



C++ for High-Performance Computing

Alessandro Castelli [12246581]

January 26, 2024

1 Introduzione

In questo elaborato, saranno analizzati e discussi tre articoli che trattano dell'utilizzo del linguaggio di programmazione C++ nel contesto del calcolo ad alte prestazioni. I tre articoli esaminano il tema da prospettive diverse. Gli articoli selezionati sono i seguenti:

1. *C++ Reflection for High Performance Problem Solving Environments* [1], reperibile al seguente link: <https://citeseerx.ist.psu.edu>
2. *How Templates Enable High-Performance Scientific Computing in C++* [2], reperibile al seguente link: <https://ieeexplore.ieee.org>
3. *Conduit: A C++ Library for Best-Effort High Performance Computing* [3], reperibile al seguente link: <https://dl.acm.org>

Ciascuno di questi documenti si occupa di affrontare problemi in ambienti ad alte prestazioni. In particolare, il primo articolo presenta un sistema di riflessione per il linguaggio C++, il quale consente la manipolazione dinamica di oggetti e funzioni del programma durante l'esecuzione. Il secondo articolo tratta dell'utilizzo del linguaggio C++ nello sviluppo di codice scientifico flessibile e ad alte prestazioni, sfruttando le potenti funzionalità dei template. Il terzo articolo introduce Conduit, una libreria C++ che fornisce un'interfaccia per implementare software che fa uso di comunicazione inter-thread e inter-processo a "miglior sforzo". Il concetto di "miglior sforzo" è una strategia che riduce la sincronizzazione e i requisiti di affidabilità dell'hardware, accettando il non determinismo in cambio di efficienza. Nel seguito del documento, verranno esposti gli argomenti trattati nei singoli articoli insieme alle relative metodologie, risultati e considerazioni critiche sulle implementazioni proposte.

2 C++ Reflection for High Performance Problem Solving Environments

L'articolo discute l'importanza degli Ambienti di Risoluzione dei Problemi (PSE), sistemi informatici che forniscono le risorse necessarie per risolvere specifiche classi di problemi. Tali PSE dovrebbero includere

metodi avanzati di soluzione, selezione automatica o semi-automatica dei metodi, e la capacità di incorporare nuovi approcci. Nel calcolo scientifico, i PSE devono affrontare compiti intensivi in termini di CPU, spesso sviluppati come componenti in linguaggi ad alte prestazioni. L'articolo sostiene che i PSE dovrebbero consentire il dinamico accoppiamento di compiti, con un'interfaccia utente grafica o uno scripting ambiente. Tuttavia, la mancanza di riflessione nei moderni linguaggi HPC porta gli sviluppatori di PSE a dipendere da linguaggi come Java, causando inconvenienti. L'articolo propone l'implementazione di funzionalità (di una libreria) di riflessione non invasiva e conformi agli standard in C++, dimostrando che questo può essere fatto in modo efficiente. Confronta il sovraccarico della riflessione con altri metodi e suggerisce che la sua implementazione è l'unico modo per incorporare funzionalità di riflessione in C++ in modo conforme agli standard e non invasivo. L'articolo discute i due tipi di riflessione a livello di codice: in fase di compilazione e in fase di esecuzione. La riflessione in fase di compilazione consente l'accesso alle informazioni sul tipo durante la compilazione, facilitando la programmazione generica, mentre la riflessione in fase di esecuzione offre la capacità di accedere dinamicamente alle informazioni sul tipo durante l'esecuzione del programma. Mentre linguaggi come Java, C# e Python supportano la riflessione come parte delle loro specifiche standard, C++ fornisce solo funzionalità limitate tramite le informazioni sul tipo in fase di esecuzione (RTTI). Visual C++ ha estensioni per la riflessione, ma con limitata portabilità. Per l'elaborazione ad alte prestazioni, Java e C# sono limitati, mentre Fortran domina, ma C++ è preferito per il middleware. La riflessione in fase di esecuzione richiede la generazione separata di metadati come codice C++ effettivo, poiché i compilatori C++ non generano automaticamente i metadati richiesti. L'articolo propone che C++ dovrebbe supportare la riflessione in modo standard e non intrusivo, e mostra come questo può essere fatto in modo efficiente.

Esempio preso dal documento: Considera il seguente blocco di codice:

```
1      classType = ClassType::getClass("
2          Service1");
3      obj = classType.createInstance();
4      obj.invoke("method1");
```

L'uso della riflessione consente di incorporare dinamicamente moduli esistenti in un'applicazione in modo dinamico e flessibile. Ad esempio, considerando una funzione come `init_lib()`, di solito richiederebbe la scrittura di codice specifico, ma con la riflessione, è possibile specificare il nome della funzione in un file di configurazione, consentendo la chiamata dinamica senza la necessità di scrivere nuovo codice o ricompilare. Questo approccio si estende anche ad altre funzioni del modulo, consentendo un incollaggio automatico tra moduli mediante l'uso di un'ontologia o una descrizione semantica. La riflessione diventa così uno strumento potente per lo sviluppo di codice riutilizzabile, semplificando il processo di integrazione di moduli esistenti in un'applicazione più ampia. Rendendo "Service1" e "method1" parametri configurabili, questo codice potrebbe essere utilizzato per invocare qualsiasi metodo. I maggiori vantaggi in questo sarebbero quindi:

- **Configurabilità dinamica:** Utilizzando la riflessione, è possibile specificare dinamicamente quali classi e metodi devono essere utilizzati senza dover modificare il codice sorgente. Ad esempio, nel blocco di codice fornito, il nome della classe ("Service1") e il nome del metodo ("method1") possono essere specificati in un file di configurazione anziché nel codice.
- **Integrazione di moduli esterni:** La riflessione semplifica l'integrazione di moduli esterni o librerie in un'applicazione senza la necessità di adattare il codice sorgente esistente. Ciò rende più facile aggiungere, rimuovere o sostituire funzionalità senza dover ricompilare l'applicazione principale.
- **Riusabilità del codice:** La riflessione può favorire la scrittura di codice più generico e riusabile. Nel caso di funzioni come "init_lib()", la capacità di chiamare dinamicamente funzioni in base al loro nome semplifica l'utilizzo di moduli senza dover scrivere codice specifico per ciascuna funzione.
- **Facilità nell'aggiornamento e manutenzione:** Se si utilizza la riflessione per gestire dinamicamente le funzionalità dell'applicazione, può diventare più semplice aggiornare o modificare parti dell'applicazione senza impattare altre parti del

codice.

Riflessione: Idee su come può essere applicata Il documento da alcune idee su come applicare la riflessione utilizzando diverse tecniche, di seguito troverai diversi contesti e casi d'uso in cui la riflessione viene implementata o sfruttata per ottenere determinati vantaggi o funzionalità.

- **Serializzazione:** Il processo di serializzazione, che consiste nel convertire lo stato di un oggetto in una sequenza di byte e successivamente deserializzarlo, è un metodo comune per la comunicazione tra applicazioni poco accoppiate. Nel contesto di un PSE, questa sequenza di byte può essere impiegata per trasferire dati dall'output di un'attività all'input di un'altra. Utilizzando la riflessione, il mittente può serializzare dinamicamente lo stato di un oggetto e inviarlo al ricevente, il quale può creare gli oggetti dinamicamente basandosi sulle loro descrizioni e popolarli con le informazioni sullo stato corrispondente.
- **Interfaccia a un Ambiente di Scripting:** Nel contesto della riflessione e dell'interfaccia a un ambiente di scripting, l'obiettivo è consentire agli utenti di uno scripting language, come Python, di utilizzare funzionalità implementate in linguaggi ad alte prestazioni come C, C++ o Fortran senza la necessità di riscrivere completamente il codice in uno scripting language. Le librerie ad alte prestazioni, scritte in linguaggi come C, C++ o Fortran, sono spesso utilizzate per compiti computazionali intensivi o per ottimizzare le prestazioni. Tuttavia, l'accesso diretto a queste librerie da parte di utenti che preferiscono linguaggi di scripting come Python potrebbe essere complesso a causa delle differenze nella gestione della memoria, nella sintassi e nella struttura dei linguaggi. La riflessione viene utilizzata per creare un'interfaccia tra queste librerie e l'ambiente di scripting. Ciò significa che, anziché richiedere agli utenti di scripting di scrivere wrapper o bindings complessi per chiamare le funzioni di queste librerie, la riflessione viene impiegata per fornire un meccanismo più automatico e meno oneroso.

- **Istanziamento di Oggetti:** La riflessione è impiegata per risolvere il problema dell'istanziamento polimorfico degli oggetti, offrendo un'alternativa alla necessità di avere un metodo di fabbrica specifico per ogni classe. Questo approccio rende il processo di istanziamento più flessibile e meno intrusivo. Nel contesto dell'istanziamento polimorfico, la pratica comune è utilizzare il "factory method pattern", che richiede che ogni classe candidata implementi un metodo dedicato per la creazione di un nuovo oggetto del tipo richiesto. Questa procedura può risultare onerosa e intrusiva, specialmente quando si lavora con nuove classi o con classi già esistenti che devono essere adattate. Con l'impiego della riflessione, non sono richiesti i vincoli del "factory method pattern". Invece, è possibile istanziare gli oggetti dinamicamente, senza la necessità di implementare metodi di fabbrica specifici.

Obiettivi della Libreria di Riflessione in C++

1. **Accesso a Runtime ai Membri:** Fornire la possibilità di accedere a runtime alle funzioni membro e ai membri di dati di una classe, consentendo l'invocazione di funzioni membro e la lettura/scrittura di membri di dati.
2. **Completezza:** La libreria dovrebbe offrire informazioni complete sulle classi e i loro membri, consentendo un accesso dettagliato.
3. **Conformità agli Standard:** Essere conforme allo standard ISO C++, garantendo la portabilità della libreria senza dipendere da caratteristiche non standard.
4. **Efficienza:** Ridurre al minimo l'overhead dell'accesso alle classi e ai loro membri attraverso la riflessione. L'utilizzo di modelli C++ per registrare la maggior parte dei metadati a compile time contribuisce a garantire un codice risultante efficiente.
5. **Non Intrusività:** Implementare la riflessione senza richiedere modifiche al codice esistente. Evitare l'aggiunta di annotazioni speciali alle classi esistenti per garantire una facile integrazione con il codice preesistente e ridurre il rischio di errori nelle sezioni

di meta-informazioni.

2.1 Implementazione della libreria di riflessione in C++

La libreria è strutturata con un nucleo di classi di base e un insieme di classi generate per gestire le informazioni specifiche del tipo. Queste classi di metadati specifici del tipo vengono create mediante l'analisi delle classi di destinazione fornite dall'utente e la successiva elaborazione degli alberi sintattici. Questo approccio ci consente di memorizzare e presentare in modo efficiente le informazioni di riflessione senza essere invasivi e garantendo la conformità agli standard del linguaggio C++.

Metaclasses `ClassType` è la metaclassa utilizzata per rappresentare classi definite dall'utente. Queste classi derivano da una classe più generica chiamata `Type` (Guarda figura 1).

`ClassType`, insieme alle sue classi di supporto, fornisce le seguenti caratteristiche:

- Nome e tipo
- Lista di membri dati e funzioni membro
- Interfaccia di istanziamento
- Informazioni sull'ereditarietà

Dopo aver creato un'istanza di `ClassType`, l'oggetto di destinazione effettivo può essere creato. Gli altri tipi derivati, `FundamentalType`, `ArrayType` e `PointerType`, come suggeriscono i loro nomi, sono utilizzati per rappresentare tipi primitivi (ad esempio, `integer`, `double`), array e puntatori.

Member Classes Ci sono due tipi di classi membro, ovvero membri dati e funzioni membro. Queste encapsulano i membri di una classe e forniscono mezzi per accedervi in modo indiretto, dato il loro nome a tempo di esecuzione. Invece di mantenere l'offset al membro encapsulato, ogni classe membro mantiene un puntatore al suo rispettivo membro dati o funzione membro. Ciò assicura che questa libreria sia completamente conforme allo standard C++.

Data Members Ogni membro dati in una classe è rappresentato da un oggetto `DataMember`. Questo oggetto contiene informazioni come nome e tipo. Il metodo `ref()` restituisce un riferimento all'oggetto rappresentato, consentendo al programma di manipolarlo come se avesse accesso diretto al membro dati. `BoundDataMember` è consapevole dell'oggetto associato, eliminando la necessità di passare un riferimento a `classAObj`. I membri dati vincolati sono ora completamente indipendenti dal tipo sottostante, rendendoli adatti a codice completamente generico.

Member Functions Le funzioni membro sono rappresentate dalle classi `MemberFunction`, che forniscono informazioni come nome, tipo di ritorno e interfacce aggiuntive. Gli argomenti delle funzioni membro sono gestiti come un vettore di oggetti generici di tipo (`Type`), consentendo la rappresentazione di tipi fondamentali, puntatori, array e classi definite dall'utente. L'invocazione di funzioni membro può avvenire in due modi: uno richiede l'invio degli argomenti singolarmente con un puntatore all'istanza corrispondente, l'altro accetta un vettore di argomenti.

Performance Dopo l'implementazione della libreria, sono stati condotti test al fine di valutare le prestazioni. Era atteso un calo di prestazioni, e l'obiettivo consisteva nel misurare l'incremento di tempo rispetto alle chiamate dirette. Ogni test coinvolgeva l'istanziatura dinamica di un oggetto e l'invocazione di un metodo su di esso, con cinque metodi che variavano nel numero di argomenti (da 1 a 5). I metodi sono stati invocati come chiamate dirette e virtuali, oltre che utilizzando la riflessione. Nel caso dell'uso della riflessione, l'istanza dell'oggetto è stata effettuata mediante metodi riflessivi. L'attenzione principale era focalizzata sul rilevamento del sovraccarico nell'uso della riflessione in confronto alle chiamate dirette, calcolando questo sovraccarico come il tempo aggiuntivo in percentuale rispetto alle chiamate dirette. Quello che è possibile osservare dai test è che il sovraccarico per la riflessione in C++ aumenta con il numero di argomenti. Questo è principalmente dovuto alla costruzione dinamica della lista degli argomenti, che comporta poche piccole allocazioni di memoria.

2.2 My vision

La mia visione

3 How templates enable high-performance scientific computing in C++

Il linguaggio di programmazione C++ offre una potente struttura di templates, consentendo lo sviluppo di software flessibile senza sacrificare prestazioni. I templates permettono di definire classi e funzioni parametrizzate in termini di altri tipi e costanti. Questa caratteristica è fondamentale per la costruzione di codici scientifici astratti e ad alte prestazioni in C++. Il framework Pooma è citato come esempio, supportando il calcolo scientifico ad alte prestazioni e fornendo astrazioni matematiche e fisiche avanzate. Pooma permette una transizione agevole tra esecuzione seriale e parallela su diverse piattaforme, inclusa la supercomputing.

Come funzionano i template in C++ Di seguito troverai un esempio banale di come possono essere utili i templates.

Listing 1: Max function without template

```
1 {  
2     if (a > b) return a;  
3     else return b;  
4 }
```

Se avessimo bisogno di scrivere una versione per float, double o qualsiasi altro tipo aritmetico, il codice sarebbe esattamente lo stesso. Invece di riprodurre questo codice per ogni tipo, possiamo scrivere una funzione template (Listing 2) per generare una funzione più generale.

Listing 2: Max function with template

```
1 template <class T>  
2 T max(T a, T b)  
3 {  
4     if (a > b) return a;  
5     else return b;  
6 }
```

Il simbolo `T` è un parametro del template in C++, e la sintassi "`class T`" può essere fuorviante perché `T` non deve necessariamente rappresentare una classe C++. Gli argomenti del template possono essere specificati in modo esplicito, ad esempio con '`max<int>(3, 2)`', dove il compi-

latore crea una versione concreta di `max` sostituendo `int` a `T`. Tuttavia, è più comune consentire al compilatore di dedurre il tipo osservando gli argomenti, come nel caso di `'max(3.0, 2.0)'`, dove il compilatore genererà una versione di `max` con `double` sostituito a `T`. Questa deduzione del tipo non è una semplice sostituzione testuale come avverrebbe con un preprocessore di macro. `T` è atteso abbia la semantica di un tipo, permettendo la dichiarazione di oggetti di quel tipo, come evidenziato negli argomenti e nel valore di ritorno della funzione `max`. In sintesi, l'utilizzo di template in C++ consente una flessibilità notevole nella creazione di funzioni e classi generiche, con la deduzione del tipo da parte del compilatore che contribuisce alla semplicità e alla chiarezza del codice.

3.1 Pooma

Array Concept Quando utilizzato da solo, un array si riferisce a tutti i valori del suo dominio e a cui possono venire applicate operazioni matematiche o funzioni elementari. Un Array in Pooma può avere fino a sette dimensioni e possono fungere da contenitori per tipi arbitrari. Il concetto di Array di Pooma supporta domini più complessi ed inoltre, l'indicizzazione degli Array in Pooma è polimorfica; cioè, l'operazione di indicizzazione `X(i1, i2)` può eseguire la mappatura da dominio a intervallo in una varietà di modi, a seconda del tipo specifico dell'Array che viene indicizzato. Analizziamo il modello del concetto di Array in Pooma, il template di classe Array. Le tre richieste più importanti dal punto di vista del design generale sono: • dominio arbitrario, • intervallo arbitrario, e • indicizzazione polimorfica. Il template della classe Array in Pooma permette di creare diverse classi Array, ognuna con un diverso numero di dimensioni (`Dim`), tipo di elementi (`T`) e modalità di indicizzazione (`EngineTag`). Questa flessibilità consente di definire array con domini arbitrari, intervalli di output arbitrari e diversi modi di indicizzazione, contribuendo a un design generale versatile ed efficiente.

Engine Il concetto di "Engine" in Pooma è fondamentale per l'indicizzazione polimorfica nella gestione degli array multidimensionali. La classe "Array" delega la memorizzazione e la ricerca dei dati a un oggetto "Engine", il cui design è guidato da requisiti specifici per essere considerato un modello del concetto di Engine.

La classe "Array" è parametrizzata da tre template: `Dim` (dimensione del dominio), `T` (tipo degli elementi dell'array) e `EngineTag` (modalità di indicizzazione). Questa parametrizzazione consente la creazione di diverse classi Array con caratteristiche specifiche, promuovendo un design flessibile e efficiente.

Il concetto di Engine è definito dai requisiti imposti dalla classe Array al suo motore. In particolare, il motore deve essere una specializzazione di un template generale "Engine" con parametri identici a quelli della classe Array. Deve inoltre definire pubblicamente un tipo chiamato "Index_t" e fornire una versione dell'operatore `()` che accetta indici di tipo "Index_t".

L'indirizzazione tra Array ed Engine consente a Pooma di supportare l'indicizzazione polimorfica. Ad esempio, se il motore lavora con un dominio discreto, definisce "Index_t" come un tipo integrale; se lavora con un dominio continuo, definisce "Index_t" come un tipo in virgola mobile.

La classe "Array" utilizza l'operatore `()` per passare gli indici al suo oggetto "Engine". Questa separazione consente a Array di essere un modello fedele del concetto di Array, offrendo un'ampia varietà di costruttori, operatori sovraccaricati e supporto per espressioni. Al contrario, gli oggetti Engine sono interfaccia a basso livello per una sorgente dati utente-definita, con accesso diretto ai dati gestito da Array.

L'approccio di Pooma, basato sulla separazione di interfaccia e implementazione, offre una maggiore complessità e ricchezza di funzionalità nella classe Array rispetto agli oggetti Engine, consentendo una facile estensione e personalizzazione da parte degli utenti.

3.2 Compile-time versus runtime polymorphism

Il confronto tra polimorfismo a tempo di compilazione e a tempo di esecuzione evidenzia le differenze cruciali in termini di flessibilità ed efficienza nell'implementazione del concetto di Engine in Pooma. L'articolo mette in evidenza il polimorfismo a tempo di compilazione, sottolineando che la conoscenza dei tipi durante la compilazione consente ottimizzazioni rilevanti. Viene confrontato con un'implementazione a tempo di esecuzione, evidenziando le limitazioni di flessibilità ed efficienza di quest'ultima.

La conclusione sottolinea che l'approccio a tempo di compilazione, mediante classi template e motori, offre una soluzione più flessibile ed efficiente rispetto a un'implementazione a tempo di esecuzione basata su ereditarietà e funzioni virtuali. Questa analisi può essere utile per comprendere le scelte di progettazione nell'implementazione di array multidimensionali in contesti scientifici.

3.3 My Vision

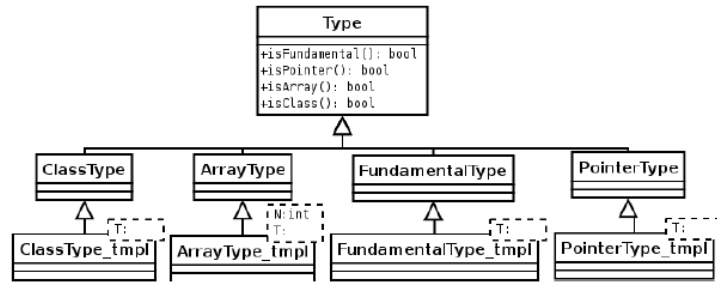


Figure 1: Metaclass hierarchy

References

- [1] Tharaka Devadithya, Kenneth Chiu, and Wei Lu. “C++ reflection for high performance problem solving environments”. In: *Proceedings of the 2007 spring simulation multiconference-Volume 2*. Citeseer. 2007, pp. 435–440.
- [2] S. Haney and J. Crotlinger. “How templates enable high-performance scientific computing in C++”. In: *Computing in Science & Engineering* 1.4 (1999), pp. 66–72. DOI: [10.1109/5992.774843](https://doi.org/10.1109/5992.774843).
- [3] Matthew Andres Moreno, Santiago Rodriguez Papa, and Charles Ofria. “Conduit: a c++ library for best-effort high performance computing”. In: *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*. 2021, pp. 1795–1800.