

# Relazione LAR TGW 3D - Gruppo 8b

Luca Maria Lauricella      Valerio Marini

June 20, 2022

Progetto relativo al Corso di Calcolo Parallelo e Distribuito del Prof. Paoluzzi presso l'Università Roma Tre.

Repository del progetto: <https://github.com/lauriluca99/TGW-3D.jl>

Documentazione del progetto: <https://lauriluca99.github.io/TGW-3D.jl>

## Contents

<b>Introduzione Linear Algebraic Representation:</b>	<b>1</b>
Perché LAR? . . . . .	2
<b>Obiettivo del progetto</b>	<b>2</b>
TGW 3D . . . . .	2
<b>Studio Preliminare</b>	<b>3</b>
spatial_arrangement.jl . . . . .	3
Funzioni presenti . . . . .	3
<b>Studio esecutivo</b>	<b>5</b>
frag_face . . . . .	6
merge_vertices . . . . .	8
spatial_arrangement . . . . .	9
Azioni Github . . . . .	10
<b>Studio definitivo</b>	<b>10</b>
Problemi noti . . . . .	10
Test . . . . .	11
Sviluppi futuri . . . . .	11

## Introduzione Linear Algebraic Representation:

LAR è uno schema rappresentativo per modelli geometrici e topologici. Il dominio di questo schema consiste in complessi di cellule formati a loro volta da

matrici sparse (matrici con grande affluenza di zeri). L'analisi di questi complessi cellulari è fatta attraverso semplici operazioni algebriche lineari, la più comune è la moltiplicazione sparsa matrice/vettore.

Dato che LAR permette una computazione efficiente di qualsiasi modello topologico, viene utilizzato con un linguaggio di programmazione, anch'esso efficiente e veloce, come Julia, il quale permette di sfruttare tutte le sue potenzialità.

## Perché LAR?

Scegliamo LAR in quanto l'aumento della complessità dei dati geometrici e dei modelli topologici richiedono una migliore rappresentazione e un modello matematico appropriato per tutte le strutture topologiche. Quindi si ha un complesso co-chain formato da collezioni di matrici sparse.

Un complesso chain consiste in una sequenza di moduli dove la singola immagine di ognuno è contenuta nel nucleo della successiva (successivo conosce precedente).

$$\cdots \xleftarrow{d_0} A_0 \xleftarrow{d_1} A_1 \xleftarrow{d_2} A_2 \xleftarrow{d_3} A_3 \xleftarrow{d_4} A_4 \xleftarrow{d_5} \cdots$$

Figure 1: Complesso chain

Un complesso co-chain è la stessa cosa ma con direzioni opposte.

$$\cdots \xrightarrow{d^{-1}} A^0 \xrightarrow{d^0} A^1 \xrightarrow{d^1} A^2 \xrightarrow{d^2} A^3 \xrightarrow{d^3} A^4 \xrightarrow{d^4} \cdots$$

Figure 2: Complesso co-chain

## Obiettivo del progetto

In questo progetto si vuole ottimizzare e parallelizzare il codice dell'algoritmo TGW 3D presente nella libreria LinearAlgebraicRepresentation.jl

### TGW 3D

L'algoritmo Topological Gift Wrapping calcola le d-celle di una partizione di spazio generate da loro partendo da un oggetto geometrico d-1 dimensionale.

TGW prende una matrice sparsa di dimensione d-1 in input e produce in output la matrice sparsa di dimensione d sconosciuta aumentata dalle celle esterne.

## Studio Preliminare

### `spatial_arrangement.jl`

L'algoritmo TGW 3D è implementato all'interno del file `spatial_arrangement.jl`

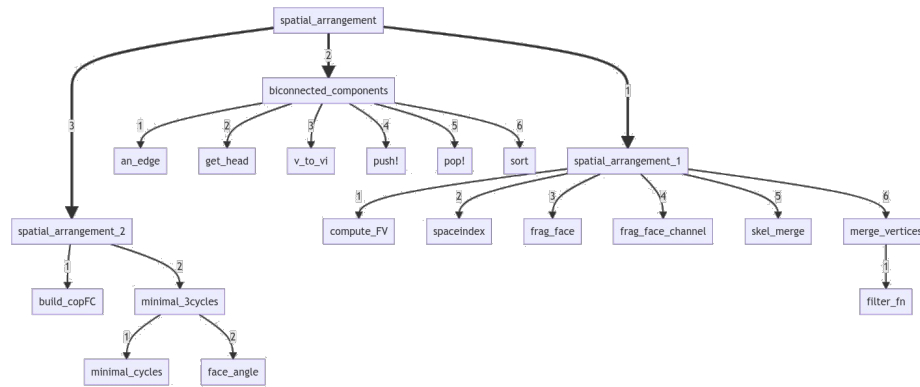


Figure 3: Grafo delle Dipendenze di `spatial_arrangement.jl`

### Funzioni presenti

**`spatial_arrangement`:** Calcola la partizione dei complessi cellulari dati, con scheletro di dimensione 2, in 3D.

Un complesso cellulare è partizionato quando l'intersezione di ogni possibile paio di celle del complesso è vuota e l'unione di tutte le celle è l'insieme dello spazio Euclideo. La funzione ritorna la partizione complessa come una lista di vertici V e una catena di bordi EV, FE, CF.

**`spatial_arrangement_1`:** Si occupa del processo di frammentazione delle facce per l'utilizzo del planar arrangement.

#### 1. `compute_FV`:

Ritorna l'array FV di tipo `Lar.Cells` dal prodotto di due array sparsi in input di tipo `Lar.ChainOp`.

#### 2. `spaceindex`:

Dato un modello geometrico, calcola le intersezioni tra i bounding box. Nello specifico, la funzione calcola le 1-celle e il loro bounding

box attraverso la funzione boundingBox. Si suddividono le coordinate  $x$  e  $y$  in due dizionari chiamando la funzione coordintervals. Per entrambe le coordinate  $x$  e  $y$ , si calcola un intervalTree cioè una struttura dati che contiene intervalli. La funzione boxCovering viene chiamata per calcolare le sovrapposizioni sulle singole dimensioni dei bounding Box. Intersecando quest'ultime, si ottengono le intersezioni effettive tra bounding box. La funzione esegue lo stesso procedimento sulla coordinata  $z$  se presente. Infine, si eliminano le intersezioni di ogni bounding box con loro stessi.

3. frag\_face:

Effettua la trasformazione in 2D delle facce fornite come parametro sigma, dopo di che ogni faccia sigma si interseca con le facce Presenti in sp\_index sempre fornito come parametro della funzione.

4. skel\_merge:

Effettua l'unione di due scheletri che possono avere 1 o 2 dimensioni.

5. merge\_vertices:

Effettua l'unione dei vertici, dei lati e delle facce vicine.

***biconnected\_components:*** Calcola le componenti biconnesse del grafo EV rappresenato da bordi, ovvero coppie di vertici.

1. an\_edge:

Funzione che, dato in input un punto, prende un lato connesso ad esso.

2. get\_head:

Funzione che, dato in input un lato e la coda, fornisce la testa

3. v\_to\_vi:

Funzione che, dato un vertice in input, ritorna falso se la prima occorrenza della matrice è pari a 0 oppure ritorna il valore trovato.

4. push!:

Inserisce uno o più oggetti nella matrice.

5. pop!:

Rimuove l'ultimo oggetto nella matrice e lo ritorna.

6. sort:

Ordina la matrice e ne ritorna una copia.

***spatial\_arrangement\_2***: Effettua la ricostruzione delle facce permettendo il wrapping spaziale 3D.

1. **minimal\_3cycles**:

Funzione che riporta i parametri dati in input in 3 dimensioni e calcola le nuove celle adiacenti per estendere i bordi della figura geometrica. Infine ritorna la matrice sparsa tridimensionale.

2. **build\_copFC**:

Funzione alternativa alla precedente.

## Studio esecutivo

Nello studio esecutivo abbiamo analizzato il codice nei notebooks cercando delle possibili ottimizzazioni. Non è stato possibile ottimizzare tutte le funzioni, infatti le principali modifiche sono state effettuate nelle funzioni: **frag\_face** e **merge\_vertices**.

Per migliorare il codice, sono stati presi in considerazione i libri: *Julia High Performance* e *Hands-On Julia Programming*, nei quali vengono menzionate le seguenti macro per migliorare le performance e la stabilità del codice:

- **@async**: racchiude l'espressione in un Task ed inizierà con l'esecuzione di questa attività procedendo con qualsiasi altra cosa venga dopo nello script, senza aspettare che il Task termini.
- **@sync**: contrariamente al precedente, questa macro aspetta che tutti i Task creati dalla parallelizzazione siano completati prima di proseguire.
- **Thread.@spawn**: Crea un Task e schedula l'esecuzione su un qualsiasi thread disponibile. Il Task viene assegnato ad un Thread quando diventa disponibile.
- **@simd**: si utilizza solo nei for per permettere al compilatore di avere più libertà nella gestione del ciclo consentendo di riordinarlo.
- **@inbounds**: elimina il controllo dei limiti degli array all'interno dell'espressione
- **@views**: converte le operazioni di taglio sull'array in una data espressione per ritornare una variabile di tipo View.
- **@code\_warntype**: viene utilizzato per individuare i problemi causati dai tipi delle variabili, operando conseguentemente con un'assegnazione specifica che riduce la complessità del codice.
- **@benchmark**: questa macro può essere usata solo davanti alle chiamate di funzione. Valuta i parametri della funzione separatamente e chiama la funzione più volte per costruire un campione di tempi di esecuzione.

- `@btime`: simile a `@benchmark` ma restituisce meno informazioni, quali il tempo minimo ed il numero di allocazioni.
- `@profile`: questa macro esegue l'espressione collezionando dei campionamenti periodici. Nei campioni si può vedere la gerarchia delle funzioni ed il tempo di esecuzione di ogni riga.

### frag\_face

Utilizzando la macro `@code_warntype` si individuano molte variabili assegnate al tipo `Any`. Questo significa essenzialmente che ci sarà un'allocazione per la posizione della memoria e l'indirizzione al valore effettivo durante l'esecuzione della funzione.

```
@benchmark frag_face(Lar.Points(V),EV,FE,[2,3,4,5],2)
```

```
BenchmarkTools.Trial: 8171 samples with 1 evaluation.
```

```
Range (min ... max): 376.300 s ... 59.363 ms GC (min ... max): 0.00% ... 97.57%
Time (median): 436.200 s GC (median): 0.00%
Time (mean ± ): 607.541 s ± 1.482 ms GC (mean ± ): 16.21% ± 7.21%
```

```
376 s Histogram: frequency by time 1.17 ms <
```

```
Memory estimate: 265.71 KiB, allocs estimate: 4874.
```

Tramite `ProfileView` otteniamo un grafico in cui si ottiene la misurazione temporale di ogni singola riga di codice. La larghezza delle barre mostra il tempo trascorso in ogni locazione di chiamata, mentre la gerarchia di chiamata è rappresentata dalle varie altezze del grafico.

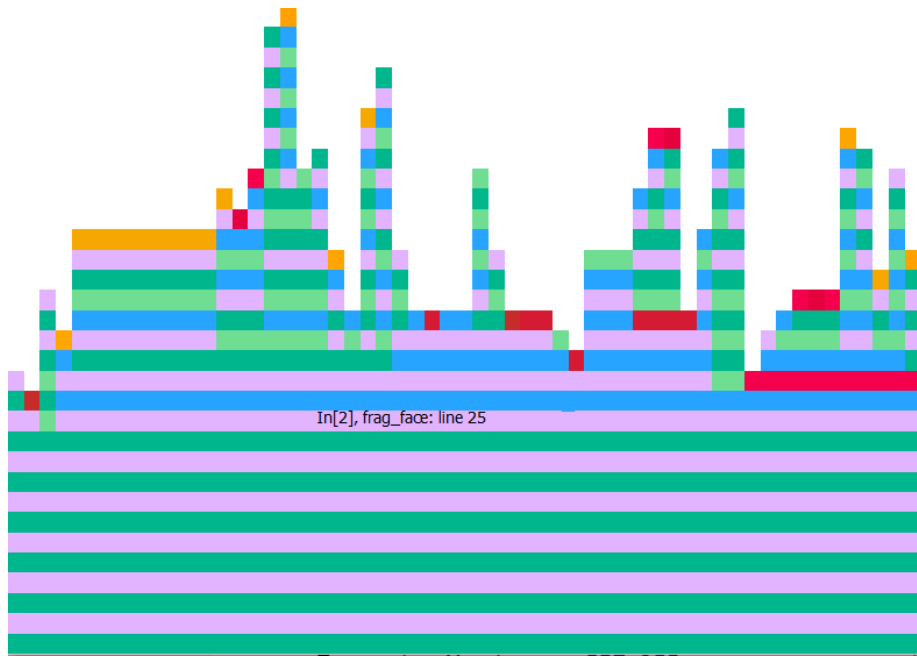


Figure 4: Grafico di ProfileView della funzione originale

Per ottimizzare la funzione abbiamo assegnato alle variabili locali un tipo deterministico per rimuovere il tipo `Any` ed avere la funzione *type-stable*. Inoltre si possono creare delle viste degli array quando c'è un'operazione di slicing, con la macro `@views`, le quali permettono di accedere ai valori dell'array senza dover effettuare una copia.

Dopo aver eseguito vari test, si è optato per utilizzare la macro `@async` per parallelizzare il ciclo *for* che calcola l'intersezione della faccia sigma con le facce in `sp_idx[sigma]`.

Quindi, applicando le suddette modifiche, si è raggiunto un tempo minimo di esecuzione inferiore di circa 20% dalla versione originale.

```
@benchmark frag_face2(Lar.Points(V),EV,FE,[2,3,4,5],2)
```

```
BenchmarkTools.Trial: 9179 samples with 1 evaluation.
```

```
Range (min ... max): 297.300 s ... 35.314 ms    GC (min ... max): 0.00% ... 97.50%
Time  (median):      376.200 s                    GC (median): 0.00%
Time  (mean ± ):      540.377 s ± 1.575 ms        GC (mean ± ): 19.48% ± 6.66%
```

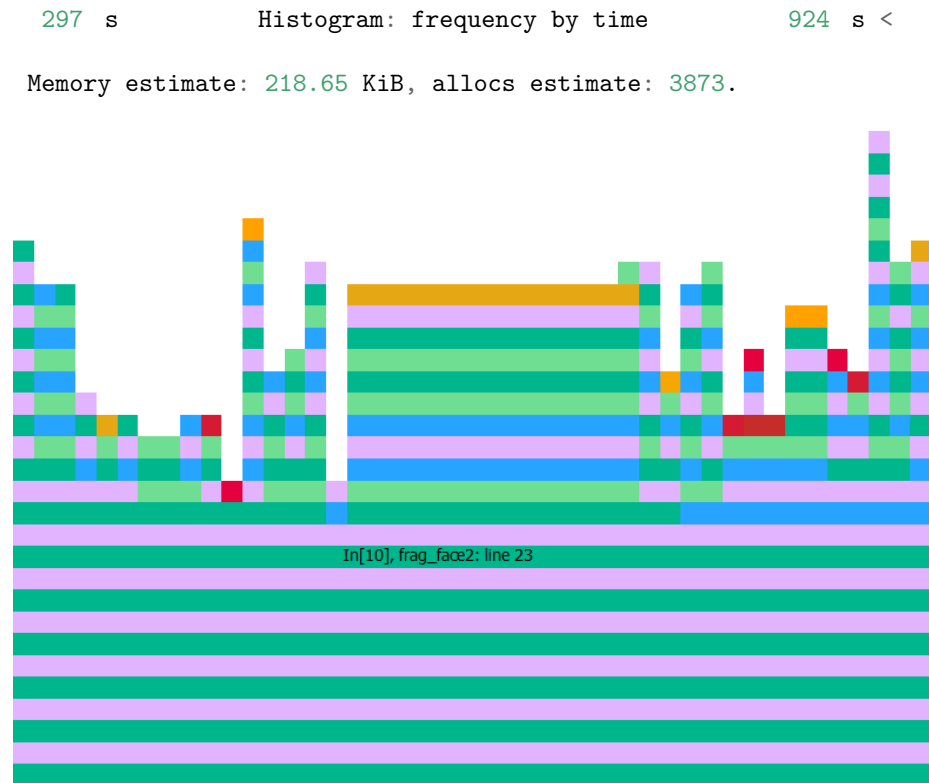


Figure 5: Grafico di ProfileView della funzione modificata

### merge\_vertices

Anche per quanto riguarda questa funzione abbiamo effettuato un controllo su i vari tipi di variabili assegnati utilizzando la macro `@code_warntype`, questa volta però non erano presenti variabili di tipo `Any` che ci avrebbero dunque destabilizzato i tipi della funzione. Per ottimizzare quest'ultima abbiamo, un'altra volta, introdotto opportunamente davanti ai cicli `for` la macro `@async` che, parallelizzando le operazioni di calcolo, ci ha permesso di avere un'ottimizzazione del 30% sul tempo di esecuzione.

```
@benchmark merge_vertices(Lar.Points(V),Lar.ChainOp(EV),Lar.ChainOp(FE),1e-4)
```

```
BenchmarkTools.Trial: 10000 samples with 1 evaluation.
```

```

Range (min ... max): 39.200 s ... 13.339 ms  GC (min ... max): 0.00% ... 99.16%
Time  (median):      49.400 s                GC (median):      0.00%
Time  (mean ±  ):    74.714 s ± 368.686 s    GC (mean ±  ): 18.01% ± 3.68%

```



39.2 s            Histogram: log(frequency) by time            141 s <

Memory estimate: 64.00 KiB, allocs estimate: 920.

Notiamo in seguito come vengono modificati i tempi dopo l'ottimizzazione.

**@benchmark** merge\_vertices2(Lar.Points(V),Lar.ChainOp(EV),Lar.ChainOp(FE),1e-4)

BenchmarkTools.Trial: 10000 samples with 1 evaluation.

Range (min ... max): 34.700 s ... 94.229 ms    GC (min ... max): 0.00% ... 99.75%

Time (median): 54.600 s                      GC (median): 0.00%

Time (mean ± ): 99.073 s ± 1.576 ms    GC (mean ± ): 27.47% ± 1.73%

34.7 s            Histogram: frequency by time            218 s <

Memory estimate: 56.56 KiB, allocs estimate: 779.

### spatial\_arrangement

Di nuovo, anche per questa funzione è stato effettuato un controllo su i vari tipi di variabili utilizzando la macro `@code_warntype`, quindi abbiamo stabilizzato i tipi delle variabili e parallelizzando le funzioni `merge_vertices` e `frag_face`, che vengono richiamate all'interno della funzione corrente, abbiamo ottenuto un codice che si comporta come una versione più veloce del codice precedente risparmiando circa un 40% del tempo di esecuzione.

**@benchmark** Lar.Arrangement.spatial\_arrangement(Points(V),ChainOp(EV),ChainOp(FE),false)

BenchmarkTools.Trial: 1551 samples with 1 evaluation.

Range (min ... max): 2.869 ms ... 7.011 ms    GC (min ... max): 0.00% ... 52.79%

Time (median): 2.966 ms                      GC (median): 0.00%

Time (mean ± ): 3.222 ms ± 846.503 s    GC (mean ± ): 6.52% ± 12.05%

2.87 ms            Histogram: log(frequency) by time            6.47 ms <

Memory estimate: 3.02 MiB, allocs estimate: 58808.

Notiamo in seguito come vengono modificati i tempi dopo l'ottimizzazione.

**@benchmark** spatial\_arrangement(Points(V), ChainOp(EV), ChainOp(FE), false)

BenchmarkTools.Trial: 2612 samples with 1 evaluation.

```
Range (min ... max): 1.661 ms ... 6.831 ms    GC (min ... max): 0.00% ... 60.79%
Time (median):      1.732 ms                  GC (median):    0.00%
Time (mean ± ):     1.911 ms ± 668.375 s      GC (mean ± ):   6.28% ± 11.05%
```

```
1.66 ms      Histogram: log(frequency) by time      5.26 ms <
```

```
Memory estimate: 1.59 MiB, allocs estimate: 28956.
```

## Azioni Github

Grazie all'utilizzo del libro *Hands-On Julia Programming*, in particolare il capitolo 13, si sono costruite diverse **Actions** di Github, le quali eseguono delle istruzioni specifiche quando Github rileva gli eventi di attivazione corrispondenti. Ogni volta che c'è un nuovo **push** sul branch **master**, viene effettuata una simulazione per verificare che il modulo `TGW3D.jl` venga correttamente aggiunto sui sistemi operativi Ubuntu (x86 e x64), Windows (x86 e x64) e macOS (x64). Inoltre, tramite la libreria `Documenter.jl`, viene creata la documentazione del nostro progetto, tramite i `docstrings` presenti nel modulo `TGW3D`, ed è inserita sulla pagina di Github corrispondente.

## Studio definitivo

Giunti nella fase finale del progetto è stata ottenuta una nuova versione del codice nel quale è stato ottimizzato e parallelizzato ove possibile anche servendoci delle macro offerte da Julia (ad es. `Thread.@spawn`, `@sync`, `@async`). Inoltre sono state eliminate varie ridondanze del codice per ottenere una miglior eseguibilità e leggibilità, talvolta anche intere sotto funzioni.

## Problemi noti

Abbiamo riscontrato qualche problema nel corso del progetto e non per tutti è stato possibile arrivare ad una soluzione efficiente, infatti si noti come la parallelizzazione multi-channel non viene utilizzata. Come per la versione originale di LAR si pone il problema quando la funzione `frag` face channel viene chiamata senza istanziare nuovamente i parametri iniziali sui diversi canali. Infatti si genera un canale vuoto dove si rimarrà in attesa all'infinito e questo porterà l'intera funzione in un loop, appunto, senza fine. Inoltre abbiamo tentato di far girare il codice sul server DGX-1 utilizzando la libreria `CUDA.jl` per ottenere una parallelizzazione ad alte prestazioni, purtroppo non è stato possibile eseguire le funzioni in quanto è necessario che queste ritornino un valore nullo, nel nostro caso invece si ha sempre un valore diverso da nullo. Una possibile soluzione è quella di caricare tutto sulla memoria RAM delle GPU ma non è stato possibile in quanto viene utilizzato il tipo `Float 64` per rappresentare la matrice dei vertici `V`.

## Test

Per quanto riguarda la parte di test sono stati verificati quelli offerti da LAR ed inoltre è stata verificata la stabilità dei vari tipi di variabile utilizzando la macro `@inferred` che si occupa di verificare se il tipo assegnato rispetti il tipo atteso da quella specifica variabile su cui viene applicata. E' stata inoltre implementata qualche funzione di test per controllare il corretto funzionamento del codice ed è stato effettuato un ulteriore controllo per accettarsi che i risultati ottenuti siano conformi con quelli della versione originale di LAR.

## Sviluppi futuri

Il progetto offre ancora un possibile refactoring futuro, infatti come visto in precedenza potrebbe essere utile osservare i risultati che dovrebbe fornirci la parallelizzazione effettuata con la libreria `CUDA.jl` o magari migliorare funzioni per ottenere una minore complessità computazionale.

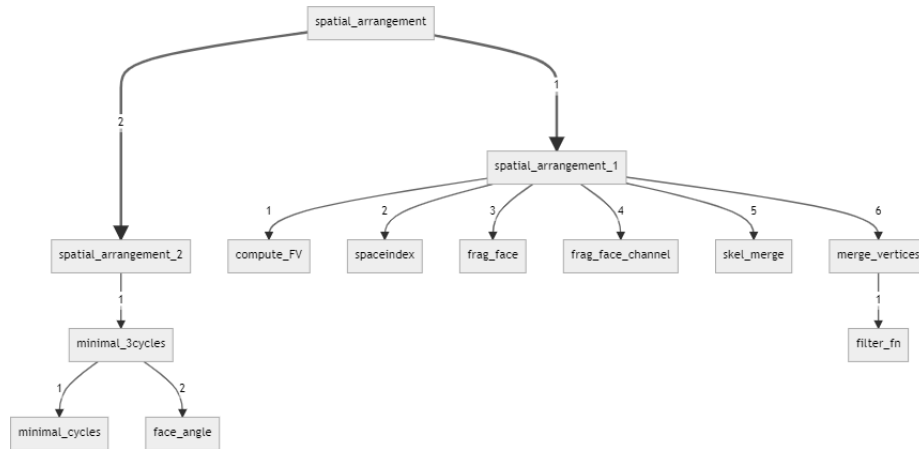


Figure 6: Grafo delle Dipendenze di `spatial_arrangement.jl`