

6×6 이동로봇의 경로추종을 위한 동역학 시뮬레이션

Full Dynamic Model in the Loop Simulation for Path Tracking Control of a 6×6 Mobile Robot

허진욱*

Huh, Jin-Wook

ABSTRACT

In this paper, we develop a detailed full dynamic model which includes various rough terrains for 6-wheel skid-steering mobile robot based on the real experimental autonomous vehicle called Dog-Horse Robot. We also design a co-simulation for performance comparison of path tracking algorithms. The control architecture in the co-simulation can be divided into two levels. The high level control is the closed-loop control of path tracking to follow a given path, and the low level is concerned about torque control of wheel motion. The simulation using the mechanical data of the Dog-Horse Robot is performed under the Matlab/Simulink environment. We also simulate and evaluate the performance of the model based adaptive controller.

주요기술용어(주제어) : Full Dynamic Modeling(동역학 모델링), Rough Terrain(야지), Path Tracking(경로 추종), Skid Steering(스키드 조향)

1. 머리말

스키드 조향 방식은 아크만 조향 방식에 비해 간단한 메커니즘과 강인한 구조를 가지고 있을 뿐만 아니라 동력 면에서도 큰 힘을 낼 수 있다는 장점이 있어서 최근에 야지 이동로봇에서 많이 이용되고 있다. 그렇지만 스키드 조향은 아크만 조향에 비해 제어가 어려워 상용차에는 많이 사용하지 않고 강인한 주행 성능을 필요로 하는 군사용 차량이나 중장비 차량에 많이 이용되고 있다. 최근에 4륜형 스키드 조향 방식

의 이동로봇에 대한 제어와 동역학 모델에 대해서는 많은 연구가 이뤄지고 있으나^[1~4] 대부분의 연구들이 평지에서의 거동에 대한 연구가 대부분이고 험지에서 6×6 차량에 대한 연구는 거의 전무하다. 4륜차량의 경우 평지 주행시 중량이 균등하게 분배되었다고 가정하거나 모든 바퀴가 지면에 닿아 있다고 가정할 수 있으므로 차량 모델링시 단순화시키기 쉽지만 6륜형의 경우 각 휠에 중량이 균등하게 분배가 되지 않으며 주행 중에는 휠 들림 등이 발생하므로 4륜차량 모델링과는 많은 차이가 있다. 대부분의 문헌들에서 간단한 동역학 모델과 평지에서의 연구에 중점을 맞추는 이유는 실시간으로 계산하기 위함이 대부분이지만 이러한 모델링은 야지 이동로봇의 실제 거동을 예측하기 어렵다는 한계를 가지고 있다. 또한 대부분의 문

† 2008년 6월 5일 접수~2008년 8월 1일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : jwhuh@add.re.kr

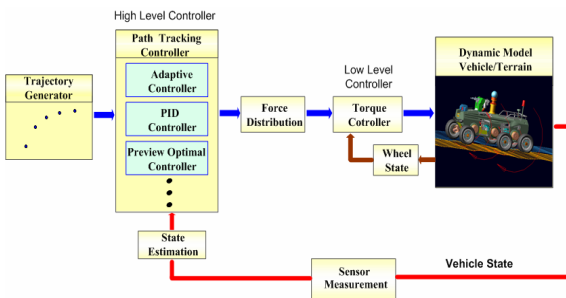
현에서는 아직 이동로봇 동역학 거동에서 가장 중요한 타이어 모델을 간략화 시켜 사용하고 있어서 해석 결과 또한 그 경향만을 참고할 수 있을 뿐이다.

본 논문에서는 상용 프로그램인 ADAMS를 이용하여 타이어, 현수장치 등을 포함한 이동로봇의 동역학 모델뿐만 아니라 다양한 노면을 모델링 하였고 이 모델을 Matlab/Simulink와 연동하여 Co-Simulation을 완성하였다. Matlab/Simulink은 제어를 구현하기 위한 것으로 본 논문에서는 모델 기반 제어를 적용하여 그 성능을 검증하였다. 이동로봇의 모델은 현재 국방과학연구소에서 개발 중인 다목적 견마형 로봇(이하 견마로봇)을 대상으로 하였으며 견마로봇은 다른 이동로봇과 달리 가스스프링 현수장치 등 복잡한 메커니즘을 가지고 있어서 동적 거동 또한 다른 이동로봇과 많은 차이를 가지고 있다. 이 논문에서는 먼저 2장에서 시뮬레이션 구성에 대해 간단히 소개하고 3장에서 시뮬레이션 결과를 보여주고자 한다.

2. 시뮬레이션 구성

가. Co-Simulation 구성

본 논문에서는 견마로봇이 제작되기 이전에 성능을 검증하고자 시뮬레이션 환경을 구성하였고 구성된 시뮬레이션 구성도를 그림 1에 도시하였다.



[그림 1] Co-Simulation 구성도

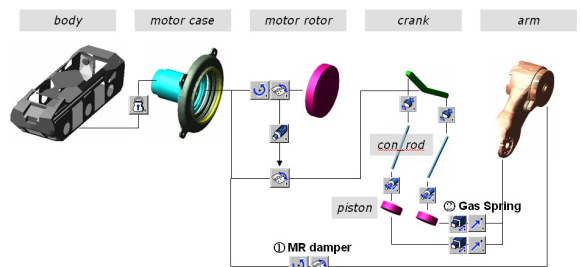
Co-Simulation은 Matlab/Simulink로 구성된 제어기 부분과 ADAMS로 구현된 동역학 모델링으로 나뉜다. 제어기는 크게 경로생성기, 상위제어기, 하위제어기로 나뉘지는데 경로생성기에서 원하는 경로점들

을 보내주면 상위제어기에서는 현재의 상태정보를 로봇에 탑재된 항법센서로부터 받은 후 현재의 상태를 추정하고 그 후 경로점들과 추정된 상태정보를 가지고 제어를 하게 된다. 상위제어기에서는 다양한 경로 추종 제어를 적용할 수 있고, 본 논문에서 상위제어기는 모델 기반의 적응 제어를 사용하였다.

견마로봇은 6개 휠을 가지고 있어서 Redundant System이 되므로 상위제어기에서 제어를 하기 위해서는 6개 바퀴에 추력을 배분할 수 있는 토크분배 알고리즘이 필요로 하다. 본 시뮬레이션에서는 차량의 상태정보를 가지고 각 바퀴에 걸리는 수직항력을 추정한 후 수직항력에 비례하게 토크를 분배하는 알고리즘을 적용 하였다.

하위제어기에서는 상위제어기에서 주어진 토크 명령을 잘 추종하기 위한 제어기로써 휠의 상태정보를 피드백 받아 제어를 하고 있다. 실제 견마로봇에서 제어기 구조는 위와 같이 구성되어 있다.

나. 동역학 모델링



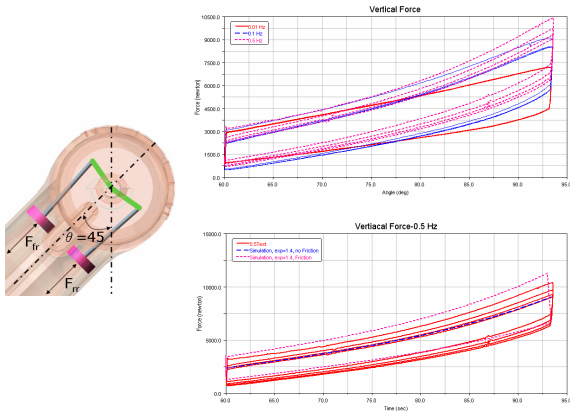
[그림 2] 견마로봇 모델링

견마로봇 대신에 ADAMS를 이용하여 견마로봇 동역학 모델을 구성하였다. 동역학 모델은 타이어 모델뿐만 아니라 가스스프링 현수장치, MR 댐퍼 등 견마

로봇의 동역학 구성품을 모두 포함하고 있으며 노면도 다양한 Roughness, 마찰계수, 경로 등을 모델링하였다. 먼저 견마로봇의 모델은 총 24자유도(로봇 6자유도, 휠 모터 6자유도, 압 모터 6자유도, 가스스프링 6자유도)로 구성되어 있다. 압 모터는 주행 중에는 고정하였다고 가정하였고 본 시뮬레이션에서는 총 18자유도로 구성되어 있다.

견마로봇에 사용되는 현수장치는 그림 3과 같이 복동식 메카니즘으로 구성되어 있을 뿐만 아니라 기계의 특성상 정지시에는 등온과정, 주행시에는 단열과정으로 상태변화를 하므로 매우 복잡한 관계식을 갖는다.

또한 실제 현수장치의 힘을 측정해보면 가스압이 기구학적 메카니즘에 의해 전달되는 힘뿐만 아니라 현수장치 내부에 기계적 마찰력이 존재하여 식에 의한 이론값과 실제 값은 상이하게 된다. 그러므로 현수장치 모델링은 마찰력까지 포함하기 위해 실제 현수장치의 단품을 가지고 측정한 시험 데이터를 이용하여 이론값을 보정한 후 모델에 적용하였다. 그림 3에서 모델링과 실험치가 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.



[그림 3] 가변현수장치 모델링

또한 주행성능에 가장 중요한 영향을 미치는 타이어 모델의 경우 다른 문헌들에서는 간단한 타이어 모델을 사용하므로 정확한 거동을 예측하기 한계가 있지만 본 논문에서는 견마로봇에 사용하는 실제 타이어를 가지고 슬립각과 타이어 하중에 대한 Lateral

force, Self-alignment moment 등의 타이어 특성을 Flat Track을 이용한 선회저항 측정기를 가지고 측정하여 적용함으로써 모델의 정확도를 높였다.

다. 노면 모델링

노면 roughness는 크게 4가지로 나뉘서 모델링을 하였다. 모델링 방법은 국제표준기준(ISO 기준)을 따라서 했으며 식은 다음과 같다^[5].

$$G_d(\nu) = G_e + \frac{G_s}{(2\pi\nu)^2} + \frac{G_a}{(2\pi\nu)^4}$$

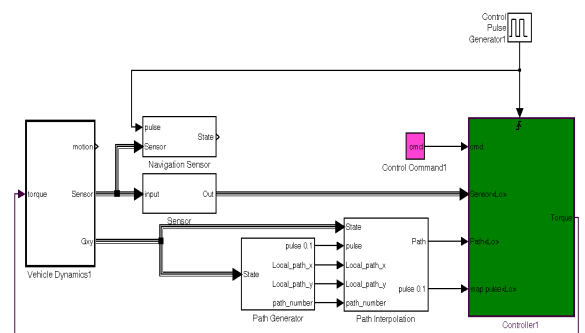
$$G_d(\nu) = PSD \text{ amplitude}$$

$$\nu = Wavenumber$$

G_e , G_s , G_a 는 Roughness magnitude parameter로 각 노면의 종류에 따라 식의 계수는 다음 표와 같다.

Surface Type	Roughness magnitude parameter		
	G_e	G_s	G_a
Moderate (2.5m/km IRI)	0	20	0
Asphalt with Long Wave	0	20	7
Rough	1	100	0
Limit Roughness	8	300	0

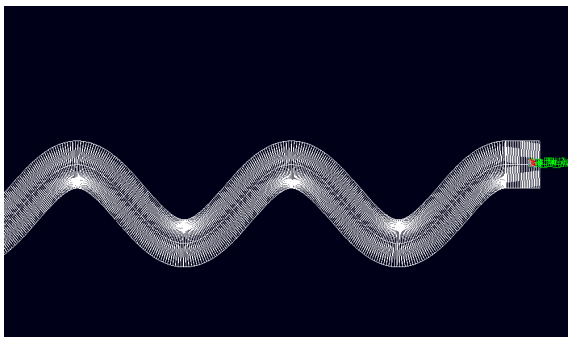
라. Matlab/Simulink 구성



[그림 4] Matlab/Simulink 구성

Matlab/Simulink와 ADAMS 모델과의 연동은 그림 4와 같이 구성하였다. Path Generation 부분에서는 경로점들을 생성해주고 Path Interpolation 부분에서는 주어진 경로점들을 가지고 현재의 Local Path 정보를 주게 된다. 제어기에서는 모델에서 나오는 상태정보와 주어진 경로 정보를 가지고 경로오차를 계산하고 원하는 속도와 경로를 주행할 수 있도록 각 휠의 토크를 제어하게 된다. 이 시뮬레이션에서는 모델기반의 적응제어 기법^[6,7]을 사용하였다. 실시간 제어에는 연산량이 적은 PID 제어기가 적합하지만 모델이 부정확할 경우 제어 성능이 떨어질 수 있다. 모델 기반의 적응제어 기법은 기준이 되는 모델을 가지고 모르는 변수들을 적응제어 기법을 가지고 맞춰가는 기법이다^[8]. 그러므로 견마로봇과 같이 기본적인 동역학 모델이 있지만 주행 특성에 영향을 주는 알려지지 않은 많은 변수들이 존재하는 시스템에 적합하다고 할 수 있다.

Desire path는 그림 5와 같이 사인파형 경로를 가지고 시뮬레이션을 하였다. 이와 같은 경로에서 Roughness, 마찰력, 노면 기울기 등을 변화시키면서 견마로봇이 주행시 어떠한 주행 특성을 나타나는지 비교하였다.



[그림 5] 사인파형 경로

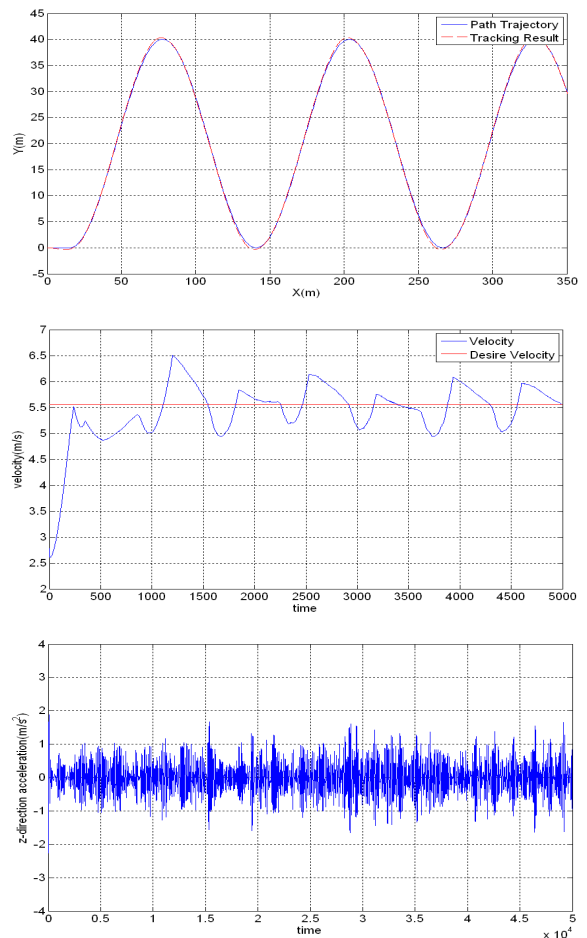
3. 시뮬레이션 결과

가. 노면 Roughness 변화에 따른 영향

먼저 Roughness 변화에 따른 차량의 주행 성능을 확인해 보았다. 노면의 Roughness 모델링은 앞

장에서 설명한 표준규격을 따라서 모델링을 하였고 Moderate road, Rough road, Limited roughness 3 가지 경우에 대해 목표 속도 20KPH로 각각 시뮬레이션을 하였다.

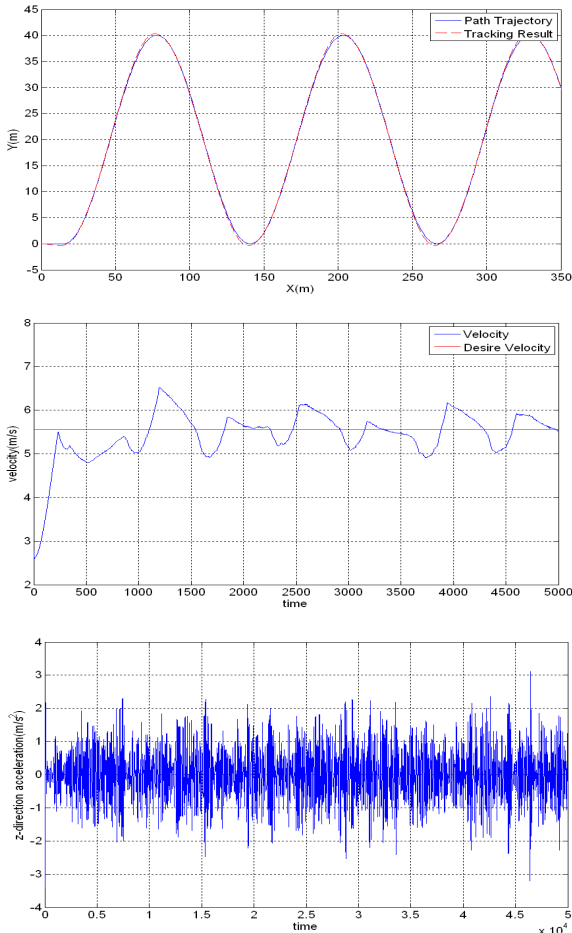
그림 6은 차량이 Moderate road에서 사인파 형의 경로를 추종할 때의 결과이고 그림 7은 Rough road에서 사인파 형의 경로를 추종할 때의 결과이다.



[그림 6] Moderate road 시뮬레이션 결과

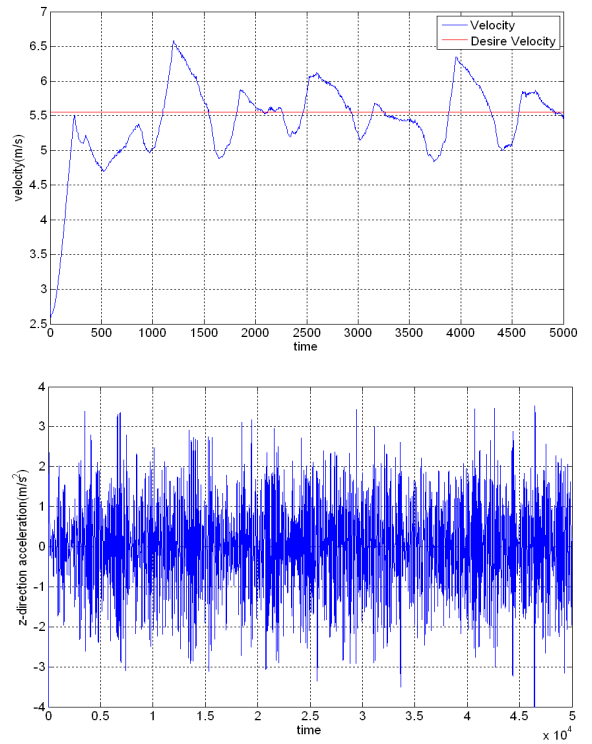
두 경우 모두 주어진 경로를 잘 추종하고 있으나 목표 속도추종에 있어서는 Overshoot이 존재하고 있다. 이것은 주어진 경로가 사인파 형이므로 방향이 바뀌는 부분에서 속도가 줄어들게 되므로 Overshoot이 생기는 형태로 경로추종을 하고 있다. 목표 속도

(20KPH) 추종 결과를 봤을 때 두 결과가 유사한 결과를 보여주고 있으나 Z방향의 가속도를 확인해 본 결과 차량이 Rough road를 주행할 때 더 많은 충격이 가해지고 있다는 것을 알 수 있다. Moderate road와 Rough road에서 20KPH로 주행할 때 현재 설계된 제어가 경로추종에 가능하다고 할 수 있다.



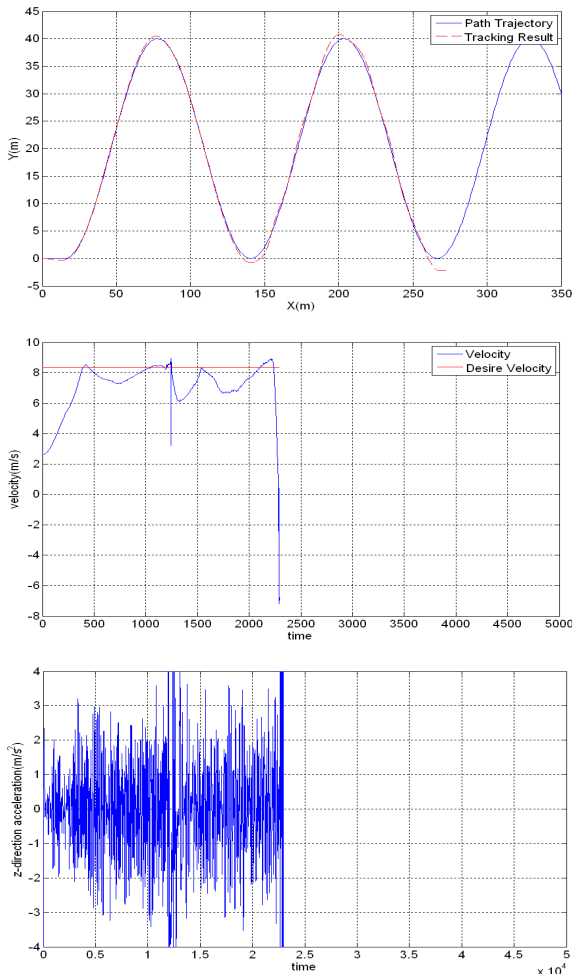
[그림 7] Rough road 시뮬레이션 결과

그림 8과 그림 9는 Limit roughness road를 20KPH와 30KPH로 주행했을 때의 결과이다. 시뮬레이션 결과 그림 7과 유사하게 경로는 잘 추종하였다. 그렇지만 목표속도는 그림 8처럼 잘 추종하지 못하였다. Z방향의 가속도를 확인해 본 결과 상당히 많은 주행하중이 걸리고 있음을 알 수 있다.



[그림 8] Limit roughness 시뮬레이션 결과(20KPH)

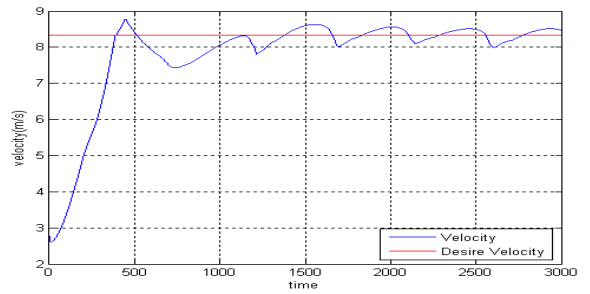
그림 9의 결과를 봤을 때 견마로봇이 30KPH로 Limit roughness road를 주행에는 한계가 있다는 것을 알 수 있다. 경로를 추종할 경우에도 추종 중 경로에서 일부 이탈하는 것을 확인 할 수 있으며 또한 결국에는 경로에서 완전히 벗어난 것을 확인할 수 있다. Z방향의가속도를 확인해 본 결과 가속도 값이 급격히 높아지고 있을 때가 사인파 형 경로에서 방향을 바꿀 때인 것을 알 수 있다. 이 때 견마로봇에 걸리는 주행하중은 견마로봇의 구조물 설계 기준치를 벗어나게 된다. 즉 견마로봇이 견뎌 낼 수 있는 강도를 벗어나는 주행하중이 걸리고 있음을 알 수 있다. Limit roughness는 매우 가혹한 조건으로 본 시뮬레이션에서도 경로추종을 잘 하다가 차량의 안정성을 잃어버리고 경로에서 이탈되는 것을 볼 수 있다. 이 노면에서 견마로봇이 30KPH로 주행하기 위해서는 현재 시스템에서 현수장치를 더욱 더 보완하거나 또는 암 제어를 포함한 안정성을 제어하는 통합주행제어 알고리즘이 필요하다는 것을 알 수 있다.



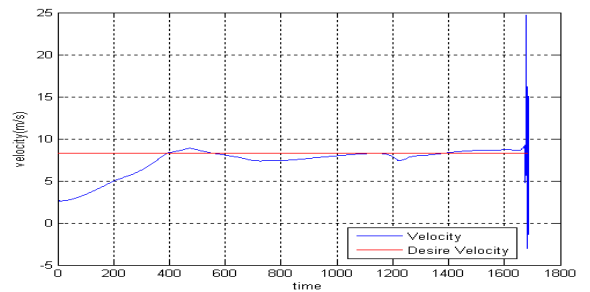
[그림 9] Limit roughness 시뮬레이션 결과(30KPH)

나. 노면 마찰력 변화에 따른 영향

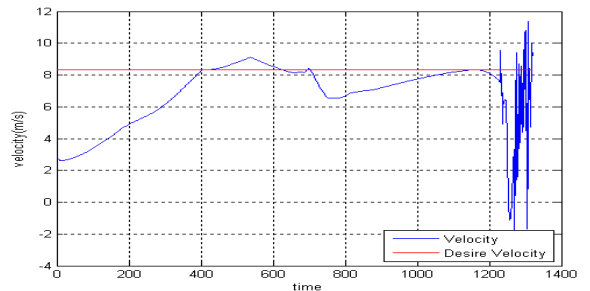
노면 마찰 계수의 변화에 따른 제어기의 성능을 검증하기 위하여 좌우의 마찰계수가 각각 다른 노면에 대해 시뮬레이션을 했다. 즉 로봇의 양쪽 바퀴에 걸리는 마찰계수가 다른 조건으로 상당히 가혹한 조건이라고 할 수 있다. 이 시뮬레이션은 건마로봇이 한쪽은 아스팔트 위에 있고 다른 한쪽은 얼음 위에 있을 때 등 다른 노면 조건에 있을 때에도 안정성을 잃지 않고 주행이 가능한지를 보기 위한 것이다. 제어기는 이와 같은 환경에서도 주행할 수 있도록 강인하게 설계되어야 한다. 시뮬레이션의 경로는 앞의 경우와 동일한 사인파형 경로로 하였다.



[그림 10] 노면 마찰계수 차이(0.9 & 0.8)



[그림 11] 노면 마찰계수 차이(0.9 & 0.7)



[그림 12] 노면 마찰계수 차이(0.9 & 0.5)

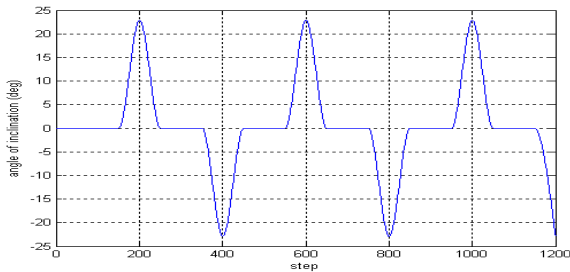
그림 10은 한쪽 바퀴에는 마찰계수가 0.9, 다른 한쪽에는 0.8이 걸렸을 때 결과이다. 균일한 마찰계수가 걸렸을 때보다 성능이 다소 떨어지지만 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 그림 11은 노면 마찰 계수가 0.9, 0.7이 걸렸을 때의 결과이다. 초기에는 잘 추종하고 있으나 결국에는 차량이 안정성을 잃으면서 경로에서 이탈하려고 하는 것을 알 수 있었다.

그림 12는 노면 마찰 계수가 0.9, 0.5인 경우로 그림 11의 경우와 같이 차량이 불안정해지고 있고 그 시점 또한 그림 11의 경우보다 훨씬 빨리 나타나고

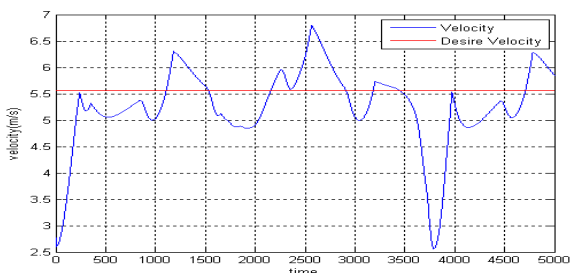
있음을 알 수 있다. 차량이 주행하는 노면의 양쪽 마찰계수가 다른 조건은 실차 주행에서 좀처럼 나타나지 않는 가혹한 조건이기는 하지만 차량을 좀 더 안정하게 제어하기 위해서는 현재의 제어가 좀 더 노면의 마찰력 차이에 강인한 성능을 보일 수 있도록 향상시킬 필요가 있을 것으로 보인다.

다. 횡경사 변화에 따른 영향

횡경사에 차량의 주행 성능이 어떻게 달라지는지 그리고 제어기의 성능이 얼마나 강인한지 보기 위해 시뮬레이션을 해 보았다. 먼저 그림 13과 같이 최대 23도 횡경사가 존재하였을 때 견마로봇이 주행하였을 경우 어떻게 되는지 확인해 보았다. 그림 14는 견마로봇이 20KPH로 주행했을 때의 결과이다. 경로추종은 앞의 경우와 유사하게 사인파 형 경로를 잘 추종하였으나 속도는 값의 기복이 심하게 나타났다. 이것은 중간 중간에 횡경사의 변화가 나타나 차량이 주행하는데 방해하기 때문에 나타난 것으로 볼 수 있다. 그렇지만 최대 23도의 횡경사에서 견마로봇이 사인파 형 경로를 잘 추종하는 것으로 보아 제어기는 경로추종에 대해서는 상당히 강인하다고 할 수 있겠다.

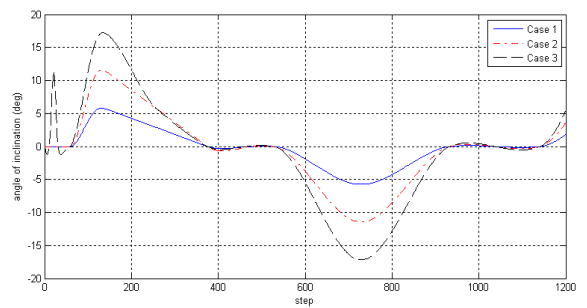


[그림 13] 횡경사 변화도

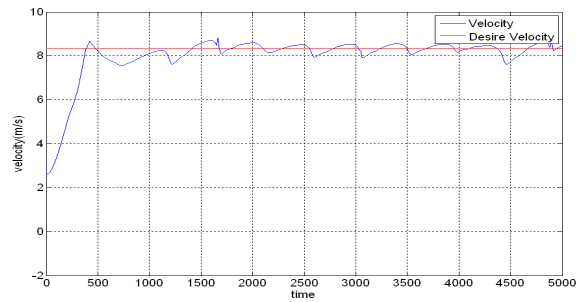


[그림 14] 횡경사 변화시 주행 결과(20KPH)

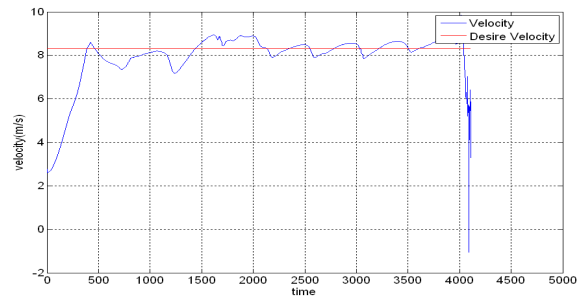
다음으로 횡경사의 변화량에 따른 주행 성능을 살펴 보기 위해서 그림 15와 같이 3가지 횡경사의 연속적인 변화에 따른 주행성능을 확인해 보았다. 그림 15에서의 다른 횡경사 변화에 따라 사인파 파의 길에서 30KPH로 주행했을 때 주행결과는 그림 16, 그림 17, 그림 18과 같다. 이 때 노면 Roughness는 Moderate로써 비교적 완만한 조건의 노면으로 하였다. 시뮬레이션 결과 경로추종은 앞의 경우들과 마찬가지로 잘 추종하였다.



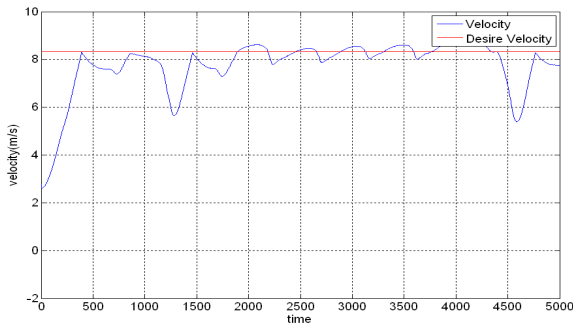
[그림 15] 다양한 횡경사 변화 Case



[그림 16] 주행 결과(Case 1)



[그림 17] 주행 결과(Case 2)



[그림 18] 주행 결과(Case 3)

그림 16의 결과를 보면 견마로봇은 경로와 속도 모두 만족할만한 성능으로 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 17의 경우에도 속도의 기복이 약간 존재하지만 경로를 잘 추종하고 있다는 것을 알 수 있다. 그렇지만 그림 18의 경우 속도에서는 많은 기복이 존재하고 있는데 이것은 횡경사의 변화가 18도에서 -18도까지 변하면서 나타나는 것으로 이 정도의 성능을 나타내는 것으로 보아 제어기가 횡경사의 변화에 대해서는 충분히 강인하게 설계되었다고 할 수 있겠다.

4. 향후계획

현재 모델은 구체적이고 정확하게 모델링이 되어 있으나 추후 실제 주행시험 데이터를 가지고 모델을 개선하는 과정이 필요하다. 따라서 향후 제작되는 견마로봇을 주행시험을 통해 얻어지는 실험 결과를 가지고 동역학 모델의 파라미터를 좀 더 정확하게 맞추는 과정이 필요하다. 그리고 본 논문에서는 적응제어기의 성능을 확인하였으나 추후에는 다양한 제어기를 검증/비교하는데 이용하고자 한다.

후 기

본 연구는 방위사업청/민군겸용기술센터와 정보통신부/정보통신연구진흥원의 민군겸용기술개발사업의 일환으로 수행하였음.[06-DU-LC-01, 네트워크 기반 다

목적 견마형 로봇 기술 개발]

참 고 문 헌

- [1] L. Caracciolo, A. D. Luca, S. Iannitti, "Trajectory Tracking Control of a Four-wheel Differentially Driven Mobile Robot", International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 2632~2638, 1999.
- [2] D. Pazderski, K. Kozlowski and W. E. Dixon, "Tracking and Regulation Control of a Skid Steering Vehicle", Amer. Nuclear Soci, 10-th Int. Topical Meeting Robotics and Reomte Systems, pp. 369~376, 2004.
- [3] K. KozLowski, D. Pazderski, "Modeling and Control of a 4-wheel Skid-steering Mobile Robot", International Journal of Applied Mathematics and Computer. Sciences, Vol. 14, No. 4, 477~496, 2004.
- [4] A. Yunfeng, Z. Qunzhi, Z. Haitao, "A New Simulation Model for 4WS Vehicles based on Dynamic Tire Friction Model", International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, pp. 1~6, 2006.
- [5] T. D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", pp. 126~132, Society of Automotive Engineers, 1992.
- [6] 강정훈, 윤용산, 최세범, 임경빈, 허진욱, 강신천, "스키드 스티어 차량의 경로추종을 위한 모델기반 적응 제어기 설계", 군사용 로봇 워크샵, 2007.
- [7] S. B. Choi, "The Design of a Look-down Feedback Adaptive Controller for the Lateral Control of Front-wheel-steering Autonomous Highway Vehicles", Vehicular Technology, IEEE Transactions on Vol. 49, Issue 6, pp. 2257~2269, Nov. 2000.
- [8] J. E. Slotine and W. Li, "Applied Nonlinear Control", pp. 311~319, Prentice Hall, 1991.