

논문 2004-41C1-4-6

Antibody Diversity 원리와 Antigen Presenting Cell을 구현한 새로운 인공 면역 시스템

(A New Artificial Immune System Based on the Principle of Antibody Diversity And Antigen Presenting Cell)

이 상 형*, 김 은 태**, 박 민 용**

(Sanghyung Lee, Euntai Kim, and Mignon Park)

요 약

본 논문에서는 fault tolerant 하드웨어에서 가장 기본이 되는 온라인 하드웨어 테스트 시스템 구현을 위하여 새로운 인공 면역 알고리즘을 제안한다. 인공 면역 알고리즘은 알려진 자기(self) 정보만을 이용하여 항체 즉 tolerance condition을 가장 최적으로 생성하는 알고리즘이다. 이를 위하여 본 논문에서는 생체 면역 시스템의 중요한 원리인 antibody diversity 원리를 적용한 새로운 tolerance condition 생성 알고리즘을 제안한다. 또한 생체 면역 시스템에서의 중요한 세포인 APC (Antigen Presenting Cell)를 Quine-McCluskey 방법으로 구현한 후 유전자 알고리즘을 통해 tolerance condition을 자동 생성하는 알고리즘을 구현한다. 이렇게 제안된 알고리즘은 FSM(Finite State Machine)의 가장 전형적인 예인 십진카운터에 적용한 후 컴퓨터 모의 실험을 통해 그 성능을 확인한다.

Abstract

This paper proposes a new artificial immune approach to on-line hardware test which is the most indispensable technique for fault tolerant hardware. A novel algorithm of generating tolerance conditions is suggested based on the principle of the antibody diversity. Tolerance conditions in artificial immune system correspond to the antibody in biological immune system. In addition, antigen presenting cell (APC) is realized by Quine-McCluskey method in this algorithm and tolerance conditions are generated through GA (Genetic Algorithm). The suggested method is applied to the on-line monitoring of a typical FSM (a decade counter) and its effectiveness is demonstrated by the computer simulation.

Keywords: Artificial immune system, fault tolerance, tolerance conditions, antibody diversity, antigen presenting cell, Quine-McCluskey method

I. 서 론

온라인 하드웨어 테스트는 fault-tolerant 하드웨어에서 가장 중요한 요소이다. 특히 인간의 손이 닿기 힘든 우주선이나 원자로 등에서 고장이 발생할 경우 자동으로 고장을 검출하는 기능이 우선적으로 필요하다. 이러한 중요성 때문에 온라인 하드웨어 테스트를 위해서 여러 가지 이론 등이 연구되어 왔다. Yinong Chen은

n-modular redundancy를 이용한 하드웨어 테스트 시스템을 연구하였으며^[1], S.Dutt는 error-detecting and correcting code를 제안하였고^[2] self-checking logic circuit이 P.K Lala에 의해서 제안되었다^[3].

최근에 인간의 면역계를 모사한 인공 면역 시스템에 관한 연구가 활발해지고 있다. 인공 면역 시스템은 컴퓨터 보안^{[4][5]}이나 바이러스 보호^[4] 등 다양한 분야에 적용되고 있으나 특히 온라인 하드웨어 테스트 시스템에 유용하게 적용할 수 있는 이론이다. 인공 면역 시스템을 적용한 온라인 하드웨어 테스트 시스템의 핵심은 생체 면역 시스템에서 항체 (antibody)에 해당하는 tolerance condition을 어떻게 효율적으로 생성할 것인가

* 학생회원, ** 종신회원 연세대학교 전기전자공학부 (Yonsei University, School of Electrical and Electronic Engr.)

접수일자: 2003년11월11일, 수정완료일: 2004년7월7일

와 생성된 tolerance condition으로 최대한 자기(Self)와 비자기(Nonself)를 정확하게 구분하는가 하는 점이다. 이와 관련한 초창기 연구로 S. Forrest는 컴퓨터 바이러스와 네트워크 침입의 검출을 위한 negative selection 알고리즘을 제안하였다^[6]. Negative selection은 기존의 알려진 self pattern에 대해서 항체를 생성하는 방식이며 정합을 위해서는 c-contiguous matching method를 사용하였다. 그 밖에도 D. Dasgupta는 multi agent system을 위한 면역 원칙을 제안하였고^[7] S.Hofmeyr는 분산 검출을 위한 면역 모델을 제안하였다^[8]. 특히 D'haeseleer는 greedy detector 생성 알고리즘을 제안하였는데^[9] 이 알고리즘은 [6][7][8]의 방식과 달리 기존의 무작위 선택 알고리즘을 향상시켜 좀 더 나은 검색 영역을 가진다.

하지만 기존에 연구된 인공면역 시스템은 생체 면역 시스템을 피상적으로 모방했을 뿐 실제적인 생체 면역 시스템과는 거리가 있는 시스템이다. 본 논문에서는 생체면역 시스템의 중요한 개념들인 (i) antibody diversity 원리, (ii) APC(antigen presenting cell)를 구현하여 새로운 인공면역 알고리즘을 제안한다. Antibody diversity 원리는 생체 면역 시스템에서 매우 중요한 원리 중에 하나로서 B cell이 한정된 DNA를 가지고 어떻게 다양한 종류의 항체를 생성하는지에 관한 원리이다^[10]. 이 원리를 적용함으로써 가능한 적은 개수의 항체로 최대한의 비자기를 검출해내는 것이 가능해진다.

한편 생체 면역계에서 APC는 사전에 자기를 비자기로부터 구분하는 역할을 하는 세포이며, APC 표면의 항원 펩티드(antigen peptide)를 T cell에게 알려줌으로써 항원의 특징을 해석해낸다. 이러한 항원 펩티드는 MHC(major histocompatibility complex)라고 부르는 분자의 일종으로 비자기로부터 자기를 구분해내는 역할을 한다^[11]. APC가 정확히 구분하지 못한 자기/비자기는 이후에 항체에 의해서 자기/비자기로 구분된다. 따라서 APC를 본 알고리즘에 구현함으로써 더 나은 성능을 가진 하드웨어 테스트 알고리즘이 가능하게 된다. 본 논문에서는 생체 면역 시스템의 중요한 두 가지 개념을 알고리즘에 적용함으로써 기존의 연구들에 비해 항체의 비자기 탐색 영역이 더 넓어지고 따라서 더 나은 비자기 검출이 가능하게 된다.

본 논문의 II장에서는 생체 면역 시스템의 개요와 생체면역시스템과 온라인 하드웨어 테스트 시스템의 연관성에 관해서 설명한다. III장에서는 antibody diversity 원리와 APC를 적용하여 실제로 tolerance condition을

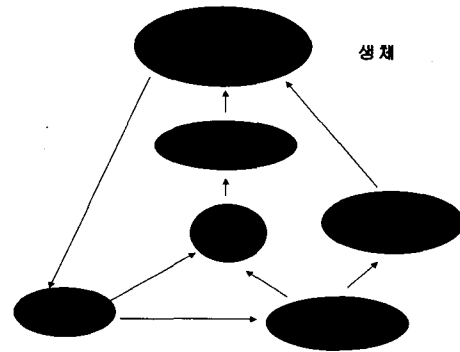


그림 1. 생체 면역계의 상호작용

Fig. 1. Interaction of Biological Immune System.

생성하는 알고리즘을 제안한 후 IV장에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 FSM(finite state machine)의 가장 간단한 예인 십진 카운터에 적용하여 성능을 확인하고 결과를 분석한 후 V장에서 결론을 짓는다.

II. 생체면역 시스템과인공 면역 시스템

A. 생체 면역 시스템

생체 면역 시스템은 바이러스나 박테리아 혹은 기생충 같은 외부 물질들의 침입에 대하여 생체를 보호하는 시스템이며. 이러한 외부 물질들을 항원(antigen)이라고 부른다. 실제 생체 면역 시스템은 두 가지 형태의 입과 구로 구성되어 있다. 즉 B cell과 T cell의 두 세포로 구분되는데 B cell은 항체(antibody)를 생성함으로써 이 항체가 항원을 파괴하는 역할을 하며, T cell은 B cell의 항체 생성을 돕는 t-helper cell과 직접 항원을 파괴하는 t-cytotoxic cell로 나뉘어진다. 일반적으로 B cell의 면역 작용을 체액 면역 (humoral immunity)이라고 하고 T-cell의 면역작용을 세포성 면역 (cell mediated immunity)이라고 한다. 한편 면역계에서 중요한 역할을 하는 또 다른 세포가 APC (antigen presenting cell)인데 이 세포는 항원을 분해한 후 MHC를 연결하여 사전에 B-Cell이 항원(비자기)과 자기를 구분할 수 있도록 해주는 역할을 하는 세포이다^[11]. 생체 면역 시스템의 상호작용은 그림 1과 같다.

B. 하드웨어 테스트를 위한 인공 면역 시스템

본 논문에서는 새로운 방식의 인공면역 시스템을 제안하여 FSM의 하드웨어 테스트에 이를 적용한다. 일반적으로 하드웨어는 FSM의 집합으로 표현될 수 있으며 FSM은 상태와 상태사이의 상태변이를 가진다. 면역 시

표 1. 면역 시스템과 하드웨어 테스트 시스템
Table 1. Immune System and Hardware Test System.

면역시스템	하드웨어 테스트 시스
자기(Self)	유효한 스테이트
비자기(Nonself)	유효하지 않은 스테이트
항체 생성	Tolerance condition 생성
항체	Set of tolerance conditions (Detectors)
항원/항체 속박 (antigen/antibody binding)	Pattern matching

스텝과 하드웨어 테스트 시스템은 표 1과 같은 연관관계를 가진다.

하드웨어 테스트를 위한 인공 면역 시스템에서는 알려진 자기에 대해서 negative selection을 통해 tolerance condition의 집합을 생성한 후 여러 state (비자기) 발생시 에러를 검출 해낸다. Tolerance condition은 생체 면역 시스템에서의 항체에 해당하며 tolerance condition 집합을 생성하는 알고리즘이 하드웨어 테스트 시스템에서 가장 핵심적인 부분이 된다. 본 논문에서는 생체 면역 시스템의 2가지 새로운 방식인 antibody diversity 원리와 APC(antigen presenting cell)를 구현한 새로운 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 기존의 immunotronics^[12] 보다 더욱 인체 면역계를 흉내 낸 방식으로 Tolerance condition 생성은 생체 면역 시스템과 유사하게 유전자 알고리즘^[13]을 통해 자동 생성한다.

III. Antibody diversity원리와 Antigen presenting cell을 이용한 tolerance condition 생성 알고리즘

A. Antibody diversity 원리

과학자들은 제한된 유전자의 수로써 어떻게 수많은 항원들에 대한 다양한 항체들을 생성해낼 수 있는지에 대해서 지속적으로 연구해왔다. 이는 항체 생성시 DNA가 가능한 다양하게 형성되어, 다양한 항체들을 생성하게 되는 것이고 이러한 다양한 항체가 다양한 항원을 파괴할 수 있게 하는 것이다. 이러한 원리를 antibody diversity의 원리라고 부른다.^[12] 생체 면역 시스템과 마찬가지로 인공면역 시스템에서도 antibody diversity 원리는 매우 중요한 역할을 한다. Antibody diversity 원리를 포함한 항체 생성원리는 그림 2와 같다.

더 많은 비자기를 탐지하기 위해서는 더 많은

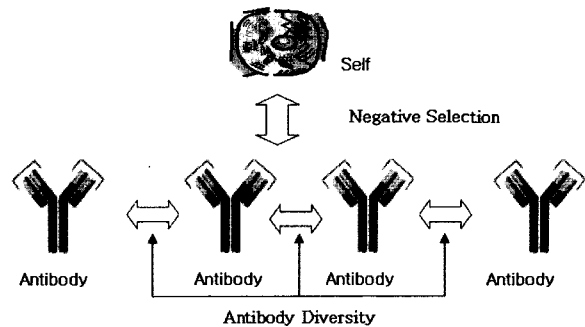


그림 2. 항체 생성의 원리
Fig. 2. The Principle of Antibody Generation.

tolerance condition들이 필요하다. 만약 비자기와 같은 수의 tolerance condition이 존재한다면 모든 비자기들을 탐지할 수 있을 것이다. 그러나 시스템의 기억공간은 한계가 있고 따라서 tolerance condition의 수를 줄일수록 더 효율적인 하드웨어 시스템을 구현할 수 있게 된다. 이 때문에 antibody diversity 원리를 구현하는 것은 중요하다. 즉 tolerance condition 생성시 tolerance condition을 가능하면 다양하게 생성함으로써 antibody diversity 원리가 구현 가능하며 이를 통하여 한정된 수의 tolerance condition만으로 최대한 비자기를 탐색할 수 있는 공간을 넓힐 수 있으며 비자기 탐색율도 높일 수가 있다.

B. Antigen presenting cell (APC)

APC는 다음과 같은 과정으로 T 세포가 항원을 구별하는 것을 지원한다.

1. APC가 항원을 삼킨다.
2. APC내의 효소가 항원을 조각낸다.
3. 이 조각은 APC의 표면으로 운반되고 MHC와 연결된다
4. T 세포가 MHC와 연결된 항원을 구분하여 제거한다.

즉 APC는 비자기(항원)와 자기를 사전에 구분하여 표시해주는 세포이다. 실제로 온라인 하드웨어 테스트 시스템에서 구현되는 APC는 항체(tolerance condition)가 자기(정상 상태)/비자기(비정상 상태)를 구분하기 전에 미리 가능한 최대로 자기(정상상태)를 찾아낸 후 불확실한 상태만 다음으로 넘겨주는 역할을 한다. 이렇게 APC를 통과한 나머지 상태들에 대해서 tolerance condition이 비정상 상태(비자기)와 정상상태(자기)를 구분하게 되는 것이다. 이렇게 APC를 온라인 하드웨어 테스트를 위한 인공면역 시스템에 구현함으로써 APC

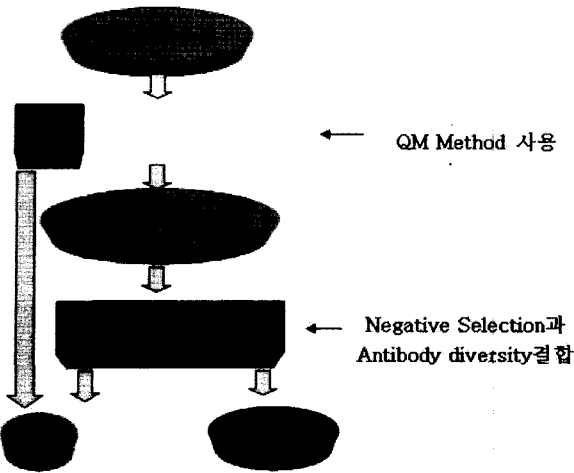


그림 3. APC를 포함한 하드웨어 테스트 시스템의 실행 과정

Fig. 3. The Process of Hardware Test System Including APC.

없이 단순히 tolerance condition만으로 자기/비자기를 구분해내는 시스템보다 더 나은 성능의 시스템을 개발할 수가 있다. 다음 그림 3에서 실제로 APC를 포함한 하드웨어 테스트 시스템이 실행되는 과정을 보여준다. 구현된 APC는 1차적으로 세포(states)들로부터 자기를 검출해낸다.. 확실하게 검출된 자기 외에 불확실한 state는 다음으로 넘겨져 negative selection과 antibody diversity원리에 의해 생성된 tolerance condition에 의해 자기와 비자기로 구분된다.

C. Quine-McCluskey method를 이용한 APC 구현

본 절에서는 APC 시스템을 하드웨어로 구현하는 방법을 설명한다. Quine-McCluskey method(QM method)는 Boolean expression을 간략화 시키는 방법으로 널리 알려져 있으며, 표를 이용하여 체계적으로 모든 필수 주항 (essential prime implicant)을 찾아내는 방법이다. 본 논문에서는 검출을 희망하는 자기 상태에 대해서 QM method를 이용하여 APC를 설계한다. 다음은 APC설계에 사용한 QM method를 정리한 것이다.

Stage 1 PI를 구한다.

Step 1

1의 개수별로 최소항(minterm) 그룹을 묶은 후 1의 개수 순서대로 배열한다.

Step 2

인접 그룹끼리 비교해서 1비트가 다른 최소항끼리 결합하여 새로운 열을 작성하며 .결합된 최소항은 체크

표시를 한다. (제거된 비트는 로 표시)

Step 3

새롭게 작성된 열의 최소항 그룹에 대해서 step 2를 수행한다.

Step 4

더 이상 최소항 그룹을 결합할수 없는 때까지 step 2를 반복한 후 과정을 종료한 후 체크가 되지 않은 최소항을 PI로 결정한다.

Stage 2 EPI(Essential Prime Implicant)를 구한다.

Step 1

Stage 1에서 구해진 PI로 PI chart를 작성한다.

Step 2

1개의 PI항에만 포함되는 최소항들을 표시함으로써 EPI를 찾아낸다

Step 3

찾아낸 EPI의 합이 주어진Boolean expression을 가장 간략화한 식이 된다.

물론 정보가 알려져 있는 자기 문자열을 모두 검출해내는 APC를 설계할 수도 있으나 시스템의 한계가 있으므로 가능한 최고의 성능을 낼 수 있도록 한정된 개수의 자기만을 검출할 수 있는 최적의 APC를 설계하는 것이 더 합리적이다. 이때 APC에서 사전 검출할 자기를 선택하는데 있어 랜덤하게 선택하는 방법도 있으나 APC의 자기 검출 성능의 더 나은 향상을 위해서 다음과 같은 알고리즘을 적용하여 일정 개수의 자기를 선택한 후 그 자기에 대해서 APC를 설계한다.

D. APC 설계를 위한 자기 선택 및 Tolerance Condition 생성 알고리즘

본 논문에서 제안하는 알고리즘에서 가장 먼저 할 일은 최적의 효율을 가진 APC를 설계하기 위해서 APC가 검출할 자기를 미리 선택하는 일이다. 이를 위해 다음과 같은 알고리즘으로 APC가 사전 검출해야 하는 자기를 미리 선택한다. 그 후 미리 선택된 자기를 제외한 나머지 자기 문자열에 대해서 antibody diversity 원리에 바탕을 둔 negative selection 방식으로 tolerance condition을 생성하게 된다.

Tolerance condition 생성 알고리즘은 그림 4와 같으며 구체적으로 다음과 같은 과정으로 진행된다.

Step 1. k 번째 tolerance condition에 대해 n 개의

자기 문자열들을 모두 비교해서 그 중에 가장 가까운

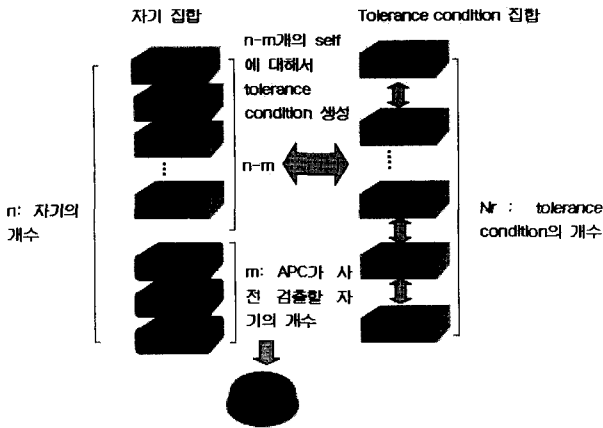


그림 4. APC와 tolerance condition 설계 알고리즘
Fig. 4. The Design algorithm of APC and tolerance condition.

해밍 거리를 가진 i 번째 자기 문자열을 찾는다.

Step 2. N_r 개의 tolerance condition에 대해서 과정을 반복하여 가장 가까운 자기 문자열로 판정된 횟수를 카운트한다.

$$f(i) = \sum_{k=1}^{N_r} \delta(i, \arg \min_{j=1}^n (H(\sigma_j, \tau_k))) \quad (1)$$

- n : 자기문자열의 개수
- N_r : tolerance condition 의 개수
- σ_j : j th self string ($1 \leq j \leq n$)
- τ_k : k th tolerance condition ($1 \leq k \leq N_r$)

여기서

$$H(XY) = \sum_{i=1}^N (x_i \oplus y_i), X, Y \in \{0, 1\} : \text{Hamming Distance}$$

: Hamming Distance (2)

$$\delta(i, j) = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} : \text{Kronecker Product} \quad (3)$$

로 정의된다

Step 3. 가장 많이 선택된 자기 문자열을 순서대로 m 개만큼 선택하게 된다. 이때 선택되는 m 개의 자기 문자열에 대해서 APC를 설계

$$F = \{f(i) : 1 \leq i \leq n\}$$

$$\mathcal{S} = \{j \mid j \in \arg \max_m (F)\} \quad (4)$$

여기서

$\max_m(X) = \{x \in X \mid \text{집합 } X \text{ 중 첫 번째부터 } m \text{ 번째 큰 수들의 집합}\}$

\mathcal{S} : APC를 위해 사전에 선택한 자기 문자열의 인덱스 집합

m : APC의 크기(APC를 위해 사전 선택되는 자기 문자열의 개수)

이다

이렇게 선택된 m 개의 자기 문자열에 대해서 APC를 설계함으로써 가장 최적의 APC를 설계할 수 있다. 그 후 APC를 위한 m 개의 자기 문자열을 제외한 $n-m$ 개의 자기 문자열에 대해서 antibody diversity 원리에 기반한 유전자 알고리즘을 통하여 N_r 개의 tolerance condition을 생성하게 된다. Tolerance condition 생성의 적합도를 평가하기 위한 함수는 다음과 같이 구성된다.

$$Fitness = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_r} H(\tau_i, \tau_j) + \sum_{i=1}^{N_r} \left(\min_{j \in \mathcal{S}} (H(\sigma_j, \tau_i)) \right) \quad (5)$$

적합도 함수의 첫번째 항은 antibody diversity 원리를 구현한 것으로 tolerance condition들의 Hamming 거리의 합을 최대가 되도록 tolerance condition을 생성한다. 그리고 두 번째 항은 negative selection을 의미하며, 알려진 자기와 각각의 tolerance condition과의 최소 Hamming 거리의 합들을 최대로 하여 tolerance condition을 생성하게 된다.

E. 유전자 알고리즘 최적화

유전자 알고리즘은 자연의 진화 메커니즘에 기반한 최적화 알고리즘이다.

앞 절의 알고리즘을 통해서 선택된 m 개의 자기를 제외한 $n-m$ 개의 자기에 대해서 antibody diversity 원리에 기반한 유전자 알고리즘을 통해서 tolerance condition이 생성한다. N_r 개의 tolerance condition이 염색체로 코딩되며, 유전자 연산자(교차 연산, 돌연변이 연산) 들을 통해 최적의 tolerance condition을 생성하는데 이러한 방식은 실제 생체 면역 시스템과 아주 유사한 방식이다. GA 최적화 과정은 그림 5와 같이 진행된다.

유전자 코드는 tolerance condition을 이진수로 코딩한다. 십진 카운터에 대해서 tolerance condition을 생성할 경우 tolerance condition 하나의 크기는 10bit가 되고 실제로 코딩되는 tolerance condition의 개수에 따라서 $10 \times N_r$ bit 의 이진 문자열이 된다. 이렇게 코딩된 유전자 코드를 가지고 표 2와 같은 유전자 파라미터를 적용하여 유전자 최적화 연산을 수행한다.

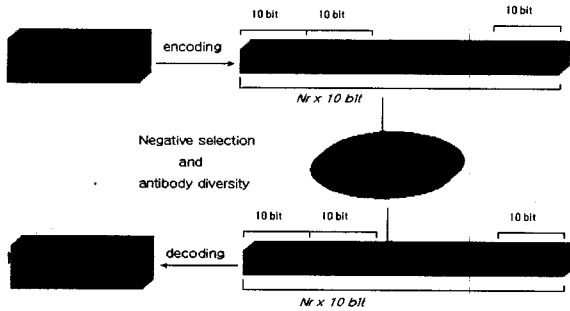


그림 5. GA 최적화 과정
Fig. 5. GA Optimizati.

표 2. 유전자 파라미터
Table 2. Genetic Parameters.

Parameter	
개체 수	100
세대 수	500
염색체 크기	$10 \times N_r (N_r = 25, 50, 75, 100, 125)$
돌연변이 확률	0.7 / 개체의 길이
교차 확률	0.7

IV. 모의 실험 및 결과

본 논문에서 제안된 알고리즘을 십진 카운터에 적용함으로써 그 성능을 확인한다. 모의 실험을 위한 자기 문자열의 구조는 그림 6과 같이 10비트의 문자열로 구성되며 상위 2비트는 오퍼레이션을 결정하며 표 3과 같이 정한다.

십진 카운터에서 적절한 자기문자열의 개수는 그림 6과 같이 40개가 된다 ($40 \times 10 \text{ bits}$). 이때 APC에서 사전 검출할 자기들의 개수 (APC 사이즈)를 각각 5,10,15개로 정하고 Tolerance condition의 개수를 각각 25, 50, 75, 100, 125개로 정한 후 비자기 검출 성공률을 구해보았다. 여기서 비자기 검출 성공률은 전체 비자기 수에 대한 tolerance condition이 비자기를 비자기라고 제대로 검출해내는 회수의 비율을 의미한다.

그림 7는 APC사이즈 (즉 APC가 사전 검출할 자기들의 개수)를 5로 결정한 후 tolerance condition의 개수를 각각 25,50,75,100,125개로 정했을 때, 1) 기존의 greedy detector^[12], 2) antibody diversity 원리를 적용하고 APC를 사용하지 않았을 때, 3) APC를 사용하고 사전 자기를 랜덤으로 선택하였을 때, 4) APC를 위한

Operation (Count Enable/Reset)/Previous state /Next state

.....	10/0000/0001
.....	00/0001/0001
.....	11/0001/0000
.....	01/1001/0000

그림 6. Self String의 구조
Fig. 6. The Structure of Self String.

표 3. Operation Bits.
Table 3. Operation Bits.

	00	10	01,11
Operation	Counter Disable	Counter Enable	Reset

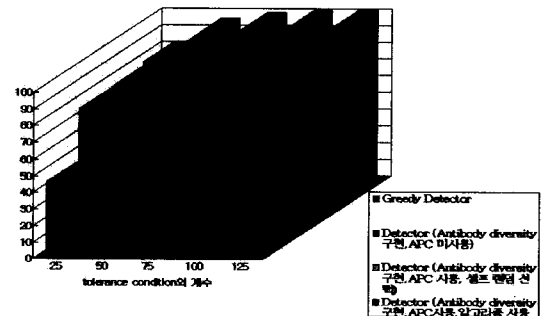


그림 7. 비자기 검출 성공률비교 (APC 크기가 5인 경우)
Fig. 7. Nonself detection rates (APC Size : 5).

사전 자기를 제안한 알고리즘을 이용하여 선택했을 경우의 네 가지 detector(tolerance conditions) 를 비교하여 검출 성공률을 보여 주고 있으며, 그림 8은 APC 사이즈를 10으로 정했을 경우 각각의 결과를 보여주고 있다. 결과를 살펴보면 기존의 greedy detector에 비해 antibody diversity 원리는 적용하여 생성한 detector (tolerance conditions)가 비자기 검출 성공률에서 훨씬 더 나은 성능을 보여준다.. 특히 적은 수의 tolerance condition을 사용할수록 본 논문에서 제안한 detector의 성능의 우수성을 더 잘 확인할 수가 있는데 그 이유는 antibody diversity 원리를 적용함으로써 detector들이 최대한 분산되어 더 넓은 비자기 탐색영역을 가지기 때문이며 이 것은 생체 면역 알고리즘에서의 antibody diversity 원리를 적용한 항체 생성 원리와 일치한다.

그림 9,10는 tolerance condition의 개수를 25,50으로

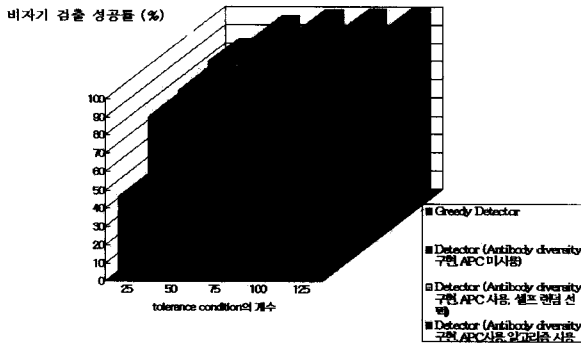


그림 8. 비자기 검출 성공률 비교 (APC 크기가 10인 경우)

Fig. 8. Nonself detection rates (APC Size : 10).

비자기 검출 성공률 (%)

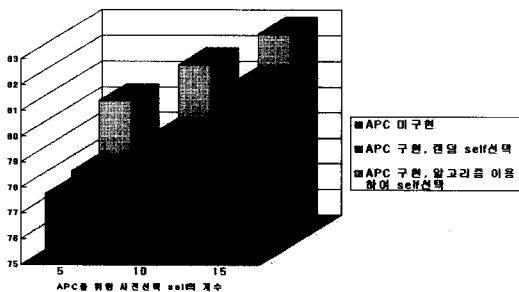


그림 9. 비자기 검출 성공률 비교 (tolerance condition의 개수가 25인 경우)
Fig. 9. Nonself detection rates (TCs : 25).

정한 후, APC사이즈에 대한 세가지 detector의 비자기 검출 성공률을 보여주고 있다. APC를 적용한 detector와 적용하지 않은 detector를 비교해보면 APC를 적용한 detector들이 역시나 더 나은 비자기 검출 성공률을 보인다. 여기서 APC에서 검출해야 할 자기의 개수를 각각 5,10,15 개로 정하고 모의실험 해본결과 당연히 많은 수의 자기를 APC가 미리 검출할수록 더 좋은 결과를 보여주고 있다. 하지만 시스템 효율상 무조건 많은 수의 자기를 APC가 검출해내는 것보다는 가장 최적의 수만을 APC가 검출해내는 것이 더 시스템 설계에 효율적이다. 본 예에서는 10개 정도가 가장 최적의 수로 보여진다.

그림 9,10에서 확인할 수 있듯이 APC를 이용하여 자기를 사전 검출할 때 검출할 자기를 랜덤으로 선택할 때와 3장에서 제안한 알고리즘으로 선택한 경우의 성능을 확인해보면 본 알고리즘으로 자기를 사전 결정한 후 APC를 설계하는 것이 더 나은 성능을 보여줌을 확인할 수 있다. 이때 APC의 크기가 작을수록 본 알고리즘의 효율은 더 높아지고 APC의 크기가 클수록 랜덤으로 선택한 경우와의 차이가 줄어들어 가는 것을 알 수 있다. APC

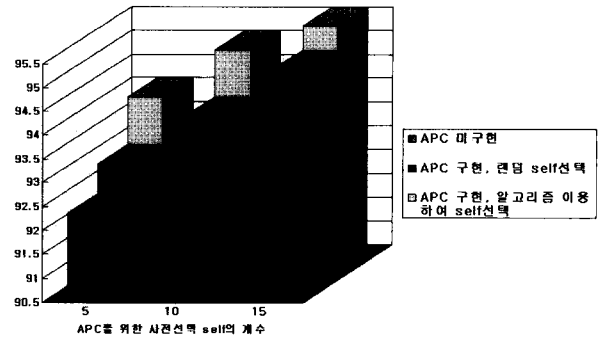


그림 10. 비자기 검출 성공률 비교 (tolerance condition의 개수가 50인 경우)
Fig. 10. Nonself detection rates (TCs: 50).

의 크기를 늘임에 따라 APC를 설계할 때 더 많은 시스템 비용이 필요하게 되고 이 때문에 될 수있는 대로 APC의 크기를 줄이는 더 효율적이다. 따라서 본 논문에서 제안한 APC 설계 알고리즘을 사용하는 것이 자기를 랜덤으로 선택하는 것보다 훨씬 더 효율적인 방법이 되는 것이다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 십진 카운터와 같은 간단한 FSM에 적용하는 경우에는 tolerance condition 생성시 별 문제가 없으나 자기 문자열의 크기와 개수가 증가하는 경우에 GA를 통하여 tolerance condition을 생성하는데 많은 시간이 소모된다. 추후 과제로 이를 해결하기 위한 새로운 방식의 진화 알고리즘이 적용되어야 할 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 fault-tolerance 하드웨어에서 가장 기본이 되는 온라인 하드웨어 테스트 시스템 구현을 위하여 새로운 인공 면역 알고리즘을 제안하였다. 새로운 인공 면역 알고리즘은 일단 알려진 자기 정보만으로 항체 즉 tolerance condition을 가장 최적으로 생성하는 알고리즘이다. 이를 위해서 본 논문에서는 antibody diversity 원리를 적용하여 적은 수의 tolerance condition만으로 최대한 많은 수의 비자기를 검출할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 즉 생체면역 시스템에서 항체생성의 중요한 원리인 antibody diversity를 인공 면역 알고리즘에 적용함으로써 오류 상태 발생시 최소한의 tolerance condition만으로도 최대한의 오류상태를 검출할 수 있는 것을 확인하였다. 또 한편으로 더 나은 성능을 위해 역시 생체 면역 시스템에서 중요한 세포 중에 하나인 antigen presenting cell을 Quine-McClus key

방식으로 구현하였다. 이를 구현함으로써 사전에 원하는 일정수의 자기를 미리 검출하여 더 나은 비자기 검출율을 보여주게 되었다.

[감사의 글]

본 연구의 아이디어 도출에 많은 도움을 주신 이화여대 분자생명과학부 세포 신호 전달 연구 센터(Center of Cell Signaling Research)의 송은주 박사에게 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Y. Chen and T. Chen, "Implementing fault-tolerance via modular redundancy with comparison," IEEE Transactions on Reliability, Vol. 39, Issue: 2, Jun.1990, pp. 217-225
- [2] S. Dutt and N.R Mahapatra, "Node-covering, error-correcting codes and multiprocessors with very high average fault tolerance," IEEE Trans. Comput., Vol. 46, Sep.1997, pp.997-1914
- [3] P. K. Lala, Digital Circuit Testing and Testability, New York: Academic, 1997.
- [4] P. K. Harmer, P. D.Williams, G. H. Grunsch, and G. B.Lamont, "An Artificial Immune System Architecture For Computer Security Applications," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6, No.3, Jun. 2002, pp. 252-280
- [5] S. Forrest, S.A. Hofmeyr, A. Somayaji, and T.A. Longstaff, "A Sense of Self for Unix Process-ing," Proc.IEEE Symp. Computer Security and Privacy, May, 1996, pp.120-128
- [6] S.Forrest, L.Allen, A.S. Perelson, and R.Cheru-kuri, "Self-Nonself Discrimination In A Computer," Proceedings of IEEE Symposium on Research in Security and Privacy, 1994, pp.202-212
- [7] D.Dasgupta, "An artificial immune system as a multi-agent decision support system," Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics, Oct. 1998, pp.3816-3820
- [8] S.A Hofmeyr and S. Forest, "Architecture for an artificial immune system," Evol.Comput.,vol.8, no. 4, pp.443-473
- [9] P.D'haeseller, S. Forrest, P. Helman, "An Immunological Approach to Change Detection: Algorithms, Analysis and Implications," Proc. Of IEEE Symp. On Security and Privacy, 1996.
- [10] R.A. Goldsby, T.J. Kindt, and B.A Osborne, Kuby Immunology, 4th ed. W.H Freeman and Company: New York, 2000.
- [11] Roitt I, Brostoff J, Male DK. Immunology. 5th ed. St Louis, MO: Mosby International Limited, 1998.
- [12] D.W. Bradley and A.M. Tyrrell, "Immunotronics -Novel Finite-State-Machine Architectures With Built-In Self-Test Using Self-Nonself Differentiation," IEEE Trans. On Evolutionary Computation, Vol.6, No. 3, Jun. 2002, pp. 227-238
- [13] D.E Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Matching Learning, Addison-Wesley:MA 1989.

저자 소개

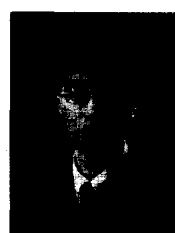


이 상 형(학생회원)
1996년 2월 연세대학교 전자공학과(공학사).
1999년 2월 연세대학교 전자공학과(공학석사).
현재 연세대학교 전기전자공학과 박사 과정.

<주관심분야: Computation intelligence, artificial immune system, and fuzzy control.>

박 민 용(종신회원)

전자공학회 논문지 제 32권 B편 2호 참조



김 은 태(종신회원)
1992년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사, 전체수석).
1994년 2월 연세대학교 전자공학과 석사과정 졸업(공학석사).
1999년 2월 연세대학교 전자공학과 박사과정 졸업(공학박사).

1999년. 3월 ~ 2002년 2월 국립한경대학교 제어계측공학과 조교수.

2002년 3월 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학부 조교수.

2003년 University of Alberta, visiting researcher
1998년 ~ 현재 IEEE TFS, IEEE SMC, IEEE

CAS, FSS 등에서 심의위원 활동 중.

2003년 대한전자공학회 해동상 수상.

<주관심분야: Computational intelligence, 지능형 로봇>