

딥러닝을 이용한 비평탄 지형 극복용 4족 보행 지능로봇의 설계에 관한 연구

한성민*, 박명숙*, 김상훈*
 한경대학교 전기전자제어공학과

tjdals512@naver.com, nicems@nate.com, kimsh@hknu.ac.kr

A Study on the Design of Four-legged Walking Intelligence Robots for Overcoming Non-Planer Tomography Using Deep Learning

Seong-Min Han*, Myeong-Suk Pak**, Sang-Hoon Kim

*Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University

요 약

본 논문은 4족 지능 로봇의 비평탄 지형 극복 기능을 구현하기 위해, 시뮬레이션 환경에서 제공하는 역기구학(Inverse Kinematic)과 개선된 강화 학습 방법(Partially Observable Markov Decision Process)을 분석하여 수립한 알고리즘을 동작 검증을 위한 임베디드 보드(Embedded Board)에 실제 적용하여 보았다. 이 연구를 통해 4족 보행 로봇의 효율적인 지형 극복형 보행 방식 설계 방법을 제안하며, 특히 IMU 센서의 지능적인 균형제어 방법을 평가하고 다양한 통신방식과 서보모터 제어 방식을 실험하고 구현하였다. 또한 모터 가감속 제어를 통해 보다 부드럽고 안정적인 보행을 구현한다.

1. 서론

급속한 산업화로 인해 많은 건물이 생겼고, 재난으로 인해 건물 붕괴 및 안전사고가 많아지고 있다. 통계청[1]에서 2005년부터 2020년까지 전 세계 기준으로 발생한 재난에 대해 통계 낸 자료에 따르면 재난으로 인해 파괴 혹은 손상된 중요 기반 시설 수는 174,398개이며, 재난에 의한 실종자 수는 3,415명이다. 재난현장은 위험요소가 많고 2차 피해로 이어질 수 있기 때문에 이동형 로봇을 사용하여 안전성과 효율성을 확보하는 지능적인 기술이 시급하다. 이동형 로봇(Mobile Robot)은 추적로봇(Tracked Robot), 바퀴로봇(Wheeled Robot), 다리로봇(Legged Robot)으로 구분된다.[2] 다리 로봇은 나머지 로봇에 비해 횡단능력(Transvers ability)과 지형 복잡성(Terrain Land)이 우수하여 다양한 지형환경(험지)에서 동작 가능하고 다리 개수에 따라서 크게 2족(Biped), 4족(Quadruped), 6족(Hexapod)으로 구분된다.[2]



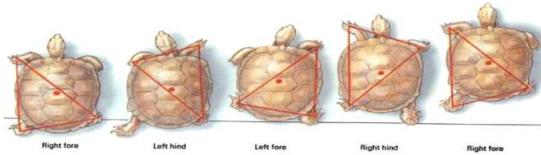
<그림 1> 로봇의 다리 개수에 따른 종류[3]

그중 4족 로봇은 2족에 비해 높은 탑재력과 균형 감각을 가지며 6족에 비해 쉬운 제어와 설계가 가능하다는 장점이 있다.[2] 4족 로봇은 관절 형태에 따라 곤충형(Insect Type), 파충류형(Reptile Type)과 포유류(Mammal Type)로 분류된다. 곤충형은 무릎관절이 엉덩이(Hip) 관절의 높이와 같거나 위를 향하며 몸통 기준 옆으로 벌어지는 형태이고 실제 곤충과 같은 보행을 수행한다. 포유류형은 무릎관절이 엉덩이 관절의 아래에 위치하며 다리가 앞뒤로 움직인다. 따라서 빠르고 동적인 보행을 할 수 있다.[3]



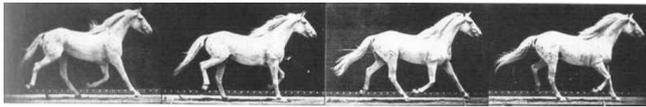
<그림 2> 4족 로봇의 관절 형태에 따른 분류[3]

포유류(견마)형의 4족 보행 패턴에는 걷기(Walk), 속보(Trot), 한 발 밀어 뛰기(Canter), 달리기(Gallop, Bound)가 있다. 걷기는 네 발이 각각 1개씩 앞으로 내디디어 이동하는 보행패턴이며 가장 안정적인 보행 방법이다. 한 발 이동 시 나머지 세 발의 지지점을 이은 삼각형 내에 무게중심이 위치한다.



<그림 3> 걷기(Walk) 보행의 발과 무게중심[3]

속보는 대각선에 위치한 발이 한 쌍이 되어 움직이는 보행 패턴으로 한 쌍의 발이 몸체를 지지하며 앞으로 이동한다.[3]



<그림 4>. 속보(Trot)의 발과 이동원리[3]

본 논문은 4족 지능로봇이 비평탄 지형을 안정적으로 횡단할 수 있도록 시뮬레이션에서 IMU 센서 값을 통해 개선된 강화학습을 사용하고, 안정적인 보행 구현을 위해 가감속 모터 제어를 실험한다.

2. 기구설계 및 균형제어

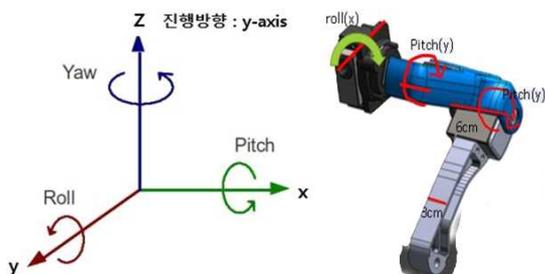
2.1. 4족 로봇의 형태와 다리 자유도

포유류 형태의 4족 로봇은 다양한 형태가 있지만 기계 메커니즘 발달 및 설계 편의에 따라 크게 두 가지 형태<그림 5>로 구현한다.



<그림 5> 포유류형 4족 로봇의 대표적 형태[4]

노란 로봇은 서보모터가 엉덩이 관절, 고관절, 무릎관절로 구성되어 있으며, 초록 로봇은 엉덩이 관절 쪽에 서보모터 3개로 구성되어 있고, 엉덩이 관절과 무릎관절에 파이프를 연결하여 구동한다.



<그림 6> 회전축 정의 및 한 다리의 회전축

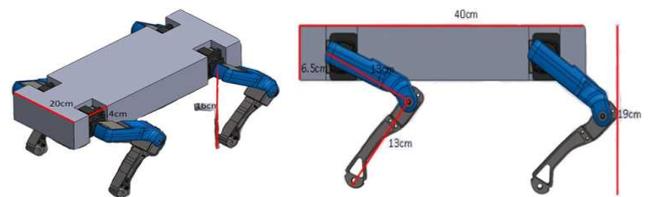
본 논문의 비평탄 지형은 높이가 불균형한 물체가

많기 때문에 <그림 6>처럼 무릎 관절의 모터를 배치하여 독립적인 높이 조절이 필요하다. 따라서 다리 당 3DOF(총 12DOF)의 노란 로봇을 채택한다.

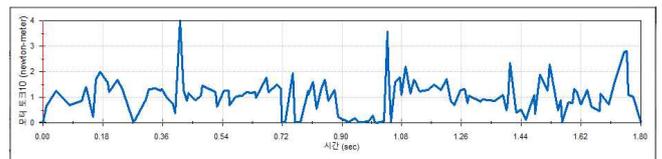
2.2. 구동 모터의 분석 및 설계

로봇의 균형감과 안정적인 보행에는 정확한 회전 힘(Torque)이 필요하다. 4족 로봇의 회전 힘을 구하는 방법은 직접 측정과 시뮬레이션 측정이 있다.

본 논문은 SOLIDWORKS(2017)에서 제공하는 시뮬레이션을 사용하여 측정하였다. 로봇의 크기는 <그림 7>이며 몸통의 무게가 2.0kg 일 때 무릎 관절에 필요한 토크 값은 최대 4.076N*m이다.



<그림 7> 연구에 사용한 4족 로봇의 규격



<그림 8> 4족 로봇의 무릎 관절에 필요한 토크 값

2.3. 역운동학을 통한 관절의 각도

본 논문은 SOLIDWORKS를 통해 만든 통합 로봇 설명 형식(URDF) 파일을 시뮬레이션 환경으로 불러온 후 임의의 비평탄 지형을 만들고 H/W 없이 보행 및 강화학습 알고리즘 실험한다. 보행에 따른 관절의 모터 각도 값은 발 끝점의 위치 및 방향에 따라 관절의 회전 값을 결정하고 관절 변숫값을 찾는 역운동학(Inverse Kinematic)을 이용한다.[5] 해당 내용을 시뮬레이션에서 구현하면 <그림 9>처럼 해당 4Bytes씩 12개의 Radian 값이 나온다.[6]

```
{ 'IDstepLength': -40.0, 'IDstepWidth': 10.0, 'IDstepAlpha': 3.
[ [ 0.04411838 -0.67072087 1.2433987 ]
[ 0.05508634 -0.48170876 1.2133169 ]
[ -0.08447948 -0.75473629 1.33621838 ]
[ -0.06189171 -0.87377142 1.24871511 ]
32
```

<그림 9> 역기구학을 이용한 모터 라디안 각도 도출[6]

2.4. DMA 방식의 UART 통신

본 연구는 Jetson에서 IMU와 강화학습을 구현한

관절의 Radian 정보를 UART(115200-32*12-N-1) 통신을 통해 4Bytes * 12개 값을 MCU로 전송한다. 이때, DMA(Direct Memory Access)를 인터럽트(Interrupt) 방식과 합쳐 효율적으로 데이터 손실 없이 받아오고, 식(1)을 통해 라디안 각도를 표준 각도로 변환하여 서보모터를 구동한다.

$$2\pi \text{radians} = 360^\circ \rightarrow 1 \text{radians} = \frac{180}{\pi} \text{ } (1)$$

```

1 #include <studio.h>
2 #include <math.h>
3 #define PI 3.14159265
4
5
6 int32_t rx1_data[11]; // UART Buffer 32bits * 12
7 HAL_UART_Receive_DMA(&huart1, rx1_data, 12); // Motor_12_value
8
9
10 double rad2deg(double radian); // Radian -> degree
11
12 double rad2deg(double radian)
13 {
14     return radian*180/PI;
15 }
    
```

<그림 10> DMA 수신 및 각도 변환

2.5. PWM을 통한 서보모터 제어

모터 제어의 대표적인 방법은 통신 방식(TTL, I2C, RS-485)과 PWM(Pulse Width Modulation) 방식이 있다. 본 연구는 STM32F407VE의 16, 32Bits 타이머를 통해 만든 PWM 신호의 주기와 듀티 비(Duty rate)를 이용하여 서보모터를 목표한다. 주기는 식(2)의 파라미터 설정을 통해 구한다.

$$\text{목표주기} = \frac{APB(1or2)}{ARR * Presclaer} \text{ } (2)$$

타이머는 APB1(=84MHz), APB2(=168MHz)에 따라 시스템 동작 클럭이 달라지며, 자동 재장전 레지스터(Auto Reload Register)는 STM32 칩 내부의 TCNT Register(Timer Count Register)를 원하는 주기로 동작시킬 수 있는 변수다. 또한 타이머의 동작 주기가 빠르기 때문에 Presclaer를 조절하여 동작 주기를 재조정한다.

본 연구는 2.4절에서 변환해 얻은 각도 값을 해당 각도에 맞는 PWM의 CCR(Capture compare Register) 값을 계산하고 대입하여 각도를 조절한다. 사용할 모터는 전체 주기 2,500us이고, 500~2,500us 사이에서 동작한다. 따라서 ARR은 10,000, Prescaler는 42로 설정하였다. 펄스의 HIGH 상태를 조절하는 CCR(Capture compare Register)은 0도일 때 2,000, 180일 때 10,000 기준을 사이로 일치시켰다.



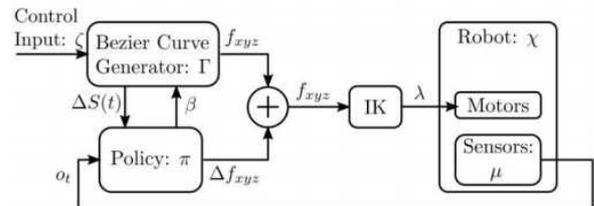
<그림 11> CCR 값에 따른 최소 최대 파형 변화 관찰

2.6. 가감속을 통한 모터 제어

본 연구는 PWM 방식으로 서보모터를 구동한다. 하지만 PWM의 파형이 급격히 변해서 모터가 급격히 변하고, 비평탄 지형을 보행하는 로봇은 불안정하게 동작하여 균형 잡는데 어려움을 겪을 수 있다. 따라서 펄스 변화에 가감속(Profile Velocity)를 넣어 펄스 파형을 사다리 꼴로 만들어 부드러운 동작을 구현할 수 있다.[7]

2.7. 강화학습을 통한 비평탄 지형 학습

본 연구는 불확실성이 많은 비평탄 지형에서 구현을 목표로 하기 때문에 POMDP 알고리즘을 사용한다. POMDP(Partially Observable Markov Decision Process)는 행위자(Agent), 환경(Enviromment), 행동(Action), 상태(State), 보상(Reward), 전이 확률(Transition), 조절 변수(γ : Discount Factor), 관측 공간(Observation space), 관측 함수(Observation function)가 있고, 매 동작 간격(Timesteps)마다 행동 직전 상태에 영향을 받기 때문에 견고해서 분석에 자주 쓰인다. 또한 불확실성을 해결하기 위해 관측자(Observ)를 두어 외부 상태 값을 누적하고 의사를 결정한다. 행위자가 환경에 따라 상호작용(Interacts)하고, 시간 간격마다 보상이 커지는 방향으로 행동하여 상태가 변하면 새로운 관찰해서 결정한다.[8]



<그림 12> POMDP 흐름선도

<그림 12>을 보면 보행에 해당하는 제어신호(Control Input)가 들어오고 상태 S(t)와 발의 높이β를 통해 보행 궤적을 생성하여 식(3) 발끝점의 좌표

(f_{xyz}) 를 생성한다.[8]

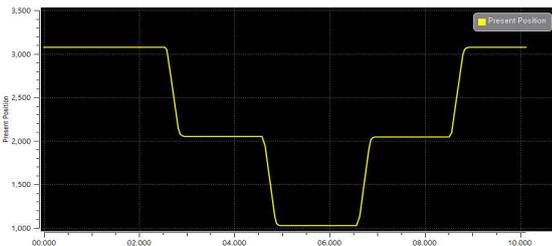
$$f_{xyz} = \Gamma(S(t), \zeta, \beta) + \Delta f_{xyz} \quad (3)$$

해당 좌표를 역운동학(IK)에 넣어 모터의 위치 좌표를 출력하고, 해당 각도일 때 IMU 센서 값을 관측자(Observer)가 관측 o_t 하여 상태 변화량 $\Delta S(t)$ 을 기존 정책(Policy)과 비교해서 원하는 발 끝점의 출력과 변화량을 가감하여 보정하고 각도를 출력한다.

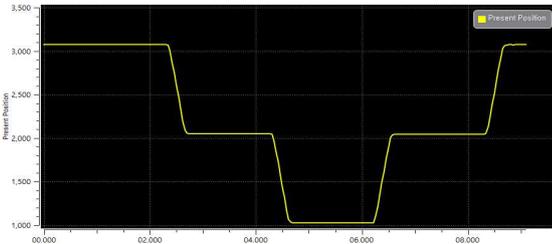
3. 실험 및 분석

본 논문에서 사용한 POMDP 알고리즘을 적용하기 위한 실험 환경은 최소 RTX 2080 Ti 이상이다. 또한 MCU는 ARM의 STM32F407VE를 사용했다.

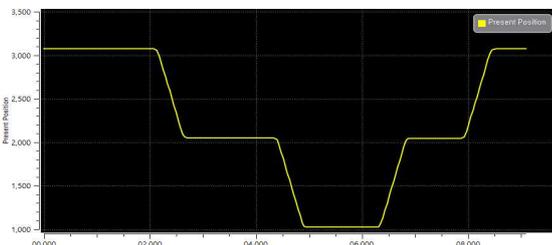
실험은 가감속 시간을 0ms ~ 1,000ms로 조절하여 2초 동안 90도, 0도, -90도 순서대로 총 8초 동안 관찰하고 어느 것이 비평탄 지형에 가장 적합할지 실험을 통해 예측하였다.



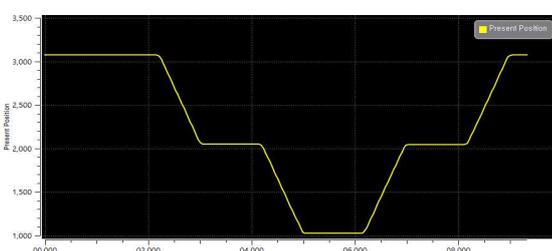
<그림 13> Profile Velocity 0ms



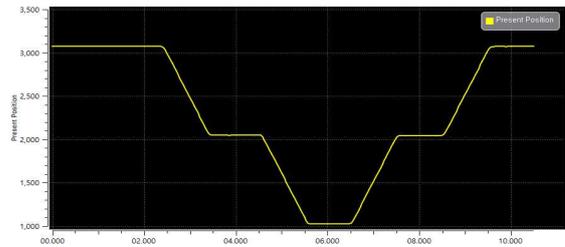
<그림 14> Profile Velocity 300ms



<그림 15> Profile Velocity 500ms



<그림 16> Profile Velocity 800ms



<그림 17> Profile Velocity 1000ms

가감속 시간 중 500ms가 보행에 적절하다고 판단했으며, 800ms부터는 실제 로봇에 적용 시 발이 공중에 오래 떠 있어 균형을 잃기 쉽고 많은 힘이 필요하다고 생각했다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구는 4족 보행 지능 로봇이 비평탄 지형을 안정적으로 걷기 위한 전반적인 설계 제안했다. 또한 모터의 가감속을 100ms 간격으로 실험하여 500ms 일 때 적합하다고 예측했다. 이로 인해 보다 자연스럽게 안정적인 동작이 가능할 것으로 기대된다. 향후 실제 H/W와 Embedded Board를 통해 IMU 센서를 탑재하여 지능적인 모터 제어와 보행을 구현한다.

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1F1A1067496).

참고문헌

- [1] 통계청, 국가통계포털, 국제, 재난검색
- [2] Priyaranjan Biswal, Development of quadruped walking robots, Ain Shamas Engineering, 1page
- [3] Markers, 아두이노로 4족 보행 만들기, 34 35
- [4] <https://github.com/alexandrospekos/quad>
- [5] Muhammed Arif Sen, Inverse Kinematic Analysis Of A Quadruped Robot, International Journal of Scientific
- [6] https://github.com/OpenQuadruped/spot_mini_mini
- [7] 이종연, Torque Control of DC Motor Using Velocity Profile Based Acceleration/Deceleration Control, 한국지능시스템학회, 2~3 page
- [8] Maurice Rahme, Linear Policies are Sufficient to Enable Low-Cost Quadrupedal Robots to Traverse Rough Terrain, 2page