

# 불확실한 조건에서의 계측을 위한 잉여센서시스템

## Redundant Sensor Sysmtes for the Measurement under Uncertain Conditions

도용태, 대구대학교 정보통신공학부

Yongtae Do

School of Computer & Communication Engineering, Taegu University

### ABSTRACT

To interact with surroundings robots and other automated machines employ sensors. However, the sensors' measurements are uncertain in some amount and this may limit the potential applications of machines. Varying surrounding conditions and noises of sensor signals are major sources of the uncertainty. In this paper the uncertainty is tried to be reduced by using redundant sensor systems, where the redundancy is accomplished by varying the parameters of logically defined sensors. The target value redundantly measured is estimated adaptively. An experiment was done for measuring the stereoscopic 3D position measurement in an inconsistent light condition.

## I. 서론

센서는 로봇이나 자동화 장치에 있어서 목표물을 감지하고 작업환경에 능동적으로 대응하며 제어의 정확성을 높일 수 있게 하는 역할을 한다. 그러나 센서에서 얻어지는 정보는 현실적으로 크고 작은 불확실성(uncertainty)을 내포하고 있다. 센서귀환 시스템에서 센서의 정보는 흔히 정확하다고 가정되어지고, 그 가정하에서 시스템의 제어요소가 제어되고 오차는 보정되어지지만, 실제로는 센서 자체가 하나의 오차원이며[1], 센서정보의 부정확성(특히 갑자기 일어나는 센서의 계측실패에 의한 허용범위를 초과하는 오차)은 자동화 시스템 작업의 질에 심각한 결과를 가져온다. 센서정보의 불확실성을 초래하는 요인으로는 센서의 오동작, 목표 탐지의 실패, 신호에 포함된 전기적 잡음, 시스템 자체의 부정확성, 그리고 작업환경의 변화등이 있다.

본 논문에서는 센서정보의 불확실성 문제를 극복하기 위해 센서를 잉여로(redundantly) 사용하여 보다 신뢰할 수 있고 정확한 정보를 얻어내는 방법들을 제시한다. 잉여센서의 사용

은 카메라를 추가로 사용하여 matching의 효율을 증가시키거나[2], 여러 종류의 센서들이 가지는 다른 특성들을 적절히 이용하여 이동 로봇 환경의 불확실성을 감소시키려는 연구[3] 등에서 이미 그 유용성이 입증된 바 있다. 그러나 잉여센서의 사용은 경제적, 혹은 시스템 설계적인 측면에서 현실적인 제약을 초래할 수 있으므로, 본 논문에서는 특히 단수의 물리적 센서를 다수의 논리적 센서(logical sensors)[4]로 정의하여 다수의 계측치를 얻고 이를 융합한다. 잉여센서 정보의 융합(fusion)을 위한 기존의 방법으로는 본 논문에서 사용한 MLE[5]외에도 결정법[6], Kalman 필터[7], 퍼지논리[8]등이 있다. 제안된 기법은 불확실한 밝기 조건하에서의 3차원 위치측정의 실험에 적용시켜 그 유용함을 증명한다.

## II. 잉여센서 시스템

### 2.1 잉여센서의 사용에 의한 불확실성의 감소

센서 계측의 잉여성은 동종, 혹은 타종의 센서를 동일한 목표에 대해 사용함으로써 얻어

질 수 있다. 이 때 잉여로 얻어진 계측치는 서로 경쟁의 관계에 있고, 이들을 융합하는 문제는 보다 신뢰성이 높은 추정값을 이들 다수의 계측치로부터 얻어내는 일이 된다.

그림 1은 일반적인 잉여센서 시스템의 구조를 보여준다. 작업환경내에 있는 임의의 목표를 물리적, 혹은 논리적으로 정의된 잉여의 센서에 의해 측정했을 때, 각 센서의 출력은 융합되기 전에 하나의 통일된 표현으로 나타내어져야 한다. 통일된 형식에 의해 표현된 측정치는 상호간의 일관성(consistency)이 점점되어진다. 즉 어떤 센서의 측정치가 다른 센서들의 결과와 허용할 수 없을 정도로 다르다면, 그 센서의 측정치는 큰 오차를 내포하고 있다고 보고 전체의 정보처리 공정에서 제외시킨다. 이 단계는 흔히 목표탐지에 실패한 센서에 의한 측정치가 전체 센서 시스템의 정확도를 크게 떨어뜨리는 것을 막기 위한 것이다. 이 때, 다수의 센서는 임의의 측정 순간에 정상적으로 동작한다는 가정을 전제로 한다. 어떤 센서의 측정치가 다른 센서들의 측정치와 일관성이 있는가의 기준은 측정치의 모델에 따르며, 이는 다음 3절에서 논한다.

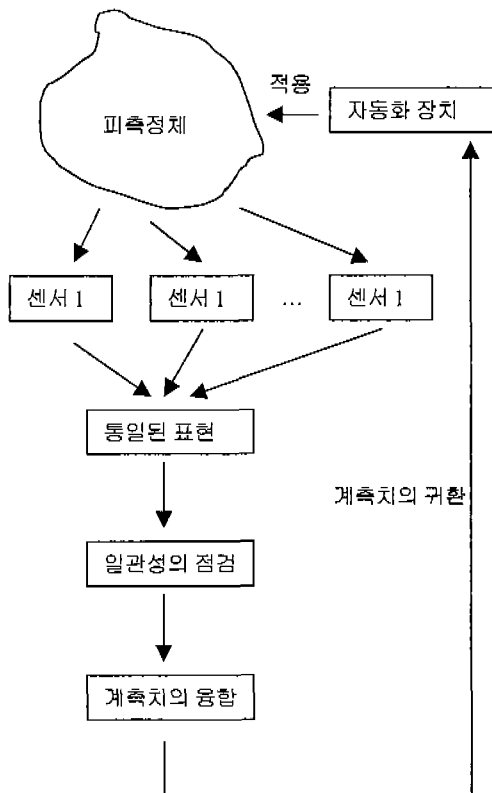


그림 1. 잉여 센서시스템

## 2.2 논리적 잉여센서

하나의 목표물에 대해 다수의 센서를 사용하는 것은 전술된 이점에도 불구하고, 추가로 요구되어 지는 (계산적, 경제적, 공간적) 조건들에 의해 제약을 받게 된다. 또 주어진 (잉여성이 없는 단수의) 센서가 충분히 활용되지 못한 상태에서 추가로 센서를 사용하게 되는 경우도 많다. 이런 측면에서 논리적 센서[4]의 개념은 유용하다. 논리적 센서는 기능에 따라 추상적으로 정의되는 소프트웨어와 하드웨어의 결합체로, 크게 입력과 계산단위, 그리고 출력벡터의 3부분으로 구성된다. 논리적으로 정의된 센서는 물리적 센서장치와 응용프로그램을 하나의 단위로 취급할 수 있게 한다. 예를 들어 만약 카메라를 불확실한 밝기 조건하에서 사용한다면, 다른 노출시간을 적용했을 때 얻어지는 각각의 계측치는 다른 논리적 센서로부터 얻어지는 다수의 출력으로 정의될 수 있다.

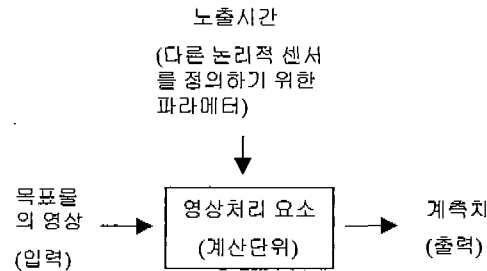


그림 2. 다른 감광도를 갖는 논리적 카메라

## III. 잉여 계측치의 융합

어떤 목표를 관측하는데  $n$ 개의 센서가 잉여로 사용되었다고 할 때, 임의의 센서  $k$ 가 참값  $S$ 로 표현되는 목표신호를 측정하여 얻어진 값  $D_k$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$D_k = S + N_k, 1 \leq k \leq n \quad (1)$$

여기서  $N_k \sim N(0, \sigma_k)$ 는 가산 측정잡음이다. 만약  $N_k$ 가 통계적 의미에서 서로 독립이라면, 잉여의 계측치로부터 불확실성이 감소된 추정치를 얻을 수 있다.

식(1)로 표현되는 측정치들의 집합이

Gaussian cluster임에 유의하면, 센서 측정치의 일관성을 점검할 수 있는 방법을 생각할 수 있다[9]. 즉, 측정치들의 중간값(median value)을 대표값으로 사용하였을 때, 어떤 센서의 측정치  $D_k$ 는  $(D_k - D_m)^2 > h\sigma^2$ 이면, 다른 센서들의 측정치와 일관성이 없다고 추정할 수 있다 (단,  $D_m$ 은 중간값,  $h$ 는 임의 상수,  $\sigma^2$ 는 분산).

일단 일관성의 점검을 통과한 계측치들은 피계측치를 추정하기 위해 융합되어야 한다. 만약 계측의 환경이 정적이고  $n$ 개의 센서가 각각 다른 정확도를 가지고 있다면, 각 센서로부터 얻어진 정보들은 각각의 정확도에 비례하는 가중치로 합하여 질 수 있다. 즉, 어떤 센서의 측정치가  $\sigma_k$ 의 분산을 갖는 가산 정규 오차를 가지고 있다면, 이 센서의 신뢰도  $C_k$ 는  $1/\sigma_k$ 로 정의될 수 있으므로 가중치  $W_k$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$W_k = C_k / \sum_{i=1}^n C_i \quad (2)$$

결국 잉여의 측정치  $\{D_1, D_2, \dots, D_k\}$ 로부터 얻어지는 추정치는

$$\hat{S} = \sum_{i=1}^n W_i D_i \quad (3)$$

와 같다. 이때  $\sigma_k$ 는 정적인 환경의 가정하에서 충분한 수의 기지 신호와 이의 측정치로부터 추정되는 것이 보통이다. 식 (3)에 의한 방법은 다음과 같은 특성을 갖는다:

(i) 만약 각 센서의 정확도가 같다면, 식 (3)은 결국 각 센서의 측정치를 산술평균하는 것이다. 즉,  $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_n = \sigma$  에 대해,  $S$ 의 오차함수는  $L = (1/n)\sigma^2$  로 결국 goodness of estimate가 사용한 센서의 개수 배만큼 향상된다.

(ii) 식(3)의  $S$ 은 주어진 측정치의 벡터  $D$ 에서 likelihood 함수

$$p(D|S) = \prod_{i=1}^n p(D_i|S) \quad (4)$$

를 최대로 하는 값이다.

식(3)의 사용은 사용된 센서들의 정확도가 시불변이라는 가정하에서 가능하다. 그러나 그러한 조건은 센서의 작업환경이 철저히 구조화되어 제어되어야만 성립한다는 문제가 있다. 실제의 경우 각 센서의 정확도는 고정되어 있기 보다는 작업환경의 변화에 따라 변화하게 되는 수가 보통이다. 만약 그 변화속도가 센서의 샘플링 주기보다 충분히 느리다면, 센

서의 정확도는 적응적으로 추정되어질 수 있을 것이다.

센서 정확도의 변화가 어떠한 주기  $T$ 동안에 충분히 작아서  $T$  동안에는 센서의 정확도가 불변으로 가정할 수 있다고 하자. 이때  $T$ 는 두 개의 상충하는 조건에 기초해서 결정되어야 한다:

(i)  $T$ 는 충분히 작아서 센서 정확도의 변화를 충실히 따라갈 수 있어야 한다;

(ii)  $T$ 는 충분히 커서 그 시간내에 될 수 있는 대로 많은 샘플링이 일어나서 센서의 정확도가 추정될 수 있어야 한다. 만약 센서의 샘플링 시간이  $d$ 라면,  $T$ 주기 동안에  $m (= T/d)$ 번의 측정이 일어날 수 있다. 그러면  $m$ 번의 측정 후 임의 센서의 측정오차의 분산은

$$\hat{\sigma}_m^2 = (1/m) \sum_{i=1}^m (S_i - D_i)^2 \quad (5)$$

와 같이 추정될 수 있다. 따라서 어떠한 시점  $t$ 에서 센서의 측정오차의 분산은 recursive한 형태로

$$\hat{\sigma}_t^2 = \hat{\sigma}_{t-1}^2 + (1/m)(N_t^2 - \hat{\sigma}_{t-1}^2) \quad (6)$$

와 같이 표현될 수 있음을 알 수 있다. 여기서 제공오차는  $N_t^2$ 는 신호의 추정치와 측정치 사이의 차의 제곱이다. 식 (6)에 의해 추정된 각 센서의 정확도는 식(3)에 의해 센서들의 측정치를 융합하는데 쓰일 수 있게 된다.

#### IV. 적용 예

변화하는 환경에 대하여 서로 다른 감도를 가진 센서들을 구현하기 위하여  $t_1, t_2, t_3$  (단,  $t_1 > t_2 > t_3$ )의 3가지 노출시간을 하나의 스테레오 카메라 시스템에 차례로 부여함으로써 3개의 3차원 논리적 위치추정센서  $K_1, K_2, K_3$ 를 정의하였다. 그러면 이 세 센서들은 감광도외에는 똑같은 내외부 파라미터를 가지는 센서들이 된다. 표1은 정의된 논리적 센서들로부터 얻은 light spot 중심의 Z축 좌표 제공오차의 확률적 특성을 나타낸 것이다.

표에서 볼 수 있듯이  $K_1$ 은 초기의 어두운 환경에서는 정확한 측정치를 제공하다가 점차 밝아짐에 따라 과대 노출되어 심하게 부정확해진다. 반면  $K_3$ 의 경우는 전반적으로 점차 정확해지기는 하지만, 초기 어두운 환경에서

과소 노출되었음에도 비교적 작은 오차를 보였다. 그 이유는 과소 노출된 경우는 light spot의 일부만 영상에 잡히므로, 중심점이 부정확하긴 하지만 여전히 작은 spot내에 존재하게 되기 때문이다. 그러나 과대 노출된 경우는 light spot의 영상외에도 많은 잡음들이 중심점 계산에 포함되어 spot과는 많이 어긋날 뿐 아니라 불규칙한 좌표를 얻게 된다. 이들 값을 본 논문에서 제안한 방식대로 적응적으로 융합한 경우의 결과가 중간값 필터를 사용한 경우보다 조금 좋았다.

구분	K1	K2	K3	평균	중간값	융합
$\mu$	15.19	2.47	1.24	3.98	2.38	2.32
$\sigma^2$	277.93	6.04	1.61	59.14	6.36	6.21

표1. 3개의 논리적 센서와 이들의 융합에 의한 계측오차

## V. 결론

센서의 계측치에는 기본적으로 얼마간의 불확실성이 내포되어 있다. 이 불확실성은 목표물 및 환경과 적응적으로 작업하는 로봇을 비롯한 자동화 장치의 지능화를 가로막은 중요한 요소가 된다. 본 논문에서는 논리적으로 정의된 다수의 센서를 융합함으로써 계측의 불확실성을 감소시키는 방법에 대하여 논하였다. 각 센서의 신뢰도는 적응적으로 추정되어 변화하는 불확실한 환경 아래에서도 좋은 결과를 얻을 수 있고, 이는 밝기가 변화하는 조건에서 스테레오 카메라를 통한 삼차원 위치측정의 실험을 통해 입증되었다. 또 논리적 센서의 사용은 제어되는 하나의 변수에 대한 센서의 성능을 효율적으로 실험할 수 있게 하였다.

## 참고문헌

- [1] D.G.Johnson, "Integrating sensors and actuators for robotic assembly", Ph.D Dissertation, Univ. of Hull, U.K., 1986.
- [2] M.Ito and A.Ishii, "Three-view stereo analysis', IEEE Tran. on PAMI, vol.PAMI-8, no.4, pp.524-532, 1986.
- [3] S.Y.Harmon et al, "Sensor data fusion through a distributed blackboard", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation,

pp.1449-1454, 1986.

- [4] T.Henderson and E.Shilcrat, "Logical sensor systems", J. of Robotic Systems, vol.1, no.2, pp.169-193, 1984.
- [5] E.Krotkov, "Exploratory visual sensing for determining spatial layout with an agile stereo camera system", Ph.D Dissertation, Univ. of Pennsylvania, 1987.
- [6] A.M.Flynn, "Combining sonar and infrared sensors for mobile robot navigation", Int. J. of Robotics Research, vol.7, pp.5-14, 1988.
- [7] J.G.Balchen and F.Dessen, "Structured solution of highly redundant sensing in robotic systems", Modelling, Identification and Control, vol.11, no.1, pp.3-11, Jan., 1990.
- [8] W.J.Kim et al, "On a notion of sensor modelling in multisensor data fusion", in Proc. '91 KACC, pp.1597-1600, 1991.
- [9] H. F. Durrant-Whyte, "Consistent integration and propagation of disparate sensor observations", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.138-145, 1985.