

指節骨連動運動を実現する腱駆動2指ハンドの設計

井上貴浩, 滝澤大佑, 谷川弘典 (岡山県立大学), 平井慎一 (立命館大学)

Design of a pair of tendon-driven robotic hand with coupled movements of the forefinger phalanx

Takahiro INOUE, Daisuke TAKIZAWA, Hironori TANIKAWA (Okayama Pref. Univ.),
Shinichi HIRAI (Ritsumeikan Univ.)

Abstract— This paper proposes a new tendon-driven robotic hand.

1. はじめに

近年ヒューマノイドと呼ばれる人間を模したロボットの研究が盛んである。コンピュータが発達することによりロボットの制御は高速化している。特に、ビジュアルフィードバックを必要とするロボットシステムにおいては、1ms (1kHz) の画像更新レートが主流になっている。他方、ヒトの神経系や運動制御においては、ロボットの高速度サンプリング制御と比較して大きな制御周期の遅れを生じることが知られている^{1,2)}。この“遅れ”は、人の運動制御における α 運動ニューロンの伝達速度に起因する。これらのようなヒト特有の知覚遅れを考慮したロボットシステムが、クローズアップされた例はあまりない。以上の点を踏まえて、本稿ではまず、人指による把持や操り問題に着目して研究を行う。そこでヒトの感覚情報遅れを考慮し、制御によるものではなく機構的にこれを再現できるロボットハンドの開発を目指す。従来の各関節位置に駆動用モータを直接的に配置する機構では、稼働範囲が広く構造が簡単であるメリットがあるが、先端での慣性が大きくなり空間分解能や位置誤差を生じ易いことや、構造上重くなり体積が増大するという欠点がある。以上の点を考慮すると、以下の特徴を満たす必要がある。

1. ヒトの知覚遅れを考慮する点で人間の筋骨格系と類似した構造を持つ。
2. ヒトの手指とほぼ同等のサイズである。
3. 指先に近い柔軟性をもつ。
4. 示指の指節骨連動運動を実現する。

よって本稿では、ヒト指の指節骨関節の連動機能を模した機構を採用した拇指示指ロボットを開発する。その駆動伝達系は、超軽量かつ高強度、低伸度のPEラインと線形ばねを直列に接続した構成になっている。また、PEラインの物理特性である高感度(低伸度)によって生じる系の弛みを防ぐ働きを線形ばねが持つ。これが近年注目されている“なじみ機構”の機能を持ち、これによって器用で滑ら

かな物体操作が実現可能になる。また、指節骨関節の連動運動を実現するため、2個のアイドラーに丸ベルトをクロスする構造を採用している。従来駆動系の滑りは致命的であったが、本稿の“なじみ機構”³⁾によってロボット指による操り制御が可能であることを示す。

2. 把持・操り戦略から見た腱駆動と連動運動

ロボットハンドに関する研究は、理論と実機開発の両面から多くの成果が生み出されているのは言うまでもない。しかし、把持戦略(物体を掴むまで)と操り戦略(物体を把持した後の操作)を体系化し、何らかの具体的なタスクを制御の観点から統一的に扱えるロボットハンドは、未だ開発途上であると言える。ただ、近年機構学的改良を加えた“なじみ機構”を有するハンドが物体操作を行う研究が報告されている³⁾。しかし、把持物体の姿勢制御のようなより複雑な操りタスクを実現するまでには至っていない。その理由は、従来のリンク関節を直接モータで駆動する方式(直接駆動)では、対象システムの定式化や運動学、逆運動学を計算できる反面、それに基づいて制御則を導き出すため、比較的煩雑になり易いところにある。それに反して、ワイヤや糸等によって駆動する方式(腱駆動)では腱を拮抗的に引っ張ることで比較的容易に制御することが可能になる。ただし、拮抗型腱駆動では運動学や逆動力学を把持・操り戦略の観点から統一的に扱えない可能性があるが、オープンループやオンオフ制御のようなより簡単な制御則で統一的に扱える可能性があり、むしろメリットの方が大きいと考えている。

このようなことから本稿では、拮抗型腱駆動による拇指示指2指ハンドを設計し、ヒト指が持つ末節骨と中節骨の連動(DIP関節)機能を採り入れたロボットハンドを開発する。本稿で提案する連動機構のベースとなる部分がFig. 1である。DIP関節(先端リンク)をふたつのモータで拮抗的に駆動させる点では従来と変わりが無いが、DIP関節とPIP関節を連動させる手段として完全に閉じたゴム丸ベル

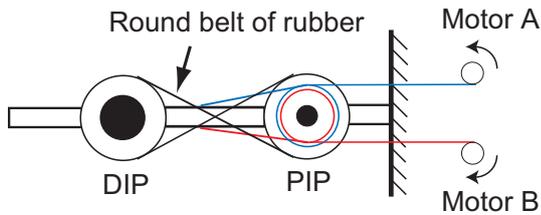


Fig.1 A proposed structure of the wire-driven finger with a round belt which is made of rubber.

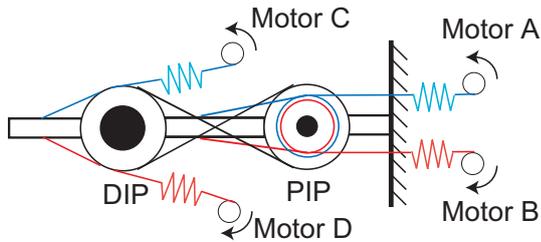
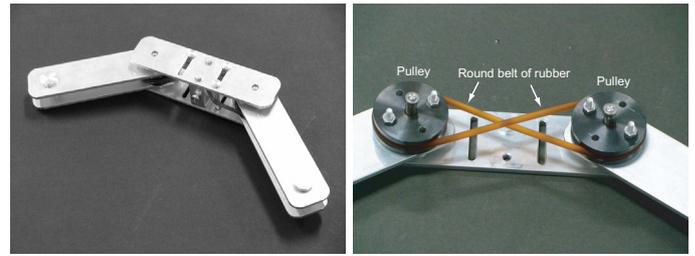


Fig.2 A proposed structure driven by a set of four motors.

トをプーリに八の字に巻きつけている．両プーリの直径は等しいため，同方向に同速度で回転する．従来の連動機構では，閉じたワイヤやベルトではなくその一端がばねを介してベース（壁）に接続した構造であった⁴⁾．これは，ばねの復元力を積極的に利用したものであるが，ヒト指では脱力時の同様な直立姿勢への復元が見受けられない．次に，提案する指機構では腱として釣り糸（PE ライン）を用いている．これは超軽量かつ高強度，低伸度の特徴を持つ．一方で，以上のような構造ではリンク先端が対象物に接触した場合，ゴム丸ベルトとプーリ間で構造上滑ることがあり得る．しかし，提案する機構では発生する滑りを積極的に抑止することは行わない．その理由を Fig. 2 で説明する．Fig. 2 が本稿で提案している連動運動を実現するモータまで含めた概略図である．リンク先端が物体に接触したときの反発力によって押し返され，丸ベルトが滑ることが容易に予想される．しかし，先端に何らかの力センサを取り付けるとすると，接触（物体把持）の瞬間にモータ C, D によって糸を引っ張り DIP 関節の回転剛性を上げることが可能になる．それによってベルトが少し滑り停止したときの関節角度を維持しつつ，把持力を増大させることができる．加えて，本機構の各系には線形ばねが挿入されている．これは，指リンクが対象物や環境へ衝突したときに，糸のたわみや緩みを防ぐ効果がある．

3. 試作機の製作

Fig. 3-(a) が前章で記述した提案機構を基に製作した示指ロボットのプロトタイプである．試作機は本手法による連動運動の検証のために製作したものであるため，モータ等



(a) prototype (b) pulleys and round belt

Fig.3 A prototype of the robotic forefinger.

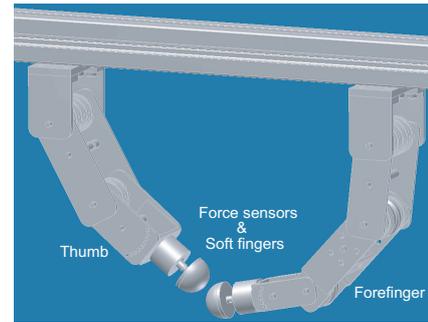


Fig.4 A prototype of two-fingered hand produced by computer-aided design (Inventor 2008).

の駆動装置は取り付けおらず，ばね要素も含まれていない．また，本ロボット指の寸法は全長 300mm，幅 30mm，厚み 33mm，重量は 304.7g となっている．また，丸ベルトの直径は 3mm で全長が 250mm であり，両プーリ間を八の字に沿った長さは約 269.2mm である．よって，丸ベルトは約 8% 伸びた状態で巻かれており，ベルト軸方向に約 2.94N の弾性力を常に生じていることになる．次に，Fig. 3-(b) には，閉じたゴム丸ベルトとふたつのプーリの拡大図を示している．この機構によって，2 リンクが同方向へと回転することになる．また，Fig. 4 には CAD で作成した示指と拇指を持つ 2 指ロボットの全体図を示す．将来研究として両リンク先端に力センサを取り付け，把持・操り動作を実現するための腱駆動ロボットに適したより簡潔な制御則の提案を行う予定である．

4. 動作検証実験

4.1 プロトタイプ

本節では，製作した連動動作確認用プロトタイプ (Fig. 3-(a)) の各関節に直径 2mm のマーカを取り付け，フレームレート 300Hz の高速度カメラ 2 台によって連動関節の動きを検証する．Fig. 5 が DIP 関節と PIP 関節の回転角度を示した結果である．3 リンクが直線上に並んだ初期状態から中間リンクを手動でゆっくりと回転させる．そのときの DIP 関節角の軌道が点線であり，PIP 関節角の軌道が実線で示されている．なお，実験は約 2.5s からスタートして

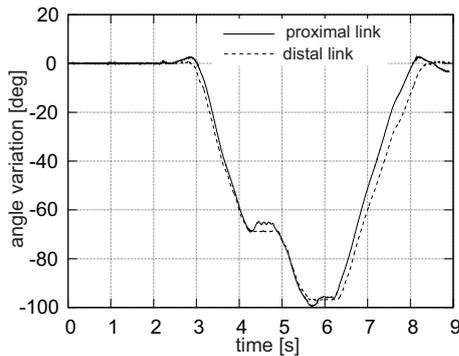


Fig.5 Verification test of the prototype.



Fig.6 Human hand and markers for verification test.

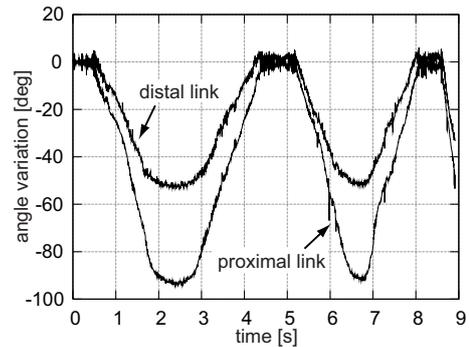


Fig.7 Verification test of a human hand.

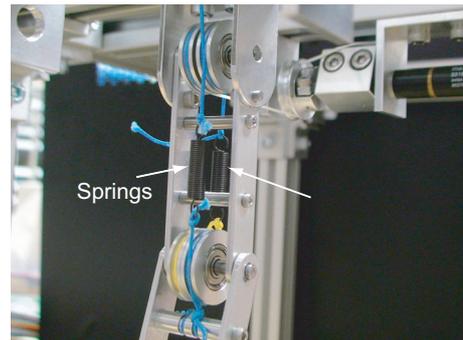


Fig.8 Layout of two springs used for preventing the deflection of the string.

いる。

Fig. 5 から分かるように，DIP 関節にヒステリシスが存在する．つまり，手で動かしている中間リンクが直立位置に戻っても，先端リンクが同位置に戻っていないことを意味する．従来のロボット制御ではこれは致命的な角度誤差になり得る．しかし，筆者らの先行研究で提案している角度誤差を許容する把持・操りのための 2 段階制御を用いると把持・操りタスクを実現できると考えている^{5,6)}．これらの詳細は今後の研究発表で示したい．

4.2 ヒトの手指の計測

本稿で開発したロボット指の更なる改良に役立てるために，本節では実際の手指の動きをカメラで計測し指節骨関節の連動運動を観察する．計測機器は前節と同様の高速度カメラ 2 台を用い，ヒトの示指の先端と各関節（DIP：遠位指節間関節，PIP：近位指節間関節，MP：中手指節間関節）に合計 4 つのマーカを貼り付ける（Fig. 6）．計測開始後に示指を最大限屈曲させ，DIP 関節と PIP 関節の角度をプロットした結果が Fig. 7 である．結果から分かるように，ロボット指とは異なり PIP 関節が DIP 関節に比較して大きく屈曲している．この結果がヒト指の連動動作の決定的な特徴であると言える．よりヒト指に近い挙動を満足するためには本節での観察を基にロボット指の改良を行う必要がある．一方で，ヒト指固有の身体的機能をロボットに反映させて得られる効果がどの程度であるのかという問題

も考慮する必要がある．今後の課題としたい．

5. 拇指示指を持つ 2 指ハンドの設計

Fig. 2 に描かれている線形ばねが実際のロボットに導入された例を Fig. 8 に示す．ロボット指先端が物体や環境に接触したときに，一対として取り付けられている線形ばねが糸のたわみや緩みを防ぐことになる．拇指ロボットにも同様の機構を採用し提案済みの 2 段階制御則を用いることで，高度な把持・操りタスクの実現を目指す．

参考文献

- 1) S.R.Devasahayam, "Signals and Systems in Biomedical Engineering", Plenum Pub Corp, 2000.
- 2) J.Hamill, K.M.Knutzen, "Biomechanical Basis of Human Movement 2nd Ed.", Lippincott Williams & Wilkins, Chap.4, 2003.
- 3) 小金澤, 石塚 "複合遊星歯車機構を用いた人工指の新機構", 第 7 回計測自動制御学会 SI 部門学術講演会予稿集, 1F2-1, 2006.
- 4) 小澤隆太, 走井一徳, "劣駆動型腱駆動機構の設計法", 日本ロボット学会学術講演会, 3M27, 2007.
- 5) T.Inoue, S.Hirai, "Mechanics and Control of Soft-fingered Manipulation", Springer-Verlag, London, 2008.
- 6) 井上, 平井, "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, Vol.75, No.757, pp.2537-2546, 2009.