

# FPGA コンポーネントを用いた水中ロボット制御の高速化

木村 仁美<sup>†</sup> 山科 和史<sup>††</sup> 大川 猛<sup>††</sup> 大津 金光<sup>††</sup> 横田 隆史<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 宇都宮大学工学部情報工学科    <sup>††</sup> 宇都宮大学大学院工学研究科情報システム科学専攻

## 1 はじめに

水中ロボットは、水中での保守点検、災害対応や安全保障、人間が困難とする水中作業など利用される範囲が広がりつつある。こういった利用に対して、外界の認識のためのセンシング技術や、外界に働きかけるためのハンドリング技術の高性能化が期待される。そこで我々では、水中ロボットの制御・処理の高速化や省電力化のために、ロボットシステムに FPGA を導入する研究を行っている。我々はこれまでに、少ない開発コストで FPGA をロボットシステムに統合するために、ロボット用の基盤ソフトウェアである ROS (Robot Operating System) に準拠して FPGA を用いた処理のコンポーネント化を提案した [1]。

本稿では、水中ロボット制御処理の高速化を目的として、FPGA コンポーネント技術を用いてジャイロ・加速度センサの処理を高速化することを検討する。

## 2 水中ロボットへの要求と小型化における問題

水中ロボットが利用される範囲が広がるに従って、カメラ画像を利用した SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)・3次元画像マッピングによる水中調査や、採泥や水中物体のサンプル採取など、水中ロボットへの要求が高度になってきている。また、水中の複雑な建造物・地形での運用の際に有用であり、緻密な保守点検や安全保障が可能となるため、水中ロボットの小型軽量化が期待されている [2]。従来利用されてきた水中ロボットには大型高重量なものが多かったが、近年の電子機器の小型・高性能化などにより、複数の計算機の搭載や、複数・複合センサの搭載が可能となり、水中ロボットの小型軽量化が可能になってきた。しかし一方で、ロボットの小型化に伴い、バッテリーの小型化により電力の制約が厳しくなるだけでなく、ロボットの姿勢が不安定になりやすくなる問題がある。そのため、水中 SLAM や採取作業などの高度な要求に応じつつ、消費電力を抑えながらも、複数のセンサやカメラからの大量のデータを高速に処理し、水中姿勢制御を安定化させる必要がある。

水中姿勢制御の安定化ためには、センサの特性を考慮して姿勢角推定の精度を上げる必要がある。単一のセンサよりも信頼性の高い新たな情報を得るために複

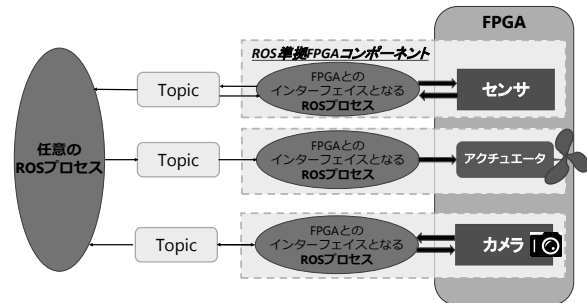


図 1: ROS 準拠コンポーネントの概念

数のセンサの出力を組み合わせたことをセンサフュージョンという。センサフュージョンは複数の独立したセンサの測定データを使用するため並列性がある [3]。センサの数が増えた場合、センシング時間や計測データの処理時間が増大するという問題がある。そのためセンシングの並列化や処理の高速化を図ることが重要である。

姿勢角推定にはモーションセンサ (加速度・ジャイロ) が用いられることが多い。加速度センサは並進運動したとき重力加速度以外の加速度がかかり出力にズレが生じるが、回転運動のみなら安定性のある出力が得られる。一方で、ジャイロセンサには、温度変化の影響でゼロ点が徐々に変化する特性 (ドリフト) や積分誤差の発生により誤差の蓄積があるが、並進運動の影響を受けないという利点がある。並進運動やドリフトの影響を受けにくい姿勢角推定を行うには、これらのセンサの特性をセンサフュージョンにより統合・複合する必要がある。

## 3 FPGA コンポーネントによるセンシングの高速化

上記の問題を解決するために、水中姿勢安定制御の基礎部分である加速度・ジャイロのセンサ入力と姿勢角推定を行う ROS 準拠 FPGA コンポーネントを開発し、センシングの高速化を図る。

### 3.1 ROS 準拠 FPGA コンポーネント

ROS (Robot Operating System) とは、ロボット用のアプリケーション作成を支援するライブラリやツール、ビルドシステムなどを提供するソフトウェアフレームワークである。Publish (配信)/Subscribe (購読) メッセージングモデルに基づいており、処理のまとまりである ROS プロセス同士は結合性が低く、柔軟で動的なネットワーク構成が可能である。そのため、ロボットシステムへの機能の追加・変更が容易である。

先行研究 [1] の ROS 準拠 FPGA コンポーネント化と

Speed-up of underwater robot control with FPGA component

<sup>†</sup>Hitomi Kimura, <sup>††</sup>Kazushi Yamashina, <sup>††</sup>Takeshi Ohkawa, <sup>††</sup>Kanemitsu Ootsu, <sup>††</sup>Takashi Yokota,  
Department of Information Science, Faculty of Engineering,  
Utsunomiya University (<sup>†</sup>)  
Department of Information Systems Science, Graduate  
School of Engineering, Utsunomiya University (<sup>††</sup>)

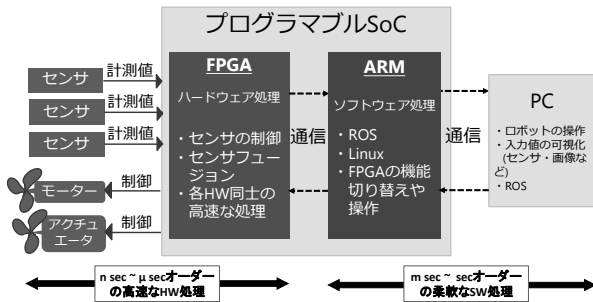


図 2: SW/HW 協調によるロボット構築の利点

は、FPGA を用いた処理を ROS の Publish/Subscribe メッセージングに対応したコンポーネントとすることである。これにより、ROS システムに高性能な FPGA を導入することが容易になる。ROS 準拠コンポーネントの概念を図 1 に示す。FPGA コンポーネント化により回路の再利用性を高め、ロボットシステムへ FPGA 回路の追加・変更をすることが容易になる。

ARM プロセッサを搭載した FPGA チップであるプログラマブル SoC (System-on-a-Chip) を用いた SW/HW 協調処理によるロボット構築の利点を図 2 に示す。プログラマブル SoC (ARM+FPGA) を用いたロボット構築の利点は、センサやモーターの制御といったハードウェア処理は nsec~usec オーダーで高速に行うことができ、かつ、HW を意識せずに ROS から FPGA に渡す入力値を任意に決められることである。

### 3.2 加速度・ジャイロセンサ処理の高速化

SW/HW 協調処理の ROS 準拠 FPGA コンポーネントとして、加速度・ジャイロのセンサ処理の FPGA コンポーネント化を検討した。ARM 搭載のマイコン [4] および FPGA でモーションセンサを動作させた。FPGA 上には 1 つのセンサと SPI 通信を行い 3 軸加速度・3 軸ジャイロのセンシングを行う回路を実装した。検討対象のシステムを表 1 に示す。Xilinx 社製のプログラマブル SoC (ARM+FPGA) である Zynq-7020 を使用し、モーションセンサ (加速度・ジャイロ) には InvenSense 社の MPU9250 を使用した。

モーションセンサをマイコン (ARM) で動作させるとき、FPGA で動作させるときの処理時間の比較を図 3 に示す。マイコンを用いたセンシングの処理時間を分析した結果、加速度・ジャイロのセンシングにそれぞれ 217us、磁気のセンシングに 341us、センサフュージョンや角度変換の計算に 13us かかり、1 周期の時間は 1017us であった。これより、複数のセンシングを逐次で行うことに時間がかかることがわかる。

SPI モードでセンサを 1MHz の動作周波数で動作させたとき、3 軸を 1 回センシングするのに要する時間は約 125us であった。2 つの MPU9250 センサを用いて、SPI の最大動作周波数である 20MHz ( $I^2C$  通信の場合 400KHz) で並列に加速度とジャイロをセンシングした場合、6 軸分の測定データを約 7us で得ること

が可能である。すなわち、FPGA を用いることで複数のセンサの入力を並列化し、制御周期を大幅に短縮することができる。

表 1: 検討対象のシステム

	マイコン (ARM)	FPGA
動作環境	ST Nucleo Board STM32F401RE (ARM Cortex-M4 コア)	Xilinx 社 Zynq7020
動作周波数	86MHz	100MHz

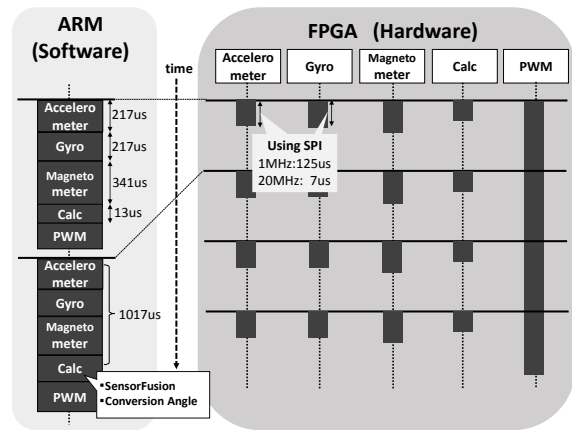


図 3: センシングの処理時間の比較

## 4 まとめ

本稿では、小型水中ロボットの姿勢制御の安定化のために、FPGA コンポーネント技術を用いた加速度・ジャイロセンサのセンシングとセンサフュージョンの実装方法について検討した。複数のセンサ入力を FPGA を用いて並列化することで、センサフュージョンを含む制御周期を短縮することが可能である。今後は、センサ入力およびセンサフュージョン計算処理の並列化の効果を実証するため、センサフュージョンによる姿勢角推定の FPGA 回路の実装とコンポーネント化を進める。

### 謝辞

本研究は一部総務省 SCOPE(No.0159-0112) および JSPS 科研費 24500055, 15K00068 の援助による。

### 参考文献

- [1] Kazushi Yamashina et al.: "Proposal of ROS-compliant FPGA Component for Low-Power Robotic Systems —case study on image processing application—", Proc. 2nd International Workshop on FPGAs for Software Programmers (FSP 2015), pp.62–67, 2015.
- [2] 坂上憲光, 川村貞夫: "水中作業を実現するロボット研究の現状", システム制御情報学会 システム/制御/情報, Vol.59, No.6, pp.227–232, 2015.
- [3] 山崎弘朗, 石川正俊: "センサフュージョン-実世界の能動的理解と知的再構成-", コロナ社, pp.6–24, 1992.
- [4] Kris Winer: "ARMmbed MPU9250AHRs", <https://developer.mbed.org/users/onehorse/code/MPU9250AHRs/>, (2015/12/21 アクセス).