

# 적응형 미들웨어를 위한 베이지안 네트워크 기반

## 적응 행동 예측

이승수<sup>0</sup>, 김경중, 조성배, 윤희용<sup>\*</sup>

연세대학교 컴퓨터과학과/성균관대학교 정보통신공학부<sup>\*</sup>

{leess<sup>0</sup>, uribyul, sbcho}@sclab.yonsei.ac.kr, youn@ece.skku.ac.kr

### Adaptive Behavior Prediction based on Bayesian Networks for Adaptive Middleware

Seung-Soo Lee<sup>0</sup>, Kyung-Joong Kim, Sung-Bae Cho, Hee-Yong Youn<sup>\*</sup>

Dept. of Computer Science, Yonsei University/School of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University<sup>\*</sup>

#### 요 약

이질적인 컴퓨팅 환경에서 다중 응용 프로그램은 안정적으로 수행되기 위해 제한된 자원을 공유하며 서로 경쟁한다. 더욱이 응용 프로그램이 수행되는 환경으로부터 획득된 불완전한 정보와 정보로부터 적응 행동의 선택까지 소요되는 시간의 비용에서 발생하는 불확실성은 응용 프로그램이 환경에 적응하며 유연하게 동작하는 것을 어렵게 한다. 본 논문에서는 베이지안 네트워크를 이용하여 불확실한 정보를 확률 값으로 처리함으로써 적응 행동을 예측하도록 한다. 또한, 실제 시뮬레이션을 통해 제안된 미들웨어의 유용성을 확인한다.

#### 1. 서 론

인터넷의 보편화와 네트워크 기술의 발달로 서로 이질적인 컴퓨팅 환경에서 시스템 간에 데이터를 공유하고 관리하는 분산 시스템들이 다양하게 개발되었다. 이러한 분산 환경에서 멀티미디어 응용 프로그램은 수행시 서비스 저하를 막기 위해 서비스 품질(QoS: Quality of Services)을 보장하도록 요구하고 있다. QoS는 지연과 지터(jitter), 대역폭과 같은 속성을 가지고 있는데, 특히, 멀티미디어 서비스를 제공할 경우 네트워크의 대역폭 및 버퍼, CPU와 같은 한정된 시스템 자원을 사용하기 위해 적절한 적응 행동을 결정하는 것이 중요하다.

QoS에 대한 연구는 지난 10여 년 동안 많이 진행 되어왔다. 그러나 이것은 단순히 시스템 레벨에서만 지원하고 있을 뿐 응용 프로그램 레벨에서 요구하는 자원의 공유나 관리는 제공하지 못하고 있다[3]. 또한, 응용 프로그램 레벨에서 단말 사용자의 컴퓨팅 환경의 차이로 인한 안정된 QoS를 지원하지 못하고 있다[1]. 특히, 각 레벨에서 결정되는 적응 행동은 데이터의 노이즈 및 정보의 시간에 따른 비용 등 실세계에서 발생할 수 있는 불확실성을 고려하지 않고 단순히 시스템의 현재 상태만을 관찰하여 결정하기 때문에 동적인 분산 환경에 적응하며 유연하게 대처하기 힘들다.

본 논문에서는 이러한 불확실성을 고려하여 적응 행동을 결정하기 위한 방법으로 베이지안 네트워크[5] 기반의 적응형 미들웨어를 제안한다. 베이지안 네트워크는 확률 기반의 모델로써 불확실하고 변화하는 환경에 적응적이고 유연한 동작을 제공한다. 본 논문에서 제안한 미들웨어는 시스템 레벨의 CPU 및 대역폭 정보와 응용 프로그램 레벨의 트래킹 정밀도 및 프레임 전송율에 대한 관측 정보, 그리고 사전 지식을 바탕으로 만든 베이지안 네트워크를 이용하여 불확실한 환경에서 적응 행동을 예측한다. 적응 행동의 예측 결과 서버에서 트래킹 클라이언트로 전송되는 물체 이미지 데이터가 일정하게 유지되는 것을 실험 결과를 통해 보인다. 그림 1은 본 논문에서 제안하는 미들웨어 아키텍처를 보여주고 있다.

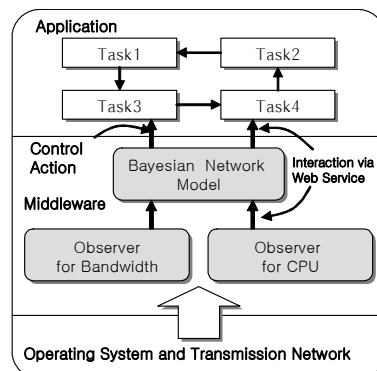


그림 1. 미들웨어 컨트롤 프레임워크 컴포넌트

#### 2. 배경

##### 2.1 자원 관리

최근의 자원 관리 메커니즘 연구는 시스템 레벨에서 수행되는 적응 메커니즘 연구의 일환으로 진행되었다. 특히, 무선 모바일 및 네트워크 분야에서는 자원 부족으로 인한 QoS 적응에 대한 많은 연구가 진행 중에 있다. 예를 들어, [1]에서의 적응형 자원 관리 메커니즘은 모바일 환경의 특성을 지원하기 위해 제안되었다. [2]에서는 응용 프로그램 기반 개념에 대해 연구를 하였다. 이 연구는 두 가지 특성에 초점을 맞추고 있는데, 그것은 적응의 민첩성과 데이터의 충실도에 대한 것이다. [3]에서는 전역적인 자원 관리 시스템을 제안하였는데, 이 연구에서는 자원을 관리하고 협상하기 위한 에이전트로서 미들웨어를 사용하였다. 위의 연구는 적응 행동을 결정하기 위해 현재 사용되고 있는 관측 정보를 이용하여 적응 행동을 결정한다. 그러나 본 논문에서는 관측 정보 이외에 관측된 정보의 노이즈 및 시간의 비용 등 불확실한 정보에 대해 확률 값으로 처리하여 보다 유연한 적응 행동을 선택함으로써 시스템의 안정성을

보이고자 한다.

### 2.2 베이저안 네트워크

베이저안 네트워크는 변수들 간의 원인과 결과 관계를 확률적으로 모델링하기 위한 도구로서 불확실한 환경에서 좀 더 신뢰성 있는 결과를 추론하기 위해 쓰이는 대표적인 방법이다. 변수의 확률적 인과관계를 네트워크로 구성한 다음 특정 조건이나 증거가 주어진 경우의 확률, 즉 조건부 확률을 복합적으로 계산하여 결과를 추론한다.

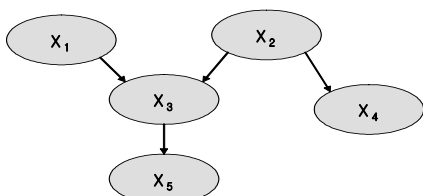


그림 2. 간단한 베이저안 네트워크 구조의 예

그림 2는 간단한 베이저안 네트워크의 예를 표현하고 있다. 베이저안 네트워크는 노드와 에지, 그리고 조건부 확률 테이블로 구성된다. 노드는 변수를, 방향성 에지는 부모에서 자식으로의 인과관계를 표현한다. 노드의 부모와 확률 값이 정해지면 조건부 확률 테이블(CPT: conditional probability table)을 가지고 식 (1)과 같은 베이저안 규칙(Bayes's rule)을 이용해 계산을 하게 되는데, 관측 정보가 불완전하더라도 안정적 추론이 가능하고 증거변수를 토대로 원인을 역추론 할 수 있다. 그림 2에서 결합 확률 값인  $p(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 는 변수 독립성 가정과 체인 규칙을 이용하여 수식(1)과 같이 계산된다.

$$p(x_i | x_j) = \frac{p(x_i | x_j) p(x_j)}{p(x_j)} \quad (1)$$

$$p(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = p(x_1) p(x_2) p(x_3 | x_1, x_2) p(x_4 | x_2) p(x_5 | x_3) \quad (2)$$

### 3. 적응형 미들웨어의 베이저안 추론

본 논문의 미들웨어는 이질적인 환경에서 시스템 자원을 모니터링 함으로서 환경의 변화를 인식하고, 환경으로부터 획득한 불확실한 정보에 확률 값을 부여함으로써 적절한 적응 행동을 결정한다. 적응 행동을 결정하기 위한 의사결정은 응용 프로그램의 유연성과 성능을 높인다. 특히, 시스템의 속성을 만족시키고 적절한 적응 행동을 결정하며 응용 프로그램 레벨에서 프레임 전송율과 같은 응용 프로그램의 중요 속성을 선택하고 조절하기 위해 베이저안 모델을 구현하였다.

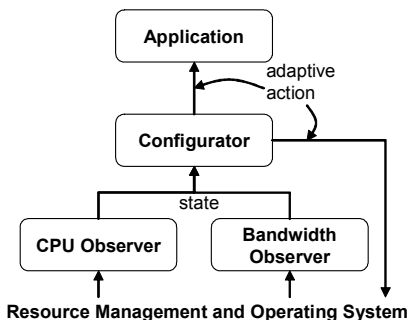


그림 3. 미들웨어 컨트롤 프레임워크 컴포넌트

그림 3은 미들웨어의 구조를 보여주고 있다. 우선, Observer는 각 자원의 상태를 파악하기 위한 기능을 수행하는데, 본 논

문에서는 자원의 종류를 CPU와 네트워크 대역폭으로 제한하였다. 반면에, Configurator는 베이저안 네트워크 모델을 포함하고 있는데, 응용 프로그램 내부에서 각 속성들을 튜닝하고 재구성하는 등 적응 행동을 결정한다.

일반적으로 응용 프로그램의 행동들은 비선형적이고 요구된 QoS 속성은 간단한 파라미터 튜닝으로 유지되기 어렵다. 더욱이 환경으로부터 획득한 자원의 상태 정보는 많은 노이즈를 포함하고 있으며, 또한, 상태를 측정할 시간으로부터 추론의 결과인 적응 행동이 수행되는 시점까지 시간에 따른 비용이 발생한다. 이를 해결하기 위해 관측 정보를 구성하는 기본적인 노드뿐만 아니라 불확실한 관측 정보에 대한 노드 및 시간의 비용을 나타내는 노드를 함께 구성하여 확률 기반의 베이저안 네트워크 모델을 설계하였다. 베이저안 네트워크 모델 내의 각 노드의 확률 값은 반복적인 실험을 통해 얻었다.

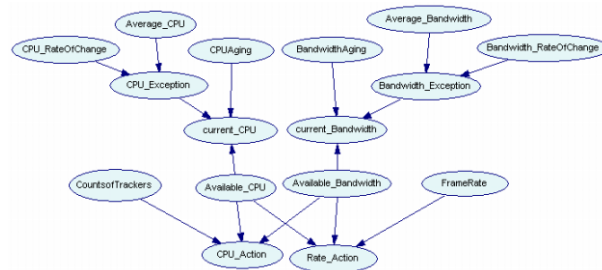


그림 4. 적응 행동을 예측하기 위한 베이저안 네트워크

그림 4는 불확실한 환경에서 관측된 정보의 노이즈와 시간의 비용을 고려하여 적응 행동을 추론하기 위해 설계된 베이저안 네트워크의 구성도이다. 베이저안 네트워크는 현재 관측된 정보로부터 적절한 적응 행동을 예측한다. 입력으로써 각 자원의 현재 사용율과 평균 사용율, 그리고 시간에 따른 비용 및 트랙커의 개수와 프레임율을 증거 변수로 사용하며 추론의 결과로는 적절한 적응 행동이 선택된다. 이러한 증거 변수는 이전 상태와 비교하여 현재 상태에서 이용 가능한 시스템 자원의 상태를 추론함으로써 시스템의 오류에 대해 영향을 덜 받도록 조정한다. 미들웨어는 적응 행동으로써 트랙커의 추가 및 제거, 송수신 데이터의 조절, 압축 및 해제 등을 선택할 수 있다.

### 4. 실험 및 결과

본 논문에서 제안한 미들웨어의 성능을 평가하기 위해 서버-클라이언트 기반의 트래킹 시뮬레이터를 구현하였다. 서버는 움직이는 물체 이미지를 클라이언트로 전송하며, 이러한 데이터를 받은 클라이언트는 움직이는 이미지에 대해 여러 개의 트랙커를 이용하여 트래킹 작업을 수행한다. 또한, 응용 프로그램과 미들웨어 간에 인터랙션이 가능하도록 .Net 기반의 웹 서비스를 채택하였다. 응용 프로그램은 C#을 기반으로 구현하였으며, 이미지 처리를 위해 OpenCV(Intel® Open Source Computer Vision) 라이브러리를 기반으로 .Net에서 사용할 수 있도록 만든 SharperCV 라이브러리를 사용하였다. 입력 데이터는 실제 수행 중에 관찰되는 CPU 사용량과 대역폭으로 제한하였다.

본 실험의 목적은 미들웨어 레벨에서 적응 행동을 선택함으로써 불확실한 환경 내의 한정된 자원을 이용하는 응용 프로그램에 대해 안정성을 유지하는 것이다. 이러한 실험을 위해 미들웨어를 적용하지 않은 응용 프로그램과 퍼지 및 베이저안 네트워크 기반의 미들웨어를 적용한 응용 프로그램 등 세 가지 형태의 응용 프로그램을 수행하였다. 또한, 각각의 응용 프로그램을 수행하는 동안 동영상 프로그램을 함께 수행하여 자원의 상태에 따라 적절한 적응행동을 선택함으로써 환경의 변화에

적응하고 안정성을 유지하도록 하였다. 그림 5와 6, 표 1은 이러한 실험 결과를 보여주고 있다.

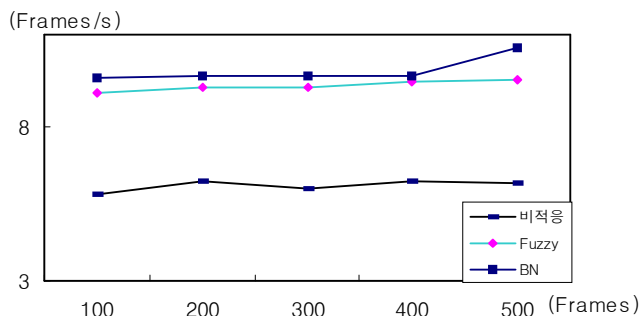


그림 5. 100~500 Frames 당 평균 프레임율

그림 5는 100개 단위로 프레임을 전송했을 때, 초당 전송되는 평균 프레임율을 나타내고 있다. 결과에서 보는 것과 같이 미들웨어를 적용하지 않은 응용 프로그램에 비해 퍼지 혹은 베이지안 네트워크를 적용한 응용 프로그램에서 많은 프레임이 전송된 것을 볼 수 있다. 또한, 미들웨어가 적용되지 않은 응용 프로그램에서 약간의 차이가 있지만 프레임율의 변화를 보이고 있다. 특히, 퍼지를 적용한 미들웨어보다 베이지안 네트워크를 적용 미들웨어에서 전송되는 프레임량이 많아질수록 성능이 향상됨을 보여주고 있다. 이것은 시간이 지속 될수록 관측 정보의 오류율 및 시간의 비용을 고려한 베이지안 네트워크가 보다 안정적임을 보여준다.

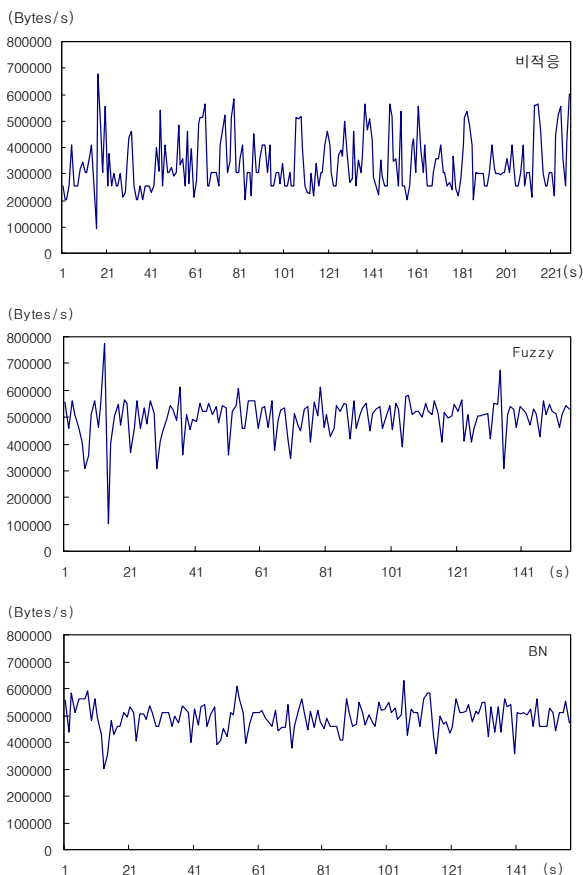


그림 6. 각 미들웨어를 적용한 응용 프로그램의 데이터 전송량

그림 6은 세 가지 형태의 응용 프로그램에 대해 500개의 프레임을 전송하였을 때 응용 프로그램에서 측정된 데이터 전송량을 그래프로 나타내고 있다. 또한, 표 1은 측정된 데이터 전송량에 대해 평균 및 표준편차를 설명하고 있다. 그림 6과 표 1에서 나타난 것과 같이 미들웨어에 의해 적응 행동이 선택된 응용 프로그램은 일정한 양의 전송율을 유지한다. 그러나 퍼지에 비해 베이지안 네트워크가 적용된 응용 프로그램이 적은 범위 내에서 안정적인 전송율을 유지하고 있는 것으로 나타내고 있다. 이러한 실험은 미들웨어가 서버-클라이언트 사이에서 불확실한 환경 내의 응용 프로그램이 안정성을 유지하는데 있어 베이지안 네트워크가 효과적인 방법임을 보여준다.

표 1. 데이터 전송량의 평균 및 표준편차 (10회 실험의 평균, 단위:KB)

BN	Fuzzy	비적응
499.3 ±41.8	492.8 ±51.9	338.3 ±83.9

### 5. 결론

본 논문은 불확실한 환경 내에서 불완전한 정보를 확률 값으로 처리하여 네트워크 대역폭과 관련된 파라미터를 튜닝하고 조정하는 적응 행동을 예측하였다. 이러한 실험을 통해 서버-클라이언트 사이에서 적응 행동을 선택하는 미들웨어의 유용성을 보였다. 특히, 적응 행동은 베이지안 네트워크 모델에 의해 결정되며, 선택된 적응 행동의 결과로 프레임율의 안정성을 유지할 수 있었다. 향후 베이지안 학습이나 강화학습과 같은 알고리즘을 이용하여 새로운 데이터를 얻을 때마다 각 노드가 업데이트됨으로써 불확실성을 해결하고 모델의 정확성을 높일 수 있는 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 논문은 정보통신부가 지원하는 21세기 프론티어 유비쿼터스 컴퓨팅 사업에 의해 지원되었음

### 참고 문헌

- [1] V. Bharghavan, K.-W. Lee, S. Lu, S. Ha, J. Li, and D. Dwyer, "The TIMELY adaptive resource management architecture," *IEEE Personal Commun Mag.*, vol. 5, pp. 8-19, Aug. 1998.
- [2] B. Noble, M. Satyanarayanan, D. Narayanan, J. Tilton, J. Flinn, and K. Walker, "Agile application-aware adaptation for mobility," in *Proc. 16th ACM Symp. Operating Systems and Principles*, pp. 276-287, 1997.
- [3] J. Huang, Y. Wang, and F. Cao, "On developing distributed middleware services for QoS- and criticality-based resource negotiation and adaptation," *J. Real-Time Syst.*, pp. 187-221, 1998.
- [4] B. Li and K. Nahrstedt, "A control-based middleware framework for quality-of-service adaptations," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.17, no. 9, pp.1632-1650, Sep. 1999.
- [5] J. Pearl, "Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference," Morgan Kaufman, 1988
- [6] T. Setphenson, "An introduction to bayesian network theory and usage," *IDIAP-PR 00-03*, 2000.
- [7] Gregory f. Cooper and Edward Herskovits, "A bayesian method for the induction of probabilistic networks from data," *Machine Learning*, vol. 9, pp. 309-347, 1992.