

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25540115

研究課題名(和文)植物ロボット化による感覚行動系発達と初期的社会性の創発可能性に関する研究

研究課題名(英文)Development of Sensory-Motor System by Plant Robotization, and Investigation of Possibility of Emergence of Primitive Sociality

研究代表者

水内 郁夫 (Mizuuchi, Ikuo)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60359651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：ロボット化した植物群により、限られた日照面積と日照時間を最大限有効活用し光合成量を大幅に増加させるような行動決定アルゴリズムを提唱し、シミュレーションによりその効果を確認した。更に実際の植物ロボット(プラントロイド)を複数設計製作し実世界において、日向に移動する実験に成功した。また、広く感覚運動系の発達の仕組みを探求する研究を行い、ロボットの好奇心の研究、他者の意向に沿う行動や動作を行うアルゴリズムの研究、人の感覚運動系の計測結果に学びロボットアルゴリズムを考察する研究などに関し成果を得た。

研究成果の概要(英文)：We proposed an algorithm that determines a behavior of each robot in a swarm of plant-pot robots. By this algorithm, the total amount of photosynthesis in a certain sunny area and a certain period of time was maximized. We confirmed the effectiveness of the algorithm by simulation. We also designed and developed two types of plant-pot robots (Plantroids), and performed real-world experiments in which the robots moved towards sunny area automatically. We also conducted research on vast aspects of sensory-motor systems: there are several interesting results on robots' curiosity, an algorithm of motion or behavior which follows an intention or preference of other individual agents, analysis of human's sensory-motor system and discussing robot's algorithm based on it, and so on.

研究分野：ロボティクス

キーワード：植物ロボット化 感覚運動系 発達 社会性

1. 研究開始当初の背景

筆者は、卒業論文の指導教員が取り組んでいた研究テーマである「ロボットにおける心の発生」の研究に惹かれて、ロボット研究の分野に入った。我々人間を始めとする高等動物は、様々な感覚情報を処理し、その結果に応じて様々な判断・思考・決定を行い、運動神経へ巧みな指令を送ることで意図した動作を実現する。更には、他者の状態推定や、他者とのコミュニケーションなど、感覚と運動という枠を超えた能力を発揮し、悩みや愛などの非常に複雑なプロセスをも脳の電気回路の中から生じさせることができる。このような脳の全般にわたる機能を人工システムにより実現することは、筆者のライフワーク的な夢である。筆者は機械工学科を卒業し、脳科学の分野とロボットの分野のどちらの大学院に進むかを迷い、結局脳を調べることもよりも脳のような機能を異なるアーキテクチャの上に実現することを夢見て、ロボット研究の世界を歩んできた。

本研究開始前何年間かの期間、農学研究者と共同で植物工場において自律移動する植物ポットの研究を進めていた。ポット栽培の植物をロボットに載せ移動できるようにし、センサも設置して周囲や光の状況をセンシングできるようにすることを進める中で、筆者は「植物ロボット化」のコンセプトを着想した。植物にアクチュエーションとセンシングの能力を付加する(ロボット化する)ことは、ソフトウェアの必要性が増してゆくということであり、それは脳の発達の初期段階をシミュレートしていることに相当するのではないかというコンセプトである。

植物と動物の生存戦略は様々な点で異なる。植物は環境を移動する能力を持つ代わりに、世代をまたいでより生存に適した環境へ(風や動物の力を借りて)移動する。太陽の方向を向くなどの、単純なセンシングとアクチュエーションのメカニズムのようなものはあるが、固定的な反応系であった。これに対し、動物は生存のために運動能力と外界の状況を知るための感覚能力を有し、固定的ではなく柔軟に適切な判断を行うための脳の回路が発達してきた。植物ロボット化とは、

感覚と動作の能力を植物に付加してゆく研究を、人工的に脳を発達させてゆくプロセスととらえて考察するというコンセプトである。

2. 研究の目的

植物ロボット化のコンセプトに基づき、様々な感覚と動作の能力を有する個体の知能ソフトウェアを発達させてゆく過程を通して、動物の知能や社会性の発達の仕組みに対して何らかの示唆を与えられるような知見を生み出すことを、研究の目的とした。

3. 研究の方法

植物ロボット化のコンセプトに基づき、様々な感覚と動作の能力を有する個体の知能ソフトウェアを発達させてゆく過程を通して、動物の知能や社会性の発達の仕組みに対して何らかの示唆を与えられるような知見を生み出すことを、研究の目的とした。

植物に移動とセンシングの能力を付加したロボットだけではなく、シミュレーション内のエージェントや人間も対象とし、広く感覚運動系の原理から社会性などの高次の能力までを研究することとした。

4. 研究成果

ロボット化した植物群により、限られた日照面積と日照時間を最大有効活用し光合成量を大幅に増加させるような行動決定アルゴリズムを提唱した。100個体以上のロボット化植物がいる環境をシミュレートし、葉の温度によって光合成能力が異なるモデルと、葉の温度の変化モデルを組み込み、現在の光合成能力に応じて各個体の日向に行きたい度合い(正負)を決定することで、常に日向には光合成の高い個体がいる状態を維持し、太陽光の空間的・時間的な効率的利用が可能であることを示した(図1)

また、実ロボットによる検証も行った。卓

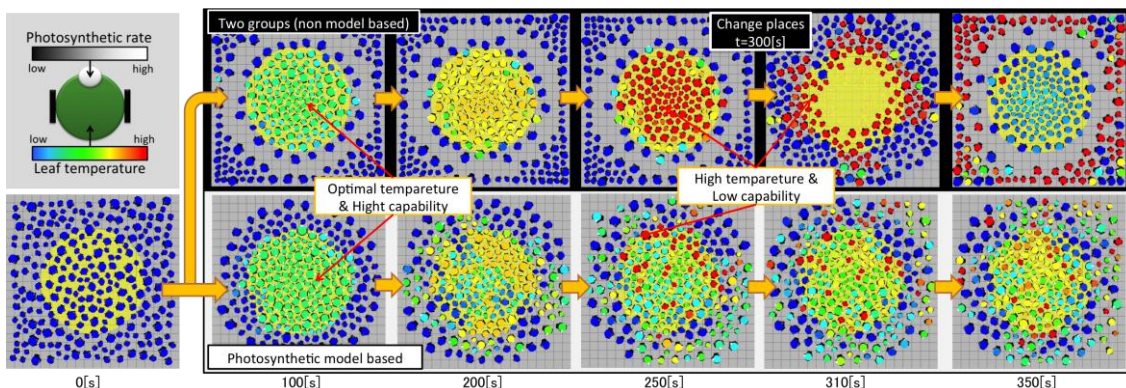


図1：葉温による光合成能の変化に基づき移動指向性を決定するアルゴリズムの検証

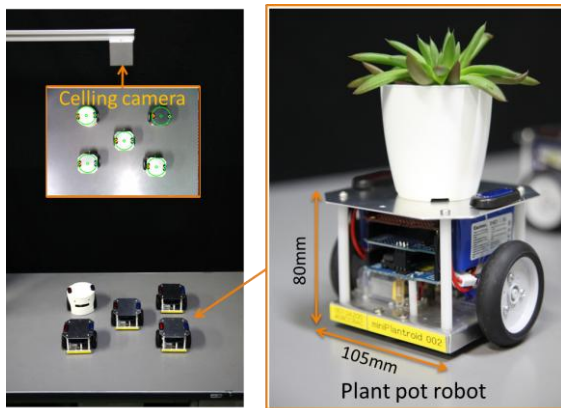


図2：プラントロイド・ミニ



図3：プラントロイド・オムニ

上型の小型植物ロボット（プラントロイド・ミニ）を5台開発し、天井に設置したカメラを用いて日向とロボットの位置を認識し、前段落に述べたアルゴリズムに基づき実際に動作が可能であることを確認した（図2）、鉢植えのブルーベリーを載せて移動できる中型の植物ロボット（プラントロイド・オムニ）を2台開発し、ロボットに設置した6枚のソーラーパネルの発電量から最も明るい方向を判断し、自律的に明るい方向に移動できることを確認した。

広く感覚運動系の発達の仕組みを探求する研究に関しては、ロボットの好奇心の研究、他者の意向に沿う行動や動作を行うアルゴリズムの研究、人の感覚運動系の計測結果に学びロボットアルゴリズムを考察する研究などを行った。ロボットの好奇心は、感覚状態を960次元空間の点として表現し、既経験感覚状態群の重心から遠ざかろうとするこ

とを好奇心と定義し、好奇心に基づき行動を決定するアルゴリズムを提唱した。他者の意向に沿う行動や動作を行うアルゴリズムに関しては、計測や推測した他者の状態とそれに影響を及ぼした可能性のある情報のセットを教師データとし、このセットを漸次的に収集し機械学習することにより、他者の状態の変化推定器を創る手法を提唱し、他者の状態を何かしらの目標にできるだけ近づけられそうな動作や行動や絵画を生成するアルゴリズムを提唱した。人の感覚運動系の計測結果に学びロボットアルゴリズムを考察する研究に関しては、力・触覚・滑りなどのセンシングと提示が可能な操縦システムを設計製作し、これを用いて、しだいに操縦者による操縦が上達する過程のデータを収集した。人の感覚運動系の上達過程の仕組みを明らかにしてロボットにそれを組み込むことを目指したが、上達過程の仕組みの解明までは至っていない。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 8 件）

- [1] Kazumi Kumagai, Jeonghun Baek, Ikuo Mizuuchi, A Situation-Aware Action Selection based on Individual's Preference using Emotion Estimation, in Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 356-361, 2014. (査読有) (DOI: 10.1109/ROBIO.2014.7090356)
- [2] Masato Yuasa, Ikuo Mizuuchi, A Control Method for a Swarm of Plant Pot Robots that Uses Artificial Potential Fields for Effective Utilization of Sunlight, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 26, No. 4, pp. 505-512, 2014. (査読有) <http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=ROBOT002600040013.xml>
- [3] Javier Francisco Guerrero Razuri, David Sundgren, Ikuo Mizuuchi, Antonio Moran, Rahim Rahmani. Integration of Artificial Neural Networks and Linear Systems for the Output Feedback Control of Nonlinear Vibration Systems, in Proceedings of The 33rd Chinese Control Conference, pp. 1850-1855, 2014. (査読有) <http://ccc.amss.ac.cn/2014/>
- [4] Jeonghun Baek, Ikuo Mizuuchi. Considerate Behavior of Robots based on Individual's Preference, in Proceedings of The 13th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, 2014. (査読有) <http://www.ias-13.org/>
- [5] Yuya Yumoto, Ikuo Mizuuchi. Recog-

nition of 3-Dimensional Branch Structure and Fruits Identification in a Tree based on It, in Proceedings of The 13th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, 2014. (査読有)

<http://www.ias-13.org/>

[6] Toma Morisawa, Ikuo Mizuuchi. Divergent Curiosity in Robots and Action Selection Method for Obtaining Unexperienced Sensory Information, in Proceedings of The 13th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, 2014. (査読有)

<http://www.ias-13.org/>

[7] Akihiro Ichimura, Ikuo Mizuuchi. Reaching Hidden Objects Based on Memory of Environmental States and Robot's Movement and Manipulation, in Proceedings of 16th International Conference on Advanced Robotics, 2013. (査読有) (DOI: 10.1109/ICAR.2013.6766497)

[8] 水内郁夫. 日なた求め、食べごろ収穫するロボット 東京農工大研究会が紹介, ブルーベリーニュース No. 62 (ISSN 1347-2615), 日本ブルーベリー協会, p. 6, April, 2013. (査読無)

<http://japanblueberry.com/magazine/>

[学会発表] (計 29 件)

[1] Ikuo Mizuuchi. Human-Inspired Robot Design of Hardware and Software, Seminar at Italian Institute of Technology, Genoa, Italy, July, 15, 2014. (招待講演)

[2] Ikuo Mizuuchi. Musculoskeletal Humanoids: Human-Inspired Design of Hardware and Software, Invited Talk at Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brazil, November 25, 2013. (招待講演)

[3] Ikuo Mizuuchi. Musculoskeletal Humanoids: Human-Inspired Design of Hardware and Software, Plenary Talk at 10th Latin American Robotics Symposium (X LARS) (IEEE-RAS), Arequipa, Peru, October 24, 2013. (招待講演)

[4] Ikuo Mizuuchi. Biologically-inspired musculoskeletal humanoids, International Summer School on Humanoid Soccer Robots 2013, Bonn, Germany, July 23, 2013. (招待講演)

[5] 森澤冬馬, 水内郁夫. 比較生産費説に基づく異種ロボットによる複数種類のタスク分担手法の提案, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 2P1-V06, May 19, 2015. (京都市勧業館「みやこめっせ」, 京都府京都市)

[6] 尾形将平, 水内郁夫. 多角照明による輪郭明確化手法に基づく特定植物識別型除草ロボットの開発, 日本機械学会ロボティ

クス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 2P1-C05, May 19, 2015. (京都市勧業館「みやこめっせ」, 京都府京都市)

[7] 櫻井遥, 水内郁夫. 振動子による滑り覚提示可能なバイラテラル操縦システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 2A2-W02, May 19, 2015. (京都市勧業館「みやこめっせ」, 京都府京都市)

[8] 熊谷和実, 水内郁夫. ロボット行動による人間の任意の表情の誘発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 1A1-S03, May 18, 2015. (京都市勧業館「みやこめっせ」, 京都府京都市)

[9] 佐藤哲朗, 水内郁夫. 絵画生成器と感性推定器を用いてロボットが絵画創作を行う手法の提案, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 1A1-S02, May 18, 2015. (京都市勧業館「みやこめっせ」, 京都府京都市)

[10] 櫻井遥, 水内郁夫. 振動子による滑り覚提示可能なバイラテラル操縦システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 2A2-W02, May 19, 2015. (京都市勧業館「みやこめっせ」, 京都府京都市)

[11] 熊谷和実, 白定勳, 水内郁夫. 感情推定結果に基づく人間が気に入る行動の選択, 第32回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2014AC3P2-08, September 6, 2014. (九州産業大学, 福岡県福岡市)

[12] 櫻井遥, 水内郁夫. 超音波振動子による滑り提示手法の提案, 第32回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2014AC1P1-07, September 4, 2014. (九州産業大学, 福岡県福岡市)

[13] 國芳隼平, 水内郁夫, 車 敬愛, 荻原勳. 熟度判定と3次元視覚に基づくブルーベリー全自動連続収穫ロボットシステム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 1P2-W05, May 26, 2014. (富山市総合体育館, 富山県富山市)

[14] 湯本裕矢, 水内郁夫. 3次元点群を用いた果樹枝構造認識アルゴリズムの柿の木での検証とヘリコプターによる点群データの収集, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 3P1-X07, May 26, 2014. (富山市総合体育館, 富山県富山市)

[15] 森澤冬馬, 水内郁夫. わずかな操作で大きな変化を起こすような環境における好奇心に基づく新奇な行動の発見, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 3P2-Q02, May 26, 2014. (富山市総合体育館, 富山県富山市)

[16] 五味亮, 水内郁夫. ロボットによる滑り情報を利用した低摩擦物体マニピュレーション, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集,

- 3P2-S03, May 26, 2014. (富山市総合体育館, 富山県富山市)
- [17] 白定勲, 水内郁夫. 個人の嗜好を学習し気の利く行動を自発的に行うロボット, 日本機械学会関東支部第20期総会講演会論文集, 20702, March 15, 2014. (東京農工大学, 東京都小金井市)
- [18] 姜馨黙, 鈴木駿介, 水内郁夫. ロボット模倣における外部視点を活用した動作修正の提案, 日本機械学会関東支部第20期総会講演会論文集, 20701, March 15, 2014. (東京農工大学, 東京都小金井市)
- [19] 國芳隼平, 水内郁夫, 荻原勲, 車敬愛. 熟度判定に基づくブルーベリー収穫ロボットの果実着生方向認識とアプローチ法, 第72回農業食料工学会年次大会講演要旨, p. 34, September 12, 2013. (帯広畜産大学, 北海道帯広市)
- [20] 湯本裕矢, 水内郁夫. 3次元枝構造認識に基づく実の個体識別のための実を用いたICPアルゴリズムによる果樹の3次元点群の重ね合せ, 第31回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2013AC3I1-06, September 6, 2013. (首都大学東京, 東京都八王子市)
- [21] 森澤冬馬, 水内郁夫. センサ情報空間からロボット動作空間への逆変換を用いた未知領域発見アルゴリズムの提案, 第31回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2013AC1N3-03, September 4, 2013. (首都大学東京, 東京都八王子市)
- [22] 國芳隼平, 水内郁夫, 荻原勲, 車敬愛. 熟度判定に基づくブルーベリー収穫ロボットの果実着生方向認識とアプローチ法, 第31回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2013AC1E3-02, September 4, 2013. (首都大学東京, 東京都八王子市)
- [23] 湯浅雅人, 錦知志, 水内郁夫. 自律移動可能な果樹栽培型 Plantroid の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1A1-Q05, May 23, 2013. (つくば国際会議場, 茨城県つくば市)
- [24] 吉田修子, 水内郁夫. 接触力とすべりを提示可能なウェアラブル操縦装置によるロボットの物体操作に関する研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1A2-J01, May 23, 2013. (つくば国際会議場, 茨城県つくば市)
- [25] 市村彰啓, 水内郁夫. 移動と環境操作による画像特徴量の変化に基づく地図表現を用いた行動制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1P1-H09, May 23, 2013. (つくば国際会議場, 茨城県つくば市)
- [26] 湯本裕矢, 水内郁夫. 3次元点群計測を用いた果樹の枝構造認識に基づく実の個体識別法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1P1-K03, May 23, 2013. (つくば国際会議

- 場, 茨城県つくば市)
- [27] 坂梨菜津子, 水内郁夫. 壁・天井面移動ロボットのための摩擦力に基づく把持機構に関する研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2A2-P11, May 24, 2013. (つくば国際会議場, 茨城県つくば市)
- [28] 湯浅雅人, 水内郁夫. 光合成特性に基づく植木鉢型ロボット群の太陽光有効活用移動制御法と実ロボットによる基礎実験, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2P1-F03, May 24, 2013. (つくば国際会議場, 茨城県つくば市)
- [29] 鈴木駿介, 湯本裕矢, 水内郁夫. 人間のヒューマノイド操縦上達過程における感覚運動制御の変化に基づく評価器自動生成法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2P1-H02, May 24, 2013. (つくば国際会議場, 茨城県つくば市)

[図書] (計 1 件)

- [1] 水内郁夫, 湯浅雅人. ロボット技術-植木鉢ロボット群による太陽光の時間的空間的有效活用技術の開発-, 植物工場生産システムと流通技術の最前線 (ISBN 978-4-86469-061-4), 第3章第4節, pp. 169-183, エヌ・ティー・エス, April, 2013.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 体感装置およびシステム  
 発明者: 水内郁夫, 櫻井遙  
 権利者:  
 種類: 技術  
 番号: 177064  
 出願年月日: 2014年9月1日  
 国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

- ・ ウェブページ: [mizuuchi.lab.tuat.ac.jp](http://mizuuchi.lab.tuat.ac.jp)
- ・ メディア等:
  - ・ 農作物の日なた移動 収穫のロボット開発, 読売新聞, 2014年6月3日
  - ・ 水内郁夫氏の講演要旨 まねできない製品を, 大分合同新聞朝刊, 2014年5月10日
  - ・ 水内郁夫氏が講演 大分政経懇話会5月例会, 大分合同新聞朝刊, 2014年5月9日
  - ・ めざましテレビ「ミライジョブズ」にて、研究紹介, フジテレビ. 2013年8月6日

- ・羽田空港第 1 ターミナル GW イベント  
～挑戦・発見・情熱 未来へ繋がる夢の  
翼～, 日本空港ビルデング株式会社,  
2013 年 5 月

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

水内 郁夫 (MIZUUCHI, Ikuo)  
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：60359651

### (2) 研究分担者

無し

### (3) 連携研究者

無し