## TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

## University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

非線形同期を使った水中可視光通信とSwarmの群移 動制御

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2019-05-16
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 伊藤, 大智
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1727

### 修士学位論文

# 非線形同期を使った水中可視光通信と Swarmの群移動制御

## 平成 30 年度 (2019 年 3 月)

# 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 海洋システム工学専攻

## 伊藤 大智

### 目次

1.	はじ	こめに	. 2
2.	非線	秋同期システム	. 8
3.	非線	表形同期シミュレーション	11
4.	可視	光非線形同期通信回路	13
5.	非線	*形同期システム同期試験	14
5.	.1.	3リングオシレータ	14
5.	.2.	実験データ自動測定システム	15
5.	.3.	周期・周期差解析	16
5.	.4.	位相平面解析	17
5.	.5.	3 台以外の場合のシミュレーション	19
6.	4PP	PM データ通信	20
6.	.1.	自動閾値制御(ATC)	21
6.	.2.	通信成功率測定	24
6.	.3.	通信速度向上	25
7.	非線	形同期 Swarm	27
7.	.1.	2 次元 Swarm シミュレーション	27
7.	.2.	2 次元 Swarm 実験	31
7.	.3.	3 次元 Swarm シミュレーション	35
7.	.4.	障害物回避	39
8.	まと	· め	42
9.	謝辞	<u>z</u>	44
10.	参考	文献	45
11.	付録	<u>.</u>	46
1	可	「視光非線形同期通信回路	46
2	実	、験データ自動測定プログラム	46
3	非	≡線形同期解析プログラム	47
4	2	次元 Swarm シミュレーションプログラム	48
<b>5</b>	S	warm ロボット制御回路	48
6	Sv	warm ロボットの位置の測定手法	49
7	Sv	warm ロボットプログラム	50
8	3	次元 Swarm シミュレーションプログラム	51
9	研	F究業績一覧	52

1. はじめに

本論文では,非線形同期を使った水中可視光通信装置の開発と,可視光非線形同期を利用した 水中 Swarm の群移動制御手法について述べる.本件の目的は,非線形同期を使った可視光通信 を利用することで,深海の高水圧によってロボット間の通信が不可になる問題を解決し,水中を アリのように群で行動し海底資源を探査する Swarm(小型群ロボット)の実現が可能であると実証 することである.

**非線形同期**は,数学的には Van der Pol (VDP)方程式に代表され,自然界にも見られる現象で ある.非線形同期の大きな特徴は,幅広いパラメータ誤差に対応して同期するという点である. 例えば,複数のメトロノームは初期状態や周期が異なっていてもしばらくすると同期して行く現 象が観察される.さらに,生物においては,ほたるが光を使って群れとして同期し発光している <sup>[1]</sup>ことや,キリギリスの仲間が縄張りや求愛行動に音を使った非線形同期を使っていることが確 認されている.しかし,生物や数学の研究は進んでいるが,工学において非線形同期の研究は進 んでいない.こうした背景の下,多脚歩行ロボットの脚やホッピングロボットの運動に VDP 方程 式を利用する試みがある<sup>[2],[3]</sup>.そして,本件では非線形同期を以下の2つに応用した.

#### 1) 水中機器間の可視光同期通信

#### 2) Swarm(群ロボット)の群移動制御

本件で用いた非線形同期システムは、ほたるを模したものであり、同様のモデルは、神経振動子やLIFモデルが知られており、研究が行われている<sup>[4],[5]</sup>.

まず、1)の応用を行った背景として、深海の高水圧による電子回路の特性変化問題が挙げられ る.それは,深海の高い水圧により,水中機器内の電子回路の特性に大きな誤差が生じ,機器同 士の同期が取れず通信ができなくなるという問題である.水中機器に用いられる電子部品は陸上 のものと同様であり、一般の電子回路が使われる.一般の機器との違いは、浸水と水圧から電子 回路を保護する点である.水中機器の小型化・単純化のためには,防水容器の選定が重要である. 深海における水中機器の防水容器には主に 2 種類ある.1 つは,耐圧容器である.チタン製の耐 圧容器を使い、電子回路を深海の高い水圧から保護する.しかし、チタンを使うため、製作コス トが高くなる. 大型で高価なため, 小型の水中機器には向かない. もう1つの防水容器は均圧容 器である. 容器内に絶縁油を満たし, 深海生物のように内部と外部の圧力を一定にする手法であ る. 耐圧容器に比べて製作コストは安く、小型にもできる. しかし、深海においては防水よりも 圧力からの保護の問題のほうが大きい、先述のように、深海では内部の電子回路に過大な水圧が かかり、電子回路に通常では考えられない誤差が発生するという問題がある。そこで、従来は電 子部品に一度高圧をかけ、その後精度を検査し高精度の電子部品のみを使用することで誤差を少 なくしていたが、この手法は高精度の電子部品を選定するための実験コストが高くなる.そこで、 本件では均圧容器を使った場合に生じる深海の高い水圧による電子回路の特性変化の問題に着目 し、これを強力な同期手法である非線形同期により解決することを考えた.水中機器に非線形同 期回路を用いることにより、装置ごとに多少の特性誤差が生じても同期することができる.よっ て、強大な水圧がかかる深海の環境でも、耐圧加工や高精度の部品の選定が必要ないと考えられ る. つまり、均圧容器を使うが、非線形同期を利用することにより各機器の電子回路に誤差が発

 $\mathbf{2}$ 

生して通信できないという問題を防ぐことが期待される.

1)では,非線形同期を深海用可視光通信装置に応用し,非線形同期発振子の同期特性の調査と 評価を行った.その結果,幅広いパラメータ誤差にも対応し,通信可能であることを確認した. 研究の次の段階として,魚などの生物が周囲の個体と速度と進行方向を同期させ,ぶつかること なく群となって動いている点にヒントを得て,2)の応用に取り組んだ.

Swarm とは、アリやハチ等に代表される群れとしての知性を利用した群ロボットのことであ る.従来、複数のロボットを協調して制御する場合、外部から集中管理することによって制御し ていた.しかし、この手法はロボットの数が増えれば増えるほど集中管理が難しくなり、対応し きれなくなるという問題がある.一方、自然界においてアリやハチなどは、全体を制御する集中 管理者がいないにも関わらず、膨大な数の個体が協調しながら行動し、群れで仕事を達成してい る.重要な点は、それぞれの個体は非常に単純な構造をしているにも関わらず、群れとなり行動 することで、複雑な仕事を成し遂げているということである.Swarm はこのコンセプトを適用し たロボットである.単体では単純な機能しか持たないロボットでも、複数で群行動を取ることで 知能的な行動を取り、目標を達成することができるとして研究が進められている.また、Swarm は海洋資源探査の分野で活躍が期待される.具体的には、多数の水中 Swarm、すなわち水中で動 作する多数の小型移動ロボットによって、群れとなり効率的に海洋資源探査を行う(図 1-1).この 手法は、アリに倣った小型単純な Swarm による群探査により、広範囲の海底を効率的に調査で きるという利点がある。

2)では、非線形同期発振子を複数組み合わせることにより、非線形同期を Swarm の動きの同 期に応用できると考え、シミュレーションと実験を行った.その結果、非線形同期のみを用いて 複数台の個体の動きが同期し、群行動が可能であることを確認した.水中 Swarm の動きの同期 に非線形同期を用いることにより、強大な水圧がかかる深海の環境で個体ごとに多少の特性誤差 が生じても同期することができる.よって、大型で高価な耐圧容器が不要となり、小型単純な水 中 Swarm の実現が可能となる.

よって、本論文では非線形同期システムを用いた水中可視光通信装置と Swarm の群移動制御 手法について述べる.

本章では、本論文の概要について述べる.

2章では、本件で用いた**非線形同期システム**について述べる.本件では、Leaky Integrate-and-Fire (LIF)と呼ばれる神経振動子のモデルを使った.

3 章では,非線形同期シミュレータついて述べる.数値解析シミュレーションソフトウェアの Simulink を用いて非線形同期システムシミュレータを作成した.シミュレーションによって,時 定数の異なる装置間でも,非線形同期により同期することを確認した.

4 章では,非線形同期システムを使った可視光通信装置の開発について述べる.非線形同期を 発生させる回路は,アナログ回路では,オペアンプを使った回路やタイマーICを使った回路等が 提案されている<sup>[6],[7],[8],[9]</sup>.本件ではマイクロプロセッサを使ったシステム<sup>[10]</sup>を用いた.マイクロ プロセッサ(ATMEGA328)・LED・フォトダイオードを使い,非線形同期システムを使った可視 光通信装置(図 1-2)を作成した.水中で試験するため電子回路は防水ケースに封入した.

5章では、非線形同期システム同期試験について述べる.具体的には、3つの非線形同期システ

ムをリング状に並べ(図 1-3)、時定数の異なるシステム間でも、非線形同期により発光周期が同期 することを、シミュレーションおよび可視光通信装置を用いた実験で確認した.実験は空気中と 水中でそれぞれ実施した.そして、リング状に並べた3台の非線形同期システムにおいて、非線 形同期が発生する時定数の範囲を調査した.調査は、3台のうち1台の非線形同期システムの時 定数を少しずつ変えていき、各時定数における非線形同期システムの点灯周期を測定した.実験 の効率化を図るため、実験データ自動測定システムを作成した.これにより、従来は2時間おき に行っていた時定数の設定変更作業やログデータの保存作業を完全自動化し、効率良く実験デー タを得ることが可能となった.次に、シミュレーションと実験の結果を解析し、各非線形同期シ ステムの点灯周期と各システム間の点灯周期差を調査した.結果として、シミュレーションと空 気中・水中での実験の結果を比較するといずれもほぼ同様の時定数の範囲で非線形同期が発生し、 点灯周期および点灯周期差もほとんど一致した.また、位相平面による同期解析を行った.具体 的には、非線形同期システムの出力電圧好を横軸、yの微分値yを縦軸とした位相平面を作成し、3 台同期時のグラフと3台非同期時のグラフを比較し、非線形同期のメカニズムについて調査した. 調査の結果、3台非同期時には各非線形同期システムが自分の点灯タイミングとは異なるタイミ ングに他からの光を受光し、位相平面のグラフが不規則に変化することがわかった.

6章では、可視光通信装置の非線形同期信号をクロックとして利用した 4PPM データ通信につ いて述べる. 可視光通信装置には青色と緑色の LED とフォトダイオードを搭載した. 青色 LED を非線形同期信号の発光体とし、青色用フォトダイオードを受光センサとして用いた。そして緑 色 LED と緑色用フォトダイオードはデータ通信用とした.非線形同期信号をクロックとして利 用し,2台の通信装置を向かい合わせて設置し,時定数の異なる装置間での4PPM データ通信の テストを行った.結果として空気中と水中両方において,時定数の異なる装置があっても、同期 し通信に成功した.続けて、通信が成功する時定数の範囲を調査した.その際にも実験データ自 動測定システムを使用した.しかし,通信可能であるのは 100mm 以下の近距離だけであった. そこで,通信可能距離を伸ばすための手法を考察した.問題は,距離が離れれば通信相手から届 く光が弱まるだけでなく、周囲の明るさや装置間の濁度の影響が大きくなる. つまり、S/N 比が 小さくなる.また、受光センサの個体差もあるため、受光判定閾値を一意に決めることができな いということである.そこで,光を受けたと判定する閾値を自動で設定する ATC (Automatic Threshold Control)を,通信装置のプログラムに実装した.結果として,周囲環境に左右されにく くなり、ATC 実装前は通信可能距離が 100mm 以下だったが、実装後は 600mm の距離で通信可 能となった. 加えて, ATC を実装したことによる同期可能範囲の変化は見られなかった. また, 通信速度についても従来は 5.6bps であったが、プログラムを改良することにより、通信速度の向 上を図った.その結果,空気中・水中ともに距離 190mm で通信速度は 100bps まで向上した.よ って、可視光非線形同期システムは、水中用 Swarm で利用可能な段階に達したと言える.

7章では、可視光非線形同期システムを利用した水中 Swarm の開発について述べる.まず、平面上を移動する 2次元 Swarm モデル(図 1-4)を作成した.本件で提案する Swarm は、各個体が3 つの非線形発振子を持つ.3 つの非線形発振子の周期(*T*<sub>1</sub>, *T*<sub>2</sub>, *T*<sub>3</sub>)によって、移動ベクトル(*v<sub>x</sub>*, *v<sub>y</sub>*)が定義される.個体同士が近づくと、それぞれの非線形発振子が同期する.同期した個体同士は同じ方向に同じ速度で移動し、群行動が実現される.本件では、ロボット・フレームワークであ

4

る Robot Operating System (ROS)と物理シミュレータの Gazebo を用いたシミュレーションに おいて、3 台から 10 台のユニットの動きが同期することを確認した.次に、3 色の LED とフォ トダイオードを持つ陸上用 Swarm ロボット実機(図 1-5)を作成した.陸上において、3 台の実機 がシミュレーションと同じ手法によって群れとなり行動した.

次に、2次元 Swarm モデルを3次元 Swarm モデル(図 1-6)に拡張した. 群移動制御を2次元 から3次元に拡張するためには、各個体の有する非線形発振子の数を3つから4つに増やす必要 がある.よって、4色の LED と光センサを持つ Swarm のシミュレーションを行った.そして、 2次元 Swarm モデルと同様に、3から10台のユニットの動きが同期することを確認した.しか し、水中 Swarm の実現のためには、海底や障害物にぶつかる問題を解決する必要がある.そこ で、Swarm に4つのレーザー距離計を取り付け、障害物が近づくと非線形発振子の周期を変化さ せ、障害物を回避する手法を検討した.シミュレーションの結果、Swarm は障害物にぶつからず に群行動することを確認した.よって、本手法により、水中 Swarm の実現可能性が示唆された.

8章では、本研究の成果についてまとめる.また、海洋資源探査用 Swarm の実現を目指して時 定数 $\tau$ や周期Tを創発する手法や、防水 Swarm ロボット開発を行うといった今後の展望について 述べる.



図 1-2 非線形同期システムを使った可視光通信装置



図 1-33リングオシレータ同期試験



図 1-42次元 Swarm モデル



図 1-52 次元 Swarm ロボット実機



図 1-63 次元 Swarm モデル

#### 2. 非線形同期システム

**非線形同期**は、数学的には Van der Pol (VDP)方程式に代表され、自然界にも見られる現象で ある.非線形同期の大きな特徴として、幅広いパラメータ誤差に対応して同期するという点が挙 げられる.例えば、自由にスライドする板の上に置いた複数のメトロノームは、初期状態や周期 が異なっていてもしばらくすると同期していく.非線形同期のモデルとしては、VDP 方程式や神 経振動子が知られている.本件では、Leaky Integrate and Fire (LIF)と呼ばれる神経振動子のモ デル<sup>[4]</sup>を使った.同様のモデルは神経細胞(ニューロン)の活動電位を記述するモデルのひとつとし て研究が行われている<sup>[5]</sup>. LIF モデルの利点としては、CR 発振回路として考えることができる点 がある.また、同期のトリガーとして連続値ではなくパルス信号を用いるため、可視光通信に適 していると考えた.よって本件では LIF モデルを採用した.

採用した LIF 非線形同期システムを、図 2-1 の回路図で表現する. CR 回路が含まれており、 閾値の電圧ymaxまで充電されると放電し、その瞬間 LED が点灯する. 周囲のシステムからの光 はフォトダイオードで受信し、受信すると出力電圧yに追加電圧をが加算される. 図 2-1 の CR 回 路部分の充電の様子は次の式(2-1)で表すことができる.

 $x(t) = Ri(t) + y(t) \qquad \cdots \quad \vec{x}(2-1)$ 

式(2-1)でxは入力電圧, yは出力電圧を表している.

 $y(t) = \frac{1}{c} \int i(t) dt$  … 式(2-2) 式(2-2)をtで微分して整理する.

$$C\frac{dy(t)}{dt} = i(t) \qquad \cdots \quad \vec{x}(2-3)$$

式(2-1)に式(2-3)を代入し、式を整理する.

$$x(t) = RC \frac{dy(t)}{dt} + y(t)$$

$$RC \frac{dy(t)}{dt} = -y(t) + x(t)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = -\frac{1}{RC}y(t) + \frac{1}{RC}x(t)$$

$$x(t) = RC \frac{dy(t)}{dt} + y(t) \qquad \cdots \quad \vec{x}(2-4)$$

式(2-4)を離散化して整理する.

$$\frac{y_k - y_{k-1}}{\Delta t} = -\frac{1}{RC}y_k + \frac{1}{RC}x_k$$
$$y_k = y_{k-1} - \frac{\Delta t}{RC}y_k + \frac{\Delta t}{RC}x_k$$
$$y_k + \frac{\Delta t}{RC}y_k = y_{k-1} + \frac{\Delta t}{RC}x_k$$
$$(1 + \frac{\Delta t}{RC})y_k = y_{k-1} + \frac{\Delta t}{RC}x_k$$

$$y_k = \frac{1}{(1 + \frac{\Delta t}{RC})} y_{k-1} + \frac{\frac{\Delta t}{RC}}{(1 + \frac{\Delta t}{RC})} x_k$$

Δtはサンプリング時間間隔である.また,電子回路の時定数RCをτとおく.

$$y_k = \frac{1}{(1 + \frac{\Delta t}{\tau})} y_{k-1} + \frac{\frac{\Delta t}{\tau}}{(1 + \frac{\Delta t}{\tau})} x_k$$

よって,

$$y_k = a_0 x_k + b_0 y_{k-1} \qquad \cdots \quad \overrightarrow{\mathbf{x}}(2-5)$$

ただし,

$$a_0 = rac{rac{\Delta t}{ au}}{(1+rac{\Delta t}{ au})}$$
 ,  $b_0 = rac{1}{\left(1+rac{\Delta t}{ au}
ight)}$ 

次に、複数のシステムを同期させることを考える.そのために、出力電圧 y がしきい値 $y_{max}$ を超えたとき、コンデンサにたまった電荷を放電(y = 0)し、この瞬間 LED を点灯させる.この LED の発光により、周囲にある他のシステムにパルス的な衝撃を与えるようにする.そのために、式(2-5)に結合係数の項を加え、フォトダイオードで外部から光を検知したときに出力電圧 y が $\varepsilon$ 上昇するようにする(式(2-6)).

$$y_k = a_0 x + b_0 y_{k-1} + m\varepsilon \quad (m, \ \varepsilon > 0) \qquad \cdots \ \exists (2-6)$$

mは結合係数,  $\varepsilon$ は追加電圧である.入力電圧 x は一定値とする.外部から光を受光した場合は m = 1,受光していない場合はm = 0である.これにより,出力電圧 y の波形は図 2-2 のようにな る.この非線形同期アルゴリズムにより,それぞれの電子回路が LED の光を通じて相互に影響を 与え,やがて同じタイミングで LED が点滅するようになる<sup>[10]</sup>. LED の点灯タイミングが同時に なったとき,同期達成となる.LED の点灯周期は時定数 $\tau = C \cdot R$ に支配されるため,本論文では  $\tau$ を変化させ,それぞれの電子回路の特性とした.





#### 3. 非線形同期シミュレーション

LIF 非線形同期システムを用いて同期が発生するかシミュレーションするため、数値解析シミ ュレーションソフトウェアである Simulink を用いて、非線形同期システムシミュレータを作成 した. 図 3・1 は非線形同期システム 1 つあたりの構成図である.「CR Based Nonlinear-Sync」 の部分で LIF 非線形同期システム(式(2-6))が計算されている. 図 3・2 は、非線形同期システムの Simulink モデルである.この Simulink モデルを複数接続し、同期が発生するかシミュレーショ ンを行った.この Simulink モデルの入力引数と出力引数の一覧およびその意味について、表 3・1 に示す.特筆すべき点として、サンプリングタイムは $\Delta t = 0.05$  [Sec],基準時定数は $\tau = 0.128$ とし た.ニューギニアに生息し、集団発光するホタルは、約 0.7 秒周期で点滅を繰り返す<sup>[10]</sup>.よって、 CR 回路の 1 回の放充電周期が 0.7 秒程度となるよう、基準時定数 $\tau = 0.128$ とした.電子回路で 実機を製作し実験する前に、このシミュレータで非線形同期が発生するか調査した.シミュレー ションの結果については 5 章で述べる.



図 3-1 非線形同期シミュレータ構成図



図 3-2 非線形同期シミュレータ Simulink モデル

入力引	 入力引数				
番号	名前	意味			
1	Т	サンプリングタイムΔt(定数: 0.050sec 固定)			
2	tau	時定数(定数)			
3	ер	接続先システムの発光による影響度(定数: 0.05V 固定)			
4	ymax	満充電時の電圧(定数: 0.99V 固定)			
5         Input x         入力電圧(定数: 1V 固定(ステップ入力))		入力電圧(定数: 1V 固定(ステップ入力))			
6	Photo Diode	接続先システムからの入力(実際は光入力)			
出力引	数				
1	Output y	非線形同期システムの出力電圧			
2	LED	接続先システムへの出力(実際は光出力)			

表 3-1 Simulink モデルの入力引数と出力引数

#### 4. 可視光非線形同期通信回路

非線形同期を発生させる回路は、アナログ回路では、オペアンプを使った回路やタイマーICを 使った回路等が提案されている<sup>[6],[7],[8],[9]</sup>.本研究ではマイクロプロセッサを使ったシステム<sup>[10]</sup>を 用いた.マイクロプロセッサ(ATMEGA328)・LED・フォトダイオードを使い、非線形同期シス テムを使った可視光通信装置(図 4·1)を作成した.回路図を図 4·2 に示す.フォトダイオードは アンプを通し AD コンバータに接続されている.LED はマイクロコントーラの Digital Output に接続されている.青色 LED(波長:470nm)を同期用の発光体とし、フォトダイオード(感 度:460nm)を受光センサとして用いる.また、緑色 LED(波長:525nm)とフォトダイオード(感 度:540nm)はデータ通信用とする.LIF モデルに基づく非線形同期システム(式(2·6))をマイクロプ ロセッサにプログラムすることで、出力電圧 y (図 2·2)はマイクロプロセッサ内部で計算される. 本手法は、マイクロプロセッサを利用することにより、アナログ回路に発生する誤差をできる限 り取り除き、非線形同期システムの時定数τなどのパラメータの設定が容易になる.また、水中で 試験するため電子回路を防水ケースに封入した.防水ケースの寸法は、長さ 55mm,幅 53mm, 高さ 36mm である.空気中および水中での実験結果については 5 章で述べる.







図 4-2 可視光非線形同期通信回路図

#### 5. 非線形同期システム同期試験

非線形同期システムシミュレータを用いた同期シミュレーションと,可視光非線形同期通信回路を用いた同期実験の内容および結果について述べる.なお,実験は空気中と水中でそれぞれ実施した.

#### 5.1. 3リングオシレータ

3 つの非線形同期システムをリング状に接続し、非線形同期の発生状況を調査した.シミュレ ーションでは、図 5-1 のように LED 出力信号が右隣のシステムに伝わり、右端のシステムの信 号は左端のシステムに伝わるように設定した.なお図中では各非線形同期システムのことを、群 れになると同期するほたるに例えて「Firefly」と表現している.そして、各システムの出力電圧 (Output y)の値および発光(Light Output)の状態を観測し、同期の解析を行った.実機での実験で は、3 台の可視光非線形同期通信回路を図 5-2 のように並べ、LED の信号がリング状に伝わるよ うに配置した.また、外部の光の影響を排除するため、実験は窓のない暗室で行った.そして、 各回路の LED の発光タイミングを観測し、同期の解析を行った.

各非線形同期システムの時定数をそれぞれ $\tau_1$ , $\tau_2$ , $\tau_3$ とする.問題を単純化して考えるため,今回 は $\tau_1 = \tau_2 = 0.128$ に固定し, $\tau_3$ のみを変化させた.そのとき,3台のシステムが同期する $\tau_3$ の範囲, および各システムの点灯周期と各システム間の点灯周期差を解析するため,シミュレーションを 行った.3台でシミュレーションを行った理由は、本件では群としての通信を目標としており、群 としての最小構成は3台であるためである.結果の一例を図5-3に示す.図5-3は、 $\tau_1 = \tau_2 =$ 0.128, $\tau_3 = 0.1$ とし、3番のシステムだけ0.5秒遅れてスタートさせたときの結果である.図5-3 の示すように、シミュレーション開始直後、3番の非線形同期回路は他とは違う発振をしている. しかし、その後追加電圧εが機能し、3つの回路が同期することを確認した.



図 5-13 リングオシレータシミュレーション接続図



図 5-23リングオシレータ試験回路



図 5-3 シミュレーション結果  $\tau_1 = \tau_2 > \tau_3$ 

#### 5.2. 実験データ自動測定システム

実験の効率化を図るため、実験データ自動測定システムを作成した.図5-4に実験データ自動 測定システムの概略図を示す.実験データ自動測定プログラムは、可視光非線形同期通信回路が 接続された実験室内のPC上で動作する.各回路に搭載されたマイクロプロセッサへ実験パラメ ータ設定や測定開始命令を送信し、各回路から送られてくる実験結果のデータを自動でCSVファ イルに記録する.また、実験室の外にあるPCやスマートフォン上から実験データ自動測定シス テムへ実験指示コマンドをメールで送ることで、測定実験が開始される.また、実験開始時・終 了時・異常発生時には自動的にシステムからユーザーへ通知メールを送る機能も実装している. これにより、従来は2時間おきに行う必要があった実験パラメータの設定変更作業やログデータ の保存作業が完全自動化され、効率良く実験データを得ることが可能となった.



図 5-4 実験データ自動測定システム

#### 5.3. 周期·周期差解析

3 リングオシレータのシミュレーションと実験の結果から、3 台の同期が発生する $\tau_3$ の範囲、 および各非線形同期システムの点灯周期と各システム間の点灯周期差を解析した.図 5-5 と図 5-6 にシミュレーションの結果と可視光非線形同期通信回路を用いた実験の結果を示す.図 5-5 は、シミュレーションと空気中での実験において、 $\tau_1 = \tau_2 = 0.128$ とし、 $\tau_3$ を変化させたときの 周期のグラフである.また、図 5-6 は、シミュレーションと空気中・水中での実験において、 同条件で周期差( $\Delta T = T_3 - T_1$ および $\Delta T = T_3 - T_2$ )をとったグラフである.図 5-6 の周期差( $\Delta T$ )が 0 となっている部分が、非線形同期が発生している部分である.図 5-5 の、 $\tau_3 < \tau_1$ の領域(Zone A)において、同期周期は $T_3$ となり、回路 1,2 は回路 3 に引き込まれている.一方で、 $\tau_3 > \tau_1$ の領 域(Zone B)では同期周期は $T_1$ となり回路 3 は回路 1,2 へ引き込まれている.すなわち、周期の長 い回路が短い回路に同期していく事が確認できる.また、図 5-6 よりシミュレーションと空気 中・水中での実験の結果を比較するとほぼ同様に非線形同期が発生した.



図 5-5 T<sub>3</sub>と周期変化 Tの変化



#### 5.4. 位相平面解析

**非線形同期のメカニズム**について調査する為,位相平面による同期解析を行った.具体的には, 非線形同期システムの出力電圧yを横軸, yの微分値yを縦軸とした位相平面を作成した.そして, 3 台同期時のグラフと3 台非同期時のグラフを比較調査した.

まず、3リングオシレータのシミュレーションより、非線形同期システムの出力電圧yのデータ を取得した.次に、yの変化量をサンプリングタイム $\Delta t$ で割ることで、微分値yを計算した.それ により、yを横軸、yを縦軸とした位相平面を作成した.位相平面は、3番のシステムの時定数 $\tau_3$ を 0.05 から 0.01 刻みで 0.30 までそれぞれ作成した.その中の代表例として、同期が発生したと きと発生しなかったときの位相平面を図 5-7 と図 5-8 に示す.3台のシステムが同期している時 は、図 5-7 のように各システムの軌跡は三角形を描いた.一方、同期していない時は、図 5-8 の ように各システムの軌跡に三角形からはみ出す部分が現れた.非同期時は各システムの発光(y = 0にリセット)タイミングがずれている為、自分の発光時とは違うタイミングで他のシステムから の光を受光し式(2-6)中のm = 1となり、出力電圧yに追加電圧をが加わる.よって、非同期時には位 相平面のグラフが不規則に変化し、図 5-8 のような軌跡になることが明らかとなった.



図 5-7 非線形同期システム3台同期時の位相平面の例( $\tau_3 = 0.07$ )



図 5-8 非線形同期システム3台非同期時の位相平面の例( $\tau_3 = 0.06$ )

#### 5.5. 3 台以外の場合のシミュレーション

3 台以外の場合の結果を調査するため、非線形同期システムが2台、4台、10台の場合のリン グオシレータモデルもそれぞれ作成し、シミュレーションを行った.設定した範囲内でランダム な値の時定数を各システムに設定し、同期が発生するかどうかシミュレーションを行った.調査 した時定数の範囲は、基準時定数τ = 0.128を中心に、0.05から0.128と、0.128から0.30の範囲 である.結果を表 5-1に示す.

結果として,確実に同期する範囲は,時定数  $\tau \ge 0.07$  から 0.128 の範囲(Zone A)に設定した場合と, 0.128 から 0.22 の範囲(Zone B)に設定した場合であることがわかった.また,同期した際の周期 Tは,非線形同期システムの個数に関係なくほとんど変わらなかった.

よって,提案するシステムは,その個数に関係なく,時定数が Zone A または Zone B の範囲 内において同期が発生することがわかった.結論としては,非線形同期システムの式(式(2-6))を使 って,基準時定数(*τ* = 0.128)から 0.54 倍から 1.72 倍の範囲内であれば,個数が増えても非線形 同期が発生することをシミュレーションで確認した.

n	Zone A	Zone B						
	$\tau$ : 0.07-0.128	$\tau$ : 0.128-0.22						
2	T=0.45[s]	T=0.70[s]						
3	T=0.45[s]	T=0.70[s]						
4	T=0.45[s]	T=0.75[s]						
10	T=0.45[s]	T=0.75[s]						

表 5-1 非線形同期システム同期範囲

注)nはシステムの個数, ては時定数, Tは同期した際の発光周期である.

#### 6. 4PPM データ通信

シミュレーションおよび実験で、時定数の異なる装置間での非線形同期が可能であると確認で きたため、次に空気中と水中での 4PPM 通信に取り組んだ.可視光非線形同期通信回路同士の通 信には、青色の LED とフォトダイオードを非線形同期クロックとして利用する.このとき、緑色 の LED とフォトダイオードを 4PPM のデータ通信用として用いる.4PPM とは、4 値パルス位 置変調(4 Pulse Position Modulation)の略である.家電のリモコンにも使われている一般的な手 法である.マイクロプロセッサとの相性が良い.本件では、表 6・1 に示す 4PPM 信号フォーマッ トを設定した.4PPM を用いることにより、光が受光できないときに発生する'0000'や外部からの 光ノイズが発生したときに考えられる'1111'が発生しても問題なくデータ伝送を可能にしている. 4PPM 通信は一般的な手法であるが、非線形同期をクロックとして利用し調査した論文は他には ない<sup>[11]</sup>.通常、1 色で 4PPM 通信を行う場合、周期は受信側と送信側で固定する必要がある.し かし、非線形同期をクロックとすることで、受信側と送信側で周期の同期が行なわれ、4PPM 通 信が可能となる.なお、同期が発生しておらず非線形同期クロックの周期がずれている回路同士 については、正しい 4PPM プロトコルのデータが受信されないため通信できない.同期している ときのみ通信が可能となる.

図 6-1 は非線形同期クロックと 4PPM データ送信例である. 8 回のデータ送信により, 8bit の 情報(Data)を送信するデータ通信フォーマットを設定した. 例えば, Data 'A' を送信する場合,

'A'の2進数表記である「01000001」を,表 6-1の4PPMフォーマットにしたがって4PPM 信号に変換すると,

0010 0001 0001 0010

Checksum は,

01+00+00+01=0010(2進数計算)

であるから,0010を表 6-1の4PPM 信号フォーマットにしたがって4PPM 信号に変換すると 00010100

また、データの転送始めと終わりのコマンドを加える.よって、4PPM 信号は、

1100 0010 0001 0001 0010 0001 0100 0011

となる.1のとき緑色 LED が点灯し,0のとき消灯する.

この符号化を使い,2 台の可視光非線形同期通信回路を向かい合わせた状態での通信試験を行った.結果として空気中と水中それぞれにおいて,時定数の異なる回路同士での4PPM 通信に成功した.結果の詳細は2節で述べる.通信試験において,通信速度は約5.7bpsである.通信速度をさらに早くすることは可能であるが,今回は肉眼でも確認しやすいように遅くした.通信速度を早くした場合の結果は3節で述べる.しかし,本件では非線形同期を小型単純なSwarmに使うことを目的としているため,低速通信でも問題ないと考えている.

4PPM	Data
0000	Null
$0\ 0\ 0\ 1$	0 0
0010	01
0100	10
1000	11
1100	Start
0011	End
1111	Null
Other	Null

表 6-1 4PPM 信号フォーマット



図 6-1 青色・緑色 LED の点灯パターン例

#### 6.1. 自動閾値制御(ATC)

非線形同期信号を通信クロックとして利用し,時定数の異なる装置間での 4PPM データ通信に成功 した.しかし,通信可能距離の問題が残っていた.距離が離れれば通信相手から届く光が弱まるだけで なく,周囲の明るさや装置間の濁度の影響が大きくなり,また,受光センサの個体差もあるため,受光 判定閾値を一意に決めることができない.そこで,受光判定閾値を自動で設定する ATC (Automatic Threshold Control)を実装した.

可視光非線形同期通信回路に使用しているフォトダイオードは、受光した光の強さに応じて出力電 圧が高くなる特性がある.そして、フォトダイオードの出力電圧をマイクロプロセッサの AD コンバ ータでデジタル値に変換した値を AD 値と呼ぶ. AD 値が閾値(Threshold)よりも高いとき、光を受光 したと判定する.また、自然光や部屋の照明など、周囲の同期通信回路の発光に関係なくフォトダイオ ードで検知される時間変化しない光成分を DC 成分と呼ぶ.なお、本通信装置は外部の光が急激に変 化しない深海の場所を想定している.図 6-2 は、青色受光フォトダイオードの AD 値の例である.フ ォトダイオードの AD 値を *AD(t)*、受光時間の長さを *Δt* とすると、図 6-2 より、

$$AD_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T AD(t) dt$$
  
=  $\frac{1}{T} \left\{ \int_0^T DC(t) dt + \int_{T-\Delta t}^T AD_h(t) dt \right\} \qquad \cdots \qquad$ \equiv (6-1)

$$AD_h(t) \ge DC(t)$$
 はそれぞれほぼ一定と考えた場合、 $AD_{av}$ は、  
 $AD_{av} = \frac{1}{r} (DC \cdot T + AD_h \cdot \Delta t) \quad \cdots \quad 式(6-2)$ 

 $AD_h$ は, 式(6-2)を変形して  $AD_h = (AD_{av} - DC)\frac{T}{\Delta t}$  … 式(6-3)

Threshold は図 6-2 より

Threshold = DC + K · AD<sub>h</sub> (0 < K < 1) … 式(6-4) 式(6-4)に式(6-3)を代入して変形すると

$$Threshold = K \frac{T}{\Delta t} A D_{av} - \left( K \frac{T}{\Delta t} - 1 \right) DC \qquad \cdots \quad \vec{x} (6-5)$$

Tは周期で、 $AD_{av}$ はセンサの AD 値(AD(t))の平均値であり、これらはマイクロプロセッサ内部で 求めることができ、既知である.次に、DC 成分の求め方について、

$$DC = \frac{1}{T - \Delta t} \int_0^{T - \Delta t} AD(t) dt + \frac{1}{\Delta t} \int_{T - \Delta t}^T (AD(t) - AD_h) dt \quad \cdots \quad \vec{\mathbf{x}} (6-6)$$

積分部分をそれぞれ*S*<sub>1</sub>,*S*<sub>2</sub>とおく

$DC = \frac{1}{T - \Delta t} S_1 + \frac{1}{\Delta t} S_2$	•••	式(6-7)
また,		
$DC = \frac{1}{T}(S_1 + S_2)$	•••	式(6-8)
図 6-2 より,		
$S_1 + S_2 = \frac{T}{T - \Delta t} S_1$		式(6-9)
<b>式(6-9)</b> を <b>式(6-8)</b> に代入して変形する		
$DC = \frac{1}{T - \Delta t} S_1$		式(6-10)

よって,

$$DC = \frac{1}{T - \Delta t} \int_0^{T - \Delta t} AD(t) dt \qquad \cdots \quad \vec{\mathbf{x}} (6-11)$$

 $\int_{0}^{T-\Delta t} AD(t) dt$  は、1 周期の中で、AD 値が急低下(AD 値の微分値が最小)した時間から、AD 値が急上昇(AD 値の微分値が最大)した時間までの AD 値を足し合わせた値であり、マイクロ プロセッサ内部で求めることができるため、既知である.

#### (i) 青色(非線形同期クロック)受光の場合

1 周期の間のサンプリング数を n とすると,

 $\frac{T}{\Delta t} = n$  … 式(6-12) nはマイコン内部でカウントすることで自明な値である. 式(6-12)を式(6-5)に代入する. 加えて,  $K = \frac{1}{2}$ とすると, Threshold は式(6-13)で求めることができる.

$$Threshold = \frac{1}{2}n \cdot AD_{av} - \left(\frac{1}{2}n - 1\right)DC \qquad \cdots \quad \exists (6-13)$$

#### (ii) 緑色(4PPM データ)受光の場合

緑の場合,青の場合と同様な1周期単位で考えると,周期ごとに点灯時間が異なることがある ため, *AD<sub>av</sub>*やΔtの値が周期ごとに一定ではない.そこで,4PPMで1データを送信するために必 要な 8 周期を 1 単位として考える. すると, 我々の設定した 4PPM プロトコルの特性から, 8 周期の間に受光するパルス数の合計は常に 10 になる(図 6-3). 図 6-3 において, 四角内の数値は発光パルスの数である. Start と End は 4PPM フォーマットより, 2 パルスである. *AD<sub>av</sub>とDC*の値は, 8 周期分の移動平均値を用いた. 8 周期単位で考えると, *T*とΔ*t*の比は常に一定であり, その比は式(6-14)の通りである.

$$\frac{T}{\Delta t} = \frac{4 \times 8}{(2 \times 2) + (1 \times 6)} = 3.2 \qquad \cdots \quad \vec{x} (6-14)$$

式(6-14)を式(6-5)に代入する. 加えて、  $K = \frac{1}{2}$ とすると、Threshold は式(6-15)で求めることができる.

$$Threshold = 1.6 AD_{av} - 0.6 DC \qquad \cdots \quad \ddagger (6-15)$$

よって,青の場合は式(6-13),緑の場合は式(6-15)をマイコン内部で計算することにより,各色の Threshold を自動で制御する.



図 6-2 青受光用フォトダイオードの AD 値



図 6-38 周期中の緑色 LED パルス数

#### 6.2. 通信成功率測定

図 6-4 に示すように、ATC を実装した可視光非線形同期通信回路を 2 台向かい合わせて 4PPM 通信試験を行った. 4PPM 通信試験結果を表 6-2 と図 6-5、図 6-6 に示す. なお、通信成功率は通信を 1000 回行った際の、2 台の通信成功率の平均値である. また、表 6-2 で時定数 $\tau$ は、回路 1、2 ともに 0.128 ( $\tau_1 = \tau_2 = 0.128$ ) とした. 図 6-5 は空気中で 2 台間の距離を 190mm とし、 $\tau_1 = 0.128$ (固定)、 $\tau_2$ は可変としたときの結果である. 図 6-6 は水中で同条件としたときの結果である. 図 6-6 について、通信成功率が $\tau_2 = 0.21$ のときに突然低くなっている. これについて、2 台間の距離を変え合計 5 回測定を行ったが、水中の場合は全て同様の結果となった.  $\tau_1 = 0.128$ と $\tau_2 = 0.21$ の時定数を持つ 2 台の組み合わせは、同期のタイミングが外れやすくエラーが発生しやすい条件だと考えられる. 特に水中実験の場合、水槽の壁や水面に光が反射する影響により、空気中に比べて多くのノイズが入るため、エラー発生が多発したと考察する.

通信可能距離について,ATC 実装前は,Threshold は 2 台間距離が 70mm のときの AD 値に 合わせた固定値を使用していたため,距離が 100mm を超える場合には Threshold を手動で適切 な値に設定し直さなければ通信不可となっていた.しかし,表 6-2 より,ATC 実装後は水中では 約 600mm の距離までであれば 70%以上の成功率で同期通信が可能であった.

時定数と通信成功率の関係については、図 6-5 と図 6-6 より、空気中・水中どちらにおいても 通信可能範囲(通信成功率が2台とも90%を超えている範囲)は $\tau_2 = 0.12 \sim 0.20$ の範囲であるこ とがわかった. すなわち、時定数の値が最大約 1.6 倍になっても通信が可能であるということで ある. これは、ATC 実装前と同じ結果である. つまり、本通信装置はパルスで同期を行なってい るため、ATC を導入しても非線形同期のメカニズムは変化せず、ATC 実装による性能低下はみら れない. よって、ATC 実装前の研究<sup>[12]</sup>の知見をそのまま生かすことが可能となる.



図 6-4 4PPM 通信試験

表(	<b>6-2</b> 쫖	「気中と水	く中での	通信成功	豖
表(	<b>6-2</b>	「気甲と水	く中での	通信成功	2

Distance	Success rate in	Success rate in					
[mm]	the air [%]	water [%]					
190	90.75	86.48					
390	73.18	84.82					
590	56.60	74.32					
790	39.55	69.53					

$(\tau_1 = \tau_2 = 0.128,$	距離を変化)
-----------------------------	--------



#### 6.3. 通信速度向上

ここまでは、可視光通信の様子を肉眼でも確認できるように通信速度を遅く設定していたが、 一方で通信速度をどこまで上げることができるか実験を行った.通信速度の向上のために、ソフ トウェアの改良を行なった.まず、サンプリングタイム $\Delta t$ を、50 ms から 3 ms に短くした.次 に、時定数  $\tau$ が小さいと周期 Tが短くなり、通信速度は増加することから、時定数  $\tau$ を 0.128 か ら 0.004 まで小さくしていった.

プログラム改良後,通信速度を上げた通信試験結果を図 6-7 に示す.図 6-7 は,プログラム改 良後に,時定数が等しい2台の可視光非線形同期通信回路を190mm離して設置し,通信速度を変 えたときの通信成功率の結果である.プログラム改良前,通信速度は空気中・水中ともに約5.6 bps であった.一方, プログラム改良後は, 空気中・水中ともに 約 100 bps まで約 80%以上の 成功率で 4PPM 通信に成功した.これは, 4PPM プロトコルで1 秒あたり最大 3 文字送信可能で あることを示している.また, 図 6-7 で興味深い点は, 空気中と水中の結果がほぼ一致している ことである.このことから, 今回測定した時定数の範囲における通信成功率, すなわち同期の発 生率は, 測定環境によって変化することはなく, 2 台の持つ時定数の相性によって決まるもので あるということがわかる.また, 通信速度が上がるにつれて, 通信成功率は必ずしも減少してい ない点には,本非線形同期システムの非線形性が影響しているものと見てとれる.



#### 7. 非線形同期 Swarm

本件は、Swarmの海底資源探査利用を目指している.従来,複数のロボットを協調して制御す る場合,外部から集中管理することによって制御していた.しかし,この手法はロボットの数が 増えた場合には対応しきれなくなるという問題がある.一方,アリやハチ,魚などは、全体を制 御する集中管理者はいないが、膨大な数の個体が協調しながら行動し、群で仕事を達成している. 重要な点は、それぞれの個体は非常に単純な構造をしているにも関わらず、群となり行動するこ とで、複雑な仕事を達成しているということである.これをロボットに適用したものが Swarm で ある.本件で開発を進めている水中 Swarm も、単体では単純な機能しか持たない.しかし、強力 な同期手法である非線形同期により複数が同期し、群行動を取ることで知能的な行動を取る.そ して、海底資源の効率的な探査が可能になると考えている.

まず,2次元平面上を群で動く Swarm のシミュレーションと実機実験を行った.次に,群移動 制御を2次元から3次元に拡張し,3次元空間を群で動く Swarm のシミュレーションを行った.

#### 7.1. 2次元 Swarm シミュレーション

ロボット・フレームワークである Robot Operating System (ROS)と物理シミュレータの Gazeboを使い,平面を動くSwarmのシミュレーションを行った.各ユニットは3つの非線形発 振子を有する(図 7-1).各非線形発振子(1,2,3)はそれぞれ赤,緑,青色に対応しており,発振子 ごとに時定数( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ )を持つ.そして、時定数によって、発振子の周期が決まる.本システムは CR 回路をベースとしているため、時定数が大きいほど周期も大きくなる.各非線形発振子の発振 周期を $T_1(t)$ ,  $T_2(t)$ ,  $T_3(t)$ とする. 3つの非線形発振子の周期( $T_1(t)$ ,  $T_2(t)$ ,  $T_3(t)$ )によって、 Swarmの移動ベクトル( $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$ )が定義される(式(7-1)). $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$ はX軸方向とY軸方向 の速度である.周期 T(t)は各発振子の持つ時定数  $\tau$ によって決まるが、同期が発生すると変化す る.Swarm 同士が近づくと、それぞれの非線形発振子の周期が同期する.同期した Swarm 同士 は同じ方向に同じ速度で移動し、群行動が実現される.

$$\begin{bmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2}{3}\pi & \cos \frac{4}{3}\pi \\ \sin 0 & \sin \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{4}{3}\pi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \end{bmatrix} \qquad \cdots \quad \not \exists (7-1)$$

例えば、3 つの非線形発振子の周期が全て同じ( $T_1(t) = T_2(t) = T_3(t)$ )の場合、式(7-1)より、  $v_x(t) = 0, v_y(t) = 0$ となる.よってこの場合、ユニットは停止する.一方、1 番の非線形発振子の 周期だけ他の2 つより大きい( $T_1(t) > T_2(t), T_3(t)$ )場合、式(7-1)より、 $v_x(t) > 0$ となる.従って この場合、ユニットは+x 方向に進む.そして、図 5-5 で示したように、周期 T(t)は時定数  $\tau$ によ って決まる.よって、ユニットが単体で動く場合、進行方向はそのユニットの持つ時定数の大き さのバランスによって決まる.

次に、異なる時定数の組み合わせを持つ2つのユニットが同期し群行動する例を考える.例えば、表 7-1に示す時定数を持つ2つのユニットがx軸上にある場合、それぞれが離れた場所にあり同期していない状態では、先述の通り、各非線形発振子の周期 *T(t)*は時定数 τ にほぼ比例して決まる.そして、式(7-1)よりユニット1は+x方向、ユニット2は-x方向に進む.やがて、2台が一定の距離に近づくと同期が発生し、周期 *T(t)*が変化する.「5.3 周期・周期差解析」で述べたよ

うに、周期*T(t)*は周期が小さい回路側に引き込まれ、同期する.この例の場合、*T*<sub>2</sub>(*t*)と*T*<sub>3</sub>(*t*)はいずれもユニット1のほうが小さいため、ユニット2の*T*<sub>2</sub>(*t*)と*T*<sub>3</sub>(*t*)がユニット1に同期する.その結果、同期後は2台とも同じ周期の組み合わせとなり、速度は*v*<sub>x</sub>(*t*) = 1, *v*<sub>y</sub>(*t*) = 0, すなわち2 台とも+x方向に進む.このように、複数台のユニットが同期し群れとなり行動する場合、**群れの 速度ベクトルは、同期したユニットの持つ時定数の組み合わせによって決まる**.そして重要な点 は、時定数の組み合わせは1パターンだけではないということである.Swarmの動く方向は、各 非線形発振子の持つ時定数のバランスによって決まるため、組み合わせのパターンは無数にある.

	• •			-			-	
	$ au_1$	$T_1(t)$ (例)	$ au_2$	$T_2(t)(例)$	$ au_3$	$T_3(t)$ (例)	$v_x(t)$	$v_y(t)$
ユニット1	0.2	2	0.1	1	0.1	1	1	0
ユニット2	0.2	2	0.3	3	0.3	3	-1	0
2 台同期後		2		1		1	1	0

表 7-1 時定数の異なる2台のユニットの周期が同期する例

2 次元 Swarm を実現するにあたり、ロボット自体の向きを変えることなく前後左右に移動させるための手法を検討した.結果として、円形の移動台車に 3 つのオムニホイールを 120° おきに取り付けたモデルを採用した.シミュレーションに使用した 2 次元 Swarm モデルを図 7-2 に示す.3 つのオムニホイールを 120° おきに配置することにより、方向転換することなく前後左右に移動可能となっている。各モータの回転速度を $M_1(t), M_2(t), M_3(t)$ とする.重要な点として、各モータの回転速度は各発振子周期に 1 対 1 で対応しているわけではない.まず、式(7-1)の変換行列を用いて、各発振子の周期  $T_1(t), T_2(t), T_3(t)$ により、速度 $v_x(t), v_y(t)$ が決まる.式(7-1)の右辺を展開すると、式(7-2)となる.

$$\begin{bmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1(t)\cos 0 + T_2(t)\cos \frac{2}{3}\pi + T_3(t)\cos \frac{4}{3}\pi \\ T_1(t)\sin 0 + T_2(t)\sin \frac{2}{3}\pi + T_3(t)\sin \frac{4}{3}\pi \end{bmatrix} \qquad \cdots \quad \vec{\mathbb{X}}(7-2)$$

そして,求めた速度v<sub>x</sub>(t),v<sub>y</sub>(t)から各モータの回転速度M<sub>1</sub>(t),M<sub>2</sub>(t),M<sub>3</sub>(t)を計算する.計算には 式(7-3)の変換行列を用いる.これにより,2次元 Swarm は方向転換することなく任意の方向に 移動する.

$$\begin{bmatrix} M_1(t) \\ M_2(t) \\ M_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0 & \sin 0 \\ \cos \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{2}{3}\pi \\ \cos \frac{4}{3}\pi & \sin \frac{4}{3}\pi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \end{bmatrix} \qquad \cdots \quad \overrightarrow{\mathbf{x}}(7-3)$$

式(7-3)に式(7-2)を代入する.

$$\begin{bmatrix} M_1(t) \\ M_2(t) \\ M_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0 & \sin 0 \\ \cos \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{2}{3}\pi \\ \cos \frac{4}{3}\pi & \sin \frac{4}{3}\pi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1(t)\cos 0 + T_2(t)\cos \frac{2}{3}\pi + T_3(t)\cos \frac{4}{3}\pi \\ T_1(t)\sin 0 + T_2(t)\sin \frac{2}{3}\pi + T_3(t)\sin \frac{4}{3}\pi \end{bmatrix} \quad \cdots \quad \not$$

式(7-4)の右辺を展開して整理すると、式(7-5)となる.

$M_1(t)$	[ 1	-0.5	-0.5]	$T_1(t)$	
$M_2(t)$	= -0.5	1	-0.5 ·	$T_2(t)$	 式(7-5)
$M_3(t)$	L-0.5	-0.5	1	$T_3(t)$	

よって,式(7-5)より,各モータの回転速度は,各発振子周期に1対1で対応しているわけではなく,式(7-5)の変換行列が示すように,各周期のバランスを取って決まる値であることがわかる.

3 台の Swarm の動きをシミュレーションした結果(図 7-3),初期の周期T<sub>1</sub>(t), T<sub>2</sub>(t), T<sub>3</sub>(t)に よって多様な群行動パターンがみられた.例えば,群全体が同期し停止するパターン(図 7-4)や, 右に移動するパターン(図 7-5)を確認した.また,Swarm の数を 10 台に増やしてシミュレーシ ョンを行った.この場合も,同様に群行動が発生した.なお,図 7-4 の例における各個体の非線 形発振子の時定数設定値を表 7-2 に,図 7-5 の時定数設定値を表 7-3 に示す.なお,ここに示 す時定数設定値は一例である.先述のように,Swarm の動く方向は,各非線形発振子の持つ時定 数のバランスによって決まるため,同様の動きをする時定数の組み合わせのパターンは無数に存 在する.



図 7-12 次元 Swarm



図 7-22次元 Swarm モデル



図 7-32次元 Swarm シミュレーション



図 7-4 群全体が同期し停止するシミュレーション結果

	$ au_1$	$ au_2$	$ au_3$
Unit 1	0.20	0.13	0.13
Unit 2	0.20	0.13	0.13
Unit 3	0.13	0.20	0.20

表 7-2 群全体が同期し停止する場合の時定数設定値



図 7-5 群全体が同期し右に移動するシミュレーション結果

	$ au_1$	$ au_2$	$ au_3$
Unit 1	0.16	0.13	0.13
Unit 2	0.16	0.13	0.13
Unit 3	0.15	0.20	0.20

表 7-3 群全体が同期し右に移動する場合の時定数設定値

#### 7.2. 2 次元 Swarm 実験

3 色の LED, 光センサを持つ陸上用 Swarm ロボットを 3 台作成した.陸上において,3 台が シミュレーションと同じ手法によって群となり行動した.作成したロボットを図 7-6 に示す.全 方位レンズ内の受光センサには、3 つのフォトダイオード(感度 赤:660nm,緑:540nm,青:460nm) を用いた.LED には 3 色の 1W パワーLED(波長赤:625nm,緑:525nm,青:470nm)を用いた.光 が全方位に届くよう、3 色の LED が搭載されたユニットを 120° おきに 3 つ配置した.駆動には 120° おきに配置されたフィードバックサーボモータ 3 個とオムニホイール 3 個を使うことによ り、シミュレーションと同様に台車の向きを変えず全方向に移動できる.電源には、小型で容量 の大きな 2 次電池であるリチウムポリマーバッテリーを使用した.

図 7-7 にハードウェア構成を示す.マイクロプロセッサには ATMEGA328 マイコンを 2 つ使

用した.1つはLIFモデルに基づく非線形同期システムの計算をし、また、受光センサとLEDの 制御をする.もう1つはモータの制御とPCとの通信を行う.2つのマイコンはSPI通信でデー タを送受信している.PCとの通信は小型無線モジュールであるXbeeを使用している.ただし、 PCとの通信は、非線形発振子の周期やモータの速度などの実験データの送信が目的である.群行 動を実現するためにPCとの通信を利用してはいない.3台のロボットを暗室に置き、実験を行っ た(図 7-8).シミュレーション結果と同様に、群全体が同期し停止するパターン(図 7-9)や、右に 移動するパターン(図 7-10)を確認した.なお、図 7-9と図 7-10の実験における各個体の非線形 発振子の時定数設定値は、シミュレーションの際の設定値(表 7-2、表 7-3)と同じである.

重要な点は、Swarmの個体はお互いの位置を認識することなく群行動している点である. 個体 同士が近づくとそれぞれの非線形振動子の周期が同期し、速度ベクトルが同じになる. よって、 Swarm はお互いに距離計測や通信をすることなく、非線形同期だけを使い群行動を実現してい る.



図 7-6 Swarm ロボット



図 7-7 Swarm ロボットハードウェア構成



図 7-8 Swarm 暗室実験







図 7-10 群全体が同期し右に移動する実験例

#### 7.3. 3次元 Swarm シミュレーション

群移動制御を 2 次元から 3 次元に拡張し,水中のような 3 次元空間を群で動く Swarm のシミ ュレーションを行った. 群移動制御を 2 次元から 3 次元に拡張するため,各ユニットの有する非 線形発振子の数を 3 つから 4 つに増やした. 2D Swarm と同様に ROS と Gazebo を用いてシミ ュレーションを行った.

図 7-11 は 4 つの非線形発振子のイメージである.各非線形発振子(1, 2, 3, 4)はそれぞれ赤, 緑,青,赤外(図中では黒で表現)に対応しており,発振周期を $T_1(t), T_2(t), T_3(t), T_4(t)$ とする.なお, 水中において赤色の光や赤外線は,青や緑に比べて減衰しやすいが,本件では,4色ともに光の伝 わる距離が同じになるよう各色の出力を調整していると仮定する.水中に4つの非線形発振子の 周期( $T_1(t), T_2(t), T_3(t), T_4(t)$ )によって,Swarmの移動ベクトル( $v_x(t), v_y(t), v_z(t)$ )が定義される (式(7-6)). 2D Swarm と同様に,Swarm 同士が近づくと,それぞれの非線形発振子の周期が同期 する.同期したSwarm同士は同じ方向に同じ速度で移動し,群行動が実現される.

$$\begin{bmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \\ v_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2}{3}\pi & \cos \frac{4}{3}\pi & 0 \\ \sin 0 & \sin \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{4}{3}\pi & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \end{bmatrix} \qquad \cdots \quad \vec{\mathbf{x}}(7-6)$$

図 7-12 は、シミュレーションに使用した Swarm モデルである.形状は、Blue Robotics 社の ROV である BlueROV2 をベースとしている.機体上部に 4 色の LED を模したオブジェクトを 付けた.これらのオブジェクトは各 LED の点灯・消灯に合わせて表示・非表示となる.上部に 取り付けているが、光信号は全方位に向けて発信される.Swarm モデルを無重力空間に置き、 シミュレーションを行った(図 7-13).使用した物理シミュレータ Gazebo は流体計算には対応し ていないため、水による抵抗は考慮していない.

3 台の Swarm の動きをシミュレーションした結果,時定数 τの設定によって,多様な群行動パ ターンがみられた.例えば,群全体が同期し停止するパターン(図 7-14)や,右に移動するパター ン(図 7-15)を確認した.図 7-14 の例における各個体の非線形発振子の時定数設定値を表 7-4, 図 7-15 の時定数設定値を表 7-5 に示す.また,Swarm の数を 10 台に増やしてシミュレーショ ンを行った.この場合も,同様に群行動が発生した(図 7-16).図 7-16 の時定数設定値を表 7-6 に示す.2次元 Swarm と同様に,これらの時定数設定値は一例である.1節で述べたとおり,同 様の動きをする時定数の組み合わせのパターンは無数に存在する.

35



図 7-11 3 次元 Swarm



図 7-12 水中ドローン型 Swarm モデル



図 7-133次元 Swarm シミュレーション



図 7-14 群全体が同期し停止するシミュレーション結果

	$ au_1$	$ au_2$	$ au_3$	$ au_4$
Unit 1	0.14	0.12	0.14	0.12
Unit 2	0.14	0.14	0.12	0.12
Unit 3	0.12	0.14	0.14	0.12

表 7-4 群全体が同期し停止する場合の時定数設定値



図 7-15 群全体が同期し右に移動するシミュレーション結果

	$ au_1$	$ au_2$	$ au_3$	$ au_4$
Unit 1	0.12	0.10	0.12	0.11
Unit 2	0.12	0.12	0.10	0.11
Unit 3	0.12	0.14	0.14	0.13

表 7-5 群全体が同期し右に移動する場合の時定数設定値



図 7-16 10 台の 3 次元 Swarm が同期し右に移動するシミュレーション結果

	$ au_1$	$ au_2$	$ au_3$	$ au_4$
Unit 1	0.14	0.12	0.12	0.12
それ以外	0.13	0.14	0.14	0.14

表 7-610台が同期し右に移動する場合の時定数設定値

#### 7.4. 障害物回避

水中 Swarm の実現のためには、Swarm が海底や障害物にぶつかる問題を解決する必要がある. そこで、Swarm に 4 つのレーザー距離計を取り付け、障害物が近づくと非線形発振子の周期を変 化させ、障害物を回避する手法を検討した.具体的な方法として、式(2-6)における結合係数 mが 1 となる条件を追加した.これまで、式(2-6)における結合係数 mが 1 となる条件は、周囲の Swarm の LED 発光を検知した場合のみであった.しかし、レーザー距離計で測定した周囲の物体までの 距離が 0.5m 以下になった場合にも結合係数 mが 1 となるようにした(図 7-17). 4 つのレーザーは図 7-11 に示す正四面体の各面の法線に合わせた向きに取り付けた.レーザー 距離計を取り付けた後の Swarm モデルを図 7-18 に示す.これにより,海底や障害物が近づいた 場合,まず障害物のある方向のレーザー距離計に対応する非線形発振子の結合係数 *m* が 1 にな る.すると,図 2-2 に示す非線形発振子の出力 *y* がより早く最大電圧*y<sub>max</sub>*に達し,周期 *T(t)*が小 さくなる.式(7-6)より,Swarm は周期 *T(t)*が大きい非線形発振子の方向へ進む特性があるため, 障害物と反対方向へ進む.よって Swarm は障害物から離れる.

例えば、海底に近づいた場合、下向きに設置されたレーザー距離計の測定距離が 0.5m 以下に なる. すると、No.4 非線形発振子の結合係数 mが1になる. これにより No.4 非線形発振子の周 期 T が小さくなる. 図 7-11 より No.4 非線形発振子は Swarm の底面方向に対応している. Swarm は周期が小さい No.4 非線形発振子の対応する底面方向とは反対に進む. よって、Swarm は上方 向に進み、海底から離れる.

3 台の Swarm シミュレーションの結果, Swarm は障害物にぶつからずに群行動することを確認した.例えば,進行方向に階段状の物体があった場合は,階段にぶつからないよう上昇しながら進んだ(図 7-19).また,壁があった場合は,壁を避けるように壁に沿って進んだ.周囲を壁で囲まれた行き止まりの場合は,その場で立ち往生した.

重要な点は、本手法では非線形発振子の結合係数 mが1となる条件を追加しただけで、障害物 回避を実現した点である.新しい式の追加や、条件分岐による制御手法の切り替えは行っていな い.高度な演算や通信を必要とせず、非線形同期だけを使い群行動を実現している.



図 7-17 結合係数 m=1 の条件







図 7-19 階段への衝突を避けるよう上昇しながら進む例

#### 8. まとめ

非線形同期を使った水中可視光通信と Swarm の群移動制御に成功した.まず,LIF 非線形同 期モデルに基づく**非線形同期システムを使った可視光通信装置**を,マイクロプロセッサ,LED, フォトダイオードを用いて製作し,可視光非線形同期通信に成功した.

具体的には、まず数値解析シミュレーションソフトウェアである Simulink を用いて非線形同 期システムシミュレータを作成した.次に、マイクロプロセッサ・LED・フォトダイオードを使 い、非線形同期システムを使った可視光非線形同期通信回路を製作した.

次に、3 台の非線形同期システムをリング状に並べ、時定数の異なる装置間でも、非線形引き込み現象により同期することを、シミュレーションと空気中・水中での実験で確認した。そして、 リング状に並べた 3 台の非線形同期システムにおいて、非線形同期が発生する時定数の範囲を調 査した.次に、3 台同期試験の結果を解析し、各システムの点灯周期と各システム間の点灯周期 差を調査した。結果として、シミュレーションと空気中・水中での実験の結果を比較するとほぼ 同様の時定数の範囲で非線形同期が発生し、点灯周期および点灯周期差もほとんど一致した。

また,非線形同期システムの出力電圧yを横軸,yの微分値yを縦軸とした位相平面を作成し,3 台同期時のグラフと3台非同期時のグラフを比較し,非線形同期のメカニズムについて調査した. 調査の結果,3 台非同期時には各非線形同期システムが自分の点灯タイミングとは異なるタイミ ングに他からの光を受光し,非線形同期システムの追加電圧 ε によって位相平面のグラフが不規 則に変化することがわかった.

最後に、可視光非線形同期通信回路の非線形同期信号をクロックとして利用した **4PPM デー 9通信**を行った.各通信回路には青色と緑色の LED とフォトダイオードを搭載した.青色 LED を非線形同期信号の発光体とし、青色用フォトダイオードを受光センサとして用いた.そして緑 色 LED と緑色用フォトダイオードはデータ通信用とした.非線形同期信号をクロックとして利 用し、2 台の通信回路を向かい合わせに置き、時定数の異なる装置間での 4PPM データ通信のテ ストを水中と空気中でそれぞれ行った.結果として、時定数の異なる回路があっても、同期し通 信に成功した.続けて、通信が成功する時定数の範囲を調査した.すると、同期は発生するが通 信はできない時定数の範囲があることがわかった.

研究の次の段階として,LIF 非線形同期システムを応用した Swarm の群移動制御の提案を行った.まず,2次元平面上を群で動く Swarm のシミュレーションを行った.シミュレーションにおいて,3台から10台の個体の動きが同期することを確認した.次に,3色のLED,光センサを持つ Swarm ロボットを作成した.陸上において,3台のロボットがシミュレーションと同じ手法によって群となり行動した.

次に、この2次元 Swarm を3次元 Swarm に拡張した. 各個体の有する非線形発振子の数を3 つから4つに増やし、4色のLEDと光センサを持つ3次元 Swarmのシミュレーションを行っ た. そして、2次元 Swarmと同様に、3から10台のユニットの動きが同期することを確認した. しかし、水中 Swarmの実現のためには、海底や障害物にぶつかる問題を解決する必要がある. そ こで、Swarmに4つのレーザー距離計を取り付け、障害物が近づくと非線形発振子の周期を変化 させ、障害物を回避する手法を検討した. シミュレーションの結果、Swarmは障害物にぶつから ずに群行動することを確認した. よって、海洋資源探査用 Swarmの実現可能性が示唆された. 群行動シミュレーションと実験は良好な結果を得たが、各 Swarm の持つ非線形発振子の時定 数  $\tau$ の創発は行えておらず、一意な値を設定している。今後、周囲の環境に応じて時定数  $\tau$ を変 化させる変数の追加が必要となる。例えば、Swarm に複数の温度センサを取り付け、温度が高い 方向にある非線形発振子の時定数  $\tau$ が大きくなるような変数を追加した場合、周囲の温度差によ って時定数  $\tau$ のバランスが変化し、Swarm は温度の高い方向に向かって動くと考えられる。本手 法を海洋資源探査用 Swarm に適用した場合、Swarm は温度の高い海底熱水鉱床に近づいていく 動きをすることが期待され、非常に興味深い。また、海洋資源探査用 Swarm の実現に向けて、防 水加工を施した 3 次元 Swarm 実機を作成し、水中で群行動実験を行うことは今後の課題である。 実際の水中にて群行動実験を実施することで、水による流体抵抗や外乱の影響など、シミュレー ションでは得られなかったデータを得ることができ、海洋資源探査用 Swarm の実現に大きく近 づくと期待される.

#### 9. 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた指導教員の田原淳一郎准教授に感謝致します.本研 究は誰かから引き継いだものではなく、学部の時から私が取り組んできた研究を継続・発展させ ながら行ったものであります.よって、シミュレーションソフト・実験装置・制御ソフトの作成 は全て1からのスタートでした.そのため、研究の進め方や取り組み方に何度も悩みましたが、 その度に田原先生から多くの助言を頂き、乗り越えることができました.そして田原先生は、学 生である私が単に研究を進めるだけでなく、その成果を外部へ積極的に発表するよう後押しし、 機会を与えてくださいました.最終的に、学部時代から通算して国内学会発表4件、国際学会発 表5件、学術雑誌への論文発表1件という数多くの発表経験を積むことができました.これらの 発表を通じ、関連する分野のさまざまな研究者の方との交流があり、本研究はより磨きのかかっ た内容になったと考えています.

また、本論文を提出するにあたり、清水悦郎教授と章ふえいふえい教授に副査をお願いし、ご 助言を賜りました.お忙しい中、本論文をご精読くださり、詳細かつ有益なご助言をくださった ことに、心より感謝申し上げます.

そして、さまざまな場面で研究に協力していただいた田原研究室の優秀なスタッフの皆様にも 感謝致します.同期の中村圭君には、ROSを用いたシミュレーションを行う際、ROSのセット アップ方法から 3D シミュレーションのやり方まで細かく教えて頂きました.私が Swarm シミ ュレータの構築を1か月という短期間で成し遂げることができたのは、ひとえに中村君の協力の おかげと感謝いたします.また、学会発表等に向けて論文を作成した際には、中村君も論文作成 で忙しいにも関わらず、貴重な時間を使って私の論文のチェックをして頂きました.特に、学術 雑誌である AROB Journal に査読付き論文を投稿できた背景には、中村君による細かいチェック が欠かせませんでした.齋藤幹大君には、発表で用いる 3D イメージ図を作成して頂きました. 3D イメージ図で表現することにより、聴衆に対し研究内容をより視覚的にインパクトのあるアピ ールをすることができ、結果的に国際学会 AROB での Young Author Award 受賞や、海洋理工学 会での2度のベストプレゼンテーション賞受賞に繋がったと考えます.また、学部4年の川村大 和君と加藤哲君には、資料作成や 3D プリンタ等の工作機械の調整に協力して頂きました.加え て、学部生である川村君と加藤君が、大学院生と同様に毎日真面目に研究室へ足を運び努力を重 ねたことで、研究室全体の士気がより向上されたと感じています.改めて感謝申し上げます.

本研究は以下の助成を受けました.ここに記して深く感謝いたします.

科研費基盤(C) (2014-2017) No.26420838

JKA 補助事業(2016-2017) H28-136

笹川科学研究助成(2018-2019)研究番号 2018-7007

44

#### 10. 参考文献

[1] J. Buck, and E. Buck, "Synchronous fireflies," Sci. Am., vol. 234, no. 5, pp. 74-85, May 1976.
[2] 梶原秀一,花島直彦,青柳学, "周期入力制御系の数理構造と強制引き込み現象",計測自動 制御学会論文集, vol. 52, no. 10, pp. 573-579, October 2016.

[3] T. Tokiwa, and T. Yamakawa, "Central pattern generator network with high controllability for tripod gait generator and its application," Journal of Signal Processing, vol. 13, no. 6, pp.477-485, November 2009.

[4] 蔵本由紀,河村洋史,『同期現象の科学 – 位相記述によるアプローチ』,京都大学学術出版会, 2017.

[5] W. Gerstner, W. M. Kistler, R. Naud and L. Paninski, "Neuronal Dynamics: From Single Neurons to Networks and Models of Cognition," UK: Cambridge University Press, 2014.

[6] 関川宗久, 木本圭子, 河野崇, 川上博, 合原一幸, 「光結合した方形波発振器を用いた同期現象」, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 111, no. 142, pp. 73-78, October 2011.

[7] W. Garvar, and F. Moss, "Electronic fireflies," Sci. Am., vol. 269, issue 6, pp. 128-130, December 1993.

[8] 高坂拓司,川上博,上田哲史,「方形波発振器を用いた電子ホタルの同期現象」,電子情報通信学会技術研究報告, vol. 96, no. 72, pp. 27-32, May 1996.

[9] 羽田野靖雄,朝長伸吾,高坂拓司,「キャパシタで結合した方形波発振器にみられる同期と分岐」,電子情報通信学会技術研究報告,vol. 108, no. 175, pp. 49-52, July 2008.

[10] 木村宏人, 江口正道, 「パルス振動子を内蔵し同期発光するマイコンホタルの製作」, 山形 県立産業技術短期大学校紀要, No.8, pp34-37, July 2002.

[11] 上野秀樹, 佐藤義之, 片岡淳, 「可視光 ID システム」, 東芝レビュー, vol. 62, no. 5, pp. 44-47, May 2007.

[12] T. Ito, J. Tahara, M. Koike, and F. Zhang, "Development of the visible light communication device for Swarm using nonlinear synchronization," Artificial Life and Robotics, vol. 23, pp. 60-66, March 2018.

### 11. 付録

#### 1 可視光非線形同期通信回路

#### 付録図 1 可視光非線形同期通信回路 回路図

ファイル名	Waterproof_hotaru_sch.pdf
URL	https://www.dropbox.com/s/fytycm6wxbvdmw1/Waterproof hotaru sch.pdf
	<u>?dl=0</u>

#### 付録図 2 可視光非線形同期通信回路 配線図

ファイル名	Waterproof_hotaru_pcb.pdf
URL	https://www.dropbox.com/s/w3lo8d0bgw48yh9/Waterproof_hotaru_pcb.pdf?
	<u>dl=0</u>

#### 付録リスト 1 可視光非線形同期通信回路 3 リングオシレータ同期試験用プログラム

ファイル名	hotaru03.ino
URL	https://www.dropbox.com/s/9yh3toi2m5w0n7o/hotaru03.ino?dl=0
動作環境	Arduino IDE 1.8.1

#### 付録リスト 2 可視光非線形同期通信回路 4PPM データ通信試験用プログラム

ファイル名	hotaru26.ino
URL	https://www.dropbox.com/s/tanfx3xpy7bx8ce/hotaru26.ino?dl=0
動作環境	Arduino IDE 1.8.1

#### 付録リスト 3 可視光非線形同期通信回路 4PPM データ通信速度向上試験用プログラム

ファイル名	hotaru28.ino
URL	https://www.dropbox.com/s/cjeha8re6pqnds7/hotaru28.ino?dl=0
動作環境	Arduino IDE 1.8.1

#### 2 実験データ自動測定プログラム

実験データ自動測定プログラムは以下の3つのプログラムから構成される. セキュリティ保護 のため、メールアドレスおよびパスワード部分は「\*\*\*」に置き換えている.

ファイル名	hotaru_control03_1.ttl
URL	https://www.dropbox.com/s/c5hp6rvffd05p9s/hotaru_control03_1.ttl?dl=0
動作環境	Tera Term Version 4.89

ファイル名	logging_management03.ttl
URL	https://www.dropbox.com/s/ov0qfzkd5l8y355/logging_management03.ttl?dl
	<u>=0</u>
動作環境	Tera Term Version 4.89

付録リスト 5 実験開始指令メールを受信し、実験を開始させるプログラム

#### 付録リスト 6 実験開始指令メールを送信するプログラム

ファイル名	starter02.ttl
URL	https://www.dropbox.com/s/y8pgsdsch5yvilm/starter02.ttl?dl=0
動作環境	Tera Term Version 4.89

#### 3 非線形同期解析プログラム

ファイル名	period_graph03.m
URL	https://www.dropbox.com/s/7ffteii6ccf6poo/period_graph03.m?dl=0
動作環境	Matlab R2015a

#### 付録リスト 7 周期・周期差解析用プログラム

#### 付録リスト 8 位相平面解析用プログラム

ファイル名	hotaru_simulink_kaiseki08.m
URL	https://www.dropbox.com/s/n18xpuz4ocsmv4u/hotaru_simulink_kaiseki08.
	<u>m?dl=0</u>
動作環境	Matlab R2015a

#### 付録リスト 9 通信成功率解析用プログラム

ファイル名	hotaru_3ring_kaiseki01.m
URL	https://www.dropbox.com/s/y68j7v9pzul6kgm/hotaru 3ring kaiseki01.m?dl
	<u>=0</u>
動作環境	Matlab R2015a

#### 4 2 次元 Swarm シミュレーションプログラム

ファイル名	land_swarm_r8.urdf
URL	https://www.dropbox.com/s/u0ipsrj35b1isql/land_swarm_r8.urdf?dl=0
動作環境	Ubuntu 16.04 LTS, Ros Kinetic Kame 1.12.14, Gazebo version 7.0.0

付録リスト 102 次元 Swarm モデル URDF ファイル

#### 付録リスト 112次元 Swarm シミュレーションプログラム

ファイル名	swarm12.py
URL	https://www.dropbox.com/s/zscctn1o7rmuz45/swarm12.py?dl=0
動作環境	Ubuntu 16.04 LTS, Ros Kinetic Kame 1.12.14, Gazebo version 7.0.0

付録リスト 122 次元 Swarm シミュレーション結果解析プログラム

ファイル名	swarm_simulation_graph01.m
URL	https://www.dropbox.com/s/yhpcrua5so2i7kp/swarm simulation graph01.
	<u>m?dl=0</u>
動作環境	Matlab R2015a

#### 5 Swarm ロボット制御回路

Swarm ロボットは、以下の4つの回路で構成されている.

- (1) フォトダイオード回路
- (2) パワーLED 制御回路
- (3) フィードバックサーボモータ制御・PC との無線通信回路
- (4) 電源制御回路

各回路の回路図と配線図を以下に示す.

#### 付録図 3 フォトダイオード回路 回路図

ファイル名	Swarm_sensor_sch.pdf
URL	https://www.dropbox.com/s/ipwfg8ih8cm1t3u/Swarm_sensor_sch.pdf?dl=0

付録図 4	フォトタ	イオー	ド回路	配線図
-------	------	-----	-----	-----

ファイル名	Swarm_sensor_pcb.pdf
URL	https://www.dropbox.com/s/zn6boarr0e0yc4s/Swarm_sensor_pcb.pdf?dl=0

#### 付録図 5 パワーLED 制御回路 回路図

ファイル名	Swarm_led_sch.pdf
URL	https://www.dropbox.com/s/s7lqx5psjmv2vrc/Swarm_led_sch.pdf?dl=0

#### 付録図 6 パワーLED 制御回路 配線図

ファイル名	Swarm_led_pcb.pdf
URL	https://www.dropbox.com/s/lg1p9lbb7aolb9e/Swarm_led_pcb.pdf?dl=0

#### 付録図 7 フィードバックサーボモータ制御・PC との無線通信回路 回路図

ファイル名	Swarm_motor_sch.pdf
URL	https://www.dropbox.com/s/g7fjt5m5rhq06ez/Swarm_motor_sch.pdf?dl=0

#### 付録図 8 フィードバックサーボモータ制御・PC との無線通信回路 配線図

ファイル名	Swarm_motor_pcb.pdf
URL	https://www.dropbox.com/s/a3que1ruwghjuh4/Swarm_motor_pcb.pdf?dl=0

付録図 9 電源制御回路 回路図

ファイル名	Swarm_power_sch.pdf
URL	https://www.dropbox.com/s/yj2crndfeuyebhr/Swarm_power_sch.pdf?dl=0

#### 付録図 10 電源制御回路 配線図

ファイル名	Swarm_power_pcb.pdf
URL	https://www.dropbox.com/s/413lqnye280jhim/Swarm_power_pcb.pdf?dl=0

#### 6 Swarm ロボットの位置の測定手法

Swarm はお互いに距離計測やデータ通信をすることなく,非線形同期だけを使い群行動する. よって,位置情報の取得や Swarm 間での情報共有は必要としない.しかし,実験の結果を評価す るためには,実験中に各 Swarm ロボットの位置情報を取得し,実験後に解析する必要がある.そ こで,各 Swarm ロボットの位置の測定について,以下の3つの手法を検討した.

- (A)3台のSwarm ロボットを上部からカメラで撮影し画像解析
- (B) 電波を用いた室内用位置測定デバイスを Swarm ロボットに取り付けて位置測定
- (C) Swarm ロボットの各モータ回転速度を積分し位置を算出

まず(A)の手法を試みた.しかし,各 Swarm は周囲の Swarm との同期に強い光の点滅(可視光 非線形同期)を使うため,光学的な手法である画像解析を用いた位置測定は不可であった.そこで, 電波を用いた室内用位置測定デバイスを用いる(B)の手法で測定を行った.本デバイスは電波を用 いるため、強い光の点滅の影響を受けず各 Swarm の位置を測定できたが,ローパスフィルタを かけても測定誤差が最大約 10cm あるため,Swarm ロボットの数 cm 単位の細かな動きは測定不 可であった.そこで,(C)の手法を採用した.(C)の手法により,3台全ての Swarm の細かな動き の変化も逃さず測定可能となった.(B)と(C)の測定結果と目視での測定結果を比較したグラフを 付録図 11 に示す.付録図 11 は,1台の Swarm ロボットを速度一定で動かした時の位置を,(B) と(C)の手法を同時に用いて比較測定した結果である.(B)の手法での測定結果は,10次のメディ アンフィルタをかける前(Original)とかけた後(Filtered)の結果をプロットしている.目視での測 定とは、ロボットが50cm進むごとの経過時間を目視で計測し、プロットしたものである.



付録図 11 より, (B)の結果は位置データにノイズが多く含まれているのに対し, (C)の結果は位置の変化を安定して算出できている.しかし, (C)の手法の欠点として以下の 2 つが挙げられる.

・長距離を動く場合、積分誤差が積算され、本来の位置との大きなズレが生じる.

・水中(3次元空間)に拡張した場合,適用できない.

今後,Swarmを長距離動かす場合には,(B)を併用し位置の補正を行い,(C)の積分誤差をリセットする工夫が必要となる.また、3次元空間内を動くSwarmを作成した場合,(B)の手法が最も有効となる.(B)の手法はノイズが多く含まれるが、メディアンフィルタをはじめとするローパスフィルタをかけることにより、実用可能であると考えている.また、ノイズが多く含まれた原因のひとつとして、今回実験を行った暗室は、広さ3.5m×4.5mの閉鎖空間であり、壁による電波反射の影響が多かったことが挙げられる.よって、電波反射の影響の少ない電波暗室や開放空間で実験を行うことにより、ノイズは低減すると考えている.しかし、本件においては(C)の手法を用いて測定を行った.

#### 7 Swarm ロボットプログラム

Swarm ロボットには、2つのマイクロプロセッサが搭載されており、それぞれ以下の役割を持つ.

(1) 非線形同期演算と、フォトダイオード・LED の制御を行うプログラム

(2) モータ制御と、PC に無線通信でログを送信するプログラム

各プログラムの詳細を以下に示す.

付録リスト 13 非線形同期演算と、フォトダイオード・LED の制御を行うプログラム

ファイル名	swarm_sync_13.ino
URL	https://www.dropbox.com/s/562r8t9m199yqkd/swarm_sync_13.ino?dl=0
動作環境	Arduino IDE 1.8.1

付録リスト 14 モータ制御と、PC に無線通信でログを送信するプログラム

ファイル名	swarm_motor_04.ino
URL	https://www.dropbox.com/s/60akymagrez7b2l/swarm_motor_04.ino?dl=0
動作環境	Arduino IDE 1.8.1

#### 付録リスト 15 Swarm ロボット実験ログ解析プログラム

ファイル名	swarm_graph03.m
URL	https://www.dropbox.com/s/grh3qlulck0kgrf/swarm_graph03.m?dl=0
動作環境	Arduino IDE 1.8.1

#### 8 3 次元 Swarm シミュレーションプログラム

#### 付録リスト 163 次元 Swarm モデル URDF ファイル(距離センサ取り付け前)

ファイル名	sea_swarm_r1.urdf
URL	https://www.dropbox.com/s/5ps8n8ldgmfeick/sea_swarm_r1.urdf?dl=0
動作環境	Ubuntu 16.04 LTS, Ros Kinetic Kame 1.12.14, Gazebo version 7.0.0

#### 付録リスト 173 次元 Swarm シミュレーションプログラム(距離センサ取り付け前)

ファイル名	swarm14.py
URL	https://www.dropbox.com/s/pbc4zqv9q4u9xbg/swarm14.py?dl=0
動作環境	Ubuntu 16.04 LTS, Ros Kinetic Kame 1.12.14, Gazebo version 7.0.0

#### 付録リスト 183 次元 Swarm モデル URDF ファイル(距離センサ取り付け後)

ファイル名	sea_swarm_r2.urdf
URL	https://www.dropbox.com/s/xmewmqfwa4d8dw5/sea_swarm_r2.urdf?dl=0
動作環境	Ubuntu 16.04 LTS, Ros Kinetic Kame 1.12.14, Gazebo version 7.0.0

#### 付録リスト 193次元 Swarm シミュレーションプログラム(距離センサ取り付け後)

ファイル名	swarm16.py
URL	https://www.dropbox.com/s/q4drpgq5vgutr7p/swarm16.py?dl=0
動作環境	Ubuntu 16.04 LTS, Ros Kinetic Kame 1.12.14, Gazebo version 7.0.0

ファイル名	swarm_simulation_graph02.m
URL	https://www.dropbox.com/s/mdk03gcr0x0jdjs/swarm_simulation_graph02.
	<u>m?dl=0</u>
動作環境	Matlab R2015a

付録リスト 203次元 Swarm シミュレーション結果解析プログラム

### 9 研究業績一覧

本件の成果は,以下に示す9件の学会(国内学会4件,国際学会5件)と,1件の学会誌(ジャー ナル)で発表を行った.

1	学会名	高速信号処理応用技術学会
	開催日	2016年08月09日(火)
	発表タイトル	非線形同期を使った LED による可視光通信の研究
	著者	伊藤大智,田原淳一郎
	発表形式	口頭発表(15分)
	会場	愛知工業大学 本山キャンパス
	掲載ページ	2016 高速信号処理応用技術学会研究会, pp.1-2, 2016
	受賞	なし
2	学会名	AROB 22nd 2017
	開催日	2017年01月19日(木)-21日(土)
	発表タイトル	Development of the Visible Light Communication Device for Swarm
		Using Nonlinear Synchronizing
	著者	Taichi Ito, Junichiro Tahara, Masakazu Koike, Feifei Zhang
	発表形式	口頭発表 (15分)
	会場	別府国際コンベンションセンター (ビーコンプラザ)
	掲載ページ	Proc. of the 22nd International Symposium on Artificial Life and
		Robotics (AROB 22nd 2017), pp.109-113, 2017
	受賞	Young Author Award
3	学会名	平成 29 年度海洋理工学会春季大会
	開催日	2017年06月08日(木)-09日(金)
	発表タイトル	非線形引き込みを使った水中 SWARM 用可視光通信装置の開発
	著者	伊藤大智,田原淳一郎
	発表形式	口頭発表(20分)
	会場	東京海洋大学品川キャンパス 楽水会館
	掲載ページ	平成 29 年度海洋理工学会春季大会, pp.57-60, 2017

付録リスト 21 学会発表リスト

	受賞	ベストプレゼンテーション賞
4 学会名 2017 China-Japan-Korea Graduates Academic Foru		2017 China-Japan-Korea Graduates Academic Forum
	開催日	2017年12月21日(木)-23日(土)
	発表タイトル	Communication Device - Visible Light Nonlinear Sync -
	著者	Taichi ITO, Junichiro TAHARA, Masakazu KOIKE, Feifei ZHANG
	発表形式	口頭発表(10分)
	会場	上海海洋大学
	掲載ページ	Proc. of the 2017 China-Japan-Korea Graduates Academic Forum,
		pp.171-177
	受賞	なし
5	学会名	AROB 23rd 2018
	開催日	2018年01月18日(木)-20日(土)
	発表タイトル	Automatic threshold control for visible light underwater
		communication device using nonlinear synchronization
	著者	Taichi Ito, Junichiro Tahara, Masakazu Koike, Feifei Zhang
	発表形式	口頭発表(15分)
	会場	別府国際コンベンションセンター (ビーコンプラザ)
	掲載ページ	Proc. of the 23rd International Symposium on Artificial Life and
		Robotics (AROB 23rd 2018), pp.410-415, 2018
	受賞	なし
6	学会名	平成 30 年度海洋理工学会春季大会
	開催日	2018年06月07日(木)-08日(金)
	発表タイトル	ROV・AUV に取り付け可能な水中 LIDAR ロガーの開発
	著者	伊藤大智,田原淳一郎
	発表形式	ポスター発表
	会場	東京海洋大学品川キャンパス 白鷹館
	掲載ページ	平成 30 年度海洋理工学会春季大会, pp.63-64, 2018
	受賞	なし
7	学会名	平成 30 年度海洋理工学会秋季大会
	開催日	2018年10月18日(木)-19日(金)
	発表タイトル	非線形同期を使った水中 SWARM の群移動制御
	著者	伊藤大智,田原淳一郎,中村圭
	発表形式	口頭発表(20分)
	会場	京都大学楽友会館
	掲載ページ	平成 30 年度海洋理工学会秋季大会, pp.67-70, 2018
	受賞	ベストプレゼンテーション賞
8	学会名	OCEANS 2018 Charleston

	開催日	2018年10月22日(月)-25日(木)
	発表タイトル	Development of the Underwater Swarm Using Visible Light
		Nonlinear Synchronization
	著者	Taichi Ito, Junichiro Tahara, Masakazu Koike, Feifei Zhang
	発表形式	ポスター発表
	会場	Charleston Area Convention Center
	掲載ページ	論文提出なし
	受賞	なし
9	学会名	AROB 24th 2019
	開催日	2019年01月22日(火)-25日(金)
	発表タイトル	Control method for underwater swarm -visible light nonlinear
		synchronization-
	著者	Taichi Ito, Junichiro Tahara, Masakazu Koike, Feifei Zhang
	発表形式	口頭発表(15分)
	会場	別府国際コンベンションセンター (ビーコンプラザ)
	掲載ページ	Proc. of the 24th International Symposium on Artificial Life and
		Robotics (AROB 24th 2019), pp.627-632, 2019
	受賞	なし

付録リスト 22	学会誌(ジャーナ	ル)掲載リスト
----------	----------	---------

1	学会誌名,掲載	Artificial Life and Robotics (2018), 23:60-66
	ページ	
	公開日	2018年03月15日(木)
	論文タイトル	Development of the Visible Light Communication Device for Swarm
		Using Nonlinear Synchronization
	著者	Taichi Ito, Junichiro Tahara, Masakazu Koike, Feifei Zhang
	査読	査読あり
	備考	AROB 22nd 2017 で発表し、ジャーナルへの論文投稿招待(Invitation)
		を受けた