

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 24 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420838

研究課題名(和文)非線形引き込みを使った海中可視光通信装置の開発

研究課題名(英文)Development of underwater visible light communication device using Nonlinear synchronization

研究代表者

田原 淳一郎 (TAHARA, Junichiro)

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：30280366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：海域での可視光通信として、RC回路とスイッチのモデルを使い、可視光による非線形同期手法を調査した。非線形同期は水圧による電子回路の特性が変化する場合において発生すると考えられる。また、可視光による同期が可能なマイコンホタルを作成した。本システムはマイクロプロセッサと青・緑のLEDとフォトダイオードで構成される。青が非線形同期を行い、通信のクロックとなる。緑は4PPM信号のデータである。回路特性の時定数を変化させ同期が発生する範囲と通信可能な範囲を調査した。非線形同期により幅広い範囲で同期と通信が可能となった。ATCを導入することにより最大600mmの距離においての通信が可能となった。

研究成果の概要(英文)：We study nonlinear synchronization method by visible light communication in the deep sea. This model is RC circuit and switch. If the characteristics of the electronic circuit due to water pressure change. It will be considered that nonlinear synchronization occurs in the circuit.

Also, we created a microcomputer firefly that can be synchronized with visible light. The system consists of a microprocessor, blue / green LED and photodiode. Blue light performs nonlinear synchronization and becomes a clock for communication. Green light is data of 4 PPM signals. We changed the time constant of the circuit characteristics and investigated the range where synchronization occurs and the range that can communicate. The nonlinear synchronization make possible over a wide range, the synchronization and the communication.

By introducing ATC, communication at a maximum distance of 600 mm became possible.

研究分野：船舶海洋工学，ロボット工学

キーワード：非線形同期 可視光通信 マイクロプロセッサ 神経振動子

1. 研究開始当初の背景

1)水中における通信の手法として音響ではなく可視光を使った通信システムが提案されてきている。音響通信装置においては鯨類等への影響もあり今後の使用制限が始まっている。そのような背景中、水中可視光通信は多様な物が提案され、レーザーを使った物やLEDを使った物が提案されている。

しかし、今までの通信装置は大型で重量がかさむ問題がある。この原因は海中の高水圧から電子回路を保護する目的で高価で重量のある耐压容器が使用されていることである。よって、小型のセンサーや小型ロボット(SWARM)に搭載出来ないため、小型・軽量で簡易な可視光通信装置が求められている。

そこで、防水方法として可視光通信機器を樹脂モールドにより均圧容器にする事を考えた。本手法では耐压容器と異なり電子回路に過大な水圧がかかるため、電子回路が不安定となり基準クロックに誤差が生じると考えられる。この問題を解決するために、ホタルの同期発光現象に使われる非線形同期を利用して電子回路の特性が異なっても通信する手法を提案する。

2)非線形同期の工学的な応用事例として通信に応用して水中における簡易通信装置としての技術の基礎調査と通信試験を行う。SWARM や小型センサーの複数機器の通信への応用が期待出来るため、メッシュ状に配置する場合を考える。

2. 研究の目的

1)可視光通信に適した非線形同期手法を開発する。特に水圧により変化すると考えられる電子回路における基本特性である時定数を変化させた際に非線形同期が発生するかどうかを確認する。これにより高水圧下における電子回路の特性が変化しても通信が可能な可視光通信システムの開発を行う。

2)非線形同期を利用した可視光通信装置を複数台設置した場合において通信が可能かどうかを調査する。特に複数台の時の通信の状況と同期現象について調査を行う。複数台の場合の同期パターンの変化を考察する。

3. 研究の方法

1)非線形同期システムの調査

ホタルの同期発光等に適した非線形同期システムを検討する。非線形同期では Van der Pol 方程式が有名であり神経振動子の挙動を模した物など多種存在する。これらの中でどれが最も可視光通信において優れているかを調査する。

2)可視光通信方式の検討

可視光通信方式は多様な方法が検討されている。例えば WDM 方式や FM 変調方式等が提案されているが 8bit 程度のマイクロプロセッサで実現することは困難である。そこで比較的単純でパルス光に適した変調方法を検討する。

3)シミュレーション

1),2)を踏まえ、始めにコンピュータシミュレーションにより非線形同期について調査する。複数台設置した場合などの試験は実験を開始する前に十分に検討する必要がある。

4)実験

まず、気中で時定数を変化させる事が可能な OP-AMP を利用した非線形同期回路を作成する。このとき、光分光器を用いて同期したユニット間のLEDの光量と波長を計測する。これにより、センサーの特性と発光状態を確認できる。次に、LED による発光体とセンサーとマイクロプロセッサによる非線形同期ユニットを一つにまとめ可視光による非線形同期を確認し、可視光通信を行う。このとき距離依存性、時定数による通信エラーの測定を行う。

4. 研究成果

1)非線形同期システムの調査

当初は VDP を用いて非線形同期のシミュレーションを行っていたがホタル同期の様にパルスによる同期を行う通信システムでは難しいと判断した。そこで神経振動子をモデルとした CR 回路にスイッチを加えた非線形同期回路モデルとした。非線形同期システムは、まず、ほたるのように一定周期で発光する現象のモデルを図1のCR回路に置き換えて考える。図1のCR回路の充電の様子は次の(1)式で表すことができる。 $\Delta t$ はサンプリング時間間隔、 $\tau$ は電子回路の時定数 $C \cdot R$ である。ここで、出力電圧  $y$  が最大値  $y_{max}$  を超えたとき、放電( $y=0$ )し、この瞬間青色 LED を点灯するものとする。この青色 LED の発光により、周囲の電子回路にパルス的な衝撃を与えるようにする。そこで、(1)式に結合係数の項を加え、外部から青色 LED の光を検知したときに出力電圧  $y$  が $\epsilon$ 上昇するようにする。つまり  $m=1$  となる。このときを図2に示す。

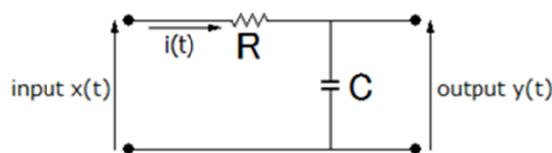


図1 CR 回路

$$y_k = a_0 x + b_0 y_{k-1} + m\epsilon \quad (m, \epsilon > 0)$$

$$a_0 = \frac{\Delta t}{(1 + \frac{\Delta t}{\tau})}, \quad b_0 = \frac{1}{(1 + \frac{\Delta t}{\tau})} \quad (1)$$

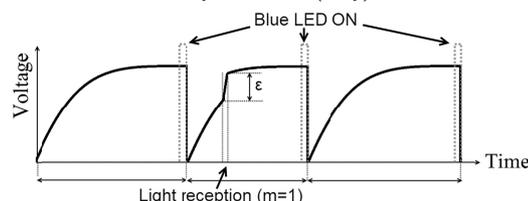


図2 マイコンホタル発振例

まず手始めに演算器に OP-AMP、センサーにフォトトランジスタ、発光体に LED を用いた回路を作成し試験を行った。その結果ホタルの様な可視光による同期が発生した。6 台の回路を作成し同期に成功した。しかしアナログ回路であったためパラメータ(C,R)の誤差が時定数の誤差として生じ、定量的な検討が出来ないためマイクロプロセッサを用いた非線形同期回路へと移行した。

マイクロプロセッサと LED、フォトダイオードを用いた非線形同期回路を策することによりパラメータを一意に決定出来る様になり実験が定量的に可能となった。このマイコンホタルを使い時定数  $\tau$  の値を変化させて行く実験をおこなった。3 つのマイコンホタルを用いて図 4 のようなリングオシレータを作成した。マイコンホタル間の距離は 70mm である。2 つのマイコンホタルの  $\tau=0.128$  を基準として残りの一つを変化させて行きその応答を調査した。通信の成功率と同期範囲の結果を図 7 に示す。

時定数  $\tau$  が  $\tau=0.128$  を基準とした場合において  $0.07 < \tau < 0.22$  であれば同期が可能であるということが確認出来る。きわめて幅広い範囲で同期することが可能である。これらは数値シミュレーションでも同様な結果を得る事ができた。これらを位相平面で表現すると図 5、6 となり同期する場合と同期しない場合の形状が異なっていることが確認できた。

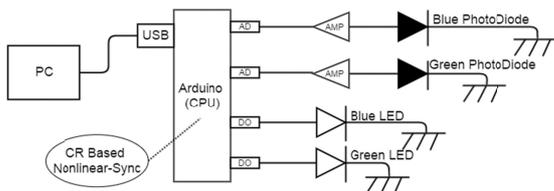


図 3 マイコンホタル

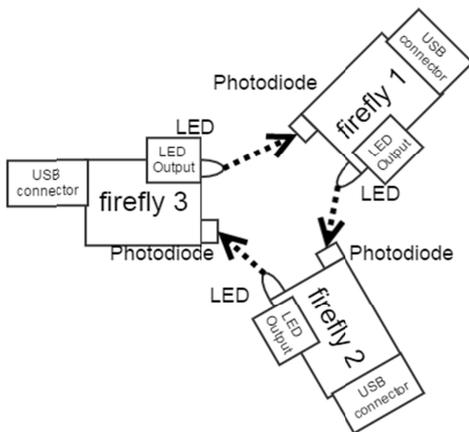


図 4 マイコンホタルによる 3 リングオシレータ

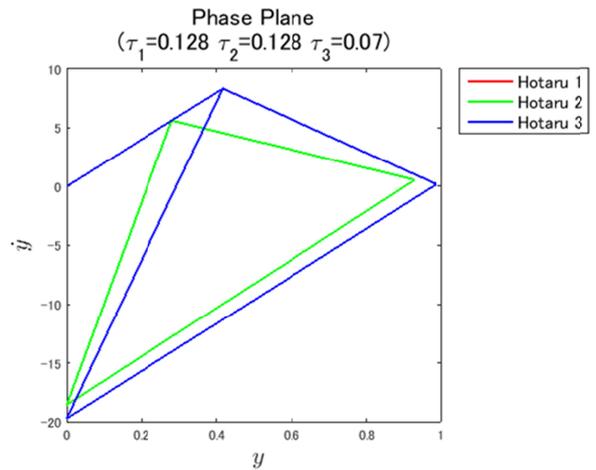


図 5 非線形同期が発生した位相平面 ( $\tau_3=0.07$ )

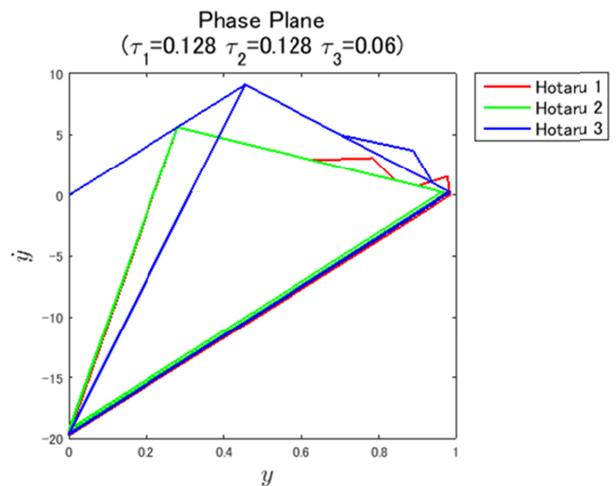


図 6 非線形同期が発生しない位相平面 ( $\tau_3=0.06$ )

## 2) 通信システム

データ通信を行う為に本研究では青色 LED と青色フォトダイオードを非線形同期用、緑色 LED と緑色フォトダイオードをデータ通信用として設計を行った。非線形同期のメカニズムは同じである。

データ通信は非線形同期の 1 周期  $T$  を 4 分割しパルス通信の 4PPM 符号化で通信を行う事とした。文字 'A' を送る時は '1100 0010 0001 0001 0010 0001 0100 0011' といったデータ形式となる。これらの通信試験を非線形同期の試験と同様に 3 リングオシレータを用いて通信成功率を測定した。これを図 7 に示す。同期が可能な範囲では通信が可能である事がわかるが、時定数  $\tau_1=\tau_2>\tau_3$  の関係の時通信成功率が急激に低下していることがわかる。この同期回路では時定数が小さい方向に同期する。よって通信機 1 と 2 の両者が 3 へ同期しなくてはならないので通信の成功率が下がる。複数の通信機器があった場合においては時定数が小さいものへ同期する傾向が顕著となる。よって複数の通信機器の場合は非線形同期の時定数により群れが多数

決により分類される傾向があることがわかる。

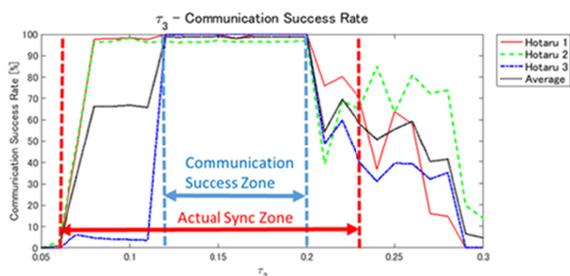


図7 3リングオシレータによる通信成功率と同期範囲

### 3)通信距離の延長

非線形同期通信システムの問題点は外部光(ノイズ)とLEDパルス光のスレッシュド値が近い場合においてON/OFFの信号分離が困難な事である。またLEDやフォトダイオードの感度の個体差があるため、100mm程度の通信距離しか得ることが出来ない。そこで4PPM信号の特性を生かすスレッシュド値を調整するATC(Automatic Threshold Control)を導入した。その結果、マイコンホタル2台の場合において、通信可能な距離が600mm程度となった。また水中においても通信が可能となった。これらの結果を図8に示す。

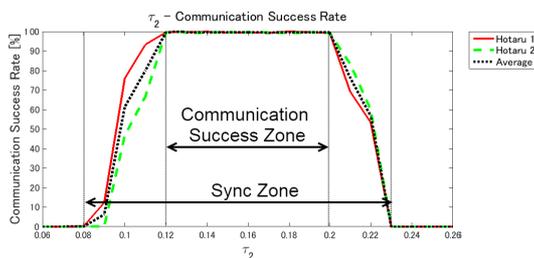


図8 ATC実装後の通信成功率

( $\tau_1 = 0.128$ 、 $\tau_2$ を変化、距離は190mm)

### 4)メッシュ配置における同期

非線形同期システムをメッシュ状に配置した場合を想定しシミュレーションを行った。その結果メッシュ状に配置した場合においても同期が発生した。このことからセンサーやSWARM等の移動体への本通信機器の応用は十分可能である事が理解できた。このことを利用して歩行ロボットの脚の通信と制御を行う事も可能であるとの知見も得た。

以上1)~4)より、非線形同期を用いた可視光通信装置については、海中での試験は行えていないが、水中と同様と考えれば問題無く通信が可能である。今後は海中において、追試験を行い有効性を調査する。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2件)

T. Ito, J.Tahara, M.Koike, F.Zhang (2017), "Development of the Visible Light Communication Device for Swarm Using Nonlinear Synchronizing", Proc. of AROB 22nd 2017, 査読有り, pp.109-113.

J.Tahara, M. Koike, F.Zhang (2016), "Development of a Communication System Using a Non-linear Synchronous Firefly", Proc. of AROB 21st 2016, 査読有り, pp.78-82.

〔学会発表〕(計 9件)

中村圭、田原淳一郎、干潟用多足歩行ロボットの開発-ROSを使ったシミュレーション-、平成29年度海洋理工学会 春期大会、pp.61-64、2017年6月9日、東京海洋大学 品川キャンパス

伊藤大智、田原淳一郎、非線形引き込みを使った水中SWARM用通信装置の開発、平成29年度海洋理工学会 春期大会、pp.57-60、2017年6月9日、東京海洋大学 品川キャンパス

中村圭、田原淳一郎、齋藤幹大、伊藤大智、遺伝的アルゴリズムによる多足歩行移動システムの開発、第49回計測自動制御学会北海道支部学術講演会、pp.83-84、2017年2月22-23日、北海道大学 工学部

田原淳一郎、伊藤大智、章ふえいふえい、小池雅和、非線形引き込みを使った海中可視光通信装置の開発、第49回計測自動制御学会北海道支部学術講演会、pp.99-100、2017年2月22-23日、北海道大学 工学部

田原淳一郎、伊藤大智、非線型引き込みをベースとしたSWARM用通信装置の開発、平成28年度海洋理工学会 秋期大会、pp.85-86、2016年10月27-28日、京都大学

田原淳一郎、伊藤大智、非線形同期を使ったLEDによる可視光通信の研究、高速信号処理応用技術学会 2016年研究会、pp.1-2、2016年8月9日、愛知工業大学

田原淳一郎、非線型同期を使った光通信システムの開発、第1回長崎県海洋エネルギー関連技術導入研究会、2015年9月25日、長崎市

田原淳一郎、非線型同期を使った光通信システムの開発 -第一報-、2015高速信号処理応用技術学会研究会、pp.39、2015年8月6日、東京都世田谷区 東京都市大学

田原淳一郎、非線形引き込みを使った海中可視光通信装置の開発 -第一報-、2014年高

速信号処理応用技術学会研究会、pp.54-55、  
高知工科大学、高知県・香美市、2014年9  
月1日

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~jtahar0/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東京海洋大学 学術研究院 准教授

田原 淳一郎 (TAHARA, Junichiro)

研究者番号：30280366

(2) 連携研究者

東京海洋大学 学術研究院 教授

章ふえいふえい (ZHANG, Feifei)

研究者番号：10226293