

주문형 비디오 서버를 위한 동적 디스크 스트라이핑과 데이터 배치 방법

이 재경^o, 이 경숙, 배 인한
대구효성가톨릭대학교 전자정보공학부

Dynamic Disk Striping and Data Placement Methods for Video-on-Demand Servers

Jae-Kyung Lee, Kyung-Sook Lee, Ihn-Han Bae
Department of Computer Engineering
Catholic University of Taegu-Hyosung

요 약

주문형 비디오 시스템에 저장되는 영화들의 다중 액세스를 지원하기 위해 영화들은 비디오 서버의 다수의 디스크에 걸쳐 스트라이프되고, 비디오 서버의 디스크 배열들간의 부하 불균형을 피할 뿐만 아니라 저장 공간과 장치 대역폭을 최대로 이용하기 위하여 영화의 블록들은 디스크 배열에 신중히 배치되어야 한다. 본 논문에서는 영화의 인기도를 고려한 동적 디스크 스트라이핑에 기초하는 그룹교대 라운드로빈이라는 영화 배치 방법을 제안하고, 그것의 성능을 시뮬레이션을 통하여 평가한다.

1. 서 론

멀티미디어 응용 중에서 엄청난 잠재적인 상업적 가치를 지닌 분야중의 하나는 주문형 비디오 시스템(VOD: Video-on-Demand)이다. 주문형 비디오 시스템은 케이블 텔레비전, 개인용 컴퓨터, 그리고 소프트웨어 산업에 큰 영향을 미치는 정보 배달의 새로운 형태이다. 가정에 가상 비디오점을 제공하는 서비스를 주문형 비디오 시스템으로 볼 수 있다. 관람자는 주어진 영화들의 집합에서 원하는 영화를 선택하여 볼 수 있다. 주문형 비디오 시스템은 영화 뿐만 아니라 대화형 학습, 카탈로그 쇼핑, 그리고 일반적인 정보 브라우징과 같은 어플리케이션도 지원한다. 주문형 비디오 시스템에서 영화들은 디지털 엔코딩된 형태로 비디오 서버에 저장된다. 이러한 비디오 서버는 정보를 저장하고 고객에게 제공할 뿐만 아니라 청구서 작성, 회계, 암

호화 등과 같은 다양한 관리 오퍼레이션을 수행한다.

멀티미디어 서비스 환경에서 가장 중요한 오브젝트중의 하나는 비디오 스트림이다. 그러한 오브젝트들은 비디오 서버에서 그것들의 전달을 위해 높은 입·출력 대역폭 뿐만 아니라 그것들의 저장을 위해 대용량의 저장 공간을 요구한다. 따라서 비디오 서버에서 가장 중요한 파라미터는 그것의 입·출력 대역폭 요구와 저장 요구이다. 입·출력 대역폭은 얼마나 많은 고객들을 동시에 서비스할 수 있는가를 나타내고 저장 장치의 용량은 서버에 저장할 수 있는 영화의 개수를 결정한다. 비디오 서버에 저장되는 영화들은 다중 액세스를 지원하기 위하여 다수의 디스크 배열에 걸쳐 스트라이프되고, 디스크 배열간의 부하 불균형을 피할 뿐만 아니라 그것들의 저장 공간과 대역폭을 최대로 이용하기 위하여 영화의 블록들은 디스크 배열에 신중히 배치되어야 한다[1].

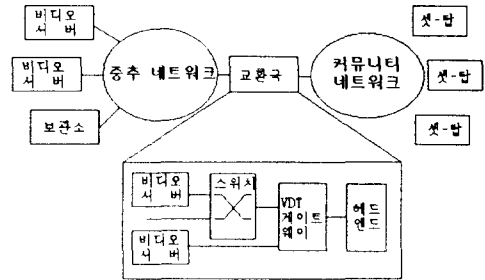
본 논문에서는 비디오 서버에서 디스크 배열들간의 트래픽 부하와 저장 공간을 균등화시켜 영화 관람 QoS를 향상시키기 위해 영화의 인기도를 고려한 동적 디스크 스트라이핑을 기초로 영화 선택 정책으로 그룹교대와 데이터 배치 정책으로 라운드로빈을 사용하는 그룹교대 라운드로빈 방법을 제안하고, 그것의 성능을 시뮬레이션을 통하여 평가한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 주문형 비디오 시스템과 디스크 스트라이핑 및 데이터 배치에 관한 관련 연구를 살펴보고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 동적 디스크 스트라이핑과 데이터 배치 방법에 대하여 설명하고, 4장에서 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제안하는 데이터 배치 방법의 성능을 평가하고, 그리고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 주문형 비디오 시스템

주문형 비디오 시스템은 주문형 비디오 서비스를 제공할 수 있는 시스템이다. 여기서 주문형 비디오 서비스는 요구할 때 언제든지 비디오 관련 서비스(영화, 비디오 게임, 홈 쇼핑, 뉴스, 원격 교육, 원격 의료 등)를 통신망을 통하여 제공 받을 수 있는 대화형 서비스이다. 즉, 사용자가 선택한 비디오 서비스 내용을 통신망을 통하여 비디오 서버로 부터 전송받아 요구에 따라 가상 VCR 기능을 이용, 원하는 서비스 내용을 대화형으로 탐색할 수 있는 서비스이다. 가상 VCR 기능이란 재생, 정지, 멈춤, 빨리감기, 빨리되감기 및 임의의 위치에서의 재생 기능 등과 같은 기존의 VCR과 유사한 기능을 의미한다.

주문형 비디오 시스템은 완전한 서비스 공급을 위해 다수의 요소들: 하나 또는 그 이상의 비디오 서버; 오피레이션, 관리, 그리고 유지 시스템; 헤드-엔드 또는 중앙국에서 스위칭, 라우팅, 다중화 시스템; 지역적으로 흩어진 비디오 서버들을 연결시키는 중추 네트워크; 헤드-엔드 또는 중앙국로부터 가정 또는 사무실로의 커뮤니티 네트워크; 호텔, 판매점, 또는 회사와 같은 고객 구내 네트워크; 텔레비전 재생을 위해 비디오를 수신하고, 복조하고, 해독하고, 그

리고 변환하는 셋-탑(set-top) 장치로 구성된다 (그림 1)[2].



(그림 1) 주문형 비디오 시스템의 구성요소

비디오 서버는 압축된 형태로 영화를 저장하고 요구에 따라 그것들을 재생하기 위하여 요구되는 저장과 제어로 구성된다. 그것은 일반적인 데이터베이스 서버와 달리 승인 제어, 요청 처리, 데이터 검색, 보증된 스트림 전송, 스트림 암호화, 멈춤, 재생, 되감기, 빨리감기를 포함하는 VCR에 있는 기능들의 지원과 같은 다수의 기능들을 수행한다. 승인 제어는 각 요청에 대해 그 요청이 시스템내의 가용 자원에 의해 서비스될 수 있는지 없는지를 결정한다. 비디오 스트림의 연속적인 배당이 보장될 수 있으면 시스템은 그 요청을 서비스할 수 있다. 비디오 데이터를 저장하는데 큰 저장 공간이 필요하므로 비디오 서버는 다수의 대용량의 저장 장치로 구성되어진다. 따라서 비디오 서버 구성 비용의 대부분은 저장 장치가 차지한다. 저장 매체는 자기, 광, 테이프 장치들의 조합이다. 일반적인 업무용 어플리케이션은 데이터 무결성을 요구하지만 비디오 서버는 보관소로부터 로컬 또는 리모트로 검색된 데이터의 디스크-기반 캐쉬를 요구한다. 즉, 높은 가용성이 데이터 무결성 보다 더 중요하다. 주문형 비디오 시스템에서, 각 데이터 스트림은 최소한 1.5 Mb/s의 데이터율을 요구한다. 그리고 같은 영화에 대한 다중 액세스를 지원하기 위하여 그 데이터를 인터리브(interleave)해야 한다. 인터리빙 기법과 인터리빙의 임상은 중요한 문제들이다. 대부분의 경우에 같은 영화에 대해 다중 액세스를 지원하기 위해 영화들은 다수의 디스크에 걸쳐 스트라이프될 것이다. 부수적인 디스크들을 추

가한 RAID(redundant arrays of inexpensive disks)를 적용할 수 있으나 비용이 많이 든다. 비디오를 위해 가장 유용한 RAID 레벨들은 RAID 1 그리고 RAID 3이다. RAID 1에서 데이터는 일반적으로 2개의 디스크들상에 반사되거나 복사되어진다. RAID 3에서 단지 하나의 부수적인 디스크가 각 배열에 대한 패리티를 저장하기 위하여 요구되어진다. RAID 3에서 디스크 고장인 경우에, 스트림들은 패리티 드라이브와 나머지 드라이브들로부터 데이터를 조합하여 재구성되어진다.

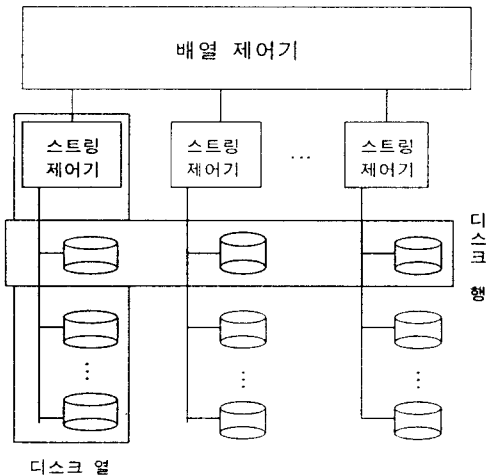
주문형 비디오 시스템의 설계를 위해서는 적절한 계산 자원을 갖는 하드웨어 구성요소들 뿐 아니라 그러한 자원들을 효율적으로 액세스하기 위한 수단을 제공하는 처리 알고리즘들이 요구되어진다. 주문형 비디오 시스템을 위해 필요한 기술로는 압축, 앞에서 언급한 디스크와 I/O 버스 기술, I/O 버퍼링을 포함하는 서버 처리기, 네트워크, 사용자 디스플레이 장치 등이다. 그러한 다양한 시스템 구성 요소들이 주어지면, 시스템의 전체 오퍼레이션을 조정하기 위하여 자원 스케줄링 알고리즘들이 필요하다. 그러한 알고리즘들은 다중 스트림들의 동시 검색을 지원하기 위하여 디스크상으로 데이터의 인터리브 배치, RAID 디스크상으로 데이터의 배치, 가용성을 증가시키기 위하여 사본의 생성, 다중 스트림의 시간 제한을 만족시키기 위한 디스크 I/O 스케줄링, VOD 시간 제한을 만족시키기 위한 I/O 버퍼 관리와 처리기 스케줄링과 같은 문제들을 처리할 것이다. 그리고 주문형 비디오 시스템 설계에서의 고려 사항들은 사용자 행위의 영향, 비디오-응용 대역폭, 기억 서브시스템 입·출력 대역폭, 네트워크 대역폭, 그리고 비디오 인기도 등이다[1].

본 논문에서는 영화 인기도를 고려한 동적 디스크 스트라이핑과 디스크 배열들간의 저장 공간과 장치 대역폭을 고려한 데이터 배치 문제에 대하여 연구한다. 디스크 스트라이핑과 데이터 배치 문제에 대한 관련 연구들은 다음과 같다. Berson[3]은 디스크 클러스터들을 논리적으로 구성하고, 단순 스트라이핑에서 오브젝트 $X_{i,1}$ 의 첫 번째 조각과 오브젝트 X_i 의 첫 번째 조각이 겹쳐지지 않도록 디스크에 할당해야 한

다는 제한을 제거함으로써, 다른 디스플레이 대역폭을 갖는 멀티미디어 데이터를 쉽게 수용할 수 있도록 하는 스테거드 스트라이핑(staggered striping)을 제안하였다. Chen[4]은 지원 가능한 처리력을 증가시키기 위하여 다중 복사본들이 다른 디스크 배열에 저장되는 미러드 디클러스터링(mirrored declustering)과 유사한 RMD(rotational mirrored declustering)라 부르는 사본 배치 방법을 제안하였다. RMD에서 다른 디스크 배열에서의 데이터 배치는 적당히 순환되므로 데이터 사본의 동적 추가/삭제 기능을 유지하면서 디스크 고장에 대해 부하 균등화 기능을 향상시켰다. 복사본 스트라이핑에 대해 다른 배치를 하여 복사본 배치에서 순환 그물 효과를 얻는다. 디스크 고장에 대해 고장난 디스크의 트래픽은 복사본을 갖는 디스크 배열내의 모든 디스크에 걸쳐 분산되어진다. 데이터 배치 정책에서 영화 선택 순서를 결정하기 위하여 3가지 정책: 순차, 교대 그리고 랜덤을 고려하였고, 영화가 저장되는 디스크 배열을 선택하기 위하여 최초 적합의 변종인 환형 최초 적합을 고려하였다. 그리고 Flynn[5]은 각 영화에 대해 디스크들의 다른 순열을 사용하는 IP(individual permutation) 알고리즘에서 순열 선택의 다른 방법들의 성능 영향과 비디오 오브젝트 중복에 의하여 제공되는 동적 부하 균등화의 가치에 대하여 연구하였다. 여기서 중복은 각 내용 항목에 대해 교차하지 않는 다른 중복 순열을 사용하였다. 그 결과 IP의 신중한 선택은 변화성을 줄이고 지터-프리 처리력을 증가시킬 수 있음을 보였다. Keeton[6]은 병렬성(parallism)과 병행성(concurrency)의 다른 정도를 제공하기 위하여 스트라이핑 단위 크기가 변하는 다수의 데이터 배치 정책을 제안하였다. 여기서 병렬성은 한 사용자 요구를 서비스하는 디스크의 개수를 나타내고, 병행성은 어떤 시점에 활동적으로 서비스되고 있는 사용자 요구의 평균 개수를 나타낸다. Dan[7]은 장치의 대역폭과 기억 공간을 최적 사용하기 위하여 핫과 코울드 비디오를 혼합하는 대역폭 대 공간 비율(BSR)이라 부르는 동적 비디오 배치 정책을 제안하였다.

3. 동적 디스크 스트라이핑과 데이터 배치 방법

본 논문에서는 그림 2와 같은 2-차원 디스크 배열을 가정하였다. 각 열의 디스크들은 SCSI와 같은 디스크 스트링 프로토콜을 거쳐서 액세스되는 공유 버스를 사용하여 배열 제어기와 통신한다. 데이터는 행(row)이라 부르는 각 스트링들의 같은 위치에 있는 디스크들에 걸쳐 분산되거나 스트라이프되어진다. 그 스트라이핑 단위는 하나의 디스크상에 저장되는 논리적 연속 데이터의 량을 나타낸다. 데이터는 디스크들의 열에 걸쳐 병렬(parallel)로 전송되어진다. 하나의 열(column)내의 디스크들은 독립적 병행(concurrent) 전송을 수행한다. 본 논문의 모델에서는 각 행에 16개의 디스크가 있고 각 열에는 2개의 디스크가 있다고 가정한다.



(그림 2) 2-차원 디스크 배열

3.1 동적 디스크 스트라이핑

인기있는 영화와 인기없는 영화가 같은 고정된 스트라이핑 폭(striping width)을 사용하여 디스크에 스트라이핑될 경우, 인기있는 영화의 장치 대역폭은 부족할 것이고 인기없는 영화의 장치 대역폭은 낭비될 것이다. 따라서 본 논문에서는 영화의 인기도에 따라 영화의 스트라이핑 폭이 가변적인 동적 스트라이핑 기법을 제

안한다. 만일 주문형 비디오 시스템에 N 고객이 있다면, 어떤 시점에 주어진 영화 m_i 의 상영을 지원하기 위하여 요구되는 세션의 개수는 $N \times p_i$ 이다. 여기서 p_i 는 영화 m_i 의 인기도를 나타낸다. 만일 디스크 배열의 한 열이 l 세션을 지원할 수 있다면, 영화 m_i 를 지원하기 위하여 요구되는 최소 디스크 열의 개수(d_c)는 다음과 같다.

$$d_c \geq \lceil \frac{N \times p_i}{l} \rceil$$

따라서 본 논문에서는 식(1)로 영화 m_i 의 스트라이핑 폭(sw_i)을 결정한다.

$$sw_i = \lceil \frac{N \times p_i}{l} \rceil \dots \dots \dots (1)$$

그리고 영화의 스트라이핑 폭의 상한은 디스크 배열에서 열-차원(C)으로 한다. 즉, $\forall sw_i \leq C$ 이다. 영화의 인기도가 시간이 흐름에 따라 변하기 때문에 각 영화의 인기도가 주기적(예, 매주)으로 재계산되고, 그 인기도를 기초로 영화의 스트라이핑 폭이 재계산되고, 그리고 그 영화의 블록들이 오프-피크 시간에 재배치된다.

3.2 데이터 배치

본 논문에서는 데이터 배치를 위해 영화 선택 정책으로 그룹교대와 영화 배치 정책으로 라운드로빈을 사용하는 그룹교대 라운드로빈(GARR: group alternate round-robin) 방법을 설계한다. 먼저 영화들을 영화 인기도의 내림차순으로 정렬한다. 따라서 요청 확률이 $p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_M$ 인 영화들은 m_1, m_2, \dots, m_M 으로 정렬되고, 디스크 배열은 디스크 열-번호 d_1, d_2, \dots, d_C 로 순서화되어 있다. 여기서 M 은 전체 영화의 개수를 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 그룹교대 영화선택 정책에서는 라운드 단위로 인기있는 영화와 인기없는 영화를 교대로 디스크 배열에 배치된다. 먼저 영화들의 누적 스트라이핑 폭이 디스크 배열의 열-차원과 같을 때 까지 인기있는 영화들을 선택하여 디스크 배열에 스트라이핑 배치하고, 다음에 영화들의 누적 스트라이핑 폭이 디스크 배열의 열-차원과 같을 때 까지 인기없는 영화들을 선택하여 디스크 배열에 역시 스트라이핑 배치한다. 그리고 영화

배치 정책으로는 라운드로빈을 고려하였다. 라운드로빈 영화 배치 정책은 영화 선택 정책에 의해 선택된 영화들을 디스크 배열에서 디스크 열의 $d_1 \rightarrow d_2 \rightarrow \dots \rightarrow d_C \rightarrow d_1 \rightarrow \dots$ 순서로 배치한다. 따라서 첫 번째 라운드에서 가장 인기있는 영화 m_1 이 선택되고, 두 번째 라운드에서 인기없는 영화 $m_M, m_{M+1}, \dots, m_{M+C-1}$ 이 선택되었다면, 영화 m_1 의 블록들은 디스크 배열의 열 d_1, d_2, \dots, d_C 에, 영화 m_M 의 블록들은 디스크 배열의 열 d_1 에, 영화 m_{M+1} 은 디스크 배열의 열 d_2 에, ..., 그리고 영화 m_{M+C-1} 은 디스크 배열의 열 d_C 에 배치되어진다.

5. 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 그룹교대 라운드로빈 데이터 배치 방법을 시뮬레이션을 통하여 그것의 성능을 평가하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다. 그리고 영화의 인기도는 Zipf의 법칙[8]에 따르고, 영화의 복사본은 생성하지 않는 것으로 가정하였다.

<표 1> 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
영화의 길이	100분
영화의 비트율	2Mb/초
영화의 크기	1.5GB
영화의 개수(M)	80 개
디스크 배열에서 행의 차원(R)	2
디스크 배열에서 열의 차원(C)	16
사용자의 수(N)	900 명
데이터 블록의 크기	500KB
디스크 용량	4.5GB
하나의 디스크가 지원하는 세션의 개수	6

시뮬레이션 파라미터에 의해 디스크 배열에는 전체 32개의 디스크가 있고, 디스크 배열의 용량은 144GB이므로 96편의 영화를 저장할 수 있다. 한편의 영화는 3000개의 블록으로 구성되고, 디스크 배열의 각 열은 2개의 디스크로 구성되므로 각 열은 12개의 세션을, 전체 시스템은 192개의 세션을 지원할 수 있다. 그리고 시뮬레이션에서는 다음 4가지 데이터 배치 방법을 고려하였다.

- 순차 라운드로빈(SRR: sequential round-

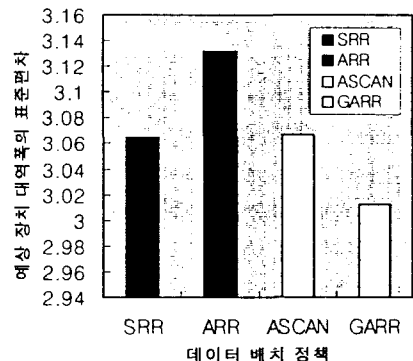
robin): 영화들을 인기순으로 정렬한 다음, 인기도가 높은 영화부터 라운드로빈 방식으로 디스크 배열에 스트라이핑 배치한다.

- 교대 라운드로빈(ARR: alternate round-robin): 영화들을 인기순으로 정렬한 다음, 인기있는 영화와 인기없는 영화를 선택하여, 교대로 라운드로빈 방식으로 디스크 배열들에 스트라이핑 배치한다.

③ 교대 주사(ASCAN: alternate scan): 영화들을 인기순으로 정렬한 다음, 인기있는 영화와 인기없는 영화를 선택하여, 교대로 주사 방식으로 디스크 배열에 스트라이핑 배치한다.

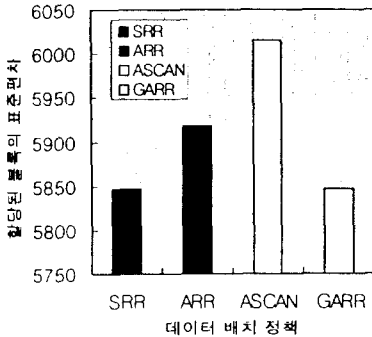
④ 그룹교대 라운드로빈(GARR: group alternate round-robin): 영화들을 인기순으로 정렬한 다음, 먼저 영화들의 누적 스트라이핑 폭이 디스크 배열의 열-차원과 같을 때 까지 인기있는 영화들을 선택하고, 다음에 영화들의 누적 스트라이핑 폭이 디스크 배열의 열-차원과 같을 때 까지 인기없는 영화들을 선택하여 교대로 즉, 첫 번째 라운드에는 인기있는 영화를 다음 라운드에는 인기없는 영화를 라운드로빈 방식으로 디스크 배열에 스트라이핑 배치한다.

그림 3은 주문형 비디오 시스템의 현재 세션 수가 190일 때, 데이터 배치 방법에 따라 디스크 배열의 각 디스크 열에 할당되는 예상 장치 대역폭간의 표준편차를 각각 보여준다. 여기서 본 논문에서 제안하는 GARR이 가장 성능이 우수하여 디스크 배열의 전체 부하를 각 디스크 열에 균등하게 분배함을 알 수 있다.



(그림 3) 데이터 배치 정책에 따른 디스크 열에 할당된 예상 장치 대역폭의 표준편차

그림 4는 데이터 배치 방법에 따라 디스크 배열의 각 열에 할당된 영화 블록의 개수의 표준편차를 각각 보여준다. 여기서 SRR과 본 논문에서 제안하는 GARR이 같은 성능으로 우수하여 디스크 배열에서 디스크 열의 기억공간을 균등하게 사용함을 알 수 있다.



(그림 4) 데이터 배치 정책에 따른 디스크 열에 할당된 블록 개수의 표준편차

디스크 배열의 각 디스크 열의 예상 장치 대역폭과 기억공간을 모두 균등하게 사용하는 GARR의 영화 배치 결과는 표 2와 같다.

<표 2> GARR에 따른 영화 배치 결과

	디스크 배열의 열번호															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
영화 블록의 수	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
대역폭	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65
기억공간	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4
대역폭	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49
기억공간	4	4	5	5	5	5	6	6	6	7	7	7	8	8	9	9
대역폭	48	47	46	45	44	43	42	41	40	49	38	37	36	35	34	33
기억공간	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14	15	15	16	17	18	19
대역폭	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20			

6. 결론

본 논문에서는 영화의 인기도에 따라 그 영화의 스트라이핑 폭이 다른 동적 스트라이핑 기법에 기반한 그룹교대 라운드로빈 데이터 배치 방법을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 그것의 성능을 평가하였다. 그 결과, 본 논문에서 제안하는 그룹교대 라운드로빈 배치 방법이 디스크배열에서 디스크 열의 예상 장치 대역폭과 기억공간을 균등하게 사용함을 알 수 있었다.

앞으로 연구내용은 데이터 중복과 효율적인 스트라이핑 기법을 통한 디스크 결함 감래 데이터 배치 방법과 영화들의 데이터 블록들을 한 디스크에 배치할 때, 데이터 블록들의 인기도를 고려하여 데이터 블록들을 실린더들에 효율적으로 배치하여 데이터 검색의 공간 국부성을 향상시킬 수 있는 데이터 배치 방법에 관한 연구 등이다.

참고문헌

- [1] T. D. C. Little, D. Venkatesh, "Popularity-based assignment of movies to storage devices in a video-on-demand system", ACM Multimedia Systems, Vol. 2, No. 6, pp. 280~287, Feb. 1995.
- [2] Y. H. Chang, D. Coggins, D. Pitt, D. Skellern, M. Thapar, and C. Venkatraman, "An Open-Systems Approach to Video on Demand", IEEE Comm. Mag., pp. 68~80, May 1991.
- [3] S. Berson, S. Ghandeharizadeh, "Staggered Stripping in Multimedia Information Systems", ACM SIGMOD'94, pp. 77~90, 1994.
- [4] M. Chen, H. Hsiao, C. Li, and P. Yu, "Using Rotational Mirrored Declustering for Replica Placement in a Disk-Array-Based Video Server", Multimedia '95, pp. 121~130, 1995.
- [5] R. Flynn, W. Tetzlaff, "Disk Striping and Block Replication Algorithms for Video File Servers", IBM Technical Report RC 20328, 1996.
- [6] K. Keeton, R. H. Katz, "The Evaluation of Video Layout Strategies on a High-Bandwidth File Server", Proceedings of the fourth workshop on Network and Operating System support for Digital Audio and Video, 1993.
- [7] A. Dan, D. Sitaram, "An Online Video Placement Policy based Bandwidth to Space Ratio (BSR)", ACM SIGMOD'95, pp. 376~385, June 1995.
- [8] G. K. Zipf, Human Behavior and the Principle of Least Effort, Addison-Wesley, 1949.