

실험계획법에 의한 휴머노이드 발의 민감도 해석 및 최적화

윤지원[†] · 박태원* · 정성필* · 박중경**

Optimization and sensitivity analysis of the humanoid robot's foot using the design of experiments

Jiwon Yoon, Taewon Park, Sungpil Jung and Joongkyung Park

Key Words : Humanoid robot(휴머노이드 로봇), Dynamic analysis(동역학 해석), Oprimization(최적화)

Abstract

These days, up-to-date humanoid robots are continuously developed. Among them, Qrio, Asimo[1,2] are famous for its unique walking technology and natural movement. These robots could show manufacturers' technological improvement and leave a good impression to the customer. In accordance with global trends, Samsung is also producing humanoid robot. The humanoid robot, however, could walk like a human compared to the industrial robot fixed in the factory. This feature could cause another dynamic effect while walking. In this paper, the robot's feet were examined to find out parameters that affect stability of the humanoid robot's feet. With the sensitivity analysis, the optimization procedure in design of experiments finds the most suitable performance of robot. Maximum deflection of the frame upon various cases was minimized, and rubber coefficients for shock absorption were optimized.

1. 서론

근래에 많은 휴머노이드 로봇의 경쟁적인 개발은 로봇공학과 관련 학문의 비약적인 발전을 가져왔다. 몇 해전부터 아주 유명해진 혼다사의 아시모(ASIMO)를 비롯해서 소니의 큐리오(QRIO) 등은 현재 휴머노이드 로봇의 발전상을 한눈에 바라볼 수 있게 한다[1,2]. 또한 이것은 제어 기술 분야 등 여러 관련 공학분야에 특히 등록 등 고급 기술 축적에 한 몫을 하고 있다. 휴머노이드 로봇의 개발을 위해서 필수적인 로봇공학은 필수적으로 필요하다. 로봇공학을 한마디로 말하

면 로봇과 관련된 이들의 내용을 공부 또는 연구하는 것이다.[3] 하지만 많은 부분 컴퓨터 공학을 이용한 프로그래밍과 제어분야가 가장 중요한 파트로 뽑힌다. 하지만 실제 휴머노이드의 구현을 위해서는 하드웨어를 어떻게 만들 것인가도 상당히 중요한 지식이다. 이 논문에서는 로봇공학 지식에 어떻게 하면 기계공학 지식을 잘 조합하여 보다 성능이 좋은 휴머노이드 로봇을 만들 것이냐에 중점을 두었다. 로봇의 설계 중에서도 휴머노이드 로봇의 발을 설계하는 것에 중점을 두었다. 민감도 해석과 최적화 과정을 도입하여 여러 가지 상황에 대해서 로봇의 발이 어떻게 반응하는지 알아보고 그것의 설계 최적값을 찾아냈다. 이 과정은 FEM 해석과 시뮬레이션을 통한 검증으로 최적화된 로봇 발의 종합적인 효과를 연구하였다.

[†] 회원, 아주대학교

E-mail : park@ajou.ac.kr

TEL : (031)219-2952 FAX : (031)219-1965

* 아주대학교

** 삼성전자

2. 휴머노이드 발설계를 위한 개념 설계

2.1 기존 휴머노이드 로봇발의 문제점

보행 전략에 따라서 발 부분의 제어가 이루어지면 발목 부분에 토크를 주어지고 발목의 회전이 이루어지게 된다. 보행에 따른 노면에서 발생하는 충격력도 생각할 수 있는데 이는 불규칙한 노면과 마찰에 의해서 발목부분의 6 축 센서로 그 힘이 측정이 된다. 현재 가장 문제가 되는 것은 시뮬레이션에 의해서 확인해본 것[4]에 의하면 두발 지지 상태에서 한발 지지상태로 전환될 때 하중이동을 하면서 각각의 단계마다 급격한 충격력변화가 제어시 오류를 발생시키기 때문에 가장 큰 문제가 되는 것으로 파악되었다. 따라서 Figure 1 과 같이 프로세스를 정하고 그 프로세스를 통해서 최적의 발 형상과 고무패턴을 유도하였다.

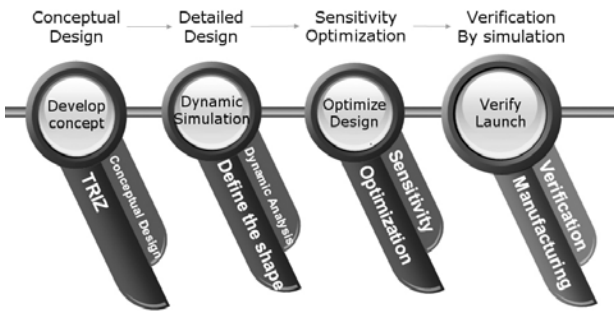
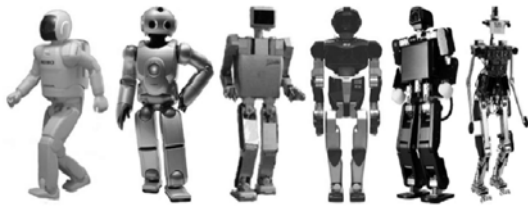


Fig. 1 Design procedure

2.2 기존의 특허 분석과 이미 개발된 발 형태

기존의 특허들[5~22]과 해결책들을 살펴보면 다음 figure 2,3 과 같다.



	Asimo	QRIO	H7	HRP-2P	Siif-H2	Johnnie
Manufacturer	Honda	Sony	Univ. Tokyo	AIST/Kawada	K. Ito	TU München
Size	130cm	58cm	147cm	154cm	25cm	180cm
Weight	54kg	7kg	58kg	58kg	730g	40kg
Speed	0.69/0.83m/s	0.33m/s	0.5m/s	0.55m/s	0.1m/s	0.61m/s
DOF	34	28	30	30	20	19
Leg	6	6	7	6	6	6
Arm	7+2	5+Fingers	7	7	3	2
Trunk	1	-	-	2	1	1
Head	3	4	2	2	1	2

Fig. 2 Comparison among many humanoid robots



Fig. 3 Foot designs of HUBO from KAIST (left) and ARA from KIST (right) at Roboworld 2006 in Seoul

Figure 2, 3 을 보면 대부분 사각형 프레임에 각각의 휴머노이드 로봇에 맞는 나름의 충격완화장치를 하고 있는 것을 알 수 있다.

2.3 로봇발의 개념설계

사람의 발에 대해서 생각해보면 사람의 발은 여러 가지 상황에 따라 각기 다른 반작용을 보인다. 사람의 발은 해부학적으로 뒷꿈치가 전체 충격의 30% 이상을 흡수할 수 있는 구조로 되었다. 효과적으로 발이 전체하중을 지지할 수 있도록 여러 종류의 뼈와 근육으로 이루어져 있다. 때문에 휴머노이드의 발도 뼈의 역할을 하는 프레임과 충격완화의 역할을 하는 조인트, 고무 등의 충격완화장치 두가지로 나눠서 생각하였다. 먼저 프레임과 고무를 나눠서 프레임이 가지는 제한 조건을 먼저 생각해보았다. 프레임구조 개선시 가장 먼저 고려해야 할 것은 다음과 같다. 첫째, 설계점(Hard point)을 준수해야 한다. 이것은 로봇의 ZMP[23]시 사각형이 장점이 많기 때문에 지지부를 고정하여 변경하지 않기로 결정하였다. 둘째, 중앙부를 삭제하기로 하였다. 기존 성능을 크게 바꾸지 않으면서 2cm 정도의 굴곡이 있는 노면을 쉽게 걸어갈 수 있도록 사람과 같이 중앙부를 움푹 파이게 설계하기로 하였다. 이를 바탕으로 다음 Figure 4 와 같이 설계 방안을 구상하였다. Figure 4 의 빗금친 영역은 바꿀 수 없는 영역으로 지정하고 직선과 곡선으로 적절한 프레임의 설계를 선택하여 가장 간결하게 모든 영역을 연결시켜주는 직선을 선택하여 다음 Figure 5 과 같이 기초 설계하였다.

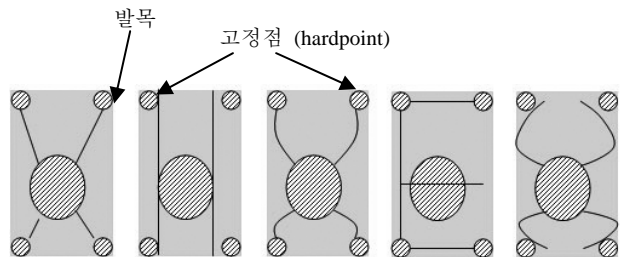


Fig. 4 Frame design brainstorming according to hardpoints

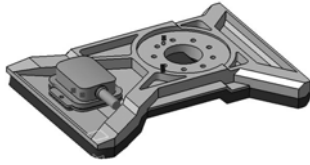


Fig. 5 Basic design

2.4 휴머노이드 발설계를 위한 상세 설계

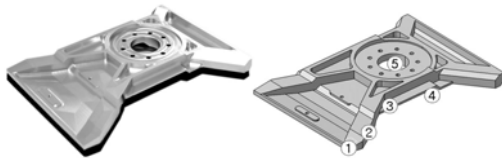


Fig. 6 First designed foot

Figure 6 와 같이 1 차 설계한 발을 실제 제작하여 다음과 같은 문제점이 있는 것을 알아냈다. 1 차 test 를 통해서 들어난 문제점을 다음과 같이 정리하였다. 너무 뽕족해서 바닥에 찍힐 염려가 있다. 삼각형부분의 모양은 보행시 좌우 바닥면 고무의 접촉면적이 다르게 해서 롤모션을 발생시킨다. 또한 발바닥 면에 경사를 준 것은 바닥과의 유효 면적을 줄여 피치방향 모션을 발생시킨다. 또한 발목의 결합위치가 현재 모델보다 뒤로 배치되면 발 앞쪽에서 오는 외란은 더 줄어들 것으로 예상된다. 그래서 발 앞쪽에 대한 제어에 더 비중을 줄 수 있어 프로그램 자체는 쉬워질 수 있다. 하지만 일반적으로 발의 중심에 ZMP[23]가 위치하도록 제어 설계하기 때문에 일반 보행 시 휴머노이드가 앞으로 쏠리기 쉽다. 위와 같은 점 때문에 발설계는 좀더 종합적인 분석이 필요하다. 이것을 위해서 민감도 분석과 최적화 방법을 도입하였다. 여러 가지의 상황에서 적절하게 충격을 완화하면서 걸음새의 안정성을 유지해주는 발은 상호 이율배반적인 성격을 가지고 있다. 이에 기초 발 설계에서 해석 설계 변수를 선택해서 원하는 성능을 얻으면서도 최적화된 형상으로 말미암아 경량화를 구현하는 것은 중요하다.

3. 휴머노이드 발설계를 위한 상세 설계

상세설계를 위해서는 적절한 설계변수를 얻기 위한 민감도 분석이 먼저 이루어져야 한다. 민감도 분석에는 상용통계툴인 미니탭 (Minitab 14)를 이용하여 프라켓-버만 (Plackett-Burmann) 민감도 분석 기법이 사용되었다.[24] 민감도 분석을 통해서 적절한 수의 설계변수를 선택하고 난 후 그 설계변수의 실험계획법에 의한

설계변수의 최적값을 구하였다.[25] 최종적으로 얻어진 설계변수는 다시 모델을 통해서 검증작업을 통해 최적화가 완료 되었음을 확인하였다.

3.1 프레임의 민감도 해석과 최적화

먼저 프레임의 민감도 해석을 위해서 기 제작한 프레임의 설계변수를 다음 Figure 7 과 같이 정의 하였다.

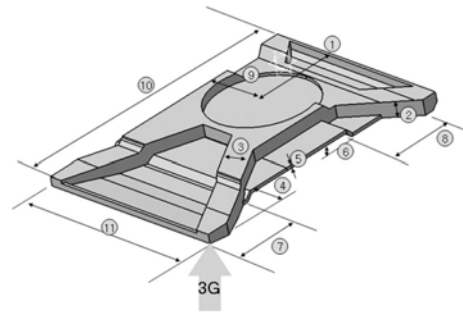


Fig. 7 Definition of the parameters for sensitivity analysis

Figure 7 에서 나타난 설계변수 중 설계제한조건 상 바꿀 수 없는 3 가지를 제외한 8 가지 설계변수로 최적 화 하였다. 설계를 위한 민감도 해석 기법(Plackett-Burmann, DOE)을 이용해서 통계적으로 유의한 3 가지 설계변수를 선정하였다. 목적함수는 상황(Case)별 최대 처짐의 최소화로 하였다. Figure 8 에 여러 가지 상황에 놓인 발의 상황 별 분류를 나타내었다. 실험계획법에 의해서 CAD 와 FEM 해석을 하였고 Figure 9 와 같이 처짐에 가장 큰 영향을 미치는 3 가지 변수를 찾았다. 3 가지 변수는 각각 발목의 앞뒤 위치, 프레임의 두께, 옆면 가공 깊이이다. 이를 바탕으로 최소의 처짐량을 주는 최적의 형상을 정하기 위해서 다음 Figure 8 와 같이 상황을 설정하고 각 상황에 따라 최적의 값을 구하였다.

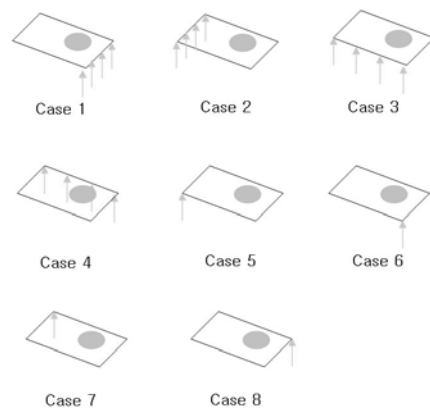


Fig. 8 Case studies for foot

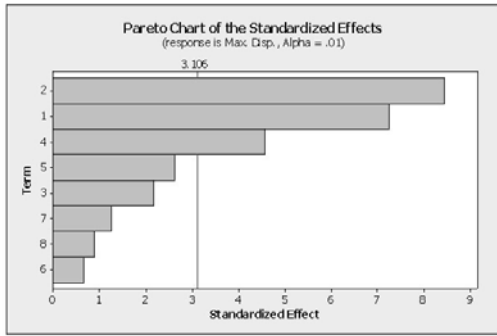


Fig. 9 Selection of the major parameters by Plackett-Burmann method

Figure 9 은 여러가지 설계 변수에 대해서 실험계획법에 의해 통계적으로 유의한 3 가지 변수를 추출해낸 것을 표현한 것이다. 로봇의 발이 단순히 한가지 상황에 대해서만 최적화 된 것이 아니라 여러가지 상황에 대해서 종합적으로 고려된 것임을 알 수 있다. 각 상황에 대해서 실험계획법으로 다시 3 가지 변수 (변수 2 : 프레임 두께, 변수 1: 발목 앞뒤 위치, 변수 4 : 옆면 가공 깊이)를 조정하여 캐드 모델과 유한 요소 해석을 통해 최적값을 얻었다. 유한요소모델의 경계조건은 Figure 8 에 의해 작성되었다. Figure 11 은 각 상황 별 최적값의 변화 추이를 나타낸다. 이것은 상황 별로 최적값이 변동한다는 것을 보여준다.



Fig. 10 FEM model

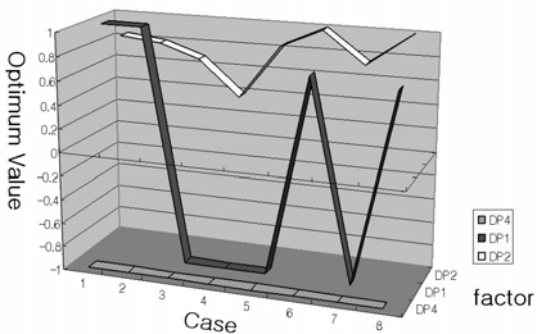


Fig. 11 Changes in optimum values case by case

종합적으로 고려해볼 때 각 상황에 따라 발은 다른 형상을 가지고 있다. 그러므로 가중치의

개념을 도입하여 각 상황별 최적값을 평균하여 사용하여 모든 상황을 고려한 최적값을 얻었다. 최종적으로 Figure 12 와 같은 최적 모델을 얻었다.

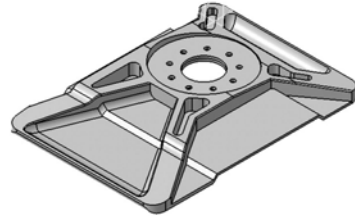


Fig. 12 Optimized model

Table 5 는 Figure 8 의 발바닥 경계조건에 의해서 이전모델과 최적화 이후 최대 처짐량이 어떻게 변화되었는지를 정리한 표이다. 각각의 케이스(case)는 발이 처할 수 있는 상황을 가정해서 만든 것이다. 표를 살펴보면 1 차 모드가 26.10%로 올라가고 대부분의 처짐량이 기존 모델에 비해서 많이 줄어든 것을 볼 수 있다. 또한 경량화 부분에서도 2004 년 모델의 1.1kg 에 비해서 48%, 2006 년에 비해서는 23.8% 경량화된 것을 볼 수 있다. 처짐량은 이전 모델에 비해서 훨씬 줄어들면서도 경량화가 가능한 모델을 제작할 수 있었다.

Table 5. Comparisons of static deflections before and after optimization

	이전모델	최적화후	변화율
1 차모드	30.1	38.0	26.10
Case 1	1.27e-1	7.31E-02	-42.44%
Case 2	1.29e-1	7.60E-02	-41.09%
Case 3	5.67e-1	7.00E-01	23.46%
Case 4	5.39e-2	2.87E-01	432.47%
Case 5	3.30e0	3.01E+00	-8.79%
Case 6	1.59E+00	6.85E-01	-56.92%
Case7	1.47E+00	1.67E+00	13.61%
Case 8	7.38E-01	1.43E-01	-80.62%
Weight	7.70E+02	5.64E+02	-23.8

3.2 고무의 민감도 해석과 최적화

고무의 충격흡수능력의 최적화를 위해서 최소처짐을 가지는 프레임을 위한 최적화 과정과 동일한 과정을 사용하였다. 목적함수는 발목부의 충격힘 최소화이다. 동역학 모델에서 고무를 가장 근사적으로 표현해줄 수 있는 접촉모델을 통해서 민감도 해석을 통한 변수를 설정하였다. 그리고 선택된 변수를 통해서 최적화를 하였고 마찬가지로 여러가지 상황에 대한 최적값의 평균을 통해 최적값을 얻었다. 접촉힘은 일반적으로 강성, 댐핑계수, 정적마찰계수 등으로

나타낸다. 이것을 설계변수로 선택하였다. 일반적인 접촉힘을 나타내기 위한 식은 Eq. (1)과 같다. Table 6 는 민감도 해석을 위한 설계변수선정을 나타낸 것이다. Figure 13 에서 볼 수 있듯이 강성계수, 댐핑계수, 침투량이 접촉힘의 정도를 결정하는 것을 알 수 있다. Figure 8 에서 본 것과 같은 상황에 대해서 동역학 해석을 통해 Figure 14 와 같이 각 상황별 최적값을 얻었다.

$$F_{contact} = k \times x^n + step(x, 0, 0, D_{max}, C_{max}) \times \dot{x}$$

x : Current penetration
 n : exponent
 C_{max} : Max. Damping force
 k : Stiffness
 D_{max} : Max penetration

Table 6. Definition of the parameters for sensitivity analysis

Parameter	Property
DP1	Exponent
DP2	Damping
DP3	Stiffness
DP4	Static friction
DP5	Penetration

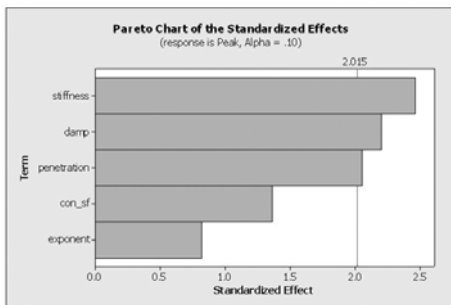


Fig. 13 Selection of the major parameters by Plackett-Burmann method

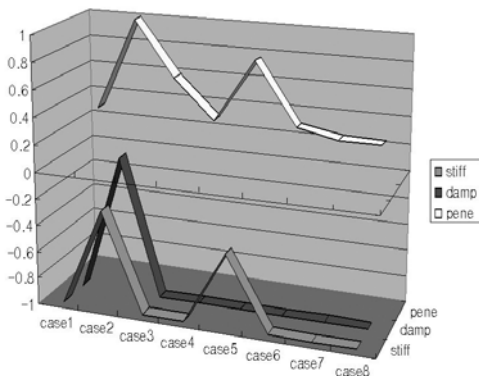


Fig. 14 Changes in optimum values case by case

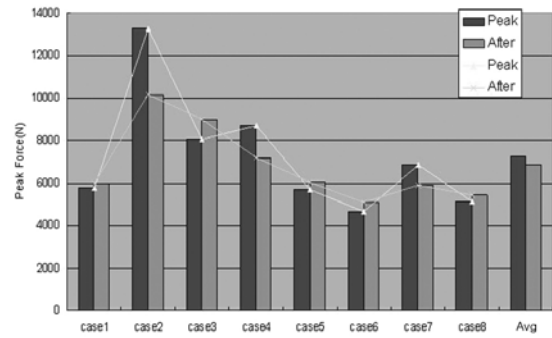


Fig. 15 Comparisons of dynamic impact before and after optimization

Table 7. Comparisons of dynamic impact before and after optimization

Unit : N

	이전모델	최적화후	변화율
Case 1	5,762	5,994	4.1
Case 2	13,268	10,145	-23.5
Case 3	8,065	9,013	11.8
Case 4	8,690	7,187	-17.3
Case 5	5,665	6,027	6.4
Case 6	4,644	5,075	9.3
Case 7	6,829	5,910	-13.5
Case 8	5,127	5,433	6
Average	7,256	6,848	-5.6

Figure 15 는 Figure 8 에서 정의한 경계조건의 상황에 대해서 해석한 결과이다. Figure 15 을 보면 상황별로 발목힘의 최대 피크치가 줄어든 것을 볼 수 있다. Table 7 에는 최적화 이후 최대 피크치의 변화량을 볼 수 있다. Table 7 에서 확인할 수 있듯이 최대 피크힘의 전체적인 평균값이 약간 감소한 것을 확인할 수 있다. 이 값들은 여러 가지 상황을 종합적으로 고려한 수치들로 상황에 따라 같은 가중치를 두고 계산하여 최종 값을 얻었다.

4. Conclusion

이 논문에서는 휴머노이드의 발의 설계에 최적화과정을 적용하여 효과적인 발 설계를 할 수 있음을 나타내었다. 먼저 개념 설계를 통해 기초설계를 하고 실제 제한 조건에 따라 모델을 취사선택하였다. 재료비, 제조가능성, 무게 등이 기준이 될 수 있다. 1 차 결정된 발 구조에 대해서 프레임과 고무로 나뉘서 최적화 프로세스를 적용하였다. 상용 통계 프로그램의 프라켓 버만 방법을 이용한 민감도 해석을 통해서 목적함수에 가장 큰 영향을 미치는 설계변수를 선택하였다. 선택한 설계변수를 이용하여 실험계획법에 의거한 최적화 프로세스를 통해 최적의 설계변수와

최적의 값을 찾았다. 프레임의 목적함수는 프레임의 처짐 최소화로 설정하였다. 고무에 대한 목적함수는 전체 모델의 움직임에 따른 발목의 충격력최소화로 설정하였다. 각각 최적값의 유도를 통해서 프레임은 처짐을 최소화시키면서도 경량화할 수 있었다. 고무 또한 최적 설계값으로 발목의 충격력을 줄일 수 있었다. 하지만 이 결과들은 제어부분과 보행방식에 많은 영향을 받기 때문에 부품 수준의 해석으로는 한계를 가진다. 때문에 전체 시스템수준의 해석과 실험이 병행되어야 한다. 휴머노이드의 발뿐 아니라 휴머노이드의 전체 바디를 구성하는 프레임의 유연체적 동적 특성도 고려되어야 한다. 고무는 비선형물성이고 초탄성특성을 나타내기 때문에 좀더 정확한 해석 결과를 위해서는 전체 시스템 특성을 고려한 비선형해석 또한 이루어져야 한다. 휴머노이드 로봇의 보행제어, 유연체, 비선형 해석에 대한 부분을 고려한다면 향후 최적화 프로세스는 유사 요소부품의 개발뿐 아니라 전체 로봇 시스템의 설계에도 널리 쓰일 수 있을 것으로 보인다. 추후 장착후 실험과의 연계를 통해서 더욱 향상된 성능의 발을 개발할 수 있을 것이다.

후 기

이 과제는 정보통신부의 후원으로 삼성전자와 함께 진행되었으며 관련기관에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] <http://world.honda.com/ASIMO/>
- [2] <http://www.sony.net/SonyInfo/QRIO/top.html>
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Robotics#Robotics>
- [4] Jinichi Yamaguchi, Atsuo Takanishi, Ichiro Kato, Experimental Development of a Foot Mechanism with Shock absorbing Material for Acquisition of Landing Surface Position Information and Stabilization of Dynamic Biped Walking, *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 3, pp.2893-2899
- [5] Foot structure for humanoid robot and robot with the same, US patent 2005/0173164 A1
- [6] Foot system for jointed leg type walking robot, Patent no.US 5758734
- [7] Biped locomotion robot, Patent No.: US 6,981,562 B2
- [8] Bipedal Walkingtype moving device and walking control device and walking control method therefore, Patents no, US 2005/0016778
- [9] Cushioning devices for foot, Patent No.: US 5,509,218
- [10] Damping system for shoe soles, European patent

application, EP 1 604 580 A1

- [11] Dynamic legged robot, Patent No.: US 2005/0194194 A1
- [12] Bipedal Walkingtype moving device, and walking control device and walking control method therefore, Patent No. US2005/0016778 A1
- [13] Cushioning device for foot, Patent No. 5509218
- [14] Floor shape deducing device for legged mobile robot, Patent no. EP 1 291 137 A1
- [15] Foot system for jointed leg type walking robot, Patent no. US005807011
- [16] Leg device for leg type movable robot, and method of controlling leg type movable robot, Patent no. US 6922455 B2
- [17] Legged mobile robot and floor reaction force detection system thereof, Patent no. US 7093497 B2
- [18] Locomotion control system of legged mobile robot, Patent no. US 5838130
- [19] Prosthetic foot, US 6514293 B1
- [20] Prosthetic foot having a cantilever spring keel, Patent no. US 4645509
- [21] Prosthetic foot with tunable performance, Patent no. US 2005/0177250 A1
- [22] Tensegrity joints for prosthetic, orthotic, an robotic device, Patent no. US 2005/0216097 A1
- [23] Kyoung-Dae Kim, Biped Robot Control for STable Walking, master's degree thesis, Hanyang Univ, 1997.12
- [24] Changwook Lee, Min-soo Kim, Hong-jae Yim, Shape Optimization for Maximizing Fatigue Life of Suspension Component Using the Experimental Design, *The Korean Society of Automotive Engineers 2002 Symposium*, 2002, pp.726-731
- [25] Sangjung Kim, Suspension parameter design using a design of experiments, master's degree thesis, Ajou Univ., 1995