



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Sviluppo di un sistema di Collision Avoidance tramite il metodo dell'Artificial Potential Field

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione, Informatica e Statistica
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica e Automatica

Candidato

Davide Albano

Matricola 1708530

Relatore

Prof. Giorgio Grisetti

Anno Accademico 2020/2021

Tesi non ancora discussa

Sviluppo di un sistema di Collision Avoidance tramite il metodo dell'Artificial Potential Field

Tesi di Laurea. Sapienza – Università di Roma

© 2021 Davide Albano. Tutti i diritti riservati

Questa tesi è stata composta con \LaTeX e la classe Sapthesis.

Versione:

Email dell'autore: albano.1708530@studenti.uniroma1.it

Sommario

L'obiettivo di questo lavoro è l'implementazione di un sistema che permetta a un robot di muoversi all'interno di un ambiente evitando eventuali ostacoli. Il robot preso in considerazione non conosce l'ambiente in cui dovrà muoversi e può quindi basarsi soltanto sulle rilevazioni fatte tramite un laser scanner.

Per l'implementazione è stato usato ROS (Robot Operating System), un framework open source usato per gestire le operazioni e le comunicazioni dei vari nodi di un robot. Per la simulazione è stato usato il pacchetto `stage_ros`, mentre per la visualizzazione delle informazioni dei vari sensori e della traiettoria calcolata dal robot è stato usato il tool RVIZ.

Data l'assenza di informazioni iniziali riguardo alla mappa è stato necessario scegliere un algoritmo di local motion planning. In particolare è stato scelto il metodo dell'Artificial Potential Field, che è spesso usato per la sua semplicità sia dal punto di vista dello sviluppo sia dal punto di vista computazionale.

Indice

1	Introduzione	5
1.1	Formulazione problema	5
1.2	Importanza della Collision Avoidance	5
1.2.1	Settore dei trasporti	5
1.2.2	Industry 4.0	6
1.3	Obbiettivo di questo progetto	6
2	Strumenti necessari e teoria	7
2.1	ROS	7
2.1.1	Caratteristiche principali	7
2.1.2	Publisher/Subscriber	8
2.1.3	Services	8
2.1.4	stage_ros	9
2.1.5	RVIZ	10
2.2	Artificial Potential Field	10
2.2.1	Teoria	10
2.2.2	Applicazione per i robot su ruote	12
3	Descrizione del progetto	13
3.1	Sistema di riferimento	13
3.2	Nodi, messaggi e servizi sviluppati	13
3.2.1	obstacle_detection	14
3.2.2	cmd_vel_controller	15

<i>INDICE</i>	4
4 Esecuzione e test dell'algoritmo	17
4.1 Descrizione dell'esecuzione	17
4.2 Analisi dei test e scelta dei parametri	19
5 Conclusioni	21

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Formulazione problema

Lo sviluppo di robot mobili a navigazione autonoma si suddivide in due parti: global path planning e local motion control. Il global path planning utilizza le informazioni che si hanno sulla mappa per trovare il percorso più corto per andare dal punto di partenza all'obiettivo.

Tuttavia può capitare che le informazioni sull'ambiente in cui il robot dovrà muoversi siano scarse, non aggiornate o mancanti. Questo porta alla necessità di sviluppare algoritmi di local motion control, che permettono al robot di calcolare in tempo reale una traiettoria in grado di evitare gli ostacoli incontrati durante la navigazione. [1]

1.2 Importanza della Collision Avoidance

In un mondo che tende sempre di più all'automazione, il problema della Collision Avoidance diventa sempre di maggiore rilievo. L'utilizzo principale di questo tipo di algoritmi si può trovare principalmente nel settore dei trasporti e nell'Industry 4.0.

1.2.1 Settore dei trasporti

All'interno del settore dei trasporti sono in corso molti studi dal punto di vista dei trasporti via terra. Sono infatti molte le aziende automobilistiche (tra cui spiccano

principalmente Tesla, Waymo e Pony.ai) che stanno investendo nello sviluppo di sistemi di guida autonomi. Questi sistemi devono dunque essere in grado di reagire a tutti i possibili imprevisti che si potrebbero incontrare durante la guida, compresa ovviamente la presenza improvvisa di ostacoli lungo il tragitto.

Anche per gli spostamenti via mare e via aria sono in corso numerosi studi riguardanti la navigazione autonoma, con particolare interesse per i droni sottomarini (UUV) e aerei (UAV).

1.2.2 Industry 4.0

Per quanto riguarda il settore industriale, sempre più aziende stanno passando all'Industry 4.0, che prevede una automazione avanzata all'interno degli impianti produttivi. In fabbriche dove questi robot mobili lavorano anche a contatto con gli operatori diventa essenziale che essi riconoscano la presenza di altri robot e soprattutto di umani, per garantire una maggiore sicurezza. In questo caso entrano in campo gli algoritmi di collision avoidance, perché anche se la mappa generale può essere ben nota, gli ostacoli possono muoversi liberamente all'interno dell'area.

1.3 Obiettivo di questo progetto

L'obiettivo di questo progetto è quello di sviluppare un sistema di Collision Avoidance basato su un laser scanner con le seguenti caratteristiche:

Input Il sistema prende in input lo scan del laser e un comando di velocità

Output Il sistema produce un comando di velocità che previene la collisione con gli oggetti rilevati nel contorno, deflettendo la traiettoria del robot verso uno spazio libero da collisioni.

Quindi, a differenza della definizione classica del problema, nel caso analizzato non avremo un obiettivo da raggiungere ma una velocità iniziale del robot, su cui si andrà a intervenire affinché il robot non vada a sbattere.

Capitolo 2

Strumenti necessari e teoria

2.1 ROS

2.1.1 Caratteristiche principali

ROS (Robot Operating System) è un framework open source utilizzato per lo sviluppo di applicazioni per la robotica. Mette infatti a disposizione strumenti e librerie utili per aiutare gli sviluppatori software nella realizzazione di applicazioni robotiche a partire dalla scrittura fino all'esecuzione e al debugging del codice.

ROS presenta inoltre alcune caratteristiche di un sistema operativo (gestione di processi, di pacchetti e delle loro dipendenze e astrazione di dispositivi hardware a basso livello) e di un middleware perché permette la comunicazione tra processi/macchine diverse.

Infine costituisce un'architettura distribuita in cui è possibile gestire in maniera asincrona un insieme di moduli software che possono essere scritti in vari linguaggi, tra cui C++ e Python.

Uno dei principali punti di forza di ROS è la sua modularità, che gli permette di essere compatibile con robot che hanno caratteristiche molto diverse tra loro. La modularità rende inoltre più facile riutilizzare il codice e permette di integrare ROS con altri framework.

ROS include anche alcuni tool che permettono di simulare hardware e di salvare i dati ottenuti dai vari sensori per poi analizzarli.

Il software viene organizzato in packages. Ogni package può contenere più eseguibili, chiamati nodi. I nodi possono comunicare tra loro in due modi, tramite il meccanismo Publisher/Subscriber oppure tramite il meccanismo dei Services.

ROS è strutturato intorno ad un nodo master che permette ai vari nodi di essere a conoscenza della presenza di altri nodi e di comunicare. Il Master è un nodo unico all'interno dell'architettura di ROS e si occupa di assegnare un nome a ogni nodo connesso al sistema e di registrarlo eventualmente come Publisher, Subscriber o Service Provider. I vari nodi usano una libreria (ROS client library) per poter usufruire delle funzionalità di ROS, attraverso linguaggio C++ (roscpp) o Python (rospy). Al master viene assegnato un well-known XML-RPC URI in modo che qualsiasi nodo creato sia sempre in grado di comunicare con esso.[4]

2.1.2 Publisher/Subscriber

È uno dei due meccanismi usati dai vari nodi ROS per comunicare, ed è una modalità di comunicazione asincrona. La scrittura di un messaggio avviene su di un topic dai nodi di tipo Publisher e tutti i nodi di tipo Subscriber che desiderano ricevere tale messaggio possono iscriversi a quel topic. Per uno stesso topic possono esserci più Publisher e più Subscriber.

Il messaggio è una struttura dati con diversi campi che possono essere di tipi diversi (sono supportati tutti i tipi standard primitivi integer, floating point, boolean, array e costanti). All'interno di un topic è possibile scrivere o leggere solo un tipo di messaggio. La definizione dei vari tipi di messaggi viene memorizzata in file .msg.

Nello sviluppo successivamente illustrato questo meccanismo di comunicazione è stato utilizzato per leggere le informazioni inviate dal laser scanner e la velocità in input e per scrivere in output la velocità ricalcolata in base agli ostacoli presenti.

2.1.3 Services

Questa modalità di comunicazione tra nodi è invece sincrona e usa la semantica Request/Response. Un nodo invia una richiesta a tutti i nodi che forniscono un determinato servizio. Da questi nodi riceverà una risposta.

La struttura dati usata dai servizi è simile a quella dei messaggi, ma ha una sezione per la Request e una per la Response, separate da una riga contenente i caratteri "----". La definizione dei vari tipi di servizi viene memorizzata in file .srv.

Nel caso qui presentato questa modalità è stata utilizzata per fornire il risultato dei calcoli effettuati sugli ostacoli circostanti al nodo che si occuperà poi di determinare la velocità e la direzione di output.

2.1.4 stage_ros

Questo package è stato utilizzato per la simulazione del robot e dell'ambiente circostante, compresi i vari ostacoli:

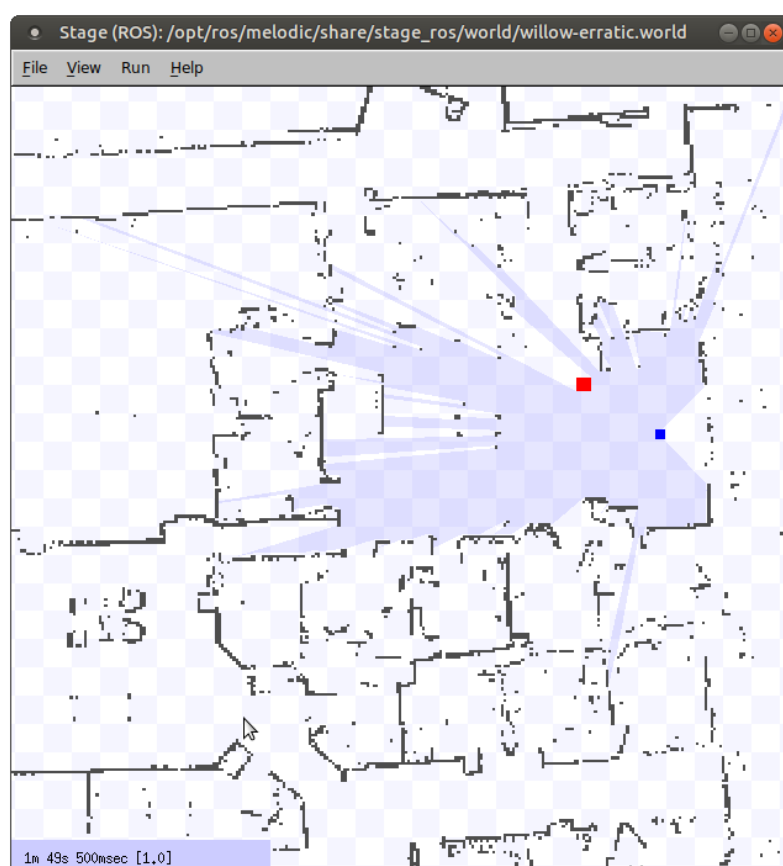


Figura 2.1. Schermata di partenza di stage_ros, in cui si possono vedere il robot (il quadrato blu), il raggio d'azione dello scanner (l'area blu chiaro), gli ostacoli (i tratti grigi) e l'obiettivo (il quadrato rosso)

2.1.5 RVIZ

RVIZ è stato molto utile per visualizzare in tempo reale le informazioni presenti sui vari topic, come ad esempio la direzione del robot o i rilevamenti effettuati dallo scanner:

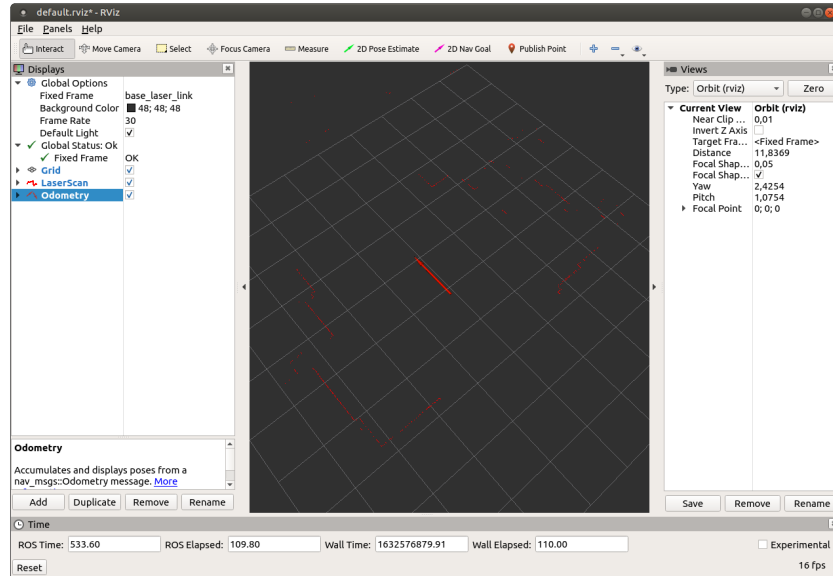


Figura 2.2. Schermata di RVIZ in cui sono state caricate le informazioni dello scanner (i tratti rossi) e della direzione del robot (la freccia rossa)

2.2 Artificial Potential Field

2.2.1 Teoria

Per quanto riguarda il local motion control, ci sono vari approcci ed algoritmi che possono essere utilizzati, come ad esempio il Vector Field Histogram, il Dynamic Window Approach e l'Artificial Potential Field[1]. Quest'ultimo metodo è stato scelto per l'implementazione del progetto.

Il metodo dell'Artificial Potential Field si basa sulla seguente idea: l'obiettivo del robot si comporta come una forza attrattiva, mentre gli ostacoli si comportano come forze repulsive. Il potenziale totale U sarà la somma delle varie forze attrattive e repulsive e il gradiente negativo $-\nabla U(q)$ indicherà la traiettoria più sicura.

Per quanto riguarda le forze attrattive si combinano due profili di attrazione in base alla distanza del robot dall'obiettivo: conico quando il robot è lontano, paraboloidale quando è vicino. In questo modo la formula per il calcolo della campo attrattivo diventa:

$$U_a(\mathbf{q}) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_a\|\mathbf{e}(\mathbf{q})\|^2 & \text{if } \|\mathbf{e}(\mathbf{q})\| \leq \rho \\ k_b\|\mathbf{e}(\mathbf{q})\| & \text{if } \|\mathbf{e}(\mathbf{q})\| > \rho \end{cases}$$

dove $\mathbf{e} = \mathbf{q}_g - \mathbf{q}$, $k_a > 0$ e $k_b > 0$. Per la continuità della funzione è necessario inoltre che:

$$k_a\mathbf{e}(\mathbf{q}) = k_b \frac{\mathbf{e}(\mathbf{q})}{\|\mathbf{e}(\mathbf{q})\|} \quad \text{for } \|\mathbf{e}(\mathbf{q})\| = \rho$$

e quindi $k_b = \rho k_a$

Per quanto riguarda invece il campo repulsivo, la formula è la seguente:

$$U_{r,i}(\mathbf{q}) = \begin{cases} \frac{k_{r,i}}{\gamma} \left(\frac{1}{\eta_i(\mathbf{q})} - \frac{1}{\eta_{0,i}} \right)^\gamma & \text{if } \eta_i(\mathbf{q}) \leq \eta_{0,i} \\ 0 & \text{if } \eta_i(\mathbf{q}) > \eta_{0,i} \end{cases}$$

dove $k_{r,i} > 0$ e $\gamma = 2, 3, \dots$; $\eta_{0,i}$ è il raggio di influenza, mentre $\eta_i(\mathbf{q})$ è il margine ed è calcolato come segue:

$$\eta_i(\mathbf{q}) = \min_{\mathbf{q}' \in \mathcal{CO}_i} \|\mathbf{q} - \mathbf{q}'\|$$

dove \mathcal{CO}_i è la obstacles region.

Otteniamo così una somma dei campi totali:

$$U_t(\mathbf{q}) = U_a(\mathbf{q}) + U_r(\mathbf{q})$$

da cui possiamo ricavare la formula della forza totale:

$$\mathbf{f}_t(\mathbf{q}) = -\nabla U_t(\mathbf{q}) = \mathbf{f}_a(\mathbf{q}) + \sum_{i=1}^p \mathbf{f}_{r,i}(\mathbf{q})$$

2.2.2 Applicazione per i robot su ruote

Essendo soggetti a determinati vincoli di movimento, nel caso dei robot su ruote non è possibile applicare direttamente la forza risultante calcolata precedentemente.

Partendo da una forza artificiale $\mathbf{f}_t = \begin{pmatrix} f_{t,x} & f_{t,y} & f_{t,\theta} \end{pmatrix}^T$ possiamo ottenere:

$$v = f_{t,x} \cos \theta + f_{t,y} \sin \theta$$

$$\omega = f_{t,\theta}$$

dove θ è l'angolo formato tra l'asse sagittale del robot e l'asse x del sistema di riferimento [3], mentre $f_{t,\theta}$ può essere calcolato nel seguente modo:

$$f_{t,\theta} = k_\theta (\text{atan } 2(f_{t,y}, f_{t,x}) - \theta)$$

[2]

Capitolo 3

Descrizione del progetto

3.1 Sistema di riferimento

Data la semplicità del caso in esame è stato possibile scegliere come sistema di riferimento il sistema di riferimento mobile del robot. Questo ha portato a una semplificazione delle formule. Infatti in questo modo la posizione del robot è sempre $(x, y) = (0, 0)$, mentre l'angolo θ definito nel capitolo precedente è sempre 0.

In questo modo le formule prima presentate diventano:

$$v = \|(f_{t,x}, f_{t,y})\|$$

$$\omega = \text{atan2}(f_{t,y}, f_{t,x})$$

Infatti tramite ω facciamo ruotare il robot nella direzione della forza risultante, e poi lo facciamo muovere linearmente impostando v uguale al modulo della forza.

3.2 Nodi, messaggi e servizi sviluppati

Per questo progetto sono stati sviluppati tre nodi ROS:

twist_generator Questo nodo si occupa di simulare una serie di comandi di velocità in input

obstacle_detection Questo nodo si occupa di analizzare le informazioni provenienti dallo scanner e memorizzare i calcoli effettuati

cmd_vel_controller Questo nodo si occupa di intercettare i comandi di velocità in input e calcolare la nuova traiettoria basandosi sulle informazioni ricevute da `obstacle_detection`

3.2.1 obstacle_detection

La parte principale di questo nodo è l'analisi delle informazioni che lo scanner scrive nel topic **base_scan**. Per poter leggere queste informazioni il nodo come prima cosa si iscrive al topic, specificando la callback che deve essere chiamata appena viene scritto un nuovo messaggio:

```
self.sub = rospy.Subscriber('/base_scan', LaserScan, self.callback)
```

Questo nodo dovrà inoltre reigstrarsi come provider del servizio **force_service** e inizializzare la variabile **force**. La forza risultante agente sul robot viene infatti calcolata da questo nodo, salvata nella variabile **force** e poi fornita a qualunque nodo la richieda:

```
self.srv = rospy.Service('force_service', Force, self.force_service)
self.force = ForceResponse(0, 0)
```

```
def force_service(self, request):
    return self.force
```

Ogni volta che lo scanner inserirà una nuova rilevazione sotto forma di messaggio nel topic **base_scan**, verrà quindi chiamata la callback, che filtrerà i dati rilevati in base a un parametro di soglia, ne calcolerà l'equivalente forza repulsiva e infine invocherà per ogni valore calcolato la funzione **set_net_force**:

```
def callback(self, msg):
    self.force = ForceResponse(0, 0)
    for i, val in enumerate(msg.ranges, start=0):
        if val >= 1.25:
            continue
        magnitude = 1 / val
        temp_angle = msg.angle_min + (i * msg.angle_increment)
        x = magnitude * math.cos(temp_angle)
        y = magnitude * math.sin(temp_angle)
```

```

angle = math.atan2(-y, -x)
force = ForceResponse(magnitude, angle)
self.set_net_force(force)

```

La funzione **set_net_force** si occuperà quindi di calcolare progressivamente la risultante delle varie forze calcolate dalla callback e di salvare il risultato nella variabile **force**:

```

def set_net_force(self, force):
    x1 = self.force.magnitude * math.cos(self.force.angle)
    y1 = self.force.magnitude * math.sin(self.force.angle)
    x2 = force.magnitude * math.cos(force.angle)
    y2 = force.magnitude * math.sin(force.angle)
    x_total = x1 + x2
    y_total = y1 + y2
    total_magnitude = math.sqrt(x_total ** 2 + y_total ** 2)
    total_angle = math.atan2(y_total, x_total)
    self.force = ForceResponse(total_magnitude, total_angle)

```

3.2.2 cmd_vel_controller

Questo nodo si occupa di leggere la velocità di input e di scrivere in output la velocità ricalcolata in base alla forza repulsiva risultante calcolata da **obsatcle_detection**. Per fare ciò deve registrarsi come Subscriber al topic **cmd_vel_input** e come Publisher al topic **cmd_vel**:

```

self.pub = rospy.Subscriber('/cmd_vel_input', Twist, self.callback)
self.pub = rospy.Publisher('/cmd_vel', Twist, queue_size=10)

```

Nella funzione di callback chiamerà quindi il servizio **force_service** che gli fornirà il valore corrente della forza repulsiva risultante. Con questo valore popolerà i valori della velocità lineare sull'asse x e di quella angolare sull'asse z. Infine invierà il messaggio sul topic **cmd_vel**, che corrisponde al topic di input del robot:

```

def callback(self, msg):
    if msg.linear.x == 0:
        self.pub.publish(msg)
    return
    rospy.wait_for_service('force_service')

```



```
try:
    force_service = rospy.ServiceProxy('force_service', Force)
    force = force_service()
    vel_msg = Twist()
    x_linear = msg.linear.x + force.magnitude
    vel_msg.linear.x = x_linear if x_linear < 0.75 else 0.75
    vel_msg.linear.y = 0
    vel_msg.linear.z = 0
    vel_msg.angular.x = 0
    vel_msg.angular.y = 0
    vel_msg.angular.z = msg.angular.z + force.angle
    print(vel_msg)
    self.pub.publish(vel_msg)
except rospy.ServiceException as e:
    print('Service call failed: %s' % e)
```

Capitolo 4

Esecuzione e test dell'algoritmo

4.1 Descrizione dell'esecuzione

Per avere un'idea dei calcoli effettuati dall'algoritmo è stata aggiunta una parte di codice che ha la funzione di scrivere sul topic **marker** le informazioni sulla forza risultante calcolata. In questo modo è quindi possibile visualizzare su RVIZ la forza calcolata in ogni istante dell'esecuzione:

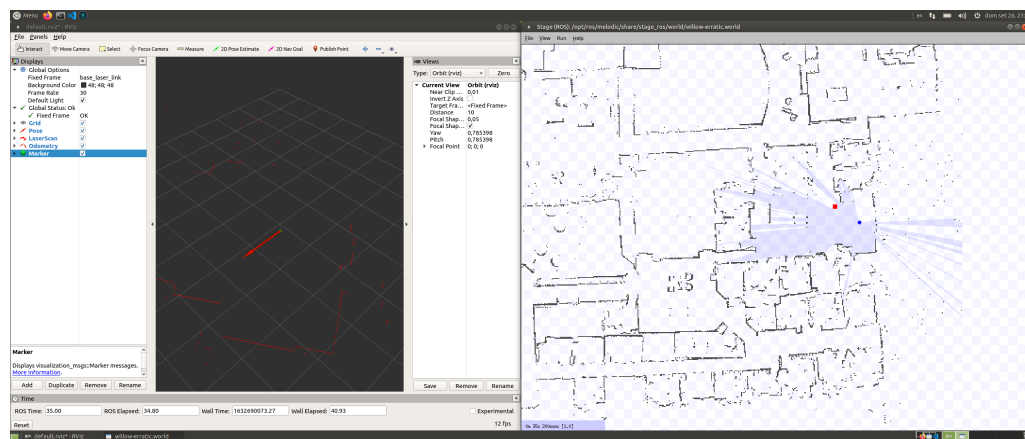


Figura 4.1. Come è possibile notare, nel test analizzato si parte da una situazione in cui la risultante delle forze (rappresentata dalla freccia verde) è nulla, poiché il robot è abbastanza distante da qualsiasi ostacolo.

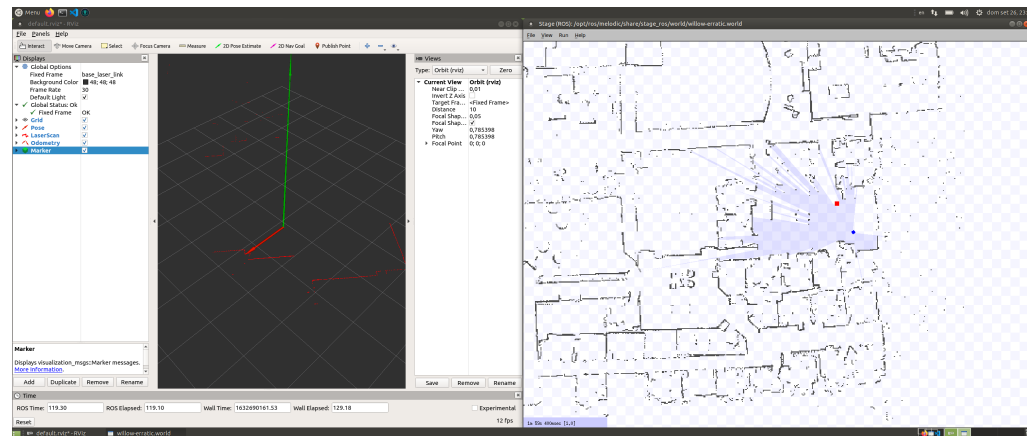


Figura 4.2. Quando si prova ad avvicinare il robot a un ostacolo, la forza risultante aumenta notevolmente.

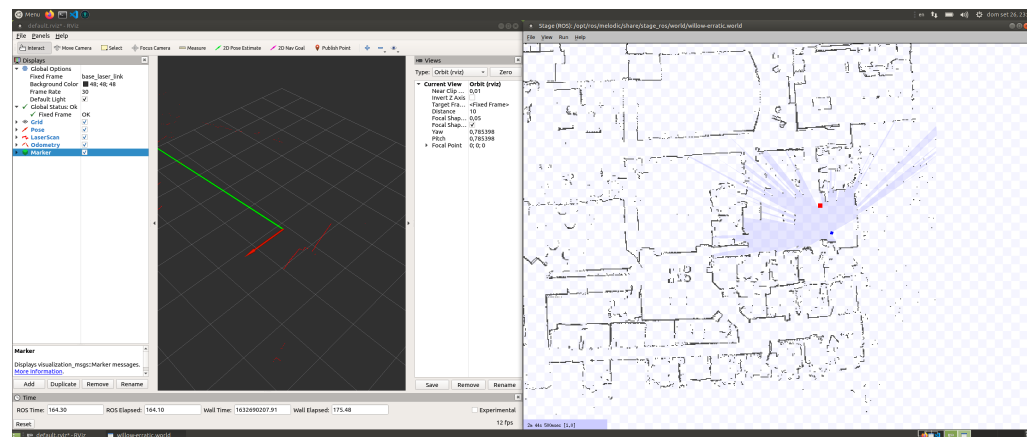


Figura 4.3. La direzione del robot (rappresentata dalla freccia rossa) viene quindi corretta in base alla forza calcolata.

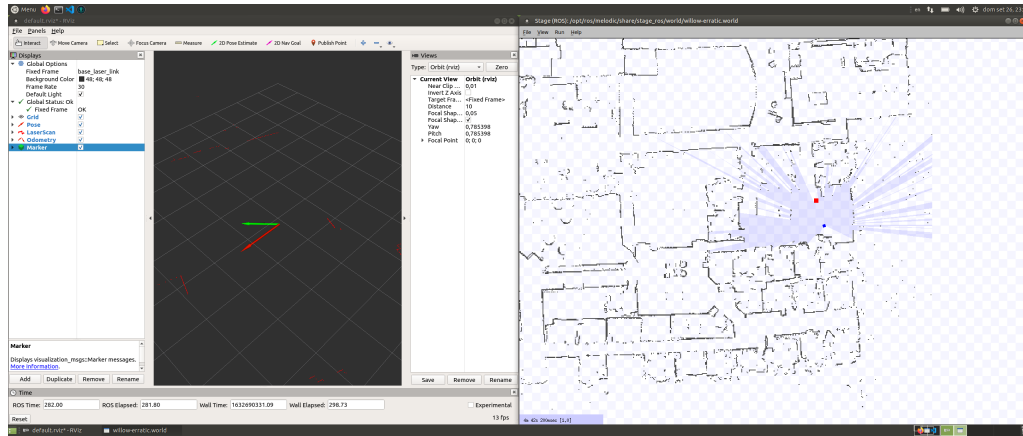


Figura 4.4. Infine, dopo le dovute correzioni, il robot viene portato in una zona in cui la presenza di ostacoli vicini è minore.

4.2 Analisi dei test e scelta dei parametri

Durante la fase di test è stato necessario valutare i seguenti parametri:

Soglia misurazioni scanner Questo parametro serve a decidere quanto devono essere vicini gli ostacoli per costituire un possibile problema di collisione.

Coefficiente velocità angolare Questo parametro serve a specificare quanto velocemente ridirezionare il robot verso la zona sicura.

Coefficiente velocità lineare Questo parametro serve a specificare quanto deve muoversi il robot nella nuova direzione calcolata.

Dopo aver svolto alcune osservazioni si è giunti a una conclusione.

Per quanto riguarda il primo parametro, è stato scelto 1.25 come distanza di soglia; infatti è stato osservato che valori più bassi causano collisioni in alcune situazioni, mentre valori troppo alti limitano troppo la libertà di manovra del robot, portandolo a volte a bloccarsi in loop.

Per quanto riguarda il secondo ed il terzo parametro non è stato possibile trovare una combinazione di valori adeguata in quanto si è notato che valori troppo alti della velocità lineare di output potevano portare a delle collisioni. Si è optato quindi per limitare la velocità lineare di output a valori inferiori a 0.75, scelta che rende

quasi nulla la possibilità di collisione. Con questo valore massimo della velocità di output è stato possibile scegliere il coefficiente per la velocità angolare pari a 1.

Capitolo 5

Conclusioni

Durante lo svolgimento di questo progetto è stato possibile capire l'importanza che possono ricoprire nella robotica gli algoritmi di local motion control. Durante i test il robot è stato infatti messo in una condizione di totale assenza di informazioni riguardo alla mappa in cui era situato. Tutti i calcoli fatti dal robot si basavano quindi solo sulle informazioni che poteva raccogliere in tempo reale. Questo evidenzia la capacità degli algoritmi di local motion control (come ad esempio quello dell'Artificial Potential Field presentato in questo studio) di reagire prontamente a eventuali imprevisti.

È stato tuttavia messo in evidenza quanto sia importante la scelta dei parametri per il corretto funzionamento dell'algoritmo, che va effettuata a seguito di test e simulazioni. Questi parametri potrebbero infatti cambiare in base all'applicazione che si deve fare dell'algoritmo.

Bibliografia

- [1] Prof. Marcello Chiaberge Lorenzo Galtarossa. Obstacle avoidance algorithms for autonomous navigation system in unstructured indoor areas. *Politecnico di Torino*, 2018.
- [2] Prof. Giuseppe Oriolo. Autonomous and Mobile Robotics - Artificial Potential Fields. *Sapienza, Università di Roma*.
- [3] Prof. Giuseppe Oriolo. Autonomous and Mobile Robotics - Motion Control of WMRs: Regulation. *Sapienza, Università di Roma*.
- [4] Prof. Giorgio Grisetti Simone Mastrocola. Applicazione di recapito parcelle mediante robot mobili. *Sapienza, Università di Roma*, 2021.