

Programowanie Równoległe - CUDA

Wersja druga

Autorzy

Grupa dziekańska: 4

Grupa laboratoryjna: 7

Termin zajęć: czwartek, 16:50

Tymoteusz Jagła 151811 - tymoteusz.jagla@student.put.poznan.pl

Kaper Magnuszewski 151746 - kacper.magnuszewski@student.put.poznan.pl

Sprawozdanie

Wymagany termin oddania sprawozdania - 31.05.2024 Rzeczywisty termin oddania sprawozdania - 31.05.2024

Wersja poprawiona - 17.06.2024

Cel zadania

Celem ćwiczenia jest praktyczne zapoznanie z zasadami programowania równoległego procesorów kart graficznych (PKG), zapoznanie z zasadami optymalizacji kodu dla PKG oraz ocena prędkości przetwarzania przy użyciu PKG i poznanie czynników warunkujących realizację efektywnego przetwarzania.

Opis zadania

Zadanie polega na sumowaniu wartości tablicy o wielkości $N \times N$, które znajdują się w określonym przez „promień” R obszarze. Tablica wynikowa ma rozmiar $(N-2R) \times (N-2R)$, sumy obliczane są dla wszystkich pozycji w odległości większej lub równej R od krawędzi tablicy wejściowej.

Tablica Dwuwymiarowa $TAB[N][N]$ (o wierszu długości N , słowo tablicy $TAB[i][j]$ jest dostępne jako $TAB[i \cdot N + j]$). Dla tablicy wejściowej TAB należy wyliczyć tablicę wyjściową $OUT[N-2R][N-2R]$ (gdzie $N > 2R$) zawierającą sumy elementów w „promieniu” R . Każdy element tablicy wyjściowej to suma $(2 \cdot R + 1) \cdot (2 \cdot R + 1)$ wartości.

Przykładowo dla $R = 1$ $OUT[i][j] = TAB[i][j] + TAB[i][j-1] + TAB[i][j+1] + TAB[i-1][j-1] + TAB[i-1][j] + TAB[i-1][j+1] + TAB[i+1][j] + TAB[i+1][j-1] + TAB[i+1][j+1]$.

Wykorzystany system obliczeniowy

Procesor (CPU)

- Model: 13th Gen Intel® Core(TM) i5-13600KF
- Liczba procesorów fizycznych: 14
 - 6 Performance-cores
 - 8 Efficient-cores
- Liczba procesorów logicznych: 20
 - 2 wątki na pojedynczy Performance-core
 - 1 wątek na pojedynczy Efficient-core
- Oznaczenie typu procesora: KF
- Taktowanie procesora:
 - Minimalne: 800MHz
 - Maksymalne: 51000MHz
- Wielkości pamięci podręcznej procesora:
 - L1d cache: 544 KiB (14 instancji)
 - L1i cache: 704 KiB (14 instancji)
 - L2 cache: 20 MiB (8 instancji)
 - L3 cache: 24 MiB (1 instancja)
- Organizacja pamięci podręcznej: Intel® Smart Cache

Jednostka przetwarzania graficznego (GPU)

- Model: NVIDIA GeForce RTX 4070 SUPER 12G VENTUS 2X OC
- Nazwa technologii: Ada Lovelace
- Producent: Micro-Star International
- Układ graficzny: AD104-350
- Parametr CUDA compute capability: 8.9
- Liczba tranzystorów: 35.800 milionów
- Proces technologiczny: 5nm
- Rdzenie CUDA: 7168
- Jednostki TMU: 224
- Jednostki ROP: 80
- Jednostki RT: 56
- Jednostki Tensor: 224
- Pamięć VRAM: 12 GB GDDR6X
- Magistrala pamięci: 192-bitowa
- Taktowanie pamięci: 1313 MHz
- Taktowanie pamięci efektywne: 21000 MHz
- Przepustowość pamięci: 504 GB/s
- Taktowanie rdzenia (bazowe): 1980 MHz
- Taktowanie rdzenia (boost): 2505 MHz
- Pamięć cache L2: 48 MB
- Pobór mocy (TGP): 220 W
- Wersja sterownika: NVIDIA 551.61

System Operacyjny

- Nazwa systemu operacyjnego: Microsoft Windows 11 N
- Oprogramowanie wykorzystane do przygotowania kodu wynikowego: Visual Studio 2022

- Oprogramowanie wykorzystane do przeprowadzenia testów: NVIDIA Nsight Compute 2024.02

Wersje programów

Wykorzystane zmienne:

- N - wielkość wymiaru tablicy wejściowej
- R - promień, w jakim realizowane jest sumowanie
- K - liczba wyników obliczanych przez jeden wątek
- BS - wielkość wymiaru bloku wątków
- $tab[N \cdot N]$ - tablica wejściowa o wielkości $N * N$
- $out[(N-2R) \cdot (N-2R)]$ - tablica wyjściowa o wielkości $(N-2R) \cdot (N-2R)$

Algorytm rozwiązujący problem sekwencyjnie dla głównego procesora komputera

Poniższa funkcja to część programu, która służy obliczeniom sekwencyjnym (wykorzystuje jeden wątek) przy użyciu głównego procesora komputera. Zewnętrzne pętle programu z zmiennymi iteracyjnymi i oraz j wskazują na kolejne pola tablicy wejściowej, dla których będziemy przeprowadzali sumowanie. Pola w odległości mniejszej od R są pomijane ze względu na niemożliwe przeprowadzenie sumy, gdy pola w zasięgu promienia wychodzą poza obszar tablicy. Pętle wewnętrzne wyznaczające x i y wskazują na kolejne pola występujące w obrębie promienia sumowania, kolejno odczytywane są wartości tablicy wejściowej na wskazanych indeksach, a następnie zwiększana jest wartość sumy dla komórki tablicy wyjściowej. Gdy zsumowane zostaną wszystkie pola w obrębie promienia R wartość sumy sum zapisywana jest do tablicy wyjściowej.

Kod 1. Obliczenia sekwencyjne

```
1 void sequential(float tab[N*N], float
2 out[(N-2*R)*(N-2*R)])
3 {
4     for (int i = R; i < N - R; i++) {
5         for (int j = R; j < N - R; j++) {
6             float sum = 0;
7             for (int x = i - R; x <= i + R; x++) {
8                 for (int y = j - R; y <= j + R; y++)
9                     sum += tab[x * N + y];
10            }
11        }
12        out[(i - R) * (N - 2 * R) + j - R] =
13            sum;
14    }
15 }
```

Algorytm rozwiązujący problem równoległe wykorzystujący pamięć globalną

Poniższy kernel służy obliczeniom równoległym przy użyciu technologii CUDA procesora graficznego. Algorytm efektywnie wykorzystuje dane w pamięci globalnej karty - wątki dzięki przesunięciu w pionie kolejnych k obliczeń wątku realizują jednocześnie dostępy do sąsiednich elementów w pamięci globalnej. Wartości i i j są indeksami określającymi pozycję w tablicy wynikowej, wyliczane są na podstawie indeksu wątku, indeksu bloku, a także wymiaru bloku. Wartość j jest dodatkowo przemnażana przez zmienną kkk , która odpowiada parametrowi K - liczbie komórek tablicy wyjściowej przetwarzanej przez pojedynczy wątek. Pierwsza pętla przechodzi po wartościach k , które oznaczają kolejne komórki tablicy wynikowej przetwarzane przez wątek. Następnie dwie wewnętrzne pętle ustalają wartości y i x , które służą do odczytu wartości w promieniu R w tablicy wejściowej. Po odczycie wartości sumowanej komórki zwiększana jest lokalna zmienna sum , która następnie jest wpisywana w odpowiadające miejsce w tablicy wyjściowej. Ze względu wykorzystanie przesunięcia k (kolejnych obliczanych komórek tablicy wyjściowej) w powiązaniu z wartością j , kolejne obliczane komórki przesunięte są w pionie. Dzięki temu sąsiednie wątki w wiązce korzystają ze wspólnych danych, ograniczając liczbę koniecznych odczytów z pamięci.

Kod 2. Obliczenia przy użyciu CUDA

```
1  __global__ void localKernel(float* tab, float* out,
2  int* kkk)
3  {
4      int i = threadIdx.x + blockIdx.x * blockDim.x;
5      int j = (threadIdx.y + blockIdx.y * blockDim.y)
6      * (*kkk);
7
8      for (int k = 0; k < *kkk; k++) {
9          float sum = 0;
10         if (i < OUTSIZE && j + k < OUTSIZE) {
11             for (int y = 0; y <= 2 * R; y++) {
12                 int jyk = (j + y + k) * N;
13                 for (int x = 0; x <= 2 * R; x++) {
14                     sum += tab[jyk + (i + x)];
15                 }
16             }
17             out[(j + k) * (OUTSIZE) + i] = sum;
18         }
19     }
```

Wywołanie procedury kernela

Poniższy kod odpowiada za wywołanie procedury kernela wykorzystywanego to przeprowadzenia obliczeń. Kolejno ustawiane jest urządzenie GPU, alokowana jest pamięć karty graficznej, do której skopiowane zostaną tablice wejściowa i wyjściowa, a następnie tablica wejściowa kopiowana jest z urządzenia host'a do pamięci karty graficznej. Kernel wywoływany jest za pomocą polecenia `localKernel <<< blocksMatrix, threadsMatrix >>>(dev_tab, dev_out);`, podawana jest macierz bloków o wymiarach $\text{ceil}(\text{OUTSIZE}/\text{BLOCKSIZE})/\text{ceil}(\text{OUTSIZE}/\text{BLOCKSIZE}/K)$, gdzie OUTSIZE jest równe wartości $N - 2R$ - wielkości krawędzi

tablicy wynikowej. Macierz bloków uwzględnia wykonywanie obliczeń dla kilku komórek tablicy *out* przez jeden wątek - jeden z wymiarów jest dzielony przez wartość *K*.

Po wywołaniu kernela sprawdzane jest czy wystąpiły błędy, następuje synchronizacja - oczekiwanie na zakończenie wywoływania kernela na GPU, po synchronizacji kopiowane są wartości tablicy wynikowej *dev_out* znajdującej się w pamięci karty graficznej do tablicy *out* na urządzeniu hosta.

Kod 3. Wywołanie kernela

```
1  cudaError_t sumLocalWithCuda(float* tab, float* out)
2  {
3      float* dev_tab = 0;
4      float* dev_out = 0;
5      cudaError_t cudaStatus;
6
7      cudaStatus = cudaSetDevice(0);
8      if (cudaStatus != cudaSuccess) {
9          fprintf(stderr, "cudaSetDevice failed! Do
you have a CUDA-capable GPU installed?");
10         goto Error;
11     }
12
13     cudaStatus = cudaMalloc((void**)&dev_tab, N * N
* sizeof(float));
14     if (cudaStatus != cudaSuccess) {
15         fprintf(stderr, "cudaMalloc failed!");
16         goto Error;
17     }
18
19     cudaStatus = cudaMalloc((void**)&dev_out,
(OUTSIZE) * (OUTSIZE) * sizeof(float));
20     if (cudaStatus != cudaSuccess) {
21         fprintf(stderr, "cudaMalloc failed!");
22         goto Error;
23     }
24
25     cudaStatus = cudaMemcpy(dev_tab, tab, N*N *
sizeof(float), cudaMemcpyHostToDevice);
26     if (cudaStatus != cudaSuccess) {
27         fprintf(stderr, "cudaMemcpy failed!");
28         goto Error;
29     }
30
31     dim3 threadsMatrix(BLOCK_SIZE, BLOCK_SIZE);
32     dim3 blocksMatrix(ceil((OUTSIZE) /
(float)BLOCK_SIZE / K), ceil((OUTSIZE) /
(float)BLOCK_SIZE));
33
34     localKernel<<< blocksMatrix, threadsMatrix
>>>(dev_tab, dev_out);
35
36     // Check for any errors launching the kernel
37     cudaStatus = cudaGetLastError();
38     if (cudaStatus != cudaSuccess) {
```

```

39         fprintf(stderr, "local launch failed: %s\n",
cudaGetErrorString(cudaStatus));
40         goto Error;
41     }
42
43     // cudaDeviceSynchronize waits for the kernel to
finish, and returns
44     // any errors encountered during the launch.
45     cudaStatus = cudaDeviceSynchronize();
46     if (cudaStatus != cudaSuccess) {
47         fprintf(stderr, "cudaDeviceSynchronize
returned error code %d after launching addKernel!
\n", cudaStatus);
48         goto Error;
49     }
50
51     cudaStatus = cudaMemcpy(out, dev_out, (OUTSIZE)
* (OUTSIZE) * sizeof(float),
cudaMemcpyDeviceToHost);
52     if (cudaStatus != cudaSuccess) {
53         fprintf(stderr, "cudaMemcpy failed!");
54         goto Error;
55     }
56
57     Error:
58     cudaFree(dev_tab);
59     cudaFree(dev_out);
60
61     return cudaStatus;
62 }

```

Opis wykonania zadania

Generowanie wartości testowych i sprawdzanie poprawności obliczeń

Do generowania wartości testowych użyliśmy liczb rzeczywistych pseudolosowych generowanych za pomocą funkcji `rand()` z biblioteki standardowej. Aby przetestować poprawność obliczeń przy użyciu algorytmu rozwiązującego problem równolegle porównywaliśmy za każdym razem jego wyjście do wyjścia funkcji obliczającej wartości tablicy sekwencyjnie. Ostateczna wersja algorytmu równoległego była w stanie rozwiązać zadany problem obliczeniowy poprawnie przy każdej próbie.

Użyte miary wydajności

Użytymi przez nas miarami wydajności był czas jaki zajęły obliczenia, ilość GigaFLOP'ów / s oraz ilość FLOP'ów / Bajt.

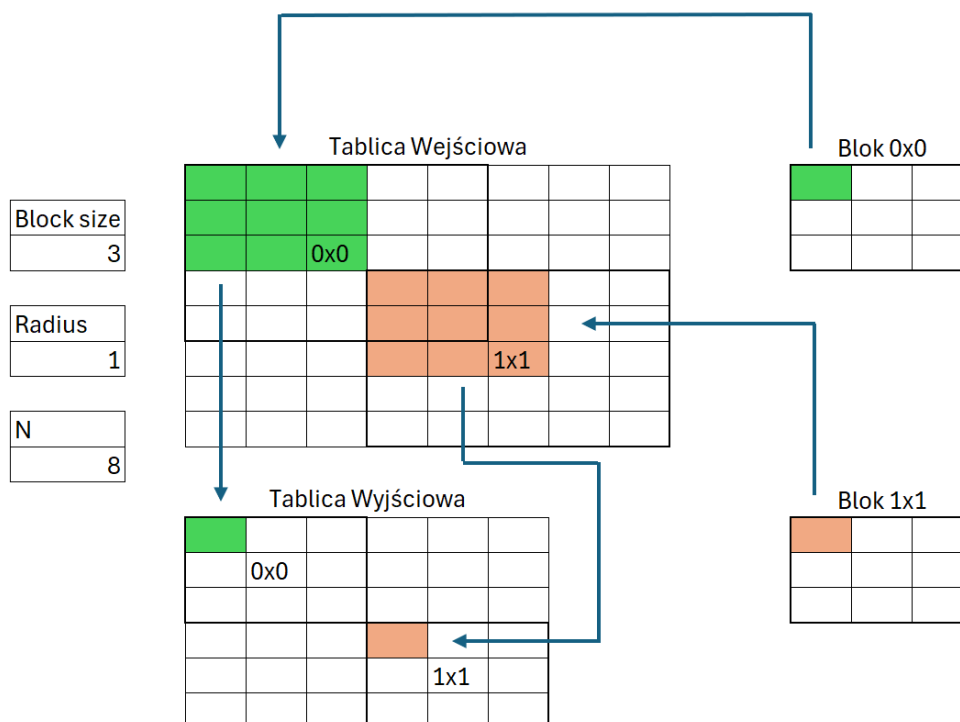
Do obliczenia ilości flopów w naszym algorytmie użyliśmy wzoru: $(N-2R)^2 \cdot (2R+1)^2$, gdzie $(N-2R)^2$ to rozmiar tablicy wynikowej, a $(2R+1)^2$ to ilość operacji wykonywanych dla jednej komórki tablicy wynikowej.

Do wyznaczenia miary GFLOP / s użyliśmy wzoru: $\frac{\text{FLOP}}{1e9 \cdot t}$, gdzie FLOP, to ilość flop'ów obliczona za pomocą poprzedniego wzoru, a t to czas jaki zajęły obliczenia.

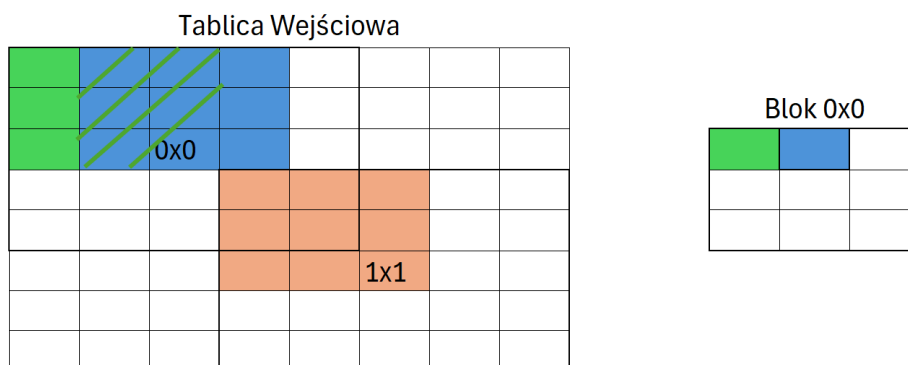
Ostatnią użytą przez nas miarą wydajności była ilość FLOP'ów / B. Wyniki zapisane w poniższych pomiarach zostały wygenerowane przez używane przez nas oprogramowanie - NVIDIA Nsight Compute. Nie wykorzystaliśmy wyników własnych obliczeń, ponieważ miara ta jest zależna od sposobu korzystania z pamięci globalnej karty. Kernel w naszym projekcie napisany został w taki sposób, aby wykorzystywać tę pamięć bardzo efektywnie. Oznacza to, że wątki realizują jednocześnie dostępy do sąsiadujących ze sobą w pamięci globalnej elementów tablicy (koalescencja dostępu do pamięci globalnej). Dzięki temu dostępy do pamięci karty są łączone. Oznacza to, że obliczane przez nas FLOP'y / B nie są wartością prawdziwą, ponieważ rozpatrzamy jedynie najgorszy możliwy przypadek. Wzór jakiego użyliśmy to: $\frac{\text{FLOP}}{(N-2R)^2 \cdot ((2R+1)^2 + 1) \cdot \text{sizeof(float)}}$, gdzie FLOP oznacza ilość flop'ów, $(N-2R)^2$ to rozmiar tablicy wynikowej, $((2R+1)^2 + 1)$ to liczba operacji wykonywanych dla jednej komórki tablicy wynikowej wraz z zapisem do niej obliczonej sumy.

Zobrazowanie problemu

Schemat 1. Miejsce dostępu i kolejność dostępu do danych realizowane przez poszczególne wątki i bloki

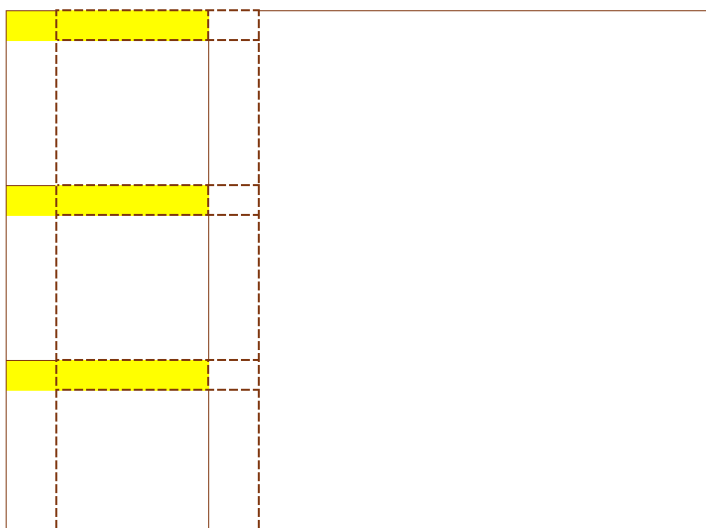


Schemat 2. Wartości wyników wyznaczone przez bloki i wątki



Schemat 3. Efektywne wykorzystanie pamięci - sąsiednie wątki korzystają z tej samej pamięci

Na żółto komórki dla kolejnych k dla $K = 3$ jednego wiersza
Przerwane linie - równoległe wykonwany wątek W2 współdzielący pamięć z W1



Żółte komórki obramowane linią przerywną to pamięć współdzielona pomiędzy wątkami W1 i W2 dla jednego wiersza
Dzięki wykorzystaniu tych samych danych przez sąsiednie wątki w wiązce występuje efektywny dostęp do pamięci

Pomiary

Tabele

Tabela 1. $N = 2000$, $R = 4$

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
0 - Sekwencyjny	-	-	0.0650	4.9448	-
1	1	8	0.0003	992.9967	20,08

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
2	4	8	0.0004	789.3871	19,88
3	16	8	0.0004	793.4404	19,45
4	1	16	0.0003	1129.5729	12,57
5	4	16	0.0003	1084.9170	19,68
6	16	16	0.0002	1452.5181	20,08
7	1	32	0.0003	1106.4290	12,37
8	4	32	0.0002	1490.6741	19,74
9	16	32	0.0002	1429.1637	20,08

Tabela 2. $N = 2000, R = 8$

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
0 - Sekwencyjny	-	-	0.3340	3.4059	
1	1	8	0.0008	1458.8523	46,68
2	4	8	0.0011	1037.5423	46,24
3	16	8	0.0012	912.9019	25,24
4	1	16	0.0006	1886.8061	71,07
5	4	16	0.0006	1867.1838	44,02
6	16	16	0.0007	1713.7155	39,13
7	1	32	0.0006	1774.9805	71,07
8	4	32	0.0006	1962.8576	49,19
9	16	32	0.0006	1819.0304	71,07

Tabela 3. $N = 2000, R = 16$

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
0 - Sekwencyjny	-	-	1.5750	2.6779	-
1	1	8	0.0028	1517.2014	207,18
2	4	8	0.0041	1033.8449	52,93
3	16	8	0.0042	994.7010	205,76
4	1	16	0.0025	1657.6391	92,07
5	4	16	0.0020	2086.1312	161,49
6	16	16	0.0023	1814.4553	161,18
7	1	32	0.0020	2061.8514	165,23
8	4	32	0.0020	2130.4732	119,94
9	16	32	0.0022	1901.9313	261,20

Tabela 4. $N = 4000, R = 4$

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
0 - Sekwencyjny	-	-	0.2700	4.7808	-
1	1	8	0.0014	952.4949	10,12

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
2	4	8	0.0013	972.0507	10,57
3	16	8	0.0013	966.7392	11,68
4	1	16	0.0008	1543.3946	11,79
5	4	16	0.0008	1699.2358	12,06
6	16	16	0.0008	1603.0744	11,68
7	1	32	0.0008	1526.1108	11,69
8	4	32	0.0007	1853.0945	11,97
9	16	32	0.0008	1708.1584	9,38

Tabela 5. $N = 4000, R = 8$

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
0 - Sekwencyjny	-	-	1.3780	3.3288	-
1	1	8	0.0044	1036.5332	41,82
2	4	8	0.0043	1062.5723	41,05
3	16	8	0.0046	989.7009	37,47
4	1	16	0.0025	1816.6027	42,98
5	4	16	0.0023	2023.7792	41,95
6	16	16	0.0026	1792.6804	41,82
7	1	32	0.0024	1922.1508	32,26
8	4	32	0.0022	2054.3492	41,79
9	16	32	0.0023	2010.2416	42,98

Tabela 6. $N = 4000, R = 16$

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
0 - Sekwencyjny	-	-	6.3560	2.6977	-
1	1	8	0.0158	1082.0573	98,90
2	4	8	0.0163	1050.7608	116,93
3	16	8	0.0170	1006.4650	122,24
4	1	16	0.0090	1910.6641	96,25
5	4	16	0.0081	2115.6857	139,25
6	16	16	0.0092	1871.5433	120,22
7	1	32	0.0079	2178.7440	112,03
8	4	32	0.0078	2201.5895	122,75
9	16	32	0.0079	2165.9561	129,35

Tabela 7. $N = 8000, R = 4$

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
0 - Sekwencyjny	-	-	6.3560	2.6977	-
1	1	8	0.0158	1082.0573	98,90

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
2	4	8	0.0163	1050.7608	116,93
3	16	8	0.0170	1006.4650	122,24
4	1	16	0.0090	1910.6641	96,25
5	4	16	0.0081	2115.6857	139,25
6	16	16	0.0092	1871.5433	120,22
7	1	32	0.0079	2178.7440	112,03
8	4	32	0.0078	2201.5895	122,75
9	16	32	0.0079	2165.9561	129,35

Tabela 8. $N = 8000$, $R = 8$

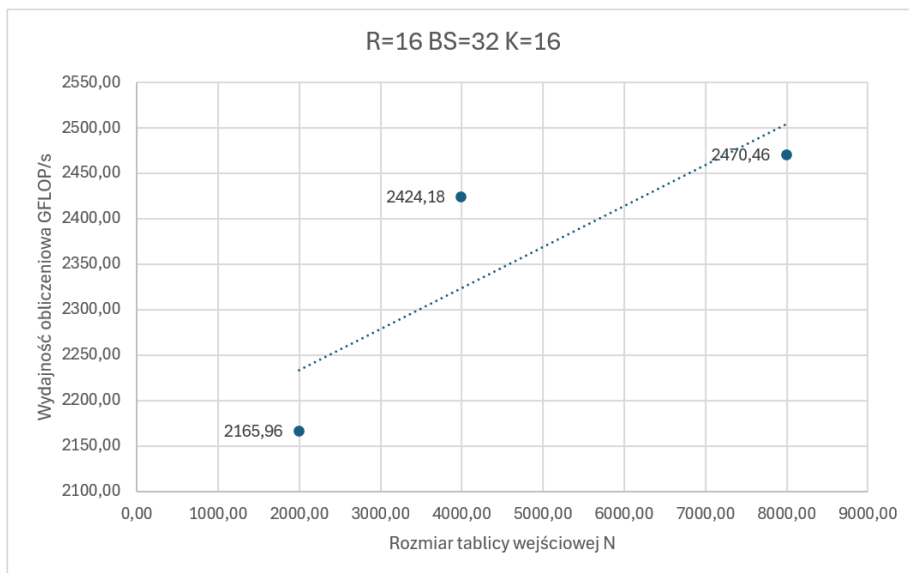
Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
0 - Sekwencyjny	-	-	5.4610	3.3734	-
1	1	8	0.0171	1077.1781	32,27
2	4	8	0.0158	1168.1293	32,21
3	16	8	0.0161	1141.2327	34,53
4	1	16	0.0090	2052.6355	34,79
5	4	16	0.0078	2368.4721	36,82
6	16	16	0.0086	2129.7647	35,34
7	1	32	0.0081	2281.3711	35,17
8	4	32	0.0076	2425.7875	37,15
9	16	32	0.0076	2424.1837	36,26

Tabela 9. $N = 8000$, $R = 16$

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
0 - Sekwencyjny	-	-	25.7140	2.6888	-
1	1	8	0.0632	1094.2898	102,15
2	4	8	0.0594	1164.6607	96,48
3	16	8	0.0606	1140.5354	96,28
4	1	16	0.0314	2202.7989	123,26
5	4	16	0.0285	2429.1239	98,07
6	16	16	0.0324	2134.1052	116,51
7	1	32	0.0286	2420.0743	103,40
8	4	32	0.0279	2482.0572	114,90
9	16	32	0.0280	2470.4554	98,32

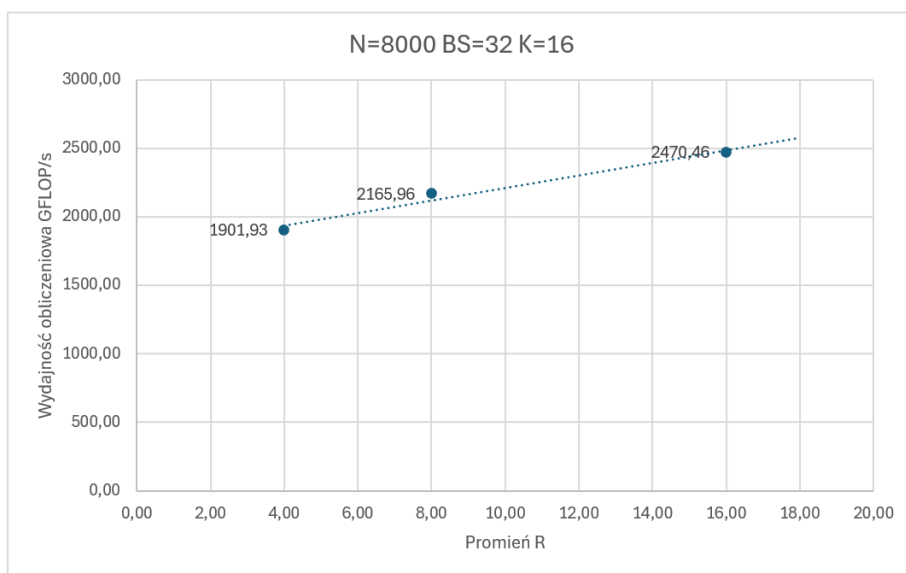
Wykresy

Wykres 1. Miara wydajności obliczeniowej w zależności od wymiaru tablicy wejściowej (N)



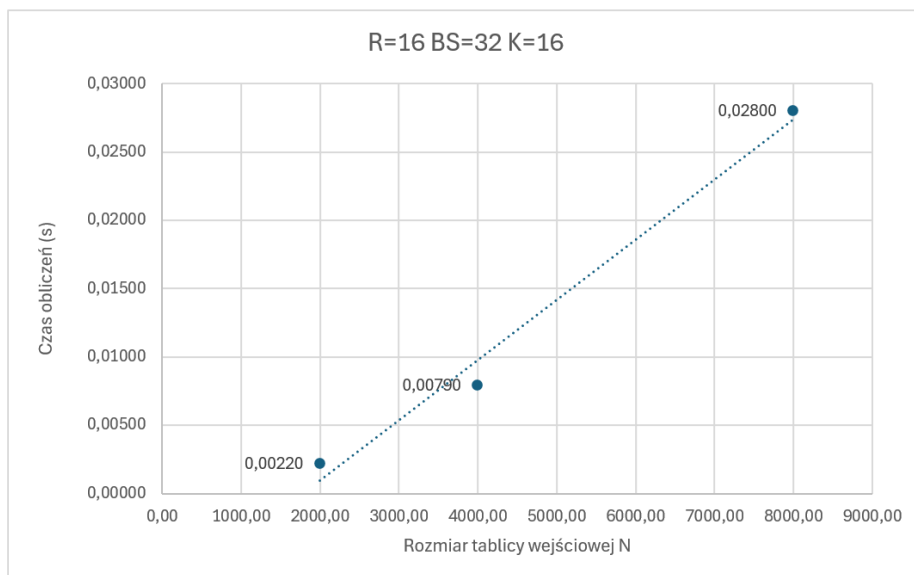
Wykres1

Wykres 2. Miara wydajności obliczeniowej w zależności od liczby wyników obliczanych przez jeden wątek (K)



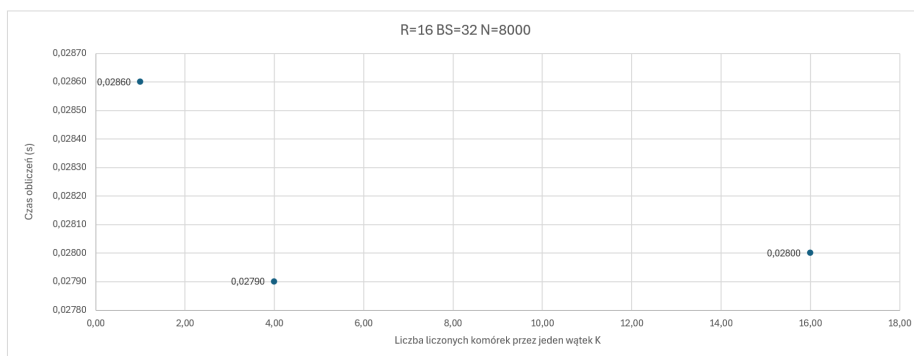
Wykres2

Wykres 3. Miara wydajności obliczeniowej w zależności od promienia w jakim elementy tablicy są sumowane (R)



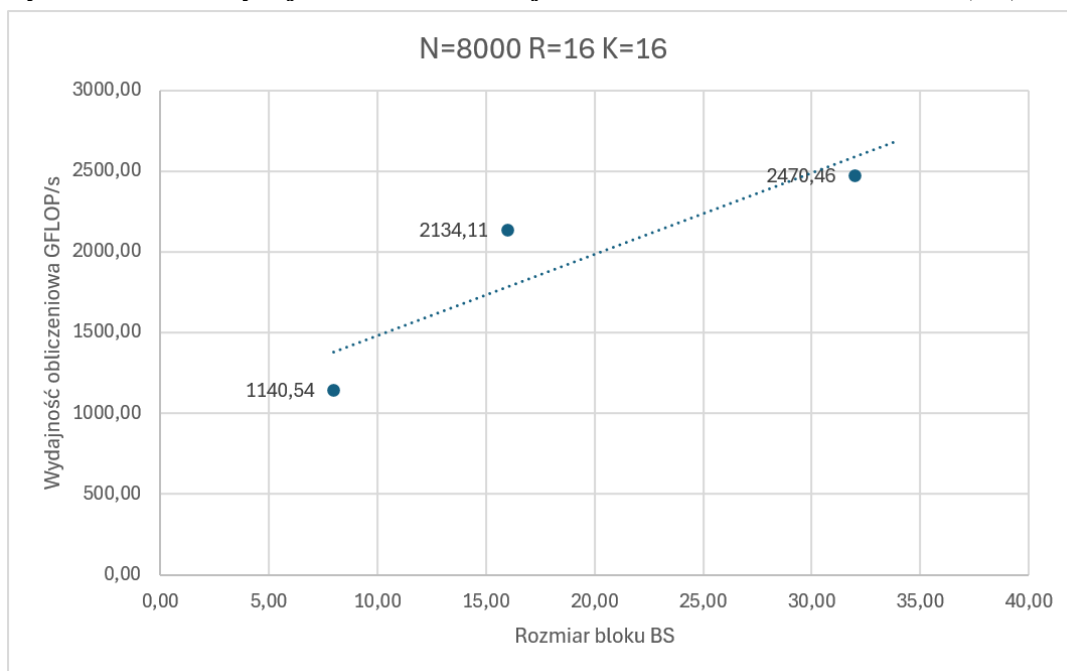
Wykres3

Wykres 4. Miara wydajności obliczeniowej w zależności od wielkości bloku (BS)



Wykres4

Wykres 5. Miara wydajności obliczeniowej w zależności od wielkości bloku (BS)



Wnioski

Wpływ parametrów na czas wykonywania obliczeń

Czas wykonywania obliczeń był zależny od użytych w eksperymencie parametrów. Największy wpływ miał parametr R , czyli promień w jakim wykonywane były obliczenia. Zauważyliśmy, że dla małej wartości R wyniki eksperymentu były nieprzewidywalne. Spowodowane jest to najprawdopodobniej małym wykorzystaniem mocy obliczeniowej używanej karty graficznej. Dopiero przy $R = 4$ oraz $N = 8000$ udało się zauważyć poprawę $\frac{\text{FLOP}}{\text{B}}$ wraz z zwiększeniem liczby komórek liczonych przez jeden wątek. Przy zwiększeniu promienia, czas wykonywania obliczeń zdecydowanie się wydłużał. Różnica jest najlepiej widoczna dla algorytmu sekwencyjnego, który przy dużej ilości operacji do wykonania zdecydowanie spowalniał. Algorytm wykonujący obliczenia równoległe również znacząco spowolnił. Jest to spowodowane dużo większą liczbą operacji sumowania do wykonania nawet przy niewielkim zwiększeniu promienia.

Kolejnym parametrem, który wpływał na czas wykonywania zadania jest liczba wyników obliczanych przez jeden wątek (parametr K). Jego zwiększenie w teorii powinno zapewnić poprawę czasu wykonywania obliczeń dzięki zapewnieniu wspólnych dostępu do pamięci dla sąsiednich wątków. W przypadku niskich wartości N i R różnice są na tyle niewielkie, że nie można jednoznacznie ocenić wpływu parametru na obliczenia. W przypadku większych promieni i rozmiarów tablicy wejściowej różnica jest już bardziej widoczna. Zwiększenie parametru k wpływa na nieznaczną poprawę prędkości obliczeń, $k = 4$ zarówno jak $k = 16$ dają zbliżone do siebie wyniki. Przykładowo:

Tabela 10. (fragment tabeli nr 9) $N = 8000, R = 16$

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
7	1	32	0.0286	2420.0743	103,40
8	4	32	0.0279	2482.0572	114,90
9	16	32	0.0280	2470.4554	98,32

Czas wykonywania obliczeń przy $k = 4$ jest wynosi 0,97 raza czasu wariantu siódmego, gdzie wątek wykonuje obliczenia dla pojedynczej komórki.

W przypadku rosnących wartości rozmiaru bloku czas obliczeń ulega jednoznacznej poprawie (przykład w tabeli nr. 11):

Tabela 11. (fragment tabli nr 9 - zestawienie wielkości bloku) $N = 8000, R = 16$

Wariant	K	BlockSize	Czas	GFLOP/s	FLOP/B
3	16	8	0.0606	1140.5354	96,28
6	16	16	0.0324	2134.1052	116,51
9	16	32	0.0280	2470.4554	98,32

Podsumowanie wyników

Badanie analizowało wydajność kernela CUDA przy różnych rozmiarach bloków (BS), liczbie wyników obliczanych przez wątki (K) dla macierzy wejściowej o rozmiarze (N) o wartościach 2000, 4000, 8000 oraz różnych rozmiarach promienia w jakim wykonywane były obliczenia (R). Najlepsze wyniki pod względem wydajności $\left(\frac{\text{GFLOP}}{s}\right)$ uzyskano dla bloków o wielkości $b = 32$, a także $k = 4, 16$, z niewielką przewagą $k = 4$. Dla większych wartości R czas wykonywania obliczeń znacznie się wydłużał. Było to spowodowane zdecydowanie większą ilością operacji, które wątek musiał wykonać. Zrównoleglenie obliczeń przy użyciu CUDA znacząco przyspieszyło czas obliczeń w stosunku obliczeń sekwencyjnych. W przypadku wysokiej liczby obliczeń (dla $R = 16$ i $N = 8000$) odnotowaliśmy maksymalnie 920-krotne przyspieszenie (tabela 9. warianty 0 i 8).