

결과보고서

교과목명		기계설계 캡스톤디자인		
과제명		다목적무인차량 액티브 서스펜션 연구 및 제작		
팀명		JLP Dynamics		
지도교수 (과제 책임자)	소속	기계전자공학부	성명	이상열

팀원현황

직책	성명	소속학과
팀장	정지훈	기계전자공학부
팀원	박정훈	기계전자공학부
팀원	이주영	기계전자공학부

5학년 **0**명 | 4학년 **3**명 | 3학년 **0**명 | 2학년 **0**명 | 1학년 **0**명 | 총 **3**명

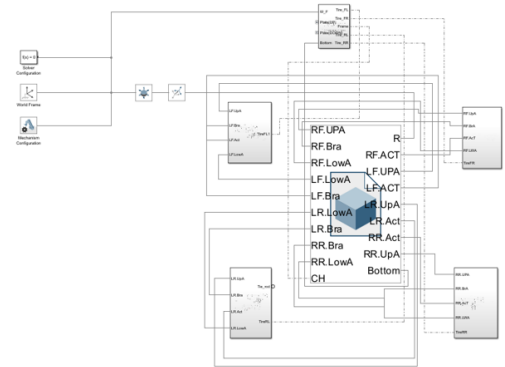
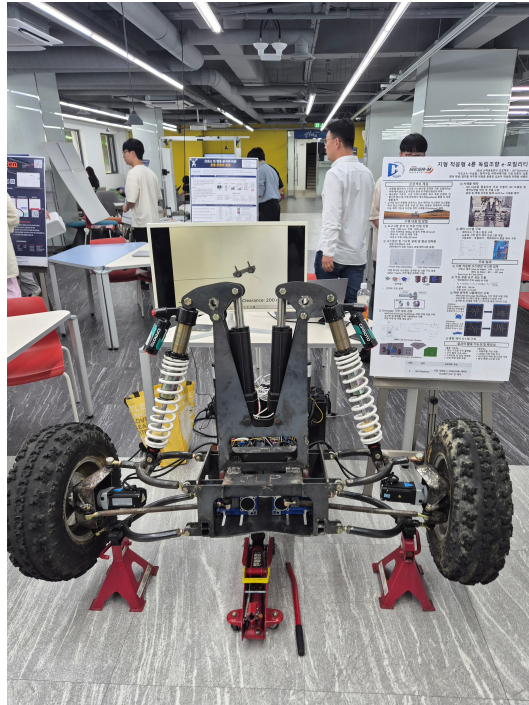
과제소개

과제개요	본 과제는 불규칙한 요철과 급격한 경사변화를 동반한 야전 오프로드 및 국방 표준 기동시험장 환경에서 경량형 UGV의 기동 불능을 방지하고 주행 안정성을 극대화하기 위한 가변 현수 및 조향 시스템 개발을 목표로 한다. 기존 수동형 서스펜션 차량은 능선 교차 구간 통과 시 차체 하부가 지면에 걸리는 ‘배걸림(Center high-centering)’ 현상에 취약하며, 험지 주행 시 발생하는 고주파 진동과 과도한 동적 하중 이동으로 인해 구동륜의 접착력이 상실되는 한계를 지닌다. 본 과제에서는 이러한 한계를 극복하고자 사용자 인터페이스(UI) 조작 및 능동 제어를 통해 주행 중 실시간으로 지상고를 150 mm에서 250 mm까지 가변할 수 있는 가변 지상고 메커니즘과, 선회 반경을 최소화하는 4WS 독립 조향 시스템을 유기적으로 결합한 하이브리드 기동 플랫폼을 제안한다. 플랫폼 설계의 타당성 및 신뢰성 검증을 위해 본 과제에서는 기구학적 상충 관계(Trade-off) 해석과 Simscape Multibody 기반의 고충실도(High-fidelity) 3차원 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 차량의 구동계는 험지 저항 조건을 고려하여 역산된 휠 1기당 소요 동력 653.24 W을 기반으로 테스트베드용 600W 급 BLDC 모터 사양을 반영하였으며, 전기적·기계적 파라미터를 가상 환경에 정밀 매핑하여 설계 치수 대비 98.5%의 극도로 높은 거동 유사도를 확보하였다. 지형 검증에서는 야전 사면 요구 경사각(21.3°) 대비 UGV 사면 단면 경사각(24.4°)의 기하학적 마진(+14.55%)을 입증하여 하부 간섭을 완벽히 회피하였다. 아울러 불규칙 구체 외란 노면 조건에서 4륜 실시간 개별 지상고 조절 시스템을 적용한 결과, 수동 고정 모드 대비 Peak-to-Peak 롤링 및 피칭 진동 폭이 각각 47.4%, 20.2% 감소하는 정량적 거동 감쇄 성과를 도출하였다. 또한 야전의 가혹한 수직 충격 하중에 대응하고자 ANSYS 기반 유한요소해석(FEA) 및 형상최적화를 선제적으로 적용하여 핵심 부품인 로커암과 너클의 안전계수를 2 이상으로 설계 확보하였다. 본 과제는 향후 전방 지형인
------	---

	지 기반의 예측 제어(Preview Control) 알고리즘 고도화와 600W급 테스트베드 실물 검증을 병행함으로써, 다목적 군용 무인 플랫폼의 생존성과 오프로드 주행성 향상을 위한 핵심 원천 기술을 제공하고자 한다.
과제목표 및 필요성	다목적 모빌리티는 물류, 경찰, 산업 및 재난 대응 등 다양한 환경에서 활용되며, 비포장 도로, 경사로, 장애물 등 불균일한 지형에서의 주행이 필수적이다. 그러나 기존 모빌리티에 적용된 수동 또는 반자동 서스펜션은 노면 변화에 능동적으로 대응하지 못해 차체 자세 불안정, 지상고 한계, 주행 안정성 저하 등의 문제를 유발한다. 이러한 문제는 센서 인식 정확도 저하와 자율주행 및 원격 제어 성능 저하로 이어져 전체 임무 수행 효율을 제한하는 주요 요인이 된다. 또한 고정된 지상고 구조는 다양한 주행 조건에서 기동성과 안정성을 동시에 확보하는 데 한계를 가진다. 따라서 본 과제의 목표는 다양한 지형에 능동적으로 대응 가능한 지상고 제어 시스템을 설계 및 제작하여 모빌리티의 주행 안정성과 활용성을 향상시키는 것이다. 이를 위해 소형·중형 모빌리티에 적용 가능한 단순하고 신뢰성 높은 기구 구조와 저전력 구동 시스템을 설계하고, 차체 자세 및 지상고를 제어하는 알고리즘을 구현한다. 또한 시제품 제작과 센서 기반 성능 평가를 통해 실제 주행 환경에서의 자세 안정성 및 장애물 대응 능력을 검증하고, 실용적인 지상고 제어 설계 방향을 제시하는 데 그 필요성이 있다.
과제내용	본 과제에서는 다양한 지형 환경에서 주행 가능한 다목적 모빌리티를 위한 지상고 제어 시스템을 설계하고 시제품을 제작한다. 먼저 선행 연구 및 기술 동향 분석을 통해 요구 성능을 정의하고, 이를 기반으로 소형·중형 모빌리티에 적용 가능한 서스펜션 구조를 설계한다. 이 과정에서 레버비, 쇼크 업소버 설치 각도, 링크 구조 등을 고려하여 차체 하중 분산과 기구적 효율을 최적화한다. 이후 액추에이터를 활용한 지상고 조절 메커니즘을 구현하고, 차체의 롤 및 피치 거동을 제어할 수 있는 기본 제어 알고리즘을 개발한다. 또한 센서를 이용하여 노면 상태 및 차체 자세를 계측하고, 이를 바탕으로 서스펜션이 능동적으로 반응하도록 시스템을 구성한다. 설계가 완료된 후에는 실제 주행이 가능한 시제품을 제작하고, 다양한 지형 조건에서 실험을 수행하여 주행 안정성, 자세 제어 성능, 장애물 대응 능력을 평가한다. 최종적으로 실험 결과를 분석하여 설계의 타당성을 검증하고, 다목적 모빌리티에 적용 가능한 지상고 제어 시스템의 설계 방향을 제시한다.
과제결과	본 연구는 상위 UI 조작을 통해 주행 중 지상고 가변이 가능한 소형 UGV 플랫폼을 설계하고, 수치 해석 및 동역학 시뮬레이션으로 공학적 타당성을 검증하였다. 먼저 기구학적 해석을 통해 지상고 변위에 따른 오프로드 돌파 성능과 전복 안정성 간의 상충 관계(Trade-off)를 규명하였다. 수치 해석 결과 지상고 292.05 mm 및 310.72 mm에서 각각 중·횡방향 안전 한계선이 램프각과 교차하는 물리적 임계점을 도출하였으며, 종방향 임계점으로부터 충분한 여유를 두어 최대 가변 범위를 250 mm로 제한하는 안전 마진 설계 전략을 확립하였다. 이를 국방과학연구소(ADD) 기동시험장 및 야전 실측 데이터와 대조하여, 최대 경사각(21.3°)의 극한 지형에서도 사면 단면 경사각(24.4°) 기준 +14.6%의 기하학적 마진을 보유함으로써 하부 배걸림을 회피하고 안정적인 주행이 가능함을 입증하였다. 또한, 험지 구름저항($\mu_r=0.1$)과 공기저항을 고려하여 휠 1기당 소요 동력을 역산하고, 이를 기반으로 600W급 서보 모터를 선정하여 Simscape DC Motor 블록에 파라미터를 정밀 매핑하였다. 구축된 고충실도 동역학 모델은 가변 모드별 설계 목표치 대비 평균 유사도 98.91%를 기록하여 해석의 유효성을 증명하였다. 사면 시뮬레이션 결과 수동 서스펜션 차량의 기동 불능 한계를 확인한 반면, 가변 플랫폼은 원활한 돌파 거동을 보였다. 특히 반경 150 mm의 구체 외란 노면 주행 시, 4륜 개별 지상고 조절 시스템을 적용하여 수동 고정 모드 대비 차체의 Peak-to-Peak 롤링 및 피칭 진동 폭을 각각 47.4%, 20.2% 정량적으로 감소시켰다. 결론적으로 본 연구는 기구학 해석과 동역학 시뮬레이션을 연계하여 가변 지상고 메커니즘이 경량 무인 플랫폼의 야전 운용 신뢰성과 주행 안정성 확보에 필수적임을 공학적으로 규명하였다.
활용방안 및 기대효과	본 과제를 통해 개발된 지형 적응형 지상고 제어 시스템은 물류, 경찰, 산업 및 재난 대응 등 다양한 분야의 다목적 모빌리티에 적용될 수 있다. 특히 비포장 도로, 경사로, 장애물 등 복잡한 지형에서 주행 안정성과 자세 제어 성능을 향상시켜 임무 수행의 신뢰성을 높이는 데 기여할 수 있다. 또한 지상고를 조절함으로써 장애물 극복 능력과 기동성을 동시에 확보할 수 있어, 기존 고정형 서스펜션 대비 활용 범위를 확장할 수 있다. 본 시스템은 센서 기반 제어를 통해 노면 변화에 실시간으로 대응함으로써 자율주행 및 원격 제어 시스템의

성능 향상에도 기여할 수 있으며, 다양한 환경에서 안정적인 데이터 수집 및 작업 수행이 가능해진다. 더불어 소형·중형 모빌리티에 적용 가능한 단순하고 효율적인 구조를 지향함으로써 제작 비용과 에너지 소비를 줄이고, 실제 산업 현장에서의 적용 가능성을 높일 수 있다.

기대효과로는 다목적 모빌리티의 주행 안정성 및 운용 효율 향상, 다양한 환경에서의 활용성 증대, 그리고 지상고 제어 기술의 실용적 설계 기준 제시가 있다. 또한 시제품 제작과 성능 검증을 통해 이론적 설계를 실제 시스템으로 구현함으로써 향후 관련 기술 개발 및 확장 연구의 기반을 마련할 수 있다.



결과물 사진

[지형 적응형 4륜 독립조향 UGV 테스트베드 실물]

본 연구를 통해 최종 구현된 600W급 구동 모터 기반의 소형 UGV 테스트베드 실물 플랫폼이다. 사진 중앙부에는 상위 UI 제어 명령 및 오프로드 노면 외란에 대응하여 지상고를 Low mode(150 mm)에서 High mode(250 mm)까지 실시간 가변할 수 있도록 수직으로 배치된 가변 액추에이터 메커니즘과 서스펜션 링크 구조가 명확히 드러나 있다. 특히, 야전의 가혹한 충격 하중이 집중되는 것을 방지하기 위해 유한요소해석(FEA) 및 형상최적화를 거쳐 안전계수 2 이상을 확보하도록 설계된 로커암(Rocker arm)과 너클(Knuckle) 부품이 견고하게 통합되어 설계 신뢰성을 실증한다. 차륜 안쪽에는 Simscape DC Motor 블록 파라미터와 1:1로 매핑된 영구자석형 동기모터(PMSM) 구동계 및 4WS 독립 조향 서보 시스템이 힘지용 타이어나 직결되어 있어, 최소 선회 반경 확보와 휠 슬립 억제에 위한 하이브리드 기동 전략의 하드웨어적 구현 유효성을 입증하고 있다.

[Simscape Multibody 기반 고충실도 동역학 해석 가상 모델]

본 연구에서 설계한 지형 적응형 UGV의 기구학적·동역학적 거동 특성을 다물체 물리계 엔진 상에서 검증하기 위해 구축한 MATLAB Simscape Multibody 고충실도(High-fidelity) 가상 모델이다. 다이어그램 중앙의 메인 서브시스템 블록은 차량의 강체(Rigid Body) 파라미터, 총 질량(300 kg), 축거 및 윤거 데이터를 포함한 차체 프레임 구조를 총괄한다. 이를 중심으로 전·후측 및 좌·우측을 구성하는 4개의 독립 현수 블록(LF: 좌전륜, RF: 우전륜, LR: 좌후륜, RR: 우후륜)이 유기적으로 인터페이스를 형성하고 있다. 각 바퀴의 독립 서브시스템 내부에는 실물 데이터시트의 전기적·기계적 사양이 1:1로 매핑된 600 W급 DC Motor 블록과 4WS 독립 조향 링크 메커니즘이 통합되어 실제 테스트베드의 구동 환경을 가상화한다. 또한, 상위 UI 제어 시스템으로부터 인가되는 모드별 가변 지상고 명령은 각 서스펜션 서브시스템의 Prismatic 및 Revolute Joint 액추에이터 신호(ACT 입력)와 결합하여 주행 중 개별 지상고 조절(Ride Height Control) 거동을 완벽히 재현하며, 힘지 노면과의 비선형 접촉 모델(Contact Force Law)을 통해 차체의 동적 롤링 및 피칭 감쇄 성능을 수치 해석적으로 검증하는 기반이 된다.

위와 같이 캡스톤디자인 교과목 결과보고서를 제출합니다.

2026. 06. 23

신청인(팀장): 정지훈 (인) **정지훈** / 지도교수: 이상열 (인) **이상열**

자료 (지형 적응형 4륜 독립조향 e-모빌리티 결과보고서)는 한성대학교 캡스톤디자인 수업 결과물로서 (JLP Dynamics)에 의해 창작되었으며 크리에이티브 커먼즈 라이선스 (저작자 표시(CC BY)) 4.0에 따라 이용할 수 있습니다