

SUSTAINA-OP™: 持続可能性を重視した子供サイズの オープンハードウェアプラットフォームヒューマノイドロボット —ハードウェアの更新・評価とシミュレーションモデルの公開—

SUSTAINA-OP™: Kid-sized Open Hardware Platform Humanoid Robot with Emphasis on Sustainability
-Update and Evaluate Hardware, and Release Simulation Model-

○学 久保寺 真仁 (千葉工業大学) 野口 裕貴 (千葉工業大学)
井上 叡 (千葉工業大学) 正 林原 靖男 (千葉工業大学)

Masato KUBOTERA, Chiba Institute of Technology, masatokubotera06@yahoo.co.jp

Yasuo HAYASHIBARA, Chiba Institute of Technology, yasuo.hayashibara@it-chiba.ac.jp

This paper describes the open hardware platform humanoid robot SUSTAINA-OP™, which has been under development since 2022. SUSTAINA-OP™ is accessible, flexible, and robust for beginners and researchers who want to operate multiple robots. The robot has shown its potential as an open hardware, as evidenced by its first and second-place results in the RoboCup Humanoid League's soccer competition at the World Championships. Currently, the experience gained from the competition is being used to accelerate software development and humanoid research. In addition, through the release of robot development data, the competition is contributing to the creation of new deliverables.

Key Words: Open Hardware Platform, Humanoid Robot, RoboCup

1 緒言

近年、ヒューマノイドロボットの研究開発においては、人間のよう複雑な動作やタスクの実行能力を持つロボットの開発に焦点が当てられている。この分野の主な挑戦は、高度なハードウェア開発に伴う高コストである。本研究では、持続可能性を重視したオープンハードウェアプラットフォームヒューマノイドロボット SUSTAINA-OP™ シリーズの開発を通じて、ハードウェアの開発と維持費用の削減、研究の促進を目指している [1, 2].

SUSTAINA-OP™ は、新規参入者や複数のロボットを運用したい研究開発者にとって、容易に利用でき、修理やアップグレードが容易な設計が特徴である。GitHub 上でプラットフォームの設計データを公開し、世界中の研究者がアクセスし貢献できる環境を提供している [3]。ロボカップヒューマノイドリーグへの参加を通じ、歩行、身体制御、物体認識、自己位置推定、戦術、協調動作などの複雑な技術課題に対する対応能力を試している。

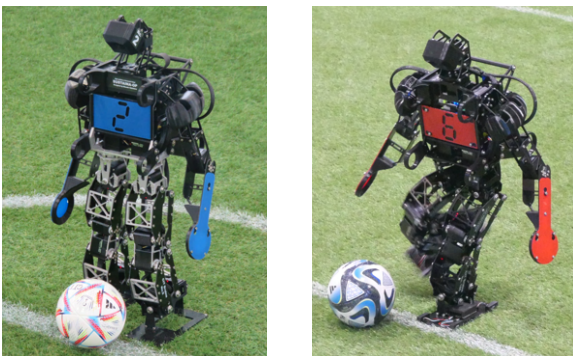
本稿では、ロボカップ 2023 に向けて改良された SUSTAINA-OP™ の概要と、そのシミュレーション環境の展開に関して述べる。

2 ロボカップに向けた開発

ロボカップ [4] は、人工知能やロボット工学の研究を促進し、これらの技術を様々な分野の基礎技術として普及させることを目的としている。その目標は、「2050 年までに、サッカーの世界チャンピオンチームに勝つ自律移動のヒューマノイドロボットチームを作る」ことにある。この目標に向け、参加チームは技術の進歩を競い合いながらも、知識の共有と協力を通じて共通の目標に向けた研究活動を促進することが望まれている。

ロボカップヒューマノイドリーグ [5] では、人間に似た身体構造と感覚を持つ二足歩行ロボットが使用され、サッカーの試合を通じて様々な技術的課題が提示される。これには、自律的な動作、周囲の状況を正確に認識し適切な行動を選択する能力、そして不整地で安定して動作する身体制御などが含まれる。

競技のルールは科学技術の進歩に合わせて定期的に更新され、FIFA のルールに近づくことを目標としている。これにより、ロボット技術と人工知能の進展を加速させるとともに、実際のサッカーに近い環境での研究が促進される。



(a) RoboCup2022 Edition (b) RoboCup2023 Edition

Fig.1: Open hardware platform SUSTAINA-OP™.



Fig.2: The final match in RoboCup2023 Humanoid League [6].

Table 1: Specification of SUSTAINA-OP™ RoboCup2022 Edition VS. RoboCup2023 Edition

Type	Specification	RoboCup2022 Edition	RoboCup2023 Edition
General	Height · Weight	647 mm · 5.2 kg (Battery included)	650 mm · 5.3 kg (Battery included)
	Battery Battery life Materials	LiHv 11.4V 3S1P 2, 800mAh Max. 30 min. walking possible A2017, GFRP, POM, TPU, PLA, etc.	
Actuators	Total	10 × B3M-SC-1170-A	9 × B3M-SC-1040-A
	Stall torque · current No load speed	7.6 Nm · 5.4 A 46 rpm	4.6 Nm · 3.6 A 54 rpm
Sensors	IMU	TDK MPU-9250	TDK ICM-42668-P
	Camera	e-con Systems™ e-CAM50_CUNX	
	Camera lens	TOWIN S02512512524F 160°(D) · 125°(H) · 90°(V)	
	Encoders Strain gauge	Contactless magnetic 12bit/1round	8 × Sensor and Control SC700-40kg
Control boards	System-on-Module	NVIDIA® Jetson Xavier™ NX	
	Carrier board	AVerMedia EN715	Sceedstudio A203 V2
	Microcontroller	ATmega32U4	
	Custom boards	3 types 3 boards	3 × ATSAMD21G18 9 types 12 boards

Note: Changes are indicated in red text.

3 プラットフォームロボットの先行研究・開発

本ロボット以外にも、ヒューマノイドリーグではプラットフォームロボットがいくつか提案されている。2011年、ROBOTIS社とバージニア工科大学は共同で DARwIn-OP(ROBOTIS-OP)を開発した。この身長46cm、重量2.8kg、20自由度を持つヒューマノイドプラットフォームは、幅広い研究者によって利用されている。RoboCup2011から2012にかけてのヒューマノイドリーグ・キッドサイズ部門で、TeamDARwInはDARwIn-OP [7]を使用し、2年連続で優勝を果たした。さらに、RoboCup2014ではキッドサイズ部門に参加したチームの50%がDARwIn-OPプラットフォームまたはそれをベースにしたロボットを使用した。RoboCup2015では、フィールドに人工芝が採用され、身長制限の緩和などの規則改定が行われたため、DARwIn-OPは歩行速度で見劣りするようになった。現在は、3世代目であるDARwIn-OP3(ROBOTIS-OP3) [8](図3a)が公開されているが、販売は既に終了している。

ロボカップヒューマノイドリーグの競技環境の変化に伴い、プラットフォームロボットへの要求も進化している。フランスのボルドー大学のRhuban Football ClubによるSigmaban+ [9](図3c)や、ドイツのハンブルグ大学が開発したWolfgang-OP [10](図3d)などの新しいプラットフォームが登場しており、これらのロボットは、より複雑な環境での性能向上や、転倒時の故障リスクの低減など、様々な改良が施されている。

Haarvojaらは、ROBOTIS-OP3の一部ハードウェアを改良して、評価を行っている [11]。転倒時の衝撃を軽減するために胴体の前後に3Dプリントによる安全バンパーが追加され、股関節には小規模の機械的改良が加えられ、軸外荷重がより均等に分散され、疲労破壊のリスクが軽減されるように改良されている。このような評価や実ロボットへの転用では、長時間の動作が必要とされるため、プラットフォームロボット開発においては、長期的に検証に利用できる高い柔軟性と堅牢性が求められる。

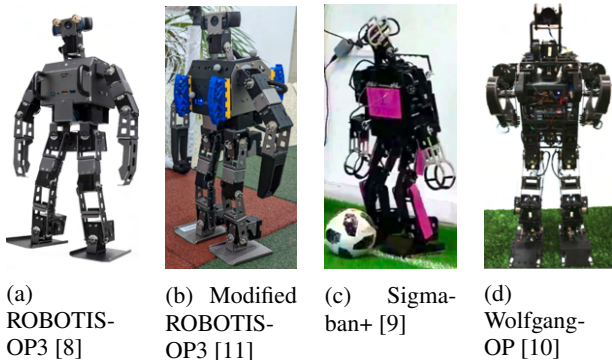


Fig.3: The major platform robots in recent years.

4 ロボットプラットフォーム SUSTAINA-OP™

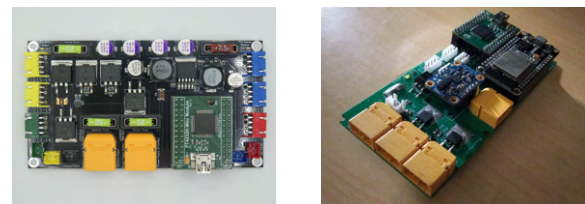
SUSTAINA-OP™は2022年より開発が始まり、現在も開発が継続されている。運動学的構造には、オープンプラットフォームヒューマノイドロボット GankenKun [12]を基礎として採用しており、機械部品は加工精度を向上するため切削加工された部品を用いて構成されている。脚部には、並行リンク構造や揺動型スライダクランク機構による減速機構を採用しており、アクチュエータのバックラッシュによる角度誤差を低減している。このロボットプラットフォームは、我々が所属する研究チーム CIT Brains [13]のロボットプラットフォームとして採用され、ロボカップヒューマノイドリーグのサッカー競技に使用されている。2022年に開催されたRoboCup2022タイ大会での優勝、そして2023年に開催されたRoboCup2023フランス大会での準優勝という成績は、SUSTAINA-OP™がロボカップヒューマノイドリーグでの競技における能力の高さを示すものであり、そして多くのチームのハードウェア開発にインスピレーションを与えている。SUSTAINA-OP™におけるハードウェアの設計データなどは、Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License [14]に基づき公開されている。これにより、SUSTAINA-OP™の開発から派生した新たな成果物(図4,5)もまたオープンハードウェアとして、他者の研究や開発に貢献し、持続可能な技術発展に寄与している。



(a) Original structure

(b) Chulsoo OP4 [15]

Fig.4: Derived anti-backlash structure inspired by my design



(a) Original board

(b) ICHIRO [16]

Fig.5: Derived electronic circuit board inspired by my design

5 ハードウェアの更新・評価

SUSTAINA-OP™ は CIT Brains の研究開発チームによって、ロボカップヒューマノイドリーグのための研究開発に利用されている。このプラットフォームの改良は、CIT Brains チームによる継続的な評価と競技会から得られる教訓を反映させ、ソフトウェア開発とヒューマノイド研究の加速、そして毎年の競技規則の変更への迅速な対応を目指して行われている。RoboCup2022 での経験から以下の教訓が得られた。

- ロボットの身体制御に足裏からの荷重情報が重要であることが認識され、センサーの追加が必須となった。
- トラブル発生時に原因がハードウェアかソフトウェアか判断が困難であったため、詳細なロボットの状態ログを取れる機能が求められることが明らかになった。
- 電子回路基板の製作に高い障壁が存在し、オープンハードウェアプラットフォームとして製作が難しいことが課題となっている。
- ソフトウェアの高度な処理能力を生かすため、より大電流を供給する電源回路が必要となっている。
- 競技中の安定した通信を実現するため、無線 LAN 接続の改善が必要であることが確認された。

これらの教訓をもとに、RoboCup2023 に向けて開発された SUSTAINA-OP™ RoboCup2023 Edition では、より高い性能と製作コストの低減を実現するための変更が施されている。

5.1 足裏荷重センサの追加

ロボカップヒューマノイドリーグでは、人工芝フィールドの不整地での安定した歩行を実現するためには、足裏からの正確な荷重情報が望まれる。RoboCup2023 Edition では足裏に荷重センサを新たに追加し、ロボットの動きの安定性を向上させるための重要なデータを提供することが可能となった。このセンサにより、ロボットは地面との接触状態を正確に把握し、より安定した身体制御を実現するための開発が進行中である。

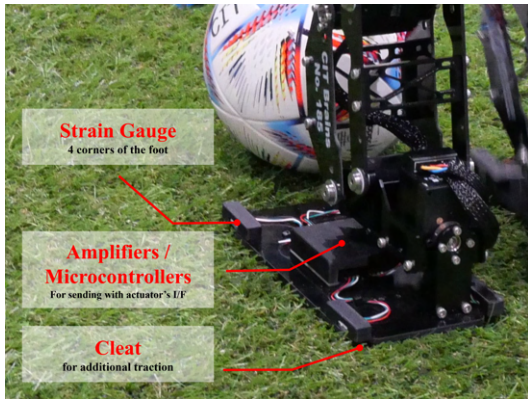


Fig.6: Power monitoring module on control circuit board and its role.

5.2 電源監視センサの追加

制御回路の監視において重要なのは電力であり、コンピュータへの安定した電力供給とアクチュエータの消費電力の計測が望まれる。これに対応するため、電力計を搭載し、コンピュータボードでの監視を可能にした。これにより、トラブル発生時の原因分析が容易となった。

5.3 電子回路基板の製作容易性を向上

電子回路基板の製作に関する障壁がヒューマノイドリーグに参加する多くのチームの大きな課題であることが浮き彫りになった。この問題に対処するため、PCBA(Print Circuit Board Assembly) サービスを利用することで製作プロセスの簡素化を図り、ハードウェアプラットフォームとして製作コストを低減した電子回路基板を提供できるようになった。

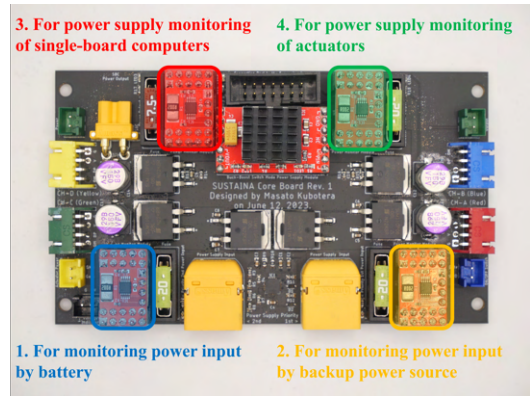


Fig.7: Configuration of load sensor with strain gauges attached to the sole.

5.4 電源回路の増強

競技中における GPU を利用した画像処理に必要なコンピュータの性能をフルに活用するため、電源回路の増強が必要とされた。RoboCup2023 Edition での電源回路の増強により、GPU を含むコンピュータボードが最大限の性能を発揮し、電力供給の安定性が向上した。

5.5 キャリアボードの変更

ロボカップヒューマノイドリーグにおけるサッカー競技では、無線 LAN における審判の判断や味方との情報共有が必要であり、安定した通信が求められる。RoboCup2022 Edition では USB I/F の無線 LAN アダプタが使用されていたが、通信の安定性に課題があった。RoboCup2023 Edition では無線 LAN カードを直接装着できる新しいキャリアボードへの変更が行われた。この変更により、従来の USB 経由の接続に比べて通信の信頼性が大幅に向上した。また、このキャリアボードの変更は、センシングデバイスの増加とデータログの要求に対応するための基盤も提供している。

6 シミュレータ環境の構築

ヒューマノイドロボットの研究は、歩行や身体制御、物体認識、自己位置推定など多様な課題に取り組む必要がある。これらの研究を効率的に進めるため、物理的なロボットがなくてもアルゴリズムの開発やテストを行えるシミュレーション環境の利用が有益である。シミュレーションにより、物理的な消耗を気にせずに継続的なテストや強化学習を実施できる。

6.1 簡略ロボットモデル

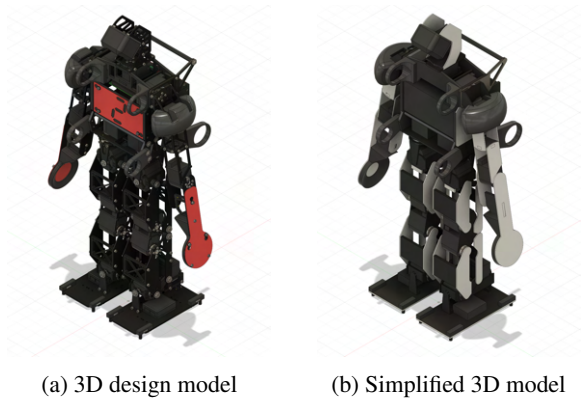
SUSTAINA-OP™ は Autodesk Inventor を用いて設計されており、非常に詳細な設計モデルが作成されている。しかし、シミュレーション用途では、ポリゴン数が多すぎるため、簡略化されたモデル (図 8b) が使用されている。

6.2 シミュレータ環境

SUSTAINA-OP™ のシミュレーション環境は、Cyberbotics 社が公開している 3 次元移動ロボットシミュレーションソフトウェアである Webots を介して提供している [17]。Webots はロボカップヒューマノイドリーグで広く使われており、バーチャル競技会でも採用されている。

7 結言

本研究の目的は、持続可能性を重視したオープンハードウェアプラットフォームヒューマノイドロボット SUSTAINA-OP™ シリーズの開発を通じて、ハードウェアの開発と維持費用の削減、研究の促進を目指すことにある。本稿では、ハードウェアの更新、性能評価、シミュレーションモデルの公開に焦点を当て、RoboCup での成果を通じてオープンハードウェアとしての効果を示した。課題には、構造設計が複雑で製作に時間を要することが挙げられる。今後は、性能向上、コスト削減、使用容易性の改善が必要である。



(a) 3D design model

(b) Simplified 3D model

Fig.8: The 3D design model and simplified 3D model for the simulator of SUSTAINA-OP™.

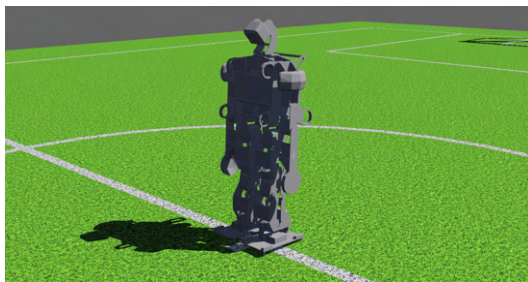


Fig.9: Robot simulator environment for SUSTAINA-OP™ with Webots.

参考文献

- [1] 久保寺真仁, 林原靖男. SUSTAINA-OP: ロボカップ用キッドサイズハードウェアプラットフォーム ヒューマノイドロボット. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'23 予稿集, pp. 2A1-A15, 2023.
- [2] Masato Kubotera and Yasuo Hayashibara. SUSTAINA-OP™: Kid-sized open hardware platform humanoid robot with emphasis on sustainability. *RoboCup 2023: Robot World Cup XXVI*, 2024.
- [3] SUSTAINA-OP™ open hardware platform website. <https://github.com/SUSTAINA-OP> Accessed on 8. March. 2024.
- [4] Robocup federation official website. <https://www.robocup.org/> Accessed on 8. March. 2024.
- [5] Robocup humanoid league official website. <https://humanoid.robocup.org/> Accessed on 8. March. 2024.
- [6] RoboCup2023 humanoid league kidsize finals CIT Brains(JP) vs. Rhoban(FR). <https://youtu.be/WMRjrZ45zCE> Accessed on 8. March. 2024.
- [7] Inyong Ha, Yusuke Tamura, Hajime Asama, Jeakweon Han, and Dennis W Hong. Development of open humanoid platform darwin-op. *SICE Annual Conference 2011*, pp. 2178-2181, 2011.
- [8] ROBOTIS. ROBOTIS OP3 manual. <https://manual.robotis.com/docs/en/platform/op3/> Accessed on 8. March. 2024.
- [9] Loïc Gondry, Ludovic Hofer, Patxi Laborde-Zubieta, Olivier Ly, Lucie Mathé, Grégoire Passault, Antoine Pirrone, and Antun Skuric. Rhoban football club: Robocup humanoid kidsize 2019 champion team paper. *RoboCup 2019: Robot World Cup XXIII*, pp. 491-503, 2019.
- [10] Marc Bestmann, Jasper Guldenstein, Florian Vahl, and Jianwei Zhang. Wolfgang-op: A robust humanoid robot platform for research and competitions. *2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 90-97, 2021.
- [11] Tuomas Haarnoja, Ben Moran, Guy Lever, Sandy H. Huang, Dhruva Tirumala, Markus Wulfmeier, Jan Humplik, Saran Tunyasuvunakool, Noah Y. Siegel, Roland Hafner, Michael Bloesch, Kristian Hartikainen, Arunkumar Byravan, Leonard Hasenclever, Yuval Tassa, Fereshteh Sadeghi, Nathan Batchelor, Federico Casarini, Stefano Saliceti, Charles Game, Neil Sreendra, Kushal Patel, Marlon Gwira, Andrea Huber, Nicole Hurley, Francesco Nori, Raia Hadsell, and Nicolas Heess. Learning agile soccer skills for a bipedal robot with deep reinforcement learning, 2023.

- [12] 下吉拓明, 林原靖男. ロボカップ用オープンプラットフォームヒューマノイドロボットの開発 第1報メカニズムの設計と製作. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'17 予稿集, p. 2P1-J07, 2017.
- [13] CIT Brains official website. <http://www.cit-brains.net/> Accessed on 8. March. 2024.
- [14] Creative Commons BY-NC-SA 4.0 License website. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> Accessed on 8. March. 2024.
- [15] Anti Backlash Structure OP website. https://github.com/daekyum02/Anti_Backlash_Structure_OP Accessed on 8. March. 2024.
- [16] MARIN Core: ICHIRO Controller Manager Board for Dynamixel website. https://github.com/RomdhoniZidane20/MARIN_CORE Accessed on 8. March. 2024.
- [17] SUSTAINA-OP Webots. https://github.com/SUSTAINA-OP/SUSTAINA-OP_Webots Accessed on 8. March. 2024.