

독립구동 인휠 전기자동차의 주행 효율 최적화를 위한 구동력 분배 알고리즘 Development of Power Distribution Algorithm for Driving Efficiency Optimization of Independently Driven Vehicle

박진현¹ · 송현우¹ · 정호운¹ · 박찬호¹ · 황성호^{1*}

J. H. Park, H. W. Song, H. U. Jeong, C. H Park and S. H. Hwang

Received: 17 Feb. 2014, Revised: 24 May. 2014, Accepted: 26 May. 2014,

Key Words : In-wheel Electric Vehicles(인휠 전기자동차), Performance Simulator(성능 시뮬레이터), Driving Efficiency(주행 효율), 4-Wheel-Drive(4륜구동), Power Distribution(구동력 분배)

Abstract: The purpose of this paper is to construct a control algorithm for improving the driving efficiency of 4-wheel-drive in-wheel electric vehicles. The main parts of the vehicle were modeled and the input-output relations of signals were summarized using MATLAB/Simulink. A performance simulator for 4-wheel-drive in-wheel electric vehicles was developed based on the co-simulation environment with a commercial dynamic behavior analysis program called Carsim. Moreover, for improving the driving efficiency of vehicles, a torque distribution algorithm, which distributes the torque to the front and rear wheels, was included in the performance simulator. The effectiveness of the torque distribution algorithm was validated by the SOC simulation using the FTP-75 driving cycle.

Subscripts

- α : vehicle speed/throttle pedal value
- A_p : throttle pedal value
- B_p : brake pedal value
- V : vehicle speed
- V_d : desired vehicle speed

1. 서 론

세계 자동차 업체들과 관련 연구 기관 등에서 전기 자동차(Electric Vehicle; EV)에 대한 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 현재 양산되는 대부분의 전기자동차는 일충전 주행거리가 150km 내외

수준이어서 주행효율 향상, 배터리 기술, 회생제동 기술 등의 지속적인 연구개발을 통한 주행거리 향상이 핵심 과제로 남아 있다¹⁾.

그 중 인휠 시스템에 대한 관심과 연구가 활발히 이루어지고 있다. 인휠 시스템이란 전기모터가 엔진 룸이 아닌 각 차륜에 장착되어 구동력을 직접적으로 각 휠에서 제어하는 시스템이다. 이 기술은 차동기어(differential)의 부재로 인하여 선회 시 각 휠의 속도를 동기화 시켜주기 위한 기술과 회생제동 제어로직, 고성능 모터 설계와 고장회피(Fail-Safe)기능 등의 고도의 시스템 기술이 필요하여 단기간에 대중성을 확보하기 어렵지만 미래 자동차 산업에서 혁명적인 변화를 일으킬 수 있는 획기적인 핵심기술 중의 하나이다⁸⁾¹⁰⁾. 또한 전기 모터가 바퀴에 직결되어 있어 구동축과 같은 동력전달요소가 불필요해짐에 따라 이로 인한 동력 손실이 적어 주행 효율 향상에 효과적이며 파워트레인 구조를 단순화 하면서 4륜구동을 구현할 수 있다. 파워트레인의 단순화는 실내 공간 확보가 가능하여 차량 디자인의 자유도 향상이 가능하고 차량 양산 업체의 개발 비용을 절감할 수 있는 묘책이기도 하다⁹⁻¹¹⁾.

* Corresponding author: hsh@me.skku.ac.kr
 1 School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea
 Copyright © 2014, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기존 인휠 시스템에 관한 연구들은 대부분 직진주행 시 좌/우 구동력 동기화나 선회시의 구동력 분배를 통한 차량의 주행 안정성 측면에 대해서 진행되어 왔다. 하지만 이러한 주행 안정성 측면뿐만 아니라 짧은 1층전 주행거리 또한 인휠 시스템의 상용화를 지연시키는 문제이다.

따라서 본 연구에서는 전기자동차 시장에서 각광을 받게 될 인휠 시스템이 적용된 4륜구동 인휠 전기자동차의 주행효율 향상을 위하여 주행모드에 따라 후륜구동과 4륜구동을 선택적으로 적용하여 4륜구동이 갖는 장점과 후륜구동이 갖는 장점 모두를 충족할 수 있도록 제어 알고리즘을 구성하였다. 정속 주행과 같이 큰 요구 토크가 필요하지 않은 운전 모드에서는 후륜 2륜으로만 구동하여 주행 효율을 향상시키고 급가속이나 제동과 같이 요구 토크가 큰 상황에서 4륜구동으로 전환되어 주행 성능을 충족시키게 된다.

2. 4륜구동 인휠 전기자동차 성능 시뮬레이터

2.1 연구 대상 차량의 성능 시뮬레이터 개발

본 논문의 연구대상 차량은 현재 한국에서 양산되고 있는 경형 승용차이다. 기존의 파워트레인은 제거하지 않고 15kW급 인휠 모터를 각 바퀴에 추가적으로 장착한 것이다. 이에 배터리 무게를 고려하여 용수철 상질량(sprung mass)은 1400kg이며 기타 주요 제원은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 4륜구동 인휠 전기자동차 주요제원

Component	Specification
Sprung mass	1400kg
Vehicle height	1160mm
Vehicle width	1780mm
Wheel base	2347mm
Tire radius	292mm
Distance of C.G to front wheel centerline	1103mm
Roll inertia	288.0 $kg \cdot m^2$
Pitch inertia	1110.9 $kg \cdot m^2$
Yaw inertia	1110.9 $kg \cdot m^2$
In-wheel motor	15 kW
Battery	65 kW/ 60 Ah
SOC range	0.3 ~ 0.8
In-wheel motor Gear ratio	6:1

주행효율 향상을 위한 토크분배 알고리즘의 검증을 위하여 우선 MATLAB/Simulink를 사용하여 연구대상 차량의 주요 제원이 반영된 4륜구동 인휠 전기자동차의 성능 시뮬레이터를 개발하였다³⁾.

성능 시뮬레이터는 Fig. 1과 같이 운전자 모델, 주제어기, 배터리, 구동력 분배 모델, 인휠 모터 등으로 구성되어 있다.

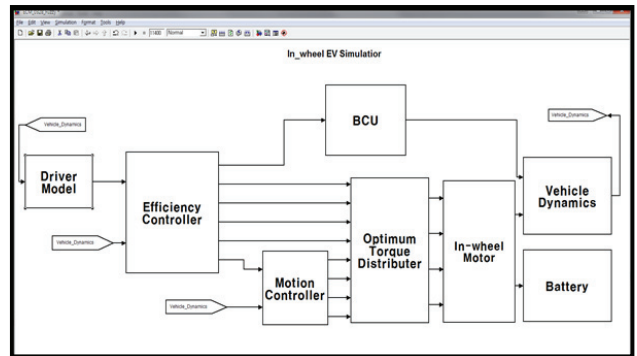


Fig. 1 인휠 전기자동차 성능 시뮬레이터

차량에 탑재되는 주요 부품들은 실험을 통해 얻어진 부품별 효율 맵과 특성 맵을 적용하여 MATLAB/Simulink를 사용하여 모델링 하였으며, 부품간 상호 입출력 관계를 정리하여 상용 프로그램 CarSim과 Co-simulation 환경을 구축하였다³⁾. 차량 모델에서는 동적 거동 해석을 위하여 상용 프로그램 CarSim을 사용하였다. 모터 모델로부터 토크를 입력으로 받아 Carsim 내의 계산을 거치면 차량속도(V)와 각 휠의 속도(rpm)가 출력되고, 이 값들은 다시 Simulink로 전달되는 순환적인 시뮬레이션이 연속적으로 이루어져 Co-simulation환경이 구축된다⁴⁾. Fig. 2는 Carsim과 MATLAB/Simulink간의 Co-simulation 환경이 구축된 모습이다.

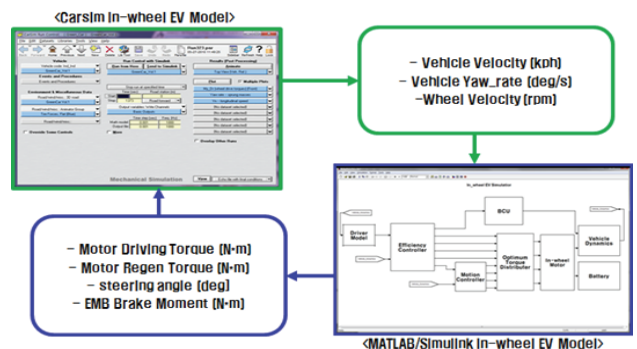


Fig. 2 Carsim과 MATLAB/Simulink 간의 Co-simulation 환경 구축

2.2 운전자 모델

운전자 모델은 시뮬레이션을 수행하는 사람의 의지를 시뮬레이터 상에 반영하기 위한 것이다. 실제 존재하여 차량에 탑재되는 부품은 아니지만 원하는 조건으로 시뮬레이션을 수행하기 위해서 요구 조건을 반영 할 수 있는 블록이 필요하다. 운전자 모델에서 요구속도 (V_d)를 입력으로 받으면 PID제어를 통하여 차량의 속도(V)가 요구속도(V_d)를 추종하도록 0~100 사이의 적절한 액셀 페달 값(A_p)과 브레이크 페달 값(B_p)을 출력한다.

$$V_d - V > 0 \text{ (Acceleration)} \quad (1)$$

$$V_d - V < 0 \text{ (Deceleration)} \quad (2)$$

식 (1)과 같이 운전자의 요구 속도가 차량의 실제 속도보다 크게 되면 가속을 하게 되어 적절한 A_p 신호를 출력하고, 식 (2)와 같이 요구속도보다 차량의 속도가 크면 감속하기 위한 브레이크 페달(B_p)신호를 출력하게 된다. 이렇게 운전자 모델에서 출력된 페달 신호는 주제어기로 전달된다.

2.3 주제어기(Main Controller)

주제어기는 차량 전체를 총체적으로 제어하는 부품으로 차량의 주행 모드를 결정하고 배터리, 브레이크, 모터 등을 관리하게 된다. 운전자 모델과 차량 모델로부터 A_p , B_p , V 신호를 입력 받아 차량의 주행상태를 결정하게 되고, 각 주행상태에 따라 필요한 배터리 파워를 출력하여 배터리 모델로 전달해 주게 된다. 주제어기에서 결정하는 차량의 주행상태는 정지, 가속, 정속, 감속 네 가지가 있다. 차량은 기본적으로 4륜구동으로 구동이 되지만 주행상태가 정속주행

Table 2 A_p , B_p , V 에 따른 차량의 상태

A_p	B_p	V	상태
0	0	0	정지
0	0	1	정속
0	1	0	정지
0	1	1	감속
1	0	0	정지
1	0	1	가속 or 정속
1	1	0	×(정지)
1	1	1	×(감속)

으로 판단되면 후륜구동으로 구동을 하게 된다. 주행 모드 결정을 위하여 A_p , B_p , V 가 각각 신호를 받을 경우를 1, 그렇지 않을 경우를 0이라고 가정했을 때 신호에 따라 일어날 수 있는 모든 경우의 수와 그에 따른 차량의 상태를 table 2에 나타내었다.

여기서 차량이 주행 중($V=1$)에 액셀 페달이 입력으로 들어왔을 때($A_p=1$) 구동력 분배를 위한 주행상황을 판단할 필요가 있다. 따라서 차량의 속도와 스톱 개도량(A_p)으로부터 다음과 같은 기준값 α 를 정의하였다.

$$\alpha = \frac{\text{차량속도}}{\text{스톱개도량}} \quad (3)$$

α 값의 수치 선정을 위하여 임의의 정속주행 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 정지상태에서 80kph까지 가속 후 정속주행 하는 것으로 하였다. 다음 Fig. 3은 시뮬레이션 결과로써 α 값, 차량속도, 스톱 개도량을 보여준다.

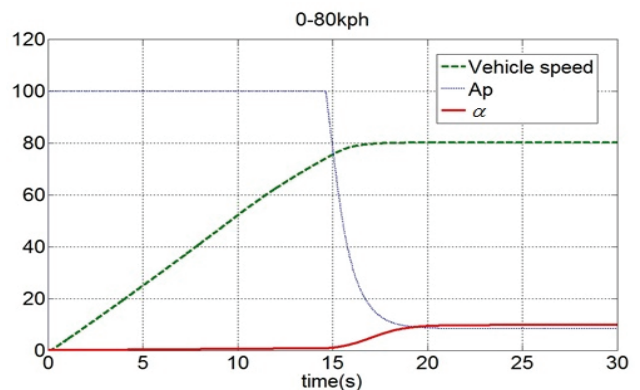


Fig. 3 80kph 가속 시뮬레이션 결과

이밖에도 60kph, 30kph 조건으로 동일한 실험 결과 각각 7, 5의 α 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 2륜구동과 4륜구동의 조건을 판별하기 위하여 적절한 α 값을 선정하고, 잦은 구동 변동을 방지하기 위하여 구동이 전환되는 조건에 시간지연요소를 추가하여 스톱 개도량에 따른 즉각적인 구동변환을 방지하도록 하였다. Fig. 4는 지금까지 기술한 내용을 기반으로 구성된 개발된 알고리즘의 플로우 차트를 보여준다. 차량은 앞서 설명한 α 값을 이용하여 정지/가속/정속/감속 중 하나의 주행모드를 결정하고, 결정된 주행 모드를 이용하여 Fig. 5와 같이 4륜구동으로 주행할지 2륜구동으로 주행할지 결정하게 된다.

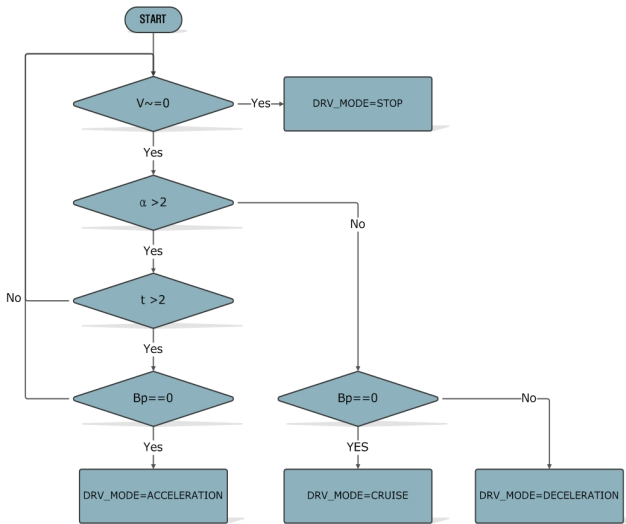


Fig. 4 주행모드 판단 제어로직

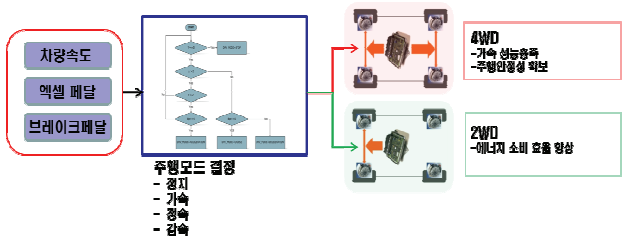


Fig. 5 주행모드에 따른 전 후륜 구동력 분배 알고리즘 개념도

2.4 Motor 모델

모터는 속도, 토크 간 효율 맵을 이용하여 모델링되었다. 모터의 속도, 요구토크, 회생제동 토크가 입력되면 효율 맵을 거쳐 모터의 효율이 결정되고 실질적인 모터 토크로 출력된다. 모터는 구동모드와 제동모드로 나누어지며 주행 모드에 따라 충·방전에 연속적으로 이루어지게 되며 회생제동 제어로직이 적용되었다⁵⁾.

3. 시뮬레이션 결과

개발된 차량 시뮬레이터의 시뮬레이션 정확도 분석을 위해 시작차량의 주행성능 분석 실험 결과와 비교시뮬레이션을 수행해 보았다. 시뮬레이션 수행결과는 Table 3에 나타나 있다.

이렇게 검증된 시뮬레이션 환경을 이용하여, 전 후륜 토크분배 알고리즘 유무에 따라 주행 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째 실험으로는 정지상태에서 80kph까지 가속 후 1000초 동안 정속 주행하여 SOC 변화량을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

Table 3 시뮬레이터 검증 시뮬레이션 결과

시험 조건	실차 실험	시뮬레이션	정확도
가속 성능 (0-80km/h)	19.7(sec)	19.3(sec)	97.97%
최고 속도 (km/h)	104.2	105.6	98.66%
제동 거리 (80-0km/h)	39.2m	40.3m	97.2%
1충전 주행거리(km)	115.3km	120.4km	95.68%

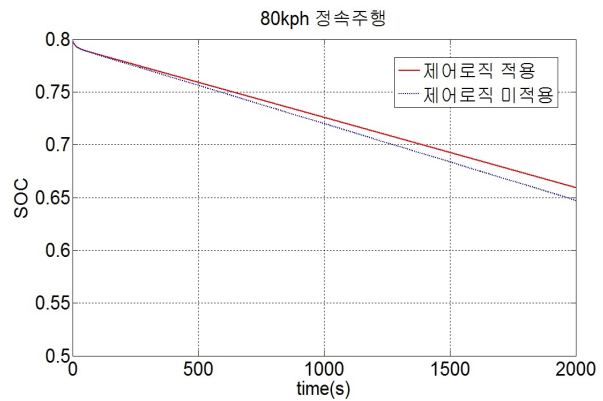


Fig. 6 80kph 정속주행 SOC 비교

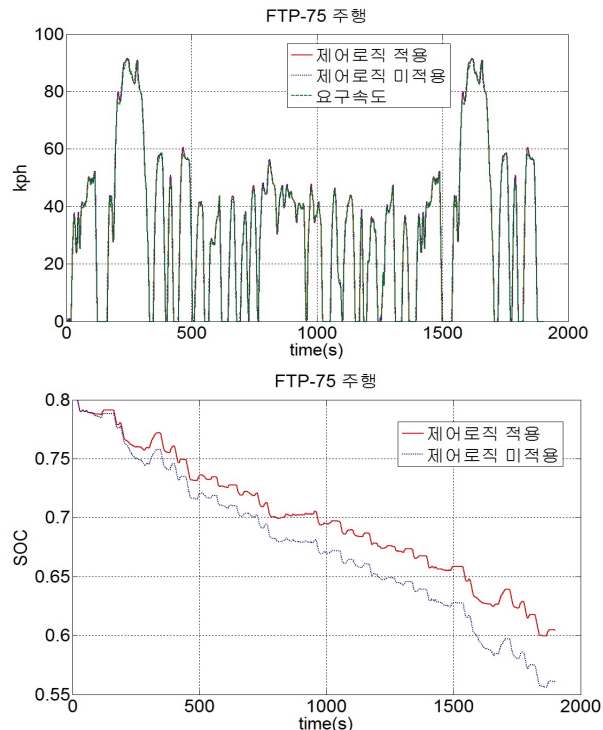


Fig. 7 FTP-75 주행 사이클 및 SOC 비교

정속주행 시뮬레이션 결과 구동력 분배 제어로직이 적용된 경우가 SOC 변화량이 적은 것을 확인할

수 있었다.

두 번째 실험으로 FTP-75 주행모드로 1900초간 주행하여 SOC 변화량의 차이를 비교하여 Fig.7에 나타내었다. 시뮬레이션 결과 상대적으로 저속인 경우에서 SOC 차이는 미비하지만 약 200초 부근과 1600초 부근에서 고속 정속 주행시 SOC 변화량의 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 반면 요구 속도 추종 성능에서는 성능 저하가 없음을 확인 할 수 있다.

이와 같이 차량의 추가적인 경량화나 각종 전장 부품의 효율향상을 위한 연구와 더불어, 운전자의 운전 의지를 판단하고 그에 따른 구동력을 적절히 분배하는 것으로도 차량의 효율이 향상되는 결과를 보임을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 4륜구동 인휠 전기자동차의 주행 효율 향상을 위하여 MATLAB/Simulink를 사용하여 성능 시뮬레이터를 구축하였다. 구축된 시뮬레이터는 연구대상 차량의 주요 제원과 주요 부품의 부품별 특성 맵을 사용하여 모델링 되었으며, 전 후륜 구동력 분배 알고리즘을 개발하여 적용한 뒤 시뮬레이션을 수행하였다.

1) 구동력 분배 알고리즘은 주행 시 상대적으로 큰 토크가 필요하지 않은 구간에서는 2륜으로 구동하여 주행 효율을 향상시키고, 충분한 구동력이 필요한 구간에서는 4륜으로 구동함으로써 성능을 충족시킨다.

2) 80kph 정속주행과 FTP-75 주행 시뮬레이션 결과 운전자모델에서 입력된 요구 속도를 잘 충족하면서도 SOC 변화량에서 차이를 발생시킴에 따라 구동력 분배 알고리즘이 적용된 경우가 주행효율이 우수함을 검증하였다.

3) 추후 연구에서는 α 값과 시간지연요소 등의 변수들을 조금 더 세밀하게 수정하여 주행 효율을 높이고, 구동력이 변환되는 과정이 기존 스위칭 방식에서 선형입력 방식으로 변경하여 주행 이질감 개선을 위한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 “지식경제 기술혁신 사업”의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(과제번호:10040220)

References

- 1) Shin-ichiro Sakai, Hideo Sado, Yoichi Hori, “Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors”, IEEE/ASME, VOL.4, No.1, pp.9-16, 1999.
- 2) Kenta Maeda, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, “For-wheel Driving-force Distribution Method for Instantaneous or Split Slippery Roads for Electric Vehicle with In-wheel Motors”, The 12th IEEE, VOL.54, No.1, pp.103-113, 2013.
- 3) D. H. Yang, J. H. Park, S. H. Hwang, “Development of Regenerative Braking Control Algorithm for In-wheel Motor Type Fuel Cell Electric Vehicles Considering Vehicle Stability”, Transactions of The Korea Fluid Power Systems Society, Vol.7, No.2, pp.7-12, 2010.
- 4) J. H. Park, J. H. Choi, H. W. Song, S. H. Hwang, “A Study of Driving Stability Performance for 2-Wheel Independently Driven Vehicle Using Electric Coner Module”, KSME, Vol.37, No.7, pp.937-943, 2013.
- 5) J. Y. Lee, S. W. Suh, W. H. Shon, C. J. Kim and C. S. Han, “System Modeling and Simulation for an In-wheel Drive Type 6×6 Vehicle”, Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 2, pp.1-11, 2011.
- 6) W. G. Kim, K. S. Yi and J. S. Lee, “Drive Control Algorithm for an Independent 8 In-Wheel Motor Drive Vehicle”, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.25, No.6, pp.1573- 1581, 2011.
- 7) J. Kim, C. Park, S. Hwang, Y. Hori and H. Kim, “Control Algorithm for an Independent Motor-Drive Vehicle,” IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, Vol. 59, No. 7, pp.3213-3222, 2010.
- 8) X. Peng, H. Zhe, G. Guifang, X. Gang, C. Binggang, and L. Zengliang, “Driving and control of torque for direct-wheel-driven electric vehicle with motors in serial,” Expert Systems with Applications, Vol. 38, pp. 80-86, 2011.
- 9) J. Wang, Q. Wang, L. Jin, and C. Song,

- "Independent wheel torque control of 4WD electric vehicle for differential drive assisted steering," *Mechatronics*, Vol. 21, pp. 63-76, 2011.
- 10) J. Lee, S. Suh, W. Whon, C. Kim, and C. Han, "System Modeling and Simulation for an In-wheel Drive Type 6×6 Vehicle," *Transactions of KSAE*, Vol. 19, No. 2, pp. 1-11, 2011.
- 11) H. Fujimoto, T. Saito, A. Tsumasaka, and T. Noguchi, "Motion Control and Road Condition Estimation of Electric Vehicles with Two In-wheel Motors", *IEEE Int. Conference on Control Applications*, pp. 1266-1271, 2004.