



三菱電機技報

4

2021

Vol.95 No.4

超スマート社会における人と機器の共生



表紙：超スマート社会における人と機器の共生



この特集号では、超スマート社会における、人と機器との新しい関係を築くための開発を支える基盤技術と、それらを活用した開発提案事例を紹介する。

- ①大型望遠鏡事業で培った技術を適用したハイパワーな人型遠隔操作ロボット、これを直感的に操作する運動伝達インタフェース、及びシンプルで繊細な作業を可能にする視覚的力触覚伝達技術の提案と脳波計測による有効性を確認した。
- ②2020年10月に竣工(しゅんこう)した技術実証棟“SUSTIE”でウェルネスオフィスを実現するために導入した運用技術及び設備システムについて紹介した。
- ③横浜訓盲学院と5か月間の形式的調査を実施し、視覚障がいと知的障がいを併せ持つユーザーにとって使いやすい操作の要素を抽出した。



①



②



③



ライフ



インダストリー



インフラ



モビリティ

特集 超スマート社会における人と機器の共生

Human-artifacts Symbiosis in Society 5.0

巻頭言

- 三菱電機の創立100周年に寄せて 4
加賀邦彦

- Towards the 100th Anniversary of Mitsubishi Electric
Kunihiko Kaga

巻頭論文

- 人とメカトロニクス機器の共生に向けて 6
岡本健一

- Approach for Human and Mechatronics Equipment-system Symbiosis
Kenichi Okamoto

- 3密を防ぐ食品工場のロボット技術 11
前川清石

- Robotics Technology for Food Factory to Avoid the Three Cs
Kiyoshi Maekawa

- 人とロボットの共生を実現するスマート化技術 15
五十嵐雄治・田口 浩・武輪知明・島田昌明・山隅允裕

- Smart Technologies to Realize Coexistence between Humans and Robots in Building
Yuji Igarashi, Hiroshi Taguchi, Tomoaki Takewa, Masaaki Shimada, Mitsuhiko Yamazumi

- 人×機械の遠隔機械操作システム 19
春名正樹・畑 浩一・川口 昇・荻野正樹・小池俊昭

- Remote Machine System with Sense of Oneness
Masaki Haruna, Koichi Hata, Noboru Kawaguchi, Masaki Ogino, Toshiaki Koike

- 人と協調するAI 24
松永沙織・森本卓爾・三塚由浩・佐藤 匠・毬山利貞

- Cooperative AI for Human-Machine Work
Saori Matsunaga, Takuji Morimoto, Yoshihiro Mitsuka, Takumi Sato, Toshisada Mariyama

- 空気調和機の衛生性向上技術 28
中西亜加音・森岡怜司・太田幸治・古川誠司

- Technologies for Improving Hygiene in Air Conditioners
Akane Nakanishi, Reiji Morioka, Koji Ota, Seiji Furukawa

- 自然を模倣するライティング技術 32
桑田宗晴・岡垣 覚

- Lighting Technology Mimicking Nature
Muneharu Kuwata, Satoru Okagaki

- 技術実証棟“SUSTIE”のウェルネスオフィス運用技術 36
浮穴朋興・藤井洋一・飯田隆義

- Wellness Office Operating Technologies for net Zero Energy Building Test Facility “SUSTIE”
Tomooki Ukiana, Yoichi Fujii, Takayoshi Iida

- サーマルダイオード赤外線センサ技術 40
藤澤大介

- Thermal Diode Infrared Sensor Technology
Daisuke Fujisawa

- 生産現場の効率化に貢献する作業分析システム 44
八田俊之・三輪祥太郎

- Worker's Behavior Analysis System to Improve Efficiency of Production Site
Toshiyuki Hatta, Shotaro Miwa

- デジタルトリプレットを活用した作業支援システム 48
佐藤 剛・梅田 靖・谷川民生

- Worker Support System Utilizing Digital Triplet
Go Sato, Yasushi Umeda, Tamio Tanikawa

- 触りたくなるインタフェース
— 視覚障がい者と開発した形と動きを用いた機器操作UI — 52
横須賀佑介・藤川裕子

- Highly User-friendly Interface Inducing Touch —User Interface Using Distinctive Shapes and Movements Developed with Visually Impaired People—
Yusuke Yokosuka, Yuko Fujikawa

一般論文

- IoTソリューションを迅速に創出する
統合IoT“ClariSense” 56
鶴 薫

- Internet of Things Suite “ClariSense” for Quickly Creating Internet of Things Solutions
Kaoru Tsuru

- くらしのエコテクノロジー 60

- Webサイト紹介(Follow ME!) 62

新型コロナウイルス感染症で亡くなられた方々に謹んでお悔やみを申し上げますとともに、罹患(りかん)された皆さまとご家族及び関係者の皆さまに心よりお見舞い申し上げます。

巻頭言

三菱電機の創立100周年に寄せて

Towards the 100th Anniversary of Mitsubishi Electric



加賀邦彦 *Kunihiko Kaga*

常務執行役 開発担当CTO 開発本部長(工学博士)

Executive Officer(Research and Development, CTO), Vice President, Corporate Research and Development

新型コロナウイルス感染症の拡大によって世界は甚大な影響を受けて、日々の暮らしやビジネスのスタイルは大きく変わりつつあります。21世紀に生きる私たちは、そのほかにも、地球温暖化、資源・エネルギー問題、海洋汚染、自然災害、水環境の悪化への対策など様々な社会課題に向き合わなければなりません。これらの課題を解決するには、これまでにない革新的な技術を創出する研究開発活動(R&D活動)が、より一層重要になります。


三菱電機は、2021年2月1日で100周年を迎え、次の100年に向けて踏み出したところです。神戸の三菱造船株の電機製作所を母体に1921年2月に当社が創設された、その14年後の1935年9月には、本店研究課が設立されR&D活動がスタートしています。それは現在、開発本部という国内外に約2,200名の技術者を擁する組織に発展し、当社のR&D活動を牽引(けんいん)しています。

開発本部は六つのR&D遂行組織からなり、国内では、三つの研究所と一つのエンジニアリングセンターが活動しています。先端技術総合研究所では、パワーエレクトロニクス、電気、機械、メカトロニクス、材料、システムソリューションなどのコア技術や先進技術の開発に取り組んでいます。情報技術総合研究所では、IoT(Internet of Things)やAIなどのIT分野と、レーダーや無線通信などの光電波・通信分野を中心にした研究開発を推進しています。デザイン研究所では、プロダクトやインタフェースなどモノのデザインに加えて、サービス価値の向上や、潜在ニ

ーズや社会課題に応えるソリューション提案などコトのデザインにも取り組んでいます。また、通信システムエンジニアリングセンターでは、通信・映像システム技術を核とした新たなシステムの開発とエンジニアリングに取り組んでいます。

海外では、米国ボストンのMitsubishi Electric Research Laboratories(MERL)、フランスとイギリスに拠点のあるMitsubishi Electric R&D Centre Europe(MERCE)がそれぞれ特色あるR&D活動を展開しています。MERLでは、産業応用を見据えた基礎研究及び先進技術の開発を行っています。MERCEでは、通信やパワーエレクトロニクス、熱マネジメントなど欧州が強みとする先進技術の研究開発に取り組んでいます。

これら各拠点で開発した技術は、製品やサービスを通じて顧客に提供され、豊かな社会の実現に貢献してきました。そのような技術の一つとして、当社製品に幅広く活用されているモータ技術があります。独自のものづくり技術と高精度な磁界解析の技術によって省エネルギー・省資源で小型・高性能を実現しています。当社モータ技術の高度化の歴史は1921年に神戸製作所で電気鉄道用モータの開発・製造から始まり、今ではエアコン、換気扇、パワーステアリング、昇降機向けのモータや、ファクトリオートメーション用の位置決めモータなどの幅広い製品で生かされています。今後、自動車等モビリティの電動化にも貢献していきます。



モータを制御する機器で用いられるパワー半導体では、シリコン半導体のチップ製造技術やパッケージング技術、駆動保護技術を進化させ、これらをパワーモジュールに集積化することで、省エネルギーを実現して地球温暖化の抑制に貢献しています。パワー半導体の事業は、1962年の耐電圧1.2kVのサイリスタの量産から始まり、現在主流のIGBT(絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)モジュールの研究開発を継続的に進めてきました。高性能と高品質を低コストで実現したトランスファーモールド外形のインテリジェントパワーモジュール“DIPIPM”は家電や車載などのインバータ機器で広く適用され、民生市場のデファクトスタンダードになりました。また、2006年には、次世代のパワー半導体であるSiC(シリコンカーバイド)半導体を搭載したパワーモジュールを開発しました。民生・産業・鉄道向けなど広い用途で、更なる省エネルギーの実現に貢献していきます。

1960年代から始まった衛星システムや地上システムの宇宙事業では、熱制御・構造技術や3軸姿勢制御技術、衛星から送られる全地球規模の観測データの処理設備、衛星搭載用の各種センサなど、衛星システム向けの技術を開発してきました。例えば、2014年に打ち上げられた陸域観測技術衛星だいち2号には、当社が開発した世界最高水準の合成開口レーダが搭載され、昼夜・天候の影響を受けずに大規模自然災害時の正確な状況把握が可能になりました。また、地上システムでは、衛星追跡用のアンテナや天文観

測用の光学・電波望遠鏡向けの技術を開発しています。

暗号技術では、1993年に共通鍵暗号の解析技術を発表し、翌年には米国標準暗号であったDES(データ暗号化標準)の解読実験に成功しました。この解析技術を利用して1995年に当社が開発した、DESよりも更に安全な共通鍵暗号“MISTY”はISO(国際標準化機構)/IEC(国際電気標準会議)標準暗号に採用されています。長年培った暗号技術の知識を活用し、最近ではクラウドサービスの利便性とプライバシー保護を両立させる秘匿検索技術や、量子計算機でも解読困難な耐量子計算機暗号など、情報社会の基盤になる技術の開発に取り組んでいます。

ご紹介した技術以外にも当社には、先人たちのR&D活動の長い歴史の中で蓄積された価値ある技術が多くあります。これらの技術を全社の財産として未来に引き継いでいくため、1978年に発足した技術部会を通じて、技術・ノウハウの共有化や相互研鑽(けんさん)、技術者のネットワーク形成などを脈々と続けてきました。またこれらの活動と並行して、社内にはない新たな技術の探索・創出のため、国内外の有力な大学及び研究機関とのオープンイノベーションに継続して積極的に取り組んでいます。

当社はこれからも、現在の事業を徹底強化するとともに、総合電機メーカーならではの強みを生かした価値創出と未来技術のR&D活動に注力し、活力とゆとりある社会の実現に貢献していきます。

人とメカトロニクス機器の共生に向けて

Approach for Human and Mechatronics Equipment – system Symbiosis



岡本健一*
Kenichi Okamoto

要 旨

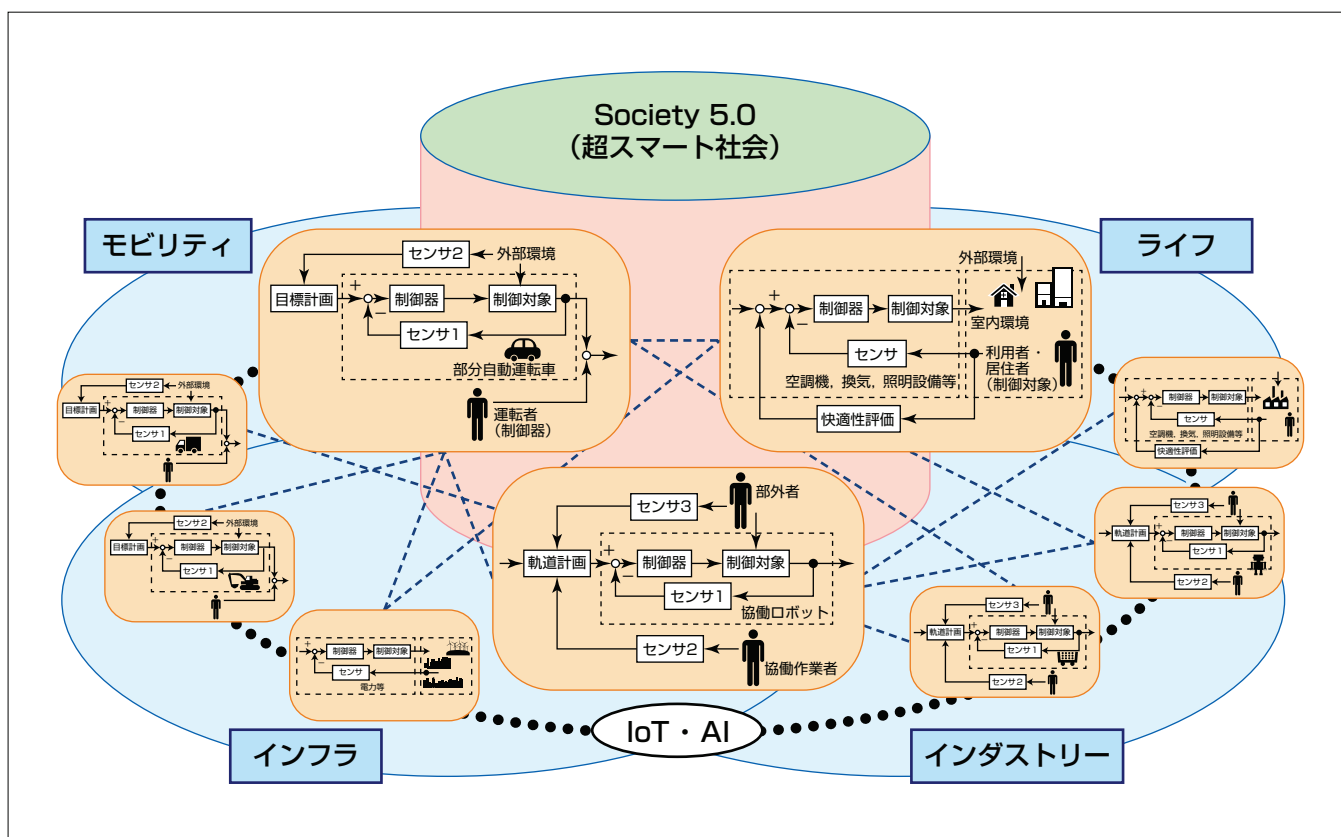
少子高齢化に伴う労働力不足に加えて、コロナ禍の影響で自動化・省人化の動きが加速している。自動化・省人化という、生産現場で使われる自動機やロボットなどが代表的なものであった。ところが近年、自動運転車から家電製品に至るまで、我々の普段の生活シーンの中で使われる機器でも、様々な形で機器の自動化が進み、より複雑なことが実行可能になってきた。

高度な自動化のためには、機器の内部状態や外部環境を把握するための情報収集、その大量な情報に基づく状況の認知・判断、及び判断結果に基づいた機器の適切な操作が必要である。機器に組み込める様々なセンサデバイスの開発やIoT(Internet of Things)の普及は大量の情報収集を可能にし、またマイコンの高性能化やFPGA(Field-Pro-

grammable Gate Array)は、複雑なアルゴリズム処理を可能にした。さらに通信技術の発達は人と遠隔にある機器とを結びつけての作業を現実的なものにし、AI技術によって機器が自ら学習してあらかじめプログラミングされた内容を超えた機能・性能を達成するようになってきている。

このような機器の進化によって、人と機器との関係にも変化が生じている。人と協働で生産を行う協働ロボットや、限定された条件下で自律運転可能なレベル3自動運転車の実用化は、機器が人に使われるだけの存在でなくなりつつあることを示している。

このような人と機器との新しい関係を築くための開発を通じて、超スマート社会の実現に貢献する。



IoTとAI技術を活用したSociety 5.0(超スマート社会)を支える“人とメカトロニクス機器の共生システム”

Society 5.0が目指す必要なもの・サービスを、必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供し、社会の様々なニーズにきめ細かく対応でき、あらゆる人が質の高いサービスを受けられ、年齢、性別、地域、言語といった様々な違いを乗り越え、生き活きと快適に暮らすことのできる社会”の実現に向けて、ライフ、インダストリー、インフラ、モビリティの各カテゴリーで“人とメカトロニクス機器が共生するシステム”を開発する。

1. ま え が き

2016年1月に内閣府閣議決定された「第5期科学技術基本計画」⁽¹⁾で日本が目指すべき未来社会の姿としてSociety 5.0(超スマート社会)の実現が掲げられている。この中で、超スマート社会は“必要なもの・サービスを、必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供し、社会の様々なニーズにきめ細かに対応でき、あらゆる人が質の高いサービスを受けられ、年齢、性別、地域、言語といった様々な違いを乗り越え、活き活きと快適に暮らすことのできる社会”と定義されている。Society 5.0は、狩猟社会(Ver 1.0)、農耕社会(同 2.0)、工業社会(同 3.0)、情報社会(同 4.0)に続く、次の社会という意味である。

情報社会と超スマート社会との違いは、“活き活きと快適に”という人の内面的な部分を明確に意識している点にあると考えられる。これは消費がモノからコトへと変化し、製品を利用して得られる体験が重要視されていることにも符合しており、今後もこの傾向は続くと思われる。

ただし、体験・サービスを具現化するには情報・ソフトウェアだけでなくハードウェア(モノ)が必須であり、機器自体も、体験・サービスを根底で支えて顧客満足を得るために進化し続けていくことが重要である。

本稿では、超スマート社会の実現に向け、質の高い体験・サービスを具現化するために、機器での“人”を意識した技術開発について述べる。また以下では、機械構造(ハードウェア)と制御装置(ソフトウェア含む)で構成されるメカトロニクス機器、又は複数のメカトロニクス機器から成るシステムをまとめて“機器”と呼ぶことにする。

2. 人と機器との関係性の変化と課題

2.1 ロボットでの人との関係変化と課題

人と共生・協調する代表的な機器といえば、まずロボットが挙げられる。ロボットは製造現場を中心に普及して生産性向上に寄与してきたが、その多様な可能性はペット型や人型ロボットなどで人に癒しを与えたり、サービス分野で利用されたりして、早くから注目されてきた。

ロボットを、日本社会が直面する少子高齢化などの課題解決の手段にするとともに、成長産業に育成していく“ロボット革命”に向けた戦略策定のため、官邸主導でロボット革命実現会議が開催されて“ロボット新戦略”⁽²⁾がまとめられた。“ロボット革命”とは、①センサ、AIなどの技術進歩によって、従来はロボットと位置付けられてこなかったモノまでもロボット化する、②製造現場から日常生活の

様々な場面までロボットを活用することによって、③新たな付加価値を創出する社会を実現することである。

IoT化を背景にセンサやAIを駆使して作業を行うシステム全般を新たな“ロボット”の概念として位置付け、サービス、介護・医療、インフラ・災害対応・建設、農林水産・食品産業分野などに“ロボット”を導入するには多くの課題がある。“ロボット革命”実現に向けて設立されたロボット革命イニシアティブ協議会(RRI: Robot Revolution Initiative)で、関連する標準化検討やロボットの利活用拡大に向けた規制改革・要望の提案、開発・製造・導入に係る安全基準やルール作りなどについて議論されている。三菱電機もこれに参加し、ロボット活用の推進と適用分野拡大に向けた活動を行っている。

製造現場では、2013年の厚生労働省通達によって労働安全衛生規則の一部改正が発行され、ISO10218-1/-2:2011によって設計・製作、設置された産業用ロボットは、柵又は囲いの設置をしなくてよいという規制緩和があった。表1には、ISO10218-1:2011の国内移行規格であるJIS B8433-1:2015-01の協働運転要求事項の内容要約を示す。

当社は、2020年5月にこの安全要求事項を満たす協働ロボットを製品化している。更にこの適用分野を広げるため、今特集号の論文(以下“特集論文”という)“3密を防ぐ食品工場のロボット技術”では、食品工場への導入を推進するための技術を述べる。人手不足に加えてコロナ対策のため、総菜の盛り付けや箱詰め作業などの自動化要求が高まっている。工業製品と異なり、不定形の総菜をどう認知・把持するかなど、人は意識せずに行えるがロボットにとっては難しい作業をいかに教示し実行させるかという技術を述べる。

JIS-B8433-1:2015-01で示された安全要求事項は、人と接触しないようにするか、又は接触してもダメージが抑えられる出力に制限することが基本である。今後、サービスや介護・医療現場などでロボット活用が普及するには、人と接触することを前提に必要な出力を持ちながらも人に対してダメージを与えない安全設計が必要である。

表1. JIS-B8433-1:2015-01の協働運転要求事項(要約)

5.10.1 一般
・ 協働運転中であることを示す視覚表示を備え、さらに5.10.2~5.10.5の一つ以上の要求事項に適合要。
5.10.2 安全適合の監視停止
・ 人間が協働作業空間内に存在→ロボット停止
・ 人間が協働作業空間から離れると、自動運転に復帰して可
5.10.3 ハンドガイド
・ ハンドガイド装置がある場合、エンドエフェクタの近くに配置し、次を備えなければならない。
a) 非常停止
b) イネーブル装置(安全適合速度監視機能有効状態でのみ可)
5.10.4 速度及び間隔の監視
・ 決められた速度及びオペレータとの間隔を保つ機能。この機能は、複数の機能又は外部入力との組合せで達成。
5.10.5 本質的設計又は制御による動力及び力の制限
・ ロボットの動力又は力を制限する機能をもつ。

2.2 自動運転車での人との関係変化と課題

自動運転技術の実用化には、旅客や貨物輸送でのドライバー不足解消、高齢者の移動手段確保、交通事故防止などの社会課題解決の期待がかかっている。

経済産業省と国土交通省の主催で設置された自動走行ビジネス検討会で、自動走行実現に向けた現状課題を分析・検討した結果が“自動走行の実現に向けた取組報告と方針”にまとめられ、2020年5月にVersion4.0⁽³⁾が発表されている。表2には、この報告書に記載された自動走行レベルの定義を示す。このレベル分けは、SAE(Society of Automotive Engineers)InternationalのJ3061(2016.9)及びその日本語参考訳である自動車技術会のJASO TP-18004“自動車用運転自動化システムのレベル分類及び定義”(2018.2.1)に基づいている。

自動走行レベルは5段階に分けられ、レベル2以下は運転者が操縦の主体であるが、レベル3以上では条件付きを含めて車(機器)側が操縦の主体になる。更に細かく見ると、レベル3及び4は車(機器)が主体になる領域が限定される。領域とは、地理的な領域だけではなく、一般道や高速道の種別、交通状況や自動車の速度範囲、電波状況、時間帯などの外部環境が含まれる。さらにレベル3では外部環境が領域内であっても、操縦が困難と判断した場合には、乗車している人に操縦を受け渡す(介入を要求する)ことが許容される。自動走行領域の制限もなく、また人に操縦を受け渡すこともない完全な自動運転がレベル5である。

またレベル1でも加速・減速動作、又はハンドル操作のどちらかを車側が支援し、さらにレベル2では運転中の部分的な場面で、加速・減速動作とハンドル操作の両方を車側が実施する部分的な自動運転が行える。

したがってレベル0と5以外は、程度の差はあるが車

(機器)と人との自動車の操縦作業を分担・協調して行う。そのためにレベル1以上では車(機器)側には、信頼性や安全性に関する要求レベルの差はあるが情報を認知する機能、得た情報に基づき状況を判断する機能、判断に基づき車を操作する機能が必要になる。このように自動運転車は2.1節のモノのロボット化の1ケースと言えるが、移動による周辺環境変化が大きいことや、車の利用者だけでなく、外部の人(歩行者など非利用者)との関係性を考慮しなければならないことが特徴的な課題である。

当社は、周辺物体の把握のための超音波やミリ波レーダなどの車載センサ、車体センサ情報に基づいて路面状況を検知する技術、将来状況を予測して最適な制御を行うモデル予測制御手法の開発などのほか、人工衛星や三次元地図データなどによる車の位置把握や、インフラ側情報を埋め込む高精度な三次元地図作成などの開発も行っている。また車とその利用者との間をつなぐ技術として、DMS(Driver Monitoring System)を開発しており、レベル3以下では必須になりつつある運転者の状態把握を行うとともに、自動運転車がどう動こうとしているかを周辺の人に知らせるダイナミックサインについても検討してきた。

特集論文“人とロボットの共生を実現するスマート化技術”では、建物内で三次元地図を活用してロボットやモビリティの移動を円滑に行う技術が述べられている。屋外向けに開発してきた三次元地図の技術を屋内向けに展開したもので、三次元地図を連携させることで屋内外のシームレスな移動を可能にし、ラストワンマイルの移動支援やビル内の貨物配達の自動化等の実現が期待できる。

また特集論文“人×機械の遠隔機械操作システム”では、人が遠隔にある機器を操作するシステムに関する研究について述べている。災害現場などの厳しい環境下で、人が現場に行くことなく遠隔の機械を操作して作業するための操作インターフェースや情報伝達技術を開発している。この成果は、レベル5の完全自動運転車で無人運転が可能になった場合に、交通事故現場などで機器(自動運転車)による状況判断が困難な場合や、自動運転機能に故障があった場合などに人が遠隔操作して路肩に緊急退避させるなどの対処が可能になり、万が一のバックアップシステムとしても有効な手段の一つになると考えられる。

さらに特集論文“人と協調するAI”では、人と機械の協調作業を円滑に行うための開発について述べている。ユースケースとして、工場内で人が運転するフォークリフトと無人搬送台車(AGV: Automated Guided Vehicle)とが経路を譲り合ってスムーズな移動を実現する例題が示されている。自動運転車が普及してきた場合、人が運転する車と自動運転車とが、いかにして道の譲り合いなどの協調動作を実現するかという課題がある。この手法はその解決策

表2. 自動走行レベルの定義

レベル	概要	操縦の主体
運転者が一部又は全ての動的運転タスクを実行		
レベル0 運転自動化なし	・ 運転者が全ての運転タスクを実施	運転者
レベル1 運転支援	・ システムが縦方向又は横方向のどちらかの車両運転制御のサブタスクを限定領域で実行	運転者
レベル2 部分運転自動化	・ システムが縦方向及び横方向両方の車両運転制御のサブタスクを限定領域で実行	運転者
自動運転システムが(作動時は)全ての動的運転タスクを実施		
レベル3 条件付き 運転自動化	・ システムが全ての動的運転タスクを限定領域で実行 ・ 作動継続が困難な場合は、システムの介入要求等に適切に応答	システム (作業継続が困難な場合は運転者)
レベル4 高度運転自動化	・ システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を限定領域で実行	システム
レベル5 完全運転自動化	・ システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を無制限に(すなわち、限定領域内ではない)実行	システム

の一例であるが、人と機器が混在して相互作用しあう様々な場面で、いかに協調的に動作するかは、今後の大きな課題である。

2.3 ビルや家庭内設備での人との関係変化と課題

前述の“ロボット新戦略”⁽²⁾のロボット革命では、従来ロボットと位置付けられてこなかったモノ(家電や住居)までがロボット化されると言われる。ビルや家庭内設備での各々の基本性能や省エネルギー性向上の追求に加えて、居住者・利用者へ与える影響(健康性・快適性)に注目した技術開発が進んでいる。室内の人の状態や温度分布をセンシングして自動的に風速・風向を調整するエアコンや、設備の運用調整で年間平均での消費エネルギー収支0にするZEB(net Zero Energy Building)でも、省エネルギー性に加えて、ビル利用者のウェルネスが注目されてきている。

国内認証CASBEE(Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency: 建築環境総合性能評価システム)で、オフィスビルの執務者・利用者の健康性・快適性を考慮したCASBEE-WO(Wellness Office)が示された。その評価項目を表3に示す。

国際的には、普及が進んでいる米国のLEED(Leadership in Energy and Environmental Design)認証の新築向け評価LEED NC(LEED New Construction)では、2013年のv4版で室内環境に関する評価項目が大きく追加されている。また、さらに人に配慮した建物評価を重視するWELL認証(WELL Building Standard)が2014年に開始されている。

前述のCASBEE-WOは、この国際的な建物評価の流れを受けて国土交通省が2018年3月に発表した“健康・快適なビルを認証”に関する最終とりまとめ⁽⁴⁾を、米国の認証制度なども参考にして一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構によって2019年に整備されたものである。

コロナ禍による影響で、感染防止に向けた換気性への注目や、在宅勤務普及による一般住居での作業効率向上への関心などの変化はあるが、“人”への影響を重視した生活空間作りは今後ますます重要になってくるだろう。

特集論文“空気調和機の衛生性向上技術”では、空調機のコロナ対応での衛生性向上に関する開発である。室内の浮遊微生物不活性化のための静電ミスト処理に加えて、空調機内部をクリーンに保つ湿式オゾン処理、冷房時に発生する結露水での菌の発生を抑止する水中パルス放電処理を述べる。

また特集論文“自然を模擬するライティング技術”では、建物内で自然環境を人工的に再現することで快適性向上を目的に、太陽光が大気中でレイリー散乱して空が青く見えるのと同じ原理を用いて青空を再現するライティング技術

表3. CASBEE-WOの評価項目

大項目	中項目	評価要素	評価項目
基本性能	健康性・快適性	空間・内装	・レイアウトの柔軟性 ・知的生産性を高めるワークプレイス ・内装計画 ・自席周辺の作業環境　・広さ
		音環境	・室内騒音レベル　・吸音
		光環境	・自然光の導入 ・グレア対策　・照度
		熱・空気環境	・空調方式及び個別制御性 ・室温制御　・湿度制御　・換気性能
		リフレッシュ	・オフィスからの眺望 ・室内の植栽・自然とのつながり ・室外の植栽・自然とのつながり ・トイレの充足性・機能性 ・給排水設備の設置自由度 ・リフレッシュスペース ・食事のための空間 ・分煙対応・禁煙対応
		運動	・運動促進・支援機能 ・階段の位置・アクセス表示
	利便性	移動空間・コミュニケーション	・動線での出会いの場の創出 ・エレベーター利用の快適性 ・バリアフリー法への対応 ・打ち合わせスペース
		情報通信	・高度情報通信インフラ
	安全性	災害対応	・耐震性　・災害時エネルギー供給
		有害物質対策	・化学汚染物質 ・有害物質を含まない材料の使用 ・有害物質の既存不適格対応
		水質安全性	・水質安全性
		セキュリティ	・セキュリティ設備
	運用管理	維持管理計画	・維持管理に配慮した設計 ・維持管理用機能の確保 ・維持保全計画　・維持管理の状況 ・中長期保全計画の有無
満足度調査		・満足度調査の定期的実施等	
災害時対応		・BCP(事業継続計画)の有無 ・消防訓練の実施　・AEDの設置	
プログラム	プログラム	・メンタルヘルス対策、医療サービス ・社内情報共有インフラ ・健康増進プログラム	

AED: Automated External Defibrillator

について述べる。

そして特集論文“技術実証棟“SUSTIE”のウェルネスオフィス運用技術”では、ビル設備の動作とともに温熱、空気質、光、音などの室内環境をシミュレーション評価可能な技術によって、ビルのウェルネス性を向上させる運用技術実証について述べる。

IoTの普及でビルや家庭内でも様々な設備がネットワークにつながり、機器同士の連携や外部とのデータのやり取りが可能になった。これによってビル内の機器を連動させて温熱、空気質、光、音などをうまく調整して環境負荷の軽減と健康性・快適性のバランスをより高いレベルで図ることが可能になる。さらに利用者の生活リズムに合わせた動作や、センサ情報を基に行動分析し、人がリビングで休憩しているのか、在宅で仕事をしているのかを判断して最適な空間環境を提供することも可能になるであろう。

さらに地域内のビル同士の情報をやり取りすることで、より効率的なエネルギー管理や、災害時のレジリエンス性向上にも発展していく。これにロボットや自動運転車が加わって、ビル設備と連携させて、“必要なもの・サービスを、

必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供する”超スマート社会(Society 5.0)の実現を目指す。

3. 制御システムとしての人と機器の共生システム

ロボット、自動運転車、建物設備での人と機器の関係性を制御システムという観点で整理して考察する。図1、図2、図3には、制御システムとして表現した例を示す。

図1、図2、図3の人と機器の共生システムで、人は外乱要素・外部環境の一部であったり、制御器の一部であったり、制御対象であったりする。Society 5.0の実現には、今後も様々な形で人と機器の共生が発生する。システムの制御系設計に当たっては、人の物理的な動きや形状、人の認知・判断、人の快適性などの心理的要素などをいかにモデル化してシステム設計に盛り込むかが、“あらゆる人へ質の高いサービスを提供する”ことを実現する上で重要になる。

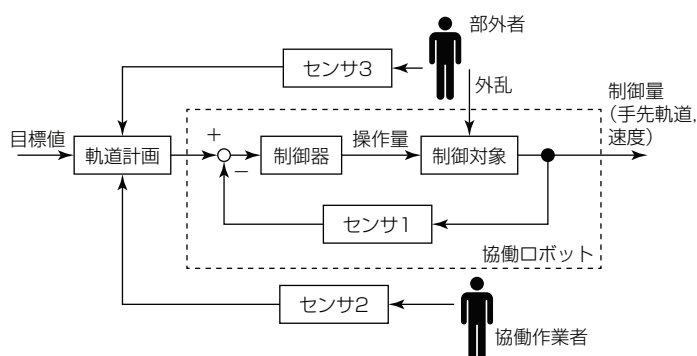


図1. 人と協働ロボットとの制御システム表現の一例

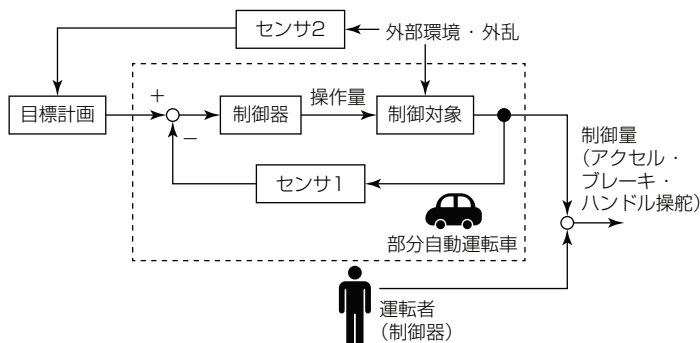


図2. 自動運転車での制御システム表現の一例

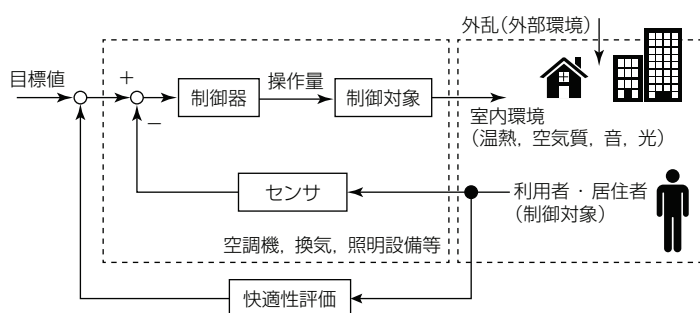


図3. 利用者を含む建物設備の制御システム表現の一例

この特集論文“サーマルダイオード赤外線センサ技術”や“生産現場の効率化に貢献する作業分析システム”では、人の状態をセンシングしたり、分析したりする技術を述べる。また特集論文“デジタルトリプレットを活用した作業者支援システム”は、熟練者の作業データからその認知・判断を模倣し、一般作業者を支援しようとするものである。さらに特集論文“触りたくなるインタフェース—視覚障がい者と開発した形と動きを用いた機器操作UI—”では、人の心理面に着目したユーザーインタフェースのデザインについて述べている。今後も“人”に関する知見・理解を深めて機器の設計に盛り込むことで、様々な人と機器の共生システムの実現に貢献する。

4. む す び

AIの進歩で、センサ情報を基に機器が自律的に動作できるようになった。柵に囲まれず動作する協働ロボットが実用化され、車は移動のための道具から人や荷物を載せて移動する自律移動機器へと変貌しようとしている。またIoTの普及は、複数の人と機器の共生システムを連携させることで、機器単体ではできないサービスを可能にしている。

このような変化によって、機器の開発では信頼性や安全性はもとより、“人”の認知・判断機能や心理面まで考慮した設計が必要になっている。特集論文では、当社での“人”を意識した開発について述べる。また、複数システムを連携させて迅速にソリューション創出するための当社の統合IoTについて一般論文“IoTソリューションを迅速に創出する統合IoT“ClariSense””で述べる。

アフターコロナの“New Normal”の目指すところは“原状回復ではなく、より強靱(きょうじん)で持続可能な“より良い状態”への回復(Build Back Better)”である。人と機器の関係でも、New Normalを目指す開発を進め、人と機器の共生システムによる質の高いサービスを提供し、より強靱で接続可能な社会作りに貢献していく。

参考文献

- (1) 内閣府閣議決定：第5期科学技術基本計画(2016)
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>
- (2) 首相官邸：ロボット新戦略(2015)
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/robot/pdf/senryaku.pdf>
- (3) 国土交通省自動走行ビジネス検討会：自動走行の実現に向けた取組報告と方針 Version4.0(2020)
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jido_soko/pdf/20200512_03.pdf
- (4) 国土交通省：健康・快適なビルを認証へ～健康性、快適性等に関する不動産に係る認証制度のあり方についてのとりまとめ～最終とりまとめ(2018)
<https://www.mlit.go.jp/common/001228138.pdf>

人と協調するAI

Cooperative AI for Human - Machine Work

松永沙織*
Saori Matsunaga
森本卓爾*
Takuji Morimoto
三塚由浩†
Yoshihiro Mitsuka

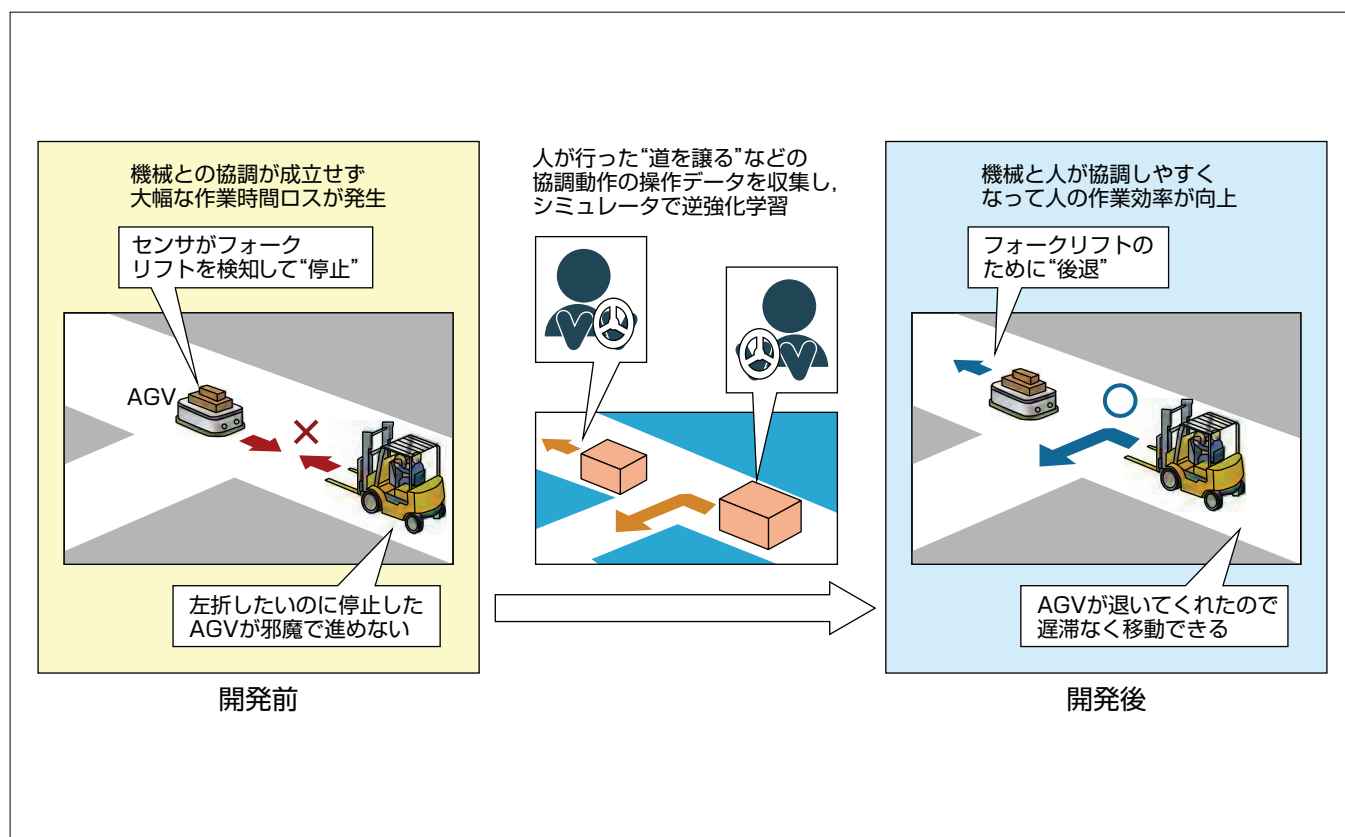
佐藤 匠*
Takumi Sato
稗山利貞‡
Toshisada Mariyama

要 旨

人手不足や作業者間の距離確保ニーズによって、人と機械が混在する作業環境がより一層普及すると考えられる中、人と機械が互いに連携して安全かつ効率的な動作を行うことが求められる。AIを用いた機械の制御手法の代表例として深層強化学習が挙げられるが、深層強化学習に必要な報酬関数は、複雑なタスクになるほど設計が困難になる。一方で、人同士であれば、相手の動きに合わせて自身の行動を決定することで相手の行動を妨害しないような協調動作を実現できる。そこで“人と協調するAI”では人の動作や操作をAIによって模倣することで、人のような自然な

協調動作を可能にすることを目的とする。模倣学習の中でも逆強化学習と呼ばれる手法を使用し、人手による動作の設計なしに、少ない教師データ数で効率的な学習を実現している。

無人搬送車(Automated Guided Vehicle : AGV)を模した小型の自律移動体にこの技術を適用した結果、教師あり学習に対して1/10以下のデータ量で学習可能であることを確認した。また、入力画像の工夫、制御モジュールとの組合せによって、従来困難であった逆強化学習による実機でのリアルタイムな協調動作を実現した。



“人と協調するAI”を適用した場合の動作例

AGVへの適用事例を示す。単純なルールで動作させる場合、他車両(フォークリフト)が危険領域に進入した時点でAGVが緊急停止し、お見合いが発生する。一方“人と協調するAI”を適用した場合、AGV側がフォークリフトへ進路を譲る動作を見せて、遅滞のないスムーズな移動を実現する。

1. ま え が き

現在、少子高齢化による人手不足などに対応するために、人に代わる機械の導入や、AIによる機械の知能化が進んでいる。例えば生産や物流の現場では、AGVの導入が加速している。省人化や作業員間の距離を確保することが望まれるニューノーマル社会では、人と機械の混在する環境がより一層増加すると考えられる。現在は安全確保のために人と機械の作業空間が分かれていることがほとんどであるが、今後は更なる効率化のため、人と機械がより連携することが求められる。そこで、当社のAI技術“Maisart”を活用し、人のような自然な動作を模倣学習することで人との協調を容易にする“人と協調するAI”を開発した。逆強化学習と呼ばれる手法を使用し、少ないデータ数で効率的な学習を実現している。

本稿では、AGVを模した小型の自律移動体に適用した例を基に、“人と協調するAI”について述べる。

2. 人と協調するAI技術

2.1 全体の構成

人と協調するAI技術の全体構成を図1に示す。今回、人が行う協調動作の操作データを“逆強化学習”(2.2節)で模倣することで、自然な協調動作を実現している。逆強化

学習では繰り返しの試行錯誤が必要になるため、適用する実環境に対応したシミュレーション環境を用意する必要がある。そして、シミュレータや実機から出力されたセンサデータは適切な前処理を行って学習しやすい形へ変換する必要がある。また実機の制御に当たっては、機器ごとに適した制御周期や制御手法を採用しなければならない。通常、自律移動体の大まかな経路の決定に関しては高周期の推論は不要であり、百ミリ〜数百ミリ秒周期でも問題ない。一方で自律移動体の制御に当たっては数ミリ〜数十ミリ秒周期でのリアルタイム制御が不可欠になる。このような背景から、入力データを変換する“俯瞰(ふかん)図生成器”“特徴量抽出ネットワーク”，大まかな目標動作を決定する“学習器”“学習済みモデル”，きめ細かな制御を行う“制御モジュール”といった各モジュールに機能を分割している。制御モジュールでの具体的な制御手法は機器ごとに最適なものを選択すればよいため、AIの適用以前から培ってきた制御技術を生かすことも可能である。高速で滑らかな制御と難しい判断を実環境で両立させることが可能な構成になっている。

次に、学習器及びその前段の俯瞰図生成器と特徴量抽出ネットワークについて述べる。

2.2 学習器(逆強化学習)

複数の人(又は人の操作する機械)が同じ環境で作業をするとき、人は相手の様子を見て進路や順番を譲ったり、作業スピードを調整したりしながら協調して作業を行うこと

で、互いの安全性と効率性を両立させている。そのためAGVなどの機械と人が共存する環境下でも、機械側が人に進路を譲ったり、周囲の人に注意して徐行したりすることが望ましい。しかしながら、現状では“前に進む”“障害物を検知すると止まる”といったルールで動作するため、場合によっては互いに身動きが取れなくなってお見合い状態になるなど、双方の作業効率が低下する可能性がある。起こり得る事象一つ一つに対応する行動のルールを

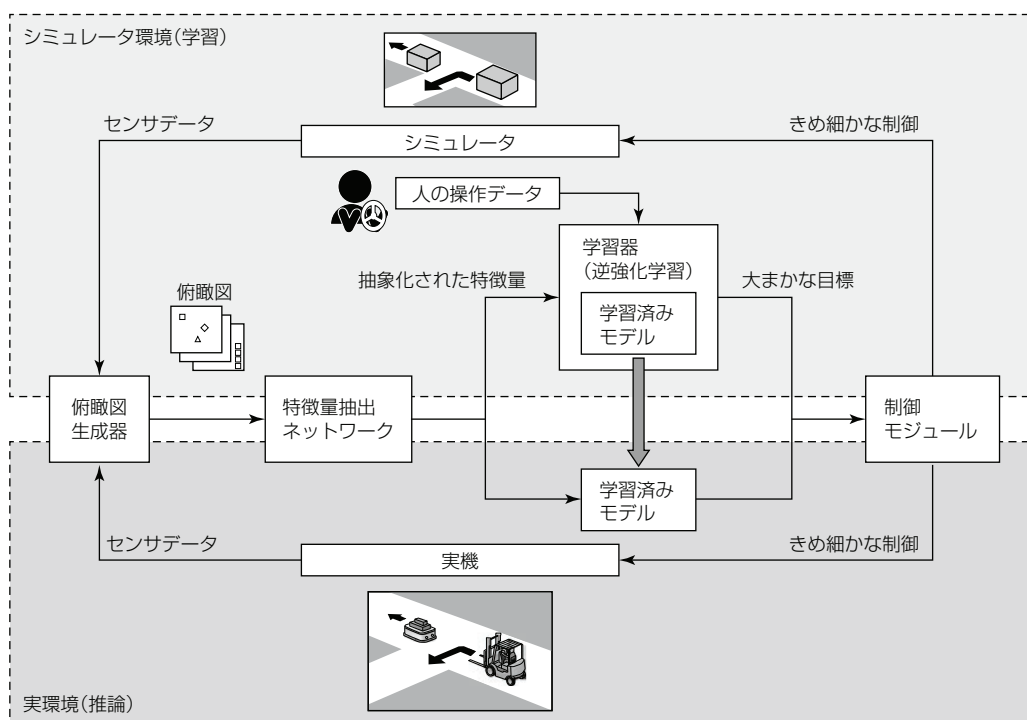


図1. 人と協調するAI技術の全体構成

全て書き下して協調作業を実現することも考えられるが、全てのルールを網羅することは困難である。そこで、AIを活用した人との協調の実現を考える。AIを用いた手法として強化学習を適用する例が挙げられる。強化学習では、報酬関数と呼ばれる、ある状態に対する行動の良しあしを表す関数を設計する必要がある。しかし、周辺環境が複雑に変化する自律移動体ではその報酬関数の設計自体が困難になる。一方で、報酬関数を人手で設計するのではなく、見本になる行動を与えてそれに近づくように振る舞い方を学習する“模倣学習”という手法がある。このうち、見本のデータ(以下“デモンストレーションデータ”という。)を教師データとして教師あり学習で行動を学習する場合、大量のデモンストレーションデータを必要とするという側面がある。これは、学習データに含まれない状態では適切な行動を決定できないため、制御中に発生する誤差や誤差の蓄積も考慮しながらあらゆるデータを準備する必要があるからである。一方、デモンストレーションデータから報酬関数を推定し、推定した報酬関数を用いて強化学習を行って最適な行動を獲得する手法は、逆強化学習と呼ばれる。与えられたデモンストレーションデータの入力情報と行動のマッピングを得るのではなく、デモンストレーションデータを基にシミュレーションで自ら試行錯誤を繰り返しながら報酬関数を推定する。逆強化学習の手法の一つである敵対的模倣学習(Generative Adversarial Imitation Learning: GAIL)⁽¹⁾は画像生成分野で注目されている敵対的生成ネットワーク(Generative Adversarial Network: GAN)⁽²⁾の要領で最適な行動を学習する方法であり、教師あり学習に対して少ないデモンストレーションデータ数で学習できることが報告されている。こうした背景から、この技術ではGAILをベースにした手法を使用している。

2.3 俯瞰図生成器と特徴量抽出ネットワーク

AIを用いた移動体制御では画像入力が用いられることが多い。自車の状態も周辺物体の状態も時々刻々変化する走行環境では、自車近傍の物体を選択して数値ベクトルを生成するよりも、自車周辺の画像として表現した方が複数物体の位置関係を容易に表現できることが理由の一つである。しかし通常、得られた画像には自車の行動決定に無関係な情報が含まれている。またシミュレータを活用した試行錯誤による学習を前提とする場合、学習時に得られる画像と運用時に得られる実画像とのギャップが課題になる。そこで“俯瞰図生成器”によってシミュレータや実機から得られる情報をバーチャル画像に変換することで、不要な情報をそぎ落としながら実環境とシミュレーション環境のギャップを抑えるという方法を取る。このとき、進行方向前方の画像ではなく上から見下ろした俯瞰図にすることで、

移動体自身と周辺物体との位置関係を簡潔に表現している。俯瞰図導入によって周辺情報はシンプルな表現になったが、画像データの次元数は大きく、学習の際に学習速度や安定性といった面でのネックになり得る。そこで“特徴量抽出ネットワーク”を導入し、得られた俯瞰図を更に圧縮して低次元の特徴量を抽出する。ここでは、VAE(Variational AutoEncoder)を使用して低次元ベクトルへと変換している。VAEについても学習が必要になるが、周辺物体との位置関係を様々に変えた俯瞰図を人工的に大量に作り出すことで、逆強化学習による自車行動の学習とは別に、特徴抽出器としての学習をあらかじめ完了させておくことが可能である。

最終的に、VAEのエンコーダによって抽出された俯瞰図の特徴量情報に、俯瞰図に含まれない情報(自車速度等)を結合したものが、学習器又は学習済みモデルに入力される。

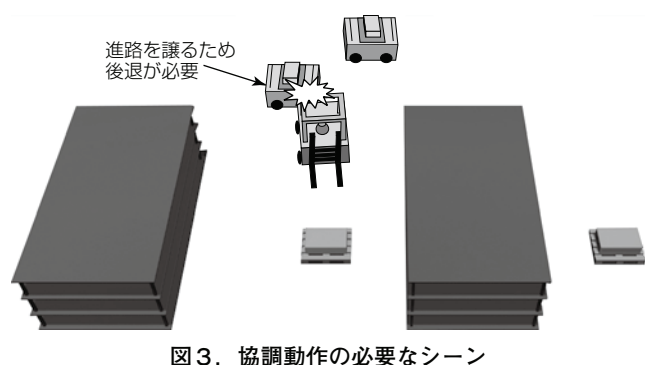
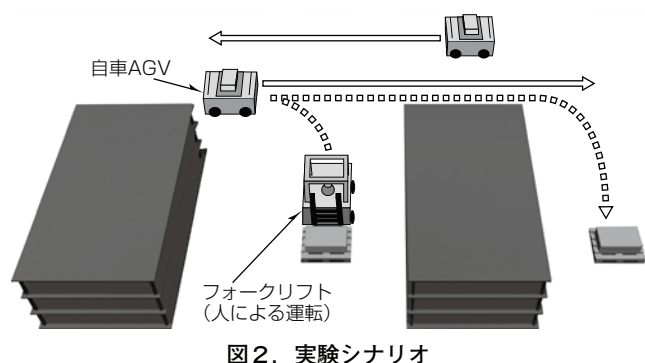
3. 小型自律移動体への適用

3.1 シナリオ

最後に、AGVを模した小型自律移動体へこの技術を活用した際の実験結果について述べる。今回はAGVの譲り合いのシーンを想定した図2に示すシナリオで実験を行う。図中の実線のように、自車AGVは図の右側に向かって直進走行している。このとき、フォークリフトと衝突したりフォークリフトの作業を邪魔したりすることのない範囲で、できるだけ早く右端まで到達することが目的である。一方人が運転するフォークリフトは、図中の点線で示すとおり、AGVの走行経路に重なるように後退して切り返した後、同じく右側へ向かって走行する。そのため、“前に進む”“障害物を検知すると停止する”といったルールでAGVを走行させた場合、フォークリフトの割り込みタイミングによっては図3のようにお見合い状態が発生して互いの作業効率が低下するシナリオになっている。今回は、フォークリフトがAGVの進路に割り込むタイミングを、①AGVの後退が必須になる急な割り込み、②AGVの後退が不要な余裕を持った割り込みの2シナリオ用意し、①②の二つのシナリオを混合して学習・評価する。①②のどちらのシナリオでも、車両の出発タイミングや出発位置はその都度微小に変化するものとする。

3.2 シミュレータでの学習

独自に構築したシミュレータを使用し、3.1節で述べたシナリオで協調動作を学習した。今回は、自車位置を画像中心とした図(実環境で2m四方に相当)の中に、他車だけを描写した二値画像を俯瞰図として使用している。特徴量

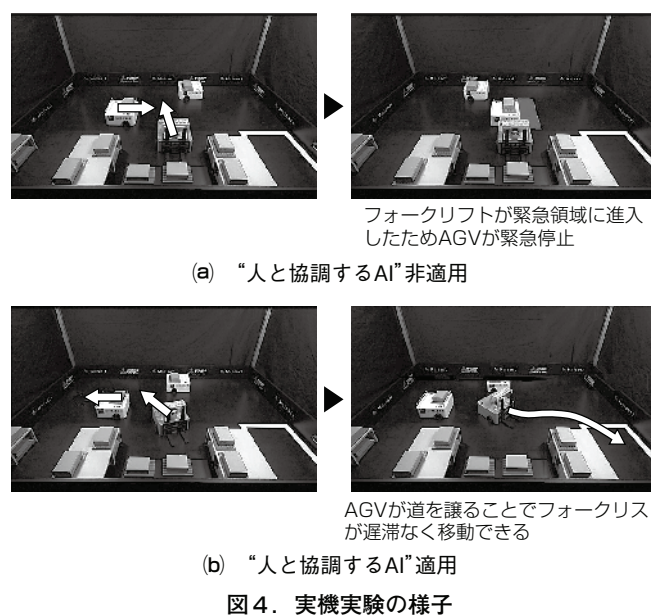


抽出ネットワークで俯瞰図を16次元のベクトルへと変換し、自車速度情報と合わせた計17次元のベクトルが学習器へと入力される。

逆強化学習に使用するデモンストレーションデータは、3.1節の①②の各シナリオで人がシミュレータ上のAGVを操作して収集している。これらのデモンストレーションデータを用いて逆強化学習と教師あり学習を行い、衝突の有無や作業完了に要した時間から算出したスコアを比較した。その結果、今回のシナリオに限定すれば、逆強化学習では①②の各4個以上のデモンストレーションデータがあれば人と同等以上のスコアを獲得できる一方、教師あり学習ではその10倍以上のデモンストレーションデータを使用しても逆強化学習使用時のスコアには届かず、かつスコアのばらつきも大きいことが分かった。逆強化学習を用いたこの手法は必要なデータ数、動作の安全性や効率性、安定性という点で教師あり学習よりも優位であることが確認できた。

3.3 実機での実験

最後に学習結果を実機へ適用した際の実験結果を示す。図4に示すとおり、図2のシミュレーション環境と同等のAGV、フォークリフト、周辺物体を再現している。自車



AGVには、デモンストレーションデータ20個を使用して学習したモデルを、追加学習や調整なしにそのまま適用した。

この技術を適用せず、“前に進む”“障害物を危険領域内に検知すると停止する”というルールで動作する場合、フォークリフトが危険領域に進入した時点でAGVが緊急停止し、作業時間ロスが発生している(図4(a))。一方、この技術を適用した場合、AGVが後退してフォークリフトに進路を譲ることでフォークリフトが遅滞なく移動でき、スムーズな作業の実現に貢献していることが分かる(図4(b))。

4. む す び

今後ますます人と機械の混在が増加すると考えられる中、人の模倣によって協調作業を実現する“人と協調するAI”を開発した。逆強化学習によって教師あり学習より少ないデモンストレーションデータで自然な動作を獲得し、俯瞰画像生成器、特徴量抽出ネットワーク、制御モジュールと組み合わせることで実機での協調動作を実現した。この技術は、作業の効率化又は作業員同士の一定の作業空間の確保が求められる場合に有効な技術になり得る。今後は人と機械の混在が想定される生産・物流現場、自動運転などでの実運用に向けて開発に取り組んでいく。

参考文献

- (1) Ho, J., et al.: Generative adversarial imitation learning, In Advances in Neural Information Processing Systems, 4565~4573 (2016)
- (2) Goodfellow, I., et al.: Generative adversarial nets, Advances in neural information processing systems 27, 2672~2680 (2014)

人とロボットの共生を実現する スマート化技術

五十嵐雄治*
Yuji Igarashi
田口 浩†
Hiroshi Taguchi
武輪知明*
Tomoaki Takewa

島田昌明*
Masaaki Shimada
山隅允裕†
Mitsuhiro Yamazumi

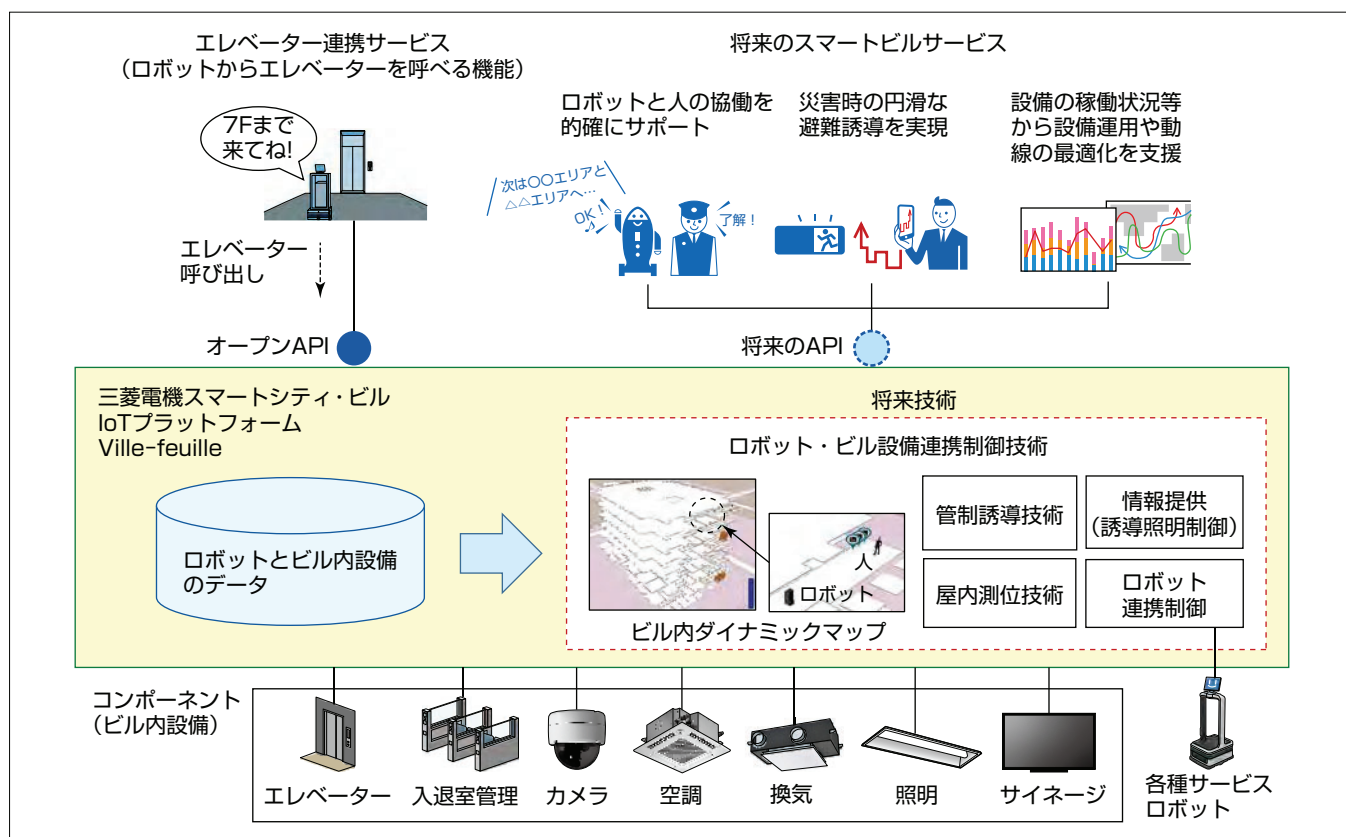
Smart Technologies to Realize Coexistence between Humans and Robots in Building

要 旨

三菱電機では、未来社会が求めるビルとその先にある新たな都市空間の創出に向けて、①ビル内のデータ活用ビジネスの展開を促進するオープンなIoT(Internet of Things)プラットフォームの構築、②労働力不足対策を目的にしたビル内のサービスロボット移動支援サービスの提供、③災害時の円滑な避難誘導を実現する人やモノの位置と状態の見える化と人やサービスロボットの動線の最適化を実現する将来技術の開発に取り組んでいる。

①では、2020年9月に、ビル内のサービスロボットや昇降機、入退室管理システムや空調機器、カメラ、照明などの全ての設備のデータを収集し、オープンなAPI(Application Programming Interface)によってパートナー企

業が収集したデータを活用したアプリケーションの実装やサービス提供をすることを想定したスマートシティ・ビルIoTプラットフォーム“Ville-feuille(ヴィルフィーユ)”を開発している⁽¹⁾⁽²⁾。②では、一部のビルでサービスロボットが指定した階に昇降機を呼ぶ“エレベーター連携サービス”の運用を開始している。③では、ビル内のリアルタイムな人とモノの配置を表した三次元地図(ビル内ダイナミックマップ)を用いて、警備・清掃・運搬などの用途で使われる各種サービスロボット(以下“ロボット”という。)のビル内での円滑な移動を実現し、人とロボットの協働作業を支援する技術(ロボット・ビル設備連携制御技術)の実証実験をしようとしている。



スマートシティ・ビルIoTプラットフォーム“Ville-feuille”とロボット・ビル設備連携制御技術

Ville-feuilleは、2020年9月9日に公開されたクラウド上に蓄積したビル内設備データの利活用を可能にする当社独自のスマートシティ・ビルIoTプラットフォームである。ロボット・ビル設備連携制御技術はVille-feuilleの拡張機能として当社の研究所で開発中の将来技術である。

1. ま え が き

日本では少子高齢化の進展に伴う生産年齢人口の減少に向けた対策の一つとして、人に代わって自律的に活動するロボットの活用が検討されている。当社では、このロボットをビル内の作業で利用するのに必要な技術を開発している。例えば、先に述べたエレベーター連携サービスでは、ロボットに対してエレベーターを呼べるインターフェース（オープンAPI）を提供している。同サービスでは1台のロボットがロボット内にあらかじめ組み込まれたビル内の地図データとセンサ機器を用いて自律的に移動する。

将来、ビル内で複数台のロボットが移動するようになれば、狭い通路の移動時やエレベーター乗降時にロボット同士のすれ違いが発生するようになり、ロボットの大きさによっては、ロボットが立ち往生するデッドロックと呼ばれる状況が生じる。また、通勤時間帯などエレベーターが混雑する時間帯にロボットがエレベーターを利用すると、人の移動を妨げてしまう状況が生じる。

本稿では、このような課題の解決に向けて、当社で開発中の“ロボット・ビル設備連携制御技術”について述べる。

2. ロボット・ビル設備連携制御技術

2.1 概 要

ロボット・ビル設備連携制御技術は、要旨の図のように Ville-feuilleが持つビル内の人又はロボットの位置や昇降機などの設備の稼働情報とビル内の地図を活用して、ロボットの安全かつ作業効率の良いビル内移動を実現する技術である。

図1は、この技術を適用したビル内でのロボットの管制誘導システムの構成を示している。

このシステムは、①ビル内の人とロボットの位置やエレベーターなどの設備の稼働状況をリアルタイムに管理するビル内ダイナミックマップデータ管理機能、②ビル内でロボットが通行可能な経路を算出する経路探索機能、③ビル内のロボットの作業効率を最大化するロボットの行動計画を作成する行動計画作成機能、④ロボットに対しての移動経路通知と移動指示をする誘導制御機能、⑤この管制誘導システムが提供する情報（走行経路上の地図情報）を用いて、ロボットが屋内走行環境に合わせて適切な速度と経路を選択するインフラ協調走行制御機能で構成される。

2.2 ビル内地図を用いたロボット管制誘導システム

ここでは、2.1節で述べたロボット管制誘導システムを

ビル内ダイナミックマップを用いたロボット管制誘導システム

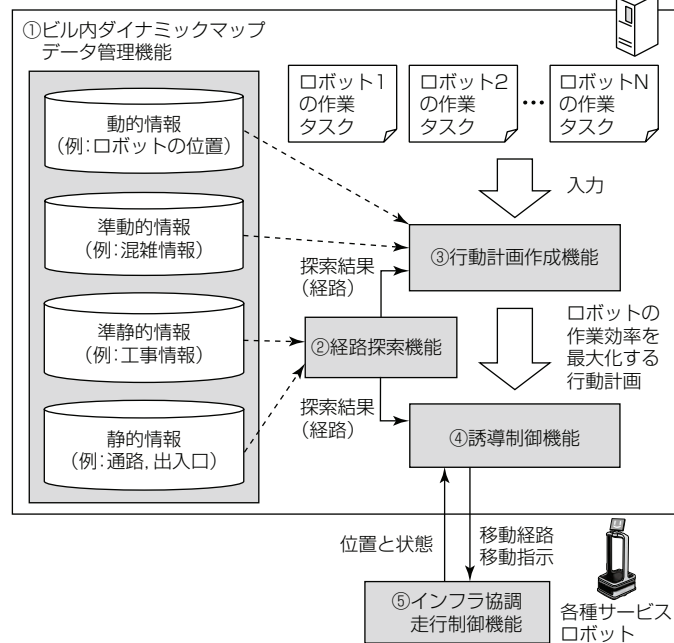


図1. ロボット管制誘導システムの構成例

構成する五つの機能について述べる。

2.2.1 ビル内ダイナミックマップデータ管理機能

ビル内ダイナミックマップデータは、当社が独自開発した屋内地図データであり、データの更新周期に応じて、静的・準静的・準動的・動的の情報と4階層に分けたデータ管理方式を採用している（図1）。

静的情報にはビルの壁面や床面又は昇降機や出入口などの固定設置物に関する情報、準静的情報には工事や昇降機のメンテナンスなどの日時単位で有効な情報、準動的情報には混雑や清掃などの時分単位で有効な情報、動的情報にはロボット又は人の位置や昇降機の稼働状況など分秒単位で有効な情報が含まれる。

また、ビル内ダイナミックマップで扱うデータ内容や形式は、国土交通省が屋内電子地図のオープンデータ化の取り組み⁽³⁾で利用している国土地理院“階層別屋内地理空間情報データ仕様書(案)”に対応しているため、公共施設の電子屋内地図データの利用も可能である。

2.2.2 ビル内ロボットの経路探索機能

この機能は、図2で示すようなビル内ダイナミックマップの静的情報に含まれるネットワークデータ（リンク、ノード）を用いて、指定された目的地の最近接ノードまでの経路を探索する。個々のリンクには通行可能な方向と距離が設定されており、Dijkstra法を用いて目的地までの移動距離が最短になる経路を探索する。工事やエレベーターのメンテナンスなどのビル内ダイナミックマップの準静的情報によって通行できないリンクがある場合は、当該リン

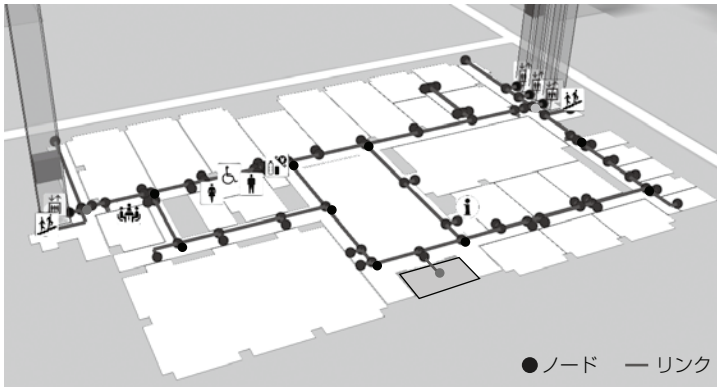


図2. ビル内ダイナミックマップのネットワークデータ例

クを探索処理の対象から外すことで、その時々状況下で通過可能な経路だけを算出できる。探索結果は、2.2.3項に述べる行動計画作成機能と2.2.4項に述べる誘導制御機能で利用される。

2.2.3 ビル内ロボットの行動計画作成機能

ビル内で、人とロボットの快適な移動空間の実現に向けた課題の一つは、ロボットが人の移動を妨げることなく、ビル内のロボットのトータルな作業効率を最大化することである。この課題解決に向けて、エレベーターの利用統計情報からエレベーターが混雑する時間帯を推定し、“当該混雑時間帯にロボットがエレベーターを利用しない”，又は“ロボットが同時刻に搭乗するエレベーターの台数を一定数以下にする”などを制約条件にして、各ロボットの行動計画を作成する。例えば、エレベーターの混雑時間帯にはロボットは充電又はタスクの実行だけを行うようにする（図3）。このようにロボットの行動計画を作成し、ロボットに指示することで、人とロボットの快適な移動環境の維持と、ロボットが実行するタスク量の最大化を両立させることが可能になる。

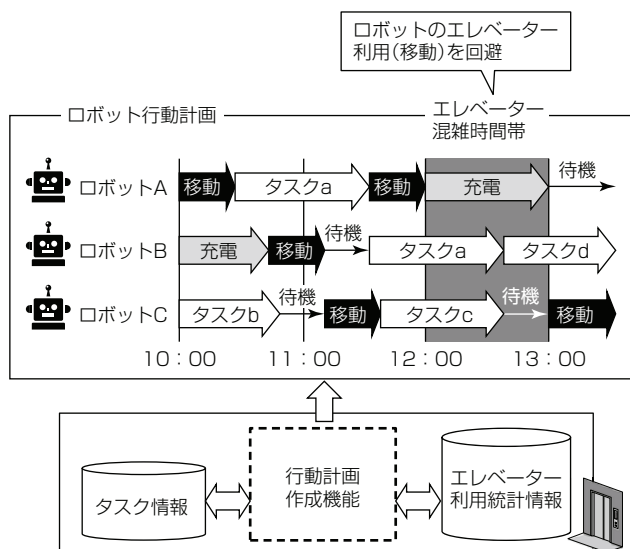


図3. ロボットの行動計画作成機能

2.2.4 ビル内ロボットの誘導制御機能

ビル内には幅が狭い通路など、ロボット同士が同時に通行できない領域（図4のCollision-path）がある。行動計画機能で、このCollision-pathを同時刻に通過するロボットを1台にするなどの制約条件を設けたとしても、エレベーターの待ち時間などによって、ロボットの移動時間には外乱が生じるため、計画した時刻にロボットがCollision-pathを通過できるとは限らない。そこで、この誘導制御機能は、約1秒周期でロボットの位置を取得し、ロボットがCollision-pathに2台以上進入することが予測される場合に、どちらかのロボットをCollision-path進入前で停止させ、一方のロボットを優先して通過させることで、円滑なロボットの屋内移動を実現している。

2.2.5 ビル内ロボットのインフラ協調走行制御機能

地図の経路情報（通路幅や通行方向）をロボットに提供することで、ロボットの経路探索領域（走行パスの生成領域）を制限したり、自己位置推定の分解能を高くするなどロボットの走行制御を走行環境に応じて適切に設定できるようになり、エレベーターの狭い間口を安全に通過できるようになる（図5）。

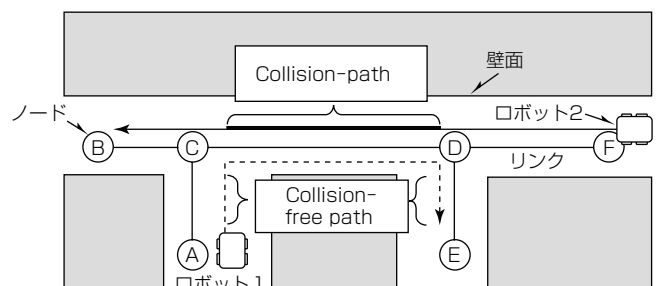


図4. ロボット同士が同時に通行できない領域（Collision-path）

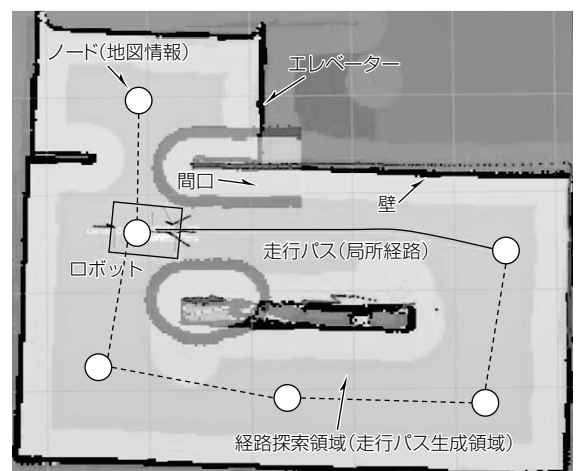


図5. 地図情報を用いたロボットの走行経路探索

2.3 ロボット移動の安心・安全を支える技術

ここでは、ロボット管制誘導システムの安心・安全を支える技術を述べる。

2.3.1 監視カメラを活用した屋内測位

複数のロボットが混在する状況では、通路やエレベーターで、ロボット同士の衝突回避が課題になる。

この課題に対して、当社はビル内の監視カメラを用いてロボットに貼り付けたマークを認識し、監視カメラからマークまでの距離と方位を高精度かつリアルタイムに算出する屋内測位技術を開発している。この技術は、マークに付与されたID (Identification) を識別することで、ロボットの識別と測位を同時に行うことができる。当社製監視カメラ“MELOOK3 NC-7620”を用いた実験で、この屋内測位技術が、奥行3.0×幅5.0×高さ2.7(m)の屋内フィールド内のロボットの位置を平均位置誤差15cm以下、測位処理時間100ms以内で検出できることを確認している(図6)。

2.3.2 安全な移動を実現する誘導照明制御

人とロボットが共生する空間では、例えば、エレベーターからロボットが降りてくる場合に、エレベーターに搭乗しようとする人とロボットがぶつからない、安全な移動を実現する必要がある。

この課題の解決に向けて、当社で開発中のプロジェクトをベースにしたアニメーションライティング装置“てらすガイド”を用いて、エレベーター前の床面や壁面に、ロボットがエレベーターから降りてくる内容を表すコンテンツ

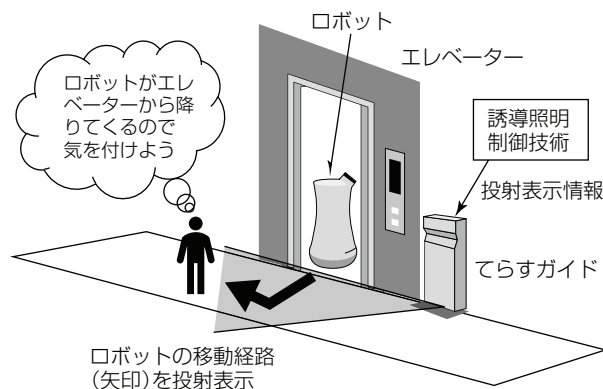


図7. 誘導照明制御技術の適用例



図8. 実証実験の様子

を投射表示することで、人とロボットの安全な移動の実現を支援する誘導照明制御技術の開発を予定している(図7)。

この誘導照明制御技術は、Ville-feuilleから取得したロボットの位置情報と予定移動経路を用いて、ロボットがエレベーターから降りる階と時刻をあらかじめ検出し、適切なタイミングで必要なコンテンツを投射表示することで、ビル内の施設利用者に対して直感的で分かりやすい情報提供を実現し、安全でスムーズな移動を支援する。

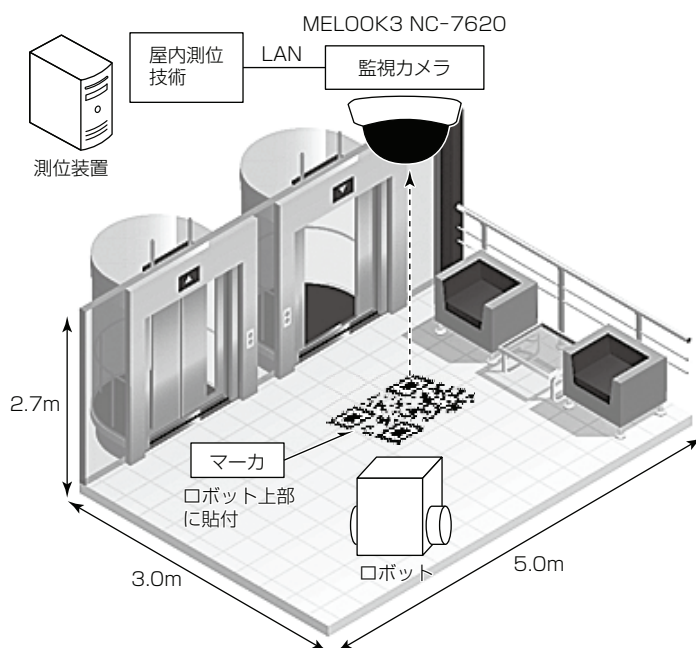


図6. 監視カメラを利用したロボットの屋内測位技術

3. む す び

開発中のロボット・ビル設備連携制御技術について、ビル内ロボットの管制誘導システムと同一システムを安全に運用する要素技術について述べた。現在、当社では、これらの開発技術を用いた実証実験を開始している(図8)。

今後、安心と安全、省人化と自動化、生産性向上をキーワードに持続可能な社会の実現に向けて、技術の深化と新たなソリューションの創出に取り組んでいく。

参 考 文 献

- (1) 三菱電機株式会社スマートシティ・ビルソリューション
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/smartbuilding/>
- (2) 石井周作：三菱電機のスマートビルソリューション，三菱電機技報，94，No.5，264～268（2020）
- (3) 国土交通省：屋内電子地図等のオープンデータ化の取組
https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tkl_000108.html

生産現場の効率化に貢献する 作業分析システム

八田俊之*
Toshiyuki Hatta
三輪祥太郎†
Shotaro Miwa

Worker's Behavior Analysis System to Improve Efficiency of
Production Site

要 旨

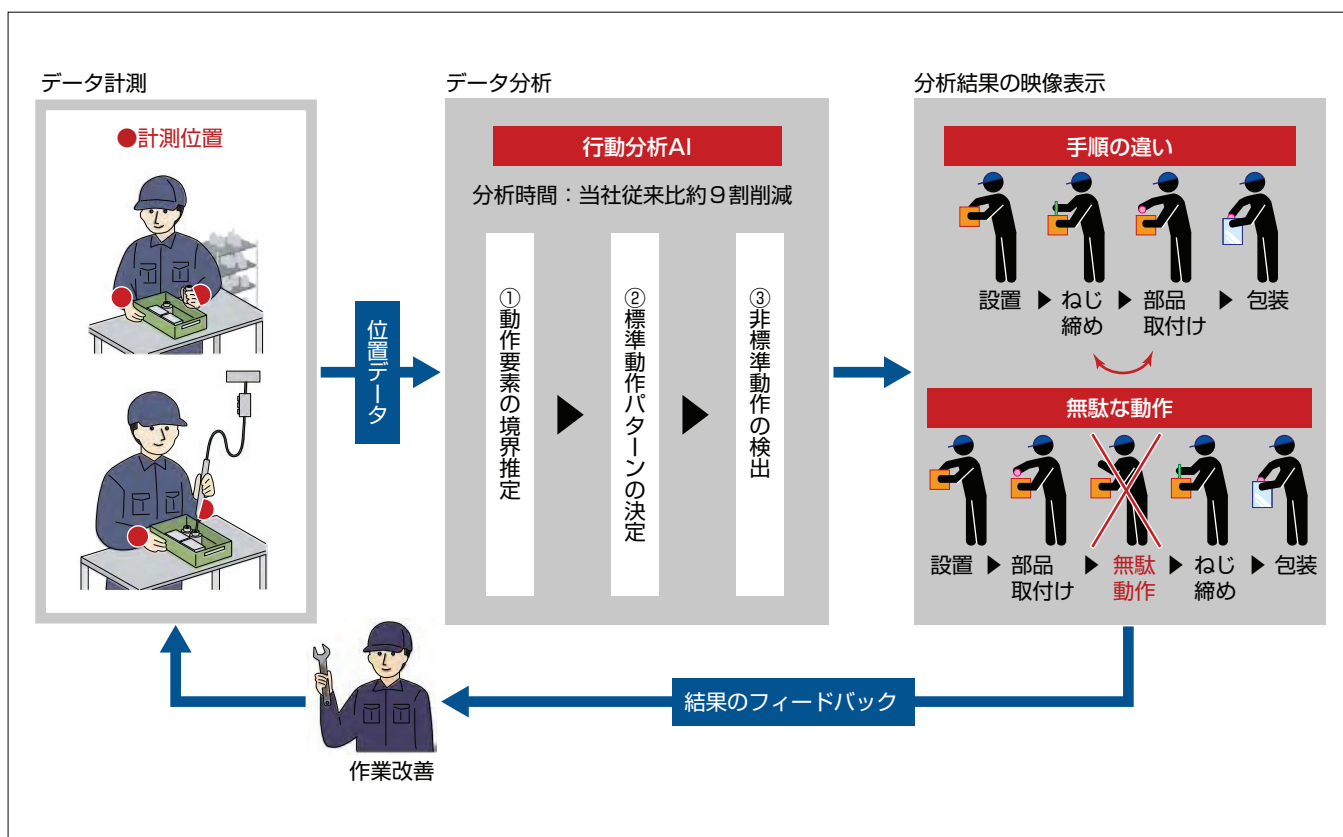
三菱電機は、FAとITの連携によって製造業の業務プロセス全般の効率化を推進するFA-IT統合ソリューション“e-F@ctory”を提唱しており、機器(生産設備)から収集したデータの自動分析による生産現場の改善を実現している。しかし、人(作業者)については、その作業行動は一連の標準動作であるものの、無駄な動作等の非標準動作が含まれるため自動分析が難しい。このため、多くの生産現場でいまだ分析者の目視に頼るVTR(Video Tape Recorder)法等が主流であり、作業分析に多くの時間を要するという問題があった。

一方、当社はこれまでに独自AI技術“Maisart”を用いた行動分析AIを開発している。行動分析AIは、人の一連の

行動を複数の動作要素に自動で分解する技術である。行動分析AIを作業行動に適用することで、動作要素に分解した作業行動の分析が可能になり、また無駄な動作等の非標準動作も検出できる。

この行動分析AIを用いて生産現場の効率化に貢献する作業分析システムを開発した。このシステムは作業行動のデータ計測機能、行動分析AIに基づくデータ分析機能、分析結果の映像表示機能で構成している。これによって、生産現場での作業分析の自動化を実現できる。

このシステムの当社工場での実証実験の結果、従来のVTR法に対して平均1割程度の所要時間で、正解率約9割の自動分析が可能であることを確認できた。



行動分析AIを用いた作業分析システム

行動分析AIは、作業行動を計測したセンサデータを三つの処理“動作要素の境界推定”“標準動作パターンの決定”“非標準動作の検出”で分析することで、作業行動での手順の違いや無駄な動作を検出する。行動分析AIに基づくデータ分析機能と、データ計測機能、分析結果の映像表示機能を統合した作業分析システムによって、作業分析の所要時間を短縮し、生産現場の効率化を推進できる。

1. ま え が き

当社は、FAとITの連携によって製造業の業務プロセス全般の効率化を推進するFA-IT統合ソリューション“e-F@ctory”を提唱しており、機器(生産設備)から収集したデータの自動分析による生産現場での改善を実現している。しかし、人(作業員)については、その作業行動は一連の標準動作であるものの、無駄な動作等の非標準動作が含まれるため自動分析が難しい。このため、多くの生産現場でいまだ目視に頼るVTR法やストップウォッチ法が主流であり、作業分析に多くの時間を要するという問題があった。

この問題に対して、当社は独自AI技術“Maisart”を用いた行動分析AIによって、作業分析の所要時間を短縮することで生産現場の効率化を推進する作業分析システムを開発した。

本稿では、行動分析AI、行動分析AIを用いた作業分析システム、及びこのシステムに関する当社工場での実証実験について述べる。

2. 行動分析AI

行動分析AIは、人の一連の行動を複数の動作要素に自動で分解する技術である。行動分析AIを作業行動に適用することで、複数の動作要素に分解した作業行動の分析が可能になり、無駄な動作等の非標準動作も検出できる。

また、人の行動を対象とした分析技術の多くが教師あり学習に基づく⁽¹⁾のに対し、行動分析AIは教師なし学習に基づくことから、事前の教師付きデータの整備と機械学習が不要であり、導入コストが低いという特長を持つ。

次に、行動分析AIについて、セル生産やライン生産での作業行動として典型的な繰り返し動作を例に、三つの処理“動作要素の境界推定”“標準動作パターンの決定”“非標準動作の検出”について述べる。

2.1 動作要素の境界推定

図1(a)に行動分析AIの入力になるセンサデータの例として、9サイクル分の繰り返し動作から両手三次元位置を計測した六次元センサデータの時系列グラフを示す。

動作要素の境界推定では、確率的生成モデル⁽²⁾に基づき、センサデータを複数の動作要素に分割する。ここで、動作要素は繰り返し動作を構成する要素のことであり、例えば“右手を上へ挙げる”“左手を前に伸ばす”などに対応する。それぞれの動作要素は、クラス分類と継続時間で表される。図1(b)は、図1(a)に示したセンサデータを動作要素に分割した時系列グラフである。

2.2 標準動作パターンの決定

標準動作パターンの決定では、まず、多重整列⁽³⁾によって前節で求めた動作要素をサイクル間で比較し、対応する動作要素を紐(ひも)付ける。図1(c)は、図1(b)で示した動作要素を紐付けた結果のマトリックス表現である。各行がサイクル、各マスが動作要素に対応し、紐付けられた動作要素を同じ列に配置している。

次に、マトリックス表現で同列にある複数の動作要素の

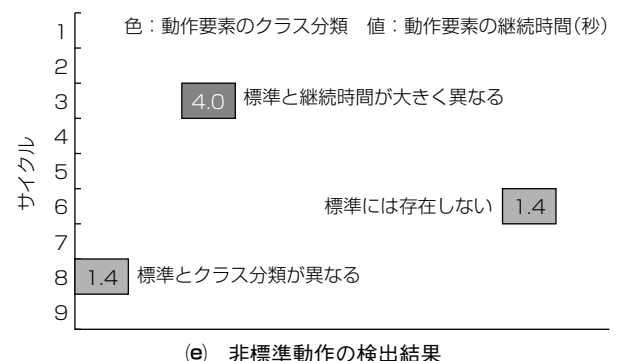
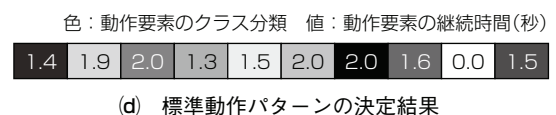
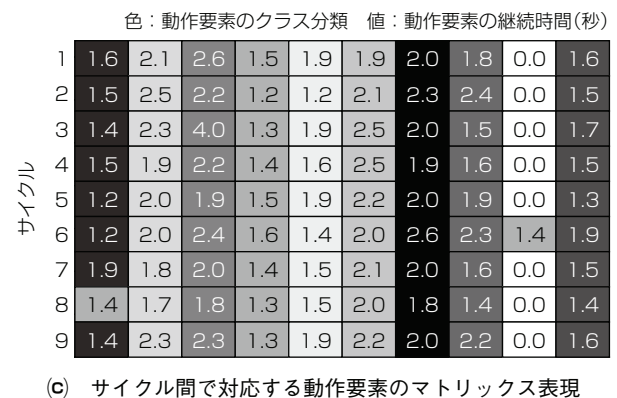
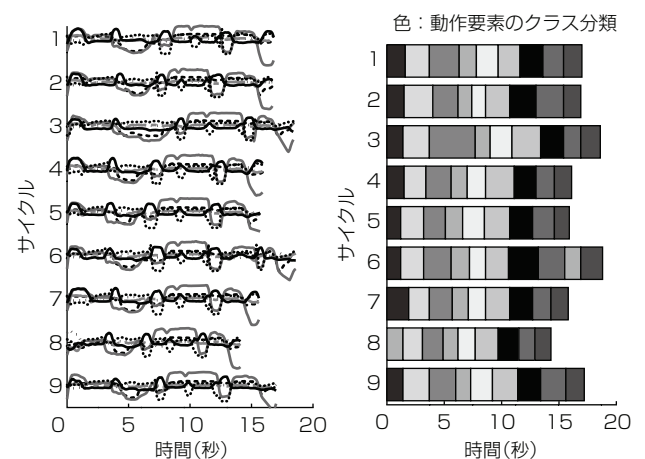


図1. 行動分析AIの処理

統計分析によって、最も標準的なクラス分類と継続時間を算出し、標準動作パターンとして決定する。図1(d)は、図1(c)の結果から決定した標準動作パターンの例である。

2.3 非標準動作の検出

非標準動作は、各動作要素と標準動作パターンを比較することで、標準とクラス分類が異なる動作要素、標準と継続時間が大きく異なる動作要素、又は標準には存在しない動作要素として検出できる。図1(e)は、図1(c)に示した各動作要素と、図1(d)に示した標準動作パターンとの比較による非標準動作の検出結果である。

3. 行動分析AIを用いた作業分析システム

行動分析AIを用いた作業分析システムは、生産現場での作業分析の所要時間を短縮し、効率化を推進することを目的にしている。このためこのシステムは、行動分析AIの入力になるデータ計測機能、行動分析AIに基づくデータ分析機能に加えて、分析結果の内容を分析者が短時間で把握するための映像表示機能を備えている。また分析結果に誤りがある場合に対応するため、分析者が誤りを短時間で修正できる修正支援UI(User Interface)を実装している。

次に、このシステムの“データ計測機能”“分析結果の映像表示機能”“修正支援UI”について述べる。

3.1 データ計測機能

このシステムでは、三次元カメラ(Intel RealSense^(注1) D400シリーズ)によって、次の2点を計測する。

- (1) 作業者の繰り返し動作を映した映像
- (2) 作業者の両手三次元位置の時間変化(センサデータ)

図2にデータ計測の様子を示す。作業者は色付きのリストバンドを両手に装着し、これを目印として三次元映像から検出することで、両手三次元位置の時間変化を計測する。



図2. 三次元カメラによるデータ計測

なおこのシステムでは、2.1節に述べたように行動分析AIはサイクルごとに分割されているセンサデータを入力として想定しており、連続的に計測したセンサデータをサイクルごとに分割する機能を次の2方式で実装している。

- (1) センサデータの相互相関解析による自動分割
- (2) GUI(Graphical User Interface)による手動分割

(注1) Intel RealSenseは、Intel Corp.の登録商標である。

3.2 分析結果の映像表示機能

このシステムでは、行動分析AIの分析結果と3.1節で計測した映像とを連携させて表示する。具体的には、サイクル間で対応する複数の動作要素の映像を同時再生することによって、分析者は分析結果の内容を短時間で把握できる。

図3は分析結果の表示例であり、左側は動作要素の時系列グラフとマトリックス表現、右側がサイクル間で対応する動作要素の映像である。時系列グラフとマトリックス表現では、行動分析AIが検出した非標準動作のマスに横線を表示して強調している。映像はマトリックス表現1列目の動作要素を同時再生しており、非標準動作であるサイクル8だけ縁取りで強調している。これによって分析者は、分析対象の繰り返し作業の冒頭は標準的に“右手で取る”動作であるが、サイクル8だけ“左手で取る”非標準動作をし

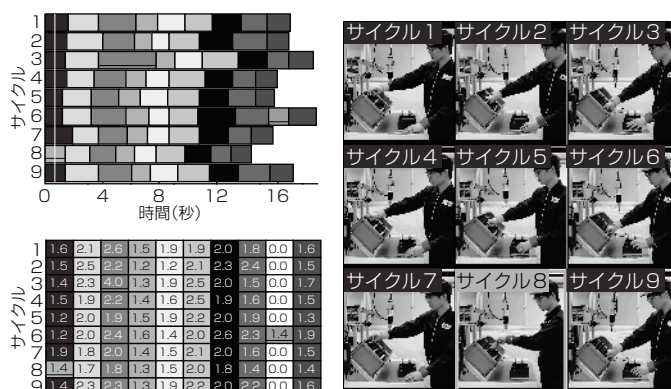


図3. 作業分析システムによる分析結果の映像表示

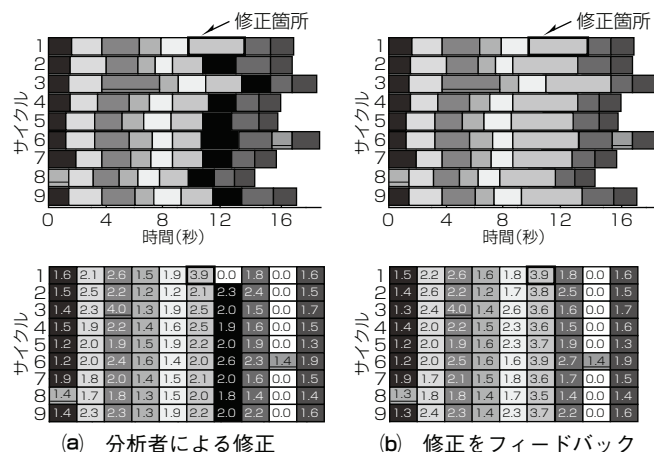


図4. 作業分析システムの修正支援UI

ている、と短時間で把握できる。

3.3 修正支援UI

このシステムのデータ分析は行動分析AIに基づくが、その分析結果には例えば“一つのねじ締め動作が二つの動作要素に分かれている”等、分析者の考えと一致しない誤りが含まれ得る。

これに対してこのシステムでは、分析者が分析結果の一部をGUI上で修正し、行動分析AIにフィードバックして再分析させる修正支援UIを実装している。これによって、分析者は少ない操作で、分析結果全体を分析者の考えと一致するように修正できる。

図4は修正支援UIによる修正の例であり、図3で示した分析結果について、マトリックス表現の6列目と7列目をまとめている。まず、分析者はサイクル1の動作要素二つをGUI上で結合する修正を行う(図4(a))。次に、修正内容を行動分析AIへフィードバックして再分析させる。これによって、サイクル2～9についても二つの動作要素が自動でまとめられる(図4(b))。

4. 実 証 実 験

行動分析AIを用いた作業分析システムに関する当社工場での実証実験及び結果を述べる。実証実験は、当社工場内の2ラインで実施した。対象としたライン及びデータ計測の条件を表1に示す。データ計測1回について作業者1名を対象とし、データ計測10回で作業者延べ10名の作業を計測した。

またこの実験では比較のため、計測したデータに対して次に示す三つの手法で分析を実施した。

- (1) 従来のVTR法による分析(“目視”)
- (2) 行動分析AIによる分析(“AI自動”)
- (3) 行動分析AIと修正支援UIによる分析(“AI支援”)

分析者は生産改善業務に従事する当社社員1名であり、対象ラインの作業工程、このシステムの使用方法を事前知識として持っている。“目視”及び“AI支援”では、分析者は対象ラインでの作業工程ごとの作業時間を全て確認できるまで分析を行った。

次に、“AI自動”による分析結果の正解率、及び各手法による分析の所要時間について評価結果を示す。

4.1 分析結果の正解率

2.1節に述べた“AI自動”による動作要素の境界推定結果について、“AI支援”の結果を真として各時刻でのクラス分類の正解率を評価した。その結果、対象ラインAでの正解率88.3%、対象ラインBでの正解率100%になった(図5(a))。

表1. 実証実験の対象ライン及びデータ計測条件

対象ライン	作業内容	作業者数	計測回数	総動画時間
A	組立, 検査	3	8	81分
B	組立	1	2	37分

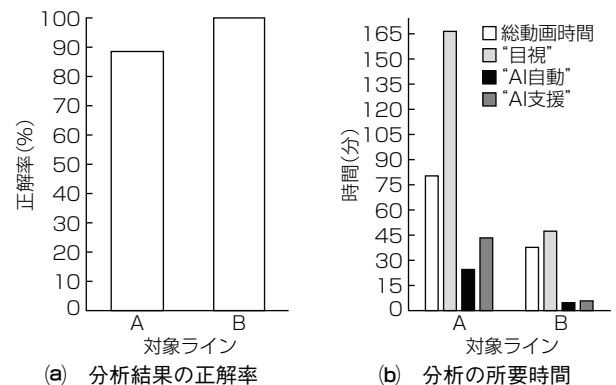


図5. 実証実験結果

すなわち行動分析AIによって、正解率約9割の分析が可能であることを確認できた。

4.2 分析の所要時間

各手法で分析の所要時間を評価した結果を図5(b)に示す。“目視”による分析の所要時間は対象ラインAで約167分、対象ラインBで約47分であった。これは動画の総時間の1.3～2.1倍に当たる。これに対して“AI自動”による分析の所要時間は対象ラインAで約24分、対象ラインBで約4分であり、“目視”に対して平均1割程度であることを確認できた。

また、分析結果に含まれる“AI支援”の所要時間は対象ラインAで約43分、対象ラインBで約5分であり、“目視”に対して平均2割程度であることを確認できた。

5. む す び

当社が開発した行動分析AI、及び作業分析システムについて述べた。またこのシステムの当社工場での実証実験によって、行動分析AIは従来のVTR法と比較して平均1割程度の時間で正解率約9割の分析が可能であることを確認できた。また行動分析AIの分析結果に誤りがある場合でも、修正支援UIによって、さらに1割程度の時間で修正可能であることを確認できた。

参 考 文 献

- (1) Abdallah, Z. S., et al.: Activity Recognition with Evolving Data Streams: A Review, ACM Computing Surveys, **51**, No.4, 71 (2018)
- (2) Nakamura, T., et al.: Segmenting Continuous Motions with Hidden Semi-Markov Models and Gaussian Processes, Frontiers in Neurorobotics, **11**, 67 (2017)
- (3) Hogeweg, P., et al.: The alignment of sets of sequences and the construction of phyletic trees: An integrated method, Journal of molecular evolution, **20**, No.2, 175～186 (1984)

人×機械の遠隔機械操作システム

Remote Machine System with Sense of Oneness

春名正樹*
Masaki Haruna

畑 浩一*
Koichi Hata

川口 昇†
Noboru Kawaguchi

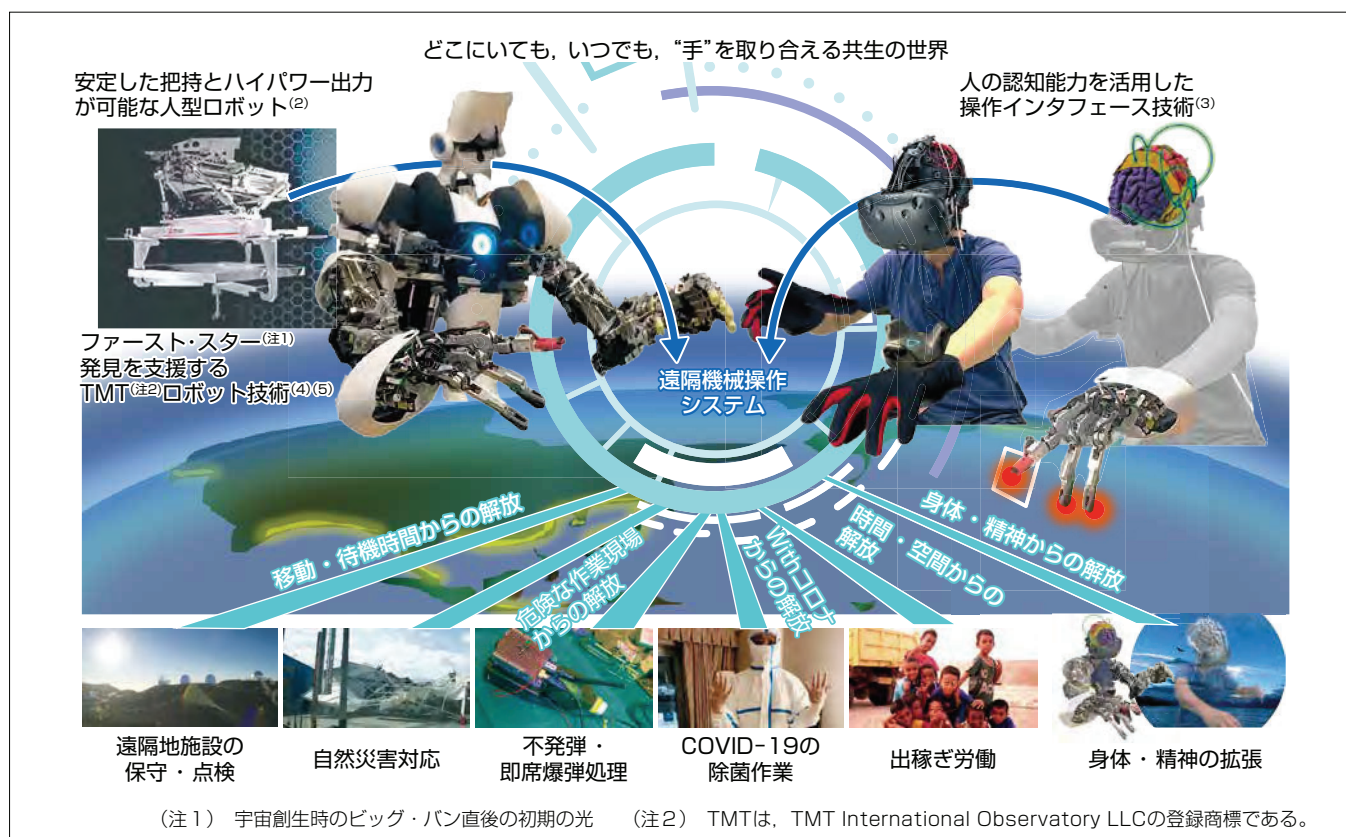
荻野正樹‡
Masaki Ogino

小池俊昭§
Toshiaki Koike

要 旨

遠隔にある観測施設の保守点検、頻発する自然災害対応、不発弾・即席爆弾処理、新型コロナウイルス(COVID-19)除菌作業等の身体的・精神的な負担の高い作業に対して、遠隔機械操作システム技術は人の安全と安心を実現する。大型望遠鏡事業で培った機構設計・駆動制御技術を適用した人型遠隔操作ロボットは、安定した把持を可能にするセルフロック機能を搭載した多指ハンドと、ハイパワー出力を可能にする直動リンク機構を持っている。オペレータの操作負担を最小限にするシンプルかつ直感的な操作インタフェースは、遠隔機械の力触覚情報を視覚的にフィードバックする新たに開発した視覚的力触覚技術を適用している。視覚的力触覚フィードバックが脳内情報流の45%低減効果、及び視覚以外のモーダル(音と振動)フィードバック

に対する優位性を持つことを脳波信号から確認した。これらの技術を統合した小型遠隔操作ロボットは、6 kgの硬く重いアルミニウム部材から壊れやすい生卵やポテトチップスまでを、シンプルな操作インタフェースでありながら直感的に把持・運搬可能である。筆者らは“Small World Project”⁽¹⁾としてインドネシアの無電化・電力不安定地域に暮らす人々との交流活動を通して、慣れ親しんだ家族や友人、地域での生活が人間の幸福にとって不可欠であると実感し、生活と労働の両立の問題を考えてきた。仮想／拡張現実(VR/AR)技術とグローバルな通信技術の進展で、この遠隔機械操作システムが国内外での労働人口偏在のソリューションになることを目指し開発を推進している。



人×機械の遠隔融合システムが実現する、“どこにいても、いつでも、“手”を取り合える共生の世界”(イメージ)

TMT(Thirty Meter Telescope)ロボット⁽⁴⁾⁽⁵⁾開発で培った要素技術群を適用したハイパワーな人型遠隔操作ロボット、及び視覚的力触覚⁽²⁾⁽³⁾を搭載したシンプルかつ直感的な操作インタフェースの統合によって、人の身体的・精神的な負担を解放し、さらに“拡張”への進化を目指す。遠隔機械操作システムは人の安心と安全、慣れ親しんだ地域で家族や友人との生活を維持できる遠隔労働を可能にする。“どこにいても、いつでも、“手”を取り合える共生の世界”実現を目指し開発を推進する。

1. ま え が き

日本を含む先進国では人口減少と少子高齢化による労働力不足が懸念されている。その解決策として自律ロボットの開発があり、人工知能技術のロボット適用が期待されている。特に、移動技術についてはGoogle社の自動運転、及びBoston Dynamics社やMIT(マサチューセッツ工科大学)の脚移動の進展は著しい(図1)。三菱電機の実験でも人運転行動から人工知能技術によって自動運転行動が獲得可能であることを確認している⁽⁶⁾。

一方で、人の手を代替できる精巧な自律マニピュレーションの実現は数十年先であるとも言われている。近年、VR/AR技術及び通信技術の進化から、遠隔操作が注目を集めている。1940年代に放射線環境での作業を目的に研究が始まり、1980年代に電気・計算機技術の進展によってテレグジスタンスやテレプレゼンスに昇華された。近年は手術支援ロボットが実用化されて活躍しているが、人作業代替を実現した遠隔機械操作システムはない。

2. ハイパワーな人型遠隔操作ロボット

三菱電機の大型望遠鏡事業⁽⁴⁾⁽⁵⁾で重量物の高精度な駆動を実現するために培ったセルフロック機構をハンドに、直動リンク機構を上半身に採用した42自由度の人型遠隔操作ロボット技術検証機を構築した。片手で11自由度を持つ機械ハンドの各関節には、高減速ウォームギヤが実装され、対象物形状に沿って安定した把持が可能である。17自由



追跡調査時に撮影(2016年12月)

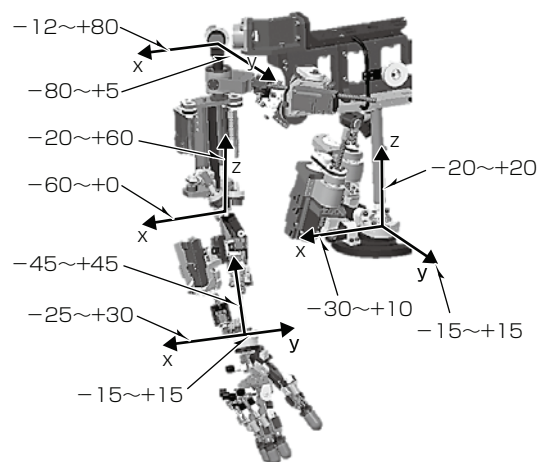
(a) 予想外の状況に即座に対応するGoogle社の自動運転車両



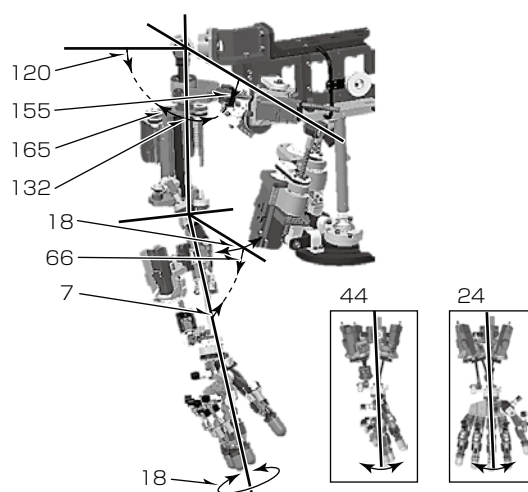
デモ参加時に会場で撮影(2015年5月)

(b) Boston Dynamics社の4足歩行ロボット

図1. 自律化の進展が著しい移動技術



(a) 駆動範囲(単位:°)



(b) 駆動トルク(単位:Nm)

図2. 人型遠隔操作ロボット試作機的设计⁽²⁾

度を持つ機械上半身(ハンド除く)の各関節には直動リンク機構が実装され、限られた体積と質量で高い推力を実現している。駆動範囲と駆動トルクを図2に示す⁽²⁾。

3. 直感的かつシンプルで繊細な作業ができる操作インタフェース

3.1 直感的な運動伝達インタフェース

手を使う作業をする際には、オペレータの手先位置と姿勢をロボットハンドへ正確に運動伝達することが重要である。この実現方式として順運動学方式と逆運動学方式の二つがある。順運動学方式として小型アームを利用した機械式操作インタフェース、逆運動学方式としてオペレータの手先空間6自由度計測できる光学計測式操作インタフェースを運動伝達検証用として試作した(図3)。機械式操作インタフェースはロボットと同じ構造の小型アームをオペレータが動かすことで直感的に全ての関節角度を生成できる。演算が不要であり、かつ、計測安定性が高い利点がある。一方で、操作インタフェースの自重がオペレータの負

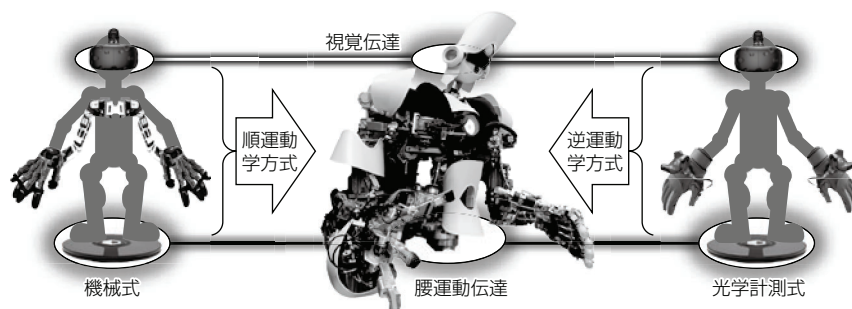


図3. 二つのオペレータの手先位置・姿勢の運動伝達インターフェース

荷になる課題がある。光学計測式操作インターフェースは手先の空間計測だけでよくシンプルでオペレータの負荷が小さい利点がある。一方で、冗長自由度や関節駆動限界等について対策が必要である。アプリケーションによって運動伝達インターフェースの選択、組合せ、切替えをして最適な操作インターフェースを提供することが可能である。

3.2 シンプルで繊細な作業ができる視覚的力触覚伝達技術

3.2.1 既存の力触覚伝達技術

遠隔機械の力触覚情報を物理的に伝達する方式として、設置型とグローブ型がある(表1)。特にHaptX社のグローブ型のHaptX Glovesは、各指先に30点の力フィードバックを搭載した最先端の市販品であって秀逸である。ただし、システムとしては圧縮機を含めて大型化する課題がある。また、人の力触覚は表層の皮膚感覚刺激だけではなく、深部感覚の重要性も指摘されている。

3.2.2 視覚的力触覚技術の提案

人の力触覚認知には視覚が深く関与していることが知られている。Intuitive Surgical社の手術支援ロボットda Vinci^(注4)では、物理的な力触覚情報がなくとも手術が可能であることが示唆されている。これら知見と筆者らの体験から、この開発では図4に示すように力触覚映像をロボットのカメラ映像にAR技術によって重畳することで、操作インターフェースの簡素化と操作性の向上の両立を目指した⁽³⁾。ロボット指先の接触点に視覚的力触覚情報を重畳する提案は筆者らの調査範囲で前例がない。また、この手法はARを利用するため遮蔽物のある作業に対してもロボット指先の接触状態をオペレータに視覚的に知らせることが可能である。

(注4) da Vinciは、Intuitive Surgical Inc.の登録商標である。

3.2.3 脳波計測による操作性評価

ハンド接触点に視覚的な力触覚情報を重畳する提案手法の操作性を、脳波(EEG)計測データにSCoT(Smooth Coherence Transform)ライブラリを使用して解析・評価した。SCoTは脳波センサによって取得された脳波データから定常ベクトル自己回帰モデルを構築して脳内信号の接続性の相関を推定する手法で

ある。この解析では、32チャンネルの電極を10-20法で規定される主要な頭皮の位置をカバーするように配置してデータ計測した後に、前頭部、後頭部、頭頂部、側頭、運動領域の五つの部位に射影し、さらに脳内信号の接続性の因果関係解析にffDTF(full frequency Directed Transfer Function)を用いて、これら五つの部位の脳内信号の流れの方向(興奮している時系列)を矢印で、流れの量を線の太さとして表す。本稿ではこの脳内信号の流れの方向と量を“脳内情報流(無単位)”という(図5)。

視覚効果の有無による操作性を図6に示すVR環境で評価した。1分間、次々と現れる“生卵”をゴールエリアに移

表1. 物理的な力触覚伝達インターフェース

名称	Sigma.7	HGlove	Prime Haptic	HaptX Gloves	なし
メーカー／研究者	Force Dimension	Haption	Manus VR	HaptX	TechExperts Inc.
質量(kg)	データなし	0.75	データなし	0.45 ^(注3)	データなし
型	設置型	グローブ型	グローブ型	グローブ型	グローブ型
手首への力フィードバック	✓				
指先への力フィードバック	✓	✓		✓	✓
指先への触覚フィードバック			✓(5点)	✓(120点)	

(注3) 空気圧縮機を除く

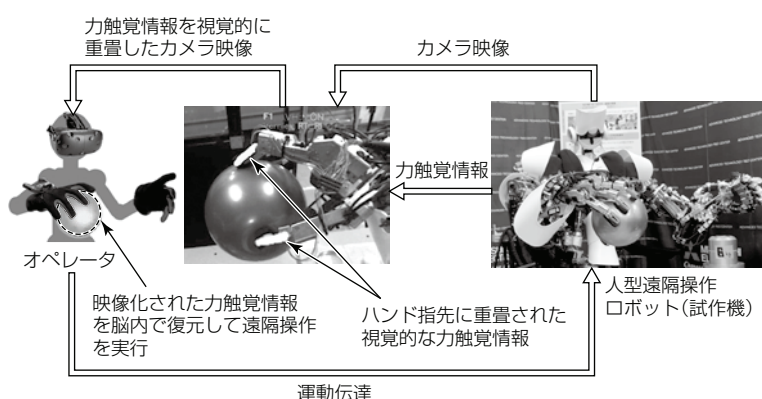


図4. 提案する視覚的な力触覚伝達技術

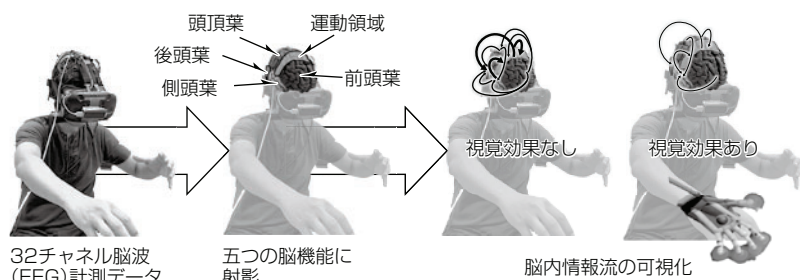


図5. 操作性の脳波データ解析プロセス⁽³⁾

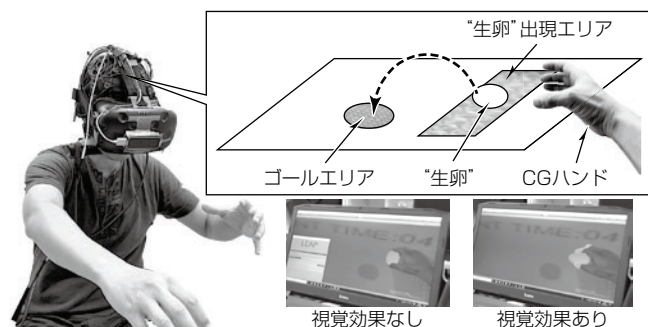


図6. VR環境での操作性評価試験

動させる作業である。結果として、脳内情報流として45%の低減、及び“慣れ”を促進する効果が確認された⁽³⁾(図7(a)(b))。また、被験者の主観評価と脳内情報流の低減量には高い相関があり(ピアソン係数: 0.795, p 値: 0.011<0.05), 図7(c)), 脳波が操作性評価の定量的指標として活用できることを確認できた。

さらに、人の応答性が高いとされる“音(スピーカー)”, 物理的な力触覚フィードバックの一つである“振動(モータ)”, 及び提案手法の視覚フィードバックとして“光”の三つのモデルについて操作性の評価を実施した(図8)。結果として、把持力は“光”が最も小さく操作性が高いことが確認された(図9(a))。また、主観評価として、遠隔作業空間に情報が集約されていることが操作性を向上させるという意見が多く“光”が最も高い評価であった(図9(b))。脳内情報流としては“振動”と“光”が同等であった(図9(c))。

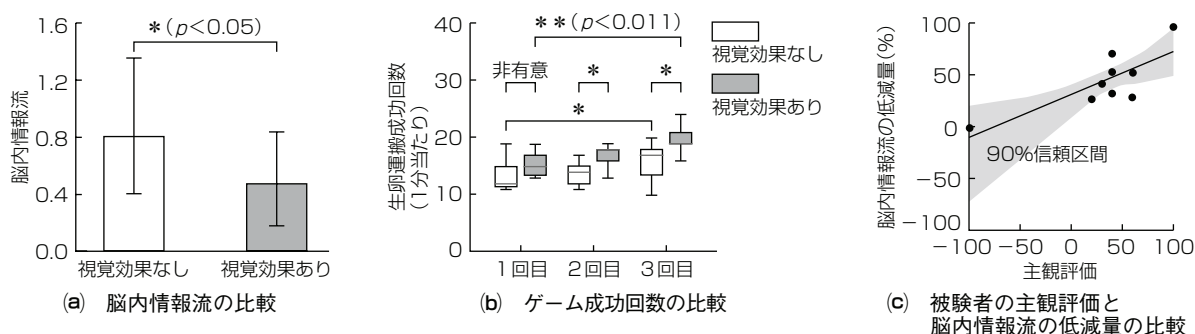


図7. 提案する視覚的力触覚技術の有無による評価結果⁽³⁾

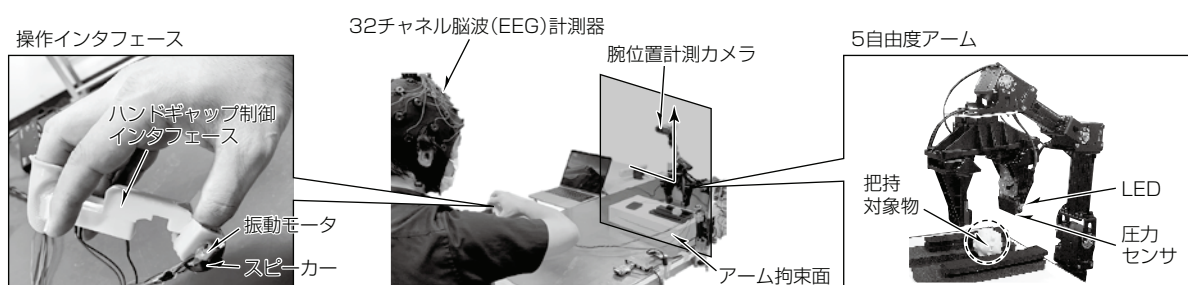


図8. “音”“振動”“光”のモーダルフィードバックの比較評価試験

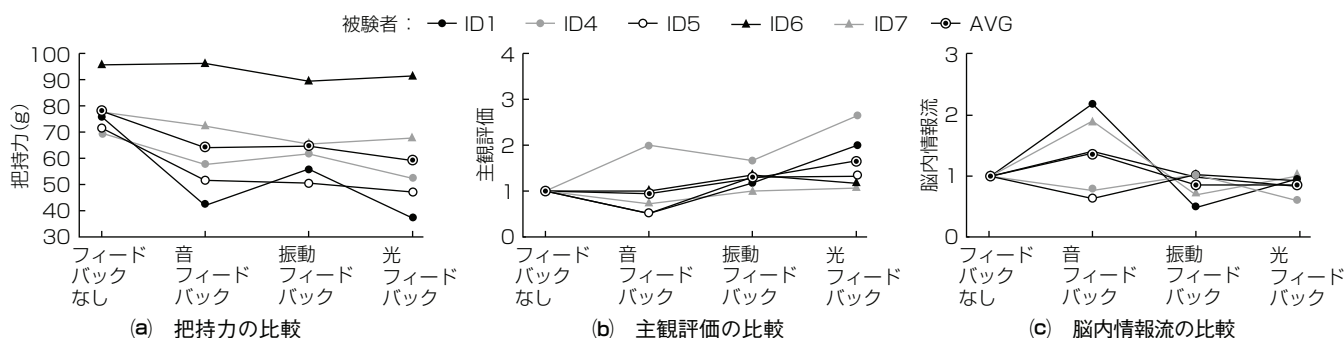


図9. “音”“振動”“光”のモーダルフィードバックの比較評価結果

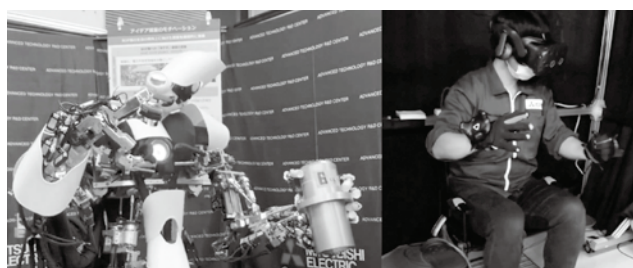
これらの評価結果から、感覚フィードバックとしてハンド接触点に視覚的な力触覚情報を重畳する提案手法は、操作インタフェースを最小限にしながらもオペレータの認知負荷を低減するとともに、直感的で繊細な作業に効果があることを確認できた。

4. 人型遠隔操作ロボットシステム試作機での作業検証

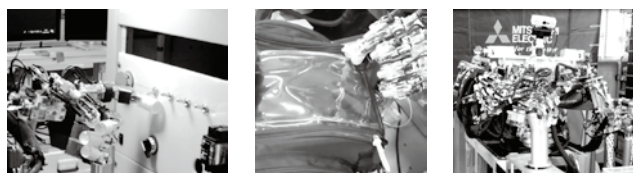
セルフロック機構を搭載したハンドはボール、アルミニウム容器、石等を安定して把持できた(図10(a))。また、ハンドを除く各関節軸に直動リンク機構を採用したことで



(a) セルフロック機構搭載ハンドの安定した把持



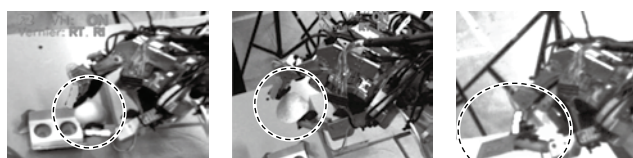
(b) 片腕 6 kg以上の把持・運搬が可能なハイパワーな人型遠隔操作ロボット



トグルスイッチ操作 ファスナー操作 円筒挿入操作

(c) 遠隔操作による様々なタスクへの柔軟な対応

図10. 直感的な運動伝達インタフェースによる作業検証



生卵の把持・運搬

ポテトチップスの把持・運搬

名刺の把持・運搬



アルコール容器把持で遮蔽が発生時にもARで力触覚情報を提示

図11. 視覚的な力触覚技術を活用した繊細な作業検証

限られた体積でハイパワーな出力が得られ、片腕で 6 kg 以上の対象物把持・運搬ができた(図10(b))。さらに、直感的な運動伝達インタフェースを介して人が操作することで初めてのタスクでも柔軟に実施することが可能であった(図10(c))。

生卵、ポテトチップス、名刺の三つの繊細な把持・運搬作業、及びアルコール容器把持について提案した視覚的な力触覚技術の検証を実施した(図11)。どの作業も把持力に応じて視覚的な力触覚情報が変化するハンド指先の色の変化を見ることで適切な力で把持と運搬が可能であること、遮蔽物のある作業に対してもロボット指先の接触状態を視覚的に提示可能であることを確認できた。

5. む す び

本稿では、大型望遠鏡事業で培った技術を適用したハイパワーな人型遠隔操作ロボット、これを直感的に操作する運動伝達インタフェース、及びシンプルで繊細な作業を可能にする視覚的な力触覚伝達技術の提案と脳波計測による有効性実証結果について述べた。これら要素技術を統合したシステムは 6 kg 以上の対象物から繊細な把持力調整が必要なポテトチップスまでの把持・運搬が可能であることを実証した。今後、開発した技術をコアに、身体的・精神的な負担の高い作業に対して人の安心と安全、さらに、Small World Projectの活動⁽¹⁾で考えた人間の幸福を実現できる生活と労働の両立を可能にする遠隔機械操作システムの社会実装を目指す。

今回の技術開発に当たって、ハードウェア及びソフトウェアの製造には三菱電機エンジニアリング(株)と三菱電機マイコン機器ソフトウェア(株)が参画し実現した。

参 考 文 献

- (1) 三菱電機(株)：三菱電機グループとSDGs Small World Project BOP層の暮らしに向けた研究開発の取組 (2018)
http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/csr/management/sdgs/pdf/small_world_project.pdf
- (2) 春名正樹, ほか：人×機械の遠隔融合システムの開発—視覚的な力触覚を利用した操作提案と基礎検証—, 情報処理学会インタラクシオン2020, 448~453 (2020)
- (3) Haruna, M., et al.: Proposal and Evaluation of Visual Haptics for Manipulation of Remote Machine System, Front. Robot. AI, DOI: 10.3389/frobt.2020.529040 (2020)
- (4) 三菱電機(株)：注目の研究・技術/次世代超大型望遠鏡TMT「分割鏡交換ロボット技術」(2016)
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/spotlight/a28/index.html>
- (5) Haruna, M., et al.: Force control technology of segment mirror exchange robot for Thirty Meter Telescope(TMT), Proc. SPIE 9906, Ground-based and Airborne Telescopes VI (2016)
- (6) Otsubo, S., et al.: Modular Neural Network for Learning Visual Features, Routes, and Operation Through Human Driving Data Toward Automatic Driving System, JACII 2020, 24, No.3, 368~376 (2020)

デジタルトリプレットを活用した 作業支援システム

Worker Support System Utilizing Digital Triplet

佐藤 剛*

Go Sato

梅田 靖†

Yasushi Umeda

谷川民生‡

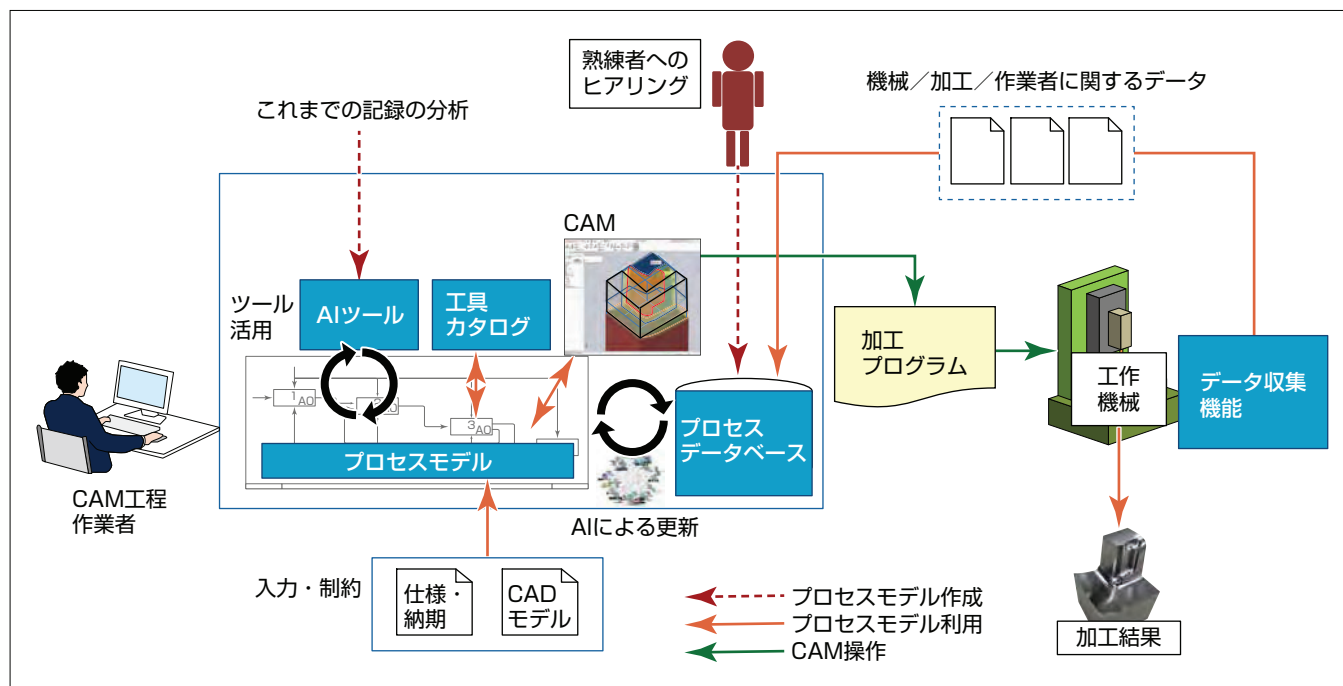
Tamio Tanikawa

要 旨

近年、Industry4.0に代表されるように生産システムをサイバー化してデジタルツインを構築し、予防保全や生産性向上のためにAIやシミュレーションを活用する試みが進んでいる。しかしながら、これらの試みでは、日本の製造業の強みであり、生産性向上に寄与し、他社との差別化による競争力強化につながる現場のカイゼンや熟練者の暗黙知を活用できる枠組みにはなっていない。そこで、人がデータから価値を生み出す知的活動世界をデジタルツインと一体で構築し、設計から生産、使用、メンテナンスなどのエンジニアリングチェーン全体で人のエンジニアリング活動を支援する“デジタルトリプレット(以下“D3”という。)”が提唱されている。D3では、知的活動を自動化するシステムを構築するのではなく、作業者の支援を行うシステムを構築し、作業者自身が知的活動の中心になる。

今回の作業支援システムの開発では高度な金型製作を題材として、D3の考え方にに基づき、作業者の暗黙知の形式

化と作業者の支援を実現するシステムの構築を目的にした。D3で、作業者の知的活動をプロセスモデルとして記録するための汎用的な記述言語PD3(Process Modeling Language for D3)を策定した。金型製作の工程の一つである“CAM (Computer Aided Manufacturing)工程”は工作機械で加工するためのプログラムを作成する工程であるが、製品の要求仕様を達成するための加工法や加工条件を決定する重要な工程であり、後工程への影響も大きい。そのため、この開発ではCAM工程を作業支援の対象にした。CAM工程の作業をPD3によってプロセスモデルとして記述し、そのプロセスモデルを実装した作業支援システムを構築した。非熟練者のCAM工程を支援するケーススタディで、非熟練者が作業支援システムで学習することで適切な加工工程を設計可能になることを確認した。この結果から、試作回数の削減や材料廃棄の低減といった加工工程のロスの削減、非熟練者への知識伝達の見込みを得た。



D3を活用した作業支援システム

この開発では、D3の考え方にに基づき、金型製作のCAM工程(工作機械で加工するための加工プログラムを作成する工程)を支援する作業支援システムを構築した。

1. ま え が き

近年、Industry4.0に代表されるように、生産システムをサイバー化してデジタルツインを構築し、予防保全や生産性向上のためにAIやシミュレーションを活用する試みが進んでいる。しかしながら、これらは日本の製造業の強みである現場のカイゼンや熟練者の暗黙知を活用できる枠組みにはなっていない。このため、人がデータから価値を生み出す活動を行う“知的活動世界”をデジタルツインと一体で構築し、設計から生産、使用、メンテナンス、資源再利用などのエンジニアリングチェーン全体で人のエンジニアリング活動を支援するD3が提唱されている⁽¹⁾。

高度な金型製作を題材としてD3の考え方に基づいて、作業者の暗黙知の形式化及び作業者の支援を実現するシステムの構築を目的として研究開発を行った。開発したシステムによって、加工工程のロスの削減による生産効率の改善、さらには高度加工技術ノウハウの知財化等によるグローバル競争力強化に寄与することを目指している。

2. D3

D3は物理世界・サイバー世界から構成されるデジタルツインに、三つ目の階層である作業者がデータから価値を創出する活動を行う“知的活動世界”を加えて構成される。D3での“知的活動世界”では、知的活動を自動化するシステムを構築するのではなく、作業者の支援を行うシステムを構築し、作業者自身が知的活動の中心になる。

D3上での作業者は、図1に示すように、“①データ収集”、種々のAIツール、シミュレータなどのソフトウェアツールを活用した“②情報分析”、作業者による“③意思決定”及び物理世界での計画の“④実施”に相当する“エンジニアリングサイクル(知的活動のプロセス)”を通じて、データから価値を創出する。

これまでの生産システム作業者は、物理世界だけでエンジニアリング活動を行っていたため、知識、経験が人に蓄積されていくのに対して、D3ではエンジニアリングサイクルを行う際の作業者支援を通じて、エンジニアリングサイクルを実施する手順がプロセスとして記録されるなど、エンジニアリング活動の記録(動態保存)が可能になる。このようにエンジニアリングサイクルを動態保存し、アーカイブ化することで、再利用、他製品や教育への展開、知識化への活用が期待される。

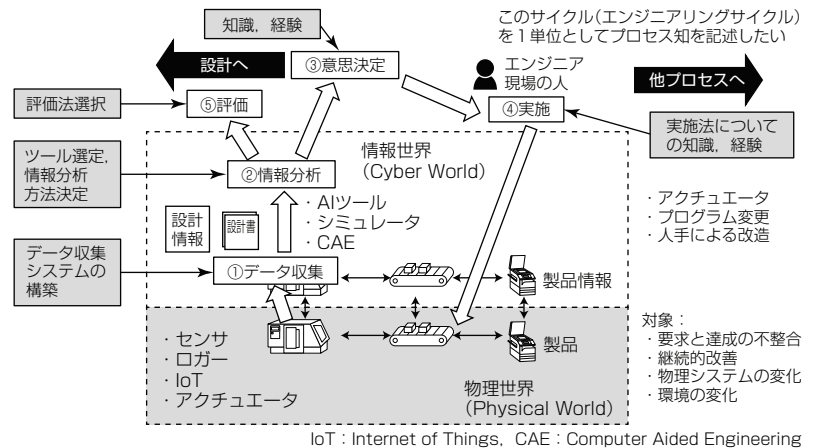


図1. D3でのエンジニアリングサイクル⁽¹⁾

3. 金型製作での作業支援

3.1 作業支援の対象とする工程

金型製作は、図2に示すように、受注から出荷までの複数の工程に分割されている。この開発では、実証フィールドとした金型製作工場での過去の不良事例分析から、特にエラーが生じやすく、後工程への影響が大きい“CAM工程”を作業支援の対象とすることにした。

“CAM工程”は、CAMソフトウェアを用いて、設計工程で作成したCADモデルの形状に基づき、工作機械を動作させる加工プログラムを作成する単純な工程に見えるが、製品の要求仕様に対して金型に求められる精度や納期を達成するための加工条件や加工順番を作業者が決定する重要な工程になっている。特に、加工条件や加工順番の決定の際に、作業者は加工不良の有無や加工精度を個人の経験に頼った予測を行い、作業者ごとに異なる判断を行っている。

作業者の予測に不足や失敗があると、加工不良が生じて再加工など手戻りが生じる。現状のCAMソフトウェアでは加工現象を考慮し、加工精度などを判断するための機能がないことが一般的である。この開発では、CAM工程での作業者の判断の個人差や予測の失敗といった課題を解決するため、作業支援システムを構築する。

3.2 D3フレームワークでのプロセス記述方法

D3では作業者の知的活動を“動態保存”し、参照、検索、他者と共有できる仕組みを構築する必要がある。そこで作業者の知的活動をプロセスモデルとして記述するための記述言語に必要な13項目の要件を決定し、記述言語PD3を策定した。これは、IDEF0(Integrated Computer Aided



図2. 金型製作の工程

Manufacturing DEfinition for Function Modeling 0)を改良した汎用的なプロセス記述言語である。

図3にPD3の記述例を示す。プロセスモデルの最小単位である工程は、図3(a)のように入力、出力、ツール、考え方、根拠の5種類の情報によって定義され、記述の具体例を図3(b)に示す。各作業のプロセスモデルは工程の入出力を連鎖させることで表現される。入力、出力はデータによって定義され、ツールはその工程を行う上で利用されるもので、CAMやシミュレーションなどのソフトウェア、工具カタログなどの参照データ、加工機などが含まれる。考え方は、工程を実行する際にどのようなことを考慮する必要があるかを記述する部分であり、根拠には、その工程の出力の採択理由を記述する構成になっている。

3.3 作業支援システム

図4に作業支援システムの全体図を示す。このシステムには主に二つのモードがあり、CAM工程を例にして次に述べる。

一つは知識獲得モードであり、過去の加工記録の参照、熟練者へのヒアリングなどによって情報収集と分析を行い、熟練者による標準的な作業のプロセスモデルをプロセス記述言語PD3で作成する。

もう一つのモードは作業支援モードであり、作成したプロセスモデルに沿ってCAM工程作業を行うことで、非熟練者であってもより品質の高い加工プログラムを作成できるようになる。プロセスモデルに沿って作業を進めることで、各工程でどのようなツール(カタログ、シミュレータ等)を使って、何を基準にどのように判断をすればよいかが分かり、適切な意思決定を行うことができる。

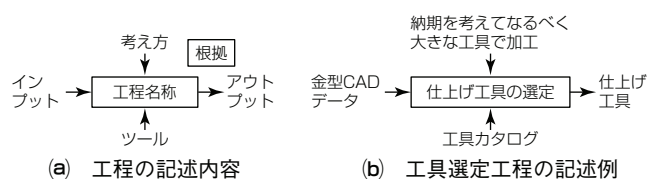


図3. プロセス記述言語PD3の記述例

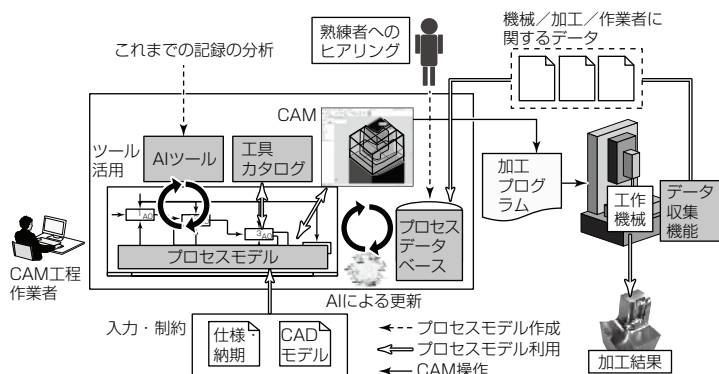


図4. 作業支援システム

また、作業者が作成した加工プログラムで加工不良が生じるとツールで判断した場合、問題の箇所に類似する過去の作業事例を検索し、過去の問題とその対策を確認して加工プログラムを修正し、ツールでの修正結果の確認ができる。

作成した加工プログラムで加工を行う際には、データ収集機能によって位置などの機械に関するデータ、切削音などの加工に関するデータ、操作履歴などの作業に関するデータを時刻同期して収集する。

これらの作業時のプロセスモデルと加工時のデータを合わせて、プロセスデータベースに蓄積する。AI技術等を活用して、蓄積された記録の検索や、これらを学習して新たな知識獲得を行うことも可能であると考えられる。

4. 作業支援システムを用いたケーススタディ

4.1 実証フィールドでのプロセスモデルの構築

CAM工程経験20年以上である複数の作業者に対してヒアリングを行い、実証フィールドでのCAM工程のプロセスモデルを構築した。

CAM工程で、作業者はCAMソフトウェアで加工プログラムを生成する前に工具の動きをイメージし、そのイメージに従って加工プログラムを生成し、実際に合わない部分はイメージから修正して生成していることが分かった。さらに通常、CAMソフトウェアでは素形材(加工前の形状)から、加工と同じ手順(荒加工、中仕上げ、仕上げの順)で加工プログラムを生成していく。しかし、作業者は工具の動きをイメージする場合、CAMソフトウェアの作業とは逆の順で最終形状から仕上げ、中仕上げ、荒加工の順にイメージしており、複数の作業者に共通した考え方であった。工具の動きをイメージするプロセスは作業者の頭の中で行われ、電子データなどに記録されないプロセスであった。工具の動きをイメージするプロセスはCAM工程の重要な一部であるため、ツール等によって記録して作業支援に活用することが重要である。

このことから、CAM工程での複数の作業者に共通する標準的な作業をPD3で記述したプロセスモデルを図5に示す。図5では全体の工程の流れだけ示しているが、各工程の入力、出力、ツール、考え方、根拠も抽出してプロセスモデルを記述している。図5で点線から上側は工具の動きをイメージする工程であり、下側は実際にCAMで作業する工程である。各工程は、仕上げ加工などの加工の種類や際(キワ)、一般面といった加工部位に細分化されている。際とは、面と面のつなぎ目の部分を指し、特に加工プログラム作成で作業者が注意しているため、別の工程に

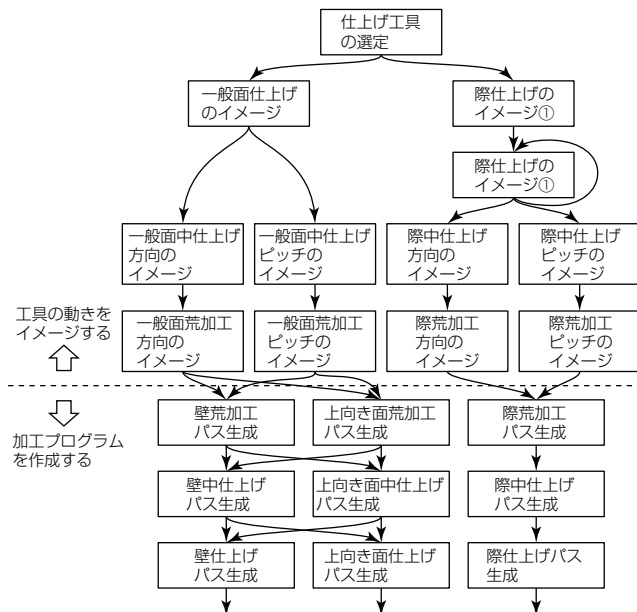


図5. CAM工程のプロセスモデル

なっている。

ヒアリングの対象になった作業者に図5のプロセスモデルとCAM工程での思考過程が合致しているかを確認し、“思考過程の整理ができてい”との評価を得た。

4.2 CAM工程での作業支援システムの評価

構築したプロセスモデルを実装した作業支援システムを用いて、適切な加工工程を設計できるかという観点で、非熟練者に対する作業支援の効果検証を実施した。CAM設計経験が1年未満の非熟練者を被験者として、典型的な加工不良である際の食い込みが生じているワーク(図6)を対象にした。

図7に作業支援システムによる支援がない場合と支援がある場合に設計された加工工程を示す。図7で実証フィールドの熟練者が指摘した主な点は次のとおりである。

(1) 支援なし(図7左欄)

- ①工具の選択が適切ではなく、図面どおりの加工ができない
- ②各工程での工具負荷が大きく、仕上がり品質が悪い

(2) 支援あり(図7右欄)

- ①図面どおりの形状が加工できている
- ②工具負荷を考慮している
- ③工程の順序がおかしい(工程8～9は工程2～3の次)

さらに、熟練者によって、“仕上がり品質”“加工形状”“加工順番”“加工時間”の四つの指標で各加工工程の評価を実施した。各項目10点満点で採点した結果、作業支援システムによって2点から11点(40点満点)まで改善でき、支援によって適切な設計に近づいていることが確認できた。これは作業支援システムによって作業の全体像を理解し、それぞれの工程での考え方を理解できたためであると考えられる。

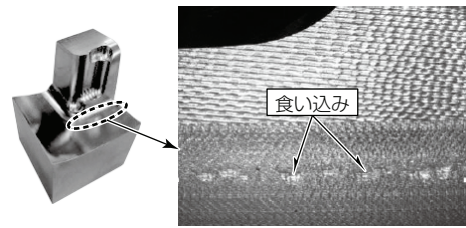


図6. ケーススタディに使用したワーク

支援なし		支援あり	
内容	加工イメージ	内容	加工イメージ
工程① 荒加工	直径16mm ラジアスエンドミル	工程① 荒加工	直径16mm ラジアスエンドミル
工程② 中仕上げ	×樹脂の流れる方向と異なる 直径12mm ボールエンドミル	工程② 中仕上げ 工程③ 仕上げ	○樹脂の流れる方向に加工 直径12mm ボールエンドミル
工程③ 仕上げ	直径12mm ボールエンドミル	工程④ 中仕上げ 工程⑤ 仕上げ	○工程分割によって工具負荷小 直径4mm ボールエンドミル
工程④ 仕上げ	×適切な工具径が選択されていない 直径7.5mm ボールエンドミル	工程⑥ 中仕上げ 工程⑦ 仕上げ	直径1mm ボールエンドミル
工程⑤ 仕上げ	直径16mm ラジアスエンドミル	工程⑧ 中仕上げ 工程⑨ 仕上げ	×加工順序が不適切 干渉の可能性あり 直径4mm ボールエンドミル

図7. ケーススタディで設計された加工工程

一方、支援システムを用いた場合でも非熟練者が誤った判断を行うケースが散見された。これは、プロセスモデルとして熟練者からのヒアリングから抽出しきれていない知識に起因する判断ミスであり、プロセスモデル及びプロセスモデルの作成方法の改良が必要である。

5. む す び

D3の考え方に基づき、金型製作のCAM工程を支援する作業支援システムを開発した。ケーススタディの結果から、非熟練者が学習してより適切な加工工程を設計することが可能になり、加工工程のロスの削減、非熟練者への知識伝達の見込みを得た。

この成果は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP15009)の結果得られたものである。

参考文献

- (1) 梅田 靖：次世代生産システムに向けた「デジタル・トリプレット」の提案, 日本機械学会 生産システム部門研究発表講演会2019, 613 (2019)

空気調和機の衛生性向上技術

Technologies for Improving Hygiene in Air Conditioners

要 旨

近年、消費者の健康・快適性、さらに新型コロナウイルス(COVID-19)蔓延(まんえん)による衛生性向上への関心の高まりに伴い、室内空気質(IAQ)を改善・向上できるデバイスや空気調和機(空調機)内部の衛生性確保が要求されている。三菱電機では、これらの解決に向けて、人への安全性を第一とし、安全性が立証されていない物質を有人環境に放出することのない衛生性向上技術を開発している。

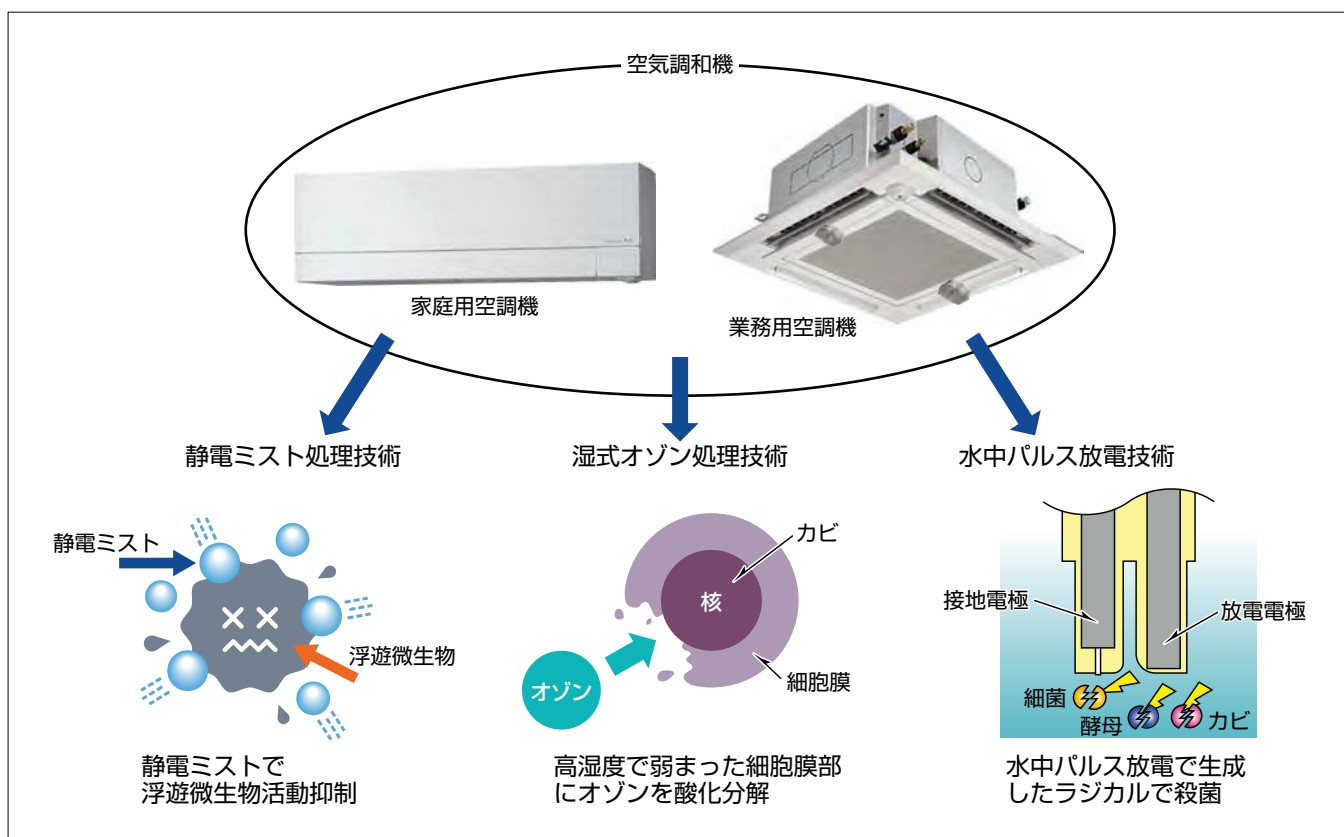
IAQ改善・向上技術である静電ミスト処理技術は、粒子径数十nmでオゾンなど不純物を含まない微細静電水滴を用いる。この微細静電水滴は浮遊微生物に帯電効果で吸着することでそれらの空気中での活動を制御できる。

臭気・アレルゲン原因物質低減を目的とした空調機内部

の防カビ技術である湿式オゾン処理技術は、空調機停止直後の高湿度条件での低濃度オゾンガス曝露(ばくろ)で、胞子が発芽時に生じる細胞壁開裂部分をオゾンで酸化分解して殺カビする。

ドレン水殺菌技術である水中パルス放電技術は、水中でヒドロキシラジカルを発生させて微生物の細胞膜などを酸化分解し、殺菌・不活化する。水中で効率的に放電を起こす電極構造として金属細線外周を樹脂で覆った放電電極を用いている。

今後は、対策が急務になっているCOVID-19に対する不活化効果を検証するとともに、室内付着微生物に対する衛生性向上技術の開発に取り組む。



衛生性向上技術の空気調和機への適用

当社は、人体安全性を第一とし、安全性が立証されていない物質を有人環境に放出することのない衛生性向上技術として静電ミスト処理技術、湿式オゾン処理技術、水中パルス放電技術などの開発に取り組んでいる。これらの技術は物理・化学的処理であるため、耐性微生物が発生することはなく、COVID-19不活化を始めとする感染リスク低減対策にもなり得る。

1. ま え が き

近年、消費者の健康・快適性への関心の高まり、COVID-19蔓延による衛生性向上への関心の高まりに伴い、室内空気質(IAQ)や室内環境質(IEQ)を改善・向上できるデバイス、さらには衛生性向上技術の空調機への搭載が求められている。近年、放電生成物や電気分解生成物を放出し、空調機内部、また室内環境の衛生性を向上させる技術が開発・製品化されている。しかし、放電生成物や電気分解生成物の人体安全性に関しては、明確化されていない⁽¹⁾。そこで当社では、人体安全性を第一とし、人体への安全性が立証されていない物質を有人環境に対して放出することのない衛生性向上技術を開発している。

本稿では、空調機用の衛生性向上技術として開発してきた内容と成果について述べる。

2. 衛生性向上技術

2.1 静電ミスト処理技術

室内空間の浮遊微生物を殺菌・不活化し、IAQを改善・向上させる技術として、静電ミスト処理技術を開発した。

図1に、静電ミストの生成方法及び浮遊微生物活動抑制メカニズムを示す。まずペルチェ冷却器で空気中の水分を冷却板に結露させる。生成した結露水を吸湿性高圧電極に滴下し、高電圧を印加して静電噴霧機構で微細水滴を生成し、空气中に放出する。吸湿性高圧電極として多孔質発泡チタンを採用することで、高い微細水滴生成量に加えて、

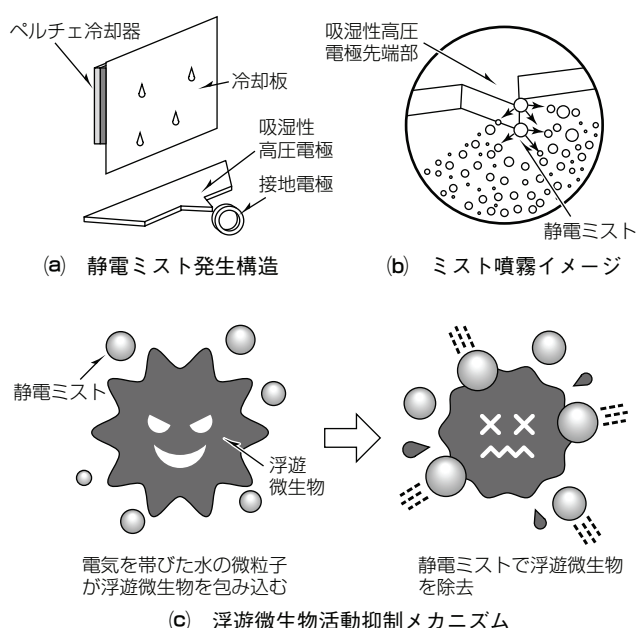


図1. 静電ミスト生成方法及び浮遊微生物活動抑制メカニズム

耐食性を高めていることが特長である。また、印加電圧の制御によって、粒子径は10~40nmで、かつ酸化力が強いオゾンガスやラジカルを含まないピュアな微細静電水滴を生成している。

静電ミストは、帯電効果によって浮遊微生物に吸着することで、それらの空気中での活動を抑制できる。また、オゾンガスやラジカルを含んでいないため、人体には影響しない。

静電ミストの浮遊カビに対する殺カビ特性を図2に示す。25m³の密閉空間にアオカビ(*Penicillium citrinum* NBRC (NITE Biological Resource Center) 6352)を噴霧する(浮遊カビ数 3.9×10^6 CFU(Colony Forming Unit)/10L-air)。その後、空調機を稼働させながら静電ミストを放出し、180分、270分後に試験空間内の空気を回収し、空間中の浮遊カビ数を平板培養法で計測した。その結果、静電ミストを放出した場合の浮遊カビ数は放出しない自然減衰に比べて少なく、165分後には2桁すなわち99%低減することが確認できた。

静電ミストの浮遊インフルエンザウイルスに対する不活化効果を検証した。25m³の密閉空間にインフルエンザウイルス(A型インフルエンザウイルス：A/Aichi2/68 (H3N2))を噴霧する(浮遊ウイルス感染価 3.9×10^4 PFC (Plaque Forming Unit)/10L-air)。その後、空調機を稼働させながら静電ミストを放出し、所定の時間後に試験空間内の空気を回収し、空間中の浮遊ウイルス数をブランク法で計測した。その結果、静電ミストを放出した場合の浮遊ウイルス数は、放出しない自然減衰に比べて少なく、158分後には2桁すなわち99%低減することが確認できた。

これらのことから、静電ミストが浮遊カビ、浮遊ウイルスを空間から除去できることが分かった。この技術は、“ピュアミスト”という名称で、当社家庭用空調機に搭載されている。

2.2 湿式オゾン処理技術

冷房時の空調機内は多湿であり、カビが繁殖しやすい。カビが繁殖時に生成する微生物由来の揮発性有機化合物は

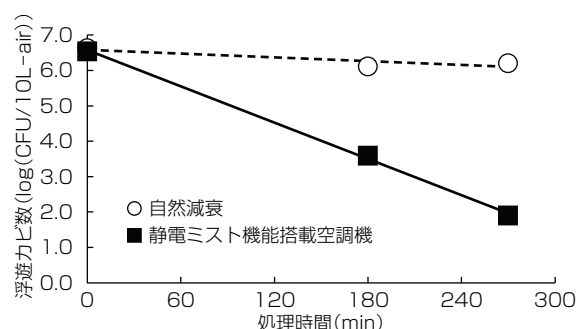


図2. 静電ミストの浮遊カビに対する除去性能特性

臭気の原因になり、またカビの胞子はアレルギーを引き起こす可能性がある⁽²⁾。そのため、空調機内部の殺カビ・防カビ技術が求められている。カビの胞子はタンパク質から成るコート層や細胞壁に保護されているため、オゾン処理で99%殺カビするのに必要なCT(Concentration-Time Value)値(オゾンガス濃度(ppm)×曝露時間(分))は5,400ppm・分程度と大きい⁽³⁾。そのため、環境基準値(0.05ppm)以下のオゾンガス濃度で殺カビするには膨大な時間がかかる。当社は、高湿度条件下では胞子が発芽してコート層や細胞壁が開裂することに着目し、高湿度条件下でオゾンガス処理を行う“湿式オゾン処理技術”を開発した。

湿式オゾン処理による黒カビ胞子の殺カビの様子を図3に示す。これは、黒カビ(*Cladosporium cladosporioides* NBRC 6348)の胞子を高湿度環境(15℃, 95%RH(Relative Humidity))で、オゾンガス1ppmに168時間曝露したときの胞子の外観である。高湿度曝露(非オゾン処理)ではカビの胞子は、外観上変化していない(図3(a))。その一方で、湿式オゾン処理では、カビの胞子の最外郭膜の一部が消失し、カビ胞子の細胞膜が開裂しているとともに、胞子に変形、すなわち溶菌していることが確認できる(図3(b))。このことから、この技術では、高湿度条件下で胞子が発芽してできるコート層や細胞壁の開裂部分がオゾンで酸化分解され、効率的に胞子を殺カビできることを確認した。

湿式オゾン処理機能を搭載した空調機内に付着した黒コ

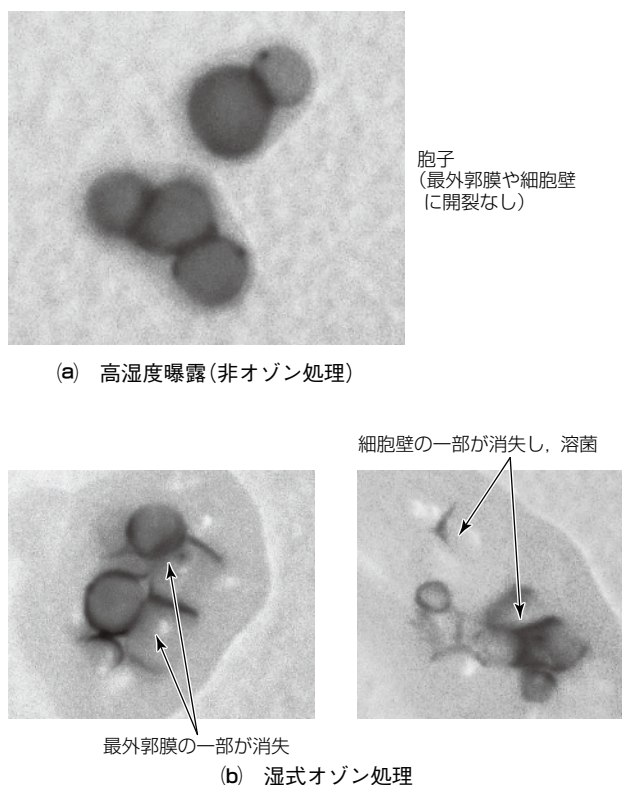


図3. 湿式オゾン処理による黒カビ胞子の殺カビの様子

ウジカビ胞子に対する殺カビ特性を図4に示す。ここでは、黒コウジカビ(*Aspergillus niger* NBRC 6341)を空調機熱交換器のアルミニウム板(約20×50(mm)部分)9か所に塗布した。その後空調機を、“6時間冷房運転→6時間停止”を基本動作とし30日間運転した。湿式オゾン処理機能を搭載した空調機は、冷房運転停止時に10分間湿式オゾン処理(空調機内部オゾンガス濃度最大0.05ppm)を行った。評価は、0日、14日、30日後にアルミニウム板上のカビを抜き取り検査キット(Pro・media ST-25, エルメックス社製)の綿棒で拭き取って板表面のカビを採取液内に移し、液中のカビ数を平板培養法で計測してアルミニウム板上でのカビ数を求めた。なお、アルミニウム板1か所当たりのカビ塗布量は、 6.1×10^5 CFU/サンプルとした。

図4に示すように、湿式オゾン処理機能搭載空調機のカビ胞子数は、湿式オゾン処理機能なしの従来の空調機に比べて少なく、30日後すなわちCT値として30ppm・分、湿式オゾンガスに曝露することで99%以上殺カビできた。これらのことから、湿式オゾン処理が効率的に殺カビできることが分かった。この技術は“カビクリーンシャワー”という名称で、当社家庭用空調機の内部クリーン技術として搭載されている。

2.3 水中パルス放電技術

冷房時、空調室内機の熱交換器上で結露水が発生する。この結露水は、業務用空調機では、ドレンパンという排水受皿に一度溜(た)められてからポンプで排水される。この溜まり水中で微生物が繁殖すると、揮発性有機化合物が生成されて臭気の原因になる。また、複数の微生物が集合化して形成するバイオフィームが排水ポンプを詰まらせて、空調機が異常停止して運転できないなどの問題も発生する。近年では、レジオネラ菌が繁殖して集団感染を引き起こす原因にもなるとして問題になっている⁽⁴⁾。これらの問題を解決するために、当社は水中パルス放電技術を開発した。水中パルス放電デバイスの構造を図5に示す。金属細線の周りを樹脂でモールドした放電電極と金属棒状の接

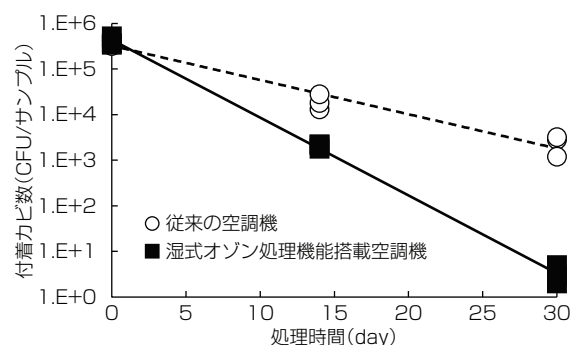


図4. 湿式オゾン処理の付着カビに対する殺カビ特性

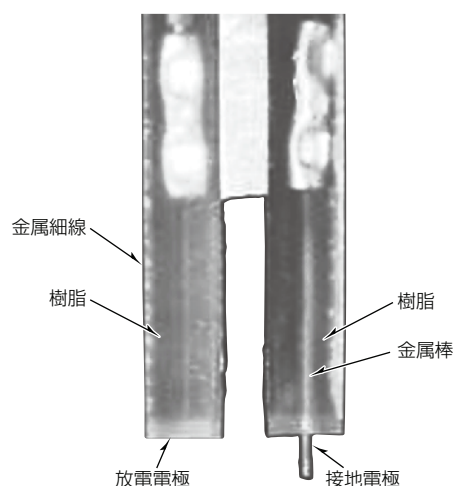
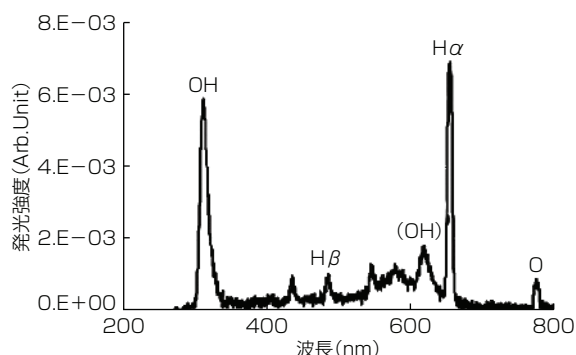


図5. 水中パルス放電デバイスの構造



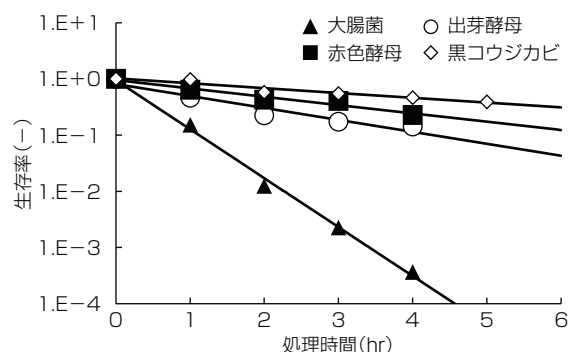
放電条件：印加電圧－8kV、パルス周波数130Hz、
放電電極線径0.3mm、接地電極線径1mm
測定装置：パルス放電解析システム
(CSP-TSP-1000MDN型、ユニソク社製)

図6. 水中パルス放電による発光スペクトル解析結果

地電極で構成し、電極間に高電圧をパルス状に印加することで放電させる構造である。周りを樹脂でモールドすることで金属細線の先端部に電界集中させて、水中で効率的に放電させる特長を持つ。実ドレン水の成分を模擬した水（模擬ドレン水、全有機炭素量(TOC)：40mg/L、電気伝導度：130 μ S/cm)中でパルス放電を起こした場合の発光スペクトル解析結果を図6に示す。パルス放電によって水中でヒドロキシラジカル(OH \cdot 、“ \cdot ”は不対電子を表す)、水素ラジカル(H \cdot)が発生することが確認でき、これらのラジカルが微生物の細胞壁や細胞膜を酸化分解して殺菌・不活化すると考えられる。

水中パルス放電の各種微生物(細菌、酵母、カビ孢子)に対する殺菌特性を図7に示す。ここでは、各対象微生物を懸濁した模擬ドレン水50mLに、水中パルス放電デバイスを配置し、放電を発生させた。所定の時間後に試験液を採取し、試験液中の微生物数を平板培養法で計測した。

図7に示すように、全ての微生物の生存率は、処理時間



放電条件：印加電圧－4kV、パルス周波数130Hz、
放電電極線径0.3mm、接地電極線径1mm

試験微生物：
大腸菌：Escherichia coli NBRC 3301、
出芽酵母：Saccharomyces cerevisiae NBRC 0203、
赤色酵母：Rhodotorula mucilaginosa NBRC 1101、
黒コウジカビ：Aspergillus niger NBRC 105649

図7. 水中パルス放電の各種微生物に対する殺菌特性

とともに減少し、水中の原核生物(細胞核を持たない生物)である大腸菌だけでなく、真核生物である酵母やカビに対しても殺菌性能を持つ。このことから、水中パルス放電技術は、複数の微生物の集合体であるバイオフィルムの形成を抑制可能であると言える。この技術は、“パルスクリン”という名称で、当社のパッケージ空調機のドレンパン洗浄技術として搭載された。

3. む す び

当社では、空調機の衛生性向上技術の開発に取り組んでいる。これまでに、IAQ改善・向上技術として静電ミスト処理技術を、空調機の内部クリーン技術として湿式オゾン処理技術を、ドレンパン洗浄技術として水中パルス放電技術を開発、家庭用空調機や業務用空調機に搭載してきた。これらの技術は、物理・化学的処理であるため、耐性微生物は発生することがない。今後は、まず対策が急務になっているCOVID-19に対する不活化効果を検証する。また、感染リスク低減技術の一つとして推奨されている換気技術、生存時間が長くなって感染リスクが高まる原因になっている室内付着微生物に対する衛生性向上技術の開発に取り組んでいく。

参 考 文 献

- (1) 栗田弘史：DNA切断頻度を指標とした放電生成物を放出する家電製品の生体に対する安全性評価，37，No.3，144～149，静電気学会誌（2013）
- (2) 高島浩介：住環境にみるカビと健康障害，J. Natl. Inst. Public Health，47，No.1，13～18（1998）
- (3) 柳 宇，ほか：空調システムにおける微生物汚染の実態と対策に関する研究 第3報，日本建築学会環境系論文集，73，No.632，1197～1200（2008）
- (4) 戸田未希，ほか：空調ドレンパン内におけるレジオネラ属菌の生息実態，第39回建築物環境衛生管理全国大会（2012）

3密を防ぐ食品工場のロボット技術

Robotics Technology for Food Factory to Avoid the Three Cs

要 旨

食品工場では、総菜の盛り付け作業など人手を要している工程が多くあるが、近年は人手不足が顕著になってきている。またコロナ禍を受けて、工場内で3密を防ぐことも強く求められるようになってきた。

そうした要求に応えるため、三菱電機では食品工場へのロボット導入を可能にするための開発を進めている。

食品工場へロボットを導入していくには、まず人が実施している作業をロボットに置き換える技術が必要になる。例えば総菜の盛り付け作業では、盛り付ける対象物を認識してつかみ上げ、弁当箱などに盛り付ける作業を短い時

間で実現することが必要になる。そこで人工知能を活用し、ビジョンセンサで不定形な食品を認識する技術、制約条件を考慮してロボットの動作やレイアウトを最適化する技術の開発を進めている。開発した技術は2019年に東京ビッグサイトで開催された2019国際ロボット展に参考出品した。

また食品工場でも装置の不意の停止を防ぐことが強く望まれており、ロボットの部品の異常を検知することで不意の停止を防止する技術の開発も進めている。さらに人との協働作業による部分的な自動化に貢献できる協働ロボットの開発も実施した。



産業用ロボット

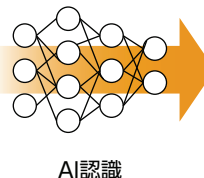
食品サンプル
不ぞろいな形状の
ワークがばら積み
状態で供給

ピッキング
認識結果を基に
ロボットで把持

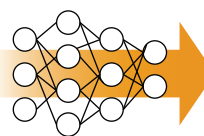
システム構成



認識対象例



AI認識



認識結果例
把持候補に対する
ハンドの位置姿勢
を表示

システムでの認識例

2019国際ロボット展でのばら積み食品のピッキング作業デモシステム

総菜の盛り付け作業など、食品工場の人手作業の置き換えを可能にするための技術開発を進めている。三次元ビジョンセンサの情報とAI技術によってばら積み供給された食品の位置・姿勢を認識してロボットで取り出す技術を開発し、2019年に開催された国際ロボット展に参考出品した。

1. ま え が き

人口減少、高齢化に伴う生産年齢人口の減少等の要因から、人手不足に悩まされる産業は多い。国内の製造業の主要な分野の一つである食品製造業でも、人手不足は顕著になってきている。また食品製造業は他の製造業と比べて労働生産性が低いことも課題であった⁽¹⁾。さらにコロナ禍を受けて、工場内で3密を防ぐことも強く求められるようになってきた。こうした要求に応えるため、食品工場へのロボット導入の期待が高まっている。本稿では、食品工場へのロボット導入に必要な、①人の作業をロボットに置き換える技術開発、②不意のロボット停止を防止する技術、③人と人の間でも作業を行える協働ロボットについて述べる。

2. 人の作業をロボットに置き換える技術

2.1 対象物の認識・把持技術

食品工場で行っている代表的な作業としては総菜などの盛り付け作業、目視検査、箱詰め作業などがある。このうち盛り付け作業、箱詰め作業では、人は作業対象物を認識・把持し、把持した対象物を搬送し、目標の位置に対象物を置いていく。これらの一連の作業をロボットで実施する必要がある。

まず作業対象物の認識・把持技術について述べる。例えば総菜の盛り付け工程では、盛り付けの対象になる唐揚げ、にんじんなどは番重と呼ばれるプラスチック容器の中にばら積みされた状態で供給され、作業員はそこから決められた分量をつかみ、容器の指定された位置につかんだ食材を配置する。このようなばら積み状態から物体をつかんで指定位置に配置する作業は他の製造業等でもよく見られる。他製造業では、カメラや距離センサによって計測したばら積みシーンから物体の位置・姿勢を認識し、産業用ロボットでピッキングして搬送することで自動化を進めていることが多い。しかしながら、食品製造業では、図1のように

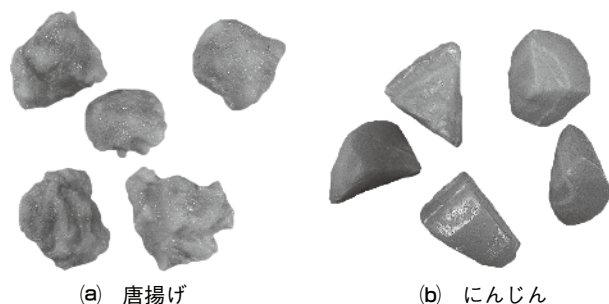


図1. 不定形物の例

取り扱う対象が個々の形状にばらつきがある不定形物のため、その方法をそのまま適用することが難しい。そこで、ばら積みされた不定形物の把持位置認識手法の開発に取り組んでいる⁽²⁾。ばら積みされた物体の認識には、一般的に対象物の三次元モデルと計測データを照合することで対象物の位置・姿勢を推定する手法がよく用いられている。この手法では、対象物体の詳細な位置・姿勢を推定することが可能だが、ばら積みされた対象物が定形であることが前提の手法であり、個々の形状にばらつきがある食品には適用できない。そのため開発中の方式では、ばら積みされた不定形物の認識をニューラルネットワークベースの手法で行う。

まず、対象になるシーンの距離画像を取得する。次に、得られたシーンを対象物ごとに切り離すセグメンテーションを行う。その後セグメンテーションの重心位置を把持候補位置として算出する。最後に、得られた候補位置周辺のデータを入力とし、把持位置や把持姿勢に関する情報を出力する把持位置検出ネットワーク(Grasp Recognition Network: GRN)を用いて、把持位置の認識を行う。GRNとしては畳み込み層とプーリング層を複数備えたネットワークを用いて、対象物を把持するために必要な把持の中心位置、ハンドの指間の幅などの情報を出力する。

次に把持位置や把持姿勢に関する情報を出力するGRNの学習方法について述べる。GRNの学習には、把持対象物の距離画像と、把持の中心位置、ハンドの指間の幅などのラベル付けしたデータが大量に必要となる。実際にばら積みされた食品の距離画像をばら積み状態を様々に変化させて撮影し、その画像に対して人手でラベル付けを行うには多大な時間と労力を要するため、実現は容易ではない。そのためシミュレータを用いて学習用データを自動生成し、自動生成したデータに対して学習を行う方式を開発している。開発した方式の学習時の手順を図2に示す。

まず数個の対象物を計測して輪郭データを収集し、基準のモデルに輪郭データから生成したばらつきのある凹凸画像を合わせ込むことで、三次元モデルを生成する。これによって食品のように形状にばらつきのある対象物のモデルを大量に生成することが可能になった。次にこれらのモデルを物理シミュレータ内で順に落下させ、ばら積みシーンを再現する。さらに三次元計測シミュレータの技術を適用することで、仮想的に設置したセンサから得られる距離画像を生成する。このとき、死角による計測抜け等を再現できるので、単純にコンピュータグラフィックスで計算した抜けのない距離画像を用いるよりも現実に近い計測データを得ることができる。次に生成したばら積み距離画像を基に、距離画像上の把持候補になり得る位置を抽出し、対象ワークの情報などから把持の回転角などの教師データを生



図2. 深層学習GRNの学習手順

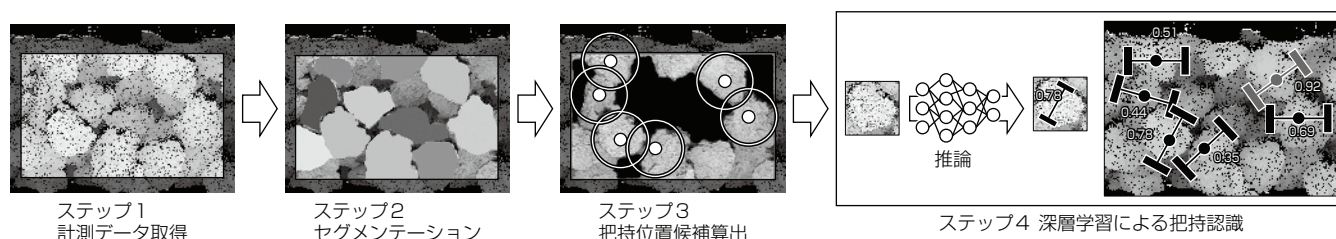


図3. 深層学習GRNによる不定形物の把持位置認識

成する。距離画像上の把持候補位置は、落下させた対象物の重心位置とし、対象物全体が見えるように距離画像を切り出す。また抽出した把持候補に対して、仮想空間内でロボットハンドを動作させることで教師データを探索する。こうして切り出した距離画像と、切り出した距離画像に対応する教師データの組合せからGRNの学習を実施する。

開発中のこの方式を用いた食品のピッキング検証用システムを構築し、2019年に開催された2019国際ロボット展で食品サンプルのピッキングを行うデモを実施した。

デモでは、唐揚げ及びにんじんの食品サンプルがばら積みされた番重を一つずつ用意し、両方の番重の内部を撮像できる位置に三次元ビジョンセンサを取り付けている。三次元ビジョンセンサの計測データから図3に示すフローで唐揚げ又はにんじんをロボットで取り出すための把持位置を導出し、導出した位置姿勢へロボットを動作させて、ロボット先端に取り付けたハンドを閉じることで対象物を把持し、トレイに並べていくピッキング作業を実施した。対象物を把持した後に落とすことなく整列トレイに置いた場合をピッキング作業成功とし、ピッキングの成否はロボットの手首部に取り付けた力覚センサの情報に基づいて判断してカウントを行った。300回試行したときのピッキング成功率は唐揚げが92%、にんじんが83%であった。

学習時は食品サンプルを複数計測し、図2のフローに従って学習を行った。2019国際ロボット展での実機デモでは、約20分で学習を完了した。

2.2 ロボット動作の高速化

人の作業をロボットで置き換えるには、ロボットの動作を高速化していく必要がある。ロボットの出し得る加速度はロボットの姿勢や把持した対象物の質量によって異なる

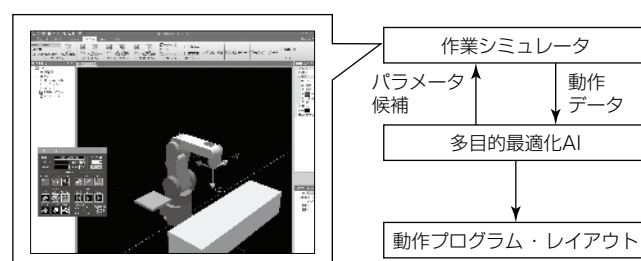


図4. 1サイクルでの動作・レイアウト最適化

ため、ロボットが動作する直前にその動作での加減速度を算出する最適加減速機能を搭載している。またロボットに同じ作業を行わせる場合でも、ロボットや番重の配置によって、必要な動作時間は異なる。そのため、ロボットの動作開始地点と動作終了地点が指定された後にロボット動作を最適化する技術だけでなく、ロボットや番重などのレイアウトそのものを最適化する技術も必要である。さらにロボットを駆動するモータの発熱、ロボットの各軸の伝達機構の寿命も考慮すると、個々の動作だけでなく1サイクルでロボット動作の最適化を実施していく必要がある。そこで1サイクルで評価し、AIを用いてレイアウトや動作パラメータの最適値を探索する技術の開発を進めている(図4)。この機能についても2019年のロボット展に参考出品している。

2.3 ロボットによる対象物の配置技術

対象物の配置を行う際には、必要に応じて力覚、触覚、視覚などのセンサ情報を活用していく。当社の産業用ロボットはオプションでロボット手首に3軸の力とモーメントを測定できる力覚センサを取り付けることができる。力覚センサの情報は正しく把持を行ったかどうか等の作業の

成否判定、ロボットの手先を柔らかく動かす制御等に適用できる。力覚センサを用いた制御はパラメータの調整が難しい場合もあるが、AIを用いてパラメータの自動調整を行う技術の開発も進めており、開発した機能の一部は既に製品に搭載している。

3. 不意のロボット停止を防止する技術

食品工場を始めとして多くの工場では故障による不意のロボット停止を防止することが非常に強く望まれている。そこで当社産業用ロボットのオプション機能として、異常検知機能と消耗度算出機能を用意している。異常検知機能では減速機等を対象に、駆動波形から故障に起因する特徴的な波形を抽出することで、ロボットの挙動に異常の兆候が現れる前に部品の異常を検知し、不意のロボット停止を防止する。また消耗度算出機能では、実際のロボットの稼働状況から減速機、ボールねじ、グリースなどの消耗度を算出し、保守点検計画の参考情報として活用する(図5)。

消耗度算出機能と同様の演算をロボットシミュレータで実施することで、作成したプログラムでロボット動作を繰り返した場合の将来の減速機、ボールねじなどの消耗度を予測することが可能である。こうした予測機能を活用することで、2章で述べた1サイクルの動作で減速機などの伝達機構の寿命を考慮した最適化も可能になる。

4. 協働ロボット

人とロボットを柵で分離するのではなく、人と人の間でも作業を行える協働ロボットの使用例が増えてきている。3密の防止が求められる工場でも、作業員間の距離

を確保するため、今後協働ロボットの適用事例が増えるものと考えている。当社はこうした需要に応えるため、国際規格ISO 10218-1、ISO/TS 15066に準拠し、衝突検知などの安全機能を備えた人とともに作業できる協働ロボット“MELFA ASSISTA”を2020年5月から発売している。衝突検知の感度を向上させるためには、ロボットコントローラ内部に備えるロボットの動力学モデルの精緻化が必要である。そこでロボットの動力学モデルのパラメータを短時間で高精度に導出するための同定方式の開発を実施した。具体的には同定する対象の特性に応じたロボット動作を実施し、そのときの動作データから、動力学モデルの各パラメータの同定を実施する。また、これまで備えていた物理特性を表現するモデルに加え、新たな非線形なモデルを追加することで、更に高精度な衝突検知を実現している。

“MELFA ASSISTA”では専用操作ボタンや稼働表示用LEDを搭載するとともに、直感的な操作でロボットの導入・立ち上げを容易にするプログラム作成ツール“RT VisualBox”も用意することで、事業環境変化への柔軟な対応と生産性向上、TCO(Total Cost of Ownership)削減に加えて、製造現場での作業員間の距離確保という課題の解決にも貢献していく。なおMELFA ASSISTAではNSF H1(米国National Sanitation Foundationの衛生に関するガイドライン)認証の食品機械用グリースを採用した機種もラインアップしている。

5. む す び

食品工場の3密を防ぐためのロボット技術について述べた。ばら積みされた状態から食品を認識・把持する技術を開発し、デモシステムで実証した。今後は更なる認識・把持の成功率向上に向けて技術開発を進めていく。また、食品工場へのロボット導入を拡大していくためには、ロボットが実施する作業の高速化、立ち上げ調整時などでのロボットシステムの使いやすさ向上など解決すべき課題も残っている。当社ではこうした課題を解決するための技術開発を推進し、国内外の食品工場で人とともに生産に広く適用される産業用ロボットや協働ロボットの提供を行っていく。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省 北海道経済産業局：「食品製造業へのロボット導入の促進」に関する調査報告書(2018)
<https://www.hkd.meti.go.jp/hokis/20180417/index.htm>
- (2) 大島彩佳里、ほか：深層学習を用いた不定形物の把持位置認識、精密工学会画像応用技術専門委員会 2020年度第2回定例研究会(2020)

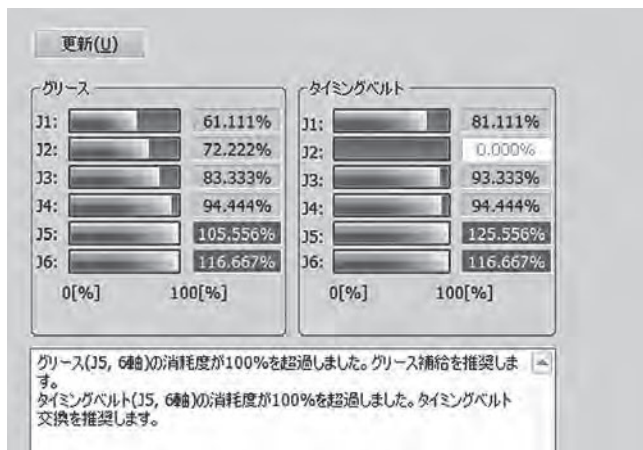


図5. 消耗度算出機能の画面例

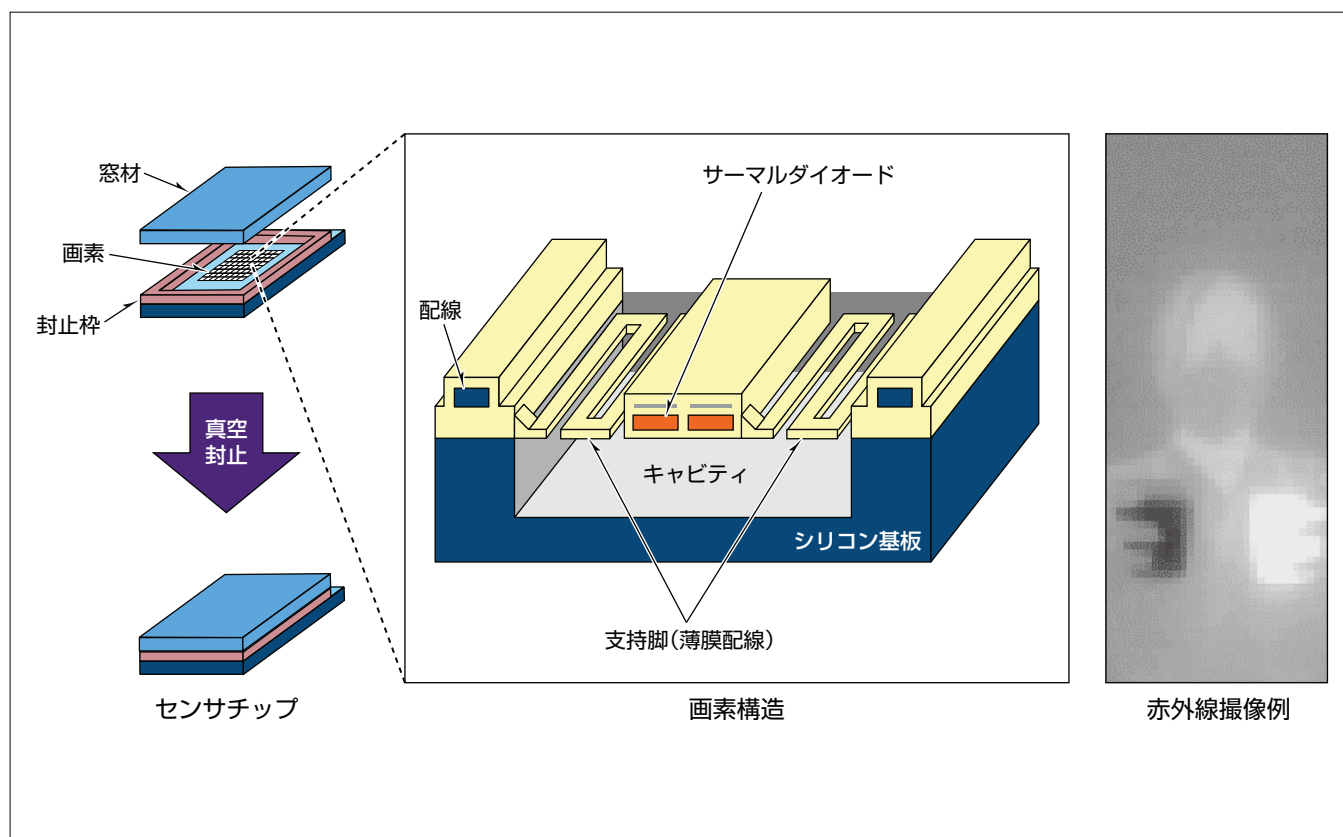
サーマルダイオード赤外線センサ技術

Thermal Diode Infrared Sensor Technology

要 旨

赤外線センサで用いられる波長帯は、大気の窓と呼ばれる、大気が赤外線をよく透過する波長帯から、 $1\sim3\mu\text{m}$ 帯(短波長赤外)、 $3\sim5\mu\text{m}$ 帯(中波長赤外)、 $8\sim14\mu\text{m}$ 帯(長波長赤外)に分けられ、各波長帯はそれぞれ特徴があり、用途・使用条件に応じて選択される。常温物体からは $10\mu\text{m}$ 近傍の赤外線が最も多く放射されることから、これらの波長帯のうち $8\sim14\mu\text{m}$ 帯を検知対象とした赤外線センサは、常温物体の検知に優れている。赤外線センサは、検出原理の違いから冷却型(量子型)と非冷却型(熱型)に大別され、特に非冷却赤外線センサは、冷凍機が不要であることから、防犯機器、空調機器、スマートビルなどの幅広い分野で使用されてきたが、最近では、ウィズコロナへの対策と

して、発熱者のスクリーニングなどでの非接触体温計測へのニーズも急速に高まっている。非冷却型の赤外線イメージセンサは、シリコン基板上に断熱構造を持つ画素(温度センサ)として形成したもので、温度センサとしては、ボロメータ、サーモパイル、強誘電体、ダイオードなど様々なものが用いられている。三菱電機が開発を行う赤外線イメージセンサは、温度センサ部にシリコン単結晶でできたダイオードを使用しており、高温分解能化($<100\text{mK}$)を実現し、 0.1°C 単位での温度分析を可能にしている。また、センサの使用環境に応じた信号補正技術や、温度センサ高感度化技術によって、温度計測の高精度化につながる。



サーマルダイオード赤外線センサ

サーマルダイオード赤外線センサの画素構造と 80×32 画素センサによる赤外線撮像例を示す。

1. ま え が き

非冷却赤外線イメージセンサは、Si(シリコン)-LSI技術とマイクロマシニング技術が融合した代表的なセンサであり、近年の非冷却赤外線イメージセンサ性能は、マイクロマシニング技術の発展によって着実に向上している。非冷却赤外線イメージセンサには幾つかの方式があるが、当社は、温度センサとしてSOI(Silicon On Insulator)層に形成した単結晶Siダイオードを用いるサーマルダイオード方式を提案し、開発してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この方式は、温度センサ部にSi単結晶でできたダイオードを使用しており、イメージセンサの画面内感度均一性が優れているという特長を持つ。非冷却赤外線イメージセンサに対する要求には、低コスト化に寄与する画素サイズ縮小や高解像度の撮像を目的とした多画素化などがあり、開発が進められてきた。

本稿では、民生向けなど市場の拡大フェーズにあるサーマルダイオード赤外線センサ技術について述べる。

2. サーマルダイオード赤外線センサ

2.1 サーマルダイオード

サーマルダイオード赤外線センサの画素断面図を図1に示す。サーマルダイオードが形成された温度センサ部は、基板内に形成された空洞の上に支持脚で保持された高断熱構造を持っており、入射赤外線量に応じてサーマルダイオードの温度が変化するようにになっている。ダイオードには、外部から順バイアスによって一定電流を流しておき、入射赤外線量をダイオードの温度変化による順方向電圧の変化として読み出す。入射赤外線によって温度センサであるサーマルダイオードの温度が高くなると、定電流動作で順方向電圧 V_f が低くなるサーマルダイオードの特性を用いている(図2)。また、サーマルダイオード赤外線イメージセンサの被写体温度感度は、サーマルダイオードの順方向電圧 V_f の温度変化係数 dV_f/dT に比例する。温度変化係数はダイオードの直列個数に依存するため、駆動(電源)電

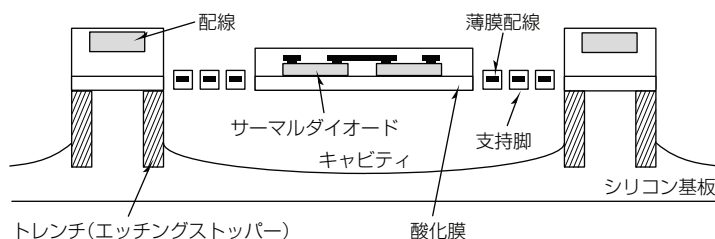


図1. 画素断面図

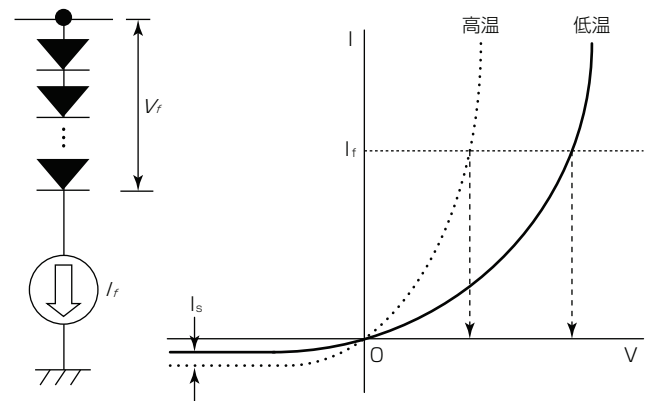


図2. サーマルダイオード特性

圧の範囲内でダイオードの直列個数を増やすことがセンサの高感度化に寄与する。

2.2 チップスケールパッケージング

非冷却赤外線イメージセンサは、シリコン基板上に断熱構造を持つ画素(温度センサ)を形成したもので、温度センサであるサーマルダイオードを、最終的に真空保持する必要がある。従来は、センサ全体をセラミックパッケージ等で、真空封止する方法が一般的であったが、コストやサイズの増大を引き起こしていた。この課題を解決するために、図3に示すように画素領域を取り囲むように封止枠を形成し、赤外線を透過する窓材として張り合わせ、画素部分だけを真空で封止するチップスケールパッケージング技術を開発した(図4)。この技術によって、従来のセラミック

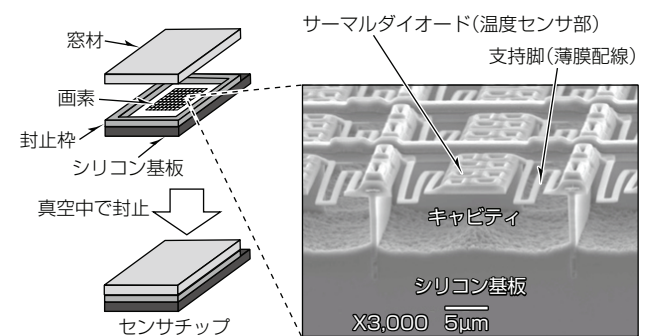


図3. チップスケールパッケージ

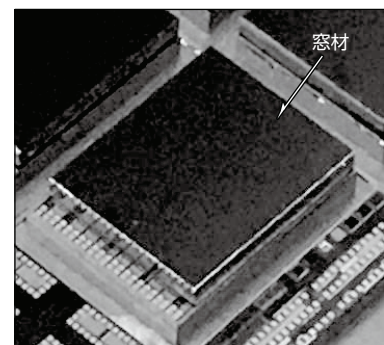


図4. センサチップ一例

パッケージを不要にし、センサの大幅な小型化を実現している。

2.3 被写体温度計測

サーマルダイオード赤外線センサの出力は、被写体放射率、被写体温度、センサ温度、センサモジュール温度の関数である。よって、サーマルダイオード赤外線センサは、各画素出力のオフセット、光量に対する感度及びそれらの温度特性によってセンサ出力が変動する。そのため、一定期間ごとにシャッターを閉じ、一様温度の被写体(シャッター)を見せ、各画素の特性を補正する処理が必要である。被写体温度に対するセンサ出力の環境温度依存性の一例を図5に示す。

当社が採用しているサーマルダイオード方式は、単結晶Siダイオードを用いているため、通常のセンサ使用環境温度範囲であれば、線形に近い特性を持っている。そのため、環境温度2条件(20℃、40℃)のデータを基にした2点による信号補正でも、図6に示すように、FPN(Flat Pattern Noise)は、0.1℃以下であり、0.1℃単位での温度分析にも

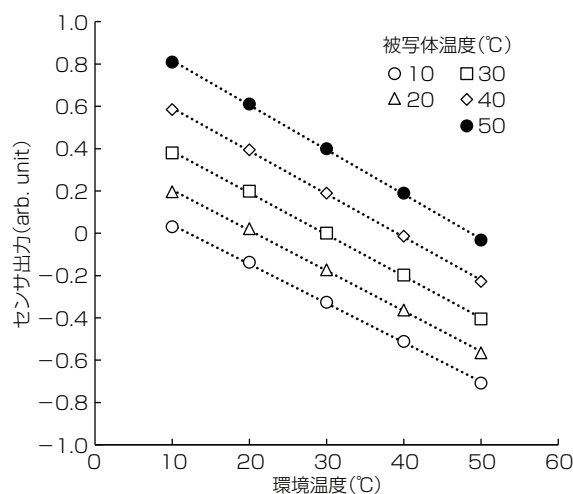


図5. センサ出力の環境温度依存性

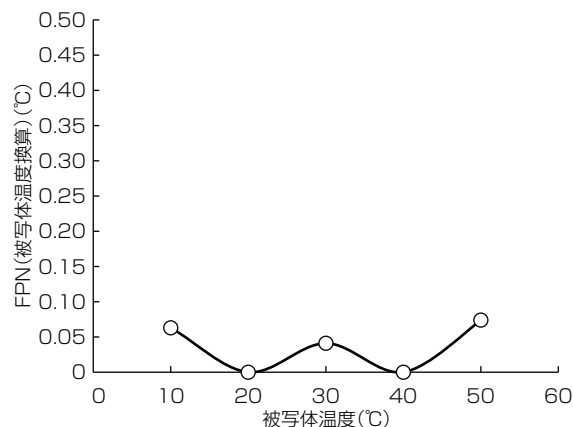


図6. FPN特性(環境温度: 20℃)

十分な性能を実現できる。ここでFPNは、温度が一様な被写体を撮像した際のサーマルダイオード赤外線イメージセンサの各画素出力の標準偏差を被写体温度換算したものであり、特性としては、より小さい値が好ましい。

3. 赤外線センサの高性能化開発

3.1 サーマルダイオード縮小化技術

サーマルダイオード赤外線センサの二次元画素アレーでの各画素の画素縮小(図7)は、センサチップサイズの縮小を実現し、低コスト化と、光学系を含むセンサモジュールの小型化を可能にする。そのため、画素縮小の取組みは、非冷却赤外線センサの開発動向として、一つの重要な流れになっている。例えば、画素ピッチを25μmから17μmに縮小した場合、画素面積は半減することになり、温度センサ部の面積は著しく減少するため、感度を維持するには、①温度センサ高感度化や、②支持脚の高断熱化が必要である。

サーマルダイオード方式では、ダイオードの直列個数を増加させるほど感度が向上するという特徴を持つことから、ダイオード1個当たりの面積低減が重要になる。図8に示すように、従来はPNダイオードを酸化膜の分離領域で分離して直列接続するのに対して、PNダイオードとNPダイオードをペアとし、分離領域なしで接続する2in1ダイオード構造を開発した。この構造によってダイオード面積の15%以上の削減が実現できる。

3.2 高感度読み出し回路技術

サーマルダイオード赤外線センサの高感度化は、被写体温度計測の高精度化にとっても重要である。感度向上手段の一つとして、3.1節に述べたように温度センサ部のダイ

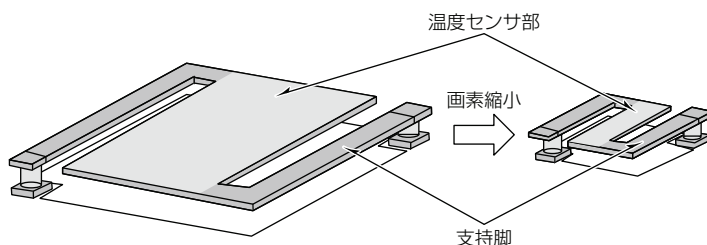


図7. 画素縮小化

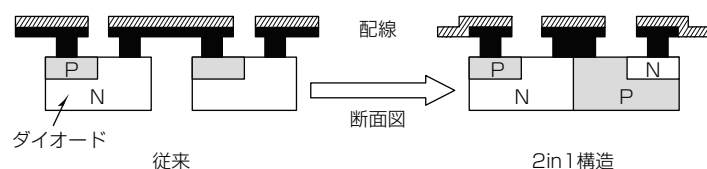


図8. サーマルダイオードの小型化

オード直列個数を増加させる方法があり、この場合には、使用する電源電圧を上昇させる必要がある。電源電圧の制約がある場合には、ダイオード直列個数を変えずに、図9に示す高感度読み出し回路による感度向上が可能である。

ダイオードの温度が上昇(下降)すると順方向電圧 V_f は減少(増加)する。電源電圧から V_f を引いた電圧である M_d のゲート電圧は増加(減少)し、 M_d の電流は減少(増加)する。この電流減少(増加)はカレントミラー回路によってダイオード電流 I_f を減少(増加)させる。これによって、ダイオードの順方向電圧は更に減少(増加)する(図10)。そのため、図9に示す回路構成によれば、ダイオードの順方向電圧 V_f 変化とダイオード電流 I_f 変化に正帰還ループを施しているため、ダイオード1個で得られる画素出力電圧変化以上の出力電圧変化が得られ、ダイオード1個当たりで従来以上の感度を実現する。この高感度読み出し回路を適用したセンサ出力特性を図11に示す。

その結果、高感度読み出し回路の適用によって、ダイ

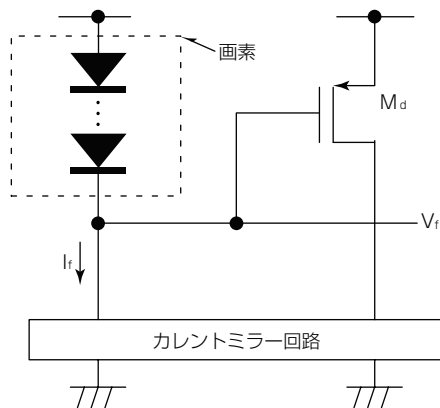


図9. 高感度読み出し回路構成例

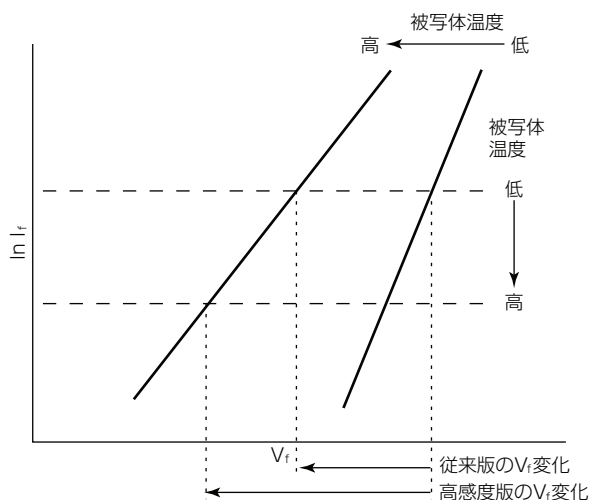


図10. サーマルダイオードの電圧-電流特性

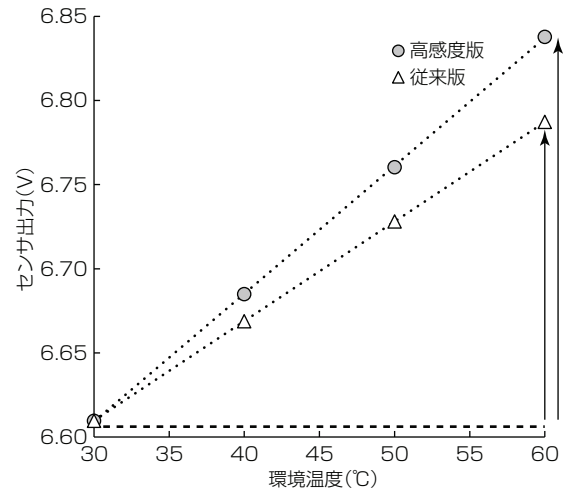


図11. 高感度読み出し回路による出力特性

オードの温度変化係数 dV_f/dT は、 1.9mV/K （1個当たり）になり、従来版読み出し回路の約1.3倍（1個当たり）の温度変化係数 dV_f/dT を実現している。この回路構成をアレー化する場合には、正帰還回路、電流源及び積分回路を、アレー状に配列された複数の画素の列ごとに設ける。

4. む す び

サーマルダイオード赤外線センサ技術について述べた。サーマルダイオード赤外線センサは、温度センサが、Si-LSI技術で製造できるため、低価格化及び量産化に適した方式と言える。このセンサの用途としては、防犯、見守り、空調・照明・機器制御、人数カウント、体温測定・監視などに適用できる。今後、安価な赤外線センサは、民生分野で、ますます重要になってくると考えられ、サーマルダイオード赤外線センサが赤外線センサの新たな用途を作り出すキーデバイスになることが期待される。

参 考 文 献

- (1) Takamuro, D., et al.: Development of new SOI diode structure for beyond $17\mu\text{m}$ pixel pitch SOI diode uncooled IRFPAs, Proc. SPIE, **8012**, 80121E (2011)
- (2) Fujisawa, D., et al.: Two-million-pixel SOI diode uncooled IRFPA with $15\mu\text{m}$ pixel pitch, Proc. SPIE, **8353**, 83531G (2012)
- (3) Fujisawa, D., et al.: Multi-color imaging with silicon-on-insulator diode uncooled infrared focal plane array using through-hole plasmonic metamaterial absorbers, Proc. MEMS, 905~908, IEEE (2015)
- (4) Fujisawa, D., et al.: Implementation of SOI diode uncooled IRFPA in TEC-less and shutter-less operation, Proc. SPIE, **10624**, 1062421 (2018)
- (5) Fujisawa, D., et al.: Development of shutter-less SOI diode uncooled IRFPA for compact size and low power consumption, Proc. SPIE, **11002**, 110022C (2019)
- (6) Fujisawa, D., et al.: Development of new pixel structure for beyond $12\text{-}\mu\text{m}$ pixel pitch SOI diode uncooled IRFPAs, Proc. SPIE, **11407**, 114071A (2020)

自然を模擬するライティング技術

Lighting Technology Mimicking Nature

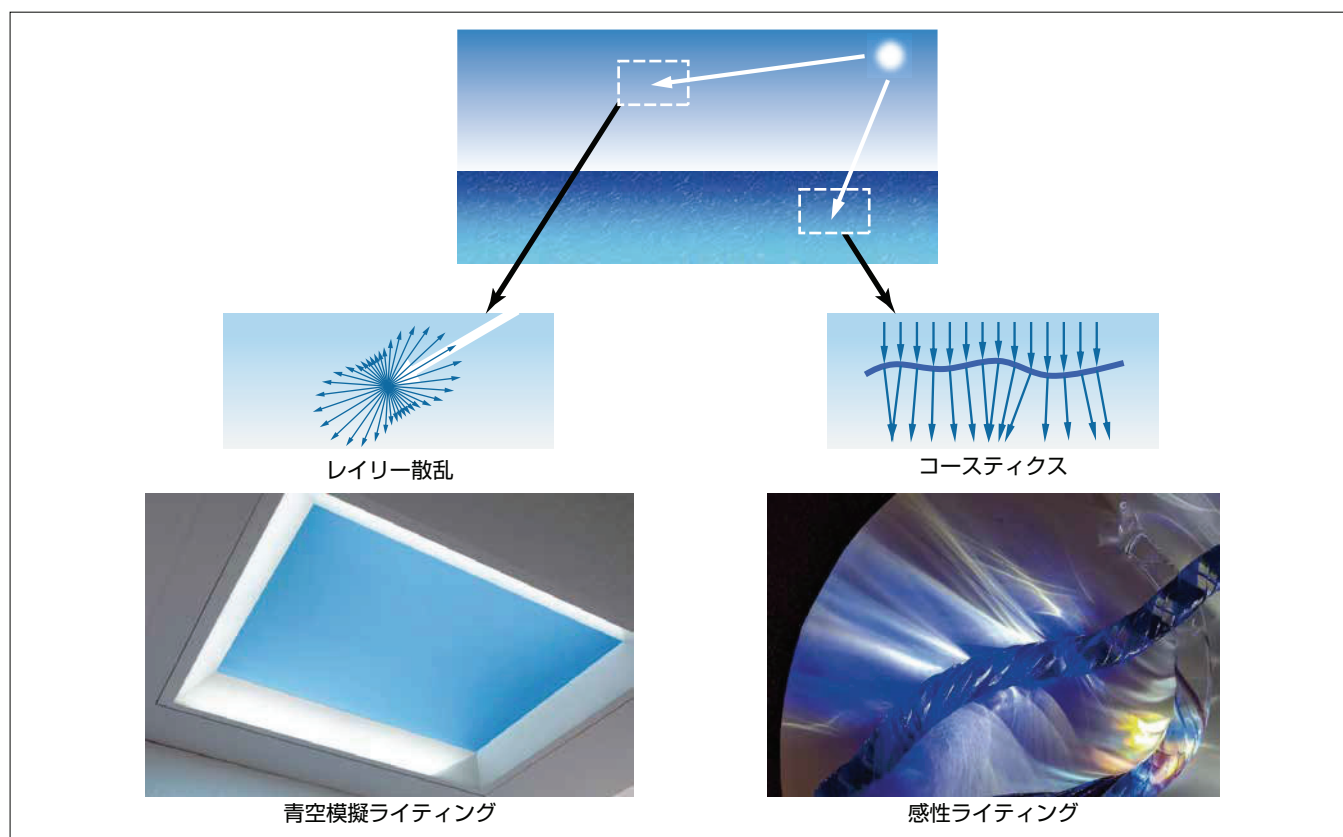
要 旨

近年、WELL認証や健康経営への関心の高まりなどから、省エネルギー等の性能面に加えて、快適性や健康性の向上といった新たな価値が照明に求められている。人類は太古から自然環境の中で生活してきたことから、自然に対して人は本質的に快適性を感じるとされている。一方で、現代人は屋内で過ごす時間が多く、自然に触れる機会が減っている。そこで三菱電機は、自然現象を人工的に再現することで人々に快適性を提供するため、自然を模擬するライティング技術を開発した。

地球に到達する太陽光が大気中の微粒子でレイリー散乱されることによって空が青く見える。この現象を用いて奥行き感のある自然な青空を再現するのが青空模擬ライティングである。これによって、自然かつ解放感あふれる室

内空間を提供し、オフィスや公共施設などの快適性向上に貢献できる。照明環境の印象評価に関する被験者実験では、一般的なLED照明に対して青空模擬ライティングの方が有意に好ましいアンケート結果が得られた。また、睡眠の質が向上する傾向も得られている。

レイリー散乱された後の光は地上に降り注ぐ。そのうち例えば海面のような凹凸面で光が屈折・反射されて生成される明暗の特有のパターンをコースティクスという。この現象を用いて、人の感性に訴えかけるような光と影のアーティスティックなパターンを生成するのが感性ライティングである。心理評価実験では、一般的なLED照明に対して、感性ライティングの方が人の心を癒す効果や創造性を高める効果があることが示唆されている。



自然を模擬するライティング

太陽からの光が地球大気中の微粒子によってレイリー散乱されることで空が青く見える。この現象を利用して青空を再現するのが青空模擬ライティングである。レイリー散乱されて地球に降り注ぐ光は、海水面の凹凸等によって屈折・反射されてコースティクスと呼ばれる特有のパターンを生成する。この現象を利用して人の感性に訴えかけるようなアーティスティックな光のゆらぎを再現するのが感性ライティングである。これら自然を模擬するライティング技術によって、癒しや快適性といった従来の照明にはなかった新たな価値を提供する。

1. ま え が き

近年、ZEB(net Zero Energy Building)に対応した省エネルギーに加えて、WELL認証や健康経営への関心の高まり等によって、人の快適性や健康性の向上が注目されている。照明分野では、光源のLED化や発光効率の改善、入退室管理と連携した点灯制御等によってZEBへの対応が進められてきたが、今後は照明にも快適性等を向上させる新たな機能が求められ、それを実現するライティング技術の開発が重要になる。従来の施設用照明は、空間を明るく均一に照明することを基本機能として開発されてきた。一方、人間は、誕生して以来長年にわたって自然環境で生活してきたことから、自然に触れたときに理屈抜きに快適性を感じると言われている。このことをヒントに、当社は自然を模倣するライティング技術を開発した。中でも、人類を含む全ての生命の源である太陽からの光に着目した。

本稿では、太陽光が大気中の微粒子によって受けるレイリー散乱を利用した“青空模擬ライティング”と、太陽光のような平行光の屈折・反射によって生成される特有のパターンであるコースティクスを応用した“感性ライティング”について、その技術及び特長、心理的な影響や効用に関する評価実験結果について述べる。

2. 青空模擬ライティング技術

2.1 青空模擬ライティングの仕組み

青空模擬ライティングは、青空を模したパネルと発光フレームによって、開放的で奥行き感のある青空と自然な光の差し込みを表現する(図1)⁽¹⁾。地球上では、太陽光が大気中の粒子によってレイリー散乱される現象によって青空が生成される(図2左)。ここで、レイリー散乱とは、波長よりも十分小さな粒子によって、波長の短い青い光が波長の長い赤い光よりも強く散乱される現象である。そこで、太陽に相当するLED光源からの光を、大気に相当する光散乱体でレイリー散乱させることによって青空を模倣した(図2右)。



図1. 青空模擬ライティング

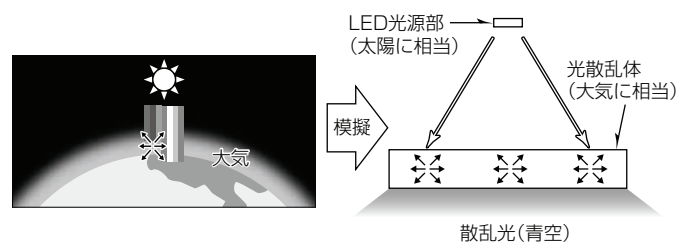


図2. 青空模擬ライティングの仕組み

2.2 青空模擬ライティングの特長

2.2.1 エッジライト方式による薄型構造

一般的な手法では、均一な青空光を得るためにLED光源と光散乱体を離して配置(図2右)することによって器具が厚型化し、設置スペースの問題から適用先が限られてしまう。よって、幅広い用途に適用するためには器具の薄型化が重要になる。そこで当社は、新たにエッジライト方式を採用することで薄型化を実現した(図3)。エッジライト方式とは、光散乱体の側面にLED光源を配置し、LED光源からの光を光散乱体内部で導光させる方式である。LED光源を光散乱体の面直方向に離して配置する必要がなく大幅な薄型化が可能になる。この方式の採用によって、一般的な埋め込み型施設用照明器具と同等の厚さ120mm以下を達成した。器具構成は、大きく分けて青空模擬パネルと発光フレームで構成される。青空模擬パネルで、LED光源からの光は光散乱体の側面から入光したのち上下面で全反射を繰り返して導光する。光散乱体には波長サイズ以下のナノ粒子が含まれており、導光中にナノ粒子でレイリー散乱された光のうち全反射条件を満たさなくなった光だけが光散乱体外部に青空光として取り出される。フレームは、青空模擬パネルの四辺を囲むように配置され、太陽光が差し込む様子を表現している。これによって奥行き感のある自然な青空を再現している。

2.2.2 時の移ろいを表現する照明の色変化

自然の空は一日の時間の流れの中でその色を変化させる。これに対応し、色温度の異なるLED光源の点灯制御によって、昼シーンだけでなく、朝／夕や夜シーンも再現

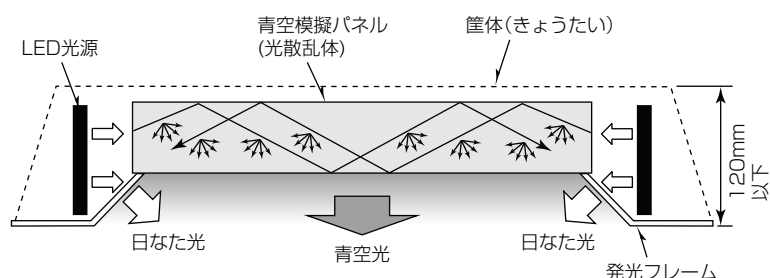


図3. エッジライト方式による薄型構造

した。時の移ろいを感じさせる色変化によって、更に自然な空を模擬することを可能にした(図4)。

2.3 青空模擬ライティングの評価実験

2.3.1 照明環境の印象評価

青空模擬ライティングが人に与える効用について被験者実験を実施した。通常照明(一般的なLED照明)だけの場合と、通常照明に加えて青空模擬照明を設置した場合で、居室空間での照明の印象についてアンケート調査を実施した(図5)。開放的、リラックス、外とのつながりなど、全ての項目で、青空模擬照明を設置した方が好印象の結果が得られた。現在、作業中のストレスや集中度など、脳波計測による感性評価も進めている。

2.3.2 睡眠への影響評価

青空模擬ライティングが睡眠の質に与える影響を被験者実験によって定量的に評価した⁽²⁾。午前9～11時の時間帯では通常照明(一般的なLED照明)下、青空模擬照明下、自然光下の三つの照明条件下で椅子に座ってのパソコン作業を、それ以外の時間は遮光制限のある室内(通常照明下)で行動させた。検査には終夜睡眠ポリグラフ装置を用いた(図6)。実験の結果、睡眠効率は“通常照明下”“青空模擬照明下”“自然光下”の順に向上し、中途覚醒割合は同じ順

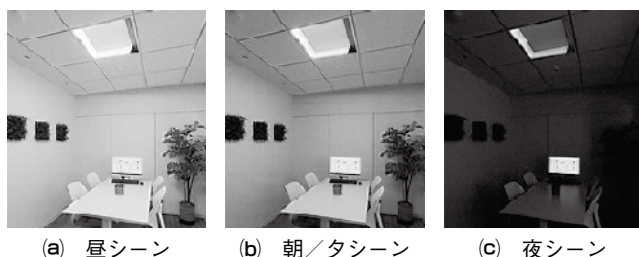
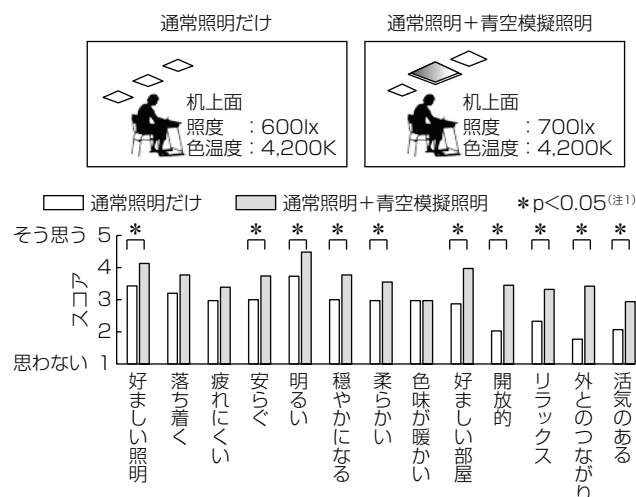
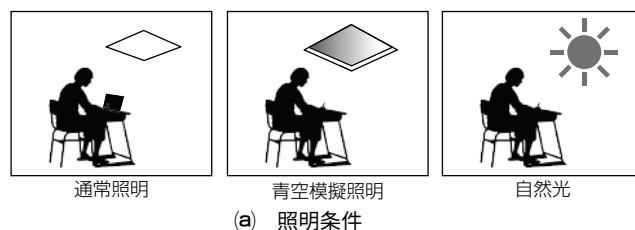


図4. 時の移ろいを表現する照明の色変化



(注1) pは有意確率で、一般に0.05以下であると統計的に有意差ありとされる。

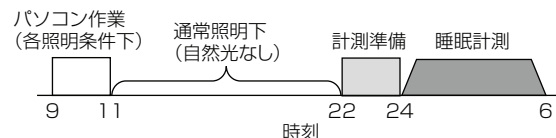
図5. 青空模擬ライティングの印象に関するアンケート結果



(a) 照明条件

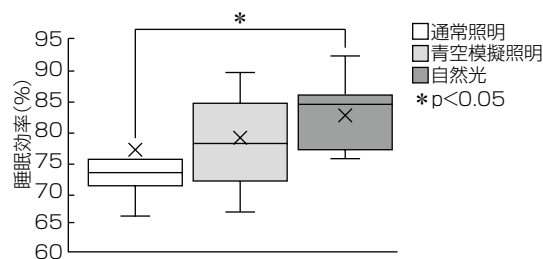
被験者	男性8名(20.63±0.70歳)
1人当たりの実験時間	21時間×3回
検査測定機器	終夜睡眠ポリグラフ装置(アリスPDx, Philips社製)
照明条件	通常照明, 青空模擬照明, 自然光

(b) 実験詳細

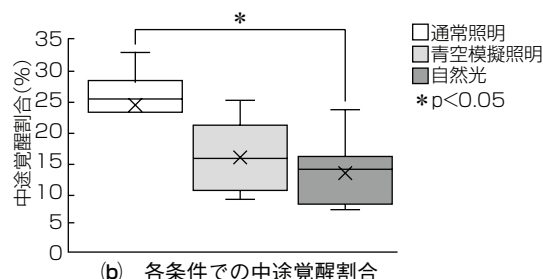


(c) 実験手順

図6. 睡眠への影響評価実験



(a) 各条件での睡眠効率



(b) 各条件での中途覚醒割合

図7. 睡眠への影響に関する実験結果

に減少することが分かった(図7)。青空模擬照明では、通常照明と比較してより自然光に近い効果が得られ、睡眠の質が向上する傾向にあることが示された。

3. 感性ライティング技術

3.1 感性ライティングのコンセプト

太陽光は、地球大気でレイリー散乱を受けた後、地上に降り注ぐ。2章に述べたとおり、当社はまずレイリー散乱による青空を模擬した。次のステップとして、地上に降り注ぐ光、すなわち、木漏れ日や水面によって生成される光の明暗やそれらのゆらぎを模擬することにした。中でも、太陽と同じく生命の起源とされる海の水面などで生じるコースティクスに着目した。コースティクスは、曲面物体

等によって光が屈折・反射して生成される独特のパターンである。太陽からの平行光が海面上の凹凸で屈折されて海底にきれいな明暗のパターンが生成されるように、コースティクスは太古から自然界で日常観察されてきたものであり、青空と同様に人の感性に訴えかけて癒しを与える効果があるものと考えられる。今回、光を屈折・反射する物体としてアーティスティックなガラスオブジェクトを用い、ガラスオブジェクトとLED光源によって生成されるコースティクスを用いた感性ライティングを開発した。車載ライティング向けに開発した技術⁽³⁾を用いて太陽光を模倣する平行光を生成した。

3.2 感性ライティングのプロト機

感性ライティングのコンセプトに基づいて2種類のプロト機を製作した。プロト機1は、生け花に見立てたガラスオブジェクトに下方から照明を当てて、壁面に照明パターンを生成する(図8(a))。プロト機2は、表面に凹凸形状を持つガラスオブジェクトをテーブルに載せて側方から照明を当てて、テーブル上面に照明パターンを生成する(図8(b))。テーブルを回転させることでパターンを時間的に変化させる。水面が波打って海底の照射パターンが変化するような自然のゆらぎを感性ライティングで再現できる。

3.3 感性ライティングの評価実験

感性ライティング2種類について心理評価実験を実施した⁽⁴⁾。実験に用いた感性ライティングを図9に示す。感性ライティング1, 2はそれぞれ3.2節に述べたプロト機1, プロト機2に準じたものであるが、感性ライティング2でテーブルは静止させた。居室を模倣した空間で、通常

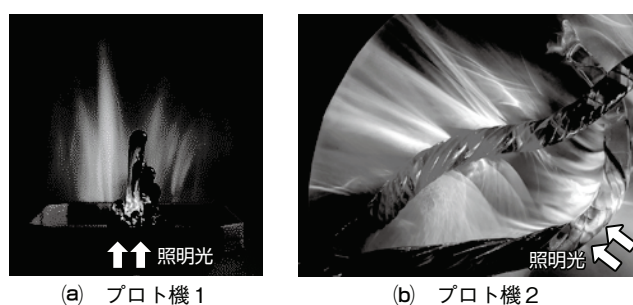


図8. 感性ライティングのプロト機

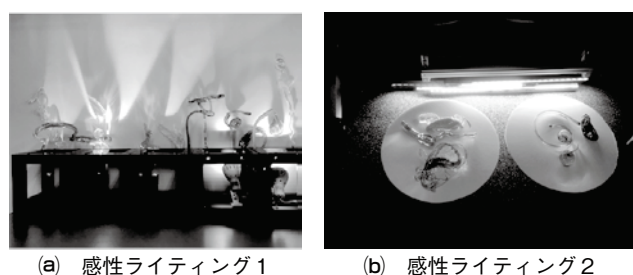


図9. 実験に用いた感性ライティング

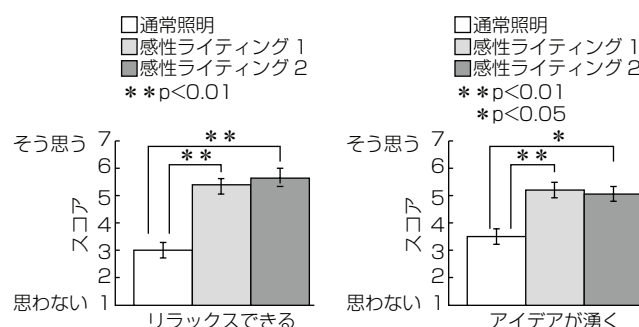


図10. 感性ライティングの印象に関するアンケート結果

照明(一般的なLED照明)、感性ライティング1、感性ライティング2に対する印象に関してアンケート調査を行った。被験者は24名(男性13名、女性11名、年齢20~40代)である。各被験者にそれぞれの環境で過ごしてもらった感想を7段階評価の尺度で回答してもらった。①各照明をどのように感じたか、②各照明はどのような効果があるか、③各照明はどのような場面で用いるのに適しているかの三つのグループに分類される質問を行った(計19項目)。ほぼ全ての質問項目に関して、感性ライティングの方が優れているという結果が得られた。“リラックスできる”“アイデアが湧く”についての結果を示す(図10)。感性ライティングは、人の感性を癒す効果に加えて、創造性を高める効果があることを示唆している。

4. む す び

自然を模倣するライティング技術として、奥行き感のある青空を再現する青空模倣ライティングと、自然のコースティクスを模倣する感性ライティングについて、その技術や人に与える影響評価実験結果を述べた。人間は太古から自然光の下で生活してきたが、現代人は大半の時間を屋内で、すなわち室内照明下で過ごす。ウィズコロナ時代ではこの傾向が助長されると考えられるため、室内照明が人に与える影響について考慮することが重要になってくる。水や食べ物について、成分や産地を確認するなどその品質を求めるのと同じように、光にもその質が求められるであろう。今後、人の心を癒す、快適性を向上させるなど、より質の高い光の実現を目指す。

参 考 文 献

- (1) 桑田宗晴：青空を模倣するライティング技術，Optics & Photonics Japan 2019講演予稿集，109 (2019)
- (2) 満倉靖忠，ほか：異なる二種類の光による睡眠への影響解析，2020年度 照明学会全国大会講演予稿集，5-O-02 (2020)
- (3) 桑田宗晴，ほか：超小型・高機能なLEDヘッドライト用光学モジュール，三菱電機技報，93，No.5，300~303 (2019)
- (4) Nakatsu, R., et al.: Evaluation of Art Lighting Combining LED Lighting and Glass Art by Psychological Experiment, Proc. of International Conference for Asia Digital Art and Design 2020, 2A-5 (2020)

技術実証棟“SUSTIE”の ウェルネスオフィス運用技術

浮穴朋興*
Tomooki Ukiana
藤井洋一*
Yoichi Fujii
飯田隆義*
Takayoshi Iida

Wellness Office Operating Technologies for net Zero Energy Building Test Facility "SUSTIE"

要 旨

近年、従業員が健康的に働くことができる環境を提供する“ウェルネスオフィス”が注目されている。ウェルネスオフィスは、意匠、設備、什器(じゅうき)、運用管理等あらゆる要素を“ウェルネス(健康)”の視点で設計したオフィスである。認証制度も整備済みであり、北米は“WELL Building Standard”が2014年から開始され、日本国内は“CASBEE(建築環境総合性能評価システム)-ウェルネスオフィス認証”が2019年から開始されている。

三菱電機は、技術実証を目的にした新しいオフィスビル“SUSTIE(サスティエ)”を2020年10月に竣工(しゅんこう)した。SUSTIEは、CASBEE-ウェルネスオフィス認証の最高ランクであるSランクと省エネルギー性能を示すZEB(net Zero Energy Building)認証の最高ランク『ZEB』

を取得した。これによって、高いレベルで健康性と省エネルギー性を両立できていることを証明した。

SUSTIEにはウェルネスオフィスを実現する様々な工夫を取り入れている。快適なオフィス空間を提供するためには、時々刻々と変わるオフィス環境を把握して運用改善を継続することが重要になる。そのような運用を支援するため、環境センシング用の各種センサを計330点設置し、独自の可視化システムによって環境把握を容易にしている。また、快適な温熱環境を提供するため、空調は快適性に優れた天井チャンバ型空気式放射空調システムを導入している。照明は照度を下げつつ明るさ感を維持するレンズ制御タイプ照明を導入し、換気は換気量の確保と熱負荷低減を両立させる全熱交換器やクールヒートチューブを導入している。



技術実証棟“SUSTIE(サスティエ)”

技術実証棟SUSTIEは、2020年10月14日に竣工した。神奈川県鎌倉市にある当社東部研究所地区内に建設し、建築面積1,954m²、延べ床面積6,456m²の4階建て鉄骨造である。室内は九つのエリアに分かれたオフィスをメインとし、1階には地区内の食堂機能も持っている。CASBEE-ウェルネスオフィス認証の最高ランクであるSランクとZEB認証の最高ランクである『ZEB』を取得しており、両最高ランクの同時取得は国内初(注1)になる。

(注1) 2020年1月31日時点、当社調べ

1. ま え が き

近年、従業員が健康的に働くことができる環境を提供する“ウェルネスオフィス”が注目されている。ウェルネスオフィスは、意匠設計、設備設計、什器選定、運用管理等のあらゆる要素を“ウェルネス(健康)”の視点で設計したオフィスである。

ウェルネスオフィスの性能を客観的に示す認証制度も既に整備されている。北米では“WELL Building Standard”が2014年から開始され、国内では“CASBEE-ウェルネスオフィス認証”が2019年から開始されている。

当社は、技術実証を目的にした新しいオフィスビル“SUSTIE”(サスティエ)を2020年10月に竣工した。SUSTIEは、CASBEE-ウェルネスオフィス認証の最高ランクであるSランクと省エネルギー性能を示すZEB認証の最高ランクである『ZEB』を取得した。これによって、高いレベルでの健康性と省エネルギー性を両立できていることを証明した⁽¹⁾。

本稿では、SUSTIEの計画時点から検討してきたウェルネスオフィス実現に貢献する運用技術と設備システムに焦点を当てて述べる。

2. ウェルネスオフィスの運用技術

ウェルネスオフィスを実現するためには多岐にわたる要件を高いレベルで満たす必要がある。例えば、国内のウェルネスオフィス認証制度である“CASBEE-ウェルネスオフィス認証”では、健康性・快適性、利便性向上、安全性確保、運営管理、プログラムという五つの評価基準があり、最高ランクを取得するためには各項目に対して高得点を取る必要がある。また、北米の認証制度である“WELL Building Standard”の最新版(v2)では、空気、水、食物、光、運動、温熱快適性、音、材料、こころ、コミュニティ、イノベーションと11個の評価基準があり、こちらも高い評価を得るためには各項目で高得点を取る必要がある。

どちらの認証制度でも、ウェルネスオフィスを実現するためには、設計・施工の配慮に加えて、継続的な運用改善を必要としており、認証項目として組み込まれている。

この章では、ウェルネスオフィスの継続的な運用改善を目的に、当社が開発したセンサデータ収集システム及び分析可視化技術と、運用時での快適性と省エネルギー性の両立を支援するビルシミュレーション技術を述べる。

2.1 センサデータ収集システム

運用改善のためには、正確な現状把握が必要になる。

SUSTIEでは、10種類以上の環境センサ(温湿度、照度、CO、CO₂、PM(Particulate Matters)10、PM2.5、花粉、TVOC、ラドン、ホルムアルデヒド、オゾン等)を各エリアに計330点設置しており、室内環境を正確に把握できる(図1)。これらのセンサは、CASBEE-ウェルネスオフィス認証の健康性・快適性及びWELL Building Standardの空気・光・温熱快適性の評価項目に合わせて選定している。取得した膨大なセンサデータは、当社のビル管理システムに保存される。

2.2 センサデータ分析可視化技術

保存された各種センサデータは、ビル管理システムによって可視化できる。可視化システムは、センサデータを3Dマップ上にグラフィカルに表示する(図2、図3)。表示はリアルタイムに更新されるため、ビル管理者は温度が低いエリア、CO₂濃度が高いエリア、暗いエリア等を直感的に把握でき、運用改善に迅速に対応できる。

センサの設置が少ない場合では、データ補間技術によって全体の傾向を把握できる。また、過去のセンサデータも同様に表示できるため、過去に遡って分析することもできる。

2.3 ビルシミュレーション技術

ウェルネスオフィスの運用では快適性の維持に加えて、一般的な要件である地球環境への配慮、すなわち高い省エネルギー性も求められる。これらの両立はエネルギーの観点では相反する要素になるため、バランスの取れた計画の立案が不可欠である。

図4に示すBIM(Building Information Modeling)を活用したビルシミュレーション技術は、ビル設備の動作と各エリアの環境(温熱、空気質、光、音)をシミュレーション可能であり、一年間のエネルギー収支と快適性を予測できる。

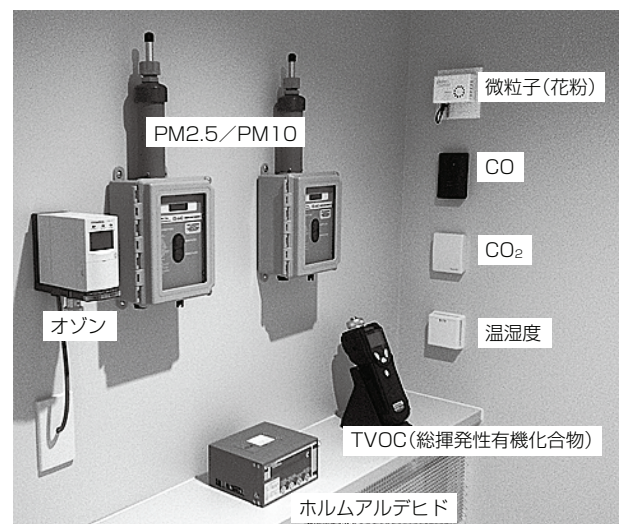


図1. SUSTIE内の各種センサ例

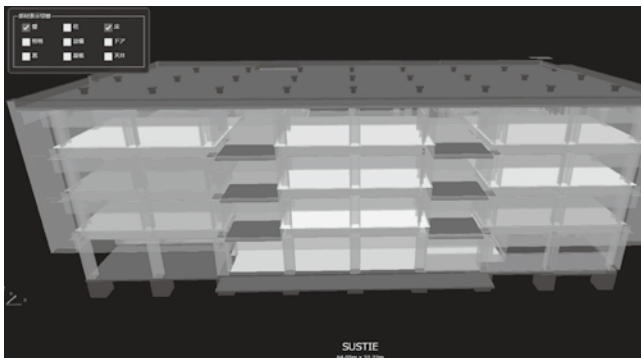


図2. 可視化システム(全体の把握例)

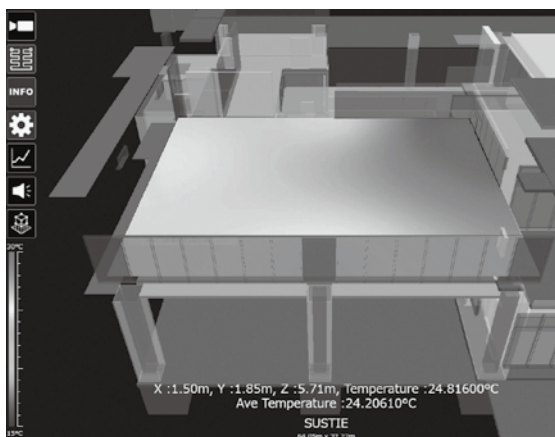


図3. 可視化システム(温度分布の把握例)

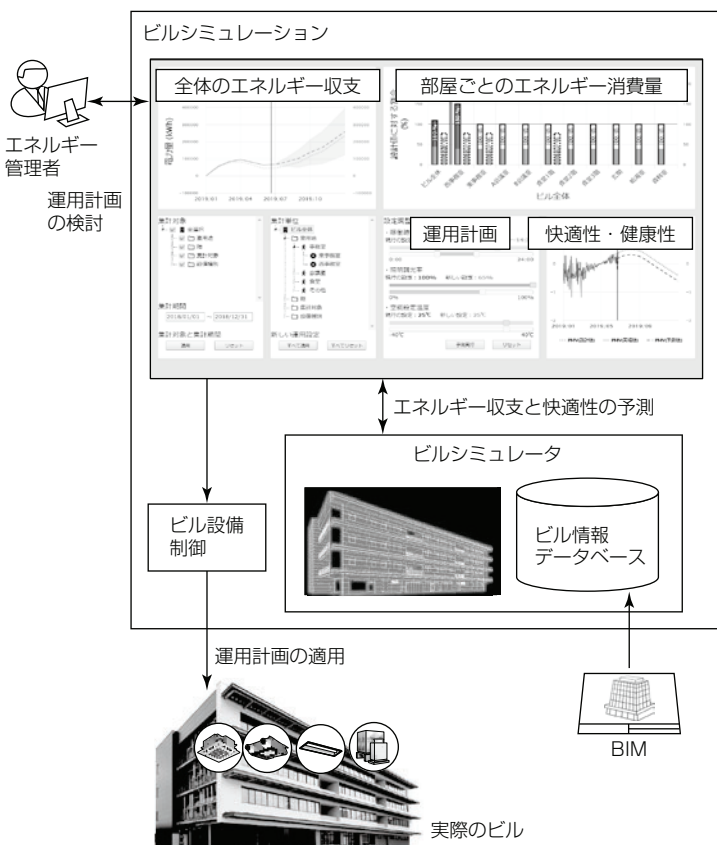


図4. ビルシミュレーション技術

ビルシミュレーションでは、一年を通じた設定温度や運転スケジュール等の運用パラメータを設定できるため、夏季、冬季、中間期ごとの快適性や省エネルギー性を事前に把握できる。そのため、運用開始前から年間を通じて快適性と省エネルギー性のバランスが取れた運用方法を検討できる。また、最適な運用パラメータを自動探索する機能を持っているため、手作業による試行錯誤の回数を減らすことができ、効率的な検討が可能である。

3. ウェルネスオフィスの導入設備

快適な室内環境を提供するために導入した、空調システム、照明システム、換気システムについて述べる。

3.1 空調システム

温熱環境の快適性を向上させるために、一部のオフィスエリアには“天井チャンバ型空気式放射空調システム”を導入した。このシステムの特長は、ビル用マルチエアコンを使用しながらも放射空調システムを実現している点にある。

放射空調システムとは、熱移動の3要素、伝導、対流、放射のうち、放射の要素を最大限活用した空調システムである。このシステムでは、人体に熱を伝える方法として主に放射熱を活用するため、空気の対流が少なく不快の要因になる気流(ドラフト)を抑制できる。また室内の温熱環境が均一になる特長もあり、座る場所に影響されない同じ快適性を提供できる。

図5にSUSTIEで採用した天井チャンバ型空気式放射空調システムを示す。このシステムでは、天井をグリッド天井対応のアルミニウム製放射パネルとし、高断熱化した天井裏空間(チャンバ)を冷暖房することで、空気式の放射空調システムを実現している。換気のために、放射パネルの一部を多孔パネルとし、天井裏から緩やかな気流によって新鮮な外気を提供するとともに、天井裏の冷暖気も同時に室内に流すことで効率的に室内を冷暖房できる。

このシステムは、快適性と省エネルギー性を両立させるために、単純な温度制御でなく、人の温冷感を推定する指標であるPMV(Predicted Mean Vote: 予想平均温冷感申告)に基づいて制御している。これによって、人の感覚を反映したより快適な温熱環境が実現できる。このシステムは、実験環境で快適性及び省エネルギー性の両立を確認している⁽²⁾。

また、吹き抜け空間を備える共用部エリアでは、水方式の放射空調システムを人の集まる場の近くに配置し、局所的に空調することで共用部エリアの快適性と省エネルギー性を両立させている。

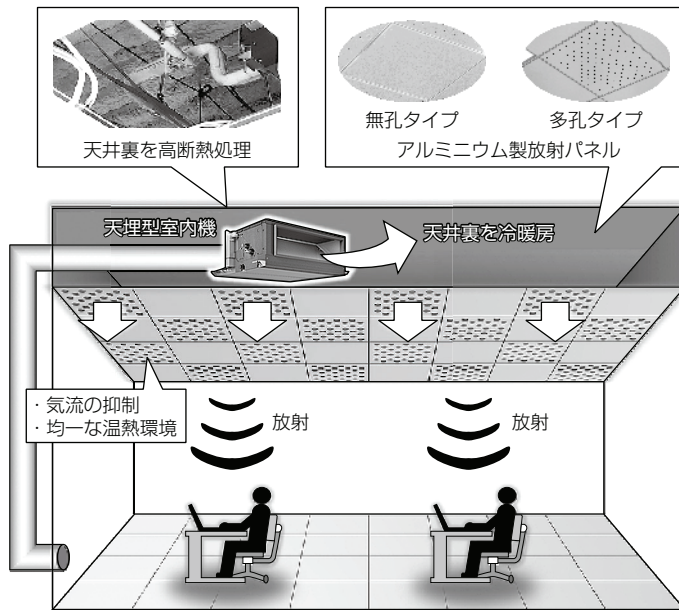


図5. 天井チャンバ型空気式放射空調システム

3.2 照明システム

オフィスエリアでの光環境の快適性と省エネルギー性を両立させるために、“レンズ制御タイプ照明”を導入した。この照明は、以前から照明の明るさの指標として使われている“照度”だけでなく、人が感じる明るさを考慮した“明るさ感”の考えを取り入れた照明器具である。天井面への反射光を増やすことで人が感じる明るさが増すという特性を活用し、特殊なレンズを備えた照明器具を導入した(図6)。これによって机上面照度を抑えつつ十分な明るさ感を確保することが可能になり、快適性と省エネルギー性を両立できる。ただし、作業内容によっては照度が不足す

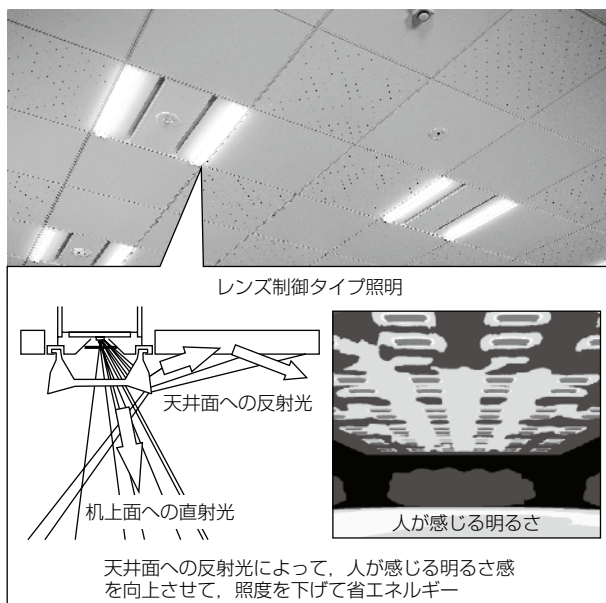


図6. レンズ制御タイプ照明

る場合も想定されるため、必要時はタスクライトを併用できるタスク&アンビエント照明システムにしている。

また、オフィスエリアのグレア対策として、開口率の高い南面の窓全体にひさしを設けて、全ての窓に自動制御のブラインドを備えている。共用部エリアでは北面窓からの外光を積極利用するとともに、間接照明、天井・壁面照射を利用し、照明器具のグレア対策を行っている。

3.3 換気システム

ウェルネスオフィス認証の基準を満たすためには、換気量を一般的な換気設計基準より多くする必要があるが、換気量を増やすと空調のエネルギー消費量が増加する。そこで、SUSTIEでは、換気に対してエリアごとに異なる熱負荷低減の工夫をすることで、換気量の確保と熱負荷低減を両立させている。

オフィスエリアは当社の全熱交換器“ロスナイ”による機械換気システムを導入し、吹き抜けや廊下等の共用部はクールヒートチューブと呼ばれる地中熱を利用した換気システム及び電動窓の自動開閉による自然換気システムを導入している。

機械換気システムでは、外気導入ダクトにWELL Building Standardの基準に対応したフィルタを装着しており、花粉やPM2.5といったアレルゲン物質を除去した上で室内に取り込む仕組みにしている。自然換気は外気条件が温熱環境及び空気質の良い条件になる場合に外気を取り込む仕組みである。また、更なる省エネルギーの工夫として、入退室管理システムで計測したオフィス在室人数に基づき、換気量をきめ細かく制御する機能も導入予定である。

4. む す び

SUSTIEでウェルネスオフィスを実現するために導入した運用技術及び設備システムについて述べた。本稿で述べた技術とシステムに加えて、建築的な工夫やアクティビティ・ベースド・ワーキング(ABW)に代表される働き方の新しい取り組みを含めることで、CASBEE-ウェルネスオフィスの最高ランクになるSランクを取得した。今後は快適・健康なオフィスを継続的に運用するとともに、WELL Building Standardの認証取得も目指す予定である。

参 考 文 献

- (1) 藤井洋一, ほか: ZEB+(ゼブプラス)関連技術を結集した実証棟の設計および運用検証(第2報)『ZEB』とWELLNESSの実現に向けた取り組み, 空気調和・衛生工学会, 49~52 (2020)
- (2) 田村夏美, ほか: 天井チャンバー型空気式放射空調システムにおけるPMV制御方式の評価, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, 3, 329~332 (2017)

触りたくなるインタフェース — 視覚障がい者と開発した形と動きを用いた機器操作UI —

横須賀佑介*
Yusuke Yokosuka
藤川裕子†
Yuko Fujikawa

Highly User - friendly Interface Inducing Touch — User Interface Using Distinctive Shapes and Movements Developed with Visually Impaired People —

要 旨

近年、スマートフォンやスマートスピーカーの普及によって、視覚障がい者も家電製品を含めた機器を操作できるようになってきている。一方で、これらの操作方法に対応できない視覚障がい者も存在する。そのため、様々な機器をこれらのユーザーにとっても操作できるものにするためには、更なる調査・検討が必要である。

この調査・検討の一助とすることを目的として、視覚障がいと知的障がいの両方を併せ持つ重複障がい者にとって操作しやすくするための要素を抽出した。具体的には、神奈川県横浜市の盲学校との5か月間のエスノグラフィ^(注1)によって、①概念教育と一致した操作方法の適用、②操作への恐怖心を払しょくする必要性、③繊細な指先感覚に

依存しない操作方法、④操作範囲の限定という四つの要素を抽出した。また得られた要素を適用した、空調機器のリモコンのコンセプトモデルである、“触りたくなるインタフェース”を試作した。この試作は、設定する項目ごとに形や動きを変えることによって、手で触ることで設定した状態を確認できる。実際にこの試作を盲学校の生徒たちに触ってもらったところ、機器操作に消極的であった生徒たちが、積極的に操作している様子を確認できた。

今後は、今回得られた操作しやすくするための要素を、家電製品、産業製品などの機器操作UI(ユーザーインタフェース)に展開していく。

(注1) 実際の環境に入り込み、行動観察やインタビューなどを通して、調査対象者について調査する方法



風量を変更している様子

空調機器のリモコンを例にした触りたくなるインタフェース

上は、盲学校でのエスノグラフィによる調査によって得られた操作しやすくするための要素を適用して試作した空調機器向けリモコンのコンセプトモデルである。電源、運転モード、設定温度、風量、風向、切タイマの設定ができる。下は、視覚障がい者がボールを移動し、風量を変更している様子である。このように、視覚障がい者が自ら触っている姿を確認できた。

1. ま え が き

家電製品を含めた様々な機器の操作に、フラットな形状のボタンを利用することがあるが、視覚障がい者にとっては操作が難しい⁽¹⁾。一方でスマートフォンやスマートスピーカーの普及によって、今まで難しかった各種機器操作を、視覚障がい者が操作できる機会も増えてきている。しかし、これらの操作方法に対応できないユーザーも存在するため、より多くのユーザーが機器操作をできるようにするためには、更なる操作方法の検討が必要である。

この一助として、三菱電機は視覚障がいと知的障がいを併せ持つユーザーを調査し、彼女／彼らにとって操作しやすくするための要素を抽出した。また、その要素を基に、空調機器のリモコンを例としたコンセプトモデルである、“触りたくなるインタフェース”を試作した。

2. 形成的調査

視覚障がい及び知的障がいを併せ持つユーザーが機器をどのように理解するのか、どのような操作方法が要求されるのか調査するために、視覚障がいと他の障がいを併せ持つ重複障がい者を受け入れている盲学校である、横浜訓盲学院^(注2)の高等部専攻科生活科の協力の下、形成的調査を実施した。高等部専攻科生活科は高等部を卒業後、3年間通うことができる教育課程である。

期間は2016年6月から10月の5か月間であり、このとき的高等部専攻科生活科は、教員5名、生徒6名で構成されていた。生徒の年齢は18歳から21歳であった。また、4名が全盲、2名が弱視であり、6名全員が知的障がい、1名が肢体不自由であった。5名の生徒は発話が難しかった。そのため、エスノグラフィ⁽²⁾を利用して、機器操作をしやすくするための要素を調査した。以下では、具体的に実施した内容について述べる。

(注2) <http://kunmou.jp/>

2.1 学校生活見学

3日間学校生活を見学した。見学したのは、授業、休み時間、給食、帰りの会であった。授業では、概念教育や、はがき作り、農作物収穫を見学した。概念教育とは、形状、方向、長さ、高さ、数量等の概念を学ぶものである。教員が作成した教材(図1)を主に利用して実施しており、教材には、例えば、円の形状を学ぶために、円の形のパズルをはめるもの(図2(a))や、高さの概念を学ぶために、円柱と同じ高さの筒を差し込むもの(図2(b))等がある。点字を学習するための教材(図1左下)には、円筒型電池の凸部(プ

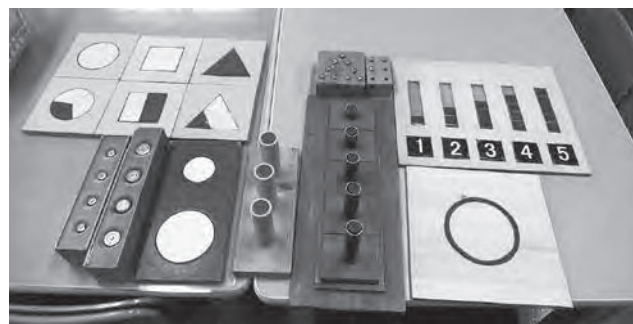
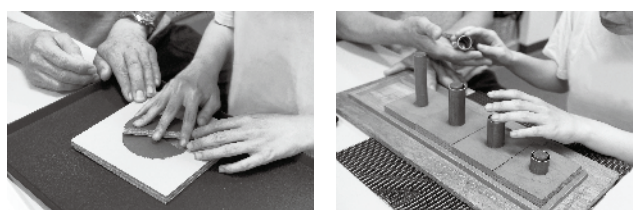


図1. 概念教育で利用する教材の例



(a) 円の形のパズルをはめるもの

(b) 円柱と同じ高さの筒を差し込むもの

図2. 概念教育の教材を利用する様子

ラス極端子)が利用され、少しずつサイズを小さくしていく、最終的に点字のサイズの凸部を読めるようにする。また、型はめやブロックなどのおもちゃを触る姿も観察した。休み時間には、テレビやYouTube^(注3)等の音を聴いたり、教員と一緒にボクシングをしたりする姿を見学した。

東京おもちゃ美術館^(注4)への社会科見学にも同行した。東京おもちゃ美術館は木のおもちゃや、日本の伝統的なおもちゃ、世界のおもちゃ等を展示している。主に木のおもちゃのエリアで生徒たちが遊ぶ姿を観察した。

(注3) YouTubeは、Google LLCの登録商標である。

(注4) <http://goodtoy.org/ttm/>

2.2 既存製品操作

既存製品が操作可能か検証するために、炊飯器の操作部と空調機器のリモコンを操作する姿を見学した。炊飯器は、上面に操作部があり、また、操作に対する音声ガイド機能が付いたものである。空調機器は教室に備付けのものを利用した。リモコンは教室の壁に設置されていた。どちらも操作部は、液晶画面、ボタン、十字キーで構成される。

2.3 操作可能性検証

既存製品操作では検証できなかった操作方法が操作可能か検証するために、2種類の新たな操作部を試作した。どちらも操作部だけ試作し、機器連携部分はオズの魔法使い法^(注5)を用いた。

(注5) システムの動きを人が代わりに実施し、ユーザーに試してほしい機能を疑似体験させる方法。



図3. 操作可能性を検証するための試作

2.3.1 検証試作1

操作部に複数のボタンがある場合に操作が難しかったため、一つの機能に一つの操作となる操作部を検証した。具体的には、ロータリスイッチだけを持つ操作部と、スライダーだけを持つ操作部(図3(a))を作成した。また、①テレビ操作、②空調機器操作の二つのシーンを検証した。シーン①ではロータリスイッチをテレビのチャンネルとして、右(左)に回すとチャンネルの値が増える(減る)動作とした。また、スライダーは、つまみを上げる(下げる)と音量が上がる(下がる)ものにした。シーン②ではスライダーだけを利用し、つまみを上げる(下げる)と設定温度を上げる(下げる)ものとした。生徒たちは、どちらのシーン、どちらの操作部も問題なく操作でき、操作部を触り続けていた。

2.3.2 検証試作2

点字の細かい凸部分を読み取れることから、視覚障がい者の繊細な指先感覚を利用した操作の可能性を検証するために、図3(b)に示す空調機器用リモコンを作成した。このリモコンは、電源ON/OFFのためのボタン、設定温度を指定するスライダー、リモコンの側面に配置された温度を示す凸のスリット及び現在の温度を表す凸部で構成される。凸部は現在の温度に応じて、対応するスリットの位置に移動する。凸スリットを読みながら、スライダーのつまみを設定したい温度まで動かすことで、設定温度を指定できる。また、現在温度の凸部の位置が、スライダーのつまみと一致した際に、設定が完了したことが分かる。このリモコンの操作は生徒たちには難しく、また、教員の介助がない場合、操作部を触っていなかった。

3. 機器操作をしやすくするための要素

2.3節で述べた形成的調査から得られた、機器操作をしやすくするための要素について述べる。

3.1 概念教育と一致した操作方法の適用

既存の炊飯器を操作した際に、“上下ボタンを押して選んでください”という音声ガイドはあったが、炊飯器上面に

配置された十字キーが操作できなかった。概念教育での上下は垂直方向に高い、低い、であるため、上下キーが炊飯器上面に配置されると、垂直方向にはボタンが存在せず、どのボタンを押したらよいか分からない様子であった。このように、生徒たちの概念と異なるガイドをしている場合には、音声があったとしても、操作が難しいことが分かった。

概念教育の教材では、決められた型にモノをはめることで正解になるものが多かった。また、東京おもちゃ美術館で遊ぶおもちゃでは、ブロックをはめて積み上げるものなどに興味、達成感を持っている姿が観察された。

これらのことから、概念教育の認識と合わせた操作方法を用いることで、理解しやすい操作になると考えられる。

3.2 操作への恐怖心を払しょくする必要性

当社が持参したおもちゃを触った際、遊び方がよく分からないおもちゃを動かす場合に、教員に確認しながら操作していた。また、検証試作2の操作部についても、教員の介助なしには操作部を触らなかった。既存製品の操作時や、はがき作りの際に、教員に手取り足取り指導され、操作を誤ったときには教員に修正される姿が見られたことから、このような経験を多くしてきているために、新しいものに触れる、操作することをおそれていると考えられる。休み時間や農作物収穫の授業の際に、教員が介助するまで、何もせず待機している姿からも、その傾向が見られた。

一方で、東京おもちゃ美術館での木のおもちゃは生徒たちが自ら積極的に触って遊んでいた。これは概念教育を含め木で作成した教材に触れる機会が多く、木に対して安心感を抱いているためと考えられる。

このことから、安心して触れる、誤ってもよいと感じさせるような操作方法の提供が必要と考えられる。

3.3 繊細な指先感覚に依存しない操作方法

点字の教材は、少しずつ小さな円筒型電池に変更していくという段階的な学習方法を取っていた。また、検証試作2で設定した凸スリットは点字と同様の細かさであったが、初めて触るものであったからか、各凸スリットを読み取ることができず、操作の理解を得ることが難しかった。

検証試作1のスライダーは、操作は可能であったが、1段階ずつ変更することは難しく、多くの場合、つまみがスライダーの端まで移動していた。

そのため、繊細な指先感覚を利用した操作は難しく、また、微細な力加減が必要な操作も難しいことが分かった。

3.4 操作範囲の限定

概念教育、はがき作り、給食ではトレイを利用していた。また、給食の弁当箱は中が複数の箇所仕切られており、

それらのへりをなぞりながら、それぞれの位置を生徒たちは把握していた。このようなしぐさは、型にはめる概念教育の際にも見られた。検証試作1の各操作部に対して、一つの操作だけが割り当てられている状況は分かりやすい様子であった。

そのため、あらかじめ操作範囲が定まっており、その中で固有の操作が可能であることが重要と考えられる。

4. 触りたくなるインタフェース

前節までの気づきに基づいて、空調機器のリモコンを例にしたコンセプトモデルである、触りたくなるインタフェース(図4)を試作した。このリモコンは、電源、冷房・暖房などの運転モード、設定温度、風量、風向、切タイマの五つを操作可能である。操作部は、それぞれ異なる形状を持ち、外形形状と可動する操作部で構成される。外形形状が異なるため、それぞれの可動部の動きも異なる。さらに、操作後には音声で変更された状態を通知する。これらによって、各機能の操作範囲を限定し、また、操作対象や現在の設定値が触覚・聴覚で理解できる。さらに、素材として木を利用することで、触ることへの安心感を与える。

4.1 各操作部仕様

各操作部について述べる。

電源(図5)は、概念教育で、型とモノの一致を成功としていることを踏まえて、形状が一致している場合をON、一致していない状態をOFFとした。

運転モード(図6)は概念教育でも学ぶ三角形を外形として持ち、各頂点につまみを移動することで、“冷房”“暖房”“ドライ”の切替えができる。また、外形をなぞることで、切替え可能なモードが三つであることが分かる。

設定温度(図7)は検証試作1での1段ずつの操作が難しいという結果から、ジグザグ型とし、温度を1段階ずつ着実に変更できる形状にした。また、垂直方向の上を高い、下を低い温度とすることで、生徒たちの高さの概念と同じ方向で操作できるようにした。

風量(図8)は風の強さをボールの数で表現し、右側に移動するほど、風量が強くなるようにした。概念教育でもタイルを複数重ねることで数を学習しているため、風の強さをボールの数で表現することは、理解しやすいと考えられる。

風向(図9)は空調機器のルーバーの向き、切タイマ(図10)は時計の形を模擬している。

4.2 簡易評価

触りたくなるインタフェースを実際に生徒たちに触ってもらった。検証試作2のときとは異なり、教員に介助され



図4. 空調機器のリモコンを例にした触りたくなるインタフェース

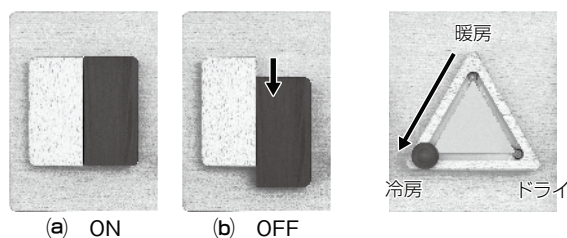


図5. 電源

図6. 運転モード

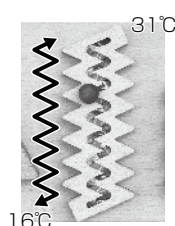


図7. 設定温度

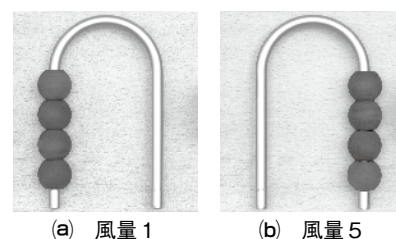


図8. 風量

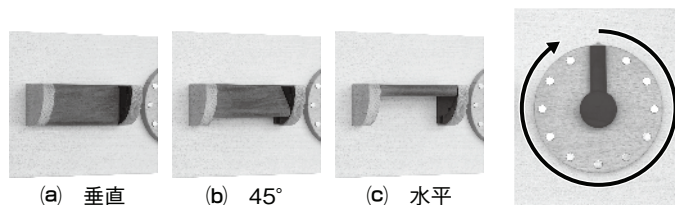


図9. 風向

図10. 切タイマ

て操作した後も、自ら繰り返し操作を実施している姿が観察された。また、教員から、“これは気に入っている様子ですよ”というコメントをもらった。

5. む す び

横浜訓盲学院と5か月間の形成的調査を実施し、視覚障がいと知的障がいを併せ持つユーザーにとって使いやすい操作の要素を抽出した。また、それらの要素を利用して、空調機器のリモコンを例として、触りたくなるインタフェースを試作し、その使いやすさを簡易的に評価した。今後は、ここで得られた知見を具体的な製品に生かしながら、更なる研究開発を実施していく。

参考文献

- (1) Guo, A., et al.: Facade: Auto-generating Tactile Interfaces to Appliances, Proc. of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 5826~5838 (2017)
- (2) Lazar J., et al.: Research Methods in Human-Computer Interaction 2nd edition, Morgan Kaufman Publishers (2017)

IoTソリューションを迅速に創出する 統合IoT“ClariSense”

鶴 薫*
Kaoru Tsuru

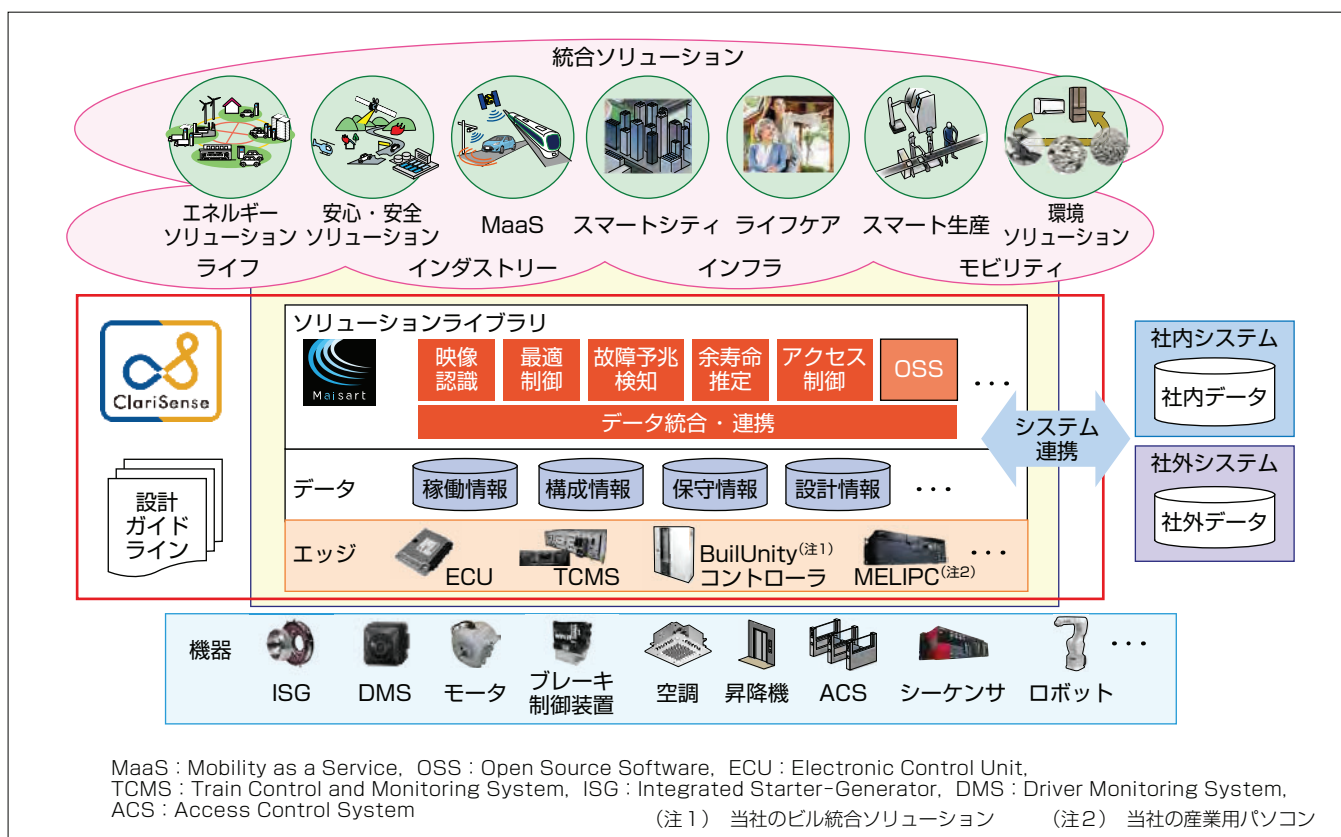
Internet of Things Suite “ClariSense” for Quickly Creating Internet of Things Solutions

要 旨

様々なセンサや機器がネットワークに接続されて、データ収集・制御による新たな価値を実現するIoT(Internet of Things)システムの普及が進んでいる。三菱電機では、様々な分野で課題を解決するため、機器やセンサ類を接続した社会・電力インフラ向けIoTシステムやビル設備向けIoTシステム、家電向けIoTシステム、工場向けIoTシステムなどを提供している。現在、こうした分野を含めて、解決すべき社会的課題の難易度が上がるに従って、複数の分野をまたがった解決方法や、様々なデータの高度利用による付加価値の高い新たなソリューションの提供が求められている。

統合IoT“ClariSense(クラリセンス)”は、総合電機メー

カーとして当社が強みとする様々な機器に対する知見や当社AI 技術“Maisart (マイサート)”, セキュリティなどの技術資産を、IoT システム統一設計ガイドラインやソリューションライブラリなどに統合して一元的に整備し、当社グループ内で共有することによって、各分野の既存IoTプラットフォームの強化や、新たなIoTシステムやシステム間連携による新たなソリューションの開発効率化を目指す取組みとしてスタートしている。ClariSenseは、個別分野のIoTプラットフォームや、個別IoTシステムの独立性を確保しつつ、将来に向けては、最新のデジタル技術を駆使して、柔軟で拡張性の高いIoTソリューションを迅速に創出するための仕組み作りを継続していく。



統合IoT“ClariSense”に基づくソリューションへの展開イメージ

統合IoT“ClariSense”は、設計ガイドラインを参照しながら、様々な機器のデータを様々なエッジを介して収集・蓄積し、これらを統合・連携させて付加価値を生むソリューションライブラリを活用し、また、様々なシステムと連携しながら、ライフ、インダストリー、インフラ、モビリティの各領域で、柔軟で拡張性の高いソリューションを迅速に創出するシステム開発を可能にする。

1. ま え が き

当社の統合IoT“ClariSense”が目指すIoTシステムとは、ライフ、インダストリー、インフラ、モビリティの各領域で、最新のデジタル技術を駆使し、柔軟で拡張性の高いソリューションを迅速に創出することを可能にするシステムである。

本稿では、ClariSenseの特長であるアーキテクチャやデータ連携・システム連携の考え方、ソリューションライブラリの仕組みについて述べる。また、将来的に強化する方向性として、マイクロサービス化によるシステム構築や、データ活用の容易化、ソフトウェア部品流通の高度化についても述べる。

2. 統合IoT“ClariSense”

2.1 当社のIoTシステムへの取組み

当社はミニコンや工業用計算機の利用が拡大した1970年代から一貫して、電力システムや上下水道処理等の社会インフラ分野で、当社機器を用いた監視・制御システムを構築してきた。当初は独自規格の通信路を用いていたが、標準的なIP(Internet Protocol)接続のローカルネットワークの利用に移行し、さらにはインターネット等の広域ネットワークを利用するように変遷し、IoTシステムと呼ばれるような形態になってきた。また、当初は社会インフラ向けが主であったが、工場内のFA機器、ビル内の設備・機器や家電機器などの接続対象が増えるとともに単なる監視・制御ではなく、収集したデータを様々な用途で活用して付加価値を生む方向へと進化してきている。

各分野でのIoTシステムの進化に従って、様々なソリューションを効率的に生み出すため、分野別でのIoTプラットフォームを整備してきた。例えば、社会・電力インフラ分野では、質の高い様々な各種IoTソリューションをタイムリーに、短期間で提供することで、社会・電力インフラ設備の運用・保守業務の効率向上に貢献する社会・電力インフラIoTプラットフォーム“INFOPRISM”を整備している⁽¹⁾。FA分野では、TCO(Total Cost of Ownership)の削減と企業価値の向上を実現するFA-IT統合ソリューション“e-F@ctory(イーファクトリー)”として製品、システムを整備している⁽²⁾。ビル管理分野では、クラウド上に蓄積したビル設備データの利活用を可能にする独自のスマートシティ・ビル IoT プラットフォーム“Ville-feuille(ヴィルフィーユ)”を整備している⁽³⁾。また、家電分野では、当社顧客の“暮らし空間イノベーション”実現の

ため、IoT家電を横断的に管理するグローバルIoT基盤を整備している⁽⁴⁾。

2.2 統合IoT“ClariSense”の目的

これまで当社は、2.1節で述べたように個別の分野でIoTプラットフォームの整備、IoTシステムの構築を行ってきた。これらの分野での個別の開発の効率化が必要になるのに加えて、ライフ、インダストリー、インフラ、モビリティの各領域での解決すべき社会的課題の難易度が上がるに従って、複数の分野をまたがった解決方法や、様々なデータの高度利用による付加価値の高い新たなソリューションの提供が求められている。このような状況下で当社グループの統一的なIoTシステムのアーキテクチャの考え方や開発効率化の仕組みなどを整備することが、ClariSenseの目的である。

2.3 “ClariSense”の特長

個別のIoTシステムの独立性を確保しつつ、システム間連携を容易にするアーキテクチャの考え方、データ連携・システム連携の考え方、効率的な開発を支援するソリューションライブラリを特長とする。

2.3.1 アーキテクチャ

各分野に最適なIoTシステムを提供するという観点から、全分野横断でのシステム実装の統一化を行うのではなく、設計思想としてのアーキテクチャを統一した。IIC(Industrial Internet Consortium)が定義しているIIRA(Industrial Internet Reference Architecture)に準拠する形で、例えば、機能視点では、機能ブロックを図1に示すように定義している。各機能ブロック内には基本になる様々な機能要素が定義されているが、実装で、各機能要素がクラウド/オンプレミスやエッジのどこに配置されるか

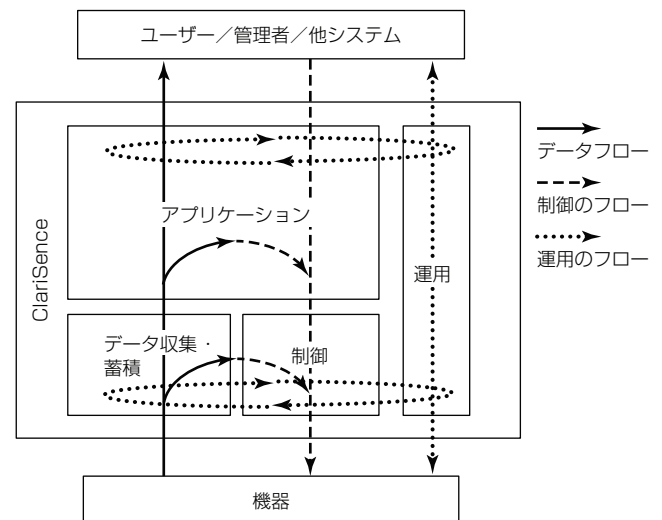


図1. ClariSenseのアーキテクチャ(機能視点)

は規定しておらず、各IoTシステムで最適に配置とするという考え方にしている。このアーキテクチャ定義は、当社で構築されるIoTシステムに関わるステークホルダーが共通の認識の基礎とするものと位置付けている。また、当社内のイントラネット上でこのアーキテクチャ定義に該当する過去のIoTシステム事例を含めて、当社内でのシステム事例の共有を併せて進めている。

アーキテクチャ定義と併せて、IoTシステムを設計する上での指針になるIoTシステム統一設計ガイドラインを次に示す各設計ガイドとして編纂(へんさん)している。

(1) データ管理設計ガイド

データの入れ物として主にクラウド上でどのサービスを選定するかを選択指針、その際に収集・蓄積するデータを格納する際の考え方、使い方を主にまとめている。

(2) データ連携設計ガイド及びAPI設計ガイド

社外公開する場合と社外公開しない場合でのクラウド上でのバッチ型連携やオンデマンド型連携の考え方、オンデマンド型の場合に利用するWebAPI(Web Application Programming Interface)の設計指針を主にまとめている。

(3) 性能・可用性設計ガイド

クラウドを利用する上でのIoTシステムの性能設計の考え方、可用性維持の考え方を主にまとめている。

(4) セキュリティ設計ガイド

IoTシステムを構築する上で機器、エッジ、クラウド／オンプレミスでのセキュリティ設計を統合的にまとめている。

(5) サービス運用設計ガイド

構築したIoTシステムの運用をどのように設計するかをまとめている。

2.3.2 データ連携・システム連携

システム連携では、図2に示すように、各システムが

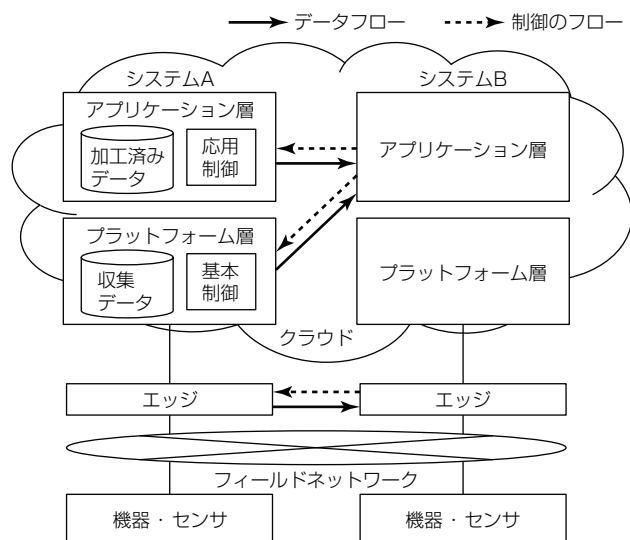


図2. データ連携・システム連携のスコープ

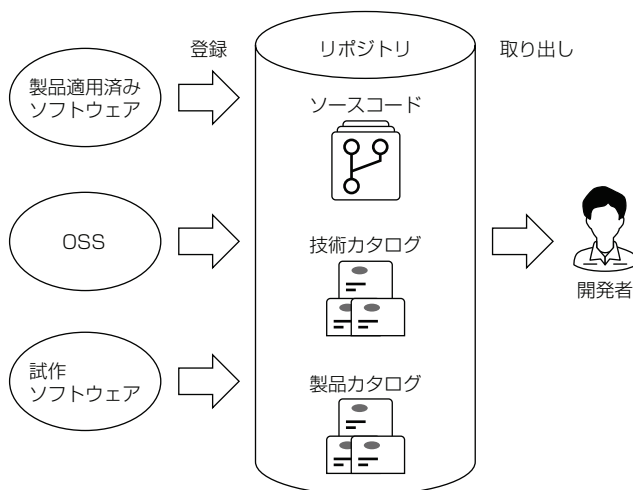


図3. ソリューションライブラリの構成

収集対象にする機器・センサから収集したデータや、分析・加工済みで保持しているデータを他システムで利用可能にするデータ連携、及び機器個体の制御や、システムの包括的な制御をエッジ層、プラットフォーム層、アプリケーション層で行う。エッジ層では、各分野の標準的なプロトコルに従う。プラットフォーム層、アプリケーション層では、WebAPIの設定を前提として、WebAPIとしては広く普及している規格であるOpenAPIを基本とするが、GraphQL等の新しい規格への対応も進める。

2.3.3 ソリューションライブラリ

ソリューションライブラリは、当社内での流通を前提としており、“当社が強みとする機器の知見を生かしたAI・セキュリティなどの技術資産のソフトウェア群、IoTの基盤になるOSS、及びその実行に必要な周辺ソフトウェアや開発環境”と定義している。ソリューションライブラリで扱う実装形態としては、クラウド上のソフトウェア及びサービス、オンプレミスサーバ上のソフトウェア、エッジ上のソフトウェア、これらソフトウェアを実行するための周辺ソフトウェア、これらソフトウェアを開発するための開発環境を含んでいる。具体的には、図3に示すように、技術資産としての製品・システムに適用済みのソフトウェア、ソリューション・システム構築や開発環境として利用するOSS、研究所等での試作ソフトウェアをソースコード、技術カタログ、製品カタログという形式でイントラネット上のリポジトリに格納し、社内の開発者が取り出せる仕組みを構築している。

3. 統合IoT“ClariSense”が目指す将来像

ClariSenseは、デジタル技術の進展に合わせて、次に述べるように今後も継続的に進化させていく。

3.1 コンテナ化・マイクロサービス化

現時点でのアーキテクチャ定義は、これまで当社で取り組んできたIoTシステムの基本形を示している。今後は、デジタル技術の進化に合わせて、IoTシステムの機能モジュールのコンテナ化やマイクロサービス化に向けた実装アーキテクチャの指針へと拡張していきたいと考えており、次の三つの方針を検討している。

(1) 機能モジュールのコンテナ化

IoTシステム構築で、クラウド上での機能モジュールのコンテナ化は既に一部で行っているが、FaaS(Function as a Service)に代表されるクラウド上のマネージドサービスを利用しない機能モジュールに関してはコンテナ化を前提としたシステム構築にシフトしていく。機能モジュールのコンテナ化には、従来のスタック型のモノリシックなシステム設計手法では、性能問題等が発生することが想定され、コンテナ形式に対応した設計手法の開発も併せて行う必要がある。なお、移行は一斉に行うのではなく、既存の機能モジュールも適材適所で残しながら順次進める想定である。

(2) マイクロサービス化とシステム連携の容易化

IoTシステムで提供するまとまった機能をサービスとして構築するマイクロサービス化を推進していく。コンテナ化された機能モジュールを利用することによって、機能の独立性と組合せの柔軟性を両立させるマイクロサービス構築を容易にしていく。また、マイクロサービス化することによって、他システムからの利用も容易になり、効率的なシステム連携が可能になる。

(3) シームレスな機能配置

分野ごとに最適なIoTシステム構築では、クラウド／オンプレミス、エッジのどこで処理を行うか、すなわち、どこに機能を配置するかは重要なポイントの一つである。従来は、システム設計時に固定的に機能配置を設計する必要があったが、静的・動的な制約条件に対応して、機能モジュールのコンテナをクラウド／オンプレミス、エッジでシームレスに配置することを可能にしていく。これによって最適なIoTシステムの構築が更に容易になる。

なお、コンテナ化・マイクロサービス化を進めるに当たっては、その開発プロセスもサービスの継続的改善を行うDevOps^(注3)の考え方を加速していく。

(注3) 開発担当者と運用担当者が密接に連携して協力しながら進める開発手法を指す造語。

3.2 様々なデータの活用 の容易化

各分野のIoTシステムで、機器やセンサ類から集められ

たデータを蓄積するデータレイクが整備されているが、スマートシティのような異分野データを連携させて新しい価値を生み出そうとする際のデータの管理方法に関してはまだ改良の余地がある。将来的には、複数分野のデータレイクを仮想的に一つのデータレイクと見なして、データ所在を気にせずにデータにアクセスできるような仕組みを構築し、データ活用の容易化を更に進める。そのためには、どこにどんなデータがあるかを検索・管理可能なデータカタログの整備や語彙の共通化を含めて対象物のデータをどのように管理するかを定義するデータモデルの整備を行政や業界の動きと連携しながら進めていく。

3.3 ソフトウェア部品流通の高度化

ソリューションライブラリで管理されるソフトウェア部品も3.1節で述べた実装アーキテクチャに合わせて、コンテナ化することを想定している。その場合、現時点では分野ごとに異なる環境(コンテナランタイムやオーケストレーションツールの違い等)も想定されるため、ターゲットとする環境に合わせてコンテナ化して運用可能とする仕組みも検討する。また、機能モジュールとしてのソフトウェア部品のコンテナ化だけではなく、ソフトウェア部品をカスタマイズする開発環境や試使用可能な環境、試験環境、コンパクトなAIを機器に組み込むFPGA(Field-Programmable Gate Array)の開発環境、AIの学習環境といった周辺ソフトウェアもコンテナの形式でパッケージングして開発者に配布することを想定している。

4. む す び

当社が強みとする様々な機器に対する知見や技術資産を、一元的に整備し、当社グループ内で共有することによって、各分野の既存IoTプラットフォームの強化や、新たなIoTシステムやシステム間連携による新たなソリューションの開発効率化を目指す統合IoT“ClariSense”の取組み内容と将来に向けた構想について述べた。今後も、最新のデジタル技術を駆使して、柔軟で拡張性の高いIoTソリューションを迅速に創出するための仕組み作りを継続していく。

参 考 文 献

- (1) 廣岡俊彦：社会・電力インフラIoTプラットフォーム“INFO-PRISM”，三菱電機技報，93，No.7，397～400（2019）
- (2) 水落隆司：FA-IT統合ソリューション“e-F@ctory”を支える最新のFA技術・システム，三菱電機技報，93，No.4，216～221（2019）
- (3) 石井周作：三菱電機のスマートビルソリューション，三菱電機技報，94，No.5，264～268（2020）
- (4) 櫻井翔一朗：“暮らし空間イノベーション”を実現するグローバルIoT家電サービス，三菱電機技報，94，No.10，566～569（2020）



家庭から宇宙まで。三菱電機の様々な技術をご紹介します

Follow ME!

三菱電機の経営戦略であるライフ、インフラ、インダストリー、モビリティの四つの領域で、暮らしの中に息づく様々な技術を紹介するサイト“Follow ME!”。

ツアーガイド“三菱学”と一緒に街を探検しながら、三菱電機の技術について楽しく知ることができます。

<https://www.mitsubishielectric.co.jp/me/technology/index.html>



コンテンツ



身近なところにも未来がたくさん。暮らしやビジネスをもっと快適なものにします。

紹介内容：青空照明／HMI(Human Machine Interface) 制御技術／ZEB(net Zero Energy Building) 運用のためのビル・シミュレーション技術／ハイブリッドナノコーティング



人々の生活基盤を整えて、豊かな社会作りに貢献します。

紹介内容：レーダーによる津波多波面検出技術



製造現場の生産性を高め、ものづくりの可能性を広げます。

紹介内容：産業用ロボット＜AI力覚制御＞



人と乗り物の調和を図る技術で、移動をよりやさしく円滑にします。

紹介内容：車載向けセンシング技術



▶詳しくはWEBサイトでご覧いただけます。

三菱電機 フォローミー

検索

