解 説

ものを食べて動くロボット

Eating Robot

土 居 隆 宏* *金沢工業大学

Takahiro Doi* *Kanazawa Institute of Technology

1. は じ め に

生物は精巧な機械であるといわれるが、ロボットに代表される高度化した機械もまた生物に近づいてきており、生物の形や機能の実現 [1]~[4] だけでなく、心の問題 [5]、自己増殖能力 [6]~[8] などにもついても研究が進められている。しかしながら、機械自らが、生物のように「ものを食べる」ことによって、代謝、エネルギーの自給を実現する例はあまり目にする事がなく、現状では、ほとんどの機械は、動くために、人間が与える電気や石油などのエネルギー源を必要とする。

食えることによるエネルギーの自給は動物にとっては基本的な能力であり、バクテリアのような単純な生物でさえ実現している。そこには工学的にも実現できそうな余地がありそうに思われる。化学エネルギーから電力を取り出すエネルギー変換の問題は、半導体等の新素材の寄与するところが大きく、ロボット技術とは関係がないと思われがちかもしれない。しかしながら、「食えること」はエネルギー変換のデバイスだけでなく、餌を探し、取り込むための機構、センシングや行動戦略とも深く関連しており、ロボット技術も大いに貢献できる分野であると考えられる。

2. 持続可能な機械における「食える」能力の必要性

本章では、ロボットに代表される機械において、持続可能な運用のためには再生可能エネルギーの導入が必要であること、そのために構造的に分散型のシステムが適しており、そこでロボットによる「食える」機能の必要性が生まれることを述べる。

2.1 再生可能エネルギーの導入

近年、環境問題に配慮し、石油に代表される地下資源によるエネルギーから、それに代わるクリーンなエネルギーとして再生可能エネルギーの導入、普及の促進が進められている [9]。

石油、石炭は、そのエネルギー密度の高さと便利さ、経済性から、従来広く使われ、これにより人類の技術的發展が早まったという説もある [10]。しかしながら、そこには持続可能性について問題も存在する。まず、これらの地下資源は、自然界では分解されにくい物質を生み出し、環境に必要な以上のダメージを与え、持続可能な活動ができなくなる可能性がある。また、地下資源には枯渇の問題があり [11] [12]、枯渇を防ぐために効率が向上するよう技術開発をすると市場価格が下がり、さらに消費が拡大するというパラドックスが知られている [13]。さらに、地下資源が持つ別の特徴として、存在する地域が偏っており、日本国内ではほとんど産出されないため、海外からの輸入が必要である点が挙げられる。これに伴い、輸送時の安全保障、災害等で輸送経路が断たれた場合の国内自給の問題がある。

一方再生可能エネルギーには、バイオマスをはじめ、太陽光、風力、地熱、潮汐等、身近な自然の力を利用するもので、上記の汚染、枯渇、資源の偏在という問題がなく、現状では地下資源と比較して高価であるが、持続可能であると言われている。新興国の経済発展などを背景として、世界的なエネルギーの需要の増大、市場の不安定化、温室効果ガスの削減の要求に伴い、今後の導入が期待されている [9]。特に我が国の豊富な森林資源や火山、海洋のエネルギーは有効に活用できるはずであると考えられる。

機械のエネルギー源を、直ちに再生可能エネルギーへ全面的に切り替えることは難しいかもしれないが、地下資源に頼りすぎることなく、多様なエネルギーの技術開発を進めておき、必要なときに選択肢として選べるようにしておくことが重要であろう。

2.2 集中型インフラストラクチャー

現在、多くのロボットや機械は、エネルギー源として、人類が構築したエネルギーのインフラストラクチャーに依存している。この特徴として、地下の資源を地上に取り出し、集中・精製・加工したうえで利用する、ある種の「集中型」の構造を持っている。石油、石炭、原子力による発電、送電網はその典型的な例である。また、再生可能エネルギーでは、例えばバイオマスにおいて、薄く広く広がるバイオマスを回収、運搬して工場などに集中させて処理し、エネ

原稿受付 2017 年 10 月 3 日

キーワード: Energy Sustainable Robot, Energy Harvesting

〒 921-8501 野々市市属が丘 7-1

*Nonoichi-shi, Ishikawa

ギーを取り出したり、太陽光発電においても、発電パネルを特定の地域に集中させて発電を行ったりすることが多い。

歴史的には、人類のエネルギー源としては生活環境の付近で入手しやすいバイオマス（薪、枯れ枝、枯れ葉など）が使われていて、これは、生活環境付近で分散しているものを地産地消の形で使うものであり、ある種の「分散型」の構造であると言える。これは物流や国際的な経済活動が未発達な時代には有効なものであった。例えば伝統的な焼き畑農業は、数千年にわたって持続可能であったと言われている[11]。

2.3 集中型インフラストラクチャーの問題点

集中型のシステムには、上流と下流があり、流れは一方向である。また、流れを集中させる「ハブ」が存在することがあり、この構造がロジスティクスの非効率化を招くことが考えられる。例えば木材バイオマスの焼却施設などでは、出力数千kW以下では発電効率が著しく低下するため、大規模である必要がある。しかしながら、バイオマス等多くの自然のエネルギー源は、地域ごとに薄く広く広がっており、エネルギーを使用する場所も分散している。そのため、分散したエネルギー源をいったんハブとなる施設に集中させて処理し、再び各使用場所まで分配するという手順をとって使っている。これは輸送コストやバイオマス確保の点から現在問題になっており、小型化、分散化への動きがみられる[16]。

集中型のシステムにおいて、上流から流れてきたものは様々な加工され、下流の最後には廃棄物となる。エネルギーに関しては変換効率の限界があり、入力したエネルギーを100%力学的な仕事に使うことはできず、必ず排熱が発生する。この排熱は使うエネルギーが多くなるほど大きくなる。集中型のシステムでは外部から多くの資源を輸送して取り入れ、外部から取り入れたものは、最終的には外部に出す必要があるため、輸送や廃棄物処理の問題が発生する。

集中型のシステムは、集中型の潤沢なエネルギーを前提とした、大量生産・大量消費の社会構造に適したものであり、持続可能性を考慮した場合には、うまく機能しない部分もあるように思われる。持続可能な社会の実現には、外部から必要以上に資源を入れず、ロジスティクスを効率化して地域のエネルギー源を有効に使い、廃棄物を環境に戻して循環させる仕組みが必要であると考えられる。

2.4 植物型機械と動物型機械

現時点で持続可能だと考えられる太陽エネルギーを利用する機械としては、光や熱をそのまま利用するもの（太陽電池など）、太陽エネルギーで作られたものを二次的に利用するもの（風力、潮力、水力、バイオマス）が考えられる。このような機械は、従来据え置き型で、動かないものが多かった。移動能力を持たない機械は、生態系との対比でとらえると、植物のようなものと見なすことができる。植物

は進化の過程で移動能力を持たなかったが、葉緑体を使って太陽の光で光合成を行い、空気中の二酸化炭素を炭水化物の形で固定してエネルギー源として蓄積することができる。自然界では、動かない植物だけでは生態系を構成することができず、動く動物の存在が不可欠である。なぜなら、動物は移動能力と、環境に対して働きかける能力を持っており、動物は植物の間を動き回り、バイオマスを攪拌したり、受粉等の活動の補助をしたり、その死骸を植物に提供することで成長を促すからである[14]。

このように、「植物」と「動物」は、相補的に生態系を構成しており、お互いになくってはならない存在となっている。本稿では、前述の動かない機械のことを「植物型」、後者の移動能力を持つ機械のことを「動物型」とよぶこととする。

2.5 動物型機械による分散システム

「植物型」機械は、移動能力を持たないため、外部から大量のリソースを集めて処理する「集中型」になりがちである。しかしながら集中型システムには、バイオマス等の薄く広く広がる資源を扱う際に、上記のロジスティクスの問題、廃棄物の問題があり、適さないことがある。

エネルギー源が分散している場合、輸送コストを最小化するためには、エネルギー源はやみくもに集中させるのではなく、できるだけ輸送せずにその場で処理しエネルギー化し、可能であればその場で使ってしまうことが効率的であり、障害に対しても頑健であると予想できる。

エネルギー源を分散させたまま利用するためには、エネルギーを取り出す装置をできるだけ小型化し、「動物型」ロボットに搭載し、それを数多く分散させればよい。従来の機械は、燃料を別の人や機械が集めてきて、運搬し、集中させる作業が必要であったが、それをロボットに代替させ、自動で行わせることができる。エネルギーに変換してしまえば輸送も容易であるし、そのまま使うこともできる。

2.6 動物型機械による「食べる」機能の実現

前述の動物型機械を利用して、分散システムを実現するためには、機械が自らエネルギー源を探し、回収する能力、すなわち「食べる」機能が必要になる。

この「食べる」機能は、動物が普通に持っている機能であり、センサと脳の処理により賢く実現しているものである。「食べる」機能の実現のために必要な能力は、移動能力、センシング能力、エネルギー変換能力である。機械がこれらの能力を持つことで、「植物型」ではなく自ら動き回って餌を探す「動物型」機械となり、分散型の運用を成立させ、時には食べることで自身が役に立つものとなりうる。従来使われてきた機械で、自らの能力を活用してものを「食べる」ことで動き続ける機械というのは筆者が知る限りなく、従来の経済原理に適合しないため、顧みられなかったものと考えられる。このような「食べる」機能はバイオマスに限らず、人類の構築した集中型エネルギー源から離れて

活動するロボットが、環境中に散在しているエネルギー源を探して集める作業には必要不可欠なものとする。

3. 生態学からヒントを得た持続可能なロボットシステム

3.1 生物とエネルギー、持続可能性

ここで視点を転ずると、生物はすでに地球上の有限の資源を有効に持続可能な形で活用する仕組みを持っている。地球上では熱帯雨林やサバンナ、サンゴ礁といった生物多様性の豊かな、生産力の大きい環境が存在し、多くの生物が生息している。このような生態系の中の生物には、植物のように太陽から光合成によってエネルギーを受けて有機物をつくり出す生産者、その生産者を食べて生活する消費者がいる。さらにこれらの死骸を土の中で分解して再び植物に吸収できるようにする分解者がいる[14]。生物資源は、生物の体内で作られ、一切特殊な装置も、特別な物質も必要とせず、ありふれた材料だけを使って、生体内で常温常圧で、必要なときに必要なだけ生産することができる。また、そうして作られた物質は不要になれば自然界で分解され、ほかの生物の資源となる。例えば、アリは世界に1京匹おり、その体重の総量は全人類の体重とほぼ同じと言われているが、廃棄物の問題を引き起こすことはない。なぜならアリが生み出すゴミは容易に分解されたり、ほかの生物の資源となったりするからである[11]。

すなわち、自然界の持続可能性を成り立たせる原理は、まず、太陽エネルギーの利用と、それに基づく植物と動物による捕食関係からなる、無駄のない資源とエネルギーの循環、さらに生物多様性による柔軟で外乱に強い頑健なシステムである。これらはローカルなリソースだけを活用しており、分散型のエネルギーシステムであるといえる。

筆者の考えは、人間が作った機械をその資源循環のサイクルの中に組み込み、家畜のように自然からエネルギーを得て動くものにすること、さらに、人間が作った機械により、生物多様性をさらに豊かにすることに寄与できないか、ということである。

3.2 エネルギーと速さ

生物の世界では、エネルギーをつぎ込むことは、時間を早め、速度を増すことである。逆に言えば、速さを必要としないことが、エネルギーの節約につながる。例えば、恒温動物は、エネルギーを使って体温を高めることで、化学反応の速度を速め、筋収縮や情報処理の速度を高めている。現代人はエアコンなどを使って常に一定の温度を保ち、高速に物事を処理するために大量のエネルギーを使っており、縄文時代と比べて現代人のエネルギー消費は40倍にも達するとの試算がある。また、変温動物であるナマコのエネルギー消費は体重あたりにして、恒温動物である人間の1/50と言われており、動きを遅くすることで、省エネルギーに

なる設計原理があるのかもしれない[15]。

機械の世界でも、要求されるタスクによっては、速度はそれほど必要ないものも考えられる。例えば人が少ない環境での、植物を相手にするような作業では、急激な動きはあまり必要ない。エネルギー効率が高く、持続可能な機械を作るためには、従来の経済性に縛られた機械の行動原理から離れ、必要以上に速く動かないことが重要であろう。このために、必要以上に速い動作が要求されないようなスケジューリングとタスク設定が必要となる。

3.3 「食べる」ことの役割

動物は「食べる」ことのために、進化の過程で形態、生態、行動、生理を変化させ、かなりのリソースを費やしている[17]。例えば牛は食事のために3~9時間を費やし、反芻のためさらに8~9時間を要するという[18]。これは、草の中に含まれるセルロース等を分解するため、微生物の力を借りて分解するためである[19]。生き物がものを食べることは、活動のエネルギーを得ることと、体をつくることである。恒温動物では、食べ物から摂取したエネルギーの97.5%を自らの活動のために消費し、残りを体の成長や子孫の形で肉に変えている[15]といわれ、活動のエネルギーに使われる割合が非常に高い。

現在の多くの機械は、動物が費やしている「食べること」に対する膨大なリソースについては、人間や、エネルギーを精製するためのインフラストラクチャに依存している。この意味では現在の機械は、「自分の力で食っていく」ことができない乳児や植物のような存在なのかもしれない。ロボットにおける「食べる」能力の獲得は、ロボットの活用範囲を広げる可能性を秘めている。

3.4 「食べる」機械の行動原理

エネルギーの節約、効率的な使用は、経済的な最適化を考えた場合にも重要なファクタである。同じ仕事をするならできるだけエネルギーを節約して費用を下げたほうが経済的には得である。従来の機械にとって、最適な動作とは、短い時間で大きな成果を出すことであり、休まず高速で動き続ける機械が理想的な動作となる。一方で「食べる」機械は、休まず動き続けることはできず、「食べる」ことによってエネルギーを自ら獲得する必要がある。従来の機械とは違う行動原理が必要になってくる。すなわち、一定時間の生産量最大という最適化ではなく、持続可能性を考慮した稼働時間・稼働量の最大化、長寿命化を目指した行動パターンの最適化が必要になる。

3.5 「食べる」行動と選択能力

多くの動物はみずから餌を探し、消化吸収する段階で「選択」を行っている。動物がものを「食べる」とときには、周囲の物体をなんでも口に入れているわけではない。周囲の環境のなかから、目や鼻や触覚を使って、おいしそうなもの、すなわち得られるエネルギーや栄養素が豊富で、腐敗など

による毒が少ないものを「選択」し、石などの異物は口に入れない。さらに果物の種、肉の骨など、咀嚼や消化が困難な部位は選択して吐き出したり、内臓で異物を検出して消化途中で吐き出すこともある。すなわち、「食べる」とときには通常何らかの「選択」が伴っている。「選択」は、消化吸収の効率の向上や、異物による内臓の損傷を防ぎ、寿命を長くすることにつながる。「選択」にはセンサ情報処理と大局的な戦略が伴い、うまくしないとエネルギー変換のコストが増大したり、効率の低下を伴うことがある。また、バイオマスの乱獲など、環境を復元不可能なほど破壊してしまい、持続可能性を満たさなくなることも考えられる。

人間がエネルギーを得る過程でも、このような「選択」は伴っている。例えば石油の精製過程や、バイオマスの可燃部位の選択もこれに似ている。機械による「選択」はセンサ情報に基づく知的な能力であり、持続可能性の実現において重要である。

4. エネルギー自給型ロボット (Energy Sustainable Robot) の提案

4.1 コンセプト

筆者らは、移動能力を持つ「動物型」のロボットで、「食べる」能力を活用することで周囲環境と協調しながら継続的に作業を進めるロボットを「エネルギー自給型ロボット」としてこれまで提案してきた[20]~[22]。エネルギー自給型ロボットのコンセプトを図1に示す。これは、移動機構、エネルギー源を探し、自らを制御するためのセンサ、エネルギー回収機構、エネルギー変換機構、エネルギー蓄積要素、これらを制御する計算機からなる。

これは、周囲環境からエネルギーを集める装置であり、バイオマス等の薄く広く広がる資源に適した、分散型のシステムとなっている。また、動物型ロボットで、食べる対象を「選択」できるため、バイオマスを根こそぎ取り尽くして環境を破壊したりすることがなく、持続可能かつ効率よく食べる対象を集めることができる。エネルギー自給型ロボットは、動物型ロボットの持つ「センシング」と「環境に実際に働きかけることができる能力」を利用しており、人間のエネルギーのインフラストラクチャから隔絶された環

図1 エネルギー自給型ロボットのコンセプト

境での持続動作も期待できる。バイオマスや廃棄物処理等では、エネルギー源が分散しており、エネルギーを取り出す前の処理が多い。このような作業は、提案するロボットを使うことで自動化、効率化できると考えられる。

4.2 エネルギー収支

提案するエネルギー自給型ロボットの行動パターンは、図2に示すように、エネルギー源の探索、エネルギー源の回収、エネルギー変換、の三つのフェーズが循環することからなる[21]。ロボットの活動のためのエネルギーは、エネルギー変換時に得るが、動作が途切れることなく継続できるよう、エネルギー蓄積のための要素も必要である。これは、動物における脂肪に相当し、短期的なエネルギー収支の赤字を補うものとなる。

4.3 アプリケーション

エネルギー自給型ロボットは、現在以下のクラス別のアプリケーションを想定している。

- 大型：象や牛、馬などの大型草食動物を想定。人間にはできないような大きな力、作業を担う。林業や建設業など。
- 中型：犬、猫程度の動物を想定。人間と同じか小さい出力。農業の収穫、不整地移動など。
- 小型：昆虫、ネズミ等の小型生物を想定。「食べること」によるエネルギー回収で、ぎりぎり動ける程度の出力。主な仕事はモニタリング等の情報を扱うもの。

これらのロボットは、地域の中であまり長距離を移動しないように、移動によるエネルギーロスが少なくなるように運用しておく。また、複数台で、獲得したエネルギーを共有できるようにすれば、必要に応じて大きなエネルギーを得ることもできる。

5. 枯れ葉回収ロボット

5.1 枯れ葉回収ロボットのコンセプト

提案するエネルギー自給型ロボットを現状の技術で簡単に実現するものとして、「枯れ葉回収ロボット」を提案している[20]~[22]。これは、山林や里山集落などで、樹木から落ちた枯れ葉を回収し、それを燃焼させることで燃焼熱を得て、そのエネルギーで発電し、継続的に動き続けるもの

図2 エネルギー自給型ロボットの行動パターン

表 1 エネルギーを自給する移動ロボット

	名称等	概要	必要なもの
(1)	惑星探査ロボット [23] 等	太陽電池で発電し動くロボット.	太陽光
(2)	Roomba [24] 等	コンセントで充電するロボット.	電力線, 家庭用コンセント
(3)	Ecoot II [25]	ナメクジ, ハエ, 果物等を食べ, エネルギーに変換する. エネルギー変換は微生物燃料電池 (MFC).	バイオマス, 採食時の人間の補助
(4)	Chew-Chew [26]	角砂糖を食べ, エネルギーに変換する. エネルギー変換は MFC.	角砂糖, 採食時の人間の補助
(5)	EATR [27]	軍用の物資搬送用途. 外燃機関と発電を利用. 詳細不明.	バイオマス
(6)	枯れ葉回収ロボット [20]~[22]	枯れ葉を回収し, エネルギー変換には直接燃焼と熱電発電を利用. ハンド機構で枯れ葉の回収も行う.	植物バイオマス

である. これは樹木と共存する形で, 枯れ葉というバイオマスを活用して, 持続可能なシステムを構成することができる. 枯れ葉は地表面の植物から生まれたものなので, 燃えても地上の炭素量が増えることはなく, カーボンニュートラル [11] となる.

5.2 従来のエネルギー自給ロボットの例

エネルギーを自ら獲得し, 継続的に動き続けるロボットとして, これまでに, 表 1 に示すものが開発されている. まず, (1) に示す太陽電池で動くロボットとしては, 惑星ローバー等多くのものがあ. しかしながら得られるエネルギーが太陽電池に限定されていることから, 地球上であれば植物やバイオマスと連携したほうが, より広範囲のエネルギー源を利用できる可能性がある. (2) のコンセントなどからエネルギーを得て動き続けるロボットは, 近年掃除ロボットでみられるようになったが, 人工の電力のインフラストラクチャーを必要としている. また, (3), (4) に示したロボットは, 微生物燃料電池 (MFC) によるエネルギー変換とロボットへの移動機能への応用の研究例であるが, エネルギー獲得のための機構と動作については明らかになっていない. (5) に示したものは, 大型で, 木質バイオマスをのこぎりで切断して活用するような大掛かりなものであるが, 提案レベルであると思われ, 実験についてはまだ発表はなく, 詳細は不明である. 本研究で扱う, 枯れ葉回収ロボットは, 自らのセンサと機構を利用して, 移動しながら燃料となる枯れ葉を自らのセンシング機能で探し出して回収し, 継続的に動き続けるもので, 過去に例を見ないものである.

5.3 枯れ葉回収ロボットの開発

本研究は 2008 年にスタートし, できるだけ簡単な構造で

図 3 枯れ葉回収ロボットの機構部

エネルギー自給を目指すということで, 当初は設計仕様を決めるため, 焼却炉のサイズを 100 [mm] 角の立方体と設定し, これで動き続けるロボットを考えた. また, 機構としては試作のため, 模型用の安価に入手できるモータとギアボックスを使用し, 必要に応じて効率の良いものに取り換えていくこととした. 発電については, 可動部分が少なく, 素子が手に入りやすい熱電発電方式を採用した. 微生物燃料電池については将来有望であると考えられたが, 当時入手困難であったため断念し, それよりもロボットシステムとして, エネルギー源を回収する機構, ソフトウェアの開発, エネルギーの評価実験によるエネルギー自給の実現可能性の検証を優先することとした.

機構は, 文献 [20] に示すものやほかの機構案を検討したのち, 最終的に文献 [21] に示す機構を採用した. これはモータ 2 個からなる移動機構とモータ 2 個からなる 2 自由度のハンドアームからなり, ハンドで 2 方向から枯れ葉をつかんで選択的に回収することができる. 機構部を図 3 に示す.

制御装置は, ノート PC と USB カメラ, マイコンからなる. このロボットの動作シーケンスは以下のとおりである.

- (1) カメラの画像処理で枯れ葉を発見し, 回収する
- (2) 焼却炉で点火, 燃焼させる
- (3) 熱電モジュールで発電し, コンデンサに蓄える

製作した機体を用いて, 燃焼および発電の実験を行い, 焼却炉の温度変化, 発電量の計測を行った. その結果, 10 [g] のコピー用紙を燃焼させたところ, 熱電モジュール 1 個あたり 15.8 [J] のエネルギーの収入があり, 製作した機構における消費エネルギーはアスファルト上で 1 [m] 移動するのに 0.66 [J] 必要であることが分かった [21]. また, 発電した電力をコンデンサに貯め, モータが駆動できることが確認できた. 今後は, 発電したエネルギーを効率よく活用できるような作業計画と, 屋外環境でのトータルのサイクルの確認, 林業, 農業をはじめ, 応用可能な分野への実装と検証を行っていく.

6. ま と め

持続可能な機械システムとしての、ものを食べて動くロボットについて述べた。生態学とのアナロジーから、動物型の「食べる」ロボットによる分散型のシステムを提案し、その例の一つとして、現在開発中の枯れ葉回収ロボットを紹介した。

以前から持続可能性について興味があり、再生可能エネルギー、エネルギーハーベスティングにロボット技術が使えないかと考えてきた。ロボットとのかかわり合いを考えたとき、単純にエネルギー源を再生可能なものに変えるだけでなく、例えばバイオマスであれば、ロボット技術を生かせるのは、環境に直接アクセスするバイオマスの前処理のところではないかと常々思っていた。また、それを機能させるには、ローカルに動く分散型のシステムが適していると思い、微力ながらいろいろと模索を行っているところである。まだまだ未完成な技術的チャレンジの段階であり、機構・デバイス・回路・制御・ソフトウェア・行動原理など、考えるべき問題はたくさんあると感じている。ご意見、ご感想などぜひいただければ幸いである。

参 考 文 献

- [1] 金子, 金広, 森澤, 三浦, 中岡, 原田, 梶田: “サイバネティックヒューマン HRP-4C の開発 — プロジェクト概要からシステム設計まで —”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.7, pp.853–864, 2010.
- [2] 西尾, アリマルダニ, 石黒: “遠隔操作アンドロイドへの身体感覚転移—遠隔操作アンドロイドのエージェンシー—”, 日本ロボット学会誌, vol.31 no.9, pp.854–857, 2013.
- [3] 広瀬: “ヘビ型ロボットの移動機構”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.2, pp.151–155, 2010.
- [4] 三浦: “昆虫規範型マイクロロボット”, 日本ロボット学会誌, vol.21, no.3, pp.236–238, 2003.
- [5] 前野: “ロボットの心の作り方—受動意識仮説に基づく基本概念の提案—”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.1, pp.51–62, 2005.
- [6] J. フォンノイマン: 自己増殖オートマトンの理論. 岩波書店, 2003.
- [7] 黒河, 吉田, 神村, 富田, 村田, 小鍛冶: “変形し移動する自立モジュール型ロボット (M-TRAN)”, 日本ロボット学会誌, vol. 21, no. 8, pp.855–859, 2003.
- [8] V. Zykov, E. Mytilinaios, M. Desnoyer and H. Lipson: “Evolved and Designed Self-Reproducing Modular Robotics,” IEEE

- Transactions on Robotics, vol.23, issue 2, pp.308–319, 2007.
- [9] 資源エネルギー庁: 再生可能エネルギー HP, http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saie/renewable/outline/index.html
- [10] デイビッド・ウィルキンソン: 生物多様な星の作り方. 東海大学出版会, 2009.
- [11] 足立直樹: 生物多様性経営. 日本経済新聞出版社, 2010.
- [12] デイヴィッド・オレル: なぜ経済予測は間違えるのか?. 河出書房新社, 2011.
- [13] 上宮: “W. S. ジェヴォンズ『石炭問題』における経済理論”, 関西学院経済学研究 32, pp.189–209, 2001.
- [14] 生態学辞典. 共立出版, 2003.
- [15] 本川達雄: 生物学的文明論. 新潮社, 2011.
- [16] 八木, 中田: “資源分布と技術特性を考慮した森林バイオマス小規模ガス化システムの経済性評価”, 日本エネルギー学会誌, vol.86, no.2, pp.109–118, 2007.
- [17] 樋口: “生物の多様性 — その意味・仕組み・進化・保護 —”, A Journal of Field Ornithology Strix, vol.13, pp.1–30, 1994.
- [18] 酪農と歴史のお話し, <http://farmhist.com/category1/entry64.html>
- [19] 畜産技術情報, <http://livestock.snowseed.co.jp/public/4e73725b/6804990a/30eb30fc30e130f3306b306430443066>
- [20] 内山, 土居: “捕食ロボットの研究”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'10 予稿集, 1P1-B29, 2010.
- [21] 井上, 生藤, 土居: “エネルギー自給型機械システムのためのエネルギー変換機構”, SI2016 予稿集, 1G1-2, 2016.
- [22] 井上, 土居: “エネルギー自給型機械システムのためのエネルギー効率を考慮した駆動輪制御”, SI2016 予稿集, 1G1-1, 2016.
- [23] 久保田: “月・惑星環境における探査ロボットの設計”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.5, pp.609–614, 1999.
- [24] iRobot, <http://www.irobot.com/For-the-Home/Vacuuming/Roomba.aspx>
- [25] Bristol Robotics Laboratory, Ecobot II, <http://www.brl.ac.uk/brlresearchprojects/microbialfuelcells/ecobotii.aspx>
- [26] Gastrobotics, <http://www.eng.usf.edu/~wilkinso/gastrobotics/>
- [27] Robotic Technology Inc., <https://roboticstechnologyinc.com/index.php/EATR>

土居隆宏 (Takahiro Doi)

2003 年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻博士後期課程修了, 博士 (工学). 理工学振興会 (東工大 TLO) プロジェクト研究員, 中京大学 助手, 金沢工業大学講師を経て, 2013 年准教授, 現在に至る. 脚型ロボット, エネルギー自給型ロボット等の研究に従事. IEEE, 日本機械学会などの会員.

(日本ロボット学会正会員)