creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학박사 학위논문

도마뱀의 주행 분석과 이를 적용한 보행 로봇의 설계

Design and Analysis of

a Lizard – Inspired Legged Robot

2015 년 8 월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

김 정 률

도마뱀의 주행 분석과
이를 적용한 보행 로봇의 설계

지도 교수 김 종 원

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2015 년 6 월

서울대학교 대학원
기계항공공학부
김 정 률

김정률의 공학박사 학위논문을 인준함
2015 년 6 월

위 원 장 박 종 우 (인)

부위원장 김 종 원 (인)

위 원 조 규 진 (인)

위 원 박 재 흥 (인)

위 원 서 태 원 (인)

초 록

험한 지형을 극복하기 위해서 동물의 주행 방법을 모사한 로봇을 개발하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 다리로 주행하는 동물은 그 기본 자세에 따라 upright posture를 가진 동물과 sprawled posture를 가진 동물로 나눌 수 있다. Upright posture를 가진 동물은 자신의 몸체를 지탱하는데 유리하고, sprawled posture를 가진 동물은 장애물을 극복하는데 유리하다.

험한 지형을 극복하는 로봇의 입장에서는, 로봇이 소형화가 될수록 로봇의 크기에 비해 장애물의 크기가 상대적으로 커지게 된다. 그러면 로봇 크기 대비 더 높은 장애물을 극복 가능한 sprawled posture 로봇이 upright posture 로봇에 비해 험한 지형의 극복에 더 유리하게 되고, 도마뱀을 모사한 소형 보행 로봇은 험한 지형을 극복하는데 유리할 것으로 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 도마뱀의 주행을 분석하고 이를 적용한 보행 로봇을 개발하고자 한다.

기존의 연구들을 살펴볼 때, sprawled posture를 가진 로봇들은 대부분은 바퀴벌레를 모사한 것이다. 바퀴벌레는 몸체가 하나의 body이기 때문에, 이를 모사 로봇들도 몸체의 움직임에 의한 영향을 분석하기 보다는 주행 속도를 증가시키는 것에 초점을 두었다. 또한 기존의 upright posture를 가진 로봇들도 모사 대상인 동물의 주행에서 몸체 움직임과 걸음걸이의 관계를 분석하는 것보다는 다리의 걸음걸이를 모사하는데 초점을 더 두었다. 특히 도마뱀의 주행과 관련하여 몸체 움직임과 걸음걸이의 관계를 밝히거나 이를 모사한 로봇에 대한 연구는 존재하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 도마뱀 몸체의 주기적인 운동 원리를 도출하고자, 도마뱀의 몸체 움직임과 걸음걸이의 관계를 분석하고 동역학 모델과 시뮬레이션을 통해 이를 밝히고자 하였다. 또한 몸체 움직임과 걸음걸이의 해석을 통해 도출된, 몸체의 주기적인 움직임 원리를 보행 로봇에 적용하고, 실험을 통해 도마뱀 몸체 움직임을 로봇으로 적용하는 것의 가능성을 확인하였다. 먼저 동역학 모델을 수립하고 도마뱀의 주행을 분석하여 도마뱀이 앞으로 주행하기 위해서는 허리, 꼬리 조인트의 토크 또는 지면에서의 반력 모멘트가 필요하다는 사실을 확인하였다. 이후 다리 근육 분석을 통해 지면에서의 반력 모멘트가 크게 발생하지 않는 것을 확인하고 동역학 시뮬레이션을 통해

반력 모멘트가 적을 때, 허리, 꼬리의 토크로 직진을 위한 모멘트를 생성하는 것을 확인하였다. 그 다음 최적화를 수행함으로써 허리, 꼬리의 조인트 토크가 직진을 위한 모멘트를 생성하면서 각 조인트 토크의 합과 차를 최소화하였을 때, 도마뱀과 유사한 S자 형상의 허리, 꼬리의 움직임이 생성되는 것을 확인하였다.

도마뱀을 모사한 2족 소형 보행 로봇의 시제품을 개발하기 위하여 먼저 로봇 시제품을 적용하기 위한 동역학 모델을 2차원의 수평 평면에 수립하였다. 허리, 꼬리의 좌우 방향의 움직임 변화 량의 차이를 통해 로봇 시제품의 모델에 주행 방향을 보정하는 방법을 고안하고, 동역학 모델의 주행 방향을 yaw 방향의 각도로 피드백 받아 허리, 꼬리 움직임의 간단한 제어를 하여 직진으로 유지하였다. 이 후, 도마뱀을 모사한 2족 소형 보행 로봇의 시제품을 4절 링크 최적화 방법을 이용하여 설계하고 제작하였다. 3차원 공간의 자유도를 2차원 수평 평면으로 구속하는 테스트벤치를 통해 2족 소형 보행 로봇의 시제품의 주행 방향을 유지하는 실험을 수행하였다. 동역학 모델과 마찬가지로, 로봇 시제품의 주행 방향을 yaw 방향의 각도로 피드백 받아 허리, 꼬리 움직임의 간단한 제어를 통해 직진으로 유지하여, 도마뱀의 몸체 움직임이 소형 보행 로봇에 적용하는 것의 가능성을 실험을 통해 검증할 수 있었다.

주요어 : 도마뱀, 보행 로봇, 동역학 시뮬레이션, 몸체 움직임 원리
학 번 : 2009-20660

목 차

1. 서론.....1
1.1. 연구 동기.....1
1.2. 생체를 모사한 로봇의 연구.....3
1.2.1. Sprawled Posture를 가진 동물의 주행을 모사하는 로봇의 연구.....3
1.2.2. Upright Posture를 가진 동물의 주행을 모사하는 로봇의 연구.....7
1.2.3. 몸체 움직임을 모사한 로봇.....12
1.3. 연구의 목표.....14

2. 도마뱀의 주행 분석.....16
2.1. 도마뱀의 걸음걸이와 몸체 움직임에 대한 기존 연구...16
2.1.1. 도마뱀의 걸음걸이 연구.....16
2.1.2. 도마뱀 허리, 꼬리의 주기적인 움직임 연구.....19
2.2. 간소화된 도마뱀의 동역학 모델을 통한 허리, 꼬리 움직임의 영향 분석.....23
2.2.1. 2차원 수평면에 수립된 도마뱀의 동역학 모델.....23
2.2.1. 2차원 수평면에 수립된 도마뱀 모델의 동역학 시스템25
2.2.3. 도마뱀이 직진 주행 시, 허리, 꼬리의 조인트 토크 필요성.....29
2.2.4. 정상 상태로 주행하는 도마뱀 모델에 대한 지면에서의 반력 설정.....29
2.2.5. 동역학 시뮬레이션.....30
2.2.6. 허리, 꼬리의 주기적인 움직임과 지면에서의 반력 모멘트와의 관계.....33
2.2.7. 주기적인 S 형상 허리, 꼬리 움직임의 장점.....36
2.2.8 동역학 시뮬레이션 최적화.....37
2.2.9 최적화 결과 도출된 도마뱀 모델의 움직임.....38
2.3. 동역학 모델을 통한 도마뱀의 움직임 영향 분석.....42
2.3.1 동역학 모델 수립.....42
2.3.2 도마뱀 모델의 정기구학 해석.....45
2.3.2.1 도마뱀 모델의 정기구학 식.....45
2.3.2.2 도마뱀 모델의 지면과의 접촉 시 관절 각도 변경....47
2.3.2.3 공중에서의 도마뱀 모델의 움직임.....50
2.3.2.4 도마뱀 모델의 조인트 운동.....51
2.3.3 동역학 모델의 역동역학 해석.....56
2.3.3.1 도마뱀 모델의 동역학 시스템.....57

2.3.3.2 역동역학을 통한 조인트 토크 추출 58
2.3.4 동역학 모델의 최적화 64

3. 도마뱀 모사 보행 로봇 설계 78
3.1. 2족 소형 보행 로봇에의 적용 가능성 78
3.2. 2족 소형 보행 로봇을 위한 동역학 해석 78
3.2.1. 도마뱀 모사 로봇의 동역학 모델 수립 78
3.2.2. 도마뱀 모사 로봇의 동역학 시스템 81
3.2.3. 모델 발과 지면의 접촉 구속 조건 설정 83
3.2.4. 도마뱀 모사 로봇의 동역학 시뮬레이션 86
3.2.4.1. 동역학 모델 좌우 회전 보정 86
3.2.4.2. 동역학 모델 직진 주행 시뮬레이션 91
3.3. 도마뱀을 모사한 2족 소형 보행 로봇의 시제품 설계 96
3.3.1. 도마뱀 로봇 시제품의 허리, 꼬리 메커니즘 96
3.3.2. 도마뱀 로봇 다리 메커니즘 99
3.3.2.1 뒷발 궤적의 추출 및 근사 함수 설정 99
3.3.2.2. 4절 링크의 제한 조건과 설계 변수 정의 102
3.3.2.3. 4절 링크 최적화 105
3.3.2.4. 도마뱀 로봇 시제품 다리 메커니즘의 3차원 CAD 107
3.3.3. 도마뱀 모사 로봇 시제품의 3차원 CAD 110
3.4. 도마뱀을 모사한 2족 소형 보행 로봇의 시제품 제작 및 실험 112
3.4.1. 도마뱀 모사 로봇 시제품의 제작 112
3.4.2. 테스트 벤치 및 자유도 구속 장치 117
3.4.3. 센서 및 통신 시스템 구축 120
3.4.4. 도마뱀 모사 로봇 시제품의 주행 실험 123

4. 결론 132

참고문헌 134

Appendix 137
A.1. 도마뱀 각 body의 무게 중심의 위치 137

Abstract 142

표 목차

표 2. 1 Callisaurus draconoides를 기준으로 한 동역학 모델의 길이와 폭, 질량 23
표 2. 2 그림 2. 10에 사용된 기호들의 용어 정리 26
표 2. 3 목표 도마뱀 Callisaurus draconoides의 크기 및 질량 [19] 42
표 3. 1 도마뱀 로봇 시제품의 길이와 무게 98
표 3. 2 최적화된 근사함수의 계수 값 101
표 3. 3 최적화된 4절 링크의 설계 변수 107
표 3. 4 다리 모터 선정 115
표 3. 5 IMU 센서의 특성 120

그림 목차

그림 1.1 개와 도마뱀의 주행 자세 비교[1],[2] 2
그림 1.2 바퀴벌레를 모사한 6족 로봇 4
그림 1.3 (a) Isprawl (Univ. of Stanford), (b) Isprawl의 힘 전달 메커니즘[6] 5
그림 1.4 (a) DASH(UC Berkeley), (b) DASH의 주행 영상의 스냅샷[7] 5
그림 1.5 VelociRoACH(UC Berkeley) [8] 6
그림 1.6 RHex[9](Univ. of Michigan) 7
그림 1.7 (a) Scout II(Univ. of McGill) [10], (b) PAW(Univ. of McGill)[11] 8
그림 1.8 PAW의 gallop 걸음걸이 시퀀스[11] 8
그림 1.9 Cheetah-cub(EPFL)[12] 9
그림 1.10 MIT Cheetah robot(MIT)[13] 10
그림 1.11 MIT Cheetah robot 주행 동영상의 스냅샷[13] 10
그림 1.12 BigDog (BostonDynamics) [14] 11
그림 1.13 Cheetah robot (BostonDynamics) [15] 11
그림 1.14 TITRUS-III (Tokyo Institute of Technology)[16] 12
그림 1.15 ACM-III[17] 13
그림 1.16 Salamander robotica[18](EPFL) 13
그림 2.1 Trot의 걸음걸이로 주행 하는 도마뱀 동영상 스냅샷[19] 17
그림 2.2 Bipedal의 걸음걸이로 주행 하는 도마뱀 동영상 스냅샷[19] 18
그림 2.3 도마뱀 몸체(hip)의 높이 방향 움직임[20] 19
그림 2.4 도마뱀의 종류에 따른 허리, 꼬리의 주기적인 움직임[21] 20
그림 2.5 도마뱀의 종류에 따른 몸체의 각 부분의 좌우 방향의 속도[21] 20
그림 2.6 도마뱀의 허리 근육[22] 21
그림 2.7 걷는 동안의 허리 근육의 활성화 정도[22] 22
그림 2.8 수평면에서의 도마뱀 동역학 모델 23
그림 2.9 (a) 도마뱀 모델의 기구학 매개변수, (b) 각 body의 절대값 기준 각도 q와 링크 사이의 조인트 각도 j, (c) 수평면 상에서 도마뱀 모델의 각 body에 작용하는 힘과 모멘트 25
그림 2.10 직진 주행하는 도마뱀의 시퀀스와 각 body에 작용하는 힘과 모멘트 28

그림 2. 11 (a) GRFx, (b) GRFy의 그래프 30
그림 2. 12 도마뱀 body2의 yaw 방향 각도 움직임에 대한 제어 알고리즘 32
그림 2. 13 동역학 시뮬레이션 34
그림 2. 14 도마뱀 다리의 근육[31] 35
그림 2. 15 동역학 모델 몸체 37
그림 2. 16 최적화를 통해 도출된 도마뱀 모델의 움직임 스냅샷 39
그림 2. 17 최적화된 도마뱀 모델 움직임 40
그림 2. 18 동역학 모델의 목표 도마뱀: Callisaurus draconoides[19] 42
그림 2. 19 도마뱀 동역학 모델의 (a) body 구성 (b) joint 구성 44
그림 2. 20 도마뱀 몸체 모델의 자유도가 2차원 수평면으로 제한된 동역학 모델 45
그림 2. 21 도마뱀 동역학 모델의 각 body의 (a)무게 중심의 위치, (b)길이 46
그림 2. 22 지면에 접촉할 때의 뒷발 발목의 각도 변경 48
그림 2. 23 앞발이 지면에 접촉한 상황의 자세 결정 50
그림 2. 24 공중에 뜬 도마뱀 동역학 모델의 무게 중심의 위치 결정 51
그림 2. 25 기존 연구의 도마뱀 관절의 각도[29] 52
그림 2. 26 임의의 값을 대입한 도마뱀의 주행 영상 스냅샷 ... 53
그림 2. 27 그림 2. 27의 도마뱀 모델의 움직임에서 다리의 움직임을 변경한 도마뱀의 주행 영상 스냅샷 54
그림 2. 28 그림 2. 27의 도마뱀 모델의 움직임에서 허리와 꼬리의 움직임을 변경한 도마뱀의 주행 영상 스냅샷 55
그림 2. 29 도마뱀 모델의 동역학 시스템 (a) 공중에 떠있는 상황, (b) 지면에 발이 접촉한 상황 56
그림 2. 30 그림 2. 27과 같은 동역학 모델 주행에서 역동역학을 통해 추출된 조인트 토크 63
그림 2. 31 최적화를 통해 도출된 도마뱀 모델의 주행 동영상 스냅샷 65
그림 2. 32 최적화를 통해 도출된 도마뱀 모델의 조인트 각도 68
그림 2. 33 최적화로 도출된 동역학 모델 주행에서 역동역학을 통해 추출된 조인트 토크 73
그림 2. 34 최적화로 도출된 도마뱀 동역학 모델에 대한 지면에서의 반력 그래프 74
그림 2. 35 실제 도마뱀 주행 영상의 스냅샷[24] 75
그림 2. 36 실제 도마뱀의 조인트 각도와 최적화를 통해 도출된

도마뱀 동역학 모델의 조인트 각도의 비교 76
그림 3. 1 도마뱀의 뒷발 궤적: Callisaurus draconoides[19] 79
그림 3. 2 도마뱀 모사 로봇의 동역학 모델 81
그림 3. 3 동역학 시스템 82
그림 3. 4 지면에 접촉한 발의 구속 조건을 확인하기 위한 1차원 동역학 모델 84
그림 3. 5 구속 조건 확인을 위한 동역학 모델 시뮬레이션 85
그림 3. 6 동역학 모델의 허리 조인트 각도 그래프의 개념도 .. 88
그림 3. 7 동역학 모델의 허리, 꼬리 움직임의 좌우 진폭 차이를 이용한 왼쪽 회전 보정 88
그림 3. 8 Yaw 방향 회전 비교 89
그림 3. 9 동역학 모델의 왼쪽 방향 회전 시뮬레이션(Matlab) 90
그림 3. 10 허리, 꼬리의 움직임을 통한 몸체 회전 반경과 각 body의 질량, 조인트 각도의 변화량과의 관계 91
그림 3. 11 허리, 꼬리의 움직임이 없는 동역학 모델의 시뮬레이션 92
그림 3. 12 제어 없이 허리, 꼬리를 sin의 함수로 움직이는 동역학 모델의 시뮬레이션 93
그림 3. 13 허리, 꼬리의 움직임으로 제어를 통해 주행 방향을 유지하는 동역학 모델의 시뮬레이션 95
그림 3. 14 제어를 통해 주행 방향을 유지하는 동역학 모델 시뮬레이션의 (a) 허리 조인트의 움직임 각도, (b) 꼬리 조인트의 움직임 각도 95
그림 3. 15 도마뱀 로봇 시제품의 허리, 꼬리 메커니즘 평면도 97
그림 3. 16 도마뱀 로봇 시제품의 허리, 꼬리 액추에이터와 축의 3차원 CAD 98
그림 3. 17 뒷발의 모션 캡쳐 100
그림 3. 18 모션 캡쳐를 통해 추출된 뒷발 궤적과 근사 함수의 비교 102
그림 3. 19 4절 링크의 설계 변수 103
그림 3. 20 4절 링크의 endpoint의 궤적(Matlab) 104
그림 3. 21 도마뱀 로봇 시제품의 다리 메커니즘을 위한 4절 링크의 제한 조건 105
그림 3. 22 도마뱀의 기준 궤적(파란색)과 4절 링크 최적화를 통해 추출된 궤적(빨간색) 107
그림 3. 23 도마뱀 로봇 시제품 다리 메커니즘의 3차원 CAD 모델 108
그림 3. 24 지면과의 접촉을 고려한 발목-발 메커니즘 108
그림 3. 25 발목-발 메커니즘의 Matlab 프로그램을 이용한 시뮬레이션 109

그림 3. 26 지면에서의 충격을 흡수할 수 있는 double-wishbone compliant 구조 110
그림 3. 27 도마뱀 모사 로봇 시제품의 3차원 CAD 111
그림 3. 28 도마뱀 모사 로봇 시제품의 테스트 벤치 및 자유도 구속 장치 112
그림 3. 29 도마뱀 모사 로봇의 시제품 및 모터와 링크 구조113
그림 3. 30 (a) 도마뱀 모사 로봇 시제품의 발 궤적과 지면과의 거리, (b) 정역학 해석을 통해 계산된 필요 모터 토크 115
그림 3. 31 도마뱀 모사 로봇 시제품의 각 부품 및 가공 재료117
그림 3. 32 도마뱀 로봇 시제품 주행용 트레드밀 118
그림 3. 33 도마뱀 로봇 시제품의 주행을 측정하기 위한 초고속 카메라 설치 118
그림 3. 34 자유도 구속 장치에 장착된 도마뱀 로봇 시제품 .119
그림 3. 35 주행 실험 시, 도마뱀 로봇 시제품 yaw 각도의 움직임을 고정하여 초기 yaw 각도를 일정하게 유지하는 장치.....120
그림 3. 36 도마뱀 모사 로봇 시제품의 yaw 방향 각도를 roll 방향 각도로 변환하는 장치 122
그림 3. 37 도마뱀 모사 로봇 시제품의 통신 시스템 123
그림 3. 38 Duty factor를 측정하기 위한 테스트 주행의 동영상 스냅샷 124
그림 3. 39 도마뱀 모사 로봇 시제품의 발과 지면과의 접촉 그래프 125
그림 3. 40 상위 제어기의 모터 명령 값(파란색)과 모터의 실제 값(빨간색) 비교 126
그림 3. 41 허리, 꼬리의 움직임이 없는 도마뱀 모사 로봇 시제품 주행 동영상 스냅샷.....128
그림 3. 42 허리, 꼬리의 움직임이 없는 도마뱀 모사 로봇 시제품 주행 동영상 스냅샷.....129
그림 3. 43 허리, 꼬리의 움직임이 없는 도마뱀 모사 로봇 시제품 주행 실험과 허리, 꼬리를 이용하여 주행 방향을 제어한 실험의 body2의 yaw 방향 각도 비교 130
그림 3. 44 동역학 모델의 시뮬레이션을 수행한 body2의 yaw 방향 각도와 허리, 꼬리를 이용하여 주행 방향을 제어한 실험의 body2의 yaw 방향 각도 비교 131

제 1 장 서 론

1.1. 연구 동기

바퀴가 접근하기 어려운 험한 지형을 극복하기 위해서 동물의 걸음걸이를 모사한 보행 로봇들이 연구되고 있다. 이 보행 로봇들은 모사하는 대상 동물의 자세에 따라 주행 특성이 결정된다. 자세는 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 개나 고양이, 말과 같은 포유 동물과 같이 4족으로 서있는 자세를 upright posture, 도마뱀이나 바퀴벌레와 같이 엎드려 있는 자세를 sprawled posture라고 한다. 각각의 자세는 그림 1. 1의 (a), (b)에서 확인할 수 있다.

각 동물의 자세에는 장단점이 존재한다. 먼저 upright posture는 자신의 몸체를 지탱하는데 적합한 다리 구조이며, 지면에서 추력이 발생하였을 경우 수평면에서 보았을 때, 지면에 접촉한 발의 위치가 몸체의 무게 중심에 가까워서 몸체에 작용하는 yaw 방향으로의 모멘트는 거의 없다는 장점이 있다. 하지만 주행 중에 몸체 밑에 다리가 항상 존재해야 하는 구조로 몸체의 무게 중심이 높고, 장애물을 극복 시 전복에 대한 위험성이 크다는 단점이 존재한다.

반면에 sprawled posture는 다리의 구조가 몸체 밑이 아닌 옆에 존재하는 것이므로 몸체에 의한 다리 움직임의 제한이 작다. 따라서 upright posture에 비해 몸체 크기 대비 더 높은 장애물을 극복하는 것이 가능하고, 상대적으로 몸체의 무게 중심이 낮아 장애물 극복 시 안정성이 뛰어나다는 장점이 있다. 하지만 이 구조는 다리가 몸체의 무게를 지탱하기 어려운 구조이며, 각 다리가 지면을 박찰 때 발생하는 추력이 수평면에서 보았을 때, 몸체의 무게 중심에서 떨어진 위치에서 발생하므로 몸체에 작용하는 yaw 방향의 모멘트를 따로 제어해야 한다는 단점이 있다.

험한 지형을 극복하는 로봇의 입장에서 볼 때, 로봇이 소형화 될수록 장애물의 크기는 로봇의 크기에 비해 상대적으로 커지게 된다. 따라서 소형 보행 로봇에서는 로봇 크기 대비 더 높은 장애물을 극복 가능한 sprawled posture 로봇이 upright posture 로봇에 비해 험한 지형의 극복에 더 유리하게 된다. 본 연구에서는 작은 크기에서 험한 지형의 극복에 유리하다고 판단되는 도마뱀의 주행을 분석하고 이를 적용한 보행 로봇을 연구하고자 한다.

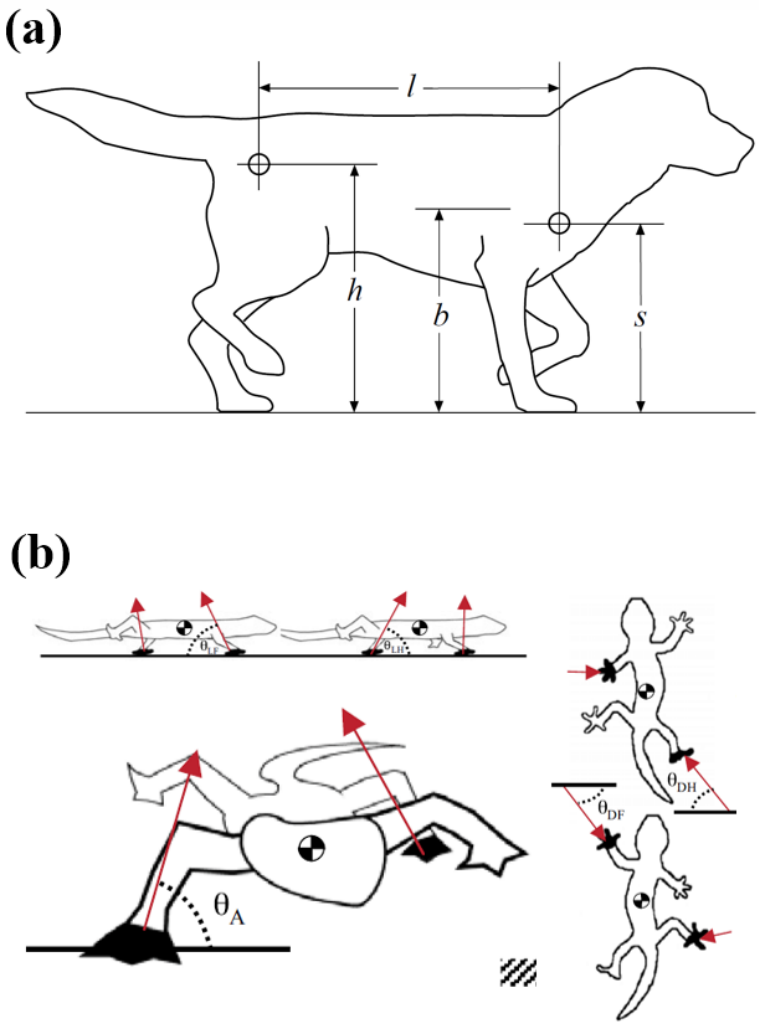


그림 1. 1 개와 도마뱀의 주행 자세 비교 (a) 개의 주행 자세[1], (b) 도마뱀의 주행 자세[2]

이를 위해서 도마뱀의 걸음걸이와 몸체의 움직임을 포유 동물과 비교를 통해 분석해 보았다. 포유 동물들은 주로 앞과 뒤의 다리 쌍으로 지면을 차면서 주행을 하는 bound, gallop 걸음걸이를 사용하여 달리는 반면, 도마뱀은 대각의 다리를 쌍으로 하여 지면을 차면서 주행을 하는 trot 걸음걸이를 사용한다. 또한 포유 동물들의 몸체는 주로 pitch 방향의 주기적인 운동이 발생하는데 반해, 도마뱀의 몸체는 pitch 방향의 움직임은 거의 발생하지 않고 yaw 방향으로 S 형상의 주기적인 움직임이 발생한다. 이러한 도마뱀의 몸체 움직임은 걸음걸이와

연관되어 주행에 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 따라서 도마뱀 몸체 움직임과 걸음걸이를 분석하여 주행에 미치는 영향 및 관계를 분석하고, 이를 적용한 로봇의 시제품을 제작하고자 한다. 그에 앞서 유사한 연구가 있는지 확인하고자 기존 연구를 조사하였고, 이를 다음 절에서 설명하고자 한다.

1.2. 생체를 모사한 로봇의 연구

1.2.1. Sprawled Posture를 가진 동물의 주행을 모사하는 로봇의 연구

기존의 sprawled posture 보행 로봇들은 그림 1. 2와 같이 바퀴벌레와 유사한 형상으로, 걸음걸이를 진행하면서도 항상 3개의 다리를 지면에 접촉하여 몸의 무게 중심을 3개의 다리가 그리는 삼각형안에 위치하여 안정된 상태를 유지하고자 하였다. 이로 인해 대부분의 sprawled posture 로봇들은 다리의 수를 6개 이상으로 설계하였다[3, 4, 5]. 이 로봇들은 항상 안정한 상태를 유지하기 때문에 로봇이 전복되는 상황이 적지만 주행 속도가 느리다는 단점이 있다. 로봇의 몸체는 하나의 강체로 구성되어 있어 몸체가 스스로 움직일 수 없기 때문에 로봇은 몸체 움직임의 영향 없이, 다리의 움직임으로만 주행한다.

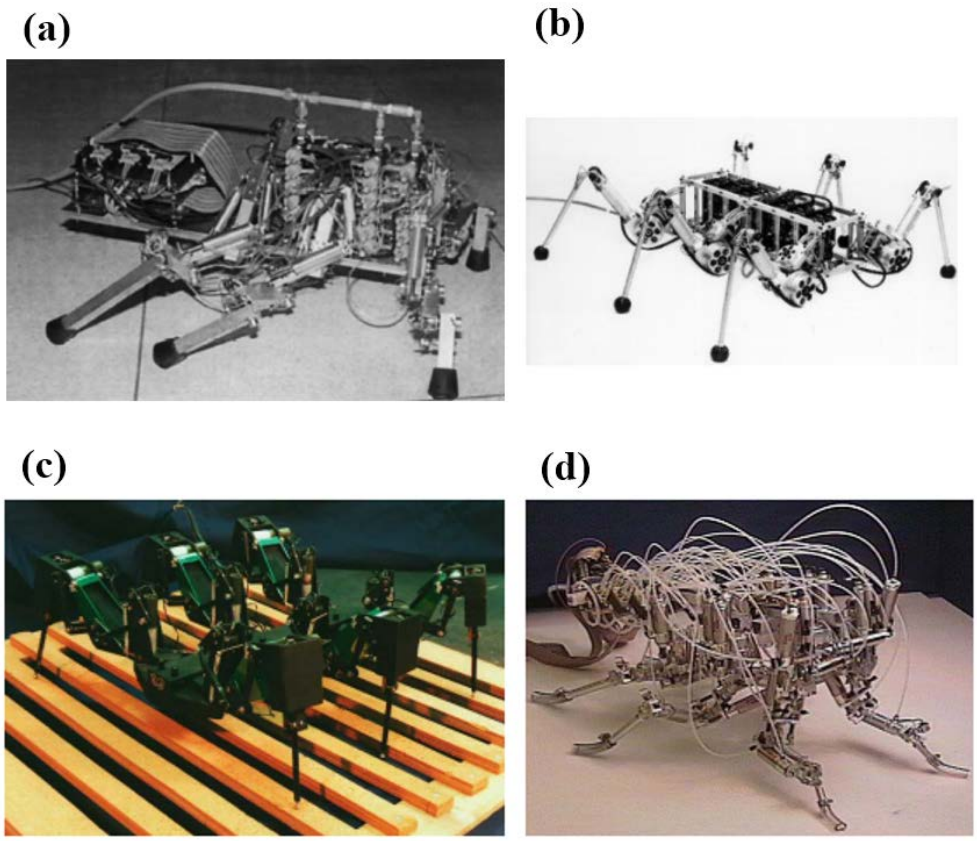


그림 1. 2 바퀴벌레를 모사한 6족 로봇 (a) Biobot(Univ. of Illinois), (b) TUM walking machine(TU, Munich), (c) CWRU II, (d) CWRU III(Univ. of Case Western Reserve)

이러한 느린 주행 속도를 극복하기 위해 로봇의 무게를 가볍게 하여 주행 속도를 빠르게 한 로봇들이 개발되었다. 그림 1. 3의 Isprawl[6] 155 ×116 ×70 mm의 크기에 315 g 무게이며 주행 속도가 2.3m/s로 매우 빠른 속도로 주행한다. 이는 그림 1. 4 (b)와 같이 모터에 크랭크-슬라이드 구조를 연결하고, flexible한 케이블을 통해 그 힘을 지면에 전달하는 구조로써 가능하게 되었다. Isprawl은 바퀴벌레의 걸음걸이를 모사하여, 움직이는 다리의 쌍을 바퀴벌레와 같게 하였고 지면으로부터 받는 반력도 바퀴벌레와 유사하게 생성되었다.

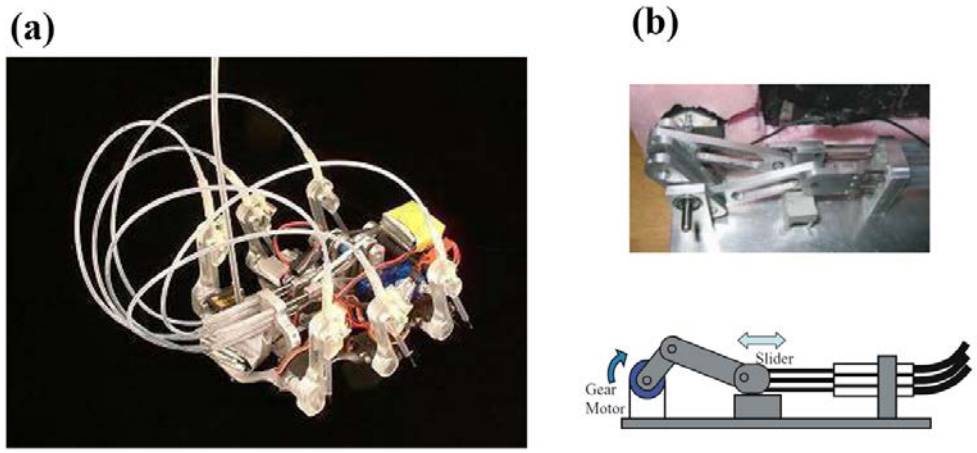


그림 1. 3 (a) Isprawl (Univ. of Stanford), (b) Isprawl의 힘 전달 메커니즘[6]

그림 1. 4와 같이 종이 접기 메커니즘을 이용한 로봇인 DASH[7]는 크기가 100 ×50 ×100 mm에 16g의 초 경량 로봇이다. 기존 로봇의 무게는 조인트 부품인 축과 베어링으로 인해 무거워지는데, DASH는 종이 접기를 이용, 부품 사용을 최소화하여 로봇 무게를 가볍게 하였다. 이 로봇은 1.1 m/s의 속도로 주행할 수 있으며 종이의 유연한 성질을 이용하여 외부의 충격에도 부서지지 않는 강인한 특징을 가졌다.

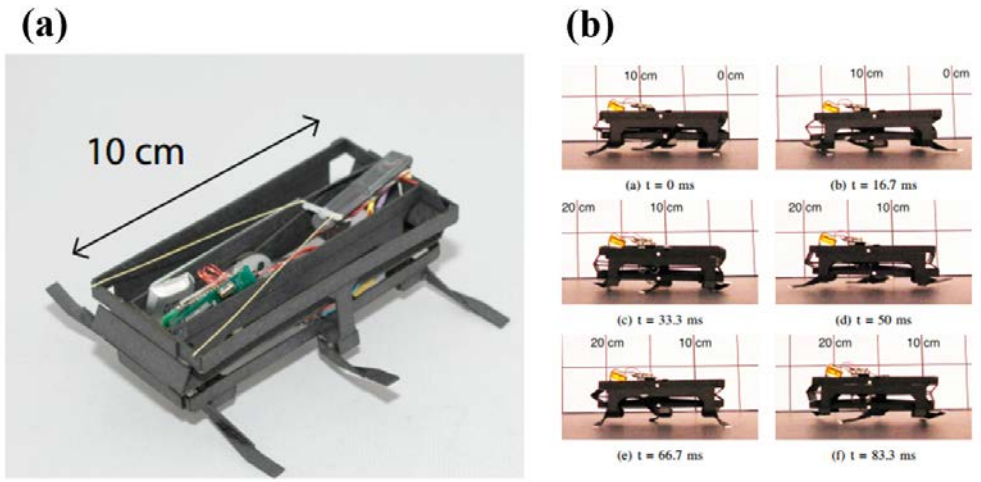


그림 1. 4 (a) DASH(UC Berkeley), (b) DASH의 주행 영상의 스냅샷[7]

DASH의 연구에서 더 발전한 그림 1. 5의 VelociRoACH[8]는 크기가 DASH와 유사한 100 ×65 ×42 mm에 29.1 g이다. 주행

속도는 2.7 m/s (27 bodylengths/s)로, 현재까지 개발된 다리 구조의 로봇 중에서 body 길이 대비 가장 빠른 속도를 가지고 있다. 로봇의 양쪽에 날개처럼 생긴 구조는 로봇의 자세를 안정화시키는 역할을 한다.

DASH와 VelociRoACH 모두 바퀴벌레를 모사한 로봇으로 몸체는 하나의 body로 구성되었고, 바퀴벌레의 걸음걸이를 모사하였다.

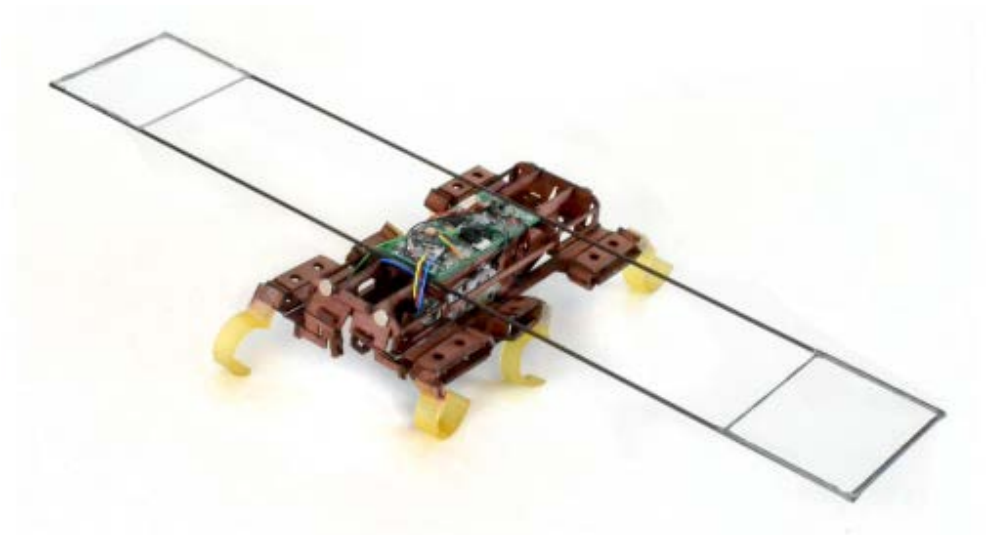


그림 1. 5 VelociRoACH(UC Berkeley) [8]

그림 1. 6의 RHex[9]는 크기가 558 ×406 ×132 mm이고 무게는 12.5 kg이다. 주행 속도는 2.7 m/s이고 약 200 mm 높이의 장애물 극복이 가능하다. RHex는 6개의 다리 중 삼각형 위치에 있는 다리들을 쌍으로 번갈아 가면서 회전하여 앞으로 주행한다. RHex는 다리의 구조에 따라 여러 가지 버전이 존재하고 버전에 따라 다양한 지형을 극복하는 것이 가능하다.

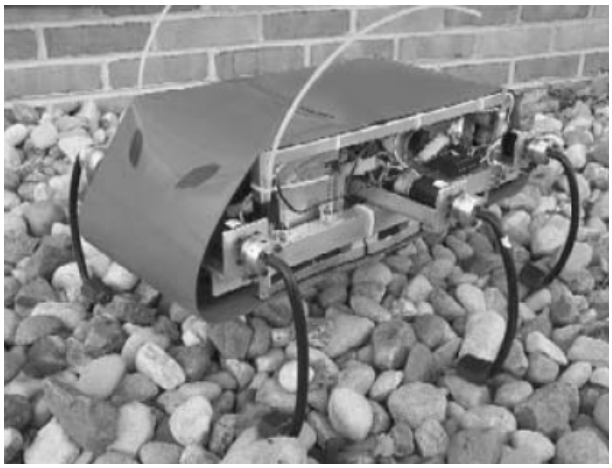


그림 1. 6 RHex[9] (Univ. of Michigan)

기존의 sprawled posture를 가진 로봇의 대부분은 바퀴벌레를 모사한 것이다. 바퀴벌레는 몸체가 하나의 body로 구성되기 때문에 주행에 있어 몸체의 영향은 없다고 볼 수 있다. 따라서 기존의 sprawled posture 로봇 연구는 대부분 몸체의 영향보다는 바퀴벌레의 걸음걸이를 모사하여 주행 속도를 증가시키는 것에 초점을 두었다.

1.2.2. Upright Posture를 가진 동물의 주행을 모사하는 로봇의 연구

Upright posture를 가진 동물은 느린 주행 속도에서는 지면에 적어도 한 개의 발이 항상 붙어있는 상태로 걷는 걸음걸이를 사용하고, 빠른 주행 속도에서는 발이 모두 지면에서 떨어지는 bound나 gallop 걸음걸이를 사용한다. 그림 1. 7의 Scout II, PAW[10, 11]는 swing 움직임을 생성하는 엑추에이터와 스프링을 이용하여 다리를 설계하고, gallop 걸음걸이를 구현하였다. 그림 1. 8은 PAW가 gallop 걸음걸이를 구현하는 과정을 설명한 사진이다.

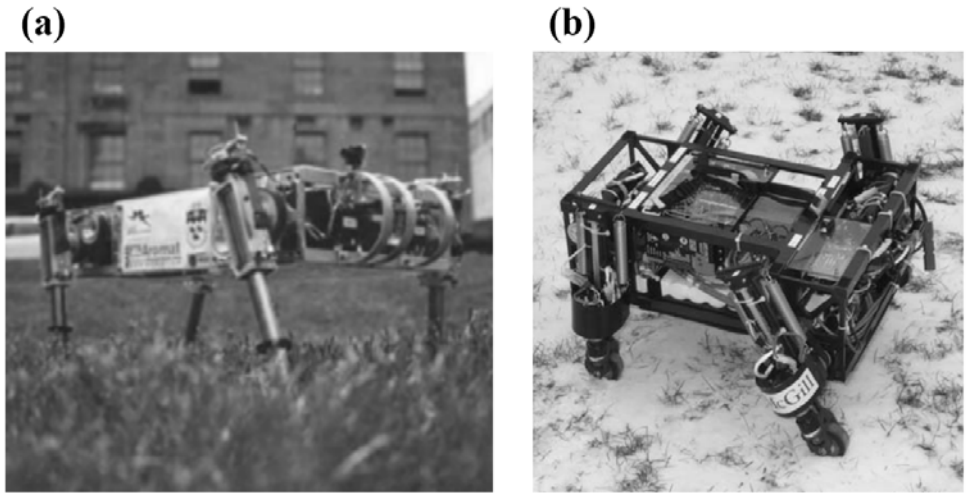
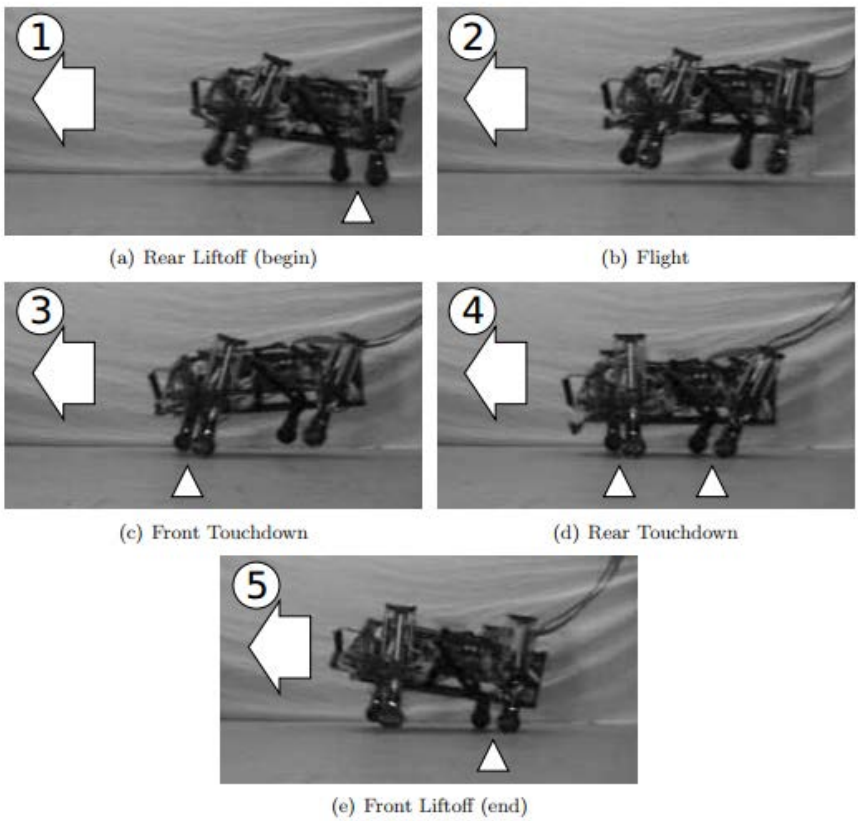


그림 1. 7 (a) Scout II(Univ. of McGill) [10], (b) PAW(Univ. of McGill) [11]



(a) Rear Liftoff (begin)

(b) Flight

(c) Front Touchdown

(d) Rear Touchdown

(e) Front Liftoff (end)

그림 1. 8 PAW의 gallop 걸음걸이 시퀀스[11]

PAW와 Scout II, 두 로봇의 다리 구조는 실제 동물을 구조적으로 완전히 모사하여 설계된 것이 아니고 대상 동물의 걸음걸이만 구현하였다. 또한 몸체는 하나의 body로 구성되어 있어 몸체가 스스로 움직이지 않고, 주행 시 pitch 방향으로 몸체의 움직임이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Cheetah-cub [12]은 고양이의 걸음걸이를 모사하여 주행하는 로봇으로, 대각 방향에 있는 다리를 쌍으로 번갈아 움직이는 trot 걸음걸이를 이용해 주행한다. 고양이의 다리 구조를 모사하였으며 이는 모터와 tendon을 이용해 구동한다. 로봇의 길이는 210 mm이며, 주행 속도는 1.42 m/s 이다. 또한 로봇은 다리에 compliant 메커니즘을 사용하여, 갑작스러운 속도의 변화에도 제어 없이 스스로 안정화하도록 설계하였다. 앞서 살펴본 PAW, Scout 와 마찬가지로 Cheetah-cub의 몸체는 하나의 body로 구성되어 있다. 하지만 PAW와는 달리 앞다리와 뒷다리에서 동시에 추력을 발생하는 trot 걸음걸이를 사용하기 때문에 몸체의 흔들림이 적은 것을 확인할 수 있다.

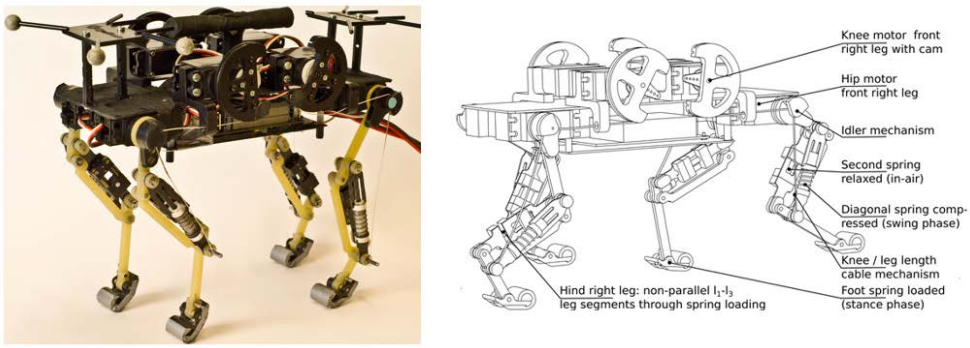


그림 1. 9 Cheetah-cub(EPFL) [12].

고양이과 동물 중에서 가장 빠른 동물인 치타를 모사한 로봇이 있다. 그림 1. 10과 같이 MIT Cheetah robot[13]은 치타의 걸음걸이를 모사하여 빠른 속도로 주행하는 것을 목표로 하는 로봇이다. 치타가 느린 주행 속도로 주행할 때는 trot 걸음걸이를 사용하고, 빠른 주행 속도로 주행할 때에는 gallop 걸음걸이를 사용하는데, Cheetah robot은 이를 모사하였다. 그림 1. 11은 MIT Cheetah robot이 trot의 걸음걸이를 사용하여 6 m/s의 속도로 주행하는 동영상의 스냅샷이다. Trot의 걸음걸이로 주행하는 MIT Cheetah robot은 허리가 움직이지

않지만 걸음걸이의 특성상 몸체의 움직임이 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

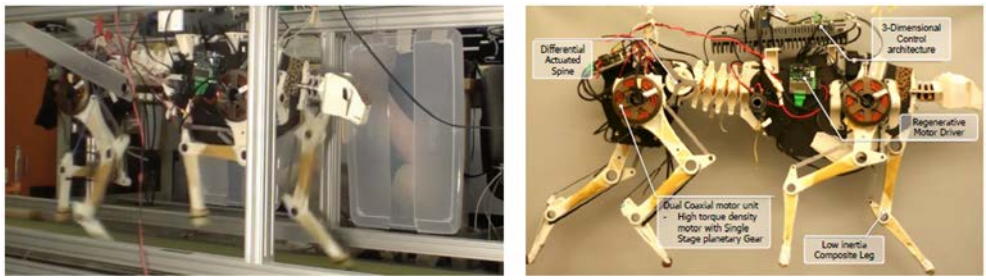


그림 1. 10 MIT Cheetah robot(MIT) [13]

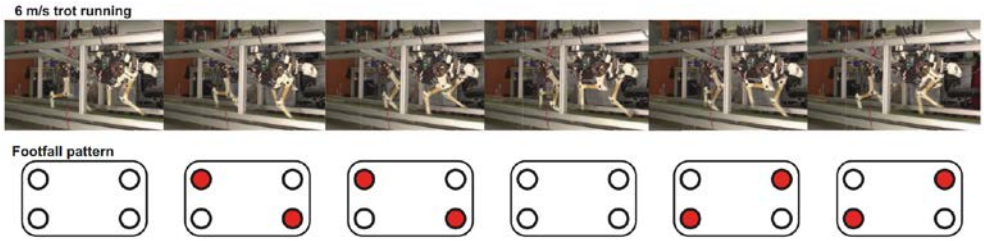


그림 1.11 MIT Cheetah robot 주행 동영상의 스냅샷[13]

BigDog[14]은 뛰어난 제어 성능을 통해 험한 지형을 잘 극복할 수 있으며, 외부의 영향에도 쉽게 넘어지지 않는다. 또한 발이 지면에 항상 접촉하고 있는 걷는 걸음걸이에서부터 trot 걸음걸이로 뛰는 것까지 다양한 걸음걸이로 주행 가능하다. 같은 BostonDynamics사의 Cheetah robot[15]은 트레드밀 위에서 45 km/h의 속도로 bound의 걸음걸이를 사용하여 주행한다. 동영상을 통해, 빠른 주행 속도에서 bound의 걸음걸이를 사용하는 Cheetah robot의 허리 조인트가 pitch 방향으로 움직이는 것을 확인할 수 있다. 빠른 주행 속도를 구현하는데 허리의 움직임이 영향이 있음을 추측할 수 있다.

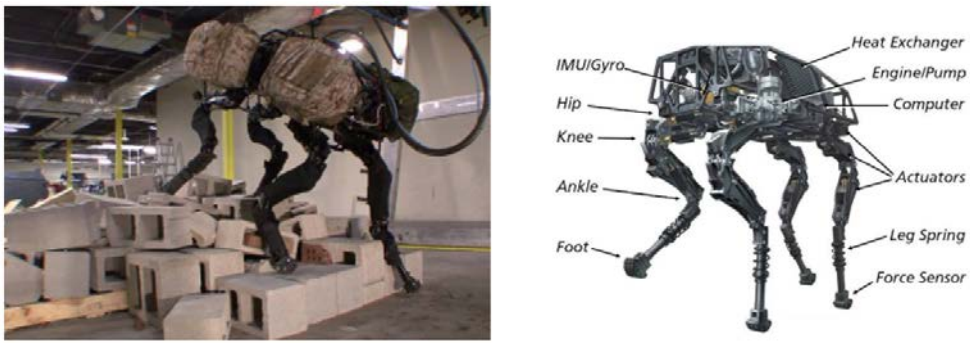


그림 1. 12 BigDog[14] (BostonDynamics)

그림 1. 13 Cheetah robot[15] (BostonDynamics)

그림 1. 14의 TITRUS-III[16]은 dinosaur를 표방한 로봇으로, 같은 파충류 종에 속해 있는 도마뱀과 유사한 구조를 하고 있다. TITRUS-III는 2족 보행을 하며, 미리 계산된 목과 꼬리의 좌우 움직임을 통해 로봇의 ZMP(Zero Moment Position)이 발 안으로 들어오도록 하며 주행한다.

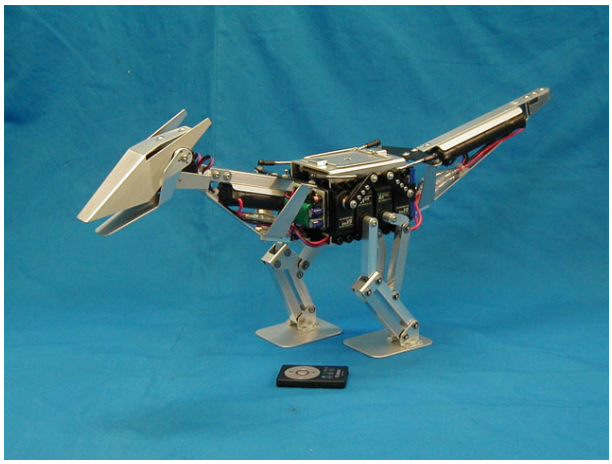


그림 1. 14 TITRUS-III[16](Tokyo Institute of Technology)

기존의 upright posture를 가진 로봇들은 개, 고양이, 치타 등을 모사한 것이다. 이 포유 동물들은 느린 속도에서는 trot 걸음걸이를 사용하고 빠른 속도에서는 bound, gallop 걸음걸이를 사용한다. Trot 걸음걸이를 사용하는 로봇은 몸체가 하나의 body로 구성되어 있더라도 몸체의 흔들림이 작지만, bound, gallop 걸음걸이를 사용하는 로봇은 몸체가 하나만으로 구성되어 있는 경우에는 pitch 방향으로 몸체의 흔들림이 큰 것을 알 수 있었다. 또한 2족 보행에서는 몸체의 움직임을 통해 주행의 안정성을 확보할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 걸음걸이의 방법과 몸체 움직임은 서로 관계가 있다는 것을 확인할 수 있었고, 걸음걸이의 방법에 따라 몸체 움직임의 중요성이 달라진다는 것도 알 수 있었다.

1.2.3. 몸체 움직임을 모사한 로봇

다리를 사용하여 주행하는 기존 로봇들은 주로 다리의 움직임에만 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 앞의 연구를 통해 안정적인 주행을 위해서는 적절한 몸체의 움직임 또한 필요하다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 도마뱀의 몸체 움직임과 유사한 뱀이나 도롱뇽의 움직임을 모사한 연구에 대하여 조사해보았다.

그림 1. 15의 ACM-III[17]는 뱀이 바닥과의 마찰력을 이용하여 앞으로 주행하는 것을 모사하여 평면에서 주행한다. ACM-III는 주행 방향과 좌우 방향의 마찰을 다르게 하여 S자 형상을 그리면서 마찰력의

차이로 앞으로 주행한다.

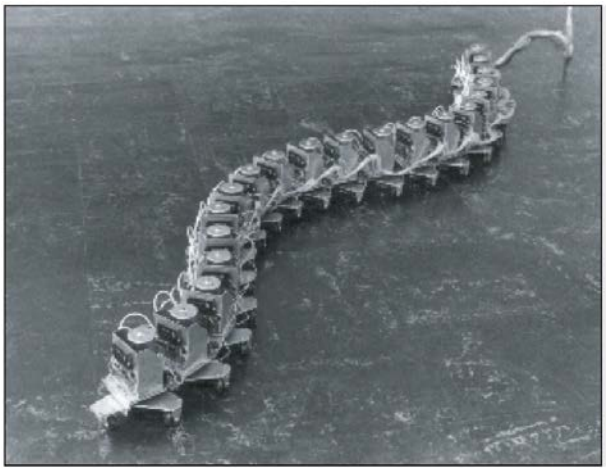


그림 1. 15 ACM-III[17]

그림 1. 16에서 확인할 수 있는 Salamander robotica[18]는 뱀 로봇과 유사하게 S자 형상을 그리며 앞으로 전진한다. 하지만 주행의 원리는 뱀 로봇과 조금 다르다. 뱀 로봇은 마찰력의 차이를 이용하여 앞으로 전진한다면 Salamander robotica는 평지에서는 대각 방향의 발을 지면에 마찰력을 이용해 고정하고 발의 위치를 pivot으로 삼아 회전하면서 앞으로 전진하게 된다. 물 속에서는 물고기가 수영하는 것과 유사하게 수영을 한다.

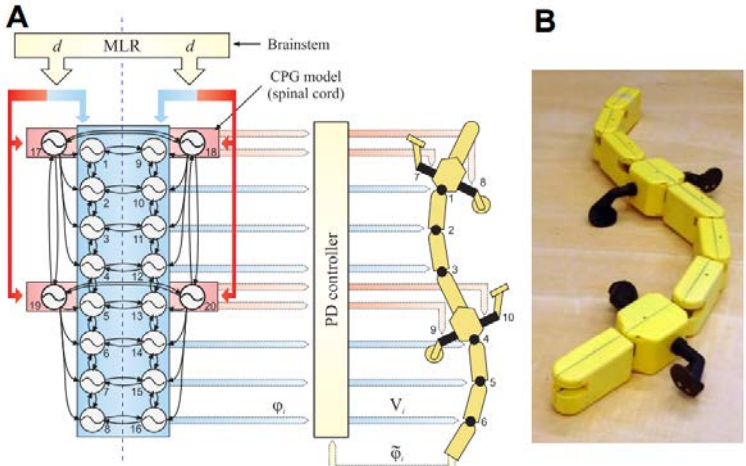


그림 1. 16 Salamander robotica[18] (EPFL)

몸체의 움직임을 모사한 로봇은 다리의 큰 추력 없이 몸체의 움직임만으로 주행이 가능하다. 이를 통해, 몸체의 움직임이 주행에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 추측할 수 있으며, 도마뱀을 모사한 로봇 또한 S자 모양의 몸체 움직임이 주행에 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

1.3. 연구의 목표

험한 지형을 극복하는 방법 중 하나로는 동물의 주행 방법을 모사한 로봇을 개발하는 것이다. 다리로 주행하는 동물은 그 기본 자세에 따라 upright posture를 가진 동물과 sprawled posture를 가진 동물로 나눌 수 있다. Upright posture를 가진 동물은 자신의 몸체를 지탱하는데 유리하고, sprawled posture를 가진 동물은 장애물을 극복하는데 유리하다.

험한 지형을 극복하는 로봇의 입장에서는, 로봇이 소형화가 될수록 로봇의 크기에 비해 장애물의 크기가 상대적으로 커지게 된다. 그러면 로봇 크기 대비 더 높은 장애물을 극복 가능한 sprawled posture 로봇이 upright posture 로봇에 비해 험한 지형의 극복에 더 유리하게 되고, 도마뱀을 모사한 소형 보행 로봇은 험한 지형을 극복하는데 유리할 것으로 판단할 수 있다. 이러한 도마뱀을 모사한 소형 보행 로봇을 개발하기 위해서는 먼저 도마뱀의 몸체 움직임과 다리의 걸음걸이에 대한 분석이 필요하다. 분석을 통해 도마뱀의 운동 원리를 밝히고 원리의 장점을 로봇에 적용할 수 있기 때문이다.

기존의 연구들을 살펴볼 때, sprawled posture를 가진 로봇들은 대부분은 바퀴벌레를 모사한 것이다. 바퀴벌레는 몸체가 하나의 body이기 때문에 몸체의 영향은 거의 없다고 볼 수 있고, 로봇들 또한 몸체의 움직임에 의한 영향을 분석하기 보다는 바퀴벌레의 걸음걸이를 모사하여 주행 속도를 증가시키는 것에 초점을 두었다. 기존의 upright posture를 가진 로봇들은 주행 속도에 따라 걸음걸이의 방법을 다르게 하였다. Trot 걸음걸이를 사용하는 로봇은 몸체가 하나의 body로 구성되어 있더라도 몸체의 흔들림이 작지만, bound, gallop 걸음걸이를 사용하는 로봇은 몸체가 하나만으로 구성되어 있는 경우에는 몸체의 흔들림이 큰 것을 알 수 있었다. 또한 2족 보행에서는 몸체의 움직임을 통해 주행의 안정성을 확보할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서

걸음걸이의 방법과 몸체 움직임은 서로 관계가 있다는 것을 확인할 수 있었고, 걸음걸이의 방법에 따라 몸체 움직임의 중요성이 달라진다는 것도 알 수 있었다. 이러한 기존의 보행 로봇들은 모사 대상인 동물의 주행에서 몸체 움직임과 걸음걸이의 관계를 분석하는 것보다는 다리의 걸음걸이를 모사하는데 초점을 더 두었다. 특히 도마뱀의 주행과 관련하여 몸체 움직임과 걸음걸이의 관계를 밝히거나 이를 모사한 로봇에 대한 연구는 존재하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 도마뱀 몸체의 주기적인 운동 원리를 도출하고 이를 도마뱀을 모사한 로봇에 적용하고자, 도마뱀의 몸체 움직임과 걸음걸이의 관계를 분석하고 동역학 모델과 시뮬레이션을 통해 이를 밝히고자 한다. 또한 몸체 움직임과 걸음걸이의 해석을 통해 도출된, 몸체의 주기적인 움직임 원리를 보행 로봇에 적용하고, 실험을 통해 도마뱀 몸체 움직임을 로봇으로 적용하는 것의 가능성을 확인하고자 한다. 본 연구를 통해 걸음걸이와 관련된 도마뱀 몸체 움직임의 원리를 확인할 수 있으며, 도출된 원리가 적용된 보행 로봇의 실험을 통해 도마뱀 몸체 움직임이 2족 소형 보행 로봇의 주행에 장점으로 적용됨을 확인할 수 있다.

제 2 장 도마뱀의 주행 분석

본 절에서는 도마뱀이 달리는 동안 발생하는 허리, 꼬리의 주기적인 운동과 걸음걸이의 관계에 대하여 동역학 해석과 시뮬레이션을 통해 그 원리를 밝히고자 한다. 먼저 2.1절에서는 도마뱀의 걸음걸이와 몸체 움직임에 대한 기존 연구에 대하여 소개하고자 한다. 2.2절에서는 2차원 수평면에 수립된 도마뱀의 동역학 모델을 통해 우선적으로 허리, 꼬리의 주기적인 움직임 영향 및 원리를 확인하고, 마지막 2.3절에서 허리, 꼬리의 운동과 다리의 운동이 모두 포함된 동역학 모델을 통해 도마뱀의 걸음걸이와 허리, 꼬리의 주기적인 움직임의 관계를 더 자세하게 분석하고자 한다.

2.1. 도마뱀의 걸음걸이와 몸체 움직임에 대한 기존 연구

2.1.1. 도마뱀의 걸음걸이 연구

도마뱀은 느린 주행 속도에서와 빠른 주행 속도에서 각기 다른 걸음걸이를 사용한다. 느린 주행 속도에서는 그림 2. 1와 같이 대각 방향의 다리가 쌍으로 움직이는 trot 걸음걸이를 사용하고, 빠른 주행 속도에서는 앞다리가 지면에서 떨어진 그림 2. 2과 같은 bipedal의 걸음걸이를 사용한다[24].

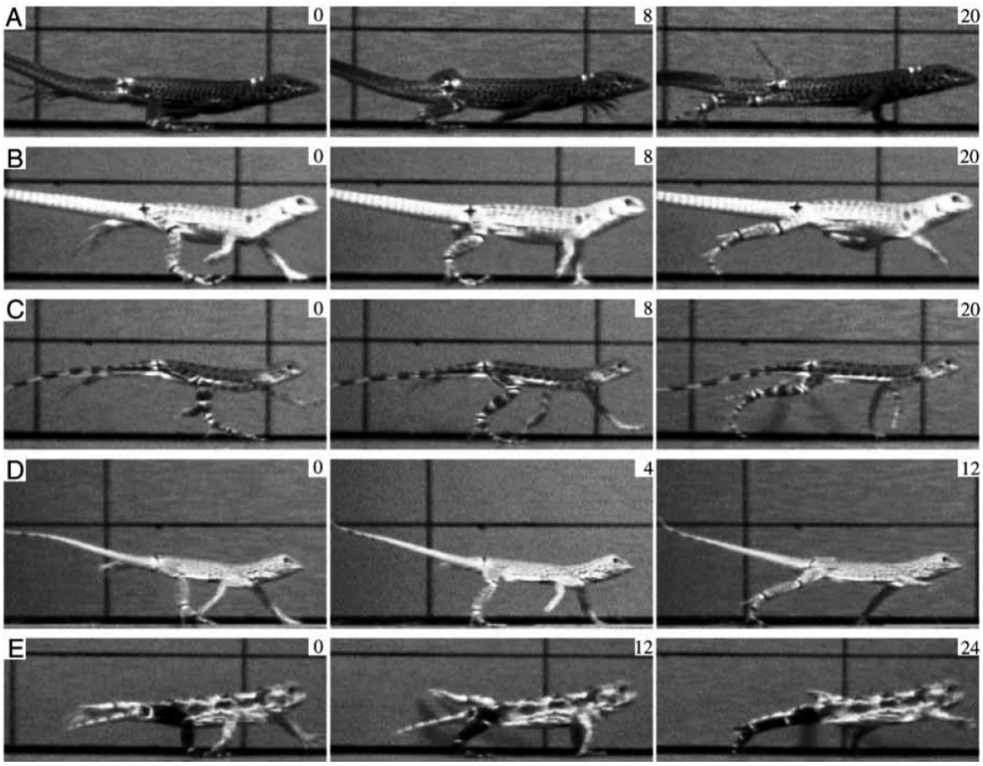


그림 2. 1 Trot의 걸음걸이로 주행 하는 도마뱀 동영상 스냅샷[19](위에서부터 차례대로 Cnemidophorus tigris, Dipsosaurus dorsalis, Callisaurus draconoides, Uma scoparia, Phrynosoma platyrhinos)

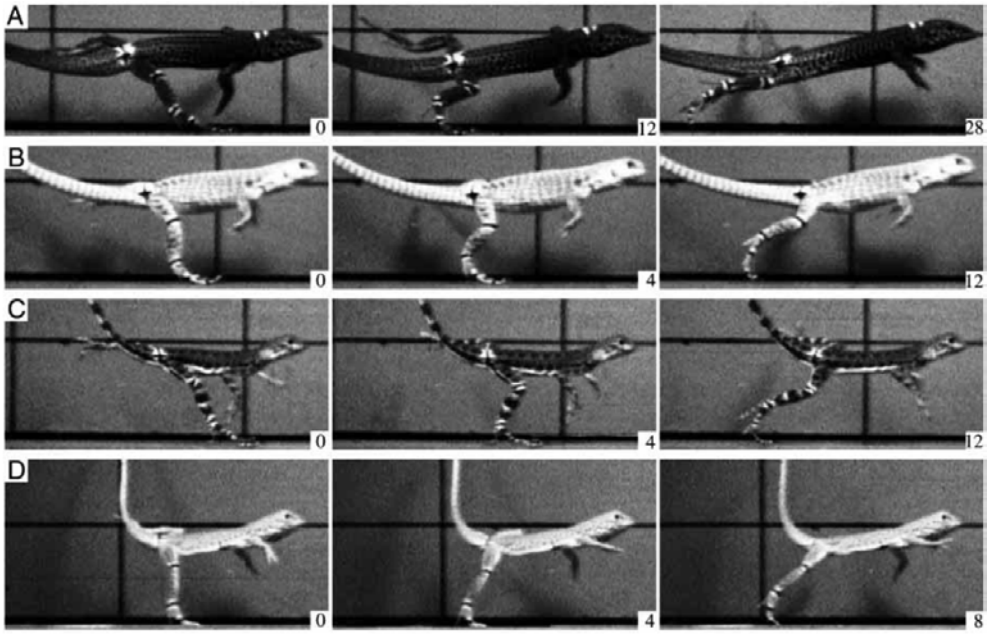


그림 2. 2 Bipedal의 걸음걸이로 주행 하는 도마뱀 동영상 스냅샷[19](위에서부터 차례대로 Cnemidophorus tigris, Dipsosaurus dorsalis, Callisaurus draconoides, Uma scoparia)

포유 동물은 달릴 때, 앞과 뒤의 쌍을 번갈아 가면서 지면을 차는 bound, gallop 걸음걸이를 사용하는데, 도마뱀은 양쪽 발을 번갈아 가면서 지면을 차는 trot 걸음걸이나 bipedal의 걸음걸이를 사용한다. 포유 동물이 달릴 때, 앞발과 뒷발이 번갈아 가면서 지면에서의 추력을 생성하고 몸체에서는 pitch 방향의 움직임이 발생한다. 하지만 도마뱀의 몸체는 주행 중에 pitch 방향이나 높이 방향으로는 움직임이 크게 발생하지 않는다. 이는 그림 2. 3을 통해 확인할 수 있다[20]. 반면 도마뱀은 양쪽 발이 번갈아 가면서 추력을 생성하고, 이로 인해 몸체는 yaw 방향으로의 주기적인 움직임이 발생한다.

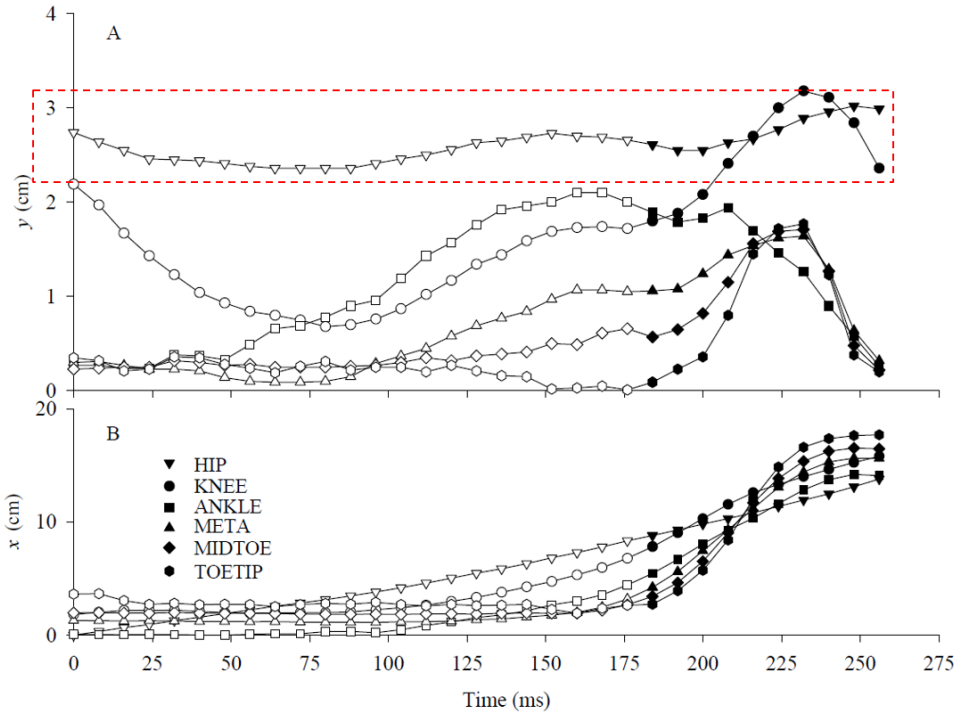


그림 2. 3 도마뱀 몸체(hip)의 높이 방향 움직임[20]

2.1.2. 도마뱀 허리, 꼬리의 주기적인 움직임 연구

도마뱀 허리, 꼬리의 주기적인 움직임의 연구는 먼저 도마뱀의 종류에 따라 그 움직임의 양상이 다른 것을 관찰을 통해 확인하였다. 그림 2. 4를 살펴보면 4 가지의 도마뱀 종류에 따라 발생하는 허리, 꼬리의 주기적인 움직임의 형상이 다른 것을 확인할 수 있다[21]. 또한 그림 2. 5을 살펴볼 때, 도마뱀의 종류에 따라 좌우 방향으로 움직이는 몸체의 각 지점 속도도 차이가 있었다[21].

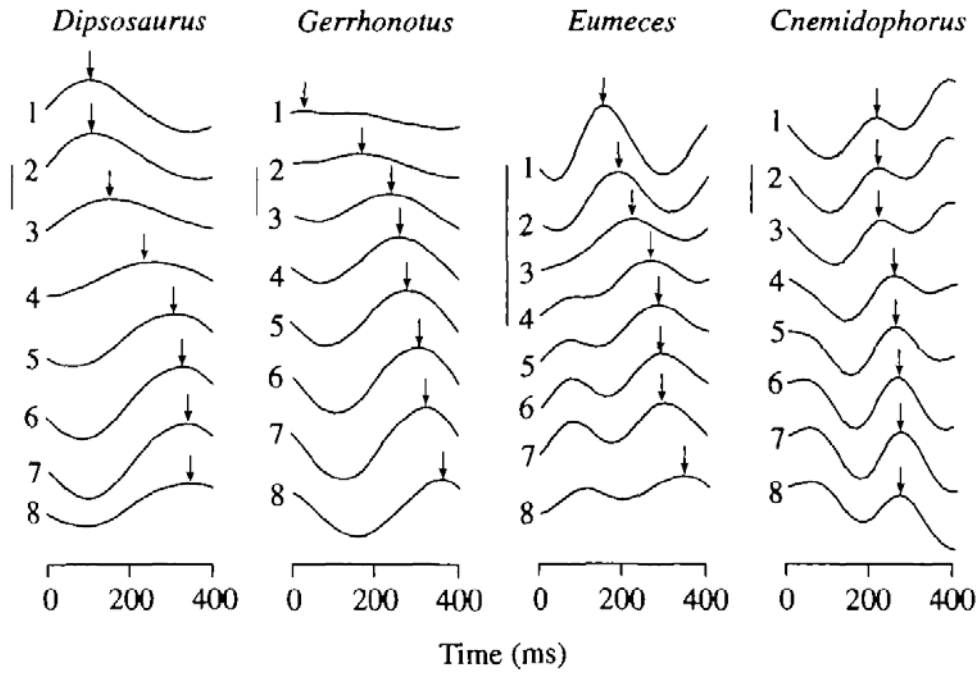


그림 2. 4 도마뱀의 종류에 따른 허리, 꼬리의 주기적인 움직임[21](왼쪽부터 차례대로 Dipsosaurus, Gerrhonotus, Eumeces, Cnemidophorus)

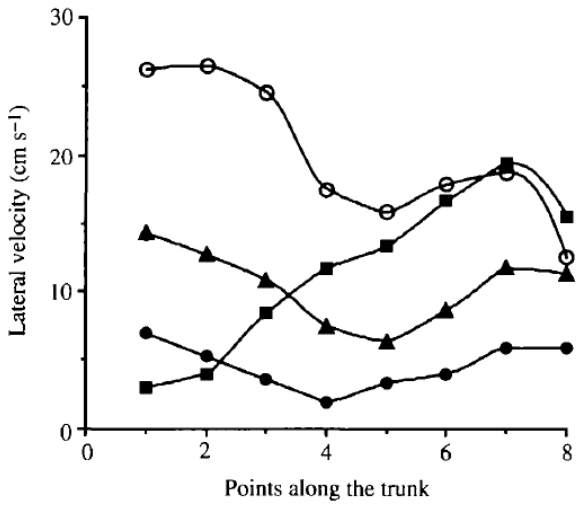


그림 2. 5 도마뱀의 종류에 따른 몸체의 각 부분의 좌우 방향의 속도[21](Dipsosaurus (채워진 삼각형으로 표시), Gerrhonotus (채워진 사각형으로 표시), Eumeces (채워진 원으로 표시), Cnemidophorus (빈 원으로 표시))

이러한 도마뱀 허리, 꼬리의 움직임이, 근육을 통해 능동적으로 생성되는 것인지 아니면 도마뱀의 걸음걸이에 의해 수동적으로 발생하는 것인지를 확인하고자 그림 2. 6과 같이 도마뱀의 허리 근육에 흐르는 전류를 측정하였으며 근육의 활성화를 확인할 수 있는 근전도 검사를 수행하였다[22].

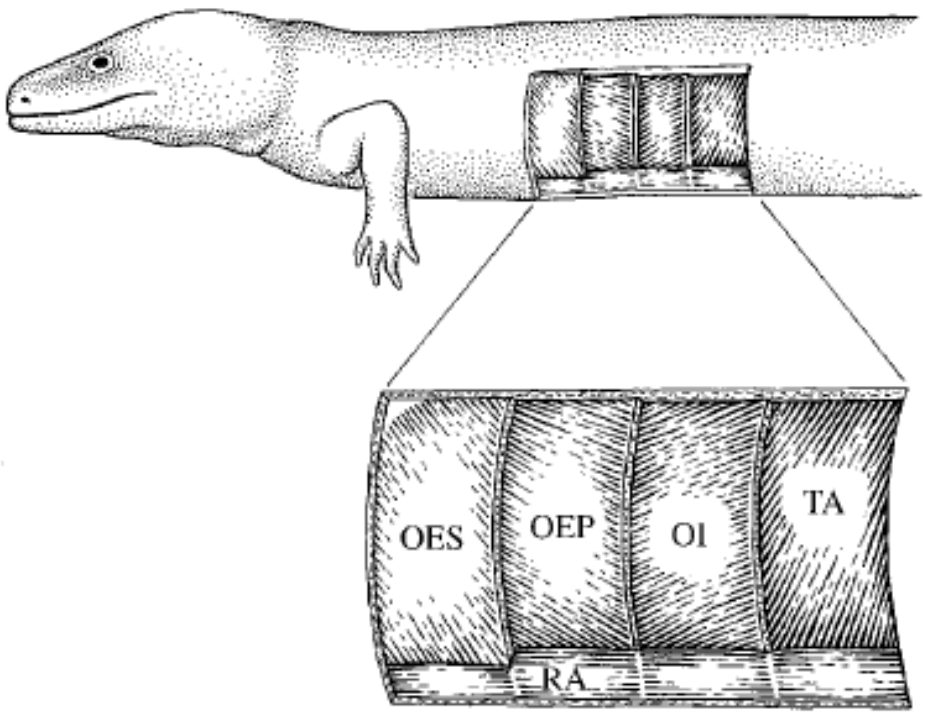


그림 2. 6 도마뱀의 허리 근육[22](도마뱀 종류: Ambystoma tigrinum, OES: obliquus externus superficialis, OEP: obliquus externus profundus, OI: obliquus internus, TA: transversus abdominis, RA: rectus abdominis)

그림 2. 7과 같이 도마뱀이 걷는 동안 근전도 검사를 수행한 결과, 걷는 동안 허리의 근육이 번갈아 가면서 활성화 되는 것을 확인할 수 있었다[22]. 이를 통해 도마뱀 몸체의 주기적인 허리 움직임은 근육을 통해 능동적으로 생성된다는 것을 확인할 수 있다[22].

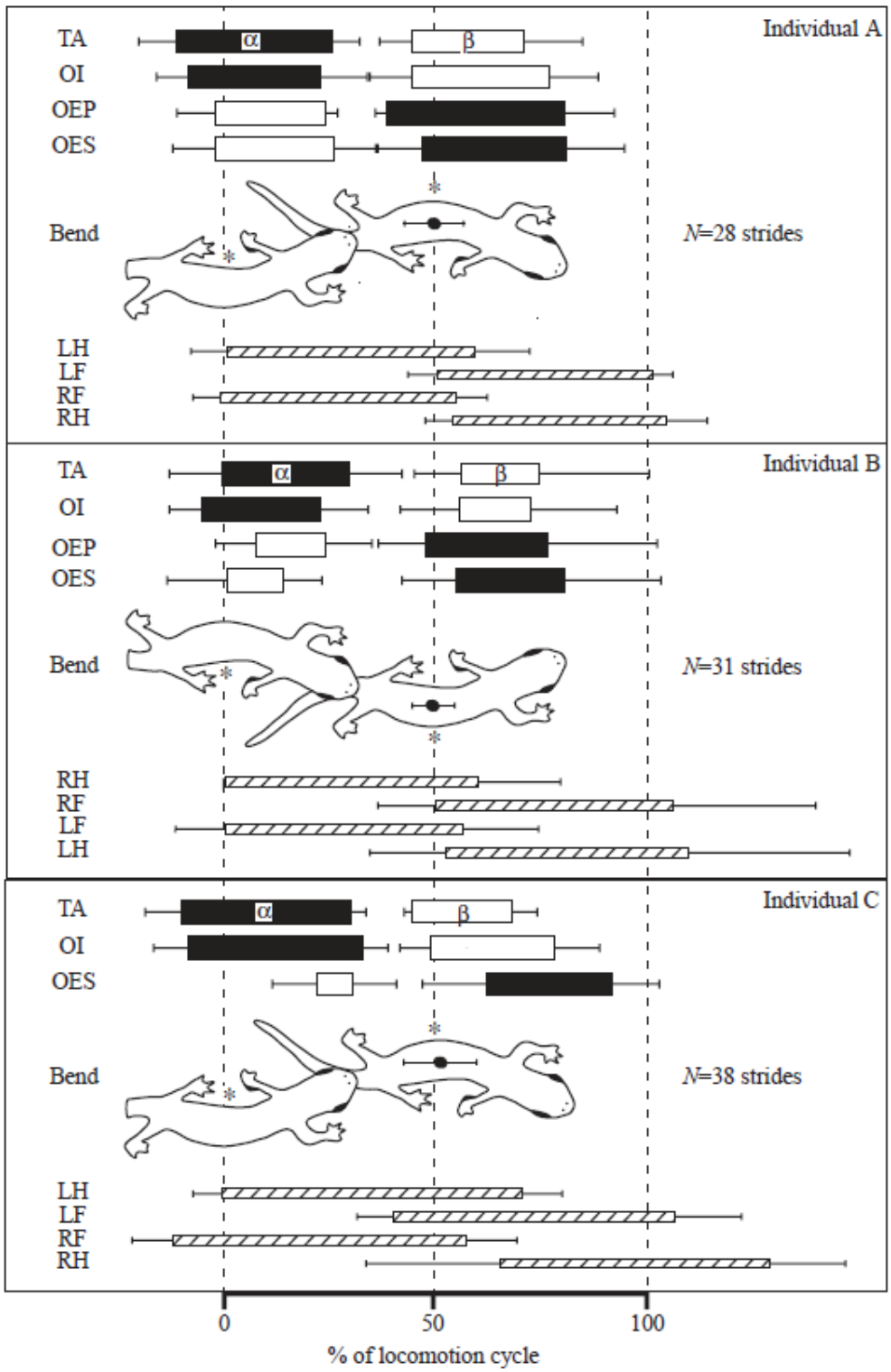


그림 2. 7 걷는 동안의 허리 근육의 활성화 정도[22](*α*(검은색 바): 항상 근육의 활성화 발생, *β*(흰색 바): 가끔 근육의 활성화 발생)

2.2. 간소화된 도마뱀의 동역학 모델을 통한 허리, 꼬리 움직임의 영향 분석

2.2.1. 2차원 수평면에 수립된 도마뱀의 동역학 모델

그림 2. 8와 같이 목표 도마뱀인 Callisaurus draconoides의 관찰을 통해 동역학 모델의 몸체를 body1, body2, tail의 세 부분으로 나누었다. 허리와 꼬리 조인트는 수평면에서 몸체가 가장 많이 회전하는 곳을 기준으로 선정하였다. 앞다리는 body1에 붙어 있고, 뒷다리는 body2에 붙어있는 것으로 설정하였다. 이 모델에서는 실제 도마뱀의 다리 질량이 앞다리의 경우 2%, 뒷다리의 경우 6%로 전체 질량에 비해 크지 않다는 연구[23]를 바탕으로 다리의 움직임에 의한 효과는 없다고 가정하였다. 다리의 질량은 각각의 body에 포함하고, 지면에서의 반력과 반력 모멘트는 뒷발이 지면에 접촉한 위치에서 발생하도록 설정하였다. 몸체의 길이와 폭, 무게에 대한 특성을 표 2. 1에 정리하였다.

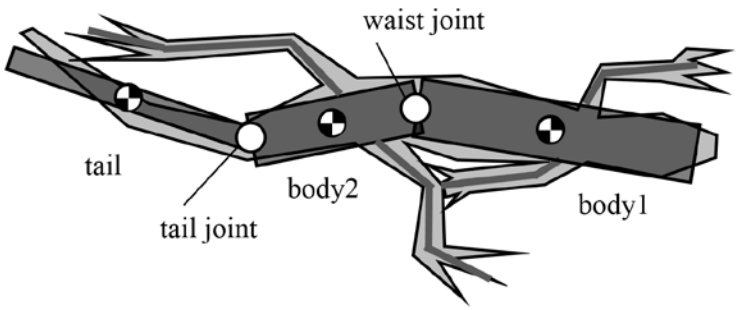


그림 2. 8 2차원 수평면에서의 도마뱀 동역학 모델

표 2. 1 Callisaurus draconoides를 기준으로 한 동역학 모델의 길이와 폭, 질량

	Callisaurus draconoides
total length (mm)	192
anterior body length (mm)	66

posterior body length (mm)	42
tail length (mm)	84
anterior body width (mm)	20
posterior body width (mm)	20
tail width (mm)	6
total mass (g)	10
anterior body mass (g) (with fore leg added)	4
posterior body mass (g) (with hind leg added)	4
tail mass (g)	2

2.2.2. 2차원 수평면에 수립된 도마뱀 모델의 동역학 시스템

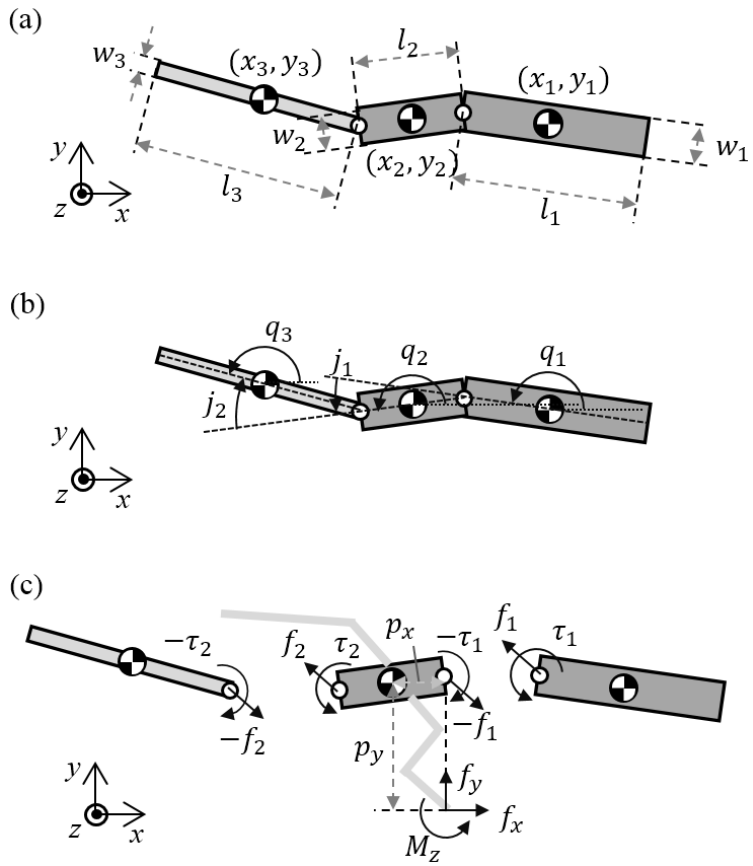


그림 2. 9 (a) 도마뱀 모델의 길이, 폭 및 위치 (b) 각 body의 절대값 기준 각도 q와 링크 사이의 조인트 각도 j, (c) 수평면 상에서 도마뱀 모델의 각 body에 작용하는 힘과 모멘트

먼저 동역학 시스템을 위한 식의 설명에 앞서 설명의 편의성을 위해 그림 2. 9에 표현된 위치와 각도, 질량, 관성질량에 대한 벡터를 정의하고자 한다. 이 벡터들은 2차원의 수평면 상에 존재하기 때문에 $R^{3\times1}$안에서 정의된다. 먼저 각 질량의 x축 방향 무게 중심 위치 벡터는 $x = [x_1, x_2, x_3]^T$, y축 방향 무게 중심 위치 벡터는 $y = [y_1, y_2, y_3]^T$으로 정의한다. 절대 축 기준으로의 각 링크의 각도 벡터는 $q = [q_1, q_2, q_3]^T$ 이며, 링크 사이의 조인트 벡터는 $j = [j_1, j_2]^T$ 이다. 질량 벡터는 $m = [m_1, m_2, m_3]^T$ 으로 정의되며 계산을 위한 행렬인 $M = diag(m)$도 정의한다. 관성 질량 벡터는 $i = [i_1, i_2, i_3]^T$ 이며, 마찬가지로 계산을 위한 행렬인 $I = diag(i)$ 도 정의한다. 계산을 편리하게 할 수 있도록 sine과 cosine 함수 벡터를 $sinq = [sinq_1, sinq_2, sinq_3]^T$, $Sinq = diag(sinq)$, $cosq = [cosq_1, cosq_2, cosq_3]^T$, $Cosq = diag(cosq)$로 정의한다.

그림 2. 9에 표현된 기호들의 용어는 표 2. 2에 정리하였다.

표 2. 2 그림 2. 9에 사용된 기호들의 용어 정리

Symbol	Description
$x_{i=1,2,3}$	*x* position of COM of links
$y_{i=1,2,3}$	*y* position of COM of links
$m_{i=1,2,3}$	mass of links
$l_{i=1,2,3}$	length of links
$w_{i=1,2,3}$	width of links
$q_{i=1,2,3}$	generalized angle of link *i*
$j_{i=1,2}$	angle of joint *i*
$\tau_{i=1,2}$	actuator torque of joint *i*
$f_{i=1,2}$	joint constraint force of joint *i*
M_z	reaction moment in z direction from ground
p_x	x component of the distance between the COM of the posterior body and foot
p_y	y component of the distance between the COM of the posterior body and foot

동역학 모델의 구속 조건은 링크 길이와 각도에 의한 것으로 식(2.1)과 식(2.2)와 같이 주어진다[24, 25].

$$x_{i+1} - x_i = \frac{1}{2}(l_{i+1}cosq_{i+1} + l_i cosq_i) \quad (2.1)$$

$$y_{i+1} - y_i = \frac{1}{2}(l_{i+1} sinq_{i+1} + l_i sinq_i) \quad (2.2)$$

식(2.1)과 식(2.2)를 벡터화하면 식(2.3)과 식(2.4)와 같다.

$$Cx = \frac{1}{2} Lcosq \quad (2.3)$$

$$Cy = \frac{1}{2} Lsinq \quad (2.4)$$

여기서 행렬 C와 L는 식(2.5)와 식(2.6)과 같이 정의된다.

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$L = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & 0 & 0 \\ 0 & l_2 & l_3 & 0 \\ 0 & 0 & l_3 & l_4 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

모델의 동역학 식은 식(2.7)과 식(2.8)과 같이 정의된다.

$$m_i \ddot{x}_i = f_{ext,x,i} + f_{x,i} - f_{x,i-1} \quad (2.7)$$

$$m_i \ddot{y}_i = f_{ext,y,i} + f_{y,i} - f_{y,i-1} \quad (2.8)$$

식(2.7)과 식(2.8)을 벡터화하면 식(2.9)와 식(2.10)이 정의된다.

$$M\ddot{x} = F_{ext,x} + C^T F_x \quad (2.9)$$

$$M\ddot{y} = F_{ext,y} + C^T F_y \quad (2.10)$$

여기서 지면에서의 반력은 오직 뒷발에서만 발생하는 것으로 가정하였기 때문에 반력 벡터는 $F_{ext,x} = [0, f_{ext,x}, 0]^T$, $F_{ext,y} = [0, f_{ext,y}, 0]^T$ 로 정의된다. 또한 내력 벡터는 $F_x = [f_{x1}, f_{x2}]^T$, $F_y = [f_{y1}, f_{y2}]^T$로 정의 된다.

구속 조건의 식인 식(2.3)과 식(2.4)를 두 번 미분하면 식(2.11)과 식(2.12)를 얻을 수 있다.

$$C\ddot{x} = -\frac{1}{2} L(Cosq\dot{q}^2 + Sinq\ddot{q}) \quad (2.11)$$

$$C\ddot{y} = \frac{1}{2} L(-Sinq\dot{q}^2 + Cosq\ddot{q}) \quad (2.12)$$

식(2.9), 식(2.10), 식(2.11), 식(2.12)를 가속도의 항을 없애도록 이항하면 내력 벡터가 식(2.13), 식(2.14)와 같이 유도된다.

$$F_x = (CM^{-1}C^T)^{-1}\left(-\frac{1}{2}L(Cosq\dot{q}^2 + Sinq\ddot{q}) - CM^{-1}F_{ext,x}\right) \quad (2.13)$$

$$F_y = (CM^{-1}C^T)^{-1}\left(\frac{1}{2}L(-Sinq\dot{q}^2 + Cosq\ddot{q}) - CM^{-1}F_{ext,y}\right) \quad (2.14)$$

그림 2. 10에서의 힘과 모멘트를 바탕으로 동역학 모델의 모멘트 식을 식(2.15)와 같이 전개할 수 있다.

$$I\ddot{q} = C^T\Gamma - \frac{1}{2}SinqLF_x + \frac{1}{2}CosqLF_y + D_yF_{ext,x} + D_xF_{ext,y} + M_{ext,z} \quad (2.15)$$

여기서 $\Gamma = [\tau_1, \tau_2]^T$는 조인트 토크 벡터이고, $D_x = [0, p_x, 0]^T$와 $D_y = [0, p_y, 0]^T$는 뒷발과 body2의 무게 중심 사이의 거리 벡터이다. $M_{ext,z} = [0, M_z, 0]^T$는 지면에서의 반력 모멘트 벡터이다.

2.2.3. 도마뱀이 직진 주행 시, 허리, 꼬리의 조인트 토크 필요성

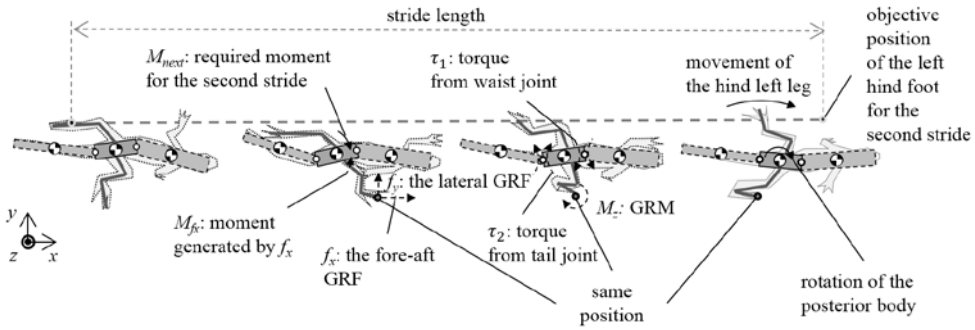


그림 2. 10 직진 주행하는 도마뱀의 시퀀스와 각 body에 작용하는 힘과 모멘트

그림 2. 10의 도마뱀의 직진 주행 시퀀스를 통해 허리, 꼬리의 조인트 토크 필요성에 대하여 설명하고자 한다. 먼저 지면에 접촉한 오른쪽 뒷발에서는 앞으로 나아가기 위한 추력인 GRF(Ground Reaction Force)가 발생한다. 이 GRF는 도마뱀을 앞으로 나아가게도

하지만 도마뱀 몸체의 body2를 반 시계 방향으로 회전하려는 모멘트도 발생시킨다. 도마뱀은 다음 step을 위해 왼쪽 발을 앞으로 뻗기 위하여, 시계 방향인 M_{swing} 이 필요하고, 이는 지면에서의 반력 모멘트인 GRM(Ground Reaction Moment)이나 허리, 꼬리의 조인트에서 발생하는 토크 τ_1, τ_2 에 의해 발생할 수 있다. 만약 지면에서의 반력 모멘트의 크기가 작다면 조인트 토크는 반드시 필요하고 필연적으로 허리, 꼬리는 움직임이 발생하게 된다.

2.2.4. 정상 상태로 직진 주행하는 도마뱀 모델에 대한 지면에서의 반력 설정

정상 상태로 주행하고 있는 도마뱀의 움직임과 지면에서의 반력, 반력 모멘트는 주기적으로 일정하다. 따라서 지면에서의 반력은 기존 연구를 통해 수학적으로 유도하는 것이 가능하다. 기존 연구를 살펴볼 때, GRF의 x축 방향 성분인 GRFx를 sine 함수로 설정하여 계산한 연구가 있다[26]. 본 연구에서도 같은 방식으로 GRFx를 설정하였다. 또한 도마뱀의 지면에서의 반력을 측정한 기존 연구를 살펴볼 때, GRF의 y축 방향 성분인 GRFy는 최대값이 GRFx와 유사하다는 것을 확인할 수 있다[27]. 정상 상태에서의 GRFy를 적분한 값인 운동량이 GRFx에 대비하여 그 크기를 알 수 있어[27, 28], 기존 연구를 참고하여 GRFy를 sine의 함수로 설정하였다. GRF의 크기는 주행 속도에 의해 결정되며, 본 연구에서의 주행속도에서는 그림 2. 11와 같이 GRF가 설정되었다.

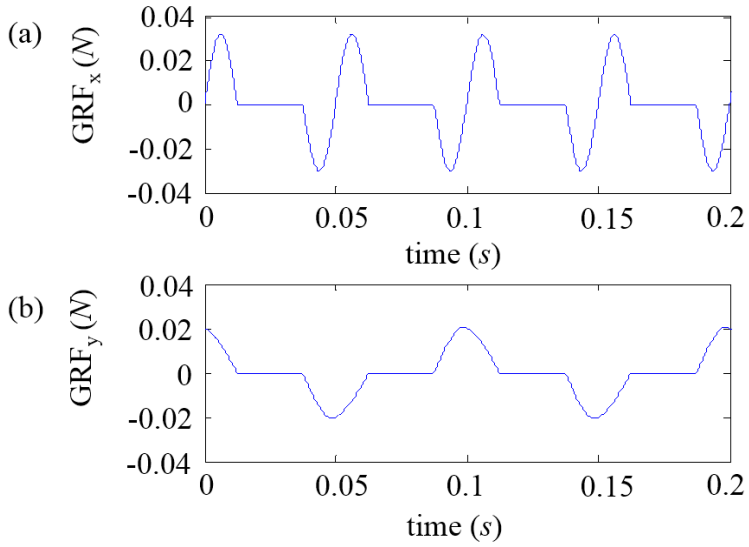


그림 2. 11 (a) GRFx, (b) GRFy의 그래프

2.2.5. 동역학 시뮬레이션

Body2의 yaw 방향으로의 주기적인 swing 운동을 생물학에서는 pelvic rotation이라고 한다. 실제 도마뱀의 pelvic rotation을 측정한 기존 연구는 도마뱀의 종류에 따라 pelvic rotation의 범위가 11.7도에서 25.8도까지 변하는 것을 확인하였다[19]. 또한 Reilly[29]의 연구를 통해 pelvic rotation이 주기적인 sine의 함수와 유사한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 도마뱀이 주행하기 위해서 수행되어야 하는 body2의 주기적인 yaw 방향의 swing 운동의 목표를 $15\sin\left(\frac{2\pi}{period}t\right)$의 함수로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션을 통해, 앞에서 언급한 body2의 주기적인 yaw 방향의 움직임이 지면에서의 반력 모멘트와 허리, 꼬리 조인트에서의 토크에 의해 결정된다는 가정을 확인해보고자 한다. 먼저 그림 2. 12의 (a)와 같이 목표된 body2의 움직임을 허리, 꼬리의 토크 없이, 지면에서의 반력 모멘트로만 제어하여 시뮬레이션을 수행한다. 이 시뮬레이션에서는 지면에서의 반력 모멘트만 제어 input으로 사용된다.

그림 2. 12의 (b)의 시뮬레이션은 허리, 꼬리의 움직임이 생성하여, 즉 허리, 꼬리의 조인트에 토크가 존재하도록 하여 시뮬레이션을 수행한 것이다. 허리, 꼬리의 움직임은 본 연구와 유사한 방식인 물고기를

연구하는 기존의 연구[30]를 참고하여 sine의 함수로 설정하였다. 허리, 꼬리의 조인트의 움직임을 sine의 함수로 움직이려면 조인트에서는 자연스럽게 토크가 생성되고 이 토크가 body2의 yaw 방향 움직임을 생성하는 지면에서의 반력 모멘트에 영향을 미치게 된다. 그림 2. 12의 (c)는 body 2의 yaw 방향 각도에 영향을 미치는 지면에서의 반력 모멘트인 M_z와 허리, 꼬리의 토크 τ_1, τ_2를 표시한 것이다.

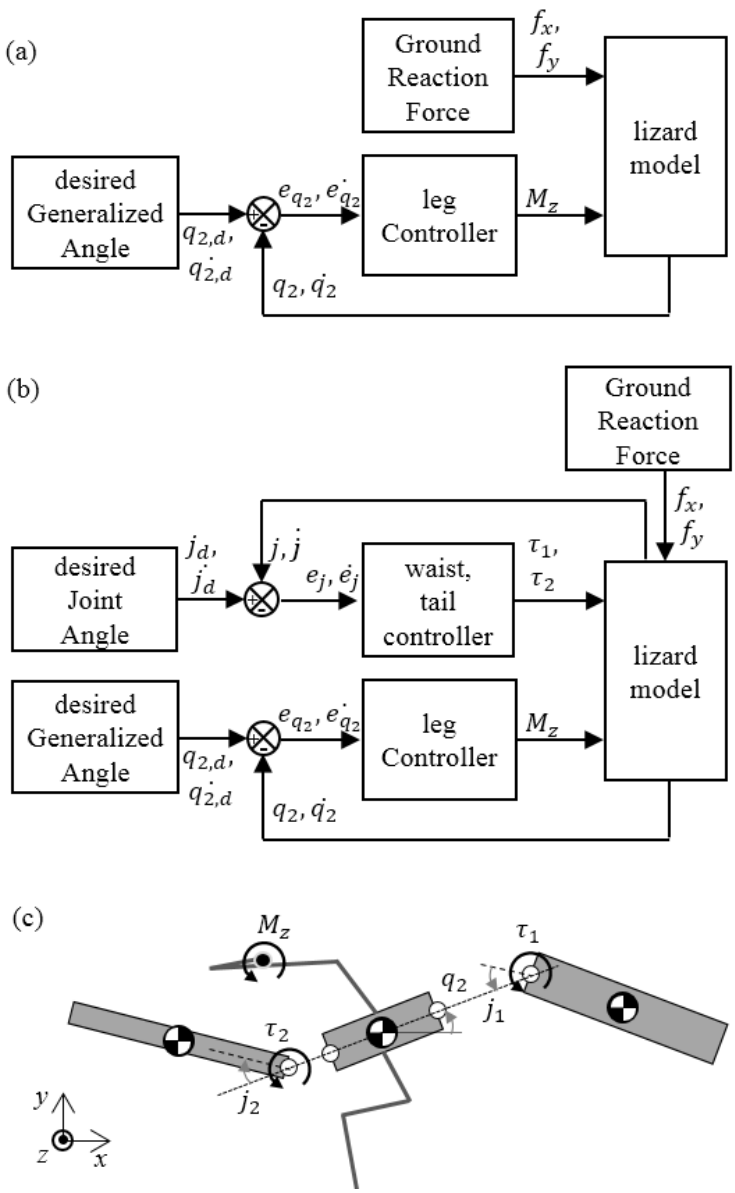


그림 2. 12 도마뱀 body2의 yaw 방향 각도 움직임에 대한 제어 알고리즘(PD 제어기)

2.2.6. 허리, 꼬리의 주기적인 움직임과 지면에서의 반력 모멘트와의 관계

동역학 시뮬레이션은 수치적인 적분의 방법으로 the fourth-order Runge-Kutta이 방법을 이용한 matlab 프로그램을 이용하여 수행하였다. 모델의 초기 주행 속도 $V_0 = 4\,m/s$ 로 설정하고, 허리,

꼬리의 조인트 각도는 $j_{01} = 0, j_{02} = 0$으로 설정하였다.

그림 2. 12의 (a), (b)의 제어 알고리즘을 각각 시뮬레이션을 수행하여, 허리, 꼬리의 조인트 토크를 통해 발생하는 움직임과 지면에서의 반력 모멘트와의 관계를 확인해보았다. 그 결과는 그림 2. 13에 나타내었다. 그림 2. 13의 (b)는 허리, 꼬리의 움직임이 없는 경우의 그림 2. 13 (a)의 위의 움직임을 만들기 위한 지면에서의 반력 모멘트의 그래프이고, 그림 2. 13 (c)는 허리, 꼬리의 움직임이 있는 경우의 그림 2. 13 (a)의 움직임을 만들기 위한 지면에서의 반력 모멘트의 그래프이다. 이 둘을 비교해볼 때, 허리, 꼬리의 움직임이 있는 경우에 지면에서의 반력 모멘트의 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이로써 지면에서의 반력 모멘트의 크기가 작을 때, 허리, 꼬리의 조인트 토크를 통해 직진을 위한 모멘트를 생성하고, 조인트 토크로 인해 움직임이 발생한다는 것을 확인할 수 있다.

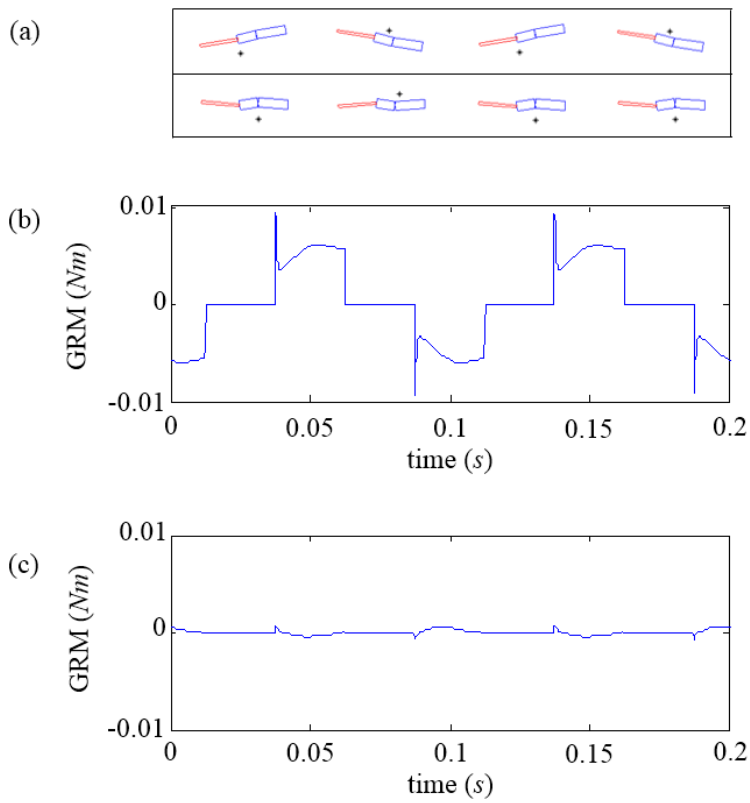


그림 2. 13 동역학 시뮬레이션 (a) 위: 허리, 꼬리의 움직임이 없는 경우의 시뮬레이션이 수행된 동역학 모델의 움직임, 아래: 허리, 꼬리의 움직임이 각각 $0.3\sin(\frac{2\pi}{period}t)$, $0.3\sin(\frac{2\pi}{period}t+\pi)$ 으로 수행되었을 경우의 시뮬레이션이 수행된 동역학 모델의 움직임, (b) (a)의 위의 움직임이 수행되었을 경우, 지면에서의 반력 모멘트 그래프, (c) (a)의 아래의 움직임이 수행되었을 경우, 지면에서의 반력 모멘트 그래프

실제 도마뱀의 해부학 연구를 살펴보면, 그림 2. 14와 같이 지면에서의 반력 모멘트를 생성하는데 사용되는 발목과 관련된 근육은 지면에서의 반력을 발생하는 허벅지 근육에 비해 그 크기와 부피가 작은 것을 알 수 있다[31].

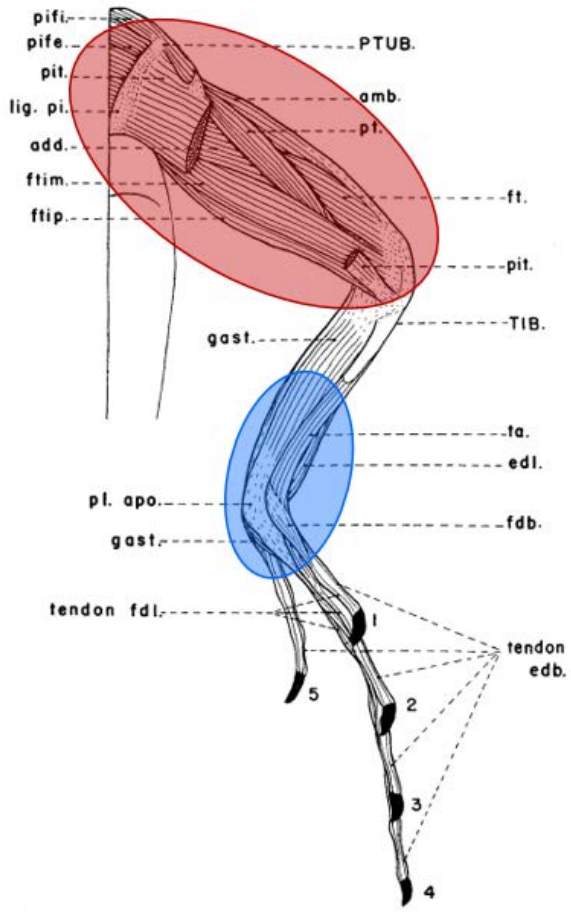


그림 2. 14 도마뱀 다리의 근육[31](빨간색 영역: 지면에서의 반력을 생성하는 허벅지 근육, 파란색 영역: 지면에서의 반력 모멘트를 생성하는 발목 근육)

게다가 Russell [32]의 연구에 의하면 도마뱀은 발목의 구조적인 이유로 지면에서의 반력 모멘트를 크게 생성하는데 한계가 있다. 따라서 도마뱀이 주행하는데 있어 상대적으로 지면에서의 반력 모멘트는 크지 않을 것으로 생각되며, 결과적으로 body2의 yaw 방향 각도의 운동은 도마뱀의 허리, 꼬리의 조인트의 토크(τ_1, τ_2)에 의해서 발생한다고 볼 수 있다.

2.2.7. 주기적인 S 형상 허리, 꼬리 움직임의 장점

앞의 절에서 지면에서의 반력 모멘트의 크기가 작을 때, 도마뱀의

허리, 꼬리의 조인트 토크를 통해 body2의 yaw 방향 각도 움직임을 생성하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 도마뱀의 몸체 움직임은 허리, 꼬리의 자유도를 생각해볼 때, S 형상이 아닌 다양한 형상의 움직임을 발생하는 것이 가능하다. 본 절에서는 도마뱀의 주기적인 S 형상의 허리, 꼬리의 움직임이 발생 원리에 대하여 분석하고자 한다.

지면에서의 반력 모멘트가 매우 작다면, body2의 yaw 방향으로 움직임을 생성하는 필요 모멘트(M_{swing})는 허리와 꼬리 조인트 토크에 의해서 발생한다. 그림 2. 15의 (a)와 같이 허리와 꼬리 조인트에서 생성하는 토크 τ_1, τ_2가 같은 방향으로 작용하면, 몸체는 C 형상과 같은 움직임을 갖게 된다. 그렇다면 필요한 모멘트(M_{swing})는 식(2.16)과 같이 유도되며, 식(2.17)에서 볼 수 있듯이 허리, 꼬리의 토크의 절대값들은 항상 필요한 모멘트보다 크게 발생되고 토크 손실이 발생한다.

$$\left|M_{swing}\right| = \left|\left|\tau_1\right| - \left|\tau_2\right|\right| \tag{2.16}$$

$$\left|\tau_1\right| + \left|\tau_2\right| \geq \left|M_{swing}\right| \tag{2.17}$$

반면에 그림 2. 15의 (b)와 같이 허리와 꼬리 조인트에서 생성하는 토크 τ_1, τ_2 가 반대 방향으로 작용하면, 몸체는 도마뱀과 유사한 S 형상의 움직임을 갖게 된다. 이때는 필요한 모멘트(M_{swing})가 식(2.18)과 같이 유도되며, 식(2.19)에서 확인할 수 있듯이 손실되는 토크가 없어지게 된다.

$$\left|M_{swing}\right| = \left|\left|\tau_1\right| - (-\left|\tau_2\right|)\right| = \left|\left|\tau_1\right| + \left|\tau_2\right|\right| \tag{2.18}$$

$$\left|\tau_1\right| + \left|\tau_2\right| = \left|M_{swing}\right| \tag{2.19}$$

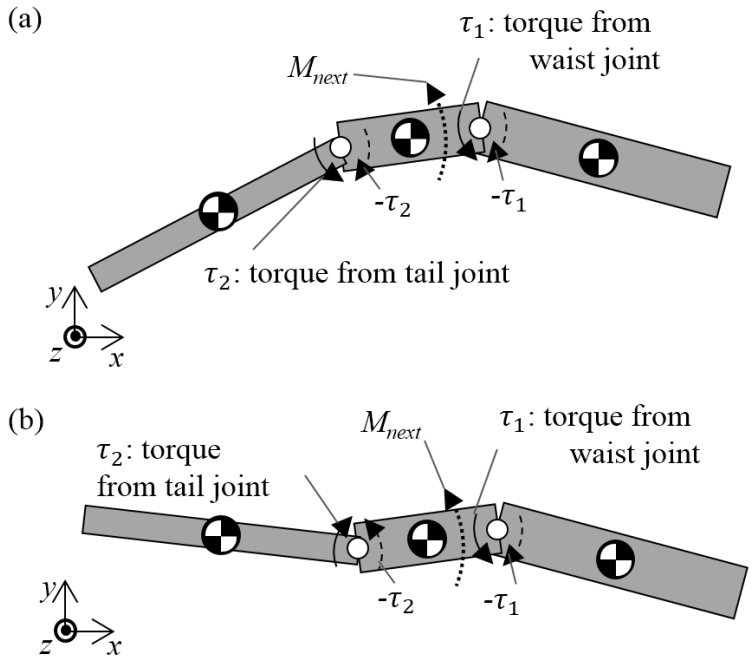


그림 2. 15 동역학 모델 몸체의 (a) C 형상, (b) S 형상 움직임

따라서 도마뱀의 주기적인 S 형상의 몸체 움직임 원리는 body2의 yaw 방향 움직임을 생성하면서 허리, 꼬리의 조인트 토크를 손실 없이 최소화하는 것으로 유추할 수 있다.

2.2.8 동역학 시뮬레이션 최적화

먼저 도마뱀의 허리, 꼬리 조인트의 움직임은 앞에서 언급한 것과 같이 sine의 함수로 정의하였고, 식 (2.20)에 유도하였다.

$$J_{d,i=1,2} = a_i \times \sin(\frac{2\pi}{period} t + b_i) \qquad (2.20)$$

sine 함수로 정의된 허리, 꼬리 조인트의 움직임은 진폭(a_i)과 위상 차(b_i)에 의하여 결정되어 최적화의 설계 변수를 허리, 꼬리 조인트의 진폭(a_i)과 위상 차(b_i)로 설정하였다.

최소화하고자 하는 최적화의 목적함수는 식(2.21)과 같이 설정하고, 식(2.22), 식(2.23), 식(2.24), 식(2.25)의 제한 조건을 설정하였다.

$$minimize \qquad f(\Gamma) = \int_0^{period} (\|\Gamma\|^2)\, dt \tag{2.21}$$

$$subject\ to \qquad 0 \le a_i \le \frac{\pi}{4} \tag{2.22}$$

$$0 \le b_i \le 2\pi \tag{2.23}$$

$$GRM \le Const1 \tag{2.24}$$

$$q_2 = Const2 \times \sin(\frac{2\pi}{period} t) \tag{2.25}$$

최소화하는 최적화의 목적함수는 $({\tau_1}^2 + {\tau_2}^2)$으로 표현할 수 있다. 이는 각 조인트 토크의 합과 차이인 $\frac{1}{2}((\tau_1 + \tau_2)^2 + (\tau_1 - \tau_2)^2)$로 정리할 수 있다. $\tau_1 + \tau_2$는 각 조인트의 합을 의미하고, $\tau_1 - \tau_2$는 각 조인트의 토크 크기 차이이며, 이 차이가 작을수록 토크 분배가 고르게 되는 것을 의미한다. 따라서 목적함수 $({\tau_1}^2 + {\tau_2}^2)$를 최소화하면 각 조인트의 토크의 합과 토크 분배가 고르게 되는 움직임이 추출되게 된다.

진폭(a_i)의 제한조건은 도마뱀의 허리가 가질 수 있는 최대 각도로 설정하고, 위상 차(b_i)는 모든 범위로 설정하였다. 지면에서의 반력 모멘트(GRM)는 생성될 수 있는 것 중에서 충분히 작은 값을 제한 조건으로 설정하였다. q_2는 생성되어야 하는 body2의 yaw 방향의 각도이다.

2.2.9 최적화 결과 도출된 도마뱀 모델의 움직임

다양한 길이와 무게 비에 대하여 위의 최적화를 수행한 결과 그림 2. 16과 같은 몸체 움직임이 도출되었다.

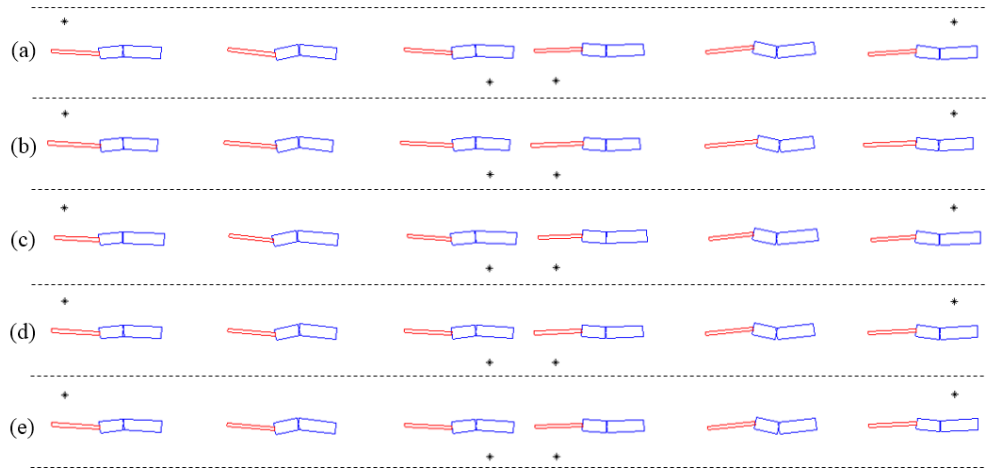


그림 2. 16 최적화를 통해 도출된 도마뱀 모델의 움직임 스냅샷
(*: 지면에 접촉한 발의 위치)
(a) l1 = 66 mm, l2 = 42 mm, l3 = 84 mm, m1 = 4.0 g, m2 = 4.0 g, m3 = 2.0 g,
(b) l1 = 60 mm, l2 = 40 mm, l3 = 92 mm, m1 = 4.0 g, m2 = 4.0 g, m3 = 2.0 g,
(c) l1 = 72 mm, l2 = 42 mm, l3 = 78 mm, m1 = 4.0 g, m2 = 4.0 g, m3 = 2.0 g,
(d) l1 = 66 mm, l2 = 42 mm, l3 = 84 mm, m1 = 4.2 g, m2 = 4.0 g, m3 =1.8 g,
(e) l1 = 66 mm, l2 = 42 mm, l3 = 84 mm, m1 = 3.8 g, m2 = 4.0 g, m3 = 2.2 g

최적화된 동역학 모델의 움직임에 대한 각 조인트 각도, 토크, 지면에서의 반력 모멘트의 그래프는 그림 2. 17에 도시하였다.

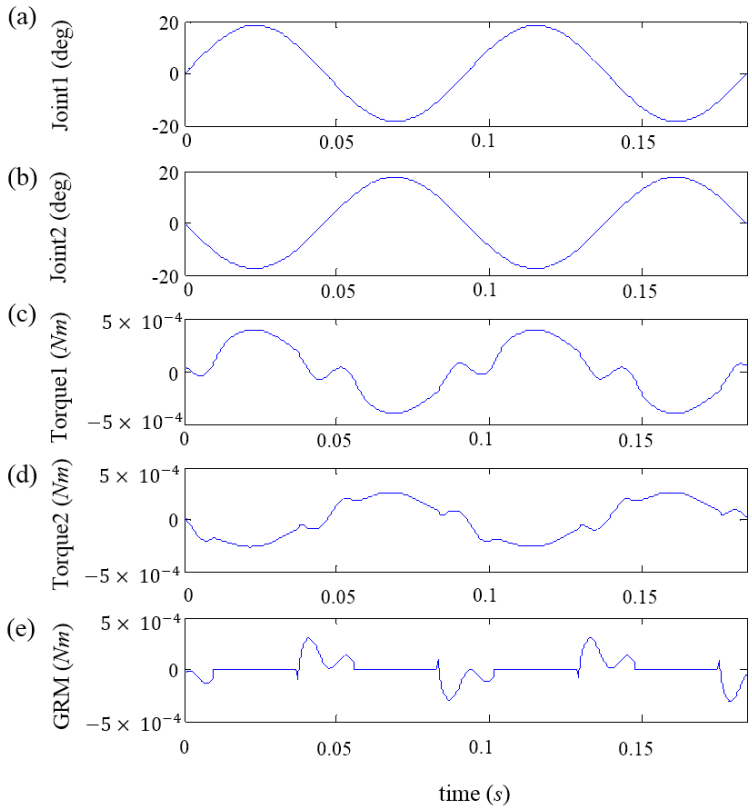


그림 2. 17 최적화된 도마뱀 모델 움직임의 (a) 허리 조인트 각도, (b) 꼬리 조인트 각도, (c) 허리 조인트 토크, (d) 꼬리 조인트 토크, (e) 지면에서의 반력 모멘트 그래프

다양한 길이와 질량 비를 가진 모델들을 $(\tau_1{}^2 + \tau_2{}^2)$의 목적함수로 최적화를 수행하였을 때, 예상한 것과 같이 실제 도마뱀의 주기적인 허리, 꼬리 움직임과 유사한 S 형상의 움직임이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 도마뱀의 S 형상의 몸체 움직임이 각 조인트 토크의 합과 차를 최소화 하면서, body2의 yaw 방향의 움직임을 생성하는 것을 동역학 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

간소화된 동역학 모델의 시뮬레이션을 통해 지면에서의 반력 모멘트의 크기가 작은 경우에서, 허리, 꼬리의 조인트 토크는 직진 주행을 가능하게 하는 모멘트를 생성하고, 허리, 꼬리 조인트의 합과 차를 최소화하였을 때, 도마뱀과 유사한 S자 움직임이 생성되는 것을 확인할 수 있었다.

2.3. 동역학 모델을 통한 도마뱀의 움직임 영향 분석

본 절에서는 도마뱀의 다리의 운동과 허리, 꼬리의 움직임이 모두 포함된 동역학 모델의 수립하고, 정기구학을 통해 모델의 움직임을 생성한다. 이후 역동역학을 통해서 각 관절에서 발생하는 토크를 추출한다. 최적화를 통해 목적함수를 최소화하는 움직임을 도출함으로써 도마뱀의 움직임 원리를 해석하고자 한다.

2.3.1 동역학 모델 수립

동역학 모델을 수립하는 목표 도마뱀은 그림 2. 18와 같이 이전 절에서와 마찬가지로 Callisaurus draconoides로 선정하였다[19]. 다리의 길이가 포함된 도마뱀의 크기 및 질량은 표 2. 3에 정리하였다.

그림 2. 18 동역학 모델의 목표 도마뱀: Callisaurus draconoides[19]

표 2. 3 목표 도마뱀 Callisaurus draconoides의 크기 및 도마뱀 질량[19]

Variable	*Ca. draconoides*
Snout vent length (cm)	7.6±0.45
Mass (g)	9.5±1.50
Tail length (cm)	10.1±1.13
Femur length (cm)	1.9±0.09
Tibia length (cm)	2.1±0.06
Tarsals and metatarsals	1.3±0.05

length (cm)	
Humerus length (cm)	1.6±0.07
Ulna length (cm)	1.2±0.06
Forefoot length (cm)	1.5±0.07
Pelvic width (cm)	0.9±0.05
Body width (cm)	1.6±0.11
Trunk width (cm)	4.4±0.22

목표 도마뱀을 기준으로 동역학 모델은 그림 2. 28과 같이 구성된다. 동역학 모델의 몸체는 body1, body2, body3(=tail)의 세 부분으로 구성하였다. 동역학 모델의 다리는 앞다리의 경우 humerus, ulna, forefoot의 세 부분으로 구성하였고, 뒷다리도 femur, tibia, hindfoot(=tarsals and metatarsals)의 세 부분으로 구성하여 그림 2. 19의 (a)와 같이 총 15개의 body로 동역학 모델을 구성하였다. 허리와 꼬리 조인트는 1 DOF인 회전 조인트로 1개씩 구성하였다. 다리는 어깨, 무릎, 발목으로 구성하였는데 어깨와 발목은 3 DOF의 스페리컬 조인트로 구성하고 무릎은 1 DOF의 회전 조인트로 구성하였다. 여기에 로봇의 위치와 각도를 설명하기 위한 가상의 조인트 3개를 추가하여 동역학 모델의 조인트는 그림 2. 19의 (b)와 같이 총 33 DOF의 조인트로 구성되었다.

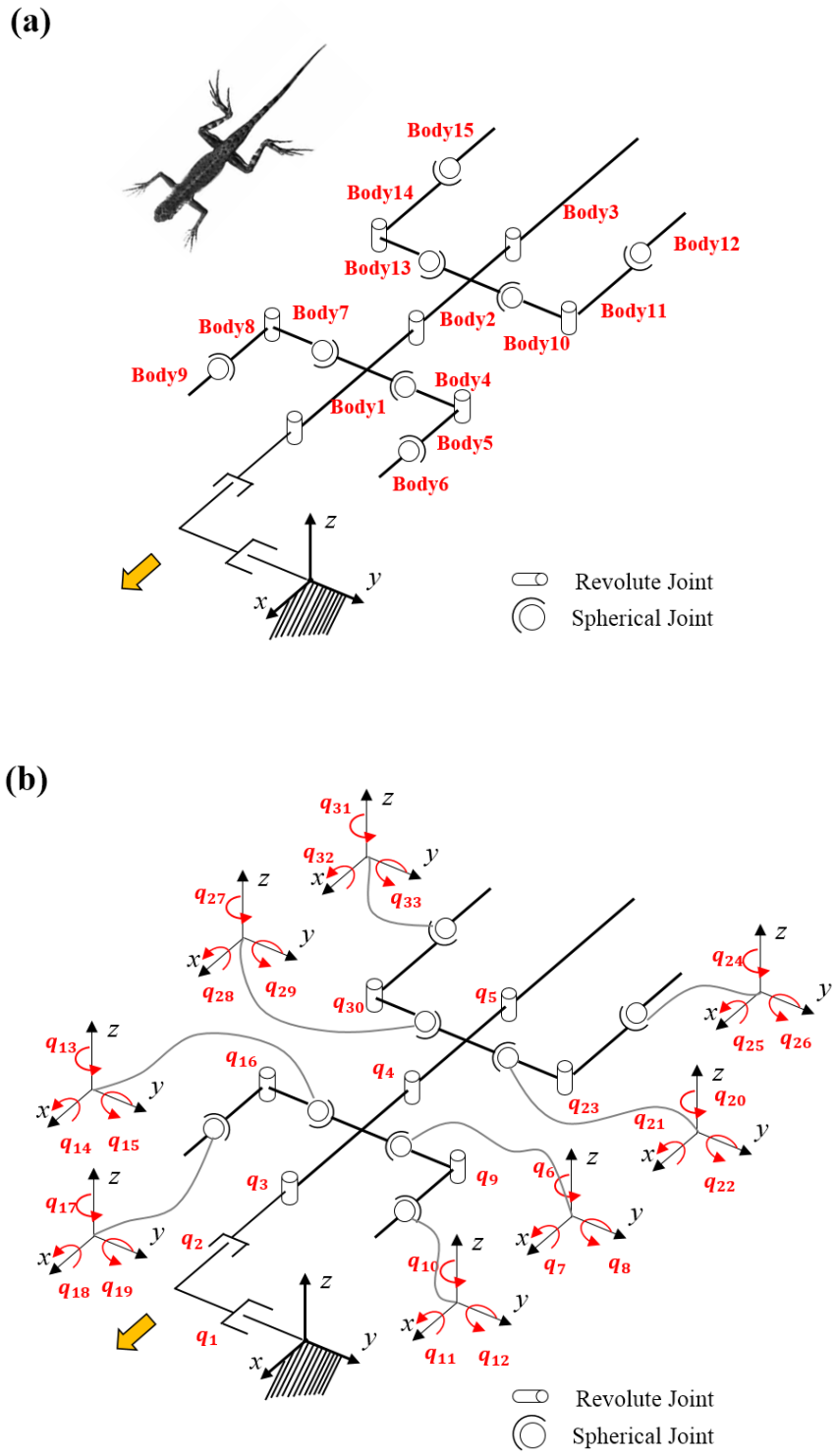


그림 2. 19 도마뱀 동역학 모델의 (a) body 구성 (b) joint 구성

도마뱀의 동역학 모델을 구성할 때 도마뱀 몸체의 모델은 기존 연구인 그림 2. 4를 참고하고, 도마뱀의 주행 영상의 관찰을 통해 높이 방향의 움직임과 roll, pitch의 움직임의 발생이 매우 적은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 도마뱀 몸체 모델의 자유도를 3차원의 공간에서 2차원의 수평면으로 제한하고 다리의 자유도는 3차원 공간으로 가지는 그림 2. 20과 같이 모델을 수립하였다.

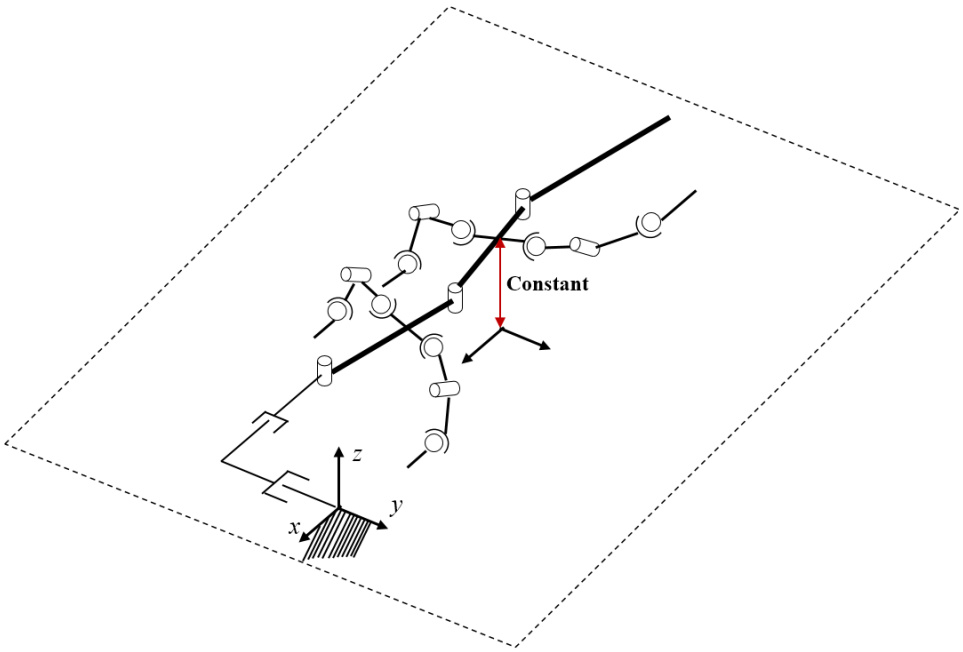


그림 2. 20 도마뱀 몸체 모델의 자유도가 2차원 수평면으로 제한된 동역학 모델

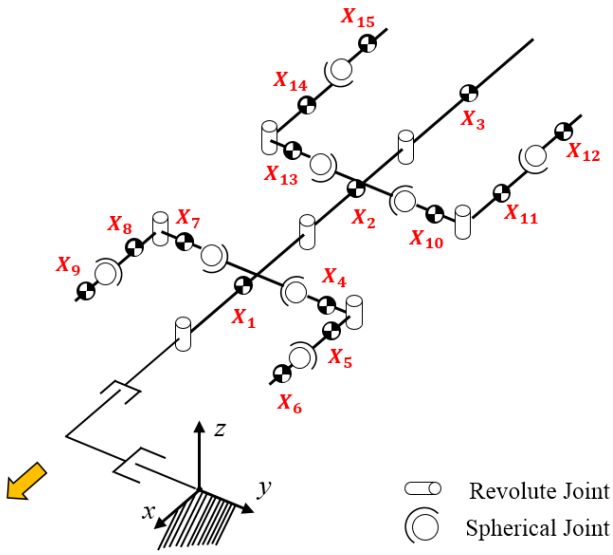
이로써 동역학 해석을 진행할 때, 동역학 모델의 몸체와 지면과의 거리는 항상 일정한 상수로 유지된다.

2.3.2 도마뱀 모델의 정기구학 해석

2.3.2.1 도마뱀 모델의 정기구학 식

동역학 모델의 각 body의 위치는 가상의 조인트를 통해 고정 좌표계에서 표현하는 것이 가능하다. 그림 2. 21의 (b)는 도마뱀 모델의 길이를 정의한 것이다.

(a)



(b)

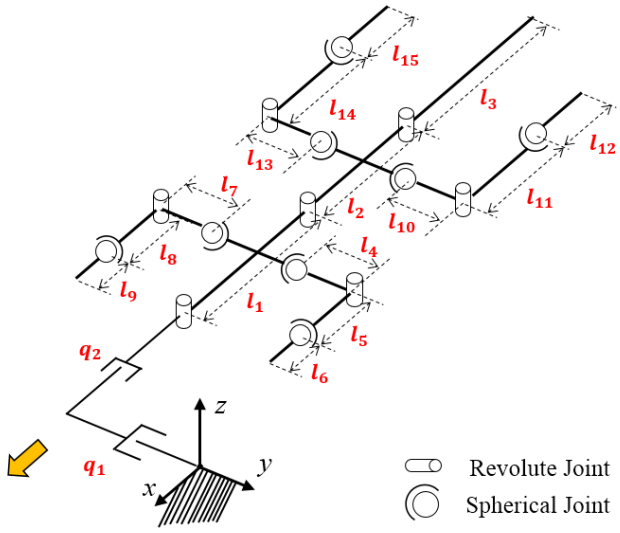


그림 2. 21 도마뱀 동역학 모델의 각 body의 (a)무게 중심의 위치, (b)길이

동역학 모델의 조인트 각도와 길이를 이용하여 그림 2. 21의 (a)에 표시된 각 body의 무게 중심의 위치를 Appendix A에서 전개하였다.

2.3.2.2 도마뱀 모델의 지면과의 접촉 시 관절 각도 변경

도마뱀 모델과 지면의 접촉 여부는 뒷발 끝의 궤적과 지면과의 거리에 의해 결정된다. 그림 2. 22 (a)와 같이 지면에 접촉하지 않은 뒷발은 항상 같은 자세를 유지한다. 뒷발 끝의 궤적이 지면의 위치보다 낮아지면 그림 2. 22 (b)와 같이 발목의 각도를 조정하여 뒷발 끝이 항상 지면의 위치와 같아지도록 한다. 그림 2. 22 (c)와 같이 뒷발 끝의 궤적이 지면보다 다시 높아지면 뒷발은 원래의 자세로 돌아간다. 따라서 뒷발 끝의 궤적이 지면보다 낮아지는 경우에는 발끝은 항상 지면의 높이와 일치하게 되며, 지면보다 높아지는 경우에는 항상 같은 자세를 유지하도록 동역학 모델을 설정하였다.

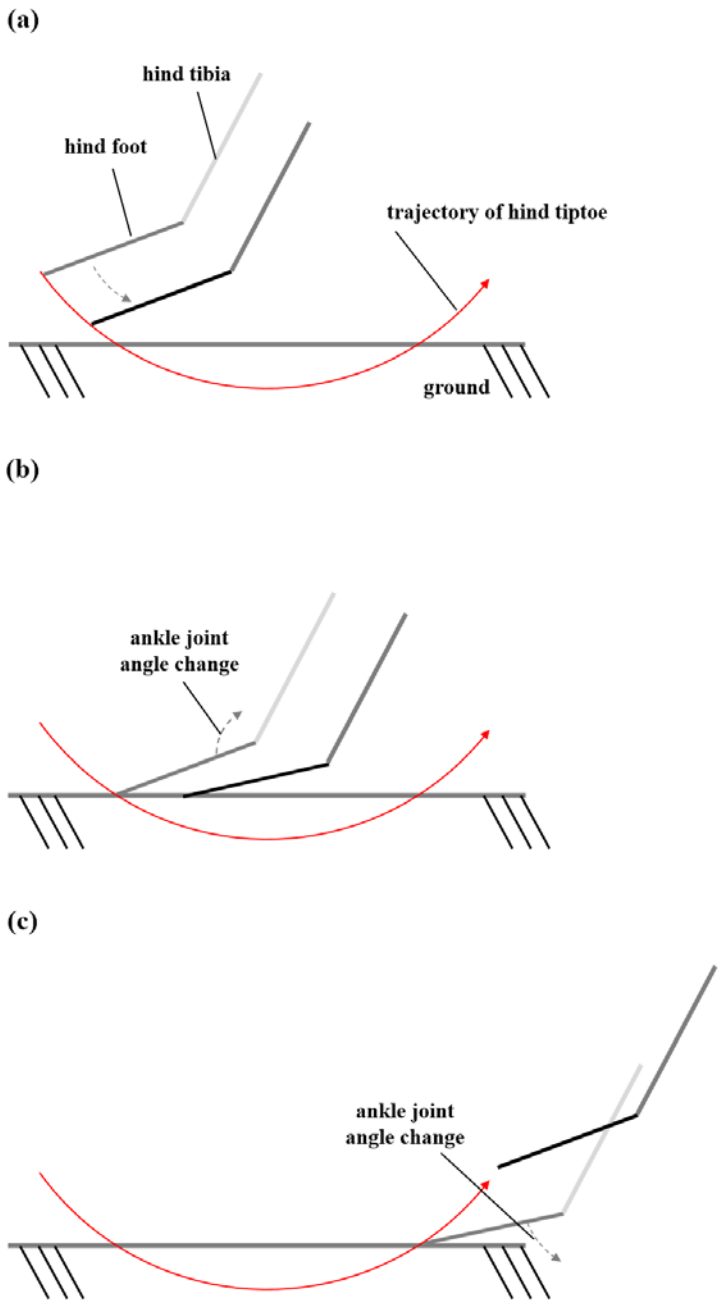


그림 2. 22 지면에 접촉할 때의 뒷발 발목의 각도 변경

뒷발이 지면에 접촉한 순간에 앞발도 지면에 접촉을 하도록

설정하였다. 그림 2. 23와 같이 뒷발이 지면에 접촉하는 순간에 앞발끝의 위치에 따라 지면과의 접촉 위치인 $P_{foot} = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{ground})$ 을 생성한다. 앞발의 무릎 위치인 P_{knee} 는 도마뱀 모델의 각 조인트에 의하여 그 위치가 정해진다. 앞 발목의 위치 P_{ankle} 은 P_{foot} 와 같은 xz 평면 위에 있고, P_{foot} 과 P_{knee}, 의 위치 그리고 왼쪽 다리 링크 길이인 l_5, l_6 (오른쪽: l_8, l_9)에 의해 정해지게 된다. 위치가 정해지면 발목의 각도 θ는 식(2.26)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \text{atan}(\frac{z_{ankle} - z_{foot}}{x_{ankle} - x_{foot}}) \tag{2.26}$$

어깨 조인트의 y축 방향 조인트 각도 $\delta(q_i)$, 무릎 조인트의 각도인 $\varphi(q_{i+1})$는 식(2.27)과 같은 관계를 가지고 있다.

$$P_{knee} + Rot(q_{i-2}, z) \times Rot(q_{i-1}, x) \times Rot(\delta, y) \times Rot(\varphi, z) \times \begin{bmatrix} -l_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = P_{ankle} \tag{2.27}$$

식(2.27)은 다시 식(2.28)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & Rot(\delta, y) \times Rot(\varphi, z) \times \begin{bmatrix} -l_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ = & \left(Rot(q_{i-2}, z) \times Rot(q_{i-1}, x)\right)^{-1} (P_{ankle} - P_{knee}) \end{aligned} \tag{2.28}$$

좌변을 항을 정리하고, 우변을 계산을 위해 식(2.29)와 같이 정의하고 식(2.30)과 같이 정리하였다.

$$D = \left(Rot(q_{i-2}, z) \times Rot(q_{i-1}, x)\right)^{-1} (P_{ankle} - P_{knee}) \in \boldsymbol{R}^{3\times 1} \tag{2.29}$$

$$-l_5 \begin{bmatrix} \cos(\delta)\cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \\ \sin(\delta)\cos(\varphi) \end{bmatrix} = D \tag{2.30}$$

따라서 φ는 식(2.31), δ는 식(2.32)에 의해 도출할 수 있다.

$$\varphi = \text{asin}(\frac{D_{21}}{-l_5}) \quad (2.31)$$

$$\delta = \text{asin}(\frac{D31}{-l_5\cos(\varphi)}) \quad (2.32)$$

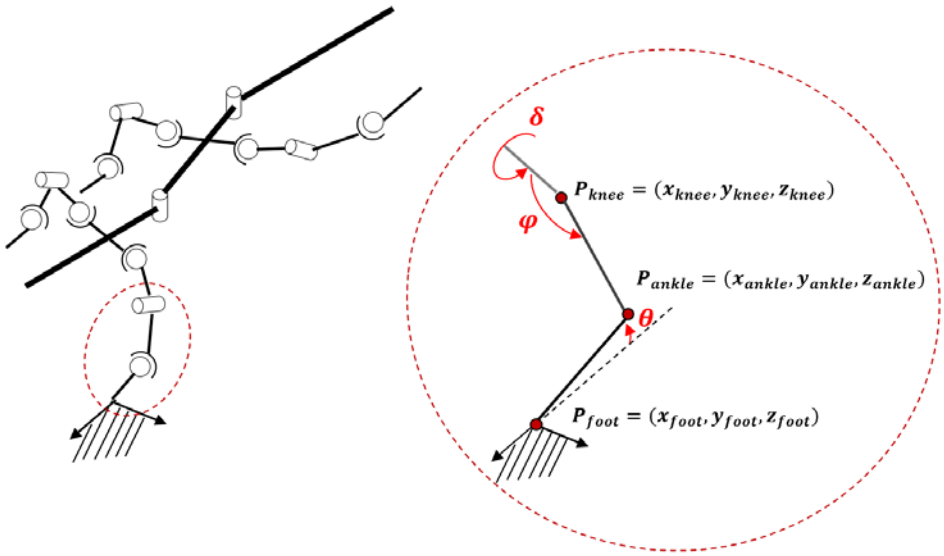


그림 2. 23 앞발이 지면에 접촉한 상황의 자세 결정

2.3.2.3 공중에서의 도마뱀 모델의 움직임

도마뱀의 동역학 모델이 지면에 접촉하지 않고 공중에 뜬 상황에서는 그림 2. 24와 같이 모델의 다음 단계의 무게 중심의 위치는 이전 단계의 무게 중심의 위치와 현재 무게 중심의 위치의 차이만큼, 현재 무게 중심의 위치에 더하여 결정한다. 이는 곧 외력이 작용하지 않는 공중에서는 중력을 제외한 모든 방향으로의 가속도는 0으로 계산한 것이다.

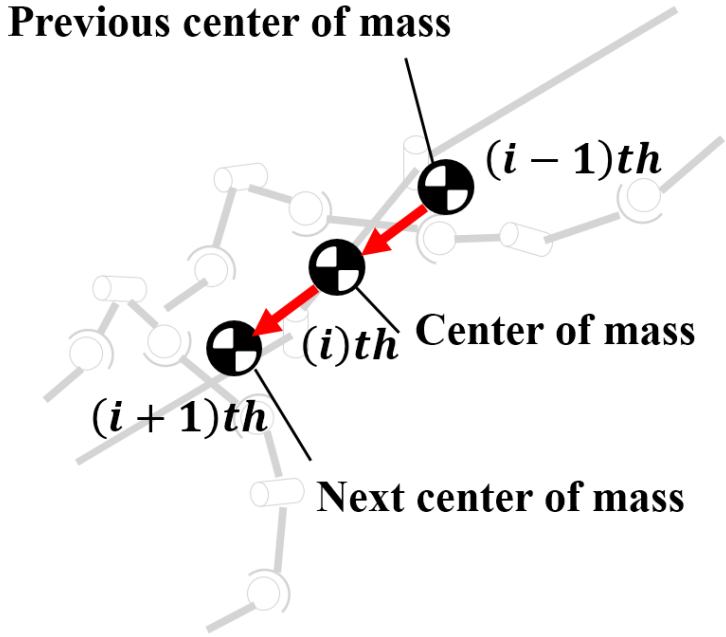


그림 2. 24 공중에 뜬 도마뱀 동역학 모델의 무게 중심의 위치 결정

2.3.2.4 도마뱀 모델의 조인트 운동

도마뱀 모델의 조인트 움직임은 기존 도마뱀의 관절 각도를 측정한 결과 그림 2. 25과 같이 일정한 주기를 가지는 swing 운동으로 확인되었다[29].

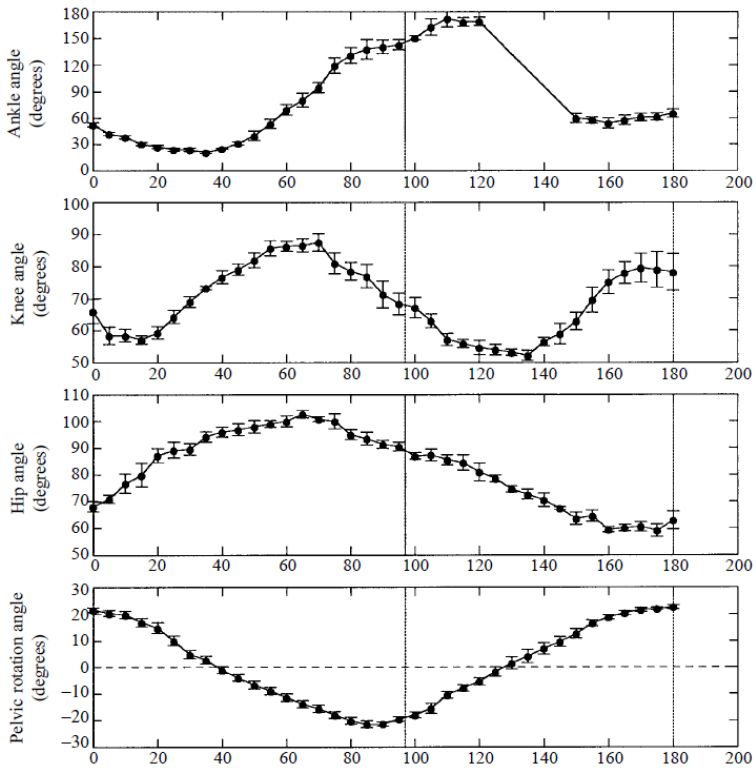


그림 2. 25 기존 연구의 도마뱀 관절의 각도[29]

따라서 본 연구에서는 기본 적인 도마뱀 모델의 조인트 움직임을 sine의 함수로 정의하고 관절의 움직임을 식(2.33)로 정의하였다.

$$q_i = a_i \sin\left(\frac{2\pi}{period} t + b_i\right) + c_i \qquad (2.33)$$

관절의 a_i, b_i, c_i 의 값에 따라 도마뱀 모델은 다양한 움직임이 생성될 수 있다. 임의의 값을 대입하여 그림 2. 26, 그림 2. 27, 그림 2.28의 주행 움직임을 생성해 보았다.

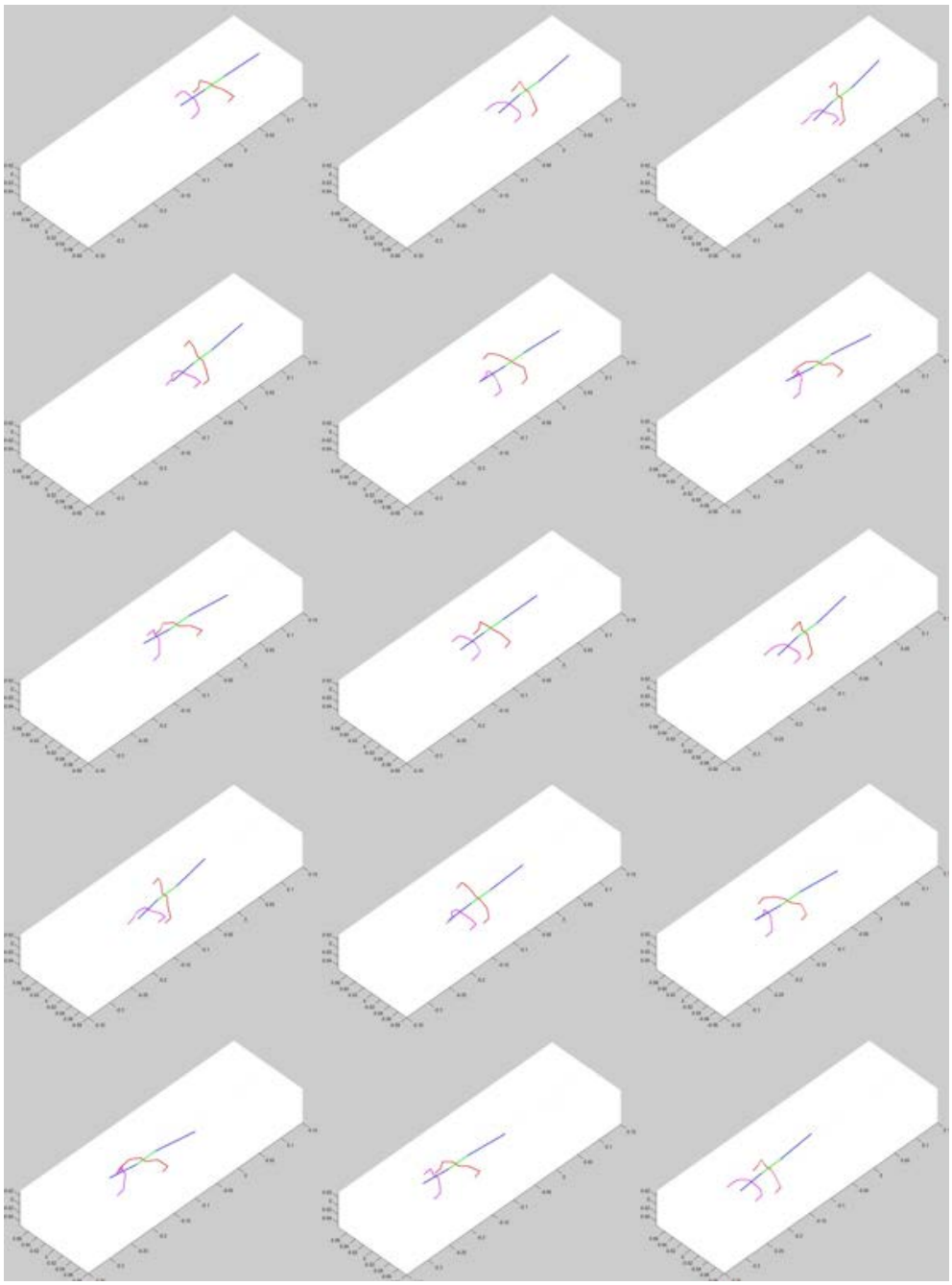


그림 2. 26 임의의 값을 대입한 도마뱀의 주행 영상 스냅샷

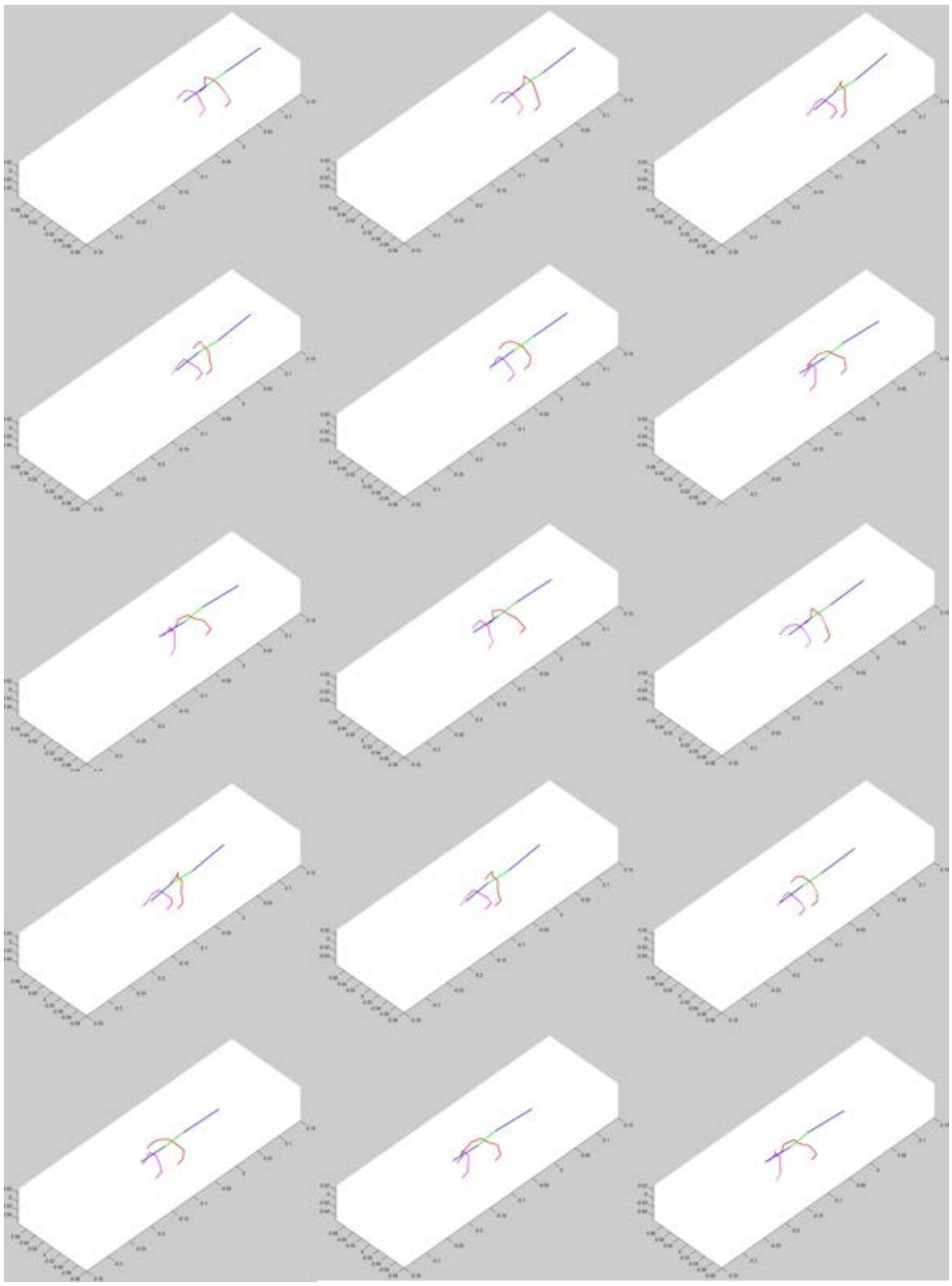


그림 2. 27 그림 2. 26의 도마뱀 모델의 움직임에서 다리의 움직임을 변경한 도마뱀의 주행 영상 스냅샷

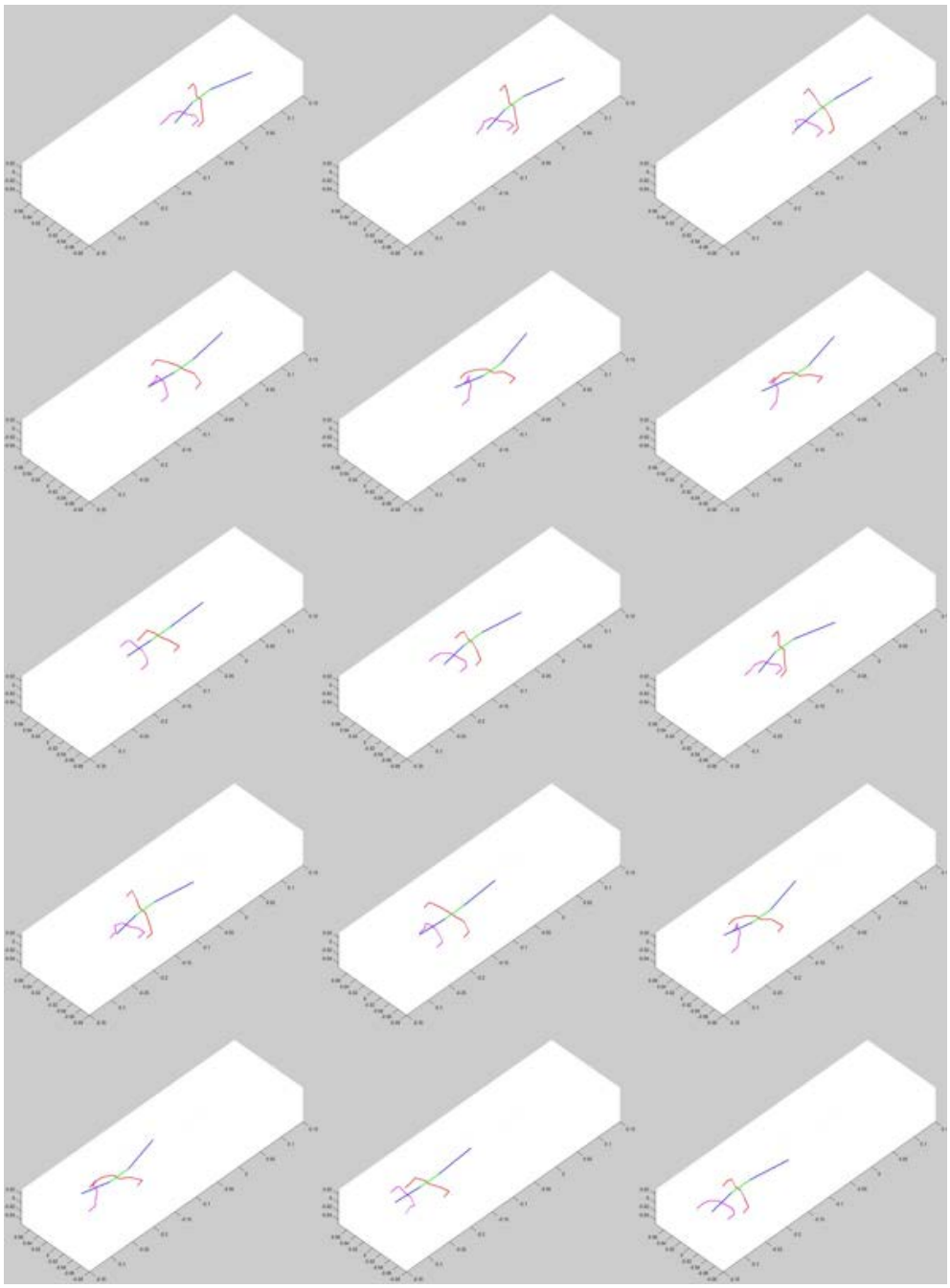


그림 2. 28 그림 2. 26의 도마뱀 모델의 움직임에서 허리와 꼬리의 움직임을 변경한 도마뱀의 주행 영상 스냅샷

2.3.3 동역학 모델의 역동역학 해석

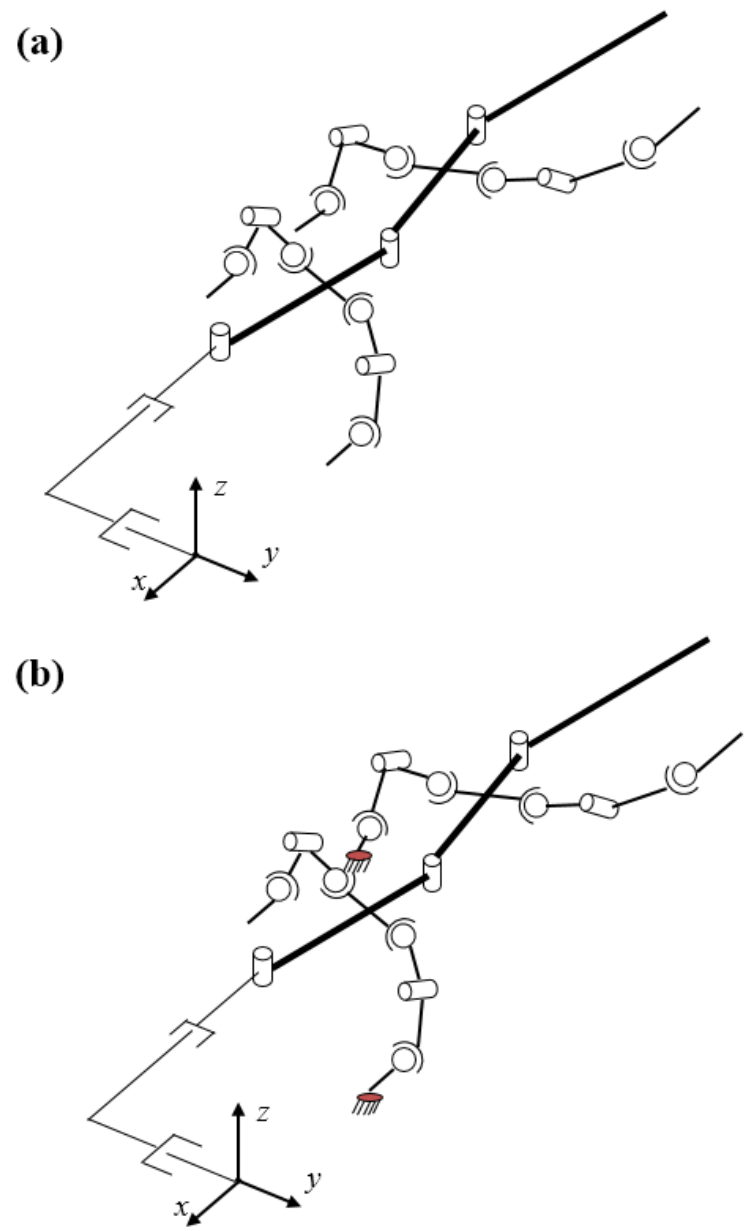


그림 2. 29 도마뱀 모델의 동역학 시스템 (a) 공중에 떠있는 상황, (b) 지면에 발이 접촉한 상황

2.3.3.1 도마뱀 모델의 동역학 시스템

도마뱀 동역학 모델의 조인트 수는 k = 30이다. 여기에 가상의 조인트를 추가하면 동역학 모델의 총 자유도는 n = k + 3 = 33이 된다.

따라서 그림 2. 29의 (a)과 같이 모델이 지면에 접촉하지 않은 동안의 동역학 시스템의 식은 (2.34)과 같다[34].

$$A(q)\ddot{q} + b(q,\dot{q}) + g(q) = \Gamma \tag{2.34}$$

여기서, q 는 $n \times 1$ 크기의 조인트의 벡터이다. 그리고 Γ 는 $n \times 1$크기의 조인트에 부합되는 토크 벡터이다. $A(q)$는 $n \times n$ 크기의 관성 질량 행렬이며, $b(q,\dot{q})$는 $n \times 1$ 크기의 코리올리 및 원심력 벡터이다. $g(q)$는 $n \times 1$ 크기의 중력의 벡터이다. 그림 2. 30의 (b)와 같이 동역학 모델의 발이 지면과 접촉한 경우에는 식 (2.35)과 같이 지면에서의 반력과 반력 모멘트 그리고 지면에 접촉한 지점의 자코비안이 식에 추가된다[4].

$$A(q)\ddot{q} + b(q,\dot{q}) + g(q) + {J_c}^T f_c = \Gamma \tag{2.35}$$

${J_c}^T$ 는 지면에 접촉한 발의 위치와 각도에 대한 자코비안의 전치행렬이다. 그리고 f_c는 지면에서의 반력과 반력 모멘트 벡터이다. J_c는 식 (2.36)과 같이 정의된다.

$$\dot{x_c} = J_c\dot{q} \tag{2.36}$$

식 (2.35)를 풀기 위해서는 필연적으로 지면에서의 반력과 반력 모멘트 벡터인 f_c를 알아야 한다. 따라서 f_c를 구하기 위하여 동역학 식을 식(2.35)과 같이 조인트 관점에서 식 (2.37)와 같은 접촉한 지점의 수식으로 자코비안 행렬인 J_c을 이용하여 변환한다.

$$\Lambda_c\ddot{x_c} + \mu_c + p_c + f_c = \bar{J_c}^T\Gamma \tag{2.37}$$

여기서

$$\Lambda_c = (J_cA^{-1}{J_c}^T)^{-1} \tag{2.38}$$
$$\mu_c = \Lambda_c\{J_cA^{-1}b(q,\dot{q}) - \dot{J_c}\dot{q}\} \tag{2.39}$$
$$p_c = \Lambda_cJ_cA^{-1}g(q) \tag{2.40}$$
$$\bar{J_c}^T = \Lambda_cJ_cA^{-1} \tag{2.41}$$

Λ_c는 접촉한 지점이 기준인 관성 질량 행렬이다. 그리고 $\overline{J_c}$는 J_c의 dynamically 일치하는 역행렬이다. μ_c 는 접촉한 지점으로 반영된 코리올리 및 원심력 벡터이다. p_c 는 접촉한 지점으로 반영된 중력 벡터이다.

지면에서의 발은 정기구학 해석을 통해 고정이 되는 움직임을 생성하였으므로 $\dot{x_c} = 0,\ \ddot{x_c} = 0$이 된다. 따라서 지면에서의 반력과 반력 모멘트 벡터 f_c는 식(2.42)과 같이 유도할 수 있다.

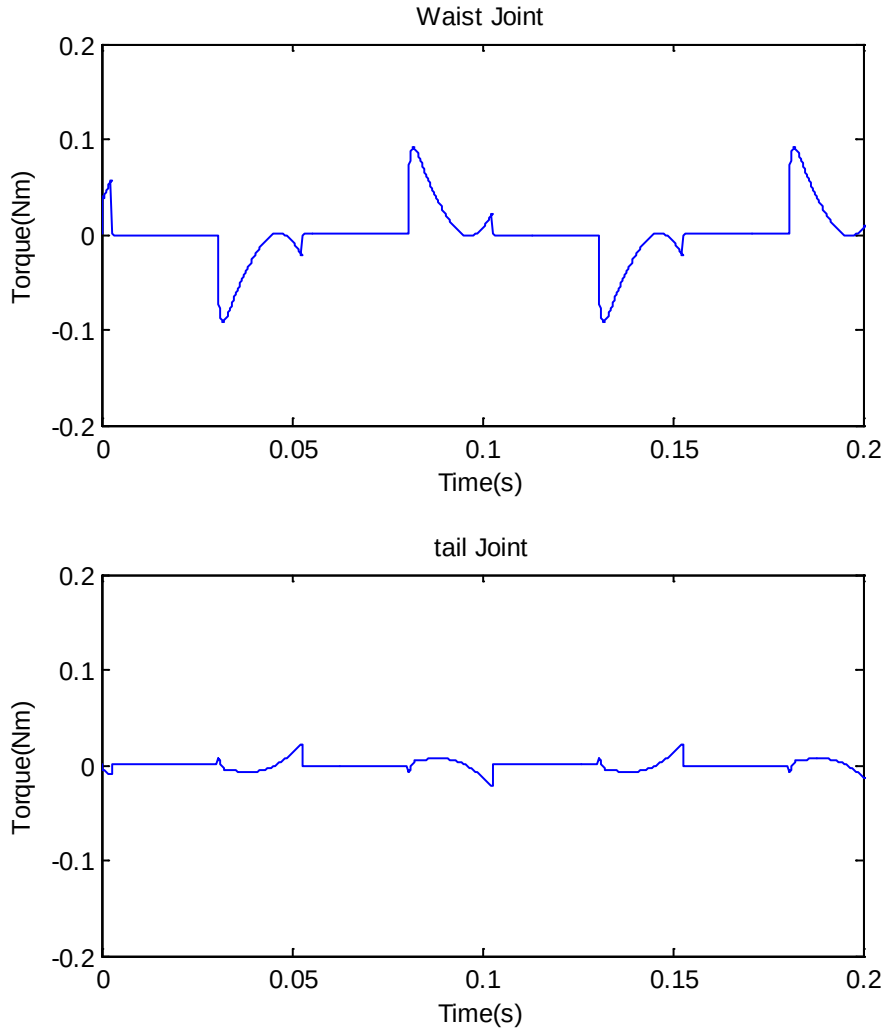
$$f_c = \overline{J_c}^T \Gamma - \mu_c - p_c \tag{2.42}$$

이를 원래의 식인 식(2.35)에 대입하면 지면에 접촉한 상황에서의 동역학 식을 식(2.43)와 같이 구할 수 있다.

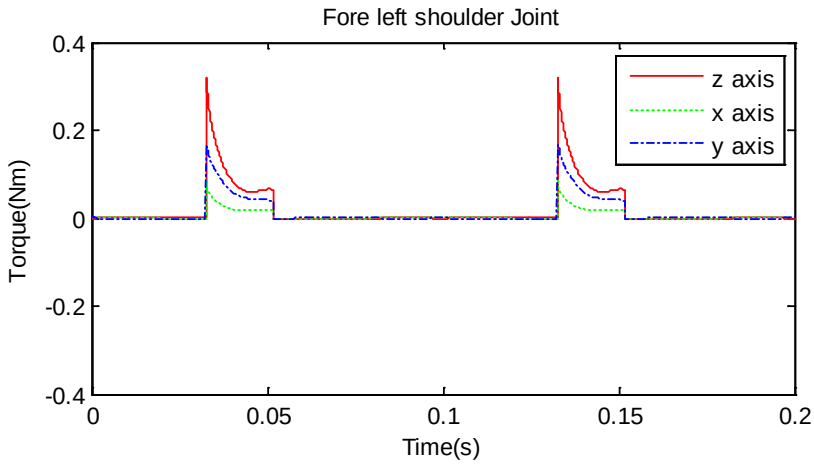
$$A(q)\ddot{q} + b(q,\dot{q}) + J_c{}^T(\overline{J_c}^T \Gamma - \mu_c - p_c) = \Gamma \tag{2.43}$$

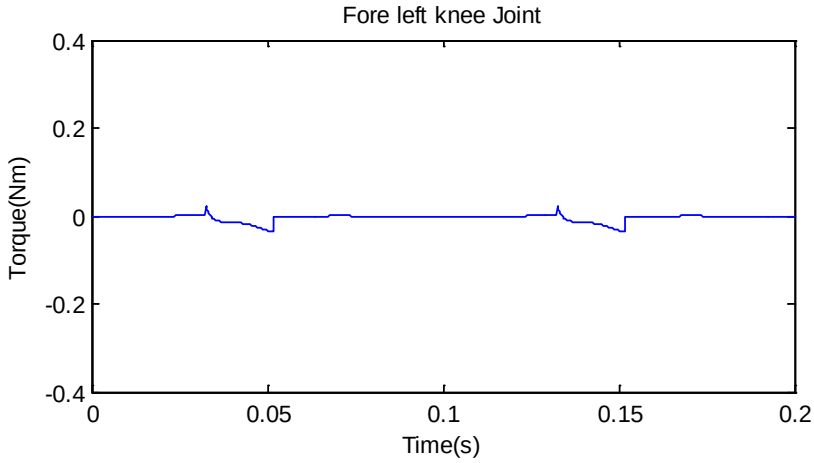
2.3.3.2 역동역학을 통한 조인트 토크 추출

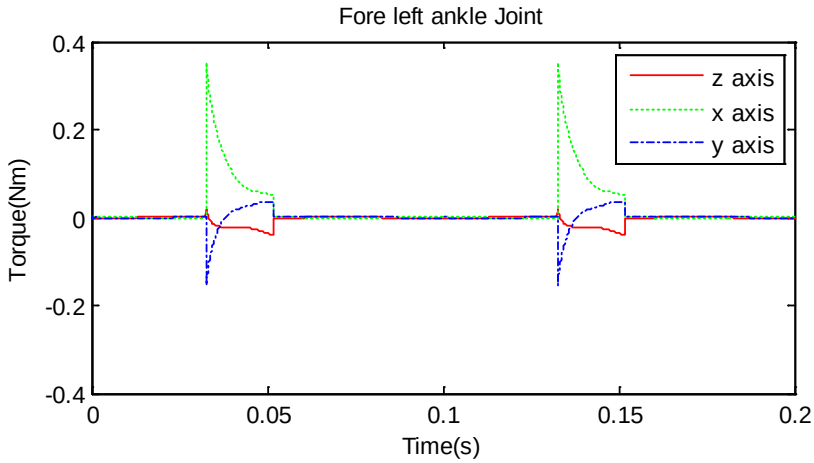
앞에서 정기구학을 통해 생성된 도마뱀 모델의 주행에 대하여 앞 절에서 유도한 동역학 식을 통해 각 조인트에서의 토크 값을 구하고자 한다. 정기구학을 통해서 생성된 도마뱀 모델의 움직임은 아주 작은 단위의 시간에 대하여 미분을 하면 $\dot{q}, \ddot{q}$에 대한 정보를 알 수 있다. 또한 각 body에 해당하는 링크의 질량은 기존 연구[23]를 통해 확인할 수 있다. 그림 2. 26의 주행에 대하여 발이 지면에 접촉하는 상황에 맞추어 식(2.34)과 식(2.43)에 조인트의 $q, \dot{q}, \ddot{q}$ 와 body의 질량을 대입하면 그림 2. 30과 같은 조인트의 토크를 추출할 수 있다.



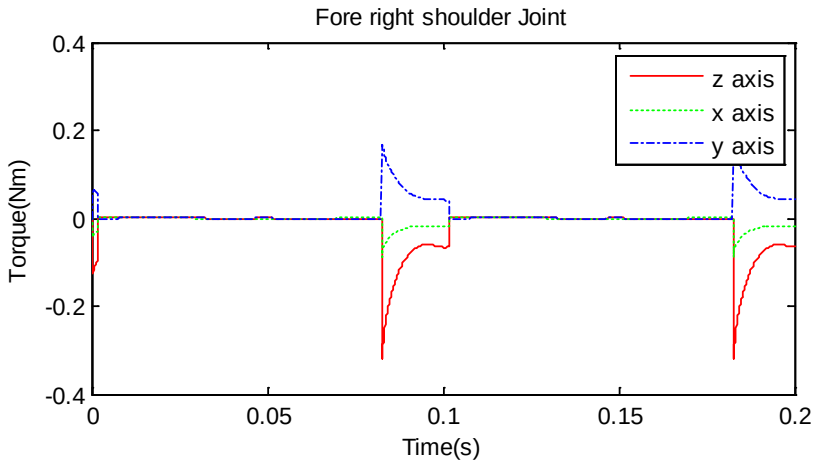
(a) 허리, 꼬리 조인트에서 발생하는 토크의 그래프

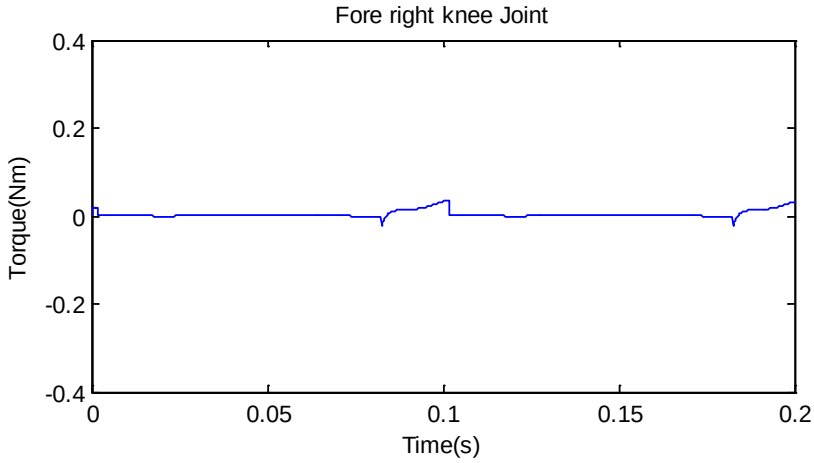


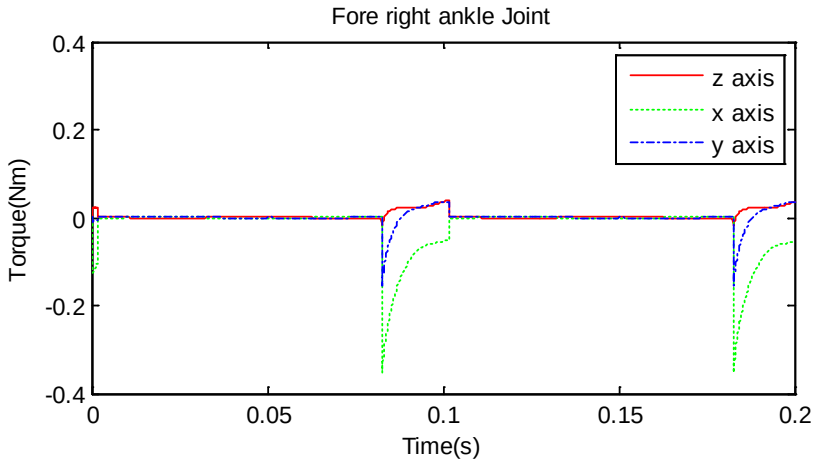




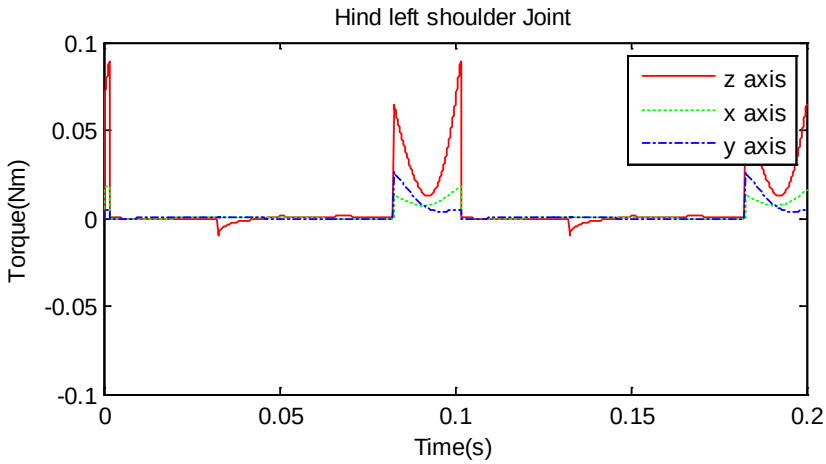
(b) 왼쪽 앞다리의 어깨, 무릎, 발목에서 발생하는 토크의 그래프

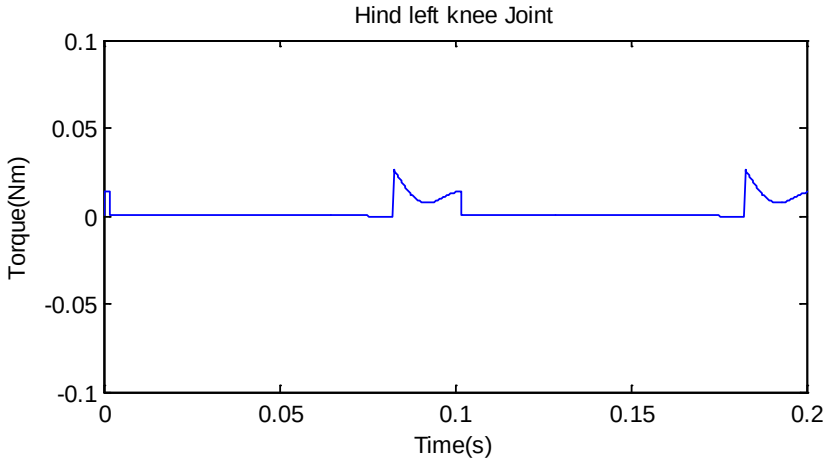


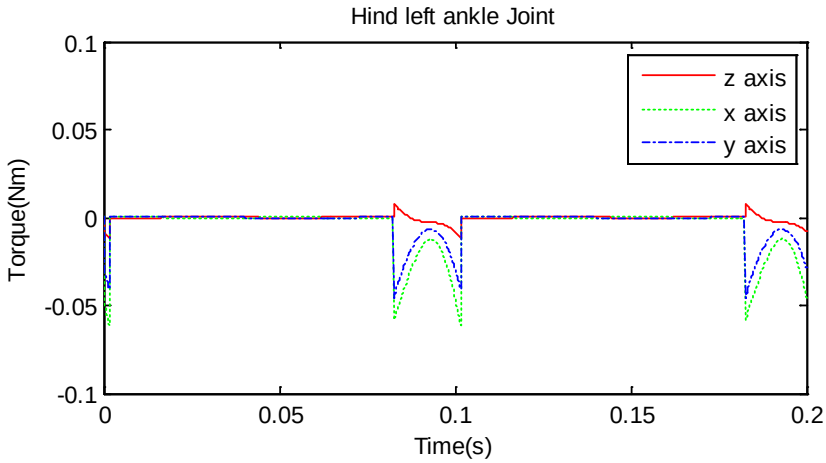




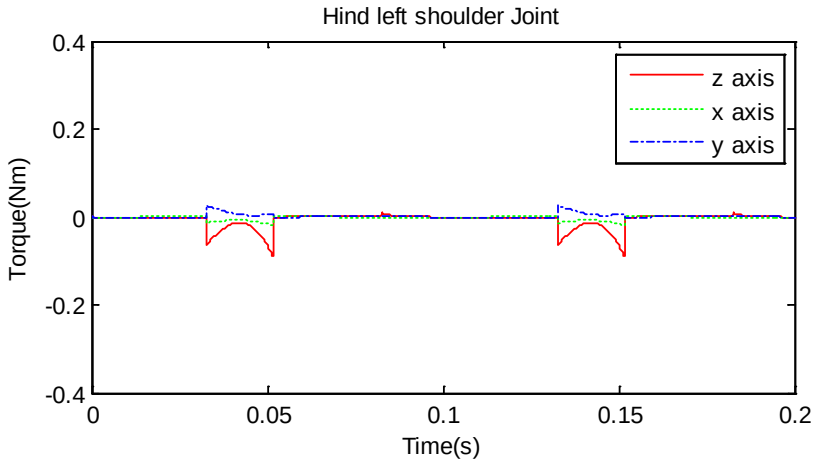
(c) 오른쪽 앞다리의 어깨, 무릎, 발목에서 발생하는 토크의 그래프

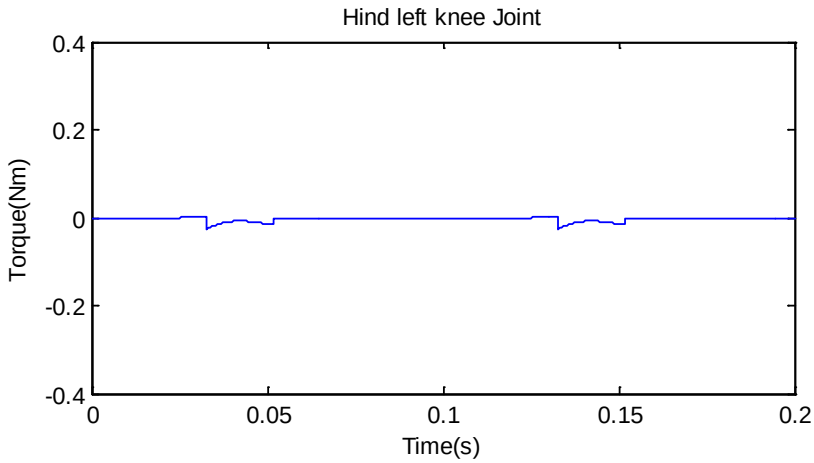


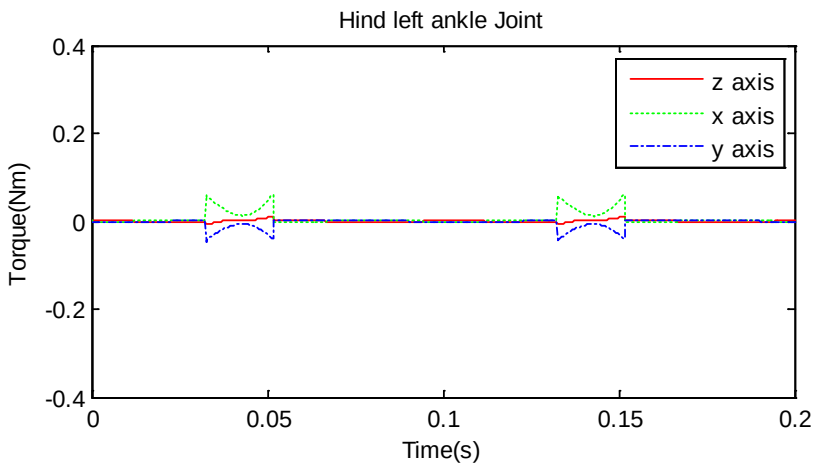




(d) 왼쪽 뒷다리의 골반, 무릎, 발목에서 발생하는 토크의 그래프







(e) 오른쪽 뒷다리의 골반, 무릎, 발목에서 발생하는 토크의 그래프
그림 2. 30 그림 2. 26과 같은 동역학 모델 주행에서 역동역학을 통해 추출된 조인트 토크

2.3.4 동역학 모델의 최적화

도마뱀의 각 조인트의 움직임은 앞에서 언급한 것과 같이 sine의 함수로 정의하였고, 식 (2.44)과 같다

$$J_i = a_i \times \sin\left(\frac{2\pi}{period} t + b_i\right) + c_i \tag{2.44}$$

sine 함수로 정의된 조인트의 움직임은 a_i, b_i, c_i에 의하여 결정된다. 따라서 최적화의 설계 변수를 a_i, b_i, c_i로 설정하였다.

최적화의 목적함수는 식(2.45)과 같이 2.2.7절의 목적함수인 식(2.21)과 동일하게 설정하였다.

$$minimize \qquad f(\Gamma) = \int_0^{period} (\|\Gamma\|^2)\, dt \tag{2.45}$$

$$subject\ to \qquad 0 \le a_i \le const1 \tag{2.46}$$

$$const2 \le b_i \le const3 \tag{2.47}$$

$$const4 \le c_i \le const5 \tag{2.48}$$

목적함수 $\int_0^{period} (\|\Gamma\|^2)\, dt$ 는 앞의 절에서 설명한 것과 같이 목적함수를 최소화하면 각 조인트의 토크의 합과 토크 분배가 고르게 되는 움직임이 추출되게 된다. a_i의 제한조건은 도마뱀의 각 조인트가 가질 수 있는 최대 각도로 설정하고, b_i, c_i의 제한조건 또한 각 조인트의 움직임에 맞게 설정하였다.

그림 2. 31는 최적화를 수행한 결과 도출된 역학 모델의 주행 영상을 스냅샷으로 정리한 것이다. 주행 영상을 살펴보았을 때, 도마뱀 모델의 몸체는 S 형상의 주기적인 움직임을 수행하는 것을 확인할 수 있다.

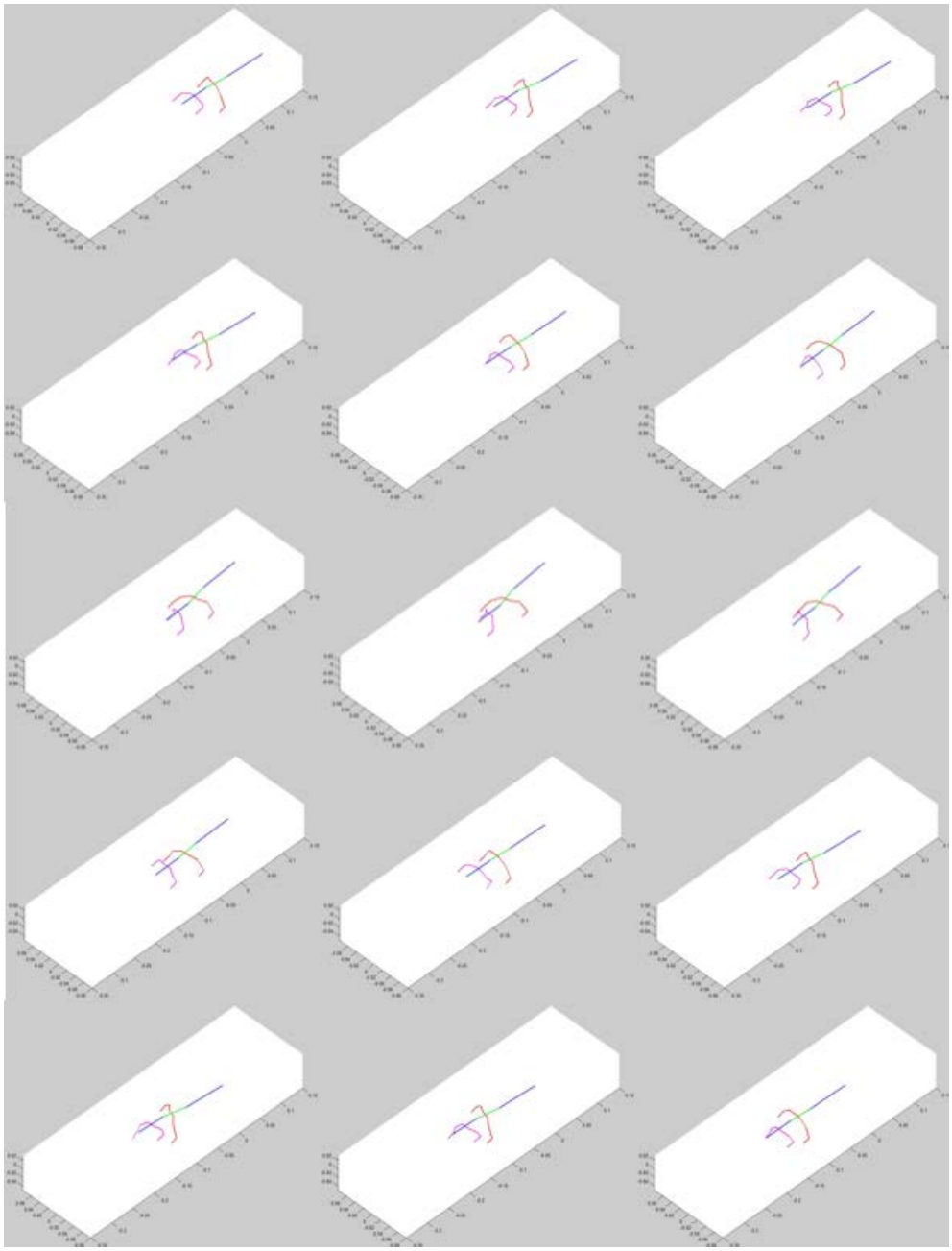
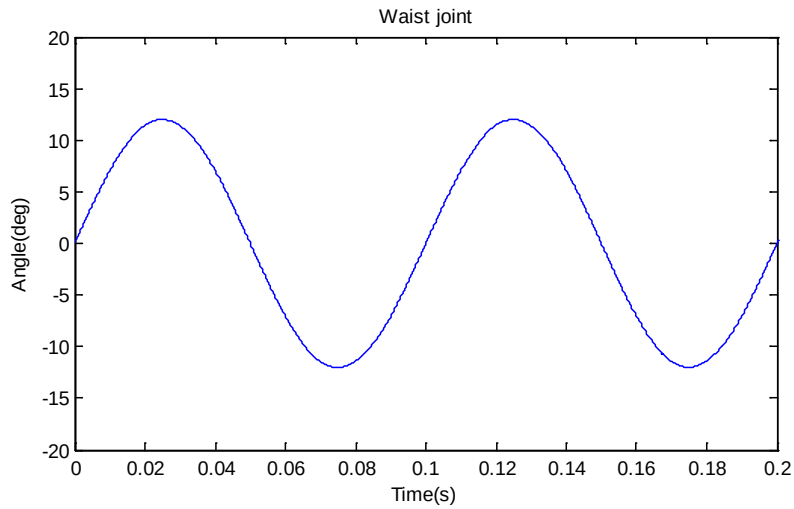
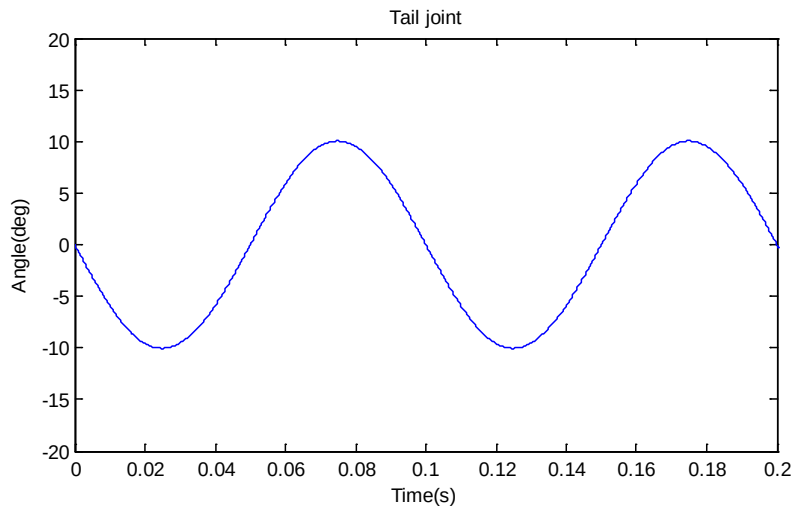


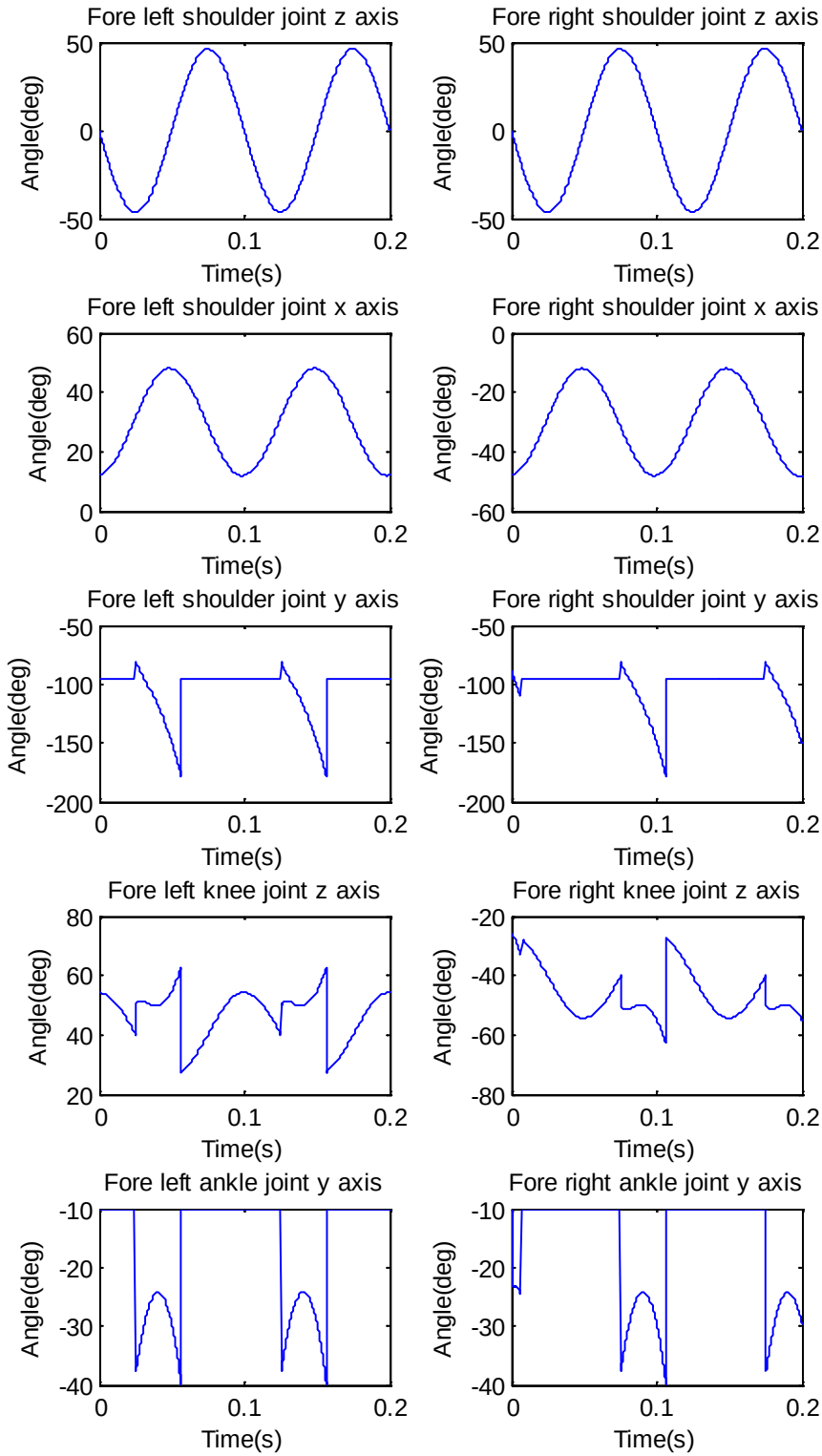
그림 2. 31 최적화를 통해 도출된 도마뱀 모델의 주행 동영상 스냅샷

위에서 도출된 도마뱀 모델 주행의 각 조인트의 움직임은 그림 2. 32에서 정리하였다. 발은 전체 무게에 비해 매우 작을 것으로 고려하여 발의 운동은 고려하지 않고 공중에서 같은 위치를 유지하도록 하였다. 따라서 발목의 z축 방향의 각도와 x축 방향의 각도는 0으로 고정되었다.

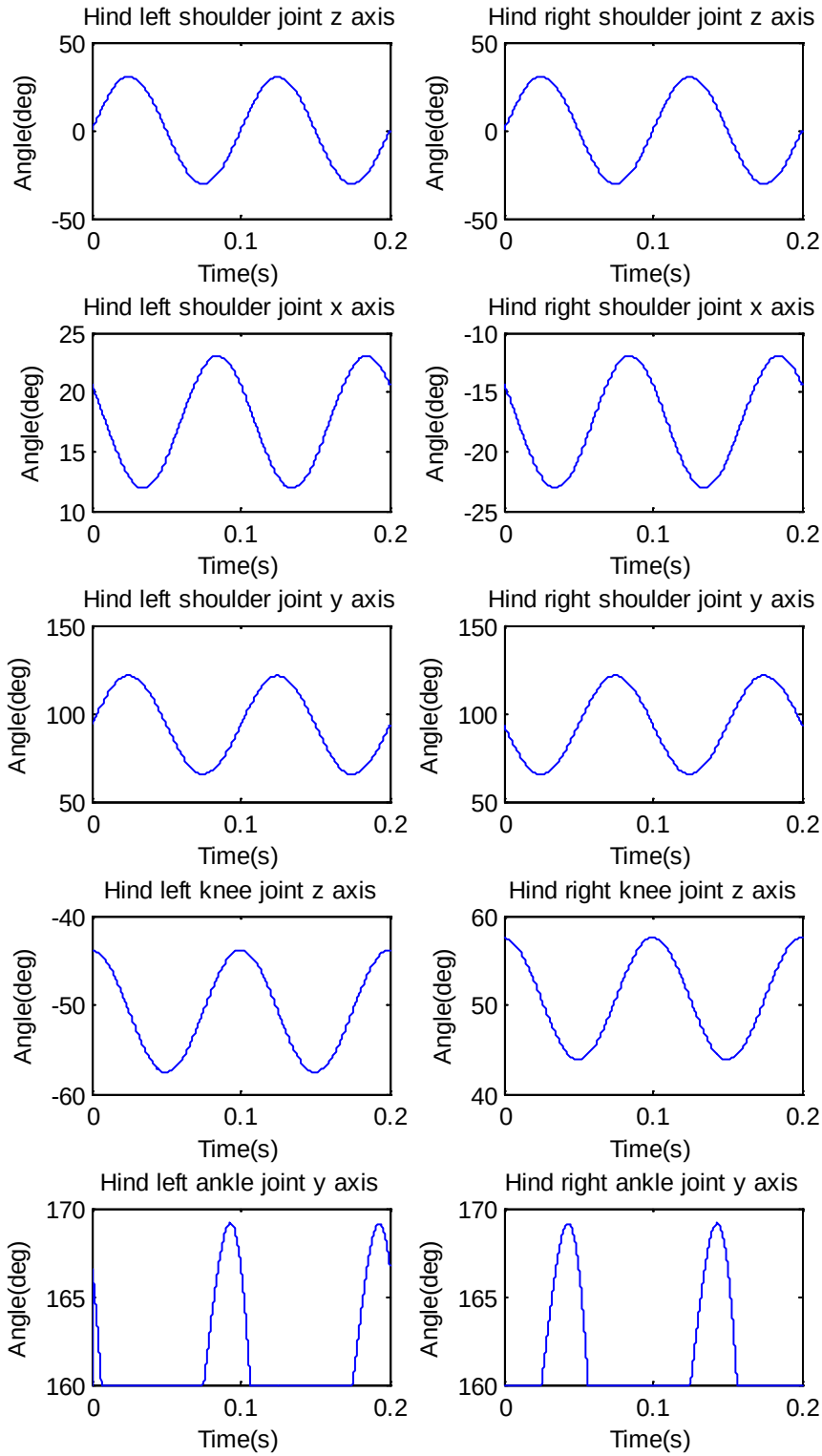




(a) 최적화를 통해 도출된 허리, 꼬리의 조인트 각도



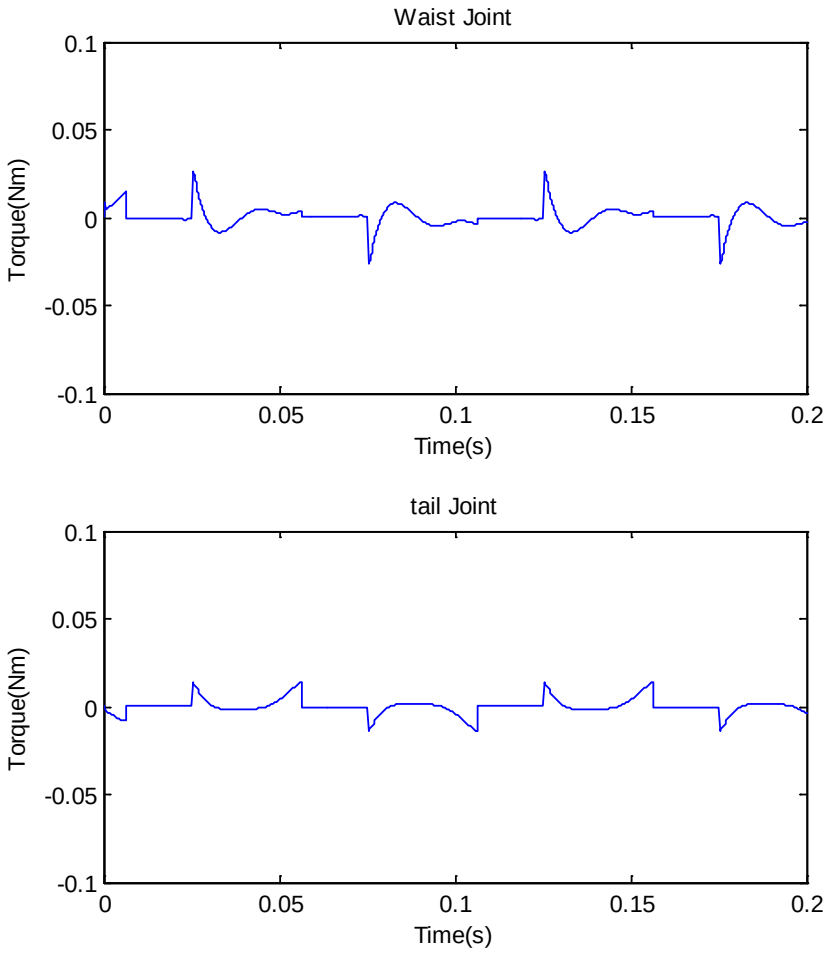
(b) 최적화를 통해 도출된 앞다리 어깨, 무릎, 발목의 조인트 각도



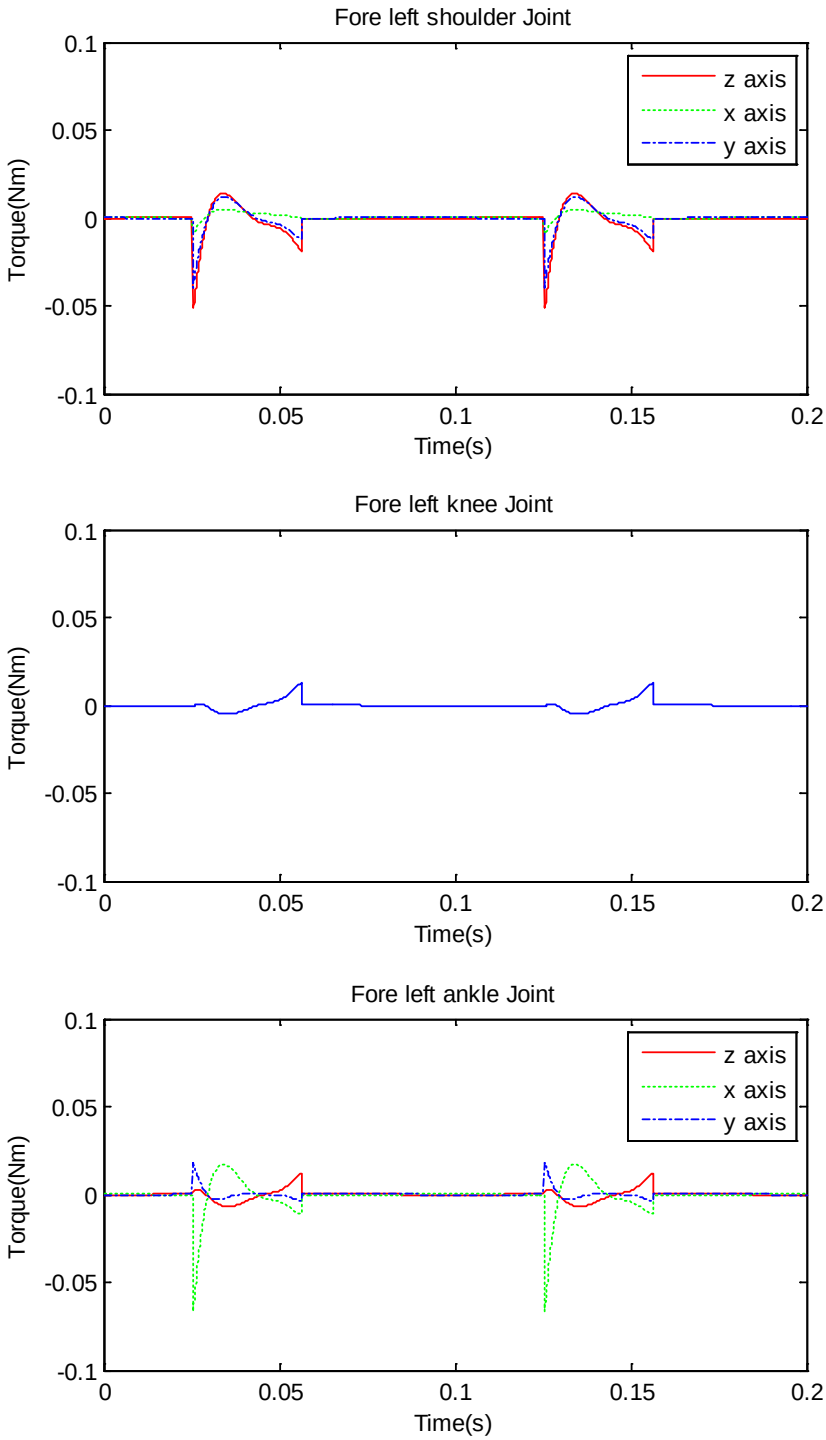
(c) 최적화를 통해 도출된 뒷다리 어깨, 무릎, 발목의 조인트 각도

그림 2. 32 최적화를 통해 도출된 도마뱀 모델의 조인트 각도

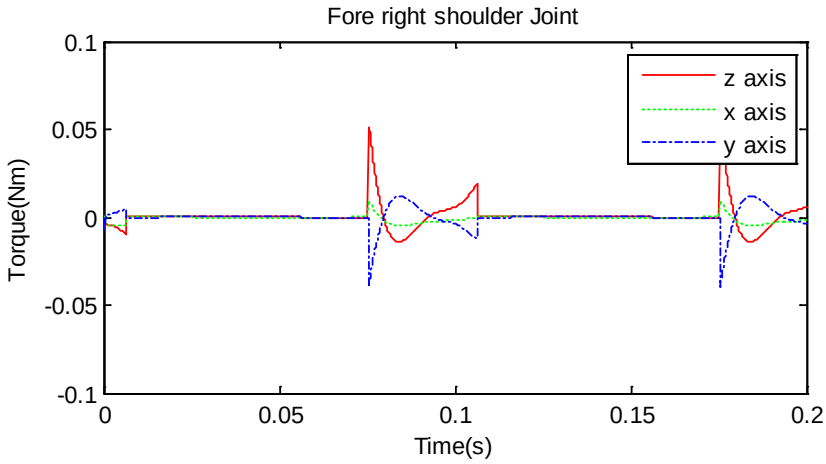
그림 2. 32에서 생성된 조인트의 각도를 미소 단위에 대하여 수치적인 미분을 수행하여 각 조인트의 $q, \dot{q}, \ddot{q}$ 값을 계산한다. 또한 기존 연구에서 측정한 body의 질량[28]을 대입하면 그림 2. 33와 같은 조인트의 토크를 추출할 수 있다.

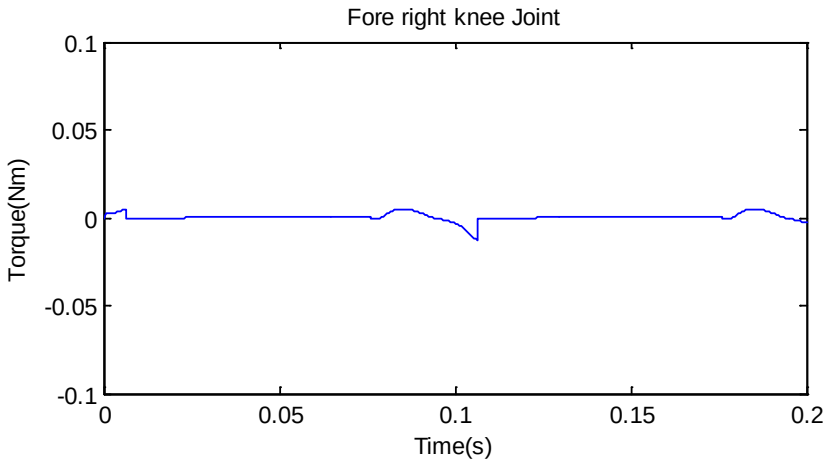


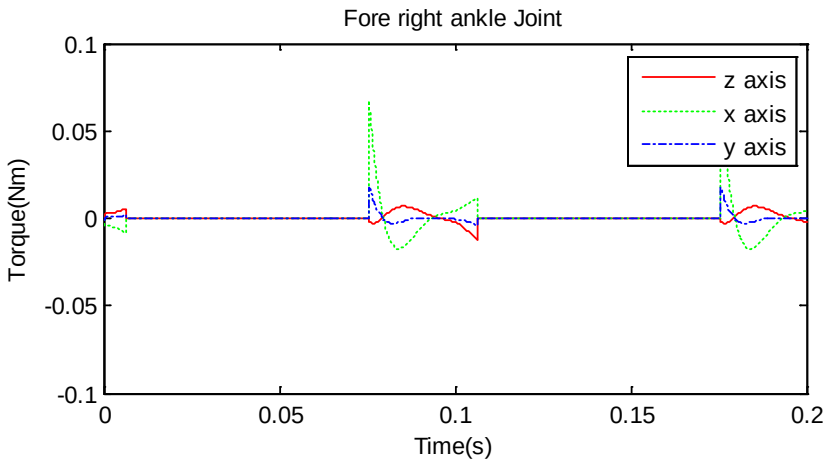
(a) 허리, 꼬리 조인트에서 발생하는 토크의 그래프



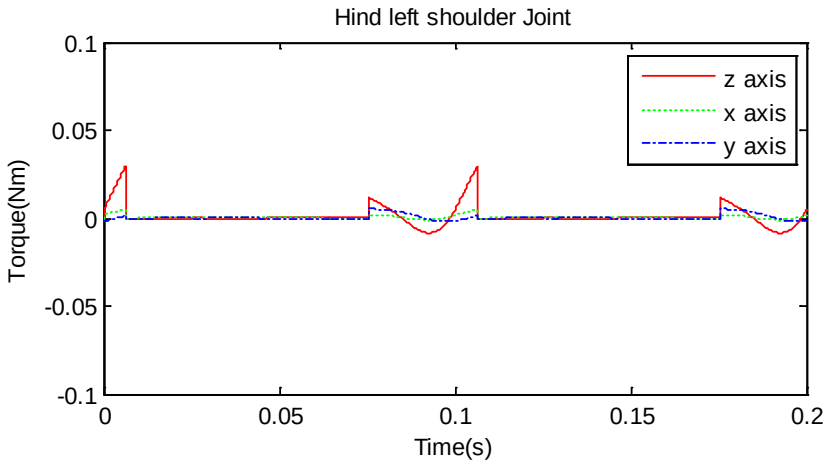
(b) 왼쪽 앞다리의 어깨, 무릎, 발목에서 발생하는 토크의 그래프

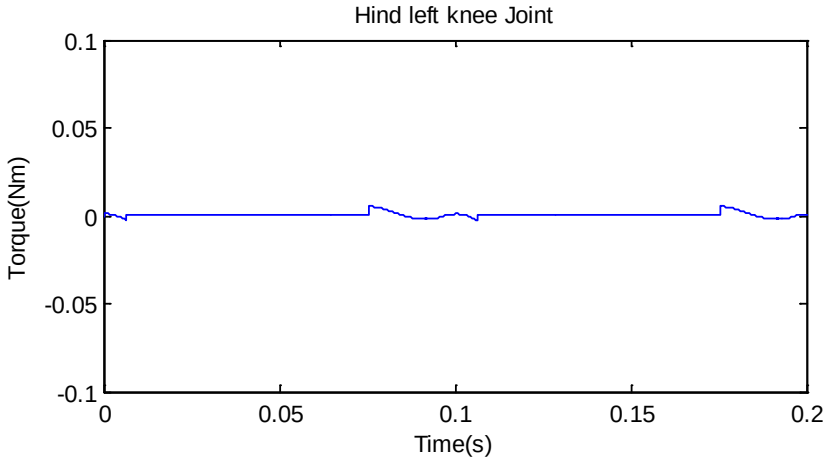


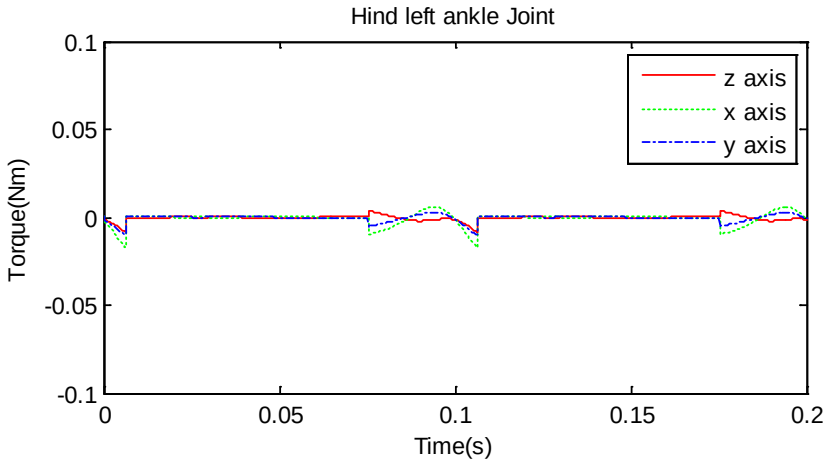




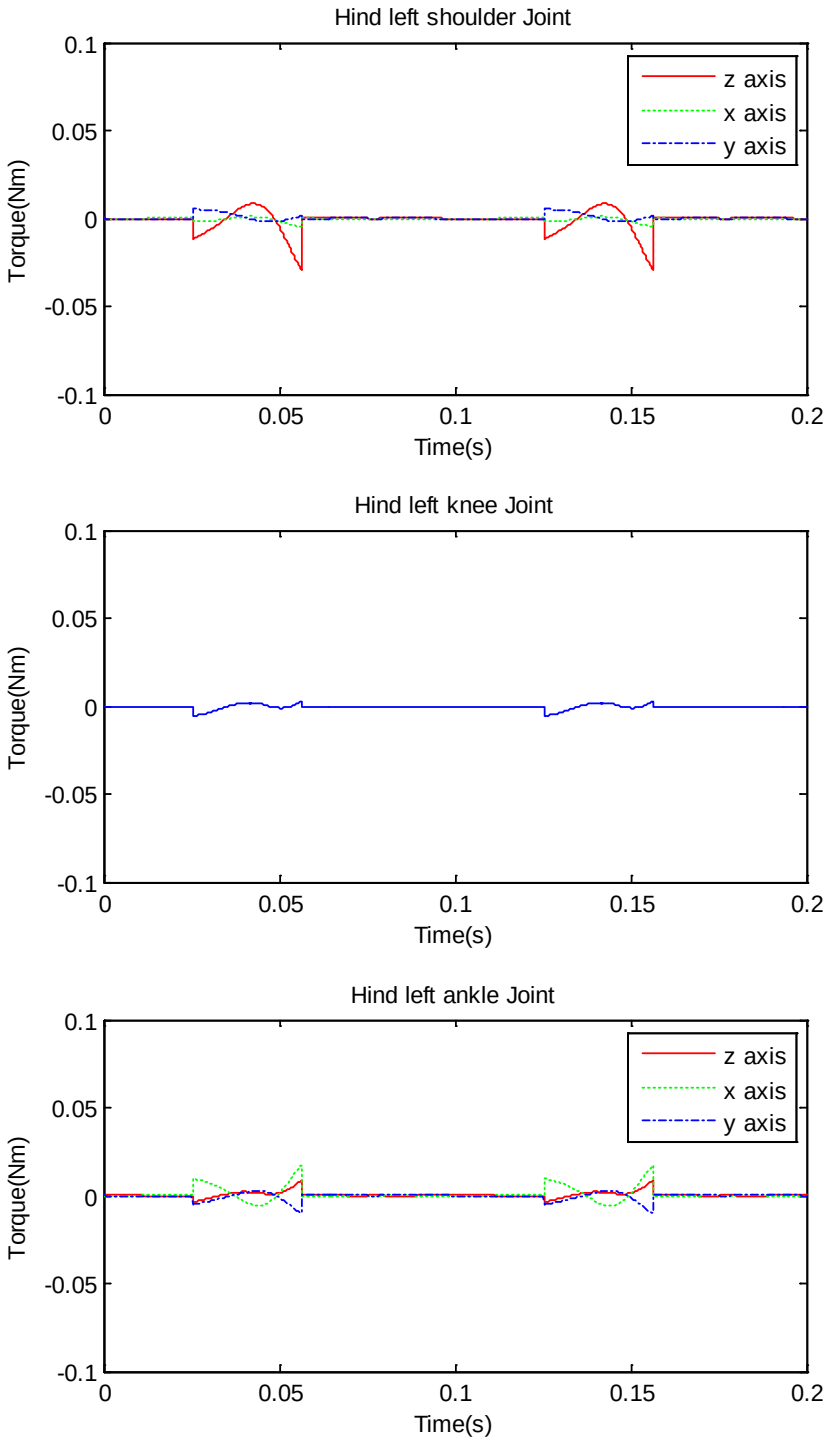
(c) 오른쪽 앞다리의 어깨, 무릎, 발목에서 발생하는 토크의 그래프







(d) 왼쪽 뒷다리의 어깨, 무릎, 발목에서 발생하는 토크의 그래프



(e) 오른쪽 뒷다리의 어깨, 무릎, 발목에서 발생하는 토크의 그래프

그림 2. 33 최적화로 도출된 동역학 모델 주행에서 역동역학을 통해 추출된 조인트 토크

이때 지면에서 발생하는 반력의 그래프는 그림 2. 34에 정리하였다.

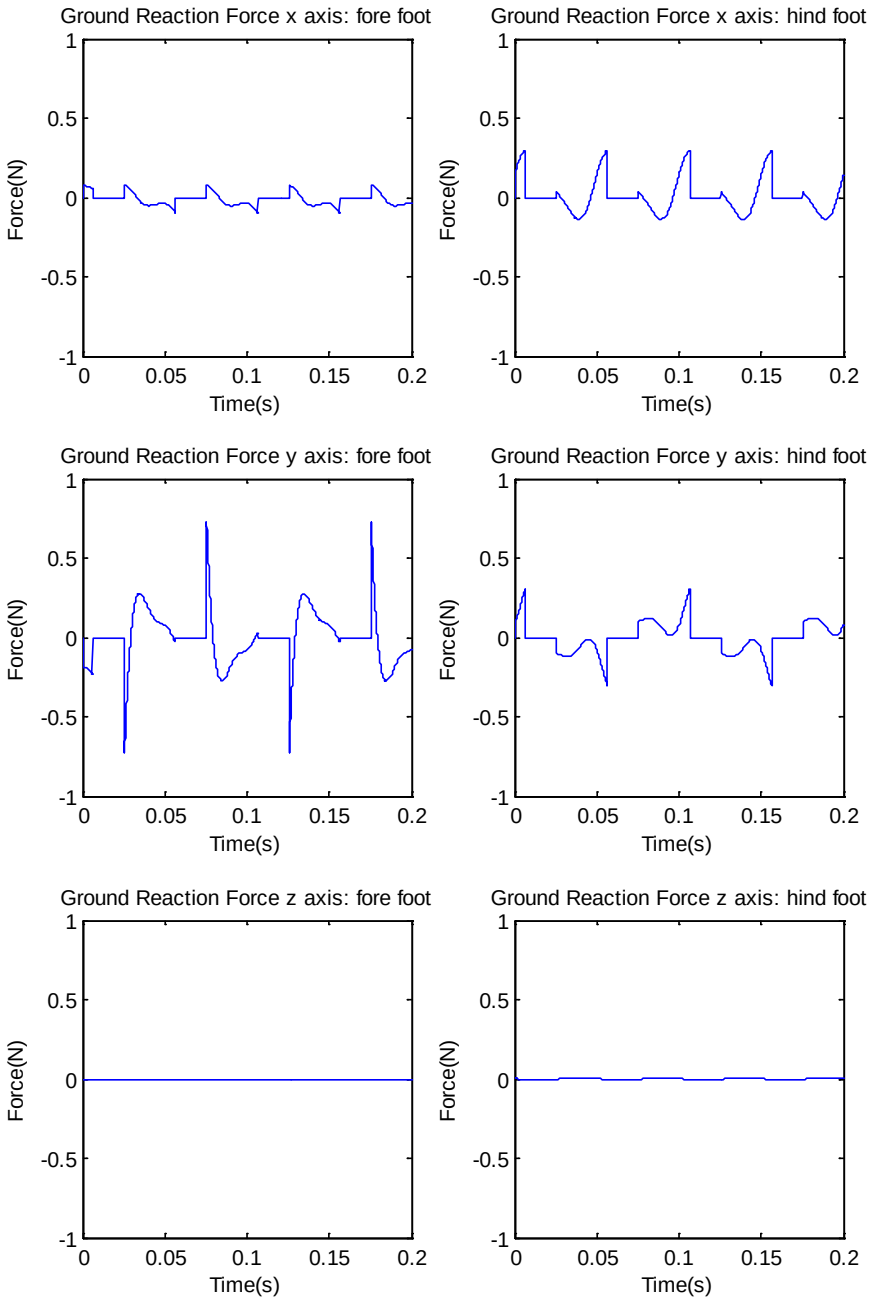


그림 2. 34 최적화로 도출된 도마뱀 동역학 모델에 대한 지면에서의 반력 그래프

도마뱀의 몸체가 수평면 위에서 주행하는 모델로 가정되었기 때문에 지면에 접촉 시, 무게의 영향이 매우 작아 높이 방향으로의 반력은 거의 발생하지 않은 것을 확인할 수 있었다.

최적화된 도마뱀의 움직임이 실제 도마뱀의 움직임과의 유사성을 확인하고자 하였다. 실제 도마뱀의 주행 동영상을 통해 각 관절의 모션을 캡쳐하고 캡쳐된 관절의 위치를 통해 역기구학을 수행하여 관절의 각도를 추출하였다. 도마뱀은 약 0.1 초를 주기로 같은 운동을 반복하고 1 주기에 23개의 데이터를 추출할 수 있었다. 그림 2. 35는 모션 캡쳐에 사용된 도마뱀 주행 영상의 스냅샷이다.

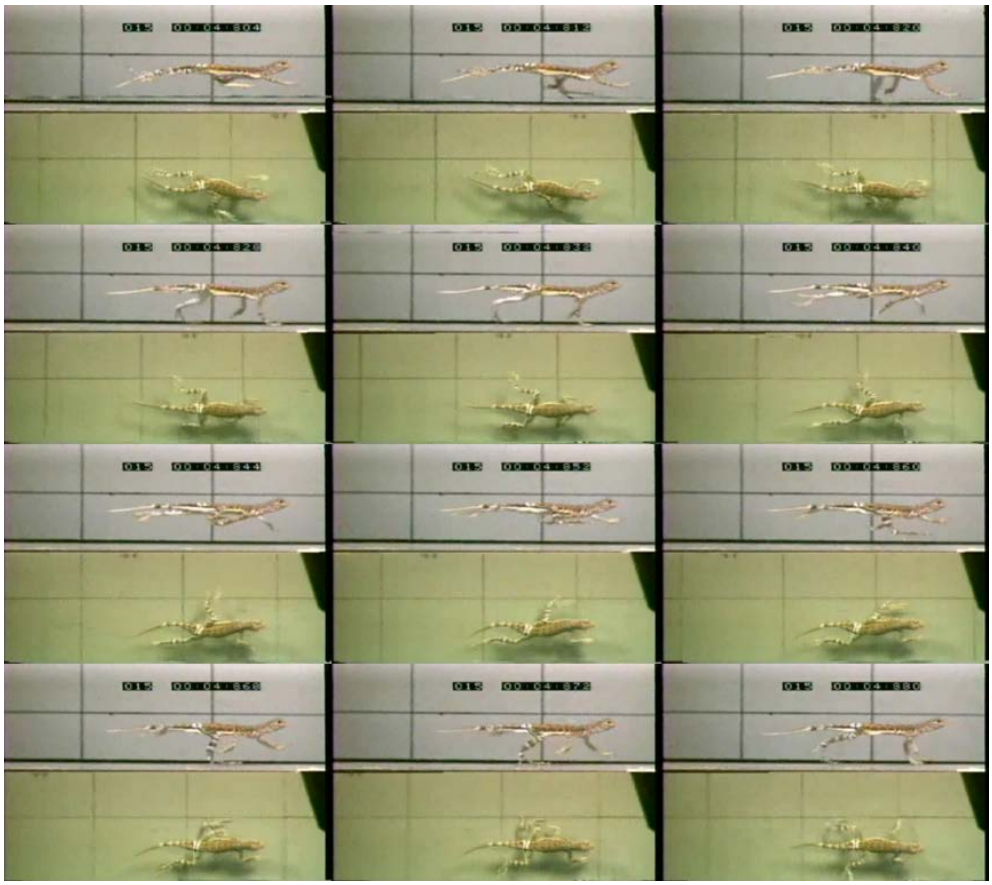


그림 2. 35 실제 도마뱀 주행 영상의 스냅샷[24]

그림 2. 35의 동영상에서 추출한 조인트의 각도와 최적화를 통해 도출된 조인트의 각도를 그림 2. 36에서 비교해보았다.

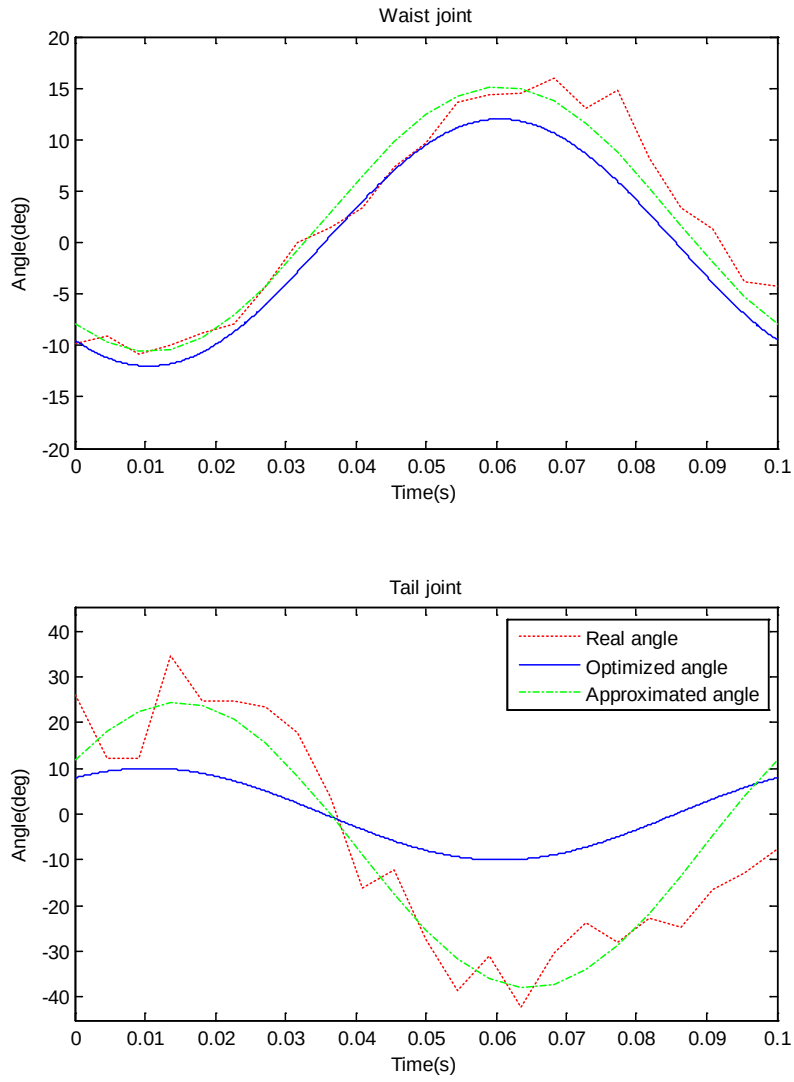


그림 2. 36 실제 도마뱀의 허리, 꼬리 조인트 각도와 최적화를 통해 도출된 도마뱀 동역학 모델의 허리, 꼬리 조인트 각도의 비교(빨간색 점선: 실제 도마뱀, 파란색 실선: 동역학 모델, 초록색 점과 실선: 실제 도마뱀 각도의 추세함수)

실제 도마뱀의 허리, 꼬리의 각도를 추세한 함수는 식(2.49), 식(2.50)에 나타내었다.

$$waist_{approx} = 12.9 * \sin\left(\frac{2\pi}{period}\mathrm{t}\right) + 2.3 \qquad (2.49)$$

$$tail_{approx} = 31.1 * \sin\left(\frac{2\pi}{period}\mathrm{t} + 2.9\right) - 6.7 \quad (2.50)$$

최적화를 통해 도출된 허리, 꼬리의 움직임은 식(2.51), 식(2.52)과 같다.

$$waist_{optimized} = 12.0 * \sin\left(\frac{2\pi}{period}\mathrm{t}\right) \quad (2.51)$$

$$tail_{optimized} = 10.4 * \sin\left(\frac{2\pi}{period}\mathrm{t} + 3.1\right) \quad (2.52)$$

최적화를 통해 도출된 허리의 각도는 진폭과 위상 차이가 거의 유사하다. 꼬리의 각도는 실제 도마뱀의 각도의 진폭이 최적화를 통해 도출된 각도의 진폭보다 더 크지만 위상 차이는 0.2 rad 차이로 거의 유사한 것을 확인할 수 있었다. 이는 최적화를 통해 도출된 허리, 꼬리가 도마뱀과 유사한 S자 형상임을 의미한다. 따라서 실제 도마뱀이 각 조인트의 합과 차를 최소화하여 주행하고, 그것의 결과로써 몸체가 S 형상의 주기적인 움직임이 발생하는 것임을 동역학 시뮬레이션과 최적화를 통해 그 원리를 도출하였다.

제 3 장 도마뱀 모사 보행 로봇 설계

3.1. 도마뱀을 모사한 2족 소형 보행 로봇의 가능성

2절에서 도마뱀의 동역학 모델을 통해 허리, 꼬리의 조인트 토크가 직진 주행을 가능하게 하는 모멘트를 생성하고 허리, 꼬리 조인트의 합과 차를 최소화하였을 때, 도마뱀과 유사한 S 형상의 주기적인 몸체 움직임이 생성되는 것을 확인하였다. 이를 2족 소형 보행 로봇에 적용하는 연구를 본 절에서 수행하고자 한다.

다리의 자유도가 높고, 액추에이터의 수가 많은 대형 로봇의 경우에는 다리가 추력을 발생하면서 동시에 방향을 유지하는 것이 어렵지 않다. 하지만 소형 로봇의 경우에는 탑재할 수 있는 액추에이터 수의 한계가 있기 때문에 추력을 담당하는 다리가 동시에 주행 방향을 유지하는 것은 한계가 있다. 이에 도마뱀의 주기적인 허리, 꼬리의 움직임을 2족 소형 보행 로봇에 적용하면 주행 방향을 유지하는데 도움이 될 것으로 생각된다. 먼저 도마뱀의 허리, 꼬리의 움직임이 로봇에 적용하는 것이 가능한지를 확인하고자 로봇의 시제품을 제작하고 실험해보고자 한다. 이 로봇 시제품은 도마뱀의 운동을 모사하여 허리와 꼬리에 각각 1개의 자유도를 가지고, 다리는 추력을 담당하도록 각각 1개의 자유도를 가지도록 설계된다. 도마뱀 로봇의 허리, 꼬리의 주행 방향에 대한 영향을 관찰하고자 하는 것으로 로봇은 z, roll, pitch의 자유도를 구속함으로써 x, y, yaw의 2차원 평면으로 그 자유도를 한정하였다.

3.2. 2족 소형 보행 로봇을 위한 동역학 해석

3.2.1. 도마뱀 모사 로봇의 동역학 모델 수립

도마뱀 모사 로봇의 동역학 모델을 수립하기에 앞서, 모델은 도마뱀의 주기적인 몸체 움직임의 원리를 검증한다는 목적에 부합하도록 두 가지의 가정을 설정하였다. 첫 번째는 도마뱀 모사 로봇의 동역학 모델이 구현되는 자유도는 6 DOF인 3차원 공간이 아니라 3 DOF의 2차원 수평 평면이다. 이는 도마뱀 몸체 움직임의 영향을 yaw 방향에

대해서, 즉 주행 방향과의 관계만을 확인하고자 하는 것으로 roll, pitch의 영향을 배제하고자 함이다. 이로써 모델은 x, y, yaw의 자유도에서만 구현되며, roll, pitch, z방향의 자유도는 제한된다. 마찬가지로 평면의 자유도를 가지므로 중력에 대한 영향은 무시한다. 두 번째는 추력을 발생시키는 발의 모델을 선형 액추에이터로 가정하는 것이다. 실제 도마뱀의 발 궤적을 살펴보면, 측면이나 정면에서 바라보았을 때 뒷발의 궤적은 각 관절의 회전 운동 조합인 3차원으로 발생한다. 하지만 뒷발의 궤적을 지면에 접촉하는 동안 수평 평면에서 관찰하면 그림 3. 1과 같이 직선을 유지하는 것을 할 수 있다.

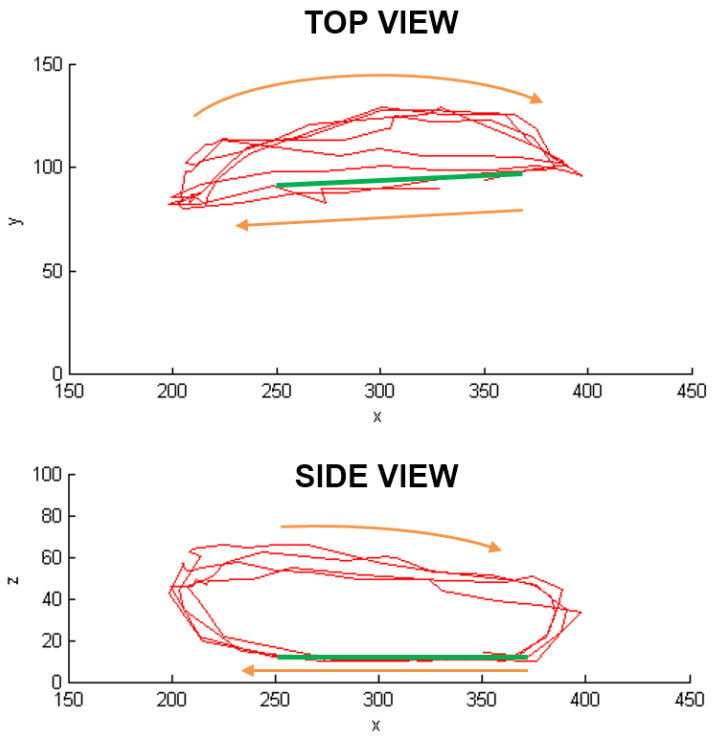
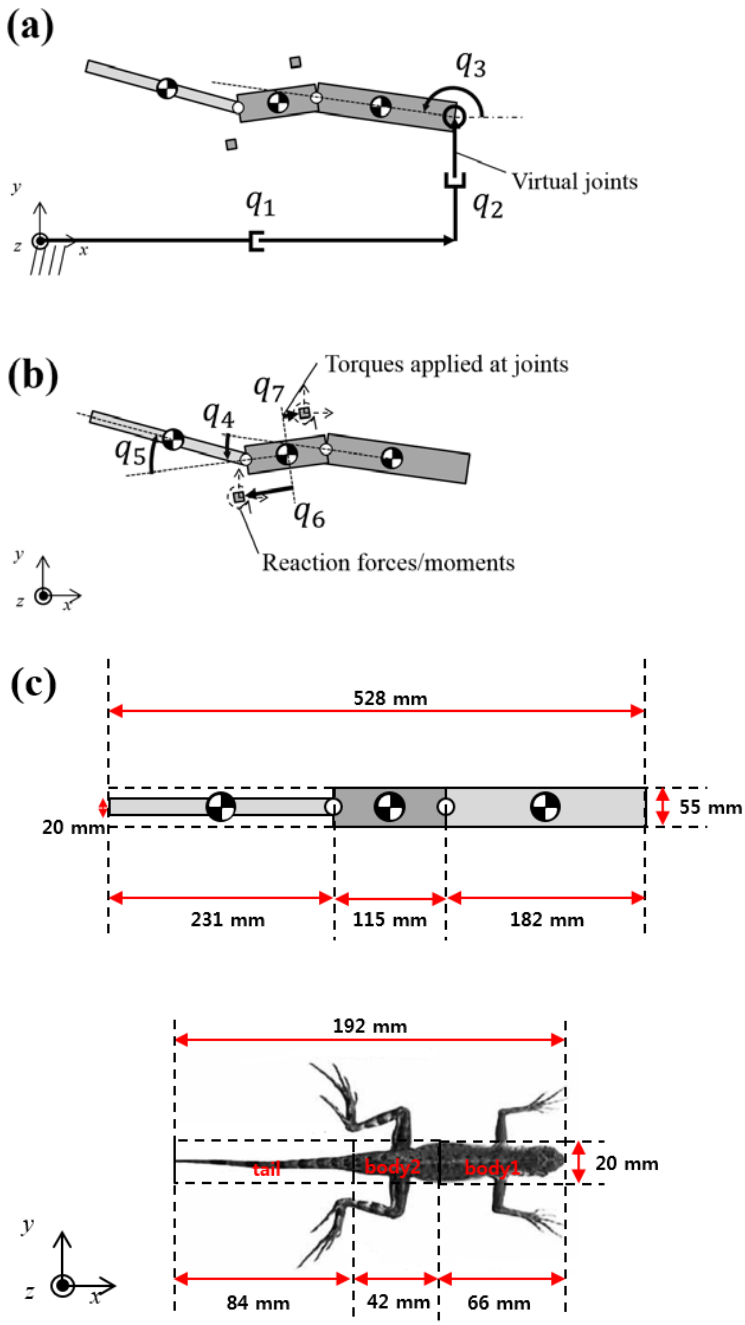


그림 3. 1 도마뱀의 뒷발 궤적: Callisaurus draconoides[19]

또한 도마뱀 다리의 무게는 기존 논문을 참고하였을 때, 도마뱀의 종류에 따라 6.2%, 4.3%로 매우 작은 것을 확인할 수 있다[23]. 그러므로 지면에 접촉하지 않은 도마뱀 다리 운동의 질량에 관한 영향은 크지 않을 것을 생각할 수 있다. 마찬가지로 도마뱀 모사 로봇도 실제 도마뱀과 유사하게 몸체 대비 다리의 질량을 작게 한다면 접촉하지 않은 다리의 영향은 크지 않을 것으로 예상할 수 있다. 따라서 도마뱀 로봇을

위한 동역학 모델의 다리는 선형 액추에이터로 간략하게 구성하였다.

위의 가정을 포함하여 그림 3. 2와 같은 동역학 모델을 수립하였다.



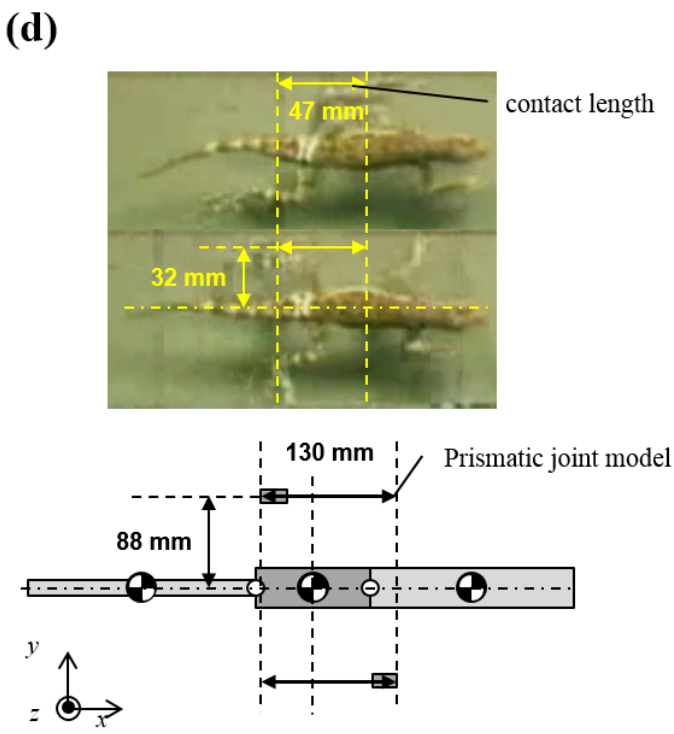


그림 3. 2 도마뱀 모사 로봇의 동역학 모델: (a) 가상의 조인트, (b) 조인트 토크 및 지면에서의 반력과 반력 모멘트, (c) 몸체의 폭과 길이, (d) 발의 보폭과 몸체에서 떨어진 거리

그림 3. 2의 (a) 그림을 살펴보면 도마뱀 모사 로봇의 동역학 모델의 관절 이외에 3개의 조인트가 더 추가된 것을 확인할 수 있다. 이는 동역학 모델의 위치와 각도를 설명하기 위한 가상의 조인트이다. 3차원 공간에서는 모델의 위치를 설명하기 위해서 총 6개의 가상 조인트가 필요하지만 본 연구에서는 2차원 평면이므로 3개의 가상 조인트를 사용하였다. 그림 3. 2의 (b) 그림의 조인트가 실제로 구동하는 동역학 모델의 조인트이다. 각 조인트에서는 토크와 힘이 발생하며, 지면에 접촉한 경우에는 지면에서의 반력과 반력 모멘트가 발생한다.

3.2.2. 도마뱀 모사 로봇의 동역학 시스템

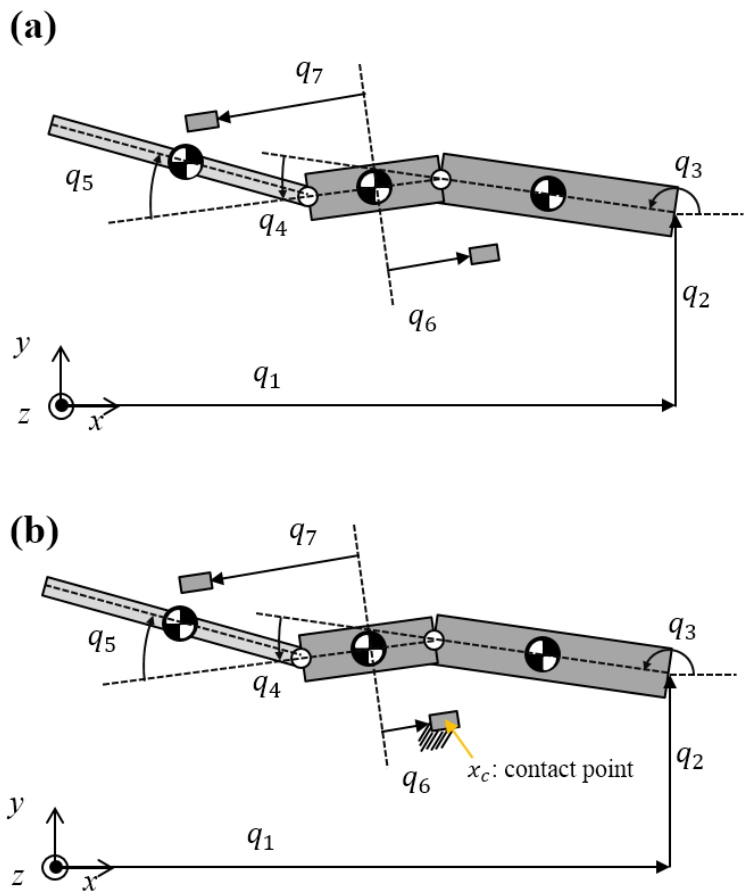


그림 3. 3 동역학 시스템: (a) 공중에 떠있는 상황, (b) 지면에 발이 접촉한 상황

주어진 도마뱀 모사 로봇의 동역학 모델의 조인트 수는 k = 4이다. 여기에 가상의 조인트를 추가하면 동역학 모델의 총 자유도는 n = k + 3 = 7이 된다. 따라서 그림 3. 3의 (a)과 같이 모델이 지면에 접촉하지 않은 동안의 동역학 시스템의 식은 (3.1)과 같다[33].

$$A(q)\ddot{q} + b(q,\dot{q}) = \Gamma \tag{3.1}$$

여기서, q 는 $n \times 1$ 크기의 조인트의 벡터이다. 그리고 Γ 는 $n \times 1$크기의 조인트에 부합되는 토크 벡터이다. $A(q)$는 $n \times n$ 크기의 관성 질량 행렬이며, $b(q,\dot{q})$는 $n \times 1$ 크기의 코리올리 및 원심력 벡터이다. 그림 3. 3의 (b)와 같이 동역학 모델의 발이 지면과 접촉한 경우에는 식 (3.2)과 같이 지면에서의 반력과 반력 모멘트 그리고 지면에 접촉한

지점의 자코비안이 식에 추가된다.

$$A(q)\ddot{q} + b(q,\dot{q}) + J_c{}^T f_c = \Gamma \tag{3.2}$$

$J_c{}^T$ 는 지면에 접촉한 발의 위치와 각도에 대한 자코비안의 전치행렬이다. 그리고 f_c는 지면에서의 반력과 반력 모멘트 벡터이다.

J_c는 식 (3.3)과 같이 정의된다.

$$\dot{x_c} = J_c\dot{q} \tag{3.3}$$

식 (3.2)를 풀기 위해서는 필연적으로 지면에서의 반력과 반력 모멘트 벡터인 f_c를 알아야 한다. 따라서 f_c를 구하기 위하여 동역학 식을 식(3.2)과 같이 조인트 관점에서 식 (3.4)와 같은 접촉한 지점의 수식으로 자코비안 행렬인 J_c을 이용하여 변환한다.

$$\Lambda_c\ddot{x_c} + \mu_c + f_c = \bar{J_c}^T\Gamma \tag{3.4}$$

여기서

$$\Lambda_c = (J_cA^{-1}J_c{}^T)^{-1} \tag{3.5}$$

$$\mu_c = \Lambda_c\{J_cA^{-1}b(q,\dot{q}) - \dot{J_c}\dot{q}\} \tag{3.6}$$

$$\bar{J_c}^T = \Lambda_cJ_cA^{-1} \tag{3.7}$$

Λ_c는 접촉한 지점이 기준인 관성 질량 행렬이다. 그리고 $\bar{J_c}$는 J_c의 dynamically 일치하는 역행렬이다. μ_c 는 접촉한 지점으로 반영된 코리올리 및 원심력 벡터이다.

3.2.3. 모델 발과 지면의 접촉 구속 조건 설정

이상적인 환경에서는 지면과 접촉한 발의 위치인 x_c 는 지면과 고정되어 있기 때문에 발의 속도와 가속도, 즉 $\dot{x_c} = 0,\ \ddot{x_c} = 0$이 된다. 그러나 동역학 시스템은 수식으로 결정되어 있는 것이 아니라 수치를 대입하여 해를 구하는 방식으로 발이 지면에 접촉하는 순간의 발의 속도가 0이 아니기 때문에 발이 완전히 지면에 고정되지 않는다. 따라서

Baumgarte’s stabilization method를 이용하여 이러한 문제를 해결하고자 하였다[34]. Baumgarte’s stabilization method는 지면을 스프링, 댐퍼 시스템으로 가정하고 지면에 접촉한 발이 자연스럽게 고정되도록 접촉된 발의 식을 (3.8)과 같이 설정한다.

$$\ddot{x_c} + 2\alpha\dot{x_c} + \beta^2 x_c = 0 \tag{3.8}$$

식 (3.4)에 Baumgarte’s stabilization method을 통해 결정된 식 (3.8)을 대입하면 식 (3.9)를 유도할 수 있다. 지면에서의 반력과 반력 모멘트 벡터인 f_c는 각 조인트의 토크와 조인트 각속도, 자코비안 행렬을 통해 식 (3.9)에서 구할 수 있다.

$$f_c = \bar{J_c}^T \Gamma - \mu_c - \Lambda_c(-2\alpha\dot{x_c} - \beta^2 x_c) \tag{3.9}$$

이를 원래의 식 (3.2)에 대입하면 지면에 접촉한 상황에서의 동역학 식을 식 (3.10)과 같이 구성할 수 있다.

$$A(q)\ddot{q} + b(q,\dot{q}) + J_c{}^T\{\bar{J_c}^T\Gamma - \mu_c - \Lambda_c(-2\alpha\dot{x_c} - \beta^2 x_c)\} = \Gamma \tag{3.10}$$

식 (3.10)을 이용하여 구속 조건이 제대로 수행되는지를 확인하기 위하여 발의 접촉만을 확인할 수 있도록 그림 3. 4와 같이 모델을 1차원으로 간소화하여 시뮬레이션을 수행하였다.

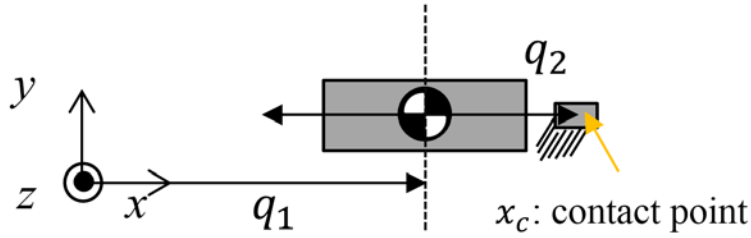


그림 3. 4 지면에 접촉한 발의 구속 조건을 확인하기 위한 1차원 동역학 모델

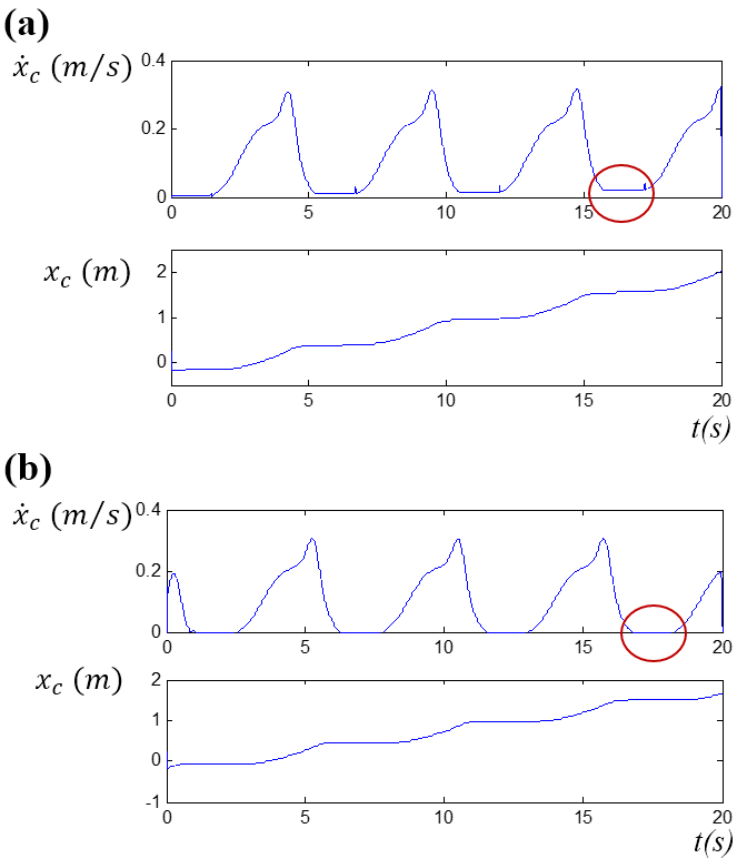


그림 3. 5 구속 조건 확인을 위한 동역학 모델 시뮬레이션. 구속 조건: (a) $\ddot{x}_c = 0$, (b) $\ddot{x}_c + \alpha\dot{x}_c + \beta x_c = 0$

그림 3. 5의 (a)는 접촉 구속 조건을 $\ddot{x}_c = 0$으로 설정하였을 경우의 접촉한 발의 속도와 위치 그래프이다. 발의 속도 그래프를 살펴보면, 지면에 접촉하였을 경우에 접촉한 발의 속도가 정확하게 0이 되지 않으며 그 오차의 값이 계속 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 설명한 것과 같이 동역학 시스템이 수치를 대입하여 구하는 방식으로 지면에 접촉하는 순간 발의 속도가 정확하게 0이 아니기 때문에 발생하는 것이다. 그림 3. 5의 (b)는 접촉 구속 조건을 Baumgarte's stabilization method를 사용하여 $\ddot{x}_c + \alpha\dot{x}_c + \beta x_c = 0$으로 설정한 경우의 접촉한 발의 속도와 위치 그래프이다. 그 중에서 속도의 그래프를 확인하면 그림 3. 5 (a)의 속도 그래프에서는 발생하였던 오차의 값이 그림 3. 6 (b)의 속도의 그래프에서는 0으로 고정되는 것을 확인할 수 있다. 이는 지면에 접촉한 발이 지면에 제대로 고정이 되는 것을 의미하고, 구속이 제대로 수행되었다는 것을 확인할 수 있다.

3.2.4. 도마뱀 모사 로봇의 동역학 시뮬레이션

도마뱀 모사 로봇의 동역학 모델을 허리, 꼬리의 움직임 없이 다리를 구동하면 양쪽 발에서 전해지는 추력의 크기가 비슷하기 때문에 먼저 차는 발에 따라 동역학 모델은 자연스럽게 먼저 차는 발의 반대쪽으로 회전을 하게 된다. 이러한 환경에서 모델의 주행 방향을 유지하는 방법에는 두 가지가 있다. 하나는 다리의 추력을 피드백 받아서 양쪽에서 차는 힘을 제어하여 주행 방향을 유지하는 것이다. 나머지 하나는 허리와 꼬리의 움직임을 이용하여 방향을 유지하는 것이다. 본 연구에서는 위의 방법 중에서 두 번째 방법을 이용하여 동역학 모델의 주행 방향을 유지하고자 한다. 먼저 동역학 모델의 허리와 꼬리 움직임을 통해 주행 방향을 보정하는 것이 가능한 지를 동역학 시뮬레이션을 통해 확인하고자 한다. 그 후에 동역학 모델의 허리, 꼬리 움직임으로 방향을 보정하면서 직진으로 달리며 주행 방향을 유지하는 것을 시뮬레이션으로 구현하고자 한다.

3.2.4.1. 동역학 모델 좌우 회전 보정

본 연구에서 동역학 모델의 주행 방향을 결정하는 yaw 방향 각도는 두 다리가 달려 있는 body2의 yaw 각도로 그 기준을 설정하였다.

Body2의 yaw 각도는 한 주기에서 다리, 허리, 꼬리의 움직임에 의해 일정하게 변하지만, 각도의 중간 값은 주행 방향으로 일정하다. 이 yaw 방향 각도의 중간 값을 주행 방향으로 설정하고, 주행 방향을 동역학 모델의 허리, 꼬리의 움직임을 통해 회전하여 보정하고자 한다.

동역학 모델의 허리, 꼬리 움직임을 이용한 좌우 회전 보정의 기본 원리는 각운동량 보존의 법칙을 이용한다. 동역학 모델의 상황은 발이 지면에 접촉한 상황과 모델이 공중에 뜬 상황, 두 가지로 나눌 수 있다. 발이 지면에 접촉한 상황에서는 허리, 꼬리의 움직임이 있더라도 발과 접촉한 지면의 마찰력에 의하여 동역학 모델의 주행 방향은 yaw 방향으로 회전을 하지 않는다. 하지만 모델이 공중에 뜬 상황에서는 각운동량 보존의 법칙에 의해, 동역학 모델의 허리, 꼬리가 움직이는 방향과 반대 방향으로 주행 방향, 즉 body2의 yaw 각도가 회전하게 된다. 이때 허리, 꼬리의 움직임의 크기를 왼쪽 회전 방향과 오른쪽 회전 방향을 다르게 하면 더 많이 움직이는 방향으로 동역학 모델의 몸체가 회전하는 것이 가능하다. 그림 3. 6는 왼쪽으로 회전하고자 하는 개념을 허리 조인트의 각도 그래프를 통해 간단하게 설명한 것이다. Contact으로 표시된 구간에서는 허리 조인트를 움직여도 주행 방향은 변하지 않지만 air-borne으로 표시된 구간에서는 허리 조인트의 움직임에 따라 주행 방향이 회전하게 된다. 그림 3. 6의 그래프를 살펴보면 air-borne 구간에서 왼쪽과 오른쪽이 각각 a, b만큼 움직이며 a와 b의 차이만큼 주행 방향이 왼쪽으로 회전할 것으로 예상할 수 있다. 또한 그림 3. 7은 그림 3. 6의 허리 및 꼬리의 움직임을 적용하였을 때, 동역학 모델이 왼쪽 방향으로 회전할 것을 예상하여 연속적인 장면으로 표현한 것이다.

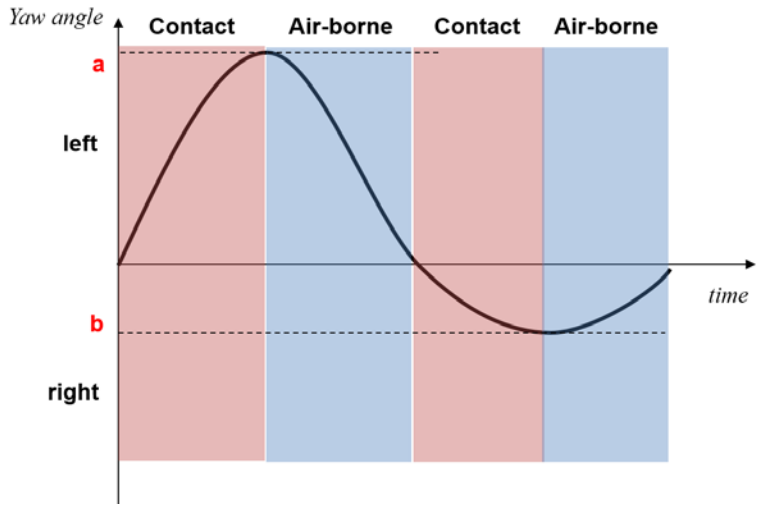


그림 3. 6 동역학 모델의 허리 조인트 각도 그래프의 개념도 (좌우 진폭 차이를 이용한 왼쪽 회전 보정)

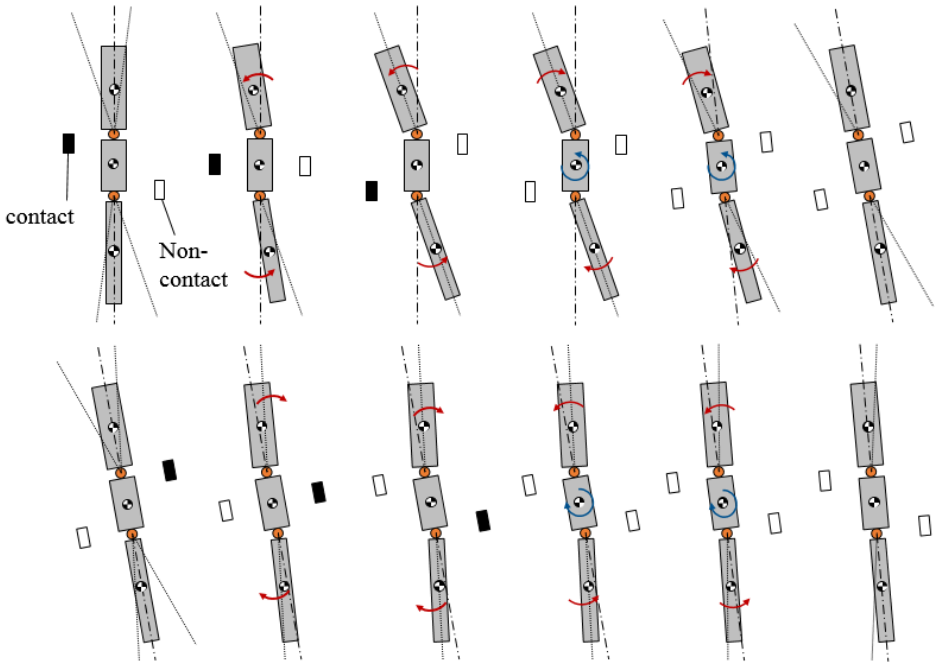


그림 3. 7 동역학 모델의 허리, 꼬리 움직임의 좌우 진폭 차이를 이용한 왼쪽 회전 보정

동역학 모델 허리, 꼬리의 움직임을 통해 주행 방향을 보정하는 방법은 두 가지의 장점이 있다. 첫 번째는 다리를 이용하여 주행 방향을 보정하는 것에 비해 제어가 더 간단하다는 것이다. 다리를 사용하여 주행 방향을 보정하려면 주행 방향으로의 속도는 그대로 유지하면서

주행 방향도 제어해야 하므로 다리의 기능이 많아지고 제어 또한 복잡해진다. 하지만 허리, 꼬리의 움직임을 이용하면 다리는 간단하게 추력만 발생하면 되고, 주행 방향 보정은 허리, 꼬리의 움직임으로 해결하면 되므로 각각의 기능에 맞게 엑추에이터가 분리되므로 상대적으로 제어가 훨씬 간단해진다. 두 번째는 회전 이후의 복원성이다. 각운동량 보존의 법칙을 통해 꼬리를 이용하여 주행 방향을 바꾸는 기존 로봇과 비교해보았다[35]. 그림 3. 8의 (a)와 같이 기존 로봇들은 로봇의 본체에 비견되는 질량을 꼬리에 설치하고, 원하는 주행 방향이 될 때까지 한번에 꼬리를 회전한다. 이때 로봇의 발에서는 필연적으로 슬립이 발생한다. 이 경우에는 로봇의 주행 방향이 회전하였을 때, 꼬리의 각도가 기존의 각도와는 다르게 변경되어 로봇의 무게 중심이 변경되거나, 변경하고자 하는 주행 방향의 회전에 한계가 발생한다. 이와 다르게, 본 연구의 허리, 꼬리 움직임의 원리는 그림 3. 8의 (b)와 같이 원하는 방향으로 회전을 한 이후에도 허리와 꼬리가 원래의 각도로 복원되므로 무게 중심의 변동이나 회전 방향의 한계가 없어진다.

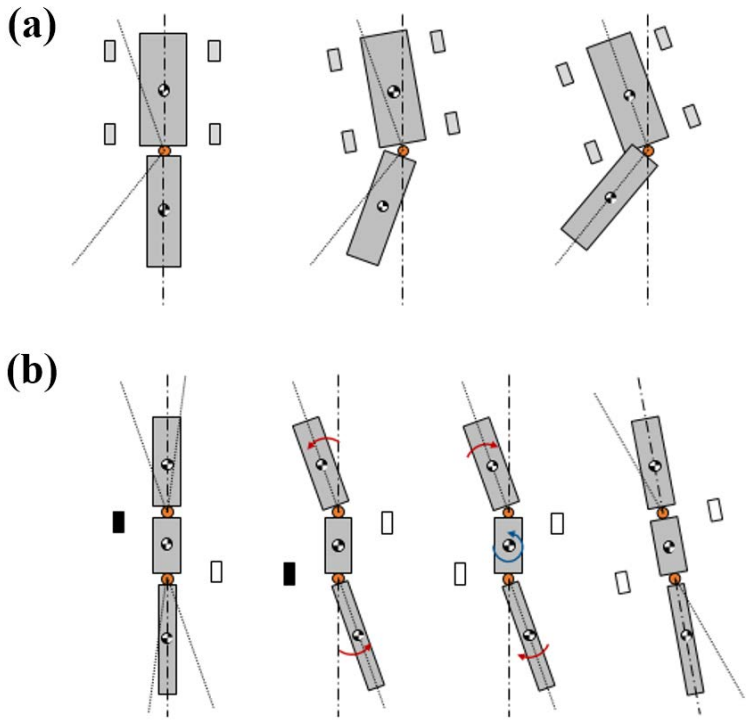


그림 3. 8 Yaw 방향 회전 비교: (a) 기존 꼬리를 가진 로봇의 원리 (b) 본 연구의 동역학 모델의 허리, 꼬리 움직임 원리

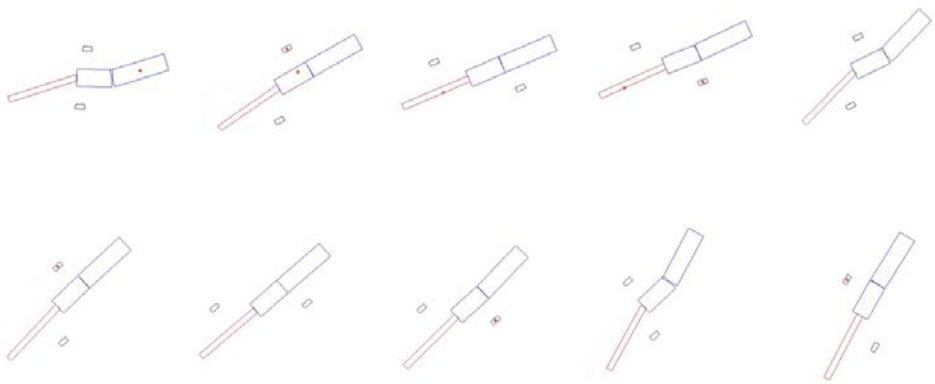


그림 3. 9 동역학 모델의 왼쪽 방향 회전 시뮬레이션(Matlab)

이 동역학 모델의 허리, 꼬리 움직임 원리도 단점이 있다. 단점은 한번에 회전할 수 있는 각도가 제한적이라는 것이다. 한번에 90° 이상을 회전할 수 있는 기존 로봇과는 달리 본 동역학 모델의 허리, 꼬리 움직임 원리는 몇 주기가 지나야 90° 이상을 회전할 수 있다. 이는 그림 3. 9의 동역학 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

동역학 모델의 허리, 꼬리의 움직임을 이용한 몸체의 회전 반경은 각 body의 질량과 허리, 꼬리 조인트의 각도 변화량에 따라 그 크기가 변경된다. 그림 3. 10의 (a)는 각 body의 질량과 각도 변화량을 표시한 것이고, 그림 3. 10의 (b)는 각 질량과 조인트 각도의 변화량이 변경되었을 때의 몸체의 회전 반경을 그래프로 설명한 것이다. 기본 값에서 약 10%씩을 변경하여 회전 반경을 조사한 결과, 그림 3. 10의 (b)의 그래프와 같이 조인트 각도의 변화량이 몸체의 회전 반경에 미치는 영향이 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

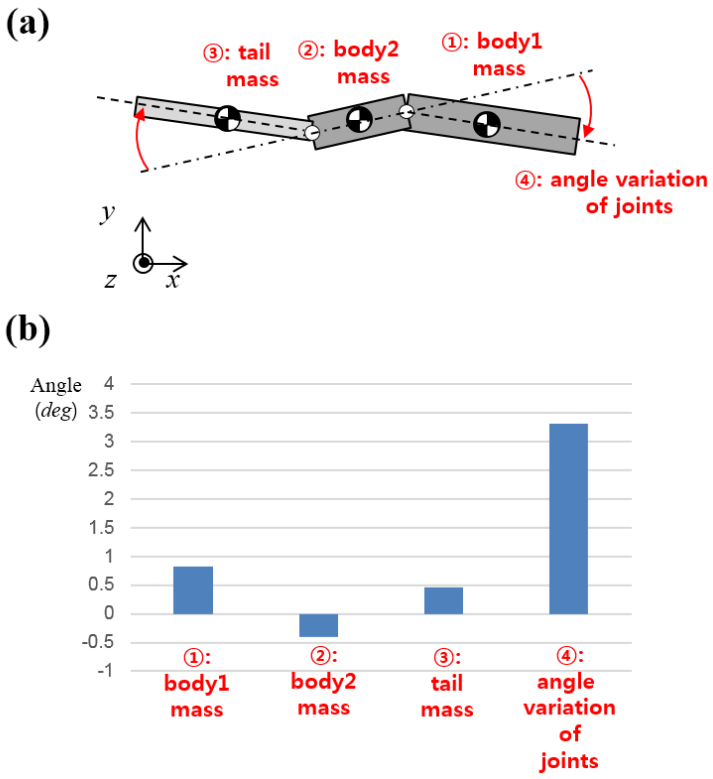


그림 3. 10 허리, 꼬리의 움직임을 통한 몸체 회전 반경과 각 body의 질량, 조인트 각도의 변화량과의 관계, (a) 동역학 모델 설명 개념도, (b) 관계 그래프

3.2.4.2. 동역학 모델 직진 주행 시뮬레이션

앞에서 언급한 것과 2족 로봇은 주행 방향을 제어하지 않는다면 먼저 닿는 발의 반대쪽 방향으로 회전할 수 밖에 없다. 또한 로봇의 양쪽 발에서 발생하는 추력 크기가 미세하게라도 다르다면 추력이 상대적으로 작은 쪽으로 회전할 수 밖에 없다. 이를 확인하기 위하여 허리, 꼬리의 움직임이 없는 동역학 시뮬레이션을 수행하고 이를 그림 3. 11에 표시하였다.

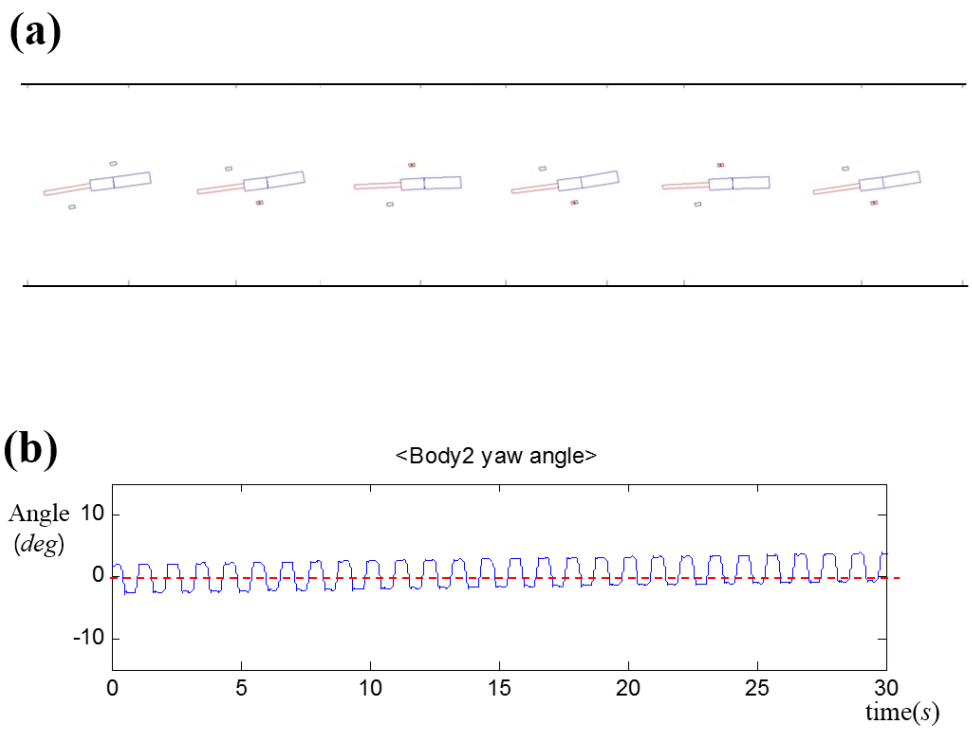


그림 3. 11 허리, 꼬리의 움직임이 없는 동역학 모델의 시뮬레이션, (a) 동역학 모델 시뮬레이션 캡쳐, (b) body2 yaw 방향 각도의 그래프

그림 3. 11의 (a)를 살펴 보면, 처음 지면과 닿는 발에 따라 모델의 주행 방향이 결정되고 그 방향으로 점차적으로 회전하는 것을 알 수 있다. 이를 그림 3. 11의 (b)의 그래프를 통해 더 자세하게 확인할 수 있다. Body2의 yaw 방향 각도는 주행 방향을 의미하고, 그래프를 확인하면 목표된 각도인 0도에서 점차 멀어져 가는 것을 알 수 있다. 이는 동역학 모델이 목표 방향에서 점차 멀어지는 것을 의미하고, 원래의 목표 방향으로 다시 되돌아올 수 없다는 것을 말한다. 따라서 허리, 꼬리의 움직임이 없다면 주행 방향을 유지하는 것이 불가능하다는 것을 확인할 수 있다.

제어가 없이 몸의 중심을 기준으로 sin의 함수로 허리와 꼬리를 움직였을 때, 동역학 모델의 주행 방향을 유지하는 것이 가능한지 확인하기 위해 그림 3. 12와 같이 시뮬레이션을 수행해보았다.

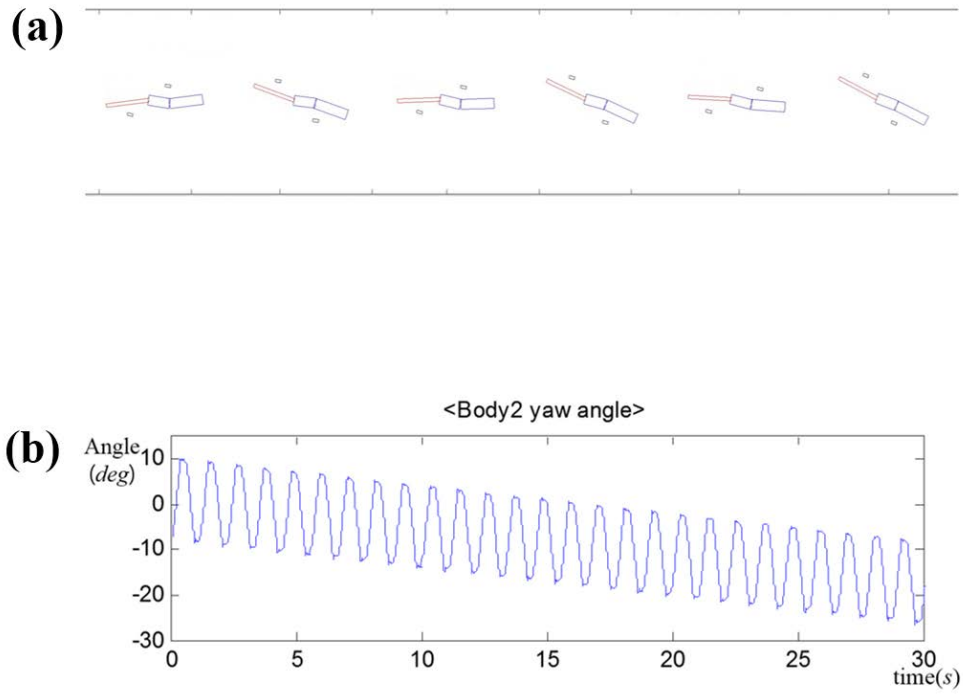


그림 3. 12 제어 없이 허리, 꼬리를 sin의 함수로 움직이는 동역학 모델의 시뮬레이션, (a) 동역학 모델 시뮬레이션 캡쳐, (b) body2 yaw 방향 각도의 그래프

시뮬레이션 결과, 그림 3. 12의 (b)의 그래프를 확인해보면 허리, 꼬리의 움직임이 없는 경우보다 더 빠르게 주행 방향에서 멀어지는 것을 확인할 수 있다. 이로써 주행 방향을 유지하기 위해서는 body2의 yaw 방향 각도를 피드백 받아서 허리, 꼬리의 움직임을 제어해야 한다는 것을 알 수 있었다.

따라서 body2의 yaw 방향 각도를 피드백 받아 허리, 꼬리의 양쪽 움직임 크기를 제어 변수로 하는 간단한 PD(Proportional-Differential) 제어를 구성하고 식을 (3.11)과 같이 수립하였다.

$$ang_{waist,tail} = k_d angvel_{body2} + k_p(ang_{dis,body2} - ang_{real,body2}) \qquad (3.11)$$

여기서 $ang_{waist,tail}$은 허리, 꼬리의 움직임 진폭의 크기이다. 그리고 $angvel_{body2}$는 body2의 yaw 방향의 각속도이며, $ang_{dis,body2}$는 목표 주행 방향, $ang_{real,body2}$는 현재 body2의 yaw 방향 각도이다. k_d는 differential 게인 값, k_p는 proportional 게인 값을 의미한다. 여기서

$ang_{real,body2}$는 실시간이 아니라 한 주기당 한 번의 각도를 의미한다. 왜냐하면 동역학 모델의 body2 yaw 방향 각도는 한 주기에서 좌우 방향으로 진동을 하기 때문에 실시간으로 yaw 방향 각도를 읽으면 실제 동역학 모델의 주행 방향과 다르게 해석될 수 있다.
위의 제어 식을 통해 허리, 꼬리의 움직임을 사용하여 몸체의 yaw 방향 각도를 보정하여 직진으로 주행하도록 시뮬레이션을 수행하여 그림 3. 13에 표현하였다. 그림 3. 14는 시뮬레이션을 수행하는 동안의 허리, 꼬리의 움직임을 나타낸 그래프이다.

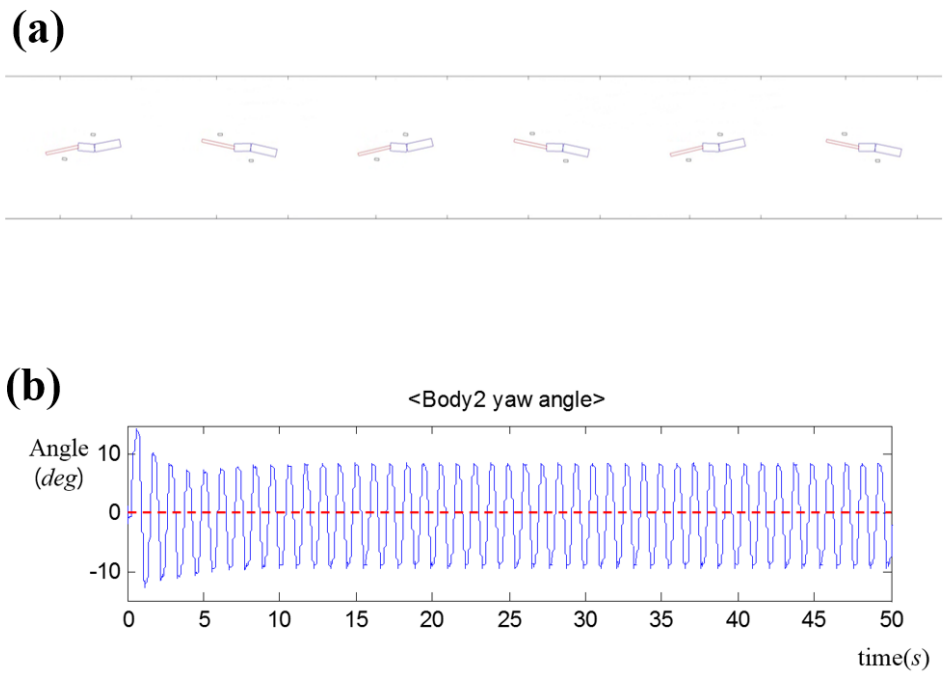


그림 3. 13 허리, 꼬리의 움직임으로 제어를 통해 주행 방향을 유지하는 동역학 모델의 시뮬레이션, (a) 동역학 모델 시뮬레이션 캡쳐, (b) body2 yaw 방향 각도의 그래프

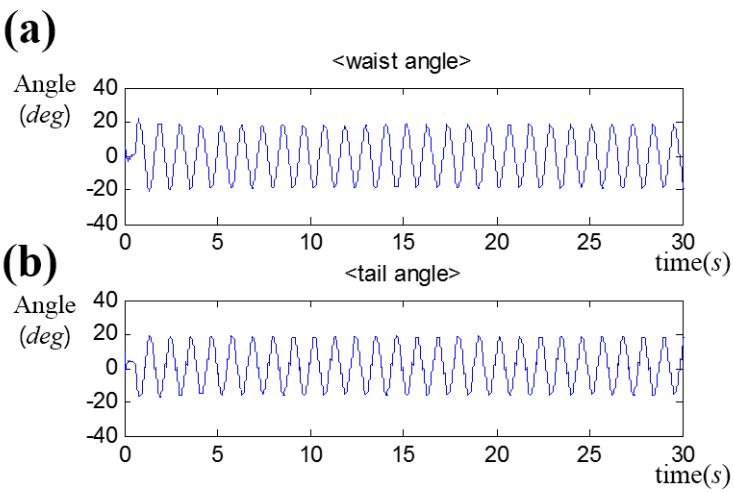


그림 3. 14 제어를 통해 주행 방향을 유지하는 동역학 모델 시뮬레이션의 (a) 허리 조인트의 움직임 각도, (b) 꼬리 조인트의 움직임 각도

그림 3. 13의 (b)를 살펴보면 body2의 yaw 방향 각도가 목표된 방향을 기준으로 진동하는 것을 확인할 수 있고, 이는 허리, 꼬리의 움직임을 통해 주행 방향을 유지한다는 것을 알 수 있다. 따라서 도마뱀의 주기적인 몸체 움직임이 2족 소형 보행 로봇에 적용되어 로봇의 주행 방향을 제어 및 유지할 수 있다는 가정을 동역학 모델과 시뮬레이션을 통해 검증할 수 있었다.

3.3. 도마뱀을 모사한 2족 소형 보행 로봇의 시제품 설계

앞에서는 동역학 모델과 시뮬레이션을 통해 도마뱀 허리, 꼬리의 주기적인 움직임이 모델의 주행 방향을 유지하는 역할을 한다는 사실을 확인하였다. 이를 실제 도마뱀을 모사한 2족 소형 보행 로봇에 적용이 가능한지를 확인하고자 한다. 따라서 2족 소형 보행 로봇에 적용 가능성을 확인할 수 있는 실험 장치인 로봇 시제품을 본 절에서 설계하고자 한다. 이 로봇 시제품은 동역학 모델의 반영할 수 있도록 몸체인 허리, 꼬리 메커니즘과 다리 메커니즘으로 구성되었다.

3.3.1. 도마뱀 로봇 시제품의 허리, 꼬리 메커니즘

도마뱀 로봇 시제품의 몸체는 동역학 모델과 동일하게 body1과 body2 그리고 tail의 세 부분으로 나누었다. 그림 3. 15와 같이 도마뱀 로봇 시제품의 폭과 길이는 도마뱀을 참고하여 결정하였다. 또한 허리와 꼬리 조인트의 위치도 동역학 모델을 참고하여 결정하였다.

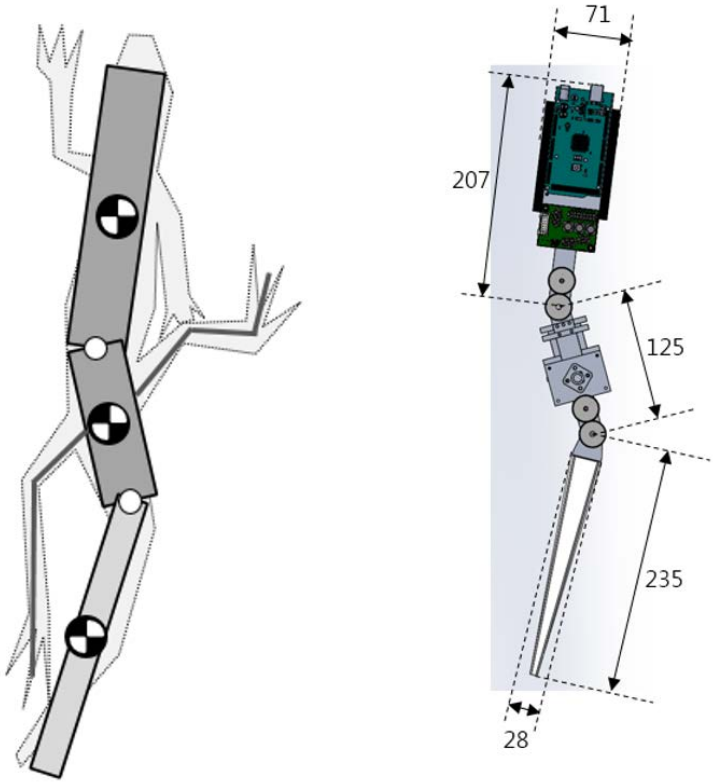


그림 3. 15 도마뱀 로봇 시제품의 허리, 꼬리 메커니즘 평면도 a) 도마뱀 연구 동역학 모델, b) 도마뱀 로봇 평면도 폭 및 길이

도마뱀의 허리와 꼬리 조인트는 그림 3. 16과 같이 각각 1개의 모터(motor– maxon ECmax22, gear ratio – 128:1)와 축을 이용하여 구성하여 능동적으로 구동하도록 설계되었다. Body1에는 다리의 모터와 허리의 모터를 제어하는 하위 제어기인 Epos2와 하위 제어기에 명령을 주는 상위 제어기 Arduino Mega가 탑재되었다. Body2는 꼬리의 모터를 제어하는 하위 제어기인 Epos2가 탑재되었다.

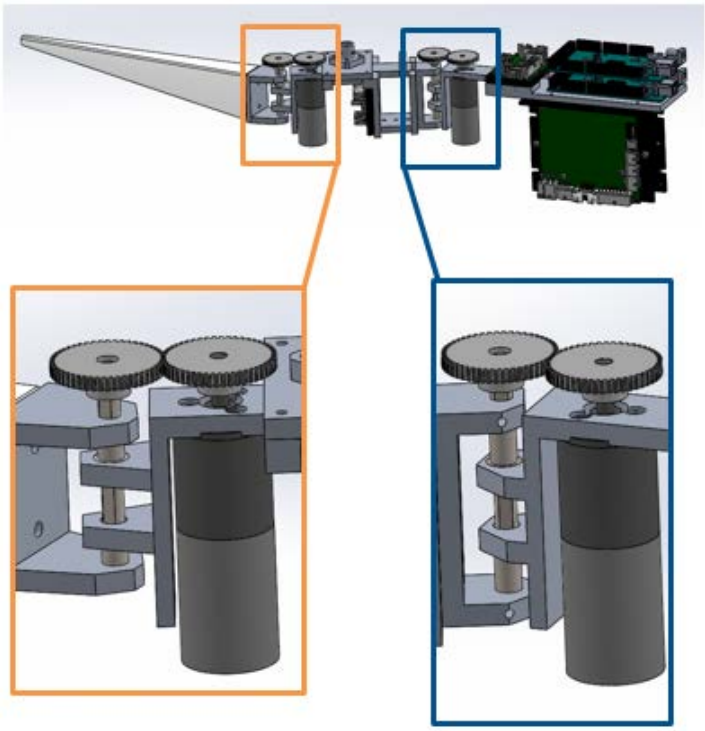


그림 3. 16 도마뱀 로봇 시제품의 허리, 꼬리 액추에이터와 축의 3차원 CAD

도마뱀 로봇 시제품의 모터를 제어하는 하위 제어기 중에서 다리는 Epos2 24/5, 허리와 꼬리는 Epos2 24/2를 사용하였다. 로봇의 전제 주행을 Arduino Mega 보드는 다리의 제어와 허리, 꼬리를 제어하는 것으로 각각 1개씩 총 2개의 보드를 사용하였다. 각 body의 길이와 무게를 정리하여 표 3. 1에 표시하였다.

표 3. 1 도마뱀 로봇 시제품의 길이와 무게

도마뱀 로봇 시제품	
total length (mm)	567
anterior body length (mm)	207
posterior body length (mm)	125
tail length (mm)	235
anterior body width (mm)	71

posterior body width (mm)	55
tail width (mm)	28
total mass (g)	2540
anterior body mass (g)	890
posterior body mass (g)	1460
tail mass (g)	190

3.3.2. 도마뱀 로봇 다리 메커니즘

도마뱀의 다리 메커니즘은 실제 도마뱀의 다리 질량이 전체 질량에 비해 작은 것을 반영하여 최대한 가볍게 설계하고자 하였다. 기존에 동물을 모사한 로봇들은 대부분 실제 동물의 다리 구조를 그대로 반영하여 각 관절마다 액추에이터를 설치하였다. 따라서 다리에 적어도 액추에이터, 모터가 2개 이상씩 설치되었고, 이는 다리의 무게를 증가시키는 요인으로 작용하였다. 본 연구에서는 도마뱀 로봇 시제품의 다리 메커니즘이 가벼우면서도 도마뱀의 주행 특성을 반영하기 위해, 다리의 액추에이터 수를 하나로 제한하고, 도마뱀의 주행 특성을 결정하는 뒷발 궤적을 모사하는 4절 링크의 최적화 방법에 대하여 연구를 수행하였다.

3.3.2.1 뒷발 궤적의 추출 및 근사 함수 설정

4절 링크 최적화를 수행에 앞서 최적화의 목적이 되는 뒷발 궤적을 Callisaurus draconoides의 주행 영상에서 추출하였다. Callisaurus draconoides의 뒷발 궤적은 1 주기에 해당하는 23개의 데이터로 모션 캡쳐를 통해 추출하였고 추출되는 뒷발의 위치는 그림 3. 17에 표시하였다.

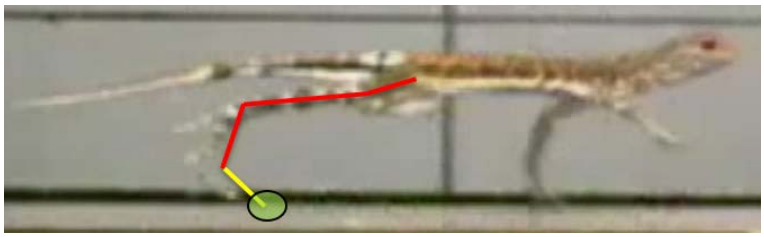


그림 3. 17 뒷발의 모션 캡쳐(빨간 선: 뒷다리, 노란 선: 뒷발, 초록색 원: 발의 궤적 위치)

궤적을 모사하는 4절 링크 최적화를 수행하기 위해서는 동영상 스냅샷의 뒷발 궤적 데이터를, 연속성이 있는 함수로 근사 하는 것이 필요하였다. 이는 4절 링크의 뒷발 궤적 최적화 방법을 수행할 때, 기준이 되는 궤적의 미분 값을 사용하기 때문이다. 따라서 앞에서 모션 캡쳐를 통해 추출한 궤적을 cosine과 sine의 함수로 근사화 하였다. 근사함수는 두 개의 다른 frequency를 가지는 cosine함수의 조합을 사용할 경우가 frequency가 하나인 경우에 비해 더 정확하게 근사 되는 것을 확인하고 이를 반영하였다. 또한 x축의 좌표와 y축의 좌표를 독립적으로 근사하여 동영상의 스냅샷을 통해 추출된 발의 궤적과 근사함수를 일치하고자 하였다. 근사함수는 cosine과 sine 함수의 진폭과 위상 차를 A, B, C, D, E, F, G, H로 선정하여 식 (3.12), (3.13)에 정리하였다.

$$\mathrm{X} = \mathrm{A}_1 \cos\left(\frac{\pi}{2}t + A_2\right) + B_1 \cos\left(\frac{\pi}{4}t + B_2\right) + C_1 \sin\left(\frac{\pi}{2}t + C_2\right) + D \quad (3.12)$$

$$\mathrm{Y} = \mathrm{E}_1 \cos\left(\frac{\pi}{2}t + E_2\right) + F_1 \cos\left(\frac{\pi}{4}t + F_2\right) + G_1 \sin\left(\frac{\pi}{2}t + G_2\right) + H \quad (3.13)$$

위에서 정리한 근사함수의 A, B, C, D, E, F, G, H의 계수를 변경하여 동영상 스냅샷을 통해 추출된 궤적과의 차이를 최소화하고자 하였다. 따라서 식 (3.14)와 식 (3.15)를 최소화하는 A, B, C, D, E, F, G, H의 계수를 Matlab의 fmincon 기능을 이용하여 추출하였다.

$$\sum(X_{ref} - X)^2 \quad (3.14)$$

$$\sum(Y_{ref} - Y)^2 \quad (3.15)$$

식(3.14), 식(3.15)를 최소화하는 근사 함수의 계수는 표 3. 2에 정리하였다. 또한 그림 3. 18에서는 동영상 스냅샷으로 추출된 궤적과

근사 함수의 궤적을 비교하였다. x축 좌표와 y축 좌표에 관하여 추출된 궤적과 근사 함수를 비교해볼 때, R 값이 각각 0.991, 0.989로 매우 잘 근사 되었음을 확인할 수 있다.

표 3. 2 최적화된 근사함수의 계수 값

Coefficient	Value
A_1	282.3
A_2	0.3673
B_1	58.96
B_2	0.0420
C_1	67.90
C_2	0.9645
D	1661
E_1	132.1
E_2	2.368
F_1	21.20
F_2	0.8552
G_1	13.93
G_2	0.5141
H	1910

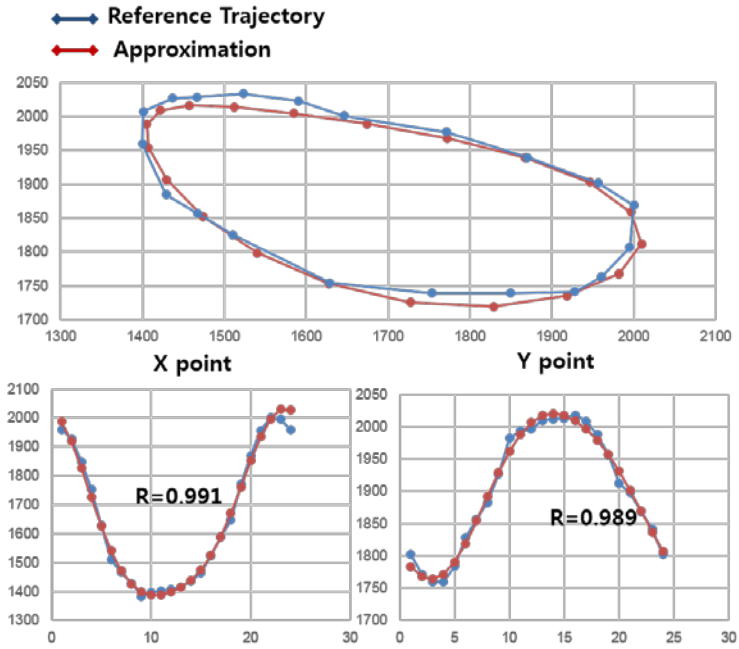


그림 3. 18 모션 캡쳐를 통해 추출된 뒷발 궤적과 근사 함수의 비교

3.3.2.2. 4절 링크의 제한 조건과 설계 변수 정의

앞에서 설정한 근사 함수의 궤적을 4절 링크의 설계 변수를 최적화하여 endpoint의 궤적으로 구현하고자 한다. 그림 3. 19에서와 같이 4절 링크는 총 7개의 설계 변수를 가지고 있다.

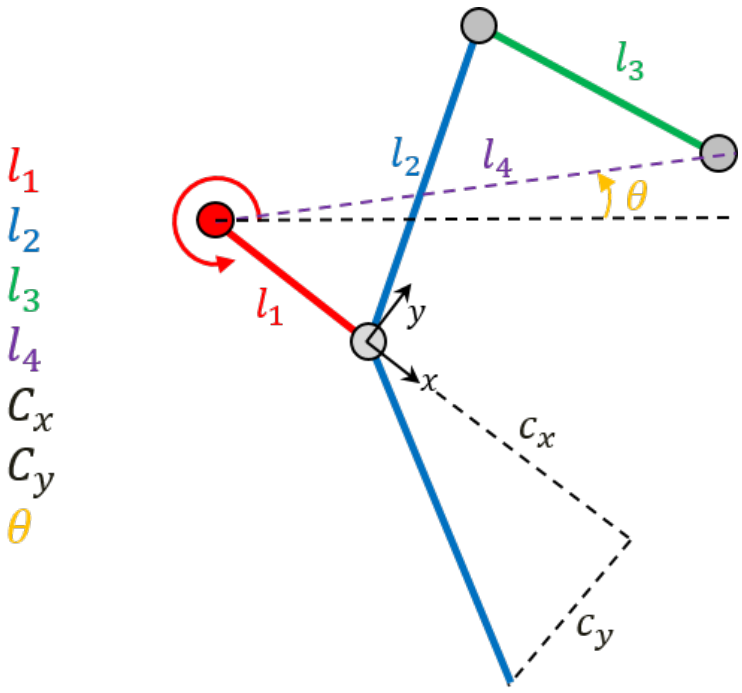


그림 3. 19 4절 링크의 설계 변수

l_1, l_2, l_3, l_4는 그림 3. 19에 표시된 각 링크의 길이를 의미한다. 그 중에서 link1은 크랭크 링크이며 능동적으로 회전하여 4절 링크를 구동하는 역할을 한다. link4는 ground에 연결되어 있는 회전 중심 사이의 거리를 의미한다. 4절 링크의 endpoint는 link2의 연장선 상에 있으며 link1과 link2 사이에 있는 조인트를 원점으로 C_x, C_Y만큼 이동한 곳에 위치한다. θ는 ground에 연결되어 있는 회전 중심들을 연결하는 직선과 수평선이 이루는 각도이다. 위의 7개의 설계 변수를 설정하면 Matlab 프로그램을 통해 endpoint의 궤적을 그림 3. 20과 결정할 수 있다.

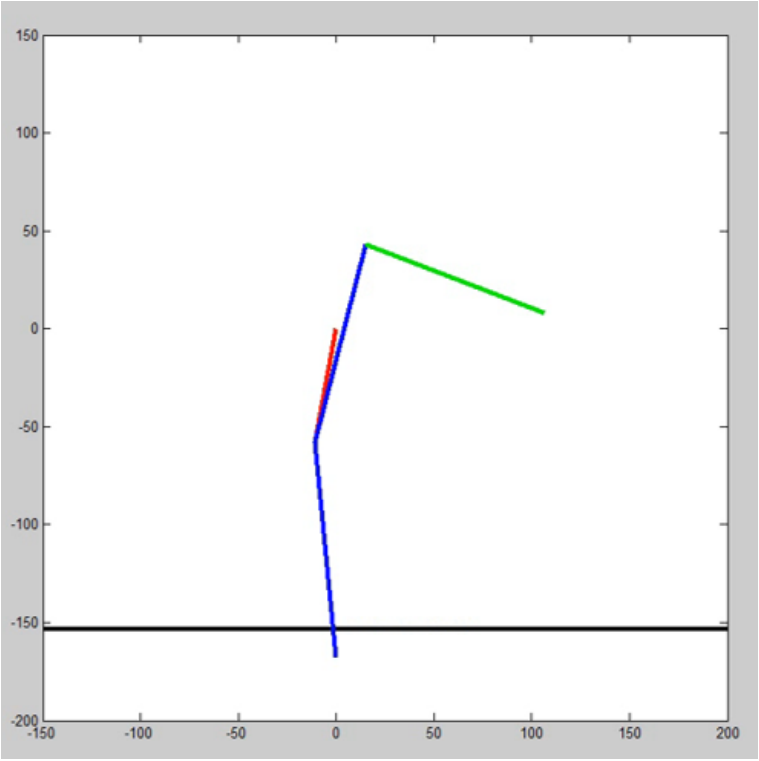


그림 3. 20 4절 링크의 endpoint의 궤적(Matlab)

일반적으로 Grashof condition를 만족하면 4절 링크는 성립하며 다른 제한 조건은 존재하지 않는다. 하지만 본 연구의 4절 링크는 도마뱀 로봇 시제품의 다리 메커니즘을 위한 것이므로 로봇 시제품과 관련된 제한 조건이 존재한다. 로봇 시제품의 크기와 관련하여 각 회전 중심들의 위치가 x축으로 120이하 y축으로 50이하 이여야 한다. 로봇 시제품의 주행과 관련된 제한 조건으로 로봇 시제품의 contact line의 길이는 130으로 유지하면서 duty factor는 도마뱀과 유사한 0.24가 되어야 한다. 또한 지면에서는 크랭크 링크가 일정한 각속도를 유지할 때, 지면에 접촉한 endpoint의 x방향의 진입 속도와 방출 속도의 차이가 작은 평속을 유지하여 한다. 여기에서는 크랭크 링크의 rpm이 120으로 고정하였을 때, 방출 속도인 v_{2x} = 1.4 m/s 이고 진입 속도와 방출 속도의 차이는 $v_{2x} - v_{1x}$ < 0.2 m/s로 제한되었다. 이러한 구속 조건들은 그림 3. 21에 정리되어 나타내었다.

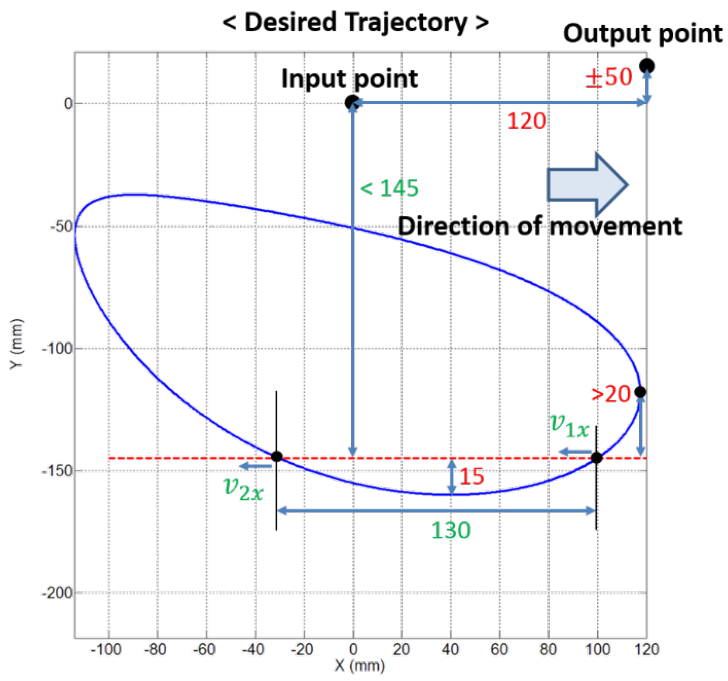


그림 3. 21 도마뱀 로봇 시제품의 다리 메커니즘을 위한 4절 링크의 제한 조건

3.3.2.3. 4절 링크 최적화

본 연구에서 사용된 4절 링크 최적화 방법론은 Hybrid Taguchi Random Coordinate search Algorithm (HTRCA) [36]이다. 이 방법은 크게 두 개의 단계를 거쳐 이루어진다. 첫 번째 단계는 기준이 되는 궤적의 미분 값과 4절 링크의 endpoint의 궤적의 미분 값 차이를 최소화하는 것이다. 이 단계를 통해서 4절 링크의 endpoint 궤적의 형상은 기준 궤적과 유사해진다. 최적화의 첫 번째 단계를 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\min_{X_{link} \in R^5} RMS(1^{st}\ deriv._G - 1^{st}\ deriv._D)$$

Subject to Desired Shape

$T_1, T_2, T_3 > 0$ → Grashof Condition

두 번째 단계는 각 궤적의 두 번째 미분한 값의 오차를

최소화함으로써 궤적의 크기를 기준 궤적과 일치되도록 결정한다. 최적화의 두 번째 단계를 정리하면 아래와 같다.

$$\min_{l_1 \in R} \; RMS(2^{nd}\, deriv._G - 2^{nd}\, deriv._D)$$

Subject to $$X_{link} = X_{link}^{*}$$

이 4절 링크 최적화 방법의 장점은 대부분의 최적화 방법들이 하지 못하는 폐쇄된 곡선에 대하여 최적화가 가능하다는 것과 다른 최적화 방법들에 비해 실패 확률이 매우 적다는 것이다. 게다가 이 최적화 방법론은 단지 궤적의 모양만 최적화하는 것이 아니라 궤적의 속도 프로파일까지 고려된다는 장점이 있어 앞에서 설정한 속도에 대한 구속 조건을 만족하면서 최적화를 수행할 수 있었다.

뒷발이 공중에 있는 경우보다는 지면에 접촉하였을 때 도마뱀의 주행에 더 큰 영향을 미치기 때문에, 목표된 최적화 궤적을 공중에서의 궤적과 지면에 접촉한 궤적을 나누고 가중치를 1대 3으로 다르게 주어, 지면에 접촉한 부분을 더 잘 반영하도록 하였다. 그 결과, 최적화된 궤적은 기준 궤적과 함께 비교되어 그림 3. 22에 표현하였다. 그리고 설계 변수는 표 3. 3에 정리하였다.

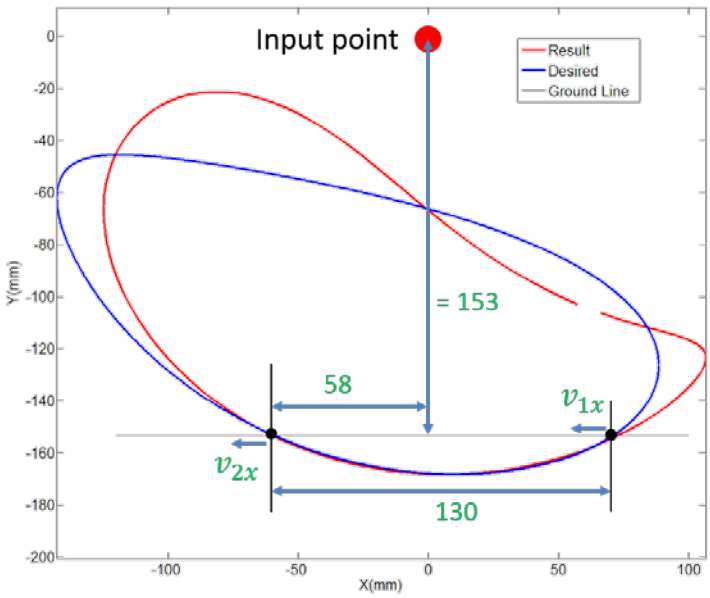


그림 3. 22 도마뱀의 기준 궤적(파란색)과 4절 링크 최적화를 통해 추출된 궤적(빨간색)

표 3. 3 최적화된 4절 링크의 설계 변수

Design Variable	Value
l_1 (mm)	58.901
l_2 (mm)	104.059
l_3 (mm)	98.169
l_4 (mm)	107.004
C_x (mm)	−104.059
C_Y (mm)	−38.286
Θ (rad)	0.0734

3.3.2.4. 도마뱀 로봇 시제품 다리 메커니즘의 3차원 CAD

위에서 도출된 설계 변수를 가지고 그림 3. 23과 같이 다리의 3차원 CAD 모델을 Solidworks 2014 프로그램을 통해 생성하였다.

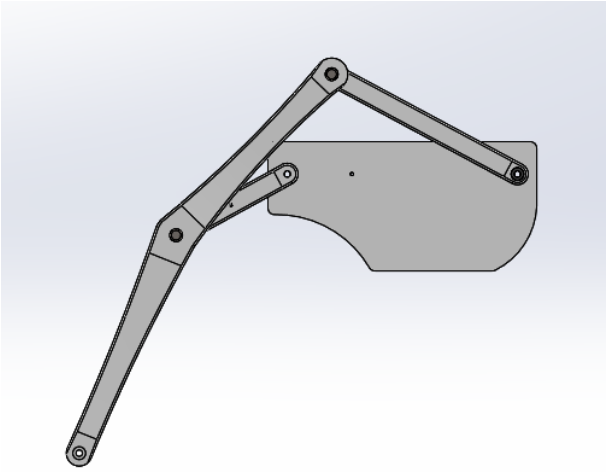


그림 3. 23 도마뱀 로봇 시제품 다리 메커니즘의 3차원 CAD 모델

위의 다리 메커니즘이 지면에 접촉하였을 때, 효과적으로 지면으로부터 추력을 얻기 위해서는 마찰력을 충분히 얻을 수 있는 넓은 발이 필요하였다. 또한 현재 다리 메커니즘의 endpoint는 궤적의 위치에 따라 각도 프레임이 바뀌기 때문에 지면에서 접촉하였을 때, 항상 지면과 수평을 유지하여 일정하게 마찰력을 얻을 수 있게 하는 추가적인 구조가 필요하였다. 따라서 위의 필요 조건을 만족할 수 있는 발목-발 메커니즘을 그림 3. 24와 같이 4절 링크의 추가 링크를 연결하여 구성하였다.

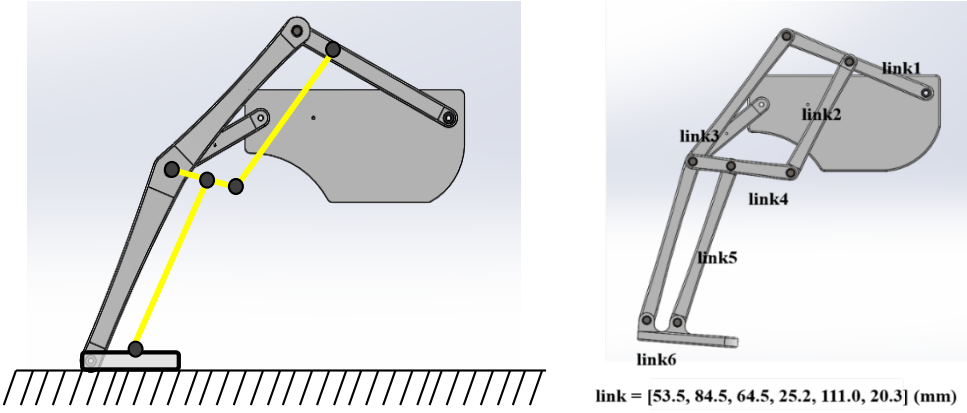


그림 3. 24 지면과의 접촉을 고려한 발목-발 메커니즘

그림 3. 25와 같이 마찰력을 발생하기 위한 발목의 적절한 진입

각도와 방출 각도를 Matlab을 프로그램을 이용하여 추가 링크의 길이를 조절하는 시뮬레이션을 수행함으로써 결정하였다.

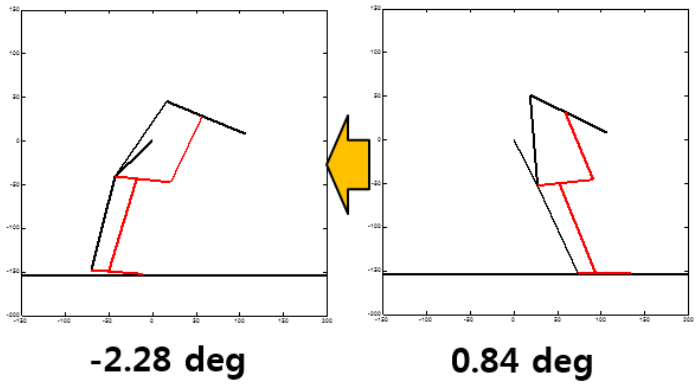
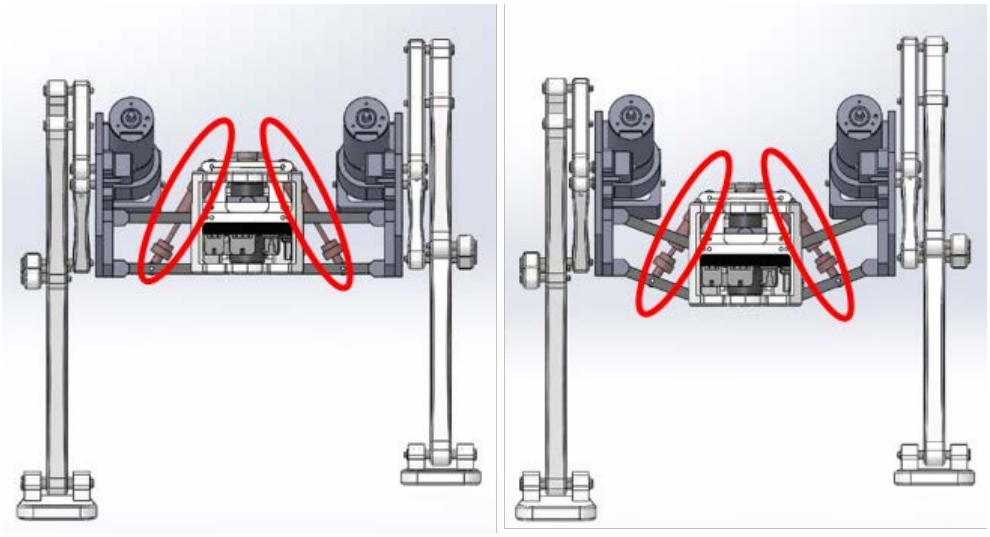


그림 3. 25 발목-발 메커니즘의 Matlab 프로그램을 이용한 시뮬레이션

발이 지면에 접촉할 때, 갑자기 지면에서 받는 큰 충격을 로봇 시제품이 그대로 받는 것을 방지하고자 이를 흡수할 수 있는 double-wish bone compliant 구조를 그림 3. 26과 같이 설계하였다.



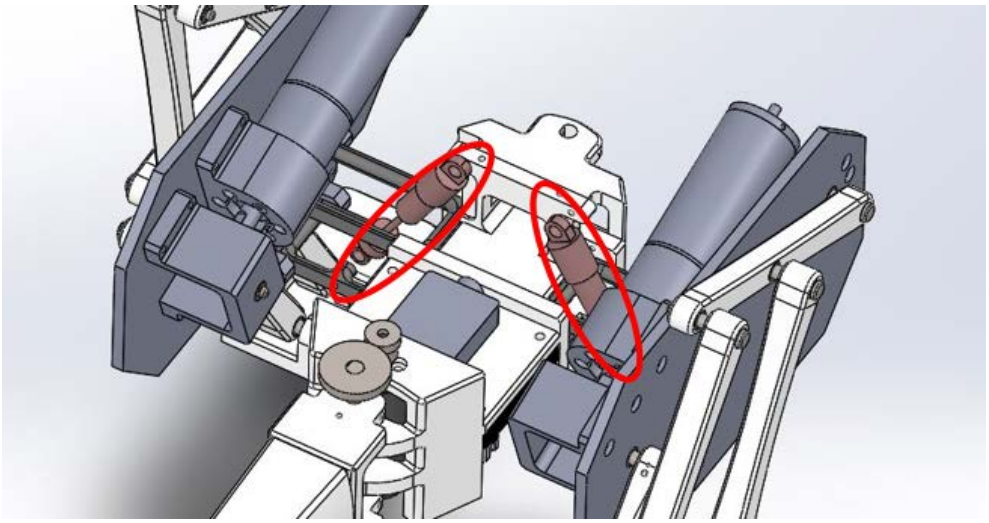
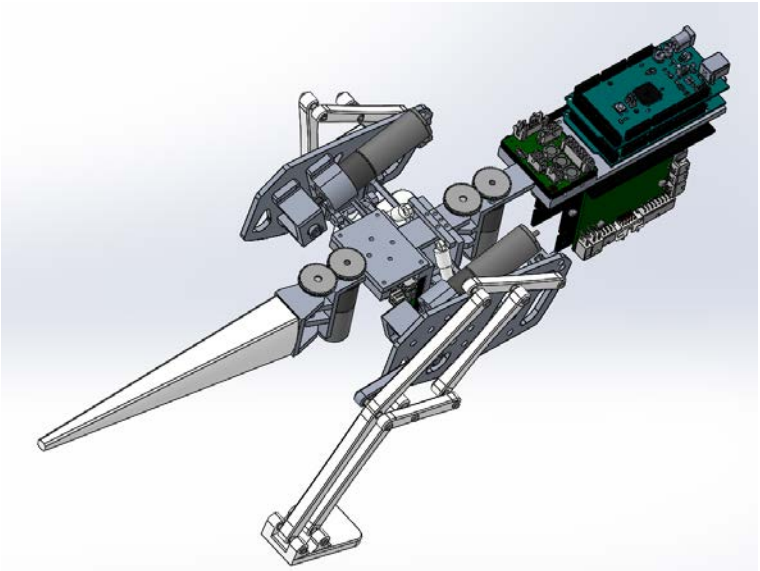


그림 3. 26 지면에서의 충격을 흡수할 수 있는 double-wishbone compliant 구조

3.3.3. 도마뱀 모사 로봇 시제품의 3차원 CAD

위의 연구에서 설계된 몸체 메커니즘과 다리 메커니즘을 종합하여 구성한 도마뱀 모사 로봇의 시제품은 그림 3. 27과 같이 3차원의 CAD로 설계 되었다.



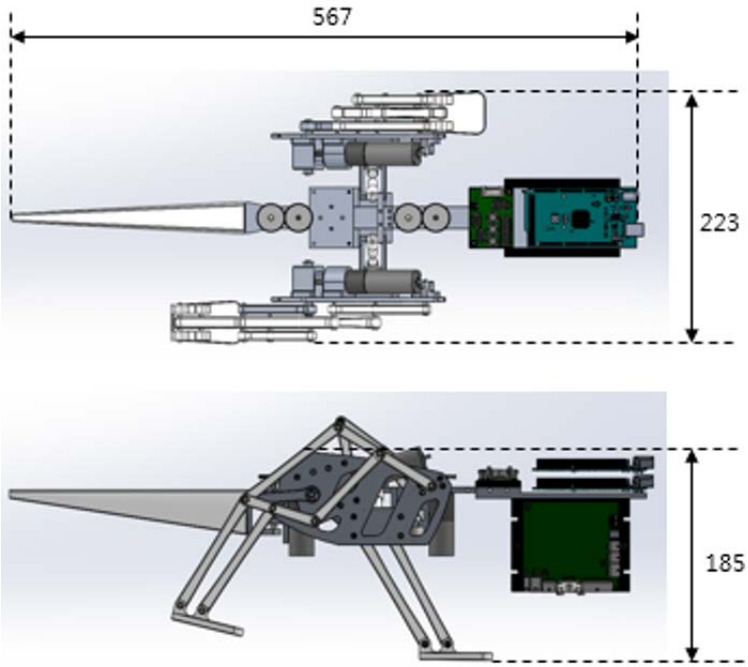


그림 3. 27 도마뱀 모사 로봇 시제품의 3차원 CAD

도마뱀 모사 로봇의 몸체는 body1, body2, tail의 세 부분으로 구성되어 있다. 각 조인트에는 액추에이터의 역할로 모터가 장착되어 능동적으로 움직일 수 있도록 설계되었다. 로봇은 뒷다리로 추력을 발생시켜서 주행하는 2족 보행 구조이며, 추력을 발생시키는 다리는 링크 구조로 4절 링크의 길이 최적화를 통해 설계하였다. 발은 지면과 닿은 경우에 지면과 수평을 이룰 수 있도록 4절 링크에 추가 적인 링크를 추가하여 설계하였다. 로봇 시제품의 몸체와 다리 사이에는 shock을 장착하여 지면에 발이 닿은 경우에 충격이 한꺼번에 받지 않도록 compliance 메커니즘을 추가하였다. 로봇의 총 무게는 2.490 g이며 총 길이는 567 mm 이다.

로봇은 그림 3. 28의 자유도 구속 장치를 통해 roll, pitch, z축의 자유도가 제한된다. x, y, yaw의 자유도만 허락되며 허리와 꼬리의 움직임을 통해 주행 방향, 즉 yaw 방향 각도를 유지하는 것을 관찰함으로써 도마뱀 몸체 연구 원리의 2족 보행 족 로봇으로의 적용 가능성을 검증할 것이다.

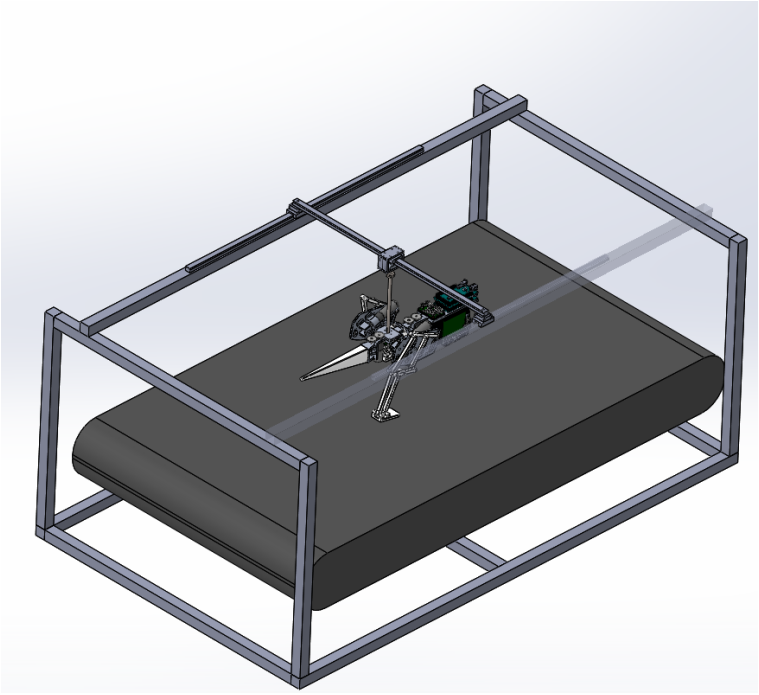


그림 3. 28 도마뱀 모사 로봇 시제품의 테스트 벤치 및 자유도 구속 장치

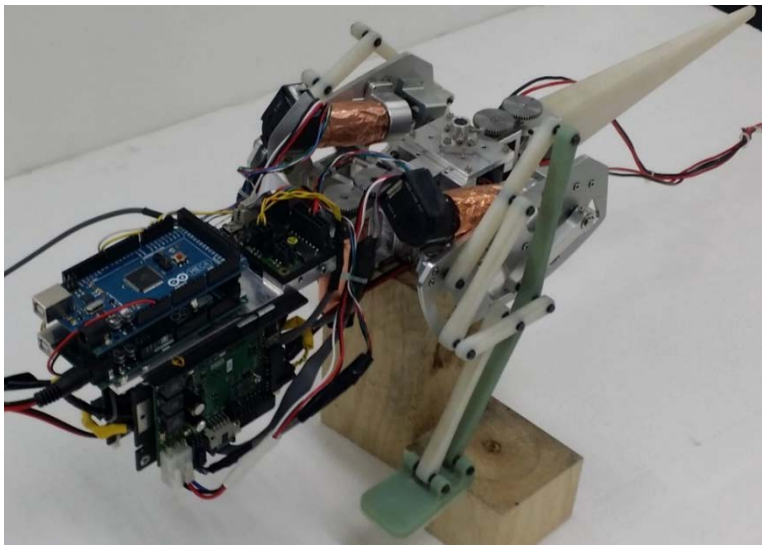
3.4. 도마뱀을 모사한 2족 소형 보행 로봇의 시제품 제작 및 실험

앞의 절에서 설계한 도마뱀 모사 로봇의 시제품을 본 절에서 실제로 제작하고 주행 실험을 하고자 한다. 로봇 시제품의 본체는 알루미늄과 ABS plastic으로 제작되었다. 로봇 시제품은 상용 트레드밀 위에서 주행 실험을 수행하며, 3차원 공간상의 자유도를 2차원 평면으로 구속하기 위한 구속장치를 추가로 장착하였다. 로봇의 통신은 RS232통신 방법을 사용하였고, 센서는 IMU의 기울기센서를 이용하였다. 본 실험을 통하여 도마뱀의 주기적인 허리, 꼬리 움직임 원리를 2족 소형 보행 로봇에 적용하여 주행 방향을 유지하는 것의 가능성을 확인하고자 한다.

3.4.1. 도마뱀 모사 로봇 시제품의 제작

도마뱀 모사 로봇의 시제품은 그림 3. 29와 같이 제작되었다. 로봇의 총 길이는 567 mm이고 폭은 223 mm, 높이는 185 mm이다. 로봇 시제품의 몸체에는 허리, 꼬리 조인트에 각각 모터가 1개씩 사용되었다(maxon사, ECmax22, 15W). 모터의 회전축은 높이 방향인

z축으로 몸의 중심을 기준으로 sine함수로 swing 운동을 수행한다. 로봇 시제품의 다리를 구동하는 모터는 좌우 방향인 z축으로 설치되어 정 방향으로 회전하여 다리 링크인 4절 링크를 구동하는 역할을 한다(maxon사, EC4pole22, 90W).



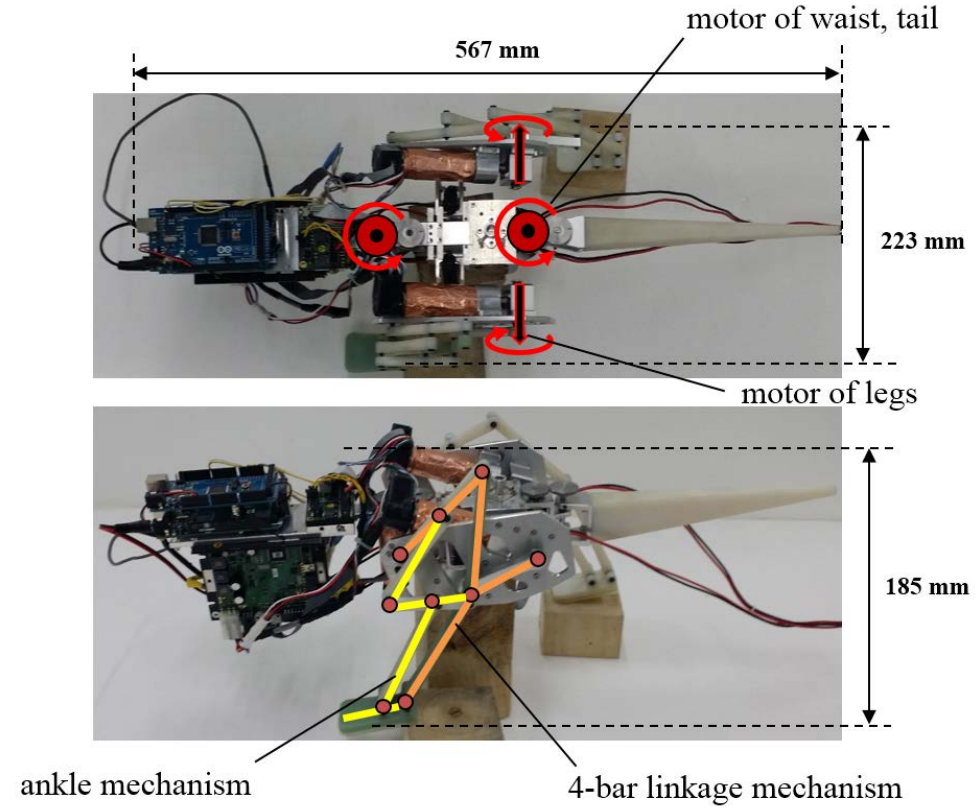


그림 3. 29 도마뱀 모사 로봇의 시제품 및 모터와 링크 구조

다리 모터의 경우 추력을 발생하는 중요한 역할을 한다. 따라서 무게는 가벼우면서 원하는 토크를 발생할 수 있는 모터를 선정하기 위해 모터의 선정 이전에 정역학 해석을 수행하였다. 식 (3.16)은 지면에서의 반력과 모터의 토크의 관계를 자코비안을 이용하여 나타낸 것이다.

$$\tau = J^T F \tag{3.16}$$

여기서 τ는 모터의 토크, F는 지면의 반력, J는 자코비안 벡터를 의미한다. F는 도마뱀 모사 로봇 시제품의 특성상 지면에 접촉한 발과 몸체 사이에 스프링이 존재하고, 높이 방향의 F_y는 스프링의 변위량인 x와 탄성계수 k에 의해 결정된다. 에 대하여 식 (3.17)에서 정리하였다. 여기서 μ는 발과 지면과의 마찰 계수이다.

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu kx \\ kx \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

측정을 통해 스프링의 탄성계수는 $k = 300\,N/m$임을 확인하고 마찰 계수 $\mu = 1$로 가정하면, 그림 3. 30의 (a)와 같이 다리 메커니즘의 발 궤적과 지면과의 거리 차이에 의해 그림 3. 30의 (b)와 같이 필요한 모터 토크가 계산된다. 정역학 해석 결과 필요한 모터 토크의 최대값은 0.557 Nm이다. 따라서 모터 토크의 최대값을 고려하여 2 가지의 모터 후보 중에서 안전 계수가 2.67인 두 번째 모터를 선정하고 표 3. 4에 정리하였다.

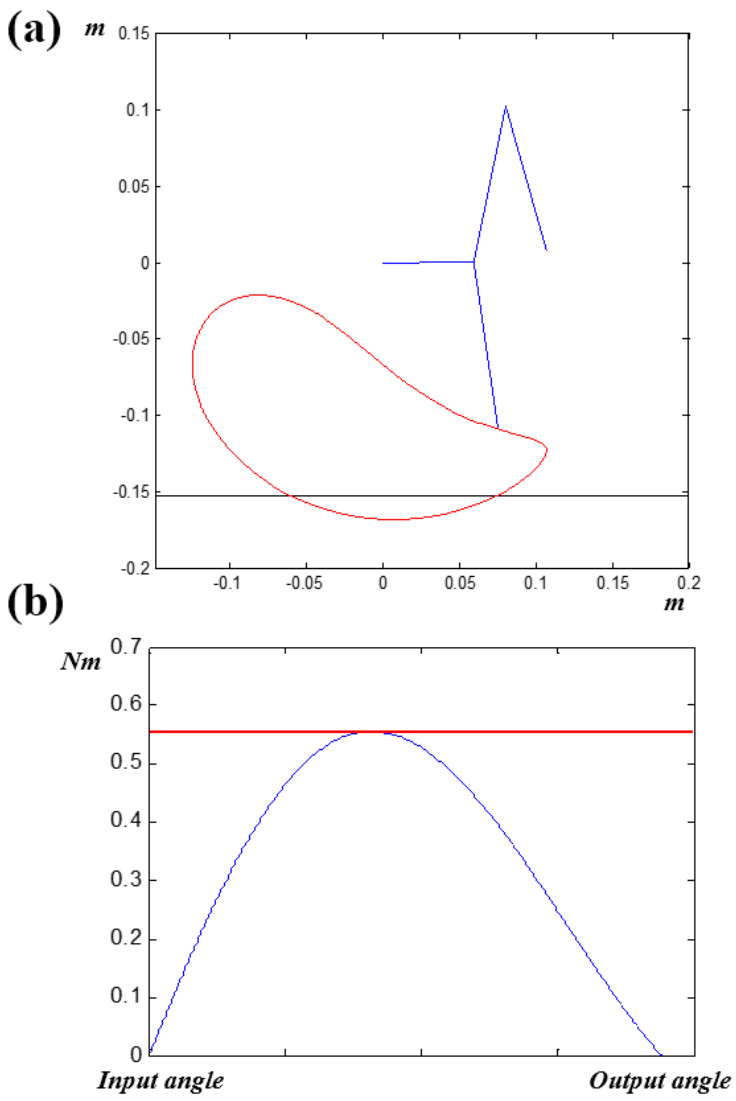


그림 3. 30 (a) 도마뱀 모사 로봇 시제품의 발 궤적과 지면과의 거리, (b) 정역학 해석을 통해 계산된 필요 모터 토크

표 3. 4 다리 모터 선정

	모터1 (RE25, 20 W)	모터2 (EC4Pole 22, 90 W)
기어비	35:1	53:1
RPM	228	226
최대 토크	0.749 Nm	1.489 Nm
안전계수	1.34	2.67

무게	200 g	210 g

그림 3. 31과 같이 도마뱀 로봇 시제품의 몸체는 제어기나 모터 등의 탑재한 것들이 많기 때문에 이들을 보호하기 위하여 외부의 충격에도 쉽게 파괴되지 않는 알루미늄으로 제작하였고, 다리와 꼬리는 비교적 가벼운 재질인 ABS plastic으로 제작하였다. 특히 다리 재질인 ABS plastic는 그 재료 자체가 compliance한 성질을 가지고 있기 때문에 순간적인 충격에 강인하게 버티면서도 원래의 목적인 다리의 질량을 가볍게 하는 역할을 한다.

그림 3. 31에서 확인할 수 있는 것처럼 로봇 시제품의 body1에는 상위 제어기 Arduino Mega 2개와 하위 제어기인 Epos2 24/5 2개, Epos2 24/2 1개, 허리 조인트 모터가 탑재되어 있다. Body2에는 하위 제어기인 Epos2 24/2 1개, 꼬리 조인트 모터 1개, 다리 구동 모터 2개가 탑재되어 있으며, 꼬리에는 아무것도 탑재 되어 있지 않다. 로봇 시제품의 총 질량은 2.54 kg이고 각각 body1의 질량은 0.89 kg, body2의 질량은 1.46 kg, tail의 질량은 0.19 kg으로 동역학 모델과 동일하게 제작되었다.

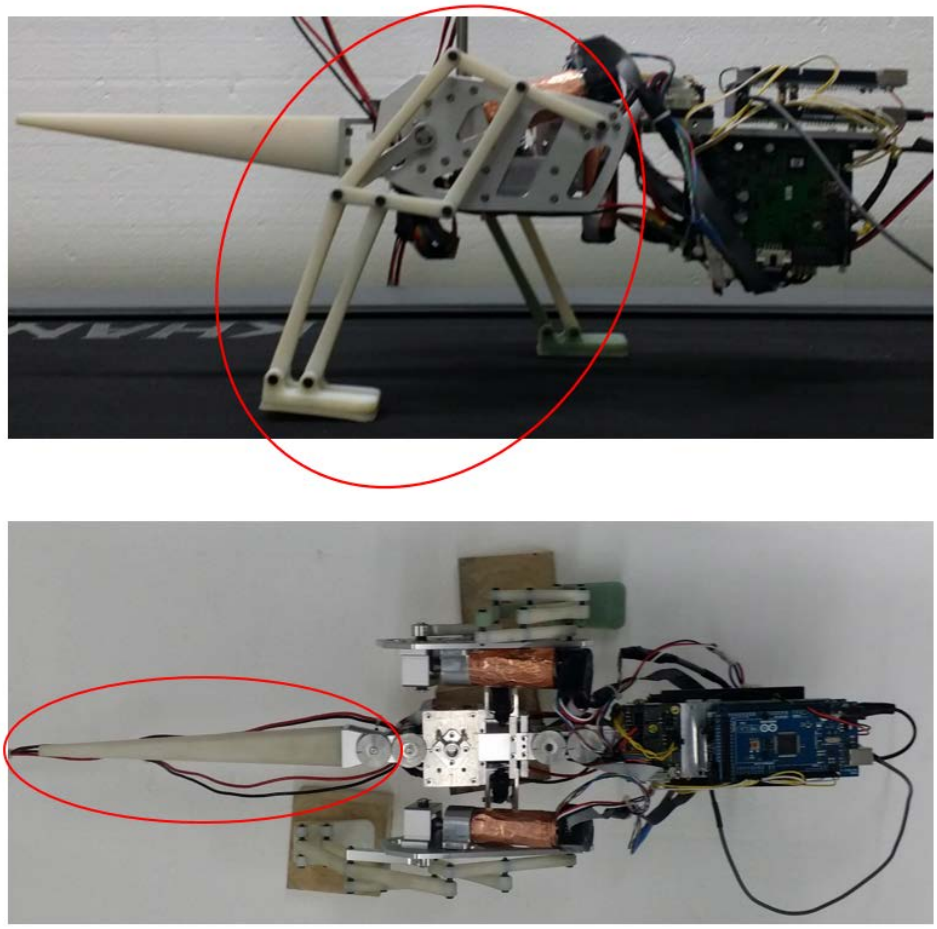


그림 3. 31 도마뱀 모사 로봇 시제품의 각 부품 및 가공 재료

3.4.2. 테스트 벤치 및 자유도 구속 장치

도마뱀 로봇 시제품의 주행은 그림 3. 32의 상용 트레드밀을 이용하여 그 위에서 진행하였다. 트레드밀은 0.1 km/h(0.0278 m/s)의 단위로 속도를 조절하는 것이 가능하여 로봇 시제품의 주행 속도와 맞추어 평속을 유지하도록 조정하였다. 트레드밀의 폭은 그림 3. 34에서 확인할 수 있듯이 530 mm이다.

그림 3. 32 도마뱀 로봇 시제품 주행용 트레드밀

테스트 벤치의 상단에는 그림 3. 33과 같이 초고속 카메라(480 fps)를 장착하여 주행 영상을 항상 일정한 각도와 거리에서 측정하는 것이 가능하도록 하였다.

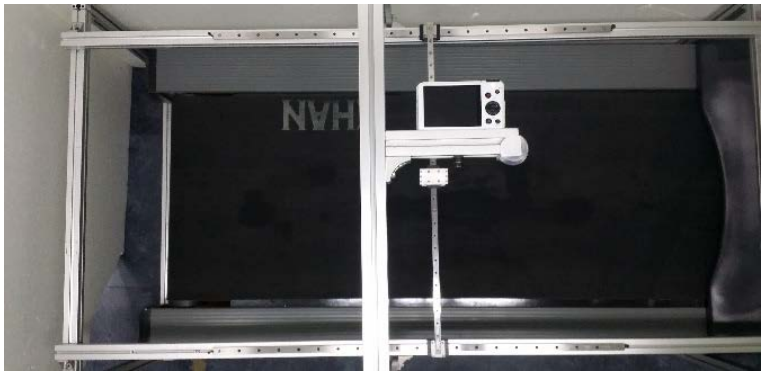


그림 3. 33 도마뱀 로봇 시제품의 주행을 측정하기 위한 초고속 카메라 설치

트레드밀 주위에는 알루미늄 프로파일과 LM 가이드, 회전축을 이용하여 로봇 시제품의 자유도를 구속하는 장치가 그림 3. 34와 같이 설치되었다. 로봇 시제품은 그림 3. 34와 같이 자유도 구속 장치를 통해 roll, pitch, z축의 자유도가 제한되고, x, y, yaw의 자유도로만 이동이 가능하다. 자유도 구속 장치는 허리와 꼬리의 움직임과 주행 방향과의

관계에만 초점을 맞추어 실험이 진행되도록 도와주는 역할을 한다.

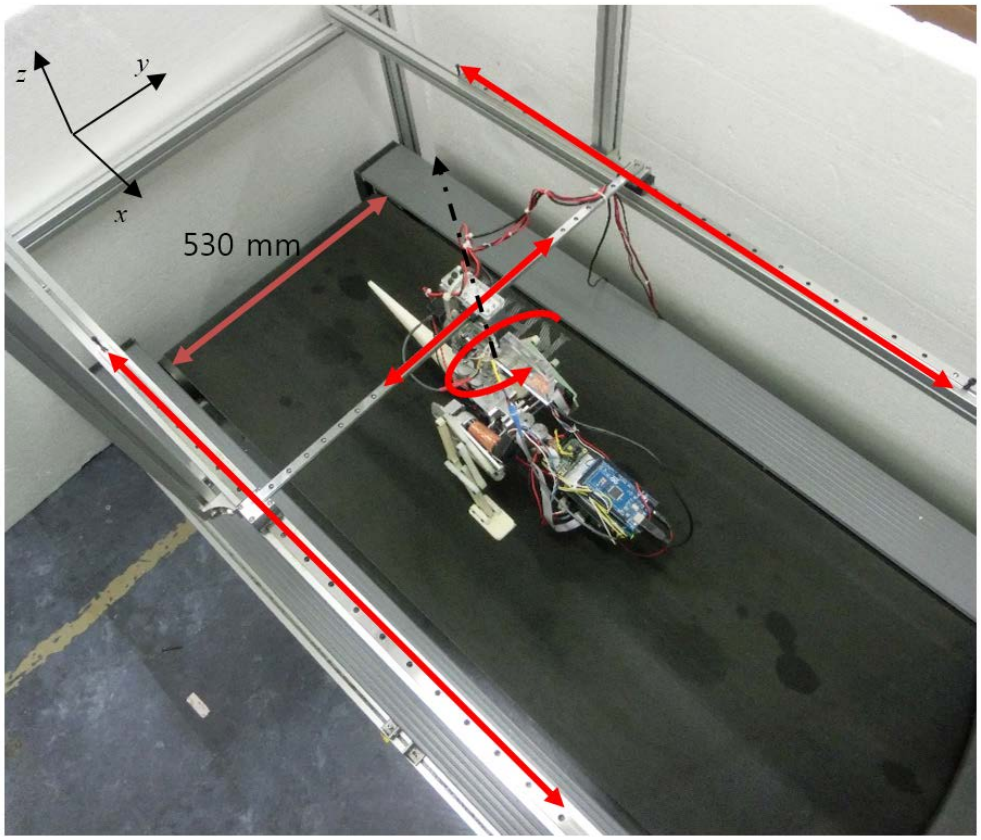


그림 3. 34 자유도 구속 장치에 장착된 도마뱀 로봇 시제품(x, y, yaw: 자유, z, roll, pitch: 구속)

또한 로봇 시제품의 주행에 있어 허리, 꼬리의 움직임이 시작되는 초기 yaw 각도를 일정하게 유지하기 위하여, 로봇 시제품의 초기 yaw 각도의 움직임을 제한하는 장치를 그림 3. 35와 같이 제작하였다. 이 장치는 로봇 시제품이 목표한 속도에 도달하면 허리, 꼬리의 움직임이 발생하기 전에 제거된다.

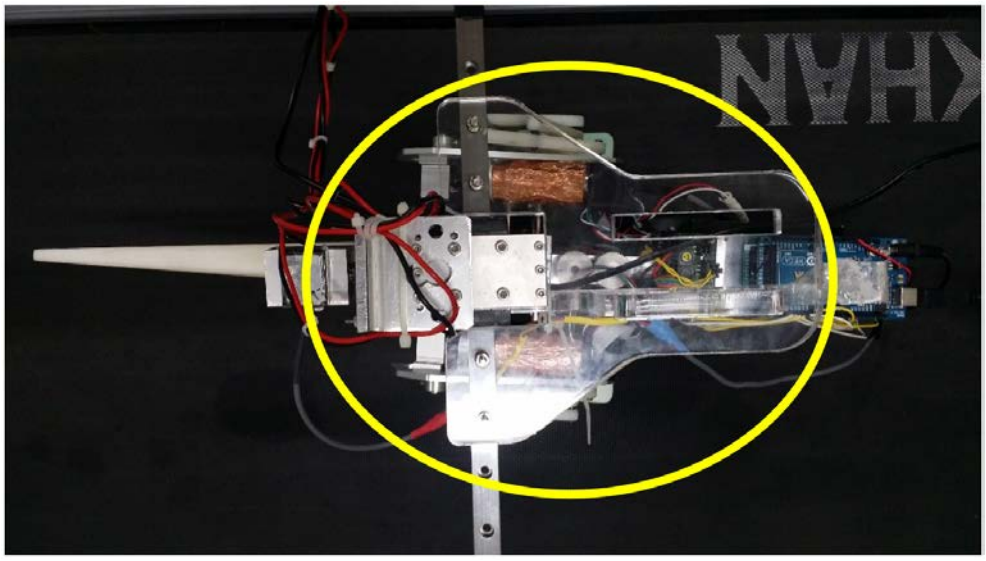


그림 3. 35 주행 실험 시, 도마뱀 로봇 시제품 yaw 각도의 움직임을 고정하여 초기 yaw 각도를 일정하게 유지하는 장치

3.4.3. 센서 및 통신 시스템 구축

도마뱀 모사 로봇 시제품의 주행 방향인 yaw 방향 각도를 확인하기 위한 센서로 IMU센서(Ruva Tech 사, RTxQ)를 사용하였다. 사용된 IMU센서의 주요 특성은 표 3. 5에 정리하였다.

표 3. 5 IMU 센서의 특성

	IMU센서
제품명	RTxQ
제작회사	Ruva Tech
크기(mm)	23×33×8
통신	RS232
Sampling rate	125 Hz (1~256 Hz 사용 가능)
측정 범위	± 180°
정밀도	0.1°
무게	17 g

원래 위의 IMU 센서는 roll, pitch, yaw 방향의 각도 측정이 모두

가능하다. Roll과 pitch의 각도는 가속도 센서를 통해 측정하고, 중력 센서를 통해 각도를 보정하게 된다. 하지만 yaw 방향의 각도는 가속도 센서를 통해 측정하고, 중력 센서가 아닌 지자기 센서를 통해 보정하게 된다. 본 연구에 사용된 로봇 시제품의 경우에는 모터에서 발생하는 자기장이 지자기 센서에 영향을 줄 수 있다고 판단하여 모터에 구리 테이프 등을 사용하여 자기장을 확실하게 차폐하였다. 하지만 실험을 수행하는 공간인 테스트 벤치의 트레드밀을 구동하는 모터에서 발생하는 자기장이 IMU센서의 지자기에 영향을 주는 것을 확인하였다. 로봇 시제품이 현재의 테스트 벤치를 사용하지 않는다면, 지자기에 영향을 받지 않아 IMU센서의 yaw 방향 각도를 그대로 사용할 수 있지만, 현재 실험에서는 테스트 벤치의 사용이 불가피하였기 때문에 추가적인 설계가 불가피하였다. 로봇과 자유도 구속 장치가 연결된 yaw 방향으로 회전하는 축에 그림 3. 36과 같은 축의 방향을 yaw 방향에서 roll의 방향으로 변환하는 장치를 설계하고, IMU 센서를 장착하여 기울기 센서를 통해 yaw 방향의 각도를 측정하였다.

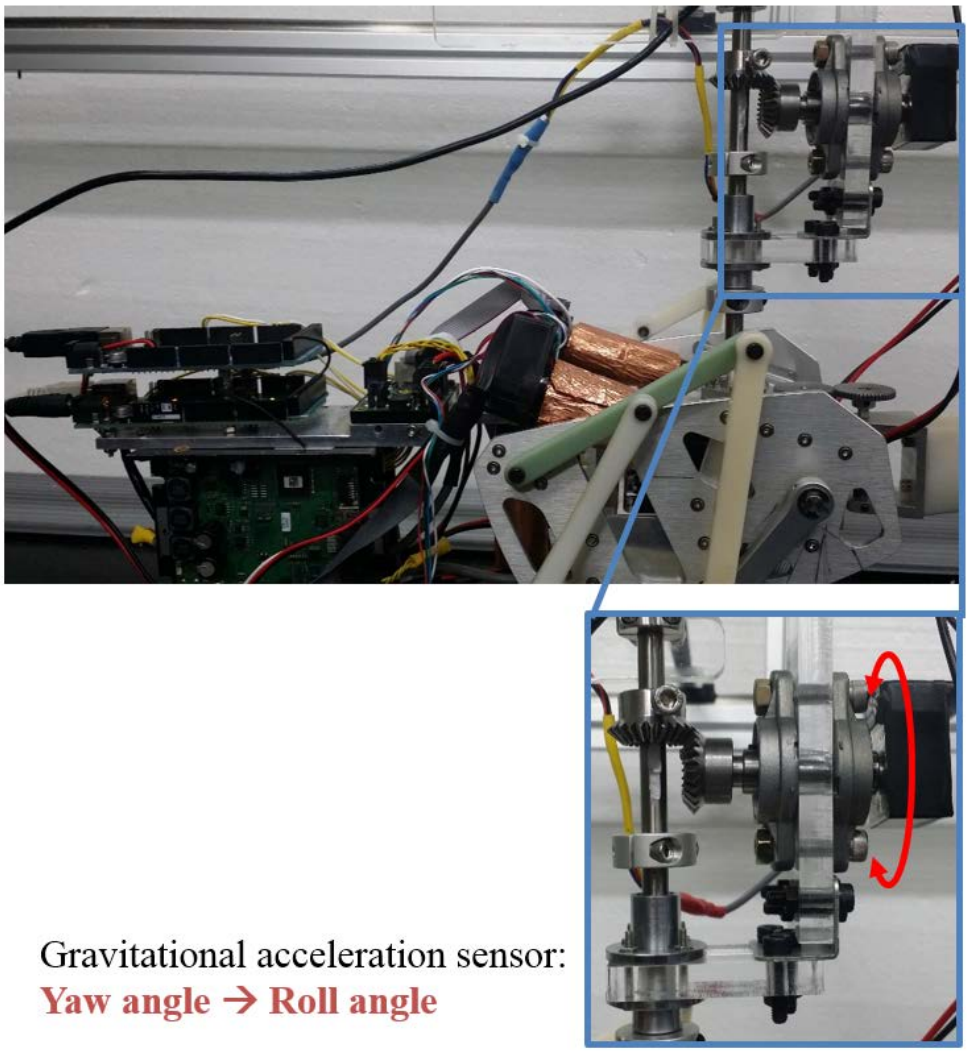


그림 3. 36 도마뱀 모사 로봇 시제품의 yaw 방향 각도를 roll 방향 각도로 변환하는 장치

그림 3. 37과 같이 로봇을 구동하는 제어기는 크게 상위 제어기인 Arduino Mega와 하위 제어기인 epos2 24/5, epos2 24/2로 구분할 수 있다. 상위 제어기는 다리의 position값을 결정하고, IMU센서의 yaw angle을 받아서 허리, 꼬리의 모터의 position값을 전달한다. 하위 제어기는 상위 제어기로부터 전달된 position 값을 잘 따라가도록 PID 제어를 한다.

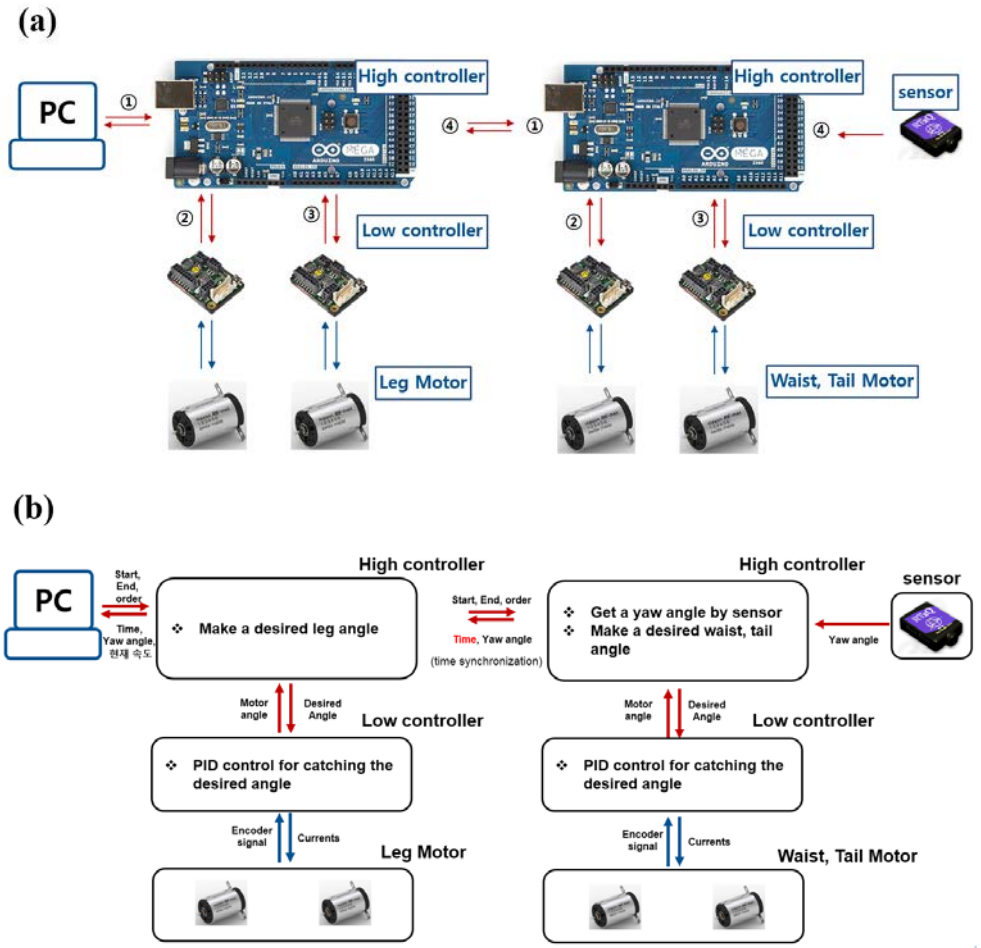


그림 3. 37 도마뱀 모사 로봇 시제품의 통신 시스템

로봇 시제품의 통신은 RS232 통신 규약을 사용하여 구성하였다. 상위 제어기를 2개를 사용하여 각각 다리와 허리, 꼬리 모터의 제어를 담당하여 각 주기마다 계산량을 2개로 분산하였다. PC에서는 사람이 로봇 시제품의 시작, 종료, 주행속도 변경, 허리, 꼬리의 움직임의 동작의 명령을 수행하고, 주행 속도와 로봇 시제품의 yaw 방향 각도를 받는다. 본 통신 시스템의 sampling rate는 66.7 Hz (15 ms)이다

3.4.4. 도마뱀 모사 로봇 시제품의 주행 실험

도마뱀 모사 로봇 시제품의 허리, 꼬리의 움직임에 의한 주행 방향 유지 실험에 앞서, 먼저 로봇 시제품이 제대로 주어진 명령을 수행하는지 확인하고자 테스트 주행을 수행하였다. 그림 3. 38은 로봇

시제품의 duty factor를 측정하기 위하여 양쪽 발이 모두 보이도록 초고속 카메라 (480 fps)로 측정한 것을 캡쳐한 장면이다.

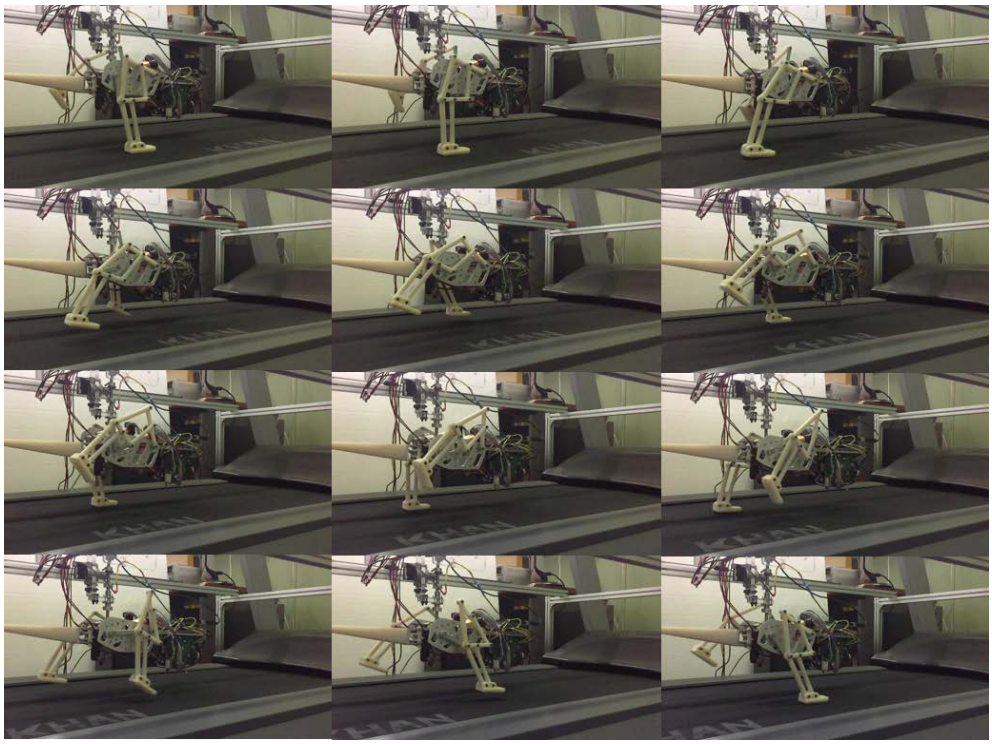


그림 3. 38 Duty factor를 측정하기 위한 테스트 주행의 동영상 스냅샷 (1주기: 1.203 s)

초고속 카메라를 이용하여 발의 지면 접촉여부를 확인하여 duty factor의 그래프를 그림 3. 39와 같이 그릴 수 있다. 이때 측정된 duty factor는 0.246으로 실제 도마뱀의 duty factor가 0.24인 것과 유사한 것을 확인할 수 있었다.

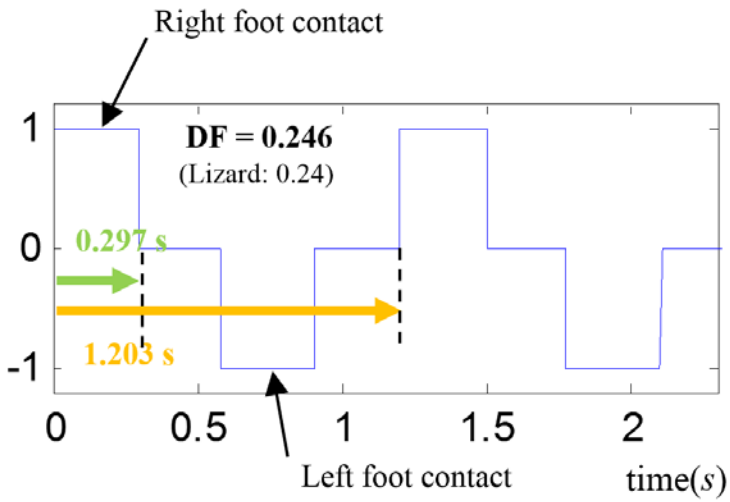


그림 3. 39 도마뱀 모사 로봇 시제품의 발과 지면과의 접촉 그래프

또한 주행 테스트 도중에 상위 제어기인 Arduino Mega에서 보낸 모터 위치 명령 값을 다리, 허리, 꼬리의 각 모터가 제대로 수행하고 있는지를 확인하고자 하였다. 이에 상위 제어기인 Arduino Mega의 하위 제어기로의 명령 값과 모터 encoder에서 보내 주는 모터의 실제 값을 비교하여 그림 3. 40에 그래프로 표시하였다.

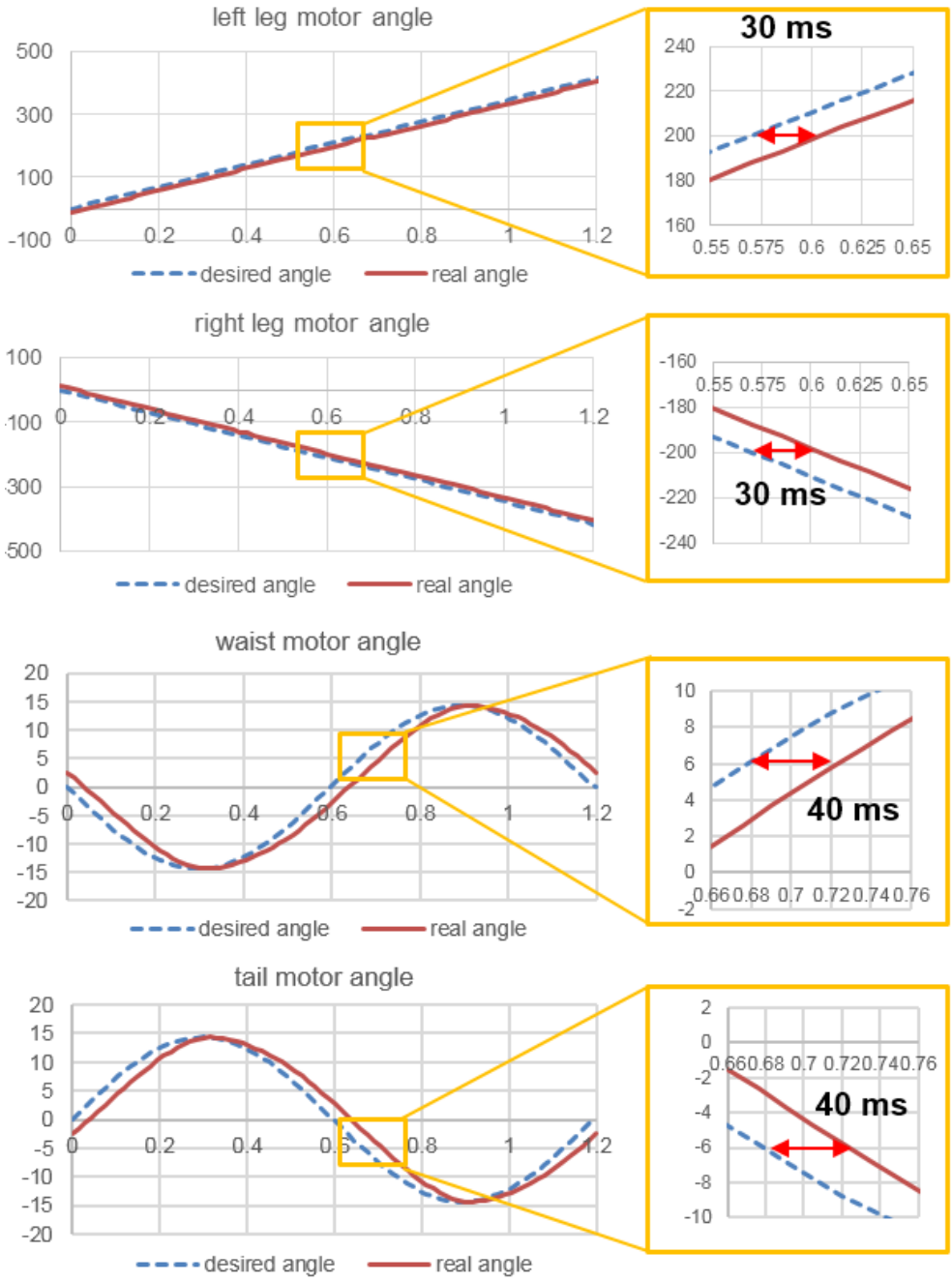


그림 3. 40 상위 제어기의 모터 명령 값(파란색 점선)과 모터의 실제 값(빨간색 실선) 비교

그림 3. 40의 그래프를 보면, 모터의 명령 값을 실제 값이 최대 40 ms 이내로 값을 따라가는 것을 확인하여, 모터의 위치 제어가 제대로 수행되고 있음을 알 수 있었다.

허리, 꼬리의 움직임을 통해 도마뱀 모사 로봇 시제품의 주행 방향을 유지하는 실험을 하기 위해서는 먼저 대조 군의 실험이 필요하다. 여기서 말하는 실험 대조 군은 허리, 꼬리의 움직임이 없는 도마뱀 모사 로봇 시제품의 주행이다. 허리, 꼬리의 움직임이 없는 경우에 주행 방향을 유지하는 것이 불가능한 것인지를 확인하고자 그림 3. 41과 같이 허리, 꼬리의 움직임이 없는 실험을 수행하였다.

그 후에 body2의 yaw 방향 각도를 피드백 받아 주행 방향을 허리, 꼬리를 통해 유지하는 실험을 구성하였다. Body2의 yaw 방향 각도를 IMU센서로 피드백 받아 허리, 꼬리의 양쪽 움직임 크기를 제어 변수로 하는 간단한 PD(Proportional-Differential) 제어 식을 식 (3.11)과 동일하게 식 (3. 18)으로 수립하였다.

$$ang_{waist,tail} = k_d angvel_{body2} + k_p(ang_{dis,body2} - ang_{real,body2}) \qquad (3.18)$$

여기서 $ang_{waist,tail}$은 허리, 꼬리의 움직임 진폭의 크기이다. 그리고 $angvel_{body2}$는 body2의 yaw 방향의 각속도이며, $ang_{dis,body2}$는 목표 주행 방향, $ang_{real,body2}$는 현재 body2의 yaw 방향 각도이다. k_d는 differential 게인 값, k_p는 proportional 게인 값을 의미한다. 여기서 $ang_{real,body2}$는 실시간이 아니라 한 주기당 한 번의 각도를 의미한다. 간단한 제어를 통한 허리, 꼬리의 움직임을 통한 주행 방향 유지 실험은 그림 3. 42와 같이 수행되었다.

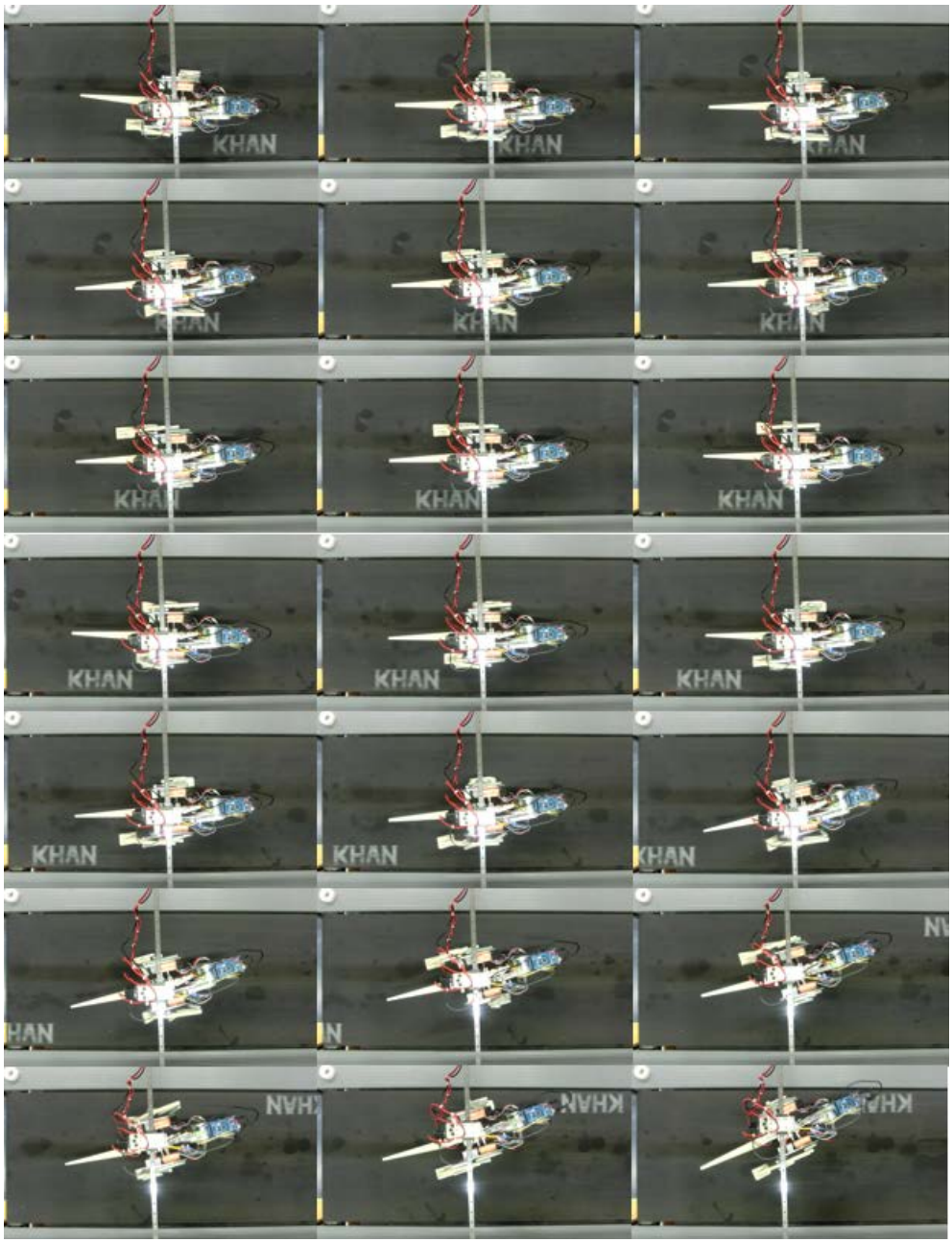


그림 3. 41 허리, 꼬리의 움직임이 없는 도마뱀 모사 로봇 시제품 주행 동영상 스냅샷

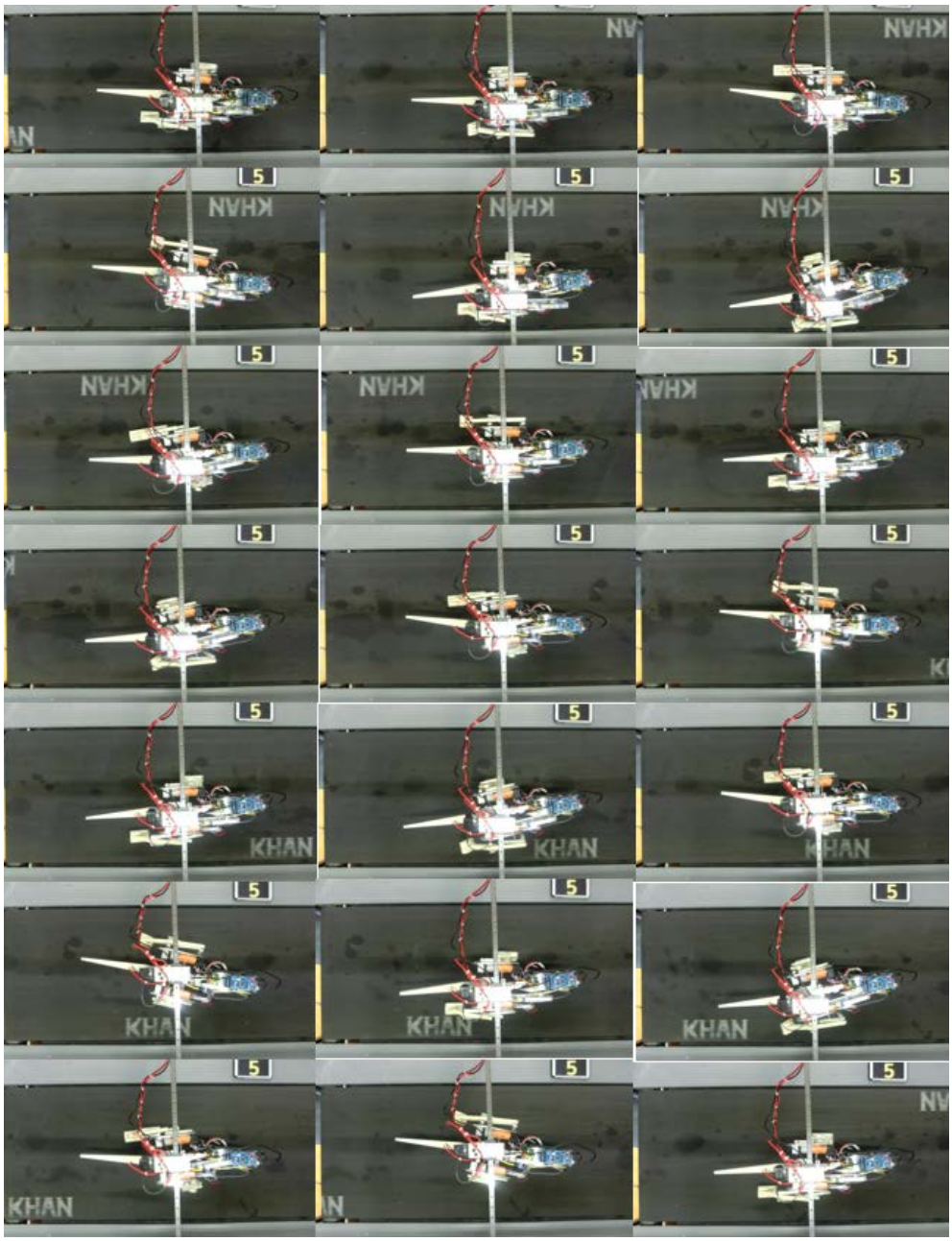


그림 3. 42 허리, 꼬리의 움직임이 없는 도마뱀 모사 로봇 시제품 주행 동영상 스냅샷

실제로 주행 방향의 유지가 잘되었는지를 확인하고자 주행 방향을 의미하는 body2의 각도의 그래프를 그림 3. 43에 나타내고, 허리, 꼬리의 움직임이 없는 실험과 비교해 보았다. 비교 결과, 허리, 꼬리의 움직임이 없는 경우에는 시작한 지 5초가 되기 전에 주행 방향이 어긋나 되돌아 오지 않지만 허리, 꼬리의 움직임을 통해 주행 방향을 제어한 경우에는 body2의 yaw 방향 각도가 목표 각도인 0도를 기준으로 주기적인 움직임을 수행하며 주행 방향을 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

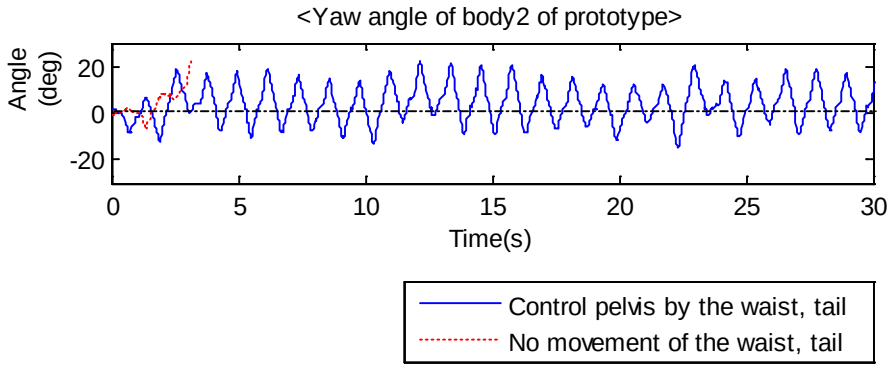


그림 3. 43 허리, 꼬리의 움직임이 없는 도마뱀 모사 로봇 시제품 주행 실험과 허리, 꼬리를 이용하여 주행 방향을 제어한 실험의 body2의 yaw 방향 각도 비교(빨간색 점선: 제어 없는 실험, 파란색 실선: 제어 실험)

또한 주행 방향을 유지하는 제어가 잘 이루어진 것인지를 확인하고자 3.2절의 simulation과 body2의 yaw 방향 각도 값을 그림 3. 44에서 비교해 보았다. 그림 3. 44의 그래프에서 확인할 수 있듯이, 시뮬레이션 값과 결과 값이 완전히 일치하지는 않지만 경향성이 비슷하고, 목표된 각도인 0을 기준으로 진동하며 주행 방향을 유지한다는 것에서 실험이 성공하였음을 확인할 수 있었다.

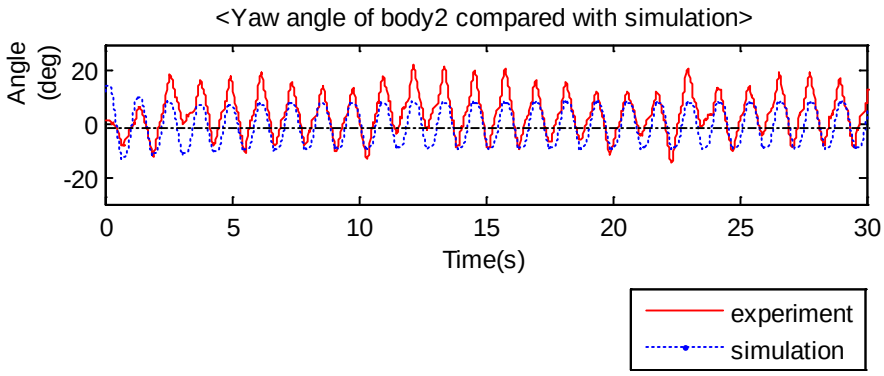


그림 3. 44 동역학 모델의 시뮬레이션을 수행한 body2의 yaw 방향 각도와 허리, 꼬리를 이용하여 주행 방향을 제어한 실험의 body2의 yaw 방향 각도 비교(빨간색 실선: 실험, 파란색 점선: 시뮬레이션)

이로써 앞에서 동역학 모델과 시뮬레이션을 통해 도마뱀 허리, 꼬리의 조인트 토크가 모델의 주행 방향을 유지하는 역할을 한다는 원리를 적용한 2족 소형 보행 로봇의 시제품을 설계하고 제작하였다. 도마뱀을 모사한 로봇의 시제품을 허리, 꼬리의 주기적인 움직임으로 주행 방향을 유지하는 실험을 수행함으로써 도마뱀의 주기적인 몸체 움직임 원리를 2족 소형 보행 로봇에 적용하는 것이 가능하다는 사실을 확인하였다.

제 4 장 결 론

본 연구에서는 도마뱀의 걸음걸이와 몸체의 주기적인 움직임 관계를 동역학 모델과 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 먼저 간소화된 모델을 수립하여 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 동역학 모델은 다리의 질량이 없다고 가정하고 몸체를 세 개의 body로 구성하여 2차원 수평면에 수립하였다. 동역학 시뮬레이션을 수행하기 전에 도마뱀의 주행 시퀀스 분석을 통해, 도마뱀이 앞으로 직진하기 위해서는 지면에서의 반력 모멘트나 허리, 꼬리 조인트 토크가 필요하다는 사실을 확인하고, 다리 근육 분석을 통해 지면에서의 반력 모멘트가 크게 발생하지 않는 것을 확인하였다. 동역학 시뮬레이션을 통해 반력 모멘트가 적을 때, 허리, 꼬리의 토크로 직진을 위한 모멘트를 생성하는 것을 확인하였다. 이 후 최적화를 수행함으로써 허리, 꼬리의 조인트 토크가 직진을 위한 모멘트를 생성하면서 각 조인트 토크의 합과 차를 최소화하였을 때, 도마뱀과 유사한 S자 형상의 허리, 꼬리의 움직임이 생성되는 것을 확인하였다.

이를 더 자세히 분석하고자 도마뱀의 다리가 포함된 30개의 조인트를 가지는 동역학 모델을 3차원 공간에 수립하였다. 기존 연구를 통해 도마뱀 몸체의 움직임은 2차원 수평면 안에서의 움직임으로 가정하였다. 도마뱀 모델의 조인트 움직임을 sine 함수로 기존 연구를 통해 가정하고 정기구학을 통해 도마뱀 모델의 주행 및 조인트 움직임을 생성하였다. 생성된 움직임과 역동역학 식을 통해 각 관절에 걸리는 토크를 추출하였다. 지면에서의 반력 모멘트가 작을 때, 허리, 꼬리의 조인트 토크로 주행을 위한 모멘트를 생성하는 것을 확인하였다. 이 후 최적화를 통해 허리, 꼬리의 조인트 토크가 직진을 위한 모멘트를 생성하면서 각 조인트 토크의 합과 차를 최소화하였을 때, 도마뱀 모델의 몸체 움직임이 도마뱀과 유사한 S자 형상을 만드는 것을 확인하고, 실제 도마뱀 몸체의 움직임과 비교하여 유사한 것을 확인할 수 있었다.

Bipedal의 걸음걸이를 사용하고, 허리, 꼬리의 움직임을 통해 주행 방향을 유지하는 도마뱀을 모사한 2족 소형 보행 로봇의 시제품을 개발하였다. 먼저 로봇 시제품을 적용하기 위한 동역학 모델을 2차원의 수평 평면에 수립하였다. 로봇 동역학 모델의 허리, 꼬리의 기본

움직임은 도마뱀 동역학 해석에서 도출된 결과를 이용하였다. 허리, 꼬리의 좌우 방향의 움직임 변화 량의 차이를 통해 로봇 시제품의 모델에 주행 방향을 보정하는 방법을 고안하고, 동역학 모델의 주행 방향을 yaw 방향의 각도로 피드백 받아 허리, 꼬리 움직임의 간단한 제어를 하여 직진으로 유지하였다. 이 후, 도마뱀을 모사한 2족 소형 보행 로봇의 시제품을 4절 링크 최적화 방법을 이용하여 설계하고 제작하였다. 3차원 공간의 자유도를 2차원 수평 평면으로 구속하는 테스트벤치를 통해 2족 소형 보행 로봇의 시제품의 주행 방향을 유지하는 실험을 수행하였다. 동역학 모델과 마찬가지로, 로봇 시제품의 주행 방향을 yaw 방향의 각도로 피드백 받아 허리, 꼬리 움직임의 간단한 제어를 통해 직진으로 유지하여, 도마뱀의 몸체 움직임이 소형 보행 로봇에 적용하는 것의 가능성을 실험을 통해 검증할 수 있었다.

참고 문헌

[1] David V. Lee, John E. A. Bertram And Rory J. Todhunter, “Acceleration And Balance In Trotting Dogs”, *The Journal of Experimental Biology*, 202, pp.3565-3573, 1999.
[2] J. J. Chen, A. M. Peattie, K. Autumn and R. J. Full, “Differential Leg Function in A Sprawled-Posture Quadrupedal Trotter”, *The Journal of Experimental Biology*, 209, pp.249-259, 2006.
[3] Delcomyn, F. and Nelson, M. E, “Architectures for a biomimetic hexapod robot”, *Robotics and Autonomous Systems,* Vol.30, pp.5-15, 2000.
[4] Weidemann, H.J, Lehrstuhl B fur Mech, Pfeiffer, F, Eltze, J, “The six-legged TUM walking robot”, *Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1026-1033, 1994.
[5] Nelson, G.M. and Quinn, R.D, “Posture control of a cockroach-like robot”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.157-162. 1998.
[6] Jonathan E. Clark, Jorge G. Cham, Sean A. Bailey, Edward M. Froehlich, Pratik K. Nahata, Robert J. Full, Mark R. Cutkosky, “Biomimetic Design and Fabrication of a Hexapedal Running Robot”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.4, pp.3643-3649, 2001.
[7] P. Birkmeyer, K. Peterson and R. S. Fearing, “DASH: A Dynamic 16g Hexapedal Robot”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2683-2689, 2009.
[8] Duncan W. Haldane, Kevin C. Peterson, Fernando L. Garcia Bermudez, and Ronald S. Fearing, “Animal-inspired Design and Aerodynamic Stabilization of a Hexapedal Millirobot”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3279-3286, 2013.
[9] Uluc. Saranli, Martin Buehler, Daniel E. Koditschek, “RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot”, *The International Journal of Robotics Research*, vol.20, no.7, pp.616-631, 2001.
[10] Buehler, M. “Dynamic locomotion with one, four and six-legged robots”, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.20, pp.15-20, 2002.
[11] James Andrew Smith, Inna Sharf, Michael Trentini, “PAW: a Hybrid Wheeled-Leg Robot”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006.
[12] Alexander Spröwitz, Alexandre Tuleu, Massimo Vespignani, Mostafa Ajallooeian, Emilie Badri, Auke Jan Ijspeert, “Towards dynamic trot gait locomotion: Design, control, and experiments with Cheetah-cub, a compliant quadruped robot”, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.32 no.8, pp.932-950, 2013.
[13] Sangok Seok, Albert Wang, Meng Yee (Michael) Chuah, David Otten, Jeffrey Lang, Sangbae Kim, “Design Principles for Highly Efficient Quadrupeds and Implementation of the MIT Cheetah Robot”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3307-3312, 2013.
[14] Marc Raibert, Kevin Blankespoor, Gabriel Nelson, Rob Playter and the BigDog Team, “BigDog, the Rough-Terrain Quaduped Robot”, *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of*

Automatic Control, pp.10822-10825, 2008.
[15] BostonDynamics Cheetah, https://www.youtube.com/watch?v=chPanW0QWhA , 2015.06.19.
Hun-Ok Lim, Atsuo Takanishi, "Biped walking robots created at Waseda University: WL and WABIAN family", Philosophical Transactions, Vol.365, pp.49-64, 2007.
[16] Kensuke Takita, Toshio Katayama, Shigeo Hirose, "The Efficacy of the Neck and Tail of Miniature Dinosaur-like Robot TITRUS-I11", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.3, pp.2593-2598, 2002
[17] Shigeo Hirose And Hiroya Yamada, "Snake-Like Robots : Machine Design of Biologically Inspired Robots", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp.88-98, 2009
[18] Auke Jan Ijspeert, Alessandro Crespi, Dimitri Ryczko, Jean-Marie Cabelguen, "From Swimming to Walking with a Salamander Robot Driven by a Spinal Cord Model", *Science*, Vol.315, no.5817, pp.1416-1420, 2007.
[19] Irschick, D. J. & Jayne, B. C, "Comparative three-dimensional kinematics of the hindlimb for high-speed bipedal and quadrupedal locomotion of lizards" *Journal of Experimental Biology*. 202, pp.1047-1065, 1999.
[20] Carrie L. Fieler And Bruce C. Jayne, "Effects Of Speed On The Hindlimb Kinematics Of The Lizard Dipsosaurus Dorsalis", *The Journal Of Experimental Biology*, 201, Pp.609-622, 1998.
[21] Ritter, D, "Lateral bending during lizard locomotion", *Journal of Experimental Biology*, 173, pp.1-10, 1992.
[22] Bennett, W.O., Simons, R.S., Brainerd, E.L, "Twisting and bending: The functional role of salamander lateral hypaxial musculature during locomotion", *Journal of Experimental Biology*, 204, 1979-1989.
[23] Legreneur, P., Homberger, D.G., Bels, V, "Assessment of the mass, length, center of mass, and principal moment of inertia of body segments in adult males of the brown anole (Anolis sagrei) and green, or carolina, anole (Anolis carolinensis)", *Journal of Morphology*, 273, 765-775.
[24] Liljebäck, P., Pettersen, K. Y. & Stavdahl, "Modelling and control of obstacle-aided snake robot locomotion based on jam resolution", *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3807-3814, 2009.
[25] Liljebäck, P., Pettersen, K. Y., Stavdahl, & Gravdahl, J. T, "Controllability and stability analysis of planar snake robot locomotion", *IEEE Transactions on Automatic Control*. 56, 1365-1380. 2011
[26] Aerts, P, Van Damme, R, D' Aout, K. & Van Hooydonck, B, "Bipedalism in lizards: Whole-body modelling reveals a possible spandrel", *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci*, 358, 1525-1533, 2003.
[27] McElroy, E.J., Wilson, R., Biknevicius, A.R., Reilly, S.M, "A comparative study of single-leg ground reaction forces in running lizards", *Journal of Experimental Biology*, 217, 735-742, 2013.
[28] McElroy, E.J., Hickey, K.L., Reilly, S.M, "The correlated evolution of biomechanics, gait and foraging mode in lizards", *Journal of Experimental Biology,* 211, 1029-1040, 2008.

[29] S. M. Reilly And M. J. Delancey, "Sprawling locomotion in the lizard Sceloporus clarkii: the effects of speed on gait, hindlimb kinematics, and axial bending during walking", *Journal of Zoology*, 243, pp.417-433, 1997.
[30] Valdivia y Alvarado, P., Youcef-Toumi, K, "Performance of machines with flexible bodies designed for biomimetic locomotion in liquid environments", *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3324-3329, 2005.
[31] Snyder, R. C, "The anatomy and function of the pelvic girdle and hindlimb in lizard locomotion", *American Journal of Anatomy*, 95, 1-45, 1954
[32] Russell, A. P, Bels, V, "Biomechanics and kinematics of limb-based locomotion in lizards: Review, synthesis and prospectus", *Comparative Biochemistry and Physiology - A Molecular and Integrative Physiology*, 131, 89-112, 2001.
[33] Park, J, "Synthesis of natural arm swing motion in human bipedal walking", *Journal of Biomechanics.* 41, 1417-1426, 2008.
[34] J. Baumgarte, "Stabilization of Constraints and Integrals of Motion in Dynamical Systems", *Computer Method In Applied Mechanics And Engineering*, 1-16, 1972.
[35] NJ Kohut, DW Haldane, D Zarrouk, "Effect Of Inertial Tail On Yaw Rate Of 45 Gram Legged Robot", *International Conference on Climbing and Walking Robots*, 2012.
[36] Kim, J.W., Jung, S, Kim, J, Seo, T.W, "A Hybrid Taguchi-Random Coordinate search Algorithm for Global Numerical Optimization Problems", *International Journal for Numerical Methods in Eng*, Manuscript submitted for publication. 2014.

Appendix

A.1. 도마뱀 각 body의 무게 중심의 위치

그림 2. 21 (a)의 각 body의 무게 중심의 위치는 그림 2. 21의 (b)에 표시된 각 링크 길이를 이용하여 아래의 수식과 같이 정리할 수 있다.

$$X_1 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{A.1}$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_4, z) \times \begin{bmatrix} l_2/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{A.2}$$

$$X_3 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_4, z) \times \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_4, z) \times Rot(q_5, z) \times \begin{bmatrix} l_3/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{A.3}$$

$$X_4 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1/2 + shoulderX \\ -shoulderY \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_6, z) \times Rot(q_7, x) \times Rot(q_8, y) \times \begin{bmatrix} 0 \\ -l_4/2 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{A.4}$$

$$X_5 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1/2 + shoulderX \\ -shoulderY \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_6, z) \times Rot(q_7, x) \times Rot(q_8, y) \times \begin{bmatrix} 0 \\ -l_4 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_6, z) \times Rot(q_7, x) \times$$

$$Rot(q_8, y) \times Rot(q_9, z) \times \begin{bmatrix} -l_5/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(A.5)

$$X_6 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1/2 + shoulderX \\ -shoulderY \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_6, z) \times$$

$$Rot(q_7, x) \times Rot(q_8, y) \times \begin{bmatrix} 0 \\ -l_4 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_6, z) \times Rot(q_7, x) \times$$

$$Rot(q_8, y) \times Rot(q_9, z) \times \begin{bmatrix} -l_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_{10}, z) \times Rot(q_{11}, x) \times Rot(q_{12}, y) \times$$

$$\begin{bmatrix} -l_6/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(A.6)

$$X_7 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1/2 + shoulderX \\ shoulderY \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_{13}, z) \times$$

$$Rot(q_{14}, x) \times Rot(q_{15}, y) \times \begin{bmatrix} 0 \\ l_7/2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(A.7)

$$X_8 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1/2 + shoulderX \\ shoulderY \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_{13}, z) \times$$

$$Rot(q_{14}, x) \times Rot(q_{15}, y) \times \begin{bmatrix} 0 \\ l_7 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_{13}, z) \times Rot(q_{14}, x) \times$$

$$Rot(q_{15}, y) \times Rot(q_{16}, z) \times \begin{bmatrix} -l_8/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(A.8)

$$X_9 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1/2 + shoulderX \\ shoulderY \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_{13}, z) \times$$

$$Rot(q_{14},x)\times Rot(q_{15},y)\times\begin{bmatrix}0\\l_7\\0\end{bmatrix}+\ Rot(q_3,z)\times Rot(q_{13},z)\times Rot(q_{14},x)\times$$

$$Rot(q_{15},y)\times Rot(q_{16},z)\times\begin{bmatrix}-l_8\\0\\0\end{bmatrix}+\ Rot(q_{17},z)\times Rot(q_{18},x)\times Rot(q_{19},y)\times$$

$$\begin{bmatrix}-l_9/2\\0\\0\end{bmatrix}$$

(A.9)

$$X_{10}=\begin{bmatrix}q_1\\q_2\\0\end{bmatrix}+Rot(q_3,z)\times\begin{bmatrix}l_1\\0\\0\end{bmatrix}+Rot(q_3,z)\times Rot(q_4,z)\times\begin{bmatrix}l_2/2+pelvicX\\-pelvicY\\0\end{bmatrix}$$

$$+Rot(q_3,z)\times Rot(q_4,z)\times Rot(q_{20},z)\times Rot(q_{21},x)\times Rot(q_{22},y)\times\begin{bmatrix}0\\-l_{10}/2\\0\end{bmatrix}$$

(A.10)

$$X_{11}=\begin{bmatrix}q_1\\q_2\\0\end{bmatrix}+Rot(q_3,z)\times\begin{bmatrix}l_1\\0\\0\end{bmatrix}+Rot(q_3,z)\times Rot(q_4,z)\times\begin{bmatrix}l_2/2+pelvicX\\-pelvicY\\0\end{bmatrix}$$

$$+Rot(q_3,z)\times Rot(q_4,z)\times Rot(q_{20},z)\times Rot(q_{21},x)\times Rot(q_{22},y)\times\begin{bmatrix}0\\-l_{10}\\0\end{bmatrix}+$$

$$Rot(q_3,z)\times Rot(q_4,z)\times Rot(q_{20},z)\times Rot(q_{21},x)\times Rot(q_{22},y)\times$$

$$Rot(q_{23},z)\times\begin{bmatrix}l_{11}/2\\0\\0\end{bmatrix}$$

(A.11)

$$X_{12}=\begin{bmatrix}q_1\\q_2\\0\end{bmatrix}+Rot(q_3,z)\times\begin{bmatrix}l_1\\0\\0\end{bmatrix}+Rot(q_3,z)\times Rot(q_4,z)\times\begin{bmatrix}l_2/2+pelvicX\\-pelvicY\\0\end{bmatrix}$$

$$+Rot(q_3,z)\times Rot(q_4,z)\times Rot(q_{20},z)\times Rot(q_{21},x)\times Rot(q_{22},y)\times\begin{bmatrix}0\\-l_{10}\\0\end{bmatrix}$$

$$+Rot(q_3,z)\times Rot(q_4,z)\times Rot(q_{20},z)\times Rot(q_{21},x)\times Rot(q_{22},y)\times$$

$$Rot(q_{23},z)\times\begin{bmatrix}l_{11}\\0\\0\end{bmatrix}+\ Rot(q_{24},z)\times Rot(q_{25},x)\times Rot(q_{26},y)\times\begin{bmatrix}l_{12}/2\\0\\0\end{bmatrix}$$

(A.12)

$$X_{13} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_4, z) \times \begin{bmatrix} l_2/2 + pelvicX \\ pelvicY \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$+ Rot(q_3, z) \times Rot(q_4, z) \times Rot(q_{27}, z) \times Rot(q_{28}, x) \times Rot(q_{29}, y) \times \begin{bmatrix} 0 \\ l_{13}/2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A.13)$$

$$X_{14} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_4, z) \times \begin{bmatrix} l_2/2 + pelvicX \\ pelvicY \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$+ Rot(q_3, z) \times Rot(q_4, z) \times Rot(q_{27}, z) \times Rot(q_{28}, x) \times Rot(q_{29}, y) \times \begin{bmatrix} 0 \\ l_{13} \\ 0 \end{bmatrix} +$$

$$Rot(q_3, z) \times Rot(q_4, z) \times Rot(q_{27}, z) \times Rot(q_{28}, x) \times Rot(q_{29}, y) \times$$

$$Rot(q_{30}, z) \times \begin{bmatrix} l_{14}/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A.14)$$

$$X_{15} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times \begin{bmatrix} l_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_3, z) \times Rot(q_4, z) \times \begin{bmatrix} l_2/2 + pelvicX \\ pelvicY \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$+ Rot(q_3, z) \times Rot(q_4, z) \times Rot(q_{27}, z) \times Rot(q_{28}, x) \times Rot(q_{29}, y) \times \begin{bmatrix} 0 \\ l_{13} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$+ Rot(q_3, z) \times Rot(q_4, z) \times Rot(q_{27}, z) \times Rot(q_{28}, x) \times Rot(q_{29}, y) \times$$

$$Rot(q_{30}, z) \times \begin{bmatrix} l_{14} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(q_{31}, z) \times Rot(q_{32}, x) \times Rot(q_{33}, y) \times \begin{bmatrix} l_{15}/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A.15)$$

여기서 $Rot(q_i, axis)$ 는 i번째의 조인트를 $axis$ 방향을 기준으로 q_i만큼 회전하는 것을 의미한다. $shoulderX$, $shoulderY$는 body1의 무게 중심의 위치에서부터 어깨 조인트까지의 각각 x축 방향 거리, y축 방향 거리를 의미하고, $pelvicX$, $pelvicY$ 는 body2의 무게 중심의 위치에서부터 골반 조인트까지의 각각 x축 방향 거리, y축 방향 거리를

의미한다.

Abstract

Design and Analysis of a Lizard-Inspired Legged Robot

Jeongyul Kim
Mechanical Aerospace Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Animal inspired legged robots have been studied widely to overcome and adapt efficiently to various terrains. Animals having legs can be divided into two categories based on their basic posture, which are the upright posture and the sprawled posture. The upright posture has an advantage on effectively supporting their body weight, whereas the sprawled posture has an advantage on overcoming obstacles.

For the legged robots, if the size of the robot is small, the obstacles of the terrain become relatively larger. Then the sprawled posture robots have more advantages than the upright posture robot in such scale. The lizard inspired legged robot has an advantage in overcoming the obstacles of the terrain. Therefore, in this paper, the locomotion of a lizard is analyzed and from this study, the lizard inspired legged robot is designed.

For the ongoing research on conventional legged robots, most of these area sprawled posture legged robot which mimics the

locomotion of a cockroach. Since the cockroach has only one body segment, studies on cockroach inspired robots have been focused on increasing the velocity of the robot rather than analyzing the effects of body motion. For the upright posture legged robots, it has been studied mainly on mimicking the gait of the target animal rather than emulating the relationship between the body motion and the locomotion of the animal. It is noted that replicating the locomotive behavior along with the body movement of the running lizard has not been ever attempted before.

In this paper, the principle of the periodic body movement of the lizard is verified by analyzing the relationship between the locomotion and the body movement of the lizard, utilizing the dynamics model and simulation. The lizard inspired legged robot was designed and experimented to empirically show that the principle of the lizard's body motion can be applied to the legged robot. As a first step, the dynamics model of the lizard was established for dynamics simulation. Taking advantage of such dynamics simulation, it was shown that either the torques of the waist and tail joints or the ground reaction moment (GRM) are necessary for straight running of the lizard. By considering the anatomical structure muscle of the limbs of the lizard, it was shown that the GRM is limited in magnitude. It was also verified using dynamics simulation, that the torques of the waist and tail joints produce the required moment for running straight, when the GRM is minimum. From optimization of the dynamics model, it was found that the S shape body movement is produced when the sum and the difference of the torques of the waist and tail joints are minimized

and when these torques of the joints produce the moment for running.

For the design of the lizard inspired legged robot, the dynamics model for the robot was established in the horizontal plane. The method for modifying the running direction of the model was developed using the torque of the waist and tail joints. Running direction was maintained by the torque of the waist and tail joints, controlled with the yaw angle of the lizard's body. The lizard inspired legged robot was fabricated using the four bar linkage optimization method. The robot was experimented to maintain the running direction using the torques of the waist and tail joints on the test-bench. As a result, it is verified that the principle of body motion of the lizard can be applied to the legged robot, which is to maintain the running direction using the torques of the waist and tail joints

Keywords : Lizard, Bipedal gait, Legged Robot, Dynamics simulation, Body motion
Student Number : 2009-20660