

어포던스 기반의 인간-기계 협업 모델을 이용한 제조 시스템 구현 연구

오영광 · 주익찬 · 이우열 · 김남훈[†]

울산과학기술대학교 인간 및 시스템공학과

Modeling and Implementation of the Affordance-based Human-Machine Collaborative System

Yeong Gwang Oh · Ikchan Ju · Wooyeol Lee · Namhun Kim

The Department of Human and Systems Engineering,
UNIST(Ulsan National Institute of Science and Technology)

Modeling and control of human-involved manufacturing systems poses a huge challenge on how to model all possible interactions among system components within the time and space dimensions. As the manufacturing environment are getting complicated, the importance of human in the manufacturing system is getting more and more spotlighted to incorporate the manufacturing flexibility. This paper presents a formal modeling methodology of affordance-based MPSG (Message-based Part State Graph) for a human-machine collaboration system incorporating supervisory control scheme for flexible manufacturing systems in automotive industry. Basically, we intend to extend the existing model of affordance-based MPSG to the real industrial application of human-machine cooperative environments. The suggested extension with the real industrial example is illustrated in three steps; first, the manufacturing process and relevant data are analyzed in perspectives of MABA-MABA and the supervisory control; second, the manufacturing processes and task allocation between human and machine are mapped onto the concept of MABA-MABA; and the last, the affordance-based MPSG of human-machine collaboration for the manufacturing process is presented with UMLs for verification.

Keywords: MPSG, Affordance Theory, Supervisory Control, UML, MABA-MABA

1. 서론

제조 시스템 분야에서 생산 자동화와 관련된 연구는, 시간과 비용을 최소화하고 시스템의 효율을 높이기 위한 방향으로 발전되어 왔다(Säfsten *et al.*, 2007; Kim, 2014). 하지만, 최근 연구에서는 제조시스템의 생산성뿐만 아니라 유연성의 중요도가 대두되고 있다(Do, 2012). 실제 산업계에서 자동화를 위한 산업용 로봇의 광범위한 도입에도 불구하고, 제조 시스템에서 인간 운영자의 역할을 완벽히 배제하는 것은 기술적인 이유뿐만 아니라 경제적인 이유에서도 거의 불가능했다(Brann *et*

al., 1996; Sheridan, 1995). 실제로, 자동화 시스템에서는 MABA-MABA(Men Are Better At-Machine Are Better At)라고 하는 인간과 기계(또는 컴퓨터) 간의 작업에서 장단점이 명확히 구분된다. 이 때문에 시스템 구성에 있어서, 동적이고 복잡한 작업, 패턴인식, 유연한 작업, 논리적 추론/복잡 다양한 정성적 정보의 분석과 같은 ‘인간만이 할 수 있는’ 또는 ‘인간이 더 유리한 기능 작업의 영역이 반드시 존재하게 되는 이유로 운영자가 필요 없는 100% 자동화가 거의 존재할 수 없는 것이다. 이는, 현실에서 발생 할 수 있는 다양한 상황을 전제로 제조 시스템의 유연성과 적응성을 확보하기 위해, 인간 작업자의 역할이

이 연구는 산업통상자원부의 2013지역특화산업육성사업의 연구결과로 수행되었음.

[†] 연락저자 : 김남훈 교수, 689-798 울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50, Tel : 052-217-2715, Fax : 052-217-2709, E-mail : nhkim@unist.ac.kr
2014년 8월 19일 접수; 2014년 10월 20일 수정본 접수; 2014년 10월 21일 게재 확정.

여전히 중요하다는 것을 반증한다. 또한, 실제, 제조 환경에서는 자동화 기기의 성능뿐만 아니라, 여전히 인간작업자의 숙련도와 역량에 따라 제품 품질과 생산시스템 효율이 된다. 이러한 이유들로, 생산 시스템의 설계 및 운영에 있어서 인간-기계 협업 시스템의 운용 기술과 인터페이스 설계 기술은, 무인화 및 자동화 기술만큼이나 중요하게 인식되어지고 있다(Sheridan, 1995).

실제로 Vineyard *et al.*(1999)의 실증적인 분석을 통한 보고에 따르면, 미국 제조업의 경우, 제조 공정에서, 인간 작업자의 실수로 인한 고장 및 불량은 전체 불량의 약 40%에 달하는 것으로 보고되었다. 특히, 제조 공정상에서 그 작업 복잡성과 다양성으로 인해 인간 작업자의 역할이 더욱 중요한 자동차 산업의 경우는 제조 시스템 내의 인간에 대한 연구가 더욱 중요하다고 할 수 있겠다(Baily and Bosworth, 2014; Olhager, 2013; Shin *et al.*, 2006).

이 논문에서는, 제조 시스템을 정의하는 네 가지 요소인 4M (Man, Machine, Material, Method) 중, 시스템의 주요 자원으로 간주되는, 인간과 기계의 원활한 협업을 위한 정형 모델에 대해 고찰하고, 이를 실제 제조 공정에 적용 및 구현하는 것을 목표로 한다. 이를 위해, 어포던스 기반 인간-기계 협업 모델을 분석하고(Kim *et al.*, 2010), 실제 자동차 부품 제조 공정을 분석하여, 유기적인 협업 모델을 설계하고 적용하기 위한 인간-기계 협업 자동화 모델을 구현하고자 한다.

이 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저, 제 2장에서는 인간-기계 협업 시스템 관련된 배경 이론을 소개 한다. 제 3장에서는 인간-기계 협업을 정형화한 모델인 어포던스 기반 시스템 모델 프레임워크를 소개하고, 실제 제조 시스템에 적용을 위한 방안을 제안한다. 그리고, 제 4장에서는 제안 모델을 적용하고자 하는 자동차 부품 제조 공정을 소개하고, 제안된 협업 프레임워크에 따라 개선한 공정 모델을 UML(Unified Modeling Language)와 유한 상태 오토마타 모델을 통해 도식화하여 설명한다. 마지막으로, 제 5장에서 본 연구의 내용을 요약 및 정리한다.

2. 관련 연구

자동화 시스템 운용에서, 인간 작업자의 역할은 로봇으로 대표되는 자동화 설비에 못지않게 중요하게 인식된다. 특히, 문헌에 따르면, 실제 자동화 시스템 운용에서 발생하는 전체 고장 및 불량 중 대다수가 인간 작업자의 실수에서 그 원인이 찾을 수 있다고 한다(Vineyard *et al.*, 1999). 하지만, 이는 단순히 인간의 실수라고 치부하기에는 무리가 있으며, 인간-기계 인터페이스 설계에서 인간의 개입 시점 및 위치 선정이 모호했기 때문인 이유도 무시할 수 없다(Baily and Bosworth, 2014; Kim *et al.*, 2010; Olhager, 2013; Shin *et al.*, 2006). 이러한 이유로, 자동화 시스템 설계 분야에서는 오랫동안 인간과 기계 협

업시스템을 효과적으로 구현할 수 있는 시스템 이론을 연구해 왔다. 여기서는 그 대표적 이론으로 MABA-MABA, Supervisory control, 그리고 Affordance-based MPSG를 소개하고자 한다.

2.1 MABA-MABA와 Supervisory Control

MABA-MABA(Men are better at, Machines are better at)는 Fitts(1951)에 의해 처음 소개된 이론으로, 인간과 기계의 협업 구성을 위해 각각에게 효과적인 작업을 분배하여 최적 운용 시스템 설계에 접근하는 방법론이다. 아래의 <Figure 1>은 인간-기계 시스템 분야에서 널리 통용되는 MABA-MABA의 구분 범위를 요약한 것이다.

<p>Men are better at :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Detecting small amounts of visual, auditory, or chemical energy • Perceiving patterns of light or sound • Improvising and using flexible procedures • Storing information for long periods, and recalling appropriate parts • Reasoning inductively • Exercising judgment <p>Machines are better at :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Responding quickly to control signals • Applying great force smoothly and precisely • Storing information briefly, erasing it completely • Reasoning deductively • Doing many complex operations at once

Figure 1. The Fitts MABA-MABA List, Abbreviated by Sheridan (1995)

Sheridan(1995)은 인간 중심의 자동화 시스템을 구성함에 있어, MABA-MABA를 효율적으로 적용하기 위한 열 가지 규칙을 제안하며, 이를 통해 시스템의 유연성을 높일 수 있도록 인간 작업자의 역할과 방향을 제시하였다. 이와 동시에 인간 작업자의 실수 등으로 인한 고장 및 불량을 줄일 수 있도록 자동화 기계의 역할 영역 또한 제시하였다. 이러한 MABA-MABA 기반한 연구는 단순히 시스템의 설계에 있어, 인간 자원과 자동화 자원의 배치 및 역할 구분을 위한 이론을 넘어, 시스템 운용을 위해 인간과 로봇의 협업의 영역을 설계하는 데에 중요한 바탕이 되고 있다(Dekker and Woods, 2002).

MABA-MABA와 함께, 시스템의 설계를 위해서는 제어이론(Supervisory Control) 개념 또한 간과할 수 없다. Supervisory control이란, <Figure 2>와 같이 시스템의 운용에서, 인간 작업자가 시스템 내에서 주어진 본연의 임무를 수행함과 동시에 자동화 시스템과 교류하며 전체적인 시스템 거동(운영)에 영향을 미치는 제어 방식을 말한다(Sheridan, 2012).

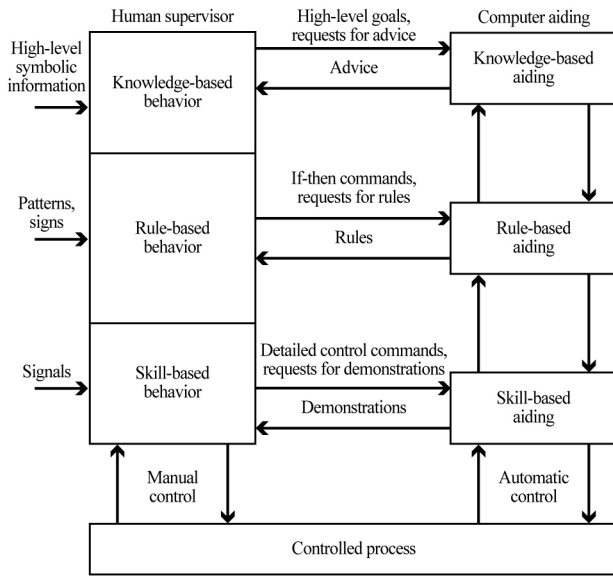


Figure 2. Example for supervisor interaction with computer (Sheridan, 2012)

<Figure 2>는 Supervisory control의 예로써, 인간-컴퓨터 시스템 제어를 위한 각 컴포넌트의 상호작용을 보여준다(Sheridan, 2012). Supervisory control에서는 인간 작업자가 자동화 시스템 내에서 본연의 역할과 동시에 전체 시스템 관리 감독을 동시에 수행하기 때문에, 시스템 상태의 변화나 전이 등에 빠른 대처가 가능하여 유연하고 효율적인 시스템의 구성이 가능하다.

즉, 인간-기계 협업 시스템의 설계의 기본은, Supervisory control 개념을 전제한 MABA-MABA 기반 인간-기계 기능의 분배 라고 할 수 있을 것이다. 이러한 협업 시스템의 설계와 구현을 위해서는, 앞서 언급한 인간-기계 협업 시스템의 수학적 모델이 필요한데, 관련한 선행 연구를 제 2.2절에서 자세히 설명하고자 한다.

2.2 어포던스 기반의 MPSG(Message-based Part State Graphs)

MPSG는 제조시스템의 자동화 운용을 위해, 메시지 기반으로 제조 자원들의 상태를 표현하는 정형 모델링 방법 중 하나이다(Smith, Joshi, and Qiu, 2003). MPSG는 유한상태 오토마타(Finite State Automata; FSA)기반으로 하여, 다양한 제조자원(로봇, CNC 머신)들의 기능 상태를 상호 통신 할 수 있는 Mealy Machine 형태의 모델링 프레임워크이다(Smith *et al.*, 2003). 초기 MPSG는 작업자가 고려되지 않은 자동화 시스템 공정관리를 위한 모델이었고, 시스템 표현을 위해 8개의 튜플(tuple)로 구성되었다. 하지만, 인간 작업자의 제조 시스템 내에서 행동과 제조 자원들 간의 상호작용에 대한 모델의 필요성이 부각되면서, 은 작업자와 관련된 인자를 추가하여 작업자를 고려한 Shin *et al.*(2006) 확장 MPSG 모델을 아래와 같이 제안하였다.

$$M^E = (Q, q_0^E, F_E, \Sigma_E, A_E, P_\alpha, \delta_E, \gamma_E)$$

Σ_E is a finite set of controller events such that $\Sigma_E = \Sigma_M \cup \Sigma_H$, where Σ_M is a set of messages for a machine operation and Σ_H is a set of input alphabets associated with human actions;

Q is a finite, non-empty set of states such that $Q = Q_M \times L \times I(p)$, where a set of state, Q_M is the set of states of the original MPSG comptroller;

q_0^E is an initial state such that an element of $q_0^E \in Q$;

δ_E is a state transition function such that $\delta_E : Q \times \Sigma_E \rightarrow Q$;

γ_E is a controller action transition function such that $\gamma_E : Q \times \Sigma_E \rightarrow A_E$;

F_E is a set of final (accepting) states such that $F_E \subseteq Q$;

L is a set of all physical locations in the system;

$I(p)$ is an indicator function of interaction status with a human. If a human is directly dealing with a part p , $I(p) = 1$, otherwise, $I(p) = 0$;

A_E is a finite set of controller actions and human actions such that $A_E = A \cup \{\text{actions caused by human activities}\}$; and

P_α is a set of physical preconditions for an action such that $\alpha \in A_E$.

확장 MPSG 모델은, 자동화 시스템 내에서 인간 작업자에 의해 확장되는 제조시스템의 유연성을 효과적으로 제어 시스템 내에 반영할 수 있다. 하지만, 제안된 Supervisory Control 개념에서 인간 작업자는 제조 자원의 역할을 수행 하여 기존의 제조 자원인 로봇과 동일하게 자율 판단 없이 제어 시스템의 가이드에 따라 주어진 임무를 수행할 수 만 있도록 표현되었다. 이는, 인간 작업자가 시스템 관리자의 역할을 수행하는 것이 아님을 의미한다.

앞서 기술한 바와 같이, 인간-기계 협업시스템의 설계와 운용을 위해서는 MABA-MABA와 Supervisory Control의 개념이 통합된 시스템 표현 방법이 필요하다. 이러한 이유로, Kim *et al.* (2010)은 작업자를 MPSG 내부에 위치하지 않고, <Figure 3>과 같이 확장 MPSG와 어포던스에 기반한 인간 작업자 모델을 구성하여 어포던스 기반 MPSG를 제안 하였다. 여기서, 어포던스란, 인간-환경 통합 시스템에서 표현되는, 인간-환경 상호 작용(행동)을 위해 필요한 환경이 인간에게 제공하는 행동 유발 인자로 정의된다(Gibson, 2013). 어포던스는 특히, 사용자 인터페이스 디자인 등의 영역에서 널리 사용되고 있으며, 이를 이용한 인간-환경 시스템의 정형 모델 프레임워크가 제안 되어 에이전트 기반 시뮬레이션 모델로 개발되기도 하였다 (Joo *et al.*, 2013).

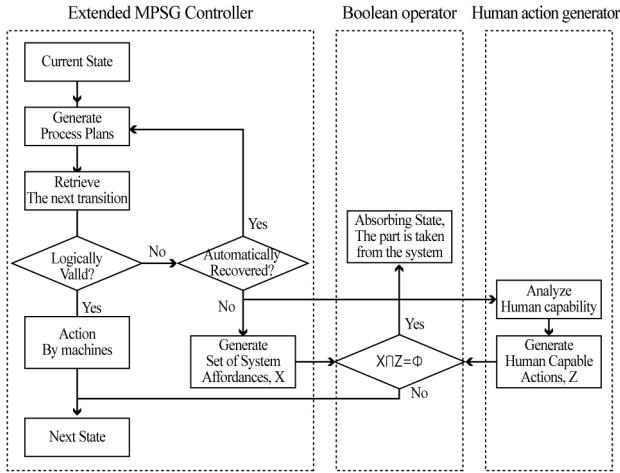


Figure 3. Control flow of human-involved automated system with consideration of affordances(Kim *et al.*, 2010)

어포던스 기반 확장 MSPG 모델은, 기존의 확장 MSPG 모델에서, MABA-MABA에 대한 인간의 인지정보 기반의 Supervisory Control을 가능하게 하기 위해 4가지 튜플이 추가되었다. 모델의 세부적인 표현은 아래와 같다(Kim *et al.*, 2010).

$$\mathbf{M}^A = \langle Q, q_0^E, F_E, \Sigma_E, A_E, P_\alpha, \delta_E, \gamma_E, X, Z, J, W \rangle,$$

where the definitions of the components are as follows :

- J is a juxtaposition function such that $J: \mathbf{X} \times \mathbf{Z} \rightarrow \mathbf{W}$,
- \mathbf{X} is a set of affordances,
- \mathbf{Z} is a set of effectivities(human capable actions),
- \mathbf{W} is a set of possible human actions,

where;

$$J(x(p, l), z(p, l)) = \begin{cases} \phi & \text{if } x_1 z_1 = 0 \\ j(\mathbf{X}, \mathbf{Z}) & \text{if } x_1 z_1 = 1 \end{cases}$$

where;

$$j(\mathbf{X}, \mathbf{Z}) = \left\{ \begin{array}{l} x_2 z_2 \times \text{pick_p_from_}l_1 \\ x_3 z_3 \times \text{move_p_from_}l_1\text{-to_}l_2 \\ x_4 z_4 \times \text{put_p_on_}l_2 \end{array} \right\} - \{0\}$$

$$l \subseteq L, x(p, l) \in X, z(p, l) \in Z$$

$$x(p, l) = x(p, (l_1 l_2))$$

= (a location set $(l_1 l_2)$ is accessible, part 'p' is pickable at l_1 , part 'p' is movable from l_1 to l_2 , part 'p' is putable on l_2),

$$z(p, l) = z(p, (l_1 l_2))$$

= (access to a location set $(l_1 l_2)$, pick the part 'p' at l_1 , move the part 'p' from l_1 to l_2 , put the part 'p' on l_2)'

δ_E is a state transition function such that

$$\delta_E: Q \times \Sigma_E \rightarrow Q, \text{ where;}$$

$$\delta_E((v, l, I(p)), a, W) = \delta_M((v, a), l, 0)$$

$$\text{if } a \in \Sigma_M \text{ (by a MH)}$$

$$\delta_E((v, l, I(p)), a, W) = \delta_H((v, l, I(p)), a, W)$$

$$\text{if } a \in W \subset \Sigma_H \text{ (by a human)}$$

$$\delta_E((v, l, I(p)), a, W) = (v, l, I(p)),$$

$$\text{if } a \notin W \subset \Sigma_H \text{ (no transition),}$$

where δ_M is a state transition function by automated MHs (robots) and δ_H is a state transition function by a human material handler, and all other definitions of tuples are the same as those of \mathbf{M}^E .

모델(M^A)에서 MABA-MABA 기반 Supervisory Control을 위한 작업자의 행동을 표현하기 위해 사용된 X(인간), Z(기계), J(병치함수), W(인간-기계 협업시스템)의 4가지 튜플은 어포던스 이론을 기반으로 정의되었다. 어포던스는 Gibson(2013)에 의해 1969년에 처음 정의된 이후, Turvey(1992)에 의해 수학적으로 정형화된 모델이다. 시스템 내에서 작업자의 행동, 즉 시스템의 상태 전이가 발생하기 위해서는, Supervisory Control을 위한 사전조건(pre-condition)인, 내부(인간 인지 상태) 전이가 발생해야 한다. 어포던스(affordance; 환경 특성-환경이 인간 작업자에게 제공하는 행동 유발인자)와 이펙티비티(effectivity; 인간 특성-인간 작업자가 가지는 행동 가능성) 조합으로 구성된 내부 상태 전이는 정형 모델 내에서 환경적인 특징을 반영한 물리적 제약과 인간이 실행 가능한 행동이 특정 시공간에 발생 할 수 있도록 정의 된다. 즉, 인간 작업자의 MABA-MABA에 대한 판단과 Supervisory Control을 위한 전체 시스템 운용 상태에 대한 판단에 따라 내부 상태가 결정되며, 그 내부 상태는 시스템 상태 전이를 위한 전제 조건으로 사용되는 것이다.

이 논문에서는 MABA-MABA와 Supervisory Control 개념을 동시에 구현 가능한 어포던스 기반의 확장 MSPG 모델을 실제 제조시스템의 설계에 활용 및 구현하여 보고자 한다. 이러한 개념은, 향후 복잡 다양한 제조 환경에서 효과적인 시스템의 운영을 위한 제어 프레임워크로서 역할을 할 것으로 기대된다.

3. 제조시스템 내의 인간-기계 협업 프레임워크 설계

어포던스 기반 MSPG 모델을 만들기 위해, 먼저, 기존의 자동화 시스템을 4Ms(Man, Machine, Material, Method)과 MABA-MABA 이론을 바탕으로 현 프로세스를 분석하고 작업을 재분류 하는 것이 필요하다. 단위 작업 별로 해당 작업을 수행할 행위자는 현 프로세스를 분석한 정보를 바탕으로 인간, 기계/로봇, 인간-기계 협업 중 하나로 결정되는데, 여기서 단위 작업은 생산하는 제품의 특징에 따라 수행하는 단위 작업의 행위자가 변경 될 수 있다.

3.1 인간이 포함된 자동화 시스템 분석 프레임워크

제안하는 시스템의 프레임워크는 인간이 포함된 제조 산업에서 발생할 수 있는 모든 상황을 인간, 기계/로봇, 인간-기계/로봇 협업으로 분류 한다. <Figure 4>와 같이, 먼저 자동화 시스템의 기계/로봇이 논리적으로 처리 할 수 있는 단위 작업인지 검사한다. 처리 가능한 작업이면 기계/로봇이 해당 단위 작업을 완료하지만 논리적인 문제가 발생한다면, 인간이 할 수 있는 행동을 어포던스 기반으로 분석하고 기계/로봇과 함께 논리적으로 처리 할 수 있는 작업인지 확인한다. 인간과 기계/로봇이 함께 할 수 없는 작업이라면, 인간이 해당 단위작업을 하도록 하고 시스템으로부터 분리한다.

예를 들어 반제품의 옵션에 따라서 모형과 무게가 서로 상이한 제품을 옮기는 경우, 잡기(grip), 옮기기(move), 놓기(put)와 같이 최소 세 가지 단위 작업이 존재한다. 예로 제시한 단위 작업은 인간 혹은 기계/로봇에 의해 모두 실행되어야 제품을 옮길 수 있다. 기계/로봇이 잡으려고 하는 반제품의 모형이 기계/로봇이 잡기에 아무런 문제가 없다면, 공장에 설치된 자동화 시스템으로 제품을 옮길 수 있다. 하지만 반제품의 모형이 기계/로봇이 잡기 어렵다면(예 : gripper 크기가 제품 크기보다 작은 경우), 해당 반제품을 옮기는 일은 설치 된 자동화 시스템으로 처리하기에는 문제가 있으므로, 기계/로봇 대신 인간이

해당 반제품을 잡을 수 있다. 인간이 잡은 반제품의 중량이 무거워 인간이 반복적으로 옮기기에 무리가 있다면 인간은 기계/로봇과 함께 해당 제품을 옮길 수 있다. 또한, 반제품이 로봇이 잡기에 어려움이 없으나 현 시스템의 환경적인 제약으로 기계/로봇이 해당 단위 작업을 할 수 없다면, 인간이 해당 단위 작업을 할 수 있다.

3.2 어포던스 기반 MSPG 모델

본 연구에서 구현하고자 하는 어포던스 기반 MSPG 모델 MC는 Kim *et al.*(2010)가 제안한 어포던스 기반 MSPG 모델을 기본으로 하며, Supervisory control의 실제 사례 적용을 위해 인디케이터 $C(p)$ 를 추가한다. 그 모델의 표현은 아래와 같다.

$$M^C = \langle Q, q_0^E, F_E, \Sigma_E, A_E, P_\alpha, \delta_E, \gamma_E, X, Z, J, W \rangle,$$

Q is a finite, non-empty set of states such that $Q = Q_M \times L \times I(p) \times C(p)$, where a set of state, Q_M , is the set of states of the original MSPG comptroller;

$C(p)$ is an indicator function of interaction status with a human and robot. If a human and a robot are dealing with a part, $C(p) = 1$, otherwise, $C(p) = 0$;

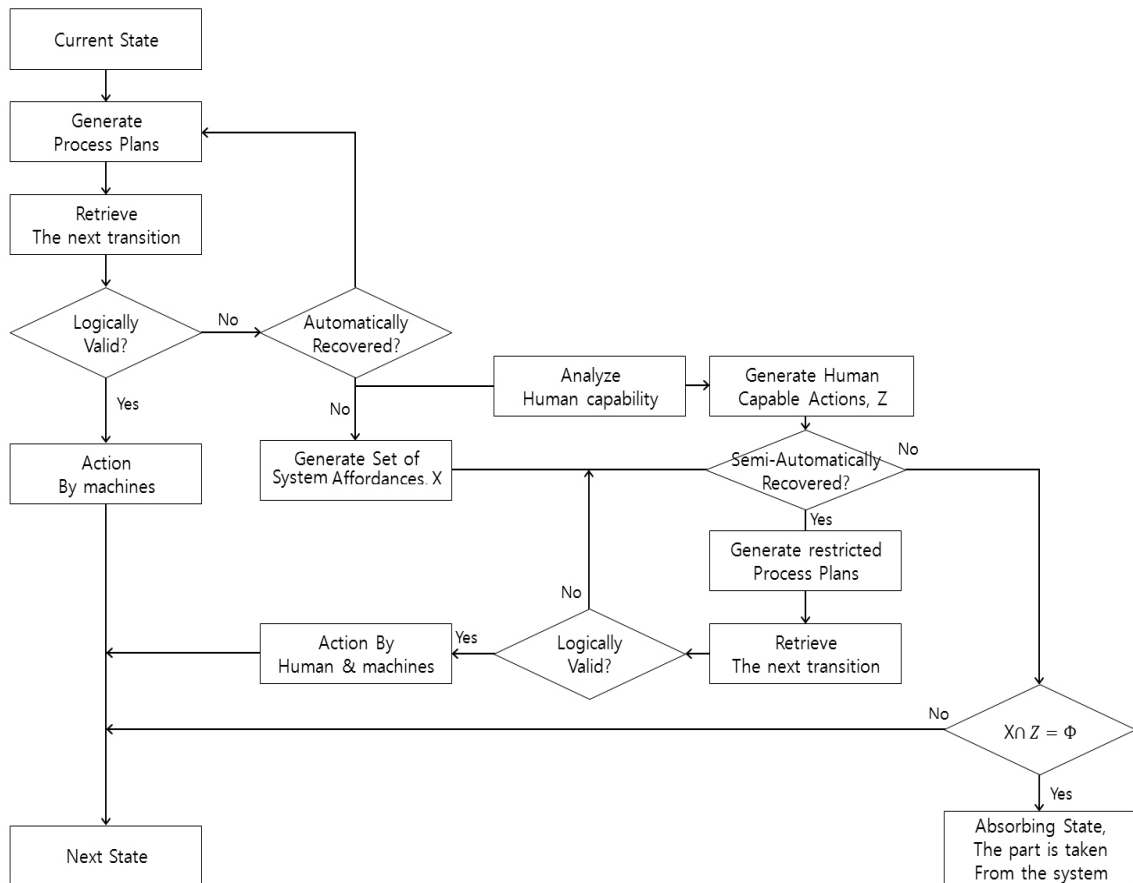


Figure 4. Control flow of human-involved automated system

인간이 작업 가능한 행동들을 분석하고 환경적 요소를 고려하여 인간 행동을 결정하는, 즉, 어포던스 기반으로 인간이 포함된 자동화 모델이 가지고 있는 장점에 본 연구에서 제안하는 인간과 기계/로봇 협업을 표현할 수 있다. 인간-기계/로봇이 협업하는 상황을 고려하기 위해, MA 모델에 추가된 Indicator $C(p)$ 는 인간과 기계/로봇이 협업하는 경우, 두 행위자 각각의 작업을 하나의 단위작업으로 만들어주는 Indicator이다. 이는, 인간 혹은 기계/로봇 중 하나의 행위자가 작업을 먼저 끝내더라도, 다른 행위자의 작업이 끝날 때까지 해당 단위 작업은 끝나지 않음을 말한다.

4. 사례연구 : 자동차 도어 파트 사출공정에서 인간-기계 협업 프레임워크 설계

위의 제 3장에서 제안한 모델을 이번 장에서 실제 제조 시스템에 적용한 사례연구를 통해 검증하고자 한다. 인간-기계 협업 프레임워크가 적용된 공정은, 현존하는 자동차 부품업체(이하 'A'사)의 제조 프로세스이며 기존의 인간-기계 분리 작업에서 인간-기계 협업 시스템 구축을 통해 시스템의 유연성과 효율을 높이고자 했다. 이를 위해, 이 논문에서는, 'A'사가 기존에 운영하던 제조프로세스와, 인간-기계 협업 프레임워크가 적용된 시스템을 UML을 통해 비교 및 검증한다. 또한, 개선된 모델의 affordance-based MPSG 표현을 구현하고, 실제 제조 환경에 적용한다.

4.1 자동차 도어 파트 사출 공정의 현 프로세스

본 연구에서 인간-기계 협업시스템을 적용하고자 하는 자동차도어트림은, <Figure 5> 같이, 1) 사출된 제품을 로봇 암이 흡착하여 컨베이어에 이송한 뒤, 2) 작업자가 사출된 제품의 버를 제거하고, 3) 외관검사를 실시한다.

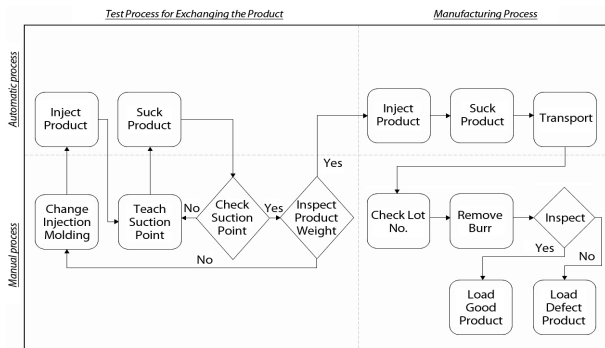


Figure 5. Current process

현 프로세스에서는 자동화된 시스템과 인간 작업자의 역할이 완전히 분리되어 있다. 이 때문에, 생산하고자 하는 제품의 사양과 모델이 변경 될 때마다 금형 및 로봇 암의 흡착 포인트

설정을 위해 추가적인 프로세스와 시간이 소요되는 문제를 야기시킨다. 그리고, 사출된 제품의 주요 품질 평가 지표 중 하나인 제품의 무게는 샘플링 검사에 의존하는데, 이는 실제 Lot 불량률을 유발하여 추가적인 품질 비용을 유발하기도 한다. 또한, 최근 늘어나는 다품종 소량 생산을 위해서는 시스템의 유연성 개선이 필요한 상황이다.

4.2 어포던스 기반 MPSG 모델 적용

제안하는 시스템의 제조 자원 연결도(connectivity graph)는 <Figure 6>과 같다. 이는, 시스템에서 제품에 변화에 영향을 주는 제조 자원들 간의 연결 관계를 표현한 것이다. <Figure 6>은 실제 시스템의 물리적 배치와 물류 이동을 나타내는 <Figure 7>로 보다 쉬운 이해가 가능하다.

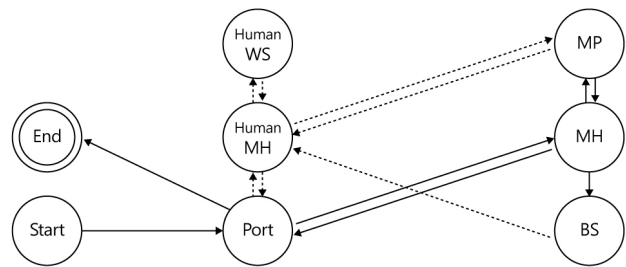


Figure 6. Connectivity Graph

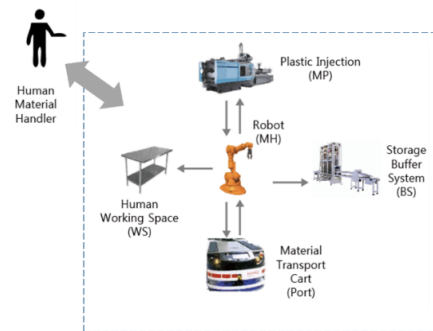


Figure 7. Physical layout of the system

어포던스 기반 MPSG 모델은 제조 자원들 간의 물리적 위치와 동선을 바탕으로 시스템 내의 제품 상태 변화에 따른 관계를 표현할 수 있을 뿐 아니라, 자동화 공정, 인간-기계 협업 공정, 작업자 수작업 공정을 보여준다. 이는 시스템 운용을 위한 제어 모델 설계의 기본이 된다.

기존의 어포던스 기반 MPSG 모델링의 도어트림 사출공정 적용을 위해, 추가적인 정보가 필요한데, 이는 생산된 제품의 상태가 인간-로봇 간의 작업 분배에 중요한 입력 정보가 되기 때문이다. 즉, 제품 사출 후, 이송 전 자동 무게 검사 결과를 추가적인 인간 작업자의 작업이 필요한지 여부를 판단할 수 있도록 설계된다. 본 연구에서는, 프로세스상 제품 품질(중량) 모니터링 정보를 $C(q)$ 로 표현한다($q=1$, 제품불량; $q=0$, 제품양품).

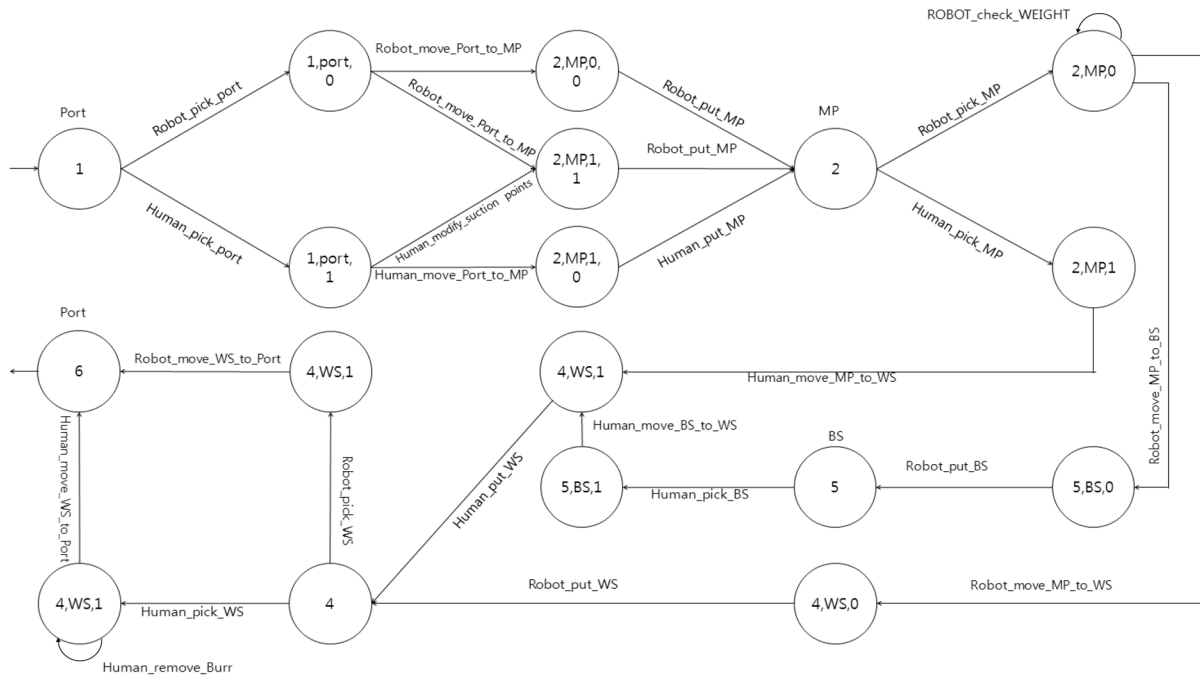


Figure 8. Application model of Affordance-based MPSG

그리고, Plastic Injection(MP) 공정에서 적용되었다. 즉, $Q = Q_M \times L \times I(p) \times C(p)$ 에서

- $I(p) \times C(p) = (0, 0)$: 로봇이 작업 할당, 제품 무게 이상 없음
- $I(p) \times C(p) = (1, 0)$: 인간 작업 할당, 제품 무게 이상 없음, 시스템 문제로 흡착포인트 재지정 필요
- $I(p) \times C(p) = (1, 1)$: 인간 작업 할당, 제품 무게 이상

제품의 무게 정보와 제품의 3D 도면파일을 토대로, 로봇에 부착된 흡착 gripper가 이송을 위한 흡착 위치를 자동 판단한다(무게 중심을 계산). 많은 경우, 제품 중량과 무게 중심에 대한 모니터링 값으로, 로봇/인간작업자 간의 작업 할당이 가능하다. 하지만, 사출품의 품질 이상 유/무에 따라, 무게는 품질 기준을 통과하여도 무게 중심이 도면 정보와 다른 경우가 발생한다(예, $I(1) \times C(1) = (1, 0)$). 이 경우는, 로봇이 이송을 하기 위한 흡착 포인트 자동 결정이 불가함으로, 인간 작업자가 Supervisory control 개념으로 접근하는 것이 모델링 되었다.

흡착 가능 포인트 자동분석 단계는 크게 데이터 분석, 로봇 가상 시뮬레이션, 그리고 흡착 포인트 업데이트로 구분할 수 있다. 먼저, 데이터 분석은 금형 정보로부터 이미지 분석/캐드(CAD) 데이터 분석을 통하여 일정 범위 면적 이상인 곳을 검색하는 것이다. 로봇 가상 시뮬레이션은 로봇 암(arm)과 실제 생산 환경을 기반으로 한 시뮬레이션을 실시하여 임의로 결정한 압착 포인트를 검증하는 것을 말한다. 그리고, 흡착 포인트 업데이트는 관리자 화면상에는 이미지 형식으로 압착 포인트를 업데이트 하면서 로봇 암의 압착 포인트를 업데이트 하는 것을 지칭한다.

4.3 UML 모델링을 통한 어포던스 기반 MPSG모델의 검증

인간-기계 협업 개념 적용 전 기존 제조프로세스와 협업 프레임워크 적용 후 개선된 제조프로세스에 대해 UML 클래스 다이어그램과 시퀀스 다이어그램을 비교하여, 협업 개념 적용 전후를 비교하였다.

기존의 시스템의 경우는, <Figure 9>와 같이 사출공정은 크게 기기 세팅과 파트 제작으로 분류 할 수 있는데, 각기 과정에서 인간 작업자의 비중이 적지 않다. 즉, 기존 시스템의 문제점 및 개선이 필요한 것은 다음과 같이 말할 수 있다.

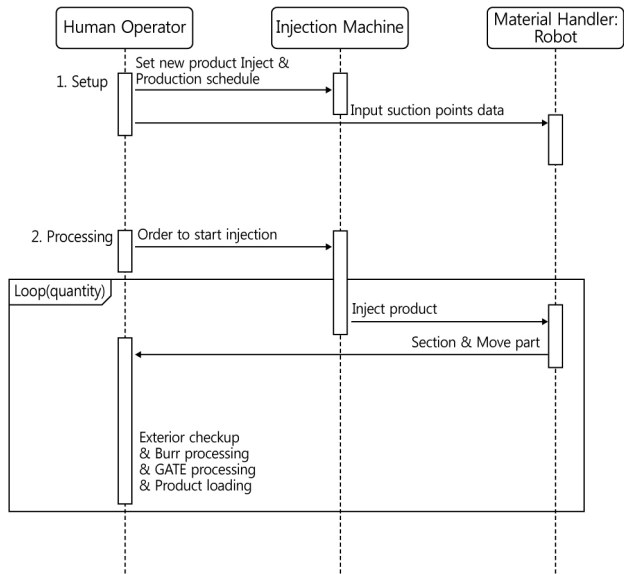


Figure 9. The sequence diagram of current system

현재 시스템에서 로봇은 사출된 제품을 그리퍼로 압착하여 컨베이어에 이송하는 역할을 담당한다. 이는 로봇이 시스템 안에서 단순 반복 작업만을 담당 하고 있는 것을 의미한다 그리고, 로봇 사용을 위해서는 사출 제품의 종류에 따라 티칭 포인트를 다르게 지정해 주어야 하는 문제도 있다. 또한, 사출된 제품의 품질 검사는 작업자에 의한 외관 검사 이외에 제품의 무게를 측정하는 단계도 필요하지만 현 시스템에서는 생산 공정 내부에도 무게 검사 단계가 존재하지 않고, 샘플링 검사에 의존하고 있는 실정이다.

기기 세팅 과정은 <Figure 10>에서 볼 수 있듯 전적으로 인간 작업자의 역할이기 때문에 담당자의 역량에 따라 세팅 시간과 결과의 정확도가 결정된다. 또한, 파트 제작과정에서 제품품질 검사는 인간 작업자를 통한 외관검사뿐이다. 제품의 무게에 대한 품질검사는 전수검사를 실시하기 힘들기 때문에 제품의 질이 떨어질 위험이 있다. 또한, 인간작업자의 역할이 상대적으로 너무 많기 때문에 인건비 문제도 내포하고 있다. 따라서 이러한 문제점들을 중점적으로 개선하여 새로운 모델을 제안하고자 한다.

제안하는 모델의 주요 특징은 다음과 같다. 먼저, 제안하는 모델은 MABA-MBAB이론 기반의 인간-기계 협업 시스템을 적용하여, 실시간 생산 정보를 바탕으로 로봇과 인간이 효율적으로 처리 할 수 있는 업무를 지정하고, 협업 할 수 있는 시스템이다. 그리고, 제안하는 시스템의 로봇은 센서 등을 이용하여 제품의 품질 검사를 실시할 뿐만 아니라, 제품의 품질을 판단하여 작업자의 의사결정을 도울 수 있다.

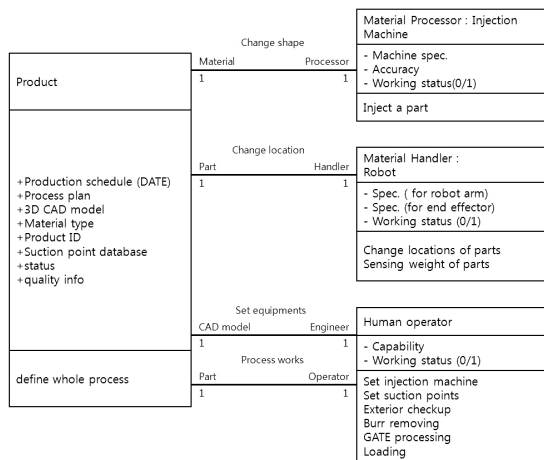


Figure 10. The class diagram of current system

세 번째는 특징은 제품의 생산을 위한 기본 제어인자를 실시간 생산 시스템 정보를 바탕으로 결정하는 것이다. 즉, 기본 제어 인자는 앞서 생산된 제품의 생산 시스템의 정보 및 품질 관련 정보를 바탕으로 가상 시뮬레이션을 통하여 결정된다. 또한, 무게 검사 부분에 있어서, 샘플링 검사를 진행하는 현재 시스템에 비해 전수 검사를 진행함으로써 제품 신뢰성을 향상 시킨다. 제안된 시스템 프레임워크는 향후, 자동화 기반 생산시스템의 합리화 및 효율 극대화를 위한 기반 목적함수를 제공하며, 이를 통해, 실시간 최적 생산계획 수립을 위한 기본 데이터로 활용될 예정이다.

다음으로 제시하는 모델은 MH(material handler)인 로봇에 스스로 흡착포인트를 찾아내는 프로그램을 탑재하고, end effector에 무게를 감지하는 센서를 부착하여 시스템의 유연성과 안정성을 향상 시킨다. 또한, 제품의 무게는 전수검사를 실시하여 제품 품질 기대 수준을 높이고, Lot 불량률이 발생 할 수 있는 가능성을 없앤다.

본 연구에서 제안하는 새로운 모델의 UML은 <Figure 11>, <Figure 12>와 같다.

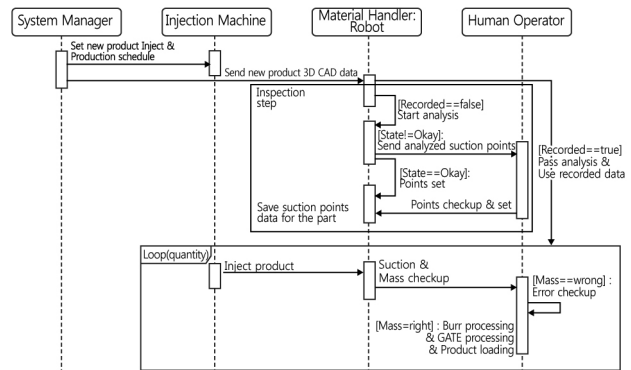


Figure 11. The sequence diagram of developed system

이 모델의 주요 개선점은 로봇과 인간작업자의 상호작용이 생겼다는 점이다. 이를 통해 시스템의 유연성이 높아 졌음을 보여준다. 또한 <Figure 12>와 같이 인간작업자의 역할을 로봇이 나눠가짐으로써 현 프로세스에서 단점으로 지적 되었던 인간작업자의 부담을 덜고 생산품 다양화에 따른 유연성을 높일 수 있으리라 기대된다.

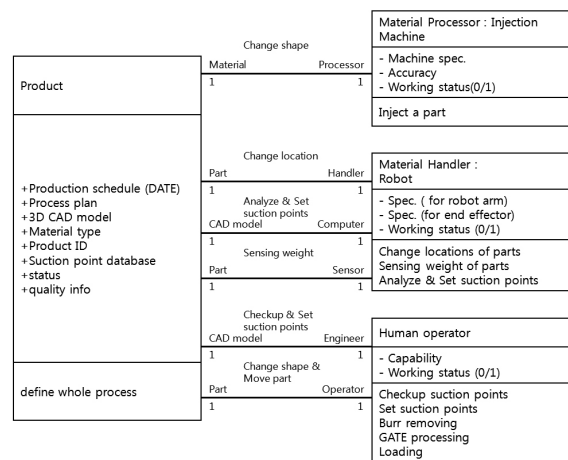


Figure 12. The class diagram of developed system

비록 개선 시스템의 경우에도 투입되는 제조 자원의 성능 한계로 로봇의 역할이 제한되지만, 인간작업자가 보조해주고 supervisor의 역할을 하는 시스템이기 때문에 새로운 환경에 대해, 유연하게 시스템 문제를 해결하고 보완이 가능하다. 이 시스템은 A'사의 생산공정 제어 모듈에 적용되었고, 향후 생산성 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

이 논문에서는 인간이 포함된 자동화 시스템에서 인간-기계 협업을 표현 할 수 있는 어포던스 기반 MPSG 모델을 분석하고, 실제 생산프로세스인, 자동차 부품 사출 및 후 가공 시스템에서 그 개념을 구현하였다. 실제, 인간과 자동화 간의 협업 및 보안을 가능하게 하는 운영 시스템의 개발은 보다 효율적이고 유연한 시스템 개발의 제반 기술이 된다.

이 연구를 통해 설명된 어포던스 기반 MPSG 모델은 단품종 소량생산에서 다품종 대량생산으로 제조 산업이 변화하는 현대 사회 고객의 다양한 요구에 대응 할 수 있는 유연한 시스템을 구성하는데 핵심인 인간-기계의 협업 단계를 정형화된 모델로 표현을 가능하게 한다. 이를 통해, 인간의 개입으로 발생하는 MABA-MABA에 의거한 동적 임부 할당과 Supervisory control 기반의 협업 운용 방법을 구현할 수 있다.

특히, 사례 연구로 제시된 제품 사출 공정의 경우, 실시간으로 취득된 생산 시스템의 정보 및 생산된 제품의 품질 관련 정보를 바탕으로, 인간과 로봇의 역할을 실시간으로 분배하고 작업의 유연성을 극대화 할 수 있는 시스템의 예를 보여준다. 어포던스 기반 MPSG 모델과 UML로 비교된 기존의 제조프로세스와 개선된 인간-기계 협업 시스템은, 다품종 소량 생산 체계의 최근 제조시스템 발전 경향을 고려할 때, 매우 효과적인 문제 해결의 방안이라고 볼 수 있다.

이 논문에서 제시된 방법론과 사례는, 향후, 자동화 기반 생산시스템의 유연성 개선, 합리화 및 효율 극대화를 위한 기반 목적함수 구성의 기본 아이디어를 제공하며, 이를 통해, 실시간 최적 생산계획 수립 및 인간-기계 협업 시스템의 최적 역할 분배 및 프로세스 수립을 위한 기본 프레임워크로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- Baily, M. N. and Bosworth, B. P. (2014), US Manufacturing : Understanding its Past and its Potential Future, *The Journal of Economic Perspectives*, **28**(1), 3-25.
- Brann, D. B., Thurman, D. A., and Mitchell, C. M. (1996), Human interaction with lights-out automation : A field study, *In Human Interaction with Complex Systems, 1996. HICS'96. Proceedings, Third Annual Symposium on* (pp. 276-283), IEEE.
- Dekker, S. W. and Woods, D. D. (2002), Maba-maba or abracadabra? Progress on human-automation coordination, *Cognition, Technology and Work*, **4**(4), 240-244.
- Do, N. C. (2012), Product Data Model for Supporting Integrated Product, Process, and Service Design, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **38**(2), 98-106.
- Fitts, P. M. (1951), Human engineering for an effective air-navigation and traffic-control system.
- Gibson, J. J. (2013), *The ecological approach to visual perception* : Psychology Press.
- Joo, J., Kim, N., Wysk, R. A., Rothrock, L., Son, Y.-J., Oh, Y.-g., and Lee, S. (2013), Agent-based simulation of affordance-based human behaviors in emergency evacuation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, **32**, 99-115.
- Kim, C. H. (2014), Determination of an Optimal Production Run Length in a Deteriorating Production Process with Rework, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **40**(2), 233-239.
- Kim, N., Shin, D., Wysk, R., and Rothrock, L. (2010), Using finite state automata(FSA) for formal modelling of affordances in human-machine cooperative manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, **48**(5), 1303-1320.
- Kirlik, A., Miller, R. A., and Jagacinski, R. J. (1993), Supervisory control in a dynamic and uncertain environment : A process model of skilled human-environment interaction, *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, **23**(4), 929-952.
- Ohlager, J. (2013), Evolution of operations planning and control : from production to supply chains, *International Journal of Production Research*, **51**(23-24), 6836-6843.
- Säfsten, K., Winroth, M., and Stahre, J. (2007), The content and process of automation strategies, *International Journal of Production Economics*, **110**(1), 25-38.
- Sheridan, T. B. (1995), *Human centered automation : oxymoron or common sense?* Paper presented at the Systems, Man and Cybernetics, 1995, Intelligent Systems for the 21st Century, IEEE International Conference on.
- Sheridan, T. B. (2006), Supervisory control. *Handbook of Human Factors and Ergonomics, Third Edition*, 1025-1052.
- Sheridan, T. B. (2012), Human supervisory control. *Handbook of Human Factors and Ergonomics, Fourth Edition*, 990-1015.
- Shin, D., Wysk, R. A., and Rothrock, L. (2006), Formal model of human material-handling tasks for control of manufacturing systems, *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, **36**(4), 685-696.
- Smith, J., Joshi, S., and Qiu, R. (2003), Message-based Part State Graphs (MPSG) : a formal model for shop-floor control implementation, *International Journal of Production Research*, **41**(8), 1739-1764.
- Turvey, M. T. (1992), Affordances and prospective control : An outline of the ontology, *Ecological psychology*, **4**(3), 173-187.
- Vineyard, M., Amoako-Gyampah, K., and Meredith, J. R. (1999), Failure rate distributions for flexible manufacturing systems : An empirical study. *European Journal of Operational Research*, **116**(1), 139-155.