

# 軟組織のトライボロジー

研究課題番号 2324604

平成23年度～平成25年度 科学研究費補助金  
(基盤研究(A)(2)) 研究成果報告書

平成26年3月

研究代表者 平井 慎一  
(立命館大学 理工学部 教授)

# まえがき

本研究の目的は、軟組織が他物体と接触ながら相対的に運動するときに接触界面に生じる現象を解明し、軟組織のトライボロジーを確立することである。軟組織の変形をモデリングするためには、軟組織と他物体との接触界面における物理現象をモデリングし、それを軟組織の変形モデリングに反映させる必要がある。まず、接触界面における軟組織の変形と軟組織に作用する分布力を計測し、軟組織のトライボロジーをマクロ的に定式化する。次に、マイクロテクスチャー上での軟組織の挙動を調べることにより、軟組織のマイクロトライボロジーを定式化する。マクロとマイクロの双方の視点から軟組織のトライボロジーを確立する。

第1章では、指の滑り運動を定式化するためにビーム束モデルを提案する(成果著書 [1], 国際会議 [2], 国際会議 [17], 国際会議 [18], 口頭発表 [4])。ビーム束モデルでは、柔軟な指先を有限個のビームの集合として表し、指先の滑り運動を定式化する。柔らかい指先が平面の上を滑るとき、指先の一部が局所的に滑り、それが接触面全体に伝播して完全な滑り状態に達する。このような局所的な滑りは、物体の操作や触覚のセンシングに重要な役割を果たす。ビーム束モデルを用いることにより、このような局所滑りをモデリングすることができる。

第2章では、滑り覚をセンシングする手法について述べる。第2.1節では、布地センサを用いた滑り覚のセンシングについて述べる(成果論文 [1], 国際会議 [14], 国際会議 [19])。布地センサは、感圧導電糸をパイル状に織ることにより製作される。指先で布地センサを押したり、指先を布地センサ上で滑らせると、パイルが変形する。その変形を抵抗の変化として検出する。押し動作における抵抗値変化の周波数特性と滑り動作における抵抗値変化の周波数特性が異なることに着目し、ウェーブレット解析を用いることにより押し動作と滑り動作を識別する。第2.2節では、分布圧センサによる圧力分布の計測結果に画像処理を用いることにより、滑りを検出する手法を述べる(成果 国際会議 [12], 口頭発表 [7], 口頭発表 [10])。分布圧センサの計測結果を一連の画像とみなし、その画像にSIFT等の特徴点追跡アルゴリズムを用いることにより、特徴的な局所圧力分布を追跡する。

第3章では、有限要素法による非一様組織のモデリングについて述べる。第3.1節では、非一様組織のモデリング手法と変形特性の同定法を述べる(成果論文 [3], 国

際会議 [9], 国際会議 [16], 口頭発表 [8]). 提案する手法を, 柔軟指先のモデリング (成果 論文 [5], 国際会議 [20]), 硝子体のモデリング (成果 国際会議 [3], 国際会議 [7]), 穿刺過程のモデリング (成果 論文 [2], 国際会議 [13], 国際会議 [21], 口頭発表 [11]) に適用した. 柔軟指先のモデリングでは, MR 装置で撮像した指先の MR 画像から指先の三次元モデルを構築する. そのモデルを用いて, 平面上を滑る柔軟指先の動的変形をシミュレーションする. 硝子体のモデリングでは, 硝子体内を運動するマイクロロボットに作用する力と CT で計測するマイクロロボットの運動から, 硝子体の力学モデルを構築する.

第 4 章では, 人指の内部構造を模したロボット指による触覚センシングについて述べる (成果 国際会議 [6], 国際会議 [15], 口頭発表 [1]). カセンサと加速度センサを柔軟素材で構成されたロボット指の内部に埋め込み, テクスチャーを識別する.

第 3 章では, マイクロテクスチャー上の物体の運動を計測し, 滑り運動を定式化する. 第 5.1 節では, 異方性エッチングを用いてマイクロテクスチャーを製作する手法を述べる (成果 国際会議 [5], 国際会議 [8], 国際会議 [24], 口頭発表 [5]). 第 5.2 節では, 非対称な摩擦を定式化する手法を述べる. 非対称的な摩擦分布を導入し非対称な摩擦をマクロに表現する手法 (成果 国際会議 [10]), 表面形状にランダムな特性を導入し非対称な摩擦をミクロに表現する手法 (成果 論文 [6], 国際会議 [1]), 国際会議 [11], 国際会議 [4]) について述べる.

本研究で提案したビーム束モデルは, 書籍 [1] にまとめられている. 軟組織のトライボロジーに着目した本研究を通して, 人の触覚を力学的に解明できるのではないかという着想を得た. このような触覚の力学的解明に関しては, 今後の課題としたい.

## 著書

- [1] Van Ho and Shinichi Hirai, *Mechanics of Localized Slippage in Tactile Sensing*, ISBN 978-3-319-04122-3, Springer, Springer Tracts in Advanced Robotics 99, 10.1007/978-3-319-04123-0, 2014

# 論文

- [1] Van Anh Ho, Masaaki Makikawa, and Shinichi Hirai, *Flexible Fabric Sensor toward a Humanoid Robotic Skin: Fabrication, Characterization, and Perceptions*, IEEE Sensors Journal, Vol.13, No.10, Special Issue on Flexible Sensors and Sensing Systems, pp.4065-4080, 10.1109/JSEN.2013.2272336, Oct., 2013
- [2] Kazuyoshi Tagawa, Hiromi T. Tanaka, Yoshimasa Kurumi, Masaru Komori, Shigehiro Morikawa, *Laparoscopic Surgery Simulator Using First Person View and Guidance Force*, Studies in Health Technology and Informatics, Vol.184, Medicine Meets Virtual Reality 20, pp.431-435, 10.3233/978-1-61499-209-7-431, 2013
- [3] Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, *Finite Element Modeling and Physical Property Estimation of Rheological Food Objects*, Journal of Food Research, Vol.1, No.1, pp.48-67, 2012
- [4] Phuong Hoai Le, Thien Xuan Dinh, Atsushi Mitani, and Shinichi Hirai, *A Study on the Motion of Micro-Parts on a Saw-Tooth Surface by the PTV Method*, Journal of System Design and Dynamics, Vol.6, No.1, pp.73-80, 10.1299/jsdd.6.73, Feb., 2012
- [5] Zhongkui Wang, Lijuan Wang, Van Anh Ho, Shigehiro Morikawa, and Shinichi Hirai, *A 3-D Nonhomogeneous FE Model of Human Fingertip Based on MRI Measurements*, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol.61, No.12, pp.3147-3157, 10.1109/TIM.2012.2205102, Dec., 2012
- [6] Phuong Hoai Le, Thien Xuan Dinh, Atsushi Mitani, and Shinichi Hirai, *Experiment and Simulation of Micro-part Dynamics with Roughness Effect*, IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, Vol.7, Issue S1, pp.S173-S178, 10.1002/tee.21820, Dec., 2012

## 国際会議

- [1] Phuong Hoai Le, Thien Xuan Dinh, Atsushi Mitani, and Shinichi Hirai, *Experiment of Micro-parts Feeding on Saw-tooth with the Effect of the Surface Geometry Parameters*, Int. Conf. on Material, Mechatronics and Automation (ICMMA2013), pp.99-104, Singapore, Apr. 21-22, 2013
- [2] Van Anh Ho and Shinichi Hirai, *Toward a Platform of Human-Like Fingertip Model in Hapti Environment for Studying Sliding Tactile Mechanism*, Robotics: Science and Systems 2013, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, June 24-28, 2013
- [3] Zhongkui Wang, Juho Pokki, Olgaç Ergeneman, Bradley J. Nelson, and Shinichi Hirai, *Viscoelastic Interaction between Intraocular Microrobots and Vitreous Humor: A Finite Element Approach*, 35th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2013), 10.1109/EMBC.2013.6610655, Osaka International Convention Center, Osaka, Japan, July 3-7, 2013
- [4] Phuong Le, Thien Dinh, Atsushi Mitani, and Shinichi Hirai, *Simulation Model for Sub-Millimeter Part Feeding on the Asymmetrical Saw-Tooth Surface with Air Drag*, 2013 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2013), 10.1109/AIM.2013.6584159, Wollongong, Australia, July 9-12, 2013
- [5] Atsushi Mitani, Phuong Le, Yasutaka Matsuo, and Shinichi Hirai, *Improvement of Sawtooth Shape Generated By Anisotropic Etching Process of Single-Crystal Silicon For Microparts Feeding Using Horizontal and Symmetric Vibrations*, 2013 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2013), 10.1109/AIM.2013.6584219, Wollongong, Australia, July 9-12, 2013
- [6] Damith Suresh Chathuranga Katudampe Vithanage, Van Ho, and Shinichi Hirai, *Investigation of the Bio-mimetic Fingertip's Ability to Discriminate Fabrics*

*Based on Surface Textures*, 2013 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2013), 10.1109/AIM.2013.6584336, Wollongong, Australia, July 9-12, 2013

- [7] Zhongkui Wang, Juho Pokki, Olgaç Ergeneman, Bradley J. Nelson, and Shinichi Hirai, *Study of biomechanical properties of vitreous humor by a finite element model*, EUROMECH Colloquium 533 Biomechanics of the Eye, Genoa, Italy, July 22-24, 2013
- [8] Atsushi Mitani and Yasutaka Matsuo, *Submillimeter Microparts Feeding Along With Asymmetric Surfaces Fabricated By Anisotropic Etching Process of Single-Crystal Silicon*, World Tribology Congress 2013, Torino, Italy, Sept. 8-13, 2013
- [9] K. Tagawa, T. Oishi, H. T. Tanaka, *Adaptive and Embedded Deformation Model: An Approach to Haptic Interaction with Complex Inhomogeneous Elastic Objects*, IEEE Int. Conf. on Haptics (IEEE Haptics 2013), pp.169-174, 10.1109/WHC.2013.6548403, Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea, 2013
- [10] Paul Umbanhowar, Thomas H. Vose, Atsushi Mitani, Shinichi Hirai, and Kevin M. Lynch, *The Effect of Anisotropic Friction on Vibratory Velocity Fields*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2584-2591, 10.1109/ICRA.2012.6225273, St. Paul, U.S.A., May 14-18, 2012
- [11] Phuong Le, Xuan Thien Dinh, Atsushi Mitani, and Shinichi Hirai, *Experiment and Simulation of Micro-parts Dynamics with Roughness Effect*, 2012 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2012), pp.586-591, 10.1109/AIM.2012.6265939, Kaohsiung, Taiwan, July 11-14, 2012
- [12] Van Anh Ho, Tatsuya Nagatani, Akio Noda, and Shinichi Hirai, *What Can Be Inferred From a Tactile Arrayed Sensor in Autonomous In-Hand Manipulation?*, Proc. 2012 IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering (CASE), pp.457-464, 10.1109/CoASE.2012.6386384, Seoul, Korea, Aug. 20-24, 2012
- [13] Lijuan Wang, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, *Modeling and Simulation of Friction Forces during Needle Insertion Using Local Constraint Method*, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4926-4932, 10.1109/IROS.2012.6385756, Vilamoura, Algarve, Portugal, Oct. 7-12, 2012

- [14] Van Anh Ho, Takahiro Araki, Masaaki Makikawa, and Shinichi Hirai, *Experimental Investigation of Surface Identification Ability of a Low-Profile Fabric Tactile Sensor*, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4497-4504, 10.1109/IROS.2012.6385538, Vilamoura, Algarve, Portugal, Oct. 7-12, 2012
- [15] Katudampe Vithanage Damith Suresh Chathuranga, Van Anh Ho and Shinichi Hirai, *A Bio-mimetic Fingertip That Detects Force and Vibration Modalities and its Application to Surface Identification*, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2012), pp.575-581, 10.1109/ROBIO.2012.6491028, Guangzhou, China, Dec. 11-14, 2012
- [16] Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, *Green Strain Based FE Modeling of Rheological Objects for Handling Large Deformation and Rotation*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4762-4767, 10.1109/ICRA.2011.5979732, Shanghai, China, May 9-13, 2011
- [17] Van Ho and Shinichi Hirai, *Three-Dimensional Modeling and Simulation of the Sliding Motion of a Soft Fingertip with Friction, Focusing on Stick-Slip Transition*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.5233-5239, 10.1109/ICRA.2011.5979901, Shanghai, China, May 9-13, 2011
- [18] Van Ho and Shinichi Hirai, *Understanding Slip Perception of Soft Fingertips by Modeling and Simulating Stick-Slip Phenomenon*, Robotics: Science and Systems VII, pp.129-136, Los Angeles, CA, U.S.A., June 27 - July 1, 2011
- [19] Van Ho, Daisuke Kondo, Shima Okada, Takahiro Araki, Emi Fujita, Masaaki Makikawa, and Shinichi Hirai, *Development of a Low-Profile Sensor Using Electro-conductive Yarns in Recognition of Slippage*, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2011), pp.1946-1953, 10.1109/IROS.2011.6094497, San Francisco, California, U.S.A., Sept. 25-30, 2011
- [20] Zhongkui Wang, Yoshiyuki Abe, Shinichi Hirai, and Shigehiro Morikawa, *A 3D FE Dynamic Model of Human Fingertip Based on MRI Data*, 2011 IEEE Int. Symp. on Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE 2011), pp.8-12, 10.1109/HAVE.2011.6088383, Yanshan Univ., Qinhuangdao, Hebei, China, Oct. 15-16, 2011



- [21] Lijuan Wang and Shinichi Hirai, *A Local Constraint Method for Needle Insertion Modeling and Simulation*, 2011 IEEE Int. Symp. on Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE 2011), pp.39-44, 10.1109/HAVE.2011.6088389, Yanshan Univ., Qinhuangdao, Hebei, China, Oct. 15-16, 2011
- [22] Phuong Hoai Le, Thien Xuan Dinh, Atsushi Mitani, and Shinichi Hirai, *Measurement of the Motion of Micro-Parts on a Vibratory Surface*, International Tribology Conference, Hiroshima, Japan, Oct. 30 - Nov. 3, 2011
- [23] Phuong Hoai Le, Thien Xuan Dinh, Atsushi Mitani, and Shinichi Hirai, *A Study on the Motion of Micro-parts on a Saw-tooth Surface by the PTV Method*, Proc. ASME 2011 Int. Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2011), Vol.7, pp.985-990, 10.1115/IMECE2011-64689, Denver, Colorado, U.S.A., Nov. 11-17, 2011
- [24] Atsushi Mitani and Yasutaka Matsuo, *Feeding of Microparts Along an Asymmetric Surface Using Horizontal and Symmetric Vibrations - Development of Asymmetric Surfaces using Anisotropic Etching Process of Single-Crystal Silicon -*, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2011), CD-ROM, TP-P291, Phuket Island, Thailand, Dec. 7-11, 2011
- [25] Xubing Zhang and Shinichi Hirai, *TPS-SURF-SAC Matching Approach of Feature Point Applied to Deformation Measurement of Nonrigid Tissues from MR Images*, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2011), pp.551-556, 10.1109/ROBIO.2011.6181344, Phuket Island, Thailand, Dec. 7-11, 2011

## 口頭発表

- [1] Damith Suresh Chathuranga Katudampe Vithanage and Shinichi Hirai, *A Bio-Mimetic Fingertip that can Detect Force and Vibration Modalities - Investigation of Bio-mimetic Fingertip's Ability to Discriminate Textures*, Robotics and Mechatronics Conference 2013, Tsukuba International Congress Center, May 22-25, 2013
- [2] Phuong Hoai Le, Thien Xuan Dinh, Atsushi Mitani, and Shinichi Hirai, 非対称表面を用いたマイクロパーツの対称振動輸送 - 振動振幅および表面形状が輸送速度に及ぼす影響の解析, ロボティクス・メカトロニクス'13 講演会予稿集 CD-ROM, つくば国際会議場, May 22-25, 2013
- [3] 井上 貴浩, 加藤 亮祐, 平井 慎一, 拮抗型ばね駆動モデルによる不良設定問題の解消, ロボティクス・メカトロニクス'12 講演会予稿集 CD-ROM, 浜松, May 28-29, 2012
- [4] Van Anh Ho, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, *Beam Bundle Model of Human Fingertip during Pre-Slide Phase*, 30th Annual Conference of Robotics Society of Japan, Sapporo, Japan, Sept. 17-20, 2012
- [5] 三谷 篤史, Le Hoai Phuong, 松尾 保孝, 平井 慎一, 非対称形状表面によるマイクロパーツの対称振動輸送 (第9報-異方性エッチングを用いた非対称表面の開発-), 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2012), 1A4-1, 福岡国際会議場, 福岡 Dec. 18-20, 2012
- [6] 小野田 裕亮, Ho Anh Van, 平井 慎一, 柔軟指の初期滑りの計測, 第29回日本ロボット学会学術講演会, 豊洲, Sept. 7-9, 2011
- [7] Van Anh Ho, Tatsuya Nagatan, Akio Noda, and Shinichi Hirai, *From Tactile Data to Image Processing, and Application in Robotic In-Hand Manipulation*, 29th Annual Conference of Robotics Society of Japan, Toyosu, Japan, Sept. 7-9, 2011

- [8] Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, *Modeling of Rheological Object with Square or Cubic Finite Element*, 7th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2011), Beijing, China, Oct. 13-14, 2011
- [9] Xubing Zhang and Shinichi Hirai, *TPS-SURF-SAC Based Matching of Feature Points in Nonrigid Deformed Tissues: Applied to Abdomen MR Images*, 7th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2011), Beijing, China, Oct. 13-14, 2011
- [10] Van Anh Ho, Tatsuya Nagatani, Akio Noda, and Shinichi Hirai, *Enhancement of Tactile Sensor's Ability in In-Hand Manipulation Utilizing Image Processing Tool*, 12th SICE System Integration Division Annual Conference, pp.354-357, Kyoto, Japan, Dec. 23-25, 2011
- [11] 森 厚郎, 平井 慎一, 森川 茂廣, MRI ガイド手術のための穿刺軌道の計測, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, pp.1508-1509, 京都, Dec. 23-25, 2011
- [12] 井上 貴浩, 加藤 亮祐, 平井 慎一, 非線形ばね要素を含んだ拮抗筋駆動指のモデリング, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, pp.2393-2396, 京都, Dec. 23-25, 2011

# 目次

第1章	ビーム束モデルを用いた滑り運動のモデリング	1
第2章	滑り覚センシング	29
2.1	布地センサによる滑り覚センシング	29
2.2	分布圧センサによる滑りの検出	62
第3章	有限要素法に基づく非一様組織のモデリング	71
3.1	動的有限要素モデリングと変形特性の同定	71
3.2	柔軟指先のモデリングと動的シミュレーション	92
3.3	硝子体のモデリングと変形パラメータの同定	104
3.4	局所制約を用いた穿刺過程のモデリング	109
第4章	人指を模したロボット指による触覚センシング	125
第5章	マイクロテクスチャー上の滑り運動のモデリング	134
5.1	異方性エッチングを用いたマイクロテクスチャーの製作	134
5.2	非対称摩擦のモデリング	141

# 第1章 ビーム束モデルを用いた滑り運動のモデリング

本章では、ビーム束モデルを提案し、そのモデルを用いて指の滑り運動を定式化する。柔らかい指先が平面の上を滑るとき、指先の一部が局所的に滑り、それが接触面全体に伝播して完全な滑り状態に達する。このような局所的な滑りは、物体の操作や触覚のセンシングに重要な役割を果たす。しかしながら、このような局所滑りを表現すること困難であるため、物体の操作や触覚センシングにおいて滑りがどのような役割を演じるか不明の点が多い。そこで、局所滑りを表現することを目的として、ビーム束モデルを提案した。

ビーム束モデルでは、柔軟な指先を有限個のビームの集合として表す。個々のビームは伸縮変形と曲げ変形を生じる。指先と平面との接触面を二次元弾性体とみなし、ビームどうしの相互作用を表現する。すなわち、個々のビームと平面との接触点を接触面における節点とし、接触面を有限要素分割する。接触面の二次元弾性変形により節点に生じる力を、指先の弾性変形によりビームに作用する接線方向の力とみなす。また、ビームの伸縮変形により、ビームに法線方向の力が生じる。結果として、面上を滑る柔らかい指先の挙動は、ビーム束の運動方程式により表される。シミュレーション結果と実験結果を比較し、二つの結果が一致することを確認した。

## 第2章 滑り覚センシング

本章では，滑り覚をセンシングする手法について述べる．

第2.1節では，布地センサを用いた滑り覚のセンシングについて述べる．布地センサは，感圧導電糸をパイル状に織ることにより製作される．指先で布地センサを押すとパイルが変形し，結果として感圧導電糸の抵抗が変化する．この抵抗変化を計測することにより，押し動作を検出できる．また，指先が布地センサ上を滑ると，指先と個々のパイルの接触が生じたり失われたりする．このとき，感圧導電糸の抵抗が変化するので，滑り動作を検出できる．押し動作における抵抗値変化の周波数特性と滑り動作における抵抗値変化の周波数特性が異なることに着目し，ウェーブレット解析を用いることにより押し動作と滑り動作を識別できることがわかった．また，統計的学習理論を用いることにより，複数のテクスチャーを識別することができた．さらに，指先をビーム束モデルで表し，そのビーム束モデルと繊維のパイルとの接触を定式化し，導電性繊維センサの出力をシミュレーションした結果を述べる．

第2.2節では，分布圧センサによる圧力分布の計測結果に画像処理を用いることにより，滑りを検出する手法を述べる．分布圧センサの各要素における計測値を画像のピクセル値とみなすことにより，分布圧センサの計測結果は時系列的に変化するグレースケール画像とみなすことができる．したがって，分布圧センサの計測結果に画像処理におけるSIFT等の特徴点追跡アルゴリズムを用いることにより，特徴的な局所圧力分布を追跡することができる．結果として，分布圧センサ上の物体の滑りを検出することが可能となる．滑り率を導入することにより，局所滑りを安定的に検出することに成功した．

### 2.1 布地センサによる滑り覚センシング

本節では，布地センサを用いた滑り覚のセンシングについて述べる．ウェーブレット変換を用いることで，押し動作と滑り動作を識別できること，統計的学習理論を用いることにより，複数のテクスチャーを識別できることを示す．さらに，第1章で導入したビーム束モデルに基づき，布地センサの動作をシミュレーションした結果を示す．

## 2.2 分布圧センサによる滑りの検出

本節では，分布圧センサによる圧力分布の計測結果に画像処理を用いて，滑りを検出する手法を述べる．特に，SIFT等の特徴点追跡アルゴリズムを用いて，滑りを検出することを試みた．特徴点追跡アルゴリズムにより，滑りを検出する能力が異なること，物体の並進運動と回転運動をともに検出できること，滑り率を導入することにより局所滑りを検出できることを示す．

## 第3章 有限要素法に基づく非一様組織のモデリング

本章では、有限要素法による非一様組織のモデリングについて述べる。有限要素モデリングは、生体組織の変形特性を定式化する手法であり、これまでに多くの研究が成されている。本章では、非一様な生体組織をモデリングする手法を確立するとともに、その手法を柔軟指先、眼の硝子体、針の生体組織への穿刺過程をモデリングする。

第3.1節では、動的有限要素モデリングと変形特性の同定について述べる。個々の組織を動的有限要素モデルを用いてモデリングするとともに、制約安定化法を用いて変形特性が異なる複数の組織を結合する。シミュレーション結果と実験結果を比較し、その差が小さくなるような変形パラメータの値を計算する。

第3.2節では、柔軟指先のモデリングについて述べる。MR装置を用いて、指先の皮膚、内部組織、骨の形状を計測し、計測結果を基に柔軟指先の三次元モデルを構築する。第3.1節の手法を用いて複数の組織を結合し、指先が表面上を滑る運動の動的なシミュレーションを実現する。

第3.3節では、硝子体のモデリングについて述べる。硝子体とは、眼球の中央部を占める組織であり、弾性特性と塑性特性を示す。すなわち、硝子体はレオロジー特性を示す生体組織である。第3.3節では、磁場駆動を用いた力と運動の計測結果を基に、硝子体の変形特性を同定し、硝子体の変形シミュレーションを実行した結果を述べる。

第3.4節では、穿刺過程のモデリングについて述べる。メッシュを適応的に分割するアダプティブメッシュ法と局所制約を用いてメッシュを分割することなく穿刺シミュレーションを実行する手法を述べる。

### 3.1 動的有限要素モデリングと変形特性の同定



## 3.2 柔軟指先のモデリングと動的シミュレーション

本節では，柔軟指先のモデリングについて述べる．指先を MR 装置で撮像し，個々の MR 画像に輪郭検出アルゴリズムを適用することにより，外部境界線，皮膚と内部組織の境界線，内部組織と骨の境界線を検出する．これらの境界線を幾何学的に接続することにより，皮膚，内部組織，骨の三次元構造を求めることができる．個々の三次元構造を結合し，メッシュ分割を適用することで，指先の三次元モデルを構築することができる．さらに，第 3.1 節で述べたように，制約安定化法を用いて個々の三次元構造を力学的に接続する．以上の過程により指先のモデルを構築し，平面上を滑る柔軟指先の動的変形をシミュレーションした結果を示す．

### 3.3 硝子体のモデリングと変形パラメータの同定

本節では，眼の硝子体のモデリングについて述べる．硝子体内にマイクロロボットを挿入し，マイクロロボットの運動を外部磁場で制御する研究が進められている．マイクロロボットに作用する力は，外部磁場から計算することができる．また，マイクロロボットの運動は，CTで計測することができる．このような力と運動の計測結果から，硝子体の変形特性を第3.1節で述べた手法で推定する．結果として，三要素モデルで硝子体の変形特性を表現できることがわかった．

### 3.4 局所制約を用いた穿刺過程のモデリング

本節では，穿刺過程のモデリングについて述べる．穿刺は，低侵襲医療に不可欠な操作である．穿刺に用いる針は，先端が片刃になっており，針の挿入に応じて針に曲げ変形が生じる．針の先端を指定した場所に案内するためには，この曲げ変形を考慮して針の根本を操作する必要がある．針の挿入のガイドや穿刺の練習のために，穿刺のシミュレーションが試みられている．本節では，メッシュを適応的に分割するアダプティブメッシュ法と，局所制約という概念を導入しメッシュを分割することなく穿刺のシミュレーションを実行する手法を述べる．

## 第4章 人指を模したロボット指による触覚センシング

本章では，人指の内部構造を模したロボット指を用いて，触覚センシングを試みた結果を示す．人の触覚受容器は，低周波の刺激に反応する SA と高周波の刺激に反応する FA に大別される．前者は主に力に，後者は振動に反応すると考えられる．そこで，力センサと加速度センサを柔軟素材で構成されたロボット指の内部に埋め込み，触覚センシングを試みた．

## 第5章 マイクロテクスチャー上の滑り運動のモデリング

本章では，マイクロテクスチャー上の物体の運動に着目し，滑り運動を定式化する．第5.1節では，異方性エッチングを用いてマイクロテクスチャーを製作する手法を述べる．製作したマイクロテクスチャーの表面形状を計測するとともに，マイクロパーツの運動を評価し，運動の非対称性を確認した．第5.2節では，非対称な摩擦を定式化する手法を述べる．摩擦分布に非対称性を導入する手法，表面形状にランダムな特性を導入する手法に加えて，空気抵抗をモデリングする手法を述べる．

### 5.1 異方性エッチングを用いたマイクロテクスチャーの製作

本節では，異方性エッチングを用いてマイクロテクスチャーを製作する手法を述べる．マイクロテクスチャーを製作する手法には，研削，エッチング，フェムト秒レーザ加工等がある．本節では，一様なテクスチャーを製作するために，異方性エッチングを用いた結果を述べる．

## 5.2 非対称摩擦のモデリング

本節では，非対称な摩擦を定式化する手法を述べる．まず，非対称な摩擦をマクロに表現する手法として，非対称的な摩擦分布を導入する手法を述べる．等方的な摩擦特性は，摩擦円で表される．一方，異方的な摩擦特性は，中心がずれた楕円で表すことができる．このような摩擦特性を導入し，パーツの運動を解析した結果を示す．また，非対称な摩擦をミクロに表現する手法として，表面形状にランダムな特性を導入する手法を述べる．表面の法線ベクトルが確率的に分布すると仮定し，場所によって法線ベクトルの方向が異なるモデルを構築した．このようなモデルを用いてパーツの運動をシミュレーションし，パーツの運動を解析した結果を示す．