



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

|                                                  |                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DIPARTIMENTO                                     | Ingegneria                                                                                                                 |
| ANNO ACCADEMICO OFFERTA                          | 2023/2024                                                                                                                  |
| ANNO ACCADEMICO EROGAZIONE                       | 2024/2025                                                                                                                  |
| CORSO DILAUREA MAGISTRALE                        | INGEGNERIA AEROSPAZIALE                                                                                                    |
| INSEGNAMENTO                                     | MOBILE AND DISTRIBUTED ROBOTICS                                                                                            |
| TIPO DI ATTIVITA'                                | C                                                                                                                          |
| AMBITO                                           | 20907-Attività formative affini o integrative                                                                              |
| CODICE INSEGNAMENTO                              | 21526                                                                                                                      |
| SETTORI SCIENTIFICO-DISCIPLINARI                 | ING-INF/04                                                                                                                 |
| DOCENTE RESPONSABILE                             | FAGIOLINI ADRIANO      Professore Associato      Univ. di PALERMO                                                          |
| ALTRI DOCENTI                                    |                                                                                                                            |
| CFU                                              | 6                                                                                                                          |
| NUMERO DI ORE RISERVATE ALLO STUDIO PERSONALE    | 96                                                                                                                         |
| NUMERO DI ORE RISERVATE ALLA DIDATTICA ASSISTITA | 54                                                                                                                         |
| PROPEDEUTICITA'                                  |                                                                                                                            |
| MUTUAZIONI                                       | MOBILE AND DISTRIBUTED ROBOTICS - Corso: INGEGNERIA DEI SISTEMI CIBER-FISICI PER L'INDUSTRIA                               |
| ANNO DI CORSO                                    | 2                                                                                                                          |
| PERIODO DELLE LEZIONI                            | 1° semestre                                                                                                                |
| MODALITA' DI FREQUENZA                           | Facoltativa                                                                                                                |
| TIPO DI VALUTAZIONE                              | Voto in trentesimi                                                                                                         |
| ORARIO DI RICEVIMENTO DEGLI STUDENTI             | <b>FAGIOLINI ADRIANO</b><br>Martedì    16:00    20:00    - Edificio 10, Viale delle Scienze, Ufficio Docente- Canale Teams |

**DOCENTE:** Prof. ADRIANO FAGIOLINI

|                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>PREREQUISITI</b>                      | Controlli automatici, concetti di programmazione in Matlab o C++.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI</b> | <p>L'obiettivo didattico principale del corso è lo studio dei sistemi robotici mobili (terrestri o aerei) e il loro utilizzo in vari contesti applicativi nell'industria e nei servizi. Questo obiettivo viene raggiunto attraverso la trattazione di modelli matematici non lineari, gli strumenti teorici che ne consentono l'analisi e alcune tecniche di base per il loro controllo. Questi strumenti vengono poi applicati allo studio del comportamento dinamico dei robot più comunemente utilizzati oggi, e al controllo del loro movimento in presenza di vincoli di sottoimplementazione e di autonomia. Infine, attraverso la definizione di procedure e metodologie per la pianificazione delle traiettorie, vengono descritti quei sistemi che consentono l'utilizzo di veicoli o velivoli autonomi, per applicazioni caratterizzate da ambienti strutturati o non strutturati.</p> <p><b>* Conoscenza e comprensione</b><br/>Lo studente, al termine del corso, avrà acquisito conoscenza e comprensione dei sistemi robotici mobili (terrestri o aerei) e del loro utilizzo in vari contesti applicativi nell'industria e nei servizi. Le conoscenze e le capacità di comprensione vengono acquisite attraverso la partecipazione alle lezioni e alle esercitazioni e attraverso lo studio personale e vengono testate durante l'esame chiedendo agli studenti di presentare gli argomenti trattati durante il corso.</p> <p><b>* Capacità di applicare la conoscenza e la comprensione</b><br/>Lo studente sarà in grado di analizzare modelli matematici non lineari, gli strumenti teorici che consentono la loro analisi e alcune tecniche di base per il loro controllo. La capacità di applicare la conoscenza e la comprensione si acquisisce attraverso lo studio delle applicazioni a casi pratici presentati nelle lezioni e l'esecuzione di esercizi pratici svolti anche con il supporto di strumenti informatici dedicati. Queste competenze vengono valutate attraverso gli esami, mediante domande che richiedono allo studente di estrapolare quanto appreso in classe e di applicarlo a casi pratici.</p> <p><b>* Autonomia di giudizio</b><br/>Lo studente avrà la capacità di interpretare, prevedere e controllare il comportamento dinamico dei robot più comunemente utilizzati oggi. Inoltre, avrà la capacità di integrare le conoscenze e di esprimere giudizi sulla base di informazioni limitate o incomplete.</p> <p><b>* Capacità di comunicazione</b><br/>Lo studente sarà in grado di comunicare i risultati delle attività di verifica e di test, le procedure utilizzate, le motivazioni alla base e le sue conclusioni, anche attraverso rapporti di prova e relazioni, in modo chiaro e senza ambiguità a interlocutori specialisti e non specialisti. Sarà in grado di riferire i risultati del controllo di processo, dei test di accettazione e dei test di affidabilità di componenti o sistemi con competenza e proprietà di linguaggio.</p> <p><b>* Capacità di apprendimento</b><br/>Lo studente svilupperà le capacità di apprendimento necessarie per intraprendere studi successivi con un alto grado di autonomia, che gli consentiranno di affrontare qualsiasi problema relativo alla definizione di procedure e metodologie per la pianificazione delle traiettorie; vengono descritti quei sistemi che consentono l'uso di veicoli o aerei autonomi, per applicazioni caratterizzate da ambienti strutturati o non strutturati.</p> |
| <b>VALUTAZIONE DELL'APPRENDIMENTO</b>    | <p>Gli studenti impareranno le metodologie utilizzate per derivare i modelli cinematici e dinamici di un robot, per pianificare le traiettorie adatte e per progettare una legge di controllo adeguata. Inoltre, conosceranno il funzionamento delle istruzioni di base di un linguaggio di programmazione per robot. Al termine del corso, gli studenti saranno in grado di applicare i metodi di modellazione appresi nel corso a robot specifici e di implementare programmi di simulazione. Gli studenti saranno in grado di valutare e scegliere il tipo di robot e le procedure di controllo più appropriate per eseguire un compito o una lavorazione industriale specifica. Gli studenti saranno in grado di discutere e spiegare, sia dal punto di vista tecnico che non, la fattibilità dell'uso dei robot per applicazioni specifiche, illustrandone i vantaggi e gli svantaggi. Infine, avranno acquisito la capacità di leggere e comprendere testi di robotica avanzata.</p> <p>La valutazione dell'apprendimento avviene attraverso il progetto e la presentazione dello stesso, che mirano a valutare:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- la conoscenza e la comprensione dei contenuti del corso</li><li>- la capacità di applicare le conoscenze a problemi e applicazioni in aree specifiche del corso e/o ad esso correlate;</li><li>- capacità di collegare e rielaborare le proprie conoscenze e di orientarsi e formulare giudizi in contesti disciplinari e/o interdisciplinari;</li><li>- proprietà di linguaggio e chiarezza di esposizione, scrittura e argomentazione.</li></ul> <p>La valutazione è espressa in trentesimi e il punteggio minimo per superarla è di 18/30. L'assegnazione del voto dipende dal livello complessivo dei risultati ottenuti. Gli elementi che contribuiscono alla formazione del voto sono i seguenti:</p> <p>* 28-30 con lode - Piena padronanza dei contenuti: assenza di errori; correzione delle imprecisioni o integrazione delle risposte in modo autonomo; approccio</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       | <p>corretto e rigoroso ai problemi; soluzioni complete, corrette ed efficaci; elementi di originalità; rielaborazione efficace delle conoscenze, autonomia e coerenza nell'orientarsi o nell'esprimere giudizi in contesti disciplinari/interdisciplinari; eccellente chiarezza espositiva, argomentazioni articolate; piena proprietà di linguaggio.</p> <p>* 24-27 - Buona padronanza dei contenuti: pochi errori/omissioni minori, correzioni/integrazioni parzialmente guidate; buona impostazione dei problemi, soluzioni sostanzialmente corrette; buona coerenza nel collegare i concetti e nell'orientarsi in ambiti disciplinari o correlati; buona chiarezza espositiva, corretta proprietà di linguaggio.</p> <p>* 18-23 - Conoscenza sufficiente dei contenuti: approccio accettabile ai problemi, soluzioni complessivamente adeguate; autonomia limitata, errori/omissioni non gravi; coerenza nell'orientare e collegare i concetti nei campi disciplinari, anche se in modo incerto e guidato; sufficiente proprietà di linguaggio, esposizione accettabile.</p> <p>- Minore di 18 - Risultati di apprendimento insufficienti: alla fine della prima metà del corso, è previsto un test in itinere che consiste in un compito scritto con domande aperte sulla parte del programma già trattata. Lo scopo di questo test è di rendere gli studenti consapevoli della loro preparazione e il suo risultato non conta ai fini del voto finale.</p> |
| <b>OBIETTIVI FORMATIVI</b>            | Il primo obiettivo formativo del corso è di fornire gli strumenti teorici per lo studio dei modelli dinamici non lineari, per la progettazione di controllori non lineari, in condizioni di conoscenza nominale del modello, e per la validazione degli stessi rispetto a disturbi ed incertezza di modello. Come secondo obiettivo il corso mira ad introdurre alcuni principali strumenti software (Matlab/Simulink, ROS, Gazebo) per la simulazione, realizzazione e la verifica di applicazioni con robot mobili e distribuiti.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>ORGANIZZAZIONE DELLA DIDATTICA</b> | Progetto e presentazione. Il progetto consiste in un approfondimento degli argomenti trattati a lezione. La presentazione tende ad accertare le capacità espressive e il corretto uso del gergo tecnico relativo ai sistemi robotici,                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>TESTI CONSIGLIATI</b>              | * Dispense fornite dal docente / Lecture notes of the teacher                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

## PROGRAMMA

| ORE | Lezioni                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4   | L1 "Introduzione alla robotica mobile". Applicazioni industriali e nei servizi. Forme di stato non lineari. Stabilità degli equilibri mediante la teoria di Lyapunov (richiami ai teoremi di Lyapunov, Barbashin-Krasovskii, Krasovskii-Lasalle).                                                                                                                                                                                                  |
| 6   | L2 "Robot su ruote". Anolonomia e forme canoniche. Veicoli tipo unicycle (modello cinematico e dinamico, controllo del moto punto-punto, inseguimento di percorsi e di traiettorie). Veicoli car-like (modelli cinematici a trazione anteriore o posteriore, con riferimento anteriore o posteriore, modelli dinamici, inseguimento di percorso e parcheggio automatizzato).                                                                       |
| 6   | L3 "Robot Distribuiti". Richiami alla teoria dei grafi. Cooperazione basata su scambio di messaggi. Algoritmo lineare del consenso. Coordinamento per rendez-vous, copertura e mantenimento in formazione. Partizioni di Voronoi.                                                                                                                                                                                                                  |
| 4   | L4 "Veicoli da Corsa". Meccanica della ruota e dello pneumatico. Slittamento dello pneumatico. Magic formula. Modello del veicolo (cinematica, interazione strada-pneumatico, trasferimento dei carichi, modello delle sospensioni). Modello a singola traccia non lineare. Controllo longitudinale e laterale con vento. Cenni al modello a doppia traccia e controllo MPC. Pianificazione ottima (a minima lunghezza, curvature o combinazione). |
| 4   | L5 "Robot Aerei". Applicazioni. Struttura meccanica, sotto-attuazione e modello di un quadrotor. Controllo lineare di assetto e posizione in cascata per la configurazione di hovering. Cenni sui controllori non lineari per l'inseguimento di traiettorie acrobatiche.                                                                                                                                                                           |
| 7   | L6 "Analisi e controllo non lineare avanzati". Raggiungibilità e osservabilità, derivate e prodotto di Lie, distribuzioni involutive. Linearizzazione esatta ingresso-uscita MIMO. Controllo adattativo e stima online dei parametri.                                                                                                                                                                                                              |
| 7   | L7 "Robot con embodied intelligence". Modellazione di soft robot articolati con attuazione pneumatica/elettrica e in configurazione agonista-antagonista. Controllo robusto ed adattativo di soft robot. Stima delle rigidità di giunto con approcci lato attuazione e lato link. Cenni alla stima della rigidità cartesiana.                                                                                                                      |
| ORE | Esercitazioni                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 4   | E1 Simulazioni in Matlab/Simulink di controllori non lineari per robot su ruote.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 12  | E2 "ROS (Robot Operating System)". Architettura e protocolli di comunicazione. URDF. Programmazione di nodi ROS in C++. Simulatore Gazebo. Realizzazione e verifica di controllori in ROS/Gazebo per sistemi a singolo e multi robot.                                                                                                                                                                                                              |