

整理番号 28-110
補助事業名 平成28年度 柔軟指ロボットハンドへの丸ベルト振り駆動機構の適用
補助事業
補助事業者名 岡山県立大学 情報工学部 井上貴浩

1 補助事業の概要

(1) 事業の目的

ヒトの手指のようなコンパクトで実用的なロボットフィンガとハンドを設計開発することが目的である。把持物体には多種多様な形状や重量の物があるが、指先の接触力推定ができないと高機能かつ汎用性のあるロボットハンドを創ることはできない。これらの問題を解決するために、先行研究において開発した直径2, 3mmの丸ベルトを単関節に拮抗配置したロボットアームの駆動メカニズムを基礎として、よりコンパクト設計となる2指ロボットフィンガの新設計を行い、関節の拮抗側への引張力を抑制することができるバネを用いた受動駆動機構を新提案する。この開発過程を通じた最終的な目標を以下に箇条書きで記す。

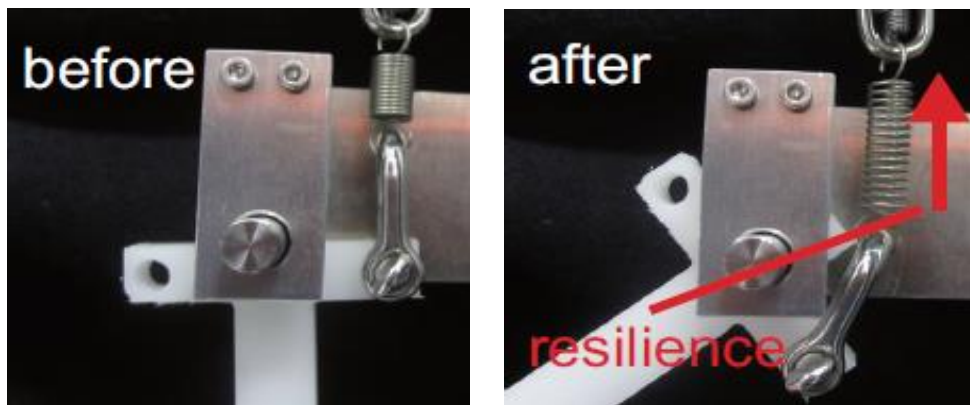
- ロボットハンドによる触知覚の獲得
- カセンサや力覚センサを搭載しないロボットハンドの開発
- ロボットハンドの小型化と軽量化
- 小径丸ベルトによる振り駆動機構のロボットフィンガへの適用
- 丸ベルトの振りによる収縮力を利用した指先押し付け力推定手法の確立
- ヒト指のようなコンプライアントで器用な把持操り動作が実現可能なロボットハンドの開発とロバストな操り制御手法の提案

(2) 実施内容

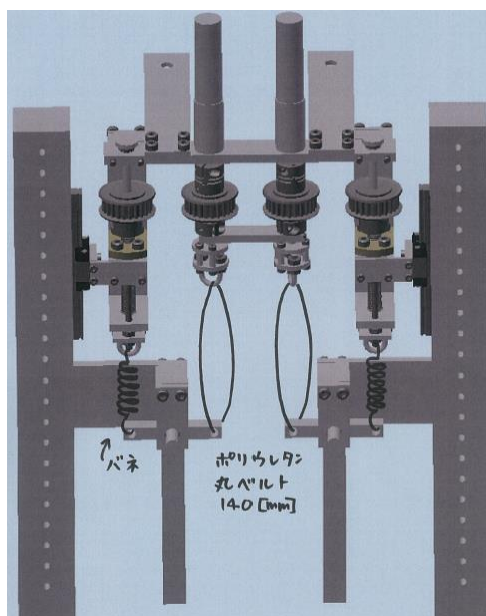
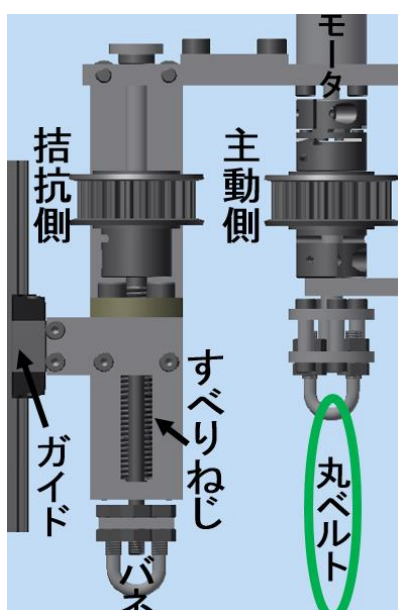
本研究のロボットハンドの機構的特徴として、先行研究では周長260 mm、直径2 mmのポリウレタン材料の丸ベルトと指先150 mmのT字リンクを使用していたが、より人間の手の大きさに近づけるために周長140 mm、直径2 mmの丸ベルトと指先80 mmのT字リンクを用いる。本機構は主動側のDCモータで振ることによって生じる、丸ベルトの収縮力によって関節を屈曲させることができる。しかしながら先行研究においては、関節周りの拮抗側（伸展運動）に線形バネをそのまま直列に配置していたため、伸展側への張力を引き起こし関節可動域が極めて小さいものとなっていた。そのようなことから、本研究では主動側の駆動に対して拮抗側のバネが常に自然長を保つような機構を考案し、関節可動域の増大を実験結果から明らかにした。本提案機構の特徴を以下で詳述する。

[1] 先行研究での問題点（拮抗側バネの弾性力の発生）

まずはじめに、上述した拮抗側のバネの弾性力による関節可動域の低下問題について述べる。申請者らの先行研究では、試作機として主動側と拮抗側に取り付けた丸ベ

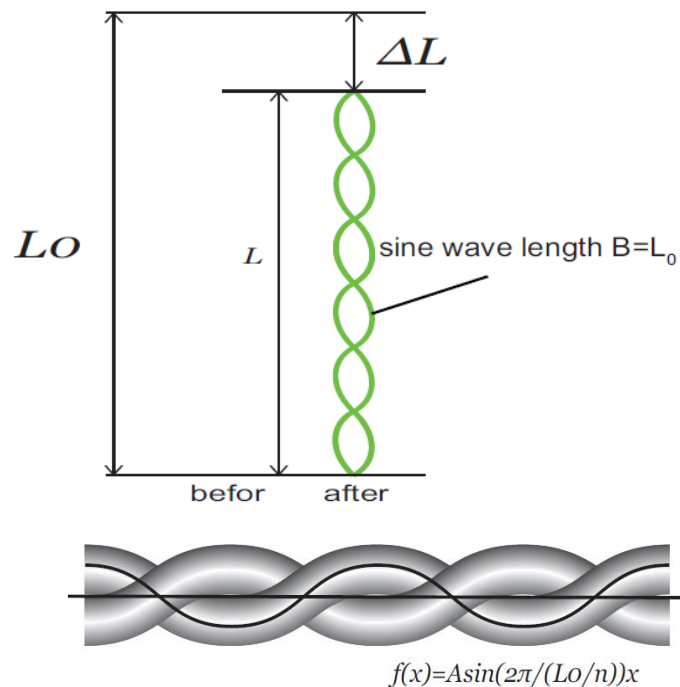


ルトによる振り駆動機構を提案し、当機構を利用した単関節ロボットを設計製作し種々の制御を行い良好な結果を得ていた。この機構はヒトの筋構造をヒントに開発したものであり、上肢関節の拮抗筋構造を模して設計したものである。しかしながら、製作したロボットの場合拮抗側のベルトにより主動側と同様の弾性力が発生し、振りを加えない場合でも関節を反対方向（伸展運動）に少なからず引っ張られる現象を生じていた。これにより、関節可動域の減少と手先（指先）押し付け力の低下を招いていた。加えて、拮抗側ベルトを線形バネに交換することによる変化も観察したが（上図）、あまり改善が見られなかった。この原因はバネの伸びによる弾性力の発生であり、丸ベルトの振りによる引張力と同じであった。このようなことから、本研究では年度期首すぐに、関節運動中に拮抗側線形バネの自然長を維持できる機構の考案しその設計へと移行していった。すべてのパーツを組み合わせた2指ハンドが以下の図（右：全体図、左：新提案機構）となる。



[2] タイミングプーリとすべりねじの選定

本機構の概要を述べる。本機構は主動側のモータの回転と同時に拮抗側に取り付けたタイミングプーリを回転させ、張られたタイミングベルトを介して同期運動を実現している。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、指関節屈曲時にはバネの復元力が生じない機能を有する受動駆動機構を新開発した。ここでは、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、モータの回転角度から丸ベルトの収縮量を計算する過程を示す。



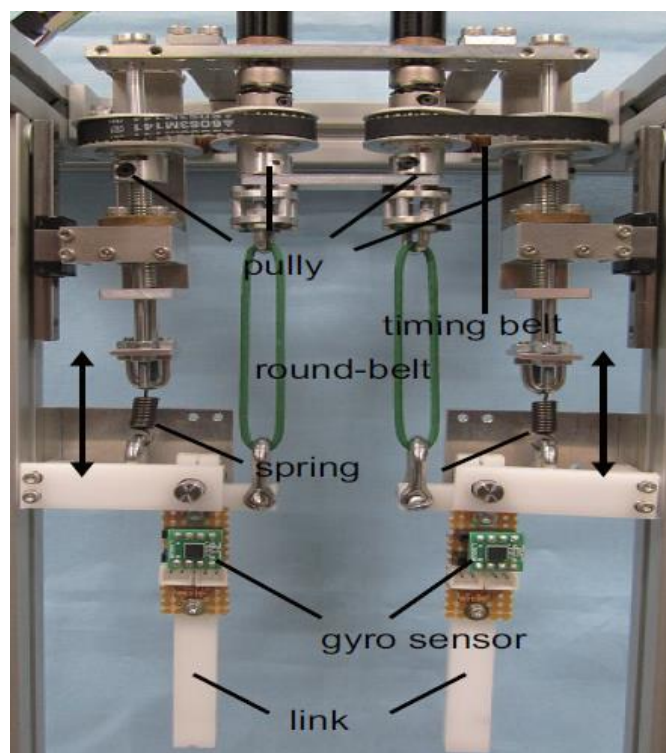
拮抗側のバネが自然長を保つためにはバネ取り付け部を上下にスライドさせる必要があるが、適切なスライド量が求まらなるとバネの伸びや縮みが発生し弾性力が残存することになる。そのようなことから、上図のようにベルトの捩り変形を正弦波と仮定した上で捩り数に対する収縮量を解析的に求めた。ここで、 L_0 を丸ベルトの初期長さ、 n を捩り数、 A を振幅とすると、接線方向の長さは次式で与えられる。

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

加えて、巻きつき後の正弦波の長さを B とすると次式となる。

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

予備実験により本研究で利用する丸ベルトの最大振り数が5回転との結果を得ている。これにより上式に 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 を求めた結果、丸ベルトの巻きつきによる収縮量は4mmとなることが明らかになった。この結果により他パーツの選定ができ、リード1mmのすべりねじに決定した(右図)。ただし、問題点としてリード1mmのすべりねじを5回転させると5mmスライドすることになる。要求仕様が4mmとなっているため、25%の誤差を生じる。そのため、丸ベルト側プーリとバネ側プーリとの間で歯数を調整し、歯数24と歯数28のプーリの組み合わせとした。このような工夫を行うことにより、9%の誤差まで軽減することができた。これを実際のスライド量誤差にすると0.36mmであり、この伸び量によるバネ弾性力は無視できるほど小さいと考えられる。これらの設計過程により製作した2本指のロボットハンドが下図である。



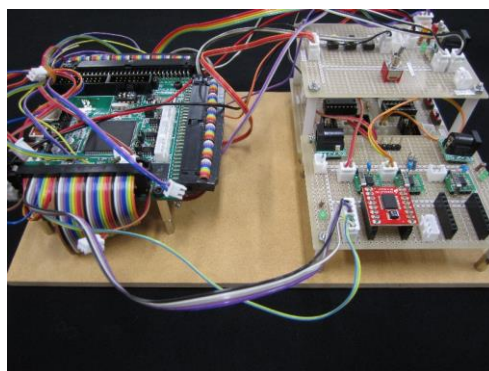
[3] ロボットの完成と制御系回路の構築

すでに選定したすべりねじとプーリによりリンク間距離が決定し、人の指を模したT字リンクを成人男性の人差し指ほどの大きさにし、軽量のポリアセタール材で製作した。また、右図は指リンクの先に取り付ける柔軟指であり、人の手の触覚、圧覚、温覚、滑り覚などの手か



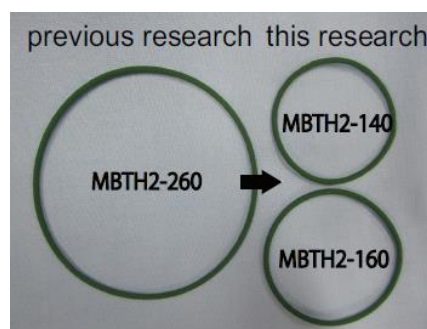
ら得られる豊富な触覚情報の中の滑り覚の役割を担う。

次に、開発したロボットでは制御回路としてマイクロコンピュータを用いており、DCモータ制御には安価な速度制御用ドライバを使用している（右図）。このドライバはPWM信号のduty比により容易に速度制御が可能であるが、一般的にトルク制御や力制御には不向きである。しかしながら、本稿で提案しているロボットはDCモータの回転により生じる丸ベルトのねじりにより収縮力を生成する。したがって、最大収縮力を上回るトルク特性を有するモータを選定することで、ベルト収縮力（引張力）とモータトルクがつり合うduty比が存在することになる。そのようなことから、ねじり量（角度）や関節角を制御量としduty比を制御入力とするPI制御を施すことで、簡易的な力制御の構成が可能となる。同様の効果を先行研究においても確認している。このように、本駆動機構が有する物理特性をうまく利用することで、速度制御用ドライバの力制御への変換が可能となる。



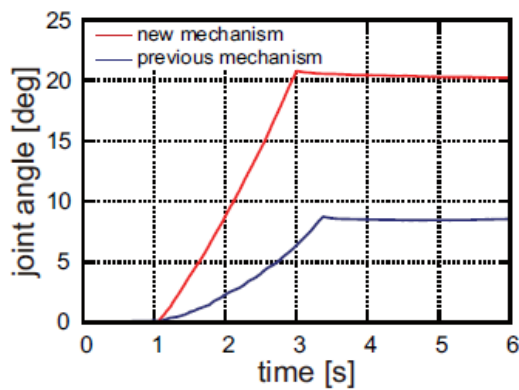
最後に、動作検証としてロボットハンドの1本の指によるベルト振り制御を行った。その結果を以下に示す。まず、本実験で使用する丸ベルトは右図のMBTH2-140である。これはベルト周長140mm、直径2mmの寸法を持つ。ここでは各丸ベルトの最大振り数に合わせた振り量制御を行う。制御則はベルト振り角度を制御量とする比例制御であり、次式となる。

まず、本実験で使用する丸ベルトは右図のMBTH2-140である。これはベルト周長140mm、直径2mmの寸法を持つ。ここでは各丸ベルトの最大振り数に合わせた振り量制御を行う。制御則はベルト振り角度を制御量とする比例制御であり、次式となる。

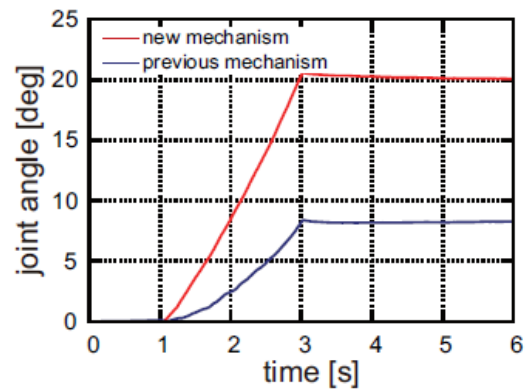


$$u(t) = -K_p(\varphi - \varphi^d)$$

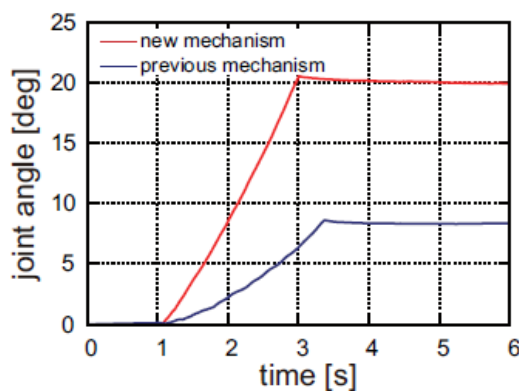
この結果においては、上述した同期運動（主動側と拮抗側の連動運動）の有無による関節角可動域の差異を示すために、両結果を下図（次ページ）に示している。(a)から(c)が各試行回数における関節角度の時間応答、(d)は振り量の時間応答化を示す。この結果から、同期運動を行う方がリンクの関節可動域が拡大されていることがわかる。加えて、最大関節角度に達するまでに同期運動を行う場合の方が速くベルトが振られていることから、本機構の応答性が向上していることがわかる。これは、バネの復元力により丸ベルトの復元トルクが増加し、モータの回転速度が遅くなると考えられる。以上の結果から、同期運動を行う受動駆動機構はロボットの関節可動域を広げ応答性を向上させることが示された。



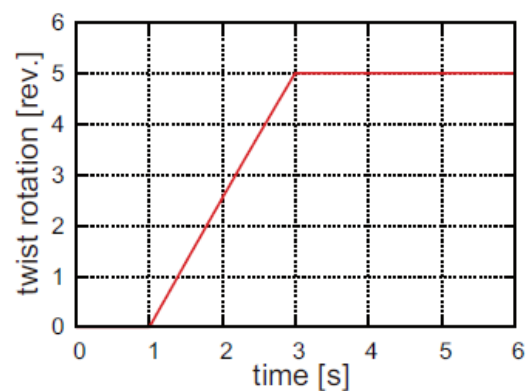
(a)1 回目



(b)2 回目



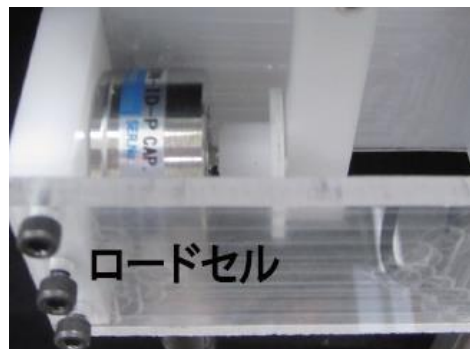
(c)3 回目



(d) 時間-振り数

[4] 指先押し付け力実験

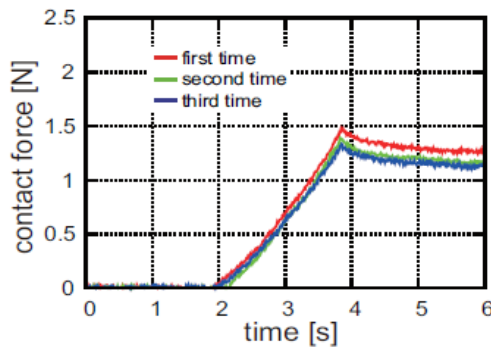
次に、追加の動作検証として指先押し付け力計測実験を行った。加えて、前半で述べた関節可動域の再検証実験を行った。それらの結果から、いずれの実験においても良好な時間応答が得られ、不具合のないロボットシステムであることを確認した。しかしながら、実用面においてより大きな把持力が必要と考えられるため、ロボットの改良を行った。次に、指先に力覚センサ等を取り付けできない場合に対応するために、ロボット動作中の他の物理量から指先力の推定アルゴリズムを考案し動作検証を行ったので以下に詳述する。



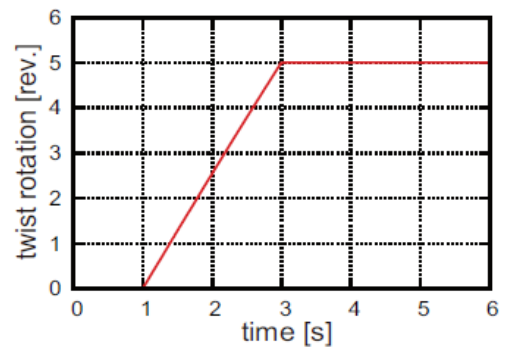
まず、丸ベルトの最大押し付け力を測定する。測定方法は右図で示すようにリンクの先をロードセルに接触させた状態を初期位置とし、前述した振り量制御を施す。また、この実験ではベルト周長を2種類(140mm, 160mm)試す。すべての実験結果が以下の図(次ページ)となる。また、実験は各丸ルトをそれぞれ3試行ずつ行う。結果図の各段の設定条件を箇条書きにすると以下ようになる。

- (1 段目) 周長 140mm, 直径 2mm, 1 本
- (2 段目) 周長 140mm, 直径 2mm, 2 本
- (3 段目) 周長 160mm, 直径 2mm, 1 本
- (4 段目) 周長 160mm, 直径 2mm, 2 本

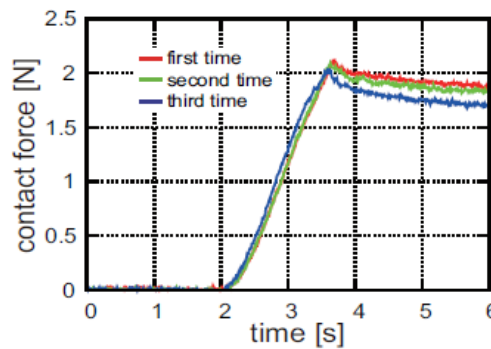
いずれの結果においても、指関節が変わっていないにもかかわらず最大値を超えて徐々に押し付け力の減少が生じている。これは、ベルトが有する弾性物体特性の応力緩和現象が生じているためである。これらの結果から、本提案機構が 1.5N~2N 程度の把持力を実現していることが明らかになった。



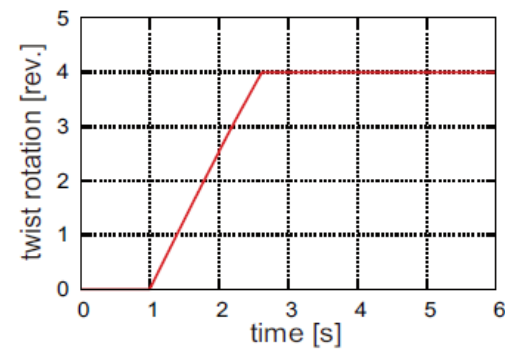
(a) 関節角度



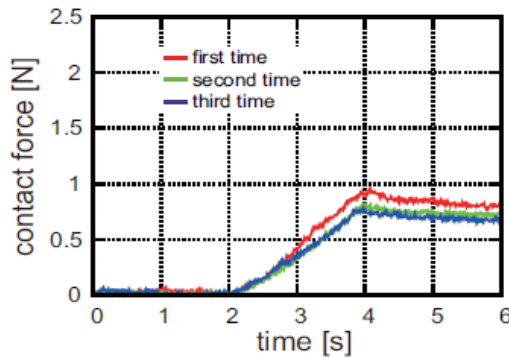
(b) 時間-振り数



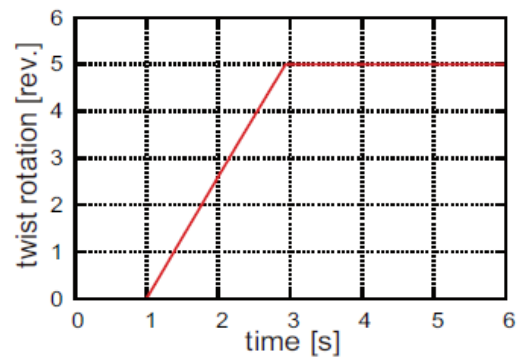
(a) 関節角度



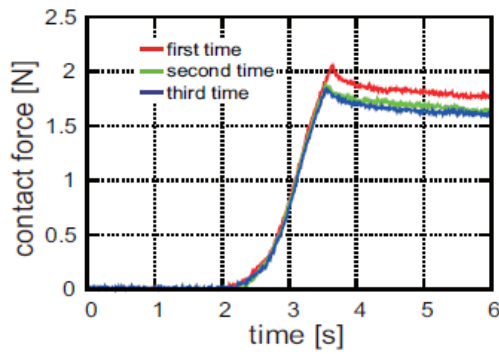
(b) 時間-振り数



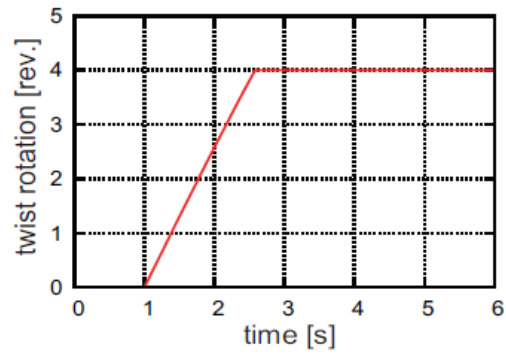
(a) 関節角度



(b) 時間-振り数



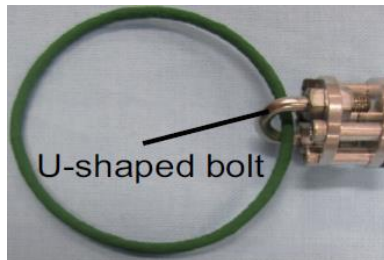
(a) 関節角度



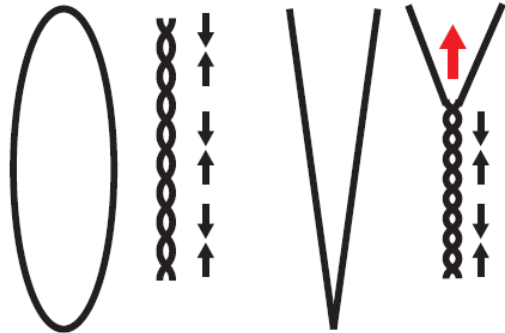
(b) 時間-振り数

[5] 丸ベルトV字配置機構への改良

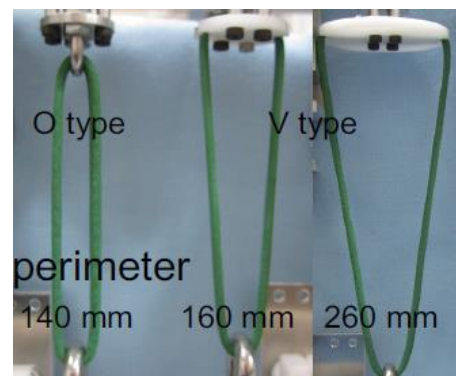
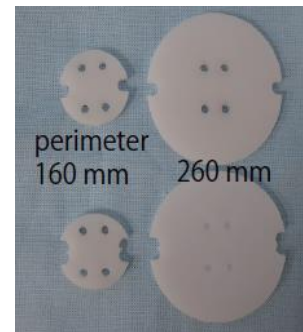
[4]での結果より押し付け力が弱く対象物が重い場合把持することができないことが判明した。そのようなことから、前述した関節可動域のさらなる向上と押し付け力向上を目的として、丸ベルトの接続方

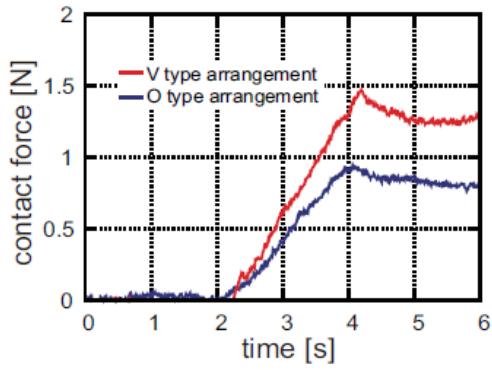


O type round belt → V type round belt

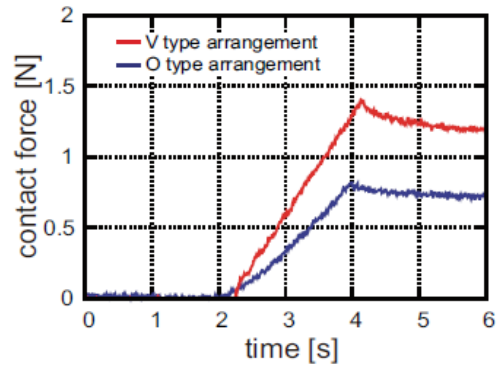


法の変更を行った。今までは上図のようにU字ボルトを用いて丸ベルトを配置していたが、右上図のように、接続後の丸ベルト形状がO型からV型になるように接続の変更を行った。V型に変更するためにはベルトの上部治具の設計変更を必要とする。よって、樹脂等の加工が可能な3D切削機(MDX40A)を用いて新しい円板治具を製作した(右図)。材料は軽量かつ高強度のポリアセタールを用いている。この治具を組み付けることで実現したV型機構が右下図である。修正機構における指先押し付け力と関節可動域の計測には、周長160 mm、直径2 mmの丸ベルトを1本もしくは2本用いる。計測方法は前回と同様であり、モータにベルト振り量の比例制御を施すことによって指関節の動作を検証する。また、目標値には丸ベルトの最大振り数(5振り)を入力する。結果を次ページ以降に示す。ここで、次ページの結果がベルト1本の比較であり、次々ページの結果が

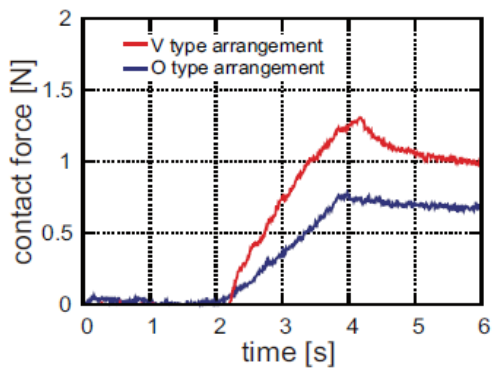




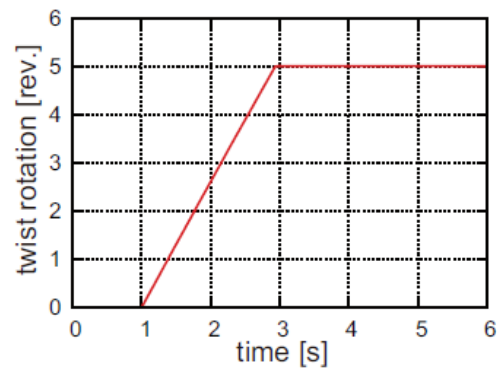
(a)1 回目



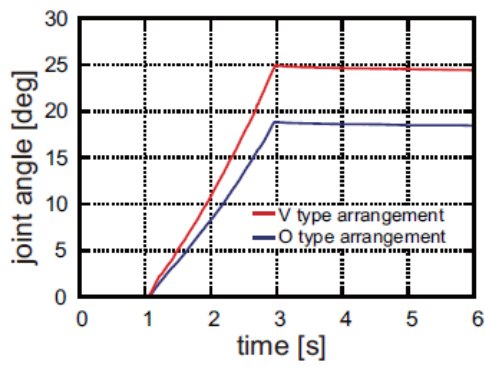
(b)2 回目



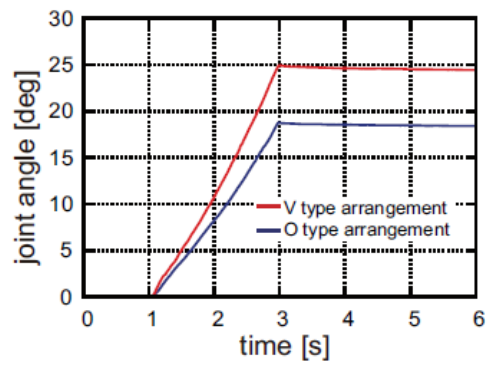
(c)3 回目



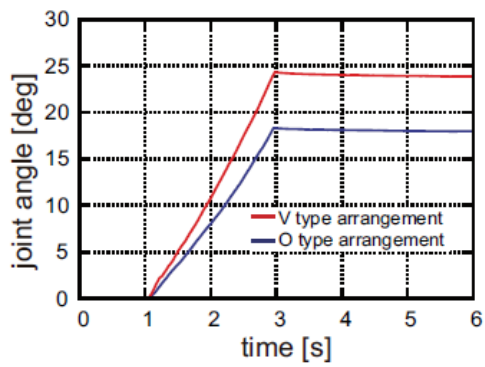
(d) 時間-振り数



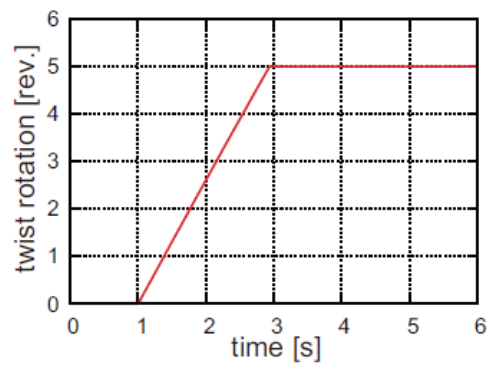
(a)1 回目



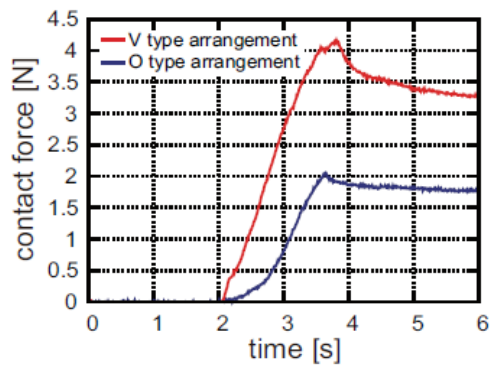
(b)2 回目



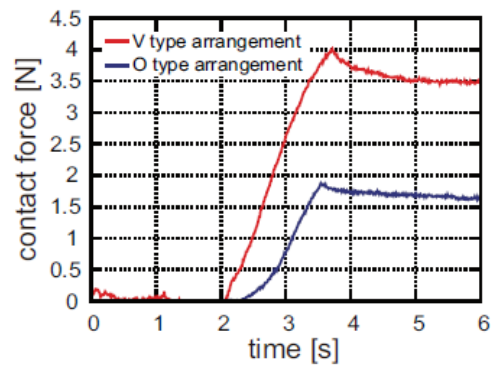
(c)3 回目



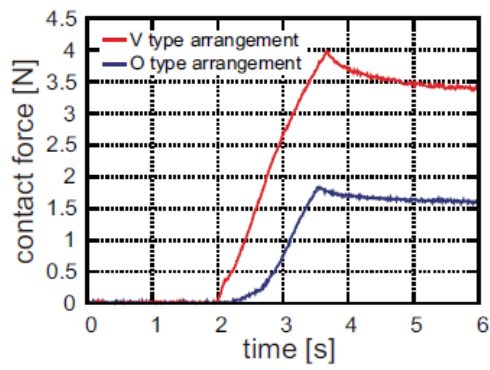
(d) 時間-振り数



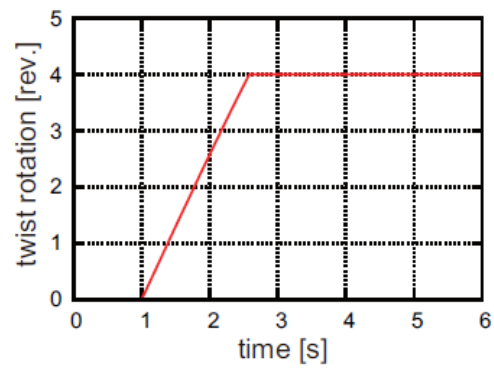
(a) 1 回目



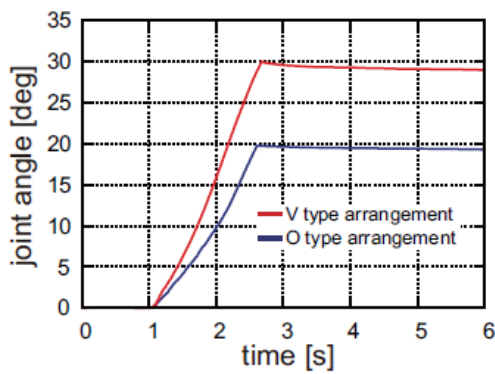
(b) 2 回目



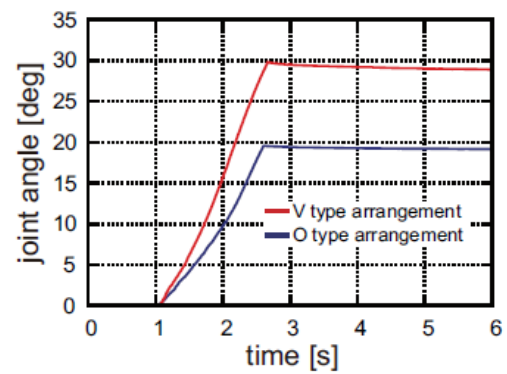
(c) 3 回目



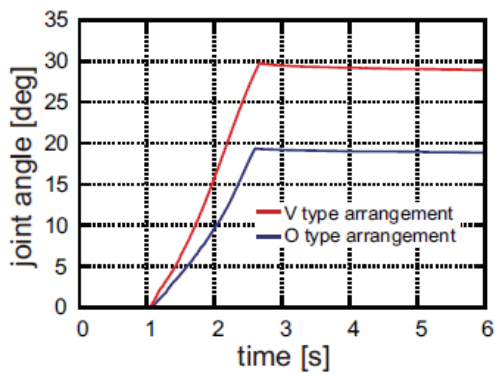
(d) 時間-振り数



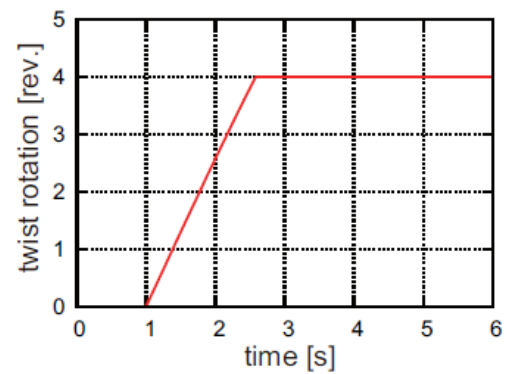
(a) 1 回目



(b) 2 回目



(c) 3 回目

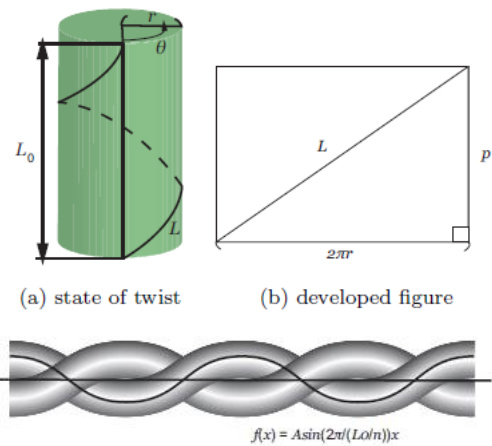


(d) 時間-振り数

果がベルト2本を接続した場合の結果である。丸ベルトをV型に配置した場合、押し付け力とリンクの関節可動域が向上しているのがわかる。この理由は、0型配置の場合振れによって生じる収縮力は向かい合うように働く。一方で、V型配置にした場合振れによって生じる収縮力は上向きの力が優勢となる。そのため同じ丸ベルトでも収縮量が変わり関節可動域が増大したと考えられる。

[6] 指先押し付け力モデルの導出

丸ベルトを振ることで生じる収縮力モデルを導出する。このとき、1本の輪状の丸ベルトに振りを加える動作及び、2本の丸ベルトが互いに巻きつく動作に関してそれぞれ個別にモデリングを行う。収縮力モデルで使用する丸ベルトの初期状態長さからの伸びは、前者に関しては右上図のように丸ベルト自体が振れることで生じる伸びとする。後者に関しては右下図のように丸ベルト同士が巻きつきあうことによって生じる伸びとして考える。以下ではこれらの導出結果を示す。



- (前者) 初期長さ L_0 に対するベルト自体の振りによる伸び量 ΔL_1 は、

$$\begin{aligned} \Delta L_1 &= L - L_0, \\ &= \theta \sqrt{r^2 + \left(\frac{L_0}{\theta}\right)^2} - L_0, \end{aligned}$$

- (後者) 巻きつきあった状態の丸ベルトの形状を正弦波と仮定する。このとき、 A を正弦波形状の振幅とすると巻きつきによる形状変化は次式で表せる。

$$f(x) = A \sin \frac{2\pi}{L_0/n} x$$

上式の接線方向の傾きは、

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{2\pi n A}{L_0} \cos \frac{2\pi n}{L_0} x.$$

となるから、巻きつき変形後の長さは次式となる。

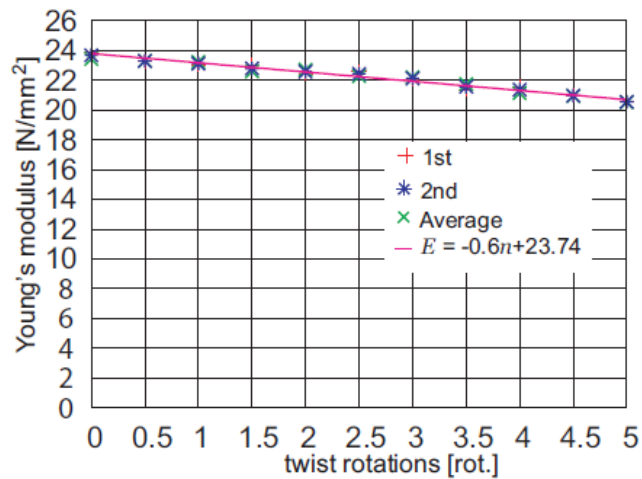
$$\Delta L_2 = \int_0^{L_0} \sqrt{1 + \left(\frac{2nA\pi}{L_0}\right)^2 \cos^2 \left(\frac{2n\pi}{L_0} x\right)} dx - L_0$$

したがって、初期長さ L_0 に対して伸び量 ΔL_2 は

$$\begin{aligned} L_2 &= \int_0^{L_0} \sqrt{(dx)^2 + \{df(x)\}^2}, \\ &= \int_0^{L_0} \sqrt{1 + \left(\frac{2nA\pi}{L_0}\right)^2 \cos^2\left(\frac{2n\pi}{L_0}x\right)} dx. \end{aligned}$$

のように表せる。

次に、振り収縮力モデルの式に適用するためのヤング率線形近似モデル（以下ヤング率モデル）を導出する。丸ベルトを用いて引張実験を行うことで得られる応力とひずみから求めた。その実験結果が下図である。



図から、各振りの1回目と2回目にはばらつきがなく、振り数の増加にともないヤング率は線形的に減少していることが分かる。このことからヤング率モデルは線形近似することが可能であり、その近似式は次式となる。

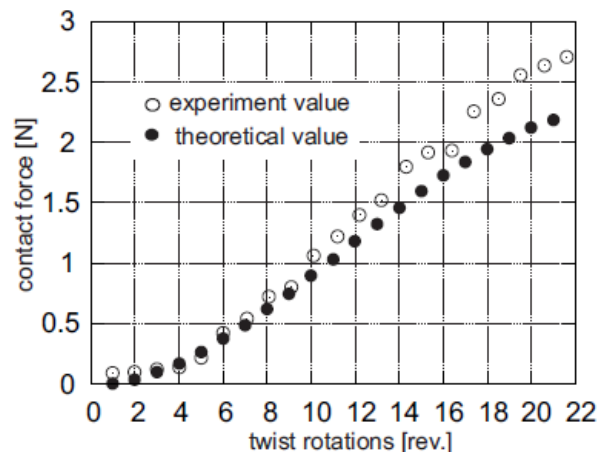
$$E = -0.6n + 23.74 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

上式を用いることで5振り以降のヤング率も推定することができる。以上の結果から丸ベルトの収縮力モデルは次式のように表される。

$$\begin{aligned} F &= 2E \frac{\pi r^2 L_0}{L_0 + \Delta L_1 + \Delta L_2} \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{L_0} \\ &= \frac{2\pi r^2 E (\Delta L_1 + \Delta L_2)}{L_0 + \Delta L_1 + \Delta L_2}. \end{aligned}$$

最終的に、上式の収縮力に指リンクの横幅を掛けた値をリンク長で除することで、指先押し付け力推定モデルが容易に導出できる。加えて、この理論モデルを2指ハンドに実装しロードセルで計測した実験値との比較を下図（次ページ）に示す。ここでは、ベルト振り機構を駆動する直流モータの電流値を計測することで実験データを取得している。結果から分かるように、理論値と実験値がほぼ等価であ

り、今回求めたモデル式が妥当であると考えられる。一方で、振り数の増大にともない実験値の方が理論値よりも大きくなっていることが分かる。これは、求めたヤング率モデルが5振りまでの振り量から線形近似した値となっているためだと考えられる。つまり、0振りと20振りのヤング率を比較するとヤング率が半分程度まで小さくなることになる。ゆえに振り数が増えるほど理論値と実験値の差が大きくなったと推察される。また、この結果から振り数が増えるとヤング率はある一定の値に収束する可能性があることが示唆された。



2 予想される事業実施効果

本研究では、2指ロボットハンドを設計製作し特徴的機構として弾性特性を有する丸ベルト振り駆動機構を実装した。この機構は指先力の高分解能化に貢献すると同時に、指関節の可動域の増加及び指先力の増大にも効果を発揮し良好な実験結果を得た。この機構はヒトの筋構造のように強さと柔らかさを兼ね備えたメカニズムであり、今まで実現できなかったヒトの巧みで滑らかな動きを実現できるロボットの開発につながっていくと予想される。

3 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

バイオメカトロニクス研究室 2016 年度 年間研究活動報告書

(URL) http://www-bs.ss.oka-pu.ac.jp/inoue/research/houkokusyo_28-110.pdf

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

特になし

4 事業内容についての問い合わせ先

団体名： 岡山県立大学情報工学部バイオメカトロニクス研究室（井上研究室）

住所： 〒719-1197

岡山県総社市窪木111 岡山県立大学情報工学部人間情報工学科

代表者： 准教授 井上貴浩（イノウエ タカヒロ）

担当部署： 事務局 企画広報室（ジムキョク キカクコウホウシツ）

担当者名 : 主事 島津あい子 (シマツ アイコ)

電話番号 : 0866-94-9116

F A X : 0866-94-9105

E-mail : inoue@ss.oka-pu.ac.jp, aiko_shimazu@ad.oka-pu.ac.jp

U R L : <http://www-bs.ss.oka-pu.ac.jp/>