

최소저크궤적과 X축-스웨이를 이용한 4족 보행로봇의 안정적 걸음새 연구

이동구*, 신우현*, 김태정*, 이정호*, 이영석**, 황헌*, 최선***

Study on Stable Gait Generation of Quadruped Walking Robot Using Minimum-Jerk Trajectory and Body X-axis Sway

DG Lee*, WH Shin*, TJ Kim*, JH Lee*, YS Lee**, H Hwang*, S Choi***

요 약 본 논문에서는 4족 보행 로봇의 주행 안정성을 개선하기 위한 3가지 이론을 제시한다. 첫 번째는 Minimum-Jerk Trajectory를 이용하여 다리궤적을 최적화 시킨다. 두 번째는 본 논문에서 새롭게 제시한 사인파와 기존의 방식인 LSM을 Jerk값에 근거하여 비교한다. 셋째는 ADAMS-MATLAB co-simulation을 이용하여 반복적인 로봇 시뮬레이션을 통해 스웨이의 최적 보폭을 계산한다. 위의 과정을 통해 로봇의 보행 개선점을 기존의 이론과 비교하여 나타내었다. 첫 번째로 정 보행시 몸체와 타원형태의 다리 끝의 움직임에 Minimum-Jerk trajectory를 사용하여 다리 궤적이 급격하게 변하는 지점의 평균 기울기를 최소 1.2에서 최대 2.9까지 감소시켜 지면에 다리 끝점이 도달할 때 충격을 최소화하여 안정성을 증가 하였다. 두 번째로 기존 LSM(Longitudinal Stability Margin)기법과 본 논문에서 제시한 사인파형 Sway를 사용하여 비교한 결과 평균 Jerk를 Z축에서 0.019, X축에서 0.457, Y축에서 0.02, 3D는 0.479 만큼 감소 시켰다. 특히 X축 Jerk는 크게 감소 하였다. 셋째로 로봇이 최소 Jerk 값으로 보행하기 위한 최적의 보폭의 길이를 상기 분석을 통해 도출하였으며 그 결과 20cm보폭 길이가 가장 안정적이었다.

Abstract In this paper, three theories for improving the stability of quadruped robot are presented. First, the Minimum-Jerk Trajectory is used to optimize the leg trajectory. Second, we compare the newly proposed sine wave and the conventional LSM in this paper based on the Jerk value. Third, we calculate the optimum stride of the sway through repetitive robot simulation using ADAMS-MATLAB cosimulation. Through the above process, the improvement of the robot walking is compared with the existing theory. First, the average gradient of the point where the leg trajectory changes rapidly was reduced from at least 1.2 to 2.9 by using the Minimum-Jerk trajectory for the movement of the body and the end of the leg during the first walk, thereby increasing the walking stability. Second, the average Jerk was reduced by 0.019 on the Z-axis, 0.457 on the X-axis, and 0.02, 3D on the Y-axis by 0.479 using the Sin wave type sways presented in this paper, rather than the LSM(Longitude Stability Margin) method. Third, the length of the optimal stride for walking at least the Jerk value was derived from the above analysis, and the 20cm width length was the most stable.

Key Words : ADAMS-MATLAB co-simulation, LSM, Longitudinal stability margin, Minimum-Jerk Trajectory, Quadruped Walking Robot

This work has supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT)(No. 2017R1A2B2010611).

*Department of Bio-mechatronics Eng., SungKyunKwan University

**Dept. Automation System, Seongnam Campus of KOREA Polytechnic

***Corresponding Author : Department of Bio-mechatronics Eng., SungKyunKwan University (ssuny@skku.edu)

Received April 01, 2019

Revised April 24, 2019

Accepted April 24, 2019

1. 서론

로봇은 크게 산업용 로봇과 지능형 로봇으로 나눌 수 있다. 산업용 로봇은 사용 목적에 따라 공업용, 의료용, 가정용, 농업용, 전투용으로 나뉜다. 지능형 로봇은 외부 환경을 스스로 탐지하고 판단해 필요한 작업을 자율적으로 실행 하는 로봇이다.[1]

보행로봇은 바퀴를 사용하는 로봇과 관절 형 다족 보행 로봇 이 두 가지 형태가 있다. 바퀴를 사용하는 로봇은 평탄지형에서 보행속도가 빠르며 안정성이 있는 반면 비 평탄 지형, 계단, 장애물, 산악지형에 대한 보행 능력에 취약하다. 다족 보행 로봇은 바퀴형 로봇에 비해 상대적으로 보행속도가 느리며, 안정성은 떨어지나, 다양한 방향으로 보행 할 수 있으며, 장애물 극복이 용이하고 비 평탄 지형이나 계단에서 보행이 용이하다.

최근 연구로 M. D. Berkemeier는 동물의 다리 구조를 응용하여 에너지 효율이 높은 다리 구조를 설계하였다.[2] 하지만 비평탄면 및 평탄면 보행 에서 로봇의 jerk에 관한 내용이 포함 되어 있지 않았다. Kim은 비 평탄 지형에서의 안정적인 보행을 위해서 디딤 발에 압력센서를 부착하여 평지에서 압축력과 비평탄 지형에서의 힘을 비교하여 몸체를 제어하여 쓰러짐을 방지하는 연구했다.[3] 이 방법은 압력 센서를 통한 새로운 보행 방법을 제시 하였지만 추가된 센서로 인해 기구부의 복잡성을 증가하였으며 또한 비탄면 지형에서 보행하기 위해서는 지면과 바닥사이의 힘을 최소로 하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 기구나 센서를 추가 하지 않고 간단하게 주행 안정성을 증가 할 수 있는 방법 제시를 목표로 한다.

현재 다양한 센서를 이용하여 주변 환경에 적응하고 보행하는 군사용 로봇 big dog은 견마형 로봇으로써 비 평탄 지형에서 자율적으로 무게중심을 잡고 빠르고 부드러운 보행을 하는 대표적인 4족 보행 로봇이며 다양한 지형에서 적응력이 뛰어난 장점을 가지고 있다.[4]

4족 보행 로봇의 안정성은 주로 걸음새에 의해 결정되며 이러한 이유로 현재까지 보다 안정한 보행을

위해 다양한 걸음새 생성 방법이 연구되고 있다.

4족 보행 로봇은 4개의 발 중에서 2개의 발이 지면에서 떨어지거나 1개의 발이 지면에서 떨어지는데, 이 때 각각 3개의 발이 지면에 붙어있다면 지지다각면이 생성되고 2개의 발이 지면에 붙어있다면 지지다각선이 형성된다. 지지다각면과 지지다각선과의 무게중심을 고려한 대표적인 걸음새 생성 방법에 COM(center of mass)과 세로안정여유 LSM(longitudinal stability margin) 2가지 방식이 있다.[5][6]

CPG(central pattern generator) 방법은 일반적인 생물체의 보행에 관련된 신경들의 패턴을 로봇의 움직임에 적용하는 보행방법으로 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.[7]

본 논문에서는 보행 안정성을 개선하기 위한 3가지 이론을 제시한다. 첫 번째는 minimum-jerk trajectory를 이용하여 다리궤적을 최적화 시킨다. 두 번째는 본 논문에서 새롭게 제시한 사인파와 기존의 방식인 LSM을 jerk값에 근거하여 비교했다.

세 번째는 ADAMS-MATLAB co-simulation을 이용하여 반복적인 로봇 시뮬레이션을 통해 스웨이의 최적 보폭을 계산한다. 위의 과정을 통해 결과적으로 기존 보다 개선된 로봇의 보행 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. 4족 보행 로봇의 설계 및 제작

4족 로봇의 구성은 안정도, 회전위치, 관절위치에 따라서 각각 모양새가 바뀐다. 본 논문에서 제안하는 4족 보행로봇은 곤충 형 다리 구조를 선택했다. 4족 보행 로봇의 모터는 Robotics사의 AX-12A를 사용한다. 그림 1은 본 논문에서 사용된 4족 보행 로봇이다.

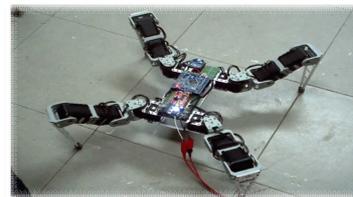


그림 1. 4족 보행 로봇
Fig. 1. Quadruped robot

2.1 정적보행 및 동적 보행

그림 2.(a)는 4족 로봇의 정적보행의 걸음새를 나타낸다. 정 보행은 동물의 여러 보행패턴 중에 가장 효율적인 보행 패턴이다. 정적보행은 보행 중 로봇에 특별한가속력이 없고 적어도 3다리가 땅에 접촉하며 보행하는 상태'를 말하며, 어느 한 순간에는 4발이 모두 땅에 닿으며 보행하는 움직임이다. 그림 2(b)는 동적 보행 걸음새를 나타낸다. 동적 보행은 그림 2(b)와 같이 보행 시 좌측 앞발과 우측 뒷발, 그리고 좌측 뒷발과 우측 앞발이 각각 쌍을 이루어 보행하는 패턴이다. 어느 순간에는 4발이 모두 땅에 닿거나 2발만 바닥에 닿거나를 반복한다.

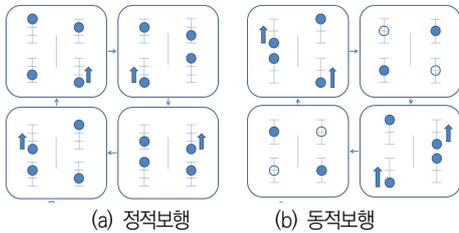


그림 2. 보행로봇의 걸음새
Fig. 2. The gait of a walking robot

2.2 안정여유

보행로봇의 안정여유는 2차원적인 표현방법과 3차원적인 표현방법이 있다. 2차원적인 안정여유는 보행 로봇이 지지하는 다리들의 끝점 즉, end effector로 이루어지는 다각형의 각 변과 무게중심을 평면(XY평면)에 투영한 점간의 최소거리를 안정도의 척도로 사용하는 방법이다.

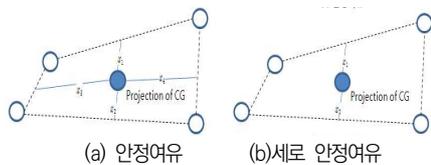


그림 3. 2차 및 3차 안정여유
Fig. 3. 2nd and 3rd stable margin

XY 평면에서 일반 표현방법을 나타내는 것으로 3차원 공간의 로봇 무게중심에서 투영된 점과 네다

리의 지지 점에 의해 형성된 네 변 간의 거리 중 최소가 되는 거리를 안정여유 값으로 나타낸다.

이것을 그림 3(a) 안정여유(stability margin, S_m) 라고 하며 식 (1)(2)로 나타낼 수 있다.[8,9,10]

$$S_m = \min(x_1, x_2, x_3, x_4) \tag{1}$$

식(1)(2)에서 계산된 값 중에 작은 값을 안정여유로 한다. 투영된 무게 중심과 이동방향에 대해 4족 보행 로봇의 이동 방향의 앞, 뒤 변과 투영된 무게중심의 최소거리 거리를 안정여유 값으로 하며 이것을 그림 3(b) 세로 안정여유(longitudinal stability margin, S_l)라 한다.

$$S_l = \min(x_1, x_2) \tag{2}$$

4족 보행 로봇에 있어서, 주기적인 물결걸음새의 안정적 여유는 다음과 같은 식(3)으로 나타낸다. 식 (3)은 디딤울, 보폭, 피치에 대한 안정여유 식을 나타낸 것이다.

$$S_m = \left(\frac{n}{4} - 1\right)P + \left(1 - \frac{3}{4\beta}\right)R \tag{3}$$

4족 보행로봇의 다리 수를 n에 대입했을 때 4족 보행 로봇의 안정 여유 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_m = \left(1 - \frac{3}{4\beta}\right)R \tag{4}$$

2.3 최소 저크 이론

관성을 갖는 기계적인 시스템의 운동에 있어서 안정적인 운동을 위해 속도 및 가속도의 제한 뿐 아니라 가속도의 시간에 대한 변화율인 저크(jerk)제한까지 고려된다.

이동 로봇의 경우 안정적인 운동은 로봇 자체의 기계적 수명과 안정된 보행에 필수적이다.

Neville Hogan은 minimum-jerk trajectory에

서 안정적인 보행은 jerk의 기능으로써 정의하였다.[11] jerk의 위치는 3번의 미분 값으로 나타내며 식(5)과 같다.

$$jerk\ x'''(t) = \frac{d^3x(t)}{dt^3} \quad (5)$$

$$\int_{t_i}^{t_f} x_1''(t)^2 dt$$

$$\therefore H(x(t)) = \frac{1}{2} \int (x''')^2 dt$$

상기 식을 일정 범위의 시간에 따른 식으로 변환하면 식 (6)과 같다.

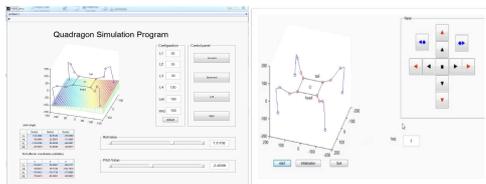
$$x(t) = \begin{bmatrix} y_i + (y_f - y_i)(10(t/a)^3 - 15(t/a)^4 + 6(t/a)^5) \\ z_i + (z_f - z_i)(10(t/a)^3 - 15(t/a)^4 + 6(t/a)^5) \end{bmatrix}$$

$$H(x(t)) = \frac{1}{2} \int_{t=0}^a ((y''')^2 + (z''')^2) dt \quad (6)$$

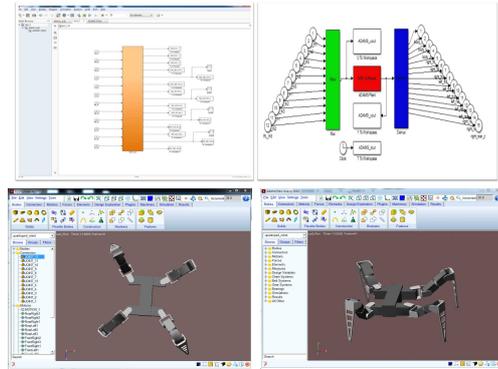
결과 값은 모든 각 구간의 변화량을 더하게 된 값으로 정리 할 수 있으며, H(저크)값이 적을수록 안정성은 더 좋아진다는 것을 알 수 있다.

3. 실험 및 고찰

그림 4는 ADAMS-MATLAB co-simulation 실험 화면으로 4족 보행 로봇의 안정적 걸음세 분석을 위해 본 연구에서는 사용하였다. 정보행시 몸체와 다리 끝의 움직임에 대한



(a) MATLAB simulation



(b) ADAMS-MATLAB co-simulation

그림 4. ADAMS를 활용한 동역학 해석

Fig. 4. Dynamic analysis using ADAMS

Minimum-jerk trajectory를 이용하여 다리궤적의 최적화 하였다. 또한 기존 LSM 기법에 대한 새로운 사인파형을 도입하여 스웨이를 개선하였다.

3.1 다리 궤적 분석 결과

각 궤적에 대한 4가지의 색은 서로 다른 다리들을 구분한 것이고 빨간색 원형표시는 다리 움직임이 급격하게 변화는 구간이며 표 1은 시간 T에 따른 다리(앞, 뒤) 기울기 변화량이 크게 바뀌는 구간의 평균 기울기를 수치화한 것이다. 그림 5(a)는 다리(앞, 뒤) 궤적에 minimum-jerk trajectory 적용 전으로 움직임이 변화하는 부분에서 기울기가 -5 ~ +2.5 사이로 급격하게 변화함을 표 1에서 확인 할 수 있으며 해당 구간에서 로봇의 움직임을 방해하는 저크가 발생할 가능성이 높다. 그림 5(b)는 다리(앞, 뒤) 궤적에 minimum-jerk trajectory 적용 후로 각 다리의 Swing phase에서 발끝의 Y좌표 변화량을 표 1에서 확인 결과 -2.2 ~ +1.2 사이로 minimum-jerk 적용 전 보다 최소 1.2에서 최대 2.9까지 기울기 변화량이 줄어들어 상대적으로 안정적으로 변화한 것을 확인 할 수 있었다.

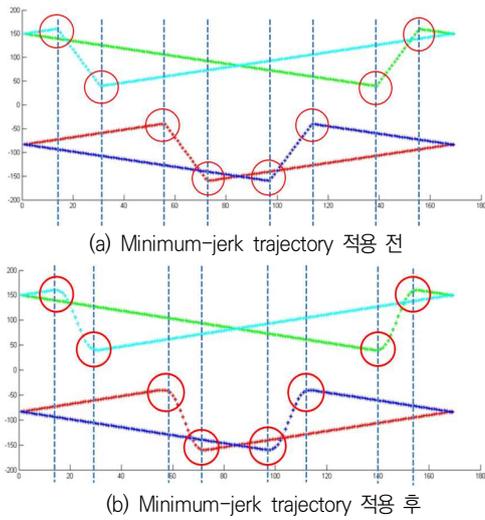


그림 5. 궤적 시간 T에 따른 Y(앞, 뒤) 그래프
Fig. 5. Y(Front, Back) graph with trajectory time T

표 1. 시간 T에 따른 다리(앞, 뒤) 기울기변화
Table 1. Changes of leg(front, back) Inclination with time

X axis range	Section of average inclination		inclination reduction
	M-jerk before application	M-jerk after application	
15~17	-5	-2.2	2.3
32~34	+2.5	+1.2	1.3
55~57	-5	-2.3	2.7
72~74	+2.5	+1.3	1.2
95~97	+5	+2.1	2.9
115~117	-2.5	-1.3	1.2
137~139	+5	+2.5	2.5
155~157	-2.5	-1.1	1.4

그림 6(a)은 다리(위, 아래) 궤적에 minimum-jerk trajectory를 적용 전으로 발끝이 바닥에서 첫 지점으로 이동하는 거리는 빨간색선 -85지점이고 반대로 발끝이 바닥에 도달하는 거리는 녹색선 -88 지점이다. 발끝이 바닥에 도달하기 직전에서 동일 시간 대비 이동거리가 상대적으로 증가함을 알 수 있는데 이는 타원의 장축의 끝에서 기울기가 무한대가 되기 때문이다. 그림6(b)은 다리(위, 아래) 궤적에

minimum-jerk trajectory를 적용한 후로 minimum-jerk trajectory를 적용하기 전보다 발끝이 바닥에서 첫 지점으로 이동거리는 -85에서 -97로 22 감소하였으며 발끝이 바닥으로 이동하는 거리는 -88에서 -99지점으로 11감소하였다. 다리를 떼는 순간과 닫는 순간의 이동 거리가 줄어들어 천천히 움직여 충격량을 줄이게 된다.

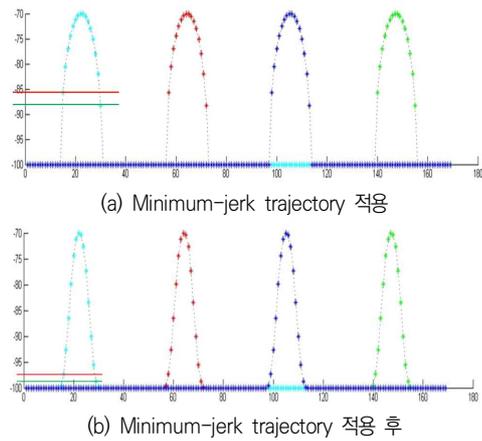


그림 6. 궤적 시간 T에 따른 Z(위, 아래) 그래프
Fig. 6. Z(Top, Bottom) graph with trajectory time T

3.2 로봇 몸체의 안정적 스웨이 분석

보행 시 4족 보행 로봇의 몸체의 좌우 움직임 sway를 LSM(longitudinal stability margin)방법과 본 논문에서 새로 적용한 사인파형을 비교/분석하였다. 그림 7은 LSM방식을 사용하여 보폭에 변화에 따라 jerk의 값의 변화를 나타내었으며 그림 8은 본 논문에서 제시한 sine wave 방식으로 보폭 변화에 따른 jerk의 변화를 나타낸 것이다. 또한 표 2는 보폭 변화(0~40cm)에 따른 각 축의 jerk변화의 평균값을 표시한 것이다.

비교 결과 sine wave일 때 LSM 방식보다 Z축은 0.019, X축은 0.457, Y축은 0.02, 3D는 0.479만큼 감소하였다. 특히 jerk의 크기와 변화가 큰 X축에 대한 변화는 크게 개선된 것을 확인할 있었다.

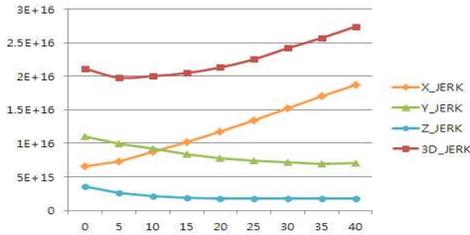


그림 7. LSM방식을 사용한 보폭 과 jerk의 변화
Fig. 7. Changes in stride and jerk using LSM

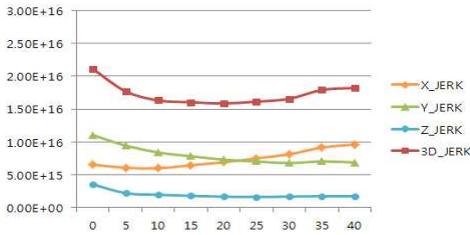


그림 8. 사인파형 방식을 사용한 보폭 과 jerk의 변화
Fig. 8. Changes in stride and jerk using sine wave method

표 2. 보폭 변화에 따른 각 축의 jerk변화
Table 2. Jerk change of each axis according to stride change.

Jerk	Z	X	Y	3D
Avg.(LSM)	0.211	1.195	0.821	2.218
Avg.(Sine)	0.191	0.738	0.801	1.739
Reduction	0.019	0.457	0.02	0.479

3.3 스웨이의 최적 보폭 분석

표 3은 보폭 변화에 따른 jerk의 변화를 수치화한 것으로 발 끝점의 궤적과 sway에 대한 결론을 통해 보폭을 변화시키에 따른 jerk값을 확인하였다.

표 3. 보폭 변화에 따른 jerk의 변화
Table 3. Variation of jerk's wave form according to the change of stride

Amp	10(cm)	15(cm)	20(cm)	25(cm)
X-jerk	5.99E+15	6.45E+15	6.90E+15	7.5E+15
Y-jerk	8.39E+15	7.82E+15	7.30E+15	7.35E+15
Z-jerk	1.94E+15	1.78E+15	1.65E+15	1.66E+15

실험의 최적조건에 의한 안정적 보행은 보폭 (AMP) 20cm일 때가 jerk 값이 최소가 되는 것을 표 3.에서 확인 할 수 있었다.

4. 결론

기존에 사용한 타원의 방정식을 이용한 보행 로봇 다리의 궤적과 minimum-jerk trajectory를 이용한 새로운 궤적을 비교하여 보다 지면과의 충격이 적고 jerk값이 최소가 되는 방법을 제시하였다.

시간 T에 따른 Y축(앞, 뒤)와 Z축(위, 아래)의 발 끝 궤적을 ADAMS와 MATLAB으로 비교 분석한 결과 minimum-jerk trajectory를 적용하였을 때 Y축 변화량은 1.2 ~ 2.9까지 기울기 변화량이 줄어들었으며 Z축에서는 발끝이 지면에서 첫 지점으로 이동할 거리가 22만큼 감소하였으며 발끝이 마지막 지점에서 지면으로 이동하는 거리는 11 감소하였다. 4족 보행 로봇 몸체의 스웨이 분석을 위해 기존 LSM 방식과 sine wave sway방식을 비교하였다. 본 논문에서 제시한 sine wave sway방식이 저크의 값 분석에서 Z축에서 0.019, X축에서 0.457, Y축에서 0.02, 3D는 0.479만큼 jerk가 감소하여 더 나은 결과를 보였으며 보폭변화에 따른 jerk값 변화를 분석한 결과 가장 안정적인 보행 궤적 및 몸체 sway를 가지는 보폭이 20cm임을 도출 하였다.

추후 연속적인 연구로는 보행 로봇의 전, 후면 장애물 및 보행 표면의 비 평탄면 조건에서 안정적으로 보행할 수 있는 알고리즘을 추가 개선 및 개발하는 것이다.

REFERENCES

- [1] Hyun Sup Song, Tae Hun Kang, Ig mo koo, Young Kouk Song, Tran Duc Trong, Choi Hyouk Ryeol, "A Study on the Stable Gait Pattern Generation of Quadruped Robot," Sungkyunkwan University Journal Machine technology. Vol. 9, pp. 25~40
- [2] M. D. Berkemeier, and K. V. Desai, "Design of a Robot Leg with Elastic Energy Storage, Comparison to Biology, and Preliminary Experimental Result," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 213~218, 1996.
- [3] E. S. Kim and J. H. Park, "Foot Adjusting

Motion on Irregularly Protruded Uneven Surface for Biped Robots,” Proceedings of the KSME 2005 Fall Annual Meeting, pp.2657-2652, 2005.

[4] M. H. Raibert, “Legged Robots That Balance”, MIT press, Cambridge, 1986.

[5] S. Song and B. Choi, “The Optimally Stable Ranges of 2n-legged Wave Gaits,” IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 4, pp. 888-902, 1990.

[6] T. Lee and C. Shih, “Study of the Gait Control of a Quadruped Walking Vehicle,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 2, No. 2, pp. 61-69, 1986.

[7] Y.Fukuoka, H. Kimura, Y.Hada and K. Takase, “Adaptive dynamic walking of a quadruped robot ‘tekken’ on irregular terrain using a neural system model,” IEEE Robotics and Automation, pp. 2037-2042, 2003.

[8] D. Zhou, K.H. Low and T. Zielinska, “A stability analysis of walking robots based on leg-end supporting moments,” Robotics and Automation 2000 Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on Vol. 3, pp. 2834-2839, 2000.

[9] Fan-Tien Cheng, Hao-Lun Lee and D.E. Orin, “Increasing the locomotive stability margin of multilegged vehicles,” Robotics and Automation 1999 Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Vol. 3, pp. 1708-1714, 1999.

[10] Xuedong Chen, K. Watanabe and K. Izumi, “A new method on judgement of static stability for the quadruped robot,” Systems Man and Cybernetics 1999. IEEE SMC '99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Vol. 6, pp. 953-958, 1999.

[11] Tamar Flash and Neville Hogan, “The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model,” The Journal of Neuroscience, Vol. 5, No. 7, pp. 1688-1703, 1985.

저자약력

이 동 구(Dong-Goo Lee) [정회원]



- 2013년 2월 : 성균관대학교 바이오생명공학과 (석사)
- 2019년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 (박사수료)

〈관심분야〉 컴퓨터비전, 인공지능, 로봇

신 우 현(Wu-Hyeon Shin) [학생회원]



- 2016년 2월 : 성균관대학교 바이오생명공학과 (석사)

〈관심분야〉 컴퓨터비전, 기계학습

김 태 정(Tae-Jung Kim) [정회원]



- 2015년 2월 : 성균관대학교 바이오생명공학과 (석사)
- 2018년 8월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 (박사수료)

〈관심분야〉 컴퓨터비전, 인공지능, 로봇

이 정 호(Jeong-Ho Lee) [정회원]



- 2015년 2월 : 성균관대학교 바이오생명공학과 (석사)
- 2019년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 (박사수료)

〈관심분야〉 컴퓨터비전, 인공지능, 로봇

이 영 석(Young-Seok Lee) [정회원]



- 2012년 8월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 (박사)
- 현재 : 한국폴리텍대학 성남캠퍼스 자동화시스템과 교수

〈관심분야〉 자동화, 스마트시스템

황 현(Heon Hwang) [정회원]



- 현재 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 교수

〈관심분야〉 컴퓨터비전, 기계학습, 로봇

최 선(Sun Choi) [정회원]



- 2005년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 (석사)
- 2011년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 (박사)
- 2015년 8월 ~ 현재 : 성균관대학교 생명공학연구원 책임연구원

〈관심분야〉 컴퓨터비전, 영상인식, 기계학습