

多様な身体動作が可能な芯まで柔らかいぬいぐるみロボット

高瀬 裕^{*1} 山下 洋平^{*1} 石川 達也^{*2}
椎名 美奈^{*2} 三武 裕玄^{*1} 長谷川 晶一^{*1}

Stuffed Toy Robot Soft to the Bone with Various Body Motions

Yutaka Takase^{*1}, Youhei Yamashita^{*1}, Tatsuya Ishikawa^{*2},
Mina Shiina^{*2}, Hironori Mitake^{*1} Shoichi Hasegawa^{*1}

Abstract – Recently, robots are more and more utilized in entertainment area. Stuffed toy robots or pet-like robots are developed to entertain or to heal people with intimate touch interactions. Softness of the robot is important for comfort in such interactions. However, most entertainment robots with expressive body motions include hard structures to actuate body, and they cause rough feelings in touch or hugging interactions. In this paper, we propose the soft-to-the-bone robot looks like a stuffed toy, driven by a novel mechanism made by a fabric material and pulling strings. The robot has large movable range and move speedy enough for various body motion expressions. Moreover, the proposed robot is evaluated to have more familiar and comfort impressions than conventional hard stuffed toy robots.

Keywords : Entertainment Robot, Stuffed-toy, Wire Driven Mechanism, Soft Mechanism

1 はじめに

近年、人とインタラクションを行い、利用者を楽しませたり、心身に癒しを与えるエンタテインメントロボットが実用化されている。こうしたロボットは様々な行動を表現したり、ジェスチャや踊りなどの身体動作表現を行って人々を楽しませる。また、ぬいぐるみや、ペット等の実際の動物を模倣することで、触れ合う・抱くなどの直接的なインタラクションを行わせるものも登場しており、生活の中で楽しさを提供する媒体として期待される。

こうしたロボットの多くは、多様な身体動作を実現するために可動部が硬い機構で構成される。硬い機構は実際の動物の外見を模したペットロボットや、ぬいぐるみを模したぬいぐるみロボットにおいては、その外見に反した触り心地によって違和感が生じ、ロボットとのインタラクションを敬遠する要因となりかねない。Harlowによる赤毛ザルの子供を用いた実験[1]や、浜田らによる高齢者を対象にした調査[2]によれば、肌触りの良さや柔らかさが人との親和性を高める要因であることが示唆されており、直接的な触れ合いの対象となるエンタテインメントロボットにおいて触感の柔



図1 実現したぬいぐるみロボット
Fig.1 Stuffed Toy Robot

らかさは実現すべき要素であると考え。また、硬い機構では小さい子どもがぬいぐるみのように扱うと破損や事故を引き起こしかねず、慎重な取り扱いが要求される点も問題となる。

以上より、本論文ではぬいぐるみの外見に反しない柔らかさを持った柔軟機構と、それを用いた、ぬいぐるみ同様の手触りと柔らかさを持ち、多様な身体動作が可能な、芯まで柔らかいぬいぐるみロボットを提案する。

実現したぬいぐるみロボットの外観を図1に示した。本ぬいぐるみロボットは、可動部を布・糸・綿の繊維素材のみで構成したワイヤ駆動機構を用いることで、ぬいぐるみらしい柔らかさと手触りを保ったまま、身体動作表現に十分な可動範囲・速度・再現性を持った動

^{*1}東京工業大学 精密工学研究所

^{*2}電気通信大学 知能機械工学研究科

^{*1}Tokyo Institute of Technology Precision and Intelligence Laboratory

^{*2}University of Electro Communications Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems

作が可能である。

以降の章では、まず先行研究を述べ、次に機構の原理および提案ロボットについて詳述する。さらに動作評価実験、印象評価実験を経て提案ロボットの有用性を評価する。

2 先行研究

エンタテインメントロボットには、実際の動物を模したペットロボットや、ぬいぐるみを模したぬいぐるみロボット等が存在し、セラピー分野でも活躍が期待されている。

Sony の AIBO[3] は、犬を模しながら、動作の不自由さや機構の硬さが違和感となることを考慮し、外見にロボットらしさを残した。また、ifoo の ifbot[4] のように、特定の生物を模することなく、ロボットの外見を持ったペットロボットも存在する。

実際の生物の外見に近づけた例としては、タテゴトアザラシを模した PARO[5] がある。これは身近ではない動物をモデルにし、実際の動作とロボットの動きを比較されることを避け、違和感の低減に努めた。

子ぐま型ソーシャルロボット [6] や Huggable[7] は外見をぬいぐるみにした例である。しかし、これらのロボットの内部機構は硬く、ぬいぐるみらしい外見から想像する触感とは異なるものである。

また、PINOKY[8] は実際のぬいぐるみにリング型のデバイスを装着することでぬいぐるみの柔らかさを保ったままユーザとの簡単なインタラクションを可能にする。このデバイスは自分のお気に入りのぬいぐるみを傷つけることなく手軽にインタラクション可能なロボットにすることを目的としているため、多数の可動部を持たせたり、多様な身体動作を行わせることを想定していない。

柔軟なロボットや機構としては、吉海らのヒューマノイドロボットに軟質ウレタンフォームの厚い肉質外装を付けることで、触感を柔らかくし、ロボットの転倒時などの影響を抑えた研究 [9]。や、液体を詰めた袋によるもの [10]、人工筋肉や空気圧を用いた方法 [11]、ゲルアクチュエータ [12] のようにアクチュエータを柔軟にするといった研究がある。

本研究では、人との親和性を考慮したエンタテインメントロボットとして、ぬいぐるみらしい触感と、多様な身体動作を実現することを目的に、ぬいぐるみ本来の素材である布、綿、糸のみを用いたワイヤ駆動機構を用いてぬいぐるみロボットの可動部を構成し、アクチュエータには既存のモータを使用した。

ワイヤ駆動機構は、古くから内視鏡に使用されている [13]。本ぬいぐるみロボットは、可動部外部からワイヤを引き可動部を変形させるという機構をぬいぐる

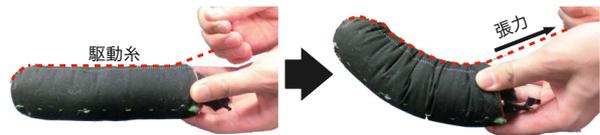


図2 柔軟機構の原理
Fig. 2 Principle of the Soft Mechanism



図3 2つの関節を持つ綿袋の構成
Fig. 3 Cylindrical Cloth Structure that has Two Joints

みの素材を使って実現し、制御を行うものである。

3 柔軟な駆動機構

本章では、ぬいぐるみの持つ柔らかさを保った可動部を実現するための駆動機構について詳述する。

3.1 柔軟な駆動機構の原理

本研究が提案する駆動機構は、ぬいぐるみ本来の素材である糸、布、綿のみで構成される可動部と、それを駆動するアクチュエータ部からなる。機構の原理を図2に示した。布を袋状にして綿を詰めた綿袋の外側に糸を通し、アクチュエータによってその糸（駆動糸）を引き、変形させることを駆動機構の基本原理とする。これにより駆動糸を引くためのアクチュエータ部を柔らかい可動部から離して設置できる。また、綿袋に対して複数の糸を通し、引く糸を選ぶことで任意の方向へ変形させることが可能になる。

本機構では、綿袋の形状と駆動糸の通し方によって綿袋の形状を様々に変形させることができる。図3に例として、2本の駆動糸を使って2段階に屈折する機構を示した。綿袋には図3aのように先端から中程まで表面に沿って糸を通し、そこから綿袋内部を通した駆動糸1と、綿袋中央から逆端まで表面を通した駆動糸2を使用した。この時、駆動糸1のみを引けば同bのように先端が折れ曲がり、糸2を引くと同cのように先端の形状を保ったまま傾かせる機構となる。また、2本の糸を同時に引けば、同dに示したように綿袋が先端ほど丸まる形状となる。この様に、駆動糸の配線を工夫し、それぞれを制御するときさまざまな機構が実現できる。

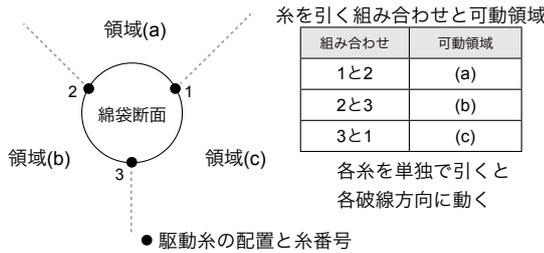


図4 腕部・脚部の機構原理
Fig. 4 Arms and Legs Mechanism

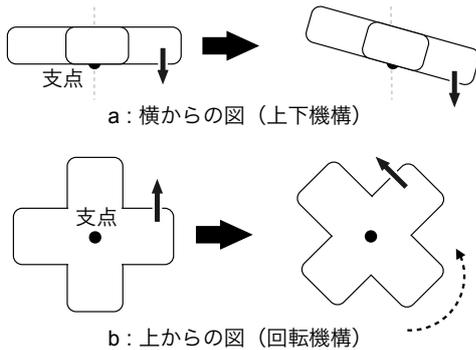


図5 頭部の機構原理
Fig. 5 Head Mechanism

3.2 目指すぬいぐるみロボット

本研究では、先に示した柔軟機構を使用して、手を振る、足をばたつかせる、首を振って利用者の方を向くといった多様、かつ比較的単純な身体動作が可能なぬいぐるみロボットの開発を目指した。

3.3 腕部・脚部の機構原理

開発した腕部・脚部の構造は、図2を基本構造として、3本の駆動糸を用いる。綿袋断面図と駆動糸の模式図を図4に示した。綿袋の表面に3本の駆動糸1から3を通し、そのうち最大2本の糸を同時に引くことで腕や脚の付け根を支点として領域(a)から(c)の任意の位置へ手先を移動する事ができる。

3.4 頭部の機構原理

頭部には、腕や脚部とは異なる機構を用い、上下への見上げ、見下ろし、回転動作を実現する。基本的な機構を図5に示した。図5aに示すように、綿袋の端点を垂直に引き、ある支点(首に相当)を起点に傾かせる上下運動機構と、図5に示した水平に引き回転を行う回転機構によって、ぬいぐるみロボットを任意の方向に向かせることを目指した。

4 柔らかいぬいぐるみロボット

本章では、実現したぬいぐるみロボットについて各部の構造と、姿勢制御について述べる。

4.1 芯まで柔らかいぬいぐるみロボット

開発したロボットは両腕、両脚、頭部の可動部を持ち、無線LANを通して制御用計算機から制御できる。

外見には利用者が親しみやすく、積極的に触りたくなる姿としてクマのぬいぐるみを選択した。クマのぬいぐるみは四肢を持ち、本研究が目的とする多様な動作を行わせることに適し、また、テディベアを始めとして国籍や年齢を問わず愛されていると言えるためである。

本ぬいぐるみロボットは基本姿勢として座った状態を取る。この時、高さ380mm、幅240mm、奥行き300mm、重量は1.4kg程度である。バッテリー駆動することで本体はワイヤレスで使用できる。動作電圧は8.3Vで、1600mAhのリチウムポリマー充電電池で30分程度動作する。

4.2 柔軟機構の実現

柔軟な可動部を構成する繊維素材にはそれぞれ要求が存在する。綿袋に使用した布には柔軟性があり、低摩擦であることが必要であることから木綿の布を採用した。綿には変形を繰り返しても元の形状に戻るような高い復元力が求められるため、ポリエステル製の綿(つぶつぶ綿, アライ)を使用した。駆動糸には、ぬいぐるみロボットの柔らかい触感を損なわないこと、駆動時にかかる負荷に耐えられること、摩擦と伸び率が低いことが求められる。そこで、超高分子ポリエチレン製の釣り糸(PE船一番4号糸, ゴーセン)を使用した。

糸を引くアクチュエータにはコアレスDCモータを使用した。モータは小型、軽量かつ十分なトルクが出力できることが必要である。そのため、Maxon社製モータRE-10に減速比16対1のプラネタリギアヘッドと、ロータリーエンコーダが付いたものを選んだ。ギアとエンコーダを含んだ大きさは全長44.6mm、重量17.2gで、内径4.5mmのプーリーを接続して糸を巻き取ることで連続して10Nの張力で糸を引くことができる。

4.2.1 腕・脚部ユニット

図6に綿袋の終端の処理と、駆動糸の配線の様子を示した。腕・脚部に使用する綿袋は体幹部との接続のため、図6aに示した付け根側の処理を行う。すなわち、綿袋に数cm程度の余分を残して綿を詰め、余分な布地部分を短冊状に切る。接続用の部品は綿袋に蓋のように設置するAと、短冊状の布地を部品Aと共に挟んで固定するリング状のBを用いる。こうして綿袋の付け根位置に固定した部品を体幹部への接続に用いる。

腕部は直径4cm、長さ24cm、脚部は直径5cm、長さ18cmの綿袋を作成し、手先、足先まで木綿布表面に並縫いによって3本ずつの駆動糸を通す。並縫いの間隔は2cmで、手先、足先部分まで通した後、糸の終端に小さなビーズを括りつけ、留め具として使用する。

a: 綿袋の付け根構造



b: 駆動機構の構成 (左腕)



図6 腕・脚部ユニット
Fig.6 Arm and Leg Unit



図7 駆動糸の配置
Fig.7 Threads Potision

る。両腕・両脚部は綿袋とモータ3個を1つのユニットとして構成した。図6bには例として左腕のユニットの様子を示した。各パーツを細分化することで、メンテナンス性を高めた。図7には、各駆動糸の配置を示した。座位を基本姿勢とするぬいぐるみロボットでは脚部は上方に蹴り上げる動作が主になるため、そういった動作が簡単に実現できるように脚の上側に駆動糸を配置した。

4.2.2 頭部ユニット

頭部の構造とその模式図を図8に示した。頭部は、頭頂からクッション、駆動部、首部で構成した。駆動部と首部には駆動糸を通すため4つの突起 p_1 から p_4 を取り付けた。頭部は高さ15cm、幅は最大で12cm程度である。頭頂と駆動部左右に取り付けたクッションはぬいぐるみの頭部形状を保つために用いる。駆動部には、直径4cm、長さ12cmの綿袋を使用し、左右のクッションも同じ大きさである。首部は直径4cm、長さ7cmの綿袋を使用し、駆動部の中央に縫い付ける。4つの突起は直径1cm、長さ4cmの綿袋を使用する。こうして、柔軟機構による駆動が可能のように可動部を小型、軽量に抑えつつ、頭部の外装を装着した場合にその形状が違和感が出ないように努めた。

頭部は6本の駆動糸を使用して各種動作を実現する。

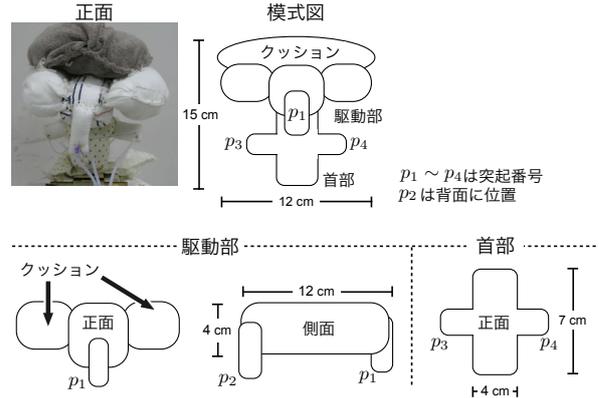


図8 頭部構造
Fig.8 Head Structure

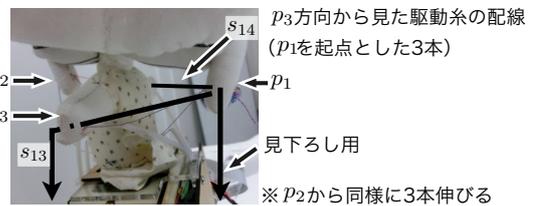


図9 頭部の駆動糸の配置
Fig.9 Wire Positions of the Head

各駆動糸の取り付けを次に述べる。図9は p_3 からみた頭部の図であり、駆動糸の一部を図示した。

見下ろし・見上げ動作

見下ろし・見上げ動作は、頭部正面に取り付けた p_1 、頭部背面に止めた p_2 に通した駆動糸を下方方向に引くことで実現した。図9には見下ろし用の糸を図示した。

回転動作

回転動作は、4本の駆動糸を使って実現する。これらの駆動糸は p_1 で端点を止め、 p_3 、 p_4 をそれぞれ貫く2本 s_{13} 、 s_{14} と、 p_2 で端点を止め、 p_3 、 p_4 を貫く2本 s_{23} 、 s_{24} からなる。図9にはこのうち s_{13} 、 s_{14} を図示した。これらのうち、 s_{13} 、 s_{24} を同時に引くと、頭部はロボット正面からみて左方向に回転し、残りの2本を引くと、逆方向に回転する。これら4本の駆動糸は、突起 p_3 、 p_4 から下方に伸ばし、体幹部中央のモータヘテフロンチューブを通して接続した。

4.3 体幹部

可動部を駆動するための18個のモータと、それを制御する回路基板は体幹部に取め、ぬいぐるみロボットの硬い部分を最小限に抑えた。体幹部は幅7cm、奥行き8cm、高さ20cm程度で、主な素材は厚さ2.5mmの中密度繊維板である。これは加工のしやすさ、軽さから選定を行った。また、各ユニットと体幹部の接合部にはABS樹脂を使用し、強度を高めた。各部の接合の例として、図10に接合前の体幹部と、脚部の接合の様子を示した。また、ぬいぐるみロボットの内部構造の概観を図11に示す。制御基板は図11aに



図 10 体幹部と脚部の接合構造
Fig. 10 Joint Area Structure of Body and Leg

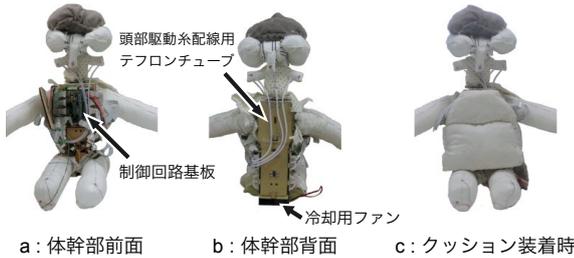


図 11 ぬいぐるみロボット内部構造
Fig. 11 Inner Structure of the Cuddly Robot

示すように体幹部前面に取めた。また、同 b に見えるように、ぬいぐるみロボットの臀部には冷却用に多翼ファンを取り付けた。

4.4 外装

図 11c に示したように、ぬいぐるみの外装を装着する前に硬い機構が集約された本体全体を布と綿で作成したクッションで覆い、利用者がぬいぐるみの体部に触れた時にできるだけ硬さを感じないように注意した。外観を構成する布生地は触り心地のよく、ベース生地に縦横共よく伸びるメリヤス編みを用いたポリエステル性プードルファーを使用した。伸縮しない生地では曲げ動作の際に内部の綿袋の動きを阻害し動作へ悪影響がある。外装によって腕部は直径 6 cm 程度、脚部は足裏を模した装飾を除いて、直径 7 cm 程度となる。

各部の駆動糸やそれを止めるビーズの触感はこの外装を装着すれば可動していない場合にはほとんど感じられない。しかし、腕部・脚部においては、可動部を動作中に握ったり、綿袋の変形を阻害するように力を入れると、駆動糸の動きが手に伝わる。また、頭部の駆動糸は主に首の周囲を通るため、頭を撫でたりする限りは駆動糸の触感が感じられることはない。

4.5 姿勢制御

ぬいぐるみロボットの姿勢制御は、現在の各駆動糸長をモータに取り付けたエンコーダからのパルス信号をカウントし把握することによる。姿勢を変更したり、特定の動作を行う場合には制御用計算機から各駆動糸の目標糸長値が制御回路へ送られる。制御回路は現

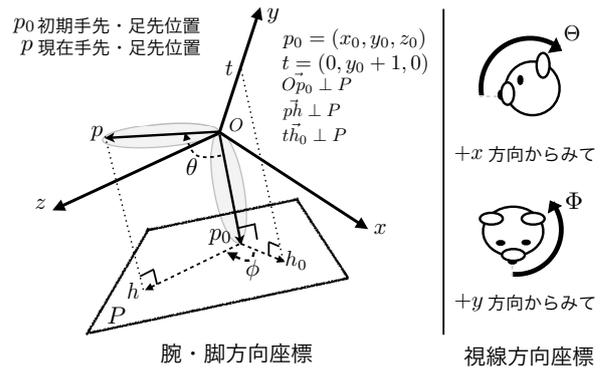


図 12 ぬいぐるみロボット上の座標系
Fig. 12 Coordinate Systems on the Robot

在の糸長が目標値へと近づくよう各モータ毎に PWM 信号を生成し、モータの制御を行う。これによって、ぬいぐるみロボットに様々な動作を行わせることができる。

5 動作評価実験

実現したぬいぐるみロボットを可動域、動作再現性、動作速度、柔軟性の 4 点から評価した。

5.1 座標系の定義

実現したぬいぐるみロボットの動作を記述する座標系として位置座標系、腕・脚方向座標系、視線方向座標系と 3 種類を定義する。

位置座標 $p = (x, y, z)$ は、x 軸をロボットから見て左向き、y 軸を上向き、z 軸を前向きとする。座標系の原点は都度定義する。

腕・脚方向座標 $d = (\theta, \phi)$ は手先・足先の方向を示す角度座標であり、腕・脚付け根位置に対する手先・足先の相対位置から求める。方向座標 d と位置座標 p の関係を図 12 左側に示した。腕・脚の糸を全く引かない状態を $(\theta, \phi) = (0, 0)$ とし、腕・脚の付け根を中心とする球面座標系とする。 $(\theta, \phi) = (0, 0)$ における手先位置を $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$ とし、座標球面の中心を O とするとき、 p_0 を含み、 \vec{Op}_0 に垂直な平面を P とする。腕先・脚先が位置 p にあるとき、点 p から面 P に垂線を下ろし、その交点を h とする。また、y 軸上の点 $t = (0, y_0 + 1, 0)$ から面 P へ垂線を下ろし、その交点を h_0 とする。この時、 θ は点 p 、原点 O 、点 p_0 のなす角とする。従って、

$$\cos \theta = \frac{\vec{Op}_0 \cdot \vec{Op}}{|\vec{Op}_0| |\vec{Op}|} \quad (1)$$

ただし、 $0 \leq \theta \leq 180 \text{ deg}$ を満たす。

また、 ϕ は点 h_0 、点 p_0 、点 h のなす角であり、

$$\cos \phi = \frac{p_0 \vec{h}_0 \cdot \vec{p} \vec{h}}{|p_0 \vec{h}_0| |p \vec{h}|} \quad (2)$$

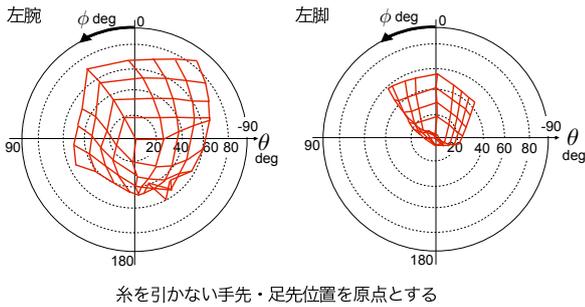


図 13 腕・脚の動作範囲 (方向座標)
Fig. 13 Movable Range of Arm/Leg in Polar Coordinate

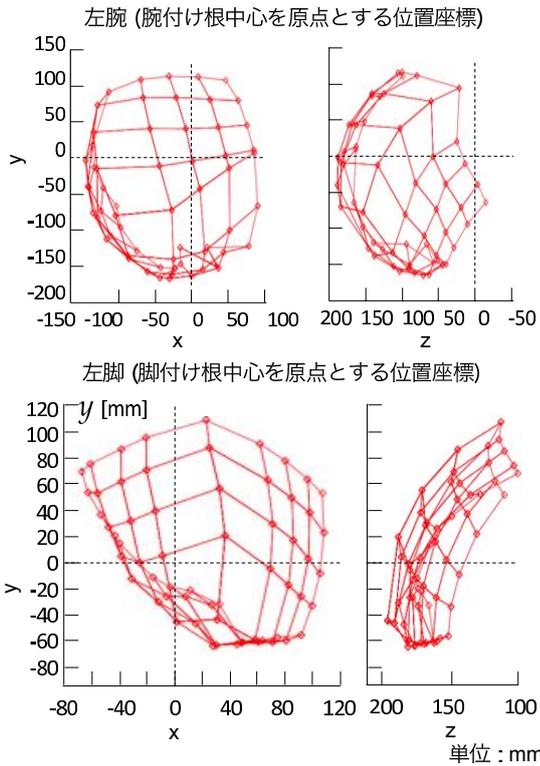


図 14 腕・脚の動作範囲 (位置座標)
Fig. 14 Movable Range of Arm/Leg in Cartesian Coordinate

と定義する。ただし、 ϕ は $p_0\vec{h}_0 \times p\vec{h}$ の符号に従って回転方向を区別し、 $-180 < \phi \leq 180$ deg を取る。

視線方向座標 $g = (\Theta, \Phi)$ は頭部の向きを示す角度座標であり、頭部中心に対する鼻先の相対位置から求める。模式図を図 12 右側に示した。頭部の糸を全く引かない状態を $(\Theta, \Phi) = (0, 0)$ とし、頭部中心を球面の中心とする球面座標系とする。首を上下に動かす向きを Θ 、左右に動かす向きを Φ とする。上を向くとき $\Theta > 0$ 、ロボットから見て左を向くとき $\Phi > 0$ である。

5.2 動作範囲の評価

腕・脚の動作範囲

動作範囲計測のため、様々な巻取量指令値を与え手先位置を計測した。

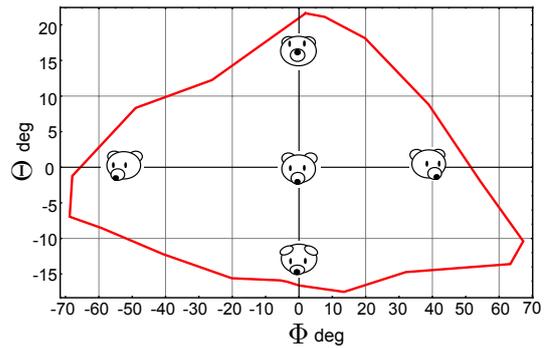


図 15 視線方向座標での頭部動作範囲
Fig. 15 Movable Range of Head in Elevation-Azimuth Coordinate

各腕・脚を駆動する3つのモータ M_1, M_2, M_3 それぞれについて、巻取量指令値を徐々に増加させ手先位置の変化がなくなった時の指令値を最大巻取量 L_{M_i} とする。このとき、糸長指令値 $\lambda = (\lambda_{M_0}, \lambda_{M_1}, \lambda_{M_2})$ は以下のように与えた。

$$\lambda \in \Lambda_{M_0} \times \Lambda_{M_1} \times \Lambda_{M_2}$$

$$(\Lambda_{M_i} := \{0, 0.25L_{M_i}, 0.5L_{M_i}, 0.75L_{M_i}, L_{M_i}\})$$

結果を図 13, 図 14 に示す。結果はほぼ左右対称だったため左腕・左脚のみ図示する。

図 13 は、方向座標系での結果であり、同心円上に θ を取り、円周に ϕ を取った。グラフより、腕は最大で 80 deg、脚は 60 deg ほど開くことができることが分かる。脚部において $\phi = 180$ deg 方向 (足を下げる動作) に対して狭い。これは脚部の駆動糸の配置によるものである。位置座標系で可動域を表した図 14 から分かる通り、腕部は付け根から手先を ± 100 mm 程度、脚部は同様に足先を上方に 100 mm、下方に 60 mm 程度上げ下げ可能なことが分かる。また、左右にはどちらも ± 100 mm 程度動かせる。これにより、腕を振り上げたり、足をばたつかせるといった動作をするのに十分な可動域を有していると言える。

頭部の可動域

頭部の可動域は、駆動糸を引かない状態の鼻先位置を原点に、首の上下、左右の可動域を計測した。結果を図 15 に示す。図は、横軸が Φ deg、縦軸が Θ deg で、実線で囲まれた範囲が可動域となる。結果として、左右の回転では 70 deg 程度の可動域を持つが、上下の可動域は首を左右に回す毎に狭くなることが分かった。これは、現在の構造では正面にいる利用者を見上げるような場合には十分だが、横を向きつつ見上げるといった動作をするには十分とは言えない。なお、下方の可動域が狭いのは、ロボットの構造上 15 deg 程度下を向くと頭部と体部が干渉するためである。

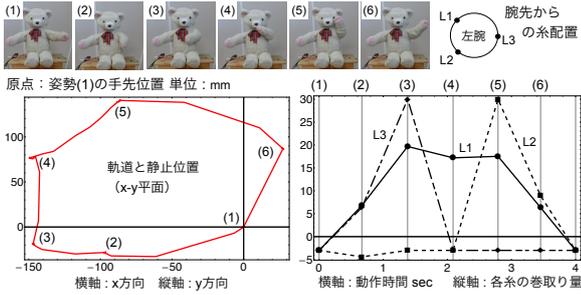


図 16 腕部の動作再現性
Fig. 16 Repeatability of Arm

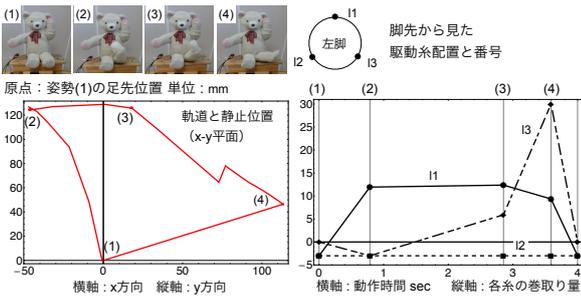


図 17 脚部の動作再現性
Fig. 17 Repeatability of Leg

5.3 動作再現性の評価

動作再現性の評価として、腕部、脚部、頭部のそれぞれが特定の動作を繰り返し行った場合の到達位置を計測し、その精度を標準偏差を求めた。位置の計測には OptoTrack (NDI) を使用した。

腕部

腕部では、図 16 上部 (1) から (6) に示すように、ロボットを正面から見て左手を時計回りに回転させる動作を 8 回繰り返し、その手先位置の軌跡を計測した。図には、姿勢 (1) における手先位置を原点とした手先の通る軌跡 (x-y 平面) と、各駆動糸の巻取り量を示した。動作の繰り返しにあたり、最終姿勢 (6) から初期姿勢 (1) へは、駆動糸の巻取り量を初期状態 (1) にすることで遷移させた。以下、脚部、頭部の測定においても同様である。ただし、ここで示した駆動糸の巻取り量は、すべての糸を緩めた状態 (巻取り量 < 0) からその姿勢が変わらない程度に各駆動糸を巻きとり、糸のたるみを除いた状態を 0 とした。

また、図に示した 6 姿勢で手先座標を計測し、標準偏差を求め、表 1 左側に示した。

その結果、初期位置である姿勢 (1) で 5 mm 弱のばらつきが見られた。この位置は腕の駆動糸をいずれも緩めた状態であることからばらつきが生じたものと考えられる。しかしながら、いずれかの駆動糸を引き、位置を指定する場合は標準偏差は 1.5 mm 以下に収まり、本研究が目指す、腕を伸ばす、手を振る、といった動作において支障のない動作再現性を持っていると

表 1 腕部と脚部各姿勢の標準偏差 (腕部：左 脚部：右)

Table 1 Standard Deviation at Each Positions of Arm (Left) and Leg (Right)

腕部姿勢	x	y	z	脚部姿勢	x	y	z
(1)	4.95	4.23	4.08	(1)	0.50	0.72	0.15
(2)	0.29	0.36	0.33	(2)	0.29	0.31	0.74
(3)	0.18	0.16	0.06	(3)	0.11	0.08	0.19
(4)	0.38	0.13	0.34	(4)	0.14	0.45	0.26
(5)	1.44	0.43	1.35				
(6)	0.09	0.34	0.19				

単位：mm
試行回数：各 8 回

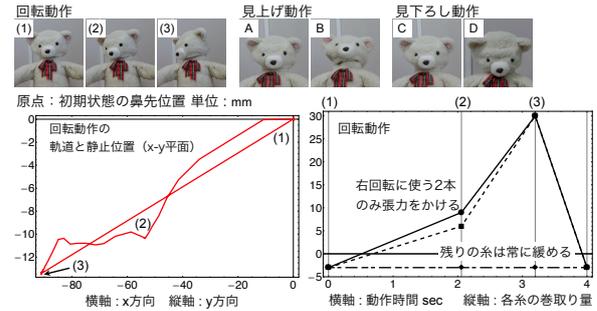


図 18 頭部の動作再現性
Fig. 18 Repeatability of Head

言える。

脚部

脚部では、図 17 に示すように、左足先をロボットに向かって時計回りに回転させる動作を 8 回繰り返し、左足先座標を 4 姿勢について計測した。ここでの原点は、姿勢 (1) の左足先である。

各姿勢での標準偏差を表 1 右に示した。全体的に標準偏差が小さく、足を動かす動作を繰り返し行うに十分な再現性を持っていると言える。腕部とは異なり、全ての姿勢で駆動糸の少なくとも 1 本をいくらか巻きとった状態であるため、ばらつきが小さくなっているものと考えられる。

頭部

頭部は、ぬいぐるみロボットが首を右回転、上向き、下向きの各方向に動かす動作をそれぞれ 8 回繰り返し、鼻先の位置を計測した。計測位置は、右回転が 3 箇所、上下方向は 2 箇所である。図 18 には各姿勢の様子と、右回転の動作の x-y 平面での軌跡と糸の巻取り量の変化を示した。ここでの原点はそれぞれ、姿勢 (1)、A、C の鼻先位置である。ただし、回転動作では頭部に使用する駆動糸のうち、右回転に使用する 2 本のみの巻取り量を変化させるため、糸の巻取り量はその 2 本と、残り 4 本を代表した 1 つについてのみ描画した。各姿勢の標準偏差を 2 に示した。右回転の動作は、腕部と同様に糸を引かない姿勢 (1) においてばらつきが大きいことが分かった。それ以外では、標準偏差が 1.0 mm 以下という結果であることから、特定の方向を向かせるような動作を行うに必要な再現性を有

表2 頭部各姿勢の標準偏差 (回転:左 見上げ:右上 見下ろし:右下)

Table 2 Standard Deviation at Each Positions of Head (Turn : Left, Look Up : Upper Right, Look Down : Lower Right)

回転	x	y	z
(1)	10.56	1.27	0.42
(2)	1.39	0.17	0.57
(3)	0.55	0.09	0.49

見上げ	x	y	z
A	0.24	0.69	0.32
B	0.21	0.15	0.19

見下ろし	x	y	z
C	0.14	0.80	0.32
D	0.25	0.13	0.11

単位: mm
試行回数: 各 8 回

表3 各種動作速度
Table 3 Motion Speed

				
姿勢	口元に手を移動	足を上げる	見上げる	首を回す
必要時間 sec	0.4	0.5	0.3	0.4

していると言える。

5.4 動作速度

動作速度は、可動部各部に特定の動作をさせた場合にかかる最短時間をビデオ録画した映像を元に計測し求めた。行った動作とそれに掛かる時間を表3に示した。各動作は駆動系1本(頭部の回転のみ2本)を最大まで引いた場合の動作である。全ての動作において動作時間は0.4 sec程度に収まり、本ロボットは機敏な動作を行えると言える。

5.5 柔軟性の評価

柔軟性の評価には、IPロボットフォン(ロボットフォン) [14] と通常のぬいぐるみを比較対象とした。腕部の上側を板で押さえ、直径22 mmの円柱形の棒を使って下側から外力を加えた。力センサ(SHIMPO FGP-5)を用いて円柱棒に加わった力を計測し、その際の変形量(つぶれた量)を測定した。ぬいぐるみロボットは、駆動糸を引かない状態と駆動糸を引き、ある方向に腕が変形してる場合で柔軟性に差があるため、それぞれを静止時、動作時として測定を行った。動作時は、腕の駆動糸のうち1本を最大まで引いた状態とした。計4種類の計測結果を図19に示す。ロボットフォンは内部が硬い機構であるため、10 mm程度で変形量が限界となる。ぬいぐるみロボットは、静止時、動作時共にぬいぐるみよりは変形に大きな力が必要だが、ぬいぐるみ同様に人間が加えられる程度の力で大きく変形させられる事が分かった。ロボットフォンのように少ない変位で変形量が限界に達してしまうようなことがなかったことから、硬さを感じない、柔らかい腕を実現できていると言える。

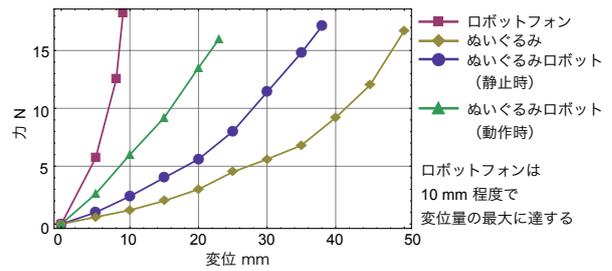


図19 ぬいぐるみロボットの変形量と必要な力
Fig.19 Relation Between Amount of Deformation and Force

5.6 まとめ

以上の評価実験によって、実現したぬいぐるみロボットは想定する動作(手を振る、手を挙げる、足をばたつかせる、首を上下左右に振る)を行うのに十分な可動域、動作再現性、動作速度を持ち、かつ実際のぬいぐるみに近い柔軟性を有していることが確かめられた。

6 印象評価実験

最後に、実現した柔らかいぬいぐるみロボットと、IPロボットフォンに対して印象評価実験を行った。比較対象であるロボットフォンは、腕部と頭部が可動し、ぬいぐるみロボットと同様の動作を行わせられることから選定した。なお、ロボットフォンの外装生地は、なめらかなフェイクファーを用いている。ぬいぐるみロボットと比べると裏地が若干厚く、毛が若干太い。手触りはぬいぐるみロボットがふわふわとしているのに対して、つるつる、すべすべといった印象である。

6.1 実験目的

本実験の目的は、多様な身体動作が可能な機構の柔らかいぬいぐるみロボットと、硬いロボットフォンに感じる印象の違いを調査することにある。

6.2 実験方法

実験は、被験者にロボットを膝の上で抱かせ、その状態で各ロボットに手を上下に振る単純な動作をさせる。被験者にはロボットの動作中にロボットを自由に触らせ、その後アンケートに答えさせる。という手順で行った。これを被験者毎に2つのロボットそれぞれに対して行った。ロボットの印象を問うアンケートには相反する形容詞句対を用い、その間を6段階で回答させた。形容詞句対は表4の13個で、浜田らの研究[2]を参考に選んだ。また、両アンケート終了後に各ロボットの印象を自由に回答してもらった。被験者は11名で、男性7名、女性4名である。

6.3 実験結果

表4の設問への回答を6段階に数値化(表4左側を6、右側を1とした。)し、ウィルコクソンの符号付き順位和検定(片側検定)を行った。図20に各設問に

表 4 使用した形容詞句対
Table 4 Adjectiv Pairs

設問番号	形容詞対
1	親しみやすい 親みにくい
2	安心な 不安な
3	感情を持つ 感情を持たない
4	あたたかい 冷たい
5	役に立つ 役に立たない
6	単純な 複雑な
7	なめらかな ごつごつした
8	好ましい 好ましくない
9	生命がある 生命がない
10	心が通じる 心が通じない
11	動きがある 動きがない
12	非機械的 機械的
13	柔軟な 硬直した

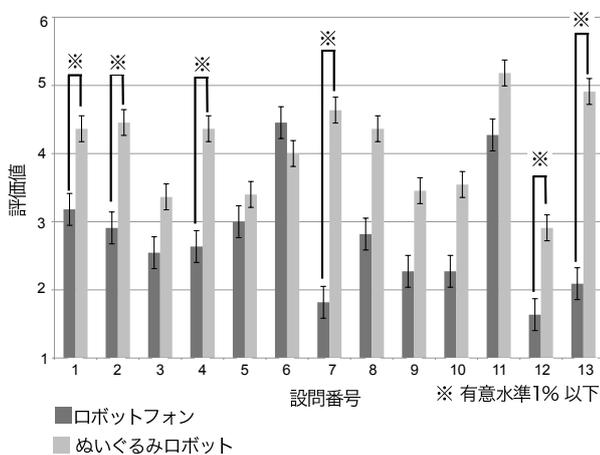


図 20 印象評価実験結果
Fig. 20 Result of Impression Test

における平均値と標準誤差を示した。横軸に設問番号、縦軸に評価値を取った。

結果、設問 1 ($N = 9, T = 2.5$), 2 ($N = 10, T = 0$), 4 ($N = 10, T = 2$), 7 ($N = 11, T = 0$), 12 ($N = 7, T = 0$), 13 ($N = 10, T = 0$) で $p < .01$ の有意差が見られた。このことから、ロボットフォンに比べぬいぐるみロボットは親しみやすさや安心感といった印象を強く与え、機械的、冷たいといった印象が低いことがわかった。また、なめらかさや柔軟さにおいても有意な差が見られた。

加えて、設問 3, 9, 10 の感情を持つかどうか、生命があるかどうか、心が通じるかどうかといった、生き物らしさを表す印象には有意差が得られなかったことから、親しみやすく、非機械的な印象を与えられても、それが生物らしさには繋がらないという知見を得た。

また、被験者からの感想として、ぬいぐるみロボットには「やわらかい」、「かわいい」、「感情移入しやすい」といった意見が得られた。対してロボットフォン

には「硬い感じがする」、「内部構造を手感じてマッチョな感じがする」、「ギアの声が気になる」といった機構や駆動音を気にする意見が多かった。

ぬいぐるみロボットの機構に対する意見が聞かれなかった理由として、被験者にはロボットに自由に触れるように要請したが、ほとんどの被験者はぬいぐるみのロボットの動きに合わせて手先を掴んだり、頭を撫でたりといった実際のぬいぐるみに触れるような接触が多く、可動部を握ったり、ロボットの動きを阻害するような接触を行うことがなかった。このため、駆動糸の動きを手を感じる事が少なかったと考えられる。

7 おわりに

本論文では、糸、布、綿による柔らかい駆動機構を提案し、その駆動機構を使用した柔らかいぬいぐるみロボットの開発とその印象評価を行った。

提案した柔軟機構は、一つの綿袋に複数の駆動糸を通すことで複数の関節を持たせることが可能である。加えて、糸の巻取り量を使って制御を行えばそれらを連動して動かすことも可能だろう。従って、本研究で製作した四肢を持ついきものに限らず、蛇のように全身を様々な方向に曲げるものを含め、様々なぬいぐるみとその柔らかさを損なわず身体動作が可能なエンタテインメントロボットとすることができる。加えて、多脚ロボットの脚部に本機構を用いて歩行動作をさせるといった、より複雑で大きな動作も実現できるだろう。

また、エンタテインメントロボットに限らず、柔軟な機構であることから対象物を破損しにくいロボットとして物の把持や運搬などの分野での活躍も期待できる。このためには、提案機構を大きくした場合における綿袋の復元力や、変形に必要な張力についての研究が必要である。

今回作成したぬいぐるみロボットは、提案機構を使用することでぬいぐるみに近い柔らかさを保ったまま、広い可動範囲と高い動作再現性を持つことを示した。また、印象評価実験を通して、内部の機構が硬いロボットよりも本ロボットのように柔らかく多様な動作を行えるロボットの方が人に親しみやすさや安心感を与えられることを確かめた。

本ぬいぐるみロボットの課題としては、首の可動域の狭さが挙げられる。首の機構を改良することで様々な方向を見上げられるようにすれば、より人に好印象を与えると共に、可能な動作の幅が広がると考えている。また、人の存在やロボットへの接触を検出し、それに見合う動作を行わせ、インタラクションが可能なロボットとしたい。

将来的に提案機構を採用したエンタテインメントロボットが普及すれば、ロボットとのインタラクション

は抱きかかえたり、一緒に寝たりといったより密接なものとなるだろう。これによって人々の生活に今以上の楽しみや癒しを与えてくれることを期待する。

「ロボットフォン」の製品化。日本ロボット学会誌 = Journal of Robotics Society of Japan, Vol. 23, No. 2, pp. 159-164, March 2005.

(2013年3月20日受付)

参考文献

- [1] Harry F. Harlow. The Nature of Love. *American Psychologist*, Vol. 13, pp. 673-685, 1958.
- [2] 浜田利満, 佐野司. 高齢者セラピー用ロボットの印象に関する調査. 筑波学院大学紀要, Vol. 6, pp. 43-48, 2011.
- [3] 藤田雅博. Robot Entertainment System AIBOの開発. 情報処理, Vol. 41, No. 2, pp. 146-150, February 2000.
- [4] S. Kato, S. Ohshiro, H. Itoh, and K. Kimura. Development of a communication robot Ifbot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, pp. 697-702 Vol.1. IEEE, 2004.
- [5] T. Shibata. An overview of human interactive robots for psychological enrichment. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 92, No. 11, pp. 1749-1758, November 2004.
- [6] 渡辺一郎. 人に優しい端末を目指す子ぐま型ソーシャルロボットとロボット・セラピー. 計測と制御 = Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 51, No. 7, pp. 614-619, July 2012.
- [7] W D Stiehl, J K Lee, C Breazeal, M Nalin, A Morandi, and A Sanna. The huggable: a platform for research in robotic companions for pediatric care. In *Proceedings of the 8th International Conference on Interaction Design and Children*, pp. 317-320. ACM, 2009.
- [8] Yuta Sugiura, Calista Lee, Masayasu Ogata, Anusha Withana, Yasutoshi Makino, Daisuke Sakamoto, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. PINOKY: a ring-like device that gives movement to any plush toy. In *Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '12*, p. 725, New York, New York, USA, May 2012. ACM Press.
- [9] 吉海智晃, 林摩梨花, 門脇明日香, 植田亮平, 稲葉雅幸. 柔軟センサ肉質外装と自動復帰可能な関節過負荷保護機構を備えたヒューマノイドの設計と開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2009, pp. 2A1-E04(1)~2A1-E04(4), May 2009.
- [10] Hitoshi Kimura, Daisuke Maruyama, Fumihiko Kajimura, Michihiko Koseki, and Norio Inou. Hermetically Sealed Flexible Mobile Robot with Hydrostatic Skeleton-Development of a New Crawler and Driving Experiment of the Robot in a Narrow Space-. *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 25, No. 7, pp. 1092-1099, October 2007.
- [11] 脇元修一, 鈴森康一, 神田岳文. インテリジェント McKibben型アクチュエータの開発: 第1報, 柔軟変位センサの内蔵による位置サーボ系の実現(機械力学, 計測, 自動制御). 日本機械学会論文集. C編, Vol. 71, No. 709, pp. 2754-2760, September 2005.
- [12] W KUHN, B HARGITAY, A KATCHALSKY, and H EISENBERG. Reversible Dilation and Contraction by Changing the State of Ionization of High-Polymer Acid Networks. *Nature*, Vol. 165, No. 4196, pp. 514-516, April 1950.
- [13] Victor C Anderson. Tensor arm manipulator, 1970.
- [14] 関口大陸, 稲見昌彦, 中野八千穂, 中野殖夫, 館. 「IP ロ

[著者紹介]

高瀬 裕 (学生会員)



2006年東京都立大学理学部物理学科卒業, 2008年総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻修了. 現在 東京工業大学総合理工学研究科知能システム科学専攻博士後期課程在学中. ヒューマンインターフェースの研究に従事.

山下 洋平 (学生会員)



2011年富山大学工学部知能情報工学科卒業, 2013年 東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻修了. 在学中 ヒューマンインターフェースの研究に従事.

石川 達也



2009年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業, 2011年 同大学大学院電気通信学研究科知能機械工学専攻修了. 在学中 ヒューマンインターフェースの研究に従事.

椎名 美奈



2008年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業, 2010年 同大学大学院電気通信学研究科知能機械工学専攻修了. 在学中 ヒューマンインターフェースの研究に従事.

三武 裕玄 (正会員)



2006年東京工業大学工学部情報工学科卒業, 2008年同大学大学院知能システム科学専攻修士課程修了, 同年 日本学術振興会特別研究員, 2011年同専攻博士課程修了. 同年 東京工業大学精密工学研究所助教, 現在に至る. バーチャルリーチャ, バーチャルヒューマンの研究に従事. 工学博士.

長谷川 晶一 (正会員)



1997年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業, 1999年同大学大学院知能システム科学専攻修士課程修了, 同年ソニー株式会社入社, 2000年東京工業大学精密工学研究所助手, 2007年電気通信大学知能機械工学科准教授, 2010年東京工業大学精密工学研究所准教授, 現在に至る. バーチャル・リアリティ, 力覚インターフェース, ヒューマンインターフェースの研究に従事. 工学博士.