지상시험모델 로버 주행장치 개념 설계

김연규¹, 김해동^{1†}, 이주희¹, 심은섭¹, 전상원²
¹한국항공우주연구원 우주응용·미래기술센터, ²한울로보틱스(주)

Conceptual Design of Rover's Mobility System
for Ground-Based Model

Youn-Kyu Kim¹, Hae-Dong Kim^{1†}, Joohee Lee¹, Eun-Sup Sim¹, and Sangwon Jeon²

¹Space Application & Future Technology Center, KARI, Daejeon 305-333, Korea

²Hanool Robotics Corp., 193 Yakdae-dong, Wonmi-gu, Bucheon 420-734, Korea

E-mail: ykkim@kari.re.kr

(Received October 26, 2009; Accepted November 24, 2009)

요 약

최근 미국, 유럽, 일본 등 우주선진국을 중심으로 달, 화성 등 행성 탐사를 위한 로버(Rover) 시스템에 대해 많은 연구 개발이 진행되고 있다. 행성탐사용 로버 시스템 기술 중 특히 주행장치, 자율 주행 알고리즘, 탑재체 등을 중심으로 많은 연구가 수행되고 있다. 이 논문에서는 실제 행성탐사에 앞서 지상에서 로버 주행장치의 주행성 및 안정성을 평가하기 위해 지상시험모델용 로버의 주행장치에 대한 개념 설계 내용을 소개하였다. 또한, 로버 주행장치의 기술적인 관점에서 해외 연구개발 사례를 분석, 기술하였다. 이를 통해 로버 주행장치 개발을 위한 요구사항들을 주행성과 안정성 관점을 고려하여 도출하였다. 설계된 로버 주행장치는 높은 주행성과 안정성을 만족하기 위해 6족을 가지고 있으며, 각 다리의 관절을 제어하는 능동 서스펜션(Active Suspension)을 적용하였다. 이러한 종류의 주행장치 개념은 근미래 (Constellation 프로그램)에 수행될 유인달 탐사에서 이동 및 거주 장치로써 NASA의 ATHELE를 통해 처음 적용하여 개발하고 있다. 이 연구에서 제안된 장치 개념은 이와 달리 우리나라에서 앞으로 수행할 무인소형 달탐사에 적용하고자 설계되었다. 이 논문에서 소개된 내용은 향후 국내에서 행성탐사용 로버시스템을 본격적으로 개발하고자 할 때 유용한 참고자료 및 경험을 제공할 것이다.

Abstract

In recent years, lots of studies on the planetary rover systems have been performed around space advanced agencies such as NASA, ESA, JAXA, etc. Among the various technologies for the planetary rover system, the mobility system, navigation algorithm, and scientific payload have been focused particularly. In this paper, the conceptual design for a ground-based model of planetary rover's mobility system to evaluate mobility and moving stability on ground is presented. The status of overseas research and development of the planetary rover systems is also addressed in terms of technical issues. And then, the requirements of the planetary rover's mobility system are derived by means of considering mobility and stability. The designed rover's mobility system has an active suspension with 6 legs that controls 6 joints on the each

[†]corresponding author

leg in order to achieve high stability and mobility. This kind of mobility system has already applied to the ATHELE of NASA for various purposes such as transportation and habitation for human lunar exploration activities in the near future (i.e., Constellation program). However, the proposed system has been designed by focusing on the small-sized unmanned explorations, which may be applied for the future Korea Lunar exploration missions. Therefore, we expect that this study will be an useful reference and experience in order to develop the planetary exploration rover system in Korea.

Keywords: rover, mobility system, planetary exploration

1. 서 론

지난 1960, 1970년대 미국과 러시아를 중심으로 활발히 수행되었던 행성탐사가 2004년 미국의 ‘Vision for Space Exploration’의 발표와 더불어 최근 미국, 유럽 및 신흥 우주선진국인 일본, 중국, 인도 등을 중심으로 많은 연구개발을 활발히 수행하고 있다. 특히 2007~2008년 달탐사 궤도선을 통해 달에 대한 연구를 활발히 수행하였으며, 미국을 중심으로 2020년에는 유인 달탐사를 통해 달 영구기지 건설, 자원 채취 및 귀환 등 본격적인 달 탐사를 계획하고 있다. 이처럼 달은 과학적, 자원적인 의미뿐만 아니라 궁극적으로 화성의 유인 탐사를 위한 전초기지로써 중요한 탐사 대상이 되고 있다.

행성탐사는 무인탐사와 유인탐사로 크게 구분할 수 있는데, ‘로버(Rover)’는 행성의 환경, 자원 등을 탐사하고, 우주인의 행성탐사 시 수송 시스템으로 활용하는 등 행성탐사 전반에 걸쳐 핵심 연구개발 기술 중의 하나이다. 미국의 유인 달탐사 프로그램인 Constellation 임무에서 소형 무인로버 및 탐사대원 운송용 유인로버에 대한 새로운 기술개발이 활발하게 이루어지고 있는 것도 이 때문이다.

무인탐사 로버는 1970년, 1973년 최초로 구소련의 달 탐사 로버인 Lunokhod가 행성탐사를 수행하였고, 1971년에는 구소련의 Mars 로버가 실패는 하였으나 화성탐사를 시도하기도 하였다(안석민과 이용교 2008). 이후 많은 무인탐사 로버 모델이 연구개발 되었지만, 실제로 행성탐사에 배치된 것은 화성탐사용 미국 NASA의 Sojourner(1997년)와 쌍둥이 로버인 Spirit, Opportunity(2004년)에 불과하다. 향후 2010년 초중반에 미국 NASA의 MSL(Mars Science Laboratory) 로버와 유럽 ESA의 ExoMars 로버의 화성 탐사계획이 예정되어 있다. 이와 더불어 일본의 SELENE-2 프로그램에서는 달 탐사 착륙선 및 로버(Micro-5) 개발이 계획되어 있고(Okada et al. 2006), 중국 등도 현재 행성탐사 로버(ORF-L)의 주행 장치에 대한 연구개발을 수행 중에 있다(Chen et al. 2009). 유인탐사 로버는 미국의 아폴로(Apollo) 프로그램에서 우주인의 수송을 위해 LRV(Lunar Roving Vehicle)가 개발되어 아폴로 15, 16, 17 임무에 사용되었다. 그리고 최근 미국 NASA에서는 행성탐사 및 달기지 건설 등의 계획에 따라 우주인 수송, 장비 이동, 기구 조립 및 탐사활동 등 다용도로 활용하기 위한 6족의 Athlete 로버(그림 1)가 연구개발 중이다.

이 논문에서는 행성탐사에 앞서 지상에서 로버의 주행장치의 이동성 및 안정성을 평가하기 위해 지상시험모델용 로버의 주행장치에 대한 개념 설계를 수행하였다. 이를 위해 우선 로버 주행성

그림 1. Athlete 로버(<http://www-robotics.jpl.nasa.gov>).

관점에서 일반적인 요구사항을 정리하였고, 이러한 요구사항에 부합하는 로버 주행장치를 제안하였다. 이것은 NASA의 Athlete 로버와 유사한 6족의 각 다리 관절을 제어하는 능동(Active) 서스펜션(Suspension) 개념을 가진 로버로써, 로버의 주행성 및 안정성 관점에서 상대적으로 효과적인 기능을 가지도록 설계하였다. 이와 더불어 이 연구에서 개발하려는 주행장치를 적용하고자 하는 로버 시스템 전체의 상위레벨의 설계 사양 및 전체 기능도(Block Diagram) 등의 설명을 통해 로버 전체 시스템에 대한 이해를 높였다. 또한, 이 논문에서는 국외에서 연구 개발되었던 로버의 주행 장치에 대한 메커니즘들을 정리하고, 이에 대한 기술적인 이슈에 대해 기술하였다.

2. 로버 주행장치 시스템

서론에서 언급하였듯이, 이 장에서는 로버 주행장치에 대한 국외 연구 개발 현황 및 로버 주행장치의 기술적인 이슈를 기술하고, 이를 통해 로버 주행장치의 기술적인 요구사항을 분석 및 기술하였다.

2.1 해외 행성탐사 로버 개발 현황

로버는 주어진 환경, 지형을 운행할 수 있는 자동화된 시스템을 말하는 것으로 현재 무인우주탐사에서 중요한 기술 중 하나이다. 관련 기술 중에서 로버의 주행 장치는 로버를 움직이는 기구장치로써 달, 화성과 같은 거친 지형에서 주행 기능과 안정도를 결정한다. 이러한 요구사항을 만족하기 위해 지금까지 많은 새로운 개념들이 제안 및 구현되었다.

표 1은 주요 선진국에서 연구 개발을 수행하였거나 현재 진행 중인 로버에 대한 주요 설명을 기술하였다. 최초의 행성탐사 로버인 구소련의 Lunokhod 1호가 1970년 달탐사를 시작한 이래로 미국 NASA를 중심으로 행성탐사 로버 개발을 수행하였다. 특히 미국은 1997년 Path Finder 착륙선의 Sojourner 로버로 화성탐사를 수행한 이래로 2004년에는 MER(Mars Exploration Rover) 쌍둥이 로버(Opportunity, Spirit)가 화성탐사를 수행하였는데, 이 로버들은 현재에도 계속 임무를 수행하고 있다. 그리고 향후 2012년도에는 미니 쿠페 차 크기의 MSL(Mars Science Laboratory) 로버를 화성

표 1. 행성 탐사 로버 개발 해외사례.

이름	주요 사양
1) 미국 NASA	
Sojourner	<ul style="list-style-type: none"> - 화성탐사 로버(1997년 착륙) - 크기: $65 \times 48 \times 30\text{cm}^3$ - 무게: 10.5kg - 전력: solar cell - Suspension: Rocker-Bogie(6 wheels) - 속도: 약 1cm/sec - 임무: 83 sols 운영, 랜더(Pathfinder) 주위 16지점의 화학특성 분석 - 주행: 영상기반 자율주행
MER (Spirit & Opportunity)	<ul style="list-style-type: none"> - 화성탐사 로버(2004년 착륙) - 크기: $1.5 \times 2.3 \times 1.6\text{m}^3$ - 무게: 180kg - 전력: solar cell - Suspension: Rocker-Bogie - 바퀴: 6 wheels (4 steering wheels) - Static Stability: 30도 - 속도: 5cm/sec@Max - 임무기간(목표): 90 sols - 장애물 극복: 바퀴 직경 1.5배 - 주행: 영상기반 자율주행
MSL (Mars Science Laboratory)	<ul style="list-style-type: none"> - 화성탐사 로버(2012년경 발사 예정) - 크기: 2.7m(길이) - 무게: 900kg - 전력: RTG(radioisotope thermoelectric generators) - Suspension: Rocker-Bogie - 바퀴: 6 wheels (4 steering wheels) - 속도: 90m/h@Max - 임무기간: 668 sols - 장애물 75cm 극복 가능 - 주행: 영상기반 자율주행 - 비용: 약 \$23억
2) 유럽	
ExoMars	<ul style="list-style-type: none"> - 화성탐사용(2016년경 발사 예정) - 무게: 205kg - 전력: Solar Cell - 바퀴: 6 wheels (4 steering & walking wheels) - 특징: Flexible wheel, 드릴링 장치 등 - Suspension: Rocker-Bogie와 유사한 기능으로 walking 기능이 추가되었음 - 주행: 영상기반 자율주행 - 현재 서브시스템별로 개발/시험중
3) 일본 JAXA	
Micro5	<ul style="list-style-type: none"> - 달 착륙선의 탐제체(SELENE-2 프로젝트용, 1990년대 후반부터 연구) - 크기: $80 \times 65 \times 20\text{cm}^3$ - 무게: 29.5kg - 전력: Solar cell - Suspension: PEGASUS (5 wheels: 4drive wheels & 1 active wheel) - wheel 직경: 15cm - 속도: 3cm/sec - 25cm 장애물 극복, static stability: 30도 - 주행: 영상기반 자율주행 - 탐제체: 샘플채취용 1m robotic arm 등
4) 구소련	
Lunokhod 2	<ul style="list-style-type: none"> - 달 탐사(1973년) - 크기: $1.7 \times 1.6 \times 1.35\text{m}^3$ - 무게: 840kg - 속도: 2km/h@Max - 8 wheels - wheel 직경: 51cm, 너비: 20cm - 전력: Solar cell - 주행: 영상기반 Remote Control
5) 중국	
ORF-L	<ul style="list-style-type: none"> - 행성탐사(주행장치 시험모델, 2008년) - Suspension: ORF-L(Rocker-Bogie 개량모델, 주행성 강조) - 현재 주행 장치 등 기초연구개발 진행

그림 2. Rocker-Bogie suspension 메커니즘(Kuroda et al. 1999).

에 보낼 계획에 있다. 미국뿐만 아니라 1990년대 후반부터 유럽, 일본, 중국 등 많은 국가에서도 로봇 임무인 로버에 대해 관심과 연구가 증대되고 있다.

표 1에서 보는 바와 같이 미국 NASA에서는 두 번의 화성탐사 로버 임무를 성공적으로 수행하였다. 과거에 화성탐사를 성공한 NASA 로버와 현재 개발 중인 로버에서 공통적으로 주행장치의 서스펜션(Suspension)은 Rocker-Bogie 라는 수동(Passive) 서스펜션을 사용하였다. 이것은 로버 채시(Chassis)분야에서 거의 교본화되어 다른 국가에서는 주행장치 개발 시 Rocker-Bogie를 비교 분석 및 개선하는 방향으로 연구를 수행할 정도이다. 이것은 Sojourner, MER, MSL 로버와 그림 2의 메커니즘과 같이 6개의 바퀴가 3개씩 양측면에 대칭적인 구조를 갖고 있으며 각 측면은 rocker와 bogie라는 2개의 연결부(link)를 갖고 있다(Kuroda et al. 1999). 그리고 rocker와 bogie는 회전 조인트(joint)에 의해 상호간에 부착되어 이 회전 조인트에 의해 바퀴 아래위로의 움직임이 자유롭고, 탑재 중량을 6바퀴에 균등하게 분배할 수 있어 바위와 같은 장애물을 넘기에 최적의 메커니즘으로 최대 바퀴 지름 1.5배의 장애물을 넘을 수 있는 것으로 알려져 있다(Kuroda et al. 1999).

유럽 우주청(ESA)는 행성 탐사를 위한 오로라(Aurora) 프로그램의 일부인 EXOMARS 임무에서 로버를 통한 화성 탐사를 2016년을 목표로 연구개발 중에 있다. EXOMARS 로버 개발을 위해 1990년대 말부터 로버 서스펜션 설계 검증 과정을 거쳐 최종 주행 모델을 선정하였다. 이 모델은 그림 3과 같이 바퀴 2개당 하나의 서스펜션으로 전체 3개의 독립적인 서스펜션 모듈을 갖고 있고, 또한 바퀴에 걷는(walking) 기능을 추가하여 하이브리드(hybrid) 형태의 서스펜션을 가짐으로써 장애물 극복 능력 및 주행성과 안정성을 높인 개념으로 현재 지상 시험 모델이 개발되어 시험 중에 있다(Lee et al. 2006). 또한 걷는 기능이 가능한 메커니즘에 의해 로버 탑재 시 바퀴를 몸체 안으로 접을 수 있어 발사체 탑재 시 위성체 공간을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 반면 바퀴에 걷는 기능을 추가함으로써 주행 메커니즘이 다소 복잡해졌으며, 관련 장치의 무게 부담을 야기한다. 또한 EXOMARS의 바퀴는 유연하게(Flexible) 설계되어 지면과의 접촉 면적을 증가시킴으로써 주행성을 더욱 높일 수 있다.

일본 JAXA는 일본의 달탐사 프로그램인 SELENE-2를 통해 달에 착륙선을 보내고, 착륙선의 탑재체로서 소형 로버인 Micro-5를 통해 달 탐사를 수행할 계획을 갖고 있다. 일본은 1990년대 말부터 Micro-5 #1~#5 로버 시험모델에 대한 연구개발을 수행하였다. Micro-5 #1을 통해 새로운 서스펜

그림 3. EXOMARS 로버 주행장치 시험모델(Lee et al. 2006).

그림 4. Micro-5 PEGASUS suspension(Kubota et al. 2003).

션인 PEGASUS(PEntad Grade Assist SUSpension)을 개발하여 검증하고 있는데, 이는 앞에서 언급한 Rocker-Bogie의 장점과 4륜 구동장치의 장점을 살려, 4륜구동 장치에 하나의 능동 바퀴를 추가함으로써 Only-one-Joint 시스템을 구성한다(Kubota et al. 2003). 이 시스템의 장애물 극복능력은 Rocker-Bogie와 같이 탁월하면서도 일반 4륜 구동 시스템과 같이 시스템이 간단하여 30kg 내외의 소형로버에 특히 적합하다. 장애물 극복 능력은 바퀴 지름의 1.5배이고, 40도의 경사 주행이 가능하다. 그림 4는 일본 Micro-5의 PEGASUS의 개념도이다. 이외 중국은 최근에 Rocker-Bogie를 개량한 새로운 서스펜션인 ORF-L(Obverse Four-Linkage) 제안하여 이에 대한 시험 검증을 최근에 수행하고 있다(Chen et al. 2009).

2.2 로버 주행장치의 기술적인 이슈

로버는 주행장치에 따라 크게 바퀴(wheel), 카터필러(caterpillar), 다리(leg) 등으로 분류할 수 있다. 다리 모양(legged) 주행 장치는 넓은 범위의 상황에서 그것의 안정도를 유지할 수 있기 때문에

표 2. 능동형 및 수동형 로버 주행장치 비교.

기술목록	성능 비교
주행성	능동형 > 수동형
안정성	능동형 > 수동형
탐재체 수용력	능동형 $\approx$ 수동형
무게/전력 효율	능동형 < 수동형
신뢰도	능동형 < 수동형
기술 성숙도	능동형 < 수동형

지형에 대한 정보의 체계가 부족한 곳에 사용하는 것이 적합하다(Barlas 2004). 하지만 이 시스템은 기계적으로 복잡하고, 많은 컨트롤을 필요로 하며 낮은 속도와 탐재체 수용 능력이 현격히 떨어진 다(Barlas 2004). 그럼에도 불구하고 안정도에 대한 성능 때문에 많은 연구가 진행되고 있다. 카터 필러는 움직임에 있어서 높은 안정도와 지면과의 좋은 마찰 계수를 제공하고, 시스템적으로 간단하 다(Siegwart et al. 2002). 하지만, 로버가 회전할 때 카터필러와 지면과의 마찰계수 손실이 크고, 하 나의 카터필러 모터가 문제가 생기면 움직일 수 없는 단점이 있어 많이 선호되고 있는 시스템은 아니 다(Siegwart et al. 2002). 따라서 바퀴 형태의 로버가 가장 많이 선호되고 있는 시스템인데, 이것은 걷는(walking) 로봇보다 간단한 알고리즘으로 빠른 속도와 많은 탐재체를 탐재할 수 있으며, 바퀴의 위치, 방향이 카터필러보다 정확하게 계산될 수 있다. 이것의 성능은 일반적으로 장애물을 넘는 크 기에 좌우되는데, 일반적으로 마찰 계수가 충분히 크다면 바퀴 지름 크기의 장애물을 넘을 수 있다.

로버의 주행 장치는 로버의 서스펜션에 따라 크게 능동(Active)형과 수동(Passive)형으로 분 류할 수 있다(Siegwart et al. 2002). 수동 서스펜션은 안정된 움직임을 위해 추가적인 액추에이 터(Actuator) 등이 장착되지 않고 간단히 기계 구조적인 방법을 이용한다. Sojourner, Opportunity, Sprit(이상 미국 NASA), 일본의 Micro5와 같이 현재 무인 로버의 대부분이 여기에 속하고 “Rocker-Bogie”가 수동 서스펜션의 대표적인 예가 된다(Siegwart et al. 2002). 반면에 능동 서스펜션은 이 동 중 안정도를 유지하기 위해 밀폐형 제어(close loop control)를 사용하는 능동 제어를 의미하 는데(Siegwart et al. 2002), 이 시스템은 로버의 걷는(walking) 기능을 가능하게 하여 주행성(장애물 극복능력 등)과 안전성이 좋다. 그리고 능동형 로버의 다리(바퀴)는 수동형보다 많은 자유도가 있어서 로버를 수송 우주선에 탑재 시, 최소한의 부피로 탑재할 수 있는 장점도 있다. 그 반면에 더 많은 장 치를 요구하고 시스템이 복잡하기 때문에 신뢰도 관점에서 단점이 있으며, 전력 소비도 수동형에 비 해 많이 요구된다. 그림 1의 미국 NASA Athlete 유인탐사 로버가 능동형의 대표적인 예이다. 그리 고 ESA의 Exomars 로버와 같이 주행모드에 따라 서스펜션 방식이 변경되는 하이브리드 형태도 연 구개발 중이다. 표 2에서 로버 주행장치 개발에서 이슈가 되는 기술적 항목에서 능동형 주행장치와 수동형 주행장치를 비교 분석하였다.

표 2에서 주행성은 거친 지형에서 바위와 틈, 경사 지형을 극복하는 능력, 안정성은 경사진 지형 에서 정지 상태에서의 몸체와 무게중심의 조정에 따른 정지 상태에서의 안정도, 탐재체 수용력은 탐 재체 수용 가능 크기, 무게/전력 효율은 전체 로버의 무게/전력 대비 주행 장치 무게/전력의 비, 신 뢰도는 시스템 복잡도 등을 의미한다(김연규 외 2009). 위에서 언급한 바와 같이 무인 탐사로버는 현 재 수동형 로버를 바탕으로 연구개발을 수행 중에 있으며, 능동형은 높은 주행성과 안정도를 요구하

표 3. 로버 시스템 상위 요구사항.

요구 사항	
주행장치 및 구조	<ul style="list-style-type: none"> - 로버 주행성: 행성환경에서 평지 주행 속도 및 정확도, 경사면에서의 주행속도 및 정확도 요구 - 장애물 극복 능력: 장애물 및 틈새 등 극복 - 로버 정적 안정 능력
자율주행	<ul style="list-style-type: none"> - 로버 각 바퀴의 주행 정보 획득 요구 - 주행 카메라 설치 및 측정 범위, 해상도 등 성능 - 로버 자기 위치 확인 및 자율 주행 알고리즘 요구 - 장애물 자동 회피 기능 요구
전력	<ul style="list-style-type: none"> - 태양 전지판 전력 손실 계산 요구(먼지, 환경, 노화 등) - 모든 서브시스템 전력 공급 가능 - 충/방전을 자동 제어 및 임무에 맞게 전력 할당
열제어	<ul style="list-style-type: none"> - 로버에 신뢰성 있는 온도 환경 제공 - 행성의 환경(온도, 대류, 먼지, 얼음 등)에 부합하도록 함. - 온도마진을 고려한 시스템 설계
통신	<ul style="list-style-type: none"> - 궤도선/착륙선/지구와의 통신 기능 제공 - 통신 대역을 고려한 송수신기 제공 - 통신 대역폭의 효율적 사용
제어 및 데이터 처리	<ul style="list-style-type: none"> - 로버 운영중 S/W 업로딩 및 수정 가능 - 로버 서브시스템의 전반적인 제어 및 관리 - 지상의 명령 및 로버의 데이터(로버상태, 사진, 결과 등) 저장과 송수신 가능 - 통신 대역폭의 효율적 사용을 위해 데이터 처리 및 압축 필요 - 로버 안전모드 및 자동 회복 메커니즘 요구
과학탐재제	<ul style="list-style-type: none"> - 로버의 과학임무를 수행하기 위한 과학탐재제(예; 카메라, 분광기, 릴 등) 각 장치에 대한 성능 요구

므로 이에 대한 연구를 중점적으로 수행하고 있어, 만약 유인 우주탐사를 수행 시에는 우주인의 안전 때문에 수동형 보다는 능동형을 더 선호할 것으로 판단된다. 따라서 이 논문에서는 유무인 행성 탐사에 모두 적용 가능한 능동형 지상시험모델 로버 주행장치를 제안하고 설계하였다.

2.3 로버 시스템 상위 요구사항 분석

이번 절에서는 로버의 일반적인 상위 요구사항을 표 3과 같이 분석하였는데, 로버 시스템의 요구사항은 로버의 임무에 따라 그 성능과 그에 따르는 요구사항이 다르므로 요구사항을 간략히 주요한 내용을 중심으로 기술하였다. 그리고 표 3에서는 로버가 달 혹은 화성 등에 착륙한 상황에서 행성 표면에서 임무를 수행하기 위한 로버 시스템에 대한 요구사항으로 로버의 발사환경, 발사 후 우주비행(Cruise), 착륙(Landing), 착륙선에서 탈출(Egress) 등 로버 임무에 대한 고려도 필요하겠지만, 표 3에서는 로버 자체 시스템에 대한 요구사항으로 크게 주행장치 및 구조(Locomotion & Structure), 자율주행, 전력, 열제어, 통신, 제어 및 데이터 처리, 과학탐재체등으로 구분하여 정리하였다.

2.4 로버 주행장치 요구사항 분석

로버의 각각 특징, 성능, 임무 등에 따라 다르겠지만, 현재까지 개발되었거나 개발 중인 행성 탐사용 로버 주행 장치에 요구된 일반적인 사항들을 정리하였다(표 4). 로버는 각 임무에 따라 그에 대한 요구사항이 다르겠지만, 최근 연구개발 되었던 행성 탐사용 소형무인 로버의 주행 요구사항을 참고로 능동형 서스펜션을 고려한 로버 주행장치 설계 요구사항을 기술하였다. 이 연구를 통해 개발하고자 하는 지상시험모델용 로버 주행장치는 장치의 주행성 및 안정성 평가가 주목적이므로 전력, 통신, 시스템 컨트롤, 인터페이스 등에 대한 시스템 전반에 대한 것은 포함하지 않았다. 또한, 행성의

표 4. 행성탐사용 지상시험로버 주행장치 개발 요구사항.

요구 사항	
기능	<ul style="list-style-type: none"> - 평지의 암석, 돌 등의 지형에서의 주행이 가능해야 한다. - 모래바닥으로 된 지형에서 주행이 가능해야 한다. - 비탈진 경사면의 종, 횡 방향으로 주행 가능해야 한다. - 주행장치는 주행 평면상의 어떠한 방향으로도 진행이 가능하여야 하며, 제자리 360도 회전이 가능해야 한다. - 암석 등의 장애물을 극복 혹은 장애물 회피가 가능해야 한다. - 바닥 틈새 사이의 장애면을 극복하여 주행할 수 있어야 한다. - 주행면의 흙먼지, 모래등의 오염으로부터 주행장치의 성능 저하가 발생하지 않도록 하여야 한다. - 장애물 회피 및 극복 등을 위해 주행장치 바퀴가 보행 (walking) 형태로 이동할 수 있어야 한다. - 주행장치의 바퀴들은 각각 2축 이상의 자유도를 가지며, 개별적으로 구동이 가능해야 한다. - 시각기반 항행알고리즘 (Vision-based Navigation)에 의한 자동 주행이 가능해야 한다. - 항행 알고리즘에 의한 주행명령과 별도로 운영자에 의한 주행장치의 수동적인 주행명령에 의해서도 주행되어야 한다. - 수동적인 주행명령을 생성할 수 있으며, 생성된 명령을 원격 통신에 의해 전송하고 수행하도록 하여야 한다. - 정지 및 주행 상태에서 항상 안정된 자세를 유지할 수 있어야 한다. - 모랫바닥 및 흙바닥과 같은 미끄럼이 있을 수 있는 바닥에서 미끄럼이 최소화되어 주행명령에 최대한 추종할 수 있는 바퀴바닥면으로 설계되어야 한다. - 허용된 장애물, 틈새 장애, 및 경사면 주행 시 몸체가 전복되지 않도록 무게중심 혹은 방지 시스템이 설계되어야 한다. - 주행성 및 주행추종 오차를 판단하기 위한 바퀴 및 Joint 등의 위치 센서, 속도 센서, 경사계 등 주행성 평가를 위한 센서가 장착되어야 한다. - 로버가 주행할 수 있도록 전력(배터리)이 공급되어야 한다. - 로버의 제어 S/W 구동 및 데이터, Command 송수신이 가능해야 한다. - 주행장치의 일부분이 고장 나더라도 나머지 부분으로 주행이 가능해야 한다.
성능	<ul style="list-style-type: none"> - 최소10m/min 이상 평지를 주행할 수 있어야 한다. - 주행 플랫폼의 높이 최대 50% 크기의 장애물을 극복하여 주행할 수 있어야 한다. - 최소 30도 이상의 평지 경사면을 오르고 내릴 수 있어야 한다. - 주행 플랫폼 높이 최대 50% 이하의 틈새 (Crevasse) 지형을 극복하여 주행할 수 있어야 한다. - 평지 30도 경사면을 횡방향으로 주행할 수 있어야 한다. - 정지된 상태에서 앞, 뒤, 좌, 우로 최대 40도 기울기까지 중심을 잃지 않고 안정된 상태를 유지해야 한다. - 최소 5m/min 이상 모랫바닥을 주행할 수 있어야 한다. - 주행 명령에 대한 추종 오차는 평지에서 최대 2% 이하, 모랫바닥에서는 최대 10% 이하이어야 하며, 평지 바닥 경사면에서는 주행오차는 최대 10% 이하이어야 한다.
특징	<ul style="list-style-type: none"> - 로버는 최소 0.5m × 0.5m × 0.3m (L×W×H) 이상이어야 한다. - 최소 바퀴 직경 0.2m 이상이어야 한다. - 플랫폼과 바닥면의 높이 차이는 최소 0.1m 이상이어야 한다. - 플랫폼과 주행장치를 포함하여 최대 30kg을 넘지 않아야 한다.

우주환경이 아닌 지형적인 요소만을 고려한 지상 환경에서의 주행성 및 안정성 시험 항목들을 고려하여 기술하였다.

3. 로버 주행장치 개념 설계

3.1 로버 주행장치 전체 구성

2장에서 기술한 요구사항을 고려하여 행성탐사용 지상시험모델 로버의 주행장치에 대한 개념설계를 수행하였다. 로버의 주행장치는 전체적으로 그림 5와 같이 구성되어 있으며, 6각형의 플랫폼위에 지상모델 로버의 본체가 탑재되게 된다. 로버의 본체부는 그림 6과 같이 구성되는데, 몸체 대신 주행장치 위에 놓일 Breadbord 타입의 평판위에 마스터 깃대를 설치하고 그곳에 장착된 카메라 및

그림 5. 로버 주행장치 외형도(Breadboard 및 마스터 깃대 제외).

그림 6. 로버주행장치 시스템 구성도.

주행장치의 각종 센서(자이로, 가속계, 위치확인센서 등)로부터 비전 정보와 각종 위치, 자세 정보를 이용하여 Breadboard 위에 장착할 컴퓨터(노트북 타입) 내 제어부를 통해 6개의 다리 및 바퀴를 제어하여 안정하게 목표 지점까지 자율 주행(자동주행, 장애물 극복/회피 등) 또는 운영자에 의한 수동주행에 의해 목표지점까지 도달한 후 로버 임무를 수행하게 한다.

그림 6에서는 중앙 제어 장치는 기능별로 Task, Action, Local 제어기로 분류되어 있는데, Task 제어부는 로버의 카메라 비전 정보를 이용하여 로버가 이동하기 위한 맵(Map)을 생성하고 지속적

그림 7. 로버주행장치 제어부 구성도.

인 비전 정보를 획득함으로써 맵을 기반으로 한 주행업무를 수행한다. Action 제어부는 생성된 맵을 기반으로 로버의 경로(path)를 생성하고, 이동 중 로버의 센서를 이용하여 이동경로에 따른 위치 확인으로부터 로버의 주행 경로상에 오차가 생기면 이에 대한 보상을 수행한다. 바퀴를 이용한 주행뿐만 아니라 걷기주행(walking)을 수행할 경우 걷기 안정성을 유지하기 위하여 걷기주행 패턴을 생성하고, 이에 대한 보상도 로버의 센서를 이용하여 수행한다. local 제어부는 전체 로버에 대한 시스템 관리 및 조정 업무를 수행하게 된다. 그림 7은 위에서 언급한 로버 제어부에 대해 세부적인 기능 블록 다이어그램으로 기술하였다.

3.2 로버자세 제어에 대한 개념설계

로버의 각 다리는 그림 8과 같이 Action level 제어부에서 2개의 3축 모션장치에 의해 제어되는 데, 이것은 1개의 roll, 3개의 pitch, 1개의 steering, 1개의 driving을 제어하게 된다. 따라서 그림 8과

그림 8. 로버 leg & wheel 구성도.

그림 9. 로버의 자세 시뮬레이션.

같이 각 다리에는 6개의 액츄에이터가 구성되고, 6 자유도를 가지게 되어 주행과 관련하여 다양한 자세를 구성할 수 있다. 그리고 각 다리는 링크 간 간섭을 최소화하도록 하였으며, 6개의 액츄에이터에 의한 무게 증가에 따라 각각의 부품을 최소화하여 각 모듈의 구성을 단순화하였다.

그림 9는 로버 주행 시에 취하는 여러가지 자세에 대한 동적 시뮬레이션을 보여주는데, 제자리 회전 및 전후진이 자유롭고, 바퀴의 위치를 고정된 상태에서 상단 본체를 상하로 움직일 수 있어, 상단 본체에 과학장비 및 카메라, 드릴 등이 장착될 경우 본체와 지면의 간격을 좁혀 과학실험 수행 및 드릴링 임무 수행과 시료채취 등의 다양한 임무에 안정적인 자세를 유지할 수 있음을 알 수 있다. 만약 장애물을 극복해야 할 경우에는 지면과의 간격을 높여 걷는 기능이 아니더라도 쉽게 장애물을 극복할 수 있도록 하였다. 그리고 6개의 다리 중 한쪽 (180도 이내) 방향이 아닌 서로 다른 지점의 3개

그림 10. 우주선 탑재 시 로버의 자세 시뮬레이션.

그림 11. 지상모델 로버 크기(단위: mm).

이상의 바퀴들만 지면에 닿는다면 자세를 유지할 수 있으므로, 장애물 극복 혹은 만약 6개의 다리 중 일부가 고장(fail)이 나더라도 주행 가능하도록 이중화(redundancy) 개념도 고려되었다. 6각형 모양의 Breadboard 타입의 플랫폼 위에는 제어부를 위한 전장 장치(소형 노트북) 및 전력장치, 카메라 등이 탑재될 것이다. 6각형 각 꼭지점이 다리와 연결되는데, 그림 8과 같이 각 다리는 6개의 모터로 구성되어 비틀림에 대해 상대적으로 강한 구조로 구성되어 있다. 아울러 Breadboard 타입의 플랫폼을 갖추므로써 다른 용도의 모듈들의 장착이 용이하게 구성되어 있다.

이와 같이 많은 자유도를 가진 로버는 다양한 자세를 가질 수 있기 때문에, 그림 10과 같이 우주선 탑재 시 최소한의 부피로 자세를 유지할 수 있는 장점을 가진다. 그리고 장애물 및 경사도 주행 시 바퀴가 지면에서 쉽게 떨어지지 않아 요구사항 내에서 마찰 계수를 유지할 수 있어 주행 안정성을 유지할 수 있다. 그림 11은 로버의 플랫폼 크기와 우주선 탑재 시 최소 부피 자세 및 로버 다리를 펼쳤을 경우의 크기에 대해 예상되는 크기를 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다.

3.3 주행을 위한 시각 장치 개념설계

로버의 주행방법은 일반적으로 운용자에 의한 원격 제어, 자율 주행으로 분류할 수 있는데, 행성탐사 로버는 운용자에 의한 원격제어와 자율주행 두 가지를 상호보완적으로 일반적으로 이용하고 있다. 행성과 지구의 통신 시간 지연에 따라 운용자에 의한 원격 제어만을 사용하기 힘들기 때문에 자율주행을 통해 로버가 자체적으로 운영되는 것이다. 일반적으로 통신 환경에 따라 다르지만 국제 우주정거장(ISS)으로부터 지상까지 0.25 ~ 6초 정도의 시간 지연이 생긴다. 달 표면에서는 3초 이상, 화성에서는 6 ~ 45분의 지연이 생기는 것으로 알려져 있다(Larson 2006). 그래서 로버의 목표지

점(Target)을 운용자에 의해 지정이 된다면, 로버는 사전 영상정보를 활용하여 목표지점으로 이동하기 위한 경로(Path)를 결정하고, 자율적으로 이동하게 된다. 여기에서 운용자에 의해 이동 중간에 추가적인 경로점(way-point) 지정을 통해 로버의 경로를 설정할 수 있으며, 로버의 자율주행을 통해 예측하지 못한 위험물 혹은 위험 상황이 생길 경우 로버의 주행을 운용자가 강제적으로 제어하게 된다. 초기 로버의 개발에서는 로버의 이동이 느리더라도 원격 제어에 의한 방법을 주로 사용하였다면, 최근 연구 방향은 로버의 자율 주행을 좀 더 강조하는 방향으로 연구되고 있다.

로버의 자율 주행에 있어서 지상용 로봇의 중요한 차이점은 지도(Map) 제작과 로버의 자기 위치 확인 즉, 기준점의 측정과 위치 보정 방식에 있다. 일반적으로 지상용 로봇에게는 기본적인 지도정보가 주어지게 되는 반면에 행성탐사 로버는 지도제작이 자율 주행에 가장 기본적인 요구사항이다. 행성탐사에서 지도제작은 스테레오 카메라를 이용하여 스테레오 영상을 생성 후, 화소간 위치차이에 대한 필터링 작업 후, 3차원 DEM(Digital Elevation Model)을 생성한 후, 이전에 제작된 지도와 합쳐 로버가 갈 수 있고 없는 지역을 표시하여 주행 지도를 생성한다. 그리고 지상 운용자 혹은 로버 스스로 경로(path)를 설정하게 되는 것이다. 이러한 주행 중에 자기 위치 확인 작업이 필요한데, 일반적으로 지상용 로봇들은 위치 센서, 초음파, 레이저 등의 거리센서, 바퀴회전 센서 및 관성센서, 카메라를 활용한 영상정보, GPS 등을 통해 자신의 위치를 확인 및 보정을 한다. 하지만 달과 같은 행성 탐사용에서는 GPS 사용이 불가능하고 초음파/레이저 등은 거리 센서의 거리 범위가 수m~수십m로 제한적이고 구조물이 없는 넓은 환경에서 전적으로 의존하는 것은 문제가 된다. 그리고 바퀴의 회전, 속도 등을 측정하는 경우는 바퀴의 미끄러짐에 따라 오차가 생길 수 있으며, 지상에서 사용되는 관성센서는 행성 환경에서는 사용이 불가능하므로 행성용 센서가 필요할 것이다. 따라서 카메라를 이용한 스테레오 영상 시스템을 행성 탐사에서는 대부분 사용하는데, 이는 가까운 지역부터 먼 지역의 관측까지 제약이 없는 측정 범위를 갖고 있으며, 2차원의 정보를 주는 거리 센서와는 달리 3차원의 정보획득이 가능하다. 따라서 행성 탐사는 스테레오 영상과 레이저 스캐너 등의 거리 센서를 동시에 사용하여 경로상의 자기 위치를 확인하는데, 영상 기반 방식은 로버의 위치를 측정하기 위하여 스테레오 영상에서 특이점을 추출하고, 추출된 특이점을 한 프레임에서 다음 프레임으로 추적하는 방식이다. 하지만 많은 연산 시간 때문에 상대적으로 짧은 이동거리(15m 이내), 많이 기울어진 지형, 바퀴가 미끄러지는 상황에서 주로 적용되고 있다. 이와 같이 행성 탐사용 로버는 영상 기반 시스템을 사용하여 자기 위치 확인, 이동경로 지도(Map) 생성, 목표지점까지 자율 주행 등을 위한 섬세한 기술이 요구된다.

행성탐사 로버의 자율 주행 방식을 토대로 이 논문에서 지상모델 로버의 자율 주행 시각 장치 개념설계가 수행되었다. 지상모델 로버는 TOF(Time of Flight) 카메라, 레이저 센서(LRF, Laser Ranging Finder) 및 바퀴의 엔코더(Encoder) 등을 이용하여 로버의 주행관련 기능을 수행한다. TOF 카메라는 행성 탐사의 스테레오 카메라와 같이 로버의 자율 주행을 위한 주 기능을 수행하고, 레이저 센서 및 바퀴의 회전 엔코더는 자율 주행과 관련한 장애물 감지 및 바퀴의 회전에 따른 위치 확인 등의 보조적인 역할을 수행한다. 이 논문에서 제안된 자율 주행 시각 장치인 TOF 카메라는 거리 측정 방식에서 능동형 방식으로 능동형 방식은 레이저, 초음파 등을 이용하여 물체 표면을 반사하여 되돌아오는 반사파의 시간을 측정하여 이것을 거리로 환산하는 방식이다. 이에 반해 스테레오 카메라는 양쪽의 영상을 이용한 수동형 방식에 속한다. 일반적으로 행성탐사에서는 스테레오 카메

그림 12. TOF 카메라 원리 및 실제 장치.

라를 이용하는데, 이 논문에서는 TOF 카메라를 이용한 것은 지상시험모델 로버는 주행 장치의 성능 시험을 통한 주행성 및 안정성을 평가하는 것이 주목적이고, 자율주행을 위한 시스템은 이러한 평가를 위한 보조 장치로 고려되었다. 그래서 자율 주행 알고리즘 개발 및 자율 주행 시스템 개발은 추후 연구과제로 남기고자 한다. 그리고 TOF 카메라는 스테레오 카메라보다 장비가 간단하고, 연산 시간이 길지 않고 쉽게 거리 정보를 획득할 수 있다. 반면에 배경 빛에 의해 노이즈 생성과 여러 가지의 TOF 카메라를 사용할 경우 카메라 간의 간섭현상이 생길 수 있고, 물체에서 반사되는 빛의 다양한 경로차는 오차를 유발하게 된다. 지상시험모델에 사용된 TOF 카메라의 동작 범위는 일반적으로 0.3 ~ 5.0m에서 운영되며, 정확도는 약 $\pm 1\text{cm}$ 정도의 성능을 가지고 있어, 지상시험모델 로버 주행 장치의 시험에 적합한 것으로 판단된다. 그림 12에서 TOF 카메라의 개략적인 원리 및 실제 장치를 보여주고 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 지상시험모델용 로버의 주행장치에 대한 개념설계를 수행하였다. 이를 위해 선행연구의 일환으로 해외에서 과거부터 현재까지 연구 개발되고 있는 로버의 주행장치에 대한 현황을 조사 분석하여 본 로버의 주행장치를 설계하는데 참조를 하였다. 그리고 행성탐사 로버의 기술적인 이슈와 행성탐사의 로버의 일반적인 요구사항을 분석함으로써 향후 지상모델용 로버 시스템을 설계하는데 참고할 수 있도록 하였다. 이 논문에서 제안한 로버주행장치는 미국 NASA의 유인로버 Athlete의 메커니즘과 유사한 6족 관절을 가진 다리 형태의 능동 서스펜션을 가진 것으로, 무인탐사를 위한 소형 무인로버설계에 적용하여 보았다. 이 연구를 통해 개발하고자 하는 로버의 주행장치는 지상시험용 모델로서 우주환경에 대한 고려보다는 탐사지형(예; 달표면)에 대한 고려를 우선으로 하였으며, 다관절 주행장치의 주행성과 평형유지 안정성을 보장하기 위한 몸체 제어, 시각장치 구현 및 시각 알고리즘 구현 가능성에 보다 초점을 맞추었다. 이 연구를 통해 얻은 개발경험은 향후 행성탐사 임무를 수행할 로버 개발 시 로버 시스템의 기술요소를 파악하고 전체 시스템의 이해에 참고가 될 것으로 판단된다. 또한, 지상시험용모델 주행장치 개발 완료 이후 향후 연구과제로서 우주환경 및 행성환경에 대한 보다 상세한 고려를 통한 우주환경용 로버의 주행장치에 대한 개발이 필요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 김연규, 김해동, 이주희, 심은섭 2009, 한국항공우주학회 춘계 학술발표회 논문집 (서울: 한국항공우주학회), pp.730-733
- 안석민, 이용교 2008, 한국항공우주학회 춘계 학술발표회 논문집 (서울: 한국항공우주학회), pp.1301-1304
- Barlas, F. 2004, MS Thesis, Izmir Institute of Technology
- Chen, B., Wang, R., Jia, Y., Guo, L., & Yang L. 2009, *Acta Astronautica*, 64, 925
- Kubota, T., Kuroda, Y., Kunii, Y., & Nakatani, I. 2003, *Acta Astronautica*, 52, 447
- Kunii, Y., Kuroda, Y., & Kubota, Y. 2003, *Acta Astronautica*, 52, 433
- Kuroda, Y., Kondo, K., Nakamura, K., Kunii, Y., & Kubota, T. 1999, in *Proc. I-SAIRAS* (Noorwijk: ESTEC), pp.77-82
- Larson, W. J. 2006, *Human Spaceflight Mission Analysis and Design*, ed. Linda K. Pranke (New York: The McGraw-Hill Company), pp.739-756
- Lee, C. G., Dalcolmo, J., Klinkner, S., Richter, L., Terrien, G., Krebs, A., Siegwart, R., Waugh, L., & Draper, C. 2006, in *Proc. 9th ESA Workshop on advanced space technologies for Robotics and automation* (Noorwijk: ESTEC)
- Okada, T., Sasaki, S., Sugihara, T., Saiki, K., Akiyama, H., Ohtake, M., Takeda, H., Hasebe, N., Kobayashi, M., Haruyama, J., Shirai, K., Kato, M., Kubota, T., Kunii, Y., & Kuroda Y. 2006, *Advances in Space Research*, 37, 88
- Siegwart, R., Lamon P., Estier, T., Lauria, M., & Piguet, R. 2002, *Robotics and Autonomous Systems*, 40, 151