Zadanie laboratoryjne nr 6-7

Programowanie Współbieżne
2014-12-20

Łukasz Ochmański 183566
Marcel Wieczorek 173526

https://code.google.com/p/programowanie-wspolbiezne/

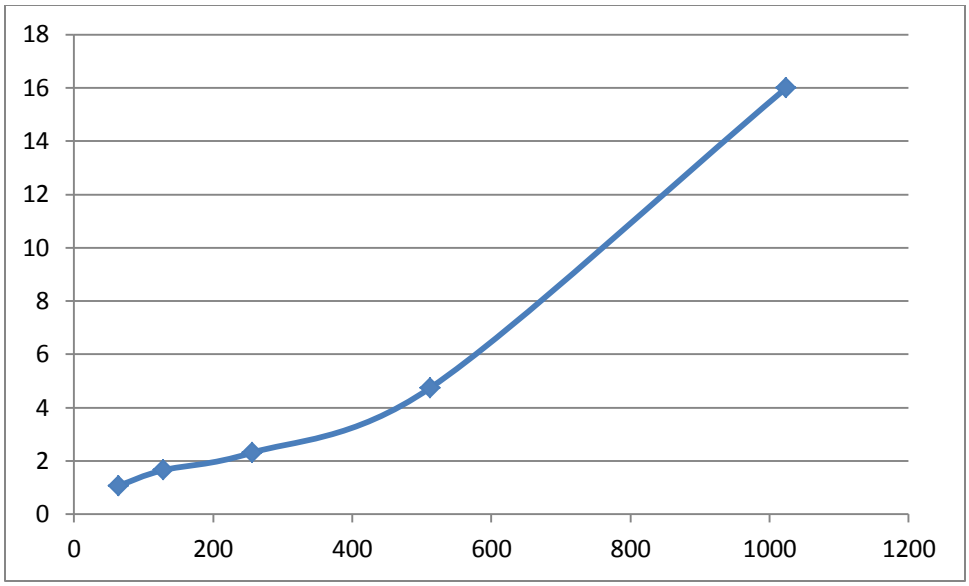
Sprawozdanie

Celem zadania było zbadanie procesu mnożenia macierzy wykorzystując architekturę rozproszoną. Do tego celu można użyć jednego klienta i kilka węzłów (ang. nodes), są one także nazywane klastrami (ang. clusters). Stosowany przeze mnie algorytm mnoży macierz o rozmiarach NxN w czasie $O(n^3)$. Następnie wykorzystuje macierz wynikową do przemnożenia przez ostatnią macierz C o tym samym rozmiarze co również skutkuje przeprowadzeniem n^3 operacji.

Za n przyjmujemy 1024 mnożenia i 1023 dodania. Zatem do n^3 operacji w jednym procesie na jednym wątku program napisany w języku Java potrzebował jedynie 3 sekund. Jeśli natomiast do rozwiązania problemu użyliśmy interfejsu gniazd, dwa procesy, które wymieniały sie informacjami wymagały 16 sekund. Dodatkowy narzut był spowodowany użyciem dwóch procesów, które obciążały procesor. Wydajność spadała, a dodatkowo scheduler musiał się przełączać pomiędzy każdym z nich. Poza tym rozmiar bufora w potoku wynosił jedynie 65 kB, zatem procesor musiał wykonać dodatkowe czynności, aby przepychać dane w tzw. paczkach. W przypadku jednego procesu nie ma bufora, a proces ma bezpośredni i nieograniczony dostęp do pamięci operacyjnej. Te oraz wiele innych powodów, między innymi użycie nietypowych bibliotek np. ObjectOutpuStream, bardzo spowolniło uzyskanie wyniku. Szczegóły z przebiegu obu wersji programu zostały zamieszczone poniżej w sekcji: Profiling. Dla wersji implementującej interfejs gniazd warto nadmienić, że dane nie były przesyłane przez kartę sieciową tylko przez wewnętrzny loopback dla localhost pod adresem 127.0.0.1:4444.

Poniżej zamieszczam czasy wykonywania obliczeń dla różnych rozmiarów macierzy (N), dla jednego klienta i jednego węzła obliczeniowego. Na osi X zaznaczono rozmiar macierzy N. Na osi Y zaznaczono czas wykonania zadania w sekundach.

N (rozmiar macierzy)	Czas (sekundy)
64	1.07
128	1.65
256	2.31
512	4.74
1024	16.81

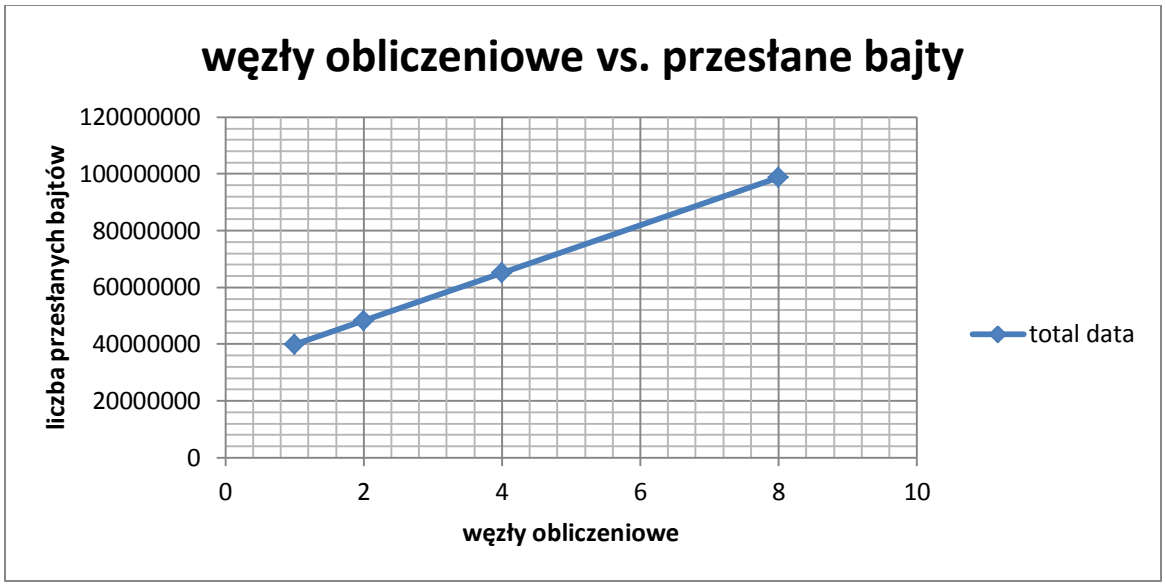


Aby skrócić czas obliczeń należało zmniejszyć rozmiar przesyłanych informacji. Najprostszym rozwiązaniem okazało się podzielenie macierzy A na wiersze i wysłanie do węzła tylko niezbędnej ilości informacji. Przykładowo jeśli mamy 4 węzły obliczeniowe wystarczy wysłać 256 wierszy do każdego węzła. Jeśli chodzi o macierz B, należało wysłać wszystkie wiersze i kolumny, aby dało się uzyskać sensowny wynik. Gdybyśmy wysłali mniej kolumn, wtedy nie udało by nam się uzyskać wyników mnożenia dla pełnej linii, i musielibyśmy zduplikować wysłanie danych do kolejnych węzłów. Byłoby to bardzo nieefektywne rozwiązanie, gdyż staramy się ograniczyć transfer do minimum. Poniżej zamieszczono dane wielkości przesyłanych żądań i odpowiedzi w bajtach:

Rozmiar macierzy N	**1 węzeł**		**2 węzły**		**4 węzły**		**8 węzłów**	
	request	response	request	reponse	request	reponse	request	reponse
1024	16818438 16.0 MB	23068910 22.0 MB	12613894 12.03 MB	11534574 11.00 MB	10511622 10.02 MB	5767406 5.50 MB	9460486 9.02 MB	2883822 2.75 MB

Po przemnożeniu wysłanych informacji w bajtach przez liczbę węzłów obliczeniowych otrzymujemy całkowitę liczbę przesłanych danych:

nodes	request	sent to node	response	sent to client	total data
1	16818438	16818438	23068910	23068910	39887348
2	12613894	25227788	11534574	23069148	48296936
4	10511622	42046488	5767406	23069624	65116112
8	9460486	75683888	2883822	23070576	98754464



Wszystkie operacje należy pomnożyć przez 2 ponieważ wysyłanie odbywa się drugi raz dla kolejnej macierzy.

Sprawność obliczyliśmy ze wzoru poniżej. Do obliczeń założyliśmy, że nasz program utworzy jednego klienta oraz k liczbę węzłów obliczeniowych. Jak łatwo zauważyć w sumie węzeł obliczeniowy musi wykonać ((1024*(1024 mnożenia +1023 dodania))*1024/k operacji na liczbach zmienno przecinkowych typu double. Dodatkowo w zależności od liczby węzłów to (1024*1024)+(1024*k) operacje wejścia/wyjścia.

Przykładowo dla k=1

ω(n) = 1024*1024*(1024+1023) = 2146435072 operacji obliczeniowych, ponieważ tyle jest operacji wewnątrz węzła obliczeniowego.

h(n,p) = (1024*1024)*2 = 2097152 operacji we/wy ponieważ tylko tyle liczb należy przesłać.

Stosunek liczby operacji obliczeniowych (2146435072) do liczby operacji we/wy (2097152) wynosi 0.000977

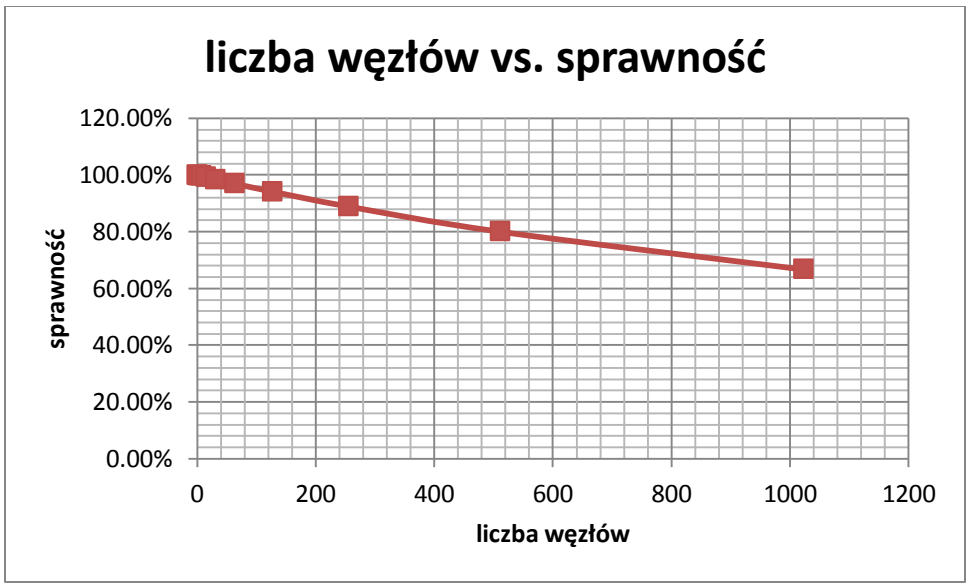
Zatem:

$$\eta(n,p) = \frac{\omega(n)}{\omega(n) + h(n,p)} = \frac{2146435072}{2146435072 + 2097152} = \frac{2146435072}{2148532224} = 99{,}90\%$$

Niestety jednak sprawność powoli spada wraz z liczbą węzłów, gdyż wzrasta liczba przesyłanych danych. Zatem dla 1024 węzłów będzie już tylko 66%.

węzły	liczba operacji dla jednego węzła	łączna liczba operacji	liczba I/O dla jednego węzła	I/O	sprawność	%
1	2146435072	2146435072	2097152	2097152	0.999023914	99.90%
2	1073217536	2146435072	1572864	3145728	0.998536585	99.85%
4	536608768	2146435072	1310720	5242880	0.997563353	99.76%
8	268304384	2146435072	1179648	9437184	0.995622568	99.56%
16	134152192	2146435072	1114112	17825792	0.991763566	99.18%
32	67076096	2146435072	1081344	34603008	0.984134615	98.41%
64	33538048	2146435072	1064960	68157440	0.969223485	96.92%
128	16769024	2146435072	1056768	135266304	0.940716912	94.07%
256	8384512	2146435072	1052672	269484032	0.888454861	88.85%
512	4192256	2146435072	1050624	537919488	0.799609375	79.96%
1024	2096128	2146435072	1049600	1074790400	0.666341146	66.63%

Powyższa zależność przedstawiona na wykresie:



Wnioski

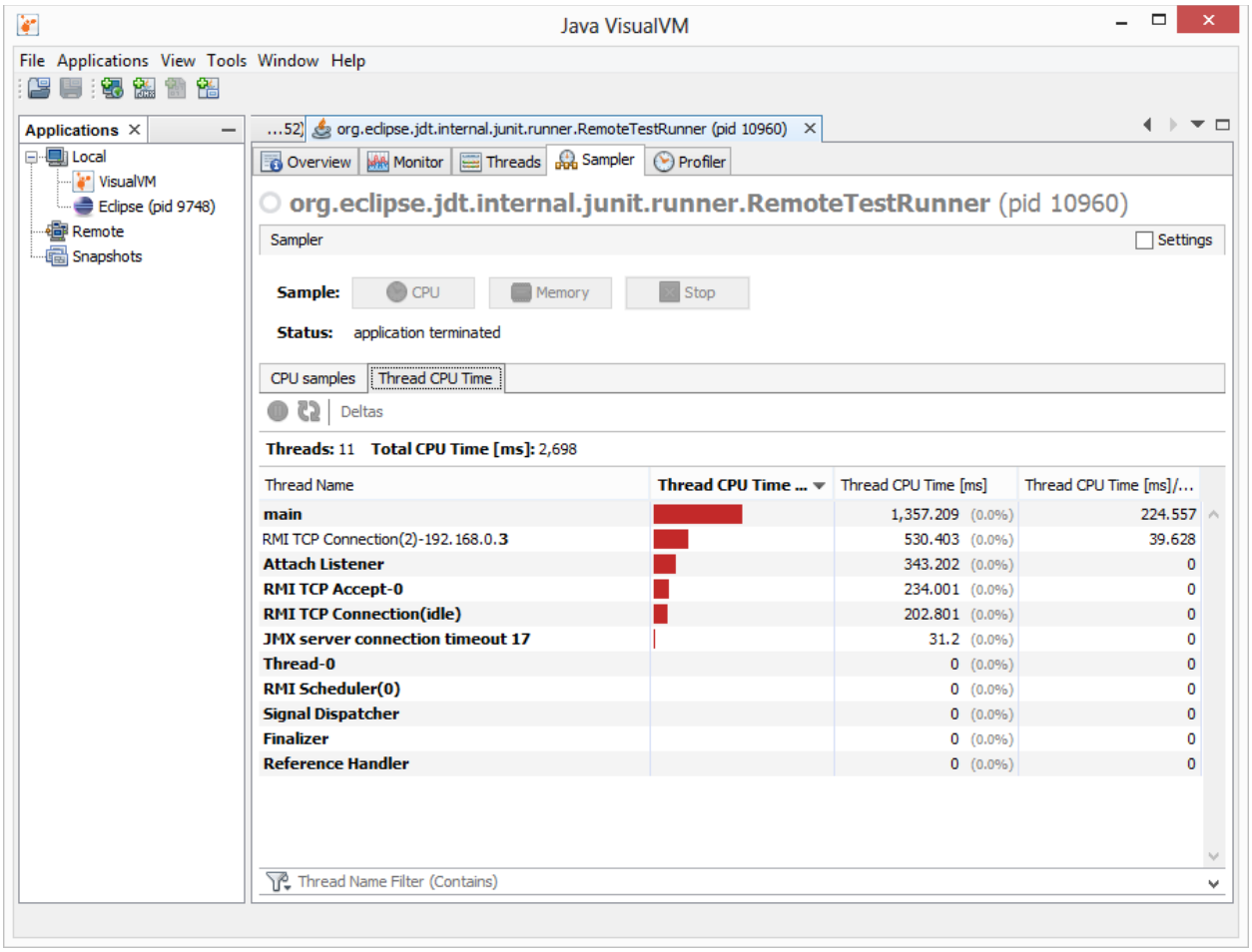
Sprawność programu mnożącego macierze jest niesamowicie duża, jednak w tym równaniu nie uwzględniono czasu jaki jest potrzebny do przesłania tak dużej liczby informacji. W tym wypadku jest to czas z jakim mierzą się rejestry procesora o częstotliwości 2 GHz z czasem przetwarzania w protokole TCP/IP. Jeśli założymy, że mnożenie wykonuje się w jednym cyklu zegara będzie to 2 miliardy operacji mnożenia/dodawania na sekundę vs. osiągnięte przez nas 35 MB/s (35 milionów bajtów procesor odczyta/przetworzy w ciągu sekundy) podczas odczytu z gniazda w naszym programie. Jest to 2000000000:35000000 = 1:57

Oznacza to, że sprawność będzie około 57 razy mniejsza niż przewidziało równanie. Poza tym podane przez nas wartości są graniczne i nie mogą być w praktyce zrealizowane z wielu powodów. Są jeszcze opóźnienia w protokole TCP/IP związane z nawiązywaniem połączenia, przesyłaniem ramek, nagłówków IP. Dodatkowo dochodzi narzut systemu operacyjnego, który przydziela zasoby i zarządza potokami, wirtualna maszyna Javy oraz sposób skompilowania programu. Zaprezentowany przez nas model jest mocno abstrakcyjny i może być jedynie użyty do celów edukacyjnych.

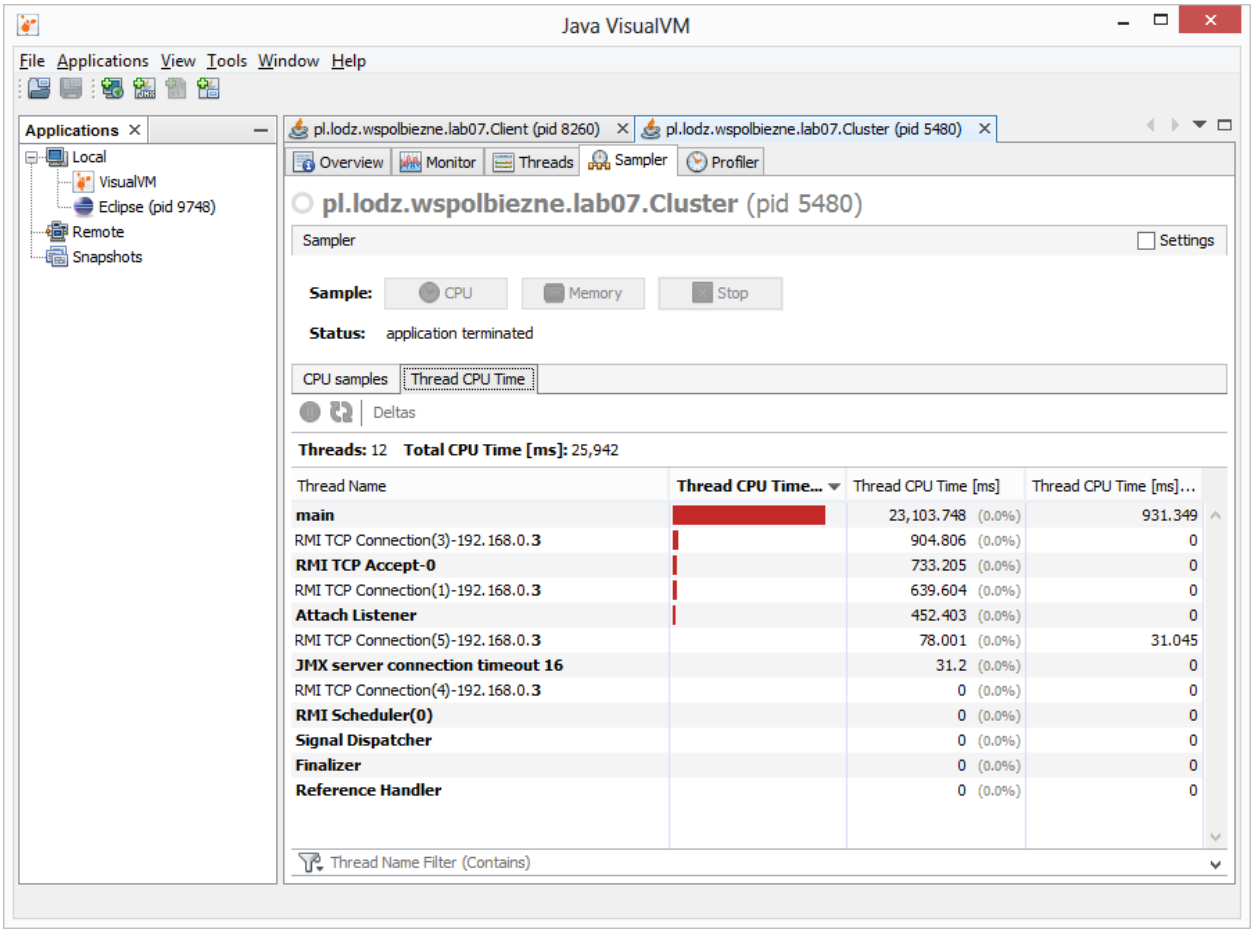
Profiling

Poniżej zamieszczam zrzuty ekranu z obserwacji dokonanych profilerem JVisualVM dla obu wersji programu: dla wersji jednoprocesowej i dla wersji wieloprocesowej z użyciem interfejsu gniazd.

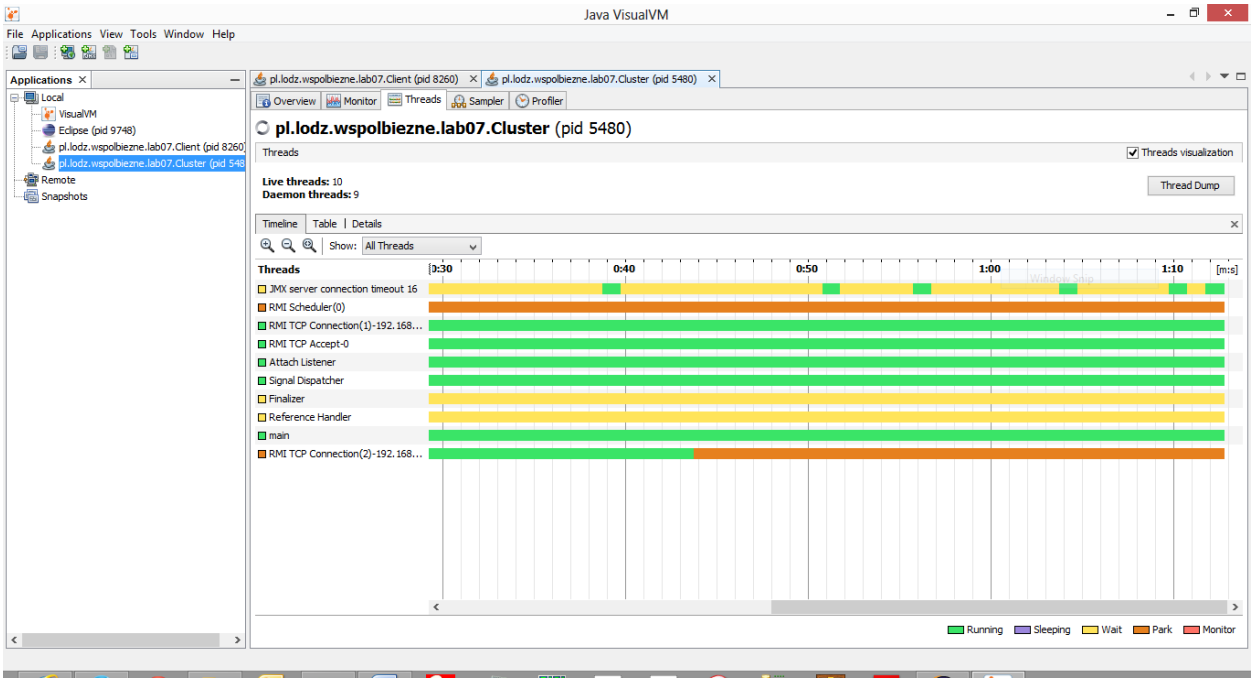
Przy jednoprocesowym mnożeniu macierzy, kompilator stworzył 11 wątków:



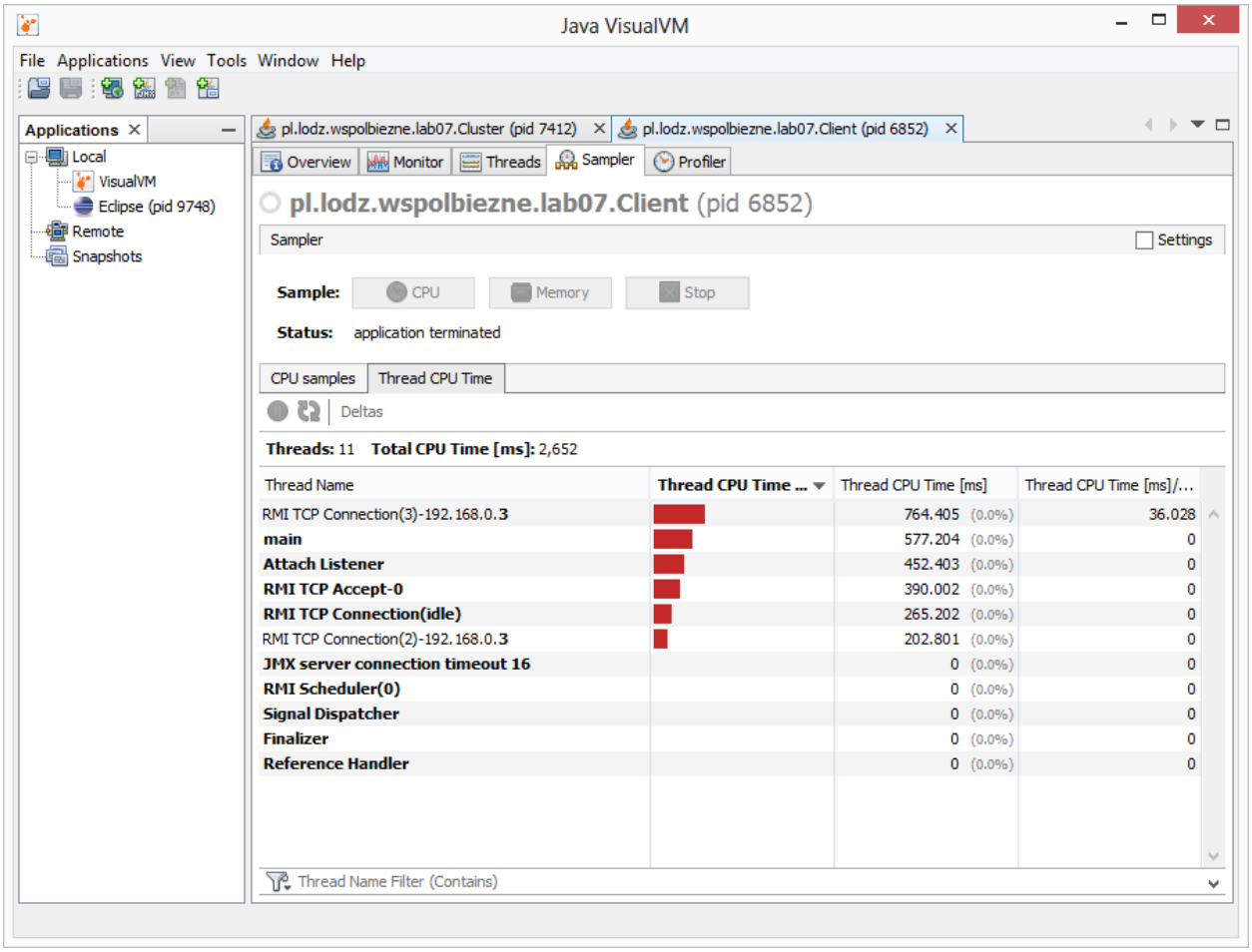
Przy użyciu interfejsu gniazd kompilator stworzył 12 wątków dla węzła obliczeniowego:



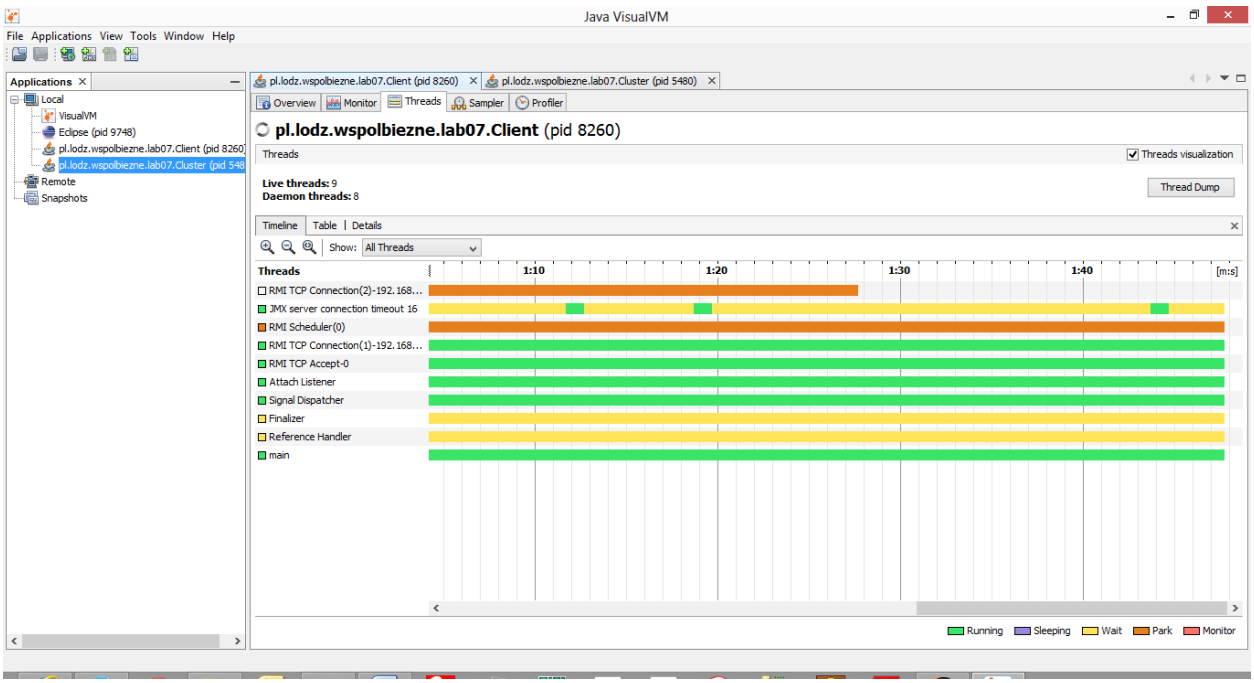
Threads:



I 11 wątków dla klienta:



Threads:



Kod programu:

```
public class Client {

    public static void main(String[] args) {
        new Client("localhost", 4444);
    }

    private final int LICZBA_PROCESORÓW = 1;
    private final int N = 1024;
    private Logger logger;
    private long start;
    private ObjectInputStream ois;
    private ObjectOutputStream oos;

    // NIESTETY JAVA NIE JEST TAKA SPRYTNA I MUSZĘ POWTÓRZYĆ TO TRZY RAZY,
    // ABY KOMPILATOR PRZYPISAŁ INNE ADRESY
    private double[][] A = new double[N][N];
    private double[][] B = new double[N][N];
    private double[][] C = new double[N][N];

    public Client(String hostName, int portNumber) {
        start = System.currentTimeMillis();
        logger = Obliczenia.getCustomLogger();
        logger.info("Connecting to server at port: " + portNumber + " ...");
        for (int i = 0; i < N; i++) {
            A[i] = new Random().doubles(N).toArray();
            B[i] = new Random().doubles(N).toArray();
            C[i] = new Random().doubles(N).toArray();
        }
        try {
            Socket kkSocket = new Socket(hostName, portNumber);
            int receiveBufferSize = kkSocket.getReceiveBufferSize();
            logger.info("Rozmiar bufora: ("
                    + receiveBufferSize
                    + " bytes) ("
                    + Obliczenia.humanReadableByteCount(receiveBufferSize,
                            false) + ")");
            dispatch(kkSocket);
            logger.info("Zakończono obliczanie.");
            System.out.println("Całkowity czas wykonania: "
                    + (double) ((double)(System.currentTimeMillis() - start) /
                    1000.00)
                    + " sekund.");
        } catch (UnknownHostException e) {
            logger.severe("Don't know about host " + hostName);
            System.exit(1);
        } catch (StreamCorruptedException e) {
            logger.severe("This constructor will block until the corresponding"
                    + " ObjectOutputStream has written and flushed the header.");
            logger.severe(e.getMessage());
            System.exit(1);
        } catch (IOException e) {
            logger.severe("Couldn't get I/O for the connection to " + hostName);
            logger.severe(e.getMessage());
            System.exit(1);
        } catch (ClassNotFoundException e) {
```

```
            logger.severe("Źle skastowany typ int[][][] / double[][][]");
            System.exit(1);
        }
    }

    @SuppressWarnings("unused")
    private void dispatch(Socket kkSocket) throws IOException,
            ClassNotFoundException {

        InputStream inputStream = kkSocket.getInputStream();
        BufferedInputStream bufferedIn = new BufferedInputStream(inputStream,
                kkSocket.getReceiveBufferSize());

        OutputStream outputStream = kkSocket.getOutputStream();
        BufferedOutputStream bufferedOut = new BufferedOutputStream(
                outputStream, kkSocket.getSendBufferSize());

        logger.info("Trwa mnożenie macierzy AxB");
        Obliczenia obliczenia = new Obliczenia(A, B);
        double[][] AB = multiply(bufferedIn, bufferedOut, obliczenia);

        logger.info("Trwa mnożenie macierzy ABxC");
        obliczenia = new Obliczenia(AB, C);
        double[][] ABC = multiply(bufferedIn, bufferedOut, obliczenia);

        ois.close();
        oos.close();
        kkSocket.close();

        if (N <= 8) {
            System.out.println(Obliczenia.toString(ABC));
        }
    }

    private double[][] multiply(BufferedInputStream bis,
            BufferedOutputStream bos, Obliczenia obliczenia)
            throws IOException, ClassNotFoundException {

        if (oos == null) {
            oos = new ObjectOutputStream(bos);
        }

        for (int proces = 0; proces < LICZBA_PROCESORÓW; proces++) {
            int start = getBeginningOfInterval(proces, LICZBA_PROCESORÓW);
            int end = getEndOfInterval(proces, LICZBA_PROCESORÓW);
            MacierzeDto C = obliczenia.getBlock(start, end);
            Logger.getGlobal().info("Trwa wysyłka bloku nr " + proces);
            long startTime = System.currentTimeMillis();

            oos.writeObject(C);
            oos.flush();

            int sizeOfC = Obliczenia.sizeOf(C);
            long duration = System.currentTimeMillis() - startTime;
            logger.info("Zakończono przesyłanie bloku nr " + proces + " ("
                    + Obliczenia.humanReadableByteCount(sizeOfC, false) + ")");
            long speed = (long) (sizeOfC / (duration / 1000d));
            logger.info("Write speed: " + sizeOfC + " bytes in " + duration
```

```
                    + "ms");
            logger.info("Write speed: "
                    + Obliczenia.humanReadableByteCount(speed, false) + "/s");
        }

        if (ois == null) {
            ois = new ObjectInputStream(bis);
        }

        ResultDto macierze;
        double[][] AB = new double[N][N];
        int i = LICZBA_PROCESORÓW;
        int size;
        while (true) {
            if (bis.available() != 0) {
                logger.info("Stream available");
                long startTime = System.currentTimeMillis();
                if ((macierze = (ResultDto) ois.readUnshared()) != null) {
                    size = Obliczenia.sizeOf(macierze);
                    logger.info("Trwa odbieranie "
                            + Obliczenia.humanReadableByteCount(size, false));
                    long duration = System.currentTimeMillis() - startTime;
                    long speed = (long) (size / (duration / 1000d));
                    logger.info("Read speed: " + size + " bytes in " + duration
                            + "ms");
                    logger.info("Read speed: "
                            + Obliczenia.humanReadableByteCount(speed, false)
                            + "/s");
                    obliczenia.merge(macierze, AB);
                    if (--i == 0)
                        break;
                }
            }
        }
        return AB;
    }

    public int getBeginningOfInterval(int interval, int totalIntervals) {
        if (totalIntervals <= interval) {
            throw new IllegalArgumentException(
                    "Przedział nie może być większy niż: " + totalIntervals
                            + " a podano: " + interval);
        }
        double fraction = (double) interval / (double) totalIntervals;
        return (int) (fraction * N);
    }

    public int getEndOfInterval(int interval, int totalIntervals) {
        if (totalIntervals <= interval) {
            throw new IllegalArgumentException(
                    "Przedział nie może być większy niż: " + totalIntervals
                            + " a podano: " + interval);
        }
        double rozmiarPrzedzialu = (double) N / (double) totalIntervals;
        double fraction = (double) interval / (double) totalIntervals;
        return (int) ((fraction * N) + rozmiarPrzedzialu);
    }
}
```

```java
public class Cluster {
    Logger logger;

    public static void main(String[] args) {
        new Cluster(4444);
    }

    public Cluster(int portNumber) {
        logger = Obliczenia.getCustomLogger();
        logger.info("Server started at 127.0.0.1:" + portNumber);
        try {
            ServerSocket serverSocket = new ServerSocket(portNumber);
            Socket clientSocket = serverSocket.accept();

            processInput(clientSocket);
            serverSocket.close();
            logger.info("Connection closed");

        } catch (IOException e) {
            logger.severe("Exception caught when trying to listen on port "
                    + portNumber + " or listening for a connection");
            logger.severe(e.getMessage());
            System.exit(1);
        } catch (ClassNotFoundException e) {
            logger.severe("Źle skastowany typ int[][][] / double[][][]");
            System.exit(1);
        }
    }

    private void processInput(Socket kkSocket) throws IOException,
            ClassNotFoundException {
        int receiveBufferSize = kkSocket.getReceiveBufferSize();
        logger.info("Rozmiar bufora: (" + receiveBufferSize + " bytes) ("
                + Obliczenia.humanReadableByteCount(receiveBufferSize, false)
                + ")");
        OutputStream outputStream = kkSocket.getOutputStream();
        BufferedOutputStream bufferedOut = new BufferedOutputStream(
                outputStream, kkSocket.getSendBufferSize());
        ObjectOutputStream oos = new ObjectOutputStream(bufferedOut);

        InputStream inputStream = kkSocket.getInputStream();
        BufferedInputStream bufferedIn = new BufferedInputStream(inputStream,
                kkSocket.getReceiveBufferSize());
        ObjectInputStream ois = new ObjectInputStream(bufferedIn);

        if (inputStream.markSupported()) {
            logger.info("mark supported");
        } else {
            logger.severe("mark not supported");
        }

        MacierzeDto macierze;
        long uptime = System.currentTimeMillis();
        while (true) {
            long startTime2 = System.currentTimeMillis();
            if (inputStream.available() != 0) {
                uptime = System.currentTimeMillis();
                if ((macierze = (MacierzeDto) ois.readUnshared()) != null) {
```

```
                    long size2 = Obliczenia.sizeOf(macierze);
                    logger.info("Przyjęto macierz do obliczenia");
                    logger.info("Trwa odbieranie "
                            + Obliczenia.humanReadableByteCount(size2, false));
                    long duration2 = System.currentTimeMillis() - startTime2;
                    long speed2 = (long) (size2 / (duration2 / 1000d));
                    logger.info("Read speed: " + size2 + " bytes in "
                            + duration2 + "ms");
                    logger.info("Read speed: "
                            + Obliczenia.humanReadableByteCount(speed2, false)
                            + "/s");
                    long liczenieDuration = System.currentTimeMillis();
                    Obliczenia obliczenia = new Obliczenia();
                    ResultDto result = obliczenia.processInput(macierze);
                    logger.info("Czas mnożenia macierzy: "
                            + (System.currentTimeMillis() - liczenieDuration)
                            + "ms");
                    long startTime = System.currentTimeMillis();
                    int sizeOfResult = Obliczenia.sizeOf(result);
                    logger.info("Trwa wysyłanie obliczeń ("
                            + sizeOfResult
                            + " bytes)"
                            + " ("
                            + Obliczenia.humanReadableByteCount(sizeOfResult,
                                    false) + ")");
                    oos.writeObject(result);
                    oos.flush();
                    long duration = System.currentTimeMillis() - startTime;
                    long speed = (long) ((long) sizeOfResult / (duration / 1000d));
                    logger.info("Write speed: " + sizeOfResult + " bytes in "
                            + duration + "ms");
                    logger.info("Write speed: "
                            + Obliczenia.humanReadableByteCount(speed, false)
                            + "/s");
                }
            }
            int timeout = 20_000;
            if (System.currentTimeMillis() - uptime > timeout) {
                ois.close();
                oos.close();
                kkSocket.close();
                logger.info("Nastąpił timeout: " + timeout / 1000 + "s");
                break;
            }
        }
    }
}

public class Obliczenia {
    private Logger logger = Logger.getGlobal();

    private int N;
    private double[][] A, B;

    public Obliczenia(double[][] A, double[][] B) {
        if (!(A.length == A[0].length && A[0].length == B.length
                        && B.length == B[0].length)) {
            throw new RuntimeException("Rozmiar macierzy ma być taki sam.");
```

```
    }
    N = A.length;
    this.A = A;
    this.B = B;
}

public Obliczenia() {

}

public MacierzeDto getBlock(int start, int end) {
    MacierzeDto D = new MacierzeDto();

    int l = end - start;
    List<Zbiór> rows = new ArrayList<>(N);
    List<Zbiór> columns = new ArrayList<>(l);

    for (int j = 0; j < l; j++) {
        Zbiór z1 = new Zbiór();
        z1.setIndex(start + j);
        List<Double> values1 = new ArrayList<>(N);
        for (int i = 0; i < N; i++) {
            values1.add(B[start + j][i]);
        }
        z1.setValues(values1);
        rows.add(z1);
    }
    for (int j = 0; j < N; j++) {
        Zbiór z2 = new Zbiór();
        z2.setIndex(j);
        double[] values2 = new double[N];
        for (int i = 0; i < N; i++) {
            values2[i] = (A[i][j]);
        }
        z2.setValues(values2);
        columns.add(z2);
    }
    D.setColumns(columns);
    D.setRows(rows);
    return D;
}

public int multiply(int[] row, int[] col) {
    int sum = 0;
    for (int i = 0; i < N; i++) {
        sum += row[i] * col[i];
    }
    return sum;
}

public int[][] processInput(int[][] rows, int[][] columns) {
    int[][] C = new int[rows.length][columns.length];
    for (int i = 0; i < rows.length; i++) {
        for (int j = 0; j < columns.length; j++) {
            C[i][j] = multiply(rows[i], columns[i]);
        }
    }
    return C;
```

```
}

public ResultDto processInput(MacierzeDto macierze) {
    ResultDto result = new ResultDto();
    int liczbaKolumn = macierze.getColumns().length;
    int liczbaWierszy = macierze.getRows().length;
    List<Element> elements = new ArrayList<>(liczbaKolumn * liczbaWierszy);
    int x = 0;
    for (int i = 0; i < liczbaKolumn; i++) {
        if ((double) i % ((double) liczbaKolumn / 10.0) < 1.0) {
            if (x != i * 100 / liczbaKolumn) {
                x = i * 100 / liczbaKolumn;
                logger.info(x + "%");
            }
        }
        for (int j = 0; j < liczbaWierszy; j++) {
            Element e = new Element();
            e.setKolumna(macierze.getColumn(i).getIndex());
            e.setWiersz(macierze.getRow(j).getIndex());
            double v = 0;
            int size = macierze.getColumn(i).getValues().length;
            for (int m = 0; m < size; m++) {
                v += macierze.getColumn(i).getValue(m)
                        * macierze.getRow(j).getValue(m);
            }
            e.setWartość(v);
            elements.add(e);
        }
    }
    result.setElements(elements);
    return result;
}

public void mergeInverted(ResultDto result, double[][] ab) {
    for (Element e : result.getElements()) {
        ab[e.getKolumna()][e.getWiersz()] = e.getWartość();
    }
}

public void merge(ResultDto result, double[][] ab) {
    for (Element e : result.getElements()) {
        ab[e.getWiersz()][e.getKolumna()] = e.getWartość();
    }
}

public static int sizeOf(Object obj) throws IOException {

    ByteArrayOutputStream byteOutputStream = new ByteArrayOutputStream();
    ObjectOutputStream objectOutputStream = new ObjectOutputStream(
            byteOutputStream);

    objectOutputStream.writeObject(obj);
    objectOutputStream.flush();
    objectOutputStream.close();

    return byteOutputStream.toByteArray().length;
}
```

```java
    public static String humanReadableByteCount(long bytes, boolean si) {
        int unit = si ? 1000 : 1024;
        if (bytes < unit)
            return bytes + " B";
        int exp = (int) (Math.log(bytes) / Math.log(unit));
        String pre = (si ? "kMGTPE" : "KMGTPE").charAt(exp - 1)
                + (si ? "" : "");
        return String.format("%.1f %sB", bytes / Math.pow(unit, exp), pre);
    }
}
```