

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Braccio robotico collaborativo ridondante con settimo asse lineare

Relatori:

Prof. Stefano Paolo PASTORELLI

Ing. Elisa DIGO

Ing. Valerio CORNAGLIOTTO

Candidato:

Camilla TARTARA

Matricola 282181

Anno accademico 2022/2023

Sommario

SOMMARIO	1
INDICE DELLE FIGURE	5
INDICE DELLE TABELLE	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUZIONE	16
1. RICERCA BIBLIOGRAFICA	23
1.1 RICERCA PRELIMINARE.....	23
1.1.1 Prima ricerca	23
1.1.2 Seconda ricerca.....	32
1.2 RICERCA SPECIFICA SUI MANIPOLATORI SCORREVOLI	35
1.3 ANALISI DEI RISULTATI DELLA RICERCA	36
1.3.1 Articoli riguardanti i manipolatori scorrevoli	36
1.3.2 Riepilogo dei risultati	49
1.4 SPUNTI DERIVATI DALL'ANALISI DEI RISULTATI DI RICERCA.....	50
2. ANALISI DELLO SPAZIO DI LAVORO.....	52
2.1 CARATTERISTICHE DEL ROBOT UR3	58
2.2 SPAZIO DI LAVORO COMPLESSIVO	61
2.3 LIMITI DI GIUNTO	64
2.3.1 Metodo 1.....	65
2.3.2 Metodo 2.....	71
2.3.3 Conclusioni.....	77

2.4	SINGOLARITÀ.....	77
2.4.1	Analisi delle singularità in funzione di q_2 e q_3	80
2.4.2	Analisi delle singularità in spazio operativo.....	82
2.5	AUTO-COLLISIONI.....	83
2.5.1	Variazione di una coppia gradi di libertà: q_2 e q_3	83
2.5.2	Variazione di una terna di gradi di libertà: q_2 , q_3 e q_4	84
2.5.3	Variazione di un set di gradi di libertà: q_2 , q_3 , q_4 e q_5	85
2.5.4	Considerazioni sul metodo di mappatura in termini di auto-collisione	87
2.6	ORIENTAZIONE FISSA DELL'END EFFECTOR.....	90
2.6.1	Sottospazio di lavoro	91
2.6.2	Analisi dei limiti del sottospazio di lavoro.....	92
2.7	ANALISI PIANI	95
2.7.1	Analisi completa di un piano yz intermedio	96
2.7.2	Analisi piani yz	105
3.	ESEMPI DI TRAIETTORIE	117
3.1	METODO DI PIANIFICAZIONE DI TRAIETTORIE.....	117
3.2	TRAIETTORIA ENTRO LO SPAZIO DI LAVORO	120
3.2.1	Analisi della traiettoria.....	121
3.2.2	Analisi della posizione e della velocità del TCP	124
3.2.3	Analisi dei gradi di libertà	125
3.2.4	Analisi della potenza	127
3.2.5	Analisi della posizione del centro di massa	128
3.2.6	Traiettoria su mappatura spazio di lavoro	129
3.3	TRAIETTORIA OLTRE LO SPAZIO DI LAVORO.....	130
3.3.1	Analisi della traiettoria.....	132

3.3.2	<i>Analisi della posizione e della velocità del TCP</i>	135
3.3.3	<i>Analisi dei gradi di libertà</i>	136
3.3.4	<i>Analisi della potenza</i>	139
3.3.5	<i>Analisi della posizione del centro di massa</i>	140
3.3.6	<i>Traiettoria su mappatura dello spazio di lavoro</i>	141
3.4	TRAIETTORIA PROSSIMA ALLA SINGOLARITÀ DI GOMITO.....	142
3.4.1	<i>Analisi della traiettoria</i>	143
3.4.2	<i>Analisi della posizione e della velocità del TCP</i>	146
3.4.3	<i>Analisi dei gradi di libertà</i>	148
3.4.4	<i>Analisi della potenza</i>	150
3.4.5	<i>Analisi della posizione del centro di massa</i>	151
3.4.6	<i>Traiettoria su mappatura dello spazio di lavoro</i>	152
3.5	TRAIETTORIA PASSANTE PER UNA CONFIGURAZIONE PROSSIMA ALLA SINGOLARITÀ DI SPALLA E DI AUTO-COLLISIONE	153
3.5.1	<i>Analisi della traiettoria</i>	155
3.5.2	<i>Analisi dello spostamento e della velocità del TCP</i>	158
3.5.3	<i>Analisi dei gradi di libertà</i>	159
3.5.4	<i>Analisi della potenza</i>	162
3.5.5	<i>Analisi della posizione del centro di massa</i>	163
3.5.6	<i>Traiettoria su mappatura dello spazio di lavoro</i>	164
3.6	TRAIETTORIA OBLIQUA CON MOTO DELLA BASE PIANIFICATO A TRAPEZIO DI VELOCITÀ.....	165
3.6.1	<i>Analisi della traiettoria</i>	167
3.6.2	<i>Analisi della posizione e della velocità del TCP</i>	169
3.6.3	<i>Analisi dei gradi di libertà</i>	171
3.6.4	<i>Analisi della potenza</i>	173

3.6.5	<i>Analisi della posizione del centro di massa</i>	174
3.6.6	<i>Traiettoria su mappatura dello spazio di lavoro</i>	175
4.	CONCLUSIONI	176
5.	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	180

Indice delle figure

<i>Figura 1 - Esempio di manipolatore scorrevole ridondante [4].....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2 - Sistema a navetta Seventh Axis di Rollon [5].....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3 - Sistema a navetta Seventh axis di Rollon impiegato in una linea per la piegatura delle lamiere [5].....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4 - Sistema di imaging robotico RadalyX [7].....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5 - Slitta integrata con robot articolato Hiwin [8].....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 6 - Cella Mandelli automatizzata per l'adding manufacturing [9].....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 1.1 - Argomento principale trattato negli articoli derivanti dalla prima ricerca</i>	<i>24</i>
<i>Figura 1.2 - Modello CAD e schema cinematico del manipolatore scorrevole a 9 gradi di libertà [19]37</i>	<i>37</i>
<i>Figura 1.3 - Modello CAD del manipolatore scorrevole con giunto prismatico integrato e micro-piattaforma a tre gradi di libertà montata sulla flangia dell'end effector [46].....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 1.4 - Esempio di simulazione del moto con integrazione del moto della base [40].....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 1.5 - Struttura cinematica della stazione di pulizia in approccio allo scafo [23].....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 1.6 - Schema cinematico del manipolatore umanoide posizionato sulla guida rettilinea [41].</i>	<i>40</i>
<i>Figura 1.7 - Manipolatore a sette gradi di libertà con primi due giunti prismatici [30].....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 1.8 - Sistema robotico ridondante con guida lineare [47].....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 1.9 - Braccio robotico Fetch [34].....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 1.10 - Sistema robotico di movimentazione ridondante con torcia di saldatura e tavolo di lavoro [43].....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 1.11 - Sistema robotico ridondante con linea aerea per la saldatura [44].....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 1.12 - Rappresentazione schematica del sistema robotico con guida lineare aerea [45].....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 1.13 - Modello 3D del sistema robotico con giunti prismatico iniziale [14].....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 1.14 - Modello CAD del sistema robotico costituito da un manipolatore a sei gradi di libertà posizionato su una guida lineare [36].....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 1.15 - Modello CAD del manipolatore scorrevole ridondante con polso roll-pitch-yaw [27].....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 1.16 - Manipolatore scorrevole ridondante: a) lineare, b) circolare e c) curvo [3].....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 1.17 - Modello CAD del manipolatore scorrevole ridondante a sette gradi di libertà utilizzato per l'analisi dinamica [4].....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 1.18 - Spazio di lavoro schematizzato</i>	<i>51</i>
<i>Figura 1.19 - Spazio di lavoro con spostamento della base.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2.1 - Schema riassuntivo delle analisi eseguite.....</i>	<i>54</i>

<i>Figura 2.2 - Configurazione zero assi con identificazione sistemi di riferimento (ground, base e end effector) e identificazione giunti.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 2.3 - Schematizzazione robot e sistemi di riferimento con convenzione di DH modificata</i>	<i>59</i>
<i>Figura 2.4 - Tabella di sintesi delle molteplicità di soluzione</i>	<i>61</i>
<i>Figura 2.5 - Spazio di lavoro operativo complessivo.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 2.6 - Analisi spazio giunti q_2q_3 in termini di limiti di giunto con metodo 1 e discretizzazione equi-spaziata</i>	<i>66</i>
<i>Figura 2.7 - Esempi di configurazioni non accettabili (gradi di libertà in analisi q_2 e q_3).....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 2.8 - Soluzioni del problema di cinematica inversa in gradi di un punto dello spazio operativo contrassegnato con il flag rosso.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 2.9 - Analisi spazio giunti q_2q_3 in termini di limiti di giunto con metodo 1 e metodo Monte Carlo</i>	<i>68</i>
<i>Figura 2.10 - Analisi spazio giunti q_2q_3 in termini di limiti di giunto con metodo 1 e discretizzazione equi-spaziata e riduzione limite sul giunto q_2.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 2.11 - Analisi spazio giunti q_4q_5 in termini di limiti di giunto con metodo 1 e discretizzazione equi-spaziata</i>	<i>70</i>
<i>Figura 2.12 - Esempi di configurazioni non accettabili (gradi di libertà in analisi q_4 e q_5).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 2.13 - Indice di prossimità ai limiti di giunto del grado di libertà q_2 con metodo 2 e indice 1....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.14 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio giunti q_2-q_3 con metodo 2 e indice 1</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.15 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio giunti q_2-q_3 e nello spazio operativo con metodo 2 e indice 1.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 2.16 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio giunti $q_1-q_2-q_3$ con metodo 2 e indice 1</i>	<i>73</i>
<i>Figura 2.17 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio operativo con metodo 2 e indice 1...74</i>	<i>74</i>
<i>Figura 2.18 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio operativo con metodo 2, indice 1 e valore limite.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 2.19 - Indice di prossimità ai limiti di giunto del grado di libertà q_2 con metodo 2 e indice 2....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 2.20 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio giunti q_2-q_3 con metodo 2 e indice 2</i>	<i>76</i>
<i>Figura 2.21 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio giunti q_2-q_3 e nello spazio operativo con metodo 2 e indice 2.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 2.22 - Esempio di singolarità di spalla del robot UR3.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 2.23 - Esempio di singolarità di gomito del robot UR3.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 2.24 - Esempio di singolarità di polso del robot UR3.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 2.25 - Singolarità in spazio giunti q_2-q_3 e spazio operativo</i>	<i>80</i>
<i>Figura 2.26 - Esempi di configurazioni: singolarità e prossima alla singolarità.....</i>	<i>81</i>

<i>Figura 2.27 - Andamento del determinante della matrice jacobiana in spazio giunti q_2-q_3 e spazio operativo</i>	81
<i>Figura 2.28 - Andamento del determinante della matrice jacobiana in spazio giunti: mappatura</i>	82
<i>Figura 2.29 - Andamento del determinante della matrice jacobiana in spazio operativo complessivo</i>	82
<i>Figura 2.30 - Analisi spazio giunti q_2q_3 in termini di auto-collisione</i>	83
<i>Figura 2.31 - Esempi di configurazioni: configurazione auto-collisione e configurazione safe con variazione q_2, q_3</i>	84
<i>Figura 2.32 - Analisi spazio giunti $q_2q_3q_4$ in termini di auto-collisione</i>	85
<i>Figura 2.33 - Esempi di configurazioni: configurazione auto-collisione e configurazione safe con variazione q_2, q_3, q_4</i>	85
<i>Figura 2.34 - Analisi spazio giunti $q_2q_3q_4q_5$ in termini di auto-collisione</i>	86
<i>Figura 2.35 - Analisi spazio operativo con variazione $q_2q_3q_4q_5$ in termini di auto-collisione</i>	86
<i>Figura 2.36 - Riassunto processo ottimizzazione analisi auto-collisioni</i>	88
<i>Figura 2.37 - Analisi spazio giunti $q_2q_3q_4$ in termini di auto-collisione con metodo ottimizzato</i>	89
<i>Figura 2.38 - Configurazioni accettabili in spazio operativo con metodo ottimizzato</i>	89
<i>Figura 2.39 - Esempio di configurazione con orientazione fissa del TCP</i>	90
<i>Figura 2.40 - Sottospazio di lavoro con orientazione TCP fissa</i>	91
<i>Figura 2.41 - Confronto tra spazio di lavoro complessivo e sottospazio di lavoro definito dall'orientazione fissa del TCP</i>	92
<i>Figura 2.42 - Limite interno del sottospazio di lavoro: esempio 1</i>	93
<i>Figura 2.43 - Limite interno del sottospazio di lavoro: esempio 2</i>	93
<i>Figura 2.44 - Limite interno del sottospazio di lavoro: esempio 3</i>	93
<i>Figura 2.45 - Limite esterno del sottospazio di lavoro</i>	94
<i>Figura 2.46 - Limite laterale del sottospazio di lavoro</i>	95
<i>Figura 2.47 - Sottospazio di lavoro con orientazione TCP fissa: piani yz in analisi</i>	96
<i>Figura 2.48 - Schema riassuntivo della procedura di analisi dei piani yz</i>	98
<i>Figura 2.49 - Piano yz con $x=0.3$ m: forma dello spazio di lavoro</i>	99
<i>Figura 2.50 - Piano yz con $x=0.3$ m: analisi destrezza</i>	99
<i>Figura 2.51 - Piano yz con $x=0.3$ m: analisi destrezza e auto-collisioni</i>	100
<i>Figura 2.52 - Piano yz con $x=0.3$ m: analisi destrezza, auto-collisioni e posizioni link rispetto al TCP</i>	100
<i>Figura 2.53 - Confronto e analisi spazio di lavoro piano $x=0.3$ m</i>	101
<i>Figura 2.54 - Soluzioni del problema di cinematica inversa del punto A</i>	102
<i>Figura 2.55 - Piano $x=0.3$, punto A</i>	103
<i>Figura 2.56 - Soluzioni del problema di cinematica inversa del punto B</i>	104
<i>Figura 2.57 - Piano $x=0.3$ m, punto B</i>	105
<i>Figura 2.58 - Piano yz con $x=0.15$ m: forma dello spazio di lavoro</i>	106

<i>Figura 2.59 - Piano yz con $x=0.5$ m: forma dello spazio di lavoro</i>	106
<i>Figura 2.60 - Piano yz con $x=0.15$ m: analisi destrezza</i>	107
<i>Figura 2.61 - Piano yz con $x=0.5$ m: analisi destrezza</i>	108
<i>Figura 2.62 - Piano yz con $x=0.15$ m: analisi destrezza e auto-collisioni</i>	109
<i>Figura 2.63 - Piano yz con $x=0.5$ m: analisi destrezza e auto-collisioni</i>	109
<i>Figura 2.64 - Piano yz con $x=0.15$ m: analisi destrezza, auto-collisioni e posizioni link rispetto al TCP</i>	111
<i>Figura 2.65 - Piano yz con $x=0.5$ m: analisi destrezza, auto-collisioni e posizioni link rispetto al TCP</i>	111
<i>Figura 2.66 - Piano $x=0.15$ m: scelta del punto C in analisi</i>	112
<i>Figura 2.67 - Soluzioni del problema di cinematica inversa del punto C</i>	113
<i>Figura 2.68 - Piano $x=0.15$ m, punto C</i>	114
<i>Figura 2.69 - Piano $x=0.5$ m: scelta del punto D in analisi</i>	115
<i>Figura 2.70 - Soluzioni del problema di cinematica inversa del punto D</i>	115
<i>Figura 2.71 - Piano $x=0.5$ m, punto D</i>	116
<i>Figura 3.1 - Soluzioni del problema di cinematica inversa associata alla posa iniziale 3.3</i>	120
<i>Figura 3.2 - Pose iniziale e finale della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	121
<i>Figura 3.3 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro con base fissa</i>	121
<i>Figura 3.4 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro con base mobile</i>	122
<i>Figura 3.5 - Percorso del TCP durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	122
<i>Figura 3.6 - Moto assoluto, moto relativo e moto di trascinamento nel caso di base mobile con traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	123
<i>Figura 3.7 - Errore di orientazione durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro con base fissa</i>	123
<i>Figura 3.8 - Andamento del determinante della matrice jacobiana durante l'esecuzione e della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	124
<i>Figura 3.9 - Andamento della posizione del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	124
<i>Figura 3.10 - Andamento della velocità del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	125
<i>Figura 3.11 - Andamento dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	126
<i>Figura 3.12 - Andamento delle velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	126

<i>Figura 3.13 - Andamento delle accelerazioni dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	127
<i>Figura 3.14 - Coppie nei giunti per l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	127
<i>Figura 3.15 - Potenza istantanea richiesta dai giunti per l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	128
<i>Figura 3.16 - Potenza istantanea richiesta per l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	128
<i>Figura 3.17 - Posizione relativa del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	129
<i>Figura 3.18 - Traiettoria del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro</i>	129
<i>Figura 3.19 - Traiettoria entro lo spazio di lavoro proiettata sulla mappatura dello spazio di lavoro</i>	130
<i>Figura 3.20 - Soluzioni del problema di cinematica inversa associata alla posa iniziale 3.5</i>	131
<i>Figura 3.21 - Pose iniziale e finale della traiettoria obliqua oltre spazio di lavoro</i>	131
<i>Figura 3.22 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro con base fissa</i>	132
<i>Figura 3.23 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro con base mobile</i>	132
<i>Figura 3.24 - Percorso del TCP durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro</i>	133
<i>Figura 3.25 - Moto assoluto, relativo e di trascinamento nel caso di base mobile</i>	133
<i>Figura 3.26 - Errore di posizione durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro</i>	133
<i>Figura 3.27 - Errore di orientamento durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro</i>	134
<i>Figura 3.28 - Andamento del determinante della matrice jacobiana durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro</i>	134
<i>Figura 3.29 - Andamento della posizione del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro</i>	135
<i>Figura 3.30 - Andamento della velocità del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro</i>	136
<i>Figura 3.31 - Andamento dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro</i>	137
<i>Figura 3.32 - Andamento della velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro</i>	137

<i>Figura 3.33 - Ingrandimento dell'andamento della velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 3.34 - Andamento dell'accelerazione dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro</i>	<i>138</i>
<i>Figura 3.35 - Coppie nei giunti durante l'esecuzione della traiettoria oltre lo spazio di lavoro.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 3.36 - Potenza istantanea richiesta dai giunti per l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 3.37 - Potenza istantanea richiesta per l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro</i>	<i>140</i>
<i>Figura 3.38 - Posizione relativa del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 3.39 - Traiettoria del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 3.40 - Traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro proiettata sulla mappatura dello spazio di lavoro</i>	<i>141</i>
<i>Figura 3.41 - Soluzioni del problema di cinematica inversa associata alla posa iniziale 3.7</i>	<i>142</i>
<i>Figura 3.42 - Pose iniziale e finale della traiettoria prossima alla singolarità di gomito</i>	<i>143</i>
<i>Figura 3.43 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito con base fissa.....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 3.44 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito con base mobile.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 3.45 - Percorso TCP durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito</i>	<i>144</i>
<i>Figura 3.46 - Moto assoluto, relativo e di trascinamento nel caso di base mobile</i>	<i>145</i>
<i>Figura 3.47 - Errore di posizione durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 3.48 - Errore di orientazione durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 3.49 - Andamento del determinante della matrice jacobiana durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito</i>	<i>146</i>
<i>Figura 3.50 - Andamento della posizione del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 3.51 - Andamento della velocità del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 3.52 - Andamento dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito.....</i>	<i>148</i>

<i>Figura 3.53 - Andamento della velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 3.54 - Ingrandimento dell'andamento delle velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito</i>	<i>149</i>
<i>Figura 3.55 - Andamento delle accelerazioni dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 3.56 - Coppie nei giunti durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito</i>	<i>150</i>
<i>Figura 3.57 - Potenza istantanea richiesta dai giunti per l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito</i>	<i>151</i>
<i>Figura 3.58 - Potenza istantanea richiesta per l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito</i>	<i>151</i>
<i>Figura 3.59 - Posizione relativa del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 3.60 - Traiettoria del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito</i>	<i>152</i>
<i>Figura 3.61 - Traiettoria prossima alla singolarità di gomito proiettata sulla mappatura dello spazio di lavoro.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 3.62 - Soluzioni del problema di cinematica inversa associata alla posa iniziale 3.9.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 3.63 - Pose iniziale e finale della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione</i>	<i>154</i>
<i>Figura 3.64 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione con base fissa</i>	<i>155</i>
<i>Figura 3.65 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione con base mobile</i>	<i>155</i>
<i>Figura 3.66 - Percorso del TCP durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 3.67 - Moto assoluto, moto relativo e moto di trascinamento nel caso di base mobile.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 3.68 - Errore di posizione durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 3.69 - Errore orientamento durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 3.70 - Andamento determinante della matrice jacobiana durante l'esecuzione della traiettoria passante per la singolarità di spalla e l'auto-collisione</i>	<i>157</i>
<i>Figura 3.71 - Prima configurazione di auto-collisione durante l'esecuzione della traiettoria con base fissa.....</i>	<i>157</i>

<i>Figura 3.72 - Andamento della posizione del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 3.73 - Andamento della velocità del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 3.74 - Andamento dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 3.75 - Andamento delle velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 3.76 - Ingrandimento dell'andamento delle velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 3.77 - Andamento delle accelerazioni dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 3.78 - Coppie nei giunti durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 3.79 - Potenza istantanea richiesta dai giunti per l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 3.80 - Potenza istantanea richiesta per l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 3.81 - Posizione relativa del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 3.82 - Posizione del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 3.83 - Traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione proiettata sulla mappatura dello spazio di lavoro.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 3.84 - Waypoint del moto reale della base.....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 3.85 - Soluzioni del problema di cinematica inversa associata alla posa iniziale 3.11.....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 3.86 - Pose iniziale e finale della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 3.87 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base con base fissa.....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 3.88 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base con base mobile.....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 3.89 - Percorso del TCP durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 3.90 - Moto assoluto, relativo e di trascinamento nel caso di base mobile.....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 3.91 - Errore di orientamento durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>168</i>

<i>Figura 3.92 - Andamento del determinante della matrice jacobiana durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>169</i>
<i>Figura 3.93 - Andamento della posizione del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura 3.94 - Andamento della velocità del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura 3.95 - Andamento dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>171</i>
<i>Figura 3.96 - Andamento delle velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>172</i>
<i>Figura 3.97 - Andamento delle accelerazioni dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>172</i>
<i>Figura 3.98 - Coppie nei giunti per l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>173</i>
<i>Figura 3.99 - Potenza istantanea richiesta dai giunti per l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>173</i>
<i>Figura 3.100 - Potenza istantanea richiesta per l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>174</i>
<i>Figura 3.101 - Posizione relativa del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>174</i>
<i>Figura 3.102 - Traiettoria del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base.....</i>	<i>175</i>
<i>Figura 3.103 - Traiettoria obliqua safe con moto reale della base proiettata sulla mappatura dello spazio di lavoro.....</i>	<i>175</i>

Indice delle tabelle

<i>Tabella 1.1 - Risultati della prima ricerca</i>	25
<i>Tabella 1.2 - Risultati della seconda ricerca</i>	32
<i>Tabella 1.3 - Risultati della terza ricerca</i>	35
<i>Tabella 2.1 - Documenti utili all'analisi dello spazio di lavoro</i>	55
<i>Tabella 2.2 - Parametri di Denavit-Hartenberg del robot UR3</i>	59
<i>Tabella 2.3 - Valore limite dei gradi di libertà [58]</i>	64
<i>Tabella 2.4 - Velocità massima nei giunti [58]</i>	64
<i>Tabella 2.5 - Descrizione configurazioni piano $x=0.3$ m, punto A</i>	103
<i>Tabella 2.6 - Descrizione configurazioni piano $x=0.3$ m, punto B</i>	105
<i>Tabella 2.7 - Descrizione configurazioni piano $x=0.15$ m, punto C</i>	114
<i>Tabella 2.8 - Descrizione configurazioni piano $x=0.5$ m, punto D</i>	116

Abstract

Il presente elaborato di tesi si concentra su una possibile applicazione della robotica collaborativa, ossia l'utilizzo di manipolatori articolati che interagiscono con l'operatore, durante l'esecuzione di un task. Nello specifico, si considera un manipolatore articolato a sei gradi di libertà (robot UR3 della Universal Robot) la cui base viene posizionata su una guida lineare rendendo così il sistema robotico complessivo, oltre che mobile, anche ridondante. Questo documento di tesi sarà suddiviso in due parti principali.

La prima parte presenta la ricerca di tutte le informazioni riguardanti i manipolatori scorrevoli, ossia tutti quei manipolatori articolati posizionati su basi mobili scorrevoli (ad esempio rotaie e guide) non dotate di ruote.

La seconda parte, invece, si concentra sullo studio del robot UR3. Inizialmente, si analizza il suo spazio di lavoro complessivo in funzione di parametri quali il raggiungimento dei limiti di giunto, le condizioni di singolarità e le condizioni di auto-collisione. Successivamente, si analizzano i vantaggi introdotti dall'aggiunta del settimo grado di libertà di traslazione. Pertanto, in questa seconda parte, viene anche analizzato il nuovo spazio di lavoro esteso ottenuto con la soluzione di sistema robotico ridondante. Infine, si conclude presentando la pianificazione e simulazione di alcune traiettorie eseguite nello spazio di lavoro esteso sfruttando la mobilità aggiunta dall'asse lineare; l'analisi viene condotta confrontando la soluzione ridondante con quella di solo robot a base fissa.

Introduzione

Robotica collaborativa

L'automazione robotica è una diramazione dell'automazione industriale il cui principale strumento sono i robot industriali: quest'ultimi sono macchine a più gradi di libertà autonome, o semiautonome, programmabili che svolgono attività, in sostituzione o a fianco dell'operatore, in ambiente lavorativo industriale [1].

Nello specifico, il manipolatore viene definito robot industriale (cartesiano, parallelo o articolato) se è posizionato all'interno di uno spazio di lavoro isolato, tramite barriere o gabbie, mentre viene definito cobot, ossia robot collaborativo, un manipolatore, solitamente di tipo articolato/antropomorfo, che condivide lo spazio di lavoro con l'operatore senza l'utilizzo di barriere fisiche. Infatti, un robot per essere definito collaborativo deve possedere dei requisiti fondamentali per permettere una sicura interazione uomo-macchina: nello specifico, si parla di requisiti in termini di percezione dell'ambiente di lavoro e di previsione dell'intenzione umana [2].

L'introduzione dei robot collaborativi negli ambienti di produzione industriale ha dato inizio ad una nuova rivoluzione industriale, definita industria 5.0 [2]. I sistemi di automazione robotici permettono di combinare al meglio le capacità dell'uomo e del robot: da una parte si sfruttano la precisione e l'assenza di affaticamento tipiche della struttura robotica e dall'altra le capacità dell'operatore di prendere decisioni, prevedere e risolvere situazioni imprecise, adattarsi alla flessibilità e alla variabilità dei compiti. In questo modo il robot è in grado di sollevare l'operatore dalle operazioni gravose, quali ad esempio la manipolazione di carichi elevati e/o l'esecuzione di operazioni ripetitive e usuranti.

Le principali differenze tra robot industriali e robot collaborativi possono essere riassunte in tre termini: *sicurezza*, *flessibilità* e *velocità di messa in opera* [1].

La *sicurezza* è il parametro principale che definisce i robot collaborativi in quanto essi sono dotati di sistemi di sicurezza integrati, quali ad esempio l'arresto di emergenza, i limiti sulle velocità di giunto e altre *safety* native [1] che permettono la condivisione dello spazio di lavoro con l'operatore senza l'ausilio di barriere fisiche. La caratteristica di sicurezza deriva, inoltre, non solo dalle dimensioni del robot, molto contenute e soprattutto minori rispetto a quelle di

un tipico robot industriale, e dalle limitazioni sulle velocità di movimento ma anche dalla possibilità di equipaggiare le strutture con dei sensori, quali ad esempio i sistemi di visione, che permettono di registrare la posizione dell'operatore e controllare, di conseguenza, i movimenti del robot e i relativi tempi di reazione dello stesso.

Per quanto riguarda la *flessibilità* un robot industriale è performante, in termini di produttività e ritorno economico, quando lavora su grandi volumi in quanto assicura grande velocità di produzione e ripetibilità; si tratta, infatti, di un tipo di automazione detta 'rigida', in quanto non permette grandi variazioni di layout del sistema produttivo e il cambiamento di produzione richiede tempo. Al contrario, i robot collaborativi sono tipicamente più piccoli, compatti e leggeri e ciò permette un loro semplice e rapido spostamento all'interno del layout industriale; oltre a ciò, essi sono facilmente riprogrammabili permettendo così una veloce variazione delle mansioni.

Infine, l'installazione dei cobot non richiede grandi modifiche del layout produttivo, al contrario dei robot industriali che sono molto ingombranti, e ciò permette una rapida integrazione nelle aree di lavoro in quanto non è necessaria l'installazione di barriere fisiche che li separino dagli operatori grazie agli standard di sicurezza integrati. Pertanto, la *messa in opera* di tali strutture robotiche risulta non solo più semplice ma anche molto più rapida rispetto a quella dei robot industriali.

Grazie a tali caratteristiche, la robotica collaborativa ha permesso di introdurre l'automazione in settori e industrie in cui la robotica tradizionale non poteva essere applicata a causa, ad esempio, di limitatezza del budget, insufficienza di spazio nel layout industriale oppure mancanza di operatori specializzati nella programmazione dei robot industriali.

I principali settori in cui vengono utilizzate le strutture robotiche sono quelli: automobilistico, elettrico, manifatturiero, metallurgico e tutti quei settori in cui sono previste attività produttive pericolose, ripetitive e/o anti-ergonomiche [2]. Pertanto, in generale, i campi in cui i cobot possono essere utilizzati sono quelli le cui attività sono caratterizzate da azioni ripetitive (quali saldatura, incollaggio, avvitatura, verniciatura, lucidatura e stampaggio), da azioni usuranti (operazioni di pick and place, manipolazione dei carichi, packaging e pallettizzazione) fino a compiti più complessi quali, ad esempio, l'asservimento di macchine a controllo numerico e il controllo qualità.

Riassumendo, è possibile affermare che i robot collaborativi portino a tanti vantaggi per le aziende in termini di: produttività, qualità, gestione delle risorse e della forza lavoro,

flessibilità nei cambi di produzione, gestione del layout, aumento dell'ergonomia e della sicurezza [1].

Sliding manipulator

Gli *sliding manipulator* (manipolatori scorrevoli) sono dei manipolatori, solitamente di tipo articolato a sei o più gradi di libertà, che hanno come primo giunto un giunto prismatico oppure che sono posizionati su un binario. Nel primo caso si tratta di strutture ridondanti la cui mobilità in termini di traslazione è data dal giunto prismatico iniziale mentre nel secondo caso si tratta di una struttura resa ridondante dall'aggiunta del grado di traslazione determinato dalla base mobile (come mostrato in Figura 1). In entrambi i casi, si tratta di strutture che presentano i vantaggi tipici sia di un dispositivo ridondante che di un dispositivo mobile: ampio spazio di lavoro, leggerezza, elevata tolleranza ai guasti ed elevata precisione di funzionamento ma anche semplice sostituzione della rotaia per completare diverse operazioni [3].

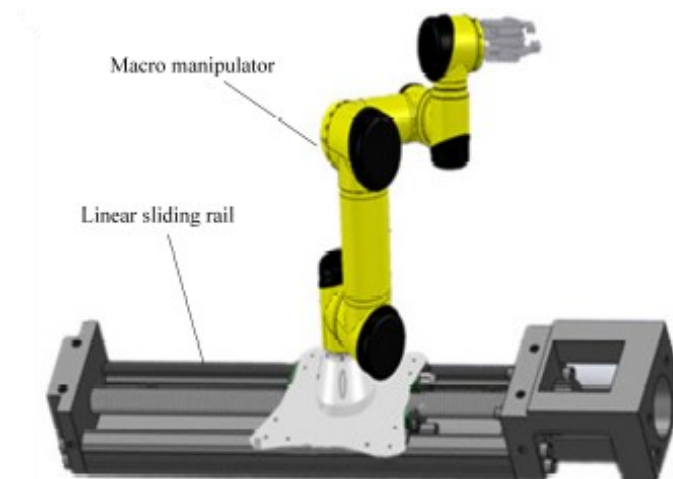


Figura 1 - Esempio di manipolatore scorrevole ridondante [4]

In particolare:

- La ridondanza determina una maggiore destrezza, la possibilità di svolgere compiti più complessi, l'aumento della manipolabilità, la limitazione delle velocità di giunto, la distribuzione uniforme del moto sui giunti, la minimizzazione del consumo di energia, l'ottimizzazione dei tempi di esecuzione dei task, l'aumento dell'affidabilità rispetto ai guasti, l'evitamento degli ostacoli e/o delle configurazioni di singolarità.
- La caratteristica di mobilità consente, invece, una migliore manovrabilità e una migliore capacità di controllo oltre che un aumento dello spazio di lavoro complessivo del manipolatore rispetto ad un manipolatore tradizionale con base fissa [3].

Inoltre, dato che la ridondanza è determinata dall'integrazione di un settimo asse di traslazione, ciò consente di ottenere tutti i vantaggi tipici di un sistema ridondante, limitando allo stesso tempo gli svantaggi legati ad essa come, ad esempio, la maggiore complessità sia dal punto di vista della struttura stessa che in termini di risoluzione del problema di cinematica inversa.

Riassumendo, si può affermare che, rispetto ad un manipolatore tradizionale con base fissa, un manipolatore ridondante scorrevole presenta i seguenti vantaggi [5]:

- spazio di lavoro più ampio,
- maggiore flessibilità di funzionamento,
- maggiore produttività,
- incremento di efficienza,
- riduzione dei costi.

Infatti, un manipolatore scorrevole è un robot generalmente compatto e leggero che grazie al maggiore raggio d'azione può asservire diversi compiti e occupare diverse postazioni.

A fronte dei tanti vantaggi portati dall'utilizzo di un sistema robotico ridondante scorrevole, è necessario, tuttavia, tener conto di alcuni aspetti legati a tale tecnologia prima di poterla integrare in un sistema produttivo, come riportato in [6]:

- Capacità di carico statico: la base del robot deve essere in grado di sopportare il carico statico (costituito dal peso del robot e del carico, dalla flessione e dal centro di gravità complessivo in condizioni statiche) in modo da evitare il ribaltamento della struttura.
- Capacità di carico dinamico: oltre che in condizioni statiche, la base deve essere propriamente dimensionata tenendo conto dei carichi che si sviluppano quando il robot esegue la traiettoria pianificata e, inoltre, è necessario dimensionare opportunamente gli arresti per evitare l'uscita del robot dalla guida.
- Velocità e accelerazione: è necessario scegliere e dimensionare opportunamente l'attuatore del robot in funzione delle velocità e dei carichi richiesti durante l'esecuzione dei task.
- Precisione e accuratezza: nel caso di più robot posizionati su una stessa guida potrebbe essere necessario integrare delle travi di supporto per rispettare i requisiti di precisione e ripetibilità durante l'esecuzione delle operazioni oltre che prevedere dei sistemi di riferimento per la calibrazione della posizione del robot sulla guida stessa.

Esempi di manipolatori ridondanti scorrevoli

Sistema di pick and place: Seventh Axis di Rollon [5]

Si tratta di un sistema a navetta versatile, detto Seventh Axis di Rollon mostrato in Figura 2, costituito da un manipolatore a sei gradi di libertà posizionato su una navetta che consente la movimentazione lungo la guida di diversi carichi, fino a 2000 kg.



Figura 2 - Sistema a navetta Seventh Axis di Rollon [5]

Tale sistema è caratterizzato da un'elevata semplicità di installazione e integrazione nel layout industriale; inoltre, è possibile scegliere sia il tipo di guida (guida a ricircolo di sfere o a cuscinetti) sia l'azionamento (a cinghia per elevate prestazioni in termini di dinamica, silenziosità e manutenzione oppure a pignone-cremagliera per corse di lunghezza maggiore).

Questo sistema robotico ridondante scorrevole può essere impiegato in linee di pallettizzazione, incollaggio e piegatura (esempio mostrato in Figura 3).



Figura 3 - Sistema a navetta Seventh axis di Rollon impiegato in una linea per la piegatura delle lamiere [5]

Sistema di imaging robotico “RadalyX” [7]

Il sistema RadalyX è uno strumento realizzato per l’ispezione non distruttiva di componenti di grandi dimensioni, di zone difficilmente raggiungibili oppure di aree di interesse di una grande struttura. Il sistema è costituito da due bracci robotici, di tipo articolato a sei gradi di libertà, che portano, rispettivamente, un tubo a raggi X e un rilevatore di immagini, e dei binari per estendere l’area di lavoro come mostrato in Figura 4.

Il sistema così costituito presenta i tipici vantaggi dei sistemi robotici ridondanti scorrevoli quali flessibilità, automazione delle operazioni ripetute, semplicità di programmazione, semplicità di spostamento nel layout ed elevata accuratezza determinata dai movimenti sincronizzati dei due bracci robotici.

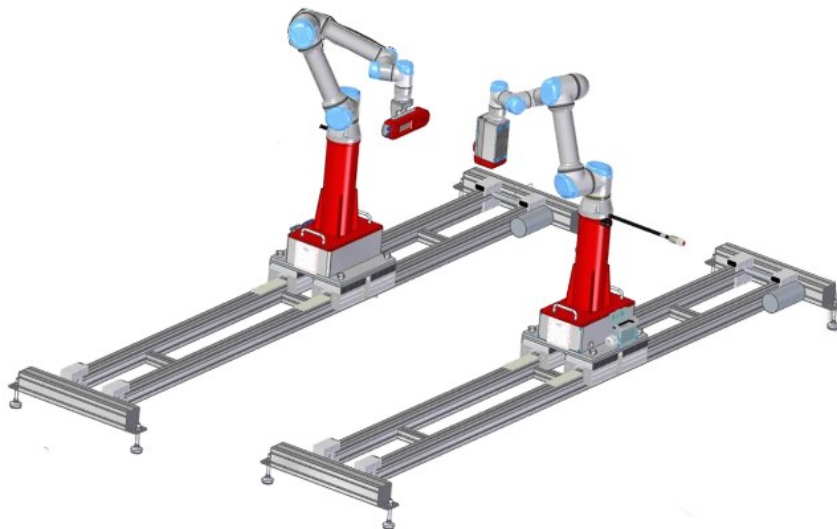


Figura 4 - Sistema di imaging robotico RadalyX [7]

Slitta per robot articolato Hiwin [8]

Si tratta di una slitta con motore lineare ad alta velocità che può essere direttamente integrata come settimo asse nel robot industriale Hiwin (Figura 5). Tale sistema ha un controllo dei sette assi integrato direttamente nell’unità di controllo del robot stesso e può essere utilizzato in diverse applicazioni come l’asservimento macchine, l’imballaggio, la sbavatura, la lucidatura, l’assemblaggio e l’avvitatura.



Figura 5 - Slitta integrata con robot articolato Hiwin [8]

Cella dedicata a processo additivo Mandelli [9]

Il sistema è costituito da un robot Comau, a sei gradi di libertà di tipo antropomorfo, e da una tavola rotante, entrambi posizionati all'interno di una cella per l'*additive manufacturing*. In particolare, il controllo degli assi del robot e della tavola rotante è integrato in un unico sistema di controllo (Sinulink Integrate Run Myrobot) che gestisce, quindi, contemporaneamente i sette gradi di libertà della struttura. Questo tipo di controllo permette di ottimizzare il controllo di posizione, velocità e accelerazione generando una traiettoria migliore in termini di qualità e tempo ciclo.

Questo è un esempio di robot industriale ridondante ma non collaborativo. Infatti, la base integrata aggiunge un grado di libertà di rotazione mobile poiché portata in rotazione della tavola. Tuttavia, il robot viene posizionato all'interno di una gabbia e il suo spazio di lavoro risulta isolato (Figura 6).



Figura 6 - Cella Mandelli automatizzata per l'*additive manufacturing* [9]

Capitolo 1

Ricerca Bibliografica

In questo primo capitolo si approfondisce lo stato dell'arte riguardante i manipolatori scorrevoli, ossia manipolatori il cui primo giunto è prismatico oppure manipolatori posizionati su guide lineari.

Per realizzare tale ricerca è stato utilizzato come strumento principale il database Scopus secondo i seguenti parametri guida:

1. Parole chiave: definite nello specifico per ogni ricerca;
2. Lingua: inglese;
3. Tipo di documento: articolo di rivista, articolo di conferenza, review;
4. Anno di pubblicazione: 2016-2022

1.1 Ricerca preliminare

Inizialmente si sono considerati manipolatori ridondanti, o a sette gradi di libertà, con giunti prismatici o soggetti a traslazione.

1.1.1 Prima ricerca

Le parole chiave utilizzate nella prima ricerca sono: robot/manipolatore ridondante, robot/manipolatore a sette gradi di libertà, giunto prismatico, attuatore lineare e traslazione. Di conseguenza, la stringa di ricerca utilizzata nel database Scopus è:

TITLE-ABS-KEY(("robotic arm" OR robot* OR "anthropomorphic arm" OR manipulator*) AND (redundan* OR ((7 OR seven*) AND (dof* OR "degrees of freedom" OR ax*))) AND (prismatic* OR "linear actuator" OR transl*))

Inoltre, sono stati eliminati tutti gli articoli riguardanti i seguenti argomenti in quanto non ritenuti pertinenti con la ricerca svolta:

- Robot designati alla riabilitazione e riguardanti l'ambito medico/chirurgico;
- Esoscheletri e/o robot indossabili;
- Robot flessibili come gli snake-robot (robot ridondanti dal design modulare).

A fronte di tale ricerca, il risultato, come riportato in Figura 1.1, è che la maggior parte degli articoli è incentrata sui manipolatori paralleli, cioè strutture costituite da bracci meccanici e piattaforme. Poiché tali sistemi non sono di interesse per la ricerca svolta sono stati eliminati nella seconda ricerca.

I risultati della prima ricerca classificati in base all'argomento

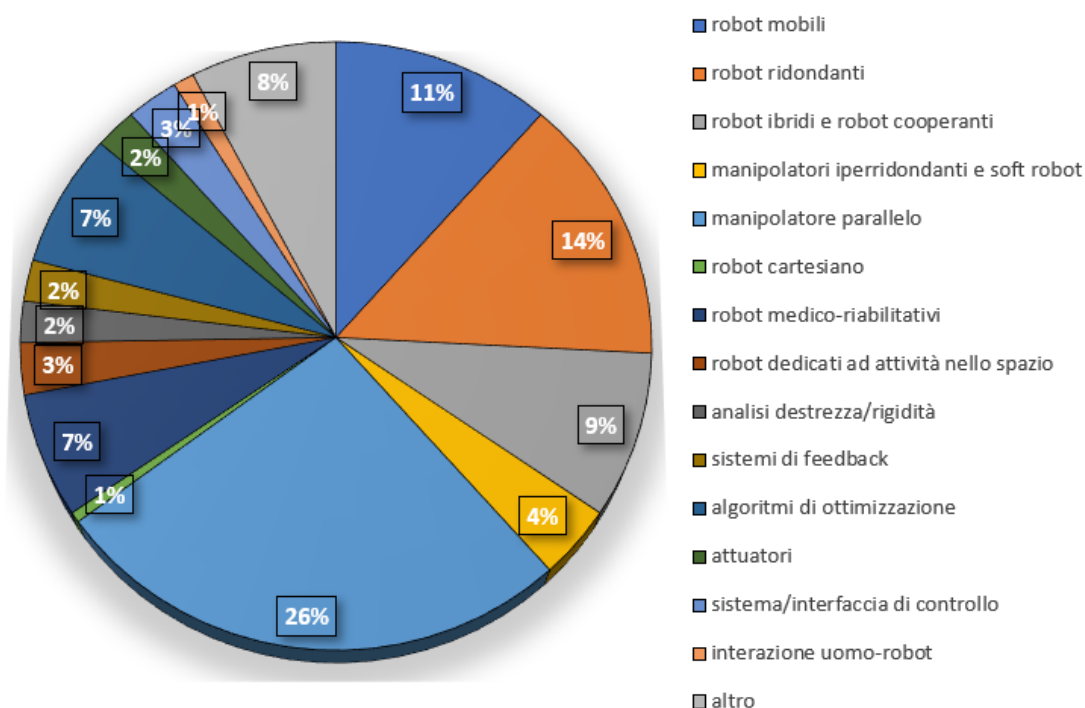


Figura 1.1 - Argomento principale trattato negli articoli derivanti dalla prima ricerca

Di seguito, in Tabella 1.1, sono riportati gli articoli di interesse estratti dalla prima ricerca; per ogni articolo, vengono riportati l'autore principale, il titolo, l'anno di pubblicazione, l'obiettivo principale e i punti chiave (evidenziati in *corsivo*).

Inoltre, per quanto riguarda la Tabella 1.1 si evidenziano in:

- *blu* gli articoli riguardanti i manipolatori scorrevoli (*sliding manipulator*) ossia i manipolatori seriali ridondanti posizionati su una guida lineare o con giunto iniziale prismatico il cui movimento può essere integrato o meno all'interno della pianificazione delle traiettorie.
- *verde* gli articoli in cui si trattano manipolatori scorrevoli con moto della base (o del primo giunto prismatico) integrato nella pianificazione del moto.

Tabella 1.1 - Risultati della prima ricerca

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo
<i>Argomento principale: esempi di robot mobili</i>			
Birrell S.	A fieldtested robotic harvesting system for iceberg lettuce [10]	2019	Utilizzo del <i>robot UR10</i> (manipolatore a sei gradi di libertà) posizionato su una <i>piattaforma mobile movimentata manualmente</i> per la raccolta della verdura con implementazione di un sistema di videocamere per la rilevazione dei prodotti.
Hernandez-Barragan J.	A modified firefly algorithm for the inverse kinematics solutions of robotics manipulators [11]	2021	Definizione di un algoritmo <i>firefly</i> per risolvere il <i>problema di cinematica inversa</i> e applicazione di tale metodo ad un manipolatore a cinque gradi di libertà posizionato su una <i>base mobile</i> .
Khort D.	Robotized Platform for picking of strawberry berries [12]	2019	Utilizzo di un <i>manipolatore articolato</i> posizionato su una <i>base mobile dotata di ruote</i> per la raccolta di frutti e implementazione di un

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo	
			algoritmo per riconoscere la maturazione dei prodotti.	
Rahman M.	Towards an autonomous RIRS: design, structure investigation and framework [13]	2021	Modellazione di un sistema autonomo di ispezione per la manutenzione dei binari. Tale sistema è costituito da un <i>braccio robotico UR10e</i> e da un <i>veicolo autonomo</i> .	
Shin D.	Multi-body dynamics simulations of high-speed transfer robots disposed between presses [14]	2017	<i>Analisi dinamica</i> di un robot di trasferimento a sei gradi di libertà montato su una <i>guida lineare</i> (asse prismatico) con <i>riposizionamento</i> della base.	
Tinoco V.	A review of pruning and harvesting manipulator [15]	2021	Revisione di una serie di esempi di sistemi robotici per la raccolta e la potatura costituiti da <i>manipolatori ridondanti</i> posizionati su <i>basi mobili</i> .	
Xing H.	An admittance-controlled wheeled mobile manipulator for mobility assistance: Human-robot interaction estimation and redundancy resolution for enhanced force exertion ability [16]	2021	Sviluppo di un sistema robotico costituito da un manipolatore articolato posto su una <i>base mobile con ruote</i> e successiva <i>analisi cinematica</i> sia del manipolatore che della base stessa.	
Xu K.	Kinematics of the center of mass for robotic	2022	Utilizzo della <i>cinematica del centro di massa</i> di una catena cinematica aperta posizionata su una <i>base mobile</i> per determinare il	

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo	
	mechanisms based on lie group theory [17]		<i>bilanciamento del robot</i> in funzione della posa del robot stesso.	
Yaguchi H.	Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper [18]	2016	Presentazione di un robot autonomo (<i>manipolatore articolato su base mobile</i>) per la raccolta dei pomodori; nello specifico si presenta l'algoritmo di riconoscimento del prodotto.	
Argomento principale: strutture robotiche ridondanti				
Baur J.	Design and development of a redundant modular multipurpose agricultural manipulator [19]	2012	Sviluppo di un <i>manipolatore seriale ridondante</i> (7, 8 e 9 gradi di libertà) per la raccolta dei frutti posizionato su una <i>piattaforma lineare mobile</i> .	
Busson D.	A Pragmatic Approach to Exploiting Full Force Capacity for Serial Redundant Manipulators [20]	2018	Utilizzo della <i>ridondanza cinematica di un manipolatore</i> per analizzare la capacità di forza.	
Ferrentino E.	On the Optimal Resolution of Inverse Kinematics for Redundant Manipulators Using a Topological Analysis [21]	2020	Sviluppo di un algoritmo di ottimizzazione per la soluzione del problema di <i>cinematica inversa</i> basato sull'analisi topologica.	
Gong M.	Analytical inverse kinematics and self-motion application for 7-	2019	Presentazione di diversi metodi di risoluzione del problema di <i>cinematica inversa per manipolatori ridondanti</i> ponendo maggior	

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo	
	dof redundant manipulator [22]		attenzione al grado di libertà di gomito anche in termini di <i>pianificazione delle traiettorie</i> con l'obiettivo di <i>evitare gli ostacoli</i> .	
Hachicha S.	Study and Modeling of a Hull Cleaning Station with an Arm Manipulator [23]	2018	Modellazione dinamica di una stazione di pulizia subacquea tramite il metodo di Newton-Eulero: tale stazione è costituita da una <i>catena seriale ridondante</i> i cui primi tre giunti sono <i>prismatici</i> .	
Kumar P.	Design and control of a 7 DOF redundant manipulator arm [24]	2019	Modellazione e analisi cinematica di un <i>manipolatore robotico ridondante</i> ed esecuzione di una traiettoria di pick and place.	
Mariappan S.	Modelling and simulation of multi spindle drilling redundant SCARA robot using SolidWorks and MATLAB/SimMechanics [25]	2016	Modellazione di un robot <i>SCARA ridondante</i> e successiva analisi dinamica al variare dei parametri di progettazione.	
Maric F.	Inverse Kinematics for Serial Kinematic Chains via Sum of Squares Optimization [26]	2020	Sviluppo di un algoritmo di ottimizzazione per la <i>soluzione del problema di cinematica inversa</i> per catene cinematiche seriali ad <i>elevato grado di ridondanza</i> .	
Reddy A.	Collision-free inverse kinematics of redundant	2022	Ottimizzazione di un metodo per la risoluzione del problema di	

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo	
	manipulator for agricultural application through optimization techniques [27]		<i>cinematica inversa</i> di manipolatori <i>ridondanti</i> con primo <i>asse prismatico</i>	
Schappler M.	Resolution of functional Redundancy for 3T2T Robot Tasks using Two sets of Reciprocal Euler Angles [28]	2019	Presentazione di un metodo innovativo per la risoluzione del problema di <i>cinematica inversa</i> delle <i>catene cinematiche seriali</i> basato sugli angoli di Eulero.	
<i>Argomento principale: pianificazione traiettorie (robot ridondanti, con base mobile o giunto prismatico)</i>				
De-An Z.	Design and control of an apple harvesting robot [29]	2011	Pianificazione delle traiettorie con obiettivo di <i>obstacle avoidance</i> di un robot posizionato su una <i>base mobile autonoma con ruote</i> .	
Liang X.	Obstacle avoidance planning for redundant manipulator based on variational method [30]	2017	Definizione di un metodo per la pianificazione delle traiettorie con l'obiettivo di <i>evitare gli ostacoli</i> per manipolatori ridondanti a <i>sette gradi di libertà</i> .	
Liu P.	Path planning of redundant manipulator based on improved RRT algorithm [31]	2021	Presentazione di un algoritmo di pianificazione delle traiettorie per <i>robot ridondanti</i> basato sull'algoritmo RRT in modo da incrementare la velocità di convergenza verso il punto target.	

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo
Porges O.	Planning Fail-Safe Trajectories for Space Robotic Arms [32]	2021	Definizione di strumenti per la pianificazione di traiettorie per <i>robot ridondanti</i> applicabili a robot con giunti sia prismatici che rotoidali con <i>l'inclusione</i> di modelli di ostacoli. Tale algoritmo viene utilizzato sia per pianificare un percorso che eviti gli ostacoli sia per <i>determinare la posizione della base</i> .
Quintero-Pena C.	Robust Optimization-based Motion Planning for high-DOF Robots under Sensing Uncertainty [33]	2021	Metodo di ottimizzazione per la pianificazione di traiettorie di <i>robot ridondanti</i> con il fine di <i>evitare gli ostacoli</i> . Tale approccio viene applicato ad un robot mobile (Fetch&Freight [34]): si tratta di un braccio a sette gradi di libertà posizionato su una <i>piattaforma mobile</i> e sollevato da un attuatore lineare.
Sepehri A.	A motion planning algorithm for redundant manipulators using rapidly exploring randomized trees and artificial potential fields [35]	2021	Studio di un metodo di pianificazione delle traiettorie per <i>manipolatori ridondanti</i> basato sull'unione di metodi preesistenti in modo da integrare un percorso adatto ad evitare gli ostacoli con il miglior percorso in termini di raggiungimento della posa desiderata.
Silwal A.	Design, integration, and field evaluation of a	2017	Progettazione e valutazione di un manipolatore robotico per la raccolta

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo	
	robotic apple harvester [36]		delle mele: utilizzo di un manipolatore a sei gradi di libertà posizionato su una <i>guida lineare</i> . Pianificazione traiettorie: <i>ricolloca</i> mento del robot in funzione della cinematica inversa.	
Zhao Y.	Dynamic obstacle avoidance and trajectory planning of a five-axis redundant industrial manipulator [37]	2021	Pianificazione delle traiettorie di un manipolatore a cinque assi <i>ridondante</i> in termini di <i>evitamento degli ostacoli</i> .	
<i>Argomento principale: toolbox per analisi strutture robotiche</i>				
Kebria P	Development and Evaluation of a Symbolic Modelling Tool for Serial Manipulators with any Number of Degrees of Freedom [38]	2016	Sviluppo di uno <i>strumento di modellazione</i> di un manipolatore seriale e successiva analisi cinematica e dinamica.	
Ozakyol H.	Advanced robotics analysis toolbox for kinematic and dynamic design and analysis of high-DOF redundant serial manipulators [39]	2019	Sviluppo di un <i>toolbox</i> per la modellazione di un robot seriale e la successiva analisi cinematica, dinamica e pianificazione delle traiettorie.	

1.1.2 Seconda ricerca

A fronte dei risultati ottenuti nella prima ricerca, è evidente che la maggior parte dei manipolatori mobili è caratterizzata da una base mobile dotata di ruote mentre in questo elaborato ci si vuole concentrare sui manipolatori scorrevoli, cioè robot con sette gradi di libertà di cui il primo prismatico oppure manipolatori posizionati su una guida lineare.

Pertanto, in questa seconda ricerca si mantiene come concetto principale quello di robot/manipolatore ridondante o a sette gradi di libertà ma si introducono parole chiave quali carrello, guida, tavola, slitta e rotaia in modo da andare ad individuare articoli maggiormente pertinenti ad un manipolatore scorrevole.

Anche in questo caso si eliminano gli articoli riguardanti l'ambito medico/riabilitativo, gli esoscheletri e i robot flessibili ma in aggiunta si escludono anche quelli riguardanti i manipolatori paralleli.

La stringa di ricerca utilizza nel database Scopus per questa seconda ricerca è la seguente:

TITLE-ABS-KEY(("robotic arm" OR robot* OR "anthropomorphic arm" OR manipulator*) AND (redundan* OR ((7 OR seven*) AND (dof* OR "degrees of freedom" OR ax*))) AND (trolley* OR tabl* OR board* OR slab* OR sled* OR shuttl* OR guid* OR rail*))

Si riportano in Tabella 1.2 i risultati ritenuti più pertinenti derivanti dalla seconda ricerca. Anche in questo caso si mantiene la legenda utilizzata in precedenza che prevede di evidenziare in:

- *blu* gli articoli riguardanti i manipolatori scorrevoli;
- *verde* gli articoli riguardanti i manipolatori scorrevoli il cui moto di base è integrato nel moto del robot stesso

Tabella 1.2 - Risultati della seconda ricerca

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo
Ghariblu H.	Path planning of complex pipe joints	2019	Studio di un sistema robotico costituito da un manipolatore articolato a sei gradi di libertà posto su una <i>rotaia lineare</i> . Vengono eseguite delle simulazioni in

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo	
	welding with redundant robotic system [40]		modo da evidenziare come la <i>ridondanza</i> del sistema migliori il percorso di saldatura in termini di pianificazione di traiettoria <i>integrando il moto della base</i> .	
Kacprzak C.	Trajectory planning of the humanoid manipulator [41]	2019	Studio di un sistema robotico umanoide costituito da due manipolatori seriali montati su un <i>sistema di binari</i> . Tale sistema robotico viene posizionato su un sistema di binari in modo da aumentare lo spazio di lavoro durante le operazioni di pick and place.	
Lizarralde N.	Online Coordinated motion control of a redundant robotic wire arc additive manufacturing system [42]	2022	Pianificazione di traiettoria per una struttura robotica utilizzata in un sistema di additive manufacturing costituita da un <i>manipolatore articolato</i> e una <i>tavola di posizionamento</i> considerati come un'unica catena cinematica ridondante.	
Schutz S.	Virtual commissioning of the trajectory tracking control of a sensor-guided, kinematically redundant robotic welding system on a PLC [43]	2022	Pianificazione di traiettoria per una struttura robotica composta da un manipolatore articolato movimentato da una <i>guida a tre assi di traslazione</i> .	
Shahabi M.	Obstacle avoidance of redundant roboti	2019	Studio di un sistema robotico costituito da un manipolatore a sei assi posizionato su una <i>guida lineare aerea</i> .	

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo	
	manipulators using safety ring concept [44]		In particolare, viene sfruttata la ridondanza del sistema per evitare il raggiungimento dei limiti di giunto durante l'esecuzione del task	
Shen N.	Path planning based on the analytical inverse kinematics of the rail-mounted industrial robot for continuous-trajectory tracking [45]	2020	Studio di un sistema robotico costituito da un manipolatore a sei assi posizionato su una <i>guida lineare aerea</i> . Per tale sistema viene proposto un metodo di soluzione per il problema di cinematica inversa e una pianificazione delle traiettorie, che prevede <i>l'integrazione del moto della base</i> , che permetta di raggiungere il punto target evitando il <i>raggiungimento dei limiti di giunto</i> .	
Tong Y.	Analytical inverse kinematic computation for 7-dof redundant sliding manipulators [3]	2021	Studio di un metodo analitico parametrizzato per risolvere la <i>cinematica inversa di manipolatori ridondanti scorrevoli</i> , ossia manipolatori articolati il cui primo grado di libertà è <i>prismatico</i> . Nello specifico vengono trattati <i>sliding manipulator</i> di tipo: lineare, circolare e curvo.	
Tong Y.	Dynamic precision analysis of a redundant sliding manipulator [4]	2020	Analisi della precisione dinamica di un <i>manipolatore scorrevole</i> (manipolatore a sei gradi di libertà posizionato su una <i>guida lineare</i>) sfruttando informazioni di cinematica del meccanismo, prestazioni di rigidità e caratteristiche dinamiche del sistema.	

1.2 Ricerca specifica sui manipolatori scorrevoli

Come ultima ricerca ci si concentra esclusivamente su quelli che vengono definiti *sliding manipulator*, cioè i manipolatori articolati a sei o più gradi di libertà che presentano un primo giunto prismatico, sia esso dotato di moto lineare o circolare, integrato nel robot.

Pertanto, la parola chiave utilizzata per la ricerca è esattamente *sliding manipulator* e vengono esclusi, oltre ai robot flessibili, ai manipolatori paralleli, agli esoscheletri e ai robot medico-riabilitativi anche i robot posizionati su piattaforme dotate di ruote.

La stringa di ricerca utilizzata risulta essere:

TITLE-ABS(("robotic arm" OR robot* OR "anthropomorphic arm" OR manipulator*) AND (redundan* OR ((7 OR seven*) AND (dof* OR "degrees off freedom" OR ax*))) AND ("sliding-manipulator" OR "sliding manipulator" OR "sliding robot"))

I risultati ottenuti comprendono alcuni degli articoli già riportati in Tabella 1.2, ma anche gli articoli riportati in Tabella 1.3.

Tabella 1.3 - Risultati della terza ricerca

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo	
Chang C.	An improved kinematics calibration method for serial manipulators based on POE formula [46]	2018	Presentazione di un metodo di calibrazione cinematica basato sul metodo POE per migliorare l'accuratezza del posizionamento di un <i>manipolatore scorrevole</i> circolare. Tale metodo può essere, successivamente, impiegato per analizzare qualsiasi manipolatore scorrevole con n gradi di libertà.	
Liu J.	Novel method of obstacle avoidance planning for	2020	Ottimizzazione del metodo di pianificazione di traiettorie di <i>manipolatori ridondanti scorrevoli</i> . Nello specifico viene analizzato un sistema composto da un binario guida,	

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo	
	redundant sliding manipulators [47]		una vite di comando, un cursore e un braccio robotico a sei gradi di libertà. La presenza della guida permette di eliminare i punti ciechi all'interno dello spazio di lavoro.	

1.3 Analisi dei risultati della ricerca

Complessivamente, dalle tre ricerche svolte, si sono ottenuti 436 articoli dei quali solo 40 sono stati considerati coerenti con l'argomento trattato. Inoltre, tra quest'ultimi solo 16 trattano nello specifico i manipolatori scorrevoli e sono quelli identificati in *blu* nelle tabelle precedenti.

Nel seguito verrà brevemente descritto il contenuto di tali articoli riportando per ciascuno il manipolatore scorrevole analizzato in modo da evidenziare quali sono le tipologie di *sliding manipulator* realizzate e/o analizzate fino ad oggi.

1.3.1 Articoli riguardanti i manipolatori scorrevoli

Baur J., "Design and development of a redundant modular multipurpose agricultural manipulator" [19]

In questo articolo vengono presentati diversi modelli cinematici di manipolatori scorrevoli ridondanti progettati con lo scopo di raccogliere prodotti, quali ad esempio la frutta. I sistemi robotici presentati sono costituiti da un manipolatore seriale ridondante, rispettivamente a 7, 8 e 9 gradi di libertà, un sistema di sensori e una piattaforma mobile che permette lo spostamento del braccio robotico lungo il corridoio dell'ambiente di lavoro. La caratteristica principale dei manipolatori realizzati in questo studio è la presenza di un primo giunto prismatico all'interno della catena cinematica seriale; tale caratteristica permette di definirli manipolatori scorrevoli.

Per risolvere il problema di cinematica diretta e progettare il manipolatore si utilizza una matrice per definire il legame tra i giunti rotoidali e i giunti prismatici della struttura; tale matrice è una matrice diagonale determinata in funzione dei pesi associati ai diversi elementi. Inoltre, viene presentata una funzione obiettivo utilizzata per definire il movimento nello

spazio che, a sua volta, è funzione del gradiente di variazione dei gradi di libertà della struttura in relazione ai loro valori massimi e minimi.

Definita la struttura cinematica, si passa alla progettazione meccanica e successivamente al controllo dell'architettura.

Infine, le tre diverse strutture vengono confrontate utilizzando una traiettoria di riferimento predefinita e si conclude che la soluzione più performante risulta essere la struttura a nove gradi di libertà.

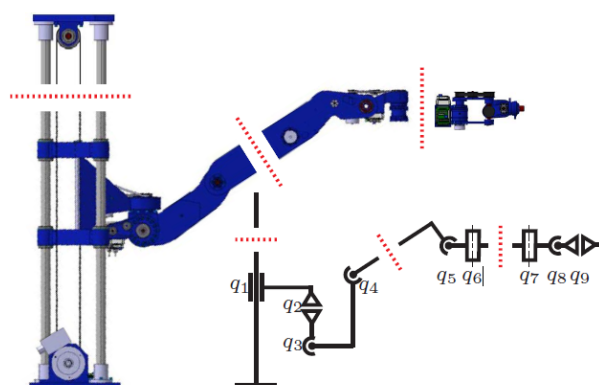


Figura 1.2 - Modello CAD e schema cinematico del manipolatore scorrevole a 9 gradi di libertà [19]

Chang C., “An improved kinematic calibration method for serial manipulators based on POE formula” [46]

All'interno del documento vengono trattati due principali aspetti della calibrazione cinematica: l'identificazione dei parametri e la modellazione cinematica. Nello specifico viene utilizzato il metodo POE, che garantisce l'uniformità del moto grazie alla risoluzione del problema di singolarità, per migliorare l'accuratezza di posizionamento di un manipolatore scorrevole e viene, inoltre, presentato un metodo POE migliorato.

In questo caso, a differenza della maggior parte degli altri articoli, viene presentato un manipolatore scorrevole circolare; nello specifico, la struttura robotica analizzata è costituita da una guida circolare su cui è montato un manipolatore articolato a sei gradi di libertà sul quale, a sua volta, viene montata, in corrispondenza dell'end effector, una micro-piattaforma mobile a tre gradi di libertà. Pertanto, considerando la sola struttura macroscopica, si ha un manipolatore scorrevole ridondante a sette gradi di libertà avendo integrato il giunto prismatico iniziale appartenente al meccanismo di scorrimento.

Definiti i metodi di calibrazione POE, sia il tradizionale che quello migliorato, vengono eseguite delle simulazioni utilizzando il sistema robotico ridondante scorrevole per confrontare i due metodi.

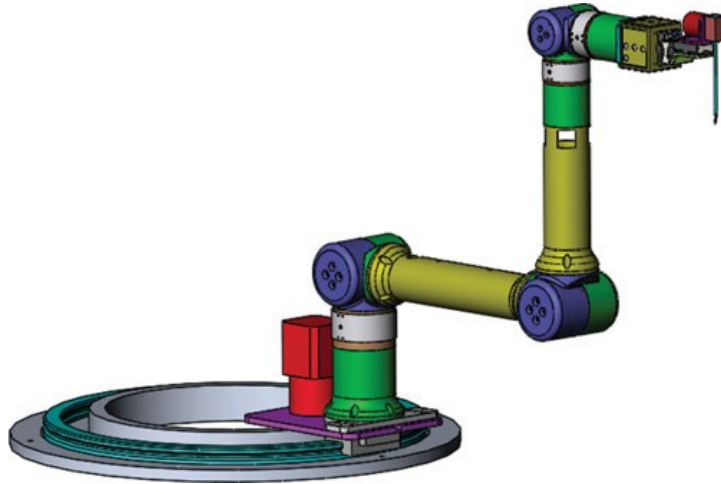


Figura 1.3 - Modello CAD del manipolatore scorrevole con giunto prismatico integrato e micro-piattaforma a tre gradi di libertà montata sulla flangia dell'end effector [46]

Ghariblu H., “Path planning of complex pipe joints welding with redundant robotic systems” [40]

In questo caso viene presentato un manipolatore scorrevole montato su una linea aerea, ossia si ha un manipolatore articolato a sei gradi integrato su una base mobile con rotaia lineare aerea.

L'articolo si concentra sulla risoluzione della ridondanza del sistema così realizzato andando a combinare due metodi: uno basato sulla matrice jacobiana e uno basato sull'ottimizzazione dell'esecuzione del task. A differenza di altri casi di studio in cui la ridondanza del sistema viene risolta senza considerare simultaneamente il moto della base e del manipolatore, in questo caso la ridondanza del sistema è integrata nella pianificazione delle traiettorie. Tale ridondanza viene sfruttata per evitare le configurazioni di singolarità e incrementare la destrezza del sistema stesso.

Per enfatizzare l'effetto della ridondanza cinematica del sistema, viene pianificata una traiettoria utilizzando diverse condizioni del sistema: 1) pianificazione con solo moto del robot a sei gradi di libertà, 2) pianificazione con integrazione del moto di base e del moto del robot e 3) pianificazione con moto aggiuntivo del tavolo di lavoro (costituito in questo caso da un tubo messo in rotazione).

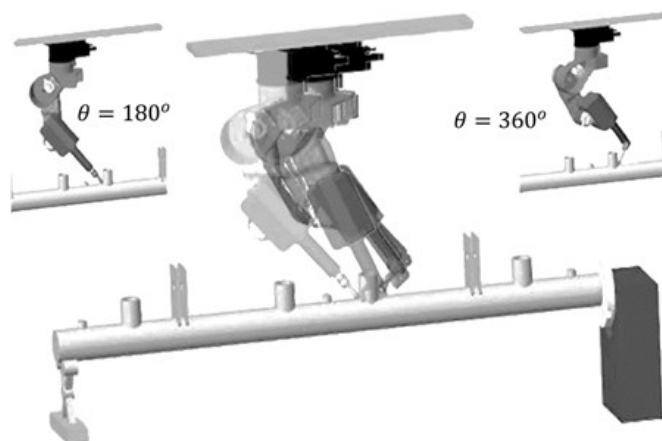


Figura 1.4 - Esempio di simulazione del moto con integrazione del moto della base [40]

Hachicha S., “Study and modelling of a hull cleaning station with an arm manipulator” [23]

Viene presentata la progettazione di una stazione di pulizia per il mantenimento degli scafi di navi immerse. Tale struttura è costituita da una catena cinematica a sette gradi di libertà, cioè ridondante, in cui i primi tre gradi di libertà sono prismatici e i rimanenti sono rotoidali.

Dopo aver introdotto la struttura cinematica e la conseguente struttura geometrica del manipolatore ridondante, viene eseguita una modellazione dinamica usando il metodo di Newton-Eulero. Infine, viene eseguita una simulazione di traiettoria in modo da verificare che il sistema sia in grado di eseguire il task nel modo più accurato possibile.

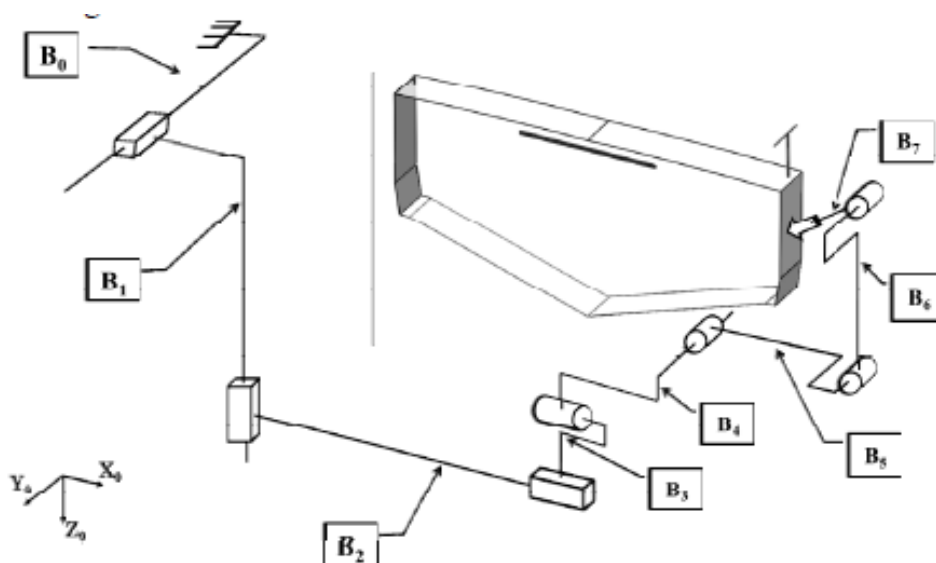


Figura 1.5 - Struttura cinematica della stazione di pulizia in approccio allo scafo [23]

Kacprzak C., “Trajectory planning of the humanoid manipulator” [41]

In questo articolo viene presentato un manipolatore scorrevole più complesso rispetto a quelli presentati negli altri articoli: si analizza un manipolatore umanoide a doppio braccio montato su una guida rettilinea. Complessivamente, la struttura è costituita da 13 gradi di libertà: 12 dovuti alla parte di manipolatore umanoide e 1 dovuto alla guida prismatica.

L’obiettivo principale è la realizzazione di un task di pick and place andando, però, a pianificare la traiettoria tenendo conto di obiettivi secondari quali: massimizzazione della destrezza del manipolatore, superamento delle configurazioni di singolarità ed evitamento degli ostacoli.

La presenza della guida lineare permette lo spostamento lungo la corsia di prelievo per cui in questo caso non si ha un’integrazione continua del moto della base con il moto del robot ma, dopo aver eseguito l’operazione di pick si avrà una traslazione del manipolatore lungo la guida fino al punto di place.

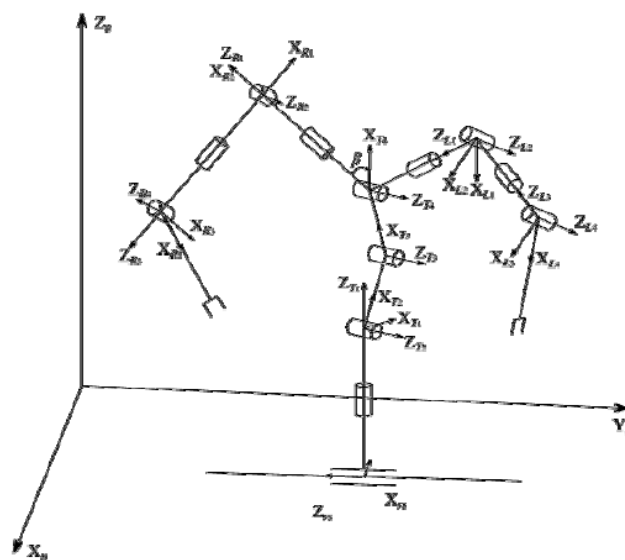


Figura 1.6 - Schema cinematico del manipolatore umanoide posizionato sulla guida rettilinea [41]

Liang X., “Obstacle avoidance planning for redundant manipulator based on variational method” [30]

Viene studiato un algoritmo di pianificazione delle traiettorie con il fine di evitare gli ostacoli applicabile ai manipolatori ridondanti utilizzando il metodo di proiezione del gradiente e il metodo variazionale. L’obiettivo, oltre che all’evitare gli ostacoli, è la realizzazione di una traiettoria che sia il più breve possibile in termini di movimento dei giunti.

Il manipolatore a cui viene applicato tale metodo ottimizzato è una catena cinematica a sette gradi di libertà in cui i primi due gradi di libertà sono realizzati attraverso giunti prismatici.

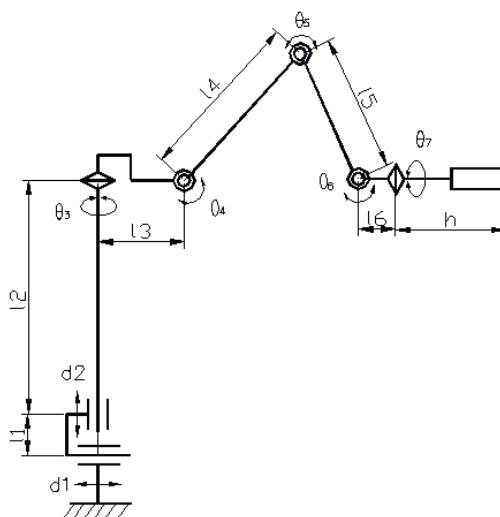


Figura 1.7 - Manipolatore a sette gradi di libertà con primi due giunti prismatici [30]

Liu J., “Novel method of obstacle avoidance planning for redundant sliding manipulators” [47]

Il principale obiettivo di questo articolo è lo studio di un metodo ottimizzato per pianificare le traiettorie di robot ridondanti in termini di evitamento degli ostacoli. In particolare, si utilizza un manipolatore ridondante costituito da soli giunti rotoidali posizionato su un binario lineare, per un totale di sette gradi di libertà (struttura complessiva ridondante).

Viene definito un metodo GP-WADV che ha come obiettivo principale l’identificazione del punto in cui manipolatore e ostacolo sono il più vicino possibile e l’associazione a tale punto di una velocità di deviazione aggiuntiva definita tramite dei fattori di ponderazione basati sul metodo di proiezione del gradiente.

Successivamente, vengono eseguite delle traiettorie simulate, sia con ostacoli singoli che con ostacoli multipli, andando ad integrare i vantaggi di un manipolatore scorrevole ridondante con i vantaggi di una pianificazione di traiettorie arricchita dal metodo GP-WADV.

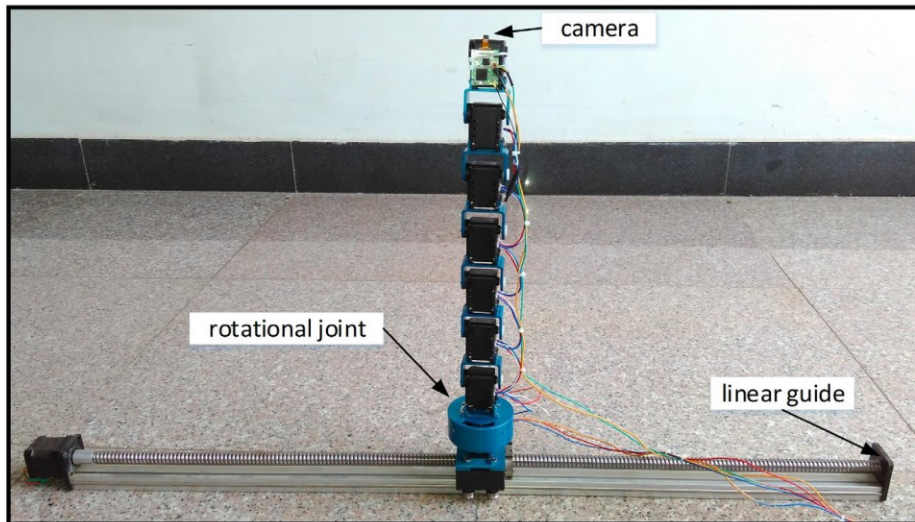


Figura 1.8 - Sistema robotico ridondante con guida lineare [47]

Quintero P., “Robust optimization-based motion planning for high-dof robots under sensing uncertainty” [33]

Viene presentato un metodo di pianificazione delle traiettorie ottimizzato applicabile a manipolatori con tanti gradi di libertà con l’obiettivo di evitare gli ostacoli durante l’esecuzione del task.

Tale metodo viene, successivamente, applicato al braccio robotico Fetch [34] a sette gradi di libertà realizzato con base e torso fissi, ossia in tale metodo non si prevede l’integrazione dell’asse di traslazione all’interno della pianificazione del moto.



Figura 1.9 - Braccio robotico Fetch [34]

Schutz S., “Virtual commissioning of the trajectory control of a sensor-guided, kinematically redundant robotic welding system on a PLC” [43]

In questo articolo viene presentato un sistema robotico ridondante costituito da un braccio robotico UR10 a sei giunti rotoidali montato su un sistema di tre assi prismatici. Questi primi tre assi prismatici vengono sfruttati per evitare le configurazioni di singolarità e allo stesso tempo incrementare la destrezza del robot.

Inoltre, si definiscono degli indici di manipolabilità che dipendono dalla combinazione di traslazione e rotazione; perciò, per analizzare la relazione tra di essi si divide la matrice jacobiana in due parti: una dedicata alla traslazione e una dedicata alla rotazione. Quest’ultima parte dedicata alla rotazione è legata ai giunti 4, 5 e 6 e sono questi i giunti che vengono maggiormente considerati per definire gli indici di manipolabilità.

Il sistema di movimentazione comprende oltre ai sei giunti del braccio robotico anche i tre assi di traslazione. Il controllo sovrapposto del sistema di movimento completo avviene sul PLC ma, nello specifico, il controllo di velocità degli assi di traslazione è effettuato sugli inverter di posizionamento e le restanti velocità sono controllate dal controllo del robot.

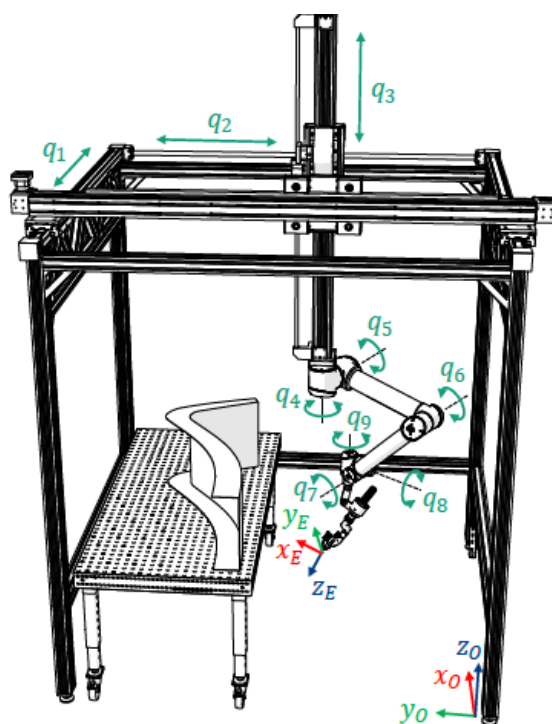


Figura 1.10 - Sistema robotico di movimentazione ridondante con torcia di saldatura e tavolo di lavoro [43]

Shahabi M., “Obstacle avoidance of redundant robotic manipulators using safety ring concept” [44]

Considerando il sistema robotico presentato in [40] (ossia un braccio robotico a sei gradi di libertà posizionato su una guida lineare aerea) sempre con l’obiettivo di realizzare una saldatura su un tubo in rotazione, si presenta un metodo per l’identificazione di un anello di sicurezza attorno al target in modo da evitare le collisioni durante l’esecuzione del task.

Una volta definito questo anello di sicurezza, si presenta un metodo di pianificazione delle traiettorie che sfrutti sia la ridondanza funzionale (determinata dal sesto giunto del robot, in quanto la rotazione dell’elettrodo di saldatura attorno al proprio asse non è fondamentale in tale processo) sia la ridondanza intrinseca (ossia quella ottenuta con l’aggiunta del settimo asse di traslazione). Tale metodo di pianificazione viene ottimizzato in termini di raggiungimento delle configurazioni di singolarità, raggiungimento dei limiti di giunto, collisione con ostacoli e anello di sicurezza.

Utilizzando il sistema ridondante precedentemente definito si eseguono diverse simulazioni combinando gli effetti delle due tipologie di ridondanze e andando a confrontare i risultati con il caso di un sistema privo di ridondanze.

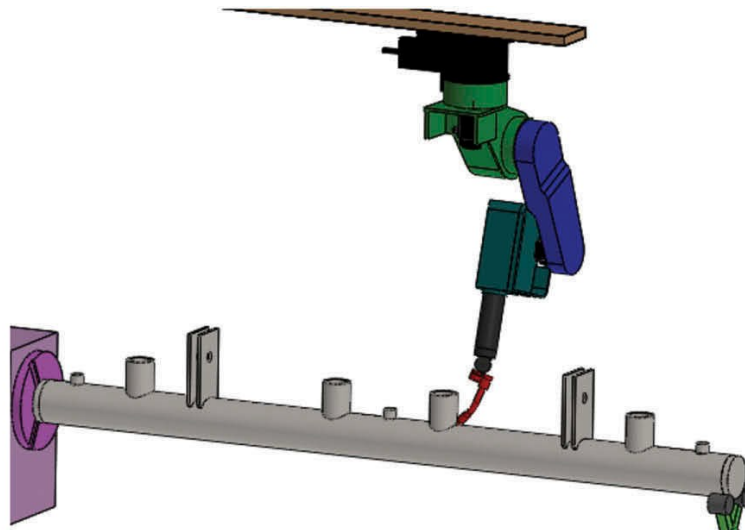


Figura 1.11 - Sistema robotico ridondante con linea aerea per la saldatura [44]

Shen N., “Path planning based on the analytical inverse kinematics of the rail-mounted industrial robot for continuous-trajectory tracking” [45]

Si analizza una cella robotica costituita da un robot Fanuc a sei gradi di libertà montato su una guida lineare aerea e l’obiettivo è studiare un metodo di pianificazione delle traiettorie tale per cui si realizzi una traiettoria continua.

Il valore iniziale del giunto lineare è pianificato in base alle informazioni ottenute dalla traiettoria di target, quindi, si risolve il problema di cinematica inversa per il solo manipolatore articolato a sei gradi di libertà. Nel caso in cui non si soddisfino i criteri di traiettoria, quali ad esempio il non raggiungimento del target oppure il raggiungimento dei limiti di giunto, allora viene ricalcolato il valore del giunto prismatico e la base viene riposizionata.

Infine, vengono eseguite delle simulazioni andando a realizzare la stessa traiettoria target ma variando i limiti di lavoro del giunto prismatico rispetto al punto di target.

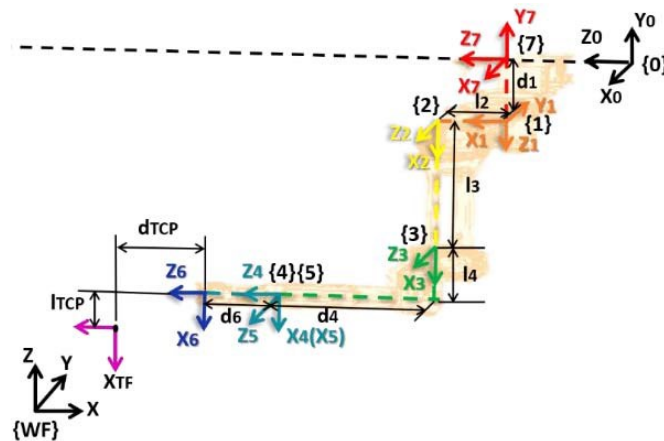


Figura 1.12 - Rappresentazione schematica del sistema robotico con guida lineare aerea [45]

Shin D.H., “Multi-body dynamics simulations of high speed transfer robots disposed between presses” [14]

Si considera un sistema robotico costituito da una catena cinematica a sei gradi di libertà, suddivisa in due arti da tre gradi di libertà ciascuno, con un giunto prismatico addizionale iniziale, come rappresentato in Figura 1.13. Tale giunto prismatico aggiuntivo determina lo spostamento in direzione gravitazionale e durante le traslazioni movimenta tutta la struttura generando elevate inerzie.

Pertanto, tale struttura viene analizzata in termini dinamici tramite diverse simulazioni in modo da determinare se il meccanismo e il motore associato, compreso di riduttore e vite a ricircolo di sfere, soddisfano le richieste senza superare i limiti ad essi associati e, inoltre,

analizzare le problematiche ad essi associate. Pertanto, vengono confrontati i parametri dinamici, come coppia e velocità, ottenuti con quelli richiesti dall'esecuzione del task.

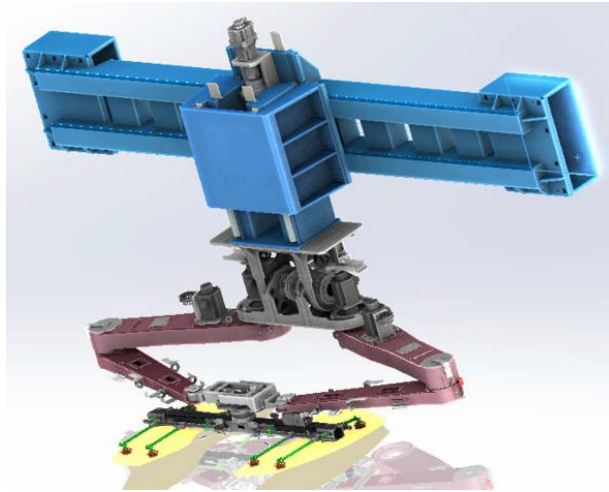


Figura 1.13 - Modello 3D del sistema robotico con giunti prismatico iniziale [14]

Silwal A., “Design, integration and fiel evaluation of a robotic apple harvester”[36]

Viene presentato un manipolatore scorrevole costituito da un braccio robotico dotato di sei gradi di libertà posizionato su una rotaia lineare per cui nel complessivo si ottiene una struttura robotica ridondante grazie all'aggiunta del settimo asse prismatico. La rotaia lineare permette di incrementare lo spazio di lavoro del robot stesso e, allo stesso tempo, permette di evitare il raggiungimento di configurazioni di singolarità.

L'articolo si concentra principalmente sullo sviluppo di un metodo per l'identificazione e la localizzazione della frutta che si vuole raccogliere e sull'analisi dell'ambiente di lavoro in cui verrà inserito il sistema robotico scorrevole. Inoltre, viene presentato un tool da installare sulla flangia dell'end effector specializzato per la raccolta dei frutti, in particolare delle mele.

Infine, viene presentato un metodo di pianificazione delle traiettorie per il ciclo di raccolta. In questo caso il moto della base viene sì integrato all'interno della pianificazione di traiettorie ma non in modo continuo, ossia si parla di ricollocamento della base. In pratica, una volta identificato il target da raggiungere il sistema calcola la posa del braccio robotico, e di conseguenza dell'end effector, tramite il problema di cinematica inversa: se il problema di cinematica inversa non converge ad una soluzione per il posizionamento dell'end effector, a causa del raggiungimento del limite dello spazio di lavoro oppure a causa del raggiungimento di una configurazione di singolarità, allora si ha uno spostamento del manipolatore lungo la guida, cioè un ricollocamento dello stesso.

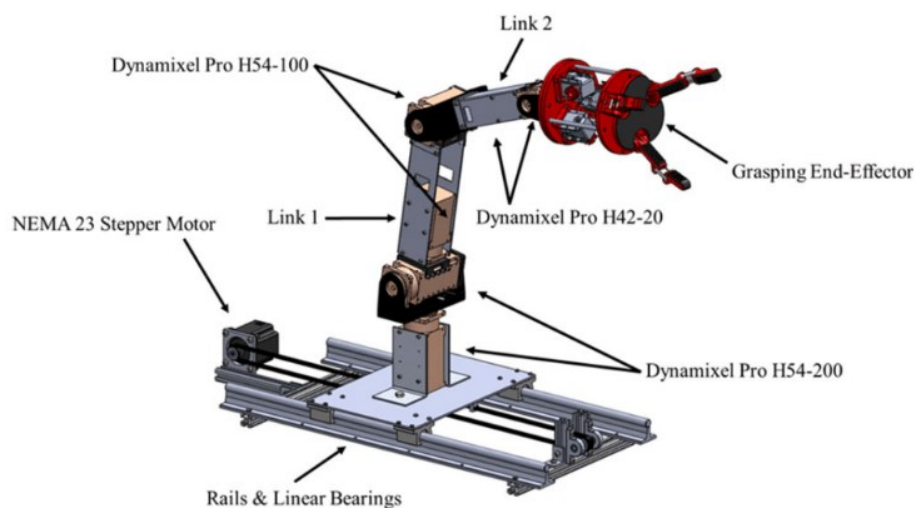


Figura 1.14 - Modello CAD del sistema robotico costituito da un manipolatore a sei gradi di libertà posizionato su una guida lineare [36]

Sridhar Reddy A., “Collision-free inverse kinematics of redundant manipulator for agricultural applications through optimization techniques” [27]

Anche in questo caso, come in alcuni dei precedenti, l’argomento principale è un robot dedicato alla raccolta della frutta. Il manipolatore scorrevole presentato è costituito da una catena cinematica a nove gradi di libertà con un primo giunto prismatico con scorrimento verticale e i rimanenti giunti rotoidali con la particolarità che i tre giunti finali costituiscono un polso di tipo roll-pitch-yaw.

Come primo passo viene presentata la struttura e viene risolto il problema di cinematica inversa con l’obiettivo di minimizzare gli errori di posizione ed orientamento dell’end effector. Al contempo viene presentato il problema di collisione: gli oggetti presenti all’interno dell’ambiente di lavoro vengono racchiusi all’interno di un riquadro di delimitazione e viene implementato un algoritmo che permette l’identificazione delle condizioni di collisione in funzione della posizione dell’oggetto di collisione e della posa del robot.

Infine, vengono presentati alcuni casi di studio in modo da poterne confrontare i risultati.

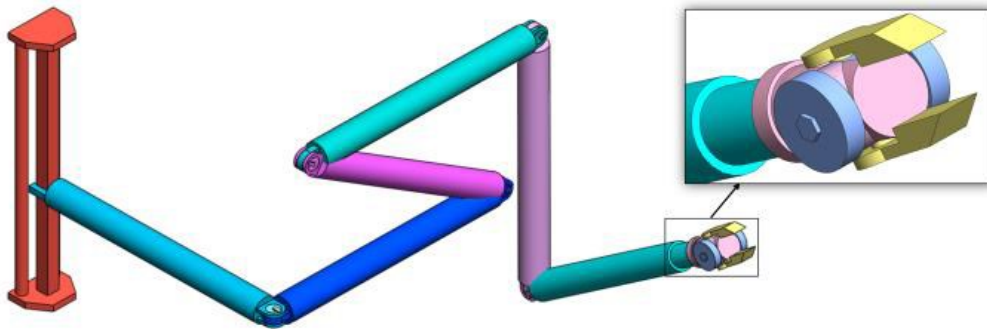


Figura 1.15 - Modello CAD del manipolatore scorrevole ridondante con polso roll-pitch-yaw [27]

Tong Y., “Analytical inverse kinematic computation for 7-dof redundant sliding manipulators” [3]

In questo elaborato vengono presentate tre tipologie di manipolatori scorrevoli: lineare, circolare e curvo. In tutti e tre i casi si tratta di un manipolatore articolato a sei gradi di libertà posizionato su una rotaia integrata. In particolare, tutti e tre i manipolatori soddisfano i requisiti delle condizioni di Pieper (gli assi di tre giunti adiacenti si intersecano in un punto oppure gli assi di tre giunti adiacenti sono paralleli tra loro).

In seguito, viene presentato un metodo parametrizzato per la soluzione del problema di cinematica inversa. Grazie alla parametrizzazione tale metodo può essere applicato a qualsiasi manipolatore scorrevole ridondante purché esso rispetti le condizioni di Pieper. Infine, vengono eseguite delle simulazioni per validare il modello.

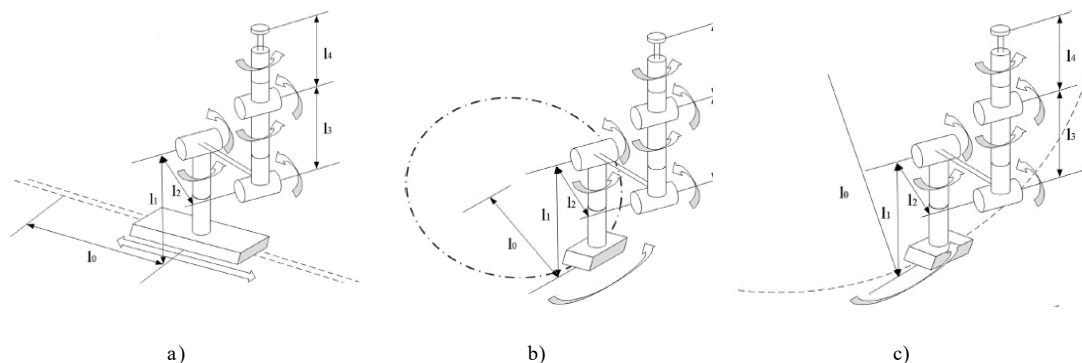


Figura 1.16 - Manipolatore scorrevole ridondante: a) lineare, b) circolare e c) curvo [3]

Tong Y., “Dynamic precision analysis of a redundant sliding manipulator” [4]

Nella prima parte viene presentato un manipolatore scorrevole costituito da un robot a sei gradi di libertà montato su una guida lineare che costituisce, nell'insieme, un sistema robotico ridondante. In questo modo si ottiene un sistema con uno spazio di lavoro più ampio, grazie

alla caratteristica di robot mobile, mantenendo la precisione e l'accuratezza tipica di un sistema ridondante.

Successivamente viene presentato un modello dinamico di tale manipolatore scorrevole tramite il metodo delle equazioni lagrangiane andando ad analizzare la frequenza naturale del sistema e le relative vibrazioni. Quindi, viene presentato un modello matematico relativo alla precisione dinamica in funzione dell'errore relativo all'end effector considerando nell'insieme tutti e sette i gradi di libertà del sistema.

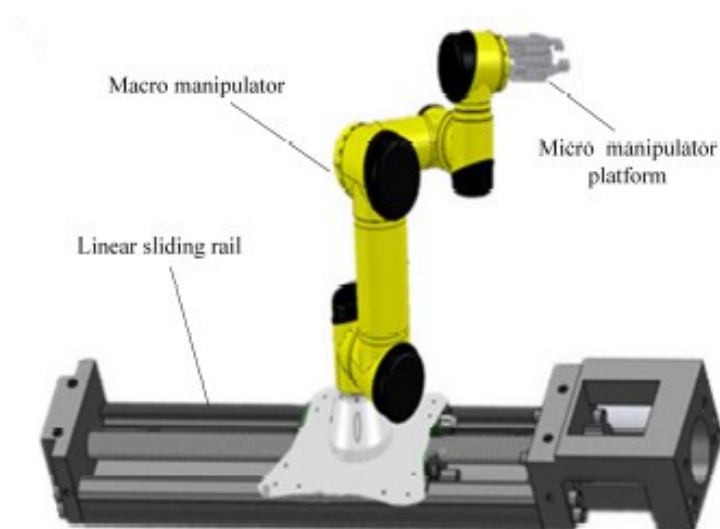


Figura 1.17 - Modello CAD del manipolatore scorrevole ridondante a sette gradi di libertà utilizzato per l'analisi dinamica [4]

1.3.2 Riepilogo dei risultati

Dall'analisi degli articoli precedentemente riportati risulta evidente che l'utilizzo di manipolatori scorrevoli presenta i seguenti vantaggi:

- Incremento dello spazio di lavoro del singolo robot;
- Incremento della destrezza;
- Possibilità di evitare le configurazioni di singolarità;
- Possibilità di raggiungere zone all'interno dello spazio di lavoro prima inaccessibili a causa dei limiti di giunto o delle auto-collisioni;
- Miglioramento dell'efficienza nell'esecuzione delle traiettorie, sia in termini di velocità dei giunti sia in termini di evitamento degli ostacoli.

Inoltre, essi risultano essere più precisi e facilmente controllabili rispetto ai robot mobili tradizionali, ossia quelli con una base dotata di ruote.

Infine, è possibile distinguere due tipologie di manipolatori scorrevoli in base all'utilizzo della base scorrevole:

- Movimento continuo e integrato della base nel moto del robot.
- Movimento discontinuo della base, ossia un ricollocamento della base nel caso in cui non siano rispettate determinate condizioni e/o vincoli.

1.4 Spunti derivati dall'analisi dei risultati di ricerca

A fronte di quanto appreso dalla ricerca svolta, si è deciso di sviluppare un manipolatore scorrevole costituito da un robot UR3 a sei gradi di libertà posizionato su una guida lineare e di studiare un moto integrato continuo anziché un semplice ricollocamento, in modo tale che il sistema robotico complessivo sia in grado di generare una traiettoria dal moto dolce e non a scatti, come si avrebbe nel caso di ricollocamento della base.

In particolare, si è deciso di mantenere fissa l'orientazione dell'end effector in modo che il robot lavori con il tool orientato verso l'operatore di fronte a sé. Se la base è ferma, l'orientazione fissa dell'end effector causa una riduzione della destrezza del robot in quanto si limita la capacità del movimento del robot e si riduce, di conseguenza, lo spazio di lavoro. Invece, ipotizzando di avere una base scorrevole, si ottiene comunque uno spazio di lavoro ridotto rispetto al complessivo, ma in tale sottospazio si ottiene una capacità di movimento maggiore e quindi un incremento di destrezza.

Ad esempio, ipotizzando di avere un sistema come quello schematizzato in Figura 1.18, si suddivide idealmente lo spazio di lavoro in tre settori.



Figura 1.18 - Spazio di lavoro schematizzato

Nel caso di robot con base fissa, la destrezza è maggiore al centro dello spazio di lavoro (settore II) e si riduce andando verso gli estremi del workspace. Invece, utilizzando una base scorrevole è possibile raggiungere un punto del settore I o III con la destrezza tipica del settore II in quanto il robot viene spostato lungo la guida e insieme al robot si trasla anche il suo spazio di lavoro e le relative caratteristiche. Pertanto, un punto che, a base fissa, appartiene al settore I o III, nel caso di base mobile può appartenere al settore II dopo la traslazione del robot.

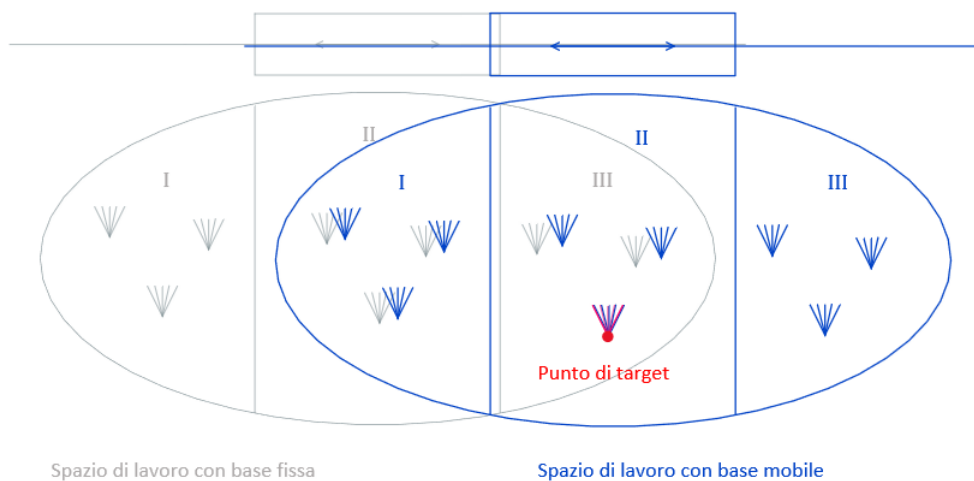


Figura 1.19 - Spazio di lavoro con spostamento della base

Capitolo 2

Analisi dello spazio di lavoro

Introduzione

Prima di passare all'analisi del robot posto su una base mobile, si è ritenuto utile analizzare il robot UR3 singolarmente e, nello specifico, si è analizzato il suo spazio di lavoro in termini di raggiungimento dei limiti di giunto, configurazioni di singolarità, configurazioni di auto-collisione e configurazioni con una parte del robot sporgente oltre al TCP.

Di seguito si riportano, riassunte, tutte le analisi svolte all'interno del capitolo:

1. *Definizione delle caratteristiche del robot:*
 - a. Rappresentazione del robot in configurazione di zero assi con identificazione dei corpi e degli assi di giunto ad essi associati;
 - b. Rappresentazione schematica del robot con assegnazione dei sistemi di riferimento ai singoli corpi con la convenzione di Denavit-Hartenberg (DH) e realizzazione della tabella dei parametri di DH.
2. *Determinazione dello spazio di lavoro complessivo* ossia l'insieme dei punti che il punto TCP del robot, posto in corrispondenza del punto E (origine del sistema di riferimento del corpo 6), può raggiungere facendo variare tutti e sei i gradi di libertà della struttura.

3. *Mappatura dello spazio giunti in termini di prossimità ai limiti di giunto*: si analizza lo spazio giunti in funzione dei valori limite associati ai gradi di libertà e, successivamente, si traducono tali informazioni in spazio operativo. Per realizzare tale analisi sono stati utilizzati due diversi metodi:
 - a. Metodo 1: calcolo della distanza tra il valore puntuale del grado di libertà e il valore limite massimo.
 - b. Metodo 2: definizione di indici in funzione di diversi parametri:
 - i. Indice 1: funzione del valore limite massimo e del valor medio del grado di libertà;
 - ii. Indice 2: funzione dei valori limiti, massimo e minimo, del grado di libertà.
4. *Mappatura dello spazio di lavoro in funzione delle condizioni di singolarità* ossia tramite l'analisi del determinante della matrice jacobiana:
 - a. Classificazione, in spazio giunti e in spazio operativo, dei punti in funzione del valore del determinante:
 - i. Se il determinante della matrice jacobiana è nullo si è in configurazione di singolarità (flag rosso);
 - ii. Se il determinante della matrice jacobiana è minore di un valore limite ma non nullo allora si è in prossimità di una configurazione di singolarità (flag arancione);
 - iii. Se il determinante della matrice jacobiana è maggiore del valore critico allora la configurazione è *safe* (flag verde), ossia è lontana dalla condizione di singolarità.
 - b. Rappresentazione dello spazio di lavoro, in spazio giunti e spazio operativo, in funzione del valore del determinante.
5. *Mappatura dello spazio di lavoro in funzione delle auto-collisioni*:
 - a. Analisi eseguita in spazio giunti e riportata in spazio operativo:
 - i. Variazione di una coppia di gradi di libertà;
 - ii. Variazione di una terna di gradi di libertà;
 - iii. Variazione di un set di gradi di libertà;
 - b. Considerazioni riguardanti il problema di cinematica inversa.
6. *Determinazione del sottospazio di lavoro con orientazione del TCP fissa*:
 - a. Determinazione del sottospazio di lavoro avendo fissato l'orientazione del TCP rispetto alla base fissa;

- b. Confronto tra lo spazio di lavoro complessivo e il sottospazio di lavoro ottenuto avendo posto orientazione fissa;
 - c. Analisi dei limiti (interno, esterno e laterale) del sottospazio di lavoro.
7. *Analisi di singoli piani y-z*: scelta un'orientazione fissa del TCP si analizzano diversi piani y-z a diverse quote x in modo da mappare lo spazio di lavoro in termini di destrezza (ossia numero di soluzioni accettabili del problema di cinematica inversa), auto-collisioni e posizione dei link rispetto al TCP. In particolare, si analizzano tre piani:
- a. Piano prossimo alla base $x = 0.15\text{ m}$;
 - b. Piano intermedio $x = 0.3\text{ m}$;
 - c. Piano all'estremo del campo di lavoro $x = 0.5\text{ m}$.

Per ciascun piano, inoltre, si sceglie un punto e si riportano le configurazioni che danno origine a tale posa.

Di seguito, in Figura 2.1, si riporta uno schema riassuntivo delle analisi proposte.

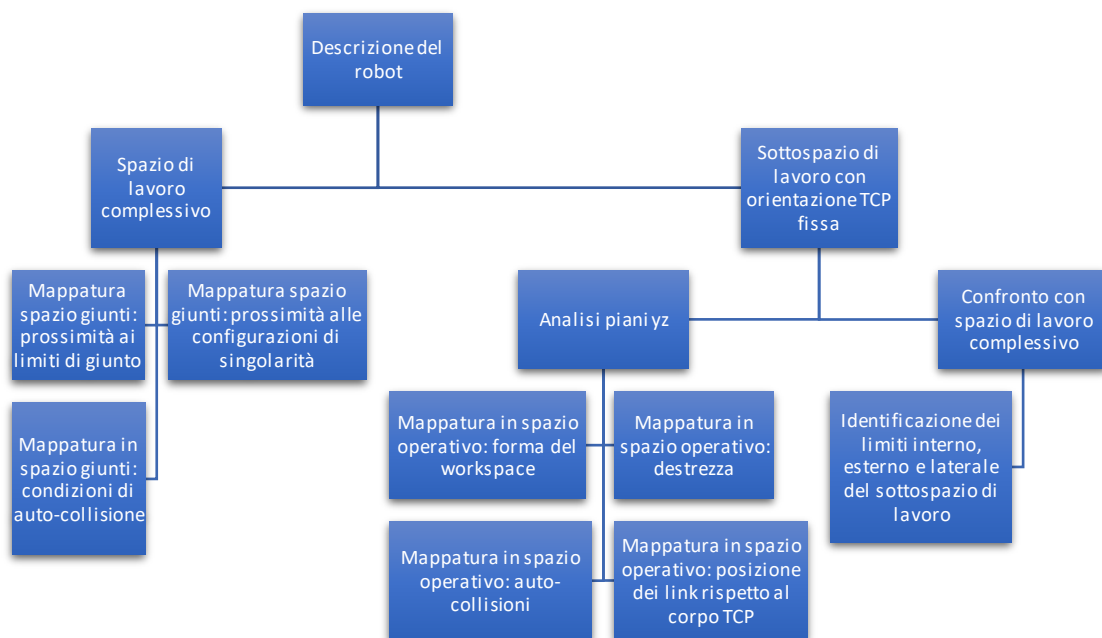


Figura 2.1 - Schema riassuntivo delle analisi eseguite

Ricerca bibliografica

Si riporta, in Tabella 2.1, un breve riepilogo di alcuni documenti che sono stati utili per eseguire le analisi presentate nel capitolo.

Tabella 2.1 - Documenti utili all'analisi dello spazio di lavoro

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo
<i>Spazio di lavoro complessivo</i>			
Gowtham Gudla A	A methodology to determinate the functional workspace of a 6R robot using forward kinematics and geometrical methods [48]	2012	Presenta un metodo per la determinazione e l'analisi dello spazio di lavoro funzionale di un robot per un determinato orientamento del tool.
Peidrò A.	An improved Monte Carlo method based on Gaussian growth to calculate the workspace of robots [49]	2017	Presentazione di un metodo ottimizzato per la determinazione dello spazio di lavoro complessivo di un robot basato sul tradizionale metodo Monte Carlo integrato con il metodo della crescita gaussiana.
<i>Indice di prossimità ai limiti di giunto</i>			
Xiang J.	General-weighted least-norm control for redundant manipulators [50]	2010	Presentazione di un metodo per il controllo dei manipolatori ridondanti basato sulle sotto-attività in termini di pianificazione di traiettorie in funzione dell'evitamento degli ostacoli e del non raggiungimento dei limiti di giunto .

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo
<i>Singularità</i>			
Aboelsnar A.	Novel use of the Monte Carlo methods to visualize singularity configurations in serial manipulators [51]	2021	Viene analizzato il problema della singularità cinematica di un robot a 6 gradi di libertà mediante il metodo Monte Carlo tradizionale per l'identificazione delle configurazioni di singolarità. Infine, viene progettata una traiettoria che non passa per configurazioni di singolarità.
Stejskal T.	Mapping robot singularities through the Monte Carlo method [52]	2022	Viene presentato un metodo di mappatura casuale, basato sul metodo Monte Carlo , dello spazio di lavoro del robot che ricerca gli stati di singolarità .
<i>Auto-collisione</i>			
An J.	Path planning for self-collision avoidance of space modular self-reconfigurable satellites [53]	2022	Viene presentato un robot ridondante e ci si concentra sul rilevamento dell' auto-collisione e sull'implementazione di strategie per evitare tali configurazioni. Per fare ciò, viene creato un modello geometrico approssimativo della struttura con un volume maggiore rispetto a quello reale.
Bhavanibhatla K.	A study on determining optimal base location of a serial manipulator	2021	Determinazione del posizionamento ottimale di un manipolatore seriale su una piattaforma mobile a sei gambe in termini di manipolabilità,

Primo autore	Titolo	Pubblicazione	Scopo/obiettivo
	mounted on a hezapod mobile robot [54]		spazio di lavoro e distribuzione delle forze. Inoltre, viene prestata particolare attenzione al tema dell' auto-collisione analizzato in termini di mappa di raggiungibilità.
Leoro J.	Motion planning of nonholonomic mobile manipulators with manipulability maximization considering joints physical constraints and self-collision avoidance [55]	2021	Viene presentata una metodologia che permette di integrare, nella pianificazione del moto, i vincoli riguardanti: limiti di giunto , limiti di velocità nei giunti, auto-collisione e singularità . Si considerano robot mobili ridondanti e si mappa lo spazio di lavoro in funzione di matrici diagonali basate sui vincoli di giunto e sulle condizioni di auto-collisione.
Selvaggio M.	Towards a self-collision aware teleoperation framework [56]	2017	Presentazione di un metodo per evitare il raggiungimento dei limiti articolari e l' auto-collisione per robot complessi applicato ad un robot mobile.
Seol W.	Methodological approach for workspace boundary determination in joint space using support vector machine [57]	2020	Presentazione di un algoritmo per la realizzazione di una mappa basata sul movimento del robot nel suo spazio di lavoro basata sul machine learning.

2.1 Caratteristiche del robot UR3

Il braccio robotico UR3 della Universal Robot è il robot collaborativo più piccolo della gamma UR. Si tratta di un robot di tipo articolato a sei gradi di libertà di dimensioni e peso contenuti, circa 11 kg di peso complessivo, che regge un carico massimo di 3 kg con un'estensione del braccio di circa 50 cm [58]. Esso è definito, in virtù delle sue elevate caratteristiche di leggerezza, flessibilità e sicurezza, determinate anche dalla presenza di un sensore di forza integrato, come manipolatore *da tavolo*, cioè consente di automatizzare le operazioni svolte in piccole aree e può lavorare a fianco dell'operatore nella sua postazione di lavoro senza la presenza di barriere fisiche.

Inoltre, grazie alla rotazione infinita sull'asse 6 e il controllo ottimizzato della forza, è possibile utilizzare il robot UR3 in applicazioni in cui è richiesta un'elevata precisione come, ad esempio, avvitare viti, stendere un sottile film di colla oppure manipolare sostanze pericolose.

Si riportano, di seguito, alcune delle possibili attività che il robot UR3 può svolgere: incollaggio, verniciatura, lucidatura, avvitamento, assemblaggio, raccolta e posizionamento, utilizzo di utensili, attività di laboratorio e aspirazione [59].

In Figura 2.2 si riporta il robot UR3 in configurazione di zero assi, ossia avendo posto tutti i sei gradi di libertà pari a 0° , e si evidenziano, oltre ai sistemi di riferimento principali (end effector, base e ground) anche gli assi dei giunti.

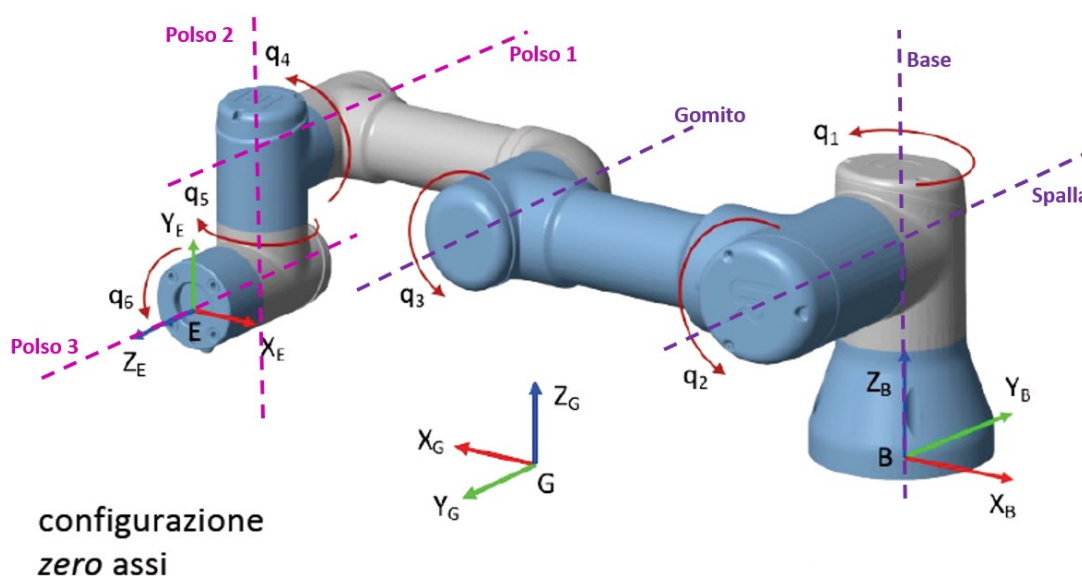


Figura 2.2 - Configurazione zero assi con identificazione sistemi di riferimento (ground, base e end effector) e identificazione giunti

Utilizzando la convenzione di Denavit-Hartenberg modificata, si assegna ad ogni corpo del robot un sistema di riferimento, come mostrato in Figura 2.3, e si ricavano i parametri di DH riportati in Tabella 2.2.

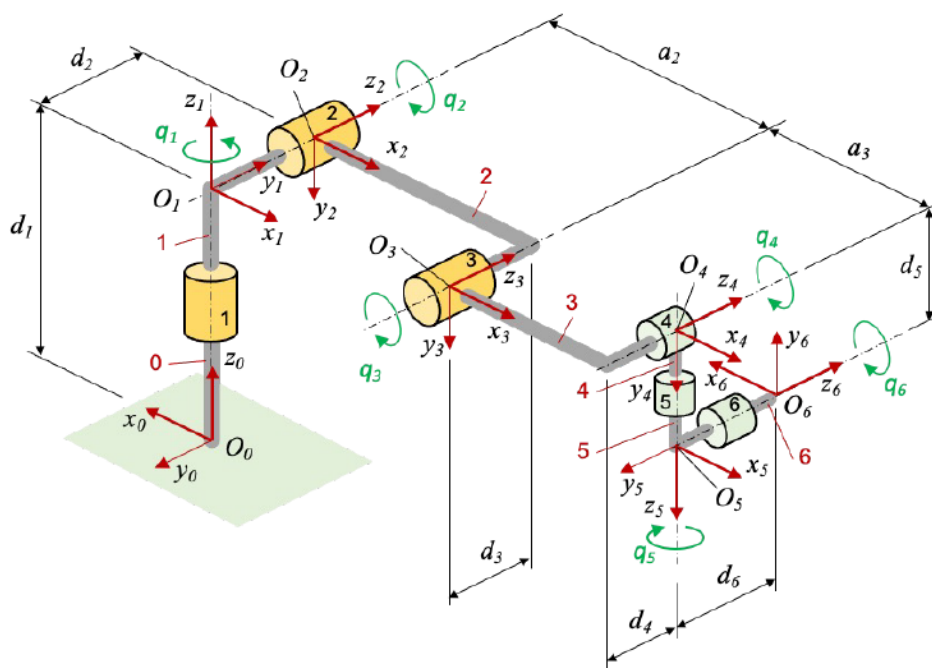


Figura 2.3 - Schematizzazione robot e sistemi di riferimento con convenzione di DH modificata

Tabella 2.2 - Parametri di Denavit-Hartenberg del robot UR3

Giunto	α [deg]	a [m]	d [m]	θ [deg]
1	0	0	0.152	180
2	-90	0	0.12	0
3	0	0.244	-0.093	0
4	0	0.213	0.083	0
5	-90	0	0.083	0
6	90	0	0.082	180

Cinematica inversa del robot UR3

Il robot può essere schematizzato come una catena cinematica di corpi rigidi connessi da giunti: la realizzazione di tale modello è fondamentale per risolvere i problemi riguardanti la pianificazione del moto. Per quanto riguarda la cinematica, è possibile distinguere due tipi di problemi:

- Problema di cinematica diretta: noti i valori dei gradi di libertà della struttura robotica si vuole determinare la posa del sistema di riferimento associato all'end effector E rispetto alla base.

- Problema di cinematica inversa: nota la posa (posizione e orientazione) del sistema di riferimento del punto E rispetto alla base si determinano le variabili di giunto.

Se da una parte la soluzione del problema di cinematica diretta è banale in quanto si ottiene moltiplicando tra loro le matrici di posa dei singoli sistemi riferimento ottenute rispetto al sistema precedente, come riportato in equazione 2.1; dall'altra la soluzione del problema di cinematica inversa è più complessa.

$${}^0\hat{A}_E = {}^0\hat{A}_1(q_1) \cdot {}^1\hat{A}_2(q_2) \cdot {}^2\hat{A}_3(q_3) \cdot {}^3\hat{A}_4(q_4) \cdot {}^4\hat{A}_5(q_5) \cdot {}^5\hat{A}_6(q_6) \quad (2.1)$$

Per quanto riguarda il problema della cinematica inversa:

1. Potrebbero non esserci soluzioni accettabili se la posa non appartiene allo spazio di lavoro del robot;
2. La soluzione analitica potrebbe non convergere ad una soluzione numerica;
3. Potrebbero esistere infinite soluzioni.

Nel caso di manipolatori a sei gradi di libertà con polso sferico il numero di soluzioni del problema di cinematica inversa si riduce a otto soluzioni che possono essere espresse in forma chiusa.

Tuttavia, il robot UR3 non ha polso sferico per cui ha un numero di soluzioni accettabili del problema della cinematica inversa che varia tra 8 e 4. La procedura utilizzata per risolvere il problema di cinematica inversa è la seguente:

1. Calcolo del vettore posizione ${}^0\underline{p}_5$ dell'origine O_5 del sistema di riferimento associato al corpo 5 a partire dalla matrice di posa del E rispetto alla base ${}^0\hat{A}_E$.
2. Soluzione del grado di libertà q_1 a partire dal vettore di posizione ${}^1\underline{p}_5$ dell'origine del sistema di riferimento del corpo 5 in relazione al sistema di riferimento del corpo 1: si ottengono due diverse soluzioni del grado di libertà q_1 che identificano le due configurazioni denominate *left shoulder* e *right shoulder*.
3. Soluzione grado di libertà q_5 a partire dal vettore di posizione ${}^1\underline{p}_6$ dell'origine del sistema di riferimento del corpo 6 in relazione al sistema di riferimento del corpo 1: si ottengono due soluzioni del grado di libertà q_5 che identificano le due configurazioni denominate *wrist in/down* e *wrist out/up*. Tuttavia, quest'ultime sono accettabili solo quando la posa ${}^1\hat{A}_6$ si trova all'interno del campo di lavoro del robot.
4. Soluzione del grado di libertà q_6 a partire dalla matrice di posa ${}^4\hat{A}_6$ ricordando che, data la struttura del robot UR3, l'asse y_1 è sempre parallelo all'asse z_4 . In questo caso:

- a. Se $\sin(q_5)$ è non nullo allora si hanno quattro soluzioni per q_6 , due per ciascuna coppia (q_1, q_5) precedentemente calcolata.
 - b. Se $\sin(q_5)$ è nullo allora si è in configurazione di singolarità in quanto l'asse z_6 è parallelo all'asse y_1 per cui qualsiasi valore il grado di libertà q_6 assuma non condiziona gli altri gradi di libertà.
5. Calcolo del vettore posizione ${}^1\underline{p}_4$ dell'origine O_4 del sistema di riferimento associato al corpo 4 in funzione dei gradi di libertà precedentemente calcolati.
 6. Soluzione del grado di libertà q_2 a partire dal vettore posizione ${}^2\underline{p}_4$ dell'origine del sistema di riferimento del corpo 4 in relazione al sistema di riferimento del corpo 2: anche in questo caso si ottengono due soluzioni del grado di libertà q_3 che identificano, rispettivamente, le configurazioni di *elbow up* e *elbow down* che risultano accettabili solo nel caso in cui la posa ${}^2\hat{A}_4$ si trova nel sottospazio di lavoro della parte braccio del robot costituita dai link 0,1,2,3.
 7. Soluzione del grado di libertà q_4 tramite la matrice di posa ${}^3\hat{A}_4$ determinata in funzione dei gradi di libertà precedentemente calcolati.

In Figura 2.4 si riporta una tabella di sintesi delle molteplicità di soluzioni del robot UR3.

q_1	q_5	q_6	${}^1\underline{p}_4$	q_3	q_2	q_4	
q_{11}	q_{51}	q_{61}	${}^1\underline{p}_{41}$	q_{31}	q_{21}	q_{41}	soluzione 1
				q_{32}	q_{22}	q_{42}	soluzione 2
	q_{52}	q_{62}	${}^1\underline{p}_{42}$	q_{33}	q_{23}	q_{43}	soluzione 3
				q_{34}	q_{24}	q_{44}	soluzione 4
q_{12}	q_{53}	q_{63}	${}^1\underline{p}_{43}$	q_{35}	q_{25}	q_{45}	soluzione 5
				q_{36}	q_{26}	q_{46}	soluzione 6
	q_{54}	q_{64}	${}^1\underline{p}_{44}$	q_{37}	q_{27}	q_{47}	soluzione 7
				q_{38}	q_{28}	q_{48}	soluzione 8

Figura 2.4 - Tabella di sintesi delle molteplicità di soluzione

2.2 Spazio di lavoro complessivo

È possibile descrivere lo spazio di lavoro complessivo del robot in due diversi spazi collegati: spazio giunti e spazio operativo. Lo spazio giunti, anche detto spazio delle configurazioni, è lo spazio in cui viene definito il vettore dei gradi di libertà \bar{q} di dimensione n , con n che indica

il numero di gradi di libertà, mentre lo spazio operativo, anche detto spazio cartesiano, è lo spazio in cui si definiscono i vettori di posizione e orientazione, ossia la posa del corpo rispetto al sistema di riferimento tridimensionale (x,y,z) fisso.

Ad ogni punto dello spazio giunti corrisponde un solo punto nello spazio cartesiano (problema di cinematica diretta) mentre ad ogni punto dello spazio cartesiano può corrispondere più di un punto nello spazio giunti (problema di cinematica inversa) con un massimo di otto soluzioni [49].

Prima di analizzare lo spazio di lavoro del robot in funzione di diversi indici, è necessario identificare quale sia lo spazio di lavoro complessivo del robot stesso [48], ossia quali siano i punti dello spazio cartesiano che il robot può raggiungere con almeno una configurazione ricordando che, secondo la soluzione del problema di cinematica inversa, ogni posa nello spazio di lavoro cartesiano ha teoricamente otto soluzioni, ossia otto set di gradi di libertà.

In riferimento a quanto definito in precedenza, per definire lo spazio di lavoro complessivo del robot, in termini di spazio cartesiano, si può sfruttare la soluzione del problema di cinematica inversa: si fanno variare tutti e sei i gradi di libertà all'interno del loro range (valori massimi e minimi definiti in Tabella 2.3) e, quindi, per ogni set di valori $\bar{q} = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$ si determina la posa ${}^0A_{EE}$ che il corpo end effector, posto in corrispondenza dell'origine del sistema di riferimento del corpo 6, assume nello spazio operativo. Lo spazio di lavoro ottenuto è rappresentato in Figura 2.5.

Risulta, quindi, evidente che i limiti, approssimati, dello spazio di lavoro del robot, in termini del punto TCP (posto in corrispondenza del punto E, ossia dell'origine del sistema di riferimento associato al corpo 6) sono:

- $-0.6 \text{ m} \leq x_{TCP} \leq 0.6 \text{ m}$
- $-0.6 \text{ m} \leq y_{TCP} \leq 0.6 \text{ m}$
- $-0.45 \text{ m} \leq z_{TCP} \leq 0.7 \text{ m}$

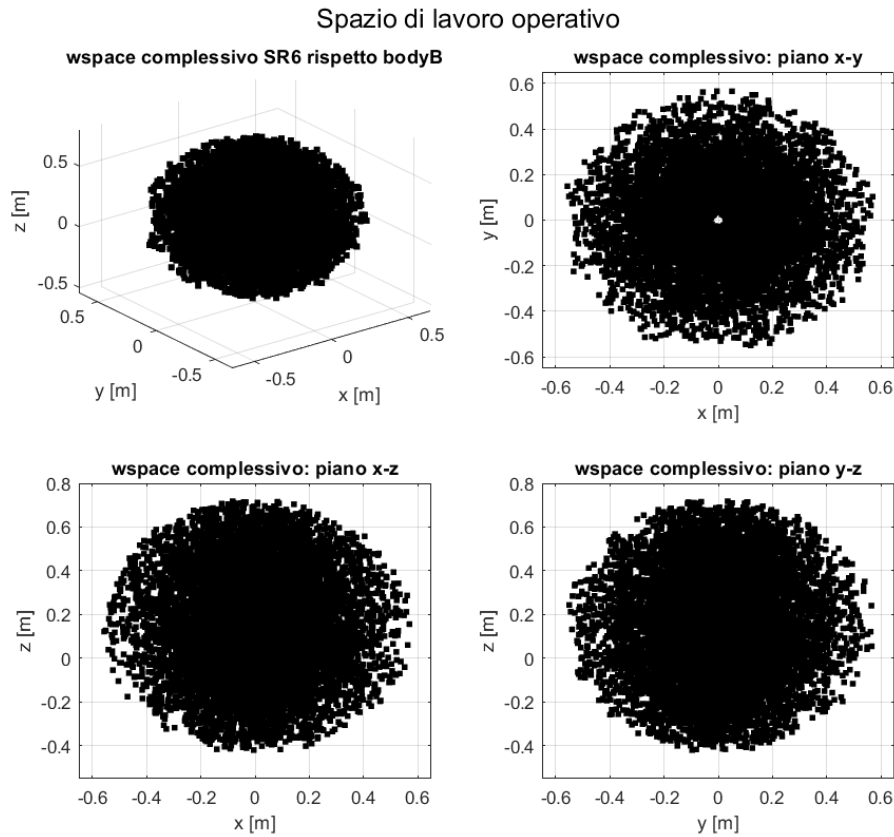


Figura 2.5 - Spazio di lavoro operativo complessivo

Metodo Monte Carlo

Per definire i vettori di gradi di libertà, utilizzati per determinare le pose nello spazio operativo che determinano lo spazio di lavoro complessivo, si è utilizzato il metodo Monte Carlo. Si tratta di un metodo che generalmente viene utilizzato per calcolare lo spazio di lavoro di un robot e che consiste nel generare un valore casuale dei gradi di libertà compreso tra i valori massimo e minimo usando la definizione riportata in equazione 2.2.

$$q_i = q_{i,min} + (q_{i,max} - q_{i,min}) \cdot r_i \quad (2.2)$$

in cui $q_{i,min}$ e $q_{i,max}$ rappresentano, rispettivamente, il valore massimo e minimo del grado di libertà in analisi (riportati in Tabella 2.3) e r_i è un parametro casuale variabile nell'intervallo (0-1).

Il metodo Monte Carlo può spesso risultare inefficiente in termini di accuratezza, in quanto si ottiene una distribuzione non uniforme con aree molto dense e precise e altre scarsamente definite, come risulta facilmente visibile in Figura 2.5. Per questo motivo, nel documento [49] viene presentato un metodo ottimizzato basato sull'algoritmo Monte Carlo tradizionale con l'integrazione della crescita Gaussiana. Tale algoritmo ottimizzato consiste nel generare

inizialmente uno spazio di lavoro impreciso tramite il tradizionale metodo Monte Carlo e, successivamente, migliorarlo densificando le aree del workspace a bassa densità attraverso la distribuzione gaussiana. Tuttavia, nel caso dell'analisi svolta in questo capitolo, si ritiene che il metodo Monte Carlo tradizionale sia sufficientemente accurato e pertanto non si utilizza la versione ottimizzata presentata in [49].

2.3 Limiti di giunto

In Tabella 2.3 si riportano i valori limiti dei gradi di libertà definiti in base alla geometria del robot mentre in Tabella 2.4 si riportano le velocità massime realizzabili nei giunti (dati ottenuti dal datasheet del robot UR3 [58]).

Tabella 2.3 - Valore limite dei gradi di libertà [58]

Giunto	q_{min} [deg]	q_{max} [deg]
1	-360	+360
2	-360	+360
3	-360	+360
4	-360	+360
5	-360	+360
6	-360	+360

Tabella 2.4 - Velocità massima nei giunti [58]

Giunto	Velocità massima [°/s]
1	±180
2	±180
3	±180
4	±360
5	±360
6	±360

Considerando i limiti riportati in Tabella 2.3, si esegue una mappatura del workspace del robot, sia in termini di spazio giunti che spazio operativo, analizzando il valore dei gradi di libertà. Nello specifico, sono stati adottati tre diversi metodi: il primo analizza il valore stesso del grado di libertà in relazione ad una banda di sicurezza mentre il secondo definisce degli indici in funzione dei valori massimi e minimi. Questi due metodi saranno analizzati nello specifico nei capitoli seguenti.

Definizione dei vettori gradi di libertà

È possibile definire i vettori di gradi di libertà variabili attraverso due diversi metodi:

- a) Discretizzazione equi-spaziata: noti il valore massimo e minimo raggiungibili da ogni grado di libertà, riportati in Tabella 2.3 e indicati in equazione 2.3 rispettivamente come $q_{i,min}$ e $q_{i,max}$, si definisce un vettore equi-spaziato di valori compresi tra il massimo e minimo utilizzando il comando in linguaggio Matlab:

$$\bar{q}_i = \text{linspace}(q_{i,min}, q_{i,max}, n) \quad (2.3)$$

dove n indica la lunghezza del vettore.

- b) Metodo Monte Carlo: si utilizza la definizione riportata in equazione 2.2 nel capitolo 2.2.

2.3.1 Metodo 1

Si definisce una banda di sicurezza che permette di identificare i set di gradi di libertà in cui almeno uno dei giunti ha un valore prossimo al valore limite; in questo modo, è possibile mantenere una distanza dal valore limite. Questo metodo consiste in un'analisi effettuata nello spazio giunti e, successivamente, riportata in spazio operativo.

Il metodo utilizzato è il seguente:

1. Scelta dei gradi di libertà variabili e discretizzazione dei vettori di tali gradi di libertà;
2. Assegnazione di un valore ai gradi di libertà fissi;
3. Per ogni set di gradi di libertà, di cui alcuni fissi e altri variabili, si calcola, tramite la cinematica inversa, la posa del sistema di riferimento del corpo end effector rispetto alla base fissa in modo da ottenere un punto nello spazio di lavoro operativo;
4. Assegnazione di un flag al punto identificato in spazio giunti e riportato nella corrispondente posa in spazio operativo:
 - a. Flag **verde**: tutti i gradi di libertà in analisi, in questo caso due o tre rispetto ai sei totali, sono lontani dai limiti di giunto e quindi si è nella zona *safe*.
 - b. Flag **giallo**: almeno uno dei gradi di libertà in analisi rientra nella banda di sicurezza prossima ai limiti di giunto.
 - c. Flag **rosso**: almeno uno dei gradi di libertà in analisi ha valore pari al valore limite.

2.3.1.1 Variazione di una coppia di gradi di libertà: q_2 e q_3

Ponendo pari a 0° i tre gradi di libertà di polso (q_4 , q_5 e q_6) e il grado di libertà q_1 si fanno variare i gradi di libertà di spalla q_2 e di gomito q_3 all'interno del loro range e si imposta una banda di sicurezza, uguale per entrambi i gradi di libertà, pari al 10% del valore limite.

In questo primo esempio, si rappresentano i punti nello spazio operativo in termini di posizione del punto E che corrisponde all'origine del sistema di riferimento associato al corpo 6, ossia il terzo link di polso. Inoltre, l'analisi viene eseguita utilizzando i due diversi metodi di discretizzazione: discretizzazione equi-spaziata e metodo Monte Carlo.

Discretizzazione equi-spaziata

Si riporta, in Figura 2.6, il risultato dell'analisi eseguita in cui si evidenzia:

- In spazio giunti: la simmetria della soluzione.
- In spazio operativo: la presenza di alcune configurazioni non accettabili sia all'estremo dello spazio di lavoro (lungo il perimetro esterno) che all'interno dello spazio accettabile.

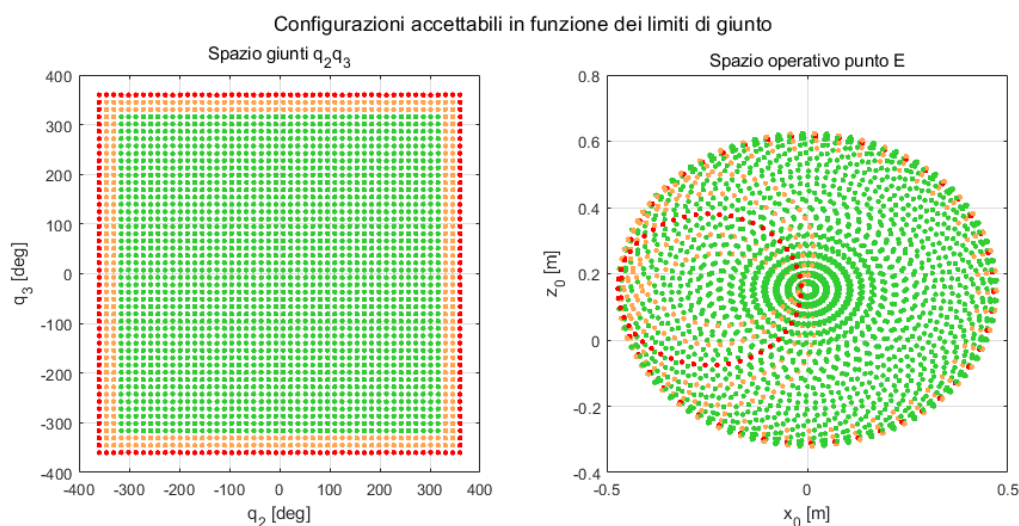


Figura 2.6 - Analisi spazio giunti q_2q_3 in termini di limiti di giunto con metodo 1 e discretizzazione equi-spaziata

In Figura 2.7 si riporta il robot disposto secondo tre diverse configurazioni non accettabili (contraddistinte dal flag rosso).

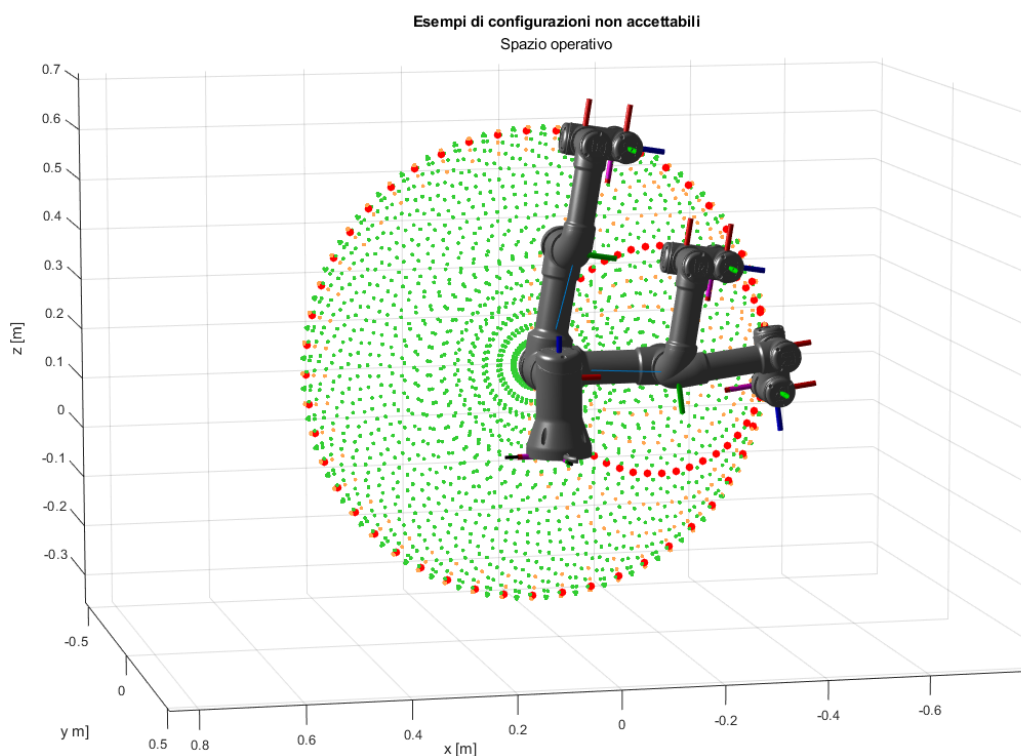


Figura 2.7 - Esempi di configurazioni non accettabili (gradi di libertà in analisi q_2 e q_3)

Tuttavia, avendo analizzato lo spazio giunti e poi trasposto le informazioni in spazio operativo, ne risulta che i punti nello spazio operativo identificati con il flag rosso sono punti in cui almeno una soluzione della cinematica inversa è non accettabile in quanto uno dei gradi di libertà ha raggiunto il valore limite ma, riguardo alla stessa posa, le altre configurazioni potrebbero essere accettabili. Ciò si può dimostrare prendendo un punto dello spazio operativo identificato con il flag rosso, e risolvendo, per tale posa, il problema di cinematica inversa.

Scelta una delle pose identificate con il flag rosso, si riportano le otto soluzioni del problema di cinematica inversa in Figura 2.8, da cui, considerando le colonne che rappresentano i gradi di libertà in analisi q_2 e q_3 (riquadrate, rispettivamente, in blu e azzurro) si evince che solo due configurazioni non sono accettabili, evidenziate in rosso, in quanto uno dei due gradi di libertà raggiunge il valore limite: in questo caso si tratta del grado di libertà q_2 .

8 soluzioni del problema di cinematica inversa di un punto dello spazio operativo con flag rosso:

-146.0122	165.8524	68.7659	-54.6183	146.0122	99.1837
-146.0122	-130.6969	-68.7659	19.4628	146.0122	99.1837
-146.0122	-145.6061	7.4859	138.1202	-146.0122	-80.8163
-146.0122	-138.6287	-7.4859	146.1146	-146.0122	-80.8163
0	-74.2063	80.8163	-87.4264	0	0
0	-0.0000	-80.8163	-0.0000	0	0
0	-74.2063	80.8163	-87.4264	0	0
0	-0.0000	-80.8163	-0.0000	0	0

Figura 2.8 - Soluzioni del problema di cinematica inversa in gradi di un punto dello spazio operativo contrassegnato con il flag rosso

Nota: in Figura 2.8 il grado di libertà q_2 assume valore non accettabile quando è pari a 0° che corrisponde a $+360^\circ$ (valore limite).

Metodo Monte Carlo

Considerando sempre i gradi di libertà q_2 e q_3 con i rimanenti gradi di libertà posti pari a 0° , si ripete la medesima analisi utilizzando il metodo Monte Carlo per determinare il valore dei gradi di libertà variabili. In Figura 2.9 si riportano i risultati.

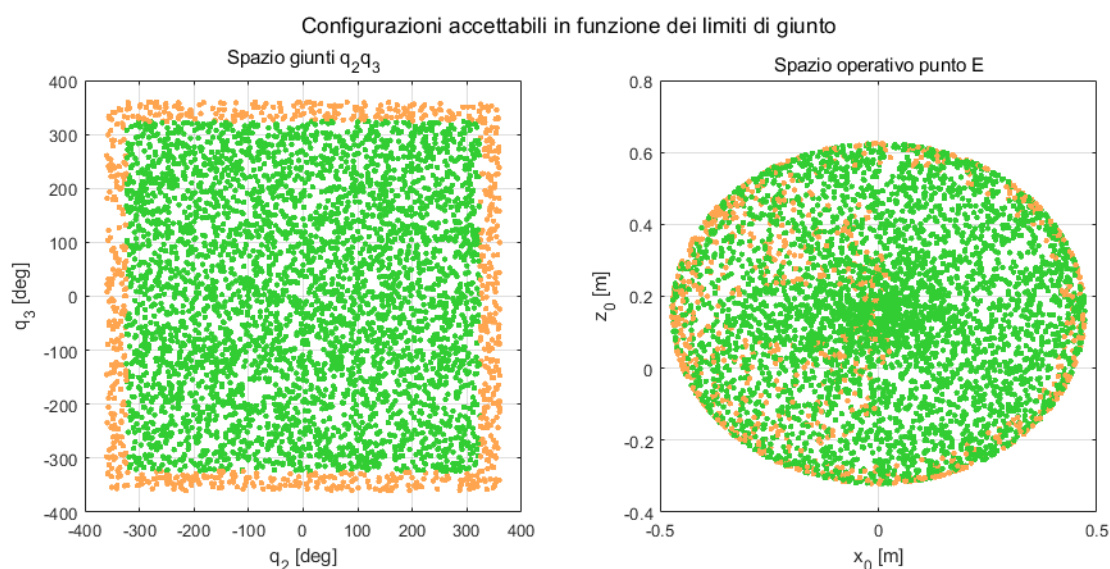


Figura 2.9 - Analisi spazio giunti q_2q_3 in termini di limiti di giunto con metodo 1 e metodo Monte Carlo

Confrontando i risultati ottenuti con questo metodo (Figura 2.9) con quelli ottenuti dalla discretizzazione uniforme (Figura 2.6) è evidente che la distribuzione dei punti è praticamente la medesima con le seguenti differenze:

- Con il metodo Monte Carlo non si raggiunge mai il valore limite (flag rosso) poiché si utilizzano valori casuali del grado di libertà all'interno del suo range di variabilità.
- Con il metodo Monte Carlo si considerano punti intermedi tra quelli ottenuti con la discretizzazione omogenea.

Variazione dei limiti di giunto rispetto al valore nominale

Potrebbe risultare necessario, in alcuni casi, considerare dei limiti più stringenti rispetto a quelli nominali (Tabella 2.3), ad esempio, a causa della presenza di ostacoli nei pressi del robot (come la presenza del tavolo di lavoro su cui il robot viene installato) oppure potrebbe essere necessario limitare i gradi di libertà per evitare che il cavo del tool installato sulla flangia si attorcigli.

In questo paragrafo si propone un esempio di riduzione dei limiti sul grado di libertà q_2 mantenendo invariati tutti i valori ad esclusione dei seguenti:

- Limite inferiore del grado di libertà q_2 pari a -200° ;
- Limite superiore del grado di libertà q_2 pari a $+200^\circ$;
- Banda di sicurezza: 10% del valore nominale;
- Metodo per la definizione dei valori dei gradi di libertà: discretizzazione uniforme.

Come visibile in Figura 2.10, ne risulta un aumento del numero di configurazioni non accettabili in spazio operativo, mantenendo, però, valide le considerazioni fatte per il caso precedente, ossia che un flag rosso indica che almeno una delle configurazioni che determina la posa non accettabile è non accettabile ma ciò non significa che lo siano tutte.

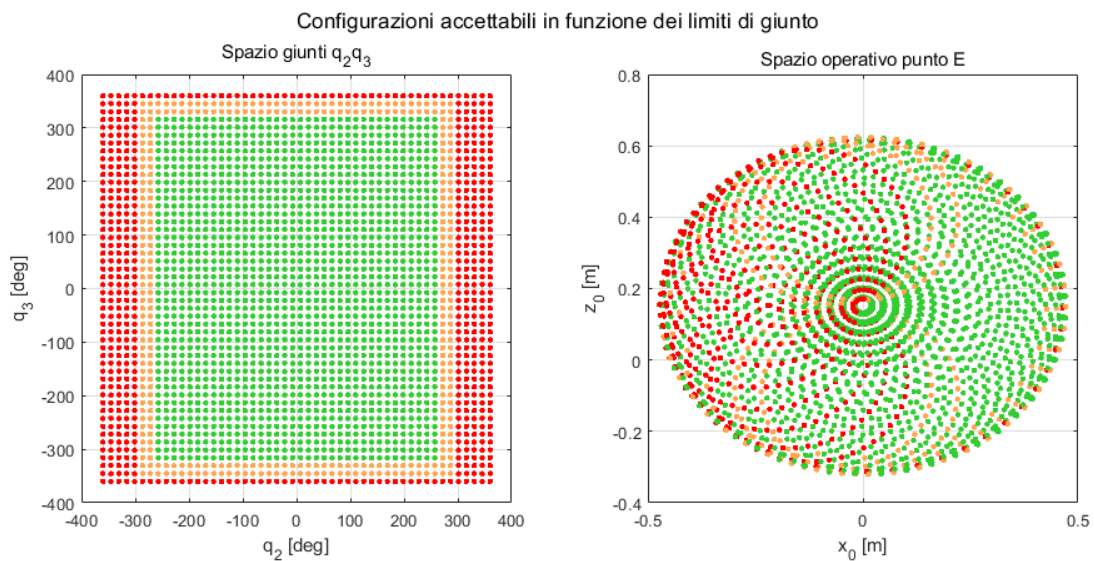


Figura 2.10 - Analisi spazio giunti q_2q_3 in termini di limiti di giunto con metodo 1 e discretizzazione equi-spaziata e riduzione limite sul giunto q_2

2.3.1.2 Variazione di una coppia di gradi di libertà: q_4 e q_5

Si ripete l'analisi svolta per i gradi di libertà di spalla e gomito, andando a considerare due gradi di libertà di polso: q_4 e q_5 . Per questo caso il grado di libertà q_6 risulta poco interessante in quanto determina la sola rotazione del tool installato sulla flangia e, quindi, non determina una variazione di posa del punto end effector (punto E). Per tale analisi si utilizzano i seguenti parametri:

- Limiti nominali (Tabella 2.3);
- Gradi di libertà fissi: $q_1 = 0^\circ$, $q_2 = -220^\circ$, $q_3 = 10^\circ$, $q_6 = 0^\circ$;
- Metodo di discretizzazione: discretizzazione uniforme (equazione 2.3);

Si riportano in Figura 2.11 i risultati in termini di spazio giunti e spazio operativo e in Figura 2.12 tre esempi di posizioni non accettabili, ricordando che anche in questo caso valgono le considerazioni già espresse per il caso q_2 - q_3 .

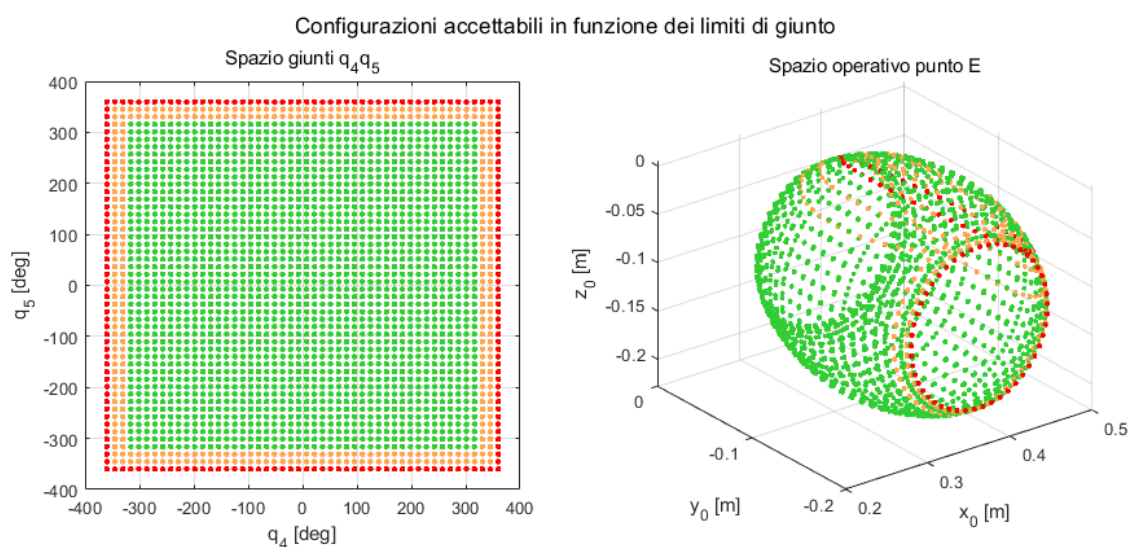


Figura 2.11 - Analisi spazio giunti q_4 - q_5 in termini di limiti di giunto con metodo 1 e discretizzazione equi-spaziata

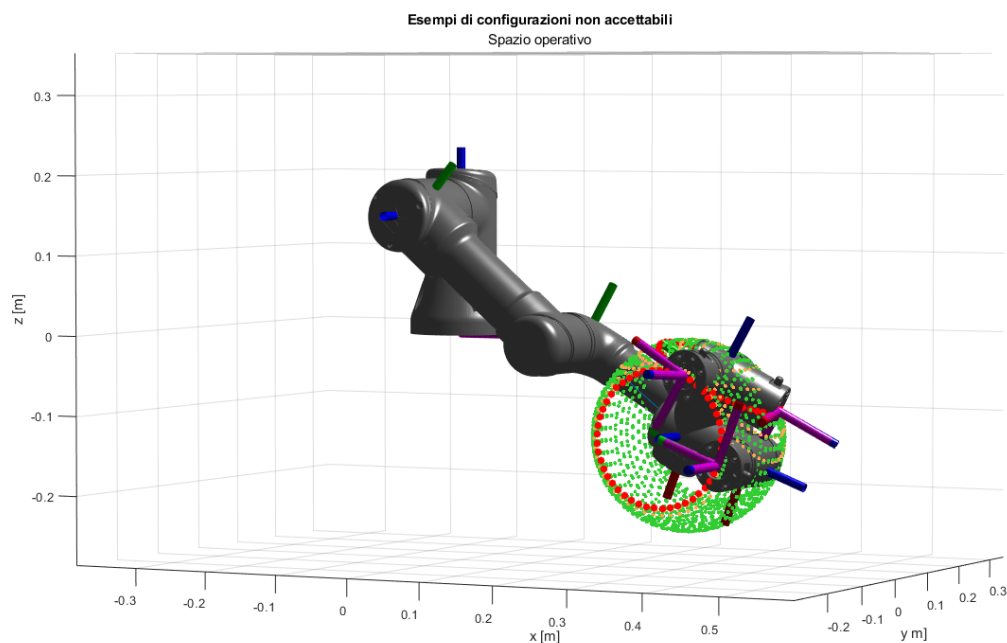


Figura 2.12 - Esempi di configurazioni non accettabili (gradi di libertà in analisi q_4 e q_5)

2.3.1.3 Considerazioni sul metodo 1

Il metodo 1 descritto in questo capitolo può essere applicato a qualsiasi coppia di gradi di libertà della struttura robotica. Come presentato nell'esempio precedente, si può assegnare ai gradi di libertà non in analisi anche valori diversi da 0° .

Inoltre, è possibile sia modificare la dimensione della banda di sicurezza (rappresentata in giallo nelle figure precedenti) sia definire una banda di valori non accettabili nell'intorno dei valori limite (al posto di definire solo due valori limite).

2.3.2 Metodo 2

A differenza del metodo 1, in questo caso si propone un metodo che associa ad ogni grado di libertà un indice di prossimità al valore limite: in particolare, si propongono due diversi indici definiti in funzione dei valori limite e del valore medio.

2.3.2.1 Indice di prossimità ai limiti di giunto 1

Il primo indice di prossimità ai limiti di giunto è definito, per il singolo grado di libertà, in funzione del valore limite massimo e della media dei valori che il grado di libertà stesso può assumere [50]:

$$indice_{prossimit\grave{a} \text{ limite giunto},1}(i) = \left| \frac{q_i - \bar{q}_i}{q_i - \max(q_{lim,i})} \right| \quad (2.4)$$

I parametri presentati in equazione 2.4 rappresentano, rispettivamente: i il grado di libertà in analisi (variabile tra 1 e 6), q_i il valore puntuale del grado di libertà in analisi, \bar{q}_i il valore medio del grado di libertà (equazione 2.5) e $q_{lim,i}$ i valori limiti del grado di libertà.

$$\bar{q}_i = \frac{\min(q_{lim,i}) + \max(q_{lim,i})}{2} \quad (2.5)$$

L'indice così definito può assumere valori variabili tra 0 e 1 e, in particolare, assume valore pari a:

- 0 quando il grado di libertà è lontano dai limiti di giunto;
- 1 quando il grado di libertà è in corrispondenza del valore limite.

Nei seguenti paragrafi, tale indice viene utilizzato per analizzare lo spazio giunti in termini di variazione di un singolo grado di libertà, di una coppia e di una terna di gradi di libertà.

Quando si considera più di un grado di libertà, si calcola l'indice per ciascuno di essi e, quindi, si determina un indice globale per tale punto dello spazio giunti scegliendo il valore massimo tra quelli degli indici calcolati:

$$indice_{prossimit\grave{a} \text{ limite giunti},1} = \max(indice_{prossimit\grave{a} \text{ limite giunto},1}(i)) \quad (2.6)$$

Con $i = 1 \div 6$.

Variazione di un singolo grado di libertà: q_2

In questo primo esempio si riporta, in Figura 2.13, il valore dell'indice calcolato con la definizione 2.4 in funzione del valore del grado di libertà q_2 e il corrispondente risultato in spazio operativo, avendo posto gli altri gradi di libertà pari a 0° .

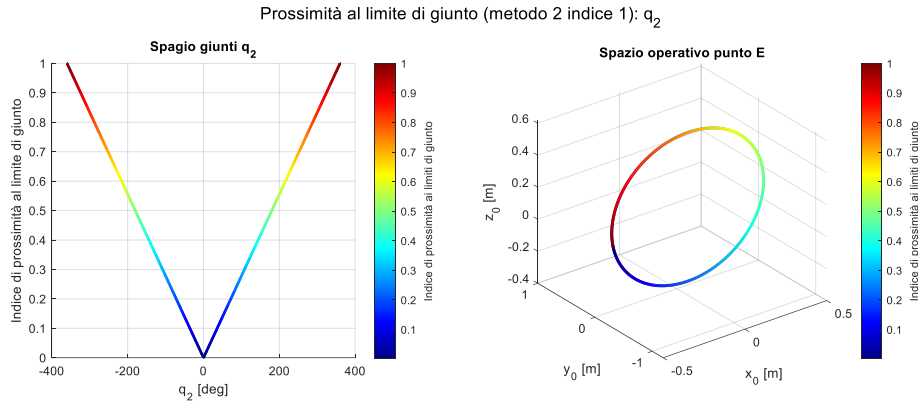


Figura 2.13 - Indice di prossimità ai limiti di giunto del grado di libertà q_2 con metodo 2 e indice 1

Risulta evidente che l'indice funziona in modo corretto dato che assume valore 1 quando il grado di libertà raggiunge il valore limite ($\pm 360^\circ$) e valore 0 quando è il più distante possibile da entrambi i limiti, superiore e inferiore.

Analisi di una coppia di gradi di libertà: q_2 e q_3

Considerando lo spazio giunti definito dai gradi di libertà q_2 e q_3 , si calcola per ciascun grado di libertà l'indice di prossimità ai limiti di giunto con l'equazione 2.4 e, successivamente, si calcola l'indice di prossimità globale di ciascun punto dello spazio giunti con l'equazione 2.6.

Inoltre, si riporta il valore dell'indice calcolato complessivamente anche nello spazio operativo ponendo pari a 0° i rimanenti gradi di libertà.

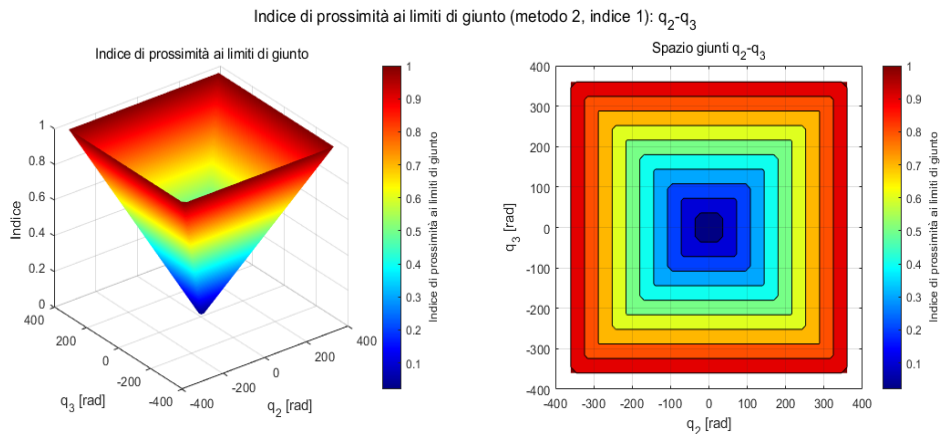


Figura 2.14 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio giunti q_2 - q_3 con metodo 2 e indice 1

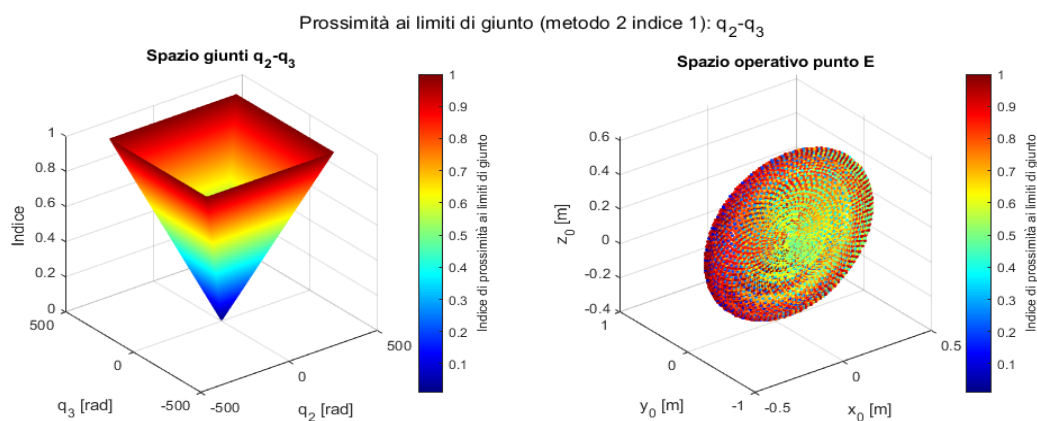


Figura 2.15 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio giunti q_2 - q_3 e nello spazio operativo con metodo 2 e indice 1

Si evince, dai risultati riportati in Figura 2.14 e Figura 2.15, che l'indice assume valore 1 quando entrambi i gradi di libertà in analisi raggiungono il valore limite e degrada verso il valore 0 man mano che ci si allontana dal valore limite.

Variazione di una terna di gradi di libertà: q_1, q_2, q_3

Utilizzando lo stesso metodo del paragrafo precedente, si applica il metodo ad un piano di giunti tridimensionale definito dai giunti q_1, q_2 e q_3 (Figura 2.16), ossia i gradi di libertà di braccio, e le considerazioni risultano le medesime del piano q_2 - q_3 .

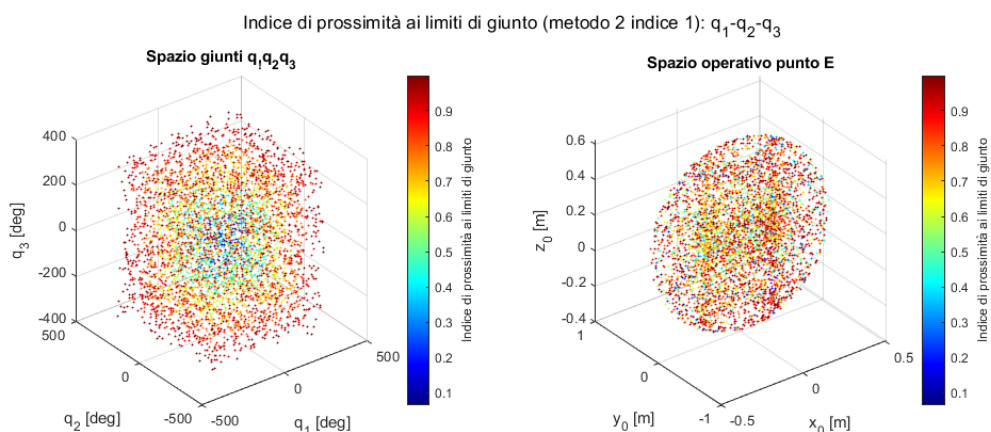


Figura 2.16 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio giunti q_1 - q_2 - q_3 con metodo 2 e indice 1

Variazione di tutti i gradi di libertà

Si fanno variare tutti i gradi di libertà del robot e per ogni set di gradi di libertà si determina il corrispondente punto nello spazio operativo.

In questo caso è possibile rappresentare i risultati secondo due metodologie:

- A. Si assegna, ad ogni punto nello spazio operativo, il valore dell'indice calcolato con l'equazione 2.6 avendo calcolato l'indice puntuale dei singoli gradi di libertà con l'equazione 2.4.
- B. Si calcola l'indice del punto nello spazio operativo come nel caso 1 e, successivamente, si definisce un valore critico dell'indice: se il valore dell'indice è maggiore del valore limite (posto pari a 0.9) allora al punto viene assegnato un flag **rosso** (non accettabile), altrimenti viene assegnato un flag **verde**.

In Figura 2.17 e in Figura 2.18 si riportano, rispettivamente, i risultati ottenuti con i metodi descritti: risulta evidente che il risultato ottenuto con il metodo A presenta più informazioni ma è di più difficile lettura. Invece, per quanto riguarda i risultati ottenuti con il metodo B, rimangono valide le considerazioni fatte per il metodo 1 ossia che un flag rosso indica che almeno una delle otto possibili configurazioni che determina tale posa ha almeno un grado di libertà con indice oltre al valore limite, ma ciò non significa che tutte le soluzioni del problema di cinematica inversa di quella posa siano non accettabili.

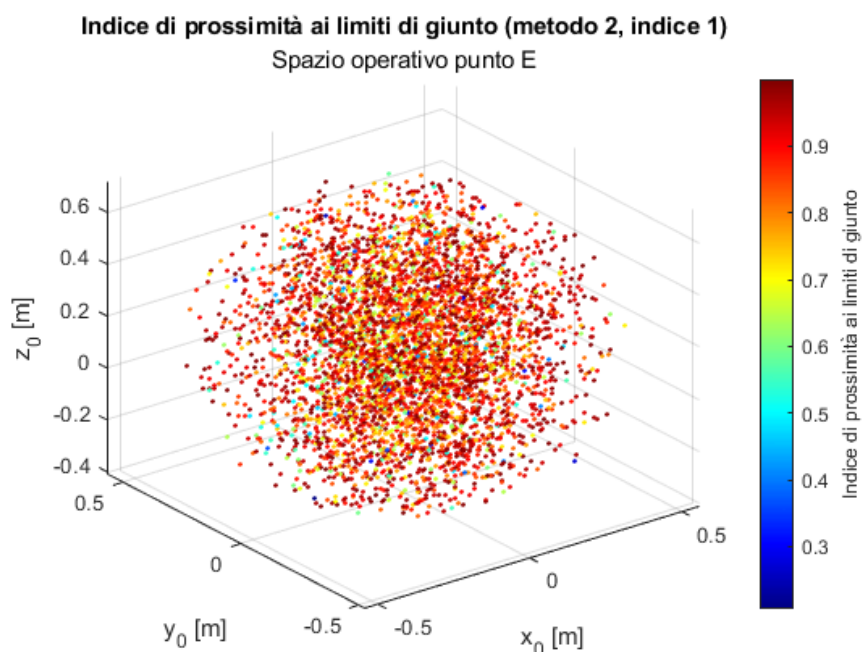


Figura 2.17 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio operativo con metodo 2 e indice 1

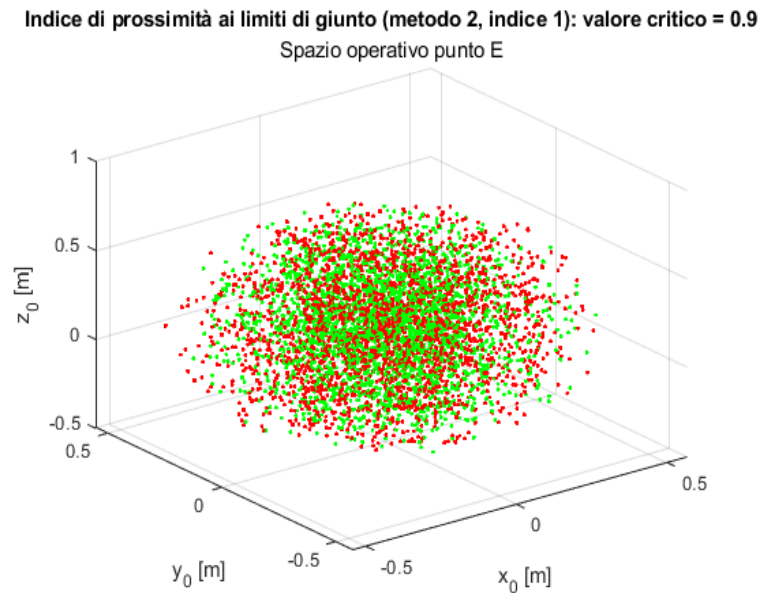


Figura 2.18 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio operativo con metodo 2, indice 1 e valore limite
Come nel caso del metodo 1, tale metodo può essere applicato a qualsiasi coppia o terna di gradi di libertà.

2.3.2.2 Indice di prossimità ai limiti di giunto 2

Il secondo indice di prossimità ai limiti di giunto è definito, per il singolo grado di libertà, in funzione dei valori limite [50]:

$$indice_{prossimità\ limite\ giunto,2}(i) = \frac{1}{4} \frac{[\max(q_{lim,i}) - \min(q_{lim,i})]^2}{[\max(q_{lim,i}) - q_i]} \quad (2.7)$$

Tale indice, così definito, assume:

- Valore 0 quando si è il più possibile lontano dai limiti di giunto;
- Valore tendente ad infinito quando si è in corrispondenza dei limiti di giunto.

Nel seguito, tale indice viene utilizzato per analizzare lo spazio giunti in termini di variazione di un singolo grado di libertà e di una coppia di gradi di libertà.

Quando si considera più di un grado di libertà, si calcola l'indice per ciascuno di essi (con la definizione 2.7) e, quindi, si determina un indice globale per tale punto dello spazio giunti scegliendo il valore massimo tra quelli degli indici calcolati, esattamente come per l'indice 1:

$$indice_{prossimità\ limite\ giunti,2} = \max(indice_{prossimità\ limite\ giunto,2}(i)) \quad (2.8)$$

Con $i = 1 \div 6$.

Variazione di un singolo grado di libertà: q_2

Come prima applicazione di questo secondo indice, si analizza la sola variazione del grado di libertà di spalla q_2 (Figura 2.19).

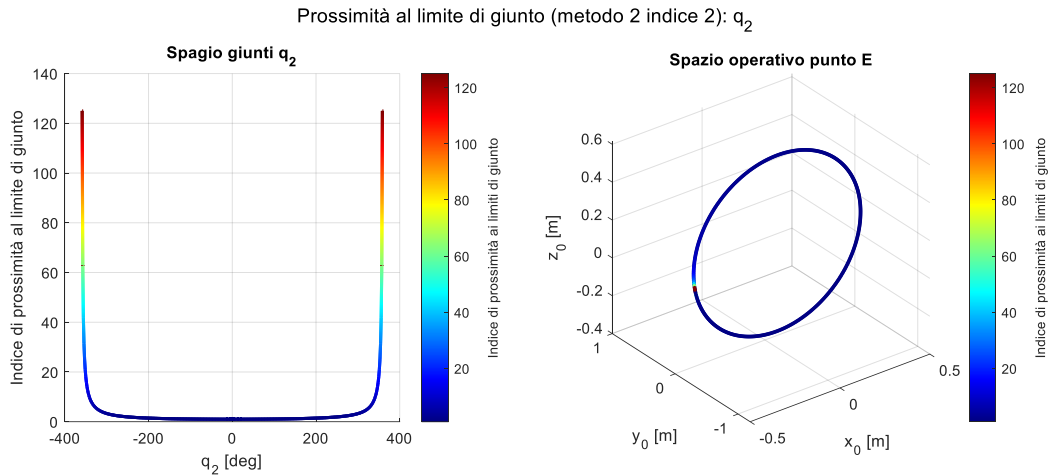


Figura 2.19 - Indice di prossimità ai limiti di giunto del grado di libertà q_2 con metodo 2 e indice 2

Risulta evidente che, rispetto al caso del metodo 2 indice 1 (Figura 2.13), avendo definito l'indice 2 secondo la definizione 2.7, si ha che il valore dell'indice aumenta molto repentinamente quando si è molto vicini ai limiti di giunto mentre si ha un'ampia zona *safe*, ossia un'ampia area dello spazio giunti in cui si ha un basso valore di indice.

Analisi di una coppia di gradi di libertà: q_2 e q_3

Allo stesso modo si procede all'applicazione dell'indice alla coppia di gradi di libertà q_2 e q_3 e si ottengono, come evidenziato in Figura 2.21 e in Figura 2.20, i medesimi risultati.

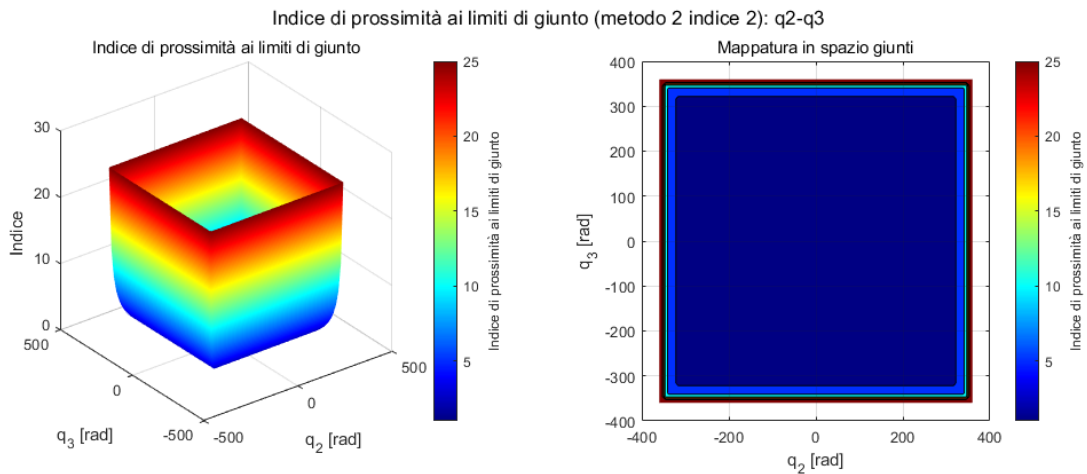


Figura 2.20 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio giunti q_2 - q_3 con metodo 2 e indice 2

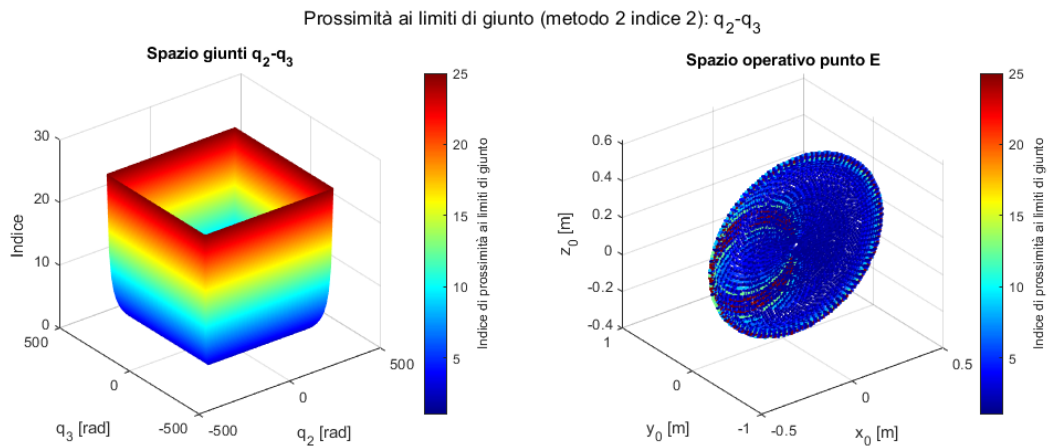


Figura 2.21 - Indice di prossimità ai limiti di giunto nello spazio giunti q_2 - q_3 e nello spazio operativo con metodo 2 e indice 2

Come nel caso precedente, anche in questo caso è possibile applicare il metodo a qualsiasi coppia di gradi di libertà.

Tuttavia, tale indice risulta di più difficile lettura, dato che ha un valore massimo tendente ad infinito, per cui non viene utilizzato per analizzare il comportamento di più di due gradi di libertà.

2.3.3 Conclusioni

Dopo aver analizzato i diversi metodi per determinare un indice di prossimità ai limiti dei gradi di libertà, risulta evidente che il metodo che fornisce i risultati più interessanti e di più semplice lettura è il metodo 2 con l'indice 1 che assegna valori variabili tra 0 e 1. Per questo motivo, nel seguito, verrà utilizzato tale indice per analizzare alcune configurazioni notevoli.

Inoltre, in sviluppi futuri del metodo, tale indice potrà essere usato per definire una legge del moto della base mobile del robot.

2.4 Singolarità

Si esegue una mappatura dello spazio di lavoro in termini di prossimità alle configurazioni di singolarità, nello specifico si tratta di configurazioni di singolarità di spalla, gomito e polso.

Per analizzare la prossimità alle configurazioni di singolarità si analizza il determinante della matrice jacobiana [51].

Nel seguito si analizzano le configurazioni di singolarità per la coppia di giunti q_2 - q_3 ma il metodo proposto può essere applicato a qualsiasi coppia, terna o gruppo di gradi di libertà.

Configurazioni di singolarità del robot UR3

Si riporta, in questo paragrafo, un esempio di configurazione di singolarità per le tre principali tipologie di singolarità associate al robot UR3: spalla, gomito e polso.

Singolarità di spalla

La singolarità di spalla (Figura 2.22) si verifica quando il punto di intersezione tra l'asse 6 (associato al corpo 3 del polso) e l'asse 5 (associato al corpo 2 del polso) giace sul piano definito dagli assi 1 (associato alla base) e 2 (associato alla spalla).

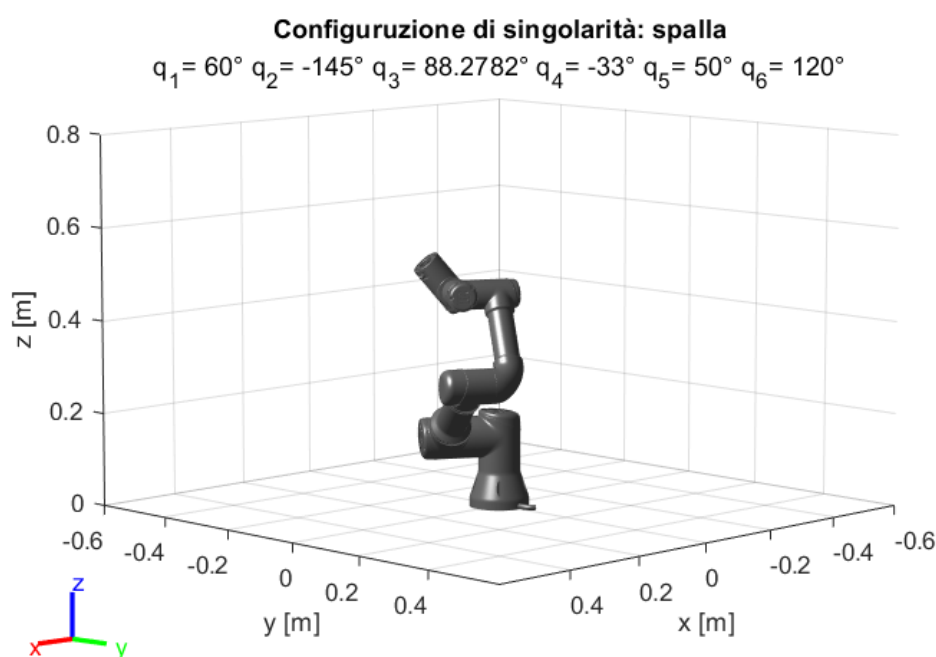


Figura 2.22 - Esempio di singolarità di spalla del robot UR3

Singolarità di gomito

La singolarità di gomito, di cui un esempio è riportato in Figura 2.23, è funzione dei gradi di libertà q_2 e q_3 e si verifica quando gli assi, rispettivamente, della spalla e del gomito sono complanari.

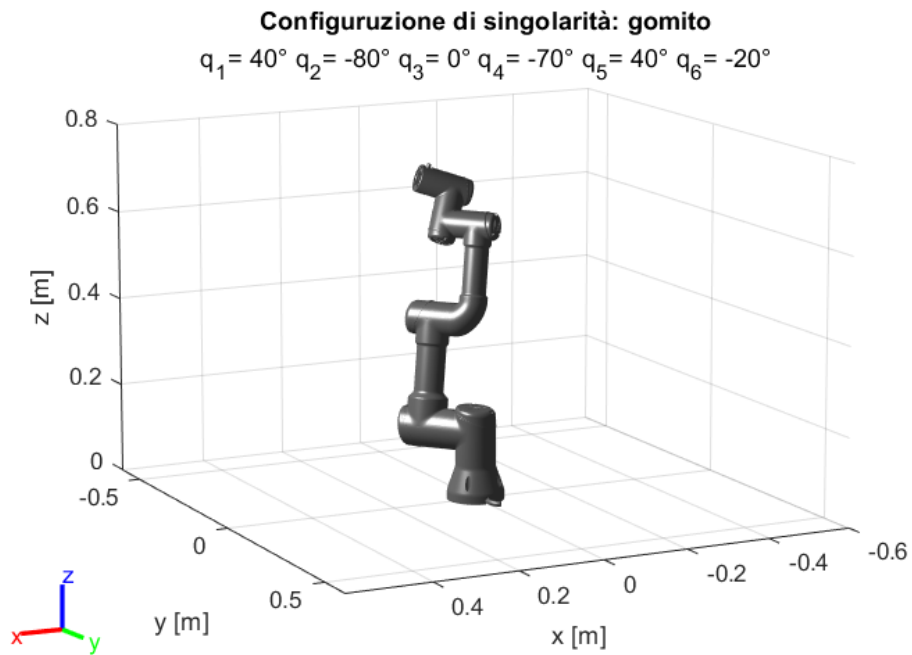


Figura 2.23 - Esempio di singolarità di gomito del robot UR3

Singolarità di polso

Infine, la singolarità di polso (Figura 2.24) si verifica quando l'asse 6 (associato al link 3 del polso) e l'asse 4 (associato al link 1 del polso) sono paralleli.

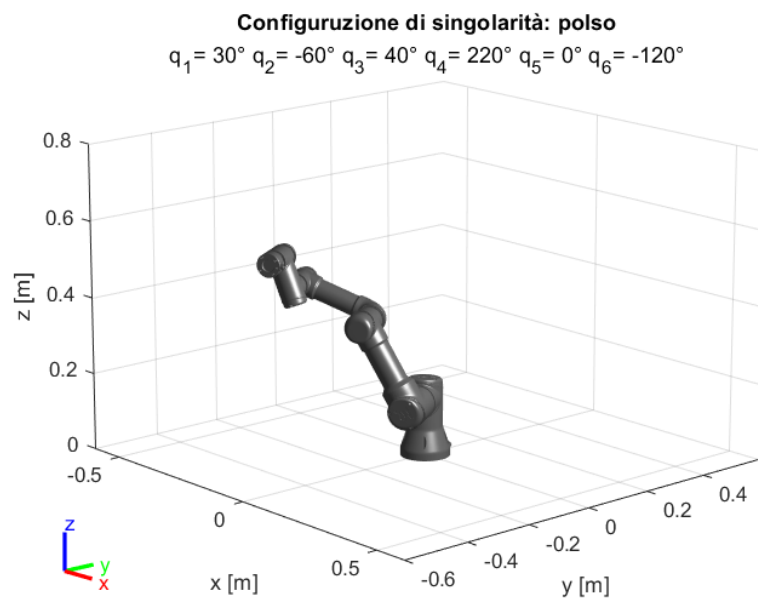


Figura 2.24 - Esempio di singolarità di polso del robot UR3

2.4.1 Analisi delle singolarità in funzione di q_2 e q_3

Per ogni coppia di valori, mantenendo fissi i rimanenti gradi di libertà, si calcola il determinante della matrice jacobiana [52]:

- Se assume valore nullo, si è in corrispondenza di una configurazione di singolarità e si associa al punto in spazio giunti, e al corrispondente punto in spazio operativo, un flag **rosso**;
- Se assume valore inferiore al valore critico limite (posto pari a 10^{-5}) ma non nullo, si è in prossimità di una configurazione di singolarità a cui si associa un flag **arancione**;
- Se assume valore superiore al valore critico, la configurazione è definita *safe* in termini di singolarità e viene identificata da un flag **verde**.

I gradi di libertà fissi vengono, posti, rispettivamente pari a

$$q_1 = 0^\circ,$$

$$q_4 = 90^\circ,$$

$$q_5 = 10^\circ,$$

$$q_6 = 0^\circ,$$

ma l'analisi può essere svolta assegnando un qualunque valore ai diversi gradi di libertà.

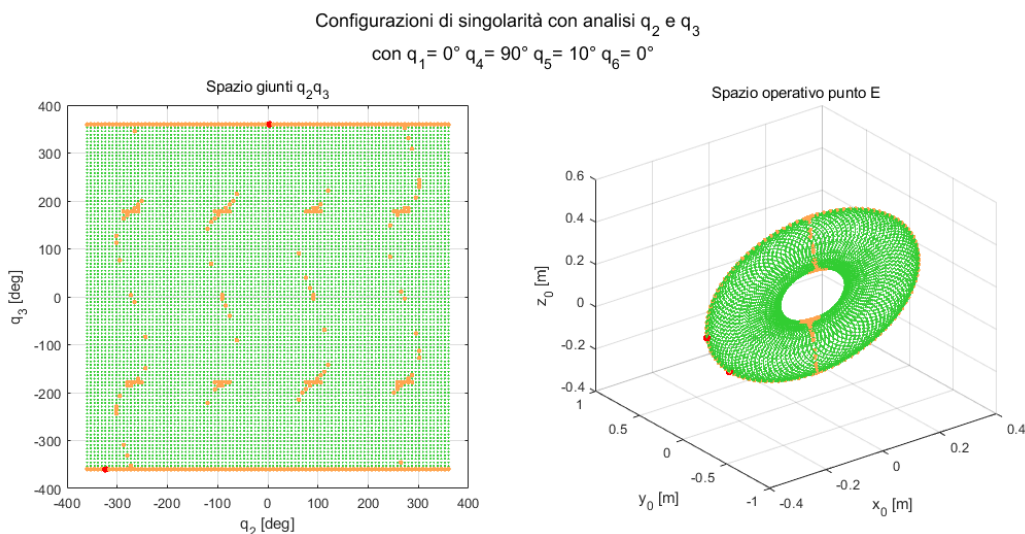


Figura 2.25 - Singolarità in spazio giunti q_2 - q_3 e spazio operativo

Scelti due punti, rispettivamente, uno con flag rosso (configurazione di singolarità) e uno con flag giallo (configurazione prossima alla singolarità) dalla Figura 2.25, si riportano, in Figura

2.26, le due configurazioni del robot identificando in rosso quella in configurazione di singolarità e in arancione quella prossima alla singolarità oltre che, in verde, una configurazione *safe*. Nello specifico, le due singolarità in analisi sono dette singolarità di gomito.

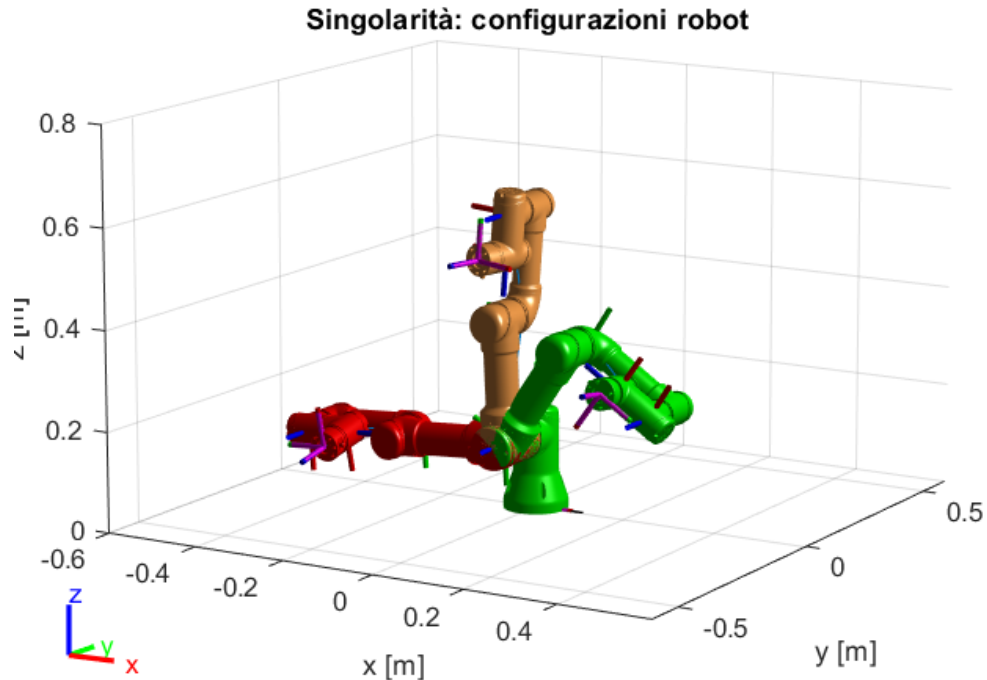


Figura 2.26 - Esempi di configurazioni: singolarità e prossima alla singolarità

Inoltre, è possibile rappresentare, sia in spazio giunti che in spazio operativo, per ciascun punto il valore stesso del determinante della matrice jacobiana, come riportato in Figura 2.27 e in Figura 2.28 [51].

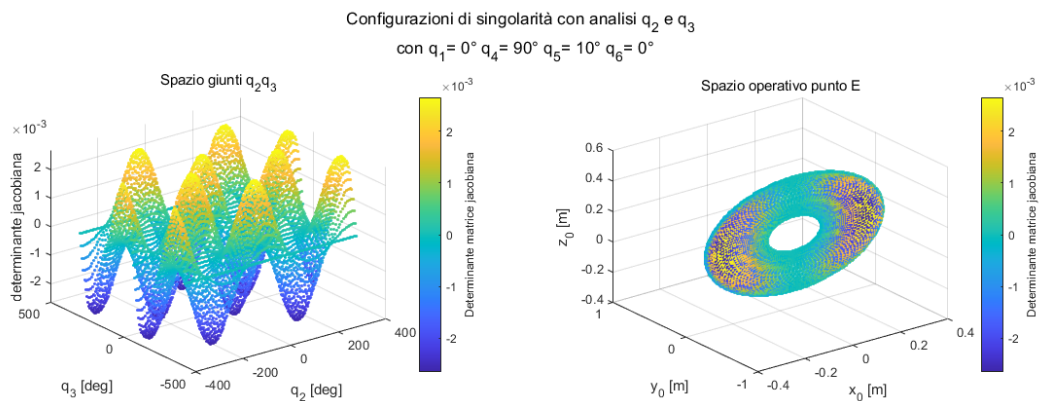


Figura 2.27 - Andamento del determinante della matrice jacobiana in spazio giunti q_2 - q_3 e spazio operativo

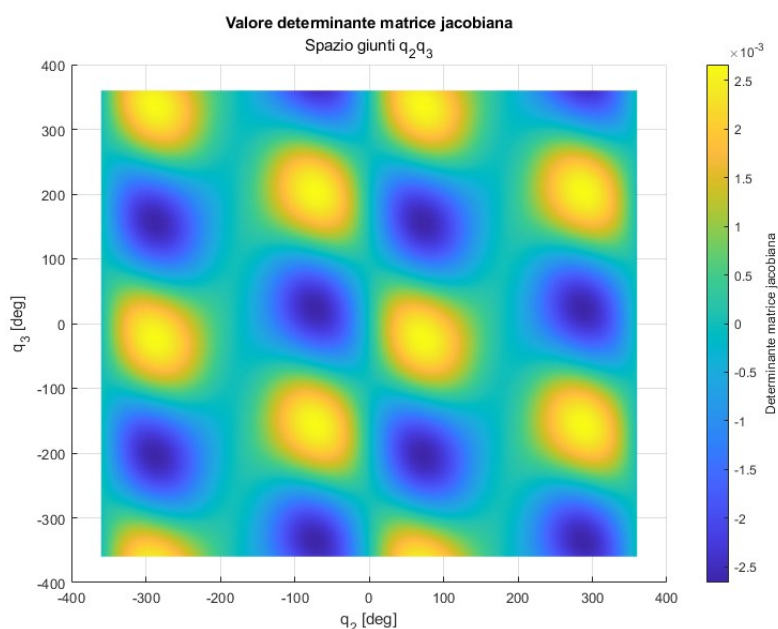


Figura 2.28 - Andamento del determinante della matrice jacobiana in spazio giunti: mappatura

2.4.2 Analisi delle singolarità in spazio operativo

Si esegue una mappatura dello spazio operativo in termini del valore del determinante della matrice jacobiana avendo definito i sei di gradi di libertà utilizzando il metodo Monte Carlo tradizionale. Il risultato di tale analisi è riportato in Figura 2.29.

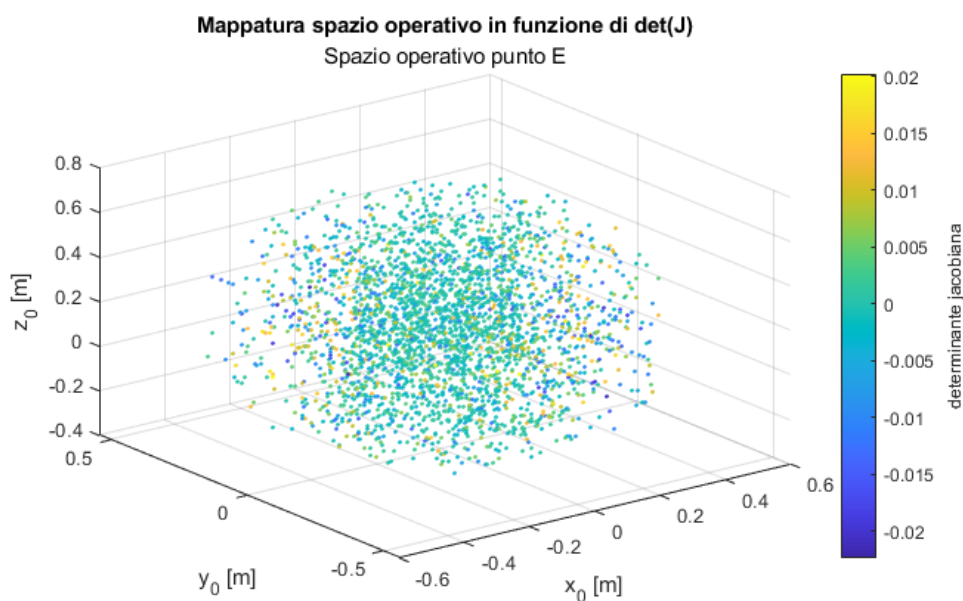


Figura 2.29 - Andamento del determinante della matrice jacobiana in spazio operativo complessivo

2.5 Auto-collisioni

Si analizza lo spazio di lavoro del robot concentrandosi sulle condizioni di auto-collisione, ossia i casi in cui la posa del robot genera compenetrazione tra i link del robot stesso.

2.5.1 Variazione di una coppia gradi di libertà: q_2 e q_3

Inizialmente si analizza lo spazio giunti mantenendo fissi i gradi di libertà di polso e il primo grado di libertà di braccio e, per ogni coppia q_2 e q_3 , si ricava la posa del robot e si determina se tale posa genera condizioni di auto-collisione. I gradi di libertà fissi sono stati posti pari a:

$$q_1 = 0^\circ,$$

$$q_4 = 50^\circ,$$

$$q_5 = 100^\circ$$

$$q_6 = 0^\circ.$$

I risultati, sia in termini di spazio giunti [57] che di spazio operativo, sono riportati in Figura 2.30 dove:

- Flag **verde**: rappresenta una configurazione *safe*;
- Flag **rosso**: rappresenta una configurazione di auto-collisione.

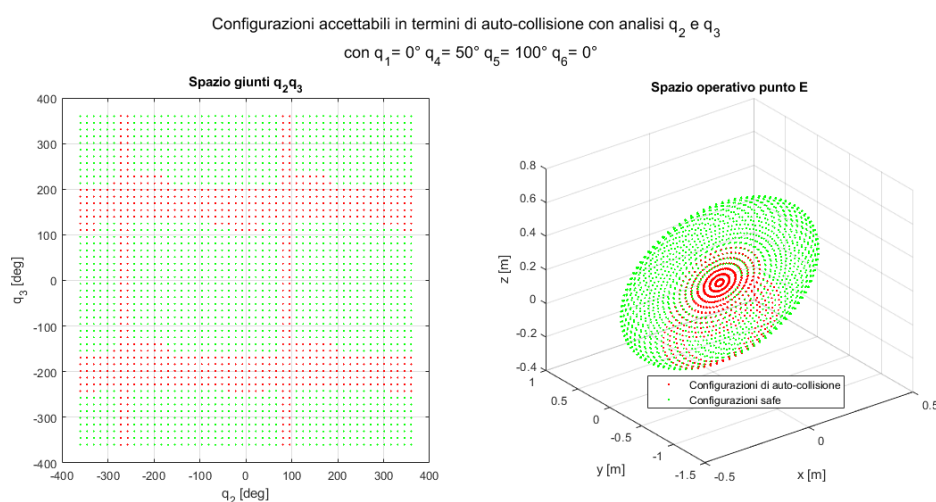


Figura 2.30 - Analisi spazio giunti q_2, q_3 in termini di auto-collisione

Inoltre, in Figura 2.31, si riportano due esempi di pose del robot: una in condizioni di auto-collisione (rappresentata in rosso) e una *safe* (rappresentata in verde). In particolare, la configurazione di auto-collisione viene rappresentata con una mesh di collisione, ossia i corpi

del robot vengono approssimati con una geometria con un volume leggermente maggiore rispetto a quello reale [53].

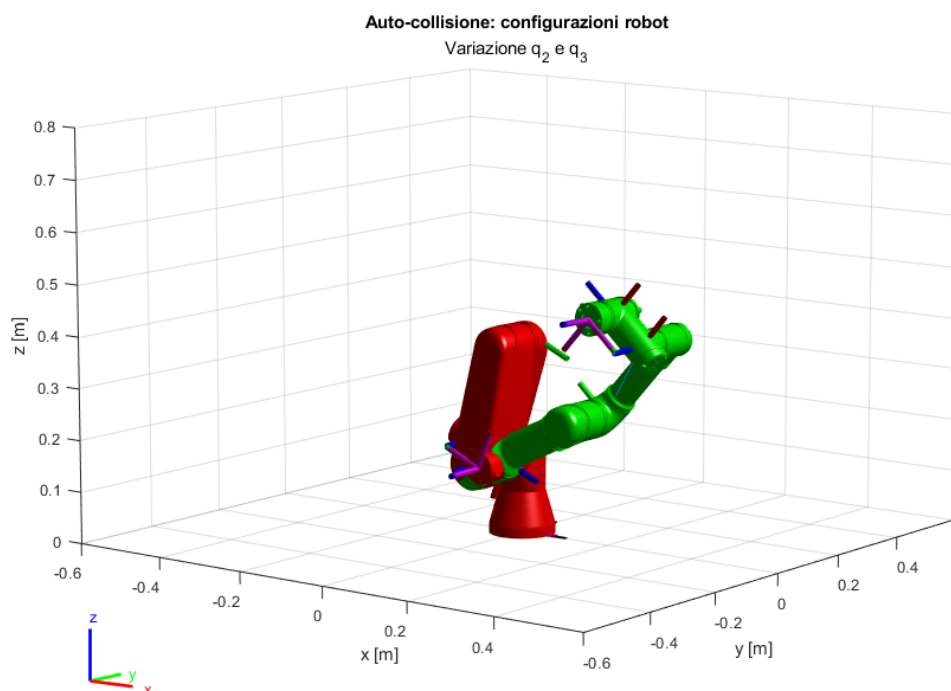


Figura 2.31 - Esempi di configurazioni: configurazione auto-collisione e configurazione safe con variazione q_2, q_3

2.5.2 Variazione di una terna di gradi di libertà: q_2, q_3 e q_4

Allo stesso modo, si analizza la terna di gradi di libertà q_2, q_3 e q_4 mantenendo la legenda (flag rosso = auto-collisione e flag verde = safe) e fissando i gradi di libertà:

$$q_1 = 0^\circ,$$

$$q_5 = 100^\circ,$$

$$q_6 = 0^\circ.$$

Per ogni terna di valori in spazio giunti, si identifica il corrispondente punto in spazio operativo. Risulta evidente, dai risultati riportati in Figura 2.32, che avvicinandosi al centro dello spazio di lavoro aumentano le configurazioni di auto-collisione in quanto il robot risulta in posizione *raccolta*, come visibile in Figura 2.33.

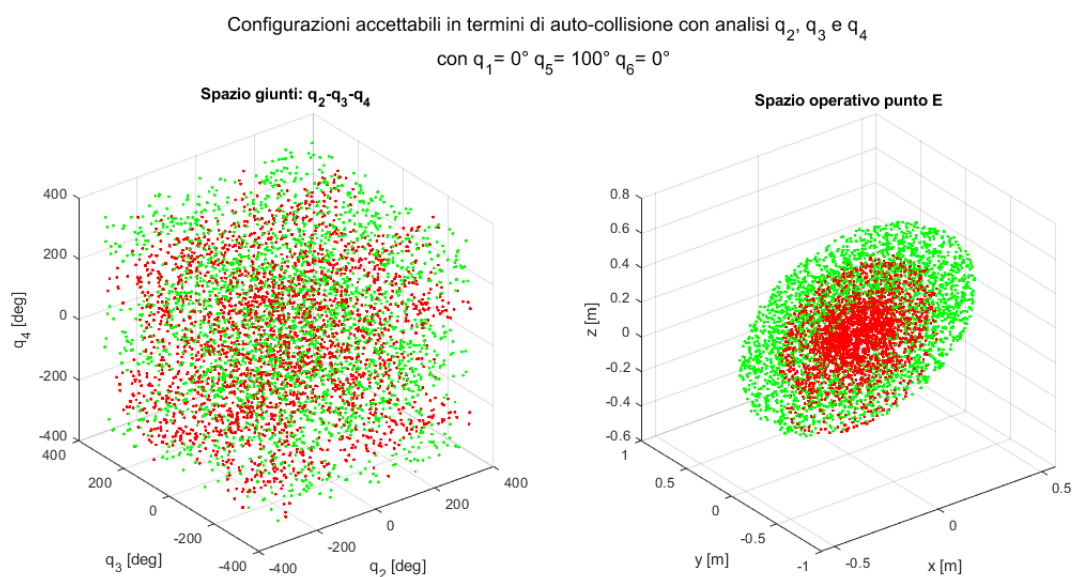


Figura 2.32 - Analisi spazio giunti $q_2q_3q_4$ in termini di auto-collisione

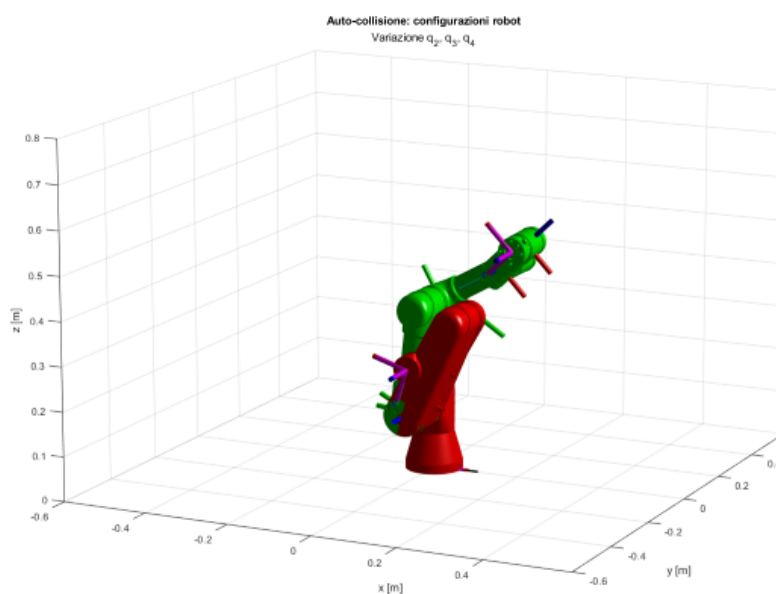


Figura 2.33 - Esempi di configurazioni: configurazione auto-collisione e configurazione safe con variazione q_2, q_3, q_4

2.5.3 Variazione di un set di gradi di libertà: q_2, q_3, q_4 e q_5

Ponendo pari a 0° il grado di libertà di base e il grado di libertà q_6 , si analizzano lo spazio giunti e lo spazio operativo in termini di auto-collisione facendo variare i gradi di libertà q_2, q_3, q_4 e q_5 nei loro range.

In questo caso, per poter visualizzare lo spazio giunti, trattandosi di uno spazio a quattro dimensioni, si è utilizzata la funzione *scatter3* di MATLAB (Figura 2.34):

- I tre assi cartesiani identificano, rispettivamente, i gradi di libertà q_2 , q_3 e q_4 ;
- Il valore del grado di libertà q_5 è stato rappresentato tramite una scala di colori;
- L'informazione riguardante l'auto-collisione è stata fornita mediante il marker:
 - Un punto quando la configurazione è *safe*;
 - Una croce quando la configurazione determina auto-collisione.

I risultati in spazio giunti e spazio operativo sono rispettivamente in Figura 2.34 e in Figura 2.35: risulta evidente che la lettura delle informazioni così rappresentate in spazio giunti è difficoltosa.

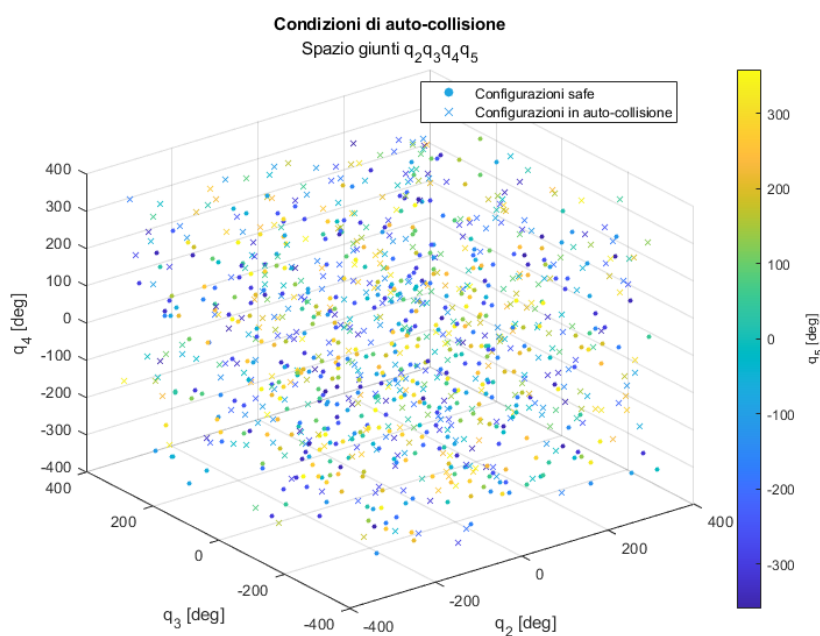


Figura 2.34 - Analisi spazio giunti q_2, q_3, q_4, q_5 in termini di auto-collisione

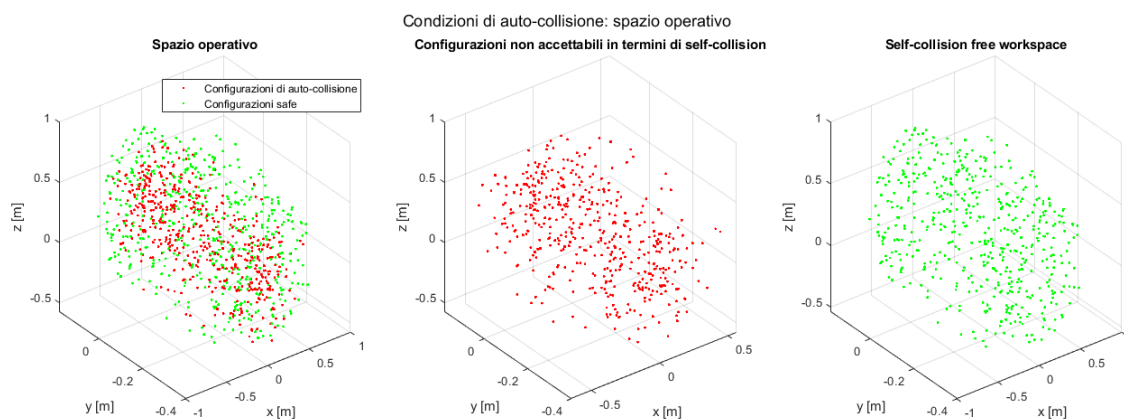


Figura 2.35 - Analisi spazio operativo con variazione q_2, q_3, q_4, q_5 in termini di auto-collisione

2.5.4 Considerazioni sul metodo di mappatura in termini di auto-collisione

Il metodo proposto può essere applicato a qualsiasi coppia, terna o set di gradi di libertà andando anche a modificare i valori dei gradi di libertà fissi. Inoltre, se si volesse realizzare uno studio più approfondito, si potrebbe associare, ad ogni punto di auto-collisione un'informazione di quali sono i link che determinano tale collisione.

Inoltre, si potrebbe analizzare lo spazio di lavoro a settori: prima si analizzano grandi aree poco dense e poi si infittiscono le zone in cui si verifica auto-collisione in modo da poter determinare dei range di accettabilità dei singoli gradi di libertà.

Ciò nonostante, il metodo utilizzato in questo capitolo non tiene conto della molteplicità di soluzioni della cinematica inversa; infatti, per come sono stati scritti i codici di calcolo, per ogni set di valori dei gradi di libertà si verifica la condizioni di auto-collisione e si rappresenta il corrispondente punto nello spazio operativo. Tuttavia, un punto nello spazio operativo che viene in questo modo definito non accettabile potrebbe risultare accettabile utilizzando una diversa soluzione del problema di cinematica inversa. Pertanto, potrebbe essere più utile utilizzare il metodo contrario (Figura 2.36):

- 1) Si definisce una posa nello spazio operativo;
- 2) Per tale posa si calcolano le soluzioni del problema di cinematica inversa;
- 3) Delle otto possibili soluzioni si analizzano solo quelle che rispettano i limiti di giunto e che sono realizzabili in termini di geometria del robot;
- 4) Si analizzano tali soluzioni accettabili in funzione dell'auto-collisione e si assegna un flag al punto:
 - a. Flag non accettabile: configurazione non realizzabile in spazio operativo;
 - b. Flag **pallino verde**: configurazione *safe*;
 - c. Flag **pallino rosso**: configurazione di auto-collisione.

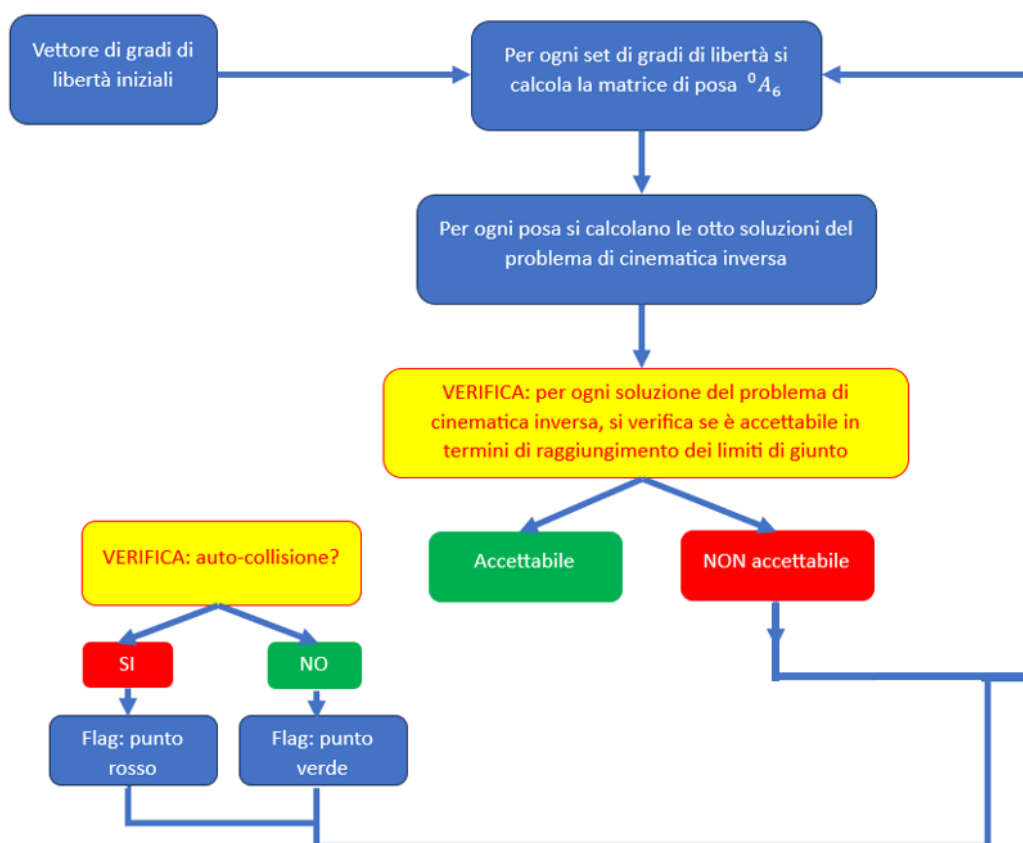


Figura 2.36 - Riassunto processo ottimizzazione analisi auto-collisioni

Tale metodo viene applicato al caso presentato nel paragrafo 2.5.1 con analisi della variazione di q_2 e q_3 avendo posto fissi:

$$q_1 = 0^\circ,$$

$$q_4 = 50^\circ,$$

$$q_5 = 100^\circ,$$

$$q_6 = 0^\circ.$$

Il risultato è riportato in Figura 2.37. Confrontando tale risultato con quello ottenuto con il metodo non ottimizzato (Figura 2.30) risulta evidente che sono molto poche le pose del robot che hanno tutte e otto le soluzioni del problema di cinematica inversa che generano auto-collisione.

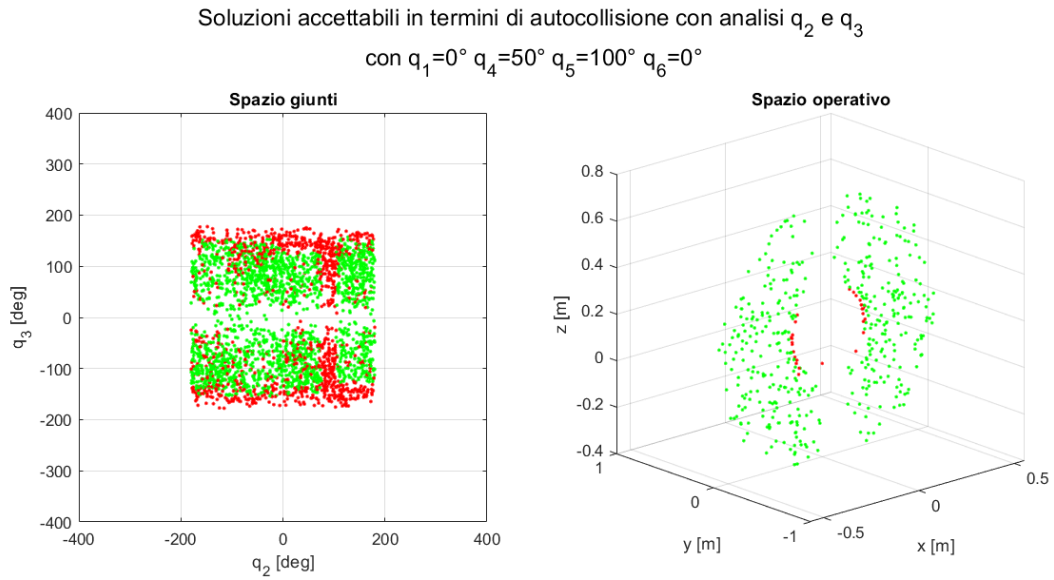


Figura 2.37 - Analisi spazio giunti q_2, q_3, q_4 in termini di auto-collisione con metodo ottimizzato

Inoltre, per quanto riguarda la Figura 2.37, è possibile notare che i gradi di libertà variano all'interno di un range di $\pm 180^\circ$ anche se il limite imposto è pari a $\pm 360^\circ$: ciò è dovuto al fatto che le coppie di gradi di libertà sono calcolate a partire dalla posa del TCP nello spazio operativo per cui nella soluzione di cinematica inversa, per come è risolto il problema, non si raggiungono mai i limiti geometrici di $\pm 360^\circ$ che corrispondono a due giri completi.

Infine, si riporta in Figura 2.38 lo spazio operativo analizzato in Figura 2.37 con evidenziato il numero di soluzioni accettabili per ciascun punto dello spazio operativo.

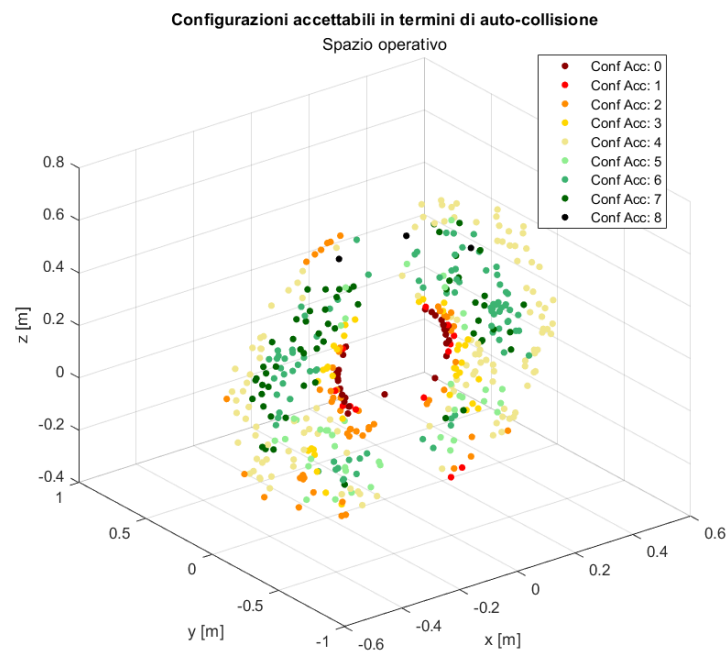


Figura 2.38 - Configurazioni accettabili in spazio operativo con metodo ottimizzato

2.6 Orientazione fissa dell'end effector

Dopo aver analizzato il generico spazio di lavoro del robot UR3, si è deciso di fissare la posa del TCP ([48]), posto in corrispondenza del punto end effector E (in quanto, in questa parte, non si è interessati all'installazione di un tool sulla flangia terminale). In particolare, si desidera avere gli assi orientati come:

- Asse $x_{TCP} \equiv x_E$ coincidente con y_{base}
- Asse $y_{TCP} \equiv y_E$ coincidente con z_{base}
- Asse $z_{TCP} \equiv z_E$ coincidente con x_{base}

Per cui si ottiene la seguente matrice di posa del TCP rispetto alla base fissa del robot:

$${}^0A_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & x \\ 1 & 0 & 0 & y \\ 0 & 1 & 0 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

In Figura 2.39 si riporta un esempio di configurazione del robot con l'identificazione del sistema di riferimento di base fisso (SR_{base}) e del sistema di riferimento del TCP (SR_{TCP}) che è posto in corrispondenza dell'origine del sistema di riferimento associato al corpo 6.

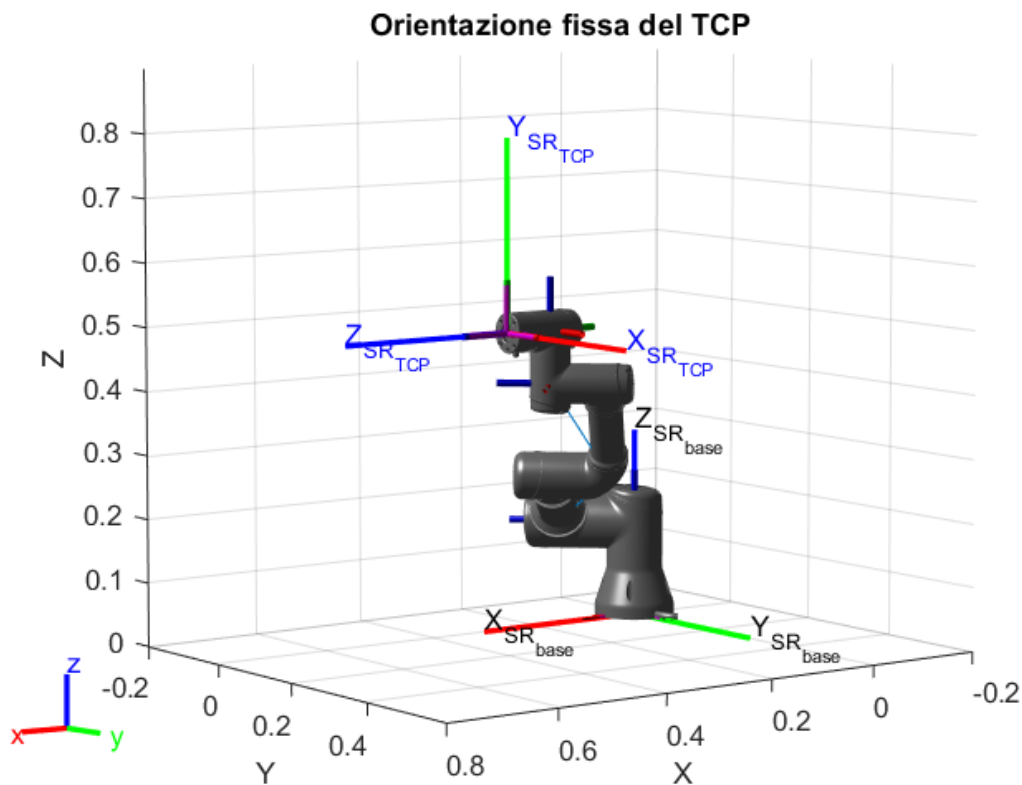


Figura 2.39 - Esempio di configurazione con orientazione fissa del TCP

2.6.1 Sottospazio di lavoro

Avendo fissato l'orientazione del TCP, si ottiene uno spazio di lavoro ridotto rispetto a quello realizzabile dal robot: in Figura 2.40 si riporta il sottospazio di lavoro ottenuto con l'orientazione fissata del TCP mentre in Figura 2.41 si riporta un confronto tra lo spazio di lavoro complessivo e il sottospazio ottenuto.

I limiti del sottospazio di lavoro sono i seguenti:

- $-0.4 < x_{TCP} < 0.55$
- $-0.5 < y_{TCP} < 0.5$
- $-0.4 < z_{TCP} < 0.7$

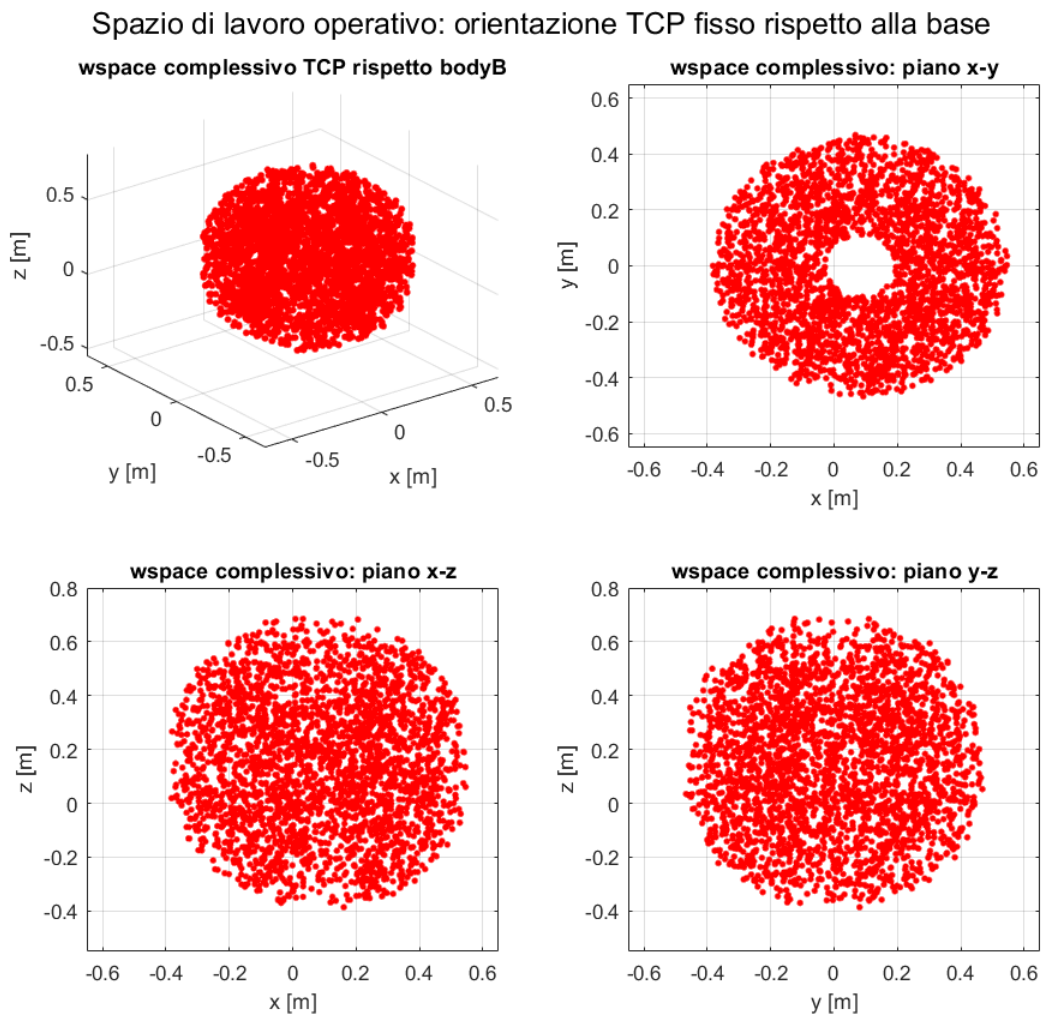


Figura 2.40 - Sottospazio di lavoro con orientazione TCP fissata

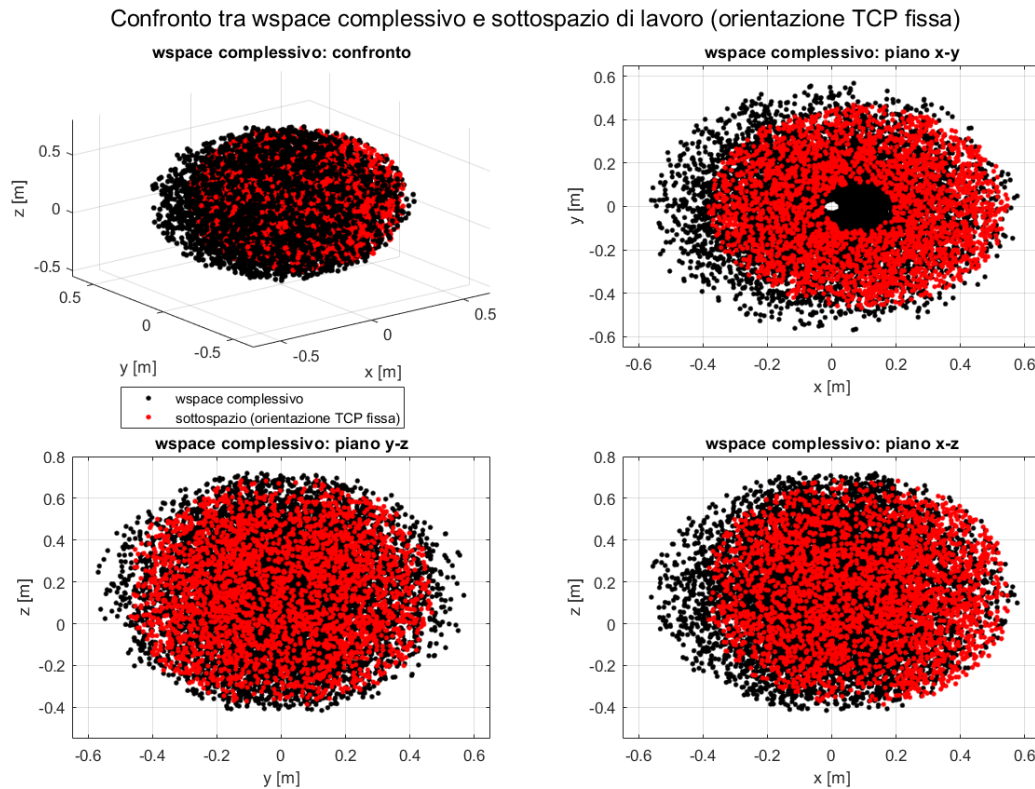


Figura 2.41 - Confronto tra spazio di lavoro complessivo e sottospazio di lavoro definito dall'orientazione fissa del TCP

Risulta evidente che il sottospazio di lavoro è compreso nei limiti dello spazio di lavoro complessivo e la riduzione dei limiti è dovuta all'orientazione fissata del TCP che rende alcuni punti dello spazio di lavoro complessivo non raggiungibili a causa dei limiti di giunto e della geometria stessa dei link. Nel capitolo seguente si riportano alcuni esempi relativi ai limiti del sottospazio di lavoro che evidenziano le pose limite del robot.

2.6.2 Analisi dei limiti del sottospazio di lavoro

Per evidenziare i limiti del sottospazio di lavoro, si riportano degli esempi di configurazione del robot.

Limite interno

Si analizza, per primo, il limite interno del sottospazio di lavoro: la parte di sottospazio non raggiungibile nei pressi della base è definita da un cilindro, con altezza pari all'intero campo di lavoro lungo l'asse z, il cui cerchio di base ha le seguenti coordinate:

- Centro: $\begin{cases} x = 0.0844 \text{ m} \\ y = 5.204 \cdot 10^{-4} \text{ m} \end{cases}$
- Raggio: 0.111 m

In Figura 2.42, Figura 2.43 e Figura 2.44 si riportano, rispettivamente, tre esempi di configurazioni con posa del TCP al limite del sottospazio di lavoro interno.

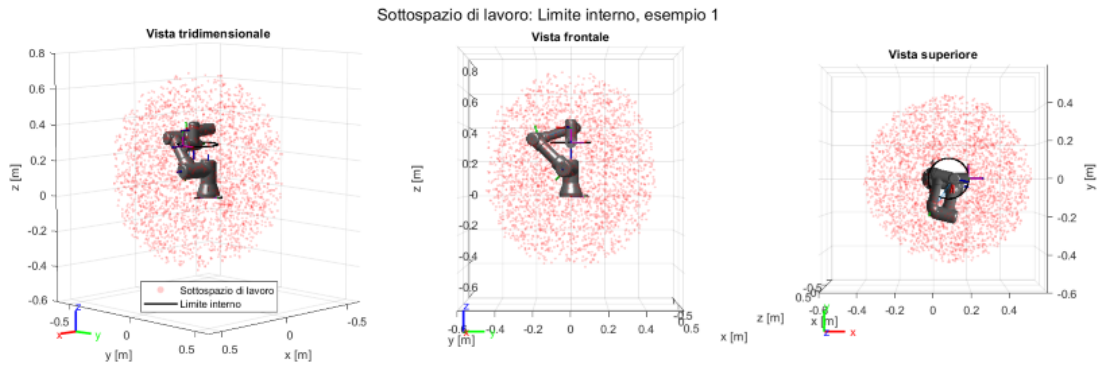


Figura 2.42 - Limite interno del sottospazio di lavoro: esempio 1

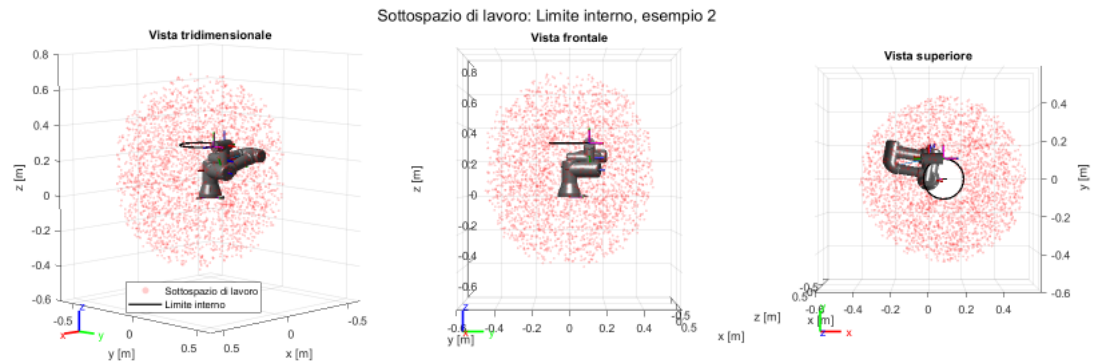


Figura 2.43 - Limite interno del sottospazio di lavoro: esempio 2

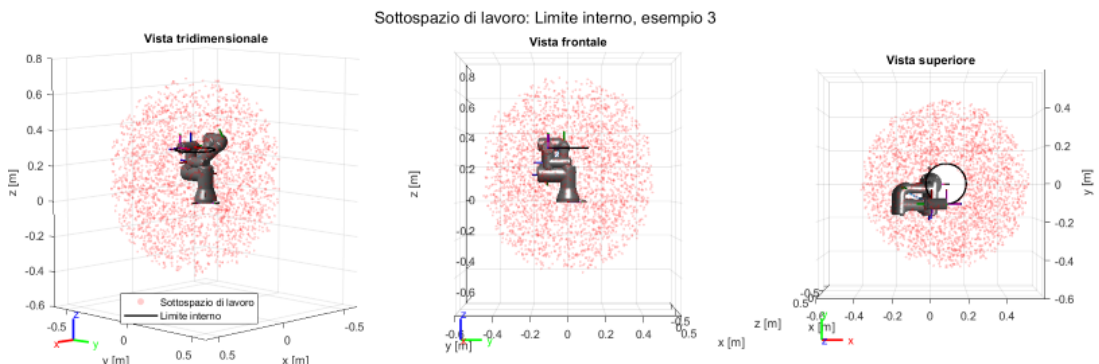


Figura 2.44 - Limite interno del sottospazio di lavoro: esempio 3

¹ Per ricavare il centro del cerchio sono state utilizzate le coordinate di due punti ottenuti dal sottospazio di lavoro (Figura 2.40) e si è utilizzata la funzione *circ_cent* [61]

Limite esterno massimo

Considerando, invece, il limite esterno del sottospazio di lavoro risulta evidente che questo ha estensione massima in corrispondenza di $z = 0.22 \text{ m}$. In questo caso, non si ha un unico cilindro ma ad ogni piano z corrisponde un cerchio nel piano xy .

In Figura 2.45 si riportano tre esempi di configurazioni con TCP posizionato sul limite esterno massimo del sottospazio di lavoro che può essere identificato con i seguenti valori:

- Centro: $\begin{cases} x = 0.844 \text{ m} \\ y = 5.204 \cdot 10^{-4} \text{ m} \\ z = 0.22 \text{ m} \end{cases}$
- Raggio: 0.467 m

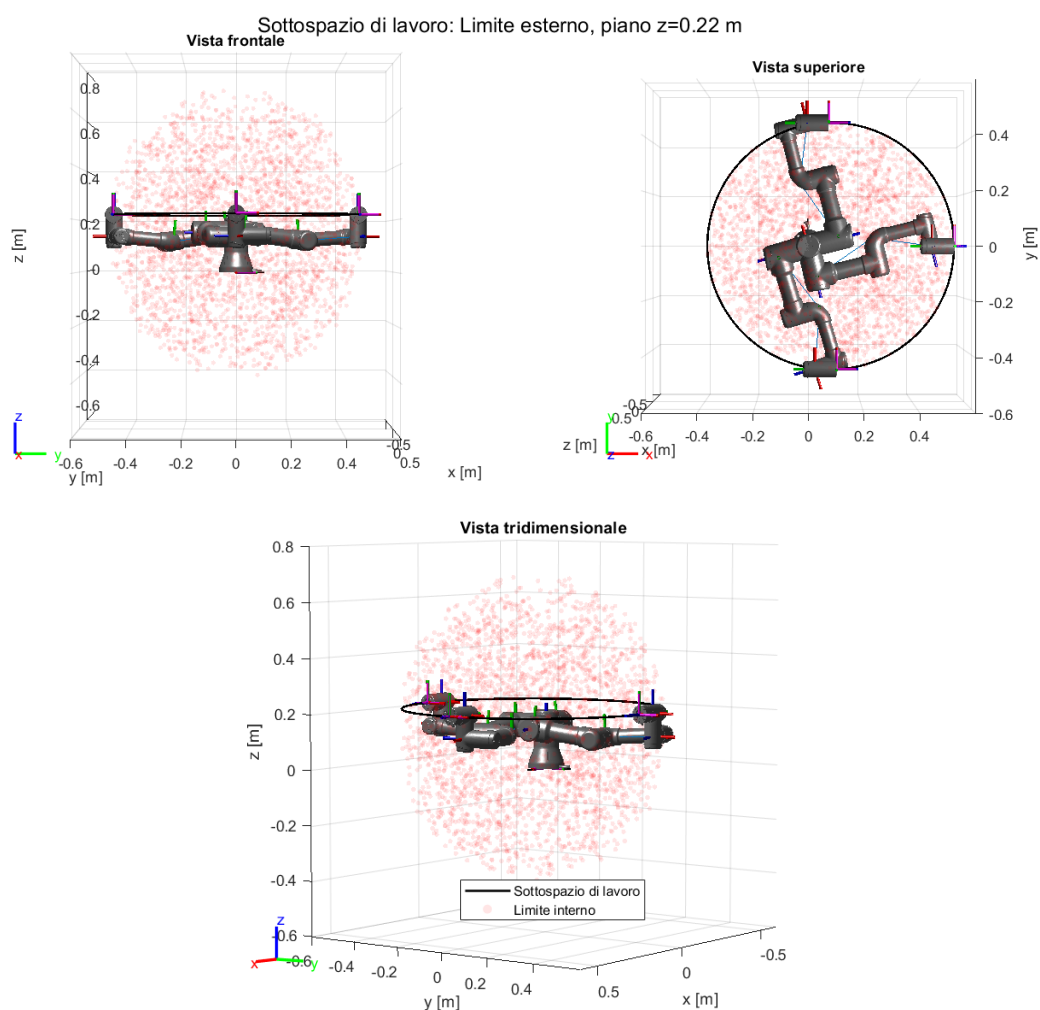


Figura 2.45 - Limite esterno del sottospazio di lavoro

Limite laterale

Per concludere l'analisi del sottospazio di lavoro, si analizza il limite laterale che può essere approssimato da una semi-ellisse come evidenziato in Figura 2.46.

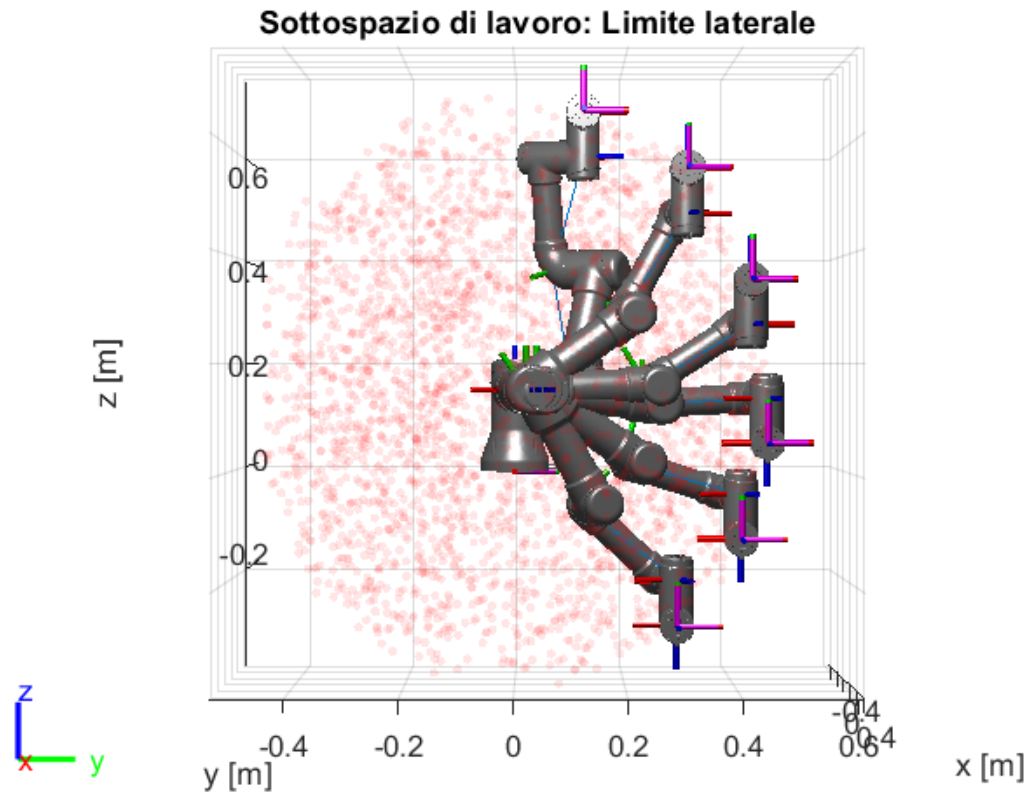


Figura 2.46 - Limite laterale del sottospazio di lavoro

2.7 Analisi piani

Una volta definito il sottospazio di lavoro con orientazione del TCP fissata (Figura 2.40), si passa all'analisi di alcuni piani: si analizzano diversi piani yz a diverse quote x. Nello specifico, si analizzano tre piani:

- Un piano vicino alla base: $x = 0.15 \text{ m}$
- Un piano intermedio: $x = 0.3 \text{ m}$
- Un piano all'estremo del campo di lavoro: $x = 0.5 \text{ m}$

Questi tre piani sono evidenziati, rispettivamente, in Figura 2.47.

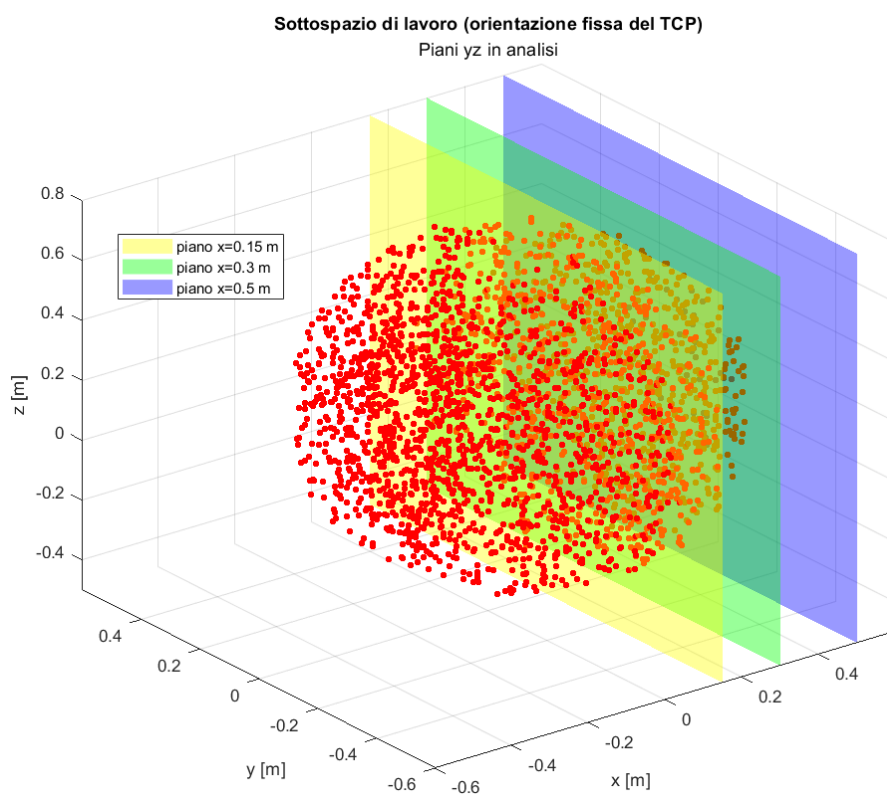


Figura 2.47 - Sottospazio di lavoro con orientazione TCP fissa: piani yz in analisi

2.7.1 Analisi completa di un piano yz intermedio

Considerando inizialmente il piano intermedio ($x = 0.3 \text{ m}$) si definisce il processo di analisi che verrà, successivamente, usato per analizzare gli altri due piani.

Metodo utilizzato

Di seguito si riporta il metodo utilizzato per analizzare i piani yz:

1. Scelta del piano yz da analizzare (quota x) e definizione dei limiti del piano;
2. Discretizzazione dei vettori y e z in funzione dei limiti del piano;
3. Determinazione della forma del piano:
 - a. Per ogni coppia y-z si determina la posa del TCP rispetto alla base avendo posto orientazione del TCP fissa rispetto alla base (equazione 2.8);
 - b. Utilizzando tale posa si calcolano, tramite la cinematica inversa, le otto soluzioni del problema di cinematica inversa associate alla posa in analisi: se almeno una di queste è realizzabile, in termini di limite di giunto e geometria dei link, allora la coppia y-z viene salvata come punto del sottospazio di lavoro.

Il risultato di primo passo, per il piano $x = 0.3\text{ m}$ è riportato in Figura 2.49.

4. Analisi della destrezza: avendo determinato, al punto precedente, le soluzioni di cinematica inversa di ciascuna posa nel sottospazio, si calcola, per ogni punto, quante delle otto possibili soluzioni sono accettabili in termini di raggiungimento dei limiti di giunto. Si ottiene un secondo risultato (esempio piano $x = 0.3\text{ m}$ in Figura 2.50) in cui si rappresenta il sottospazio di lavoro *colorato* in funzione del numero di soluzioni accettabili.
5. Analisi delle auto collisioni: noto, per ogni punto del sottospazio di lavoro, il numero delle soluzioni accettabili in termini di limiti di giunto si determina quante delle soluzioni accettabili sono accettabili anche in termini di auto-collisione. Per fare ciò, si analizzano le soluzioni accettabili utilizzando la funzione *checkCollision* del *Robotics System Toolbox* di MATLAB che restituisce valore 1 quando la configurazione determina auto-collisione tra i corpi del robot e valore 0 quando si è in condizioni *safe* ossia il robot non collide con se stesso. Anche in questo caso, si riporta in Figura 2.51 il risultato relativo al piano $x = 0.3\text{ m}$.
6. Analisi della posizione del braccio rispetto al TCP: come ultima analisi, si considerano le soluzioni accettabili, sia in termini di limiti di giunto che auto-collisioni. Si determina, per ogni soluzione di ogni posa, se uno dei link del robot è posizionato oltre al TCP lungo l'asse x . Per determinare tale condizione, per ogni configurazione, si calcolano le pose dei sistemi di riferimento associate ai corpi 2, 3, 4 e 5 del robot e si confronta la quota x di questi sistemi di riferimento con la quota x del sistema di riferimento associato al TCP: se la quota x del sistema di riferimento di uno dei corpi è maggiore di quella del TCP, allora la configurazione è considerata non accettabile.

In Figura 2.48 si riporta uno schema che riassume in breve il processo di analisi appena descritto.

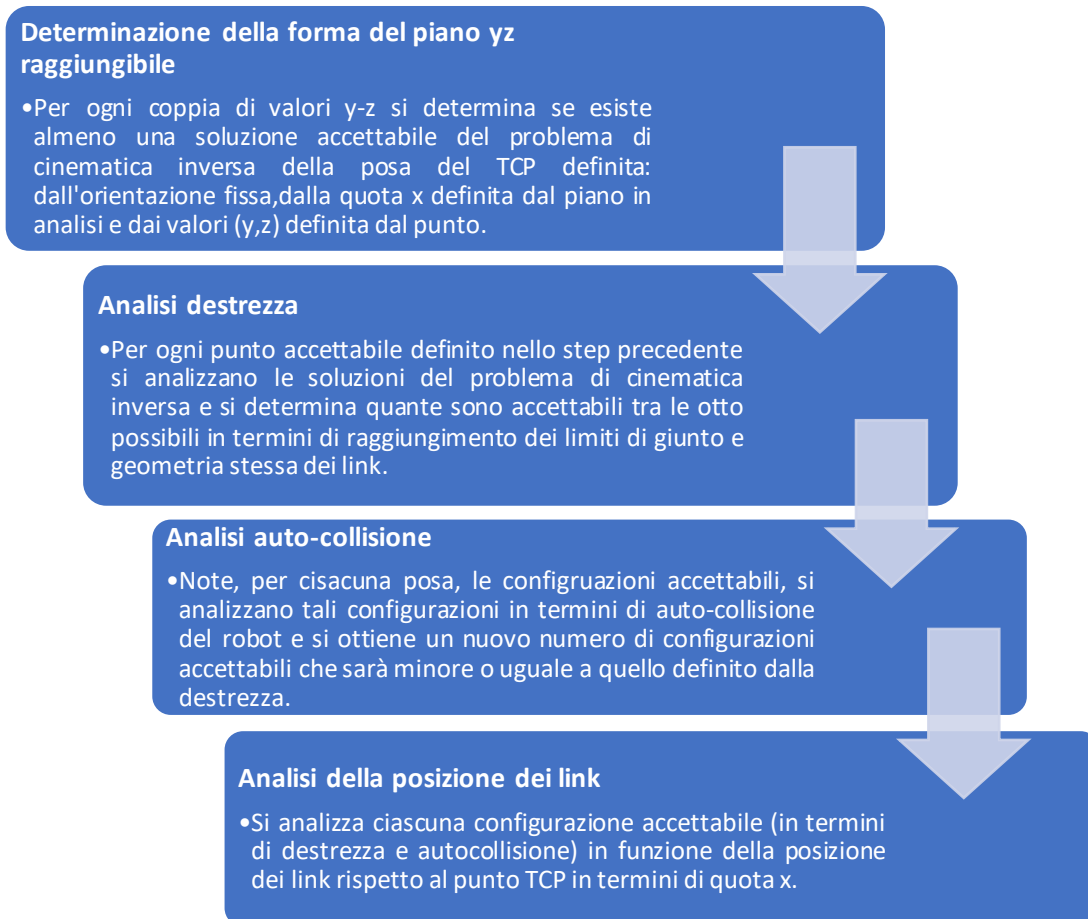


Figura 2.48 - Schema riassuntivo della procedura di analisi dei piani yz

Piano $x = 0.3 m$

Utilizzando il metodo precedentemente spiegato si analizza il piano $x = 0.3 m$ e si riportano di seguito i risultati in termini di forma del piano raggiungibile con orientazione del TCP fissata, destrezza, auto-collisione e posizione dei link rispetto al TCP.

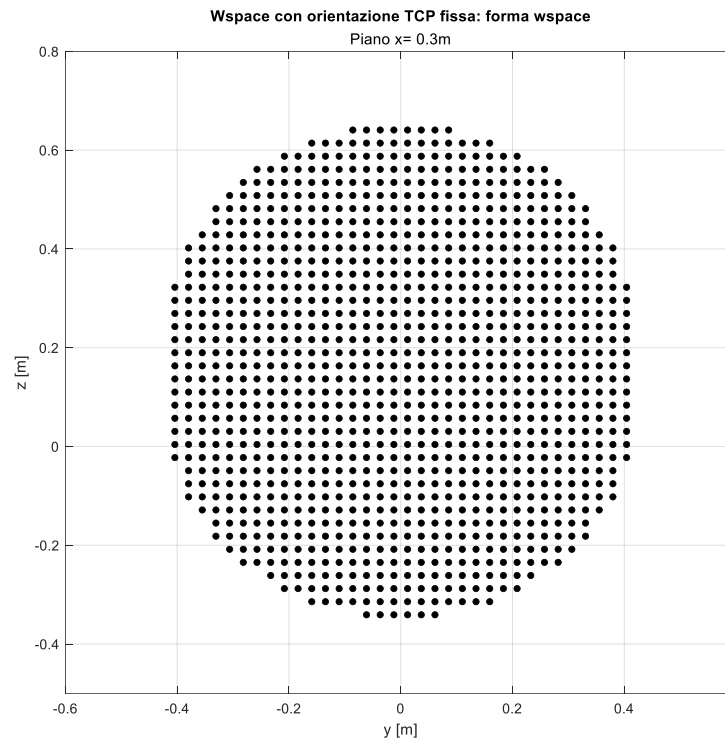


Figura 2.49 - Piano yz con $x=0.3\text{ m}$: forma dello spazio di lavoro

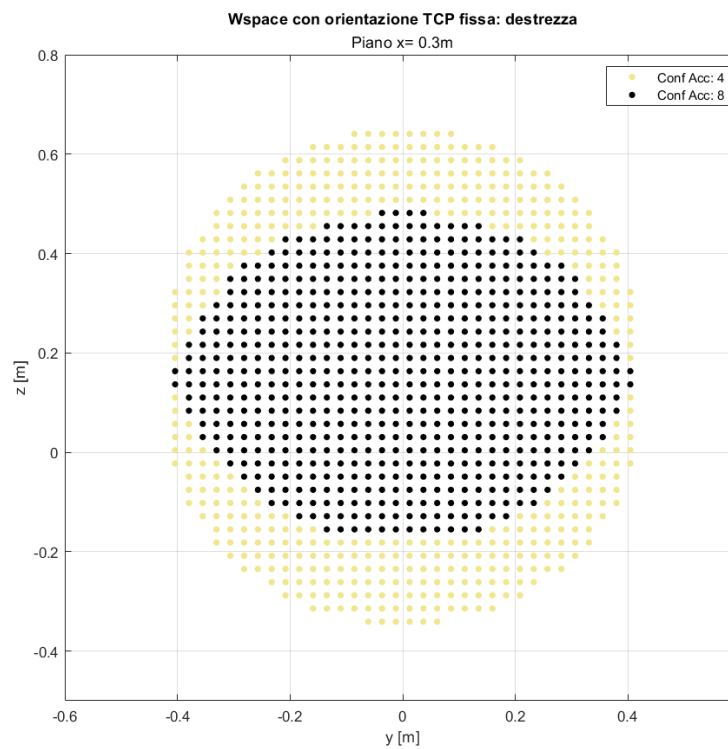


Figura 2.50 - Piano yz con $x=0.3\text{ m}$: analisi destrezza

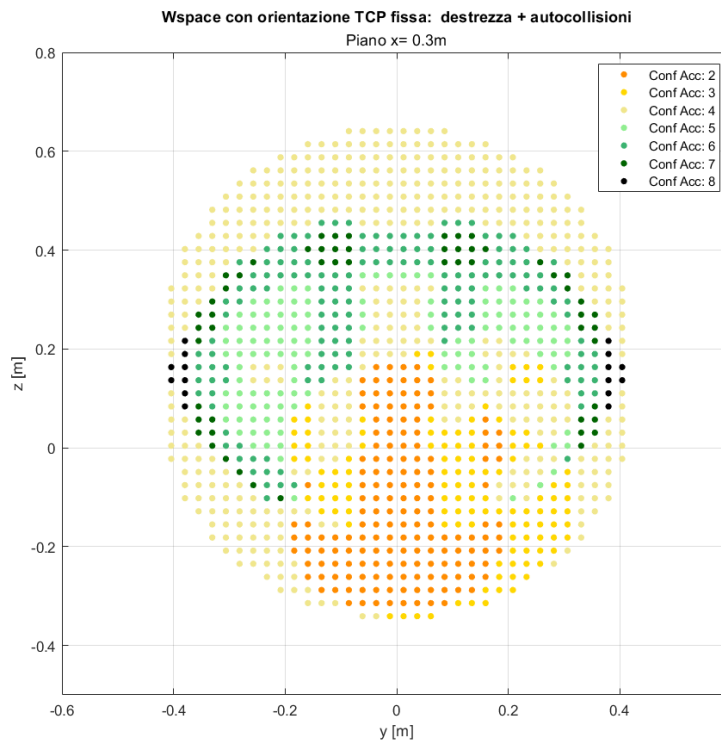


Figura 2.51 - Piano yz con $x=0.3 m$: analisi destrezza e auto-collisioni

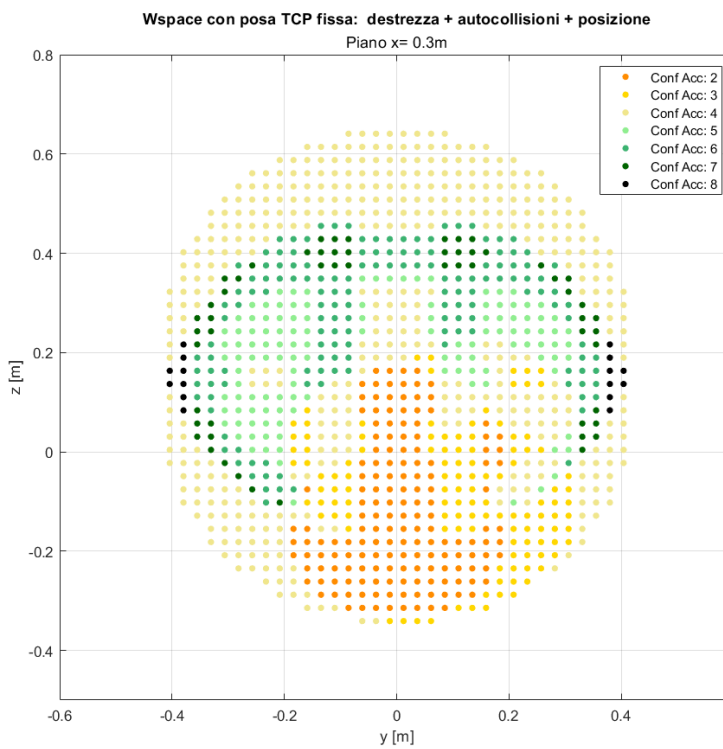


Figura 2.52 - Piano yz con $x=0.3 m$: analisi destrezza, auto-collisioni e posizioni link rispetto al TCP

Considerando i risultati riportati nelle figure sopra risulta evidente che:

- Analisi destrezza (Figura 2.50): i punti situati nella parte più interna dello spazio di lavoro possono essere realizzati con 8 diverse configurazioni mentre quelli situati all'estremo del campo di lavoro, come ci si aspettava, sono realizzabili con sole quattro soluzioni e ciò è dovuto sia ai limiti imposti sui giunti sia alla geometria dei link.
- Analisi auto-collisioni: è possibile suddividere lo spazio di lavoro in due zone, come riportato in Figura 2.53:
 - Zona I: trattandosi della parte alta dello spazio di lavoro in cui il robot risulta in configurazione più *distesa* non si verificano auto-collisioni.
 - Zona II: parte centrale e inferiore dello spazio di lavoro in cui il robot, per realizzare la posa, risulta in configurazione più *raccolta* da cui si originano le auto-collisioni.
- Analisi della posizione dei link rispetto al TCP: risulta evidente confrontando la Figura 2.52 con la Figura 2.51 che non si hanno configurazioni in cui alcun link del robot risulta in posizione *avanzata* rispetto al TCP. Questo si verifica in quanto il piano è sufficientemente lontano dalla base: un esempio di configurazioni con link che *sporgono* rispetto alla base sarà riportato nell'analisi del piano $x = 0.15 m$.

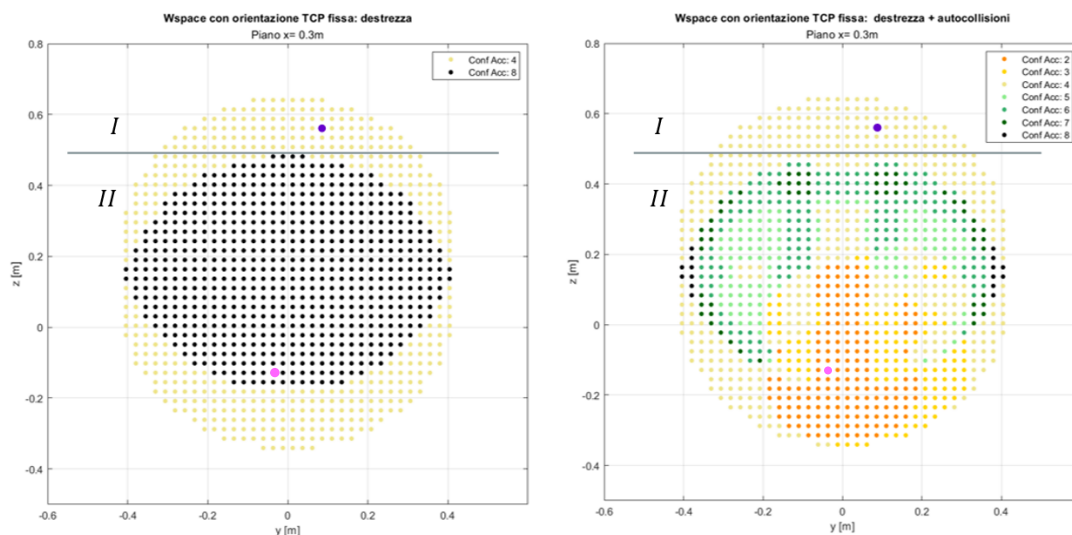


Figura 2.53 - Confronto e analisi spazio di lavoro piano $x=0.3 m$

Infine, per evidenziare quanto affermato nell'analisi del piano, si scelgono due pose nel piano operativo (punti A e B evidenziati, rispettivamente, in viola e rosa in Figura 2.53) e si riportano

le otto configurazioni ad esse associate in modo da evidenziare le configurazioni non accettabili e le differenze tra le diverse zone del piano.

Punto A

Si riporta, in Figura 2.54, la matrice contenente le otto soluzioni del problema di cinematica inversa e i vari indici secondo la seguente legenda:

- Prime 6 colonne (riquadrate in **blu**) rappresentano i sei gradi di libertà, in radianti;
- Colonna 7 (riquadrate in **rosso**) identifica la *raggiungibilità* della posa e assume:
 - Valore 0: quando la configurazione è realizzabile (limiti di giunto e geometria dei link);
 - Valore 2: quando la configurazione non è realizzabile
- Colonna 8 (riquadrate in **verde**) riporta l'analisi in termini di *auto-collisione* e *posizione* dei link rispetto al TCP e assume:
 - Valore 0: quando la configurazione è *safe*, ossia non si verificano auto-collisioni e nessun link sporge rispetto al TCP;
 - Valore 3: quando si è in configurazione di *auto-collisione*;
 - Valore 4: quando uno dei link del robot sporge oltre il TCP
- Colonna 9 (riquadrate in **azzurro**): identifica il corpo che sporge oltre il TCP, per cui assume:
 - Valore 0: quando non si ha alcun link che sporge;
 - Valore 1÷6: indica il corpo che sporge rispetto al TCP;
- Colonna 10 (riquadrate in **rosa**): riporta, per ciascuna configurazione, il valore dell'indice di prossimità ai limiti di giunto calcolato con il metodo 2 indice 1 (equazione 2.4) e assume:
 - Valore 1: se almeno uno dei gradi di libertà ha valore pari a quello limite;
 - Valore 0: quando tutti i gradi di libertà sono lontani dai valori limite;
- Colonna 11 (riquadrate in **marroncino**): riporta il valore del determinante della matrice Jacobiana per ciascuna configurazione.

0.8634	-2.6581	1.1306	-1.6141	0.7073	-3.1416	0	0	0	0.3333	-0.0063
0.8634	-1.6135	-1.1306	-0.3975	0.7073	-3.1416	0	0	0	0.3333	0.0063
0.8634	NaN	NaN	NaN	-0.7073	0	2.0000	0	0	0.1593	0
0.8634	NaN	NaN	NaN	-0.7073	0	2.0000	0	0	0.1593	0
3.0274	NaN	NaN	NaN	1.4566	0	2.0000	0	0	0.9298	0
3.0274	NaN	NaN	NaN	1.4566	0	2.0000	0	0	0.9298	0
3.0274	-1.5281	1.1306	-2.7441	-1.4566	3.1416	0	0	0	1.0000	-0.0097
3.0274	-0.4835	-1.1306	-1.5275	-1.4566	3.1416	0	0	0	1.0000	0.0097

Figura 2.54 - Soluzioni del problema di cinematica inversa del punto A

Mentre, in Figura 2.55, si riportano le quattro configurazioni raggiungibili, da cui si dimostra, come evidenziato in Figura 2.54, che non si hanno configurazioni di auto-collisione né braccio sporgente verso l'operatore in quanto il braccio è disteso verso la parte alta dello spazio di lavoro.

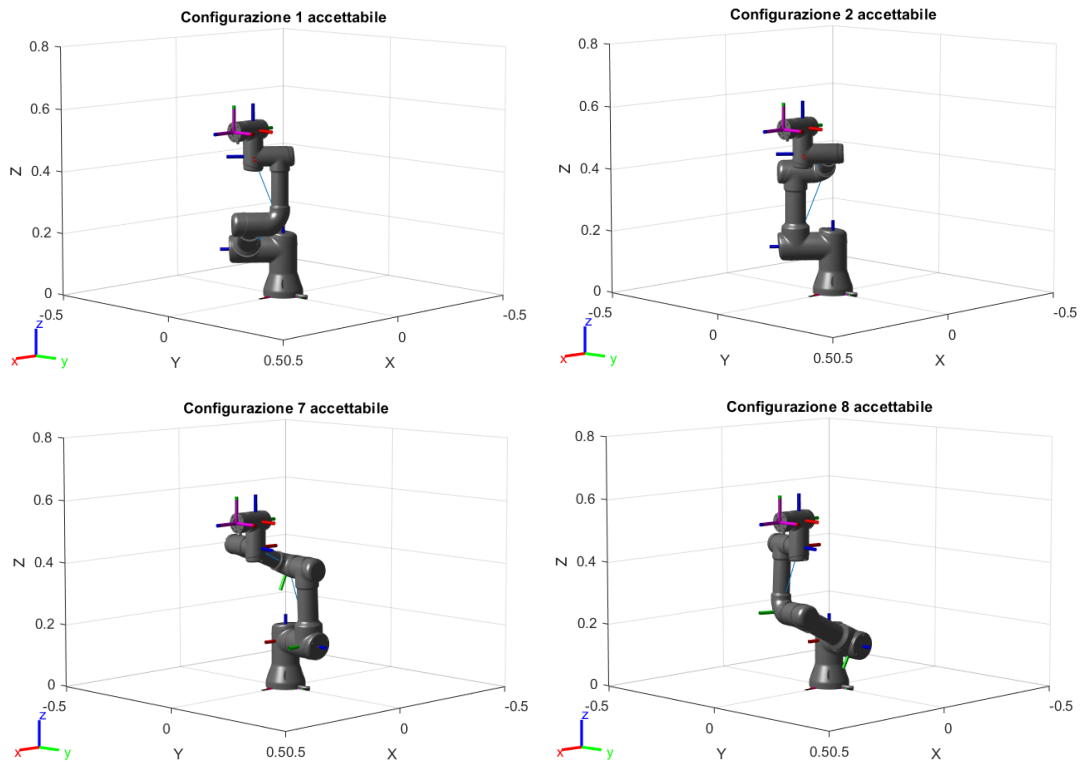


Figura 2.55 - Piano $x=0.3$, punto A

Per quanto riguarda gli esempi di configurazione riportati in Figura 2.55, si riporta in Tabella 2.5 la loro descrizione in funzione del posizionamento dei link.

Tabella 2.5 - Descrizione configurazioni piano $x=0.3$ m, punto A

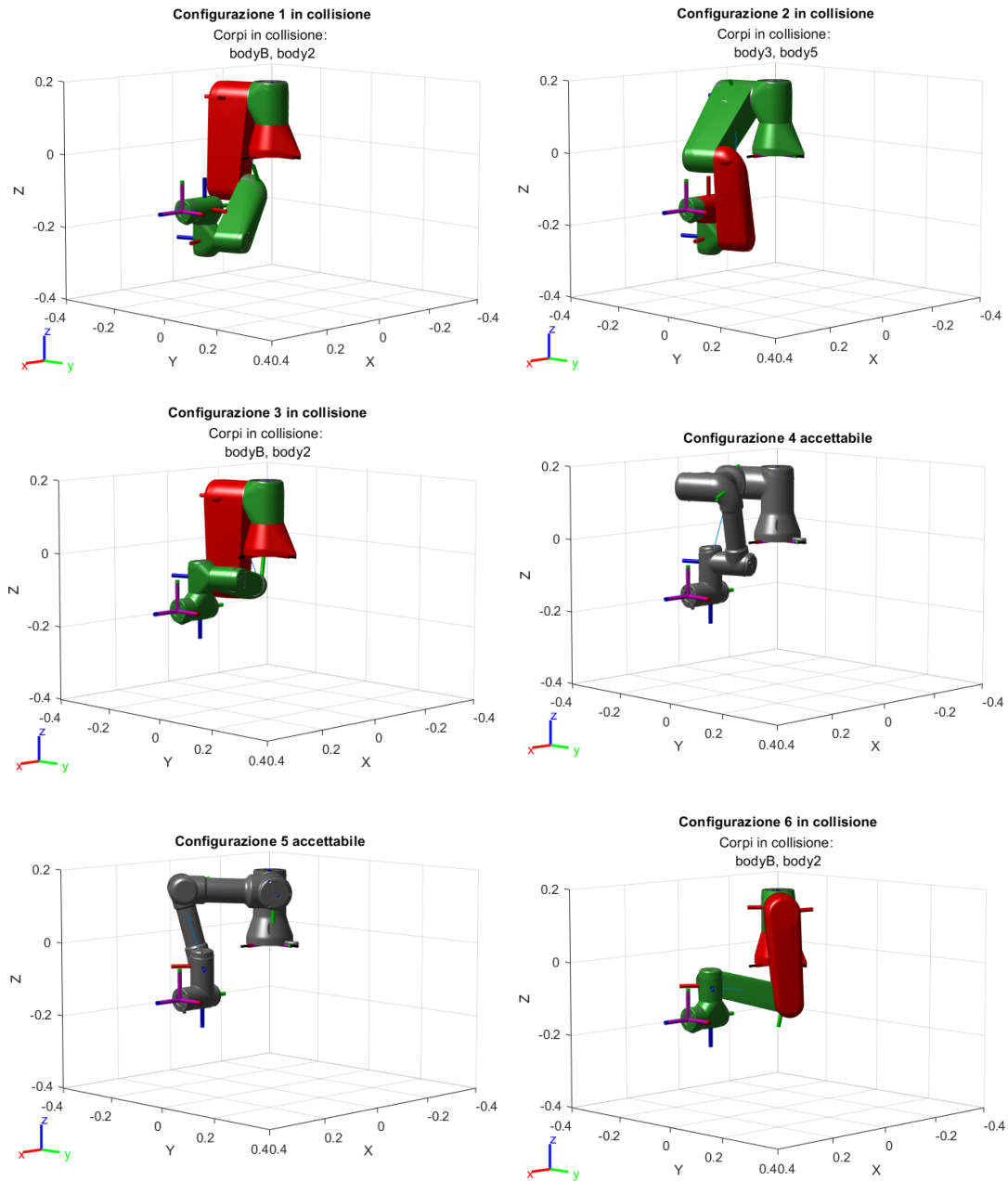
Configurazione	Handed (left/right)	Elbow (down/up)	Wrist (flipper/noflipped)
1	Right	Down	Noflipped
2	Right	Up	Noflipped
7	Left	Up	Noflipped
8	Left	Down	Noflipped

Punto B

Analogamente al punto A, si riportano, rispettivamente, in Figura 2.56 e Figura 2.57, la matrice delle soluzioni e le configurazioni ad esse associate.

0.3539	1.6358	0.9069	0.5990	1.2169	-3.1416	0	3.0000	0	0.3520	-0.0074
0.3539	2.4765	-0.9069	1.5719	1.2169	-3.1416	0	3.0000	0	0.6506	0.0074
0.3539	1.5042	1.8545	2.9245	-1.2169	0	0	3.0000	0	0.8707	0.0090
0.3539	-3.1048	-1.8545	-1.3238	-1.2169	0	0	0	0	0.3307	-0.0090
2.4539	-0.0368	1.8545	-1.8178	0.8831	0	0	0	0	0.6408	0.0074
2.4539	1.6374	-1.8545	0.2171	0.8831	0	0	3.0000	0	0.6408	-0.0074
2.4539	0.6650	0.9069	1.5697	-0.8831	3.1416	0	3.0000	0	1.0000	-0.0061
2.4539	1.5058	-0.9069	2.5426	-0.8831	3.1416	0	3.0000	0	1.0000	0.0061

Figura 2.56 - Soluzioni del problema di cinematica inversa del punto B



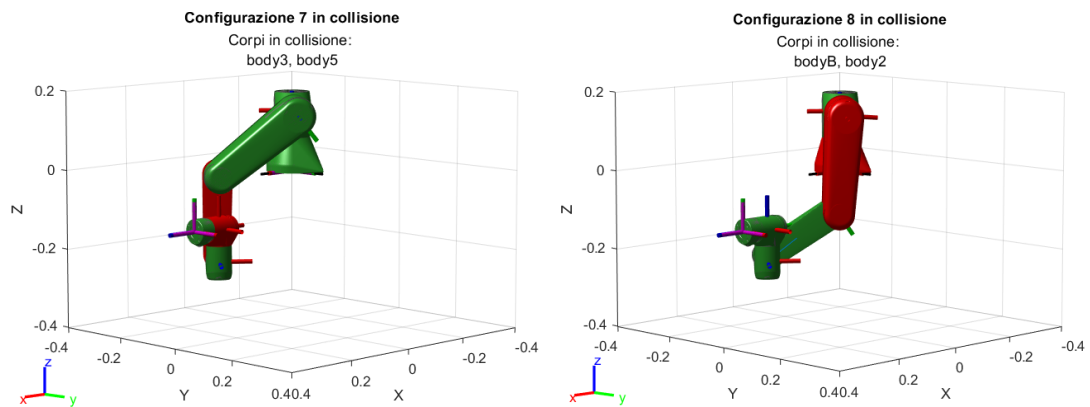


Figura 2.57 - Piano $x=0.3$ m, punto B

In questo modo è possibile evidenziare come, andando a lavorare nella parte bassa dello spazio di lavoro, il robot risulti in configurazione *raccolta* e ciò determina delle auto-collisioni; tuttavia, trattandosi di un piano intermedio sufficientemente lontano dalla base non si hanno configurazioni in cui uno dei link superiori, lungo l'asse x , il punto TCP.

Per quanto riguarda gli esempi di configurazione (Figura 2.57), si analizza, in Tabella 2.6, la posizione dei link.

Tabella 2.6 - Descrizione configurazioni piano $x=0.3$ m, punto B

Configurazione	Handed (left/right)	Elbow (down/up)	Wrist (flipped/noflipped)
1	Right	Down	Noflipped
2	Right	Up	Noflipped
3	Right	Down	Flipped
4	Right	Up	Flipped
5	Left	Up	Flipped
6	Left	Down	Flipped
7	Left	Up	Noflipped
8	Left	Down	Noflipped

2.7.2 Analisi piani yz

Utilizzando la procedura riportata in Figura 2.48 si analizzano i due piani definiti in precedenza: $x = 0.15$ m prossimo alla base e $x = 0.5$ m vicino all'estremo del campo di lavoro.

2.7.2.1 Forma dei piani yz con x fissata

Piano prossimo alla base (x=0.15 m)

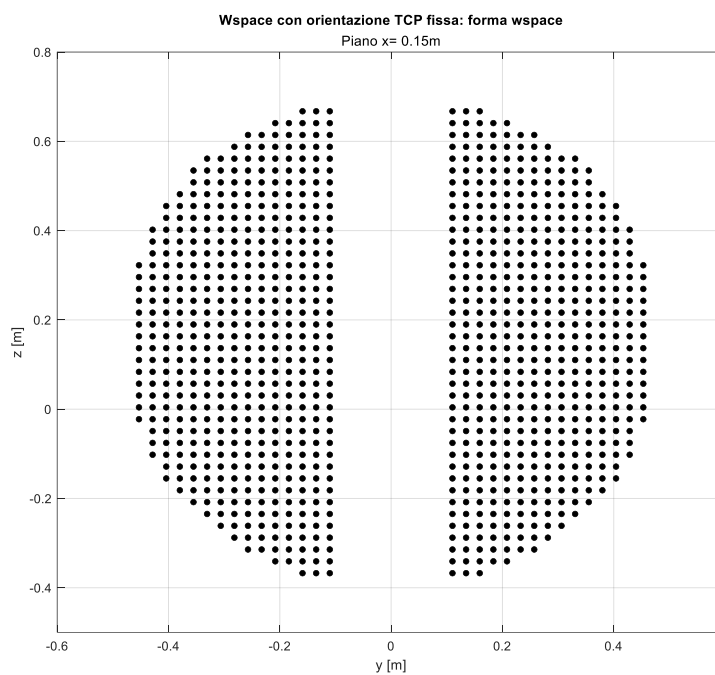


Figura 2.58 - Piano yz con x=0.15 m: forma dello spazio di lavoro

Piano all'estremo del campo di lavoro x=0.5 m

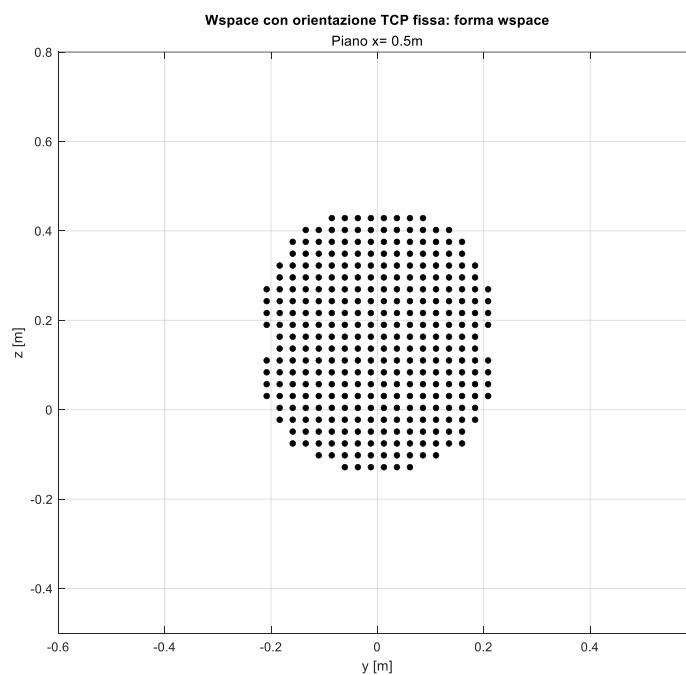


Figura 2.59 - Piano yz con x=0.5 m: forma dello spazio di lavoro

Confronto

Confrontando le forme dei tre piani, rispettivamente Figura 2.49, Figura 2.58 e Figura 2.59, risulta evidente che spostandosi verso la base lo spazio di lavoro è più ampio sia lungo l'asse y che l'asse z mentre risulta più stretto verso l'estremo e ciò è determinato dal fatto che i giunti di gomito e spalla si estendono e possono raggiungere o configurazioni di singolarità oppure i limiti di giunto stessi.

Tuttavia, spostandosi verso la base, compare una zona interna allo spazio di lavoro non raggiungibile: anche in questo caso la causa sono i limiti di giunto e la geometria dei link oltre che l'orientazione fissata del TCP rispetto alla base.

2.7.2.2 Analisi destrezza

Considerando i medesimi piani yz , si analizza il problema di cinematica inversa: per ogni punto dello spazio di lavoro operativo si calcolano le otto soluzioni del problema di cinematica inversa e si assegna un flag colorato in funzione del numero di soluzioni di cinematica inversa accettabili. Infatti, data la geometria del robot, il problema di cinematica inversa non sempre fornisce otto soluzioni realizzabili.

Piano prossimo alla base $x=0.15$ m

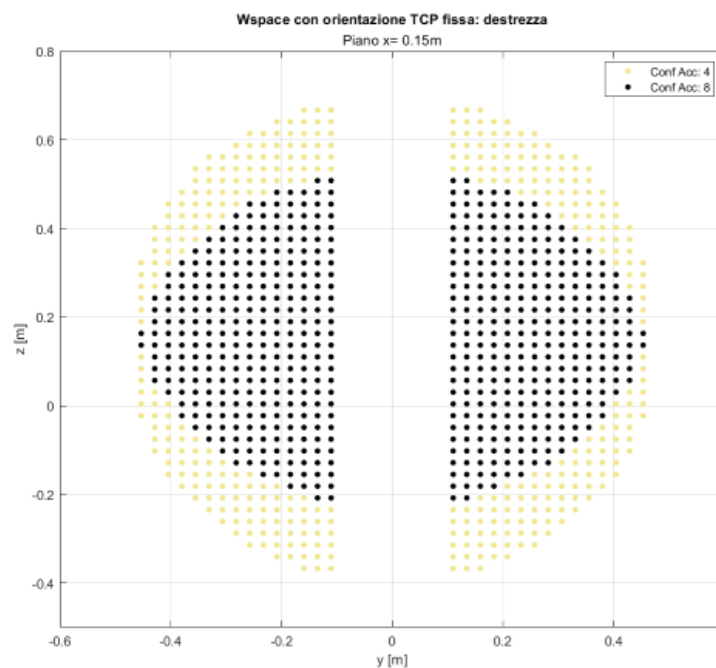


Figura 2.60 - Piano yz con $x=0.15$ m: analisi destrezza

Piano all'estremo del campo di lavoro $x=0.5$ m

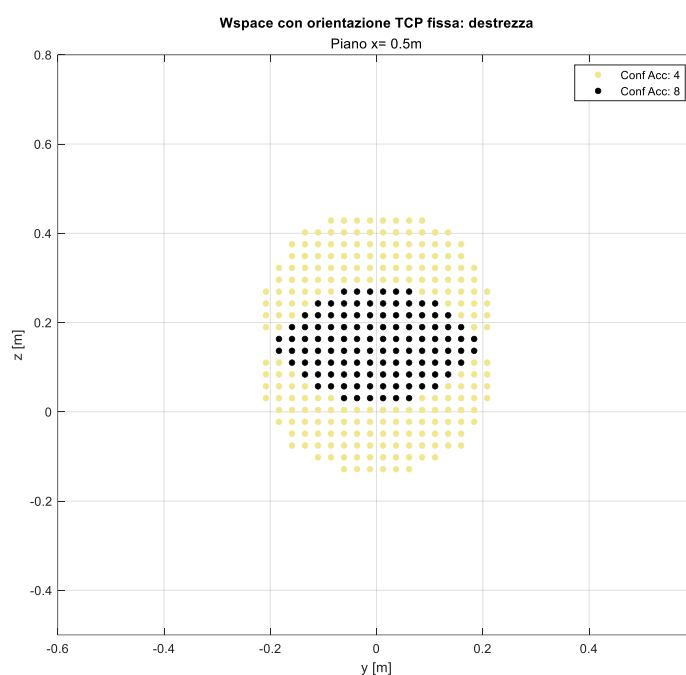


Figura 2.61 - Piano yz con $x=0.5$ m: analisi destrezza

Confronto

Analizzando i risultati ottenuti per i tre piani (Figura 2.50, Figura 2.60, Figura 2.61) risulta evidente che, in tutti e tre i casi, il robot può raggiungere pose all'interno dello spazio di lavoro con 8 soluzioni accettabili mentre, spostandosi verso l'esterno, si ottengono solo 4 soluzioni e ciò è determinato dalla presenza dei limiti di giunto, dalla geometria dei link e da come sono stati assemblati.

2.7.2.3 Analisi auto-collisione

Come definito in precedenza, noto, per ogni punto dello spazio di lavoro operativo, il numero di soluzioni accettabili in termini di destrezza, si calcola per ogni configurazione accettabile di quel punto se tale configurazione genera auto-collisione.

Piano prossimo alla base x=0.15 m

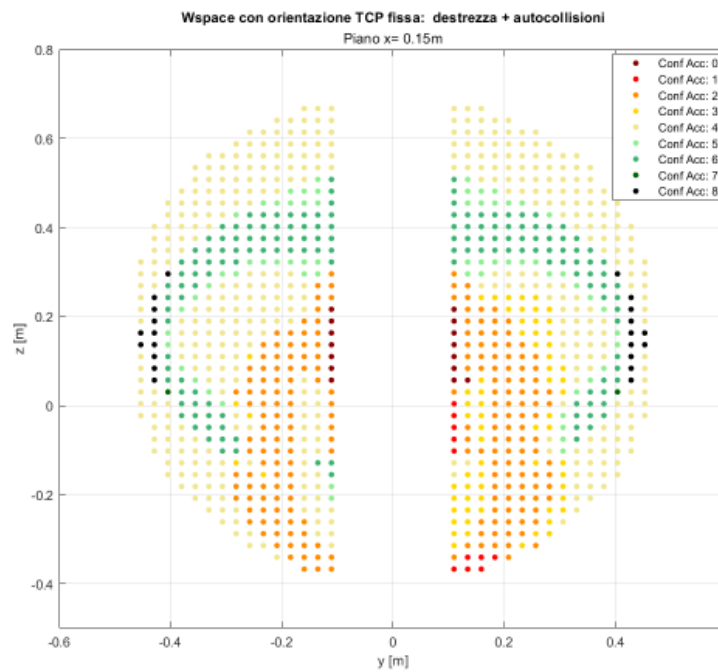


Figura 2.62 - Piano yz con x=0.15 m: analisi destrezza e auto-collisioni

Piano all'estremo del campo di lavoro x=0.5 m

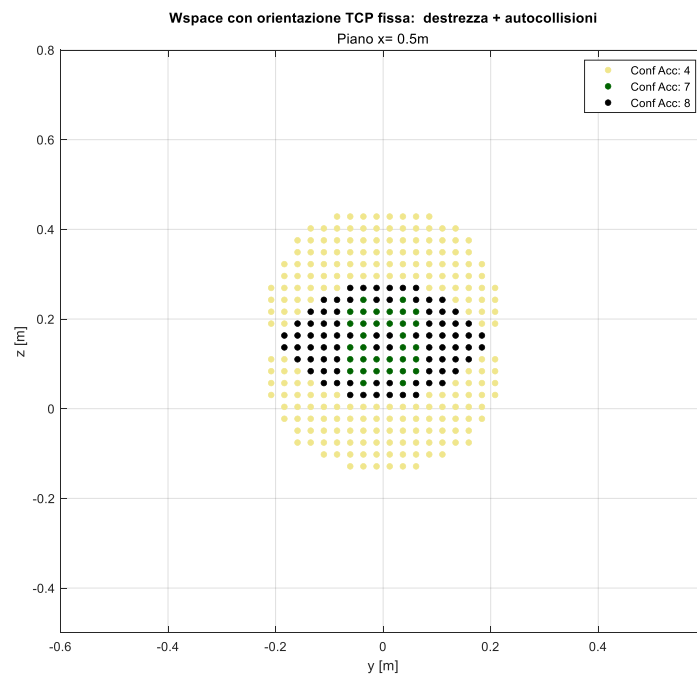


Figura 2.63 - Piano yz con x=0.5 m: analisi destrezza e auto-collisioni

Confronto

Analizzando e confrontando i risultati riportati, rispettivamente, in Figura 2.62 e Figura 2.63, risulta evidente che valgono le stesse considerazioni fatte per il piano intermedio (Figura 2.51): spostandosi verso il centro e la parte inferiore dello spazio di lavoro aumentando le configurazioni non accettabili a causa delle auto-collisioni in quanto il robot si trova in configurazioni *raccolte*.

2.7.2.4 Analisi posizione del robot rispetto flangia terminale

Per una questione di percezione di sicurezza dal punto di vista dell'operatore, si è ipotizzato che lavorare con un robot che non sporga verso l'operatore sia più accettabile per cui si vogliono eliminare tutte quelle configurazioni che determinano un ribaltamento del braccio, in particolare del gomito, rispetto alla flangia terminale.

Noto per ciascun punto dello spazio di lavoro operativo il numero di soluzioni del problema di cinematica inversa accettabili sia in termini di destrezza che di auto-collisione, si determina se la configurazione del robot è tale per cui una parte del braccio sporga rispetto all'end effector.

Per fare ciò, come definito in precedenza, si considerano solo le configurazioni accettabili (limiti di giunto, geometria e auto-collisione) e, per ciascuna, si calcolano le matrici di posa dei sistemi di riferimento associati ai singoli corpi e, successivamente, si verifica che la quota x dell'origine di questi sistemi di riferimento sia minore di quella del sistema di riferimento associato al corpo end effector.

In particolare, dato che il sistema di riferimento non è posto nella parte più *sporgente* del link, si è deciso di adottare un coefficiente di sicurezza: ossia, invece di confrontare la quota x dell'origine del sistema di riferimento con la quota x del TCP, la si confronta con un valore leggermente inferiore pari a $0.9 \cdot x_{TCP}$.

Piano prossimo alla base x=0.15 m

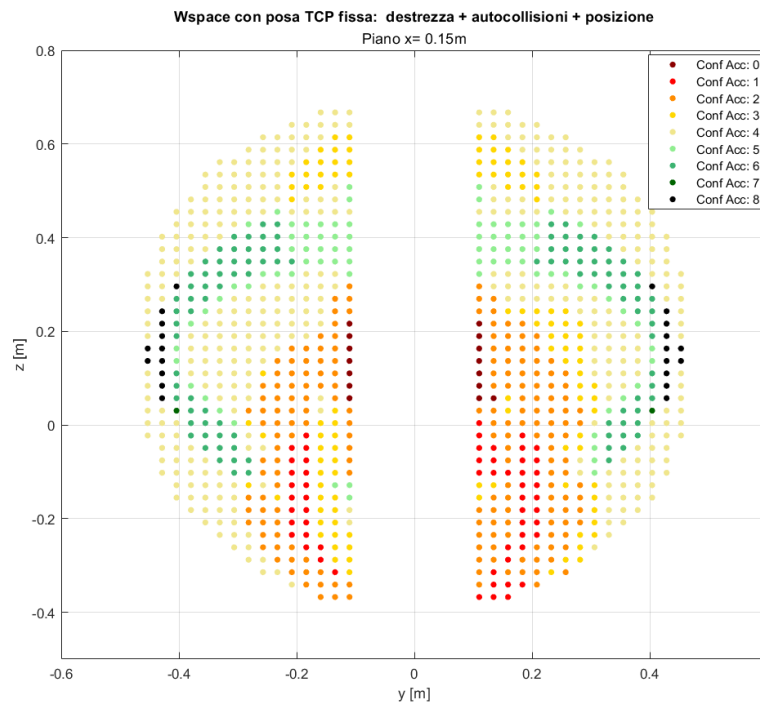


Figura 2.64 - Piano yz con x=0.15 m: analisi destrezza, auto-collisioni e posizioni link rispetto al TCP

Piano all'estremo del campo di lavoro x=0.5 m

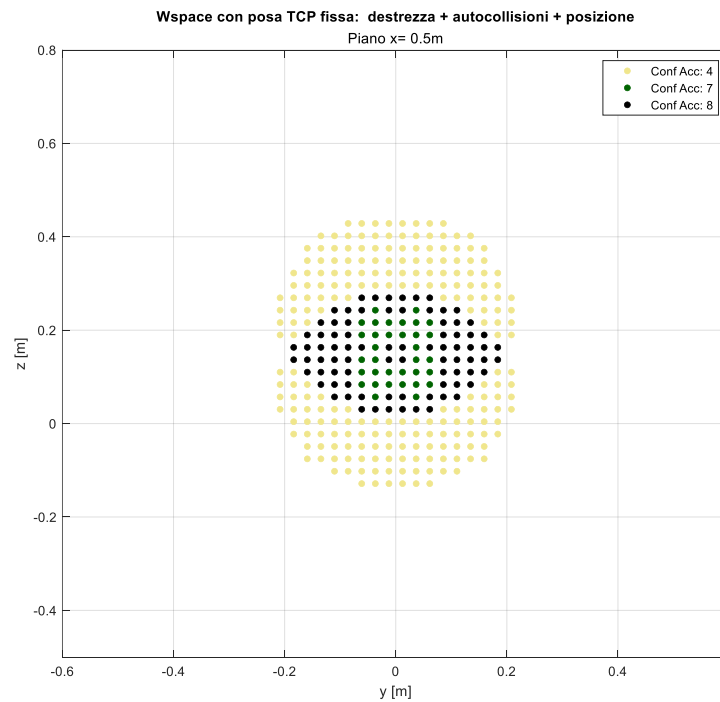


Figura 2.65 - Piano yz con x=0.5 m: analisi destrezza, auto-collisioni e posizioni link rispetto al TCP

Confronto

Confrontando le Figura 2.64 e Figura 2.65, risulta evidente che, considerando un piano distante dalla base del robot, non si ha mai un link sporgente rispetto al TCP, cosa che al contrario avviene nei pressi della base in quanto il robot lavora in configurazione raccolta.

2.7.2.5 Analisi di alcuni punti del sottospazio di lavoro operativo

Come fatto per il piano intermedio $x=0.3$ m, anche per gli altri due piani si scelgono dei punti significativi e si riportano le configurazioni in modo da evidenziare le configurazioni non accettabili.

Inoltre, per ciascuna configurazione, si riporta il valore dell'indice di prossimità ai limiti di giunto utilizzando il metodo 2 e l'indice 1 definiti nei paragrafi precedenti oltre che il valore del determinante della matrice jacobiana.

Piano prossimo alla base $x=0.15$ m

Utilizzando la mappatura dello spazio di lavoro completo (destrezza, auto-collisione e posizione dei link rispetto al TCP), si sceglie un punto, evidenziato in Figura 2.66, e si riportano, come per il piano intermedio, la matrice delle soluzioni e le corrispondenti configurazioni del robot.

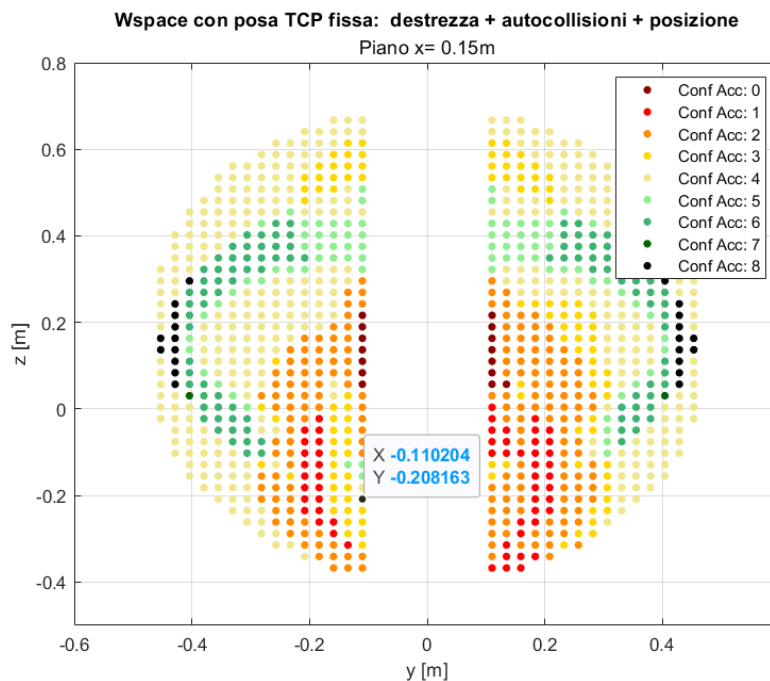
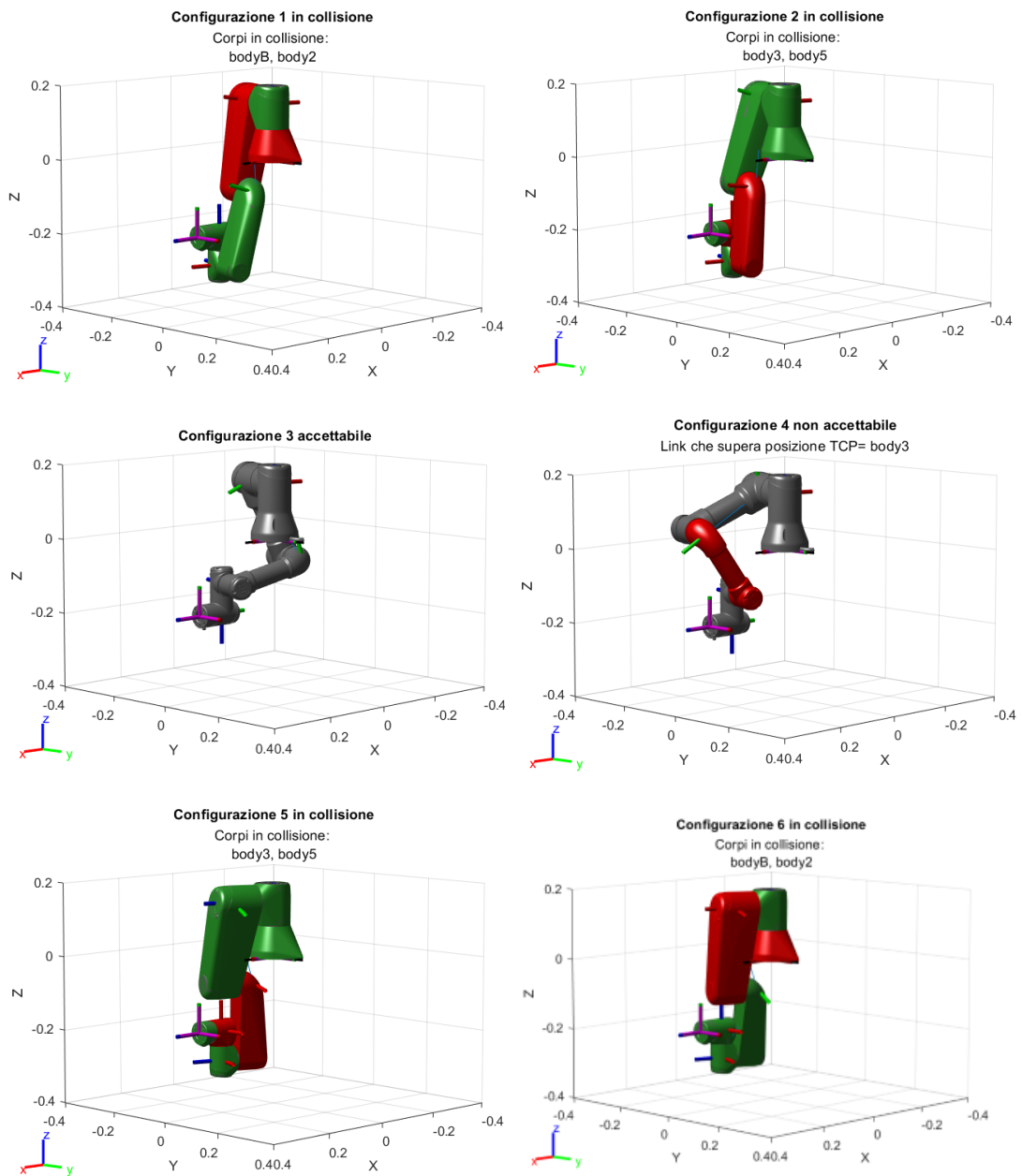


Figura 2.66 - Piano $x=0.15$ m: scelta del punto C in analisi

In Figura 2.67 si riporta la matrice delle soluzioni con evidenziati i vari indici mentre in Figura 2.68 le relative configurazioni.

-0.2864	1.7132	0.1858	1.2426	1.8572	3.1416	0	3.0000	0	1.0000	-0.0010
-0.2864	1.8863	-0.1858	1.4411	1.8572	3.1416	0	3.0000	0	1.0000	0.0010
-0.2864	1.1381	1.7392	-2.8772	-1.8572	0	0	0	0	0.3827	0.0051
-0.2864	2.7169	-1.7392	-0.9777	-1.8572	0	0	4.0000	3.0000	0.7618	-0.0051
1.2214	1.2553	0.1858	1.7005	0.3494	-3.1416	0	3.0000	0	0.3711	0.0003
1.2214	1.4284	-0.1858	1.8990	0.3494	-3.1416	0	3.0000	0	0.4331	-0.0003
1.2214	0.4247	1.7392	-2.1639	-0.3494	0	0	0	0	0.3827	-0.0018
1.2214	2.0035	-1.7392	-0.2644	-0.3494	0	0	0	0	0.4682	0.0018

Figura 2.67 - Soluzioni del problema di cinematica inversa del punto C



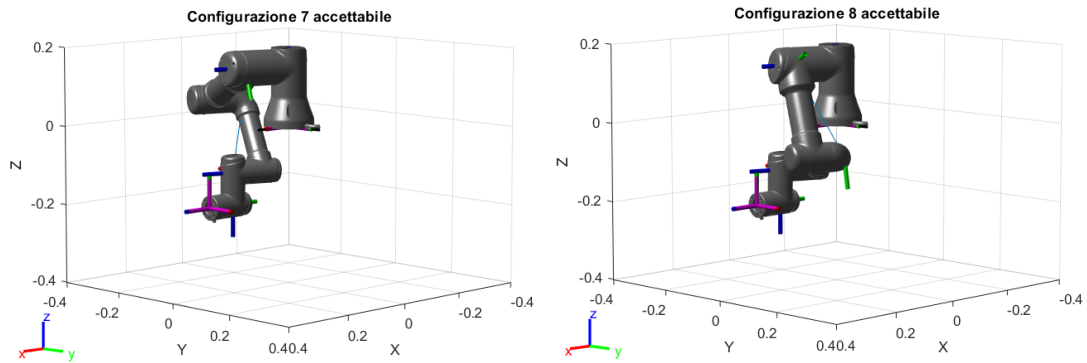


Figura 2.68 - Piano $x=0.15$ m, punto C

Per quanto riguarda gli esempi di configurazione riportati in Figura 2.68, si riporta in Tabella 2.7 la loro descrizione in funzione del posizionamento dei link

Tabella 2.7 - Descrizione configurazioni piano $x=0.15$ m, punto C

Configurazione	Handed (left/right)	Elbow (down/up)	Wrist (flipped/noflipped)
1	Right	Down	Noflipped
2	Right	Up	Noflipped
3	Right	Down	Flipped
4	Right	Up	Flipped
5	Left	Up	Noflipped
6	Left	Down	Noflipped
7	Left	Up	Flipped
8	Left	Down	Flipped

Piano all'estremo del campo di lavoro $x=0.5$ m

Come eseguito con il piano $x = 0.15$ m anche in questo caso si sceglie un punto (Figura 2.69), si riportano la matrice di soluzioni associata (Figura 2.70) e le relative configurazioni del robot (Figura 2.71). Trattandosi di un piano posto molto lontano dalla base si ha il robot in configurazione estesa per cui si verifica un solo caso di auto-collisione e nessun caso di link posizionato oltre il TCP.

Tuttavia, nella colonna che riporta gli indici di prossimità ai limiti di giunto si hanno valori molto prossimi a 1 e ciò è determinato dal fatto che lavorando all'estremo del campo di lavoro i giunti hanno valore prossimo al limite.

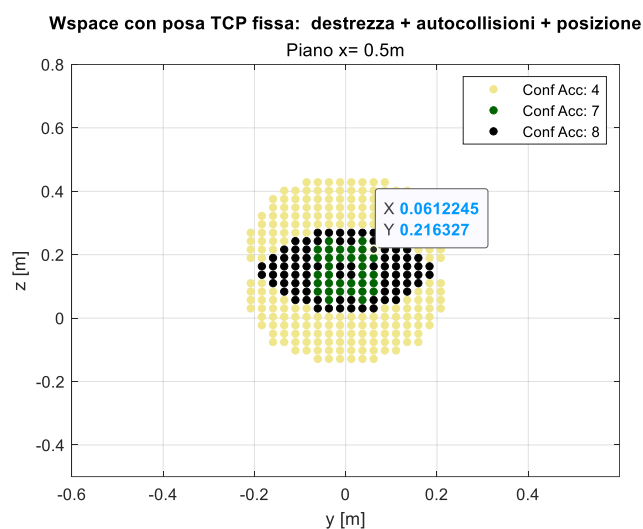
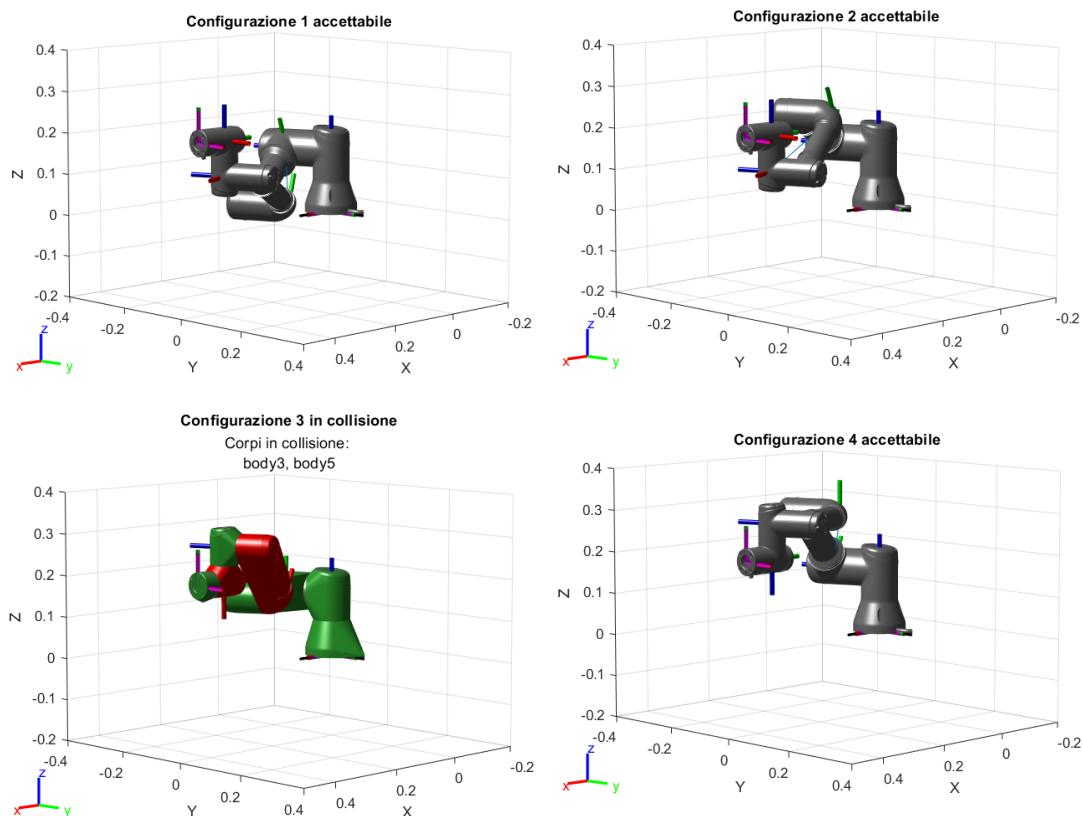


Figura 2.69 - Piano x=0.5 m: scelta del punto D in analisi

0.4089	2.6631	0.9339	-0.4554	1.1619	-3.1416	0	0	0	0.7356	-0.0156
0.4089	-2.7546	-0.9339	0.5469	1.1619	-3.1416	0	0	0	0.3333	0.0156
0.4089	-3.0940	0.6432	2.4508	-1.1619	0	0	3.0000	0	0.6395	0.0117
0.4089	-2.4960	-0.6432	3.1392	-1.1619	0	0	0	0	0.9985	-0.0117
3.0236	-0.6456	0.6432	0.0024	1.4528	0	0	0	0	0.9276	0.0126
3.0236	-0.0476	-0.6432	0.6908	1.4528	0	0	0	0	0.9276	-0.0126
3.0236	-0.3870	0.9339	2.5947	-1.4528	3.1416	0	0	0	1.0000	-0.0169
3.0236	0.4785	-0.9339	-2.6862	-1.4528	3.1416	0	0	0	1.0000	0.0169

Figura 2.70 - Soluzioni del problema di cinematica inversa del punto D



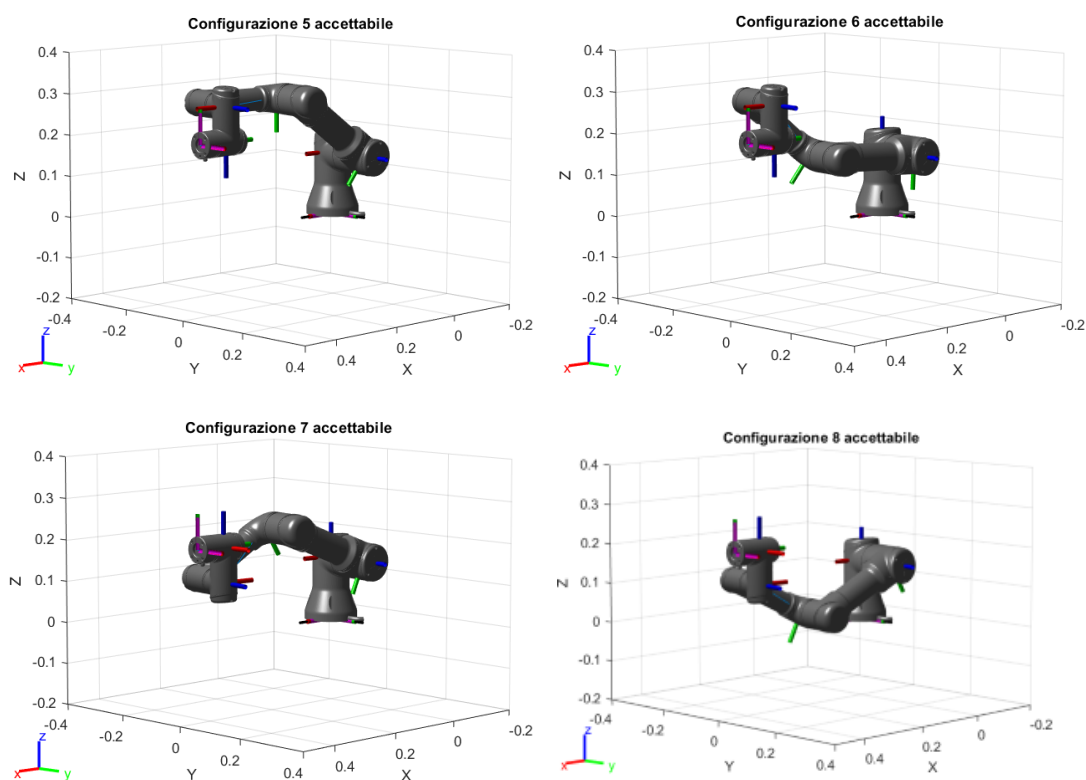


Figura 2.71 - Piano $x=0.5$ m, punto D

Per quanto riguarda gli esempi di configurazione riportati in Figura 2.71, si riporta in Tabella 2.8 la loro descrizione in funzione del posizionamento dei link

Tabella 2.8 - Descrizione configurazioni piano $x=0.5$ m, punto D

Configurazione	Handed (left/right)	Elbow (down/up)	Wrist (flipper/noflipped)
1	Right	Down	Noflipped
2	Right	Up	Noflipped
3	Right	Down	Flipped
4	Right	Up	Flipped
5	Left	Up	Flipped
6	Left	Down	Flipped
7	Left	Up	Noflipped
8	Left	Down	Noflipped

Capitolo 3

Esempi di traiettorie

Dopo aver analizzato e mappato lo spazio di lavoro del robot con base fissa sia considerando il caso generico che il caso con orientazione fissata si passa all'analisi delle traiettorie. In particolare, in questo capitolo si presentano alcuni esempi di traiettorie semplici realizzate su diversi piani yz che sono utili per enfatizzare i vantaggi apportati dall'utilizzo della base mobile. Nello specifico, si trattano traiettorie che vanno oltre lo spazio di lavoro del robot, che transitano in prossimità di configurazioni di singolarità e per configurazioni di auto-collisione.

In particolare, l'installazione del robot sulla guida è tale da avere moto di traslazione lungo l'asse y del sistema di riferimento associato alla base.

3.1 Metodo di pianificazione di traiettorie

Il metodo utilizzato per pianificare le traiettorie prevede inizialmente la pianificazione della traiettoria con base fissa, l'introduzione di una legge nota del moto della base e la conseguente pianificazione con spostamento continuo della base. Nello specifico, i passi seguiti sono i seguenti:

1. Definizione delle pose iniziali e finali con orientazione del TCP fissa come nel capitolo precedente.
2. Identificazione della configurazione iniziale sulla base dalle soluzioni del problema di cinematica inversa.

3. Definizione dei parametri di traiettoria: tempo di esecuzione della traiettoria, velocità e accelerazione di riferimento (poste per tutte le traiettorie utilizzate pari a zero).
4. Pianificazione della traiettoria in spazio giunti per il caso con base fissa:
 - a. Utilizzo, in ambiente *Simulink*, del blocco *Transform Trajectory*, che permette di ricavare, note le pose iniziale e finale, la successione di pose oltre che la velocità e l'accelerazione del TCP nello spazio.
 - b. Calcolo della successione di configurazioni del robot tramite il problema di cinematica inversa a partire dalla successione di pose calcolate al punto *a* utilizzando un loop sull'informazione di partenza riguardante la configurazione. Più nel dettaglio, si determina la configurazione successiva utilizzando l'informazione riguardante la configurazione precedente come base di partenza.
 - c. Calcolo della velocità e dell'accelerazione nei giunti tramite, rispettivamente, la velocità e l'accelerazione del TCP nello spazio e la matrice jacobiana.
 - d. Verifica della traiettoria in termini di auto-collisione: ogni posa eseguita durante l'esecuzione della traiettoria viene analizzata tramite la funzione *checkCollisions* in ambiente *MATLAB*.
 - e. Analisi del determinante della matrice jacobiana durante l'esecuzione della traiettoria per verificare il transito nei pressi di una configurazione di singolarità.
5. Definizione del moto noto della base:
 - a. Utilizzo, se non diversamente specificato, di un moto rettilineo uniforme con velocità costante:

$$velocita_{base} = \frac{spazio}{tempo\ esecuzione\ traiettoria} \quad (3.1)$$

Definendo come spazio la differenza tra il punto di inizio e di fine della traiettoria della base specificati per ciascuna traiettoria.

- b. Calcolo dei punti di passaggio (waypoint) della base utilizzando la definizione del moto rettilineo uniforme:

$$waypoint = y_{start} + velocita_{base} \cdot tempo \quad (3.2)$$

6. Determinazione della successione di pose nel caso di traiettoria con base mobile:
 - a. Nota la successione di traiettorie necessaria per eseguire il task (ricavate con base fissa) e nota la successione di waypoint della base, si calcola per ogni

istante della traiettoria la posa del robot come sottrazione tra la posa desiderata e la posizione della base.

- b. Nota la nuova successione di pose si ricavano per derivazione gli andamenti di velocità e accelerazione del TPC nello spazio.
- c. Nota la successione di pose del TCP, tramite il problema di cinematica inversa si ricava la successione di configurazioni utilizzando il loop sulle condizioni iniziali come fatto in precedenza.
- d. Nota la successione di configurazioni si calcola la matrice jacobiana e utilizzando la velocità del TCP si calcola la velocità nei giunti.
- e. Note la successione di configurazioni, la velocità nei giunti e le coppie nei giunti (calcolate a partire dalle configurazioni imponendo la sola presenza della forza di gravità) si calcola, tramite la dinamica diretta con wrench di azioni esterne nullo, l'accelerazione nei giunti.
- f. Verifica delle auto-collisioni e del determinante della matrice jacobiana come per la traiettoria con base fissa.

7. Rappresentazione dei risultati:

- a. Animazioni delle traiettorie (si riportano solo alcuni frame significativi);
- b. Confronto tra percorso desiderato e percorso reale sia nel caso di traiettoria eseguita con base fissa sia nel caso di base mobile;
- c. Rappresentazione del moto assoluto nel caso di base mobile con identificazione del moto relativo del robot rispetto alla base e del moto di trascinamento della base;
- d. Rappresentazione degli errori di posizione e orientamento;
- e. Andamento reale della posizione e della velocità del TCP nello spazio;
- f. Andamento della posizione, della velocità e dell'accelerazione dei gradi di libertà evidenziando i limiti ricavati dal datasheet del robot;
- g. Coppia e potenza richieste per l'esecuzione della traiettoria;
- h. Posizione del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria;
- i. Proiezione della traiettoria sulla mappatura dello spazio di lavoro ricavata nel capitolo precedente.

3.2 Traiettoria entro lo spazio di lavoro

Si tratta di una traiettoria realizzabile sia con base fissa che con base mobile. I dati di input per la realizzazione di tale traiettoria sono i seguenti:

- Posa iniziale:

$${}^0A_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.3 \\ 1 & 0 & 0 & -0.3 \\ 0 & 1 & 0 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

- Configurazione iniziale: soluzione 5 (Figura 3.1)

-0.6412	2.5543	1.3699	-0.7826	2.2120	3.1416	0	0	0
-0.6412	-2.4697	-1.3699	0.6980	2.2120	3.1416	0	0	0
-0.6412	3.1362	1.0326	2.1143	-2.2120	0	0	3.0000	0
-0.6412	-2.1913	-1.0326	-3.0593	-2.2120	0	0	0	0
1.8980	-0.9503	1.0326	-0.0823	0.3272	0	0	0	0
1.8980	0.0053	-1.0326	1.0273	0.3272	0	0	3.0000	0
1.8980	-0.6719	1.3699	2.4436	-0.3272	3.1416	0	3.0000	0
1.8980	0.5873	-1.3699	-2.3590	-0.3272	3.1416	0	0	0

Figura 3.1 - Soluzioni del problema di cinematica inversa associata alla posa iniziale 3.3²

- Posa finale:

$${}^0A_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.3 \\ 1 & 0 & 0 & 0.3 \\ 0 & 1 & 0 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

- Tempo di esecuzione della traiettoria: 1 s
- Time scaling: polinomiale di quinto grado
- Moto base: moto rettilineo uniforme con velocità costante
- Punto di partenza della base: $y = -0.3 \text{ m}$
- Punto di arrivo della base: $y = 0.3 \text{ m}$

In Figura 3.2 si riportano la posa iniziale e finale desiderate per l'esecuzione del task.

² Si utilizza la stessa notazione usata nel capitolo precedente per analizzare le singole colonne: le colonne 1÷6 contengono i gradi di libertà in radianti, la colonna 7 è relativa alla raggiungibilità (0 se *safe*, 2 se non raggiungibile), la colonna 8 riporta l'analisi in termini di auto-collisione e posizione relativa dei link (0 se *safe*, 3 se auto-collisione, 4 se braccio sporgente), la colonna 9 indica il link che è posizionato oltre il TCP, la colonna 10 riporta il valore dell'indice di prossimità ai limiti di giunto (0 lontano dai vincoli, 1 in corrispondenza dei limiti), la colonna 11 riporta il valore del determinante della matrice jacobiana.

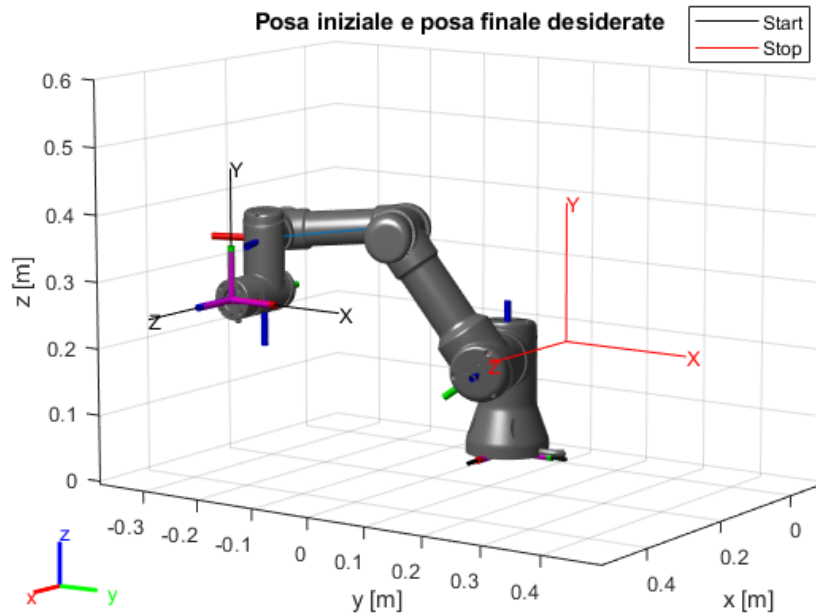


Figura 3.2 - Pose iniziale e finale della traiettoria entro lo spazio di lavoro

3.2.1 Analisi della traiettoria

Il primo confronto che si esegue tra le due pianificazioni del moto è quello relativo dell'esecuzione effettiva della traiettoria. In Figura 3.3 e Figura 3.4 si riportano, rispettivamente, alcune pose che il robot assume durante l'esecuzione della traiettoria con base fissa e con base mobile. Per semplificare la visualizzazione, si identifica il robot con base fissa con il colore nero e il caso con base mobile con il colore blu.

Configurazioni del robot durante esecuzione della traiettoria: Base fissa

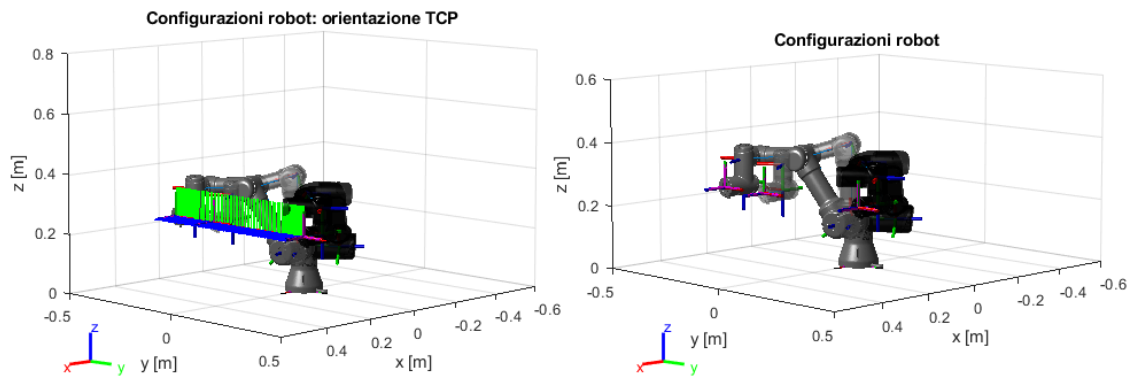


Figura 3.3 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro con base fissa

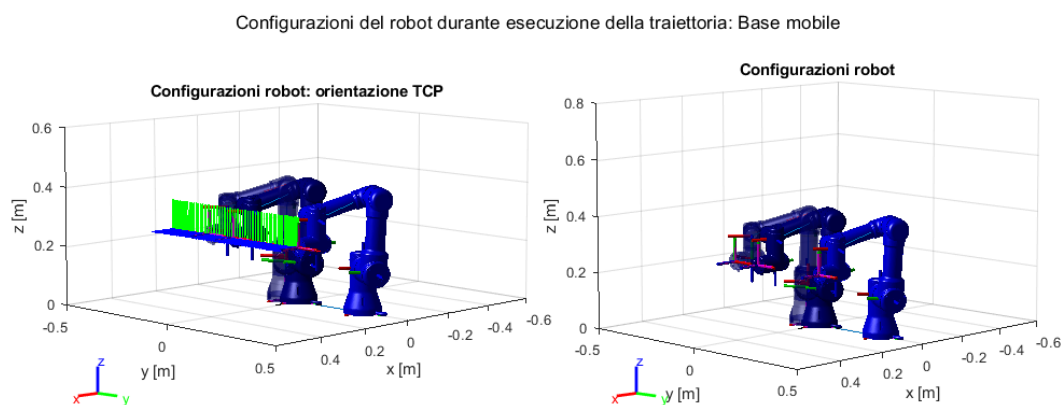


Figura 3.4 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro con base mobile

Si riporta, invece, in Figura 3.5 il confronto tra i punti percorsi dal TCP durante l'esecuzione del task: risulta evidente che entrambi i casi ripercorrono esattamente il percorso desiderato. Infatti, non si evidenzia alcun errore di posizione e orientamento (Figura 3.7) dato che si ha una perfetta sovrapposizione tra le pose che assume il TCP durante l'esecuzione della traiettoria con base fissa (nero) e quelle con base mobile (blu). Mentre, in Figura 3.6, si riportano i diversi moti realizzati per eseguire la traiettoria con base mobile ossia moto relativo del robot rispetto alla base e moto di trascinamento della base. La somma di questi due moti determina il moto assoluto per l'esecuzione della traiettoria.

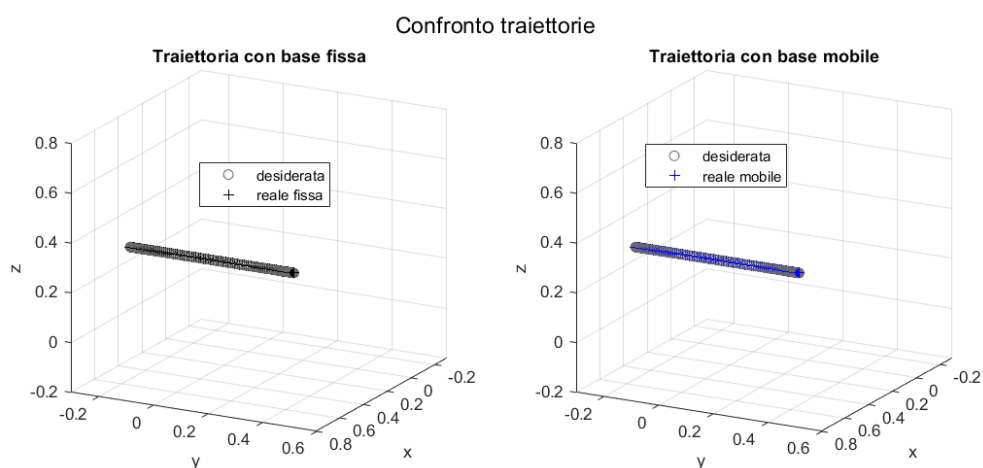


Figura 3.5 - Percorso del TCP durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

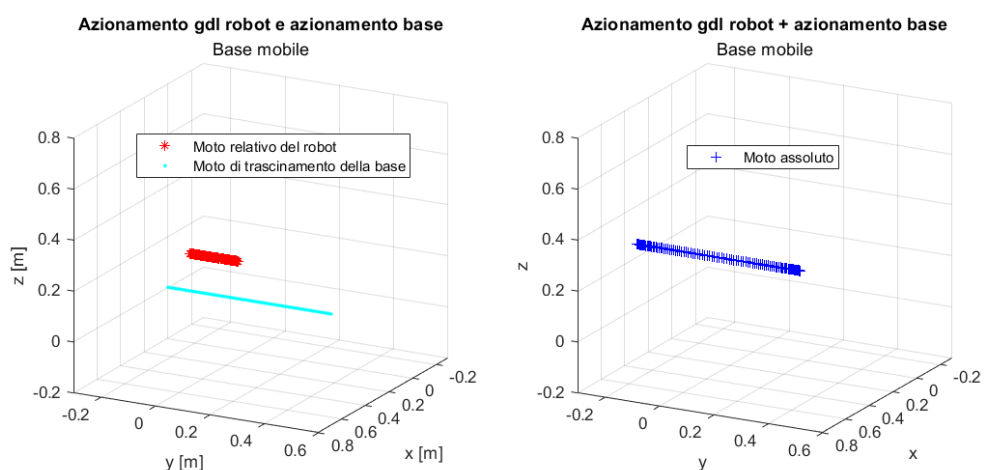


Figura 3.6 - Moto assoluto, moto relativo e moto di trascinamento nel caso di base mobile con traiettoria entro lo spazio di lavoro

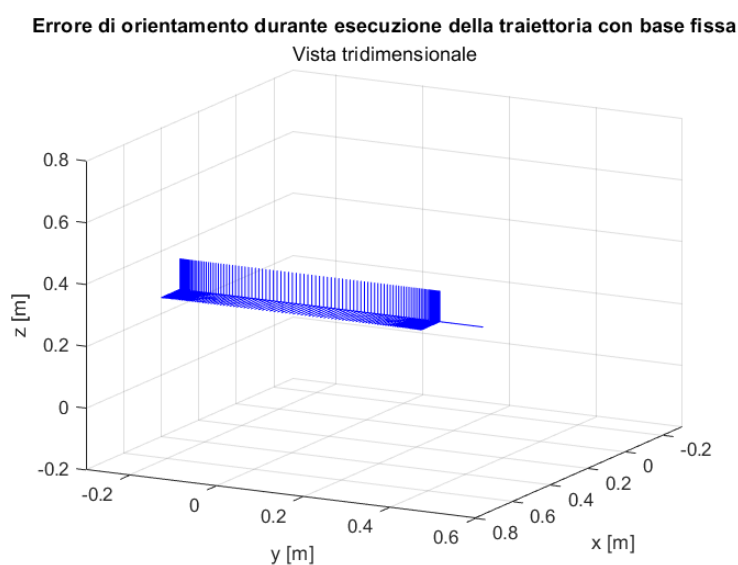


Figura 3.7 - Errore di orientazione durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro con base fissa

Per evidenziare il fatto che si tratta di traiettorie *safe*, si è eseguita l'analisi sia in termini di auto-collisione sia di singolarità. Ciascuna configurazione assunta dal robot durante l'esecuzione del moto è stata analizzata con la funzione *checkCollision* per verificare la presenza di configurazioni di collisione e per ciascuna posa associata si è calcolato il valore del determinante della matrice jacobiana, il cui andamento è riportato in Figura 3.8, da cui si evince che la traiettoria non passa nelle vicinanze di configurazioni di singolarità.

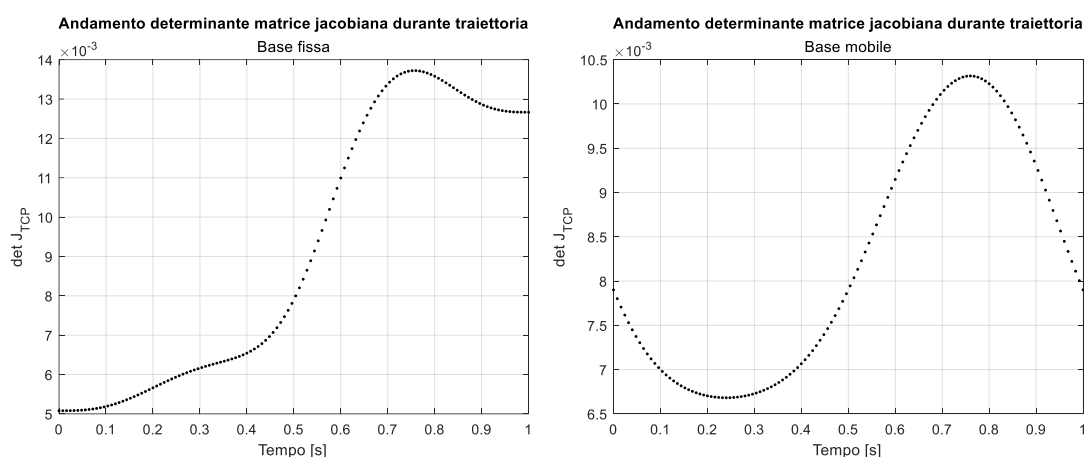


Figura 3.8 - Andamento del determinante della matrice jacobiana durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

3.2.2 Analisi della posizione e della velocità del TCP

Dato che la traiettoria è eseguibile senza errori anche con la base fissa, si ha una perfetta sovrapposizione dello spostamento nel piano del TCP tra i due casi (Figura 3.9).

Invece, per quanto riguarda la velocità del TCP durante l'esecuzione del moto nel caso di base mobile si evidenzia un picco di velocità sia ad inizio traiettoria che a fine traiettoria (Figura 3.10); questo è dovuto al fatto che si è utilizzato un moto di base con velocità costante che nella realtà non è realizzabile in quanto richiede una coppia istantanea infinita.

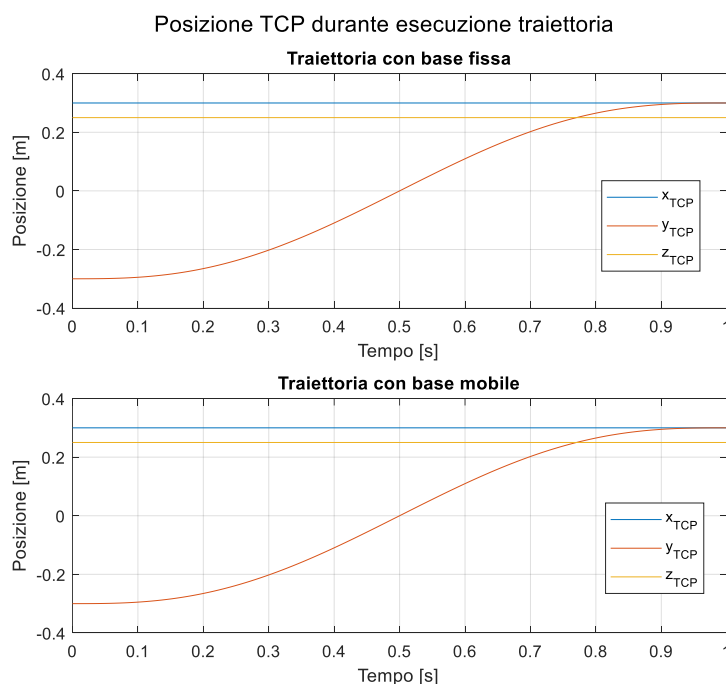


Figura 3.9 - Andamento della posizione del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

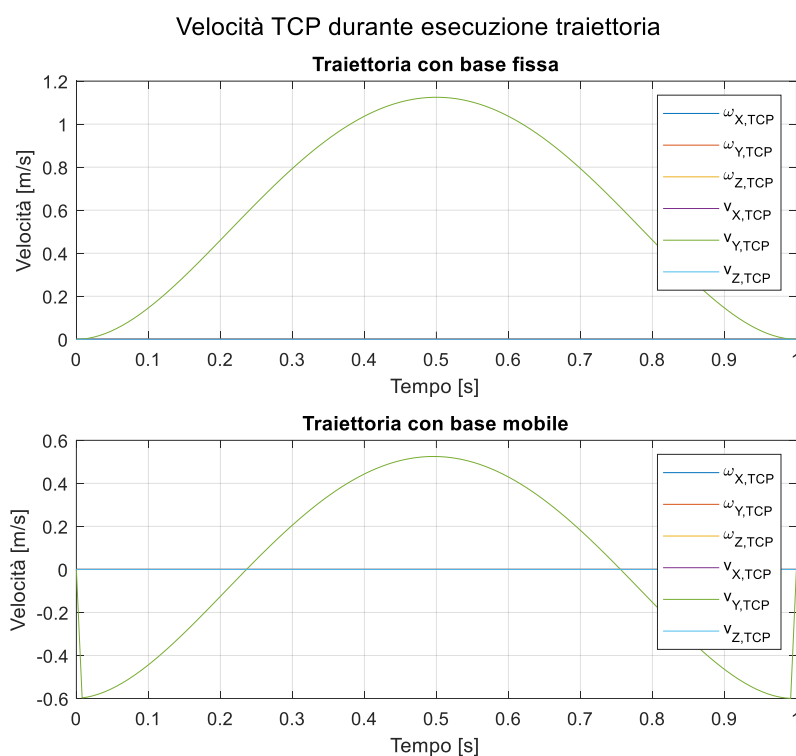


Figura 3.10 - Andamento della velocità del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

3.2.3 Analisi dei gradi di libertà

Si riportano, rispettivamente, in Figura 3.11, Figura 3.12, Figura 3.13 , gli andamenti dei gradi di libertà e delle relative velocità e accelerazioni. Nel caso di base fissa la velocità del giunto q_5 supera il valore limite nonostante la traiettoria sia realizzabile e non si raggiungano i valori limiti dei gradi di libertà. Questo problema viene risolto utilizzando il metodo della base mobile.

Pertanto, l'introduzione del moto di base permette non solo di ridurre la variazione dei gradi di libertà ma anche di ridurre le velocità e le accelerazioni nei giunti.

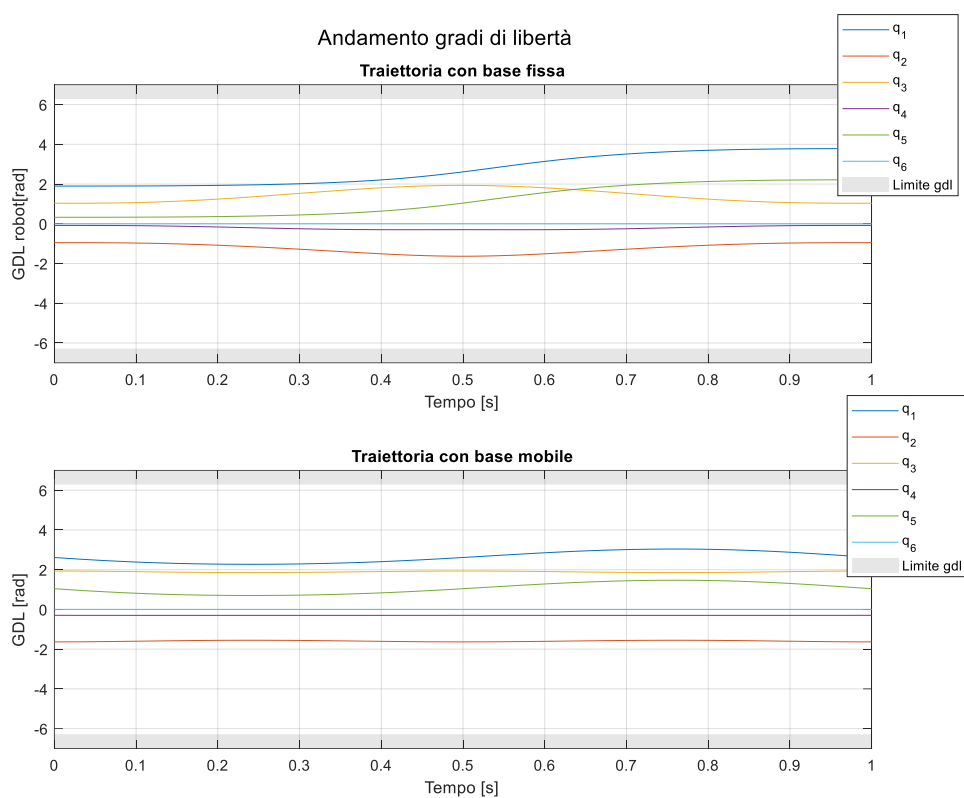


Figura 3.11 - Andamento dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

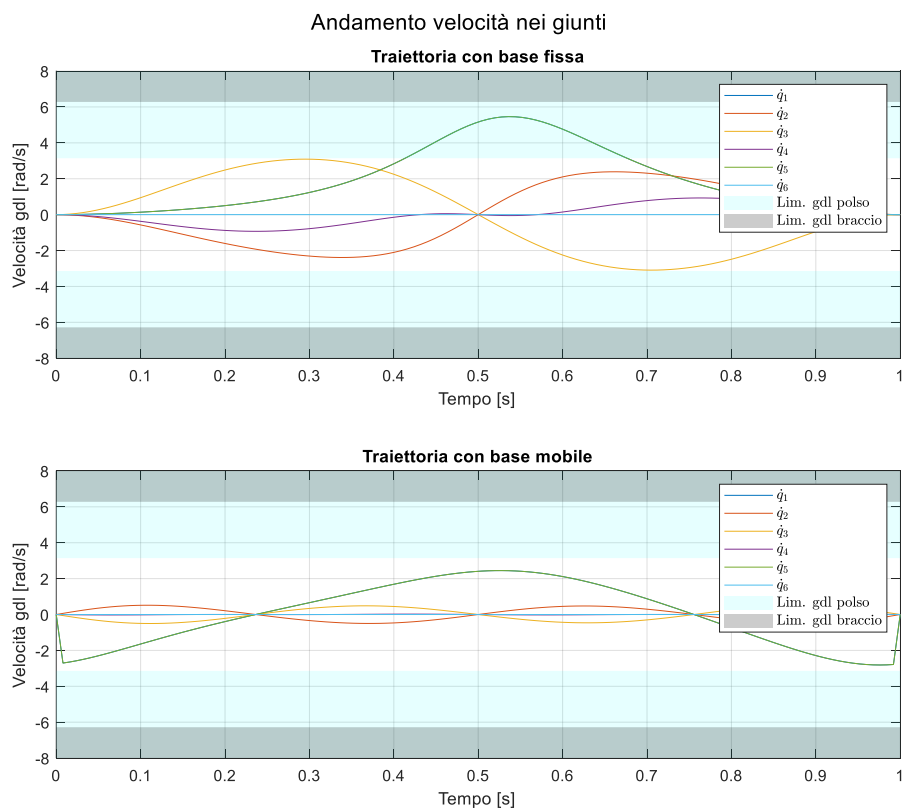


Figura 3.12 - Andamento delle velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

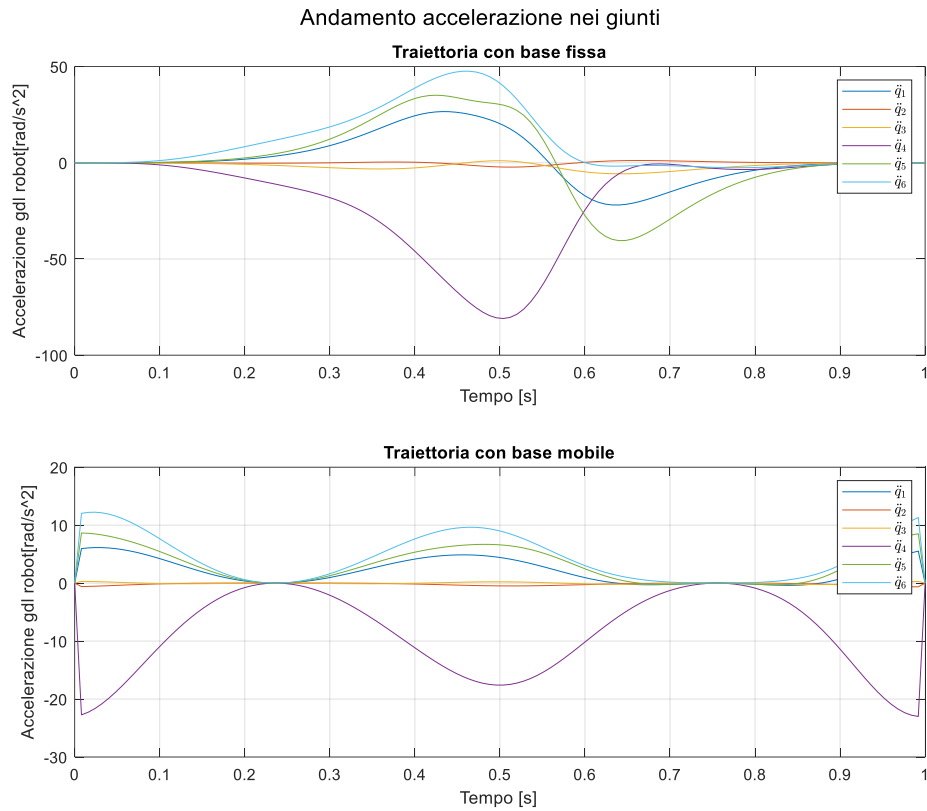


Figura 3.13 - Andamento delle accelerazioni dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

3.2.4 Analisi della potenza

Considerando il robot a vuoto, ossia senza carichi esterni posti sul TCP durante l'esecuzione della traiettoria, si calcolano le coppie richieste dai singoli giunti in ogni istante del moto.

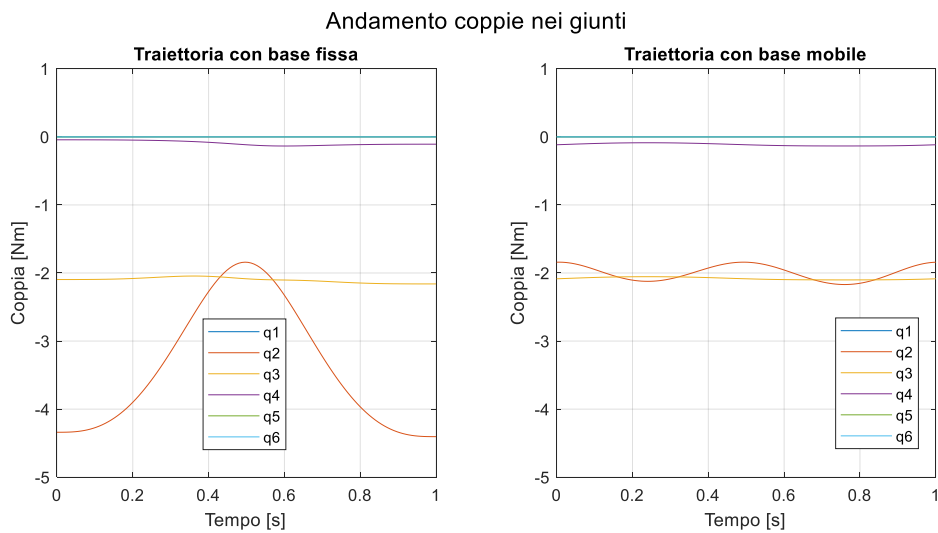


Figura 3.14 - Coppie nei giunti per l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

Dalla Figura 3.14 risulta evidente che l'utilizzo della base mobile permette la riduzione delle coppie richieste e ciò si traduce in una riduzione della potenza istantanea richiesta dai singoli giunti (Figura 3.15) e conseguentemente della potenza totale istantanea (Figura 3.16).

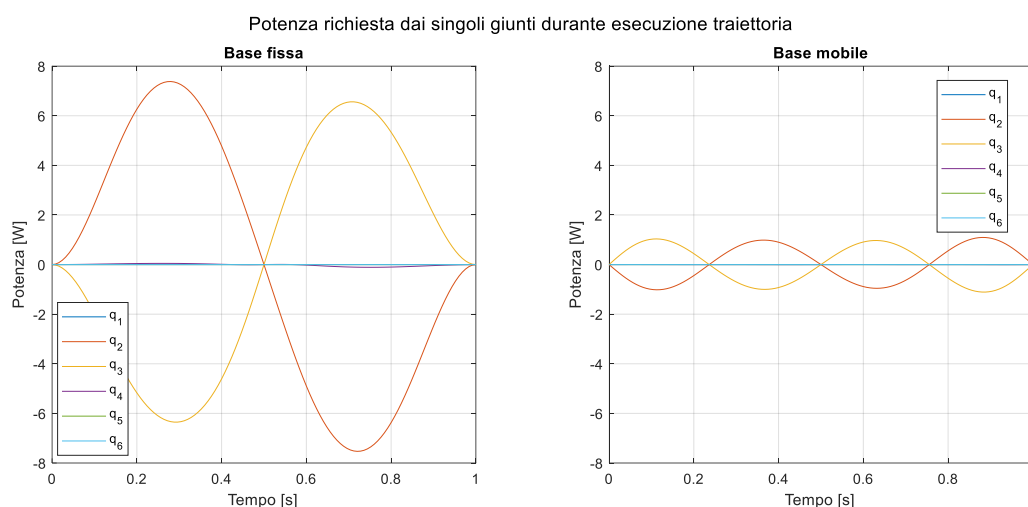


Figura 3.15 - Potenza istantanea richiesta dai giunti per l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

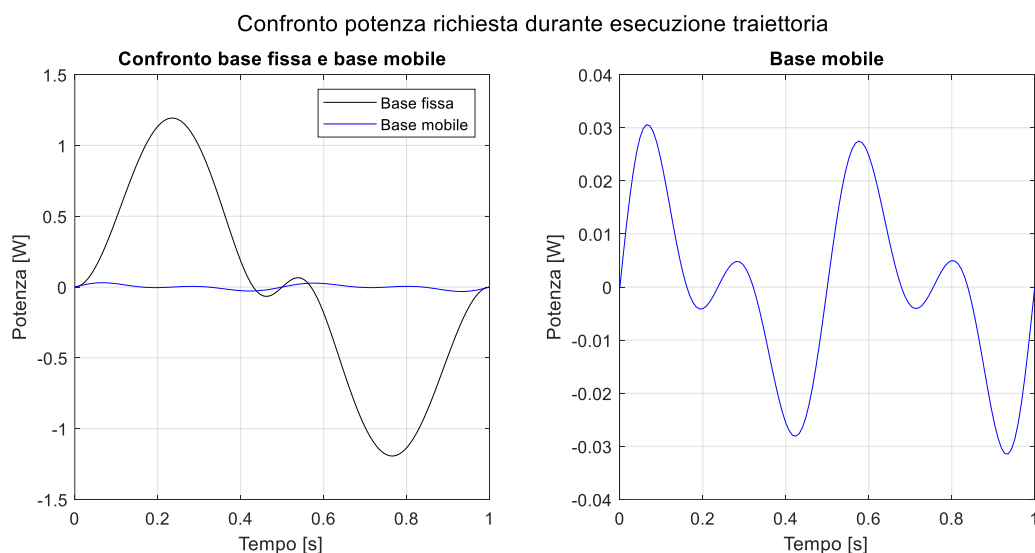


Figura 3.16 - Potenza istantanea richiesta per l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

3.2.5 Analisi della posizione del centro di massa

Un'ulteriore analisi svolta è quella relativa alla posizione del centro di massa in quanto si vuole determinare se lo spostamento della base può *aiutare* il robot a lavorare nelle condizioni sbracciate senza ribaltarsi.

In Figura 3.17 si riporta la posizione relativa del centro di massa nei due casi mentre in Figura 3.18 si esegue il confronto. È evidente che l'utilizzo della base mobile riduce la variazione

della posizione del centro di massa lungo l'asse y , ossia l'asse della guida, ma non riduce lo sbraccio lungo l'asse x per cui si riscontra sì un vantaggio ma non così evidente.

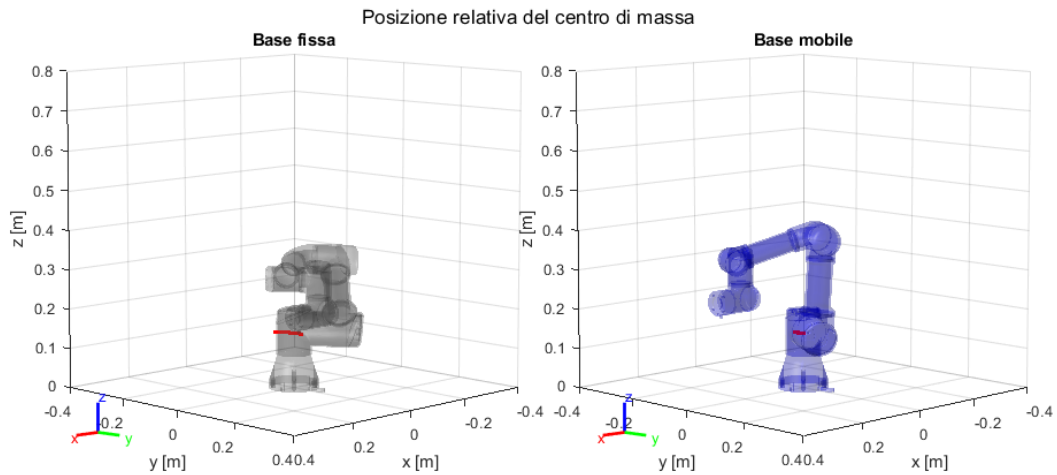


Figura 3.17 - Posizione relativa del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

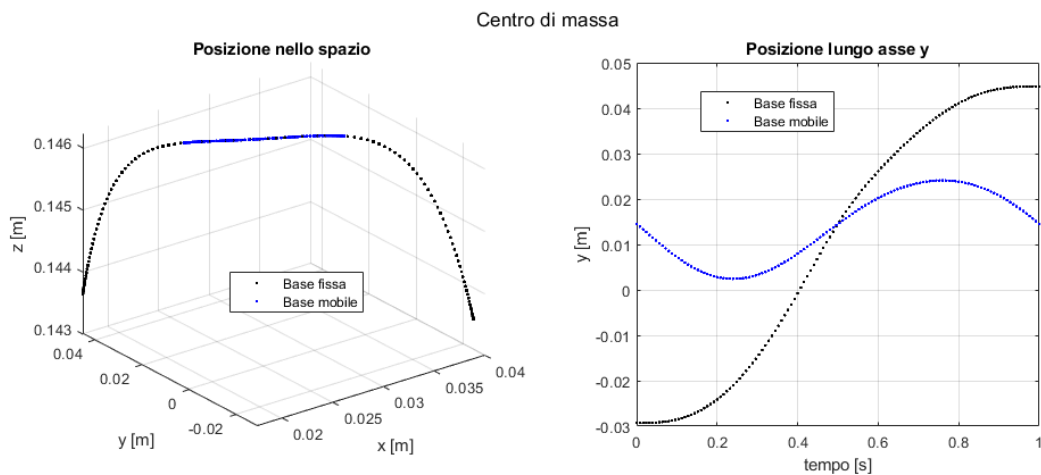


Figura 3.18 - Traiettoria del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria entro lo spazio di lavoro

3.2.6 Traiettoria su mappatura spazio di lavoro

Sfruttando le informazioni ricavate nel capitolo precedente riguardo alla mappatura dello spazio di lavoro in termini di destrezza, auto-collisione e posizione dei link rispetto al TCP, si riporta la traiettoria eseguita sul piano yz in modo da evidenziare che entrambe le traiettorie rientrano all'interno dello spazio di lavoro raggiungibile. Per quanto riguarda la traiettoria eseguita con base mobile (Figura 3.19), si ha che i punti rappresentati in blu sono sovrapposti in quanto rappresentano il moto relativo del robot rispetto alla sua base.

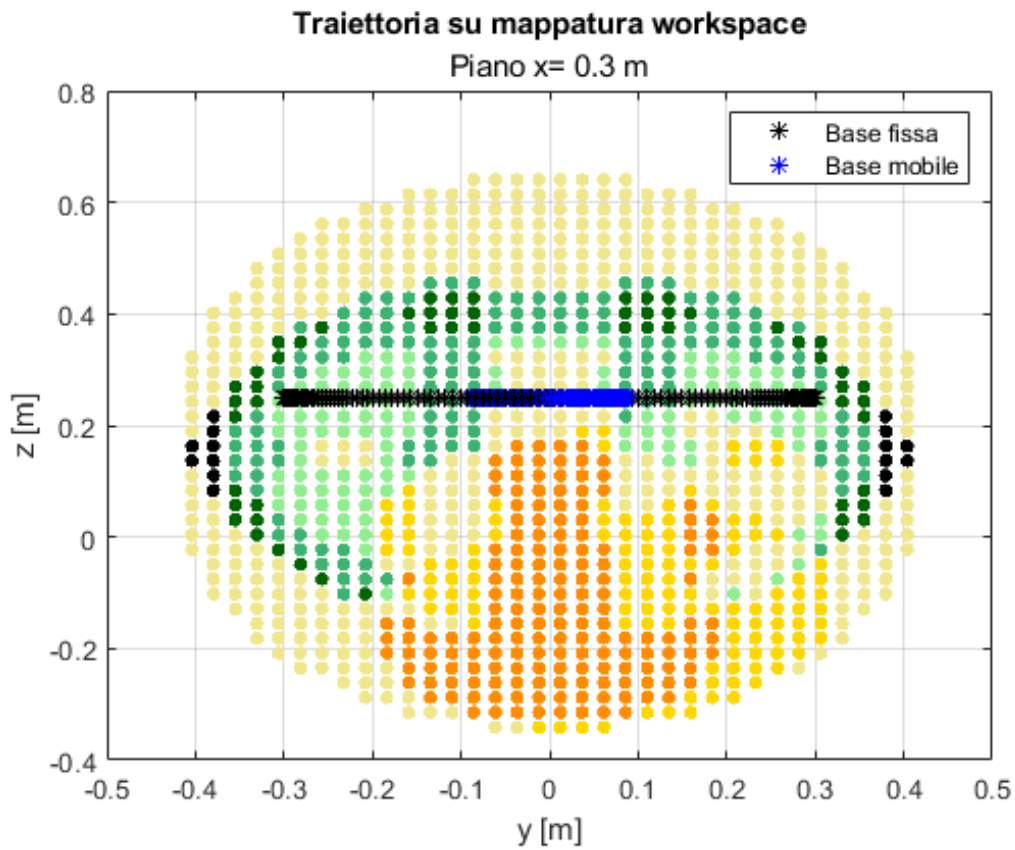


Figura 3.19 - Traiettoria entro lo spazio di lavoro proiettata sulla mappatura dello spazio di lavoro

3.3 Traiettoria oltre lo spazio di lavoro

Si considera una traiettoria che va oltre lo spazio di lavoro del robot con i seguenti parametri:

- Posa iniziale:

$${}^0A_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

- Configurazione iniziale: soluzione 1 (Figura 3.20)

0.2663	2.4695	0.7516	-0.0795	1.3045	-3.1416	0	0	0
0.2663	-3.1156	-0.7516	0.7256	1.3045	-3.1416	0	3.0000	0
0.2663	2.7686	0.9709	2.5436	-1.3045	0	0	0	0
0.2663	-2.6152	-0.9709	-2.6971	-1.3045	0	0	0	0
2.8753	-0.5264	0.9709	-0.4445	1.3045	0	0	0	0
2.8753	0.3730	-0.9709	0.5980	1.3045	0	0	0	0
2.8753	-0.0260	0.7516	2.4160	-1.3045	3.1416	0	3.0000	0
2.8753	0.6721	-0.7516	-3.0621	-1.3045	3.1416	0	0	0

Figura 3.20 - Soluzioni del problema di cinematica inversa associata alla posa iniziale 3.5³

- Posa finale:

$${}^0A_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.5 \\ 1 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0 & 1 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

- Tempo di esecuzione della traiettoria: 1 s
- Time scaling: polinomiale di quinto grado
- Moto base: moto rettilineo uniforme con velocità costante
- Punto di partenza della base: $y = 0$ m
- Punto di arrivo della base: $y = 0.8$ m

In Figura 3.21 si riportano la posa iniziale e finale desiderate per l'esecuzione del task.

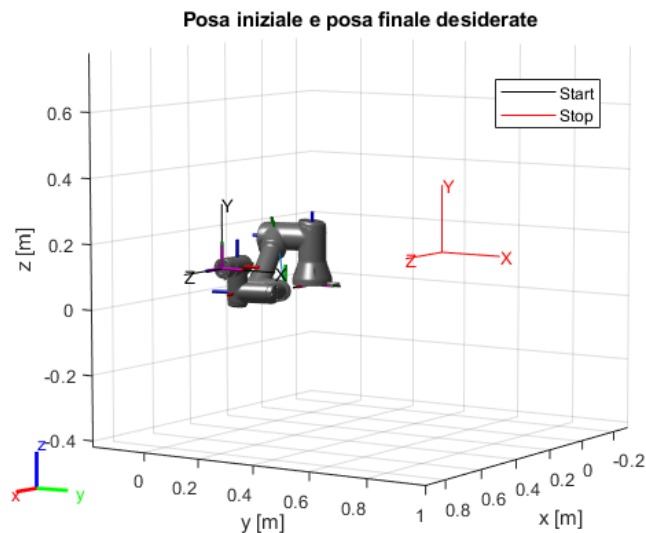


Figura 3.21 - Pose iniziale e finale della traiettoria obliqua oltre spazio di lavoro

³ Si utilizza la stessa notazione usata nel capitolo precedente per analizzare le singole colonne: le colonne 1÷6 contengono i gradi di libertà in radianti, la colonna 7 è relativa alla raggiungibilità (0 se *safe*, 2 se non raggiungibile), la colonna 8 riporta l'analisi in termini di auto-collisione e posizione relativa dei link (0 se *safe*, 3 se auto-collisione, 4 se braccio sporgente), la colonna 9 indica il link che è posizionato oltre il TCP, la colonna 10 riporta il valore dell'indice di prossimità ai limiti di giunto (0 lontano dai vincoli, 1 in corrispondenza dei limiti), la colonna 11 riporta il valore del determinante della matrice jacobiana.

3.3.1 Analisi della traiettoria

Trattandosi di una traiettoria che non può essere completamente eseguita con base fissa (Figura 3.22) si ha, in tal caso, il non raggiungimento del punto di target e un progressivo aumento dell'errore di posizione e orientazione. Questo è dovuto al fatto che all'interno del codice utilizzato per pianificare le traiettorie si è utilizzato un loop sul problema di cinematica inversa con l'utilizzo della configurazione precedente come punto di partenza per la definizione della configurazione successiva e questo implica che il sistema cerca di raggiungere il target perdendo in accuratezza.

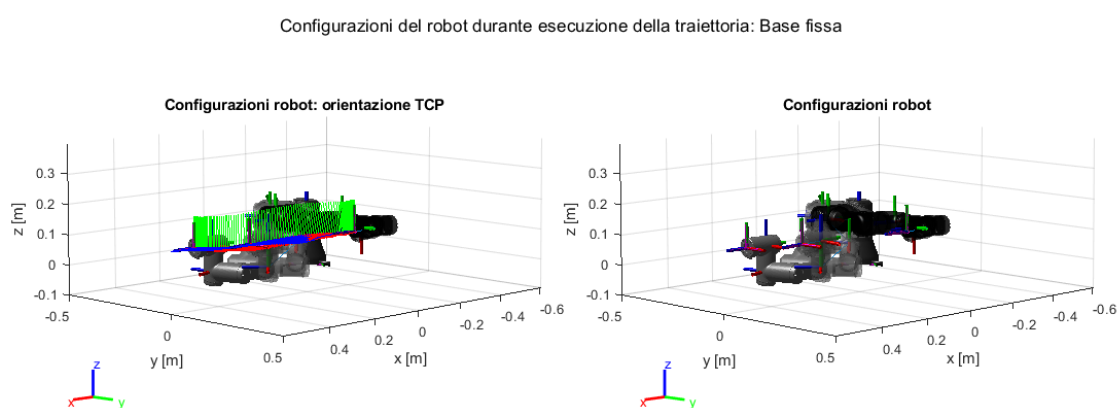


Figura 3.22 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro con base fissa

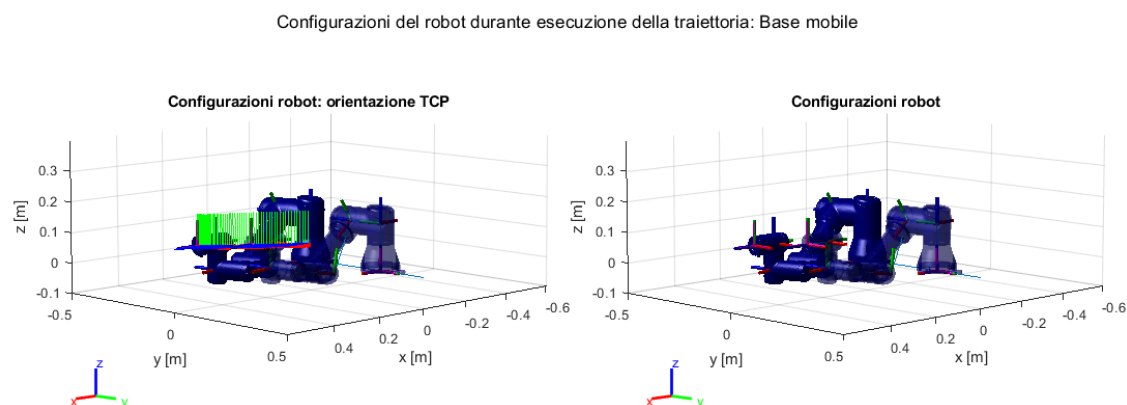


Figura 3.23 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro con base mobile

Dalla Figura 3.24, risulta evidente l'errore di posizione e orientamento che si determina cercando di completare la traiettoria senza spostare la base. Il valore di tale errore è riportato nelle Figura 3.26 e Figura 3.27. Invece, per quanto riguarda il caso di base mobile, si riportano alcune configurazioni del robot in Figura 3.23 e le relazioni tra moto relativo e moto di trascinamento in Figura 3.25.

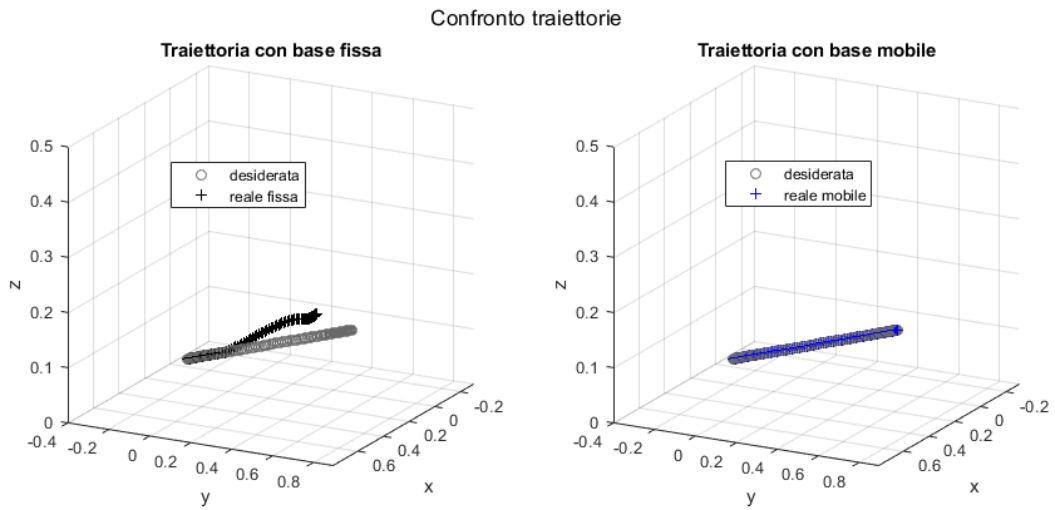


Figura 3.24 - Percorso del TCP durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

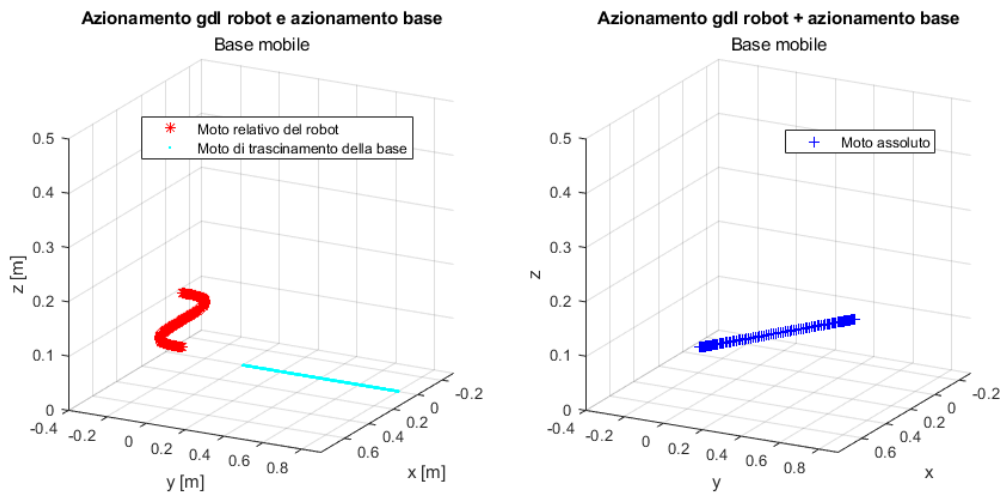


Figura 3.25 - Moto assoluto, relativo e di trascinamento nel caso di base mobile

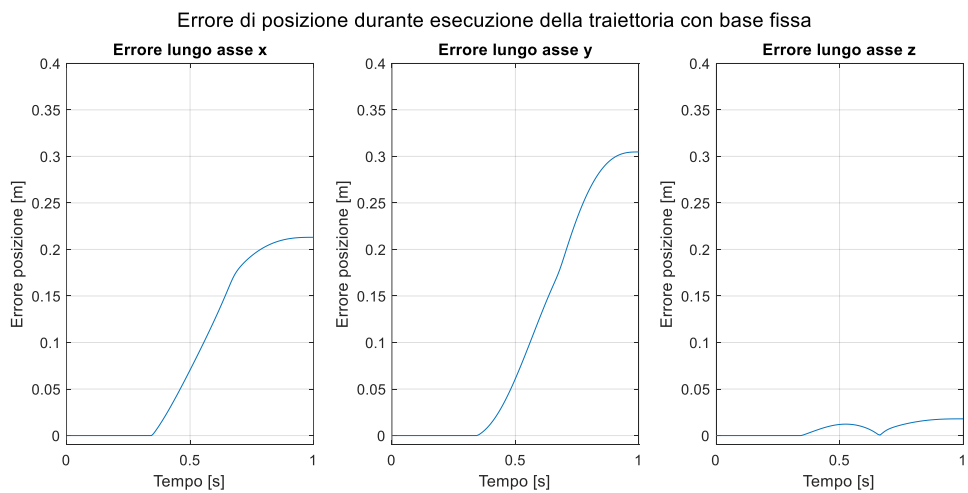


Figura 3.26 - Errore di posizione durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

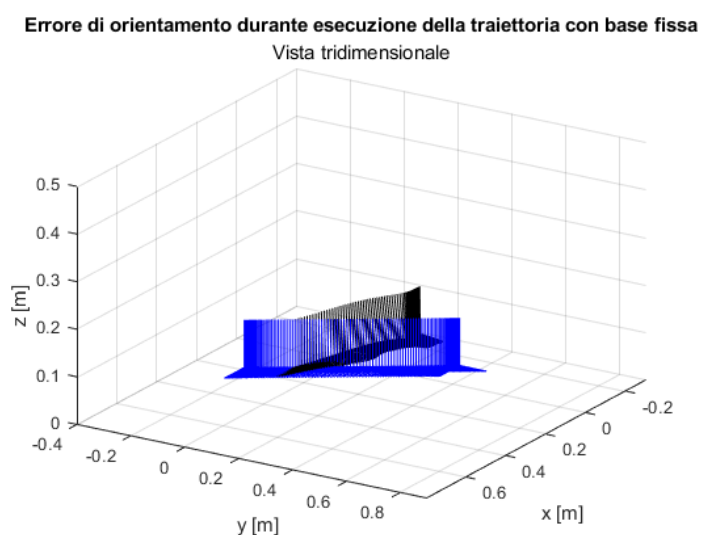


Figura 3.27 - Errore di orientamento durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

Anche per questa traiettoria si esegue un'analisi in termini di auto-collisione e si ricava che non si verificano auto-collisioni durante l'esecuzione della traiettoria sia nel caso di base fissa che nel caso di base mobile.

Invece, analizzando l'andamento del determinante della matrice jacobiana (Figura 3.28) si ricava che nel caso di traiettoria eseguita con base fissa, nell'istante in cui si raggiunge il limite del campo di lavoro si determina un valore nullo del determinante: ciò è dovuto al fatto che nel raggiungere il limite dello spazio di lavoro si è raggiunta anche la configurazione di singolarità di gomito esteso.

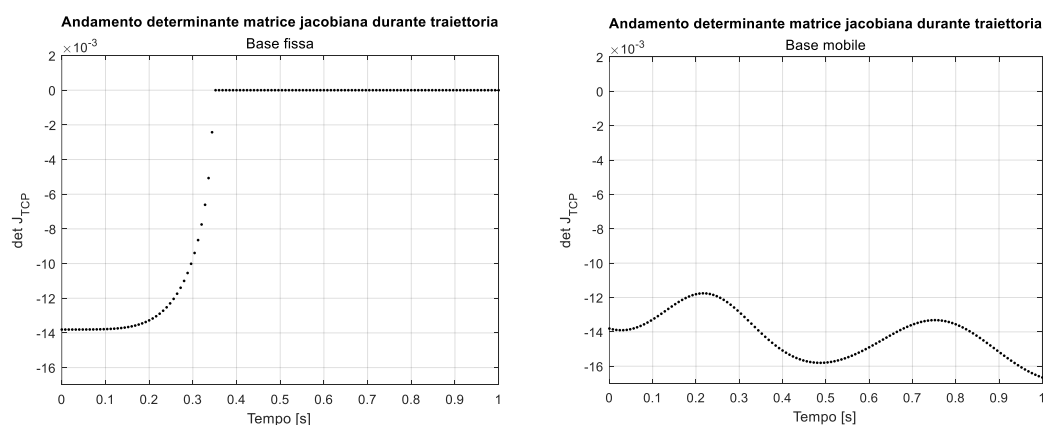


Figura 3.28 - Andamento del determinante della matrice jacobiana durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

3.3.2 Analisi della posizione e della velocità del TCP

Come evidenziato dalle figure precedenti, anche in Figura 3.29 si evidenzia il fatto che utilizzando il metodo della base fissa il robot non è in grado di raggiungere il target a differenza del caso con base mobile.

Invece, per quanto riguarda le velocità del TCP nel caso di base mobile (Figura 3.30), rimangono valide le stesse considerazioni del caso precedente: i picchi di velocità di spunto sono dovute al moto della base imposto come moto rettilineo uniforme con velocità costante.

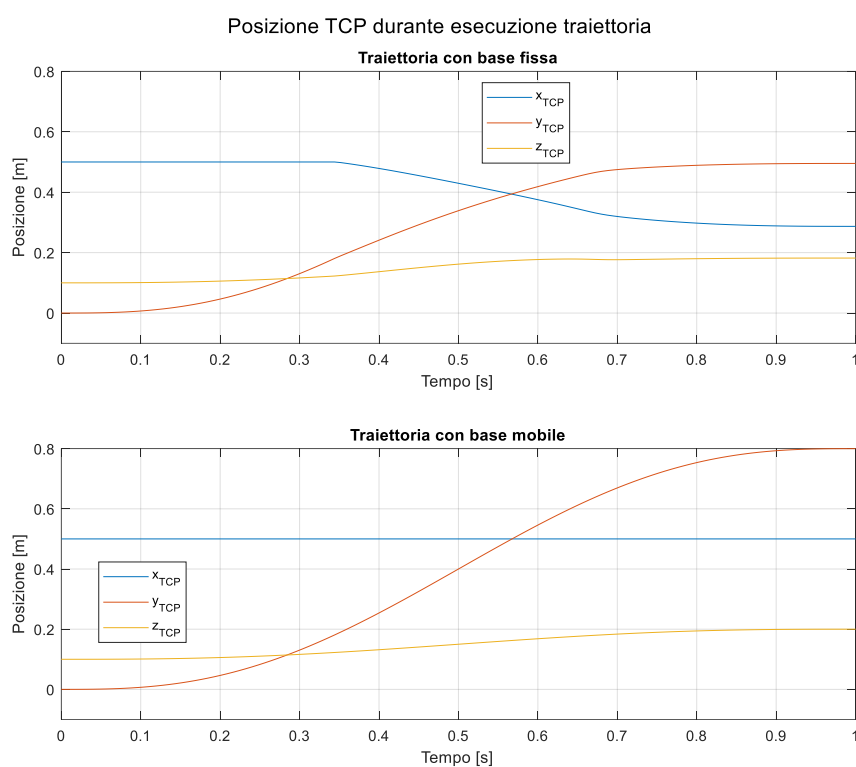


Figura 3.29 - Andamento della posizione del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

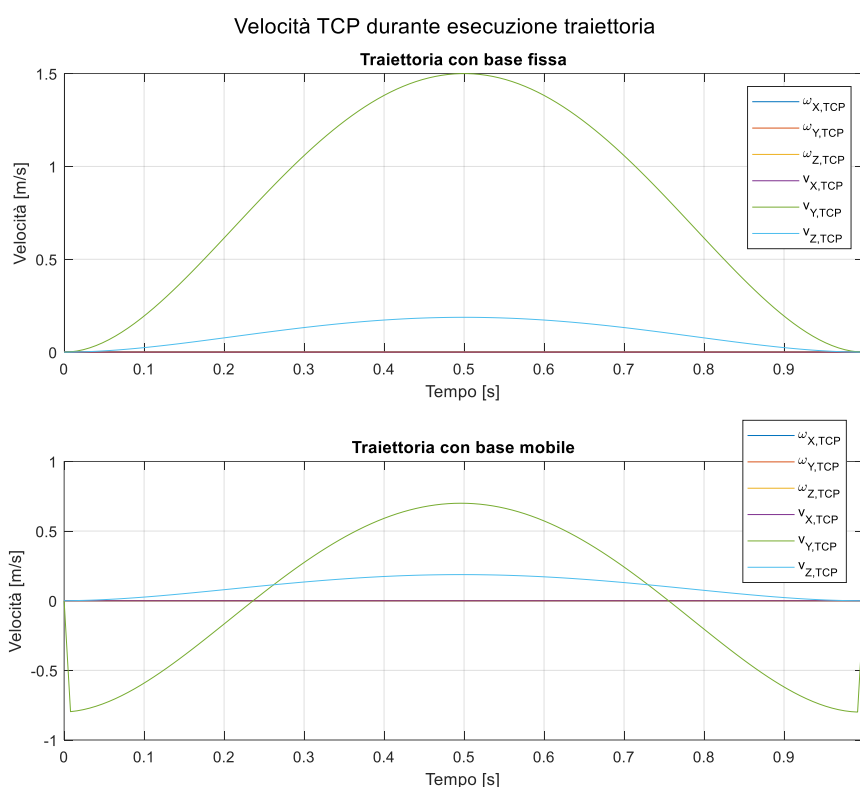


Figura 3.30 - Andamento della velocità del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

3.3.3 Analisi dei gradi di libertà

Si riportano, rispettivamente in Figura 3.31, Figura 3.32 e Figura 3.34, gli andamenti di posizione, velocità e accelerazione dei gradi di libertà. Risulta evidente come, nel caso di traiettoria eseguita con base fissa, dall'istante in cui si raggiunge il limite del campo di lavoro, e quindi la singolarità di gomito esteso, si hanno velocità nei giunti che non solo superano i valori limite ma tendono ad infinito. Tale comportamento viene rispecchiato anche dagli andamenti delle accelerazioni.

Per quanto riguarda il caso di base mobile, considerando l'ingrandimento riportato in Figura 3.33, si ha che tale metodo permette di mantenere le velocità all'interno dei range.

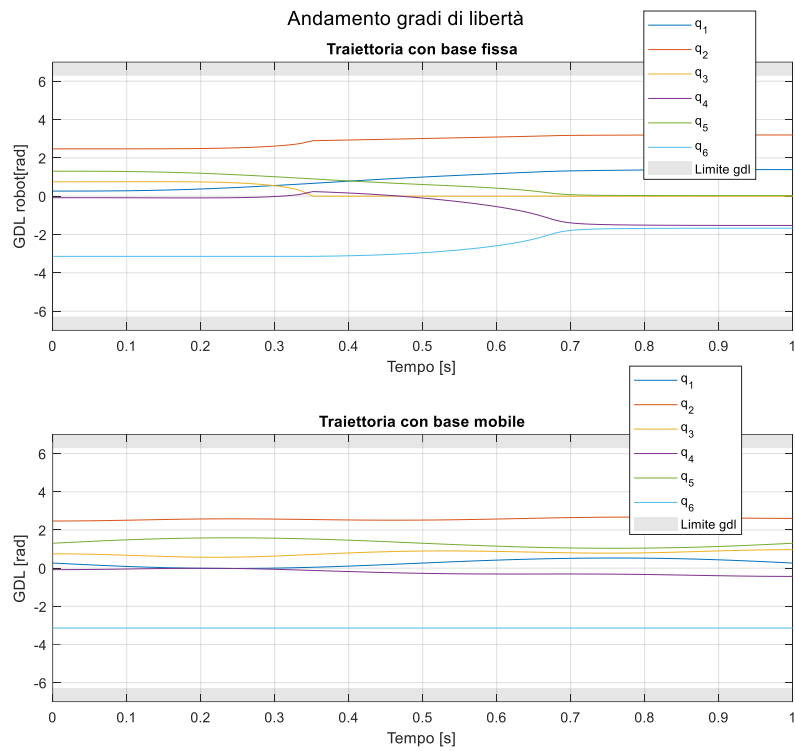


Figura 3.31 - Andamento dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

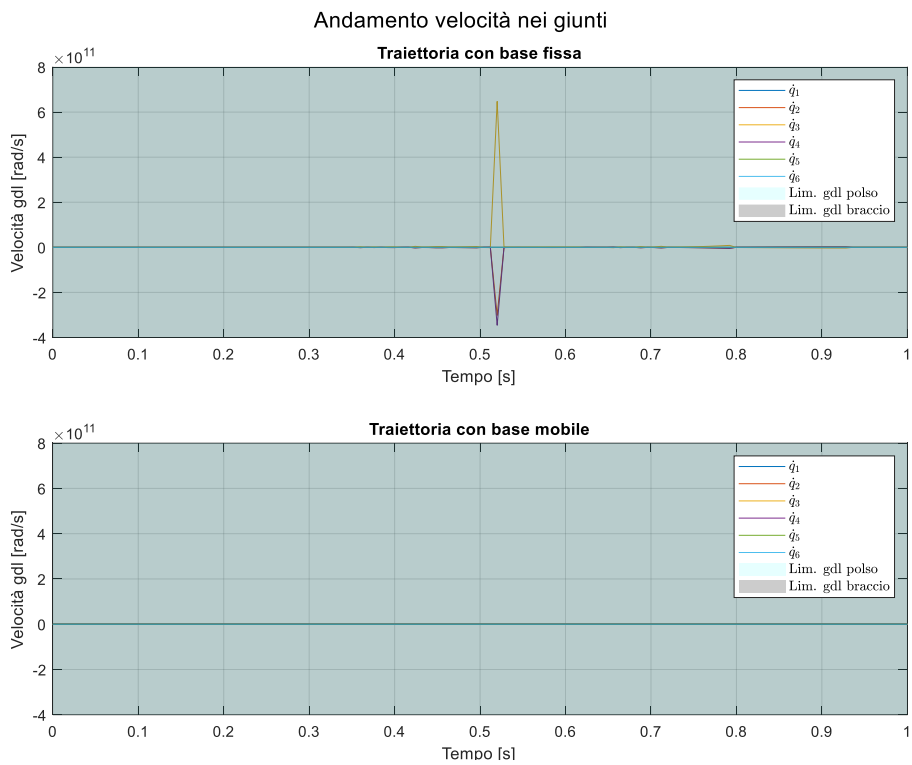


Figura 3.32 - Andamento della velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

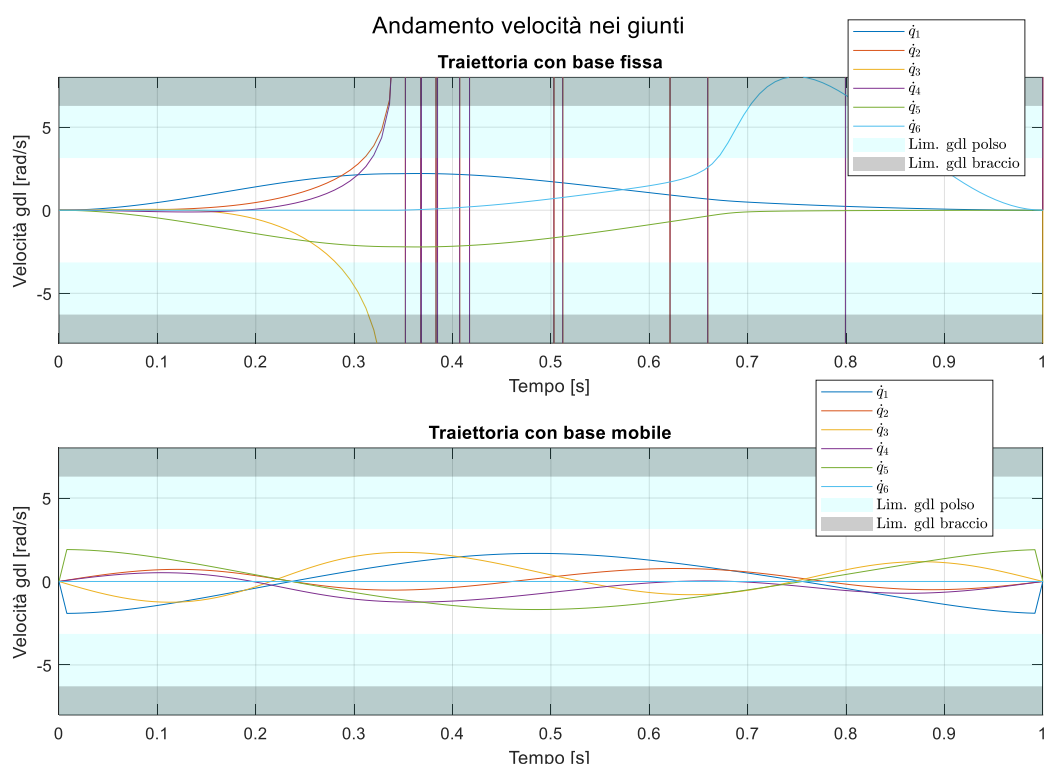


Figura 3.33 - Ingrandimento dell'andamento della velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

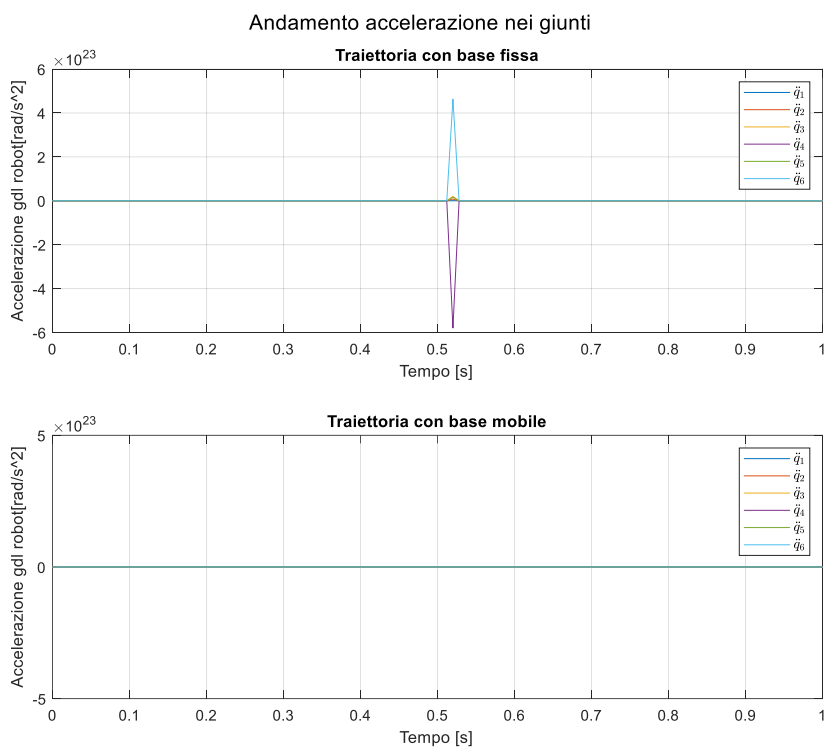


Figura 3.34 - Andamento dell'accelerazione dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

3.3.4 Analisi della potenza

Come nel caso di traiettoria orizzontale *safe* anche in questo caso l'utilizzo della base mobile permette di ridurre la coppia nei giunti (Figura 3.35) e conseguentemente anche la potenza richiesta durante l'esecuzione della traiettoria (Figura 3.36, Figura 3.37).

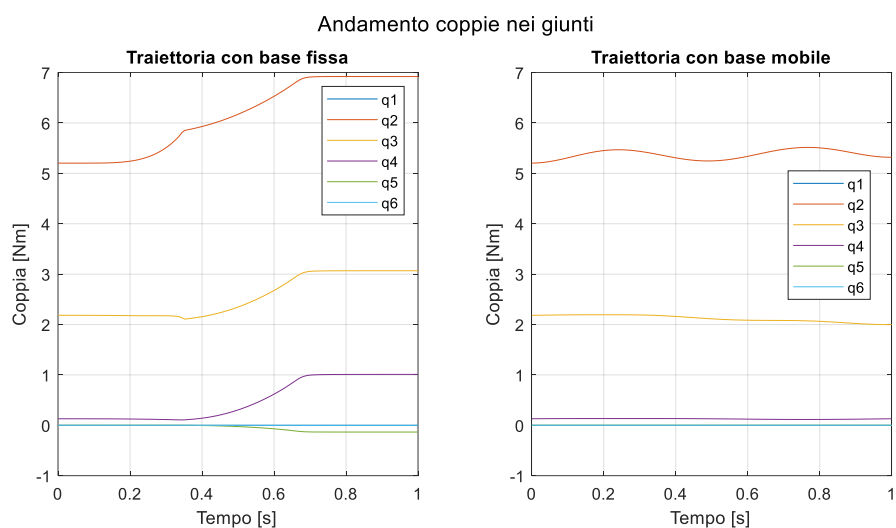


Figura 3.35 - Coppie nei giunti durante l'esecuzione della traiettoria oltre lo spazio di lavoro

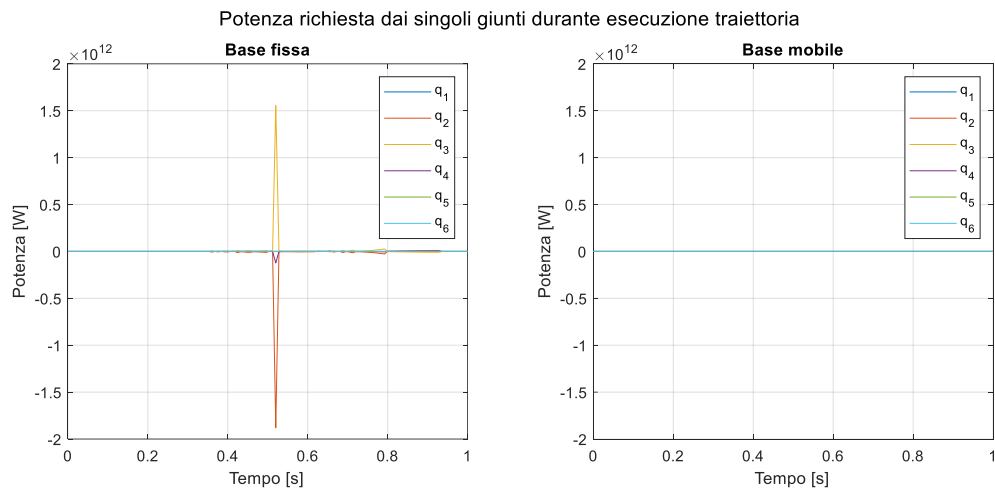


Figura 3.36 - Potenza istantanea richiesta dai giunti per l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

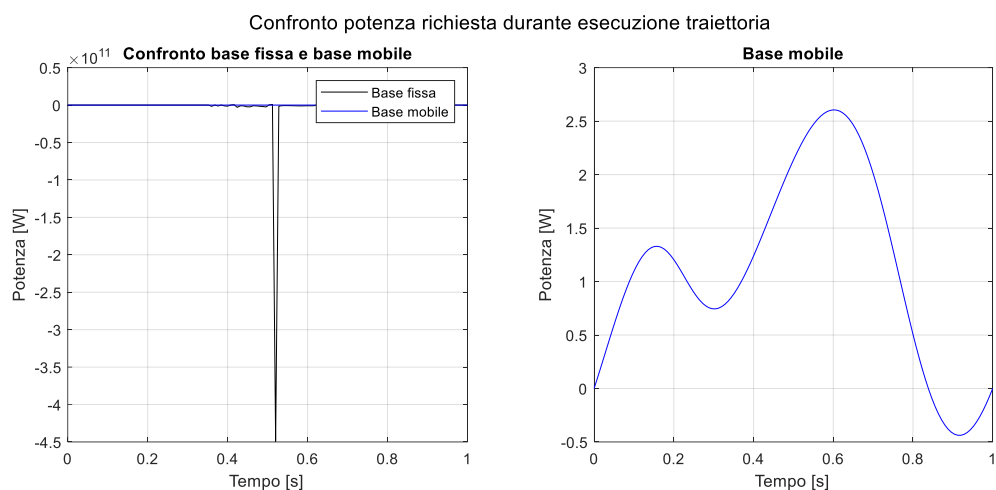


Figura 3.37 - Potenza istantanea richiesta per l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

3.3.5 Analisi della posizione del centro di massa

Come per il caso precedente, si riporta la posizione nello spazio del centro di massa del robot (Figura 3.38 e Figura 3.39) e si ottiene un vantaggio in termini di posizione solo lungo l'asse della guida, ossia l'asse y.

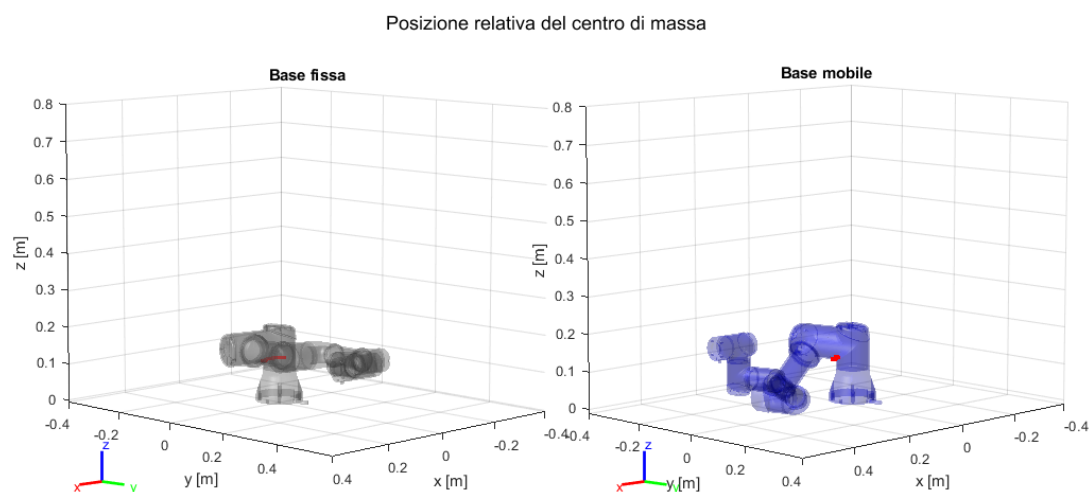


Figura 3.38 - Posizione relativa del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

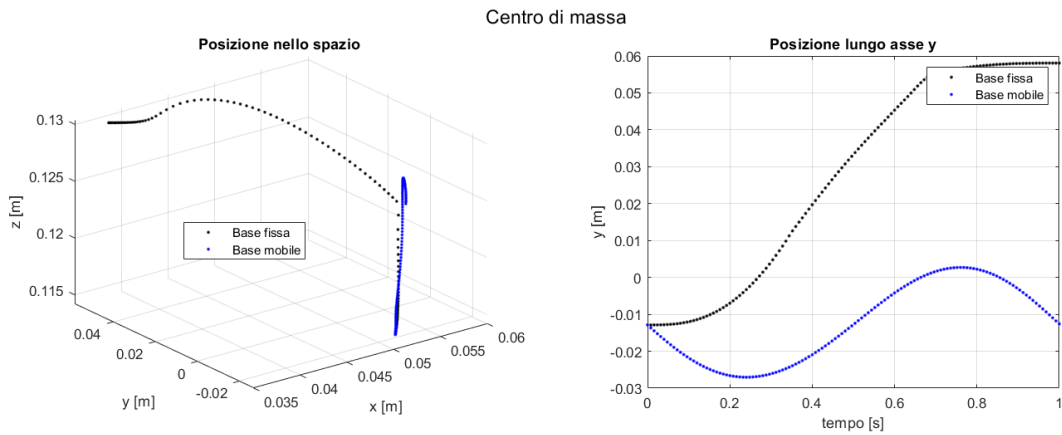


Figura 3.39 - Traiettoria del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro

3.3.6 Traiettoria su mappatura dello spazio di lavoro

Anche in questo caso si utilizza la mappatura dello spazio di lavoro in funzione di destrezza, auto-collisioni e singularità e si evidenzia come la traiettoria con base fissa vada oltre lo spazio di lavoro del piano $x = 0.5 \text{ m}$, mentre l'utilizzo della base permette l'esecuzione della traiettoria come evidenziato in Figura 3.40.

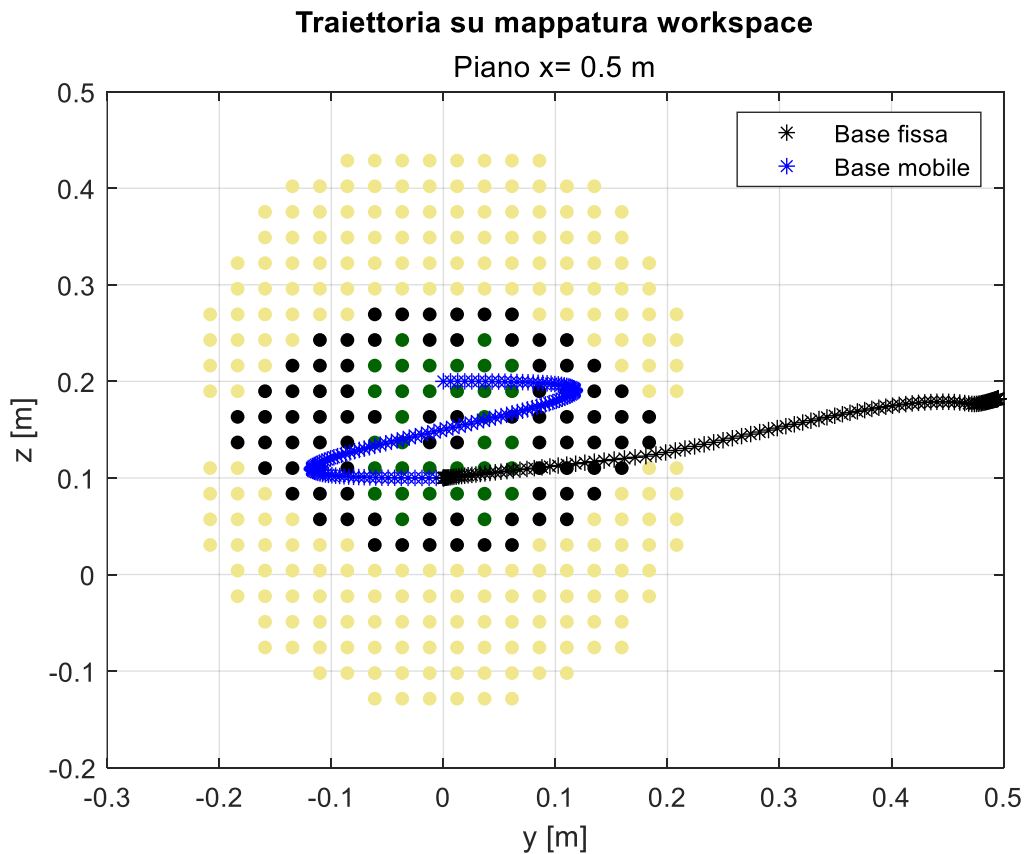


Figura 3.40 - Traiettoria obliqua oltre lo spazio di lavoro proiettata sulla mappatura dello spazio di lavoro

3.4 Traiettoria prossima alla singolarità di gomito

Si analizza una traiettoria che transita in prossimità della singolarità di gomito. I dati utilizzati per realizzare tale traiettoria sono i seguenti:

- Posa iniziale:

$${}^0A_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.35 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

- Configurazione iniziale: soluzione 1 (Figura 3.41)

0.4229	2.9438	1.7444	-1.5467	1.1479	-3.1416	0	0	0
0.4229	-1.7561	-1.7444	0.3589	1.1479	-3.1416	0	0	0
0.4229	-2.6253	0.9029	1.7225	-1.1479	0	0	3.0000	0
0.4229	-1.7882	-0.9029	2.6911	-1.1479	0	0	0	0
2.7186	-1.3534	0.9029	0.4505	1.1479	0	0	0	0
2.7186	-0.5163	-0.9029	1.4191	1.1479	0	0	3.0000	0
2.7186	-1.3855	1.7444	2.7827	-1.1479	3.1416	0	0	0
2.7186	0.1978	-1.7444	-1.5949	-1.1479	3.1416	0	0	0

Figura 3.41 - Soluzioni del problema di cinematica inversa associata alla posa iniziale 3.7⁴

- Posa finale:

$${}^0A_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.35 \\ 1 & 0 & 0 & 0.35 \\ 0 & 1 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

- Tempo di esecuzione della traiettoria: 1 s
- Time scaling: polinomiale di quinto grado
- Moto base: moto rettilineo uniforme con velocità costante
- Punto di partenza della base: $y = 0$ m
- Punto di arrivo della base: $y = 0.35$ m

⁴ Si utilizza la stessa notazione usata nel capitolo precedente per analizzare le singole colonne: le colonne 1÷6 contengono i gradi di libertà in radianti, la colonna 7 è relativa alla raggiungibilità (0 se *safe*, 2 se non raggiungibile), la colonna 8 riporta l'analisi in termini di auto-collisione e posizione relativa dei link (0 se *safe*, 3 se auto-collisione, 4 se braccio sporgente), la colonna 9 indica il link che è posizionato oltre il TCP, la colonna 10 riporta il valore dell'indice di prossimità ai limiti di giunto (0 lontano dai vincoli, 1 in corrispondenza dei limiti), la colonna 11 riporta il valore del determinante della matrice jacobiana.

In Figura 3.42 si riportano la posa iniziale e finale desiderate per l'esecuzione del task.

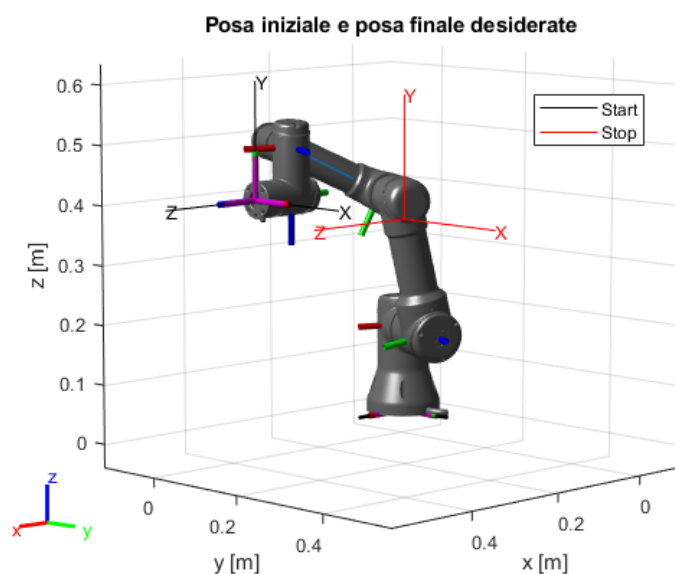


Figura 3.42 - Pose iniziale e finale della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

3.4.1 Analisi della traiettoria

Si tratta di una traiettoria realizzata all'interno dello spazio di lavoro e le differenze di posa tra caso con base fissa e caso con base mobile sono riportate in Figura 3.43 e Figura 3.44.

Configurazioni del robot durante esecuzione della traiettoria: Base fissa

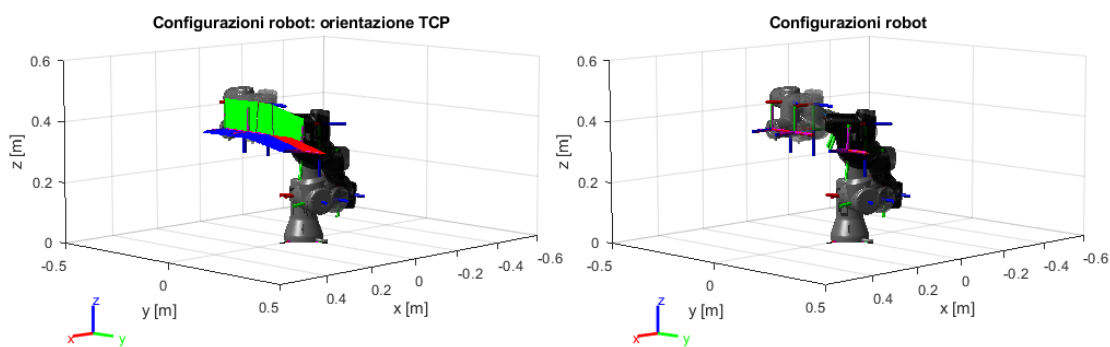


Figura 3.43 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito con base fissa

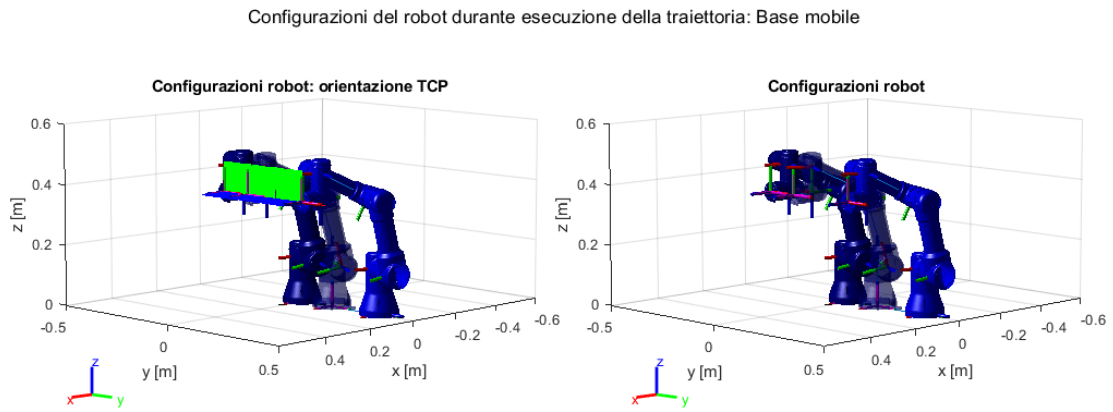


Figura 3.44 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito con base mobile

Risulta evidente dalla Figura 3.45 e dagli errori riportati in Figura 3.47 che quando il robot transita nei pressi della singolarità di gomito esteso perde precisione sia in termini di posizione che di orientamento.

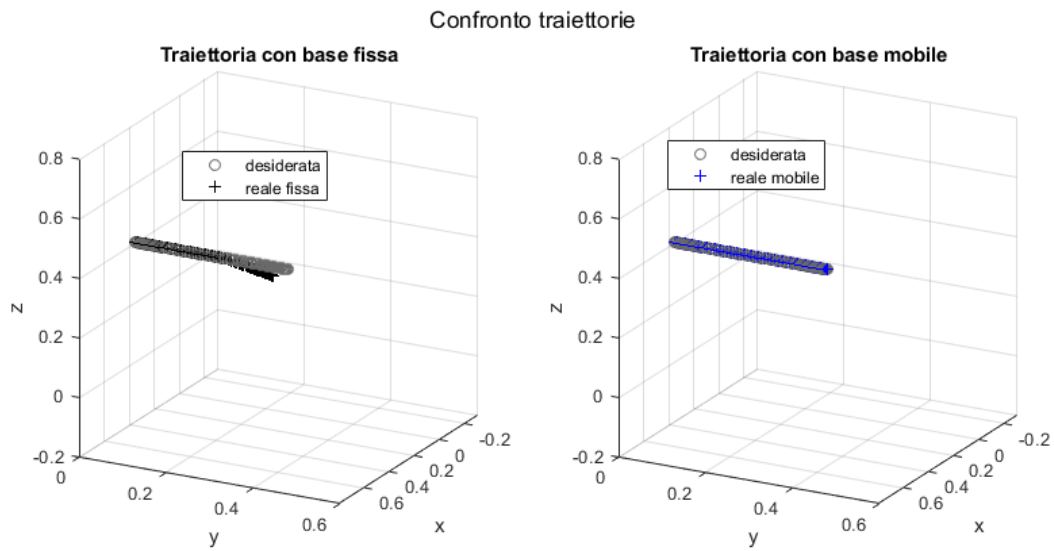


Figura 3.45 - Percorso TCP durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

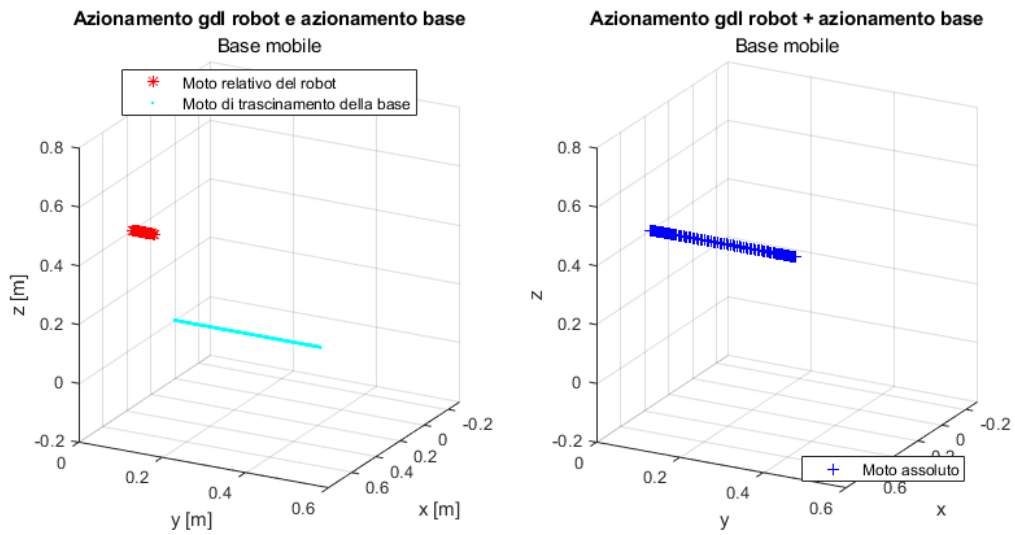


Figura 3.46 - Moto assoluto, relativo e di trascinamento nel caso di base mobile

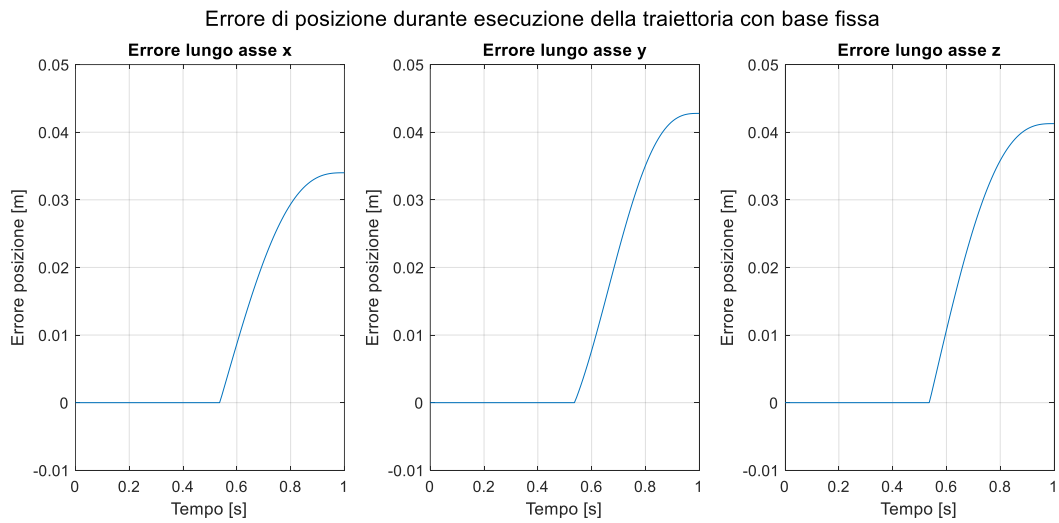


Figura 3.47 - Errore di posizione durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

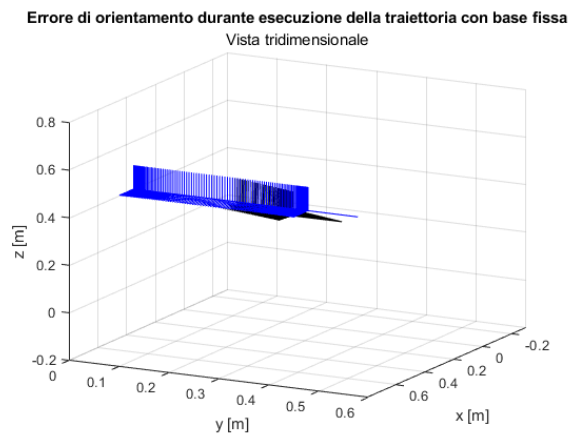


Figura 3.48 - Errore di orientazione durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

Anche in questo caso non si verificano auto-collisioni durante l'esecuzione della traiettoria né nel caso di base fissa né nel caso di base mobile ma si evidenzia, in Figura 3.49, l'annullamento del determinante della matrice jacobiana dall'istante in cui si è in prossimità della configurazione di singolarità.

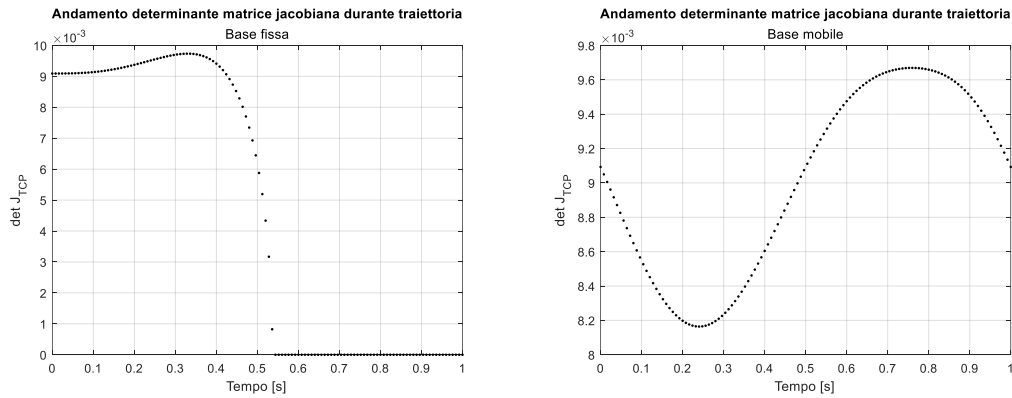


Figura 3.49 - Andamento del determinante della matrice jacobiana durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

3.4.2 Analisi della posizione e della velocità del TCP

Come nei casi precedenti si analizza la posizione e la velocità effettive del TCP e ne risulta che, nel caso di base fissa, avendo raggiunto la configurazione di singolarità non si è in grado di raggiungere il punto di target. I risultati sono riportati in Figura 3.50 e Figura 3.51.

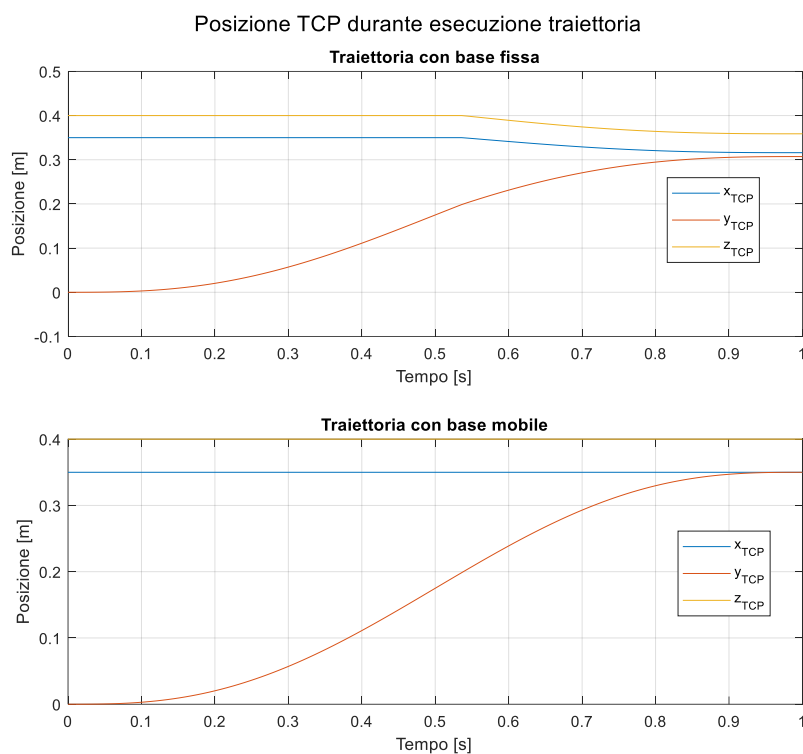


Figura 3.50 - Andamento della posizione del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

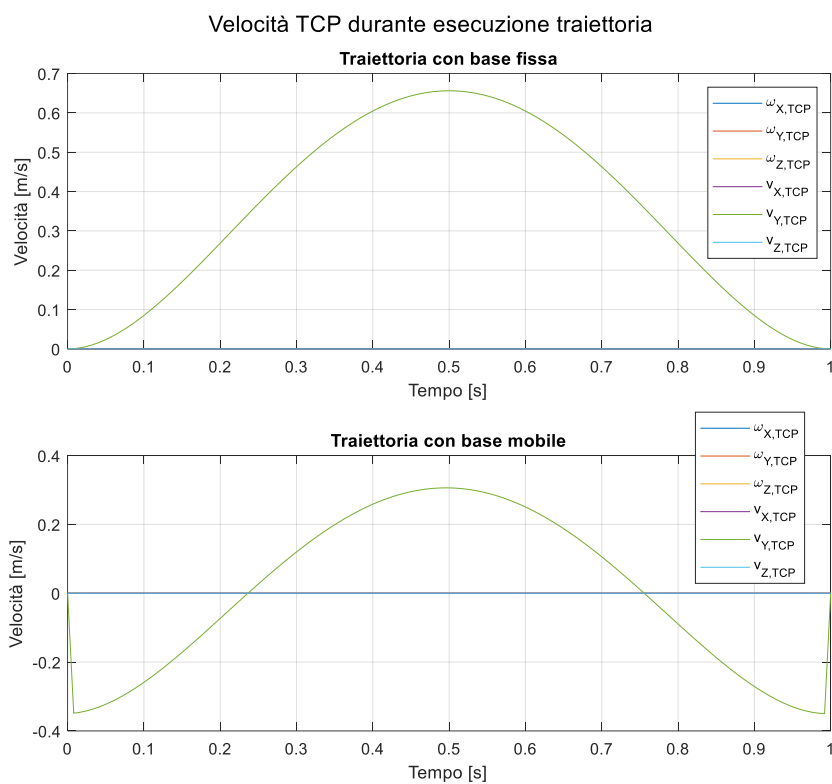


Figura 3.51 - Andamento della velocità del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

3.4.3 Analisi dei gradi di libertà

Come nei casi precedenti si riportano gli andamenti relativi ai gradi di libertà della struttura robotica nei quali si ritrova la conferma del passaggio per la configurazione di singolarità di gomito. Infatti dall'istante $t = 0.6$ s si ha un repentino aumento delle velocità nei giunti nel caso di base fissa (Figura 3.53) mentre, come evidenziato in Figura 3.54, nel caso di base mobile le velocità rientrano nei limiti.

I risultati relativi alla posizione dei gradi di libertà e alle accelerazioni sono riportati rispettivamente in Figura 3.52 e in Figura 3.55.

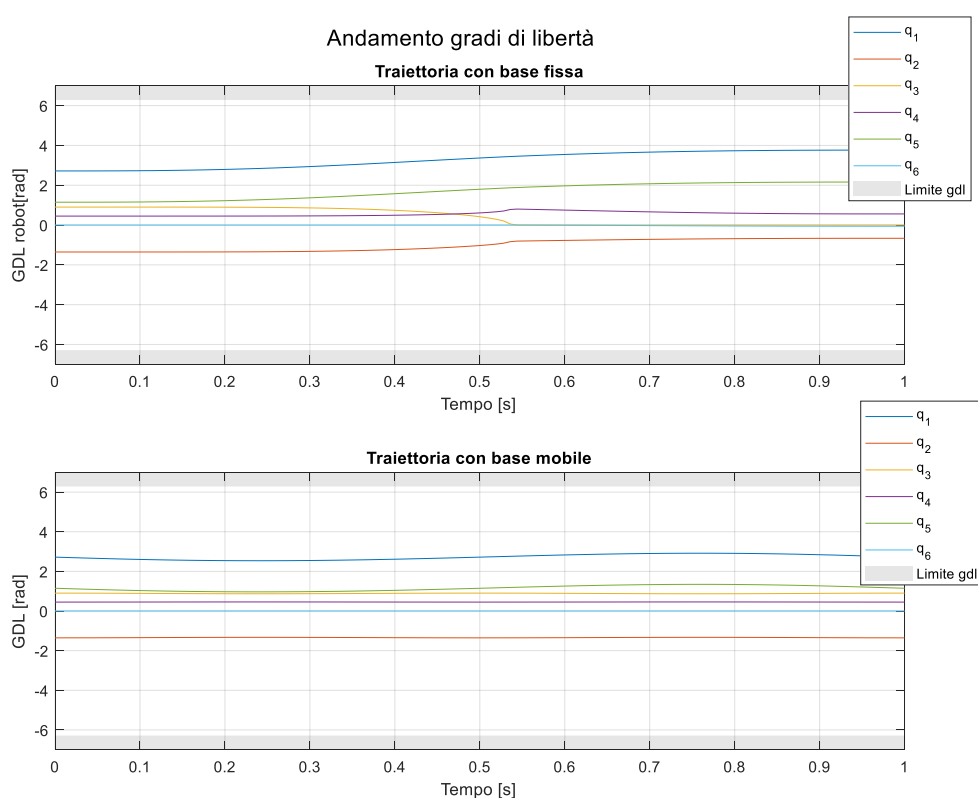


Figura 3.52 - Andamento dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

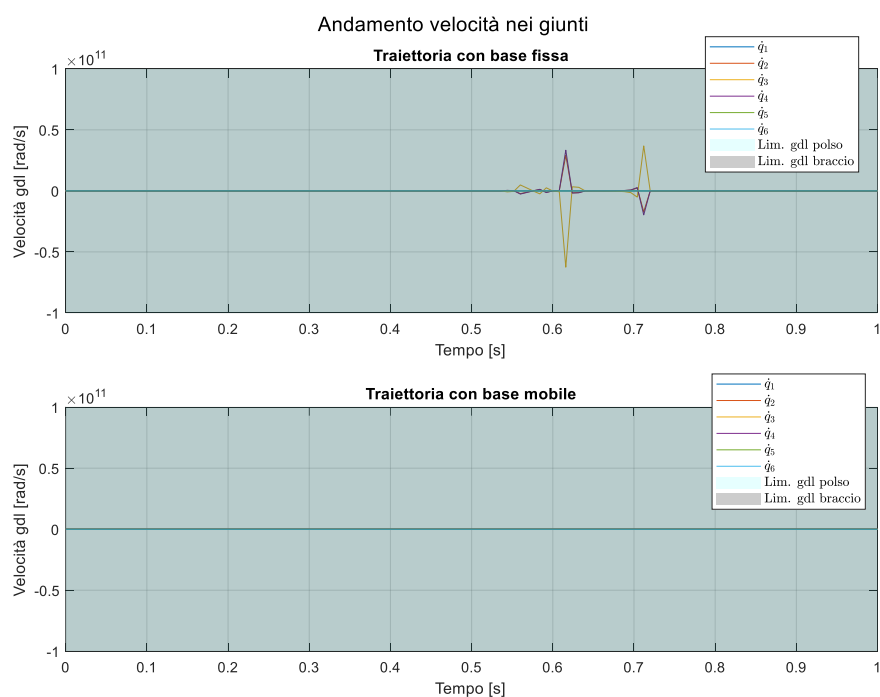


Figura 3.53 - Andamento della velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

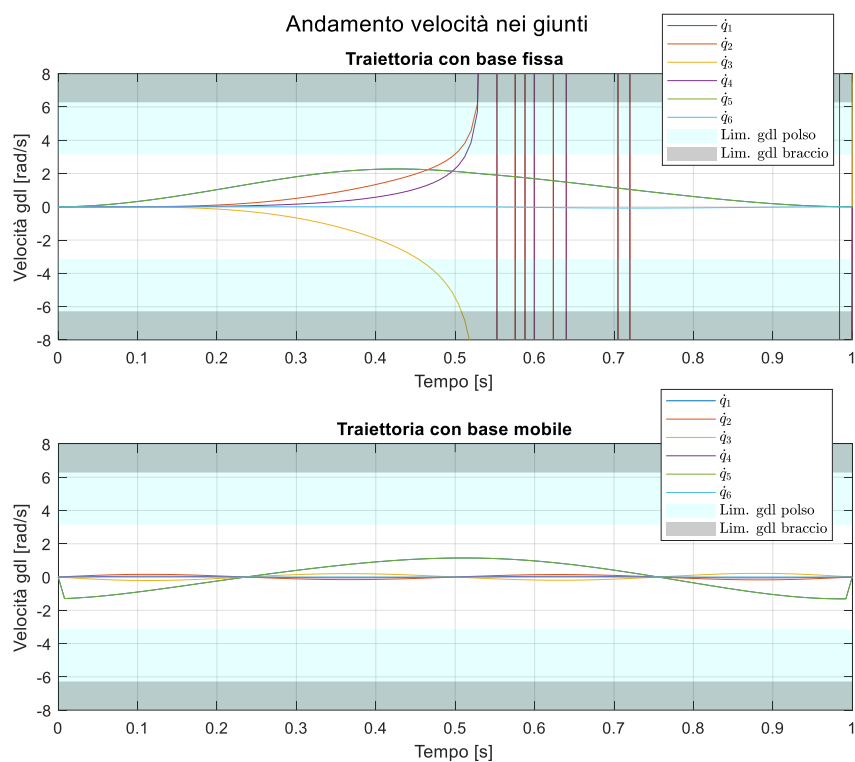


Figura 3.54 - Ingrandimento dell'andamento delle velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

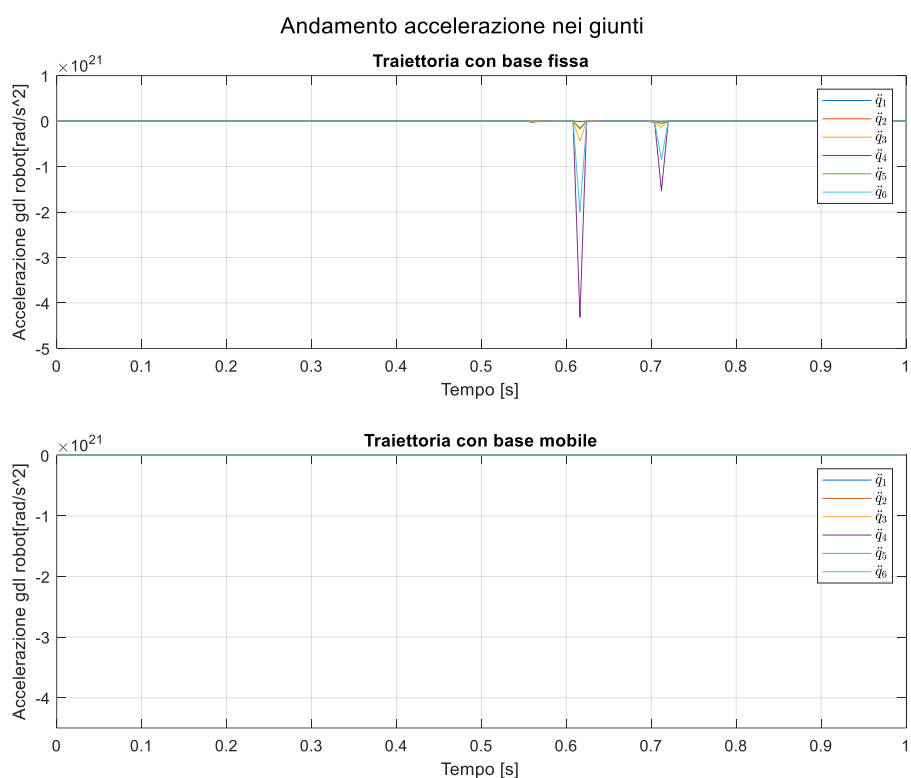


Figura 3.55 - Andamento delle accelerazioni dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

3.4.4 Analisi della potenza

I risultati dell'analisi in termini di coppia e potenza sono riportati in Figura 3.56, Figura 3.57 e Figura 3.58 e valgono le stesse considerazioni fatte per i casi precedenti.

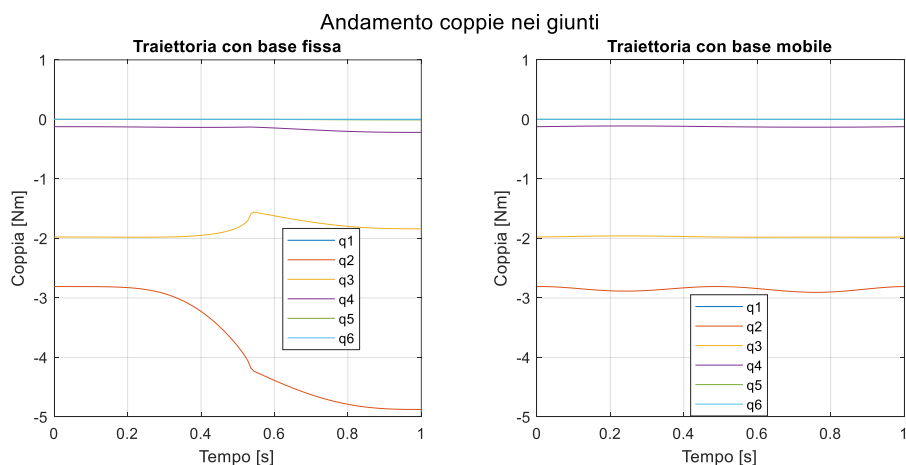


Figura 3.56 - Coppie nei giunti durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

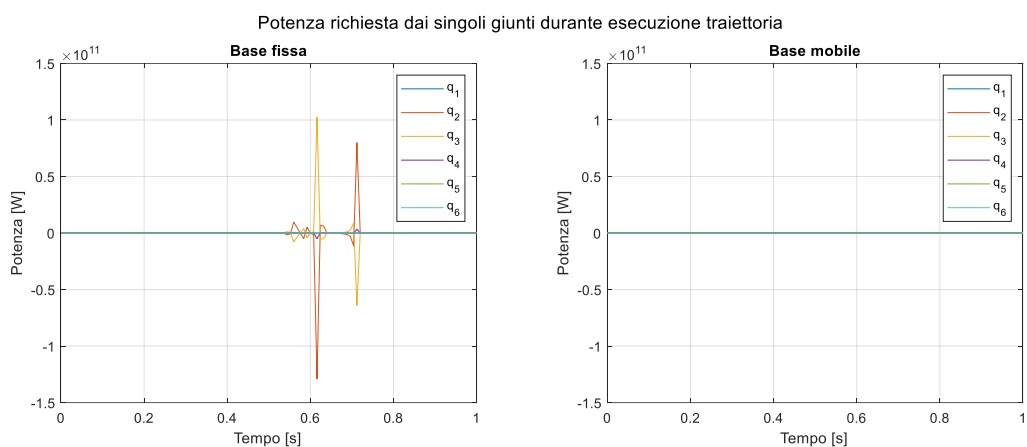


Figura 3.57 - Potenza istantanea richiesta dai giunti per l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

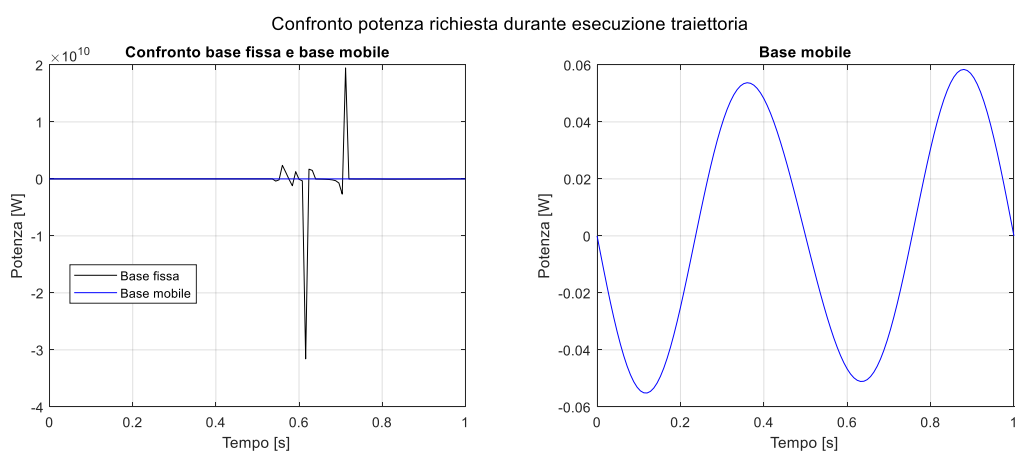


Figura 3.58 - Potenza istantanea richiesta per l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

3.4.5 Analisi della posizione del centro di massa

Anche per quanto riguarda l'analisi relativa al centro di massa, i cui risultati sono riportati in Figura 3.59 e Figura 3.60, valgono le stesse considerazioni dei casi precedenti.

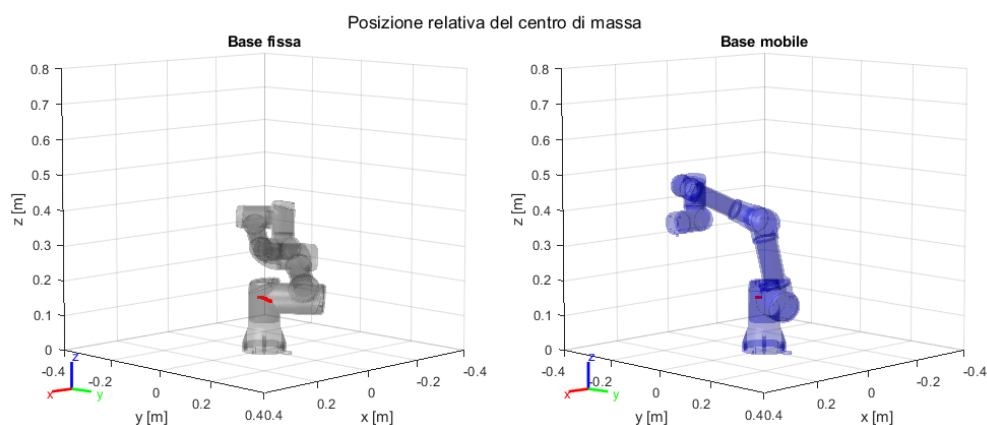


Figura 3.59 - Posizione relativa del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

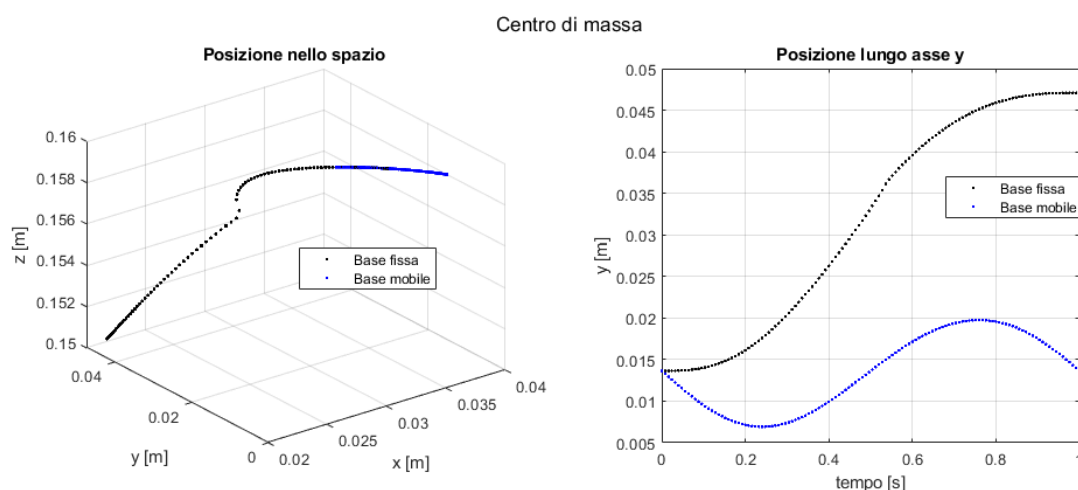


Figura 3.60 - Traiettoria del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria prossima alla singolarità di gomito

3.4.6 Traiettoria su mappatura dello spazio di lavoro

Infine, come per gli altri casi, si riporta in Figura 3.61 la proiezione della traiettoria sulla mappatura dello spazio di lavoro da cui è possibile evidenziare come nel caso di traiettoria con base fissa ci si avvicini al limite dello spazio di lavoro che è quello che determina la presenza della singolarità di gomito.

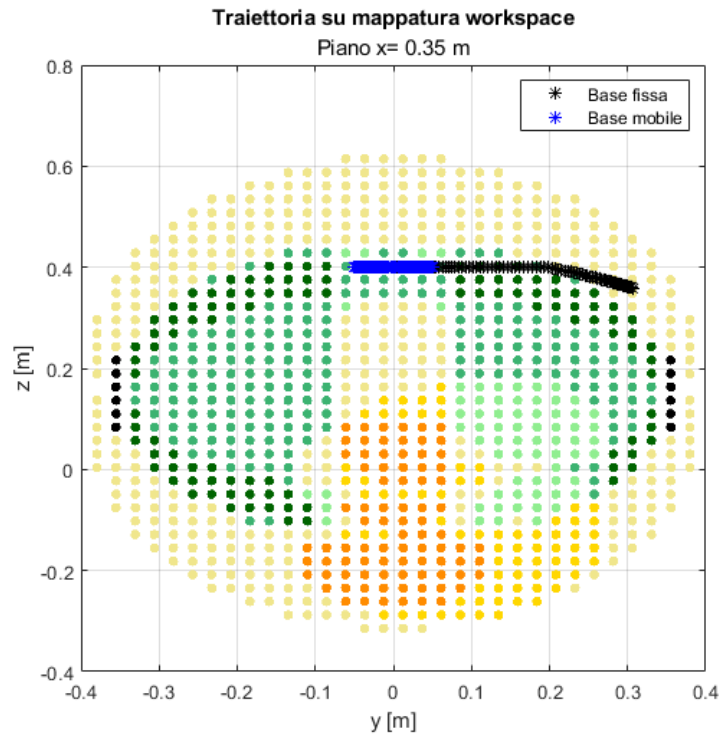


Figura 3.61 - Traiettorie prossima alla singolarità di gomito proiettata sulla mappatura dello spazio di lavoro

3.5 Traiettorie passante per una configurazione prossima alla singolarità di spalla e di auto-collisione

Si analizza una traiettoria che transita in prossimità della singolarità di spalla. I dati utilizzati per realizzare tale traiettoria sono i seguenti:

- Posa iniziale:

$${}^0A_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.15 \\ 1 & 0 & 0 & -0.15 \\ 0 & 1 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

- Configurazione iniziale: soluzione 4 (Figura 3.62)

-0.4138	1.8035	2.5924	-1.2543	1.9846	3.1416	0	3.0000	0
-0.4138	-2.3598	-2.5924	1.8106	1.9846	3.1416	0	3.0000	0
-0.4138	2.9474	2.3456	0.9902	-1.9846	0	0	3.0000	0
-0.4138	-1.3101	-2.3456	-2.6274	-1.9846	0	0	0	0
1.2650	-0.7818	2.5924	1.3310	0.3058	-3.1416	0	3.0000	0
1.2650	1.3380	-2.5924	-1.8873	0.3058	-3.1416	0	3.0000	0
1.2650	-1.8315	2.3456	-0.5142	-0.3058	0	0	0	0
1.2650	0.1942	-2.3456	2.1514	-0.3058	0	0	3.0000	0

Figura 3.62 - Soluzioni del problema di cinematica inversa associata alla posa iniziale 3.9⁵

- Posa finale:

$${}^0A_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.15 \\ 1 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0 & 1 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

- Tempo di esecuzione della traiettoria: 1 s
- Time scaling: polinomiale di quinto grado
- Moto base: moto rettilineo uniforme con velocità costante
- Punto di partenza della base: $y = -0.45 \text{ m}$
- Punto di arrivo della base: $y = 0 \text{ m}$

Si riportano in Figura 3.63 le pose iniziali e finali per l'esecuzione della traiettoria.

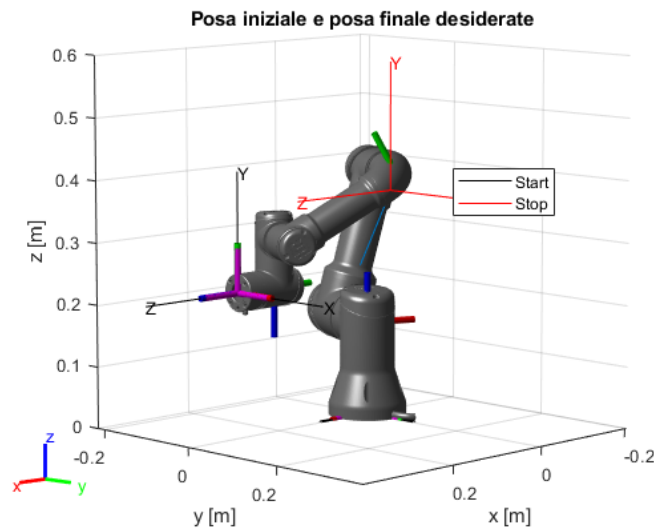


Figura 3.63 - Pose iniziale e finale della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

⁵ Si utilizza la stessa notazione usata nel capitolo precedente per analizzare le singole colonne: le colonne 1÷6 contengono i gradi di libertà in radianti, la colonna 7 è relativa alla raggiungibilità (0 se *safe*, 2 se non raggiungibile), la colonna 8 riporta l'analisi in termini di auto-collisione e posizione relativa dei link (0 se *safe*, 3 se auto-collisione, 4 se braccio sporgente), la colonna 9 indica il link che è posizionato oltre il TCP, la colonna 10 riporta il valore dell'indice di prossimità ai limiti di giunto (0 lontano dai vincoli, 1 in corrispondenza dei limiti), la colonna 11 riporta il valore del determinante della matrice jacobiana.

3.5.1 Analisi della traiettoria

La traiettoria analizzata, anche se rientra nei limiti dello spazio di lavoro accettabile, presenta due problematiche: da una parte si transita nei pressi della singolarità di spalla (come evidenziato dall'andamento del determinante della matrice jacobiana riportato in Figura 3.70) e dall'altra si transita per una configurazione di auto-collisione (riportata in Figura 3.71).

Analizzando alcune delle pose che il robot assume durante l'esecuzione della traiettoria si evidenzia, nel caso di base fissa, il ribaltamento della spalla tipici del passaggio per la configurazione di singolarità (Figura 3.64). Mentre nel caso di base mobile non si verifica (Figura 3.65).

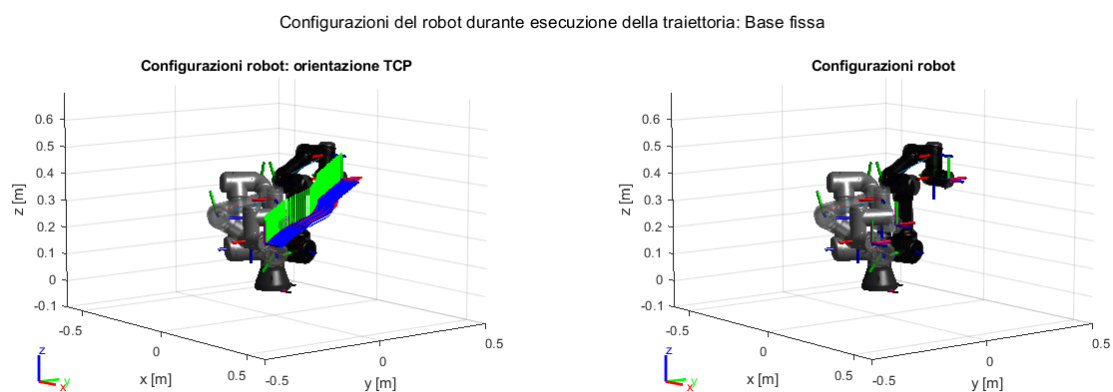


Figura 3.64 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione con base fissa

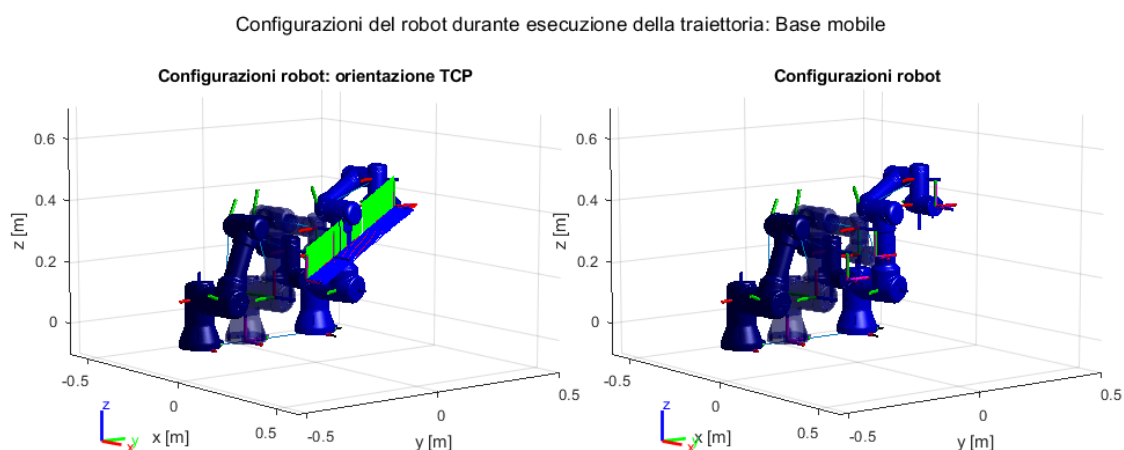


Figura 3.65 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione con base mobile

L'errore dovuto alla presenza della singolarità di spalla è evidenziato anche in Figura 3.66 dove si nota lo *sbandamento* del percorso e negli errori in Figura 3.68 e in Figura 3.69. Invece,

in Figura 3.67 si riporta il moto assoluto del robot con base fissa con determinazione dei moti relativi e di trascinamento.

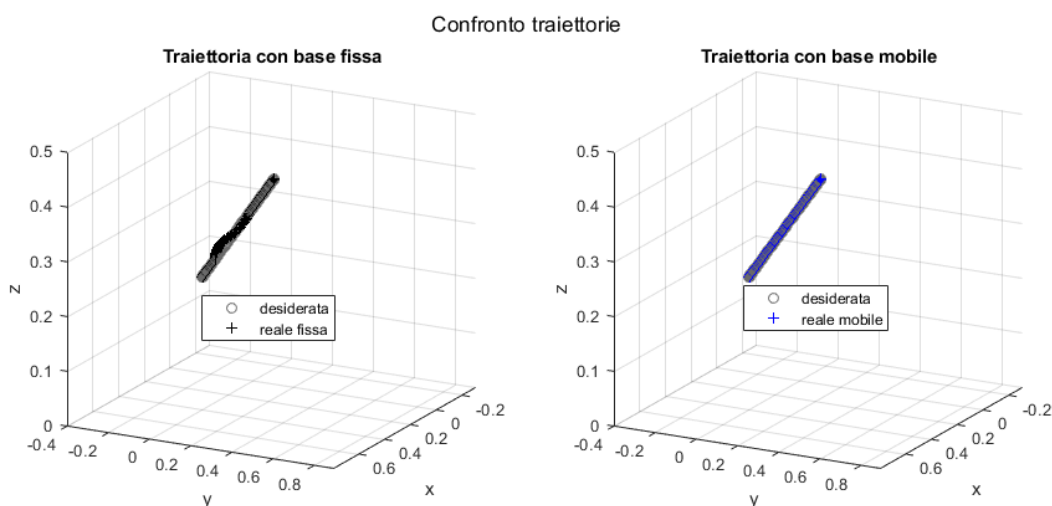


Figura 3.66 - Percorso del TCP durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

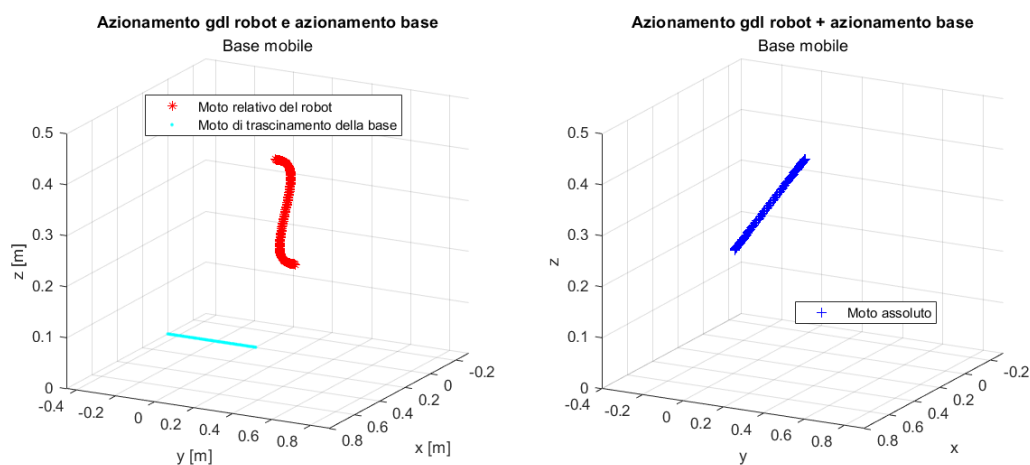


Figura 3.67 - Moto assoluto, moto relativo e moto di trascinamento nel caso di base mobile

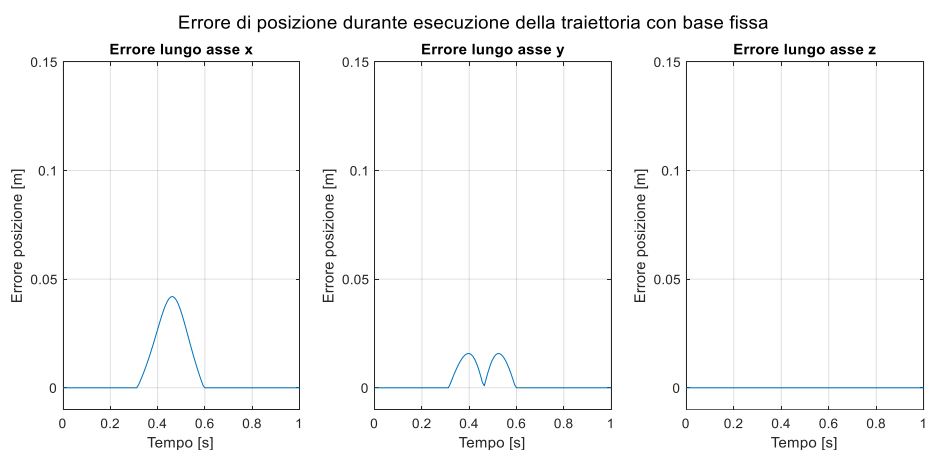


Figura 3.68 - Errore di posizione durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

Errore di orientamento durante esecuzione della traiettoria con base fissa
Vista tridimensionale

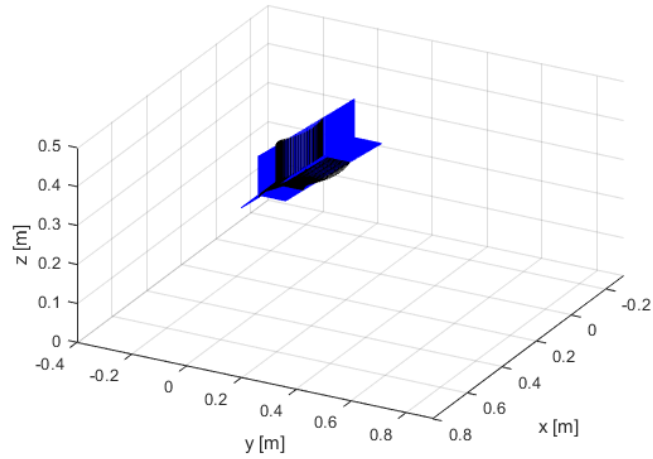


Figura 3.69 - Errore orientamento durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

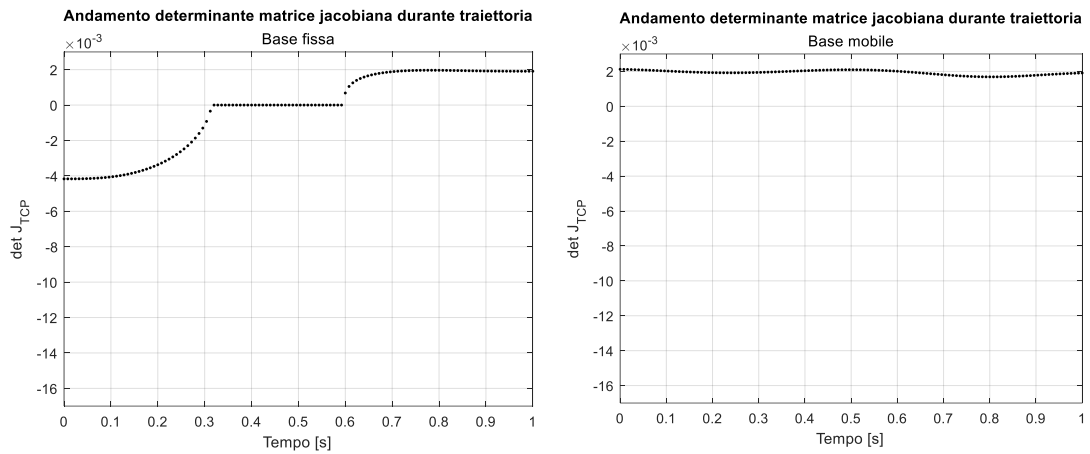


Figura 3.70 - Andamento determinante della matrice jacobiana durante l'esecuzione della traiettoria passante per la singolarità di spalla e l'auto-collisione

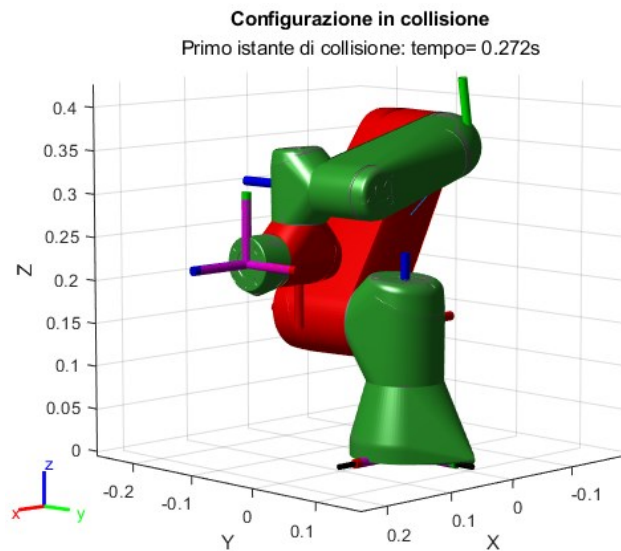


Figura 3.71 - Prima configurazione di auto-collisione durante l'esecuzione della traiettoria con base fissa

3.5.2 Analisi dello spostamento e della velocità del TCP

Analizzando gli andamenti della posizione del TCP nel tempo (Figura 3.72) risulta evidente che il passaggio per la configurazione di singolarità avviene tra gli istanti di tempo $t = 0.3$ s e $t = 0.6$ s in quanto si verifica uno sbandamento del percorso.

Invece, per quanto riguarda le velocità del TCP (Figura 3.73), i picchi di velocità nel caso di base mobile sono dovuti al moto imposto alla base come nei casi precedenti.

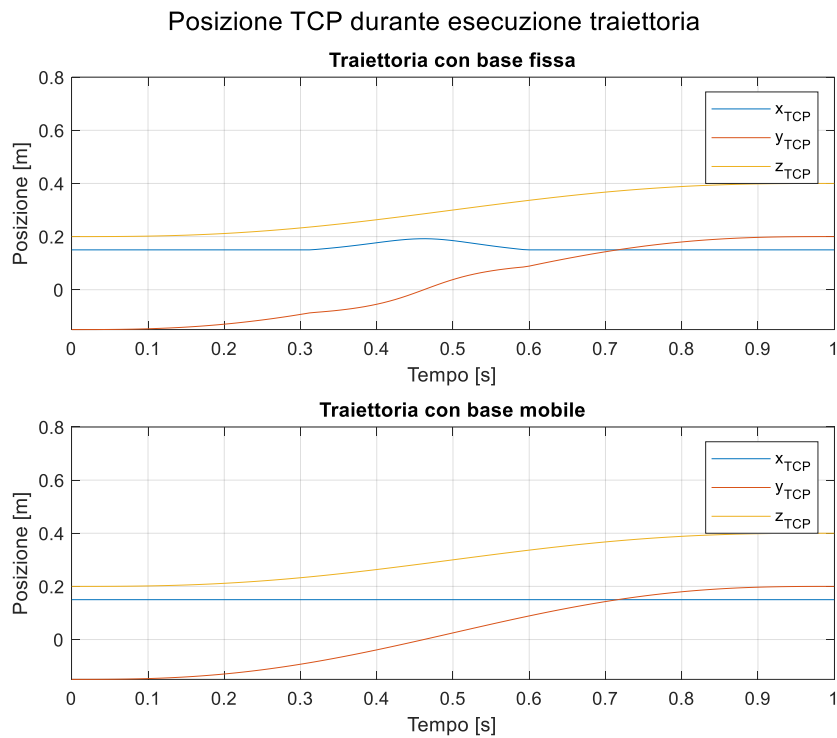


Figura 3.72 - Andamento della posizione del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

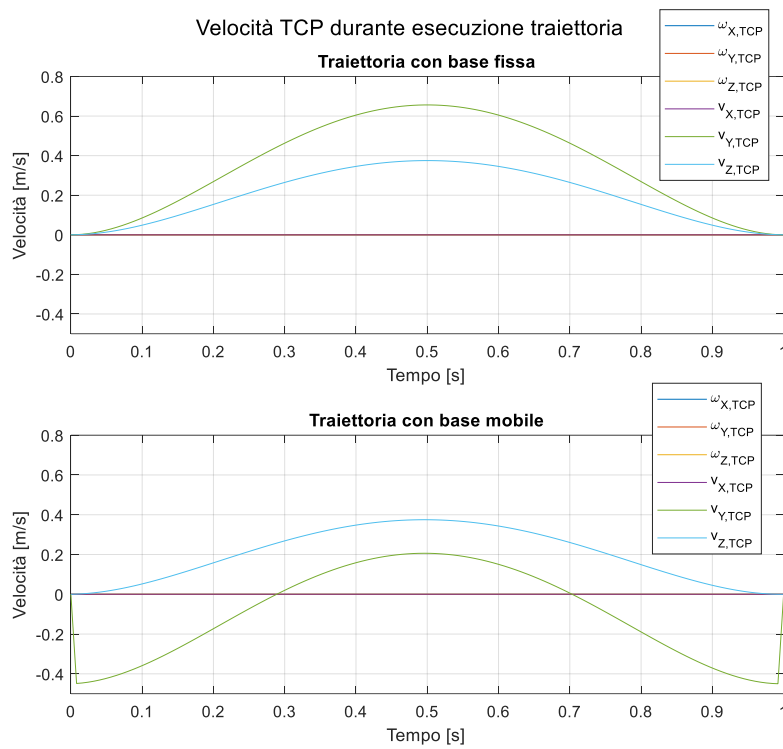


Figura 3.73 - Andamento della velocità del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

3.5.3 Analisi dei gradi di libertà

In Figura 3.74, Figura 3.75 e Figura 3.77 si riportano gli andamenti dei gradi di libertà e le relative velocità e accelerazioni. Come nel caso del passaggio per la singolarità di gomito, anche in questo caso quando si arriva in prossimità della singolarità di spalla si verifica un repentino aumento delle velocità; mentre, utilizzando la base mobile si riesce ad effettuare la traiettoria mantenendo le velocità nei giunti all'interno dei limiti (Figura 3.76).

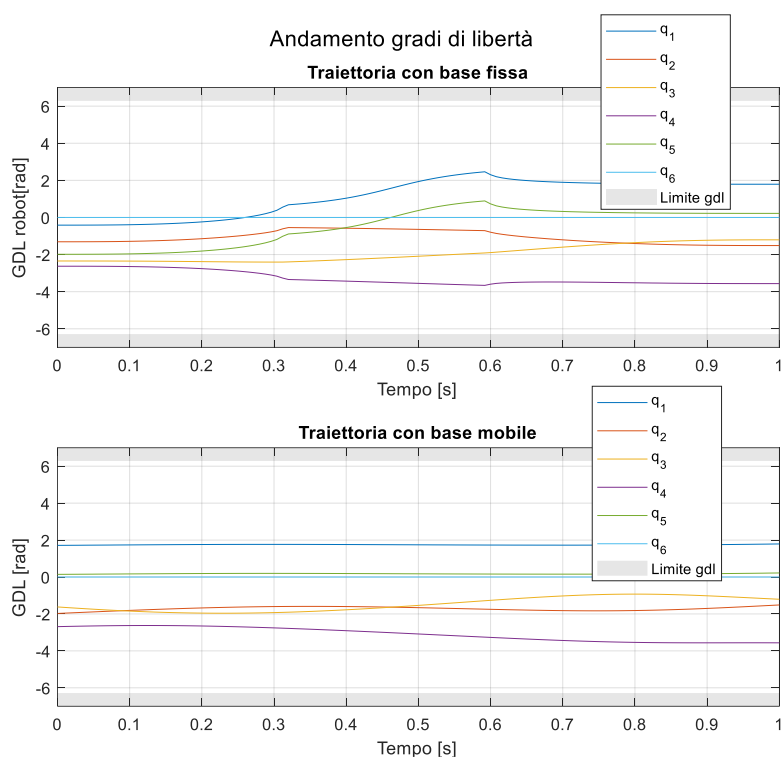


Figura 3.74 - Andamento dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

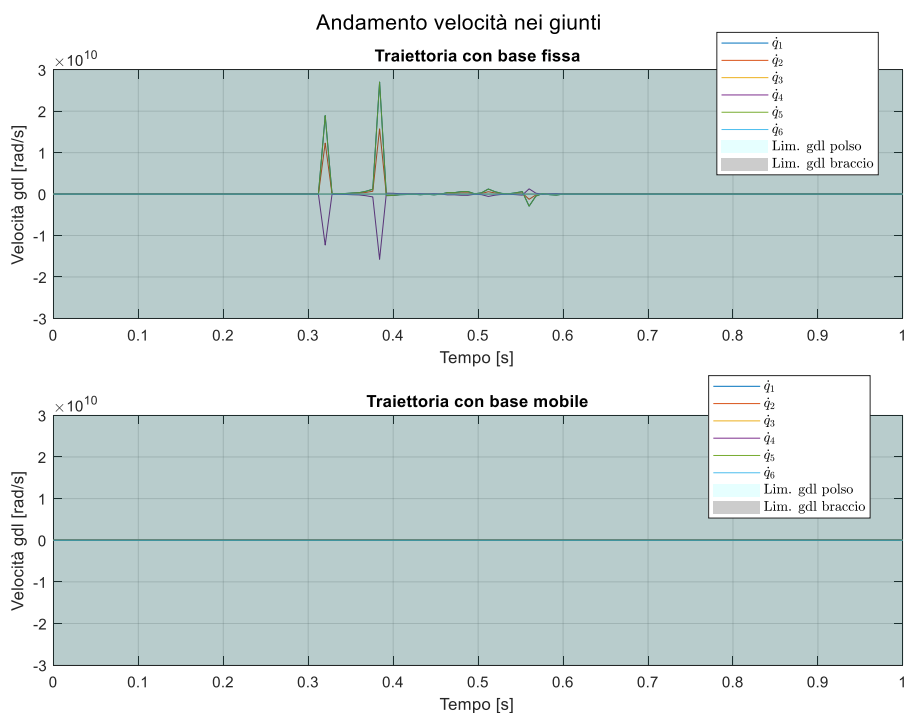


Figura 3.75 - Andamento delle velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

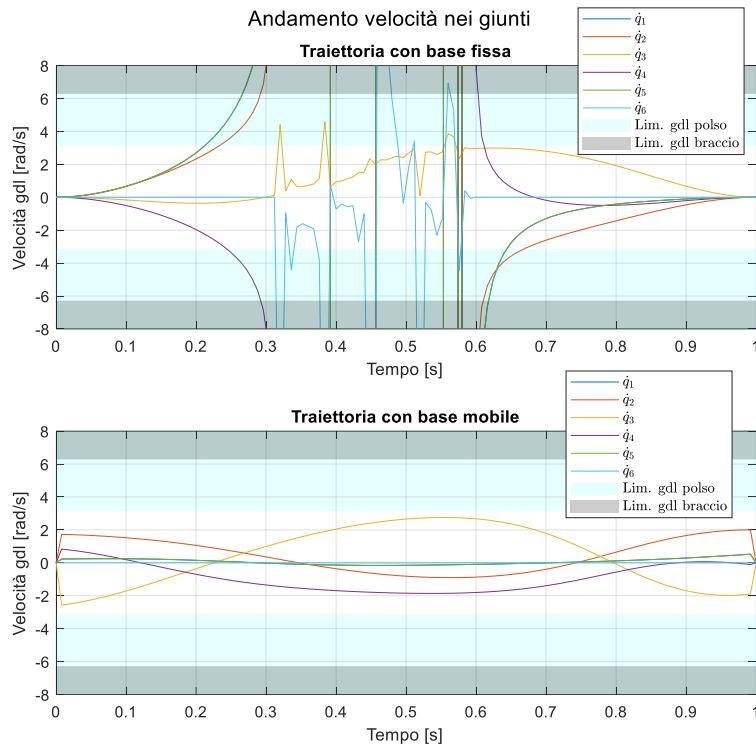


Figura 3.76 - Ingrandimento dell'andamento delle velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

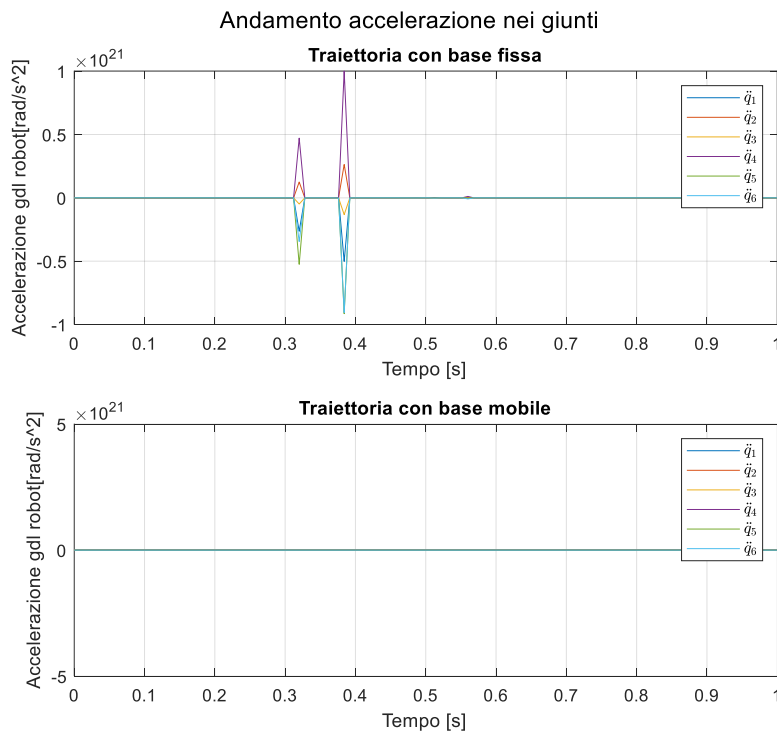


Figura 3.77 - Andamento delle accelerazioni dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

3.5.4 Analisi della potenza

Come per i casi precedenti si riportano gli andamenti della coppia e della potenza per cui valgono le stesse considerazioni (Figura 3.78, Figura 3.79, Figura 3.80)

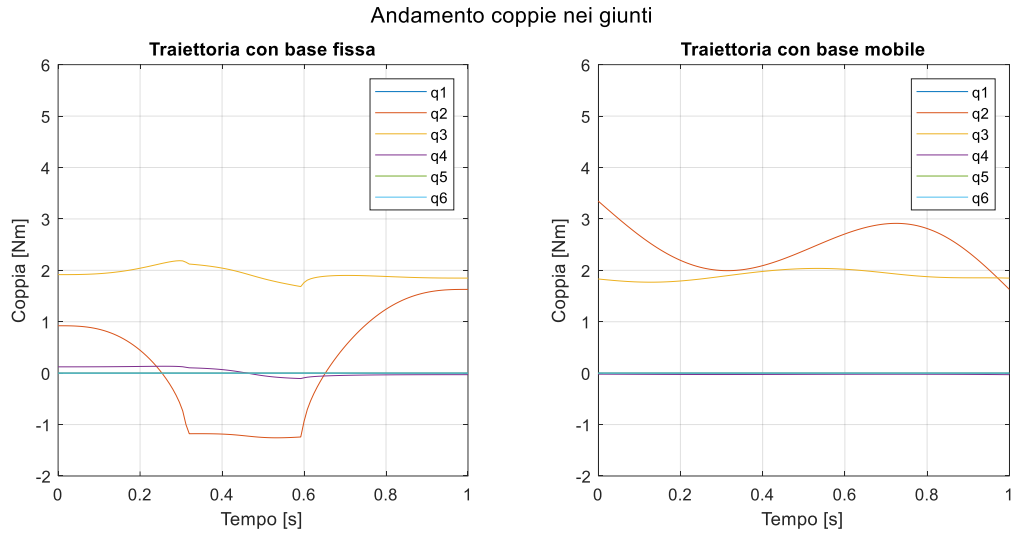


Figura 3.78 - Coppie nei giunti durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

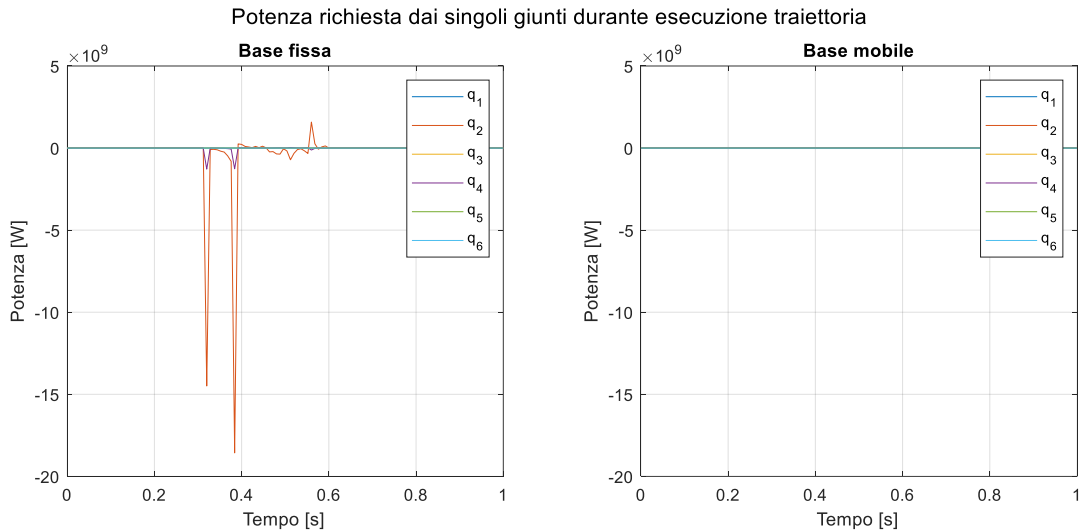


Figura 3.79 - Potenza istantanea richiesta dai giunti per l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

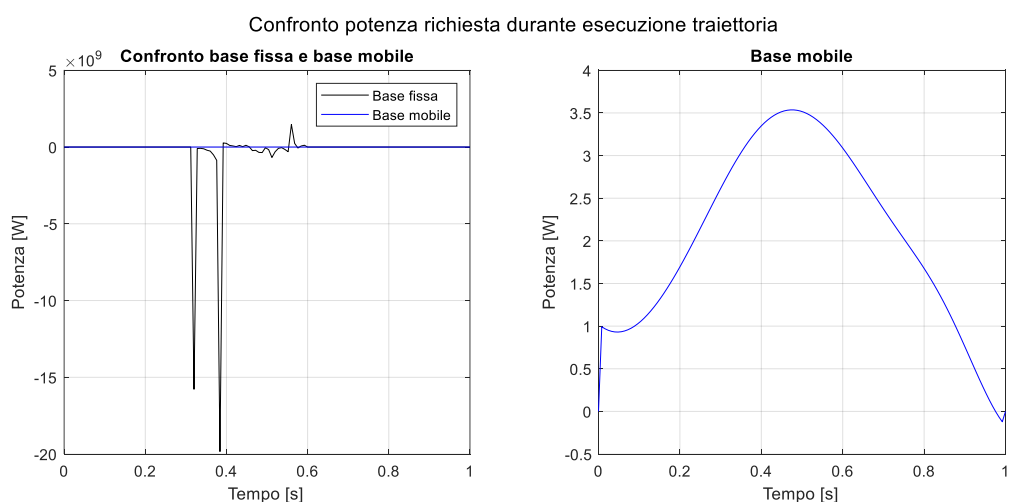


Figura 3.80 - Potenza istantanea richiesta per l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

3.5.5 Analisi della posizione del centro di massa

Come per i casi precedenti si riporta la posizione nello spazio del centro di massa (Figura 3.81): in questo caso, l'utilizzo della base mobile determina una traiettoria che non prevede il ribaltamento del robot e ciò si visualizza anche dall'andamento della traiettoria del centro di massa (Figura 3.82).

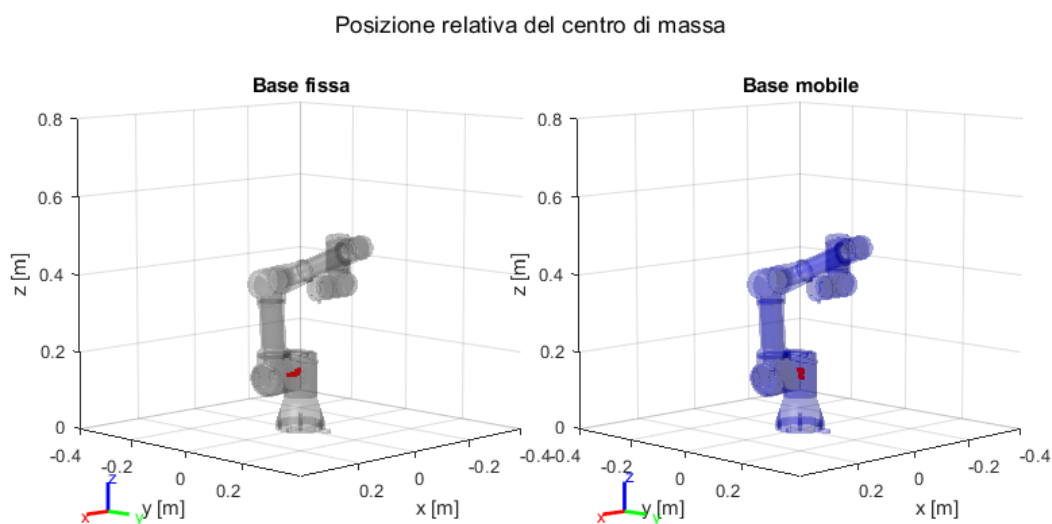


Figura 3.81 - Posizione relativa del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

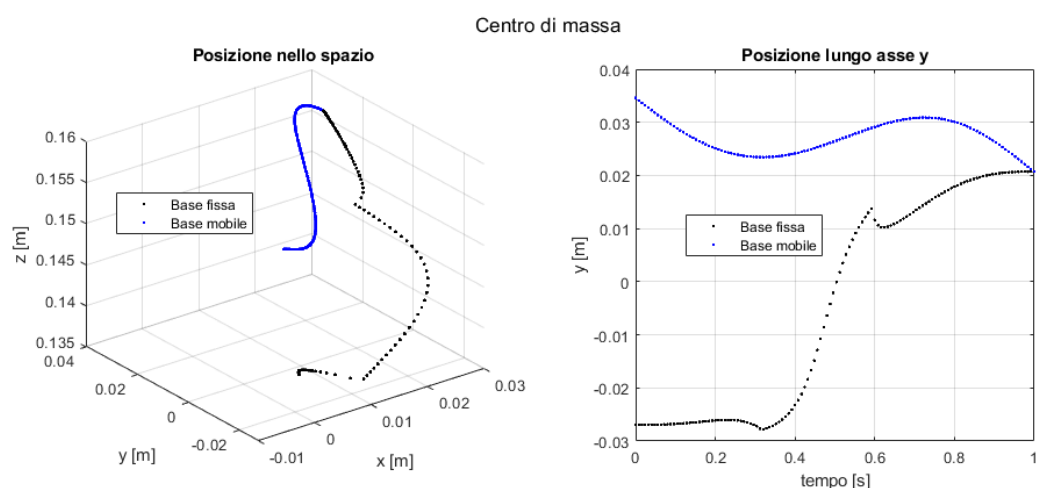


Figura 3.82 - Posizione del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione

3.5.6 Traiettoria su mappatura dello spazio di lavoro

Infine, si riporta la proiezione della traiettoria sullo spazio di lavoro mappato in funzione di destrezza, auto-collisione e posizionamento del braccio rispetto al TCP. Dalla Figura 3.83 è evidente il passaggio attraverso una parte dello spazio di lavoro non raggiungibile determinato dalla presenza della singolarità di spalla durante l'esecuzione della traiettoria con base fissa mentre nel caso di base mobile, la traiettoria relativa rimane all'interno dello spazio di lavoro.

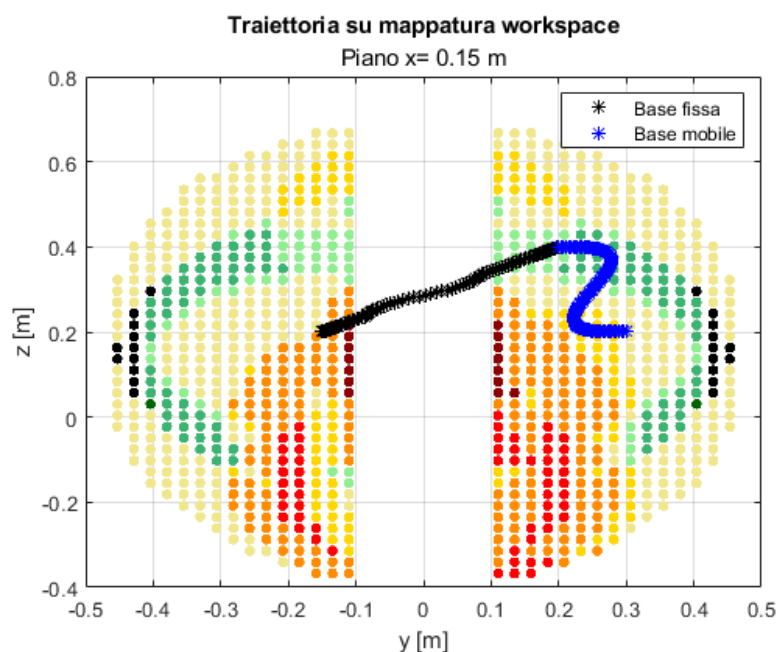


Figura 3.83 - Traiettoria con singolarità di spalla e auto-collisione proiettata sulla mappatura dello spazio di lavoro

3.6 Traiettoria obliqua con moto della base pianificato a trapezio di velocità

Come ultima analisi si riporta una traiettoria all'interno dello spazio di lavoro con un moto della base non più con velocità costante ma scalato secondo la legge trapezoidale.

Per realizzare tale moto della base si calcola prima la velocità costante secondo la legge 3.1, si determinano i waypoint con la legge oraria del moto rettilineo uniforme e poi si interpolano tali punti con scalandoli con il *time scaling* ricavato dalla legge trapezoidale. In Figura 3.84 si riporta un confronto tra i waypoint con legge rettilinea uniforme e i waypoint ottenuti con il *time scaling* trapezoidale.

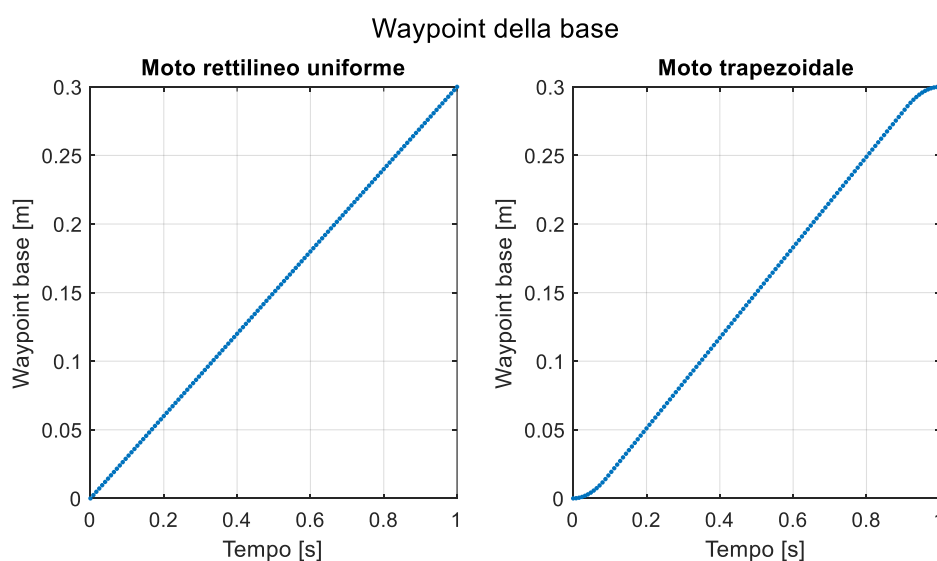


Figura 3.84 - Waypoint del moto reale della base

I parametri utilizzati sono i seguenti:

- Posa iniziale:

$${}^0A_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.2 \\ 1 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0 & 1 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

- Configurazione iniziale: soluzione 4 (Figura 3.85)

1.5312	2.0018	2.2082	-1.0684	0.0395	-3.1416	0	0	0
1.5312	-2.3408	-2.2082	1.4074	0.0395	-3.1416	0	3.0000	0
1.5312	2.8057	2.0284	1.4491	-0.0395	0	0	3.0000	0
1.5312	-1.6663	-2.0284	-2.5885	-0.0395	0	0	0	0
3.6859	-1.4753	2.0284	-0.5531	2.1151	0	0	0	0
3.6859	0.3359	-2.0284	1.6925	2.1151	0	0	3.0000	0
3.6859	-0.8008	2.2082	1.7342	-2.1151	3.1416	0	3.0000	0
3.6859	1.1398	-2.2082	-2.0732	-2.1151	3.1416	0	3.0000	0

Figura 3.85 - Soluzioni del problema di cinematica inversa associata alla posa iniziale 3.11⁶

- Posa finale:

$${}^0A_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.2 \\ 1 & 0 & 0 & 0.3 \\ 0 & 1 & 0 & 0.35 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

- Tempo di esecuzione: 1 s
- Time scaling: polinomiale di quinto grado
- Moto base con time scaling: trapezoidale
- Punto di partenza della base: $y = 0 \text{ m}$
- Punto di arrivo della base: $y = 0.3 \text{ m}$

In Figura 3.86 si riportano le pose iniziale e finale della traiettoria.

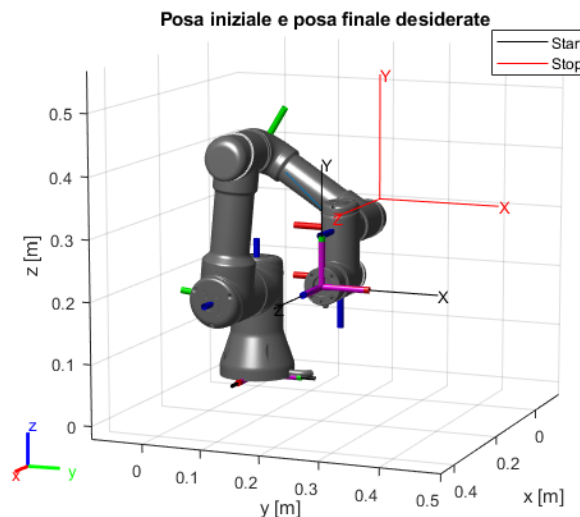


Figura 3.86 - Pose iniziale e finale della traiettoria con moto reale della base

⁶ Si utilizza la stessa notazione usata nel capitolo precedente per analizzare le singole colonne: le colonne 1÷6 contengono i gradi di libertà in radianti, la colonna 7 è relativa alla raggiungibilità (0 se safe, 2 se non raggiungibile), la colonna 8 riporta l'analisi in termini di auto-collisione e posizione relativa dei link (0 se safe, 3 se auto-collisione, 4 se braccio sporgente), la colonna 9 indica il link che è posizionato oltre il TCP, la colonna 10 riporta il valore dell'indice di prossimità ai limiti di giunto (0 lontano dai vincoli, 1 in corrispondenza dei limiti), la colonna 11 riporta il valore del determinante della matrice jacobiana.

3.6.1 Analisi della traiettoria

La traiettoria in analisi è una traiettoria *safe* per cui rientra completamente nello spazio di lavoro del robot, non incontra configurazioni di singolarità né di auto-collisione come evidenziato dalla perfetta sovrapposizione dei percorsi in Figura 3.89 e dall'assenza di errori di orientazione in Figura 3.91. In Figura 3.87 e Figura 3.88 si riportano alcuni frame della traiettoria eseguita dal robot nelle due condizioni mentre in Figura 3.90 il moto assoluto del robot confrontato con i moti relativo e di trascinamento.

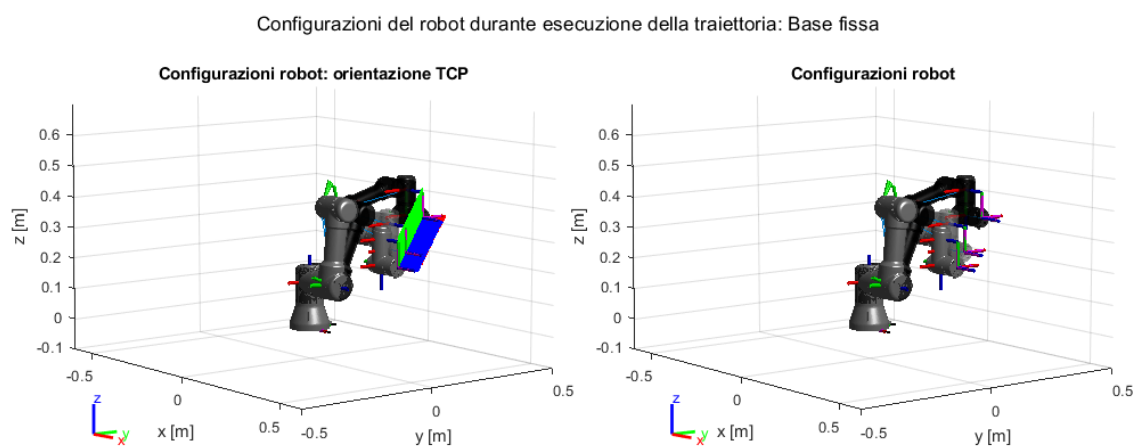


Figura 3.87 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base con base fissa

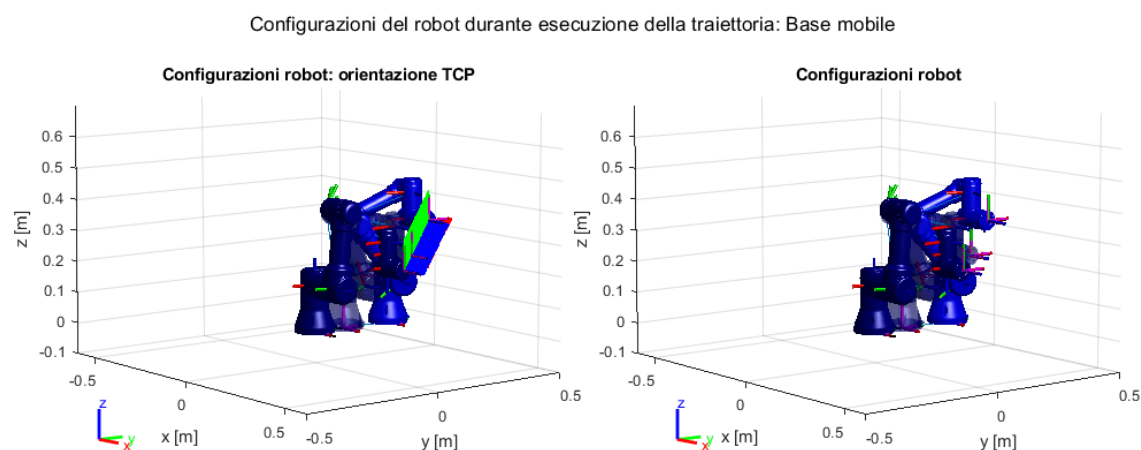


Figura 3.88 - Configurazioni del robot durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base con base mobile

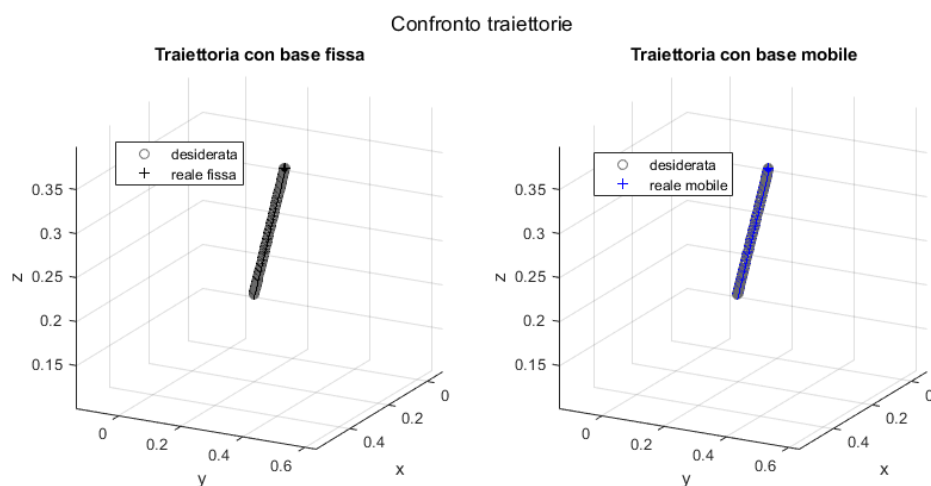


Figura 3.89 - Percorso del TCP durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

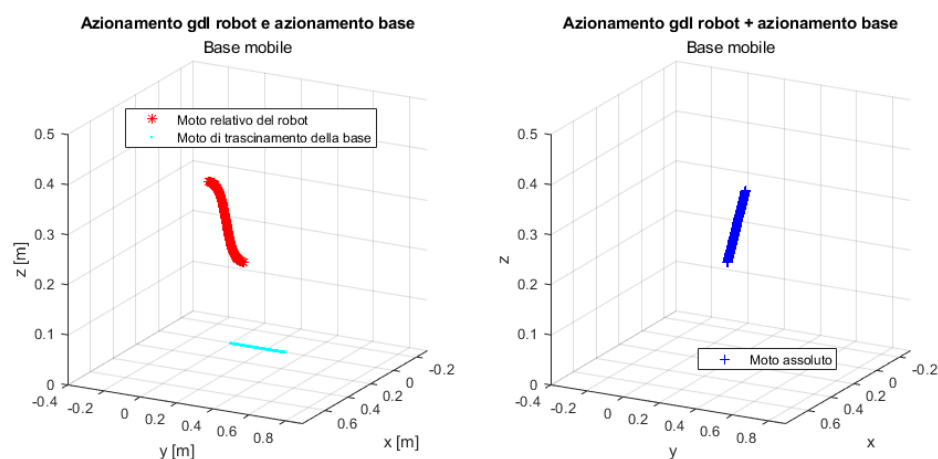


Figura 3.90 - Moto assoluto, relativo e di trascinamento nel caso di base mobile

Errore di orientamento durante esecuzione della traiettoria con base fissa
Vista tridimensionale

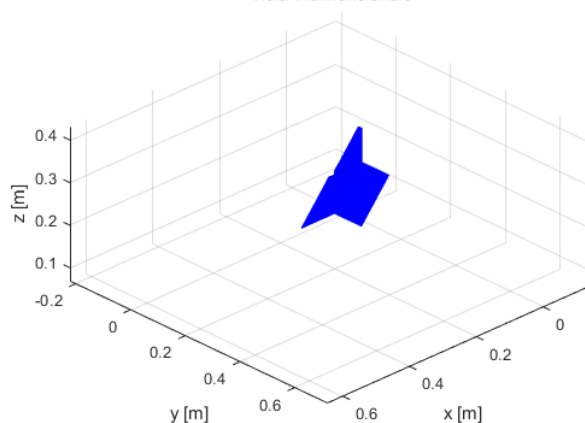


Figura 3.91 - Errore di orientamento durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

Analizzando il determinante della matrice (Figura 3.92) risulta evidente che non si transita nei pressi di nessuna configurazione di singolarità, né nel caso di base fissa né nel caso di base mobile. Inoltre, avendo analizzato la successione di configurazioni con la funzione *checkCollision* si può affermare che durante la traiettoria non si ha compenetrazione tra i link in nessun istante.

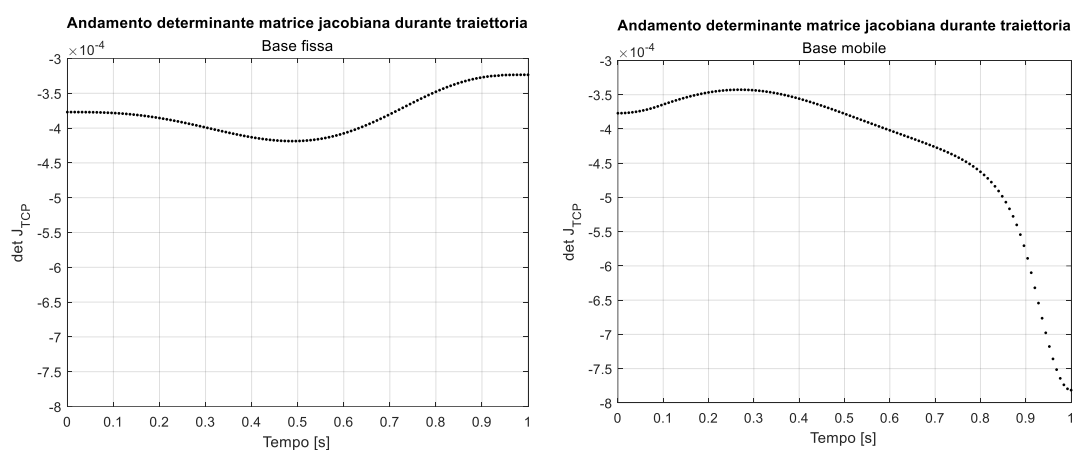


Figura 3.92 - Andamento del determinante della matrice jacobiana durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

3.6.2 Analisi della posizione e della velocità del TCP

Per quanto riguarda la posizione del TCP (Figura 3.93) non essendoci errori di traiettoria non si hanno differenze tra il caso base fissa e il caso base mobile.

Invece, per quanto riguarda la velocità effettiva del TCP (Figura 3.94) è evidente che l'introduzione del *time scaling* trapezoidale nella definizione del moto della base ha migliorato l'andamento della velocità nel caso di base mobile: non si ha più un picco iniziale e finale dovuto alla richiesta di accelerazione istantanea ma si ha una rampa. Un possibile sviluppo futuro sarebbe quello di ottimizzare il *time scaling* del moto della base utilizzando altri metodi come quello polinomiale oppure modificando i parametri di quello trapezoidale come valore massimo a regime e tempo di esecuzione.

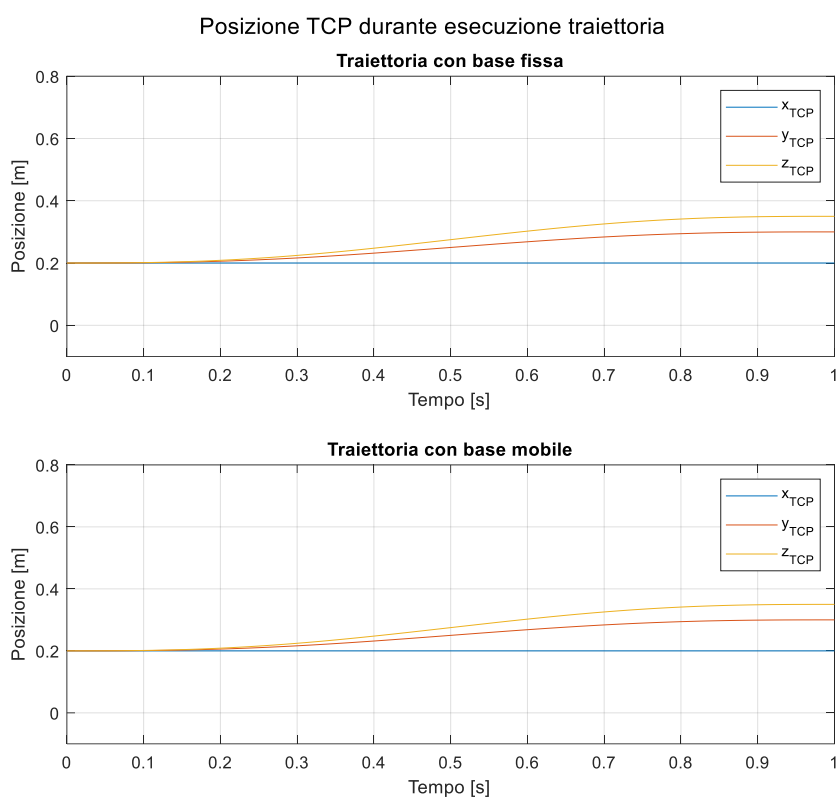


Figura 3.93 - Andamento della posizione del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

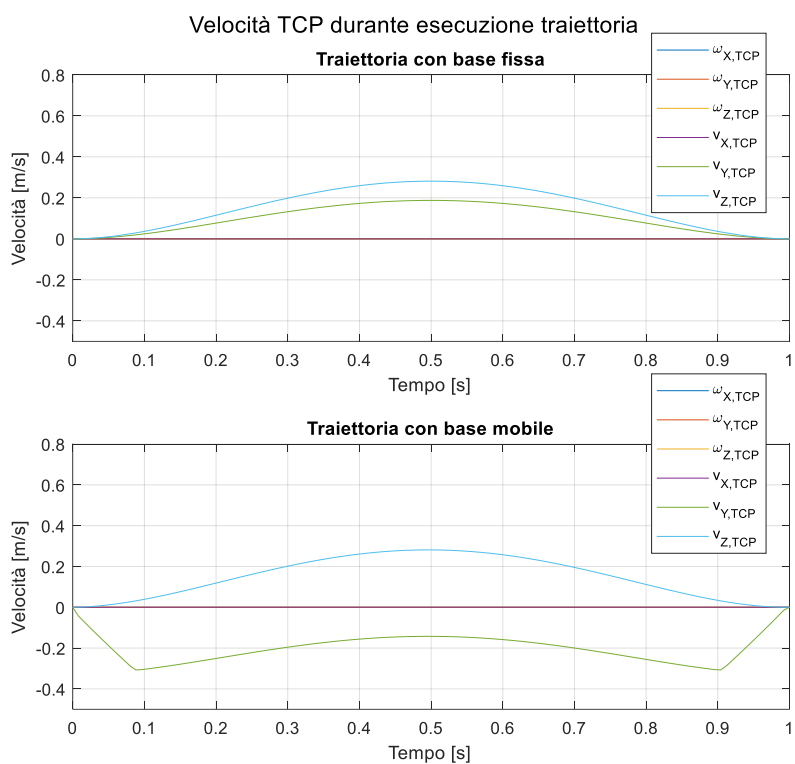


Figura 3.94 - Andamento della velocità del TCP nello spazio durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

3.6.3 Analisi dei gradi di libertà

Per quanti riguarda gli andamenti dei gradi di libertà (Figura 3.95, Figura 3.96, Figura 3.97) trattandosi di una traiettoria *safe* sono valide le considerazioni fatte nel capitolo 3.2.

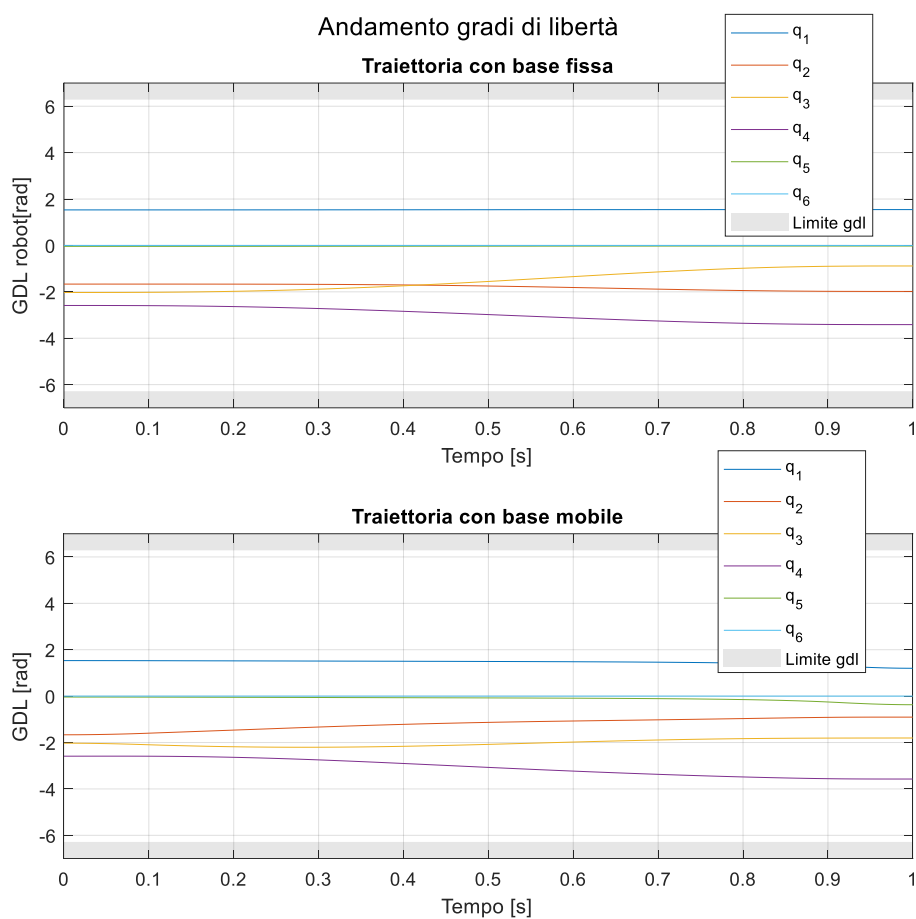


Figura 3.95 - Andamento dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

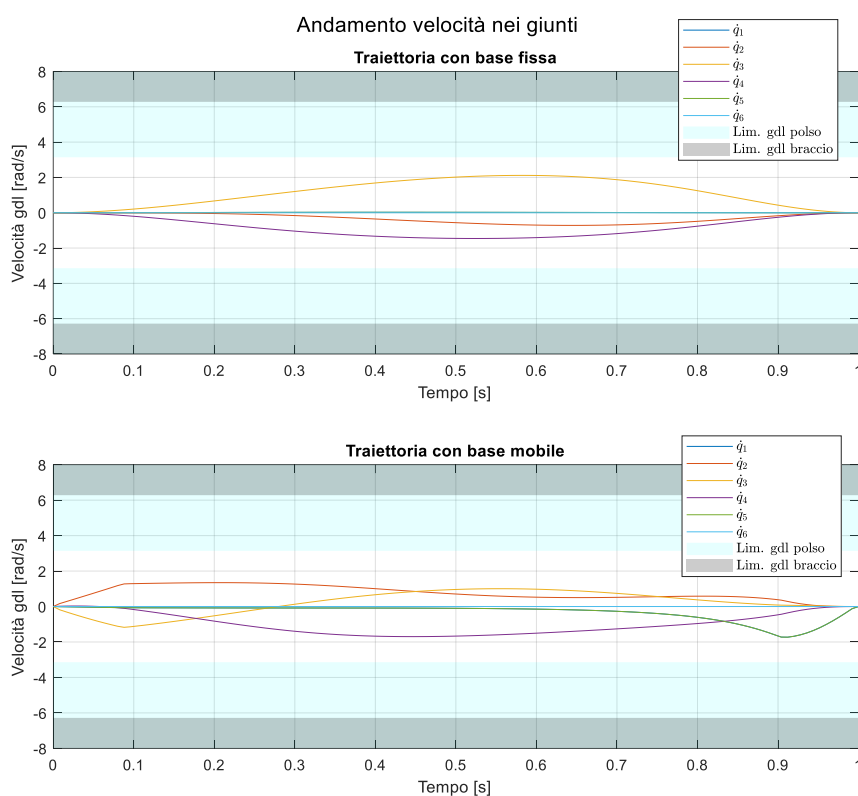


Figura 3.96 - Andamento delle velocità dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

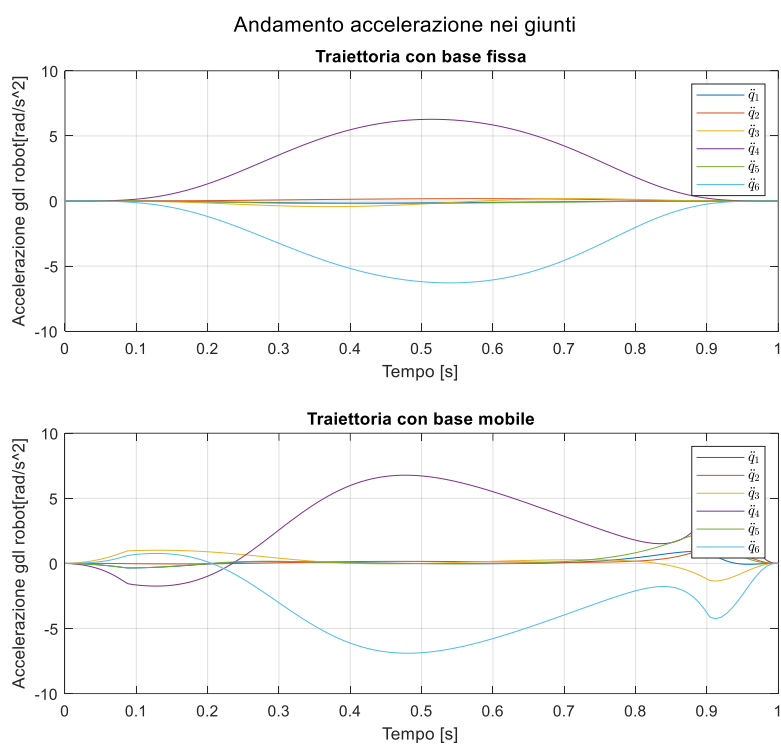


Figura 3.97 - Andamento delle accelerazioni dei gradi di libertà durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

3.6.4 Analisi della potenza

Per quanti riguarda gli andamenti di coppia e potenza (Figura 3.98, Figura 3.99, Figura 3.100) trattandosi di una traiettoria *safe* sono valide le considerazioni fatte nel capitolo 3.2.

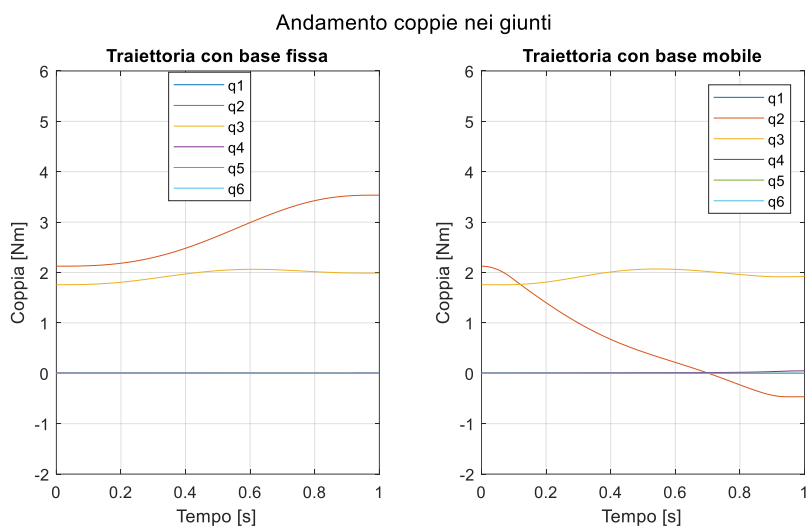


Figura 3.98 - Coppie nei giunti per l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

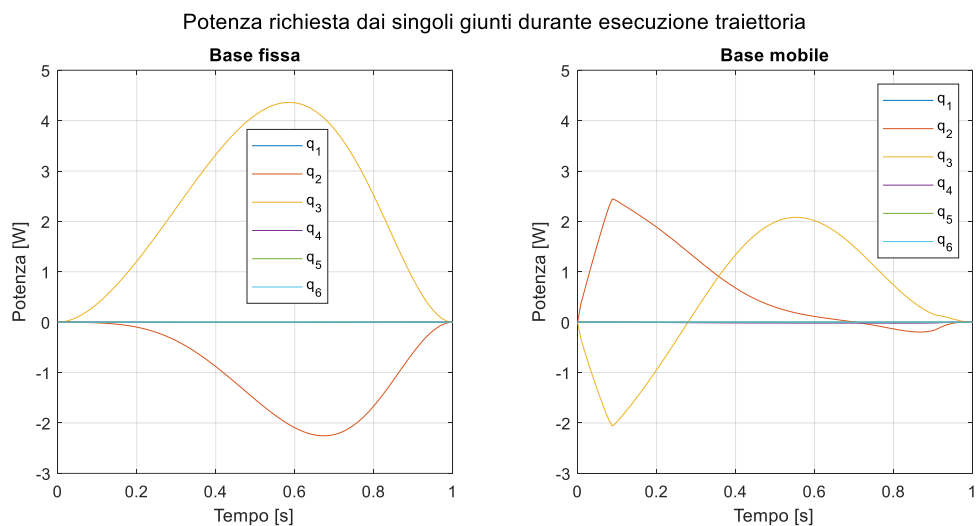


Figura 3.99 - Potenza istantanea richiesta dai giunti per l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

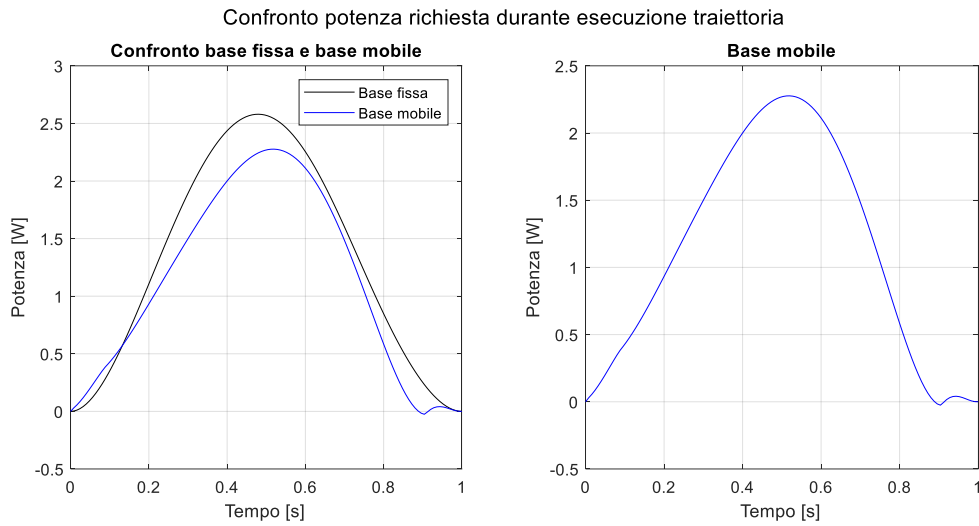


Figura 3.100 - Potenza istantanea richiesta per l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

3.6.5 Analisi della posizione del centro di massa

In Figura 3.101 e Figura 3.102 si riporta la posizione del centro di massa, relativa e assoluta, per le quali valgono le stesse considerazioni della traiettoria *safe* orizzontale.

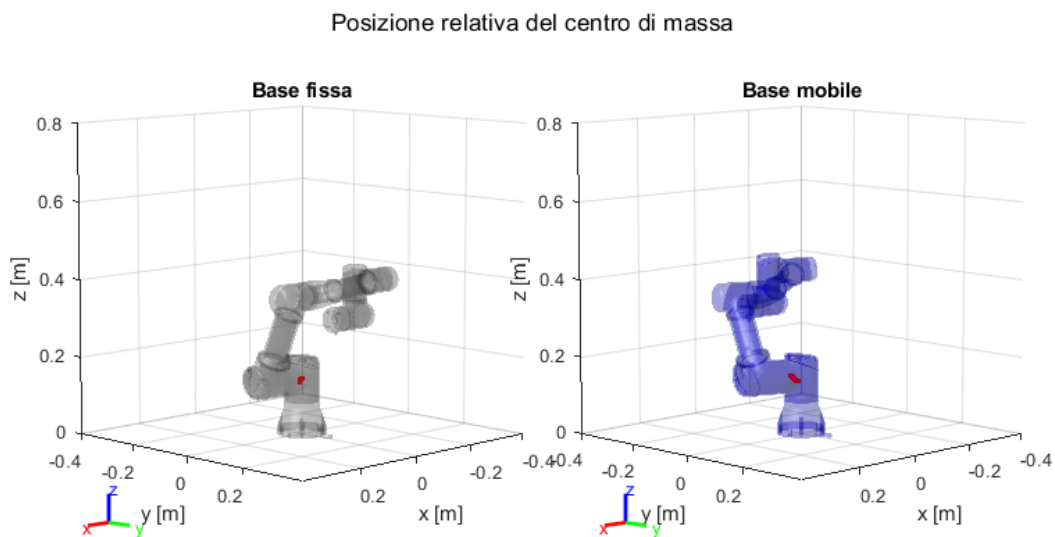


Figura 3.101 - Posizione relativa del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

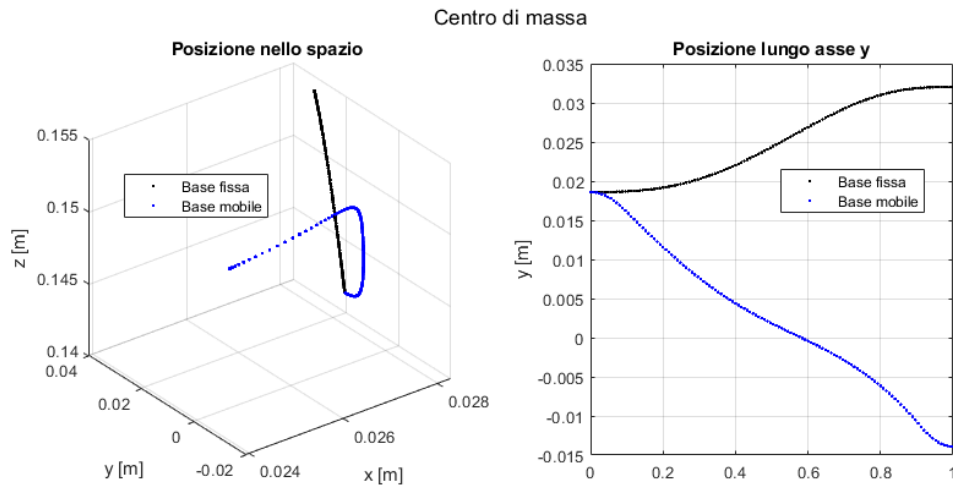


Figura 3.102 - Traiettoria del centro di massa durante l'esecuzione della traiettoria con moto reale della base

3.6.6 Traiettoria su mappatura dello spazio di lavoro

Infine, si riporta (Figura 3.103) la proiezione della traiettoria sulla mappatura dello spazio di lavoro, eseguita in termini di auto-collisioni, destrezza e posizione dei link, da cui si evidenzia che entrambe le configurazioni rientrano nello spazio di lavoro e che non sono prossimi ai limiti di tale spazio.

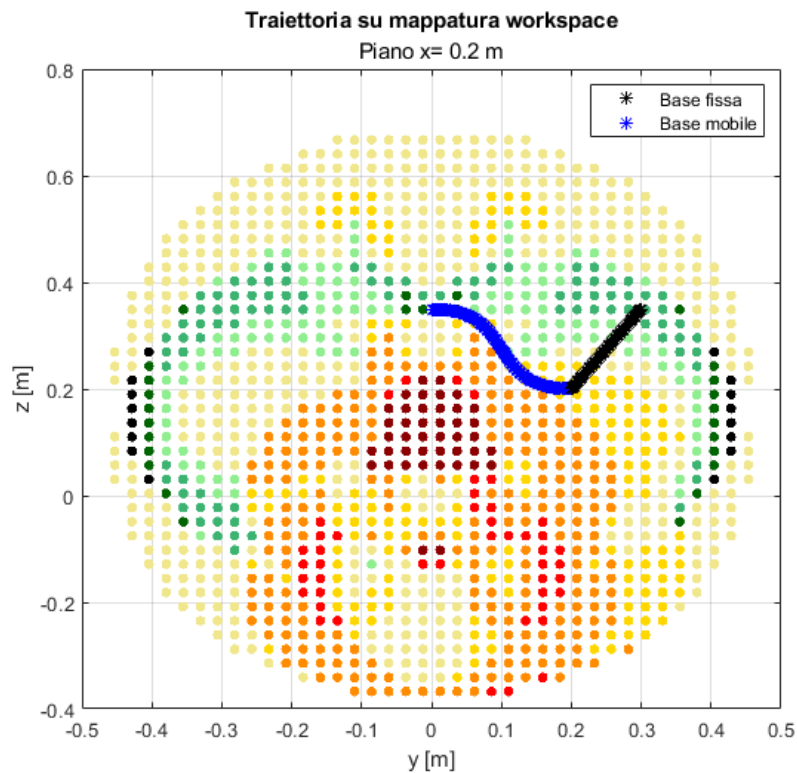


Figura 3.103 - Traiettoria obliqua safe con moto reale della base proiettata sulla mappatura dello spazio di lavoro

Conclusioni

Sliding manipulator

La struttura robotica analizzata, costituita da un robot antropomorfo a sei gradi di libertà reso ridondante e scorrevole grazie all'integrazione di un settimo asse di traslazione, appartiene alla classe degli sliding manipulator. Per quanto riguarda questo tipo di struttura sono state individuate, durante la prima ricerca bibliografica, alcune applicazioni industriali: alcune utilizzano un sistema simile a quello trattato in questa tesi ma con una semplice ricollocazione della base anziché un moto integrato continuo.

La maggior parte delle applicazioni dei manipolatori scorrevoli si colloca nel campo della raccolta della frutta, perché la presenza della base scorrevole permette il ricollocamento del robot lungo il filare delle piante che costituisce il campo di lavoro del robot [15], [36]. Un altro esempio di applicazione molto ricorrente è l'esecuzione di operazioni di pick and place, in quanto la presenza della guida permette al robot di afferrare un oggetto nel punto di raccolta e spostarlo lungo la guida fino al punto di rilascio senza però modificarne l'orientazione [14]. Infine, un esempio di applicazione più affine al tema trattato in questa tesi, ossia l'integrazione del moto continuo della base, si ritrova nel campo della saldatura, dove la presenza della guida permette al robot di eseguire una saldatura molto precisa senza entrare in collisione con l'oggetto in lavorazione [40], [43], [44].

Dall'analisi dei risultati della ricerca bibliografica è emerso che i robot scorrevoli, a differenza dei robot mobili con ruote, presentano il vantaggio di una più semplice programmazione ma anche di una migliore precisione di lavorazione.

Mappatura dello spazio di lavoro del robot

Inizialmente si è considerato lo spazio di lavoro complessivo del robot UR3 ottenuto facendo variare tutti e sei i gradi di libertà all'interno del loro range di variabilità e si sono svolte diverse

analisi. Nello specifico è stato analizzato lo spazio giunti in termini di prossimità ai limiti di giunto, prossimità alle configurazioni di singolarità e di auto-collisione.

Da questa analisi è emerso che la mappatura in spazio giunti può essere utile, ad esempio, per definire dei limiti sui giunti durante la pianificazione di traiettorie in modo da evitare il raggiungimento dei limiti geometrici, di configurazioni di singolarità o di auto-collisione. Tuttavia, non è conveniente riportare l'analisi dello spazio giunti in spazio operativo tramite la cinematica diretta, in quanto non si tiene conto della molteplicità di soluzioni del problema della cinematica inversa e, quindi, in questo passaggio si rischia di perdere informazioni importanti riguardanti le pose in spazio operativo.

Pertanto, per tener conto delle informazioni relative alla molteplicità di soluzioni si è continuata l'analisi dello spazio di lavoro andando a considerare direttamente lo spazio operativo senza *passare* per lo spazio giunti. In questo caso si è deciso di ridurre il problema andando a fissare l'orientazione del TCP rispetto alla base in modo che questo risultasse sempre puntato verso l'operatore. Si è ottenuto, in questo modo, un sottospazio di lavoro del quale sono stati analizzati alcuni piani. Nello specifico sono stati considerati tre piani, uno prossimo alla base, uno intermedio e uno all'estremo del campo di lavoro in modo da evidenziare come cambia la mappatura dei piani in funzione della destrezza e delle auto-collisioni.

Si è ricavato che i piani prossimi alla base sono caratterizzati da uno spazio di lavoro che è più ampio lungo gli assi y e z ma che presenta una parte centrale non raggiungibile a causa dei limiti imposti sui giunti e della geometria stessa dei link. Al contrario, allontanandosi dalla base, il campo di lavoro si restringe ma non si hanno più *fori* al suo interno. Un aspetto comune a tutti i piani è quello di avere una zona centrale dello spazio di lavoro caratterizzata da otto soluzioni accettabili del problema di cinematica inversa e una zona esterna caratterizzata da quattro soluzioni del problema di cinematica inversa: questo è dovuto alla presenza dei limiti di giunto, della geometria dei link e dalla presenza della configurazione di singolarità di gomito esteso al limite esterno dello spazio di lavoro.

Dopo aver determinato la forma dello spazio di lavoro per ciascun piano, si è passati all'analisi della destrezza, ossia per ogni punto del piano si è determinato quante soluzioni del problema di cinematica inversa fossero accettabili. Ottenuto ciò, si è inserita l'analisi delle auto-collisioni: sono state analizzate le configurazioni accettabili che, in alcuni casi, sono state ridotte. È emerso che i piani prossimi alla base sono caratterizzati da una maggior concentrazione di condizioni di auto-collisione rispetto ai piani intermedi e lontani e ciò

dipende dal fatto che il robot, per lavorare vicino alla base, è costretto ad assumere delle pose *raccolte*.

Inoltre, dato che si è ipotizzato che il robot lavori su un piano di fronte a un operatore, si è deciso di limitare il movimento dei link andando a eliminare tutte quelle configurazioni che hanno una parte del robot che sporge oltre al TCP. Questo perché avere un link o un giunto del robot che *punta* sporgendosi verso l'operatore fa percepire il robot come uno strumento collaborativo meno sicuro. Pertanto, si è aggiunta quest'analisi nella mappatura dello spazio di lavoro ed è risultato che solo per i piani prossimi alla base si verifica una condizione tale da permettere al robot di sporgersi oltre al TCP. Generalmente, il link del robot che sporge rispetto al TCP è il gomito e tale condizione non si verifica per piani con quota x maggiore di circa 0.2 m in quanto il robot risulta in configurazione più distesa.

Vantaggi e svantaggi dell'integrazione del moto continuo della base

Sono state confrontate, nel capitolo 3, diverse traiettorie eseguite sia con base fissa che con base mobile. In particolare, sono state trattate traiettorie *safe*, cioè traiettorie che rientrano nei limiti dello spazio di lavoro, traiettorie che transitano in prossimità di configurazioni di singolarità, traiettorie che transitano per configurazione di auto-collisione e infine traiettorie che transitano oltre i limiti dello spazio di lavoro, siano essi interni che esterni.

Da questi confronti sono emersi i principali vantaggi dell'integrazione di un settimo asse di traslazione:

1. *Ampliamento dello spazio di lavoro* del robot: traslando l'intero robot attraverso la guida su cui è posizionata la base, si ha una traslazione anche del suo spazio di lavoro che risulta più ampio nella direzione di traslazione (nel caso in analisi si tratta dell'asse y della base).
2. *Evitamento delle configurazioni di singolarità e delle configurazioni di auto-collisione*: utilizzando un moto della base con opportune modifiche in termini di velocità e punti di inizio e fine traiettorie, è possibile pianificare delle traiettorie che non transitino per configurazioni problematiche.
3. *Non raggiungimento dei limiti geometrici dei giunti*, oltre che *riduzione delle velocità nei giunti* stessi all'interno del loro range di variabilità.
4. La riduzione della velocità, associata alla *riduzione della coppia* richiesta dovuta al fatto che si riduce la variazione dei gradi di libertà, determina una *riduzione della*

potenza richiesta per la realizzazione della configurazione e di conseguenza per l'esecuzione del task.

5. Piccolo vantaggio in termini di posizione del centro di massa: si ha una *riduzione dello sbraccio* del robot in direzione parallela all'asse di traslazione, in quanto l'allungamento del robot è ridotto dall'inseguimento della base.

Nei primi esempi riportati nel capitolo 3 è stato utilizzato un moto della base di tipo lineare uniforme con velocità costante. Nella realtà tale legge non è realizzabile in quanto richiede un'accelerazione istantanea allo spunto infinita. Pertanto, come ultimo esempio di traiettoria si è riportata una traiettoria *safe* il cui moto della base è stato reso *reale* con l'introduzione di un *time scaling* trapezoidale: ciò ha determinato un andamento della velocità, sia dei giunti che del TCP nello spazio, con uno spunto iniziale non a picco ma a rampa.

Sviluppi futuri

In seguito alle analisi eseguite in questa tesi è possibile proporre alcuni spunti per ampliare e ottimizzare quanto riportato. Ad esempio, sarebbe possibile pianificare il moto della base non arbitrariamente ma in funzione degli indici ricavati nell'analisi dello spazio di lavoro (limiti di giunto, auto-collisione e singolarità), utilizzando una legge di accelerazione costante a tratti.

Inoltre, si potrebbe installare il robot su una struttura cartesiana che permetta di incrementare la profondità dello spazio di lavoro. Infine, anche se in questo caso si è considerata una guida lineare, sarebbe possibile utilizzare guide di forme diverse come quella circolare o curva [3].

Bibliografia e sitografia

- [1] “Robot collaborativi o cobot: cosa sono? La guida definitiva.” Accessed: Oct. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/it/robot-collaborativi-o-cobot-cosa-sono-la-guida-definitiva/>
- [2] A. ’Frisoli, “Robotica collaborativa, perchè è la chiave per l’industria 5.0,” *Agenda Digitale*. Accessed: Oct. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.agendadigitale.eu/industry-4-0/robotica-collaborativa-perche-e-la-chiave-per-lindustria-5-0/>
- [3] Y. Tong, J. Liu, Y. Liu, and Y. Yuan, “Analytical inverse kinematic computation for 7-DOF redundant sliding manipulators,” *Mech Mach Theory*, vol. 155, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104006.
- [4] Y. Tong, J. Liu, Z. Ju, Y. Liu, and L. Fang, “Dynamic precision analysis of a redundant sliding manipulator,” *Robotics and Rehabilitation intelligence*, 2020.
- [5] “Vantaggi per l’automazione con l’uso del settimo asse,” Rollon by timken. Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://blog.rollon.com/it/settimo-asse-un-vantaggio-per-l-automazione>
- [6] “Aggiunta di un settimo asse al sistema robotico a sei assi ,” Rollon by timken. Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://blog.rollon.com/it/aggiunta-settimo-asse-su-sistema-robotico-a-sei-assi>
- [7] “Radalytica NDT-NDI Robotico.” Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.radalytica.com/pages/radalyx-aerospaziale.pdf>
- [8] “Robot Multi Asse e Pinze Elettriche,” www.hiwin.it. Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: https://www.hiwin.it/images/download/documenti/HIWIN_catalogo_Robot_e_Pinze_alta_web_2022.pdf
- [9] D. ’Davò and M. ’Leonesio, “Controllo diretto, traiettoria perfetta,” *Tecnologie meccaniche*. Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.mandelli.com/media/download/2183>

- [10] S. Birrell, J. Hughes, J. Y. Cai, and F. Iida, “A field-tested robotic harvesting system for iceberg lettuce,” *J Field Robot*, vol. 37, no. 2, pp. 225–245, Mar. 2020, doi: 10.1002/rob.21888.
- [11] J. Hernandez-Barragan, C. Lopez-Franco, N. Arana-Daniel, A. Y. Alanis, and A. Lopez-Franco, “A modified firefly algorithm for the inverse kinematics solutions of robotic manipulators,” *Integr Comput Aided Eng*, vol. 28, no. 3, pp. 257–275, 2021, doi: 10.3233/ica-210660.
- [12] D. Khort, A. Kutyrev, R. Filippov, N. Kiktev, and D. Komarchuk, “Robotized Platform for Picking of Strawberry Berries,” in *Science and Technology PIC S&T*, 2019.
- [13] M. Rahman, H. Liu, I. D. Cardenas, A. Starr, A. Hall, and R. Anderson, “Towards an Autonomous RIRS: Design, Structure Investigation and Framework,” in *2021 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering, ICMRE 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Feb. 2021, pp. 164–168. doi: 10.1109/ICMRE51691.2021.9384846.
- [14] Shin D.H, Jin S, Jeong C.P, Song Y, and J W.Y, “Multi-body dynamics simulations of high speed transfer robots disposed between presses,” in *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 2017.
- [15] V. Tinoco, M. F. Silva, F. N. Santos, L. F. Rocha, S. Magalhaes, and L. C. Santos, “A Review of Pruning and Harvesting Manipulators,” in *2021 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, ICARSC 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Apr. 2021, pp. 155–160. doi: 10.1109/ICARSC52212.2021.9429806.
- [16] H. Xing *et al.*, “An admittance-controlled wheeled mobile manipulator for mobility assistance: Human–robot interaction estimation and redundancy resolution for enhanced force exertion ability,” *Mechatronics*, vol. 74, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.mechatronics.2021.102497.
- [17] K. Xu, H. Chen, A. Mueller, and X. Ding, “Kinematics of the center of mass for robotic mechanisms based on lie group theory,” *Mech Mach Theory*, vol. 175, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104933.
- [18] H. Yaguchi, K. Nagahama, T. Hasegawa, and M. Inaba, “Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper,” in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Institute of Electrical and

- Electronics Engineers Inc., Nov. 2016, pp. 652–657. doi: 10.1109/IROS.2016.7759122.
- [19] J. Baur, J. Pfaff, H. Ulbrich, and T. Villgrattner, “Design and development of a redundant modular multipurpose agricultural manipulator,” in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 2012, pp. 823–830. doi: 10.1109/AIM.2012.6265928.
- [20] D. Busson and R. Bearee, “A Pragmatic Approach to Exploiting Full Force Capacity for Serial Redundant Manipulators,” *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 3, no. 2, pp. 888–894, Apr. 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2792541.
- [21] E. Ferrentino and P. Chiacchio, “On the optimal resolution of inverse kinematics for redundant manipulators using a topological analysis,” *J Mech Robot*, vol. 12, no. 3, Jun. 2020, doi: 10.1115/1.4045178.
- [22] M. Gong, X. Li, and L. Zhang, “Analytical Inverse Kinematics and Self-Motion Application for 7-DOF Redundant Manipulator,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 18662–18674, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2895741.
- [23] S. Hachicha, S. Nejim, C. Zaoui, A. Maalej, and H. Dallagi, “Study and modeling of a hull cleaning station with an arm manipulator,” in *2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies, IC_ASET 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2018, pp. 132–137. doi: 10.1109/ASET.2018.8379847.
- [24] P. B. Kumar, N. K. Verma, D. R. Parhi, and D. Priyadarshi, “Design and control of a 7 DOF redundant manipulator arm,” *Australian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 5, pp. 532–543, 2021, doi: 10.1080/14484846.2019.1656354.
- [25] S. M. Mariappan and A. Veerabathiran, “Modelling and simulation of multi spindle drilling redundant SCARA robot using SolidWorks and MATLAB/SimMechanics,” *Revista Facultad de Ingenieria*, vol. 2016, no. 81, pp. 63–72, 2016, doi: 10.17533/udea.redin.n81a06.
- [26] Maric Filip, Giamou Matthew, Khoubyarian Soroush, Petrovic Ivan, and Kelly Jonathan, “Inverse Kinematics for Serial Kinematics Chains via Sum of Squares Optimization,” in *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020.

- [27] A. Sridhar Reddy, V. V. M. J. Satish Chembuly, and V. V. S. Kesava Rao, “Collision-free Inverse Kinematics of Redundant Manipulator for Agricultural Applications through Optimization Techniques,” *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 35, no. 7, pp. 1343–1354, Jul. 2022, doi: 10.5829/ije.2022.35.07a.13.
- [28] M. Schappler, S. Tappe, and T. Ortmaier, “Resolution of Functional Redundancy for 3T2R Robot Tasks using Two Sets of Reciprocal Euler Angles,” 2019.
- [29] Z. De-An, L. Jidong, J. Wei, Z. Ying, and C. Yu, “Design and control of an apple harvesting robot,” *Biosyst Eng*, vol. 110, no. 2, pp. 112–122, 2011, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.07.005.
- [30] X. Liang, T. Zhou, and B. Wang, “Obstacle avoidance planning for redundant manipulator based on variational method,” *Strojarski Facultet*, 2017. doi: 10.17559/TV-20140917061048.
- [31] P. Liu, “Path Planning of Redundant Manipulator Based on Improved RRT Algorithm,” in *2021 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications, AEECA 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2021, pp. 34–39. doi: 10.1109/AEECA52519.2021.9574129.
- [32] O. Porges, D. Leidner, and M. A. Roa, “Planning Fail-Safe Trajectories for Space Robotic Arms,” *Front Robot AI*, vol. 8, Nov. 2021, doi: 10.3389/frobt.2021.710021.
- [33] C. Quintero-Peña, A. Kyriallidis, and L. E. Kavraki, “Robust Optimization-based Motion Planning for high-DOF Robots under Sensing Uncertainty,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 9724–9730. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9560917.
- [34] M. Wise, M. Ferguson, D. King, E. Diehr, and D. Dymesich, “Fetch & Freight: Standard Platforms for Service Robot Applications,” 2019.
- [35] A. Sepehri and A. M. Moghaddam, “A motion planning algorithm for redundant manipulators using rapidly exploring randomized trees and artificial potential fields,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 26059–26070, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3056397.

- [36] A. Silwal, J. R. Davidson, M. Karkee, C. Mo, Q. Zhang, and K. Lewis, "Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester," *J Field Robot*, vol. 34, no. 6, pp. 1140–1159, Sep. 2017, doi: 10.1002/rob.21715.
- [37] Y. Zhao, Y. Li, and T. Chen, "Dynamic Obstacle Avoidance and Trajectory Planning of a Five Axis Redundant Industrial Manipulator," 2021.
- [38] P. M. Kebria, H. Abdi, and S. Nahavandi, "Development and evaluation of a symbolic modelling tool for serial manipulators with any number of degrees of freedom," in *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2016 - Conference Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Feb. 2017, pp. 4223–4228. doi: 10.1109/SMC.2016.7844895.
- [39] H. Ozakyol, C. Karaman, and Z. Bingul, "Advanced robotics analysis toolbox for kinematic and dynamic design and analysis of high-DOF redundant serial manipulators," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 27, no. 6, pp. 1429–1452, Nov. 2019, doi: 10.1002/cae.22160.
- [40] H. Ghariblu and M. Shahabi, "Path planning of complex pipe joints welding with redundant robotic systems," *Robotica*, vol. 37, no. 6, pp. 1020–1032, Jun. 2019, doi: 10.1017/S0263574718001418.
- [41] C. Kacprzak and G. Pająk, "Trajectory Planning of the Humanoid Manipulator," *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, vol. 24, no. 3, pp. 591–602, Aug. 2019, doi: 10.2478/ijame-2019-0037.
- [42] N. Lizarralde, F. Coutinho, and F. Lizarralde, "Online Coordinated Motion Control of a Redundant Robotic Wire Arc Additive Manufacturing System," *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 7, no. 4, pp. 9675–9682, Oct. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3191741.
- [43] S. Schutz, R. Schmidt, C. Henke, and A. Trachtler, "Virtual Commissioning of the Trajectory Tracking Control of a Sensor-Guided, Kinematically Redundant Robotic Welding System on a PLC," in *SysCon 2022 - 16th Annual IEEE International Systems Conference, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/SysCon53536.2022.9773878.
- [44] M. Shahabi, H. Ghariblu, and M. Beschi, "Obstacle avoidance of redundant robotic manipulators using safety ring concept," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 32, no. 7, pp. 695–704, Jul. 2019, doi: 10.1080/0951192X.2019.1599438.

- [45] N. Shen, Y. Wu, J. Li, N. Lu, and J. Yao, "Path planning based on the analytical inverse kinematics of the rail-mounted industrial robot for continuous-trajectory tracking," in *Proceedings - 2020 12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IHMSC 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2020, pp. 273–276. doi: 10.1109/IHMSC49165.2020.00068.
- [46] C. Chang, J. Liu, Z. Ni, and R. Qi, "An improved kinematic calibration method for serial manipulators based on POE formula," *Robotica*, vol. 36, no. 8, pp. 1244–1262, Aug. 2018, doi: 10.1017/S0263574718000280.
- [47] J. Liu, Y. Tong, Z. Ju, and Y. Liu, "Novel method of obstacle avoidance planning for redundant sliding manipulators," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 78608–78621, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990555.
- [48] A. Gowtham Gudla, "A methodology to determine the functional workspace of a 6R robot using forward kinematics and geometrical methods," 2012. [Online]. Available: <https://scholar.uwindsor.ca/etd>
- [49] A. Peidró, Ó. Reinoso, A. Gil, J. M. Marín, and L. Payá, "An improved Monte Carlo method based on Gaussian growth to calculate the workspace of robots," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 64, pp. 197–207, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.engappai.2017.06.009.
- [50] J. Xiang, C. Zhong, and W. Wei, "General-weighted least-norm control for redundant manipulators," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 4, pp. 660–669, Aug. 2010, doi: 10.1109/TRO.2010.2050655.
- [51] M. Aboelnasr, H. M. Bahaa, and O. Mokhiamar, "Novel use of the Monte-Carlo methods to visualize singularity configurations in serial manipulators," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 15, no. 2, pp. 7948–7963, Jun. 2021, doi: 10.15282/jmes.15.2.2021.02.0627.
- [52] T. Stejskal, J. Svetlík, and Š. Ondočko, "Mapping Robot Singularities through the Monte Carlo Method," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/app12168330.
- [53] J. An *et al.*, "Path Planning for Self-Collision Avoidance of Space Modular Self-Reconfigurable Satellites," *Aerospace*, vol. 9, no. 3, Mar. 2022, doi: 10.3390/aerospace9030141.

- [54] K. Bhavanibhatla, S. Suresh-Fazeela, and D. K. Pratihari, “A study on determining optimal base location of a serial manipulator mounted on a hexapod mobile robot,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 4, Apr. 2021, doi: 10.1007/s40430-021-02937-2.
- [55] J. Leoro and T. Hsiao, “Motion planning of nonholonomic mobile manipulators with manipulability maximization considering joints physical constraints and self-collision avoidance,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/app11146509.
- [56] M. Selvaggio, S. Grazioso, G. Notomista, and F. Chen, “Towards a self-collision aware teleoperation framework for compound robots,” in *2017 IEEE World Haptics Conference, WHC 2017*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2017, pp. 460–465. doi: 10.1109/WHC.2017.7989945.
- [57] W. Seol, K. S. Kim, and S. Kim, “Methodological approach for workspace boundary determination in joint space using support vector machine,” *Electron Lett*, vol. 56, no. 6, pp. 286–288, Mar. 2020, doi: 10.1049/el.2019.3023.
- [58] “UR3 Technical specifications,” Universal Robots. Accessed: Oct. 05, 2023. [Online]. Available: https://www.universal-robots.com/media/240787/ur3_us.pdf
- [59] R. 'Gerosa, “UR3 il nuovo robot da tavolo di Universal Robots,” Alumotion . Accessed: Oct. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.alumotion.eu/2015/03/ur3-il-nuovo-robot-da-tavolo-di-universal-robots/#:~:text=Il%20nuovo%20robot%20di%20Universal,ideale%20per%20applicazioni%20di%20avvitatura>.
- [60] Chiran, “Computer center of circle given two points and a radius.” MATLAB Central File Exchange, Oct. 08, 2023. Accessed: Oct. 08, 2023. [Online]. Available: Chiran (2023). Computes center of circle given two points and a radius (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29623-computes-center-of-circle-given-two-points-and-a-radius>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved October 8, 2023.