

# 3M3D ワイヤ干渉駆動に基づくヒューマノイド腰関節の開発

Yiwei Wang<sup>\*1</sup> 李 文揚<sup>\*2</sup> 東 郷 俊 太<sup>\*1\*2</sup>  
横 井 浩 史<sup>\*1\*2</sup> 姜 銀 来<sup>\*1\*2</sup>

## Development of a Humanoid Waist Based on 3M3D Coupled Tendon Drive

Yiwei Wang<sup>\*1</sup>, Wenyang Li<sup>\*2</sup>, Shunta Togo<sup>\*1\*2</sup>,  
Hiroshi Yokoi<sup>\*1\*2</sup> and Yinlai Jiang<sup>\*1\*2</sup>

This study proposed a 3-motor 3-degree-of-freedom (3M3D) coupled tendon-driven humanoid waist, which has motion characteristics similar to the human. Based on the variability of balancing moment requirements due to differences in the range of motion (ROM) of each degree of freedom (DOF) of the waist, we designed a suitable motor-joint routing form for the waist. Accordingly, the structural design of the waist was conducted. Performance evaluation experiments were conducted, and the results of the maximum static torque experiment showed that the maximum static torque values of 22.2 [Nm], 87.0 [Nm], and 53.0 [Nm] for yaw, pitch, and roll, respectively. Repetition accuracy evaluation experiments and accuracy evaluation experiments at different velocities showed that the motion velocity has a certain effect on the accuracy, however, the waist has a good repetition accuracy.

**Key Words:** Humanoid Waist, Coupled Tendon Drive, Robotic Mechanism

### 1. はじめに

ヒューマノイドロボットは、人間の外観や動きを模倣することで、人間とのインタラクションや、人間のサポート、失った肢体の一部の機能を代替ができ、様々な場面での需要が高まっている。ヒューマノイドロボットは、頭、アーム/手、胴体、脚（または車輪）の四つのパーツに分かれ、手 [1] [2]、腕 [3] [4]、脚 [5] の研究開発は多く発表されている。一方、胴体に関する研究発表は比較的少ない。胴体はヒューマノイドロボットの核となる部分であり、胴体の可動域は手先の可動域に大きく影響するため、多自由度腰関節を持つ胴体は、人間の胴体の動きの再現に不可欠である。腰関節は、ロボット上半身の重量を支えながら動作する必要があるため、高トルクが設計のポイントになる。また、ヒューマノイドロボットの用途が日常的なものであることから、安全性も重要な検討事項となっている。

高トルクは、出力の高いアクチュエータを利用するほか、動力伝達機構の減速比および干渉駆動におけるアクチュエータの駆動率を高めることで実現できる。減速比の高い動力伝達機構としてハーモニックドライブ<sup>®</sup>がよく使われるが、コストが高いという問題がある [6]。ワイヤ駆動は、プーリの半径を変えることで様々な減速比を得られ、長距離の動力駆動も容易であるため、複数のアクチュエータの出力を複数の関節に伝達し干渉

させる干渉駆動の実現に適している。ワイヤ駆動はほかの駆動方式に比べ、小型、軽量、高柔軟性という利点があるが、精度、耐荷重、耐久性で劣る。ワイヤ駆動の精度、耐荷重、耐久性を向上させるため、姜ら [7] は 2 モータ 2 自由度と 3 モータ 3 自由度のワイヤ干渉駆動機構のモジュール化設計法を提案した。

本研究では、人間の身体能力を模倣した高トルクと高可動域を有する 3 自由度ヒューマノイド腰関節の開発を目的とする。減速比と干渉駆動による高トルクを実現するために、ワイヤ干渉駆動を採用した。第 2 章では、腰関節におけるワイヤ干渉駆動のワイヤルーティング形式の設計について述べる。第 3 章では、ワイヤルーティング形式に基づき、腰関節の機構設計について述べる。第 4 章では、開発された腰関節の性能評価実験について述べる。最後に、まとめと今後の展望について述べる。

### 2. ワイヤ干渉駆動形式の設計

本研究では、3 自由度腰関節の開発を目的としたため、その駆動方式として 3 モータ 3 自由度 (3M3D) ワイヤ干渉駆動を選択した。3M3D ワイヤ干渉駆動は、複数のモータで同時にジョイントに力を伝えることができるため、非干渉駆動方式と比較して、モータの駆動率を高めることができ、同じモータでより大きなジョイントトルクが得られる。

#### 2.1 3M3D ワイヤ干渉駆動の解析

Li ら [8] は、Fig. 1 のような 3M3D ワイヤ干渉駆動機構を提案した。3M3D ワイヤ干渉駆動機構の駆動式は以下のように簡略化できる。

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}\mathbf{T}_m \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\theta}_m = \mathbf{A}^T \boldsymbol{\theta} \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{S} \odot \mathbf{R} \odot \mathbf{R}_m \quad (3)$$

原稿受付 2022 年 7 月 12 日

<sup>\*1</sup>電気通信大学大学院情報理工学研究所

<sup>\*2</sup>電気通信大学脳・医工学研究センター

<sup>\*1</sup>Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

<sup>\*2</sup>Center for Neuroscience and Biomedical Engineering, The University of Electro-Communications

■ 本論文は有用性（要素分野）で評価されました。

ここで、 $\mathbf{T} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$  はジョイントトルクベクトル、 $\mathbf{T}_m = [\tau_{m1} \ \tau_{m2} \ \tau_{m3}]^T$  はモータトルクベクトル、 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$  はジョイント角度ベクトル、 $\boldsymbol{\theta}_m = [\theta_{m1} \ \theta_{m2} \ \theta_{m3}]^T$  はモータ角度ベクトルである。行列  $\mathbf{A}$  は motor-joint routing matrix とよばれ、行列  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{R}_m$  のアダマル積である。 $\mathbf{S} = [s_{ij}]_{3 \times 3}$  はモータとジョイントの回転関係行列、 $s_{ij} = 1$  はモータ  $j$  とジョイント  $i$  が同じ方向に回転し、 $s_{ij} = -1$  は反対方向、 $s_{ij} = 0$  は干渉していないことを示している。 $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{3 \times 3}$  はジョイントプリー半径行列、 $r_{ij}$  はジョイント  $i$  上のモータ  $j$  に接続されたプリーの半径を表す。 $\mathbf{R}_m = [1/r_{mj}]_{3 \times 3}$  はモータプリー半径行列、 $r_{mj}$  はモータ  $j$  のプリー半径を表す。

各ジョイントを独立に駆動させる場合、モータトルクとジョイントトルクは次のような関係がある。

$$\begin{bmatrix} \tau_{m1}^1 & \tau_{m1}^2 & \tau_{m1}^3 \\ \tau_{m2}^1 & \tau_{m2}^2 & \tau_{m2}^3 \\ \tau_{m3}^1 & \tau_{m3}^2 & \tau_{m3}^3 \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \tau_1 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_2 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $\tau_{mj}^i$  はジョイント  $i$  を独立に駆動させる場合のモータ  $j$  のトルクである。

## 2.2 腰関節のためのワイヤルーティング形式設計

人間の胴体の運動は三つの方向に単純化でき、各方向の可動域 (ROM) はそれぞれ  $-30^\circ \sim 80^\circ$  (Pitch),  $-35^\circ \sim 35^\circ$  (Roll),  $-45^\circ \sim 45^\circ$  (Yaw) [9], 胴体の最大屈曲速度は  $80^\circ/\text{s}$  である [10]. 各方向の ROM を見ると、Pitch 方向の最大平衡モーメントは Roll 方向の約 2 倍 ( $\sin 80^\circ : \sin 35^\circ = 0.98 : 0.57 \approx 2 : 1$ ) であることが分かる。また、Yaw 方向は重力によるトルクを補償する必要がない。したがって、最大ジョイントトルク比は  $\tau_{\text{pitch}} : \tau_{\text{roll}} : \tau_{\text{yaw}} = 4 : 2 : 1$  として設計した。これに基づき、腰関節の motor-joint routing matrix を以下の

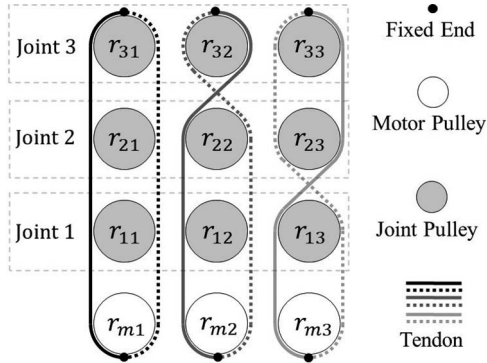


Fig. 1 The 3M3D coupled tendon-driven mechanism

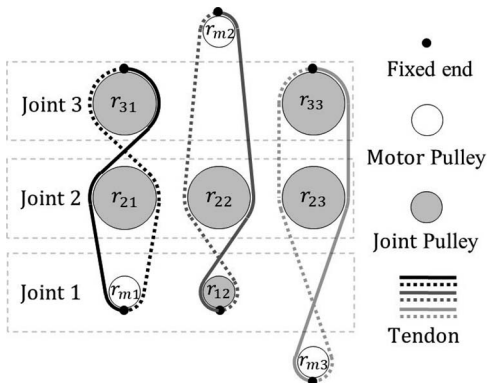


Fig. 2 Tendon routing form of the humanoid waist

ように設計した。

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{S} \odot \mathbf{R} \odot \mathbf{R}_m \\ &= \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 2 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 2 & 2 & -2 \\ -2 & 0 & -2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

式 (4) により、各ジョイントを独立に駆動する場合のモータトルクとジョイントトルクは次のような関係がある。

$$\begin{bmatrix} \tau_{m1}^1 & \tau_{m1}^2 & \tau_{m1}^3 \\ \tau_{m2}^1 & \tau_{m2}^2 & \tau_{m2}^3 \\ \tau_{m3}^1 & \tau_{m3}^2 & \tau_{m3}^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1/3 & \tau_2/6 & -\tau_3/6 \\ -2\tau_1/3 & \tau_2/6 & -\tau_3/6 \\ -\tau_1/3 & -\tau_2/6 & -\tau_3/3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

全モータの定格トルクを  $\tau_r$  とすると、ジョイント 1, 2, 3 を独立に駆動させる場合の最大トルクはそれぞれ  $1.5\tau_r$ ,  $6\tau_r$ ,  $3\tau_r$  であることが分かった。したがって、ジョイント 1, 2, 3 をそれぞれ Yaw, Pitch, Roll 方向に回転するジョイントに対応させることで、腰関節のワイヤルーティング形式は Fig. 2 のように設計された。Fig. 2 から、モータの回転速度を  $v_m$  とすると、ジョイント 1, 2, 3 の回転速度はそれぞれ  $v_m$ ,  $v_m/2$ ,  $v_m/2$  となることが分かる。そこで、胴体の最大屈曲速度から、腰関節の目標速度を  $80^\circ/\text{s}$  とすると、モータの最大回転速度は少なくとも  $160^\circ/\text{s}$  となる。

## 3. 腰関節の機構設計

設計したワイヤルーティング形式に従って、Fig. 3 (a) のような 3 自由度ワイヤ干渉駆動型ヒューマノイド腰関節を開発した。腰関節の寸法は、 $244.5 [\text{mm}] \times 160 [\text{mm}] \times 314 [\text{mm}]$  (縦 \* 横 \* 高さ) である。プリー  $r_{21}$ ,  $r_{31}$ ,  $r_{22}$ ,  $r_{23}$ ,  $r_{33}$  の半径は  $30 [\text{mm}]$ , プリー  $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ,  $r_{12}$ ,  $r_{m3}$  の半径は  $15 [\text{mm}]$ , 中間プリーの半径は  $14 [\text{mm}]$  である。ワイヤは直径  $2.0 [\text{mm}]$ , 引

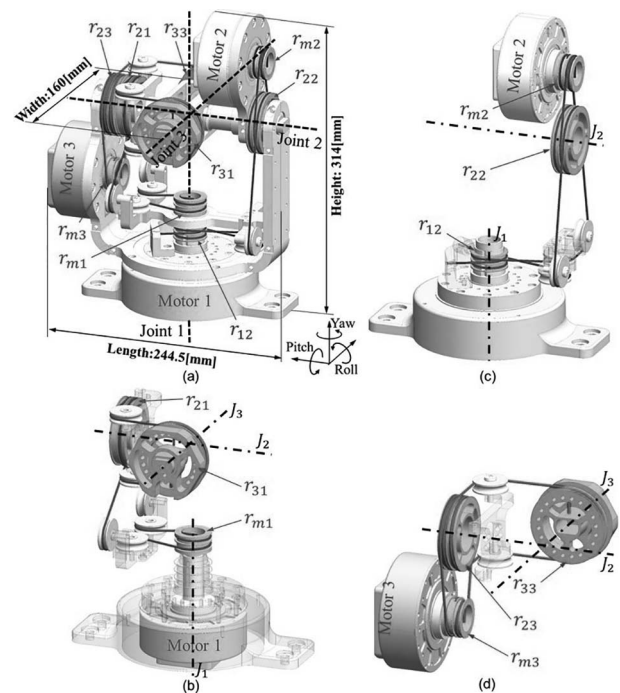


Fig. 3 Mechanical design of the waist. (a) Overall design, (b) Routing design of tendon  $r_{m1} - r_{21} - r_{31}$ , (c) Routing design of tendon  $r_{m2} - r_{22} - r_{12}$ , (d) Routing design of tendon  $r_{m3} - r_{23} - r_{33}$

張り強度は 2,840 [N] のステンレスワイヤ (タイプ: 7\*7\*7) を使用した。

Fig. 3 (b)(c)(d) は、各ワイヤの具体的なルーティングを示している。各ワイヤは、一端がモーターリに固定され、ワイヤルーティング形式に従って対応するジョイントプリーを通過し、最終的に末端ジョイントプリーに固定されるようにルーティングされた。

目標速度を達成し、高トルクを得るために、定格トルク 13 [Nm]、定格速度 1,000 [rpm] のモータ (RMD X8 Pro, MY-ACTUATOR 社製) を選択した。

#### 4. 腰関節の性能評価実験

開発した腰関節の性能を調べるために、性能評価実験を行った。まず腰関節の負荷能力を評価するために最大静的トルク実験を行い、次に腰関節の精度を評価するために、精度評価実験を行った。

##### 4.1 最大静的トルク実験

腰関節は、目標物の重量を支えるだけでなく、胴体、頭、上肢などロボットの上半身の重量を支える必要がある。ジョイントの最大静的トルクは、腰関節の負荷能力を反映している。そのため、腰関節の負荷能力を調べるため、最大静的トルク実験を行った。

最大静的トルク実験は、一つのジョイントを駆動し、その反対側にテンションメーター (FSH-100K-USB, SCHMIDT 社製、測定範囲: 0~1,000 [N]、精度:  $\pm 1.5\%$  F.S.) を接続し、ジョイントが静止する張力値を測定することで、ジョイントの最大静的トルクを算出する。

その結果、ジョイント 1, 2, 3 の最大静的トルクはそれぞれ 22.2 [Nm]、87.0 [Nm]、53.0 [Nm] となった。また、各関節の最大静的トルクはモータの定格トルクの 1.7 倍、6.7 倍、4.1 倍であり、このトルク比はおおよそ理論計算値と一致した。各ジョイントの最大静的トルク値が理論計算値より大きくなった理由は、モータ駆動が妨げられたときに、モータの出力トルクが定格トルクより大きくなるためであると考えられる。

##### 4.2 精度評価実験

一般的に腰関節からロボットハンドまでの距離は長いので、腰関節の精度はハンドの把持精度に大きく影響する。加えてヒューマノイドロボットは作業現場で繰り返し動作が要求されるため、ロボットの関節には高い再現性が要求される。また、腰関節には大きな荷重がかかり、さらに関節運動速度も大きいことから、速度が精度に与える影響を評価する必要がある。

###### 4.2.1 繰り返し精度評価実験

繰り返し精度評価実験は無負荷で行い、具体的な実験手順は以下のようにしている。

1) 設計された動作軌跡に従って腰関節を 5 回繰り返し動作し、磁気式の三次元位置計測システム (LIBERTY, Polhemus 社製) を用いて、軌跡座標 (胴体上部の軌跡) をリアルタイムに記録する。計測システムの分解能は 0.00127 [mm] で、精度は 0.76 [mm] である。

2) 5 回の軌跡座標の平均値を算出する。

$$x_m^j = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 x_i^j, y_m^j = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 y_i^j, z_m^j = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 z_i^j \quad (7)$$

3) 各回の軌跡座標と平均軌跡座標を比較し、軌跡間距離の最大値を繰り返し精度とする。

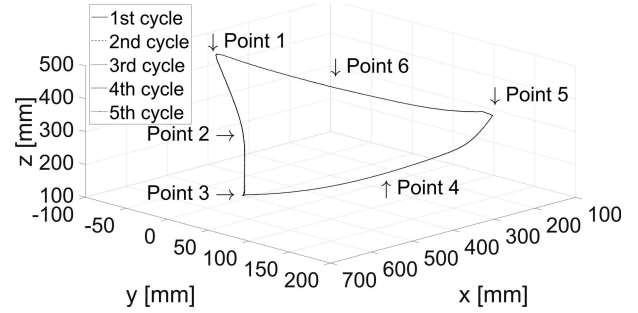


Fig. 4 Motion trajectory of the waist for repetition accuracy evaluation experiment

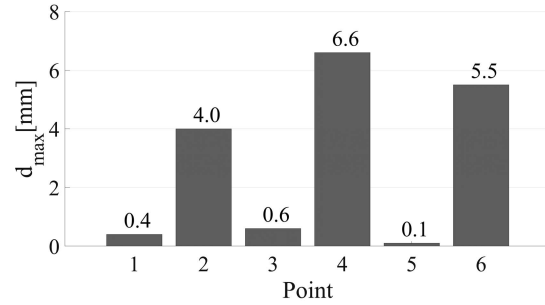


Fig. 5 Result of repetition accuracy evaluation experiments

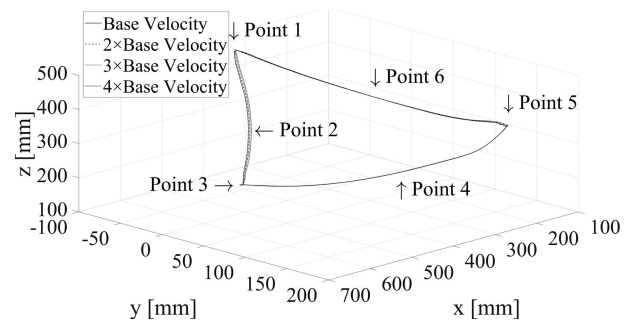


Fig. 6 Motion trajectory of the waist for accuracy evaluation experiment at different velocities

$$d_i^j = \sqrt{(x_i^j - x_m^j)^2 + (y_i^j - y_m^j)^2 + (z_i^j - z_m^j)^2} \quad (8)$$

$$d_{\max} = \max(d_i^j) \quad (9)$$

ここで、 $i$  は軌跡の回数 ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ )、 $j$  は軌跡上  $j^{\text{th}}$  位置点を表す。  $x_m^j, y_m^j, z_m^j$  は 5 回平均軌跡座標である。  $x_i^j, y_i^j, z_i^j$  は、 $i^{\text{th}}$  回の軌跡座標を示す。  $d_{\max}$  は繰り返し精度を表す。

Fig. 4 は 5 回の軌跡、Fig. 5 は繰り返し精度を示す。その結果、繰り返し精度は 6.6 [mm] 以下であり、特に Point 1, 3, 5 では高精度 (センサの精度に基づいて無視できる程度の偏差である) であることが示された。この結果から、腰関節の繰り返し精度は良好であることが示されたが、停止点 (Point 1, 3, 5) での精度に比べ、動作点 (Point 2, 4, 6) での精度が比較的悪い、これはワイヤの収縮により、動作中の機構の安定性が低いことが主な原因であると考えられる。

###### 4.2.2 異なる速度での精度実験

目標関節最大速度 (80°/s) を踏まえ、実験速度は 20°/s, 40°/s, 60°/s, 80°/s に分類した。本実験の運動軌跡は繰り返し精度実験の軌跡とし、異なる速度での軌跡点を基準速度での軌跡点と比較し、精度を評価した。

Fig. 6 と Fig. 7 は実験結果の比較である。この結果から、速

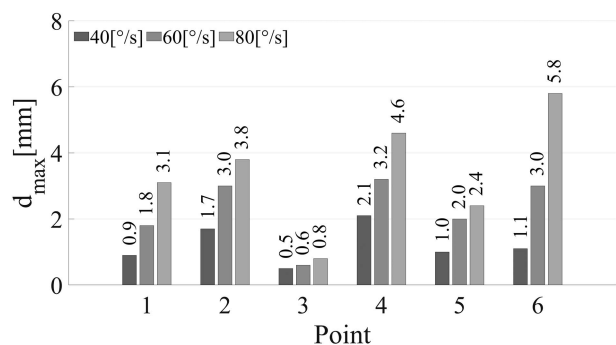


Fig. 7 Result of accuracy evaluation experiments at different velocities

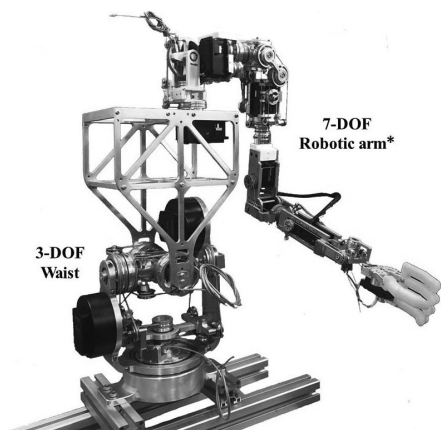


Fig. 8 Robot upper body equipped with the 3-DOF waist developed in this study. \* 7-DOF robotic arm [8]

度が腰関節の精度に大きな影響を与えるが、目標関節速度における精度は5.8 [mm]であったことから、全体の精度は良いことが分かった。急加減速による高い運動慣性が、精度に影響を与える主な原因と考えられている。同時に高い運動慣性は機構に衝撃を与え、機構に永久的な損傷を与える可能性があるが、ワイヤはその伸縮性により、機構への衝撃の一部を分担し、耐久性を向上させることができる。

## 5. まとめ

本研究では、上半身ヒューマノイドロボットの一部として、3自由度の腰関節を開発した (Fig. 8)。開発した腰関節は、既存の腰関節に比べ、高トルクと高可動域を実現した (Table 1)。

腰関節の精度を評価するために、繰り返し精度評価実験と異なる速度での精度実験を行った。実験の結果、速度は精度に影響する (関節速度が大きいほど精度は悪くなり、目標関節速度での精度は5.8 [mm]) が、この腰関節は良好な繰り返し精度 (精度は6.6 [mm] 以下) であることが示された。

一方、このヒューマノイド腰関節は、人間の基本的な身体能力を模倣することができるが、実際の人間の胴体の動きは、本研究の腰関節よりも柔軟な脊椎の動きで実現されている。また、腰関節には大きな負荷がかかり、運動時に大きな運動慣性が発生するため、精度に影響を及ぼすことがあると考えられている。そのため、今後の研究において、人間の胴体をより模倣するために、人間の脊椎の構造を参考として、より多くの動作の可能

Table 1 Comparison of the developed waist with existing waists and human waist

Waist	DOF&ROM*	Maximum Torque* (Nm)
Human waist [9]	P: -30 ~ 80 R: -35 ~ 35 Y: -45 ~ 45	-
WABIAN-2 [11]	R: -16 ~ 16 Y: -180 ~ 180	R: 70.4 Y: 23.5
iCub [5]	P: -10 ~ 90 R: -90 ~ 90 Y: -60 ~ 60	P: 45.8 R: 30.1 Y: 27.2
Developed waist	P: -30 ~ 60 R: -30 ~ 30 Y: -90 ~ 90	P: 87.0 R: 53.0 Y: 22.2

\* P: Pitch, R: Roll, Y: Yaw

性を持つヒューマノイド脊椎構造を設計する予定である。また、精度を機械的に向上させるためには、重力補償機構を付加することが必要であると考えている。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP23H03785, JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2131 および、立石財団、競輪の補助を受けて実施した。

## 参考文献

- [1] W. Ryu, Y. Choi, Y.J. Choi and S. Lee: "Development of a Lightweight Prosthetic Hand for Patients with Amputated Fingers," Applied Sciences, vol.10, no.10, 3536, 2020.
- [2] C.D. Santina, C. Piazza, G. Grioli, M.G. Catalano and A. Bicchi: "Toward Dexterous Manipulation With Augmented Adaptive Synergies: The Pisa/IIT SoftHand 2," IEEE Transactions on Robotics, vol.34, no.5, pp.1141-1156, 2018.
- [3] H. Yang, Y. Yan, S. Su, Z. Dong, S. Haseeb and U. Hassan: "LWH-Arm: A Prototype of 8-DoF Lightweight Humanoid Robot Arm," 3rd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS), pp.6-10, 2019.
- [4] 姜銀来, 李文揚, 陳鵬, 東郷俊太, 横井浩史: "モジュール化したワイヤ干渉駆動型ヒューマノイド・ロボットアーム", 日本ロボット学会誌, vol.38, no.7, pp.657-666, 2020.
- [5] A. Parmiggiani, G. Metta and N.G. Tsagarakis: "The Mechatronic Design of the New Legs of the iCub Robot," 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.481-486, 2012.
- [6] S.-H. Yun, J. Seo, J. Yoon, H. Song, Y.-S. Kim and Y.-J. Kim: "3-DOF Gravity Compensation Mechanism for Robot Waists with the Variations of Center of Mass," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3565-3570, 2019.
- [7] 姜銀来, 李文揚, Yiwei Wang, 東郷俊太, 横井浩史: "ワイヤ干渉駆動とそのモジュール化設計", 日本ロボット学会誌, vol.39, no.9, pp.803-806, 2021.
- [8] W. Li, P. Chen, D. Bai, X. Zhu, S. Togo, H. Yokoi and Y. Jiang: "Modularization of 2- and 3-DoF Coupled Tendon-Driven Joints," IEEE Transactions on Robotics, vol.37, no.3, pp.905-917, 2021.
- [9] H.M. Clarkson: Musculoskeletal Assessment: Joint Range of Motion and Manual Muscle Strength. Lippincott Williams & Wilkins, 2000.
- [10] T. Consmüller, A. Rohlmann, D. Weinland, C. Druschel, G.N. Duda and W.R. Taylor: "Velocity of Lordosis Angle during Spinal Flexion and Extension," PLoS ONE, vol.7, no.11, e50135, 2012.
- [11] A. Musa, M. Omer, et al.: "Development of a humanoid robot having 2-dof waist and 2-dof trunk," IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.333-338, 2005.