다중의 결함을 갖는 하이퍼큐브 진단 알고리즘

최혜연⁰ 김동군 이충세
충북대학교 전자계산학과
yeovon@just.chungbuk.ac.kr, tnt2002@algo.chungbuk.ac.kr
csrhee@cbucc.chungbuk.ac.kr

Hypercube Diagnosis Algorithm for Large Number of Faults

Hui-Juan Cui⁰ Dong-Kun Kim Chung-Sei Rhee
Dept. of Computer Science, Chungbuk National University

요 약

대부분의 진단 알고리즘은 PMC 모델을 바탕으로 결함의 개수가 t개를 초과하지 않는다는 t-진단가능 시스템의 특성을 이용한다. 하지만, 병렬처리 시스템의 규모가 커짐에 따라 시스템 내에서 발생되는 결함의 빈도가 높아지게 된다. 즉, 진단 알고리즘에서 가정하는 결함의 개수 t는 병렬처리 시스템 안에 있는 노드의 수에 비해 상당히 작은 개수이며, 결함의 개수가 t개를 초과할 경우는 거의 고려하지 않았다. 본 논문에서는 결함의 개수가 t개를 초과하는 경우에 대하여 진단의 정확여부를 판단할 수 없는 충분히 작은 개수의 노드가 존재한다는 것을 허락함으로서, 진단 가능한 결함의 최대 수를 증가시키는 알고리즘을 제안한다.

1. 서 론

병렬처리 시스템의 규모가 커짐에 따라 시스템 내에서 발생되는 결함의 빈도가 높아지고 있다. 결함의 발생으로 인하여 시스템이 다운되고 이를 복구하는데 소요되는 비용은 병렬처리 시스템의 성능을 저하시키는 가장 큰 요인이기 때문에 시스템의 신뢰성과 가용성을 향상시키기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 다양한 병렬처리 시스템 중에서 하이퍼큐브 형태의 병렬처리 시스템은 정규적이며 계층적인 구조를 갖는다. 이런 하이퍼큐브의 특성은 효율적인 진단 알고리즘을 개발하는데 유리하게 적용될 수 있다.

시스템 안에 있는 노드는 진단되지 않거나, 결함 또는 결함이 아닌 세 가지 상태를 가질 수 있다. 시스템을 진단할 때, 결함이 아닌 노드를 결함이라고 진단하지 않고 결함인 노드를 결함이 아니라고 진단하지 않은 경우를 정확한 진단이라고 한다. 모든 노드들이 상태가 결함이거나 결함이 아닌 두 가지 상태로만 진단된 경우(즉, 진단되지 않은 경우를 제외한)를 완전한 진단이라고 한다[1],[2]. 정확한 진단은 반드시 완전한 진단인 것은 아니며, 완전한 진단도 반드시 정확한 진단은 아니다. 이상적인 진단은 정확하고도 완전한 진단이다. 진단 가능한 최대 노드 수 d는 진단 알고리즘이 정확하고도 완전할 수 있는 최대의 수이다. 사용되는 대부분의 테스트 그래프는 t-진단 가능하다. 시스템 내에 d개를 초과하는 결함노드가 존재할 경우, 진단의 가능여부에 대한 문제를 over-d 문제라고 정의한다. 이런 경우에는 불완전하지만 정확한 진단이 수행되어야 한다.

멀티프로세스 시스템의 진단 가능한 노드 수 d는 통신 그래프의 연결성에 의하여 결정된다. 하이퍼큐브 시스템은 연결도 d가 선형적으로 증가됨에 따라 노드의 개수는 지수 적으로 증가하는 특성을 갖는다. 대규모의 하이퍼큐브 멀티프로세스 시스템은 수천 개의 노드를 포함하고 있다. 이런 복합한 환경에서 많은 노드에서 결함이 발생될 수 있다.

Somani, Agarwal, Avis는 over-d 결함 진단에 대하여 언급한 적이 있지만[3], 그들은 비적응적 진단의 경우만을 고려하였다. [2]에서 확률적인 방법을 이용한 over-d 문제의 해결이 시도된 적이 있다.

본 논문에서는 결함의 개수가 t개를 초과하는 경우에 대하여 진단의 정확여부를 판단할 수 없는 충분히 작은 개수의 노드가 k개 존재한다는 것을 허용함으로서, 진단 가능한 결함의 최대 수를 증가 시키는 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 용어에 대한 정의와 관련연구를 살펴본다. 3장에서는 제안하는 진단 알고리즘을 기술하고, 마지막으로 4장에서는 결론과 향후 연구 방향에 대하여 알아본다.

2. 관련 용어 정의

Preparata, Metze와 Chien은 처음으로 시스템 레벨 진단의 개념을 사용하는 결함 진단 방법을 제안하였다[4]. PMC 모델이 제안된 후 많은 연구가 이 모델의 특성을 사용하여 진행되었고 진단 알고리즘은 크나큰 발전을 이루었다. Nakajima[5]는 시스템을 진단하기 위하여 수행되는 테스트가 동적인 방법에 의하여 선택적으로 수행되는 적응적 진단 방법을 제안하였고, Vaid와 Pradhan[1]은 노드 사이의 완전 연결에 대한 가정을 완화시키는 ASDA(Adaptive Safe Diagnosis Algorithm) 알고리즘을 제안하였으며 Feng은 하이퍼큐브의 구조적인 특징을 이용하는 적응적 진단 알고리즘 HADA(Hypercube Adaptive Diagnosis Algorithm)와 IHADA(Improved HADA)를 제안하였다[6]. Choi와 Rhee는 HADA와 IHADA의 방법과

다르게 링을 분할하기 위하여 신드롬을 분석하여 분할하는 차원을 선택하는 적응적 큐브 분할 방법을 이용한 진단 알고리즘을 제안하였다[7]. HADA/IHADA와 적응적 큐브 분할 방법은 하이퍼큐브의 모든 노드를 하나의 링에 임베딩 하는 반면에 Kranakis와 Pelc는 전체 하이퍼큐브 H_n을 $H_j \times H_{n-j}$로 분할하여 진단을 수행하는 알고리즘 HYP-DIAG를 제안하여 진단의 효율을 높였다[8]. 하지만 진단 가능한 결함의 최대 수를 n으로 가정하였기에 대규모의 병렬처리 시스템에 적합하지 않다. Somani와 Peleg는 전통적인 t-진단가능 시스템의 단점을 감안할 수 있는 t/k-진단가능 시스템을 제안하였다[9].

시스템에서 진단 가능한 결함의 수는 시스템의 각 노드들의 연결 정도에 의존한다. 대부분의 병렬처리 시스템에서 얻어진 t의 값은 시스템에 있는 프로세서의 수와는 상관없이 매우 작다. 이것은 병렬 처리 시스템의 각 노드들이 적은 수의 통신 링크로 연결되어 있기 때문이다. 하이퍼큐브는 t-진단가능 시스템으로 각 노드가 n 개의 링크를 갖고 있기 때문에 최대로 진단할 수 있는 결함의 수는 t=n이다.

정의 1. 시스템은 t-진단가능 하다. 만약 테스트하는 노드에서 얻어진 테스트 결과가 주어졌을 때 ,결함 노드들의 수가 t 개를 넘지 않는다는 조건 하에서 모든 결함 노드들이 확인될 수 있다.

프로세서들 사이에 제한된 연결에도 불구하고 시스템의 진단 능력을 증가시키는 방법을 제안해 왔다 [10],[11]. Somani와 Peleg는 다음과 같이 t/k-진단가능 시스템을 제안하였다 [9].

정의 2. n 개의 노드들의 시스템 S는 t/k-진단가능 하다. 만약 결함의 집합 F에 대하여 시스템에서 얻어진 임의의 신드롬이 주어졌을 때, 결함 노드들의 수가 t 개를 넘지 않는다는 조건 하에서 모든 결함 노드들은 집합 F'안에 분리될 수 있다. 여기서, 집합 F' 안에는 많아야 K 개의 노드가 결함이 아닐 수 있다. 즉, $|F'| \le |F| + k$ 이다.

임의의 정수 n에 대하여, n차원 하이퍼큐브(n-큐브)는 그래프 $H_n = (V_n, E_n)$으로 표현한다. 여기서, V_n은 길이가 n인 이진수의 집합이고, E_n은 $\{\{u, v\} : u, v \in V$이고, u와 v는 정확히 하나의 비트만 다르다$\}$인 집합이다. n-큐브는 각 노드가 차수 n을 갖는 2^n개의 노드로 구성된다. 그러나 n-큐브에서 진단될 수 있는 노드의 수는 최대 n이다. 본 논문에서는 노드의 불확실 진단을 허용함으로써 최대로 t(t>n) 만큼의 결함을 진단할 수 있다.

n>1에 대한 n-큐브는 해밀턴 그래프가 존재한다. 즉, 이것은 모든 노드들을 포함하는 원소들의 사이클이며, RGC(Reflected Gray Code)를 사용하여 효율적으로 구성될 수 있다[12]. 이런 사이클을 RGC-링이라 한다. n-큐브는 $0<j<n$에 대하여 두 그래프의 곱 형태인 $H_j \times H_{n-j}$로 표현될 수 있으며, 그래프 $H_j \times R_{n-j}$로 임베딩 할 수 있다. 여기서, R_{n-j}는 H_{n-j}에 있는 노드로 구성된 RGC-링이다. 이와 같은 임베딩 방법은 다음의 알고리즘에서 중요한 역할을 한다. 즉, n-큐브 H_n은 그래프 R_{n-j}를 하나의 노드로 하는 2^j개의 서로 다른 그래프로 이루어진 j-큐브 H_j를 구성할 수 있다. H_j와 인접한 노드에 대응하는 링들을 *adjacent*라고 한다. 링 R에 있는 임의의 노드 v에 대하여, R에 인접하는 서로 다른 링 속에 있는 v에 대한 j개의 이웃들을 v의 *foreign neighbors*라 한다. 알고리즘은 R_{n-j}에 있는 노드를 테스트 할 때, 한쪽 방향(시계방향)으로 모든 노드들의 테스트를 수행한다. 이것은 한쪽 방향의 테스트 결과만으로 각각이 링이 결함 노드를 포함하고 있는지 아닌지를 확인할 수 있음을 의미한다. 얻어진 신드롬 속에 1을 하나도 포함하고 있지 않은 링들을 *healthy*라 하고 그렇지 않으면 *unhealthy*로 부를 것이다. 만약 *unhealthy* 링이 *healthy* 링과 인접한다면 *guarded*이고 그렇지 않으면 *unguarded*이다.

3. t/k-HYP-DIAG 알고리즘 제안

본 논문에서 제안하는 진단 알고리즘은 Kranakis 와 Pelc이 제안한 HYP-DIAG 알고리즘을 이용한다. HYP-DIAG 알고리즘은 하이퍼큐브의 t-진단가능 하다는 특성을 바탕으로 하여 진단할 하이퍼큐브를 모든 결함 노드를 포함할 수 있는 최소 크기의 RGC 링으로 분할을 한다. HYP-DIAG 알고리즘에서는 진단 가능한 최대의 결함 수 가 n이라고 가정하였으므로 하이퍼큐브를 분할하는 RGC 링의 크기는 $r = \lfloor \log n \rfloor + 1$이다. n 개를 초과하는 결함을 진단하기 위해서, over-d 결함문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 하이퍼큐브의 t/k-진단가능 특성을 이용하여 RGC 링의 크기를 $r = \lfloor \log t \rfloor + 1$로 변환하였다.

정리 1. 하이퍼큐브는 $t=(k+1)n-(k+1)(k+2)/2+1$에 대하여 t/k-진단가능 하다 ($k \le n$, $n>3$).

증명 : [9]에 있는 정리 2로 증명을 대신한다.

알고리즘 t/k-HYP-DIAG

단계 1. H_n의 서브그래프 $H_j \times R_r$을 구성한다. 여기서, $r = \lfloor \log t \rfloor + 1$, $j=n-r$이고, R_r은 H_r 안에 있는 RGC-링이다. 시계방향으로 R_r의 모든 노드들의 테스트를 수행한다. *healthy* 링을 모두 확인한다. *healthy* 링의 모든 노드를 *fault-free*로 진단한다.

단계 2. 인접한 *healthy* 링의 모든 노드를 테스터로서 사용하여 모든 *guarded* 링에 있는 노드를 진단하다.

단계 3. 만약 *unguarded* 링이 존재한다면, *foreign neighbors* 가 모두 결함을 갖는 유일한 노드 *x* *즉 판단 할 수 없는* 노드 만을 제외한 모든 노드를 진단한다.

t/k-진단가능 시스템에서 k가 커지면 불확실 진단의 개수가 늘어나면서 진단의 정확성이 떨어지게 되므로 k가 작으면서도 진단 가능한 노드의 최대수가 많이 증가되기를 원한다. 그러므로 본 논문에서는 k=1로 가정하여 진단가능한 노드 수가 t=2(n-1)일 경우를 연구한다.

따름정리. 하이퍼큐브는 t=2(n-1)에 대하여 t/1-진단가능 하다.

증명 : 정리 1에서 k=1인 경우이므로 명백하다.

보조정리 3.1 $n \ge 12$ 에 대하여,만아야 3개의 unguarded RGC 링이 존재한다.

증명 : 4개의 unguarded RGC 링이 존재한다고 가정하면, unguarded RGC 링의 인접 링들이 unhealthy 링이기 때문에 4개의 unguarded 링과 4j 개의 unhealthy 링을 합한 4j+4개의 unhealthy 링이 존재한다. 그중에서 중복 계산된 unhealthy 링의 개수가 많아야 8개 이다. 그러므로 unhealthy 링은 적어도 (4j-4)개 존재한다.
4개의 unguarded RGC 링이 존재한다는 가정은 다음과 같은 모순을 일으킨다.

$$4j-4=4(n-r)-4=4n-4(\lfloor \log t \rfloor+1)-4 > t,\ n \geq 12$$

보조정리 3.2 진단을 할 수 없는 노드는 많아야 하나 존재한다.
증명 : 이러한 경우는 이웃하고 있는 노드들이 모두 결함인 경우이다. 이것은 따름정리에서 k=1로 가정할 때의 경우이므로 명백하다.

단계 1은 2^n 만큼의 테스트가 필요하고 단계 2와 3은 최악의 경우에 많아야 3n/2 만큼의 테스트를 해야 한다([8]에 있는 정리 3.1로 증명).

4. 결론

시스템-레벨 진단 알고리즘은 병렬시스템에서 중요한 연구 분야이다. 또한 하이퍼큐브 구조는 계층적이며 정규적인 특성을 가지고 있으며 최근 들어 병렬처리 시스템에 많이 이용되고 있다. 기존의 하이퍼큐브 진단 알고리즘은 진단 가능한 노드의 수가 n보다 작거나 같다는 가정을 하고 있다. Kranakis와 Pelc는 전체 하이퍼큐브 H_n을 결함을 모두 포함할 수 있는 서브 링을 하나의 노드로 하는 새로운 하이퍼큐브 $H_j \times R_{n-j}$로 분할하여 진단을 수행하는 알고리즘 HYP-DIAG를 제안하였다. 허나 이 알고리즘 역시 진단가능한 노드의 개수가 최대 n이라는 단점을 갖고 있다. Somani와 Peleg는 진단의 정확여부를 판단할 수 없는 노드의 존재를 허락함으로서 진단가능한 결함의 최대 수를 증가하는 t/k-진단가능 시스템을 제안하고 하이프큐브가 t/k-진단가능 시스템이라는 사실을 증명하였다.

본 논문에서는 알고리즘 HYP-DIAG을 바탕으로 t/k-진단가능 시스템의 개념을 적용하여 결함 노드수 t>n 일 경우의 over-d 문제를 해결하는 t/k-HYP_DIAG 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘 진단가능한 최대의 노드 수를 증가하는 대신에 소량의 불정확 진단을 허용함으로써 HYP-DIAG 알고리즘의 효율성을 이용하고 결함의 수가 많을 수 있는 대형 멀티미디어에서도 이용가능하게 하였다. t/k-HYP-DIAG 알고리즘은 정확하지만 불완전한 알고리즘이다. k=1 일 경우 2n-2개의 결함을 진단할 수 있게 함으로써 적은 량의 테스트 로 비교적 우수한 진단능력을 보여준다. 앞으로의 연구방향은 시스템-레벨의 가정의 제약점을 제거하고 분산적인 환경에서 수행되는 진단알고리즘에 대한 연구이다.

참고문헌

[1] N.H. Vaidya and D.K. Pradhan, "Safe System Level Diagnosis", IEEE Trans. Computers, vol. 43. no. 3, pp. 367-370, Mar. 1994.
[2] A.K. Somani, V.K. Agarwal, "Distributed Diagnosis Algorithms for Regular Interconnected Structures", IEEE Trans. Computers, vol. 41, no. 7, pp. 899-900, July 1992.
[3] A.K. Somani , V.K. Agarwal , D. Avis, "A Generalized Theory For System Level Diagnosis", IEEE Trans. Computers, vol. 36 no. 5, pp. 538-546, May 1987.
[4] F.P. Preparata, G. Metze, and R.T. Chien, "On the Connection Assignment Problem of Diagnosable Systems", IEEE Trans. Electronic Computers, no. 12, pp. 848-854, Dec. 1967.
[5] N. Nakajima, "A New Approach to System Diagnosis", Proc. 19th Allertion Conf. Comm., Control, and Computing, pp. 697-706, 1981.
[6] C. Feng, L.N. Bhuyan, and F. Lombardi, "Adaptive System-Level Diagnosis for Hypercube Multiprocessors", IEEE trans. Computers, vol. 45, no. 10, pp. 1157-1170, Oct. 1996.
[7] 최문옥, 이충세, "적응적 큐브 분할을 이용한 하이퍼큐브 진단 알고리즘", 정보과학회논문지, 제 27권, 제 4호, pp. 431-439, 2000년 4월.
[8] E. Kranakis and A. Pelc, "Better Adaptive Diagnosis of Hypercubes", IEEE Trans. Computers, vol. 49, no. 10, pp. 1013-1020, Oct. 2000.
[9] A.K. Somani and O. Peleg, "On Diagnosability of Large Fault Sets in Regular Topology-Based Computer Systems", IEEE trans. Computers, vol. 45. no. 8, pp.892-903, Aug. 1996.
[10] A.D. Friedman, "A New Measure of Digital System Diagnosis", Proc. Fifth Int'l Symp. Fault-Tolerant Computing, pp. 167-170, 1975.
[11] K.Y. Chwa and S.L. Hakimi, "On Fault Identification in Diagnosable Systems", Proc. 19th Allerton Conf. Comm., Control, and Computing, pp. 414-422, June 1981.
[12] D.P. Bertsekas and J.N. Tsilsiklis, Parallel and Distributed Computation, Numerical Methods, Prentice-Hall Int'l, 1989.