

Исследование оптимизации инвариантного кода циклов (LICM оптимизации)

Исполнитель исследования

ФИО: Алибеков Мурад Рамазанович

Факультет: ИИТММ

Кафедра: МОСТ

Направление: ФИИТ

Номер группы: 381806-1

Тестовая инфраструктура

CPU: Intel(R) Core(TM) i5-4690K CPU @ 3.50GHz

OS: Ubuntu 20.04 LTS

Результаты тестирования

Файл	Ключ оптимизации		
	baseline (-O0)	optimized (-O1)	optimized without LICM
licm_5	1,27 с	0,84 с	0,90 с
licm_10	1,16 с	0,76 с	0,84 с
licm_20	1,28 с	0,83 с	0,94 с
licm_div_5	1,06 с	0,21 с	1,06 с
licm_div_10	2,09 с	0,38 с	2,10 с
licm_div_20	4,19 с	0,84 с	4,18 с

Анализ результатов

Различия между версиями без оптимизации (-O0) и с оптимизацией (-O1)

1. Код функции `main` содержит вычисление набора значений переменных, объявленных перед циклом и в неоптимизированной версии, эти значения вычисляются при каждом запуске, а в оптимизированном – получены на этапе компиляции.
2. Внутри функции `func` инвариантные относительно цикла выражения в оптимизированной версии вычисляются за пределами цикла, а внутри подставляются готовые значения, в отличие от `baseline` версии, в которой подобные выражения вычисляются непосредственно внутри цикла.
3. В функции `func` предполагается передача параметров по значению, из-за этого в неоптимизированной версии происходит их копирование. В оптимизированной версии происходит передача по ссылке, видимо, потому что они не меняются в ходе цикла.
4. В оптимизированной версии вычисление инкремента и условия продолжения цикла встроено непосредственно в его тело, в неоптимизированной версии они вынесены в отдельные блоки.

Особенности версии без LICM оптимизации¹

1. Отключение LICM-прохода компилятора подразумевает собой отключение вынесения инвариантного кода за пределы цикла. В остальном, эта версия аналогична стандартной полностью оптимизированной версии с ключом оптимизации -O1.

Общий вывод

Как видно из результатов анализа производительности, время выполнения программы при отключении LICM-прохода близко к времени выполнения версии без оптимизации. Это происходит, потому что в тестовых примерах относительно большая часть кода инвариантна в циклах, и, как следствие, LICM оптимизация – наиболее значимая (по сравнению с другими оптимизациями) в данных примерах и с ней происходит значительное ускорение (особенно в примерах с делением).

Приложение

Приложение 1. Логи запусков программы анализа производительности для разных файлов

Performance counter stats for './build/licm_5_baseline' (10 runs):

```
1 266,43 msec task-clock          # 0,998 CPUs utilized
( +- 0,11% )
210      context-switches        # 0,166 K/sec
( +- 0,87% )
0        cpu-migrations          # 0,000 K/sec
896      page-faults             # 0,708 K/sec
4 899 442 269      cycles         # 3,869 GHz
( +- 0,06% )
10 810 299 598     instructions    # 2,21 insn per cycle
( +- 0,00% )
801 993 234        branches       # 633,271 M/sec
( +- 0,00% )
60 265            branch-misses   # 0,01% of all branches
( +- 0,24% )

1,26944 +- 0,00147 seconds time elapsed ( +- 0,12% )
```

Performance counter stats for './build/licm_5_optimized' (10 runs):

```
841,13 msec task-clock          # 0,999 CPUs utilized
( +- 0,14% )
91      context-switches        # 0,108 K/sec
( +- 0,91% )
0        cpu-migrations          # 0,000 K/sec
896      page-faults             # 0,001 M/sec
```

¹ Версия без LICM оптимизации подразумевает, что отключена именно данная оптимизация, в то время как остальные включены. Т.к. для подобного случая нет ключа оптимизации, то для этого в коде LLVM (в файле *llvm-project/llvm/lib/Transforms/Scalar/LICM.cpp*) пришлось вручную отключить LICM-проход компилятора и заново пересобрать LLVM + Clang. В частности, для отключения LICM-прохода:

- После строки №223 (в начало `runOnLoop`) добавил строку `return false;`
- После строки №350 (в начало `LoopInvariantCodeMotion::runOnLoop`) добавил строку `return false;`

```

      3 257 733 934      cycles      #      3,873 GHz
( +-  0,03% )
      6 007 484 066      instructions  #      1,84  insn per cycle
( +-  0,00% )
      401 329 948      branches      #  477,130 M/sec
( +-  0,00% )
      27 728      branch-misses      #      0,01% of all branches
( +-  0,83% )

      0,84172 +- 0,00121 seconds time elapsed ( +-  0,14% )

```

Performance counter stats for './build/licm_5_optimized_without_LICM' (10 runs):

```

      896,92 msec task-clock      #      0,998 CPUs utilized
( +-  0,10% )
      98      context-switches      #      0,110 K/sec
( +-  2,31% )
      0      cpu-migrations      #      0,000 K/sec
      896      page-faults      #      0,999 K/sec
      3 467 411 775      cycles      #      3,866 GHz
( +-  0,04% )
      10 007 580 974      instructions  #      2,89  insn per cycle
( +-  0,00% )
      401 349 221      branches      #  447,473 M/sec
( +-  0,00% )
      28 312      branch-misses      #      0,01% of all branches
( +-  1,51% )

      0,89855 +- 0,00151 seconds time elapsed ( +-  0,17% )

```

Performance counter stats for './build/licm_10_baseline' (10 runs):

```

      1 160,77 msec task-clock      #      0,999 CPUs utilized
( +-  0,11% )
      125      context-switches      #      0,108 K/sec
( +-  2,40% )
      0      cpu-migrations      #      0,000 K/sec
      1 186      page-faults      #      0,001 M/sec
      4 476 581 848      cycles      #      3,857 GHz
( +-  0,03% )
      9 409 160 993      instructions  #      2,10  insn per cycle
( +-  0,00% )
      401 621 914      branches      #  345,996 M/sec
( +-  0,00% )
      32 600      branch-misses      #      0,01% of all branches
( +-  1,31% )

      1,16202 +- 0,00126 seconds time elapsed ( +-  0,11% )

```

Performance counter stats for './build/licm_10_optimized' (10 runs):

```

      756,42 msec task-clock      #      0,999 CPUs utilized
( +-  0,11% )
      80      context-switches      #      0,106 K/sec
( +-  2,78% )

```

```

          0      cpu-migrations      #      0,000 K/sec
        1 186    page-faults          #      0,002 M/sec
    2 929 184 953    cycles            #      3,872 GHz
( +-  0,03% )
    5 008 389 238    instructions      #      1,71  insn per cycle
( +-  0,00% )
    201 468 704     branches          # 266,344 M/sec
( +-  0,00% )
    28 129     branch-misses          #      0,01% of all branches
( +-  1,48% )

    0,757374 +- 0,000999 seconds time elapsed ( +-  0,13% )

```

Performance counter stats for './build/licm_10_optimized_without_LICM' (10 runs):

```

      843,59 msec task-clock          #      0,999 CPUs utilized
( +-  0,11% )
      80      context-switches       #      0,095 K/sec
( +-  2,14% )
          0      cpu-migrations      #      0,000 K/sec
          1 186    page-faults        #      0,001 M/sec
    3 273 570 782    cycles            #      3,881 GHz
( +-  0,06% )
    9 008 730 513    instructions      #      2,75  insn per cycle
( +-  0,00% )
    201 534 926     branches          # 238,903 M/sec
( +-  0,01% )
    29 475     branch-misses          #      0,01% of all branches
( +-  2,15% )

    0,84485 +- 0,00140 seconds time elapsed ( +-  0,17% )

```

Performance counter stats for './build/licm_20_baseline' (10 runs):

```

    1 274,03 msec task-clock          #      0,996 CPUs utilized
( +-  0,28% )
    150      context-switches       #      0,118 K/sec
( +-  9,36% )
          0      cpu-migrations      #      0,000 K/sec
          2 061    page-faults        #      0,002 M/sec
    4 938 351 442    cycles            #      3,876 GHz
( +-  0,25% )
    8 713 681 286    instructions      #      1,76  insn per cycle
( +-  0,00% )
    202 418 391     branches          # 158,880 M/sec
( +-  0,02% )
    45 647     branch-misses          #      0,02% of all branches
( +-  3,83% )

    1,27975 +- 0,00555 seconds time elapsed ( +-  0,43% )

```

Performance counter stats for './build/licm_20_optimized' (10 runs):

```

      832,51 msec task-clock          #      0,998 CPUs utilized
( +-  0,52% )

```

```

      84      context-switches      #      0,101 K/sec
( +-  1,94% )
      0      cpu-migrations      #      0,000 K/sec
      2 061      page-faults      #      0,002 M/sec
      3 210 712 205      cycles      #      3,857 GHz
( +-  0,46% )
      4 511 619 889      instructions      #      1,41  insn per cycle
( +-  0,00% )
      102 012 940      branches      # 122,536 M/sec
( +-  0,00% )
      31 320      branch-misses      #      0,03% of all branches
( +-  1,18% )

      0,83457 +- 0,00481 seconds time elapsed ( +-  0,58% )

```

Performance counter stats for './build/licm_20_optimized_without_LICM' (10 runs):

```

      936,34 msec task-clock      #      0,998 CPUs utilized
( +-  0,34% )
      100      context-switches      #      0,107 K/sec
( +-  5,33% )
      0      cpu-migrations      #      0,000 K/sec
      2 061      page-faults      #      0,002 M/sec
      3 631 041 962      cycles      #      3,878 GHz
( +-  0,31% )
      8 112 528 336      instructions      #      2,23  insn per cycle
( +-  0,00% )
      102 188 373      branches      # 109,136 M/sec
( +-  0,04% )
      37 041      branch-misses      #      0,04% of all branches
( +-  3,83% )

      0,93794 +- 0,00343 seconds time elapsed ( +-  0,37% )

```

Performance counter stats for './build/licm_div_5_baseline' (10 runs):

```

      1 050,01 msec task-clock      #      0,995 CPUs utilized
( +-  0,07% )
      124      context-switches      #      0,118 K/sec
( +- 15,46% )
      0      cpu-migrations      #      0,000 K/sec
( +-100,00% )
      606      page-faults      #      0,577 K/sec
      4 061 764 336      cycles      #      3,868 GHz
( +-  0,02% )
      3 207 038 568      instructions      #      0,79  insn per cycle
( +-  0,01% )
      201 264 407      branches      # 191,678 M/sec
( +-  0,02% )
      32 841      branch-misses      #      0,02% of all branches
( +-  5,62% )

      1,05559 +- 0,00487 seconds time elapsed ( +-  0,46% )

```

Performance counter stats for './build/licm_div_5_optimized' (10 runs):

```

          211,54 msec task-clock                #    0,998 CPUs utilized
( +-  0,46% )
          20      context-switches            #    0,095 K/sec
( +-  4,03% )
           0      cpu-migrations               #    0,000 K/sec
          606     page-faults                 #    0,003 M/sec
      817 216 088     cycles                   #    3,863 GHz
( +-  0,04% )
    1 505 302 543     instructions             #    1,84  insn per cycle
( +-  0,00% )
      100 920 887     branches                 # 477,081 M/sec
( +-  0,01% )
        20 234     branch-misses              #    0,02% of all branches
( +-  1,77% )

    0,21191 +- 0,00105 seconds time elapsed ( +-  0,49% )

```

Performance counter stats for './build/licm_div_5_optimized_without_LICM' (10 runs):

```

          1 042,53 msec task-clock                #    0,994 CPUs utilized
( +-  0,08% )
          104     context-switches            #    0,100 K/sec
( +-  4,90% )
           0      cpu-migrations               #    0,000 K/sec
          606     page-faults                 #    0,581 K/sec
      4 035 980 520     cycles                   #    3,871 GHz
( +-  0,01% )
    3 306 722 238     instructions             #    0,82  insn per cycle
( +-  0,00% )
      101 211 336     branches                 #   97,083 M/sec
( +-  0,01% )
        30 187     branch-misses              #    0,03% of all branches
( +-  2,36% )

    1,04855 +- 0,00539 seconds time elapsed ( +-  0,51% )

```

Performance counter stats for './build/licm_div_10_baseline' (10 runs):

```

          2 088,43 msec task-clock                #    0,998 CPUs utilized
( +-  0,05% )
          231     context-switches            #    0,111 K/sec
( +-  6,33% )
           0      cpu-migrations               #    0,000 K/sec
          1 089     page-faults                 #    0,521 K/sec
      8 102 853 299     cycles                   #    3,880 GHz
( +-  0,01% )
    5 713 295 782     instructions             #    0,71  insn per cycle
( +-  0,00% )
      202 426 518     branches                 #   96,928 M/sec
( +-  0,02% )
        59 797     branch-misses              #    0,03% of all branches
( +-  2,55% )

    2,09214 +- 0,00220 seconds time elapsed ( +-  0,11% )

```

Performance counter stats for './build/licm_div_10_optimized' (10 runs):

```

          379,59 msec task-clock                #    0,997 CPUs utilized
( +-  0,30% )
          40      context-switches             #    0,105 K/sec
( +-  9,32% )
           0      cpu-migrations                #    0,000 K/sec
          1 089    page-faults                  #    0,003 M/sec
    1 469 678 161    cycles                     #    3,872 GHz
( +-  0,10% )
    2 507 491 319    instructions               #    1,71  insn per cycle
( +-  0,00% )
          101 298 371    branches               #   266,862 M/sec
( +-  0,02% )
          24 126    branch-misses              #    0,02% of all branches
( +-  2,58% )

    0,38056 +- 0,00165 seconds time elapsed ( +-  0,43% )

```

Performance counter stats for './build/licm_div_10_optimized_without_LICM' (10 runs):

```

          2 098,93 msec task-clock                #    0,999 CPUs utilized
( +-  0,08% )
          206     context-switches             #    0,098 K/sec
( +-  1,40% )
           0      cpu-migrations                #    0,000 K/sec
          1 089    page-faults                  #    0,519 K/sec
    8 106 793 928    cycles                     #    3,862 GHz
( +-  0,01% )
    5 810 348 170    instructions               #    0,72  insn per cycle
( +-  0,00% )
          101 881 836    branches               #   48,540 M/sec
( +-  0,01% )
          41 589    branch-misses              #    0,04% of all branches
( +-  1,77% )

    2,10189 +- 0,00219 seconds time elapsed ( +-  0,10% )

```

Performance counter stats for './build/licm_div_20_baseline' (10 runs):

```

          4 179,27 msec task-clock                #    0,998 CPUs utilized
( +-  0,13% )
          437     context-switches             #    0,104 K/sec
( +-  3,16% )
           0      cpu-migrations                #    0,000 K/sec
( +-100,00% )
          2 061    page-faults                  #    0,493 K/sec
   16 148 407 242    cycles                     #    3,864 GHz
( +-  0,02% )
   10 719 234 520    instructions               #    0,66  insn per cycle
( +-  0,01% )
          203 531 044    branches               #   48,700 M/sec
( +-  0,06% )
          81 013    branch-misses              #    0,04% of all branches
( +-  5,29% )

    4,18912 +- 0,00594 seconds time elapsed ( +-  0,14% )

```

Performance counter stats for './build/licm_div_20_optimized' (10 runs):

```
      836,47 msec task-clock          #    0,995 CPUs utilized
( +-  0,43% )
      152      context-switches      #    0,181 K/sec
( +- 21,78% )
           0      cpu-migrations      #    0,000 K/sec
           2 061      page-faults      #    0,002 M/sec
      3 201 759 444      cycles        #    3,828 GHz
( +-  0,29% )
      4 512 150 816      instructions   #    1,41  insn per cycle
( +-  0,00% )
      102 127 270      branches        # 122,093 M/sec
( +-  0,04% )
           37 411      branch-misses   #    0,04% of all branches
( +-  4,26% )

0,84102 +- 0,00412 seconds time elapsed ( +-  0,49% )
```

Performance counter stats for './build/licm_div_20_optimized_without_LICM' (10 runs):

```
      4 171,73 msec task-clock          #    0,998 CPUs utilized
( +-  0,06% )
      418      context-switches      #    0,100 K/sec
( +-  3,01% )
           0      cpu-migrations      #    0,000 K/sec
           2 061      page-faults      #    0,494 K/sec
      16 205 060 670      cycles        #    3,884 GHz
( +-  0,02% )
      10 419 256 240      instructions   #    0,64  insn per cycle
( +-  0,01% )
      103 534 714      branches        #   24,818 M/sec
( +-  0,14% )
           76 106      branch-misses   #    0,07% of all branches
( +-  6,05% )

4,17898 +- 0,00432 seconds time elapsed ( +-  0,10% )
```