

## FPGAによる海洋生物のための音声解析システムの実装

清水 友樹<sup>†</sup> バールラジェンダール<sup>††</sup> 坂田 雅雄<sup>†††</sup> 浦 環<sup>†††</sup> 柳澤 政生<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 早稲田大学理工学研究科 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

<sup>††</sup> インド工科大 Hauz Khas New Delhi 110016 INDIA

<sup>†††</sup> 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

E-mail: <sup>†</sup>{shimizu,yanagi}@yanagi.comm.waseda.ac.jp, <sup>†††</sup>{sakata,ura}@iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 海中の生態環境は謎に包まれている部分が多く、昨今工学的視点からその生態を探ろうという試みが多くなされている。現在我々はその手法の一つである、自律型海中ロボットによる海中生物の調査を行っている。ターゲットとしている生物は、捕食のために2000mもの深海に潜るとされ、生態が明らかでないマッコウクジラである。本稿では、マッコウクジラの発する音声解析するシステムをFPGAにより実装し、個体識別と方位角、俯角等の位置情報を推定する手法を提案する。

キーワード FPGA, 海中生物, 音響工学, デジタル信号処理, 三角測量, AUV

## FPGA-based Sound Analysis System for the Marine Organism

Yuki SHIMIZU<sup>†</sup>, Rajendar BAHL<sup>††</sup>, Masao SAKATA<sup>†††</sup>,

Tamaki URA<sup>†††</sup>, and Masao YANAGISAWA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Science and Engineering, Waseda University Okubo 3-4-3, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan

<sup>††</sup> Center for Applied Research in Electronics, Indian Institute of Technology Hauz Khas, New Delhi, 110016 INDIA

<sup>†††</sup> Institute of Industrial Science, The University of Tokyo Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

E-mail: <sup>†</sup>{shimizu,yanagi}@yanagi.comm.waseda.ac.jp, <sup>†††</sup>{sakata,ura}@iis.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** Many parts of sea environment are unclear, so a lot of research activities are trying to explore and analyze it with techniques of engineering. We are investigating the sea organism by the autonomous underwater vehicle which is one of the techniques. The organism we are targeted, is the Sperm Whale that goes underwater to 2000m for his own predation. In this paper, we implement the system with FPGA to analyze sound the Sperm Whale produces, and propose the method to classify individuals and to estimate the locational information as an angle of direction and depression.

**Key words** FPGA, Marine Organism, Acoustic Engineering, Digital Signal Processing, Triangulation, AUV

### 1. 背景

海中の生態系への理解は、生態系保護のために不可欠とされ、現在工学的視点からその生態解析を行う試みが様々な手法により行われている。自律型海中ロボット AUV(Autonomous Underwater Vehicle) は、その手法の一つであり、運用にアンビリカルケーブルを必要としない自律行動可能な無人機である。

AUVによって解析するターゲットの一つとして、我々は現在マッコウクジラの調査を行っている。一般的なマッコウクジラの調査は、船上からの目視観測などが多く深海2000mまで潜行するマッコウクジラの海中での生態系についてはほぼ未知となっている。AUVは自律的に潜行活動が行えるため、他の潜水技術よりも移動する生物に対して解析を行いやすいという点

から有用である。

マッコウクジラは生物であるため常に動き回っており、追跡を行うためにはリアルタイムでその位置を推定する必要がある。AUVにおける認識判断は動作速度や消費電力などの制約から、AUV制御用のCPUのみでのリアルタイムシステムは難しく、FPGA(Field Programmable Gate Array)との協調システムとしてこれを解決する。FPGAはCPUと比べ並列演算に優れており、また消費電力の面で優れている。

運用する母船の規模や、海洋の状況などによって混入するノイズの種類が変化し、現場においてこれを柔軟に対処し、システムを適宜調整する必要がある。FPGAには再構成可能であるという利点があるため、これらの問題を解決できるという点から、今回の解析システムにおいて最適であると考えている。

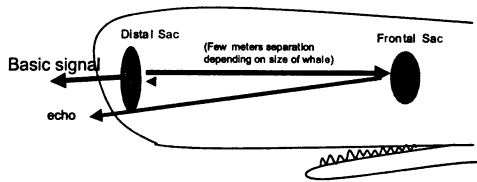


図1 マッコウクジラ体内反射.

マッコウクジラは群れを成すため、AUVで追跡を行う際に特定のマッコウクジラ1体を追い続ける必要がある。これを解決するため、マッコウクジラの鳴き声の一種である Click [3][4]を元に個体識別を行い、また方位角、仰角といった3次元的な方向算出を複数の海中マイクからの音声入力によって得る。これらのパラメータ算出をFPGAで行い、クジラの追跡を自律的に行えることを目標としている。

本稿では、マッコウクジラの個体識別と方向推定を演算することができるアーキテクチャについて述べ、FPGAによって実装、評価を行った結果を示す。第2節、第3節でクジラの特徴を活かした個体識別、および方向推定手法について述べ、第4節でこれらの手法を元にFPGA上へ実装するアーキテクチャについて述べる。第5節では、FPGA実装後にその面積、スループットを評価し、実際にマッコウクジラの音声を入力とした場合の解析結果について述べる。また、第6節で本稿の総括を行う。

## 2. 個体識別アルゴリズム

本稿で提案する手法において、マッコウクジラの個体識別を行う際に、音声的な特徴からなんらかのパラメータを抽出する必要がある。これらのパラメータの定義と、算出アルゴリズムについて本節で述べる[8]。

### 2.1 IPI

Inter-Pluse Interval(IPI)は、マッコウクジラの発声音と体内反射音の到達時間差が、個体によって異なりかつ個体毎に一定であることを利用し、個体識別を行う際に最重要としているパラメータである[1][2][6]。

マッコウクジラにおける発声と体内反射の様子を図1に示す。マッコウクジラは頭の先のあたりから発声を行うが、体内に Sac と呼ばれる空洞があり、この空洞で鳴き声が反射する。鳴き声と体内の反射音の時間差は、頭の先から Sac までの距離に比例し、個体の差によって異なる。発声音と体内反射音の到達時間差をとればそれが IPI となる。

算出する際のアルゴリズムを図2に示す。ここで PowerSpectrum とは、FFT 後の信号値の自己相関を示した値であり、FFT 後の各複素数値を  $a + bi$ 、PowerSpectrum を  $p + qi$  と表現した時、以下の式で求められる。

$$p = \sqrt{a^2 + b^2} \quad q = \sqrt{ba - ab} = 0 \quad (1)$$

### 2.2 SPEC

SPEC とは最大周波数の事を指し、FFT による算出の後、もっとも強い周波数と定めている。SPEC の算出アルゴリズムを図

- 
- Step1 海中マイクから入力される音声を 50kHz でサンプリングし、Click が含まれる 256pt 分のデータを取り出す
  - Step2 ハイパスフィルタにより不要な周波数をカットする
  - Step3 2 乗することによりデータの特徴点を強調する
  - Step4 256pt の音声の後に無音の 256pt のデータを追加し 512pt の一続きのデータとする
  - Step5 512ptFFT により周波数領域に変換する
  - Step6 PowerSpectrum を求める
  - Step7 対数をとる
  - Step8 IFFT により時間領域に戻す
  - Step9 絶対値をとる
  - Step10 初期到達信号以外の極大値をとるピーク点を算出する
  - Step11 ピーク点を IPI として出力する
- 

図2 IPI 算出アルゴリズム.

- 
- Step1 海中マイクから入力される音声を 50kHz でサンプリングし、Click が含まれる 256pt 分のデータを取り出す
  - Step2 256ptFFT により周波数領域に変換する
  - Step3 PowerSpectrum を求める
  - Step4 不要な帯域は 0 で置き換えカットする
  - Step5 最大となるピーク点を算出する
  - Step6 ピーク点を SPEC として出力する
- 

図3 SPEC 算出アルゴリズム.

3に示す。SPEC は補間等は行わず整数値として演算する。将来的にはピーク近傍からピーク推定を行い、実数値として演算する事も考えている。また、マッコウクジラの鳴き声である Click は、周波数帯域が 1kHz-10kHz に広がっているため、不要な帯域は PowerSpectrum 演算後にカットするものとする。

### 2.3 ASPEC/NRG

ASPEC(平均周波数)は、次の式で求められる。

$$ASPEC = \frac{\sum(f \times P(f))}{\sum P(f)} \quad (2)$$

ここで  $f$  は周波数であり、 $P(f)$  とは周波数  $f$  における PowerSpectrum である。全ての周波数の成分を加算したもの、つまりエネルギーを分母とし、各々の周波数の値と PowerSpectrum 値を乗算したものを全て加算したものを分子とすることによって求められるパラメータである。

この値はクジラの個体によって特徴が異なるため、複数のクジラが群れているときの識別に利用できる。なお NRG は FFT を施す範囲の総エネルギー値であり、これは上記式の分母に相当するため、この2パラメータは同時に算出する事が可能である。ASPEC を算出するためのアルゴリズムを図4に示す。

## 3. 位置情報推定アルゴリズム

マッコウクジラの個体識別とは別に、AUV が進行する方向を定める必要があるため、海中音響手法で方向推定に用いられる SBL, LBL について本節は解説を行う[7]。

### 3.1 SBL

Short-BaseLine(SBL)は、数 cm から数十 cm の間隔で海中マイクを配置し、入力される音の時間差をとることにより、音源

- Step1 海中マイクから入力される音声を 50kHz でサンプリングし、Click が含まれる 256pt 分のデータを取り出す
- Step2 FFT により周波数領域に変換する
- Step3 PowerSpectrum を求める
- Step4 不要な帯域は 0 で置き換えカットする
- Step5 すべての PowerSpectrum 値を加算する
- Step6 周波数値と PowerSpectrum 値を乗算し、すべての値を加算する
- Step7 Step5 と Step6 によって求まる 2 値を除算する
- Step8 Step7 の除算後の値を ASPEC, Step5 の値を NRG として出力する

図 4 ASPEC/NRG 算出アルゴリズム。

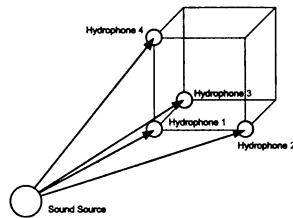


図 5 Short-BaseLine 概念図。

- Step1 海中マイクから入力される音声を 50kHz でサンプリングし、Click が含まれる 256pt 分のデータを取り出す
- Step2 各々の入力を FFT により周波数領域に変換する
- Step3 4つの入力を元に CrossSpectrum を求める
- Step4 IFFT により時間領域に戻す
- Step5 各々の CrossSpectrum のピーク近傍 5 点を求める
- Step6 近傍 5 点から補間を行い正確なピークを求める
- Step7 最小二乗法により 3 次元ベクトルを作成する

図 6 SBL 方向算出アルゴリズム。

の方向を推定する手法である。海中マイクの配置等、SBL の概念図を図 5 に示す。

今回提案するシステムにおいて、AUV 単体では大きなベースラインを確保できないため、SBL を用いて方向算出を行う。算出のアルゴリズムを図 6 に示す。CrossSpectrum とは、1 対の音声を FFT 後の信号値において相関をとる計算によって求められ、1 つの値を  $a + bi$ 、もう 1 つの値を  $c + di$  とし、CrossSpectrum を  $p + qi$  とすると、以下の式で表される。

$$p = \sqrt{ac + bd} \quad q = \sqrt{ad - bc} \quad (3)$$

また、FFT を行った後相互相関をとり、さらに IFFT で元に戻したものをケブストラムと呼ぶ。

### 3.2 LBL

Long-BaseLine(LBL) は、数十 m からさらに長距離のベースラインを持つことにより三角測量を行う手法である。SBL ではベースラインが短く、誤差が大きくなるため距離推定ができないが、SBL と組み合わせることにより精度が向上する。今回のシステムにおいて、AUV 単体の SBL で方位推定は可能であるが距離推定ができないため、AUV の運用母船にも SBL 用の海中マイクアレイを用意し、それぞれが方位推定を行った後、音

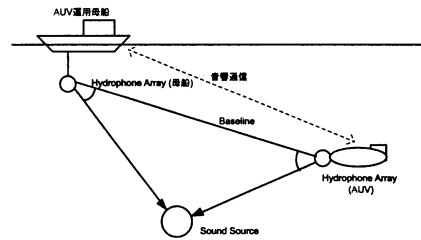


図 7 Long-BaseLine を用いた観測の概念図。

響通信<sup>(注1)</sup>により距離推定を行い、追跡するための指標とする。LBL を用いた観測の概念図を図 7 に示す。

LBL では三角測量を用いて位置推定を行う。先述の SBL で作成した 3 次元ベクトルを元に、最小二乗法を用いて 2 基のマイクロホン群からの方向を推定する。本稿で提案する手法においては、LBL は用いているが、SBL のピーク近傍 5 点の算出までを FPGA に実装することとしているため、アーキテクチャ内にはこの LBL の演算は含まれない。

## 4. クジラ解析システムアーキテクチャ

本節では、第 2 節、第 3 節で述べてきたアルゴリズムに沿って演算を行い、FPGA に搭載するマッコウクジラ解析システムのアーキテクチャの概要を示す。まず FPGA を採択する理由を述べ、全体のアーキテクチャ、さらにその中で特殊な機構について詳細を示す。

### 4.1 FPGA の採択

第 1 節でも述べたが、AUV 制御用 CPU のみによる解析ではリアルタイム性という面において難がある。並列度を上げやすいという理由で、ASIC や汎用 DSP による実現も考えられるが、これらの外部の RAM や ROM を含めたシステム全体の再構成が難しいため、海洋状況によってフィルタの操作等、変更する箇所が多い今回のシステムには不適であると考えられる。

FPGA を採択したのは、各々の演算中に必要なハイパスフィルタ等のカットオフ周波数、係数等、各演算器の設定変更が再構成により容易に行え、海洋上の S/N<sup>(注2)</sup> の状況に応じて素早く対処できるという面で利点があると言える。内部に RAM も内包していることから、システム全体の構成変更も柔軟に行えるためである。リアルタイム性という意味でも、並列化が容易であることから、システムの要件を満たしている。

### 4.2 システム全体の構成

FPGA に搭載するシステムの構成を図 8 に示す。今回の実装するアルゴリズムにおいて共通となる演算は、FFT 演算と Spectrum 演算である。ここで、PowerSpectrum の演算と CrossSpectrum の演算は入力される値の違いのみで演算は同等であるため、同じ演算器で計算させることとしている。

また、FFT は 4ch 同時に演算できるようにし、各々のパラ

(注1)：海中では電波、光が届かないため、音によって通信を行う。これを音響通信と呼ぶ。

(注2)：Signal to Noise ratio. 信号と雑音の比であり、この値が高ければノイズレベルが低いことになる。

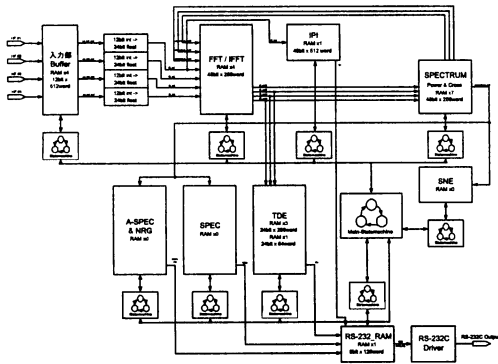


図8 システムの全体構成.

メータ演算の手前で一齐に演算する。また IFFT は FFT と同様の演算器で行えるため、同じ演算器で IFFT も演算させる。IPI の演算においても FFT、PowerSpectrum の演算が含まれるのだが、要求される精度が他のパラメータと異なるため、演算ステップ数が多い FFT 演算器を別に用意している。中央に配置されている FFT は 256pt、IPI 内部の FFT は 512pt である。

まず 1ch のみを用いて、FFT、PowerSpectrum の演算を行い、演算対象 256pt の総エネルギーを全加算によって求める。これは、エネルギー計算が 1ch 分のデータで十分評価できるためである。現在までの平均エネルギーと閾値を乗算したものと、この総エネルギーを比較し、閾値を超えた場合のみ 4ch のパラメータ演算を行う。この演算対象 256pt は継ぎ目なく入力されたデータを対象とし続けるため、バッファリング用の RAM が音声入力部に配置されている。

FFT、PowerSpectrum 演算の後、各々のパラメータ演算部から、AUV への出力部となる RS-232C 用の RAM に各種パラメータが保存され、全てが出揃ったら RS-232C ドライバを介し、AUV へデータの出力がなされる。この時出力される値は以下の通りである。

- IPI, SPEC 整数 8bit × 2
- A-SPEC/NRG 浮動小数点 24bit × 2
- SBL 用ピーク点アドレス 整数 8bit × 6
- SBL 用ピーク近傍 5 点値 浮動小数点 24bit × 5 × 6

#### 4.3 24bit 浮動小数点データ型

今回求められているパラメータの多くはピーク点算出が主であり、FFT の解像度によって精度が固定化されてしまうものが大半である。つまり、量子化レベルはそれほど重要ではない。しかし、入力が 12bit A/D であるが、固定小数点 12bit のまま演算を行うと、FFT その他の演算で乗算と加算を繰り返す事によるオーバーフロー、アンダーフローが多発してしまう。また、12bit 以上の固定小数点などデータ長拡大を行うと、演算器の占める面積が肥大化し実装が困難になってくる。今回はこれを解決するデータ型として、24bit 浮動小数点データ型を提案する。

今回は特殊な 24bit 浮動小数点というデータパスで構成している。一般的な IEEE754 形式の 32bit 浮動小数点との比較を図 9 に示す。指数部が存在するためオーバーフロー、アンダー

IEEE754 Floatpoint Data Type

|    |    |    |
|----|----|----|
| 1  | 7  | 24 |
| 符号 | 指数 | 仮数 |
| 1  | 7  | 16 |

Our Data Type

図9 24bit 浮動小数点データ型.

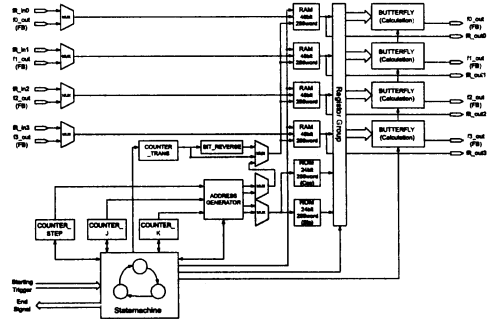


図10 FFT 演算器構成.

フローは抑えやすく、仮数 bit が 16bit とコンパクトなため、浮動小数点加算、乗算の演算器を省面積とすることができる。

#### 4.4 FFT 演算器

単純な構成の FFT はバタフライ演算と、その演算を行う対象データのアドレス算出の 2 つの演算が交互に行われる。つまり、アドレス演算器とバタフライ演算器は 1 対で配置されることになるが、今回提案するシステムにおいては、4ch の入力音に対し同時に並列でバタフライ演算を施し、かつアドレス演算、コントローラ、ROM は共有化する構成をとっている。この構成を図 10 に示す。コントローラ、ROM などは演算器にとってオーバヘッドとなりうる箇所であるが、4ch 分のバタフライ演算器に対し 1 つのコントローラ群で済むため、省面積化を実現する上に、実行速度は並列化により単純な構成の FFT より単純に 4 倍高速となる。

現状ではパイプライン等は行わず、アドレス演算の後データフェッチ、バタフライ演算、書き戻しの順で逐次行われるようになっている。パラメータの算出頻度は多ければ多いほどジラの追跡の精度は向上するため、全体の演算のうち、90%以上を占める FFT を並列演算として高速化することにより、システム全体のスループットの向上を達成できる。

#### 4.5 演算器分散構成

今回のアーキテクチャでは FPGA の内部に分散して存在する BlockRAM を、データパス用の RAM として用いるため、外部の RAM や ROM を参照する必要がない。従ってプロセッサ構成はとらず、各々の演算器がそれぞれ独立して演算を行い、演算器それぞれが別の RAM を有する形となっている。冗長ではあるが、BlockRAM の配置場所は FPGA 内部で固定であり、演算器ごとに RAM が存在することにより FPGA 内の配線が集中せず、結果的に配線長を抑えることができ動作速度を向上させることができる。

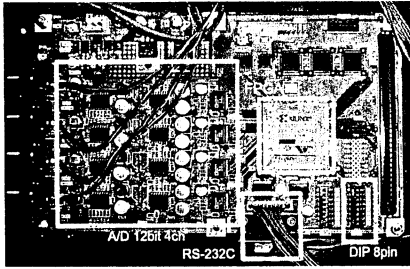


図 11 FPGA 搭載ボード概観.

表 1 FPGA 搭載ボード仕様.

|      |   |
|------|---|
| FPGA | Xilinx Virtex2 XC2V3000<br>(約 300 万システムゲート 14,336 Slices) [9] |
| 寸法   | 120mm × 240mm   |
| 入力   | 12bit A/D 4ch   |
| 出力   | RS-232C 57,600bps (入力可)                                       |
| その他  | 内部設定用 DIP 8pin  |

## 5. 評価

実際に FPGA に前節で述べたアーキテクチャを実装し、評価を行う。本節では、実装後の面積・動作速度の面からアーキテクチャを評価し、また実際に Click 音声を FPGA ボードに入力した際の結果の提示と、考察を行う。

### 5.1 FPGA 搭載ボード

実際に海洋での運用を踏まえた FPGA 搭載の専用ボードの開発を行った。ボードの概観を図 11 に示し、仕様を表 1 にまとめる。AUV の搭載スペースは限られており、できる限りコンパクトなボードとする必要があるため、RAM、ROM、マイクロプロセッサなどの外部処理装置は配置していない。RAM と ROM は FPGA 内部の BlockRAM を用いて実現する。

ボードと AUV との通信は RS-232C を介して行われる。通信機構を RS-232C としたのは開発の容易性によるものである。また、量子化レベルがパラメータ演算に大きな影響を与えないと判断したため A/D は 12bit とした。RS-232C による入力も可能であるが、今回の FPGA 内アーキテクチャはプロセッサ型の構成ではなく、演算器と RAM が分散し各々が独立して自動的に動作しているため、コード入力の必要はなく入力は用いていない。

### 5.2 面積

XC2V3000 向けに論理合成を行い、各演算ブロックが使用した Slice 数の比較を行う。ターゲットデバイスは Xilinx Virtex-2 XC2V3000 とし、論理合成は Xilinx ISE 6.2i を用いた。結果を表 2 に示す。面積の面からみた場合、FFT 演算が含まれるブロックが全体の多くを占めている事がわかる。これは、4ch 分の演算を同時に行う並列アーキテクチャにより、バタフライ演算を行う前に一度 BlockRAM からレジスタに取り出すため、この多く配置されたレジスタが肥大化の原因と考えられる。

また最大値探索が主なパラメータ演算部は非常に小さくなっている。ここで、浮動小数点演算を含む SPECTRUM と、SBL

表 2 各演算ブロックの消費面積.

| ブロック名     | 使用した Slice | 全 Slice 数に占める割合 |
|-----------|------------|-----------------|
| FFT/IFFT  | 2713       | 18.92%          |
| SPECTRUM  | 170        | 1.19%           |
| ASPEC/NRG | 948        | 6.61%           |
| IPI       | 3821       | 26.65%          |
| SPEC      | 46         | 0.32%           |
| SBL       | 170        | 1.19%           |
| Other     | 1866       | 13.02%          |
| Total     | 9734       | 67.90%          |

表 3 各演算ブロックの処理時間.

| 処理内容      | 必要な処理時間 ns |
|-----------|------------|
| FFT/IFFT  | 1,409,100  |
| SPECTRUM  | 1,228,950  |
| SPEC      | 38,500     |
| ASPEC/NRG | 39,450     |
| SBL       | 84,700     |
| IPI       | 10,319,150 |

用の演算を行う部位が同じ Slice 数であるのは、BlockRAM が 18bit×18bit の乗算器としても利用できるため、浮動小数点演算器による面積の増大が押さえられているためである。

IPI 演算部が非常に大きいのは、フィルタリング用の 256ptFFT/IFFT 演算器と、ケプストラム演算用の 512ptFFT/IFFT 演算器を別に持っているためである。しかし、IPI は 1ch の演算であるため、演算器数は 4ch の FFT 演算器よりも少なくなるため、FFT 演算ブロックの 2 倍以下で抑えられている。

### 5.3 処理時間

今回のシステムは時間当たりのパラメータ解析頻度をできる限り密にする必要があるため、AUV が追跡を行うために、リアルタイムで解析できることが前提である。よって FPGA におけるスループットがリアルタイム解析に支障ないか評価する必要がある。FPGA 上の各演算器が 256pt の解析対象 1 つを処理するのに必要な処理時間は表 3 のようになった。なお、評価には ModelSim XE II 5.7g を用いており、配置配線後の遅延制約を満たす 20MHz でシミュレーションしている [5]。

Spectrum 演算が FFT 演算と近い処理時間を要するが、これは FFT が 4ch 同時に演算を行っているのに対し、Spectrum 演算は PowerSpectrum 演算の後、CrossSpectrum6 パターンを順に実行しているためである。つまり、1ch 分の演算に関しては Spectrum 演算は FFT 演算よりも処理時間は圧倒的に小さなものとなる。

よって、全体の処理のうち FFT 演算が最も処理時間を要し、その演算を 4 回含む IPI の演算が支配的であることは明らかであると言える。フィルタリングのために 256pt の FFT と IFFT を行い、さらに 512pt の FFT と IFFT を行う必要があるため、結果的に FFT4ch 演算ブロックの処理時間の約 7.3 倍となっている。そこで、IPI の演算は他のパラメータの FFT の演算と同時に並列で演算開始とすることにより、全体の処理時間が IPI の処理時間とほぼ等しくなるように制御部を作成した。

リアルタイム性の面で、実際にシステムを 20MHz で動作さ

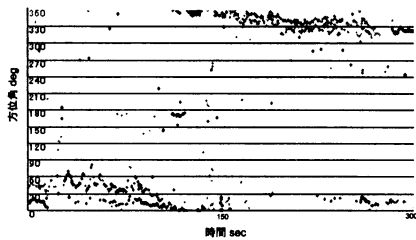


図 12 方位角の解析結果.

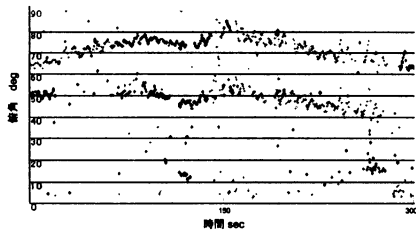


図 13 俯角の解析結果.

せた場合、1回の解析に要する処理時間は、IPIの処理時間と等しく10msほどとなり、リアルタイムシステムとして要求されている処理時間は1回あたり20msほどであるため、リアルタイム性は実現できている。

#### 5.4 音声解析結果

FPGA実装後、海洋で採取したマッコウクジラのClickを入力し、出力されたSBL用パラメータを元に方位角と俯角<sup>(注3)</sup>の解析を行った。結果を図12、13に示す。

この解析サンプルは、実際に目視で確認したクジラ3頭のClickを含んでおり、俯角の結果で言えば70度付近、50度付近、20度付近に存在する。俯角が浅いクジラに関してはノイズの影響から鮮明に現れていないが、他の2頭は俯角、方位角とも鮮明に追跡できていることがわかる。

なお、俯角、方位角以外のパラメータについても、ソフトウェアによる同等のアルゴリズムを用いた演算結果と合致しているため、システムの整合性は取れていると判断した。

#### 5.5 評価に対する考察と今後の展望

面積、スループットの評価において今後改良する点としてまず挙げられるのは、フィルタリングを行う際にFFTを介した手法ではなくFIR型のフィルタにより実装を行う事である。FFTによるフィルタの場合、IFFTも含め2.8msの処理時間を要するが、これを仮にFIR型100段と置き換えると、約10 $\mu$ sの処理時間でフィルタリングが行えるため、大幅な処理時間短縮が行える。最も処理時間の長いIPI演算を高速にすることにより、全体のスループット向上を行うことができ、パラメータ演算の時間当たりの密度が上がるため、AUVの追跡精度の向上が実現する。

また、FFT単体について、アドレス演算、データフェッチ、バ

タフライ演算、データ書き戻しの4ステップを順に行うのではなく、パイプライン化を行うことによって、アドレス演算とバタフライ演算を並行して行うことが挙げられる。現在これらの演算は、アドレス演算が3Clock、バタフライ演算が12Clock、データのフェッチと書き戻しがそれぞれ4Clock必要としているため、現状は1対のFFT演算に23Clock必要としている所を、20Clockに押さえることができる。また、書き戻し用とフェッチ用のRAMを別に用意すれば、フェッチと書き戻しも同時に行えるため、16Clockで演算ができる。ただし単純に必要なBlockRAMは2倍となる。

なお、処理時間の評価には示していないが、RS-232Cの通信がスループット低下の原因となり、リアルタイム性を阻害している。通信速度を向上することは難しいため、送出するデータ量の削減が解決策となる。SBL用の送出データは、現状では近傍5点の浮動小数点値6つを送出しているが、5点からのピーク補間と最小二乗法による方位推定までの演算をFPGAで行うことにより、送出データは現状の112Byteから14Byteまで削減可能である。

## 6. まとめ

本稿では、マッコウクジラ個体識別及び方位推定のためのアルゴリズム、及びそのアルゴリズムの実装と評価を行った。既存のAUV制御用CPUのみの解析システムではできなかったマッコウクジラの追跡が、今回提案したFPGAによるリアルタイムシステムの実装によって可能となる。

## 文 献

- [1] J. C. Goold and S. E. Jones, "Time and Frequency Domain Characteristics of Sperm Whale Clicks," J. Acoust. Soc. Am, Vol.98, No.3, pp. 1279-1291, Sep. 1995.
- [2] J. C. Goold and S. E. Jones, "Signal processing techniques for acoustic measurement of sperm whale body lengths," J. Acoust. Soc. Am, Vol.100, No.5, pp. 3431-3441, Sep. 1996.
- [3] C. Levenson, "Source level and bistatic target strength of the sperm whale, *Physeter catodon*, measured from an oceanographic aircraft," J. Acoust. Soc. Am, Vol.55, pp. 1100-1103, 1977.
- [4] C. Levenson, "Vocal behavior of male sperm whales: Why do they click?," J. Acoust. Soc. Am, Vol. 109, pp. 2554-2559, Dec. 2001.
- [5] Mentor Graphics ModelSim, <http://www.model.com/>
- [6] J. Newcomb, R. Fisher, R. Field, G. Rayborn, S. Kuczaj, G. Ioup, J. Loup, and A. Turgut, "Measurements of ambient noise and sperm whale vocalizations in the northern gulf of Mexico using near bottom hydrophones," Oceans, Vol.3, pp. 1365-1371, Oct. 2002.
- [7] R. J. ユーリック, "海中音響の原理," 共立出版, 1978.
- [8] T. Ura, R. Bahl, M. Sakata, J. Kojima, T. Fukuchi, J. Ura, K. Mori, T. Nakatani, Y. Nose, H. Sugimatsu, "Development of AUV-Based System for Acoustic Tracking of Diving Sperm Whales," OCEANS'04 MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04, pp.2302-2307, Nov. 2004.
- [9] Xilinx Virtex-2 FPGA Data Sheet, <http://direct.xilinx.com/bvdocs/publications/ds031.pdf>

(注3) : AUVを基点とし、3次元の各方位を(x,y,z)の軸で表すとした場合、x-y平面における角度を方位角としている。またz軸方向の見下ろし角度を俯角と呼ぶ。