

# 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  $\alpha$  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擬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．

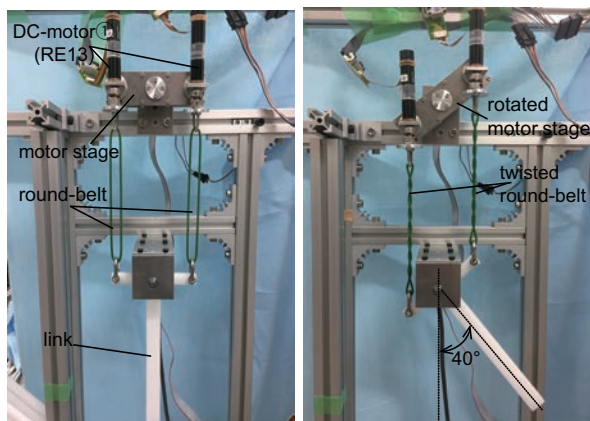
## 2. 単関節ロボットフィンガ

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

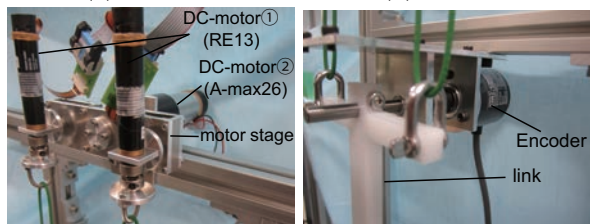
本ロボットフィンガは丸ベルト，2 種類の DC モータが計 3 個，エンコーダ，T 型リンク，モータステージで構成されており，拮抗的に配置した丸ベルトの一端に取り付けられた DC モータ 1 によって丸ベルトに振りを加える．また，リンクの角度はリンクにシャフトを介して取り付けられたエンコーダで計測し，フィードバック制御の制御量とする．

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．

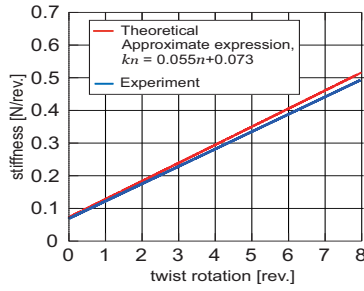


図2 丸ベルトの剛性に関するモデル値と実測値の比較.

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。

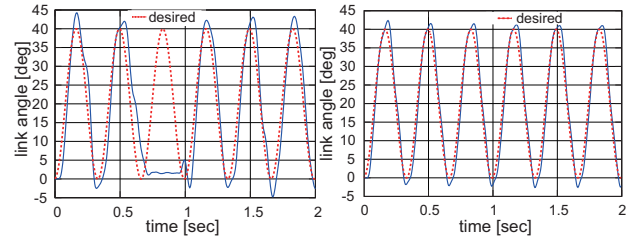
## 2.2 丸ベルトの振り数と応答性の関係

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 $\theta^d$ は以下の式を与える。

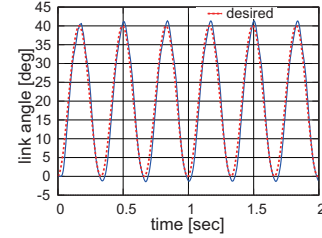
$$\theta^d(t) = 20 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 20. \quad (1)$$

実験ではこの角速度 $\omega$ 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。

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

$\theta^d$ 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

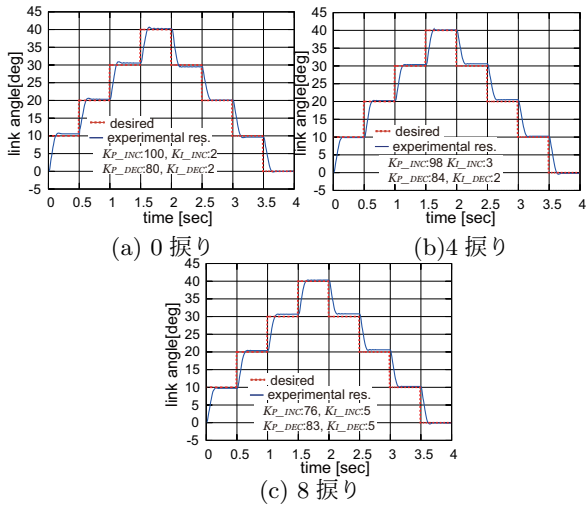


図4 制御周期 2ms でのステップ入力に対する応答.

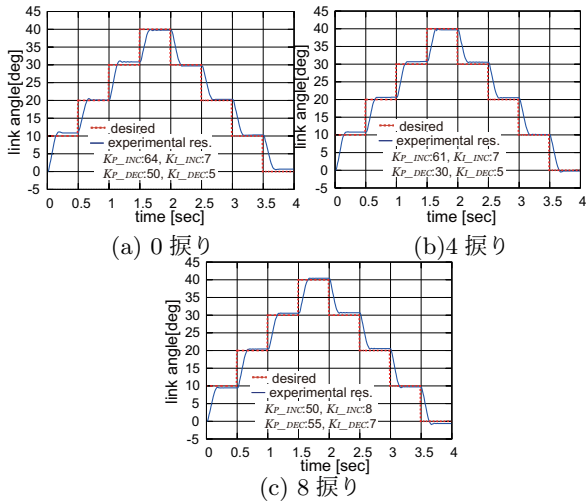


図5 制御周期 50ms でのステップ入力に対する応答.

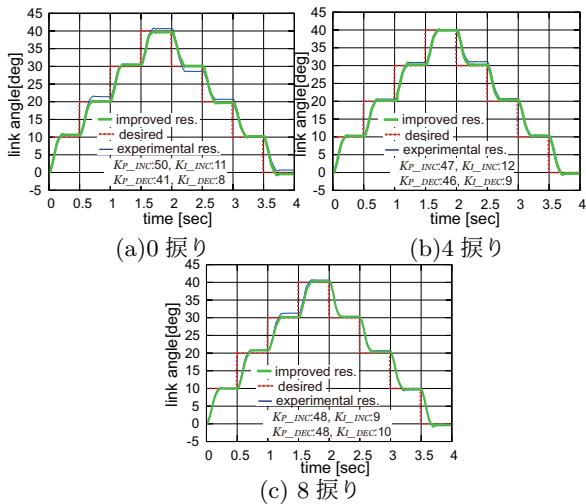


図6 制御周期 100ms でのステップ入力に対する応答.

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

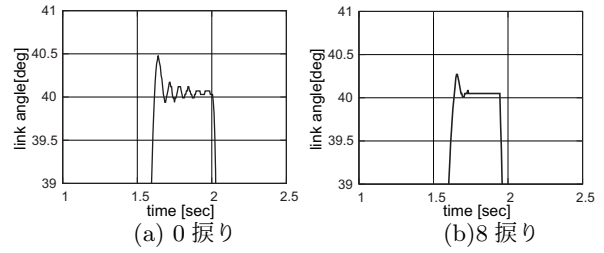


図7 目標値の収束部分.

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  $0.25\text{Hz}$  の正弦波と定める. ここで正弦波の周波数を  $0.25\text{Hz}$  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  $0^\circ$  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.  $\theta^d$  は上述したように振幅  $0^\circ \sim 40^\circ$ , 周波数  $0.25\text{Hz}$  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  $100\text{ms}$  の結果から

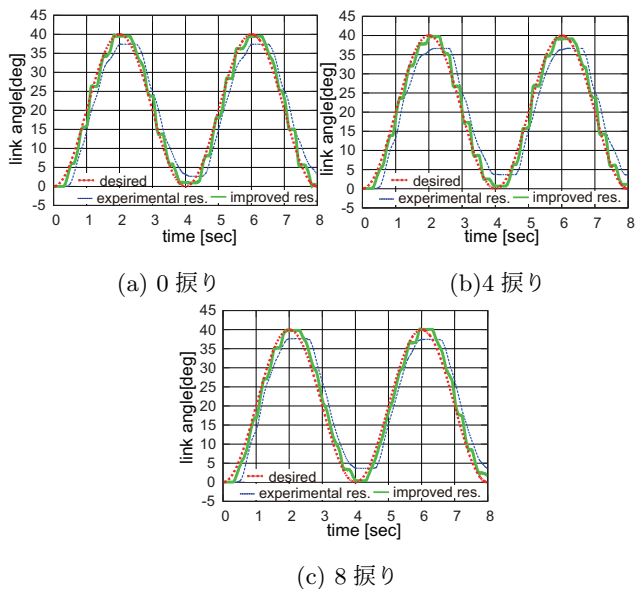


図8 制御周期 100ms での正弦波入力に対する応答。

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.