

저심도 도시철도용 급곡선 주행시스템 성능검증용 HILS를 위한 해석모델 개발

Development of an Analytical Model of Near Surface Transit for HILS to Evaluate Performance of Running System on the Sharp Curve

조연호*[†], 이원상*, 강광호*, 엄경수**

Yonho Cho*[†], Wonsang Lee*, Gwangho Kang*, Kyongsu Eom**

Abstract The running system for near surface transit running on the sharp curve with 15mR frequently. The railway vehicle which run on sharp curve build severe wear and noise, and generate huge lateral force then reduce ride quality and reach to the derail condition. The steering device and guide mechanisms are demanded to improve this problems. The motorized bogie hard to adopt this system, so lateral displacement and yaw angle control with individual motor torque control. The trailing bogie equipped with hydraulic steering link which convert relative rotate angle between carbody to bogie rotate angle. These two systems are developed and ready to test. The performance of this steering system evaluated with HILS before build test vehicle. This paper describes about development of an analytical model of test vehicle with 3 car modules which secure the precision and real time calculate time.

Keywords : IRW(Independently Rotating Wheels), Steering system, Individual torque control, HILS, real time simulation model

초 록 저심도 도시철도용 주행시스템은 최소곡선 15mR을 빈번하게 주행하게 된다. 급곡선 주행조건에서 철도차량은 과도한 마모와 소음 및 횡압이 발생하고 승차감 저하뿐 아니라 탈선에 이르는 경우도 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 조향기구나 안내기구의 적용이 요구된다. 구동대차는 조향시스템 적용이 어려워 개별모터 제어에 의한 토크 제어를 통한 횡변위와 요각제어를 수행하고 부수대차에는 유압식 조향 링크를 설치하여 차체간 회전각을 이용한 조향 기능이 구현되는 시스템을 개발하여 시험을 준비 중이다. 시험차량 제작 전 HILS를 이용하여 개발시스템의 성능을 검증하고자 한다. 본 논문에서는 HILS를 이용한 개발시스템의 성능검증을 위해서 실시간 해석시간과 정확도를 확보할 수 있는 3편성 시험차량의 해석모델 개발에 대한 연구내용을 기술하였다.

주요어 : 독립구동, 조향시스템, 개별모터제어, HILS, 실시간 해석모델

1. 서 론

저심도 도시철도 시스템은 도로를 따라 5m이내의 얇은 깊이로 철도를 부설하기 때문에 도로의 선형을 따라 철도 선형이 결정된다. 따라서 2차선 도로로 부설된 교차로를 주행할 경우 최소곡선 15mR의 급곡선을 빈번하게 운행하게 된다.

† 교신저자: 현대로템주식회사 주행장치개발팀(ycho@hyundai-rotem.co.kr)

* 현대로템주식회사 주행장치개발팀, ** 현대로템주식회사 철차연구3팀

급곡선을 주행하는 철도차량은 횡압이 커지게 되며 이에 따라 소음과 마모가 크게 발생하는 문제점이 발생한다. 일반적으로 급곡선을 주행하는 트램은 좌우 독립 차륜방식 대차를 적용하여 별도의 조향시스템 없이도 주행이 가능하지만, 지속적인 플렌지 접촉에 의한 소음과 마모는 독립 차륜을 적용하는 차량의 단점으로 작용한다. 최근에는 트램 운영사에서 이러한 문제점으로 인해 독립차륜 방식을 포기하고 강제윤축 방식 대차를 적용하는 추세이며, 이러한 경우 곡선 통과 속도를 크게 낮추거나 조향시스템이나 도유시스템이 추가로 적용된다. 저심도 도시철도용으로 개발 중인 급곡선 주행시스템에는 2가지 조향기술이 적용될 예정이다. 시험차량 제작 전에 개발 시스템의 성능을 검증하기 위해 HILS를 이용한 성능평가를 수행할 예정이다. 본 논문에서는 HILS를 이용한 성능검증을 위해 해석 정확도와 실시간 해석 속도가 보장되는 해석모델 개발에 대한 내용을 기술하였다.

2. 실시간 해석모델 개발

시험차량은 3량 편성으로 구성된다. 선두 차량에는 구동대차가 부속되고 후미 차량에는 견인대차가 부속되고 가운데 차량은 공중에 뜬 상태로 운행된다. 일반적으로 운행되고 있는 5량편성의 트램의 경우 3대차 지지 방식이며, 본 시험차량은 5모듈 차량의 1/2에 해당하는 기능을 수행할 수 있도록 고안되었으며, 개발된 시스템은 3량 차량뿐 아니라 5량 편성 차량에도 바로 적용될 수 있다. 구동대차는 모터와 구동기어의 유격이 제한되어 있어서 급곡선을 주행할 때 원하는 만큼의 조향 각을 적용할 수 없다. 반면 견인대차는 모터가 장착되지 않으므로 급곡선을 주행할 때 래디얼 조향에 준하는 조향 각을 적용할 수 있도록 유압식 조향링크를 적용하였다. 특히 본 시험차량에 장착되는 조향링크는 차체 사이에 장착된 관절 실린더에서 차체간 회전각에 의해 발생하는 조향력으로 윤축을 조향 할 수 있도록 고안되었다. 본 시스템의 장점은 별도의 액추에이터나 센서의 추가 장착 없이 기계적 링크 시스템과 유사하게 적용된다는 점이지만, 관절 실린더가 앞쪽에 위치할 경우 조향 지연이 없으나 관절실린더가 뒤쪽에 위치할 경우 조향 지연이 발생하는 단점이 있다.

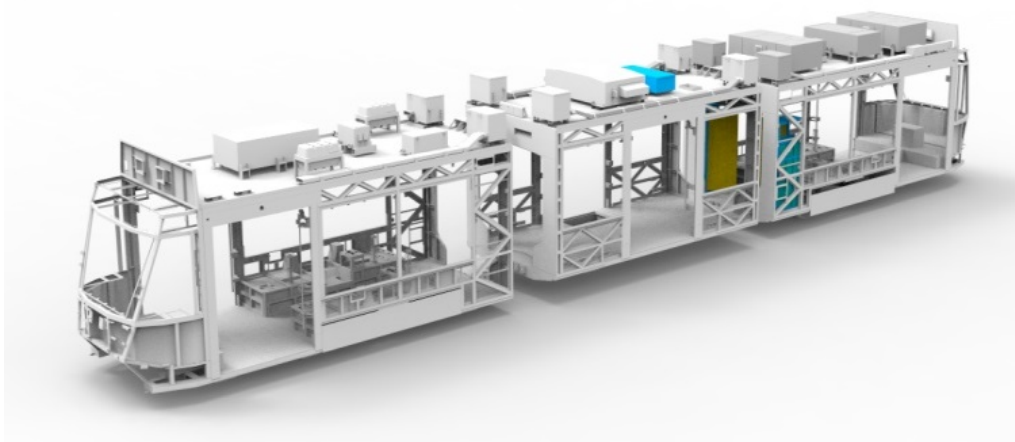


Fig. 1 Test vehicle concept design for near surface transit on sharp curve

대부분의 견인대차는 중간 차체에 적용되므로 이러한 문제는 실 차 적용 시에는 크게 문제가 되지 않겠지만, 선두 차량에 적용 시 주행방향에 따라 조향 성능이 제한된다. 구동대차는 조향기구적용이 어려우므로 좌우 개별 모터의 토크 차에 의한 요 모멘트를 이용하여 휠/레일 접촉 점에서 횡력을 발생시키는 원리를 이용하여 횡변위를 제어하도록 개별 토크 제어 시스템을 개발하였다. 경우에 따라 급곡선 주행 시 토크 차에 의한 요각제어를 통해 조향 기능도 일부 제공하므로 횡압과 마모를 감소시키는데 효과가 있을 것으로 기대된다. 아래 그림은 실시간 해석모델 개발을 위한 시험차량의 해석모델이다. 3차량을 3절 링크로 간주하여 해석을 수행할 경우 해석적으로는 정확한 해를 구할 수 있으나 수식이 복잡해 지고 연산량이 많아져서 실시간 해석보장이 어려워진다. 따라서 본 논문에서는 링크 구조 대신 관절 부에 대한 횡 방향 강성모델을 추가하여 힘의 합력 모델로 3차량 해석모델의 거동을 예측하도록 식을 간략화 하였다.

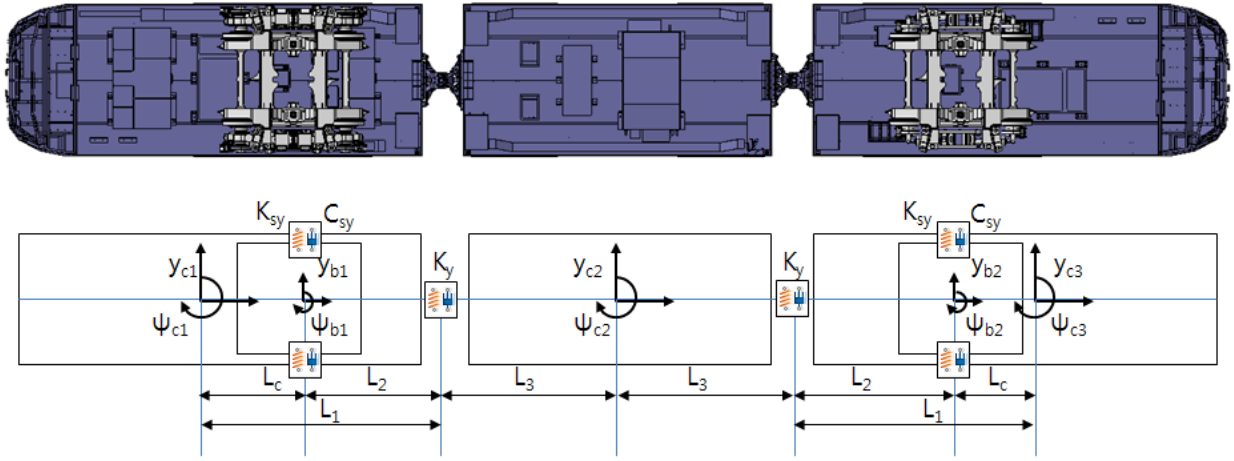


Fig. 2 The analytical model of test vehicle for near surface transit on sharp curve

$$m_{c1}\ddot{y}_{c1} = 2K_{sy}y_{b1} - 2K_{sy}y_{c1} + 2C_{sy}\dot{y}_{b1} - 2C_{sy}\dot{y}_{c1} - 2K_{sy}L_c\psi_{c1} - 2C_{sy}L_c\dot{\psi}_{c1} - K_y y_{c1} + K_y y_{c2} - K_y L_1\psi_{c1} - K_y L_3\psi_{c2} \quad (1)$$

$$m_{c2}\ddot{y}_{c2} = K_y y_{c1} - 2K_y y_{c2} + K_y y_{c3} + K_y L_1\psi_{c1} - K_y L_1\psi_{c3} \quad (2)$$

$$m_{c3}\ddot{y}_{c3} = -2K_{sy}y_{c3} + 2K_{sy}y_{b2} - 2C_{sy}\dot{y}_{c3} + 2C_{sy}\dot{y}_{b2} - 2K_{sy}L_c\psi_{c3} - 2C_{sy}L_c\dot{\psi}_{c3} + K_y y_{c2} - K_y y_{c3} + K_y L_3\psi_{c2} + K_y L_1\psi_{c3} \quad (3)$$

$$I_{cz1}\ddot{\psi}_{c1} = -2K_{sy}L_c^2\psi_{c1} - 2C_{sy}L_c^2\dot{\psi}_{c1} - 2K_{sx}L_1^2\psi_{c1} - 2C_{sx}L_3^2\dot{\psi}_{c1} + 2K_{sx}L_1^2\psi_{b1} + 2C_{sx}L_3^2\dot{\psi}_{b1} + 2K_{sy}L_c y_{b1} + 2C_{sy}L_c \dot{y}_{b1} + C_{sy}L_2 \dot{y}_{c1} + K_{sy}L_2 y_{c1} + K_y L_1 y_{c2} - K_y L_1 y_{c1} - K_y L_1^2\psi_{c1} - K_y L_1 L_3\psi_{c2} \quad (4)$$

$$I_{c2} \ddot{\psi}_{c2} = -K_y L_3 y_{c1} + K_y L_3 y_{c3} - K_y L_1 L_3 \psi_{c1} - 2K_y L_3^2 \psi_{c2} - K_y L_1 L_3 \psi_{c3} \quad (5)$$

$$I_{c3} \ddot{\psi}_{c3} = -2K_{sy} L_c^2 \psi_{c3} - 2C_{sy} L_c^2 \dot{\psi}_{c3} - 2K_{sx} L_1^2 \psi_{c3} - 2C_{sx} L_3^2 \dot{\psi}_{c3} + 2K_{sx} L_1^2 \psi_{b2} + 2C_{sx} L_3^2 \dot{\psi}_{b2} - 2K_{sy} L_c y_{b2} - 2C_{sy} L_c \dot{y}_{b2} - C_{sy} L_2 \dot{y}_{c3} - K_{sy} L_2 y_{c3} - K_y L_1 y_{c2} + K_y L_1 y_{c3} - K_y L_1^2 \psi_{c3} - K_y L_1 L_3 \psi_{c2} \quad (6)$$

3량의 차체에 대한 횡변위와 요 변위에 대한 자유도만을 고려한 6개의 운동방정식을 도출하였으며 대차와 윤축의 운동방정식은 차량 편성과 무관하므로 기존에 발표된 독립구동 방식 철도차량의 곡선주행 해석을 위한 운동방정식을 그대로 적용한다.

3. HILS 해석을 위한 시스템 구성

HILS를 이용한 시험차량의 조향성능 검증해석을 수행하기 위해 실시간 해석모형을 개발하였다. 휠셋 4개, 대차 2개, 차체 3개로 구성된 26자유도 해석모형에 대하여 Simulink를 이용한 해석모형을 작성한 후 가변 스텝 적분기를 이용한 연속시간 해석을 수행하여 해석이 정상적으로 수행됨을 확인하였다. 실시간 해석을 위해 도입중인 dSPACE사의 SCALEXIO 연산장비는 이산시간 해석으로 10마이크로초의 적분스텝까지는 실시간 해석성능을 보장한다. 개발된 해석모형을 이용해 작성된 프로그램을 고정 스텝 적분기를 이용한 이산시간 해석을 수행하여 적분스텝이 10마이크로초보다 큰 조건에서 해석이 정상 수행됨을 확인하였다.

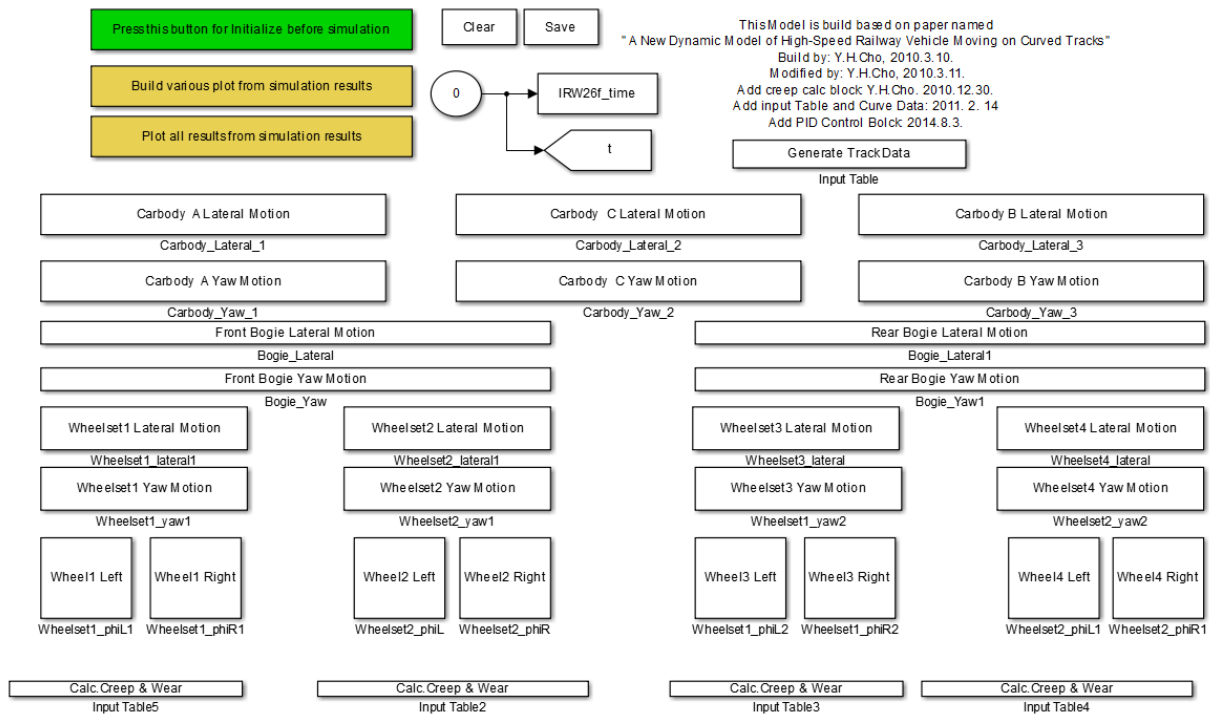


Fig. 3 The simulation model of test vehicle with real time simulation equations with Matlab/Simulink

저심도 도시철도용 급곡선 주행시스템을 위한 HILS는 구동대차를 위한 개별모터 제어 성능검증용 HILS와 견인대차를 위한 유압식 조향링크 제어 성능검증용 HILS로 구성된다. 아래 그림은 해당 HILS의 구성 개념도이다. (ITC: Individual Torque Control, HCS: Hydraulic Cylinder Steering)

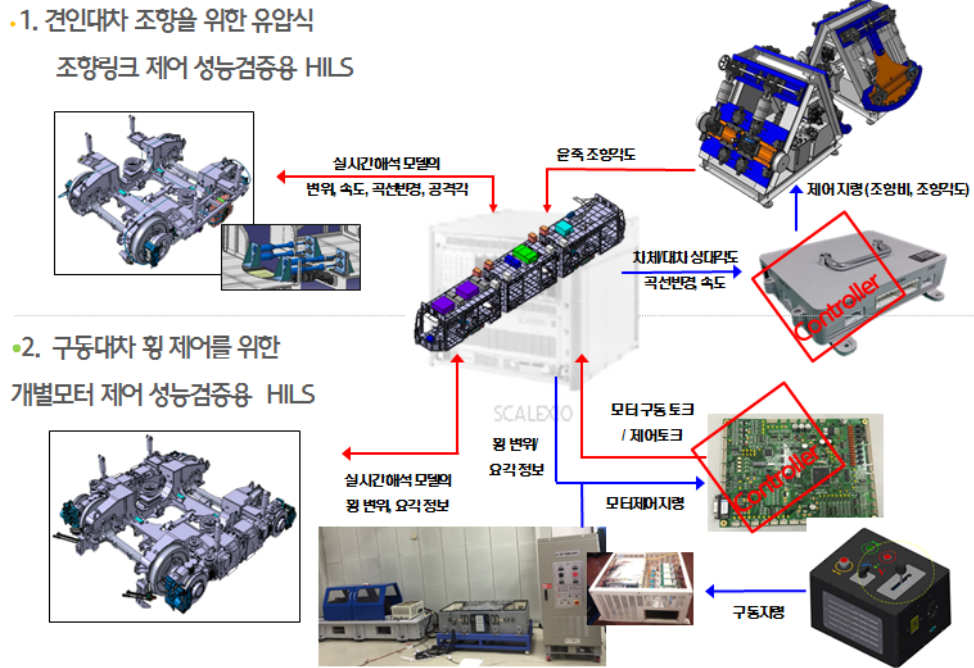


Fig. 4 HILS schematics of test vehicle with two type control system (ITC, HCS)

앞에서 개발한 실시간 해석모델과 시험차량의 3D모델을 이용하여 dSPACE사의 Motion Desk라는 가시화 프로그램으로 HILS를 통한 해석결과를 확인할 수 있다. 아래 그림은 HILS를 통한 시험차량의 주행시험 결과이다. 실시간 해석 시간을 보장하는 해석모델을 이용한 해석을 수행 중이며, 향후 ADAMS와 Simpack을 이용한 다물체 동역학 해석모델 결과와의 비교를 통해 정확도를 검증할 예정이다.

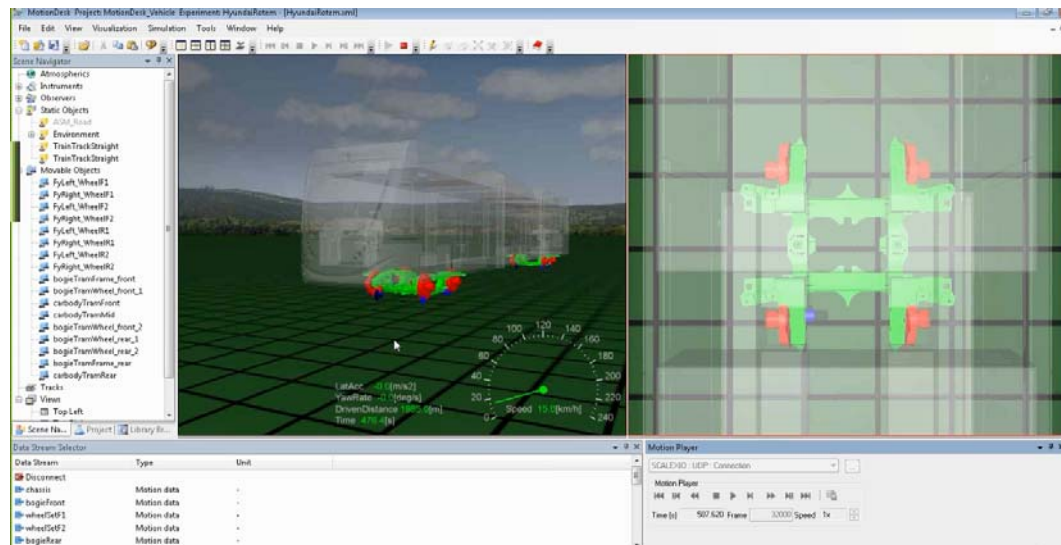


Fig. 5 Real time simulation results with Motion desk and SCALEXIO h/w from dSPACE

후 기

본 연구는 국토교통부 저심도 도시철도시스템 기술 개발 과제의 지원으로 수행되었습니다

참고문헌

- [1] Y.Lin, C.Lin and N.Shieh(2006), "A Hybrid Evolutionary Approach for Robust Active Suspension Design of Light Rail Vehicles", IEEE Transactions on control systems technology. Vol.14, No.4, pp. 695-706.
- [2] N.Shieh, C.Lin, N.Lin and Y.Lin (2004), "Optimal Design for Passion of a Light Rail Vehicle using Constrained Multiobjective Evolutionary Search", Proceedings of the IEEE international conference on networking, sensing & control. pp.134-139.
- [3] Y.Cho and J.Kwack (2012), "Development of a New Analytical Model for a Railway Vehicle Equipped with Independently Rotating Wheels", IJAT, Vol.13, No.7, pp. 1047-1056.
- [4] R. V. Dukkipati and S. Narayana Swamy (1992), "Independently Rotating Wheel Systems for Railway Vehicles-A State of the Art Review", Vehicle System Dynamics 21, pp. 297-330.
- [5] R. M. Goodall and Hong Li (2000), "Solid Axle and Independently Rotating Wheelsets - A Control Engineering Assessment of Stability", Vehicle System Dynamics 33, pp. 57-67.
- [6] M. Gretschel and L. Bose (2002), "A New Concept for Integrated Guidance and Drive of Railway Running Gears", Control Engineering Practice 10, pp.1013-1021.
- [7] T. X. Mei, Z. Nagy, R. M. Goodall and A. H. Wickens (2002), "Mechatronic Solutions for high speed railway vehicles", Control Engineering Practice 10, pp.1023-1028
- [8] T. X. Mei and R. M. Goodall (2003), "Practical Strategies for Controlling Railway Wheelset Independently Rotating Wheels", ASME 125, pp.354-360..
- [9] T. X. Mei and R. M. Goodall (2001), "Robust Control for IRW on a Railway Vehicle Using Practical Sensors", IEEE Transactions on Control System Technology 9, 4, 599-607.
- [10] A. Saitoh and K. Tanifuji (2002), "Comparison of Curving Characteristics of Rail Vehicle with Independently Rotating Wheels between Steering Methods", JSME 11th Proceedings of transportation conference 02-50, pp.139-142.
- [11] R. Obata, K. Tanifuji, H. Soma and T. Masuda (2006), "Curving Performance of a Rail Vehicle with Independently Rotating Wheels by Torque Difference Control", JSME. C, 72, 716, pp.50-56.
- [12] Bemhard KURZECK and Luciano VALENTE (2011), "A novel mechatronic running gear: concept, simulation and scaled roller rig testing", 9th WCRR Proceedings.
- [13] X.Jian and L.Zushu (2003), "Dynamic Model and Motion Control Analysis of Three-link Gymnastic Robot on Horizontal Bar", Proceedings of the IEEE international conference on robotics, intelligent systems and signal processing. pp. 83-87.