

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제25권 제4호, 2020년 7월 (JBE Vol. 25, No. 4, July 2020)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2020.25.4.487>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

## 산업용 로봇 Arm과 휴머노이드 로봇 액터를 연동한 로봇 공연 플랫폼 개발

조자양<sup>a)</sup>, 김진영<sup>a)</sup>, 이설희<sup>a)</sup>, 이상원<sup>a)</sup>, 김형태<sup>a)†</sup>

### Development of Robot Performance Platform Interoperating with an Industrial Robot Arm and a Humanoid Robot Actor

Jayang Cho<sup>a)</sup>, Jinyoung Kim<sup>a)</sup>, Sulhee Lee<sup>a)</sup>, Sang-won Lee<sup>a)</sup>, and Hyungtae Kim<sup>a)†</sup>

#### 요약

차세대 로봇 공연 기술을 개발하기 위하여 산업용 로봇 arm에 휴머노이드형의 로봇 액터를 부착한 RAoRA (Robot Actor on Robot Arm) 구조를 제안하고, 시스템 연동 제어를 위한 소프트웨어를 탑재하여 로봇 공연 플랫폼을 구축하였다. 로봇 액터와 산업용 로봇 arm의 연동 모션을 위하여 역학적 분석을 수행하고 기계적 메커니즘을 설계 및 제작하였다. 로봇 액터의 동작을 위하여 3D 모델의 기구학적인 분석, spline 위치 보간, 모션 제어 알고리즘 및 제어 장치를 개발하였다. 비전문가도 직관적이고 안전한 공연 콘텐츠를 제작할 수 있도록 사전 시각화, 시뮬레이션 도구 및 콘솔 통합 운영 도구를 개발하였다. 테스트를 위하여 지면에 거의 밀착하여 자연스럽게 걷거나 서서히 공중으로 올라가는 air walk 시연하였고 러닝 타임 5분의 공연에 적용하였다. 그 결과 제안된 로봇 공연 플랫폼은 기존의 로봇 공연에서는 구현이 불가능했던 입체적이고 생동감 있는 모션을 구현할 수 있었다.

#### Abstract

For the purpose of next generation technology for robot performances, a RAoRA (Robot Actor on Robot Arm) structure was proposed using a robot arm joined with a humanoid robot actor. Mechanical analysis, machine design and fabrication were performed for motions combined with the robot arm and the humanoid robot actor. Kinematical analysis for 3D model, spline interpolation of positions, motion control algorithm and control devices were developed for movements of the robot actor. Preliminary visualization, simulation tools and integrated operation of consoles were constructed for the non-professionals to produce intuitive and safe contents. Air walk was applied to test the developed platform. The air walk is a natural walk close to a floor or slow ascension to the air. The RAoRA also executed a performance with 5 minute-running time. Finally, the proposed platform of robot performance presented intensive and live motions which was impossible in conventional robot performances.

Keyword : robot show, robot actor, industrial robot arm, air walk, animatronics

## I. 서 론

산업용 로봇은 일반적으로 인간의 팔을 모사하여 제작되고 있으며, 산업계에서는 가공, 제품 이송, 조립, 용접 및 검사 등의 공정에 널리 활용되고 있다<sup>[1][2][3][4][5]</sup>. 일반적으로 산업용 로봇은 여러 개의 관절과 프레임으로 arm을 구성하고, 각 관절에는 모터와 기어를 적절하게 배치한다. arm 끝단의 end-effector에는 도구를 장착하고 의도된 궤적으로 움직이거나 힘을 조정함으로써 산업 현장의 작업을 자동화하고 있다<sup>[6][7]</sup>. 산업용 로봇은 확정된 작업 동선을 최대한 정확하게 추종하는 것이 목적이므로, 작업 부하와 정밀도를 고려하여 제어 방법을 결정하고, 제어 조건이 최적화되도록 튜닝(tuning) 작업을 필수적으로 수행한다<sup>[8]</sup>. 이러한 로봇 arm 구조는 여러 관절의 각도를 조정함으로써 비교적 자유롭고 다양한 자세를 연출해낼 수 있으므로 일부 엔터테인먼트와 로봇 공연에서 활용하고 있다. 선진국의 엔터테인먼트 분야에서는 증강 현실, 프로젝션 매핑과 로봇 arm을 결합한 시뮬레이터를 개발하고 있다<sup>[9][10][11]</sup>.

일반적인 로봇 공연에서는 휴머노이드 형태의 로봇 배우 혹은 로봇 액터를 활용하여 배우 역할을 수행하는 사례가 대부분이다<sup>[12]</sup>. 오사카 대학은 적극적으로 로봇 공연 연구를 수행하고 있으며, 극단인 세이넨단과 상호 협업하여 최첨단 로봇을 인간 배우와 함께 로봇 연극에 등장시킨 사례가 있다<sup>[13]</sup>. 또한, 도쿄 대학 예술 학부와 협업하여 인간과 유사한 연기를 할 수 있는 휴머노이드를 제작하였고, 실제 연극 무대에 적용하였다<sup>[14]</sup>. 서구의 사례로는 두려움과 놀람 등 인간과 거의 유사한 표정을 지을 수 있는 휴머노이드 로봇 제미노이드 F (Geminoid F)가 단독으로 공연한 경우도 있었다<sup>[15]</sup>. 덴마크에서는 인간이 주인공을 보조하는 조

연으로 산업용 쿠카(KUKA) 로봇 2대를 사용한 프레티덴(Fremtiden)이라는 연극을 기획하였으며, 연출가와 기술자가 협업하여 로봇이 연극 전체에 걸쳐서 출연하였다<sup>[16]</sup>. 데머스(Demers)는 더 스릴러 걸스(The Triller Girls)라는 공연에서 12대의 로봇을 군집 제어를 활용하여 댄스 공연을 시연하였다<sup>[17]</sup>. 국내에서는 인간형 휴머노이드에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 실제 공연에 주연으로 등장하여 호응을 받는 사례도 있다<sup>[18]</sup>. 보다 실감있는 로봇 공연을 위한 애니메트로닉스(animatronics) 기술도 로봇 액터에 적용되고 있다<sup>[19]</sup>. 텍사스 대학에서는 신체 모델에 의한 표정 메카니즘을 선보였으며, 디즈니와 픽사에서는 로봇 액터 기술을 개발하여 영화에 적용해왔다<sup>[20][21]</sup>.

이상과 같이 기존 사례 및 선행 연구를 살펴보면 로봇 기술은 문화 산업에서 차지하는 비중이 증가할 것으로 예상되며, 첨단 기술 공연에서도 필수적으로 활용될 것으로 예상된다. 그러나, 기존의 로봇 액터 기술은 무대 및 스튜디오의 평면이라는 공간에 한정되어 동작하므로, 실제 공연의 장면 연출에는 한계로 작용하고 있다. 이로 인하여 현재의 로봇 액터 기술은 관객들의 눈높이를 만족시키기에는 다소 미흡한 것이 현실이다. 이러한 문제점에 대하여 휴머노이드 로봇 액터와 산업용 로봇 arm을 결합하는 구조가 대안이 될 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 기존 로봇 공연의 공간적 한계를 극복하기 위하여 산업용 로봇 arm을 로봇 액터에 접목한 RAoRA (Robot Actor on Robot Arm) 구조를 제안하였다. 논문의 구성은 2장에서 RAoRA 메카니즘 설명과 3장에서 컨텐츠 연동과 공연 시연 설명하고 결론을 맺는다.

## II. RAoRA 플랫폼

### 1. RAoRA 기구 개념

RAoRA는 공연용 로봇 액터를 목적으로 하는 시스템으로 그림 1과 같이 산업용 로봇 arm의 end-effector에 휴머노이드형 로봇 액터를 장착한 개념이다. 산업용 로봇 arm은 5자유도를 가지는 다관절 로봇으로 평행 이동, 전후 이동, 상승, 회전 및 기울임 등 인간의 팔로 조합할 수 있는 대부

a) 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문(Korea Institute of Industrial Technology, Human Convergence Technology R&D Department)

‡ Corresponding Author : 김형태(Hyungtae Kim)

E-mail: htkim@kitech.re.kr

Tel: +82-31-8040-6878

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5711-551X>

※ 본 연구는 과학기술정보통신부와 문화체육관광부가 지원하는 연구개발 사업(2017K000232 및 R2019050038)의 성과물임을 알립니다. (This work was supported by the R&D Program funded by the Ministry of Science and ICT and the Ministry of Culture, Sports and Tourism (MSIT, 2017K000232 and MCST R2019050038))

· Manuscript received May 19, 2019; Revised June 17, 2020; Accepted June 17, 2020.

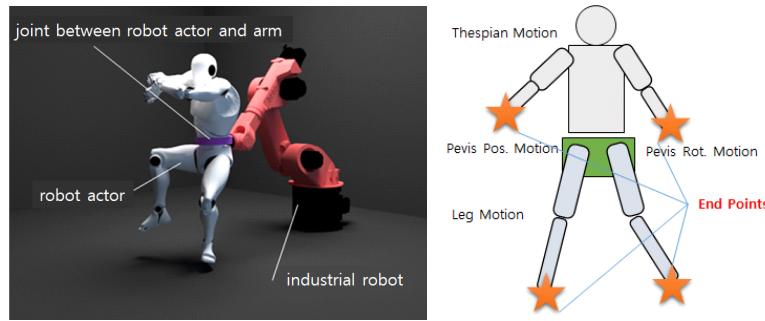


그림 1. RAoRA 구조의 개념도(좌)와 로봇 액터의 동작 제어 구분(우)  
Fig. 1. Concept of RAoRA structure (left) and motion control of a robot actor (right)

분의 동작을 모사할 수 있다. 로봇 액터는 휴머노이드 형태로 인간의 동작을 모사함으로써 시나리오에 따라 연기를 수행한다. RAoRA 기구에서는 로봇 arm이 로봇 액터를 상승시키거나 자세를 자유롭게 바꿀 수 있으므로 로봇 액터가 하늘로 비상하면서 춤 동작을 표현하는 것이 가능하다. 또한, 로봇 액터의 중심이 심하게 이동하는 춤이나 운동을 모사하는 동작의 경우 로봇 arm이 중심 이동을 커버해 주므로, 기존 로봇 액터로 표현하기 어려운 동작도 가능해진다. 공중 동작 이외에 발동작에 있어서 기존의 로봇 액터를 활용한 시나리오는 발바닥을 지면에 접촉한 상태의 연출만 가능하였다. 발바닥 비접촉 혹은 미끄러짐 동작의 경우 산업용 로봇 arm을 움직여서 발바닥의 마찰을 적절히 조정함으로써 구현할 수 있다.

그림 1에서 보여주는 동작은 로봇 액터가 춤추는 연기를 가상으로 모델링 한 결과이다. 로봇 액터는 춤추는 동작 자체만 연기하고, 실제로 상하로 뛰는 움직임은 로봇 arm이 담당함으로써, 관객은 로봇 액터가 실제로 춤추는 모습으로 인지하게 된다. 그리고, 대부분의 하중을 로봇 arm이 지지하고 있으므로 발로 지지하는 기존 로봇 액터보다 설계와 제작에 있어서 훨씬 유리하다. 기존 로봇 액터는 하체가 상체를 지지하며 중심을 잡아야 하므로, 설계 단계에서 공연 단계까지 하중과 무게 중심이 항상 제약 조건으로 작용한다. 즉, RAoRA 구조에서는 로봇 액터 개발시 하중, 모터 출력 및 관절 자유도에 상관없이 실감있는 공연 연출에 높은 비중을 두고 로봇을 설계할 수 있다. 추가적으로, 로봇 공연에 있어서 분장도 중요한 요소인데, RAoRA 구조에서는 분장의 무게는 로봇 arm이 담당하므로, 휴머노이드 부

분에 분장 장착이 쉽도록 설계할 수 있었다. face 및 몸체의 외피에 분장을 쉽게 장착할 수 있고, 유지 보수를 위한 분해 및 조립이 용이한 구조로 제작하였다.

## 2. 가상 모델을 활용한 기구 설계

개념적인 RAoRA 구조를 보다 구체적인 동작으로 연출하고 모터와 관절 등의 설계 요소를 도출하기 위하여 3ds Max 환경을 활용하였다. 3ds Max는 캐릭터 애니메이션 모델 기능을 지원하므로 로봇 액터의 가상 모델을 skeleton 모델로 구축하였다. skeleton 모델은 그림 2 좌측과 같이 로봇 액터의 기구학적 특성과 동특성 분석을 위하여 관절을 간략화한 모델이다. 최초 skeleton 모델에서는 전체 관절 수는 23개로 구성하였으며, 각 관절당 회전 자유도를 3으로 가정하여 총 69개의 자유도 모델을 구축하고 동작 분석을

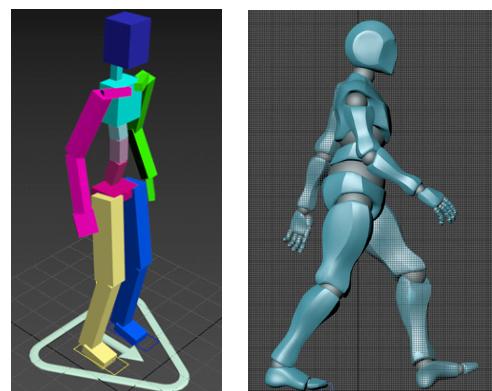


그림 2. 디지털 액터의 skeleton 모델과 표준 모델  
Fig. 2. A skeleton model and a standard model of an digital actor

수행하였다. 그러나, 로봇 액터의 제작 단가, 기간 및 시스템 복잡성 등 현실적인 측면을 고려하여 로봇 액터의 표현에 지장을 주지 않는 선에서 관절 수를 감소함으로써 자유도를 최적화하였다. Thespian의 경우 자연스러운 동작이 가능한 최소 자유도 모델은 46 자유도였으며, leg의 경우는 14개의 자유도가 최적임을 알 수 있었다. 자유도 뿐만 아니라, 동작 범위 및 속도 등을 고려하여 하드웨어 기구 설계와 구동계 사양 도출도 가능하였다. 이러한 skeleton 모델을 기반으로 그림 2 우측과 같이 디지털 액터의 표준 모델도 제작하여 차후 저작 도구에 활용하였다. 표준 모델은 실제 구현할 로봇 액터의 링크 비율과 거의 유사하게 모델링하였다.

### 3. RAoRA 기구 제작

RAoRA 통합 시스템은 제어의 측면에서 복잡하고 방대하므로, 로봇 액터의 동작을 고려하여 Thespian (상체), Pelvis, leg 및 로봇 arm 등 4개의 하부 시스템으로 분리하였다. 그림 1의 로봇 액터의 춤 연기는 Thespian, Pelvis 및 leg 동작의 조합으로 이루어지고, 로봇 액터 전체의 이동과 자세는 산업용 로봇 arm이 처리한다. Thespian은 로봇 액터의 상체 부분으로 영국의 Engineered Arts사에서 공연/전시 용으로 제작·판매되고 있는 RoboThespian 제품을 적용하였다. Thespian의 관절 및 동작 구성은 표 1과 같이 arm, 몸통, 머리, face 등 총 46개의 동작 자유도로 구성되어 있다. arm은 좌우가 대칭이며 팔, 팔꿈치, 손목 및 손가락 동작으로 구분되며, 모터에 의하여 별리기, 틀기 및 굽히기 등의 동작을 구동하였다. 몸통과 머리는 숙이기, 회전 및

표 1. Thespian의 동작 자유도 구성

Table 1. Degree of freedom in Thespian movement

parts	details	DOF	motions
arm	shoulder	3	open/forward/ twist/bend
	elbow	1	
	wrist	2	
	finger	4	
trunk	pan/tilt/yaw	3	bow/rotate/tilt
head	pan/tilt/yaw	3	bow/tilt/rotate
face	eye	6	position/size(pupil, eyelid, eyebrow)
	style	1	
LED	face/chest/arms/legs	6	light
	total	46	

좌우 기울이기 동작이 가능하다. face는 눈동자 위치, 동공의 크기, 눈꺼풀 및 눈썹을 조정할 수 있다. 그림 3은 제작된 RAoRA 시스템으로 로봇 arm에 Pelvis를 연결하고 Pelvis 상하로 Thespian과 leg를 장착한 모습을 볼 수 있다.



그림 3. 제작된 RAoRA 시스템 (좌)과 leg/Pelvis 메카니즘 (우)  
Fig. 3. Construction of RAoRA system (left) and leg.Pelvis mechanism (right)

Leg는 발가락, 발목, 무릎 및 허벅지로 구성되어 있으며 양쪽 대칭으로 총 14개의 자유도로 설계하였다. 로봇 액터의 Pelvis는 산업용 로봇 arm의 end-effector와 연결된 부분으로 로봇 arm의 궤적을 정의할 때 이동 지점으로 사용한다. Pelvis에는 허리 동작을 위한 3자유도 spherical joint로 연결되어 있으며, 그림 3과 같이 모터 드라이브를 설치하였다. RAoRA에 적용된 산업용 로봇 arm은 KUKA사의 360-3 제품으로 5자유도의 로봇 액터의 자세를 연출할 수 있다. 산업용 로봇 arm의 바닥 기준 로봇 액터 이동 영역은 표 2와 같다.

표 2. 산업용 로봇 arm의 로봇 액터 이동 범위

Table 2. Transfer range of an industrial robot arm for a robot actor

movement	minimum	maximum
forward	0mm	2825mm
backward	0mm	1362mm
left	0mm	2825mm
right	0mm	2825mm
top	0mm	3371mm
bottom	0mm	427mm
radius	0mm	2825mm
rotation	-185°	+185°

#### 4. RAoRA 동작 원리

RAoRA를 공연에 사용하기 위하여는 기술적으로 곡선 궤적과 제어 방법이 가장 중요하다. RAoRA의 연기 동작을 위하여 손끝, 발끝 및 자세 등의 궤적이 정의되어야 하며, 로봇 액터의 관성 부하가 있는 상태에서 정의된 궤적을 추종하는 제어가 필요하다. 본 연구에서는 곡선 궤적의 수학적 정의를 위하여 C-spline을 사용하였고, 궤적에 따른 모터의 회전 각도를 계산하기 위하여 역기구학을 적용하였다.

RAoRA에서의 궤적은 손 동작, 발 동작 및 몸통의 자세로 구분한다. 각각의 동작은 PC에서 입력하면 불연속적인 3차원 좌표의 배열이다. 시나리오를 검토하기 위한 가상 모델이나 RAoRA의 연기 동작은 수백 개의 point로 정의되어 있다. 따라서, RAoRA의 매끄럽고 연속적인 동작을 위한 궤적은 point 간의 수학적인 중간 위치로 예측해서 보완해야 하는데, 본 연구에서는 C-spline을 적용하였다. C-spline의 경우 2차 미분의 연속성이 보장되므로 곡선 궤적에서 로봇을 부드럽게 움직이게 할 수 있다<sup>[22]</sup>. 예를 들면, C-spline에서  $q_i$ 와  $q_{i+1}$ 의 중간 지점은 다음과 같이 매개 변수  $\lambda$ 를 이용하여 계산할 수 있다<sup>[23]</sup>.

$$q_i(\lambda) = [\lambda^3 \lambda^2 \lambda 1] \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{i-1} \\ q_i \\ q'_{i-1} \\ q'_i \end{bmatrix} \quad (0 \leq \lambda \leq 1) \quad (1)$$

여기서, 매개 변수의 범위는  $0 \leq \lambda \leq 1$ 로 한정되며, 두 지점 사이의 비율로 정의한다. 2차 미분의 연속성을 보장하기 위하여 경계 조건을 설정하고, 각 m개의 궤적 좌표의 1차 미분은  $m \times m$  크기의 역행렬로 구한다.

각 궤적의 좌표는 여러 개의 모터의 회전각과 관절의 길이를 조합하여 맞추어야 하므로, 역기구학을 사용하여 모터의 입력값을 결정하였다. 각 관절 사이의 관계는 xyz 방향의 평행 이동과  $\Theta\phi\psi$  방향의 회전의 상대 운동으로 구성되므로, 임의 순번의 관절에 대한 Cartesian 좌표계는 3차원 행렬 변환식을 이용하여 행렬 곱의 형태로 상대적인 위치를 계산한다<sup>[24]</sup>. 그러므로, 각 관절의 이동량과 회전각이 주어지면, 다관절 끝단에 설치된 end-effector의 위치를 아래와 같이 수학적인 방법으로 구할 수 있다.

$$[T] = {}^0 T_n = \prod_{i=1}^n {}^{i-1} T_i, q_n = T q_0 \quad (2)$$

그러므로, 각 모터의 입력은 상기 수식에서 궤적  $q_n$ 에 T의 역행렬을 이용하여 구한다. 로봇 액터의 end-effect는 정의된 속도로 이동하므로 각 관절의 속도는 모터의 출력과 관련이 있다. Lagrangian은 궤적을 이루는 부분의 위치에너지와 속도 에너지 등 에너지 보존 법칙에 의한 총량이다. 전체 관절의 운동 방정식은 Hamilton의 원리에 의하여 Lagrangian 방정식을 적용하여 구할 수 있다. 구해진 운동 방정식에서는 회전 관성, 관절의 강성 및 모터의 출력에 대한 식으로 표현할 수 있다<sup>[25]</sup>.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial \theta_i} \right) \quad (3)$$

이와 같이 구해진 회전 각도로 모터를 동작시키더라도 속도에 의한 부하, 관절의 하중 및 마찰에 의하며 현실적으로는 오차가 발생한다. RAoRA에 적용한 산업용 모터의 경우 동작 중에 위치와 속도를 모니터링하면서, 명령 위치와 실제 위치의 차이를 구하고 오차를 계산하는 기능있다. 이 오차를 제어기에 입력함으로써 입력값을 조정하여 위치 오차를 0에 수렴하게 만든다. 제어 알고리즘은 산업용 모터 제어기에 기본적으로 탑재된 PID와 feedforward이다. 이러한 제어 알고리즘은 공연 중 발생할 수 있는 마찰, 굴곡, 관성, 충격 및 진동 등 외부 요인에 의한 물리적 간섭 인자를 극복하고 시나리오의 동작을 수행할 수 있도록 신뢰성을 높여 준다.

### III. 디지털 액터와 시연

#### 1. 디지털 액터의 동작 특성 분석

RAoRA로 공연할 수 있는 동작을 검토하기 위하여 그림 2 우측과 같이 제작된 디지털 액터의 표준 모델을 활용하여 모션 추출 프로그램을 제작하였다. 모션 추출 프로그램도 3ds Max의 MaxScript 기반으로 제작되었으며, 각 동작 분석에서 필요한 관절의 최대 속도 등 회전 데이터 값을 추출할 수 있다. 연속적인 동작 분석을 위하여 앞서 설명한 역기구학과 C-spline 등이 프로그램에 적용되었다. 결과 파일은



그림 4. Maxscript 모션 추출 프로그램 및 동특성 분석 결과

Fig. 4. Maxscript motion extraction program and analysis results of dynamic characteristics

다양한 CG저작도구에서도 표준적으로 사용할 수 있도록 FBX 형식으로 출력하였다. 모션 추출 프로그램을 활용하여 공연에 선보일 다양한 디지털 액터 동작을 검토하기 위하여 기본 동작 7종과 춤 동작 7종 선정하여 분석하였다. 그림 4는 모션 추출 프로그램에서 동작 분석을 수행했던 예이다. 표준 모델을 동작시킨 다음, 관심 있는 관절을 선택하여 축별 변위, 속도, 가속도 및 무게 중심 등 동특성 데이터를 얻어내었다. 각 관절별 동특성 데이터는 연출에 사용하지만, 관절 설계 검증에도 유용하게 활용할 수 있었다.

## 2. RAoRA 구동 소프트웨어

앞에서 구해진 동특성 데이터를 활용하여 RAoRA 구동 명령어를 만들어 내는 통합 모션 저작용 소프트웨어를 제작하였다. 가상적인 동작과 실제 RAoRA 구동에는 차이가 발생하는 경우가 자주 발생하였는데, 로봇 액터 동작의 공간 정합 성능을 높이기 위한 수정 및 보정 작업을 통합 모션 저작용 소프트웨어로 용이하게 진행하였다. 예를 들면, leg 동작의 경우 디지털 액터의 여러 부위의 위치값을 end-e-

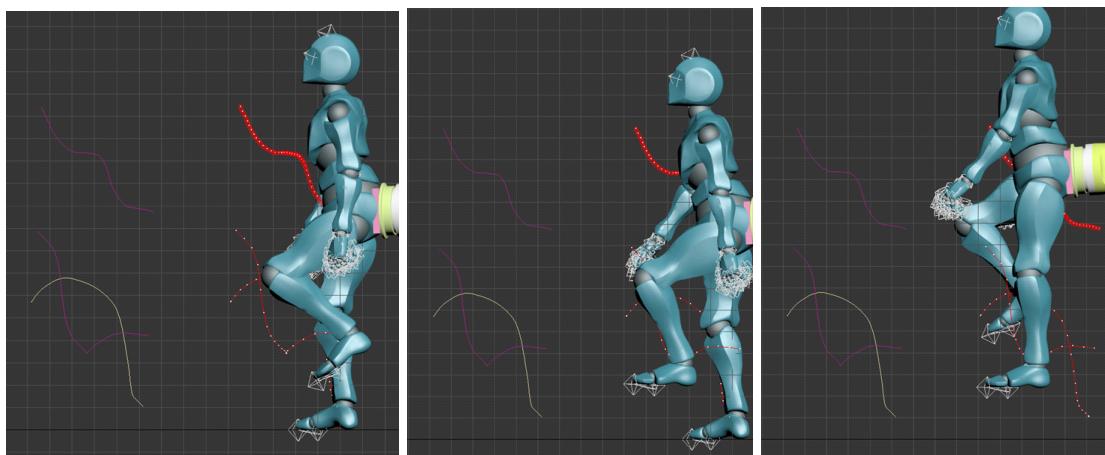


그림 5. 디지털 액터의 air walk 정의 화면

Fig. 5. A screen shot of air walk for a digital actor

fect의 목표 값으로 설정하여 공간 정합성을 관찰해 보았다. 결과적으로 그림 5와 같이 발목을 목표 값으로 각 관절의 회전을 제어하는 것이 높은 공간 정합성을 보였다. 통합 모션 저작용 소프트웨어에서는 RAoRA 동작을 부드럽게 하고, 동작 데이터의 용량을 최적화를 위하여 궤적을 C-spline 곡선으로 처리하였다. 각 모터의 출력은 제어 궤적을 기반으로 역기구학으로 연산하여 결정하였다. 통합 모션 저작용 소프트웨어는 기준 CG 저작에 널리 사용되고 있고, 사용자에게 친숙한 3ds Max 환경의 Plug-In으로 제작함으로써 엔지니어링 비전문가도 활용할 수 있다. RAoRA 구동을 위한 통합 운영 소프트웨어는 시스템의 모드를 설정하고 통합 모션 저작 데이터를 로딩한 후, 제어 파라미터를 조정하여 RAoRA가 구동되도록 제작하였다. 단일 소프트웨어로 자유도가 많은 RAoRA의 전체 제어는 복잡하므로, 통합 운영 소프트웨어는 Thespian, Pevlis, leg 및 로봇 arm으로 분리하여 제어할 수 있도록 구성하였다.

### 3. RAoRA Air Walk

RAoRA 플랫폼의 테스트를 위하여 허공의 계단을 올라가는 동작인 air walk를 시연해 보았다. 디지털 동작 분석 프로그램으로 동작 특성을 검토하고, 통합 모션 저작용 소프트웨어를 활용하여 동작을 조정하였다. 그림 5와 같이 발목과 Pelvis의 궤적을 기준으로 동작을 정의하면 디지털 액터와 로봇 arm의 각 관절별 각도가 계산되어 RAoRA의 동

작을 확인할 수 있었다. 그림 5에서 굵은 적색 선은 Pelvis의 궤적이며, 얇은 적색 선은 양 발목의 궤적이다. 4개의 입력 궤적이 역기구학 공식에 의하여 각 모터의 회전 각도가 결정되었다. 통합 모션 저작용 소프트웨어의 직관적인 화면을 통하여 발 바닥의 자세와 위치를 교정함으로써 자연스럽게 계단을 올라가는 모습으로 연출할 수 있었다.

air walk 동작과 별도의 Thespian의 연기 동작을 입력한 후, 통합 운영 소프트웨어를 활용하여 시연하였다. 그림 6은 RAoRA의 하체는 air walk를 하면서 Thespian은 별도의 연기를 하는 장면이다. 로봇 액터의 중심이 이동하는 것은 산업용 로봇이 수행하고, 나머지 동작은 로봇 액터가 처리하였다. leg 동작을 그림 6의 계단을 올라가는 동작과 비교하면 일치하는 것을 알 수 있다. 실제로 로봇 arm과 로봇 액터의 동작이 같이 연동하여 마치 허공의 계단에 올라가는 느낌을 주었다.

### 4. 공연 콘텐츠 시연

로봇 공연 전문업체 이산 솔루션과 협업하여 RAoRA 시나리오를 기획하였고, 5분 러닝 타임의 공연 콘텐츠를 제작하였다. 공연 콘텐츠의 스토리 라인은 꿈을 그리는 로봇, 달나라 여행, 아름다운 비상, 심해 탐험, 괴물의 공격 및 댄스 세레모니로 구성하였다. 스토리 라인과 RAoRA의 특성을 고려하여 연출 장면과 콘티를 제작하였다. 그림 7은 콘티에 의하여 제작된 시나리오의 주요 장면을 시놉시스로

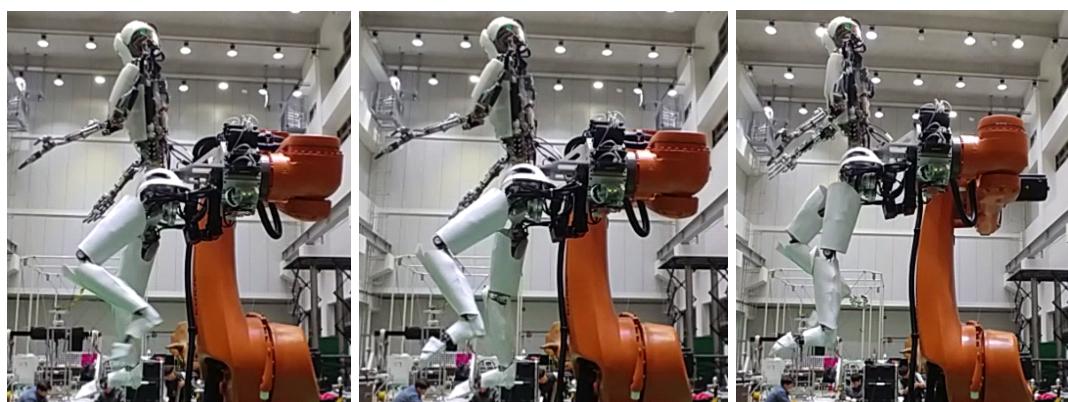


그림 6. RAoRA의 air walk 시연 장면

Fig. 6. Pictures of air walk test using RAoRA



그림 7. RAoRA의 연출 시나리오 (좌) 도입부 (중) 아름다운 비상 (우) 심해 탐험  
Fig. 7. Scenario for RAoRA (left) intro (center) beatiful soar (right) exploring deep sea

제작한 것으로 도입부, 아름다운 비상 및 심해 탐험 등이다. 연출 장면 및 콘티를 기반으로 RAoRA 동작은 걷기, 계단 오르기, 헤엄치기 및 장풍 등으로 결정하였다. 결정된 동작은 skeleton 모델 분석, 동특성 분석 및 동작 조정을 거친 후 전체 시나리오로 연속 구동하였다.

그림 8은 시연 장면을 발췌한 것으로 시나리오 도입부의 노래하는 연기, 아름다운 비상 후에 지붕에 앉아서 발을 흔드는 연기 및 심해 탐험에서 물을 헤치며 걷는 연기 장면이다. 시연 공연에서 공중에서 face, arm, leg 및 몸통 자세 등을 조합하여 다양한 동작을 매끄럽게 연출하였다. 시연 공연에서는 제안된 RAoRA 구조는 기존 로봇 공연 이 보여 줄 수 없는 공중 동작과 다양한 연기를 쉽게 구현할 수 있음을 보였다. 향후 RAoRA 플랫폼은 템포가 강한 댄스 동작이 가능하도록 보완하여 첨단 공연, 영화, 엔터테인먼트 및 테마파크 등에 활용될 예정이다.

#### IV. 결 론

본 과제에서 제안된 RAoRA는 산업용 로봇 arm의 end-effector에 휴머노이드형 로봇 액터를 장착한 구조로서 기존 로봇 액터가 불가능했던 공중 동작과 발바닥 비고정 동작을 쉽게 연출할 수 있었다. RAoRA 기구는 skeleton 모델로 자유도를 최적화하였고, 로봇 액터의 동작을 고려하여 4개의 하부 시스템으로 분리하여 제작였다. 다관절 구조 RAoRA는 정의된 궤적에 따라 동작하기 위하여 역기구학 및 C-spine 보간 적용하였다. 3ds Max 환경을 이용하여 디지털 액터의 동작 분석 및 통합 모션 저작용 Plug-In 소프트웨어 환경을 구축하였으며, 통합 운영 소프트웨어는 4개의 하부 시스템에 대하여 각각 제작하였다. 공연 동작 실증을 위하여 허공의 계단을 올라가는 air walk와 5분 러닝 타임의 공연 컨텐츠를 시연하였다. 제안된 RAoRA 플랫폼은 비



그림 8. RAoRA의 다양한 공중 동작 연출 (좌) 노래하기 (중) 지붕에서 앉아서 발 흔들기 (우) 물을 헤치며 걷기  
Fig. 8. Screen shots of various air actions using RAoRA (left) singing (center) seating and shaking legs on the ceiling (right) move through the water

전문가도 활용할 수 있는 환경으로 구축되어 있으므로 향후 스마트 스테이지, 와이어 플라잉과 함께 첨단 공연 장비로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌 (References)

- [1] H. Huynh, H. Assadi, E. Riviere-Lorphevre, O. Verlinden, and K. Ahmadi, "Modelling the dynamics of industrial robots for milling operations," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 61, pp. 101852, March 2020.
- [2] A. Morgan, K. Hang, W. Bircher, F. Alladkani, A. Gandhi, B. Calli, and A. Dollar, "Benchmarking Cluttered Robot Pick-and-Place Manipulation With the Box and Blocks Test," *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 2, pp. 454-461, April 2020.
- [3] J. Lee, P. Chang, and M. Jin, "Adaptive Integral Sliding Mode Control With Time-Delay Estimation for Robot Manipulators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 8, pp. 6796-6804, August 2017.
- [4] H. Shah, M. Sulaiman, A. Shukor, and Z. Kamis, "An experiment of detection and localization in tooth saw shape for butt joint using KUKA welding robot," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 97, No. 5-8, pp. 3153-3162, May 2018.
- [5] M. Kim, and S. Lee, "A Single-Lens Multi-Sensor Imaging System for 3-D Shape Inspection with a Wide Field of View," *International Journal of Optomechatronics*, Vol. 6, No. 4, pp. 350-365, November 2012.
- [6] K. Kallu, W. Jie and M. Lee, "Sensorless Reaction Force Estimation of the End Effector of a Dual-arm Robot Manipulator Using Sliding Mode Control with a Sliding Perturbation Observer," *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 16, No. 3, pp. 1367-1378, May 2018.
- [7] M. Alebooyeh, and R. Urbanic, "Neural Network Model for Identifying Workspace, Forward and Inverse Kinematics of the 7-DOF YuMi 14000 ABB Collaborative Robot," *IFAC PapersOnLine*, Vol. 52, No. 10, pp. 176-181, August 2019.
- [8] A. Ahmed, B. Koh, and Y. Lee, "A Comparison of Finite Control Set and Continuous Control Set Model Predictive Control Schemes for Speed Control of Induction Motors," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 14, No. 4, pp. 1334-1346, April 2018.
- [9] K. Vollmann, and M. Kuhnhen, "Exploiting robot simulation techniques to succeed in entertainment industry," *Proceeding of IEEE International Conference on Industrial Technology*, Bangkok, Thailand, pp. 860-863, 2002.
- [10] M. Katliar, M. Olivari, F. Drop, S. Nooitj, M. Diehl, and H. Bulthoff, "Offline motion simulation framework: Optimizing motion simulator trajectories and parameters," *Transportation Research Part F*, Vol. 66, pp. 29-46, October 2019.
- [11] M. Kim, and J. Kim, "Augmented Reality System in Real Space using Mobile Projection," *Journal of Broadcast Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 622-627, September 2018.
- [12] Y. Park, and S. Oh, "The Influence of the Appearance of 'Robot Actor' on the Features of the Theater," *The Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 19, No. 11, pp. 507-515, November 2019.
- [13] O. Hirata, and H. Lee, "The Concept and Significance of Robot Theater," *The Korean Journal of Arts and Studies*, Vol. 16, pp. 77-97, June 2017.
- [14] S. Nishiguchi, K. Ogawa, Y. Yoshikawa, T. Chikaraishi, O. Hirata, and H. Ishiguro, "Theatrical approach: Designing human-like behaviour in humanoid robots," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 89, pp. 158-166, March 2017.
- [15] C. Becker-Asano, and H. Ishiguro, "Evaluating facial displays of emotion for the android robot Geminoid F," *Proceeding of IEEE Workshop on Affective Computational Intelligence*, Paris, France, 2011.
- [16] O. Brown, "The machine as autonomous performer," *Interactive Experience in the Digital Age*, Springer, New York, pp. 75-90, 2014.
- [17] L. Demers, "The Multiple Bodies of a Machine Performer," *Robots and Art*, pp. 273-306, Springer, Singapore, 2016.
- [18] D. Go, H. Hyung, H. Yoon, and D. Lee, "The Implementation of Reacting Motion for Human-Like Robot Based on Position of Counterpart and Situation on the Stage," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 28, No. 5, pp. 457-463, October 2018.
- [19] A. Madhani, "Brining physical characters to life," *Proceeding of ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, CA, USA, 2009.
- [20] J. Rajruangrabin, and D. Popa, "Control of Head-Eye Coordination of Conversational Robotic Actors," *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 42, No. 16, pp. 729-734, Gifu, Japan, 2009.
- [21] C. Causer, "Walt Disney Audio-Animatronics Timeline," *IEEE Potentials*, Vol. 38, No. 5, pp. 24-25, August 2019.
- [22] W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling, ang B. Flannery, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 113-116, 1992.
- [23] V. Anand, *Computer Graphics and Geometric Modeling for Engineers*, John Wiley & Sons, New York, pp. 230-236, 1993.
- [24] P. McKerrow, *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley, Singapore, pp. 134-157, 1990.
- [25] L. Meirovitch, *Methods of Analytical Dynamics*, McGraw-Hill, New York, pp. 67-81, 1970.
- [26] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 95-99, 1990.

---

## 저자소개

---

### 조자양



- 2012년 : 단국대학교 멀티미디어공학과 학사
- 2016년 : 한양대학교 컴퓨터공학과 석사
- 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-2292-2423>
- 주관심분야 : 실시간 분산제어, 모선 제어, 원격 제어, 자율 주행, 임베디드 시스템, 무대 기술

### 김진영



- 1991년 : 성균관대학교 기계설계학과 학사
- 2000년 : 성균관대학교 기계공학과 석사
- 2004년 : 성균관대학교 기계공학과 박사과정 수료
- 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문
- 주관심분야 : 다가체 모선제어, 애니메트로닉스, 동적영상매핑 알고리즘

### 이설희



- 2005년 : 경기대학교 기계시스템공학과 학사
- 2007년 : 한양대학교 기계공학과 석사
- 2008년 : LG전자
- 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-9244-9275>
- 주관심분야 : 매니퓰레이터, 병렬 메커니즘, 자율주행로봇, 무대 기술

### 이상원



- 2002년 : 서울산업대학교 기계설계학과 학사
- 2004년 : 성균관대학교 기계설계 석사
- 2012년 : 한국기술교육대학교 메카트로닉스 박사
- 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문
- 주관심분야 : 이동 플랫폼 메커니즘 설계 및 구조해석, 안전 제어 시스템 설계, 병렬 메커니즘

### 김형태



- 1996년 : 한양대학교 정밀기계공학과 학사
- 1998년 : 한양대학교 정밀기계공학과 석사
- 2005년 : 한양대학교 정밀기계공학과 박사
- 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문 수석연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-5711-551X>
- 주관심분야 : 머신 비전, 빅데이터 병렬 처리, 영상 처리 알고리즘, 스펙트랄 이미징