

연속적인 작업하에서의 학습효과를 고려한 인간신뢰도의 분석과 예측
(Analysis and Estimation for The Human Reliability with
Learning Effect Under Time-Continuous Tasks)

김 재 환 * 김 국 **

abstract

In man-machine system, the human errors are of recurring type but the failure of machine is irreducible by itself. Human performance is increased quantitatively, the mathematical model is developed and the model parameters are estimated by maximum likelihood estimation. Hence, we can estimate and analyze the human reliability in the given time interval.

1. 서 론

인간-기계 체계(man-machine system)에서 과거의 신뢰도 연구는, 대부분기계 체계에만 제한되었다. 그러나, 인간-기계 체계는 인간과 기계가 각각의 기능들을 수행하나 그기능들은 상호 관련되어 있으므로, 체계의 기능이 성공적으로 수행되려면 체계들의 장비나 인간 모두 각각의 기능을 성공적으로 수행 하여야 한다. 그러나, 아무리 잘 훈련된 최고의 작업 조건하에서 작업하더라도 인간의 오류(human error)는 발생하기 마련이다. 따라서, 불완전한 인간요소를 무시하고 체계 신뢰도를 추정한다면, 그 추정치는 정확한 값이 아니면 실제값보다 높게 추정된다.

한편, 인간신뢰도 연구에 있어서 인간성능을 계량화하는 것이 중요하다. 인간과 기계는 고장을 일으킬 수 있다는 점에서 유사성이 있고, 이는

* 한국해양대학교 이공대학 응용수학과

** 국방과학연구소

분석의 유사성을 제공하지만 인간의 고장 즉, 실수에는 독특한 점이 있다. 첫째로는 인간실수의 재발성 이다. 기계는 한번 고장시 스스로 복구되지 못하나, 인간은 정상상태에서 간헐적으로 실수를 저지른다. 이는 인간의 실수를 비동질적 포아송 과정(nonhomogeneous poisson process)으로 다룰 수 있는 근거이다.

둘째, 인간은 작업의 참여기간에 따라 학습현상이 있다는점이다. 따라서, 본논문에서는 작업이 연속적일때 학습효과를 고려한 인간신뢰도 모형을 개발하고, 이 모형에 대한 모수들을 추정하여 인간신뢰도의 예측을 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 기호 및 가정

- $N(t)$: 시간 t 까지 발생한 인간오류의 총횟수.
 $M(t)$: $N(t)$ 의 기대값. 즉, $E[N(t)]$.
 $R(t)$: 시간 t 에서의 인간신뢰도.
 $a(t)$: 평균실수율(average error rate).
 $\lambda(t)$: 시간 t 에서의 인간오류율(human error rate).

본 논문에서는 경계(vigilance), 안정화(stabilizing), 추적(tracking) 과 같은 연속적인 작업에서의 인간 실수과정은 비동질적 포아송 과정을 따른다고 가정하였으며, 아울러, 다음과 같은 가정들을 하였다.

1. 인간성능은 학습효과에 의해 연속적으로 향상되나, 어떤 고정된 포화수준(saturation level) 이상으로는 증가하지 않는다.
2. 인간의 오류는 연속적인 기간(interval)동안 발생하는 것이 아니라 순간적인 사건(event)으로 발생한다.
3. 중복되지 않는 기간내에서 발생하는 인간오류의 횟수는 서로 독립이다.
4. 어떤 주어진 기간동안에서 피로와 싫증에 의한 인간의 성능의 감소는 없다.

2.2 인간 신뢰도 모형

본 절에서는 인간성능을 계량적으로 표현하기 위한 인간 신뢰도모형을 구하고, 또한, 인간신뢰도를 분석하는데 유용한 평균 오류시간및 평균 오류율에 관한 식을 유도 하고자 한다. 먼저, 인간의 오류율에 대해서 설명

하면, 인간오류율은 학습효과에 의해 단조감소(monotonic decreasing) 하다가, 시간이 지남에 따라 어떤 일정한 수준에서는 더 이상 감소 하지 않는다. 이 인간오류율, $\lambda(t)$ 는 다음식과 같이 주어진다.

$$\lambda(t) = \lambda_0 + a \exp(-\beta t) \quad (2.1)$$

여기서, $\lambda_0 + a$ 는 초기 인간오류율이며, β 는 학습효과속의 속도를 나타내는 모수이다. 이때, 주어진 시간 t_1 과 t_2 사이에서 작업자에 의해 발생하는 인간오류 횟수의 분포는 다음과 같다.

$$P\{N(t_2)-N(t_1)=K\} = \exp\{-[M(t_2)-M(t_1)]\} \frac{[M(t_2)-M(t_1)]^K}{K!} \quad (2.2)$$

여기서, 기대값 $M(t)$ 는

$$\begin{aligned} M(t) &= \int_0^t \lambda(s) ds \\ &= \int_0^t [\lambda_0 + a \exp(-\beta s)] ds \\ &= \lambda_0 t + \frac{a}{\beta} [1 - \exp(-\beta t)] \end{aligned} \quad (2.3)$$

으로 주어진다.

한편, 주어진 시간 t_1 과 t_2 에 인간이 작업을 성공적으로 수행할 확률, 인간신뢰도 $R(t_1, t_2)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R(t_1, t_2) &= P\{N(t_2)-N(t_1) = 0\} \\ &= \exp\{-[M(t_2) - M(t_1)]\} \end{aligned} \quad (2.4)$$

또한, t_0 시간까지 작업이 진행 되었을때 그 이후의 시간 t 에서의 신뢰도 $R(t/t_0)$ 는

$$\begin{aligned} R(t/t_0) &= \exp\{-[M(t+t_0) - M(t_0)]\} \\ &= \exp\{-[\lambda_0 t + \frac{a}{\beta} \exp(-\beta t_0)(1 - e^{-\beta t})]\}, t > 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

으로 주어진다. 또, 식(2.5)로 부터 시간 $(0, t)$ 에서의 신뢰도 $R(t)$ 는

$$R(t) = \exp\{-[\lambda_0 t + \frac{a}{\beta} (1 - e^{-\beta t})]\} \quad (2.6)$$

으로 주어지며, 평균오류율(average error rate) $a(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a(t) &= \frac{M(t)}{t} \\ &= \lambda_0 + \frac{a}{\beta} \left[\frac{1 - \exp(-\beta t)}{t} \right], t > 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

여기서, $a(t)$ 는 단조감소함수(monotonic decreasing function)이다.

다음은 인간오류가 발생하는 분포, 즉, 누적 분포함수 $F(t)$ 는

$$\begin{aligned} F(t) &= 1 - R(t) \\ &= 1 - \exp[-M(t)] \\ &= 1 - \exp\left\{-\left[\lambda_0 t + \frac{a}{\beta} (1 - e^{-\beta t})\right]\right\} \end{aligned} \quad (2.8)$$

으로 주어지며, 이때 처음오류발생까지의 평균시간(mean time to first error occurrence) MTTFE는 다음식으로 주어진다.

$$MTTFE = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.9)$$

MTTFE는 $\lambda(t)$ 에서 주어진 3개의 모수 λ_0, a, β 의 값에 따라 결정된다. 인간성능을 평가하는 기준(measure)의 하나인 차후오류발생까지의 평균시간(mean time to next error) MTTFE는 식 (2.5)에 의해

$$\begin{aligned} MTTFE &= \int_0^{\infty} R(\tau | t_0) d\tau \\ &= \int_0^{\infty} \exp\left\{-\left[\lambda_0 \tau + \frac{a}{\beta} \exp(-\beta t)(1 - \exp(-\beta \tau))\right]\right\} d\tau \end{aligned} \quad (2.10)$$

3. 모수 추정 (Parameter estimation)

본장에서는 인간신뢰도 모형에 대한 모수 λ_0, α, β 를 최우추정법(maximum likelihood estimation)에 의해 추정하고자 한다. 먼저, 확률변수 $X_k (k=1, 2, \dots, n)$ 를 그림 3.1에서와 같이 인간오류가 발생하는 가가의 시간간격으로 정하고, 또한, $S_k = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ 로 정하면 S_k 는 k 번째의 인간오류가 발생할때까지의 시간을 의미한다.

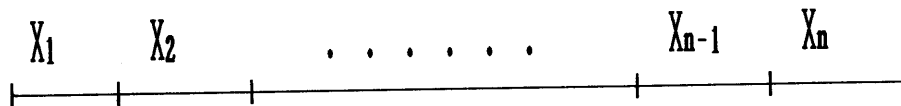


그림 3.1 확률변수

이때, 최우추정치를 구하기 위한 결합 확률밀도함수(joint probability

density funciton) 인 우도함수(likelihood funciton)는 다음식과 같다.

$$\begin{aligned}
 L(\lambda_0, \alpha, \beta) &= f(X_1, X_2, \dots, X_n) \\
 &= \prod_{k=1}^n f(x_k / S_{k-1}) \\
 &= \prod_{k=1}^n \left[-\frac{d}{dX_k} \{R(X_k / S_{k-1})\} \right] \\
 &= \prod_{k=1}^n \left[-\frac{d}{dX_k} \exp\{M(S_{k-1} + X_k)\} \right] \\
 &= \exp[-M(S_n)] \prod_{k=1}^n \frac{dM(s_k)}{ds_k} \\
 &= \exp \left[\lambda_0 s_n + \frac{a}{\beta} (1 - \exp(-\beta S_n)) \prod_{k=1}^n [\lambda_0 + \alpha \exp(-\beta s_k)] \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

우도함수가 (3.1)식과 같이 주어졌을때, 우도함수 L를 최대화시키는 최우추정치를 찾아야 하는데, (3.1)식의 우도함수는 매우 복잡한 함수이므로 수리적으로 구하기가 매우 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 수치해석적인 방법으로 구하였다.

지금까지 분석한 방법을 다음과 같은 예 [4]에 적용시켜 보았다. 공습경보를 감비하는 레이더(radar) 감시자가 레이더의 스크린에서 공습신호를 발견하는데 다음의 자료와 같은 시간간격으로 오류를 범한다면,

{2, 4, 8, 12, 16, 22, 29, 33, 43, 57, 67, 83, 98, 106, 118, 135, 146, 167, 189, 201}

식 (3.1)을 최대화시키는 최우추정치 $\lambda_0 = .06950$, $\alpha = .3044$, $\beta = .05047$ 으로 구해진다. 그리고, MTFE는 식(2.9)에 의해 3,0463분이 되고, 시간간격 [200, 230]에서 작업을 성공적으로 수행할 인간신뢰도는 12.43%로 구해진다.

4. 결론 및 연구방향

인간-기계체계에서 기계체계와는 달리 인간의 오류는 비동질적 포아송 과정을 따라 반복적으로 발생하며, 이때 인간의 오류는 학습효과에 의해 줄어들기 마련이다. 이에 본 논문에서는 인간신뢰도를 계량적을 분석하기 위해 학습효과를 고려한 신뢰도 모형을 제시하였고, 모형에 대한 모수들을 최우추정법에 의해서 추정하였다. 그리고, 이 추정치에 의해서, 인간신뢰도의 예측 및 분석을 실시 하였다.

본 논문에서는 인간의 오류는 과거의 자료(data)와 무관한 것으로 가정하였으나, 현실적으로 인간의 오류는 과거의 자료에 의존할 수 있으므로 이런 경우에 대한 인간신뢰도를 분석하고 예측하는 것이 앞으로의 연구과제이다.

5. 참고 문헌

- [1] D.Meister, A Critical review of human performance reliability predictive methods, IEEE Tr. Reliab., 22.3, 116 (1973)
- [2] B.Dhillon, human reliability, Pergamon press, (1986)
- [3] K.S.Park, Human reliability with probabilistic learning in discrete and continuous tasks: Conceptualization and modelling, Microelectron. Reliab., 25.1, 157 (1985)
- [4] K.S.Park, Human reliability, Elsevier, (1987)

