

ロボカップ 2023 サッカー ヒューマノイドリーグに向けた 自律型二足歩行ロボットの開発

○久保寺 真仁, 野口 裕貴, 井上 叡, 横尾 陸, 桑野 雅久, 林原 靖男 (千葉工業大学)

Development of the Autonomous Bipedal Robot for the RoboCup 2023 Soccer Humanoid League

○ Masato KUBOTERA, Hiroki NOGUCHI, Satoshi INOUE, Riku YOKOO,
Gaku KUWANO and Yasuo HAYASHIBARA (Chiba Institute of Technology)

Abstract: In this paper, we introduce the development of an autonomous soccer-playing bipedal robot for the RoboCup 2023 by CIT Brains. The robot is developed as an open hardware platform, with design data available on GitHub. We are also developing software executing on SoM with GPU, such as decision-making with task-based AI, body control on artificial turf fields and image processing.

1. はじめに

千葉工業大学未来ロボティクス学科の学生を中心として構成されたチーム「CIT Brains^[1]」は、ロボカップサッカー ヒューマノイドリーグを通じて自律型ヒューマノイドロボットの開発に取り組んでいる。チームは 2006 年から活動しており、現在は大学院生 5 名と教員 1 名が所属している。これまでに、6 世代のキッドサイズのヒューマノイドロボット (Fig. 1) を含む自律的にサッカー競技を行うための要素技術を開発してきた。

近年では、新しいロボットプラットフォーム「SUSTAINA-OPTM^[2,3]」を開発している。そこでは画像処理や機械学習などのために、Graphics Processing Unit (GPU) を含む並列処理可能な System on Module (SoM) を用いている。これらのハードウェアの開発データは GitHub^[4] で一般に公開されている。

競技を行うための要素技術には、画像処理、行動決定、身体制御などのソフトウェアが含まれる。これらは機能ごとに独立して並列に動作するソフトウェア群を構築している。

我々のチームは、ロボカップの世界大会に毎回参加しており、ロボカップ 2022・タイで優勝^[5]、ロボカップ 2023・フランスでも準優勝している。本稿では、ロボカップ 2023 に向けて開発された、ロボットプラットフォームとソフトウェア群に焦点を当て、紹介する。

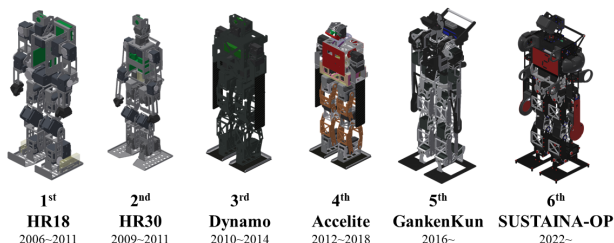


Fig.1 The history of CIT Brains' KidSize robots.

2. ロボカップ ヒューマノイドリーグ

「ロボカップ^[6]」は、国際的な自律移動型ロボットによる競技会である。「西暦 2050 年までに、サッカーの世界チャンピオンチームに勝てる、自律移動のヒューマノイドロボットのチームを作る」という目標に向かって、人工知能やロボット工学の研究を促進し、様々な分野の基礎技術として波及させることを目指す、ランドマーク・プロジェクトである。

「ヒューマノイドリーグ^[7]」は、キッドサイズ (身長: 0.4~1.0 m)、アダルトサイズ (身長: 1.0~2.0 m) の 2 クラスで行われる。我々が参加するキッドサイズリーグでは、各チームが 4 体の人間に近い身体構造と感覚を持つ二足歩行ロボットを用いて、6×9 m の人工芝フィールドでサッカーを前後半合わせて 20 分行う (Fig. 2)。



Fig.2 Soccer competition in the RoboCup2023 Humanoid League KidSize.

3. ロボットを構成する要素技術

ヒューマノイドリーグで用いる、自律的にサッカー競技を行うロボットには、以下の技術要素が必要とされる。

1. 自立して動作する二足歩行ロボット
2. ロボット自身の状態や周辺状況の検出
3. 周囲の状況のデータに基づいた適切な行動選択
4. 人工芝フィールドで転倒せず運動できる身体制御

本稿では、これらに関連する要素について紹介する。

4. ロボットプラットフォーム

ヒューマノイドリーグにおけるロボットプラットフォームには、2050年までのロードマップ^[8]に従い毎年更新される競技規則^[9]や研究課題に迅速に適応できる柔軟性が要求される。代表的なロボットプラットフォームとして、ROBOTIS社とバージニア工科大学によって共同開発され、2011年にリリースされた「DARwIn-OP^[10]」がある。しかし、人工芝フィールドの採用や身長制限の緩和などの競技規則の改定により、採用は減少している。近年では、「NimbRo-OP2X^[11]」や「Wolfgang-OP^[12]」のような新しいロボットプラットフォームや DARwIn-OP から派生して開発されたロボットが用いられている。

我々のチームは、ロボットプラットフォームを独自で開発することにより、競技規則の改定や新たな研究課題に迅速に対応している。現在までに6世代のロボットプラットフォームを開発しており、最新のプラットフォームである SUSTAINA-OPTM^[2,3]は、ロボカップ2022から導入された(Fig. 1)。このロボットは、「持続可能性:Sustainability」をコンセプトに、堅牢性を高め、修理やメンテナンスに必要なリソースを最小限に抑えるための設計を施している。また、ヒューマノイドリーグへの参加に伴うハードウェア開発コストの高さという障壁を克服することを目的として、ほぼすべてのロボットの設計データをGitHub^[4]で公開している。ヒューマノイドリーグでは、各チーム4体のロボットがアタッカーやゴールキーパーなど、様々な役割を分担する。SUSTAINA-OPTMは、全てを担当できる汎用性の高いプラットフォームとして設計した。これにより、仮にも故障が発生した場合でも、控えのロボットとすぐに置換することができる。

4.1 メカニズム

SUSTAINA-OPTMは、高さ0.65m、重さ5.3kgで19自由度を持つ自立型二足歩行ロボットプラットフォームである(Table 1)。運動学的構造は、我々のチームが以前に開発したロボットプラットフォーム「GankenKun^[13,14]」をベースとしている。

ヒューマノイドリーグキッドサイズでは、小型であるため、部品点数が少ない構造が好まれ、シリアルリンク構造のロボットプラットフォームが多い傾向がある。しかし、我々は、人工芝フィールド上における安定した歩行を実現するために、脚部に平行リンク構造や揺動型スライダクランクによる減速機構などを採用している。

上半身には、転倒時の衝撃への対策として、3Dプリンタで製作された熱可塑性ポリウレタンエラストマー(TPU: Thermoplastic Polyurethane)素材のバンパーを取り付け壊れにくくしている。

四肢には、歩行時の衝撃や起き上がりによって生じる塑性変形を抑えるために、ガラス繊維強化プラスチック(GFRP: Glass Fiber Reinforced Plastic)素材が用いられている。ただし、素材のたわみによる軸受けの破損が課題となっていた。そのため、ロール・ピッチ軸には滑り軸受けを採用することで、アキシャル荷重にも耐えることができる構造としている。

4.2 エレクトロニクス

Fig. 3に電子回路の概要を示す。SUSTAINA-OPTMは、画像処理や機械学習などを用いた研究課題に対応するために、GPUを搭載した組み込み用SoM「NVIDIA® Jetson Xavier™ NX」を搭載している。このSoMには、キャリアボードを介して、カメラや慣性計測装置(IMU: Inertial Measurement Unit)などのセンサやアクチュエータが接続される。ロボットに搭載されるデバイスの内、IMUおよび制御スイッチは、Arduino^[15]ボードによる処理を介して、SoMと接続される。カメラは、組み込みカメラの通信規格(MIPI CSI-2: Mobile Industry Processor Interface Camera Serial Interface-2)によってSoMと接続しており、Image Signal Processor (ISP)に直接、画像データが転送される^[16]ため、取込レイテンシーとデータ変換のCPU負荷を低減している。アクチュエータは、ノイズ耐性に優れたRS-485規格であり、SoMとUSB/Quad RS-485変換を通じて、4並列のデジチェーン接続(数珠つなぎ)によって接続される。

足先にはZMPを計測するための力センサが取り付けられているが、これらもアクチュエータと同一バス上に接続される。

SoMを含めた制御回路は、ロボット胸部の限られたスペースに収納するために、モジュール化された回路基板を独自に開発し搭載している(Fig. 4)。ロボットプラットフォームは、LiHv 3S1P 2800mAhのバッテリーによって、最大で30分の自立動作が可能である。バッテリーなどから供給される電力、SoMやアクチュエータへ供給する電力はソフトウェア群から監視することができる。

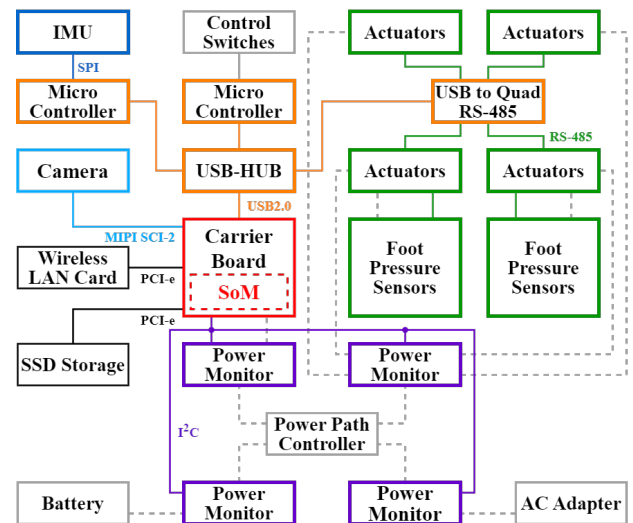


Fig.3 Overview of electrical system configuration in the SUSTAINA-OPTM.

Table 1 Specification of SUSTAINA-OP™ RoboCup2023 Edition

Height	0.65 m
Weight	5.3 kg (Battery included)
Walking speed	Max. 0.33 m/s
Degrees of freedom	19 DoFs
Actuators	10 × B3M-SC-1170-A (KONDO) 9 × B3M-SC-1040-A (KONDO)
Sensors	IMU(3-axis gyroscope and 3-axis accelerometer): ICM-42688-P (TDK InvenSense) Camera: e-CAM50_CUNX (e-con Systems) with wide-lens: S02512512524F (TOWIN) Encoders: Contactless magnetic 12bit/1round in actuators
Single board computer	SoM: Jetson Xavier NX (NVIDIA) Carrier board: A203 V2 (Seed studio)
Battery	LiHv 11.4V 3S1P 2800mAh: HP-G830C2800S3 (Hyperion)
Materials	A2017, GFRP, POM, TPU, PLA, etc.
Custom Circuit Boards	1 × SUSTAINA Core Board Rev. 1 1 × A203 V2 Expansion Board Rev. 2 1 × IMU Measurement and Transmission Module Rev. 1 1 × USB to Quad RS-485 Conv. Module Rev. 1 4 × Power Monitor Module Rev. 2 1 × USB-HID Control Switches Module Rev. 1 1 × Buck-Boost Switch Mode Power Supply Module Rev. 1 2 × Quad Load Cell Amplifier to RS-485 Conv. Module Rev. 1 1 × ICM-42688-P-Module Rev. 1

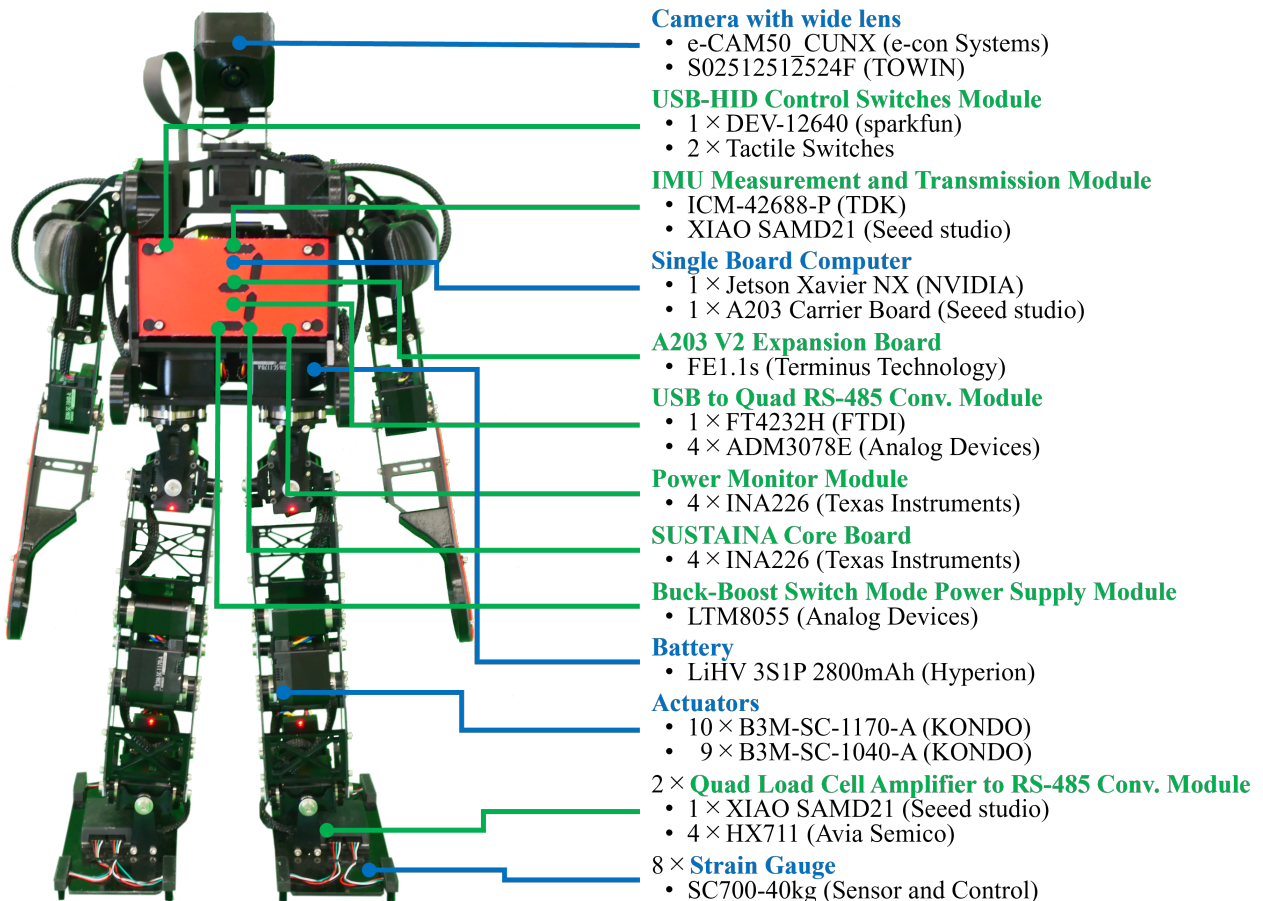


Fig.4 Overview of the hardware components. The blue text is the main COTS (Commercial Off-The-Shelf) components and the green text is the custom circuit boards designed for SUSTAINA-OP™. The design data of the custom circuit boards are available on GitHub ^[4].

5. ソフトウェア

Fig. 5 にロボットのソフトウェア構成の概要と、データの流れを示す。これらのソフトウェア群は、画像処理、自己位置推定、行動決定、身体制御で主に構成されている。それぞれのソフトウェアは機能などの単位でプロセスやスレッドとして並列に動作する。我々のシステムには Robot Operating System (ROS) [17] を採用することはしていないが、それに近い Publisher/Subscriber 型などの通信モデルやソフトウェアアーキテクチャを構築している。データは Protocol Buffers [18] などの Interface Description Language (IDL) で定義し、ZeroC Ice [19] や ZeroMQ [20] などのプロセス間通信ミドルウェアを利用して送受信する。OS は Ubuntu 20.04 であり、これは「NVIDIA® JetPack 5.0.2 SDK [21]」を用いて構築したものである。

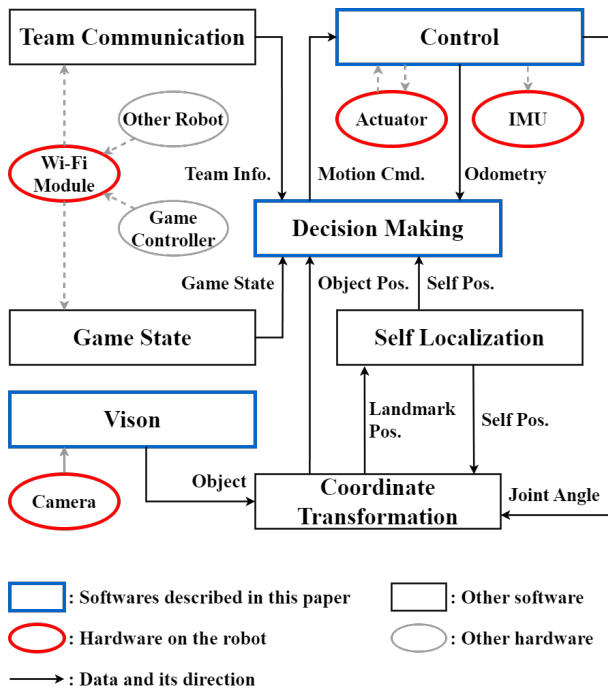


Fig.5 Overview of software architecture.

5.1 画像処理

フィールド上の照明条件の変化などに対して、物体をロバストに認識するために、我々の画像処理システムは機械学習を用いている。認識対象はボール、ゴールポスト、ロボット、フィールドである。これらの認識には 2 つの異なる機械学習の手法を用いている。1 つは「You Only Look Once (YOLO) [22]」を用いた物体検出、もう 1 つはピクセルレベルで物体を認識する「セマンティックセグメンテーション (SS: Semantic Segmentation)」である。入力画像はロボットの頭部に取り付けられた、対角 160° の広角レンズを搭載した単眼カメラによって取得される (Fig 6(a))。取得する画像の解像度は 640 × 480 px である。

YOLO を用いた物体検出では、ボール、ゴールポスト、ロボットの 3 種類を認識している。ロボットの敵、味方は、ロボットに取り付けられたカラーマーカーをもとに識別される。カラーマーカーの色は赤と青の 2 種類であり、試合前に決定される。セマンティックセ

グメンテーションはフィールドの白線を検出する。ただし、フィールド外の白い物体を白線と誤認識することがある。そのため、緑地も検出し、緑地と隣接する白色をフィールドの白線とすることで、誤認識を減らしている (Fig 6(c), 6(d))。検出したゴールポストと白線は自己位置推定のランドマークとして用いられ、ボールとロボットは行動決定で利用される。

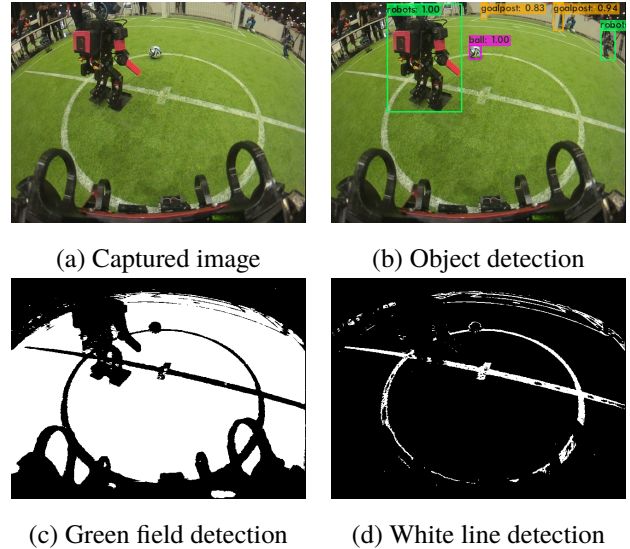


Fig.6 Object detection procedure: (a) Image capture using a head-mounted camera. (b) Detection of the ball, goal posts, and robots using YOLO. (c-d) Detection of the green field and white lines using SS.

5.2 行動決定

サッカー競技における行動決定は、戦略が複雑になるほど人手による管理や開発が容易ではなくなる。そこで、我々は行動決定に「階層化型タスクネットワーク (HTN: Hierarchical Task Network)」を採用している。このアプローチにより、ロボットの行動は抽象的に扱われ、階層的な行動セット (タスクツリー) で表現されるので、人間が管理しやすい形になる。

競技には、通常 4 体のロボットが出場し、各ロボットは、試合の状況に合わせてプランを調整し、タスクツリーから適切な行動を選択および実行する。各ロボットには異なる役割 (アタッカ、ディフェンダ、ゴールキーパ) が割り当てられ、それぞれに固有のタスクツリーが用意されている (Fig. 7)。また、競技中のゴールキーパ以外のロボットは状況に応じて自動的に役割を切り替えることができ、味方と連携しながら多様なポジショニングを実現する。

我々のチームでは、ドリブルやキックなどの組み合わせによる複数パターンの戦略が用意されており、事前に設定可能なファイルの変更により、敵チームの戦略に合わせてドリブルの有無やキックの種類を選択できる。キックの種類には、ボールを前に蹴り出す通常のキックと、斜めに蹴り出すクロスキックの 2 種類がある。これらのキックを使い分けることで、我々のロボットは正面から向かってくる相手に対して、ボールを奪われない方向に蹴り出すことができ、試合を優位に進めることができる。

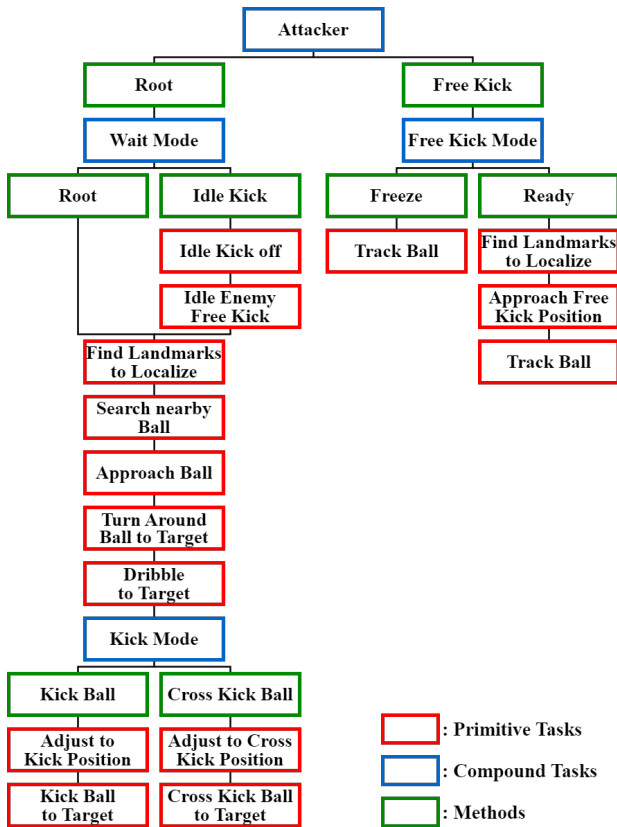


Fig.7 An example of a task tree in the attacker robot. Actions to be executed are called Primitive Tasks (red nodes) and abstract actions are called Compound Tasks (blue nodes). The set of actions is Subtask, and the set of Compound and Primitive Task is Method (green nodes). A Compound Task is a set of Methods.

5.3 身体制御

人工芝フィールド上で安定な歩行を行うため、「Zero Moment Point (ZMP) [23]」規範に基づく歩行パターン生成と IMU を活用した姿勢安定化制御を採用している。これら 2 つの機能を含む身体制御は、100 Hz で実行される。ZMP 規範による歩行パターン生成では、オンラインの計算負荷を軽減するために、事前に計算した ZMP 軌道をテーブルとして用いる。目標方向や目標速度などのパラメータに基づいて、このテーブルの軌道を調整することで、歩行パターンを生成する。これにより、ロボットに搭載された NVIDIA® Jetson Xavier™ NX 上で 180 μs 程度の計算時間で歩行パターンを生成することができる。胴体に搭載された IMU で計測したピッチ・ロール方向の角速度を脚の関節角度にフィードバックすることで、姿勢を安定化している。

6. 競技会における成果

我々のチームは、2023 年 7 月 4 日から 10 日かけてフランス・ボルドーで開催された、「RoboCup2023 World Championships」に参加した。ヒューマノイドリーグ キッドサイズには、10 か国 (AU, BR, CA, CN, DE, FR, ID, JP, KR, UK) から 12 チームが参加した (Fig. 8)。我々のチームは、「Soccer Competition」,

「Drop-In Challenge」, 「Technical Challenge」の各部門において入賞した (Table 2)。

Table 2 Awards of CIT Brains in the RoboCup2023 World Championships.

KidSize	Soccer	Competition	2 nd
KidSize	Drop-In	Challenge	2 nd
KidSize	Technical	Challenge	3 rd



Fig.8 Players and robots in the RoboCup2023 Humanoid League.

7. おわりに

本稿では、千葉工業大学未来ロボティクス学科のプロジェクトチーム「CIT Brains」の取り組みとして、ロボカップ 2023 ロボカップ サッカー ヒューマノイドリーグにおけるヒューマノイドロボットの開発を紹介した。日本において、ロボカップ ヒューマノイドリーグに参加するのは我々のチームだけである。人工知能やロボット工学の研究を促進し、ロボカップが掲げる壮大な目標を達成するには、再び日本国内でヒューマノイドリーグが熱心に取られるようになることが期待される。

謝辞

本稿で紹介したロボカップ 2023 へのロボット開発と競技会参加に際し、近藤科学株式会社、マウザーエレクトロニクス、ハル・エンジニアリング株式会社、株式会社東日本技術研究所、VA Linux Systems Japan 株式会社、株式会社 DciTech、株式会社アールティのスポンサー企業の皆様、および笹川日仏財団、萩原芸術振興財団からの助成金、個人の寄付に深く感謝申し上げます。皆様の協力と資源提供は、研究開発プロジェクトの成功とロボカップ競技会への参加実現の大きな助けとなりました。

参考文献

- [1] *CIT Brains official website*. Accessed on 20.October.2023. URL: <http://www.cit-brains.net/>.
- [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*, (In Press).
- [3] 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, 2A1–A15, (2023).
- [4] *SUSTAINA-OP™ Open Hardware Platform website*. Accessed on 20.October.2023. URL: <https://github.com/SUSTAINA-OP>.
- [5] Yasuo Hayashibara et al.: “RoboCup2022 KidSize League Winner CIT Brains: Open Platform Hardware SUSTAINA-OP and Software”. *RoboCup 2022: Robot World Cup XXV*, pp. 215–227, (2023).
- [6] *RoboCup Federation official website*. Accessed on 20.October.2023. URL: <https://www.robocup.org/>.
- [7] *RoboCup Humanoid League official website*. Accessed on 20.October.2023. URL: <https://humanoid.robocup.org/>.
- [8] *RoboCup Soccer: Humanoid League Roadmap from 2022 to 2050*. Accessed on 20.October.2023. URL: http://humanoid.robocup.org/wp-content/uploads/roadmap_2022.pdf.
- [9] *The rules of the Humanoid League*. Accessed on 20.October.2023. URL: <https://humanoid.robocup.org/materials/rules/>.
- [10] Inyong Ha et al.: “Development of open humanoid platform DARwIn-OP”. *SICE Annual Conference 2011*, pp. 2178–2181, (2011).
- [11] Grzegorz Ficht et al.: “NimbRo-OP2X: Adult-Sized Open-Source 3D Printed Humanoid Robot”. *2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 1–9, (2018).
- [12] Marc Bestmann et al.: “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).
- [13] 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, 2P1–J07, (2017).
- [14] 中島崇晴, 島田悟志, 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2報ハードウェアの評価と改良”. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'19 予稿集, 1J3–02, (2019).
- [15] *Arduino official website*. Accessed on 20.October.2023. URL: <https://www.arduino.cc/>.
- [16] *Block diagram of Jetson Xavier NX processor engines including high-speed I/O and memory fabric*. Accessed on 20.October.2023. URL: <https://developer.nvidia.com/blog/jetson-xavier-nx-the-worlds-smallest-ai-supercomputer/>.
- [17] *ROS - Robot Operating System official website*. Accessed on 20.October.2023. URL: <https://www.ros.org/>.
- [18] *Protocol Buffers - Google's data interchange format*. Accessed on 20.October.2023. URL: <https://github.com/protocolbuffers/protobuf>.
- [19] *ZeroC Ice official website*. Accessed on 20.October.2023. URL: <https://zeroc.com/ice>.
- [20] *ZeroMQ official website*. Accessed on 20.October.2023. URL: <https://zeromq.org/>.
- [21] *NVIDIA Developer JetPack SDK*. Accessed on 20.October.2023. URL: <https://developer.nvidia.com/ja-jp/embedded/jetpack>.
- [22] Joseph Redmon et al.: “You only look once: unified, real-time object detection”. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 779–788, (2016).
- [23] Miomir Vukobratović and Juri Stepanenko: “On the stability of anthropomorphic systems”. *Mathematical Biosciences* 15.1, pp. 1–37, (1972).