

トレイグジスタンスの研究 (第 42 報)

迂回ジョイントを用いた遭遇型多指マスタハンドの駆動トルク計算モデル

東京大学 中河原 修平, (株)テック・エキスパーツ 川淵 一郎, 東京大学 梶本 裕之, 川上 直樹, 館 暉

Study on Telexistence (XLII)

Torque Calculation Model of Encounter-Type Multi-Fingered Master Hand Using Circuitous Joints

Shuhei Nakagawara The University of Tokyo, Ichiro Kawabuchi TechExperts Incorporation,

Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi The University of Tokyo

Abstract: We have developed an encounter-type master hand using circuitous joints. The circuitous joint has a structure which extends the link length in proportion to the joint angular displacement. We derive a model to calculate motor torque in order to provide an operator desirable resistive forces.

1. はじめに

我々はロボットハンドをスレーブとして操作するためのマスタハンドを開発している。我々の開発したマスタハンドは外骨格型で迂回ジョイントと呼ぶ新規関節機構を持ち[1], 通常時は操作者の指先に非接触追従する遭遇型触覚提示を行う[2]という特徴を持つ。以後, 迂回ジョイントを用いたマスタフィンガー (Fig.1)の駆動トルク計算モデルを導出し, 実験により検証する。



Fig.1 Master finger in extension and flexion

2. 駆動トルク計算モデル

2.1 マスタフィンガーの構成

迂回ジョイントはスライド機構により関節角に比例してリンク長を変え, ジョイント回転中心を操作者の指の関節に一致させる。これによってコンパクトな外骨格型機構で操作者の指と干渉することなく広い作業領域をカバーすることが可能となる。マスタフィンガーは人間の屈伸3関節に対応して3つの迂回ジョイントから成る (Fig.2 左)。ワイヤをモータで引くことにより伸展方向に駆動し, 屈曲方向へは内蔵バネを用いて駆動する (Fig.2 右)。

2.2 1つの迂回ジョイントにおける駆動の入出力関係

Fig.3 にモデルとする迂回ジョイントとパラメータを示す。関節伸長変位, ロープ繰り出し長と関節角変位の関係は

$$s_j = r_j \cdot \theta_j \quad (1), \quad w_j = 2s_j + r_p \cdot \theta_j = (2r_j + r_p)\theta_j \quad (2)$$

と幾何学的に求まる。ロープ張力と関節トルクの関係式はエネルギー保存則に基づいて,

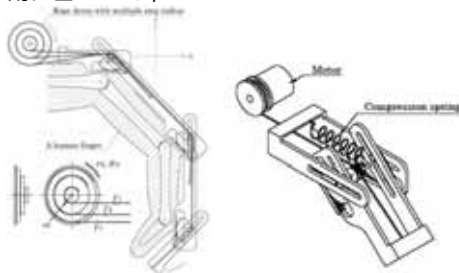
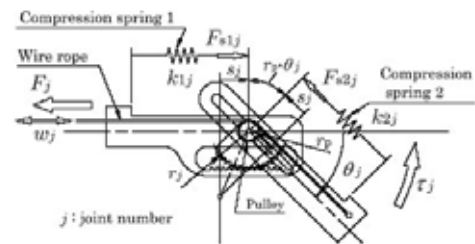


Fig.2 Coupled driving method and a compression spring in a circuitous joint



j : 関節番号	τ_j : 関節トルク
θ_j : 関節角変位	s_j : 関節伸長変位
r_j : 円弧歯車のピッチ円半径	r_p : ロープ用プーリ円半径
k_{1j} : 圧縮バネ1のバネ定数	k_{2j} : 圧縮バネ2のバネ定数
F_j : ワイヤロープの張力	w_j : ワイヤロープの繰り出し長
F_{s1j} : 圧縮バネ1の発生力	F_{s2j} : 圧縮バネ2の発生力
$F_{s'1j}$: 圧縮バネ1の $\theta_j = 0$ 時の発生力	$F_{s'2j}$: 圧縮バネ2の $\theta_j = 0$ 時の発生力

Fig.3 Relation between rope tension and joint torque at a circuitous joint

$$F_j \cdot w_j = \tau_j \cdot \theta_j + (F_{s'1j} \cdot s_j - k_{1j} \cdot s_j^2 / 2) + (F_{s'2j} \cdot s_j - k_{2j} \cdot s_j^2 / 2) \quad (3)$$

と求められる。(3)において左辺は関節角変位が j から 0 まで変化する過程におけるロープ張力のする仕事, 右辺第 1 項は関節トルクがする仕事, 右辺第 2, 3 項はそれぞれ圧縮バネ 1, 2 が吸収するエネルギーである。(1)を(3)に代入して,

$$F_j = \frac{\tau_j}{2r_j + r_p} + \frac{(F_{s'1j} + F_{s'2j})r_j}{2r_j + r_p} + \frac{(k_{1j} + k_{2j})r_j^2}{2(2r_j + r_p)} \theta_j \quad (4)$$

を得る。(4)において右辺の第 2, 3 項は圧縮バネに関するものであり, その影響を無視すると

$$F_j = \tau_j / (2r_j + r_p) \quad (5)$$

が得られる。(5)より圧縮バネの影響を無視する限り, ロープ張力と関節トルクが比例しかつ関節角変位とは無関係であることがわかる。すなわち, ロープを用いる駆動方式の利点として, 関節トルクの制御が極めて単純なことが示される。なお今後は式の簡略化も含めて, 圧縮バネの影響を無視した(6)を用いる。

2.3 マスタフィンガーの駆動の入出力関係

複数の迂回ジョイント機構を連結して運用する場合は, ある関節を通過するロープの張力の和がその関節の駆動力として働く。つまり大きな関節トルクを生ずべき根元の関節のためのロープ張力が複数のロープに分割される点もまたロープを用いる本駆動方式の利点の一つである。マスタフィンガーは Fig.4 に示すように 3 つの迂回ジョイントから成る。根元から j 番目の関節における関節トルクと 3 つのロープの張力の関係は

$$\tau_j = \sum_{m=j}^3 F_m(2r_j + r_p) \quad (j=1,2,3) \quad (6)$$

と表される。次に指先の点Tに作用する外力と釣り合うロープ張力の計算式を求める。なおマスタハンドは3本のロープを1つのモータと1つのドラムで巻き取る (Fig.2左) ので、各関節は連動して変化する。機構の姿勢を規定する角変位 θ_j ($j=1,2,3$) は

$$\theta_1 : \theta_2 : \theta_3 = 1 : u : v \quad (7)$$

の比率で連動するとする。1 はモータ角変位から求められる。

関節 j における関節トルクと外力の釣り合いは

$$\tau_j = \overline{J_j T} \times \overline{F_T} + \sum_{m=j}^3 (\overline{J_j m_m} \times m_m \overline{G}) \quad (j=1,2,3, \overline{G}: \text{Gravity direction}) \quad (8)$$

である。ただし右辺第2項は式の簡略化のため以降では省略する。

これを(6)へ代入して整理すると各ロープ張力は

$$\begin{cases} F_1 = \frac{\overline{J_1 T} \times \overline{F_T}}{2r_1 + r_p} - \frac{\overline{J_2 T} \times \overline{F_T}}{2r_2 + r_p} - \frac{\overline{J_3 T} \times \overline{F_T}}{2r_3 + r_p} \\ F_2 = \frac{\overline{J_2 T} \times \overline{F_T}}{2r_2 + r_p} - \frac{\overline{J_2 T} \times \overline{F_T}}{2r_2 + r_p}, F_3 = \frac{\overline{J_3 T} \times \overline{F_T}}{2r_3 + r_p} \end{cases} \quad (9)$$

と求まる。また各ロープを繰り出す長さは(2)から

$$\begin{cases} w_1 = (2r_1 + r_p)\theta_1 \\ w_2 = (2r_1 + r_p)\theta_1 + (2r_2 + r_p)\theta_2 \\ w_3 = (2r_1 + r_p)\theta_1 + (2r_2 + r_p)\theta_2 + (2r_3 + r_p)\theta_3 \end{cases} \quad (10)$$

と求まる。機構全体の諸元を Fig.4 に示す。単純化のために

- ・ 機構の摩擦を無視する
- ・ 指先の点Tに作用する外力 F_T はリンク長の方向と常に直交し、その作用点を Fig.4 中のバーチャルな点Tとみなす

と仮定する。まず(7)を(10)に代入して

$$\begin{cases} w_1 = (2r_1 + r_p)\theta_1 \\ w_2 = ((2r_1 + r_p)u + (2r_2 + r_p))\theta_1 \\ w_3 = ((2r_1 + r_p)u + (2r_2 + r_p)v + (2r_3 + r_p))\theta_1 \end{cases} \quad (11)$$

それぞれのロープを巻き取るドラム半径は(11)で示されるロ

ープ繰り出し長に比例するから

$$\tau_D = \left(F_1 + \frac{(2r_1 + r_p)u + (2r_2 + r_p)v}{2r_1 + r_p} F_2 + \frac{(2r_1 + r_p)u + (2r_2 + r_p)v + (2r_3 + r_p)}{2r_1 + r_p} F_3 \right) r_D \quad (12)$$

r_D : もっとも繰り出し長の短いロープを巻き取るドラムの半径
 τ_D : ドラムを回転させるのに必要なトルク
 θ_D : ドラムの回転角変位

であり、さらに各ベクトルは

$$\begin{cases} \overline{J_1 T} = (a_1 + r_1 \cdot \theta_1 + r_2 \cdot u\theta_1) \begin{pmatrix} \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \end{pmatrix} + (a_2 + r_2 \cdot u\theta_1 + r_3 \cdot v\theta_1) \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + u\theta_1) \\ \sin(\theta_1 + u\theta_1) \end{pmatrix} \\ \quad + (a_3 + r_3 \cdot v\theta_1) \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + u\theta_1 + v\theta_1) \\ \sin(\theta_1 + u\theta_1 + v\theta_1) \end{pmatrix} \\ \overline{J_2 T} = (a_2 + r_2 \cdot u\theta_1 + r_3 \cdot v\theta_1) \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + u\theta_1) \\ \sin(\theta_1 + u\theta_1) \end{pmatrix} + (a_3 + r_3 \cdot v\theta_1) \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + u\theta_1 + v\theta_1) \\ \sin(\theta_1 + u\theta_1 + v\theta_1) \end{pmatrix} \\ \overline{J_3 T} = (a_3 + r_3 \cdot v\theta_1) \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + u\theta_1 + v\theta_1) \\ \sin(\theta_1 + u\theta_1 + v\theta_1) \end{pmatrix}, \quad \overline{F_T} = F_T \begin{pmatrix} -\sin(\theta_1 + u\theta_1 + v\theta_1) \\ \cos(\theta_1 + u\theta_1 + v\theta_1) \end{pmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

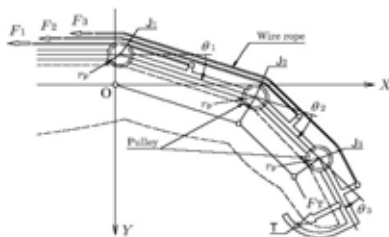
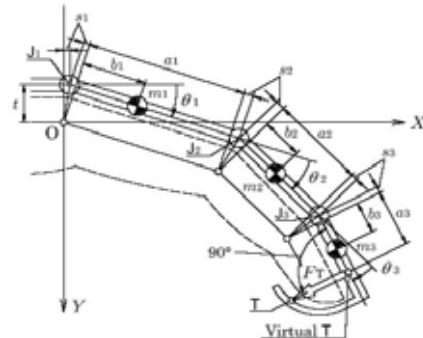


Fig.4 Force equilibrium on a master finger mechanism

と得られるので、(13)を(9)へ代入してロープ張力が求められ、さらに(12)へ代入してトルクを求めることができる。すなわち関節角変位、指先提示力、トルクの関係式が得られる。

3. 実験

上ではパネと機構質量を無視したが、実験では無視できないので、それらを考慮し、上述のモデルの検証を行った。関節角変位を横軸に、指先接触力とモータトルクの比を縦軸とするグラフで Fig.5 に示す。理論値と実際の値が良く一致していることが確認できる。



(t : 機構の中心線と人間の指の中心線との間のオフセット)
 a_j : リンク長 b_j : 各リンクの重心位置 m_j : 各リンクの質量

Fig.5 Specifications of a master finger mechanism

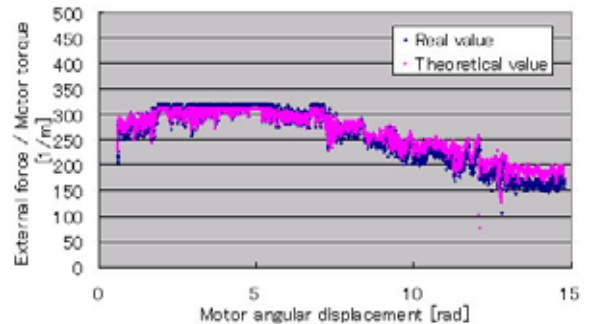


Fig.6 Comparison between real value and theoretical one

4. まとめ

迂回ジョイントを用いたマスタフィンガーの駆動トルク計算モデルを導出し、実験によって検証を行い、正確性を確認した。

謝辞 本研究は、CRESTの研究課題「テレグジスタンスを用いる相互コミュニケーションシステム」の一環として実施された。

参考文献

- 1) 川淵, 梶本, 川上, 館, “テレグジスタンスの研究(第39報) TELESAR マスタ・スレーブフィンガーシステムの開発,” 第4回計測自動制御学会 SI 部門講演会論文集, pp.598-599, 2003.
- 2) 中河原, 梶本, 川淵, 川上, 館, “テレグジスタンスの研究(第41報) 遭遇型多指マスタハンドを用いた指のマスタスレーブ制御,” 日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集, pp.469-470, 2004.