

子供サイズ人型ロボットプラットフォームの 自立化へ向けた開発

梶田秀司, 大西祐輝*, 金子健二**

Development of a Child-sized Humanoid Robot Platform Towards a Self-Contained System

Shuuji Kajita, Yuki Onishi* and Kenji Kaneko**

In this report, we present ChuBot-1, a child-sized humanoid robot developed as a research platform to explore general tasks in daily life. We focus on the design of the robot's lower body and describe a basic walking experiment. Building upon a previously developed open-source humanoid robot, we have engineered a novel leg mechanism for ChuBot-1. This mechanism weighs 6.5 kg, stands 62.5 cm tall, and features 12 degrees of freedom. The robot is constructed using off-the-shelf servo modules and 3D-printed components. It successfully demonstrated the ability to walk, achieving a step length of 10 cm and a duration of 0.7 seconds per step.

Keywords : *Humanoid robot, 3D printing, Biped locomotion*

1. はじめに

2024 年現在, 世界的な規模でヒューマノイドロボットの開発ブームが起きている¹⁾. 代表的なのは米国で, 有名なボストン・ダイナミクス社の Atlas だけでなく, アジリティ・ロボティクス社の Digit, Tesla の Optimus を始め, 新興ベンチャー発の等身大ヒューマノイドロボットが数多く発表されている. ヒューマノイドロボット開発のもう一方の極が中国であり, Unitree 社や UBTECH Robotics 社など歴史ある企業に加え新興ベンチャーが開発したヒューマノイドロボットが次々と出現している. この他, カナダ, シンガポール, ノルウェー, イスラエルの企業からヒューマノイドロボットが発表されており, 「ヒューマノイド研究のビッグバンが起きている」と言う表現は過言ではない.

この盛り上がりの背景には, AI 技術, 特に大規模言語モデル (LLM) と深層強化学習の急速な進歩がある. これらの技術によって, 従来困難と考えられてきた人間の日常生活をサポートするロボットが近い将来に実現できるのではないか? という期待が広まっているのである.

一方, 我が国のヒューマノイドロボット研究を見ると, ホンダの ASIMO や SONY の QRIO, 産業技術総合研究所の HRP-2 などが世界の研究をリードしていた 2000 年から 2010 年代初頭までの勢いを喪失し, 低迷していると言わざるを得ない. これは日本のロボット研究開発の一旦を担う大学研究者の立場として憂慮すべき事態である.

ヒューマノイドロボット研究については「産業化への道筋が遠く, 研究の優先度は低い」という見

* 東京工業大学 ** 産業技術総合研究所

解が我が国の研究コミュニティにおいて一定数存在する。しかし、大学における研究開発において、ヒューマノイドロボットは学生の知的興味と惹きつける対象であること、加えて AI をめぐる前述の状況から専門家の想定を超える技術革新が起きる可能性を秘めていることから、その重要性は従来以上に増していると我々は確信している。

我々が目標とするのは大学での研究に適した身長 120cm 程度の子供サイズで人間と共存し日常生活の様々なタスクを補助／代行できるロボットである。本報告ではこのロボット（ChuBot-1 と呼称する）の下半身部分の開発について述べる（図 1）。

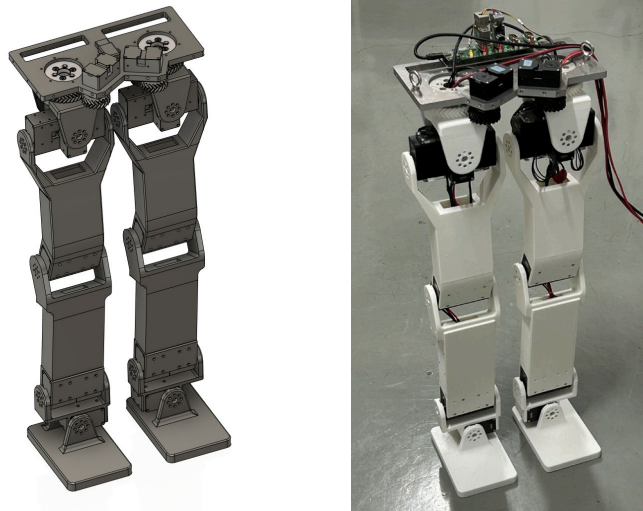


Figure 1. Lower body of ChuBot-1 Left: CAD Model, Right: Real hardware

2. 子供サイズ人型ロボットプラットフォームの開発

2.1. ChuBot-1 の基本構成

ChuBot-1 の基本構成を考える上でドイツボン大学の Sven Behnke 教授の研究室で開発された子供サイズのヒューマノイドロボット NimbRo-OP2X²⁾を参考にした。このロボットはホンダの ASIMO(身長 130cm, 体重 48kg)と同身長でありながら体重は 19kg と 2.5 分の 1 であり、実験や取り扱いが易しい機体となっている。アクチュエータとして後述する市販のサーボモジュール 34 個を用い、3D プリンタで制作されたリンク構造体と合わせてロボットを構成している。その CAD データはインターネット上で公開されている³⁾。

NimbRo-OP2X のシステム構成に習い、同じサーボモジュールを用い、構造部品を 3D プリンタで製造することとした。ただし脚構造に関しては、NimbRo-OP2X が並行リンク構造を採用しているのに対し（図 2 左）、ChuBot-1 では標準的なシリアルリンク構造を採用することにした（図 2 右）。これは、前者がサッカー競技を目的とし移動環境が水平面に限定されているのに対し、我々の研究では日常生活環境で現れる斜面や様々な不整地への対応を目指しているためである。

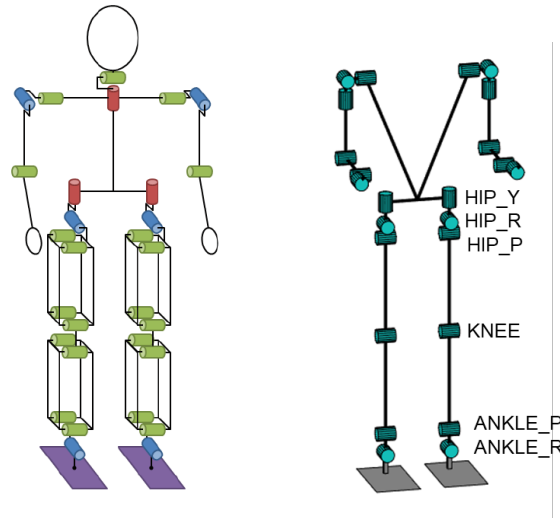


Figure 2. Link and joint structure Left: NimbRo-OP2X, Right: Chubot-1

本研究で用いた ROBOTIS 社の Dynamixel XM540-W270-R (以降 XM540 と呼称する)の仕様を表 1 に示す. XM540 はサーボモータ, 減速機, エンコーダ, サーボドライバ, コントローラ, および通信インタフェースをコンパクトに一体化したサーボモジュールであり, NimbRo-OP2X をはじめとするさまざまな研究用ロボットに使用されている.

Table 1 Specification of Dynamixel XM540-W270-R

Type	XM540-W270-R
Input Voltage	10 - 14.8V
Stole torque at 12V	10.6Nm
No load speed at 12V	30rpm
Dimensions (W×H×D)	33.5×58.5×44mm
Weight	165g
Link (Physical)	RS485 Multi Drop Bus
Baud Rate	9,600 - 4,500,000 bps

2.2. ChuBot-1 の脚機構設計

本研究では XM540 を用いて可能な限りシンプルな脚構造の設計を目指した. 設計した下半身部分を図 3 に示す. 例えば股関節ロール軸とピッチ軸については 4 つの XM540 をアクリル製のプレート 2 枚とネジで結合することにより, 単純でありながら十分な強度を持つ構造を形成している. 大腿, 下腿などの基本的なリンクは CAD ソフトウェアの Fusion360 を用いて設計し, 出力した STL ファイルに基づき 3D プリンタで造形を行った. 大腿リンクと下腿リンクの膝関節付近でリンクが屈曲しているのはリンク間の干渉を防ぐためのもので, この形状により膝の 180° までの屈曲を可能としている. 股関節ヨー軸を駆動するための 21T と 40T のダブルヘリカルギアについては, NimbRo-OP2X の公開されている CAD データをそのまま利用して作成した.

Pelvis link については、ロボット全体の基準となり、変形を避けるべき部位であることから、厚さ 10mm のアルミ板(A5052)の切削加工により制作した。

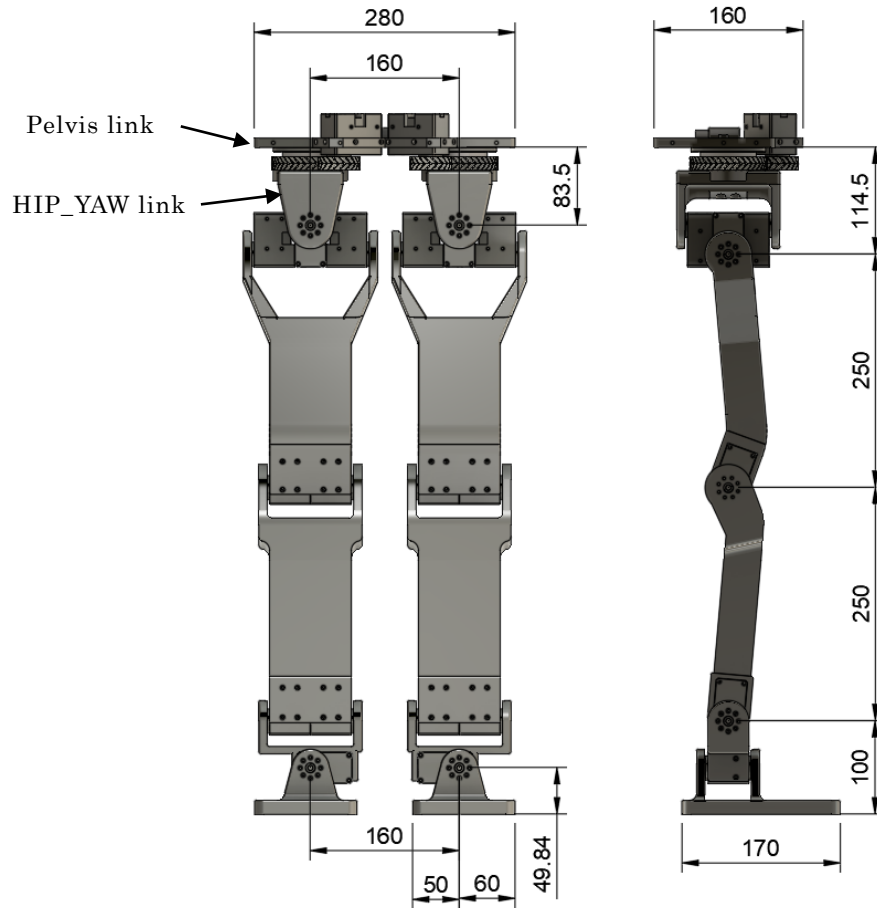


Figure 3. Leg design

2.3. 股関節剛性の改善

2 足歩行ロボットの股関節には歩行中に大きなモーメントが作用し、塑性変形や破壊などのトラブルの温床となることが多い。本研究でも当初の試作モデルにおいて股関節ロール軸の剛性不足のため、片脚直立時に Pelvis link が大きく傾く問題が発生した。そこで股関節の主要部品であるヨー軸とロール軸をつなぐリンク（以降 HIP_YAW リンクと呼称する）について有限要素法による強度解析を行った。

片脚で体を支持する際、ロボットの上部部分の重量を 15kg と仮定すると、左右脚間の距離 160mm から HIP_YAW リンクには 11760Nmm のモーメントが作用する（図 4 左）。当初の設計ではこのモーメントによりリンク先端部に 1.413mm の変形が生ずることが判明した（図 4 中）。これに対し、剛性向上に配慮した HIP_YAW リンクを再設計することにより、変形量を 0.1547mm と約 10 分の 1 にまで減らすことに成功した（図 4 右）。

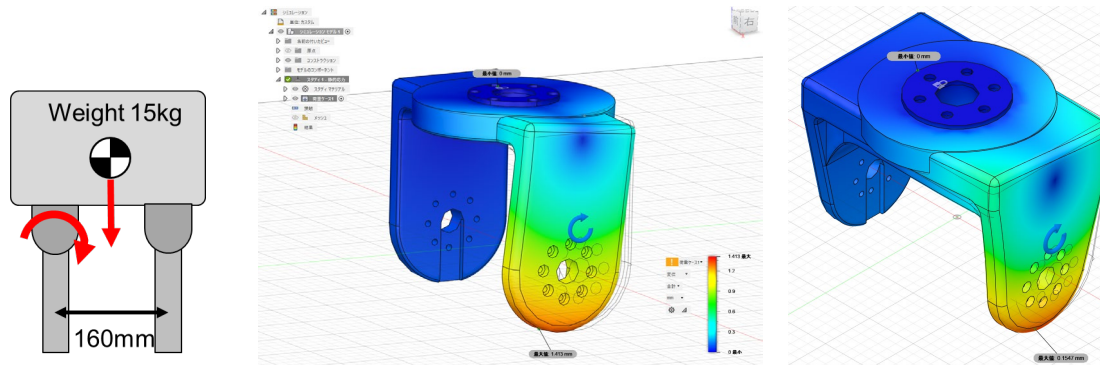


Figure 4. HIP_YAW link. Left: Moment generation, Center: Original design, Right: Improved design

剛性向上のための改良点を図 5 に示す. 見やすくするため HIP_YAW リンクの上下を反転して示しており, 図の下が Pelvis link 側となり, 股関節ロール軸を保持する 2 枚の板が上に突き出た形となっている. 単純なコの字型形状であった当初設計 (図 5 左) に対し, モーメントを受ける板部分を台形に変更し, 厚みを増やした上で剛性向上のため 2 枚の板をつなぐリブ構造を追加した (図 5 右).



Figure 5. Improvement of the HIP_YAW link. Left: Original, Right: Redesigned structure

2.4. ChuBot-1 の制御システム

ChuBot-1 下半身部分の制御システムを図 6 に示す. 片脚 6 自由度を 10 個の XM540 によって駆動している. XM540 は電力と信号を伝送する 4 ピンのコネクタを 2 個備えており, デイジーチェーン接続と中継ボード(DX Sharing Board) により, 省配線で制御システムを構築することができる. 中継ボードは電源供給のハブの役割も担っている.

2 足歩行において特にトルクが必要となる股関節ロール軸、ピッチ軸, 膝関節, 足首関節ピッチ軸にはそれぞれ 2 個の XM540 を配置し, 同期して 1 つの関節を駆動する Dual mode で使用した. Dual mode では, 2 つのモジュールを専用ケーブルで接続し, 一方を Master、一方を Slave にモード設定する. な

お, 出力軸が機械的に結合していない状態で Dual mode の動作をさせるとサーボが発散してモータを焼損する事故が発生した. 組立段階で動作テストを行う場合には注意が必要である.

制御用コンピュータには Intel NUC を用い, USB ポートを介してサーボモジュールとの通信を行う. USB を RS485 に変換するために用いた USB-COM485-PLUS4 は, 4 系統の RS485 ケーブルを接続することができ, 右脚, 左脚をそれぞれ割り当てた. 残る 2 系統は今後右腕と左腕用に使用する予定である.

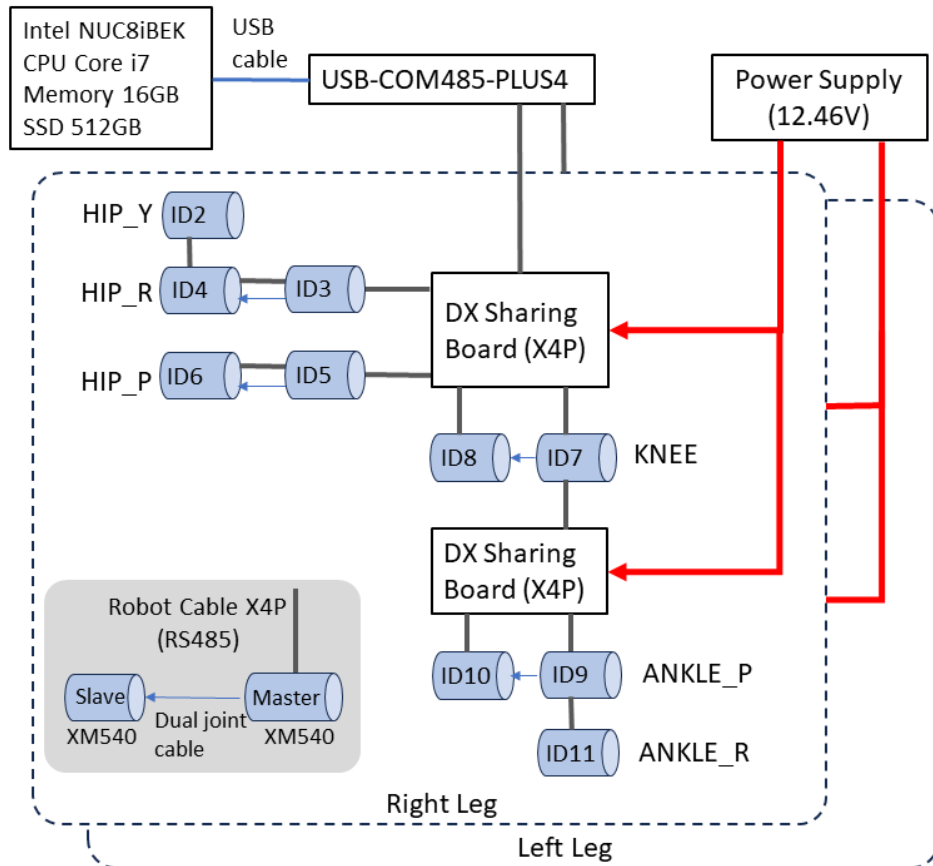


Figure 6. System block diagram

3. 歩行動作テスト

試作したロボット下半身部分の機能を確認するため, 設計データに基づいて 2 足歩行パターンを生成し, 歩行動作のテストを行った.

3.1. 歩行パターンの生成

歩行実験に用いる歩行パターンを生成するため, CAD データを用いて URDF モデルデータを作成した. このデータを MATLAB の Robotics System Toolbox を用いて読み込むことにより, ロボットモデルに関する順運動学, 逆運動学などを計算することができる. 2 足歩行パターンを生成するため最初に足先の軌道を図 7 のように作成する.

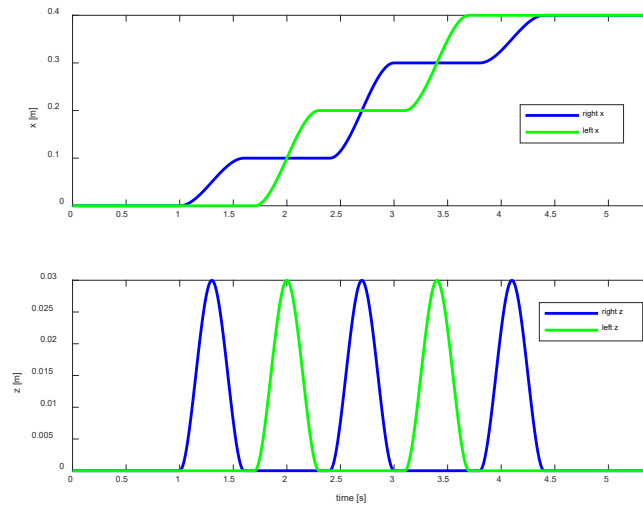


Figure 7. Foot trajectories. Top: travel direction, Bottom: vertical direction

このグラフでは一歩 10cm で 4 歩前進するための足（フット）の動きを 3 次スプライン曲線で計画している。グラフの上段が前進方向(x 軸), 下段が鉛直方向(z 軸)の変位であり, 青が右足, 緑が左足の動きを表す。単脚支持期間を 0.6s, 両脚支持期間を 0.1s としているので一歩が 0.7s, 歩行の一周期は 1.4s となる。

次に足部の動きに対応した ZMP（ゼロモーメントポイント）の軌道を計画する。ZMP は歩行中の床反力の作用中心を表す点であり, これに基づいてダイナミックな 2 足歩行運動を計画する手法は 1973 年に Vukobratovic と Stepanenko によって提案された⁴⁾。

床面に固定された座標系において, ロボットの歩行開始から終了までの ZMP 軌道を図 7 の赤線で示す (上段: 進行方向 x 軸, 下段: 左右方向 y 軸)。歩行ロボットのダイナミクスは本来複雑な非線形方程式で表されるが, 脚質量を 0, 重心が直線運動を描くという仮定を置くと, 重心運動に関する線形微分方程式で表現することができ, 与えられた ZMP 軌道を満たす重心軌道を簡単に計算できる⁵⁾。得られた重心軌道が図の黒線で示されている。

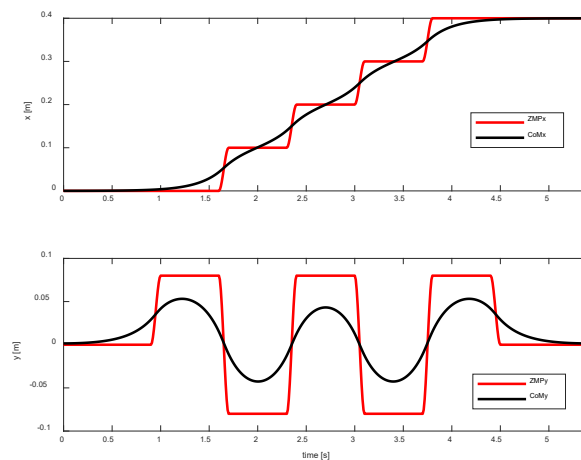


Figure 7. ZMP and Center of mass (CoM) trajectories. Top: travel direction, Bottom: vertical direction

重心軌道と足先の軌道から、逆運動学を用いて得られた脚関節の軌道を図に示す。上段が右脚、下段が左脚の各関節角度の時間変位を表し、各関節の名称は図 2 右の構造図に示したものに対応している。例えば黄色のプロットは膝関節の屈曲を示しており、歩行中に足を持ち上げるための左右交互の膝曲げ動作を読み取ることができる。

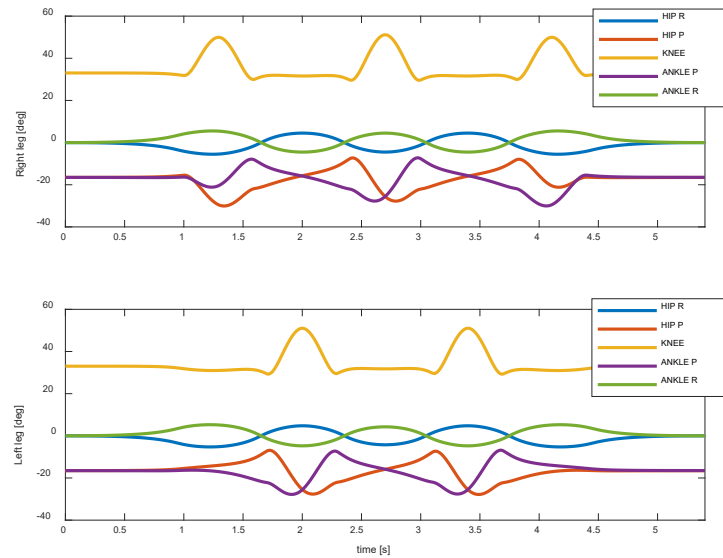


Figure 8. Calculated walking pattern. Top: Right leg, Bottom: Left leg

3.2. 2足歩行実験

組みあがった ChuBot-1 の下半身部分は床面から Pelvis link 上面までの高さが 62.5cm、重量 6.5kg となった。歩行実験では転倒時の破損防止のため介護用リフターを用い、Pelvis link をベルトスリングでつないだ状態で行った (図 9)。実験中はベルトスリングが緩んだ状態を維持し、歩行するロボットがリフターによる補助を受けないよう留意した。



Figure 9. ChuBot-1 and the lifter

前節の手法で生成した一歩 10cm の歩行パターンに基づく関節角度を 10ms 毎にロボットのアクチュエータに送ることで 2 足歩行を実現した。ロボットは転倒することはなかったものの、特に歩行停止時に大きな振動が見られた。今後、姿勢センサおよび力センサによる安定化制御を追加することにより停止時の振動を改善する予定である。

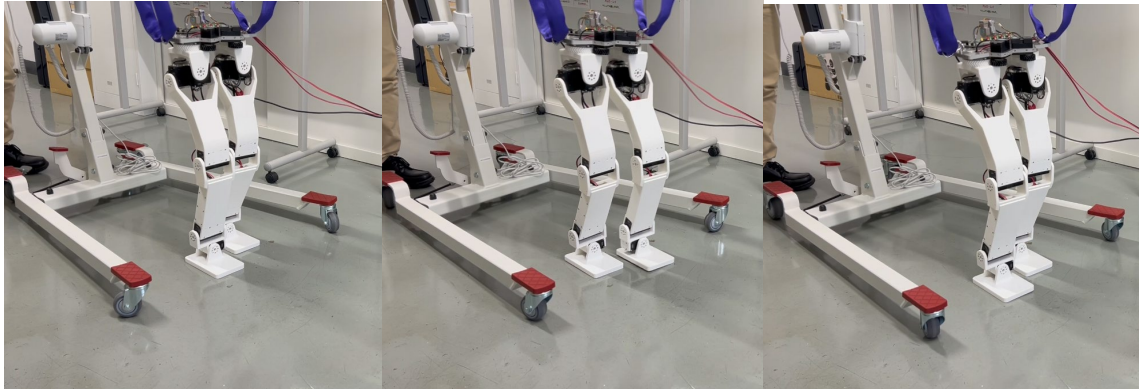


Figure 10. Biped walking experiment

4. おわりに

本報告では、研究開発のプラットフォームとして用いる子供サイズのヒューマノイドロボットの下半身部分の開発と歩行実験について述べた。

従来、人間サイズのヒューマノイドロボットを制作する際には、1 関節毎に配置されたサーボモータ、サーボドライバとエンコーダカウンタボードや各種インタフェースボードの配線で接続するために長時間の作業と、一定規模の開発チームが必要であった。しかし近年普及しているモジュール化された部品を利用することにより、小規模な大学研究室の予算と人的リソースであっても、人間サイズのヒューマノイドロボットが開発可能であるという見通しが得られた。

今後、上半身の開発を進め、日常生活環境における多様な動作実験を行える子供サイズのヒューマノイドロボットを目指してゆく。図 11 はシミュレーション環境において、ドア通過を行う ChuBot-1 である。このような実験が早期に行えるよう引き続き開発を行ってゆく所存である。

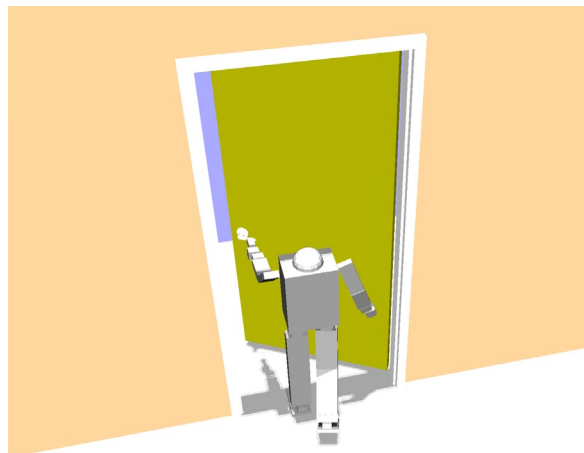


Figure 11. Door passing simulation

謝辞

本研究は中部大学先端研究センター 2023 年度プロジェクト 5、および日本学術振興会科学研究費助成事業・基盤研究（B）20H02124 の援助を受け遂行されました。ここに謝意を表します。また、ロボット構成部品の 3D プリンティングと機械加工に関し、工学デザインルームの山本芳樹氏、加藤和則氏をはじめとするスタッフの皆様より多大なご助力を頂きました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 森山和道：ロボット共生社会の基礎知識 第 16 回 2024 年はヒューマノイド研究ビッグバン!? 使い道はどこ？
<https://www.jsme.or.jp/career-mech/juniornews-m2404/>, (最終アクセス 2024 年 5 月 6 日)
- 2) G.Ficht, H.Farazi, A.Brandenburger, et al.: NibRo-OP2X: Adult-sized Open-source 3D Printed Humanoid Robot, Proceedings of International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.747-754, 2018.
- 3) Autonomous Intelligent Systems Group, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn,
<https://github.com/NimbRo/nimb-ro-op2>, (最終アクセス 2024 年 5 月 3 日)
- 4) M. Vukobratovic and J. Stepanenko, On the Stability of Anthropomorphic Systems, Mathematical Biosciences, 15(1), pp.1-37, 1972.
- 5) 梶田秀司編著: ヒューマノイドロボット 改訂 2 版, オーム社, 2020.