

최적의 측정값 구간의 길이를 갖는 최소 공분산 유한 임펄스 응답 필터 기반 디지털 위상 고정 루프 설계

유성현* · 배동성** · 최현덕***

A Digital Phase-locked Loop design based on
Minimum Variance Finite Impulse Response Filter with Optimal Horizon Size

Sung-Hyun You* · Dong-Sung Pae** · Hyun-Duck Choi**

요 약

디지털 위상 고정 루프는 위상 동기화를 위해 사용되는 회로로 일반적으로 통신, 회로분야 등 다양한 분야에서 사용된다. 디지털 위상 고정 루프를 설계 시 상태추정기를 사용하는 경우 보통 칼만 필터와 같은 무한 임펄스 응답 상태추정기를 활용해왔다. 일반적으로 무한 임펄스 응답 상태추정기 기반 디지털 위상 고정 루프의 성능은 우수하지만, 초기값의 부정확, 모델 오차, 외란 등의 예상하지 못하는 상황에서 급격한 성능저하가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 새로운 디지털 위상 고정 루프를 설계 하기 위해 최적의 측정값 구간 길이를 갖는 최소 공분산 유한 임펄스 응답 필터를 제안한다. 제안된 유한 임펄스 응답 필터의 중요 파라미터인 측정값 구간 길이를 구하기 위해 수치적 방법을 소개하며, 필터의 이득을 얻기 위해 비용함수로 오차의 공분산 행렬을 설정하고, 이를 최소화 하기 위하여 선형 행렬 부등식을 사용하였다. 제안된 디지털 위상 동기 루프의 우수성과 강인성을 검증하기 위해 노이즈 정보가 부정확한 상황에서 기존 방법과의 비교 및 분석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

ABSTRACT

The digital phase-locked loops(DPLL) is a circuit used for phase synchronization and has been generally used in various fields such as communication and circuit fields. State estimators are used to design digital phase-locked loops, and infinite impulse response state estimators such as the well-known Kalman filter have been used. In general, the performance of the infinite impulse response state estimator-based digital phase-locked loop is excellent, but a sudden performance degradation may occur in unexpected situations such as inaccuracy of initial value, model error, and disturbance. In this paper, we propose a minimum variance finite impulse response filter with optimal horizon for designing a new digital phase-locked loop. A numerical method is introduced to obtain the measured value interval length, which is an important parameter of the proposed finite impulse response filter, and to obtain a gain, the covariance matrix of the error is set as a cost function, and a linear matrix inequality is used to minimize it. In order to verify the superiority and robustness of the proposed digital phase-locked loop, a simulation was performed for comparison and analysis with the existing method in a situation where noise information was inaccurate.

키워드

Finite Impulse Response (FIR) Filter, Kalman Filter (KF), Unbiased Constraint, Digital Phase-Locked Loop (DPLL)
유한 임펄스 응답 필터, 칼만 필터, 불편추정 조건, 디지털 위상 동기 회로

* 조선대학교 전자공학부 (you@chosun.kr)

** 상명대학교 소프트웨어학과

*** 교신저자 : 전남대학교 ICT융합시스템공학과

• 접수일 : 2021. 07. 14

• 수정완료일 : 2021. 07. 31

• 게재확정일 : 2021. 08. 17

• Received : Jul. 14, 2021, Revised : Jul. 31, 2021, Accepted : Aug. 17, 2021

• Corresponding Author : Hyun-Duck Choi

Department of ICT Convergence System Engineering, Chonnam University,

Email : ducky.choi@jnu.ac.kr

I. 서론

디지털 위상 고정 루프는 위상 동기화와 신호의 영점 통과를 확인 하기 위해 널리 사용되는 일반적인 회로로 통신, 회로, 제어, 신호처리 분야 등 다양한 분야에서 사용되어왔다[1-2]. 특히, 디지털 위상 고정 루프는 소프트웨어와 하드웨어의 발전으로 많은 성능향상이 있었으며, 성능 향상을 위해 사용된 방법으로는 상태추정기 등의 다양한 수학적인 알고리즘 등이 있다. 잘 알려진 상태추정기가 대표적으로 칼만 필터(Kalman filter)이며 이는 디지털 위상 고정 루프에도 사용되며 우수한 성능을 보여왔다.

칼만 필터는 우수한 성능을 입증하며 모바일로봇을 활용한 SLAM[3], 무인운송체의 자세추정[4], 비주얼 센서 네트워크의 트래픽 예측[5] 등 다양한 분야에서 활용되어 왔지만, 여러 가지 문제점이 존재한다. 칼만 필터는 대표적인 무한 임펄스 응답 필터로서 과거의 모든 측정값을 사용하며 모든 모델 정보를 요구하기 때문에 초기값의 부정확성, 모델의 오차 등의 다양한 외란에 취약하다는 특징을 가지고 있다. 이러한 단점들 때문에 오차가 누적되어 상태추정기의 추정치의 급격한 성능 저하가 발생하거나 발산하는 현상이 발생할 수 있다. 위의 단점을 극복하기 위해 일반적으로 사용되는 상태추정기가 유한 임펄스 응답 필터(FIR filter: Finite Impulse Response filter)이다.

유한 응답 상태추정기는 측정값 구간의 길이(horizon size)를 정의하고 가장 최근의 측정값들을 사용하는데, 이로 인해 상태추정기 추정치의 성능 저하를 막을 수 있다. 또한 유한 입력 유한 출력 안정성(BIBO stability: Bounded Input Bounded Output stability)을 갖는 안정적인 상태추정기로 초기값의 부정확성, 모델의 오차 등 다양한 외란에 기존의 무한 임펄스 응답 필터보다 우수한 추정성능과 강인한 성능을 보인다[6-7]. 이러한 우수성으로 인하여 Optimal FIR 필터[8], Kalman-like FIR 필터[9], Frobenius FIR 필터[10] 등 많은 연구결과를 발표하였으며 실내 위치추정[11], 비주얼 트래킹[12], 드론의 호버링[13] 등 많은 분야에 적용되어왔다. 최근에는 디지털 위상 고정 루프에 불편성 FIR 필터를 적용한 연구가 발표되었으며[14], 최소 공분산 유한임펄스 응답 필터 기반 디지털 위상 고정 루프설계도 연구되었지만[15], 자세한 유도보다는 소개에 그쳤으며, 최적의 측정값 구간 길이에 관한 내용은 소개되지 않았고 자세한 분석과 확장된 내용

을 본 논문에서 소개한다.

본 논문에서는 최적의 측정값 구간의 길이를 갖는 최소 공분산 유한 임펄스 응답 필터 기반 디지털 위상 고정 루프를 상태공간 모델을 기반으로 설계한다. 최적의 측정값 구간의 길이를 얻기 위해 수치적 해석방법을 사용하고, 최소 공분산 유한 임펄스 응답 필터의 해를 구하기 위해 공분산을 최소화 하는 선형 행렬 등식의 해를 구한다. 이를 위해 불편성 조건(Unbiased condition)을 만족하도록 오차와 추정치와의 관계 및 평균값을 도출해내며 오차 공분산의 상한과의 관계를 부등식으로 정의한다. 오차 공분산의 크기를 최소화 하기 위해 MATLAB의 LMI toolbox를 활용하여 이득값을 얻어 디지털 위상 고정 루프를 설계하였다. 제안된 유한 임펄스 응답 필터 기반의 디지털 위상 고정 루프의 우수한 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 최적의 측정값 구간의 길이를 갖는 최소 공분산 유한 임펄스 응답 필터 기반 디지털 위상 고정 루프에 대해 소개하고, 3장에서는 제시된 모델을 기반으로 제안한 디지털 위상 고정 루프의 강인성을 검증하기 위한 시뮬레이션 결과를 보이며, 4장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 최적의 측정값 구간의 길이를 갖는 최소 공분산 유한 임펄스 응답 필터 기반 디지털 위상 고정 루프 설계

본 장에서는 디지털 위상 고정 루프의 상태공간 기반 설계 기법에 대해 다루어 본다. 디지털 위상 고정 루프의 상태 공간 모델은 식 (1)과 같이 주어진다 [1].

$$\begin{aligned} x_k &= Ax_{k-1} + Gw_k \\ y_k &= Cx_k + v_k \end{aligned} \quad (1)$$

이때, 상태공간모델의 상태벡터는 $x_k = [\alpha_k \ \beta_k]^T$ 와 같으며, $\alpha_k = t_0 + k(T_1 - T_0)$ 는 zero crossing point를 의미하며 t_0 는 초기 타이밍 오프셋, T_0, T_1 는 각각 수신기와 발신기의 주기를 의미한다. $\beta_k = T_1 - T_0$ 는 타이밍 오프셋을 의미한다. y_k 는 측정치를 의미하며, $A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $G = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$, $C = [1 \ 0]$ 은 상태공간을 이루는 시스템 행렬이며, 상태공간모델의 시스템 모델과 측정 모

델의 잡음 w_k, v_k 는 가우시안 백색 잡음으로 평균이 0이며 분산이 각각 Q, R 인 랜덤 잡음이다.

디지털 위상 고정 루프의 상태벡터를 추정하기 위해 유한 임펄스 응답 구조의 상태추정기를 설계하면 식 (2)와 같다.

$$\hat{x}_k = HY_{k-1} \quad (2)$$

이때, \hat{x}_k 는 상태벡터의 추정치를 의미하며, H 는 유한 임펄스 응답구조의 상태추정기 이득을 의미, $Y_{k-1} = [y_{k-N}^T \ y_{k-N+1}^T \ \dots \ y_{k-1}^T]^T$ 는 측정치를 누적하여 만든 벡터 혹은 행렬로 정의되는데 이때, 측정값 구간의 크기를 N 으로 정의하며 이를 horizon이라고 부른다. 측정치는 가장 최근의 $k-1$ 번째 측정치부터 측정값 구간 내의 가장 오래된 $k-N$ 번째까지의 측정값을 쌓아 만들게 된다. 측정값 구간의 크기 N 은 사용자가 설정해야 하는 파라미터로 상태추정기 성능에 다양한 변화를 끼친다. 작은 측정값 구간의 크기는 빠른 연산을 가능하게 하는 반면에 충분한 성능을 보이기 어렵다. 이는 상태공간 모델 (1)의 잡음과 외란의 영향을 충분히 억제하기 어렵기 때문이다. 반면에 측정값 구간을 너무 크게 설정하면, 상태공간 모델 (1)의 잡음과 외란의 영향을 충분히 억제할 수 있지만, 연산량이 급격하게 증가하는데 이는 다음에 소개되는 유한 임펄스 응답 필터를 설계하기 위해 사용되는 행렬들의 크기가 커지기 때문이다. 따라서, 측정값 구간의 크기 N 을 적절히 설정하여야 하는데, 이는 해석적으로 설계하기는 어렵기 때문에 III장에서 설정하는 법에 대해 소개하도록 한다 [13].

측정치를 누적하여 만든 벡터 Y_{k-1} 를 상태 공간 모델 (1)을 사용하여 다시 표현하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{k-1} = \bar{C}_N x_{k-N} + G_N W_{k-1} + V_{k-1} \quad (3)$$

이때, 각각의 행렬 $\bar{C}_N, G_N, W_{k-1}, V_{k-1}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{C}_N = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N-1} \end{bmatrix}$$

$$G_N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ CG & 0 & \dots & 0 & 0 \\ CAG & CG & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N-2}G & CA^{N-3}G & \dots & CG & 0 \end{bmatrix}$$

$$W_{k-1} = [w_{k-N}^T \ w_{k-N+1}^T \ \dots \ w_{k-1}^T]^T$$

$$V_{k-1} = [v_{k-N}^T \ v_{k-N+1}^T \ \dots \ v_{k-1}^T]^T$$

여기서 \bar{C}_N 은 가관측성을 나타내는 행렬이며 이 행렬이 반드시 N 의 랭크를 가져야 한다.

또한, 상태벡터 x_k 를 상태공간 모델 식 (1)을 사용하여 표현하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_k = A^N x_{k-N} + [A^{N-1}G \ A^{N-2}G \ \dots \ G] W_{k-1} \quad (4)$$

유한 임펄스 응답 구조의 상태추정기를 다시 표현하기 위하여 식 (2)에 식 (3)을 대입하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{x}_k = HY_{k-1} = H\bar{C}_N x_{k-N} + HG_N W_{k-1} + HV_{k-1} \quad (5)$$

식 (5)에 식 (4)을 대입하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{x}_k = (H\bar{C}_N - A^N)x_{k-N} + x_k + HV_{k-1} + (HG_N - [A^N G \ \dots \ G] W_{k-1}) \quad (6)$$

식 (6) 양변에 평균을 취하면 식 (7)과 같다.

$$E[\hat{x}_k] = E[(H\bar{C}_N - A^N)x_{k-N} + x_k + HV_{k-1} + (HG_N - [A^N G \ \dots \ G] W_{k-1})] = E[(H\bar{C}_N - A^N)x_{k-N} + x_k] \quad (7)$$

이때 상태벡터의 추정치의 평균값과 상태벡터를 갖게 만들려면 식 (8)과 같은 불편성 조건을 만족해야 한다.

$$\overline{HC}_N - A^N = 0 \quad (8)$$

불편성 조건을 만족하기 위한 유한 임펄스 응답 필터의 이득값을 구하기 위해 먼저 오차를 $e_k = \hat{x}_k - x_k$ 로 정의하고 이는 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} e_k &= \hat{x}_k - x_k \\ &= (\overline{HC}_N - A^N)x_{k-N} + HV_{k-1} \\ &\quad + (HG_N - [A^N G \cdots G] W_{k-1}) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)로부터 식 (10)과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} e_k^T e_k &= \langle HV_{k-1} + (HG_N - [A^N G \cdots G] W_{k-1})^T \rangle \\ &\quad \times \langle HV_{k-1} + (HG_N - [A^N G \cdots G] W_{k-1}) \rangle \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)의 양변에 평균을 취하면 다음은 오차의 공분산을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E[e_k^T e_k] &= E \left[\langle HV_{k-1} + (HG_N - [A^N G \cdots G] W_{k-1})^T \rangle \right. \\ &\quad \left. \times \langle HV_{k-1} + (HG_N - [A^N G \cdots G] W_{k-1}) \rangle \right] \\ &= \text{trace}(\Pi Q \Pi^T + H R H^T) \end{aligned}$$

이때, $\Xi = HG_N - [A^N G \cdots G] W_{k-1}$ 로 정의되며, 오차의 최소 공분산을 최소화하기 위해 임의의 양수 ϵ 를 사용하여 오차의 공분산의 상한을 정하는 부등식을 일반적인 볼록 최적화 문제에서 흔히 사용되는 방법으로 식 (11)과 같다 [16].

$$\text{trace}(\Xi Q \Xi^T + H R H^T) < \epsilon I \quad (11)$$

식 (11)을 만족하는 해 H를 얻기 위해 MATLAB의 LMI(linear matrix inequality) 툴박스를 이용하여 ϵ 를 최소화하는 볼록 최적화 문제를 풀어 유한 임펄스 응답 필터의 오차 공분산을 최소화하는 최적의 이득을 얻을 수 있다.

본 논문의 독창성 및 기여도는 다음과 같다. 먼저 제시한 논문에서는 최초로 최소 공분산 유한 임펄스 응답 필터를 사용하여 디지털 위상 고정 루프를 설계하였으며, 최소 공분산 유한 임펄스 응답 필터의 측정값 구간을 정하기 위한 수치적 방법을 제시하였으며 이는 다음 장에서 소개한다.

III. 시뮬레이션

본 장에서는 기존의 디지털 위상 고정 루프와 제안된 디지털 위상 고정 루프의 성능을 비교한다. 성능비교를 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 수행된 시뮬레이션은 기존 칼만 필터 기반의 디지털 위상 고정 루프와 제안된 디지털 위상 고정 루프의 성능을 비교하였다. 시뮬레이션을 위하여 수신기와 발신기의 타이밍 오프셋은 $T_0 = 0.001$, $T_1 = 1.1 T_0$ 로 설정하였으며, 시스템 모델의 공분산과 측정값 모델 잡음공분산은 각각 $Q = \text{diag}(T_0^2/12, T_0^2/12)$, $R = T_0^2/32$ 로 설정하였다. 하지만 칼만 필터기반의 디지털 위상 고정 루프와 제안된 위상 고정 루프의 시스템 모델 공분산과 측정값 모델 잡음 공분산을 $1.2Q$, $0.8R$ 로 설정하였으며, 시뮬레이션을 위한 상태벡터의 초기값과 상태벡터 초기값의 추정치는 각각 $x_k = [0 \ 0]^T$, $\hat{x}_k = [0.1 \ 0.2]^T$ 로 부정확하게 설정하여 무한 응답 상태 추정기인 칼만 필터 기반의 디지털 위상 고정 루프와 제안된 디지털 위상 고정 루프의 오차 누적으로 인한 성능을 비교한다.

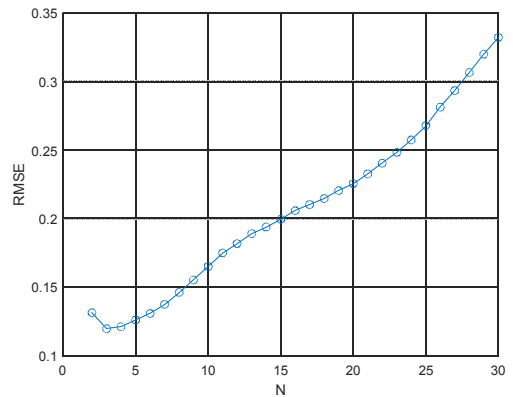


그림 1. 제안된 디지털 위상 고정 루프의 최적의 측정값 구간 길이를 위한 RMSE 비교

Fig. 1 Comparison of RMSE with various N for optimal horizon size of the proposed DPLL

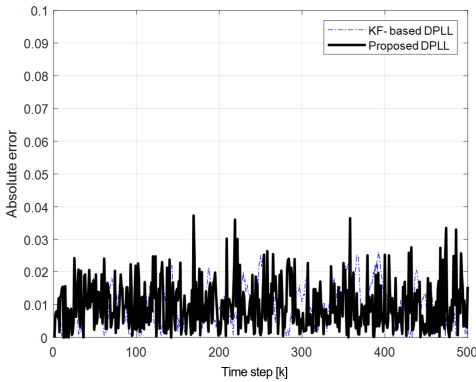


그림 2. 이상적인 환경에서의 칼만 필터 기반 디지털 위상 고정 루프와, 제안된 디지털 위상 고정 루프의 절대 위상 오차 비교

Fig. 2 Comparison of absolute phase error between Kalman filter-based DPLL and the proposed DPLL in ideal condition

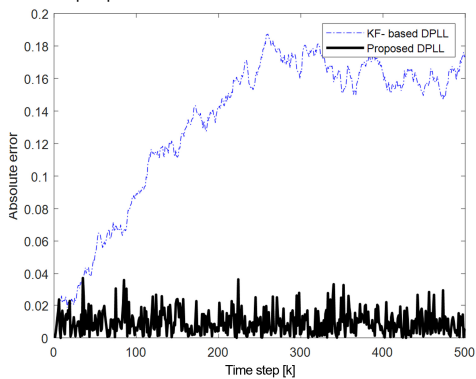


그림 3. 부정확한 초기값과 잡음 공분산을 갖는 환경에서의 칼만 필터 기반 디지털 위상 고정 루프와, 제안된 디지털 위상 고정 루프의 절대 위상 오차 비교

Fig. 3 Comparison of absolute phase error between Kalman filter-based DPLL and the proposed DPLL in terms of incorrect initial value and noise covariances

먼저 제안된 디지털 위상 고정 루프의 최적의 측정값 구간 길이를 수치적인 방법으로 구하는 법을 소개하기 위해 그림 1과 같이 다양한 측정값 구간 길이에 대해 RMSE(root mean square error)를 비교하였다.

제안된 상태추정기의 최적의 측정값 구간 길이는 측정 구간 중 RMSE가 가장 적은 측정값 구간 길이로 결정하였는데, 이는 이상적인 상황에서 각각의 측정값 구간의 크기

N 의 크기를 변경해 가며 가장 작은 RMSE를 갖는 측정값 구간의 크기 N 을 구하는 것을 의미한다. 따라서, 본 논문에서 제안된 디지털 위상 고정 루프 설계 시 최적의 측정값 구간을 수치적 방법을 통하여 3으로 결정하였다.

위상 오차는 (1)에 표시된 상태벡터의 첫 번째 원소이기 때문에 상태벡터의 정확한 추정은 성능을 나타낸다. 따라서 디지털 위상 고정 루프의 성능을 평가하기 위하여 절대 위상 오차값을 비교하였으며, 그림 2와 3은 이상적인 상황과 부정확한 잡음 상황에서의 기존 방법(칼만 필터) 기반의 디지털 위상 고정 루프와 제안된 최적의 측정값 구간 길이를 갖는 유한 임펄스 응답 필터 기반의 디지털 위상 고정 루프의 절대 위상 오차값을 나타낸다.

칼만 필터 기반의 디지털 위상 고정 루프의 경우 이상적인 상황에서는 오차의 크기가 제안된 방법과 비슷하지만 부정확한 초기값과 시스템 모델 공분산, 측정값 모델 잡음 공분산을 갖는 경우 오차가 누적되어 부정확한 성능을 보인다. 하지만 제안된 디지털 위상 고정 루프의 경우 오차가 누적되지 않는 구조적인 강인함으로 인하여 부정확한 초기값과 시스템 모델 공분산, 측정값 모델 잡음 공분산에도 불구하고 강인한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 제안된 디지털 위상 고정 루프가 예상치 못한 부정확한 상황에서 더욱 강인한 성능을 갖는다고 할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 최적의 측정값 구간의 길이를 갖는 최소 공분산 유한 임펄스 응답 필터 기반 디지털 위상 고정 루프를 소개하였다. 제안된 새로운 디지털 위상 고정 루프는 불편성 조건을 만족하도록 설계되었으며, 이득값은 오차의 공분산을 최소화 하도록 LMI 수식의 블록 최적화 문제를 풀어 이득을 유도하였다. 또한 수치적으로 최적의 측정값 구간 길이를 얻어내었으며, 예상치 못한 부정확한 상황에서 강인한 성능을 갖는 것을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 향후 제안된 유한 응답 상태추정기는 통신, 측위 등의 다양한 분야에서 활용될 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] P. Driessen, "DPLL bit synchronizer with rapid acquisition using adaptive Kalman filtering techniques," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 42, no. 9, 1994, pp. 2673-2675.
- [2] A. Patapoutian, "On phase-locked loops and Kalman filters," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, no. 5, 1999, pp. 670-672.
- [3] D. Jeong, J. Chung, S. Hwang, J. Pyun, N. Ko, and T. Kim, "Improvement of SLAM Using Invariant EKF for Autonomous Vehicles," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 2, 2020, pp. 237-244.
- [4] G. Song, H. Choi, and N. Ko, "Attitude Estimation of Unmanned Vehicles Using Unscented Kalman Filter," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 1, 2019, pp. 265-273.
- [5] S. Park. "Traffic Estimation Method for Visual Sensor Networks," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 11, 2016, pp. 1069-1076.
- [6] Y. Shmaliy, S. Zhao, and C. Ahn., "Unbiased finite impulse response filtering: An iterative alternative to Kalman filtering ignoring noise and initial conditions," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 37, no. 5, 2017, pp. 70-89.
- [7] S. You, C. Ahn, Y. S. Shmaliy, and S. Zhao, "Minimum weighted Frobenius norm discrete-time FIR filter with embedded unbiasedness," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 65, no. 9, 2018, pp. 1284-1288.
- [8] S. Zhao, Y. Shmaliy, and F. Liu. "Fast computation of discrete optimal FIR estimates in white Gaussian noise," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 6, 2014, pp. 718-722.
- [9] S. Zhao, Y. Shmaliy, and F. Liu, "Fast Kalman-like optimal unbiased FIR filtering with applications," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 9, 2016, pp. 2284-2297.
- [10] S. You, C. Ahn, Y. Shmaliy, and S. Zhao, "Frobenius Norm-based Unbiased FIR Fusion Filtering for Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, in press.
- [11] J. Pak, C. Ahn, M. Lim, and M. Song, "Indoor Localization Using Unscented Kalman/FIR Hybrid Filter," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 21, no. 11 2015, pp. 1057-1063.
- [12] I. Choi, J. Pak, C. Ahn, S. Lee, M. Lim, and M. Song, "Arbitration algorithm of FIR filter and optical flow based on ANFIS for visual object tracking," *Measurement*, vol. 75, 2015 pp. 338-353.
- [13] S. You, C. Ahn, Y. Shmaliy, S. Zhao, "Fusion Kalman and weighted UFIR state estimator with improved accuracy," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 12, 2019, pp. 10713-10722.
- [14] S. You, J. Pak, C. Ahn, P. Shi, M. Lim, "Unbiased finite-memory digital phase-locked loop," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 63, no. 8, 2016, pp. 798-802.
- [15] S. You and H. Choi, "A New Digital Phase-locked Loop design based on Minimum Variance Finite Impulse Response Filter," *2021 The 36th ICROS Annual Conference (ICROS 2021), Yeosu, Korea 2021*.
- [16] C. Ahn, "12-1∞ Elimination of Overflow Oscillations in 2-D Digital Filters Described by Roesser Model With External Interference," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 60, no. 6, 2013, pp. 361-365.

저자 소개



유성현(Sung-Hyun You)

2013년 서울과학기술대학교 전자
IT미디어공학부 졸업(공학사)
2019년 고려대학교 전기전자공학
부 대학원 졸업(공학박사)

2019년 ~ 2020년 고려대학교 연구교수
2020년 ~ 현재 조선대학교 전자공학부 조교수
※ 관심분야 : 상태추정기, 측위 및 위치추정 알고리즘, 지능제어, 최적제어, 드론, 자율주행



배동성(Dong-Sung Pae)

2013년 고려대학교 전기전자공학
부 졸업(공학사)
2019년 고려대학교 전기전자공학
부 대학원 졸업(공학박사)

2019년 ~ 2020년 고려대학교 연구교수
2020년 ~ 2020년 LG전자 선임연구원
2020년 ~ 현재 상명대학교 소프트웨어학과
조교수
※ 관심분야 : 컴퓨터 비전, 임베디드, 지능형 데이터 시스템, 자율주행



최현덕(Hyun-Duck Choi)

2011년 고려대학교 전기전자공학
부 졸업(공학사)
2017년 고려대학교 전기전자공학
부 대학원 졸업(공학박사)

2017년 ~ 2018년 현대모비스 전자현가설계팀 책임연구원
2018년 ~ 2019년 삼성전자 무선사업부 AI개발 그룹 책임연구원
2019년 ~ 현재 전남대학교 ICT융합시스템공학과 조교수
※ 관심분야 : 지능제어 및 응용, 인공지능, 자율주행, 드론

