

# 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

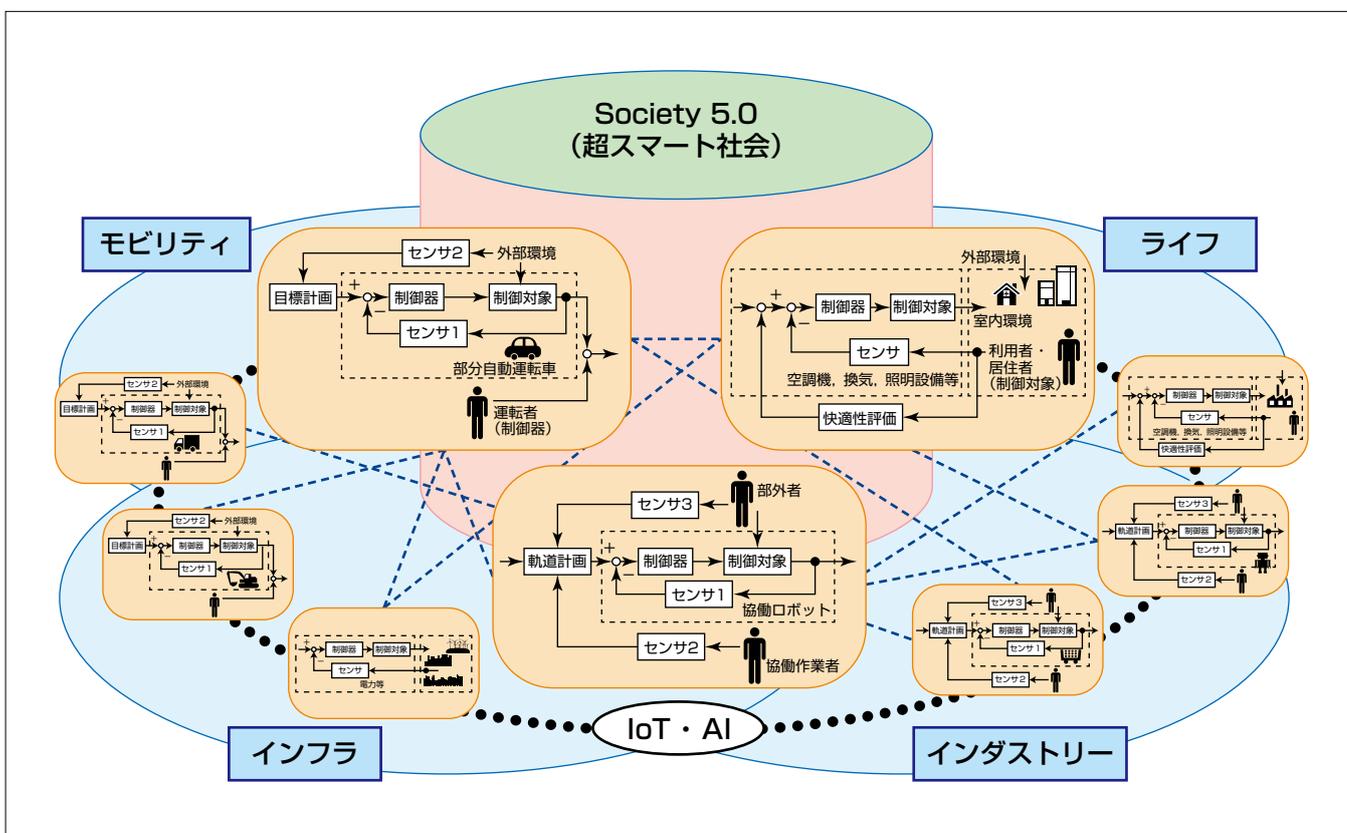
少子高齢化に伴う労働力不足に加えて、コロナ禍の影響で自動化・省人化の動きが加速している。自動化・省人化という、生産現場で使われる自動機やロボットなどが代表的なものであった。ところが近年、自動運転車から家電製品に至るまで、我々の普段の生活シーンの中で使われる機器でも、様々な形で機器の自動化が進み、より複雑なことが実行可能になってきた。

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、生き生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」<sup>(1)</sup>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”<sup>(2)</sup>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の場合に達成。
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<sup>(3)</sup>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

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

(機器)と人々が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

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”<sup>(2)</sup>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<sup>(4)</sup>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制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
	利便性	運動	・運動促進・支援機能 ・階段の位置・アクセス表示
		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
	安全性	情報通信	・高度情報通信インフラ
		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	
運用管理	セキュリティ	・セキュリティ設備	
	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	
プログラム	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	・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、今後も様々な形での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。

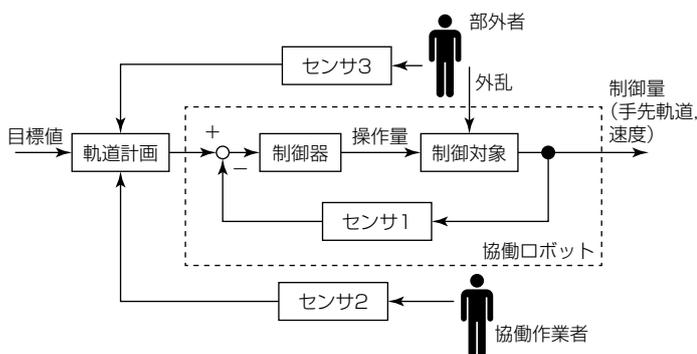


図1. 人と協働ロボットとの制御システム表現の一例

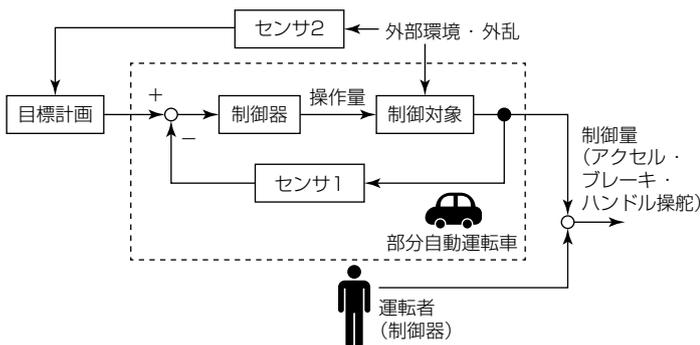


図2. 自動運転車での制御システム表現の一例

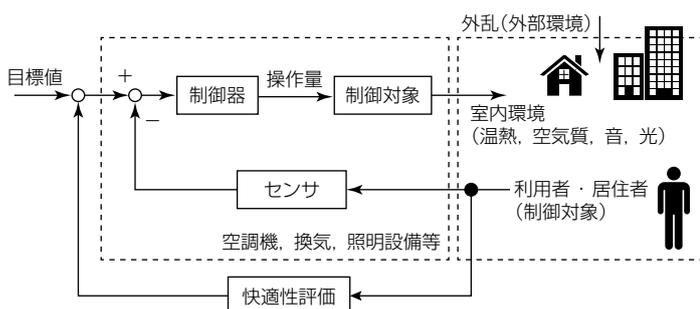


図3. 利用者を含む建物設備の制御システム表現の一例

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・判断を模擬し、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、より強靱で持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](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>