

神経振動子のパラメータ自動調整機構

宮腰清一 (電子技術総合研究所)

多賀徹太郎 (東京大学) 國吉康夫 (電子技術総合研究所)

A self tuning mechanism for the parameters of a neural Oscillator

*Seiichi MIYAKOSHI (Electrotechnical Laboratory(ETL)),

Gentaro TAGA (The University of Tokyo) and Yasuo KUNIYOSHI (ETL)

Abstract – We propose the method of parameter tuning for a neural oscillator. Because of using entrainment characteristics of a neural oscillator, the tuning mechanism became simple. The tuning mechanism makes on-line fitting of the output wave of the neural oscillator to a wide variety of sinusoidal input waves. We also connected the adaptive(tuning) neural oscillator to a simple model in a dynamical physical simulator, and certify the effectivity of the adaptive neural oscillator comparing with both of the parameter fixed sinusoidal oscillator and neural oscillator.

Key Words: Parameter Tuning, Neural Oscillator, Entrainment, PLL

1 はじめに

ロボットのリズムを持った運動の制御に、生物のCPG (Central Pattern Generator) を模した機構を用いる事が有効ではないかと考えられている1) 2)3)4)。CPGは神経生理学において、様々な脊椎動物の脊髄中に発見されている5)6)7)。CPGは、ある位相関係をもって振動している神経組織の集団で、神経回路網の特性のみならず身体・環境の動作機構間との相互作用から、その振動パターンが生成する。

松岡は、CPGは神経振動子の組み合わせによって構成されるとし、神経振動子を構成する神経素子のモデル化や神経素子相互の結合パターンと生成される発振パターンとの関連について研究を行った8)。神経振動子には、「引き込み」と呼ばれる外部から与えられた振動的入力信号に自励振動を同調させていく性質がある。多賀等は、神経振動子の持つ引き込み特性を利用し、下肢の動的物理モデルを用いてシミュレーションを行い、矢状面内の二次元2足歩行に関する神経系と物理系の「大域的相互引き込み」による動的制御系を提案・構築した1)9)10)。長谷等は、1)の基本構造を元に、遺伝的アルゴリズムと焼き鈍し法を導入し、それぞれ神経系構造とパラメータの微小修正を行わせ、歩行運動獲得のシミュレーションを行った11)。琴坂等は、神経振動子の引き込み特性を用いて、ロボットに人間と同期したリズム運動(太鼓の打撃)を行わせ、同時に、神経振動子に対するフィードフォワード型のパラメータ調整により、緩急をつけた打撃にも追従できる事を示した12)。

発振器の外部振動入力への同期機構としては、周波数可変発振器や位相比較器を用いて構成されるPLL(Phase Locked Loop)機構が良く知られており、既に広範囲の様々な電子機器で利用されている13)。

本論文では、神経振動子のフィードバック型のパラメー

タ調整法を提案する。調整過程での引き込み特性の利用により、単純な調整機構で自動パラメータ調整が行える。様々な振動入力への発振出力の適応をシミュレーション上で行い、さらに簡単な物理系と接続してのシミュレーションを行い、本手法の有効性を検証した。

2 原理と構造

本論文では、松岡の神経振動子を利用する8)。神経振動子は、緩和型発振器の一種であり、順応(自己抑制、疲労)特性、つまり興奮後に鎮静する性質を持つ神経素子(図1左)を相互抑制的に対にして構成できる(図1右)。適切なパラメータ設定がなされた神経振動子に一定入力を加えると自励振動を起こす。神経振動子の固有周波数に十分近い振動入力とその一定入力に重ね合わされた場合、神経振動子の出力と振動的入力との間の位相は強く固定され、出力振幅も入力の振幅に応じて増減する(図1右)。この引き込み特性を、センサからの振動的入力、あるいは他の神経振動子との同期へと利用できる1)。

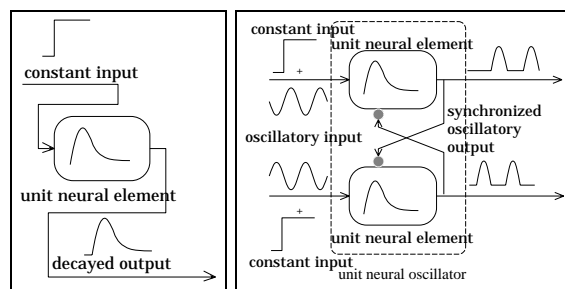


図1: An adaptive neural element and entrainment of a neural oscillator.

より広帯域の振動入力との間で無理のない引き込みを起こすためには、神経振動子の自励振動の固有周波数を振動入力に合わせて変更する必要がある。そのため、神経振動子の固有周波数や振幅を決めているパラメータの自動調整を行う。

2.1 対型神経振動子

神経振動子は、二組の一階微分方程式によりモデル化可能である⁸⁾。それぞれの一組の方程式(1)と(2)、あるいは(3)と(4)は、順応神経素子の一素子(図1左)を形成する。神経振動子は、順応神経素子を相互抑制的に対に結合して構成される。

$$\tau_1 \dot{x}_1 = -x_1 - \beta f(v_1) - \gamma f(x_2) + b(u_0 + u_{f1}) \quad (1)$$

$$\tau_2 \dot{v}_1 = -v_1 + f(x_1) \quad (2)$$

$$\tau_1 \dot{x}_2 = -x_2 - \beta f(v_2) - \gamma f(x_1) + b(u_0 + u_{f2}) \quad (3)$$

$$\tau_2 \dot{v}_2 = -v_2 + f(x_2) \quad (4)$$

$$y = cf(x_1) + cf(x_2) \quad (5)$$

以上の式の x_1 と x_2 と v_1 と v_2 は状態変数で、 τ_1 と τ_2 は時定数、 β は順応の強度を表し、 u_0 は一定入力の意味する。 u_{f1} と u_{f2} は主にセンサからのフィードバック入力であり、 γ は二つの順応素子の結合係数である。 $f(x)$ と Θ はそれぞれ閾値関数 ($\max(x, \Theta)$) とその閾値である。 b は入力係数、 c は出力係数である。

2.2 4素子神経振動子

二つの神経素子を対型に構成した神経振動子に、さらに位相調整機能を持たせるために、対型神経振動子を二組利用して十字型に組み合わせ、さらに環状に抑制性結合して4素子神経振動子を構成した(図2)。

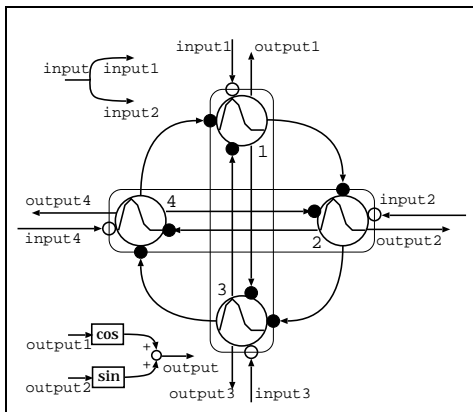


図2: A Quad Elements neural oscillator.

対になった神経素子は相互抑制結合により180度ずれた位相で発振する。隣り合った神経素子は環状の抑制結合のため90度ずれた位相で発振する。図2のように素子に番号を振る。一周期の中で、1番の素子を起点(0度)とすると、2番素子は90度進み、3番素子は逆転(180度ずれ)、4番素子は3番(逆転)に対して90度進み、という具合に位相のずれた素子が並ぶ事になる(松岡の論文⁸⁾に類似の4素子神経振動子についての記述がある)。これらの素子の出力を適切に一次結合すれば、振動入力に対し、任意の位相オフセットで固定された発振出力を

得られる。この時は、位相オフセットを ϕ とした場合、1番と2番(3番と4番も同様)の一次結合の係数として $\cos \phi$ と $\sin \phi$ をそれぞれ選べば良い。ただしこれは、出力波形が正弦波に近く、神経素子自体での時間遅れがないとした前提の下で、(図2と異なり、)1番と3番にそれぞれ振動入力とその反転したものを加えた場合である。

神経素子入力端と振動入力との結合の仕方は上記の他にいくつか考えられる。位相の制御のみを目的とする場合には前記の結合方法を用いれば良い。ここでは図2のように、1番と2番、3番と4番の入力端を結びつけ、1と2の組に振動入力、3と4の組にその反転したものを入力する事にした。これは入力振幅に応じて出力振幅を変動させるためである。この場合、素子相互間の位相のずれは90度毎にはならず、1番と2番(同様に3番と4番)の間の位相差は90度よりも小さくなるが、振動入力を2番と1番の出力が(この順で)前後に挟むような位相で、引き込みを起こしつつ発振する。素子の出力の位相が直交して(90度ずれて)はいないが、前記と同様に1番と2番(3番と4番)を一次結合により結びつければ、位相オフセットの調整は同様に可能である。

2.3 パラメータ調整機構

引き込みの強さは神経振動子の自励振動の固有周波数や振動入力の振幅に応じて決まる。固有周波数とかけ離れた、あるいは小振幅の入力に対しても無理なく引き込みを起こすには、神経振動子の自励振動を司るパラメータを振動入力に合わせて調整する必要がある。

本研究では、パラメータ自動調整の目的を「入力振動を写し取るように出力振動を発生させる」とした。振動入力としては正弦波を想定した。よって、調整する特徴量は周波数・振幅・位相の三つとなる。神経振動子の特性を決めるこれら三つの量と関係しているパラメータは、式((1) - (5))の中では、周波数に関しては時定数 τ_1 と τ_2 であり、振幅に関しては出力係数 c であり、4素子神経振動子と出力の一次結合による合成方法を用いれば位相オフセット ϕ である。これらに加えて、神経振動子をさらに複数組み合わせる時に相互の結合の強さを設定しやすいように、出力係数 c を掛ける前の発振出力 x_1 、つまり内部的な振幅を1に正規化する目的で、入力に係数 b を掛けて調整する事とした。この係数 b は出力係数 c と連携して、発振出力の振幅を決めている。

一方、 τ と τ' の比、それと β は固定している。これらは無闇に動かすと周波数や振幅のみならず波形自体の変化を引き起こす。

周波数の調整には、式(6)を用いた。

$$d_f \equiv \text{sgn}(\theta_y)(\text{sgn}(\dot{\theta}_u) - \text{sgn}(\dot{\theta}_y)) \quad (6)$$

ただし、 $\dot{\theta}_u$ は振動入力値(u_f)の微分、 $\dot{\theta}_y$ は発振出力値(y)の微分、 sgn は、式(7)に示す符号関数である。

$$\text{sgn}(x) \equiv \{-1|(x < 0), 0|(x = 0), 1|(0 < x)\} \quad (7)$$

式(6)の意味を示す。入力と出力の振動運動の増減方向が一致している場合は差が0になり、そうでない場合、つまり入出力のどちらか一方が頂点を過ぎた時刻から他方が同様に過ぎるまでの時間、この差の値は±2のどちらかの値をとる。この値を時間で積分すると、振動の頂点の時間的ずれに比例する量を得られる。振動入力と発振出力のどちらの頂点が時間的に早いか、逆に言えば、神経振動子の出力を時間的に進める(遅らせる)べき方向は、この差の値に振動出力の正負の符号を掛ける事で判定できる。ここでは、直接「時間的に積分」は行わず、急峻に変化する d_f の高周波寄生成分を除く目的も兼ねて、 d_f を式(8)に示す2次の低域通過フィルタ(LPF: low pass filter)に通す事で擬似的に積分した。

$$\frac{\omega^2}{s^2 + 2\eta\omega s + \omega^2} \quad (8)$$

この(フィルタを通した)値を加法的($x = x + \Delta$)に時定数 τ_1 に作用させ、 τ_2 は τ_1 との比から導き、周波数の調整を行った。

振幅の調整には、以下の式を用いた。

$$d_y \equiv |\theta_u| - |\theta_y| \quad (9)$$

単純に入出力の絶対値の差をとっている。同様に適当な係数を掛け、2次のLPFを通した後、加法的($x = x + \Delta$)に出力係数 c に作用させ、発振出力の振幅の調整を行った。

入力係数 b の調整には以下の式を用いた。

$$d_u \equiv 0.6 - |\theta_x| \quad (10)$$

ただし、 θ_x は係数 c を掛ける前の神経振動子の出力値(x_1)である。この(内部的な)出力値の振幅を1に近づける事が目的だが、振幅の値そのものを扱う事はせず、出力値が正弦波の波形に近いという仮定の下に、一周期の絶対値を時間的に積分して得た面積の値で代用した。ただし、上記と同様に直接の時間積分は行わず、適当な2次のLPFを通す事で代用した。この値を入力係数 b に加法的に作用させて、発振波形の内部的な振幅を1に近づけるように調整を行った。また、振幅に対して、この入力係数 b は出力係数 c と同様の作用をするので、 d_u に適当な係数を掛けた後 d_y から減算し、出力係数側で補正している。

位相の自動調整はまだ行っていない。この理由は、入力と出力の波形の時間的なずれの情報から、周波数のずれに起因する分と位相のずれに起因する分を分離できていないからである。現状では、周波数が真値より高めに調整される事で位相ずれ(遅れ)の補償が起きている。引き込みが起きている限り、出力波形の位相ずれは結果として見えなくなる。

以上の調整機構は入出力の振動運動の値が十分に近い事を前提としている。つまり、引き込みが起きている、入出力間の周波数・振幅・位相のずれが既にある程度の範囲に止まっている場合でないと正しく機能しない。そこで、入出力間の差の大きい時は引き込み作用を強く働かせ、そうでない時には緩和する機構を設けた。

$$d_{uy} \equiv |\theta_u - \theta_y| \quad (11)$$

不一致度 d_{uy} は、入出力の差が大きくな時には大きな値をとるので、これを神経振動子の入力の振動的部分(u_f)の係数とすれば、引き込みの強度を入出力の差に応じて調整できる。この値も2次のLPFを通した後、

$$f(2(\text{sgmd}(D_{uy}, c/5) - 0.5), 0) \quad (12)$$

とし、さらに適当な値を掛けて神経振動子の振動入力(u_f)の係数としている。ただし、 $f(x, \theta)$ は前記の閾値関数、 $\text{sgmd}(u, T)$ は、シグモイド関数

$$\text{sgmd}(u, T) = \frac{1}{1 + \exp(-u/T)} \quad (13)$$

であり、 D_{uy} はLPF通過後の d_{uy} とする。シグモイド関数は、出力係数 c により正規化類似の操作を行った。

3 シミュレーション結果

シミュレーションは、神経系に汎用数値・数式処理言語MaTX (<http://www.matx.org/>)、物理系に動力学シミュレータDADS(LMS社CADSI部門)を用い、両者を結合して行った。

3.1 正弦波入力への追従

周波数・振幅・位相を様々に変えた正弦波入力を加えて、パラメータ自動調整を行う神経振動子の出力波形の追従性を調べた。

適当に定めた神経振動子の固有周波数(0.47[Hz])と比較して、より低い周波数(0.1[Hz])の振動入力へのパラメータ自動調整を行った。50秒までは引き込みのみ、それ以後、自動調整機構を働かせた。図3上は、破線で神経振動子への正弦波入力、実線で神経振動子からの発振出力を時系列図で表している。図3下に、その時のパラメータの動きを、上図と時間軸を合わせて表示してある。ただし、出力係数 c のみ、1/10にスケールして

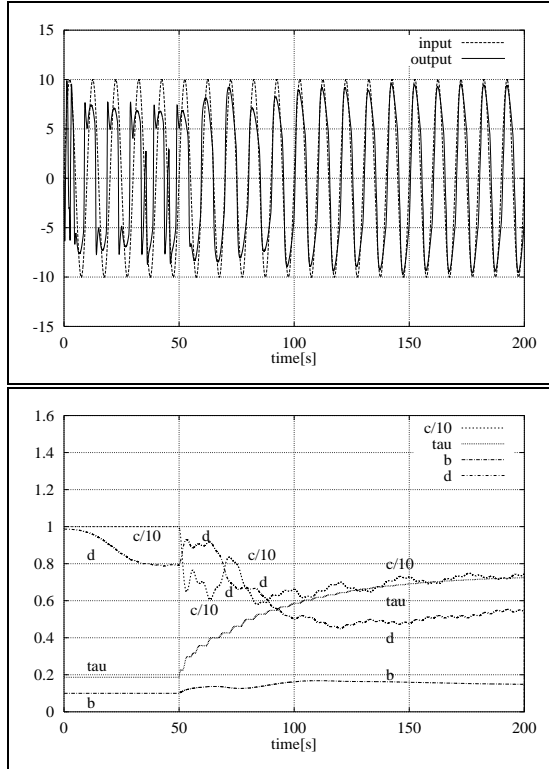


図 3 : Following to a lower frequency sinusoidal input by parameter tuning.

ある．自動調整が働く前の50秒までは，引き込みのみによる同調が起きているが，固有周波数と大きく違うため，出力波形にひげが出ている．自動調整が働き始める50秒を過ぎると，神経振動子の時定数 τ_1 は(表示していないが τ_2 も) 増加し始め，その他のパラメータも変化し始めている．パラメータの調整がある程度進むと，引き込みにより，波形は殆ど適応して見える．ちなみに，シミュレーションは，サンプリング・インタバル5[ms]で行った．

さらに，周波数・振幅・位相を同時に変化させた場合の追従性を見た(図4)．図の表記はこれまでと同様である．入力の変化のさせ方は表1に示す．ただし， t は時刻[s]である．また，サンプリング・インタバルは2[ms]とした．

0秒から15秒まで	$10 \sin(2\pi(1.0)t)$
15秒から20秒まで	$5 \sin(2\pi(1.5)t + \pi/2)$
20秒から30秒まで	$15 \sin(2\pi(2.5)t)$
30秒から50秒まで	$5 \sin(2\pi(0.5)t - (3/2)\pi)$
50秒から70秒まで	$2.5 \sin(2\pi(1.0)t)$
70秒から100秒まで	$12 \sin(2\pi(0.3)t + \pi/4)$

表 1 : The time table of the input sinusoidal wave.

入力波形のパラメータを個別，あるいは同時に変化させても追従している様子が分かる．ただし，追従の方向に得意・不得意が見られた．周波数は低くなる方が追従

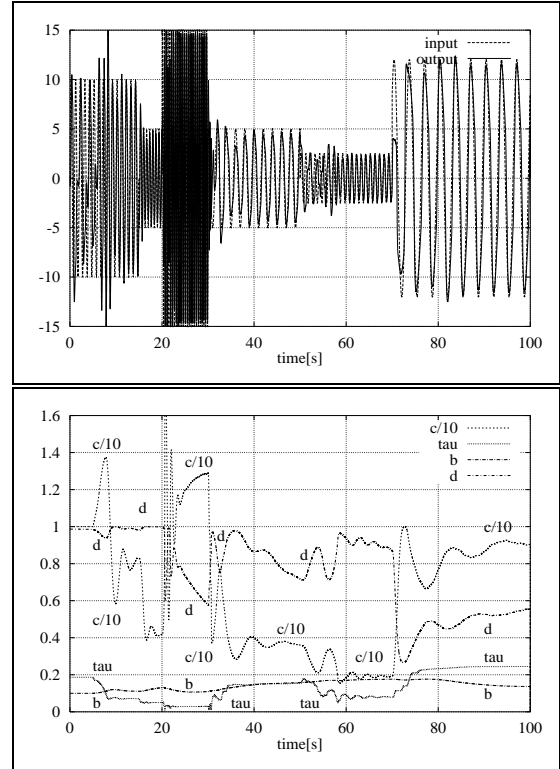


図 4 : Following to various kinds of frequency, amplitude and phase sinusoidal input by parameter tuning.

しやすい．急激に高周波数の方に变化させると，脱調してしまう場合が見られた．ただし，単位時間あたりで見た場合の収束の速さは，低周波数側へ変化させた場合の方が遅い．振幅に関しては，大きい方へ変化させた場合の方が引き込みが強くなるために，脱調を起こしづらくなる．位相の変化に関しては，特にそうした異方性は見られなかった．

3.2 振り子の励振

動力学シミュレータDADS内に振り子のモデルを作り，励振を行ってその様子を見た．振り子は，剛体棒により1自由度の回転継ぎ手(支持点を兼ねる)と重りをつなぐ形式のものである．重りの質量は33.5[kg]である．棒の質量と慣性モーメントは無視できる．継ぎ手中心と重りの重心との距離は1[m]である．摩擦はない．角度は真下を0とし，反時計回りを正とする．振り子の根本の回転継ぎ手にトルクの形で，パラメータ自動調整を行う神経振動子からの発振出力を加えて励振する．比較のために，固定周波数・振幅の正弦波発振器とパラメータ自動調整を行っていない神経振動子とを用いて，同様に励振を行ってみた．以降のシミュレーションのサンプリング・インタバルは10[ms]である．

3.2.1 引き込み作用の検証

始めに、一定正弦波トルク入力(周波数0.47[Hz]、振幅10[N/m])による励振を行った。図5に、振り子の角度と角速度をそれぞれ実線と破線で示す。振り子の振幅と周期の非線形性により位相ずれが生じ、約80[s]経過時に、一旦、振り子の振動が止まっている。



図5：The pendulum oscillation by a sinusoidal oscillator

次に、同条件で、神経振動子(パラメータ固定)により励振を行った。神経振動子の引き込みのための帰還入力として、振り子の角速度を選んだ。ただしこの時、神経振動子の出力と前記の一定正弦波入力との間の周波数や振幅が違っていると比較できない。そこで、前記の一定正弦波入力と等しくなるよう、パラメータ自動調整を行う(適応後固定)。この時の角速度入力の振幅は、前記の一定正弦波入力での励振した時の最大振幅(4.4[rad/s])を用いた。神経振動子は入力振幅に応じて出力振幅が決まるので、振り子の振幅の小さい初期には、むしろ固定正弦波入力より小さな振幅の発振出力となる。

同じ設定で、パラメータ自動調整も併用した神経振動子による励振も行った。この時、調整するパラメータは周波数のみとし、不一致度(d_{uy})に基づく振動入力の調整を併用した。これは、振幅も含めた自動調整を行うと、振り子の振れ始めの小さな振幅に向かって自動調整を始めてしまい、振り子を大きく励振する実験の目的が達成されなくなってしまうためである。開始5秒後からパラメータ自動調整を働かせた。

両者とも神経振動子の引き込み特性により、位相ずれが起こらず振り子の振幅が次第に大きくなり、60[s]手前を境に倒立状態を越えて、振り子が継ぎ手を中心に回転運動を始めた。また、神経振動子の振動出力の振幅は全時間に渡り10[N/m]よりもむしろ小さく、振り子の大きな励振は、神経振動子の引き込み作用が原因である事が分かった。パラメータ自動調整を行ったものはわずかながら早い時刻から回転運動を始め、また回転速度も大きかった。以上の図は割愛する。

3.2.2 自動調整の効果の検証

神経振動子で、パラメータが固定のものと自動調整されるものの差が現れやすい課題として、(1)振り子の長さを元の6割に縮めた場合、(2)回転継ぎ手に可動域制限(-80度~30度)を設けた場合、の2題をシミュレーションする。リミッタ接触時は、 2×10^4 [N m/rad]の弾性抵抗と2[N m/(rad/s)]の粘性抵抗を受ける。また、振り子は前記と同一だが、継ぎ手には、弾性抵抗(2[N m/rad])と粘性抵抗(1[N m/(rad/s)])を持たせた。

図6に、(1)の場合の振り子の振幅を示す。固定パラ

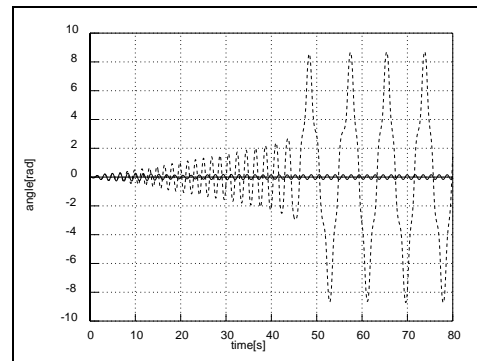


図6：The oscillation of the short pendulum by the fixed and adapted parameter neural oscillator

メータのもの(実線)は殆ど励振出来ていない。一方、自動調整したもの(破線)は、励振により、最終的に回転運動を起こしている。この時の振り子への入力トルクを図7に示す。上が自動調整を行ったもの、下が固定パラ

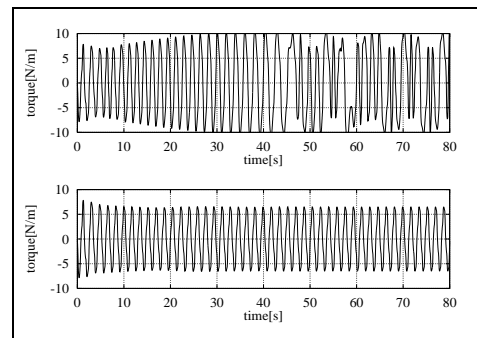


図7：The input torque

メータのものである(以降、順番は同様故省略)。振り子の振幅の増加につれ入力トルクの振幅にも差が出てきているが、振り子の振幅ほどの差はない。振り子の振幅の差は、引き込みがうまく起きているかどうかの差から生じている事を示している。

次に、(2)の場合の結果を図8に示す。固定のものは、30度のリミッタに当たるまでは振幅が増加しているが、それ以後、リミッタとの接触による周期の短縮に対応できず、-80度のリミッタにとどくまでに大きく励振させられない。一方、自動調整のものは、両リミッタとの接

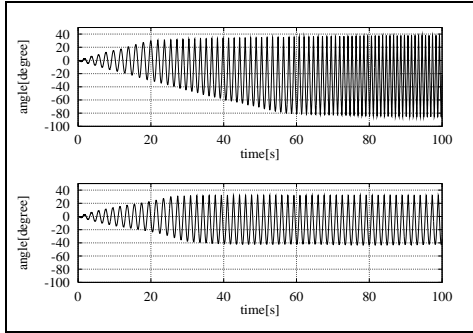


図 8 : The oscillation of the limited swing range pendulum by the fixed and adapted parameter neural oscillator

触以降も角速度の増加を続け、最終的にその状態で安定した。その時の加速度を図9に示す。揺動の加速度自体は小さいが、リミッタとの衝突時に大きな加速度がひげのように出ている。また、リミッタとの接触以後の周期の変化も見える。

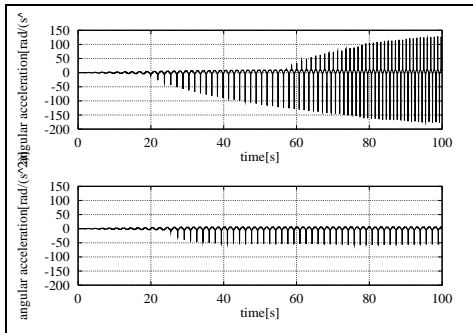


図 9 : The acceleration

この時の入力トルクを図10に示す。こちらも振幅に

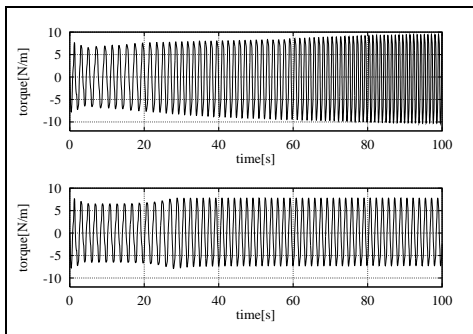


図 10 : The input torque

大差はなく、自動調整機構による引き込みの維持が、励振がうまく行った原因である事が分かる。

4 まとめと今後の課題

- 位相オフセットの調整が可能な4素子神経振動子の構成法を提案した。
- 周波数・振幅の自動調整機構を提案した。
- 様々な周波数・振幅の正弦波入力に対しても無理なく引き込みによる追従を行える事を示した。
- 物理系と接続して、有効性を確認した。

位相の調整を含んだ調整法とする事、単純に目標値が定まらない実際のタスクを実現する時にも有効となるよう拡張を行う事を今後の課題とする。

本研究は、COE 大域情報処理技術研究の一環として行われた。

参考文献

- 1) G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu: "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," *Biological Cybernetics*, Vol. 65, pp. 147-159, 1991.
- 2) 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, pp. 1138-1145, 1998.
- 3) 伊藤 聡, 湯浅 秀男, 羅 志偉, 伊藤 正美, 柳原 大: "リズム運動の環境適応に関する数理的モデルについて", 計測自動制御学会論文集, Vol. 34, No. 9, pp. 1237-1245, 1998.
- 4) 片山 修, 北村 新三: "神経振動子を用いた2足歩行運動生成への記述関数法の適用", 計測自動制御学会論文集, Vol. 34, No. 7, pp. 830-835, 1998.
- 5) S. Grillner: "Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates," *Science*, 228, pp. 143-149(1985).
- 6) B. Calancie, B. Needham-Shropshire, P. Jacobs, K. Willer, G. Zych and B. A. Green: "Involuntary stepping after chronic spinal cord injury : evidence for a central rhythm generator for locomotion in man," *Brain*, 117, pp. 1143-1159(1994).
- 7) V. Dietz, G. Colombo, L. Jensen and L. Baumgartner: "Locomotor capacity of spinal cord in paraplegic patients," *Ann. Neurol.*, 37, pp. 574-582(1995).
- 8) K. Matsuoka: "Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptation," *Biological Cybernetics*, Vol. 52, pp. 367-376, 1985.
- 9) G. Taga: "A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion," *Biological Cybernetics*, 73, pp. 97-111(1995).
- 10) G. Taga: "A MODEL OF INTEGRATION OF POSTURE AND LOCOMOTION," *International Symposium on Computer Simulation in Biomechanics*(1997).
- 11) 長谷 和徳, 山崎 信寿: "2足歩行運動を生成する神経系構造の自律的獲得", 日本機械学会論文集(C編), Vol. 64, No. 625, pp. 3541-3547(1998).
- 12) 琴坂 信哉, Stefan Schaal: "ロボットの打撃運動を生成する神経振動子のパラメータ学習", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol. 3, pp. 1221-1222(1999).
- 13) "特集:実践 発振回路の完全攻略", *トランジスタ技術*, Vol. 36, No. 417, pp. 230-267(1999).