Journal of the Human Engineering Society of Korea
Vol. 5 No. 2, Dec. 1986

《研究論文》

절대 음조 식별작업에 있어서의 인간신뢰도 학습현상

(Human Reliability Growth in the Absolute Identification of Tones)

朴 喜 石† 朴 景 洙††

Abstract

In this paper, we consider the validity of a human probabilistic learning model applied to the prediction of errors associated with the absolute identification of tones. It is shown that the probabilistic learning model describes the human error process adequately.

The model parameters are estimated by two methods which are the method of maximum likelihood, and the method of mement. The MLE version of the model has the better predictive power but the ME version is more readily obtainable and may be more practical.

Ⅰ. 서 론

인간-기계 체계내에서 인간과 기계는 각각의 기능들을 수행하나 그 기능들은 상호 관련되어 있다. 체계의 기능이 성공적으로 수행되려면 체계내의 장비나 인간 모두 각각의 기능을 성공적으로 수행하여야 한다. 그러나 아무리 잘 훈련된 작업자가 최고의 작업조건하에서 작업하더라도 인간오류(human error)는 발생하게 된다[2]. 따라서 불완전한 인간요소를 무시하고 체계신뢰도를 추정한다면 그 추정치는 정확한 값이 아니며 실제 값보다 높게 추정된다.

인간신뢰도(human reliability)는 정해진 시간내에 작업자가 주어진 작업을 성공적으로 수행할 확률[3]로 정의된다. 이 인간신뢰도 연구에 있어서 중요한 문제는 인간성능을 계량화하는 것이다. 이 때 인간신뢰도를 적절히 표현해 주는 수리모형은 인간오류가 발생하는 형태의 분석과 예측을 가능케 한다. 이에 박 경수[4]는 반복작업에 있어서의 학습효과(learning effect)를 고려한 인간신뢰도 모형을 개발하였다.

한편, 인간신뢰도에 대한 구조적인 모형이 결정되면 인간성능의 계량화 문제는 모수 추정(parameter estimation) 문제로 귀결된다[5]. 이에 본 연구에서는 박 경수가 제시한 인간신뢰도 모형에 대하여 음조의 절대식별 실험을 이용하여 모형의 타당성을 검토하고 모수추정방법, 특히 최우추정법(method of maximum likelihood)과 moment법을 비교하려 한다.

Ⅱ. 모수추정방법

2-1 모형설명

이산적인 시간영역에서 수행되는 작업의 경우, 확률변수들 $\{X_i : i=1,2 \cdots,\}$은 i번째 시행에서

†(株) 工管
††韓國科學技術院 産業工學科

작업자가 오류를 범하면 1의 값을 갖고 성공이면 0의 값을 가지며, 서로 독립이라 하자. 그리고

$P_i = i$ 번째 시행에서 오류가 발생하는 확률 $(0 \le P_i \le 1)$

$$N_n = \sum_{i=1}^{n} X_i$$

$$M_n = E[N_n]$$

이라 하면, 일반적인 학습곡선의 형태와 같이

$$\frac{1}{n} M_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} P_i = P_1 \cdot n^{-\alpha} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

의 형태가 된다고 하였다. 여기서 α는 학습률을 나타내는 모수 $(0 \le \alpha \le 1)$로서

$$\frac{M_{2n}/2n}{M_n/n} = 2^{-\alpha} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

로 정의되며 P_1은 첫번째 시행에서 오류가 발생할 확률이다. 그러면 (1)로부터

$$P_n = P_1 \cdot [n^{1-\alpha} - (n-1)^{1-\alpha}] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

이 된다.

2-2 최우추정법

Nonstationary Bernoulli Process (NSBP)에서 실험표본 $\{x_i : i = 1, 2, \cdots, n\}$이 주어질 때, 그 실험표본의 결합확률밀도함수는 아래의 (4)식이 되며 이는 실험표본의 우도함수(likelihood function)라 할 수 있다.

$$L = \sum_{i=1}^{n} P_i^{x_i} (1-P_i)^{1-x_i} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

그런데 P_i가 모수 P_1, α의 함수이므로 L은 P_1, α의 함수가 된다. 여기서 우리의 관심사는 주어진 표본의 우도함수 값을 최대로 하는 모수들의 최우추정치 (maximum likelihood estimator : M.L.E.)이다. 이 때 대수학적(algebraical)인 해를 구하기가 어려우므로 수치적(numerical)인 방법을 사용한다. 즉 초기 $\hat{P}_1'$ 값에 대하여 α의 여러 값을 (4)에 대입하여 그 중 L값을 가장 크게 하는 $\hat{\alpha}'$ 값을 찾는다. 이 α' 값에 대하여 P_1의 여러 값을 (4)에 대입하여 그 중 L값을 가장 크게 하는 $\hat{P}_1'$ 값을 찾는다. 이 과정을 더 이상의 개선의 여지가 없을 때까지 계속한다.

2-3 Moment 법

시행이 계속되고 data의 형태가 어떤 시행구간동안 발생한 오류갯수로 주어지면 1차 moment 간의 간단한 연립방정식으로 모수를 추정할 수 있다. 즉 첫번째 시행부터 n_1 시행까지 m_1개의 오류가 발생하였고 $(n_1 + 1)$번째 시행부터 n_2 시행까지 m_2 개의 오류가 발생하였다고 하자. 그러면 NSBP모형의 (1)로부터

$$m_1 = P_1 \cdot n_1^{1-\alpha} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

$$m_1 + m_2 = P_1 \cdot n_2^{1-\alpha} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

이 되므로 여기에 $0 \le \alpha \le 1$, $0 \le P_1 \le 1$의 제약조건을 첨가하여 네가지 조건을 만족시키는 $\hat{P}_1$, $\hat{\alpha}$를 구하게 된다. $0 \le \alpha \le 1$의 제약조건을 만족시키려면

$$m_1/n_1 \ge (m_1 + m_2)/n_2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

가 성립되어야 하고 $0 \le P_1 \le 1$의 조건을 만족시키려면

$$\ln(n_1) \cdot \ln(m_1 + m_2) \ge \ln(n_2) \cdot \ln(m_1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

이 성립되어야 한다. 따라서 해집합은 실험치가 (7)과 (8)을 만족하면

$$\hat{\alpha} = 1 - \frac{\ln(m_1 + m_2) - \ln(m_1)}{\ln(n_2) - \ln(n_1)}$$

$$\hat{P}_1 = (m_1 + m_2) n_2^{-(1-\hat{\alpha})}$$

를 추정치로 쓰고 만약 (7)을 만족치 않으면

$$\hat{\alpha} = 0$$

$$\hat{P}_1 = (m_1+m_2)/n_2$$

를 추정치로 쓰며 만약 (8)을 만족치 않으면

$$\hat{\alpha} = 1 - \ln(m_1+m_2)/\ln(n_2)$$

$$\hat{P}_1 = 1$$

이 추정치가 되고 (7),(8)을 모두 만족하지 않으면 $\hat{\alpha} = 0, \hat{P}_1 = 1$이 추정치가 된다.

Ⅲ. 실 험

본 실험은 피실험자가 개인용 computer(TI-99/4A)에서 생성되는 음을 듣고 그 음의 높낮이를 판단하는 음조식별작업이다. 즉 5단계로 높낮이가 차이나는 음계를 만들어 음높이가 가장 낮은 음은 1번, 가장 높은 음은 5번 등으로 음높이 순으로 번호를 부여하여 피실험자가 한 음을 듣고나서 그 음의 번호를 알아 맞히게 된다. 여기서 음간의 주파수 차이는 각 간격마다 동일한 주파수 차이로 느껴지도록 Fechner 법칙 [1]에 따라 정해졌는데 1번음의 주파수는 200 Hz였고 Weber 상수는 0.05였다.

피실험절차로는 각 시행마다 피실험자는 5음계중 임의로 선택된 한 음을 듣고 나서 그 음에 대응한다고 생각되는 번호를 keyboard를 통하여 입력하고 그 반응의 진위(眞僞)여부를 화면을 통하여 알게 되어 정보 되먹임(feedback)을 받게 된다. 피실험자들은 정상적인 청각능력을 가진 남자 대학원생 6명으로 그 중 3명에 대하여는 100회 시행후 30분동안 쉰 뒤에 다시 100회 시행을 하는 형태로 하루 3번씩 2일에 걸쳐서(실험조건 1), 나머지 3명에 대하여는 100회 시행군간 간격을 2시간으로 하

표 1. 피실험자 A1의 첫번째 실험

시행구간 관측구간	시행구간 예측구간	추정방법	모수의추정치 P1	모수의추정치 α	M.A.D. 관측구간	M.A.D. 예측구간
1-60	61-100	M.L.E.	1.00	.35	1.07	.68
		M.E.	.23	0	1.00	1.83
		Linear	.23	0	1.00	1.83
1-80	81-100	M.L.E.	1.00	.35	.95	.75
		M.E.	1.00	.35	.95	.75
		Linear	.21	0	1.34	1.19
1-100	다음번 1-30	M.L.E.	1.00	.36	.79	2.35
		M.E.	1.00	.36	.79	2.35
		Linear	.19	0	1.88	1.29

표 2. 피실험자 A1의 두번째 실험

시행구간 관측구간	시행구간 예측구간	추정방법	모수의추정치 P1	모수의추정치 α	M.A.D. 관측구간	M.A.D. 예측구간
1-60	61-100	M.L.E.	.53	.15	1.43	2.29
		M.E.	.28	0	.81	2.77
		Linear	.28	0	.81	2.77
1-80	81-100	M.L.E.	.72	.24	1.17	1.04
		M.E.	.25	0	.78	1.58
		Lincar	.25	0	.78	1.58
1-100	다음번 1-30	M.L.E.	.93	.31	1.24	1.57
		M.E.	.67	.24	1.11	1.46
		Linear	.22	0	1.70	.87

표 3. 피실험자 A1의 세번째 실험

시행구간 관측구간	시행구간 예측구간	추정방법	모수의추정치 P1	모수의추정치 α	M.A.D. 관측구간	M.A.D. 예측구간
1-60	61-100	M.L.E.	1.00	.41	.67	3.17
		M.E.	.31	.13	.66	2.37
		Linear	.18	0	1.03	2.00
1-80	81-100	M.L.E.	1.00	.36	2.12	2.06
		M.E.	.20	0	1.01	1.68
		Linear	.20	0	1.01	1.68
1-100	다음번 1-30	M.L.E.	.51	.18	2.20	1.42
		M.E.	.22	0	1.44	1.06
		Linear	.22	0	1.44	1.06

여 (실험조건 2) 실시되었다. 시행속도는 피실험자가 스스로 조절할 수 있었으며 (self-paced) 100 회 시행에는 약 30 분이 소요되었다.

Ⅳ. 분 석

4-1 결 과

본 실험의 분석결과가 다음의 표들에 나타나 있다. 여기서 모형의 타당성 검토를 위한 척도로서 평균절대오차 (mean absolute deviation : MAD) 를 사용하였다. 즉

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |M_i - \widehat{M}_i|$$

여기서

M_n : n 번째 시행까지 작업자가 범한 오류갯수의 누적치

$\widehat{M}_n = \widehat{P}_1 \cdot n^{1-\widehat{\alpha}}$: M_n 의 추정치

이다.

4-2 모형의 설명력

모형의 설명력은 관측치로 모수들을 추정하고 그 추정치를 모형에 적용시켜 얻은 값과 관측치와의 차이를 MAD로 나타낸 것을 의미한다. 오류를 범할 확률이 NSBP모형대로 감소한다면 MAD값은 작게 나타날 것이다.

본 연구에서는 100 회 시행결과를 1 ~ 60 회, 1 ~ 80 회, 1 ~ 100 회로 나누어 모수를 최우추정법, moment 법으로 추정하였고 MAD로써 우열을 비교하였다. 그리고 학습효과의 정도를 검토하기 위하여 직선식으로 적합시킨 경우 ($\alpha =$ 0) 와도 비교하였다.

모수추정방법간에는 우열을 가리기가 힘들고 직선식과의 비교결과는 첫번째 실험에서 학습현상이 왕성히 일어남을 볼 수 있다. 두번째 실험에서는 직선식과의 차이가 작아지는데 이는 실험조건 1 에서 더욱 뚜렷이 나타난다. 이는 100 회 시행군간의 시간적인 격차가 30 분이기 때문에 충분한 휴식을 취할 수 없어서 주의력 수준이 원상태로 회복되지 않기 때문이다.

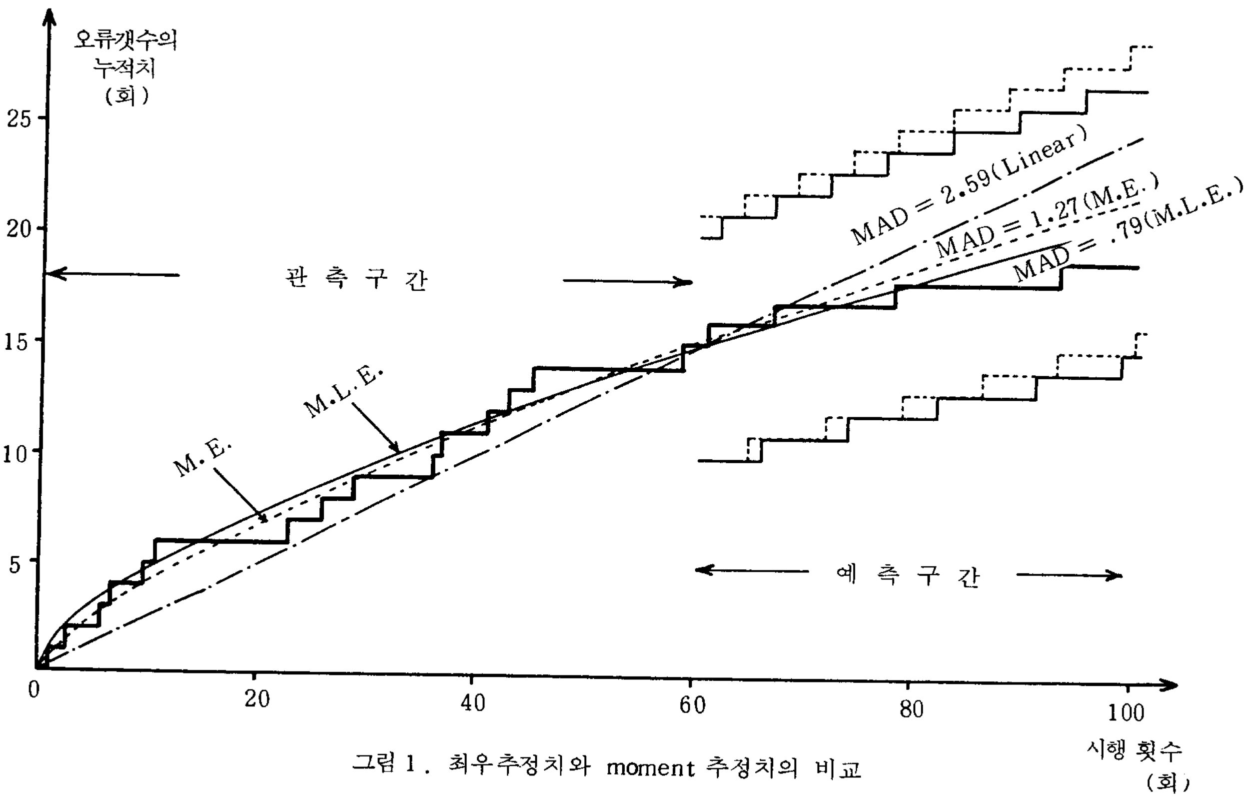

그림 1 . 최우추정치와 moment 추정치의 비교

4-3 모형의 예측력

모형의 예측력이라 함은 과거의 시행결과로써 모수를 추정하고 모형을 통하여 앞으로의 시행결과를 예측한 값과 실제 관측치와의 차이를 MAD로써 나타낸 것을 말한다. 이로써 작업자의 오류발생과정이 얼마나 지속적인가를 알 수 있다. 본 연구에서는 100회 시행을 1～60회, 1～80회로 나누어서 각 경우에 대하여 모수들을 추정하고 1～60회 data로 61～100회를, 1～80회 data로 81～100회를 예측하였다. 이때 최우추정법이 moment 법보다 우수하였다. 이는 〔그림 1〕에서 뚜렷이 볼 수 있다.

한편 망각현상의 영향을 검토하기 의하여 전번의 1～100회 시행결과로 모수들을 추정하고 모형을 통하여 다음 회의 1～30회의 결과를 예측하여 실제 관측치와 비교하였다. 이에 다음번 1～30회의 MAD가 상대적으로 크므로 일단 작업의 연속성이 파괴되면 모수추정치를 외삽하여 사용할 수 없음을 알 수 있다.

V. 결 론

5-1 모형의 타당성

본 연구를 통하여 NSBP모형은 학습효과를 고려한 인간의 오류발생과정을 적절히 나타내주는 타당한 모형임을 알 수 있다. 여기서 모형의 타당성 여부를 결정짓는 가장 중요한 요인은 주의력 정도·싫증감 등이다. 이는 본 연구에서 채택한 실험이 정신적인 부하를 요구하는 단순반복작업이기 때문이다.

한편 작업의 연속성이 파괴되면 모형치를 외삽하여 사용할 수 없음을 알았다.

5-2 모수추정방법

모형의 설명력에 있어서는 추정방법간에 큰 차이가 없으나 예측력에 있어서는 최우추정법이 우세하다. 특히 최우추정치는 최근의 data에 민감하게 반응하므로 가까운 장래의 결과를 예측하기에 유리하다. moment 법은 최우추정법에 다소 열등하지만 손쉽게 모수를 추정할 수 있고 또한 각 시행결과에 대한 정보가 결핍되었을 때 사용할 수 있는 현실적인 잇점이 있다.

參 考 文 獻

[1] Atkinson, R.L., et. al., *Introduction to Psychology.* (8th ed.), Harcourt Brace Jovanovich, New York, 1983.

[2] Lincoln, R.S., "Human Factor in the Attainment of Reliability," *IRE Trans. Reliab. Control,* April. 1960, 97-103.

[3] Meister, D., *Human Factors ; Theory and Practice,* John Wiley & Sons, New York, 1971.

[4] Park., K.S., "Human Reliability with Probabilistic Learning in Discrete and Continuous Tasks : Conceptualization and Modeling," *Microelectronics and Reliability,* 25(1), 1985, 157-166.

[5] Regulinski, T.L., "On Modeling Human Performance Reliability," *IEEE Trans. Rel.,* R-22(3), 1973, 114-115.