終フレームの面積の差として定義し, 10 試行の平均値をエラーバー付き標準偏差とともに示した.

- **接触角度 20° における全マーカ ID の共通最終フレームでの変形量**

  マーカ ID0 において w-VBTS と wo-VBTS 間に差がみられる.
  特に ID 0, 1, 2 で面積増加の変形が観測され, ID0 では w-VBTS では正方向に面積が増加している傾向を示すのに対して, wo-VBTS では変形量がほとんどなくその分, マーカ ID 1 と 2 において w-VBTS よりも wo-VBTS の方がマーカの正方向への面積増加傾向がみられる. また, w-VBTS では接触荷重が爪構造による柔軟なスキンの幾何的拘束により一極集中するのに対して, wo-VBTS では接触荷重がマーカ ID 1, 2 の方へ分散したため, 図 4.17 で示したように, 目標荷重到達のタイミングが w-VBTS より遅れたと考えられる.

- **接触角度 30° における全マーカ ID の共通最終フレームでの変形量**

  ID0–2 で顕著な変形に加え, ID7 でも正方向への面積増加傾向が w/wo-VBTS の双方で確認できる. この傾向は, 接触角の増加に伴い接触点が ID7 側へ移動したことに起因すると考えられる.

- **接触角度 40° における全マーカ ID の共通最終フレームでの変形量**

  ID1 と ID2 の変形は減少し, ID7 の変形はさらに正方向への面積増加傾向が確認できる. 加えて,

w-VBTS の ID19 でも正方向への面積増加傾向が出現しており, wo-VBTS では見られない.

- **接触角度 50° における全マーカ ID の共通最終フレームでの変形量**

  ID1 と ID2 の変形は減少し, ID7 は正方向への面積増加が確認できた. w-VBTS の ID19 は大きな正の変形を示した一方，wo-VBTS の ID19 では同等の変形は確認されなかった。

- **接触角度 60° における全マーカ ID の共通最終フレームでの変形量**

  w-VBTS および wo-VBTS の ID7 の変形がさらに正方向への面積増加が確認できた. また, w-VBTS の ID19 は正方向への面積増加を示したが，wo-VBTS ではその傾向は w-VBTS に比べて小さい結果となった.

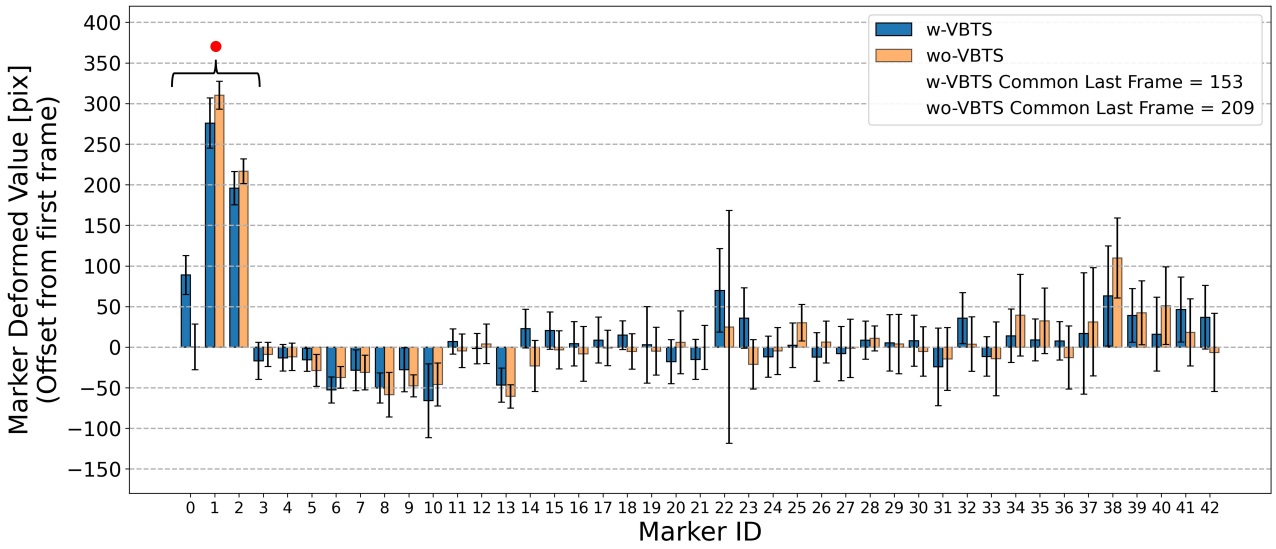



図 4.22: 共通最終フレーム (20°) における w-VBTS と wo-VBTS のマーカ変形量の比較. 棒グラフは初期フレームに対する変形オフセットの平均値を示し, エラーバーは試行間の標準偏差 ($\pm 1\sigma$) を表す.

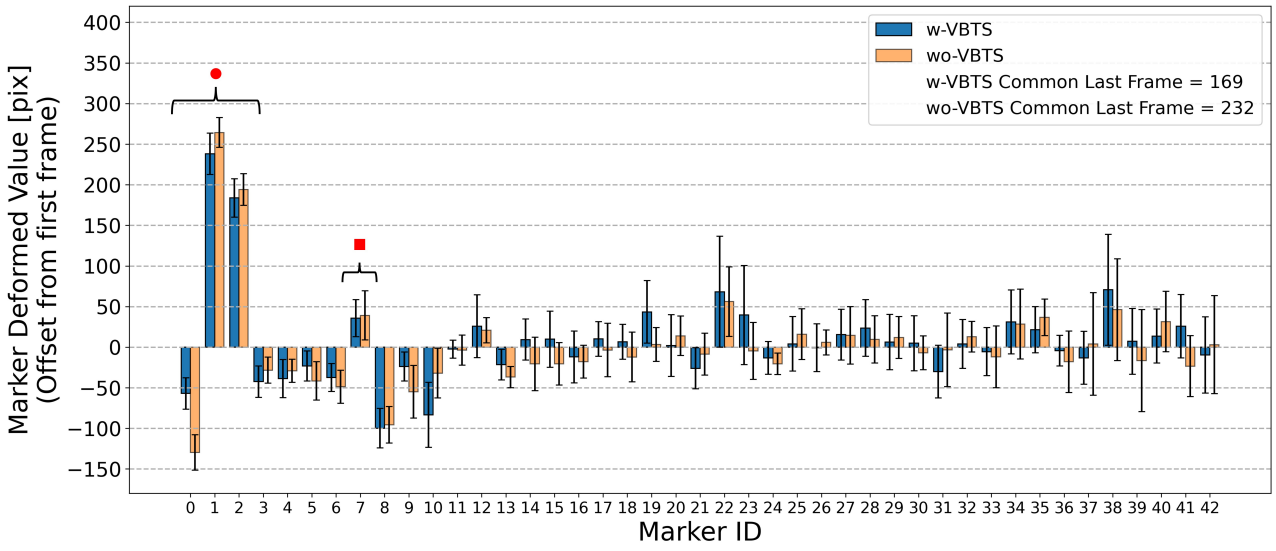



図 4.23: 共通最終フレーム (30°) における w-VBTS と wo-VBTS のマーカ変形量の比較. 棒グラフは初期フレームに対する変形オフセットの平均値を示し, エラーバーは試行間の標準偏差 ($\pm 1\sigma$) を表す.

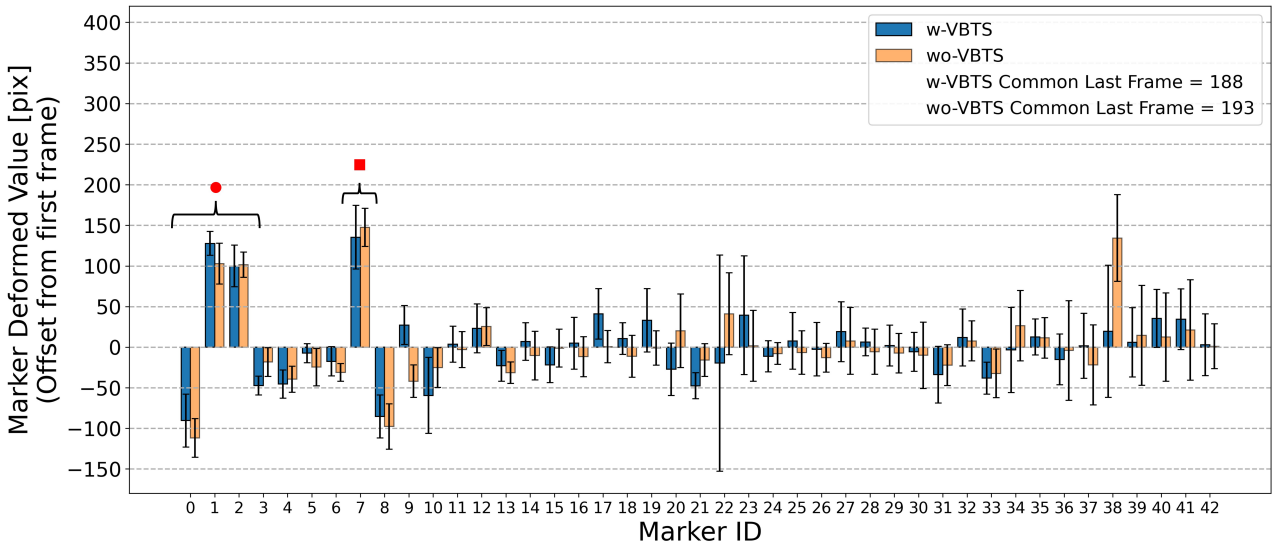



図 4.24: 共通最終フレーム (40°) における w-VBTS と wo-VBTS のマーカ変形量の比較. 棒グラフは初期フレームに対する変形オフセットの平均値を示し, エラーバーは試行間の標準偏差 ($\pm 1\sigma$) を表す.

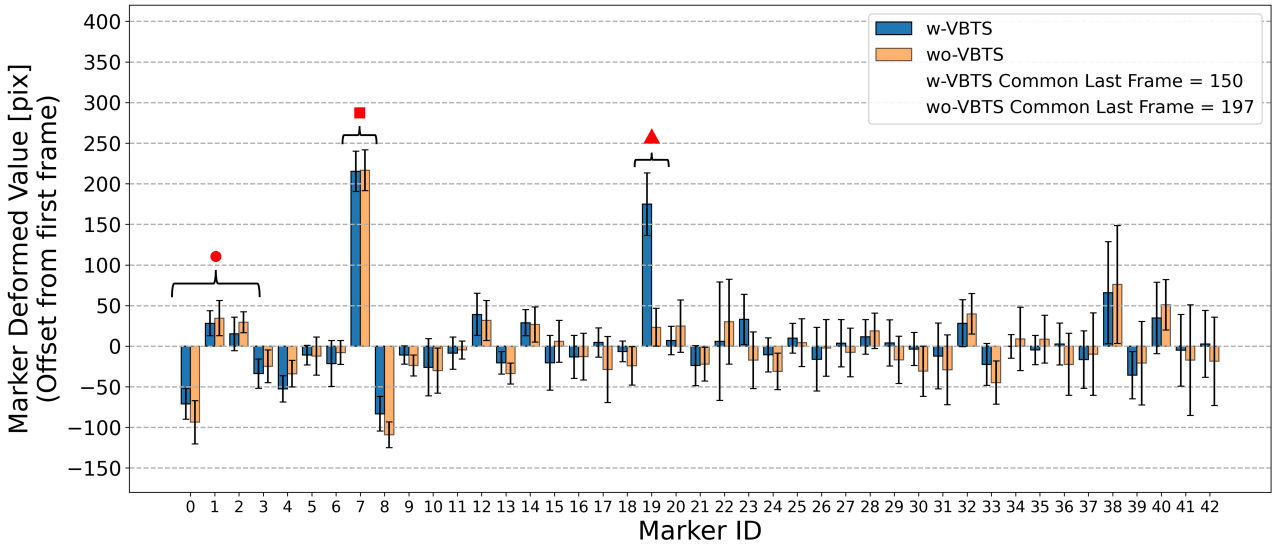



図 4.25: 共通最終フレーム (50°) における w-VBTS と wo-VBTS のマーカ変形量の比較. 棒グラフは初期フレームに対する変形オフセットの平均値を示し, エラーバーは試行間の標準偏差 ($\pm 1\sigma$) を表す.

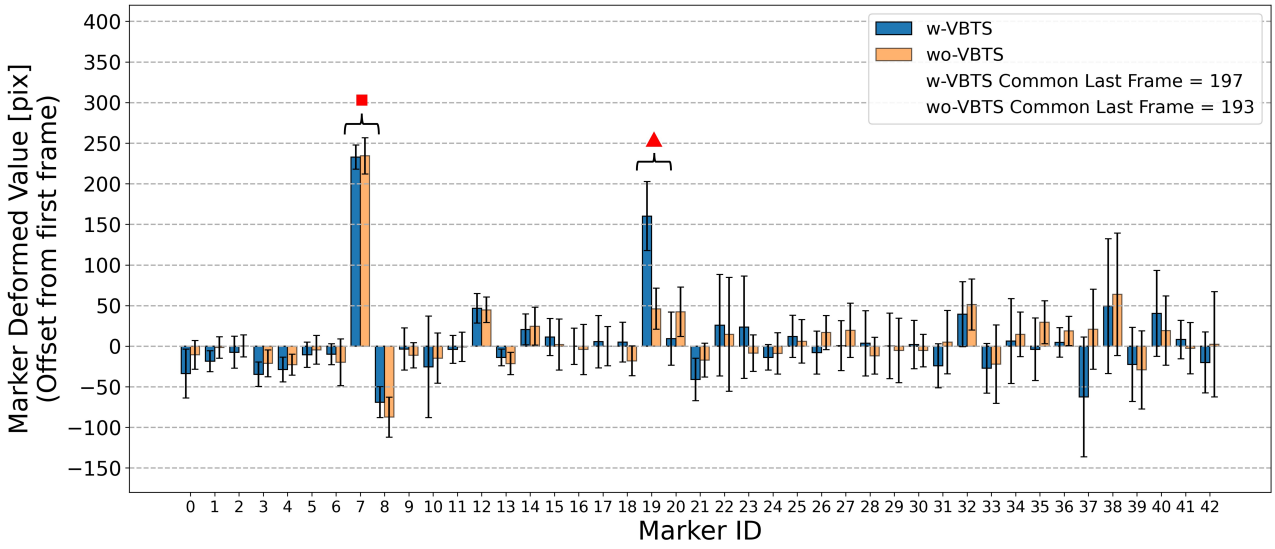



図 4.26: 共通最終フレーム (60°) における w-VBTS と wo-VBTS のマーカ変形量の比較. 棒グラフは初期フレームに対する変形オフセットの平均値を示し, エラーバーは試行間の標準偏差 ($\pm 1\sigma$) を表す.

以上より, 図 4.22–4.26 の結果から, 接触角が増加するにつれて, 主たる変形位置は ID0—2 から ID7, 最終的には ID19 へと移行する傾向を示した. 図 4.12 に示すように, この傾向は接触角の変化に伴う MB と w/wo-VBTS の接触点の移動によって説明できる. さらに, 40° と 60° では，フレーム毎のマーカ変形, 接触荷重の推移および共通最終フレームのマーカ変形いずれにおいても, w-VBTS と wo-VBTS の明確な差は現れなかった (図 4.19，図 4.21).

これに対する補足として, 図 4.27 は 接触角度 40° と 60° における ID19 の変形過程を示す. 接触角度 40° (図 4.27-(a)) では w/wo-VBTS の大きな差は観測されなかった. 接触角度 60° (図 4.27-(b)) では, w-VBTS の ID19 は wo-VBTS に比べて明瞭な正の変形傾向が見られた。

総じて，接触角が 20° から 60° に変化するにつれて，支配的な変形は ID0 から ID19 へと移行し,

その過程で w-VBTS と wo-VBTS の間に正方向への面積増加の差異が見て取れる．これらの結果は，爪構造が皮膚変形に影響を与えること, そしてその効果が VBTS 内部マーカを通じて明瞭に観測できることを示している．

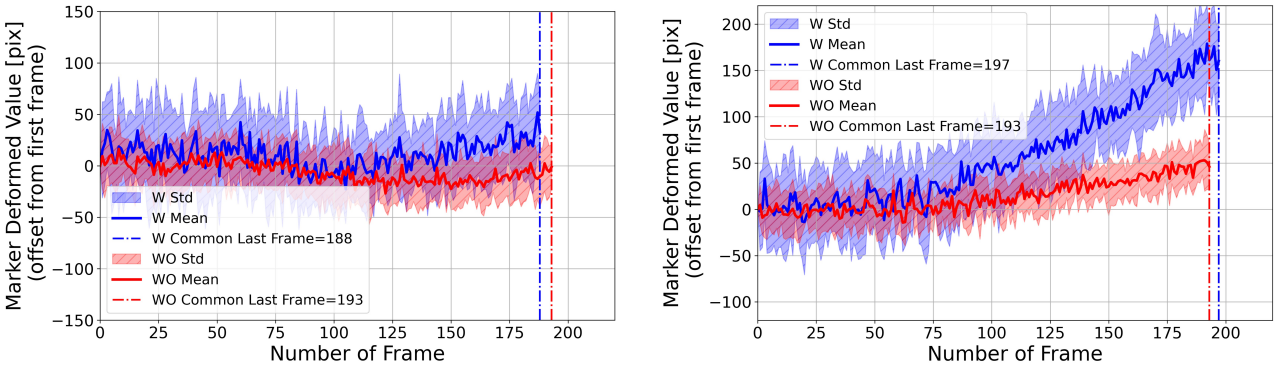



図 4.27: 40°, 60° におけるフレームごとのマーカ ID19 の形状変化量および荷重推移．(a)：接触角度 40° かつマーカ ID19 の形状変化量, (b)：接触角度 60° かつマーカ ID19 の形状変化量．

## 4.3 プロトタイプ型: w-VBTS の実験結果の考察

ここでは, 簡易的な爪構造の影響を, 機械的効果 (保持力・接触面積) と, 光学的効果 (マーカ変形) という観点から議論する．

**・機械的効果**

保持力の実験では, 立方体および台形物体の把持のいずれにおいても, w-VBTS は一貫して wo-VBTS を上回った (図 4.8)．これらの結果は, 人の爪が軟部組織の変形を抑える幾何学的拘束を与え, 把持安定性を高めるという先行研究の報告 [15][16] に類似する結果を示した．さらに, 接触面積の解析では, ほとんどの荷重・角度条件で, w-VBTS は wo-VBTS に比べて平面接触面積が大きかった．Bonferroni 補正後に有意が残ったのは 20 ケース中 7 ケースにとどまったものの (表 4.4), 一貫した傾向は, 爪構造が接触界面の拡大に寄与することを示している．これらのことから, 総合すると人の爪構造の模倣はここで提案した w-VBTS の機械的性能 (保持力と平面接触面積) を向上させたといえる．

**・光学的効果**

爪構造の有無による内部マーカ変形の差は, 爪が柔軟皮膚に与える幾何学的拘束をマーカ計測で評価できることを示唆する結果となった．角度依存の観察でもこれが裏付けられた．小さな接触角 (20°・30°) では, w-VBTS と wo-VBTS のマーカ変形の傾向は類似していたが, w-VBTS は目標荷重への到達が早く, より効率的な荷重伝達を示したといえる (図 4.17, 4.18)． これに対し, 大きな接触角 (40°, 50°, 60°) では, 特定のマーカ (例：ID 0, 7, 19) に w-VBTS 特有の変形パターンが見られた (図 4.24–4.26)．さらに, 接触角が大きくなるにつれて, 変形するマーカは ID0 から ID19 へと接触点の移動に対応してシフトした (図 4.22 – 4.26)．これらの知見は, 内部マーカが, 爪構造が皮膚の変形経路をどのように変えるかを示す光学的指標になり得ることを示す．

**・まとめ**

提案する w-VBTS は, 単純な爪構造 (外からの装着) によって機械的効果と光学的効果の両面から恩恵を受ける. 機械的には, 爪構造が柔軟なスキンの過度な変形を抑え保持力を高め, 接触面積を拡大する. 光学的には, 内部カメラで定量追跡可能な形でマーカ変形からも爪構造の有無による変形の差異が確認できた. これらの複合的効果は, 爪構造が VBTS の性能向上に寄与することを支持し, マーカ変形解析の結果が, ビジョンベース触覚センサにおける幾何学的拘束のモニタリングの可能性を示すことを示唆する. 言い換えれば, 爪構造による柔軟なスキンの幾何学的拘束という現象は, マーカの変化量より観察可能である.

### 4.4 プロトタイプ型: w-VBTS の実験結果における結論

本研究では, 人間の指先構造がもつ幾何学的拘束効果を, ビジョンベース触覚センサ (VBTS) で再現することは可能であるかを検討した. そのために, 爪構造ありの w-VBTS と爪構造なしの wo-VBTS の 2 種類を安定して作製する手法を開発し, 保持力，平面接触面積, 内部マーカ変形の 3 つの評価指標で比較実験を実施した. その結果, w-VBTS は wo-VBTS と比べて一貫して高い保持力と大きな接触面積を示し, 爪構造を組み込む機械的利点が確認できた. さらに, 内部マーカの変形解析では w-VBTS と wo-VBTS の間で明確に異なる変形パターンが観察され, 爪による幾何学的拘束効果を定量化する新しい指標を与えた. これらの知見は, 爪に着想を得た構造がカメラベース触覚センサにおける柔軟皮膚を幾何学的に拘束し, その効果がカメラ画像データから定量的に捉えられることを実験的に初めて示すものであり, VBTS の設計指針に新たな視点 (生物模倣) を提供する. 一方で, 指先形状を単純化していることや, 接触推定精度の直接評価をおこなっていないことなどの課題は残る.

# 第5章

# 爪骨構造一体型: NB-VBTSによる微小な段差・物体把持に関する評価研究

## 5.1 手法

### 5.1.1 センサデザイン

ここでは, 4.1.1 項で提案した w-VBTS をさらにヒトの指形状に近づけた新しいセンサ Nail-Bone VBTS (NB-VBTS) の外観（構成要素と寸法）を詳述する. 従来の w-VBTS は爪構造を外付けで装着する方式を採用していた (図 4.1).

しかし, この構造では爪先での薄い物体の把持・操作がおこなえない構造であった. 爪構造は, 幾何的拘束性による接触面積の増加に加えて, 巧緻な物体操作を可能とする機能も有している. そこで NB-VBTS では, ヒト指先の多層構造 (爪・骨・柔軟皮膚) を w-VBTS と同様に模倣しつつ, 図 5.1-(a) に示すように, 骨構造と爪構造を一体化した内部支持構造へと改良した. 比較のために, 従来型 VBTS に近しい, 半球と円柱を組み合わせた単純な形状の Bone VBTS (B-VBTS) を作製する (図 5.1-(b)). NB-VBTS と B-VBTS は同一のカメラ (SYD-V31105L-158A-01, MISUMI Electronics Corp.), 同一のスキン材料, および同一の作製プロセスを用いている.

両者の詳細寸法を図 5.2 に示す. NB-VBTS の骨構造形状は B-VBTS と同一である. ただし, NB-VBTS では爪構造 (厚さ 1mm) を導入するため, B-VBTS の骨構造の片側半分に相当する部分を爪が置き換える形となっている. なお, 柔軟なスキンの半径 (15mm), 最外層の厚み (1.5mm), マーカサイズ (1mm) は NB-VBTS と B-VBTS で同一である. また, NB-VBTS におけるマーカの配置イメージおよび各部位の名称を図 5.3 に示す.

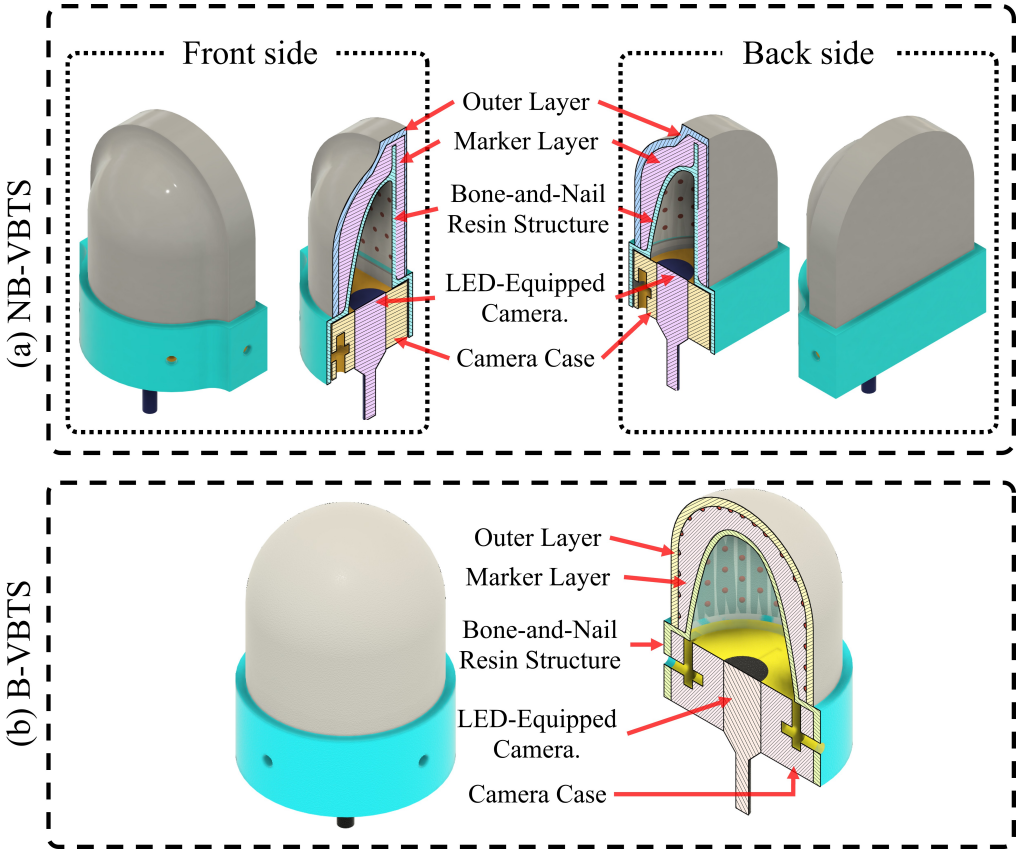



図 5.1: NB/B-VBTS の外観図. (a)：NB-VBTS, (b)：B-VBTS.

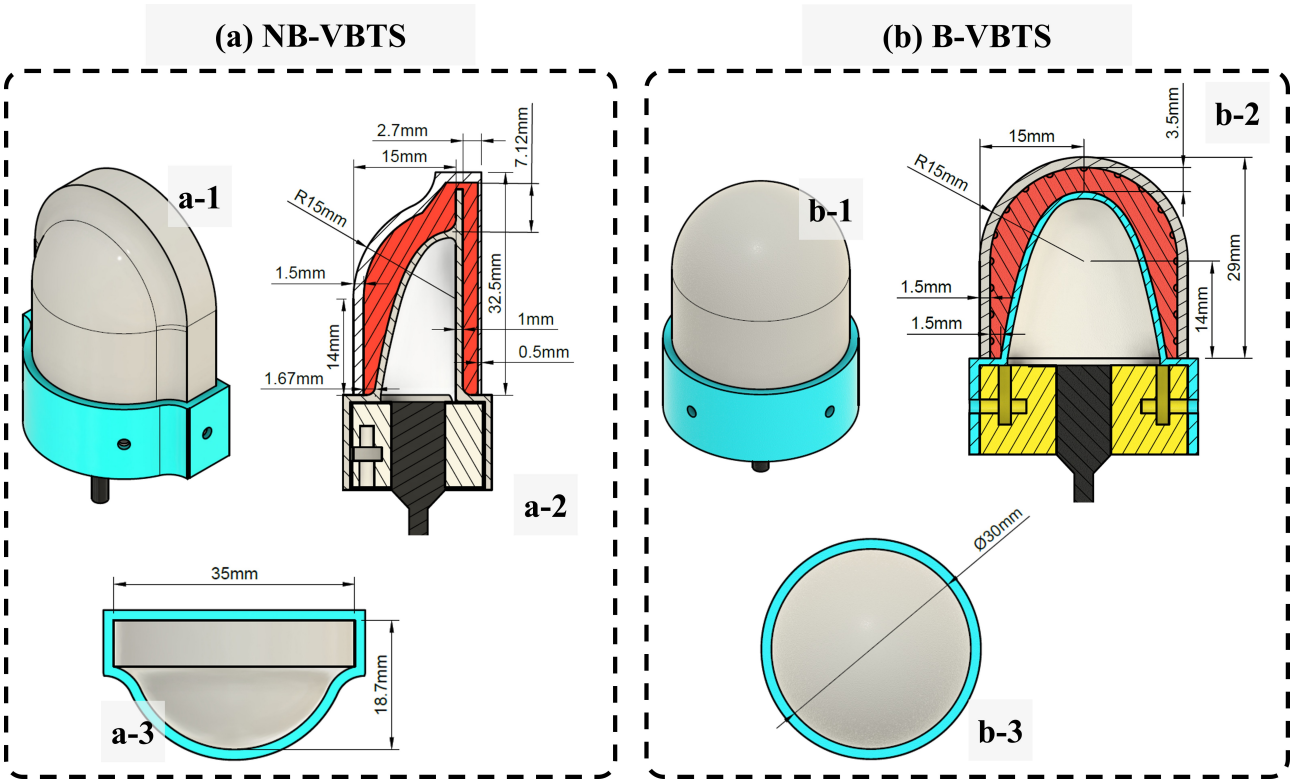



図 5.2: NB/B-VBTS の寸法. (a)：NB-VBTS の詳細な寸法, (b)：B-VBTS の詳細な寸法

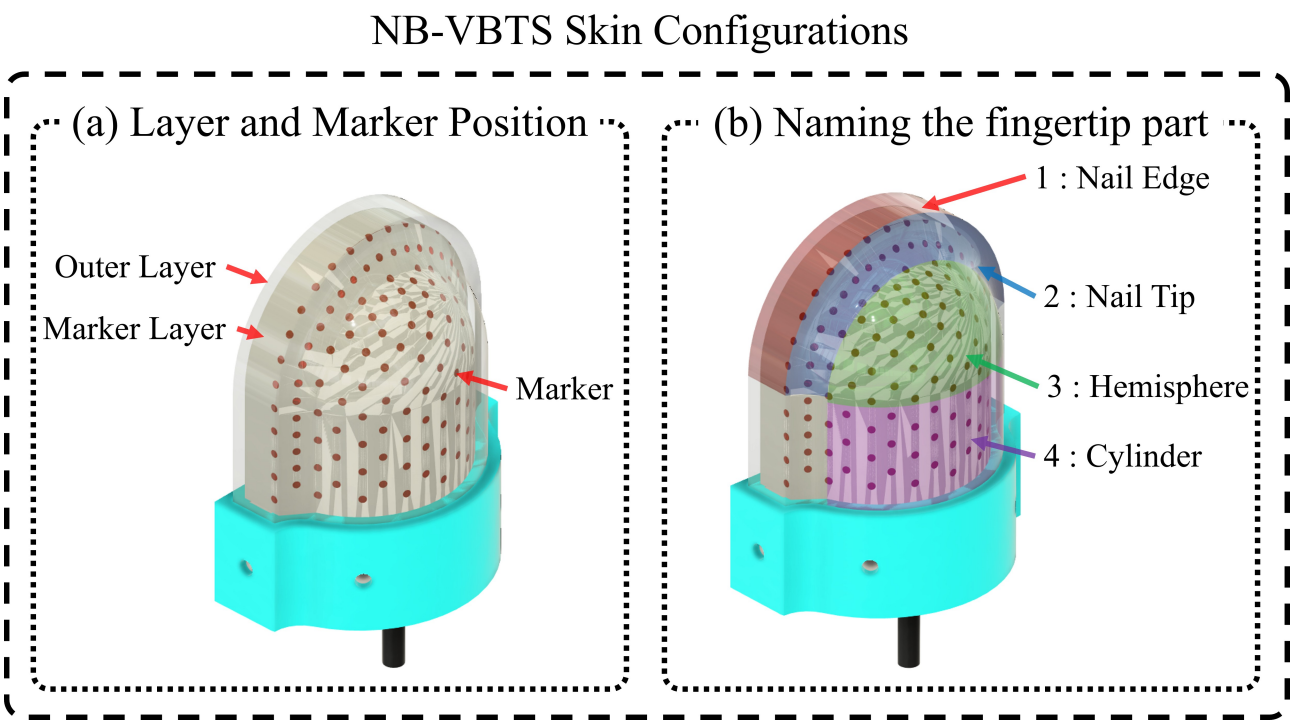



図 5.3: NB-VBTS のスキンレイヤーと各部位の名称. (a)：NB-VBTS のレイヤーと実際のマーカ配置のイメージ (爪先端部にもマーカ付与), (b)：B-VBTS における各部位の名称, Nail Edge：爪部の外周, Nail Tip：爪先, Hemisphere：指の半球構造部, Cylinder：指の円柱部, 他.

### 5.1.2　透明骨構造と柔軟スキンの作成

ここでは, 提案する NB-VBTS および B-VBTS の製作手順を示す. 骨構造および骨と爪の一体化構造は Form 3 用の Clear Resin V4 (Form 3) で積層造形した後, 3M 製スポンジ研磨パッド (図 5.4 (1) - (5)) および Hynzework 製研磨コンパウンド (図 5.4 (6) - (8)) によって順次研磨し, 最終的に透明性が得られる. 透明な骨と爪の一体化構造を図 5.4-(9) の左, 透明な骨構造を図 5.4-(9) の右に示す. 次に, NB-VBTS のスキンを鋳型成形で作製する (図 5.4-(b))。ただし, B-VBTS も基本工程は同じで, 使用する金型のみが異なるため, 詳細　は省略する. また, ここで示すスキン作製に使用する材料として Solaris (Smooth-On Inc.) と Slacker (Smooth-On Inc.) のブレンドを例示しているが, 他材料においても同様の過程で作製する.

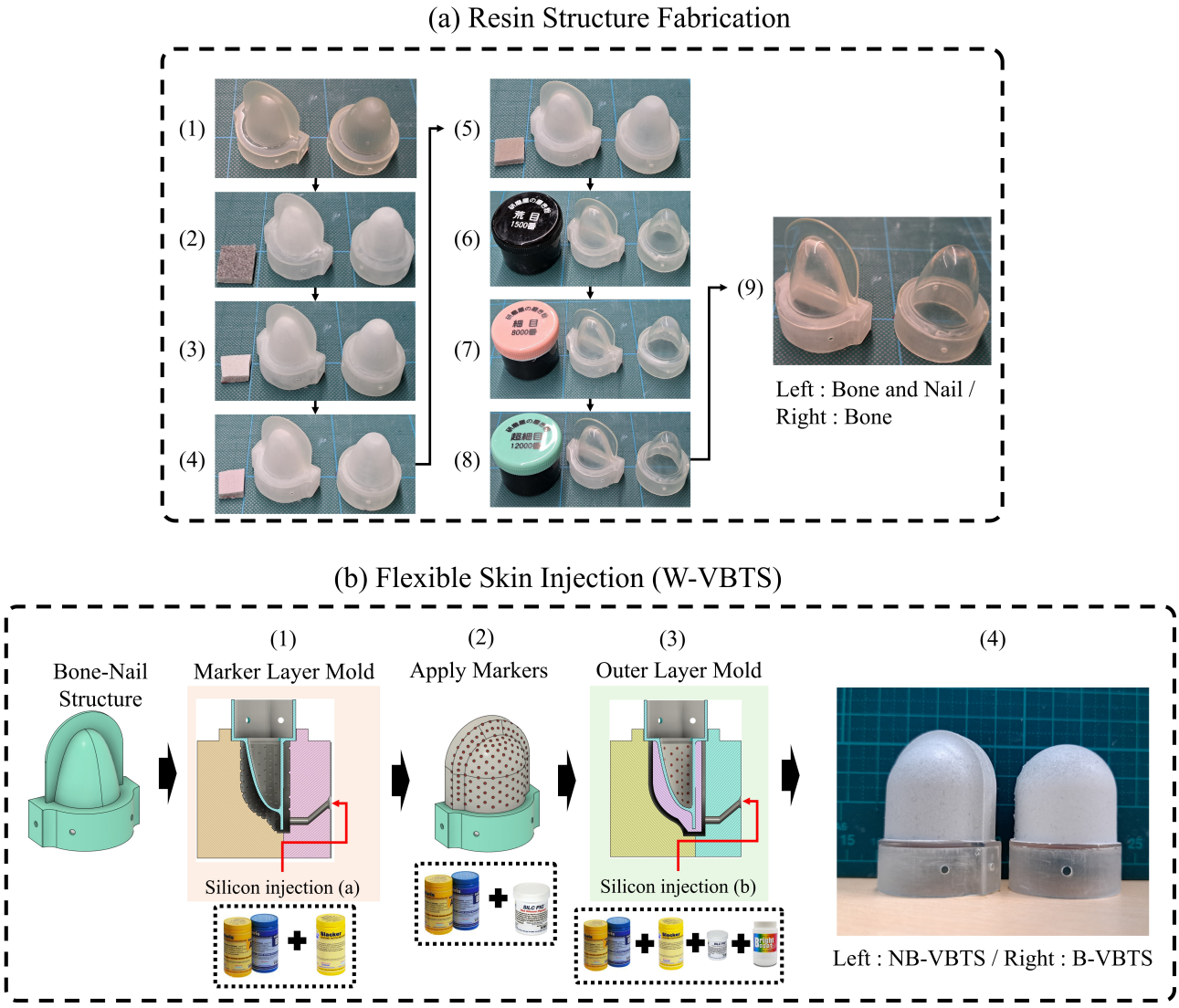



図 5.4: NB/B-VBTS の透明骨構造と柔軟スキンの作製方法. (a)： 骨構造および爪と骨構造が一体化した透明構造の作製プロセス, (b)： NB-VBTS を例とした柔軟なスキンの作製プロセス.

## 5.2 実験内容

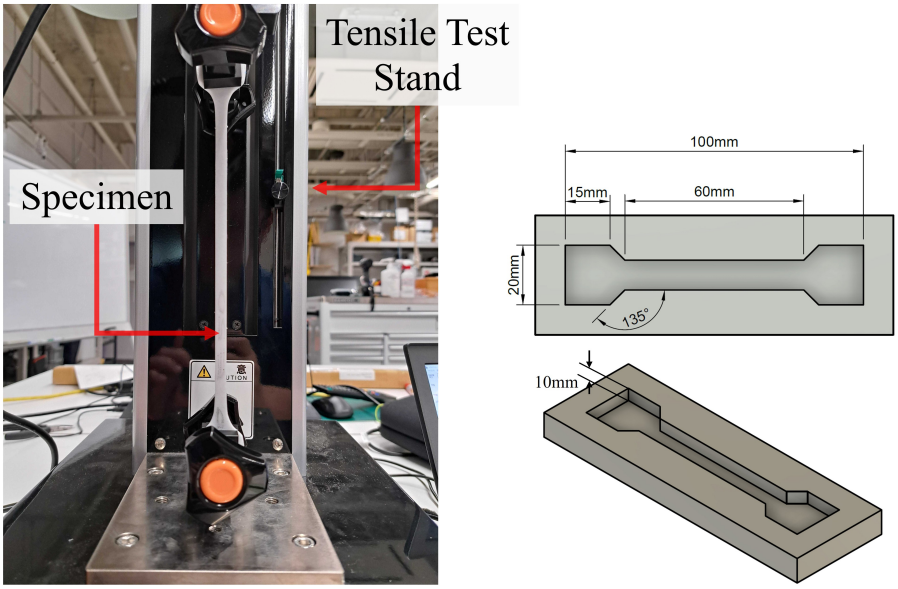
### 5.2.1 柔軟スキン材料の評価

提案する NB-VBTS は, 透明支持構造からスキン内部のマーカが配置されている箇所まで 2.7 mm 以上離れており, ヒトのスキンに近しい特性 [16][17] を持つ Ecoflex 00-10(Smooth-On Inc.) を用いると, 材料の不透明性によりカメラでマーカを認識することができない. そこで, NB-VBTS と B-VBTS の接触面積比較実験には, 4 種類の柔軟なスキン材料を用いて評価をおこない, 他の微小段差検知実験および薄い物体把持実験には, 引張試験を実施し耐久性がある透明なスキンを用いることとした. ここでは, 選定に用いた材料の紹介と引張試験の結果について示す. まず, 5 種類の柔軟なスキン材料として Ecoflex 00-50(Smooth-On Inc.), Ecoflex 00-10(Smooth-On Inc.), Solaris(Smooth-On Inc.), Solaris と Slacker の混合 (Smooth-On Inc.), ゲル (硬度 7, EXSEAL Co., Ltd.) を用いた. 各材料の混合比および光学的特性は 表 5.1 に示す.

表 5.1: 5 種類の柔軟材料の混合比と光学特性 (T：透明，O：不透明)

| **No.** | **Material** | **Part A** | **Part B** | **Slacker** | **T** or **O** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ECOFLEX 00–50 | 1 | 1 | – | O |
| 2 | ECOFLEX 00–10 | 1 | 1 | – | O |
| 3 | SOLARIS | 1 | 1 | – | T |
| 4 | SOLARIS and Slacker | 1 | 1 | 0.5 | T |
| 5 | Gel | 1 | 1 | – | T |

Solaris は電子部品などの展示時の保護用途に設計された低粘度で無色透明のシリコンゴムである．Slacker は DragonSkin シリーズ (Smooth-On Inc.) や Ecoflex シリーズのシリコンの感触をより柔らかくすることが可能な透明液体の調整剤である．Slacker のデータシートでは, Solaris への使用は想定されていないが, 実験的に試したところ, Solaris 単体よりも, Slacker を混合した方が耐久性が上がる傾向があった．また, ゲルは人肌のような柔らかさを提供できる材料であるが, 耐久性に課題がある．そこで, 材料選定の基準のため各種材料を用いて図 5.5 に示すような引張試験を実施した．試験機には, 卓上型引張圧縮試験機 (MCT-2150, A&D COMPANY) を用いた．各種材料の引張試験の結果を図 5.6 に示す．透明性があり耐久性がある材料は, 表 5.1 および 図 5.6 の結果より, Solaris と Slacker の混合材料であった．このことから, 本研究で実施する接触面積の比較実験のスキン材料は, Ecoflex 00-50, Ecoflex 00-10, Solaris と Slacker の混合, ゲルの 4 種類, 微小段差検知および薄い物体把持実験のスキン材料は, Solaris と Slacker の混合の 1 種類を用いた．




(a) (b)

図 5.5: 引張試験の測定環境．(a)：卓上型引張圧縮試験機 (MCT-2150) による引張試験時の例, (b)：評価に使用したドッグボーンのサイズ．

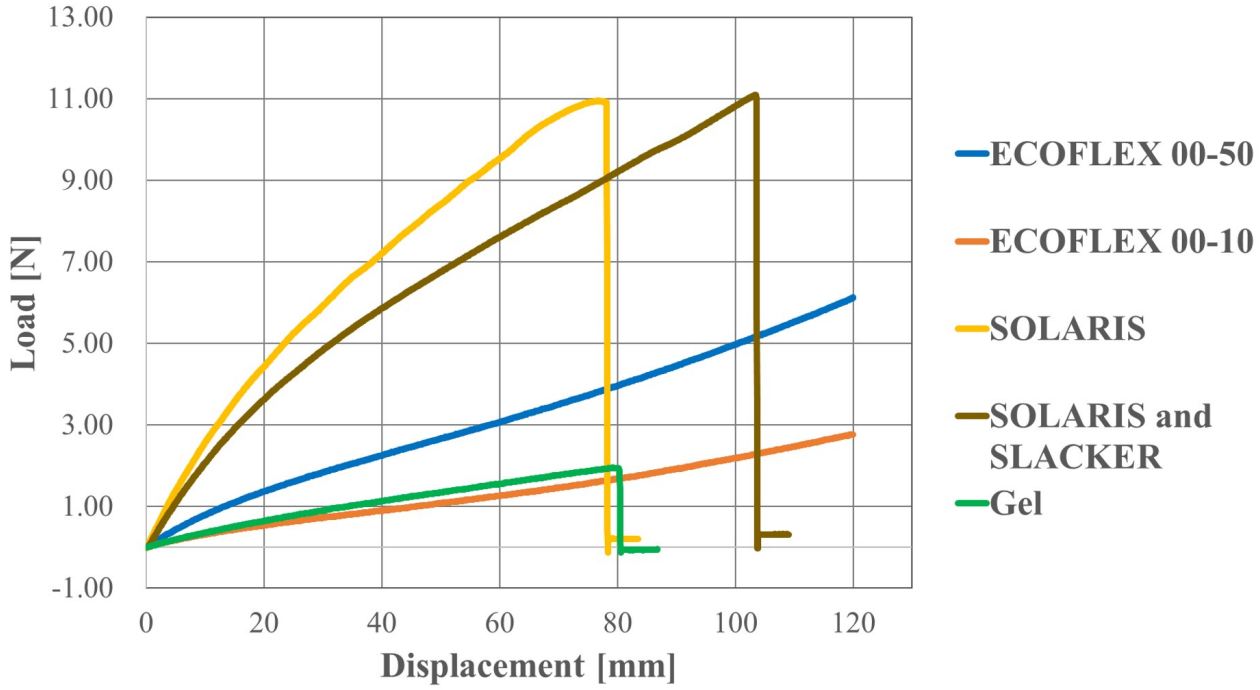



図 5.6: 各種材料における引張試験結果.

### 5.2.2 接触面積比較

ここでは, 提案する NB-VBTS と B-VBTS において, 爪構造が接触面積に与える影響を評価した実験結果を示す.

#### 5.2.2.1 接触面積比較実験の環境・手法

本実験では, 4.2.2.1 と同様な環境を構築し (図 5.7), NB-VBTS と B-VBTS それぞれを 50°, 60°, 70° の接触角度で平面に押し当てた際の接触面積を比較する. 測定スタンド (MX2-500N, IMADA CO., LTD) に, フォースゲージ (ZTA-50N, IMADA CO., LTD), 測定ボックス (MB), および提案する NB-VBTS と B-VBTS を取り付ける. MB にはアクリル板と小型カメラ (LPUSB8MP04AF-V72) が含まれている. MB はフォースゲージに取り付けられ, NB/B-VBTS に向けて降下させ, 小型カメラがアクリル板と NB/B-VBTS の間の接触領域を撮影する (図 5.7-(c)). 加える荷重は 5N の 1 パターンとして, 各試行回数は 10 回とした.

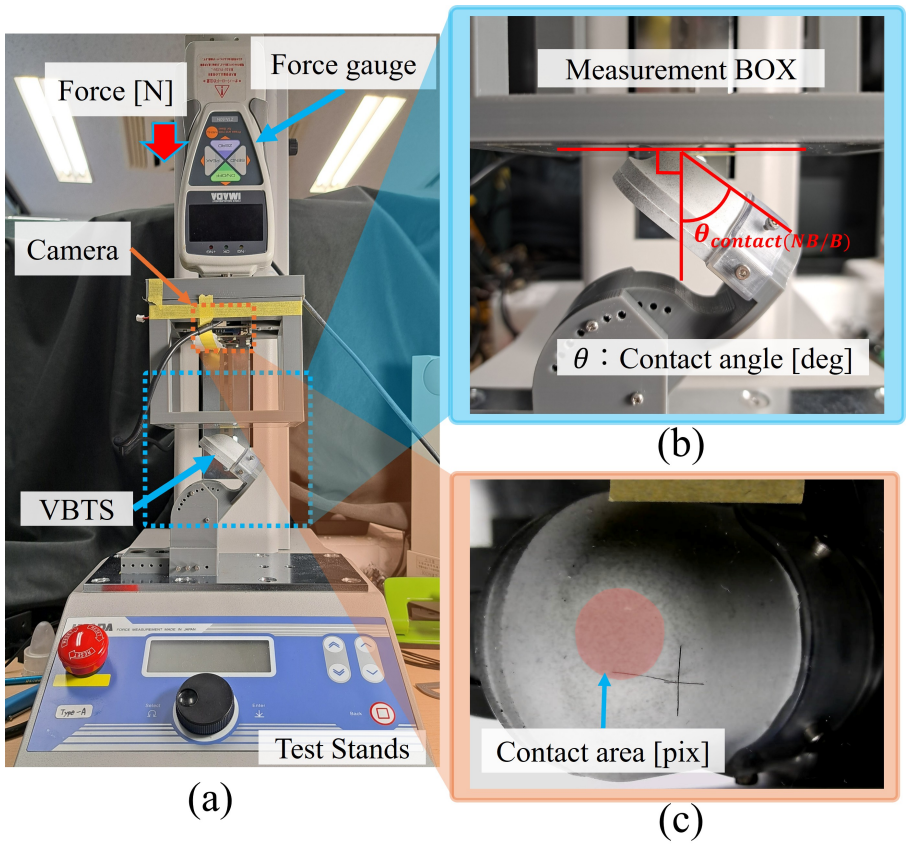



図 5.7: 接触面積測定の実験環境．(a)：測定装置, (b)：MB と NB-VBTS の接触角度 ($\theta_{contact(NB/B)}$), (c)：MB 内のカメラで撮影した接触面画像の例.

#### 5.2.2.2　データ解析

MB で取得した接触面の画像データを 3.1.1 で示したように, 接触範囲を GIMP を用いて手動で選択する．GIMP を用いて接触面積 (pix) を抽出し, その値を式 3.3 の $S_{\text{pix}}$ に代入する．(mm) 単位に換算した接触面積の値を用いて, 3.1.3 項で示した流れで検定をおこなった.

#### 5.2.2.3　接触面積比較実験の結果

ここでは, 4 種類の材料 (Ecoflex 00-50, Ecoflex 00-10, Solaris と Slacker の混合, ゲル) で作成された NB/B-VBTS による接触面積の比較実験結果を示す．図 5.8 に荷重 5N を印加した状態における, 各種材料で作製された NB/B-VBTS の接触面積 $\text{mm}^2$ の平均値を棒グラフ, 標準偏差をエラーバーで示している．Ecoflex 00-10 を用いた場合, 3 パターンの接触角すべてにおいて NB-VBTS と B-VBTS の接触面積に明確な差が見られた．Solaris と Slacker の混合, ゲル, および Ecoflex 00-50 については, Ecoflex 00-50 の 50° を除くすべての条件で, NB-VBTS の方が B-VBTS より接触面積が大きい結果となった．ここで, 図 5.8 で得られた接触面積値に対して, 正規性を確認するため Shapiro-Wilk 検定を実施し, その結果を表 5.2, 5.3 に示す．Shapiro–Wilk 検定 ($\alpha = 0.05$) の結果, Ecoflex 00-10 (NB-VBTS, 70°, p=0.035）および Gel (B-VBTS, 70°, p=0.013) を除き, すべての条件で正規性は棄却されなかった．したがって, これら 2 条件にはノンパラメトリック検定 (Mann–Whitney U 検定) を, その他の条件には t 検定 (Welch の t 検定) を適用した.

接触荷重 5 N で各種材料および接触角度の組み合わせ計 12 条件について, NB-VBTS と B-VBTS の

差を統計的に検定した (Mann–Whitney U 検定および Welch の t 検定) 結果を, 表 5.4 に示す. まず, 有意水準 $\alpha = 0.05$ で検定した場合, 12 条件中 7 条件が有意な差がある結果となった. 12 条件中 5 条件は非有意という結果のため, 表 5.4 では赤色でハッチングしている. 更に, 多重比較に対して Bonferroni 補正（比較数 $m = 12$, $\alpha^* = 0.004167$) を適用すると, 12 条件中 5 条件に減少した. ただし, 補正後も一貫して有意な差が確認できたのは Ecoflex 00-10 の全角度条件と, Gel の 50°, および Ecoflex 00-50 の 70° である. 一方, Solaris と Slacker の混合材はいずれの角度でも補正後には有意に至らず, 特に 60°・70° は補正前から有意差が確認されなかった.

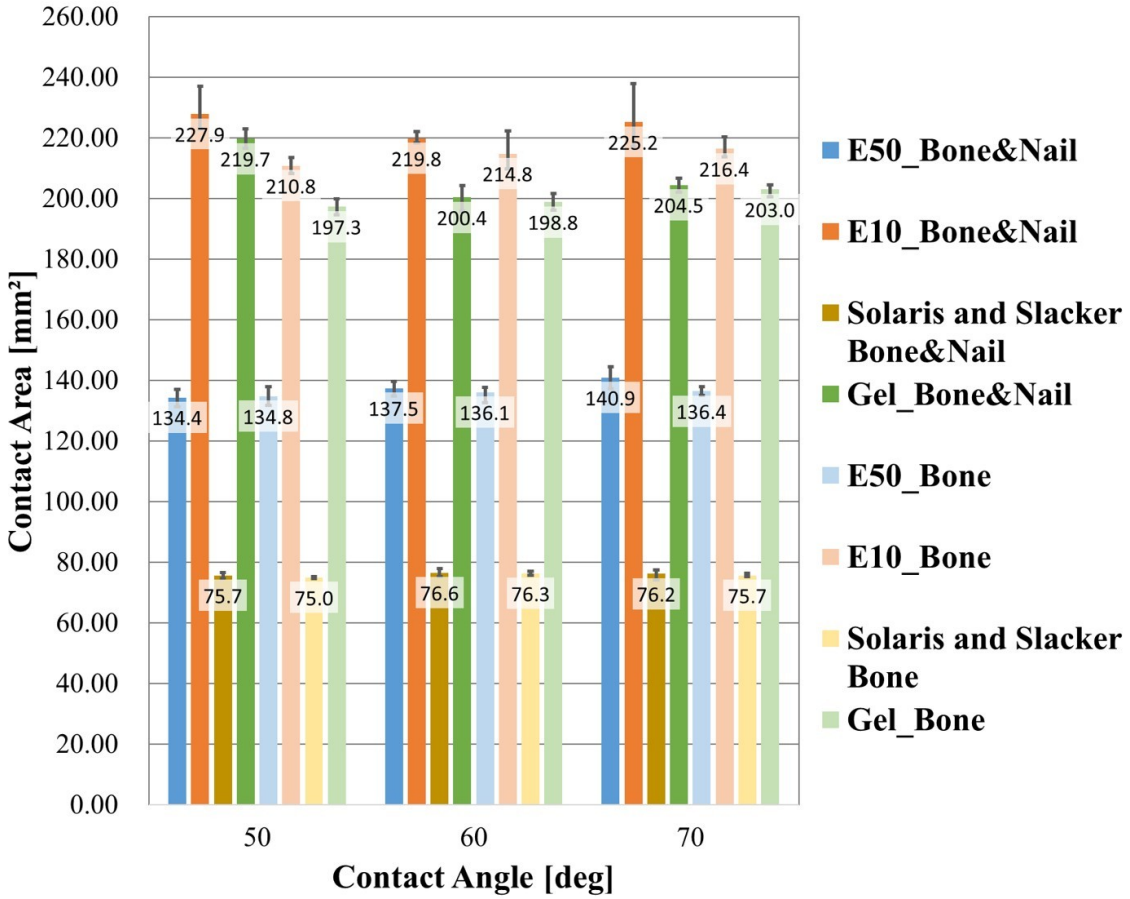



図 5.8: 接触面積比較実験結果.

表 5.2: 荷重 5N 時の Ecoflex 00-50, Ecoflex 00-10 における接触面積値に対する Shapiro–Wilk 検定の結果 (p 値)

| Material | Ecoflex 00-50 | | | Ecoflex 00-10 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| θ _contact | 50 | 60 | 70 | 50 | 60 | 70 |
| NB-VBTS | 0.673 | 0.832 | 0.908 | 0.07 | 0.366 | 0.035 |
| B-VBTS | 0.945 | 0.085 | 0.557 | 0.962 | 0.734 | 0.588 |

表 5.3: 荷重 5N 時の Solaris & Slacker, Gel における接触面積値に対する Shapiro–Wilk 検定の結果 (p 値)

| Material | Solaris & Slacker | | | Gel | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| θ _contact | 50 | 60 | 70 | 50 | 60 | 70 |
| NB-VBTS | 0.524 | 0.739 | 0.292 | 0.494 | 0.919 | 0.073 |
| B-VBTS | 0.157 | 0.101 | 0.528 | 0.467 | 0.967 | 0.013 |

表 5.4: 接触荷重 5N で異なる材料および接触角条件における NB-VBTS と B-VBTS の Welch の t 検定および Mann–Whitney U 検定の結果 (p 値). 赤色セルは $\alpha = 0.05$ で非有意，黄色セルは Bonferroni 補正後 ($m = 12$, $\alpha^* = 0.004167$) も有意，無着色セルは $\alpha = 0.05$ では有意だが補正後は非有意であることを示す. なお, セル内のアンダーラインは Mann–Whitney U 検定の結果である.

| | | Contact Angle [deg] | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 50 | 60 | 70 |
| Materials | E50 | 0.66 | $0.36 \times 10^{-1}$ | $0.30 \times 10^{-4}$ |
| | E10 | $0.18 \times 10^{-7}$ | $0.14 \times 10^{-2}$ | $\underline{0.58 \times 10^{-3}}$ |
| | Solaris & Slacker | $0.25 \times 10^{-1}$ | 0.52 | 0.17 |
| | Gel | $0.11 \times 10^{-12}$ | 0.15 | $\underline{0.186}$ |

#### 5.2.2.4 接触面積比較実験の考察

本実験では, 4 種類のスキンの材料 (Ecoflex 00-50、Ecoflex 00-10, Solaris と Slacker の混合, ゲル) を用いて, 一定の接触荷重下で接触角度を変えて NB-VBTS と B-VBTS の接触面積を比較した. 図 5.8 に示すように, 各種検定および補正処理後の結果から, Ecoflex 00-50 の 50° を除くすべての条件で, NB-VBTS の方が B-VBTS より接触面積が大きい結果となった. この結果に対して各種検定および補正処理をおこなった結果, Ecoflex 00-10 の全角度条件と, Gel の 50°, および Ecoflex 00-50 の 70° で有意な差が得られた. 特筆すべきは, Ecoflex 00-10 の全角度条件において頑健な有意差が得られたことである. 従来の研究で報告されているように Ecoflex 00-10 は人間の指腹などの柔らかい皮膚を模擬する材料として適している報告があるように [17][16], NB-VBTS で提案した指構造が柔軟な人間の皮膚に似たスキンを幾何的に拘束することで, 接触面積を増大させていることを示唆する. このことは, NB-VBTS の内部支持物, 特に爪部分がスキンの過剰な変形を抑えて, 接触面積を増大する役割となっていると考えられる. しかし, 他の材料においては, 人間の肌の性質とは異なる機械的特性故に, NB-VBTS の爪構造は接触面積を増大させる働きは得られなかった. 特に, Solaris と Slacker の混合材に関しては, 爪構造の幾何的拘束性に関する働きは得られない結果となった. 今後, 材料の機械的特性が Ecoflex 00-10 に近く, 透明な材料を選定することが望ましいと考える.

### 5.2.3　微小突起検知実験

ここでは, 材料選定の結果より耐久性があり透明な材料の Solaris と Slacker の混合材料を用いて作製された NB-VBTS と B-VBTS を用いて, 等間隔に並んだ微小な突起構造の検出実験について示す. 本実験の目的は, 今回提案した NB-VBTS の爪構造において微小な段差をどの間隔まで検知することが可能なのか明らかにすることである. また, B-VBTS を用いて同様の評価をおこなうことで, 爪構造が微小な突起構造の検出に有用であることを示す.

#### 5.2.3.1　微小突起検知実験環境

NB-VBTS と B-VBTS を用いて, 等間隔に並んだ微小な突起物の検出実験環境を図 5.9 に示す. フォーストルクセンサ (FT300-S, Robotiq Inc.) を X 軸リニアステージ (KXL06300-C2-F2A, 駿河精機製) に取り付け, その上部に等間隔 (d) に三角形の構造を持つ試料を設置した. 本実験では, d=0.5, 1, 2, 4, 8 mm の試料を用意した (図 5.10). NB-VBTS と B-VBTS は試料の先端に軽く接触するように 2 つのサーボモータ (XM430-W350, Robotis Co., Ltd.) を所望の角度に調整した. NB-VBTS の実験では, 図 5.9 中の $\theta_1$ は 260°, $\theta_2$ は 90° とし, B-VBTS の実験では $\theta_1$ は 258°, $\theta_2$ は 94° に設定した. X 軸リニアステージの動作速度は +X 軸方向に 2 mm/s とした. X 軸リニアステージの移動中は, フォーストルクセンサの各値を CSV ファイルに記録し, 同時に NB/B-VBTS 内部のカメラでマーカ変位の動画を記録した. これらの CSV ファイルを後述する手法で解析する.

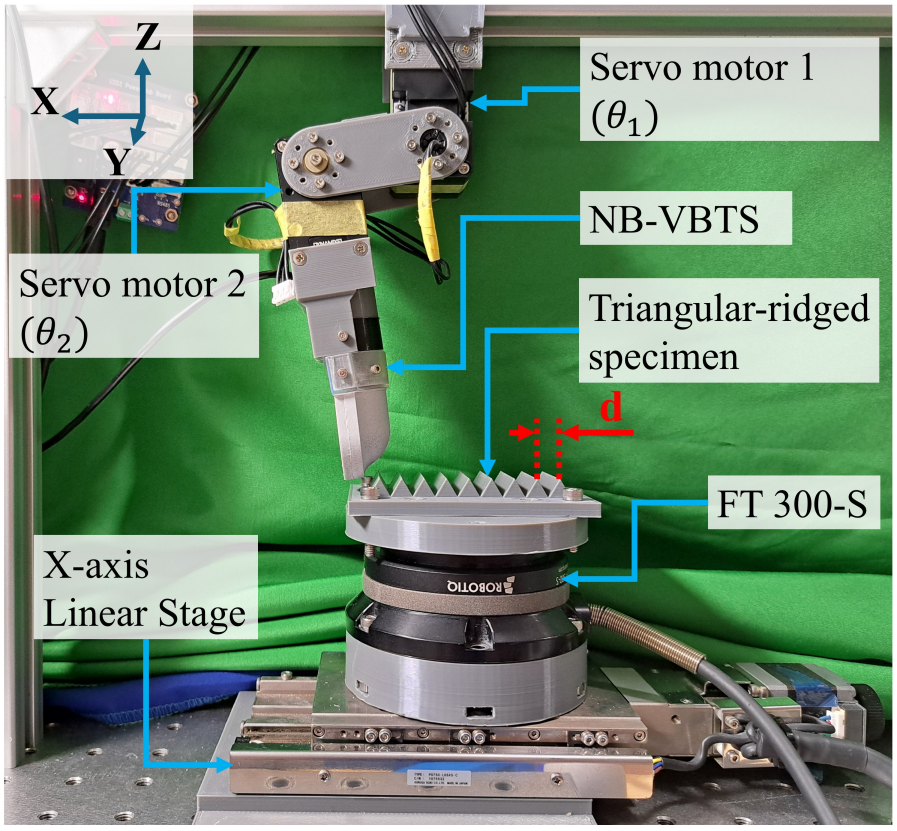



図 5.9: 微小突起構造検知実験環境. $\theta_1 = 260°$, $\theta_2 = 90°$.

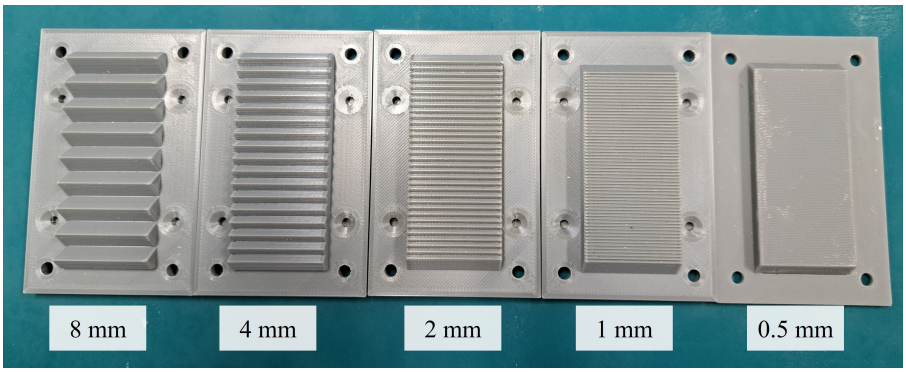



図 5.10: 微小突起構造の各試料.

#### 5.2.3.2　マーカ変位量の算出方法

ここでは, 5.2.3.1 で取得した 動画ファイルからマーカの合成ベクトルの大きさの算出方法を示す. 各マーカは, 初期位置 (3.2.5.3 参照) からの変位ベクトルを式 5.1 で求める. ただし, $\boldsymbol{p}_i^0$ は初期フレームのマーカ $i$ の 2 次元座標を意味する.

$$\Delta \boldsymbol{p}_i^t \;=\; \boldsymbol{p}_i^t - \boldsymbol{p}_i^0. \tag{5.1}$$

大きさ $\left\|\Delta \boldsymbol{p}_i^t\right\|$ が閾値 $\delta = 3\,[\mathrm{pix}]$ を超える場合のみ総和に用い, 式 5.2 により合成変位ベクトルを算出する. ここで閾値 $\delta = 3\,[\mathrm{pix}]$ を用いた理由は, フレーム間で検出位置の若干のずれによるノイズ抑制のためである.

$$\boldsymbol{F}_t = \sum_{i:\ \|\Delta \boldsymbol{p}_i^t\| \geq \delta} \Delta \boldsymbol{p}_i^t. \tag{5.2}$$

こうして得られる合成ベクトル $\boldsymbol{F}_t$ は, その時刻に「意味のある」変位が全体としてどれくらい強く現れているかを要約する指標となる. 時刻 $t$ とともに $\boldsymbol{F}_t$ を CSV に記録しておくことで, 後段の周波数解析に使用する.

#### 5.2.3.3　フォーストルクセンサとマーカ変位の周波数解析

ここでは, 5.2.3.1 で取得したフォーストルクセンサの $F_x$, $F_z$ に関する CSV ファイルおよび, 5.2.3.2 で取得したマーカベクトルの変位に関する解析方法について示す. 本実験では, フォーストルクセンサとマーカ変位のサンプリング周期は非同期となっている. そこで, 両データを式 5.3 の共通サンプリング周期 $\Delta t = 1/f_s$ で定義される等間隔の時刻列へ線形補間し, 式 5.4 の離散データを取得する.

$$t_n = t_0 + n\,\Delta t, \quad n = 0, 1, 2, \ldots, N-1. \tag{5.3}$$

$$\hat{F}_x[n] = F_x(t_n), \quad \hat{M}[n] = M(t_n). \tag{5.4}$$

ただし, $t_0$ は解析開始時刻, $\Delta t$ は共通サンプリング周期, $f_s$ は 2 系列 (FT センサと NB-VBTS) の平均サンプリング周波数の小さい方, $N$ は生成されるサンプルの総数を意味する. また, $\hat{F}_x[n]$ と $\hat{F}_z[n]$ はフォーストルクセンサで得られる力成分の x 成分および z 成分の補間後の離散データを意味し, $\hat{M}[n]$ は, マーカの合成ベクトルの大きさの補間後の離散データを意味する. また離散データに対して, Savitzky–Golay フィルタ (窓長 : 11 サンプル, 次数 : 3) を適用し, $\tilde{F}_x[n]$, $\tilde{M}[n]$ を取得する. ただし, $\tilde{F}_x[n]$ と $\tilde{M}[n]$ は, $\hat{F}_x[n]$ と $\hat{M}[n]$ の平滑化済みのことを意味する.

次に, Welch 法で 0–15Hz のパワースペクトル密度 (PSD) を評価した. $\tilde{x}_k[n]$ は平滑化済み離散信号

$\tilde{x}[n]$ の第 $k$ 区間であり, 区間長さは $L = 256$ , オーバーラップ率は 50% (128 サンプル) として, 各区間にハン窓 $w[n]$ を適用した. これによって得られる PSD 推定 $S_{xx}(f_m)$ は式 5.5 で与えられる.

$$S_{xx}(f_m) = \frac{1}{K\,U} \sum_{k=1}^{K} \Big| \mathcal{F}\{\, w[n]\ \tilde{x}_k[n]\,\}(f_m) \Big|^2. \tag{5.5}$$

ここで, $\tilde{x}_k[n]$ は平滑化系列 $\tilde{x}[n]$ ($\tilde{F}_x[n]$, または $\tilde{M}[n]$) の第 $k$ 区間, $K$ は平均化に用いた区間数 (本実験では 256), $\mathcal{F}\{*\}$ は離散フーリエ変換を意味する. また, 窓パワーの正規化係数は式 5.6 で定義し, 周波数ビンは式 5.7 とした.

$$U \ = \ \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} w^2[n]. \tag{5.6}$$

$$f_m = \frac{m\, f_s}{L} \qquad (\, m = 0, 1, \ldots, \lfloor L/2 \rfloor\,). \tag{5.7}$$

また, 微小突起構造の間隔は図 5.9 内の $d(= 8, 4, 2, 1, 0.5)$ であり, X 軸リニアステージの動作速度は +x 軸方向に 2mm/s であることから式 5.8 で周期が算出でき, その逆数を取ることで試料における理想的な周波数が設定できる (式 5.9). それぞれの試料における理想周波数を表 5.5 に示す.

$$T_s = \frac{d_s}{v} \qquad (\, s = 8, 4, 2, 1, 0.5[\mathrm{mm}]). \tag{5.8}$$

$$f_s = \frac{1}{T_s} \qquad (\, s = 8, 4, 2, 1, 0.5[\mathrm{mm}]). \tag{5.9}$$

表 5.5: 微小突起構造を持つ試料における理想周波数

| No. | d [mm] | Ideal [Hz] |
|---|---|---|
| 1 | 8 | 0.25 |
| 2 | 4 | 0.5 |
| 3 | 2 | 1.00 |
| 4 | 1 | 2.0 |
| 5 | 0.5 | 4 |

#### 5.2.3.4 微小突起検知実験結果

ここでは, Solaris と Slacker の混合材料をスキンとして作製された NB-VBTS を対象に, 微小な突起構造を検出する性能を評価した結果を示していく. まず, 式 5.4 に平滑化処理をおこなって取得した, $F_x$ およびマーカ変位のデータ ($\tilde{F}_x[n]$, $\tilde{M}[n]$) および $F_z$ それぞれの平滑化処理後を含めた結果を図 5.11–5.15 に示す. $\tilde{F}_x[n]$ と $\tilde{M}[n]$ の両者は, 微小突起の間隔が 8 mm から 1 mm で良好な同期的変動を示し, 画像由来信号と力計測の整合性が確認できる. しかし, 微小突起の間隔が 0.5 mm の場合は, $\tilde{F}_x[n]$ と $\tilde{M}[n]$ に周期的な信号の特徴を確認できない結果となった.

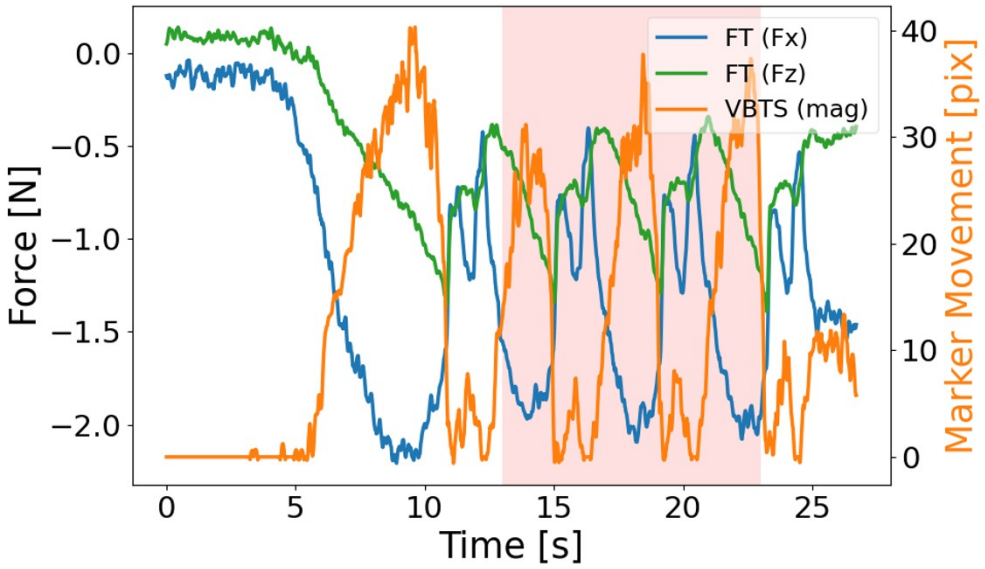



図 5.11: 微小突起間隔 8 mm における平滑化処理結果.

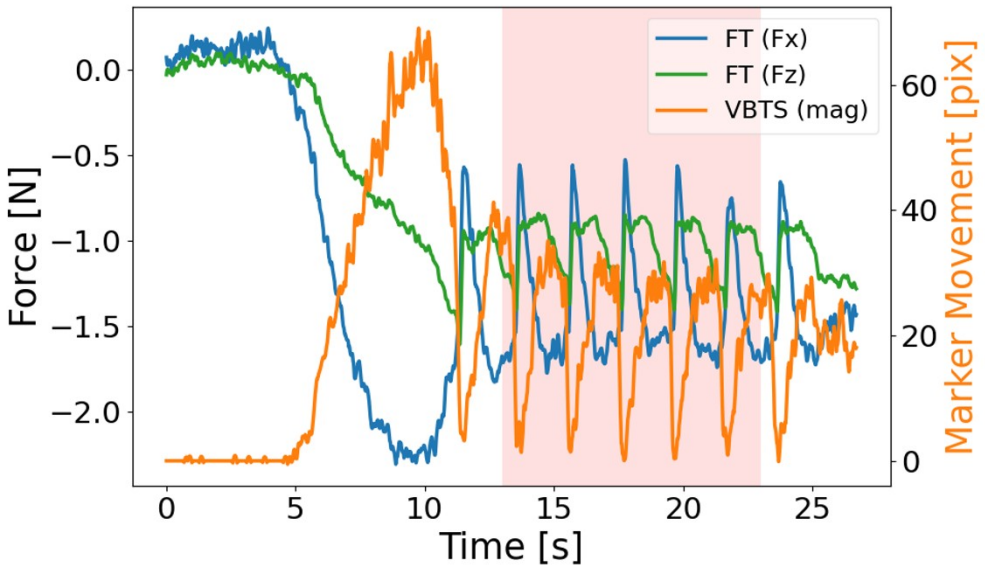



図 5.12: 微小突起間隔 4 mm における平滑化処理結果.

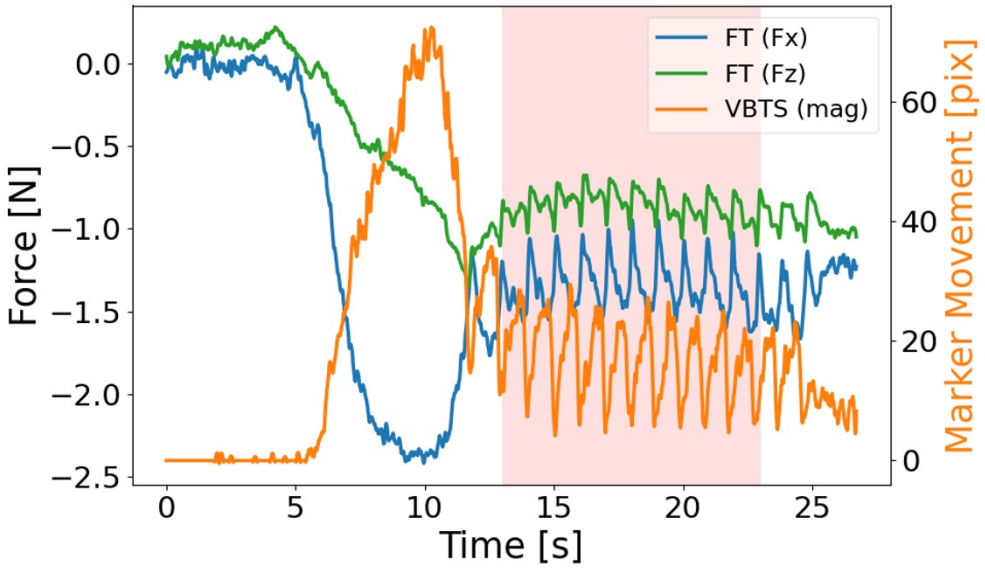



図 5.13: 微小突起間隔 2 mm における平滑化処理結果.

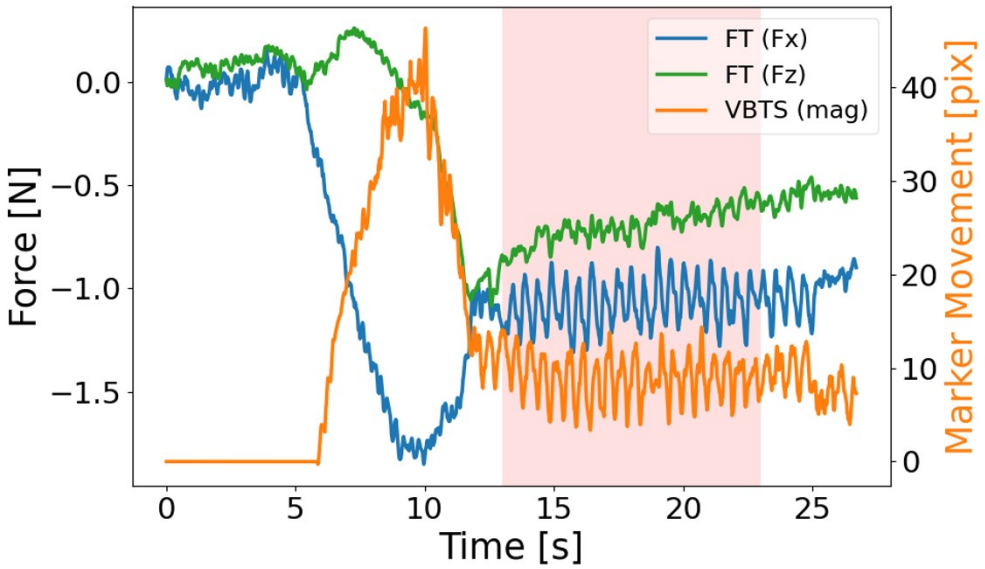



図 5.14: 微小突起間隔 1 mm における平滑化処理結果.

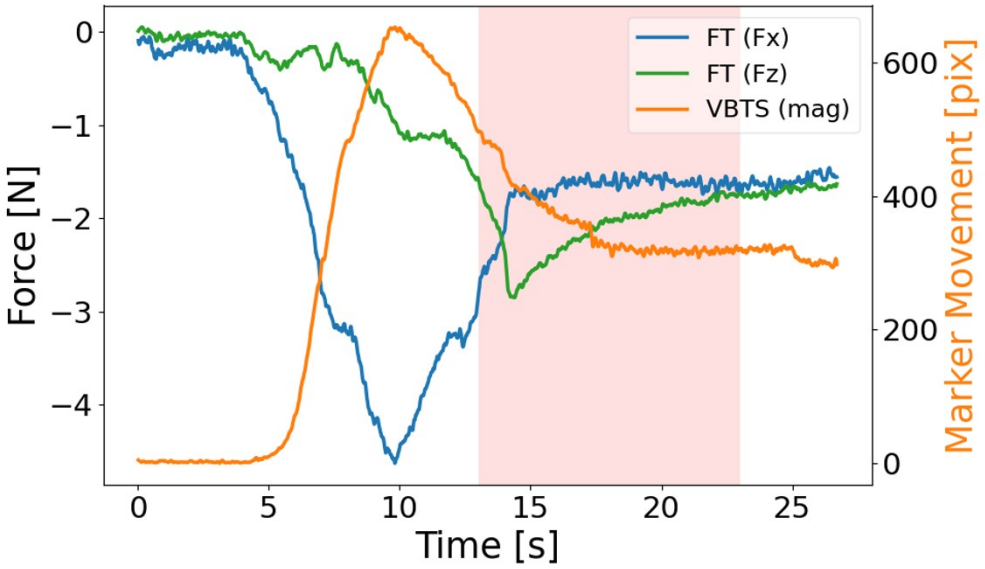



図 5.15: 微小突起間隔 0.5 mm における平滑化処理結果.

次に, 図 5.11–5.15 の 13–23[sec] を解析区間 (ハッチングした範囲) とし, 平滑化済みのデータ $\tilde{F}_x[n]$ と $\tilde{M}[n]$ に対して, 式 5.5 による PSD 推定の結果を図 5.16–5.20 に示す. 微小突起の間隔が $d = 8, 4, 2, 1$ mm の PSD の解析結果 (図 5.16–5.19) では, 理想的な周波数に近しい値でピークが見られる. しかし, $d = 0.5$ mm では (図 5.20), 理想的な周波数にピークが確認できなかった.

表 5.5 に示す $d = 8, 4, 2, 1$ mm に対する理想周波数 ( $d = 0.5$ mm はピークが見られないため対象としない) と, PSD のピーク周波数から逆算した実効値の誤差を, 表 5.6 に整理した結果, 最大誤差は 0.69 mm であった. すなわち, PSD 解析によって得られるピーク周波数は, 理想周波数を高い精度で再現することが可能であることを示している.

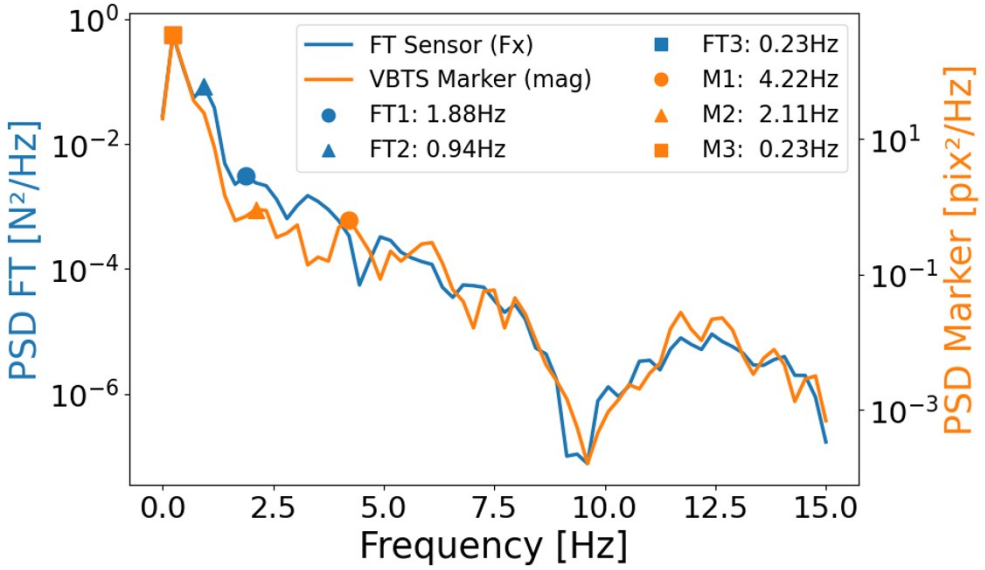



図 5.16: 微小突起間隔 8 mm における PSD 算出結果.

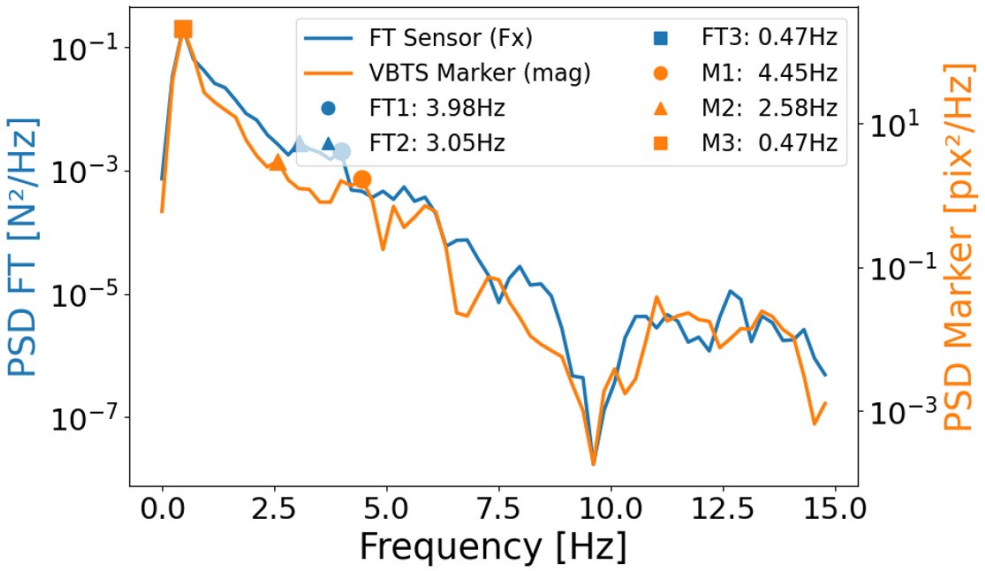



図 5.17: 微小突起間隔 4 mm における PSD 算出結果.

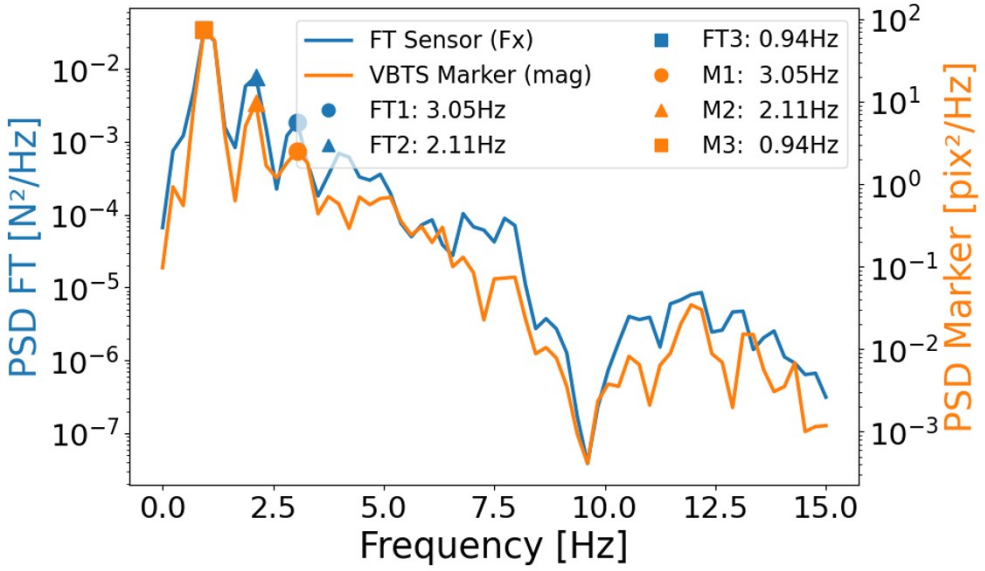



図 5.18: 微小突起間隔 2 mm における PSD 算出結果.

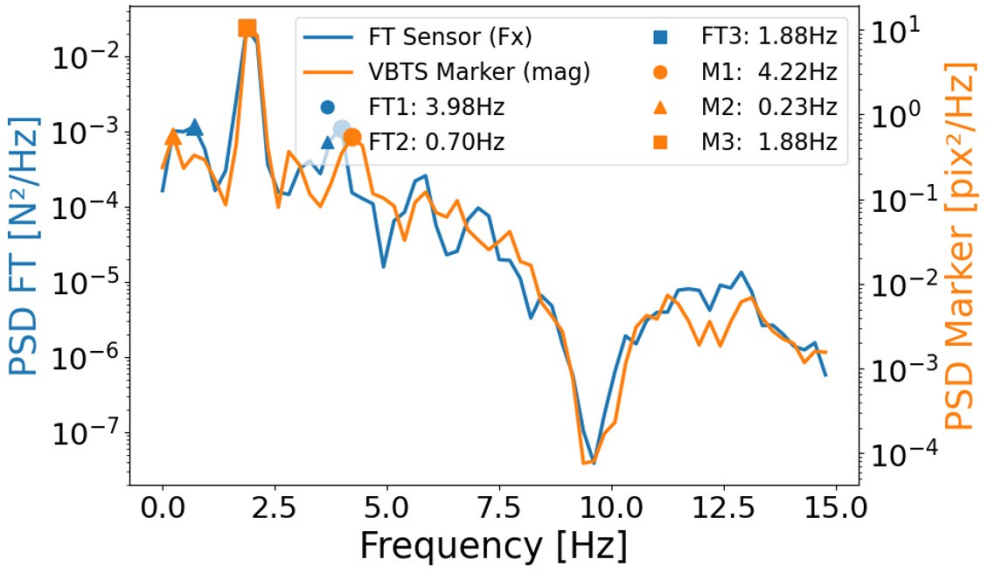



図 5.19: 微小突起間隔 1 mm における PSD 算出結果.

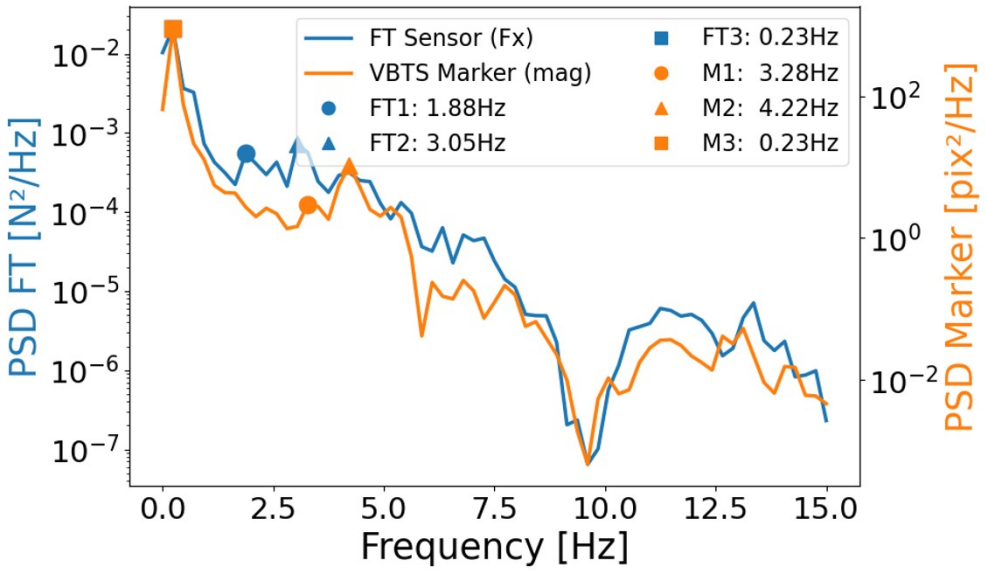



図 5.20: 微小突起間隔 0.5 mm における PSD 算出結果.

表 5.6: 理想と実測の PSD 周波数の比較、および距離誤差.

| **No.** | ***d* [mm]** | Ideal [Hz] | PSD [Hz] | Distance Error [mm] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 8 | 0.25 | 0.23 | +0.6957 |
| 2 | 4 | 0.50 | 0.47 | +0.2553 |
| 3 | 2 | 1.00 | 0.94 | +0.1277 |
| 4 | 1 | 2.00 | 1.88 | +0.0638 |

比較として, 同条件の B-VBTS における平滑化処理済みの $F_x$ およびマーカ変位のデータ $(\tilde{F}_x[n], \tilde{M}[n])$ および, $F_z$ を含めた結果を図 5.21–5.24 に示す. B-VBTS では, 微小突起の間隔が $d = 8, 4, 2\,\mathrm{mm}$ においては, $\tilde{F}_x[n]$ と $\tilde{M}[n]$ で同期的変動を示すが, $1\,\mathrm{mm}$ でフォーストルクセンサおよびマーカ変位のデータに同期的変動が見られなくなった. このことから, B-VBTS においては微小突起の間隔が $0.5\,\mathrm{mm}$ の場合は評価の対象外とした.

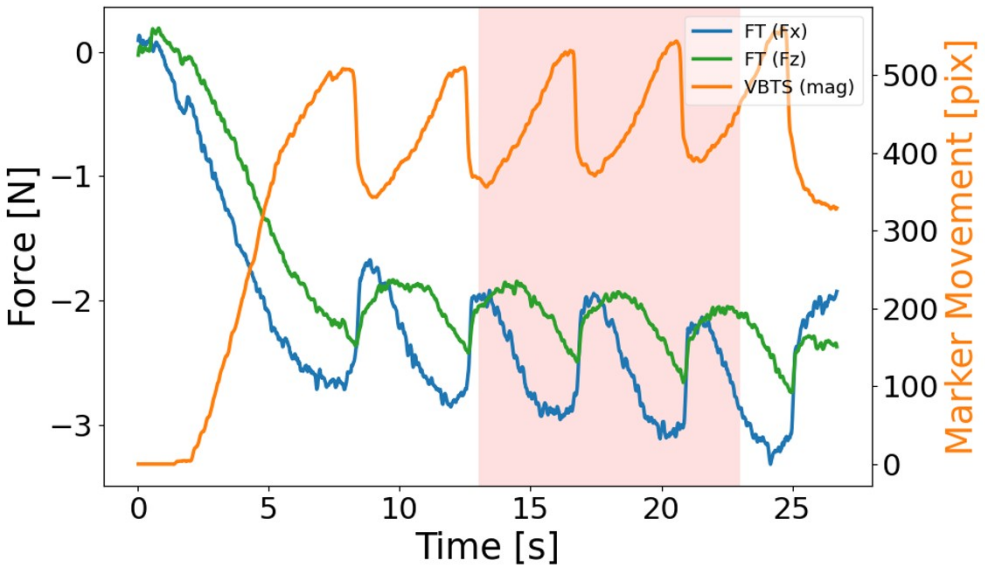



図 5.21: B-VBTS の微小突起間隔 $8\,\mathrm{mm}$ における平滑化処理結果.

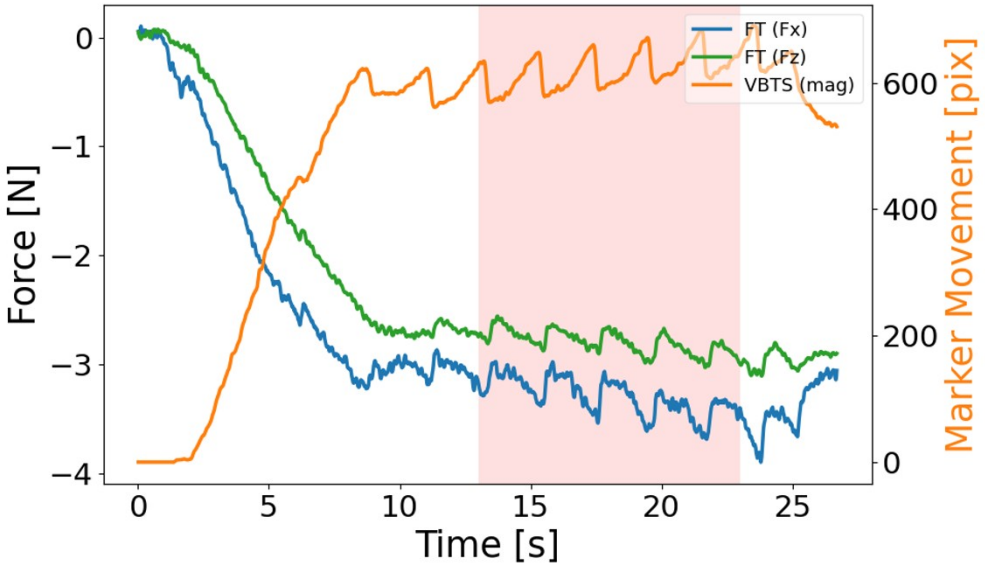



図 5.22: B-VBTS の微小突起間隔 $4\,\mathrm{mm}$ における平滑化処理結果.

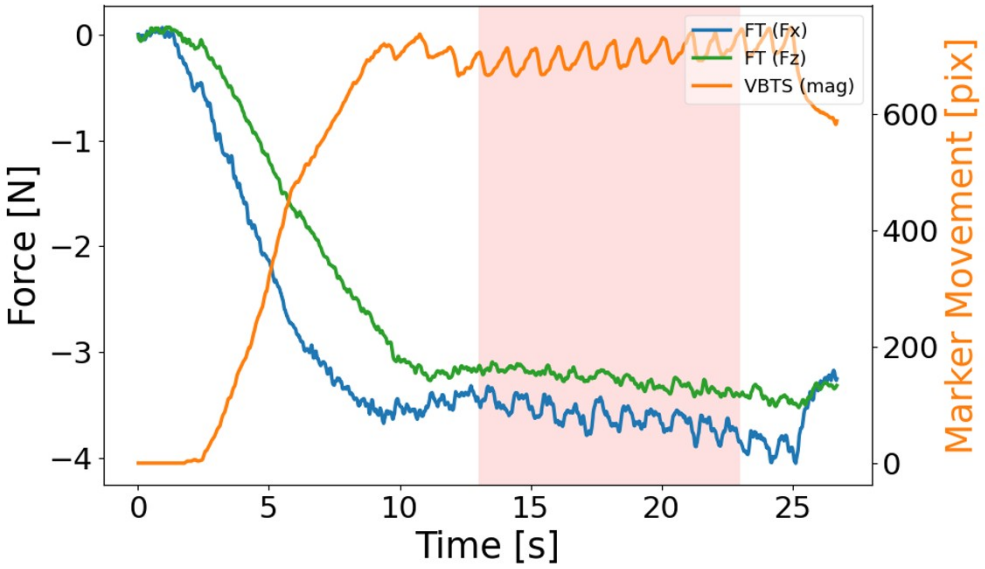



図 5.23: B-VBTS の微小突起間隔 2 mm における平滑化処理結果.

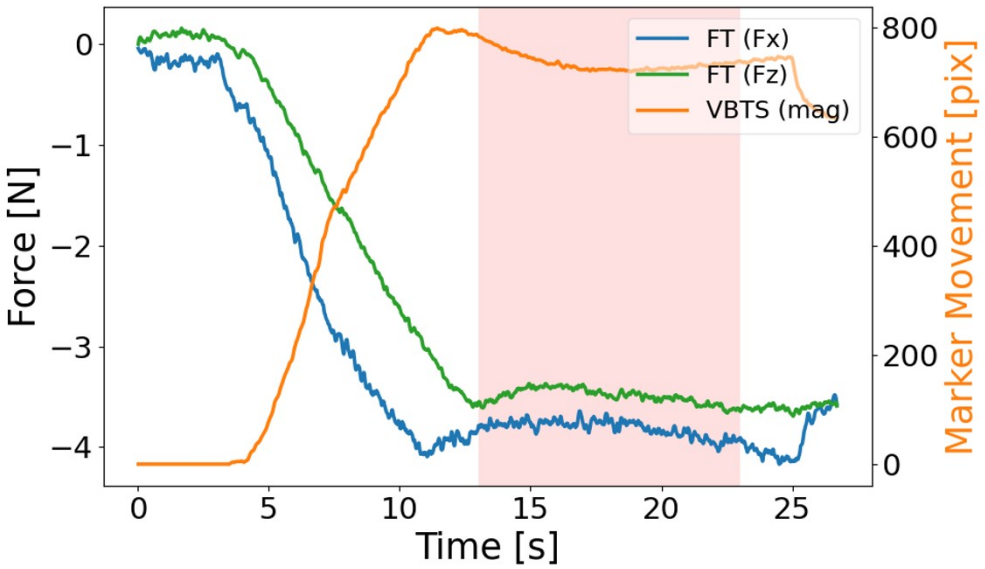



図 5.24: B-VBTS の微小突起間隔 1 mm における平滑化処理結果.

次に, 図 5.21–5.24 の 13–23[sec] を解析区間 (ハッチングした範囲) とし, 平滑化済みのデータ $\tilde{F}_x[n]$ と $\tilde{M}[n]$ に対して, 式 5.5 より PSD 推定の結果を図 5.25–5.28 に示す. 微小突起の間隔が $d = 8, 4, 2\,\mathrm{mm}$ の PSD の解析結果 (図 5.25–5.27) では, 理想的な周波数に近い値でピークが見られる. しかし, $d = 1\,\mathrm{mm}$ では (図 5.28) 理想的な周波数にピークが確認できなかった.

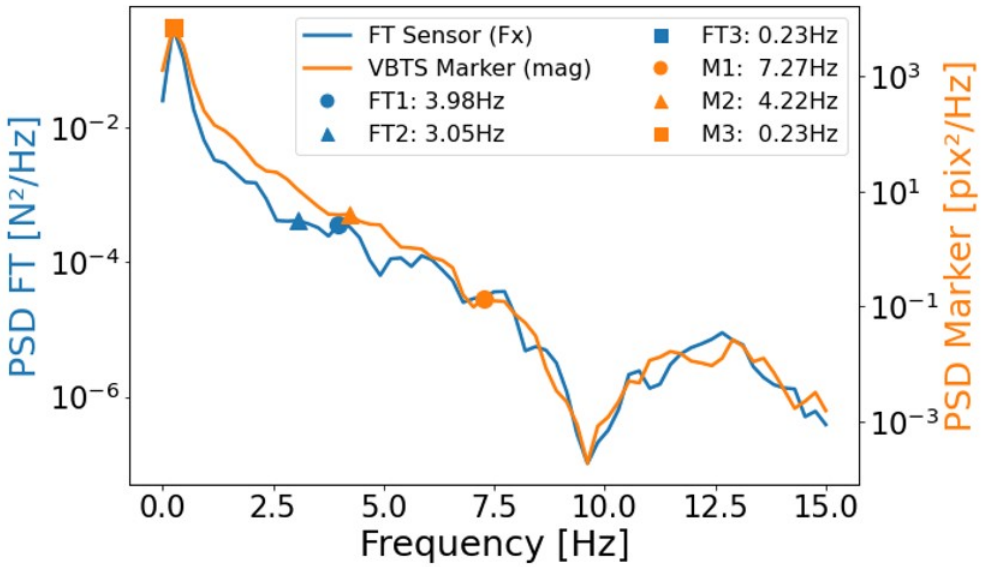



図 5.25: B-VBTS の微小突起間隔 8 mm における PSD 算出結果.

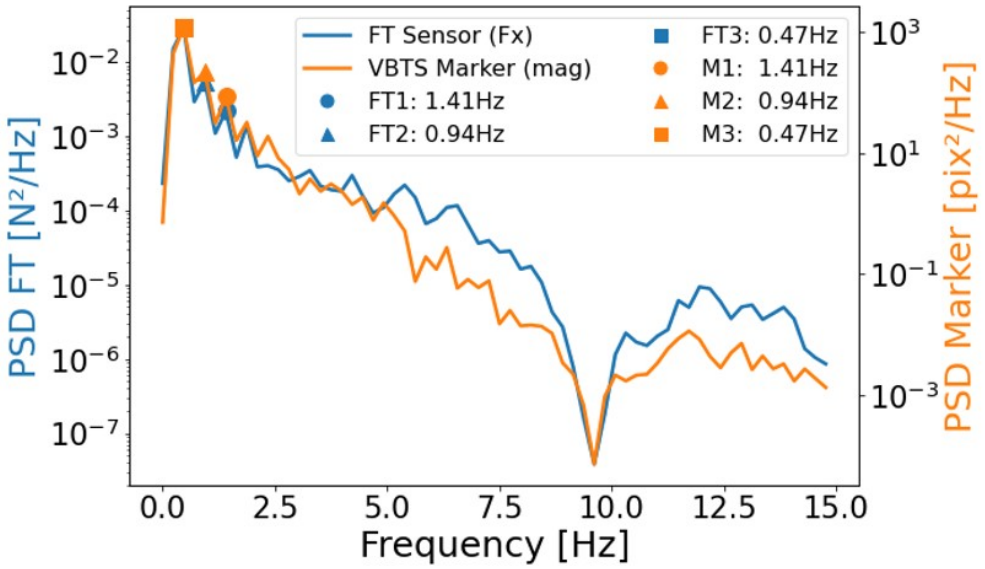



図 5.26: B-VBTS の微小突起間隔 4 mm における PSD 算出結果.

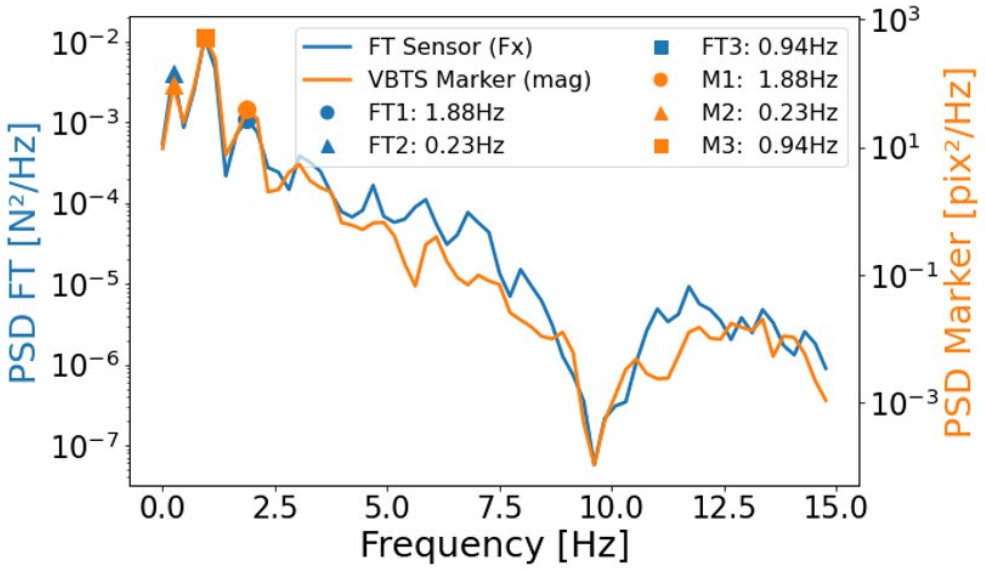



図 5.27: B-VBTS の微小突起間隔 2 mm における PSD 算出結果.

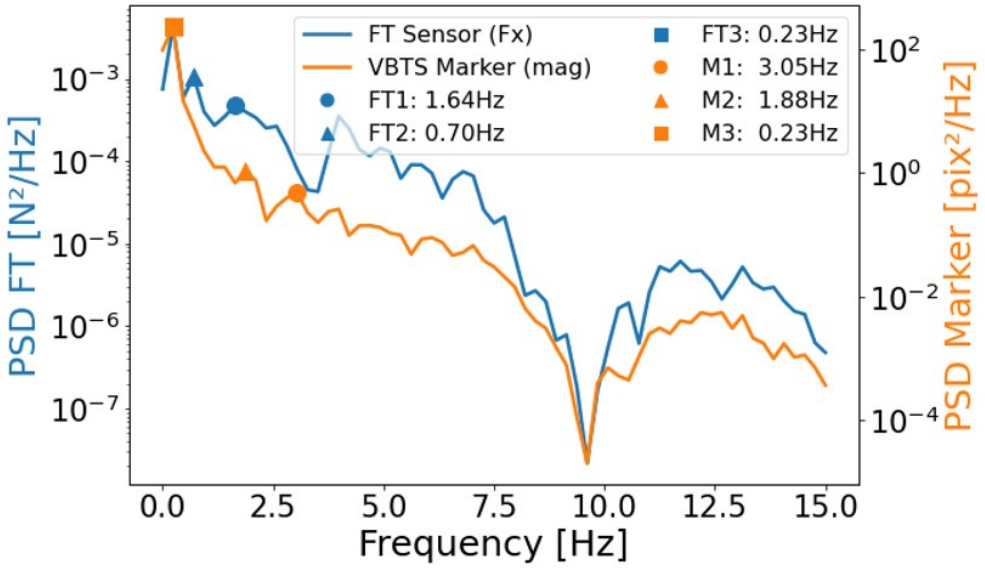



図 5.28: B-VBTS の微小突起間隔 1 mm における PSD 算出結果.

また, NB-VBTS の各試料における平滑化処理後の結果の 図 5.11–5.14 と B-VBTS の各試料における平滑化処理後の結果の 図 5.21–5.24 の $F_z$ の値が, NB-VBTS の方が小さな値を示しつつ, $d = 1\,\mathrm{mm}$ の試料においても周波数特定が良好に行える結果となっている. このことは, B-VBTS にくらべて NB-VBTS では爪構造があることで法線力 $F_z$ が小さくても微小突起を検出できることが示され, 提案する爪構造が大きな押し付け力を必要とせずに微細な表面起伏を感知可能とする点が確認された. 以上より, VBTS に爪構造を導入することで, 爪先端における微小突起の直接検出が可能となり, 従来構成の単純な形状 B-VBTS に対して最小の微小突起間隔 ($d = 1\,\mathrm{mm}$) および必要法線力 $F_z$ の面で優位であることが示せた.

#### 5.2.3.5　微小突起検知実験の考察

NB-VBTS は $d = 8, 4, 2, 1\,\mathrm{mm}$ で理想周波数に整合する PSD ピークが得られ, 最大距離誤差は $0.69\,\mathrm{mm}$ に収まった. これは画像由来の合成変位と力計測 ($F_x$) が同一周波数成分を共有していることを示し, 爪先端での突起の周期的な乗り越えが安定して検出されていることを意味する. 一方で $d = 0.5\,\mathrm{mm}$ では理想周波数に整合する PSD ピークが得られず, 本条件では限界近傍と考える. 原因としては, 皮膚形状が微小突起の間隔に対して大きすぎるためと考える. 具体的には, 現状の設計 (図 5.2) では爪先は平面となっており, この設計をより最適化することで更に微小な突起間隔の検知が可能になると考える. また, 爪構造無しの B-VBTS では $d = 1\,\mathrm{mm}$ でピークが消失し, NB-VBTS と比較して検出下限が劣ることが示せた. さらに, NB-VBTS は法線力 $F_z$ が小さい条件でも $d = 1\,\mathrm{mm}$ を特定できており, 爪構造が少ない法線力で突起を知覚可能にすることを実験的に裏づけた. メカニズムとして, 爪構造が接触部を爪の先端に集中させることで, 周期刺激 (空間→時間) への変換効率が上がったと解釈できる.

総合すると, NB-VBTS は小さな押し付け力で, より細かいピッチまで検知できる構造的優位を持つ. これは, 繊細なテクスチャ探索や脆弱物体表面の評価に有利であり, 過度な法線荷重を避けたいタスク (塗装面・薄膜の検査等) への適用可能性を示唆する結果である.

### 5.2.4　薄い物体把持実験

ここでは, 材料選定の結果より耐久性と透明性を兼ね備えた材料の Solaris と Slacker の混合材料を用いて作製された NB-VBTS の爪先構造を利用した薄い物体把持の実験について示す. 本実験の目的は, 従来の VBTS における薄い物体の操作には, 専用のかぎ爪のようなハードウェアと併用した研究が報告されているが, VBTS 本体のみでの薄い物体把持に成功した事例は少ない. そこで, 本実験では爪構造と骨構造を一体化した透明な内部支持構造および柔軟なスキンから構成される新しいマーカベースの NB-VBTS により, 薄い物体把持の実験をおこない, VBTS における人の指の構造を模倣することで得られる多機能性の 1 つとして実証することを目的とする.

#### 5.2.4.1　データ取得環境

本実験では, 提案する NB-VBTS の爪先部にあるマーカの移動量から爪部にかかる法線力を推定し, データ駆動型で薄い物体把をおこなうことを目的とする. 爪先部 (図 5.3) のマーカ変位量のデータを収集するため, 図 5.29 に示すように提案する NB-VBTS をデータ取得用の環境に設置する. 上下に動作するリニアステージ (KXB12200-5-J, SURUGA SEIKI CO.,LTD.) にデジタルフォースゲージ (ZTA-20N, IMADA CO., LTD.) を取り付ける. さらに, デジタルフォースゲージの先端に, 直径 20 mm のインデンターを取り付け, NB-VBTS を挟んだ万力 (vice) を実験台に固定する. 万力の位置を手動で調整して, NB-VBTS の爪先部の 3 カ所 (1/3, 2/3, 3/3) にインデンターを接触させるようにした (図 5.30).

ここで, インデンターと爪先部の接触位置を厳密に指定しない理由は, 爪先部のマーカ数は少数であり, 細かな接触位置推定は難しいと考えるためである. 本研究で重要視しているのは, 爪先部にかかる法線荷重量をマーカ移動量から推定し, 薄い物体把持の可能性を実証することである. また, 事前実験として, インデンターを押し当てる爪先部の箇所が異なることによって, 同一荷重で押したとしても異なるマーカ変位の傾向があることが分かっている. そこで, 本研究では爪先部を図 5.30 に示す 3 つのパートに分けてインデンターを押し当てることにした.

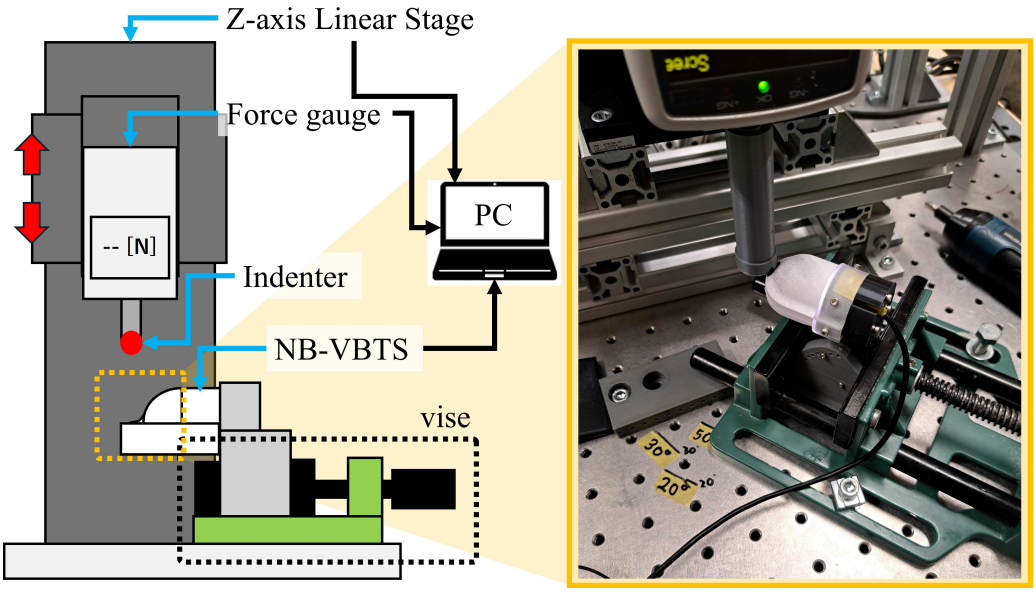



図 5.29: NB-VBTS の爪先部のマーカ変位量データ取得環境.

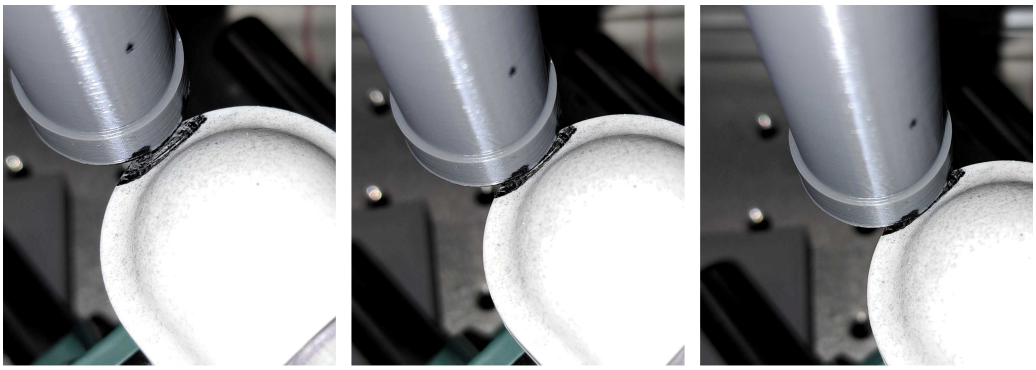



図 5.30: 爪先部のインデンター接触 3 パターン. (a)：1/3(先端), (b)：2/3(中間), (c)：3/3(半球近傍)

本研究の学習に用いるデータはマーカの移動ベクトルとする. 具体的には, 図 5.31 に示すように, 前のフレームと現在のフレーム間におけるマーカの移動ベクトル $(dx,\, dy,\, r)$ を用いる. NB-VBTS には 127 個のマーカがあるため, 各フレーム $t$ に対してマーカ $i$ $(i = 1, ..., 127)$ のフレーム間変位を算出する (式 5.10).

$$\Delta x_i^{(t)} = x_i^{(t)} - x_i^{(t-1)}, \quad \Delta y_i^{(t)} = y_i^{(t)} - y_i^{(t-1)}, \quad r_i^{(t)} = \sqrt{\left(\Delta x_i^{(t)}\right)^2 + \left(\Delta y_i^{(t)}\right)^2}. \tag{5.10}$$

ここで, $(\, x_i^{(t)},\, y_i^{(t)}\,)$ は, 現在のフレームにおいて YOLOv8 によって検出された画像座標系におけるマーカ中心位置であり, $(\, x_i^{(t-1)},\, y_i^{(t-1)}\,)$ は, 1 フレーム前のマーカ中心位置を意味する. 学習用の特徴量ベクトルは, マーカ ID 順に並べて 381 次元とした (式 5.11).

$$\mathbf{x}^{(t)} = \left[\, \Delta x_1^{(t)},\ \Delta y_1^{(t)},\ r_1^{(t)},\ \ldots,\ \Delta x_{127}^{(t)},\ \Delta y_{127}^{(t)},\ r_{127}^{(t)} \,\right]^\top \in \mathbb{R}^{381}. \tag{5.11}$$

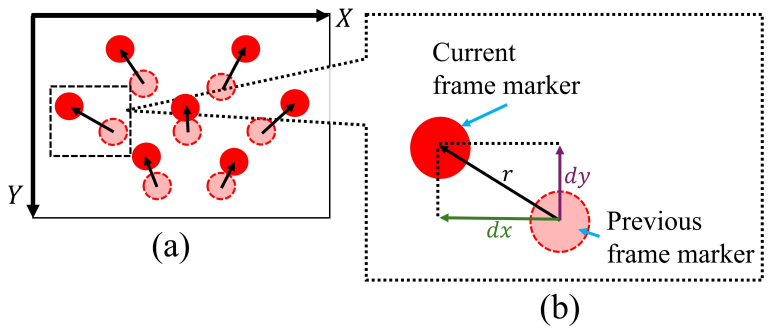



図 5.31: 画像座標系におけるマーカのフレーム間変位 $(dx, dy)$ と 距離 $r$ の定義. (a)：マーカ全体の変位の例, (b)：フレーム間のマーカベクトル量の定義.

特徴量ベクトルの取得までの流れを, 図 5.32 に示す. マーカの検出と追跡は 3.2.5.2 で示した方法でおこない, 初期フレームにおいては 3.2.5.3 に示す手法で, 初期 ID の割り当てをおこなった. マーカの検出と追跡処理を実行しながら, Z 軸リニアステージを NB-VBTS の爪先部の接触直前までの位置まで降下させる (速度は 0.7 mm/s). その後, デジタルフォースゲージを一度 0 N へリセットし, Z 軸リニアステージを低速で下降させながら (0.05 mm/s), NB-VBTS の爪先部に接触させる. 軽度の接触の判定としてデジタル

フォースゲージが初期接触の閾値としている 0.1 N に達したら, Z 軸リニアステージの降下を停止し, 再度デジタルフォースゲージを一度 0 N へリセットする. その後, Z 軸リニアステージの降下を再開し, 接触閾値 ($Thresh_N$) に達するまで降下を続ける. 接触閾値 ($Thresh_N$) は $[0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0]$ の 9 パターンとして, それぞれの閾値の設定において 20 回分のデータを取得した (図 5.32 を 20 回おこなう). 学習用の特徴量ベクトルは, 図 5.32 の流れで取得され, 特徴量ベクトルを CSV ファイルに保存する. ラベルは, $Thresh_N$ 到達時のデジタルフォースゲージの実測値とした.

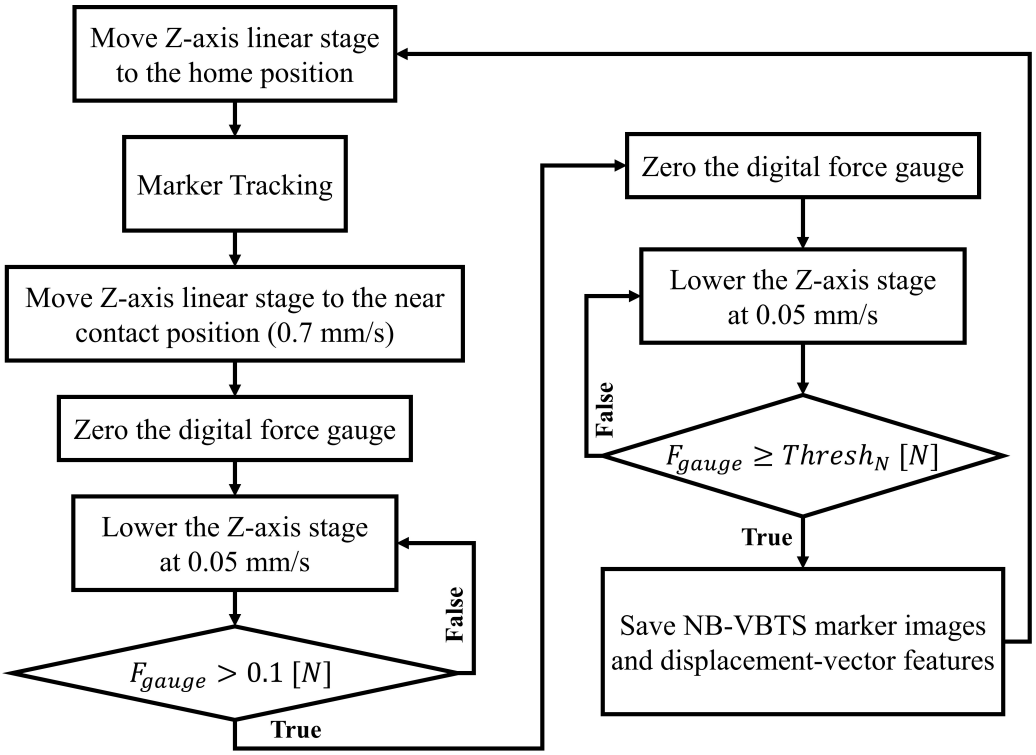



図 5.32: NB-VBTS におけるデータ取得フローチャート. (接近, 接触, 保存)

#### 5.2.4.2 データセット作成

ここでは, 5.2.4.1 で示した方法で, 取得したデータを拡張し (Augmentation), 学習データに分割する方法を示す. 実測データのばらつきを参考にして, 学習データを拡張する. そのために, 本研究では「$\alpha$ : マーカごとの $dx$, $dy$ 方向への小さな揺らぎ」, 「$\beta$ : 並進ドリフト (画像全体がそろってずれる量)」, 「$\gamma$ : 微小回転 (画像全体が少し回転する量)」3 つのパラメータを用いた.

まず, 条件 c(荷重閾値 ($Thresh_N$), 接触部 (cp:contact point)) におけるマーカ ID 間の特徴量 ($dx$, $dy$, $r$) のスケールを, 中央値で要約する (式 5.12). ただし, $\mathcal{I}(c)$ は条件 $c$ で検出されたマーカ ID の集合, $i \in \mathcal{I}(c)$ は個々のマーカ ID を意味する. また, $\sigma_{dx}^{(i)}(c)$ と $\sigma_{dy}^{(i)}(c)$ は, フレーム間のマーカ変位を $x$ 方向は $dx$, $y$ 方向は $dy$ とし, ID $i$ の条件 $c$ 内の 20 回測定分における標準偏差と定義する.

$$\tilde{\sigma}_{dx}(c) = \mathrm{median}_{i\in\mathcal{I}(c)}\{\sigma_{dx}^{(i)}(c)\}, \quad \tilde{\sigma}_{dy}(c) = \mathrm{median}_{i\in\mathcal{I}(c)}\{\sigma_{dy}^{(i)}(c)\}, \quad \tilde{\sigma}_{r}(c) = \mathrm{median}_{i\in\mathcal{I}(c)}\{\sigma_{r}^{(i)}(c)\}. \tag{5.12}$$

**・局所揺らぎ $\alpha$ の決定方法**

各条件 $c$ における $\sigma_{dx}^{(i)}(c)$, $\sigma_{dy}^{(i)}(c)$ の ID 間の中央値を各条件におけるマーカごとのノイズ強度とする. $\sigma_{dx}^{(i)}(c)$ と $\sigma_{dy}^{(i)}(c)$ をそれぞれ条件ごとに箱ひげ図としてプロットした (図 5.33). 破線 (青色/緑色) は,

全条件 c にわたる $\sigma_{dx}$(青色), $\sigma_{dy}$(緑色) の中央値である. オレンジ色の線は, 各条件 c 内における $\sigma_{dx}$ と $\sigma_{dy}$ 合わせての中央値を示している. 各条件により分布の広がりが多少異なり, $\sigma_{dx}$ は $\sigma_{dy}$ よりも高めに推移する傾向がみられる. 局所揺らぎ $\alpha$ は $\tilde{\sigma}_{dx}(c)$, $\tilde{\sigma}_{dy}(c)$ をガウス雑音の標準偏差スケールとして用い, ノイズを各 ID へ独立に付与する (式 5.13).

$$dx_i \leftarrow dx_i + \alpha_x(c), \quad dy_i \leftarrow dy_i + \alpha_y(c). \tag{5.13}$$

ただし, $\alpha_x(c)$ と $\alpha_y(c)$ は式 5.14 として $K_\alpha = 0.9$ とする.

$$\alpha_x(c) = K_\alpha \tilde{\sigma}_{dx}(c) \quad \alpha_y(c) = K_\alpha \tilde{\sigma}_{dy}(c). \tag{5.14}$$

**・並進ドリフト $\beta$ の決定方法**

条件 c ごとの $\beta$ 候補は $0.25 \times median(\sigma_r)$ を各条件における共通のノイズ強度とする. 式 5.12 内の $\sigma_r^{(i)}(c)$ は, $dx$ と $dy$ の合成ベクトル (大きさ) のばらつきを意味する (式 5.15).

$$\sigma_r^{(i)}(c) = \sqrt{\left(\sigma_{dx}^{(i)}(c)\right)^2 + \left(\sigma_{dy}^{(i)}(c)\right)^2} \tag{5.15}$$

この $\sigma_r^{(i)}(c)$ を条件ごとに可視化したものが図 5.34 である. 各条件におけるマーカ変位の大きさの標準偏差 ($\sigma_r$) の中央値を青色棒グラフで示し, 赤色の点線は条件ごとの $\beta$ 候補値を意味する (式 5.16). ただし, $k = 0.25$ とした.

$$\beta(c) = \beta_{candidate} = k\tilde{\sigma}_r(c) \tag{5.16}$$

赤色の水平点線は $\beta$ 候補の全条件中央値である. このうち $\beta$ 候補によって, 条件依存のばらつき規模に比例した一貫性のある並進ノイズを付与できる (式 5.17). ただし, 式 5.17 内の $dX, dY$ は, 式 5.18 に従う.

$$dx_i = dx_i + dX, \quad dy_i = dy_i + dY. \tag{5.17}$$

$$dX \sim \mathcal{N}\left(0,\, \beta(c)^2\right), \quad dY \sim \mathcal{N}\left(0,\, \beta(c)^2\right) \tag{5.18}$$

**・微小回転 $\gamma$ の決定方法**

全ての条件において, $\phi \sim \mathcal{N}\left(0,\, \gamma(c)^2\right)$ [deg] からノイズ強度を決定する. 本研究では, $\gamma(c)^2 = 0.5°$ とする. 回転角 $\phi$ をラジアンに変換し (式 5.19), その値を全試行のマーカ $(dx, dy)$ に適用する (式 5.20).

$$\phi_{rad} = radians(\phi) \tag{5.19}$$

$$\begin{pmatrix} dx' \\ dy' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi_{\mathrm{rad}} & -\sin\phi_{\mathrm{rad}} \\ \sin\phi_{\mathrm{rad}} & \cos\phi_{\mathrm{rad}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx_i \\ dy_i \end{pmatrix} \tag{5.20}$$

以上のノイズ付加によって, 元の特徴量のデータを拡張し 「訓練/検証/テスト」 用に 「70:15:15」 で分割した. ここで, 分割したそれぞれの特徴量に対して z-score 正規化を適用する. 正規化に用いる統計量 (平均 ($\mu$)・標準偏差 ($\sigma$)) は訓練用に分割されたデータのみから推定し, 検証とテストにはその推定された結果をそのまま適用する.

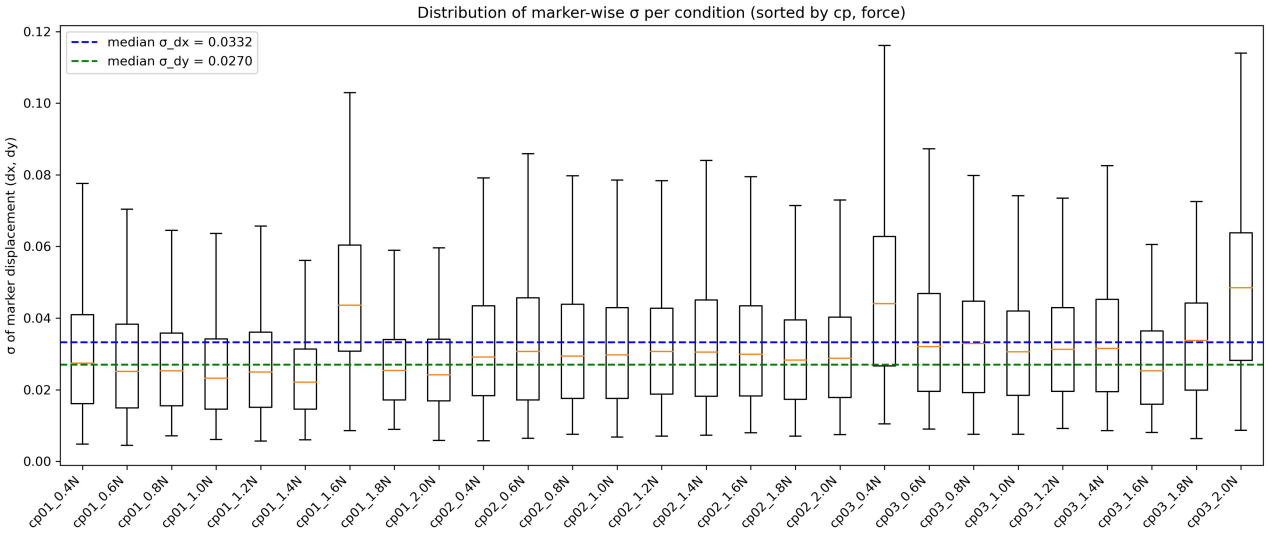



図 5.33: 条件別のマーカー変位標準偏差 $(\sigma_{dx}^{(i)}, \sigma_{dy}^{(i)}(c))$ の分布と全体中央値.
箱：$\left\{\sigma_{dx}^{(i)}(c)\right\}_i \cup \left\{\sigma_{dy}^{(i)}(c)\right\}_i$ の IQR, オレンジ色の線：$\left\{\sigma_{dx}^{(i)}(c)\right\}_i \cup \left\{\sigma_{dy}^{(i)}(c)\right\}_i$ の中央値, 破線 (青/緑)：全条件を横断した $\sigma_{dx}$ と $\sigma_{dy}$ の中央値.

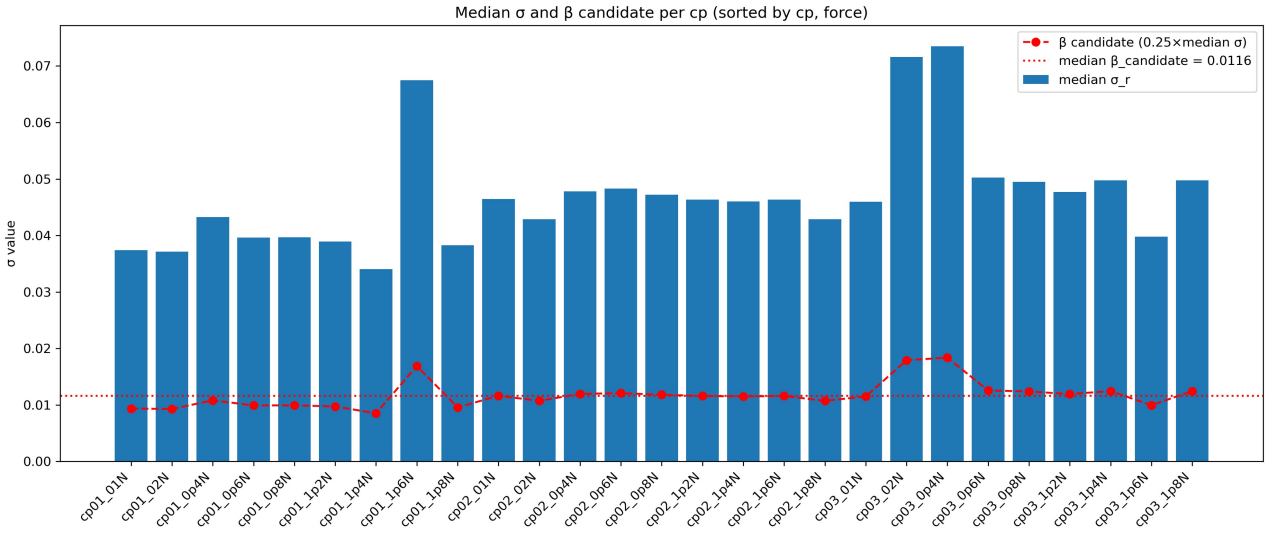



図 5.34: 条件ごとのマーカー変位スケール（$\sigma_r$）と $\beta$ 代表値.
棒グラフ： 各条件におけるマーカの変位大きさの標準偏差 $\sigma_r$ の中央値, 赤色点付き線 $(\beta_{candidate})$：$0.25 \times median(\sigma_r)$ の値, 赤色水平点線：$\beta_{candidate}$ の全条件中央値.

#### 5.2.4.3 多層パーセプトロン (MLP) の構成と学習方法

本研究では, フォースゲージで取得される力の実測値 $F\,[N]$ を訓練集合の統計量 $(\mu_F, \sigma_F)$ により標準化し式 5.21 を回帰対象と設定した.

$$y^{(\mathrm{std})} = \frac{F - \mu_F}{\sigma_F} \tag{5.21}$$

推論時は式 5.22 により物理量 (N) へ復元する.

$$\hat{F} = \sigma_F \, \hat{y}^{(\mathrm{std})} + \mu_F \tag{5.22}$$

また, 本研究では多層パーセプトロン (MLP) を用いて, 入力次元は採用した特徴量の総数 ($381 = 127 \times 3$) とした. 隠れ層は全結合と活性化関数としての ReLU 関数から構成し, 過学習抑制のため, 隠れ層の後段に Dropout(0.1) を適用した. 出力層はユニット数 1 で, $y^{std}$ を直接回帰する. 比較のために 3 パターンの隠れ層構成を評価した (表 5.7).

いずれの構成においても損失関数は標準化後のラベル $y^{std}$ に対する平均二乗誤差 (Mean Squared Error : MSE) とし, バッチサイズは 128, 最大エポック数は 128 である. 回帰タスクの安定収束を目的に Adam を適用した. 学習率は, スケジューラは用いず, 全エポックで $1.0 \times 10^{-3}$ と一定にし, 重み減衰 (weight decay) は $1.0 \times 10^{-4}$, 一次モーメントの減衰率 ($\beta_1$) は 0.9, 二次モーメントの減衰率 ($\beta_2$) は 0.999, 数値安定化項 ($\epsilon$) は $1.0 \times 10^{-8}$ に設定した.

表 5.7: MLP 構成一覧

| Arch No. | Hidden 幅リスト | #Hidden | 活性化 | Dropout | 入力次元 | 出力次元 | 目的空間 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| No.1 | [381, 190] | 2 | ReLU | 0.1 | #feat | 1 | z-F |
| No.2 | [381, 190, 95] | 3 | ReLU | 0.1 | #feat | 1 | z-F |
| No.3 | [381, 190, 95, 47] | 4 | ReLU | 0.1 | #feat | 1 | z-F |

#feat は使用した特徴量数 (dx dy r の数). 目的空間 z-F は $F$ を $\mu_F, \sigma_F$ で標準化した値.
損失は MSE, 最適化は Adam (weight decay=$10^{-4}$).

早期終了は検証指標 (検証 MAE) に基づいて適用し, 各エポック末に検証データ全体で式 5.23 を算出し, patience=5 (検証が 5 エポック連続で改善しない場合に学習を打ち切り) とした. ただし, 式 5.23 中の $n$ は検証データのサンプル数, $i$ はインデックス, $\hat{F}_i$ は検証サンプル $i$ に対するモデルの予測値 (スカラー), $F_i$ は検証サンプル $i$ に対する真値 とする.

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left| \hat{F}_i - F_i \right| \tag{5.23}$$

最良モデルは検証 MAE が最小となったエポックの重みを保存して用いる方法で学習をおこなった.

#### 5.2.4.4 多層パーセプトロン (MLP) の学習結果と評価

ここでは, 5.2.4.3 で示したネットワーク構成および学習方法で学習をおこなった結果を示す. 学習曲線 (訓練と検証の損失) を図 5.35–5.37 に示す. いずれのアーキテクチャにおいても初期エポックで急速に減少し, その後は緩やかに鈍化した. 検証損失は訓練損失に概ね追随して推移し, 顕著な発散 (過学習) 傾向は観察されなかった. 早期終了 (patience=5, 指標=検証 MAE) を導入しているため, 検証損失が頭打ちとなった後の過学習フェーズは自動的に抑制され, 最良検証 MAE を与えたエポックの重みを採用している.

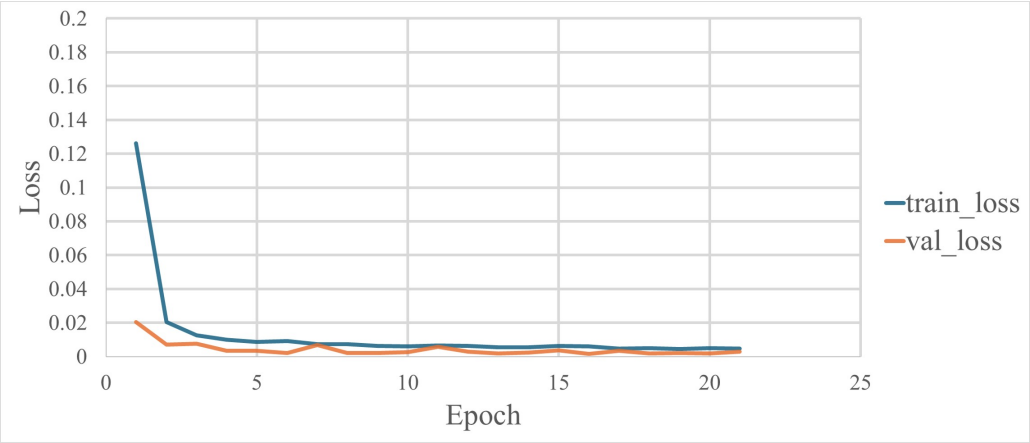



図 5.35: MLP (381 × 190) の学習曲線

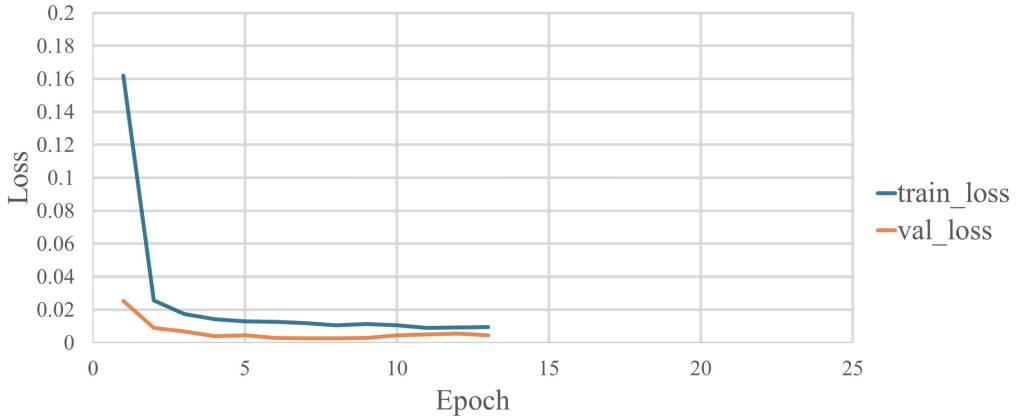



図 5.36: MLP (381 × 190 × 95) の学習曲線

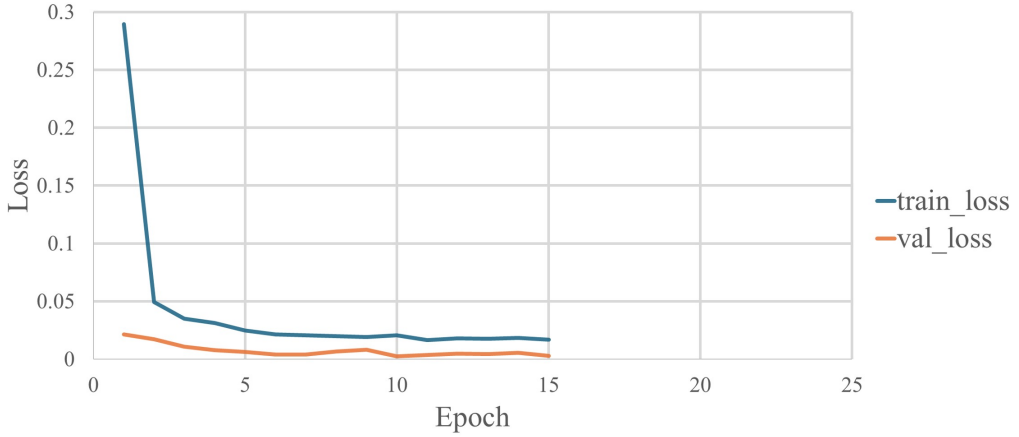



図 5.37: MLP (381 × 190 × 95 × 47) の学習曲線

また, それぞれの回帰モデルについて, テストデータに対する予測結果と真値の散布図を図 5.38 に示す. いずれのモデルも点群は基準線 $y = x$ 付近に密集しており, 高い一致度を示した. 回帰直線 $\hat{F} = aF + b$ の傾き $a$ と切片 $b$ に系統差が見られる (表 5.8) が, いずれの回帰モデルも良好な予測結果をテストデータに対して示していると考える.

表 5.8: 力推定モデルの回帰特性と誤差指標 (3 手法の比較)

| | $381 \times 190$ | $381 \times 190 \times 95$ | $381 \times 190 \times 95 \times 47$ |
|---|---|---|---|
| サンプル数 $n$ | 486 | 486 | 486 |
| Pearson 相関 $r$ | 0.9992 | 0.9991 | 0.9989 |
| 決定係数 $R^2$ | 0.9984 | 0.9980 | 0.9979 |
| 回帰傾き $a$ | 1.0003 | 0.9389 | 0.9975 |
| 回帰切片 $b$ [N] | +0.0200 | -0.056 | -0.018 |
| バイアス $\mathrm{mean}(\hat{F} - F)$ [N] | +0.0196 | +0.0191 | -0.0145 |
| MAE [N] | 0.0229 | 0.0339 | 0.0220 |
| RMSE [N] | 0.0286 | 0.0425 | 0.0278 |

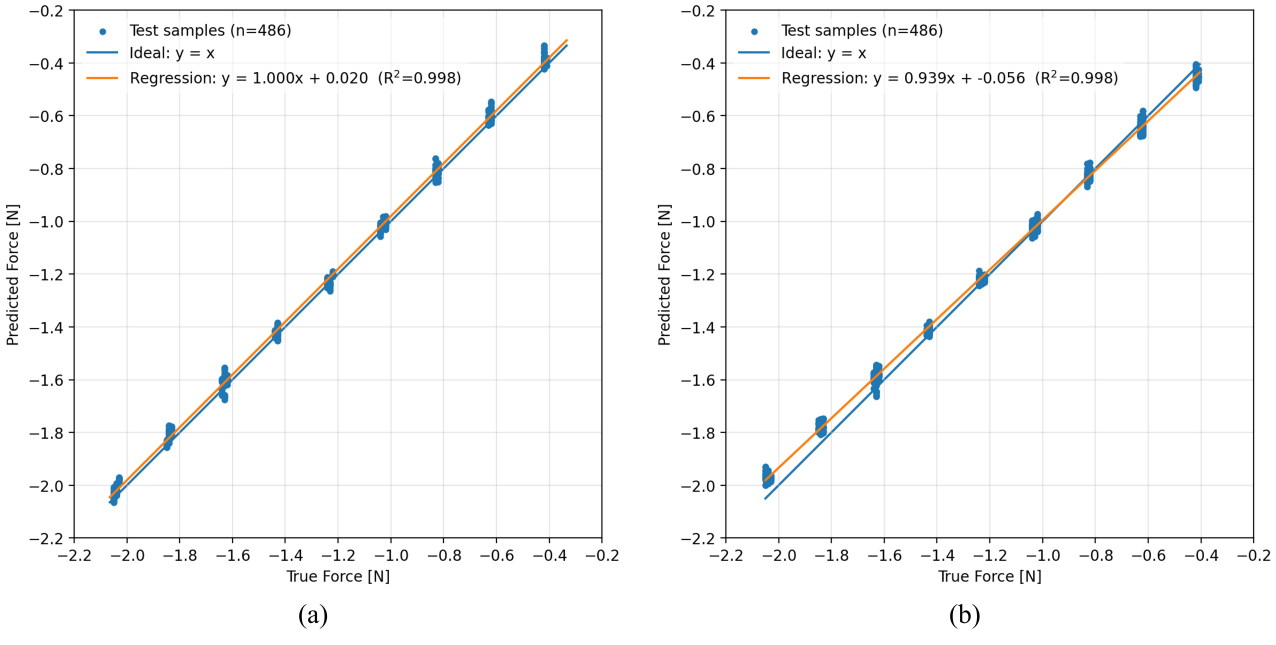



図 5.38: MLP 構成差による力推定精度の比較.
(a)：381 × 190 の推定精度, (b)：381 × 190 × 95 の推定精度, (c)：381 × 190 × 95 × 47 の推定精度.

次に, 今一度テストデータとは異なるデータを図 5.29, 5.30 に示した環境で再取得して, それらのデータを用いて汎化性能を評価した. 具体的には, MLP の学習データには $[0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0]$ の 9 パターンを接触荷重の閾値として, 爪先部のインデンター接触箇所を 3 パターンとしていた. そこで, 新規のデータとして取得するデータは, $-0.4$— $-2.0\,\mathrm{N}$ まで $0.1\,\mathrm{N}$ ずつの接触荷重の閾値として, 爪先部のインデンター接触箇所 (cp： contact point) を同様に 3 パターンとしてそれぞれ 10 回ずつ測定をおこなった. 学習に用いたデータとは, 微妙な接触位置のずれを含むことや未知のデータを含むため, これらのデータに対して学習を完了した MLP の予測性能を評価することで未知のデータへの汎化性能を評価することにつながると考えた. それぞれの cp における各回帰モデルの未知データへの推定精度の結果を回帰直線および決定係数を示したグラフに示す (図 5.39–5.41 ). また, それぞれのグラフに

おける回帰特性と誤差統計を比較した (表 5.9–5.11). 3 層 ($381 \times 190 \times 95$) の MLP が全 cp で最小または同等の誤差を示す結果となった. cp $= 1/3$ では 2 層 MLP に過大ゲイン ($a = 1.099$) と正の切片 ($b = 0.211\,\mathrm{N}$) が現れ MAE が最も大きい (0.0901 N). 一方, 3 層 MPL は $a \approx 1$ かつ切片の値も小さく, MAE は 0.058 N と最小に抑制されている. cp=2/3 でも 3 層 MLP の $a = 0.9938$ が最も 1 に近く, MAE は 0.0959 N と良好な結果となっている. 爪先部の最奥側では, 2 層および 4 層 MLP でバイアスが増大 ($+0.3229, +0.2687$) し誤差が顕著に悪化するのに対して, 3 層 MLP は MAE 0.1405 N に留まっている. 以上より, 接触位置に伴う非線形性・外乱 (局所変形場の差や微小な接触位置の差) に対して, 3 層 MLP は表現力と Dropout(0.1) による正則化のバランスが保たれており, 位置変動に対して提案した 3 種の MLP のなかでは最もロバストな回帰 MLP であると判断できる. よって, 次の把持実験においては, 3 層 MLP を用いることにした.

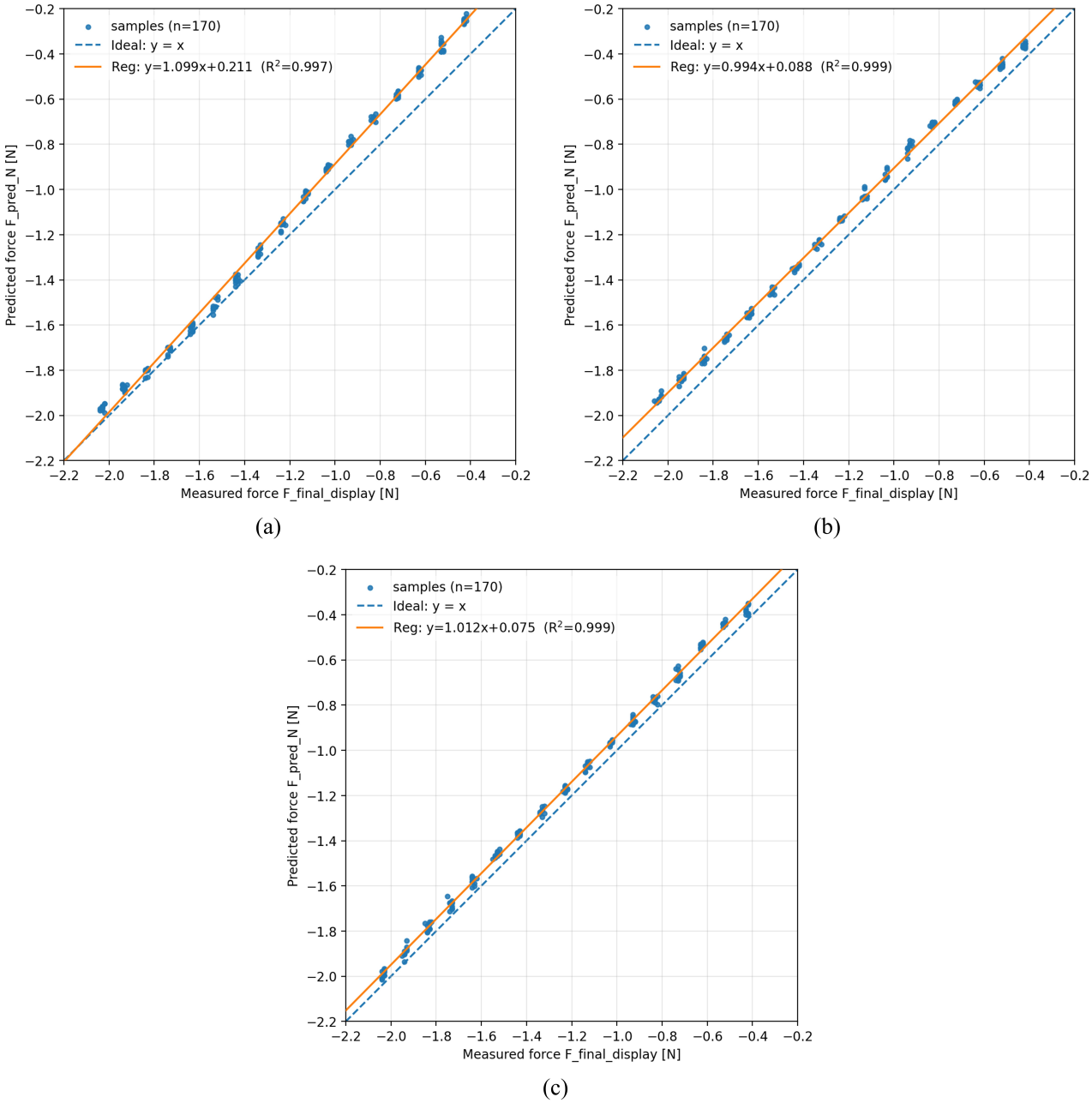



図 5.39: MLP 構成差による未知データに対する力推定精度の比較 (Contact Point：1/3).
(a)：381 × 190 の推定精度, (b)：381 × 190 × 95 の推定精度, (c)：381 × 190 × 95 × 47 の推定精度.

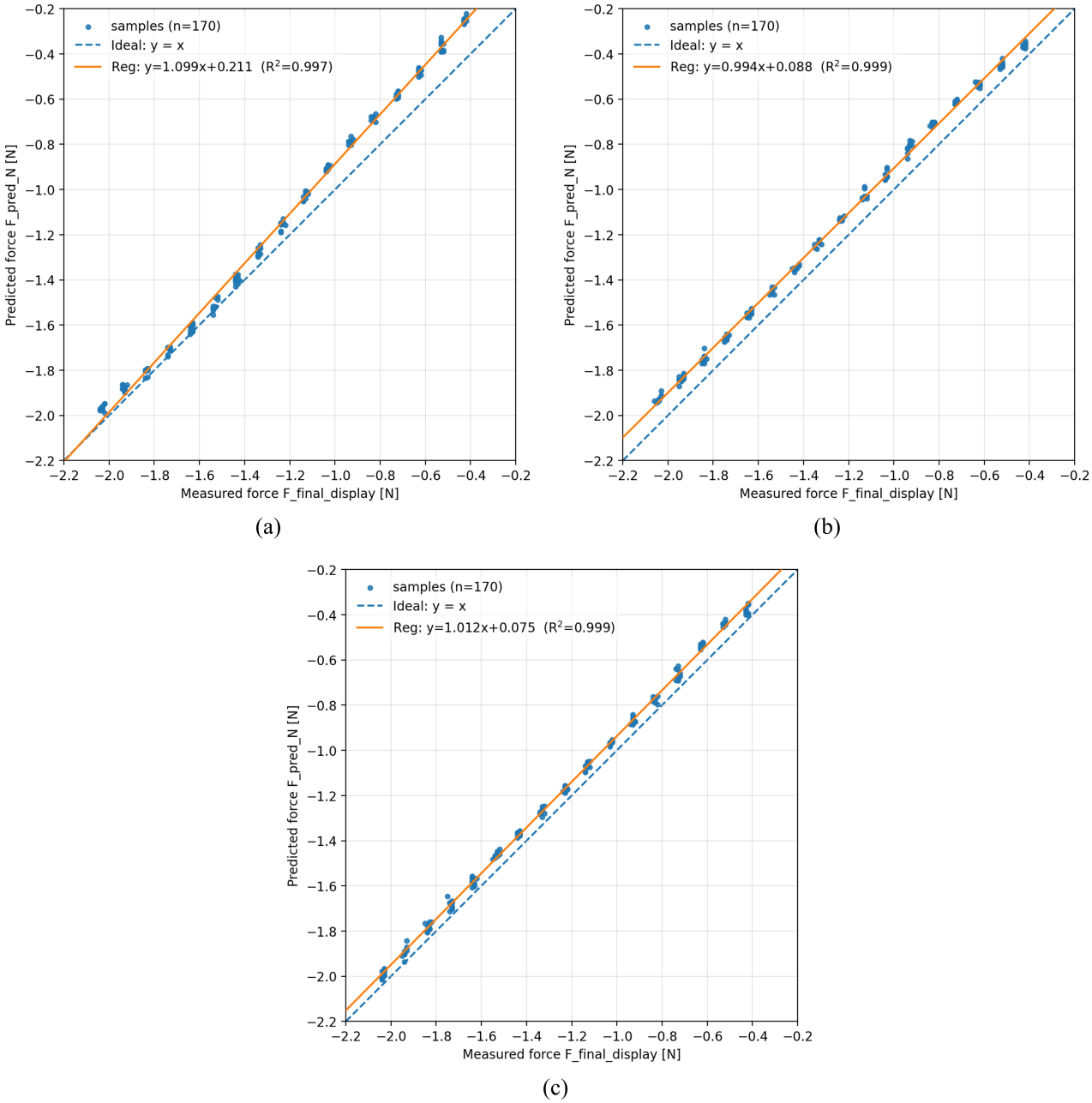
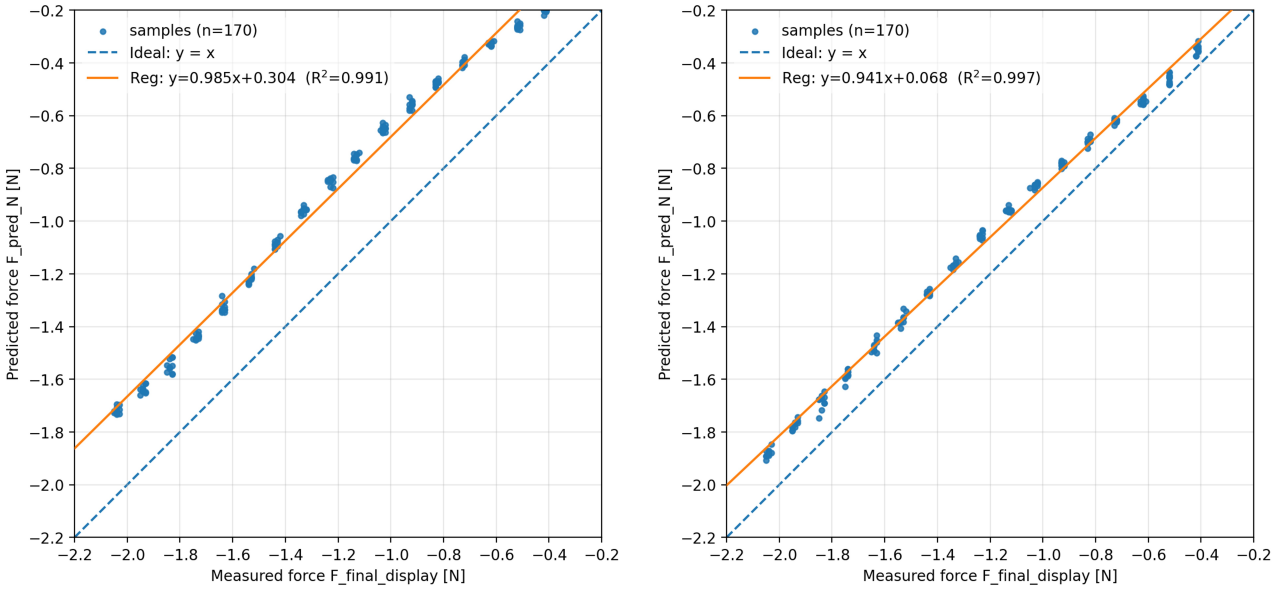


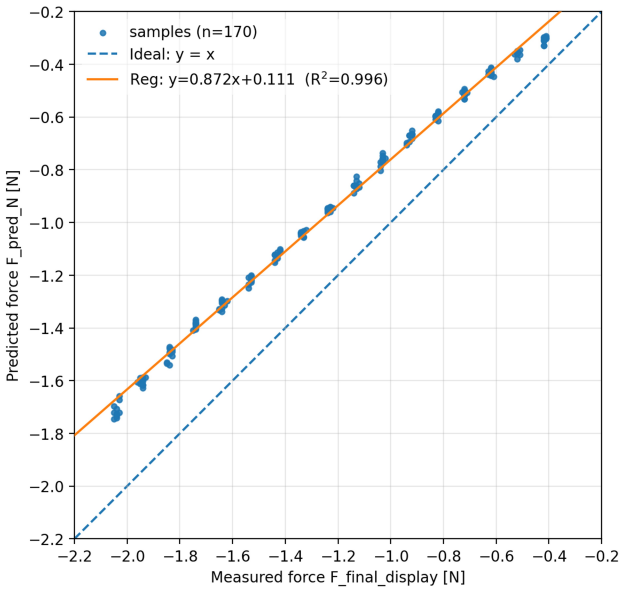

図 5.40: MLP 構成差による未知データに対する力推定精度の比較 (Contact Point：2/3).
(a)：381 × 190 の推定精度, (b)：381 × 190 × 95 の推定精度, (c)：381 × 190 × 95 × 47 の推定精度.




(a)




(b)




(c)

図 5.41: MLP 構成差による未知データに対する力推定精度の比較 (Contact Point：3/3).
(a)：381 × 190 の推定精度, (b)：381 × 190 × 95 の推定精度, (c)：381 × 190 × 95 × 47 の推定精度.

表 5.9: Contact Point 別の力推定モデルの回帰特性と誤差指標 (CP=1/3)

| | $381 \times 190$ | $381 \times 190 \times 95$ | $381 \times 190 \times 95 \times 47$ |
|---|---|---|---|
| サンプル数 $n$ | 170 | 170 | 170 |
| Pearson 相関 $r$ | 0.9987 | 0.9991 | 0.9994 |
| 決定係数 $R^2$ | 0.9975 | 0.9982 | 0.9987 |
| 回帰傾き $a$ | 1.0985 | 0.9828 | 1.0122 |
| 回帰切片 $b$ [N] | +0.2113 | +0.0364 | +0.0754 |
| バイアス mean$(\hat{F} - F)$ [N] | +0.0900 | +0.0576 | +0.0603 |
| MAE [N] | 0.0901 | 0.0576 | 0.0603 |
| RMSE [N] | 0.1057 | 0.0617 | 0.0632 |

表 5.10: Contact Point 別の力推定モデルの回帰特性と誤差指標 (CP=2/3)

| | $381 \times 190$ | $381 \times 190 \times 95$ | $381 \times 190 \times 95 \times 47$ |
|---|---|---|---|
| サンプル数 $n$ | 170 | 170 | 170 |
| Pearson 相関 $r$ | 0.9984 | 0.9993 | 0.9996 |
| 決定係数 $R^2$ | 0.9969 | 0.9985 | 0.9991 |
| 回帰傾き $a$ | 1.0437 | 0.9938 | 0.9185 |
| 回帰切片 $b$ [N] | +0.2024 | +0.0883 | +0.0534 |
| バイアス mean$(\hat{F} - F)$ [N] | +0.1486 | +0.0959 | +0.1539 |
| MAE [N] | 0.1486 | 0.0959 | 0.1539 |
| RMSE [N] | 0.1529 | 0.0978 | 0.1597 |

表 5.11: Contact Point 別の力推定モデルの回帰特性と誤差指標 (CP=3/3)

| | $381 \times 190$ | $381 \times 190 \times 95$ | $381 \times 190 \times 95 \times 47$ |
|---|---|---|---|
| サンプル数 $n$ | 170 | 170 | 170 |
| Pearson 相関 $r$ | 0.9955 | 0.9983 | 0.9982 |
| 決定係数 $R^2$ | 0.9911 | 0.9966 | 0.9965 |
| 回帰傾き $a$ | 0.9850 | 0.9412 | 0.8722 |
| 回帰切片 $b$ [N] | +0.3045 | +0.0681 | +0.1114 |
| バイアス mean$(\hat{F} - F)$ [N] | +0.3229 | +0.1405 | +0.2687 |
| MAE [N] | 0.3229 | 0.1405 | 0.2687 |
| RMSE [N] | 0.3263 | 0.1462 | 0.2774 |

#### 5.2.4.5　薄い物体把持実験環境

ここでは, 提案する NB-VBTS による薄い物体把持実験の実験環境について示す. 本実験では, 透明な骨構造と平坦な爪構造が一体化した内部支持物の周りに柔軟なスキン (内部にマーカあり) を備えた NB-VBTS を用いて薄い物体を把持する実験をおこなった. 図 5.42 に実験環境を示す. 2 基の NB-VBTS を 平行開閉 1 自由度グリッパの指部に取り付けた. 薄い物体として扱う試料は図 5.42 に示すように, 物体設置台の平面に物体設置場所を指定し, そこに設置する. 2 機の NB-VBTS にはそれぞれ内部カメラが組み込まれている. しかし, 研究室の保有している同機種の 2 台のカメラ (SYD-V31105L-158A-01, MISUMI Electronics Corp.) の内 1 台の LED ライトが故障していることにより, 内部のマーカ画像の輝度が 2 指間で異なっている. これによって, 図 5.42 内の cam1 側を内部 LED ライトが正常なカメラ, cam2 側を内部 LED ライトが故障しているカメラとする. また, 本実験で使用する薄い物体の試験片を図 5.43 に示す. 学生証は著者のものを使用しおおむね ISO の国際規格に準拠したサイズとなっている. 黒色の正方形の物体は 3D プリンタ (材料：PLA) で作成した試験片であり, それぞれのマスキングテープには厚みと重さを示している.

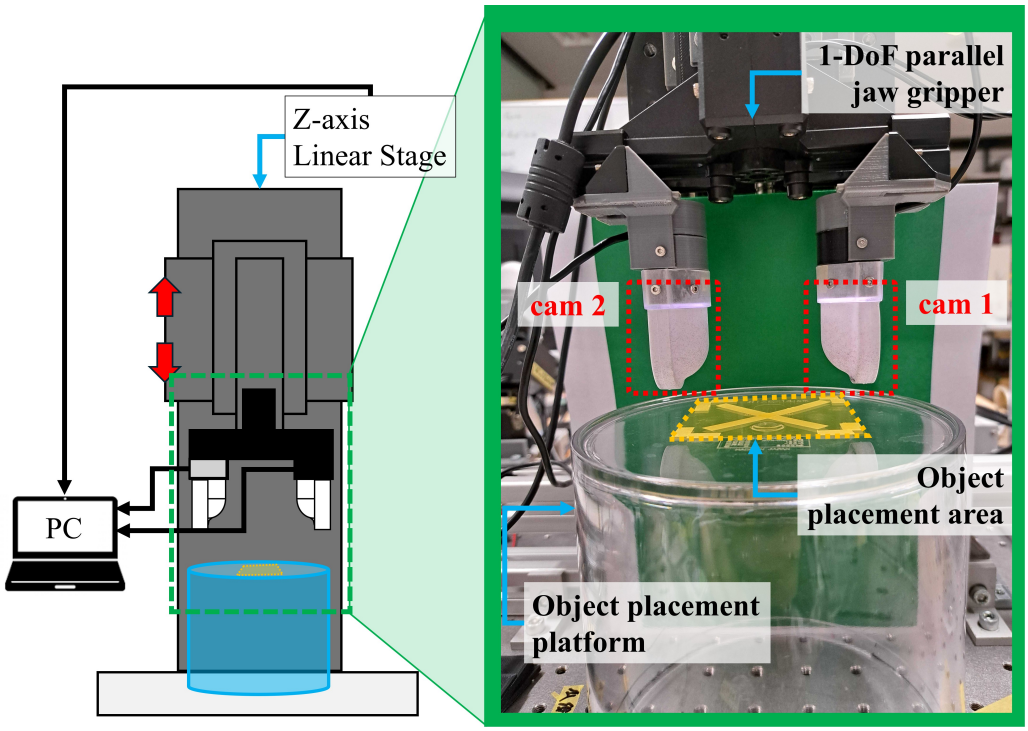



図 5.42: 薄い物体把持実験の実験環境.

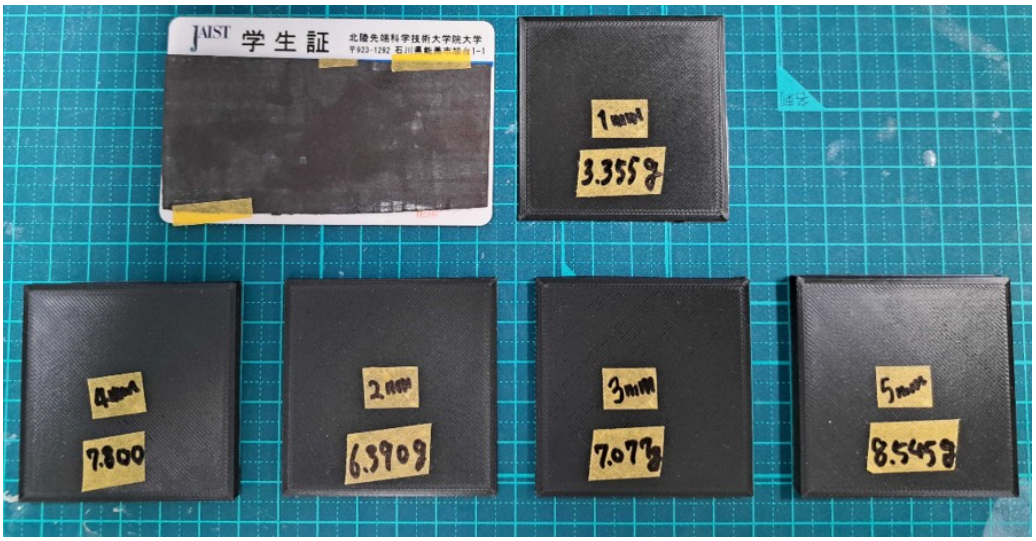



図 5.43: 実験に用いる薄い物体.
PLA で作成した試験片. 黒：$54.6 \times 54.6 \times T$ mm, $(T = 1, 2, 3, 4, 5\text{mm})$, 学生証：$53.98 \times 85.51 \times 0.79$ mm

#### 5.2.4.6 薄い物体把持実験の条件

ここでは, 図 5.42 で示した実験環境においてどのような条件および把持戦略で薄い物体の把持をおこなうのか, 予備実験の結果を含めて示す. 把持開始位置までの Z 軸リニアステージの降下方法および, 平行開閉 1 自由度グリッパ内の Dynamixel を回転させることで薄い物体を把持するまでの動作条件および把持後の動作についての流れを図 5.44 に示す. 処理開始後にグリッパを全開状態にした状態で, Z 軸リニアステージを薄い物体それぞれの事前に設定した高さ $(Z_{init})$ まで移動させる. なお, 処理開始後には $\hat{F}$ の推論を開始する. ただし, 推論をおこなうのは cam1 側の NB-VBTS のみとする.

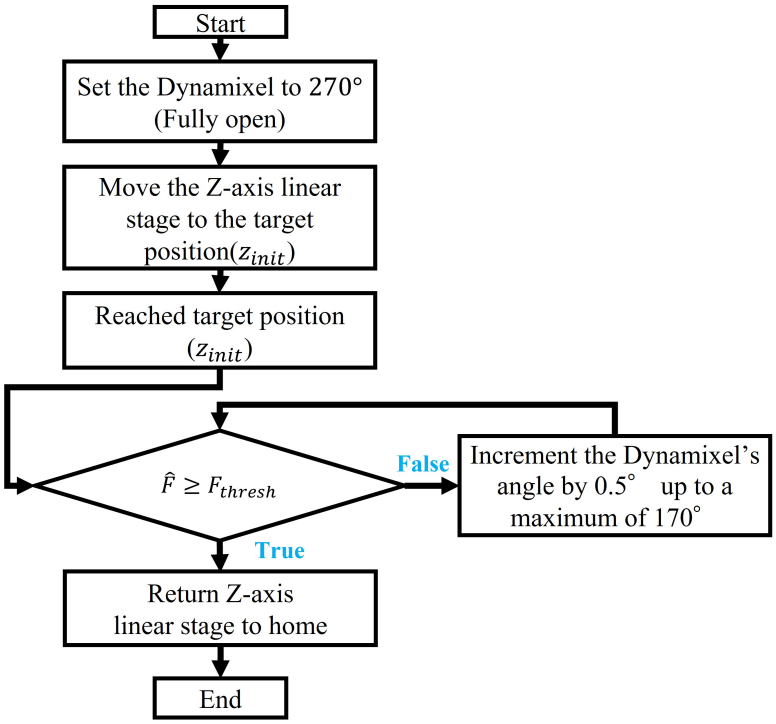



図 5.44: 薄い物体把持のフローチャート.

また, $Z_{init}$ は NB-VBTS が物体設置台の平面に接触する直前の位置を予め測定し取得しておく. Z 軸リニアステージが $Z_{init}$ に到達すると, 推定された爪先部の接触荷重 $\hat{F}$ が閾値 ($F_{thresh}$) 以下の場合は, Dynamixel を 0.1° ずつ回転させてグリッパを閉じていく. $\hat{F}$ が閾値に到達したら Dynamixel の回転を停止し, 5 秒間その状態を維持し Z 軸リニアステージを初期位置に速度 0.8 mm/s で復帰し薄い物体をその時点で把持できていれば把持成功と判定する. 一方, 把持失敗の条件としては, Z 軸リニアステージを初期位置に移動させている間に物体が滑り落ちたり, 2 指の爪先部で把持しているが回転している場合は失敗と判定する. ただし, 爪先部の接触荷重に対する閾値 ($F_{thresh}$) およびそれぞれの試験片に対する $Z_{init}$ は実験的に決定した. 実験的におこなった, 閾値 ($F_{thresh}$) および $Z_{init}$ の候補値抽出の結果を表 5.12 に示す.

本実験では, それぞれの試験片 ($T = 1, 2, 3, 4, 5$ mm) における, 把持開始時の Z 軸リニアステージの位置 ( $Z_{init}$ ) は $Z_{init} = \{139.3, 139.3, 139.3, 138.3, 137.3\,\text{mm}\}$ と設定し, 爪先部の接触荷重に対する閾値 ($F_{thresh}$) は $F_{thresh} = \{$-0.3,-0.3,-1.0,-1.0,-1.0 [N]$\}$ とした. また, 学生証の把持実験の条件は, 試験片 $T = 1$mm と同一で実施した. これらの値を用いて, 試験片それぞれで 5 回ずつ把持の試行をおこない評価をおこなった. なお, 試験片に応じて $Z_{init}$ を調整した理由は, 図 5.45 に示すように, 試験片の厚みが大きく爪先部のみの接触ではなく, 指腹の先端部に接触しており, 持ち上げ動作開始時に試験片が鉛直下方向に押し出される現象がみられるためである. 実験の評価に使用するデータは, 時系列と共に変化する cam1 側で推定される $\hat{F}$ および, cam1 と cam2 で追跡しているそれぞれのマーカ ID1 ($ID1_{cam1}\, ID1_{cam2}$) の時系列データとする.

表 5.12: 厚さ・Z 高さ・閾値と成否の一覧

| Thickness [mm] | $Z_{init}$ [mm] | $F_{thresh}$ [N] | Success or Fail |
|---|---|---|---|
| 1 | 139.3 | $-0.3$ | Success |
| 2 | 139.3 | $-0.3$ | Success |
| 3 | 139.3 | $-0.3 \sim -0.9$ | Fail |
| 3 | 139.3 | $-1.0$ | Success |
| 4 | 139.3 | $-1.0$ | Fail |
| 4 | 138.3 | $-1.0$ | Success |
| 5 | 138.3 | $-1.0$ | Fail |
| 5 | 137.3 | $-1.0$ | Success |
| 0.79 (Student Card) | 139.3 | $-0.3$ | Success |

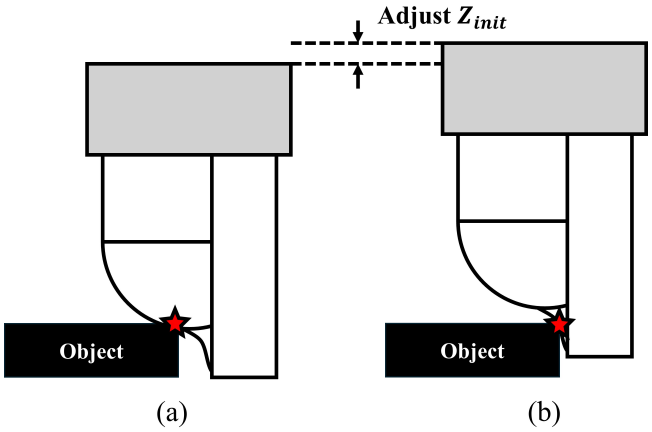



図 5.45: 把持開始高さ調整のイメージ.
(a)：試験片のエッジが指腹部に接触し, 持ち上げ時に鉛直下方向へ滑ってしまう, (b)：試験片の面を爪先部のみで接触させることで持ち上げ時の鉛直下方向への滑りを防ぐ.

#### 5.2.4.7　薄い物体把持実験の結果

ここでは, 薄い物体把持の実験結果を示す. 本実験では, 事前実験で決定した把持開始位置 ($Z_{init}$) および爪先部の物体との接触荷重閾値 ($F_{thresh}$) による, 5 種類の PLA で作成した試験片と実用されている学生証の把持成功率を評価した. 結果を表 5.13 に示す.

表 5.13: 厚さ・Z 高さ・閾値と成功回数

| 厚さ [mm] | Z 高さ [mm] | 閾値 [N] | 成功回数 |
|---|---|---|---|
| 1 | 139.3 | −0.3 | 5/5 |
| 2 | 139.3 | −0.3 | 5/5 |
| 3 | 139.3 | −1 | 5/5 |
| 4 | 138.3 | −1 | 5/5 |
| 5 | 137.3 | −1 | 5/5 |
| 0.79 (Student Card) | 139.3 | −0.3 | 4/5 |

5 種類の PLA で作成した試験片 ($T = \{1, 2, 3, 4, 5\,\mathrm{mm}\}$) では, それぞれすべての把持試行において成功した. また, 学生証の把持実験では 5 回中 4 回で把持が成功した. それぞれの把持成功時の時系列データ (1 試行分) を 図 5.46–5.51 に示す.

厚さ 1mm の試験片の結果 (図 5.46) では, 爪先部の物体との接触荷重閾値 ($F_{thresh}$) は $-0.3\,\mathrm{N}$ に設定しているため, 60 sec 前あたりに $-0.3\,\mathrm{N}$ に到達し, 5 秒間待機した後 Z 軸リニアステージが上昇していることが見て取れる. この時, 鉛直下方向に向かって試験片自体の重みによって, $\hat{F}$ の値が増加している. 同様に, 他の試験片 (図 5.47–5.50) および学生証の結果 (図 5.51) においても持ち上げ時の $\hat{F}$ 増加の現象は見られた.

また, 図 5.47 – 5.50 の 60 sec 付近でスパイク状の $\hat{F}$ の変化がみられる. これは, 把持完了の 5 秒後に Z 軸リニアステージを上昇させた際に若干の滑りの現象が 2 指間で生じているためと考える. この滑り現象後, $\hat{F}$ の値は安定して把持が成功している. ここで, 事前実験で確認した失敗時の 2 つの例を図 5.52 に示す. 厚さ 3mm で 把持開始位置 $Z_{init} = 139.3\,\mathrm{mm}$ および爪先部の物体との接触荷重閾値

$F_{thresh} = -0.7\,\mathrm{N}$ の場合, 把持力が十分ではないため Z 軸リニアステージを上昇させたタイミングで試験片が少し傾くが, $F_{thresh}$ が最終的に安定し試験片を把持した状態で Z 軸リニアステージは初期位置に戻った. しかし, 試験片が 2 指間で傾いたため失敗と判定している. また, 厚さ 4mm で把持開始位置 $Z_{init} = 139.3\,\mathrm{mm}$ および爪先部の物体との接触荷重閾値 $F_{thresh} = -1.0\,\mathrm{N}$ の場合, 図 5.45 に示す状態のため, Z 軸リニアステージが上昇したタイミングで試験片が鉛直下方向へ押し出され落下し, 把持に失敗した.

また, cam1 と cam2 それぞれの追跡している $ID1$ の立ち上がりのタイミングは, $\hat{F}$ の立下りのタイミングとほとんど同じタイミングであるが, カメラの LED ライトが cam2 側で故障しているため, $ID1_{cam2}$ の移動量と $\hat{F}$ の推定値の傾向は, 明らかに異なっている.

総じて, 図 5.46–5.51 は力の閾値制御により 「接触-—把持完了-—持ち上げ-—把持解除」 の各段階が明瞭に切り替わり, 触覚画像由来のマーカ変位と力推定が cam1 においては, 物理過程に一貫して対応することを示せており, 提案指先の把持安定性とセンサ融合推定の妥当性を示唆する結果となった.

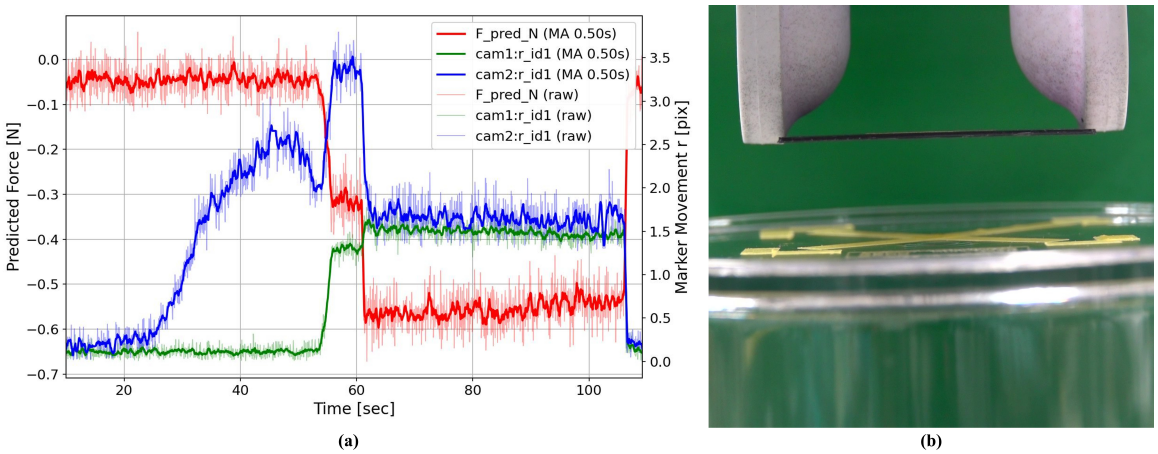



図 5.46: $T = 1\,\mathrm{mm}$ の把持時における時系列データと把持成功時の図.
(a) : 時系列データ (cam1 側の $\hat{F}$ の推定値および $ID1_{cam1}$ $ID1_{cam2}$) のマーカ移動量), (b) : $T = 1\,\mathrm{mm}$ の把持成功時の写真.

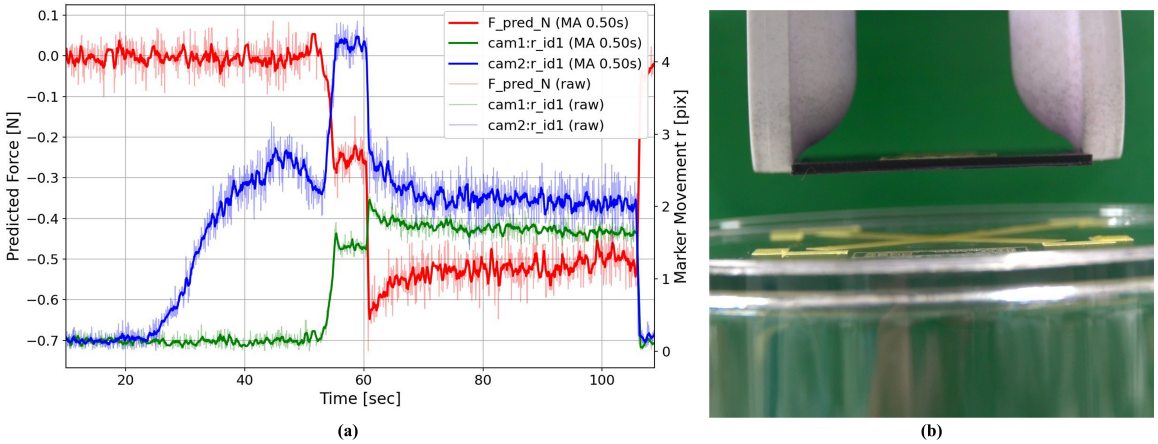



図 5.47: $T = 2\,\mathrm{mm}$ の把持時における時系列データと把持成功時の図.
(a) : 時系列データ (cam1 側の $\hat{F}$ の推定値および $ID1_{cam1}$ $ID1_{cam2}$) のマーカ移動量), (b) : $T = 2\,\mathrm{mm}$ の把持成功時の写真.

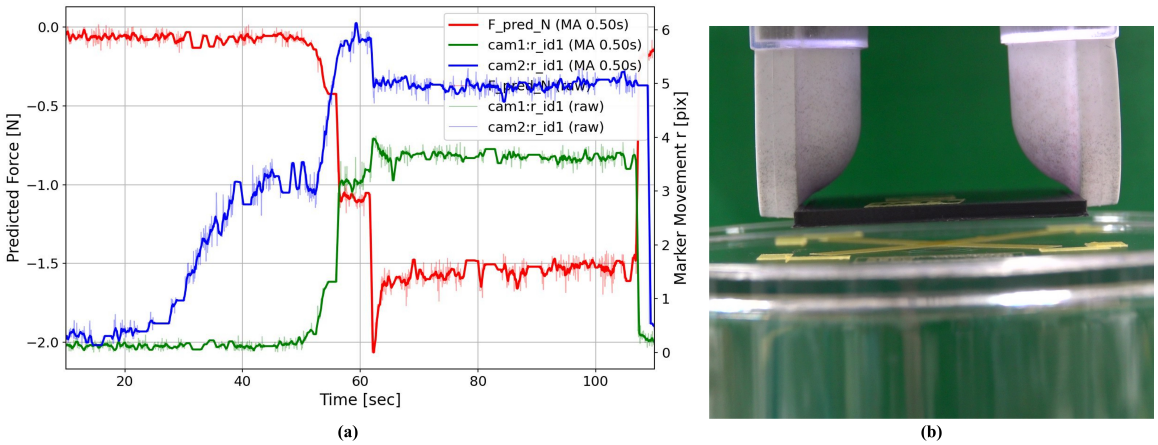



図 5.48: $T = 3\,\mathrm{mm}$ の把持時における時系列データと把持成功時の図.
(a)：時系列データ (cam1 側の $\hat{F}$ の推定値および $ID1_{cam1}$ $ID1_{cam2}$) のマーカ移動量), (b)：$T = 3\,\mathrm{mm}$ の把持成功時の写真.

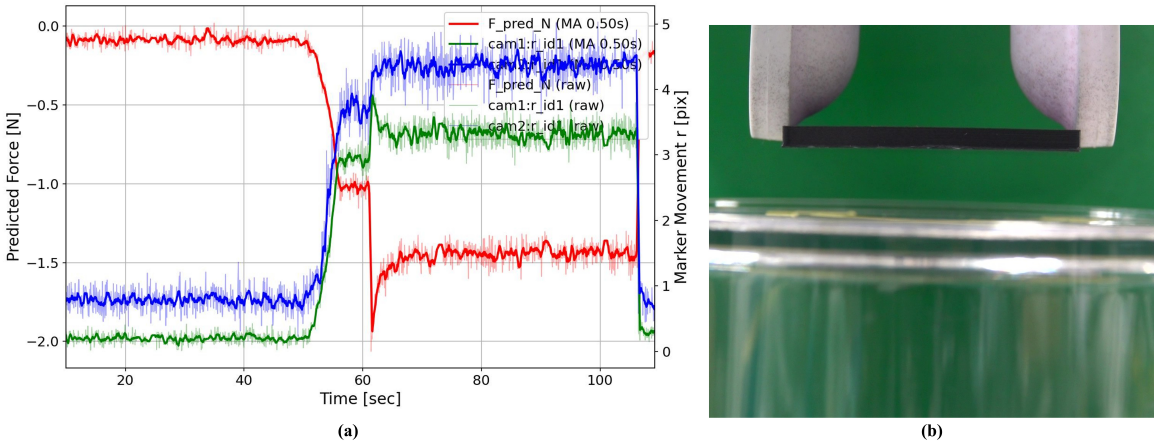



図 5.49: $T = 4\,\mathrm{mm}$ の把持時における時系列データと把持成功時の図.
(a)：時系列データ (cam1 側の $\hat{F}$ の推定値および $ID1_{cam1}$ $ID1_{cam2}$) のマーカ移動量), (b)：$T = 4\,\mathrm{mm}$ の把持成功時の写真.

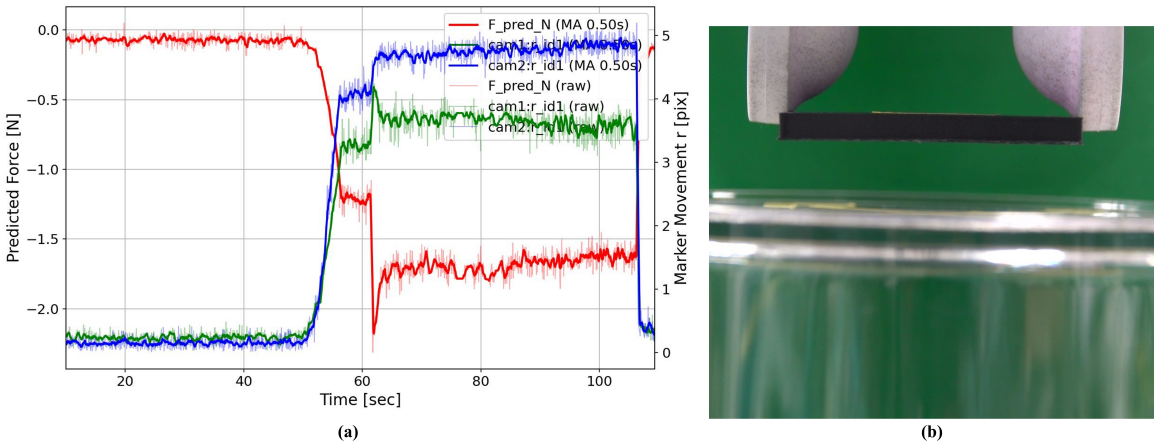



図 5.50: $T = 5\,\mathrm{mm}$ の把持時における時系列データと把持成功時の図.
(a)：時系列データ (cam1 側の $\hat{F}$ の推定値および $ID1_{cam1}$ $ID1_{cam2}$) のマーカ移動量), (b)：$T = 5\,\mathrm{mm}$ の把持成功時の写真.

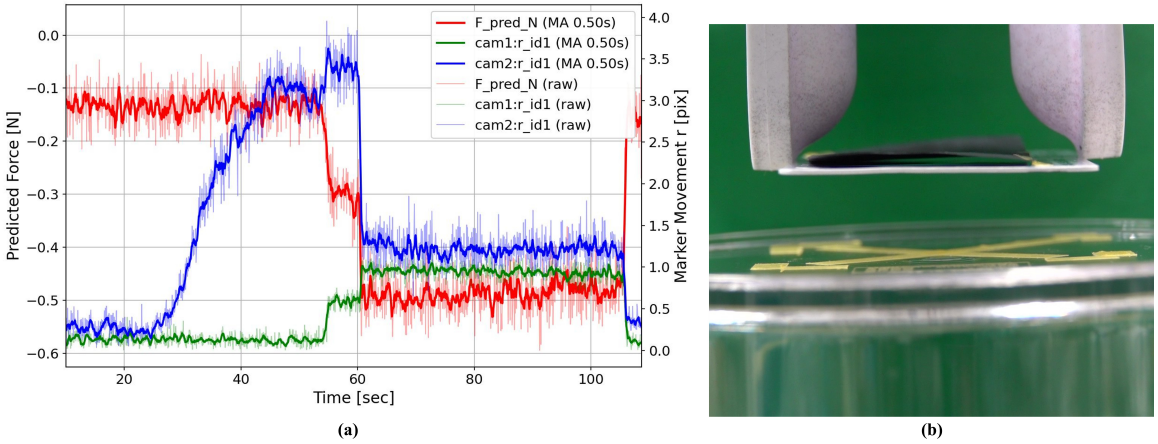



図 5.51: $T = 0.79\,\mathrm{mm}$(Student Card) の把持時における時系列データと把持成功時の図.
(a)：時系列データ (cam1 側の $\hat{F}$ の推定値および $ID1_{cam1}$ $ID1_{cam2}$) のマーカ移動量), (b)：$T = 0.79\,\mathrm{mm}$ の把持成功時の写真.

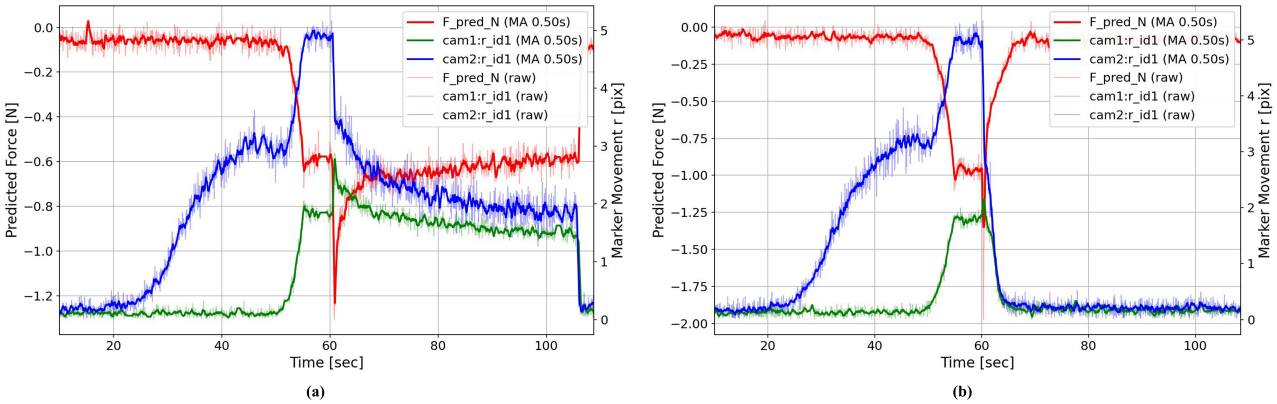



図 5.52: $T = 3\,,4\,\mathrm{mm}$ の把持失敗時における時系列データ.
(a)：2 指間で試験片が少し傾き把持は失敗しているが, 最終的に $\hat{F}$ が安定し Z 軸リニアステージが初期位置に戻っている, (b)： 試験片のエッジが指腹部に接触し, Z 軸リニアステージの上昇とともに鉛直下方向へ試験片が押し出して把持に失敗している (図 5.45-(a)).

#### 5.2.4.8　薄い物体把持実験の考察

本実験では, 爪先部にかかる法線力をデータ駆動型で推定し, 薄い物体の把持実験を通して VBTS における人の指の構造を模倣することで得られる多機能性の 1 つを実証することを目的とした. データ駆動型の力推定 (MLP) は, データ取得環境とは異なる新規データに対しても高い一致度を維持し, 特に 3 層構成 ($381 \times 190 \times 95$) が接触位置依存の非線形性に対して最もロバストな結果を示した. 具体的には, 接触位置 (cp) の微妙な違いによって応力場とマーカ変化傾向の対応が変化しうるにもかかわらず, 3 層の MLP 回帰モデルは傾きは 1 に近く, 小切片かつ低 MAE を広範囲で確認できた. これは、提案したデータ拡張 (局所揺らぎ, 並進ドリフト, 微小回転) と標準化学習が, 実環境で生じる微小なマーカ変動や接触箇所のばらつきを効果的に吸収した結果と解釈できる.

また, 回帰モデル (MLP) を用いて, 力の閾値制御と爪骨一体型構造の組み合わせが, 薄い物体のピッキング動作に有効であることが, 薄い物体把持の実験を通して示せた. 具体的には, PLA 試験片 $T = \{1, 2, 3, 4, 5\}\mathrm{mm}$ ではいずれも 5/5 回成功し, 学生証でも 4/5 回の成功が得られた. また, 試験片の把持に成功した $\hat{F}$ の時系列情報より初期滑りの現象が見受けられた. 把持に成功している場合, 初期滑り後に $\hat{F}$ が安定するのに対して, 持ち上げ動作時に 2 指間で試験片が傾いてしまう場合にも初期滑りの現象が見受けられることから, 今回のような単純な閾値による把持制御ではなくより高度な制御方法を適用することが望ましい結果が得られた. さらに、厚み増加に伴う把持開始高さの補正や, 力閾値の補正によって, 指腹先端の先行接触による「押し出し」失敗を抑制できた点は, フィンガーの幾何配置と荷重プロファイルの両面から把持戦略を最適化する必要性が示唆される結果となった.

以上より, 提案する NB-VBTS は, 薄い物体の把持において, VBTS に基づく把持状態の推定と生体模倣形状の相乗効果により, 「接触—把持—持ち上げ—解除」の各段階を安定に切り替えられることを示せた.

## 5.3 爪骨構造一体型: NB/B-VBTS の実験結果の考察

ここでは, 爪構造と骨構造を一体化した NB-VBTS の接触面積, 微小突起検知, 薄い物体把持の機能性について議論する.

**・接触面積**

NB-VBTS と比較対象の爪構造を備えない B-VBTS における接触面積の比較実験では, NB-VBTS は B-VBTS に比べて同一荷重・接触角条件下でより大きな接触面積を示した. これは, 爪と骨の一体構造によりスキンの不要な変形が抑制され, 指腹の幾何学拘束により有効接触域を拡張したためと解釈できる. とくに柔軟スキン (Ecoflex 00–10) では, 爪と骨構造による支持が圧力分布を安定化させ, 面接触への遷移を促進したと考えられる. これは, 検定後の厳しい条件の補正結果からも確認できる. 一方, 比較的硬めのスキン (Ecoflex 00–50, Solaris と Slacker の混合材) や柔らかすぎるスキン (Gel) の場合, 検定後の結果に有意な差が確認できなかった.

このことから, スキンの幾何的拘束性の獲得には, 材料による依存性があることが示された. これは, 従来の研究より知られていることで, 現状研究室で入手可能な材料としては Ecoflex 00–10 が最も幾何的拘束性を獲得できる材料と考える.

**・微小突起検知**

NB-VBTS の爪先部における微小突起検知では, 内部マーカの合成変位とフォーストルクセンサによる力計測結果を真値としての PSD が理想周波数近傍にピークを持つかによって検知性能を評価した. NB-VBTS は $d = 8, 4, 2, 1\,\mathrm{mm}$ で理想周波数に整合するピークが立ち, 距離換算誤差も最大 0.69mm に収まった. 一方, $d = 0.5\,\mathrm{mm}$ ではセンサ構造上の限界に近く理想周波数付近でのピークは消失していた. 比較対象となる同一材料 (Solaris と Slacker の混合) で作成された B-VBTS では, $d = 1\,\mathrm{mm}$ で理想周波数のピークは得られなかった. これらの結果より, 爪先で接触が集中することで周期刺激の取得効率が上がり, 微細な起伏の特徴を検知できる可能性が示された.

**・薄い物体把持**

爪先の局所マーカ運動 (127 点 $\times$ $dx, dy, r = 381$ 次元) から法線力を直接回帰するデータ駆動モデル (MLP) を構築した. 学習データは実測に基づく 3 種類のノイズ (局所揺らぎ・並進ドリフト・微小回転) で拡張し, z 標準化・早期終了など再現性を考慮した手順で学習をおこなった. MLP の構成比較では, テスト内ではどれも高一致を示したが, 未知の接触位置・荷重レンジでの外挿評価では 3 層 (381-190-95) が最もバランス良く, バイアスや MAE が小さく抑えられるため, 実運用に耐えるロバスト性を示した. 学習済みの 3 層の MLP 構成を用いて, 薄い物体把持実験をおこなった結果, 最も薄い試料として厚み 0.79mm の学生証の把持に高確率で成功し, より厚みのある試験片では 5/5 回で把持の成功を示せた.

一方, 試験片ごとに対する把持開始の位置決めや, 物体ごとの適切な把持力の決定および滑りの現象が生じた際のより巧緻な把持戦略が今後の課題としても示唆される結果となった.

## 5.4 爪骨構造一体型: NB/B-VBTS の実験結果における結論

本研究では, 人間の指先構造がもつ幾何学的拘束効果および爪先部における巧緻な物体検知および操作の機能性がビジョンベース触覚センサ (VBTS) で再現可能か評価した. また, 爪構造と骨構造を一体化

した NB-VBTS と爪構造を持たない B-VBTS を安定して作製する手法を開発した. 接触面積比較実験では, NB-VBTS は B-VBTS と比べて一貫して大きな接触面積を示し, 爪構造を組み込む機械的利点が確認できた. 更に, 微小突起検知実験では NB-VBTS の方が B-VBTS より細かな突起を検知することが可能であることが示せた. これは, 爪先部における接触力集中によるものと考えられ, 構造的な優位性を示すことができた. 薄い物体把持実験では, 従来研究ではかぎ爪構造を外付けのハードウェアとして備えた VBTS(2.7) による薄い物体操作が報告されてきたが, 本研究では初めて VBTS 単体で ISO/IEC 7810 で規格されているサイズに近い物体を操作することに成功した.

これらのように, ヒトの指の構造に着想を得て提案した NB-VBTS は 3 つの実験を通して多機能性を実証することができた. 一方で, 本研究内容はラボ内で完結する限定的な結果にとどまる. このことから今後は, より汎用的な微小突起検知や物体操作および更なる構造設計の見直しにより, より巧緻な物体操作の獲得を目指す必要がある.

# 第6章

# 全体の考察と結論

## 6.1 考察

### 6.1.1 設計と製作

w-VBTS と wo-VBTS および NB-VBTS と B-VBTS はいずれも光学式 3D プリンタで作成した鋳型 (GrayResin) を用いて安定的に作成する手法を確立した. 特に, それぞれのセンサ内部に組み込まれている透明な内部支持構造を独自に作成することが可能なため, NB-VBTS のように骨構造と爪構造を一体化させ, よりヒトの指構造に近い VBTS を作製することに成功した点は爪先部での物体表面の特徴の検知および薄い物体操作に寄与する設計となった. この内部支持構造と柔軟なスキンはいずれも接着剤は必要としない点も作製における人為的な誤差を省くことに貢献している. 今後, 更にヒトの指の構造に近づけるための設計, 例えば小型化やスキンと骨および爪の曲率変更は十分に可能である. しかし, マーカの付与はヒトの手作業で 1 つずつおこなっているため, 時間がかかりセンシングの誤差につながる可能性がある. 具体的には, NB-VBTS の場合は直径 1 mm のマーカ 127 個を手作業で作成しているため, 時間がかかるのと人為的なマーカの大きさの誤差が懸念される. 今後, より効率的なマーカ作成方法を確立することが望ましい.

### 6.1.2 マーカ検出と追跡

本研究では, マーカの検出方法として YOLOv8 を用いた. 従来のマーカベースの VBTS の多くは色フィルタによるマーカ検出手法が採用されてきていた. しかし, 本研究で提案する NB-VBTS では単純な色フィルタでは個々のマーカを検出することが難しかった. 一方, 従来の YOLO シリーズはアンカーベースによる物体検出となっているため, 小さな物体や物体の大変形時に誤検出が懸念されていた. 近年では, 様々な YOLO シリーズが報告されてきており, その中で YOLOv8 はアンカーフリーによる検出手法のため小物体の検出および物体の大変形に堅牢であることが知られている. 本研究ではこの点に着目し, YOLOv8 のなかでも小規模なネットワークである YOLOv8n を w/wo-VBTS および NB/B-VBTS それぞれにファインチューニングすることで, 本研究における実験過程ではマーカの誤検出と誤追跡は見られなかった. 処理速度としては, 本実験では詳細な評価をおこなっていないが, NB-VBTS による薄い物体把持実験における FPS は 15–20 程度での動作が可能であることを確認した. より処理速度を上げるためには, YOLOv8n に入力する画像サイズの縮小や追跡アルゴリズムの改良, また色フィルタによるマーカ検出のための詳細な実装が課題として考えられる.

### 6.1.3 w/wo-VBTS による保持力・接触面積 (NB/B-VBTS 含めて議論)・マーカ変形量比較実験

#### 6.1.3.1 保持力

ロボットハンドの 2 指先端に w-VBTS を取り付けて, 実験台に固定された試験片を把持した状態で鉛直上方向に引き上げる際の保持力を wo-VBTS を取り付けた場合とで比較した結果, 先行研究 [15] [16] と同様に爪構造を備えた w-VBTS の方が保持力が大きくなる結果となった. これは, 簡易的に外付けした爪構造であっても柔軟なスキンの過度な変形を抑制する幾何的拘束現象が得られたことから, 提案した w-VBTS において爪構造の機能性の 1 つである保持力の増加を再現できていることを示唆する.

#### 6.1.3.2 接触面積 (NB/B-VBTS 含めて議論)

w-VBTS の接触面積は, 比較対象とした wo-VBTS よりも大きな接触面積となることから, 本実験を通して爪構造の柔軟なスキン (Ecoflex 00-10) に対する幾何的拘束性が再現できていることを確認した. 具体的には, 表 4.4 に示すように, w-VBTS と wo-VBTS 間における接触面積には, 20 個の実験条件中 7 個の条件において堅牢な有意差がある示された. また, 図 4.11 に示すように, 一貫して w-VBTS の方が接触面積は大きくなる傾向にあることが示された.

同様に, NB-VBTS と B-VBTS の接触面積比較実験の場合, 柔軟なスキン材料の内 Ecoflex 00-10 では接触角度は限定的ではあるが, 5 N の接触荷重下では有意な差がすべての試行で示せた (表 5.4). しかし, NB-VBTS と B-VBTS の接触面積比較実験における他のスキン材料は, Ecoflex 00-10 に比べて硬めまたは, 柔らかすぎであるなどの材料特性が異なることから (図 5.6) 接触面積の有意差は得られなかったと考えられる.

これらのことから, VBTS において人の指の構造を模倣することで接触面積増大の機能獲得は 本センサ構造で期待できる一方, 材料選定が重要であることが示唆される結果となった. 今後, 有限要素法 (Finite Element Method : FEM) による詳細な解析を通して設計の最適化が期待される.

#### 6.1.3.3 マーカ変形量比較実験

マーカ変形量比較実験を通して w-VBTS と wo-VBTS の間には, 内部マーカの変形量に差異があることが明らかになった. これは, スキンの過度な変形を爪構造が抑制し, 荷重の伝達効率を向上させたためと考える. 実際, デジタルフォースゲージによる接触荷重の測定結果から, 目標接触荷重への到達は w-VBTS の方が速い場合が見受けられた. この接触荷重の伝達効率の差異から内部マーカの変形量に差が生じていると考えられる. このことから, 簡易的な爪構造の導入でも柔軟なスキンの幾何的拘束性による荷重の伝達効率の向上が図れることが示唆される.

今後は, マーカの変形量と接触荷重による評価だけではなく, wo-VBTS スキンにおける接触力推定が可能なデータ駆動型推定モデルを構築し, そのモデルを w-VBTS に適用することでモデルベースでの爪構造の有用性を実証することが期待される.

### 6.1.4 NB/B-VBTS による微小突起検知・薄い物体把持

#### 6.1.4.1 微小突起検知実験

本研究で提案した, 爪構造と骨構造を一体化した内部支持構造を持つ NB-VBTS の爪先部は, 微小突起の間隔 1 mm の理想周波数ピークの検知が可能であった. 一方, 従来の多くの VBTS が採用している半球と円柱構造を組み合わせた単純構造を模した比較用 B-VBTS では微小突起の間隔 1 mm の理想周波

数ピークの検知はおこなえなかった. このことから, NB-VBTS のセンサ構造は爪先部に微小突起との接触により生じる力を集約することが可能となり構造的な優位性が示された.

本研究では, ラボ内での指定された環境下での実験的測定にとどまっている. 今後は, 爪先部で得られる時系列データを基にしたテクスチャ検知モデル (LSTM など) を構築し, より汎用的な検知システムの構築および爪先部の構造見直しによる, より細かな微小突起間隔の検知可能性が期待される.

#### 6.1.4.2 薄い物体把持実験

NB-VBTS の爪先部における接触力の単回帰モデル (MLP) による推定精度は良好な結果を示した. 更に, その推定モデルを用いた薄い物体把持実験では ISO/IEC 7810 で規格されたサイズに近しい物体を操作することに成功し, 4/5 回の成功率を得ている. 物体の厚みが 1mm から 5mm の物体把持実験では 5/5 回の成功となっている. 本研究のように, 単一の VBTS およびデータ駆動型の接触力推定を用いた薄い物体把持の研究報告は, 我々の調べる限りでは他に見受けられない. このことから, 人の指の構造を模倣することで薄い物体把持をおこなえることを示せたことは有意義なものと考える.

一方課題は多く残る. 第 1 に, 把持開始位置を事前に設定しておく必要がある. この課題に関しては, 近年盛んに研究されている模倣学習によって個々の物体に合わせた制御をおこなうことが考えられる. 第 2 に, 薄い物体である試験片ごとに把持力の閾値を事前に設定している. また, これに起因して持ち上げ動作時の滑り現象に対する対策が未実装であることが課題として挙げられる. この課題については, 把持時の接触力推定値とグリッパーの開閉に, より高度な制御モデルを適用することが考えられる.

今後, これらの課題を解決することで, 爪先部の薄い物体把持の有用性は説得力を持つことができ, 人の指の構造を模倣することの真の有用性を示せると期待する.

# 第7章

# 今後の課題

今後はまず, NB-VBTS の指腹部を含めた指全体における触覚機能の実装をおこない, 薄い物体以外の様々な物体の把持に対応可能な触覚センシングを可能とさせることで, より巧緻な物体操作が可能になると考える. 触覚機能を獲得する手法としてシミュレーションベースを想定している. 具体的には, 我々の研究室で確立している Sim2Real の応用が考えられる. 具体的には, Luu ら [69] は SOFA と Gazebo を用いて, 軟体の変形・接触力・マーカ変位を含むシミュレーションデータ (仮想触覚画像+スキン変形) を大量に生成することを可能にしている. さらに, 敵対的生成ネットワーク (GAN) を用いて, シミュレーション画像を「実機に近い質感」に補正し, シミュレーションデータで学習した DNN を実機に転用している.

現在, 爪先部に対するインデンターの押し当てによる単回帰モデルの確立は多くの時間を費やしており, 実環境で指腹部を含めた指全体にインデンターを押し当てることは非常に時間を要すると考える. また, 実環境で得られた画像データは若干のマーカ作成時の誤差や, 内部照明の若干の差異が生じ, サンプル間で推定される触覚情報に誤差が含まれやすい. これに対して, 近年では敵対的生成ネットワーク (GAN) を用いて, 接触時の画像をシミュレーション環境下の画像に翻訳した後に, それを学習データとして用いることでセンサ間の誤差の影響を抑えることが可能となっている. また, シミュレーション環境下でデータ取得をおこなうことでスキン全体の変形具合をモデルのメッシュ構造から推定する機能獲得が期待できる.

加えて, 現在は単純な平行開閉 1 自由度グリッパによる物体把持にとどまっている. より巧緻な物体操作をおこなうためには, 自由度を増やしたグリッパを用いることが有用である. 本研究で提案した NB-VBTS は, 従来の VBTS よりも細かな物体操作の可能性が期待できるが, これに自由度の改善が加わることで, 更なる巧緻な物体操作が期待される.

このためにも先に挙げた指全体での触覚情報の取得機能を実装することは第一に取り組むべき課題と考える. さらに, 本研究結果の研究コミュニティにおける再現性と波及効果を高めるため, センサ構造の設計情報や制御ソフトウェア (ソースコード), 学習用データベースなどのハードウェアおよびソフトウェア資産を順次公開し (Github など), 他研究者が NB-VBTS を容易に再現/拡張できる環境を整備することも検討している.

# 謝辞

本研究に取り組むにあたり, 主指導教員の HO Anh Van 教授に深く感謝申し上げます. 会社員在職中より, 本学への進学および HO 研究室での研究希望を快く受け入れてくださり, 入学時の研究計画書に対しても, ご多忙の中, 丁寧かつ具体的な助言とご添削を賜りました. さらに, 次世代研究者挑戦的研究プログラム (SPRING) や日本学術振興会関連プログラムへの応募に際しては, 書類作成の方針から細部の文言に至るまで的確な指導を頂きました. HO 先生のご指導により応募書類の完成度を高めることができ, その結果として採択に至ったことおよび, 書類作成の経験は, 私の研究活動を大きく前進させる契機となりました. また, ゼミ等での直接的な研究指導に加え, 工学・学術にとどまらない広範な知見に基づくご示唆から, 研究の社会的意義や長期的展望を学ぶことができ, 視野を大きく広げることができました. ここに記して心より御礼申し上げます.

NGUYEN Huu Nhan 助教授におかれましては, 本研究の遂行を通じて, 英語による論文執筆や投稿プロセスに関する多大なご助言を賜りました. 特に, 研究の新規性や貢献を読み手に伝えるための構成や表現について丁寧にご指導いただいたことにより, 国際会議や学会誌・論文誌への投稿を見据えた執筆力を養うことができました. ここに心より感謝申し上げます。また, 佐藤俊樹 准教授には, 副テーマの検討から実装・評価に至るまで, 一貫したご指導と建設的なフィードバックを頂戴いたしました. そのおかげで, 看護理工学会での発表機会を得るとともに, 石川テックプランターでの受賞という成果を挙げることができました. 両先生のご支援が, 本研究全体の厚みと広がりを生み出してくださったものと深く感謝しております.

さらに, 日頃から実験の準備やデータ取得, 議論の場などで惜しみない協力をしてくださった研究室メンバーにも, この場を借りて御礼申し上げます. 日常の何気ない議論や助け合いが, 研究を継続するうえで大きな励みとなりました.

最後に, 両親および姉妹とそのご家族には, 私が一度会社を退職し, 再び学生として研究に専念するという決断を尊重し, 今日に至るまで変わらぬ支援と理解を示してくれました. 見えないところで支え続けてくれた家族の存在が, 本論文完成まで歩み続ける力となりました. この場をお借りして, 深甚なる感謝の意を表します.

# 本研究に関する業績

### 論文誌 (査読あり)

- Takeshi Tomomizu, HO Anh Van. Mechanical and Optical Evaluation of a Vision-Based Tactile Sensor Inspired by Human Fingernail and Bone Structures. Advanced Robotics, 2026.

### 国際学会 (査読あり)

- Takeshi Tomomizu, HO Anh Van, "Enhancing Vision-Based Tactile Sensing Through a Fingernail-Inspired Structure for Improved Contact and Texture Detection", Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2026), Cancun, Mexico, 2026, pp. 1–8.

### 国内学会 (査読あり)

- Takeshi Tomomizu, Nhan Huu Nguyen, HO Anh Van. Mechano Evaluation of a Vision-Based Tactile Sensor with Nail and Bone Structure. 第 30 回 ロボティクスシンポジア, 2025 年 3 月 18 日–19 日, 愛媛県松山市, pp. 1–8.
- Takeshi Tomomizu, HO Anh Van. TacBed-mini: Feasibility of Vision-Based Tactile Sensing Applied to Body-Pressure Monitoring. 第 13 回看護理工学会, 2025 年 11 月 8 日–9 日, 岐阜県草津市, p. 1.

### 国内学会 (査読なし)

- Takeshi Tomomizu, Quan Khanh LUU, Nhan Huu NGUYEN, HO Anh Van. Preliminary Design of Vision-Based Tactile Sensor with Nail and Soft Structures. ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2024, 2024 年 5 月 29 日–6 月 1 日, 栃木県宇都宮市, pp. 1-4
- 友水 豪志, HO Anh Van. Vision Based Tactile Sensor におけるつめおよび骨構造の機械的評価. ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2025, 2025 年 6 月 4 日–6 月 7 日, 山形県山形市, pp.1-4.

# 参考文献


[1] R. S. Johansson and J. R. Flanagan, "Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks," *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 10, pp. 345–359, 2009. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:17298704

[2] T. Brandt, M. Dieterich, and D. Huppert, "Human senses and sensors from aristotle to the present," *Frontiers in Neurology*, vol. Volume 15 - 2024, 2024. [Online]. Available: https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2024.1404720

[3] R. 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, no. 3, p. 550—564, 1984. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/BF00237997

[4] I. Birznieks, P. Jenmalm, A. W. Goodwin, and R. S. Johansson., "Encoding of direction of fingertip forces by human tactile afferents," *Journal of Neuroscience*, vol. 21, no. 20, pp. 8222–8237, October 2001.

[5] M. Guertler, L. Tomidei, N. Sick, M. Carmichael, G. Paul, A. Wambsganss, V. H. Moreno, and S. Hussain, "When is a robot a cobot? moving beyond manufacturing and arm-based cobot manipulators," *Proceedings of the Design Society*, vol. 3, pp. 3889–3898, 2023.

[6] J. Wirtz, P. G. Patterson, W. H. Kunz, T. Gruber, V. N. Lu, S. Paluch, and A. Martins, "Brave new world: service robots in the frontline," *Journal of Service Management*, vol. 29, no. 5, pp. 907–931, 09 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1108/JOSM-04-2018-0119

[7] R. Johansson and J. Flanagan, "Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks," *Nature reviews. Neuroscience*, vol. 10, pp. 345–59, 05 2009.

[8] E. G. Zook, "Anatomy and physiology of the perionychium," *Hand Clinics*, vol. 18, no. 4, pp. 553–559, 2002. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749071202000264

[9] R. Shirato, A. Abe, H. Tsuchiya, and M. Honda, "Effect of fingernail length on the hand dexterity," *Journal of Physical Therapy Science*, vol. 29, pp. 1914–1919, 11 2017.

[10] M. Longo, "Precise tactile localization on the human fingernail," *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 291, p. 20241200, 07 2024.

[11] I. Birznieks, V. Macefield, G. Westling, and R. Johansson, "Slowly adapting mechanoreceptors in the borders of the human fingernail encode fingertip forces," *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, vol. 29, pp. 9370–9, 08 2009.

[12] H.-Y. Han and S. Kawamura, "Analysis of stiffness of human fingertip and comparison with artificial fingers," in *IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.99CH37028)*, vol. 2, 1999, pp. 800–805 vol.2.

[13] H.-Y. Han, A. Shimada, and S. Kawamura, "Analysis of friction on human fingers and design of artificial fingers," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, 1996, pp. 3061–3066 vol.4.

[14] P. Tiezzi and G. Vassura, "Experimental analysis of soft fingertips with internal rigid core," in *ICAR '05. Proceedings., 12th International Conference on Advanced Robotics, 2005.*, 2005, pp. 109–114.

[15] A. Kumagai, Y. Obata, Y. Yabuki, Y. Jiang, H. Yokoi, and S. Togo, "Comparison of precision grasping performance between artificial fingers with and without nails," in *2022 IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)*, 2022, pp. 380–381.

[16] ——, "Improvement of precision grasping performance by interaction between soft finger pulp and hard nail," *Soft Robotics*, 2023, available from The University of Electro-Communications Institutional Repository, https://uec.repo.nii.ac.jp/records/10314.

[17] M. Controzzi, M. D'Alonzo, C. Peccia, C. Oddo, M. C. Carrozza, and C. Cipriani, "Bioinspired fingertip for anthropomorphic robotic hands," *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 11, pp. 25–38, 01 2014.

[18] K. Noda, K. Hoshino, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "A shear stress sensor for tactile sensing with the piezoresistive cantilever standing in elastic material," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 127, no. 2, pp. 295–301, 2006, mEMS 2005 Special Issue. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424705005534

[19] Z. Zhan, R. Lin, V. T. Tran, J. An, Y. Wei, H. Du, T. Tran, and W. Lu, "A paper-carbon nanotube based wearable pressure sensor for physiological signal acquisition and soft robotic skin," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 9, 10 2017.

[20] S. Teshigawara, K. Tadakuma, A. Ming, M. Ishikawa, and M. Shimojo, "Development of high-sensitivity slip sensor using special characteristics of pressure conductive rubber," in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 3289–3294.

[21] R. Dahiya, M. Valle, G. Metta, and L. Lorenzelli, "Bio-inspired tactile sensing arrays," vol. 7365, 05 2009, pp. 1–9.

[22] H.-K. Lee, S.-I. Chang, and E. Yoon, "A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 1681–1686, 2006.

[23] Z. Ji, H. Zhu, H. Liu, N. Liu, Z. Yang, and L. Sun, "The design and characterization of a flexible tactile sensing array for robot skin," *Sensors*, vol. 16, p. 2001, 11 2016.

[24] C. Wang, L. Dong, D. Peng, and C. Pan, "Tactile sensors for advanced intelligent systems," *Advanced Intelligent Systems*, vol. 1, no. 8, p. 1900090, 2019. [Online]. Available: https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aisy.201900090

[25] K. Murakami and T. Hasegawa, "Novel fingertip equipped with soft skin and hard nail for dexterous multi-fingered robotic manipulation," in *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, vol. 1, 2003, pp. 708–713 vol.1.

[26] J. A. Fishel and G. E. Loeb, "Sensing tactile microvibrations with the biotac — comparison with human sensitivity," in *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 2012, pp. 1122–1127.

[27] T. Matsuno, K. Kanada, F. Arai, H. Matsuura, and T. Fukuda, "Strategy of picking up thin plate by robot hand using deformation of soft fingertip," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 2326–2331.

[28] K. Or, A. Schmitz, S. Funabashi, M. Tomura, and S. Sugano, "Development of robotic fingertip morphology for enhanced manipulation stability," in *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2016, pp. 25–30.

[29] D.-K. Kim, J.-H. Kim, Y.-T. Kim, M.-S. Kim, Y.-K. Park, and Y.-H. Kwon, "Robot fingertip tactile sensing module with a 3d-curved shape using molding technique," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 203, pp. 421–429, 2013. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424713004573

[30] Y. Xu, S. Zhang, S. Li, Z. Wu, Y. Li, Z. Li, X. Chen, C. Shi, P. Chen, P. Zhang, M. D. Dickey, and B. Su, "A soft magnetoelectric finger for robots ' multidirectional tactile perception in non-visual recognition environments," *npj Flexible Electronics*, vol. 8, pp. 1–11, 2024. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:266767318

[31] Z. Xu, Z. Si, K. Zhang, O. Kroemer, and Z. Temel, "A multi-modal tactile fingertip design for robotic hands to enhance dexterous manipulation," 2025. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2510.05382

[32] E. Roscow, C. Kent, U. Leonards, and N. Lepora, "Discrimination-based perception for robot touch," vol. 9793, 07 2016, pp. 498–502.

[33] W. Yuan, S. Dong, and E. H. Adelson, "Gelsight: High-resolution robot tactile sensors for estimating geometry and force," *Sensors*, vol. 17, no. 12, 2017. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2762

[34] B. Ward-Cherrier, N. Rojas, and N. F. Lepora, "Model-free precise in-hand manipulation with a 3d-printed tactile gripper," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 4, pp. 2056–2063, 2017.

[35] N. Pestell, L. Cramphorn, F. Papadopoulos, and N. F. Lepora, "A sense of touch for the shadow modular grasper," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 2220–2226, 2019.

[36] A. Church, J. James, L. Cramphorn, and N. Lepora, "Tactile model o: Fabrication and testing of a 3d-printed, three-fingered tactile robot hand," 07 2019.

[37] N. Lepora, Y. Lin, B. Money-Coomes, and J. Lloyd, "Digitac: A digit-tactip hybrid tactile sensor for comparing low-cost high-resolution robot touch," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, pp. 1–7, 10 2022.

[38] M. Lambeta, P. wei Chou, S. Tian, B. Yang, B. Maloon, V. R. Most, D. Stroud, R. Santos, A. Byagowi, G. Kammerer, D. Jayaraman, and R. Calandra, "Digit: A novel design for a low-cost compact high-resolution tactile sensor with application to in-hand manipulation," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, pp. 3838–3845, 2020. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:212684133

[39] J. Lee, S. Lee, and M. Kim, "Vision-based tactile sensor using random pattern," in *2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2022, pp. 1453–1456.

[40] W. Fan, H. Li, W. Si, S. Luo, N. Lepora, and D. Zhang, "Vitactip: Design and verification of a novel biomimetic physical vision-tactile fusion sensor," 2024. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2402.00199

[41] N. F. Lepora, C. Ford, A. Stinchcombe, A. Brown, J. Lloyd, M. G. Catalano, M. Bianchi, and B. Ward-Cherrier, "Towards integrated tactile sensorimotor control in anthropomorphic soft robotic hands," in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2021, pp. 1622–1628.

[42] C. J. Ford, H. Li, M. G. Catalano, M. Bianchi, E. Psomopoulou, and N. F. Lepora, "Shear-based grasp control for multifingered underactuated tactile robotic hands," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 41, pp. 3113–3128, 2025.

[43] X. Lin and M. Wiertlewski, "Sensing the frictional state of a robotic skin via subtractive color mixing," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 2386–2392, 2019.

[44] S. Wang, Y. She, B. Romero, and E. Adelson, "Gelsight wedge: Measuring high-resolution 3d contact geometry with a compact robot finger," 2021. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2106.08851

[45] B. Romero, F. Veiga, and E. Adelson, "Soft, round, high resolution tactile fingertip sensors for dexterous robotic manipulation," 05 2020.

[46] Z. Lin, J. Zhuang, Y. Li, X. Wu, S. Luo, D. Gomes, F. Huang, and Z. Yang, "Gelfinger: A novel visual-tactile sensor with multi-angle tactile image stitching," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 8, pp. 5982–5989, 09 2023.

[47] H. Sun, K. Kuchenbecker, and G. Martius, "A soft thumb-sized vision-based sensor with accurate all-round force perception," *Nature Machine Intelligence*, vol. 4, pp. 135–145, 02 2022.

[48] O. Azulay, N. Curtis, R. Sokolovsky, G. Levitski, D. Slomovik, G. Lilling, and A. Sintov, "Allsight: A low-cost and high-resolution round tactile sensor with zero-shot learning capability," 07 2023.

[49] I. Andrussow, H. Sun, K. J. Kuchenbecker, and G. Martius, "Minsight: A fingertip-sized vision-based tactile sensor for robotic manipulation," *Advanced Intelligent Systems*, vol. 5, no. 8, p. 2300042, 2023. [Online]. Available: https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aisy.202300042

[50] D. F. Gomes, Z. Lin, and S. Luo, "Blocks world of touch: Exploiting the advantages of all-around finger sensing in robot grasping," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. Volume 7 - 2020, 2020. [Online]. Available: https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2020.541661

[51] W. K. Do, A. Dhawan, M. Kitzmann, and M. Kennedy, "Densetact-mini: An optical tactile sensor for grasping multi-scale objects from flat surfaces," 05 2024, pp. 6928–6934.

[52] Y. Zhou, P. Zhou, S. Wang, and Y. She, "In - hand singulation, scooping, and cable untangling with a 5 - dof tactile - reactive gripper," *Advanced Robotics Research*, vol. 1, 08 2025.

[53] A. Yamaguchi and C. G. Atkeson, "Combining finger vision and optical tactile sensing: Reducing and handling errors while cutting vegetables," in *2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2016, pp. 1045–1051.

[54] Y. Yang, X. Wang, Z. Zhou, J. Zeng, and H. Liu, "An enhanced fingervision for contact spatial surface sensing," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 15, pp. 16 492–16 502, 2021.

[55] B. Belousov, A. Sadybakasov, B. Wibranek, F. Veiga, O. Tessmann, and J. Peters, "Building a library of tactile skills based on fingervision," *CoRR*, vol. abs/1909.09669, 2019. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1909.09669

[56] B. Ward-Cherrier, L. Cramphorn, and N. F. Lepora, "Tactile manipulation with a tacthumb integrated on the open-hand m2 gripper," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 1, pp. 169–175, 2016.

[57] N. F. Lepora, K. Aquilina, and L. Cramphorn, "Exploratory tactile servoing with active touch," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 1156–1163, 2017.

[58] N. F. Lepora and B. Ward-Cherrier, "Superresolution with an optical tactile sensor," in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, pp. 2686–2691.

[59] I. H. Taylor, S. Dong, and A. Rodriguez, "Gelslim 3.0: High-resolution measurement of shape, force and slip in a compact tactile-sensing finger," in *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2022, pp. 10 781–10 787.

[60] A. Wilson, S. Wang, B. Romero, and E. H. Adelson, "Design of a fully actuated robotic hand with multiple gelsight tactile sensors," *ArXiv*, vol. abs/2002.02474, 2020. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:211066374

[61] S. Liu, S. Cui, C. Zhang, Y. Cai, and S. Wang, "Real-time marker localization learning for gelstereo tactile sensing," in *2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2022, pp. 162–166.

[62] G. Jocher, A. Chaurasia, and J. Qiu, "Yolo by ultralytics," 2023, available from: https://github.com/ultralytics/ultralytics.

[63] M. Hussain, "Yolov5, yolov8 and yolov10: The go-to detectors for real-time vision," *ArXiv*, vol. abs/2407.02988, 2024. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:270924280

[64] D. Tzutalin, "Labelimg," 2015, available from: https://github.com/tzutalin/labelImg.

[65] B. Dwyer, J. Nelson, T. Hansen *et al.*, "Roboflow (version 1.0) [software]," https://roboflow.com, computer vision platform. Accessed: 2025-10-28.

[66] H. W. Kuhn, "The hungarian method for the assignment problem," *Naval Research Logistics (NRL)*, vol. 52, 1955. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:9426884

[67] S. Dong, D. Ma, E. Donlon, and A. Rodriguez, "Maintaining grasps within slipping bounds by monitoring incipient slip," *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3818–3824, 2018. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53110413

[68] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, 1979.

[69] Q. K. Luu, N. H. Nguyen, and V. A. Ho, "Simulation, learning, and application of vision-based tactile sensing at large scale," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 39, no. 3, pp. 2003–2019, 2023.