7. 병렬 알고리즘 – STACK SKIP-LIST

멀티쓰레드 프로그래밍

정내훈

목차

- Stack
- SKIPLIST

목차

소개

- Stack
  - 후입선출(LIFO) 구조
  - Push(), Pop() 메서드를 제공

무제한 성긴 동기화 스택

- 무제한 성긴 동기화 스택은 연결리스트로 구성되고 top 필드가 첫 노드를 가리킨다.
  - 만약 스택이 비어있을 경우는 nullptr
  - -1을 스택에 추가하는 것은 고려하지 않는다.
  - Empty일 경우 Pop()은 -2을 리턴한다.

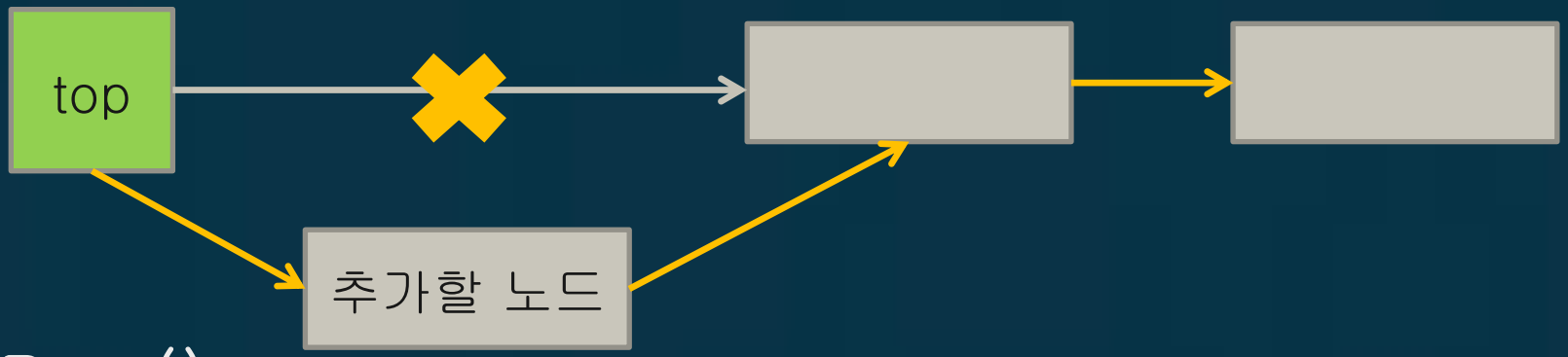
무제한 성긴 동기화 스택

- Code
  - class Node

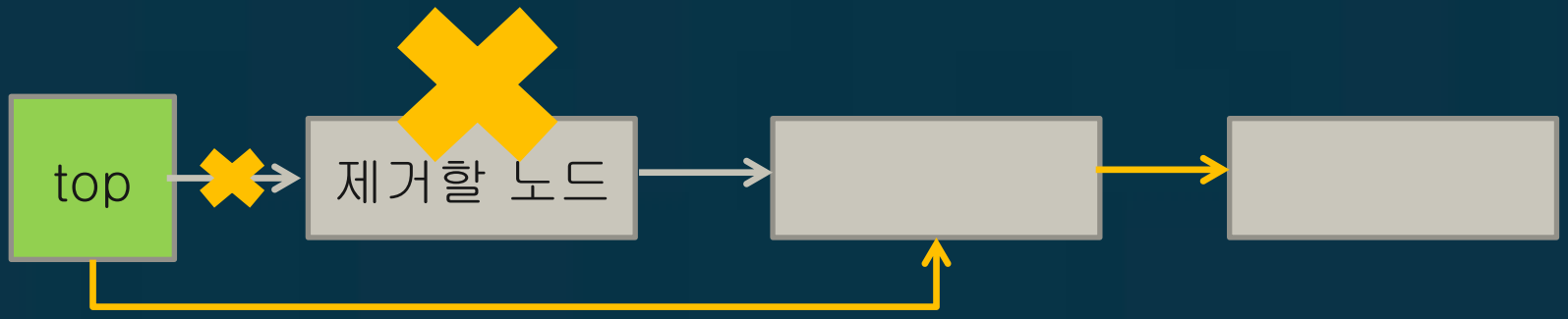
```
class Node
{
public:
	int value;
	Node *next;
	Node() { }
	~Node() { }
	Node(int input_value) {
		value = input_value;
		next = nullptr;
	}
};
```

무제한 무잠금 스택

- Push()



- Pop()



무제한 성긴 동기화 스택

- Code
  - Single Thread Code

```
int Pop()
{
    if (nullptr == top) return -2;
    int temp = top->key;
    NODE *ptr = top;
    top = top->next;
    delete ptr;
    return temp;
}
```

```
void Push(int x)
{
    NODE *e = new NODE{ x };
    e->next = top;
    top = e;
}
```

무제한 성긴 동기화 스택

- 실습 #20
  - 성긴 동기화 스택을 구현하라.
  - 1,2,4,8 쓰레드에서의 성능비교를 하라.
  - 아래 벤치마크 프로그램을 사용하라.

```
void ThreadFunc(int threadNum)
  {
   for (int i=1; i<NUM_TEST / threadNum; i++) {
      if ((rand() % 2) ||  (i < 1000 / threadNum)) {
         Stack.Push(i);
      } else {
         Stack.Pop();
      }
    }
}
```

Stack

- 성능 (수목반)
  - Intel® Core™ i7-4770@ 2.20Hz, 4Core, Hyperthread, 16GB Memory
  - Single Thread : 877ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free Stack	STAMPED LF QUEUE	EBR LF QUEUE
1	1245	636	1135	473
2	1545	797	1027	534
4	1661	1139	1158	652
8	1968	724	1269	774
16	1960	730	1280	790

Stack

- 성능
  - Intel® Core™ i7-7700@ 3.60Hz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : 785ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free QUEUE	STAMPED LF QUEUE	EBR LF QUEUE
1	1252	757	1135	473
2	1268	636	1027	534
4	1358	797	1158	652
8	1560	1139	1269	774
16	1570	1177	1280	790

무제한 무잠금 스택

- 무잠금 스택은 CompareAndSet을 이용하여 구현한다.
- Top의 변환을 CAS를 사용하여 non-blocking으로 구현한다.
- ABA 문제가 있으므로 delete를 하지 않는다.

무제한 무잠금 스택

- 실습 #21
  - 무제한 Lock-Free 스택을 구현하라.
  - 1,2,4,8 쓰레드에서의 성능비교를 하라.
  - 아래 벤치마크 프로그램을 사용하시오.
  - 교재의 try-pop이니 try_push은 무시하시오.

```
void ThreadFunc(int threadNum)
  {
   for (int i=1; i<NUM_TEST / threadNum; i++) {
      if ((rand() % 2) ||  (i < 1000)) {
         Stack.Push(i);
      } else {
         Stack.Pop();
      }
    }
}
```

무제한 무잠금 스택

- 숙제 #11 <<< 2020년도 생략 >>>
  - 무제한 Lock-Free 스택을 구현하라.
  - Try_pop이니 try_push 같은 것이 들어있는 프로그램을 베끼지 마시오.
  - 제출물
    - .cpp 파일
    - 실행속도 비교표 (Lock버전, Lock free)
    - CPU의 종류 (모델명, 코어 개수, 클럭)
  - 제출 : 생략

Stack

- 성능
  - Intel® Core™ i7-7700@ 3.60Hz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : 785ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free Stack	STAMPED LF QUEUE	EBR LF QUEUE
1	1252	773		
2	1268	653		
4	1358	761		
8	1560	986		
16	1570	1027		

무제한 무잠금 스택

- 결론
  - CAS를 사용하여 Lock-free 스택을 구현하였다.
  - 메서드 호출은 스택의 top에 대해 성공한 CAS호출의 순서로 하나씩 진행되므로 순차병목현상이 나타날 수 있다.
- 메모리 문제
  - new와 delete를 사용하면. ABA문제가 생긴다.
  - Queue보다 문제가 생길 확률이 크다.

BACK OFF 스택

- CAS 동기화의 문제
  - 경쟁이 심할 경우 CAS 실패 시 계속 재시도하는 것은 전체 시스템에 악영향을 줌
    - Thread가 많아질 수록 경쟁이 심해짐
    - 경쟁이 심할 경우 CAS가 실패할 확률이 높음
      - 실패할 경우 성공할 때 까지 반복
    - CAS를 실행할 경우 같은 CPU의 모든 Core의 메모리 접근이 중단됨
      - Thread가 많아질 수록 잦은 메모리 접근 중단

목차

BACK OFF 스택

- BackOff
  - 교재 7장에 나옴
  - 경쟁이 심할 경우 경쟁을 줄이자.
    - CAS의 실패는 경쟁이 심함을 뜻함.
    - CAS가 실패했을 경우 적절한 기간 동안 실행을 멈추었다가 재개 하자.
    - CAS의 실패 확률이 낮아짐 -> 메모리 접근 중단 감소
  - 적절한 기간
    - 처음에는 짧게
    - 계속 실패하면 점점 길게
    - 첫 번 시도에 성공하면 짧게
    - Thread마다 기간을 다르게 해야 한다.

BACK OFF 스택

- BackOff 객체
  - CAS가 실패 했을 경우 다음 CAS를 시도하기 전에 사용.
  - 사용될 때 마다. BackOff 시간 간격 증가.
  - 시간 간격은 범위 안에서 랜덤하게

BACK OFF 스택

- BackOff class

```
class BackOff{
    int minDelay, maxDelay;
    int limit;
public:
    BackOff(int min, int max)
      : minDelay(min), maxDelay(max), limit (min) {}

    void InterruptedException() {
        int delay = 0;
        if (limit != 0) delay = rand() % limit;
        limit *= 2;
        if (limit > maxDelay) limit = maxDelay;
        this_thread::sleep_for(chrono::microseconds(delay));;
    }
};
```

Stack

- 성능
  - Intel® Core™ i7-7700@ 3.60Hz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : 785ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free Stack	Backoff LF Stack	EBR LF QUEUE
1	1252	773	801	
2	1268	653	816	
4	1358	761	757	
8	1560	986	765	
16	1570	1027	748	

Stack

- 성능 (수목반)
  - Intel® Core™ i7-4770@ 2.20Hz, 4Core, Hyperthread, 16GB Memory
  - Single Thread : 877ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free Stack	BackOff LF Stack	BackOff-2 LF STack
1	1245	636	737	736
2	1545	797	643	599
4	1661	1139	783	833
8	1968	724	1031	1167
16	1960	730	1082	1190

Stack

- 성능 (화목반-B조)
  - Intel® Core™ i7-4770@ 2.20Hz, 4Core, Hyperthread, 16GB Memory
  - Single Thread : 877ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free Stack	BackOff LF Stack	BackOff-2 LF STack
1	1245	795	793	819
2	1545	667	832	624
4	1661	779	862	752
8	1968	1130	779	974
16	1960	1166	801	1028

BACK OFF 스택

- Better backoff

```
int delay = 0;
if (limit != 0)
    delay = rand() % limit;
limit *= 2;
if (limit > maxDelay)
    limit = maxDelay;
int start, current;
_asm RDTSC;
_asm mov start, eax;
do {
    _asm RDTSC;
    _asm mov current, eax;
} while (current - start < delay);
```

Stack

- 성능
  - Intel® Core™ i7-7700@ 3.60Hz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : 785ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free Stack	Backoff LF Stack	Backoff-2 LF STack
1	1252	773	801	800
2	1268	653	816	730
4	1358	761	757	883
8	1560	986	765	1207
16	1570	1027	748	1225

BACK OFF 스택

- Better backoff – 2
  - 절대 시간이 중요한가? CPU가 빠르면Critical Section 처리 속도도 빠르다.
  - 루프에서 메모리를 아예 접근하지 않는 것이 바람직하다.

```
int delay = 0;
if (0 != limit) delay = rand() % limit;
if (0 == delay) return;
limit += limit;
if (limit > maxdelay) limit = maxdelay;

_asm mov eax, delay;
myloop:
_asm dec eax
_asm jnz myloop;
```

Stack

- 성능 (수목반)
  - Intel® Core™ i7-4770@ 2.20Hz, 4Core, Hyperthread, 16GB Memory
  - Single Thread : 877ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free Stack	BackOff LF Stack	BackOff-3 LF STack
1	1245	636	737	723
2	1545	797	643	635
4	1661	1139	783	807
8	1968	724	1031	1166
16	1960	730	1082	1186

Stack

- 성능
  - Intel® Core™ i7-7700@ 3.60Hz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : 785ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free Stack	Backoff LF Stack	Backoff-3 LF STack
1	1252	773	801	783
2	1268	653	816	710
4	1358	761	757	783
8	1560	986	765	942
16	1570	1027	748	965

BACK OFF 스택

- 실습 #22
  - 무제한 무잠금 BackOFF Lock-Free 스택을 구현하라.
  - 1,2,4,8 쓰레드에서의 성능비교를 하라.
  - 아래 벤치마크 프로그램을 사용하라.

```
void ThreadFunc(int threadNum)
  {
   for (int i=1; i<25000000 / threadNum; i++) {
      if ((rand() % 2) ||  (i < 1000)) {
        Stack.Push(i);
      } else {
        Stack.Pop();
      }
    }
}
```

BACK OFF 스택

- 숙제 12 : << 생략 >>
  - Lock Free BackOff Stack의 구현
    - 강의자료실에 있는 LFSTACK활용
  - 제출물
    - .cpp 파일
    - 실행속도 비교표 (Lock버전, Lock free, Lock free BackOff)
    - CPU의 종류 (모델명, 코어 개수, 클럭)
  - 제출 : nhjung@kpu.ac.kr
    - 제목 : [2019 멀티코어 프로그래밍 숙제 12] 학번, 이름
    - 11월 19일 화요일 오전 11시까지 제출

BACK OFF 스택

- BackOff Stack 성능 (8 Core, 4 CPU XEON)

	1	2	4	8	16	32	64
BackOff STACK	1370	1158	1233	1198	1749	2977	2986
LF STACK	1392	1236	2298	2704	4739	6779	7081

목차

- 소개
- 무제한 무잠금 스택
- 백오프 스택
- 소거 백오프 스택
  - 무잠금 교환자
  - 소거 배열

소거

- 병행성 문제
  - Queue나 Stack은 리스트의 말단 부분에서 잦은 충돌이 생긴다.
    - fine grain synchronization타입의 최적화가 불가능하다.
    - Queue는 ½로 충돌이 분산된다.
  - Stack의 경우 충돌을 회피해서 병렬로 처리하는 방법이 가능
    - 아이디어 :
      - push, pop이 동시에 발생하는 경우 꼭 Stack에 넣어야 하나?

소거

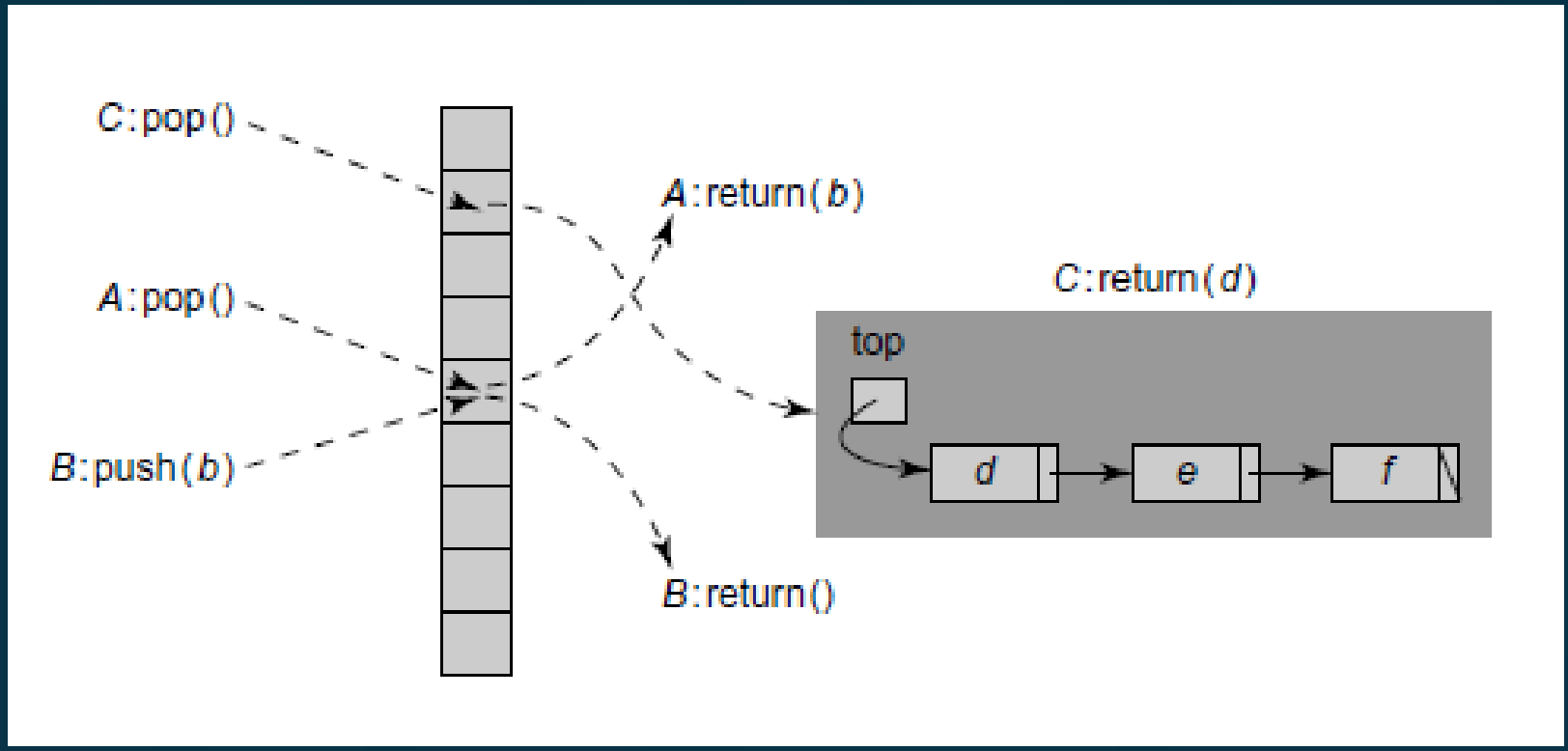
- 소거
  - 많은 쓰레드가 서로 충돌할 경우 Stack에 넣지 않고 직접 Data를 주고 받도록 한다.
    - Stack을 통하지 말고 다른 객체를 통해 전달
  - Lock-Free로 Data를 주고 받도록 한다.
  - 높은 경쟁률에 대비하여 주고 받는 별도의 객체를 복수로 준비한다.

소거

- 만약 push와 pop이 거의 동시에 실행된다면 두 연산은 서로 취소되어 없어지고 스택에 접근하지 않는다.
- 이런 경우 push를 호출하는 스레드는 스택의 변동 없이 pop을 호출하는 스레드와 값을 교환할 수 있다.
  - 이 때 서로를 소거(eliminate)하게 된다고 한다.

소거

- 소거(elimination)



소거

- EliminationArray
  - 자료교환의 장소 (교환자(Exchanger) 객체)
  - 여러 개의 원소를 갖고 부하를 분산
    - 서로 만나지 못할 경우도 있다.
    - 경쟁이 심할 경우 많은 장소가 효율적이고, 경쟁이 적을 경우는 장소가 적어야 한다.
- 스레드는 EliminationArray에서 임의의 항목을 골라서, 서로를 소거하려 시도
  - 잘못된 종류의 호출을 만난 경우는 소거 실패
    - 예) push와 push, pop과 pop
  - 임의로 하지 않고, 짝을 잘 맞추어 주면?
    - 정보 전달 자체가 오버헤드
    - Lock-free로 하는 것은 어렵다. Open-Problem

소거 백오프 스택(2020-수목)

- 앞에서 구현했던 LockFreeStack에서 백오프를 사용하지 않고, 대신에 소거를 시도한다.
  - 소거 :
    - Elimination Array의 임의의 원소를 선택한다
      - 임의 : 협조 자체가 오버헤드
      - Array의 크기는 가변
    - 소거 시도 :
      - 아무도 없으면 기다림
      - 다른 스레드가 기다리고 있으면 교환
      - 이미 교환 중이면 재시도 [array size 증가 필요]
    - 주의점
      - Time Out 필요 [array size 감소 필요]
      - 서로 만난 스레드가 <push>, <pop>의 조합이라는 보장이 없음
        - 잘못된 만남은 실패

무잠금 교환자

- Elimination Array의 원소
- 두개의 쓰레드가 Lock free로 값을 교환할 수 있게 해주는 객체
- Exchange(myitem)의 메소드를 갖고 있으며 두개의 쓰레드가 Exchange()를 호출하면 서로의 입력 값을 리턴한다.
  - pop도 자기 값(-1)을 상대방에게 준다.
- 리턴 값은 교환값과 상태(성공, 실패, 타임아웃(-2)) 이다.

```
1  public class LockFreeExchanger<T> {
2    static final int EMPTY = ..., WAITING = ..., BUSY = ...;
3    AtomicStampedReference<T> slot = new AtomicStampedReference<T>(null, 0);
4    public T exchange(T myItem, long timeout, TimeUnit unit)
5      throws TimeoutException {
6      long nanos = unit.toNanos(timeout);
7      long timeBound = System.nanoTime() + nanos;
8      int[] stampHolder = {EMPTY};
9      while (true) {
10       if (System.nanoTime() > timeBound)
11         throw new TimeoutException();
12       T yrItem = slot.get(stampHolder);
13       int stamp = stampHolder[0];
14       switch(stamp) {
15       case EMPTY:
16         if (slot.compareAndSet(yrItem, myItem, EMPTY, WAITING)) {
17           while (System.nanoTime() < timeBound){
18             yrItem = slot.get(stampHolder);
19             if (stampHolder[0] == BUSY) {
20               slot.set(null, EMPTY);
21               return yrItem;
22             }
23           }
24           if (slot.compareAndSet(myItem, null, WAITING, EMPTY)) {
25             throw new TimeoutException();
26           } else {
27             yrItem = slot.get(stampHolder);
28             slot.set(null, EMPTY);
29             return yrItem;
30           }
31         break;
32       case WAITING:
33         if (slot.compareAndSet(yrItem, myItem, WAITING, BUSY))
34           return yrItem;
35         break;
36       case BUSY:
37         break;
38       default: // impossible
39         ...
40       }
41     }
42   }
43 }
```

무잠금 교환자(2020-화목B조)

- 구현
  - Slot
    - 처음 교환을 시도한 쓰레드의 입력값을 저장하는 공간
    - 두 번째 쓰레드가 자신의 값을 넘겨 주는 공간
  - 교환기는 3개의 상태를 가진다.
    - EMPTY
      - 슬롯에 아무런 값도 저장되지 않은 상태
    - WAITING
      - 처음 온 쓰레드에서 슬롯에 값을 하나 저장한 상태
      - 다른 쓰레드가 와서 읽어가기를 기다리는 상태
    - BUSY
      - 나중에 온 쓰레드가 슬롯의 값을 읽어가고 자신의 값으로 변경한 상태
      - 처음 쓰레드는 아직 읽기를 완료하지 않음

무잠금 교환자

- 상태에 따른 구현 (1/2)
  - EMPTY
    - CAS를 이용하여 슬롯에 자신의 아이템을 넣고 상태를 WAITING으로 바꾸기를 시도한다.
      - 실패
        - 다른 스레드가 이미 CAS를 성공한 경우이다.
        - 다른 스레드가 waiting으로 변경
        - 처음부터 다시 시도
      - 성공
        - 스핀을 하면서 다른 스레드가 교환을 끝내길 기다림
        - 교환이 완료(BUSY) 된 후에는 대기 중이던 스레드는 아이템을 가져간 후 상태를 empty 으로 바꾼다.
          - Empty()로 전환하는 일은 CAS를 이용하지 않는다
          - 오직 한 스레드 만 작업하기 때문

무잠금 교환자

- 상태에 따른 구현 (2/2)
  - EMPTY
    - Waiting으로 바꾼 후 다른 스레드를 기다림
    - 다른 스레드가 나타나지 않는다면,
      - 대기중이던 스레드는 slot의 상태를 CAS를 호출하여 EMPTY로 전환
      - 성공시
        - 시간제한 예외 발생
      - 실패시
        - 다른 스레드가 나타나서 교환을 완료하고 Busy로 변경했다는 의미이므로 대기중이던 스레드는 교환을 완료한다.

무잠금 교환자

- 구현
  - WAITING
    - 어떤 스레드가 대기중이며 슬롯은 그 스레드의 아이템을 갖는다.
      - CAS를 이용하여 자신의 아이템을 적고 대기중인 스레드의 아이템을 얻는 것을 시도한다.(BUSY상태로 전환)
      - 실패시에는 처음부터 다시
      - 성공하면 얻은 아이템을 반환한다.
  - BUSY
    - 현재 다른 두 스레드가 슬롯을 써서 값을 교환하고 있으므로 처음부터 다시.

무잠금 교환자(2020-화목 A조)

- 구현
  - AtomicStamperReference의 구현
    - 값의 교환과 상태 변경을 Atomic하게 구현해야 한다.
    - StampedQueue와 같은 구현?
      - InterlockedCompareExchange64
      - InterlockedCompareExchange128
    - 해결책
      - 32비트 int의 상위 2비트 사용
        - 교환할 수 있는 값의 최대값 감소

무잠금 교환자

- ABA 문제??
  - 해당 알고리즘은 ABA문제를 일으키지 않는다.
    - ABA현상이 발생한다.
    - 하지만 그냥 진행해도 문제없다.
    - 교환대상이 바뀐 것 뿐이고 값도 그대로이기 때문에 아무 문제 없다.
      - 사실은 CAS를 통해서 old값을 읽기 때문에 상태만 그대로이면 값이 바뀌는 것 까지도 문제가 없다.
- 타임아웃 문제
  - 너무 짧은 교환 시간은 항상 실패하게 되므로 시간제한 기간을 고를 때 주의해야 한다.

소거 배열

- 소거 배열 (Elimination array)
  - Exchage객체의 배열.
    - capacity개의 원소를 갖는다.
  - visit()
    - 소거배열이 갖고 있는 exchange원소 중 하나를 랜덤하게 선택해서 교환을 시도한다.
    - range값을 통해 random값의 범위를 조정할 수 있다.

소거 배열

- Code
  - Class Elimination

```
class EliminationArray {
   int range;
   LockFreeExchanger exchanger[MAX_THREAD];
public:
   EliminationArray() { range = 1;}
   ~EliminationArray() {}
   int Visit(int value, bool *time_out) {
      int slot = rand()% range;
      bool busy;
      int ret = exchanger[slot].exchange(value, time_out, &busy);
      if ((true == *time_out) && (range > 1)) range--;
      if ((true == busy) && (range <= num_thread / 2)) range++;
                                    // MAX RANGE is # of thread / 2
   }
};
```

소거 배열

- EliminationBackoffStack
  - LockFreeStack에서 CAS에 실패했을 경우 백오프를 하는 대신에 EliminationArray를 써서 값의 교환을 시도한다.
  - Push()
    - CAS(…)
      - 성공하면 리턴
    - 자신의 입력값을 인자로 Visit()를 호출
      - timeout이 아니면
        - 다른 스레드와의 교환이 성공
        - pop과의 교환이었으면 리턴 (교환된 값이 -1)
        - pop과의 교환이 아니었으면 다시 CAS로~~
      - timeout이면
        - 다시 CAS로~~~

소거 배열

- EliminationBackoffStack
  - Pop()
    - CAS(…) 시도
      - 성공하면 return
    - -1 을 인자로 visit()를 호출
      - timeout이 아닌 경우 : 교환 성공
        - push()호출과 교환했는지 검사 (교환값 != -1)
        - push()호출과의 교환이면 교환값을 리턴
        - 다시 CAS()로~~~
      - Timeout인 경우
        - 다시 CAS()로~~~.

소거 배열

- RangePolicy
  - EliminationArray의 LoadBalancing
  - EliminationArray에서 사용 중인 최대 인덱스 값을 갖는다.
  - 경쟁이 심하면 값을 늘리고
    - 방문했을 때 Busy인 경우
  - timeout이 발생하면 값을 줄인다.

소거 배열

- EliminationBackoffStack
  - 만약 교환이 실패한다면 원인은?
    - 처음부터 교환이 없었거나, 같은 종류의 연산과 값이 교환되었을 경우 실패한다.
    - 이런 경우 다시 top에 대한 CAS를 재시도 한다.

소거 배열

- EliminationBackoffStack
  - 교환자의 위치 선택 범위는?
    - 범위의 크기와 충돌 확률은 반비례적
    - 스레드의 수가 적을 경우 범위는 작아야하고 스레드수가 클 경우 범위가 넓어야 한다.
    - RangePolicy객체를 이용하여 범위를 지정한다.
      - 간단하게는 time_out 하면 범위를 줄이고 exchanger에 너무 많은 쓰레드가 몰리면 범위를 늘인다.

실습

- 실습 #21 : EliminationBackoffStack
  - Lock-Free 소거 백오프 Stack을 완성하라
    - 샘플 프로그램 참조 (버그가 있을 수 있음)
    - 소거 성공 횟수를 기록해서 출력 할 것.
  - 1, 2, 4, 8 쓰레드에서의 성능비교를 하라.
  - 실습 #20과의 성능 비교를 하라.

숙제

- 숙제 12 :
  - LockFree 소거 Stack의 구현
  - 제출물
    - .cpp 파일
    - 실행속도 비교표 (Lock버전, Lock free, Lock free 소거)
    - CPU의 종류 (모델명, 코어 개수, 클럭)
    - 강의 자료의 stack.cpp 참조
  - 제출 : eclass
    - 수목 : 11월 24일 화요일 오전 11시

Stack

- 성능(화목)
  - Intel® Core™ i7-7700@ 3.60Hz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : 857 ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free Stack	Backoff-2 LF Stack	Elimination LF Stack
1	1077	732	692	
2	1191	573	644	
4	1316	616	661	
8	1491	737	752	
16	1505	766	753	

Stack

- 성능(화목)
  - Intel® it-4770HQ 2.2GHz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free Stack	Backoff-2 LF Stack	Elimination LF Stack
1		954		763
2		640		776
4		785		799
8		1005		1145
16		1211		1242

Stack

- 성능(화목-B조)
  - Intel® it-4770HQ 2.2GHz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : ms

Thread	Coarse Stack	Lock-Free Stack	Backoff-2 LF Stack	Elimination LF Stack
1		733		776
2		619		753
4		937		867
8		1381		1362
16		1404		1335

결론

- EliminationBackoffStack
  - LockFreeStack과 달리 확장될 가능성 있음
  - 부하가 높아지면 성공적인 소거가 증가하고, 병렬적으로 여러 개의 연산이 완료된다
  - 소거된 연산은 절대로 스택에 접근하지 않기 때문에 LockFreeStack에서의 경쟁이 줄어든다.

목차

- Stack
- SKIPLIST

SKIP-LIST

- 소개
- 순차 스킵 리스트
- 병행 스킵 리스트
- Lock-Free 스킵 리스트

소개

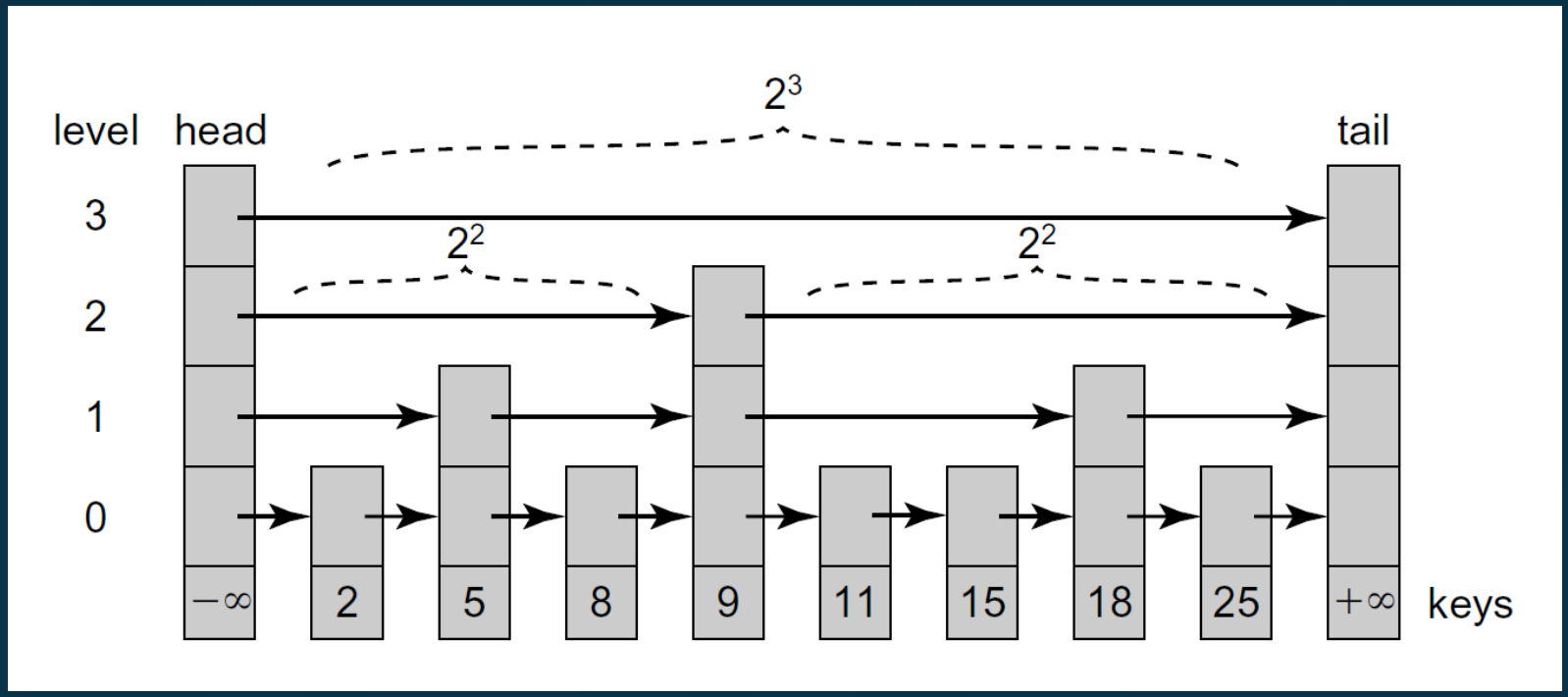
- 지금까지의 자료구조
  - Queue, Stack
  - Set
    - Linked List, 검색시간 O(n)
- O(n) 검색시간?
  - 실제로 사용하기에는 너무 무리
  - 원소의 개수가 적을 경우에는 사용 가능
- 실제 사용하는 자료구조
  - Hash : 순서가 필요 없는 경우
  - Binary Tree계열 (B+, Red-Black, Heap, AVL..)

소개

- 일반적인 트리구조
  - 트리의 깊이를 유지하기 위해서 정기적인 재균형(Rebalancing) 작업이 필요(AVL트리..)
    - 하지만 병행 구조에서는 재균형작업이 병목이나 경쟁상태를 유발할 가능성이 있다.
- SkipList
  - 평균 O(logn) 검색시간을 갖는 병행 검색 구조
  - 재균형작업이 필요 없음!!!
  - 랜덤 자료구조(Randomized algorithm, Probabilistic data structure)
  - Worst Case O(n) 임

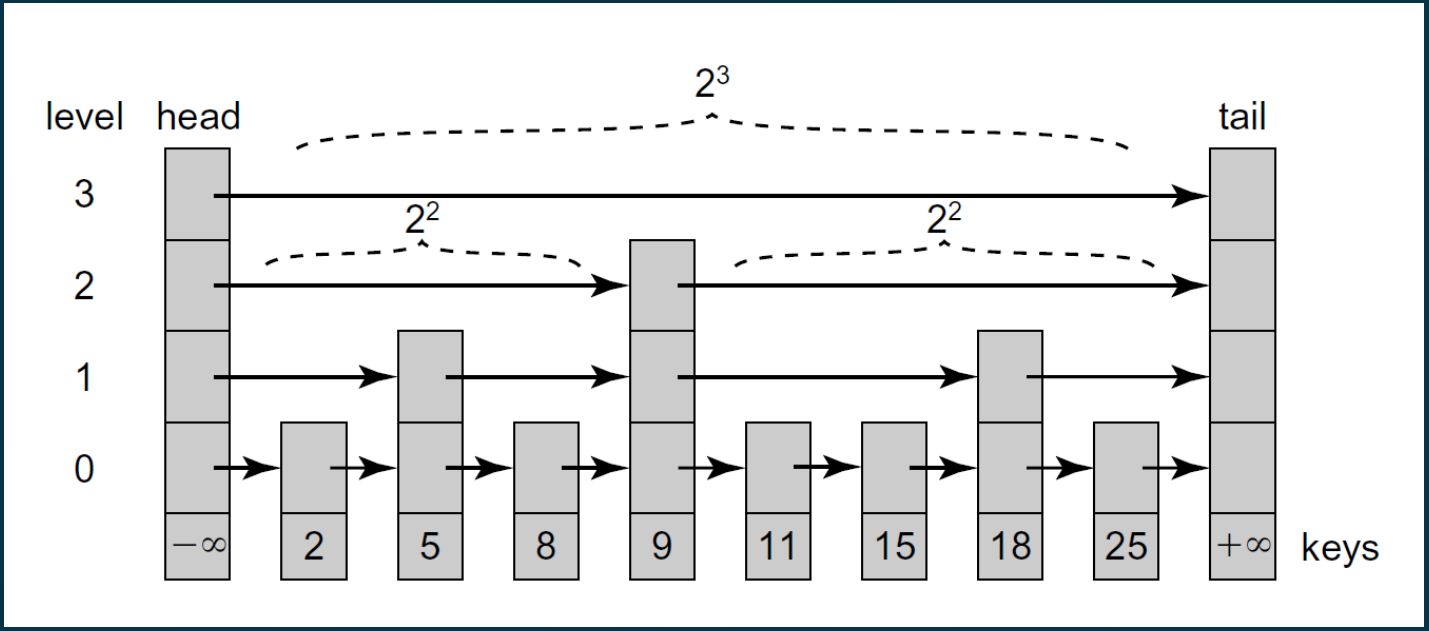
소개

- 스킵리스트의 예
  - Set을 구현할 때 사용한 연결리스트의 확장
  - 노드들이 추가 포인터를 갖고 있으며, 같은 레벨의 포인터 끼리 연결됨. (next -> next[n])



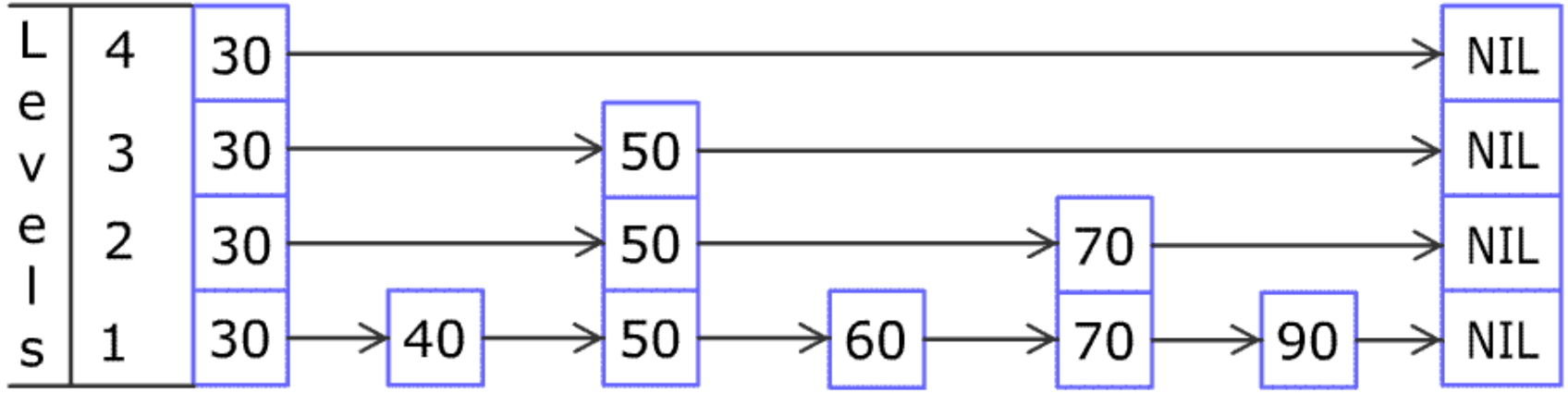
소개

- 스킵리스트의 기본 아이디어
  - 추가 링크 (레벨 1 이상) 지름길을 만든다.
    - 노드를 추가하거나 제거할 때 지름길을 유지한다.
  - 검색을 할 때 지름길을 우선 이용한다.



소개

- 스킵리스트의 동작

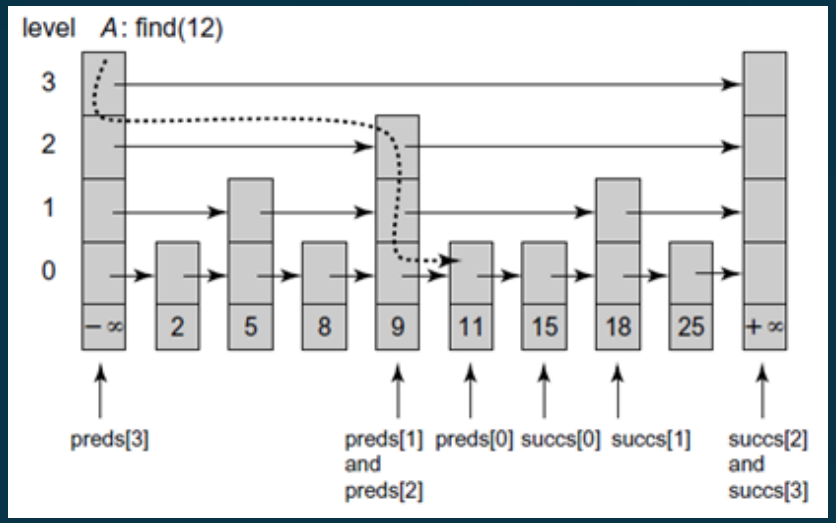


SKIP-LIST (2020-화목)

- 소개
- 순차 스킵 리스트
- 병행 스킵 리스트
- Lock-Free 스킵 리스트

순차 스킵리스트

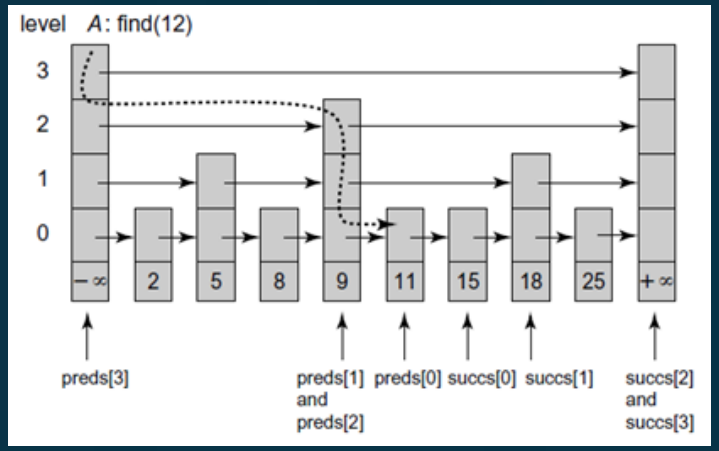
- 순차 스킵리스트 : Find(12)



  - 언제나 시작은 head에서,
  - 높은 레벨의 포인터부터 검색 시작
  - 한 레벨의 검색이 끝나면 다음 레벨의 검색 시작
    - 레벨별 검색결과 저장
  - 맨 아래 레벨에 도달할 경우 종료된다.

순차 스킵리스트

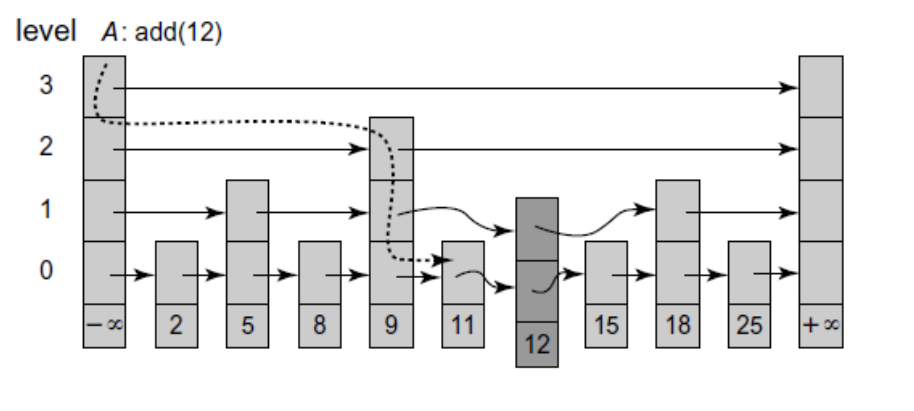
- 순차 스킵리스트
  - 검색의 구현 Find()



  - 더 높은 층의 리스트는 낮은 층의 리스트에 대한 지름길이다.
    - 계층의 각 연결은 바로 아래 계층의 2^i-1개의 노드를 건너 뛴다

순차 스킵리스트

- 순차 스킵리스트 : Add()



  - 랜덤한 높이의 노드를 생성한다.
    - 높이가 높을 수록 노드의 개수는 감소 (단계 마다 $\frac{1}{2}$)
  - 검색한 위치에 추가한다.
  - pred, curr 가 아닌 pred[], curr[]가 필요하다.
    - remove()도 마찬가지

순차 스킵리스트

- Node 구조

```
class NODE
{
public:
        int value;
        NODE *next[MAX_LEVEL + 1];
        int top_level;
        NODE()
        {
                value = 0;
                for (auto i = 0; i <= MAX_LEVEL; ++i)
                        next[i] = nullptr;
                top_level = 0;
        }
        NODE(int x, int top)
        {
                value = x;
                for (auto i = 0; i <= MAX_LEVEL; ++i)
                        next[i] = nullptr;
                top_level = top;
        }
};
```

순차 스킵리스트

- 공통함수 : Find

```
void Find(int key, SLNODE *preds[], SLNODE *currs[])
{
      preds[MAX_LEVEL] = &head;
      for (int cl = MAX_LEVEL; cl >= 0; --cl) {
            if (cl != MAX_LEVEL)
                preds[cl] = preds[cl + 1];
            currs[cl] = preds[cl]->next[cl];
            while (currs[cl]->key < key) {
                  preds[cl] = currs[cl];
                  currs[cl] = currs[cl]->next[cl];
            }
      }
}
```

리스트의 구현

- 실습 : #22
  - 성긴 동기화 스킵리스트를 구현하시오
  - 1과 1000사이의 숫자를 랜덤하게 4백만회 삽입/삭제하는 프로그램을 통해 실행 속도를 측정하시오 (다음 페이지)
  - 쓰레드가 1개, 2개, 4개, 8개일 때의 속도를 비교하시오.
    - 각각 실행 전 Skip-List를 클리어 하시오

리스트의 구현

- 실습 : #22
  - test program

```
#define NUM_TEST   4000000
#define KEY_RANGE  1000
```

```
void *ThreadFunc(void *lpVoid)
{
        int key;

        for (int i=0;i < NUM_TEST / num_thread;i++) {
           switch (rand() % 3) {
                case 0: key = rand() % KEY_RANGE;
                        csklist.Add(key);
                        break;
                case 1: key = rand() % KEY_RANGE;
                        csklist.Remove(key);
                        break;
                case 2 : key = rand() % KEY_RANGE;
                        csklist.Contains(key);
                        break;
                default : printf("Error\n");
                        exit(-1);
}}}
```

숙제(2020-수목, EL실습 필요)

- 숙제 13 :
  - 성긴 동기화 SkipList의 구현
    - 수업시간에 작성한 프로그램을 디버깅하여 완성하시오
  - 제출물
    - .cpp 파일
    - 실행속도 비교표 (쓰레드 개수 별)
    - CPU의 종류 (모델명, 코어 개수, 클럭)
  - 제출 : eclass
    - 화목반 : 11월 28일 토요일 오전 11시
    - 수목반 : 12월 1일 화요일 오진 11시

학기말 스케줄 (수목)

- 12월 2일 : 대면
- 12월 3일 : 비대면 (온라인 동영상)
- 12월 9일 – 12월 16일 : 비대면 (온라인 동영상)
- 12월 17일 : 종강, 기말고사 (대면)

성능

- 수목 : i4-4770HQ
- 싱글 쓰레드 : 2710ms (LIST)
- CLIST :
  - 1 : 2710
  - 2 : 2661
  - 4 : 2789
  - 8 : 3064

성긴 동기화 스킵리스트

- 성능(수목)
  - Intel® i7-4770HQ 2.2GHz, 4Core, Hyperthread, 16GB Memory
  - Single Thread : 2710ms(list), 831(skiplist)

Thread	Coarse List	Lazy List	LF List	Coarse SKLIST
1	2710			1073
2	2661			1029
4	2789			1179
8	3064			1120
16				1422

성긴 동기화 스킵리스트

- 성능(화목)
  - Intel® i7-7700 3.6GHz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : 1822ms(list), 658ms(skiplist)

Thread	Coarse List	Lazy List	LF List	Coarse SKLIST
1	1986	2208	2173	960
2	1857	1615	1780	882
4	1994	1016	1232	916
8	5716	643	895	1120
16	7297	645	888	1127

SKIP-LIST

- 소개
- 순차 스킵 리스트
- 병행(Lazy) 스킵 리스트
- Lock-Free 스킵 리스트

잠금 기반의 병행 스킵리스트

- Non-Blocking 스킵리스트의 전 단계
- Mark field를 사용한 Lazy 방식의 스킵리스트
- 노드의 추가가 완전히 종료되지 않았을 때를 고려 해야 함.
  - fullyLinked field 추가
- 노드가 스킵리스트에 언제 추가되는가?
  - 모든 링크다 다 연결되었을 때
    - fullyLinked가 true일때
  - marking이 false일 때

잠금 기반의 병행 스킵리스트

- 조감도
  - 노드
    - 개별적인 잠금
      - std::recursive_mutex 필요 : 하나의 노드를 여러 번 잠글 수 있음.
    - Marked 필드(bool)
      - Remove()시 논리적으로 제거하고 있는 중이라면 true
    - next[n]
      - 각 층에 해당하는 포인터의 배열
    - fullyLinked 필드(bool)
  - 보초노드 (head, tail)
    - 초기(SkipList가 비어있을 경우)에는 head의 모든 층은 tail을 가리킨다.

잠금 기반의 병행 스킵리스트

- Find
  - 찾지 못했을 경우 -1을 리턴
  - 찾았을 경우 최고 레벨을 리턴
  - 주의) 위쪽 링크가 다 연결되지 않았을 경우가 있으므로 검색이 끝난 후 최고 레벨을 리턴하면 곤란. (리턴 값과 최고 레벨을 비교하여 pred, curr가 모든 레벨의 링크를 담고 있는가 확인 가능)

```
int find(T x, Node<T>[] preds, Node<T>[] succs) {
  int key = x.hashCode();
  int lFound = -1;
  Node<T> pred = head;
  for (int level = MAX_LEVEL; level >= 0; level--) {
    Node<T> curr = pred.next[level];
    while (key > curr.key) {
      pred = curr; curr = pred.next[level];
    }
    if (lFound == -1 && key == curr.key) {
      lFound = level;
    }
    preds[level] = pred;
    succs[level] = curr;
  }
  return lFound;
}
```

잠금 기반의 병행 스킵리스트

- Add()
  - Add()는 항상 Find()를 호출
    - Find()
      - 스킵리스트를 순회하고 모든 층에 대해, 앞 노드와 뒷 노드를 반환
  - 노드가 추가되는 동안 앞 노드가 변경되는 것을 방지하기 위해 앞 노드들을 잠근다.
  - fullyLinked 필드
    - 모든 층에서 추가된 노드에 제대로 참조를 설정할 때까지 논리적으로 집합에 있지 않다고 판단
    - 모든 층에 연결 될 경우에 true
    - False일 경우에 접근이 허용되지 않으며 true가 될 때까지 스핀

잠금 기반의

- ADD
  - 검색한다
  - 존재 할 경우
    - marking되어 있으면 다시 시작 (invaid이므로)
    - fullyLinking를 기다린 후 false return
  - 0레벨부터 valid 검사하면서 locking
  - 0레벨부터 리스트에 연결
  - unlocking
  - [ ] 아직 추가되지 않았는데 false를 return하면 안됨.

```
boolean add(T x) {
  int topLevel = randomLevel();
  Node<T>[] preds = (Node<T>[]) new Node[MAX_LEVEL + 1];
  Node<T>[] succs = (Node<T>[]) new Node[MAX_LEVEL + 1];
  while (true) {
    int lFound = find(x, preds, succs);
    if (lFound != -1) {
      Node<T> nodeFound = succs[lFound];
      if (!nodeFound.marked) {
        while (!nodeFound.fullyLinked) {}
        return false;
      }
      continue;
    }
    int highestLocked = -1;
    try {
      Node<T> pred, succ;
      boolean valid = true;
      for (int level = 0; valid && (level <= topLevel); level++) {
        pred = preds[level];
        succ = succs[level];
        pred.lock.lock();
        highestLocked = level;
        valid = !pred.marked && !succ.marked && pred.next[level]==succ;
      }
      if (!valid) continue;
      Node<T> newNode = new Node(x, topLevel);
      for (int level = 0; level <= topLevel; level++)
        newNode.next[level] = succs[level];
      for (int level = 0; level <= topLevel; level++)
        preds[level].next[level] = newNode;
      newNode.fullyLinked = true; // successful add linearization point
      return true;
    } finally {
      for (int level = 0; level <= highestLocked; level++)
        preds[level].unlock();
    }
  }
}
```

잠금 기반의 병행 스킵리스트

- Remove()
  - Find()를 호출해서 대상키를 가지고 있는 노드가 이미 리스트에 있는지 확인
    - 리스트에 있다면, 제거할 노드를 삭제할 수 있는지 확인
      - Marked, fullyLinked 필드를 이용해 확인
      - 삭제할 수 있다면, marked필드를 설정하여 논리적으로 삭제
      - 물리적인 삭제 방법은
        - 대상 노드의 앞 노드와 대상 노드를 잠그고, 각 층에서 하나씩 대상 노드를 제거(위층부터 제거)하고 다음 노드와 연결한다.

잠금 기반의 방

- Remove()
  - 변수
    - victim : 제거하려는 노드
    - isMarked : 제거하려는 노드에 marking을 했는가?
  - 마킹을 했거나 제거 조건이 만족되면 제외 시도
    - 마킹을 하지 않았으면 마킹 실행
  - locking을 할 때 valid 검사
    - marking되었다면 locking원상 복구 후 continue;
  - top_level부터 링크를 끊는다.

```
95    boolean remove(T x) {
96      Node<T> victim = null; boolean isMarked = false; int topLevel = -1;
97      Node<T>[] preds = (Node<T>[]) new Node[MAX_LEVEL + 1];
98      Node<T>[] succs = (Node<T>[]) new Node[MAX_LEVEL + 1];
99      while (true) {
100       int lFound = find(x, preds, succs);
101       if (lFound != -1) victim = succs[lFound];
102       if (isMarked |
103             (lFound != -1 &&
104             (victim.fullyLinked
105             && victim.topLevel == lFound
106             && !victim.marked))) {
107         if (!isMarked) {
108           topLevel = victim.topLevel;
109           victim.lock.lock();
110           if (victim.marked) {
111             victim.lock.unlock();
112             return false;
113           }
114           victim.marked = true;
115           isMarked = true;
116         }
117         int highestLocked = -1;
118         try {
119           Node<T> pred, succ; boolean valid = true;
120           for (int level = 0; valid && (level <= topLevel); level++) {
121             pred = preds[level];
122             pred.lock.lock();
123             highestLocked = level;
124             valid = !pred.marked && pred.next[level]==victim;
125           }
126           if (!valid) continue;
127           for (int level = topLevel; level >= 0; level--) {
128             preds[level].next[level] = victim.next[level];
129           }
130           victim.lock.unlock();
131           return true;
132         } finally {
133           for (int i = 0; i <= highestLocked; i++) {
134             preds[i].unlock();
135           }
136         }
137       } else return false;
138     }
139   }
```

잠금 기반의 병행 스킵리스트

- Remove() : 다시
  - 제거 조건 검사 (103 ~ 106)
    - find에서 찾음, marking안됨, fullylinked임. pred/curr에 모든 링크가 담겨 있음
    - 아니면 return false
  - 조건에 맞으면 marking
    - lock을 걸고 mark
    - 다른 스레드에서 먼저 marking하면 return false
  - Marking 후 링크 재설정
    - invalid한 pred를 발견한 경우 다시 find 후 재설정

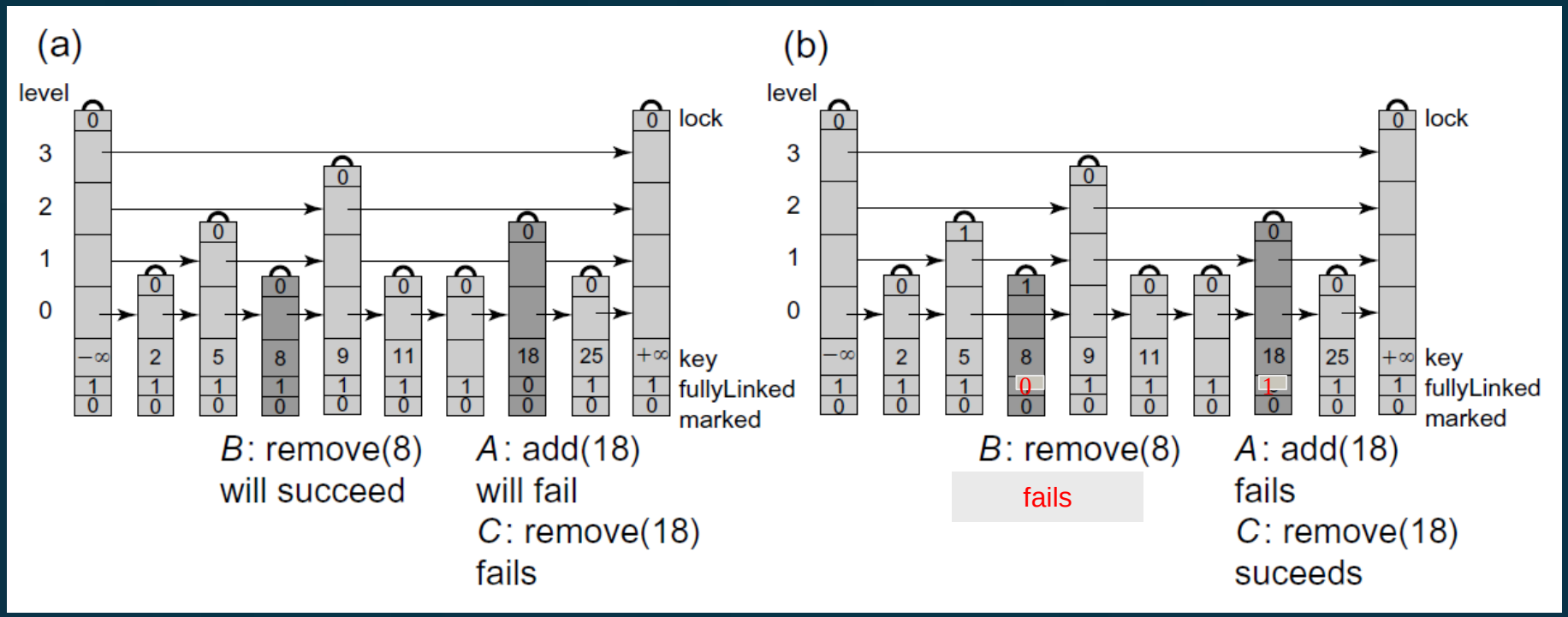
잠금 기반의 병행 스킵리스트

- Contains

```
140   boolean contains(T x) {
141       Node<T>[] preds = (Node<T>[]) new Node[MAX_LEVEL + 1];
142       Node<T>[] succs = (Node<T>[]) new Node[MAX_LEVEL + 1];
143       int lFound = find(x, preds, succs);
144       return (lFound != -1
145            && succs[lFound].fullyLinked
146            && !succs[lFound].marked);
147    }
```

잠금 기반의 병행 스킵리스트

- 조감도



잠금 기반의 병행 스킵리스트

- 결과
  - i7 – 920
  - 연산횟수 32768
  - 순차 SkipList(1Thread) : 0.37s

Thread	LazySkipLisy	Efficiency
1	0.094s	1
2	0.053s	0.885
4	0.026s	0.90
8	0.024s	0.48
16	0.020s	0.29
32	0.020s	0.14

실습

- 실습 : #23
  - 게으른 동기화 스킵리스트를 구현하시오
  - mutex로 std::recursive_mutex를 사용
    - 같은 쓰레드라면 여러 번 lock()을 호출할 수 있고, lock()을 호출한 회수 만큼 unlock()을 해줘야 잠금해제
  - 지난 실습 (#22)에서 사용했던 벤치마크 프로그램을 사용하시오
  - 쓰레드가 1개, 2개, 4개, 8개일 때의 속도를 비교하시오.
    - 각각 실행 전 Skip-List를 클리어 하시오
    - 각 단계마다 최초 20개의 원소를 출력하시오

숙제

- 숙제 14 :
  - 게으른 동기화 SkipList의 구현
    - 수업시간에 작성한 프로그램을 디버깅하여 완성하시오
      - 업로드한 샘플 참조 (버그가 많음)
    - mutex로 std::recursive_mutex를 사용
      - 같은 쓰레드라면 여러 번 lock()을 호출할 수 있고, lock()을 호출한 회수 만큼 unlock()을 해줘야 잠금해제
  - 제출물
    - .cpp 파일
    - 실행속도 비교표 (쓰레드 개수 별)
    - CPU의 종류 (모델명, 코어 개수, 클럭)
  - 제출 : eclass
    - 화목 : 12월 1일 오전 11시
    - 수목 : 12월 8일 오전 11시

기말 스케줄 (화목)

- 12월 1일 : A조 수업
- 12월 3일 : B조 수업
- 12월 8일 – 12월 10일 : 전체 비대면 수업
- 12월 15일 : 기말 고사 및 종강 (대면)

온라인 수업 스케줄(수목)

- 13주 1,2 차시 : 12월 2일 대면 수업
- 13주 3,4 차시 : 온라인 동영상 수업
- 14주 : 온라인 동영상 수업
- 15주 1,2 차시 : 온라인 동영상 수업 (12월 16일)
- 15주 3,4 차시 : 학기말 고사 (대면, 12월 17일)

스킵리스트

- 성능(화목)
  - Intel® i7-4700HQ 2.2GHz, 4Core, Hyperthread, 16GB Memory
  - Single Thread : 2029ms(list), 844ms(skiplist)

Thread	Coarse List	Lazy List	LF List	Coarse SKLIST	Lazy SKLIST	
1	2970		2532	984	1192	
2	2837		1737	1079	649	
4	3159		1251	1116	427	
8	3141		931	1418	339	
16	3137		954	1437	1937	

스킵리스트

- 성능(화목)
  - Intel® i7-7700 3.6GHz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : 1822ms(list), 658ms(skiplist)

Thread	Coarse List	Lazy List	LF List	Coarse SKLIST		
1	1986	2208	2173	960		
2	1857	1615	1780	882		
4	1994	1016	1232	916		
8	5716	643	895	1120		
16	7297	645	888	1127		

스킵리스트

- 성능(수목)
  - Intel® i7-7700 3.6GHz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : 1822ms(list), 658ms(skiplist)

Thread	Coarse List	Lazy List	LF List	Coarse SKLIST	Lazy SKLIST	
1	1986	2208	2173	960	1041	
2	1857	1615	1780	882	614	
4	1994	1016	1232	916	324	
8	5716	643	895	1120	249	
16	7297	645	888	1127	1552	

SKIP-LIST

- 소개
- 순차 스킵 리스트
- 병행 스킵 리스트
- Lock-Free 스킵 리스트

LockFreeSkipList

- LockFreeSkipList
  - 3 장의 LockFreeList를 사용
  - 삽입과 삭제를 위해 CAS 사용
  - 삭제 시에는 노드의 next에 표시하여 논리적으로 제거한다
  - 물리적인 제거는 Find()에서 이루어 진다.
    - Find()는 리스트를 순회하면서 표시된 노드를 만날 때마다 잘라내어서 표시된 노드의 키는 절대 검색하지 않는다.

LockFreeSkipList

- 클래스 정의
  - LockFree List
    - 합성 포인터

```
1  public final class LockFreeSkipList<T> {
2    static final int MAX_LEVEL = ...;
3    final Node<T> head = new Node<T>(Integer.MIN_VALUE);
4    final Node<T> tail = new Node<T>(Integer.MAX_VALUE);
5    public LockFreeSkipList() {
6      for (int i = 0; i < head.next.length; i++) {
7        head.next[i]
8        = new AtomicMarkableReference<LockFreeSkipList.Node<T>>(tail, false);
9      }
10   }
11   public static final class Node<T> {
12     final T value; final int key;
13     final AtomicMarkableReference<Node<T>>[] next;
14     private int topLevel;
15     // constructor for sentinel nodes
16     public Node(int key) {
17       value = null; key = key;
18       next = (AtomicMarkableReference<Node<T>>[])
19        new AtomicMarkableReference[MAX_LEVEL + 1];
20       for (int i = 0; i < next.length; i++) {
21         next[i] = new AtomicMarkableReference<Node<T>>(null,false);
22       }
23       topLevel = MAX_LEVEL;
24     }
25     // constructor for ordinary nodes
26     public Node(T x, int height) {
27       value = x;
28       key = x.hashCode();
29       next = (AtomicMarkableReference<Node<T>>[])
          new AtomicMarkableReference[height + 1];
30       for (int i = 0; i < next.length; i++) {
31         next[i] = new AtomicMarkableReference<Node<T>>(null,false);
32       }
33       topLevel = height;
34     }
35   }
```

LockFreeSkipList

- Add()
  - Find()를 이용하여 노드가 이미 리스트에 있는지 확인하고 자신의 앞노드(preds[])와 뒤노드(succs[])를 얻는다
  - 추가되는 시점의 정의
    - 게으른 동기화 : 모든 리스트가 연결되면
    - LF 동기화 : 0 층이 연결되면
      - find를 할 때 0층 연결 되었는가의 여부를 true, false로 리턴
  - 새 노드는 최하층 리스트에 연결하여 논리적으로 추가하고 그 다음에 순서대로 최상층까지 연결한다
    - 최상층
      - 새 노드가 고른 임의의 topLevel값이다.

LockFreeSkipList

- Add()

```
36    boolean add(T x) {
37      int topLevel = randomLevel();
38      int bottomLevel = 0;
39      Node<T>[] preds = (Node<T>[]) new Node[MAX_LEVEL + 1];
40      Node<T>[] succs = (Node<T>[]) new Node[MAX_LEVEL + 1];
41      while (true) {
42        boolean found = find(x, preds, succs);
43        if (found) {
44          return false;
45        } else {
46          Node<T> newNode = new Node(x, topLevel);
47          for (int level = bottomLevel; level <= topLevel; level++) {
48            Node<T> succ = succs[level];
49            newNode.next[level].set(succ, false);
50          }
51          Node<T> pred = preds[bottomLevel];
52          Node<T> succ = succs[bottomLevel];
53          newNode.next[bottomLevel].set(succ, false);
54          if (!pred.next[bottomLevel].compareAndSet(succ, newNode,
55                                                    false, false)) {
56            continue;
57          }
58          for (int level = bottomLevel+1; level <= topLevel; level++) {
59            while (true) {
60              pred = preds[level];
61              succ = succs[level];
62              if (pred.next[level].compareAndSet(succ, newNode, false, false))
63                break;
64              find(x, preds, succs);
65            }
66          }
67          return true;
68        }
69      }
70    }
```

LockFreeSkipList

- Remove()
  - Find()를 호출하여 표시되지 않고 대상키를 갖는 노드가 최하층리스트에 있는지 확인
    - 최하층 리스트만 빼고 표시를 남겨서 논리적으로 제거
    - 최하층을 제외하고 전부 표시했다면 최하층의 next 참조에 표시
      - 이 표시를 남기는 것에 성공하면 Find()를 통해 물리적 제거를 한다.

LockFreeSkipList

- Remove()

```
71    boolean remove(T x) {
72      int bottomLevel = 0;
73      Node<T>[] preds = (Node<T>[]) new Node[MAX_LEVEL + 1];
74      Node<T>[] succs = (Node<T>[]) new Node[MAX_LEVEL + 1];
75      Node<T> succ;
76      while (true) {
77        boolean found = find(x, preds, succs);
78        if (!found) {
79          return false;
80        } else {
81          Node<T> nodeToRemove = succs[bottomLevel];
82          for (int level = nodeToRemove.topLevel;
83               level >= bottomLevel+1; level--) {
84            boolean[] marked = {false};
85            succ = nodeToRemove.next[level].get(marked);
86            while (!marked[0]) {
87              nodeToRemove.next[level].attemptMark(succ, true);
88            succ = nodeToRemove.next[level].get(marked);
89            }
90          }
91          boolean[] marked = {false};
92          succ = nodeToRemove.next[bottomLevel].get(marked);
93          while (true) {
94            boolean iMarkedIt =
95              nodeToRemove.next[bottomLevel].compareAndSet(succ, succ,
96                                                           false, true);
97            succ = succs[bottomLevel].next[bottomLevel].get(marked);
98            if (iMarkedIt) {
99              find(x, preds, succs);
100             return true;
101           }
102           else if (marked[0]) return false;
103         }
104       }
105     }
106   }
```

LockFreeSkipList

- Find()
  - 스킵리스트를 순회하는데 각 층을 내려가며 리스트를 진행한다.
  - 진행 중에 표시된 링크(marked)를 만나면 이 링크를 잘라내어서 표시된 노드의 키값을 절대 보지 않는다.
    - 모든 층의 링크를 다 잘라내지는 않으므로, 정확한 정의대로의 스킵리스트는 유지하지 못한다. 하지만 검색의 정확성에는 문제가 없다.

LockFreeSkipList

- Find()
  - LockFreeSkipList를 검색하고 대상키가 집합에 있을 때만 true를 반환
    - 0 레벨에 존재하고 마킹이 되지 않은 것을 집합에 존재한다고 정의
  - 두가지 속성을 만족
    - 표시된 연결(marked)은 순회하지 않는다. 대신 해당 층의 리스트에서 표시된 연결이 참조된 노드를 제거

LockFreeSkipList

- Find()

```
107   boolean find(T x, Node<T>[] preds, Node<T>[] succs) {
108     int bottomLevel = 0;
109     int key = x.hashCode();
110     boolean[] marked = {false};
111     boolean snip;
112     Node<T> pred = null, curr = null, succ = null;
113     retry:
114       while (true) {
115         pred = head;
116         for (int level = MAX_LEVEL; level >= bottomLevel; level--) {
117           curr = pred.next[level].getReference();
118           while (true) {
119             succ = curr.next[level].get(marked);
120             while (marked[0]) {
121               snip = pred.next[level].compareAndSet(curr, succ,
122                                                     false, false);
123               if (!snip) continue retry;
124               curr = pred.next[level].getReference();
125               succ = curr.next[level].get(marked);
126             }
127             if (curr.key < key){
128               pred = curr; curr = succ;
129             } else {
130               break;
131             }
132           }
133           preds[level] = pred;
134           succs[level] = curr;
135         }
136         return (curr.key == key);
137       }
138   }
```

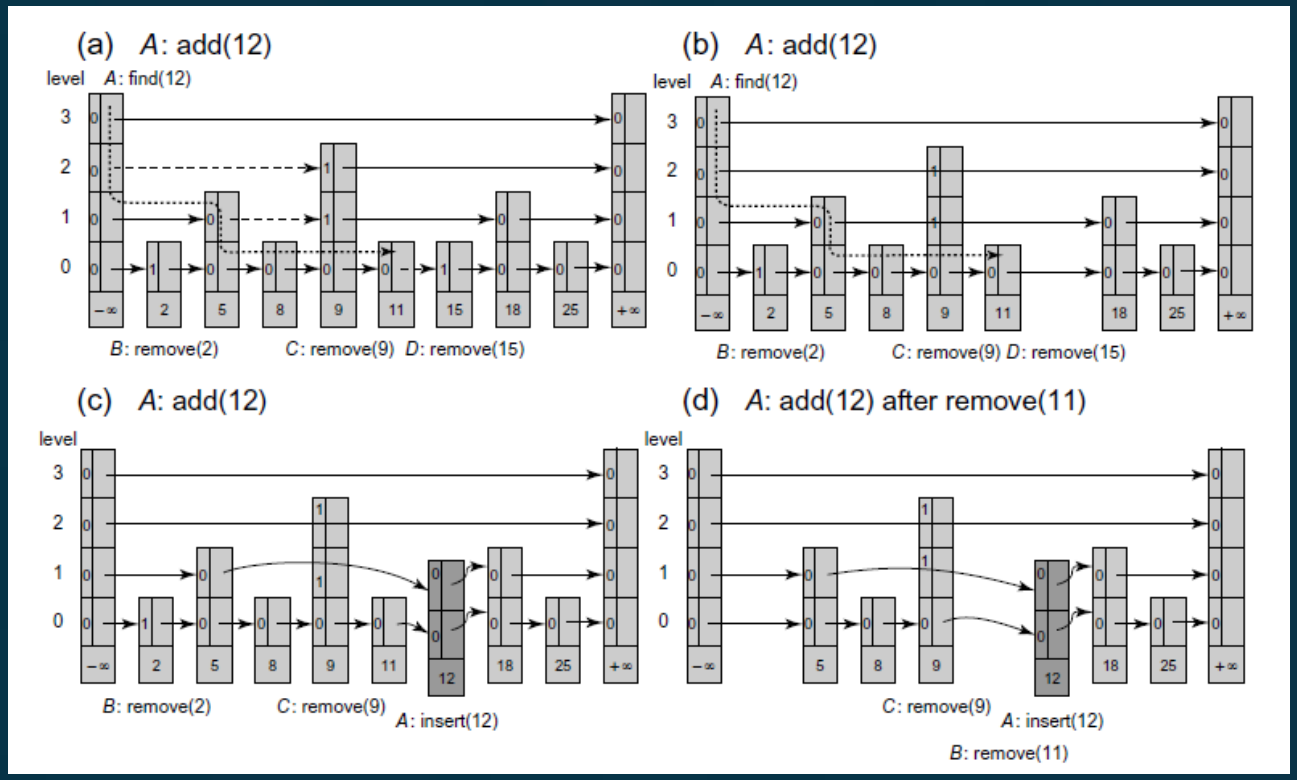
LockFreeSkipList

- Contains()

```
139   boolean contains(T x) {
140     int bottomLevel = 0;
141     int v = x.hashCode();
142     boolean[] marked = {false};
143     Node<T> pred = head, curr = null, succ = null;
144     for (int level = MAX_LEVEL; level >= bottomLevel; level--) {
145       curr = pred.next[level].getReference();
146       while (true) {
147         succ = curr.next[level].get(marked);
148         while (marked[0]) {
149           curr = pred.next[level].getReference();// curr.next로 변경
150           succ = curr.next[level].get(marked);
151         }
152         if (curr.key < v){
153           pred = curr;
154           curr = succ;
155         } else {
156           break;
157         }
158       }
159     }
160     return (curr.key == v);
161   }
```

LockFreeSkipList

- LockFreeSkipList



LockFreeSkipList

- 실습 #24
  - Lock Free Skip List 프로그램을 작성한다.
    - 4장에서 구현된 Free-List 연동
  - 순차 Skip List와 속도 비교
  - Lock Free 일반 List와 속도 비교
  - 자료실의 샘플 프로그램 참조

스킵리스트

- 성능(화목)
  - Intel® i7-4700HQ 2.2GHz, 4Core, Hyperthread, 16GB Memory
  - Single Thread : 2029ms(list), 844ms(skiplist)

Thread	Coarse List	Lazy List	LF List	Coarse SKLIST	Lazy SKLIST	LF SKLIST
1	2970		2532	984	1192	877
2	2837		1737	1079	649	527
4	3159		1251	1116	427	336
8	3141		931	1418	339	189
16	3137		954	1437	1937	192

스킵리스트

- 성능(수목)
  - Intel® i7-7700 3.6GHz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
  - Single Thread : 1822ms(list), 658ms(skiplist)

Thread	Coarse List	Lazy List	LF List	Coarse SKLIST	Lazy SKLIST	LF SKLIST
1	1986	2208	2173	960	1041	806
2	1857	1615	1780	882	614	492
4	1994	1016	1232	916	324	262
8	5716	643	895	1120	249	186
16	7297	645	888	1127	1552	181

정리

- non-blocking Stack
  - Back Off의 유용성 (CASLOCK에서의 비교)
  - 부하 분산 테크닉
    - Elimination
- non-blocking 검색 자료구조
  - SKIP-LIST
    - 평균 O(logn)의 검색 시간

총정리

- 왜 멀티쓰레드 프로그래밍을 해야 하는가?
- 멀티쓰레드 프로그램은 멀티코어 CPU에서 어떻게 실행되는가?
- 멀티쓰레드 프로그래밍 API는 무엇인가?
- 내가 작성한 멀티쓰레드 프로그램이 왜 죽는가?
- Lock을 쓰면 왜 느린가?
- Lock을 제거했더니 왜 죽는가?

총정리

- Lock을 사용하지 않을 때 쓰레드간의 동기화는 어떻게 구현 하는 것이 좋은가?
- Non-Blocking 알고리즘이 무엇인가?
  - 어떻게 구현해야 하는가?
  - Blocking보다 왜 좋은가? 어떤 경우에 좋은가?
- Lock-Free 알고리즘의 구현이 왜 어려운가?