



UNIVERSITÀ DI TRENTO

Dipartimento di Ingegneria e Scienza dell'Informazione

Corso di Laurea in
Ingegneria Informatica, delle Comunicazioni ed Elettronica

ELABORATO FINALE

PROLOG PLANNER

Task planner logico per la manipolazioni di blocchi tramite un UR5

Supervisore
Prof. Luigi Palopoli

Laureando
Davide De Martini

Anno accademico 2022/2023

Ringraziamenti

A tutti

Indice

Sommario	2
1 Introduzione	2
1.1 Definizione del problema	3
1.2 Obiettivi desiderati	3
1.3 Struttura della tesi	3
2 Stato dell'arte	4
2.1 Prolog	4
2.1.1 Struttura e sintassi	5
2.1.2 Esecuzione	6
2.1.3 Debugging	7
2.2 Evoluzione di prolog	7
2.2.1 Tappe fondamentali dell'evoluzione di Prolog	8
2.3 Lavori notabili	9
3 Descrizione del caso di studio	10
3.1 Prima milestone: Studio di Prolog	11
3.2 Seconda milestone: Sviluppo del planner	12
3.2.1 Rappresentazione dei blocchi	12
3.2.2 Azioni del planner	13
3.2.3 Generatore del piano	15
4 Descrizione dell'architettura ROS	16
5 Conclusione	16
Bibliografia	16

Sommario

Sommario è un breve riassunto del lavoro svolto dove si descrive l'obiettivo, l'oggetto della tesi, le metodologie e le tecniche usate, i dati elaborati e la spiegazione delle conclusioni alle quali siete arrivati.

Il sommario dell'elaborato consiste al massimo di 3 pagine e deve contenere le seguenti informazioni:

- contesto e motivazioni
- breve riassunto del problema affrontato
- tecniche utilizzate e/o sviluppate
- risultati raggiunti, sottolineando il contributo personale del laureando/a

1 Introduzione

In questo primo capitolo viene introdotto il caso di studio, partendo dalla definizione del problema, definendo poi gli obiettivi desiderati e concludendo con una spiegazione della struttura della tesi.

Per la mia tesi triennale mi sono voluto concentrare sul campo dell'intelligenza artificiale e la robotica. Il caso di studio identificato dal prof. Luigi Palopoli, che è stato poi oggetto del mio tirocinio e della mia tesi, è l'utilizzo di Prolog, un linguaggio logico e dichiarativo, per l'implementazione di un task planner ad alto livello. Questo deve essere in grado di coordinare un manipolatore robotico, nel nostro caso un UR5 della Universal Robots, per l'operazione di manipolazione di blocchi. Il planner tramite delle primitive come *ruota* e *muovi* deve essere in grado di pilotare il braccio robotico per la creazione di un pilastro. Esso è stato concepito ad alto livello per permettere la compatibilità con più tipologie di robot e la flessibilità delle applicazioni. Nel caso studiato verrà utilizzato per la creazione, appunto, di un pilastro, ma questa astrazione ad "alto livello" permette di essere usato per più compiti: ad esempio per la creazione di una costruzione come una casa o qualsiasi struttura che si può creare con dei blocchi di Lego. Queste primitive verranno inviate al nodo controllore del movimento che, tramite algoritmi di cinematica e interpolazione dei punti, troverà le configurazioni dei giunti adatte al movimento richiesto.

Successivamente si è voluto implementare il tutto in un ambiente simulato, così da avere un riscontro anche visivo del lavoro svolto e capire le possibili applicazioni in un contesto reale. La simulazione è stata svolta con ROS e Gazebo, due strumenti open source ampiamente utilizzati nel mondo della robotica. Il primo ci permette di comunicare al robot tramite una serie di topic e servizi, mentre il secondo ci permette di simulare l'ambiente in cui il robot si trova.

La scelta di questo caso di studio è nata principalmente dal mio interesse verso la robotica e le applicazioni dell'intelligenza artificiale in vari contesti. L'utilizzo di un linguaggio logico per la creazione di un task planner è stato un approccio nuovo che non avevo mai considerato e fin da subito mi è interessato. La rappresentazione della conoscenza in un robot tramite Prolog è un approccio molto interessante che può essere applicato in molti altri contesti. Un altro motivo che mi ha portato a scegliere questo caso di studio è la sua possibilità di espansione. Due possibili miglioramenti potrebbero essere la temporizzazione delle azioni e la successiva ottimizzazione del tempo di esecuzione finale (*makespan*) e l'utilizzo del machine learning per istanziare i fatti iniziali. Sapere che questo lavoro possa essere portato avanti e migliorato è sicuramente un altro motivo principale della sua scelta. Mi sono quindi rivolto al prof. Palopoli e lui mi ha proposto di sviluppare questo progetto. La

scelta di utilizzare Prolog è nata dal fatto che è un ottimo strumento per modellare la conoscenza in un agente. Esso permette di creare delle "basi di conoscenza", contenenti sia fatti che regole, su cui successivamente fare inferenza. L'esecuzione di un programma prolog è comparabile alla dimostrazione di un teorema mediante la regola di inferenza della soluzione. Tutte queste premesse, e l'ampio utilizzo di prolog nel mondo dell'intelligenza artificiale, ci hanno incuriosito e portato allo sviluppo del progetto.

1.1 Definizione del problema

Il caso di studio presentato non è nuovo nel mondo dell'intelligenza artificiale. L'utilizzo di linguaggi logici per applicazioni di planning è, ed era, uno degli approcci preferiti dalla comunità per risolvere problemi in questo dominio. È difficile trovare delle applicazioni nella vita reale che utilizzano solamente Prolog, questo il più delle volte viene usato insieme ad altri strumenti o linguaggi di programmazione tipo Java.

Inizialmente la sfida è stata di prendere domestichezza con il linguaggio di programmazione. Essendo un paradigma che non avevo mai utilizzato e, abituato ai linguaggi imperativi come Python, Java, ho provato a usare un approccio simile in Prolog, fallendo. Questo perché, al contrario di come siamo abituati, Prolog fa un uso massiccio della ricorsione e il concetto di variabile è differente da come siamo abituati. Presa domestichezza la sfida diventò quella di definire un modo efficace per rappresentare l'ambiente studiato. Dovevo riuscire a trovare un'astrazione della realtà tale che, utilizzando una stringa, riuscisse a rappresentare tutte le informazioni necessarie sulle proprietà attuali del blocco di lego. Successivamente questa si è trasformata nel identificare le azioni base che il nostro planner doveva inviare al robot. Tutto ciò doveva essere svolto mantenendo consistenza tra il mondo modellato e la base di conoscenza, quindi evitare che un blocco che si è spostato nel mondo reale rimanga nella sua posizione precedente nella base di conoscenza.

1.2 Obiettivi desiderati

In sede di sviluppo del progetto abbiamo voluto specializzare il planner nella costruzione di pilastri di altezza scelta dall'utente. Questi sono composti dai *megablocks*, dei blocchi di lego di dimensione maggiorata, per facilitare la presa al nostro manipolatore. Nella base di conoscenza questi saranno rappresentati come dei fatti *ground*, ciò significa che il nostro interprete Prolog li assumerà per veri a priori. Il predicato che svolgerà la creazione del pilastro dovrà restituire tutte le possibili soluzioni che soddisfano il nostro problema. Successivamente una serie di azioni saranno calcolate per la costruzione del pilastro e queste verranno inviate al robot. Esso è un UR5 del produttore Universal Robots, un manipolatore a 6 gradi di libertà. Alla sua estremità è presente un gripper a due dita parallele della Soft Robotics che permette la presa dei blocchi. Tramite il piano generato, il robot dovrà costruire il pilastro richiesto con i blocchi messi a disposizione. Riceverà quindi una serie di azioni ad alto livello e convertirà queste in movimenti veri e propri del braccio tramite il nodo di motion planning.

1.3 Struttura della tesi

Questa tesi inizierà presentando lo stato dell'arte delle applicazioni in Prolog, dando inizialmente una visione generale del linguaggio e la sua sintassi. Vedremo l'evoluzione del linguaggio negli anni e la sua applicazione in ambiti sia di ricerca che di industria. In seguito ci sarà un capitolo dedicato più dettagliatamente al caso di studio in cui il programma Prolog sarà spiegato più dettagliatamente. Successivamente andrò a spiegare cosa è ROS e gli strumenti che ho utilizzato per simulare il robot. In questa sezione descriverò l'architettura e i nodi creati per il progetto, soffermandomi anche su concetti di cinematica e di motion planning. Infine un capitolo sarà dedicato alle conclusioni e ai lavori futuri.

Iniziamo ora introducendo appunto lo stato dell'arte di prolog e le pubblicazioni notabili, andando

a dare un approfondimento anche al mondo dell'industria.

2 Stato dell'arte

In questo capitolo verranno presentati i principali lavori che compongono lo stato dell'arte di Prolog. In particolare verrà inizialmente introdotto il linguaggio, poi sarà presentata la storia di Prolog, partendo dalla creazione fino a come lo conosciamo ora. Infine verrà introdotta la sua applicazione nel mondo portando i lavori notabili, sviluppando il focus nel ambito dell'automazione e della robotica. Per la scrittura di questo capitolo ho utilizzato varie fonti. Esse saranno riportate a inizio di ogni sezione e in ogni parte in cui sono state utilizzate.

2.1 Prolog

In questa sezione verrà introdotto il linguaggio, dandogli una definizione e una descrizione della sua attuale implementazione. Per la scrittura di questa sezione ho utilizzato principalmente il libro *The art of Prolog* [5] e il lavoro *50 years of Prolog and beyond* [3].

Ad oggi Prolog è considerato il linguaggio di programmazione logica più utilizzato e più importante. La sua evoluzione, però, non è stata lineare. Negli anni ha subito diverse modifiche, la cosa curiosa è che, a differenza di altri linguaggi, queste venivano integrate nel progetto principale invece che creare dei linguaggi paralleli. Qui di seguito elenco i principi fondamentali che ogni implementazione di Prolog deve rispettare secondo lo studio di Körner et al. [3]:

1. Il linguaggio deve essere basato sulla logica dei predicati di primo ordine utilizzando le clausole di Horn. Sia per la creazione delle basi di conoscenza che per le interrogazioni delle basi di conoscenza (query).
2. Avere l'abilità di manipolare predicati e clausole come termini, così che i meta-predicati possano essere scritti come normali predicati.
3. Risoluzione SLD [4] basata al principio di risoluzione di Robinson.
4. Unificazione di termini arbitrari che includono variabili.
5. Esplorazione depth-first dell'albero di ricerca.

I punti fondamentali per un implementazione di Prolog sono quindi: l'uso delle clausole di Horn, la risoluzione SLD e l'unificazione di termini arbitrari. Ci sono altre importanti funzioni che un implementazione dovrebbe supportare:

6. Negazione come fallimento e altri aspetti logici come la disgiunzione e l'implicazione.
7. Possibilità di alterare il contesto dell'esecuzione durante la risoluzione.
8. Possibilità di utilizzare la programmazione con *constraints*.

Queste sono quindi le caratteristiche che ogni implementazione di Prolog dovrebbe avere, se anche una dovesse mancare allora non si potrebbe considerare un implementazione di Prolog.

La *Regola del pollice* per capire se un risolutore logico può essere considerato un implementazione di Prolog e quindi rispettare i pilastri elencati sopra è la seguente. Il test richiede che la ben nota regola *append/3* possa essere scritta esattamente come segue

```
append([], X, X).  
append([H|X], Y, [H|Z]) :- append(X, Y, Z).
```

e questa può essere interrogata in differenti modi: fare l'append tra due liste `append([1,2],[c,d],R)`, oppure decostruire una lista come `append(A,B,[1,2])` o infine istanziarla con argomenti arbitrari come `append([X|T],[c],[Z,Z,Z])`. Se la regola funziona senza anomalie, l'implementazione utilizzata può considerarsi un'implementazione di Prolog.

Descriviamo ora più in dettaglio la struttura di Prolog e la sua sintassi.

2.1.1 Struttura e sintassi

Iniziamo definendo la tipologia di dati supportata da Prolog. Il dato in Prolog viene chiamato termine, esso può essere un atomo, un numero, una variabile oppure un termine composto.

- Atomo: è un termine che non è né un numero né una variabile. Gli atomi sono usati per rappresentare nomi di oggetti, relazioni o costanti.
- Numero: i numeri in Prolog possono essere sia interi che reali.
- Variabili: sono usate per rappresentare oggetti o valori sconosciuti. Le variabili in Prolog iniziano con una lettera maiuscola o con il carattere di sottolineatura.
- Termine composto: esso è composto da un atomo chiamato *functore* e un numero di argomenti. Il numero di argomenti è chiamato *arietà* del termine composto. Casi speciali di termini composti sono le liste e le stringhe.

L'utilizzo di questi dati ci permette di definire le *clausole di Horn* [2] che sono alla base del linguaggio. La sintassi del prolog è basata appunto sulla logica dei predicati di primo ordine, limitata però alle clausole di Horn. Queste sono delle disgiunzioni di letterali in cui al massimo uno dei letterali è positivo. Un esempio è il seguente:

$$\neg \text{umano}(X) \vee \text{mortale}(X) \quad (2.1)$$

Questo significa che:

$$\forall X (\neg \text{umano}(X) \vee \text{mortale}(X)) \quad (2.2)$$

Utilizzando l'equivalenza logica:

$$\neg X \vee Y \equiv X \Rightarrow Y \quad (2.3)$$

Quindi:

$$\forall X (\text{umano}(X) \Rightarrow \text{mortale}(X)) \quad (2.4)$$

In questo esempio possiamo vedere come è costituita una clausola di Horn. Se la premessa (*umano*) è vera allora anche la conseguenza (*mortale*) è vera.

Le clausole possono essere senza testa:

```
umano(luca).
padre(livio, lorenzo).
```

Oppure con testa:

```
mortale(lorenzo) :- umano(lorenzo).
```

Come detto prima, la logica in Prolog è espressa in termini di relazioni tra fatti e regole, la verifica di queste relazioni prende il nome di *query* o *interrogazione*. Un fatto in Prolog può essere visto come una clausola con il corpo vuoto, ad esempio:

```
umano(luca).
```

In questo esempio vediamo come si può esprimere logicamente che luca sia un umano. Un fatto può essere visto anche come una regola che a priori è sempre vera:

```
umano(luca) :- true.
```

Una regola, invece, è una clausola completa di testa e corpo, la testa è vera solamente se anche il corpo è vero. Un esempio di regola è quello visto prima:

```
mortale(X) :- umano(X).
```

Il corpo di una regola è un insieme di predicati, questi possono essere congiunti o disgiunti. L'operatore di congiunzione è la virgola (,) mentre quello di disgiunzione è il punto e virgola (;). Prolog viene fornito di predicati predefiniti, spesso utilizzati per la manipolazione di liste, aritmetica, input/output. Esempi di questi sono *append*, *is*, *write*, *read*, ecc.

L'insieme di questi 'costrutti' compone l'interità della sintassi base in prolog. Ci sono anche altri operatori, uno dei più importanti è il seguente: Il predicato `\+ /1` definisce la *negazione come fallimento*. Ciò permette a Prolog di essere un sistema di ragionamento non monolitico.

```
legale(X) :- \+ illegale(X).
```

Per definire degli algoritmi iterativi come quelli che siamo abituati a vedere in linguaggi imperativi, Prolog utilizza la ricorsione. Io stesso ne ho fatto largo uso per la mia base di conoscenza, un esempio è il seguente:

```
list_length([], 0).  
  
list_length(_|T, N) :-  
    list_length(T, N1),  
    N is N1 + 1.
```

In questo esempio il predicato è utilizzato per calcolare la lunghezza di una lista, vediamo come ci sia il caso base (lista vuota) e il caso ricorsivo. In ogni caso al momento l'ho usato soltanto come esempio, nel capitolo 3 spiegherò meglio la struttura del programma e come ho risolto i problemi incontrati in Prolog.

2.1.2 Esecuzione

L'esecuzione di un programma Prolog è basata sulla ricerca di un insieme di predicati che soddisfano una data query. Il metodo di risoluzione utilizzato è la risoluzione SLD [4] (Selection, Linearization, and Driving). Questo processo di inferenza consiste in più fasi:

1. Selezionare una clausola goal, essa rappresenta quello che si desidera dimostrare.
2. Unificare la clausola goal con quella del programma, quindi trovare un modo di rendere uguali i termini nelle due clausole.
3. Risolvere la clausola unificata, il programma userà quindi le sostituzioni fatte nella fase precedente per risolvere la clausola. Questo genererà nuove clausole che verranno aggiunte all'insieme di clausole da risolvere.
4. Ripetere i passaggi 2 e 3 fino a quando non si raggiunge un punto di terminazione. La strategia di scelta delle clausole è la selezione lineare più a sinistra.
5. Il processo termina quando viene raggiunto uno di questi casi:
 - Una clausola vuota viene generata dimostrando quindi che la query è vera.
 - Non è possibile selezionare ulteriori clausole per unificare e risolvere.
 - Viene raggiunto il limite di profondità o di tempo (prestabilito dall'utente).

Per esplorare tutte le possibili soluzioni di un problema, Prolog utilizza il *backtracking*. Se durante l'esecuzione di una regola o l'unificazione di un fatto si raggiunge un punto in cui non è più possibile trovare delle soluzioni, Prolog torna indietro (backtrack) per cercare altre possibilità. Questo processo quindi permette di riprendere l'esplorazione delle alternative non ancora considerate. Durante il processo di backtracking Prolog annulla tutte le assegnazioni fatte precedentemente e cerca altre alternative. Le variabili unificate vengono quindi scollegate per permettere la ricerca di altre soluzioni. Un esempio di questo strumento:


```

padre(giovanni, maria).
padre(giovanni, giuseppe).
madre(maria, francesca).

genitore(X, Y) :- padre(X, Y).
genitore(X, Y) :- madre(X, Y).

```

Se noi dovessimo eseguire la query *genitore(giovanni, X)* Prolog troverebbe due soluzioni: $X = \text{maria}$ e $X = \text{giuseppe}$. Facendo così Prolog ha esplorato tutte le alternative possibili dell'albero di ricerca.

2.1.3 Debugging

Prolog fornisce un insieme di strumenti per il debugging, uno di questi è il *trace*. Questo strumento permette di vedere l'esecuzione del programma passo passo. In questo modo è possibile vedere come Prolog risolve le query e quali clausole vengono selezionate. Nella console di SWI-Prolog è possibile attivare il trace con il comando *trace.* e disattivarlo con *notrace.* Avviandolo ad ogni chiamata di un predicato verrà mostrato il suo nome e i suoi argomenti. Inoltre verrà mostrato il risultato della sua risoluzione. Questo renderà il debugging di un programma più semplice, e permetterà di capire meglio il funzionamento di Prolog.

2.2 Evoluzione di prolog

La sezione seguente si concentra sull'evoluzione del linguaggio Prolog nel corso degli anni. Sin dalla sua ideazione negli anni 70', Prolog ha subito notevoli sviluppi, adattamenti e miglioramenti per adeguarsi alle esigenze della comunità. Per la scrittura di questa sezione mi sono affidato all'articolo di Körner et al. [3], il lavoro *Logic programming for deliberative robotic task planning* [7] e altre fonti e articoli.

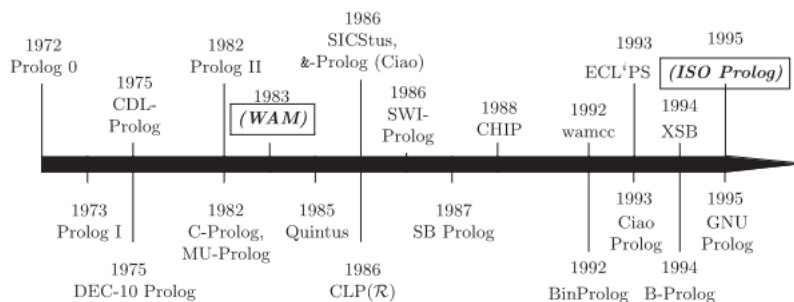


Figura 2.1: Evoluzione di Prolog [3]

Di seguito vedremo una panoramica delle principali tappe che hanno contrassegnato l'evoluzione di Prolog (vedi figura 2.1). Esploreremo le innovazioni chiave e i contributi accademici che hanno, negli anni, arricchito il linguaggio. Vedremo poi le due principali varianti di Prolog che sono state sviluppate nel corso degli anni, e come esse abbiano influenzato il linguaggio principale.

Prolog fa parte principalmente di tre rami della ricerca: intelligenza artificiale, risoluzione automatica dei teoremi e processamento del linguaggio naturale.

Il campo dell'intelligenza artificiale nasce all'incirca nel 1956 e diede velocemente vita al linguaggio di programmazione funzionale LISP. Da lì in poi l'interesse aumentò e diede vita ad altri linguaggi più o meno ad alto livello.

La soluzione automatica di teoremi è un campo della matematica che si occupa di trovare dimostrazioni automatiche di teoremi matematici. Questa materia fece un grande passo avanti quando Alan Robinson introdusse la regola di risoluzione per inferenza nel 1965. La risoluzione può essere utilizzata per ottenere una procedura semi-decisionale per la logica predicativa ed è al centro della maggior parte delle procedure di inferenza nella programmazione logica.

A seguito di questi progressi, un visionario precoce nello sviluppo del campo della programmazione logica è stato Cordall Green, che già alla fine degli anni 60 immaginava come estendere la risoluzione per costruire automaticamente la soluzione di un problema. In particolare voleva applicare questo

strumento per la risoluzione di domande basate sulla logica di primordine. Questo rappresentò il primo zenit della programmazione logica impiegata in applicazioni di AI.

Un altro progetto notevole è quello di Ted Elcock che sviluppò Absys, un linguaggio di programmazione dichiarativo che anticipò alcune delle funzioni di Prolog come la negazione come fallimento, operatori di aggregazione e il backtracking.

Nel frattempo Alain Colmerauer stava provando a sviluppare un sistema di conversazione uomo-macchina, ciò lo portò a sviluppare Q-systems, un sistema impegnato per le traduzioni da Inglese a Francese dei rapporti meteorologici Canadesi. Il suo obiettivo di modificare Q-systems, per ottenere un sistema domanda e risposta, lo portò a sviluppare un linguaggio di programmazione basato sulla logica predicativa. Questo linguaggio fu chiamato Prolog, e fu sviluppato nel 1972 dal francese Alain Colmerauer. Il risultato fu quindi lo sviluppo di Prolog: un sistema di risoluzione lineare ristretto alle clausole di Horn che poteva risolvere problemi in maniera non deterministica.

L'articolo di Körner [3] fornisce una panoramica completa dell'evoluzione di Prolog, e di come questo linguaggio sia stato influenzato nel corso degli anni. Io mi concentrerò soltanto su alcuni aspetti chiave che hanno portato Prolog a diventare il linguaggio che conosciamo oggi. Se siete interessati a una panoramica più completa seguendo una linea temporale come quella in figura 2.1 vi consiglio caldamente di leggere l'articolo.

2.2.1 Tappe fondamentali dell'evoluzione di Prolog

Nella sua prima decade di vita Prolog subì molte variazioni, la sua prima versione fu Prolog 0, seguita da Prolog 1. In queste versioni il linguaggio prevedeva già qualche predicato built in che poi fu incluso nello standard ISO. Queste versioni includevano già il predicato `dif/2`, con questo iniziò a prendere piede il concetto di unificazione. Successivamente seguì l'aggiunta della negazione come fallimento, questa fu una delle aggiunte più importanti, in quanto permise di risolvere problemi che non erano risolvibili con la sola unificazione.

Nel 1974 David H.D. Warren sviluppò Warplan, un sistema di pianificazione automatica basato su Prolog. Lo sviluppo di questo progetto, che poi diventò la sua tesi di dottorato, lo portò a voler ottimizzare l'interprete Prolog, siccome ritenuto lento rispetto ad altri linguaggi di più alto livello come LISP. Sviluppò quindi un nuovo interprete, chiamato WAM (Warren Abstract Machine).

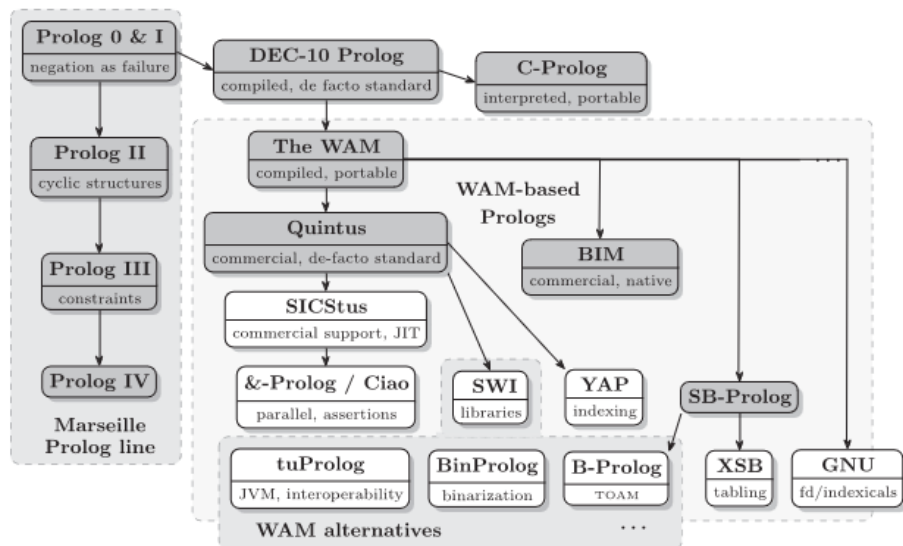


Figura 2.2: Quadro generale delle versioni di Prolog [3]. In grigio scuro sono riportate le versioni che ad oggi (2022 [3]) non sono più supportate.

WAM era, ed è tutt'ora, lo standard per i compilatori Prolog. Due delle implementazioni più di successo sono *GNU Prolog* e quella utilizzata per il mio progetto *SWI-Prolog*. Entrambe queste implementazioni sono open source e disponibili online.

GNU Prolog è un compilatore Prolog gratuito e open source, è stato sviluppato da Daniel Diaz. È stato sviluppato per essere un compilatore Prolog standard, e quindi non include estensioni pro-

una descrizione della soluzione del problema nei tre tipi di logica precedentemente descritti. Conclude poi con una discussione dei risultati ottenuti spiegando come la logica standard sia la più adatta per risolvere questo tipo di problemi.

Un altro lavoro che utilizzò Prolog fu *Fifth Generation Computer Systems*. Questa fu una iniziativa di 10 anni, promossa dal Giappone, che aveva come obiettivo quello di creare i computer utilizzando tanta programmazione logica e programmazione parallela. Questo perchè come obiettivo finale si volevano avere dei sistemi per la ricerca in ambito di intelligenza artificiale. Più informazioni a riguardo di questo progetto possono essere trovate nel lavoro di Körner [3].

Anche la nota azienda IBM utilizzò Prolog per lo sviluppo di un computer capace di rispondere alle domande. Questo fu sviluppato nel 2011 e prese il nome di *Watson*. Nel 2013 IBM annunciò che Watson sarebbe stato utilizzato per l'aiuto a prendere decisioni riguardo al trattamento del cancro ai polmoni. Prolog è stato usato per creare la base di conoscenza e per l'analisi del linguaggio. Una curiosità è che anche la nostra università ha partecipato allo sviluppo iniziale di Watson insieme ad altre università statunitensi [9].

Un ultimo lavoro che utilizza Prolog per il design di un braccio robotico è *Design an Arm Robot through Prolog Programming Language* [8]. Lo scopo di questo articolo era quello di progettare un braccio robotico comandato da un programma Prolog. Nel paper viene introdotto il caso di studio fornendo al lettore le nozioni base di robot e sistema intelligente. Nella seconda parte poi viene spiegato il design utilizzato per il sistema Prolog e come è stato implementato, includendo anche il codice Prolog utilizzato per risolvere il problema.

Questi sono alcuni dei lavori più interessanti che ho trovato sia per il campo della robotica che per quello dell'intelligenza artificiale. Prolog ha una storia che conta più di 50 anni e quindi è stato utilizzato in molti altri lavori. Questa panoramica serviva per capire le potenzialità di Prolog e come questo sia utilizzato al giorno d'oggi. La ricerca nell'ambito di Prolog e dell'intelligenza artificiale continua a progredire, portando ad importanti sviluppi. Oltre al campo della robotica e dell'intelligenza artificiale, è rilevante menzionare anche l'intelligenza artificiale neurosimbolica. Questo approccio combina elementi di intelligenza artificiale simbolica, come Prolog, con tecniche di intelligenza artificiale ispirate al funzionamento del cervello, come le reti neurali artificiali. L'integrazione di questi due paradigmi promette di aprire nuove strade nel campo dell'intelligenza artificiale e potenzialmente superare alcune delle limitazioni dei singoli approcci. La ricerca in questo ambito è in continua evoluzione, offrendo nuove prospettive e sfide interessanti.

3 Descrizione del caso di studio

In questo capitolo verrà presentato più in dettaglio il caso di studio. Verrà definito inizialmente il workflow adottato durante il periodo di tirocinio, spiegando le milestone principali raggiunte. Successivamente verranno spiegate le parti principali del programma Prolog, approfondendo il funzionamento e le sfide incontrate durante lo sviluppo.

Lo sviluppo del task planner è stato oggetto del mio periodo di tirocinio, il lavoro è durato complessivamente circa 4 mesi. In questi 4 mesi ho dovuto inizialmente studiare il linguaggio e i requisiti minimi, sviluppare un'idea e successivamente implementarla con il codice.

In robotica un task planner è un componente software che si occupa di pianificare e coordinare le attività del robot al fine di raggiungere determinati obiettivi. Il task planner prende in input il goal, analizza il contesto in cui il robot opera e restituisce in output un piano che indica l'ordine delle azioni da eseguire per completare con successo il compito assegnato. Una volta generato il piano questo viene eseguito dal sistema di controllo del robot, nel mio caso il *motion planner*. In sostanza, il task planner è responsabile della pianificazione delle attività del robot in modo efficiente e intelligente. È uno dei componenti fondamentali per il controllo e automazione delle applicazioni robotiche complesse.

Descriviamo ora le milestone che compongono la roadmap per lo sviluppo del progetto:

- Prendere domestichezza con Prolog: fase preliminare di studio del linguaggio

- Sviluppare il codice in Prolog: fase di sviluppo del codice
- Wrappare il codice Prolog con un linguaggio ad alto livello: fase di ricerca e studio della libreria adatta per il wrapping
- Creare la simulazione in Gazebo e ROS: fase di sviluppo della simulazione

In questo capitolo voglio entrare nel merito delle prime due milestones, la terza e la quarta verranno spiegate nel capitolo seguente. Queste milestone verranno contestualizzate con una data indicativa sia per l'inizio che per la fine. Per ogniuna verrà indicato il lavoro svolto e il suo contributo per la realizzazione del caso di studio.

3.1 Prima milestone: Studio di Prolog

In questa sezione andremo a vedere in dettaglio la prima milestone, ovvero lo studio del linguaggio Prolog. Questa milestone è stata fondamentale per lo sviluppo del task planner, in quanto mi ha permesso di capire le potenzialità del linguaggio e di capire come sviluppare il codice. Prolog ha una curva di apprendimento molto ripida, infatti il tempo che ho dedicato a questa è stato all'incirca di un mese e mezzo, da marzo fino a metà aprile. Durante questo periodo mi sono studiato lo stato dell'arte del linguaggio (vedere capitolo 2) e mi sono esercitato con esso.

Inizialmente sono stato introdotto al linguaggio tramite video su YouTube e articoli online. Una cosa che è stata fondamentale per lo studio del linguaggio è stato il libro *Prolog Programming for Artificial Intelligence* [1] e il materiale fornito con esso. Questo conteneva delle esercitazioni che modellavano il noto problema del *Blockworld*. In queste esercitazioni infatti veniva spiegato come costruire una base di conoscenza che contenesse al suo interno le informazioni necessarie per descrivere lo stato dei blocchi nello spazio tridimensionale. L'esercizio supponeva che ci fosse una telecamera posta sopra il nostro 'mondo' e che fosse ortogonale ad esso, quindi la coordinata z non poteva essere calcolata con l'osservazione. I blocchi erano rappresentati con il fatto `see(Block,X,Y)`, questo identificava un blocco alla coordinata X e Y specificata. C'era anche un predicato aggiuntivo che specificava il contatto del blocco, questo era il predicato `on(B1,B2)`. Questo serviva a specificare se il blocco si trovasse sopra un altro blocco oppure sopra il tavolo. Un esempio di base di conoscenza utilizzando questi fatti è la seguente:

```
see(a,2,5).
see(d,5,5).
see(e,5,2).

on(a,b).
on(b,c).
on(c,table).
on(d,table).
on(e,table).
```

Come si può notare da questo esempio, l'ipotetica telecamera individua solamente i blocchi a , d , e siccome b e c sono sotto a . Venivano applicati approcci ricorsivi per risolvere problemi (come quello di trovare la coordinata z dei blocchi) e questo mi è stato molto utile per capire come sviluppare codice per un paradigma logico. L'algoritmo per calcolare la coordinata z di un blocco era il seguente:

```
z(Block,0) :- on(Block, table).
z(Block,Z) :- on(Block, OtherBlock), z(OtherBlock, Z1), Z is Z1 + 1.
```

Questo è un classico esempio di algoritmo ricorsivo in cui si ha un caso base e un caso ricorsivo. Il caso base indica che se il blocco si trova sul tavolo la sua coordinata sarà 0, quello ricorsivo invece itera finché non trova il blocco che poggia sul tavolo, poi ricorsivamente incrementa di 1 la coordinata z . In seguito, verso fine marzo inizio aprile, ho provato a ampliare questo esempio cercando un modo efficiente di rappresentare la realtà. È quindi iniziato il periodo di sviluppo del codice in cui il

programma ha iniziato a prendere forma. Tutte le varie versioni del programma sono documentate e reperibili nella repository GitHub del progetto [6].

Vediamo ora come è stato sviluppato il codice del planner e le sfide incontrate.

3.2 Seconda milestone: Sviluppo del planner

In questa sezione approfondiremo le fasi di creazione del planner, il codice del planner e le sfide incontrate durante lo sviluppo. Il periodo di sviluppo effettivo del codice del planner è iniziato verso metà aprile ed è finito all'incirca a metà giugno. Ritengo che questo sia stato il compito più impegnativo e allo stesso tempo più interessante del progetto. Andiamo quindi a dividere questa sezione in tre parti, cioè le tre parti che compongono il programma: la rappresentazione dei blocchi, le azioni e il generatore del piano.

3.2.1 Rappresentazione dei blocchi

Una parte fondamentale del mio progetto è stata la scelta di una convenzione per rappresentare i blocchi nella base di conoscenza. Questa, come detto nel capitolo 2, è composta da fatti e regole. I fatti sono le informazioni che il programma ha a disposizione per ragionare, mentre le regole sono le azioni che il programma può eseguire per modificare lo stato del mondo. In questa versione, che non utilizza la logica probabilistica, i fatti sono istanziati dall'utente. In questo caso si dice che sono *grounded* quindi veri al 100%. Premesso ciò andiamo a vedere come sono stati rappresentati i blocchi, vedendo anche l'evoluzione nelle varie versioni.

Inizialmente la rappresentazione era stata ideata con il seguente fatto:

```
block(ID, X, Y, Z, W, H, D, O, S).
```

L'ID rappresenta un identificativo univoco del blocco, questo può essere ad esempio b1. La tripla X, Y, Z rappresenta le coordinate nello spazio tridimensionale della posizione del blocco, queste vengono usate per localizzare il blocco nello spazio. La tripla W, H, D rappresenta la dimensione del blocco, rispettivamente la lunghezza, l'altezza e la profondità. Infine il parametro O rappresenta l'orientamento del blocco rispetto al mondo. Per ragioni di semplicità non abbiamo voluto rappresentarlo con una rappresentazione canonica come gli angoli di eulero oppure i quaternioni ma, invece, con un intero che indica una posizione fissata del blocco. Questo intero ha un range da 1 a 6 e questi numeri indicano: 1 = il blocco è posizionato col la testa¹ rivolta verso l'alto (posizione usuale del blocco per essere impilato), 2 = il blocco è sottosopra quindi la testa poggerà sul tavolo, 3 = il blocco poggia sul lato e la testa è verso l'interno del tavolo, 4 = il blocco poggia sul lato e la testa è verso l'esterno del tavolo, 5 = il blocco poggia sul lato e la testa è verso la parte sinistra del tavolo, 6 = il blocco poggia sul lato e la testa è verso la parte destra del tavolo. S rappresenta la forma del blocco che nel nostro caso di studio sarà sempre un cubo, quindi questo parametro non verrà mai utilizzato, è stato solamente aggiunto per la completezza della rappresentazione.

Questa rappresentazione, però non era ottimale per il mio scopo. Non teneva conto del fatto che i blocchi possono essere impilati e quindi non teneva conto della relazione di contatto tra i blocchi. Dopo varie riflessioni ho quindi deciso di aggiungere due nuovi attributi al mio fatto `block`:

```
block(ID, X, Y, Z, W, H, D, O, CH, CL, S).
```

Sono stati aggiunti gli attributi CH e CL. Questi servono a specificare il "contatto alto" e il "contatto basso". Con contatto alto mi riferisco al contatto che il blocco ha con la sua testa, mentre con contatto basso mi riferisco al contatto che il blocco ha con la sua base. Ad esempio se il blocco b1 dovesse essere sopra al blocco b2 il suo attributo CL sarebbe b2 mentre l'attributo CH di b2 sarebbe b1. Questo fornisce già un'astrazione abbastanza adeguata per la nostra realtà, ma con l'evolvere del progetto questa non si è rivelata sufficiente. Era necessario infatti che venisse in qualche modo rappresentato il fatto che una volta impilati due blocchi questi venissero considerati come un unico blocco composto. Bisognava quindi trovare un modo di creare e modificare i fatti *on the fly* e di rappresentare la nozione di blocco composto. Il primo problema è stato risolto con l'aggiunta della proprietà *dynamic* al predicato `block`. Questo permette di modificare i fatti in runtime, quindi di

¹Con testa mi riferisco alla parte superiore del blocco di lego

aggiungere e rimuovere fatti. La rimozione e l'aggiunta di nuovi fatti è possibile tramite i predicati built-in `retract/1` e `assertz/1`. Il primo serve a rimuovere un fatto dalla base di conoscenza, il secondo invece serve ad aggiungerlo. Per rendere un predicato dinamico serve specificarlo a inizio file con la seguente direttiva: `:- dynamic block/13` nel caso del blocco. Per rappresentare invece il blocco composto mi sono servito di due ulteriori attributi, il predicato `block/13` è quindi così composto:

```
block(ID, X, Y, Z, W, H, D, O, CH, CL, S, MB, L).
```

Questi ultimi due attributi sono MB e L, servono rispettivamente a identificare i blocchi di cui è composto il blocco e a indicare se il blocco fa parte di un blocco composto o no. Porto un esempio così da essere più chiaro:

```
block(b1, 1, 0, 0, 1, 2, 1, 1, b2, table, block, [b1], 1).
block(b2, 1, 0, 2, 1, 2, 1, 1, air, b1, block, [b2], 1).
block(s1, 1, 0, 0, 1, 4, 1, 1, air, table, block, [b1, b2], 0).
```

Il blocco b1 si trova in coordinate 1, 0, 0, ha dimensioni 1, 2, 1 e sopra di lui si trova b2 e sotto il tavolo, è composto da se stesso e fa parte di un blocco composto. Il blocco b2 si trova in coordinate 1, 0, 2, ha dimensioni 1, 2, 1 e sopra di lui si trova l'aria e sotto b1, è composto da se stesso e fa parte di un blocco composto. Infine, il blocco composto s1 si trova in coordinate 1, 0, 0, ha dimensioni 1, 4, 1 e sopra di lui si trova l'aria e sotto il tavolo, è composto da b1 e b2 e non fa parte di un blocco composto.

Questa è la rappresentazione che, ad oggi, ritengo più efficace per rappresentare questa astrazione. Avendo il progetto dei possibili scenari futuri che potrebbero richiedere una rappresentazione diversa, questa rappresentazione potrebbe cambiare in futuro.

3.2.2 Azioni del planner

Ora andremo a vedere il set di azioni che il planner può eseguire e come queste sono state implementate in Prolog. Ho individuato 3 tipi diversi di azioni: *move_block*, *rotate_block* e *link*. Verrà riportata la loro implementazione e di seguito una spiegazione del loro funzionamento. Queste azioni vanno intese come astrazioni ad alto livello di azioni che il robot può compiere. Il compito del task planner, quindi, non è quello di descrivere nei minimi dettagli il movimento che dovrà compiere il braccio, quello è compito del motion planner.

Iniziamo con la *rotate_block*, questa azione serve a portare un blocco dal suo orientamento attuale a quello desiderato, ovviamente per i nostri scopi l'orientamento desiderato sarà sempre 1. L'implementazione che ho scelto per questa azione è la seguente:

```
1 rotate_block(Block, X, Y, Z, NO) :-
2     block(Block, X, Y, Z, W, H, D, O, TL, TH, S, MB, L),
3     (list_length(MB, N), N > 1 -> rotate_list(MB, NO); NO = NO),
4     L is 0,
5     add_action(rotate(Block, X, Y, Z, NO)),
6     retract(block(Block, X, Y, Z, W, H, D, O, TL, TH, S, MB, L)),
7     assertz(block(Block, X, Y, Z, W, H, D, NO, TL, TH, S, MB, L)).
```

Come si può vedere, la testa della nostra clausola di Horn prende in input 5 parametri: il blocco da ruotare, le sue coordinate e il nuovo orientamento. I primi 4 parametri vengono utilizzati nella riga successiva per cercare di unificare con il predicato `block/13` e ottenere così le informazioni del blocco. Avendo il blocco ora ne conosciamo tutte le sue proprietà tra cui l'orientamento attuale e se è un blocco composto. Quest'ultimo viene usato nell'istruzione successiva, se stiamo operando un blocco composto da più blocchi allora dobbiamo ruotare anche questi ultimi. Per farlo utilizzo il predicato `rotate_list/2` che prende in input la lista dei blocchi che compongono il blocco composto e il nuovo orientamento. Questo predicato si occupa di ruotare tutti i blocchi della lista.

```
1 rotate_list([], NO).
2
3 rotate_list([H|T], NO) :-
```

```

4     rotate_compose(H, _, _, NO),
5     rotate_list(T, NO).
6
7 rotate_compose(Block, X, Y, Z, NO) :-
8     block(Block, X, Y, Z, W, H, D, O, TL, TH, S, MB, L),
9     (list_length(MB, N), N > 1 -> rotate_list(MB, NO); NO = NO),
10    retract(block(Block, X, Y, Z, W, H, D, O, TL, TH, S, MB, L)),
11    assertz(block(Block, X, Y, Z, W, H, D, NO, TL, TH, S, MB, L)).

```

Con questa serie di predicati riusciamo appunto a ruotare tutti i blocchi che compongono il blocco composto. Iteriamo inizialmente tutti gli elementi nella lista e poi li passiamo uno ad uno al predicato `rotate_compose`. Questo è identico al predicato principale, l'unica differenza è che non controlla se un blocco fa parte di un blocco composto oppure no ($L=1$).

Tornando al predicato principale, successivamente verrà svolto il controllo per verificare che il blocco non faccia parte di un blocco composto. Svolto quest'ultimo controllo possiamo aggiungere l'azione eseguita al piano (verrà spiegata meglio nella sezione 3.2.3) e infine aggiornare il predicato `block/13` con il nuovo orientamento. Per svolgere quest'ultima azione utilizzeremo i predicati built-in `retract/1` e `assertz/1` che ci permettono di rimuovere un predicato e aggiungerne uno nuovo.

La seconda azione presa in considerazione è la *move_block*, questa azione serve a spostare un blocco da una posizione ad un'altra. L'implementazione che ho scelto per questa azione è la seguente:

```

1 move_block(Block, X, Y, Z, NX, NY, NZ) :-
2     block(Block, X, Y, Z, W, H, D, O, TL, TH, S, MB, L),
3     (list_length(MB, N), N > 1 -> move_list(MB, NX, NY, NZ); NX = NX, NY = NY, NZ = NZ),
4     L is 0,
5     add_action(move(Block, X, Y, Z, NX, NY, NZ)),
6     retract(block(Block, X, Y, Z, W, H, D, O, TL, TH, S, MB, L)),
7     assertz(block(Block, NX, NY, NZ, W, H, D, O, TL, TH, S, MB, L)).

```

Questo predicato è molto simile se non uguale al precedente, cambia solo il fatto che non si deve ruotare il blocco e che si devono aggiornare le coordinate del blocco. La logica quindi è uguale come la sua implementazione, le uniche differenze sono che nel piano verrà aggiunta l'azione `move/7` e che il predicato `block/13` verrà aggiornato con le nuove coordinate. Anche in questo caso c'è il controllo sul blocco composto, quindi ci sarà anche l'implementazione di `move_list/4` che è molto simile a `rotate_list/2`.

L'ultima azione presa in considerazione per il nostro caso di studio è la *link*, questa, nella realtà, è già applicata dalla `move_block/7` però per mantenere la consistenza della base di conoscenza in maniera più semplice ho deciso di implementarla come azione a parte. Questa, essenzialmente, serve a verificare se i blocchi sono impilati, se si gli "incolla" creando il blocco composto. La sua implementazione è la seguente:

```

1 link(B1, B2, R) :-
2     block(B1, X1, Y1, Z1, W1, H1, D1, O1, TL1, TH1, S1, MB1, L1),
3     block(B2, X2, Y2, Z2, W2, H2, D2, O2, TL2, TH2, S2, MB2, L2),
4     count(s, N),
5     all_diff([B1, B2]),
6     L1 = 0,
7     L2 = 0,
8     X1 = X2,
9     Y1 = Y2,
10    Z1 is Z2 - H2,
11    W1 = W2,
12    D1 = D2,
13    HighP is H1 + H2,
14    add_action(link(B1, B2)),

```



```

15 retract(block(B1, X1, Y1, Z1, W1, H1, D1, O1, TL1, TH1, S1, MB1, L1)),
16 retract(block(B2, X2, Y2, Z2, W2, H2, D2, O2, TL2, TH2, S2, MB2, L2)),
17 assertz(block(B1, X1, Y1, Z1, W1, H1, D1, O1, B2, TH1, S1, MB1, 1)),
18 assertz(block(B2, X2, Y2, Z2, W2, H2, D2, O2, TL2, B1, S2, MB2, 1)),
19 string_concat('s', N, PIL),
20 retract(count(s, N)),
21 N1 is N+1,
22 assertz(count(s, N1)),
23 atom_string(STACK,PIL),
24 R = STACK,
25 assertz(block(STACK, X2, Y2, Z2, W1, HighP, D1, 1, TL2, TH1, block, [B1,B2],0)).

```

Iniziamo definendo in input i due blocchi che vogliamo "incollare", R è un parametro in cui verrà salvato l'ID del blocco composto creato. Le due istruzioni seguenti servono a recuperare le informazioni dei due blocchi che vogliamo utilizzare cercando di unificarli con i predicati `block/13`. L'istruzione a linea 5 serve a controllare che i due blocchi non siano uguali, questo perchè non ha senso creare un blocco composto con un solo blocco. Verifichiamo poi un insieme di precondizioni tra cui la verifica che i due blocchi non siano già parte di un blocco composto, che siano allineati e che siano della stessa dimensione. Successivamente ci calcoliamo l'altezza del blocco composto come somma delle altezze dei due blocchi. Aggiorniamo la base di conoscenza e creiamo aggiungiamo anche il blocco composto che avrà come ID la stringa "s" seguita da un numero che viene incrementato ad ogni blocco composto creato.

Queste sono le tre azioni base che il planner deve eseguire per poter risolvere il problema, ora vediamo come vengono utilizzate per generare il piano che poi verrà eseguito dal nodo di motion planning.

3.2.3 Generatore del piano

La generazione del piano è il cuore del planner, è qui che vengono utilizzate le azioni base per generare il piano che verrà eseguito dal nodo di motion planning. Il task planner è composto, per il nostro scopo, principalmente da un predicato: `pillar/7`. Questo è strutturato nel seguente modo:

```

1 pillar(X, Y, Z, High, Width, Depth, Actions) :-
2   find_blocks(Blocks),
3   valid_blocks(Blocks, High, ValidBlocks, Width, Depth),
4   nth0(0, ValidBlocks, B1),
5   nth0(1, ValidBlocks, B2),
6   stack(B1, B2, X, Y, Z, R),
7   select(BL1, ValidBlocks, ValidBlocks1),
8   select(BL2, ValidBlocks1, ValidBlocks2),
9   stackRec(ValidBlocks2, R, X, Y, Z),
10  plan(Actions).

```

I primi 3 argomenti sono le coordinate dove verrà costruito il pilastro, i tre seguenti sono le dimensioni del pilastro. L'ultimo argomento è l'output del planner: una lista di azioni che verranno eseguite dal nodo di motion planning. Il predicato inizia quindi salvando nella lista *Blocks* tutti i blocchi utilizzabili, quindi con $L=0$, presenti nella base di conoscenza. Successivamente, tramite un algoritmo di esplorazione ricorsiva, trova la combinazione di blocchi adatta per soddisfare l'altezza richiesta dall'utente. Il codice prolog è il seguente:

```

1 valid_blocks(Blocks, DesiredHeight, ResultBlocks, DesiredWidth, DesiredDepth) :-
2   length(Blocks, N),
3   between(1, N, NumBlocks),
4   length(ResultBlocks, NumBlocks),
5   select_blocks(Blocks, ResultBlocks, DesiredHeight, DesiredWidth, DesiredDepth).
6
7

```

```

8  select_blocks(_, [], 0.0, DesiredWidth, DesiredDepth).
9  select_blocks(Blocks, [Block|Remaining], DesiredHeight, DesiredWidth, DesiredDepth) :-
10     seleziona(Block, Blocks, RemainingBlocks),
11     block(Block, _, _, _, DesiredWidth, Height, DesiredDepth, _, _, _, _, _),
12     DesiredHeight >= Height,
13     RemainingHeight is DesiredHeight - Height,
14     select_blocks(RemainingBlocks, Remaining, RemainingHeight, DesiredWidth, DesiredDepth).
15
16
17 seleziona(X, [X|Resto], Resto).
18 seleziona(X, [Y|Resto], [Y|Resto1]) :-
19     seleziona(X, Resto, Resto1).

```

A prima vista può sembrare complesso ma cercherò di spiegarlo in maniera semplice ed efficace. L'entrypoint di questa "procedura" è `valid_blocks/5`, il compito di questo predicato è di istanziare una lista di lunghezza compresa tra 1 e n , dove n è il numero di blocchi disponibili. Inizialmente la lista verrà istanziata a 1, nel caso l'iterazione fallisca questa verrà incrementata di 1 fino ad arrivare alla capienza massima cioè n . Successivamente viene chiamato il predicato `select_blocks/5`, questo restituirà la lista contenente i blocchi che soddisfano i requisiti di altezza, larghezza e profondità richiesti dall'utente. Inizialmente, quindi, il programma prolog cercherà di trovare una soluzione con un solo blocco, se non la trova passerà a due blocchi e così via fino ad arrivare ad una soluzione oppure al fallimento del predicato.

Trovata la lista di blocchi che soddisfa i requisiti, il programma prosegue con la creazione del pilastro. Questo viene creato tramite i predicati `stack/6` e `stackRec/5`, l'ultimo è la versione ricorsiva in cui si passa la lista dei blocchi da utilizzare e l'ID del blocco composto di "base". Questi due predicati utilizzano le azioni spiegate prima per creare il pilastro. L'ultima istruzione, `plan/1`, copierà le azioni create durante la generazione del pilastro nella lista `Actions` che verrà restituita in output dal predicato `pillar/7`.

Questa è quindi la soluzione al caso di studio che ho pensato e implementato. Ovviamente è migliorabile e ci sono sicuramente altri modi per risolvere questo problema, ma questo è il risultato che ho ottenuto e che ho deciso di presentare in questa tesi.

4 Descrizione dell'architettura ROS

5 Conclusione

Bibliografia

- [1] I. Bratko. *Prolog Programming for Artificial Intelligence*. International computer science series. Addison Wesley, 2001.
- [2] Alfred Horn. On sentences which are true of direct unions of algebras. *The Journal of Symbolic Logic*, 16(1):14–21, 1951.
- [3] Philipp Körner, Michael Leuschel, João Barbosa, Vítor Santos Costa, Verónica Dahl, Manuel V Hermenegildo, Jose F Morales, Jan Wielemaker, Daniel Diaz, Salvador Abreu, et al. Fifty years of prolog and beyond. *Theory and Practice of Logic Programming*, 22(6):776–858, 2022.
- [4] Robert A Kowalski. Predicate logic as a programming language. *Proceedings of IFIP*, pages 569–574, 1974.
- [5] Paul J. Krause. The art of prolog—second edition by leon sterling and ehud shapiro, mit press, cambridge, ma1994, pp. 509, £19.95 (paperback), £44.94 (hardback), isbn 0-262-19338-8. *The Knowledge Engineering Review*, 10(4):411–411, 1995.
- [6] Davide De Martini. Prolog planner project. <https://github.com/davidedema/prolog-planner>. Repository GitHub del progetto.
- [7] Fiorini Paolo Meli Daniele, Nakawala Hirenkumar. Logic programming for deliberative robotic task planning. *Artificial Intelligence Review*, 2023.
- [8] Aram Mustafa and Tarik Rashid. Design an arm robot through prolog programming language. *Advances in Robotics and Automation*, 1:1–6, 01 2013.
- [9] Unitn. Unitn collabora per watson. <https://webmagazine.unitn.it/news/ateneo/7380/ad-unitrento-il-nuovo-ibm-faculty-award>. Pagina del webgazine di UniTn che documenta la notizia.