

## 제2세대 로봇을 위한 다중센서 시스템에 관하여

도 용 태

대구대학교 공과대학 제어계측공학과

### On the Multi-Sensor Systems for the Second Generation Robots

Yongtae Do

Department of Control & Instrumentation Engineering,

Taegu University

#### ABSTRACT

Readings from robotic sensors are somewhat uncertain. This uncertainty problem makes it difficult to employ the sensor feedback controlled robots widely in real industrial sites. In this paper, redundant sensor fusion techniques are discussed to effectively overcome the sensor uncertainty. A weighted averaging technique is proposed under static and dynamic sensing environments. Proposed technique is tested by the experiments of stereoscopic 3d position measurements.

#### 1. 서론

센서를 이용하여 작업 상황을 감지함으로써 예기치 못한 환경의 변화에 능동적으로 대처하며 작업할 수 있는 이른바 '제2세대 로봇' [1]은 로봇이 산업현장에 이용되기 시작한 이후 지난 30여년간 로봇에 관련된 연구의 오랜 목표중의 하나였다. 하지만 아직 대부분의 산업용 로봇은 단순 반복작업에 이용되어지고 있을 뿐이며, 제2세대 로봇의 본격적인 도래에는 앞으로도 적지 않은 시간이 걸릴 것으로 보인다.

이처럼 로봇의 지능적인 작업에로의 응용이 더디게 이루어지고 있는 데는 여러가지 이유가 있겠지만 크게 두가지 이유를 먼저 생각할 수 있을 것이다: 첫째는 경제성의 문제로, 작업환경을 조직화하여 로봇이 단순작업을 반복케 하는 것이 조직화되어 있지 않는 환경에서 로봇이 융통성있는 작업(flexible manipulation)을 하게 하는 것보다 싼 비용과 적은 계산(less computing power)으로 생산을 자동화할 수 있는 방법이라는 것이다. 이 문제는 현재 제2세대 로봇의 활용을 가로막는 가장 큰 현실적 요인이기는 하지만, 급속도로 가격이 저하되면서 동시에 고성능화 되어가고 있는 컴퓨터 및 마이크로프로세서를 생각할 때 그 심각성은 점차 작아질 것이다. 둘째는 제2세대 로봇에 필수적인 센서에서 얻

어지는 정보가 실제적으로 많은 불확실성(uncertainty)을 내포하고 있다는 문제이다. 센서관련 자동화 시스템에서 센서의 정보는 흔히 정확하다고 가정되어지고, 그 가정하에서 시스템의 요소가 재어지고 오차는 보정되어지지만, 실제로는 센서 자체가 하나의 오차원이며 [2], 센서정보의 부정확성(특히 갑자기 일어나는 센서 failure에 의한 허용범위를 초과하는 오차)은 제2세대 로봇을 포함한 자동화 시스템 작업의 질에 심각한 결과를 가져온다. 센서정보의 불확실성을 초래하는 요인으로는 센서의 오동작, 목표 탐지의 실패, 신호에 포함된 전기적 잡음 그리고 시스템 자체의 부정확성이 포함된다.

본 논문에서는 로봇의 지능작업에로의 활용을 가로막는 두 요인들중 센서정보의 불확실성 문제를 극복하기 위한 한 해결책으로 센서를 필요 수 이상 여유있게(redundantly) 사용하거나 보다 신뢰할 수 있고 정확한 정보를 얻어내는 방법들을 제시하고 그 유용성을 실증해 보인다. 센서를 여유있게 사용하여 시스템의 성능과 신뢰도를 증가시킨 대표적인 예로는 3대의 카메라를 사용함으로써 matching의 효율을 증가시키는 이른바 trinocular 스트레오 [3, 4], 혹은 여러 종류의 센서들이 가지는 다른 특성들을 적절히 이용하여 이동로봇 환경의 불확실성을 감소시키려는 연구 [5, 6] 등이 있다.

본 논문은 2장에서 일반적인 다중센서 시스템의 기본구조를 살펴본 후, 3장에서 센서로부터 얻어진 정보를 융합하기 위한 기법들에 관해 논한다. 여유있게 사용된 센서들의 정보를 처리하는 기법으로는, 가장 대표적인 것으로 MLE(maximum likelihood estimation) [7] 외에도 결정법 [6], Kalman 필터링 [8], 퍼지로직을 이용한 기법 [9] 등이 있다. 본 논문에서 제안한 각 센서의 정확도를 고려한 가중 평균법은 단순 평균법 뿐만 아니라 MLE방법을 대표할 수 있다는 것을 보이고, 변화하는 환경에서도 적용할 수 있도록 발전시킨다. 4장에서는 제안된 기법을 다중센서를 사용한 3차원 위치측정의 실험에 적용시켜 그 유용함을 증명한다.

## 2. 다중센서 시스템과 센서 Redundancy

하나의 목표에 대하여 다중의 센서들은 크게 두가지 방법으로 사용되어질 수 있다: 먼저 하나의 센서가 다른 센서의 동작을 도와 주는 역할을 하도록 사용되어질 수 있다. 로봇트의 팔에 부착된 시각 센서가 gripper안쪽에 부착된 촉각 센서의 측정값에 필요한 대략적이고 기초적인 정보를 제공할 때가 한 예이다[10]. 이 경우 센서의 측정은 미리 정해진 순서에 의해 이루어지고 뒤에 행해진 측정이 선행된 측정값에 대해 우월하다. 다중의 센서들은 경쟁적으로도 사용되어질 수 있다. 이러한 방식이 사용되는 경우에는 센서들의 측정이 서로 독립적으로 이루어진다.

센서를 다중으로 사용함으로써 얻을 수 있는 잇점 (즉, 불확실성의 감소)은 여유있게(redundantly)사용된 센서의 정보들 사이에 경쟁적인 관계가 성립할 때 커질 수 있다. 본 논문에서의 관심은 이렇게 여유있게 사용된 센서들의 경쟁적 관계에 있는 측정치로부터 보다 신뢰도가 높은 정보를 얻어내는 데 있으며, 이후의 '다중센서'는 이러한 의미에서 사용되는 것으로 한다.

제2세대 로봇트를 위한 다중센서 시스템의 구조는 일반적으로 <그림1>과 같이 나타내어질 수 있다. 로봇트의 작업환경 내에 있는 임의의 목표를 다중의 센서에 의해 측정했을 때, 각 센서의 출력은 하나의 통일된 표현으로 나타내어지게 된다 (만약 같은 종류의 센서들이 사용되었다면 이 과정은 불필요하다). 통일된 형식에 의해 표현된 측정치는 상호간의 일관성(consistency)이 점검되어진다. 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 다중센서 시스템의 정확도를 크게 떨어뜨리는 것을 막기 위한 것이다. 이때, 다수의 센서는 임의의 측정 순간에 정상적으로 동작한다는 가정을 전제로 한다. 어떤 센서의 측정치가 다른 센서들의 측정치와 일관성이 있는가의 기준은 측정치의 모델에 따르며, 이는 융합기법과 함께 다음 3장에서 논한다.

### 3. 다중센서 정보의 융합기법

**센서 모델:** 하나의 목표신호를 관측하는데  $n$ 개의 센서가 여유있게 사용되었다고 할 때, 임의의 센서  $k$ 가 참값  $S$ 로 표현되는 목표신호를 측정하여 얻어진 값  $D_k$ 는 가산 측정잡음  $N_k \sim N(0, \sigma_k)$ 를 포함하여

$$D_k = S + N_k \quad \text{단, } 1 \leq k \leq n \quad (1)$$

와 같이 표현되어질 수 있다. 여기서 각 센서의 측정잡음  $N_k$ 가 통계적 의미에서 서로 독립이라면, 다중의 측정치로부터 보다 정확한 estimate를 얻을 수 있을 것이다.

결국 센서융합의 문제는 다중센서의 측정치들로부터 미지

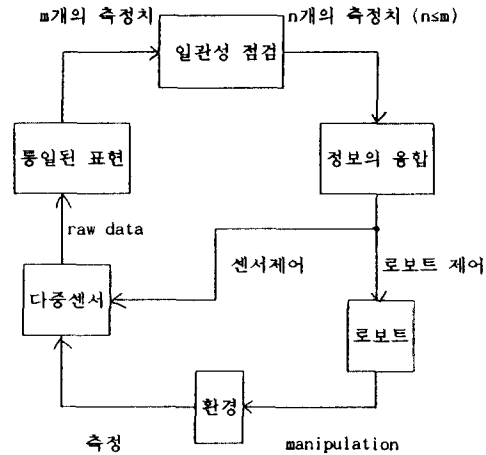


그림 1. 다중센서 시스템의 구조

의 신호  $S$ 의 최적의 estimate인  $\hat{S}$ 을 얻을 수 있는 기법  $f: \hat{S} = f(D_1, D_2, \dots, D_k)$ 를 찾는 것이며, 이때 goodness of estimate는 오차함수  $L = E[(S - \hat{S})^2]$ 로부터 정의될 수 있다. 즉, 오차제곱의 기대치가 작을수록 좋은 estimate라고 할 수 있다.

식(1)로 표현되는 측정치들의 집합이 Gaussian cluster임에 유의하면, 센서 측정치의 일관성을 점검할 수 있는 방법을 생각할 수 있다. Durrant-Whyte[11]는 임의의 센서 측정치의 일관성을 점검하기 위해 측정치들의 중간값(median value)과의 거리를 사용하였다. 즉, 어떤 센서의 측정치  $D_k$ 는  $(D_k - D_m)^2 > h\sigma^2$ 이면, 다른 센서들의 측정치와 일관성이 없다고 추정하였다 (단,  $D_m$ 는 중간값,  $h$ 는 임의의 상수,  $\sigma^2$ 는 분산).

**절점 환경:** 만약  $n$ 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 Gaussian error를 가지고 있다면, 이 센서의 신뢰도  $C_k$ 는  $1/\sigma_k$ 로 정의될 수 있고, 이 신뢰도를  $n$ 개 센서의 신뢰도에 대하여 normalizing 하여 얻어지는 가중치  $W_k$ 는

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

와 같이 정의될 수 있다. 결국 다중센서의 측정치  $(D_1, D_2, \dots, D_k)$ 로부터 얻어지는 estimate  $\hat{S}$ 은 식(2)의 가중치로 평균한

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

와 같다. 이때  $\sigma_k$ 는 시불변 환경의 가장하에서 충분한 수의

기지의 신호(known signals)와 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, 각 센서는 같은 가중치를 갖게 되어 미지의 신호 S는

$$\hat{S} = (1/n) \sum_{i=1}^n D_i \quad (4)$$

와 같이 estimation될 수 있으며, 이때 S의 오차함수는  $L = (1/n)\sigma^2$ 로 결국 goodness of estimate가 사용한 센서의 갯수 배만큼 향상된다.

(ii) 식(3)의 S는 주어진 측정치의 벡터 D에서 likelihood 함수

$$p(D|\hat{S}) = \prod_{i=1}^n p(D_i|\hat{S}) \quad (5)$$

를 최대로 하는 값이며[12], Krotkov[7]는 likelihood함수를 최대로 하는 estimate  $\hat{S}$ 이 다중센서중 가장 정확한 센서 단독에 의한 측정치보다 그 goodness of estimate가 크다는 것을 증명하였다.

**동적 환경:** 다중센서에 의해 얻어진 정보를 식(3)으로 융합하기 위해서는 사용된 센서들의 정확도가 시불변이라는 가정이 성립하여야 한다. 그러나 그러한 조건은 로봇의 작업환경이 철저하게 구조화(structured)되어 제어되어야만 성립한다는 문제가 있다. 실제의 경우 각 센서의 정확도는 고정되어 있기 보다는 작업환경의 변화에 따라 변화하게 되는 수가 많다. 만약 그 변화속도가 센서의 샘플링 주기보다 충분히 느리다면, 센서의 정확도는 적응적으로 estimation 되어질 수 있을 것이다. 불변의 환경하에서 제안된 가중평균법을 변화하는 환경하에서 고려해 보자.

센서 정확도의 변화가 어떠한 주기 T동안에 충분히 작아서 T 동안에는 센서의 정확도가 불변으로 가정할 수 있다고 하자. 이때 T는 두개의 상충하는 조건에 기초해서 결정되어야 한다: (i) T는 충분히 작아서 센서 정확도의 변화를 충실히 따라갈 수 있어야 한다; (ii) T는 충분히 커서 그 시간내에 될 수 있는대로 많은 샘플링이 일어나서 센서의 정확도가 estimation될 수 있어야 한다. 만약 센서의 샘플링 시간이 d 라면, T주기 동안에  $m (= T/d)$ 번의 측정이 일어날 수 있다. 그러면 m번의 측정 후 임의의 센서의 측정오차의 분산은

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_m^2 &= (1/m) \sum_{i=1}^m (S_i - D_i)^2 \\ &= (1/m) \sum_{i=1}^m N_i^2 \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 estimation될 수 있다. 새로운 측정치에 대해, 헛식은 다음과 같이 새로운 제곱오차를  $1/m$ 의 가중치로 곱함으로써 update될 수 있다:

$$\hat{\sigma}_{m+1}^2 = ((m-1)/m)\hat{\sigma}_m^2 + (1/m)\hat{N}_{m+1}^2 \quad (7)$$

결국 어떠한 시점 t에서 센서의 측정오차의 분산은 recursive한 형태로

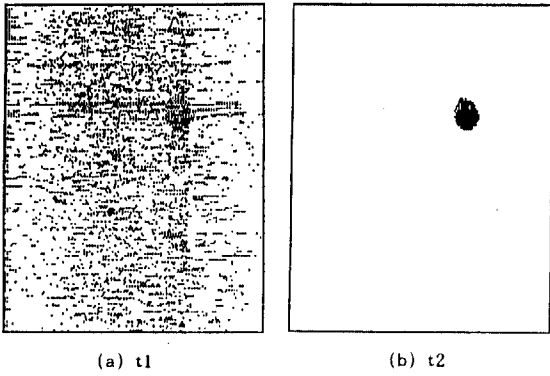
$$\hat{\sigma}_t^2 = \hat{\sigma}_{t-1}^2 + (1/m)(N_t^2 - \hat{\sigma}_{t-1}^2) \quad (8)$$

와 같이 표현될 수 있다. 식 (8)에 의해 estimation된 각 센서의 정확도는 식(3)의 가중평균법에 의해 센서들의 측정치를 융합하는데 쓰일 수 있게 된다. 식 (8)에서 residual항은  $1/m$ 에 의해 가중되었음에 유의하자. 만약  $1/m$ 대신  $1/t$ 이 가중치로 사용되었다면 현재와 과거의 오차가 같은 중요도로 고려되는 것이고, 만약  $1/m$ 이 사용된다면 과거의 오차는 iteration이 진행됨에 따라 점차 작은 비중으로 고려되는 것이다.

#### 4. 실험 및 고찰

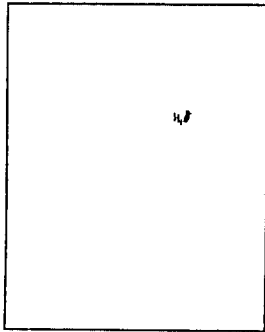
센서의 정확도는 여러가지 내부적, 외부적 환경요소에 따라서, 센서의 성능을 시험한다는 것은 쉽지 않다. Henderson등에 의해 제안된 '논리적 센서 (logical sensor)'[13]의 개념은 센서를 특성에 따라 정의하고 시험하는데 편리하다. 하나의 논리적 센서는 하나 또는 여러 개의 센서와 측정 및 처리 소프트웨어로 정의될 수 있다. 본 논문에서는 변화하는 환경에 대하여 서로 다른 감도를 가진 센서들을 구현하기 위하여  $t_1, t_2, t_3$  (단,  $t_1 > t_2 > t_3$ )의 세가지 노출시간을 하나의 스테레오 카메라 시스템에 차례로 부여함으로써 3개의 삼차원 논리적 위치측정센서 K1, K2, K3를 정의하였다. 그러면 이 세 센서들은 빛감광도외에는 똑같은 내외부 파라미터를 가지는 센서들이 된다. <그림 2>는 정의된 논리적 센서들로부터 얻은 light spot의 영상이다. 점차로 밝아지는 환경하에서 구조화된 조명에 의해 만들어진 light spot 중심의 Z축 좌표를 이들 센서들로 측정하고 제곱오차를 그래프로 나타낸 것이 <그림 3>이다.

그래프에서 볼 수 있듯이 K1은 초기의 어두운 환경에서는 정확한 측정치를 제공하다가 점차 밝아짐에 따라 과대 노출(over-exposed) 되어 심하게 부정확해진다. 반면 K3의 경우는 전반적으로 점차 정확해지기는 하지만, 초기 어두운 환경에서 과소 노출(under-exposed)되었음에도 비교적 작은 오차를 보였다. 그 이유는 <그림 2>에서 볼 수 있듯이 과소 노출된 경우는 light spot의 일부만 영상에 잡히므로, 중심점이 부정확하긴 하지만 여전히 작은 spot내에 존재하게 되기 때문이다. 그러나 과대 노출된 경우는 light spot의 영상 외에도 많은 잡음들이 중심점계산에 포함되어 spot과는 많이 어긋날 뿐 아니라 불규칙한 좌표를 얻게 된다.



(a) t1

(b) t2



(c) t3

그림 2. 서로 다른 노출시간으로 잡은 light spot의 영상:  
( $t_1 > t_2 > t_3$ )

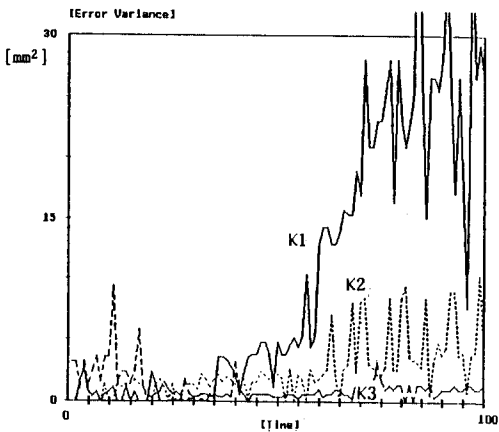
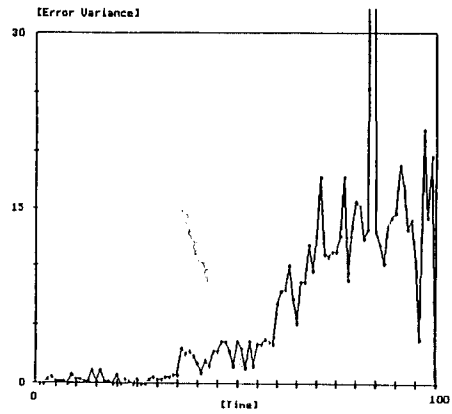
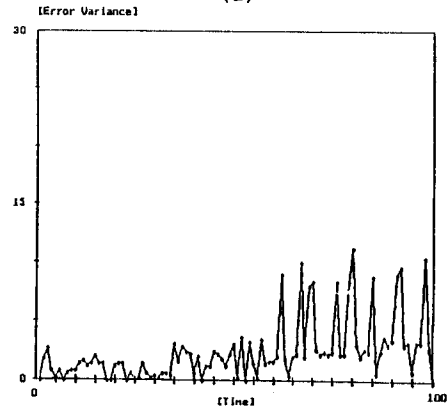


그림 3. 다른 빛 감도를 가지는 세개의 논리적 스테레오 센서로 측정된 3D 위치값의 제곱오차

<그림 4>의 (a)와 (b)는 각각 측정치를 고정된 가중치로 평균한 경우와 적응적으로 변화하는 가중치로 평균한 경우의 결과를 나타내 보인다. 그림에서 볼 수 있듯이, 적응적으로 변화하는 가중치를 사용한 경우 그 오차가 작음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. 센서의 융합: (a) 고정 가중치, (b) 적응 가중치

## 5. 결론

센서를 여유있게(redundantly) 사용함으로써 센서의 불확실성을 감소시키는 방법에 대하여 논하였다. 각 센서의 정확도를 고려하여 간단히 정의된 가중 평균법은 보다 복잡한 절차에 의해 얻어지는 MLE법과 본질적으로 동일하다. 각 센서의 가중치는 정적인 환경뿐 아니라 시간에 따라 변화하는 측정조건에서도 적응적으로 estimation될 수 있고, 그 유용성은 밝기가 변화하는 조건에서 스테레오 카메라를 통한 삼차원 위치측정의 실험을 통해 입증되었다. 논리적 센서의 사용은 제어되는 하나의 변수(밝기)에 대한 센서의 성능을 효율적으로 실험할 수 있게 하였다.

여러가지 센서융합기법의 비교연구는 실제 기술활용에 있어 기준을 제공할 수 있을 것이며, 다수의 환경변수에 대한 실험은 또다른 유용한 연구과제가 될 것이다.

## 6. 참고문헌

- [1] A. Pugh, "Second generation robotics", in Robot Vision, ed. A. Pugh, pp.3-10, IFS Publications Ltd., 1983.

- [2] D. G. Johnson, "Integrating sensors and actuators for robotic assembly", Ph.D Dissertation, Univ. of Hull, U.K., 1986.
- [3] M. Ito and A. Ishii, "Three-view stereo analysis", IEEE Tran. on PAMI, vol.PAMI-8, no.4, pp.524-532, 1986.
- [4] U. R. Dhond and J. K. Aggarwal, "Binocular versus trinocular stereo", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2045-2050, 1990.
- [5] S. Y. Harmon et al, "Sensor data fusion through a distributed blackboard", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1449-1454, 1986.
- [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] E. Krotkov, "Exploratory visual sensing for determining spatial layout with an agile stereo camera system", Ph.D Dissertation, Univ. of Pennsylvania, 1987.
- [8] 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.
- [9] W. J. Kim et al, "On a notion of sensor modelling in multisensor data fusion", in Proc. '91 KACC, pp.1597-1600, 1991.
- [10] P. M. Taylor et al, "A multi-sensory approach to sole assembly", in Proc. RoViSec-6, pp.117-126, 1986.
- [11] H. F. Durrant-Whyte, "Consistent integration and propagation of disparate sensor observations", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.138-145, 1985.
- [12] J. K. Hackett and M. Shah, "Multi-sensor fusion", Tech. Rep. CS-TR-89-16, Univ. of Central Florida, 1989.
- [13] T. Henderson and E. Shilcrat, "Logical sensor systems", J. of Robotic Systems, vol.1, no.2, pp.169-193, 1984.