

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02230

研究課題名(和文) 触知覚センシングにおける軟組織のダイナミクス・トライボロジー

研究課題名(英文) Dynamics and Tribology of Soft Tissues in Tactile Perception

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) 34,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、人が触覚を通して対象物の特性を知覚する過程を力学的に理解し、柔らかい触覚センシングデバイスを開発することである。本研究では、指先の力学モデリング、指先の滑り覚の力学的解析、三次元プリンタを用いたソフトフィンガーの構築、ソフトフィンガーにおけるセンシング、しわ構造を用いた滑り覚センシングに関する研究を進めた。指先のモデリングと力学シミュレーションを通して、滑り覚に加速度が有効であることを見出した。ソフトフィンガーから構成されるソフトハンドを試作し、物体操作を実現した。ソフトフィンガーの曲げ変形を計測することによる滑り検出の可能性を示し、しわ構造を用いた滑り検出を提案した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to understand the dynamic process of human tactile perception, through which humans recognize object properties, and to develop soft tactile sensing devices. We conducted research on dynamic modeling of fingertip, mechanical analysis of fingertip slippage, soft finger fabrication using a three-dimensional printer, sensing in soft fingers, and slippage sensing using wrinkle structure. Through modeling and dynamics simulation of fingertips, we found that acceleration is effective in slippage detection. Soft hand consisting of soft fingers was prototyped to perform object grasping and manipulation. We showed the possibility of slip detection by measuring bending deformation of soft fingers and proposed slip detection using wrinkle structure.

研究分野：ソフトロボティクス

キーワード：触覚 滑り覚 モデリング 力学モデル ソフトフィンガー ソフトハンド センシング 曲げ変形

1. 研究開始当初の背景

指の動的な運動や皮膚組織の動的な変形が触覚にどのように影響するか、触覚に関する不明の課題が多く残されていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人が触感覚を通して対象物の特性を知覚する過程を力学的に理解するとともに、触感覚に関する力学的な知見を基に柔らかい触覚センシングデバイスを開発することである。

3. 研究の方法

本研究では、指先の力学モデリング、指先の滑り覚の力学的解析、三次元プリンタを用いたソフトフィンガーの構築、ソフトフィンガーにおけるセンシング、しわ構造を用いた滑り覚センシングに関する研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 指先の力学モデリング

指先のMR画像(図1)の各スライスに対して、末節骨と指表面の輪郭を抽出し、すべてのスライスにおける輪郭を接続することにより、末節骨と指表面の三次元形状を得た。皮膚の厚みを一定値の1mmと仮定し、指表面を厚みの分だけ縮小することで、皮下組織の表面とした。これらの表面を有限要素ソフトウェア ABAQUS にインポートし、指先の幾何モデル(図2)を構築した。末節骨、皮下組織、皮膚は弾性体であると仮定し、それぞれのヤング率、ポワソン比、密度の値を定め、指先の力学モデルを構築した。

構築した指先モデルが表面に接触し、その上を滑るダイナミックシミュレーションを実施した(図3)。初期滑りが接触領域の周辺で生じ、滑りが中央部に向かって拡大し、最終的に全体の滑りに至るといった初期滑り現象を、構築した力学モデルが模擬できることがわかった。さらに、指表面と指内部のミーゼス応力を解析した結果、接触領域の境界で応力の値が大きいことがわかった。

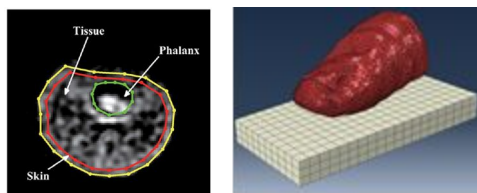


図 1

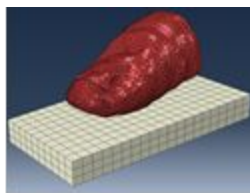


図 2

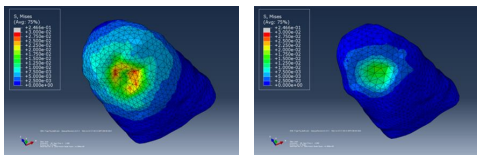


図 3

(2) 指先の滑り覚の力学的解析

皮膚における触覚受容器の配置が触覚に与える影響を解析するために、3次元モデルの断面から指先の2次元力学モデルを構築し

た(図4)。モデルの次元を減らしたのは、計算時間を短縮するためである。一方、皮膚を表皮と真皮に分割するとともに、表皮と真皮の境界面のマイクロ構造を導入した。さらに、触覚受容器の FA-I, FA-II, SA-I, SA-II を指モデルの内部に配置した。

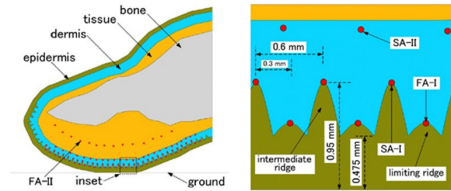


図 4

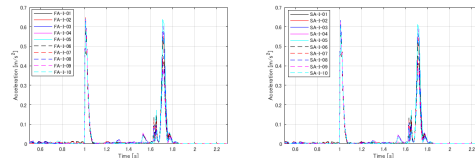


図 5

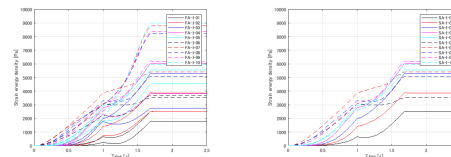


図 6

構築した二次元モデルが表面に接触し、その上を滑るダイナミックシミュレーションを実施した。力学シミュレーションの結果、受容器 FA-I と SA-I の場所で、初期滑りの瞬間に加速度が生じることがわかった(図5)。一方、滑りの検出に有効であると言われている触覚受容器における歪みエネルギー密度を計算した結果、歪みエネルギー密度を用いて初期滑りを検出することは困難であることがわかった(図6)。また、末節骨の形状が、初期滑りの瞬間に生じる加速度に影響すること、指紋を導入すると加速度信号にノイズが発生し、滑りの検出が困難であることがわかった。

指先の力学モデリングと滑り覚の力学的解析に関して、国際会議[22],[25]で発表した。また、初期滑りの提示に関して、論文[10]、国際会議[16],[17]で発表した。生体モデリングに関して、論文[11]、国際会議[6],[20]で発表した。

(3) ソフトフィンガーの構築

触覚を有し、様々な対象物を把持・操作できるロボットハンドを実現するためには、柔らかい材料で構成されたソフトフィンガーの導入が有効と考える。そこで、三次元プリンタを用いて空気圧駆動のソフトフィンガーを製作し、複数の指から成るソフトハンドを試作した。ソフトフィンガーは、複数のチャンバーを有しており、空気圧を印加すると一方向に屈曲する。ソフトフィンガーを設計し、三次元プリンタで試作した。空気圧を印

加すると、複数のチャンバーが膨張し、たがいに押し合う。結果として、下方に曲がる。図7に試作したソフトフィンガーの曲げ変形を示す。左側から順に、0kPa、20kPa、30kPa、40kPa、50kPaの空気圧を加圧したときの曲げ変形を示す。印加する空気圧に応じて、曲げ変形が生じていることがわかる。



図7

三次元プリンタを用いることにより、様々な構造のソフトフィンガーを容易に試作することができる。チャンバーの形状や配置、チャンバーの材料のヤング率により、ソフトフィンガーの変形後の形状が異なる。マルチマテリアルに対応し、ラバーライク材料を用いることができる三次元プリンタは、ヤング率が異なる複数の材料から成るフィンガーを試作することが可能である。そこで、様々なチャンバーの配置、材料のヤング率を有するフィンガーを試作した。

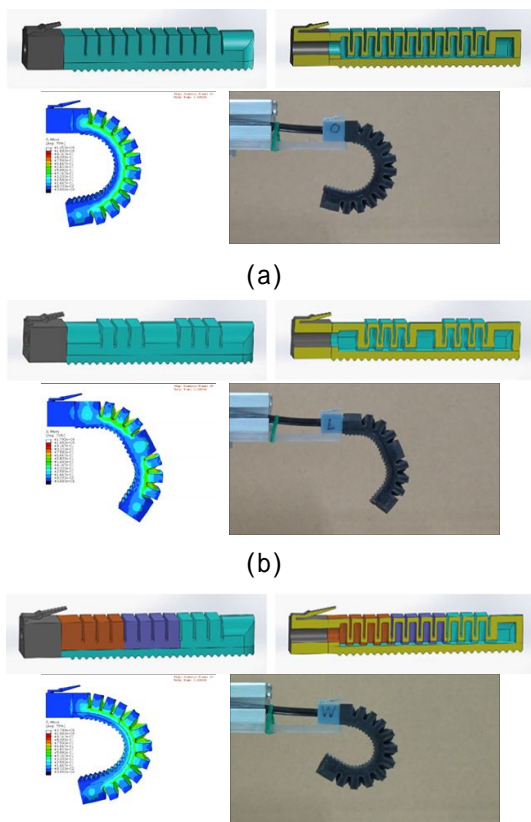


図8

図8に様々な構造のソフトフィンガーを示す。図8(a)は、チャンバーが一様に分布するデザインであり、空気圧を印加すると一様に曲がる。すなわち、変形後の形状は円弧に近い。図8(b)は、チャンバーが非一様に分布するデザインである。空気圧を印加すると、チャンバーが密な個所では大きく曲がり、チャ

ンバーが疎な個所ではあまり曲がらない。この場合、ソフトフィンガーの変形は、リンク機構の変形形状に近くなる。図8(c)は、チャンバーが異なる複数の材料から成るデザインである。この場合、チャンバーは三つの異なる硬さを持つ。柔らかい材料から成るチャンバーの部分が大きく変形する。この場合、中央部で大きい曲げ変形が生じている。以上のように、実験により得られたフィンガーの変形形状が有限要素シミュレーションの結果と一致することを確認した。

ソフトフィンガーの設計、試作、評価に関して、論文[3]、[4]、国際会議[3]、[5]、[12]で発表した。

(4) ソフトフィンガーにおけるセンシング

ソフトフィンガーにセンサを埋め込み、フィンガーの屈曲を検出することを試みた。三次元プリンタによるフィンガーの製作中に、フィルム状の曲げセンサを埋め込み、フィンガーの曲げ変形を測定した。曲げセンサを有する複数のフィンガーから成るソフトハンドを構築し、対象物を把持する実験を行った。対象物を把持できたとき、指と対象物の間に滑りが生じ、把持が失敗したときでは、センサの出力が異なることがわかった(図9)。滑りが生じたときには、曲げセンサの出力が大きく変化し、把持が成功したときには変化が小さい。したがって、ウェーブレット変換等を用いることにより、滑りの検出が可能であると考えられる。また、ソフトフィンガーの変形のダイナミックシミュレーションを実行し、シミュレーション結果と実験結果を比較したところ、両者が良く一致することがわかった。

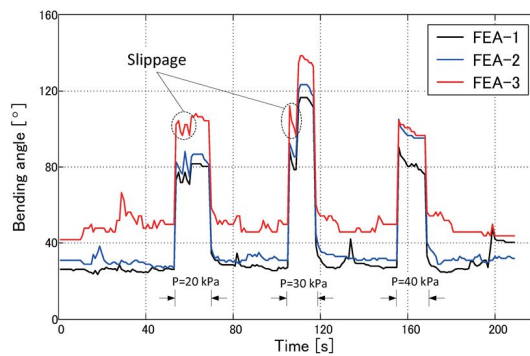


図9

柔軟な指先の内部に埋め込むことが可能なセンサとして、永久磁石とホール素子を用いるセンサを構成した。永久磁石は柔軟な指先内部に埋め込まれ、ホール素子は指の底面に固定されている。指先の変形に伴い、永久磁石とホール素子の相対的な位置関係が変化し、結果としてホール素子の出力が変化する。したがって、ホール素子の出力から、指先に作用する力を推定することができる。

フィンガーの曲げ変形の検出に関して、国際会議[2]、[11]で発表した。永久磁石とホ

ール素子を用いるセンサに関して，論文[9]，国際会議[15]，[18]，[23]で発表した。

(5) しわ構造を用いた滑り覚センシング

人の指先が濡れた状態にあると，皮膚にしわを生じる．このしわは，濡れた状態での把持を確実にするとともに，触覚を鋭敏にすると言われている．そこで指先のしわ構造(図10)を用いた滑り覚センシングを試みた。

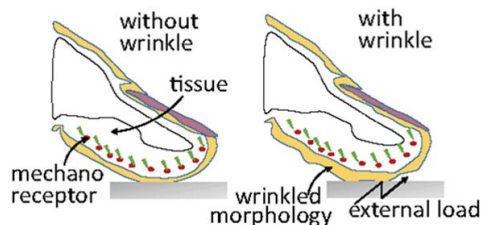


図 10

しわ構造を実現するために，空気圧チャンバーを有する構造(図11)をエラストマーで試作した．隣り合うチャンバーの間に，歪みゲージを埋め込む．歪みゲージは表面に平行であり，エラストマーの表面に作用する鉛直荷重に反応する．一方，接線方向の荷重には，ほとんど反応しない．ここで，一方のチャンバーに空気圧を印加すると，チャンバーが膨張し，チャンバーが埋め込まれている部分にしわが生じる．これと同時に歪みゲージの向きが斜めになるため，歪みゲージは接線方向の荷重に反応する．このように，個々のチャンバーに空気圧を印加するかどうかにより，それぞれの歪みゲージの鉛直荷重に対する応答と接線方向の荷重に対する応答を変化させることができる。

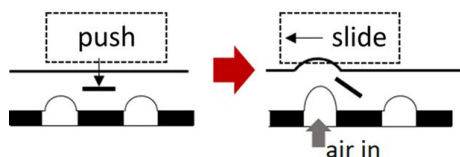
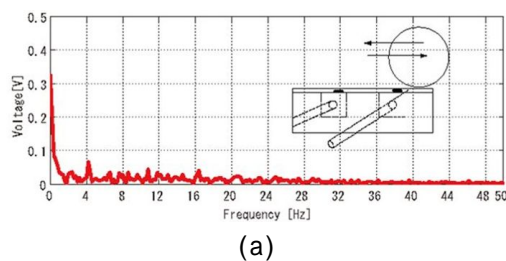


図 11

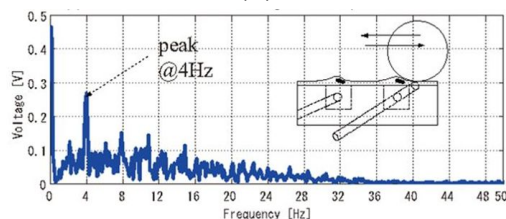
空気圧を印加せずしわがない状態，空気圧を印加ししわがある状態において表面上で物体を周波数 4Hz の往復運動で滑らせる．センサ信号をフーリエ変換し，振幅スペクトルを計算した．しわ構造がない場合，明瞭なピークは現れず，滑り運動を検出できない(図12(a))．一方，しわ構造を有する場合，振幅スペクトルは周波数 4Hz で明瞭なピークを示す(図12(b))．このように，しわ構造を用いることにより，滑り運動を検出することができる。

しわ構造を用いた滑り運動の検出に関して，論文[6]，国際会議[8]，[10]，[14]で発表した．また，しわ構造を実現する方法として，空気圧等の外部エネルギーを用いる手法のみならず，プレストレッチ指と同様に曲げ

変形エネルギーと伸縮変形エネルギーを用いる手法が考えられる．このような観点から，フィンガーの表面形状を変化させる方式を提案し，微分幾何法に基づきその力学モデルを構築した(論文[8]，国際会議[7])．



(a)



(b)

図 12

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 11 件)

[1] Atsushi Yamada, Shigeyuki Naka, Norihisa Nitta, Shigehiro Morikawa, and Tohru Tani, A Loop-Shaped Flexible Mechanism for Robotic Needle Steering, IEEE Robotics and Automation Letters, 3:648-655, 10.1109/LRA.2017.2779273, 査読有, 2018.

[2] Takahiro Matsuno, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, Grasping state estimation of printable soft gripper using electro-conductive yarn, Robotics and Biomimetics, Vol.4, No.13, pp.1-11, 10.1186/s40638-017-0072-4, 査読有, 2017.

[3] Zhongkui Wang, Mingzhu Zhu, Sadao Kawamura and Shinichi Hirai, Comparison of different soft grippers for lunch box packaging, Robotics and Biomimetics, Vol.4, No.10, pp.1-9, 10.1186/s40638-017-0067-1, 査読有, 2017.

[4] Zhongkui Wang, Yuuki Torigoe, and Shinichi Hirai, A Prestressed Soft Gripper: Design, Modeling, Fabrication, and Tests for Food Handling, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.2, Issue 4, pp.1909-1916, 10.1109/LRA.2017.2714141, 査読有, 2017.

[5] 荒木 凌馬, 安部 隆, 野間 春生, 寒川 雅之, 近接・接触・滑りを検知できる MEMS 多軸触覚センサを用いた小型電動マニピュレータ制御, 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン 部門誌), Vol.137, No.7, pp.212-217, <https://doi.org/10.1541/>

ieejsmas.137.212, 査読有, 2017.

[6] Van Ho, Hideyasu Yamashita, Zhongkui Wang, Shinichi Hirai, and Koji Shibuya, Wrin'Tac: Tactile Sensing System with Wrinkle's Morphological Change, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.13, Issue 5, pp.2496-2506, 10.1109/TII.2017.2718660, 査読有, 2017.

[7] 梅木 尚, 野沢 瑛斗, 奥山 雅則, 野間 春生, 安部 隆, 寒川 雅之, 近接覚・触覚コンボセンサにおける周波数変調プローブ光を用いた近接計測手法の検討, 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌), Vol.137, No.5, pp.146-150, <https://doi.org/10.1541/ieejsmas.137.146>, 査読有, 2017.

[8] Van Anh Ho and Shinichi Hirai, Design and Analysis of a Soft-Fingered Hand with Contact Feedback, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.2, Issue 2, pp.491-498, 10.1109/LRA.2016.2645120, 査読有, 2016.

[9] Damith Suresh Chathuranga, Zhongkui Wang, Yohan Noh, Thrishantha Nanayakkara, and Shinichi Hirai, Magnetic and Mechanical Modelling of a Soft Three-Axis Force Sensor, IEEE Sensors Journal, Vol.16, Issue 13, pp.5298-5307, 10.1109/JSEN.2016.2550605, 査読有, 2016.

[10] Van Ho, Hisayoshi Honda, and Shinichi Hirai, Development of a Novel Slip Haptic Display Device Based on the Localized Displacement Phenomenon, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.1, Issue 1, pp.585-592, 10.1109/LRA.2016.2524068, 査読有, 2016.

[11] 田川 和義, 近江 奈帆子, 田中 弘美, 小森 優, 来見 良誠, 森川 茂麿, 多様な VR 術野構築のための漿膜・結合組織の半自動生成手法, 電子情報通信学会技術研究報告 115(25), 35-39, http://jglobal.jst.go.jp/detail/?JGLOBAL_ID=201502211477498796, 査読有, 2015.

〔学会発表〕(計 26 件)

[1] Takahiro Matsuno and Shinichi Hirai, Deformation Estimation of a Plate Spring Using Asymmetric and Symmetric Conductive Patterns, 2017 IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration, 2017.

[2] Mingzhu Zhu, Wang Zhongkui, Sadao Kawamura and Shinichi Hirai, Design and Fabrication of a Soft-bodied Gripper with Integrated Curvature Sensors, IEEE 24th Int. Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP2017), 2017.

[3] Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, A Prestressed Soft Gripper: Design, Modeling, Fabrication, and Tests for Food Handling, 2017 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2017),

2017.

[4] Takahiro Matsuno, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, Real-time Curvature Estimation of Printable Soft Gripper using Electro-conductive Yarn, 2017 IEEE Int. Conf. on Real-time Computing and Robotics (IEEE RCAR 2017), 2017.

[5] Zhongkui Wang, Mingzhu Zhu, Sadao Kawamura, and Shinichi Hirai, Fabrication and Performance Comparison of Different Soft Pneumatic Actuators for Lunch Box Packaging, 2017 IEEE Int. Conf. on Real-time Computing and Robotics (IEEE RCAR 2017), 2017.

[6] Zhongkui Wang, Kosuke Kadoma, and Shinichi Hirai, An Indentation-type Instrument for Measuring Soft Tissue Elasticity, Int. Conf. on Innovation in Medicine and Healthcare (KES-InMed-17), 2017.

[7] Van Ho and Shinichi Hirai, Design and Analysis of a Soft-Fingered Hand with Contact Feedback, 2017 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2017), 2017.

[8] Van Ho, Hideyasu Yamashita, Zhongkui Wang, Shinichi Hirai, and Koji Shibuya, Morphological Computation in Tactile Sensing: The Role of Wrinkle, 2017 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2017), 2017.

[9] Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, Soft Gripper Dynamics Using a Line-Segment Model with Optimization-Based Parameter Identification Method, 2017 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2017), 2017.

[10] Van Anh Ho, Hideyasu Yamashita, Koji Shibuya, Zhongkui Wang, Shinichi Hirai, Junya Nagase, and Kazuyoshi Tsutsumi, Function-Selectable Tactile Sensing System with Morphological Change, Proc. 2016 IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (SII 2016), 2016.

[11] Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, A 3D Printed Soft Gripper Integrated with Curvature Sensor for Studying Soft Grasping, Proc. 2016 IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (SII 2016), 2016.

[12] Zhongkui Wang, Damith Suresh Chathuranga, and Shinichi Hirai, 3D Printed Soft Gripper for Automatic Lunch Box Packing, 2016 IEEE Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2016), 2016.

[13] Van Anh Ho, Shinichi Hirai, and Koki Naraki, Fabric Interface with Proximity and Tactile Sensation for Human-Robot Interaction, 2016 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016), 2016.

[14] Hideyasu Yamashita, Van Anh Ho, Koji

Shibuya, and Shinichi Hirai, Morphological Computation in Tactile Sensing: A New Approach in Implementation, 2016 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016), 2016.

[15] Damith Suresh Chathuranga, Zhongkui Wang, Yohan Noh, Thrishantha Nanayakkara, and Shinichi Hirai, A Soft Three Axis Force Sensor Useful for Robot Grippers, 2016 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016), 2016.

[16] Van Ho and Shinichi Hirai, From Localized Shearing to Localized Slippage Perception, 2016 International Symposium on Experimental Robotics (ISER 2016), 2016.

[17] Van Ho, Hisayoshi Honda, and Shinichi Hirai, Development of a Novel Slip Haptic Display Device Based on the Localized Displacement Phenomenon, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2016.

[18] Damith Suresh Chathuranga Katudampe Vithanage, Zhongkui Wang, Yohan Noh, Thrishantha Nanayakkara, and Shinichi Hirai, Robust Real Time Material Classification Algorithm Using Soft Three Axis Tactile Sensor: Evaluation of the Algorithm, 2015 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2015), 2015.

[19] Takahiro Inoue, Sizuka Yamamoto, Ryuichi Miyata, and Shinichi Hirai, A Robotic Joint Design by Agonist and Antagonist Arrangement with Twisting Small-Diameter Round-Belts, 2015 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2015), 2015.

[20] Kazuyoshi Tagawa, Takahiro Yamada, Hiromi T. Tanaka, A Study on Corotated Deformation Model for Simulating Soft Tissue in Large Deformation, Innovation in Medicine and Healthcare 2015 (InMed 2015), 2015.

[21] Van Anh Ho and Shinichi Hirai, Measuring McKibben Actuator Shrinkage using Fiber Sensor, The 24th Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2015), 2015.

[22] Wang Zhongkui, Damith Suresh Chathuranga Katudampe Vithanage, and Shinichi Hirai, Study on the Human Perception of Incipient and Overall Slippages Using A 2D FE Fingertip Model, The 37th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2015), 2015.

[23] Damith Suresh Chathuranga Katudampe Vithanage, Wang Zhongkui, Yohan Noh, Thrishantha Nanayakkara, and Shinichi Hirai, Disposable Soft 3 Axis Force Sensor

for Biomedical Applications, The 37th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2015), 2015.

[24] Helge Arne Wurdemann, Sina Sareh, Ali Shafti, Yohan Noh, Angela Faragasso, Damith Suresh Chathuranga Katudampe Vithanage, Hongbin Liu, Shinichi Hirai, and Kaspar Althoefer, Embedded Electro-Conductive Yarn for Shape Sensing of Soft Robotic Manipulators, The 37th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2015), 2015.

[25] Zhongkui Wang, Damith Suresh Chathuranga, and Shinichi Hirai, Study on Fingertip Slippage using FE Model for Developing Human-Like Tactile Sensor, 2015 Int. Conf. on Real-time Computing and Robotics (RCAR 2015), 2015.

[26] Damith Suresh Chathuranga, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai, An Anthropomorphic Tactile Sensor System with its Applications in Dexterous Manipulations, 5th Annual IEEE Int. Conf. on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems, 2015.

〔図書〕(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ritsumei.ac.jp/se/~hirai/project/GASR2015-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

野間 春生 (Noma, Haruo)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号: 00374108

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

王 忠奎 (Wang, Zhongkui)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号: 50609873

森川 茂廣 (Morikawa, Shigehiro)

滋賀医科大学・神経難病研究センター・客員教授

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

三谷 篤史 (Mitani, Atsushi)

札幌市立大学・デザイン学部・准教授

研究者番号: 70388148