

# 퍼지 적분 기반 기계 지능 측정법을 이용한

## 로봇 지능의 측정에 관한 연구

### A Study on Measuring RIQ (Robot Intelligence Quotient) using Fuzzy Integral-based MIQ (Machine Intelligence Quotient)

정진우<sup>1</sup>, 한정수<sup>2</sup>, 김대진<sup>3</sup>, 도준형<sup>4</sup>, 이형욱<sup>5</sup>, 변증남<sup>6</sup>

<sup>1,3</sup>대전 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 인간친화 복지 로봇시스템 연구센터

<sup>2</sup>경기도 수원시 영통구 매탄동 416 삼성전자주식회사

<sup>4,5,6</sup>대전 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 전자전산학과

E-mail: {jinwoo<sup>1</sup>, dikim<sup>3</sup>, jhdo<sup>4</sup>, helee<sup>5</sup>}@ctrsys.kaist.ac.kr, pyodori<sup>2</sup>@gmail.com, bien<sup>6</sup>@kaist.edu

#### 요 약

산업용 로봇으로부터 시작된 로봇에 관한 연구는 서비스 로봇에 대한 개념이 확산되면서 최근 폭발적으로 그 영역을 넓혀가고 있다. 또한, 인간과 함께 생활하는 서비스 로봇의 경우 로봇 스스로가 인간 및 환경을 이해하고 조작할 수 있어야 하므로 매우 높은 수준의 지능이 요구되고 있다. 이에 본 논문에서는 로봇의 지능이란 무엇인가라는 근본적인 문제에 대해 공학적인 측면에서 다루고자 한다. 구체적으로 기존의 개발된 로봇들을 통해 로봇의 지능을 구성하는 요소들을 분석해내고 이를 활용해 특정 로봇의 지능 수준을 측정하거나 또는 서로 다른 두 로봇 간의 지능들을 비교할 수 있는 척도에 대해 제시하고자 한다. 기존의 퍼지 적분 기반 기계 지능 측정법에서의 방법, 즉 Choquet 퍼지 적분과 Sugeno 퍼지 적분을 함께 사용함으로써 정량적/정성적인 판단을 동시에 진행하는 방법을 응용함으로써 인간의 IQ에 해당되는 로봇의 IQ 수치를 얻어낼 수 있게 된다.

**Key Words** : Robot Intelligence Quotient, Choquet Fuzzy Integral, Sugeno Fuzzy Integral

#### 1. 서 론

산업용 로봇으로부터 시작된 로봇에 관한 연구는 서비스 로봇(Service Robot)에 대한 개념이 확산되면서 최근 폭발적으로 그 분야를 넓혀가고 있다 [1]. 특히 최근에는 유비쿼터스 컴퓨팅(Ubiquitous Computing)의 연구가 널리 퍼지면서 집안, 사무실 등 주변의 가구 및 가전기기들을 로봇화 하려는 시도들이 있다. 지체장애인들이나 노약자들이 보조자의 도움 없이 하루동안 일상생활이 가능하도록 도와주려는 시도인 지능형 주거공간(Intelligent Sweet Home) 프로젝트[2], 사용자의 의도를 파악하고 그에 맞는 서비스를 해주려는 스마트 주방(Smart Kitchen) 프로젝트[3]와 로보틱 주방(Robotic Kitchen) 프로젝트 [4] 등은 그 좋은 예에 해당된다. 이와 같은 서비스 로보틱 시스템들은 인간의 생활 속에서 인간과 함께 작업을 해야 하므로 기존의 단순반복적인 동작을 해오던 로봇들과 비교했을 때 훨씬 높은 지능(Intelligence)을 요구하게 된다.

지능이란 무엇인가에 대해서는 현재 다양한 해석들이 존재한다. 사전적 정의로는 새로운 상황에 대한 학습/이해/대처 능력이 지능이며 [5], D. Wechsler [6,7]의 경우 지능을 의도적으로 행동하고, 합리적으로 생각하고, 그리고 주변 환경을 효과적으로 다룰 수 있는 능력으로 정의하기도 하였다. 또한, H. Gardner[8,9]의 경우, 지능을 다룰 때는 논리-수학적 지능, 언어적 지능, 공간적 지능, 음악적 지능, 신체운동적 지능, 개인적 지능 등 6가지의 복합 지능(Multiple Intelligence)을 같이 고려해야 한다는 복합 지능 이론을 주장하고 있다. 인간의 지능에 대한 이해를 바탕으로 기계의 지능을 정의하고자 한 시도도 있었는데, P. J. Antsaklis[10]는 주어진 데이터를 분석하고 체계화시켜 지식(knowledge)으로 변화시키는 과정(process)을 기계의 지능이라 주장했다. 이때, 기계의 지식이라 함은 지능적 기계의 특정 작업에 대한 무지(ignorance)와 불확실성(uncertainty)을 줄이기 위해 사용되는 규격화된 정보라고 정의했다[10]. 또한, 인간의 지능

을 다룰 때 복합지능을 고려해야 된다는 개념과 유사하게 기계의 지능을 다룰 때에도 자율성(autonomy), 복잡한 환경에 대한 조정 능력(controllability), 인간-기계 상호작용 능력(man-machine Interaction), 생체 모방 능력(Bio-inspired Behavior)을 같이 고려해야 된다는 보고도 있었다[11].

로봇 또한 기계에 속하므로 기계의 지능에 대한 정의를 바탕으로 로봇에서의 지능에 대해 논할 수 있다. H. Miura [12]는 로봇의 지능을 논의할 때에는 보다 빠르고 정확한 동작을 만들어내는 지능, 학습할 수 있는 지능, 동적 균형을 지킬 수 있는 지능에 대해 나누어 고려해야 됨을 주장하였다. 또한, V. Graefel[13] 등은 지능형 로봇에 대한 명확한 정의는 아직 존재하지 않지만, '인간을 포함한 지능적 생물체(intelligent creature)의 동작이나 모습을 모방할 수 있는 재프로그래밍 가능한 기계'가 지능형 로봇으로 이해되고 있다고 주장했다. 이상의 논의들로부터 로봇에서의 지능이 무엇이고 어떤 요소들이 로봇의 지능을 보다 향상시킬 수 있는 것인가에 대한 명확한 해답은 아직 존재하지 않지만, 그 해답을 찾기 위해 많은 시도들이 행해지고 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 로봇의 지능을 정의하고 계산할 수 있는 하나의 가능한 방법으로서 기계 지능 측정법[11]에 기초해 개발된 방법을 소개한다. 2장에서 기존의 기계 지능 측정법에 대해 간략히 소개한 뒤, 3장에서 로봇에서의 지능 측정방법에 대해 논의하고 4장에서 결론을 맺는다.

## 2. 기계 지능 측정법

E. Geisler는 과학기술에서 사용하는 추상화 방법(abstraction ladder)[14]을 현상의 관찰, 개념 설계, 차원 수 결정, 변수내용 결정, 변수축도 개발, 측정의 6단계를 나누어 정리하였다. 기계 지능 측정법[11]은 이 6단계에 방법에 맞추어 개발되었다. '현상의 관찰'을 위해 INSPEC 논문 데이터베이스에서 "INTELLIGENT and (MACHINE or SYSTEM or ROBOT)"이라는 키워드(keyword)로 총 2159편의 논문을 찾았다. 그 뒤 '개념 설계' 단계를 위해 지능과 관련된 주변 키워드들을 추출했으며, '차원 수 결정' 단계를 위해, 추출된 키워드들 사이의 유사도 확인을 거쳐 총 4가지의 핵심 속성들(key attributes)로 분류하였다. 분류된 4가지의 핵심 속성은 자율성, 복잡한 환경에 대한 조정 능력, 인간-기계 상호작용 능력, 생체 모방 능력인

데, 분류된 핵심 속성을 통해 다시 대상 논문들의 시스템들을 확인해 본 결과 대부분의 경우 4차원 구성이 아닌 2가지의 전형적인 3차원 모델로 표현 가능함을 알 수 있었다. 첫 번째 모델은 자율성, 인간-기계 상호작용력, 환경 조정력의 세 가지 차원으로 구성된 모델로서 엘리베이터, 식기 세척기, 산업용 로봇 등의 응용 예에서 주로 사용되고, 두 번째 모델은 자율성, 인간-기계 상호작용력, 생체 모방 능력의 세 가지 차원으로 구성된 모델로서 엔터테인먼트 로봇, 의료용 로봇 등의 서비스 로봇 예에서 주로 사용될 수 있었다.

'변수내용 결정' 단계에서는 대상으로 삼은 시스템에서 핵심 속성들 각각을 표현해 줄 수 있는 변수들을 전문가가 직접 선택하고, 또한 이 변수들의 값을 객관적이거나 주관적인 방법으로 최소값 0 ~ 최대값 1 중에서 결정하게 된다. 또한 '변수축도 개발'을 위해서는 Sugeno 퍼지적분[14] 기반 방법(Type I MIQ)과 Choquet 퍼지적분[15] 기반 방법(Type II MIQ)이 모두 사용되었다. Sugeno 퍼지적분 기반 방법은 일종의 가중치 중앙값으로서 지능의 최소값을 표현하는 다소 주관적인 측정 방법에 해당되고, 이에 비해 Choquet 퍼지적분 기반 방법은 일종의 가중치 합으로서 전반적인 지능을 표현해주는 다소 객관적인 측정 방법이라 할 수 있다[11]. 이렇게 만들어진 '변수축도', 즉 퍼지 적분들을 통해 핵심 속성들 각각을 구성하는 변수들 값으로부터 핵심 속성 값들을 구해내고, 이 핵심 속성 값들로부터 최종적인 로봇의 지능을 0 부터 1 사이의 값으로 측정가능하게 된다. 특별히 인간의 지능 측정법에서는 200을 최대 지능으로 설정하고 있으므로 이와 유사하게 표현할 목적으로 최종 단계에서 200을 곱해 결국 로봇의 지능을 0~200 사이의 값으로 표현하게 된다.

## 3. 로봇 지능 측정법

기계 지능 측정법은 추상적으로만 존재했던 기계의 지능이라는 개념을 구체적인 수로 표현해주는 방법론을 제시했다는 점에서 큰 의미를 가지지만 '변수내용 결정' 단계에서 여전히 전문가에 의해 변수의 값 뿐만 아니라 변수의 수 및 내용 등이 결정되므로 서로 다른 전문가에 의해 측정된 지능이 큰 차이를 보일 수 있다. 이에 본 논문에서는 기존의 기계 지능 측정법을 기초해 보다 구체적이고 객관적인 측정이 가능할 수 있는 로봇 지능 측정법을 제시하고자 한다. 이를 위해 기본적으로 다음의 5가지 가정들을 사용한다.

(가정1) 성능(performance)만으로는 로봇의 지능(intelligence)을 결정하지 못한다. 즉, 사람의 경우와 유사하게 높은 지능을 가진 로봇이 보다 좋은 성능을 만들 것이라 기대할 수는 있으나 성능이 좋다고 해서 무조건 지능이 좋은 것은 아니라는 개념이다. 결국 성능과 함께 그 성능을 만들어낼 수 있는 요소들을 같이 고려해야 로봇의 지능을 측정할 수 있다.

(가정2) 로봇 지능의 측정은 상대적으로 이루어지며 이로 인해 시간이 지날수록 로봇의 지능이 감소할 수도 있다. 로봇의 경우 (가정1)에 의해 성능과 함께 요소, 즉 부속 기능들에 기초해 지능을 측정하게 되며 인간과 달리 로봇의 부속품들은 날이 갈수록 발달하게 되므로, 지능 측정이 상대적으로 이루어지면 특정 로봇의 지능은 시간이 지나면서 감소할 수도 있게 된다.

(가정3) 로봇의 지능을 결정하기 위해서는 정성적인 평가와 정량적인 평가를 같이 고려해야 된다. 실제 대부분의 경우, 성능들의 상대적인 평가가 정량적으로 이루어지기가 힘들기 때문에 성능들의 평가는 주로 정성적으로, 세부 요소, 즉 부속 기능들의 평가는 정량적으로 이루어지게 된다.

(가정4) 로봇의 기능은 이동능력(mobility), 조작능력(manipulability), 상호작용 능력(interaction)의 세 가지 능력으로 구분된다.

(가정5) 로봇의 각 기능의 우수성은 센서(sensor), 프로세스(processor), 작동기(effector), 인터페이스(interface)의 네 가지 요소로 나누어 측정가능하다.

위의 가정들을 종합해보면 결국 로봇의 지능은 부속품 또는 부속 기능의 능력 측정(Measurement)에 기초한 로봇지능  $RIQ_M$ 과 로봇의 각 분야별 성능에 대한 인지(Perception)를 바탕으로 한  $RIQ_P$ 로 나누고, 이들 각각은 이동능력, 조작능력, 상호작용 능력의 세 가지 능력과 센서, 프로세스, 작동기, 인터페이스의 네 가지 요소로 나누어 측정될 수 있다. 이때, 측정시 필요한 각 능력과 요소들의 평가기준을 설정하기 위해 IEEE 논문 데이터베이스에서 "INTELLIGENT and ROBOT"을 키워드로 해서 찾아낸 총 186편의 논문을 대상으로 지능과 관련된 주변 키워드들을 추출하여 표1, 표2와 같이 정리하였다. 표1의 각 측정 요소들의 값은 대상으로 하는 로봇이 정해지면 쉽게 측정이 가능하지만, 표2의 경우는 성능에 대한 인지 및 이해를 바탕으로 하므로 전문가의 평가에 의해 간접적으로 측정하게 된다.

<표1.  $RIQ_M$ 의 측정 요소>

	센서	프로세스	작동기	인터페이스
이동력	-Sampling frequency -Resolution -Number of different sensors	-Speed of CPU	-Range of workspace -Speed of body -Resolution of body -Degree of mobility -Degree of steerability	-Number of input -Number of output
조작능력	-Sampling frequency -Resolution -Number of different sensors	-Speed of CPU	-Range of workspace -Speed of end-effector -Resolution of end-effector -Degree of Freedom	-Number of input -Number of output
상호작용 능력	-Sampling frequency -Resolution -Number of different sensors	-Speed of CPU	-Range of workspace -Degree of Freedom	-Number of input -Number of output

<표2.  $RIQ_P$ 의 측정 요소>

	센서	프로세스	작동기	인터페이스
이동력	-Obstacle detection -Scene understanding	-Learning capability -Intervention of human operation -Fault tolerance -Localization -Map building -Obstacle avoidance -Path planning	-Movement accuracy	-Understandability -Representation
조작능력	-Obstacle detection -Object recognition	-Learning capability -Intervention of human operation -Fault tolerance -Obstacle avoidance -Path planning	-Grasping accuracy -Movement accuracy	-Understandability -Representation
상호작용 능력	-Person recognition -Object recognition -Behavior recognition -Environment recognition	-Emotional recognition -Emotional representation -Learning capability	-Human-friendliness	-Understandability -Representation

이렇게 측정된 표의 값들을 이용해 열(상하) 방향으로 퍼지 적분함으로써 센서, 프로세스, 작동기, 인터페이스 각각의 지능을 얻어낼 수 있게 된다. 또한 행(좌우) 방향으로 퍼지 적분함으로써 이동력, 조작능력, 상호작용 능력 각각에 대한 지능을 구할 수 있게 된다. 이렇게 구해진 각각의 지능들을 다시 퍼지 적분함으로써

써 최종적인 로봇의 지능(RIQ)을 얻게 된다. 표3과 표4는 KAIST에서 개발한 인터랙티브 로봇, BECKY[16]를 대상으로 표1, 표2의 측정 요소들 값을 결정한 것이다. 표3과 표4를 통해 RIQ가 구해지는 과정은 다음과 같다.

<표3> 정량적 분석 결과 (Choquet 퍼지적분)

	센서	프로세스	작동기	인터페이스
공통기능	0.57	0.16	0.55	0.75
이동력			N/A	
조작능력			0.5	

$$RIQ_{\text{공통기능}} = (0.16-0.0) \times 1.0 + (0.55-0.16) \times 0.75 + (0.57-0.55) \times 0.5 + (0.75-0.57) \times 0.25 = 0.51$$

$$RIQ_{\text{조작능력}} = 0.5$$

$$RIQ_M = 0.5 \times 0.51 + 0.5 \times 0.5 = 0.51$$

<표4> 정성적 분석 결과 (Sugeno 퍼지적분)

	센서	프로세스	작동기	인터페이스
공통기능		0.6		0.7
이동력		N/A		
조작능력		0.4		
상호작용 능력		0.7		

$$RIQ_{\text{공통기능}} = \max\{\min(0.6, 1.0), \min(0.7, 0.5)\} = 0.6$$

$$RIQ_{\text{이동력}} = 0$$

$$RIQ_{\text{조작능력}} = \max\{\min(0.4, 1.0)\} = 0.4$$

$$RIQ_{\text{상호작용능력}} = \max\{\min(0.7, 1.0)\} = 0.7$$

$$RIQ_P = 0.25 \times 0.6 + 0.25 \times 0.4 + 0.5 \times 0.7 = 0.6$$

$$RIQ = 0.5 \times 0.51 + 0.5 \times 0.6 = 0.56$$

단, 밑줄 친 숫자들은 전문가에 의해 선택된 결합을 시키기 위한 가중치들이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 기존의 기계 지능 측정법[11]에 기초해 로봇의 지능을 측정할 수 있는 방법론을 제시하였다. 제안된 방법을 통해 두 로봇 간의 비교 및 특정 로봇의 장단점 파악이 보다 쉽게 이루어질 수 있게 되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수 연구센터 육성사업의 지원으로 수행되었음(R11-1999-008).

#### 참고 문헌

[1] Zeungnam Bien, Jin-Woo Jung and Dae-Jin Kim, "Special Lecture Series on Service Robotic Systems for Aging, Disability and Independence-

Part I: Service Robots for the needed," International Journal of Human-friendly Welfare Robotic Systems, Vol.5, No.3, pp.29-35, 2004.

[2] Z. Zenn Bien, Kwang-Hyun Park, Dae-Jin Kim, and Jin-Woo Jung, "Welfare-oriented service robotic systems: Intelligent sweet home & KARES II," Advances in Rehabilitation Robotics, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 306, No.4, pp.57-94, 2004.

[3] S. Soucek, Gerhard Russ, Clara Tamarit, "The Smart Kitchen Project-An Application of Fieldbus Technology to Domotics," Proc. of IEEE 2nd Int. Workshop on Networked Appliance, Rutgers University, USA, 2000.

[4] H. Morishita, K. Watanabe, T. Kuroiwa, T. Mori, and T. Sato, "Development of robotic kitchen counter: kitchen counter equipped with sensors and actuator for action-adapted and personally fit assistance," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol.2, pp.1839-1844, Chiba, Japan, 2003.

[5] Merriam-Webster Dictionary

[6] David Wechsler, The Measurement of Adult Intelligence, 1939.

[7] David Wechsler, The Measurement and Appraisal of Adult Intelligence, 1958.

[8] H. Gardner, Frames of Mind. New York, Basic Books Inc., 1983.

[9] H. Gardner, T. Hatch, "Multiple intelligences go to school: Educational implications of the theory of multiple intelligences," Educational Researcher, Vol. 18, No. 8, pp. 4-9, 1989.

[10] P. J. Antsaklis, "Defining intelligent control," IEEE Control Syst. Mag., vol. 14, pp. 4-66, 1994.

[11] Zeungnam Bien, Won-Chul Bang, Do-Yoon Kim, and Jeong-Su Han, "Machine Intelligence Quotient: Its Measurements and Applications," Fuzzy Sets and Systems, Vol. 127, No. 1, 2002.

[12] Hirofumi Miura, "What is robot intelligence", Proc. of IEEE Symposium on Emerging Technologies & Factory Automation, 1994.

[13] Volker Graefe and Rainer Bischoff, "Past, Present and Future of Intelligent Robots," Proc. of CIRA 2003, Kobe, 2003.

[14] M. Sugeno, Theory of fuzzy integrals and applications, Ph. D. Doctoral Dissertation, Tokyo Institute of Tech, 1974.

[15] A. Verikas, A. Lipnickas and K. Malmqvist, "Fuzzy measures in neural networks fusion," Proc. of the 7th International Conference on Neural Information Processing, pp.1152-1157, 2000.

[16] 도준형, 사용자의 감정 모니터링을 이용한 서비스 로봇 구현에 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위 논문, 2001년.