

자동생산체계에서 인간-기계 시스템의 안전도측정과 안전작업설계에 관한 연구

A Study on Safety Assessment and Design of the Safe Task in Automated Man-Machine System

오 영 진*

ABSTRACT

Some problems to assess the safety of automated man-machine system are studied in many ways. The difficulty occurred in this system is the vagueness of human behavior. Fuzzy set theory is used to assess the human behavior in safety analysis. The unsafe behavior listed top 10 in accident statistics would be explained as the factors of human vagueness. Three cases are considered, which consist of man-machine system as man-man, man-machine, machine-machine types.

For the design of safe task, using characteristics of work performance, each motion cycle time is required to know the rate of learning. Approach of human behavior to the standard motion means more safe motion. It is important to design the works as to minimize the time performance to the standard motion's, which utilize the control of risk potential with easy. In that process, use of fuzzy set theory is appropriate to analyze the human behavior to identify its vagueness.

1. 서 론

산업 시스템은 과학기술의 발달과 더불어 점차 정교하게 자동화된 인간-기계 시스템으로 구성되어져 나가고 있다. 그러므로 이러한 시스템에 관련된 연구가 다각도로 진행되어 전반적으로 생산성의 향상을 얻을 수 있게 되었으며 기업의 경영과 생산에 요구되는 다양한 정보를 취득하는 것이 더욱 용이해 졌다고 볼 수 있다. 인간-기계 시스템에 관한 연구는 그 시작이 서로 다른 특성을 갖는 인간과 기계에 대한 이해를 통하여 보다 인간이 사용함에 편리하고 안전하도록 기계와 인간의 동작을 설계 하는데 있다. [1, 5] 그러므로 생산성 향상과 동시에 더욱 안전하고 용이한 작업이 수행되도록 하는 것이 그 목적이 된다.

자동화된 시스템 안에서 안전을 생각하게 되면 필연히 관련되는 것이 인간의 신뢰도에 관한 사항이다. Three Mile 섬의 사고 이후로 더욱 인간 신뢰도에 대한 흥미가 고조되었으며 이러한 연구에 대한 올바른 전제는 인간-기계 시스템의 성공적인 수행가능도, 즉 시스템의 안전성은 장비의 고장에서와 마찬가지로 인간의 실수에 의한다는 기능상의 문제이다. [7]

신뢰도를 연구하는 사람들은 기계나 장비의 신뢰도 측정에 대해서는 나름대로 믿을 만한 기준을 지니고 있으며 인간공학의 측면에서도 또한 인간의 신뢰도에 대해서 마찬가지로의 연구가 진행되고 있다. 그러므로 인간의 동작이 기계나 장비에서와 같이 표현되어야 함은 물론이며 인간과 기계의 신뢰도를 조합하여 전체적인 시스템의 신뢰도를 측정해야 한다. [11] 인간의 신뢰도를 구하여 전체 시스템의 상태를 알고자 하는 연구는 많이 전개되고 있으나 아직은 정형화 된 것이 없다. 이는 인간이 작업에 임할 때 인간의 복잡한 특성중의 하나인 자의성으로 인한 당연한 결과이기도 하다. 이러한 자의성으로 인해 인간의 행동이 성공적으로 수행되는 가에 관한 확률을 측정하는 것은 매우 곤란한 문제가 아닐 수 없다.

본 연구에서는 작업의 수행에 있어서 인간이라는 모호성을 내포한 요소와 기계가 하나의 시스템을 형성하여 운용될 경우에 그 시스템의 안전도를 측정하는 방법으로 퍼지 집합 이론을 도입하고 안전한 작업의 설계를 위해 동작을 분해하여 각 동작마다의 안전성을 측정, 설계하고 이를 관리함을 제시한다.

*한양대학교 산업공학과 박사과정

접수일 : 1990. 10. 26.

2. 분석동작 단위

시스템 속에서 일하는 작업자 또는 보전기술자 행동은 기계의 경우와 같이 변화과정을 입력과 출력으로 나타낼 수 있다. 인간의 동작을 단위 동작으로 분해하는 것은 크게 어렵지 않다.

그러나 단위를 잡는 것이 어렵다. 가령 지점 A에서 지점 B로 1분동안 걸어가는 것을 보면 걷는다는 것은 기본적으로 더 작은 동작요소로 구성되어 있다. 한발이 성공적으로 시간과 공간의 조건을 만족시키는 신뢰도와 다른 발의 경우와의 관계는 지점 B에 도달하는 것이 우선 기본이 된다. 동작의 분석을 위해선 시스템의 작업에 대한 분류를 생각해야 한다. Fleish은 이를 4개의 개념으로 분류했다. [7]

즉, Behavior Description, Behavior Requirement, Ability Requirement, Task Characteristics의 4가지로 작업을 분류했는데 이중 작업 설계나 훈련, 요원 선발을 위해서는 ability requirement가 타당하다고 했다. 본 논문에서는 이를 이용하여 동작을 분석할 때 행동이 불안전하다고 판단되는 동작을 표 1과 같이 10개의 요소로 나누어 보기로 한다. [2]

인간의 동작은 기계와는 달리 목적수행을 성공했는가 또는 실패했는의 binary 성질의 것이 아니며 더욱이 인간은 그 자체가 closed loop 시스템을 형성하고 있으므로 스스로 tracking 하는 교정의 기능이 있다. [5] 그러므로 시스템의 안전도를 구하기 위해 인간의 행동 특성을 고려하여 사고의 요인이 되는 불안전 행위를 분석하도록 한다. 이러한 인간의 행동은 모호성이 존재하므로 이를 좀 더 정확해 분석하기 위해 본 논문에서는 퍼지 집합론을 이용하여 모형화 하도록 한다.

본 연구에서는 자동화된 생산 시스템을 가정하고 인간-인간의 작업과 인간-기계의 작업 그리고 기계와 기계만의 작업으로 이루어지는 세가지의 경우에 대해 안전도 측정 모델을 제시한다.

표 1. 인적 요소인 불안전 행위의 빈도수("출처 : '86 산업재해분석, 노동부)

원 인	빈도수	빈도수/총계 (P_{M_i})
1. 위험장소 접근	3,159	0.04
2. 안전장치 기능의 제거	1,132	0.01
3. 복장, 보호구의 잘못된 사용	2,147	0.03
4. 기계, 기구의 잘못 사용	11,615	0.15
5. 운전중인 기계장치의 손질	4,498	0.06
6. 불안정한 속도조작	7,499	0.09
7. 위험물 취급의 부주의	2,095	0.04
8. 불안전상태의 방치	8,018	0.10
9. 불안전 자세의 동작	38,154	0.48
10. 감독 불충분	1,198	0.11
총 계	79,515	1.00

3. 안전도측정 모델

본 연구에서 사용되는 기호들은 다음과 같다.

H : 인간과 관계가 있는 위험 원소로 이루어진 집합

h_i : H 의 원소

P_{h_i} : h_i 의 확률

E_H : 퍼지부분집합으로 나타낼 수 있는 인간의 행위나 관련된 사상

E_H' : E_H 의 여집합

$\mu_{E_H}(h_i)$: 단조감소함수로서 h_i 가 E_H 에 속할 멤버십 정도

$E_H \alpha$: E_H 의 α -level 집합

$P(E_H \alpha)$: E_H 의 α -level 집합의 확률

$P_Y(E_H)$: 사상 E_H 의 확률의 척도

W_i : $P_Y(E_H)$ 의 support

본 연구에서 사용되는 가정은 다음과 같다.

- 1) 멤버십 함수는 단조감조함수이다.
- 2) 기계와 관련된 사상의 멤버십값은 1이다.
- 3) 멤버십함수 값중에서 $\mu_{EH}(h_i)=1$ 이다.
- 4) 기계의 신뢰도는 crisp하다.

CASE 1) 인간의 사상에 대한 확률표현

인간의 경우 사상의 발생이 매우 복합적인 요인에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 경우 입력사상의 확률을 crisp한 경우로 보기보다는 복합적인 요인에 의한 값으로 보는 것이 타당하다. 즉,

$$H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$$

$$E_H = \{\mu_{EH}(h_1)/h_1, \dots, \mu_{EH}(h_n)/h_n\}, \text{ 단, } \mu_{EH}(h_i) \in [0, 1] \quad i=1, 2, \dots, n$$

으로 나타낼 수 있으므로 [10] 원소 h 가 E_H 에 포함되는 멤버십 값이 1 아니면 0인 crisp subset $E_H \alpha$ 를 이용하여 인간과 관련된 사상의 확률표현을 할 수 있고 최종적으로 Top Event의 발생확률을 계산하는 과정을 구축할 수 있다. $E_H \alpha$ 는

$$E_H \alpha = \{h \mid \exists \mu_{EH}(h) \geq \alpha \text{ 이고 } h \in E_H\}$$

로 나타낼 수 있다. 이 때 사상 E_H 의 확률은 식 (3.1)과 같다.

$$P(E_H) = \bigcup_{\alpha \in I} \left\{ \frac{\alpha}{P(E_H \alpha)} \right\}, \quad I = \{0, 1\} \dots \dots \dots (3.1)$$

즉, 이는 다음과 같다.

$$E_H \alpha = \{h_1, \dots, h_n\}, \quad P_{EH}(\alpha) = 1, \quad 0 \leq \alpha \leq \mu_{EH}(h_n)$$

$$E_H \alpha = \{h_1, \dots, h_{n-1}\}, \quad P_{EH}(\alpha) = 1 - P_{h_n}, \quad \mu_{EH}(h_n) < \alpha \leq \mu_{EH}(h_{n-1}) \dots \dots \dots (3.2)$$

$$E_H \alpha = \{h_1\}, \quad P_{EH}(\alpha) = 1 - \sum_{i=2}^n P_{h_i}, \quad \mu_{EH}(h_2) < \alpha \leq \mu_{EH}(h_1)$$

이를 다시 나타내면 다음과 같다.

$$P_Y(E_H) = \left\{ \mu_{EH}(h_n)/1, \mu_{EH}(h_{n-1})/1 - P_{h_n}, \dots, \frac{1}{1 - \sum P_{h_i}} \right\} \dots \dots \dots (3.3)$$

그런데 식 (3.3)은 crisp subset이므로 다음과 같이 구간연속 부분집합으로 바꿀 수 있다.

$$f_{FGP}(E_H)(W) = \sup \{ \alpha \mid P(E_H \alpha) \geq W \} \dots \dots \dots (3.4)$$

이는 “ E_H 의 확률이 최소한 W 이다”에 대한 확률이다. 그리고 “ E_H 의 확률이 최대한 W 이다”에 대한 확률은 식 (3.5)와 같다.

$$f_{FLP}(E_H)(W) = \sup \{ \alpha \mid P(E_H \alpha') \geq 1 - W \} \dots \dots \dots (3.5)$$

식 (3.4)와 식 (3.5)를 각각 풀어서 나타내면 다음과 같다.

$$f_{FGP}(E_H)(W) = \begin{cases} \mu_{EH}(h_1)=1, & W_0 \leq W \leq W_1 \\ \mu_{EH}(h_2), & W_1 < W \leq W_2 \dots \dots \dots (3.6) \\ \vdots \\ \mu_{EH}(h_n), & W_{n-1} < W \leq W_n = 1 \\ 0 & \end{cases}$$

$$f_{FLP}(E_H)(W) = \begin{cases} 0, & 0 = W_0 \leq W < W_1 \\ 1 - \mu_{EH}(h_2), & W_1 \leq W \leq W_2 \dots \dots \dots (3.7) \\ \vdots \\ 1 - \mu_{EH}(h_n), & W_{n-1} \leq W < W_n \\ 1, & W = 1 \end{cases}$$

“E_H의 확률이 W이다”에 대한 확률 FEP(E_H)의 정의는 식 (3.8)과 같다.

$$FEP(E_H) = FGP(E_H) \cap FLP(E_H) \dots\dots\dots (3.8)$$

CASE 2) 기계에 의한 사상의 확률표현

기계제조업체가 제시한 기계의 신뢰도가 정확하다고 가정할 때 기계 m_i가 고장날 확률을 p_{mi}라고 하자.

이 때 기계 m_i가 고장날 사상의 집합 M은 단지 한만의 원소를 표현하고 그것의 멤버십 값은 다음과 같다

$$\mu_{EM}(m_i) = \begin{cases} 0, & M \ni m_i \quad (i=1, \dots, n) \\ 1, & M \not\ni m_i \quad (i=1, \dots, n) \end{cases} \dots\dots\dots (3.9)$$

$$E_M = \{ \mu_{EM}(m_i) / m_i \} \dots\dots\dots (3.10)$$

이 때 인간과 기계가 관련된 사상의 확률계산이 가능하도록 crisp subset의 개념인 그림 1과 같이 식 (3.9) 3.10)을 다음과 같이 piecewise continuous subset으로 바꾼다(그림 2).

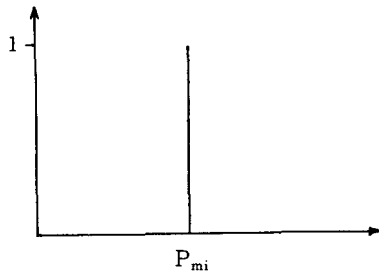
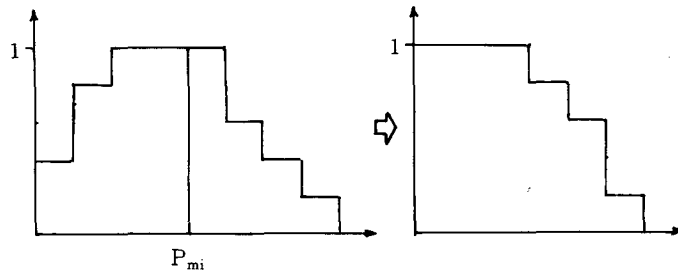
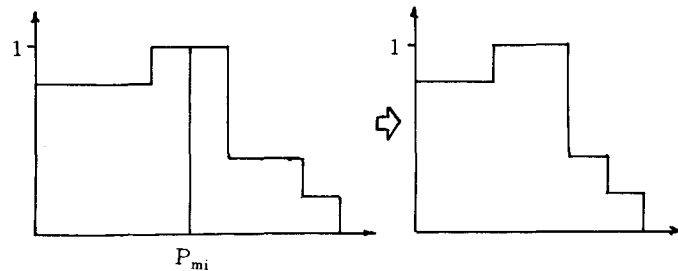


그림 1. Crisp Subset의 확률



(a) Max의 경우



(b) Min의 경우

그림 2. 구간연속 부분 함수의 확률

즉 기계 m_i 가 고장날 경우 확률은 P_{m_i} 인데 그럴 정도는 1이라는 의미이고 그림 2에 의하면 기계 m_i 가 고장날 확률이 0과 P_{m_i} 사이에 존재할 정도가 1이라는 의미로 전환된다.

이와 같이 변환하였을 경우에 Min 연산은 결과에 영향을 주지 않으나 Max의 경우 실제 발생 값보다 크게 나온다. 그러나 이것은 인간의 발생확률보다 기계의 발생확률이 높기 때문에 OR 연산의 결과와 같은 의미가 되므로 보다 더 현실적이라는 이점이 있다.

따라서 기계 m_i 가 포함된 사상 E_M 의 확률은 다음과 같다.

$$FEP(E_M) = 1, 0 \leq W \leq W_i \dots\dots\dots (3.11)$$

CASE 3) 인간-인간, 기계-기계에 의한 사상확률

인간-인간의 경우 그림 1에서 본 바 대로 실행을 하고 기계-기계의 경우를 살펴보면 그림 3과 같다.

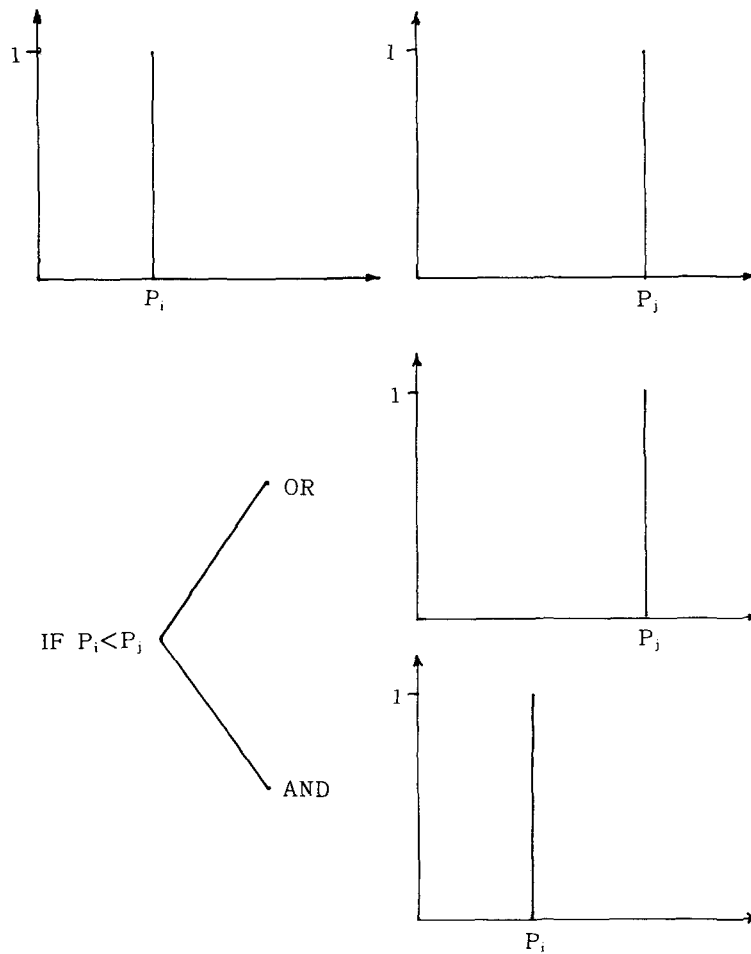


그림 3. 동일한 형태의 발생 확률

이상과 같이 최종결과에 대한 해석을 할 때 OR인 경우 기계 m_i 와 m_j 에 의해 발생한 사상의 확률은 P_j 라는 결과가 나오고 AND인 경우는 P_i 가 나온다. 즉, OR인 경우 고장날 확률 P 가 $0 < P < P_j$ 일 정도가 모두 1이므로 구간값 중에서 확률 P 가 가장 큰 P_j 가 고장날 확률 P 가 되는 것이다. Min의 경우도 마찬가지로 P_i 가 P 가 된다.

Algorithm

Step 1. 초기화

$\mu_{EH}(h_i)$ 를 단조 감소함수가 되도록 sorting

$$\mu_{EH}(h_1)=1$$

$$\mu_{EH}(m_i)=1(m_i \text{는 각각의 기계})$$

Step 2. 연산

i) 인간-기계 ?

If OR gate인가?

then $FEP(E_H) \vee FEP(E_M)$

Elseif AND gate인가?

then $FEP(E_H) \wedge FEP(E_M)$

ii) 인간-인간 ?

If OR gate 인가?

then $FEP(E_{H1}) \vee FEP(E_{H2})$

Elseif AND gate 인가?

then $FEP(E_{H1}) \wedge FEP(E_{H2})$

iii) 기계-기계 ?

If OR gate 인가?

then If $FEP(E_{M_i}) \geq FEP(E_{M_j})$

then $FEP(E_M) = FEP(E_{M_i})$

Else

$FEP(E_M) = FEP(E_{M_j})$

Elseif AND gate 인가?

then If $FEP(E_{M_i}) \geq FEP(E_{M_j})$

then $FEP(E_M) = FEP(E_{M_i})$

Else

$FEP(E_M) = FEP(E_{M_j})$

Step 3. 최종사상이 계산되었는가?

Yes ==> Step 4.

No ==> go to Step 1.

Step 4. Stop.

4. 안전작업의 설계

작업을 분해하여 보면 여러 동작중에서 재해를 유발시키는 동작이 포함된다. 즉 문제가 되는 동작이 안전하게 수행되는지의 여부가 그 작업전체의 안전도에 영향을 미치게 된다. 예를 들어 절단작업의 경우에 작업물을 장치한 후 바로 손을 안전위치에 놓은 후 절단이 이루어져야 하는데 여기서 손으로 작업물을 올려놓는 동작이 절단작업에서는 필수적인 동작인 동시에 재해위험의 동작이 된다. 그러므로 이러한 동작을 집중관리 또는 대체 작업화(자동화 등)한다면 시스템 전체적으로 안전도가 향상될 것이다.

이러한 재해 유발 동작이 작업설계에 포함되는 경우 작업자가 규정된 동작대로 작업을 한다면 재해까지는 가지 않겠지만 인간은 작업중에 계속적으로 불안전 행위의 위협을 자초하기도 한다. 그러므로 작업이 규정된 동작으로 점차 수렴되는가를 측정할 필요가 있다. 반복적으로 각 동작의 response time을 측정함에 있어서 문제가 되는 것은 연속된 동작사이에 독립성이 보장되지 않고 있다. [11] 이는 심리등의 인간자의성에 영향을 받는 동시에 인간은 학습현상을 보이기 때문이다. 반복 테스트에 의해 performance가 향상되었다는 것은 인간의 동작이 점차 규정된 동작으로 수렴한다는 의미이다. 그러므로 식 (4.1)에 의해 작업자의 동작별로 학습률을 구한다.

$$T_N = T_1 N^{-\alpha} \text{ where } T_N : N\text{번 측정시 평균 소요시간} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$T_1 : \text{첫번 측정시 소요시간}$$

$$\alpha = -L_n R / L_n^2$$

$$R : \text{학습률}$$

여러 작업 방법의 대안이 있는 경우 학습률이 큰 동작 또는 T_N 이 작아지는 동작의 조합으로 설계된 작업방법을 선택하도록 한다. 이 과정에서 학습률이란 의미는 개인의 능력과 작업환경, 심리적인 영향이 있는 모호성이 내포되므로 여기에 퍼지이론을 적용한다.

식 (4.1)에서 R의 퍼지 수를 (m, a, b)로 정의하여 L-R 형태의 멤버십 함수로 만들면 다음과 같다.

$$R = \mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{a+b}, & a \leq x \leq m \dots\dots\dots (4.2) \\ \frac{b-x}{a+b}, & m \leq x \leq b \dots\dots\dots (4.3) \end{cases}$$

$$\alpha = -L_n R / L_n^2 = \begin{cases} \frac{L_n(x-a) - L_n(a+b)}{L_n^2}, & a \leq x \leq m \dots\dots\dots (4.4) \\ \frac{L_n(b-x) - L_n(a+b)}{L_n^2}, & m \leq x \leq b \dots\dots\dots (4.5) \end{cases}$$

위험동작의 수행도를 위의 식에서 구한 퍼지 학습률에 의해 개인별로 관리를 한다면 재해 potential 관리가 용이할 것이다.

5. 결 론

인간과 기계가 함께 일하는 작업시스템의 안전도를 측정하는 일은 인간자체의 모호성으로 인해 인간신뢰도 측정이 곤란하다. 또 이것을 기계와 합성(synthesis)시키는 일도 용이치 않다. 본 연구에서는 인간의 행동이 재해를 유발시킬 요인을 10개의 불안전 행위로 설정하고 각 동작단위(작업단위)에서 이를 퍼지 환경으로 설정하여 안전도를 측정하는 모델을 제시하였다. 또한 재해 유발 동작에 대한 집중적 관리와 그 설계를 위해 인간의 행위가 규정된 동작에 수행되는 수행도를 학습효과에 의해 측정하여 재해 potential 관리에 유용토록 했다. 앞에서 논했듯이 인간의 모호성을 측정하는 많은 연구가 있지만 아직 정형화된 것은 없다. 이러한 주제를 중심으로 인간-기계 시스템의 작업설계시 여러 대안에 대해 평가를 하는 방법들이 앞으로의 연구과제가 될 것이다.

참 고 문 헌

1. 이근희, 인간공학, 창지사, 1983.
2. 노동부, '86산업재해분석, 노동부, 1987.
3. Brown, David B., *System Analysis and Design for Safety*, Prentice-Hall, 1976.
4. Dubois, D., and H. Prade, *Fuzzy Sets and Systems*, Academic Press, 1980.
5. Greene, D. E., and R. E. Barr, "A Stochastic Sequential Model for Man-Machine Tracking Systems," *IEEE on S.M.C.*, 18(2), 1988.
6. Hitoshi, F., and Naruhito, "Fuzzy Importance in Fault Tree Analysis," *Fuzzy Set and Systems*, 12(3), 1984.
7. Adams, Jack A., "Issues in Human Reliability," *Human Factors*, 24(1), 1982.
8. Brown, R. A., and C. H. Green, "Precepts of Safety Assessment," *J. Opl Res. Soc.*, 31(7), 1980.
9. Paul, Richard P., and Y. Nof, Shimon, "Work methods measurement-a comparison between robot and human task performance," *Int. J. Prod. Res.* 17(3), 1979.

10. Yager, R. R., "A representation of the probability of a fuzzy subset," *Fuzzy Set and Systems*, 13(3), 1986.
11. Siegel, A. I., et al, "A Family of Models for Measuring Human Reliability," *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, IEEE, 1975.