

室山真徳¹⁾、巻幡光俊¹⁾、田中秀治¹⁾、小島貴裕¹⁾、中野芳宏¹⁾、Travis Bartley¹⁾、
 中山貴裕²⁾、山口宇唯²⁾、山田整²⁾、出尾隆志²⁾、野々村裕³⁾、畑良幸³⁾、船橋博文³⁾、江刺正喜¹⁾

¹⁾東北大学、²⁾トヨタ自動車(株)、³⁾(株)豊田中央研究所

1. はじめに

MEMS 技術によるセンサと、LSI によるセンサ読出し、信号処理および信号伝送回路との組み合わせによって、数 mm²サイズの小型のセンサ端末(センサノード)を、半導体製造技術により一括に大量に生産できる。この特徴を利用すれば、様々なモノに潤沢に超小型センサノードを盛り込むことができ、新しい価値を持ったシステムを生み出せる可能性がある。我々は MEMS-LSI 融合の小型センサノードを、次世代の人間支援用ロボットの触覚実現に応用するシステムを開発している。本稿では、我々の提案するロボット体表の分散イベントドリブン型センサネットワークシステムの概要を説明し、その実現の中核となる、MEMS-LSI 融合型デバイスを紹介する。ネットワークの上位システムも開発しており、それらについても併せて紹介し、最後に今後の展望をまとめる。

2. 生体を模倣したイベントドリブン型触覚センサネットワークシステム

介護などを目的とした社会性ロボットに、ヒトと同じような触覚を実現することで、操作、認識、危険回避などのヒトと同様の動作を行うことができるよう

になり、人間とロボットの共生が進む。これまでに様々な触覚センサが提案されているが^{1),2)}、我々は、ヒトの触覚のような反応を模擬し、さらに、ロボット体表をネットワーク化し、ロボット体表全高密度分布の触覚センサを実現する。ヒトの触覚受容器は 1000 万個以上あると言われており、各触覚受容器は温度や力などの刺激に対して閾値を持ち、閾値以上の刺激に対してのみ反応する。いわゆるイベントドリブン方式の発火反応である。その発火はパルス状電位のデジタル信号の送信であり、触覚受容器から神経を通じて脳に発火信号が送られることで刺激を認知する。受容器と神経は基本的に 1 対 1 で対応しており、超並列接続で信号を送っている。この生体システムは、ノイズに強い、低消費エネルギー、即時対応など様々な利点を持っている。ヒトの触覚情報は五感のうち、視覚に次ぐ通信量であり、また、身体のスべてに存在するため、システムとして効率的なセンシングが行われている。我々は、このイベントドリブンセンサシステムを MEMS-LSI 融合技術で実現しようとしている。ただし、神経の超並列接続は模倣せず、LSI の能力を十分に活用し、共通バスネットワーク通信により、実装を容易にする。

図に我々が提案するバスネットワーク型触覚セ

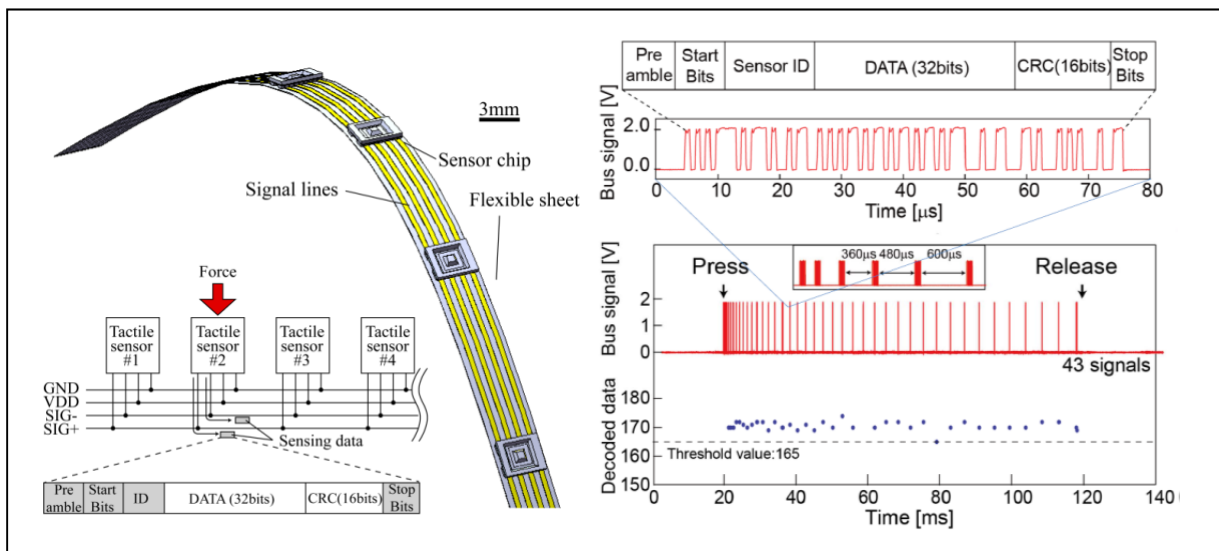


図 1 生体模倣型イベントドリブン触覚センサネットワーク

ンサを示す。センサノードでは、力を検知する必要があるため、センサ部が上面、下面に電源供給や信号伝送のための電極が取り付けられており、表面実装型のデバイス構造となっている。あらかじめ規定された閾値以上の強い力が押されたセンサノードのみ、それらのデータをバスネットワーク上に送る。また、継続して強い力がかかっている場合は、発火の間隔が徐々に長くなるヒトの順応も模擬している。図の測定したデータを使って説明する。ヒトのパルス発火にあたる部分はパケット化されており、パケットは非同期通信のための符号化、センサノードID番号、センサデータなどから構成されている。強い力が印加されている場合のみ発火しており、徐々に発火間隔が長くなっているのが分かる。

バスは上位のノードである、リレーノードに繋がれている。リレーノードは最大255個のセンサノードまで対応できる。リレーノードはUSB接続により、最上位ノードのホストに接続される。最大127個のリレーノードが接続できるため、最大30000個以上のセンサノードのシステムを構築可能である。

このシステムは起動時パラメータ設定モードと動作モードの2つのモードが存在し、これにより1種類のセンサノードを用意すればセンサノードの特性を変えることができる。これにより、敏感な手や広いダイナミックレンジが必要な足裏など、設置場所による特性が必要に応じて構成可能になる。

3. MEMS-LSI 融合型センサノード

センサノードは、力のセンシングと、そのセンサ

信号読取り回路、信号処理回路、伝送処理回路から構成される。センサ部以外はLSIにより実現している。本章では、LSIについてまず説明し、2種類の集積化技術について紹介する。

3.1. 機能詳細

センサノードは、東北大学マイクロシステム融合研究開発拠点が提供する、乗合ウェアハシステムを利用して製造している。乗合メンバー間で秘密保持契約(NDA)を結ぶことで、8インチのフルウェハでTSMC社0.18CMOSのLSIが入手でき、MEMSポストプロセスが行いやすいという利点がある。一方で、製造会社が提供するシャトルサービスでウェアハ製造する場合は、自身の回路部以外の他者の回路は回路情報保護のためレーザ消去され、レーザ照射後の段差のためポストプロセスが困難になる。

回路部について説明する。シュミットトリガ回路による弛張発振回路による静電容量周波数変換回路と周波数カウンタにより、容量値をデジタル化する。差動方式の容量読出し回路であり、センサ容量を固定の参照容量から引くことでプロセスばらつきなどを補正でき、精度の高いセンシングが可能となっている。デジタル化されたセンシングデータは、センサIDなどと合わせて符号化される。センサノードは自身のクロックで動作する非同期であり、非同期通信に適した4b5b符号化とNRZI(Non-Return to Zero, Inverted)符号化を用いている。これにより、リレーノードでのデータ復元ができる。また、起動時パラメータ設定モードでは、リレーノードからの設

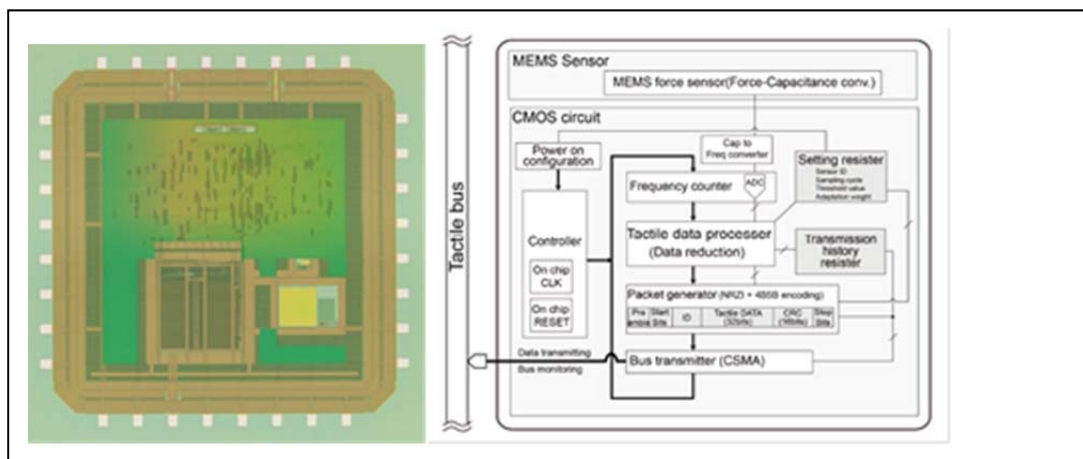


図2 センサノード用LSI

定データを非同期で受信するため、オーバーサンプリングによるクロック・データ復元(Clock and Data Recovery:CDR)を行う。

そのほか、オンチップクロック、オンチップリセット、ID 設定のための One-Time Programmable(OTP)メモリが組み込まれている。

3.2. MEMS diaphragm-on-CMOS 技術

下部に LSI、上部に Si による MEMS センサを集積化した MEMS diaphragm-on-CMOS 技術を Through Si Groove(TSG)技術を用いて開発した。図に示す。左の断面構造にあるように、下部の LSI と上部の Si との間に静電容量の電極を形成し、Si ダイアフラムの突起を押すことで、電極の距離が変わり静電容量が変化する。接合は Benzocyclobutene (BCB)を用いた。電気的接続は TSG を利用している。これは、台形型のダイシングブレードを使ってハーフダイシングにより V 型溝を作る技術である。完成したデバイスは図の右に示しており、測定結果を図に示す。デバイスサイズは 2.54mm×2.54mm、高さが 0.27mm である。容量のギャップは 10 μm であり、初期容量は 7pF であった。1N 印加時は 10fF の容量変化であった。

3.3. Flipped CMOS diaphragm-on LTCC via

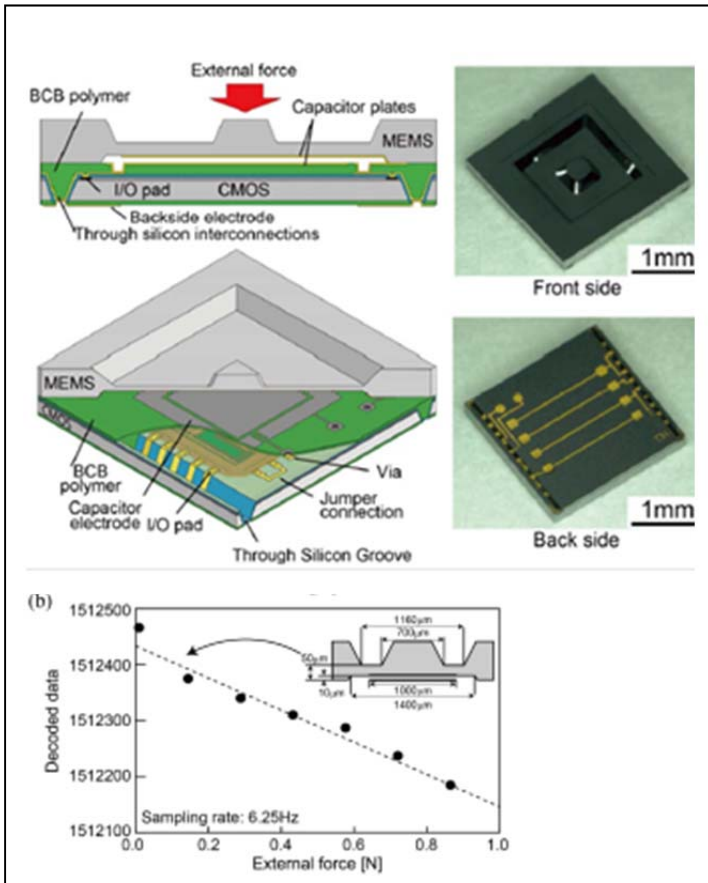


図 3 MEMS diaphragm on CMOS 技術によるセンサノード

wafer 技術

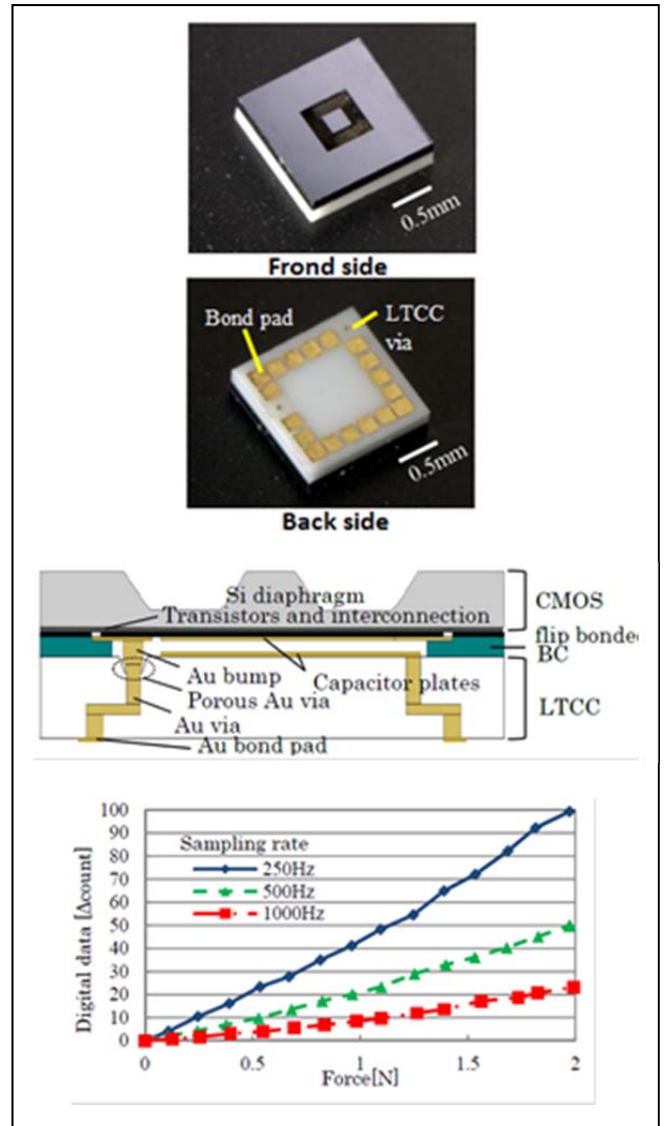


図 4 Flipped CMOS diaphragm-on-LTCC via wafer 技術によるセンサノード

もうひとつの集積化技術として、Flipped CMOS diaphragm-on-LTCC via wafer 技術を開発した。この技術は 3.2 節の技術と異なり、ひっくり返した LSI の Si 基板の裏面をエッチングによりセンシングダイアフラムを形成し、Low Temperature Cofired Ceramics(LTCC)の貫通配線のあるウェハと接合することで、表面実装型のデバイスを Through Silicon Via (TSV)なしで実現するものである。プロセス自体はより簡単になるという利点がある。ボンディングには BCB を用いている。電極の接合には LSI 型に形成した Au バンプと LTCC 側の Au ビアで行う。Au ビアはビア内にある無機物フィラーを HF によるエッチングで溶出させることで、多孔質化し、接合圧着時の Au バンプと Au ビアの変形を吸収できる高信頼接続を実現している。図に実験結果を示す。起

動時パラメータ設定も上手く活用し、1kHzと250Hzの発火において、それぞれ0.3Nと0.1Nの力読取り感度を実現できた。

4. システムレベルネットワークシステム

センサノードが末端のノードであり、センサノードの制御およびデータ取得のための上位ノードである、リレーノードとホストを開発した。

4.1. リレーノードとホスト

リレーノードではホストからの要求に応じて、センサノードに発火の閾値、発火頻度や順応の特性を設定する。また、センサノードから非同期で送られてくる発火情報の解析およびホストへの送信を行う。センサノードは50MHzの非同期通信で信号を送るため、オーバーサンプリング法によるデータ復元のためには、10倍以上のサンプリングが必要となる。そのため、我々は”多層エッジ検出”法による高速オーバーサンプリング法を実装した。これは、FPGA(Cyclone3, Altera)内にあるPhase Locked Loop(PLL)を使って、200MHzのベースクロックから、90°ずつずらした4(0°、90°、180°、270°)相クロックを用いることで、実効的に800MHzでデータを取得できる方法である。そのほかセンサノードのデータを解析しCRCコードを利用して信号衝突

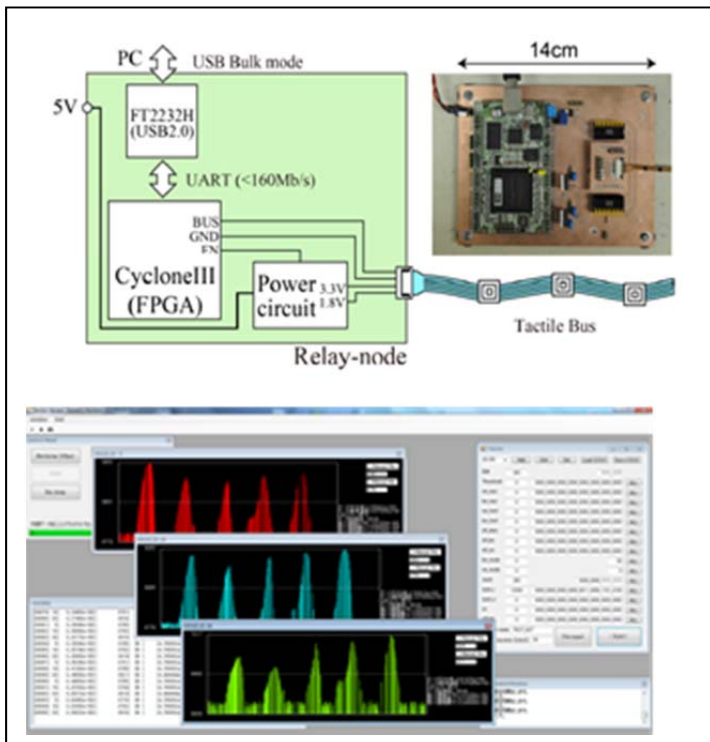


図5 リレーノードとホスト

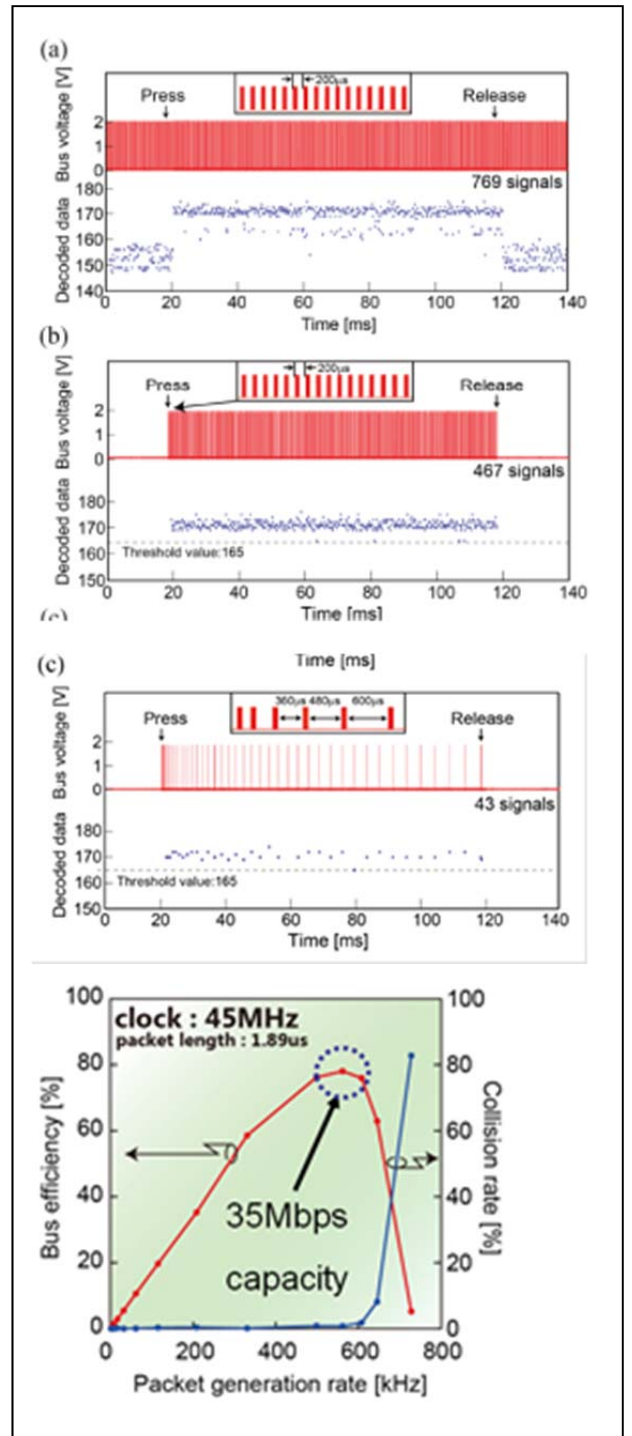


図6 システムレベル評価結果

などによる壊れたデータを除外するなどの作業も行う。

ホストはPCベースで実装している。PCのGUI上で各種パラメータ設定を用意に行えるようにしており、また、リレーノードから随時送られてくる各センサノードからのデータをリアルタイムで表示させたり、解析したりする機能を実装している。図に示す。

4.2. システムレベルの評価

システム全体でイベントドリブン型触覚センサネット

ワークの評価を行った。図の(a)は力の閾値を最小にして、5.5kHzの発火頻度で常にセンサノードが、力のデータを送信している。これに対し、起動時パラメータ設定により、力の閾値を設定した結果が(b)である。閾値以下のデータが送信されていないのが分かる。これにより 59%のデータが削減できている。次に、閾値に加え順応による発火を確認したのが(c)である。徐々に発火間隔が開いているのが分かる。順応により、さらに 37.4%のデータが削減できるため、閾値と順応で合計 96.7%のデータを削減できることを確認した。

最後に複数センサノードを動作させたときのネットワーク特性について評価した。センサノードのクロックは50MHzである。発火頻度を表すパラメータは Packet generation rate であり、この発火頻度で 3つの各センサノードを常に発火させた。そのときのパケットの衝突率とバスの利用率が示されている。これによりバスの利用率は最大で 80%であり、そのときの発火頻度は 600kHz 程度であることが分かる。この発火頻度以上にすると衝突確率が大幅に上がり、バスの利用効率が極端に下がることが分かる。バスの状況をモニタリングしながら、適切に発火頻度を制御することで多数のセンサノードがある場合でも効率的なデータ伝送を行うことができる。

5. おわりに

本稿では、MEMS-LSI 融合技術によるセンサノードを用いた次世代ロボット用触覚センサネットワークシステムを紹介した。ロボット体表に分散型かつイベントドリブンの小形センサノードを配置することで、ヒトの触覚を模した機能が実現できた。さらには、LSI の利点を活かし、バス型共通ネットワークによる省配線化も実現した。2種類の集積化方法によるセンサノードを紹介したが、ネットワークプロトコルなどは共通のため、これら以外の集積化によるセンサノードでも問題なくシステムに実装できる。異なる構造のセンサノードも同一システムに実装可能である。

リレーノードやホストも開発し、システム全体としての特性も評価し、システムに実装されている起動時パラメータ設定を用いて適切にパラメータを設定することで、システムに破綻をきたすことなく、高速

に触覚情報を取得できることを示した。

今後は、大量にセンサノードを作製し、かつ、より上位のアルゴリズムレベルで通信量を削減しつつ高精度な触覚情報を取得できる方法を開発し、利用しやすい高性能な触覚センサネットワークを開発して、ロボットへ実装していきたい。

MEMS-LSI 集積化小形センサノードによる Internet of Things(IoT)への応用の可能性もあると考えている。日本が得意とする MEMS と LSI 技術の融合により、新市場を生み出す面白いアプリケーションを生み出していきたい。

参考文献

- [1] B. D. Argall, A. G. Billard, "A Survey of Tactile Human-Robot Interactions," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 58, No. 10, pp.1159-1176, 2010.
- [2] R. S. Dahiya, G. Metta, M. Valle, et al., "Tactile Sensing – From Humans to Humanoids," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 26, No. 1, pp.1- 20, 2010.
- [3] M. Muroyama, et al, "Development of an LSI for Tactile Sensor Systems on the Whole-Body of Robots," *Trans. IEEJ*, Vol. 131, No. 8, pp.302-309, 2011.
- [4] M. Makihata, S. Tanaka, M. Muroyama, et al., "Integration and Packaging Technology of MEMS-on-CMOS Capacitive Tactile Sensor for Robot Application Using thick BCB Isolation Layer and Backside-Grooved Electrical Connection," *J. Sensors and Actuators A*, Vol. 188, pp.103-110, 2012.
- [5] M. Makihata, M. Muroyama, et al., "A 1.7mm³ MEMS-on-CMOS Tactile Sensor Using Human-Inspired Autonomous Common Bus Communication," *Proc. Transducers 2013*, pp.2729-2732, 2013.
- [6] 小島貴裕, 巻幡光俊, 室山真徳, 江刺正喜, 中山貴裕, 山口宇唯, 山田整, 野々村裕, 船橋博文, 畑良幸, 田中秀治, "LSI をダイアフラムとする集積化触覚センサの作製," 第 5 回「集積化 MEMS シンポジウム」, 7PM1-E-2, 2013.
- [7] Y. Nakano, M. Muroyama, M. Makihata, S. Tanaka, S. Matsuzaki, H. Yamada, T. Nakayama, U. Yamaguchi, Y. Nonomura, M. Fujiyoshi, M. Esashi, "A Simulated Network System Prototype for Development of a Networked Tactile Sensor System with Integrated MEMS-LSI Tactile Sensors (in Japanese)," in *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, Vol. 132, No. 9, pp.288-295, Sep. 2012.

[8]巻幡光俊, 室山真徳, 中野芳宏, 田中秀治, 中山貴裕, 山口宇唯, 山田整, 野々村裕, 船橋博文, 畑良幸, 江刺正喜, “バス型触覚センサネットワーク用高速シリアルインタフェースの開発”, センサシンポジウム 2013, 5PM3-PSS-45, 2013.

室山 真徳 (むろやま まさのり)

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 助教



巻幡 光俊 (まきはた みつとし)

東北大学 マイクロシステム融合研究開発センター (μSIC) 研究員

2013年9月より、カリフォルニア大学バークレー校 ポスドク研究員



田中 秀治 (たなか しゅうじ)

東北大学 工学研究科 教授

小島 貴裕 (こじま たかひろ)

東北大学 大学院

中野 芳宏 (なかの よしひろ)

東北大学 大学院

2013年4月より、レーザーテック(株) 技術本部技術一部

Travis Bartley

東北大学 マイクロシステム融合研究開発センター (μSIC) 研究員

中山 貴裕 (なかやま たかひろ)

トヨタ自動車(株) パートナーロボット部 製品設計室 要素設計グループ主任

山口 宇唯 (やまぐち うえい)

トヨタ自動車(株) パートナーロボット部 先行開発室 第3先行開発グループ主任

山田 整 (やまだ ひとし)

トヨタ自動車(株) パートナーロボット部 先行開発室 第4先行開発グループ主幹

野々村 裕 (ののむら ゆたか)

(株)豊田中央研究所 パワーエレクトロニクス研究部 主席研究員

畑 良幸 (はた よしゆき)

(株)豊田中央研究所 パワーエレクトロニクス研究部

船橋 博文 (ふなばし ひろふみ)

(株)豊田中央研究所 パワーエレクトロニクス研究部

江刺 正喜 (えさし まさよし)

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 教授