

논문 2017-12-30

이동 목표물의 효율적인 위치 추정을 위한 파티클 필터 신호 처리의 GPU 기반 가속화

(GPU-based Acceleration of Particle Filter Signal Processing
for Efficient Moving-target Position Estimation)

김 성 섭, 조 정 훈*, 박 대 진*

(Seongseop Kim, Jeonghun Cho, Daejin Park)

Abstract : Time of difference of arrival (TDOA) method using passive sonar sensor array has normally been used to estimate the location of a concealed moving target in underwater environment. Particle filter has been introduced for effective target estimation for non-Gaussian and nonlinear systems. In this paper, we propose a GPU-based acceleration of target position estimation using particle filter and propose efficient embedded system and software architecture. For the TDOA measurement from the passive sonar sensor, we use the generalized cross correlation phase transform (GCC-PHAT) method to obtain the correlation coefficient of the signal using FFT and we try to accelerate the calculation of GCC-PHAT based TDOA measurements using FFT with GPU CUDA. We also propose parallelization method of the target position estimation algorithm using the GPU CUDA to update the state of each particle for the target position estimation using the measured values. The target estimation algorithm was verified using Matlab and implemented using GPU CUDA. Then, we realized the proposed signal processing acceleration system using NVIDIA Jetson TX1 as the target board to analyze in terms of the execution time. The execution time of the algorithm is reduced by 55% to the CPU standalone-operation on the target board. Experiment results show that the proposed architecture is a feasible solution in terms of high-performance and area-efficient architecture.

Keywords : Acceleration, GPU, CUDA, SONAR, Time of difference arrival (TDOA), Generalized cross correlation phase transform (GCC-PHAT), Particle filter

1. 서 론

수중 음향 신호는 수중의 특수한 환경에 기인한 신호의 간섭, 왜곡, 산란 현상을 이용하여 다양한 시공간적인 정보를 추출하는데 사용되어 왔다 [1].

*Corresponding Authors (jcho@knu.ac.kr, boltanut@knu.ac.kr.)

Received: Aug. 2 2017, Revised: Aug. 29 2017, Accepted: Sep. 4 2017.

S. Kim, J. Cho, D. Park: School of EE, Kyungpook National University

※ 본 논문은 교육부의 재원으로 한국연구재단의 기초과학연구 프로그램의 지원을 받아 수행된 연구결과임 (No. 2014R1A6A3A04059410, 2016R1D1A1B03934343).

본 연구는 수중에서 움직이는 목표물의 효과적인 은닉 탐지를 수행하기 위하여 수동 소나 센서와 파티클 필터를 이용한 신호 처리 과정을 가속 (Acceleration)하기 위한 GPU 기반 임베디드 시스템을 제안한다. 목표물의 위치 추정을 위한 알고리즘을 Matlab을 이용하여 검증하고, 이를 가속화하기 위한 알고리즘을 구현하여 NVIDIA 사의 Tegra 타겟 보드위에 신호처리 알고리즘을 적재 (Embedding)하였다. 그리고 보드 상에서 실제 동작 하는데 소요되는 알고리즘의 실행 시간을 분석하였다. 이를 통해 수중에서 은닉 물체의 움직임 추정을 위한 신호 처리 과정에 필요한 메모리 버퍼, 알고리즘 연산기의 하드웨어 구조 및 이를 구동하는 알고리즘의 적정 설계요소를 탐색하고 이를 계산하는 효율적인 임베디드 시스템을 구현한 사례 연구를

소개하고자 한다.

움직이는 목표물의 위치를 추정하기 위해 목표물에서 발생하는 음향 신호를 센서 배열 입력으로 수신하여 최소 3개의 음향신호 도달 시간차 (Time of difference of arrival, 이하 TDOA) 값을 측정하여 위치를 추정한다 [2, 3]. 이때, TDOA 측정치를 계산하는 방법에는 다양한 방식이 존재하며 일반적인 상관 계수 측정 방법 외에도 generalized cross correlation phase transform (GCC-PHAT) 방식을 이용한 TDOA 측정치를 구하는 방법이 존재한다. 특히 GCC-PHAT 방식은 위상 변환을 이용한 신호의 상관 계수를 구하는 방법으로, 일반적인 상관 계수를 구하는 방법에 비해 비교적 계산량이 적어 실시간으로 TDOA를 측정하는데 적합하여 임베디드 시스템에서의 가속화된 처리의 장점을 활용하는데 유리하다. 본 논문에서는 수중의 3차원 공간에서 각각의 수동 소나 센서 간의 GCC-PHAT를 이용한 TDOA 계산의 가속화를 위하여 GPU 기반의 TDOA 측정치 계산을 제안한다.

일반적으로 목표물의 위치 추정 방법에는 칼만 필터, 확장 칼만 필터, 무향 칼만 필터, 파티클 필터 등 다양한 필터들이 사용되고 있다. 그리고 TDOA 기반 목표물 추정 문제는 TDOA 측정치와 목표물의 위치 간의 비선형성으로 인해 목표물의 위치를 추정하는데 어려움이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 수중에서의 비선형, 비가우시안 시스템에 대해서도 강점을 가지는 파티클 필터를 적용한 목표물의 위치 추정 방식 기반 [4]의 가속화된 임베디드 시

스템을 제안한다. 파티클 필터는 오차가 존재하는 관측 값만을 가지고 시스템의 상태를 예측 몬테-카를로 기반 방법으로 파티클의 수가 충분하다면 최적 추정치에 접근하게 된다. 반면 파티클의 수가 충분하지 않다면 문제가 발생할 수 있다. 즉, 임베디드 시스템에서 정확한 목표물의 위치 추정을 위하여 파티클의 수를 증가시키는 것은 계산량이 증가한다는 것을 의미하고, 이는 필연적으로 시스템의 동작 속도에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 반복되는 각각의 파티클의 상태 갱신 과정과 가중치 계산 과정에서 발생하는 복잡한 계산을 고속으로 처리하기 위하여 GPU를 이용한 각 파티클의 병렬 처리 과정을 제안하여 연산이 효율적이면서도 가속화된 성능을 가지는 파티클 필터를 제안한다. 실험 부에서는 제안하는 기법을 NVIDIA Tegra GPU 기반 임베디드 보드에 직접 구현하여 목표물 위치 추정에 요구되는 신호처리 알고리즘의 실행시간에 영향을 주는 알고리즘-하드웨어의 상호 관계에 대해 분석을 하였다. 이를 통해 물체위치추정의 신호처리 가속화 과정의 성능-하드웨어 비용 간 균형점을 결정하는 사례연구로써 본 연구를 소개하고자 한다. 또한, 추후 연구로서 GPU에서 TDOA 측정치를 이용한 가속화된 목표물 위치 추정 알고리즘 동작의 실시간 처리 관점에서 접근하여 분석하고 연구를 진행할 계획이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 본 연구와 관련된 사례 연구들을 소개하고, III장에서는 구현한 제안하는 전체 시스템 및 각각의 시스템을

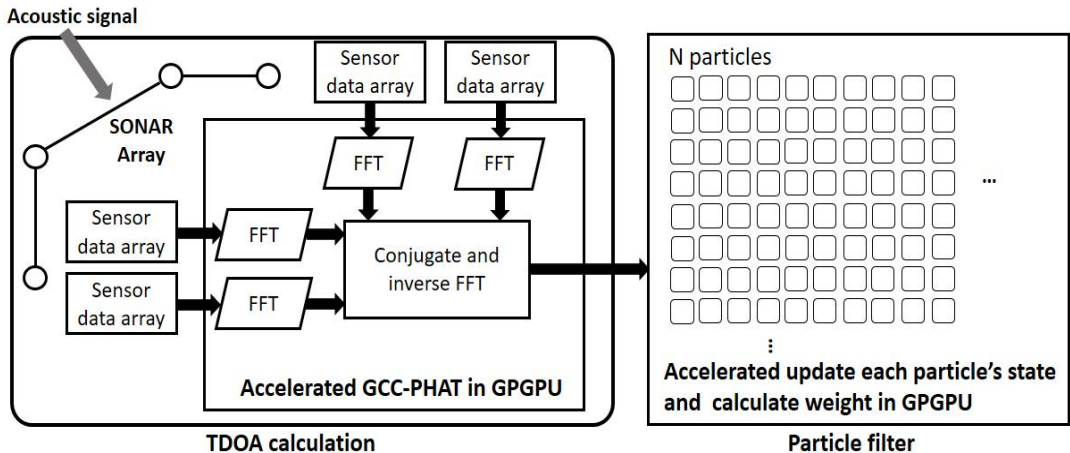


그림 1. 제안하는 GPU 기반의 가속화 알고리즘
 Fig. 1 Proposed GPU based accelerated algorithm

소개한다. IV장에서는 실제 타겟 보드에서 알고리즘을 동작시켜 실행 시간 관점에서 분석하고 마지막 V장에서 결론을 맺도록 한다.

II. 사례 연구

TDOA 측정치를 이용한 파티클 필터 연구는 기존에 진행 되었으나 고속 처리의 관점 보다는 알고리즘 및 잡음 환경에서의 잡음 처리가 중점이 되어 진행되었다 [5, 6]. 또한 수중에서의 TDOA를 이용한 목표물 추정 연구도 진행되었다 [4]. 본 연구에서는 GPU를 병렬 처리 기술을 이용한 가속화 관점에서 접근하여 알고리즘 구현 및 검증에 제안한다. GPU를 이용한 파티클 필터 동작을 위하여 본 논문에서는 TDOA 측정치를 이용한다. TDOA를 측정하기 위한 방법으로는 일반적인 상관 계수를 이용한 방법 외에도 GCC 알고리즘을 이용한 여러 방법들이 연구되어 왔다 [7-9]. 본 논문은 그중 GCC-PHAT를 GPU를 이용한 가속화된 계산을 구현하여 실시간성을 보장하는 TDOA 측정을 제안한다. 특히, GCC-PHAT를 푸리에 변환 계산 과정에서 접근하여 실시간 임베디드 시스템에서 고속으로 동작하도록 한다. 또한 기존의 진행된 GPU를 이용한 파티클 필터 동작 연구와 마찬가지로 [10, 11], 본 연구에서는 측정치로 GCC-PHAT를 이용한 TDOA를 사용하는 GPU 기반의 가속화된 파티클 필터 동작을 제안한다.

III. 본 론

1. 제안하는 구조

본 논문에서는 수동 소나 센서 배열을 이용한 파티클 필터 기반의 물체의 목표물 추정을 GPGPU를 사용하여 임베디드 시스템에서의 가속화를 목표로 한다. 3차원 공간에서의 목표물 위치 추정을 위하여 최소 3개의 TDOA 측정치가 필요하므로, 하나의 기준 소나 센서와 세 개의 소나 센서, 총 네 개의 센서를 이용하여 목표물의 위치를 추정하도록 하였다. 각각의 소나 센서로 입력된 신호들은 TDOA 측정치를 구하기 위하여 고속 푸리에 변환 과정을 거친다. 이때, 가속화된 GCC-PHAT를 위하여 각 소나 센서로부터 얻어진 데이터들을 GPGPU에서 고속 푸리에 변환을 거치도록 한다. 그 후 해당 데이터들은 커널에서 복소 곱셈 연산을 마저 수행한 후 푸리에 역변환 과정을 거치도록 하여 네

개의 소나 센서 배열로부터 3개의 TDOA 측정치를 구하도록 한다.

그리고 파티클 필터 과정의 다음 부분을 GPGPU를 이용하여 가속화하도록 제안한다. 구해진 TDOA 측정치를 이용하여 시스템의 상태 방정식을 기반으로 하여 현재 상태를 예측하고 갱신된 시스템의 상태로부터 관측치를 구한다. 그리고 예측된 측정치와 실제 측정치를 이용하여 각 파티클의 가중치를 계산한다. 본 논문에서는 이 과정에서 각 파티클의 상태 갱신과 이를 이용한 해당 파티클의 가중치 계산을 GPGPU를 이용하여 커널에서 병렬적으로 동작하도록 하여 고속으로 처리하도록 한다. 제안하는 가속화 구조는 그림 1과 같다.

2. GCC-PHAT

TDOA 측정치를 위한 GCC-PHAT 방식은 그림 2의 알고리즘으로 나타난다. GCC-PHAT 방식은 다음과 같다. 두 개의 수동 소나 센서로 입력되는 음향 신호를 $x_a[n]$, $x_b[n]$ 이라 하자. 이때, 각 신호를 고속 푸리에 변환하여 $X_a(f)$, $X_b(f)$ 를 구한다. 그 후 $X_b(f)$ 의 복소 켤레 $[X_b(f)]^*$ 를 구하여 $X_a(f)$ 와 곱한 후 그 결과의 크기로 나누어 준다. 그리고 이 값을 푸리에 역변환을 한 결과 값 중에서 가장 큰 값의 인덱스 값이 TDOA 측정치가 된다. 따라서 GCC-PHAT를 이용한 두 음향 신호 간의 상관 계수 측정 방법은, 두 번의 고속 푸리에 변환과 한 번의 푸리에 역변환 과정을 거치게 된다.

GCC-PHAT를 이용하여 계산한 TDOA 측정치로부터 수중 3차원 공간에서의 목표물의 위치를 추정할 수 있으며, TDOA 측정치 계산을 고속으로 할수록 본 논문에서 제안하는 파티클 필터를 이용한 목표물의 위치 추정도 고속으로 이루어질 수 있음을 알 수 있다.

Algorithm GCC-PHAT

For two signals $x_a[n]$ and $x_b[n]$

$$X_a(f) = FFT(x_a[n])$$

$$X_b(f) = FFT(x_b[n])$$

$$G_{PHAT}(f) = \frac{X_a(f)[X_b(f)]^*}{|X_a(f)[X_b(f)]|}$$

$$I_{GPHAT}(p) = InverseFFT(GPHAT(f))$$

$$TDOA \text{ measurement } T_{ab} = argmax_p(I_{GPHAT}(p))/sampling \text{ rate}$$

그림 2. GCC-PHAT 알고리즘

Fig. 2 GCC-PHAT algorithm

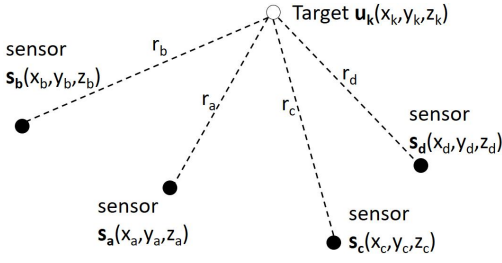


그림 3. TDOA를 이용한 목표물의 위치 추정
Fig. 3 Target position estimation using TDOA

3. 파티클 필터

본 논문에서는 수중에서의 센서 배열로 입력되는 신호로부터 얻어지는 TDOA 측정치로부터 목표물의 위치를 추정한다. 이때의 간략적인 구도는 그림 3과 같다.

3차원 공간에서 네 개의 소나 센서 배열로부터 목표물의 위치를 추정하게 되며, 이때 센서 a는 기준 센서로 사용되어 다른 센서와의 TDOA 측정에 사용된다. 본 논문에서는 추정 방법으로 파티클 필터를 사용하도록 제안한다. 파티클 필터를 이용한 물체 추정 방식은 상태공간에서 N개의 파티클을 이용하여 물체의 현재 위치를 확률적으로 추정하는 방법이다. 파티클 필터는 확장형 칼만 필터와 다르게 비가우시안, 비선형 시스템 모델에서도 강점을 가진다.

본 논문에서는 움직이는 목표물의 상태를 등가 속도 운동으로 정의하였다. 이때, 상태 방정식의 변수의 값은 x, y, z의 좌표와 x방향, y방향, z방향의 속도이다. 또한, k-1번째의 시스템 상태에서부터 k번째의 상태를 얻기 위한 시스템 상태 방정식을 다음과 같이 식 (1)로 정의한다. 이때, 행렬 A는 상태 전이 행렬을, 행렬 W는 오차 공분산 행렬을 나타낸다.

$$s_k = A s_{k-1} + W_k \tag{1}$$

그리고 시스템의 상태와 측정값 사이의 관계를 나타내는 관측 모델은 식 (2)로 정의된다. 이때, 측정값 z_k는 움직이는 물체에서 각 소나 센서로 입력된 신호에서 구한 TDOA 측정치이다.

$$z_k = h_k(s_k) + V_k \tag{2}$$

TDOA 측정값 z_k와 시스템의 상태, 즉 위치와의 관계식 h_k는 다음으로부터 구할 수 있다. 먼저, 식

(3)에서 목표물과 센서 a와의 거리 r_a(s_k)를 다음과 같이 나타낸다. u_k는 목표물의 위치 벡터이며 s_a는 a번째 센서의 위치 벡터이다.

$$r_a(s_k) = |u_k - s_a|, \tag{3}$$

$$r_{ab}(s_k) = c T_{ab}(s_k) = r_a(s_k) - r_b(s_k)$$

이때, 측정값은 센서 a와 센서 b 사이의 TDOA 관측치 T_{ab}이며, 센서 a와 센서 b 사이의 거리는 위의 식처럼 TDOA 관측치와 수중에서의 음파의 속도 c (1500m/s)와의 곱, 또는 각 센서에서 목표물까지의 거리의 차로 나타낼 수 있다. 즉, TDOA 측정값과 시스템의 상태 (위치)와의 관계는 다음과 같이 식 (4)로 나타나며, 이로부터 관계식 h_k를 구할 수 있다.

$$T_{ab}(x_k) = \frac{1}{c}(r_a(x_k) - r_b(x_k)) \tag{4}$$

앞서 구한 시스템의 상태 방정식과 관측 모델을 파티클 필터에 적용하여 목표물의 위치를 추정한다.

Algorithm Particle filter

```

Set initial state s0
Generate N particles s0(i) (i = 1,2,...,N)
Set initial weights w0(i) = 1/N (i = 1,2,...,N)
For k=1,2,3...
    sk(i) = A sk-1(i) + Wk. (i = 1,2,...,N)
    zk(i) = h(sk(i)) + Vk
    z = TDOA measurements
    wk(i) = wk-1(i) p(z | sk(i))
    where p(z | sk(i)) ~ N(h(sk(i)), Qk})
    Normalize weights wk(i) = wk(i) / ∑i=1N wk(i)
    Neff = 1 / ∑i=1N (wk(i))2
    If Neff < Nth
        Resampling
    end
end
end
    
```

그림 4. TDOA 측정치를 이용한 파티클 필터 알고리즘

Fig. 4 Particle filter algorithm using TDOA measurement

칼만 필터와 달리 파티클 필터는 N개의 파티클을 통해서 확률분포를 근사화하고, TDOA 측정값을 통하여 지속적으로 파티클의 분포를 갱신한다. 이 과정에서 각 파티클의 가중치는 실제 관측한 측정치와 예측한 측정치 간의 확률 분포에 따라 계산되며, 그 후 리샘플링 (Re-sampling) 과정을 거친다. 리샘플링 과정은 가중치가 낮은 파티클을 제거함으로써 확률 분포에 의한 오차를 줄여 나가며 목표물의 위치를 추정해 나간다. TDOA 측정치를 이용한 파티클 필터의 전체 알고리즘은 다음의 과정으로 이루어진다. 각 파티클에 대하여 시스템의 상태를 갱신하고 그 후 TDOA 측정치와 시스템의 상태와의 관계식을 이용하여 측정치를 갱신한다. 그 후 GCC-PHAT를 이용하여 구한 실제 관측된 TDOA 측정치와 예측한 측정치 간의 확률 분포에 따른 각 파티클들의 가중치를 구한다. 그리고 각 파티클의 가중치를 일반화한다. 마지막으로 리샘플링을 수행하기 위한 유효 파티클 수 N_{eff} 를 계산한 후 해당할 경우 리샘플링을 수행하여 가중치가 높은 파티클들을 리샘플링하여 오차를 줄여 나간다. 해당 과정을 재귀적으로 반복함으로써 목표물의 위치를 추정해나가며, 언급한 파티클 필터의 동작은 그림 4의 알고리즘과 같다.

4. GPGPU를 이용한 알고리즘 가속화

수중에서 음향 신호를 이용하여 움직이는 물체의 위치를 추정할 때, 본 논문에서는 GPGPU를 이용하여 가속화된 목표 추정을 제안한다. GPGPU는 특히 병렬 처리에 장점을 가지는 아키텍처로써, 고속 연산에 이용되는 장치이다. 제안하는 목표물의 위치 추정 알고리즘에서 GPGPU를 이용하는 부분은 크게 TDOA 측정치를 구하기 위한 GCC-PHAT 과정과 파티클 필터 동작으로 나눌 수 있다.

GCC-PHAT 방식을 이용한 TDOA 측정치 계산은, 앞서 언급한 것처럼 고속 푸리에 변환 방법을 기반으로 한다. 따라서 푸리에 변환 과정에서의 속도를 더 높임으로써 전체적인 구조를 가속화할 수 있다. 본 논문에서는 CUDA에서 지원하는 cuFFT 라이브러리를 이용한 고속 푸리에 변환을 이용하여 TDOA 계산 과정에서 소모되는 실행 속도를 줄이도록 하였다. 소나 센서로 입력되는 데이터들은 시간 지연에 따른 상관 계수를 구해야하므로 시간에 대하여 동기화되어 있다고 가정한다. 이때, 센서 데이터들은 같은 샘플링 주기로 디지털 변환이 되어 있으므로 고속 푸리에 변환 과정 시 같은 계수를 이용하여 변환이 가능하다. cuFFT는 같은 푸리에

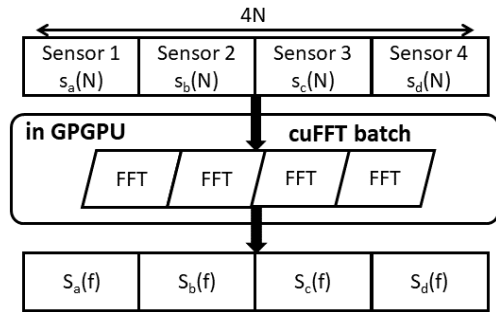


그림 5. GPU를 이용한 병렬 고속 푸리에 변환
Fig. 5 Parallel fast fourier transform using GPU

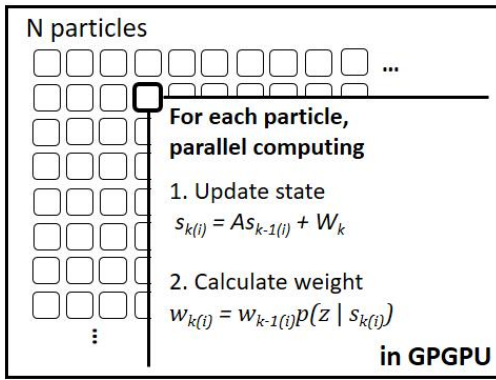


그림 6. GPU에서의 파티클 필터 계산 과정
Fig. 6 Particle filter calculation process in GPU

변환 계수를 사용하는 데이터들에 대하여 고속으로 처리하기 위한 Batch 기능을 제공한다. 아래의 그림 5는 CUDA에서 여러 센서 데이터들로부터 동일한 고속 푸리에 변환을 Batch 기능을 활용하여 변환하는 과정을 나타낸다.

이때, 4개의 소나 센서에서 얻어지는 데이터 개수가 각 N개일 때, 커널로 복사되는 데이터는 1차원 배열의 4N개가 되는 것을 알 수 있다. 마찬가지로, TDOA 측정치를 얻기 위하여 고속 푸리에 변환 과정 후 푸리에 역변환 과정을 수행할 때에도 그림 5의 과정을 거쳐 고속으로 변환이 가능하다.

또한, 본 논문에서는 파티클 필터를 이용하여 목표물의 위치를 추정하며, 이때의 파티클 필터의 동작도 그림 6과 같이 GPGPU를 이용하여 병렬적으로 수행되도록 제안한다. 파티클 필터는 파티클의 개수에 따라 필터의 성능이 좌우되며, 필터 과정에서 각 파티클에 수행되는 계산들은 반복적이다. 따라서 각 파티클의 상태 갱신 과정과 각 파티클의

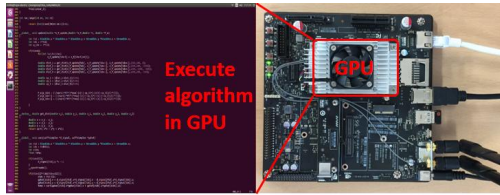


그림 7. 타겟 보드 (NVIDIA Jetson TX1)
Fig. 7 Target board (NVIDIA Jetson TX1)

표 1. NVIDIA Jetson TX 1 사양
Table 1. Specification of NVIDIA Jetson TX1

Jetson TX1	
GPU	1TFLOP/s 256-core Maxwell
CPU	64-bit ARM A56 CPUs
Memory	4GB 64-bit LPDDR4 25.6GB/s

확률 분포에 따른 가중치를 구하는 과정을 GPU의 커널에서 병렬적으로 수행함으로써 파티클 필터를 이용한 목표물 추정 과정을 가속화할 수 있다. GPU를 이용한 각 파티클의 병렬 계산 과정은 그림 6과 같이 나타난다.

IV. 실험

제한한 GPU 기반의 가속화된 목표물의 위치 추정의 알고리즘을 실제 구현하여 실험을 진행하였다. 타겟 보드로는 NVIDIA Jetson TX1을 사용하였으며 Ubuntu 14.04 Linux 운영체제에서 구현한 알고리즘을 동작, 검증하고 동작 속도 관점에서 분석하였다. 그림 7은 실제 실험에서 타겟 보드로 사용한 NVIDIA Jetson TX1이며, 표 1은 NVIDIA Jetson TX1의 CPU, GPU, 메모리의 사양을 나타낸다.

또한, 파티클 필터와 TDOA 측정치를 이용한 목표물 위치 추정 알고리즘을 Matlab을 이용하여 구현하여 실제 알고리즘 동작을 검증하였다. 그림 8은 파티클 필터를 이용한 목표물의 위치 추정 알고리즘을 Matlab을 이용하여 검증한 결과이다.

소나 센서로 입력되는 음향 신호는 11025Hz의 주기로 샘플링 과정을 거친 신호를 사용하였으며 1초간의 신호를 메모리에 저장하여 TDOA를 측정하고 파티클 필터를 이용하여 목표물의 위치를 추정하도록 하였다. 제안하는 가속화된 목표물의 위치 추정 방법에서 알고리즘의 수행 속도는 GCC-PHAT

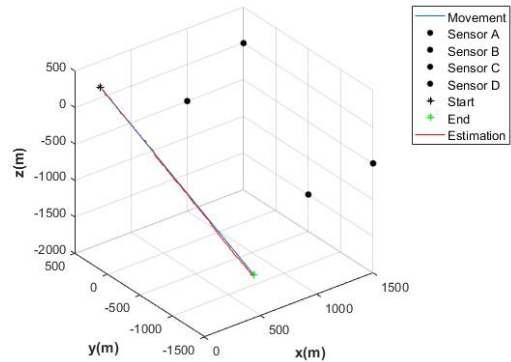


그림 8. Matlab을 이용한 파티클 필터 동작 검증
Fig. 8 Verification of particle filter using Matlab

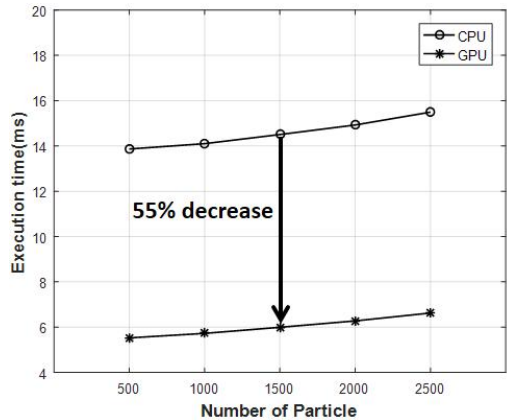


그림 9. 파티클 수에 따른 알고리즘 실행 소요 시간
Fig. 9 Execution time of algorithm according to number of particles

를 이용한 TDOA 측정치를 구하는데 좌우된다. 특히 GCC-PHAT는 고속 푸리에 변환 기반의 방법이므로, 구현한 알고리즘의 속도는 고속 푸리에 변환에 많은 영향을 받는다. CPU를 이용하는 알고리즘은 FFTW3 라이브러리를 사용한 고속 푸리에 변환을 사용하여 구현하였으며 GPU를 사용하는 알고리즘에는 cuFFT 라이브러리를 사용한 고속 푸리에 변환을 구현하였다.

실험은 CPU만을 사용하였을 때의 알고리즘 동작 속도와 GPU를 같이 사용하였을 때의 알고리즘 동작 속도를 비교하며 진행 하였다. 그 결과 제안한 GPU 기반의 시스템에서 보다 빠른 목표물의 위치 추정이 가능함을 확인하였다. CPU만을 사용하였을 경우와 GPU를 사용하였을 때의 파티클 수에 대한

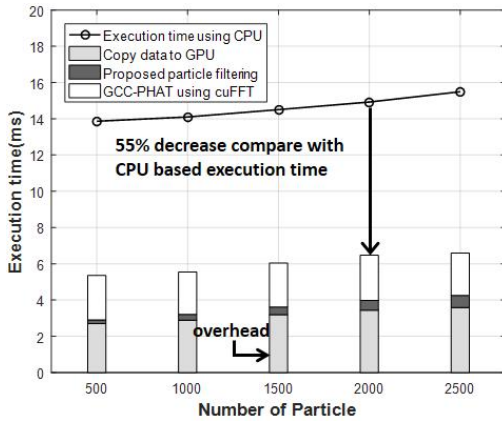


그림 10. 파티클 수에 따른 제안하는 알고리즘의 부분별 실행 시간

Fig. 10. Partial execution time of algorithm according to the number of particles

목표물의 현재 상태의 위치 추정 알고리즘 실행 시간은 그림 9의 그래프와 같이 나타낸다. 이때 가로축은 파티클의 수, 세로축은 목표물의 현재 상태의 위치 추정 알고리즘의 실행 시간이다. 그래프에서 나타난 것처럼 GPU를 같이 사용할 경우 물체의 현재 상태를 추정하는데 소모되는 알고리즘 실행 시간이 평균적으로 약 55% 정도 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, 파티클의 수가 증가할수록 알고리즘의 동작 속도가 증가하는 것을 확인하였다.

제안하는 GPU 기반의 가속 알고리즘에서 TDOA 계산, 파티클 필터 동작, 그리고 GPU로의 데이터 복사 과정에서 소요되는 각각의 알고리즘 실행 시간은 그림 10과 같다. 앞의 결과와 마찬가지로 파티클의 수가 증가할수록 알고리즘의 전체 실행 시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 파티클의 수가 증가할수록 제안하는 GPU 기반의 각 파티클에 대한 계산 과정에 소요되는 시간은 약 0.1ms 간격으로 증가하는 것을 확인하였다. 알고리즘의 실행에 필요한 데이터들을 GPU로 복사하는데 소요되는 시간을 포함하더라도 CPU 기반 동작 알고리즘 보다 전체 실행시간이 55% 정도 짧은 것을 알 수 있다. 또한, TDOA 측정치를 이용한 파티클 필터 기반 위치 추정 알고리즘의 실행 시간은 파티클 필터 동작보다 GCC-PHAT를 이용한 TDOA 측정치 계산에서 많이 소요되는 것을 알 수 있다.

제안하는 GPU 기반의 알고리즘과 CPU 기반의 알고리즘에 대하여 TDOA 계산에 의한 알고리즘 실행 간을 분석하기 위하여 센서로 입력된 신호의

표 2. 샘플링 레이트에 따른 알고리즘 실행 시간
Table 2. Algorithm execution time according to sampling rate

Sampling rate	Execution time (ms)	
	GPU	CPU
11kHz	6.28	15.06
22kHz	11.46	27.16
33kHz	15.11	46.27
44kHz	18.24	56.95

샘플링 레이트를 변경해가며 결과를 분석하였다. 표 2는 샘플링 레이트를 변경해가며 측정한 알고리즘의 실행 시간이다. 샘플링 레이트가 증가할수록 전체 알고리즘 실행 소요 시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 44kHz의 샘플링 레이트로 샘플링된 신호를 사용할 경우 CPU 기반의 알고리즘은 알고리즘 동작에 약 56.95ms가, GPU를 이용한 알고리즘은 약 18.24ms가 소요되었고, 샘플링 레이트가 낮을 때 보다 알고리즘 실행 시간이 더 차이 나는 것을 확인하였다. 이로부터 CPU만을 이용하는 알고리즘의 경우, 특히 샘플링 레이트에 대해 알고리즘 실행 시간이 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 반면, 제안하는 GPU 기반의 알고리즘의 경우 샘플링 레이트에 대해 상대적으로 실행 시간이 영향을 덜 받는 것을 확인하였다. 전체 실험의 결과로 제안하는 GPU 기반의 알고리즘의 가속화된 동작을 검증하였으며, GPU를 사용한 알고리즘의 경우 그렇지 않은 경우와 비교하여 목표물의 현재 위치를 추정하는 알고리즘의 실행 소요 시간이 약 55% 정도 빨라지는 것을 확인하였다.

V. 결론

본 논문은 GPU를 이용하여 수중에서 목표물의 은닉 탐지를 위한 음향 신호를 수동 소나 센서로 입력 받고 TDOA 측정치를 구하여 목표물의 위치를 추정하고 이를 가속화하도록 하였다. 목표물의 위치를 추정하기 위하여 파티클 필터를 사용하였으며, GPU의 커널에서 각 파티클의 계산 과정을 병렬적으로 수행하도록 하였다. 또한, TDOA 측정치를 GPU를 이용한 병렬 고속 푸리에 변환 기반의 GCC-PHAT 방식을 적용하여 계산하여 파티클 필터에서 사용되는 TDOA 측정치의 계산을 가속화하

여 전체적인 알고리즘을 고속으로 동작하도록 하였다. 본 논문은 GPU를 이용하여 수중 환경에서 목표물이 발생하는 음향 신호를 이용한 가속화된 목표물의 위치 은닉 탐지 알고리즘을 실제 구현하였으며, 이를 타겟 보드인 NVIDIA Jetson TX1을 사용하여 검증하였다. GPU를 사용한 알고리즘의 실행 시간은 GPU를 사용하지 않았을 때에 비해 약 55% 정도 줄어드는 것을 확인하였다. 이로부터 제안한 구조가 고성능 아키텍처 관점에서 실현 가능한 구조라는 것을 확인하였다. 추후 연구로는 본 논문에서 구현한 GPU 기반의 고속 처리 과정을 실시간 처리 관점에서 접근하여 보완하고 연구할 계획이다.

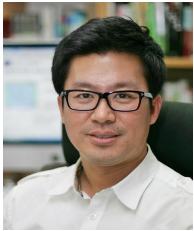
References

- [1] M. T. Isik, O. B. Akan, "A Three Dimensional Localization Algorithm for Underwater Acoustic Sensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 8, No. 9, pp. 4457-4463, 2009.
- [2] S. Poursheikhali, H. Zamiri-Jafarian, "TDOA Based Target Localization in Inhomogenous Underwater Wireless Sensor Network," *Proceedings of 5th International Conference on Computer and Knowledge Engineering*, pp. 1-6, 2015.
- [3] K.S. Bae, J.Y. Lee, K.C. Kwak, H.S. Yoon, "TDOA-based Sound Source Localization to Control Intelligent Service Robot's Attention," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, Vol. 2, No. 4, pp. 227-232, 2007 (in Korean).
- [4] Y. Xu, W. Dandan, F. Hua, "Underwater Acoustic Source Localization Method Based on TDOA With Particle Filtering," *Proceedings of the 26th Chinese Control and Decision Conference*, p. 4634-4637, 2014.
- [5] J. Vermaak, A. Blake, "Nonlinear Filtering for Speaker Tracking in Noisy and Reverberant Environments," *Proceeding of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 5, pp. 3021-3024, 2001.
- [6] F. Gustafsson, F. Gunnarsson, "Positioning Using Time-difference of Arrival Measurements," *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 6, pp. VI-553-6, 2003.
- [7] B. Van Den Broeck, A. Bertrand, P. Karsmakers, B. Vanrumste, H. Van hamme, M. Moonen, "Time-domain Generalized Cross Correlation Phase Transform Sound Source Localization for Small Microphone Arrays," *Proceedings of 5th European DSP Education and Research Conference*, pp. 76-80, 2012.
- [8] B. Qin, H. Zhang, Q. Fu and Y. Yan, "Subsample Time Delay Estimation via Improved GCC PHAT Algorithm," *Proceedings of 9th International Conference on Signal Processing*, pp. 2579-2582, 2008.
- [9] B. Kwon, Y. Park, Y. Park, "Analysis of the GCC-PHAT Technique for Multiple Sources," *Proceedings of International Conference on Control Automation and Systems*, pp. 2070-2073, 2010.
- [10] C. Choi, H. I. Christensen, "RGB-D Object Tracking: A Particle Filter Approach on GPU," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1084-1091, 2013.
- [11] G. Hendeby, J. D. Hol, R. Karlsson, F. Gustafsson, "A Graphics Processing Unit Implementation of the Particle Filter," *Proceedings of 15th European Signal Processing Conference*, pp. 1639-1643, 2007.

Seongseop Kim (김 성 섭)

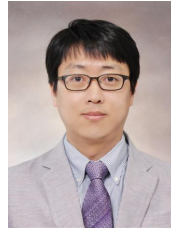
He received the B.S. degree in electronics engineering from Kyungpook National University, Daegu, Korea in 2017. He is currently a M.S student in department of electronics engineering at Kungpook National university, Deagu, Korea. His research interests include hardware-accelerated signal processing algorithm and high performance microprocessor-based system implementation

Email: kss92318@gmail.com

Jeonghun Cho (조 정 훈)

He received the B.S. degree in EE, the M.S. and the Ph. D degree in EECS from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Deajeon, Korea in 1996, 1998, and 2003, respectively. He was a senior engineer at Hynix Semiconductor from 2003 to 2005. Main role was development of a C compiler for 8-bit microcontrollers. He is currently a professor with the School of EE of Kyungpook National University, Daegu, South Korea since 2005. His research interest includes a binary translation, software safety and security for automotive, AUTOSAR, run-time monitoring and logging for embedded system. Dr. Cho is a member of IEEE.

Email: jcho@knu.ac.kr

Daejin Park (박 대 진)

He received the B.S. degree in electronics engineering from Kyungpook National University, Daegu, Korea in 2001, the M.S. degree and Ph.D. degree in electrical engineering from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea, in 2003, and 2014, respectively. He was a Research Engineer at Major Semiconductor Companies such as SK Hynix Semiconductor, Samsung Electronics over 12 years from 2003 to 2014, respectively and have worked on processor architecture design and low-power ASIC implementation with custom designed software algorithm optimization. Dr. Park is now with School of Electronics Engineering as full-time assistant professor in Kyungpook National University, Daegu, Korea and presidential research fellow.

Email: boltanut@knu.ac.kr