



# 4. 동기화 연산과 CAS

멀티쓰레드 프로그래밍  
정내훈

# 목차

- 병렬 프로그램 작성시 주의점
  - 컴파일러
  - CPU
    - 상호배제의 구현
    - 메모리 일관성 문제
- Non-Blocking 프로그래밍
- 이론 시간 + CAS

# 이론 시간

- wait-free 자료구조를 어떻게 만드는가?
  - 이 알고리즘을 wait-free 알고리즘으로 변환 할 수 있는가?
  - wait-free로 구현할 수 없는 알고리즘도 있는가?
  - 알고리즘을 wait-free로 변환하려면 어떻게 해야 하는가?

# 이론 시간

- 일단 wait-free atomic memory부터 만들어 보자.
- 기본적인 질문
  - 실제 메모리로 Atomic Memory를 제작할 수 있는 알고리즘이 존재하는가???? .
  - wait-free를 유지하면서

# 이론 시간

- 기본적인 질문

- 실제 메모리로 Atomic Memory를 만들 수 있는 알고리즘이 존재하는가???? .
- wait-free를 유지하면서

- 답 : 존재한다.

- 교재 참조
- 이 강의에서는 자세한 설명 생략

# 이론 시간

- 기본적인 질문 2

- 기존의 싱글쓰레드 자료구조도 Atomic Memory를 사용해서 멀티쓰레드 자료구조로 변환하는 것이 가능한가???? .
- wait-free를 유지하면서

- 답 : 불가능하다.

- 증명은 교재에, 그리 어렵지 않음.
- 다 다음 주

# 이론 시간

- 기본적인 질문 3

- 일반적인 자료구조를 멀티쓰레드 자료구조로 변환하려면 Atomic-memory 말고 무엇이 더 필요한가??

- **wait-free**를 유지하면서

- 답 : CompareAndSet() 연산이면 충분하다.

- 증명 : 교재에 있음

- 나중에 같이 증명

# 동기화 연산들

- CompareAndSet?
- 동기화 연산의 일종
- 동기화 연산?
  - 공유메모리에 대한 연산 : 읽기, 쓰기처럼 **한 word**에 대한 연산이다.
  - 스레드끼리의 동기화는 동기화 연산을 통해서 이루어 진다.
  - 읽기, 쓰기도 동기화연산이다.
  - 읽기, 쓰기 말고도 여러가지 연산이 존재한다.
    - 예) `sum += 2;`
  - 읽기, 쓰기이외의 다른 연산들을 배울 때가 되었다.



# 동기화 연산들

- 동기화 연산?

- 다른 스레드와 통신하기 위한 기본 기능
  - 멀티쓰레드 알고리즘의 핵심
- CPU의 명령어(또는 그 조합)으로 구현
- **Wait-free**로 구현되어 있어야 한다.
  - 아니면 Non-Blocking 알고리즘에서 사용할 수 없다.
- 기존 동기화 연산
  - Load (wait-free)
  - Store (wait-free)
  - Lock/Unlock (blocking)
  - atomic\_thread\_fence (wait-free)
  - +=, fetch\_and\_add (wait-free)
- **CAS (wait-free)**의 추가가 필요

# 동기화 연산들

## ● CAS(Compare And Set)연산

— bool 메모리.CAS(expected, update)

- 메모리의 값이 expected면 update로 바꾸고 true를 리턴
- 메모리의 값이 expected가 아니면 false를 리턴

```
bool 메모리::CAS(expected, update)
{
    if (메모리.value == expected) {
        메모리.value = update;
        return true;
    } else return false;
}
```

Wait Free 아토믹 동작

- atomic load/store로 구현 가능???
  - NO!!! (Wait-free 조건 때문)

# 이론 시간

- 기본적인 질문 4
  - 어떻게 CAS로 일반적인 자료구조를 멀티쓰레드 자료구조로 변환하는가??
  - **wait-free**를 유지하면서
- 답 : 알고리즘이 있다.
  - 모든 기존 자료구조를 Wait-free multithread로 변환해 주는 알고리즘이 존재한다.

# 이론 시간

## ● 변환 알고리즘

```
class LFUniversal {
private:
    Node *head[N], Node tail;
public:
    LFUniversal() {
        tail.seq = 1;
        for (int i=0; i<N; ++i) head[i] = &tail;
    }
    Response apply(Invocation invoc) {
        int i = Thread_id();
        Node prefer = Node(invoc);
        while (prefer.seq == 0) {
            Node *before = tail.max(head);
            Node *after = before->decideNext->decide(&prefer);
            before->next = after; after->seq = before->seq + 1;
            head[i] = after;
        }
        SeqObject myObject;
        Node *current = tail.next;
        while (current != &prefer) {
            myObject.apply(current->invoc);
            current = current->next;
        }
        return myObject.apply(current->invoc);
    }
};
```

```
class CASConsensus {
private:
    int FIRST = -1;
    AtomicInt r = AtomicInteger(FIRST);
public:
    value decide(value v) {
        propose(v);
        int i = thread_id();
        if (r.CAS(FIRST, i)) return
        proposed[i];

        else return proposed[r];
    }
}
```

# 이론 시간

- XEON, E5-4620, 2.2GHz, 4CPU (32 core)
- Queue를 무잠금, 무대기로 구현한 것과, lock으로 atomic하게 만든 것의 성능 비교.
  - Test조건 : 16384번 Enqueue, Dequeue (결과는 milisecond)
  - lock을 사용한 것은 테스트 loop 횟수 100배
  - 따라서 100배 성능 차이 (4개 thread의 경우)

| 쓰레드 갯수 | 1    | 2    | 4    | 8    | 16   | 32   | 64   |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| 무잠금 만능 | 3749 | 1966 | 1697 | 1120 | 742  | 525  | 413  |
| 무대기 만능 | 3640 | 1964 | 1219 | 1136 | 577  | 599  | 448  |
| lock   | 232  | 822  | 1160 | 1765 | 1914 | 4803 | 7665 |

- 그렇다면, lock을 사용해야 하는가?
  - No : 멀티쓰레드에서의 성능향상이 없다.

# 이론 시간

- 결론

- CPU가 제공하는 CAS를 사용하면 모든 싱글쓰레드 알고리즘을 Lock-free한 멀티쓰레드 알고리즘으로 변환할 수 있다.

- 현실

- 비효율적이다.

# 이론 시간

- 대안

- 자료구조에 맞추어 최적화된 lock-free 알고리즘을 일일이 개발해야 한다.
  - 멀티쓰레드 프로그램은 힘들다. => 연봉이 높다.

- 다른 데서 구해 쓸 수도 있다.

- Intel TBB, VS2015 PPL, Boost
- 인터넷 (검증 필요)
- 하지만 범용적일 수록 성능이 떨어진다.  
자신에게 딱 맞는 것을 만드는 것이 좋다.

# 이론 시간

## ● 정리

- 성능 향상을 위해 멀티쓰레드 프로그래밍을 해야 한다.
  - Data Race가 발생한다.
- Data Race를 최소화 해야 한다.
  - Data race는 모든 오 동작의 근원
- 어쩔 수 없이 남은 Data Race를 Lock 없이 해결해야 한다.
  - Data race를 모두 없앨 수 없다.
  - Lock으로 해결하는 것은 성능 페널티가 크다
- Data Race는 공유 객체 때문에 발생한다.
  - 객체 : int, float, struct, class, container ...
- Non-Blocking 멀티쓰레드 객체가 필요하다.



# 이론 시간

- 정리

- CAS를 사용하면 **모든** 일반 자료구조를 Multi-Thread Lock-Free 자료구조로 변환 할 수 있다.
- 효율적인 변환은 상당한 프로그래밍 노력을 필요로 한다.
  - 지금부터 경험해 볼 것이다.

# CAS

- 실제 CAS의 구현 : C++11
  - Atomic\_compare\_and\_set은 없고  
atomic\_compare\_exchange를 대신 사용

```
bool CAS(atomic_int *addr, int expected, int new_val)
{
    return std::atomic_compare_exchange_strong(
        addr, &expected, new_val);
}
```

```
bool CAS(volatile int *addr, int expected, int new_val)
{
    return std::atomic_compare_exchange_strong(
        reinterpret_cast<volatile atomic_int *>(addr),
        &expected, new_val);
}
```

# CAS

- Windows API

- API

```
#include <windows.h>

LONG __cdecl InterlockedCompareExchange(
    __inout LONG volatile *Destination,
    __in LONG Exchange,
    __in LONG Comparand );
```

- CAS의 구현

```
Bool CAS(LONG volatile *Addr, LONG Old, LONG New)
{
    LONG temp = InterlockedCompareExchange(Addr, New, Old);
    return temp == Old;
}
```

# CAS

- LINUX API

```
#include <stdbool.h>

bool CAS(int *ptr, int oldval, int newval)
{
    return __sync_bool_compare_and_swap(ptr, oldval, newval);
}
```

# CAS

## ● 실습 #18 :

- CAS를 사용하여 Lock()과 Unlock()을 구현한 후 1억 만들기 프로그램을 실행해 보자.
- 1, 2, 4, 8개 스레드에서의 속도비교를 해보자.
- 힌트
  - 0으로 초기화 되어 있는 공유 메모리 X가 있을 때. 모든 스레드에서 “CAS (&X, 0, 1)”을 실행 시키면 오직 하나의 스레드에서만 리턴값이 true가 된다.
- 주의 사항
  - sum을 atomic <int>로 선언하지 말 것

# CAS

## ● 실습 #18 : 예제

```
volatile int sum;
volatile int LOCK = 0;
void CAS_LOCK()
{
    /* if (true == CAS(&LOCK, 0, 1)) */
}
void CAS_UNLOCK()
{
}
void worker(int num_threads)
{
    const int loop_count = 50000000 / num_threads;
    for (auto i = 0; i < loop_count; ++i) {
        CAS_LOCK();
        sum = sum + 2;
        CAS_UNLOCK();
    }
}
```

# 숙제 #2

- 숙제 2 : CAS lock의 구현

- 제출물

- .cpp 파일
    - 실행속도 비교표 (no Lock, mutex 사용, 빵집 알고리즘, CAS 사용)
    - CPU의 종류 (모델명, 코어 개수, 클럭)

- 제출 : E-Class (수업시간에 검사를 맡은 수강생은 제출하지 말것)

# CAS

- 실제 HW (x86 계열 CPU) 구현
  - LOCK prefix와 CMPXCHG 명령어로 구현
  - lock cmpxchg [A], b 기계어 명령어로 구현
    - eax에 비교값, A에 주소, b에 넣을 값

```
if (eax == [a]) {  
    ZF = true;  
    [a] = b;  
} else {  
    ZF = false;  
    eax = [a];  
}
```



# CAS

## ● 실제 HW (ARM) 구현

```
static inline AtomicWord CompareAndSwap(volatile AtomicWord* ptr,
                                         AtomicWord old_value,
                                         AtomicWord new_value)
{
    uint32_t old, tmp;
    __asm__ __volatile__ ("1: @ atomic cmpxchg\n"
                          "mov %0, #0\n"
                          "ldrex %1, [%2]\n"
                          "teq %1, %3\n"
                          "strexeq %0, %4, [%2]\n" // Store Register Exclusive
                          "teq %0, #0\n"
                          "bne 1b"
                          : "=r" (tmp), "=r" (old)
                          : "r" (ptr), "Ir" (old_value),
                            "r" (new_value)
                          : "cc");

    return old;
}
```

# 정리

- 빠르고 정확한 병렬 프로그램을 작성하는 것은 어렵다.
  - 포기하라.
- 포기하는 것이 불가능하면 주의해서 프로그래밍하라.
  - atomic 변수나 mfence의 도움 필요
- 쓰레드 간의 동기화를 위한 자료구조가 필요하다.
  - Non-Blocking자료구조가 필수이다.
  - Non-Blocking자료구조에는 CAS가 필수이다.

# 다음 장

- Non\_blocking 자료구조 맛보기
  - 링크드 리스트로 구현된 Set
- atomic memory로 wait-free 자료구조를 만들지 못함을 증명

# 질문???

---

# 결과 : 속제 #1

## ● 16개 스레드에서 결과가 왜???

기본 속도: 3.40GHz  
 소켓: 1  
 코어: 4  
 논리 프로세서: 8  
 가상화: 사용  
 L1 캐시: 256KB  
 L2 캐시: 1.0MB  
 L3 캐시: 8.0MB

작업 관리자

파일(F) 옵션(O) 보기(V)

프로세스 성능 앱 기록 시작프로그램 사용자 세부 정보 서비스

| 이름                | PID   | 상태   | 사용자 이름 | CPU | 메모리(활성 개... | UAC 가상화 |
|-------------------|-------|------|--------|-----|-------------|---------|
| Bakery.exe        | 14016 | 실행 중 | zzapu  | 97  | 700 K       | 사용 안 함  |
| Taskmgr.exe       | 16804 | 실행 중 | zzapu  | 01  | 23,324 K    | 허용 안 함  |
| svchost.exe       | 4596  | 실행 중 | SYSTEM | 00  | 8,696 K     | 허용 안 함  |
| System            | 4     | 실행 중 | SYSTEM | 00  | 16 K        |         |
| SearchIndexer.exe | 11244 | 실행 중 | SYSTEM | 00  | 24,468 K    | 허용 안 함  |
| dwm.exe           | 1220  | 실행 중 | DWM-1  | 00  | 12,544 K    | 사용 안 함  |

Microsoft Visual Studio 디버그 콘솔

```
1 Threads Sum = 100000 Duration = 6 millioseconds
2 Threads Sum = 99996 Duration = 2 millioseconds
4 Threads Sum = 100000 Duration = 5 millioseconds
8 Threads Sum = 100000 Duration = 47 millioseconds
16 Threads Sum = 100000 Duration = 431296 millioseconds
```

D:\wdepot\Projects\Lecture\MP\Bakery\64\Release\Bakery.exe(프로세스 14016개)이(가) 종료되었습니다(코드: 0개).  
 디버깅이 중지될 때 콘솔을 자동으로 닫으려면 [도구] -> [옵션] -> [디버깅] > [디버깅이 중지되면 자동으로 콘솔 닫기]를 사용  
 하도록 설정합니다.  
 이 창을 닫으려면 아무 키나 누르세요...