

## 휴머노이드 로봇 관절 아암의 운동학적 해석 및 모션제어에 관한 연구

### A Study on Kinematics Analysis and Motion Control of Humanoid Robot Arm with Eight Joints

정양근<sup>1\*</sup>, 임오득<sup>2</sup>, 김민성<sup>3</sup>, 도기훈<sup>3</sup>, 한성현<sup>4</sup>

Yang-Geun Jung<sup>1\*</sup>, O-Duek Lim<sup>2</sup>, Min-Seong Kim<sup>3</sup>, Ki-Hoon Do<sup>3</sup>, Sung-Hyun Han<sup>4</sup>

#### 〈Abstract〉

This study proposes a new approach to Control and trajectory generation of a 8 DOF human robot arm with computational complexity and singularity problem. To deal with such problems, analytical methods for a redundant robot arm have been researched to enhance the performance of research, we propose an analytical kinematics algorithm for a 8 DOF biped dual robot arm. Using this algorithm, it is possible to generate a trajectory passing through the singular points and intuitively move the elbow without regarding to the end-effector pose. Performance of the proposed algorithm was verified by simulation test with various conditions. It has been verified that the trajectory planning using this algorithm.

*Keywords : Humanoid Robot Arm Kinematics, Redundant Arm, Eight Joints, Working Path, Cartesian and Joint Space*

<sup>1</sup> 정회원, 교신저자, 신라정보기술(주),  
E-mail: pmy2626@naver.com

<sup>2</sup> 정회원, 해군정비창

<sup>3</sup> 정회원, 경남대학교 대학원 석사과정

<sup>4</sup> 정회원, 경남대학교 기계공학부 교수 工博

<sup>1\*</sup>Corresponding Author, Shinra Information Technology  
Co., Ltd.

<sup>2</sup> Naval shipyard

<sup>3</sup> M.S. Course, Graduate School Kyungnam University.

<sup>4</sup> Detp. school of mechanical Engineering, Kyungnam University.

## 1. 서 언

기존의 산업용 로봇에서 많이 사용하던 6축 머니플레이터 대신에 서비스 로봇에서는 8축 휴머노이드 로봇 아암이 많이 사용되고 있다. 8축 휴머노이드 로봇 아암은 기존의 6축 로봇 아암에 비하여 특이점 및 장애물 회피에 더욱 우수한 성능을 가지고 있으므로, 정해지지 않은 복잡한 환경에서 동작해야 하는 서비스 로봇에 적합하다. 이러한 8축 로봇 아암의 운용을 위하여 제어 및 경로생성 알고리즘도 많은 연구가 수행되어 왔다.[2-5] 그러나 이룬 모바일 플랫폼을 채택한 서비스 로봇을 이용하여 다양한 작업 기능을 구현하고 비선형적 특성이 강하게 나타나는 동작에서 성능이 악화되는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하고 8축 로봇 아암의 제어 및 경로생성 알고리즘의 성능을 높이기 위해서는 해석적인 역기구학 해법이 필요하다. 로봇 아암의 역기구학 해법은 해석적인 방법과 수치해석적인 방법으로 나눌 수 있으며, 일반적으로 해석적인 방법이 수치해석적인 방법에 비해 많은 장점을 가지고 있다.[1]

그러나 회전관절로 구성된 직렬형 로봇의 경우 정기구학이 복잡한 비선형식으로 구성되어 있기 때문에 일반적인 방법으로는 해석적인 역기구학 해를 구할 수 없다. 또한, 여유 자유도에 의하여 역기구학의 해가 무한개 존재하므로 해석적인 방법을 적용하기 어렵다. 따라서 여유 자유도 로봇 아암의 역기구학 문제는 주로 수치해석적인 기법을 적용하여 특정한 조건을 만족하는 단일 해를 구하는 방법이 사용되어 왔다. 그러나 수치해석적인 방법은 해석적인 방법에 비해 연산량이 많고, 역기구학 해에 수치해석 오차가 포함되어 있기 때문에 해석적인 방법에 비해 오차가 크다. 따라서 여유 자유도 로봇의 해석적인 역기구학 해를 구하기 위한 노력이 계속되고 있다.[2]

8축 휴머노이드 로봇 아암의 해석적인 역기구학 해를 구하기 위하여 Lau 및 Wai는 공간좌표상에서 팔꿈치가 향하는 방향에 대한 변수를 추가하는 방법을 제안하였다. 휴머노이드 로봇 아암은 손목 관절 3개의 회전축이 교차하는 손목점(wrist point)을 가지기 때문에 여유 자유도가 팔꿈치의 움직임으로 나타난다. 따라서 팔꿈치의 위치에 대한 변수를 추가하면 휴머노이드 로봇 아암의 역기구학 해를 유한하게 한정 할 수 있게 된다. 그러나 Lau 및 Wai의 방법에서는 팔꿈치의 위치에 대한 변수가 기준 위치 및 로봇 아암의 자세에 따라 다른 의미를 가지게 되므로 직관적으로 적용하는데 어려움이 있다.

8축 로봇 아암의 운동학적 해석방법은 본 연구에서 제안한 역기구학 해법은 다음과 같은 특징을 갖는다. 첫째, 완전히 해석적인 방법으로 연산량이 적고, 해의 오차도 작다. 둘째, 로봇 아암의 팔꿈치 방향에 대한 변수를 작업공간상의 물리적인 의미를 갖도록 정의하여 작업자가 직관적으로 인식할 수 있다.[3]

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 휴머노이드 로봇 아암의 구조 및 특성을 분석하고, 3장에서는 휴머노이드 로봇 아암의 운동학적 해석 및 동특성을 나타내었다. 그리고 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안한 운동학적 알고리즘의 신뢰성을 검증하였다. 마지막으로 5장에서는 맺음말을 언급한다.

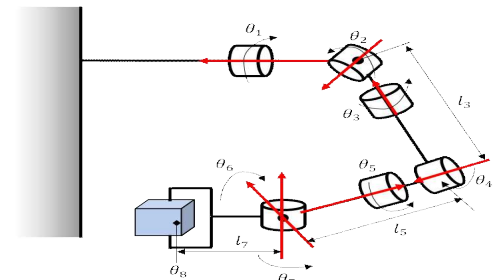


Fig. 1. The joint structure of humanoid robot

## 2. 휴머노이드 로봇 아암의 구조분석

기존의 6축 로봇 아암은 특이점이 존재하고 장애물회피에 한계가 있으므로, 최소한의 자유도를 추가하여 로봇 아암의 성능을 향상시키고자 하는 연구가 수행되었다.

이 연구에서는 6축 로봇 아암의 어깨와 팔꿈치 사이에 회전축을 추가하는 형태의 8축 로봇 아암이 장애물 및 특이점 회피에 가장 우수함이 증명되었고, 이러한 구조의 로봇 아암은 사람의 아암과 유사한 관절 구조를 가지기 때문에 휴머노이드 로봇 아암(humanoid robot arm)이라는 명칭이 붙었다. 휴머노이드 로봇 아암의 관절 구조는 Fig. 1(a)와 같이 어깨에 3축 구상관절(S), 팔꿈치에 1자유도 회전관절(R), 손목에 3축 구상관절(S)로 구성된 형태를 가진다. 그리고 일반적으로 회전관절만을 사용하여 구성할 때는 Fig. 1(b)와 같이 어깨와 손목에 3개의 회전축이 교차하는 점이 존재하도록 구성한다.[5][6]

휴머노이드 로봇 아암은 손목점을 가지므로 손목 동특성분석 알고리즘의 적용이 가능하다. 이 경우에 로봇 아암의 어깨 및 팔꿈치의 4축은 손목점의 위치에 의해 결정되며, 손목의 3축은 로봇 아암 말단의 방위에 의해 결정된다. 이 때 어깨 및 팔꿈치에서 손목점의 위치는 3축 구속 조건인데 비하여, 관절 자유도는 4축이므로 여유 자유도가 발생한다. 로봇 아암의 어깨 및 팔꿈치에서 발생하는 여유자유도를 도식화하면 Fig.2와 같다. Fig.2와 같이 손목점이 정해진 상태에서 어깨 및 팔꿈치 4축의 구동을 통해 로봇 아암의 자세를 결정하면, 로봇의 팔꿈치가 어깨점에서 손목점을 향하는 벡터를 중심으로 하는 팔꿈치 원상에 위치하게 된다. 역기구학 해를 구하면 로봇의 팔꿈치가 원상의 모든 점에 위치하는 경우에 대한 해가 구해지므로 무한하게 많은 해가 나오게 된다. 따

라서 해석적인 해를 구하기 위해서는 팔꿈치의 위치를 원상의 한 점으로 특정할 수 있는 조건을 부가하여야 한다. 이를 위하여 중력가속도 벡터를 기준으로 팔꿈치 방향 변수를 정의하고, 운동학(Kinematics) 해에 사용한다. Fig.2에서 EC는 팔꿈치이동경로 원호(Elbow Circle; EC)를 나타낸다.[7]

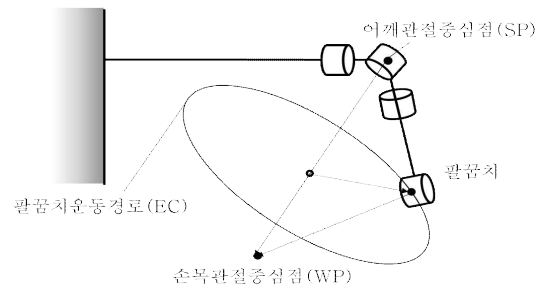


Fig. 2. The structure of shoulder and elbow joints of humanoid robot

휴머노이드 로봇 아암의 역기구학 해를 유한하게 한정 짓기 위해서, 팔꿈치의 위치를 팔꿈치 원상의 한 점으로 특정 지을 수 있는 팔꿈치 방향 변수를 정의한다. 이 때 팔꿈치 방향 변수를 직관적으로 사용하기 위해서는 작업공간 상에서 물리적인 의미를 지니고 있어야만 한다. 따라서 중력가속도 벡터를 사용하여 팔꿈치 방향 변수를 정의한다.[8-12]

Fig. 3은 중력가속도 벡터를 사용하여 팔꿈치 방향변수  $\theta$ 를 정의하는 방법을 나타낸다. 팔꿈치 원의 좌표축을  $n, u, v$  벡터로 나타내면,  $\theta$ 는  $n$ 을 기준으로  $u$ 와 팔꿈치의 위치  $E$  사이의 각도를 의미한다. 이때  $n$ 은 어깨점  $S$ 에서 손목점  $W$ 를 향하는 방향벡터,  $u$ 는 원 위의 기준 방향벡터,  $v$ 는  $n, u$ 와 수직인 방향벡터이다. 이때 중력가속도  $g$ 를 팔꿈치 원이 존재하는 평면에 사영하여  $u$ 를 결정하면  $\theta$ 에 작업공간 상의 물리적인 의미가 부여된다. 즉, 관절각이 Zero이면 팔꿈치의 방향

이 작업공간 상에서 중력 방향을 향하게 되고, 관절각이  $90^\circ$  이면, 팔꿈치의 방향이 작업공간상에서 중력과 수직인 방향을 향하게 된다.[3-15]

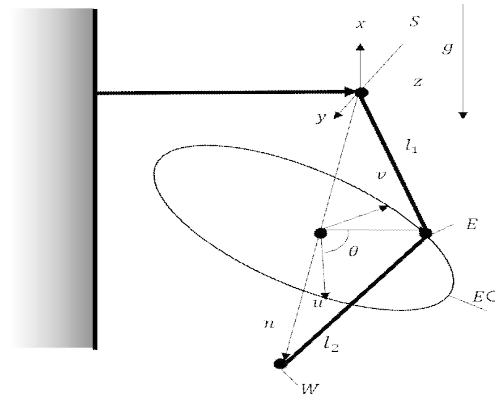


Fig. 3. The coordinates of elbow

### 3. 휴머노이드로봇아암의 동특성 분석

이 장에서는 앞 장에서 정의한 팔꿈치 방향 변수를 적용하여 8축 휴머노이드 로봇 아암의 해석적인 역기구학 알고리즘을 구하는 과정을 나타낸다. 먼저 휴머노이드 로봇 아암의 기구학 모델을 정의한다. 그리고 손목운동 알고리즘을 적용하여 어깨 및 팔꿈치 4축과 손목 3축을 분리한 후, 손목점의 위치와 팔꿈치 방향 변수를 사용하여 어깨 및 팔꿈치 4축에 대한 역기구학을 구한다. 마지막으로, 로봇 아암 말단의 방위 정보를 사용하여 손목 3축에 대한 역기구학 해를 구한다.[16]

운동학적 해를 구하기 위하여 휴머노이드 로봇 아암의 기구학모델을 정의한다. 로봇 아암의 각 관절의 동작 방향을 고려하여 회전축을 설정한 후 DH(Denavit-Hartenberg) 표기법에 맞추어 기구학 파라미터  $a, \alpha, d, \theta$  를 결정한다. Fig. 4는 로봇 아암의 각 관절의 회전축과 링크 길이를 나

타낸 기구학 모델이며, Table 1은 기구학 파라미터의 값을 정리한 것이다.[17]

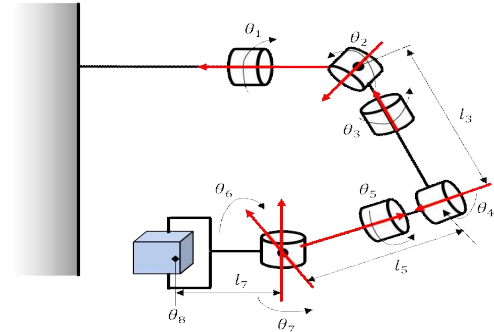


Fig. 4. The kinematic model of humanoid robot arm

Table 1. DH parameter of humanoid robot arm.

Joint	a	$\alpha$	d	$\theta$
1	0	$\pi/2$	0	$\theta_1$
2	0	$\pi/2$	0	$\theta_2$
3	0	$\pi/2$	$-l_3$	$\theta_3$
4	0	$-\pi/2$	0	$\theta_4$
5	0	$\pi/2$	$-l_5$	$\theta_5$
6	0	$\pi/2$	0	$\theta_6$
7	$-l_7$	0	0	$\theta_7$
8	0	0	$-l_7$	$\theta_8$

### 4. 모의성능실험

제안한 역기구학 알고리즘을 적용하여 특이점에 서의 역기구학 해와 팔꿈치 방향 변수를 사용하여 여유 자유도 구동 시뮬레이션을 수행한다. 그리고 이를 통하여 제안한 알고리즘의 성능을 검증한다.

특이점에서는 로봇 아암의 자유도가 구속되는 현상이 발생하고, 이는 자코비안 행렬의 역행렬이 발산하는 문제를 일으킨다. 따라서 자코비안 행렬

을 사용하는 수치해석적인 역기구학 알고리즘은 특이점 근방에서 계산오차가 증폭되는 문제가 발생한다. 그러나 이 논문에서 제안한 역기구학 알고리즘은 완전히 해석적인 방법을 사용하기 때문에 특이점 부근에서도 정확한 해를 구할 수 있다. 이러한 성질을 검증하기 위하여 작업공간상에서 특이점을 통과하는 경로를 생성하고, 역기구학 알고리즘을 통하여 관절공간으로 변경하는 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5는 직교공간 상에서 싱글러 포인트를 통과하는 작업경로를 생성한 모습을 나타낸다. 시뮬레이션을 단순화하기 위하여 xy 평면상의 경로를 생성하였으며, 부드러운 곡선을 그리며 특이점을 통과하는 경로를 생성하기 위하여 포물선 경로를 사용하였다. 그리고 그림에서 붉은 선은 로봇 아암의 경계 특이점의 궤적을 나타내며, 포물선 경로와 접하는 점이 로봇 아암이 특이점을 지나는 위치가 된다.

Fig. 6은 작업공간에서 생성한 경로를 제안한 역기구학을 통해서 관절공간으로 변환한 결과를 나타낸다. 이 그래프에서 특이점( $t = 1.03s$ )의 부근에서  $\theta_1, \theta_4, \theta_6$ 가 연속적인 경로를 그리는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통하여 제안한 역기구학 알고리즘이 수치해석적인 역기구학 알고리즘과는 달리 특이점 부근에서도 안정적으로 해석이 가능함을 확인하였다.

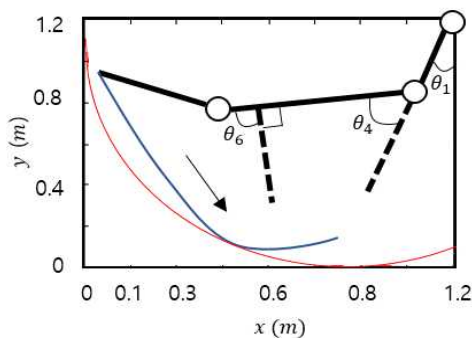


Fig. 5. Working path analysis in cartesian space

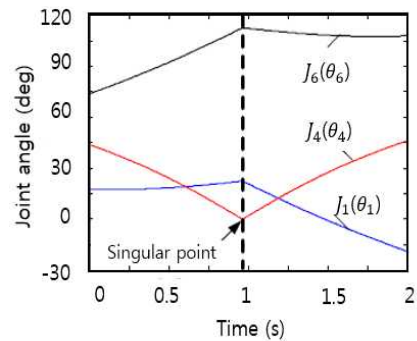


Fig. 6. Working path analysis in joint space

제안한 역기구학 알고리즘에서는 휴머노이드 로봇 아암의 여유 자유도를 위하여 팔꿈치 방향 변수  $\theta$ 를 정의하였다. 따라서 제안한 역기구학 알고리즘에서  $\theta$ 를 사용하면 로봇 아암의 말단점의 경로에 독립적으로 로봇 아암의 여유 자유도를 활용할 수 있다. 이러한 성능을 검증하기 위하여  $\theta$ 를 사용한 여유 자유도 구동 시뮬레이션을 수행하였다.

로봇 아암의 말단점을 고정된 상태로  $\theta$ 를  $0^\circ$ 에서  $70^\circ$ 로 변경하는 경로를 생성하여, 제안한 역기구학을 통해 관절공간으로 변경한 결과를 그래프로 Fig. 7에 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, 로봇 아암의 말단점을 고정된 상태로 여유 자유도를 활용하기 위해서는 로봇 아암의 모든 관절을 유기적으로 구동해야 한다. 그러나 제안한 알고리즘에서는  $\theta$ 를 사용하면 직접적으로 여유 자유도를 활용할 수 있기 때문에 경로 생성 알고리즘에 적용할 경우에 여유 자유도 활용이 용이하다.

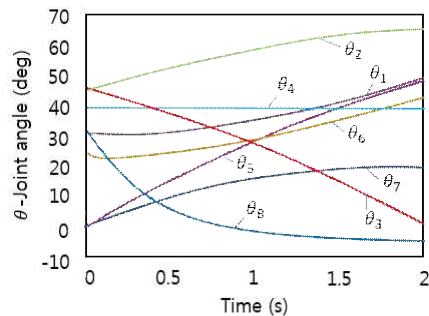


Fig. 7. The path trajectory of driving joints

## 5. 맺음말

본 연구에서는 8축 휴머노이드 로봇 아암의 해석적인 운동학적 해석 및 작업경로 해석 알고리즘을 제시하였다. 그리고 8자유도 중에서 여유 자유도 특성을 해결하기 위하여 팔꿈치  $\theta$ 를 정의하였고, 이를 사용하여 로봇 아암의 말단점의 작업경로와 독립적으로 여유 자유도를 활용할 수 있음을 증명하였다. 그리고 제안한 알고리즘이 완전히 해석적이기 때문에 특이점 부근에서도 오차 없이 역기구학 연산이 가능함을 시뮬레이션으로 확인하였다. 개발한 역기구학 알고리즘을 휴머노이드 로봇 아암의 제어 및 경로생성 알고리즘에 적용하면, 실시간 연산 성능과 작업경로의 안정성을 향상시킬 수 있다.

## 참고문헌

- [1] A. Koivo and T. H. Guo, "Adaptive Linear Controller for Robot Manipulators." IEEE Transactions and Automatic Control, Vol. AC-28, pp.162-171, (1983).
- [2] Pin, F.G. et. al., "Autonomous Mobile Robot Research using the Hermies- III Robot," IROS International Conference on Intelligent Robot and Systems, Tsukuba, Japan, (1989) .
- [3] T.C. Hasi, "Adaptive Control Scheme for Robot Manipulator-A Review," In Proceeding of the 1987 IEEE Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, (1987).
- [4] S. Nicosia and P. Tomee, "Model Reference Adaptive Control Algorithm for Industrial Robots," Automatics, Vol. 20, No. 5, pp.635-644, (1984).
- [5] Allen, P. K., Toshimi, B., Timcenko, A., "Real Time Visual Servoing," In Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 851-856, (1991).
- [6] Hashimoto, K., Kimoto, T. Edbine, T., and Kimura, H., "Manipulator control with image-based visual servo," In Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2267-2272, (1991)..
- [7] Iwata H., Kobashi S., Aono T., and Sugano S., "esign of Anthropomorphic 4 DOF Tactile Interaction Manipulator with Passive Joints," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1785-1790, (2005).
- [8] H. Y. K. Lau and L. C. C. Wai, "Jacobianbased Redundant Control Strategy for the 7 DOF WAM," International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Vol.2, pp.1060- 1065, (2002).
- [9] B. Siciliano, "inematic Control of Redundant Robot manipulators: A Tutorial," Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.3, pp.201-212, (1990).
- [10] C. Klein and C. Huang, "eview of

- Pseudoinverse Control for use with Kinematically Redundant Manipulators, "IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.13, No.3, pp245-250, (1983).
- [11] 정양근, 심현석, 이우송, 한성현, "영상 피드백에 의한 4축 스카라 로봇의 실시간 궤적추적제어에 관한 연구", 한국산업융합학회 논문집 제17권 3호, pp. 136-144, (2014)
- [12] 이세한, "운동용 힘 발생기를 위한 리니어 모터의 진류제어", 한국산업융합학회 논문집 제18권 1호, pp. 1-9, (2015)
- [13] 양준석, 구영목, 조상영, 원종범, 원종대, 한성현, "내열환경 단조공정에서 핸들링작업을 위한 유연 아암 그리퍼 설계에 관한 연구", 한국산업융합학회 논문집 제18권 4호, pp. 216-223, (2015)
- [14] 조상영, 김민성, 구영목, 원종범, 강정석, 한성현, "고온 환경 단조 공정자동화를 위한 6축 수직다관절 로봇의 기구학 및 동특성 해석에 관한 연구", 한국산업융합학회 논문집 제19권 1호, pp. 10-17, (2016)
- [15] 조상영, 김민성, 양준석, 원종범, 강정석, 한성현, "수직다관절형 아암의 운동학적 모델링 및 관절공간 모션제어에 관한 연구", 한국산업융합학회 논문집 제19권 1호, pp. 18-30, (2016).
- [16] 정양근, 김민성, 조상영, 원종범, 원종대, 한성현, "고열 단조부품 핸들링을 위한 로봇 그리퍼의 방위 및 포지션 정밀제어에 관한 연구", 한국산업융합학회 논문집 제19권 2호, pp. 88-94, (2016).

---

(접수:2017.01.12. 수정: 2017.02.25. 게재확정: 2017.03.09.)