

각가속도 변화에 의해 탐지된 슬립에 기반한 주행로봇의 견인력 제어

Traction Control of Mobile Robot Based on Slippage Detection by Angular Acceleration Change

최 현 도*, 우 춘 규, 강 현 석, 김 수 현, 곽 윤 근

(Hyun Do Choi, Chun Kyu Woo, Hyun Suk Kang, Soohyun Kim, and Yoon Keun Kwak)

Abstract : The common requirements of rough terrain mobile robots are long-term operation and high mobility in rough terrain to perform difficult tasks. In rough terrain, excessive wheel slip could cause an increase in the amount of dissipated energy at the contact point between the wheel and ground or, even more seriously, the robot could lose all mobility and become trapped. This paper proposes a traction control algorithm that can be independently implemented to each wheel without requiring extra sensors and devices compared with standard velocity control methods. The proposed traction algorithm is analogous to the stick-slip friction mechanism. The algorithm estimates the slippage of wheels by angular acceleration change, and controls the increase or decrease state of torque applied to wheels. Simulations are performed to validate the algorithm. The proposed traction control algorithm yielded a 65.4% reduction of total slip distance and 70.6% reduction of power consumption compared with the standard velocity control method.

Keywords : angular acceleration change, mobile robot, slippage, stair climb, traction control

I. 서론

주행로봇은 공장 내부의 무인 이동 시스템, 건물 내부의 감시(building security) 및 정찰(observation), 화재 경보(fire alarming), 적지 정찰(military reconnaissance), 가사 보조(warehousing), 장애인 보조(mobility for the disabled) 등의 다양한 분야에서 널리 이용되고 있다. 이러한 응용 분야에서, 주행로봇은 주어진 임무를 수행하기 위해 구릉 지역, 험지 지역을 효율적으로 극복하고 통과하는 주행성(mobility)을 갖추어야 한다.

주행성은 로봇이 가지는 물리적인 특성과 지형의 특성에 강하게 영향을 받는다[1,2]. 예를 들어, 편평하고 딱딱한 지형에서 높은 주행성을 가지는 로봇도 연약하고 미끄러운 모래나 복잡한 지형에서는 슬립이 발생하여 주행성이 떨어질 수 있다. 바퀴의 슬립(slip)은 바퀴와 지면 사이의 접촉점에서 소산되는 에너지의 증가를 가져오며, 좀더 심각한 경우에는 로봇이 주행성을 잃고 특정 지형에 갇히게 되는 상황이 발생하게 된다.

이러한 문제를 해결할 수 있는 방법 중 하나는 견인력 제어(traction control)다. 지면이 받을 수 있는 최대 견인력을 제한하거나 슬립을 직접적으로 측정하여 슬립에 따라 가해진 토크를 변화시키는 것은 주행성의 향상을 가져올 수 있다. 주행성의 향상은 주행로봇의 임무를 수행할 수 없는 상황이 발생하는 것을 줄일 수 있으며 에너지 효율도 향상시키게 된다. 견인력 제어 알고리즘의 개발은 로봇의 물리적 특성뿐만 아니라 로봇과 지형의 상호 작용이 반드시 고려되어야 하며,

주행로봇이 실시간으로 수행하고 있는 연산에 부하를 주지 않을 정도로 단순하고 효율적이어야 한다.

견인력 제어에 대한 연구는 현재까지 많은 분야에서 활발하게 진행 중이다. 초기에는 차량의 에너지 효율과 주행성을 향상시키기 위해 실내 또는 포장도로와 같은 평평한 지형 위에서 견인력 제어가 수행되었다[3-4]. 그러나, 험지에서 자유로운 주행을 위해 개발된 독창적이고 복잡한 메커니즘을 가진 주행로봇이 구름조건을 유지하려면 각각의 바퀴에 요구되는 속도는 달라진다. 이 방법을 험지를 극복하기 위한 주행로봇에 적용하기 위해서는 각각의 로봇에 적합한 기구학(kinematics)과 동역학(dynamics)이 고려되어야 한다.

이러한 측면에서, Yoshida와 Hamano는 슬립 기반의 견인력 제어(slip-based traction control) 방법을 개발하는데 주행로봇의 기구학과 동역학을 고려하였다[5]. 이 방법을 새롭게 개발된 로봇에 적용하기 위해서는 실시간 동역학과 기구학의 계산과 더불어 이에 대한 해석이 필수적으로 요구된다. 자이로스코프(gyroscope)와 기울기 센서(inclinometer)에 의한 측정이 경제적이고 간단하다라도, 연속적인 기구학과 동역학의 계산은 주어진 임무를 수행하기 위해 많은 작업을 수행해야 하는 주제어기에 부하를 가져다 줄 수 밖에 없다. 특히, 사용자와의 인터페이스나 지형을 인식하고 자신의 위치를 추정하는 작업을 동시에 수행하고 있을 경우, 제어기에 가해지는 연산량의 부하는 로봇의 효율적인 운용을 어렵게 만들 수도 있다.

바퀴의 슬립을 최소화하기 위한 다른 접근 방법은 지형정보를 이용하여 각각의 바퀴의 토크를 최적화 하는 토크 기반의 견인력 제어(torque-based traction control)이다[6-8]. 이 방법의 중요한 요소는 바퀴-지면 접촉각 추정에 있다. 또 다른 연구로 주행로봇의 자세 안정성(stability)과 견인력(traction)을 향상시키기 위한 능동형 관절 현가장치(actively articulated

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 6. 18., 채택확정 : 2008. 10. 6.

최현도, 우춘규, 강현석, 김수현, 곽윤근 : KAIST 기계공학과
(chluseh@kaist.ac.kr/zedai@kaist.ac.kr/kangpoh@kaist.ac.kr/soohyun@kaist.ac.kr/ykkwak@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 2단계 두뇌한국(BK)21사업에 의하여 지원되었음.

suspensions)의 제어 방법이 개발되었다[9]. 이러한 방법은 지형의 윤곽이 천천히 변화하고 로봇이 정지하고 있을 경우에 잘못된 접촉각이 추정된다는 단점이 있다. 또한, 잘못 예측된 바퀴-지형 접촉각은 부적절한 모터 토크를 유도하여 바퀴의 슬립을 가중시키게 되고, 슬립은 다시 잘못된 접촉각 추정을 야기시키게 된다는 단점도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 직접적인 바퀴-지형 접촉각의 측정에 대한 연구도 수행되었다[10].

앞서 살펴본 견인력 제어와 관련된 연구는 크게 슬립 기반의 연구와 토크 최적화기반의 연구로 대별될 수 있다. 두 접근 방법 모두에 요구되는 공통적인 가정은 실시간으로 로봇의 기구학과 동역학 혹은 정역학이 해석되어야 한다는 점이다. 이는 견인력 제어를 주행로봇에 적용하기 위해서는 부과적인 해석 과정과 센서들이 필요하다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 기존의 속도제어 방법과 비교하였을 때 부과적으로 요구되는 센서와 장치 없이 각각의 바퀴에 독립적으로 적용 가능한 견인력 제어 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 각가속도를 기반으로 바퀴의 슬립을 추정하여 토크를 선형적으로 증가시키거나 감소시킨다. 기존의 견인력 제어 방법에 비해 실시간 기구학과 동역학의 계산이 불필요하며 기구학과 동역학의 계산과 해석은 제어기 설계 단계에서만 요구된다는 장점을 가진다. 이러한 특성으로 인해 제어기의 연산부하는 감소하게 되어, 주행로봇은 힘을 극복하는 동시에 요구되는 더 다른 많은 작업을 수행할 수 있다.

II. 시험주행로봇

본 연구에 사용된 차륜형 주행로봇은 ROBHAZ-6WHEEL이며, 지형에 대한 적응성을 향상시키기 위해 주행로봇의 몸체와 각각의 바퀴 사이를 연결하는 4절 링크기구(4-bar linkage mechanism)를 가지고 있다[11]. ROBHAZ-6WHEEL은 크게 구동 바퀴 조립부와 수동형 링크 메커니즘과 로봇 본체로 나누어진다. 좌우 대칭적인 구조를 가진 ROBHAZ-6WHEEL은 외부 환경에 따라 독립적으로 링크 메커니즘의 자세가 변경되는 피동 적응형(passively adaptable) 특성을 지니고 있으며, 주행로봇의 전복을 방지하기 위해 4절 링크 메커

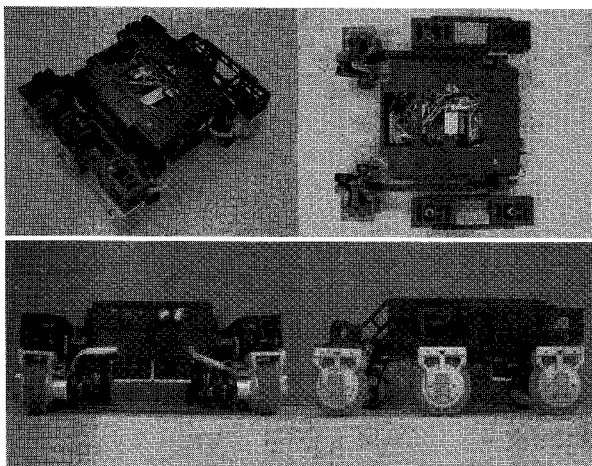


그림 1. 시험주행로봇 ROBHAZ-6WHEEL.

Fig. 1. Test bed ROBHAZ-6WHEEL.

니즘의 과도한 운동 범위를 제한하는 제한된 회전조인트(Limited revolution joint) 기계요소가 장착되어 있다. 본체의 전기적 시스템은 싱글 보드 컴퓨터(single board computer: SBC)와 캔 모듈(controller area network module), 무선 랜(wireless LAN), 모터 제어기(motor controller), 배터리(battery)로 구성되어 있다.

그림 1은 제작된 ROBHAZ-6WHEEL을 보여준다. 50 Watt Maxon EC flat motor와 500 pulse USDigital optical encoders, 80:1 HarmonicDrive가 바퀴 안쪽에 설계 및 조립되었다. 일체형으로 설계된 휠인모터(wheel-in-motor)은 바퀴 안쪽에 구동에 필요한 부품들이 모두 일체화되어 있기 때문에, 공간의 이용 효율이 증가하며, 주행 로봇이 운동시 장애물과 로봇과의 간섭이 줄어들게 된다.

III. 각가속도 변화를 이용한 견인력 제어

1. 각가속도 변화에 의한 슬립 탐지

마찰 계수 곡선은 크게 두 영역으로 나누어 볼 수 있다. 슬립의 증가에 따라 지면에서 받는 마찰 계수가 증가하는 영역인 접착 영역(adhesion region)과 슬립이 증가하더라도 마찰 계수의 변화가 없거나 감소하는 영역인 슬립 영역(slip region)이다.

접착 영역에서는 바퀴에 가해지는 토크를 선형적으로 증가시키면 가해진 토크와 견인력이 평형 상태를 유지하지만, 슬립 영역에서는 토크의 증가에 따라 견인력의 증가가 이루어지지 못하기 때문에 토크가 가해진 방향으로 바퀴는 가속되게 된다. 가속이 시작되는 시점은 가해진 토크가 최대 견인력에 의한 토크가 보다 커지는 시점이다. 이러한 현상을 이용하여 각가속도의 변화를 측정하여 바퀴의 슬립을 추정할 수 있다. 반대로 슬립이 일어나고 있는 상황에서 각가속도가 큰 음(negative)의 값을 가진다면 가해진 토크에 비해 견인력이 증가하였다는 것을 의미하므로 바퀴는 접착 영역에 있다는 것을 의미한다.

2. 제안된 견인력 제어 알고리즘

제안된 알고리즘의 주요한 개념은 바퀴의 슬립과 접착을 각가속도의 변화로 추정하여 토크의 선형적인 증가와 감소를 반복한다는 것이다.

가해진 토크가 최대 정지 마찰력에 의해 생성될 수 있는 토크보다 크다는 것은 바퀴의 급격한 가속 정보에 의해 판단될 수 있으며, 특정한 각가속도를 선정한다. 이 특정값 이상의 각가속도가 측정되면 바퀴의 토크는 선형적인 증가를 멈추고 토크 증감상태를 바꾸게 된다. 이제 토크는 선형적으로 감소하기 시작하며, 이 상태는 특정값 이하의 각가속도가 측정될 때까지 계속되고 다시 토크는 선형적으로 증가한다. 음의 각가속도는 바퀴에 가해진 토크가 운동 마찰력에 의해 생성될 수 있는 토크보다 작아졌음을 나타낸다. 그러므로 바퀴의 가해진 토크에 의해 생성되는 견인력은 최대 정지 마찰력과 운동 마찰력 사이를 진동 수렴하게 되고, 바퀴에 가해진 토크는 선형적인 증가와 감소를 반복하게 된다. 그림 2는 이러한 현상을 잘 보여준다.

그러나, 각가속도는 바퀴의 슬립 뿐만 아니라, 슬립이 완벽하게 없는 경우를 고려하더라도 기구학적 변화에도 영향을 받게 된다. 복잡하고 독창적인 구조의 로봇은 힘을 극복할

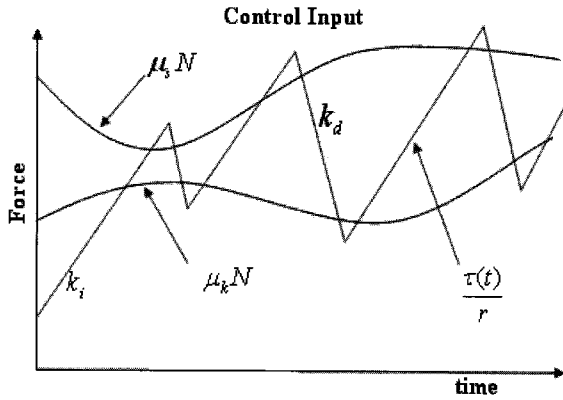


그림 2. 제안된 견인력 제어 알고리즘.
Fig. 2. Proposed traction control algorithm.

때 기구학적 불일치성(kinematic incompatibility)을 가지게 되며, 지면에서 미끄러지지 않을 조건을 유지하기 위해서 각각의 바퀴는 가속될 수 있다. 또한, 기동력을 극대화하여 운용되어야 하는 주행로봇은 매우 빠르게 가속되고 감속된다. 빠른 운동을 유지하기 위해 명령 속도는 높고 바퀴에 가해질 수 있는 최대 견인력은 최대 정지 마찰력과 수직항력의 곱으로 제한되기 때문에, 바퀴는 미끄러질 수 밖에 없다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 기구학적 변화에 의해 발생하는 각가속도를 미리 측정하고, 토크 상태의 변화에 기준이 되는 특정 각가속도 값을 기구학적 불일치에 의해 발생할 수 있는 값보다 더 높은 값으로 선택한다. 이러한 방법으로 인해 제안된 알고리즘의 토크 상태는 기구학적 불일치성에 둔감하도록 설계되었다.

각속도의 빠른 변화는 바퀴에 가해진 토크와 최대 정지 마찰력에 의해 생성되는 토크의 대소 관계를 나타내 준다. 견인력 제어 알고리즘의 제어 변수들을 결정하기 위하여 단일 바퀴의 동역학 해석을 수행하였다. 자연적인 야외 환경은 딱딱한 지형으로 단순화되기에는 많은 한계가 있으나, 등가적인 마찰력과 수직항력으로 표현할 수 있다. 더욱이, 제안된 알고리즘은 마찰계수와 수직항력의 정확한 추정이 불필요하며 그 변화에 매우 강한 특성을 지닌다. 그림 3은 주행 로봇의 단일 바퀴에 작용하는 힘을 나타낸다. P_x 와 P_y 는 외부적인 힘이고, N 은 수직항력, T 는 견인력, τ 는 바퀴에 가해진 토

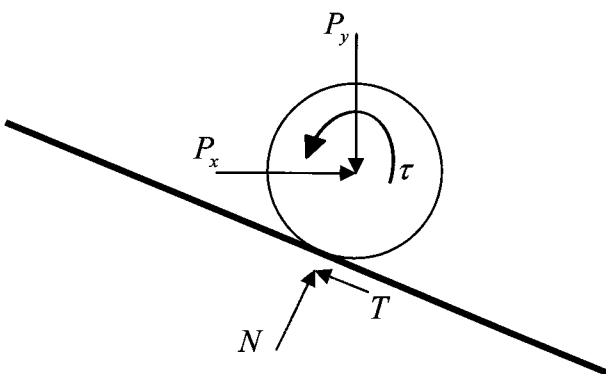


그림 3. 단일 바퀴에 작용하는 힘.
Fig. 3. Force acting on a single wheel.

크, $\dot{\theta}$ 는 바퀴의 각속도를 의미한다. 단일 바퀴에 대한 동역학 식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$J\ddot{\theta} = \tau - B\dot{\theta} - rT, T < \mu_s N \tag{1}$$

여기서, J 는 바퀴 질량관성모멘트(moment of inertia), B 는 바퀴모듈 내부적인 감쇠계수(damping coefficient), r 은 바퀴 반지름, μ_s 는 최대 정지 마찰계수이다.

$\tau < B\dot{\theta} + r\mu_s N$ 를 만족할 때, $rT = \tau - B\dot{\theta}$ 에서 마찰 견인력이 계산된다. 이와 같은 조건에서 바퀴에 가해진 토크는 최대 정지 마찰력을 극복할 만큼 크지 않으므로, 바퀴는 급격하게 가속되지 않는다. 토크가 선형적으로 증가하고 $\tau = k_d \dot{\theta}$ 라고 두면, 식 (1)은 아래와 같이 표현된다.

$$J\ddot{\theta} = k_d \dot{\theta} - B\dot{\theta} - rT \tag{2}$$

바퀴에 가해진 토크가 최대 정지 마찰력과 균형을 이루는 시간 t_1 이 존재하게 된다.

$$k_d t_1 = B\dot{\theta}_1 + r\mu_s N \tag{3}$$

t_1 를 결정하는 식은 식 (3)과 같이 $T = \mu_k N$ 가 된다. 이때 μ_k 는 운동 마찰계수이다. 여기서 $t' = t - t_1$ 라고 정의하면, θ 는 t' 의 함수가 된다. 따라서, 식 (1)에 이 관계를 대입하게 되면, 식 (4)를 얻게 된다.

$$J\ddot{\theta}(t') + B\dot{\theta}(t') = k_d t' + B\dot{\theta}_1 + r(\mu_s - \mu_k)N \tag{4}$$

식 (4)은 1계 선형 미분방정식이다. 환경의 변화와 비교해 볼 때 토크 상태의 변화는 미소한 시간 간격에서 빠르게 반복되기 때문에, 일정한 수직항력의 가정은 가능하다. 식 (4)의 양변에 적분인자(integrating factor)를 곱하면, 미분방정식의 일반해(general solution)를 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\theta}(t') = \frac{k_d}{B} t' + \dot{\theta}_1 e^{-\frac{B}{J}t'} + \frac{1}{B}(r(\mu_s - \mu_k)N + B\dot{\theta}_1 - \frac{k_d J}{B})(1 - e^{-\frac{B}{J}t'}) \tag{5}$$

식 (5)를 t' 에 대해서 양변을 미분하면, 바퀴의 각속도는 식 (6)에서와 같이 얻어진다.

$$\dot{\theta}(t') = \frac{k_d}{B} + \frac{1}{J}(r(\mu_s - \mu_k)N - \frac{k_d J}{B})e^{-\frac{B}{J}t'} \tag{6}$$

식 (6)은 제안된 제어기의 변수를 선정하는데 중요한 지침을 제공한다. 본 연구에서는 허용 가능한 최대 각가속도를 α_{max} 로 정의하였으며, α_{max} 는 최대 정지 마찰력에 의해 유도된 토크보다 바퀴에 가해진 토크가 크다는 것을 나타낸다. 그러므로 α_{max} 이상의 값이 측정되었을 경우 바퀴의 토크는 슬립을 피하기 위해 감소하게 된다.

본 연구에서는 제안된 알고리즘의 제어 변수를 구하기 위해 마찰계수가 시간에 대해 변화가 무시할 만큼 작다고 가정하였다. 최대 정지 마찰계수와 운동 마찰계수가 수학적 유도 과정에 필요하였으나, 이 정보가 실질적인 제어 알고리즘 구현에 반드시 필요한 것은 아니다. 제안된 접근 방법의 충분

조건 중 하나는 바퀴의 슬립을 감지하기 위해 토크의 증가에 따라 바퀴가 미끄러져야 한다는 점이다. 접촉 영역에서 견인력은 토크에 증가에 따라 증가하는 반면, 슬립 영역에서는 바퀴가 가속되고 슬립이 증가함에 따라 견인력의 변화는 다소 둔감하게 된다. 최대 마찰력과 운동 마찰력의 추정 보다 중요한 것은 마찰계수의 변화 보다 바퀴에 가해진 토크에 가속도의 변화를 민감하도록 설계하는 것이다.

그러므로, 제안된 알고리즘은 마찰 계수의 변화에 강인하도록 설계되었다. 이러한 강인성(robustness)은 k_t 와 k_d 의 절대 값을 크게 선정함으로써 구현 가능하다. 그러나, 이러한 환경에서 바퀴는 매우 빠르게 가속되고 감속되기 때문에, 바퀴의 각속도를 측정하는 엔코더의 분해능(resolution)은 k_t 와 k_d 의 증가에 따라 향상되어야 한다.

제안된 제어기의 변수를 결정하는 첫 번째 단계로, 주행 로봇의 기구학적 불일치성이 바퀴의 각가속도에 영향을 미친다고 가정하였다. 주행로봇이 험지를 극복하는 과정을 시뮬레이션하여, 기구학적 불일치성에 의해 영향을 받는 바퀴의 각가속도 크기를 측정하였다. 각가속도를 유발시키는 두 개의 원인을 구별하기 위해, 식 (7)이 만족되어야 한다.

$$\alpha_{\max} > \max_j \{ \alpha'_j(t) \} + \varepsilon, 0 < t < t_f \quad (7)$$

여기서 $\alpha'_j(t)$ 는 로봇이 험지를 진행하는 동안 기구학적 불일치성에 의해 바퀴 j 에서 발생하는 각가속도를 나타낸다. 그때 식 (8)에서와 같이, α_{\max} 는 t_f 이라는 시간 안에 토크의 상태-증가(increasing) 혹은 감소(decreasing)를 바꿀 수 있게 하는 최소의 각가속도로 선택된다.

$$\alpha_{\max} = \min_j \{ \theta'_j(k_t, t_r, N_j, \Delta\mu_j) \} \quad (8)$$

$\Delta\mu_j$ 는 바퀴 j 에 발생하는 최대 정지 마찰력과 운동 마찰력 사이의 차이이며, $\Delta\mu$ 는 $\mu_s - \mu_k$ 이다. t_r 은 바퀴가 최대 정지 마찰력을 지나 토크의 상태가 바뀔 때까지 걸리는 시간으로 알고리즘의 반응속도를 나타내는 지표이며, 주행로봇의 운동속도와 주변 환경의 거칠기를 고려하여 선택되어야 한다(본 연구의 경우: 10 ms). 식 (8)에서 α_{\max} 는 t_r 과 k_t 가 증가함에 따라 증가하게 된다. 최종적으로 k_t 는 식 (7)과 (8)을 고려하여 결정되게 된다.

이제 토크의 상태는 바뀌게 되었으며, 가해진 토크가 운동 마찰력에 의해 발생된 토크보다 작아질 때까지 토크는 선형적으로 감소하게 된다. 토크의 선형적인 증가와 같은 방법으로, 특정한 음의 각가속도가 감지될 때까지 토크는 감소를 계속하게 된다. $\tau = \tau_{\max} - k_d t$ 라고 두면, 식 (1)은 식 (9)와 같이 다시 쓰여진다.

$$J\ddot{\theta} = \tau - B\dot{\theta} - r\mu_k N \quad (9)$$

그리고 토크가 운동마찰력과 균형을 이루는 시간 t_2 가 존재하게 되고, 그때 식 (10)의 관계를 만족하게 된다.

$$\tau_2 = B\dot{\theta}_2 + r\mu_k N \quad (10)$$

여기서 $\tau_2 = \tau(t_2)$, $\dot{\theta}_2 = \dot{\theta}(t_2)$ 그리고 $t' = t - t_2$ 이다.

시간 t_2 이후, 단일 바퀴에 대한 운동 방정식은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$J\ddot{\theta}(t') + B\dot{\theta}(t') = -k_d t' + B\dot{\theta}_2 \quad (11)$$

식 (11)에 대한 일반해는 수직항력이 일정하다는 가정과 함께 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\dot{\theta}(t') = -\frac{k_d}{B} t' + \dot{\theta}_2 e^{-\frac{B}{J} t'} + \frac{1}{B} (B\dot{\theta}_2 - \frac{k_d J}{B}) (1 - e^{-\frac{B}{J} t'}) \quad (12)$$

식 (12)를 t' 에 대해 미분하게 되면 각가속도는 식(13)과 같이 얻어진다.

$$\ddot{\theta}(t') = -\frac{k_d}{B} + \frac{k_d}{B} e^{-\frac{B}{J} t'} \quad (13)$$

여기서 α_{\min} 을 최소 허용 각가속도(minimum permissible angular acceleration)로 정의한다. 이 변수는 가해진 토크가 운동 마찰력에 의해 생성된 토크보다 작다는 것을 나타낸다. α_{\min} 이 측정되었을 때, 토크 상태는 변화하게 되고 바퀴에 가해지는 토크는 증가하게 될 것이다. α_{\min} 과 k_d 는 전술된 바퀴의 가속도 해석 부분과 동일한 방법으로 결정 된다.

본 장에서 제안한 제어변수 결정방법은 안정적인 알고리즘의 거동을 토대로 도출된 것으로 정확한 결과를 위해서는 추가적인 시뮬레이션과 실험적 변수 조정과정이 필요하다. 제안된 가속도 기반의 독립적인 견인력 제어는 각각의 바퀴의 가속도를 추정하여, 가해진 토크의 선형적인 증가와 선형적인 감소를 변화시키는 방법이다. 주변 환경과 주행로봇이 가지는 기구학적 불일치성에 강인한 특성을 가지기 위해서는 k_t 와 k_d 를 크게 선정하여야 한다. 또한, 높은 k_t 와 k_d 에서 기구학적 불일치에 의해 발생하는 가속도 범위를 빠른 시간 내에 넘을 수 있기 때문에 t_r 이 줄어들어 빠른 반응의 견인력 제어를 기대 할 수 있다. 그러나, 바퀴가 매우 빠르게 가속되고 감속되기 때문에, 빠른 운동을 감지하기 위해 엔코더 분해능과 샘플링 주파수가 높아야 한다는 제약이 따르게 된다.

그림 4는 제안된 견인력 제어 알고리즘의 블록다이어그램을 나타낸다. 바퀴의 각속도를 피드백 받아 각가속도를 추정하게 되고, 특정값의 각가속도가 감지되면 적분기에 들어가게 될 값을 변화시키게 된다. 토크는 증가와 감소를 반복하게 된다. 그러나 제안된 견인력 제어가 적용될 경우, 바퀴는 지면에서 받을 수 있는 최대 마찰력에 상응하는 토크를 모터로부터 받게 된다. 이러한 현상은 주행로봇이 급격한 경사나 극복하기 어려운 환경에 있을 경우, 지면으로부터 받는 힘을

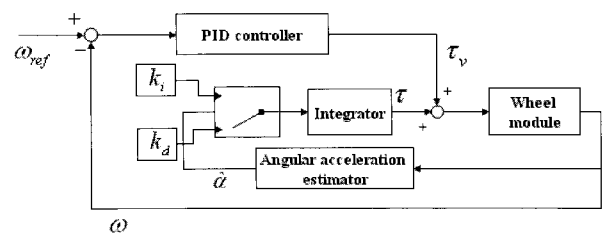


그림 4. 견인력 제어 알고리즘의 블록다이어그램.
Fig. 4. Block diagram of traction control algorithm.

극대화시켜 주행성의 향상에 도움을 주지만, 평지에서는 점차적으로 바퀴가 가속되는 문제를 야기하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 외부 루프(loop)에 PID 제어를 추가하여 바퀴 속도의 계속적인 증가나 감소를 해결하였다.

IV. 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 환경

시뮬레이션은 ADAMS™와 MATLAB® Toolbox를 이용하여 수행되었다. 동역학 시뮬레이션 변수는 실제 주행로봇에 대응하도록 최대한 실제값과 가깝게 선정되었다. 모든 기하학적 변수와 질량, 질량관성모멘트는 3-D CAD 프로그램인 ProENGINEER™에서 모델링되었다. 그러므로, 이 변수들은 배터리, SBC, 모터 구동기, 등을 포함한 시스템의 형상과 밀도로부터 매우 정확하게 계산되었다.

바퀴 모듈의 내부적인 감쇠 토크는 변수 추정 과정을 통해 각속도의 함수로 표현되었다. 접촉하는 면사이의 충격과 마찰은 식 (14)과 (15) 같이 모델링되었다.

$$N = k_c g^n + c \frac{dg}{dt} \text{ for } g \geq 0 \tag{14}$$

$$T = \mu N \tag{15}$$

여기서 k_c 는 접촉점의 탄성계수, g 는 인접하는 두 물체 사이의 형상 침투량(penetration), n 은 힘 지수(force exponent)를 나타내는 양수, c 는 접촉점에서 감쇠계수, dg/dt 는 접촉점에서 침투속도, μ 는 마찰계수를 나타낸다. 사용된 변수의 값들은 다음과 같다; $k_c=150\text{ N/mm}$, $n=2.1$, $c=20\text{ Ns/mm}$.

그림 5는 통합된 시뮬레이션 환경을 보여준다. 제안된 견인력 알고리즘은 S-function을 포함한 MATLAB® Simulink®에서 구현되고 모델링되었다. 주행로봇의 동역학(forward dynamics)은 ADAMS™에서 계산되었다.

세 바퀴가 미끄러지지 않는다는 가정(non-slip condition)을 할 때, 두 바퀴의 속도는 다른 한 바퀴의 속도의 함수가 된다. 이것은 주행 로봇이 2차원 환경을 운동하고 세 개의 바퀴가 일정 속도로 운동하도록 제어된다면 두 개의 바퀴는 반드시 미끄러진다는 것을 의미한다. 그러므로, 견인력 제어를 두 개의 바퀴에 적용함으로써 바퀴의 슬립을 완벽히 제거할 조건을 찾을 수 있다. 본 논문에서는 링크 자세 변화에 의한 바퀴 위치 변화가 작은 첫번째와 세번째 바퀴에 견인력 제어

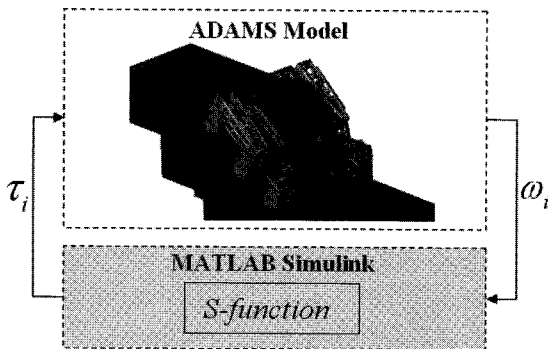


그림 5. 통합된 시뮬레이션 환경.
Fig. 5. Integrated simulation environments.

를 적용하였다.

S-function은 이산(Discrete) 시간영역에서 제어 법칙을 수행하게 된다. 제어 모델과 역학적 운동 모델과 동시적으로 해석하기 위해 ADAMS™을 플랜트(Plant)로 가져오게 된다. 해석에 사용된 플랜트의 입력과 출력은 바퀴의 토크와 각속도이다. 플랜트로 모델링된 ADAMS™ 모델은 MATLAB® Simulink®로 가져오게 되고 연결된다. 이러한 프로그램들을 이용하여 높은 정밀도로 제안된 알고리즘을 해석하고 분석하는 통합된 시뮬레이션이 수행되었다.

2. 단일 바퀴에 대한 견인력 제어 시뮬레이션

시뮬레이션은 제안된 알고리즘과 가정을 검증하기 위해 수행되었다. 여기서, 수행된 시뮬레이션은 최적의 제어변수를 산출하기 위한 것이 아니라, 기존의 속도제어 방식과 비교하고 제안된 알고리즘의 적용 가능성을 검증하기 위한 것이다.

각각의 바퀴는 견인력이 최대 정지 마찰력과 운동 마찰력 사이를 수렴하게 하기 위해 독립적으로 제어된다. 모든 바퀴에서 최대 견인력이 가해지기 때문에, 주행로봇은 지형이 받을 수 있는 최대 힘을 유지하며, 힘이나 장애물을 극복하게 된다. 이와 같은 과정에 반드시 고려되어야 하는 필요조건은 견인력이 변화하는 수직 항력과 마찰 계수에 의해 최대 마찰력 근방의 값을 유지할 수 있어야 한다는 것이다.

제안된 알고리즘이 이 조건을 만족하는지 살펴보기 위해 기초적인 시뮬레이션이 수행되었다.

접촉점에서 속도기반의 마찰 모델이 사용되었으며, 사용된 변수들은 다음과 같다. 최대 정지 마찰 계수 $\mu_s=0.7$, 운동 마찰 계수 $\mu_k=0.5$, 정적 천이 속도 $v_s=3\text{mm/s}$, 동적 천이 속도 $v_k=20\text{mm/s}$, 바퀴 반지름 $r=60\text{mm}$, 관성 모멘트 $J=0.049\text{kgm}^2$, 바퀴모듈 감쇠계수 $B=0.01\text{Nms}$. 그리고 수직항력의 변화는 $N(t)=100+50\sin(2\pi ft)\text{N}$ 으로 모델링되었으며, $f=0.2\text{Hz}$ 이다. 시뮬레이션 결과, 수직 항력의 변화가 100N이었음에도 불구하고, 실제 견인력은 그림 6에서와 같이 최대 마찰력의 변화를 잘 추종하고 있음을 볼 수 있다. 바퀴의 슬립 속도 또한 발산하지 않고 0.02m/s 이내로 수렴하는 것을 확인하였다.

부정확한 μ_s 와 μ_k 에 대한 제안된 알고리즘의 민감도(sensitivity)를 조사하기 위해 바퀴의 슬립 거리를 관찰 하였

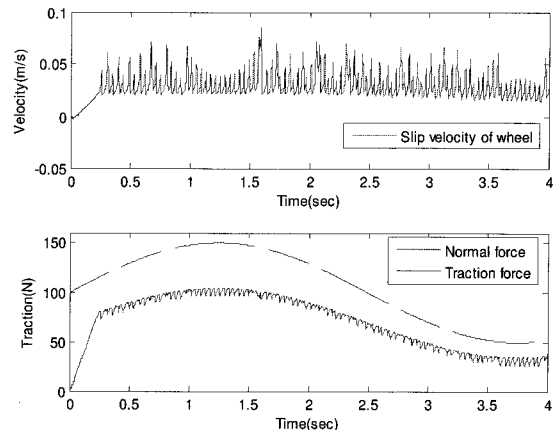


그림 6. 수직항력 변화에 따른 슬립과 견인력.
Fig. 6. Slip velocity and traction with normal force variation.

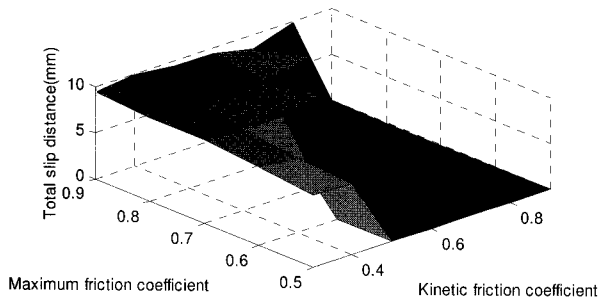


그림 7. 제안된 방법의 μ_s 와 μ_k 에 따른 민감도.
Fig. 7. Sensitivity of the proposed method to μ_s and μ_k .

고 100N의 수직항력을 가정하였다. 그림 7은 슬립 거리에 대한 마찰계수의 민감도가 낮다는 것을 의미한다. 운동 마찰계수가 최대 정지 마찰계수보다 큰 영역은 제안된 알고리즘을 적용할 수 없는 영역으로 그림 7에서 슬립 거리는 영(zero)으로 표현되어 있다. 이러한 결과는 제안된 견인력 제어 알고리즘이 수직항력과 마찰계수의 변화에 강인한 특성을 지닌다는 것을 보여준다.

3. 계단등반시물레이션

단일 바퀴에 대한 알고리즘 적용 가능성을 평가한 후, 실제 주행로봇인 ROBHAZ-6WHEEL에 알고리즘을 적용하고 실제 계단 환경에서의 성능 평가를 수행하였다. 알고리즘의 실질적인 적용에 앞서 논의되어야 할 두 가지 내용은 제어 변수의 선정 방법과 견인력 제어가 적용되어야 하는 바퀴의 선정이다.

그림 4에 나타난 외부 루프에 추가된 PID 제어기는 주행로봇의 바퀴가 점차적으로 증가하거나 감소하는 현상을 보상하여 목표하는 속도 근방에서 견인력 제어가 수행될 수 있도록 한다. 여기서, 한가지 고려해보아야 할 사항은 PID 제어기에 의한 바퀴의 응답속도이다. 결론적으로, PID 제어기에 의한 바퀴의 응답속도가 너무 빠른 경우에는 원하는 견인력 제어의 효과를 얻을 수 없으며, 너무 느린 경우에는 바퀴의 점차적인 가속과 감속의 효과를 줄일 수 없다. 바퀴의 응답이 너무 빠른 경우 발생할 수 있는 문제는 견인력 제어에 의한 토크의 응답보다 속도 자체를 보상하기 위해 발생하는 토크의 응답이 더욱 빠르기 때문에 견인력 제어를 위한 토크값은 PID 제어기 자체의 동적 거동에 묻혀 보이지 않게 된다. 본 연구에서 실험적으로 설계된 바퀴의 상승시간(rising time)은 2초이다.

토크의 증감 상태를 결정하는 특정 각가속도 값의 선정을 위해 기구학적 불일치성에 의한 각가속도 해석이 제어변수들을 결정하기 전에 반드시 선행되어야 한다.

본 논문에서 제안된 견인력 제어 알고리즘은 바퀴의 각가속도를 바퀴의 슬립에 대한 지표로 이용한다. 그러나 각가속도는 바퀴의 슬립에도 영향을 받지만 다른 요소에 의해서도 영향을 받는다. 슬립이 일어나지 않을 조건을 유지하며 복잡한 지형을 로봇이 주행할 경우, 각각의 바퀴는 상대적인 가속과 감속을 하게 된다. 지형을 극복하며 발생하는 각가속도를 바퀴의 슬립으로 오인하지 않기 위해 이에 대한 시뮬레이션이 수행되었다.

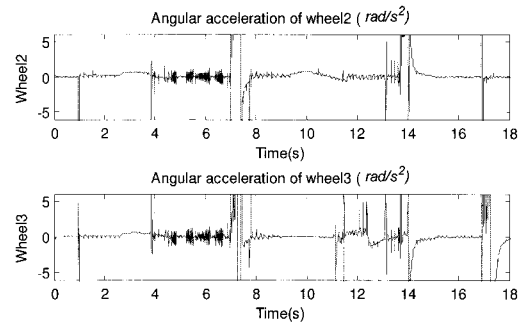


그림 8. 기구학적 불일치에 의해 발생하는 각가속도.
Fig. 8. Angular acceleration caused by kinematic incompatibility.

바퀴1은 60 mm/s의 일정한 속도로 회전하고, 바퀴2와 바퀴3은 접촉점에서 미끄러지지 않을 조건(non-slip condition)을 유지하도록 조정되었다. 그림 8은 기구학적 불일치성에 의해 나타나는 각가속도가 거의 모든 영역에서 1 rad/s² 이하라는 것을 확인할 수 있다. 1 rad/s² 이상의 각가속도가 발생하는 영역은 주행로봇의 자세가 급격하게 변화하는 영역으로 미끄러지지 않을 조건을 유지하기 위한 각각의 바퀴의 각속도의 비(ratio)가 무한대 이거나 영이 된다. 그러므로 바퀴가 필연적으로 미끄러지기 때문에, 특이점에서 가속도는 고려하지 않았다. 결과적으로, 견인력 제어 알고리즘은 각가속도가 1 rad/s² 이상이 될 때 바퀴가 미끄러지는 것으로 판단하게 된다. 그 외의 여러 변수들은 III장의 내용을 바탕으로 표 1과 같이 결정되었다.

두 번째로 견인력 제어가 적용되어야 하는 바퀴의 선정문제이다. ROBHAZ-6WHEEL이 가지는 3쌍의 바퀴 중 어느 쌍에나 견인력 제어가 적용될 수 있다. 제안된 견인력 제어 알고리즘의 주요한 특징 중 하나는 바퀴의 각가속도로부터 바퀴의 슬립과 접촉상태를 판단한다는 것이다. 과도한 각가속도가 감지되면 바퀴는 미끄러지는 것으로 판단하며, 특정값 이하의 각가속도가 감지되면 다시 바퀴는 접촉상태에 있는 것으로 판단한다. 물론, 바퀴가 지면으로부터 힘을 받게 되면 바퀴의 슬립률(slip ratio)을 영이 될 수는 없다. 중요한 점은 바퀴의 각가속도는 슬립이 전혀 일어나지 않는 상황을 고려하더라도 주행로봇이 만나는 지형의 변화와 주행로봇의 자세 변화에 의해 발생된다는 점이다. 전술할 것과 같이 제안된 견인력 제어가 효율적으로 작동을 하기 위해서는 로봇의 자세 변화에 의한 각가속도가 바퀴의 슬립에 의해 나타나는

표 1. 견인력 제어 알고리즘의 변수.

Table 1. Parameters of the traction control algorithm.

Parameters	Value
k_i	4 Nm/s
k_d	-4 Nm/s ²
α_{max}	1 rad/s ²
α_{min}	-1 rad/s ²
σ	100 rad/s ²
Sampling time of controller	10 ms
Sampling time of dynamic simulation	1 ms

각가속도에 비해 작아야 한다는 사실은 자명하다. 여기서, 본 연구에서는 어느 바퀴에 견인력 제어가 적용되는 것이 가장 효율적인가에 대한 답을 얻을 수 있었다. 로봇의 자세 변화에 의한 각가속도는 중간 바퀴 쌍에서 가장 크다. 그러므로 중간 한 쌍의 바퀴에 속도 제어를 적용하고 나머지 두 쌍의

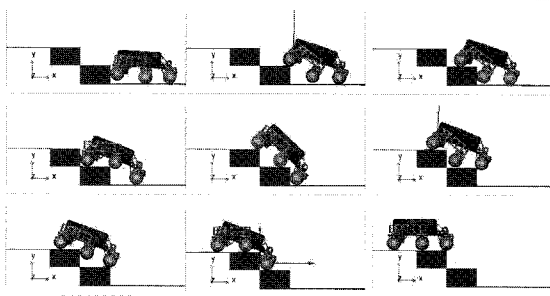
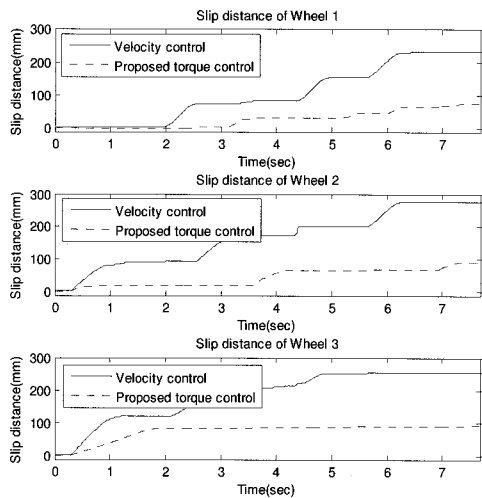
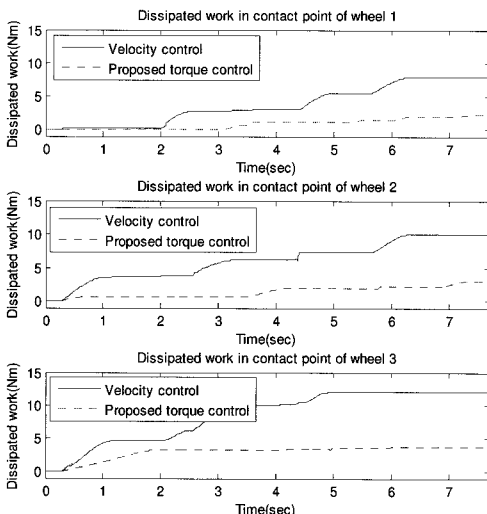


그림 9. 견인력 제어를 적용한 계단 등반 시뮬레이션.
Fig. 9. Stair climb simulation with the traction control algorithm.



(a) Slip distance.



(b) Dissipated work.

그림 10. 시뮬레이션 결과.
Fig. 10. Simulation result.

바퀴에 견인력 제어를 적용하였다.

계단환경은 주행로봇이 가장 극복하기 어려운 환경 중 하나이기 때문에, 시험환경으로 계단을 선택하였다. 그림 9은 시뮬레이션 과정을 나타내며, 주행 로봇이 운동하도록 명령된 거리는 1074mm이다. 속도제어 방법과 견인력 제어 방법 모두에서 주행로봇은 계단을 성공적으로 극복할 수 있었다. 이는 주행로봇이 가지는 광범위한 영역의 적응성에 의한 것이다. 그러나, 좀 더 나은 성능은 그림 10에서 보여진 것과 같이 견인력 제어를 적용하였을 경우에 얻어 졌다. 지면과 미끄러진 거리는 총 65.4% 감소하였으며, 소산된 에너지의량은 70.6% 감소되었다.

V. 결론

본 연구에서는 바퀴의 슬립을 감소시켜 주행로봇의 에너지 효율 높이고 주행성을 확보하기 위한 견인력 제어 기법 및 그에 대한 연구가 수행되었다. 제안된 견인력 제어 알고리즘은 다른 센서와 장치 없이 바퀴의 각속도만을 피드백(feedback)받아 구현될 수 있다. 바퀴의 각가속도를 이용하여 바퀴와 지면의 슬립을 인식하여 토크의 선형적인 증가와 감소를 반복하기 때문에, 슬립과 접착의 기준이 되는 각가속도의 선정은 제어기 설계에 가장 중요한 요소가 된다.

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 시뮬레이션은 ADAMSTM과 MATLAB®을 이용하여 수행되었으며, 이용된 ROBHAZ-6WHEEL의 모델은 ProENGINEERTM를 이용하여 실제와 동일하게 모델링되었다. 제안된 견인력 알고리즘을 적용한 주행로봇의 계단등반 시뮬레이션에서 슬립 70.6% 감소, 지면 소산에너지 65.4% 감소 등 성능 향상을 확인할 수 있었다.

다양한 실험적인 분석을 통해, 제안된 견인력 제어 방법은 딱딱한 지형에서 효율이 극대화되지만, 부서지기 쉬운 모래와 자갈과 같은 지형 환경에서는 안정성을 보장하기 힘들다는 단점을 확인하였다.

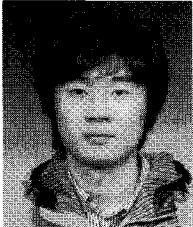
참고문헌

- [1] G Bekker, Introduction to Terrain-Vehicle Systems, University of Michigan Press, MI. 1965.
- [2] J. Wong, Theory of ground vehicle, John Wiley and Sons, 1976.
- [3] H. Lee and M. Tomizuka, "Adaptive vehicle traction force control for intelligent vehicle highway systems," *Proc. of the ASME Conference on Dynamics, Systems, and Control*, vol. 50, issue. 1, pp. 17-24, Feb. 1996.
- [4] H. Tan and Y. Chin, "Vehicle antilock braking and traction control: a theoretical study," *International Journal of Systems Science*, vol. 23, no. 3, pp. 351-365, Mar. 1992.
- [5] K. Yoshida and H. Hamano, "Motion Dynamics of a Rover with Slip-Based Traction Model," *Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 3155-3160, May. 2002.
- [6] K. Iagnemma and S. Dubowsky, "Traction Control of Wheeled Robotic Vehicles in Rough Terrain with Application to Planetary Rovers," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 10-11, pp. 1029-1040, Oct.-Nov. 2004.
- [7] K. Iagnemma, S. Kang, H. Shibly, and S. Dubowsky, "Online Terrain Parameter Estimation for Wheeled Mobile Robots With

Application to Planetary Rovers,” *IEEE Transactions on robotics and robotics*, vol. 20, no. 5, pp. 921-926, Oct. 2004.

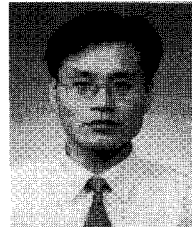
- [8] P. Lamon, A. Krebs, M. Lauria, R. Siegwart, and S. Shooter, “Wheel torque control for a rough terrain rover,” *Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics & Automation*, vol. 5, pp. 4682- 4687, April-May. 2004.
- [9] K. Iagnemma, A. Rzepniewski, and S. Dubowsky, “Control of Robotic Vehicles with Actively Articulated Suspensions in Rough Terrain,” *Autonomous Robots*, vol. 14, no. 1, pp. 5-16, Jan. 2003.

- [10] P. Lamon and R. Siegwart, “Wheel Torque Control in Rough Terrain-Modeling and Simulation,” *Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, Barcelona, pp. 867-872, April 2005.
- [11] C. K. Woo, H. D. Choi, S. Yoon, S. H. Kim, and Y. K. Kwak “Optimal design of the new wheeled mobile robot based on a kinetic analysis for the stair climbing states,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 49, no. 4, pp. 325-354, July 2007.



최 현 도

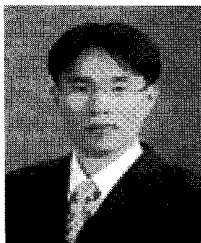
2002년 부산대학교 기계공학부 졸업.
2004년 KAIST 기계공학과 대학원 졸업
(공학석사). 2008년 동 대학원 졸업(공학박사).
관심분야는 기구설계, 주행로봇, 견인력 제어.



우 춘 규

1995년 부산대학교 기계설계공학과 졸업.
1997년 KAIST 기계공학과 졸업(공학석사).
2002년~2006년 LG전자 DA연구소. 2007년 KAIST 기계공학과 졸업
(공학박사). 2007년~현재 KAIST 기계공학과 Post-Doc 중.
관심분야 주행로봇

이동메커니즘 설계/해석, System Integration.



강 현 석

2006년 부산대학교 기계공학부 졸업.
2008년 KAIST 기계공학과 대학원 졸업(공학석사).
관심분야는 힘지 극복을 위한 지형 특성 추정.



김 수 현

1978년 서울대학교 기계공학과 졸업.
1980년 KAIST 기계공학과 졸업(공학석사).
1991년 Imperial College of Science and Technology, University of London 졸업(공학박사).
1991년~현재 KAIST 기계공학과 교수 재직중.
관심분야는 micro-actuation, nano 운동 측정과 제어를 위한 광학장치, 정찰로봇.



곽 윤 근

1971년 서울대학교 기계공학과 졸업.
1974년 University of Colorado, Boulder, USA 공학설계 및 경제평가학과 졸업
(공학석사). 1978년 University of Texas, Austin, USA 기계공학과 졸업(공학박사).
1978년~현재 KAIST 기계공학과 교수 재직중.

관심분야는 지능로봇, 감성로봇, 정찰로봇.