

1

クリーン環境と清浄化技術の専門誌

クリーンテクノロジー

Clean Technology

2020

Vol.30 No.1

特集①：クリーンルームの最新動向と将来展望～その開発竣工等～
特集②：粒子の捕集・計測・制御①

インテクノス 検索
www.intechno.co.jp

「異物」の監視 解析・改善

清掃の妥当性を数値化

5 μ m以上の「表面付着粒子」の
径と数を約5秒で測定



PartSens®
表面清浄度検査「パーツセンス」

クリーン環境の新しい監視技術

15 μ m以上の「落下・堆積粒子」を
リアルタイム監視



APMON
落下粒子モニタリング「アップモン」

INTECHNO
株式会社 インテクノス・ジャパン

Clean Technology

1

各誌ページをご覧ください

日本工業出版

検索



■特集：クリーンルームの最新動向と将来展望～その開発竣工等～

- 医薬品製造施設向け最新室圧制御技術 ／ダイダン(株) 井上雅博・篠原拓真・1
- 電解水エアワッシャーシステム ／新菱冷熱工業(株) 佐原 亮・三上秀人・服部美紀・5

■特集：粒子の捕集・計測・制御①

- 試料採取フィルターによるPM_{2.5}の無機元素の操作ブランク値の違い ／環境省環境調査研究所 本多将俊・10
- 時間応答性の高い可搬型センサーを用いた局所的なPM_{2.5}高濃度汚染場の調査 ／大阪市立環境科学研究センター 板野泰之
／(公財)ひょうご環境創造協会 中坪良平
／名古屋大学 松見 豊・12
- 室内SPMの粒度分布に関する考察 ／芝浦工業大学 西村直也・16
- 高保塵量のフッ素樹脂HEPAフィルタ開発 ／ダイキン工業(株) 桐谷絵美・20
- 局所作業空間の可視化と浮遊微粒子捕集の手法 ／(株)セントラル科学貿易 鈴木清之・24

■解説

- 環境センサによるクリーン空調制御システムの開発 ／清水建設(株) 近藤恒佑・長谷部弥・小松原正幸・染谷孟行・28
- 過酢酸による空間除染の最新技術 ／SDバイオシステム(株) 榎 昭雄・磯貝未来・34
- VOC排出規制の現状と展望 ／高砂熱学工業(株) 河岡将行・伊藤 衛・39
- 微生物バイオプロセスを用いたレアメタル資源の確保 ／法政大学 山本兼由・渡邊宏樹・43
- ガンマ線滅菌・殺菌 ／(株)コーガアイソトープ 河合政利・福山貞伸・50
- セラミック膜による小スケールろ過試験機 ／岩井ファルマテック(株) 佐藤大樹・55
- MEMSとLSI技術によるエッジヘビーセンシング ／東北大学 室山真徳・58
- アルコール溶液をキャリアとする高効率蓄電システム ／九州大学 福嶋 貴・北野 翔・山内美穂・64
- 空気は食品の副原料 ／中設エンジ(株) 野々村和英・70

解説

MEMSとLSI技術による エッジヘビーセンシング

機械学習との連携を前提としたエッジにおける 高付加価値データ生成とMEMS-LSI集積化触覚センサの実装

東北大学 室山 真徳

● はじめに

現在、IoT (Internet of Things : モノのインターネット) 化は着実に進んでおり、“21世紀のデータ駆動型社会の経済活動での最も重要な糧は、良質で最新の豊富なリアルデータになってきている”⁽¹⁾とも言われている。その中で、エッジに関する技術が近年脚光を浴びている。エッジは、クラウドと対比した“ネットワーク上の末端の場所”として扱われる。近年のエッジの例としては、産業用ロボット、食品などの工場、物流倉庫、建設現場、オフィス、車、動物やひと自身などがある。実際に外界 (フィジカル) とサイバースペースとの間でやりとりする“物理的な末端の場所”をエッジとも定義できる。

一般にクラウドには計算資源やデータストレージなどが豊富に存在するが、クラウド利用が前提のエッジにおいて課題となるのがネットワークであり、大量データの高速度通信、リアルタイム性や安定したネットワーク接続の確保が重要となる。

これらの課題をエッジ側で解決するコンセプトがエッジコンピューティングである。特に、カメラ画像などの大容量データをエッジ側でリアルタイムに処理してエッジ側での自律的な制御や判断に利用するエッジヘビーコンピューティングが脚光を浴びている⁽²⁾。しかし、問題の解決には画像情報だけでは不十分な場合も多い。

これに対し、筆者が提案しているのが、エッジヘビーセンシング (Edge

Heavy Sensing : EHS) である。エッジ側で起きる出来事を正確に把握するための高品質なデータを取得する概念を言う。エッジで取得したデータを基に、より高度な処理を施して情報、知識および知恵を獲得する。一般的なIoTが利用するセンシングデータは質量ともに疎なものが主であるが、EHSでは密なものを扱う。EHSの目指すところは、エッジの状況を明らかにし、次の行動や判断に利用することにある。

EHSを用いてこれまで取得できなかった質の高いセンシングデータを得ることができる。たとえば、多種原理センシング、高感度、高ダイナミックレンジ、高いリアルタイム性、高空間分解能、高時間分解能などの特徴のうち、いずれかもしくはすべてを有するセンシングデータを得ることができる。これにより、機械学習に利用できる量と質が伴った高品質データの生成が可能となる。エッジコンピューティングにおいては、これらの入力が次の動作の判断のための重要な材料となる。

本稿では、EHSをMEMSとLSIの技術を用いて実現する方法を提示する。まず、EHSの概要について説明し、その具体的実践としての触覚センサシステムについて紹介する。最後に本稿をまとめる。

● エッジヘビーセンシング (EHS) の概念

これまでに筆者が実際に現場を確認したり、ヒアリングによって明らかに

なったりしたエッジにおける未解決の課題に以下のようなものがある。これらの課題は、人手不足に起因しているものが多く、今後重要度が上がると予想される。解決には、画像に加え、接触や動きなどのエッジにおける状態や変化を細やかに取得する必要がある。

- 介護ロボットによる要介護者の安全性の確保、きめ細やかなサービスの実現
- 食品工場に設置したロボットによるお弁当詰め込み、果物・肉などの自動選別
- 漁港における魚の種類や鮮度を考慮した優しく素早い自動選別
- 物流現場における多種多様な商品の自動ピッキング
- 建設現場における工機の安全確保・自動化・遠隔操作の実現
- 遠隔ロボット手術、遠隔ロボット作業
- 熟練作業者の動作の見える化
- 衣服裁縫の完全自動化
- 機械・装置の故障予測・検知
- 小型ロケットの打ち上げ時の状態把握
- 運転者の状態の把握、自動運転化
- スポーツ時の動作解析・改善指導
- 健康状態把握、リハビリの補助
- AR/VR/MRの臨場感の向上

最下位層である (物理レイアに一番近い) センシングデータの質は、その上位層である情報、知識、知恵に与える影響が大きく、アプリケーションの品質に多大な影響を及ぼす。前述の課

題の解決の鍵は、高品質データの取得、その絞り込みと抽象化である。センサとしては現在カメラが主流であり機械学習と連携した技術が活発に研究開発されているが、さらに人間の五感のように複合センサシステムを取り扱うことで次のような効果が期待できる。

- ① 今まで把握できていなかったエッジの現象を理解して解析、判断やフィードバックに利用
- ② 現象理解のための情報密度が低い画像データと比較して効率の良いデータ取得が可能

図1を基にEHSの概念図を説明する。DIKW (Data/Information/Knowledge/Wisdom) モデルに沿って説明する。

- ① まず、エッジに分布配置した多種多様なセンサ群から多様なセンシングデータを取得する。データには力、温度、加速度、角速度、振動、硬さ、重さ、距離、凹凸、画像などがある。
- ② そのデータ群から情報を生成する。生成する情報は、形状、接触具合(力分布、すべりなど)、質感、材料、動き、振動の経時変化

などである。

- ③ 次に知識化の段階として、対象物の識別、きちんと持っている・落としそうであるなどの抱きかかえ、把持具合の把握、異常(故障)の発見、異物の発見などを行う。
- ④ 最終的な知恵として、ものを壊さず落とさず素早く把持・移動させる、人を快適に抱きかかえる、故障する前に機器を停止・修理する、対象物の価値を落とさないように汚れを取り除く、対象物を傷つけずに選別する、などを実現する。

上記の④を実現するための入力としてEHSでは①～③までを扱う。なお、それぞれの階層において機械学習と連携することで効果が上がる。機械学習と連携する際には、必ずしもエッジ側で行う必要はなく、5Gなどを通じてクラウド上にデータや情報などを送り処理する方法もある。そのため、EHSはエッジコンピューティングに限定したコンセプトではなく広く捉えることができる。

機械学習を用いる場合、学習フェーズにおいては、大量のデータの中から

有益な情報を生成することを目的とするため、エッジ側で生成するデータは多くてもよい。適切なアルゴリズムが実装されているのであれば、むしろ、データはできる限り多い方が、質の高い情報が得られ、過学習などにもなりにくいなどの利点がある。一方で、推論フェーズにおいては、少ない計算資源で目的を達成するためにできるだけ小さいサイズのセンシングデータを取得することが求められる。EHSは上記の学習および推論フェーズのどちらにも有効に活用できる可能性がある。

EHSのプラットフォームが広く利用されるためには、センサのハードウェアに加え、ソフトウェアインタフェースの統一と公開、制御システムやシミュレータの提供が重要となる。

MEMSとLSIによるエッジヘビーセンシング1.0 (EHS1.0) の提案

末端におけるセンシング、デジタル化ならびに通信を行うために、具体的な実現方法としてMEMSとLSIを利用したEHSを提案している。ここで提案する方法をエッジヘビーセンシング1.0 (EHS1.0) と呼ぶことにする。

EHS1.0において鍵となるのが、多種類のセンサへの対応、高精度センシング、センサの高密度実装、省配線、効率的かつ高速な応答などである。これらの課題を解決するため、MEMSとLSIを以下のように活用する。

- 多種類のセンサへの対応 (LSIで実現) : センサの原理に合わせて読み取り回路を選択でき、また、その特性を変更できるようにする。
- 高精度センシングとデジタル化 (MEMSとLSIで実現) : MEMSによるセンサの実現ならびにセンサ直近で信号読み取りを行うことでノイズ混入や寄生容量などを少なくできる。読み取った信号はチップ内でデジタル化する。外部とのや



図1 EHSによるエッジの情報取得とその活用例

りとりはデジタル信号で行う。

- 高密度実装 (MEMSで実現) : MEMSセンサとLSIを用いて一体集積化して小型化。近接配置してもよい。
- 省配線 (LSIで実現) : クロックとリセット信号は内蔵し、データにクロックの情報を埋め込むCDR (Clock and Data Recovery) 技術を利用しつつ、シリアルバス通信による少配線を実現。
- 高効率かつ高速な応答 (LSIで実現) : デジタルの差動通信 (RS485) および効率的な独自の非同期通信プロトコルを利用。事前に定義した閾値を超えたセンシングデータが生成されたときのみバス上にデータを送るイベントドリブンの応答を実装。

LSIについては文献(3)(4)を、集積化については文献(5)(6)を、システムおよびネットワークについては文献(7)(8)を参照されたい。概要は文献(9)(10)にある。

具体的な例として、次世代ロボットを取り上げる。次世代型ロボットの研究開発が活発に行われており、人間支援や人間協調作業を行うため人と同等以上の皮膚感覚を次世代型ロボットに実装することが求められている。本稿では開発中の触覚センサネットワークシステムについて言及し、その後マルチセンサシステムへの拡張について説明する。

(1) MEMS-LSI集積化触覚

センサネットワークシステム

提案する触覚センサネットワークシステムの概念を図2に示す。ネットワーク階層は3層あり、末端の方からセンサノード、リレーノード、ホストとなる。MEMSとLSIの集積化デバイスはセンサノードとなり、エッジの最末端に配置される。

センサノードを統括するリレーノードは主にFPGAとUSB通信チップから

構成され、ホストからの指示をセンサノードに伝えるとともに、センサノードからのデータを集約しホストに送る。本システムでは、一つのホストに対して、最大で30,000個以上のセンサノードを設置する能力がある。一つのバス上には最大256個のセンサノードを設置できる。

センサノードはMEMS-LSI集積化触覚センサデバイスによって実現した(図3)。LSIを加工してセンシングのダイアフラムとし、LTCC貫通ビアウエハと接合して、高度なウエハレベル集積化・パッケージングを実現している。サイズは2.7 mm²であり、このチップ1個で3軸の力センシング (X,Y,Z)

と温度センシングが可能である。高感度、低多軸感度、低ヒステリシスのセンサ特性を有している。また、シリアルバスでのデジタル通信とイベントドリブンの高速応答をシステムとして実現している。集積化触覚センサデバイスは8ビットIDを用いているため、一つのバス上に最大256個設置可能である。実際はシリアルバス上で多数個設置する場合、電源の安定性ならびに信号品質の確保が必要であり、実装の方法によって最大の設置個数が制限される。現在60個までの集積化触覚センサデバイスを一つのバス上に実装して実証している。

次に集積化触覚センサネットワーク

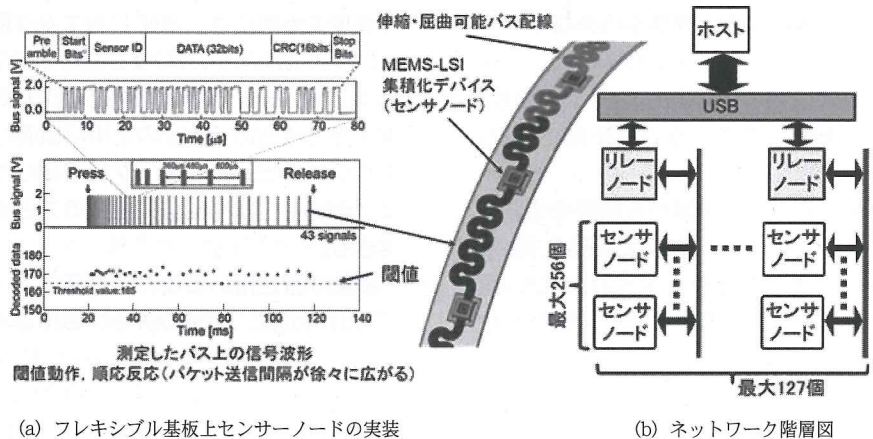
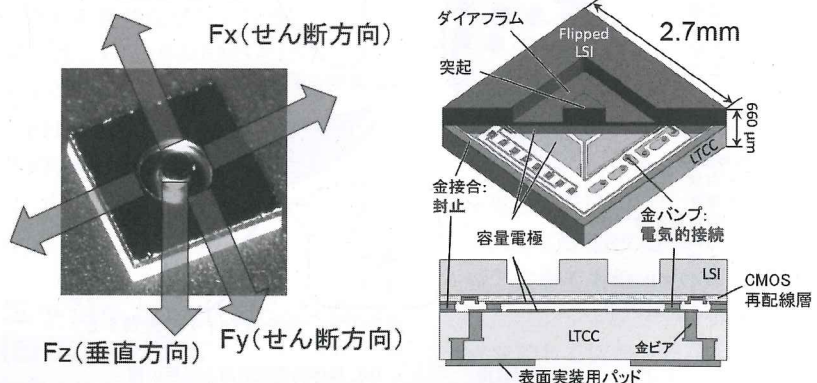


図2 触覚センサ概要



システムをロボットアーム／ハンドに実装した例を示す(図4)。ロボットハンドの時間当たりの移動量を一定にし、そのときのセンサ出力値の変化のデータを取得した。その変化量から把持対象物の硬さを判別できる。そのほか、内蔵の温度センサによる物体の熱さ判別もシステムも実装し、実証した。

(2) マルチセンサシステム

集積化触覚センサデバイスに組み込んでいるLSIをより汎化したセンサ・プラットフォームLSIを開発しており、本LSIを用いてEHS1.0を実現する。図5に製造したセンサ・プラットフォームLSIを示す。

センサ・プラットフォームLSIによ

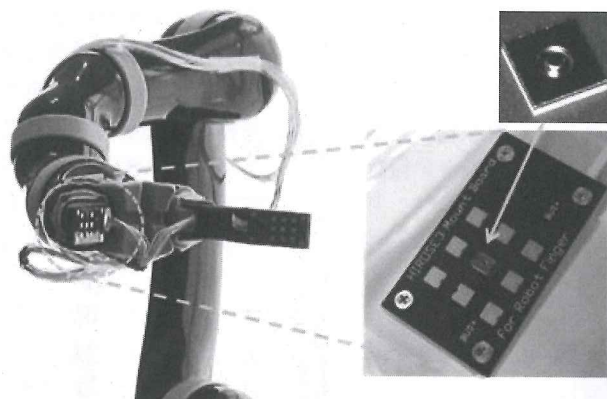
り前述した集積化触覚センサデバイスに加えて、市販の触覚センサ、加速度センサ、距離センサ、温度センサ、ガスセンサ等を統一的な方法でシステムに統合できる。本LSIは二つのインタフェースを提供する。一つは①センシングインタフェースであり、もう一つは②通信のインタフェースである。

① センシングインタフェース

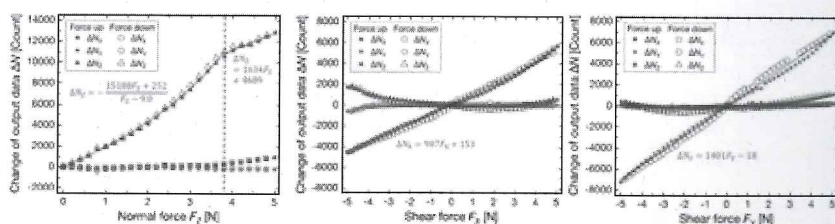
LSI自体には温度センサが内蔵されており、分解能は約0.45℃である。これは主にセンサ出力値補正用に用いるが、集積化チップ自体を用いた温度センシングにも適用可能である。センシングインタフェースについては、多種原理ならびに多数のセンサの同時接続を提供する。外部センサ接続のため、容量出力型センサとアナログ電圧出力型センサ読み取り回路を準備している。それぞれ最大8チャンネル接続が可能である。アナログ電圧によるセンシングについてはプリアンプ(1~100倍)とA/D変換器(12ビットの逐次比較型)を利用できる。

LSI内部のコンフィグレーション機能により、センシングの種類、利用チャンネルの選択、シングル/差動読み取りの選択、平均化処理、バス通信における速度調整ならびに信号衝突回避のための待ち時間の設定などを行うことができる。また、不揮発メモリであるOTP(One-Time Programmable)メモリを内蔵しているため、コンフィグレーションは都度行う必要がなく、ある固定の設定を書き込むことが可能である。

ほかに特徴的な点として、本LSIにはMEMS技術によるセンサを集積化しやすいように、LSI内部の信号による外乱を防ぐシールド構造、MEMS接合のための平坦な領域、ならびにLSI背面からの電極取り出しのためのTSV(Through Si Via: シリコン貫通配線)アクセスパッドを用意している。

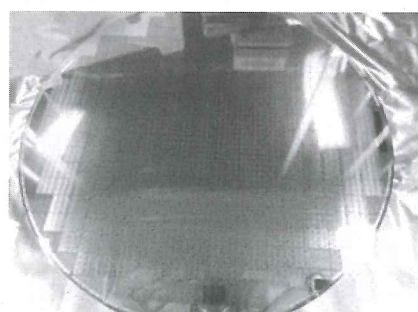


(a) 集積化触覚センサの設置例

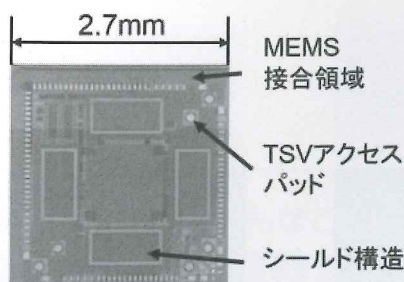


(b) 3軸センシングの測定結果

図4 MEMS-LSI集積化触覚センサ搭載型ロボットアームの動作実証



(a) センサ・プラットフォームLSIの8インチウェハ



(b) センサ・プラットフォームLSIチップ

図5 センサ・プラットフォームLSI

② 通信インタフェース

通信部分は省配線と、効率的なデータ転送を実現する。シリアルバス通信を実現するために、RS485に準拠した差動型の通信を実装している。また、効率のよい独自の非同期通信プロトコルを用いている。クロックとリセットはLSI内に内蔵しており、加えて開発したCDRアルゴリズムによる短いロック期間での通信が可能な高効率かつ高信頼な非同期通信を実現している。

効率的なデータ転送のために、人の神経を模したイベントドリブン応答と順応を実装した。これにより多数個のLSIを同一バスに接続していても、ネ

ットワークの輻輳を避けつつ、必要なデータのみをオンデマンドで高速に収集することができる。

マルチセンサのシステムを実証するために、センサノードに一つのセンサ・プラットフォームLSIと複数のセンサを実装した(図6)。用いたセンサは、1軸および3軸の静電容量型力センサ、1軸抵抗式力センサ、アナログ電圧出力型3軸加速度センサ、アナログ電圧出力型距離センサであり、いずれも容易に入手可能である。なお、距離センサには連動した振動モータ出力制御を行った。距離センサと対象物の距離が近くなるにつれ振動モータの振動数

を増加させた。

(3) 残る課題

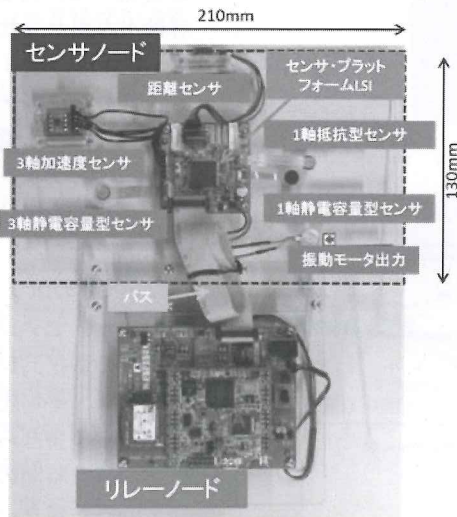
上記の集積化触覚センサとマルチセンサシステムを次世代ロボットに組み込むことで、たとえばロボットアーム／ハンドによる不定形物の把持および移動が可能となる。ビジョンセンサや慣性センサを基にロボットの動作推定を行いつつ対象物近くまでハンドを高速に移動させ、その後触覚センサにより優しく対象物を把持し、対象物の材質や重さや滑り具合を考慮して目的の場所まで落とさず壊さず対象物の移動を行うことができる。このシステムインテグレーションによるEHS1.0の動作実証を現在行っている。

現時点において、EHS1.0を満たすためにふたつの課題について取り組んでいる。一つが取り付け方などの実装方法と実利用に関連する信頼性確保などのハードウェア面での取り組みであり、もう一つがAPI (Application Programming Interface) など利用方法に関するソフトウェアインタフェースの提供に関する取り組みである。欲しいデータを確実にかつ容易に取るためのハードウェアとソフトウェアが準備できてはじめて、多くの人に広く利用されうるEHSのプラットフォームの提供が可能となる。

また、EHSのセンシングアルゴリズムの開発に関しても取り組み始めている。センサ・プラットフォームLSIならびにマルチセンサシステムを利用することで、ハードウェア構成はそのまま時空間的にセンシング方法を変更することができる。筆者はこの手法を多重センシングと定義し、その研究開発を進めている。

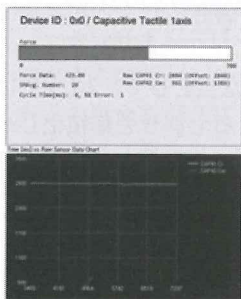
● おわりに

本稿では、今後のエッジ側における高度なサービス実現を可能とするエッジヘビーセンシングについて概観した。特に具体的な実現の方法として半導体

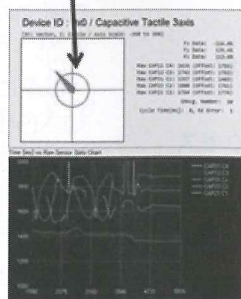


(a) マルチセンサを実装したシステム

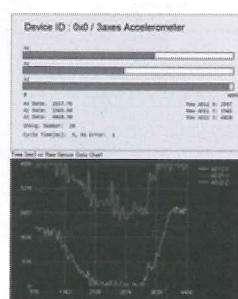
現在の3軸力のデータ表示



(b) 1軸容量型センサの出力



(c) 3軸容量型センサの出力



(d) 3軸加速度センサの出力

図6 マルチセンサシステムの動作実証

技術であるMEMSとLSIの活用によるEHS1.0を提案した。

エッジヘビーセンシングにおいては、末端のデバイスも重要であるが、そこからデータを収集する経路、その後のデータ処理のソフトウェアを含めて全体で考える必要がある。また、アプリケーションによってその組み方も変わるため、ニーズの特性を十分に解析する必要がある。

今後は、多くの適用例を積み重ねていく予定であり、さらには機械学習との連携ならびにデータからの情報や知識への昇華による高付加価値化を狙う。センサ関係の社会実装において特に重要なのは、キラーアプリケーションの開拓であり、顧客や市場との対話を通じてEHSの社会実装を進めていく。国内外問わず広くその応用を目指す。

〔謝辞〕

本研究の一部は、先端融合領域イノベーション創出拠点プログラム「マイクロシステム融合研究開発拠点」により開発された。また、システム開発の一部は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「次世代人工知能・ロボット中核技術開発/革新的ロボット要素技術分野/次世代ロボットのためのマルチセンサ実装プラットフォーム」のプロジェクトの支援によって行われた。エッジヘビーセン

シングと多重センシングの研究の一部は、JSPS科研費JP 18K 04256の助成を受けている。海外連携についてはCOI若手連携研究ファンドデジタル分野を通じて支援を頂いている。

本稿での触覚センサに関する研究成果は、東北大学 江刺正喜教授、田中秀治教授、平野栄樹准教授、邵晨鐘氏をはじめ東北大学関係者各位、トヨタ自動車(株)中山貴裕氏をはじめトヨタ自動車関係者各位、(株)豊田中央研究所野々村裕氏(現名城大学教授)、畑良幸氏、藤吉基弘氏をはじめ豊田中央研究所関係者各位との共同研究成果である。ここに謝意を表する。

〈参考文献〉

- (1) 大野治：日本型IoTビジネスモデルの壁と突破口、日刊工業新聞社(2019)
- (2) <https://www.preferred-networks.jp/ja/>
- (3) 室山真徳・巻幡光俊・中野芳宏・松崎栄・山田整・山口宇唯・中山貴裕・野々村裕・藤吉基弘・田中秀治・江刺正喜：ロボット全身分布型触覚センサシステム用LSIの開発、電気学会論文誌E、Vol.131、No.8、pp.302-309(2011)
- (4) Masanori Muroyama, Takahiro Nakayama, Yoshiyuki Hata, and Shuji Tanaka：“MULTI-SENSOR PLATFORM LSI ENABLING DIFFERENT SENSORS TO BE EVENT-DRIVEN AND CONNECTED TO COMMON DIFFERENTIAL BUS LINE”, in Proc. Transducers 2017, pp.1156-1159(2017)
- (5) Sho Asano, Masanori Muroyama, Travis Bartley, Takahiro Kojima, Takahiro Nakayama, Ui Yamaguchi, Hitoshi Yamada, Yutaka Nonomura, Yoshiyuki Hata, Hirofumi Funabashi, Shuji Tanaka：“Surface-mountable capacitive tactile

sensors with flipped CMOS-diaphragm on a flexible and stretchable bus line”, Sensors and Actuators A 240, pp.167-176(2016)

- (6) Sho Asano, Masanori Muroyama, Takahiro Nakayama, Yoshiyuki Hata, Yutaka Nonomura and Shuji Tanaka：“3-Axis Fully-Integrated Capacitive Tactile Sensor with Flip-Bonded CMOS on LTCC Interposer”, Sensors 2017, Volume 17, Issue 11, No.2451, pp.1-14(2017)
- (7) Chenzhong Shao, Shuji Tanaka, Takahiro Nakayama, Yoshiyuki Hata and Masanori Muroyama：“Electrical Design and Evaluation of Asynchronous Serial Bus Communication Network of 48 Sensor Platform LSIs with Single-Ended I/O for Integrated MEMS-LSI Sensors”, Sensors 2018, Volume 18, Issue 1, No.231, pp.1-17(2018)
- (8) 室山真徳：人間共存型ロボットに向けたMEMS-LSI集積化センサネットワークの構築、センサフュージョン技術の開発と応用事例、第5章、第3節、(株)技術情報協会、pp.217-224、ISBN978-4-86104-736-7(2019)
- (9) 室山真徳：MEMS-LSI集積化と触覚センサ、金属、Vol.85、No.9、pp.686-692(2015)
- (10) Masanori Muroyama, Takahiro Nakayama, Yoshiyuki Hata, Yutaka Nonomura, Travis Bartley, Shuji Tanaka：“A CMOS-LSI for a Sensor Network Platform of Social Robot Applications”, in Proc. Smart Systems Integration 2016, pp.320-327(2016)

筆者紹介

室山真徳

東北大学 マイクロシステム
融合研究開発センター
准教授 博士(工学)

●優良技術図書案内

空調衛生設備技術者必携：こんなことも知らないの？

空調衛生設備【試運転調整業務の実務知識】

安藤紀雄・他 著 A5判320頁 3,500円＋税

お問合せは日本工業出版(株) フリーコール 0120-974-250 <https://www.nikko-pb.co.jp/>