이질형 분산 시스템에서 유전자 알고리즘을 이용한 동적 부하 균등 기법

이 동 우† · 이 성 훈†† · 황 종 선†††

요 약

송신자 개시 부하 균등 알고리즘에서는 전체 시스템이 과부하일 때 송신자(과부하 프로세서)가 부하를 이전하기 위해 수신자(저부하 프로세서)를 발견할 때까지 불필요한 이전 요청 메시지를 계속 보내게 된다. 따라서 이 같은 상황에서는 저부하 상태인 수신자 프로세서로부터 승인 메시지를 받기까지 불필요한 프로세서간 통신으로 인하여 프로세서의 이용률이 저하되고 또한 타스크의 처리율이 낮아지는 문제점이 발생한다. 본 논문에서는 이질형 분산 시스템에서의 동적 부하 균등을 위해 유전자 알고리즘을 기반으로 하는 접근 방법을 제안한다. 이 기법에서는 불필요한 요청 메시지를 줄이기 위해 요청 메시지가 전송될 프로세서들이 제안된 유전자 알고리즘에 의해 결정된다.

A Dynamic Load Balancing Scheme Using Genetic Algorithm in Heterogeneous Distributed Systems

Dongwoo Lee† · Seong-Hoon Lee†† · Jong-Sun Hwang†††

ABSTRACT

In a sender-initiated load balancing algorithm, a sender (overloaded processor) continues to send unnecessary request messages for load transfer until a receiver (underloaded processor) is found while the system load is heavy. Therefore, it yields many problems such as low cpu utilization and system throughput because of inefficient inter-processor communications until the sender receives an accept message from the receiver in this environment. This paper presents an approach based on genetic algorithm (GA) for dynamic load balancing in heterogeneous distributed systems. In this scheme the processors to which the requests are sent off are determined by the proposed GA to decrease unnecessary request messages.

키워드 : 이질형 분산시스템(Heterogeneous Distributed System), 부하 균등 알고리즘(Load Balancing Algorithm), 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)

1. 서 론

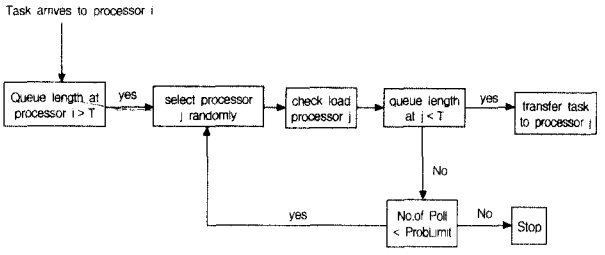
분산 시스템(distributed systems)은 네트워크로 연결되어 있으면서 자체적으로 처리 능력을 갖는 프로세서들의 집합으로 구성된다. 이러한 분산 시스템은 높은 성능, 유용성 및 낮은 가격으로 확장 가능하다는 장점을 갖고 있다. 따라서 분산 시스템의 성능을 극대화하기 위해서는 분산 시스템의 전체 부하(load)를 각 프로세서에 균등하게 유지해야 한다.

분산 시스템에서 부하 균등의 목표는 프로세서의 이용률을 극대화하고 평균 반응 시간을 최소화하기 위하여 각 프로세서에 타스크를 균등하게 할당하는 것이다. 이러한 부하 균등 알고리즘(load balancing algorithm)은 크게 3가지 - 정적, 동적, 적응적 방법 - 로 분류할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 방법들 중 동적 부하 균등 알고리즘을 기반으로 한다. 동적(dynamic) 부하 균등 알고리즘은 실행 중에 과부하(overloaded) 프로세서가 시스템의 부하정보를 이용하여 초과된 타스크를 저부하(underloaded) 프로세서로 보낸다. 기존에 연구되어온 많은 부하 균등 알고리즘들은 대부분 동형 분산 시스템(homogeneous distributed systems)환경에서 부하를 각 프로세서에 균등하게 유지하기 위한 연구들이었다[1, 2, 6, 10]. 이러한 기존의 알고리즘들은 각 프로세서들이 서로 다른 처리 속도를 갖는 이질형 분산 시스템에서는 적합하지 않다. 최근에 Chin Lu는 이질형 분산 시스템에서의 적응적 부하 균등 문제를 다루었다[7]. 본 논문에서는 이 같은 이질형 분산 시스템에서의 동적 부하 균등을 위해 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 기반으로 하는 접근법을 제안한다.

동적 부하 균등 기법은 3 방법 - 송신자 개시 방법(sender-initiated), 수신자 개시 방법(receiver-initiated), 대칭 개시 방

† 정 회 원 : 우송대학교 컴퓨터전자정보공학부 교수
†† 정 회 원 : 천안대학교 정보통신학부 교수
††† 종신회원 : 고려대학교 컴퓨터학과 교수
논문접수 : 2002년 5월 24일, 심사완료 : 2003년 2월 3일

법(symmetrically-initiated) - 으로 세분화할 수 있다. 본 논문에서는 이들 중 송신자 개시 방법을 기반으로 한다. 송신자 개시 방법은 송신자 프로세서(sender : overloaded processor)가 수신자 프로세서(receiver : underloaded processor)에게 타스크를 전송하기 위해 부하 균등 알고리즘을 수행한다[1, 2].



(그림 1) 송신자 개시 부하 균등 방법

이러한 송신자 개시 방법에서는 타스크를 전송하기 위한 이전 요청(request) 메시지가 송신자 프로세서로부터 임의로 선정된 다른 프로세서로 보내진다. 만일 선정된 프로세서가 저부하 상태이면 송신자 프로세서에게 승인(accept) 메시지를 보낸다. 반면에 선정된 프로세서가 과부하 상태이면 송신자 프로세서에게 거절(reject) 메시지를 보내게 된다. 송신자 프로세서는 수신자 프로세서로부터 승인 메시지를 받을 때까지 (그림 1)과 같이 반복적으로 임의(random)로 선정되는 다른 프로세서를 조사한다.

분산 시스템내의 전체적인 시스템 부하가 과부하 상태이면 타스크를 이전 받을 수 있는 프로세서를 쉽게 찾을 수 없다. 왜냐하면 대부분의 프로세서들이 송신자 프로세서로부터 타스크를 이전 받을 수 있는 저부하 상태를 유지하지 못하기 때문이다. 따라서 이러한 과정을 승인 메시지를 받을 때까지 반복적으로 임의로 선정된 다른 프로세서들에 타스크 이전 요청 메시지를 보내야 한다. 그러므로 많은 이전 요청 및 거절 메시지들이 발생하고 이로 인하여 실행 전에 많은 시간이 소모된다. 따라서 실질적인 타스크 처리 시간이 낭비된다.

본 논문에서는 이질형 분산 시스템에서 효율적인 부하 균등을 위하여 송신자에 의해 발생되는 이전 요청 메시지들이 전송될 프로세서를 유전자 알고리즘을 통하여 결정한다. 이 같은 유전자 알고리즘을 사용하는 목적은 수신자 프로세서를 결정하기 위한 시간을 단축하여 CPU 이용률을 증대하고 분산 시스템의 전체적인 처리율(throughput)을 증대하기 위한 것이다. 이러한 유전자 알고리즘에서는 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)등과 같은 유전자 연산자(genetic operator)를 사용한다. 유전자 알고리즘은 하나의 집단(population)에 적용되는데 이러한 집단은 이전 요청 메시지가 전송될 프로세서들의 집합을 나타내는 각각의 이진 스트링(binary string)으로 구성된다.

2장에서는 유전자 알고리즘을 기반으로 하는 부하 균등 기법 등을 알아본다. 3장에서는 제안한 유전자 알고리즘을 기반으로 하는 동적 부하 균등 알고리즘에 대한 내용 즉, 코딩(coding) 방법 및 적합도 함수, 알고리즘 등을 기술한다. 4장에서는 기존 방법과의 비교 분석을 위한 실험 결과를 기술하고 분석한다. 마지막으로 5장에서 결론을 기술한다.

2. 관련 연구

본 논문에서는 이질형 분산 시스템에서의 부하 균등 문제를 해결하기 위하여 유전자 알고리즘을 이용한다. 이러한 유전자 알고리즘을 기반으로 하여 부하 균등 문제를 해결하기 위한 연구로서 Terence C. Forgarty 등은 사탕무우 공장(sugar beet pressing station)에서 프레스들(presses)간의 부하 균등 문제를 위하여 2단계의 유전자 알고리즘을 이용하였다[5]. Garrison W. Greenwood 등은 실시간 분산 컴퓨팅 시스템(real-time distributed computing system)에서 휴리스틱 알고리즘의 적응성을 보이기 위해 진화 전략(evolutionary strategy)을 이용한 스케쥴링(scheduling) 문제를 연구하였다[9]. 기본적으로 이 논문은 동형 분산 시스템을 기반으로 하였으며 진화 전략을 이용한 스케쥴링 문제가 실시간 분산 시스템에 적용될 수 있음을 나타낸 연구라 할 수 있다. David B. Fogel 등은 이질형 컴퓨팅 환경에서 타스크들을 스케쥴링하기 위하여 진화 프로그래밍(evolutionary programming) 및 greedy 알고리즘을 이용하였다[11]. 이 논문에서는 이질형 컴퓨팅 환경에서의 스케쥴링 문제에 진화 프로그래밍 및 greedy 알고리즘을 이용한 접근법이 적용될 수 있음을 보여 주고 있다.

3. 부하 균등

3장에서는 본 논문에서 제안하는 이질형 분산 시스템 환경에서 유전자 알고리즘 기반의 동적 부하 균등 기법에 대해 기술한다. 이를 위해 부하 상태를 측정하기 위한 부하 척도 방법, 부하 균등을 알고리즘 접근법으로 다루기 위한 코딩(coding)방법, 집단내 각 스트링의 평가를 위한 적합도 함수(fitness function)를 기술한다. 또한 이를 기반으로 하는 전체적인 유전자 알고리즘 기반의 부하 균등 알고리즘을 기술한다.

3.1 부하 척도(load measure)

분산 시스템내 각 프로세서의 부하 상태를 측정하기 위한 척도로 많은 방법들 중에서 CPU 큐 길이를 선정하여 사용하였다. 이 같은 이유는 기존의 연구에서 가장 적합한 것으로 알려져 있기 때문이다[5]. 하지만 이질형 분산 시스템의 가장 큰 특징은 동일한 타스크에 대하여 각기 다른 프로세서들이 다른 처리 시간을 갖는다는 것이다. 따라서

기존의 부하 척도 방법인 CPU 큐 길이는 이질형 분산 시스템의 부하 상태를 적절하게 반영하지 못한다고 할 수 있다. 이러한 배경 하에 이질형 분산시스템의 부하 상태를 적절히 나타낼 수 있는 다음과 같은 부하 척도 방법 - VCQL (Virtual CPU Queue Length) - 을 사용한다.

$$VCQL = T_{no} \times P_{tu} \quad (1)$$

매개변수 T_{no}는 CPU 큐에 있는 타스크의 개수를 의미하고 P_{tu}는 각 프로세서에서 하나의 타스크를 처리하는데 소요되는 처리시간을 나타낸다. 이질형 분산 시스템에서의 각 프로세서는 동일한 타스크를 처리할 때 상대적으로 다른 프로세서들 보다 처리시간이 빠른 프로세서가 있는 반면에 느린 처리시간을 갖는 프로세서가 있다. 예를 들면 프로세서 P_i는 5개의 타스크를 갖고 있으면서 각 처리 시간이 2초라 하고 프로세서 P_j는 7개의 타스크를 갖고 있으면서 각 처리 시간이 1초라 할 때 프로세서 P_i는 상대적으로 적은 타스크를 갖고 있으면서도 느린 처리 속도로 인하여 전체 타스크를 수행하는 시간은 10초가 된다. 반면에 P_j는 상대적으로 더 많은 타스크를 갖고 있으면서도 전체 타스크를 수행하는 시간은 7초가 된다. 따라서 VCQL을 각 프로세서의 부하를 측정하는 척도로 이용하는 것이 이질형 분산 시스템의 부하상태를 더 적절히 나타낸다고 할 수 있다.

타스크를 다른 프로세서로 이전하기 위한 이전 정책(transfer policy)은 VCQL을 기준으로 하여 이전을 결정하는 임계값 정책(threshold policy)을 기반으로 한다. 이러한 이전 정책은 타스크가 이질형 분산 시스템내 어느 특정 프로세서에 들어올 때 발생한다. 만일 한 프로세서에 들어온 새로운 타스크가 이 프로세서의 VCQL 값을 상한 임계값(T_{up})을 초과하도록 한다면 프로세서는 송신자가 된다. 반면에 해당 프로세서의 VCQL 값이 하한 임계값(T_{low})을 초과하지 않으면 타스크를 받을 수 있는 수신자 프로세서가 된다.

3.2 개 요

본 논문의 알고리즘에서는 전체 분산 시스템의 부하 균등을 위해서 모든 프로세서의 부하 상태를 3단계(저부하, 정상부하, 과부하)로 분리하여 사용하며 이들은 각 프로세서에서의 VCQL로 결정된다. 이 같은 3단계의 부하표현 방법은 <표 1>과 같다.

〈표 1〉 3단계 부하표현

부하 상태	의 미	기준(Criteria)
Light	저부하 상태	$VCQL \le T_{low}$
Middle	정상 부하 상태	$T_{low} < VCQL \le T_{up}$
Heavy	과부하 상태	$VCQL > T_{up}$

저부하 상태인 프로세서는 자신의 VCQL 값이 적으므로 다른 과부하 상태인 프로세서가 가지고 있는 타스크를 이전 받을 수 있는 상태이며, 정상 부하인 프로세서는 자신의 VCQL 값이 적절하여 타스크를 다른 프로세서로 이전하거나 다른 프로세서로 부터 타스크를 이전 받지 않아도 되는 상태이다. 또한 과부하 상태인 프로세서는 자신의 타스크를 다른 프로세서로 이전해 줄 수 있는 상태이다. 따라서 3단계 부하 상태를 유지하기 위하여 2개의 임계값 즉, 하한(T_{low}) 및 상한 임계값(T_{up})을 사용한다. 일례로, 만일 20을 상한 임계값이라 하고 5를 하한 임계값이라 하면 해당 프로세서의 VCQL이 20보다 크면 과부하 상태가 되며 VCQL이 5 이하이면 저부하 상태가 된다. 그 외는 정상부하 상태이다. 한 프로세서가 과부하 상태일 때 다른 프로세서로 타스크를 전송하기 위하여 부하 균등 알고리즘을 수행한다. 알고리즘은 타스크를 전송하는데 있어 요구 지향(demand-driven) 기법을 사용한다.

본 논문은 송신자 개시 정책을 기반으로 하기 때문에 부하가 증가하는 시점인 타스크가 어느 한 프로세서에 들어오는 시점에서 부하 균등 알고리즘을 수행한다. 먼저 해당 프로세서는 부하 정보를 요청하는 메시지들을 각 프로세서에 보낸다. 이때 메시지가 전송될 프로세서가 임의로 선정되는 것이 아니라 유전자 연산후 스트링의 내용에 따라 메시지가 전송될 프로세서들이 결정된다. 그러면 메시지를 받은 수신자 대상 프로세서는 자신들의 부하 정보를 송신자 프로세서에게 보낸다. 이 같은 유전자 알고리즘을 이용하여 부하 균등 과정을 간략한 예를 통하여 기술하면 다음과 같다.

예를 들어 10개의 프로세서들로 구성된 분산 시스템에서 프로세서 P_0가 송신자 프로세서로 결정된 후의 수행 과정은 다음과 같다. 먼저 유전자 연산을 수행한 후 집단내 스트링들 중에서 가장 높은 적합도를 갖는 스트링 <-, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0>이 선정되었다고 가정한다. 그러면 송신자 프로세서 P_0는 이전 요청 메시지를 수신자 대상 프로세서 즉, P_1, P_3, P_6로 보낸다. 이전 요청 메시지를 받은 이들 3개의 프로세서들 각각은 자신들의 VCQL를 기반으로 부하 상태를 측정하게 된다. 만일 이들 중에서 프로세서 P_3가 저부하 상태라면 프로세서 P_3로 부터 송신자 프로세서 P_0로 승인 메시지가 보내진다. 그러면 프로세서 P_0는 프로세서 P_3로 타스크를 이전하게 된다. 수신자 대상 프로세서들로부터 두 개 이상의 승인 메시지가 보내지면 임의로 하나를 선정한다. 본 논문에서는 이러한 유전자 알고리즘에 지역 개선 연산(local improvement operation), 선택(selection), 교배(crossover) 등과 같은 유전자 연산자를 사용한다.

3.3 메시지 시스템

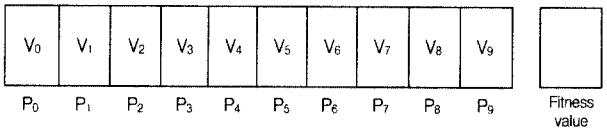
분산 시스템에서의 동적 부하 균등을 위하여 프로세서들 간 통신을 위해 사용될 메시지들을 간단히 기술하면 <표 2>와 같다.

〈표 2〉 메시지 시스템의 매개변수

Req_{ij}	P_i에서 P_j로 전송되는 타스크 이전 요청 메시지
Acc_{ji}	P_j에서 P_i로 전송되는 이전 승인 메시지
Rej_{ji}	P_j에서 P_i로 전송되는 이전 거절 메시지
Mig_{ij}	P_i에서 P_j로 타스크가 전송됨을 알림
T_{ij}	P_i에 있던 타스크가 P_j로 전송이 끝났음을 P_j에게 알림

3.4 코딩 방법

분산 시스템 내에 있는 전체 프로세서의 개수가 n일 때 i번째 프로세서는 P_i로 표현되며 i는 $0 \le i \le n-1$의 범위를 갖는다. 이러한 분산 시스템내 각 프로세서는 자신의 집단을 가지며 각 집단은 여러 개의 스트링들로 구성된다. 이러한 스트링을 표현하는 코딩 방법으로는 이진 코딩(binary coding), 트리 코딩(tree coding), 프로그램 코딩(program coding) 방법 등이 있다[5]. 본 논문에서는 이진 코딩 방법을 이용한다. 따라서 하나의 스트링은 이진코드 벡터(binary-coded vector)로 정의할 수 있으며 $<v_0, v_1, v_2, \cdots, v_{n-1}>$과 같이 표현된다. 그러면 각 v_i는 스트링내 유전인자(gene) 및 분산 시스템내 프로세서들과 대응된다고 할 수 있다. 이러한 각 v_i의 값은 이진값(binary value)을 갖는다. 예를 들어 분산 시스템내 프로세서가 10개 있을 때 이와 같은 코딩 결과는 (그림 2)와 같이 표현할 수 있다.



(그림 2) 스트링에 대한 코딩

이와 같이 표현된 스트링은 초기에 임의로 다른 스트링과의 중복 없이 만들어지며 이전 요청 메시지가 전송되는 프로세서의 집합을 의미한다. 따라서 만일 v_i가 1이면 이전 요청 메시지가 P_i 프로세서로 전송되고 그렇지 않고 v_i가 0이면 P_i 프로세서에게 이전 요청 메시지를 보내지 않는다. 각 스트링은 자신의 적합도(fitness value)를 포함하며 이러한 적합도에 비례하여 하나의 스트링이 선정된다. 이같이 선정된 스트링에 의해 표현된 프로세서들에 이전 요청 메시지를 전송하게 된다.

3.5 적합도 함수

한 집단에 포함된 각 스트링은 다음과 같은 식 (2)로 정의된 적합도 함수(fitness function)로 평가된다. 유전자 연산자가 적용된 하나의 집단내 모든 스트링 중에서 가장 적합도가 높은 스트링이 선정되어 선정된 스트링의 내용 즉, 해당 스트링내 '1'로 설정된 비트에 대응되는 프로세서로 타스크를 이전하기 위한 이전 요청 메시지를 보내게 된다. 따라서 적합도 함수 F_i값이 높게 되기 위해서는 TMPT(Total Message Processing Time)의 값이 작아야 하고 TMTT(Total Message Transfer Time)의 값도 작으면서 TTPT(Total Task Processing Time)의 값이 작아야 한다.

$$F_i = \left(\frac{1}{\alpha \times TMPT + \beta \times TMTT + \gamma \times TTPT} \right) \quad (2)$$

식 (2)에서 사용된 α, β, γ는 각 매개변수 TMPT, TMTT, TTPT에 대한 가중치로서 4절의 성능 평가에서 다룬다. TMPT는 전송될 요청 메시지들의 처리 시간으로서 전송될 요청 메시지의 개수(Request Message Number(*ReMN*))와 각 메시지 처리 시간의 곱(product)으로 정의할 수 있다. 적합도 함수 F_i의 값이 높기 위해서는 TMPT의 값이 작아야 하며 따라서 전송될 이전 요청 메시지의 개수가 적어야 한다. 이 같은 의미는 선정된 스트링의 내용 중에서 '1'로 설정된 비트의 개수가 적어야 한다는 것을 나타낸다. 이때 각각의 메시지 처리 시간은 타스크 처리 시간과 동일한 것으로 한다. 식 (3)에서 사용된 $ReMN_k$는 3.4절의 (그림 2)와 같이 표현된 스트링에 대한 코딩에서 k번째 비트가 '1'로 설정되어 있음을 의미하며 따라서 대응되는 프로세서로 요청 메시지를 보낸다.

$$TMPT = \sum_{k \in x} (ReMN_k \times \text{Time Unit}),$$
$$\text{단 } x = \{ i \mid v_i = 1 \text{ for } 0 \le i \le n-1 \} \quad (3)$$

매개 변수 TMTT는 송신자로부터 선정된 스트링내 '1'로 설정된 각 비트에 대응되는 수신자 대상 프로세서들까지의 메시지 전송 시간의 합(summation)을 의미한다. 따라서 TMTT의 값이 작으면 작을수록 적합도 함수 F_i는 높은 적합도를 가지며 이는 부하 균등을 위해 메시지 및 타스크를 이전할 수 있는 수신자 프로세서와 송신자 프로세서간의 전송 거리가 짧다는 것을 의미한다. 이 매개 변수는 다음과 같은 식 (4)로 정의된다. 여기서 n은 분산 시스템내 전체 프로세서의 개수가 된다.

$$TMTT = \sum_{k \in x} (EMTT_k),$$
$$\text{단 } x = \{ i \mid v_i = 1 \text{ for } 0 \le i \le n-1 \} \quad (4)$$

식 (4)에서 사용된 매개 변수 $EMTT_k$(Each Message Transfer Time)는 송신자 프로세서로부터 k번째 프로세서까지의 메시지 혹은 타스크 전송 시간을 나타낸다.

마지막으로 TTPT는 선정된 스트링내 '1'로 설정된 각 비트에 대응되는 수신자 대상 프로세서들에서 타스크들을 처리하는데 소요되는 시간으로서 식 (5)와 같이 정의할 수 있다. 여기서 TTPT의 값이 작다는 것은 선정된 스트링내 각 비트에 대응되는 프로세서들의 부하 상태를 나타내는 VCQL의 값이 작다는 뜻으로 각 프로세서의 부하 상태가 저부하인 스트링이 선정되어 송신자 프로세서가 타스크를

이전해줄 수 있는 수신자 프로세서를 용이하게 발견할 수 있다는 것이다. 따라서 이전 요청 메시지에 대한 승인 메시지 비율이 높아진다.

$$TTPT = \sum_{k \in x} (VCQL_k),$$
$$\text{단 } x = \{ i \mid v_i = 1 \text{ for } 0 \le i \le n-1 \} \quad (5)$$

따라서 유전자 알고리즘에서 여러 세대(generation)를 거치면서 해당 집단내 스트링들 중에서 함수 F_i에 대한 최대 적합도를 갖는 스트링 즉, 각 프로세서들이 갖고 있는 VCQL의 값이 작으면서 동시에 전송될 이전 요청 메시지의 개수 및 메시지 전송 시간이 가장 작은 적합도를 갖는 스트링이 유전자 알고리즘을 통해 선정된다는 것을 나타낸다.

3.6 알고리즘

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 5개의 프로시쥬어로 구성되는데 초기화(Initialization), 부하측정(Check_load), 스트링 평가(String_evaluation), 유전자 연산(Genetic_operation), 메시지 평가(Message_evaluation) 등이다. 또한 유전자 연산은 3개의 부프로시쥬어(sub-procedure) 즉, 지역개선 연산(local improvement operation), 선택, 교배 등으로 구성된다. 이 같은 프로시쥬어들은 분산 시스템내 각 프로세서에서 시행되며 전체적인 알고리즘은 다음 (그림 3)과 같다.

```
Algorithm : Genetic-based load balancing algorithm

{ initialization() ;
  while (load_check())
  {
        string_evaluation() ;
        genetic_operation() ;
        message_evaluation() ;
  }
  }

Procedure genetic_operation()
  {
        local_improvement_operation() ;
        selection() ;
        crossover() ;
  }
```

(그림 3) 부하 균등 알고리즘

알고리즘을 구성하는 각 프로시쥬어들의 기능 및 알고리즘 단계는 다음과 같다.

- **초기화(Initialization)** : 초기화 프로시쥬어는 전체 시스템이 작업을 시작할 때만이 각 프로세서에서 시행된다. 전체 시스템의 부하는 전반적으로 과부하 상태로 설정되고 스트링들로 구성된 집단은 어떠한 스트링의 중복 없이 임의로 만들어진다.
- **부하 측정(load_check)** : 어떤 하나의 프로세서에서 새로운 타스크가 들어올 때마다 부하 측정 프로시쥬어가 호출되어서 자신의 부하를 측정한다. 프로세서에서의 부하 측정은 자신의 VCQL을 측정함으로서 이루어진다. 만일 프로세서가 과부하 상태이면 스트링 평가 및 유전자 연산 프로시쥬어를 적용한 후 *집단 내에서 가장 높은 적합도를 갖는 하나의 스트링을 선정한 후에* 선정된 스트링의 내용에 따라서 수신자 대상 프로세서들로 타스크 이전 요청 메시지를 보낸다.

```
Procedure load_check()          /* 송신자 프로세서 결정 */
{
   if (a task arrives at processor Pi) {
      if (the load of Pi > T2)   /* T2 : 상한 임계값 */
         let Pi be a sender;
      else wait until another task arrives ;
      }
}
```

- **스트링 평가(string_evaluation)** : 스트링 평가 프로시쥬어는 집단 내에 존재하는 스트링들의 적합도를 계산한다. 또한 타스크가 전에 적용되었던 프로세서에서 다시 들어올 때에는 바로 전에 생성된 집단 내 스트링들을 대상으로 학습을 하기 위하여 바로 이전(previous) 집단에 포함된 스트링들의 적합도를 계산한다.
- **유전자 연산(genetic_operation)** : 지역 개선 연산[18] 및 선택, 교배 등을 포함하는 유전자 연산 프로시쥬어는 다음과 같은 방법으로 해당 집단에 적용된다. 먼저 분산 시스템내 프로세서들이 지역적으로 그룹화되어 있는 환경에서는 하나의 스트링이 p개의 부분(part)으로 구성되어 있다고 가정할 수 있다. 그러면 다음과 같은 유전자 연산들이 각 스트링에 적용되며 새로운 스트링들로 구성된 집단이 만들어진다.

3.6.1 지역 개선 연산(local_improvement_operation)

먼저 스트링 1이 선정된다. 그런 다음 해당 스트링 1에 대한 하나의 복사본을 만들고 복사본의 부분 1로부터 p까지 순차적으로 선정된 후에 돌연 변이 연산자가 적용된다.

돌연 변이 연산자가 적용된 부분 1를 포함하고 있는 새로운 스트링에 대한 적합도를 계산한 다음 만일 새로운 스트링에 대한 적합도가 기존의 스트링 적합도보다 높으면 기존 스트링을 새로운 스트링으로 교체한다. 부분 2에 대한 연산이 끝나면 임의로 선정된 부분 2에 대한 지역 개선 연산이 수행된다. 이러한 지역 개선 연산은 차례로 각 부분에 적용된다. 모든 부분에 대한 지역개선 연산이 끝났을 때 하나의 새로운 스트링이 만들어진다.

스트링 1에 대한 지역 개선 연산이 끝난 후에 스트링 2가 선정되어 위에서 기술한 지역개선 연산이 적용되며 이러한 유전자 연산이 집단에 포함된 모든 스트링에 적용된다.

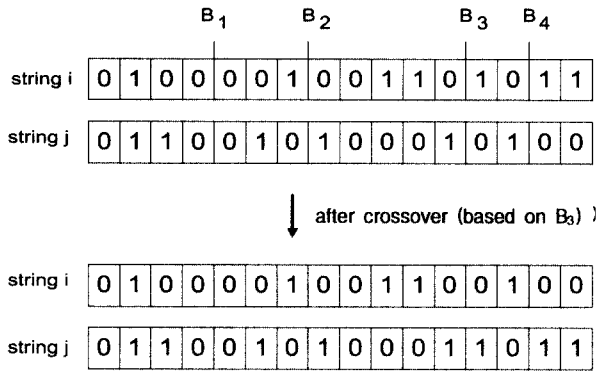
```
Sub-procedure local_improvement_operation()
{
    /* 집단 내 모든 스트링들에 대한 지역 개선 연산 수행 */
        select string[i] ;
        generate copy version of the selected string[i] ;
        for (j = 1 ; j <= total_part_number ; j++)
         /* total_part_number : p */
        {
          /* 해당 스트링의 부분들에 대한 돌연 변이 연산
             수행 */
            apply mutation operator to part j ;
            evaluate the mutated new string ;
            if (fitness of new string > fitness of
                original string)
             /* 이전 스트링을 새로운 스트링으로 교체 */
            original string ← new string ;
}
```

3.6.2 선택(selection)

선택 연산은 스트링들에 적용되며 다음 세대의 집단을 만들기 위하여 부모가 될 스트링 쌍들(pairs)을 결정하는 단계로 일반적으로 많이 이용되는 "roulette wheel selection" 기법을 사용한다.

3.6.3 교배(crossover)

교배 연산은 새로이 만들어진 스트링들에 적용되며 교배 연산 결과 스트링들에 대한 평가가 이루어진다. 이 단계에서는 다음 세대 스트링들에 대한 부모들의 유전 형질 전이(genetic materials transfer)가 일어난다. 이러한 전이는 교배 연산자에 의해 이루어지는데 본 본문에서는 부하 균등을 위해 변형된 "one-point" 교배 연산자를 선정하여 적용한다. 기존의 순수한 "one-point" 교배 연산자는 교배를 수행할 교배점(crossover point)을 하나의 스트링내 전체 유전인자들을 대상으로 하여 임의로 하나의 유전인자를 선정하여 교배를 수행하였다. 본 논문에서는 좀 더 효율적인 유전자 알고리즘을 기반으로 하는 부하 균등을 위하여 변형된 교배 방법을 제안하여 교배 활동을 수행한다. 제안된 교배 활동에서는 먼저 교배의 기본이 되는 교배점을 선정하기 위해 전체 유전인자를 대상으로 하지 않고 부분(p)들의 경계점들(boundaries)을 대상으로 하여 이 경계점들 중에서 하나의 경계점을 임의로 선정하여 교배활동을 수행하게 된다. 따라서 이와 같은 교배 연산을 그림으로 표현하면 (그림 4)와 같다. (그림 4)의 예에서는 16개의 유전인자를 갖고 있으면서 4개의 부분이 있다고 했을 때 이들 4개의 부분들의 경계점(B_1, B_2, B_3, B_4)을 대상으로 하여 이들 중에서 하나의 교배점을 임의로 선정하여 교배연산을 수행하게 된다. 따라서 임의로 선정된 교배점이 B_3일 때 교배 연산은 다음과 같다.



(그림 4) 교배 연산

위에서 언급된 전체적인 유전자 연산(genetic_operation)을 알고리즘으로 표현하면 다음과 같다.

```
Procedure genetic_operation()
{
   for (i = 1 ; i <= total_string_number ; i++)
       /* total_string_number : 전체 스트링 개수 */
        local_improvement_operation() ;
  selection() ;       /* use "wheel of fortune" method[4] */
  crossover() ;
  /* 수신자 대상 프로세서에 요청 메시지 전달 */
  send the request messages to the processors with bit position
  set '1' ;
}
```

유전자 연산은 해당 스트링의 적합도에 비례하는 확률로서 집단 내에 존재하는 스트링들중 하나의 스트링을 선정한다. 그런 다음 선정된 스트링의 내용, 즉 선정된 스트링내 '1'로 설정된 비트에 대응되는 수신자 대상 프로세서들에 이전 요청 메시지를 보낸다.

- **메시지 평가(message-evaluation)** : 메시지 평가 프로시쥬어는 하나의 프로세서가 네트워크를 통하여 다른 프로세서로부터 메시지를 받을 때 발생한다. 프로세서 P_j가 Req_{ij} 메시지를 받을 때 프로세서 P_j가 저부하 상태이면 Acc_{ji} 메시지를 송신자 프로세서에 보낸다. 그런 다음에 타스크를 수신자 프로세서에 전송할 준비를 한다. 만일 프로세서 P_j가 과부하 상태이면 Rej_{ji} 메시지를 보낸다. 프로세서 P_j로부터 받은 메시지가 Acc_{ji}일 때 j를 가용 리스트(available list)에 넣게 되며 이 리스트는 이전 요청 메시지를 받은 프로세서들 중에서 송신자 프로세서에 Acc_{ji} 메시지를 보내면서 여분의 타스크를 이전 받을 수 있는 프로세서들로 구성된다. 전에 발생된 P_i의 이전 요청 메시지에 대한 모든 응답을 받은 후에 송신자 프로세서는 수신자 프로세서에게 타스크와 함께 Mig_{ij} 메시지를 보낸다. 만일 가용 리스트에 두개 이상의 프로세서가 존재하면 임의로 하나를 선정한다. Mig_{ij} 메시지를 받은 프로세서 P_j는 송신자 프로세서로부터 받은 타스크를 자신의 CPU 큐에 저장한다. 그런 다음에 송신자 프로세서 P_i는 수신자 프로세서 P_j에 T_{ij} 메시지를 보낸다.

```
Procedure message_evaluation( )
{
   if (processor Pj receives a request-message)
     {
        if (Pj's VCQL < T1) /* T1 : 하한 임계값 */
           transfer an accept message to sender ;
        else transfer a reject message ;
     }
    /* decide a receiver */
   if ( the processors in available list >= 2)
      receiver ← a processor(Pj) selected in available list
                 randomly ;
   else receiver ← a processor(Pj) in available list ;
     /* in sender(Pi) */
   transfer migration message and task to Pj(receiver) ;
   change VCQL of the processor Pi ;
    /* in receiver(Pj) when the receiver receives a task from the
       sender */
   change VCQL of the processor Pj ;
    /* in sender */
   send the Tij message to the processor Pj ;
}
```

4. 성능 평가

제안된 유전자 알고리즘을 기반으로 하는 동적 부하 균등 모델의 성능을 기존의 송신자 개시 알고리즘[1, 2] 및 단순 유전자 알고리즘(simple genetic algorithm)과 비교하기 위하여 실험하였다. 실험에서 적용된 단순 유전자 알고리즘 기반의 부하균등 방법은 다음과 같은 내용에서 제안하는 방법과 차이가 있다. 즉, 3.6에서 제안한 알고리즘에서의 유전자 연산에서 단순 유전자 알고리즘기반의 방법에서는 먼저 지역 개선 연산을 수행하지 않고 선택 연산이 적용된다. 그런 다음에 교배 연산을 수행하게 되는데 이때 적용되는 교배 정책은 순수한 "one-point" 교배 정책을 이용한다. 마지막으로 돌연변이(mutation) 연산을 수행하게 된다.

4.1 실험 환경

본 논문에서의 시스템은 이질형 시스템(heterogeneous system)으로서 30개의 이질형 프로세서($P_0, P_1, P_2, \cdots, P_{29}$)로 구성되었다고 가정한다. 또한 처리될 각각의 타스크 크기는 동일한 것으로 가정한다. 각각의 프로세서로부터 다른 프로세서로의 메시지 전송 및 타스크 전송 시간은 2차원 배열로 표현되며 이때 각 원소의 값은 난수 발생기(random number generator)로 부터 결정되는 3이하의 값을 갖는다. 이를 그림으로 나타내면 (그림 5)와 같으며 의미는 다음과 같다. 송신자가 P_0일 때 유전자 알고리즘에 의해 결정된 수신자 프로세서가 P_3라 하면 메시지 전송 및 타스크 전송 시간은 2가 된다. 또한 각 프로세서에서의 타스크 처리 시간은 1차원 배열로서 나타내며 이들 원소의 값은 난수 발생기로부터 결정되는 3이하의 값을 갖는다고 가정한다. 단위는 초(second)로 한다.

Sender \ Receiver	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4
P_0	0	3	1	2	3
P_1	3	0	2	3	1
P_2	1	2	0	1	3
P_3	2	3	1	0	2
P_4	3	1	3	2	0

(그림 5) 프로세서간 전송 시간(프로세서 갯수 n=5인 경우)

실험을 위해 기본적으로 사용될 매개 변수들은 <표 3>에서 기술된 내용과 같으며 매개 변수들 중에서 교배 발생 확률, 스트링 개수 등에 대한 값은 일반적으로 다양한 응용에 유용하게 적용되는 것으로 알려져 있다[3]. 제안된 알고리즘의 효율성 및 적응성을 보이기 위하여 아래의 각 실험에서 해당 매개 변수들의 값을 변경하여 실험하였다.

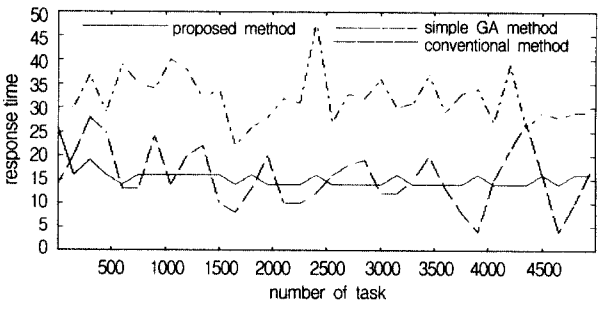
<표 3> 매개변수들의 내용

프로세서의 개수	30
교배 발생 확률(P_c)	0.7
돌연변이 발생 확률(P_m)	0.1
스트링(염색체)의 개수	50
처리될 타스크 개수	5000
스트링의 부분 개수(p)	5
TMPT에 대한 가중치(α)	0.5
TMTT에 대한 가중치(β)	0.15
TTPT에 대한 가중치(γ)	0.05

4.2 비교 평가

본 논문에서 제안한 알고리즘과 기존의 송신자 개시 알고리즘 및 단순 유전자 알고리즘을 이용한 접근법과의 성능 비교는 처리될 대상 타스크에 대한 반응 시간(response time)을 척도로 하여 다양한 실험을 통하여 비교하였다.

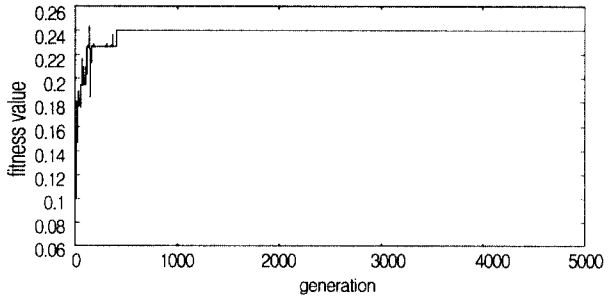
실험 1 : 본 실험은 분산 시스템의 전체 시스템 부하가 60%일 때 제안된 방법과 기존의 송신자 개시 방법 및 단순 유전자 알고리즘을 이용한 접근법간의 반응 시간을 알아보기 위한 실험으로서 <표 2>를 기반으로 한 실험 결과는 (그림 6)과 같다.



(그림 6) 실험 1에 대한 결과

실험에서 나타난 성능은 각각의 처리 대상 타스크에 대한 반응 시간을 나타낸 결과로서 기존의 송신자 개시 방법에서는 송신자가 저부하 상태인 수신자에게 타스크를 이전하기 위하여 임의로 분산 시스템내 프로세서들 중에서 하나를 선정하여 저부하 상태인지를 조사한다. 선정된 프로세서가 저부하 상태가 아니면 저부하 상태인 프로세서가 선정될 때까지 위의 과정을 반복 수행한다. 따라서 각 타스크에 대한 반응시간에서 심한 요동 현상을 보인다. 단순 유전자 알고리즘에 의한 실험 결과는 상대적으로 기존의 송신자 개시 알고리즘보다 더 높은 반응 시간을 보이고 있음을 알 수 있다. 반면에 제안된 알고리즘에 의한 실험 결과에서는 위에서 기술된 두개의 방법에서 보이고 있는 심한 요동 현상을 보이지 않고 있으며 평균 반응 시간에서 가장 낮은 시간을 보이고 있다. 이 같은 이유는 본 논문에서 기술된 지역 개선 연산 및 교배 정책에 기인한 결과라 할 수 있다.

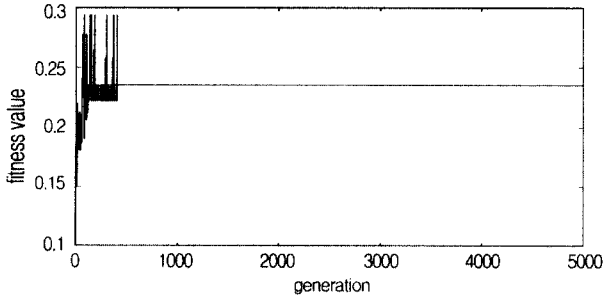
실험 2 : 본 실험은 분산 시스템 내에 포함된 각 프로세서들의 진화 과정을 알아보기 위하여 위의 <표 3>에서 기술된 매개 변수들을 기준으로 하여 프로세서 P_6에서의 전체 스트링에 대한 평균 적합도 변화를 실험하였다.



(그림 7) 실험 2에 대한 결과

실험 2를 통하여 알 수 있는 내용은 약 400 세대를 거치면서 일정한 적합도를 갖는다는 것을 알 수 있다. 이 같은 현상은 다른 프로세서에서도 유사한 결과를 나타낸다.

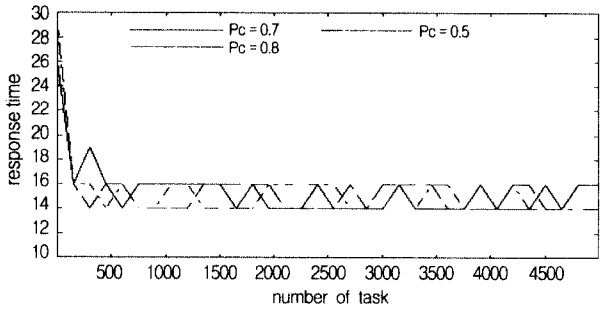
실험 3 : 본 실험은 프로세서 P_6에서의 전체 스트링 중에서 가장 높은 적합도를 갖는 스트링에 대한 적합도 변화를 실험하였다.



(그림 8) 실험 3에 대한 결과

본 실험 결과는 실험 2에서의 내용과 거의 일치한다. 가장 높은 적합도를 갖는 스트링에 대한 적합도 변화에 따라 초기에 높은 요동현상을 보인다. 또한 다른 프로세서에서도 유사한 결과를 보인다.

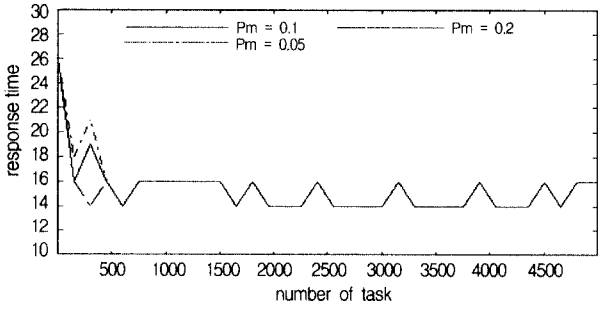
실험 4 : 본 실험에서는 위의 <표 2>에서 기술된 교배 발생 확률(P_c)이 제안된 알고리즘에 미치는 영향을 알아보기 위한 내용이다.



(그림 9) P_c 변화에 따른 실험 결과

이 부분의 실험 결과는 (그림 9)과 같으며 각각의 적용된 P_c에 따라 반응 시간에서 많은 편차를 보이고 있으나 전체적으로는 미세한 차이를 보이고 있다. 따라서 교배 발생 확률을 변화시켜도 기존의 송신자 개시 알고리즘 및 단순 유전자 알고리즘의 성능보다 우수한 것으로 나타나고 있다.

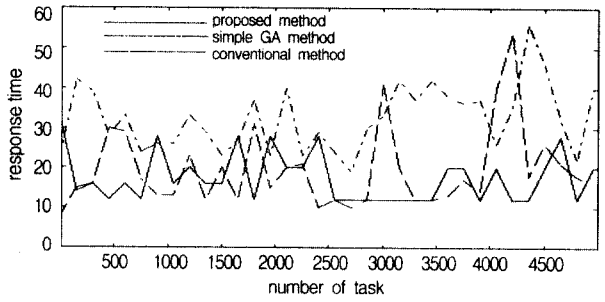
실험 5 : 본 실험에서는 위의 <표 3>에서 기술된 돌연 변이 발생 확률이 제안된 알고리즘에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험으로서 비교 대상은 다양한 응용에서 일반적으로 널리 이용되고 있는 P_m = 0.05[3] 및 P_m = 0.2와 비교 분석하였다.



(그림 10) P_m 변화에 따른 실험 결과

실험 결과는 전체적으로 P_m의 확률에 따라 성능에 별 다른 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다.

실험 6 : 본 실험은 시스템 부하에 따른 반응 시간 및 평균 반응 시간의 변화를 알아보기 위하여 전체 시스템 부하가 80%일 때의 반응 시간을 알아보기 위한 실험이다.



(그림 11) 80%일 때 반응 시간

(그림 11)은 전체 시스템 부하가 80%일 때 반응 시간을 나타낸 것이다. 실험 1에서의 실험 결과보다 각 방법간의 성능 차이가 두드러지게 나타나고 있으며 제안된 알고리즘에 의한 성능이 반응 시간 및 평균 반응 시간에서 가장 우수한 결과를 보이고 있다. 결론적으로 시스템의 부하가 높으면 높을수록 제안된 알고리즘이 이질형 분산 시스템에 잘 적용됨을 알 수 있다.

위에서 기술된 다양한 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 먼저 실험 1과 실험 6의 결과를 통해서 분산시스템의 부하가 높으면 높을수록 제안된 알고리즘의 성능이 상대적으로 좋아짐을 알 수 있다. 또한 유전 연산자들에 적용된 확률 변화에도 제안된 알고리즘이 다른 두 가지 방법보다 우수함을 보이고 있다.

5. 결 론

분산 시스템이 전반적으로 과부하일 때 송신자 개시 알고리즘은 송신자 프로세서가 여분의 타스크를 수신자 프로세서로 이전하기 위하여 불필요한 메시지 송신 및 수신이 자주 발생한다. 이러한 문제점으로 인하여 실질적인 타스크 처리 시간이 줄어들면서 CPU 이용률이 저하되고 분산 시스템의 전체적인 처리율(throughput)이 낮아진다.

본 논문에서는 이질형 분산 시스템에서의 효율적인 부하 균등을 위해 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유전자 알고리즘을 기반으로 하는 새로운 동적 부하 균등 기법을 제안하였다. 이러한 유전자 알고리즘을 통하여 이전 요청 메시지들이 전송될 수신자 대상 프로세서들을 결정한다. 기존의 송신자 개시 부하 균등 알고리즘 및 단순 유전자 알고리즘에 의한 접근법과의 비교 분석을 위한 실험에서는 반응 시간 및 평균 반응 시간을 기준으로 다양한 실험을 통하여 비교하여 분석하였다. 실험 결과는 제안된 알고리즘이 시스템 부하가 높을 때 가능한 짧은 반응 시간을 갖는 수신자 프로세서를 결정함으로서 전체적으로 다른 방법들보다 빠르게 나타났다. 반면에 단순 유전자 알고리즘에 의한 부하 균등 접근법은 이질형 분산 시스템에서의 부하 균등을 위해서는 부적절하다는 것을 알 수 있었다. 또한 다양한 매개 변수들의 변화에 따른 실험 결과의 효율성을 위해 다양한 실험을 하였으며 이 같은 실험을 통하여 제안된 알고리즘에 대한 효율성 및 유전자 알고리즘의 다양한 매개 변수들의 변화에 따른 알고리즘의 적응성을 보였다. 본 논문에서는 이질형 분산 시스템의 특성 중에서 각 프로세서의 처리 시간이 다르다는 점만을 고려하였다. 따라서 향후 연구에서는 이질형 특성 중 보다 많은 요소들을 반영하는 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] D. L. Eager, E. D. Lazowska, J. Zahorjan, "Adaptive Load Sharing in Homogeneous Distributed Systems," *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol.12, No.5, pp.662-675, May, 1986.

[2] N. G. Shivaratri, P. Krueger and M. Singhal, "Load Distributing for Locally Distributed Systems," *IEEE Computer*, Vol.25, No.12, pp.33-44, December, 1992.

[3] J. Grefenstette, "Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, Vol.SMC-16, No.1, January, 1986.

[4] L. M. Ni, C. W. Xu and T. B. Gendreau, "A Distributed Drafting Algorithm for Load Balancing," *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol.SE-11, No.10, pp.1153-1161, October, 1985.

[5] Philip D. Wasserman, *Advanced Methods in Neural Computing*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.

[6] Branco Soucek, *Dynamic, Genetic and Chaotic Programming*, John wiley & Sons, 1992.

[7] M. Livny and M. Melman, "Load Balancing in Homogeneous Broadcast Distributed Systems," *Proc. ACM Computer Network Performance Symp*, pp.44-55, 1982.

[8] Terence C. Fogarty, Frank Vavak and Phillip Cheng, "Use of the Genetic Algorithm for Load Balancing of Sugar Beet Presses," *Proc. Sixth International Conference on Genetic Algorithms*, pp.617-624, 1995.

[9] Garrison W. Greenwood, Christian Lang and Steve Hurley, "Scheduling Tasks in Real-Time systems Using Evolutionary Strategies," *Proc. Third Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems*, pp.195-196, 1995.

[10] Chin Lu and Sau-Ming Lau, "An Adaptive Load Balancing Algorithm for Heterogeneous Distributed Systems with Multiple Task Classes," *Proc. International Conference on Distributed Computing Systems*, pp.629-636, 1996.

[11] David B. Fogel and Lawence J. Fogel, "Using Evolutionary Programming to Schedule Tasks on a Suite of Heterogeneous Computers," *Computers & Operations Research*, Vol. 23, No.6, pp.527-534, 1996.

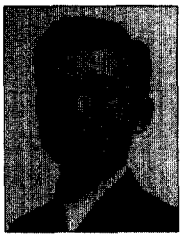
[12] S. H. Lee, T. W. Kang and C. S. Hwang, "A Genetic Algorithm with a Local Improvement Mechanism for Dynamic Load Balancing in Distributed Systems," Proc. 4th International Conference on Soft Computing, Vol.2, pp.486-489, 1996.

이 동 우

e-mail : dwlee@woosong.ac.kr
고려대학교 전자공학과(공학사)
고려대학교 전자공학과(공학석사)
고려대학교 컴퓨터학과(박사수료)
1995년~현재 우송대학교 컴퓨터전자정보공학부 조교수
관심분야 : 분산처리 및 분산시스템, 데이터베이스

이 성 훈

e-mail : shlee@cheonan.ac.kr
한남대학교 컴퓨터공학과(학사)
고려대학교 컴퓨터학과(석사)
고려대학교 컴퓨터학과(박사)
1998년~현재 천안대학교 정보통신학부 조교수
관심분야 : 인공지능, Bioinformatics, 분산시스템



황 종 선

e-mail : hwang@disys.korea.ac.kr
고려대학교 수학과(학사, 석사)
University of Georgia, 전산학 박사
1982년~현재 고려대학교 컴퓨터학과 교수
관심분야 : Mobile Computing, 분산처리 및 분산시스템