

A-04

リアルタイム粒子追跡システムの FPGA ボード試作

田窪 佑貴†
Yuki Takubo神戸 尚志‡
Takashi Kambe

1. はじめに

現在、科学技術の分野で流れは様々な場面で出現し、流れ現象の解明と制御が科学技術の新たな展開のキーテクノロジーとなっている。流れを観測するために、従来は観測点となる場所にセンサを設置し、その反応を測定する手法がとられてきた。しかしこの方法は観測可能な点が限られ、必ずしも精密な測定が行えるとは限らなかった。これに変わる手法として、トレーサと呼ばれるマーカ（粒子）を流れ場に挿入することで可視化を行い、これにデジタル画像処理技術を加え、流れ場の瞬時・多点の速度情報を抽出する PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法) と呼ばれる手法が提案されている。これは粒子追跡システムとも呼ばれ、流れ場を空間的に、多点同時に連続して測定することが可能である点で優れている。

高精度多点同時解析のアルゴリズムとして、粒子マスク相関法（以下 PMC 法: Particle Mask Correlation Method 法と呼ぶ）、およびカルマンフィルタ (Kalman-filter) と χ^2 検定 (Chi-square Test) を組み合わせた KC 法を用いた技術がある。PMC-KC 法は最高精度レベルの抽出・追跡能力を持つ反面、高度な処理を多用し、解析に多大な時間を要する。

筆者らは PMC-KC 法を元に、システムを設計し、処理の高速化、システムの小規模化を進め、高性能カメラと統合することによりリアルタイム画像解析システムを構築することを目指している。このシステムは画像中に捕らえられた膨大な数のトレーサ粒子の移動を自動的に追跡し、高性能カメラが流れ場の撮影を行うと同時に、流れ場の計測をリアルタイムに行うことが可能となる。

本研究では、PMC 法と KC 法のハードウェア化と、粒子追跡結果をディスプレイ上に流速に合った矢印を表示させるインターフェース回路を、FPGA ボード上に試作し、その評価を行う。

2. 粒子追跡技術

本章では、主に PMC 法と KC 法の概要について述べる。

計測は水中の粒子画像を 1/15[s] 間隔で撮影する。撮影画像は x 軸方向 1008pixel、y 軸方向 1018pixel の 8bit 輝度である。図 2-1 はある時刻の粒子の流れを、粒子追跡システムを用い、追跡した様子である。

PMC 法は“テンプレートマッチング法”をもとにした粒子抽出法である。粒子画像は対称な二次元正規分布で近似できるものとし、これをマスク(テンプレート)として対象画像上に重ね、相関係数を計算する。マスクと粒子画像の形状が等しければ、輝度は違っても相関係数はほぼ 1 になる。マスクを撮影画像上で走査させ、相関係数を計算する。その値が、ある閾値以上になる部分に粒子が存在するとみなし、粒子位置を求める。

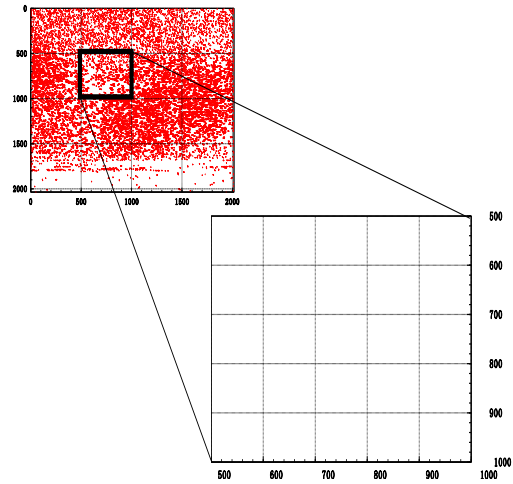


図 2-1 粒子追跡技術

相関値計算の式は(2.1)式で表される。

$$r = \frac{\sum_{i,j=1}^{n \times m} (I_{i,j} - \bar{I})(M_{i,j} - \bar{M})}{\sqrt{\left[\sum_{i,j=1}^{n \times m} (I_{i,j} - \bar{I})^2 \right] \left[\sum_{i,j=1}^{n \times m} (M_{i,j} - \bar{M})^2 \right]}} \quad (2.1)$$

n, m : 水平, 鉛直相関領域サイズ

i, j : 水平, 鉛直位置

$I_{i,j}$: 撮影画像の輝度値

\bar{I} : 撮影画像の輝度値の平均値

$M_{i,j}$: マスク画像の輝度値の平均

\bar{M} : マスク画像の平均値

PMC 法により抽出された粒子情報を用い、カルマンフィルタ (Kalman-filter) 法 (粒子情報予測) と χ^2 検定法 (粒子の同定) を用いて粒子追跡を行う。

ある時刻 t の粒子座標、速度、加速度などの状態量から、次時刻 $t+1$ の状態量がカルマンフィルタによって推定出来る。その推定値と観測値から、粒子を特定する。この操作を繰り返すことで、粒子を時々刻々と追跡する。粒子を同定するのに χ^2 検定を用いる。

3. PMC-KC 法のハードウェア化

PMC 法内の相関値計算を実行する回路に対し、処理時間、回路規模について最適化を行なう。最適化手法はデータアクセス、並列化、演算回路化、モジュール構成変更の 4 つの手法を用いる。また、KC 法については、カルマンフィルタと χ^2 検定の処理範囲の限定とパイプライン化を行う。

† 近畿大学大学院 総合理工学研究科エレクトロニクス系工学専攻

‡ 近畿大学 理工学部電気電子工学科

4. インターフェース回路

本章では3章で述べたPMC、KC回路をFPGAボードに搭載し、カメラや液晶ディスプレイとあわせて連続的に動作させるためのインターフェースについて述べる。

4.1 流速の表示回路

PMC-KC法回路は粒子情報(x軸座標、y軸座標、x軸方向の流速、y軸方向の流速)を出力する。その粒子情報を元に、粒子画像の適切な位置に適切な向きの矢印を表示する。メモリ量の削減と高速化のために、軸方向とY軸方向の流速の比を元に、矢印の向きを8方向に分類する。

次に、FPGA内にフレームメモリーを用意し、矢印情報を書き込み、粒子画像を重ね合わせ、ディスプレイへ出力する。

4.2 粒子情報の入力システム

粒子追跡システムをFPGAボードに組み込むための前段階として図4-1のシステム試作を行っている。

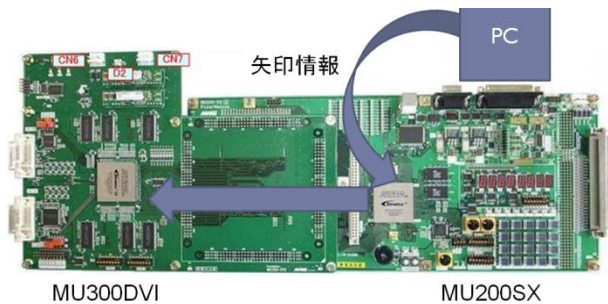


図 4-1 FPGA ボード

このシステムの動作手順は、

- ① 図4-1の右側にあるFPGAボードMU200SXに搭載されているFPGAのオンチップRAMにPCからKC法結果を書き込む。
- ② ①で書き込まれたデータをFPGAボードMU300DVIに送信する。MU300DVIには4.1で述べた表示回路を搭載する。

これによりPCからKC法結果を入力することができる。

5. 設計結果

PMC-KC法の高速化結果を表1に示す。

表1 PMC-KC法の高速化結果

回路名	処理時間 (ms)	回路規模 (ゲート)
PMC	34.0	176,226
KC	62.4	771,948

論理合成はDesignCompilerを用いた。回路の動作周波数は100(MHz)であり、論理合成に使用したライブラリはHITACHIO.18 μ mである。

流速の表示回路と粒子情報の入力システムは現在設計中である。

6. まとめ

本研究では、C言語設計におけるPMC、KC法の回路高速化手法を行い、これらの回路をFPGAボードに組み込むためのインターフェース回路は現在、設計中である。これらを統合することにより、粒子画像の連続的な入力とリアルタイムに粒子の流速を解析表示するシステムの開発を進める。

[参考文献]

- [1]可視化情報学会編：“PIVハンドブック”、森北出版株式会社、東京、1~4 (2002)
- [2]江藤剛治、竹原幸生、道奥康治、久野悟志：“PTVのための粒子画像抽出法に関する検討—粒子マスク相関法について—”、水工学論文集、40、1051~1057 (1996)
- [3]江藤剛治、竹原幸生、岡本孝司：“標準画像を用いた粒子マスク相関法とKC法の性能評価”、日本機械学会論文集、65、184~191 (1999)
- [4]Okada, K., A. Yamada, et al. “Hardware Algorithm Optimization Using Bach C,” IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences 85(4): 835-841, (2002).
- [5]中川寛誉、上津寛和、神戸尚志、“2次元ジグザグ走査による相関値計算回路の設計とその評価、”第21巻、第1号、pp18-27、システム制御情報学会論文集、(2008).
- [6]神戸尚志、上津寛和、酒井皓司、山田晃久：“相関値計算回路のアーキテクチャ設計とその最適化、”回路とシステムワークショップ、pp. 231-236, (2008).
- [7]神戸尚志、酒井皓司、上津寛和、上嶋智太郎：“リアルタイム粒子追跡のための階層的パイプライン回路設計、”電子情報通信学会 VLSI 設計技術研究会、(2008).
- [8]K. Jyoko, T. Ohguchi, H. Uetsu, K. Sakai, T. Ohkura, T. Kambe: “C-based Design of a Particle Tracking System,”SASIMI2006, pp. 92-96, (2006).