

Algoritmi per la trasformata di Burrows-Wheeler Posizionale con compressione run-length

Davide Cozzi
matr. 829827

Negli ultimi anni si è assistito a un cambio di paradigma nel campo della bioinformatica, ovvero il passaggio dallo studio della sequenza lineare di un singolo genoma a quello di un insieme di genomi, provenienti da un gran numero di individui, al fine di poter considerare anche le varianti geniche. Questo nuovo concetto è stato nominato per la prima volta da Tettelin, nel 2005, con il termine di *pangenoma*. Grazie ai risultati ottenuti in pangenomica, ci sono stati miglioramenti sia nel campo della biologia che in quello della medicina personalizzata, grazie al fatto che, con il pangenoma, si migliora la precisione della rappresentazione di multipli genomi e delle loro differenze.

Il genoma umano di riferimento (GRCh38.p14), è composto da circa 3.1 miliardi di basi, con più di 88 milioni varianti tra i genomi sequenziati, secondo i risultati ottenuti nel 1000 Genome Project. Considerando come la quantità dei dati di sequenziamento sia destinata ad aumentare esponenzialmente nei prossimi anni, grazie al miglioramento delle tecnologie di sequenziamento, risulta necessaria la costruzione di algoritmi e strutture dati efficienti per gestire una tale informazione. In merito, uno degli approcci più usati per rappresentare il pangenoma è un pannello di aplotipi, ovvero, computazionalmente, una matrice di M righe, corrispondenti agli individui, e N colonne, corrispondenti ai siti con le varianti. Si specifica che, con il termine aplotipo, si intende l'insieme di alleli, ovvero di varianti, che un organismo eredita da ogni genitore.

In questo contesto trova spazio uno dei problemi fondamentali della bioinformatica, ovvero quello del pattern matching. Inizialmente tale concetto era relativo allo studio di un piccolo pattern all'interno di un testo di grandi dimensioni, ovvero il genoma di riferimento. Ora, con l'introduzione del pangenoma, tale problema si è adattato alle nuove strutture dati.

Lo scopo di questa tesi è ottimizzare il problema del pattern matching, inteso come ricerca dei set-maximal exact match (SMEM) tra un aplotipo esterno e un pannello di aplotipi, in una delle strutture dati più utilizzata: la *trasformata di Burrows-Wheeler Posizionale* (PBWT). Il progetto di tesi, svolto in collaborazione con il prof. Gagie (Dalhousie University) e la prof.ssa Boucher (University of Florida), ha quindi permesso lo sviluppo di una variante **run-length encoded** della PBWT, detta **RLPBWT**, che permettesse di risolvere tale problema.

Stato dell'arte

Parlando pattern matching tra un pattern e un testo, una delle strutture dati che bisogna citare è la ben nota *trasformata Burrows-Wheeler (BWT)*, una trasformata reversibile che ha permesso, anche memorizzando in modo compatto il testo, di ottenere algoritmi efficienti per il pattern matching. La BWT, inoltre, è fortemente legata al concetto di Suffix Array (SA), definito come la lista lessicograficamente ordinata delle posizioni di partenza di tutti i suffissi di un testo, e a quello delle lunghezze del Longest Common Prefix (LCP) tra ogni suffisso consecutivo indicizzato nel SA.

Invece, allo scopo di risolvere il problema del calcolo degli SMEM tra un pannello di aplotipi e un aplotipo esterno, Durbin, nel 2014, propose una struttura dati ispirata alla BWT, detta *Trasformata di Burrows-Wheeler Posizionale (PBWT)*. Tale trasformata viene costruita a partire da un pannello di aplotipi, rappresentato, riferendosi al solo caso bi-allelico, tramite una matrice binaria. Cruciale è il fatto che tale struttura permetta di calcolare gli SMEM tra un aplotipo esterno e il pannello in tempo $\mathcal{O}(MN)$, mentre una soluzione naïve impiegherebbe $\mathcal{O}(M^2N)$. Gli SMEM sono tali per cui gli indici di inizio e fine del match sono i medesimi sia sul pannello, in termini di indici di colonna, che sull'aplotipo query. Tale vincolo, da cui deriva il termine “posizionale”, non è soddisfacibile dalla BWT ed è dovuto al fatto che ogni colonna (o indice della query) rappresentano un preciso sito per una specifica variante genica. Il tradeoff di questo algoritmo, conosciuto anche come *algoritmo 5 di Durbin*, è la richiesta in termini di spazio (13NM bytes secondo l'autore) e superare questo limite è l'obiettivo principale di questo progetto di tesi.

Brevemente, il funzionamento della PBWT prevede la costruzione di due insiemi di array, tramite l'*ordinamento dei prefissi inverso* a ogni colonna del pannello, detti *insieme dei prefix array* e *insieme dei divergence array*. Per ogni colonna, secondo l'ordinamento dettato dalla stessa, i due array presentano un comportamento analogo a quanto visto per il suffix array e l'array LCP nella BWT.

Un'altro obiettivo raggiunto negli ultimi anni è stato quello di studiare la costruzione di un'unica BWT partendo da multipli genomi. A tal fine si è sfruttata una caratteristica della BWT, ovvero la tendenza a produrre una sequenza con caratteri uguali in posizioni consecutive, a causa delle ripetizioni di determinate sottostringhe nel testo. Partendo da molte sequenze genomiche concatenate si hanno, ovviamente, molte regioni ripetute che comportano tali sequenze massimali di caratteri uguali nella BWT, dette run.

Si è quindi ideata la *trasformata Burrows-Wheeler Run-Length encoded (RLBWT)* dove ogni run viene memorizzata in modo efficiente come coppia (carattere, lunghezza della run). Ad esempio, la stringa `aaaaaa` sarebbe memorizzata come `(a,6)`. Alcuni paper recenti hanno proposto, per questa struttura dati compressa, un nuovo tipo di indicizzazione: il cosiddetto *r-index*. Tale indice non è lineare sulla lunghezza del testo ma sul numero di run della sua BWT, riducendo lo spazio in memoria richiesto dall'indice stesso. L'*r-index* include la RLBWT e un suffix array sample, ovvero i valori del SA all'inizio e alla fine di ogni run. Tali articoli hanno portato alla produzione di due tool, *MONI* e *PHONI*, alle cui tecniche è fortemente ispirata questa tesi. Queste due soluzioni hanno entrambe l'obiettivo di calcolare i maximal exact match (MEM) tra un testo e un

pattern, ovvero sottostringhe del pattern che sono anche sottostringhe del testo, avendo che tale match non può essere esteso, in entrambe le direzioni, senza introdurre un mismatch.

Si noti che il calcolo dei MEM è direttamente correlato alla costruzione dell'array delle *Matching Statistics (MS)*. Tale array, lungo quanto il pattern e formato da coppie (posizione pos , lunghezza len), annota, per ogni posizione del pattern, la lunghezza len di un match, anche non massimale, con una sottostringa nel testo avente indice iniziale pos . Estraendo da tali match i MEM si possono poi ottenere tutte altre occorrenze del medesimo MEM nel testo. In *MONI*, per il calcolo delle MS, è stato usato anche il concetto di *threshold*, definito come il minimo valore dell'array LCP tra due run consecutive dello stesso carattere. Un ulteriore miglioramento si è registrato in *PHONI* con l'uso delle *LCE query* per il calcolo dell'array MS. Infatti, tale struttura, dati due indici del testo i e j , restituisce il più lungo prefisso comune tra il suffisso i -esimo e il suffisso j -esimo del testo.

Si denota, infine, un collegamento naturale che si ha tra la PBWT e la BWT, avendo, ad esempio, che il prefix array, in una certa colonna, della prima corrisponde al suffix array della seconda mentre il divergence array è una diversa rappresentazione dell'array LCP. Anche grazie a queste premesse, si è basato il progetto di tesi sulla costruzione RLPBWT a partire dalle tecniche teorizzate per la RLBWT.

Contributo

L'idea con la quale si è sviluppata questa tesi vede, come punto di partenza, alcuni primi risultati teorici, presenti in letteratura, che caratterizzavano una variante run-length encoded della PBWT. Purtroppo, tale proposta presentava alcune ridondanze nei dati memorizzati e non caratterizzava alcuna tecnica algoritmica per il calcolo degli SMEM. Inoltre, per quanto l'intuizione iniziale fosse quella di adattare l'algoritmo 5 di Durbin all'uso con una struttura run-length encoded, non si è trovato un modo per memorizzare i dati del divergence array in modo proporzionale al numero di run. Inoltre non si è trovata una soluzione efficiente per utilizzare i sample del prefix array ad inizio e fine di ogni run.

Si è quindi deciso di cambiare approccio al problema, ispirandosi ai risultati già ottenuti per la RLBWT. Tale approccio si basa anche sull'uso dei bitvector sparsi, una struttura dati succinta che permette di memorizzare e interrogare vettori binari efficientemente. Quindi, le strutture necessarie all'indicizzazione delle run e al cosiddetto mapping, ovvero il “seguire” una riga dalla sua posizione permutata in una certa colonna alla posizione permutata in quella successiva nella matrice PBWT, sono state implementate tramite bitvector sparsi, con un numero di simboli $\sigma = 1$ proporzionale al numero run. Al fine di avvicinarsi alle idee proposte in *MONI* e *PHONI* è quindi servito uno studio teorico preliminare per ridefinire: matching statistics (e conseguente calcolo degli SMEM), threshold e LCE query. In particolare, grazie agli ultimi due concetti, si è potuto non memorizzare il divergence array. Parlando di matching statistics, si ha che sono definite tramite un array, lungo quanto il pattern e formato da coppie (riga row , lunghezza len), che, per ogni colonna, tiene traccia del suffisso comune che non sia es-

tendibile a sinistra, terminate in quella colonna e lungo len , tra la riga row del pannello e l'aplotipo query. Una volta calcolato tale array è possibile estrarre uno SMEM, terminate in colonna k tra la query e la riga row , ed estendere, tramite una struttura dati a supporto, tale risultato a tutte le altre righe del pannello che presentano il medesimo SMEM. Il primo metodo di calcolo di tale array è stato basato sull'utilizzo delle threshold. Ragionando sulla *matrice PBWT*, una threshold è definita come l'indice del massimo valore del divergence array all'interno di una run (comprendendo anche la testa, qualora esistente, della run successiva, essendo il suo valore del divergence array calcolato sfruttando anche la coda della run corrente). L'insieme delle threshold per una certa colonna è stato memorizzato come bitvector sparso. Inoltre, si è provveduto a tenere in memoria i sample di prefix array a inizio e fine di ogni run.

Grazie all'uso delle threshold si è potuto sviluppare un algoritmo efficiente, dal punto di vista della memoria richiesta, per il calcolo delle matching statistics in due "sweep" sul pattern, calcolandone prima le posizioni e poi, tramite random access al pannello, anche le lunghezze. Tale soluzione richiedeva in memoria l'intero pannello, per il quale si è scelto di usare uno Straight-Line Program (SLP), ovvero una grammatica context-free che genera una e una sola parola, molto compatta in memoria, sulla quale è possibile effettuare random access (in tempo non costante). Ad esempio, un pannello $70,000 \times 46,538$, che normalmente richiede $\sim 3.3\text{GB}$ in memoria ($\sim 451\text{MB}$ se compresso tramite GZIP), viene memorizzato, tramite SLP, in $\sim 7\text{MB}$.

Riprendendo quanto fatto in *PHONI* per la RLBWT, si è, poi, deciso di risparmiare ulteriore spazio eliminando l'uso delle *threshold*. Per ottenere il calcolo dell'array delle matching statistics si sono quindi usate le LCE query, ridefinite in questo caso come il suffisso comune più lungo tra due righe del pannello, eventualmente fissando il termine a una colonna precisata. Il loro calcolo è permesso in modo efficiente dall'uso dell'SLP. Calcolando la lunghezza di tale suffisso comune, è possibile computare anche le lunghezze delle matching statistics contemporaneamente al calcolo delle righe. Quindi, si è ottenuto il calcolo completo di tale array in un singolo "sweep" sul pattern, passando da un tempo proporzionale a $2N$ a uno proporzionale a N . Si noti che il calcolo degli SMEM viene fatto contemporaneamente al calcolo delle lunghezze delle matching statistics quindi, con l'uso delle LCE query, si è ridotto sia lo spazio necessario in memoria per la RLPBWT che il tempo di calcolo degli SMEM.

Risultati sperimentali

L'obiettivo della fase sperimentale è stato quello di confrontarsi con l'algoritmo 5 di Durbin, permettendo di verificare la riduzione della memoria necessaria al calcolo degli SMEM. L'importanza di ottenere dati quantitativi è anche dovuta al limite dato dalla non forte caratterizzazione asintotica, dal punto di vista della complessità temporale, delle operazioni con le strutture dati succinte, fattore che potrebbe comportare errori di valutazione limitandosi a stime teoriche. L'uso di tali strutture comporta un aumento atteso dei tempi di calcolo. Le simulazioni sono state effettuate su pannelli simulati tramite uno dei software più usati in bioinformatica per generare pannelli di aplotipi.

Per questa sintesi, si è scelto di riportare alcuni risultati relativi ad un pannello

$70,000 \times 46,538$, che è stato interrogato con 30,000 query, al fine di ridurre la fluttuazione statistica dei risultati. I risultati qui riportati, relativi alla PBWT, sono stati ottenuti usando l'implementazione ufficiale della stessa. Per la RLPBWT, invece, si è utilizzata l'implementazione con le LCE query.

In merito al tempo di calcolo si è ottenuto il risultato atteso: con la PBWT si ottiene il calcolo degli SMEM in 411s mentre con la RLPBWT in 1824s, ovvero poco più del quadruplo del tempo. Si è passato quindi ad analizzare i risultati in termini di memoria. Secondo le stime di Durbin, gli array necessari al funzionamento dell'algoritmo 5 richiederebbero $\sim 13NM$ bytes, implicando, per il pannello in analisi, $\sim 40GB$ di memoria. Anche sperimentalmente si sono registrati picchi di memoria prossimi ai 40GB di memoria, confermando le stime. Invece, per la RLPBWT il picco registrato è stato di appena $\sim 3GB$, richiedendo circa il 92.5% di memoria in meno rispetto alla soluzione di Durbin.

Conclusioni

In conclusione, la RLPBWT proposta è stata in grado di ridurre sensibilmente la quantità di memoria necessaria per la risoluzione del problema del calcolo degli SMEM tra un pannello di aplotipi e un aplotipo esterno. Si segnala, inoltre, come siano possibili diversi sviluppi futuri. Tra di essi si ha un'ulteriore ottimizzazione della struttura, sia in termini di gestione del mapping che, eventualmente, di gestione di più query contemporaneamente. In merito a quest'ultimo sviluppo si segnala che Durbin ha proposto anche un algoritmo per il calcolo degli SMEM tra un pannello di aplotipi e un pannello di query. Questo algoritmo è basato sulla creazione di un unico pannello, su cui costruire la PBWT, e sul calcolo dei match interni al pannello stesso. Tale implementazione, nel setup di test descritto nella sezione precedente (che si noti comportare il perfetto input per tale soluzione), risulta essere molto performante sia in termini di tempo (22s) che di memoria utilizzata (10,084KB) durante l'esecuzione.

Inoltre, sono possibili diverse generalizzazioni rispetto alle caratteristiche del pannello, come ad esempio pannelli multi-allelici o con dati mancanti. Tali caratteristiche sono, infatti, comuni in dati reali. In particolare, la gestione di dati mancanti, molto rilevante a causa della non perfezione delle tecnologie di sequenziamento, risulta essere un problema aperto in bioinformatica. Sarà quindi richiesto lo sviluppo di nuove metodologie, basate, eventualmente, su algoritmi parametrici o algoritmi approssimati, per la risoluzione del problema del calcolo degli SMEM. Si segnala, infine, come la RLPBWT sia potenzialmente in grado di risolvere efficientemente anche altri task, come ad esempio la ricerca di k-SMEM, ovvero SMEM con un aplotipo esterno che coinvolgano esattamente k righe nel pannello.

Le potenzialità di tale struttura sono quindi molteplici e, grazie al ridotto consumo di memoria, si hanno le giuste premesse perché venga utilizzata per gestire e interrogare grosse moli di dati reali, incrementando le capacità di studio, previsione e inferenza che si possono avere grazie allo studio del pangenoma.