

논문 2008-45SC-6-15

스테레오 비전에서 향상된 적응형 퍼지 칼만 필터를 이용한 거리 추정 기법

(Distance Estimation Method using Enhanced Adaptive Fuzzy Strong Tracking Kalman Filter Based on Stereo Vision)

임 영 철*, 이 충 희*, 권 순*, 이 종 훈*

(Young-Chul Lim, Chung-Hee Lee, Soon Kwon, and Jong-Hoon Lee)

요 약

본 논문에서는 스테레오 비전에서 시차를 이용하여 근거리뿐만 아니라 원거리의 장애 물체에 대해서도 신뢰성 있는 거리를 추정하기 위한 알고리즘을 제안한다. 시차를 이용한 거리 측정에서 양자화 오차는 원거리에서의 거리 정확도를 떨어뜨리게 되므로, 이를 최소화하기 위해 부화소 보간법(sub-pixel interpolation)을 이용하여 시차 정확도를 향상시키고, 거리 정확도 및 경로 추적의 최적화를 위해서 향상된 적응형 퍼지 칼만 필터(EAFSTKF : Enhanced Adaptive Fuzzy Strong Tracking Kalman Filter)를 사용한다. 제안한 방법은 차량과 같이 다양한 동적인 움직임에 의한 비선형성에 대하여 기존 칼만 필터에서 발생되는 발산 문제(divergence problem)를 해결할 수 있고, 거리의 정확도 및 신뢰도도 높일 수 있다. 몬테카를로(Monte Carlo) 방법을 이용한 모의실험 결과 제안한 방법은 기존 방법들과 거리 오차율(RMSER : Root Mean Square Error Rate)을 비교하였을 때, strong tracking Kalman filter(STKF)에 비하여 성능이 약 13.5%정도 향상되었음을 보여준다.

Abstract

In this paper, we propose an algorithm that can estimate the distance using disparity based on stereo vision system, even though the obstacle is located in long ranges as well as short ranges. We use sub-pixel interpolation to minimize quantization errors which deteriorate the distance accuracy when calculating the distance with integer disparity, and also we use enhanced adaptive fuzzy strong tracking Kalman filter(EAFSTKF) to improve the distance accuracy and track the path optimally. The proposed method can solve the divergence problem caused by nonlinear dynamics such as various vehicle movements in the conventional Kalman filter(CKF), and also enhance the distance accuracy and reliability. Our simulation results show that the performance of our method improves by about 13.5% compared to other methods in point of root mean square error rate(RMSER).

Keywords : stereo vision, distance estimation, sub-pixel interpolation, Kalman filter, fuzzy system

I. 서 론

최근 자동차 산업은 기계 중심의 전통적 산업에서 IT 기술을 융합하는 지능형 자동차 기술로 진화하고 있다. 현재 지능형 자동차의 핵심 기술은 차량이나 보행

자와 같은 외부 장애 물체를 인식해 미리 경고해주거나 능동적으로 회피할 수 있는 기술로 진화하고 있다. 더욱이 고속도로와 같은 고속 주행 환경에서는 적어도 5초전에 위험 물체를 감지하고, 운전자에게 위험 상황을 알려줘야 하며, 이것은 약 200m의 거리에 해당 된다^[1]. 장애 물체의 거리를 추정하는 일반적인 매체로는 레이더^[2], 레이저^[3], 적외선^[4] 등의 능동 센서를 사용하는 방법과 카메라와 같은 수동 센서를 사용하는 방법이 있다. 능동 센서는 거리 측정 오차는 작지만, 단일 매체만으로는 장애 물체를 검출하기가 힘들고, 다중 사용자에

* 정회원, 대구경북과학기술연구원
(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology)

※ 이 논문은 교육과학기술부 2008년도 중점연구과제
의 연구결과입니다.

접수일자: 2008년7월7일, 수정완료일: 2008년11월14일

의한 간섭의 영향으로 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 카메라와 같은 수동 센서는 간섭에 무관하게 장애 물체를 검출할 수 있지만, 거리 정확도가 원거리로 갈수록 나빠지는 단점이 있다. 특히, 모노 카메라를 사용할 때는 일반적으로 원근법(perspective)을 이용하여 거리를 측정하지만, 이러한 방법은 기본적으로 장애 물체의 크기를 미리 알고 있거나, 도로가 평坦하고 카메라가 고정되어 있다는 가정에서 가능하다. 실제 환경에서는 이러한 문제를 해결하기가 어렵기 때문에, 카메라를 이용하여 거리를 측정할 때는 스테레오 카메라를 주로 많이 이용한다. 스테레오 카메라를 이용한 일반적인 거리 측정은 좌우 영상에서 장애 물체의 시차를 이용하여 구할 수 있다. 하지만, 스테레오 매칭으로 획득된 시차는 카메라 화소의 단위인 정수 값으로만 표현 가능하며, 이것은 시차의 양자화 오차를 발생시킨다. 근거리에서는 이러한 양자화 오차가 거리 오차에 미미한 영향을 미치지만, 거리가 멀어질수록 거리 오차는 급격하게 증가한다. 이러한 양자화 오차를 줄이기 위하여 부화소 보간 방법을 이용하고, 이 때 추정된 시차의 오차는 정규 분포와 유사한 형태를 가지며[5-8], 추정된 시차와 칼만 필터(CKF : conventional Kalman filter)를 이용하여 좀 더 정확한 거리를 추정할 수 있다[7].

본 논문에서는 스테레오 비전으로 장애 물체의 거리를 추정함에 있어서, 기존 칼만 필터의 문제를 해결하고, 거리 오차율을 최소화하여 실제 장애 물체의 경로를 최적화하여 추적할 수 있는 향상된 적응형 퍼지 동적 필터(EAFSTKF : Enhanced adaptive fuzzy strong tracking Kalman filter)를 설계하고 검증한다. 제안한 방법은 몬테카를로 방법을 이용한 모의실험을 통해 기존 방법과 오차율을 비교함으로써 성능의 우수함을 증명한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시차를 이용한 기존 거리 추정 방법과 칼만 필터 적용에 대한 문제점 및 해결 방법에 대하여 소개하고, III장에서는 본 논문에서 제안한 향상된 적응형 퍼지 칼만 필터와 퍼지 시스템에 대하여 설명한다. IV장에서는 제안한 방법과 기존 방법의 성능을 모의실험을 통해 비교 분석하고, V장에서는 결론을 맺는다.

II. 기존 거리 추정 방법

스테레오 비전을 이용한 거리 측정은 좌우 영상에서 스테레오 매칭을 통하여 획득된 깊이맵(depth map)으

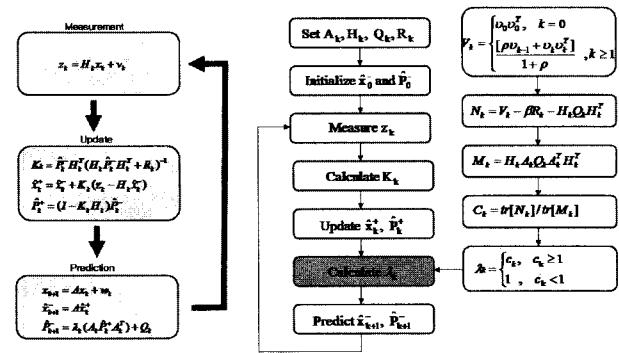


그림 1. STKF의 블록도

Fig. 1. Block diagram of STKF.

로부터 얻어진 시차를 이용한 방법을 많이 사용한다. 이 때, 시차는 화소의 개수, 즉 정수로만 표현된다. 이로 인해 양자화 오차가 발생하며, 이러한 오차를 최소화하기 위하여 부화소 보간(sub-pixel interpolation)을 이용한 정밀 시차 추정 방법을 사용한다. 추정된 시차의 오차는 정규 분포 상의 표준편차에 해당되는 신뢰도를 갖게 되며, 이러한 오차의 신뢰도를 높이기 위하여, 칼만 필터를 적용함으로써, 거리 정확도 및 경로 추적을 최적화할 수 있다. 칼만 필터의 잡음 중에 시스템 잡음은 대부분의 실제 상황에서 시스템 모델을 예측하기는 어렵지만, 센서의 측정 잡음은 일반적으로 정규 분포를 가지는 경우가 많으며, 잡음의 신뢰도도 예측 가능하다. 이로 인해, 측정 잡음을 실제 잡음과 유사하게 모델링하면, 그만큼 정확도를 향상시킬 수 있다. 스테레오 비전에서 부화소 보간 방법으로 정밀 시차를 추정하면, 균일 분포(uniform distribution)의 특성을 갖고 있는 측정 잡음을 정규 분포의 형태로 변환할 수 있고, 또한 거리에 따른 실제 잡음의 분산 값을 예측할 수 있다.

칼만 필터는 시스템 모델의 불확실성으로 인해 기동이나 초기치 오차에 의하여 발산할 수 있다. 이러한 문제를 보완하기 위하여 STKF(Strong Tracking Kalman Filter)^[9-12]를 이용한다. STKF는 추정치가 실제 경로를 이탈했다고 판단되면, 공분산(P_k)값을 적절한 가중치에 의해 조절함으로써, 실제 목표 물체의 경로로 다시 수렴하게 하여 추적할 수 있게 한다^[12]. 그림 1은 STKF의 블록도를 보여주며, strong tracking loop에서 v_k 는 예측치와 측정치의 오차를 나타내는 residual을, ρ 는 forgetting factor, β 는 softening factor를 나타낸다. STKF에서 β 값이 작으면, CKF loop에서 strong tracking loop로 전환되기 위한 문턱치가 낮아짐으로써, 기동에 의한 발산을 막을 수 있지만, 추정치가 측정치의 오차에 따라 진동할 수 있다. 반면에 β 값이 커지게

되면 strong tracking loop로 진입하기 위한 문턱치가 높아짐으로써, CKF와 거의 같은 기능을 수행하게 되므로 발산에 의한 추적의 강건성을 보장받을 수 없다. 이로 인해 현 상태에 따라 적절한 β 값을 설정하여, 발산이 발생했다고 판단되었을 때만 strong tracking loop로 진입할 수 있게 할 필요가 있다.

III. 적응형 퍼지 칼만 필터

적응형 퍼지 칼만 필터는 GPS를 기반한 위치 추정에 사용되는 방법^[13-15]으로써, 기본적인 개념은 DOD(Degree of divergence)를 관측하고, 퍼지 시스템에서 관측된 DOD에 따라 β 를 적용적으로 결정한다. 결정된 β 에 의해서 발산하는 시점을 감지하여, 목표 물체가 기동이 발생했을 때, 경로에서 이탈하지 않고 실제 경로를 추적할 수 있게 한다. 그림 2는 [15]에서 사용되었던 AFSTKF(Adaptive Fuzzy Strong Tracking Kalman Filter)의 블록도를 보여준다. STKF에서는 고정된 β 값을 사

용하지만, AFSTKF에서는 퍼지시스템으로 결정된 적응적인 β 를 사용함으로써, 좀 더 신뢰성을 높일 수 있다. [15]에서 사용된 AFSTKF는 GPS의 측정 오차를 고려하여 설계된 필터이기 때문에, 스테레오 비전에서 시차를 이용한 거리 추정에 사용하기에는 적절하지 않다. 본 논문에서는 스테레오 비전에서 시차 오차를 고려하여, 적절한 DOD를 설정하고, 퍼지 시스템에서 관측함으로써, 시차를 이용한 거리 추정에 최적화된 필터를 설계한다. 그럼 3은 스테레오 비전을 이용한 거리 측정에 최적화된 향상된 적응형 퍼지 동적 필터(EAFSTKF)의 블록도를 보여준다.

1. Fading factor(λ_k)

λ_k 는 기동 운동이나 초기치 오차에 의하여 경로 이탈이 감지되었을 때, 적절한 가중치에 의해 다음 단계의 공분산(P_{k+1})을 조절하고, 조절된 공분산에 의해 칼만 이득(K_{k+1})을 결정하게 한다. 이러한 칼만 이득은 추정치와 측정치의 오차, 즉 residual의 가중치를 조절함으로써, 실제 경로로 다시 수렴하여 추적할 수 있게 한다. λ_k 는 아래 식과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} P_{k+1}^- &= \lambda_k A_k P_k A_k^T + Q_k, \\ \lambda_k &= \frac{P_{k+1}^- - Q_k}{A_k P_k A_k^T} \\ &= \frac{H_k P_{k+1}^- H_k^T - H_k Q_k H_k^T}{H_k A_k P_k A_k^T H_k^T} \\ &= \frac{V_{k+1} - R_{k+1} - H_k Q_k H_k^T}{H_k A_k P_k A_k^T H_k^T}. \end{aligned} \quad (1)$$

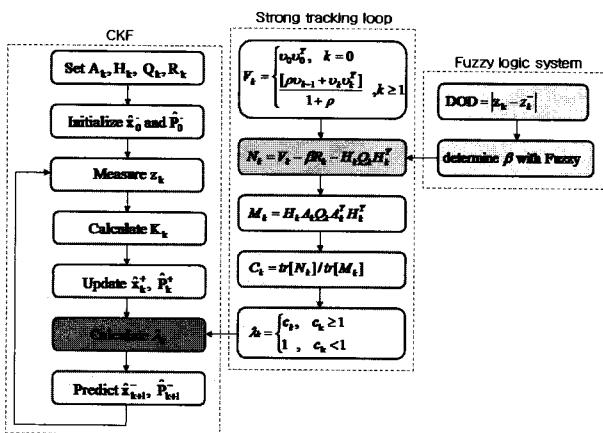


그림 2. AFSTKF의 블록도
Fig. 2. Block diagram of AFSTKF.

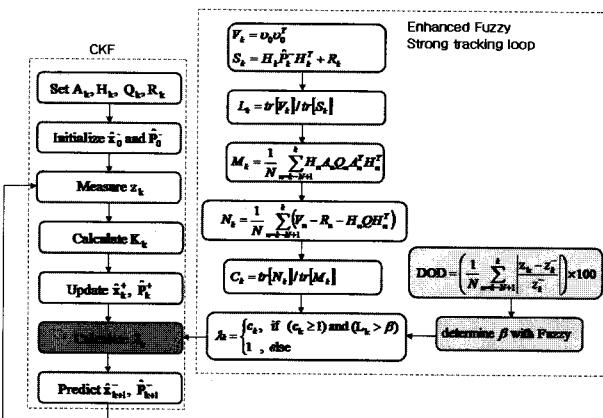


그림 3. EAFSTKF의 블록도
Fig. 3. Block diagram of EAFSTKF.

식 (1)은 기대치와 fading-memory 필터를 기반으로 한 이론적인 해석이며, 실제 스테레오 비전에서 시차 오차를 고려한 거리 추정에 적용하기 위하여, 아래식과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} M_k &= \frac{1}{N} \sum_{n=k-N+1}^k H_n A_n Q_n A_n^T H_n^T, \\ N_k &= \frac{1}{N} \sum_{n=k-N+1}^k (V_n - R_n - H_n Q_n H_n^T), \\ \lambda_k &= \text{tr}(N_k)/\text{tr}(M_k). \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 $\text{tr}(X)$ 함수는 행렬 X에서 대각 성분의 합을 나타낸다. 그림 3에서와 같이 λ_k 는 1보다 크고, 발산이 발생했다고 판단되어질 때만 적용된다. 발산의 판단 여부는 $\text{tr}(V_k)$ 와 $\text{tr}(S_k)$ 의 비, 즉 실제 residual의 공분산과 그것의 기대치의 비로써 판단하며, 이 비율이 β 보다 커

지면, 발산으로 판단한다. 이 때, V_k 와 S_k 는 아래식과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} V_k &= v_k v_k^T, \\ S_k &= H_k P_k^- H_k^T + R_k. \end{aligned} \quad (3)$$

그림 3에서와 같이 residual의 공분산 V_k 와 그것의 기대치 S_k 가 일정 비율(β) 이상이 되면, 발산이 발생했다고 판단한다. 이 때 β 는 퍼지 시스템에서 DOD를 관측하여, 적응적으로 조절한다.

2. T-S 퍼지 시스템

β 를 적응적으로 결정하기 위하여, 퍼지 시스템을 이용하며, 퍼지 시스템은 그림 4와 같이 퍼지화(fuzzification), 퍼지 추론(fuzzy inference), 비퍼지화(defuzzification) 등으로 구성된다. 퍼지화는 크리스프(crisp) 입력에 대하여 퍼지 입력으로 변환하고, 퍼지 추론은 규칙 기반(rule base)으로부터 결과를 유추해낸다. 비퍼지화는 다시 크리스프 출력으로 변환하는 구조로 되어있다. 일반적인 퍼지 시스템은 비선형 제어기에서 좋은 성능을 내기 위하여, 복잡한 비선형 시스템에서 퍼지 집합을 분할하고, 각 영역에 적절한 규칙을 규정하여 최적의 출력을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 그림 5에서와 같이 T-S 퍼지 모델(Takagi and Sugeno fuzzy model)을 이용하여, 장애 물체 추적 시 발산의 발생 유무를 판단하는 문턱치(β)를 결정한다. 그림 5의 T-S 퍼지 시스템에서 출력(y)은 아래식과 같이 각각의 출력(y_k)과 가중치(w_k)의 곱에 의하여 결정된다.

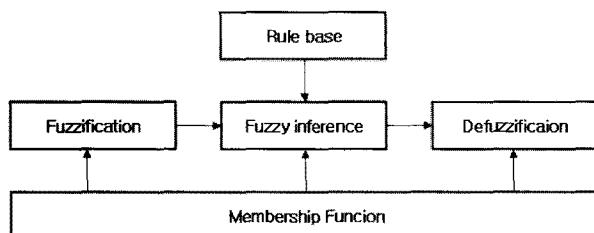


그림 4. 퍼지 시스템

Fig. 4. Fuzzy System.

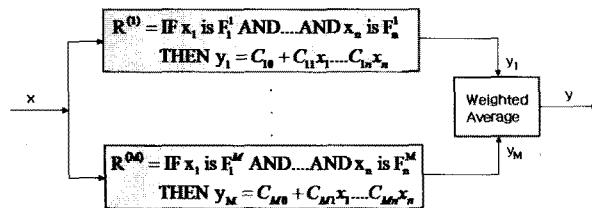


그림 5. T-S 퍼지 모델

Fig. 5. T-S Fuzzy model.

$$y = \sum_{k=1}^M w_k y_k. \quad (4)$$

식 (4)에서 가중치(w_k)는 아래식과 같이 계산된다.

$$w_k = \frac{\prod_{i=1}^n u_{F_i^k}(x_i)}{\sum_{j=1}^M \left[\prod_{i=1}^n u_{F_i^k}(x_i) \right]}, \text{ with } \sum_{i=1}^M w_i = 1. \quad (5)$$

식 (5)에서 u 는 소속 함수(membership function)를 나타낸다.

3. Softening factor(β)

장애 물체의 급격한 기동에 대한 발산의 정도를 감지하는 변수로써, DOD를 사용하며, 아래 식과 같이 결정한다.

$$DOD_k = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=k-N+1}^k \left| \frac{z_n^- - z_n}{z_n^-} \right| \right) \times 100. \quad (6)$$

식 (6)에서 DOD는 추정치에 대한 측정치의 평균 오차율을 나타낸다. 만약, DOD가 작다면, 현재 추정치가 목표 물체의 경로에 수렴하고 있는 상태로써, 거리 정확도 및 추적 신뢰도가 높다고 판단한다. 이 순간에는 현 상태를 유지하기 위하여 β 를 크게 함으로써, strong tracking loop로 진입하기 위한 문턱치를 높여서 CKF로 동작하게 한다. 반면에 DOD가 크다면, 실제 경로와 추정하는 경로와의 차이가 발생하여, 경로에서 이탈하고 있다고 판단한다. 이 순간에는 β 를 작게 함으로써, Strong tracking loop로 전환되는 문턱치를 낮춤으로써, 실제 경로로 다시 수렴할 수 있게 만든다. β 를 결정하기 위한 퍼지 시스템의 입력 변수, DOD는 아래식과 같이 소속 함수를 구성한다.

$$u(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)에서 소속 함수는 삼각형 형태로 구성되며, DOD에 대한 퍼지 규칙은 아래와 같이 3가지의 일차 함수로 정의한다.

- 1) Rule 1 : 만약 DOD가 0이면, β 는 $C_{10} + C_{11}DOD$
- 2) Rule 2 : 만약 DOD가 작으면, β 는 $C_{20} + C_{21}DOD$
- 3) Rule 3 : 만약 DOD가 크면, β 는 C_{30}

IV. 모의실험 및 검증

본 절에서는 장애 물체의 거리 추정 정확도 및 신뢰도를 높이기 위하여, 적응형 퍼지 칼만 필터를 설계하고 그 성능을 검증한다. 기존 방식과의 거리 정확도 및 신뢰도에 대한 성능 비교를 위하여 MATLAB 7.0을 이용하여 모의실험을 하며, 전체적인 시뮬레이터 구성은 그림 6과 같다.

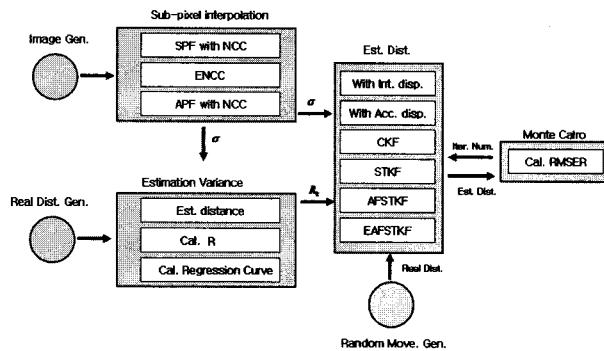


그림 6. 시뮬레이터 구성도
Fig. 6. Block diagram of simulator.

1. 부화소 보간

시차의 정확도를 향상시키고, 거리에 따른 오차 특성을 분석하기 위하여 부화소 보간 방법을 이용한다. 본 실험에서는 그림 6에서와 같이 3가지 보간 방법을 이용하여 성능을 분석한다. 부화소 보간 방법 중에 대칭 포물선 정합(SPF : Symmetric Parabola Fitting)은 스테레오 매칭으로 구해진 시차와 좌우 이웃하는 시차에 대하여, 좌우 영상으로부터 윈도우 기반의 NCC를 구하고, 이차 포물선을 구성하여, 극점의 위치를 찾음으로써 정밀시차를 구한다^[5-7]. 비대칭 포물선 정합(APF : Asymmetric Parabola Fitting)은 비대칭인 좌우 두 개의 포물선을 NAC(Normalized Auto Correlation)와 NCC를 이용하여 구하고, 두 포물선의 합에서 극점의 위치를 찾음으로써 정밀 시차를 구한다^[12]. ENCC는 NCC를 이용하여, 추정 시차의 위치를 수식적으로 전개하여, 극점의 위치를 찾음으로써 추정할 수 있다^[8]. 아래식과 같이 부화소 보간 방법들의 성능 검증은 사인 곡선(sinusoid)을 이용하여 인위적으로 생성된 영상을 사용한다.

$$I_L(x, y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(\cos\left(\frac{\pi x^2}{P}\right) + \cos\left(\frac{\pi y^2}{P}\right) \right), \quad (8)$$

$$I_R(x, y) = I_L(x - \tau, y).$$

표 1. 추정 시차의 RMSE
Table 1. RMSE of estimated disparity.

SPF	ENCC	APF
0.1428	0.1244	0.1001

식 (8)에서 P 는 공간 주파수(1/pixel)를 나타내며, 본 실험에서는 1000으로 설정한다. 식 (8)에서 우영상을 [-0.5 0.5] 구간 내에서 τ 만큼 이동시키고, 이동된 위치를 각각의 방법을 이용하여 찾음으로써 정확도를 판별한다. 각각의 방법에 대한 정밀 시차의 RMSE(Root mean square error)는 표 1과 같다^[12]. 추정된 시차의 RMSE는 여러 가지 동적 필터들을 이용한 거리 추정 시, 거리에 따른 측정치 분산(R_k)을 구하기 위한 변수로 사용된다.

2. 측정치 분산

시차를 이용한 목표 물체와의 거리(Z_d)는 아래식과 같이 구할 수 있다.

$$Z_d = \frac{BF}{x_r - x_l} \approx \frac{BF}{kp_d}. \quad (9)$$

식 (9)에서 B 는 좌우 카메라의 거리, F 는 초점 거리, p_d 는 화소간의 거리를 나타내며, 본 논문에서는 각각 30cm, 9mm, 7.4um로 설정한다. 식 (9)에서와 같이 실제 시차($x_r - x_l$)는 영상에서 화소간의 거리와 화소의 개수로 표현되기 때문에, 시차의 양자화 오차가 발생한다. 이러한 시차의 양자화 오차에 의한 거리 오차는 그림 7에서와 같이 목표 물체와의 거리가 멀어질수록 오차가 커지게 된다. 이러한 시차 오차의 정확도를 높이기 위하여 부화소 보간 방법을 사용하며, 추정된 시차에 의하여, 측정된 거리(Z_{ad})는 아래식과 같이 표현된다.

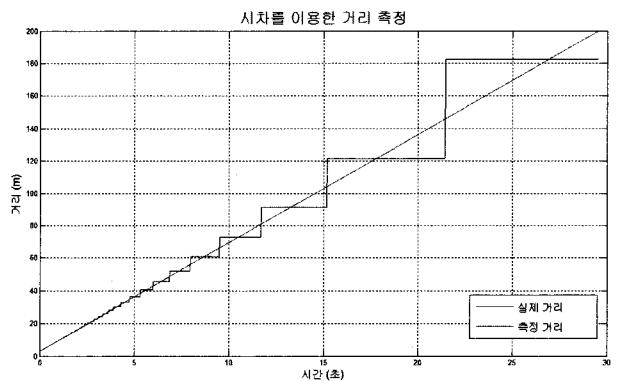


그림 7. 시차를 이용한 거리 측정
Fig. 7. Distance calculation with disparity.

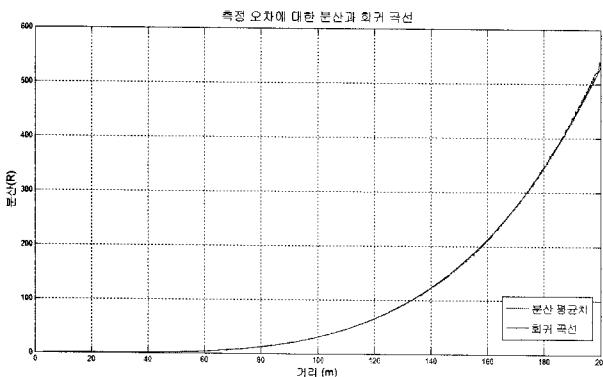


그림 8. 측정 오차에 대한 분산과 회귀 곡선
Fig. 8. Measurement variance and regression curve.

$$Z_{ad} = \frac{BF}{(k_r + \sigma \times randn) \times P_d}. \quad (10)$$

식 (10)에서 k_r 은 실제 시차를 나타내며, σ 는 시차의 표준편차를 나타내며, 실제 환경에서의 오차를 고려하여 본 실험에서는 0.2로 설정하여 거리를 측정한다. 측정된 거리 오차에 대한 분산(R_k)은 아래식과 같이 구해진다.

$$R_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_k^i - Z_{ad,k})^2. \quad (11)$$

식 (11)에서 Z_k 는 실제 거리를 나타내며, N 은 반복 실험 횟수를 나타낸다. R_k 는 몬테카를로 방법(Monte Carlo method)을 이용하여 구하며, 그림 8은 100,000번을 반복 실험하여 얻어진 R_k 의 평균치와 최소제곱회귀 분석(least-squares regression)을 이용하여 구해진 회귀 곡선을 보여 준다. 회귀 곡선의 방정식은 아래 식과 같이 표현된다.

$$R_k = (a_1 Z_k^2 + a_2 Z_k + a_3) Z_k^2. \quad (12)$$

식 (12)에서 R_k 는 실제 거리에 대한 4차 함수로써 표현되며, 최소 제곱 회귀 분석으로 구해진 a_1, a_2, a_3 는 각각 $3.65 \times 10^{-7}, -7.19 \times 10^{-6}, 1.48 \times 10^{-4}$ 이다.

3. 적응형 퍼지 동적 필터 설계 및 성능 분석

스테레오 비전을 이용한 거리 측정은 부화소 보간 방법으로 추정된 시차를 이용하여 거리를 측정할 수 있지만, 추정된 시차에서 발생되는 가우시안 잡음으로 인해 원거리로 갈수록 거리 오차가 커져서 측정 정확도 및 신뢰도가 떨어진다. 이러한 시차 오차로 인한 거리 오차를 최소화하고 이동 경로를 최적으로 추적하기 위하여 적응형 퍼지 칼만 필터를 이용한다. 본 논문에서 사

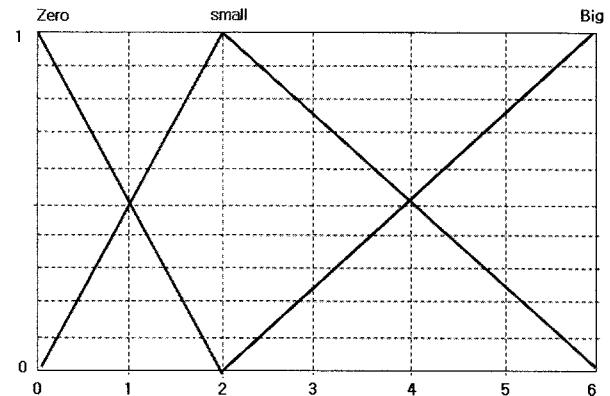


그림 9. 입력 DOD에 대한 소속 함수
Fig. 9. Membership function of input DOD.

용한 천이 행렬(A), 관측 행렬(H), 시스템 잡음 공분산(Q)과 측정 잡음 공분산(R_k)은 아래와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ H &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ Q &= N_{acc} \times \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^4}{4} & \frac{\Delta t^3}{2} \\ \frac{\Delta t^3}{2} & \Delta t^2 \end{bmatrix}, \\ R_k &= (a_1 Z_k^{-2} + a_2 Z_k^{-1} + a_3) Z_k^{-2}. \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서 Δt 는 표본화 주기(sampling rate), N_{acc} 는 가속도 오차를 나타내며, 본 논문에서는 각각 30ms와 10m/s^2 으로 설정한다. 식 (12)를 이용한 측정치 공분산(R_k)은 실제 거리를 알 수 없기 때문에 추정치를 이용하여 결정한다.

본 논문에서는 거리 정확도 및 신뢰도의 성능을 비교 분석하기 위하여 CKF, STKF, AFSTKF, EAFSTKF 등을 이용하여, 추정된 거리의 오차율을 구한다. 먼저, 그림 1의 STKF에서 ρ 와 β 는 기존 논문^[12, 15]에서 사용되고 있는 값인 0.95와 4.5로 설정하고, 그림 2의 AFSTKF에서의 퍼지 규칙과 소속 함수는 [15]에서 사용된 값으로 설정한다. 그림 3의 EAFSTKF에서 식 (2)와 (6)에서 사용한 윈도우의 개수(N)는 10으로 설정한다. 또한 DOD에 대한 소속 함수(u)는 그림 9와 같이 설정하고, T-S 모델의 3가지 퍼지 규칙에서 $C_{10}, C_{11}, C_{20}, C_{21}, C_{30}$ 은 각각 8, -1, 5, -25, 2로 설정한다.

거리 정확도의 성능을 검증하기 위하여 무작위(random)로 목표 물체를 이동시키고, 목표 물체의 경로를 추적하면서 측정된 거리에 대하여 실제 거리와의 오차율을 비교한다. 그림 10은 시차를 이용하여 측정된 거리, 정밀 시차를 이용하여 측정된 거리, CKF를 이용

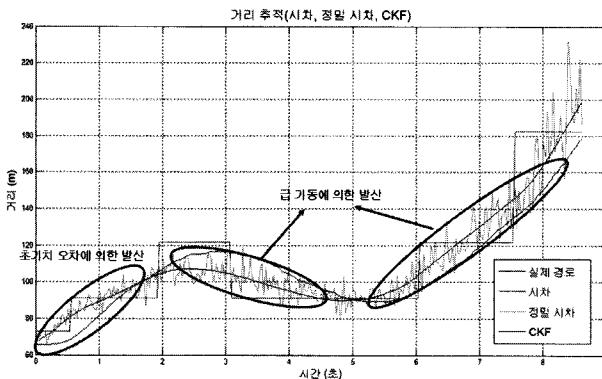


그림 10. 거리 추적(시차, 정밀 시차, CKF)

Fig. 10. Tracking distance(disparity, accurate disparity, CKF).

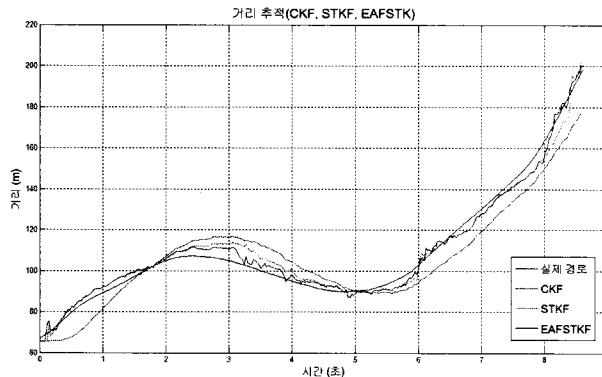


그림 11. 거리 추적(CKF, STKF, EAFSTKF)

Fig. 11. Tracking distance(CKF, STKF, EAFSTKF).

하여 측정된 거리와 이동 경로를 보여준다. 그림 10에서와 같이 CKF를 이용한 거리 추적에서는 초기치 오차가 클 경우, 수렴 시간이 오래 걸리는 문제와 기동 시 발생하는 문제가 발생한다. 그림 11은 STKF와 EAFSTKF를 사용하여 추적된 거리를 CKF와 비교하여 보여준다. 그림 11에서와 같이 STKF와 EAFSTKF를 사용함으로써, CKF에서 재기되었던 문제를 해결할 수 있다. 또한 EAFSTKF를 이용함으로써, STKF에 비하여 정확도 및 신뢰도를 좀 더 향상시킬 수 있다.

3m~200m까지의 거리에서 거리 정확도 및 신뢰도의 비교 분석을 위하여 몬테카를로 방법을 이용하여, 다양한 거리 추정 방법에 의한 거리 오차율에 대하여 아래 식과 같이 RMSE(Root mean square error rate)로 나타낸다.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \left(\frac{H_k x_k - z_k^+}{H_k x_k} \right)^2} \times 100. \quad (14)$$

식 (14)에서 N은 반복 횟수를 나타내며, 본 논문에서는 10,000번을 실험한다. M은 3~200m 구간내의 표본 개수

표 2. 추정 거리의 RMSE

Table 2. RMSE of estimated distance.

거리 추정 방법	RMSER(%)
disparity	5.77
accurate disparity	3.49
accurate disparity + CKF	3.20
accurate disparity + STKF	2.00
accurate disparity + AFSTKF	2.00
accurate disparity + EAFSTKF	1.73

(sampling number)를 나타내며, z_k^+ 는 추정된 거리를 나타낸다. 표 2는 스테레오 비전 기반으로 다양한 방법에 의하여 측정된 거리에 대한 RMSE를 보여준다. 표 1에서와 같이 GPS에 적용된 AFSTKF^[15]를 스테레오 비전에 그대로 적용했을 때 STKF와 성능에서 큰 차이가 없는 것을 알 수 있고, 본 논문에서 제안한 EAFSTKF가 13.5%정도의 성능 향상이 있음을 보여준다.

V. 결 론

본 논문에서는 스테레오 비전 기반으로 장애 물체의 거리를 추정하고 이동 경로를 추적하는 향상된 적응형 퍼지 동적 필터를 설계하고, 성능을 기존 방법과 비교하여 검증하였다. 시차를 이용한 거리 측정은 시차의 양자화 오차로 인하여 원거리에서의 거리 오차를 증가시키는 문제를 발생시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 부화소 보간에 의한 정밀 시차 추정과 추정된 시차의 분산을 예측하여 적응형 퍼지 동적 필터를 적용함으로써, 거리 오차를 최소화하여 신뢰성 있는 거리 정보를 추정하고 이동 경로를 추적할 수 있다. 본 논문에서 제안한 향상된 적응형 퍼지 칼만 필터는 스테레오 비전 기반에서 시차를 이용한 거리 추정에 최적화함으로써, 차량과 같은 외부 도로 환경에서 근거리 장애 물체뿐만 아니라 원거리 장애 물체에 대하여 신뢰성 있는 거리를 추정하고 이동 경로를 추적할 수 있다. 이로 인해 위험 상황을 미리 운전자에게 경고할 수 있는 충돌 경고 시스템이나 충돌 회피 시스템과 같은 안전 시스템에 적용될 수 있다. 향후 다중 물체 인식 및 위치 추정을 위한 연구와 다양한 외부 환경에서의 실험 및 검증이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] A. N. Ndjeng, S. Glaser and D. Gruyer, "A

- Multiple Model Localization System for Outdoor Vehicles, ~ IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 1050–1055 June 2007.
- [2] B. Mabus, A. Joos, and U. Kolbe, "Multi-target multi-object radar tracking," in Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 489 - 494, June 2003.
- [3] J. Wang, F. Gao, S. Shi, and J. Wang, "A New Method for Distance and Relative Velocity Measurement in Vehicle Collision Warning System," in Proc. IEEE Intelligent Systems Design and Applications, pp. 1142 - 1147, Oct. 2006.
- [4] Y. -L. Chen, and C. -A. Wnag, "Vehicle Safety Distance Warning System: A Novel Algorithm for Vehicle Safety Distance Calculating Between Moving Cars," in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 2570 - 2574, April 2007.
- [5] S. Birchfield, and C. Tomasi, "A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 20, No. 4, pp. 401 - 406, April 1998.
- [6] M. Shimizu, and M. Okutomi, "Precise sub-pixel estimation on area-based matching," in Proc. IEEE International Conference on Computer Vision, Vol. 1, pp. 90 - 97, July 2001.
- [7] S. Nedevschi, R. Danescu, D. Frentiu, T. Marita, F. Oniga, C. Pocol, R. Schmidt, and T. Graf, "High accuracy stereo vision system for far distance obstacle detection," in Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 292 - 297, June 2004.
- [8] E. Z. Psarakis, and G. D. Evangelidis, "An enhanced correlation-based method for stereo correspondence with subpixel accuracy," in Proc. IEEE International Conference on Computer Vision, Vol. 1, pp. 907 - 912, Oct. 2005.
- [9] D. H. Zhou and P. M. Frank, "Strong tracking Kalman filtering of non-linear time-varying stochastic systems with colored noise: Application to parameter estimation and empirical robustness analysis," Int. J. Control, Vol. 65, no. 2, pp. 295–307, Sep. 1996.
- [10] H. You, S. Qiang, Y. -L. Dong, Y. Jian, "Adaptive Tracking Algorithm Based on Modified Strong Tracking Filter," Radar, CIE, pp. 1-4, Oct. 2006.
- [11] P. Pan, X. Feng, F. Li, "Self-adaptive Constant Acceleration Model and Its Tracking Algorithm Based on STF," International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 3784-3789, Aug. 2007.
- [12] Y. -C. Lim, C. -H. Lee, S. Kwon, and W. -Y. Jung, "Distance Estimation Algorithm for Both Long and Short Ranges Based on Stereo Vision System," IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 841-846, June 2008.
- [13] W. Jin, X. Zhan, "A Modified Kalman Filtering via Fuzzy Logic System for ARVs Location," International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 711-716, Aug. 2007.
- [14] D. -J. J, C. -M. Huang, "An Adaptive Fuzzy Strong Tracking Kalman Filter for GPS/INS Navigation," IECON 2007, pp. 2266-2271, Nov. 2007.
- [15] D. -J. Jwo, S. -H. Wang, "Adaptive Fuzzy Strong Tracking Extended Kalman Filtering for GPS Navigation," IEEE Sensors Journal, Vol. 7, no. 5, pp. 778-789, May. 2007.

저자 소개



임 영 철(정회원)
 1999년 2월 경북대학교
 전자공학과 학사
 2005년 2월 경북대학교
 전자공학과 석사
 2005년 6월 ~ 현재 DGIST 연구원
 <주관심분야 : 스테레오 비전, 영
 상 추적, 위치 추정>



이 충 회(정회원)
 1996년 2월 경북대학교
 전자공학과 학사
 1998년 2월 경북대학교
 전자공학과 석사
 1998년 2월 ~ 2005년 12월 LG전자
 2005년 12월 ~ 현재 DGIST
 선임 연구원
 <주관심분야 : 스테레오 비전, 장애물체 검출>



권 순(정회원)
 2003년 8월 고려대학교
 전자공학과 학사
 2006년 2월 서울대학교
 전자공학과 석사
 2006년 2월 ~ 현재 DGIST 연구원
 <주관심분야 : 스테레오 비전,
 DSP architecture>



이 종 훈(정회원)
 1996년 2월 성균관대학교
 전자공학과 공학사
 1998년 2월 성균관대학교
 전기전자및컴퓨터공학과
 공학석사
 2002년 2월 성균관대학교
 전기전자및컴퓨터공학과
 공학박사
 2002년 1월 ~ 2005년 7월 삼성전자 통신연구소
 책임
 2005년 7월 ~ 현재 대구경북과학기술연구원
 (DGIST) 과제책임자/선임
 2007년 3월 ~ 현재 영남대학교 정보전자공학부
 겸임교수
 <주관심분야 : 레이더/비전 융합신호처리, 차량용
 레이더, lidar>