

```
(btree? (caddr t))))
```

W reprezentacji tej liście są dane symbolem `leaf`, zaś wierzchołki — czwórką, w której pierwszy element jest symbolem `node`, drugi — dowolną etykietą, zaś trzeci i czwarty — odpowiednio lewym i prawym poddrzewem.

Zdefiniuj procedurę `mirror` zwracającą „lustrzane odbicie” danego drzewa. Przykładowo,

```
(mirror '(node a (node b (node c leaf leaf) leaf) (node d leaf leaf))  
  ≡ '(node a (node d leaf leaf) (node b leaf (node c leaf leaf))))
```

#### Ćwiczenie 4.

Dla reprezentacji drzew z poprzedniego zadania zaimplementuj procedurę `flatten` zwracającą listę etykiet w kolejności infiksowej. Zadbaj o to, aby Twoja procedura nie tworzyła pomocniczych list nie będących częścią wyniku (w szczególności — nie używaj procedury `append`).

#### Ćwiczenie 5.

Zwróć uwagę że powyższa reprezentacja drzew opisuje również drzewa przeszukiwań binarnych z wykładu (tj. każde drzewo BST z wykładu jest drzewem w sensie powyższego predykatu). Użyj procedury `insert` z wykładu i procedury `flatten` żeby zaimplementować procedurę `treesort`, sortującą listę poprzez wstawienie wszystkich jej elementów do drzewa poszukiwań binarnych, a następnie spłaszczenie go z powrotem do listy.

#### Ćwiczenie 6.

Zaimplementuj procedurę `delete`, zwracającą drzewo z usuniętym danym kluczem, dla reprezentacji drzew przeszukiwań binarnych z wykładu. Wskazówka: Aby stworzyć drzewo przeszukiwań binarnych z którego usunęliśmy korzeń, najlepiej znaleźć (jeśli istnieje) najmniejszy element większy od tego korzenia.

## Zadanie domowe (na pracownię)

Kopce lewicowe (znane też jako drzewa lewicowe) to prosta i efektywna struktura danych implementująca kolejkę priorytetową (którą na wykładzie zaimplementowaliśmy używając nieefektywnej struktury listy posortowanej), zaproponowana w 1972 roku przez Clarka Crane’a i uproszczona rok później przez

Donalda Knutha. Podobnie jak w przypadku posortowanej listy, chcemy móc znaleźć najmniejszy element w stałym czasie, jednak chcemy żeby pozostałe operacje (wstawianie, usuwanie minimum i scalanie dwóch kolejek) działały szybko — czyli w czasie logarytmicznym. W tym celu, zamiast listy budujemy *drzewo binarne*, w którym wierzchołki zawierają elementy kopca wraz z wagami. Dodatkowym niezmiennikiem struktury danych, który umożliwi efektywną implementację jest to, że każdemu kopcowi przypisujemy *range*, którą jest długość „prawego kręgosłupa” (czyli ranga prawego poddrzewa zwiększona o 1 — lub zero w przypadku pustego kopca), i że w każdym poprawnie sformowanym kopcu ranga lewego poddrzewa jest nie mniejsza niż ranga prawego poddrzewa.

Pozwala to nam zdefiniować następującą implementację:

```
(define leaf 'leaf)

(define (leaf? h) (eq? 'leaf h))

(define (hnode? h)
  (and (list? h)
        (= 5 (length h))
        (eq? (car h) 'hnode)
        (natural? (caddr h))))

(define (make-node elem heap-a heap-b)
  ;; XXX: fill in the implementation
  ...)

(define (node-elem h)
  (second h))

(define (node-left h)
  (fourth h))

(define (node-right h)
  (fifth h))

(define (hord? p h)
  (or (leaf? h)
      (<= p (elem-priority (node-elem h)))))

(define (heap? h)
  (or (leaf? h)
      (and (hnode? h)
            (heap? (node-left h))
            (heap? (node-right h))
            (<= (rank (node-right h))
                (rank (node-left h)))
            (= (rank h) (inc (rank (node-right h)))))
      (hord? (elem-priority (node-elem h))
              (node-left h))
      (hord? (elem-priority (node-elem h))
              (node-right h)))))

(define (rank h)
  (if (leaf? h)
```

```
0
(third h)))
```

Liście reprezentujemy tu przez symbol `leaf`, wierzchołki zaś jako listy pięcioelementowe w której pierwszy element to symbol `hnode`, drugi to element kopca, trzeci to *ranga* danego wierzchołka (patrz `rank`), a czwarty i piąty — odpowiednio lewe i prawe poddrzewo. Predykat `heap?` sprawdza ponadto czy zachowany jest porządek kopca (używając `hord?`) i czy własność rangi opisana powyżej jest spełniona. Selektory `node-elem`, `node-left` i `node-right` są dostarczone, należy jednak zaimplementować konstruktor `make-node`. Zwróć uwagę, że nie przyjmuje on rangi tworzonego kopca, ale musi ją wyliczyć. Oznacza też, że musimy stwierdzić w procedurze konstruktora który z kopców powinien zostać prawym, a który lewym poddrzewem (możemy natomiast założyć że porządek kopca zostanie zachowany). Zwróć uwagę na użycie procedury `elem-priority` znajdującej priorytet elementu w kopcu (który powinien być liczbą).

Mając powyższą reprezentację danych, możemy zaimplementować operacje na kopcu:

```
(define empty-heap leaf)

(define (heap-empty? h)
  (leaf? h))

(define (heap-insert elt heap)
  (heap-merge heap (make-node elt leaf leaf)))

(define (heap-min heap)
  (node-elem heap))

(define (heap-pop heap)
  (heap-merge (node-left heap) (node-right heap)))

(define (heap-merge h1 h2)
  (cond
    [(leaf? h1) h2]
    [(leaf? h2) h1]
    ;; XXX: fill in the implementation
    [else ...]))
```

Wszystkie operacje na kopcach za wyjątkiem scalania są dostarczone: predykat `heap-empty?` sprawdza czy kopiec jest pusty, `heap-insert` wstawia element do kopca, `heap-min` znajduje element o minimalnym priorytecie, zaś `heap-pop` usuwa ten element z kopca. Wstawianie i usuwanie są zaimplementowane przez scalanie, a uzupełnienie tej implementacji jest Twoim zadaniem. Idea scalania kopców jest następująca: jeśli jeden z kopców jest pusty, scalanie jest trywialne (bierzemy drugi kopiec). Jeśli oba są niepuste, możemy znaleźć najmniejszy element każdego z nich. Mniejszy z tych dwóch elementów powinien znaleźć się w korzeniu wynikowego kopca — łatwo go znaleźć. Mamy zatem cztery

obiekty:

- element o najniższym priorytecie (nazwiemy go  $e$ ),
- lewe poddrzewo kopca z którego korzenia pochodzi  $e$  —  $h_l$
- prawe poddrzewo kopca z którego korzenia pochodzi  $e$  —  $h_r$
- drugi kopiec,  $h$ , którego korzeń miał priorytet większy niż  $e$ .

Aby stworzyć wynikowy kopiec wystarczy teraz scalić  $h_r$  i  $h$  (rekurencyjnie), a następnie stworzyć wynikowy kopiec z kopca otrzymanego przez rekurencyjne scalanie, kopca  $h_l$  i elementu  $e$ . Poprawnie zdefiniowany konstruktor `make-heap` sam zadba o to, żeby otrzymany kopiec spełniał niezmienniki struktury danych.

Zaimplementuj brakujące części procedur i przetestuj implementację kopca używając dołączonej procedury sortowania przez kopcowanie. Szablon z wypełnionymi częściami implementacji i testami wyślij jako plik o nazwie `nazwisko-imie.rkt` w systemie SKOS do dnia **19 marca 2018, godz. 06.00**.