

自然と共生する知能情報機械系に関する基盤研究

研究代表者 橋本 周司
(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

地球環境の未来を考えると自然を大きく捉えて理解することが必要である。そのためには未踏地域用のロボットと情報ネットワークの活用が不可欠であり、人間共存ロボットとは異なる視点からの研究が必要であるということが本研究の基本的な立場であり特徴である。本研究は、情報機械系と自然との共生を目指し、最終的に機械を介在した人間と自然の共生を実現するための研究開発であり、情報工学、ロボット工学の新しい適用分野を開拓し新しい社会基盤をつくることを目指すものである。そこで、人体を含む自然を対象とした知能情報機械系の基盤技術の確立を目的として、対象の変化に適応して働くセンサ・アクチュエータ系の理論的および実験的研究を行なう。また、既存の研究課題の深化に加えて、ロボット製作の新しい方法、より柔軟なモビリティの探求、自然の中で働くロボットのための多自由度ヒューマンインタフェースなど新しい研究分野にも挑戦する。

2. 主な研究成果

本プロジェクトは多くの研究者が参加していることから、多種多様な研究成果が生れている。プロジェクトの最終年度にあたって、当初の研究目的に沿ってプロジェクトを振り返れば、能動的なセンサ・アクチュエータネットワークおよび自然環境ロボットについては、災害対応ロボット「OCTOPUS」、環境および野生動物のモニタリングを行うロボット「WAMOT」および「WABEC」の開発とネットワーク運用において研究が進展した。また、エネルギー管理を含めた自律ロボットの群制御に関しては、多腕ロボットを制御するためのインタフェース、水中ロボットのエネルギー循環制御、モニタリングロボットのための充電ステーションの開発などを行った。これらはいずれもネットワークで接続された屋外全天候型の知能ロボットにかかわるものである。

以下では本年度の新しい研究成果を紹介する。その他の主な成果については、研究業績を参照されたい。

2.1 複合エアチェンバー型ソフトロボット

通常のロボットは構成するパーツの多くが硬く、変形性の乏しいものであるため、外部環境に関係なく一定の形を有するものが多い。一方、ソフトロボットは柔らかい素材で構成されているため、自然環境にも相性が良いとされている。このタイプのロボットは生物の機能を参考にしたものが多く、魚から毛虫に至るまで様々な動物を模倣したソフトロボットの開発が進んでいる。本研究では、空気の注入と排出により変形し移動するソフトロボットの製作を試みた。ロボットの体はシリコン製なので、軟らかい体で内部の機器を衝撃から守ることができる。

作製したロボットを図1上に示す。ボディはシリコンのエアチェンバーで構成されており、ロボット内部の空気量をミニエアポンプとミニバルブによって制御することで駆動する。コントロール

システムはロボット内部に取り付けた。これにより、制御に用いる電子部品は外部環境に晒されず、耐久性が高まる。駆動には、ロボット上部のエアタンク内の空気のみを使用しているため、外部環境の空気に依存せず、塵埃環境でも駆動可能である。ロボット下部は、ロボットの移動を実現する箇所であり、六つのエアチェンバーと四つのブレーキ（下向のストッパ）で構成されている。

本ロボットは、各チェンバーの空気を調節することで移動する。移動効率を高めるために、ブレーキで摩擦をコントロールして、前進や後退、または旋回を達成する。ブレーキ部分の詳細画像を図1下に示す。この部分はロボット前後に四つあり、シリコンで構成されている。ブレーキが作動していない時には、地面から約 10mm 離れており、作動すると地面と接触する構造になっている。ブレーキには鉾が付いており、作動すると地面に刺さることでロボットを動きを止めるアンカーの役割をする。

ロボットが前進する際のロボット下部及びブレーキ部分の制御の様子を図2の左に示す。まず最上部の図のようにロボット後部のブレーキをかけ、後部を固定する。次に前のエアチェンバーから順番にポンプと電磁弁で空気を入れる。その後、前のブレーキをかけ、後ろのブレーキを外す。こうすることで、ロボットの前の部分が固定される。最後に、後ろからエアチェンバーで順に空気を排出することで前進する。前進の手順を逆にすると、ロボットは後退する。

また、左に旋回する際の制御の様子を図2の右図に示す。左旋回には、右側のエアチェンバーとブレーキを使用する。制御の手順は、通常の前進や後退のアルゴリズムと同様のものである。また、同様に右旋回は左のエアチェンバーとブレーキを制御することで実現可能である。

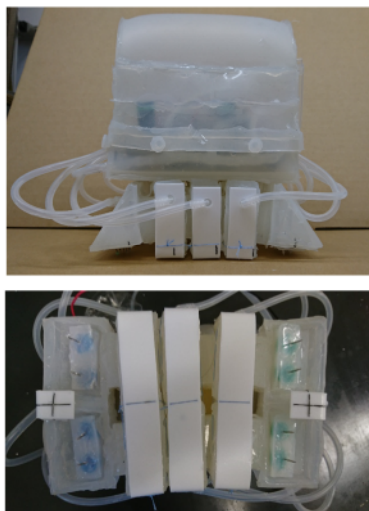


図 2.1 ソフトロボットの外観
上) 側面、下) 底面

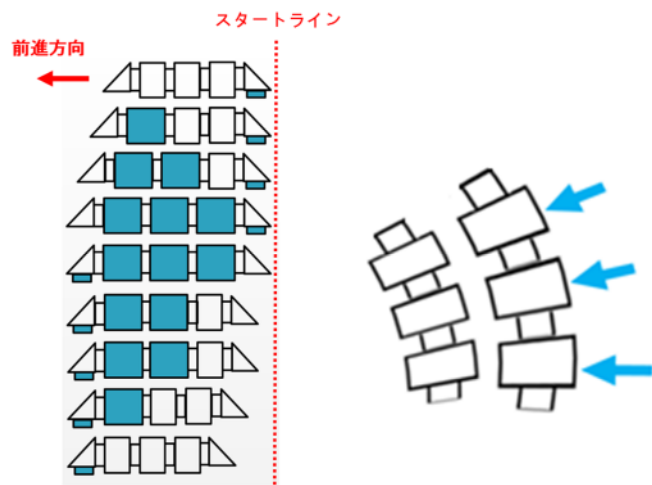


図 2.2 エアチェンバーによる移動制御
左) 直進 右) 旋回

開発したソフトロボットの移動を検証するため動作実験を行った。用意した実験フィールドはビーズを散布して滑りやすくした粘土面である。バラツキはあるもののエアチェンバーの制御を系統的行うことによって、身体が伸縮して移動できることが判る。また、移動実験を他の地面環境でも行った。用意した環境は木材、コンクリートおよび土のフィールドである。これらの環境ではアンカーの鉾が効かず移動が逆方向になることもあり、環境に応じた制御が必要であることが判った。

今回は複合エアチェンバーによる移動を試みたが、同じ道具立てでロボットの形状の制御も可能であり、起伏のある壁面などに密着するような形状制御も検討している。

表 2.1 実験結果

	一回目	二回目	三回目	四回目	五回目	平均値
前進距離 (mm)	20	15	11	13	12	14.2
後退距離 (mm)	22	20	12	15	15	16.8
時計回り (°)	5	6	10	5	8	6.8
逆時計回り (°)	5	5	5	10	7	6.4

2.2 塵埃の分布を考慮した回収ロボットの経路計画

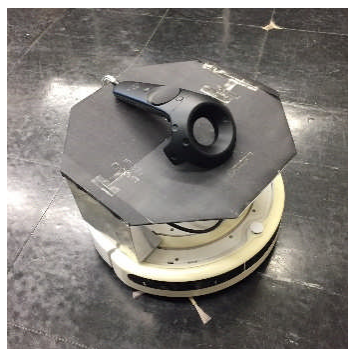
環境に分散したものを回収し集めることはロボットに求められる基本的な人力代替の機能と言える。その代表的な例は掃除ロボットであり、これまでも数多くの開発例がある。それらの多くは、いかにして一度の掃除で掃除対象領域全体を漏れなくかつ効率的に移動するかという観点から行われてきた。しかしながら、実際の環境では、塵埃は領域内に均一に分布しているわけではなく、その環境特有の偏りがある。したがって、掃除ロボットが環境特有の塵埃の分布の傾向を把握し、掃除経路の計画に取り入れることにより効率化が図れる。ここでは、市販の埃センサ (GP2Y1023AU0F) を取り付けた掃除ロボット (Roomba 537J) に掃除対象領域を掃除させて塵埃の分布を取得し、その結果から環境の塵埃分散傾向を推測する手法を検討した。また、推測結果を考慮した掃除経路計画の効果を実機により確認した。

経路提示のための環境地図として、対象領域を掃除ロボットと同じ大きさのセルに分割したグリッドマップを用いる。ロボットが移動できるのは、ロボットの存在するセルに隣接する周囲 8 セルである。掃除ロボットが消費するエネルギーは、セル間の移動距離と転回動作にのみで決まるものとする。本手法は、塵埃の分布取得、塵埃の分布の予測、予測された塵埃の分布に基づいた経路計画の三つにより構成される。

1) 塵埃の分布は、掃除ロボットに取り付けた埃センサを用いて、掃除対象領域全体を巡回して掃除することで取得する。

2) 塵埃の分布の予測は、過去の掃除で得た塵埃の分布から、その環境特有の塵埃の拡散の傾向を各層のユニット数を対象領域のセル数とした 4 層のニューラルネットワーク (以下 NN) で学習することにより行われる。これは、塵埃の蓄積と拡散が繰り返しにより最終的な分布が形成されるという仮説に基づいている。そこで、NN の入力を拡散前の塵埃の分布 (前回掃除後の塵埃の分布全体に、均一な塵埃を加えたもの)、出力を拡散後の塵埃の分布 (ロボットが取得した塵埃の分布) とした。

3) 掃除経路の計画では、四段階のプロセスにより塵埃の分布を考慮した効率的な掃除経路を決定する。まず、加法的重み付き重心離散ボロノイ図法に Newton 法による重みの最適化を組み合わせた手法を用いて、掃除対象領域を各部分領域内の塵埃の量が均一になるよう分割する。次に、遺伝的アルゴリズムを用いて、分割された各部分領域の通過順を塵埃の密度が高い部分領域を優先的に移動するように決定する。その後、タブーサーチを用いて、各部分領域内を効率的に移動する経路を決定する。最後に、このタブーサーチを経路全体に適用することで、移動経路を最適化する。



(a) ロボット本体



(b) センサ部

図 2.3 使用したロボット

図 2.3 に実機ロボット(a)と埃センサ(b)の外観を示す。このロボットを用いて、塵埃の分布を認識できるか、また、認識した塵埃の分布を用いて、NN により塵埃の分布の傾向を学習できるかを実験的に検証した。掃除対象領域は縦横 3.6m(12*12 セル)の屋内床面である。ロボットの位置情報取得には、HTC Vive を使用した。塵埃の分布は、掃除対象領域の一部(図 2.4 の赤枠内)に、人為的に塵埃を撒くことで作成した。実際に掃除ロボットが取得した塵埃の分布の例を図 2.4 に示す。図中で輝度値が低いセルは、塵埃が多く検出されたことを意味する。赤枠で囲った範囲に多くの塵埃が検出されていることから、実際の環境と一致しており埃センサが正しく塵埃の分布を取得したことが確認された。実測データで学習した NN に、領域全体に均一に塵埃が蓄積した分布を入力し、塵埃の分布を予測した結果の例を図 2.5 に示す。図 2.4 の赤枠で囲われた範囲と同じ範囲で塵埃が多く分布するような分布が予測されていることから、塵埃の分布の傾向を学習できていることが判る。

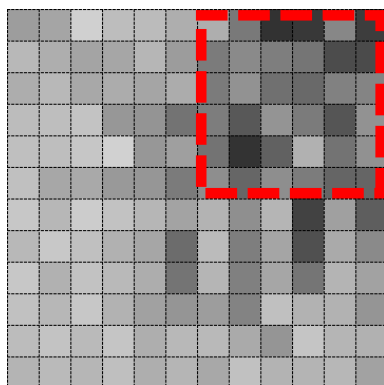


図 2.4 掃除対象領域

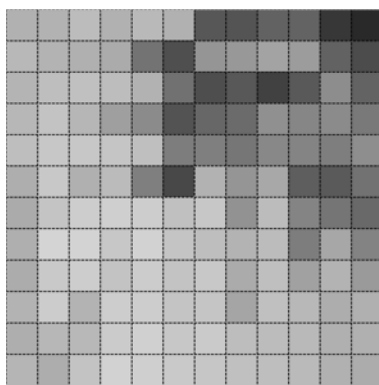


図 2.5 塵埃分布予測結果

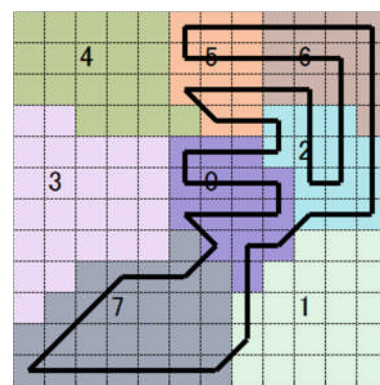


図 2.6 掃除経路

上の実験で予測した塵埃の分布に対して前述の経路計画アルゴリズムを適用し、実際に掃除ロボットに掃除させたときの結果を確認する実験を行った。図 2.5 の塵埃の分布に対して前述の経路計画アルゴリズムを適用して得られた掃除経路を図 2.6 に示す。実機に、提案手法(図 2.6 の経路)と従来手法(塵埃の分布を考慮せず、領域全体を掃除)で掃除させたときの結果を表 2.2 に示す。この結果から、環境特有の塵埃の分布の傾向を掃除経路に反映させ、効率的に塵埃を収集する掃除経路が生成されていることが確認できる。掃除ロボットが同じ環境を繰り返し掃除する状況において、本手法によれば粉塵の収集率を下げることなくより効率的に掃除を遂行できることが判る。

表 2.2 掃除効果の比較

手法 評価指標	提案手法	従来手法
塵埃収集率[%]	85.6	86.2
掃除時間[s]	240.7	421.3

2.3 ニューラルネットワークを用いた倒立振子のブラインドバランス制御

ロボットを正確に制御するためには、ロボットの各部位の寸法や重量などに依存する制御パラメータの決定が必要である。しかしながら、対象のモデルが明確に得られないなど、制御パラメータを得ることが難しい場合には、制御パラメータの決定には試行錯誤や経験的な知識が要求される。これに対してベイズ最適化を用いて制御パラメータを自動的に決定する手法が提案されているが、学習に時間がかかるため、リアルタイムには制御パラメータを調整できない。このため、システムが変化すると制御が不能になってしまう。そこで、ロボットの動作状態と制御パラメータの関係をニューラルネットワークに学習させることで、パラメータが未知のロボットの制御パラメータをリアルタイムに調整することを考えた。ここでは、フライホイールによる倒立振子のバランス制御を例題として、この方法の実現性を検証した結果を述べる。

フライホイールを用いた倒立振子のバランス制御では、一般に制御入力トルク u を以下の式で与えることにより、制御を行う。

$$u = -(k_1 \theta_p + k_2 \dot{\theta}_p + k_3 \ddot{\theta}_w) \quad (1)$$

ここで、 θ_p 、 $\dot{\theta}_p$ および $\ddot{\theta}_w$ は、それぞれ振子が鉛直方向となす角度、振子の角速度、フライホイールの角速度である。また、 $K = [k_1 \ k_2 \ k_3]$ はフィードバックゲインを表し、これが倒立振子の制御に必要な制御パラメータである。

フィードバックゲインは振子ごとに最適値があり、振子の密度が均一であれば、長さ L と質量 M の値を元に、線形二次レギュレータを用いて求めることができる。しかしながら、ここでは振子の長さや質量が未知であるとして、振子の制御中に適切なフィードバックゲインを推定することを考える。そのために、振子の各時刻の運動状態とフィードバックゲインの間の関係をニューラルネットワークに学習させ、制御システムに組み込む。これにより、パラメータ未知の振子に対しても制御を試みつつ、運動状態を取得することで制御が可能となる。

ニューラルネットワークの入力は、振子の角度、角速度、制御入力トルクで、出力はフィードバックゲインである。瞬時の角度、角速度、トルクだけでは安定的にフィードバックゲインを推定できない。そのため、その時々々の運動状態から過去 N ステップ分の角度、角速度、制御入力トルクの時系列データを入力とする。 N を 10、20、50、100 と変化させて学習させた結果を比較したところ、 N が増えれば増えるほど推定精度が上がるということが分かった。そこで、以下の実験では 100 ステップ分を入力とした。

ニューラルネットワークは入力層 300、中間層 500、出力層 3 の 3 層構造である。活性化関数には $\tanh$ を使い、誤差逆伝播法により学習を行った。

ニューラルネットワークの学習データは MATLAB/Simulink を用いて収集した。学習に用いたフライホイールは質量 228g、半径 0.100m、慣性モーメント $2.16 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、モータは質量 204g、最大回転数 1350rpm、最大トルク 0.452Nm である。この条件は、およそ長さ 1m までの振子を倒立制御できるものである。それぞれバランスを保てる範囲で振子の長さを 0.1m ごとに 0.2 m~1.0m、質量を 0.1kg ごとに 0.1 kg~1.5kg、振子の初期角度を 1° ごとに $1^\circ \sim 10^\circ$ で変化させた。振子の角度、角速度、入力トルクの 3 つを過去 100 ステップ分取得したものを 1 セットとして入力とし、最適なフィードバックゲインを教師データとして学習を行う。ここでは 1 ステップを 0.01 秒としているため、100 ステップ分で 1 秒間のデータが入力となる。ただし、初期段階では過去のデータが取れないため、初めの 1 秒間はフィードバックゲインを一定値とした。

制御中に振子の長さや質量が変化しても、適応的に制御できるかを確認するために、制御中に振子の長さや質量を変化させるシミュレーション実験を行った。制御開始時の振子を、長さ 0.64m、質量 0.82kg とし、1.5 秒後に長さ 0.96m、質量 0.82kg に変化させた。ニューラルネットワークを用いて制御した結果と、フィードバックゲインを制御開始時の長さや質量に最適化した値で制御した結果を比較した。どちらの制御も初期角度は 2° である。目標は振子の角度を 0 にすることである。

図 2.7、図 2.8 にそれぞれの制御方法による振子角度、フィードバックゲインの結果を示す。図 2.7 より、フィードバックゲインを固定した制御 (lqr) では、振子の長さが変化するとバランスを崩してしまうが、ニューラルネットワークを用いた制御 (NN) では安定することが示された。また、図 2.8 からニューラルネットワークを用いた制御では、制御中に振子の長さや質量が変化しても、概ね適切なフィードバックゲインに近い値で追従したことが示されている。これらから、ニューラルネットワークを用いてフィードバックゲインを適応的に調整することで、振子のパラメータ変化に対してロバストな制御ができたといえる。

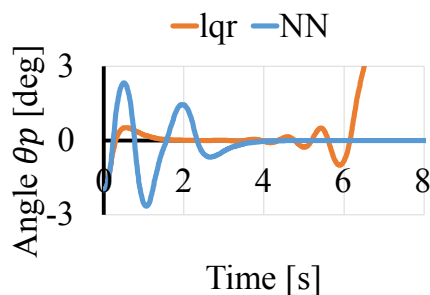


図 2.7 振子の角度

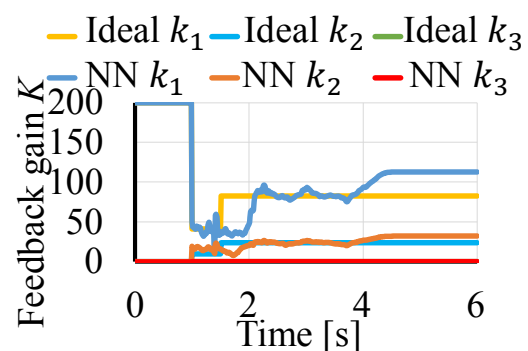


図 2.8 フィードバックゲイン

実機による制御実験を行ったところ振動的な倒立となった。そこで、実機のクーロン摩擦を調べたところ、シミュレーションでは無視していたクーロン摩擦の影響が無視できないことが分かった。今後はこの問題を解決すると共に、制御の範囲を二次元に拡張し、どのような形状の物体でもバランスが取れる取り付け型の姿勢安定化デバイスにすることを考えている。

3. 共同研究者

山川 宏 (早稲田大学 名誉教授)、三輪 敬之 (理工学術院 教授)、高西 淳夫 (理工学術院 教授)、小林 哲則 (理工学術院 教授)、菅野 重樹 (理工学術院 教授)、藤江 正克 (早稲田大学 名

誉教授)、梅津 光生 (理工学術院 教授)、岩田 浩康 (理工学術院 教授)、石井 裕之 (理工学術院 准教授)

4. 研究業績

< 主要な学術論文 >

- 1) Sasaki, T., Enriquez, G., Miwa, T. & Hashimoto, S., "Adaptive Path Planning for Cleaning Robots Considering Dust Distribution." *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.30, No.1, pp.5-14, 2018.
- 2) Miwa, T., Sakai, Y. & Hashimoto, S., "Learning Four-dimensional Spatial Representations through Perceptual Experience with Hypercubes," *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2017.
- 3) Shigemune, H., Kuwajima, Y., Matsushita, Y., Maeda, S., Cacucciolo, V., Cianchetti, M., Laschi, C., Sawada, H., Hashimoto, S. & Sugano, S., "Swinging Paper Actuator Driven by Conduction Electrohydrodynamics," 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2017.
- 4) Shigemune, H., Maeda, S., Hashimoto, S. & Sugano, S., "Simultaneous printing of multiple origami structures," *International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, 2017.
- 5) Miwa, T., Nakai, Y., Sawada, H. & Hashimoto, S., "4-D Space Visualization with Hidden Hypersurface Removal," *International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, pp. 381-384, 2017.
- 6) Manawadu, U. E., Kamezaki, M., Ishikawa, M., Kawano, T. & Sugano, S., "A multimodal human-machine interface enabling situation-Adaptive control inputs for highly automated vehicles," 28th IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 1195-1200, 2017.
- 7) Murata, S., Hirano, K., Arie, H., Sugano, S. & Ogata, T., "Analysis of imitative interactions between humans and a robot with a neuro-dynamical system," *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 343-348, 2017.
- 8) Chen, K., Kamezaki, M., Katano, T., Ishida, T., Seki, M., Ichiryu, K. & Sugano, S., "Analysis of operation strategy in a multi-operator control system for four-arm disaster response robot OCTOPUS," *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 514-519, 2017.
- 9) Chen, K., Kamezaki, M., Katano, T., Kaneko, T., Azuma, K., Uehara, Y., Ishida, T., Seki, M., Ichiryu, K. & Sugano, S., "A preliminary study on a groping framework without external sensors to recognize near-environmental situation for risk-tolerance disaster response robots," 15th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 181-186, 2017.
- 10) Sato, R., Kamezaki, M., Niuchi, S., Sugano, S. & Iwata, H., "A pre-offering view system for teleoperators of heavy machines to acquire cognitive maps," 15th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, Conference. Institute of Electrical and

Electronics Engineers Inc., p. 61-66, 2017

11) Okamura, N., Kobayashi, Y., Sugano, S. & Fujie, M. G., "Change detection technique for muscle tone during static stretching by continuous muscle viscoelasticity monitoring using wearable indentation tester," International Conference on Rehabilitation Robotics, ICORR 2017, p. 1686-1691, 2017.

12) Murata, S., Yamashita, Y., Arie, H., Ogata, T., Sugano, S. & Tani, J., "Learning to Perceive the World as Probabilistic or Deterministic via Interaction with Others: A Neuro-Robotics Experiment," IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 28, 4, p. 830-848, 2017.

13) . Tomo, T. P., Schmitz, A., Enriquez, G., Hashimoto, S. & Sugano, S., "Wayang robot with gamelan music pattern recognition," Journal of Robotics and Mechatronics. 29, 1, p. 137-145, 2017.

14) Tanaka, K., Zhang, D., Inoue, S., Kasai, R., Yokoyama, H., Shindo, K., Matsuhira, K., Marumoto, S., Ishii, H. & Takanishi, A., "A design of a small mobile robot with a hybrid locomotion mechanism of wheels and multi-rotors," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA), p. 1503-1508, 2017.

15) Hashimoto, K., Matsuzawa, T., Teramachi, T., Uryu, K., Sun, X., Hamamoto, S., Koizumi, A. & Takanishi, A., "A four-limbed disaster-response robot having high mobility capabilities in extreme environments", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 5398-5405, 2017.

16) Otani, T., Hashimoto, K., Miyamae, S., Ueta, H., Sakaguchi, M., Kawakami, Y., Lim, H. O. & Takanishi, A., "Angular momentum compensation in yaw direction using upper body based on human running", IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), p. 4768-4775, 2017.

17) Matsuzawa, T., Hashimoto, K., Sun, X., Teramachi, T., Kimura, S., Sakai, N., Yoshida, Y., Imai, A., Kumagai, K., Matsubara, T., Yamaguchi, K., Tan, W. X. & Takanishi, A., "Crawling gait generation method for four-limbed robot based on normalized energy stability margin," IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, p. 223-229, 2017.

18) Matsuzawa, T., Koizumi, A., Hashimoto, K., Sun, X., Hamamoto, S., Teramachi, T., Sakai, N., Kimura, S. & Takanishi, A., "Crawling motion and foot trajectory modification control for legged robot on rough terrain," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA), p. 1976-1982, 2017.

19) Nomura, K., Sato, M., Takeuchi, H., Minoru, K., Ryoichi, T., Ishii, H. & Takanishi, A., "Development of in-pipe robot with extension hose and balloons," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA), p. 1481-1486, 2017.

20) Tanaka, K., Okamoto, Y., Ishii, H., Kuroiwa, D., Mitsuzuka, J., Yokoyama, H., Inoue, S., Shi, Q., Okabayashi, S., Sugahara, Y. & Takanishi, A., "Hardware and control design considerations for a monitoring system of autonomous mobile robots in extreme environment," IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics,(AIM), p. 1412-1417, 2017.

21) Li, C., Shi, Q., Li, K., Zou, M., Ishii, H., Takanishi, A., Huang, Q. & Fukuda, T., "Motion evaluation of a modified multi-link robotic rat," IEEE/RSJ International Conference on

5. 研究活動の課題と展望

本プロジェクトでは、情報ネットワークに組み込まれたロボット技術とその地球環境全体への親和性の確保に必要とされる技術とその方法論について種々の確度から研究を進めてきた。長期大型プロジェクトとしては 2017 年が最終年度であるが、プロジェクト期間中における IoT の進展とビッグデータの普及と AI の進化には目覚ましいものがあった。

プロジェクトの計画時に想定していたセンサばかりでなくアクチュエータも繋がることによる柔軟かつ物理的な作用を伴うネットワークの構築にはまだ課題が残されているが、これまでの成果によりその最終的な姿が見えてきたと考えている。(図 5. 1)

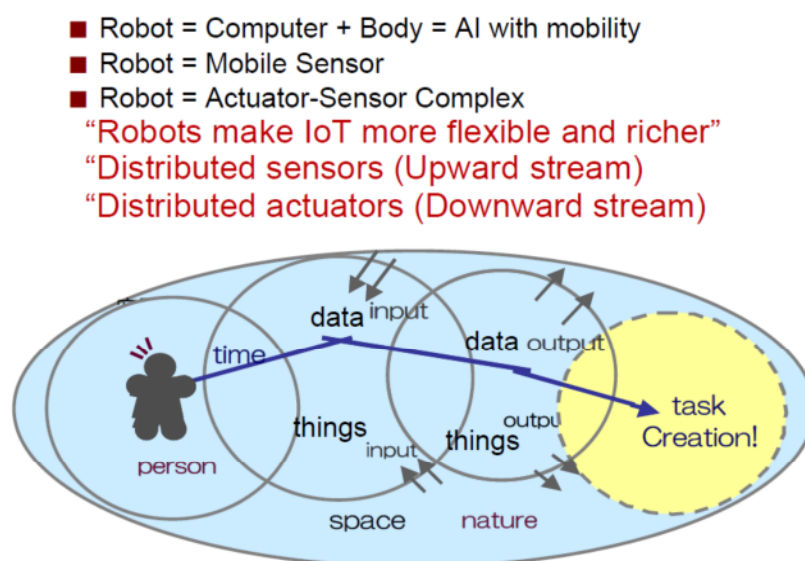


図 5. 1 ビッグデータ、IoT とロボット

従来、自律ロボットという名ですべてをロボットの機体に搭載する独立性がロボット研究のひとつの目標であったが、最近の情報ネットワークの発展とクラウド上の AI の出現は、ロボット開発の方向性を大きく変えた。つまり、計算的に大きな負荷のかかる情報処理的な仕事は、ネットワーク上のコンピュータ群に任せることが可能になったことから、「自律」の意味が変わってきたのである。AI は知的なロボットにとって必須であるが、ロボット研究者の注力すべきことは、ロボット動作を生成するための知的な情報処理機構の開発というより、人間あるいは自然環境とのインタラクションに直接関係するインタフェースとアクチュエーションの物理的な機構とその制御になるように思われる。また、これらの物理的な実体を持つロボットが多数結合したネットワークが環境に作用する際の総体としての影響評価と分散と集中の融合したシステム設計の問題も大きな課題となってきた。さらに、自己組織型組立によるロボット新しい制作方式の確立、ソフトウェアで実現されている機械学習に対応して身体構造の自己増殖・進化の機構を実体のロボットで実現することもロボット工学のフロンティアと言える。

これらの新しい課題の理論的研究と同時に、災害対応ロボット、医療ロボット、環境維持モニタリングなどの社会実装からのバックキャスト思考も自然と共生する知能機械の研究には重要である。本プロジェクトの成果を引き続き発展させる中でこれらに対する解答を用意したい。