OS project1 wiki

컴퓨터소프트웨어학부
2021018068 정환

1. Design

   proc.c의 scheduler()함수를 바꾸는 것이 주요 과제였다. fcfs를 위한 queue와 mlfq를 위한 queue를 만들어 CPU scheduling을 수행하는 상황이 오면 schedmode에 따른 queue에서 프로세스를 꺼내 CPU를 할당한다. CPU scheduling은 scheduler() 함수를 통해 수행된다. 프로세스의 상태가 RUNNABLE이 되는 때에는 schedmode에 따른 queue에 enqueue를 수행한다. 구현의 세부 사항은 다음에서 설명한다.

2. Implementation

   a) proc.h

   먼저 proc.h에 다음과 같이 추가했다.

```
83  enum schedulermode { FCFS, MLFQ };
```

```
95    int level;                // Process level (for MLFQ)
96    int priority;             // Process priority (for MLFQ)
97    int timequantum;          // Time quantum (for MLFQ)
98    int creationtime;         // ticks value
```

```
114 struct queue {
115   struct proc *proc[NPROC];
116   int front;
117   int rear;
118   int size;
119 };
```

   이걸 기반으로 proc.c에 새로운 코드를 추가했다.

b) proc.c

```
29  enum schedulermode schedmode;
30  struct spinlock schedmode_lock;
31
32  struct queue fcfs_queue;
33  struct queue mlfq_queue[6]; // 0 : L0, 1 : L1, 2 ~ 5 : L2(priority 3 ~ 0)
34  struct spinlock fcfs_queue_lock;
35  struct spinlock mlfq_queue_lock;
36
37
38  int tickcount = 0;
39  struct spinlock tickcount_lock;
```

schedmode는 현재 scheduling 모드가 FCFS인지 MLFQ인지를 나타낸다. 다음으로 RUNNABLE상태인 프로세스들을 넣을 fcfs_queue와 mlfq_queue를 선언했다. mlfq_queue에서 인덱스 3, 4, 5인 queue는 priority가 2, 1, 0인 level 2 queue이다.

그리고 priority boost의 조건을 위한 tickcount를 선언했다. 이 변수들의 race condition을 막기 위해 해당하는 spinlock들을 생성해주었다.

1) procinit()

```
322     schedmode = FCFS;
323     fcfs_init();
324     mlfq_init();
```

xv6가 부팅할 때 procinit()을 실행하는데 queue와 schedmode도 초기화해주기 위해 procinit()안에 위와 같이 넣어주었다.

```
41  void
42  fcfs_init(void)
43  {
44    initlock(&fcfs_queue_lock, "fcfs_queue_lock");
45    fcfs_queue.front = 0;
46    fcfs_queue.rear = -1;
47    fcfs_queue.size = 0;
48  }
```

```
50  void
51  mlfq_init(void)
52  {
53    initlock(&mlfq_queue_lock, "mlfq_queue_lock");
54    for(int i = 0; i < 6; i++) {
55      mlfq_queue[i].front = 0;
56      mlfq_queue[i].rear = -1;
57      mlfq_queue[i].size = 0;
58    }
59  }
```

각 init함수는 이와 같은 구조이다.

2) scheduler()

```
715  scheduler(void)
716  {
717    struct proc *p;
718    struct cpu *c = mycpu();
719
720    c->proc = 0;
721    for(;;){
722      // The most recent process to run may have had interrupts
723      // turned off; enable them to avoid a deadlock if all
724      // processes are waiting.
725      intr_on();
726
727      if(isEmptyQueue()){
728        asm volatile("wfi");
729        continue;
730      }
731
732      p = dequeue();
733      acquire(&p->lock);
734      // printf("[scheduler] Dequeued PID %d (level=%d, priority=%
735      p->state = RUNNING;
736      c->proc = p;
737      swtch(&c->context, &p->context);
738
739      c->proc = 0;
740      release(&p->lock);
741    }
742  }
```

CPU scheduling이 필요할 때 사용되는 scheduler함수는 위와 같이 수정했다. ready 큐가 비어있지 않다면 프로세스 하나를 큐에서 빼고 상태를 RUNNING으로 만들어 context switch를 하여 실행한다.

3) allocproc()

```
389    p->creationtime = ticks;
```

새로운 프로세스를 생성할 때 creationtime을 ticks로 설정해 먼저 생성된 프로세스를 구별할 수 있게 하였다.

4) userinit(), fork(), wakeup(), kill()

```
879          enqueue(p);
```

프로세스의 상태를 RUNNABLE로 만드는 함수들 안에 enqueuer(p)로 ready queue에 넣어주었다.

5) enqueue(proc)

```
144  void
145  enqueue(struct proc *p)
146  {
147    acquire(&schedmode_lock);
148    enum schedulermode mode = schedmode;
149    release(&schedmode_lock);
150
151    if(mode == FCFS) {
152      p->level = -1;
153      p->priority = -1;
154      p->timequantum = -1;
155      fcfs_enqueue(p);
156    } else if(mode == MLFQ) {
157      p->level = 0;
158      p->priority = 3;
159      p->timequantum = 2 * p->level + 1;
160      mlfq_enqueue(p);
161    } else {
162      panic("Unknown scheduling mode");
163    }
164  }
```

현재 schedmode에 따라 프로세스의 level, priority, timequantum을 초기화해주고 해당 queue에 넣는다. enqueue를 실행하는 모든 곳에 p의 lock이 이미 잡혀있다는 것을 주의했다.

6) fcfs_enqueue(proc)

```
61  void
62  fcfs_enqueue(struct proc *p)
63  {
64    acquire(&fcfs_queue_lock);
65    if(fcfs_queue.size == NPROC) {
66      release(&fcfs_queue_lock);
67      panic("FCFS queue is full");
68    }
69    fcfs_queue.rear = (fcfs_queue.rear + 1) % NPROC;
70    fcfs_queue.proc[fcfs_queue.rear] = p;
71    fcfs_queue.size++;
72    release(&fcfs_queue_lock);
73
74    //printf("Equeued PID %d (level=%d, priority=%d,
75
76  }
```

fcfs_queue에 락을 걸어 동시 접근을 막고 fcfs_queue에 인자로 받은 프로세스를 추가했다.

7) mlfq_enqueue(proc)

```
79  void
80  mlfq_enqueue(struct proc *p)
81  {
82    int queueidx = p->level;
83
84    if(p->priority < 3) {
85      queueidx = 5 - p->priority; // idx will be 3 ~ 5
86    }
87
88    acquire(&mlfq_queue_lock);
89
90    if(mlfq_queue[queueidx].size == NPROC) {
91      release(&mlfq_queue_lock);
92      panic("MLFQ queue is full");
93    }
94
95    mlfq_queue[queueidx].rear = (mlfq_queue[queueidx].rear + 1) % NPROC;
96    mlfq_queue[queueidx].proc[mlfq_queue[queueidx].rear] = p;
97    mlfq_queue[queueidx].size++;
98
99    release(&mlfq_queue_lock);
100
101   //printf("Equeued PID %d (level=%d, priority=%d, state=%d)\n", p->pid,
102
103 }
```

priority와 level에 따른 mlfq_queue의 인덱스를 계산하고, 해당하는 queue에 프로세스를 넣었다.

8) dequeue()

```
166 struct proc*
167 dequeue(void)
168 {
169   acquire(&schedmode_lock);
170   enum schedulermode mode = schedmode;
171   release(&schedmode_lock);
172
173   struct proc *p;
174
175   if(mode == FCFS) {
176     do {
177       p = fcfs_dequeue();
178     } while(p->state != RUNNABLE);
179
180     return p;
181   } else if(mode == MLFQ) {
182     do {
183       p = mlfq_dequeue();
184     } while(p->state != RUNNABLE);
185
186     return p;
187   } else {
188     panic("Unknown scheduling mode");
189   }
190 }
```

dequeue도 schedmode에 따라 구분하였다. RUNNABLE에서 상태가 바뀌어 RUNNABLE이 아닌 프로세스를 꺼낸다면 다시 뽑는 과정을 수행한다.

9) fcfs_dequeue()

```
105  struct proc*
106  fcfs_dequeue(void)
107  {
108    acquire(&fcfs_queue_lock);
109
110    if(fcfs_queue.size == 0) {
111      release(&fcfs_queue_lock);
112      panic("FCFS queue is empty");
113    }
114
115    struct proc *p = fcfs_queue.proc[fcfs_queue.front];
116    fcfs_queue.front = (fcfs_queue.front + 1) % NPROC;
117    fcfs_queue.size--;
118    release(&fcfs_queue_lock);
119
120    return p;
121  }
```

특별한 내용 없이 제일 앞에 있는 프로세스를 꺼낸다.

10) mlfq_dequeue()

```
123  struct proc*
124  mlfq_dequeue(void)
125  {
126    for(int i = 0; i < 6; i++) {
127      acquire(&mlfq_queue_lock);
128
129      if(mlfq_queue[i].size > 0) {
130        struct proc *p = mlfq_queue[i].proc[mlfq_queue[i].front];
131        mlfq_queue[i].front = (mlfq_queue[i].front + 1) % NPROC;
132        mlfq_queue[i].size--;
133
134        release(&mlfq_queue_lock);
135
136        return p;
137      }
138      release(&mlfq_queue_lock);
139    }
140
141    panic("MLFQ queue is empty");
142  }
```

level 0에서부터 level2까지 탐색하여 level이 낮은 queue의 데이터를 꺼낸다.

11) isEmptyQueue()

schedmode에 따라 fcfs_queue와 mlfq_queue가 비어있는지를 확인했다.

12) receiveTimerIntr()

기존은 타이머 인터럽트가 오면 yield()만을 수행했다. 이제는 FCFS일 때 오면 아무 일도 발생하지 않고, MLFQ일 때 오면 적절한 과정을 수행해주어야 한다. 그래서 trap.c에 타이머 인터럽트가 왔을 때 yield()를 해주는 부분에 receiveTimerIntr()라는 함수를 호출해주었다.

```
245  void
246  receiveTimerIntr(void)
247  {
248    acquire(&schedmode_lock);
249    enum schedulermode mode = schedmode;
250    release(&schedmode_lock);
251
252    if(mode == MLFQ) {
253      acquire(&tickcount_lock);
254      tickcount++;
255      if(tickcount == 50){
256        tickcount = 0;
257        release(&tickcount_lock);
258        priorityboost();
259        return;
260      }
261      release(&tickcount_lock);
262
263      struct proc *p = myproc();
264
265      acquire(&p->lock);
266      p->timequantum--;
267
268      if(p->timequantum == 0) {
269        if(p->level < 2) {
270          p->level++;
271        } else {
272          p->priority = (p->priority == 0) ? 0 : p->priority - 1;
273        }
274        p->timequantum = 2 * p->level + 1;
275
276        release(&p->lock);
277
278        yield();
279      } else {
280        release(&p->lock);
281      }
```

schedmode가 mlfq일 때만 작업을 수행한다. 먼저 mlfq에서 시간이 얼마나 지났는지를 확인하기 위한 tickcount를 증가한다. 만약 tickcount가 50이 되면 priorityboost과정을 수행한다. 아니라면 현재 실행중인 프로세스의 timequantum을 1감소하고 timequantum을 다 썼다면 level, priority, timequantum을 설정해준 뒤 yield()를 호출하여 cpu를 양보한다.

13) priorityboost()

```
224  void priorityboost(){
225    struct proc *p;
226
227    for(p = proc; p < &proc[NPROC]; p++) {
228      acquire(&p->lock);
229      if(!(p->state == UNUSED && p->state == ZOMBIE)) {
230        p->level = 0;
231        p->priority = 3;
232        p->timequantum = 2 * p->level + 1;
233
234      }
235      release(&p->lock);
236    }
237
238    for(int i = 1; i < 6; i++){
239      while(mlfq_queue[i].size != 0){
240        enqueue(mlfq_queue[i].proc[mlfq_queue[i].front]);
241        mlfq_queue[i].front = (mlfq_queue[i].front + 1) % NPROC;
242        mlfq_queue[i].size--;
243      }
244    }
245  }
```

모든 상태의 프로세스들이 있는 proc배열을 돌며 UNUSED와 ZOMBIE상태가 아닌 프로세스들의 level, priority, timequantum을 규칙에 맞게 바꿔준다. 그 후 level0에 있는 프로세스를 제외한 모든 level의 큐에 있는 프로세스를 level0으로 enqueue한다. 현재 실행중인 프로세스는 상태만 바꿔준 뒤 그대로 실행하게 둔다. 따라서 실행중인 프로세스는 바꿔준 timequantum만큼 실행한 뒤 level1로 이동하게 된다.

14) yield()

```
768  void
769  yield(void)
770  {
771    struct proc *p = myproc();
772
773    acquire(&schedmode_lock);
774    int mode = schedmode;
775    release(&schedmode_lock);
776
777    acquire(&p->lock);
778    p->state = RUNNABLE;
779    if(mode == FCFS){
780      //printf("yield process %d, level :
781
782      fcfs_enqueue(p);
783    } else if(schedmode == MLFQ){
784      mlfq_enqueue(p);
785    }
786    sched();
787    release(&p->lock);
788  }
```

yield함수는 실행중인 프로세스의 상태를 RUNNABLE로 바꾼 뒤 schedmode에 따라 queue에 넣는다. 그 후 sched()를 호출해 scheduler를 작동시킨다.

15) setpriority(pid, priority)

```
999  int setpriority(int pid, int priority)
1000 {
1001   struct proc *p = getprocess(pid);
1002
1003   if(p == 0) {
1004     return -1;
1005   }
1006
1007   if(priority < 0 || priority > 3) {
1008     return -2;
1009   }
1010
1011   acquire(&p->lock);
1012   p->priority = priority;
1013   release(&p->lock);
1014
1015   yield();
1016
1017   return 0;
1018 }
```

pid로 받은 프로세스의 priority를 인자로 받은 priority로 바꾼다. 이때 조건에 따라 값을 return 한다. 정상적으로 priority를 바꾼다면 yield()를 호출해 cpu 스케쥴링을 다시 실시한다. priority가 바뀌어서 우선순위가 더 높은 프로세스가 생길 수 있기 때문이다.

16) getprocess(pid)

```
969  struct proc*
970  getprocess(int pid)
971  {
972    struct proc *p;
973
974    for(p = proc; p < &proc[NPROC]; p++) {
975      acquire(&p->lock);
976      if(p->pid == pid) {
977        release(&p->lock);
978        return p;
979      }
980      release(&p->lock);
981    }
982
983    return 0;
984  }
```

pid를 인자로 받아서 해당하는 프로세스가 있다면 proc 포인터를 return하고 없으면 0을 return 한다.

17) getlev()

```
1008  getlev(void)
1009  {
1010    if(schedmode == FCFS) {
1011      return 99;
1012    } else {
1013      struct proc *p = myproc();
1014
1015      acquire(&p->lock);
1016      int level = p->level;
1017      release(&p->lock);
1018
1019      return level;
1020    }
1021  }
```

현재 schedmode가 FCFS라면 99를 return하고, MLFQ라면 해당 level을 return한다.

18) mlfqmode()

```
1023  int mlfqmode(void)
1024  {
1025    acquire(&schedmode_lock);
1026
1027    if(schedmode == MLFQ) {
1028      printf("Scheduling mode is already MLFQ\n");
1029      release(&schedmode_lock);
1030      return -1;
1031    }
1032
1033    schedmode = MLFQ;
1034    release(&schedmode_lock);
1035
1036    acquire(&tickcount_lock);
1037    tickcount = 0;
1038    release(&tickcount_lock);
1039
1040    struct proc *runningp = myproc();
1041    acquire(&runningp->lock);
1042    runningp->level = 0;
1043    runningp->priority = 3;
1044    runningp->timequantum = 2 * runningp->level + 1;
1045    release(&runningp->lock);
1046
1047    while(!isEmptyfcfsQueue()) {
1048      struct proc *p = fcfs_dequeue();
1049      acquire(&p->lock);
1050      p->level = 0;
1051      p->priority = 3;
1052      p->timequantum = 2 * p->level + 1;
1053      mlfq_enqueue(p);
1054      release(&p->lock);
1055    }
1056
1057    return 0;
1058  }
```

현재 schedmode가 FCFS일 때 MLFQ로 바꾸는 작업을 수행한다. tickcount를 0으로 초기화하고, state가 UNUSED와 ZOMBIE가 아닌 프로세스들의 level, priority, timequantum을 설정한다. 그 후 fcfs_queue에 있는 모든 프로세스를 dequeue해서 mlfq_queue로 enqueue한다.

19) fcfsmode()

```
1065  {
1066    acquire(&schedmode_lock);
1067
1068    if(schedmode == FCFS) {
1069      printf("Scheduling mode is already FCFS\n");
1070      release(&schedmode_lock);
1071      return -1;
1072    }
1073
1074    schedmode = FCFS;
1075    release(&schedmode_lock);
1076
1077    struct proc *dequeuedProc[NPROC];
1078    int procCnt = 0;
1079
1080    while(!isEmptymlfqQueue()) {
1081      dequeuedProc[procCnt++] = mlfq_dequeue();
1082    }
1083
1084    struct proc *p;
1085
1086    for(p = proc; p < &proc[NPROC]; p++) {
1087      acquire(&p->lock);
1088      if(!(p->state == UNUSED && p->state == ZOMBIE)) {
1089        p->level = -1;
1090        p->priority = -1;
1091        p->timequantum = -1;
1092      }
1093      release(&p->lock);
1094    }
1095
1096    int isEnqueued[NPROC] = {0};
```

먼저 mlfq_queue에 있는 모든 프로세스를 dequeue해서 dequeuedProc배열에 넣는다. 그 후 state가 UNUSED와 ZOMBIE가 아닌 프로세스들의 level, priority, timequantum을 -1로 설정한다.

```
1098    while(1) {
1099      struct proc *earlyP;
1100      int findEarlyP = 0;
1101      int earlyPCreationTime = 0;
1102      int earlyPIdx = -1;
1103
1104      for(int i = 0; i < procCnt; i++) {
1105        p = dequeuedProc[i];
1106
1107        if(isEnqueued[i] == 1) {
1108          continue;
1109        }
1110
1111        acquire(&p->lock);
1112        int creationTime = p->creationtime;
1113        release(&p->lock);
1114
1115        if(findEarlyP == 0) {
1116          earlyP = p;
1117          earlyPIdx = i;
1118          earlyPCreationTime = creationTime;
1119          findEarlyP = 1;
1120        } else {
1121          if(creationTime < earlyPCreationTime) {
1122            earlyP = p;
1123            earlyPIdx = i;
1124            earlyPCreationTime = creationTime;
1125          }
1126        }
1127      }
1128
1129      if(findEarlyP) {
1130        isEnqueued[earlyPIdx] = 1;
1131        acquire(&earlyP->lock);
1132        fcfs_enqueue(earlyP);
1133        release(&earlyP->lock);
1134      } else {
1135        break;
1136      }
1137    }
1138
1139    return 0;
1140  }
```

그 다음으로 dequeuedProc안에 있는 프로세스 중 creationtime이 가장 작은 걸 순서대로 fcfs_queue에 넣는다.

c) sysproc.c

```
95  uint64
96  sys_yield(void)
97  {
98    yield();
99    return 0;
100 }
101
102 uint64
103 sys_setpriority(void)
104 {
105   int pid;
106   int priority;
107   argint(0, &pid);
108   argint(1, &priority);
109
110   return setpriority(pid, priority);
111 }
112
113 uint64
114 sys_getlev(void)
115 {
116   return getlev();
117 }
118
119 uint64
120 sys_mlfqmode(void)
121 {
122   return mlfqmode();
123 }
124
125 uint64
126 sys_fcfsmode(void)
127 {
128   return fcfsmode();
129 }
```

system call로 호출하기 위한 함수를 위와 같이 만들었다. 만드는 과정은 assignment1과 같으므로 설명을 생략한다.

3. Results

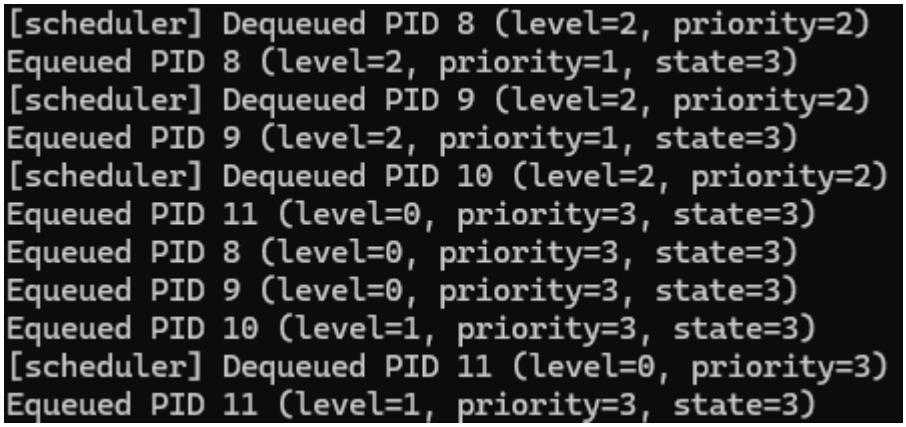
```
$ test
FCFS & MLFQ test start

[Test 1] FCFS Queue Execution Order
Process 4 executed 100000 times
Process 5 executed 100000 times
Process 6 executed 100000 times
Process 7 executed 100000 times
[Test 1] FCFS Test Finished

Scheduling mode is already FCFS
nothing has been changed
successfully changed to MLFQ mode!

[Test 2] MLFQ Scheduling
Process 8 (MLFQ L0-L2 hit count):
L0: 10497
L1: 24369
L2: 65134
Process 9 (MLFQ L0-L2 hit count):
L0: 10876
L1: 23893
L2: 65231
Process 10 (MLFQ L0-L2 hit count):
L0: 9816
L1: 25193
L2: 64991
Process 11 (MLFQ L0-L2 hit count):
L0: 10332
L1: 23964
L2: 65704
[Test 2] MLFQ Test Finished

FCFS & MLFQ test completed!
$
```

test.c의 실행 결과이다. FCFS모드에서는 context switching이 거의 일어나지 않아 빠르지만 MLFQ모드에서는 context switching이 자주 일어나 수행속도가 느렸다.

```
[Test 1] FCFS Queue Execution Order
Equeued PID 4 (level=-1, priority=-1, state=3)
Equeued PID 5 (level=-1, priority=-1, state=3)
Equeued PID 6 (level=-1, priority=-1, state=3)
Equeued PID 7 (level=-1, priority=-1, state=3)
[scheduler] Dequeued PID 4 (level=-1, priority=-1)
Process 4 executed 100000 times
Equeued PID 3 (level=-1, priority=-1, state=3)
[scheduler] Dequeued PID 5 (level=-1, priority=-1)
Process 5 executed 100000 times
[scheduler] Dequeued PID 6 (level=-1, priority=-1)
Process 6 executed 100000 times
[scheduler] Dequeued PID 7 (level=-1, priority=-1)
Process 7 executed 100000 times
[scheduler] Dequeued PID 3 (level=-1, priority=-1)
[Test 1] FCFS Test Finished
```

enqueue와 dequeue될 때마다 print를 이용해 출력해보았을 때도 규칙에 맞는 과정으

로 CPU scheduling을 수행했다. queue에 들어온 순서대로 dequeue해서 실행하였다.



MLFQ 모드로 바꾼 후인 Test2의 수행 과정에 대한 print결과이다. time quantum을 다 썼을 때마다 level 2, priority 2에서 level 2, priority 1로 바꿔서 queue에 넣는 것을 볼 수 있다. 또한 pid 10인 프로세스가 실행되고 있을 때 priority boosting이 일어나서 level 0이 아닌 queue에 있던 11, 8, 9 프로세스를 level 0으로 넣는 것을 볼 수 있다. 현재 실행중인 10 프로세스도 level 0으로 상태를 변경하고 priority와 time quantum을 바꿔주었다. 바꾼 time quantum을 다 쓴 후 level 1인 큐에 들어가는 것을 볼 수 있다. 그 후에도 정상적으로 작동한다.

이 외에도 MLFQ에서 FCFS 모드로 변경하여 수행하였을 때도 정상작동하였다.

4. Troubleshooting

proc.c에서 선언한 변수들과 프로세스의 lock을 고려하여 코드를 작성하는 것이 관건이였다. 전체적으로 lock을 잡고 푸는 사이의 과정을 최대한 짧게 만드는 것을 고려하였다. 또한 mlfq_queue에서 level 2인 큐에서 priority에 따라 꺼내는 순서를 다르게 만드는 것을 queue의 규칙을 지키면서 어떻게 해야하나 고민했었다. 이 문제를 각 priority에 대한 queue를 또 만드는 것으로 해결하였다.