

Struttura Dati Succinta per la Gestione di Sequenze di Parentesi ben Bilanciate

Fabrizio Brioni

1 giugno 2022

Sommario

In questo documento verrà mostrata una struttura succinta per memorizzare ed effettuare operazioni su una sequenza di parentesi ben bilanciata. Inizialmente verrà descritta la struttura dati segment tree, dopodiché vi sarà la descrizione di un'organizzazione a due livelli (simile alla struttura di jacobson per il rank) per la memorizzazione di informazioni riguardanti le sequenze di parentesi ben bilanciate e infine una spiegazione di come integrare le due strutture per gestire operazioni di tipo `find_close`, `find_open`, `find_enclose` in modo efficiente e succinto.

1 Introduzione

Una sequenza V di parentesi è definita ben bilanciata se in ciascun prefisso di V il numero di parentesi aperte è maggiore o uguale al numero di parentesi chiuse e il numero complessivo di parentesi aperte in V è uguale al numero di parentesi chiuse. In termini meno formali, può essere definita come una sequenza di parentesi da cui è possibile ottenere un'operazione aritmetica valida inserendo eventuali numeri e operazioni. Alcune operazioni utili eseguibili su tali sequenze sono le seguenti:

- **find_close(i)**: data una parentesi aperta in posizione i , calcolare la posizione delle corrispondente parentesi chiusa;
- **find_open(i)**: data una parentesi chiusa in posizione i , calcolare la posizione delle corrispondente parentesi aperta;
- **find_enclose(i)**: data una parentesi in posizione i , calcolare le posizioni (x, y) della coppia di parentesi corrispondenti che la racchiudono. Nel caso vi siano più coppie con tale proprietà, cercare quella più interna, ovvero quella che non contiene altre coppie valide (per una definizione più formale si legga la sezione **Notazioni**).

In questo documento verrà mostrato come, data una sequenza di parentesi ben bilanciate di lunghezza $2n$, eseguire tali operazioni con una complessità temporale di $\mathcal{O}(\log n)$ utilizzando $2n + o(n)$ bits di memoria.

2 Notazioni

Sia v una sequenza di parentesi di lunghezza $2n$ numerate da 0 a $2n - 1$ e sia v_i la parentesi di indice i . Per comodità supponiamo che un valore $v_i = 1$ indichi una parentesi aperta in posizione i e un valore $v_i = 0$ indichi una parentesi chiusa in posizione i . Definiamo l'eccesso di una posizione i come:

$$\text{excess}_v(i) = |\{j : j < i \wedge v_i = 1\}| - |\{j : j \leq i \wedge v_i = 0\}|$$

ovvero la differenza tra il numero di parentesi aperte che precedono i (escluso) e il numero di parentesi chiuse che precedono i (questa volta incluso). Ne segue che una sequenza di parentesi è ben bilanciata se e solo se:

$$\begin{aligned} \text{excess}_v(i) &\geq 0 & 0 \leq i < 2n - 1 \\ \text{excess}_v(2n - 1) &= 0 \end{aligned}$$

Inoltre ne consegue la seguente definizione delle operazioni di `find_close`, `find_open` e `find_enclose`:

$$\begin{aligned} \text{find_close}_v(i) &= \min\{j : j > i \wedge \text{excess}_v(j) = \text{excess}_v(i)\} \\ \text{find_open}_v(i) &= \max\{j : j < i \wedge \text{excess}_v(j) = \text{excess}_v(i)\} \\ \text{left_enclose}_v(i) &= \max\{j : j < i \wedge \text{excess}_v(j) + 1 = \text{excess}_v(i)\} \\ \text{right_enclose}_v(i) &= \text{find_close}_v(\text{left_enclose}_v(i)) = \min\{j : j > i \wedge \text{excess}_v(j) + 1 = \text{excess}_v(i)\} \\ \text{find_enclose}_v(i) &= (\text{left_enclose}_v(i), \text{right_enclose}_v(i)) \end{aligned}$$

Inoltre useremo t^v per indicare una sequenza di interi di lunghezza $2n$ tale che:

$$t_i^v = \text{excess}_v(i) \quad 0 \leq i < 2n - 1$$

Infine definiamo una funzione `find_succ`(x, i, v) che data una sequenza x_0, x_1, \dots di interi e due interi i e v restituisca l'indice del primo elemento che segue x_i ed ha valore minore o uguale a v :

$$\text{find_succ}(x, i, v) = \min\{j : j > i \wedge x_j \leq v\}$$

in modo analogo definiamo una funzione `find_prev`(x, i, v) che restituisca l'indice dell'ultimo elemento che precede x_i ed ha valore minore o uguale a v :

$$\text{find_prev}(x, i, v) = \max\{j : j < i \wedge x_j \leq v\}$$

3 Segment Tree

Il Segment Tree relativo a una sequenza x_0, x_1, \dots, x_{n-1} di n valori è un albero binario che ha come radice un nodo contenente informazioni relative all'intera sequenza (come ad esempio la somma, il valore massimo o il minimo) e (se $n \neq 1$) avente come sottoalbero sinistro un Segment Tree relativo alla sequenza $x_0, \dots, x_{\lfloor \frac{n-1}{2} \rfloor}$ e come sottoalbero destro un Segment Tree relativo alla sequenza $x_{\lfloor \frac{n-1}{2} \rfloor + 1}, \dots, x_{n-1}$. Dato un nodo k di tale albero, con $k.data$ indicheremo l'informazione contenuta (nel nostro caso sarà sempre contenuto il minimo dell'intervallo di competenza) e con $k.left$ e $k.right$ rispettivamente il figlio sinistro e destro.

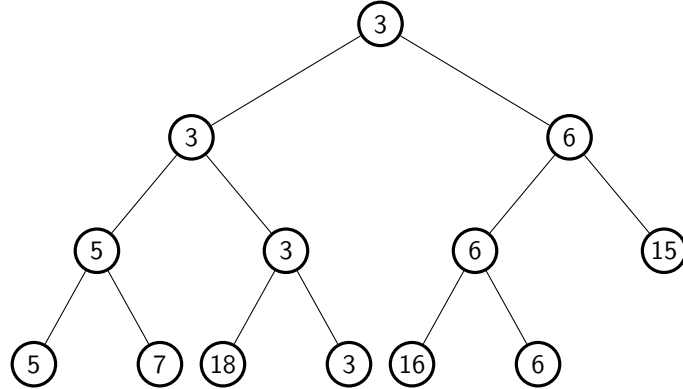


Figura 1: Segment Tree relativo alla sequenza 5, 7, 18, 3, 16, 6, 15. In ciascun nodo è contenuto il valore minimo della sequenza di cui si occupa.

3.1 Costruzione

La seguente procedura restituisce la radice del Segment Tree relativo alla sequenza x di lunghezza $n = \text{size}(x)$:

```

1: procedure BUILD( $x$ )
2:    $root \leftarrow \text{RECURSIVE\_BUILD}(x, 0, \text{size}(x) - 1)$ 
3:   return  $root$ 
4: end procedure
5:
6: function RECURSIVE_BUILD( $x, l, r$ )
7:    $tmp \leftarrow \text{new Segment Tree node}$ 
8:   if  $l = r$  then
9:      $tmp.data \leftarrow x_l$ 

```

```

10:     tmp.left ← null
11:     tmp.right ← null
12:   else
13:     tmp.left ← RECURSIVE_BUILD( $x, l, \lfloor \frac{l+r}{2} \rfloor$ )
14:     tmp.right ← RECURSIVE_BUILD( $x, \lfloor \frac{l+r}{2} \rfloor + 1, r$ )
15:     tmp.data ← min{tmp.left.data, tmp.right.data}
16:   end if
17:   return tmp
18: end function

```

Per una sequenza lunga n il numero $f(n)$ di nodi creati è:

$$f(n) = \begin{cases} 1 & n = 1 \\ 1 + f(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + f(\lceil \frac{n}{2} \rceil) & n > 1 \end{cases}$$

ne consegue che $f(n) = \mathcal{O}(n)$ e poiché la funzione `Recursive_build` viene chiamata una volta per ciascun nodo, la complessità della procedura di costruzione è $\mathcal{O}(n)$. Inoltre supponendo che ciascun elemento della sequenza abbia un valore compreso fra 0 e A , il numero di bit necessari per contenere le informazioni di tutti i nodi è $\mathcal{O}(n \log A)$.

3.2 find_succ e find_prev

Grazie a tale struttura è possibile implementare in modo efficiente la funzione `find_succ(x, i, v)` una volta costruito il Segment Tree relativo ad x la cui radice è `root`:

```

1: procedure FIND_SUCC(root, x, i, v)
2:   return FIND_SUCC_RECURSIVE(root, i, v, 0, size(x) - 1)
3: end procedure
4:
5: function FIND_SUCC_RECURSIVE(node, ind, val, l, r)
6:   if ind ≥ r ∨ node.data > val then
7:     res ← ∞
8:   else if l = r then
9:     res ← l
10:  else
11:    res ← FIND_SUCC_RECURSIVE(node.left, ind, val, l, ⌊  $\frac{l+r}{2}$  ⌋)
12:    if res ≠ ∞ then
13:      res ← FIND_SUCC_RECURSIVE(node.right, ind, val, ⌊  $\frac{l+r}{2}$  ⌋ + 1, r)
14:    end if
15:  end if
16:  return res
17: end function

```

Il numero di nodi visitati e la complessità di tale procedura è $\mathcal{O}(\log n)$. In modo del tutto analogo è possibile implementare la funzione `find_prev(x, i, v)`:

```

1: procedure FIND_PREV(root, x, i, v)
2:   return FIND_PREV_RECURSIVE(root, i, v, 0, size(x) - 1)
3: end procedure
4:
5: function FIND_PREV_RECURSIVE(node, ind, val, l, r)
6:   if ind ≤ l ∨ node.data > val then
7:     res ← -∞
8:   else if l = r then
9:     res ← l
10:  else
11:    res ← FIND_PREV_RECURSIVE(node.right, ind, val, ⌊  $\frac{l+r}{2}$  ⌋ + 1, r)
12:    if res ≠ -∞ then
13:      res ← FIND_PREV_RECURSIVE(node.left, ind, val, l, ⌊  $\frac{l+r}{2}$  ⌋)
14:    end if
15:  end if
16:  return res
17: end function

```

4 Organizzazione a due livelli delle informazioni

Data una sequenza v di parentesi ben bilanciate di lunghezza $2n$, la si suddivide in *super blocchi* di dimensione $\log^2 2n$ (primo livello) e si suddivide ciascun super blocco in *blocchi* di dimensione $\log 2n$ (secondo livello). Si ponga per comodità $\log 2n = k$.

4.1 Gestione Primo Livello

Il numero di super blocchi in questo livello è $\frac{2n}{k^2}$ (numerati da 0 a $\frac{2n}{k^2} - 1$), per ognuno di essi si calcoli l'eccesso minimo presente ottenendo la sequenza S :

$$S_i = \min_{ik^2 \leq j < (i+1)k^2} \{t_j^v\} \quad 0 \leq i < \frac{2n}{k^2}$$

Si costruisca una Segment Tree relativo a questa sequenza: poiché gli elementi di t^v sono compresi tra 0 e $2n$ (poiché sono gli eccessi di una sequenza di $2n$ parentesi) e la sequenza S è lunga $\frac{2n}{k^2}$, tale Segment Tree occuperà un numero di bit pari a $\mathcal{O}(\frac{2n}{k^2} \log 2n) = \mathcal{O}(\frac{2n}{\log 2n}) = o(n)$.

Inoltre si calcoli la sequenza T composta dall'eccesso iniziale di ciascun super blocco:

$$T_i = t_{ik^2}^v \quad 0 \leq i < \frac{2n}{k^2}$$

salvando la sequenza T in un array il numero di bit necessari per memorizzarla sarà anch'esso $\frac{2n}{k^2} \log 2n = o(n)$, quindi in totale il numero di bit utilizzati per salvare in memoria questo primo livello di informazioni è $o(n)$.

4.2 Gestione Secondo Livello

Il numero di blocchi in questo livello è $\frac{2n}{k}$ (numerati da 0 a $\frac{2n}{k} - 1$), per ognuno di essi si calcoli l'eccesso minimo presente come differenza rispetto all'eccesso iniziale del relativo super blocco:

$$B_i = \left(\min_{ik \leq j < (i+1)k} \{t_j^v\} \right) - T_{\lfloor \frac{i}{k} \rfloor} \quad 0 \leq i < \frac{2n}{k}$$

salvando la sequenza B in un array il numero di bit necessari per memorizzarla è $\frac{2n}{k} \log (2(\log 2n)^2) = \frac{2n}{\log 2n} (2 \log \log 2n + \log 2) = o(n)$ perchè ciascun elemento di B sarà compreso tra $-(\log 2n)^2$ e $(\log 2n)^2$.

Inoltre si calcoli la sequenza A composta dalla differenza tra l'eccesso iniziale di ciascun blocco e l'eccesso del relativo super blocco:

$$A_i = t_{ik}^v - T_{\lfloor \frac{i}{k} \rfloor} \quad 0 \leq i < \frac{2n}{k}$$

salvando la sequenza A in un array il numero di bit necessari per memorizzarla è $\frac{2n}{k} \log (2(\log 2n)^2) = o(n)$, quindi in totale il numero di bit utilizzati per salvare in memoria questo secondo livello di informazioni è $o(n)$.

5 find_close e find_open

Una volta creato il Segment Tree relativo a S (la cui radice verrà indicata con **root**) e calcolati i valori di T , B e A relativi alla sequenza di parentesi v è possibile eseguire l'operazione **find_close(i)** (supponendo che la parentesi in posizione i sia aperta) nel seguente modo:

1. Si calcola l'eccesso $u = t_i^v = T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} + A_{\lfloor \frac{i}{k} \rfloor} + (t_i^v - t_{k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor)}^v) = T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} + A_{\lfloor \frac{i}{k} \rfloor} + 2 \sum_{j=k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor)}^{i-1} v_j - (i - k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor)) + (1 - v_{k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor)})$ che è possibile calcolare in $\mathcal{O}(\log n)$ (la sommatoria contiene al più $\log 2n$ addendi);
2. Si verifica se la posizione cercata appartiene allo stesso blocco dell'indice i effettuando una scansione lineare di tutte le parentesi che seguono i fino alla fine del blocco a cui esso appartiene ($v_{i+1}, v_{i+2}, \dots, v_{k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor + 1) - 1}$): se vi è un indice x tale che il numero di parentesi aperte e chiuse comprese fra i e x è uguale allora tale indice x è la posizione cercata. Durante questo processo viene fatto accesso al più $k = \log 2n$ volte alla sequenza v ;

3. Altrimenti si verifica se la posizione cercata appartiene allo stesso super blocco dell'indice i effettuando una scansione dei valori di B relativi ai blocchi successivi a quello di i fino alla fine del super blocco a cui appartiene i ($B_{\lfloor \frac{i}{k} \rfloor + 1}, \dots, B_{k(\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor + 1) - 1}$): se vi è un indice x tale che $B_x + T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} \leq t_i^v$ allora la posizione cercata si trova nel blocco x (e questo blocco si trova nello stesso super blocco di i), in tal caso per trovare la posizione esatta basta una scansione di tutte le parentesi di tale blocco ($v_{xk}, v_{xk+1}, \dots, v_{xk+k-1}$) finchè non si trova il primo indice y in cui vale $t_y^v = t_i^v$ (si noti come sia possibile calcolare mano a mano il valore di t_y^v utilizzando la stessa formula del punto 1). Durante questo processo viene fatto accesso al più $k = \log 2n$ volte alla sequenza B e al più $k = \log 2n$ volte alla sequenza v ;
4. Se non è stata trovata la posizione dopo gli step 2 e 3 significa che la posizione cercata si trova in un altro super blocco rispetto a quello in cui si trova i , per trovare tale super blocco basterà chiamare la procedura **Find_succ**($B, \lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor, t_i^v$) che provvederà a ritornare l'indice x del primo super blocco che segue i contenente un eccesso minore o uguale a t_i^v (e poichè due valori consecutivi t^v differiscono di al più 1, quel super blocco conterrà sicuramente un eccesso uguale a t_i^v). A quel punto va ricercato il blocco in cui si trova la posizione cercata e dopodichè si ricerca la posizione esatta in modo analogo a quanto spiegato nello step 3: si effettua una scansione dei valori di B relativi ai blocchi contenuti nel super blocco x ($B_{xk}, \dots, B_{xk+k-1}$) e se vi è un indice y tale che $B_y + T_x \leq t_i^v$ allora la posizione cercata si trova nel blocco y , infine per trovare la posizione esatta basta una scansione di tutte le parentesi di tale blocco ($v_{xk^2+yk}, \dots, v_{xk^2+yk+k-1}$) finchè non si trova il primo indice z in cui vale $t_z^v = t_i^v$. Durante questo processo viene effettuata una chiamata alla funzione **Find_succ** (che ha complessità $\mathcal{O}(\log \frac{2n}{k^2}) = \mathcal{O}(\log n)$) e viene fatto accesso al più $k = \log 2n$ volta alla sequenza B e al più $k = \log 2n$ volta alla sequenza v .

In conclusione è possibile effettuare l'operazione **find_close** con complessità $\mathcal{O}(\log n)$ utilizzando la sequenza v di parentesi che occupa $2n$ bit e altre strutture ausiliare (il Segment Tree relativo alla sequenza S e le sequenze T, B, A) che occupano $o(n)$ bit. Il seguente pseudocodice mostra l'implementazione di tutta la procedura:

Algorithm 1 Find_close

```

1: procedure FIND_CLOSE( $root, T, A, B, n, v, i$ ) ▷ si suppone  $v_i$  parentesi aperta
2:    $k \leftarrow \log 2n$ 
3:    $u \leftarrow T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} + A_{\lfloor \frac{i}{k} \rfloor} - (i - k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor))$  ▷ step 1
4:   for  $j \leftarrow k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor)$  to  $i - 1$  do
5:      $u \leftarrow u + 2v_j$ 
6:   end for
7:    $u \leftarrow u + (1 - v_{k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor)})$ 
8:
9:    $tmp \leftarrow 0$  ▷ step 2
10:  for  $x \leftarrow i$  to  $k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor + 1) - 1$  do
11:    if  $v_x = 1$  then
12:       $tmp \leftarrow tmp + 1$ 
13:    else
14:       $tmp \leftarrow tmp - 1$ 
15:    end if
16:    if  $tmp = 0$  then
17:      return  $x$ 
18:    end if
19:  end for
20:
21:  for  $x \leftarrow \lfloor \frac{i}{k} \rfloor + 1$  to  $k(\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor + 1) - 1$  do ▷ step 3
22:    if  $B_x + T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} \leq u$  then
23:       $curr_t \leftarrow T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} + A_x$ 
24:      for  $y \leftarrow xk$  to  $xk + k - 1$  do
25:        if  $curr_t = u$  then
26:          return  $y$ 
27:        end if

```

```

28:         if  $v_y = 1$  then
29:              $currt \leftarrow currt + 1$ 
30:         end if
31:         if  $v_{y+1} = 0$  then
32:              $currt \leftarrow currt - 1$ 
33:         end if
34:     end for
35: end if
36: end for
37:
38:  $x \leftarrow \text{FIND\_SUCC}(root, B, \lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor, u)$  ▷ step 4
39: for  $y \leftarrow xk$  to  $xk + k - 1$  do
40:     if  $B_y + T_x \leq u$  then
41:          $currt \leftarrow T_x + A_y$ 
42:         for  $z \leftarrow xk^2 + yk$  to  $xk^2 + yk + k - 1$  do
43:             if  $currt = u$  then
44:                 return  $z$ 
45:             end if
46:             if  $v_z = 1$  then
47:                  $currt \leftarrow currt + 1$ 
48:             end if
49:             if  $v_{z+1} = 0$  then
50:                  $currt \leftarrow currt - 1$ 
51:             end if
52:         end for
53:     end if
54: end for
55: end procedure

```

In modo simmetrico è possibile implementare l'operazione **find_open(i)**: basti notare che l'operazione **find_open(i)** relativa ad una sequenza $v = v_0, \dots, v_{2n-1}$ è equivalente a un'operazione di **find_close(2n-1-i)** relativa alla sequenza sequenza v_{2n-1}, \dots, v_0 . Inizialmente si verifica se la posizione cercata è presente nello stesso blocco di i , altrimenti si verifica se è presente nello stesso super blocco di i e in caso contrario si va a ricercare il super blocco di appartenenza, il blocco corretto all'interno del super blocco e infine la posizione esatta all'interno del blocco:

Algorithm 2 Find_open

```

1: procedure FIND_OPEN( $root, T, A, B, n, v, i$ ) ▷ si suppone  $v_i$  parentesi chiusa
2:      $k \leftarrow \log 2n$ 
3:      $u \leftarrow T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} + A_{\lfloor \frac{i}{k} \rfloor} - (i - k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor) + 1)$  ▷ step 1
4:     for  $j \leftarrow k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor)$  to  $i - 1$  do
5:          $u \leftarrow u + 2v_j$ 
6:     end for
7:      $u \leftarrow u + (1 - v_{k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor)})$ 
8:
9:      $tmp \leftarrow 0$  ▷ step 2
10:    for  $x \leftarrow i$  down to  $k \lfloor \frac{i}{k} \rfloor$  do
11:        if  $v_x = 1$  then
12:             $tmp \leftarrow tmp + 1$ 
13:        else
14:             $tmp \leftarrow tmp - 1$ 
15:        end if
16:        if  $tmp = 0$  then
17:            return  $x$ 
18:        end if
19:    end for

```

```

20:   for  $x \leftarrow \lfloor \frac{i}{k} \rfloor - 1$  down to  $k(\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor)$  do ▷ step 3
21:     if  $B_x + T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} \leq u$  then
22:        $currt \leftarrow T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} + A_{x+1}$ 
23:       for  $y \leftarrow xk + k - 1$  down to  $xk$  do
24:         if  $v_{y+1} = 0$  then
25:            $currt \leftarrow currt + 1$ 
26:         end if
27:         if  $v_y = 1$  then
28:            $currt \leftarrow currt - 1$ 
29:         end if
30:         if  $currt = u$  then
31:           return  $y$ 
32:         end if
33:       end for
34:     end if
35:   end for
36:
37:    $x \leftarrow \text{FIND\_PREV}(root, B, \lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor, u)$  ▷ step 4
38:   for  $y \leftarrow xk + k - 1$  down to  $xk$  do
39:     if  $B_y + T_x \leq u$  then
40:       if  $y < xk + k - 1$  then
41:          $currt \leftarrow T_x + A_{y+1}$ 
42:       else
43:          $currt \leftarrow T_{x+1}$ 
44:       end if
45:       for  $z \leftarrow xk^2 + yk + k - 1$  down to  $xk^2 + yk$  do
46:         if  $v_{z+1} = 0$  then
47:            $currt \leftarrow currt + 1$ 
48:         end if
49:         if  $v_z = 1$  then
50:            $currt \leftarrow currt - 1$ 
51:         end if
52:         if  $currt = u$  then
53:           return  $z$ 
54:         end if
55:       end for
56:     end if
57:   end for
58: end procedure

```

6 Find_enclose

L'operazione `left_enclose(i)` è analoga a `find_open(i)` con l'unica differenza che l'eccesso cercato non è pari a t_i^v ma bensì $t_i^v - 1$ (e che non esiste una parentesi con tale eccesso se $t_i^v = 0$):

Algorithm 3 Left_enclose

```

1: procedure LEFT_ENCLOSE( $root, T, A, B, n, v, i$ )
2:    $k \leftarrow \log 2n$ 
3:    $u \leftarrow T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} + A_{\lfloor \frac{i}{k} \rfloor} - (i - k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor))$  ▷ step 1
4:   for  $j \leftarrow k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor)$  to  $i - 1$  do
5:      $u \leftarrow u + 2v_j$ 
6:   end for
7:    $u \leftarrow u + (1 - v_{k(\lfloor \frac{i}{k} \rfloor)})$ 
8:   if  $v_i = 0$  then
9:      $u \leftarrow u - 1$ 
10:  end if
11:   $u \leftarrow u - 1$  ▷ l'eccesso cercato ora è  $t_i^v - 1$ 

```

```

12:  if  $u = -1$  then
13:      return  $-1$                                  $\triangleright$  Non esiste una coppia di parentesi che racchiude l'indice  $i$ 
14:  end if
15:
16:   $tmp \leftarrow u + 1$                                  $\triangleright$  step 2
17:  for  $x \leftarrow i$  down to  $k \lfloor \frac{i}{k} \rfloor$  do
18:      if  $tmp = u$  then
19:          return  $x$ 
20:      end if
21:      if  $v_x = 0$  then
22:           $tmp \leftarrow tmp + 1$ 
23:      end if
24:      if  $v_{x-1} = 1$  then
25:           $tmp \leftarrow tmp - 1$ 
26:      end if
27:  end for
28:
29:  for  $x \leftarrow \lfloor \frac{i}{k} \rfloor - 1$  down to  $k(\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor)$  do                                 $\triangleright$  step 3
30:      if  $B_x + T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} \leq u$  then
31:           $curr_t \leftarrow T_{\lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor} + A_{x+1}$ 
32:          for  $y \leftarrow xk + k - 1$  down to  $xk$  do
33:              if  $v_{y+1} = 0$  then
34:                   $curr_t \leftarrow curr_t + 1$ 
35:              end if
36:              if  $v_y = 1$  then
37:                   $curr_t \leftarrow curr_t - 1$ 
38:              end if
39:              if  $curr_t = u$  then
40:                  return  $y$ 
41:              end if
42:          end for
43:      end if
44:  end for
45:
46:   $x \leftarrow \text{FIND\_PREV}(root, B, \lfloor \frac{i}{k^2} \rfloor, u)$                                  $\triangleright$  step 4
47:  for  $y \leftarrow xk + k - 1$  down to  $xk$  do
48:      if  $B_y + T_x \leq u$  then
49:          if  $y < xk + k - 1$  then
50:               $curr_t \leftarrow T_x + A_{y+1}$ 
51:          else
52:               $curr_t \leftarrow T_{x+1}$ 
53:          end if
54:          for  $z \leftarrow xk^2 + yk + k - 1$  down to  $xk^2 + yk$  do
55:              if  $v_{z+1} = 0$  then
56:                   $curr_t \leftarrow curr_t + 1$ 
57:              end if
58:              if  $v_z = 1$  then
59:                   $curr_t \leftarrow curr_t - 1$ 
60:              end if
61:              if  $curr_t = u$  then
62:                  return  $z$ 
63:              end if
64:          end for
65:      end if
66:  end for
67: end procedure

```

E di conseguenza l'operazione `find_enclose` non è nient'altro che una chiamata a `left_enclose` e `find_close`:

Algorithm 4 Find_enclose

```
1: procedure FIND_ENCLOSE( $root, T, A, B, n, v, i$ )
2:    $x \leftarrow \text{LEFT\_ENCLOSE}(root, T, A, B, n, v, i)$ 
3:   if  $x = -1$  then
4:     return  $(-1, -1)$  ▷ non esiste soluzione
5:   else
6:     return  $(x, \text{FIND\_CLOSE}(x))$ 
7:   end if
8: end procedure
```

7 Conclusioni

È stato mostrato come sia possibile effettuare le operazioni `find_close`, `find_open` e `find_enclose` con complessità $\mathcal{O}(\log n)$ utilizzando $2n + o(n)$ bits. Inoltre la costruzione iniziale di tutte le strutture necessarie ha complessità $\mathcal{O}(n)$.