

방수배열소나의 연산량 감소를 위한 펄스 시작점 산출 방법

김도영^{1*}, 신기철¹, 정태진¹, 엄민정¹

¹LIGNex1

A method of determining pulse start points for reduction in computational amount of intercept array sonar

Do-Young Kim^{1*}, Kee-Cheol Shin¹, Tae-Jin Jung¹, Min-Jeong Eom¹

¹LIGNex1

요약 방수배열소나의 주 기능은 적 수상함 및 잠수함, 어뢰 등에서 방사하는 펄스를 탐지하는 것이다. 펄스를 탐지한 경우에는 자함 입장에서 위험도가 높은 상황이므로 자함의 기동 및 생존을 위해 표적의 위치를 찾는 건 매우 중요하다. 표적의 위치는 각 센서에서 수신된 펄스의 시작점을 찾고 센서 간 시간지연 값을 계산하여 산출하게 된다. 펄스 시작점을 구하기 위해서는 신호의 포락선을 산출하고 미분 필터링 과정을 거치게 되는데 방수배열소나는 신호의 샘플링 주파수가 높아 처리하는 샘플 개수가 많으므로 이 과정은 연산량이 큰 문제가 있다. 이에 본 논문은 연산량을 줄일 수 있는 간축 적용 펄스 시작점 산출 방법을 제안하였다. 간축 계수를 변경하면서 시뮬레이션을 수행하였고 연산량이 감소함을 확인하였다. 제안한 방법은 실시간 처리 시스템에 효과적이며 자원 활용도에 장점을 가질 것으로 기대한다.

• **주제어** : 잠수함, 펄스탐지, 방수배열소나, 펄스 시작점, 간축

Abstract The main function of intercept array sonar is to detect pulses radiated from enemy surface ships, submarines, and torpedoes. When a pulse is detected, it is a high risk situation for the own ship, so it is very important to find the target's location for the ship's maneuverability and survival. The target's location is calculated by finding the starting point of the pulse received from each sensor and calculating the time delay between sensors. In order to find starting point, the envelope of the signal is calculated and differential filtering is performed. However, since intercept array sonar has a high sampling frequency of the signal, the number of samples to be processed is large, so this process has a problem with a large computational amount. In this paper, we propose a pulse starting point calculation method using decimation for reducing computational amount. Simulations were performed while changing the decimation factor, and it was confirmed that computational amount was reduced. The proposed method is expected to be effective in real-time processing system and have advantages in resource utilization.

• **Key Words** : Submarine, Pulse detection, Intercept array sonar, Pulse starting points, Decimation

Received 23 October 2023, Accepted 27 March 2024

* **Corresponding Author** Kim, Do-Young, LIG Nex1 Co.,Ltd, 333, Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-City, Gyeonggi-do, 13488, Korea.
E-mail: doyoung.kim@lignex1.com

I. 서론

잠수함에서 방수배열소나는 적 수상함 및 잠수함, 어뢰 등에서 방사한 방수펄스를 탐지하고 탐지된 펄스를 분석하여 표적의 위치를 산출한다[1]. 산출된 표적의 위치를 통해 자함의 기동을 결정하고 어뢰 표적인 경우 회피 침로를 권고하게 된다. 이와 같이 방수배열소나의 표적의 위치 산출은 잠수함의 생존에 직결되는 중요한 기능이다[2].

방수배열소나에서 표적의 위치는 각 센서에서 수신되는 펄스의 시작점을 구하고 시작점 간 시간지연 값을 계산하여 얻어진다[3][4]. 펄스의 시작점을 구하기 위해서는 수신된 신호에 대해 주파수 영역으로 변환, 주파수 필터링, 시간 영역 변환을 통해 포락선을 산출하고 포락선의 경계점을 구하기 위해 미분 필터링을 취한 뒤 크기가 최대인 인덱스를 찾는 과정을 거치게 된다. 다음 과정은 얻어진 펄스의 시작점을 기준으로 일정 구간 신호에 대해 상호상관 및 보간을 수행하는 Signal Matching을 통해 시작점 오차를 보정하고 보정된 시작점 간 시간지연 값을 이용하여 표적의 위치를 산출한다[5].

여기에서 방수배열소나는 높은 샘플링 주파수를 가지므로 시작점을 구하기 위한 포락선 산출 과정과 미분 필터링 및 최대 인덱스를 찾는 과정은 큰 연산량이 요구되는 문제점이 있다[6,7].

이에 본 논문에서는 산출된 펄스 시작점이 Signal Matching에서 오차 보정되는 점을 감안하여 허용 오차 범위를 만족하고 연산량을 줄일 수 있는 간축 적용 펄스 시작점 산출 방법을 제시하였다. 시뮬레이션은 간축 계수를 변경하면서 수행하였고 연산량이 감소함을 확인할 수 있었다. 본 논문은 서론에 이어, 2장에서는 기존의 펄스 시작점 산출 과정에 대한 설명을 한 후 간축 적용 펄스 시작점 산출 방법을 서술한다. 3장에서는 기존과 제시한 방법에 대해 비교 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하며, 4장에서 결론을 맺는다.

II. 본론

2.1 기존 펄스 시작점 산출

기존 펄스 시작점 산출은 그림 1과 같이 추출된 신호에 대해 주파수 영역 변환을 수행하고 펄스 주파수에 해당하는 주파수 필터링을 수행한 뒤 시간 영역으

로 변환하여 포락선을 산출한다. 산출된 포락선은 경계를 찾기 위해 주파수 영역 미분 필터링 1~3을 거친 후 필터링 결과를 곱하여 시간 영역으로 변환한 뒤 레벨이 큰 최대 인덱스를 찾아 펄스의 시작점을 산출하는 과정을 가진다.

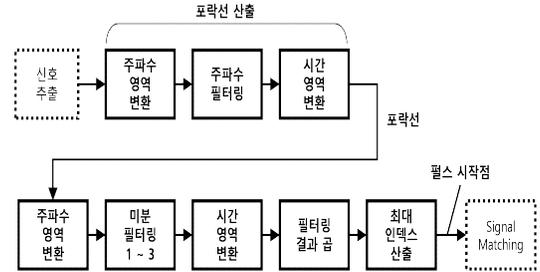


Fig. 1. Pulse starting point calculation process

그림 1의 기존 펄스 시작점 산출 과정에서 포락선을 구하는 과정은 그림 2에서 확인할 수 있다.

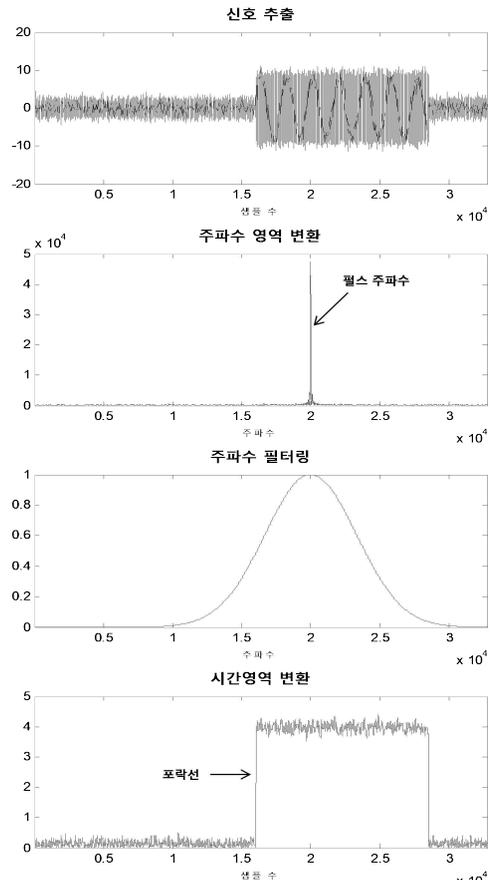


Fig. 2. Envelope calculation process using frequency filtering

포락선에 대한 미분 필터링 및 결과를 곱한 값의 최대 인덱스를 구하여 펄스 시작점을 찾는 과정은 그림 3과 같다.

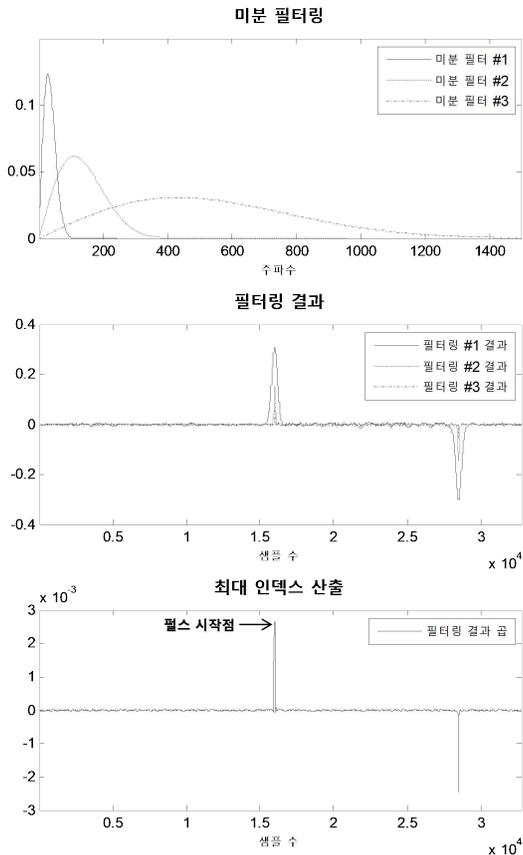


Fig. 3. Edge detection and pulse starting point

펄스 시작점은 다음 과정인 Signal Matching에서 오차 보정이 이뤄진다. Signal Matching에서는 앞서 구한 펄스 시작점을 기준으로 2ms(시작점 이전 1ms, 시작점 이후 1ms) 구간 신호에 대해 상호상관을 수행하고 상호상관 결과를 보간하여 상세 시작점을 산출한다.

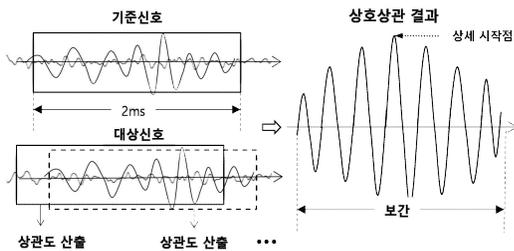


Fig. 4. Signal Matching

그림 4와 같이 Signal Matching에서는 2ms 신호에 대해 상세 시작점을 산출하므로 펄스 시작점 오차가 상호상관을 수행하는 구간 범위를 넘지 않을 경우에는 펄스 시작점 오차 보정이 가능하게 된다. 여기서 펄스 시작점 오차 보정 범위는 시작점 기준 최대 1ms가 됨을 알 수 있다.

기존 펄스 시작점 산출 과정에서 그림 2와 그림 3의 포락선을 산출과 경계점을 찾기 위한 미분 필터링 및 최대 인덱스 산출 과정은 방수배열소나의 높은 샘플링 주파수로 인해 처리되는 샘플 수가 많아 연산량이 높은 문제점을 가지게 된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 Signal Matching에서 펄스 시작점 오차가 허용되는 범위를 고려한 연산량을 줄일 수 있는 간축 적용 펄스 시작점 산출 방법을 제시한다.

2.2 간축 적용 펄스 시작점 산출

간축 적용 펄스 시작점 산출 과정은 그림 5와 같다.

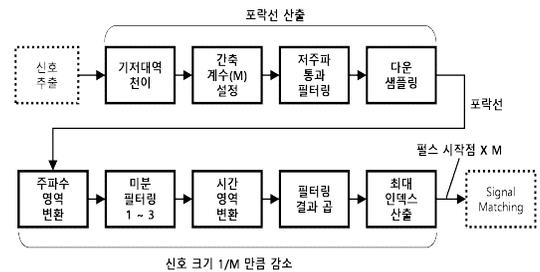


Fig. 5. Pulse starting point calculation process Using Decimation

우선, 추출된 신호 $S(n)$ 에 대해 펄스 주파수 f_p 를 이용하여 기저대역 천이 값 $S_B(n)$ 을 식 (1)과 같이 구한다.

$$S_B(n) = S(n)\exp(-j2\pi f_p t) \quad (1)$$

단,

$$n = 1, 2, \dots, N(\text{샘플 수}), t = \frac{1}{f_s}, \frac{2}{f_s}, \dots, \frac{N}{f_s}, f_s: \text{샘플링 주파수}$$

간축 계수 M은 오차 허용 범위를 고려하여 설정한다. 최대 오차 허용값이 1ms이고 M만큼 간축했을 때 발생하는 오차의 최대치는 M - 1이며 최종 펄스 시작점 산출에서 M을 곱하므로 간축 계수 범위는 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$1 \leq M(M-1) \leq f_s \times 10^{-3}(1ms) \quad (2)$$

간축 계수 M은 범위를 만족하는 한도 내에서 시스템 요구 연산량을 고려하여 설정할 수 있다.

기저대역으로 천이된 신호는 저역 통과 필터링 후 다운 샘플링을 취해준다. 이 과정의 결과로 신호의 포락선을 얻을 수 있으며 그림 6을 통해 확인 할 수 있다.

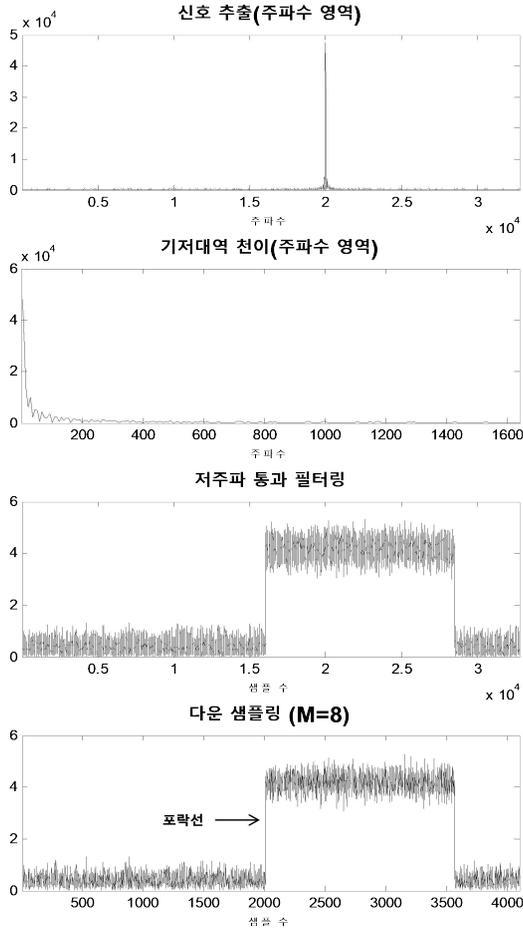


Fig. 6. Envelope calculation process using decimation

그림 6에서와 같이 산출된 포락선의 샘플 수는 1/M (그림 6은 M=8로 설정한 결과임.)로 감소하였다. 따라서, 이후 시작점을 찾기 위한 미분 필터링 및 최대 인덱스 산출 과정의 샘플 수는 1/M만큼 감소되어 수행되므로 연산량 감소의 효과를 가지게 된다.

식 (3)은 1/M만큼 감소된 샘플 수로 처리되는 미분 필터 F_m 을 나타낸다.

$$F_m(k) = \begin{cases} j \left[\pi(k-1)N_m^2 \right] \times \exp \left[-\frac{1}{2N_m^2} \left(\frac{\pi(k-1)M}{N} \right)^2 \right], & k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2M} \\ 0, & k = \frac{N}{2M} + 1 \\ -j \left[\pi \left(\frac{N}{M} - k + 1 \right) N_m^2 \right] \times \exp \left[-\frac{1}{2N_m^2} \left(\frac{\pi \left(\frac{N}{M} - k + 1 \right) M}{N} \right)^2 \right], & k = \frac{N}{2M} + 2, \dots, \frac{N}{M} \end{cases} \quad (3)$$

단,

$$m = 1, 2, 3, N = \text{샘플수}, N_1 = 384, N_2 = 96, N_3 = 24$$

필터링 결과 $edge_m(n)$ 는 산출된 포락선 $e(n)$ 와 식 (3)의 미분 필터를 이용하여 식 (4)와 같이 얻을 수 있다.

$$edge_m(n) = \{IFFT[F_m(k)E(k)]\} \quad (4)$$

단,

$$n = 1, 2, \dots, N/M, k = 1, 2, \dots, N/M, E(k) = \{FFT[e(n)]\}$$

이후, 필터링 결과는 곱한 뒤 레벨이 가장 큰 인덱스를 펄스의 시작점으로 판단한다.

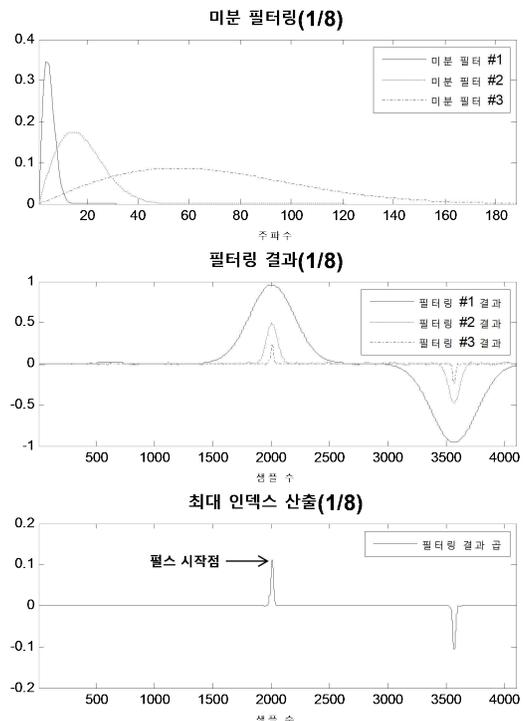


Fig. 7. Edge detection and pulse starting point(M=8)

그림 7은 간축 계수 M=8일 때 미분 필터링 및 결과 그리고 최대 인덱스 산출 시 샘플 수가 1/8만큼 줄어들었을 때의 펄스 시작점 산출 과정을 보여준다. 최종 펄스 시작점은 최대 인덱스값에 간축 계수 M만큼 곱하여 산출하게 된다.

III. 시뮬레이션 및 결과 분석

3.1 시뮬레이션 시나리오

방수배열소나의 방수펄스 모의 신호를 생성하여 시뮬레이션을 수행하였으며 간축 계수를 변경해 가면서 제안된 방법의 연산 시간과 기존 방법의 연산 시간을 측정하여 연산량 감소 여부를 비교 분석하였다. 표 1은 시뮬레이션 설정값을 나타낸다.

Table 1. Simulation parameter setting value

시뮬레이션 파라미터	설정값
신호 샘플 수	32,768개
샘플링 주파수/ 펄스 주파수	250kHz/30kHz
펄스반복주기/ 발생 개수	2000ms/20개
간축 계수(M)	2, 4, 8, 16
연산 시간 측정 환경	Window10, Intel i5-9400 2.90GHz, 64비트, Microsoft Visual Studio 2019

설정값 중 간축 계수(M)는 계수 값을 2의 멱수로 가졌을 때 식 (2)에 의해 최대 오차 허용 범위를 만족하는 최대값이 16이므로 2, 4, 8, 16으로 설정하였다.

3.2 시뮬레이션 결과 분석

기존 방법과 간축 적용 방법의 연산 시간을 비교 측정하였다. 연산 시간은 펄스 반복 주기와 펄스 발생 개수에 맞춰 2초 간격으로 20번 측정하였으며 상세 수치 값은 표 2와 같다.

Table 2. Computation time measurement results

구분	연산 시간(ms)			
	최대값	최소값	평균값	
기존 방법	9.188	8.757	8.913	
간축 적용	M=2	4.795	4.581	4.668
	M=4	3.242	3.120	3.158
	M=8	2.499	2.412	2.445
	M=16	2.154	2.082	2.098

기존 방법에서의 연산 시간은 평균값이 8.913ms로 측정이 되었다. 이와 비교해 간축 적용 방법에서는 간축 계수 M=2일 때 4.668ms로 연산 시간이 감소하였고 간축 계수가 커짐에 따라 연산 시간이 더욱 줄어들어 M=16일 때 2.098ms로 크게 감소함을 확인할 수 있다.

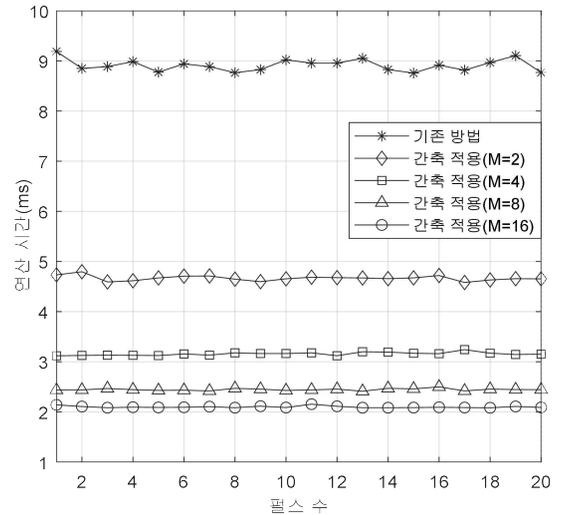


Fig. 8. Comparison of computation times

그림 8은 펄스 발생 개수 20개에 대해 연산 시간 시뮬레이션 측정 결과를 비교하여 도식화하였으며 간축 적용 시 연산 시간 감소 경향을 확인할 수 있다.

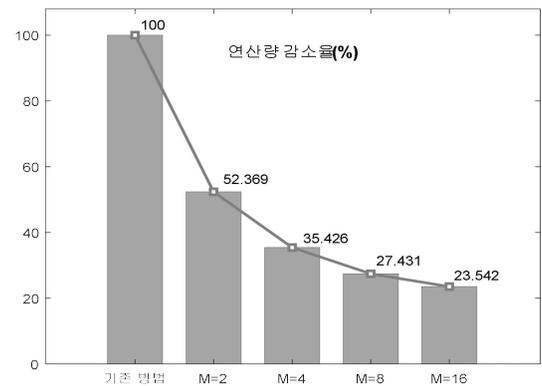


Fig. 9. Reduction ratio of computational amount

그림 9는 연산량 감소율을 보여주며 연산 시간을 기반으로 기존 방법의 연산량을 100으로 했을 때 간축 계수에 따른 연산량을 도식화하여 표현하였다. 간축 계수 M=16일 때 기존 대비 23.542%의 연산량이 필요하며 이는 76.458%만큼의 연산량 감소를 의미한다.

VI. 결론

방수배열소나에서 표적의 위치는 센서 간 시간지연 값을 계산하여 산출하게 되는데 시간지연 값을 구하기 위해서는 펄스의 시작점을 찾는 것이 선행되어야 한다. 여기서 방수배열소나는 높은 샘플링 주파수를 가지고 있어 펄스의 시작점을 찾는 과정인 포락선 산출, 미분 필터링 과정에서 높은 연산량이 요구되는 문제점이 있다. 이에 본 논문에서는 연산량을 줄일 수 있는 간축 적용 펄스 시작점 산출 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 검증하기 위해 간축 계수를 변경해 가면서 시물레이션을 수행하였으며 기존 방법과 비교 연산 시간을 측정하였다. 시물레이션 결과를 통해 기존 방법과 비교해 연산 시간이 감소함을 확인하였으며, 간축 계수가 커짐에 따라 연산 시간이 더욱 줄어드는 것을 확인하였다. 제안된 간축 적용 시작점 산출 방법은 실시간 시스템 적용에 효과적이며 자원 활용에도 장점을 가질 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] D. Y. Kim, K. C. Shin, M. J. Eom, S. C. Kwon, "A method for automatically adjusting threshold to improve the intercept pulse detection performance of submarine," *Journal of the Korea Institute of Convergence Signal Processing*, 22(4), pp. 213-219, 2021.
- [2] J. N. Sreedavy, R. Pradeepa, V. P. Felix, "A novel algorithm for intercept sonar signal detector," *International Symposium on Ocean Electronics*, Cochin, India, pp. 3-8, 2009
- [3] G. C. Carter, "Time Delay Estimation for Passive Sonar Signal Processing," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, And Signal Processing*, vol. ASSP-29, no. 3, pp. 463-470, 1981.
- [4] A. D. Waite, *SONAR for practising Engineers Third Edition*, JOHN WILEY & SONS Ltd, pp. 249-260, 2002.
- [5] C. H. Knapp, G. C. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, And Signal Processing*, vol. ASSP-24, no. 4, pp. 320-327, 1976.
- [6] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, pp. 679-698, 1986.

- [7] H. Jeong, C. I. Kim, "Adaptive Determination of Filter Scales for Edge Detection," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 5, pp. 579-585, 1992.

저자소개

김도영 (Do-Young Kim)



2008년 2월 : 한양대학교
전자전기공학부(공학사)
2010년 7월 : 한양대학교
이동통신전공(공학석사)
2010년 8월~현재 : (주)LIG넥스원
관심분야 : SONAR

신기철 (Kee-Cheol Shin)



1996년 2월 : 한국해양대학교
해양공학과(공학사)
1998년 2월 : 한국해양대학교
해양공학과(공학석사)
2003년 8월 : 한국해양대학교
해양개발공학과(공학박사)
2005년~현재 : (주)LIG넥스원
관심분야 : SONAR

정태진 (Tae-Jin Jung)



2007년 2월: 경북대학교
전자공학부(공학사)
2009년 2월: 경북대학교
전자공학부(공학석사)
2015년 2월: 경북대학교
전자공학부(공학박사)
2015년 ~ 현재: LIG 넥스원(주)
관심분야 : SONAR

엄민정 (Min-Jeong Eom)



2012년 2월: 한국해양대학교
해양공학과(공학사)
2014년 2월: 한국해양대학교
해양공학과(공학석사)
2014년 ~ 현재: LIG 넥스원(주)
관심분야 : SONAR