



Politechnika Wrocławska

Struktury danych
i złożoność obliczeniowa
Wykład 3.

Prof. dr hab. inż. Jan Magott

Metody konstrukcji algorytmów:

- Siłowa (ang. brute force),
- „Dziel i zwyciężaj” (ang. divide-and-conquer),
- Zachłanna (ang. greedy),
- Transformacyjna konstrukcja algorytmu,
- Programowanie dynamiczne,
- Przeszukiwanie z powrotami i metoda podziałów i ograniczeń,
- Algorytmów genetycznych.



Metoda „dziel i zwyciężaj”

Metoda „dziel i zwyciężaj”

1. Dziel: Podziel problem na podproblemy,
2. Zwyciężaj: Podproblemy rozwiąż rekurencyjnie lub bezpośrednio, jeśli są odpowiednio małe,
3. Scal: Połącz rozwiązania podproblemów w celu wyznaczenia rozwiązania problemu.



A	S	O	R	T	I	N	G	E	X	A	M	P	L	E
A	S													
		O	R											
A	O	R	S											
				I	T									
						G	N							
				G	I	N	T							
A	G	I	N	O	R	S	T							
								E	X					
										A	M			
								A	E	M	X			
												L	P	
												E	L	P
								A	E	E	L	M	P	X
A	A	E	E	G	I	L	M	N	O	P	R	S	T	X

n - liczba
elementów,
 $\lceil n/2 \rceil$ ($\lfloor n/2 \rfloor$) -
liczba
elementów
lewej (prawej)
części

Źródło:
[R. Sedgewick,
Algorithms,
Second Edition,
Addison-Wesley,
1988.]



Metoda „dziel i zwyciężaj”

n - liczba elementów,

Uzasadnienie formuł:

$\lceil n/2 \rceil$ ($\lfloor n/2 \rfloor$) - liczba elementów lewej (prawej) części,

n parzyste czyli $n = 2k$, $k \in N_+$,

$$\lceil 2k/2 \rceil = k = \lfloor 2k/2 \rfloor$$

n nieparzyste czyli $n = 2k + 1$, $k \in N_+$,

$$\lceil \frac{2k+1}{2} \rceil = k+1, \quad \lfloor \frac{2k+1}{2} \rfloor = k$$



MERGE(A, p, q, r)

```
1   $n_1 \leftarrow q - p + 1$ 
2   $n_2 \leftarrow r - q$ 
3  utwórz tablice  $L[1..n_1 + 1]$  i  $R[1..n_2 + 1]$ 
4  for  $i \leftarrow 1$  to  $n_1$ 
5      do  $L[i] \leftarrow A[p + i - 1]$ 
6  for  $j \leftarrow 1$  to  $n_2$ 
7      do  $R[j] \leftarrow A[q + j]$ 
8   $L[n_1 + 1] \leftarrow \infty$ 
9   $R[n_2 + 1] \leftarrow \infty$ 
10  $i \leftarrow 1$ 
11  $j \leftarrow 1$ 
12 for  $k \leftarrow p$  to  $r$ 
13     do if  $L[i] \leq R[j]$ 
14         then  $A[k] \leftarrow L[i]$ 
15              $i \leftarrow i + 1$ 
16         else  $A[k] \leftarrow R[j]$ 
17              $j \leftarrow j + 1$ 
```

Tablice $A[p..q]$ i $A[q + 1..r]$ są posortowane,
 ∞ jest wartownikiem większym od każdego z elementów tablicy A ,
MERGE scala powyższe tablice w posortowaną tablicę $A[p..r]$.

Złożoność czasowa $\Theta(n)$,
gdzie $n = r - p + 1$.

Źródło: [CLRS, Wprowadzenie do algorytmów]

Metoda „dziel i zwyciężaj”

```
 $i \leftarrow 1$   
 $j \leftarrow 1$   
for  $k \leftarrow p$  to  $r$   
  do if  $L[i] \leq R[j]$   
    then  $A[k] \leftarrow L[i]$   
       $i \leftarrow i + 1$   
    else  $A[k] \leftarrow R[j]$   
       $j \leftarrow j + 1$ 
```

Niezmiennik pętli:

Przed wykonaniem pętli dla k , tablica $A[p..k - 1]$ zawiera $k - p$ najmniejszych elementów tablic $L[1..n_1 + 1]$ i $R[1..n_2 + 1]$ będących posortowanymi.

$L[i]$, $R[j]$ są najmniejszymi elementami tablic L , R , które jeszcze nie zostały skopiowane do tablicy A .

Metoda „dziel i zwyciężaj”

MERGE-SORT(A, p, r)

1 **if** $p < r$

2 **then** $q \leftarrow \lfloor (p + r)/2 \rfloor$

3 MERGE-SORT(A, p, q)

4 MERGE-SORT($A, q + 1, r$)

5 MERGE(A, p, q, r)

Dziel

Zwyciężaj

Scal

Źródło: [CLRS, Wprowadzenie do algorytmów]



Metoda „dziel i zwyciężaj”

 $T(i)$

MERGE-SORT(A, p, r)

1 **if** $p < r$

2 **then** $q \leftarrow \lfloor (p + r)/2 \rfloor$

3 MERGE-SORT(A, p, q)

4 MERGE-SORT($A, q + 1, r$)

5 MERGE(A, p, q, r)

Dziel

$\Theta(1)$

Zwyciężaj

$2 \cdot T(i/2)$

Scal

$\Theta(i)$

$T(i)$ – czas sortowania i elementów, gdy $1 < i$

$$T(i) = 2 \cdot T(i/2) + \Theta(i)$$

Metoda „dziel i zwyciężaj”

 $T(1)$

MERGE-SORT(A, p, r)

1 **if** $p < r$

2 **then** $q \leftarrow \lfloor (p + r)/2 \rfloor$

3 MERGE-SORT(A, p, q)

4 MERGE-SORT($A, q + 1, r$)

5 MERGE(A, p, q, r)

Dziel

$\Theta(1)$

$T(1)$ – czas sortowania i elementów, gdy $1 = i$

$$T(1) = \Theta(1)$$



Metoda „dziel i zwyciężaj”

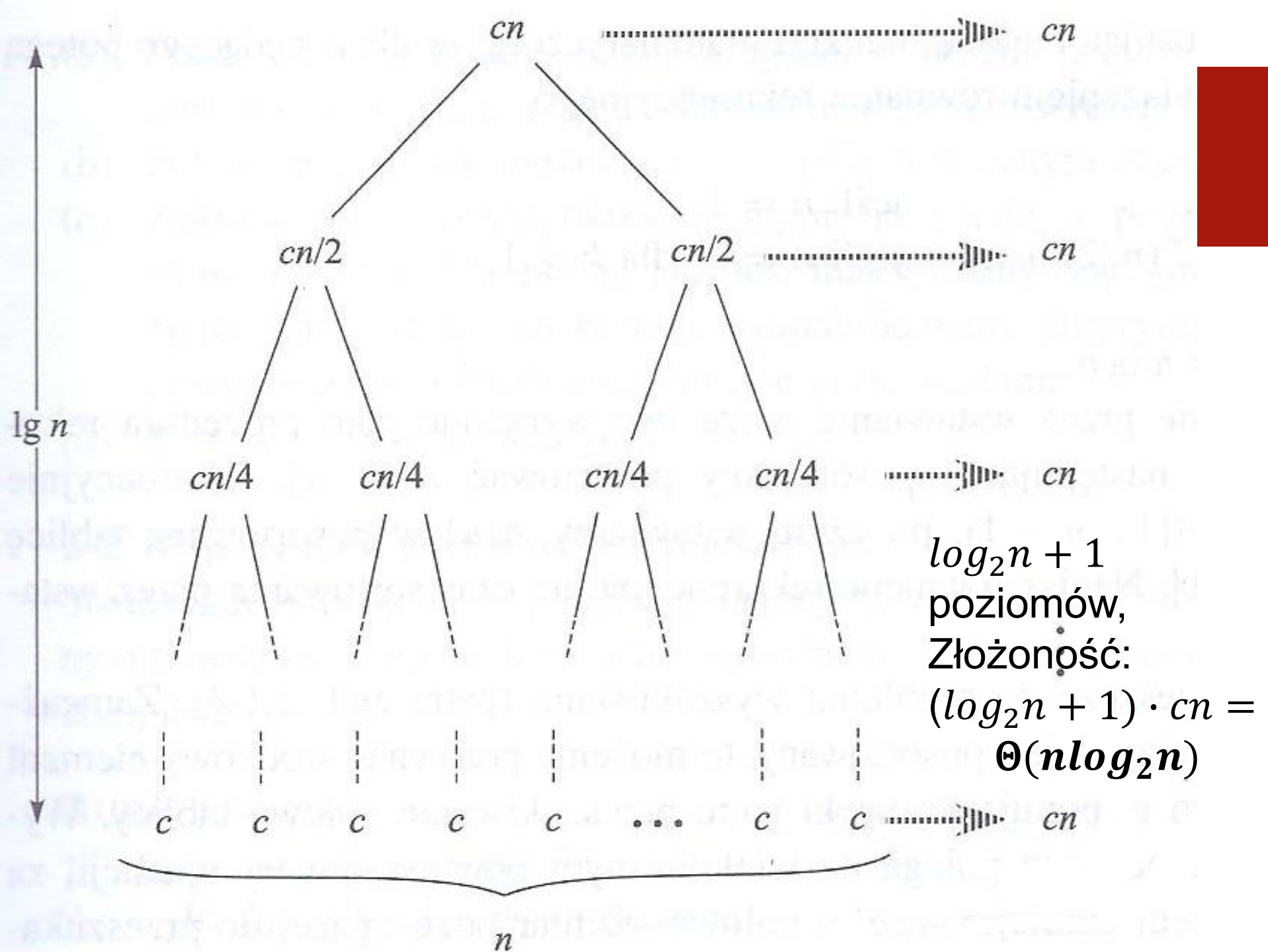
$$T(i) = \begin{cases} \Theta(1) & \text{jeśli } i = 1 \\ 2 \cdot T\left(\frac{i}{2}\right) + \Theta(i) & \text{jeśli } i > 1 \end{cases}$$

$$T(i) = \begin{cases} c & \text{jeśli } i = 1 \\ 2 \cdot T\left(\frac{i}{2}\right) + c \cdot i & \text{jeśli } i > 1 \end{cases}$$

Metoda „dziel i zwyciężaj”

$$T(i) = \begin{cases} c & \text{jeśli } i = 1 \\ 2 \cdot T\left(\frac{i}{2}\right) + c \cdot i & \text{jeśli } i > 1 \end{cases}$$

$$\begin{array}{ccc} T(i) & = & c \cdot i \\ i > 1 & & \swarrow \quad \searrow \\ & & T\left(\frac{i}{2}\right) \quad T\left(\frac{i}{2}\right) \end{array}$$





Metoda zachłanna

Dyskretny problem plecakowy - wersja decyzyjna

Dane:

Skończony zbiór elementów $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$.

Rozmiar $s(a_i) > 0$ i waga (wartość) $w(a_i) > 0$ elementu a_i .

Pojemność plecaka $b > 0$ i stała $y > 0$.

Zadanie:

Czy istnieje podzbiór $A' \subset A$ taki, że:

$$\sum_{a_i \in A'} s(a_i) \leq b$$

$$\sum_{a_i \in A'} w(a_i) \geq y \quad ?$$



Metoda zachłanna

Dyskretny problem plecakowy - wersja optymalizacyjna

Dane:

Skończony zbiór elementów $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$.

Rozmiar $s(a_i) > 0$ i waga (wartość) $w(a_i) > 0$ elementu a_i .

Pojemność plecaka $b > 0$ i stała $y > 0$.

Zadanie:

Wyznacz podzbiór $A' \subset A$ taki, że:

$$\sum_{a_i \in A'} s(a_i) \leq b$$

$$\max \sum_{a_i \in A'} w(a_i)$$

Metoda zachłanna

Algorytm zachłanny dla wersji optymalizacyjnej

1. Dla każdego elementu $i \in \overline{1, n}$ oblicz $p_i = w(a_i)/s(a_i)$.
 $A' = \emptyset$ i $S = 0$.
2. Wyznacz sekwencję $\sigma = \langle \sigma(1), \dots, \sigma(n) \rangle$ taką, że
 $p_{\sigma(j)} \geq p_{\sigma(j+1)}$ dla $j \in \overline{1, n-1}$.
3. Dla $j \in \overline{1, n}$ wykonuj: Jeżeli $S + s(a_{\sigma(j)}) \leq b$, to
 $A' := A' \cup \{a_{\sigma(j)}\}$ i $S := S + s(a_{\sigma(j)})$.
4. Stop



Metoda zachłanna

i	$s(a_i)$	$w(a_i)$
1	1	9
2	2	8
3	6	7
4	7	10
5	1	8
6	4	7

$b=12$



Metoda zachłanna

i	$s(a_i)$	$w(a_i)$	$w(a_i)/s(a_i)$
1	1	9	9
2	2	8	4
3	6	7	1,17
4	7	10	1,43
5	1	8	8
6	4	7	1,75

$b=12$

$\sigma = < 1, 5, 2, 6, 4, 3 >$



Metoda zachłanna

$$S = \langle 1, 5, 2, 6, 4, 3 \rangle$$

$S \leftarrow 0$

Weź a_1 i sprawdź czy $S + s(a_1) \leq b$ czyli $0 + 1 \leq 12$.

Zatem $A' \leftarrow \{a_1\}$ i $S \leftarrow 1$.

Weź a_5 i sprawdź czy $S + s(a_5) \leq b$ czyli $1 + 1 \leq 12$.

Zatem $A' \leftarrow \{a_1, a_5\}$ i $S \leftarrow 2$.

Weź a_2 i sprawdź czy $S + s(a_2) \leq b$ czyli $2 + 2 \leq 12$.

Zatem $A' \leftarrow \{a_1, a_5, a_2\}$ i $S \leftarrow 4$.

Weź a_6 i sprawdź czy $S + s(a_6) \leq b$ czyli $4 + 4 \leq 12$.

Zatem $A' \leftarrow \{a_1, a_5, a_2, a_6\}$ i $S \leftarrow 8$.

Weź a_4 i sprawdź czy $S + s(a_4) \leq b$ czyli $8 + 7 \leq 12$.

Zatem $A' \leftarrow \{a_1, a_5, a_2, a_6\}$ i $S \leftarrow 8$.

Weź a_3 i sprawdź czy $S + s(a_3) \leq b$ czyli $8 + 6 \leq 12$.

Zatem $A' \leftarrow \{a_1, a_5, a_2, a_6\}$ i $S \leftarrow 8$.

Metoda zachłanna

Jaka jest złożoność obliczeniowa algorytmu?

1. Dla każdego elementu $i \in \overline{1, n}$ oblicz $p_i = w(a_i)/s(a_i)$.
 $A' \leftarrow \emptyset$ i $S \leftarrow 0$.
2. Wyznacz sekwencję $\sigma = \langle \sigma(1), \dots, \sigma(n) \rangle$ taką, że
 $p_{\sigma(j)} \geq p_{\sigma(j+1)}$ dla $j \in \overline{1, n-1}$.
3. Dla $j \in \overline{1, n}$ wykonuj: Jeżeli $S + s(a_{\sigma(j)}) \leq b$, to
 $A' \leftarrow A' \cup \{a_{\sigma(j)}\}$ i $S \leftarrow S + s(a_{\sigma(j)})$.
4. Stop

Metoda zachłanna

Jaka jest złożoność obliczeniowa algorytmu?

1. Dla każdego elementu $i \in \overline{1, n}$ oblicz $p_i = w(a_i)/s(a_i)$.
 $A' \leftarrow \emptyset$ i $S \leftarrow 0$. $O(n)$
2. Wyznacz sekwencję $\sigma = \langle \sigma(1), \dots, \sigma(n) \rangle$ taką, że
 $p_{\sigma(j)} \geq p_{\sigma(j+1)}$ dla $j \in \overline{1, n-1}$.
3. Dla $j \in \overline{1, n}$ wykonuj: Jeżeli $S + s(a_{\sigma(j)}) \leq b$, to
 $A' \leftarrow A' \cup \{a_{\sigma(j)}\}$ i $S \leftarrow S + s(a_{\sigma(j)})$.
4. Stop

Metoda zachłanna

Jaka jest złożoność obliczeniowa algorytmu?

1. Dla każdego elementu $i \in \overline{1, n}$ oblicz $p_i = w(a_i)/s(a_i)$.
 $A' \leftarrow \emptyset$ i $S \leftarrow 0$. $O(n)$
2. Wyznacz sekwencję $\sigma = \langle \sigma(1), \dots, \sigma(n) \rangle$ taką, że
 $p_{\sigma(j)} \geq p_{\sigma(j+1)}$ dla $j \in \overline{1, n-1}$. $O(n \log n)$
3. Dla $j \in \overline{1, n}$ wykonuj: Jeżeli $S + s(a_{\sigma(j)}) \leq b$, to
 $A' \leftarrow A' \cup \{a_{\sigma(j)}\}$ i $S \leftarrow S + s(a_{\sigma(j)})$.
4. Stop

Metoda zachłanna

Jaka jest złożoność obliczeniowa algorytmu?

1. Dla każdego elementu $i \in \overline{1, n}$ oblicz $p_i = w(a_i)/s(a_i)$.
 $A' \leftarrow \emptyset$ i $S \leftarrow 0$. $O(n)$
2. Wyznacz sekwencję $\sigma = \langle \sigma(1), \dots, \sigma(n) \rangle$ taką, że
 $p_{\sigma(j)} \geq p_{\sigma(j+1)}$ dla $j \in \overline{1, n-1}$. $O(n \log n)$
3. Dla $j \in \overline{1, n}$ wykonuj: Jeżeli $S + s(a_{\sigma(j)}) \leq b$, to
 $A' \leftarrow A' \cup \{a_{\sigma(j)}\}$ i $S \leftarrow S + s(a_{\sigma(j)})$. $O(n)$
4. Stop



Metoda zachłanna

Złożoność obliczeniowa algorytmu

$$O(n) + O(n \log n) + O(n) = O(n \log n)$$

Czy rozwiązanie:

$$A' = \{a_1, a_5, a_2, a_6\}$$

zajętość plecaka:

$$S = 8$$

sumaryczna wartość zapakowanych elementów:

$$\sum_{a_i \in X} w(a_i) = 9 + 8 + 8 + 7 = 32$$

jest optymalnym ?



Metoda zachłanna

i	$s(a_i)$	$w(a_i)$
1	1	9
2	2	8
3	6	7
4	7	10
5	1	8
6	4	7

$b=12$

Metoda zachłanna

Lepszym rozwiązaniem jest:

$$A' = \{a_1, a_5, a_2, a_4\}$$

zajętość plecaka:

$$S = 11$$

sumaryczna wartość zapakowanych elementów:

$$\sum_{a_i \in X} w(a_i) = 9 + 8 + 8 + 10 = 35$$



Metoda zachłanna

Ciągły problem plecakowy - wersja decyzyjna

Dane:

Skończony zbiór produktów $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$.

Rozmiar $s(a_i) \in N$ i wartość $w(a_i) \in N$ elementu a_i .

Pojemność plecaka $b > 0$ i stała $y > 0$.

Zadanie:

Czy istnieje taki zbiór wartości $x_1, x_2, \dots, x_n \in [0,1]$, że:

$$\sum_{i \in \{1, n\}} s(a_i) \cdot x_i \leq b$$

$$\sum_{i \in \{1, n\}} w(a_i) \cdot x_i \geq y \quad ?$$

Czy algorytm zachłanny oparty na $p_i = w(a_i)/s(a_i)$ da rozwiązanie?



Metoda zachłanna

Przykłady interpretacji

Dyskretny problem plecakowy

- Ładowanie sztabek złota do plecaka,
- Ładowanie bloków betonowych na platformę.

Ciągły problem plecakowy

- Ładowanie złotego piasku,
- Ładowanie substancji sypkich na platformę do przewozu materiałów różnych gatunków.



Transformacyjna konstrukcja algorytmu

Przykład 1.

Wyznaczanie najmniejszej wspólnej wielokrotnej (NWW) liczb $m, n \in \mathbb{N}$ poprzez **redukcję problemu**:

$$NWW(m, n) = (m \cdot n) / NWP(m, n)$$



Transformacyjna konstrukcja algorytmu

Przykład 2.

Startujemy od mało efektywnego (naiwnego) algorytmu i konstruujemy algorytm efektywniejszy.

Problem: Wyznaczenie pary najbliższych spośród n elementów tablicy.

- Metoda siłowa o złożoności $O(n^2)$,
- Transformacja do postaci:
 1. Wstępne sortowanie tablicy: $O(n \log n)$,
 2. Skanowanie tablicy z wyznaczaniem najmniejszej różnicy między sąsiednimi elementami: $O(n)$,Sumaryczny koszt: $O(n \log n)$.



Transformacyjna konstrukcja algorytmu

Przykłady 3.

Startujemy od mało efektywnego (naiwnego) algorytmu i konstruujemy algorytm efektywniejszy.

Problem:

Dane: Posortowane niemalejąco tablice A, B o n elementach
 $A[i], B[j] \in N$, $i, j \in \overline{1, n}$, liczba $x \in N$.

Pytanie: Czy istnieją takie $A[i], B[j]$, $i, j \in \overline{1, n}$, że:

$$A[i] + B[j] = x ?$$



Transformacyjna konstrukcja algorytmu

Problem:

Dane: Posortowane niemalejąco tablice A, B o n elementach $A[i], B[j] \in N$, $i, j \in \overline{1, n}$, liczba $x \in N$.

Pytanie: Czy istnieją takie $A[i], B[j]$, $i, j \in \overline{1, n}$, że:
 $A[i] + B[j] = x$?

Metoda siłowa

BOOLEAN EQUAL-SUM-BF(A, B, n)

for $i \leftarrow 1$ to n

for $j \leftarrow 1$ to n

do if $(A[i] + B[j] = x)$ then return true

return false

$O(n^2)$



Transformacyjna konstrukcja algorytmu

Dane: Posortowane niemalejąco tablice A, B o n elementach
 $A[i], B[j] \in N$, $i, j \in \overline{1, n}$, liczba $x \in N$.

Pytanie: Czy istnieją takie $A[i], B[j]$, $i, j \in \overline{1, n}$, że:
 $A[i] + B[j] = x$?

Efekt transformacji

BOOLEAN EQUAL-SUM-TR(A, B, n)

$i \leftarrow 1$

$j \leftarrow n$

while($i \leq n$ and $j > 0$)

do if ($A[i] + B[j] = x$) **then return true**

else if ($A[i] + B[j] < x$) **then** $i \leftarrow i + 1$

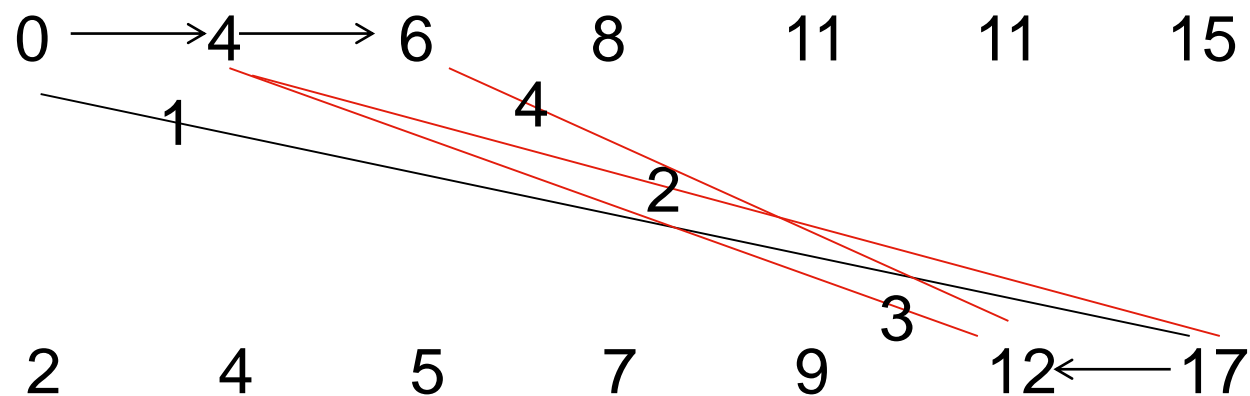
else $j \leftarrow j - 1$

return false



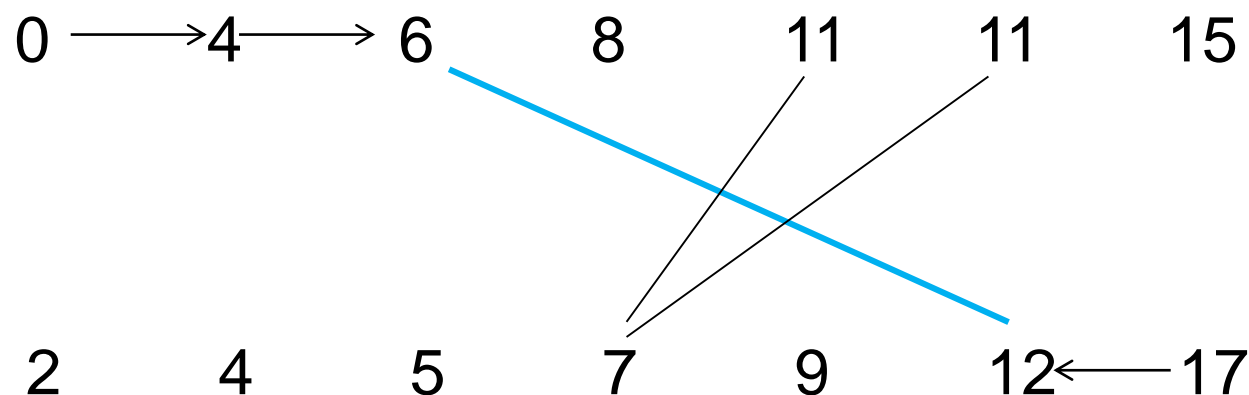
Transformacyjna konstrukcja algorytmu

$X=18$



Transformacyjna konstrukcja algorytmu

$X=18$

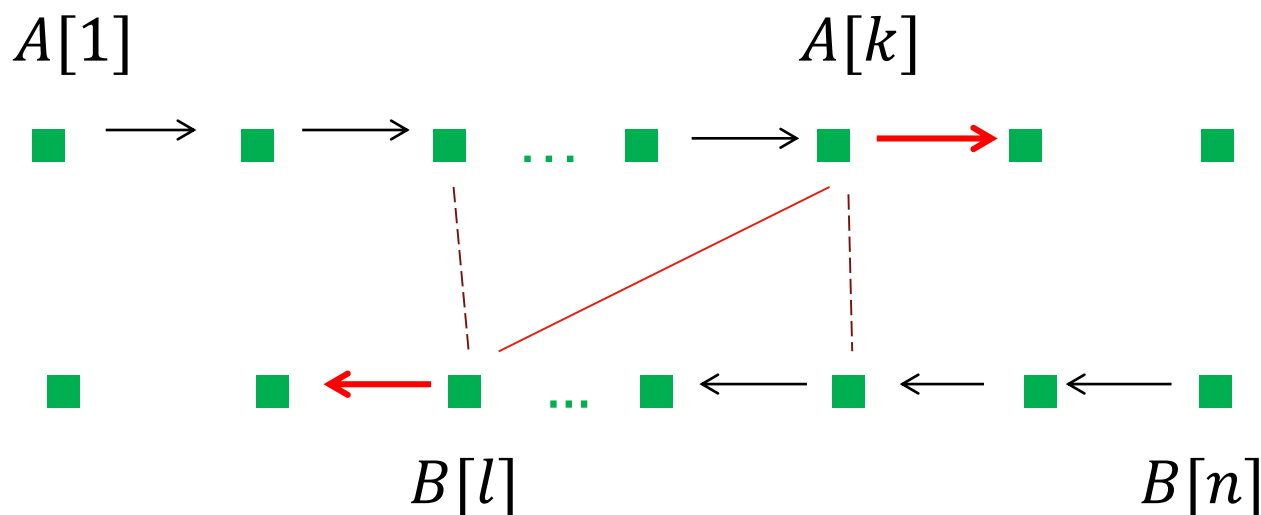


Wyróżniona para liczb $A[k], B[l]$ spełniająca wymagania:

$$k = \min\{i: (\exists j \in \overline{1, n})(A[i] + B[j] = x)\},$$

$$l = \max\{j: (\exists i \in \overline{1, n})(A[i] + B[j] = x)\}.$$

Transformacyjna konstrukcja algorytmu



Groźba pominięcia pary $A[i] + B[j] = x$

Pominięcie wyróżnionej pary gdy:

przy warunku $i < k \wedge j = l$ nastąpi $j \leftarrow l - 1$

lub

?

przy warunku $i = k \wedge l < j$ nastąpi $i \leftarrow k + 1$.



Transformacyjna konstrukcja algorytmu

Niezmiennik: Nie pominięto wyróżnionej pary tzn. $i \leq k \wedge l \leq j$.

Inicjowanie: Przed pierwszym wykonaniem pętli dla $i = 1 \wedge j = n$, wyróżniona para nie została pominięta.

Niezmienniczość: Nie pominięto wyróżnionej pary przed $(i + n - j)$ - tym wykonaniem pętli, to:

Jeśli $A[i] + B[j] = x$, tzn. $i = k, j = l$ i nastąpi wyjście z pętli z wartością **true**

albo

Jeśli $A[i] + B[j] \neq x$, to zmiana wartości zmiennych i, j nie spowoduje pominięcia wyróżnionej pary.

Kończenie: Dla $i = k, j = l$ następuje wyjście z pętli z wartością **true**.



Transformacyjna konstrukcja algorytmu

BOOLEAN EQUAL-SUM-TR(A, B, n)

$i \leftarrow 1$

$j \leftarrow n$

while($i \leq n$ and $j > 0$)

do if ($A[i] + B[j] = x$) **then return true**

else if ($A[i] + B[j] < x$) **then** $i \leftarrow i + 1$

else $j \leftarrow j - 1$

return false

$X=18$

A: 16 16 16 ... 16 17

B: 1 3 3 ... 3 3

$O(n)$