GPU計算を実装した全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式の開発と

コンクリートの超音波映像化への応用

1. はじめに

フェーズドアレイ探触子を用いた超音波映像化が 工業分野で普及しつつある.現在の映像化装置の多く は、現場における映像化の即時性を優先させるため、 リニアスキャンやセクタスキャンなどの方法¹⁾であ る. さて, 著者らは高精度に欠陥を再構成する手法と して全波形サンプリング処理 (FSAP:Full-waveform Sampling and Processing) 方式²⁾を提案している. FSAP 方式は、アレイ探触子の振動素子から個別に超 音波の送受信を行い、得られた波形を PC 上のメモリ にストアし,全ての波形パターンが得られた後に時間 遅延 (ディレイ)を考慮して集束ビームを作成する手 法である. ここでは FSAP 方式の現場への応用を意 図して, FSAP 方式に GPGPU (GPU による汎目的 計算)を導入し, 演算を超並列処理することで高速化 を試みた. GPGPUを実装した FSAP 方式を用いて、 コンクリート供試体中の欠陥の映像化の検証結果を 示す.

2. 全波形サンプリング処理方式の高速化

FSAP 方式の詳細については論文²⁾を参照して頂 くこととし、以下に GPGPU を導入した FSAP 方式 による欠陥再構成の概要を簡単に述べる. FSAP 方式 は、従来のように電子スキャン装置で集束ビームを制 御するのではなく、PCのメモリ上に超音波波形をス トレージし、そのデータを元に集束ビームを合成する 方法である.図-1に示すように、i番目の素子から送 信され、j番目の素子で受信された欠陥エコー $M_{ij}(t)$ をPCのメインメモリに波形記憶マトリクスとして保 存する. i と i の組み合わせを変えながら、各素子で 超音波を送受信していくと,波形記憶マトリクスの全 ての要素が埋まることになる. アレイ探触子の素子の 総数が N 個ならば, 組み合わせは N² パターン存在 する.この波形記憶マトリクスから波形データを選択 して PC メモリ上でディレイを設定し、映像化領域の 1 画素にビームが集束するように波形を合成する.

図-2(a) に波形取得から欠陥再構成までの流れを示 す.まずメインメモリの内容を GPU(デバイスメモ リ) ヘコピーする.著者等は波形処理としてデコンボ リューション処理を提案しているが,この処理は主と してフーリエ変換が時間を占める.波形記憶マトリク スの全パターンに FFT と逆 FFT を1度ずつ実行す るので,全部で2×N²回である.ここでは CUDA ラ イブラリの CUFFT を用いて高速に実行している. 愛媛大学大学院 学生員 〇堀口貴志,川村郡 愛媛大学大学院 正 員 岡崎慎一郎,中畑和之

次に、映像化したい部分の画素 (x 方向に k 番目, y 方向に l 番目に位置する画素) とアレイ探触子の中 心までの縦波の伝搬時間 T^0_{kl} (以下,基本伝搬時間と よぶ)を計算する.送信素子および受信素子から画 素番号 [k,l] までの伝搬時間と基本伝搬時間との差か ら,送信素子と受信素子におけるディレイ ΔT^i_{kl} , ΔT^j_{kl} が求められる.これらの和からトータルのディレイ $\Delta T^{ij}_{kl} = \Delta T^i_{kl} + \Delta T^j_{kl}$ が求まる. $M_{ij}(t)$ から ΔT^{ij}_{kl} だけ シフトさせ,それらを重ね合わせる.

$$F_{kl}(t) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} M_{ij}(t + \Delta T_{kl}^{ij})$$
(1)

上式からわかるように, x 方向に K 個, y 方向に L 個 の画素があるとすれば, 全部で N² × K × L 回の演算 が必要になる.図-2(b) に示すように,GPU 計算では 映像化領域を 2 次元ブロックに分ける.ブロックの中 でスレッドが定義され,全てのスレッドでは SIMD 演 算 (全て同じ命令を同時に実行する) が行われる.こ こでは,1つのスレッドが1つの画素の計算を担当し ている.最終的に,各画素で基本伝搬時間に相当する 振幅値を抽出し,色をつけて出力する.



FSAP 方式による4素子の場合の計測波形の記録

3. 高速化性能の検証

1 ブロック中の $x \ge y$ 方向のスレッド数 $(S_x, S_y) \ge x$ 変化させて、映像化に要する時間を調べた.この結果、 $S_x=16$, $S_y=32$ の時、最も映像化に要する時間が短い ことがわかった.このスレッドパターンを用いて、総 素子数 N=64 個、映像化範囲を 40mm×40mm、画素 数が K=400, L=400 で映像化を行ったときの時間は 0.27s であった.同じ映像化範囲・画素数を CPU で計 算した場合は約 46s であったので、約 170 倍の高速化 が得られた.図-3 に画素数を増加させた時の GPU と CPU の速度の比較を示す.画素数が増えると、CPU 計算による映像化時間の増大に比べて GPU 計算はあ まり変化しないことがわかる.



 図-2 GPU 計算を導入した FSAP 方式のフロー (a) と CUDA におけるブロックとスレッド (b)



図−3 画素数を変化させた場合の GPU と CPU による計 算時間の比較

4. コンクリート中の人工欠陥の映像化結果

ここでは,低周波アレイ探触子(公称中心周波数 400,200kHz)を用いたコンクリート(骨材の最大粒 径が10mm,骨材率は50%)の内部欠陥の映像化結 果を示す.なお,今回使用した周波数帯域において波 動分散による影響は顕著ではないことを事前に確認し ている.

中心周波数 400kHz のアレイ探触子 (素子ピッチは 5mm)を用いて、図-4の左に示すようなコンクリート 供試体中の欠陥 (スリット)を映像化した結果を同図 の右に示す.アレイ探触子は、コンクリート中の欠陥 の真上になるように設置した.欠陥深さは探触子設置 面から真下に約 80mm である.超音波の送受信に用い た素子数は 24 で、欠陥を含む 60mm×60mm の範囲 を映像化した.参考までに図-4の上に素子番号 12 で 超音波を送受信したときの波形を示す.35µs 付近の 波形が欠陥からのエコーに相当する.この結果から、 FSAP 方式によって欠陥の位置およびその形状を精度 よく映像化できることがわかる.

中心周波数 200kHz のアレイ探触子 (素子ピッチは 10mm)を用いて,図-5の左のコンクリート供試体中 の欠陥を映像化した結果を同図の右に示す.アレイ探 触子の設置位置は前節と同様にし,欠陥の深さは探触 子設置面から真下に約150mmである.超音波の送受 信に用いた素子数は16で,欠陥を含む70mm×70mm の範囲を映像化した.図-4の結果と比べると,超音波 の波長が大きいため,映像化結果は若干ぼやけている が,スリットの位置や大きさは確認できる.図-5の上 に素子番号8で超音波を送受信したときの波形を示 す.欠陥からのエコーは70µs付近に見られるはずで あるが,S/N比が小さく,エコーを識別することは困 難である.骨材や微小空隙からの散乱波成分はランダ ムノイズに相当するが,各送受信方向からの波形を複 数重ね合わせるFSAP方式では,ノイズが平均化さ れることで,欠陥部からの散乱波成分が相対的に高く なるため,欠陥の再構成が可能であると考えられる.



図-4 400kHz アレイ探触子を用いたコンクリート中のス リット欠陥の映像化結果



図-5 200kHz アレイ探触子を用いたコンクリート中のス リット欠陥の映像化結果

参考文献

- (1) 廣瀬壮一監修: 特集 フェーズドアレイ超音波探傷, 非 破壊検査, Vol.62, No.2, pp.75-101, 2013.
- 中畑和之,平田正憲,廣瀬壮一: 全波形サンプリング 処理方式を利用した散乱振幅からの欠陥再構成,非破 壊検査, Vol.59, No.6, pp.277-283, 2010.