2A2-15 同調制御に基づく人間とロボットのインタラクション

Synchronization Based Control for Human-Robot Interactions

○ 正 橋 本 稔 (信 州 大)

春日 智 史 (富 士 通 S S L)

Minoru HASHIMOTO, Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda, Nagano
Tomofumi KASUGA, FUJITSU SSL

In this study we propose a framework using neural oscillators for human-robot physical interaction such as “handshaking”. Neural oscillators are used for synchronization and entrainment between human and robot motions. Passiveness of the interaction can be changed by adjusting strength of the synchronization. Joint torque information is taken as an input signal for the neural oscillators, and the neural oscillator generates the desired trajectory of a robot joint. This paper addresses a model structure of the neural oscillator for human-robot physical interaction. The experiments with a joint torque sensing robot arm show that a handshake between a robot and a human being is realized by the proposed method. Lastly the validity of the proposed method is examined by a psychological evaluation with a paired comparison method, and it is found that the proposed method is better than conventional impedance control in terms of “Flexible”, “Natural”, “Kind” and “Affinity”.

Key Words: Human-Robot Interaction, Neural Oscillator, Torque Sensor, Handshaking

1. 結 論

日本社会は 2014 年には高齢化率が 25%となり、4 人に 1 人は 65 歳以上の高齢者となる。このような高齢社会において、労働人口の減少、要介護者の増大は深刻な社会問題となっている。介護支援ロボットの実現はその問題解決のひとつの重要なアプローチとして位置付けられ、多くの研究やプロジェクトが立ち上がっている^{[1],[2]}。これらの研究において、人間とロボットが直接物理的に相互作用を行う身体的インタラクションにおいて、安心感や親近感を人間に与えられるかということが重要な課題となっている。

人間同士のインタラクションにおいて、生体リズムが相互に同調化して引き込む現象が重要な役割を果たしており、添い寝のような幼児と母親の原始的インタラクションにおいて、呼吸の引き込み現象が存在することが示されている^[3]。したがって、人間に一体感や共感を与えるインタラクションのためには、この同調・引き込み現象によりお互いのリズムを合わせることが本質的に重要であると考えられる。そこで本研究では、安心感や親近感を与える人間とロボットの身体的インタラクションのためには、身体的インタラクションにおける同調・引き込みが本質的に重要であると考え、相互のインタラクションにより新たな場を創出させる方法を検討する。その上で、インタラクションの目的や与えたい印象により異なるインタラクションの能動性や受動性を実現する方法として、同調性を変更する方法を提案する。身体的インタラクションの中には、相手に合わせる受動的なものや相手を自分の動きにむりやり引き込む能動的なものがあり、これらを調整することがインタラクションの目的を達成する上で重要である。

2. 人間とロボットの協調制御

従来、人間とロボットのインタラクションに関する多くの研究が行われてきた。ここでは、物体運搬作業の協調制御と人間とロボットが直接接触する身体的インタラクションの研究について、概観してみよう。

人間とロボットの協調作業に関する研究では、人間同士の協調運搬作業を実験的に解析し、人間の可変インピーダンス特性をロボットに組み込むことで自然な作業を実現する研究^[4]が行われている。また、ロボットだけでは操ることができない物体を人間が作業の一部を担い、力を加えて物体の方向を指定することで、ロボットが物体を移動することができるようにする研究^[5]がある。

一方、人間とロボットが直接触れ合う身体的インタラクションでは、人間の初期の動作を観測しながら、隠れマルコフモデルを修正したものを用いてどの経路パターンを追従しようとしているかを早い段階で識別し、ロボットをその経路にしたがって制御する方法^[6]が提案されている。また、ダンスパートナーロボットシステムの研究^[7]では、人間のダンスステップの推定を隠れマルコフモデルによって行ない、その推定結果に基づいてロボットを制御する方法が取られている。また、人間がロボットの任意の部位に力を加えたことをロボットが認識し、それに応じて動作させる研究^[8]も行われている。さらに、リハビリテーション支援装置では、患者がマニピュレータをアクティブに等速で運動させる制御や、逆にマニピュレータが患者の手首を等速で運動させる制御などを実現している^[9]。

しかしこれらの研究は、人間とロボットのどちらか一方がマスターであり、他方がスレーブとして設定されており、どちらかが相手に一方的に合わせるものである。ロボットの制御法としては、主にインピーダンス制御が

用いられ、適当なインピーダンスを設定することにより、マスターやスレーブの制御を実現する方法が取られてきた。このような制御法では、人間とロボットのどちらがマスターでどちらがスレーブであるかを前もって決めておく必要があり、互いの運動の同調・引き込みによる創出が行なわれておらず、一体感のあるインタラクションにはなっていないように思われる。

3. 神経振動子を用いたロボット制御

一方、神経振動子^{[10],[11]}は、外界との同調などを考慮した周期的な運動の生成が可能で、近年、ロボットの歩行^{[12],[13]}やロボットアームの運動^[14]、またリズムミクな運動生成^[15]や歩行支援装置^[16]へと応用されている。これらの研究は、神経振動子の有する同調・引き込み特性を利用して、ロボットの動特性や環境変動にロバストでリズムミクな制御を実現しようとするものである。人間とロボットのインタラクションに応用された例としては、Maedaら^[17]によるロープ回しの研究がある。これは、人間とロボットでロープを回す協調作業を LPLL (Linear Phase-Locked Loop) という引き込み効果のあるソフトウェアを用いて実現したものである。これは人間とロボットが直接接触しているものではなく、人間とロボットが直接接触する身体的インタラクションにそのまま用いられるものではない。また、ロボットの運動は一定の円軌道を描くものとし、その周期と位相のみを LPLL を用いて引き込む方法をとっており、複雑な運動への拡張性という点で限界がある。さらに、同調性に関する検討は行なわれていない。

本研究では、人間とロボットの身体的インタラクションにおいて、神経振動子を用いて相互運動の同調・引き込み現象により協調運動を創出するとともに、その同調性を調整することによりロボットの能動性または受動性を変更する制御法を提案し、その有用性を握手実験とその心理的評価実験により検証する。人間と人間が握手をするとき、どちらかが一方的に相手に合わせるということではなく、自然に同一の周期運動を作り出している。その同調の程度により、支配を意図する握手、友好的な握手、さらに服従を意図する握手など握手の意図が異なるものと考えられている^[18]。本研究で提案する神経振動子を用いた身体的インタラクションの制御法は、握手のみならず、介護における患者の歩行補助やリハビリ運動といった、引き込みや同調を必要とする周期運動へと応用できると考えられる。

本論文の構成は次の通りである。次章において提案する制御法の基本構成について述べる。次に、握手実験を用いてその実現可能性を示すとともに、提案手法とインピーダンス制御を用いた握手制御の心理評価実験を行なってその有用性を検討する。

4. 身体的インタラクションのための同調制御

4.1 SBC 法

人間とロボットの身体的インタラクションにおいて、相互の運動を同調させるとともに、同調性を調整する制御方法について提案する。ここでは、この同調制御法を SBC (Synchronization Based Control) 法と呼ぶことにする。本手法は、人間と接触してインタラクションするさまざ

まなロボットに適用できるが、ここでは、ロボットアームを想定して説明を行なう。Fig. 1 にその基本構成を示した。ロボットの各関節に神経振動子を設け、その出力をその関節の目標角度とする。人間とのインタラクションによって発生する関節トルクにゲインを掛けたものを神経振動子の入力信号とする。神経振動子の入出力間の同調現象を利用して、人間とロボットの運動を同調させよ

Fig. 1 Block diagram of Synchronization Based Control (SBC)

うとするものである。ここで、入力ゲインを変更することにより、その同調の程度を連続的に変更することができる。

4.2 神経振動子の構成

生物の歩行運動や呼吸などのリズムミクな運動生成に、神経振動子が用いられていると考えられている。神経振動子は、入力された周期的な信号に対して同調することにより、容易に外部事象に対して同調するという機能を有することが知られている。

神経振動子の数学モデル (松岡モデル^{[10],[11]}) は式(1)~(3)で表される非線形1階連立微分方程式で表せる。また、ユニットの構造を Fig. 2 に示す。

$$T_r \frac{dx_i}{dt} + x_i = - \sum_{j=1} a_{ij} g(x_j) - b_i x'_i + s_i + \text{Input} \quad (1)$$

$$T_a \frac{dx'_i}{dt} + x'_i = g(x_i) \quad (2)$$

$$g(x_i) = \max(0, x_i) \quad (3)$$

Fig. 2: Structure of unit

Fig. 3: Mutual inhibition

ここで、 x_i は i 番目のニューロンの内部状態を表す変数、 x'_i はニューロンの疲労状態を表す変数、 $g(x_i)$ はニューロンの出力、 S_i は定常入力、 b_i は疲労係数、 a_{ij} は j 番目のニューロンから i 番目のニューロンへの結合係数、 T_r, T_a は時定数である。Input はニューロンへの入力である。

各関節に配置する神経振動子は2つのユニットで構成される。その構造を Fig. 3 に示した。ここで、関節 i 、ユニット j ($j=1, 2$) の神経振動子の振る舞いを、(1)~(3)式を変形した(4)~(6)式で表す。

$$\begin{aligned}
 T_r \frac{dx_{ij}}{dt} + x_{ij} &= -\sum_{k \neq j} a_{ik} g(x_{ik}) - b_{ij} x'_{ij} + s_{ij} \\
 &\quad + (-1)^{j-1} K_i \left(\sum_{l \neq i} (g(x_{li}) - g(x_{li2})) \right) \\
 &\quad + (-1)^{j-1} \text{Input1} + \text{Input2} \quad (4) \\
 T_a \frac{dx'_{ij}}{dt} + x'_{ij} &= g(x_{ij}) \quad (5) \\
 g(x_{ij}) &= \max(0, x_{ij}) \quad (6) \\
 \text{Input1} &= C_i \tau_i \quad (7) \\
 \text{Input2} &= L_i |\tau_i| \quad (8)
 \end{aligned}$$

以下に、本制御法のために(1)-(3)式を変更して、新たに
加えられた項についての詳細を述べる。

(4)式の第4項は、関節間の同調と安定な振動を目的と
している。 $\sum_{l \neq i} g(x_{li}) - g(x_{li2})$ は自分以外の神経振動子の

出力を加え合わせることを表している。 K_i はそれに掛
けられる定数である。

Input1 に関する項は、周波数の同調のためのものであ
り、(7)式で表される。ここで、 τ_i は人間との相互作用に
より発生した第 i 関節の関節トルクである。 C_i は定数で、
入力大きさを調整するゲインである。この入力、2 個
のユニットにそれぞれプラスとマイナスを掛けて入力す
る。

Input2 は、人間の振幅に合わせるためのものであり、
(8)式で表される。ここで、 L_i は調整ゲインで、関節ト
ルクの絶対値に掛けて、Input2 とする。Input1 とは異な
り、各ユニットに加算する。これにより、人間が加えた
力に応じた出力(目標角度)が得られる。また、Input2
を入力することにより、神経振動子自身の持つ周波数が
わずかに変化するが、無視できる程度のものであること
がわかっている。

各関節の目標角度は、神経振動子の出力に O_i を用いて
ゲイン調整したものである。

関節数 2 の場合について、(4)-(8)式で表される神経振
動子の構造を Fig. 4 に示した。詳細については、文献[19]
を参照されたい。

Fig.4 : Structure of the Neural Oscillator

5. 握手制御実験

実験に用いるロボットアームは関節トルクセンサ内蔵
型 7 自由度アーム^[20]であり、関節 1 (肩関節) と関節 4 (肘
関節) の目標角度を、神経振動子を用いて決定し、その
他の関節は一定の角度の位置制御をしている。実験の様
子を Fig. 5 に示した。Input1, Input2 は、関節トルクセン
サの出力から重力項を除去した値を用いて算出し、神経
振動子へフィードバックされる。制御に用いた神経振動
子のパラメータの値は、 $T_r=0.086$, $T_a=0.043$, $a_{ik}=0.8$,
 $s_{ij}=2.0$, $b_{ij}=2.5$, $O_i=5.73$, $K_i=1.2$, $C_i=0.04$ and 0.01 ,
 $L_i=0.13$ である。この場合、インタラクションがない状態
でのロボットの基本周波数は 1.5 Hz となっている。

ここで人間とロボットが同調しているかを調べるため
に、画像処理ボード IP7000 を用いて人間の関節角の計測
を行った。 C_i を調整し、柔軟に設定した場合の握手の結果
を Fig. 6 に、堅固に設定した場合の握手の結果を Fig. 7
に示した。

Fig.5: Overview of a human-robot handshake

Fig.6 : Experimental results ($C_i=0.04$)

Fig.7 : Experimental results ($C_i=0.01$)

この結果から、Fig.6 では、関節トルクが小さく、周波数も 1.1Hz 程度で、ロボットは人間に対して受動的に振舞っていることが分かる。一方、Fig.7 では、大きな関節トルクが発生しており、周波数がロボット自身の持つ基本周波数に近い。これは、ロボットが人間に対して能動的に働いており、ロボット自身の運動に人間の動きをある程度引き込んでいるためだと考えられる。以上より、 C_1 の値を変えることにより、ロボットアームの同調性を変更でき、受動的な握手、能動的な握手、またはその中間の握手を容易に実現できることを示している。

6. 心理評価実験

本研究で提案した握手制御法の有効性を調べるために、人間とロボットの握手の心理評価実験を行った。評価方法には Bradley の一対比較法^[2]を用いた。神経振動子を用いた握手を 2 種類、従来考えられる方法であるインピーダンス制御を用いた握手を 2 種類、計 4 種類の試料を用意し、そのうちの 2 つずつを組にして比較してもらい、どちらがより好ましい握手であるかを、「柔軟である」、「自然である」、「優しい」、「親近感のある」の 4 項目について 12 名の被験者に評価してもらった。試料の詳細は以下に示す。実験順や組み合わせは無作為に選んでいる。また、周波数と振幅は全ての試料で統一してある。

- 神経振動子を用いた握手 (とても柔軟)
- 神経振動子を用いた握手 (やや柔軟)
- インピーダンス制御を用いた握手 (剛性小さめ)
- インピーダンス制御を用いた握手 (剛性大きめ)

各資料の判定比 (尺度値) を $\pi_a, \pi_b, \pi_c, \pi_d$ とし、それぞれの評価項目についてそれらを推定し、さらに χ_0^2 を求めると、Table1 のようになった。自由度 3 のカイ 2 乗分布の 5% 点は $\chi^2 (3, 0.05) = 7.82$ なので、全ての評価項目で $\chi_0^2 > \chi^2 (3, 0.05)$ が成立し、有意差があることが分かった。

また、神経振動子を用いた場合 (a, b) とインピーダンス制御を用いた場合 (c, d) とでは、ほとんどの被験者が神経振動子の方を良いとしていることが分かった。これは、インピーダンス制御は周波数を相手に合わせられないなど同調の能力がないが、神経振動子は周波数の変化などに柔軟に対応することができるからではないかと考えられる。また、a と b を比較すると、「柔軟である」という評価項目以外は、b の順位が高い。この結果は、受動的であり過ぎるよりも、ある程度能動的である方が、人間にとって快適だということを表しているのではないかと考えられる。

7. まとめ

人間とロボットの身体的インタラクションにおいて、お互い運動の同調が、自然で一体感のあるインタラクションを実現する上で、重要であることを指摘し、さらに友好的なインタラクションなど、特定の意図を持たせるためにはその同調性を調整する必要があることを指摘した。その上で、このようなロボット制御を実現するために、神経振動子を用いた同調制御法 (SBC 法) を提案し、握手実験によりその有効性を示した。さらに、人間にとってどのような印象を与えるかを評価するために、本制御法と、従来のインピーダンス制御法により握手実験を行い、一対比較法により心理評価を行なった。その結果、「自然である」、「親近感のある」などの点で、提案手法が優れていることが分かった。

Table1 : Interval scale and χ_0^2

	π_a	π_b	π_c	π_d	χ_0^2
flexible	0.46	0.37	0.11	0.06	25.46
natural	0.34	0.47	0.11	0.08	21.15
kindly	0.40	0.45	0.11	0.04	31.41
affinity	0.37	0.46	0.10	0.07	24.37

参考文献

- [1] <http://www.waseda.jp/prj-rt/>
- [2] 木下源一郎: “人とロボットの共生,” 第 7 回日本感性工学会大会予稿集, 69/71 (2005)
- [3] 渡辺富夫, 大久保雅史: “コミュニケーションにおける引き込み現象の生理的側面からの分析評価,” 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.5, 1225-1230, (1998)
- [4] 池浦 良淳: “ロボット-人間協調システムのモデリング,” 日本ロボット学会誌, Vol.18, No. 3, pp. 331-336, 2000.
- [5] 平田泰久, 初雁卓郎, 小菅一弘, 浅間一, 嘉悦早人, 川端邦明: “人間と複数の分散型ロボットヘルパーとの協調による単一物体の搬送,” 日本機械学会論文集 (C 編), 68 巻, 668 号, 1207-1214, 2002.
- [6] 山田陽慈: “人の意を考慮した人間/知能機械系,” 計測と制御, Vol.38, No.6, 363-368, (1999)
- [7] 竹田貴博, 小菅一弘, 平田泰久: “ダンスパートナロボットシステム-MS DanceR-第 5 報: 隠れマルコフモデルを用いたダンスステップの推定と複数のユーザへの適用,” 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, IPI-N-057 (1)-(2), (2005)
- [8] Hiroyasu Iwata, Hayato Hoshino, Toshio Morita, and Shigeki Sugano: “Human Robot Physical Interaction Utilizing Force Detectable Tactile Covers,” in Proc. of the First IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2000), paper no.87, 2000.
- [9] 高岩昌弘, 則次俊郎, 正子洋二: “空気式パラレルマニピュレータを用いた手首部リハビリテーション支援装置の開発,” 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, 1J22, (2005)
- [10] Kiyotoshi Matsuoka: “Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with adaptation,” Biological Cybernetics, 52, 367-376, 1985.
- [11] Kiyotoshi Matsuoka: “Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators,” Biological Cybernetics, 56, 345-353, 1987.
- [12] Gentaro Taga: “A model of the neuro-musculo-skeletal system for human location,” Biological Cybernetics, 73, 97-111, 1995.
- [13] 木村浩, 秋山征一, 桜間一彰: “神経振動子を用いた四足ロボットの不整地歩行と整地走行,” 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.8, 1138-1145, (1998)
- [14] Matthew M. Williamson: “Neural Control of Rhythmic Arm Movements,” Neural Networks, 11, 1379-1394, (1998)
- [15] 琴坂 信哉, Stefan Schaal: “神経振動子を用いたロボットのリズム的な運動生成,” 日本ロボット学会誌, vol.19, No.1, pp.116-123, 2001.
- [16] 高梨豪也, 三宅美博: “共創型介助ロボット“Walk-Mate”の歩行障害への適用,” 計測自動制御学会論文集, vol.39, no.1, 74-81 (2003)
- [17] Yusuke Maeda, Atsushi Takahashi, Takayuki Hara and Tamio Arai: “Human-robot Cooperative Rope Turning - An Example of Mechanical Coordination through Rhythm Entrainment,” Advanced Robotics, Vol.17, No.1, 67-78, (2003)
- [18] デイビッド・ルイス: “成功のためのボディ・ランゲージ,” (金利光訳), 東京図書, pp.129-146, (1998)
- [19] 春日智史, 橋本稔: “神経振動子を用いた人間とロボットの握手-制御実験と評価-, ” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, IP2N-058 (1)-(2), (2005)
- [20] Minoru Hashimoto, Tomofumi Kasuga and Masashi Horiuchi: “Development of Joint Torque Sensing Robot Arm for Human-Robot Physical Interactions,” in proc. of 6th Japan-France & 4th Asia-Europe Mechatronics Congress, pp.163-168, (2003)
- [21] 日科技連官能検査委員会, “新版 官能検査ハンドブック,” 日科技連出版部, pp.385-393, (1973)