

[研究助成 (C)]

身体動作と感情の再現を目指すヒューマノイドロボットの開発

2227002



研究代表者
(助成金受領者)
共同研究者

電気通信大学 大学院
情報理工学研究科
電気通信大学 大学院
情報理工学研究科

博士後期課程
教授

WANG YIWEI
姜 銀 来

[研究の目的]

本研究の目的は、人間らしい身体動作と感情表現の再現を目指し、ヒューマノイドロボットにおける体幹の動作表現に適した機構を設計・構築することである。体幹は、日常的な動作における姿勢制御や動作の滑らかさに寄与するだけでなく、前屈・後屈・側屈・ねじれといった豊かな動きにより、人間の感情や意図を視覚的に伝達する重要な部位である。にもかかわらず、従来のヒューマノイドロボットでは、四肢の動作に比べて体幹の表現力は限定的であり、その構造や設計には十分な検討の余地がある。

本研究では、ロボットの体幹を単なる関節の連結としてではなく、「身体表現の中心としての構造」として捉え、人間の体幹が持つ柔軟性・可動性・連続性に着目した機構の設計を行う。特に、感情や内面的状態を反映するような姿勢変化を再現可能とするために、従来の剛体的な関節構成に加え、柔軟構造やワイヤ駆動、干渉駆動、重力補償の導入も検討する。

具体的な研究項目としては、

- (1) 人間の体幹動作における構造的特徴の分析
(関節配置、可動範囲、動作の滑らかさなど)、
- (2) これらの特徴を模倣するためのロボット体幹の機構構成および可動部の設計、
- (3) 開発したロボット体幹の性能評価および上半身動作の確認、

の3点を柱とし、人間らしい動作表現を可能に

する体幹の機構設計手法の確立を目指す。

本研究を通じて、ロボットにおける体幹動作の表現力を向上させ、将来的には人間との自然な非言語的コミュニケーションを支える身体的基盤技術の構築に貢献することを目的とする。

[研究の内容、成果]

1. 人間の体幹動作における構造的特徴の分析

1.1. モデル解析に基づく脊椎関節の最適分割数

ヒューマノイドロボットの脊椎モデル設計において、関節の分割数が曲線の滑らかさおよび形状の一貫性に与える影響を分析し、最適な分割数の選定を目的とした。

脊椎構造の全長を 450 mm とし、これを 1～10 分割してモデル化した(図1)。各分割は等長・等角で回転し、全体の回転角度は 90° に統一した。各モデルにおける隣接する曲線間の類

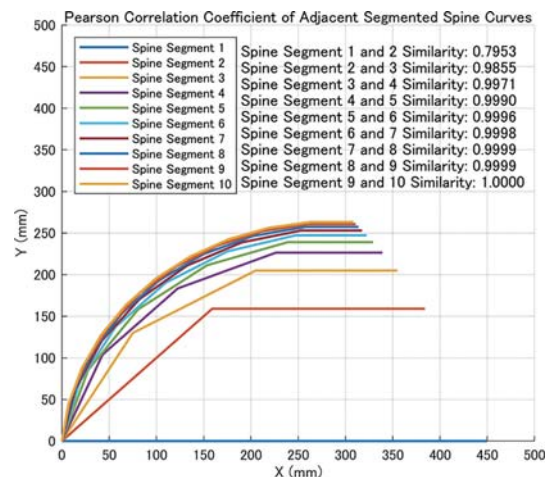


図1 隣接する脊椎セグメント間のピアソン相関係数

似度については、Pearson の相関係数を用いて定量的に評価を行った。

その結果、分割数が増加するほど曲線の滑らかさと一貫性が向上し、特に分割数が3以上では相関係数が0.99を超え、自然な曲線形状の再現が可能であることが確認された。さらに、分割数が8以上では相関係数が0.9999を超え、非常に高い精度が得られた一方で、それ以降の改善はごくわずかであった。

以上より、動作性能と構造の複雑性とのバランスを考慮すると、脊椎関節の分割数は3~7の範囲が最適であると判断される。

1.2. 体幹の自由度・可動域の設計

人間の体幹姿勢を参考に、ロボット体幹はPitch, Roll, Yaw の3自由度で設計した。それぞれ、Pitch は屈曲・伸展, Roll は側屈, Yaw は回旋動作に対応する。特に Pitch 方向については、脊椎関節の最適分割数に関する分析結果に基づき、3分割構造を採用したことで、自然な動作表現と構造・制御の単純化の両立が可能となり、さらに重力補償機構の適用にも適していることが確認された。本設計の概要を図2に示す。

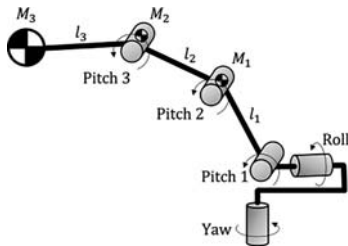


図2 ロボット体幹の自由度設計

可動域は構造と干渉の関係から制限されるため、人間に近い動作を実現しつつ、コンパクトな設計となるよう設定した。本研究では、Pitch 方向は $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ （各関節は $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ）、Roll 方向は $-25^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 、Yaw 方向は $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ とした。この構成により、体幹の柔軟性と自然な動作表現を両立している。

2. ロボット体幹の機構構成および可動部の設計

2.1. 全体設計

図3に開発したロボット体幹の構造を示す。体幹は3つの Pitch 自由度、1つの Roll 自由度、1つの Yaw 自由度を持ち、Pitch 1, Roll, Yaw の回転軸は1点で交差する。寸法は $320 \times 188 \times 650.5$ mm（長さ×幅×高さ）、Pitch 1~3 リンクはいずれも長さ150 mmで、可動部全体の長さは450 mmである。

本体幹は、3モータによるワイヤ干渉駆動機構、3リンクの連結機構、バネ・ワイヤー・プーリーによる重力補償機構の3要素で構成される。干渉駆動機構は Pitch 1, Roll, Yaw を相互に干渉させて駆動し、連結機構は Pitch 1~3 の動作をワイヤで連動させる。

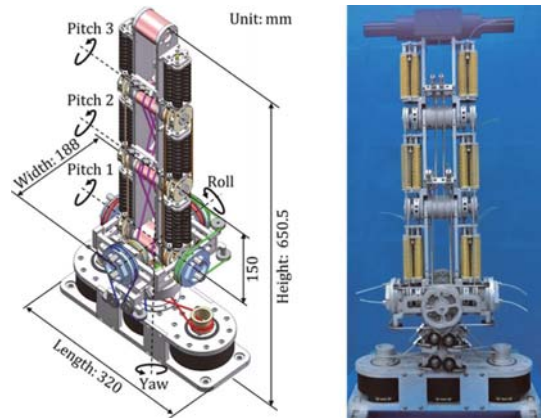


図3 ロボット体幹の全体設計

2.2. 3モータ3自由度ワイヤ干渉駆動機構

図4に示すように、設計した3モータ3自由度ワイヤ干渉駆動システムをロボット体幹に実装した。3つのモータはすべて基部に固定され、モータ3はYaw関節と同軸、モータ1・2はその両側に配置している。

モータプーリーと関節プーリーは、中間プーリーとワイヤを用いて接続されており、一部のプーリー径は25 mm、残りは50 mmである。中間プーリーには直径17 mmのステンレスベアリングを用い、ワイヤにはSUS304製のナイロン被覆付きステンレスワイヤ（線径2.0 mm、引張強度2840 N）を使用し、サーキュラースリーブで固

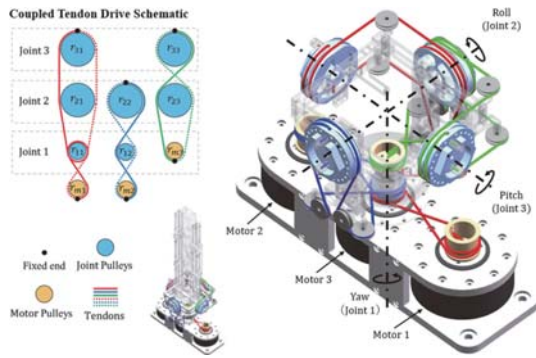


図4 3モータ3自由度ワイヤ干渉駆動構成

定した。モータはRMD-X8 Proを採用し、構造部品はアルミニウム合金7075製である。

2.3. 3リンク連結機構

ロボット体幹の動作をより人間に近づけるため、Pitch方向を3自由度（Pitch 1～3）に分割した。しかし、自由度の増加に伴い、モータ数の増加や構造の複雑化が課題となる。

そこで、人間の脊椎のように各関節が連動して動作する仕組みに着目し、3つのPitch関節をワイヤとプーリで連結する3リンク連結機構を設計した（図5）。この機構では、Pitch 1の回転がPitch 2, Pitch 3へと伝達され、3つの関節が同時に等角で回転するよう構成している。

プーリ半径はすべて同一とし、機構は体幹中央部に配置した。ワイヤ固定にはサーキュラースリーブPT-75-3を使用し、張力調整のために中空ボルトによる調整機構を組み込んでいる。

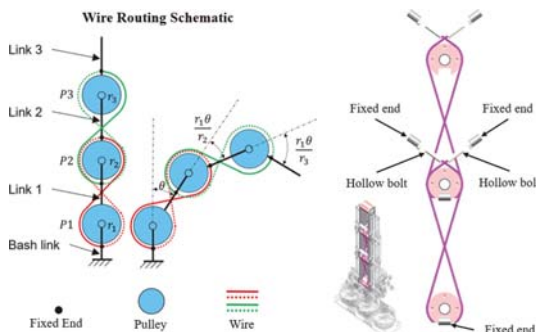


図5 3リンク連結機構の構成

2.4. バネ・ワイヤ・プーリ系重力補償機構

2.4.1. 新たな重力補償機構の提案

一般的な重力補償機構は、関節の回転をバネに伝達し、バネの反力によって重力を打ち消す構造を持つ。本研究では、ワイヤ、プーリ、バネを組み合わせた新たな重力補償機構を提案し、n-link-1-DOF（Pitch）ロボットだけでなく、n-link-2-DOF（Pitch-Roll）平行型ロボットにも適用可能であり、理論上は完全な重力補償が実現できることを示した（図6参照）。

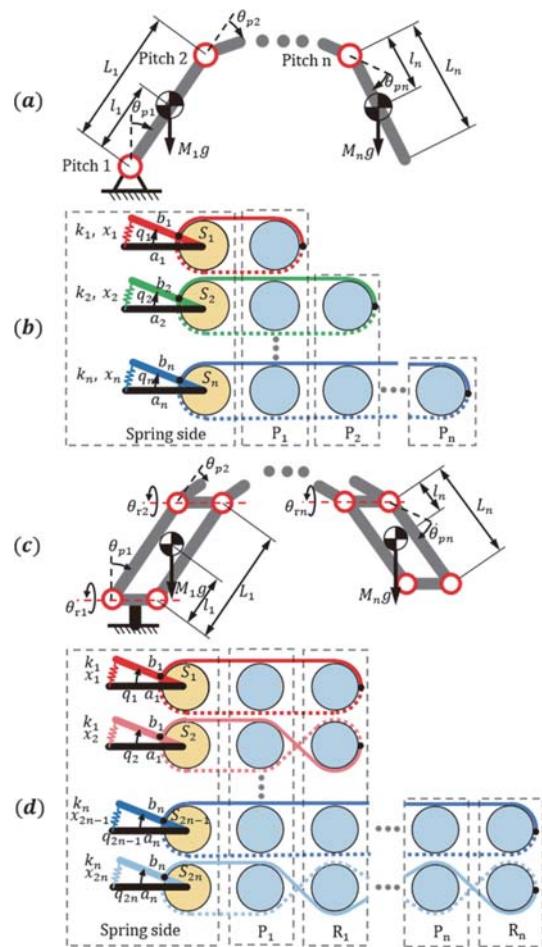


図6 (a) n-link-1-DOF ロボットシステム、と (b) その重力補償機構のワイヤ配線図；(c) n-link-2-DOF 平行型ロボットシステム、と (d) その重力補償機構のワイヤ配線図

この機構では、関節とバネをワイヤとプーリで特定のルーティング形式で連結し、関節の回転角とバネの変位との間に一定の関係を持たせることで、安定した補償動作を可能にしている。

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{p1} \\ \theta_{p1} + \theta_{p2} \\ \vdots \\ \theta_{p1} + \dots + \theta_{pn} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_{2n-1} \\ q_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{p1} + \theta_{r1} \\ \theta_{p1} - \theta_{r1} \\ \vdots \\ \theta_{p1} + \theta_{r1} + \dots + \theta_{pn} + \theta_{rn} \\ \theta_{p1} - \theta_{r1} + \dots + \theta_{pn} - \theta_{rn} \end{bmatrix}$$

関節が異なる回転角にあるとき、ロボットシステムの総位置エネルギーが一定であれば、ロボットシステムの重力は完全に補償されていると考えられる。

$$V_T = V_g + V_k = \sum_{i=1}^n M_i g h_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n k_i x_i^2 = \text{const.}$$

以上、ロボットシステムが完全に静的平衡を達成するために、全てのバネのバネ定数が算出できる。

2.4.2. 重力補償機構のロボット体幹への適用

提案した重力補償モデルに基づき、図7に示すようなロボット体幹用の重力補償機構を設計した。本機構は、1つの Roll 自由度と3つの Pitch 自由度に対して同時に重力補償が可能である。補償バネは体幹方向に沿って左右対称に配置されており、重心位置の最適化とバランス性能の向上に寄与している。

ワイヤは Roll 関節から中間プーリを介して Pitch 方向に伝達され、各 Pitch 関節と連動するようにルーティングされている。バネ側では、ワイヤを複数のプーリに巻き付けて末端に固定し、中空ボルトによる張力調整機構を備えている。

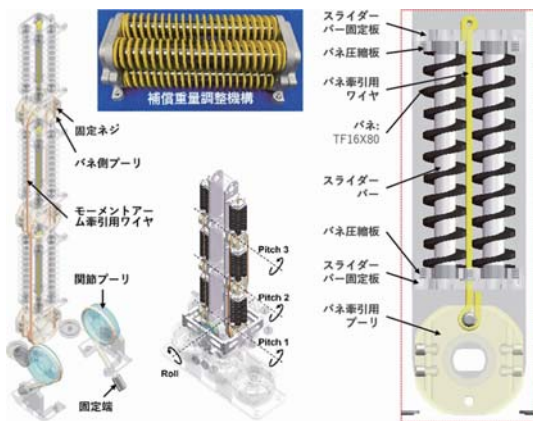


図7 重力補償機構の構成

また、バネモジュールはスライドバー付きの圧縮機構で構成され、バネの動作を軸方向に制限することで、安定したエネルギー伝達を実現している。バネの本数は動作条件に応じて調整可能であり、負荷に応じた柔軟な補償力の設定が可能である。

2.5. 性能評価および上半身動作の確認

2.5.1. 重力補償率

ロボット体幹の重力補償性能を評価するため、外部トルクを直接測定し補償率を算出する手法を採用した。図8に示す実験装置では、Pitch 軸を中心とした半径 150 mm のガイドプーリを 3D プリンタで作製し、ワイヤの作用点を一定に保つことで正確なトルク計測を可能とした。駆動ワイヤはガイドプーリから中間プーリを経由して、引張圧縮試験機 (SVZ-200NB-100R3) に接続されており、体幹の動作中に張力をリアルタイムで測定できる構成とした。

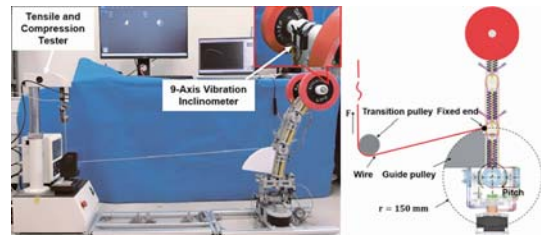


図8 重力補償測定実験の実験様子

実験では 5 kg の荷重を用い、Pitch 方向 ($90^\circ \rightarrow 0^\circ$) および Roll 方向 ($25^\circ \rightarrow 0^\circ$) の動作に対して、3つの条件 (① 補償なし, ② 重力補償のみ, ③ 重力補償+重量調整) で張力を測定した。得られた張力 F とプーリ半径 r を用いて関節トルク $\tau = F \cdot r$ を算出し、補償率 $\sigma = ((\tau_0 - \tau_c) / \tau_0) \cdot 100\%$ で評価した。ここで、 τ_0 は補償機構なしのトルク、 τ_c は補償機構ありのトルクである。

図9に示す通り、Pitch および Roll 関節のどちらにおいても、重力補償機構を動作させることで関節トルクが大幅に減少し、補償効果が確認された。さらに重量調整機構を併用することでトルクはさらに低減したが、摩擦の影響によ

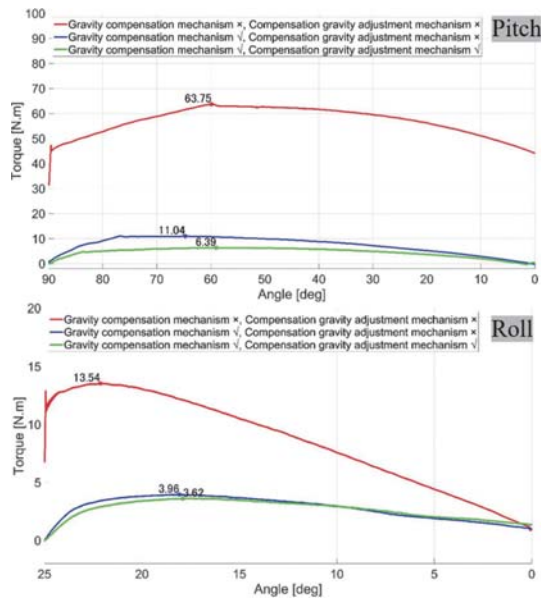


図9 重力補償率測定実験の実験結果

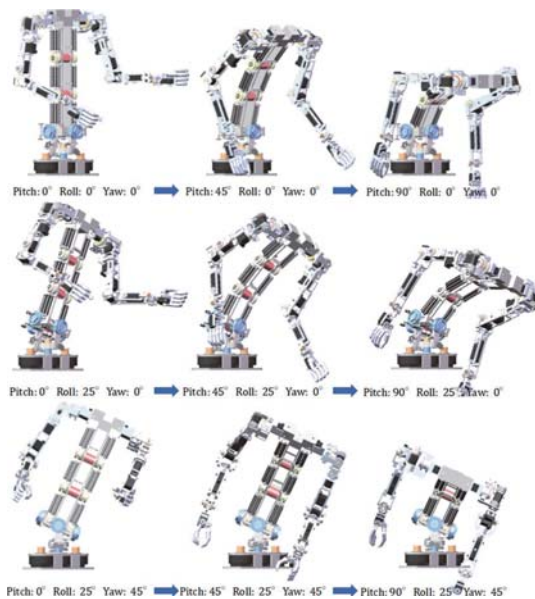


図10 体幹の姿勢変化における動作確認

りゼロには至らなかった。

補償率は、補償機構のみ動作時で Pitch 関節 82.7%, Roll 関節 70.8%, 重量調整併用時には全関節のトルクが 7 Nm 以下に抑えられ、特に Pitch 関節では 90.0% の補償率を達成した。

2.5.2. 上半身動作確認

図 10 に、SolidWorks 上で実施したロボット上半身の動作シミュレーション結果を示す。体幹は Pitch, Roll, Yaw の 3 自由度を有し、それぞれの関節に対して段階的に角度を変化させ

ることで、全 9 パターンの姿勢を再現している。

各自由度は目標角度に対して正確に追従しており、連続的な動作も滑らかに実現されていることが確認できた。本結果から、提案した多自由度体幹構造がシミュレーション上において正常に機能していることが示された。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では、ロボット体幹の多自由度構造と重力補償機構の有効性をシミュレーション上で確認した。今後は実機への動作実験を通じて、摩擦やワイヤのたるみなど、実環境での影響を評価する必要がある。

また、補償機構の他部位との連携動作の検討に加え、人との協調動作を見据えた自然な動作設計や印象評価も今後の課題である。

[成果の発表、論文など]

- [1] **Wang Yiwei**, 李文揚, 東郷俊太, 横井浩史, 姜銀来: 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, 日本ロボット学会誌, 42 巻 1 号, pp. 78-81, 2024.
- [2] **Wang Yiwei**, 東郷俊太, 横井浩史, 姜銀来: 汎用性の高いバネ・ワイヤー・プーリー系重力補償機構の提案, 第 42 回 日本ロボット学会学術講演会, 2024.