

현가장치 기구 재구성에 의한 6×6 로봇차량의 기동성 안정화 Mobility Stabilization of a 6×6 Robot Vehicle by Suspension Kinematics Reconfiguration

백운경 · 이지웅
W. K. Baek and J. W. Lee

(접수일 : 2009년 12월15일, 수정일 : 2010년 5월 24일, 채택확정 : 2010년 5월 27일)

Key Words : Robot Vehicle(로봇차량), Force-Angle Stability Margin(힘-각도 안정성여유), Stability Performance Index(안정성 평가지수), Articulated Suspension(관절형 현수장치), Tip-over(차량전복), Reconfiguration(재구성)

Abstract : The dynamic stability of a robot vehicle can be enhanced by the Force-Angle Stability Margin concept that considers a variety of dynamic effects. To evaluate the robot vehicle stability, a SPI(stability performance index), which is a function of the suspension arm angles, was used. If the SPI has a minimum value, the robot vehicle has maximum stability. The FASM and SPI concepts were incorporated in the mobility simulation by using ADAMS and MATLAB/Simulink. The simulation results using these concepts showed significant improvements of the vehicle stability on rough terrains.

1. 서 론

기술선진국에서는 2000년대에 들어와 고기동성 로봇차량의 본격적인 개발을 시작하였다. 최근에는 미육군의 미래전장시스템(FCS) 계획에 등장하는 MULE(Multifunction Utility/Logistics and Equipment) 로봇차량의 시제품이 DARPA¹⁾ 및 로키드마틴사²⁾를 중심으로 BAE시스템, 산디아국가연구소 및 RMSV 사³⁾에 의해 공동으로 제작되었다. Fig. 1은 MULE 로봇차량을 나타낸다. 이 차량은 내부의 전자장비 보호를 위해 탄소/케블라 복합소재를 사용한 초경량 일체형 차체, 360도 회전이 가능한 독립 회전식 현가장치, 자기유변유체(MRF)를 이용한 회전식 댐퍼를 사용하고, 헬기에서 투하 즉시 기동하며 0.91미터의 수직장애물 및 1미터 폭의 수평장애물 통과가 가능한 것으로 알려지고 있다.

한편, 보행로봇이나 로봇차량의 기동안정성에 대해서도 선행 연구가 이루어지고 있다. Dominic A. Messuri⁴⁾는 다리를 가지는 로봇차량의 안정성에 대

하여 연구를 하였고, E. G. Papadopoulos⁵⁾는 작동기를 가지는 차량의 전복안정성에 대하여 연구하였다. Karl Iagnemma⁶⁾는 기구적 재구성을 통한 행성탐사 로봇의 안정성에 관하여 연구하였다. 또한 Steven C. Peters⁷⁾는 고속으로 주행하는 이동로봇의 전복 안정성의 측정법을 제안하였다.



Fig. 1 MULE robot vehicle (Lockeed Martin)

본 논문에서는 힘-각도 안정성 여유 즉, FASM (Force-Angle Stability Margin) 개념⁵⁾을 적용하여 로봇차량의 기동안정성을 향상시키는 방법을 연구하고, 동역학 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다.

백운경(교신저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : baekwk@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6164
이지웅 : 부경대학교 대학원

2. 로봇차량의 동역학 모델

본 연구에서 다루는 로봇차량 모델은 Fig. 2와 같고, 6x6 로봇차량을 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 이용하여 모델링 하였다. 로봇차량 모델은 1개의 차체와 6개의 현수암, 그리고 6개의 인-허브(in-hub) 모터가 장착된 휠 타이어로 이루어진다.

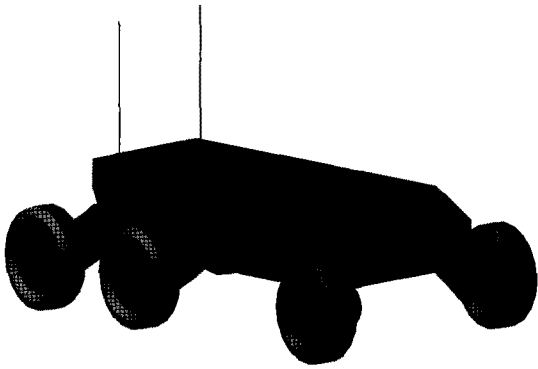


Fig. 2 ADAMS model of a 6x6 robot vehicle

로봇차량의 현수암(arm) 모델을 Fig. 3에 간략하게 나타내었다. 로봇차량의 현수암의 가장 중요한 요소인 회전식 현수암의 기능을 모델링 하기 위하여 차체와 현수암 사이에 크랭크를 모델링 하였다. 차체와 크랭크는 회전조인트로 연결하여 1자유도의 운동을 가지나, 그 회전 조인트에 운동구속 (Driving constraints)을 가함으로써 현수암 구동 모터를 모델링 하였다. 크랭크는 차체에서 가하는 운동구속에 의해서만 움직임이 가능하다. 또한, 크랭크와 현수암 사이도 회전조인트로 연결하고 그 사이에 토셔널(Torsional) 스프링을 힘 요소로 모델링 함으로써 간단하면서도 실제 회전식 현수암 시스템과 유사한 동작을 할 수 있는 모델을 구현하였다. 회전형 감쇠기는 차체와 현수암 사이에 모델링 하여 차체와 현수암 사이의 상대각속도에 의해 감쇠토크가 발생되게 모델링하였다.

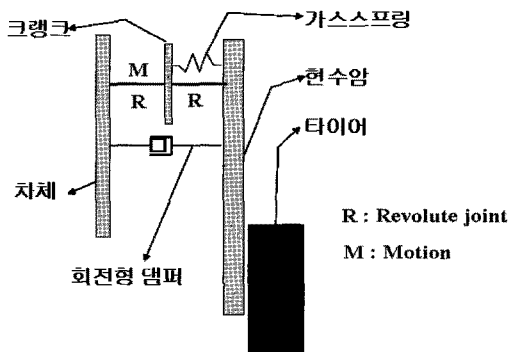


Fig. 3 Modeling of the articulated suspension

3. 로봇차량의 기동안정성

3.1 힘-각도 안정성 여유(FASM) 이론

3차원에서의 일반화된 FASM을 정의하면 Fig. 4와 같이 정의를 할 수 있다. 로봇차량이 m 개의 휠과 지면의 접촉점을 가지고 있다면, 그 접촉점들은 $p_i, i = \{1, \dots, m\}$ 으로 나타낼 수가 있다. p 점이 이웃하는 p 와 만나는 선을 tip-over축이라 두고 그 축을 a 라 두면 벡터식에 의하여 식 (1)과 식(2)를 세울 수 있다.

$$a_i = p_{i+1} - p_i, \quad i = \{1, \dots, m-1\} \quad (1)$$

$$a_m = p_1 - p_m \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)로부터 m 개의 휠과 지면의 접촉점을 가지는 로봇차량은 반드시 m 개의 tip-over 축을 가지는 것을 알 수 있다.

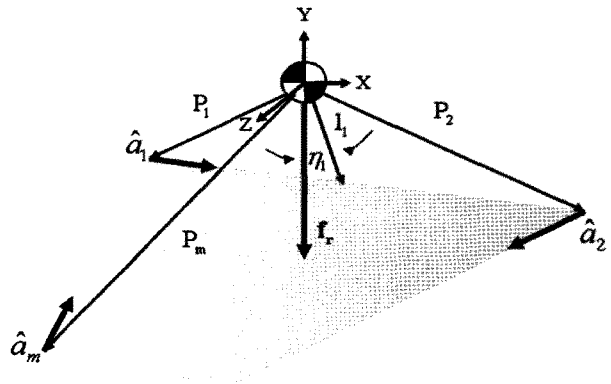


Fig. 4 3D force-angle stability measure

로봇차량의 무게중심과 tip-over축이 수직으로 만나는 벡터를 l_i 라 두면 각 tip-over축에서의 법선벡터 l_i 는 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$l_i = (1 - \hat{a}_i \hat{a}_i^T) p_{i+1} \quad (3)$$

여기서, $\hat{a} = a/||a||$ 이다.

FASM의 안정성 각도들은 각각의 tip-over축에서 무게중심에 작용하는 힘벡터 f_r 과 식 (3)에서 정의한 축 l_i 를 이용하여 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\eta_i = \sigma_i \cos^{-1}(\hat{f}_r \cdot \hat{l}_i), \quad i = \{1, \dots, m\} \quad (4)$$

여기서,

$$\sigma_i = \begin{cases} +1 & (\hat{l}_i \times \hat{f}_g) \cdot \hat{a}_i < 0 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

FASM의 전체적인 안정성 여유 β 는 식 (6)과 같이 모든 tip-over축에서의 안정성 각 중 가장 작은 값으로 정의한다.

$$\beta = \min(\eta_i), i = \{1, \dots, m\} \quad (6)$$

$\beta < 0$ 이면 로봇차량은 불안정해지게 된다.

로봇차량에 외부력이 가해지면 FASM의 정의는 변경되어야 한다. 로봇차량에 가해지는 내력과 외력의 합은 다음 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$\sum f_{inertial} = \sum (f_{grav} + f_{manip} + f_{support} + f_{dist}) \quad (7)$$

여기서, $f_{inertial}$ 은 관성력들을 나타내고, f_{grav} 는 중력 방향으로 작용하는 하중을 나타낸다. 그리고, f_{manip} 은 로봇차량에 장착된 작동기에 의한 전달력을 나타내고, $f_{support}$ 는 로봇차량을 지지하는 반력, 그리고 마지막 f_{dist} 는 로봇차량에 작용하는 외란이다. $f_{support}$ 는 지면이 로봇차량에 가해지는 힘과 같으므로, 로봇차량의 무게중심에 작용하는 알짜힘 f_n 은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f_n &\cong \sum (f_{grav} + f_{manip} + f_{dist} - f_{inertial}) \\ &= - \sum f_{support} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)과 같은 방법으로 로봇차량에 작용하는 알짜모멘트 m_n 은 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} m_n &\cong \sum (m_{grav} + m_{manip} + m_{dist} - m_{inertial}) \\ &= - \sum m_{support} \end{aligned} \quad (9)$$

그러므로 동적요소가 포함된 tip-over축의 FASM은 식(4)의 f_r 을 식(10)의 f_i 로 교체해야 한다.

$$f_i = (1 - \hat{a}_i \hat{a}_i^T)(f_n) + \frac{\hat{l}_i \times (\hat{a}_i \hat{a}_i^T) m_n}{\|\hat{l}_i\|} \quad (10)$$

3.2 로봇차량 Tip-over축과 안정성 평가지수의 정의

FASM을 로봇차량에 적용하기 위하여 Fig 5와 같이 4개의 tip-over축을 정의하였다. 각각의 tip-over축에 대하여 무게중심에서의 알짜 힘벡터와 일

반축 사이의 각도 η 를 계산하였다.

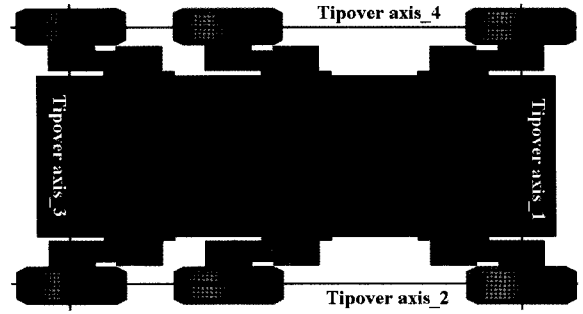


Fig. 5 Tip-over axes of the robot vehicle

로봇차량의 안정성을 평가하기 위하여 본 논문에서는 안정성 평가지수를 정의 하였다. 안정성 평가지수는 η 의 함수로 식 (11)과 같다.

$$\Phi = |(\eta_i - \eta_{i+2})| + |\eta_{i+1} - \eta_{i+3}| \quad (11)$$

식 (11)에서 정의한 안정성 평가지수 Φ 가 작을수록 로봇차량의 안정성이 우수한 것이다. 또한 $\eta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6\}$ 이므로 각 현가장치의 암의 각도 함수이다. 그러므로 각 현가암의 각도를 로봇차량의 상황에 따라서 변경하면 로봇차량의 안정성을 향상시킬 수 있다.

로봇차량 현가 암의 변경에는 제한조건이 따른다. 그것은 로봇차량의 지상고를 유지하면서 안정성을 유지해야 하기 때문이다. 제한조건 g 를 식으로 나타내면 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} g_{front} &\cong -30^\circ \leq \theta_i \leq 60^\circ \\ g_{middle, rear} &\cong -60^\circ \leq \theta_i \leq 30^\circ \end{aligned} \quad (12)$$

현가암 각도의 제한조건을 그림으로 나타내면 Fig. 6과 같다.

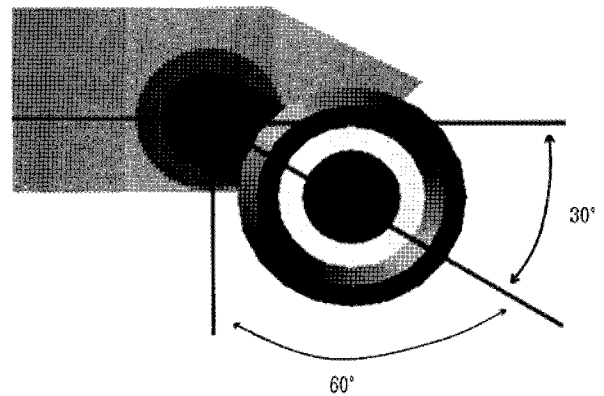


Fig. 6 Constraint condition of the robot suspension

4. ADAMS와 MATLAB의 통합시뮬레이션

로봇차량 현가장치의 각도를 제어하기 위하여 범용 동역학 해석프로그램인 ADAMS와 수치해석 프로그램인 MATLAB/Simulink를 이용하여 통합시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 7은 FASM 이론을 통하여 로봇차량의 안정성을 향상시키는 과정을 나타낸다.

Fig. 8은 ADAMS와 MATLAB/Simulink의 통합시뮬레이션 환경을 나타낸 것이다. 로봇차량은 제어할 대상인 플랜트(plant)가 되고 MATLAB/Simulink로 구성된 제어기를 통하여 로봇차량을 제어하게 된다. 제어대상인 로봇차량은 3장에서 정의한 힘-각도 안정성 여유를 ADAMS에서 계산하여 각각 4개의 tip-over축에 대해서 출력한다. 출력된 FASM 값들은 로봇차량의 안정성 평가지수를 계산하는데 이용된다. 안정성 평가지수가 최소화되고, 제한조건을 만족하는 현가압의 각도를 찾아내기 위하여 PI제어를 통하여 Fig. 3처럼 모델링 된 6개의 크랭크 각을 제어함으로써 로봇차량의 힘-각도 안정성 여유를 높이게 된다. 또한 제어기는 로봇차량의 속도와 로봇차량이 험지에서 직진성을 유지할 수 있도록 좌우 휠의 토크를 제어한다.

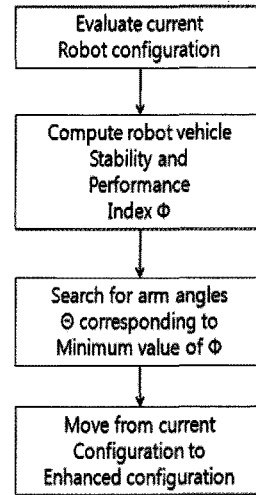


Fig. 7 Control strategy diagram

5. 시뮬레이션을 통한 기동안정성의 검증

5.1 로봇차량의 횡경사로 주행 시뮬레이션

본 논문에서 다루는 로봇차량의 경우 종 방향의 안정성에 비하여 상대적으로 횡방향의 안정성이 취약하다. 본 항에서는 로봇차량을 횡경사를 가지는 노면에서 주행시켜, 현가압의 각도를 변경하면서 주행할 때와 그렇지 않을 때의 로봇차량의 안정성의 변화를 살펴보았다. 횡경사의 각도는 진행방향의 길

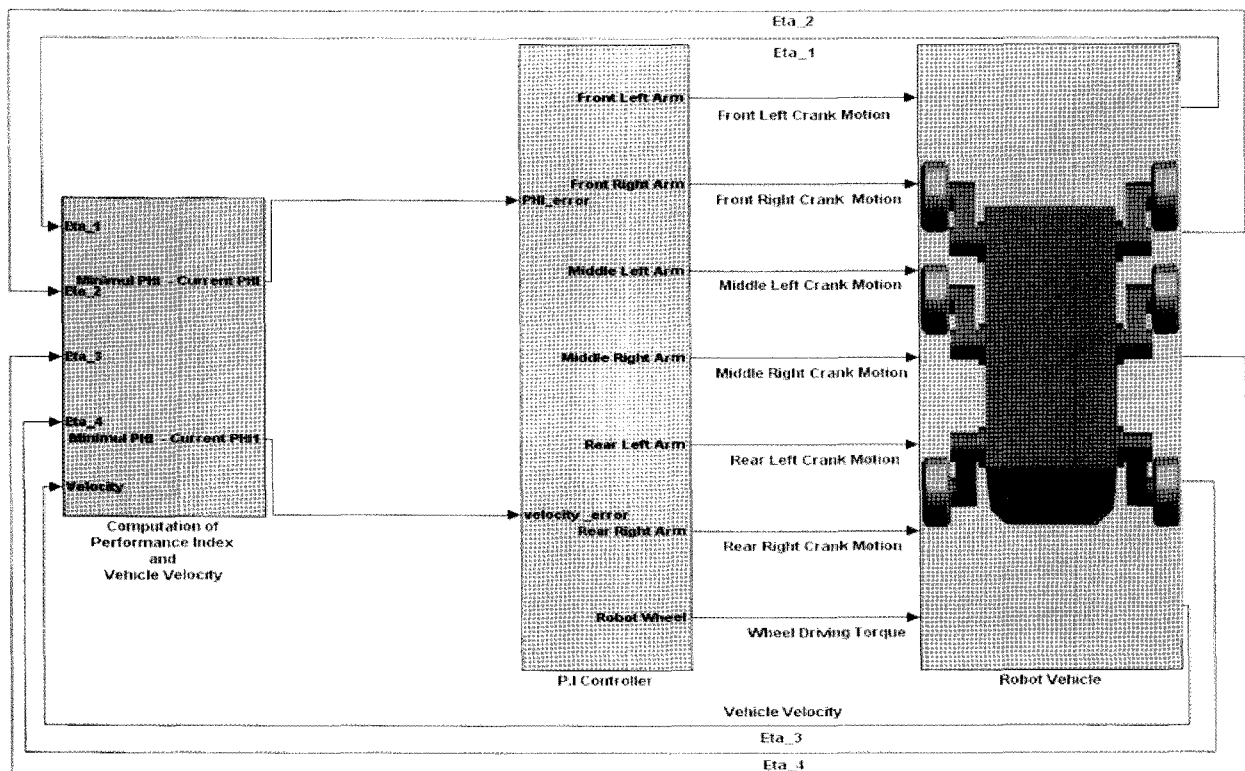


Fig. 8 Block diagram of the co-simulation environment

이에 따라서 변하게 모델링 하였고 -35° 에서 35° 까지 횡경사의 각도를 변경하였다. 로봇차량의 속도는 30 km/h로 설정하였다. Fig. 9는 주행거리에 따른 노면 횡경사의 각도를 나타낸 그림이다.

Fig. 10에서 Fig. 12는 Fig. 9와 같은 횡경사를 가지는 노면을 로봇차량이 6×6 관절형 현가장치의 각도를 가변했을 때와 그렇지 않고 주행했을 때 각 현가암의 각도를 나타낸 것이다.

Fig. 10에서부터 Fig. 12까지 보인 바와 같이 FASM을 적용하여 현가장치의 암을 변경시키는 로봇차량과 그렇지 않은 로봇차량의 현가암의 각도가 전륜과 중륜, 그리고 후륜에서 최대 35° 까지 차이가

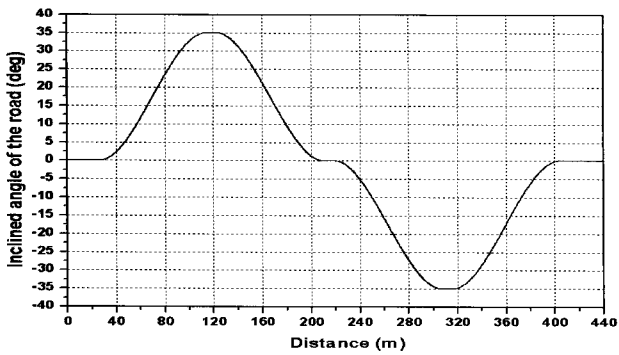


Fig. 9 Laterally inclined angle of the road

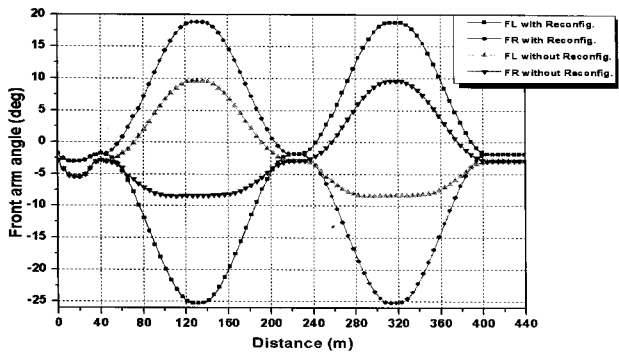


Fig. 10 Front suspension arm angle

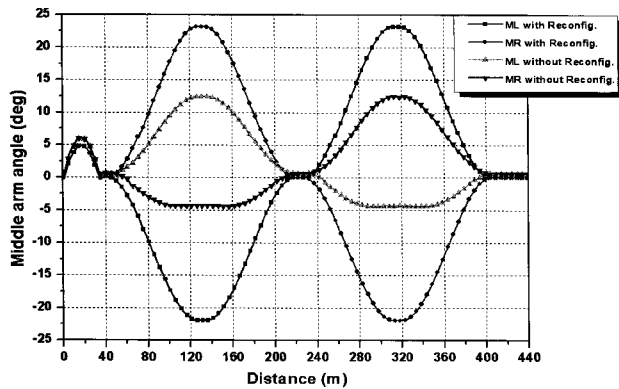


Fig. 11 Middle suspension arm angle

발생하는 것을 알 수 있다. 이는 로봇차량의 안정성을 향상시키기 위해 현가암의 각도를 재구성하였기 때문이다.

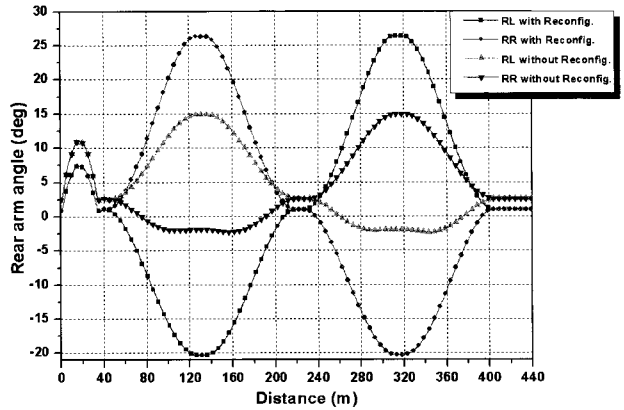


Fig. 12 Rear suspension arm angle

Fig. 13은 현가암의 각도를 재구성한 로봇차량과 그렇지 않은 로봇차량의 횡경사 주행 시 안정성 평가지수를 나타낸 것이다. 안정성 평가지수는 로봇차량의 안정성이 높을수록 작은 값을 가지며, 로봇차량의 안정성이 최고로 높을 때는 로봇차량의 안정성 평가지수 값이 0이 된다.

Fig. 13에서 보이는 것처럼 현가암의 각도를 재구성함으로써 노면의 횡경사 각도가 최대인 지점에서 로봇차량의 안정성이 40%정도 향상된다.

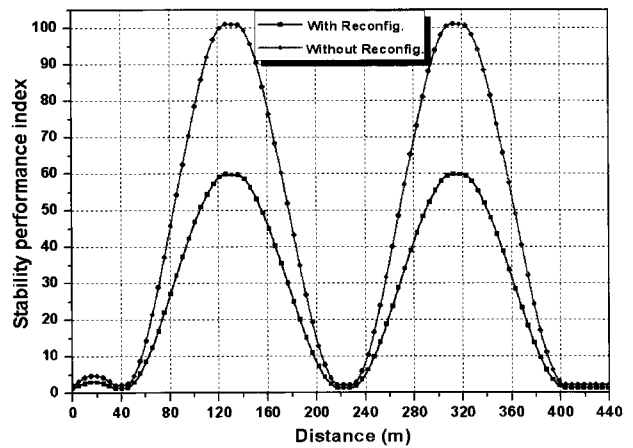


Fig. 13 Stability performance index

Fig. 14는 로봇차량이 횡경사를 가지는 노면을 주행할 때의 모습을 나타낸 그림이다. 현가암의 각도를 재구성한 로봇차량이 그렇지 않은 차량에 비하여 차체의 롤 각이 작은 안정한 형태로 주행하고 있는 것을 보여준다.

5.2 로봇차량의 복합노면 주행 시뮬레이션

실제 로봇차량이 주행하는 노면의 조건은 횡경사 또는 종경사만이 존재하는 것이 아니라 여러 가지 형태의 노면이 복합적으로 존재한다. 그러한 복잡한 노면을 구현하기 위하여 Fig. 15와 같은 노면을 ADAMS에서 모델링 하였다. 이 노면은 횡경사와 종경사를 가지고 있으며, 횡경사와 종경사가 만나는 지점에는 3차원의 노면 기울기를 가지게 된다.

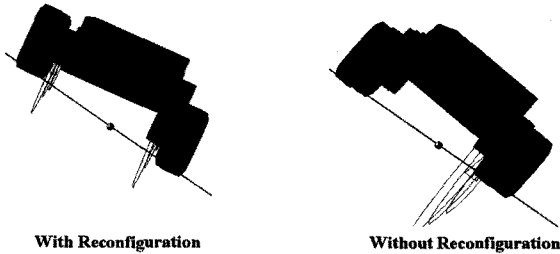


Fig. 14 Shape of the robot vehicle on the laterally inclined road



Fig. 15 Shape of the complex road with longitudinally and laterally inclined angle

Fig. 16은 복합적인 노면 주행 시 로봇차량의 안정성 평가지수를 나타낸 것이다.

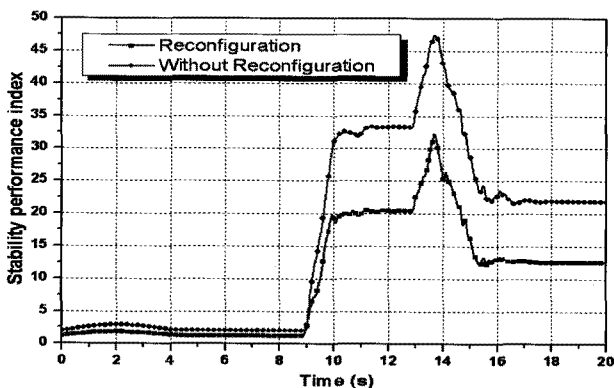


Fig. 16 Stability performance index on the complex road

복합노면에서의 안정성 평가지수를 살펴보면 9초 이후부터 로봇차량의 안정성 평가지수가 증가하는

데 이는 로봇차량이 경사가 기울어진 노면을 주행하고 있기 때문이다. 그리고 안정성 평가지수가 가장 높은 13.5초 부근은 횡경사와 종경사가 모두 존재하는 복합적인 구간으로써 안정성 평가함수가 증가한다. 안정성 평가지수가 가장 큰 부근에서 FASM을 적용한 모델이 그렇지 적용을 하지 않은 모델에 비하여 안정성 평가지수가 약 33 % 향상되는 것으로 나타났다.

6. 결 론

힘-각도 안정성 여유인 FASM (Force-Angle Stability Margin)을 적용한 로봇차량의 안정성 향상을 연구하고 이를 검증하기 위하여 로봇차량의 동역학 해석을 수행하였다. FASM을 적용한 모델과 그렇지 않은 모델의 로봇차량 험지주행 해석결과 횡경사를 가지는 노면에서의 주행 시 횡경사가 최대가 되는 지점에서 로봇차량의 안정성은 현가장치 기구를 재구성을 한 모델이 그렇지 않은 모델에 비하여 안정성 평가지수가 40 % 향상되었다.

그리고 종경사와 횡경사를 모두 포함하는 복합노면에서의 주행 시 로봇차량의 안정성은 현가장치의 기구학적 재구성을 통하여 안정성 평가지수의 33 % 향상을 보였다. 따라서 로봇차량의 주행제어시스템에 FASM 개념을 적용한다면, 로봇차량의 기동안정성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. <http://www.darpa.mil>
2. <http://www.lockheedmartin.com>
3. <http://www.millenworks.com>
4. Dominic A. Messuri and Charles A. Klein, September 1985, "Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-Terrain Locomotion", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-1, No. 3, pp. 132~141.
5. E. G. Papadopoulos and D. A. Rey, April 1996, "A New Measure of tip-over Stability Margin for Mobile Manipulators", Proceeding of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3111~3116.
6. Karl Iagnemma and Steven Dubowsky, 2003,

- "Control of Robotic Vehicles with Actively Articulated Suspensions in Rough Terrain", *Autonomous Robots* Vol. 14, pp. 5~16.
7. Steven C. Perters and Karl Iagnemma, May 2006, "An Analysis of Rollover Stability Measurement for High-Speed Mobile Robots", *Proceeding of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3711~3716.