

DRC 휴보의 4족 보행 제어

김정엽^{a*}

Quadruped Walking Control of DRC-HUBO

Jung-Yup Kim^{a*}^a Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	19	August	2015
Revised	22	September	2015
Accepted	5	October	2015

Keywords:

DARPA Robotics challenge
DRC-HUBO
Quadruped walking
ZMP control

ABSTRACT

In this paper, we describe the quadruped walking-control algorithm of the complete full-size humanoid DARPA Robotics Challenge-HUBO (DRC-HUBO) robot. Although DRC-HUBO is a biped robot, we require a quadruped walking function using two legs and two arms to overcome uneven terrains in the DRC. We design a wave-type quadruped walking pattern as a feedforward control using several walking parameters, and we design zero moment point (ZMP) controllers to maintain stable walking using an inverted pendulum model and an observed-state feedback control scheme. In particular, we propose a switching algorithm for ZMP controllers using supporting value and weighting factors in order to maintain the ZMP control performance during foot switching. Finally, we verify the proposed algorithm by performing quadruped walking experiments using DRC-HUBO.

1. 서론

1980년대부터 일본을 중심으로 이족 인간형 로봇의 개발이 꾸준히 진행되어왔다¹⁻³⁾. 약 30년간의 연구로부터 다양한 연구 결과를 얻고 있으나 아직 까지도 인간 생활에 완벽히 적용할 수 있는 로봇은 없는 실정이다. 이러한 문제의 가장 큰 원인은 다름아닌 이족 보행의 어려움에 있다. 많은 연구자들이 꾸준히 이족 보행 제어에 대해서 연구하고 있지만⁴⁻⁶⁾, 여전히 경사가 있고 울퉁불퉁한 지면 위에서 외부의 충격에도 강인하게 보행할 수 있는 로봇은 전 세계에서 사례를 찾기 힘들다.

최근, 이족 보행 로봇 이외에도 군사용 등의 목적으로 4족 보행

로봇의 개발이 미국을 중심으로 점차 수행되고 있다⁷⁻⁹⁾. 4족 보행은 2족 보행에 비해 운동성과 속도는 낮지만, 험지에서의 보행 안정성 측면에서는 지지 영역이 더욱 넓어 장점이 더 높다. 따라서, 산악이나 재난 현장에서의 험지 이동이 필요한 상황에서는 4족 보행이 매우 효과적일 수 있다.

본 논문에서는 후쿠시마 원전 사고를 배경으로 시작된 세계 최대 재난 로봇대회인 DARPA 로보틱스 챌린지에서 험지 돌파 task를 위한 DRC(DARPA robotics challenge) -휴보(Fig. 1)의 4족 보행 제어에 대해서 연구하였다¹⁰⁾. 따라서, 이족 인간형 로봇인 DRC-휴보를 이용하여 4족 보행 패턴 생성 및 ZMP(zero moment point) 제어 알고리즘을 실험적으로 구현하였다.

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6355

Fax: +82-2-971-7706

E-mail address: jyk76@seoultech.ac.kr (Jung-Yup Kim).



Fig. 1 Photograph of DRC-HUBO

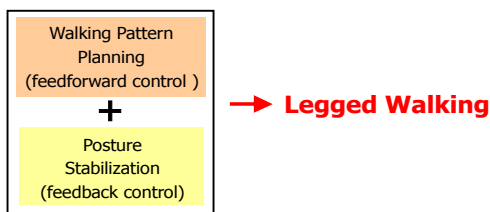


Fig. 2 Structure of legged walking algorithm

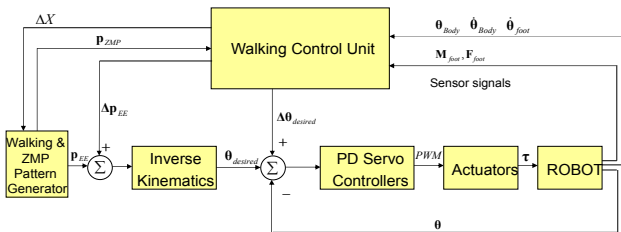


Fig. 3 Walking control block diagram of DRC-HUBO

2. 4족 보행 알고리즘

2.1 보행 알고리즘의 기본 구조

Fig. 2는 족형 로봇의 보행 알고리즘을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 보행 패턴이라는 미리 설계된 피드포워드 제어 입력과 자세안정화라는 센서 피드백 제어 입력이 결합되어 최종적인 족형 보행을 수행하게 된다. 이러한 기본 구조를 고려하여 DRC-휴보의 보행 제어 알고리즘의 블록 선도를 Fig. 3과 같이 제시하였다. 기본적으로 미리 설계된 4족 보행 패턴이 생성되면 역기구학식으로부터 다리의 참조관절위치가 계산되고 PD 서보 제어를 통하여 로봇의 관절 위치가 독립적으로 제어된다. 동시에 자세 제어를 위한 참조 ZMP 패턴이 생성되고, 각종 센서 피드백으로부터 ZMP 제어를 수행하기 위해 발과 골반중심의 위치를 실시간 수정한다. 이외에도, 다리의 진동 억제나 보행 패턴의 최적화를 위해 관절 위치나 걸음새 파라미터들도 수정된다. 본 논문에서는 자세제어에서 가장 비중이 높은 ZMP 제어기의 설계에 초점을 맞춰 서술하였다.

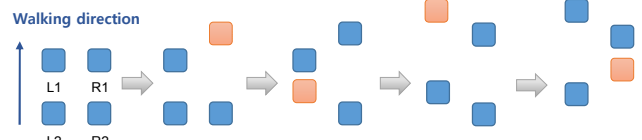


Fig. 4 Wave-typed quadruped walking pattern

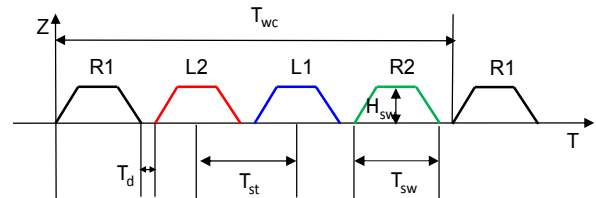


Fig. 5 Description of walking parameters

Table 1 Walking parameters

Walking parameters	Description
1) Swing time (T_{sw})	Time during a foot in the air
2) Delay time (T_d)	Time interval between feet delay ratio (k_d) $\times T_{sw}$
3) Step time (T_{st})	$T_{st} = T_{sw} + T_d$
4) Walking cycle time (T_{wc})	$T_{wc} = 4 \times T_{st}$
5) Swing height (H_{sw})	Maximum foot swing height
6) Body height (H_b)	Nominal body height from floor
7) Step length (L_s)	Longitudinal step length
8) Side step length (L_{ss})	Lateral step length
9) Rotation angle (Th_r)	Body rotation angle
10) Body sway amplitude (A_b)	Amplitude of lateral body swaying

2.2 4족 보행 패턴 설계

4족 보행 패턴 설계를 위해 속도는 느리지만, 힘에서의 보행 안정성을 극대화 할 수 있는 wave 타입의 4족 보행 패턴을 제안하였다. wave 타입의 보행 패턴은 Fig. 4와 같이 발을 순차적으로 하나씩 옮기는 걸음새로써, 항상 3점 지지를 유지하기 때문에 안정성이 매우 높은 장점이 있다.

다음으로 4족 보행 패턴을 설계하기 위한 10가지 보행 파라미터들을 Table 1과 같이 제안하였으며(Fig. 5 참조), 특히, delay ratio를 이용한 delay time의 계산으로부터 보행 속도를 손쉽게 제어할 수 있도록 하였다. 본 파라미터들을 이용하여 생성된 4족 보행 패턴 예시를 Fig. 6에 나타내었으며, 보행 중에 진후/좌우 스텝길이, 속도, 발 상승 높이, 몸통 스웨이 진폭 등이 변화될 수 있음을 보여준다. 또한, ZMP 제어를 위한 ZMP 패턴 역시 보행 패턴에 맞춰서 생성되었다.

이렇게 생성된 기준 보행 패턴은 지면의 높낮이가 변하는 힘지에서는 사용이 불가하다. 따라서, 발 착지 높이의 변화에 적극 대응할 수 있도록 기준 보행 패턴을 온라인 상에서 수정해야 한다.

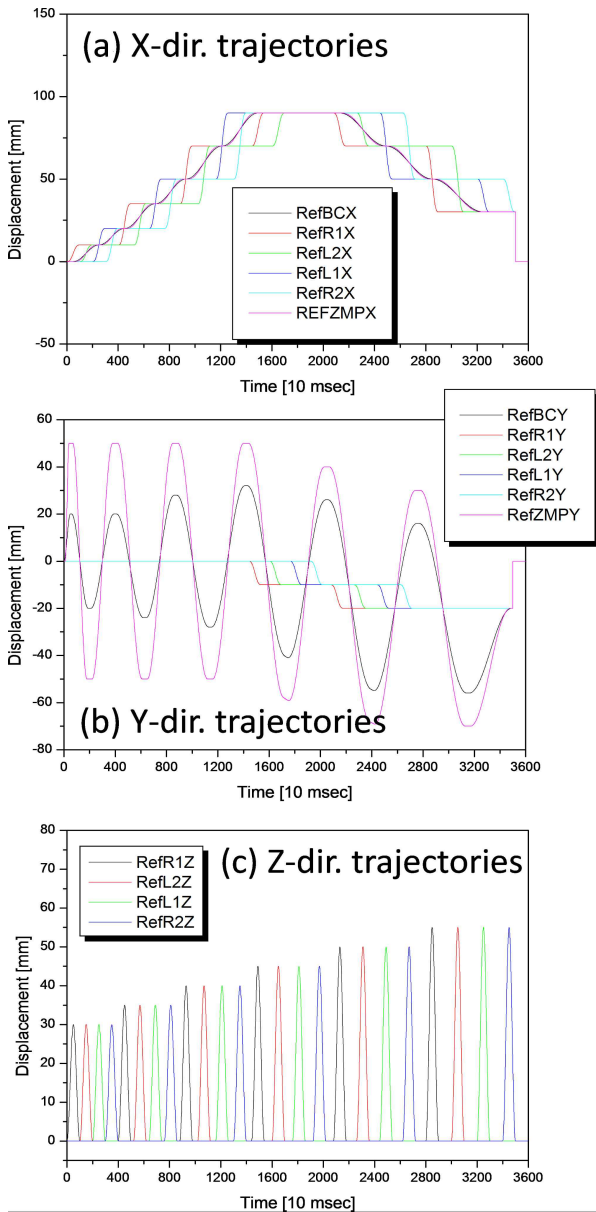


Fig. 6 An example of quadruped walking pattern

본 연구에서는 발 착지 경우를 이른 착지와 늦은 착지로 나눠서 고려하였다. 이른 착지는 착지가 정해진 시간보다 일찍 지면에 착지하게 되는 경우이며 발 착지 위치를 착지 순간의 위치로 수정하게 된다. 늦은 착지는 정해진 시간에 착지가 이뤄지지 않은 경우이며 보행 패턴 생성을 중단하고 발을 수직방향으로 착지가 이뤄질 때까지 하강시키게 된다 (Fig. 7 참조). 이러한 전략을 통하여, 보행 중에 적절히 발 착지 높이를 변화시켜 험지에 적응하게 된다.

2.3 ZMP 제어기의 설계

로봇의 균형유지를 위해 4족 보행 ZMP 제어 알고리즘을 제안하였다. 우선, 4점 지지된 DRC-휴보를 Fig. 8과 같이 스프링과 댐퍼가 장착된 독립진자로 모델링하였고, 정면에서 바라본 모델과라미

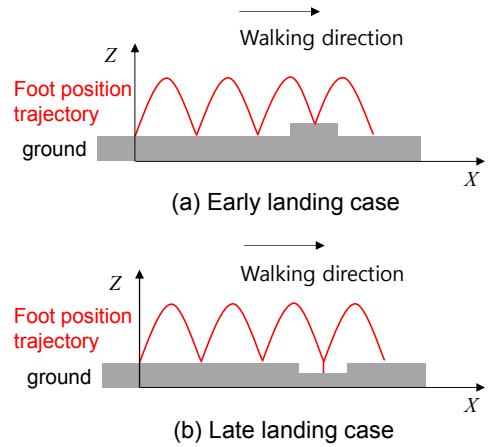


Fig. 7 Early and late landing strategy

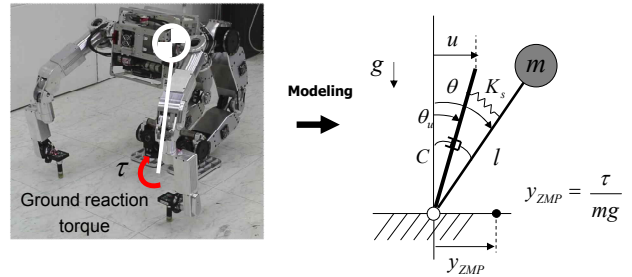


Fig. 8 Mathematical modeling of DRC-HUBO

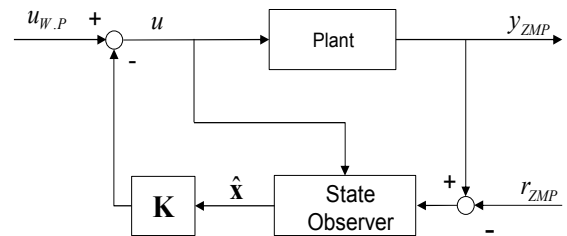


Fig. 9 Observed-state feedback ZMP control

터 K_s ($=3,677.2 \text{ Nm/rad}$), l ($=0.417 \text{ m}$)과 C (17 Nms/rad)를 실험적으로 구하였다. 따라서, 몸통의 Y축 수평 변위 입력 u 와 Y축 ZMP 출력 y_{ZMP} 사이의 전달함수는 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$G(s) = \frac{Y_{ZMP}(s)}{U(s)} = -\frac{K_s}{mgl} \cdot \frac{s^2 - \frac{g}{l}}{s^2 + \frac{C}{ml^2}s + \frac{K_s}{ml^2} - \frac{g}{l}} \quad (1)$$

위의 수학적 모델을 이용하여 Fig. 9와 같이 Observed state feedback 제어 블록선도를 구축하였다. 그림에서 $u_{W,P}$ 는 4족 보행 패턴 입력이며 r_{ZMP} 는 참조ZMP 입력이고, y_{ZMP} 는 실제 ZMP 출력이다. 이러한 제어 블록선도는 X축 및 Y축 방향에서 독립적으로 구축되며, 3점 및 4점 지지 상황에서 역시 독립적으로 구축되어 총 4개의 ZMP 제어 블록 선도가 보행 시 사용된다.

2.4 ZMP 제어기 스위칭 알고리즘

DRC-휴보의 4족 보행 시, 지지 다리의 개수가 계속적으로 변하게 된다. 따라서, 위에서 설계된 3점 지지 ZMP 제어기와 4점 지지 ZMP 제어기가 지지 다리의 상황에 따라 자동적으로 스위칭되어야 한다. 본 논문에서는 지지 다리의 개수를 발과 손에 장착된 힘모멘트 센서로부터 계산하였다. 특히, 지지 다리 개수의 부드러운 변화를 위해 각 발에 대해 0~1까지 변하는 지지 수치를 Fig. 10과 같이 도입하였다. 그림에서 보는 것과 같이 5 N 이하에서는 공중, 20 N 이상에서는 착지로 판단하며 그 사이 과정은 착지하는 과도 기간으로 설정하였다. 결국, Fig. 11과 같이 보행 중에 각 발의 지지 수치를 모두 합산하여 총 지지 다리 수치를 계산하고 다시 저주파 통과 필터링을 수행함으로써 충격이 가해져도 매우 부드러운 스위칭이 되도록 한다. 마지막으로, 식 (2)와 같이 3점 지지 ZMP 제어의 가중치 k_1 과 4점 지지 ZMP 제어의 가중치 k_2 를 이용하여 최종적인 ZMP 제어 입력이 결정되며 가중치들은 Fig. 12와 같이

총 지지 다리 수치에 따라 0과 1사이에서 부드럽게 변한다.

$$\text{Observed-state feedback control input} = k_1 \cdot (3\text{-leg ZMP control input}) + k_2 \cdot (4\text{-leg ZMP control input}) \quad (2)$$

3. 4족 보행 시뮬레이션 및 실험

제안된 보행 제어 알고리즘을 이용하여 우선 컴퓨터를 이용한 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이터로써 webots이라는 상용 동역학 시뮬레이터를 사용하였으며, Fig. 13에 스냅샷을 첨부하였다. 또한, 트레드밀에서 4족 보행 실험을 수행하였으며, Fig. 14과 같이 보행 실험 스냅샷을 나타내었으며, 실험 동영상은 참고 문헌 [11]에서 확인할 수 있다. 참고로 보행속도는 50 mm/sec로 설정되었다. 시뮬레이션과 실험 스냅샷에서 알 수 있듯이 DCR-휴보의 4족 보행 제어를 성공적으로 수행하였으며, 제안된 보행 알고리즘 효율성을 실험적으로 검증할 수 있었다.

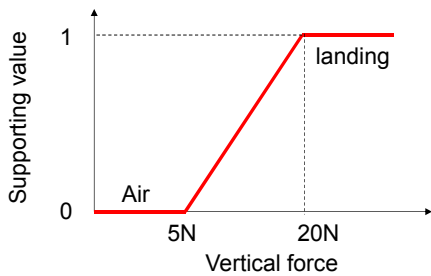


Fig. 10 Supporting value

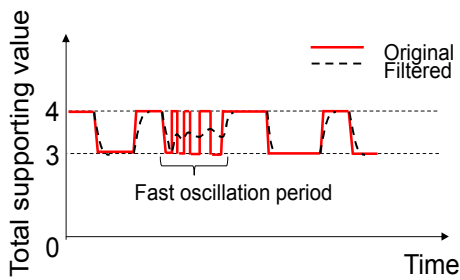


Fig. 11 Total supporting value

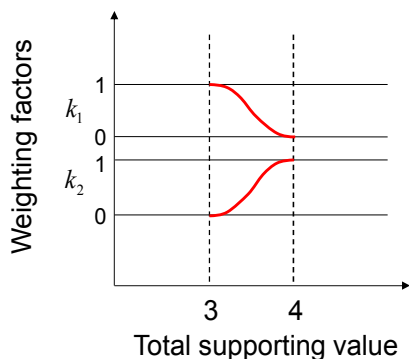


Fig. 12 Weighting factors for ZMP control switching

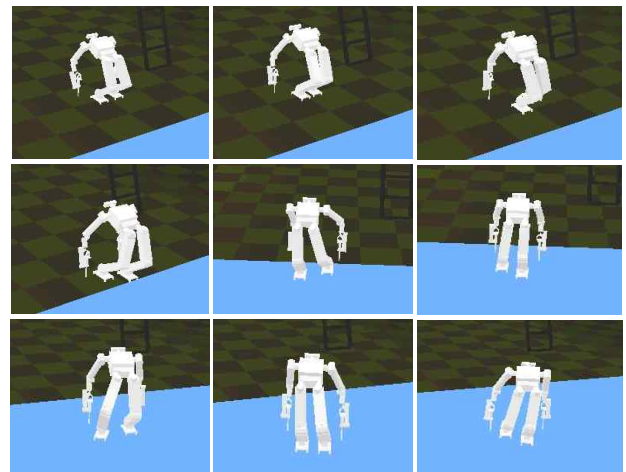


Fig. 13 Quadruped walking simulation of DRC-HUBO

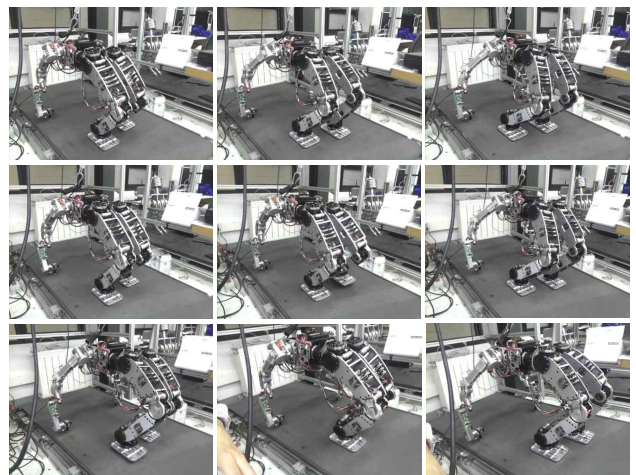


Fig. 14 Quadruped walking experiment of DRC-HUBO

4. 결론

본 논문에서는 DRC-휴보의 4족 보행 제어에 대해서 서술하였다. DRC-휴보는 기본적으로 2족 로봇이지만, 특별히 DARPA로 보틱스 챌린지를 위하여 4족 보행이 가능하도록 개발되었으며, 험지 보행을 위한 4족 보행 알고리즘을 본 논문에서 개발하였다. 우선, 여러 가지 보행 파라미터를 이용한 4족 보행 패턴을 설계하였고, 도립진자 모델을 이용하여 ZMP 제어를 설계하였다. 특히, 지지 수치와 가중치를 이용한 ZMP 제어기 스위칭 알고리즘을 제안하였으며, 동역학 시뮬레이션과 트레드밀에서의 실제 보행 실험으로부터 제안된 4족 보행 제어 알고리즘을 성공적으로 검증하였다.

참고로, 저자가 기존에 개발한 2족 보행 알고리즘과 본 연구의 알고리즘은 보행패턴 생성과 자세 안정화라는 두 가지 측면에서 기본적 구조는 동일하다. 그러나 4족 보행의 경우, 지지 다리 수치와 가중치에 따른 ZMP 제어기 스위칭이 추가 개발된 점이 대표적인 특징이라고 할 수 있다. 안타깝게도, 본 연구에서 개발된 DRC-휴보의 4족 보행은 실제 대회에서는 경사로에서 팔꿈치 관절의 용량 부족으로 사용이 불가하였으나, 향후 연구로써, 팔의 관절 용량을 대폭 늘리고, wave 타입의 보행 패턴 이외에도 여러 가지 타입의 보행 패턴을 시도할 계획이며, 3D 비전 시스템을 이용한 험지 비전 가이드 4족 보행 제어를 장기적인 연구과제로 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

References

- [1] Takanishi, A., Tochizawa, M., Karaki, H., Kato, I., 1989, Dynamic Biped Walking Stabilized with Optimal Trunk and Waist Motion, IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, 187-192.
- [2] Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., Takenaka, T., 1998, The Development of Honda Humanoid Robot, IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, 1321-1326.
- [3] Park, I. W., Kim, J. Y., Lee, J. Oh, J. H., 2007, Mechanical Design of the Humanoid Robot Platform, HUBO, Advanced Robotics, 21:11 1305-1322.
- [4] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., Hirukawa, H., 2003, Biped Walking Pattern Generation by Using Preview Control of Zero-moment Point, IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, 1620-1626.
- [5] Park, I. W., Kim, J. Y., Lee, J. Oh, J. H., 2008, Phase Plane Control of a Humanoid, IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, 145-150.
- [6] Hyon, S. H., Cheng, G., 2006, Passivity-based Full-body Force Control for Humanoids and Application to Dynamic Balancing and Locomotion, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems 4915-4922.
- [7] Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R., 2008, BigDog, the Rough-terrain Quadruped Robot, Proc. of the 17th World Congress the Int. Federation of Automatic Control, 10822-10825.
- [8] Wooden, D., Malchano, M., Blankespoor, K., Howard, A., Rizzi, A. A., Raibert, M., 2010, Autonomous Navigation for BigDog, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 4736-4741.
- [9] Seok, S., Wang, A., Chuah, M. Y., Otten, D., Lang, J., Kim, S., 2013, Design Principles for Highly Efficient Quadrupeds and Implementation on the MIT Cheetah Robot, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 3307-3312.
- [10] Kim, J. Y., 2014, Experimental Realization of Quadruped Walking Using DRC HUBO, 29th ICROS Conference, 77-78.
- [11] Kim, J. Y., 2015, viewed 15 August 2015, Quadruped Walking of DRC HUBO, <<https://www.youtube.com/watch?v=4r1OVXKGn3I>>.

[1] Takanishi, A., Tochizawa, M., Karaki, H., Kato, I., 1989, Dynamic