report

June 18, 2024

1 Wstęp

Niniejsze sprawozdanie zawiera opis i wyniki wykonania zadania domowego #2: **Optymalizacja eliminacji Gaussa** z przedmiotu Optymalizacja kodu na różne architektury (OKNRA).

Wykonał: Danylo Knapp

Numer albumu: 414137

2 Dane techniczne

2.1 Maszyna lokalna

```
uname -a
Linux congard-fedora 6.8.9-200.fc39.x86_64 #1 SMP PREEMPT_DYNAMIC Thu May  2 18:44:19 UTC 2024
```

2.1.1 CPU

```
[congard@congard-fedora Studia]$ lscpu
Architecture:             x86_64
  CPU op-mode(s):         32-bit, 64-bit
  Address sizes:          48 bits physical, 48 bits virtual
  Byte Order:             Little Endian
CPU(s):                   16
  On-line CPU(s) list:    0-15
Vendor ID:                AuthenticAMD
  Model name:             AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics
    CPU family:           23
    Model:                96
    Thread(s) per core:   2
    Core(s) per socket:   8
    Socket(s):            1
    Stepping:             1
    CPU(s) scaling MHz:   35%
    CPU max MHz:          4300.0000
    CPU min MHz:          400.0000
    BogoMIPS:             5789.17
    Flags:                fpu vme de pse tsc msr pae mce cx8 apic sep mtrr pge mca cmov pat pse36 clflush mmx fxsr sse sse2 ht syscall nx mmxext fxsr_opt pdpe1g
                          b rdtscp lm constant_tsc rep_good nopl nonstop_tsc cpuid extd_apicid aperfmperf rapl pni pclmulqdq monitor ssse3 fma cx16 sse4_1 sse4_
                          2 movbe popcnt aes xsave avx f16c rdrand lahf_lm cmp_legacy svm extapic cr8_legacy abm sse4a misalignsse 3dnowprefetch osvw ibs skinit
                           wdt tce topoext perfctr_core perfctr_nb bpext perfctr_llc mwaitx cpb cat_l3 cdp_l3 hw_pstate ssbd mba ibrs ibpb stibp vmmcall fsgsbas
                          e bmi1 avx2 smep bmi2 cqm rdt_a rdseed adx smap clflushopt clwb sha_ni xsaveopt xsavec xgetbv1 cqm_llc cqm_occup_llc cqm_mbm_total cqm
                          _mbm_local clzero irperf xsaveerptr rdpru wbnoinvd cppc arat npt lbrv svm_lock nrip_save tsc_scale vmcb_clean flushbyasid decodeassist
                          s pausefilter pfthreshold avic v_vmsave_vmload vgif v_spec_ctrl umip rdpid overflow_recov succor smca
```

Jak wynika z powyższych informacji, mój procesor nie wspiera AVX-512.

Wspierane liczniki procesora:

```
[congard@congard-fedora Studia]$ papi_avail | grep Yes
PAPI_L1_ICM  0x80000001  Yes   No   Level 1 instruction cache misses
PAPI_L2_DCM  0x80000002  Yes   No   Level 2 data cache misses
PAPI_L2_ICM  0x80000003  Yes   No   Level 2 instruction cache misses
PAPI_TLB_DM  0x80000014  Yes   No   Data translation lookaside buffer misses
```

```
PAPI_TLB_IM  0x80000015  Yes   Yes  Instruction translation lookaside buffer misses
PAPI_BR_TKN  0x8000002c  Yes   No   Conditional branch instructions taken
PAPI_BR_MSP  0x8000002e  Yes   No   Conditional branch instructions mispredicted
PAPI_TOT_INS 0x80000032  Yes   No   Instructions completed
PAPI_FP_INS  0x80000034  Yes   No   Floating point instructions
PAPI_BR_INS  0x80000037  Yes   No   Branch instructions
PAPI_TOT_CYC 0x8000003b  Yes   No   Total cycles
PAPI_L2_DCH  0x8000003f  Yes   No   Level 2 data cache hits
PAPI_L1_DCA  0x80000040  Yes   No   Level 1 data cache accesses
PAPI_L2_DCR  0x80000044  Yes   No   Level 2 data cache reads
PAPI_L2_ICH  0x8000004a  Yes   No   Level 2 instruction cache hits
PAPI_L2_ICR  0x80000050  Yes   No   Level 2 instruction cache reads
PAPI_FP_OPS  0x80000066  Yes   No   Floating point operations
```

Uwaga: avx512 zostanie przetestowane na bastionie (ale bez pomiaru flopsów)

2.2 Kompilator

Podczas kompilacji optymalizacji **ge1-ge7** użyto kompilatora clang:

```
[congard@congard-fedora Studia]$ clang --version
clang version 17.0.6 (Fedora 17.0.6-2.fc39)
Target: x86_64-redhat-linux-gnu
Thread model: posix
InstalledDir: /usr/bin
```

2.3 Bastion

```
uname -a
Linux dc1a-lab-oknra.ipa.ki.agh.edu.pl 4.18.0-553.5.1.el8_10.x86_64 #1 SMP Wed Jun 5 09:12:13
```

2.3.1 CPU

```
a1.52 [knapp@dc1a-lab-oknra:~] $ lscpu
Architecture:        x86_64
CPU op-mode(s):      32-bit, 64-bit
Byte Order:          Little Endian
CPU(s):              2
On-line CPU(s) list: 0,1
Thread(s) per core:  1
Core(s) per socket:  1
Socket(s):           2
NUMA node(s):        1
Vendor ID:           GenuineIntel
CPU family:          6
Model:               85
Model name:          Intel(R) Xeon(R) Platinum 8260 CPU @ 2.40GHz
Stepping:            7
CPU MHz:             2399.999
BogoMIPS:            4799.99
Hypervisor vendor:   VMware
Virtualization type: full
L1d cache:           32K
L1i cache:           32K
L2 cache:            1024K
L3 cache:            36608K
NUMA node0 CPU(s):   0,1
Flags:               fpu vme de pse tsc msr pae mce cx8 apic sep mtrr pge mca cmov pat pse36 clflush mmx fxsr sse sse2 ss syscall nx pdpe1gb rdtscp lm constant_
tsc arch_perfmon nopl xtopology tsc_reliable nonstop_tsc cpuid pni pclmulqdq ssse3 fma cx16 pcid sse4_1 sse4_2 x2apic movbe popcnt tsc_deadline_timer aes xsave
avx f16c rdrand hypervisor lahf_lm abm 3dnowprefetch invpcid_single ssbd ibrs ibpb stibp ibrs_enhanced fsgsbase tsc_adjust bmi1 avx2 smep bmi2 invpcid avx512f a
vx512dq rdseed adx smap clflushopt clwb avx512cd avx512bw avx512vl xsaveopt xsavec xsaves arat pku ospke md_clear flush_l1d arch_capabilities
```

Jak wynika z powyższych informacji, dany procesor ma wsparcie AVX-512.

2.3.2 Kompilator

Podczas kompilacji na bastionie optymalizacji **ge3**, **ge7** i **ge8** użyto kompilatora gcc:

```
[knapp@dc1a-lab-oknra:~] 127 $ gcc --version
gcc (GCC) 8.5.0 20210514 (Red Hat 8.5.0-22)
Copyright (C) 2018 Free Software Foundation, Inc.
This is free software; see the source for copying conditions.  There is NO
warranty; not even for MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.
```

3 Wykonanie pomiarów

W celu wykonania pomiarów zostały przygotowane dodatkowe funkcje, uruchamiające odpowiednie testy i wypisujące wyniki. Na przykład, uruchomienie wszystkich benchmarków wygląda w sposób następujący:

```
#define RUN_BENCH(name) do { \
    printf("Starting benchmark: " #name "\n"); \
    run_bench(name, ge, size, dim);            \
    printf("\n"); \
} while (0)

static void benchmark(ge_t ge, int size, MatDim_t dim) {
    RUN_BENCH(benchmark_time);
    RUN_BENCH(benchmark_flops);
    RUN_BENCH(benchmark_ins_cyc);
    RUN_BENCH(benchmark_cond_taken_mispred);
}
```

gdzie `gt_t` - funkcja wykonująca eliminację Gaussa.

Benchmarkowanie z użyciem PAPI wygląda w sposób następujący:

```
static void benchmark_ins_cyc(ge_t ge, void *mat, int size) {
    int event_codes[2] = {PAPI_TOT_INS, PAPI_TOT_CYC};
    long long values[2];

    papi_run(ge, mat, size, event_codes, 2, values);

    printf("Total instructions executed: %lld\nTotal cycles: %lld\n", values[0], values[1]);
}
```

gdzie `papi_run` - funkcja, wykonująca pomiary liczników `event_codes` i zapisująca wyniki do `values`.

3.1 Użyte flagi

We wszystkich przypadkach, użyto następujących flag:

- `-march=native` - dopasowanie do własnej architektury
- `-O2` - *domyślnie jest `-O0`, czyli bez żadnych optymalizacji*
- `-mavx` (`-mavx512f` w przypadku bastionu)

3.2 Macierz

Rozmiar macierzy we wszystkich przypadkach jest ustawiony na `1500`.

3.3 Mierzone liczniki

- `PAPI_FP_OPS` - FLOPS (oprócz bastionu, gdzie ten licznik nie jest wspierany)
- `PAPI_TOT_INS` - liczba instrukcji
- `PAPI_TOT_CYC` - liczba cykli
- `PAPI_BR_TKN` - liczba instrukcji warunkowych
- `PAPI_BR_MSP` - liczba instrukcji warunkowych, niepoprawnie przewidzianych

4 Pomiary

W tym rozdziale zostaną omówione poszczególne optymalizacje oraz zostaną przedstawione wyniki.

4.1 Maszyna lokalna

4.1.1 ge1

Wersja bez optymalizacji.

```
Starting benchmark: benchmark_time
Starting benchmarking...
Benchmarking time...
Time: 1.505726e+00 sec
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_flops
Starting benchmarking...
Benchmarking flops...
Real_time: 1.504705
Proc_time: 1.504604
flpops: 3371625750
MFLOPS: 2240.872559
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_ins_cyc
Starting benchmarking...
Total instructions executed: 8997765703
Total cycles: 6347900856
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_cond_taken_mispred
Starting benchmarking...
Conditional branch instructions taken: 1123876835
Conditional branch instructions mispredicted: 1134511
Check: -4.605781e+16
```

4.1.2 ge2

Liczniki pętli zostały umieszczone w rejestrach.

```
Starting benchmark: benchmark_time
Starting benchmarking...
Benchmarking time...
Time: 1.527838e+00 sec
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_flops
Starting benchmarking...
Benchmarking flops...
Real_time: 1.510554
Proc_time: 1.510518
flpops: 3371625750
MFLOPS: 2232.099121
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_ins_cyc
Starting benchmarking...
Total instructions executed: 8997766009
Total cycles: 6380764740
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_cond_taken_mispred
Starting benchmarking...
Conditional branch instructions taken: 1123876922
Conditional branch instructions mispredicted: 1134107
Check: -4.605781e+16
```

Jak widać, nie ma prawie żadnej różnicy w porównaniu z poprzednim wynikiem, co mówi o tym, że w poprzednim przypadku kompilator już to zoptymalizował samodzielnie.

4.1.3 ge3

W rejestrze została umieszczona powtarzającą się w najbardziej zagnieżdżonym miejscu wartość, czyli:

```
multiplier = (A[i][k]/A[k][k]);
```

Wynik:

```
Starting benchmark: benchmark_time
Starting benchmarking...
Benchmarking time...
Time: 7.626570e-01 sec
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_flops
Starting benchmarking...
```

```
Benchmarking flops...
Real_time: 0.761170
Proc_time: 0.759529
flpops: 2248874750
MFLOPS: 2960.880615
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_ins_cyc
Starting benchmarking...
Total instructions executed: 1119811406
Total cycles: 3261152374
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_cond_taken_mispred
Starting benchmarking...
Conditional branch instructions taken: 78217265
Conditional branch instructions mispredicted: 44795
Check: -4.605781e+16
```

Jak widać w powyższego wyniku, mamy 2 krotne przyspieszenie w porównaniu z poprzednimi wynikami.

4.1.4 ge4

Najbardziej zagnieżdżona pętla została rozwinięta do 8 iteracji.

```
Starting benchmark: benchmark_time
Starting benchmarking...
Benchmarking time...
Time: 1.025453e+00 sec
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_flops
Starting benchmarking...
Benchmarking flops...
Real_time: 1.037115
Proc_time: 1.037027
flpops: 2248874750
MFLOPS: 2168.578857
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_ins_cyc
Starting benchmarking...
Total instructions executed: 5099311209
Total cycles: 4176920414
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_cond_taken_mispred
Starting benchmarking...
```

```
Conditional branch instructions taken: 147160767
Conditional branch instructions mispredicted: 867175
Check: -4.605781e+16
```

Czasowo jest gorzej niż w poprzednim przypadku. Ale czy to jest źle? Nie, bo to zostało zrobione w celu umożliwienia wykonania dalszych optymalizacji.

4.1.5 ge5

Macierz dwuwymiarowa została zamieniona na macierz jednowymiarową indeksowaną przez macro.

```
Starting benchmark: benchmark_time
Starting benchmarking...
Benchmarking time...
Time: 1.060818e+00 sec
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_flops
Starting benchmarking...
Benchmarking flops...
Real_time: 1.094921
Proc_time: 1.090934
flpops: 2248874750
MFLOPS: 2061.421387
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_ins_cyc
Starting benchmarking...
Total instructions executed: 7204409530
Total cycles: 4327164810
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_cond_taken_mispred
Starting benchmarking...
Conditional branch instructions taken: 147160798
Conditional branch instructions mispredicted: 877104
Check: -4.605781e+16
```

Czasowo - bez zmian.

4.1.6 ge6

Zostały wprowadzone operacje wektorowe SSE3.

```
Starting benchmark: benchmark_time
Starting benchmarking...
Benchmarking time...
Time: 9.591380e-01 sec
Check: -4.605781e+16
```

```
Starting benchmark: benchmark_flops
Starting benchmarking...
Benchmarking flops...
Real_time: 0.946750
Proc_time: 0.946701
flpops: 2248874750
MFLOPS: 2375.485840
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_ins_cyc
Starting benchmarking...
Total instructions executed: 4698871313
Total cycles: 3979664139
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_cond_taken_mispred
Starting benchmarking...
Conditional branch instructions taken: 147160696
Conditional branch instructions mispredicted: 897919
Check: -4.605781e+16
```

Jest lepiej, ale nie jest to specjalnie zauważalne.

4.1.7 ge7

Zostały wprowadzone 256-bitowe operacje wektorowe AVX.

```
Starting benchmark: benchmark_time
Starting benchmarking...
Benchmarking time...
Time: 8.824810e-01 sec
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_flops
Starting benchmarking...
Benchmarking flops...
Real_time: 0.867856
Proc_time: 0.867736
flpops: 2248874750
MFLOPS: 2591.657715
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_ins_cyc
Starting benchmarking...
Total instructions executed: 3015016248
Total cycles: 3670233743
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_cond_taken_mispred
```

```
Starting benchmarking...
Conditional branch instructions taken: 147160652
Conditional branch instructions mispredicted: 866772
Check: -4.605781e+16
```

Czasowo jest lepiej, ale wciąż jest gorzej niż w przypadku **ge3**.

4.1.8 Podsumowanie

W przypadku maszyny lokalnej, najlepszą optymalizacją okazała się optymalizacja **ge3**.

4.2 Bastion

4.2.1 ge3

```
gcc ge3.c benchmark.c \
    $(pkg-config --cflags --libs papi) \
    -lm -O2 -DMAT_SIZE=1500 -o ge3 && ./ge3
```

```
Starting benchmark: benchmark_time
Starting benchmarking...
Benchmarking time...
Time: 7.848650e-01 sec
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_ins_cyc
Starting benchmarking...
Total instructions executed: 9000008952
Total cycles: 2343783760
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_cond_taken_mispred
Starting benchmarking...
Conditional branch instructions taken: 1123875279
Conditional branch instructions mispredicted: 1123546
Check: -4.605781e+16
```

4.2.2 ge7

```
gcc ge7.c benchmark.c \
    $(pkg-config --cflags --libs papi) \
    -lm -O2 -mavx -DMAT_SIZE=1500 -o ge7 && ./ge7
```

```
Starting benchmark: benchmark_time
Starting benchmarking...
Benchmarking time...
Time: 6.307870e-01 sec
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_ins_cyc
```

```
Starting benchmarking...
Total instructions executed: 5002186579
Total cycles: 1607707368
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_cond_taken_mispred
Starting benchmarking...
Conditional branch instructions taken: 144906716
Conditional branch instructions mispredicted: 1000737
Check: -4.605781e+16
```

Wniosek: jest lepiej, niż w przypadku optymalizacji **ge3**.

4.2.3 ge8

Zostały wprowadzone 512-bitowe operacje wektorowe AVX.

```
gcc ge8.c benchmark.c \
    $(pkg-config --cflags --libs papi) \
    -lm -O2 -mavx512f -DMAT_SIZE=1500 -o ge8 && ./ge8

Starting benchmark: benchmark_time
Starting benchmarking...
Benchmarking time...
Time: 4.825540e-01 sec
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_ins_cyc
Starting benchmarking...
Total instructions executed: 1917559472
Total cycles: 1082019997
Check: -4.605781e+16

Starting benchmark: benchmark_cond_taken_mispred
Starting benchmarking...
Conditional branch instructions taken: 79190832
Conditional branch instructions mispredicted: 434740
Check: -4.605781e+16
```

Wniosek: lepiej niż poprzednio

4.2.4 Podsumowanie

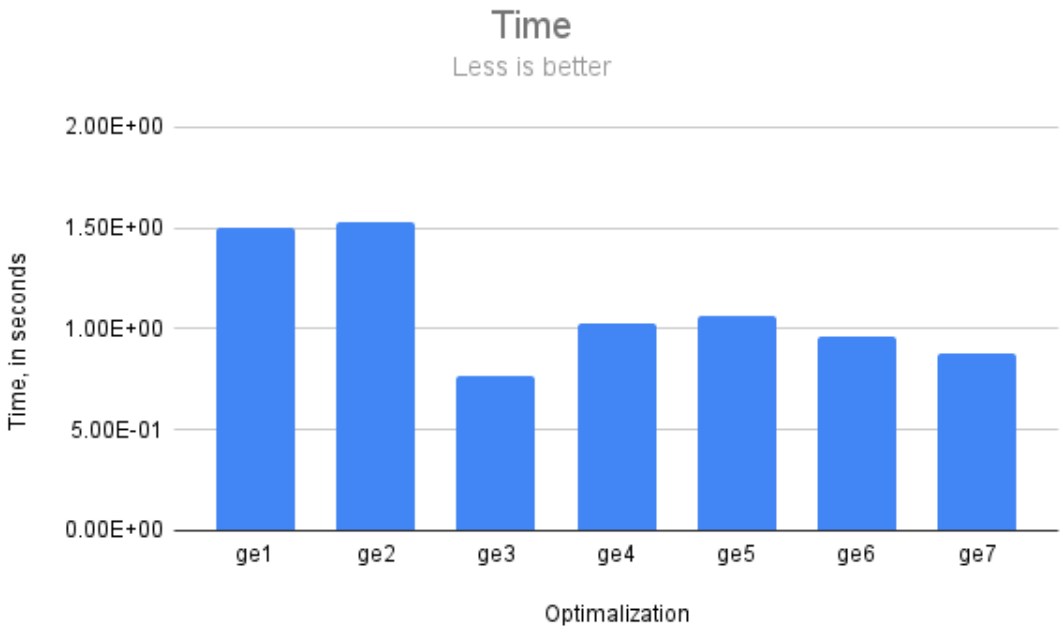
W przypadku bastionu, najlepszą optymalizacją okazała się optymalizacja **ge8**.

5 Wykresy

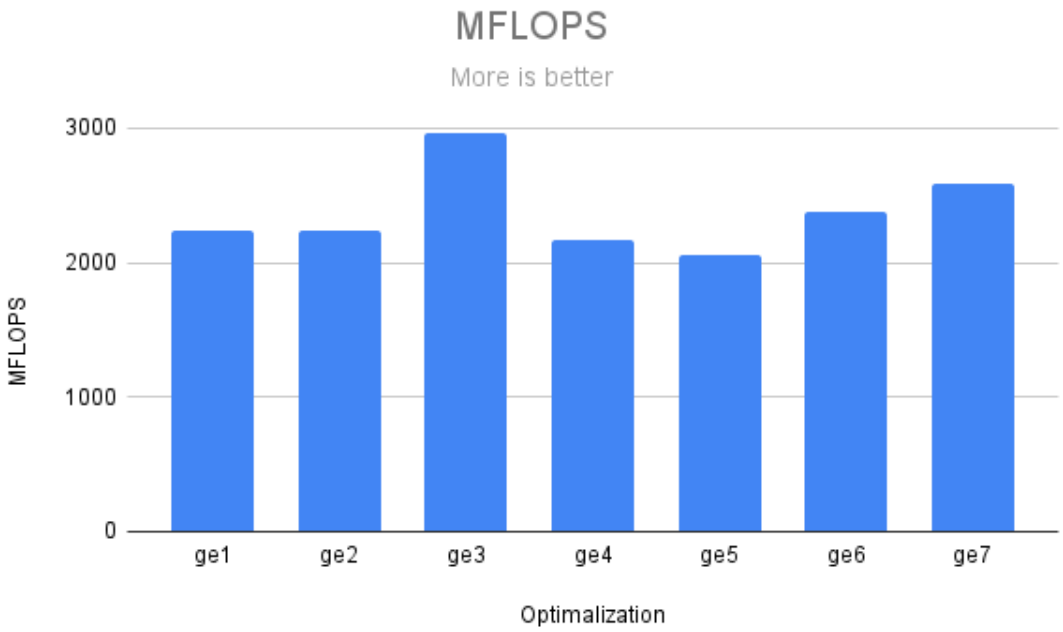
W tym rozdziale zostaną przedstawione wykresy dla poszczególnych pomiarów.

5.1 Maszyna lokalna

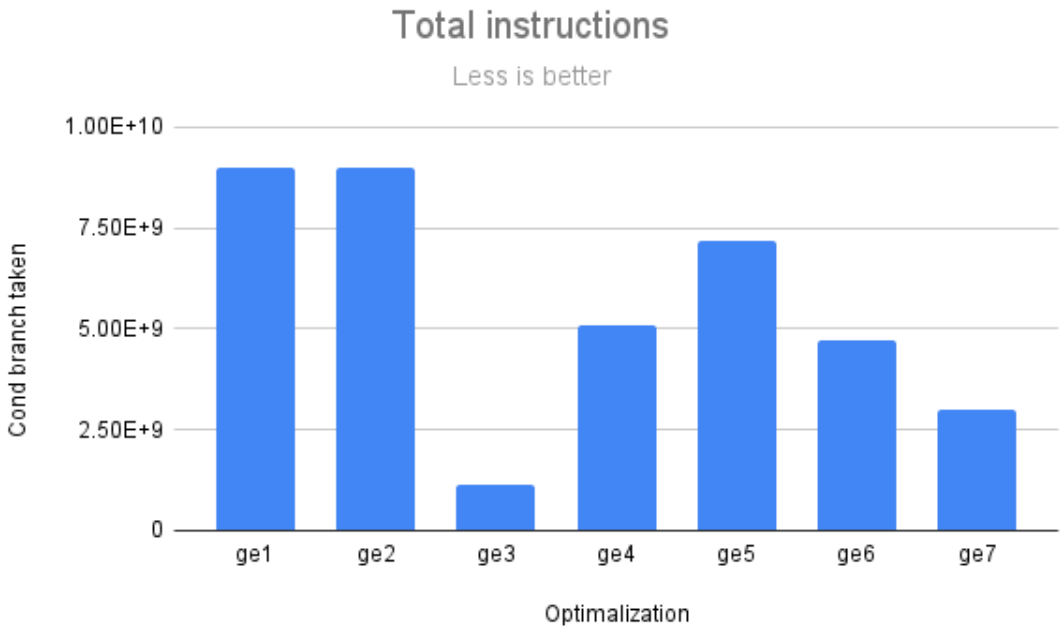
5.1.1 Time



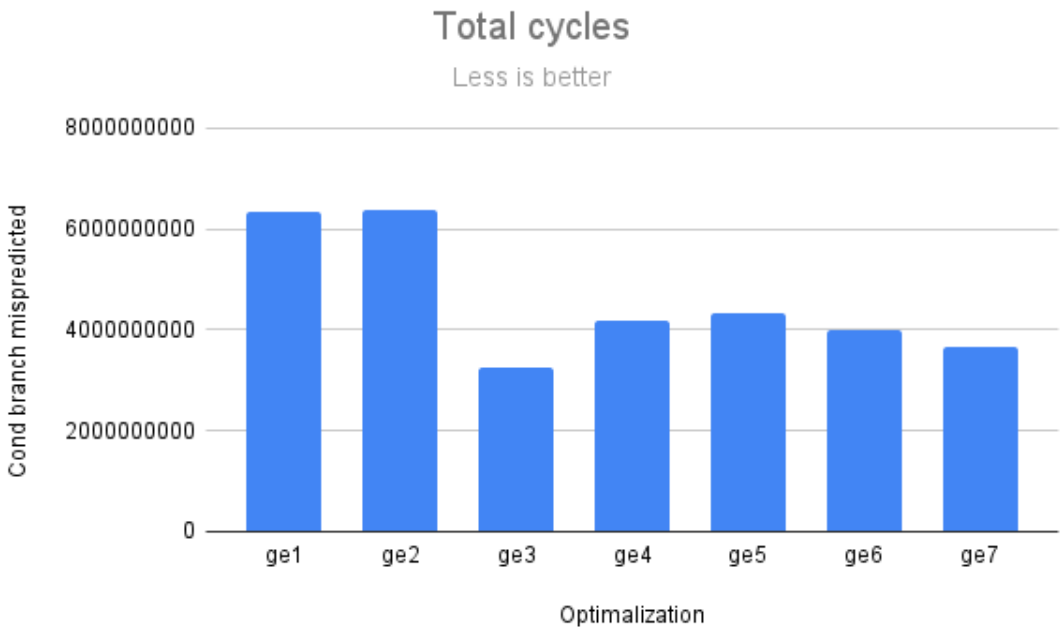
5.1.2 MFLOPS



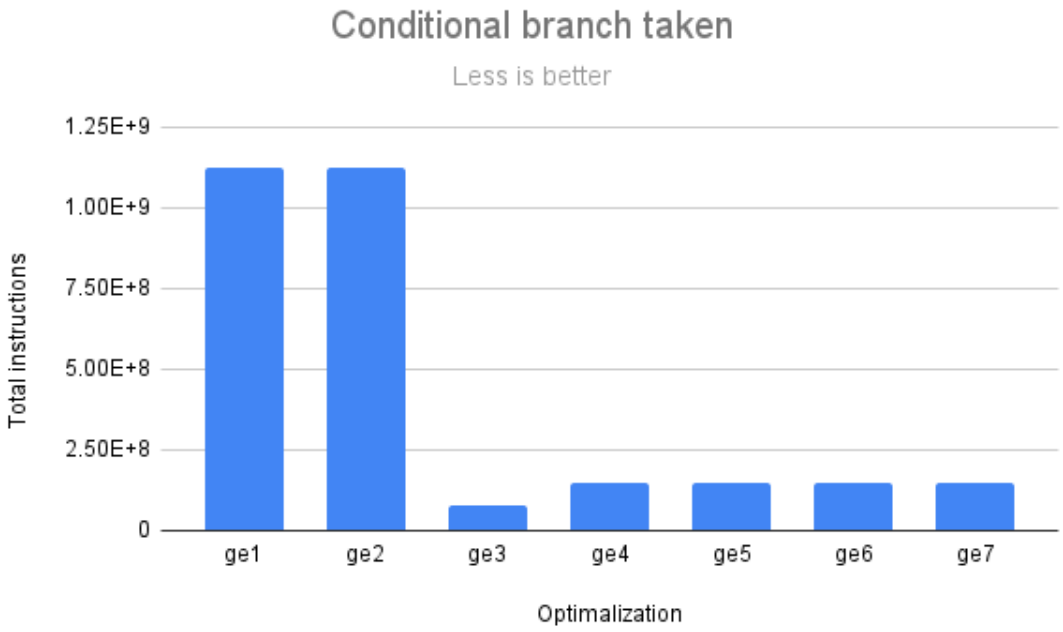
5.1.3 Total instructions



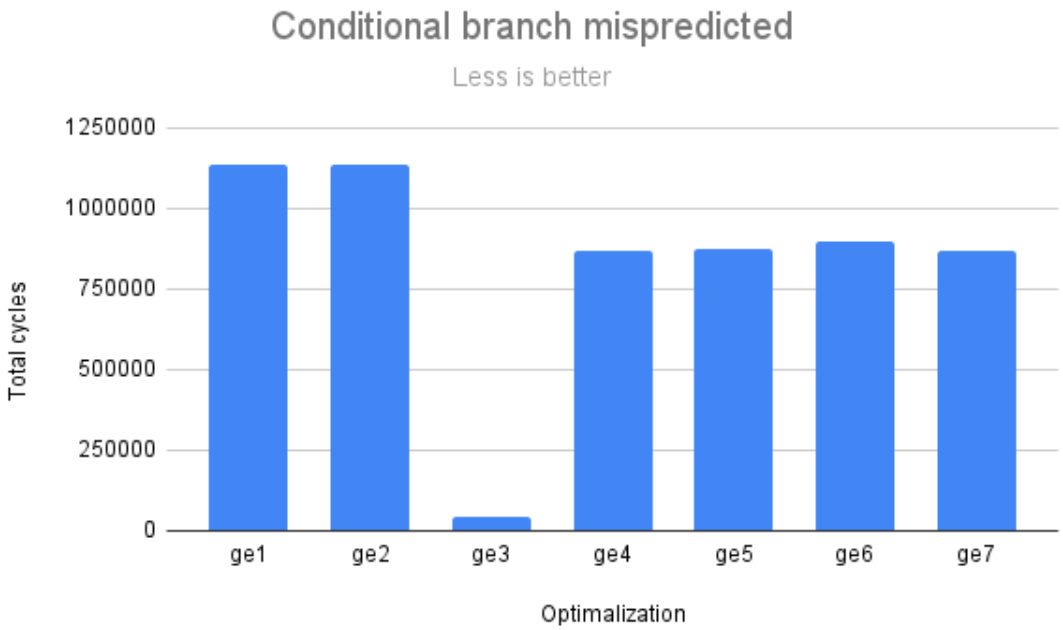
5.1.4 Total cycles



5.1.5 Conditional branch taken

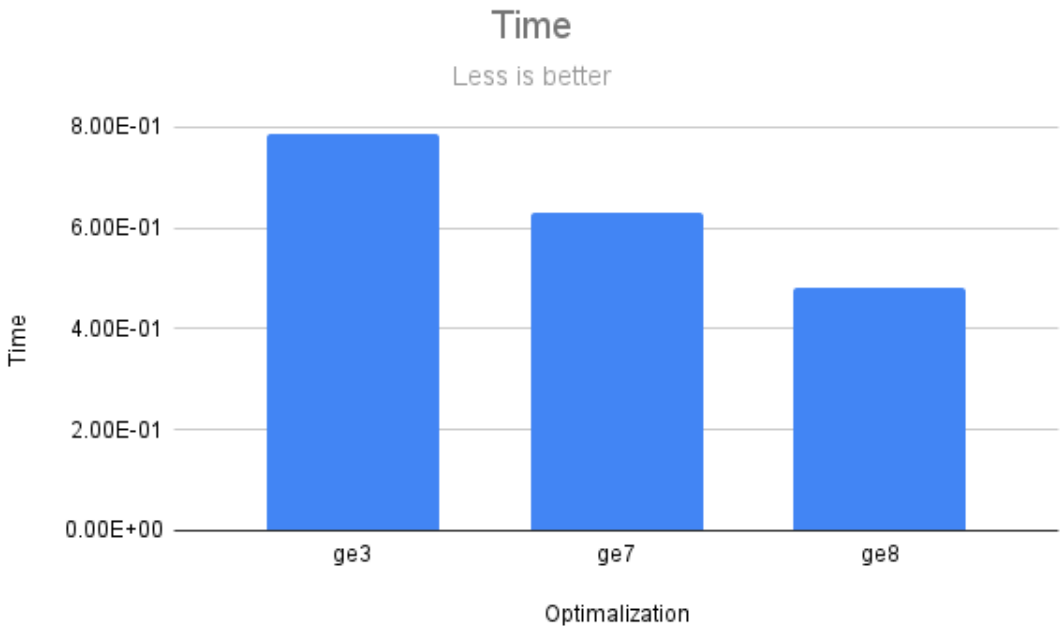


5.1.6 Conditional branch mispredicted

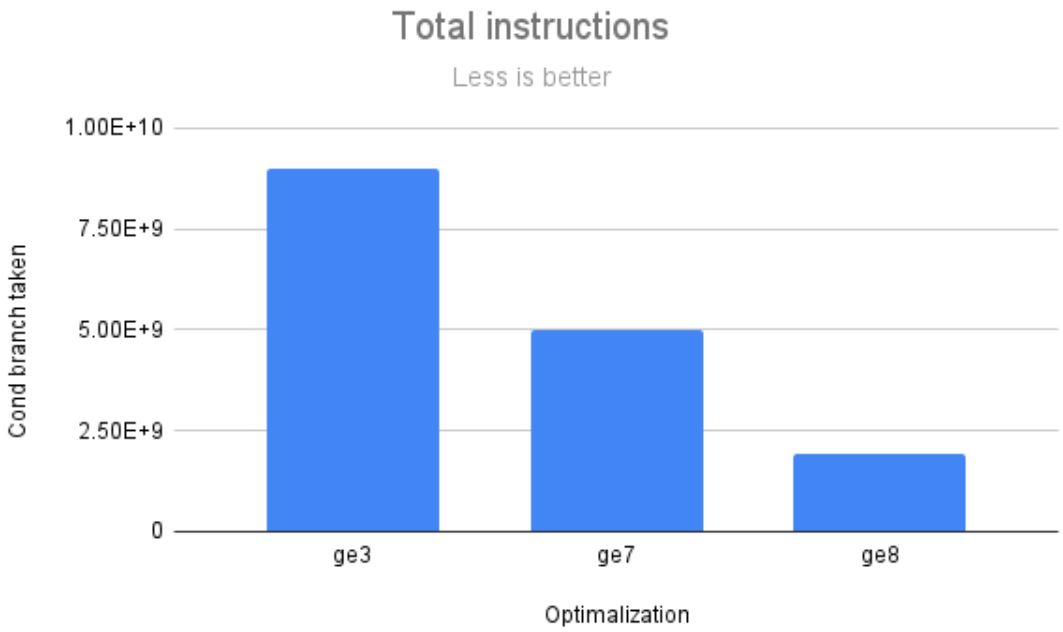


5.2 Bastion

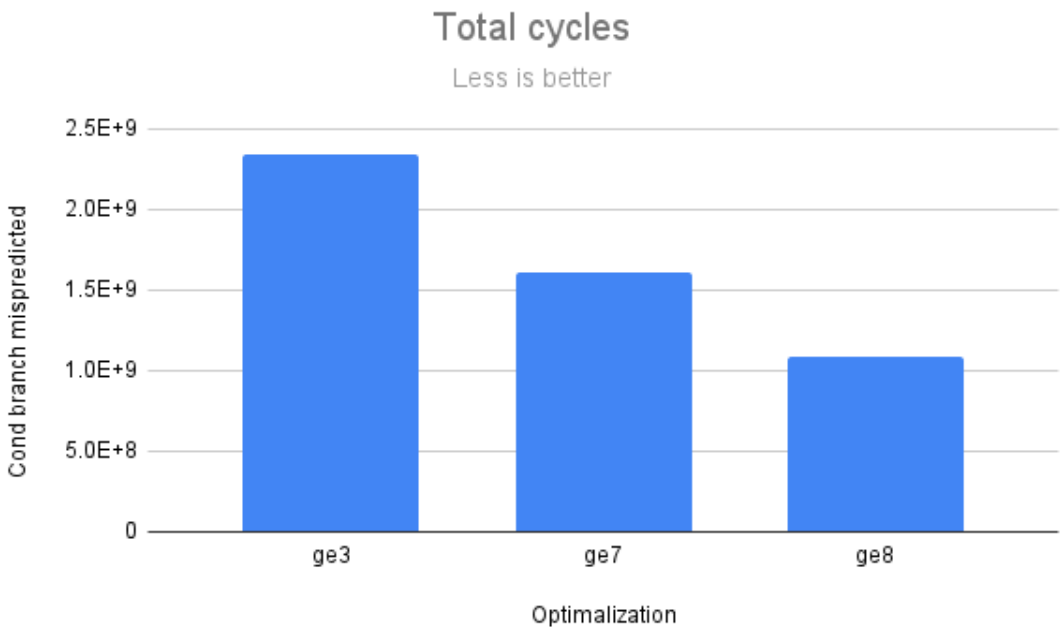
5.2.1 Time



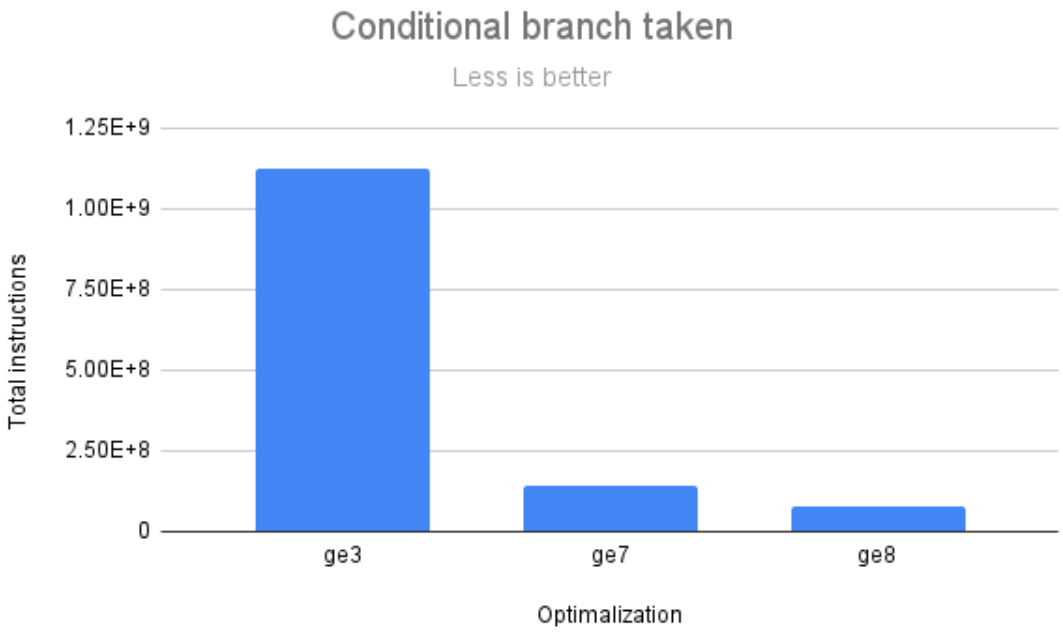
5.2.2 Total instructions



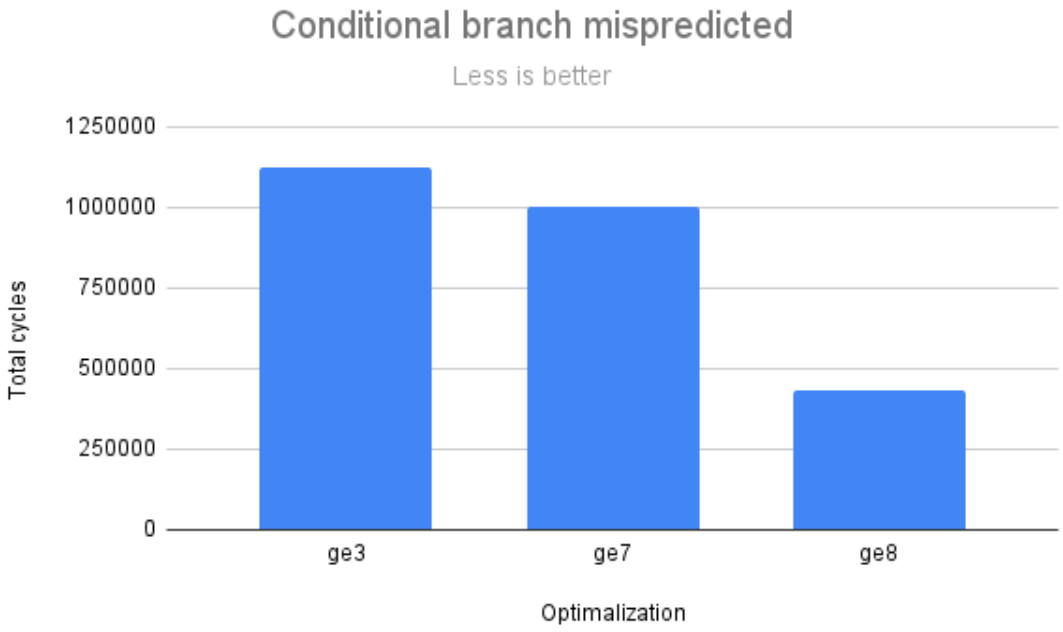
5.2.3 Total cycles



5.2.4 Conditional branch taken



5.2.5 Conditional branch mispredicted



6 Wnioski

- W przypadku maszyny lokalnej, najlepszą optymalizacją okazała się optymalizacja **ge3**;
- W przypadku bastionu, najlepszą optymalizacją, zgodnie z oczekiwaniami, okazała się optymalizacja **ge8**;
- Nie wszystkie współczesne procesory wspierają AVX-512, co jest zwłaszcza zauważalne w przypadku procesorów AMD: AVX-512 jest wspierane dopiero przez najnowocześniejsze mikroarchitektury Zen 4 oraz Zen 5.

7 Źródła

1. Materiały do laboratorium 2 – dr hab. inż. Maciej Woźniak
2. Materiały do laboratorium 3 – dr hab. inż. Maciej Woźniak
3. Materiały do laboratorium 4 – dr hab. inż. Maciej Woźniak
4. How To Optimize Gemm – flame: https://github.com/flame/how-to-optimize-gemm
5. AVX-512 – Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/AVX-512