

バイオメカトロニクス研究室
2017 年度
年間研究活動報告書

作成日 2018 年 5 月 17 日

補助事業名

平成 29 年度住環境での自立支援を目的とした 2 輪自律移動による
杖型ガイドロボットの開発と制御 補助事業

JKA 補助事業により作成

論文一覧

【国内発表論文】

1. 岡本造, 井上貴浩, 平井慎一,
受動要素を備えた丸ベルト振り機構の2指による把持物姿勢操り制御,
計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2017 年 12 月
2. 植田尊大, 井上貴浩, 平井慎一,
弾性ベルト拮抗配置による可変関節剛性と長制御周期実験,
日本ロボット学会学術講演会, 2017 年 9 月
3. 荒木佑介, 井上貴浩,
ヒト指バイオメカニズムに基づくロボット指ワイヤ配置の実験的検討,
日本ロボット学会学術講演会, 2017 年 9 月
4. 荒木佑介, 井上貴浩,
停止位置の異なる2本腱ロボットフィンガの開発,
日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2017 年 5 月
5. 岡本造, 井上貴浩,
丸ベルト振り駆動と受動要素を組み合わせたロボットフィンガの開発,
日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2017 年 5 月

受動要素を備えた丸ベルト振り機構の2指による把持物姿勢操り制御

○岡本 造 (岡山県大), 井上 貴浩 (岡山県大), 平井 慎一 (立命館大)

Posture Control of a Grasped Object by Two fingers of a Round-belt Twisting-mechanism with Passive Component

○Itaru OKAMOTO (Okayama Pref. Univ.), Takahiro INOUE (Okayama Pref. Univ.)

and Shinichi HIRAI (Ritsumeikan. Univ.)

Abstract : In this paper, we develop a novel robotic joint mechanism that has a polyurethane round-belt and a linear spring placed on each side of the joint. This mechanism is based on antagonistic mechanical configuration by the round-belt activated by twisting motion. This mechanism enables the robotic joint to move around its axis according to the contraction force generated by the twisting. In addition, antagonist side of the joint generates passive tension by a spring, which may reduce the range of motion of the joint. In order to improve that problem, this study newly modified the joint mechanism so that the tensile force can be eliminated by maintaining natural length of the spring. Finally, we show successful experiments in terms of two-fingered object manipulation by the proposed twisting mechanism.

1. 緒言

従来のロボット技術においては自動車など大量生産を目的とした産業用ロボットが発展していたが、近年では、生活、福祉、防災・復興支援を目的としたサービスロボットが普及してきている。それに伴い、人間とロボットが物理的接触を伴う協調作業が増加すると考えられるため、コンプライアンスを兼ね備えたロボットの開発が求められている。コンプライアンスを考慮したロボットハンドの研究では、空気圧アクチュエータ [1], 形状記憶合金 [2] などが挙げられる。これらは、利用される素材が柔らかく外力に対して力を吸収し傷害を防ぐことが可能であることからコンプライアンスを備えていると言える。一方で、応答性の低さによる制御性能が劣化は、手先の位置決め性能や物体把持など高精度な制御を困難にさせている。このような研究背景の下、Inoue ら [3] [4] は、ポリウレタン丸ベルト (以下丸ベルト) を用いた Twist-drive 機構を開発し、筋構造を模倣することで物体との衝突が起きた場合、丸ベルトの弛緩により衝撃を緩和させる機能を付加している。また、ロボットリンクの関節剛性と手先押し付け力を高い分解能で直接制御できる利点がある。しかしながら、ロボットハンドへの拡張は未だ成されておらず、物体の把持や操り制御には至っていない。このようなことから、本研究では物体把持を可能とする機構の開発と把持物体の姿勢操り制御を行う。

物体の把持・姿勢操り制御に関しては、近年、多くの研究がなされている [5-7]。把持・操り系は対象物の運動方程式、接触状況を表す拘束条件により表現される。通常、この拘束条件を用いて変数の消去を行い対象物と内力に関する制御系が構成される。しかしながら、その場合、指先と対象物の距離は制御系の変数として陽に含まれていない

ため、接触状態から非接触状態への移行などを直接指令するのは難しいとされている。また、操作の途中で接触点において予期せぬ滑りが発生した場合は、関節情報のみからでは対象物の姿勢情報を正確に推定することが困難である。指先に触覚センサをつけたとしても、対象物が滑った場合にはやはり対象物の姿勢情報を正確に知るのは限界がある。そのため、本研究では接触点を安定させるため、指先にシリコンゴムを原材料とする柔軟指を取り付けている。また、対象物の姿勢情報の取得にはビデオカメラや視覚センサが用いられることが多いが、本稿では加速度センサを使用することで高速周期での姿勢情報の取得を可能にする。

以上より、本稿ではまず、2章でエラストマー特性を持つ丸ベルトと線形バネを配置し高いコンプライアンスを有する2指ロボットハンドの特徴について述べる。3章では、本稿における把持物体の姿勢操り制御の手法について説明した後、実際に把持物体に加速度センサを取り付け、その姿勢情報を制御量とする把持物体の姿勢操り制御を行う。

2. 受動要素を持つ2指ロボットハンド

本稿で開発したロボットハンドを Fig. 1 に示す。本機構の設計には、人の筋構造を模倣した拮抗駆動を採用しており、屈曲方向 (以下主動側) に丸ベルト伸展方向 (以下拮抗側) に線形バネを配置することで関節周りの拮抗駆動を実現している。本機構の駆動原理は、DC モータによって丸ベルトが振られることで生じる収縮力により、丸ベルトの他端に取り付けたリンクが回転し、ロボット関節の軸周りの回転を可能にしている。また、DC モータ制御には安価な速度制御用ドライバを用いることで容易に高速度な制御を可能としている。本機構において、丸ベルトと線形バネを拮抗配置することには3つの利点がある。1つ目は、Fig. 2 のように関節周りに衝撃が与えられたとき両側

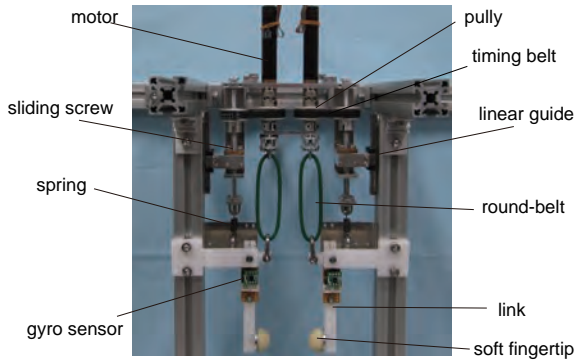


Fig. 1: A developed two-fingered hand with the twist-drive mechanism and a linear spring.



(a)external force from the right (b)external force from the left

Fig. 2: Secure safety by elastic force of linear spring and round belt.

共に弾性力が働き、高いコンプライアンスを確保できる点である。2つ目は、両側の弾性力により関節剛性が上がることで動作が安定する点である。3つ目は、能動的に関節が駆動するときは関節可動域を制限する必要がない点である。一方で、主動側の丸ベルトが振られリンクが屈曲した場合拮抗側ではバネの復元力が生じる。それにより、リンクの指先の押し付け力と関節可動域が低下してしまう問題がある。そこで本稿では、新たな試みとして屈曲時にバネの復元力を生じない機構を開発した。Fig. 3ではバネの影響を受けない駆動方法を概略図にしている。駆動原理はまず、モータの回転により丸ベルトが振られリンクが屈曲動作を始める。次に、主動側と拮抗側に取り付けたプーリにタイミングベルトを介すことで動きを同期させる。それに伴い、拮抗側のすべりねじに回転運動が与えられるためガイドレールに沿ったスライドが可能となる。これにより、バネは上下の並進運動が可能になり自然長を保つことができる。本研究では、主動側の出力に対して拮抗側が受動的に動作し、屈曲時にバネが自然長を維持する機構を受動駆動機構と呼ぶ。

次に、関節可動域と指先の押し付け力を向上させるために、丸ベルトの異なる接続方法の検証を行う。比較対象は、Fig. 4(a)のようにU字ボルトを介して丸ベルトをO型に接続したものと、円盤シャフトを介してV型に接続したものの2つとする。実験方法は、周長160mm、直径2mm、

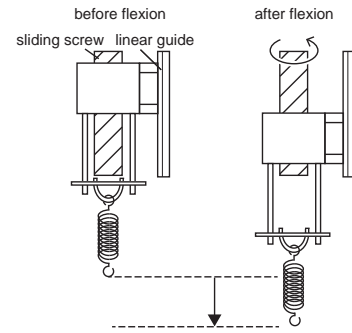
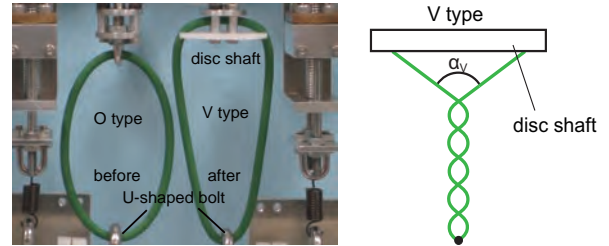


Fig. 3: Schematic diagram showing the way of synchronous motion.



(a)comparison of two types (b)twist deformation

Fig. 4: Difference of design on O-type and V-type arrangements.

1本の丸ベルトを用いてO型接続とV型接続の場合で関節可動域と指先の押し付け力を比較する。制御則はモータ付属のエンコーダ角度を制御量とする比例制御であり、ロボットのモータへの指令入力は角度変数を φ とすると次式となる。

$$v(t) = -K_p(\varphi - \varphi^d). \quad (1)$$

目標値 φ^d には本実験で使用する丸ベルトの最大振り数を入力し、 φ には振り量としてエンコーダを用いる。Fig. 5(a)は、関節可動域のグラフであり、Fig. 5(b)は、押し付け力のグラフである。結果から分かるように、V型接続の方が関節可動域と指先の押し付け力が拡大していることが分かる。Fig. 4(b)のように、丸ベルトを円盤シャフトとリンクに接続しV型にすることで成す二等辺三角形の頂点を α_v 角とすると、丸ベルトが振られたときの α_v 角はO型より大きくなることは明らかであり、振れによる収縮量が大きくなるため関節可動域と指先の押し付け力の拡大につながっていると考えられる。このように、丸ベルトの接続方法を変更することで、エネルギー効率の向上を実現している。一方で、Fig. 5(b)では、最大押し付け力が一定に維持できていない。これは、本駆動系で使用する丸ベルトの様な粘弾性物体特有の応力緩和現象によるものである。以上のように、拮抗側の影響の減少、関節可動域と指先押し付け力の拡大を実現した本2指ロボットハンドを用いて、3章では把持物体の姿勢制御を行う。

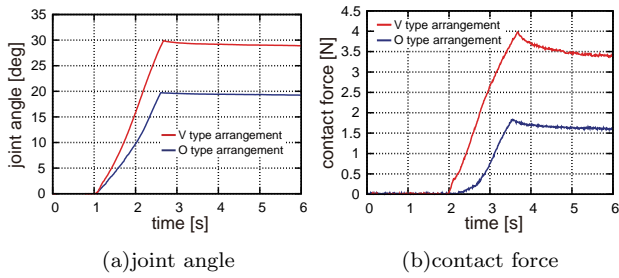


Fig. 5: Experimental comparison of the range of motion with respect to the proposed mechanism.

3. 把持物体の姿勢制御

本章では、Fig. 6 のようにシリコンゴムを原材料とする柔軟指と 2 指 1 自由度対構造とを組み合わせたロボットハンドによる立方体形状物の姿勢操り制御を行う。また、重力の影響を考慮した垂直 2 次元面内で行われ、Inoue ら [8] が提案する把持物体姿勢制御を参考にする。提案制御則の概略的ブロック線図が Fig. 7 であり、入力側から 1 段階目制御器、2 段階目制御器の順で直列に接続された構成になっている。また、制御量である物体姿勢は 3 軸加速度センサで検知している。把持する対象物は、1 辺 20 mm の立方体 (ポリアセタール) である。

3.1 1 段階目における仮想関節角度目標の生成

本稿で提案する目標関節角決定法は、対象物の目標角度 θ_{obj}^d に対象物姿勢が収束した時点で仮に、リンク角度 θ_{fi} が仮想関節角目標 θ_{fi}^d とそれぞれ一致するよう決定する方法が考えられる。これを積分器で表すと、第 i 指に関して以下のような 1 段階目積分器が考えられる (Fig. 7 参照)。

$$\theta_{fi}^d = (-1)^i K_I \int_0^T (\theta_{obj} - \theta_{obj}^d) dt. \quad (2)$$

これは、一般的な制御積分であり、制御量をターゲットである物体姿勢としている。また、式の記号 i は第 i 指の意味であり、ハンド構造が Fig. 6 のような対向構造に対応した設計となっている。つまり、左右の指で正負逆の値が式によって生成される。式 (2) により、 θ_{fi}^d が 1 段階目制御器において生成される。Fig. 7 から分かるように、直列に繋がれた次段 (2 段階目制御器) への入力として利用されている。

3.2 関節角度偏差を許容する 2 段階目 P 制御

次に、生成された目標関節角を使って関節角トルク制御を行う。2 段階目制御則は、比例ゲイン K_P を用いて以下のように記述できる (Fig. 7)。

$$u_i = -K_P (\theta_{fi} - \theta_{fi}^d) + \tau_{bi}. \quad (3)$$

P 制御のみでは関節角が目標値に収束したときに、トルクを発生できない問題があるため、バイアストルク τ_{bi} を加

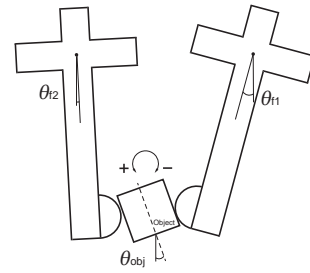


Fig. 6: Schematic diagram of the posture control of a grasped object.

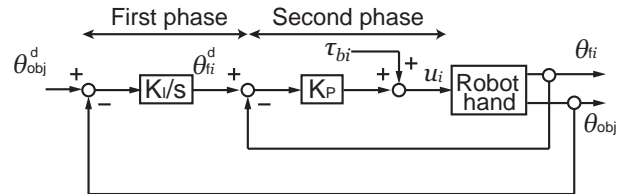


Fig. 7: A block diagram of the proposed control method.

えている。以上の全体的な 2 段階構成の流れが Fig. 7 である。図より 1 段階目制御器式 (2) の出力側と 2 段階目制御器式 (3) の入力側が直列に繋がれている。この制御における目標関節角を介した“連動動作”が提案 2 段階制御則の最大の特徴である。また、重力下における操り動作にもかかわらず、提案する 2 段階制御則は運動学的手法が不要な構造となっている。尚、本稿ではバイアストルクを左右で同値としているため、 $\tau_{b1} = \tau_{b2} = \tau_b$ としている。

3.3 ステップ入力に対する応答

本節では、前節に述べた 2 段階制御則を用いて姿勢操り制御を行う。1 つ目の実験はまず、5 sec の静止状態の後 5 sec かけて平行に配置したリンクを初期状態から対象物へアプローチし接触させる。次に、対象物の目標値 θ_{obj}^d をステップ状に変化させ、15 sec 毎に 5° , 10° , 15° , 20° の順にステップ状に変化させ式 (2) に代入する。2 つ目の実験は、0 sec から 10 sec の初期動作は 1 つ目の実験と同様で、ステップ状に対象物の目標値を 5° , 15° , 0° とする。いずれの実験においても、把持物体から指先が離れるような瞬時トルクが発生する可能性があるため式 (3) のバイアストルク τ_b に 1500 を印加している。また、2 段階制御則における各ゲイン K_P , K_I はそれぞれ $K_P=175$, $K_I=0.00045$ とする。尚、制御周期を 2 msec とし速い制御周期での姿勢操り制御を行う。

Fig. 8(a) と Fig. 9(a) は対象物の角度と目標値を示しており、(b), (c) では両リンクの角度と 1 段階目制御器で生成した θ_{fi}^d を示す。結果から分かるように、いずれのステップ入力に対しても物体姿勢が目標値に収束していることがわかる。また、2 つの実験とも各ゲインを同じ値に決定しているにもかかわらず非常に良好な結果が得られていること

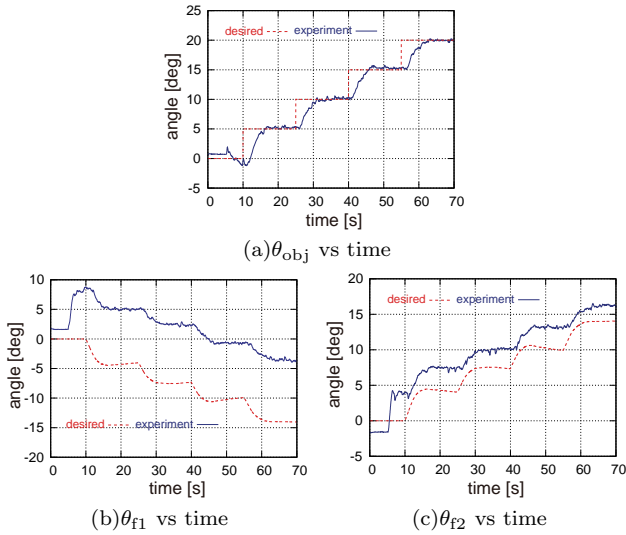


Fig. 8: Experimental results of the posture control of a grasped object when you input up step.

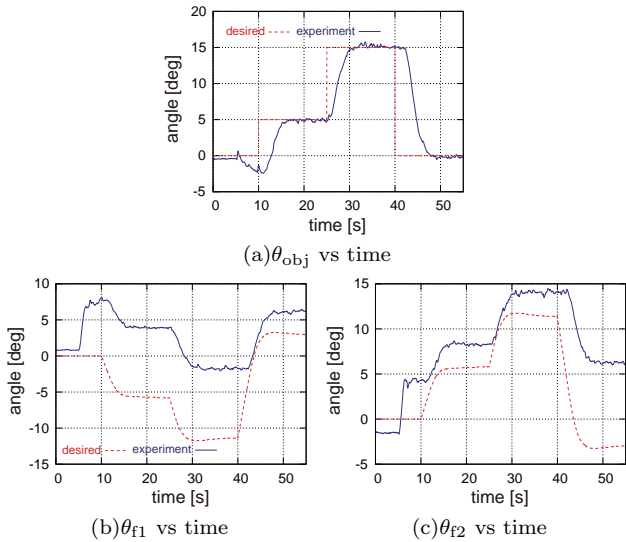


Fig. 9: Experimental results of the posture control of a grasped object when you enter up and down steps.

から、入力ステップに対してゲインチューニングを行う必要がないということであり制御を格段に容易にできる。また、(b)、(c) から両リンクの関節角と仮想関節角目標との間に大きな定常偏差が残っているにもかかわらず、対象物の姿勢は目標値に収束しているのがわかる。つまり、1 段階目制御器で目標値としている物体姿勢を収束させることができれば、両リンクの角度偏差は許容され得るものであると考えられる。さらに、本制御手法においてリンク角度を運動学的手法による計算を行わず把持姿勢を操ることができる。安定把持において従来では安定に把持する力は、ヤコビ行列の計算や系を安定化させるための制御則を必要としていたが、柔軟指を取り付けることで把持・操り制御で不可欠な制御入力なくなり、容易に制御則を表現できる。一方で、対象物が収束するまでに約 5 sec 程の遅れが生じている。一つの原因として、加速度センサの出力をマ

イクロコンピュータで AD 変換を行っており、AD 変換で生じるノイズをデジタルローパスフィルタで大きなノイズをカットしている。ローパスフィルタの持つ基本的な性質として、信号が立ち上がるタイミングに遅れを生じ、波形の角が丸くなって立ち上がりの傾斜が緩くなるのが挙げられる。実験手順の 5 sec の静止状態は立ち上がりを考慮したためである。これらのことから、目標値に収束するまでに時間が生じたと考えられる。収束時間の短縮は今後の課題である。

4. 結言

本稿では、丸ベルトと線形バネを関節周りに対向配置した 2 指ロボットハンドを製作した。また、拮抗側にバネを配置することで生じるリンクの関節可動域の低下を改善するために、バネの復元力が生じない受動駆動機構を設計した。加えて、同期運動の有無による関節可動域を計測し有用性を示した。丸ベルトの接続方法を O 型から V 型に変更を行い、関節可動域と指先押し付け力の向上を実現した。また、2 段階制御則から姿勢操り制御を行った。加えて、各ゲインを同じ値に決定しているにも関わらず非常に良好な結果が得られていることから、入力ステップに対してゲインチューニングを行う必要がない簡易的なプログラムの構築ができた。さらに、リンク角度を運動学的手法による計算を行わず把持姿勢を操ることができ、ビデオカメラのような視覚センサの欠点である低速周期ではなく加速度センサでの高速周期の制御を実現した。

謝 辞

本研究の一部は、科研費基盤研究 A(15H02230), JKA 補助事業 (28-110,2017M-112) を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] 中村太郎, “空気圧人工筋肉を用いたバックドライブ可能な可変剛性機構とその制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.31, No.6, pp.572-576, 2013.
- [2] T.Maeno and T.Hino, “Miniature five fingered robot hand driven by shape memory alloy actuators,” in Proceedings of the 12th IASTED International Conference Robotics and Applications, pp.174-179, 2006.
- [3] T.Inoue and S.Yamamoto and R. Miyata and S.Hirai, “A Robotic Joint Design by Agonist and Antagonist Arrangement with Twisting Small-diameter Round-belts,” IEEE/RSJ Int.Conf. Robotic and Automation., pp.1751-1756, 2015.
- [4] 宮田龍一, 井上貴浩, “上肢筋の拮抗構造を模倣したポリウレタン丸ベルトによる Twist-drive 機構と制御”, 第 16 回計測自動制御学会 SI 部門, 2015.
- [5] 福井航, 小林太, 小島史男, 中本裕之, 前田正, 今村信昭, 白沢秀則, “多肢ロボットハンドのための触覚情報に基づく物体操作”, 第 54 回自動制御連合講演会, 2011.
- [6] 吉川恒夫, “把持と操りの基礎理論 3. 制御” 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4, pp.505-511, 1996.
- [7] 前田仁, 谷江和雄, 小森谷清, “触覚フィードバックを用いた多肢ハンドによる未知形状物体の転がり接触を考慮した操り制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.9, pp.1462-1470, 1995.
- [8] 井上貴浩, 平井慎一, “柔軟指による把持物体の姿勢制御”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol75, No.757, pp.2537-2546, 2009.

弾性ベルト拮抗配置による可変関節剛性と長制御周期実験

○植田 尊大（岡山県大院），井上 貴浩（岡山県大），平井 慎一（立命館大）

1. 緒言

近年，着脱式のリハビリテーションロボットやパワーアシストロボットなどの研究開発が多数行われている．これらのロボットには小型軽量，低費用，滑らかかつ迅速な応答性といったことが求められる．これらの条件を満たすアクチュエータとして，ストリングに振りを加えそのときの長手方向の収縮力を利用する Twisted String Actuator(以下では TSA と称す) が注目されている．Povov ら [1] は単一方向のみの運動である TSA を回転軸周りに拮抗的に配置した回転型 TSA を利用した肘外骨格を開発している．それにより回転軸となるプーリに取り付けられたリンクで重量物の持ち上げを可能にしている．しかし，ここで用いられているストリングは非常に細いため出力の小ささや耐久性，応答性に不安が残る．そのような TSA の問題点を踏まえ，我々は振りを加える対象を直径 2~3mm の小径丸ベルトとし，丸ベルト振り駆動機構を新たに開発している．宮田ら [2] [3] は関節周りの 2 箇所拮抗的に丸ベルトを配置した拮抗型振り駆動機構ロボットフィンガを開発し，2 箇所の丸ベルトに加える振り数を制御することで先端に取り付けたリンクの角度や押し付け力を変化させている．目標値となるリンク角度や押し付け力を正弦波状に変化させることで，滑らかかつ精度の高い動きを実現しているが，2 箇所の振り数の差を生じさせる時間が必要なため急峻な姿勢制御

には対応できず，また，その可動域も $\pm 15^\circ$ 程度に留まっている．そこで，本稿では，上記ロボットを改良し，新たな方法で制御を行う新単関節ロボットフィンガ（以下ロボットフィンガと称す）について説明した後，本ロボットフィンガを用いて角度制御を行うことで改良の有用性を示す．

一方で，人の筋肉の様な粘弾性を有する丸ベルトが組み込まれた本ロボットフィンガは生体模倣の面でも応用が期待できる．一般的なロボット制御にはその性能劣化を防ぐため高速な制御周期が要求される．一方で，人の運動メカニズムはロボット制御に比して遅れの多いシステムであると言える [4] [5]．この”遅れ”とは人の運動制御における α 運動ニューロンに起因し，その値は筋の種類によって異なるが，神経パルスの発生から筋活動までに約 80ms 程度の時間を要する箇所も存在する [6]．そういった伝達遅れが複合的に潜在する動的システムにも関わらず人は適応的な制御を実現している．このような観察の下に，本稿ではロボット制御の制御周期を故意に最大 100ms に遅らせ，生体内の大幅な伝達遅れを模倣した実験を行うことで，本ロボットフィンガが 100ms の遅れにも対応できることを示す．

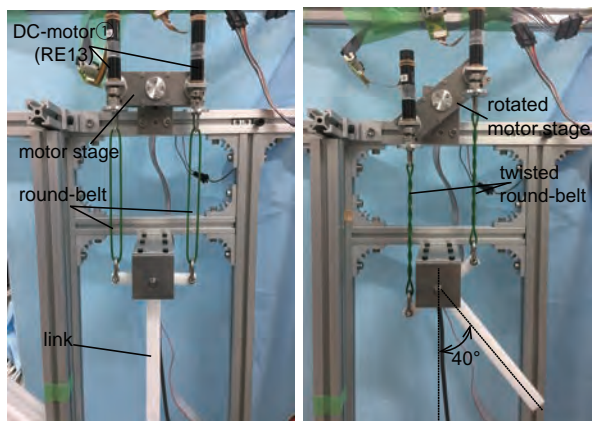
2. 単関節ロボットフィンガ

我々は現在，丸ベルト振り駆動機構を用いることで小型軽量，ローコスト，滑らかかつ迅速な応答性を兼ね備え，なおかつ人の動作を模倣できる機構の実現のために図 1 のような単関節ロボットフィンガを開発し制御を行っている．本章では本ロボットフィンガの構成と新提案の制御手法について説明した後，実験結果を基に本ロボットフィンガの特性について述べる．

2.1 ロボットフィンガの構成と制御手法の新提案

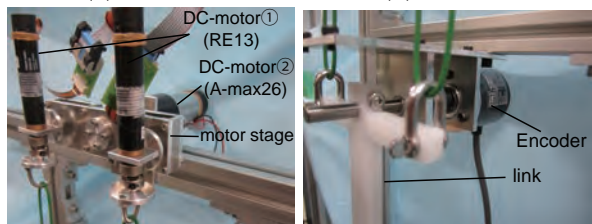
本ロボットフィンガは丸ベルト，2 種類の DC モータが計 3 個，エンコーダ，T 型リンク，モータステージで構成されており，拮抗的に配置した丸ベルトの一端に取り付けられた DC モータ 1 によって丸ベルトに振りを加える．また，リンクの角度はリンクにシャフトを介して取り付けられたエンコーダで計測し，フィードバック制御の制御量とする．

これまで宮田ら [7] が同様の機構を用いて，2 箇所の丸ベルトの振り収縮量に差を生じさせることで先端に取り付けられたリンクを回転させていた．その手法による制御は人の様な滑らかな動きやリーチング運動時に特徴的な角速度ベル型軌道を再現することに成功している．しかし，この制御方法では 2 箇所の振り数の差を生じさせる時間が必要となるため急峻な動きには対応できず，対応可能な動作周波数は 0.3Hz 程度であった．また，リンク可動域も $\pm 15^\circ$ 程度に留まっていた．そこで，本稿では丸ベルトの振り量の差によ



(a) 全体図

(b) 制御後



(c) モータステージ拡大図

(d) リンク拡大図

図 1 単関節ロボットフィンガ．

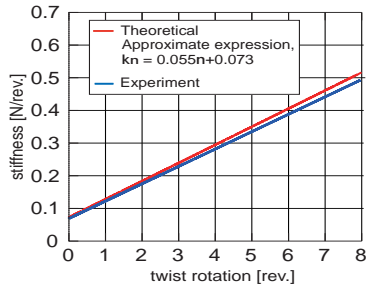


図2 丸ベルトの剛性に関するモデル値と実測値の比較.

てリンクを回転させるのではなく、振り量は同一にしDC モータ2によってモータステージを回転させることで丸ベルトを介して繋がったT型リンクを回転させるという新たな駆動法を提案する。これによりモータステージの回転とリンクの回転を同期させることができ図1-(b)に示すようにリンクの可動域を $\pm 40^\circ$ まで拡張することができる。また、モータステージとリンクの間を軟らかい丸ベルトで仲介することで外部からリンクに加わる衝撃を緩衝させることができる。さらに、我々はこれまで丸ベルトに関するモデリングを行っており [7], 図2のモデル値と実測値が示すように、丸ベルトに加わる振り数が増加すれば剛性は高まるという結果が得られているため、丸ベルトの剛性の違いによって本ロボットフィンガの挙動も変化すると考えている。よって、次節で振り数の違いとロボットフィンガの応答性の関係を検証する。

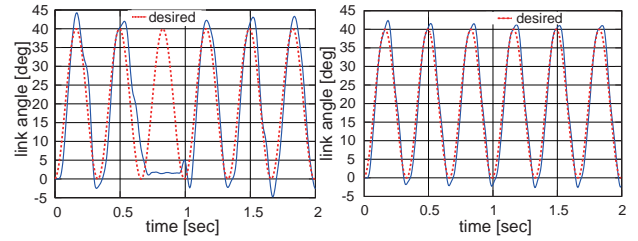
2.2 丸ベルトの振り数と応答性の関係

本節ではリンクの目標角度入力に振幅 $0^\circ \sim 40^\circ$ の正弦波を与える角度制御を行う。ここでは、制御周期が2msのPI制御を行う。また、目標角度 θ^d は以下の式を与える。

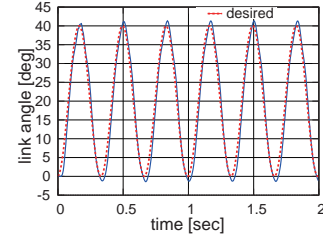
$$\theta^d(t) = 20 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 20. \quad (1)$$

実験ではこの角速度 ω を変化させることで3Hzの正弦波を入力する。また、本実験では直径2mm, 周長260mmの丸ベルトを用い、リンクの回転軸周りに拮抗的に1本ずつ配置する。初期状態として丸ベルトに与える振り数は0, 4, 8回とする。図3が実験結果であり、いずれも縦軸がリンク角度, 横軸が時間, 実線が実測値, 破線が目標軌道を示す。

図3より3Hzの目標軌道において振り数の増加に伴い追従性が向上していることが分かる。さらに、3Hzでの0振りでは動作が完全に乱れているのに対し、8振りでは正確に目標値に追従していることから、本ロボットフィンガにおいては振り数が増加すれば対応可能な動作周期の範囲も拡張することができる。これは前述した丸ベルトの硬さの変化によるものだと考える。丸ベルトの振りが少ない状態、すなわち比較の変形しやすい状態では動作が早くなればなるほどモータステージの回転方向が切り替わる瞬間に慣性の影響を受け、高速走行時に急停止すると体が前のめりになるのと同様に、丸ベルトでも方向転換の直後に行き過ぎが生じてしまう。それにより振りが少ない状態での高速動作では偏差が生じてしまう。反対に振り数が多い



(a) 0 振り ($K_p 300, K_i 22$) (b) 4 振り ($K_p 460, K_i 15$)



(c) 8 振り ($K_p 520, K_i 30$)

図3 3Hzでの応答性.

8回の状態では方向転換直後の変形が少ないため3Hzという早い動作においても素早い切り替えが可能である。ただし、振り数0回でも0.5Hz程度の動作は可能であり、これまでのロボットフィンガよりも応答性は向上していると言える。また、振り数が多いと丸ベルトへの負荷が大きいため状況によって振り数の使い分けが必要である。

3. 長制御周期実験

人の運動メカニズムはロボット制御に比して遅れの多いシステムであると言え、神経パルスの発生から筋活動までに約80ms程度の時間を要する箇所も存在しているにも関わらず適応的な制御を実現している [4] [5] [6]. 本章では故意に制御周期を延長させた中でステップ状と正弦波状のタスクを与えるときの挙動を検証し、生体模倣の面から本ロボットフィンガの有用性を明らかにする。本章の各実験において丸ベルトは前章の実験と同様に直径2mm, 周長260mmのものを拮抗的に1本ずつ配置し、初期状態で与える振り数は0回, 4回, 8回とする。

3.1 ステップ入力に対する応答

本節ではロボットフィンガの目標角度入力を0.5秒毎にステップ状に初期状態から $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 0^\circ$ の順で切り替えた。制御はリンク角度を制御量としたPI制御で行い、制御入力式は式(2)の通りである。

$$u = -K_p(\theta - \theta^d) - K_i \int (\theta - \theta^d) dt. \quad (2)$$

θ^d は上述したように0.5秒毎にステップ的に切り替わる。ここで、比例ゲインと積分ゲインに関してはリンク角度増加時と減少時で別々のゲインを選定しており、リンク増加時と減少時の比例ゲイン, 積分ゲインをそれぞれ $K_{p_inc}, K_{i_inc}, K_{p_dec}, K_{i_dec}$ とする。以上のタスクを行う際の制御周期を2ms, 50ms, 100msと変更しロボットフィンガの挙動を検証する。図4-6の

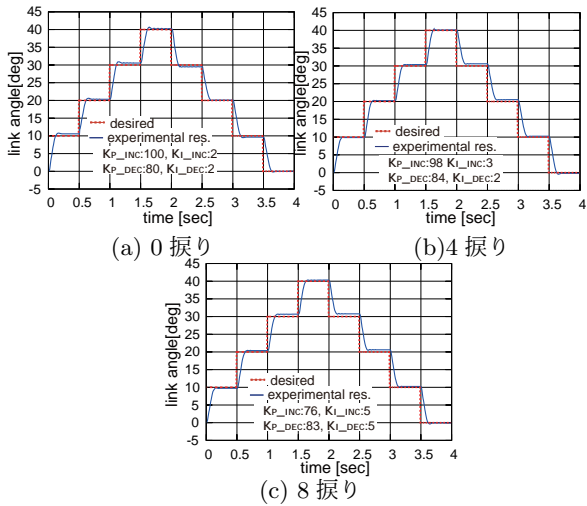


図4 制御周期 2ms でのステップ入力に対する応答.

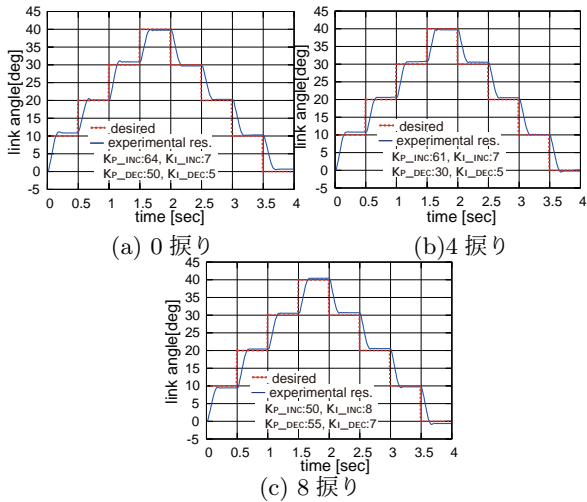


図5 制御周期 50ms でのステップ入力に対する応答.

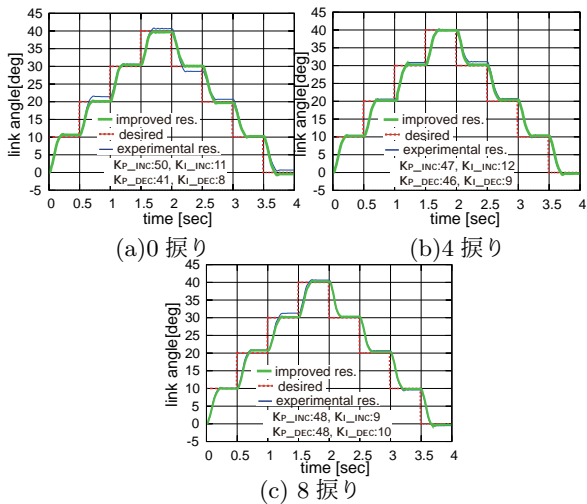


図6 制御周期 100ms でのステップ入力に対する応答.

experimental res. (細い実線) が実験結果であり, 各実験で決定した各ゲイン K_{p_inc} , K_{i_inc} , K_{p_dec} , K_{i_dec} は図の凡例部に記述する通りである. また, いずれも縦軸がリンク角度, 横軸が時間を示す.

結果から, いずれの振り数においても簡易な増加時ゲインと減少時ゲインの調節を行うだけで, 大幅な伝達遅れがある中でも目標値におおよそ追従しているこ

表1 各パラメータ一覧

	a	b	c	d	K_{i_inc}	K_{i_dec}
0回	2	46	-0.5	42	11	8
4回	1	45	-0.5	476.5	12	9
8回	-0.25	47.75	1	47	9	10

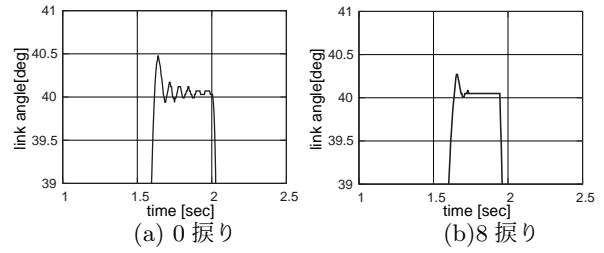


図7 目標値の収束部分.

とが分かる. しかし, それでも制御周期が長くなるにつれて偏差が大きくなってしまいう箇所も存在する. そこでさらなる精度向上のために, 増加時と減少時という2通りのゲインではなく, 比例ゲインのみを各目標角度毎に再選定することで改善を図る. ここで, 目標値毎の比例ゲインは試行錯誤で決めるのではなく, 図6時の比例ゲイン値を基準とし目標値より超過した区間では基準ゲインより小さく, 不足した区間では基準ゲインより大きくなるよう比例ゲインを式(3), (4)のように1次関数的に決定した. 本稿ではこれらの1次関数で決定した比例ゲインを傾斜比例ゲインと呼ぶ.

$$K_{p_inc} = a(\text{目標角度}/10) + b, \quad (3)$$

$$K_{p_dec} = c(\text{目標角度}/10) + d. \quad (4)$$

a, b, c, d の値を表1に, 改善後の結果を図6の improved res. (太い実線) に示す. 結果から積分ゲインはそのまま一次関数的に傾斜比例ゲインを決定することにより目標値との偏差がほとんどなくなり追従精度が改善したと言える. 一方で, 振り数0回と8回の収束部分にも注目したい. 両振り数の収束部分を拡大したものを図7に示す. 図7から振り数が多いと振動が抑制されていることが明らかである. すなわち, 振り数が増加すれば丸ベルトの変形は小さい, つまり剛性が高いと言える. これは2章で述べた丸ベルトの振り数と剛性の関係とも一致しており, 改めてその傾向の妥当性を高める結果となった.

3.2 正弦波入力に対する応答

本節では連続的な動的タスクに対して制御周期を延長したときのロボットフィンガの挙動を検証する. そこで, 目標角度入力に正弦波を印加することとし, 式(1)により振幅 $0^\circ \sim 40^\circ$, 周波数 0.25Hz の正弦波と定める. ここで正弦波の周波数を 0.25Hz に定めたのは前節のステップ実験と同様に実験開始後4秒でリンク角度が 0° に戻ってくるようにするためである.

次に本節での制御内容について述べる. 制御はリンク角度を制御量としたPI制御で行い, 制御入力式は式(2)と同じである. θ^d は上述したように振幅 $0^\circ \sim 40^\circ$, 周波数 0.25Hz の正弦波であり, 各ゲイン K_{p_inc} , K_{i_inc} , K_{p_dec} , K_{i_dec} にはそれぞれ前節の 100ms の結果から

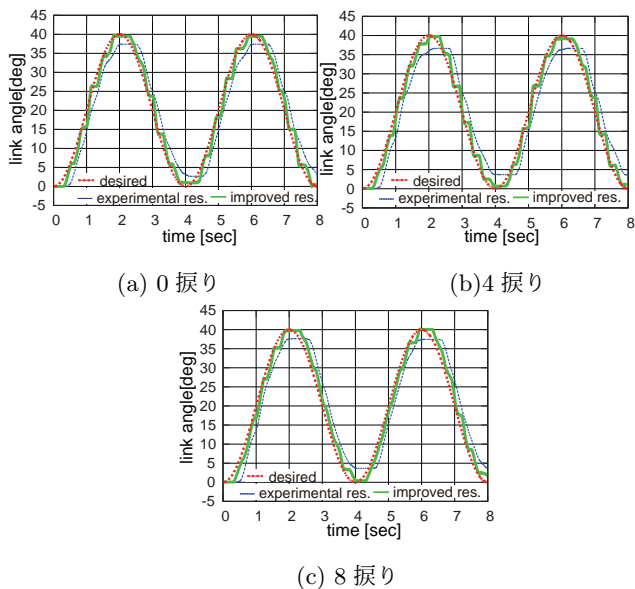


図8 制御周期 100ms での正弦波入力に対する応答。

得られた傾斜比例ゲインと積分ゲイン (式 (3), (4), 表 1) を採用する。以上のタスクを制御周期 100ms で行った結果が図8の experiment res. (細い点線) である。いずれも縦軸がリンク角度, 横軸が時間を示す。

結果から, 前節で得られた傾斜比例ゲインと積分ゲインでは目標軌道を満足しないこと分かる。その要因として, ステップ目標においてはステップが切り替わる瞬間には大きな偏差が生じ, それによって次のステップに到達できるだけの制御入力値がモータに入力されるが, 一方で正弦波目標に対しては目標値とリンク角度の偏差が小さいまま推移するため偏差を埋めるだけの入力が入りづらい。そこで, そのわずかな偏差でも目標軌道を満足できるように積分ゲインを単純に 10 倍することで改善を試みる。その結果が図8の improved res. (実線) であり, ぎくしゃくした挙動は残るものの目標軌道上を推移できていることが分かる。このぎくしゃくした挙動をなくすことは今後の課題であるが, 粘弾性を有する丸ベルトをモータとリンクの間に介することで, モータとリンクを直接接続するより安定姿勢を保ちうるゲイン決定の範囲が広いと考えられ, その分ゲインチューニングが容易になると言える。

4. 結言

本稿では滑らかかつ迅速な応答性を兼ね備え, なおかつ人の動作を模倣できる機構の実現のために, 丸ベルトを拮抗的に配置した単関節ロボットフィンガを開発し, 関節剛性を変化させながらモータステージの回転とリンクの動作を同期させるという新たな駆動法を提案した。これまでの研究から丸ベルトの振り数が増加することで剛性が高まるという傾向が得られていたが, 本ロボットフィンガでの応答性検証実験において, 振り数が多いほど動作が正確になり応答性も向上するという結果から丸ベルトと剛性には正の相関があるという妥当性を高めた。本ロボットフィンガにおいては配置する丸ベルトの本数を増やすことでさらなる関節剛性の向上が見込まれ, 本稿では果たせなかった 4Hz 以上の早い動作にも対応できる可能性があるため今後

実験・検証を行うこととする。

一方で, 生体内の伝達遅れを模擬した長制御周期実験においては傾斜比例ゲインを求めることで 100ms の制御周期にも適応できることを示した。さらに, 制御の中で積分ゲインを引き上げるだけで正弦波のような連続した動的タスクにも対応できる可能性も示唆した。本稿での実験のように簡易なゲインチューニングだけで 100ms という大幅な制御遅れを許容できると, 人を模倣できるだけでなくその間に様々なセンシングや割り込みを行うことができるため, 制御面においても大きなメリットがある。今後は角度制御だけでなくリンクの押し付け力制御においても同様の長制御周期実験を行うことでより人の指先を模倣でき, なおかつ制御面でもメリットをもたらす長制御周期かつ高速動作に対応可能なロボットフィンガへの改良に繋げたい。

謝 辞

本研究の一部は, 科研費基盤研究 A(15H02230), JKA 補助事業 (28-110,2017M-112) を受けて行われたものである。

参 考 文 献

- [1] D.Povov, I.Gaponov, and J.-H.Ryu: Bidirectional elbow exoskeleton based on twisted-string actuators, IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.5853-5858, 2013.
- [2] 宮田, 井上: 高速指先タッピング動作を模倣したポリウレタン丸ベルト振りアクチュエータによる力追従制御, 日本ロボット学会学術講演会, 2X2-01, 2016.
- [3] T.Inoue, R.Miyata, S.Hirai: Antagonistically twisted Round Belt Actuator System for Robotic Joints, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.28, No.6, pp.842-53, 2016.
- [4] S.R.Devasahayam: Signals and Systems in Biomedical Engineering, Plenum Pub Corp, 2000.
- [5] J.Hamill, K.M.Knutzen: Biomechanical Basis of Human Movement 2nd Ed., Lippincott Williams & Wilkins, Chap.4, 2003.
- [6] R.E.Burke: Motor units: anatomy, physiology, and functional organization, In Handbook of Physiology, American Physiological Society, 2, 345/422, 1981.
- [7] 植田, 井上: 丸ベルト振りアクチュエータにおける振り剛性のモデリング, 日本ロボット学会学術講演会, 3E1-05, 2016.

ヒト指バイオメカニズムに基づく ロボット指ワイヤ配置の実験的検討

○荒木佑介(岡山県大院) 井上貴浩(岡山県大)

1. 緒言

ヒトの指はその構造に由来する機能的な特性が多数存在する。例えば、指先で物体をつまみ上げるとき意識せずとも指の姿勢が維持されるため、物体の操作や力の調節が容易になる。複雑な制御の簡単化のためにロボットハンドはこのようなヒトの指が備えているバイオメカニズムに基づく能力を有することが望ましい。また、筋電義手のように把持対象の大きさ・形状が不特定のロボットハンドは、いかなる物体に対しても安定した把持を実現しなければならない。

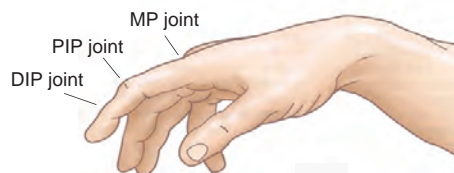
現在ではヒトの手を規範としたロボットハンドが数多く提案されている。これらのロボットハンドの駆動方法にはヒトと同様に各リンクに停止(固定)したワイヤをアクチュエータを用いて引っ張るワイヤ駆動が多く採用されている。このようなワイヤ駆動系では、同じアクチュエータを用いてもワイヤをどのリンクに停止させるかによってロボットの動作や力特性が変化する。Ozawaらはワイヤ駆動系を6クラスに分類し、各ワイヤ配置について運動学の解析を行った[1]。しかし、実際のロボットを用いた性能の評価は行われていない。発揮力や動作は実際のロボットを用いた実験を行うことで、より明確な性質を確かめることができると考えられる。このようなことから、本稿では4パターンのワイヤ配置を採り上げ、実機を用いた実験を通してヒトのバイオメカニズムに基づく能力を再現するために最適な機構を明らかにする。

2. 先行研究とワイヤ配置

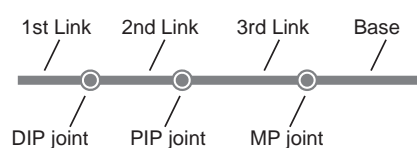
本章では、比較を行う4パターンのワイヤ配置を紹介する。はじめに、ワイヤ配置の条件を設定する。ここではワイヤ配置の組み合わせが多い第2~5指(拇指以外)を取り扱うこととし、ロボットの構成はヒトの指(図1(a))と同様に図1(b)に示すような3関節とする。また、アクチュエータは一関節ごとに最大1個とし各ワイヤ配置では1~3個のアクチュエータを用いる。ここで、アクチュエータの数とワイヤの停止位置によってはすべての関節が屈曲しない配置が存在する。例えば、アクチュエータ1個のときワイヤを第2リンクに停止させるとDIP関節が屈曲しない。そのため、停止位置はすべての関節が最大屈曲角まで屈曲するように配置する。以上のワイヤ配置条件を以下にまとめる。

1. リンク構成は3関節。
2. 各ワイヤ配置で用いるアクチュエータは1~3個。
3. ワイヤはすべての関節が最大屈曲角まで屈曲するように配置する。

次に上記の条件内で考えられるワイヤ配置を挙げ、その配置を採用している先行研究を紹介する。なお、本



(a) 手の指関節 [2]

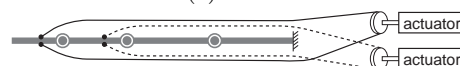


(b) ロボット指の構成

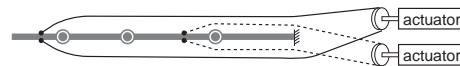
図1 ヒトの手とロボット指



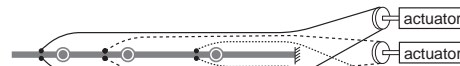
(a) DIP 型



(b) DIP-PIP 型



(c) DIP-MP 型



(d) DIP-PIP-MP 型

図2 ワイヤ配置

章で紹介する先行研究ではアクチュエータやワイヤの引っ張り機構、伸展の方法が異なる場合があるがワイヤを巻き取ることでロボットが屈曲するという本質的な駆動方法は同等であり、本稿ではワイヤの停止位置に注目するためそれらの相違は考慮しないこととする。

図2(a)は1本のワイヤがロボットの第1リンクに停止しているワイヤ配置(以下ではDIP型と呼ぶ)である。この配置は把持のみを目的としたハンドに多く採用されている[3-5]。近野らは、このDIP型の3指ロボットハンドを開発し接触センサを用いて未知物体の把持を実現した[5]。DIP型のメリットは少ないアクチュエータで駆動できるため小型化が容易な点である。また、構造がシンプルのためメンテナンスを行いやすい。

次に考えられる配置は2本のワイヤが2個のアクチュエータによって独立に引っ張られる構造である。図2(b)は両ワイヤがそれぞれ第1リンク、第2リンクに停止

しているワイヤ配置 (以下では DIP-PIP 型と呼ぶ) である。Melchiorri らが開発した UB Hand IV にこのワイヤ配置が採用されている [6]。このワイヤ配置は、ヒトの筋・腱構造に近い構造である。ヒトの第 2~5 指は主に深指屈筋と浅指屈筋と呼ばれる 2 種類の筋が作用して屈曲する。各筋の腱はそれぞれ末節骨 (図 1(b) では第 1 リンク)、中節骨 (第 2 リンク) に停止している。このようにヒトの手の構造を最小数のアクチュエータで再現している。

DIP-PIP 型と同様に 2 本のワイヤによる駆動方法では図 2(c) に示す DIP-MP 型が挙げられる。ワイヤの停止位置はそれぞれ第 1 リンクと第 3 リンクである。Seki らはこの DIP-MP 型ワイヤ配置を採用した 5 指ハンドを開発し、力配分機構を用いてピック&プレースを実現している [7]。

最後に図 2(d) に示すようにすべての関節にワイヤが停止している DIP-PIP-MP 型である。この配置はすべての関節が制御可能であるため、精密な指姿勢制御を目的としたロボットハンドに用いられている [8-10]。

3. ロボット指の設計

ここでは、本実験で使用するロボット指の設計について述べる。前述の通りロボットは 3 関節で構成し、アクチュエータには DC モータを用いる。各リンク長は成人男性の示指を参考にし、材料にはポリアセタール (POM) を使用する。

本機構では図 3 に示すように各モータにシャフトを介して 2 つのプーリを取り付け、ワイヤをそれぞれ逆巻きで巻き付ける。この機構によってモータをどちらの方向に回転させても一方が腱を巻き取り、他方は腱を送り出すため 1 個のモータで屈曲・伸展を行うことが可能である。この機構はバネなどの弾性力のみで伸展を行う機構に比べモータトルクの損失が少ない。しかし、このように屈曲と伸展を同一のモータで行う機構はワイヤのテンションをあらかじめ調整しておく必要がある [11]。また、屈曲位では伸展位に比べてロボット指内のワイヤ長が短くなるため、そのテンションのゆるみによって動作遅れを生じる。このため本機構では、伸展側のワイヤにトーションバネを取り付け、ワイヤのゆるみをバネの復元力で引っ張り動作遅れを回避する。さらに、屈曲の過程で徐々にバネが自然長に復元するため、屈曲時のモータトルクの損失が少ない。各リンクの屈曲角度は $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ とし、関節に屈曲角度を制限する機構を設けることでこの可動域を実現する。また、ワイヤをリンクの内部に通すことで物体把持を行うときワイヤが物体と干渉しないようにリンクが腱鞘の役割を果たす。図 4 にロボット指の全体図を示す。なお、図 4 は DIP-PIP 型ワイヤ配置であり、アクチュエータやワイヤの数は配置パターンによって増減する。

4. 比較実験

本章では、開発したロボット指を用いて比較実験を行う。第 2 章で紹介したワイヤ配置を本機構によって再現した模式図を図 5 に示す。

比較する性能は、以下の 3 項目とする。1 つ目は把持力である。把持力は握力把持 (Power grasp) における物体の保持能力であるため、ロボットハンドの最も重

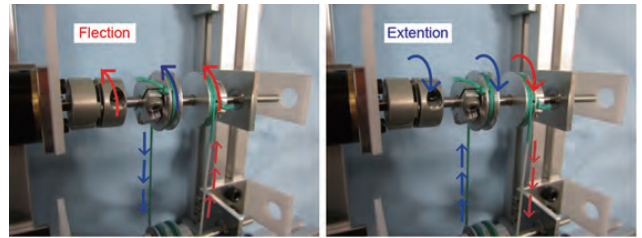


図 3 ワイヤ巻き取り機構

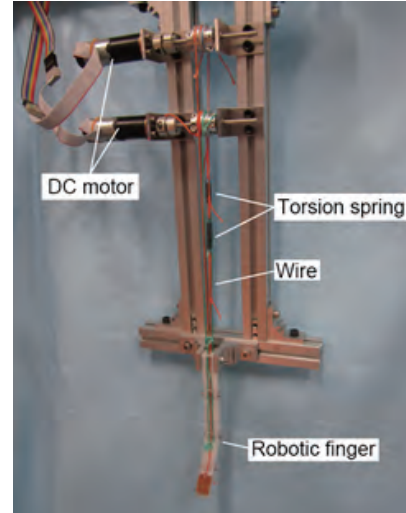


図 4 ロボット指

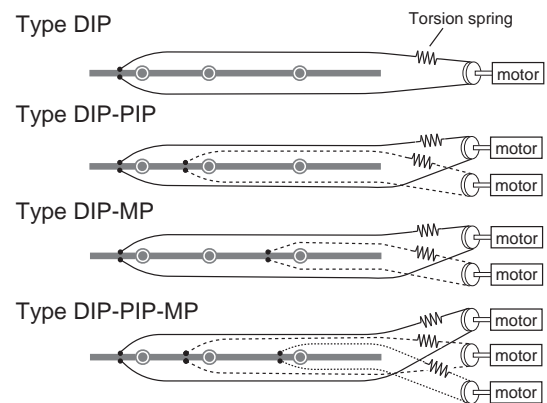


図 5 実験で比較するワイヤ配置

要な性能である。2 つ目は精密把持 (Precision grasp) のために重要な指先力である。多関節ロボットの精密把持では、把持中に各関節が拘束されていなければ正確な指先力制御は困難である。そのため、本実験では指先力計測中の屈曲姿勢も同時に評価する。3 つ目は屈曲力配分である。ハンドが安定して物体把持を行うためにその質 (Grasp quality) を向上させる研究が行われている [12, 13]。本稿では、各関節間の屈曲力のバランスを計測することで把持の質を評価する。なお、上記 3 つの比較項目のうち把持力、指先力は使用するアクチュエータの性能によって発揮力が変化する。また、比較するワイヤ配置ごとにモータ数が異なるため単純に発揮力を比較できない。このため、本稿では次式を用いて正規化を行う。

$$F_{normalize} = \frac{F}{n}. \quad (1)$$

ここで、 n はモータ数である。式 (1) を用いることで、モータ 1 本当たりの発揮力を求めることができ動力の伝達効率が明らかになる。

4.1 把持力

把持力は、図 6(a) のようにロードセルを包み込むようにして計測する。各モータへの入力はそれぞれ最大電圧指令とし、各ワイヤ配置でそれぞれ 5 回ずつ計測を行い、平均を計測結果とする。また、前述の通りその結果に対して式 (1) を用いて正規化を行う。

表 1 に実験結果を示す。全体としてモータ数が増加すると伝達効率が悪化する傾向にある。これはアクチュエータと共にワイヤが増加し、ワイヤどうしが干渉するためであると考えられる。ヒト型ロボットハンドの大きさはヒトの手と同程度の大きさが求められ、さらに常に指の姿勢が変化する。そのような狭く動的なスペースに複数のワイヤを干渉させずに配置することは困難である。そのため、本機構と異なる構造のロボットハンドにおいても、アクチュエータの増加とともに動力の伝達効率が低下する傾向があると考えられる。また、DIP-MP 型の発揮力は同じモータ数の DIP-PIP 型の 6 割以下である。このことから第 3 リンクに停止するワイヤは把持力への寄与が少ないことが示唆される。実際、ヒトの MP 関節を屈曲させる掌側骨間筋と背側骨間筋は他の関節を屈曲させる筋に比べ非常に小さい。そのためそれらの筋は主に力の発揮には用いられない。ロボットでも同様に MP 関節を屈曲させるワイヤは力の発揮という点では十分な効果を得られないと考えられる。

4.2 指先力

本稿の指先力の計測は図 6(b) に示すように、固定した金属板にロードセルを取り付けロボットの指先の発揮力を計測する。ロボットの姿勢以外の計測条件はすべて前節と同様である。

計測結果を表 2 に示す。前節と同様にモータ数が増加すると動力の伝達効率が低下している。また、図 7 は計測中のロボットの姿勢を示したものである。ワイヤ張力下では図 7 のように DIP 型と DIP-MP 型の PIP 関節が伸展する。力発揮時にロボット指の姿勢が変化するワイヤ配置では指先力制御が困難であり精密把持に適していない。この結果から、第 2 リンクに停止するワイヤは PIP 関節の屈曲力を増加させることで屈曲位の維持に寄与していると考えられる。

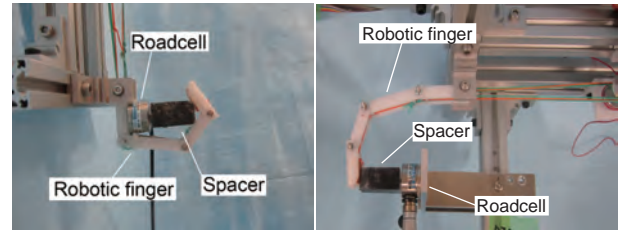
4.3 屈曲力配分

ここではロボット指の DIP 関節、PIP 関節、MP 関節の屈曲力を計測しそのバランスを評価する。図 8 に示すように、本実験では計測する関節を 45° 屈曲させ、計測を行わない関節は伸展位で関節を拘束し一関節ごと計測を行う。

各モータへの入力は最大電圧指令とし、計測は各関節に対して 5 回ずつ行い平均値を計測結果とする。また、次式を用いて正規化を行う。

$$F_{\text{ratio}} = \frac{F_i}{F_{\text{DIP}} + F_{\text{PIP}} + F_{\text{MP}}} \times 100, \quad (2)$$

($i = \text{DIP, PIP, MP}$).



(a) 把持力 (b) 指先力

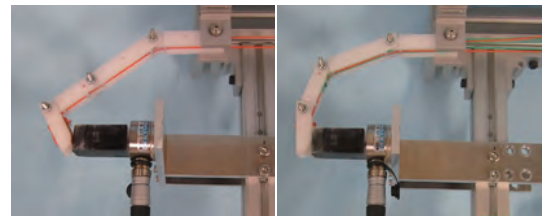
図 6 各実験時のロボット指の初期姿勢

表 1 把持力の計測結果

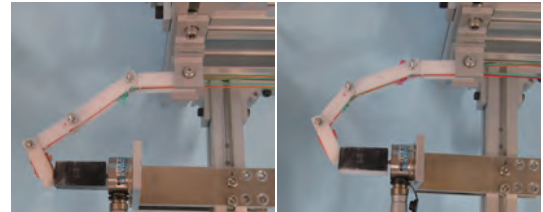
Tendon configuration type	DIP	DIP-PIP	DIP-MP	DIP-PIP-MP
The number of DC motors	1	2	2	3
Grasp force [N]	8.22	14.02	7.94	9.57
Normalized Grasp force [N]	8.22	7.01	3.97	3.19

表 2 指先力の計測結果

Tendon configuration type	DIP	DIP-PIP	DIP-MP	DIP-PIP-MP
The number of DC motors	1	2	2	3
Fingertip force [N]	5.23	8.82	8.80	7.23
Normalized Fingertip force [N]	5.23	4.41	4.40	2.41



(a) DIP 型 (b) DIP-PIP 型



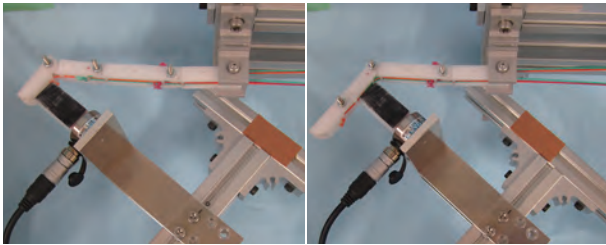
(c) DIP-MP 型 (d) DIP-PIP-MP 型

図 7 ワイヤ張力下における指姿勢

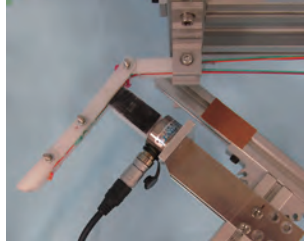
図 9 に実験結果を示す。また、男子学生 (22~23 歳) 10 名に対し示指を用いて同様の実験を行った結果を図 10 に示す。これらの結果から、DIP-PIP 型と示指の屈曲力配分が類似していることがわかる。第 2 章でも述べたが、DIP-PIP 型はヒトの構造に近い。このようにワイヤの停止位置をロボット上に再現することで、ヒトと同様の力配分を実現することができることが明らかとなった。

4.4 比較実験のまとめ

把持力の比較では、ワイヤの本数が増加するほど動力の伝達効率が悪化し、第 3 リンクに停止するワイヤの把持力への寄与が少ないことが明らかとなった。また、指先力の比較では第 2 リンクのワイヤが指先力発揮時の指姿勢の維持に効果的であることが示された。最後に行った屈曲力配分の比較では、DIP-PIP 型がヒトの



(a) DIP 関節 (b) PIP 関節



(c) MP 関節

図 8 屈曲力配分計測の様子

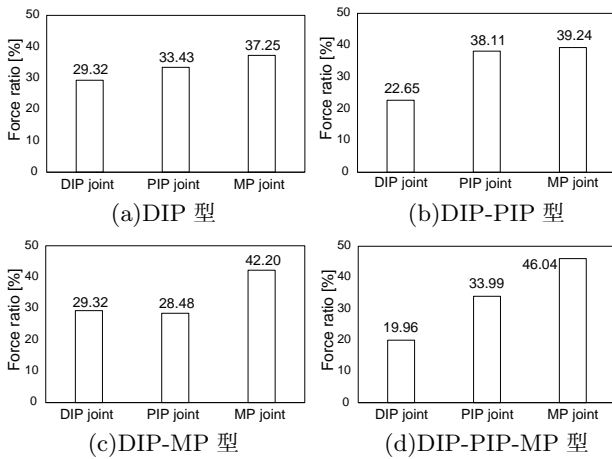


図 9 屈曲力配分の計測結果

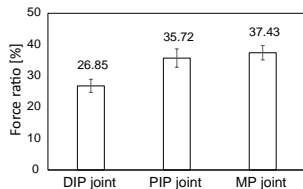


図 10 示指の屈曲力配分

示指と同等の力配分を実現していることが明らかとなった。さらに把持力、指先力の両計測において正規化前の発揮力に注目すると、モータ数に関わらず DIP-PIP 型が最大であることがわかる。以上の結果を踏まえると DIP-PIP 型がヒトのバイオメカニズムに基づく能力の再現に最適なワイヤ配置であると考えられる。

5. 結言

本稿では、定めた条件下で考えられる 4 パターンのワイヤ配置に対して把持力、指先力、関節の屈曲力配分を定量的に評価することでヒトのバイオメカニズムに基づく能力の再現に適した機構を示した。これは今後のロボットハンドの設計において有益であると考え

られる。さらに多くの比較項目、ワイヤ配置について検討しワイヤ駆動系の諸特性をより明確にすることが今後の課題である。

謝 辞

本研究の一部は、科研費基盤研究 A(15H02230)、JKA 補助事業(28-110,2017M-112)を受けて行われたものである。

参 考 文 献

- [1] R.Ozawa, et al. "Analysis, classification, and design of tendon-driven mechanisms", IEEE transactions on robotics, 396-410, 2014.
- [2] A.I.Kapandji, カバンジー機能解剖学 上肢, 医歯薬出版株式会社, 2011.
- [3] 神川康久, 前野隆司, "ヒトの把持力分布を模倣した 5 指なじみ機構を有する義手の開発", 日本機械学会論文集, Vol.74, No.746, pp.208-214, 2008.
- [4] 鴨川雄樹, 桑原陽平, 林憲玉, "腱駆動機構を用いたヒューマノイドロボットハンドの開発", 日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス講演会, pp. 25-29, 2014.
- [5] 近野敦, 多田充徳, 長嶋功一, 稲葉雅幸, 井上博允, "人間型多指ハンドの開発及び手探りによる未知物体の把持実験", 日本機械学会論文集, Vol.65, No.638, pp.188-193, 1999.
- [6] C.Melchiorri, et al. "Development of the UB hand I V: Overview of design solutions and enabling technologies." IEEE Robotics and Automation Magazine, pp.72-81, 20.3.2013.
- [7] T.Seki, et al. "Development of Five-Finger Multi-DoF Myoelectric Hands with a Power Allocation Mechanism", Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2054-2059, 2013.
- [8] S.C.Jacobsen, et al. "The UTAH/M.I.T. Dexterous Hand:Work in Progress", The International Journal of Robotics Research, Vol.3, No.4, pp.21-50, 1984.
- [9] C.Konnaris, et al. "Etho Hand:A Dexterous Robotic Hand with Ball-Joint Thumb Enables Complex In-hand Object Manipulation", 6th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp.1154-1159, 2016.
- [10] M.Grebenstein, et al. "Antagonistically driven finger design for the anthropomorphic DLR hand arm system." Humanoid Robots (Humanoids), 2010 10th IEEE-RAS Int. Conf. on IEEE, pp.609-616, 2010.
- [11] S.C.Jacobsen, et al. "Control strategies for tendon-driven manipulators." IEEE Control Systems Magazine, pp. 23-28, 10.2.1990.
- [12] M.Pozzi, et al. "Grasp Robustness and Contact Force Distribution in Underactuated and Compliment Robotic Hands", IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.2, No.1, pp.329-336, 2017.
- [13] Y.Kamikawa, et al. "Underactuated Five-Finger Prosthetic Hand Inspired by Grasping Force Distribution of Humans.", IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp22-26, 2008.

停止位置の異なる 2 本腱ロボットフィンガの開発

Development of Robotic Finger Having Double-Tendons of Different Insertion Position

○学 荒木佑介 (岡山県大院) 正 井上貴浩 (岡山県大)

Yusuke ARAKI, Okayama Pref. Univ., c325002u@ss.oka-pu.ac.jp

Takahiro INOUE, Okayama Pref. Univ., inoue@ss.oka-pu.ac.jp

This paper newly proposes a three-joint robotic finger mechanism on the basis of biomechanical structure of human fingers. This finger consists of MP, PIP, and DIP joints activated by two tendons and motors. This tendon driven mechanism is designed to create secure coupled motion of the joints, which can be realized by applying different insertion configuration of the tendons. We experimentally verify that the bioinspired mechanism is appropriate for adaptive grasping. Finally, this study identifies a transfer function model with respect to the tapping force from dynamic repetitive motion.

Key Words: Robotic hand, Robotic finger, Tendon driven, Insertion position, Transfer function

1 緒言

現在ヒューマノイドロボットの研究・開発が盛んに行われており、今後 10 年程度のうちに人間に取って代わって様々な仕事を行うことが期待されている。そのような汎用性の高いロボットが人の生活環境に適応し、道具や乗り物を操作するためには、人の手と同等の機能を有するロボットハンドの搭載が不可欠である。このため、ロボットハンドの研究は現在でも盛んに行われており、先行研究では少ないアクチュエータで多関節ハンドを制御する劣駆動機構が多数提案されている。神川らは、5 指 15 自由度 (各指 3 自由度) を有するロボットハンドを 1 つのアクチュエータのみで駆動する劣駆動機構を開発した [1]。駆動方法は腱駆動であり、人の把持力分布を再現することでなじみ把持を実現している。しかし、神川らの提案するロボットハンドのように、各指 3 関節のロボットハンドを 1 つのアクチュエータのみの腱駆動で制御する場合、屈曲力が作用しない関節が存在するため屈曲が不規則になることが考えられる。このような劣駆動機構では非線形な出力を得ることが多いうえに、外乱が加わることで屈曲・伸展動作が不安定になる傾向にある。

一方で、腱駆動ロボットハンドの研究ではなじみ把持やパワーグラスブなどの静的性能に焦点が絞られており、動的な性能の評価を行っている研究が少ない。人型ロボットハンドのマニピュレーションでは、ハンドの屈曲・伸展・姿勢維持・連続屈曲などの種々の動作のためにアクチュエータへの入力素早く変化することが予想される。このため、人型ロボットハンドの研究においては開発と同時にその動的特性の評価が必要であると考えられる。

また、近年ではバイオメカニクスやバイオミメティクスの発展が顕著であり、生体を手本とすることで効率的で機能的なシステムの開発が行われている。生物は非常に長い年月をかけて淘汰されているため、そのメカニズムには無駄がなく洗練されている。これは人間も例外ではなく、人型ロボットハンドの開発において人の手の構造を模倣することは有効な手段であると考えられる。

このようなことから、本稿では人の手の構造を模倣するロボットフィンガの開発を行い、その機能を再現する機構を提案する。また、腱の停止位置に着目した研究が少ないことから、人の腱の停止位置をロボット上に再現する。異なる停止位置パターンを比較することで物体把持と指先押しつけにおける影響を考察し、提案機構の有用性を示す。加えて、開発したロボットの静・動特性の評価を行う。

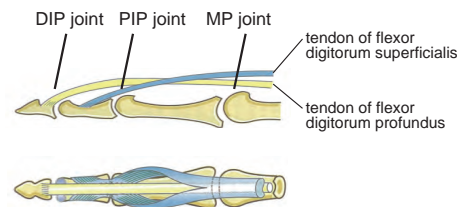


Fig.1 The insertion positions of flexor tendons [2].

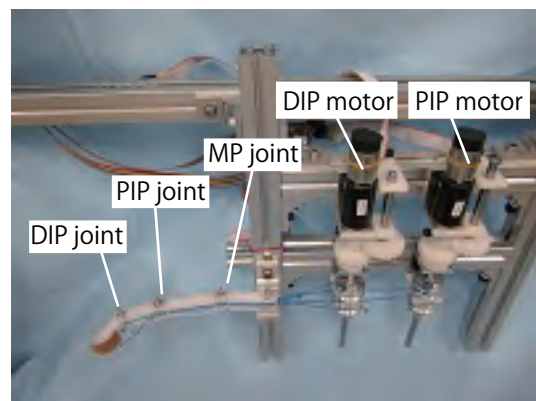


Fig.2 A developed robotic finger.

2 腱駆動ロボットフィンガの開発

拇指を除く 4 指の屈曲には主に DIP 関節 (第 1 関節) を屈曲させる深指屈筋と PIP 関節 (第 2 関節) を屈曲させる浅指屈筋が作用し、これらの屈筋は腱 (非伸縮性の繊維) を媒介して各指を屈曲させる。これら 2 種類の屈筋をそれぞれ DC モーターで模倣し (以下では浅指屈筋、深指屈筋を模倣させるモーターをそれぞれ PIP モーター、DIP モーターと呼ぶ)、腱には非伸縮性の糸を用いる。両モーターにはプーリを取り付け、そのプーリに固定した腱を巻き取ることでロボットの屈曲・伸展制御を行う。また、これらの屈筋腱は Fig.1 のように異なる指骨に停止し、浅指屈筋は中節骨基部、深指屈筋は末節骨基部に停止する [2]。それぞれの停止位置をロボット上に再現することで人の指の安定した屈曲を実現する。

一方で、人の手には物体把持を安定化させるためのなじみ把持と呼ばれる機能が存在する。この機能によって、把持動作におい

Table 1 Specifications of the grasped objects.

object shape	mass [g]	size [mm]
cylindrical(large)	187	$\phi 101$
cylindrical(small)	105	$\phi 57$
cubic(large)	232	$170 \times 118 \times 102$
cubic(small)	212	$110 \times 80 \times 46$

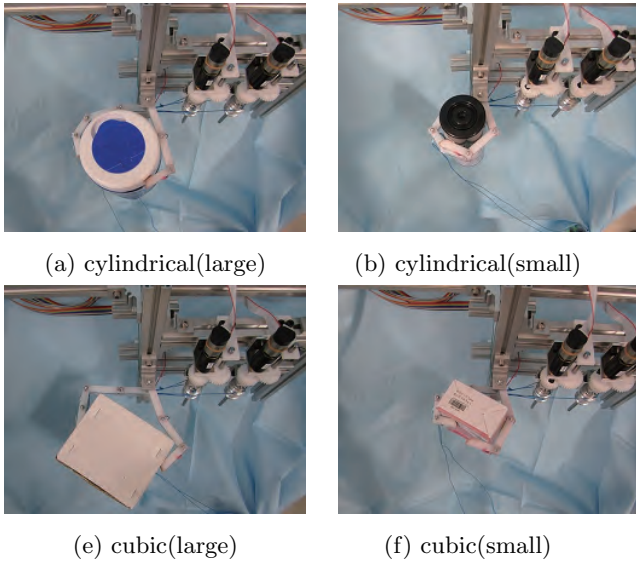


Fig.3 Experiments of adaptive grasps for several objects.

て各指が物体を包み込むように屈曲するため安定した把持が可能である。腱駆動の場合、腱がロボット内部を通るためある関節が物体に接触した場合でも他の関節の回転が制限されない。このため、予め物体の形状を知ることなくなじみ把持が可能となる。以下ではなじみ把持の検証実験も合わせて行う。本稿では、ロボットの指部の材料にはポリアセタールを用い、信号生成とロボット制御系はすべてマイコンで構築する。

Fig.2 に開発したロボットフィンガを示す。リンク数、関節数は人の第2~5 指と同様に4 リンク 3 関節とし、各リンク長はおおよそ成人男性の示指と同等となるように設計を行った。なじみ把持の検証実験として円筒形と直方体それぞれ2 種類の大きさの物体の把持実験を行う。なお、ここでは物体把持のために拇指を模擬したロボット(以下では拇指ロボットと呼ぶ)を補助として取り付ける。拇指ロボットも DC モータを用いた腱駆動とし、3 リンク 2 関節とする。ただし、拇指に作用する屈筋は主に長母指屈筋のみであることからアクチュエータは1 つのみとする。実験では各モータへの入力は最大電圧指令とする。なじみ把持の結果と把持物体の仕様を Fig.3, Table.1 に示す。提案機構を用いることで、Fig.3 のように大きさ、形状の異なる物体に対してなじみ把持が可能であることがわかる。また、把持において物体の情報を必要としないためヒューマノイドが把持を行うときの演算処理の軽減に有効であると考えられる。

3 構造特性

本機構では人の手の構造を模倣しており、PIP モータと DIP モータの腱は異なる位置に停止する (Fig.4)。この構造に関する研究は少なく、この構造的な特性を解明することができれば今後のロボットハンド開発への応用が十分に期待できる。本章では、ロボットの腱の構造を変更する2 つの実験を行うことで、指先押しつけと物体把持における本機構の特性を考察する。本章の2 つの実験においてモータへの入力は最大電圧指令とし、計測はそれぞれ5 回行う。

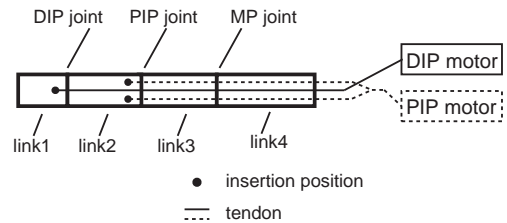


Fig.4 Insertion positions of tendons.

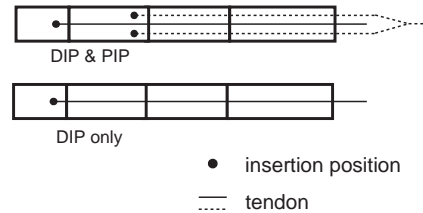


Fig.5 Difference of tendon configuration for an experiment of fingertip force.

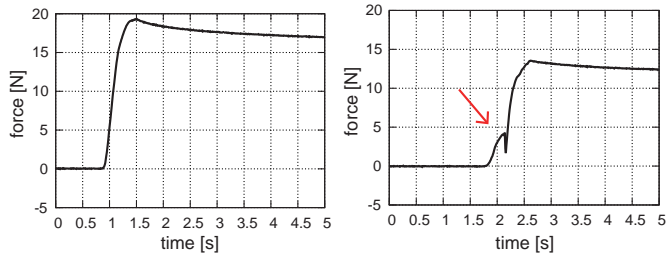
3.1 指先押しつけ

本機構の指先押しつけ時の特性を調べるために、提案機構である腱が2 本の場合 (Fig.5 上図) と腱が1 本のみ (Fig.5 下図) の場合の指先力の比較実験を行う。実験は固定した板にロードセルを取り付けてロボットの指先で押しつける。計測結果の一例を Fig.6 に示す。

Fig.6 に示すように腱1 本の場合に比べ、腱2 本の場合では指先力が増加していることがわかる。この結果から PIP モータは指先力増加に寄与していることが理解できる。さらに、Fig.6(b) の2.2 s 付近では不規則な挙動を示している。これは腱の張力下で PIP 関節の予期しない伸展が生じたためである。この伸展を Fig.7 を用いて説明する。(a1), (b1) はそれぞれ両方のモータを用いた駆動と DIP モータのみの駆動を表している。リンク1 が物体に接触し屈曲できなくなったとき、通常は (a2) のように両関節で屈曲力を生成できるためロボットは屈曲位を維持する。しかし、DIP モータのみの駆動では DIP 関節のみに屈曲力が生じ (b1), PIP 関節は屈曲力を生成できないためリンク2 がリンク1 に対して屈曲をはじめ、同時にリンク2 は (b2) のようにリンク3 に対して相対的に伸展する。この PIP 関節の予期しない伸展の撃力が Fig.6(b) の2.2 s 付近で計測されたと考えられる。この実験から PIP モータの腱はリンク2 に停止することで指先力の増加だけでなく、安定的な指先押しつけに寄与していることが明らかとなった。この構造的な特性は高指先力を有するロボットハンドの安定的つまみ動作の実現において非常に有効であると考えられる。

3.2 物体把持

人の手を模倣した提案機構は通常 Fig.8 上図に示すような腱停止位置 (以下構造 A と呼ぶ) を構成するが、Fig.8 下図のように両モータの腱がいずれも指先に停止している構造 (構造 B) においても各関節の屈曲が可能である。しかし、構造 B では DIP 関節の屈曲力が増加し把持力分布が構造 A とは異なると予想される。本節では構造 A と構造 B の屈曲力配分の比較を行うことで、ロボットの物体把持動作への影響を考察する。本実験では構造 A と構造 B における MP, PIP, DIP 関節の3 箇所の伸展状態における屈曲力の計測をそれぞれ5 回ずつ行い、平均値を計測結果とする。実験結果を Fig.9 に示す。縦軸は、平均した計測結果から次式を用いて算出した全体の屈曲力に対する各関節の屈



(a) with PIP & DIP motors (b) with DIP motor only

Fig.6 Experimental results of fingertip force.

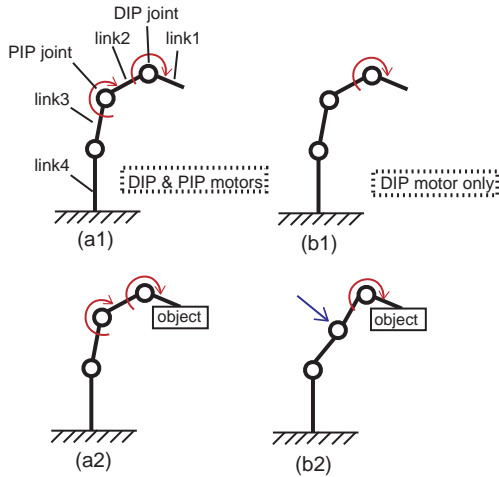


Fig.7 The mechanism of accidental extension.

曲力の割合 F_i を表す.

$$F_i = \frac{f_i}{f_{mp} + f_{pip} + f_{dip}} \times 100[\%], \quad (i = mp, pip, dip). \quad (1)$$

ここで、 $f_i[N]$ は各関節の屈曲力を表す。構造 A では指先に近づくにつれて屈曲力の割合が減少するのに対して構造 B では逆に指先に近づくにつれ増加している。この結果から、腱停止位置の違いはロボットフィンガに異なる力配分を付与することが明らかとなった。加えて、Fig.10 のように物体把持動作を比較すると構造 A ではなじみ把持を実現しているのに対し、構造 B では指先が物体接触後も DIP 関節が屈曲を続けるためなじみ把持が実現できなかった。これは力配分の計測結果から得たように、構造 B では指先が最も屈曲力が大きいためであると考えられる。これらのことから、提案機構では PIP モータがリンク 2 に停止しロボットに適切な屈曲力分布を与えることで、安定した物体把持を実現していると考えられる。また、ロボットハンドの屈曲力分布はなじみ把持実現のための重要な要素であることが示唆される。

以上の構造評価から、提案機構は劣駆動でありながら安定した指先押しつけと物体把持を実現していることが示された。さらに人型ロボットハンドへの応用が可能であり、動作の安定を機構によって実現しているためハンドのロボスタな制御に有効な機構であるといえる。

4 性能評価

本章では、ロボットフィンガの運動特性を明らかにするための実験と解析を行う。把持力、屈曲時間の検証を静特性評価とし、タッピング運動（繰り返し指先おしつけ運動）の検証を動特性評価とする。なお、以下の実験において腱停止位置はすべて提案機構である Fig.4 の状態で行う。

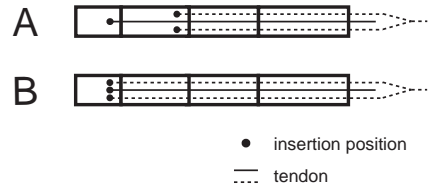


Fig.8 Difference of tendon configuration for an experiment of force distribution on a finger.

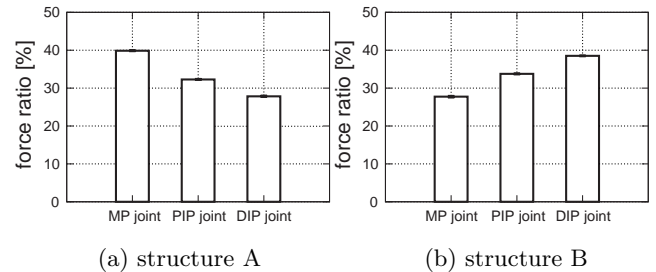
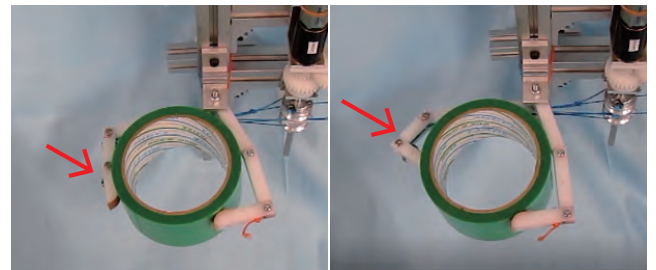


Fig.9 Experimental results of force distribution in the tendon configuration of A and B.



(a) structure A (b) structure B

Fig.10 This result shows irregular joint motion in the index finger while using the configuration B.

4.1 静特性

把持力はロボットにロードセルを握るように屈曲させることで計測を行う。把持力計測の様子を Fig.11 に示す。Fig.4 に示すリンク 4 にロードセルを取り付け、伸展位から計測を開始する。本実験ではロードセルとロボットの間にはスペーサを挿入する。また、2つのモータへの入力はいずれも最大電圧指令とし、最大把持力を計測する。屈曲時間はロボットの伸展位（腱巻き取り角度 0° ）から最大屈曲姿勢（巻き取り停止）になるまでの時間を計測する。なお、最大屈曲姿勢は各関節が伸展位から 90° 屈曲した状態である。各計測はそれぞれ 4 回ずつ行い平均値を計測結果とする。

計測の結果、把持力は 37.7 N 、屈曲時間は 1.89 s であった。ロボットハンドの各指に約 22.5 N の把持力があると、電動ドライバー等の道具を使って作業することが可能である [3]。提案機構ではこの基準を約 68% 上回ることから、人型ハンドのためのロボットフィンガとして妥当な把持力を有すると言える。しかし、屈曲時間は人が 0.5 s 以下であるのに対して本ロボットは低速であるため今後改良の必要がある。

4.2 動特性

本節ではタッピング動作から動的性能の評価を行う。高いタッピング能力は指の連続屈曲や滑らかな連動動作を実現するために不可欠であることが示唆されている [4]。ここでは、タッピングのバンド幅をタッピング能力として定義し、タッピング実験の結果を基に作成するゲイン線図からバンド幅を求める。さらに、

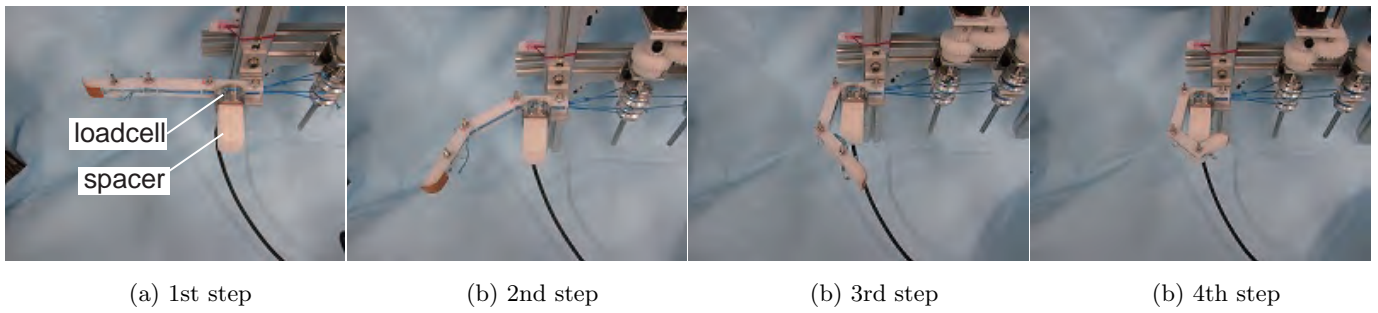


Fig.11 Experimental movement of the robotic finger for measuring static performance.

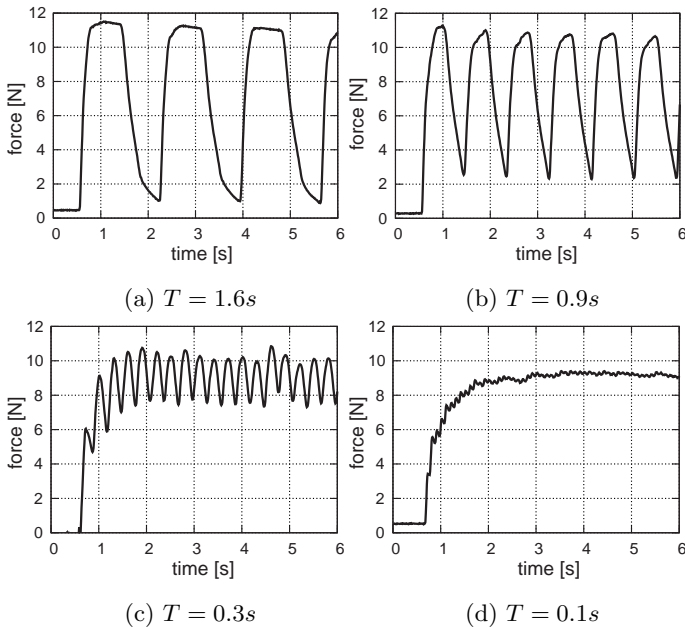


Fig.12 Experimental results of dynamic performance.

提案機構の入出力特性を理解するために最小 2 乗推定によってシステムの伝達関数を推定する。

タッピング実験ではモータに指令電圧 0% と 99% を周期的に繰り返すパルス波を入力し、周期は 0.1~10 s の間で 28 通りの試行を行う。出力は指先力とし前章の指先力計測と同様の条件で計測を行う。4 つの周期における実験結果を代表して Fig.12 に示す。これら出力の振幅と入力に対する時間遅れから次式を用いてゲインと位相を算出した結果を Fig.13 の点データに示す。

$$g = 20 \log \frac{l_o}{l_i}, \quad \phi = \frac{\delta T}{T} \times 360. \quad (2)$$

ここで $l_i, l_o, \delta T, T$ はそれぞれ入力と出力の振幅、時間遅れ、入力信号の周期を表す。ゲインが 3 dB 下がる周波数がバンド幅であるため、求めたゲイン線図から 6.97 rad/s (1.11 Hz) であることが明らかとなった。しかし、人のタッピングバンド幅は 5~6 Hz であることから応答性の改善が今後の課題である [5]。

伝達関数は MATLAB の oe 関数を用いて推定する [6]。本機構は遅れ系のシステムであり、関数がプロパーであると仮定する。遅れ系システムは伝達関数の次数に比例してゲインの減少率が上がる特性が存在する。ゲインの算出結果では周波数が 10 倍に増加したときゲインが約 40 dB 減少していることから本システムの伝達関数 $G(s)$ の分母を 2 次とする。次に分子の次数は oe 関数による最小 2 乗推定の結果から 0 次とし各パラメータを代入した結果、伝達関数は次式のように表されることが明らかとなった。

$$G(s) = \frac{0.11}{s^2 + 0.22s + 0.02}. \quad (3)$$

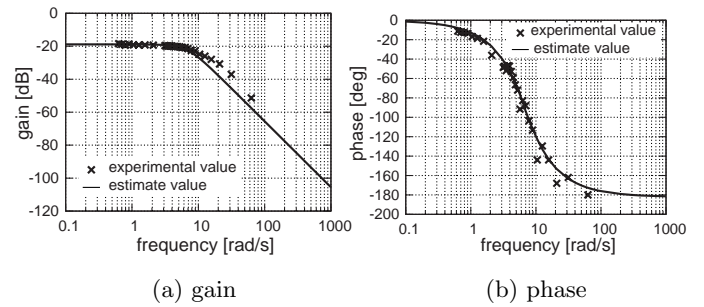


Fig.13 Experimental data of dynamic performance and estimated gain and phase.

この伝達関数から得たゲイン曲線と位相曲線を Fig.13 の実線に示す。わずかな誤差は残っているが良好な推定値となっていることから、本手法で推定した伝達関数が妥当であることがわかる。

5 結言

本稿では、人の手の屈筋と腱停止位置を模倣するロボットフィングの開発を行った。異なる腱停止位置のパターンと比較することで、提案機構が安定した指先押しつけと物体把持を実現することを示した。性能評価では種々の静特性を明らかにするとともに、タッピングバンド幅を用いて動特性を評価した。さらに、タッピング実験の結果から伝達関数を推定し、システムの入出力特性を明らかにした。

謝 辞

本研究の一部は、科研費基盤研究 A(15H02230), JKA 補助事業 (27-146, 28-110) を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] 神川康久, 前野隆司, "ヒトの把持力分布を模倣した 5 指なじみ機構を有する義手の開発", 日本機械学会論文集, Vol.74, No.746, pp.208-214.
- [2] A.I.Kapandji, カパンジー機能解剖学 上肢, 医歯薬出版株式会社, 2011.
- [3] 星野聖, 以後直樹, "人型多指ロボットハンド", バイオメカニズム学会誌, Vol.38, No.1, pp.31-37.
- [4] 島圭介, 田村康裕, 辻敏夫, 神島明彦, 横江勝, 佐古田三郎, "指腹剛性モデルの基づく指タップ力推定法", バイオメカニズム学会誌, Vol.35, No.4pp.37-44, 2011.
- [5] 矢部京之助, 大築立志, 笹井達哉 編, 入門運動神経生理学, 杏林舎, 2003.
- [6] 井上貴浩, 濱野祐哉, 平井慎一, "半球柔軟指の指先力減衰特性", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, pp.8-11, 2016.

丸ベルト振り駆動と受動要素を組み合わせたロボットフィンガの開発

Development of a Robotic Finger Including Round-belt Twist-mechanism and Passive Component

○学 岡本造 (岡山県大院) 正 井上貴浩 (岡山県大)

Itaru OKAMOTO, Okayama Pref. Univ, c325010b@ss.oka-pu.ac.jp

Takahiro INOUE, Okayama Pref. Univ, inoue@ss.oka-pu.ac.jp

In this paper, we develop a novel robotic joint mechanism that has a polyurethane round-belt and a linear spring placed on each side of the joint. This mechanism is based on antagonistic mechanical configuration by the round-belt activated by twisting motion. This mechanism enables the robotic joint to move around its axis according to the contraction force generated by the twisting. In addition, antagonist side of the joint generates passive tension by a spring, which may reduce the range of motion of the joint. In order to improve that problem, this study newly modified the joint mechanism so that the tensile force can be eliminated by maintaining natural length of the spring.

Key Words: Twisted actuator, Position control, Force control, Round-belt.

1 緒言

産業分野で広く利用されてきたロボット技術は、近年では人と接触する機会の多い分野へ広く応用されている。例えば、生活支援や介助支援を目的としたロボットが挙げられ、今後ロボットと人との協調作業の機会が増加すると考えられる。そのため、ロボットは人に接触する際に高い安全性が要求される [1]。このようなことから、人の筋肉のように瞬時に弛緩し外力を緩和させる駆動方式が研究されている。例えば、生物の筋肉に似たアクチュエータとしては空気圧人工筋 [2] [3]、形状記憶合金 [4]、などが存在している。しかし、これらに共通することは、利用される素材が柔らかく動作が柔軟であり外力に対して力を吸収し傷害を防ぐことが可能である高いコンプライアンスを備えていることである。

Inoue らは先行研究において、丸ベルトの基礎物理特性を明らかにした上で、拮抗型単関節ロボットを開発し関節制御に成功している [5] [6]。しかしながら、ロボットハンドへの拡張を課題としており物体の把持や操り制御には至っていない。このようなことから本研究では、エラストマーの特徴を持つポリウレタン丸ベルト (以下丸ベルト) と線形バネを対抗配置し高いコンプライアンスを有するロボットフィンガを開発した。

2 受動要素を持つ本機構の特徴

本機構のロボットフィンガを図 1 に示す。本機構の設計には、人の筋構造を模倣した拮抗駆動を採用しており、屈曲方向に丸ベルト (以下主動側) 伸展方向に線形バネ (以下拮抗側) を関節周りに対抗配置することで拮抗駆動を実現している。また、リンクへの衝撃が与えられたとき主動側では丸ベルトの弾性力、拮抗側ではバネの復元力が生じ高い安全性を確保している。拮抗配置にすることで、2つの利点がある。一つ目は、両側で弾性力が働き関節剛性が上がることで動作が安定する点である。二つ目は、能動的に関節を駆動するときは関節可動域を制限しない点である。本機構の駆動原理は、リンクと直流モータに固定された丸ベルトが振られることで生じる収縮力によりロボット関節の軸周りの回転を可能にしている。また、DC モータ制御には安価な速度制御用ドライバを用いることで容易に高速度な制御を可能としている。一方で、リンクの屈曲時にバネの復元力が働くため指先の押し付け力と関節可動域の低下が生じる。そこで本稿では、新たな試みとして主動側と拮抗側に取り付けたプーリにタイミングベルトを

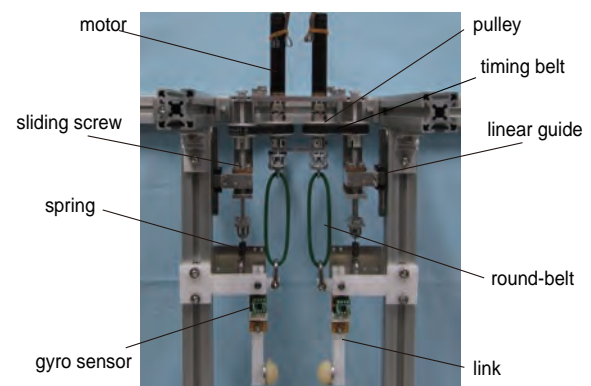


Fig.1 A developed two-fingered hand with the twist-drive mechanism and a linear spring.

介すことで動きを同期させる。また、拮抗側のすべりねじによりガイドレールに沿ったスライドが可能となるためバネは自然長を保つことができる。これにより、屈曲時にバネの復元力が生じない受動駆動機構を開発した。

2.1 拮抗側の設計

本節では、丸ベルトのような柔軟に変形するエラストマー材料の物性を線形弾性理論や簡易な数学的変形解析を用いて、モータの回転動作から丸ベルトの収縮量を計算する。図 2 は丸ベルトが振れた様子を幾何学的に示したものであり、そのときの丸ベルトの形状を正弦波であると仮定する。ここで、 L_0 は丸ベルトの初期長さ、 n は振じり数、 A は振幅とすると接線方向の長さは次式で与えられる [7]。

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{2nA\pi}{L_0} \cos\left(\frac{2n\pi}{L_0}x\right). \quad (1)$$

巻きつき後の正弦波の長さを B とすると次式となる。

$$\begin{aligned} B &= \int_0^L \sqrt{(dx)^2 + (df(x))^2} dx, \\ &= \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{2nA\pi}{L_0}\right)^2 \cos^2\left(\frac{2n\pi}{L_0}x\right)} dx. \end{aligned} \quad (2)$$

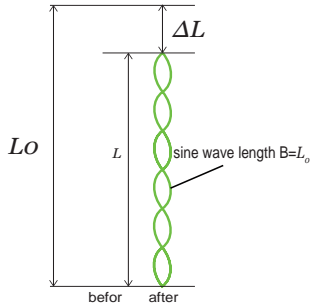


Fig.2 Computation process of contraction displacement of a twisted round-belt.

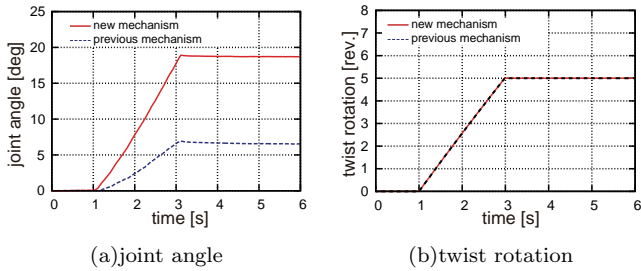


Fig.3 Experimental comparison of the range of motion with respect to the proposed mechanism.

式 (2) に L_0 , n , A の値を代入した上で L を変化させ、 B が L_0 と一致するときの L を求めることで丸ベルトの巻きつきによる収縮量を求めることができる。上記の計算から、すべりねじのリードを 1、主動側のプーリを 24 拮抗側のプーリを 28 と選定し、主動側の回転数と拮抗側のバネの移動量を近似させている。

2.2 同期運動の有無による受動駆動機構の有用性

本節では、同期運動の有無による指先の押し付け力と関節可動域を計測し、受動駆動機構の有用性を示す。計測方法は、周長 140 mm、直径 2 mm、1 本の丸ベルトを用いて振り量制御を行う。制御側はモータ付属のエンコーダ角度を制御量とする比例制御であり、ロボットのモータへの指令入力は角度変数を φ とすると次式となる。

$$u(t) = -K_p(\varphi - \varphi^d). \quad (3)$$

目標値である φ^d には丸ベルトの最大振り数を入力し、振り量とエンコーダ角度は等しいものとする。

ここで、同期運動の有無による関節角度を図 3(a) に示し、図 3(b) は丸ベルトの振り数である。同期運動を行わない場合のリンクの最大関節角度が 6.51° 、同期運動を行う場合が 18.5° となり関節角度は 11.99° 拡大する結果を得た。また、簡易的な実験から丸ベルトの本数を増やすことで、容易に関節角度を広げることができる。以上の結果から、同期運動を行う受動駆動機構は少ない振り数でロボットリンクの可動域を広げ応答性を向上させることが可能であることを示した。

3 丸ベルトの接続方法の変更

本章では、指先の押し付け力と関節可動域を向上させるために、丸ベルトの接続方法の変更を行う。従来は図 4(a) のように U 字ボルトを用いて丸ベルトを O 型に接続していたが、円盤シャフトを用いることで V 型に変更をしている。

3.1 接続変更の効果

本節では、周長 160 mm、直径 2 mm、1 本の丸ベルトを用いて O 型接続と V 型接続での場合で関節可動域と指先の押し付け

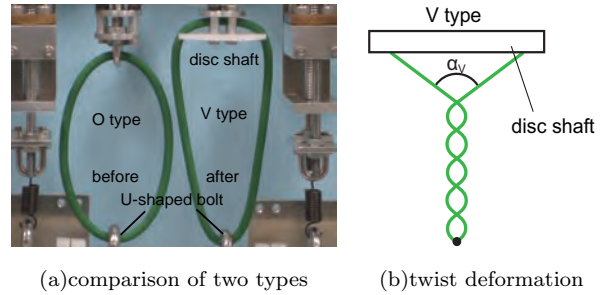


Fig.4 Difference of design on O-type and V-type arrangements.

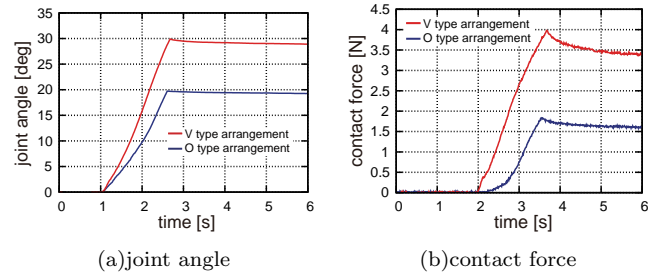


Fig.5 Experimental results of joint angle and fingertip force to compare each round-belt arrangement.

力を比較する。制御側は振り量制御とし目標値には同じ振り数を入力し比較を行う。図 5(a) は、関節角度のグラフであり、図 5(b) は、押し付け力のグラフである。結果から分かるように、関節可動域と指先押し付け力が拡大していることが分かる。また、最大押し付け力が一定に維持できていない。これは、本駆動系で有する丸ベルトがエラストマー材料であり、粘弾性物体特有の応力緩和現象が生じているためである。応力緩和は、一定のひずみを与えることによって生じた応力が減少する経時変化のことであり、粘弾性物体は一定のひずみを与えられたとき最大応力が生じ、減少速度を落としながら一定応力に収束する [8]。関節可動域と指先の押し付け力が拡大した理由として、丸ベルトを V 型に接続することで成す二等辺三角形の頂点を図 4(b) のようにリンクに接続されたところを α_v 角とすると、丸ベルトが振られたときの α_v 角は O 型とより大きくなるは明らかであるため、振れによる収縮量が大きくなり関節可動域と指先の押し付け力の拡大につながっていると考えられる。丸ベルトの接続を変更することで、エネルギー効率の向上を実現している。

3.2 正弦波に対する力追従制御

本節では、人のタッピング動作を模倣し、周期の異なる正弦波入力に対する指先の押し付け力による軌道追従制御を行う。青木ら [9] は、中指の高速タッピング運動実験を行い、最大押し付け力が 0.7 N のタッピング動作が繰り返されている結果を得ている。本研究では、人を模したタッピング運動を正弦波と仮定し最大押し付け力が 0.7 N となる目標値を次式とする。また、目標押し付け力の周波数 ω を 1 Hz から徐々に高くすることで追従性能を検証する。

$$F^d(t) = 0.3 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 0.4. \quad (4)$$

また、制御手法は比例制御であり次式に従う。

$$v(t) = -K_p(F - F^d). \quad (5)$$

上式の比例ゲインは応答を確認しながら適宜調整する。図 6(a)(c) と (b)(d) はそれぞれ入力周波数を 3 Hz と 4 Hz にしたときの

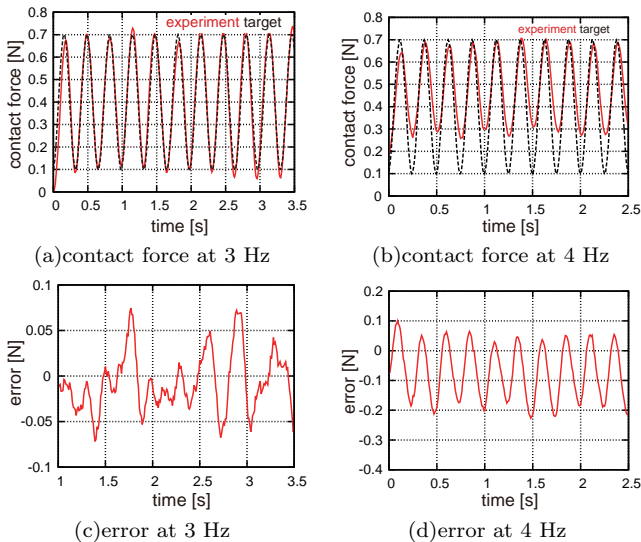


Fig.6 Experimental result of trajectory tracking control of contact force for desired sinusoidal function.

グラフである。(a)(b)はロードセル値の10点移動平均を示し、図(c)(d)は目標値に対する誤差を示す。結果から、精度が低下することなく ± 0.05 Nで追従していることから、本機構の高精度な追従制御が可能であるといえる。加えて、単純な力フィードバック制御では予備実験によりうまくいかないことがわかっており、本研究では目標軌道の減少時は正転・逆転を可能にし、増加時はモータ回転を正転のみで行っている。理由として、目標軌道の減少時はモータの振り数を減らしており、振りトルクはモータ出力にベルトの復元トルクが加算され速く回転してしまう。そのため、従来の速度制御系のように回転方向制御を与え速く回転するのを防止している。一方で、目標軌道の増加時はモータの振り数を増やしており、モータの出力トルクに対して反対方向にベルトの復元力が加わる。そのため、復元トルクにより振りトルクが押し戻されオーバーシュートなく軌道追従が可能となる。故に、目標軌道の増加時は従来にない回転方向制御不要の新たな駆動システムとなり、丸ベルトを用いることでシステムの簡略化を実現している。次に、4 Hz以上の周波数では指を模したタッピング動作は実現できなかった理由を考える。この原因として、受動駆動機構を可能にする2つのプーリを介すベルトの張り不足により、モータが逆転する度にプーリとベルトのかみ合いにずれが生じたためだと考えられる。

3.3 ジャイロセンサを用いた関節角制御

本節では、ジャイロセンサを用いた関節角制御を行う。制御則は簡易的なPI制御とする。関節角制御にジャイロセンサを用いた理由として、先行研究ではエンコーダを用いており機構のサイズと重量が大きくなる問題があり、ジャイロセンサに変更することで図7のように機構の小型化・軽量化を実現している。本実験では、目標関節角度を $\theta^d=40$ とする。加えて、図8(a)から関節角度が目標値に偏差なく収束していることがわかる。これは、ジャイロセンサはエンコーダ同等の制御が可能であるといえる。

4 結言

本稿では、丸ベルトと線形バネを関節周りに対向配置した非対称関節駆動による単関節ロボットを製作した。また、拮抗側にバネを配置することで生じるリンクの関節可動域の低下を改善するために、バネの復元力が生じない受動駆動機構を設計した。加えて、同期運動の有無による関節可動域を計測し有用性を示し

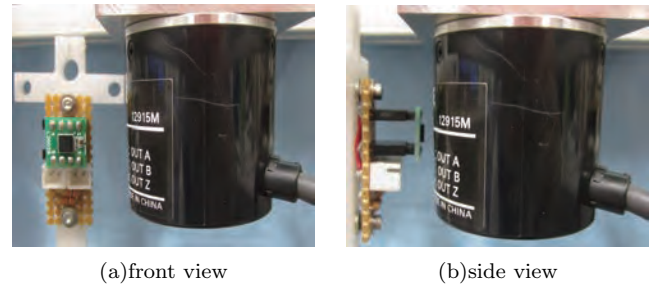


Fig.7 Comparison of the size of gyro sensor and rotary encoder.

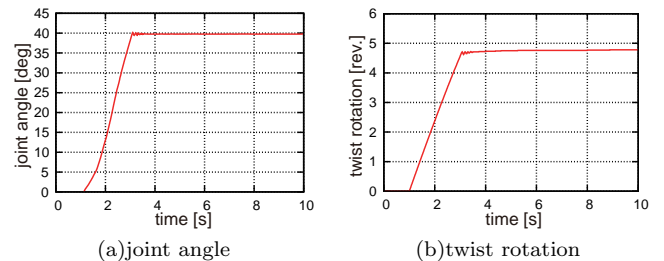


Fig.8 Experimental result of joint control based on PI controller and a gyro sensor.

た。丸ベルトの接続方法をO型からV型に変更を行い、関節可動域と指先押し付け力の向上を実現した。次に、人のタッピング運動を模した正弦波目標に対する力制御を行い3 Hzでの高精度なタッピング動作制御が可能であることを示した。最後に、ジャイロセンサを用いた関節角制御が可能であることを示した。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究A(15H02230)、JKA補助事業(27-146, 28-110)を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] 生田幸士, 野方誠, “福祉ロボットの安全性に関する統一評価法の提案-危険性の定量化による安全設計対策-”, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3, pp.363-370, 1999.
- [2] 中村太郎, “空気圧人工筋を用いたバックドライバブルな可変剛性機構とその制御”, 日本ロボット学会誌, vol.31, No.6, pp.572-576, 2013.
- [3] B.Tondu, S.Ippolito, J.Guiochet, A.Daidie, “A Seven-degrees-of-freedom Robot-arm Driven by Pneumatic Artificial Muscles for Humanoid Robot”, Int. Journal Robotics Reseach, Vol.24, No.4, pp.257-274, 2005.
- [4] T Maeno, T.Hino, “Miniature five-fingered robot hand driven by shape memory alloy actuators”, in Proceedings of the 12 th IASTED International Conference Rbotics and Applications, pp.174-179, 2006.
- [5] T.Inoue, S.Yamamoto, R.Miyata, S.Hirai, “A Robotic Joint Design by Agonist and Antagonist Arrangement with Twisting Small-diameter Round-belts”, IEEE/RSJ Int.Conf. Robotic and Automation, pp.1751-1756, 2015.
- [6] T.Inoue, R.Miyata, S.Hirai, “Antagonistically-twisted Round-belt Actuator System for Robotic Joints”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.28, No.6, 2016. to be published.
- [7] 植田, 井上 “小径丸ベルトによる平行二重振りアクチュエータ”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2016.
- [8] 村上謙吉, “レオロジー基礎論”, 産業図書, pp.115-150, 2016.
- [9] 矢部京之介, 大築立志, 笠井達哉, “入門運動神経生理学-ヒトの運動の巧みさを探る-”, 市村出版, pp.210-215, 2003.