

# 人間 - 機械시스템의 評價모델 (II)

## A Model for Man-Machine System Evaluation (II)

李相道\* 河正鎮\* 鄭重喜\*

李東春\*\*

### Abstract

Man-machine system is an integrated total system which is linked by functions of man and machine, and the value of the system is determined by its compatability.

And it is able to evaluate the system value on the aspects of utility, availability, and cost benefit.

The authors previously represented the methodology of system utility using transfer functions, and this paper successively discusses the reliability of man-machine system.

The reliability estimation and evaluation methodologies are briefly mentioned, and some examples are shown in this paper.

### 1. 序 論

人間-機械시스템은 人間과 機械間的 機能的 結合으로 이루어지는 하나의 統合시스템으로서 그 結合의 완벽성 정도에 따라 시스템의 價値(system value)가 決定된다.

따라서, 人間工學的 側面에서는 設計뿐만 아니라 運用되고 있는 시스템의 價値를 評價하여 그 情報資料를 再活用해야 할 必要가 있다. 그러나 시스템의 價値를 단 하나의 尺度로 평가해내는 것도 쉽지 않지만, 評價된 尺度間的 相互比較는 不可能하다.<sup>1)</sup>

이러한 시스템의 價値는 시스템의 有用性(utility), 利用度(availability), 및 費用利得(cost benefit)의 側面에서 評價해볼 수 있다.

시스템의 有用性은 豫期되는 performance를 計量的으로 指標化한 것으로서 適合性(suitability)과 有効性(effectiveness)으로 나눌 수 있고, 利用度는 시스템에 관련되는 危險(risk)에 대한 指標로서 信賴性(reliability)과 保全性(maintainability)으로 代表된다. 또한 費用利得은 必要로 하는 財務關係의 trade-off의 指標이다.<sup>2)</sup>

本 研究는 傳達函數에 의한 시스템의 有効性 評價

를 前研究<sup>3)</sup>에 이어 시스템의 信賴性 評價 方法에 關하여 考察하고자 한다.

### 2. 人間의 信賴性 評價

#### 2.1 人間의 情報處理機能과 信賴性

人間의 信賴性에 關하여는 먼저 美軍에서 시스템의 利用率을 높이기 위한 目的으로 시작되었으나 人間은 機械要素와 같이 一要素 一機能만을 행하는 것도 아니고, 많은 情報를 동시에 받아 一括處理할 수도 있고, 또 그에 대한 反應도 彈力的으로 變하는 등 그 複雜性 때문에 現在까지 確立된 方法論은 없다.

시스템내에서의 行動은 反射運動的인 것(skill based behavior), 주어진 規則에 따르는 것(rule based behavior), 그리고 자기의 判斷基準에 따르는 것(knowledge based behavior)으로 區分되며 後者로 될수록 모델화는 어려워진다.

이러한 行動에 따른 人間의 信賴性은 크게 나누어 다음과 같은 두 가지로 區分된다.<sup>4)</sup>

첫째는 心理學的인 人間行動의 分析으로 실제 行動에 있어서의 分析 혹은 Simulator나 實驗室에서 特殊環境下의 人間의 行動樣態를 조사하는 方法이다. 그 外 面接이나 設問紙에 의하여 感覺的인 安全, 信賴의 因子를 파악하여 그것을 제량화하는 것, 또 人

\* 東亞大學校 工科大学 産業工學科

\*\* 慶北間放大學 産業工學科

間行動의 基本構造를 모델화하는 것 등이 試圖되고 있다. Fig. 1은 그같은 모델화의 한 例이다. 心理學的인 研究는 人間的 本質을 파고드는 것이므로 事例도 한정되어 있어 定性的인 研究가 되지 않을 수 없다.

또 하나의 方向은 工學的인 手法를 이용하여 人間的 信賴性을 計量的으로 포착해내는 方法이다. 이를테면 機械시스템의 信賴性評價에 사용되는 統計 · 確率의 手法를 토대로 한 方法도 行해지고 있다. 실제 데이터의 不足을 補完하는 實驗研究도 많다.

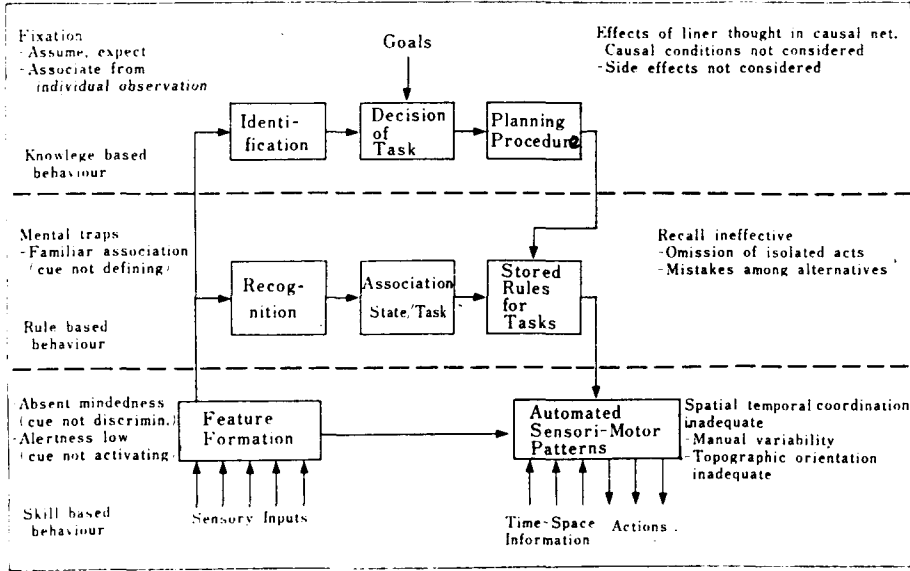


Fig. 1. Human Information Processing and Error

(資料 ; 寺野壽郎, p. 294.)

그 외에도 作業分析(task analysis)이나 人間的 行動의 傳達函數等도 行해지고 있다. 工學的인 研究는 量的인 表現의 正確性은 있으나 心理學的인 研究와 의 gap이 커서 양자간의 差를 줄여나가야 할 必要가 있다.

2와 같다. 이것은 人間이 行하는 順次的인 作業順序를 各要素로 분해하고 그들 각각에 베이타를 맞추어 하나씩 逆順으로 일의 要素와 合成하여 人間的 信賴性을 해석하는 方法이다. THERP의 實例를 든 것이 Fig. 3이다. 이것은 밸브 a를 닫아 놓고 밸브 b를 서서히 여는 作業을 나타낸 것으로서 最左端 s에 달했을 때 일은 “成功”이 된다. 여기서 人間이 行한 作業의 信賴度는 各要素作業 信賴度의 積의 合으로 表現된다.

2.2 人間的 信賴性評價 方法

2.2.1 THERP (Technique for Human Error Rate Prediction)

이것은 Swain이 考案한 것으로서 그 概念은 Fig.

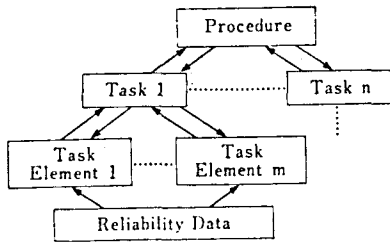


Fig. 2. THERP, A method to get human reliability

(資料 ; 行待武生外, p. 56)

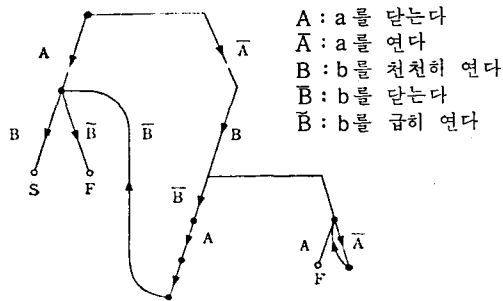


Fig. 3. An example of "THERP".

(資料 ; 行待武生外, p. 56)

이 評價法에서는 人間の 作業要素가 獨立이 아니므로 Swain은 從屬性모델을 제안하고 있다. 이것은 先行하는 作業要素와의 從屬性을 고려함으로써 해당 作業요소의 信賴性 데이터에 加重值를 주는 方法이다. 이 모델에 사용되는 加重值는 Table 1과 같다.

Table. 1 Swain's dependence level.

Pr. (S <sub>B</sub> /S <sub>A</sub> )	dependence level	Pr. (F <sub>B</sub> /F <sub>A</sub> )
BHSP	ZD	BHFP
$1 + 19 \times \text{BHSP}$	LD	$1 + 19 \times \text{BHFP}$
20		20
$1 + 6 \times \text{BHSP}$	MD	$1 + 6 \times \text{BHFP}$
7		7
$1 + \text{BHSP}$	HD	$1 + \text{BHFP}$
2		2
1	CD	1

註) S<sub>A</sub> ; Success of Task A  
 F<sub>A</sub> ; Failure of Task A  
 Task A            Task B  
 BHSP ; Basic Human Success Probability  
 BHFP ; Basic Human Failure Probability

Table. 1은 先行하는 作業의 成功·失敗에 대하여는 해당되는 作業과 같은 mode가 되는 條件付確率을 나타내고 있다. 從屬性은 五段階로 나누어지며,

ZD(zero dependence)는 獨立을, CD(complete dependence)는 條件付確率에 1임을 나타내고 있다. 또 나머지 3段階의 加重值 LD(low dependence), MD(midium dependence), HD(high dependence)는 0과 1 사이의 값을 가지며 그 數値는 對數的인 법에 바탕을 두고 있다.

2. 2. 2 Yukimachi의 解析方法

이것은 Swain의 方法을 現實的으로 利用하기 쉽도록 한 것으로서 그 特徵은 다음과 같다.

(1) 시스템 全體의 表現과 信賴度計算을 一體化할 수 있다.

(2) 단위작업의 시간적 順序, 從屬性을 나타낼 수 있다.

(3) 結果的으로 失敗에 도달하는 作業順序를 따르지 않도록 하고 있다.

Fig. 4는 Yukimachi (行待)方法에 의한 信賴性 解析의 例를 나타낸 그림이다. 이는 單位作業 label은 Swain의 作業要素에 對應시키고 右側에 error mode 및 各各의 發生確率을 나타낸다. 다음의 點檢 label에서는 그것을 成功(correct)과 失敗(wrong)로 나누어 각각의 發生確率을 나타낸다. 그리고 確率house로는 從屬性에 의한 條件付 確率을 나타낸다.

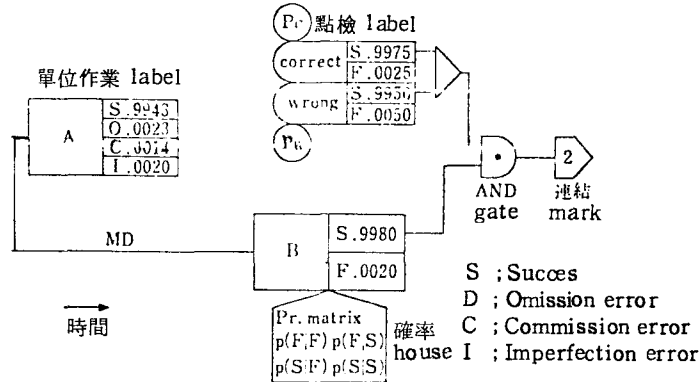


Fig. 4 An expression of Yukimachi's theory.

(資料 ; 待待武生, p. 56)

Fig. 4의 경우 單位作業 B는 成功(S)과 失敗(F)의 두 mode 밖에 없고, 確率house 내의 條件付 確率은 2 x 2 matrix가 된다. 이것은 error mode에 對應시켜 確張할 수 있다.

2. 2. 3 FTA

FTA (fault tree analysis)는 잘 알려져 있는 바와같이 災害發生의 豫側이나 安全性의 事前評價, 大規模시스템의 안전해석 등에 많이 利用된다.

FTA의 長點은 定性的인 因果關係가 파악될 수 있는 狀態에서는 해석대상 發生確率을 定量的으로

計算할 수 있다는 점이다. 또 短點으로는 Bull代數에 의한 두 값의 論理性 때문에 人間の error를 對象으로 한 경우에는 改良된 方法, 이블테면 Fuzzy理論等の 採用이 必要한 것, 또 事象의 時間的 順序나 從屬性을 나타내기 어렵다는 點 等이다.

2. 3. 學習現象을 考慮한 人間の 信賴性予測

시스템內에서의 人間은 機器의 操作, 修理, 部品交替等の 斷續的인 作業과 警戒(vigilance), 監視(monitoring), 追跡(tracking) 등의 連續的인 業

務를 遂行하게 되며, 시스템이 自動化되고 安靜될수록 연속적인 業務遂行의 비중이 커진다. 이러한 業務遂行上의 error는 人間的 信賴도를 豫測하는 바로미터가 되며, 作業을 반복할수록 確率的인 學習效果<sup>6)</sup>에 의하여 그 發生率이 低下한다. 이러한 前提下에서 人間的 作業遂行信賴도를 구하면 다음과 같이 豫測된다.<sup>7)</sup>

2. 3. 1 斷續的인 業務

이 경우의 error發生은 獨立 베르누이 過程에 따르며 試行回數  $n_1$  에서  $n_2$  까지 error 없이 成功的으로 業務를 遂行할 수 있는 人間的 信賴도  $R(n_1, n_2)$ 는 獨立 베르누이 過程의 結合確率質量函數(joint mass function)에 의하여 다음과 같이 求해진다.

$$R(n_1, n_2) = \psi_{x_{n_1}}(0_{n_1}) \times \psi_{x_{n_1+1}}(0_{n_1+1}) \times \dots \times \psi_{x_{n_2}}(0_{n_2})$$

$$= (1-p_{n_1}) \times (1-p_{n_1+1}) \times \dots \times (1-p_{n_2})$$

$$= \prod_{i=n_1}^{n_2} (1-p_i) \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $\psi_{x_i}$  ; 確率變數  $x_i$  의 pmf,

$p_i$  ; error 發生 確率

$n$  회째 試行에서의 error 發生 確率は

$$P_n = \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^{n-1} P_i$$

$$= P_1 \left( \frac{n_2}{n+1} \right) - P_1 \left\{ \frac{(n-1)^2}{n} \right\}$$

$$= P_1 \left\{ \frac{n^2}{n+1} - \frac{(n-1)^2}{n} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

이므로  $n=n_1$  까지와  $n_{1+1} \leq n \leq n_2$  까지의 error 發生數를 各各  $K_1, K_2$  라 두면

$$K_1 = P_1 \left( \frac{n_1^2}{n_1+1} \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$K_2 = P_1 \left( \frac{n_2^2}{n_2+1} \right) - K_1$$

의 관계가 成立된다. 따라서 學習現象에서 가장 重要的 初期值  $P_1$  은 式 (2)에서

$$P_1 = \frac{K_2(n_2+1)(n_1+1)}{n_2^2(n_1+1) - n_1^2(n_2+1)} \dots \dots \dots (3)$$

가 된다.

2. 3. 2 連續的인 業務

連續作業을 행하고 있는 경우이고, 學習現象이 있을 때 時間  $t_1 \leq t \leq t_2$  사이에  $K$ 件的 error 가 發生할 確率は 非同次 포아송 過程(nonhomogeneous poisson process)을 따르며, 人間的 信賴도는 다음과 같은 條件付 確率が 된다.

$$R(t_1, t_2) = \Pr\{A(t_2) - A(t_1) = 0\}$$

$$= \exp \left\{ -P_1 \left( \frac{t_2^2}{t_2 + d\theta} \right) - \frac{t_1^2}{t_1 + d\theta} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

여기서  $A(t_i)$ 는 累積 error 發生件數를 말하며 斷續的인 作業에서의 試行回數  $n$ 은 時間間隔  $t$ 를 一定 單位時間  $d\theta$ 로 나눈 것으로 생각할 수 있다. 따라서 式 (4)에서의  $P_1$ 은 앞의 경우와 같은 要領에 의하여 구할 수 있다.

즉 時間區間  $0 \leq t \leq t_1, t_1 \leq t \leq t_2$  사이의 error 發生件數를 各各  $K_1, K_2$  라고 하면

$$K_1 = P_1 \left( \frac{t_1^2}{t_1 + d\theta} \right) \dots \dots \dots (5)$$

$$K_2 = P_1 \left( \frac{t_2^2}{t_2 + d\theta} \right) - K_1$$

가 되고 여기서  $P_1$ 을 구하면

$$P_1 = \frac{K_2(t_1 + d\theta)(t_2 + d\theta)}{t_2^2(t_1 + d\theta) - t_1^2(t_2 + d\theta)} \dots \dots \dots (6)$$

가 된다. 各各에 대한 實驗值와 理論值의 比較가 參考文獻 (7)에 나타나 있다.

그 외에도 人間的 信賴도를 豫測하는 方法으로는 Data Store<sup>8,9)</sup>와 SHERB<sup>8,9)</sup>가 있다. Data Store는 Munger 등이 電子裝備等の 運用에 관한 職務를 主對象으로 하여 經驗과 實驗에 의한 人間的 信賴도에 관한 資料集이다. 시스템內에서의 人間的 活動을 分析하여 Data Store 表上에서 求한 값으로서 人間的 作業遂行信賴도를 類推한다.

또한 SHERB(The Sandia Human Error Rate Bank)는 Rigby에 의하여 開發된 資料集으로서 THERP를 바탕으로 하여 工程에서의 人間的 여러 가지 作業活動에 대하여 信賴도를 求해 놓은 것이다.

3. 機械의 信賴性

機械의 信賴性은 故障 統計 資料에 의하여 求할 수 있다. 또 大規模의 組立製品等の 信賴性은 시스템 構成要素의 信賴性 데이터에 의하여 全體시스템의 信賴性을 구하는 方法을 擇한다. 大規模 프랜트에서는 全體의 信賴性을 直接的으로 向上시키는 方法을 強求하기 보다는 重要 事故를 重點的으로 防禦하는 쪽이 實際的이며 이러한 目的으로 FTA(Fault Tree Analysis)나 ETA(Event Tree Analysis) 手法를 많이 쓴다. 이들 手法는 機械시스템의 信賴性 評價에 크게 有效하게 使用되고 있으나 몇 가지 問題點이 있다.

첫째는 시스템의 상태를 어떻게 선정하느냐 하는 문제이다. 보통은 要素 機器의 상태를 正常·異狀으로 對應시키나 狀態數가 많아지면 解析이 힘들어진다. 반대로 狀態數를 너무 적게 하면 狀態間의 推移關係가 確實해지지 않는다.

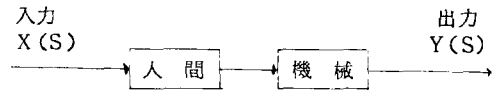
둘째로는 機器의 상태는 故障 初期에는 正常·異狀의 상태가 確實하지 않기 때문에 간과되기 쉽고, 세째는 構成機器의 故障確率이 計量的 값으로 주어져 있어야만 한다는 점이다.

마지막으로 機械는 人間과 直·間接적으로 人間과 關係를 갖기 때문에 人間도 같이 취급해야 한다는 어려움을 들 수 있다.

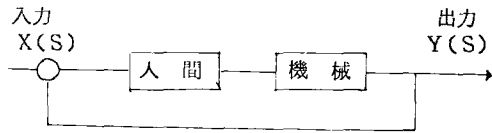
이러한 信賴性工學的方法外에도 最近에는 多變量 解析을 使用하여 機器 故障의 主因子를 抽出한다거나, operator의 經驗에 기초를 두어 安全問題의 구조를 파악하는 등 시스템工學的 技法의 應用도 試圖되고 있다. 4)

#### 4. System의 信賴性

지금까지 人間과 機械의 信賴性에 대하여 생각하였다. 그러나 人間-機械시스템은 相互間의 機能的 結合을 이루고 있고 그것은 Fig. 5와 같이 開루프(open loop) 또는 閉루프(closed loop)가 된다.



(a) Open Loop System



(b) Closed Loop System

Fig. 5. Equivalent Block Diagram of Man-Machine System

이는 人間과 機械間의 機能上의 結合 또는 情報 흐름의 關係를 나타내지만, 이를 信賴性關係에 결부시키면 Fig. 5(a)는 人間과 機械間의 直列結合을, (b)는 並列結合을 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 直列結合에서는 全體 시스템의 信賴度는

$$R_{\text{system}} = R_{\text{human}} \times R_{\text{equipment}} \dots(7)$$

로 나타낼 수 있다. 그리고 이 關係를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 6이다. 시스템이 自動化되고 人間의 業務가 監視, 追跡, 警戒業務만으로 單純化될 때 이 모델에 가까워진다.

또 並列結合은 手動 또는 半自動化된 機械를 利用하여 人間이 機器를 修理·保全하면서 加工하는 作業型에 比較할 수 있다. 非信賴度를 F로 나타내면 시스템 전체의 信賴度는

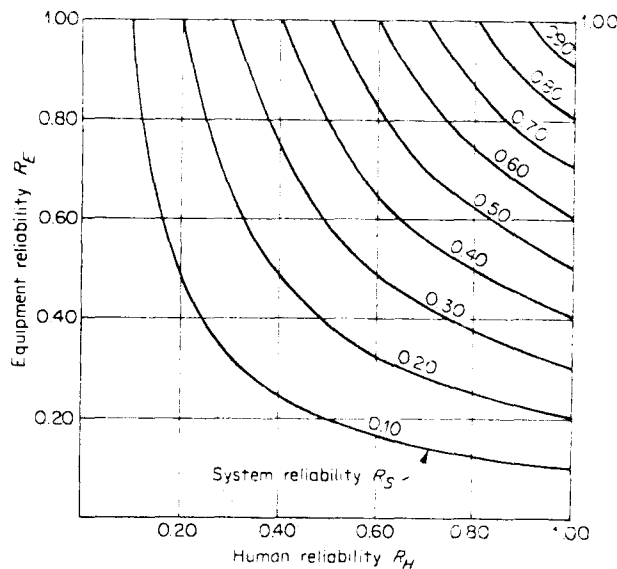


Fig. 6. Effect of human and equipment reliabilities on system reliability. (op.cit. McCormick, p. 26)

$$R_{\text{system}} = 1 - \{ (1 - F_{\text{human}}) (1 - F_{\text{equipment}}) \} \dots\dots\dots (8)$$
 로 表現할 수 있다.

**5. 結 論**

지금까지 人間-機械시스템의 信賴性 解析 및 豫測方法에 관하여 既括하고, 全體 시스템의 信賴度를 구하는 方法을 提言하였다. 式 (7), (8)은 信賴性工學에서는 이미 널리 알려진 모델이나 人間-機械시스템에서도 각각의 結合과 시스템의 흐름에 따라 轉用될 수 있음을 보여 준 것이다.

人間과 機械間의 不完全 整合(uncompatibility)은 결국 error를 發生시키는 重要 要因이 되고 시스템 運轉上의 信賴度를 低下시키게 된다. 따라서 人間要素를 充分히 고려한 시스템의 設計가 무엇보다도 重要하게 됨은 두 말할 나위가 없다.

**參 考 文 獻**

1. 林喜男, "人間工學(I)", オペレーションズ・リサーチ, 人間工學, vol. 19, No. 6, 1974, p. 52.
2. Abre Pienarr, Paul S. Kruger, and Kristian

- Adendorff, "An Evaluation Model for Quantifying System Value", IIE Transactions, March 1986, pp. 10 ~ 15.
3. 李相道·河正鎮·鄭重喜·李東春, "人間-機械시스템의 評價모델 (I)", 工業經營論叢 vol. 6, No. 9, 1983. 12月, pp. 39 ~ 44.
4. 寺野壽郎, "人間-機械系の信賴性評價", 人間工學, vol. 18, No. 6, 1982, pp. 293 ~ 296.
5. 長町三生·穴山恭廣·伊藤宏司·行待武生, "産業用 ロボットの人間工學的 研究(2)", 人間工學, vol. 20, No. 1, 1984, pp. 56 ~ 57.
6. M. Parvin, and G. Grammas, "Man-Machine: On a Probabilistic Learning Model", Policy Analysis and Information Systems, Vol. 4, No. 1, 1980, pp. 47 ~ 51.
7. 金尙天, "人間-機械시스템의 人間遂行信賴性에 관한 研究", 東亞大學校 大學院 碩士學位請求論文, 1985, pp. 13 ~ 19.
8. Ernest J. McCormick, "Human Factors in Engineering Design", McGraw-Hill, 1976, p. 26.
9. 朴景洙, "人間工學", 英志文化社, 1985. pp. 36 ~ 37.