

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246046

研究課題名(和文) 軟組織のトライボロジー

研究課題名(英文) Tribology of Soft Tissues

研究代表者

平井 慎一 (Hirai, Shinichi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：90212167

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円、(間接経費) 10,440,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、軟組織が他物体と接触し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表現し、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、滑りをセンシングするために、布地センサを用いる手法と圧力分布の計測結果に画像処理を用いる手法を提案した。次に、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とともに、有限要素法による非一様組織のモデリングと変形特性の同定法を提案した。さらに、マイクロテクスチャー上の物体の運動を計測し、滑り運動を定式化した。

研究成果の概要(英文)：This research aims at establishing tribology of soft tissues, which governs sliding motion among soft tissues. It is required to model physical interaction among soft tissues and incorporate it into soft tissue modeling. Firstly, we proposed two methods to detect sliding motion: one using fabric sensors and another applying image processing techniques to successive tactile images. Next, we proposed a beam bundle model to formulate sliding motion of a soft tissues. Additionally, we proposed a method to describe deformation of non-homogeneous soft tissues based on finite element approach and a method that identifies deformation properties in the model. Finally, we proposed a microscopic model of sliding motion along micro textures.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：知能機械学・機械システム

キーワード：ソフトメカニクス トライボロジー 軟組織 変形 接触 滑り ダイナミクス モデリング

## 1. 研究開始当初の背景

生体力学や生体工学の分野では、軟組織のモデリングに関する研究が進められてきた。特に、手術のシミュレーションや手術手技の訓練を目的とする研究開発が進められ、その一環として軟組織のモデリングとシミュレーションに関する研究が盛んに成されている。しかしながら、生体のモデリングのためには、軟組織単体の力学的なモデリングでは不十分であり、軟組織と軟組織あるいは軟組織と硬い物体との力学的な相互作用を研究する必要がある。軟組織と他物体との界面において、接触力や凝着力がどのように作用するか、摩擦がどのように分布するか、物質がどのように移動するかによって、軟組織や他物体の形状変形は大きく異なる。したがって、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。しかしながら、軟組織と軟組織あるいは軟組織と硬い物体との間の力学的な相互作用、すなわち摩擦や凝着に関しては、学術的な解明がほとんど成されていない。

摩擦や潤滑を対象とする学問分野としてトライボロジーがあげられる。トライボロジーの主たる対象は、硬い物体と硬い物体の界面であり、たとえばベアリングやピストン、骨格の関節部などをその対象としている。しかしながら、大変形を伴う軟組織との摩擦や凝着に関しては、あまり研究が成されていない。したがって、軟組織が他物体と接触し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が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、軟組織が他物体と接触し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滑りを計測する手法を確立する。次に、軟組織の滑りをマクロ的に定式化する。さらに、マイクロテクスチャー上の物体の運動を計測し、軟組織のマイクロトライボロジーを定式化する。

## 3. 研究の方法

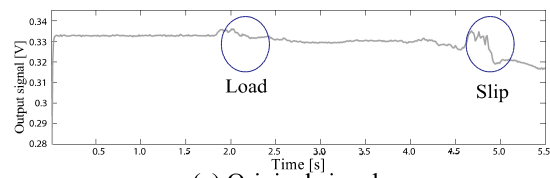
軟組織が他物体と接触しながら相対的に運動するときに接触界面に生じる現象を理解するために、滑りをセンシングする手法を確立する。軟組織の変形をモデリングする手法と変形特性を同定する手法を確立するとと

もに、滑り運動をマクロの立場とミクロの立場からモデリングする。さらに、提案するモデルを生体組織のモデリングに適用する。

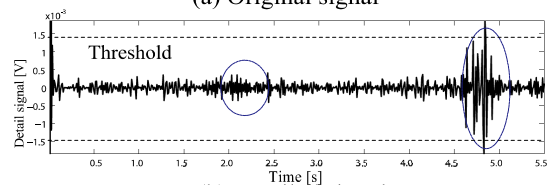
## 4. 研究成果

### (1) 滑りのセンシング

滑りをセンシングする手法として、布地センサを用いる手法と圧力分布の計測結果に画像処理を用いる手法を提案した。布地センサは、感圧導電系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、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手法を提案した。滑りの検出が可能であることを示し、ウェーブレットを基にした特徴量により複数のテクスチャーを識別することに成功した。圧力分布の計測結果に画像処理を用いる手法では、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。この手法により、滑り運動を計測することができた。



(a) Original signal



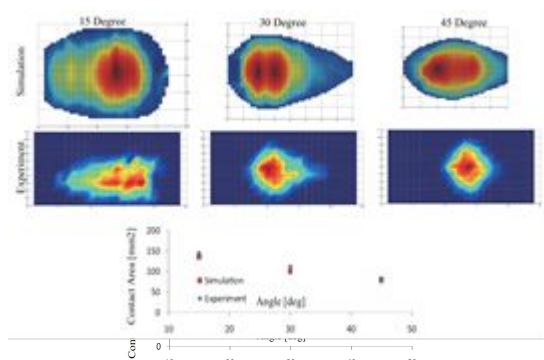
(b) Detailed signal

布地センサによる滑りの検出

### (2) 滑り運動のマクロモデリング

滑り運動を定式化するためにビーム束モデルを提案した。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。提案したビーム束モデルは、このような局所滑りをモデリングすることができる。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、ビーム同士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。



指先の応力分布のシミュレーション結果と実験結果の比較

### (3) 非一様組織のモデリングと同定

有限要素法による非一様組織のモデリングと変形特性の同定法を提案した。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。提案する手法を、柔軟指先のモデリング、硝子体のモデリング、穿刺過程のモデリングに適用した。柔軟指先のモデリングでは、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。複数の組織を結合し、指先の変形モデルを構成する。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した。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。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、硝子体の変形特性を同定するとともに、硝子体の変形シミュレーションを実行した。穿刺過程のモデリングにおいては、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提案した。

### (4) 滑り運動のマイクロモデリング

マイクロテクスチャー上の物体の運動を計測し、滑り運動を定式化した。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。特に、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てマイクロテクスチャーを製作する手法を提案した。次に、非

対称な摩擦を定式化する手法を提案した。非対称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、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を提案した。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、物体の滑り運動を解析した。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した。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物体の滑り運動をシミュレーションした。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

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, 2013, 査読有
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, 査読有
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, 10.5539/jfr.v1n1p48, 2012, 査読有
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, 2012, 査読有
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, 2012, 査読有

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, 2012, 査読有
- [学会発表](計 33 件)
1. 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, 2013 年 9 月 13 日発表
  2. Zhongkui Wang, Juho Pokki, Olgac 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, 2013 年 7 月 23 日発表
  3. Damith Suresh Chaturanga 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, Wollongong, Australia, 2013 年 7 月 12 日発表
  4. 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, Wollongong, Australia, 2013 年 7 月 11 日発表
  5. 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, Wollongong, Australia, 2013 年 7 月 10 日発表
  6. Zhongkui Wang, Juho Pokki, Olgac 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, Osaka, Japan, 2013 年 7 月 5 日発表
  7. 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, Berlin, Germany, 2013 年 6 月 26 日発表
  8. Damith Suresh Chaturanga 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, ロボティクス・メカトロニクス'13 講演会, つくば国際会議場, 茨城県, 2013 年 5 月 24 日発表
  9. 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, つくば国際会議場, 茨城県, 2013 年 5 月 24 日発表
  10. 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, Daejeon, Korea, 2013 年 4 月 15 日発表
  11. 三谷 篤史, Le Hoai Phuong, 松尾 保孝, 平井 慎二, 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, 福岡国際会議場, 福岡県, 2012 年 12 月 18 日発表
  12. Katudampe Vithanage Damith Suresh Chaturanga, 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, Guangzhou, China, 2012 年 12 月 11 日発表
  13. 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 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Portugal, 2012 年 10 月 10 日発表
  14. Lijuan Wang, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, Modeling and Simulation of Friction Forces during Needle Insertion Using Local

- Constraint Method, 2012 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Portugal, 2012年10月10日発表
15. Van Anh Ho, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, Beam Bundle Model of Human Fingertip during Pre-Slide Phase, 第30回日本ロボット学会学術講演会, 札幌コンベンションセンター, 北海道, 2012年9月19日発表
  16. 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, Seoul, Korea, 2012年8月22日発表
  17. 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, Kaohsiung, Taiwan, 2012年7月13日発表
  18. 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, アクトシティ浜松, 静岡県, 2012年5月29日発表
  19. 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, St. Paul, U.S.A., 2012年5月16日発表
  20. 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, 京都大学, 京都府, 2011年12月25日発表
  21. 森 厚郎, 平井 慎一, 森川 茂麿, 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, 京都大学, 京都府, 2011年12月24日発表
  22. Van Anh Ho, Tatsuya Nagatani, Akio Noda, and Shinichi Hirai, Enhancement of Tactile Sensor's Ability in In-Hand Manipulation Utilizing Image Processing Tool, 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, 京都大学, 京都府, 2011年12月23日発表
  23. 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, Phuket Island, Thailand, 2011年12月8日発表
  24. 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, Phuket Island, Thailand, 2011年12月8日発表
  25. 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, ASME 2011 Int. Mechanical Engineering Congress & Exposition, Denver, U.S.A., 2011年11月16日発表
  26. 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, Qinhuangdao, China, 2011年10月15日発表
  27. 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, Qinhuangdao, China, 2011年10月15日発表
  28. 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, San Francisco, U.S.A., 2011年9月27日発表
  29. 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, 芝浦工業大学, 東京都, 2011年9月9日発表
  30. Van Anh Ho, Tatsuya Nagatani, Akio Noda, and Shinichi Hirai, From Tactile Data to Image Processing, and Application in Robotic In-Hand Manipulation, 第29回日本ロボット学会学術講演会, 芝浦工業大学, 東京都, 2011年9月9日発表
  31. Van Ho and Shinichi Hirai, Understanding Slip Perception of Soft Fingertips by Modeling and Simulating Stick-Slip Phenomenon, Robotics: Science and Systems VII, Los Angeles,

- U.S.A., 2011年6月29日発表
32. Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Green Strain Based FE Modeling of Rheological Objects for Handling Large Deformation and Rotation, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Shanghai, China, 2011年5月12日発表
  33. 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, Shanghai, China, 2011年5月12日発表

〔図書〕(計1件)

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, pp.224

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ritsumei.ac.jp/se/~hirai/project/GASR2011-j.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

平井 慎一 (HIRAI SHINICHI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：90212167

(2)研究分担者

田中 弘美 (TANAKA HIROMI)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：10268154

森川 茂廣 (MORIKARA SHIGEHIRO)

滋賀医科大学・医学部・教授

研究者番号：60220042

三谷 篤史 (MITANI ATSUSHI)

札幌市立大学・デザイン学部・講師

研究者番号：70388148

井上 貴浩 (INOUE TAKAHIRO)

岡山県立大学・情報工学部・准教授

研究者番号：60453205