

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20246049

研究課題名(和文)

人の巧みさに関する軟組織の力学の解明

研究課題名(英文)

Soft Tissue Mechanics in Human Dexterity via Internal Sensing

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

研究成果の概要(和文):

本研究の目的は、人の軟組織が運動の巧みさにどのように貢献しているかを力学的に解明することである。まず、軟組織の変形モデリングのために、動的なレオロジー変形を有限要素近似により定式化するとともに、変形過程の計測結果から変形モデルのパラメータを推定する手法を確立した。次に、軟組織のMR画像から内部変形を計算する手法を提案するとともに、軟組織のモデリング手法を基に人指の変形モデルを構成し、人指の変形をシミュレーションする手法を確立した。さらに、柔軟指のポテンシャルエネルギーを定式化するとともに、柔軟指により把持される物体の運動を制御する手法を提案した。提案する制御手法を用いると情報伝達の遅れに対してロバストに物体を操作できることを示し、それが柔軟指のポテンシャルエネルギーの性質に帰することを示した。

研究成果の概要(英文):

We will investigate how mechanically human soft tissues contribute to human motion dexterity. First, we have formulated dynamic rheological deformation using finite element approximation for the modeling of soft tissues. We have established a method to identify deformation parameters in the model from the measurement of actually deforming objects. Second, we have proposed two methods to compute inner deformation from MR images of soft tissues. We have then constructed mechanical models of human fingertips to simulate their deformation during object grasping and manipulation. Next, we have formulated potential energy stored in soft fingertips to proposed control laws for grasping and manipulation performed by soft fingertips. We have concluded that the proposed control law is robust against the delay in signal processing and this robustness originates from the softness of fingertips.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	14,000,000	4,200,000	18,200,000
2009年度	11,500,000	3,450,000	14,950,000
2010年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
年度			
年度			
総計	35,500,000	10,650,000	46,150,000

研究分野：

工学

科研費の分科・細目：

機械工学 知能機械学・機械システム

キーワード：

ソフトメカニクス, 軟組織, 巧みさ, 力学, 内部変形

1. 研究開始当初の背景

人は、意識することなく様々な物体を把持し、様々な道具を巧みに操ることができる。運動生理学やロボティクスの分野では、このような人の巧みさを解明する試みが成されてきた。運動生理学では、物体によって異なる把持形態の記述や手指の運動に関する脳神経系の活動部位の同定が進められている。一方、ロボティクスの分野では、柔軟な組織が触覚に与える影響の力学的解析や柔軟指による物体把持の力学解析が成され、柔らかい組織が触覚のフィルターの役割を果たすことやポテンシャルエネルギーの形成を通して安定な把持と操作に寄与していることが明らかになりつつある。しかしながら、人が物体を操作するとき、どのような力学で巧みな操作が可能になっているかは不明のままである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人の皮膚や軟骨などの軟組織が、人の運動の巧みさにどのように貢献しているかを力学的に解明することである。本研究では、内部イメージング技術に基づき人の軟組織の変形を計測し、力学モデリングを通して人の巧みな操作における軟組織の力学を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、内部イメージング技術に基づき人の軟組織の変形を計測し、柔らかい指先を有する人指の力学モデルを構築するとともに、柔軟指操作の力学モデルの解析を通して、軟組織が人の巧みな物体操作にどのように貢献しているかを明らかにする。

4. 研究成果

軟組織の変形モデリングとパラメータ推定

軟組織は、弾性変形と塑性変形の両方を示し、非線形や非一様など複雑な変形特性を有する。このような変形特性を表わすために、動的なレオロジー変形を有限要素近似により定式化するとともに、変形過程の計測結果から変形モデルのパラメータを推定する手法を確立した。

有限要素近似による定式化においては、直列モデルと並列モデルを解析し、それぞれの限界を明らかにするとともに、その限界を克服するために多重粘性要素を提案した。レオロジー変形のモデリングにおいては、コーシー歪みとグリーン歪みを用いて変形を定式化し、回転を含む変形のシミュレーションを示した。さらに、制約安定化法を用いて、非

一様な層状物体をモデリングする手法を提案した。特に、変形モデルのパラメータ推定においては、変形形状と変形により生じる力を同時に再生するように、モデルを選択しパラメータを推定する手法を提案した。

MR 画像からの内部変形場の計算

軟組織の MR 画像から内部変形を計算する手法を提案した。変形前と変形後の MR 画像を撮影し、これらを比較することにより内部変形を計算する。変形場の計算においては、画像のアフィン変換に加えて画像の変形に対処する必要がある。また、軟組織の MR 画像は、解像度が少なく輪郭が明瞭でない場合が多い。このような MR 画像に対して、ロバーストに画像間の対応点を求め、変形場を計算するアルゴリズムが求められる。本研究では、局所不変特徴量を用いた変形場の計算手法と、SAC と TPS を用いた変形場の計算手法を提案している。前者は、局所的に不変な特徴量を用いて画像間の対応点を計算する。後者は、Spatial Association Correspondence と Thin Plate Spline を用いて、局所的な対応点探索と大域的なモデル更新を交互に実行することで、変形場を計算する。

指の内部変位計測と変形シミュレーション

人指の MR 画像から人指の内部変形を計測するとともに、軟組織のモデリング手法を基に、人指の変形モデルを構成し、人指の変形をシミュレーションする手法を確立した。指先の変形計測を進めるとともに、軟組織が硬い物体と接触し転がりや滑りを生じる状態のモデリングを進めた。軟組織の転がりのモデリングでは、軟組織を梁の集まりで表わし、転がりに起因する制約を課している。軟組織の滑りのモデリングでは、梁と梁の間に弾性要素を配置することにより、局所滑りを表わしている。

柔軟指操作の三次元力学モデル

平行分布モデルにより柔軟指のポテンシャルエネルギーを定式化し、柔軟指操作の三次元力学モデルを構成するとともに、柔軟指により把持される物体の姿勢と位置を制御する二段階制御を提案した。さらに提案した制御則を、二自由度二指による把持物体の姿勢と位置の制御、一自由度三指による把持物体の三次元空間内における姿勢制御、運動関節を有する指による物体操作に拡張した。

視覚情報遅れ下における物体操作

視覚情報遅れ下における物体操作について考察した。人の視覚や神経系には、数ミリ秒ないしは数十ミリ秒に至る情報伝達の遅れがある。このような遅れに関わらず、人は巧みに物体を操作することができる。なぜこ

のような操作が可能であるかを探究することが目的である。二段階制御法では情報伝達の遅れに対してロバストに物体を操作できることを示し、それが柔軟指のポテンシャルエネルギーの性質に帰することを示した。

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12件(全件査読有))

1. Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Modeling and Estimation of Rheological Properties of Food Products for Manufacturing Simulations, J. of Food Engineering, Vol.102, pp.136-144, 2011.
2. Van Ho and Shinichi Hirai, Modeling and Analysis of a Frictional Sliding Soft Fingertip, and Experimental Validations, Advanced Robotics, Vol.25, No.3, pp. 291-311, 2011.
3. Van Ho, Viet Dzung Dao, Susumu Sugiyama, Shinichi Hirai, Development and Analysis of a Sliding Tactile Soft Fingertip Embedded with a Micro Force/Moment Sensor, IEEE Transaction on Robotics, 掲載決定
4. 森川 茂麿, 村山 浩之, 藤本 栄, 椎野 顯彦, 犬伏 俊郎, 栗林 秀人, パラレルイメージング用アレイコイルを利用した13Cスペクトロスコピックイメージングの試み, 日磁医誌, Vol.31, pp.65-69, 2011.
5. 平井 慎一, 物理世界と情報世界をつなぐソフトインターフェース, 日本ロボット学会誌, ロボティック・サイエンス論文特集号, Vol.28, No.4, pp.503-511, May, 2010.
6. Amatsubo, T., Yanagisawa, D., Morikawa, S., Taguchi, H., and Tooyama, I., Amyloid imaging using high-field magnetic resonance, Magn Reson Med Sci, Vol.9, pp.95-99, 2010.
7. Zhongkui Wang, Kazuki Namima, and Shinichi Hirai, Physical Parameter Identification of Uniform Rheological Deformation Based on FE Simulation, 生体医工学, Vol.47, No.1, pp.1-6, 2009.
8. 井上 貴浩, 平井 慎一, 柔軟指による把持物体の姿勢制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.757, pp.2537-2546, Sept., 2009.
9. 柴田 瑞穂, 太田 剛士, 平井 慎一, 摘み滑り動作を利用した布地の展開動作, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.9, pp.1029-1036, 2009.
10. 井上 貴浩, 松井 俊樹, 平井 慎一, 視覚情報遅れを考慮した2指1自由度対ロボットハンドによる対向操り動作, 計測自動制御学会論文集, Vol.45, No.12, pp.678-687, Dec., 2009.
11. Takahashi, S., Saruhashi, Y., Odate, S., Matsusue, Y., and Morikawa, S., Percutaneous aspiration of spinal ventricle cysts using real-time magnetic resonance imaging and navigation, Spine Vol.34, pp.629-634, 2009.
12. Tokuda J., Morikawa S., Haque H.-A., Tsukamoto T., Matsumiya K., Liao H., Masamune K., and Dohi T., Adaptive 4D MR Imaging for MRI-guided Therapy Using Navigator-Based Respiratory Signal, Magn Reson Med Vol.59, pp.1051-1061, 2008.

[学会発表](計47件)

1. Van Ho and Shinichi Hirai, Toward a Platform for Modeling and Simulating Dynamic Stick-Slip Transitions of Soft Fingertips, 第16回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.275-282, 指宿シーサイドホテル(鹿児島), March 14, 2011.
2. Penglin Zhang and Hirai Shinichi, A Local Geometric Preserving Approach For Interior Deformation Fields Measurement From MR Volumetric Images of Human Tissues, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (Robio 2010), pp.437-441, Tianjin, China, Dec. 14-18, 2010.
3. Xubing Zhang, Shinichi Hirai and Penglin Zhang, SURF and Spatial Association Correspondence for the Extraction and Matching of Feature Points from MR Images of Deformed Tissues, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (Robio 2010), pp.448-453, Tianjin, China, Dec. 14-18, 2010.
4. Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Contact Modeling and Parameter Switching for Simultaneous Reproduction of Rheological Force and Deformation, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (Robio 2010), pp.726-731, Tianjin, China, Dec. 14-18, 2010.
5. Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Modeling and Property Estimation of Japanese Sweets for Their

- Manufacturing Simulation, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010), Taipei, Oct. 18-22, 2010.
6. Takahiro Inoue, Shinichi Hirai, Daisuke Takizawa, Modelless and Grasping-Forceless Control by Robotic Fingers Capable of Mechanically Coupled Movement, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010), Taipei, Oct. 18-22, 2010.
 7. Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Modeling and Parameter Estimation of Rheological Objects for Simultaneous Reproduction of Force and Deformation, 1st Int. Conf. on Applied Bionics and Biomechanics (ICABB-2010), Venice, Italy, Oct. 14-16, 2010.
 8. Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Finite Element Modeling of Rheological Objects for Simultaneously Reproducing their Deformation and Force Behaviors, 6th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2010), Fukuoka, Oct. 8-9, 2010.
 9. Xubing Zhang, Shinichi Hirai, and Penglin Zhang, The Feature Points Matching of Non-rigid Tissues Based on SURF, Spatial Association Correspondence and Clustering: Application to MR 2-D Slice Deformation Measurement, 6th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2010), Fukuoka, Oct. 8-9, 2010.
 10. Mizuho Shibata, Tsuyoshi Ota, and Shinichi Hirai, Robotic Unfolding of Hemmed Fabric using Pinching Slip Motion, Int. Conf. on Advanced Mechatronics (ICAM2010), Suita, Japan, Oct. 4--6, 2010.
 11. Takahiro Inoue and Shinichi Hirai, Robotic Manipulation with Large Time Delay on Visual Feedback Systems, IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2010), Montreal, Canada, July 7-9, 2010.
 12. Yujiro Yamazaki, Takahiro Inoue, and Shinichi Hirai, Two-Phased Controller for a Pair of 2-DOF Soft Fingertips Based on the Qualitative Relationship between Joint Angles and Object Location, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4294--4301, Anchorage, May 3-8, 2010.
 13. Van Ho, Viet Dzung Dao, Susumu Sugiyama, and Shinichi Hirai, Design of a Small-Scale Tactile Sensor with Three Sensing Points for Using in Robotic Fingertips, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4855-4860, Anchorage, May 3-8, 2010.
 14. Van Ho and Shinichi Hirai, Two-Dimensional Dynamic Modeling of a Sliding Motion of a Soft Fingertip Focusing on Stick-To-Slip Transition, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4315-4321, Anchorage, May 3-8, 2010.
 15. Yujiro Yamazaki, Takahiro Inoue, and Shinichi Hirai, Two-Phased Force and Coordinates Controller for a Pair of 2--DOF Soft Fingers, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (Robio 2009), pp.931-937, Guilin, China, Dec. 19-23, 2009.
 16. Kazuki Namima, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, Simulation of Soft Fingertip Deformation under Contact and Rolling Constraints using FEM and CSM, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (Robio 2009), pp.1585-1590, Guilin, China, Dec. 19-23, 2009.
 17. Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Modeling and Parameter Identification of Rheological Object Based on FE Method and Nonlinear Optimization, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009), St. Louis, U.S.A., Oct. 11-15, 2009.
 18. Shinichi Hirai, Simulation of Deformation in Robotics (Keynote Speech), Asia Simulation Conference 2009, Oct. 7, 2009.
 19. Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Parameter Estimation of Rheological Object Based on FE Simulation and Nonlinear Optimization, 5th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2009), Kyoto, Oct. 4-5, 2009.
 20. Yoshiyuki Abe, Zhongkui Wang, Kazuki Namima, Shigehiro Morikawa, and Shinichi Hirai, Inner Displacement Measurement of Grasping by Robotic Hand, 5th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2009), Kyoto, Oct. 4-5, 2009.
 21. Yamaguchi, S., Satake, K., Shirai, Y., Tanaka, H.T., and Morikawa, S., 3-dimensional finite element method based needle insertion simulation considering needle tip shape, 23rd Int. Cong. and Exh. Computer Assisted

- Radiology and Surgery (CARS) 2009, Berlin, Germany, June 23-27, 2009.
22. Mizuho Shibata, Tsuyoshi Ota, and Shinichi Hirai, Wiping Motion for Deformable Object Handling, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.134-139, Kobe, May 12-17, 2009.
 23. Van Ho Anh, Viet Dzung Dao, Susumu Sugiyama, and Shinichi Hirai, Analysis of Sliding of a Soft Fingertip Embedded with a Novel Micro Force/Moment Sensor: Simulation, Experiment, and Application, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.889-894, Kobe, May 12-17, 2009.
 24. Zhongkui Wang, Kazuki Namima, and Shinichi Hirai, Physical Parameter Identification of Rheological Object Based on Measurement of Deformation and Force, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1238-1243, Kobe, May 12-17, 2009.
 25. Takahiro Inoue and Shinichi Hirai, Parallel-distributed Model in Three-dimensional Soft-fingered Grasping and Manipulation, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2092-2097, Kobe, May 12-17, 2009.
 26. Morikawa, S., Haque, H.-A., Naka, S., Murakami, K., Kurumi, Y., Tani, T., and Inubushi, T., An Optical and Electromagnetic Hybrid Tracking System for MR Image Guided Interventional Procedures, ISMRM 17th Scientific Meeting and Exhibition, Honolulu, U.S.A., April 18-24, 2009.
 27. Van Ho Anh, Viet Dzung Dao, Susumu Sugiyama, and Shinichi Hirai, Force/Moment Sensing During Sliding Motion using a Micro Sensor Embedded in a Soft Fingertip, Proc. 10th Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2008), Dec. 17-20, Hanoi, Vietnam, 2008.
 28. Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Physical Parameter Identification of Rheological Object Based on FE Dynamic Model, 4th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2008), Beijing, China, November, 2008.
 29. Zhongkui Wang, Kazuki Namima, Shinichi Hirai, Physical Parameter Identification of Isotropic Uniform Deformation Based on FE Simulation, 生体医工学シンポジウム 2008

- (BMES2008), Toyonaka, Sept., 2008.
30. Takahiro Inoue and Shinichi Hirai, Task-selection Control by Thumb and Forefinger Based on Softfinger Contact, Third Asia International Symposium on Mechatronics (AISM2008), Sapporo, August 27-31, 2008.
 31. Yamaguchi, S., Morikawa, S., Shirai, Y., and Tanaka, H.T., Modeling of Needle Insertion for Percutaneous Minimally Invasive Therapy, 22nd Int. Cong. and Exh. Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2008), Barcelona, Spain, June 25-28, 2008.

〔図書〕(計1件)

Takahiro Inoue and Shinichi Hirai, Mechanics and Control of Soft-fingered Manipulation, Springer-Verlag, ISBN 978-1-84800-980-6, Jan., 2008, 245 ページ.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ritsumei.ac.jp/se/~hirai/project/GASR2008-j.html> 和文
<http://www.ritsumei.ac.jp/se/~hirai/project/GASR2008-e.html> 英文

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

犬伏 俊郎 (INUBUSHI TOSHIRO)
 滋賀医科大学・MR医学総合研究センター・教授
 研究者番号：20213142

森川 茂廣 (MORIKAWA SHIGEHIRO)
 滋賀医科大学・医学部・教授
 研究者番号：60220042

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