

가변 휠형 무인자율차량의 접촉휠 예측 모델

임경빈* · 김선제* · 박석훈* · 윤용산† · 이상훈**
(2009년 3월 31일 접수, 2009년 6월 29일 수정, 2009년 6월 30일 심사완료)

Estimation Model of Contact Wheels for UGV with Actively Articulated Suspensions

Kyeong Bin Lim, Sun Je Kim, Sukhoon Park, Yong-San Yoon and Sang Hoon Lee

Key Words: UGV(무인자율차량), Actively Articulated Suspension(가변 휠 현가장치), Contact Wheel(접촉휠), Fuzzy Rule-based Model(퍼지 규칙기반 모델)

Abstract

Wheels of UGV can be used to get the information about the ground. However, wheels of UGV with actively articulated suspension cannot be used as the roles because the each wheel does not remain in contact with the ground. Therefore, in this study, we proposed the indexes and models to estimate the contact wheels. First, we formulated the dynamic equations about the actively articulated suspensions and wheels. Then estimation index I_{WTC} and I_{ATC} were developed from the equations, and analyzed the strengths and weaknesses of each index. As the results, we developed the fuzzy rule-based estimation model additionally derived from our observations. I_{WTC} model and I_{ATC} model could eliminate the noise of about 60% in comparison with the result without the estimation model. Fuzzy model also could reduce the noise of about 83%. In addition, fuzzy rule-based estimation model had high sensitivity and precision as well as robustness.

기호설명

T_w, T_a : 휠 및 암 토크
 I_w, I_a : 휠 및 암 관성모멘트
 m_w, m_a : 휠 및 암 질량
 α_w, α_a : 휠 및 암 각가속도
 β : 차량의 피치각
 θ : 암 각도
 \vec{F}_c : 각 바퀴와 지면의 접촉력
 l : 암 길이
 g : 중력가속도

\vec{r}_w : 휠모터와 바퀴 접촉점 간 벡터
 \vec{r}_a : 암의 회전 중심과 휠 접촉점 간 벡터
 \underline{k} : z-방향 단위 벡터
 $O_e O_r$: 비접촉휠을 비접촉휠로 예측한 경우
 $C_e O_r$: 비접촉휠을 접촉휠로 예측한 경우
 $O_e C_r$: 접촉휠을 비접촉휠로 예측한 경우

1. 서론

능동형 현가장치를 가진 무인자율차량은 재난 지역, 전쟁터, 외계 행성 등의 험지에서 현가장치의 능동적 구동을 통해 향상된 주행성능 갖도록 한 차량이다. 능동형 현가장치를 가진 무인자율차량을 포함한 여러 무인차량은 센서를 통해 전방의 지형을 예측하고 경로를 계획하여 이동한다. 능동형 현가장치를 가진 무인자율차량은 능

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : ysyoon@kaist.ac.kr
TEL : (042)350-3022 FAX : (042)350-3210

* 한국과학기술원 기계공학과

** 국방과학연구소 5기술 2부

동형 현가장치에 부여된 추가적인 자유도를 제어함으로써 차량의 무게중심과 자세를 임의로 조정하여 험지 내에서 주행성능을 높인다. 이 때, 차량의 바퀴는 카메라를 통해 측정할 수 없는 지역적 지형 특성, 즉 지면과의 접촉각, 재질에 대한 정보를 제공하는 중요한 수단이 된다. 이와 같은 시도는 특히 화성탐사선 *microrover*의 자율주행 및 화성지형 연구를 목적으로 한 JPL의 노력 하에 꾸준히 연구되어왔다. *Wlicox*⁽¹⁾는 바퀴로부터의 정보를 통해 바퀴 미끄럼률과 지면의 가라앉음을 예측하였고 이후 *Iagnemma* 등⁽²⁾과 *Shibly* 등⁽³⁾은 휠로부터의 정보를 통해 지면의 점착성 및 내부 마찰각을 예측하였고 *Brooks* 등^(4,5)은 바퀴에서의 진동을 통한 지형 재질 예측 등을 연구하였다.

각 바퀴는 지형특성을 계측하는 수단일 뿐 아니라 차량의 제어를 위한 모델링에 있어 기준이 되는 경계조건이기도 하다. *Iagnemma* 등⁽⁶⁾은 각 바퀴의 위치를 기준으로 한 정적 안정성을 제시하고 이를 기준으로 한 가변휠의 형상 계획을 세웠다. *Chakraborty* 등⁽⁷⁾은 각 바퀴와 지면과의 경계 조건을 토대로 하여 험지에서 미끄럼이 발생하지 않는 주행을 위한 운동방정식을 제시한 바 있다. *Lim* 등⁽⁸⁾은 각 바퀴와 지면의 경계조건을 기준으로 하여 험지 내 장애물을 극복하기 위한 가변 휠의 형상 계획을 수립하는 연구를 수행하였다.

이상의 연구들의 일부는 대상이 되는 무인자율차량의 구조적 특징에 의하여 지면과의 접촉이 보장되었기 때문에 바퀴로부터의 정보가 지형의 특징을 충분히 반영할 수 있다.⁽¹⁾ 그러나 일반적인 4륜 이상의 가변 휠형 무인자율차량은 현가장치의 자유도로 인해 차량 자세를 유지하기에 여유가 생기므로 모든 바퀴가 지면과 접할 필요 충분 조건이 발생하지 않는다. 그러므로 각 바퀴로부터의 정보로부터 지형정보를 얻기 위해서는 각 바퀴가 지면과 접하고 있는지 알아야 할 필요가 있다. 그러나 현재까지 가변 휠형 무인자율차량의 각 바퀴에 대한 접촉유무를 판단하기 위한 모델을 제시한 연구는 찾지 못했으며, 비록 *Brooks* 등,⁽⁹⁾ *Reina* 등⁽¹⁰⁾은 각 바퀴가 지면과 접한 면을 카메라로 측정함으로써 바퀴의 가라앉음(*sinkage*)을 측정할 바 있으나 이는 각 바퀴의 접촉 유무만을 판별하는 것이 목적이 아니므로 비용이 많이 들며 비효율적이다. 그러므로 본 논문에서는

추가적인 측정장비를 사용하지 않고 일반적인 무인자율차량이 제공하고 있는 데이터를 통한 간단한 접촉률 예측 모델을 제시하고자 한다.

본 논문은 아래와 같이 구성된다. 2장에서는 각 현가장치 및 현가장치와 연결된 바퀴의 동역학 모델을 통한 예측 지수와 예측 모델을 제시하고 예측 모델의 성공률을 분석해보았다. 3장에서는 2장에서 제시한 예측지수를 기반으로 한 퍼지논리 기반 예측 모델을 제시하고 이에 대한 효용성을 평가하였다. 마지막으로 4장에서는 본 논문에서 얻은 결론 및 추후 과제에 대해서 기술하였다.

2. I_{WTC} Model and I_{ATC} Model

2.1 Overview

본 장에서는 능동형 현가장치를 가진 무인자율차량의 각 바퀴에 대한 접촉상태를 예측하기 위한 두 가지의 모델 기반 예측지수 및 이를 이용한 예측모델을 제안하고자 한다. Fig. 1에서와 같은 능동형 현가장치 시스템에서 바퀴와 지면 간의 접촉에 의한 접지력과 주행 시 발생하는 견인력은 휠 토크 및 암 토크에 영향을 미치게 된다. 여기서 암이란 일반적인 능동형 현가장치를 가진 무인 자율차량에 있어 플랫폼과 휠 사이에 존재하는 링크부를 지칭한다. 이 때, 접지력과 견인력의 합이 휠 토크에 미치는 영향을 ‘휠 토크 기여도 (이하 WTC), 암 토크에 미치는 영향을 암토크 기여도(이하 ATC)로 정의하였다. 본 연구에서는 각 기여도를 정규화하여 바퀴 접촉을 예측하는 지수로 사용하였다.

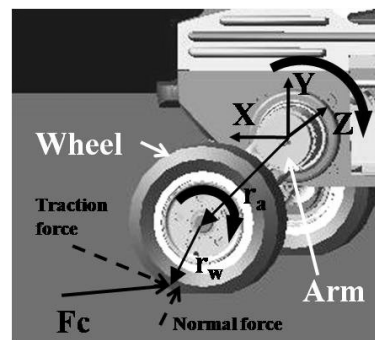


Fig. 1 Scheme of actively articulated suspension

2.2 Estimation Model of I_{WTC} and I_{ATC}

Fig. 1에서와 같은 능동형 현가장치에서 휠에 대한 동역학식 모델을 구성하면 수식 (1)과 같다.

$$I_w \cdot \alpha_w = T_w - (\vec{r}_w \times \vec{F}_c) \cdot \underline{k} \quad (1)$$

수식 (1)로부터 지면과의 접촉에 의한 힘이 휠 토크에 주는 영향인 WTC와 이를 정규화한 WTC Index (이하 I_{WTC})는 수식 (2)와 수식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$WTC \equiv |T_w - I_w \cdot \alpha_w| \quad (2)$$

$$I_{WTC} \equiv WTC / WTC_{ref} \quad (3)$$

여기서 WTC_{ref} 은 휠의 접촉 유무를 판별하는 기준이 되는 값으로 본 논문에서는 다음 절에서 설명하는 바와 같이 시뮬레이션 결과를 이용하여 적절한 값을 선정하였다. 본 논문에서는 위의 예측 지수를 이용한 예측 모델을 아래 수식 (4)와 같이 구성하였다.

$$Contact\ Index = \begin{cases} Contact & \text{if } I_{WTC} \geq 1 \\ Open & \text{if } I_{WTC} < 1 \end{cases} \quad (4)$$

본 논문에서 제안한 I_{WTC} 모델은 단지 두 개의 센서 데이터, 즉, 휠모터 토크 및 휠 각가속도를 사용하므로 노이즈에 의한 영향이 적으며 계산이 간단한 장점이 있다. 그러나 차량이 진행상태가 아닌 경우, 즉 휠 모터가 비활성화되어 있는 경우에는 수식 (1)의 모든 항들이 0에 수렴하게 되므로 휠의 접촉 유무와 관계없이 수식 (2)에서 계산되는 WTC가 0으로 수렴하게 되어 변별력이 떨어지게 되는 단점이 예상된다. 그러므로 안정적으로 접지휠의 예측 모델을 구성하기 위해서는 이를 보완할 수 있는 추가적인 지수의 도입이 필요하다.

능동형 현가장치의 휠과 플랫폼 사이에 위치하는 암에 대해서 앞에서와 같이 동역학식 모델을 구성하면 수식 (5)와 같다.

$$I_a \cdot \alpha_a = T_a - (\vec{r}_a \times \vec{F}_c) \cdot \underline{k} - (m_a/2 + m_w) \cdot g \cdot l \cdot \sin(\theta - \beta) - T_w \quad (5)$$

수식 (5)로부터 지면과의 접촉에 의한 힘이 암

토크에 주는 영향인 ATC와 이를 정규화한 ATC Index (이하 I_{ATC})는 수식 (6),(7)과 수식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$ATC \equiv T_a - (I_a \cdot \alpha_a + K \cdot \sin(\theta - \beta) + T_w) \quad (6)$$

$$K = (m_a/2 + m_w) \cdot g \cdot l \quad (7)$$

$$I_{ATC} \equiv ATC / ATC_{ref} \quad (8)$$

앞에서와 마찬가지로 ATC_{ref} 역시 휠의 접촉 유무를 판별하는 기준으로 다음 절에서 이를 결정한 과정을 설명할 것이다. 앞에서와 같이 위의 예측 지수를 이용한 예측 모델을 아래와 같이 구성하였다.

$$Contact\ Index = \begin{cases} Contact & \text{if } I_{ATC} \geq 1 \\ Open & \text{if } I_{ATC} < 1 \end{cases} \quad (9)$$

I_{ATC} 를 이용한 예측 모델은 계산이 복잡하지는 않으나 I_{WTC} 예측 모델에 비해 많은 센서 데이터가 요구되어 외란에 의해 예측지수의 변별력이 영향을 많이 받을 것으로 예상된다. 그러나 능동형 현가장치를 가진 무인 자율차량은 각 현가장치가 지면에 대해 독립진자 구조를 하고 있으므로 암모터가 비활성화되면 차량의 안정성을 유지할 수 없다. 그러므로 무인자율차량의 운행 중 암모터는 항상 활성화 상태이므로 차량의 휠 모터가 비활성화되어 있는 경우에도 I_{ATC} 가 변별력을 유지할 수 있는 장점이 있다. 다만 암의 각도에 따라서 동일한 지면반발력에 대해 토크 기여도가 변하며 경우에 따라서는 토크 기여도가 0에 가깝게 되어 변별력이 떨어지는 경우가 발생할 수 있다.

2.3 Simulation conditions

앞에서 제안한 두 개의 예측지수 I_{WTC} 와 I_{ATC} 를 이용한 휠 접촉 예측모델의 정확도를 알아보기 위하여 본 논문에서는 ADAMS-Simulink Co-simulation 환경을 구축하여 필요한 데이터를 습득하였다. 본 시뮬레이션 환경에서 사용된 차량 모델은 국방과학연구소와 (주)TUR에서 개발한 모델로서 국방과학연구소에서 현재 개발 중인 견마로봇을 기준으로 한 동역학 모델이다.⁽¹¹⁾ 이 때 사용한 타이어모델은 PAC2002(MF-Tire) 타이어 모델로 (주)한국타이어에서 수행한 하중시험을 통

한 각 응답특성을 커브피팅(Curve Fitting)하여 구축하였다.

차량 모델은 Co-simulation 환경에서 장애물 극복을 위한 행동계획 알고리즘⁽⁸⁾을 사용하여 동작하였으며 장애물은 600mm의 수직상승 장애물을 대상으로 하였다. 데이터는 100Hz로 기록하였고 휠과 암에서 각각 토크, 각가속도, 그리고 암각도와 차량의 피치각을 측정하였다. 또한 각 휠의 접촉유무에 대한 기준데이터로 각 타이어의 수직하중을 추가로 기록하여 하중이 100N 이하인 경우 본 논문에서는 휠이 지면과 떨어졌다고 판단하였다. 그 결과 수직상승 장애물의 통과 과정에서 전륜은 약 40% 구간에서 바퀴가 지면에서 떨어졌으며 중륜과 후륜은 약 20% 구간에서 지면과의 접촉을 잃었다. 전체적으로 바퀴로부터 측정된 약 25%의 데이터가 지면의 특성을 반영하지 못한 노이즈 신호라고 할 수 있다.

2.4 Estimation Result of I_{WTC} and I_{ATC} Model

첫 번째로 휠토크를 0.1N.m 기준으로 하여 바퀴의 휴지기와 가동기로 나눠 WTC_{ref} 와 ATC_{ref} 에 따른 예측성공률을 확인해보았다. Fig. 2와 Fig. 3을 보면 WTC_{ref} 가 0.2 이상인 경우 휠이 가동기에 있으면 예측 성공률은 약 97%에 이르며 그래프가 평형 상태에 도달한다. WTC_{ref} 를 0.3으로 결정하게 되면 WTC 값에 노이즈가 0.1N.m 수준으로 발생하더라도 비슷한 수준으로 예측 성공률을 유지하는 강건성이 예상된다. 반면 휠이 휴지기에 있으면 예측 성공률은 80% 이하로 떨어지게 되며 성공률 또한 측정값의 오차에 대해 민감하게 반응하게 됨을 예상할 수 있다. ATC_{ref} 에 대한 결과를 보면 I_{ATC} 모델을 사용하였을 경우에는 휠모터의 가동 여부와 무관한 예측 성공률이 나타나고 있으며 그 정확도는 앞서와 같이 ATC_{ref} 가 약 1N.m일 때, 약 93% 수준임을 알 수 있다. 이는 휠토크가 큰 경우에는 I_{WTC} 예측 모델을 사용하였을 때보다 약간 낮은 수치이나 휠토크가 작은 경우에는 크게 개선된 수치이며 특히 정확도가 전후 0.4N.m 구간에서 유지되고 있으므로 ATC 의 계산 시 포함되는 오차값에 대해 정확도가 민감하게 반응하지 않을 것임을 알 수 있다. 이하의 모델에서는 이와 같은 이유로 WTC_{ref} 와 ATC_{ref} 를 각각 0.3N.m와 1N.m로 결정하였다.

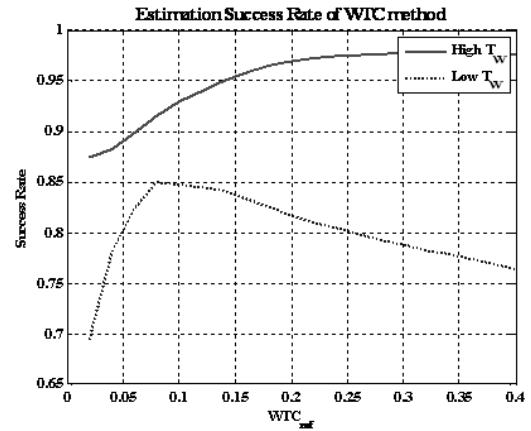


Fig. 2 Success rate by I_{WTC} model in terms of WTC_{ref}

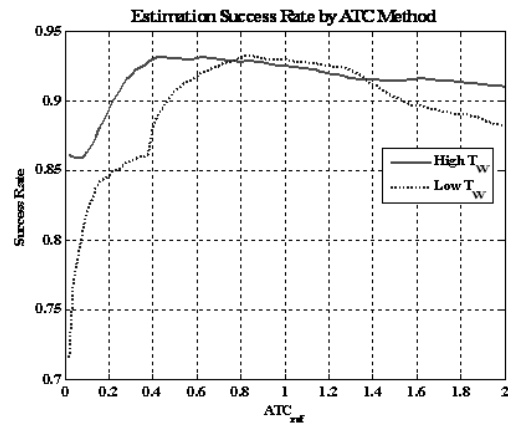


Fig. 3 Success rate by I_{ATC} model in terms of ATC_{ref}

두 번째로 각 휠토크 구간에서의 각 예측 지수를 사용한 예측 모델의 예측 성공률을 분석해 보았다. 차량이 600mm 수직상승 장애물을 극복하면서 측정된 휠토크를 분석한 결과 휠모터의 휴지 상태에 해당되는 0.2N.m 이하의 휠토크를 갖는 구간이 전체의 60%를 차지했다. 시뮬레이션을 통해 측정된 데이터를 대상으로 각 휠토크에 대해 I_{WTC} 과 I_{ATC} 예측모델을 사용한 예측 성공률은 Fig. 4와 같았다. 앞서 언급한 바와 같이 I_{WTC} 예측모델을 사용하였을 경우 휠토크가 큰 경우에는 차량의 접촉유무가 잘 예측되었으나 휠토크 값이 작아지면서 예측 성공률이 80% 아래 수준으로 떨어지는 경우가 발생하였다. 특히 휠토크가 0.2Nm 이하인 경우가 전체의 약 60%에 해당하므로 그 구간에서의 예측 성공률이 80%에 머물고

있음은 I_{WTC} 를 이용한 예측모델의 정확도가 전체적으로 높지 않음을 의미한다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 휠이 휴지상태에 있을 경우 I_{WTC} 를 계산하는데 필요한 각 항이 모두 0으로 수렴하면서 I_{WTC} 의 변별력이 떨어지는 문제임을 추정할 수 있다. 반면 I_{ATC} 모델을 사용하였을 때, 휠토크가 낮은 구간, 특히 I_{WTC} 모델을 사용하였을 경우 예측성공률이 현저하게 낮아지기 시작하는 1N.m 이하 구간에서 90% 수준의 예측 성공률을 보여주고 있다. 그러나 그 외의 구간에서는 예측 성공률이 I_{WTC} 모델에 비해 낮으며 특히 휠토크가 5N.m 부근에서 현저하게 떨어지고 있는 것이 확인되었다.

2.5 Comparison between I_{WTC} model and I_{ATC} model

위의 결과들을 종합해 보았을 때, I_{WTC} 모델은 예상한 바와 같이 휠모터가 휴지기가 아닌 경우 97% 수준의 높은 정확도를 보여줄 수 있으나 전체의 절반 이상의 구간에 해당되는 휠 모터의 휴지기에서 정확도가 보장되지 않으며 예측의 강건성이 떨어진다. 반면 I_{ATC} 모델은 이를 보완할 수 있는 좋은 지수으로써 휠모터의 휴지기에도 90% 이상의 예측 정확도를 보여줄 수 있으며 예측 정확도는 ATC의 오차값에 대해 강건성을 갖추고 있다.

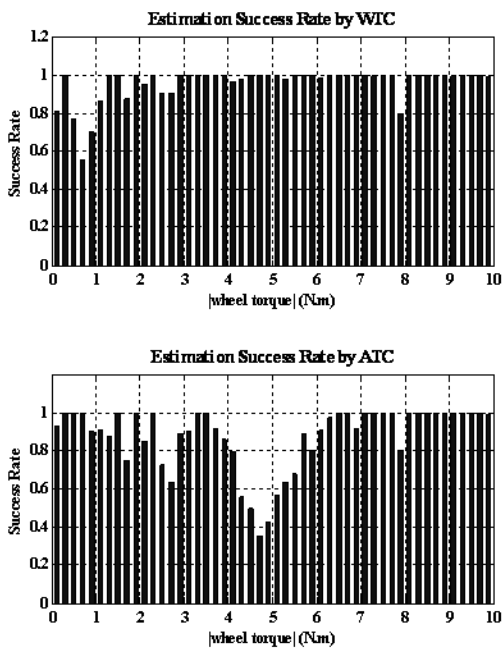


Fig. 4 Success rate by I_{WTC} model(top) and success rate by I_{ATC} model(bottom)

두 모델 간 예측 일치도를 확인해 본 결과 휠토크가 7N.m 이상인 경우에서는 두 예측모델을 사용한 결과가 서로 일치하였으나 그 이하에서는 80% 이하의 일치도를 보였다. 이와 같이 두 예측 결과가 서로 다른 경우, 휠토크 수준에 따른 예측 정확도를 살펴보았을 때 Fig 5에서와 같이 1N 이상에서는 일반적으로 I_{WTC} 모델의 예측 결과를 따르고 그 이하에는 I_{ATC} 모델의 예측 결과를 따르면 예측 성공률을 높일 수 있음을 예측할 수 있었다.

3. Fuzzy Rule-based Estimation Model

3.1 Overview

앞 장에서의 결과에서와 같이 I_{WTC} 모델과 I_{ATC} 모델은 서로 상보적 관계에 있기 때문에 이를 통합한 하나의 모델 개발을 통해 차량 바퀴의 접착 유무를 보다 정확하게 예측할 수 있다. 본 연구에서는 앞 장에서의 결과를 통해 간단한 퍼지 규칙을 적용한 퍼지규칙기반 모델을 제안하고자 한다. 퍼지 논리는 전문가의 경험적 또는 직관적 지식을 규칙화한 것으로 신경망 이론과 함께 비선형 시스템의 모델링에 사용되는 대표적인 방법이다. 그러나 퍼지 논리는 신경망 이론에 비해 시스템의 물리적 특성이 잘 반영되며 그에 따라 오버피팅(overfitting) 문제가 덜 발생한다. 따라서 앞 장에서와 같이 시스템의 물리적 특성이 잘 나타나고 있는 비선형 시스템의 경우에는 퍼지 논리를 적용하는 것이 유리하다.

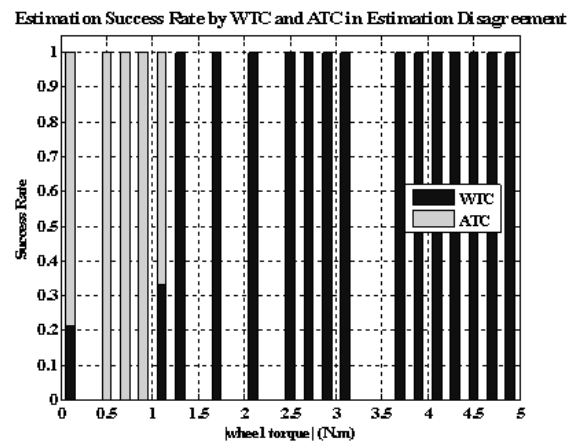


Fig. 5 Ratio of estimation success by I_{WTC} model and I_{ATC} model when results form two models are disagreed with each other

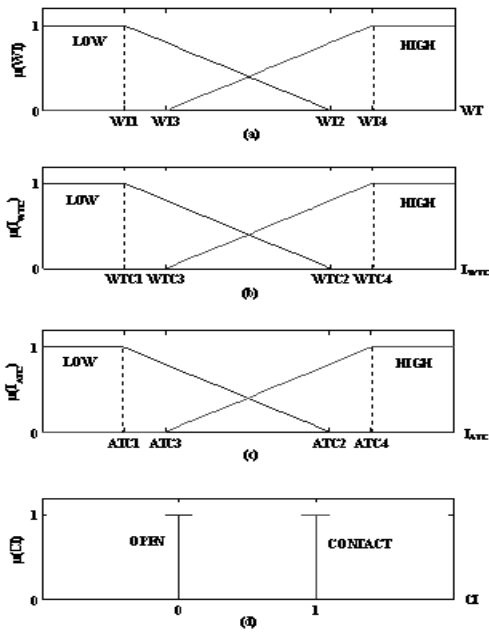


Fig. 6 Membership functions for (a)WT, (b)IwTC, (c)IATC and (d)Contact Index(CI)

3.2 Fuzzy-Logic Approach

퍼지 논리를 적용하기 위하여 모델의 입력과 출력 변수에 대한 퍼지 집합을 구성하여야 한다. 본 모델은 휠토크 수준에 따라서 IwTC와 IATC를 적절하게 결합하는 모델로서 입력 변수는 휠토크(이하 WT)와 IwTC 및 IATC라 할 수 있다. 각 정보는 WT에 대하여 {LOW, HIGH} 퍼지 집합, IwTC에 대해서 {LOW, HIGH} 퍼지 집합, 그리고 IATC에 대해서 {LOW, HIGH} 퍼지 집합을 구성하였고 Fig. 6(a)(b)(c)와 같은 솔더형태의 소속함수(shoulder-shaped membership function)를 통해 변환하였다. 본 모델의 출력 변수는 이진값으로 표현되는 각 바퀴의 지면 접촉 유무(이하 CI)로 {CONTACT, OPEN} 퍼지 집합과 Fig. 6(d)과 같은 싱글톤(singleton) 소속함수를 통해 변환하였다. Fig. 6의 소속함수의 각 변수들은 최적화 과정을 통해 퍼지 논리가 전문가의 지식을 보다 잘 반영할 수 있도록 조정할 수 있다.⁽¹²⁾

각 바퀴의 접촉 유무를 예측하는 모델은 아래의 퍼지 논리 규칙으로 이루어진 추론 과정을 통해 이루어진다. 본 연구에서는 앞 장에서의 결과를 토대로 아래와 같은 네 개의 퍼지 논리 규칙을 결정하였다.

- 1) IF WT is LOW AND IATC is LOW,
THEN CI is OPEN

- 2) IF WT is LOW AND IATC is HIGH,
THEN CI is CONTACT

- 3) IF WT is HIGH AND IwTC is LOW,
THEN CI is OPEN

- 4) IF WT is HIGH AND IATC is HIGH,
THEN CI is CONTACT

위 규칙은 휠토크값이 클 경우 IwTC를 통한 예측 결과를 따르고 작을 경우에는 IATC를 통한 예측 결과를 따르도록 하는 간단한 규칙을 나타낸 것이다. 최종 결정을 내리기 위한 비퍼지화(Defuzzification) 방법으로는 최대높이법(Maximum Height Method)을 사용하였다.

3.3 Optimal Membership Function

퍼지규칙 기반 모델이 2장에서 얻은 경험적 지식을 정확하게 반영하기 위해서는 Fig. 6의 소속함수에 대한 최적화 과정이 필요하다. WT, IwTC, IATC 세 개 퍼지 집합은 각각 네 개의 퍼지 변수를 가지며 이에 대한 소속함수는 솔더(shoulder) 형태이다. 하나의 솔더 함수는 2개의 변수를 가지므로 총 12개의 변수에 대한 최적화 과정이 필요하다. 본 예측 모델의 성능을 평가하기 위해 수식 (10), (11)과 같이 두 가지 목적함수를 제안하였다.

$$J_1 = (\sum(C_e C_r + O_e O_r)) / N \tag{10}$$

$$J_2 = \frac{(1 + \alpha) \times (precision \times sensitivity)}{\alpha \times precision + sensitivity} \tag{11}$$

$$sensitivity = \sum O_e O_r / \sum (O_e O_r + C_e O_r) \tag{12}$$

$$precision = \sum O_e O_r / \sum (O_e O_r + O_e C_r) \tag{13}$$

여기서 N은 전체 샘플 데이터의 개수를 의미하며 정확도(precision) 및 민감도(sensitivity)는 수식 (12)와 (13)과 같이 정의된다. J₁은 일반적인 예측 정확도이고 J₂은 질병 등의 예측에 사용되는 지수의 성능을 평가하는데 사용되는 F-measure를 나타내고 있다.⁽¹³⁾ F-measure는 가중치가 곱해진 예측 민감도(sensitivity)와 예측 정확도(precision)의 조화 평균값으로 이 때 사용되는 α 는 지수가 예측하고자 하는 상황에 대한 예측 민감도의 중요도를 뜻한다. 즉, 실제 지면과의 접촉이 떨어진 바퀴를 정확하게 찾아내는 능력에 대한 중요성을 나타내며 본 연구에서는 α 에 대한 최적 소속함수의 변화도 추가로 알아보았다.

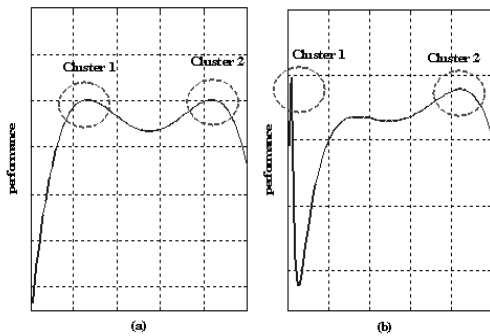


Fig. 7 (a) 2 clusters which have same optimal performances, but average form 2 clusters will have had performance. (b) left cluster has best performance, but not robust. Right cluster has good performance and robustness

수식 (10)의 목적함수를 최대화하기 위한 최적화 알고리즘으로 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 사용하였다. 이는 본 알고리즘이 전역범위에서 최적화를 하는데 유리하며 일반적으로 최대경사법(steepestdescent method)과 같이 각 변수에 대한 민감도를 계산하는 방식은 위의 목적함수가 이진화 결과에 따른 성공률을 나타내고 있기 때문에 각 소속함수 변수의 미소 변화에 따른 민감도가 일반적으로 0으로 나오는 경향이 있어 불리하였기 때문이다. 본 연구에서는 50개의 멤버로 구성된 풀을 대상으로 20 세대동안 최적화를 하였으며 각 세대에서 4회의 95% 경계감쇠를 실시하였다. 이와 같은 최적화를 서로 다른 10개의 초기 유전자 풀에 대해서 수행하였다. 이와 같은 최적화 과정은 모두 600mm 수직 상승 장애물 통과 시에 얻은 데이터를 대상으로 실시하였다.

J_1 및 α 에 따른 서로 다른 J_2 에 대한 10회의 최적화 과정 결과 중 최종적으로 가장 적합한 소속함수를 결정하기 위해서 패턴인식 알고리즘을 사용하였다. 최적값으로 결정된 10개의 데이터를 패턴 인식알고리즘을 사용하여 군집화하는 이유는 아래와 같다. 우선 Fig 7의 (a)에서와 같이 유사한 목적함수 값을 갖는 최적값이 서로 다른 군집에 속하고 있을 때, 이를 평균한 값은 최적값에 도달하지 않을 가능성이 있기 때문이고 다른 이유로는 (b)에서와 같이 최적값의 근처 값에서는 목적함수의 민감도가 큰 경우, 성능의 안정성을

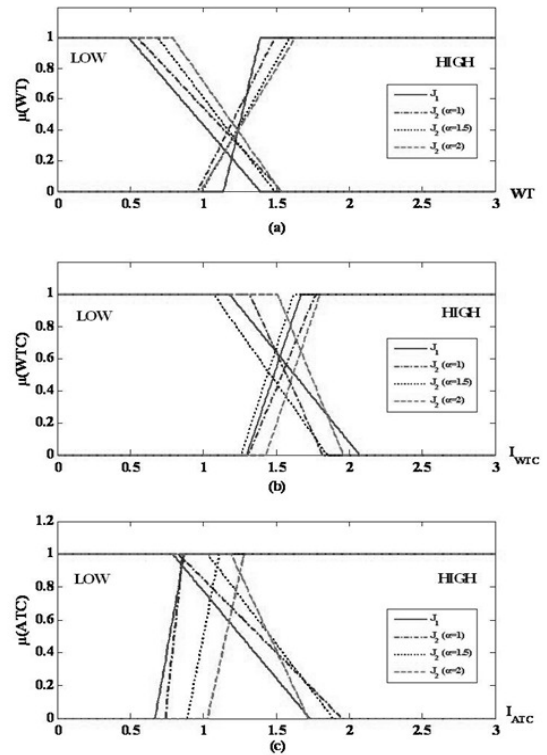


Fig. 8 Optimal membership functions of (a)WT, (b)IWTC, (c)IATC in terms of objective function

보장할 수 없기 때문이다. 이와 같은 경우 군집 2와 같이 비교적 우수한 성능을 가지며 안정성이 보장되는 최적값을 선택하는 것이 좋다. 즉, 10개의 최적값을 군집화하여 각 군집에 속하는 최적값들의 성능이 우수하며 군집에 속하는 요소 간의 거리가 큰 군집을 선택하여 그 군집의 선택함으로써 우수한 성능과 안정성을 보장하였다. 패턴인식 알고리즘으로는 일반적으로 많이 사용되는 다중시작 k-평균알고리즘(multi-start k-means clustering algorithm)을 사용하였다. 이는 일반적인 k-평균 알고리즘의 문제인 초기군집 설정 문제를 반복의 방법으로 해결한 것으로 본 연구에서는 총 10회 반복을 통해 최적의 군집형태를 얻었다.

이와 같은 방법으로 최적값 10개를 총 5개의 군집으로 나눈 결과 군집 중 원소의 개수가 많고 목적함수 값에 대한 성능이 우수한 군집의 중심과 그 결과로 나타난 예측 민감도 및 예측 성공률은 Table 1과 같다. Fig 8은 이를 적용한 최적소속함수의 형태를 보여주고 있다. Fig 8의 (a)와 (b)에서 최적화에 따른 소속함수의 기울기가 변화

Table 1 Optimal parameters of membership functions

		Var ₁	Var ₂	Var ₃	Var ₄	Sensitivity	Success Rate
J ₁	WT	0.49	1.39	1.14	1.39	0.925	0.964
	I _{WTC}	1.18	2.07	1.3	1.67		
	I _{ATC}	0.79	1.73	0.67	0.87		
J ₂ α=1	WT	0.55	1.54	0.96	1.49	0.925	0.964
	I _{WTC}	1.32	1.82	1.31	1.77		
	I _{ATC}	0.83	1.95	0.74	0.86		
J ₂ α=1 .5	WT	0.69	1.49	0.99	1.59	0.937	0.962
	I _{WTC}	1.07	1.85	1.26	1.62		
	I _{ATC}	1.03	1.89	0.89	1.11		
J ₂ α=2	WT	0.79	1.53	0.98	1.63	0.946	0.961
	I _{WTC}	1.51	1.96	1.43	1.80		
	I _{ATC}	1.19	1.72	1.03	1.28		

는 모습을 볼 수 있으나 소속함수의 교차점이 서로 유사하게 유지되고 있는 것을 확인할 수 있으며 이는 본 모델의 예측 성능이 WT와 I_{WTC}의 소속함수에 민감하지 않음을 보여준다. 그러나 Fig. 8(c)에서와 같이 I_{ATC}의 소속함수는 소속함수 간 교차점이 예측 모델의 민감도 성능을 중요시할수록 우측으로 이동하고 있으며 그 변화가 비교적 큼을 알 수 있다. 그러므로 I_{ATC}의 소속함수를 우측으로 이동시키는 방법을 통해 예측 모델의 민감도 성능을 향상시킬 수 있다. 이는 즉, 지면과 접촉이 떨어진 바퀴에 대해 정확한 예측을 할 수 있음을 의미하며 상대적으로 지면과 접촉된 바퀴에 대해서도 떨어졌다고 잘못 예측할 확률이 증가하므로 예측 성공률은 낮아질 수 있다. 이는 Table 1에서 α가 증가할수록 예측 성공률이 감소하는 것을 통해서도 알 수 있다.

3.4 Estimation Results and Discussion

소속함수를 최적화한 퍼지 규칙 기반 접지형 예측 모델의 성능을 앞서 제안한 I_{WTC} 모델 및 I_{ATC} 모델의 성능과 비교해보았다. 이때, I_{WTC} 예측 모델과 I_{ATC} 예측모델 역시 퍼지 모델과 같이 예측성공률 혹은 α 값에 따른 F-measure가 가장 높을 수 있도록 WTC_{ref}와 ATC_{ref}에 대한 최적화 과정을 거쳤다. Fig 9는 앞 장에서 사용한 바 있는 600mm 높이의 수직 상승 장애물을 극복하면서 얻은 데이터를 통해 각 바퀴에서의 예측 성공률을 비교한 결과이다. 퍼지 논리를 사용하였을 경우 I_{WTC}, I_{ATC} 방법에 비하여 바퀴에 따른 편차가 줄어들었으며 예측 성공률 역시 평균적으로 5% 정도 상승하였음을 알 수 있다. 이 때, 각 바

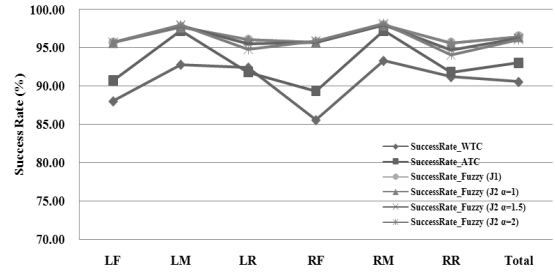


Fig. 9 Success rates of I_{WTC}, I_{ATC} and Fuzzy models of the data from the simulations of negotiating step-up with height of 600mm

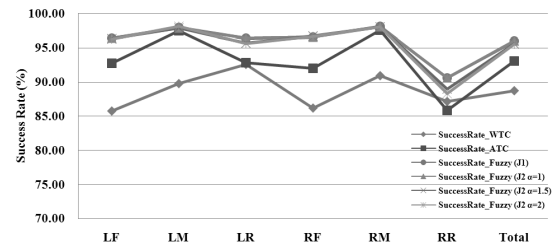


Fig. 10 Success rates of I_{WTC}, I_{ATC} and Fuzzy models of the data from the simulations of negotiating step-up with height of 500mm

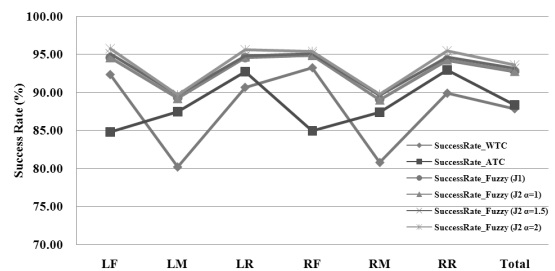


Fig. 11 Success rates of I_{WTC}, I_{ATC} and Fuzzy models of the data from the simulations of negotiating step-down with height of 500mm

퀴는 차량의 무게 중심에 대한 위치가 서로 다르고 차량이 장애물을 돌파하며 겪는 동특성이 다르다. 따라서 결과에서 각 바퀴의 예측 성공률의 편차가 크지 않음은 퍼지 논리를 사용한 예측 모델이 강건성을 갖추었음을 시사하고 있다.

앞의 모델은 모두 600mm 수직상승 장애물 극복 중 얻은 데이터를 대상으로 설계하고 최적화하였다. 본 연구에서는 모델의 유효성을 검증하

기 위하여 추가로 앞 장에서 설명한 시물레이션 환경에서 500mm 수직상승 장애물 및 500mm 수직하강 장애물의 극복 중 얻은 데이터를 추가로 수집하고 위의 모델에 적용해보았다. 그 결과 Fig 10과 Fig 11과 같이 I_{WTC} , I_{ATC} 모델에 비해 예측 정확도가 3% 이상 향상되었으며 예측 성공률이 90% 이상으로 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 I_{WTC} 와 I_{ATC} 모델은 차량이 겪는 동특성에 따라 우위가 변하고 있으나 퍼지 방법을 두 모델의 우수한 특성의 조합을 통해 높은 예측률을 유지할 수 있었다.

또한 예측 민감도 역시 퍼지 모델을 사용하여 개선되었는데 600mm 수직 상승 장애물로부터의 데이터에 대해서는 82%, 87%에서부터 92% 이상으로 향상되었으며 이를 500mm 수직하강 장애물 데이터에 적용하였을 시에도 53%, 77%에서부터 최대 86%까지 30% 이상 정확도를 향상시킬 수가 있었다. 예측 정확도 역시 평균 10% 수준의 향상을 볼 수 있었는데 이는 소속함수의 최적화 시에 적용한 목적함수인 F-measure를 정의하는 방법에 따라 예측민감도와 예측정확도의 향상도가 변할 수 있다.

접촉휠 예측 모델을 사용하지 않았을 경우 현재 600mm 높이 수직 상승 장애물 통과 시 각 바퀴는 약 30% 구간에서 바퀴가 지면과 접하지 않은 상태이다. 그러므로 바퀴를 통해 얻은 데이터를 통한 지면의 상태 예측은 약 30%의 잡음을 갖고 있게 된다. 이 때, I_{WTC} 및 I_{ATC} 모델을 통해 예측 정확도를 약 90% 수준으로 향상시키면 현재 갖고 있는 잡음의 60%를 제거하는 효과를 가질 수 있으며 퍼지 규칙 기반 모델을 통해 추가로 5%의 예측 성공률을 높이면 약 83%의 오차제거 효과를 누릴 수 있다. 특히 바퀴로부터 얻은 데이터의 사용처에 따라 예측민감도 혹은 예측정확도가 중요해지면 그에 적합한 소속함수를 사용함으로써 성능의 향상이 가능하다.

4. 결 론

본 논문에서는 가변 휠형 무인자율차량에서의 접촉 휠을 예측하기 위하여 차량의 동역학 모델을 기반으로 한 두 개의 지수, I_{WTC} 와 I_{ATC} 및 이를 이용한 예측 모델을 제안하였으며 또한 제안한 지수들의 상보적인 관계를 고려한 퍼지규칙기

반 접촉 휠 예측 모델을 제안하였다. 제안한 두 개의 지수는 각각 휠과 현가장치의 동특성을 모델한 것으로 차량의 휠토크와 관련하여 예측모델의 변별력이 결정될 수 있음을 예측하였고 이를 시물레이션을 통해 확인할 수 있었다. 결과적으로 휠 모터가 사용기에 있을 시에는 바퀴의 동역학 모델을 통한 예측지수인 I_{WTC} 를 이용하고 휠 모터가 휴지기에 있을 시에는 현가장치의 동역학 모델로부터 구성된 I_{ATC} 를 사용하는 퍼지 규칙을 개발할 수 있었다. 본 퍼지 규칙 모델의 구성을 위해서 예측 성공률 및 F-measure를 목적함수로 갖는 최적화 문제를 정의하였고 유전자 알고리즘 및 다중시작 k-means 군집화 알고리즘을 사용하여 소속함수를 최적화하였다. 시물레이션 조건에서 바퀴는 평균 30%의 구간에서 지면과의 접촉을 잃게 되는데 본 모델을 사용한 결과 I_{WTC} 와 I_{ATC} 모델을 사용한 결과 약 90%의 예측 정확도를 가지며 휠의 지면 접촉 유무를 예측할 수 있었다. 그리고 위의 두 지수를 이용한 퍼지 규칙 기반 모델을 사용한 결과 예측 정확도가 95% 수준에 도달하여 30%의 잡음을 5%로 약 83%의 오차제거 효과를 볼 수 있었다. 또한 퍼지 규칙 기반 모델을 적용한 결과 I_{WTC} 와 I_{ATC} 모델의 경우보다 각 바퀴에 대해 고른 성능을 보였으며 시물레이션 조건이 바뀐 경우에도 높은 예측률을 유지하는 강건성을 보여주었다.

무인 자율차량의 바퀴는 카메라 비전과 더불어 지면에 대한 정보를 제공하는 중요한 수단이며 바퀴가 지면과 접촉하는 것이 보장되는 4륜 이하의 차량에서는 이를 적극적으로 이용하고자 하는 노력이 있어왔다. 본 연구를 통해 바퀴의 접촉 여부를 확신할 수 없는 4륜 이상의 무인자율차량에서도 바퀴로부터의 정보를 통해 지면 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히 본 모델은 간략한 모델 기반의 지수와 계산속도가 빠른 퍼지 기반 모델을 사용하여 계산량이 적으며 연산속도가 빠른 장점이 있다.

본 연구는 검증된 동역학 모델을 사용한 시물레이션의 기반에서 행해졌으나 시물레이션으로는 측정 데이터의 잡음 수준을 충분히 묘사할 수 없으며 무인자율차량이 겪는 다양한 지형을 묘사하는데도 한계가 있다. 그러므로 이를 보완하기 위해서는 추후에 본 모델을 사용한 실차 시험이 행해질 필요가 있으며 또한 본 모델에서는 접촉 유

무를 100% 예측하는 것이 불가능했으므로 추가적인 방법이 제안될 필요가 있다. 또한 본 모델을 통해 접촉 유무를 예측하였을 시, 지면에 대한 정보가 어느 정도 개선되었는지에 대한 연구도 추후에 진행되길 기대한다.

후 기

본 연구는 방위사업청/민군겸용 기술센터/정보통신부/정보통신연구진흥원의 민군 겸용 기술개발 사업의 일환으로 수행되었음.[06-DU-LC-01, 네트워크 기반 다목적 견마형 로봇 기술 개발]

참고문헌

- (1) Wilcox, B., 1994, "Non-geometric Hazard Detection for a Mars Microrover," *Proceedings of the AIAA Conference on Intelligent Robotics in Field, Factory and Space*
- (2) Iagnemma, K., Kang, S. W., Shibly, H. and Dubowsky, S., 2004, "On Line Terrain Parameter Estimation for Wheeled Mobile Robots with Application to Planetary Rovers," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 20, No 5, pp. 921~927.
- (3) Shibly, H., Iagnemma, K. and Dubowsky, S., 2005, "An Equivalent Soil Mechanics Formulation for Rigid Wheels in Deformable Terrain with Application to Planetary Exploration Rovers," *Journal of Terramechanics*, Vol. 42, No 1, pp. 1~13.
- (4) Brooks, C. A. and Iagnemma, K., 2005, "Vibration-Based Terrain Classification for Planetary Exploration Rovers," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No 6, pp. 1185~1191.
- (5) Brooks, C. A. and Iagnemma, K., 2007, "Self-supervised Terrain Classification for Planetary Rovers," *Proceedings of NASA Science Technology Conference*.
- (6) Iagnemma, K., Rzepniewski, A., Dubowsky, S. and Schenker, P., 2003, "Control of Robotic Vehicles With Actively Articulated Suspensions In Rough Terrain," *Autonomous Robots*, Vol. 14, No. 1, pp. 5~16.
- (7) Chakraborty, N. and Ghosal, A., 2005, "Dynamic Modeling and Simulation of a Wheeled Mobile Robot for Traversing Uneven Terrain Without Slip," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 127, No. 5, pp. 901~909.
- (8) Lim, K. B., Park, S., Yoon, Y. S., Lee, S. H. and Kang, S., 2009, "Configuration Planning of an Actively Articulated Suspension to Vehicle Orientation Control on Unstructured Terrain," *Trans. of the KSME (A)*, Vo. 33, No. 3, pp. 251~260.
- (9) Brooks C. A., Iagnemma. K. and Dubowsky, S., 2006, "Visual Wheel Sinkage Measurement for Planetary Rover Mobility Characterization," *Autonomous Robots* Vol. 21, No. 1, pp. 55~64.
- (10) Reina, G., Ojeda, L., Millella, A. and Borenstein, J., 2006, "Wheel Slippage And Sinkage Detection for Planetary Rovers," *IEEE Transactions on Mechatronics*, Special issue on Novel Aspects in Robotics, Vol. 11, No. 2, pp. 186~195.
- (11) Huh, J. W., 2008, "Full Dynamic Model in the Loop Simulation for Path Tracking Control of a 6x6 Mobile Robot," *Journal of Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 11, No. 4, pp. 141~148.
- (12) Athalye, A., Edwards, D., Manoranjan, V. S. and Lazaro, A. D., 1993, "On Designing a Fuzzy Control-System Using an Optimization Algorithm," *Fuzzy Set Syst.*, Vol. 56, No. 3, pp. 281~290.
- (13) Altman, D. G. and Bland, J. M., 1994, "Statistics Notes - Diagnostic Tests 1: Sensitivity and Specificity," *British Medical Journal*, Vol. 308, No. 6943, pp. 1552~1552.