神経振動子を利用したロボットハンドによるマニピュレーション： 人間計測に基づく操作パターンの生成*

栗 田 雄 一^{*1}, 上 田 淳^{*1}
松 本 吉 央^{*2}, 小 笠 原 司^{*1}

CPG Based Manipulation : Measurement of Human's Rhythmic Finger Gaits

Yuichi KURITA^{*3}, Jun UEDA,
Yoshio MATSUMOTO and Tsukasa OGASAWARA

^{*3} Robotics Laboratory, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology,
8916-5 Takayama-cho, Ikoma-shi, Nara, 630-0192 Japan

A number of researches for the dextrous manipulation have been studied in robotics and physiologic fields independently. Multi-fingered manipulation for dextrous robot hands should be based on the analysis of human skills. The purpose of this study is to apply the CPG-based control to the dextrous manipulation. In this paper, CPG-based manipulation is proposed for the rotating manipulation. Manipulation patterns of fingers are investigated when a subject rotates a cylindrical object. Typical contact patterns during the rotating manipulation are measured by FSRs. Based on the observation, the neural circuit model which generates a similar contact pattern is constructed. The experimental results by the computer simulation suggest that rotating manipulation can be performed using the constructed CPG model.

Key Words: Manipulator, Bio-Motion, Motion Control, Robot Hand, Central Pattern Generator

1. は じ め に

人の手指は、複数の指を協調させて精緻な操作を行うことができる。リハビリおよび生理工学の分野においては、古くからヒト手指の精緻運動が数多く計測・解析されてきた。たとえば、手指運動の分類⁽¹⁾⁽²⁾、把持のプランニング、リーチング⁽³⁾⁽⁴⁾、把持力制御⁽⁵⁾などに関する研究が行われている。一方ロボット工学の分野においては、多指ロボットハンドを用いて器用な操りを実現することを目的として、内力/外力計算に基づく把持安定性⁽⁶⁾、把持力最適化⁽⁷⁾ Finger gates を用いた持ち替え操作⁽⁸⁾などの研究がなされている。しかしながら、これらの研究の多くは工学的アプローチに基づいた接触状態や物体持ち替え運動の理論解析に重点が置かれており、ヒトの操作スキルの解析結果がハンドの制御に応用された例は少ない。

生物の生理学的知見に基づき工学的アプローチによってロボットの制御に応用された例として、CPG(Central Pattern Generator)に基づく歩行制御の研究を挙げることができる。自律的適応を行なう生物の運動においては、脊髄に存在する CPG がリズムパターンの生成に

重要な役割を果たしているといわれている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。この知見に基づき、神経振動子の結合によって生物の歩行パターンを実現しようとする試みが数多くなされており^{(11)~(13)}、ロボット実機による歩行実験にも成功している。

ここで田口らは、ヒトの円筒操り中の各指の動作の軌跡をモーションキャプチャを用いて計測し、習熟の結果、各指の動作パターンがある一定のリズムに収斂することを報告している⁽¹⁴⁾。このことは、円筒操りのような一定のリズムパターンに収斂する手指運動においては CPG を利用した制御が有効である可能性を示しているが、実証はなされていなかった。

そこで本研究では、手指による精緻運動を CPG を利用して実現することを目的とする。本論文では、人手指の物体回転操作時における各指と物体との接触状態に着目してその典型的パターンの計測を行う。次に神経振動子の結合を用いて、計測された典型パターンを生成する CPG モデルの構築を行う。最後にシミュレータにより生成されたパターンを用いた回転操作を行ない、提案手法の妥当性を検討する。

2. 典型的接触パターンの計測

2.1 計測システム ロボットハンドを用いて物体を把持する際に点接触を仮定した場合、静的安定を実現するためには 3 本の指が必要になる。また、静的

* 原稿受付 2004 年 4 月 15 日。

^{*1} 正員、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 (〒630-0192 生駒市高山町 8916-5)。

^{*2} 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科。

E-mail: yuichi-k@is.naist.jp

Fig. 1 Contact sensing system

Fig. 2 Experimental scene

安定を保ちつつ把持指の置き換えを行なうためには、もう1指を必要とする。このことからこれまでに開発されたロボットハンドは4指で構成されるものも多い⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。そこで本稿では、将来的に4指ハンドによる操作を考慮して、4指による人の物体回転操作を計測対象とする。

人の手指の運動を計測する装置としては、モーションキャプチャシステムやセンサグローブなどが頻繁に用いられる。しかしタスクの指定されたパターン運動においてはその操作を行なうために手指のとりべき運動は限られている。そのため、ロボットハンドを用いて操作を行う際に人の手指運動を正確に計測し、それを完全に模倣する必要性は薄い。パターン運動の実現において重要な情報は、“どの指を”、“どのタイミングで”動かしたかである。そこで本研究では、指と物体の接触状態に着目する。

回転操作時の各指の接触状態は、図1(a)に示されるFSR(Force Sensing Resistor)を使用して計測する。被験者は、図1(b)に示すゴム手袋の指先内側にFSRを取りつけた装着器具を母指・示指・中指・環指の4指にはめて、直径65[mm]、重さ20[g]の円筒を回転させ

Fig. 3 Experimental Result (FSR data, subject A)

る。実験の様子を図2に示す。実験は、事前に円筒の回転操作を十分に練習した5名の被験者によって行われた。なおデータのサンプリング速度は50[Hz]である。

2.2 実験結果 図3は被験者Aの回転操作時においてある2秒間の各指のFSR出力値を表している。図中縦軸はFSRの出力値を示しており、値が大きいほど大きな力が物体に加えられたことを示す。また横軸は時間を表す。ここで回転操作時における各指の力の協調制御による把持安定性の考察もまた興味深い問題ではあるが、本稿では運動パターンの計測を目的とするため、各指の接触時間に着目する。各被験者のFSR出力値を適当な閾値で二値化し、接触/非接触状態に二分化した結果を図4(a)~(e)に示す。

図4に示された各被験者の接触データから典型的な接触パターンを計算する。母指が接触状態から非接触状態になるタイミングでデータを分割し、それを1周期の運動パターンとして扱う。その結果、全ての被験者について1周期の時間は多くが0.7~0.8[sec]の範囲に収まっていることが確認された。そこで次の手順を用いて典型接触パターンを算出した。

1. 母指が接触状態から非接触状態になるタイミングで接触データを分割する
 2. 1周期が0.7~0.8[sec]に収まるデータのみを抽出する
 3. 1周期が0.8[sec]になるようにデータを線形補間する
 4. 各時刻における平均を計算し、再び二値化する
- 得られた各被験者の典型接触パターンを図5に示す。典型的接触パターンにおける各指の接触/非接触状態の切り替わりからは、被験者Eを除いて大まかに以下のような特徴を確認できる。

1. 母指が接触すると環指が物体から解放される
 2. 環指が接触すると示指が物体から解放される
 3. 示指が接触すると母指が物体から解放される
- すなわち、母指・示指・環指の3指は、常に少なくともそのうちの2指が接触状態になるように動作している傾向が確認できる。一方、中指の接触パターンは被

Fig. 4 Experimental results (Contact data, all subjects)

験者による違いが比較的大きく、1 周期内でも接触/非接触を繰り返すが、母指の接触と協調して接触し、環指の非接触時に物体の支持の補助を行なっている。また被験者 E については、他の被験者と比較して中指と環指の使い方が異なる。環指の接触するタイミングが他の被験者と比較して遅い一方で、中指が早めに接触することで物体の支持を行っている。

以上から、回転操作時には主要な 3 指 (母指・示指・環指) が主に物体の回転および支持の役割を担っており、中指は他の 3 指によってのみでは安定な把持が実現できないときに、把持の補助を行う役割がある

Fig. 5 Typical contact pattern

のではないかと考えられる。

3. 神経振動子を用いた接触パターンの生成

前章で説明した実験結果から、回転操作において各被験者の接触パターンには共通の特徴が現れることが確認された。そこで計測の結果得られた知見をもとに接触パターンを生成する神経回路モデルを構築する。本稿では、松岡⁽¹¹⁾によって提案され、Taga ら⁽¹²⁾⁽¹³⁾によって二足歩行シミュレーションに適用された神経振動子モデルを用いる。松岡らのモデルにおいて個々の神経振動子は次の非線型方程式によって表される。

$$\tau \dot{u}_i = -u_i - \beta v_i + \sum_{j=1}^n w_{ij} y_j + u_0 + S_i \quad (1)$$

$$\tau' \dot{v}_i = -v_i + y_i \quad (2)$$

$$y_i = f(u_i) \quad (f(u_i) = \max(0, u_i)) \quad (3)$$

ここで u_i , v_i はそれぞれ i 番目のニューロンの内部状態および疲労状態, y_i はニューロンの出力, u_0 は上位からの駆動入力, S_i はセンサからのフィードバック信号を意味し, β はニューロンの疲労係数, w_{ij} はニューロン i から j への結合係数, τ , τ' はそれぞれ u_i と v_i の時定数を意味する。

Fig. 6 Structure of the constructed CPG model

構築したモデルを図6に示す。図中 $N1 \dots N4$ は、各指の接触パターンを生成するニューロンである。 $S_i = 0$ としたときの各ニューロンの出力を図7(a)に示す。ここで生成されたCPGモデルの出力は接触時間を表すものであり、出力の絶対値は意味をもたない。そこで生成されたパターンを二値化して1周期の接触パターンとして表現したものを図7(b)に示す。生成されたパターンは、母指、示指、環指が順に接触/非接触を繰り返し、常にそのうち少なくとも2指が接触状態になる。また中指は環指の非接触時に接触することで、母指、示指による把持を補助する役割を担う。

4. 回転操作シミュレーション

4.1 各指の制御手法 回転操作のようなパターン運動において各指は基本的に一定の動作を繰り返す行なう。例えば本稿で対象としている物体の回転操作において各指が行なう動作は、大きく分けて次の4種に分けることができる。

- 指を物体に接触させる
- 指を物体に接触させたまま物体を回転させる
- 指を物体から解放する
- 指を元の位置にもどす

ここで前章で構築したCPGモデルにより出力された接触パターンを利用して

- 指と物体を接触/回転させるための指令 (Contact command)
- 指を物体から解放し元の位置にもどすための指令 (Return command)

の2種類の指令を発行することにより、簡単なモデル構成で回転操作を実現することができる。

(a) Neuron outputs

(b) Contact pattern in one cycle

 Fig. 7 Neuron outputs from the constructed CPG model ($\tau = 0.3, \tau' = 1.5, u_0 = 7.0, \beta = 3.0, w_{ij} = 2.2$)

Fig. 8 Finger control in the contact command

Fig. 9 Finger control in the return command

ここで Contact command および Return command が発行されたときの各指の動作を図8および図9に示す。Contact commandが発行されると、各指の接触状態に応じて Approach mode および Rotation mode の二種類の制御が実行される。同様に Return commandが発行されると、接触状態に応じて Release mode および Back mode の二種類の制御が実行される。

Fig. 10 Simulator

Rotation mode においては、次式で表される力 F_p が各指に発生する。

$$F_p = k_{p1}(p_d - p) - k_{v1}\dot{p} + F_c \quad (4)$$

ここで、 p は各指の現在位置、 p_d は各指の目標位置、 $\dot{p}$ は現在の速度、 k_{p1} 、 k_{v1} は定数である。また F_c は、物体重量および摩擦係数から計算された物体を把持するために必要となる把持力である。目標位置 p_d は、各指ごとにあらかじめ設定されている。さらに物体位置のずれを補正するため、物体中心の目標位置 o_d に現在の物体中心位置を保つための力を各指に付加する。

Back mode においては、次式で表される力 F_q が各指に発生する。

$$F_q = k_{p2}(q_d - p) - k_{v2}\dot{p} \quad (5)$$

ここで q_d は各指の目標位置、 k_{p2} 、 k_{v2} は定数である。目標位置 q_d は、各指ごとにあらかじめ設定されている。

Approach mode および Release mode においては、各指にあらかじめ設定された力 F_a 、 F_b が発生する。また (1) 式におけるフィードバック項 S_i は次式で与えた。

$$S_i = k_s \max(0, s_{zi} - s_{min}) \quad (6)$$

ここで s_{zi} は i 番目の指先から得られる z 軸方向の反力であり、 s_{min} は外乱発生を判定する最小値、 k_s は定数である。

4.2 シミュレーション 構築された CPG モデルによって生成される接触パターンと前節で説明した各指の制御手法を用いて多指ハンドによる回転操作が可能であるかを検証するため、図 10 に示すシミュレータを作成した。シミュレーションにおいては、ハ

Fig. 11 Experimental scene during the rotating manipulation in the simulation

ンドはリンクなしの指先のみのモデルとし、物体の質量を $1.0[\text{kg}]$ 、重力加速度を $0.1[\text{m/s}^2]$ とすることで物体重量を $0.1[\text{N}]$ に設定した。また指先と物体表面の摩擦係数は 1.0 とした。各指の初期位置は、人の指の可動域を参考に、物体座標系において x, y 平面上の $0[\text{rad}]$ (母指)、 $2\pi/3[\text{rad}]$ (示指)、 $\pi[\text{rad}]$ (中指)、 $4\pi/3[\text{rad}]$ (環指)の角度に配置された。また Rotation mode において、母指、示指、環指は $\pi/6[\text{rad}]$ 、中指は $\pi/12[\text{rad}]$ の回転を行うように p_d が設定された。シミュレーションにおいて使用した CPG パラメータは $\tau = 0.9, \tau' = 12.0, u_0 = 7.0, \beta = 3.0, w_{ij} = 2.3$ であり、図 6 で示された CPG モデルの出力に基づいて Contact command および Return command が発行される。

生成された指令により指が物体を回転させる様子を図 11 に示す。図 12(a) は定常状態 (外乱のない状態) における円筒の x, y, z 軸まわりの回転角度を表しており、図 12(b) はグローバル座標系における物体中心の設定目標位置 $o_d = (0, 0, 30)$ からの相対位置変化を表す。また時刻 $20[\text{sec}]$ から $40[\text{sec}]$ における各指それぞれのニューロン出力値および各指に取り付けられたセンサ出力値の z 軸成分を図 12(c)~(f) に示す。シミュレーションの結果、CPG の各ニューロンにより出力された接触パターンを利用して、空中で把持したまま円筒物体を z 軸まわりに回転させることが可能であることが確認できた。

次に時刻 $25[\text{sec}]$ から $26.5[\text{sec}]$ の間、 z 軸正方向に $3.0[\text{N}]$ の力が加わったときの円筒回転角度と相対位置変化を図 13(a) および (b) に、時刻 $20[\text{sec}]$ から $40[\text{sec}]$

(a) Angle of the object

(b) Relative position of the object

(c) Neuron and sensor outputs of the thumb

(d) Neuron and sensor outputs of the index finger

(e) Neuron and sensor outputs of the middle finger

(f) Neuron and sensor outputs of the ring finger

Fig. 12 Experimental results (no disturbance)

における各ニューロン出力値およびセンサ出力値を図13(c)~(f)に示す。外乱発生時、物体に接触している指のみが発生した力の影響を受け、z軸正方向に大きく反応していることが確認できる。これによりもたらされ

(a) Angle of the object

(b) Relative position of the object

(c) Neuron and sensor outputs of the thumb

(d) Neuron and sensor outputs of the index finger

(e) Neuron and sensor outputs of the middle finger

(f) Neuron and sensor outputs of the ring finger

Fig. 13 Experimental results (disturbance is applied from 25.0 to 26.5[sec])

るニューロンに対するフィードバック入力各ニューロン出力値に影響を及ぼし、結果として各指に対してContact commandを長時間出すことになる。その結

果、各指は円筒から指を離さなくなることによって回転操作を停止し、安定状態を保とうとする。外乱がおさまると、 S_i の値が小さくなると、各ニューロンは再び Contact command と Return command を発行するようになり、回転操作が再開される。図 13(a) より外乱発生直後の z 軸回りの回転が停止し、外乱が収まると再び回転が再開されていることが確認できる。本シミュレーションの結果、外乱発生時においても、CPG を利用して物体を落とさず回転操作が可能であることを確認できた。

5. お わ り に

本稿では、ヒトの回転操作パターンにおける各指の接触パターンに着目し、指と物体の接触情報を FSR を用いて被験者実験により計測した。計測の結果、被験者には共通した接触パターンが生じることが確認された。また神経振動子を用いて手指の回転操作パターンを再現する CPG モデルを構築し、ヒトの接触パターンに近い出力が得られることを確認した。さらにシミュレータを作成し、構築した CPG の出力を用いて回転操作が可能であることを確認した。

回転操作パターンの計測実験における問題点として、回転操作中の物体と指の接触部位が指腹部から指側面部まで広範囲に分布するため、FSR のようなタッチセンサによる計測では正確な接触判定に誤りが生じる可能性が挙げられる。また人の手指を用いた操りにおいて、固着/滑り接触および転がり接触が重要な役割を果たしていることがよく知られている。今後より正確な接触位置検出が可能な把握計測システムの開発およびモーションキャプチャシステムなどを用いた指運動の正確な軌跡の計測、さらに操作中の滑り計測などを行なうことなどを計画している。シミュレーションにおいては現在指先のみのモデルを用いているが、今後手全体のダイナミクスを考慮に入れて実験を行う予定である。

なお本研究は、21 世紀 COE プログラム「ユビキタス統合メディアコンピューティング」の支援および財団法人人工知能研究振興財団の平成 15 年度研究助成を受けた。

文 献

- (1) J. R. Napier. The prehensile movements of the human hand. *J. Bone and Joint Surgery*, 38 B (1956), 902–913.
- (2) M. R. Cutkosky and R. D. Howe. Human grasp choice and robotics grasp analysis. In *Dextrous robot hands*, (1990), 5–31, Springer-Verlag.
- (3) M. A. Arbib, T. Iberall, and D. Lyons. Coordinated control programs for control of the hands. *Exp. Brain Res.*, 10 (1985), 111–129.

- (4) M. Jeannerod, M. A. Arbib, G. Rizzolatti, and H. Sakata. Grasping objects: The cortical mechanisms of visuomotor transformation. *Trends in Neurosciences*, 18 (1995), 314–320.
- (5) G. Westling and R. S. Johansson. Factors influencing the force control during precision grip. *Exp. Brain Res.*, 53 (1984), 277–284.
- (6) Y. Nakamura, K. Nagai, and T. Yoshikawa. Dynamics and stability in coordination of multiple robotics mechanisms. *Int. J. Robotics Research*, 8-2 (1989), 44–61.
- (7) M. Buss, H. Hashimoto, and J. B. Moore. Dextrous hand grasping force optimization. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 12-3 (1996), 406–418.
- (8) M. Huber and R. A. Grunen. Robust finger gaits from closed-loop controllers. In *Proc. 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (2002), 1578–1584.
- (9) S. Grillner. Locomotion in vertebrates: central mechanisms and reflex interaction. *Physiological Review*, 55 (1975), 367–371.
- (10) U. Bassler. On the definition of central pattern generator and its sensory control. *Biological Cybernetics*, 54 (1986), 65–69.
- (11) 松岡 清利. リズム発生神経回路における周波数およびパターンの制御. *MBE*, 107 (1986), 101–108.
- (12) G. Taga, Y. Yamaguchi, and H. Shimizu. Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators. *Biological Cybernetics*, 65 (1991), 147–159.
- (13) G. Taga. A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion ii. real-time adaptability under various constraints. *Biological Cybernetics*, 73 (1995), 113–121.
- (14) 田口 博丈, 長谷 和徳, 前野 隆司. ヒト手指の円筒操り動作パターンとその習熟機構の解析. 日本機械学会論文集, 68-670 (2002), 1647–1654.
- (15) J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger. DLR-Hand II: Next Generation of a Dextrous Robot Hand, In *Proc. IEEE Int. Conf. on Conference on Robotics and Automation*, (2001), 109–114.
- (16) 上田 淳, 近藤 誠宏, 小笠原 司. 作業計測とスキル生成のための NAIST-Hand システムの開発. 第 21 回日本ロボット学会学術講演集, (2003), 3E24(CD-ROM).