



DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E FISICA
Corso di Studi Magistrale in Scienze Computazionali
INSEGNAMENTO DI CALCOLO PARALLELO E DISTRIBUITO

MODULO `larcc`
TRADUZIONE IN JULIA
E PARALLELIZZAZIONE

Prof. Alberto Paoluzzi

Sarah Tofoni
Martina Trani

A.A. 2017-2018

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Modulo <code>larcc</code>	2
1.1.1	CSR (Compressed Sparse Row)	2
1.1.2	CSC (Compressed Sparse Column)	2
1.1.3	COO (Coordinate Representation)	2
1.1.4	BRC (Binary Row Compressed)	2
1.2	Funzioni selezionate	3
1.3	Grafico delle dipendenze tra funzioni	3
1.4	Tempi di esecuzione	4
2	Implementazione	5
2.1	<code>csrCreate</code> , <code>brc2Coo</code> , <code>coo2Csr</code> , <code>triples2mat</code>	5
2.1.1	Traduzione	5
2.1.2	Versione parallela	6
2.1.3	Tempi di esecuzione	7
2.2	<code>csr2DenseMatrix</code> , <code>csrGetNumberOfRows</code> , <code>csrGetNumberOfColumns</code>	8
2.2.1	Traduzione	8
2.2.2	Versione parallela	9
2.2.3	Tempi di esecuzione	9
2.3	<code>larModelNumbering</code>	10
2.3.1	Traduzione	10
2.3.2	Versione parallela	11
2.3.3	Tempi di esecuzione	11
2.4	<code>larFacets</code> , <code>setup</code>	12
2.4.1	Traduzione	12
2.4.2	Versione parallela	13
2.4.3	Tempi di esecuzione	14
2.5	<code>larCellAdjacencies</code> , <code>matrixProduct</code> , <code>csrTranspose</code>	14
2.5.1	Traduzione	15
2.5.2	Versione parallela	15
2.6	<code>csrPredFilter</code> , <code>check</code>	16
2.6.1	Traduzione	16
2.6.2	Versione parallela	16
2.7	<code>mkSignedEdges</code>	17
2.7.1	Traduzione	17
2.7.2	Versione parallela	18
2.7.3	Tempi di esecuzione	18
2.8	Test	19
2.8.1	<code>test01</code>	19
2.8.2	<code>test11</code>	23
3	Conclusioni	26

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Modulo `larcc`

Nel modulo `larcc` vengono utilizzate delle rappresentazioni topologiche basilari, che includono alcuni comuni formati per le matrici sparse:

1. CSR, *Compressed Sparse Row*
2. CSC, *Compressed Sparse Column*
3. COO, *Coordinate Representation*
4. BRC, *Binary Row Compressed*

1.1.1 CSR (Compressed Sparse Row)

Il formato *Compressed Sparse Row* (CSR) memorizza una matrice M di dimensione $m \times n$ sparsa in forma di riga, utilizzando tre matrici unidimensionali A , IA , JA .

L'array A contiene tutte i valori di M diversi da zero, in ordine da sinistra a destra dall'alto verso il basso.

L'array IA è di lunghezza $m + 1$, definito ricorsivamente nel modo seguente:

- $IA_0 = 0$
- $IA_i = IA_{i-1} + \text{numero di elementi diversi da zero nella riga } i - 1 \text{ della matrice originale}$

Il terzo array, JA , contiene l'indice di colonna in M di ciascun elemento di A .

1.1.2 CSC (Compressed Sparse Column)

Il formato *Compressed Sparse Column* (CSC) è simile a quello precedente, a eccezione del fatto che i valori vengono letti prima per colonna, viene memorizzato un indice di riga per ogni valore e vengono memorizzati i puntatori di colonna.

1.1.3 COO (Coordinate Representation)

Il formato *Coordinate Representation* (COO) memorizza una lista di tuple *riga*, *colonna*, *valore*. Idealmente, le voci sono ordinate prima per indice di riga e poi per indice di colonna, per migliorare i tempi di accesso casuale.

1.1.4 BRC (Binary Row Compressed)

Il formato *Binary Row Compressed* (BRC), nell'infrastruttura `larcc`, è il formato standard di matrice, utilizzato per rappresentare una matrice binaria solitamente sparsa.

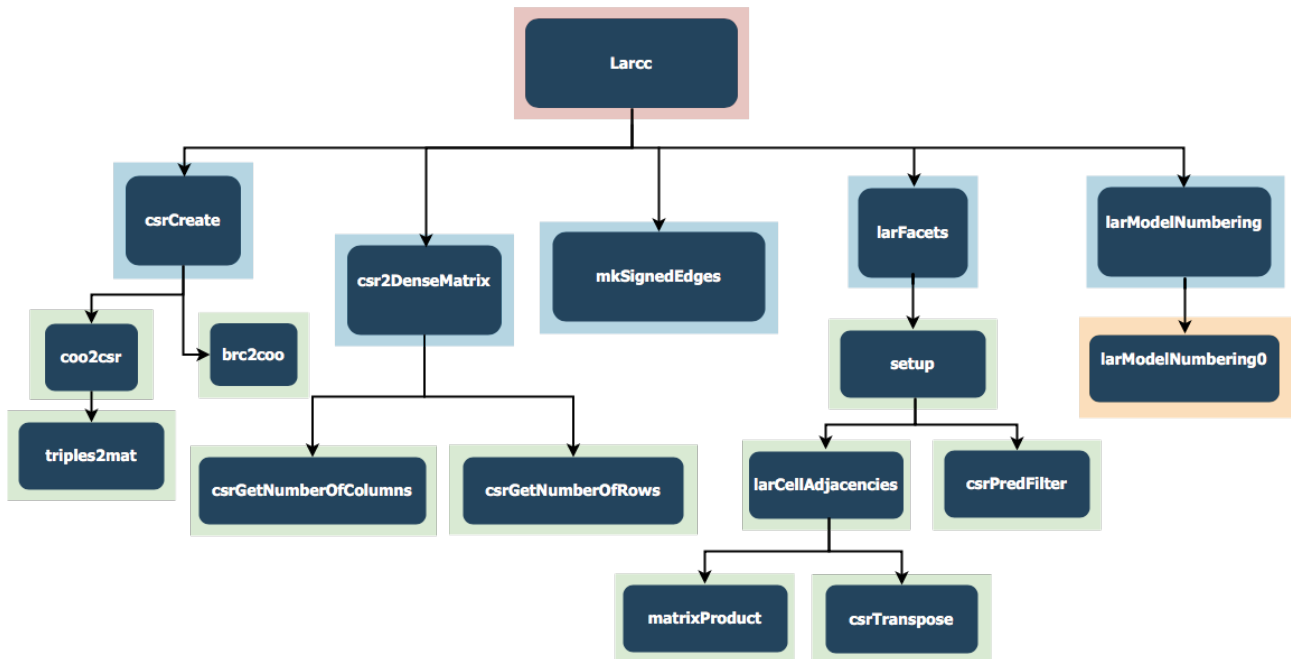
Tale rappresentazione consiste in un array di array di interi, in cui gli array componenti non hanno necessariamente la stessa dimensione. Ogni array componente, corrispondente a una riga della matrice, contiene gli indici delle colonne in corrispondenza dei quali è memorizzato un 1, mentre non viene tenuta traccia di eventuali zeri.

1.2 Funzioni selezionate

La scelta delle funzioni di cui realizzare la traduzione sequenziale da Python a Julia è stata effettuata in base alla frequenza con la quale le stesse venivano richiamate all'interno dei test del modulo. Di ognuna di queste funzioni selezionate, vengono riportati una breve descrizione del comportamento, il codice originario in Python, la relativa traduzione in Julia, la versione parallela e i tempi di esecuzione.

API	Locali	Funzioni esterne
csrCreate brc2Coo coo2Csr triples2mat csr2DenseMatrix csrGetNumberOfRows csrGetNumberOfColumns larModelNumbering larFacets setup larCellAdjacencies matrixProduct csrTranspose csrPredFilter mkSignedEdges	larModelNumbering0	cellNumbering

1.3 Grafico delle dipendenze tra funzioni



1.4 Tempi di esecuzione

Per calcolare i tempi di esecuzione delle funzioni, sia in versione seriale sia parallelizzata, sono state utilizzate la macro `@elapsed` e la macro `@timev` (versione *verbose* della macro `@time`). La prima restituisce soltanto il tempo in secondi, la seconda restituisce anche la quantità di memoria allocata.

Dal momento che alla prima chiamata di `@elapsed f(args)` o `@timev f(args)` la funzione `f` deve essere compilata prima che eseguita, il primo utilizzo delle macro non deve essere considerato, perché il tempo di esecuzione sarà sicuramente peggiore del normale.

Capitolo 2

Implementazione

2.1 csrCreate, brc2Coo, coo2Csr, triples2mat

`csrCreate`: effettua la conversione dal formato BRC (Binary Row Compressed) al formato CSR (Compressed Sparse Row), utilizzando due modi differenti a seconda se la dimensione della matrice è sconosciuta (`shape=(0,0)`) o no.

`brc2Coo`: trasforma una matrice in rappresentazione BRC in una lista di triple (*riga, colonna, 1*), ordinate per riga.

`coo2Csr`: effettua la conversione dalle triple al formato CSR.

`triples2mat`: realizza la trasformazione della matrice in formato *sparso*, data come lista di triple (*riga, colonna, valore*) di elementi non nulli, nel formato `scipy.sparse` corrispondente al parametro `shape` in ingresso, settato di default a `csr`, il formato standard dell'infrastruttura `larcc`.

2.1.1 Traduzione

Python

```
def triples2mat(triples, shape = "csr"):
    n = len(triples)
    data = arange(n)
    ij = arange(2*n).reshape(2,n)
    for k, item in enumerate(triples):
        ij[0][k], ij[1][k], data[k] = item
    return scipy.sparse.coo_matrix((data,ij)).asformat(shape)

def brc2Coo(ListOfListOfInt):
    COOm = [[k,col,1] for k,row in enumerate(ListOfListOfInt) for col in row]
    return COOm

def coo2Csr(COOm):
    CSRm = triples2mat(COOm, "csr")
    return CSRm

def csrCreate(BRCmatrix, lenV = 0, shape = (0,0)):
    triples = brc2Coo(BRCmatrix)
    if shape == (0,0):
        CSRmatrix = coo2Csr(triples)
    else:
```

```

        CSRmatrix = scipy.sparse.csr_matrix(shape)
        for i,j,v in triples:
            CSRmatrix[i,j] = v
    return CSRmatrix

```

Julia

```

function triples2mat(triples, shape = "csr")
    n = length(triples)
    data = collect(1:n)
    i = collect(0:n-1)
    j = collect(n:2n-1)
    ij = [i,j]
    for e in enumerate(triples)
        k = e[1]
        ij[1][k] = triples[k][1]
        ij[2][k] = triples[k][2]
        data[k] = triples[k][3]
    end
    return ss.coo_matrix((data,ij))[:asformat](shape)
end

function brc2Coo(BRCmatrix)
    COOmatrix = vcat([[k-1,col,1] for (k,row) in enumerate(BRCmatrix)
        for col in row])
    return COOmatrix
end

function coo2Csr(COOmatrix)
    CSRmatrix = triples2mat(COOmatrix, "csr")
    return CSRmatrix
end

function csrCreate(BRCmatrix, lengthV = 0, shape = (0,0))
    triples = brc2Coo(BRCmatrix)
    if shape == (0,0)
        CSRmatrix = coo2Csr(triples)
    else
        CSRmatrix = ss.csr_matrix(shape)
        for (i,j,v) in triples
            CSRmatrix[i,j] = v
        end
    end
    return CSRmatrix
end

```

2.1.2 Versione parallela

```

@everywhere function ptriples2mat(triples, shape = "csr")
    n = length(triples)
    data = collect(1:n)
    i = collect(0:n-1)
    j = collect(n:2n-1)
    ij = [i,j]

```

```

@sync for e in enumerate(triples)
    k = e[1]
    ij[1][k] = triples[k][1]
    ij[2][k] = triples[k][2]
    data[k] = triples[k][3]
end
return ss.coo_matrix((data,ij))[:asformat](shape)
end

@everywhere function pbrc2Coo(BRCmatrix)
    COOmatrix = vcat([[k-1,col,1] for (k,row) in enumerate(BRCmatrix)
        for col in row])
    return COOmatrix
end

@everywhere function pcoo2Csr(COOmatrix)
    CSRmatrix = ptriples2mat(COOmatrix, "csr")
    return CSRmatrix
end

@everywhere function pcsrCreate(BRCmatrix, lengthV = 0, shape = (0,0))
    triples = pbrc2Coo(BRCmatrix)
    if shape == (0,0)
        CSRmatrix = pcoo2Csr(triples)
    else
        CSRmatrix = ss.csr_matrix(shape)
        @sync for (i,j,v) in triples
            CSRmatrix[i,j] = v
        end
    end
    return CSRmatrix
end

```

2.1.3 Tempi di esecuzione

Seriale

```

julia> @timev csrCreate(EV)
0.001009 seconds (156 allocations: 8.359 KiB)
elapsed time (ns): 1009260
bytes allocated: 8560
pool allocs: 156
PyObject <9x6 sparse matrix of type '<type 'numpy.int64''>'
    with 18 stored elements in Compressed Sparse Row format>

```

Parallela con lo stesso numero di processori

```

julia> @timev pcsrCreate(EV)
0.000569 seconds (156 allocations: 8.359 KiB)
elapsed time (ns): 569140
bytes allocated: 8560
pool allocs: 156
PyObject <9x6 sparse matrix of type '<type 'numpy.int64''>'
    with 18 stored elements in Compressed Sparse Row format>

```


Parallela con l'aggiunta di 15 processori

```
julia> @timev pcsrCreate(EV)
0.002283 seconds (156 allocations: 8.359 KiB)
elapsed time (ns): 2282594
bytes allocated: 8560
pool allocs: 156
PyObject <9x6 sparse matrix of type '<type 'numpy.int64''>'
with 18 stored elements in Compressed Sparse Row format>
```

2.2 csr2DenseMatrix, csrGetNumberOfRows, csrGetNumberOfColumns

`csr2DenseMatrix`: il pacchetto `scipy` fornisce l'utile metodo `.todense()` allo scopo di trasformare ogni matrice nel formato *sperso* nel corrispondente formato *denso*. Per ragioni di generalità e portabilità è riportata la funzione `csr2DenseMatrix`.

`csrGetNumberOfRows`, `csrGetNumberOfColumns`: le due funzioni ausiliarie consentono di chiedere il numero di righe e colonne di una matrice CSR, indipendentemente dall'implementazione a basso livello (che in questo caso è fornita da `scipy.sparse`).

2.2.1 Traduzione

Python

```
def csrGetNumberOfRows(CSRmatrix):
    Int = CSRmatrix.shape[0]
    return Int

def csrGetNumberOfColumns(CSRmatrix):
    Int = CSRmatrix.shape[1]
    return Int

def csr2DenseMatrix(CSRm):
    nrows = csrGetNumberOfRows(CSRm)
    ncolumns = csrGetNumberOfColumns(CSRm)
    ScipyMat = zeros((nrows, ncolumns), int)
    C = CSRm.tocoo()
    for triple in zip(C.row, C.col, C.data):
        ScipyMat[triple[0], triple[1]] = triple[2]
    return ScipyMat
```

Julia

```
function csrGetNumberOfRows(CSRmatrix)
    shape = CSRmatrix[:get_shape]()
    Int = shape[1]
    return Int
end

function csrGetNumberOfColumns(CSRmatrix)
    shape = CSRmatrix[:get_shape]()
    Int = shape[2]
    return Int
end
```

```
function csr2DenseMatrix(CSRmatrix)
    nrows = csrGetNumberOfRows(CSRmatrix)
    ncolumns = csrGetNumberOfColumns(CSRmatrix)
    ScipyMat = zeros{Int64, (nrows, ncolumns)}
    C = CSRmatrix[:tocoo]()
    for triple in zip(C[:row], C[:col], C[:data])
        ScipyMat[triple[1]+1, triple[2]+1] = triple[3]
    end
    return ScipyMat
end
```

2.2.2 Versione parallela

```
@everywhere function pcsrGetNumberOfRows(CSRmatrix)
    shape = CSRmatrix[:get_shape]()
    Int = shape[1]
    return Int
end
```

```
@everywhere function pcsrGetNumberOfColumns(CSRmatrix)
    shape = CSRmatrix[:get_shape]()
    Int = shape[2]
    return Int
end
```

```
@everywhere function pcsr2DenseMatrix(CSRmatrix)
    nrows = pcsrGetNumberOfRows(CSRmatrix)
    ncolumns = pcsrGetNumberOfColumns(CSRmatrix)
    ScipyMat = zeros{Int64, (nrows, ncolumns)}
    C = CSRmatrix[:tocoo]()
    @sync for triple in zip(C[:row], C[:col], C[:data])
        ScipyMat[triple[1]+1, triple[2]+1] = triple[3]
    end
    return ScipyMat
end
```

2.2.3 Tempi di esecuzione

Seriale

```
julia> @timev csr2DenseMatrix(csrEV)
0.001151 seconds (326 allocations: 13.125 KiB)
elapsed time (ns): 1150963
bytes allocated: 13440
pool allocs: 326
9x6 Array{Int64,2}:
 1  1  0  0  0  0
 1  0  0  1  0  0
 0  1  1  0  0  0
 0  1  0  1  0  0
 0  1  0  0  1  0
 0  0  1  0  1  0
 0  0  1  0  0  1
 0  0  0  1  1  0
 0  0  0  0  1  1
```

Parallela con lo stesso numero di processori

```
julia> @timev pcsr2DenseMatrix(pcsrEV)
0.001471 seconds (330 allocations: 13.313 KiB)
9x6 Array{Int64,2}:
 1  1  0  0  0  0
 1  0  0  1  0  0
 0  1  1  0  0  0
 0  1  0  1  0  0
 0  1  0  0  1  0
 0  0  1  0  1  0
 0  0  1  0  0  1
 0  0  0  1  1  0
 0  0  0  0  1  1
```

Parallela con l'aggiunta di 15 processori

```
julia> @timev pcsr2DenseMatrix(pcsrEV)
0.046019 seconds (330 allocations: 13.313 KiB)
9x6 Array{Int64,2}:
 1  1  0  0  0  0
 1  0  0  1  0  0
 0  1  1  0  0  0
 0  1  0  1  0  0
 0  1  0  0  1  0
 0  0  1  0  1  0
 0  0  1  0  0  1
 0  0  0  1  1  0
 0  0  0  0  1  1
```

2.3 larModelNumbering

`larModelNumbering`: realizza la visualizzazione *numerata* di un modello LAR, utilizzando gli indici delle celle che vengono colorati in 4 modi differenti.

2.3.1 Traduzione

Python

```
def larModelNumbering(scalx = 1, scaly = 1, scalz = 1):
    def larModelNumbering0(V, bases, submodel, numberScaling = 1):
        color = [ORANGE, CYAN, GREEN, WHITE]
        nums = AA(range)(AA(len)(bases))
        hpcs = [submodel]
        for k in range(len(bases)):
            hpcs += [cellNumbering((V, bases[k]), submodel)
                     (nums[k], color[k], (0.5+0.1*k)*numberScaling)]
        return STRUCT(hpcs)
    return larModelNumbering0
```

Julia

```
function larModelNumbering(scalx = 1, scaly = 1, scalz = 1)
    function larModelNumbering0(V, bases, submodel, numberScaling = 1)
        color = [p.ORANGE, p.CYAN, p.GREEN, p.WHITE]
        nums = [collect(0:length(bases[1])),
                 collect(0:length(bases[2])),
                 collect(0:length(bases[3]))]
        hpcs = [submodel]
```

```

        for k in collect(1:length(bases))
            hpcs = vcat(hpcs, [l.cellNumbering((V,bases[k]), submodel)
                               (nums[k], color[k], (0.5+0.1*(k-1))*numberScaling)])
        end
        return p.STRUCT(hpcs)
    end
    return larModelNumbering0
end

```

2.3.2 Versione parallela

```

@everywhere function plarModelNumbering(scalx=1,scaly=1,scalz=1)
    function plarModelNumbering0(V,bases,submodel,numberScaling=1)
        color = [p.ORANGE,p.CYAN,p.GREEN,p.WHITE]
        nums = [collect(0:length(bases[1])),
                 collect(0:length(bases[2])),
                 collect(0:length(bases[3]))]
        hpcs = [submodel]
        @sync for k in collect(1:length(bases))
            hpcs = vcat(hpcs, [l.cellNumbering((V,bases[k]),submodel)
                               (nums[k],color[k],(0.5+0.1*(k-1))*numberScaling)])
        end
        return p.STRUCT(hpcs)
    end
    return plarModelNumbering0
end

```

2.3.3 Tempi di esecuzione

Seriale

```

julia> @timev larModelNumbering(1,1,1)(V,[VV,EV,FV],submodel,2)
centre
centre
centre
0.068753 seconds (1.75 k allocations: 95.000 KiB)
elapsed time (ns): 68752973
bytes allocated: 97280
pool allocs: 1752
PyObject <pyplasm.xgepy.Hpc; proxy of <Swig Object of type 'std::shared_ptr< Hpc > *'
at 0x7f7f2f52c390> >

```

Parallela con lo stesso numero di processori

```

julia> @timev plarModelNumbering(1,1,1)(V,[VV,EV,FV],submodel,2)
centre
centre
centre
0.070618 seconds (2.36 k allocations: 172.938 KiB)
elapsed time (ns): 70617629
bytes allocated: 177088
pool allocs: 2360
non-pool GC allocs:1
malloc() calls: 2
PyObject <pyplasm.xgepy.Hpc; proxy of <Swig Object of type 'std::shared_ptr< Hpc > *'
at 0x7f7f2f40bc30> >

```

Parallela con l'aggiunta di 15 processori

```
julia> @timev plarModelNumbering(1,1,1)(V,[VV,EV,FV],submodel,2)
centre
centre
centre
  0.070363 seconds (1.76 k allocations: 95.188 KiB)
elapsed time (ns): 70363111
bytes allocated: 97472
pool allocs: 1756
PyObject <pyplasm.xgepy.Hpc; proxy of <Swig Object of type 'std::shared_ptr< Hpc > *'
at 0x7f7f30fad5a0> >
```

2.4 larFacets, setup

larFacets: produce l'estrazione delle facce di un complesso di celle. Restituisce il modello LAR **V**, **cellFacets** partendo dal parametro **model** in input. Due parametri opzionali definiscono la dimensione (intrinseca) delle celle in input, con valore di default uguale a 3, e l'eventuale presenza di un numero di celle vuote (**emptyCellNumber**). Il numero è zero di default quando il complesso è chiuso, ad esempio nel caso del d-bordo di un $(d + 1)$ -complesso. Se sono presenti celle vuote, il loro sottoinsieme deve essere collocato alla fine della lista di celle.

2.4.1 Traduzione

Python

```
def setup(model, dim):
    V, cells = model
    csr = csrCreate(cells)
    csrAdjSquareMat = larCellAdjacencies(csr)
    csrAdjSquareMat = csrPredFilter(csrAdjSquareMat, GE(dim))
    return V, cells, csr, csrAdjSquareMat

def larFacets(model, dim = 3, emptyCellNumber = 0):
    V, cells, csr, csrAdjSquareMat = setup(model, dim)
    solidCellNumber = len(cells) - emptyCellNumber
    cellFacets = []
    # for each input cell i
    for i in range(len(cells)):
        adjCells = csrAdjSquareMat[i].tocoo()
        cell1 = csr[i].tocoo().col
        pairs = zip(adjCells.col, adjCells.data)
        for j,v in pairs:
            if (i < j) and (i < solidCellNumber):
                cell2 = csr[j].tocoo().col
                cell = list(set(cell1).intersection(cell2))
                cellFacets.append(sorted(cell))
    # sort and remove duplicates
    cellFacets = sorted(AA(list)(set(AA(tuple)(cellFacets))))
    return V, cellFacets
```

Julia

```
function setup(model, dim)
    V, cells = model
    csr = csrCreate(cells)
    csrAdjSquareMat = larCellAdjacencies(csr)
    csrAdjSquareMat = csrPredFilter(csrAdjSquareMat, dim)
    return V, cells, csr, csrAdjSquareMat
end
```

```
function larFacets(model, dim=3, emptyCellNumber=0)
  V, cells, csr, csrAdjSquareMat = setup(model, dim)
  solidCellNumber = length(cells) - emptyCellNumber
  cellFacets = []
  for i in collect(1:length(cells))
    adjCells = csrAdjSquareMat[i][:tocoo]()
    cell1 = csr[i][:tocoo]()[:col]
    pairs = zip(adjCells[:col], adjCells[:data])
    for pair in pairs
      if (i < pair[1]+1) && (i < solidCellNumber+1)
        cell2 = csr[pair[1]+1][:tocoo]()[:col]
        cell = intersect(cell1, cell2)
        cellFacets = append!(cellFacets, [sort(cell)])
      end
    end
  end
  # sort and remove duplicates
  t = []
  # crea una lista t di tuple, dopo aver creato l'INSIEME a partire da cellFacets
  for e in Set(cellFacets)
    t = vcat(t, ntuple(i -> e[i], length(e)))
  end
  # crea un array associando ad ogni elemento di t la sua posizione in ordine crescente
  sp = sortperm(t)
  # crea una lista ordinata t seguendo le posizioni degli elementi
  t = t[sp]
  list = []
  # trasforma la lista di tuple in una lista di liste
  for elem in t
    list = vcat(list, [[elem[1], elem[2]]])
  end
  return V, list
end
```

2.4.2 Versione parallela

```
@everywhere function psetup(model, dim)
  V, cells = model
  csr = csrCreate(cells)
  csrAdjSquareMat = plarCellAdjacencies(csr)
  csrAdjSquareMat = pcsrPredFilter(csrAdjSquareMat, dim)
  return V, cells, csr, csrAdjSquareMat
end
```

```
@everywhere function plarFacets(model, dim=3, emptyCellNumber=0)
  V, cells, csr, csrAdjSquareMat = psetup(model, dim)
  solidCellNumber = length(cells) - emptyCellNumber
  cellFacets = []
  @sync for i in collect(1:length(cells))
    adjCells = csrAdjSquareMat[i][:tocoo]()
    cell1 = csr[i][:tocoo]()[:col]
    pairs = zip(adjCells[:col], adjCells[:data])
    @sync for pair in pairs
      if (i < pair[1]+1) && (i < solidCellNumber+1)
        cell2 = csr[pair[1]+1][:tocoo]()[:col]
        cell = intersect(cell1, cell2)
        cellFacets = append!(cellFacets, [sort(cell)])
      end
    end
  end
```

```
        end
    end
end
# sort and remove duplicates
t = []
# crea una lista t di tuple, dopo aver creato l'INSIEME a partire da cellFacets
@sync for e in Set(cellFacets)
    t = vcat(t, ntuple(i -> e[i],length(e)))
end
# crea un array associando ad ogni elemento di t la sua posizione in ordine crescente
sp = sortperm(t)
# crea una lista ordinata t seguendo le posizioni degli elementi
t = t[sp]
list = []
# trasforma la lista di tuple in una lista di liste
@sync for elem in t
    list = vcat(list, [[elem[1],elem[2]]])
end
return V,list
end
```

2.4.3 Tempi di esecuzione

Seriale

```
julia> @timev larFacets(model,2,1)
0.210991 seconds (44.40 k allocations: 2.133 MiB)
elapsed time (ns): 210990828
bytes allocated: 2236952
pool allocs: 44395
non-pool GC allocs:2
(Array{Int64,1}[[9, 0], [13, 2], [15, 4], [17, 8], ...])
```

Parallela con lo stesso numero di processori

```
julia> @timev plarFacets(model,2,1)
0.212279 seconds (44.56 k allocations: 2.142 MiB)
elapsed time (ns): 212278970
bytes allocated: 2245624
pool allocs: 44563
non-pool GC allocs:2
(Array{Int64,1}[[9, 0], [13, 2], [15, 4], [17, 8], ...])
```

Parallela con l'aggiunta di 15 processori

```
julia> @timev plarFacets(model,2,1)
0.234690 seconds (45.36 k allocations: 2.154 MiB, 3.99% gc time)
elapsed time (ns): 234690376
gc time (ns): 9372822
bytes allocated: 2258840
pool allocs: 45362
non-pool GC allocs:2
GC pauses: 1
(Array{Int64,1}[[9, 0], [13, 2], [15, 4], [17, 8], ...])
```

2.5 larCellAdjacencies, matrixProduct, csrTranspose

larCellAdjacencies: effettua il calcolo delle celle adiacenti.

Le funzioni seguenti costituiscono le interfacce per due importanti operazioni sulle matrici richieste dal modulo `larcc`.

`matrixProduct`: calcola il prodotto binario di matrici compatibili.

`csrTranspose`: calcola la trasposta di una matrice.

2.5.1 Traduzione

Python

```
def csrTranspose(CSRm):
    CSRm = CSRm.T
    return CSRm

def matrixProduct(CSRm1, CSRm2):
    CSRm = CSRm1 * CSRm2
    return CSRm

def larCellAdjacencies(CSRm):
    CSRm = matrixProduct(CSRm, csrTranspose(CSRm))
    return CSRm
```

Julia

```
function csrTranspose(CSRmatrix)
    return CSRmatrix[:,transpose]()
end

function matrixProduct(CSRm1, CSRm2)
    CSRm = CSRm1 * CSRm2
    return CSRm
end

function larCellAdjacencies(CSRm)
    CSRm = matrixProduct(CSRm, csrTranspose(CSRm))
    return CSRm
end
```

2.5.2 Versione parallela

```
@everywhere function pcsrTranspose(CSRmatrix)
    return CSRmatrix[:,transpose]()
end

@everywhere function pmatrixProduct(CSRm1, CSRm2)
    CSRm = CSRm1 * CSRm2
    return CSRm
end
```



```
@everywhere function plarCellAdjacencies(CSRm)
    CSRm = pmatrixProduct(CSRm, csrTranspose(CSRm))
    return CSRm
end
```

2.6 csrPredFilter, check

`csrPredFilter`: nell'implementazione di vari operatori topologici, alcune operazioni sugli elementi delle matrici sono necessarie. Questa funzione implementa un'operazione di filtro su una matrice, tramite un *predicato* generico.

`check`: funzione ausiliaria utilizzata da `csrPredFilter`, implementata solo in Julia.

2.6.1 Traduzione

Python

```
def csrPredFilter(CSRm, pred):
    coo = CSRm.tocoo()
    triples = [[row,col,val] for row,col,val in zip(coo.row, coo.col, coo.data)
               if pred(val)]
    i, j, data = TRANS(triples)
    CSRm = scipy.sparse.coo_matrix((data,(i,j)),CSRm.shape).tocsr()
    return CSRm
```

Julia

```
function check(x, dim)
    return x >= dim
end

function csrPredFilter(CSRm, dim)
    triples = []
    i = []
    j = []
    data = []
    coo = CSRm[:tocoo]()
    for z in zip(coo[:row], coo[:col], coo[:data])
        if check(z[3], dim)
            triples = vcat(triples, [[z[1],z[2],z[3]]])
        end
    end
    for t in triples
        i = vcat(i,t[1])
        j = vcat(j,t[2])
        data = vcat(data,t[3])
    end
    CSRm = ss.coo_matrix((data,(i,j)),CSRm[:shape])[:tocsr]()
    return CSRm
end
```

2.6.2 Versione parallela

```
@everywhere function pcheck(x,dim)
    return x >= dim
end
```

```
@everywhere function pcsrPredFilter(CSRm, dim)
    triples = []
    i = []
    j = []
    data = []
    coo = CSRm[:tocoo]()
    @sync for z in zip(coo[:row], coo[:col], coo[:data])
        if pcheck(z[3], dim)
            triples = vcat(triples, [[z[1], z[2], z[3]]])
        end
    end
    for t in triples
        i = vcat(i, t[1])
        j = vcat(j, t[2])
        data = vcat(data, t[3])
    end
    CSRm = ss.coo_matrix((data, (i, j)), CSRm[:shape])[:tocsr]()
    return CSRm
end
```

2.7 mkSignedEdges

`mkSignedEdges`: realizza il disegno di archi orientati, restituendo l'hpc del disegno con le frecce delle 1-celle orientate di un complesso cellulare 2D. L'orientamento di ogni arco va dal secondo al primo vertice, indipendentemente dagli indici dei vertici stessi. Pertanto, l'orientamento degli archi può essere invertito scambiando gli indici dei vertici nella definizione della 1-cella.

2.7.1 Traduzione

Python

```
def mkSignedEdges(model, scalingFactor = 1):
    V, EV = model
    assert len(V[0]) == 2
    hpcs = []
    times = C(SCALARVECTPROD)
    frac = 0.06*scalingFactor
    for e0, e1 in EV:
        v0, v1 = V[e0], V[e1]
        vx, vy = DIFF([v1, v0])
        nx, ny = [-vy, vx]
        v2 = SUM([v0, times(0.66)([vx, vy])])
        v3 = SUM([v0, times(0.66-frac)([vx, vy]), times(frac)([nx, ny])])
        v4 = SUM([v0, times(0.66-frac)([vx, vy]), times(-frac)([nx, ny])])
        verts, cells = [v0, v1, v2, v3, v4], [[1, 2], [3, 4], [3, 5]]
        hpcs += [MKPOL([verts, cells], None)]
    print(verts)
    print(cells)
    hpc = STRUCT(hpcs)
    return hpc
```

Julia

```
function mkSignedEdges(model, scalingFactor=1)
    V, EV = model
    assert(length(V[1])==2)
    hpcs = []
    frac = 0.06*scalingFactor
    for e in EV
        # cambio gli indici per farli partire da 1 (siamo in Julia)
        e1 = e[1]+1
```

```
e2 = e[2]+1
v1 = V[e1]
v2 = V[e2]
vx = v2[1]-v1[1]
vy = v2[2]-v1[2]
nx = -vy
ny = vx
v3 = v1 + (0.66*[vx,vy])
v4 = v1 + ((0.66-frac)*[vx,vy]) + (frac*[nx,ny])
v5 = v1 + ((0.66-frac)*[vx,vy]) + (-frac*[nx,ny])
verts = [v1,v2,v3,v4,v5]
cells = [[1,2],[3,4],[3,5]]
W = [Any[vert[h] for h=1:length(vert)] for vert in verts]
CW = [Any[cell[h] for h=1:length(cell)] for cell in cells]
hpcs = vcat(hpcs, p.MKPOL(PyObject([W,CW,[]])))
end
hpc = p.STRUCT(hpcs)
return hpc
end
```

2.7.2 Versione parallela

```
@everywhere function pmkSignedEdges(model,scalingFactor=1)
V,EV = model
assert(length(V[1])==2)
hpcs = []
frac = 0.06*scalingFactor
@sync for e in EV
    # cambio gli indici per farli partire da 1 (siamo in Julia)
    e1 = e[1]+1
    e2 = e[2]+1
    v1 = V[e1]
    v2 = V[e2]
    vx = v2[1]-v1[1]
    vy = v2[2]-v1[2]
    nx = -vy
    ny = vx
    v3 = v1 + (0.66*[vx,vy])
    v4 = v1 + ((0.66-frac)*[vx,vy]) + (frac*[nx,ny])
    v5 = v1 + ((0.66-frac)*[vx,vy]) + (-frac*[nx,ny])
    verts = [v1,v2,v3,v4,v5]
    cells = [[1,2],[3,4],[3,5]]
    W = [Any[cell[h] for h=1:length(cell)] for cell in verts]
    CW = [Any[cell[h] for h=1:length(cell)] for cell in cells]
    hpcs = vcat(hpcs, p.MKPOL(PyObject([W,CW,[]])))
end
hpc = p.STRUCT(hpcs)
return hpc
end
```

2.7.3 Tempi di esecuzione

Seriale

```
julia> @timev mkSignedEdges((V,EV))
0.033148 seconds (11.85 k allocations: 484.578 KiB)
elapsed time (ns): 33148194
bytes allocated: 496208
```

```
pool allocs:          11850
PyObject <pyplasm.xgepy.Hpc; proxy of <Swig Object of type 'std::shared_ptr< Hpc > *'
at 0x7f7f30ff9510> >
```

Parallela con lo stesso numero di processori

```
julia> @timev pmkSignedEdges((V,EV))
0.032413 seconds (11.85 k allocations: 484.766 KiB)
elapsed time (ns): 32412705
bytes allocated: 496400
pool allocs:          11854
PyObject <pyplasm.xgepy.Hpc; proxy of <Swig Object of type 'std::shared_ptr< Hpc > *'
at 0x7f7f2f3efdb0> >
```

Parallela con l'aggiunta di 15 processori

```
julia> @timev pmkSignedEdges((V,EV))
0.025127 seconds (11.85 k allocations: 484.766 KiB)
elapsed time (ns): 25126705
bytes allocated: 496400
pool allocs:          11854
PyObject <pyplasm.xgepy.Hpc; proxy of <Swig Object of type 'std::shared_ptr< Hpc > *'
at 0x7f7f31019720> >
```

2.8 Test

In questa sezione si riporta la traduzione da Python a Julia dei file test01.py e test11.py già scritti all'interno del modulo e funzionanti.

Nel test01 vengono testate le funzioni `csrCreate` e figlie, `csr2DenseMatrix` e figlie, `matrixProduct`, `csrTranspose`; nel test11 si testano invece `larFacets` e figlie, `mkSignedEdges` e `larModelNumbering`.

Gli stessi test possono essere utilizzati per verificare il corretto funzionamento delle versioni parallelizzate delle funzioni, semplicemente invocando le funzioni parallelizzate al posto di quelle seriali.

2.8.1 test01

Python

```
""" Model generation, skeleton and boundary extraction """
from larlib import *

# input of geometry and topology
V2 = [[4,10],[8,10],[14,10],[8,7],[14,7],[4,4],[8,4],[14,4]]
EV = [[0,1],[1,2],[3,4],[5,6],[6,7],[0,5],[1,3],[2,4],[3,6],[4,7]]
FV = [[0,1,3,5,6],[1,2,3,4],[3,4,6,7]]

# characteristic matrices
csrFV = csrCreate(FV)
csrEV = csrCreate(EV)
# print "\nFV =\n", csr2DenseMatrix(csrFV)
print("\nFV =\n", csr2DenseMatrix(csrFV))
# print "\nEV =\n", csr2DenseMatrix(csrEV)
print("\nEV =\n", csr2DenseMatrix(csrEV))

# product
csrEF = matrixProduct(csrEV, csrTranspose(csrFV))
# print "\nEF =\n", csr2DenseMatrix(csrEF)
```

```
print("\nEF =\n", csr2DenseMatrix(csrEF))

# boundary and coboundary operators
facetLengths = [csrCell.getnnz() for csrCell in csrEV]
boundary = csrBoundaryFilter(csrEF,facetLengths)
coboundary_1 = csrTranspose(boundary)
# print "\ncoboundary_1 =\n", csr2DenseMatrix(coboundary_1)
print("\ncoboundary_1 =\n", csr2DenseMatrix(coboundary_1))

# product operator
mod_2D = (V2,FV)
V1,topol_0 = [[0.],[1.],[2.]], [[0],[1],[2]]
topol_1 = [[0,1],[1,2]]
mod_0D = (V1,topol_0)
mod_1D = (V1,topol_1)
V3,CV = larModelProduct([mod_2D,mod_1D])
mod_3D = (V3,CV)
VIEW(EXPLODE(1.2,1.2,1.2)(MKPOLs(mod_3D)))
# print "\nk_3 =", len(CV), "\n"
print("\nk_3 =", len(CV), "\n")

# 2-skeleton of the 3D product complex
mod_2D_1 = (V2,EV)
mod_3D_h2 = larModelProduct([mod_2D,mod_0D])
mod_3D_v2 = larModelProduct([mod_2D_1,mod_1D])
_,FV_h = mod_3D_h2
_,FV_v = mod_3D_v2
FV3 = FV_h + FV_v
SK2 = (V3,FV3)
VIEW(EXPLODE(1.2,1.2,1.2)(MKPOLs(SK2)))
# print "\nk_2 =", len(FV3), "\n"
print("\nk_2 =", len(FV3), "\n")

# 1-skeleton of the 3D product complex
mod_2D_0 = (V2,AA(LIST)(range(len(V2))))
mod_3D_h1 = larModelProduct([mod_2D_1,mod_0D])
mod_3D_v1 = larModelProduct([mod_2D_0,mod_1D])
_,EV_h = mod_3D_h1
_,EV_v = mod_3D_v1
EV3 = EV_h + EV_v
SK1 = (V3,EV3)
VIEW(EXPLODE(1.2,1.2,1.2)(MKPOLs(SK1)))
# print "\nk_1 =", len(EV3), "\n"
print("\nk_1 =", len(EV3), "\n")

# boundary and coboundary operators
np.set_printoptions(threshold=sys.maxint)
csrFV3 = csrCreate(FV3)
csrEV3 = csrCreate(EV3)
csrVE3 = csrTranspose(csrEV3)
facetLengths = [csrCell.getnnz() for csrCell in csrEV3]
boundary = csrBoundaryFilter(csrVE3,facetLengths)
coboundary_0 = csrTranspose(boundary)
# print "\ncoboundary_0 =\n", csr2DenseMatrix(coboundary_0)
print("\ncoboundary_0 =\n", csr2DenseMatrix(coboundary_0))

csrEF3 = matrixProduct(csrEV3, csrTranspose(csrFV3))
facetLengths = [csrCell.getnnz() for csrCell in csrFV3]
boundary = csrBoundaryFilter(csrEF3,facetLengths)
coboundary_1 = csrTranspose(boundary)
# print "\ncoboundary_1.T =\n", csr2DenseMatrix(coboundary_1.T)
```

```
print("\ncoboundary_1.T =\n", csr2DenseMatrix(coboundary_1.T))

csrCV = csrCreate(CV)
csrFC3 = matrixProduct(csrFV3, csrTranspose(csrCV))
facetLengths = [csrCell.getnnz() for csrCell in csrCV]
boundary = csrBoundaryFilter(csrFC3, facetLengths)
coboundary_2 = csrTranspose(boundary)
# print "\ncoboundary_2 =\n", csr2DenseMatrix(coboundary_2)
print("\ncoboundary_2 =\n", csr2DenseMatrix(coboundary_2))

# boundary chain visualisation
boundaryCells_2 = boundaryCells(CV, FV3)
boundary = (V3, [FV3[k] for k in boundaryCells_2])
VIEW(EXPLODE(1.5, 1.5, 1.5)(MKPOLLS(boundary)))
```

Julia

```
using PyCall
using DataStructures

@pyimport larlib as l
@pyimport numpy as np
@pyimport pyplasm as p
@pyimport scipy.sparse as ss
@pyimport sys

include("traduzione.jl")
include("largrid.jl")

# input of geometry and topology
V2 = [[4,10],[8,10],[14,10],[8,7],[14,7],[4,4],[8,4],[14,4]]
EV = [[0,1],[1,2],[3,4],[5,6],[6,7],[0,5],[1,3],[2,4],[3,6],[4,7]]
FV = [[0,1,3,5,6],[1,2,3,4],[3,4,6,7]]

# characteristic matrices
csrFV = csrCreate(FV)
csrEV = csrCreate(EV)
println("FV = ", csr2DenseMatrix(csrFV), "\n")
println("EV = ", csr2DenseMatrix(csrEV), "\n")

# product
csrEF = matrixProduct(csrEV, csrTranspose(csrFV))
println("EF = ", csr2DenseMatrix(csrEF), "\n")

# boundary and coboundary operators
facetLengths = []
for csrCell in csrEV
    facetLengths = vcat(facetLengths, csrCell[:getnnz]())
end
boundary = l.csrBoundaryFilter(csrEF, facetLengths)
coboundary_1 = csrTranspose(boundary)
println("coboundary_1 = ", csr2DenseMatrix(coboundary_1), "\n")

# product operator
mod_2D = V2, FV
V1 = [[0.],[1.],[2.]]
topol_0 = [[0],[1],[2]]
topol_1 = [[0,1],[1,2]]
mod_0D = V1, topol_0
mod_1D = V1, topol_1
V3, CV = larModelProduct([mod_2D, mod_1D])
```

```
larExplodedView(V3,CV)
println("\nk_3 = ", length(CV), "\n")

# 2-skeleton of the 3D product complex
mod_2D_1 = V2,EV
mod_3D_h2 = larModelProduct([mod_2D,mod_0D])
mod_3D_v2 = larModelProduct([mod_2D_1,mod_1D])
_,FV_h = mod_3D_h2
_,FV_v = mod_3D_v2
FV3 = vcat(FV_h, FV_v)
larExplodedView(V3,FV3)
println("\nk_2 = ", length(FV3), "\n")

# 1-skeleton of the 3D product complex
list = []
for i in collect(0:length(V2)-1)
    list = vcat(list, [[i]])
end
mod_2D_0 = V2,list
mod_3D_h1 = larModelProduct([mod_2D_1,mod_0D])
mod_3D_v1 = larModelProduct([mod_2D_0,mod_1D])
_,EV_h = mod_3D_h1
_,EV_v = mod_3D_v1
EV3 = vcat(EV_h, EV_v)
larExplodedView(V3,EV3)
println("\nk_1 = ", length(EV3), "\n")

# boundary and coboundary operators
np.set_printoptions(threshold=sys.maxint)
csrFV3 = csrCreate(FV3)
csrEV3 = csrCreate(EV3)
csrVE3 = csrTranspose(csrEV3)
facetLengths = []
for csrCell in csrEV3
    facetLengths = vcat(facetLengths, csrCell[:getnnz]())
end

csrEF3 = matrixProduct(csrEV3, csrTranspose(csrFV3))
facetLengths = []
for csrCell in csrFV3
    facetLengths = vcat(facetLengths, csrCell[:getnnz]())
end
boundary = l.csrBoundaryFilter(csrEF3,facetLengths)
coboundary_1 = csrTranspose(boundary)
println("coboundary_1.T = ", csr2DenseMatrix(coboundary_1[:transpose]()), "\n")

csrCV = csrCreate(CV)
csrFC3 = matrixProduct(csrFV3, csrTranspose(csrCV))
facetLengths = []
for csrCell in csrCV
    facetLengths = vcat(facetLengths, csrCell[:getnnz]())
end
boundary = l.csrBoundaryFilter(csrFC3,facetLengths)
coboundary_2 = csrTranspose(boundary)
println("coboundary_2 = ", csr2DenseMatrix(coboundary_2), "\n")

# boundary chain visualisation
boundaryCells_2 = l.boundaryCells(CV,FV3)
larExplodedView(V3, [FV3[k+1] for k in boundaryCells_2])
```

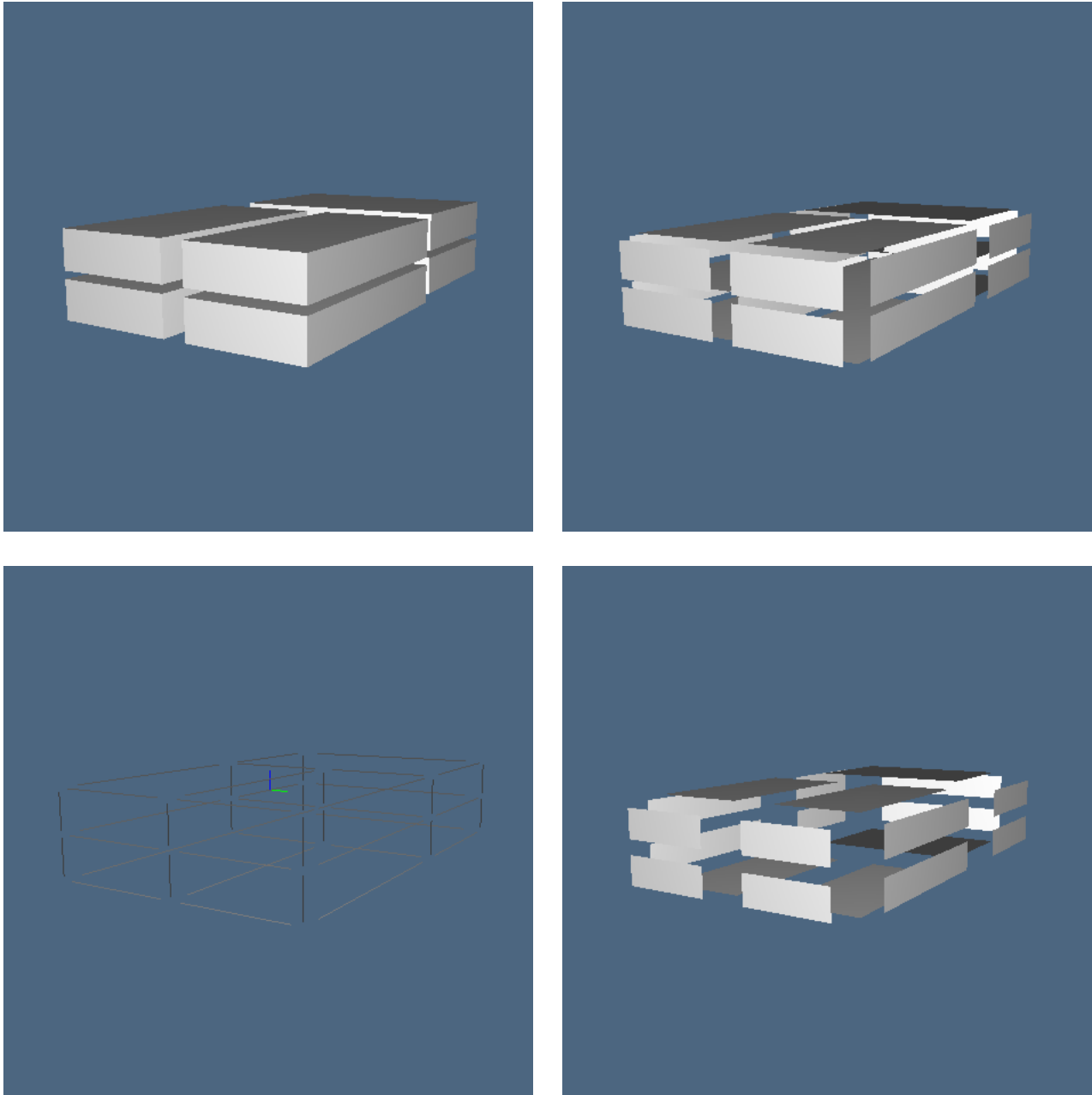


Figura 2.1: Risultati grafici durante l'esecuzione di test01.jl

2.8.2 test11

Python

```
""" Example of oriented edge drawing """
from larlib import *
```

```
V = [[9,0],[13,2],[15,4],[17,8],[14,9],[13,10],[11,11],[9,10],[7,9],[5,9],[3,
8],[0,6],[2,3],[2,1],[5,0],[7,1],[4,2],[12,10],[6,3],[8,3],[3,5],[5,5],[7,6],
[8,5],[10,5],[11,4],[10,2],[13,4],[14,6],[13,7],[11,9],[9,7],[7,7],[4,7],[2,
6],[12,7],[12,5]]
```

```
FV = [[0,1,26],[5,6,17],[6,7,17,30],[7,30,31],[7,8,31,32],[24,30,31,35],[3,4,
28],[4,5,17,29,30,35],[4,28,29],[28,29,35,36],[8,9,32,33],[9,10,33],[11,10,
33,34],[11,20,34],[20,33,34],[20,21,32,33],[18,21,22],[21,22,32],[22,23,31,
```



```
32],[23,24,31],[11,12,20],[12,16,18,20,21],[18,22,23],[18,19,23],[19,23,24],
[15,19,24,26],[0,15,26],[24,25,26],[24,25,35,36],[2,3,28],[1,2,27,28],[12,13,
16],[13,14,16],[14,15,16,18,19],[1,25,26,27],[25,27,36],[36,27,28]]

VIEW(EXPLODE(1.2,1.2,1)(MKPOLLS((V,FV))))
VV = AA(LIST)(range(len(V)))
_,EV = larFacets((V,FV+[range(16)]),dim=2,emptyCellNumber=1)

submodel = mkSignedEdges((V,EV))
VIEW(submodel)
VIEW(larModelNumbering(scalx=1,scaly=1,scalz=1)(V,[VV,EV,FV],submodel,2))
```

Julia

```
using PyCall
using DataStructures

@pyimport larlib as l
@pyimport numpy as np
@pyimport pyplasm as p
@pyimport scipy.sparse as ss
@pyimport sys

include("traduzione.jl")
include("largrid.jl")

V = [[9,0],[13,2],[15,4],[17,8],[14,9],[13,10],[11,11],[9,10],[7,9],[5,9],[3,
8],[0,6],[2,3],[2,1],[5,0],[7,1],[4,2],[12,10],[6,3],[8,3],[3,5],[5,5],[7,6],
[8,5],[10,5],[11,4],[10,2],[13,4],[14,6],[13,7],[11,9],[9,7],[7,7],[4,7],[2,
6],[12,7],[12,5]]

FV = [[0,1,26],[5,6,17],[6,7,17,30],[7,30,31],[7,8,31,32],[24,30,31,35],[3,4,
28],[4,5,17,29,30,35],[4,28,29],[28,29,35,36],[8,9,32,33],[9,10,33],[11,10,
33,34],[11,20,34],[20,33,34],[20,21,32,33],[18,21,22],[21,22,32],[22,23,31,
32],[23,24,31],[11,12,20],[12,16,18,20,21],[18,22,23],[18,19,23],[19,23,24],
[15,19,24,26],[0,15,26],[24,25,26],[24,25,35,36],[2,3,28],[1,2,27,28],[12,13,
16],[13,14,16],[14,15,16,18,19],[1,25,26,27],[25,27,36],[36,27,28]]

larExplodedView(V,FV)
VV = []
for i in collect(0:length(V)-1)
    VV = vcat(VV, [[i]])
end
model = (V, vcat(FV,[collect(0:15)]))
_,EV = plarFacets(model,2,1)

submodel = pmkSignedEdges((V,EV))
p.VIEW(submodel)
```

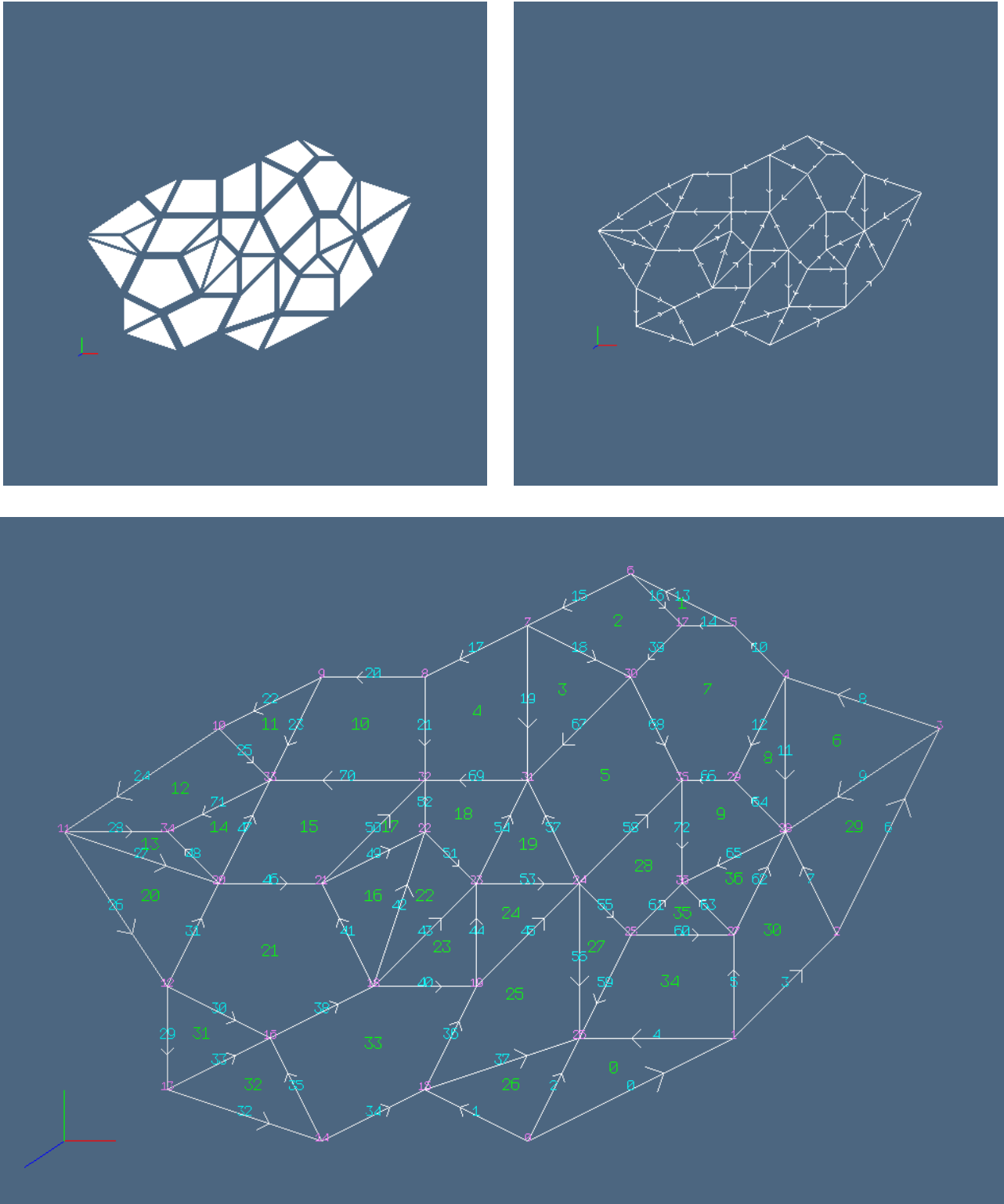


Figura 2.2: Risultati grafici durante l'esecuzione di `test11.jl`

Capitolo 3

Conclusioni

Dallo svolgimento di diversi test sul numero di processori, si nota che la parallelizzazione di alcune delle funzioni rallenta l'esecuzione delle stesse. Un altro tentativo è stato effettuato andando ad agire su diversi input di grandi dimensioni. Sono state pertanto confrontate le performance delle funzioni parallelizzate con quelle seriali, utilizzando 15 processori, su diversi input di grandi dimensioni.

Segue lo studio sulla funzione `csrCreate` con diversi input con $n = 15$.

```
input1 = vcat([EV*j for j=1:100]...)
input2 = vcat([EV*j for j=1:1000]...)
input3 = vcat([EV*j for j=1:5000]...)
```

dove

```
EV = [[0,1],[0,3],[1,2],[1,3],[1,4],[2,4],[2,5],[3,4],[4,5]]
```

Tempi della versione seriale

```
timeinput1 = 0.002113414
timeinput2 = 0.008444055
timeinput3 = 0.050567467
```

Tempi della versione parallela

```
timepinput1 = 0.002388622
timepinput2 = 0.00893245
timepinput3 = 0.060305142
```

Confronti tra la versione seriale e la parallela tramite il rapporto tra i loro tempi

```
timeinput1/timepinput1 = 0.8847837790994139
timeinput2/timepinput2 = 0.945323511466619
timeinput3/timepinput3 = 0.8385266218260459
```

Come si evince dall'esempio di cui sopra, la versione parallela non è efficiente.

Esempio sicuramente più significativo è dato dallo studio sulla funzione `csr2DenseMatrix`.

```
input1 = vcat([EV*j for j=1:100]...)
input2 = vcat([EV*j for j=1:1000]...)
input3 = vcat([EV*j for j=1:5000]...)
```

Tempi della versione seriale

```
timeinput1 = 0.009490412  
timeinput2 = 0.466812199  
timeinput3 = 12.684459215
```

Tempi della versione parallela

```
timepininput1 = 0.010543615  
timepininput2 = 0.669056614  
timepininput3 = 14.3567615
```

Confronti tra la versione seriale e la parallela tramite il rapporto tra i loro tempi

```
timeinput1/timepininput1 = 0.9001098769255138  
timeinput2/timepininput2 = 0.6977170380382787  
timeinput3/timepininput3 = 0.8835181398674068
```

Si può dunque concludere che la versione seriale, in caso di grandi input, aiuta a velocizzare il processo.