



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II  
SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA E DELLE TECNOLOGIE  
DELL'INFORMAZIONE

Guida dello Studente

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE in INGEGNERIA  
DELL'AUTOMAZIONE E ROBOTICA

Classe delle Lauree Magistrali in Ingegneria dell'Automazione LM-25

MSc AUTOMATION ENGINEERING AND ROBOTICS

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Napoli, giugno 2022

# Generalità sul Corso di Studi

## Il Corso di Studi in breve

La progettazione e la gestione di sistemi capaci di operare in maniera autonoma senza l'intervento dell'uomo ha assunto un ruolo centrale nella società odierna. Come conseguenza, negli ultimi anni si è registrata una crescita esponenziale degli ambiti di applicazione dei controlli automatici.

La formazione del laureato magistrale in Ingegneria dell'Automazione e Robotica si basa su una solida preparazione di base (matematica, fisica), acquisita durante il percorso di studi triennale, e ha l'obiettivo di formare professionisti in grado di operare su applicazioni delle tecnologie dell'informazione ai problemi di automazione presenti in vari ambiti, tra i quali la robotica, l'industria, le scienze della vita, l'aerospazio e l'elettronica di consumo.

In particolare, il percorso formativo della Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Automazione e Robotica prevede:

- insegnamenti rivolti ad approfondire le tecniche moderne di controllo di sistemi multivariabile e le tecniche di ottimizzazione
- insegnamenti rivolti ad approfondire le conoscenze di ingegneria industriale (elettrica e meccanica)
- insegnamenti rivolti ad approfondire l'implementazione di sistemi in tempo reale
- insegnamenti comuni di robotica e di controllo di sistemi complessi nonlineari, tenuti in lingua inglese

Inoltre, al secondo anno sono previsti 18 CFU di attività curriculari a scelta dello studente erogati in inglese, relativi ai due percorsi di:

- Automation & Control Engineering, nel quale si approfondiscono le tematiche relative al controllo di sistemi distribuiti complessi
- Robotics, nel quale si approfondiscono le tematiche relative alle varie applicazioni di robotica industriale e di servizio

## Sbocchi occupazionali

Il laureato magistrale in Ingegneria dell'Automazione e Robotica trova ampi sbocchi professionali nel mondo del lavoro, sia a livello nazionale sia a livello internazionale, nei seguenti ambiti:

- aziende che producono hardware e software per l'automazione
- aziende che progettano e producono macchine, robot e impianti a elevato livello di automazione
- aziende che gestiscono impianti di produzione automatizzati
- enti o aziende che gestiscono reti e servizi a larga scala
- società di ingegneria e di consulenza che analizzano e progettano sistemi complessi
- centri di ricerca pubblici e privati

Testimonianze di ex-studenti sono riportate al link

<https://www.youtube.com/watch?v=rePs1YFS4DI&t=3s>

## Conoscenze richieste per l'accesso: termini e modalità di ammissione

I requisiti curriculari richiesti includono il conseguimento di una Laurea nella classe L-8. Inoltre, l'accesso è subordinato alla verifica dei requisiti curriculari e dell'adeguatezza della preparazione dello studente così come riportato al link

<https://ingegneria-automazione.dieti.unina.it/index.php/it/corsi-di-studio/regolamento-per-l-ammissione>

Per chiarimenti e ulteriori informazioni contattare il Coordinatore del Corso di Studi.

## Piano di Studi

Denominazione Insegnamento	SSD	Modulo	CFU	TAF	OBBLIGATORIO / A SCELTA
<b>I anno</b>					
<b>I semestre</b>					
Azionamenti elettrici per automazione e robotica	ING-IND/32	unico	9	B	OBBLIGATORIO
Complementi di controlli	ING-INF/04	unico	6	B	OBBLIGATORIO
Complementi di meccanica	ING-IND/13	unico	9	B	OBBLIGATORIO
Modelli e metodi della ricerca operativa	MAT/09	unico	6	C	OBBLIGATORIO
<b>II semestre</b>					
Identificazione e controllo ottimo	ING-INF/04	unico	6	B	OBBLIGATORIO
Progetto e sviluppo di sistemi in tempo reale	ING-INF/05	unico	9	C	OBBLIGATORIO
Foundations of robotics	ING-INF/04	unico	9	B	OBBLIGATORIO
<b>II anno</b>					
<b>I semestre</b>					
Nonlinear dynamics and control	ING-INF/04	unico	9	B	OBBLIGATORIO
Modelli numerici per i campi	ING-IND/31	unico	9	C	OBBLIGATORIO (A SCELTA CURRICULARE FINO A 9 CFU)
Modellistica e dinamica dei campi	ING-INF/02	unico			
Prototipazione virtuale	ING-IND/15	unico			
Robotica medica	ING-INF/06	unico			
Control lab	ING-INF/04	unico	6	B	OBBLIGATORIO (A SCELTA CURRICULARE FINO A 6 CFU)
Robotics lab	ING-INF/04	unico			
A scelta autonoma dello studente (si veda tabella riportata sotto)			12	D	OBBLIGATORIO
<b>II semestre</b>					
Advanced control engineering	ING-INF/04	Discrete event systems and supervisory control	6	B	OBBLIGATORIO (A SCELTA CURRICULARE FINO A 12 CFU)
		Control of complex systems and networks	6	B	
Advanced robotics	ING-INF/04	Field and service robotics	6	B	
		Robot interaction control	6	B	
Ulteriori conoscenze (*)			6	F	OBBLIGATORIO
Prova finale			12	E	OBBLIGATORIO

### Attività formativa curriculare a scelta comune ad entrambi i percorsi

#### Attività formativa curriculare a scelta - Percorso Automation & Control Engineering

#### Attività formativa curriculare a scelta - Percorso Robotics

(\*) Le "Ulteriori Conoscenze" possono essere acquisite dall'allievo nell'ambito del lavoro per la preparazione della Tesi. L'acquisizione di tali conoscenze deve essere certificata attraverso un modello AC, controfirmato dal relatore della Tesi di Laurea. Le "Ulteriori conoscenze" possono altresì essere acquisite mediante tirocini extramoenia o intramoenia.

Il tirocinio extramoenia è svolto presso aziende, centri di ricerca o altri enti pubblici e/o privati, italiani o esteri, con affiancamento di un tutor dell'azienda o dell'ente e la supervisione di un tutor universitario.

Il tirocinio intramoenia è svolto presso laboratori di ricerca dell'ateneo con affiancamento di un tutor universitario (docente o ricercatore).

II ANNO - Insegnamenti a scelta curriculare/autonoma per PdS di automatica approvazione						
Denominazione Insegnamento	SSD	Modulo	CFU	Sem.	TAF	CdS di riferimento
Un insegnamento della scelta curricolare comune			9	I	C	
Un insegnamento del percorso Automation & Control Engineering	ING-INF/04		6-12	I-II	B	
Un insegnamento del percorso Robotics	ING-INF/04		6-12	I-II	B	
Algoritmi distribuiti e progettazione dei sistemi di controllo su rete	ING-INF/04		6	II	D	LM Ing. dell'Automazione e Robotica
Biometric systems	INF/01		6	II	D	LM Informatica
Circuiti per DSP	ING-INF/01		9	I	D	LM Ing. Elettronica
Cloud and datacenter networking	ING-INF/05		3	II	D	LM Ing. Informatica
Cognitive computing systems	ING-INF/05		6	II	D	LM Ing. Informatica
Computer systems design	ING-INF/05		9	II	D	LM Ing. Informatica
Computer vision	INF/01		6	I	D	LM Informatica
Control architectures for autonomous driving (**)	ING-INF/04	Control systems for autonomous ground vehicles	6	I	D	LM Autonomous Vehicle Engineering
Control architectures for autonomous driving (**)	ING-INF/04	Mobile robots	6	II	D	
Distributed systems	ING-INF/05		6	I	D	LM Ing. Informatica
Dinamica e controllo dei velivoli	ING-IND/03		6	I	D	LM Ing. Automazione e Robotica
Elaborazione di segnali multimediali	ING-INF/03		9	II	D	LM Ing. TLC
Embedded systems	ING-INF/05		6	II	D	LM Ing. Informatica
Human-robot interaction	INF/01		6	I	D	LM Informatica
Image processing for computer vision	ING-INF/03		9	II	D	LM Ing. TLC
Intelligent robotics	INF/01		6	II	D	LM Informatica
Introduzione ai circuiti quantistici	ING-IND/31		9	I	D	LM Ing. Elettronica
Instrumentation and measurements for smart industry	ING-INF/07		9	II	D	LM Ing. TLC
Machine learning	ING-INF/05		6	I	D	LM Ing. Informatica
Machine learning	INF/01	Statistical learning	6	I	D	LM Informatica

Machine learning	INF/01	Neural networks and deep learning	6	II	D	
Methods for artificial intelligence	INF/01		6	II	D	LM Informatica
Formal Methods	ING-INF/05		3	II	D	LM Ing. Informatica
Nonlinear systems	ING-INF/04		6	II	D	LM Math. Eng.
Plasmi e fusione termonucleare	ING-IND/31		9	I	D	LM Ing. Elettrica
Power devices and circuits	ING-INF/01		9	I	D	LM Ing. Elettronica
Progettazione e sviluppo di prodotto sostenibile	ING-IND/15		9	I	D	LM Ing. Meccanica Prog. Prod.
Propulsione dei veicoli elettrici	ING-IND/32		6	II	D	LM Ing. Automazione e Robotica
Radiolocalizzazione terrestre e satellitare	ING-INF/03		9	I	D	LM Ing. TLC
Ricerca operativa II	MAT/09		9	I	D	LM Ing. Gestionale
Social, ethical and psychological issues in artificial intelligence	INF/01		6	II	D	LM Informatica
Statistical learning and data mining	SECS-S/01		6	II	D	LM Ing. Automazione e Robotica
Tomografia e imaging: principi, algoritmi e metodi numerici	ING-INF/02		9	I	D	LM Ing. TLC

**(\*\*) Gli studenti che optano per l'insegnamento integrato di Control Architectures for autonomous driving (12 CFU) non potranno scegliere l'insegnamento integrato di Advanced Robotics e, pertanto, non potranno optare per il percorso di Robotics.**

### **Elenco delle propedeuticità**

Il percorso di studi non presenta propedeuticità.

### **Tipologia di Attività Formativa (TAF):**

A = Base - B = Caratterizzanti - C = Affini o integrativi - D = Attività a scelta  
E = Prova finale/conoscenze linguistiche - F = Ulteriori attività formative

### **Note al Piano di Studi**

Gli studenti iscritti alla Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Automazione e Robotica che vogliono seguire il percorso di studi statutario non devono presentare piano di studi.

### **Personalizzazione del piano di studi**

Nel caso in cui lo studente voglia inserire come scelta autonoma degli insegnamenti diversi da quelli di automatica approvazione dovrà compilare il piano di studi. Maggiori informazioni al link <https://ingegneria-automazione.dieti.unina.it/index.php/it/servizi-agli-studenti/modulistica/13-servizi-agli-studenti/modulistica/440-manifesti-degli-studi>

### **Attività di tirocinio curriculare**

Il Corso di Studi prevede 6 CFU di "Ulteriori Conoscenze" che possono essere acquisite dall'allievo nell'ambito del lavoro per la preparazione della Tesi.

Le “Ulteriori conoscenze” possono altresì essere acquisite mediante tirocini extramoenia o intramoenia. Il tirocinio extramoenia è svolto presso aziende, centri di ricerca o altri enti pubblici e/o privati, italiani o esteri, con affiancamento di un tutor dell’azienda o dell’ente e la supervisione di un tutor universitario. Il tirocinio intramoenia è svolto presso laboratori di ricerca dell’ateneo con affiancamento di un tutor universitario (docente o ricercatore).

### **Attività per la preparazione e lo svolgimento della prova finale**

La Laurea in Ingegneria dell’Automazione si consegue dopo aver superato una prova finale alla quale si viene ammessi una volta conseguiti tutti i crediti previsti dal proprio piano di studi esclusi quelli relativi alla prova finale stessa. Tale prova consiste nella valutazione della Tesi di Laurea Magistrale, consistente in una relazione scritta (eventualmente in lingua inglese) avente per oggetto un progetto originale sviluppato dallo studente in modo autonomo sotto la guida di un relatore e eventuali co-relatori.

La prova finale è sostenuta dal Candidato innanzi a una Commissione presieduta dal Coordinatore del Corso di Studi e consiste nella presentazione del lavoro svolto sotto la guida di un docente Relatore e nella successiva discussione con i componenti della Commissione.

Al candidato è consentito di avvalersi di un supporto audio-visivo, da proiettare pubblicamente, oppure, in alternativa, di redigere un fascicoletto di sintesi, da consegnare in copia a ciascun componente della Commissione.

Al termine della presentazione, ciascun docente può rivolgere osservazioni al candidato, inerenti all’argomento del lavoro di tesi. La presentazione ha una durata compresa di norma in 15 minuti.

### **Periodi di formazione all’estero – Programmi ERASMUS**

Il Corso di Studi offre molte opportunità di formazione all’estero. Oltre ai programmi di scambio Erasmus, per i quali si rimanda al portale del Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell’Informazione al link <http://erasmus.dieti.unina.it/> per maggiori informazioni, nella sezione di *Avvisi agli Studenti* del sito del Corso di Studi vengono proposte varie opportunità di tirocinio e/o tesi all’estero (<https://ingegneria-automazione.dieti.unina.it/index.php/it/avvisi/avvisi-agli-studenti>)

### **Percorsi speciali**

I laureati magistrali in Ingegneria dell’Automazione e Robotica possono accedere alla Doppia Laurea Magistrale Interna in Mathematical Engineering acquisendo 51 CFU aggiuntivi.

Per maggiori informazioni contattare il Coordinatore del Corso di Studi oppure consultare il link <https://ingegneria-automazione.dieti.unina.it/index.php/it/corsi-di-studio/doppia-laurea-magistrale-interna>

# Orientamento e Tutorato

## **Orientamento in ingresso**

Il futuro studente può raccogliere informazioni interagendo direttamente con personale universitario delegato all'orientamento, in eventi on-line ed in presenza, che si sviluppano durante l'anno.

Sul sito di Ateneo al portale [www.orientamento.unina.it](http://www.orientamento.unina.it) è disponibile il calendario dei singoli eventi, che è anche riportato sul sito della Scuola Politecnica e delle Scienze di base (SPSB), [www.scuolapsb.unina.it](http://www.scuolapsb.unina.it) sezione orientamento.

In particolare, il Corso di Studi organizza varie iniziative di orientamento in ingresso coordinate a livello Dipartimentale, di Scuola e di Ateneo.

Ogni anno viene organizzato l'evento Magistrali@SPSB in cui vengono mostrati: l'offerta didattica delle lauree magistrali, gli sbocchi professionali e le opportunità di tesi e tirocini. Le registrazioni Youtube di tali eventi sono reperibili anche successivamente tramite il sito della SPSB riportato nelle sezioni precedenti.

Nel periodo gennaio-settembre si svolge on-line la serie di eventi "Futuri Studenti", le cui istruzioni di accesso sono riportate ai link sopra. Sarà possibile interagire con docenti universitari per porre domande specifiche sugli sbocchi professionali associati a ciascun percorso, su come vivere pienamente l'esperienza universitaria e ricevere informazioni specifiche sui vari percorsi di studio.

Nel periodo marzo-luglio sono organizzati gli eventi "Open Days" per visitare in presenza le strutture o assistere ad eventi specifici. Le date di questi eventi sono fornite durante l'evento "Porte Aperte" e le modalità di partecipazione possono essere reperite sul sito del Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione ([www.dieti.unina.it](http://www.dieti.unina.it)).

## **Orientamento e tutorato in itinere**

L'orientamento in itinere viene svolto essenzialmente attraverso incontri organizzati dal Corso di Studi all'inizio di ogni anno accademico per presentare l'offerta didattica a scelta. Tali incontri vengono pubblicizzati attraverso il sito web del Corso di Studi (<https://ingegneria-automazione.dieti.unina.it/>) e i relativi canali social.

## **Orientamento in uscita e attività di placement**

Il Corso di Studi organizza attività di orientamento in uscita in maniera coordinata con il proprio Dipartimento, con la Scuola Politecnica e delle Scienze di Base (SPSB) e l'Ateneo.

Sul sito [www.orientamento.unina.it](http://www.orientamento.unina.it) è disponibile una lista di opportunità per tirocini extra-curricolari (i.e. post-laurea) e offerte di lavoro. Inoltre, la SPSB gestisce una piattaforma dinamica di job placement, all'indirizzo [www.jobservice.unina.it](http://www.jobservice.unina.it). La piattaforma è rivolta a studenti e aziende per favorire l'incontro tra l'offerta e la richiesta di tirocini curricolari (pre-laurea), tirocini extra-curricolari (post-laurea) e lavoro.

Allo scopo di ridurre i tempi del placement e rendere la scelta lavorativa più consapevole, in primavera, il Corso di Studi contribuisce all'evento della SPSB "Career Day@SPSB", generalmente in presenza. Durante questo evento gli studenti e i neo-laureati hanno modo di approfondire di persona i domini produttivi delle singole aziende e i profili lavorativi offerti.

Inoltre, la presentazione delle opportunità professionali e degli sbocchi lavorativi e di ricerca è promossa anche attraverso seminari tematici, organizzati dal Corso di Studi durante l'anno e pubblicizzati attraverso canali di comunicazione del Corso di Studi stesso (<https://ingegneria-automazione.dieti.unina.it/index.php/it/avvisi/avvisi-agli-studenti>).

## Calendario, scadenze e date da ricordare

### **Termini e scadenze**

L'immatricolazione e l'iscrizione agli anni successivi hanno luogo, di norma, dal 1 settembre di ogni anno fino al 31 marzo dell'anno successivo, con modalità che sono rese note con una specifica Guida alla iscrizione e al pagamento delle tasse pubblicata alla URL:

<https://www.unina.it/didattica/sportello-studenti/guide-dello-studente>

Ulteriori scadenze (termini per la presentazione dei piani di studio, termini per la presentazione delle candidature ERASMUS, etc.) sono segnalate nella sezione avvisi del sito del Corso di Studi:

<https://ingegneria-automazione.dieti.unina.it/index.php/it/avvisi/avvisi-agli-studenti>

### **Calendario delle attività didattiche e degli esami di profitto**

Il calendario didattico del Corso di Studi viene reso disponibile sui siti web della Scuola, del Dipartimento e del Corso di Studi, prima dell'inizio delle lezioni.

Link al calendario didattico:

<https://ingegneria-automazione.dieti.unina.it/index.php/it/servizi-agli-studenti/calendario-attivita-didattiche>

Link al calendario degli esami di profitto:

<https://ingegneria-automazione.dieti.unina.it/index.php/it/servizi-agli-studenti/calendario-degli-esami>

### **Orario delle attività formative**

I corsi sono erogati nei plessi di Napoli Ovest, a Fuorigrotta. L'orario dettagliato è consultabile al link

<http://easyacademy.unina.it/agendastudenti/index.php?view=easycourse& lang=it>

### **Calendario delle sedute di laurea**

Ogni anno sono previste cinque sessioni di laurea ordinarie nei mesi di maggio, luglio, settembre, ottobre e dicembre, e due sessioni di laurea straordinarie nei mesi di gennaio e marzo.

Il Calendario dettagliato è disponibile sul portale della Scuola Politecnica e delle Scienze di Base al link

<http://www.scuolapsb.unina.it/index.php/laurea-ingegneria>



## Referenti del Corso di Studi

Coordinatore Didattico: Prof. Gianmaria De Tommasi;  
tel. 081/7683853; e-mail: [detommas@unina.it](mailto:detommas@unina.it)

Referente per il Programma ERASMUS: Prof. Pietro De Lellis ([pietro.delellis@unina.it](mailto:pietro.delellis@unina.it))

Responsabile per i Tirocini: Prof. Gianmaria De Tommasi ([detommas@unina.it](mailto:detommas@unina.it))

Referente per l'Orientamento: Prof. Luigi Villani ([luigi.villani@unina.it](mailto:luigi.villani@unina.it))

Rappresentanti degli Studenti: Mariachiara Pollola ([m.pollola@studenti.unina.it](mailto:m.pollola@studenti.unina.it)) – Luigi Cacciapuoti  
([luigi.cacciapuoti3@studenti.unina.it](mailto:luigi.cacciapuoti3@studenti.unina.it);<mailto:fl.battiloro@studenti.unina.it>)

Segreteria Didattica dipartimentale: [segreteria didattica.dieti@unina.it](mailto:segreteria didattica.dieti@unina.it)

## Contatti e Strutture

Indicazione della Sede (georeferenziata, **clickare sui link**)

I corsi sono erogati nei plessi di Napoli Ovest a Fuorigrotta.

### **Polo Fuorigrotta**

- [Via Claudio 21](#)
- [Via Nuova Agnano 11](#)

### **Sito web del Corso di Studi**

<https://ingegneria-automazione.dieti.unina.it/>

### **Canali Social ufficiali del Corso di Studi**

#### **Pagina Facebook**

<https://www.facebook.com/Automazione-UNINA-880210735350675/>

#### **Profilo Twitter**

<https://twitter.com/AutomaUNINA>

#### **Canale Telegram**

<https://t.me/AutomaUNINA>

Sito web del Dipartimento

<https://www.dieti.unina.it/index.php/it/>

Sito web della Scuola

<http://www.scuolapsb.unina.it/>

Sito web di Ateneo

<http://www.unina.it/home>

Portale Orientamento

<http://www.orientamento.unina.it/>

# Schede degli insegnamenti

## ADVANCED CONTROL ENGINEERING SSD ING-INF/04

### EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenze di base sui sistemi di controllo a ciclo chiuso.

### OBIETTIVI FORMATIVI

Il corso ha lo scopo di fornire agli studenti:

- gli strumenti per l'analisi e il controllo di reti di agenti dinamici, con particolare riferimento all'ottimizzazione ed alla sicurezza delle stesse, ed al loro possibile utilizzo in fase di progettazione o di gestione di sistemi a rete in diversi domini applicativi di interesse ingegneristico;
- gli strumenti formali per la modellistica, la verifica e il controllo dei sistemi ad eventi discreti.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

##### Modulo di Discrete Event Systems and Supervisory Control

Il percorso formativo intende fornire agli studenti gli strumenti metodologici per l'analisi del comportamento dei Sistemi ad Eventi Discreti (SED), vale a dire di sistemi dinamici il cui spazio di stato è discreto e la cui evoluzione dipende dall'occorrenza di eventi asincroni. Si introdurranno, inoltre, gli strumenti per la sintesi di leggi di supervisione. In particolare, gli strumenti di modellistica adottati saranno gli automi e le reti di Petri. Lo studente deve dimostrare di avere appreso le peculiarità dei SED e di saperne analizzare il comportamento.

##### Modulo di Control of Complex Systems and Networks

Durante il percorso formativo lo studente deve acquisire gli strumenti metodologici essenziali per la modellazione, analisi e il controllo di sistemi complessi che possono essere studiati come reti di sistemi dinamici interconnessi. Il percorso formativo guiderà gli studenti verso la comprensione dei legami tra le proprietà topologiche del grafo che descrive la rete e la dinamica individuale dei nodi, individuando i legami causali che determinano l'emergenza spontanea di comportamenti collettivi, quali ad esempio il consenso e la sincronizzazione. Gli strumenti analitici e numerici acquisiti dagli studenti saranno poi utilizzati per comprendere le peculiarità nella progettazione di leggi di controllo per sistemi su rete.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

##### Modulo di Discrete Event Systems and Supervisory Control

Lo studente deve dimostrare di sapere modellare processi reali, come sistemi manifatturieri, sistemi di logistica, e sistemi IT, attraverso l'utilizzo di automi e reti di Petri. Lo studente, inoltre, deve dimostrare di saper formalizzare specifiche di controllo di supervisione e di riuscire a sintetizzare il controllore corrispondente.

##### Modulo di Control of Complex Systems and Networks

Lo studente deve essere in grado di applicare la metodologia acquisita per modellare ed analizzare sistemi reali che possono essere interpretati in termini di reti complesse, come ad esempio reti di sensori wireless, dinamiche di popolazione, formazioni di veicoli autonomi. Inoltre, gli studenti dovranno essere in grado di applicare le tecniche di controllo apprese per progettare controllori di sistemi complessi in presenza di vincoli

sul numero di segnali in ingresso e nodi osservabili della rete.

## PROGRAMMA-SYLLABUS

### Modulo di Discrete event systems and supervisory control

- 1 Introduzione
  - 1.1 Sistemi e modelli
  - 1.2 Concetto di stato e modelli dinamici
  - 1.3 Sistemi ad eventi discreti
  - 1.4 Modelli logici, temporizzati e stocastici
- 2 Linguaggi e automi
  - 2.1 Definizione di linguaggio
  - 2.2 Operazioni definite sui linguaggi
  - 2.3 Definizione di automa
  - 2.4 Linguaggi generati e marcati da automi
  - 2.5 Operazioni definite sui automi
  - 2.6 Riconoscitore canonico di un linguaggio regolare
  - 2.7 Stati equivalenti e minimizzazione dello spazio di stato di un automa
  - 2.8 Automi logici non deterministici
  - 2.9 Automa osservatore
  - 2.10 Diagnosticabilità per automi a stati finiti e automa diagnosticatore
  - 2.11 Espressioni regolari
  - 2.12 Le classi dei linguaggi regolari e dei linguaggi riconoscibili: il teorema di Kleene
  - 2.13 Pumping lemma per linguaggi regolari
  - 2.14 Grammatiche di Chomsky – cenni
  - 2.15 Decidibilità e complessità – cenni
- 3 Automi temporizzati deterministici
  - 3.1 Definizione di struttura di temporizzazione deterministica
  - 3.2 Definizione di automa temporizzato deterministico
  - 3.3 Evoluzione temporale di una automa temporizzato deterministico
- 4 Automi temporizzati stocastici – cenni
- 5 Reti di Petri
  - 5.1 Definizione di rete di Petri e di sistema rete di Petri
  - 5.2 Linguaggio generato da una rete di Petri
  - 5.3 Insieme di raggiungibilità e equazione di stato
  - 5.4 Reti etichettate e linguaggio generati e marcati da reti etichettate
  - 5.5 Grafo di raggiungibilità e grafo di copertura
  - 5.6 Proprietà comportamentali: raggiungibilità, limitatezza, conservatività, ripetitività, reversibilità, vivezza e blocco
  - 5.7 Proprietà strutturali: P e T invarianti; sifoni e trappole
  - 5.8 Stima dell'insieme di raggiungibilità mediante equazione di stato e vettori invarianti
  - 5.9 Osservabilità per sistemi di Petri con marcatura iniziale incerta: the observer coverability graph
  - 5.10 K-diagnosticabilità per reti di Petri limitate
  - 5.11 Classi di reti di Petri e sottoclassi di reti ordinarie
- 6 Reti di Petri temporizzate – cenni
- 7 Controllo supervisivo
  - 7.1 Specifiche di controllo
  - 7.2 Concetto di supervisore
  - 7.3 Controllo supervisivo in presenza di eventi non controllabili e condizione di ammissibilità
  - 7.4 Controllo supervisivo in presenza di eventi non controllabili e non osservabili. Supervisore parziale
  - 7.5 Traduzione di specifiche di controllo in automi
  - 7.6 Teorema di controllabilità

- 7.7 Controllabilità
- 7.8 Realizzazione di supervisori mediante automi a stati finiti
- 7.9 Supremal controllable sublanguage e Infimal prefix-closed and controllable superlanguage
- 7.10 Basic Supervisory Control Problem e Dual Basic Supervisory Control Problem
- 7.11 Teorema di controllabilità e non bloccaggio
- 8 Controllo di reti di Petri mediante monitor
  - 8.1 Vincoli GMEC
  - 8.2 Posti monitor
  - 8.3 Sistema a ciclo chiuso e condizione di realizzabilità
  - 8.4 Reti con transizioni non controllabili

## **Modulo di Control of complex systems and networks**

### Parte 1 Introduzione e richiami

- 1 Introduzione
  - 1.1 Definizione di sistema complesso
  - 1.2 Reti complesse di sistemi dinamici
  - 1.3 Esempi: reti di sensori wireless e sistemi compartimentali
- 2 Richiami di teoria delle matrici
  - 2.1 Matrici convergenti e semi-convergenti; classificazione degli autovalori
  - 2.2 Proprietà spettrali delle matrici stocastiche
  - 2.3 Teorema dei dischi di Geršgorin
  - 2.4 Teorema di Perron-Frobenius
  - 2.5 Esempi

### Parte 2 Teoria dei grafi

- 3 Elementi di teoria dei grafi
  - 3.1 Grafi orientati e non orientati
  - 3.2 Definizioni fondamentali
  - 3.3 Percorsi, connettività e periodicità
  - 3.4 Grafo di condensazione
  - 3.5 Grafi pesati
  - 3.6 Matrice di adiacenza
- 4 Legami tra grafi e matrici
  - 4.1 Matrice di adiacenza e sue proprietà
  - 4.2 Alcune equivalenze elementari
  - 4.3 Percorsi nel grafo e potenze della matrice di adiacenza
  - 4.4 Grafi e matrici irriducibili
  - 4.5 Grafi e matrici primitive

### Parte 3 Analisi e controllo di reti di sistemi dinamici lineari: il problema del consenso

- 5 Problema del consenso a tempo discreto
  - 5.1 Rete di integratori a tempo discreto
  - 5.2 Definizione di consenso
  - 5.3 Condizioni topologiche per il consenso in reti tempo-invarianti
  - 5.4 Esempio: modello di popolazione di Leslie
- 6 Problema del consenso a tempo continuo
  - 6.1 Matrice Laplaciana di un grafo: definizione e proprietà
  - 6.2 Esempio: dinamiche collettive in gruppi animali
  - 6.3 Rete di integratori a tempo continuo
  - 6.4 Rango della matrice Laplaciana ed equilibri della rete
  - 6.5 Nodi globalmente raggiungibili ed emergenza consenso
  - 6.6 Condizioni topologiche per il consenso in reti tempo-invarianti
- 7 Velocità di convergenza al consenso
  - 7.1 Fattore di convergenza ad un passo

- 7.2 Fattore di convergenza asintotico
- 7.3 Legame tra velocità di convergenza e proprietà del grafo
- 8 Problemi di consenso su reti tempo-varianti
  - 8.1 Esempi di reti tempo-varianti
  - 8.2 Convergenza su grafi tempo-varianti connessi ad ogni istante
  - 8.3 Convergenza su grafi tempo-varianti connessi in una finestra temporale

#### Parte 4 Reti di sistemi dinamici non-lineari: sincronizzazione

- 9 Reti di sistemi dinamici non-lineari
  - 9.1 Modellazioni e ipotesi fondamentali
  - 9.2 Modello standard di una rete complessa
  - 9.3 Esempi
- 10 Sincronizzazione
  - 10.1 Definizione
  - 10.2 Esempi: oscillatori di Kuramoto
  - 10.3 Analisi di stabilità basata su funzioni di Lyapunov
  - 10.4 Condizioni per la sincronizzazione
  - 10.5 Ipotesi su campo vettoriale e topologia

#### Parte 5 Controllo di reti complesse non-lineari

- 11 Controllo decentralizzato di reti complesse
  - 11.1 Controllo centralizzato e decentralizzato
  - 11.2 Controllabilità delle reti
  - 11.3 Controllo 'pinning'
  - 11.4 Controllo parziale di una rete
- 12 Problemi emergenti e tecniche di controllo avanzato delle reti
  - 12.1 Cenni su controllo adattativo delle reti
  - 12.2 Controllo di reti dipendenti dallo stato
  - 12.3 Coevoluzione di topologia e stato dei nodi
  - 12.4 Applicazioni emergenti

## MATERIALE DIDATTICO

### **Modulo di Discrete event systems and supervisory control**

C. G. Cassandras e S. Lafortune, Introduction to Discrete Event Systems. Springer, 2008.  
 A. Di Febbraro e A. Giua, Sistemi ad eventi discreti. McGraw-Hill, 2002.  
 Control of Discrete-Event Systems. Springer, 2013.  
 Materiale disponibile alla pagina <http://wpage.unina.it/detommas/dssc.html>

### **Modulo di Control of complex systems and networks**

- F. Bullo, Lectures on Network Systems, Edizione 1.3, 2019.  
 - M. E. J. Newman, A. L. Barabasi, and D. J. Watts, The structure and dynamics of networks, Princeton University Press, 2006.  
 - Materiale addizionale e appunti delle lezioni disponibili nella sezione *file* della classe Teams del corso  
*Per approfondimenti:*  
 - Siljak, D. D. Decentralized control of complex systems. Courier Corporation, 2011.  
 - A. Barrat, M. Barthelemy, A. Vespignani, Dynamical Processes on Complex Networks, Cambridge University Press, 2008.  
 - Uri Alon lab dataset. Disponibile su <http://www.weizmann.ac.il>  
 - Pajek's dataset. Disponibile su <http://vlado.fmf.uni-lj.si/pub/networks/data>

## MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

### **Modulo di Discrete event systems and supervisory control**

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa il 70% delle ore totali, b) esercitazioni in aula mediante l'utilizzo di strumenti di analisi e simulazione (UMDES, TINA, ecc.) per circa il 30% delle ore totali.

### **Modulo di Control of complex systems and networks**

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa il 70% delle ore totali, b) esercitazioni in aula mediante l'utilizzo di strumenti di analisi e simulazione (Matlab-Simulink) per circa il 30% delle ore totali.

## VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

### Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	X
discussione di elaborato progettuale	
altro	

In caso di prova scritta i quesiti sono	A risposta multipla	
	A risposta libera	
	Esercizi numerici	

Entrambi i moduli prevedono solo la prova orale. Ciascun colloquio orale consiste nella discussione di una tesina assegnata dal docente e nell'accertamento dell'acquisizione dei concetti e dei contenuti introdotti durante le lezioni.

### Modalità di valutazione:

Il voto finale sarà ponderato sui CFU di ciascun modulo e quindi così composto:

- Modulo di Discrete event systems and supervisory control, 6 CFU, 50%
- Modulo di Control of complex systems and networks, 6 CFU, 50%

# ADVANCED ROBOTICS

## SSD ING-INF/04

### INSEGNAMENTI PROPEDEUTICI (se previsti dall'Ordinamento del CdS)

Foundations of Robotics

Nonlinear Dynamics and Control

### EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenze sui fondamenti della robotica

### OBIETTIVI FORMATIVI

Il corso ha lo scopo di fornire agli studenti:

- Competenze per il controllo dell'interazione tra robot e ambienti scarsamente strutturati, attraverso il controllo di forza, il controllo visuale, la manipolazione e la cooperazione
- Gli strumenti per la modellistica, pianificazione e controllo di robot mobili (con ruote, droni, su gambe, sottomarini) a guida autonoma

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

##### Modulo: Robot Interaction Control

Il percorso formativo intende fornire agli studenti gli strumenti metodologici per il controllo di robot nell'interazione con ambienti scarsamente strutturati. a modellistica, la pianificazione e il controllo dei robot. Vengono introdotte le tecniche di controllo in forza e controllo visuale per manipolatori rigidi e di controllo per manipolatori con giunti elastici, nonché le tecniche per il controllo della manipolazione e della cooperazione di sistemi robotici. Lo studente deve dimostrare di avere appreso le soluzioni al problema del controllo dell'interazione sulla base delle tecniche studiate nel corso.

##### Modulo: Field and Service Robotics

Il percorso formativo intende fornire agli studenti gli strumenti metodologici essenziali per la modellazione, la pianificazione e il controllo di sistemi di robot mobili a guida autonoma. Vengono trattati i problemi fondamentali riguardanti i robot con meccanismi di locomozione in spazi aperti, strutturati e non. I metodi analitici acquisiti dagli studenti sono poi utilizzati per comprendere le peculiarità nella progettazione di tecniche di pianificazione e leggi di controllo per tali robot.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

##### Modulo: Robot Interaction Control

Lo studente deve dimostrare di saper applicare le metodologie acquisite per modellare e controllare sistemi robotici nell'interazione con l'ambiente

##### Modulo: Field and Service Robotics

Lo studente deve dimostrare di saper applicare le metodologie acquisite per modellare, pianificare e controllare robot a guida autonoma con differenti meccanismi di locomozione, come rover terrestri, droni (in particolare quadricotteri), robot sottomarini, robot quadrupedi e bipedi

### PROGRAMMA/SYLLABUS

##### Modulo: Robot Interaction Control

- Interazione di un manipolatore con l'ambiente



- Controllo di cedevolezza
- Controllo di impedenza
- Controllo di forza
- Controllo parallelo forza/moto
- Moto vincolato
- Vincoli naturali e vincoli artificiali
- Controllo ibrido forza/moto
- Visione per il controllo
- Elaborazione dell'immagine
- Stima della posa
- Visione stereo e calibrazione di una telecamera
- Controllo visuale nello spazio operativo
- Controllo visuale nello spazio delle immagini
- Controllo visuale ibrido
- Modellistica di manipolatori con giunti elastici
- Controllo di manipolatori con giunti elastici
- Manipolazione robotica
- Modelli di contatto
- Modelli di attrito
- Definizione delle prese
- Forze interne e forze esterne
- Modelli cinematico e dinamico di un sistema costituito da robot cooperanti e oggetto manipolato
- Controllo e pianificazione di un compito di manipolazione

#### Modulo: Field and Service Robotics

- Robotica per l'esplorazione e robotica di servizio
- Robot su ruote
- Cinematica e dinamica
- Pianificazione
- Controllo del moto
- Localizzazione odometrica
- Pianificazione del moto
- Pianificazione probabilistica
- Pianificazione attraverso il metodo dei potenziali artificiali
- Robotica aerea
- Cinematica dei droni
- Dinamica di un quadricottero
- Controllo gerarchico e controllo geometrico
- Controllo passivo con stimatore di disturbi esterni
- Robotica sottomarina
- Cinematica e dinamica
- Controllore misto
- Robot su gambe
- Cinematica della base flottante
- Dinamica e dinamica centroidale
- Stabilità e criteri
- Controllo whole-body
- Pianificatore
- Stimatore basato sulla quantità di moto

## MATERIALE DIDATTICO

### Modulo: Robot Interaction Control

- B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, Robotics – Modeling, Planning and Control, Springer, London, 2009, ISBN 978-1-84628-641-4
- B. Siciliano, O. Khatib (Eds.), Springer Handbook of Robotics, 2<sup>nd</sup> Edition, Springer, Berlin, 2016 ISBN 978-3-319-32552-1
- B. Siciliano, O. Khatib, T. Kröger, Multimedia Extension to Springer Handbook of Robotics, 2016.
- Materiale disponibile alla pagina <https://prisma.dieti.unina.it/index.php/education/education-courses/723-robot-interaction-control>

### Modulo: Field and Service Robotics

- B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, Robotics – Modeling, Planning and Control, Springer, London, 2009, ISBN 978-1-84628-641-4
- A. Ollero, B. Siciliano (Eds.), Aerial Robotic Manipulation, Springer, Berlin, 2019, ISBN 978-3-030-12945-3
- G. Antonelli, Underwater Robots, 3rd Ed., Springer, Berlin, ISBN 978-3-319-02877-4
- Materiale disponibile alla pagina <https://prisma.dieti.unina.it/index.php/education/education-courses/18-education/education-courses/722-field-and-service-robotics>

## MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

### Modulo: Robot Interaction Control

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa il 70% delle ore totali, b) esercitazioni in aula per circa il 20% delle ore totali, c) seminari per il 10% circa delle ore totali

### Modulo: Field and Service Robotics

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa il 70% circa delle ore totali, b) seminari per il 20% circa delle ore totali; c) esempi in aula mediante l'utilizzo di strumenti di analisi e simulazione in Matlab/Simulink® per circa il 10% delle ore totali

## VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

### Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	X
discussione di elaborato progettuale	X
altro	

In caso di prova scritta i quesiti sono	A risposta multipla	
	A risposta libera	
	Esercizi numerici	

Entrambi i moduli prevedono la prova orale. Il colloquio consiste nell'accertamento dell'acquisizione dei concetti e dei contenuti introdotti durante le lezioni. Il colloquio orale del modulo di Field and Service Robotics include anche la discussione di un elaborato progettuale assegnato dal docente durante il primo

mese del corso.

**Modalità di valutazione:**

Il voto finale sarà ponderato sui CFU di ciascun modulo e quindi così composto:

- Modulo: Robot Interaction Control, 6 CFU, 50%
- Modulo: Field and Service Robotics, 6 CFU, 50%

# ALGORITMI DISTRIBUITI E PROGETTAZIONE DEI SISTEMI DI CONTROLLO SU RETE SSD ING-INF/04

## EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenze di base sui sistemi di controllo a ciclo chiuso.

## OBIETTIVI FORMATIVI

Il corso ha lo scopo di:

- fornire allo studente le competenze per l'analisi, la progettazione e il dimensionamento dei "sistemi di controllo su rete" (Networked Control Systems-NCSs) e dei "sistemi cyber-fisici" (Cyber-Physical Systems-CPSs) impiegati per il monitoraggio e il controllo dei processi distribuiti su rete;
- approfondire le tecniche di sintesi di algoritmi distribuiti, resilienti e fault-tolerant per la stima, il controllo e l'ottimizzazione su rete, applicabili ai moderni sistemi cyber-fisici presenti in ambito industriale (Smart Factory - Industria 4.0, sistemi di elaborazione distribuita, Internet of Things) e civile/sociale (Smart City, reti e infrastrutture di comunicazione);
- illustrare le metodologie introdotte attraverso esempi di progettazione integrata software/hardware di rappresentativi sistemi cyber-fisici.

## RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

### Conoscenza e capacità di comprensione

Il percorso formativo intende fornire agli studenti gli strumenti metodologici per l'analisi e la progettazione software/hardware dei moderni sistemi di controllo su rete e dei sistemi cyber-fisici. Lo studente deve dimostrare di avere appreso quali sono i requisiti peculiari delle componenti software e hardware dei sistemi di controllo su rete e dei sistemi cyber-fisici dedicati al monitoraggio e controllo dei principali processi industriali e civili. Lo studente dovrà inoltre dimostrare la conoscenza delle fasi principali della progettazione integrata software/hardware di un sistema cyber-fisico e della sintesi dei relativi algoritmi distribuiti di controllo, stima e ottimizzazione. Lo studente deve infine dimostrare di aver compreso il ruolo delle tecniche di validazione degli algoritmi e di valutazione delle performance di un sistema cyber-fisico mediante strumenti di simulazione.

### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve dimostrare di sapere formalizzare le specifiche di funzionamento di un sistema di controllo su rete e di un sistema cyber-fisico individuando i requisiti prestazionali del sistema di controllo e della rete, anche in termini di autonomia energetica. A partire dalle specifiche formali di rappresentativi sistemi cyber-fisici, poi, lo studente deve dimostrare di sapere sviluppare semplici algoritmi distribuiti per il monitoraggio, il controllo e l'ottimizzazione su rete, e di essere in grado di dimensionare i principali componenti hardware per la loro implementazione. Infine, lo studente dovrà mostrare la capacità di progettare i test di validazione degli algoritmi e del sistema cyber-fisico nel suo complesso avvalendosi anche dell'utilizzo di semplici simulatori.

## PROGRAMMA-SYLLABUS

1. Introduzione ai sistemi di controllo su rete e ai sistemi cyber-fisici
  - 1.1 Processi complessi, distribuiti su rete e su larga scala
  - 1.2 Sistemi di controllo remoto
  - 1.3 Architetture centralizzate, decentralizzate e distribuite
  - 1.4 Algoritmi distribuiti
  - 1.5 Definizione e specifiche dei sistemi cyber-fisici e degli algoritmi distribuiti
  - 1.6 Esempi applicativi
2. Modello multi-layer dei sistemi cyber-fisici
  - 2.1 Livello “applicazione”
  - 2.2 livello “rete”
  - 2.3 livello “fisico”
  - 2.4 Specifiche del livello applicazione, rete e fisico
3. Algoritmi distribuiti, progettazione e dimensionamento di un sistema cyber-fisico
  - 3.1 I sistemi multi-agente e gli algoritmi di consenso
  - 3.2 Progettazione del sistema di controllo a livello rete
  - 3.3 Sintesi di algoritmi distribuiti per il controllo di traffico, di congestione e bilanciamento del carico
  - 3.4 Progettazione del sistema di controllo a livello applicazione
  - 3.5 Sintesi di algoritmi cooperativi di stima, ottimizzazione e controllo su rete
  - 3.6 Autonomia energetica e “Energy Harvesting” in sistemi cyber-fisici. Algoritmi distribuiti di gestione energetica
  - 3.7 Analisi di stabilità, convergenza e complessità computazionale degli algoritmi distribuiti
4. Resilienza e robustezza del sistema cyber-fisico e degli algoritmi distribuiti
  - 4.1 Effetti dei ritardi di comunicazione, delle perdite dati, del rumore di misura e di canale, e incertezze parametriche sulle prestazioni del sistema cyber-fisico
  - 4.2 Algoritmi distribuiti robusti, resilienti agli attacchi a livello di segnale e fault-tolerant
5. Algoritmi distribuiti per sistemi cyber-fisici basati su reti di sensori/sistemi embedded, reti di calcolatori, sistemi di elaborazione, flotte di droni e veicoli
6. Esempi di applicazione delle metodologie introdotte al progetto integrato software/hardware di rappresentativi sistemi cyber-fisici per le Smart City e le Smart Factory (Industria 4.0)

## MATERIALE DIDATTICO

[1] Appunti integrativi delle lezioni disponibili sul sito docenti

[2] S. Manfredi, “Multilayer Control of Networked Cyber-Physical Systems. Application to Monitoring, Autonomous and Robot Systems”. Advances in Industrial Control, Springer, 2017

[3] A. Bemporad, M. Heemels, M. Vejdemo-Johansson, “Networked Control Systems”, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer, 2010

## MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa il 50% delle ore totali, b) esercitazioni in aula mediante l'utilizzo di strumenti di simulazione e/o in laboratorio per circa il 50% delle ore totali

## VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	X
discussione di elaborato progettuale	X
altro	

# AZIONAMENTI ELETTRICI PER AUTOMAZIONE E ROBOTICA

## SSD ING-IND/32

### EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenze di base su:

- macchine elettriche;
- elettronica di potenza;
- convertitori statici di energia elettrica;
- sistemi di controllo a ciclo chiuso.

### OBIETTIVI FORMATIVI

Obiettivo dell'insegnamento è quello di fornire agli studenti competenze avanzate sul dimensionamento, sul controllo e sull'esercizio di azionamenti elettrici con motori elettrici in corrente continua e alternata, che consentano sia l'analisi delle prestazioni energetiche e dinamiche di azionamenti già in esercizio, sia la scelta delle soluzioni più idonee nel caso di nuove installazioni, con particolare riferimento ai sistemi di automazione industriale.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Lo studente deve dimostrare di:

- aver appreso gli strumenti metodologici per l'analisi e il dimensionamento sia dei singoli componenti di un azionamento elettrico - con particolare riferimento ai motori elettrici, ai convertitori statici di energia elettrica utilizzati per la loro alimentazione e ai relativi sistemi di controllo - sia dell'azionamento inteso come sistema collocato nell'ambito di un processo industriale;
- conoscere i punti di forza e le criticità dei differenti azionamenti elettrici basati su differenti tipologie di macchine elettriche, convertitori, sensoristica e strategie di controllo.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve dimostrare di:

- sapere utilizzare in autonomia gli strumenti metodologici acquisiti al fine individuare le soluzioni più idonee nel caso di nuove installazioni, con particolare riferimento ai sistemi di automazione industriale;
- saper implementare programmi di simulazione in ambiente Matlab/Simulink per l'analisi preventiva delle prestazioni dinamiche ed energetiche di un azionamento;
- sapere implementare su un PLC gli algoritmi di controllo di un azionamento utilizzando i linguaggi previsti dallo standard IEC 61131-3;
- saper applicare le conoscenze teoriche acquisite attraverso esercitazioni analitiche ed esperienze di laboratorio

### PROGRAMMA-SYLLABUS

- Analisi dei componenti costituenti un azionamento elettrico
- Elementi di meccanica degli azionamenti

- Modellizzazione del comportamento termico degli azionamenti elettrici
- Normativa di riferimento
- Azionamenti con motore in corrente continua
  - controllo in regime stazionario
  - controllo in cascata
  - regolatori industriali
  - esempi di applicazioni
- Cenni sulle architetture digitali per sistemi di controllo programmabili
- impiego di microcontrollori per l'automazione industriale.
- Azionamenti con motore asincrono
  - modello della macchina asincrona in regime stazionario
  - caratteristiche di regolazione stazionarie
  - controllo tensione/frequenza
  - dominio limite di coppia
  - controllo della frequenza di scorrimento
- Inverter a tensione impressa controllato in corrente
- Tecniche di modulazione vettoriale per inverter a tensione impressa
- Modello dinamico della macchina asincrona
- Controllo vettoriale del motore asincrono
  - orientamento sul flusso di statore e rotore
  - controllo diretto ed indiretto
  - osservatori e stimatori del flusso
  - controllo diretto della coppia e del flusso
  - esempi di applicazioni
- Azionamenti DC brushless
  - caratteristiche costruttive e principio di funzionamento
  - strategie di alimentazione per il controllo della velocità
  - schemi di controllo half wave e full wave.
- Azionamenti AC brushless
  - caratteristiche costruttive e principio di funzionamento
  - strategie di alimentazione per il controllo della velocità
  - controllo ad orientamento di campo
  - dominio di regolazione coppia-velocità
  - esempi di applicazioni
- Inverter multilivello tipo NPC
- Motore asincrono monofase
- Motore universale
- Azionamenti con motori asincroni con rotore ad anelli: schemi Kraemer e Scherbius
- Attività di laboratorio incentrata sull'uso dei PLC per il controllo di azionamenti elettrici con motori asincroni e brushless
- Implementazione del programma di simulazione di un azionamento con motore asincrono/brushless e controllo vettoriale

## MATERIALE DIDATTICO

W. Leonhard: Control of Electrical Drives, Springer Verlag

B.K. Bose: Power Electronics and AC Drives.

A. Del Pizzo: Azionamenti Elettrici, volumi 1 e 2, editore: Praise Worthy Prize

## MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà:

- lezioni frontali per circa l'80% delle ore totali
- esercitazioni in aula e in laboratorio per circa il 20% delle ore totali

## VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

### Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	X
discussione di elaborato progettuale	X
altro	

L'esame si articola in due momenti distinti, seppur contigui dal punto di vista temporale:

- 1) verifica di un elaborato progettuale consistente in un programma di simulazione realizzato e implementato da ciascuno studente per la modellizzazione di azionamenti con motore asincrono/brushless e controllo vettoriale (peso 1/4);
- 2) tre domande teoriche relative ai contenuti fondamentali in cui si articola il corso (peso 3/4).

### Modalità di valutazione:

La verifica del programma di simulazione di cui al precedente punto 1) ha come obiettivo l'accertamento della capacità dello studente di modellizzare correttamente un azionamento elettrico al fine di prevederne le prestazioni, sia energetiche che dinamiche, e di dimensionarne gli anelli di controllo.

Le domande di cui al punto 2) hanno l'obiettivo di evidenziare il livello di approfondimento e consapevolezza raggiunto dallo studente nello studio della materia.



# COMPLEMENTI DI CONTROLLI

## SSD ING-INF/04

### EVENTUALI PREREQUISITI

Analisi di sistemi multivariabili. Proprietà strutturali dei sistemi lineari. Conoscenze sulla progettazione classica di sistemi di controllo a ciclo chiuso.

### OBIETTIVI FORMATIVI

L'obiettivo del corso è quello di fornire allo studente le principali metodologie per la progettazione di sistemi di controllo avanzati per sistemi lineari multivariabili.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Il percorso formativo intende fornire agli studenti gli strumenti metodologici per la progettazione di sistemi di controllo per impianti multivariabili. A tal scopo verranno introdotte le principali tecniche di progetto basate sulla rappresentazione a spazio di stato degli impianti, quali la tecnica di allocazione degli autovalori, il controllo ottimo, ed il controllo ottimo H-infinito. Verrà inoltre affrontato il problema della stima dello stato di un sistema attraverso un osservatore (filtro di Kalman), e quello della riduzione dell'ordine.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Al termine del corso, gli studenti saranno in grado di progettare controllori per sistemi multivariabili usando i tools messi a disposizione dal software Matlab/Simulink, e di valutare le prestazioni e la robustezza assicurate dal controllore progettato.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

- **Richiami sui sistemi lineari tempo-invarianti.**

Decomposizione modale di sistema lineari nel dominio del tempo (diagonalizzazione della matrice dinamica e calcolo della matrice di transizione); sottospazi di raggiungibilità, controllabilità ed osservabilità; i Gramiani di raggiungibilità, controllabilità ed osservabilità; forme canoniche di Kalman; norma in H-infinito di un sistema lineare tempo-invariante.

- **Teoria della stabilità.**

Stabilità dei punti di equilibrio. Il Metodo di Lyapunov. Equazioni di Lyapunov per i sistemi lineari.

- **Controllo di sistemi multivariabili.**

Analisi dei sistemi multivariabili: sistemi ad anello aperto, sistemi ad anello chiuso. Il criterio di Nyquist per sistemi multivariabili. Il teorema del piccolo guadagno. Stabilizzabilità e rilevabilità di sistemi lineari, test PBH. Allocazione dei poli attraverso la retroazione di stato e la formula di Ackerman per sistemi SISO; lemma di Heymann; teoria e progetto degli osservatori; principio di separazione ed allocazione dei poli attraverso la reazione di uscita.

- **Controllo Ottimo.**

Cenni sull'ottimizzazione statica con vincoli di uguaglianza. Problemi di ottimizzazione dinamica; l'equazione di Hamilton-Jacobi-Bellman; formulazione del principio del massimo per problemi con e

senza vincoli terminali; soluzione di problemi di controllo ottimo a tempo minimo; regolatori lineari quadratici; equazione differenziale di Riccati; problemi su orizzonte temporale infinito ed equazione algebrica di Riccati; proprietà di stabilità a ciclo chiuso del regolatore lineare quadratico. Robustezza del controllore LQ.

Il controllo ottimo in ambito stocastico; il filtro di Kalman; il principio di separazione ed il controllo LQG. Specifiche nel dominio della frequenza e scelta dei pesi nel controllo LQG. Controllo LQG con azione integrale.

- **Controllo Ottimo H-infinito.**

Formulazione del problema standard H-infinito. Controllo robusto: analisi di stabilità e prestazioni robuste. Progettazione di controllori robusti.

- **Tecniche di riduzione dell'ordine.**

Realizzazioni bilanciate e loro impiego per la riduzione dell'ordine dell'impianto e/o del controllore.

### MATERIALE DIDATTICO

L. Magni, R. Scattolini, Advance and Multivariable Control, Pitagora Editrice Bologna.

Appunti forniti dal docente

### MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa il 70% delle ore totali, b) esercitazioni in aula mediante l'utilizzo del software Matlab/Simulink ([www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)) per circa il 30% delle ore totali.

### VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

#### Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	X
discussione di elaborato progettuale	X
altro	

Il colloquio orale è rivolto ad una discussione sugli argomenti teorici trattati nel corso e alla presentazione di un elaborato progettuale sviluppato dallo studente.

#### Modalità di valutazione:

Nella prova orale lo studente deve dimostrare di padroneggiare gli argomenti teorici sviluppati nel corso, deve essere inoltre in grado di illustrare chiaramente le linee guida usate nell'elaborato progettuale.

# COMPLEMENTI DI MECCANICA

## SSD ING-IND/13

### EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenze di base sulla meccanica acquisite nell'insegnamento di Fondamenti di Meccanica; conoscenze di base dell'ambiente di lavoro Matlab/Simulink.

### OBIETTIVI FORMATIVI

Fornire allo studente nozioni su alcuni fenomeni meccanici che si possono verificare negli organi di macchine e le nozioni fondamentali per la progettazione di organi meccanici e tecniche di monitoraggio e diagnostica durante il loro funzionamento. Sono, inoltre, trattati elementi di base della meccanica dei Robot.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Le attività formative previste dall'insegnamento mirano a fornire allo studente tutti gli strumenti metodologici necessari ad affrontare lo studio di un sistema meccanico in generale e di uno robotico in particolare. Lo studente deve dimostrare di conoscere e saper comprendere le problematiche relative alla meccanica che sono sempre presenti in qualsiasi sistema automatico o automatizzato. Le lezioni e le esercitazioni hanno lo scopo di sviluppare nello studente le connessioni causali tra l'analisi meccanica ed il funzionamento dei meccanismi anche destinati a costituire un sistema di automazione.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Il percorso formativo è orientato a trasmettere le capacità e gli strumenti metodologici e operativi necessari ad applicare concretamente le conoscenze relative all'analisi meccanica nel monitoraggio e nella diagnostica dei sistemi meccanici stessi. Lo studente dovrà inoltre mostrare la capacità di utilizzo delle principali fasi di sintesi di un sistema robotico riconoscendone le caratteristiche principali e la struttura cinematica, e dimostrando di saper strutturare un'analisi cinematica e dinamica del sistema stesso.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

- Rigidità e deformabilità di componenti meccanici
- Determinazione delle sollecitazioni negli organi di macchina
- Sistemi a più gradi di libertà
  - matrici di inerzia e matrici di rigidità
  - equazioni del moto
  - frequenze naturali
  - linee elastiche
- Dinamica dei rotori rigidi.
- Elementi di dinamica dei rotori elastici
  - Velocità critiche flessionali
  - Bilanciamento dei rotori rigidi e macchine bilanciatrici
  - Cenni sul bilanciamento dei rotori elastici
- Studio del comportamento cinematico e dinamico di sistemi meccanici mediante simulazione al calcolatore.
- Elementi di Tribologia
  - Contatto tra superfici
  - Topografia superficiale
  - Meccanismi di usura
  - Proprietà dei lubrificanti
  - Principali meccanismi di lubrificazione
  - Cuscinetti e loro dimensionamento

- Criteri di diagnostica di elementi meccanici
  - Trasformata Wavelet ed applicazioni
  - Analisi multirisoluzionale
  - Teoria del Chaos
  - Esempio di progettazione di un sistema meccanico
- Robot industriali
  - Definizioni, concetti generali
  - Classificazione dei robot
- Descrizione e principi di funzionamento di un robot
  - Sistemi di trasmissione del moto
  - Riduttori
  - Attuatori
  - Altri componenti meccanici per l'automazione
- Sistemi articolati piani ad 1 g.d.l.
  - Quadrilateri articolati: studio cinematico
  - Sintesi cinematica
  - Bilanciamento statico
  - Bilanciamento dinamico
- Sistemi articolati ad n assi
  - Problema cinematico diretto ed inverso
  - Matrici di rotazione
  - Coordinate omogenee
  - Matrici di trasformazione
  - Struttura dei link e parametri dei giunti
  - Rappresentazione di Denavit ed Hartenberg
  - Posizione della pinza
  - Matrice di velocità
  - Matrice di accelerazione
  - Statica del braccio
  - Calibrazione cinematica
- Leggi del moto e traiettorie
  - Tempo minimo di azionamento
  - Scalatura delle leggi del moto
  - Pianificazione delle leggi del moto e delle traiettorie di un robot
  - Traiettoria della pinza di un robot ad n assi
- Dinamica
  - Equazioni di equilibrio dinamico di un manipolatore a più gradi di libertà
  - Matrici delle azioni
  - Forze che agiscono sui link
  - Equilibrio dinamico dei segmenti
  - Cenni sulla dinamica di manipolatori non rigidi

### **MATERIALE DIDATTICO**

Libro di testo: Vincenzo Niola, Giuseppe Quaremba - "Elementi di dinamica non lineare di sistemi meccanici per l'Ingegneria. Dalla Trasformata Wavelet alla Teoria del Chaos".

Libro di testo: Vincenzo Niola, Giuseppe Quaremba - "Sistemi Vibrazionali Complessi. Teoria, Applicazioni e metodologie Innovative di analisi".

Libro di testo: C. Rossi - "Lezioni di Meccanica dei Robot" - Edizioni ESA, ISBN9788895430188

Dispense disponibili sui siti web dei docenti.

## MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa l'80% delle ore totali, b) esercitazioni in aula mediante l'utilizzo del software Matlab (<https://www.mathworks.com/>) per circa il 20% delle ore totali.

## VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

### Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	X
solo scritta	
solo orale	
discussione di elaborato progettuale	
altro	

In caso di prova scritta i quesiti sono (*)	A risposta multipla	
	A risposta libera	X
	Esercizi numerici	X

Il colloquio orale segue tre prove intercorso distribuite temporalmente ad inizio, centro e fine del corso volte all'accertamento dell'acquisizione dei concetti e dei contenuti introdotti durante le lezioni fino al momento della prova stessa. Tipicamente lo studente ha a disposizione 2 ore per la prova intercorso che consiste nel rispondere a 3 quesiti o esercizi numerici. Le tre prove hanno uguale peso sul giudizio finale.

### Modalità di valutazione:

L'esito delle prove intercorso insieme all'esito della prova orale consente di formulare il giudizio. Il superamento delle prove intercorso da solo non è sufficiente per il superamento dell'esame. Se le prove intercorso non sono sostenute il giudizio è formulato solo sulla base della prova orale.

# CONTROL LAB

## SSD ING-INF/04

### EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenze di base sui sistemi di controllo a ciclo chiuso; conoscenze di base delle problematiche legate al determinismo nella progettazione e lo sviluppo di sistemi software real-time.

### OBIETTIVI FORMATIVI

Obiettivo principale del corso è fornire allo studente l'opportunità di fare esperienza di risoluzione di problemi pratici di modellazione, identificazione e controllo utilizzando le nozioni teoriche acquisite in corsi precedenti, per un insieme di applicazioni basate su sistemi elettromeccanici. L'apprendimento avverrà attraverso l'inserimento in gruppi di lavoro per la progettazione ed implementazione su PC e/o su schede a microcontrollore di leggi di controllo model-based per ognuno dei set-up sperimentali presenti nel laboratorio, sia fisico che virtuale.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Il percorso formativo intende fornire agli studenti gli strumenti metodologici per la progettazione di un sistema di controllo reale utilizzando la metodologia Model Based System Design. Lo studente imparerà ad applicare i concetti di Model in the Loop (MIL), Software in the Loop (SIL), Process in the Loop (PIL) ed Hardware in the Loop (HIL), seguendo il tipico schema di sviluppo a "V" di un sistema di controllo, portando in conto anche la scrittura e la verifica dei requisiti. In ognuno di questi step, lo studente deve dimostrare di avere compreso come applicare le nozioni teoriche di modellistica, identificazione, simulazione e controllo apprese in corsi precedenti a problemi pratici e molto vicini a concreti sistemi di controllo industriali.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve dimostrare di sapere applicare la metodologia Model Based System Design ad un progetto di un sistema di controllo assegnato. In particolare, a partire dallo sviluppo di modelli in ambiente Matlab/Simulink per i sistemi disponibili in laboratorio, lo studente si occuperà del progetto del controllore in funzione di opportuni requisiti. Successivamente, lo studente deve dimostrare di sapere codificare tale legge di controllo e testarla mediante implementazione su schede a microcontrollore. Il progetto sarà concluso quando lo studente riuscirà a dimostrare l'effettivo funzionamento della logica di controllo sviluppata sul sistema reale, mediante dei test di validazione.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

- Model Based System Design
  - Diagramma a "V"
  - Model in the Loop
  - Software in the Loop
  - Process in the Loop
  - Hardware in the Loop
  - Testing e verifica dei requisiti
- Laboratorio Virtuale Interattivo Quanser
  - Servo Motor Control
  - Inverted Pendulum
  - Aero System
- Laboratorio Remoto Interattivo Quanser
  - Servo Motor Control
  - Aero System

- Programmazione di Microcontrollori
  - Self-balancing Motorcycle
  - Rover
  - Drawing Robot
  - Temperature Control Lab (Lab on Chip)

### MATERIALE DIDATTICO

Materiale del docente.

### MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa il 20% delle ore totali, b) esercitazioni in aula mediante l'utilizzo dei set-up sperimentali del laboratorio per circa l'80% delle ore totali.

### VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

**Modalità di esame:**

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	
discussione di elaborato progettuale	X
altro	

La prova d'esame consiste nella discussione di un elaborato progettuale relativo ad un sistema di controllo assegnato dal docente e basato su uno dei sistemi disponibili in laboratorio, sia fisico che virtuale.

Nel corso della discussione lo studente dovrà anche mostrare i risultati ottenuti mediante prove di testing pratici sul sistema sviluppato.

**Modalità di valutazione:**

Si valuterà la capacità di scrivere una relazione tecnica, di collaborazione all'interno di un team, di esposizione dei risultati ottenuti. Si valuterà, inoltre, anche l'aderenza del progetto presentato alle specifiche richieste mediante prove pratiche dimostrative.

# DINAMICA E CONTROLLO DEI VELIVOLI

## SSD ING-IND/03

### EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenze di base sulla dinamica dei sistemi e sulle tecniche di controllo classico. Utilizzo del Matlab/Simulink per la simulazione dei sistemi dinamici.

### OBIETTIVI FORMATIVI

Il corso ha come primo obiettivo quello di fornire agli allievi le conoscenze metodologiche necessarie per l'analisi della risposta dinamica di un velivolo ad ala fissa, con o senza pilota a bordo, a una qualsiasi causa perturbatrice a partire da una condizione iniziale di equilibrio. Esso fornisce gli elementi di base della meccanica del volo e successivamente affronta il problema della risposta dinamica del velivolo nello spazio di stato.

La seconda parte del corso fornisce allo studente gli elementi per la progettazione di algoritmi di incremento artificiale della stabilità, di algoritmi di incremento della controllabilità e di autopiloti. I problemi di controllo sono affrontati con riferimento a esempi applicativi e mediante l'uso di tecniche di controllo sia classico che moderno.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Il percorso formativo intende fornire agli studenti gli strumenti metodologici per comprendere le prestazioni e le caratteristiche dinamiche di un velivolo ad ala fissa, per leggere le specifiche di un sistema di controllo di volo e comprendere quali siano le tecniche più idonee per soddisfarle.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Al termine del corso, gli studenti saranno in grado di valutare le prestazioni di un velivolo ad ala fissa, progettare un algoritmo di controllo che ricade nella classe degli algoritmi di incremento artificiale della stabilità, degli algoritmi di incremento della controllabilità o degli autopiloti. I problemi di controllo sono affrontati con riferimento a esempi applicativi e mediante l'uso di tecniche di controllo sia classico che moderno. Lo studente sarà altresì in grado progettare uno stimatore ottimo dello stato del velivolo e di simulare la dinamica del velivolo sia a ciclo aperto che a ciclo chiuso.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

- Introduzione ai principi di funzionamento dei moderni velivoli con particolare riferimento alla manovrabilità e al controllo
- Modello di atmosfera standard
- Volo rettilineo, uniforme, simmetrico, orizzontale
- Volo in discesa e volo librato
- Volo in salita
- Quota di tangenza teorica e pratica
- Fattore di carico e diagramma di manovra
- La virata e la richiamata
- Le manovre di decollo e di atterraggio
- Cenni alla stabilità statica longitudinale e latero-direzionale
- Equazioni generali del moto del velivolo
- Derivate di stabilità
- Modello linearizzato della dinamica e modi caratteristici longitudinali e latero-direzionali
- Qualità di volo e loro classificazione
- Specifiche richieste a un sistema di controllo di volo



- Sistemi di aumento della stabilità
- Sistemi di aumento della controllabilità
- Autopiloti progettati con tecniche di controllo classico
- Applicazione del controllo ottimo alla progettazione di algoritmi di controllo di volo
- Applicazioni dell'assegnamento dei poli e dell'autostruttura al controllo di volo
- Stima dello stato e filtraggio alla Kalman
- Controllo H-infinito applicato ai problemi di controllo di volo
- Simulazione della dinamica a ciclo chiuso di un velivolo ad ala fissa in ambiente Matlab-Simulink

#### MATERIALE DIDATTICO

- Appunti e slides forniti dal docente.
- Stevens, B.L., and F.L. Lewis, Aircraft Control and Simulation, Wiley.
- Roskam, J., Airplane Flight Dynamics, Roskam Aviation
- Pamadi, B.N., Performance, Stability, Dynamics and Control of Airplanes, AIAA Education Series

#### MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per l'80% delle ore totali, b) esercitazioni in aula mediante l'utilizzo del software MATLAB/SIMULINK (<https://www.mathworks.com/>) per circa il 20% delle ore totali.

#### VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

##### Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	X
discussione di elaborato progettuale	X
altro	

La prova di esame consiste di due parti:

- n. 2 o 3 domande orali sulla meccanica e/o dinamica del volo dei velivoli ad ala fissa;
- discussione di un elaborato sviluppato in ambiente Matlab/Simulink dalla quale possono scaturire domande sugli algoritmi di controllo di volo e loro implementazione.

##### Modalità di valutazione:

L'esito dell'esame sarà il frutto di una media pesata delle valutazioni conseguite per la prova orale e la discussione dell'elaborato progettuale.

# FOUNDATIONS OF ROBOTICS

## SSD ING-INF/04

### EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenze di base su: algebra lineare, modellistica dei sistemi meccanici ed elettrici, sistemi di controllo a ciclo chiuso.

### OBIETTIVI FORMATIVI

Il corso si propone di fornire le competenze di base per la modellistica, la pianificazione e il controllo del moto dei robot

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Il percorso formativo intende fornire agli studenti gli strumenti metodologici per la modellistica, la pianificazione e il controllo dei robot. Vengono introdotti i componenti di un robot, i modelli cinematici, statici e dinamici dei robot manipolatori, le tecniche di pianificazione di traiettoria e gli schemi di controllo. Lo studente deve dimostrare di avere appreso quali sono i requisiti dei sistemi dedicati al controllo dei robot, sulla base dei modelli impiegati. Lo studente deve inoltre dimostrare la conoscenza nella derivazione di modelli e nella validazione degli algoritmi per l'inversione cinematica e il controllo mediante strumenti di simulazione.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve dimostrare di saper derivare i modelli cinematici, statici e dinamici e di saperli applicare a casi di studio pratici riguardanti i robot manipolatori a catena aperta. A partire da questi, deve dimostrare di saper progettare schemi di controllo che risolvano i problemi di regolazione e di inseguimento di traiettoria e di saperli validare in ambiente Matlab/Simulink®.

### PROGRAMMA/SYLLABUS

- Robotica industriale e robotica avanzata
- Descrizione e principi di funzionamento di un robot
- Cinematica diretta
- Calibrazione cinematica
- Cinematica differenziale e Jacobiano
- Ridondanza e singolarità
- Algoritmi per l'inversione cinematica
- Dualità cineto-statica
- Pianificazione di traiettorie nello spazio dei giunti e nello spazio operativo
- Attuatori e sensori
- Unità di governo
- Modello Lagrangiano
- Proprietà notevoli del modello dinamico
- Algoritmo ricorsivo di Newton-Eulero
- Identificazione dei parametri dinamici
- Dinamica diretta e dinamica inversa
- Controllo decentralizzato
- Controllo indipendente ai giunti
- Controllo centralizzato
- Controllo a coppia precalcolata
- Controllo PD con compensazione di gravità

- Controllo a dinamica inversa
- Controllo robusto e adattativo
- Controllo nello spazio operativo

#### MATERIALE DIDATTICO

- B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, Robotics – Modelling, Planning and Control, [Springer](#), London, UK, 2009, DOI: [10.1007/978-1-84628-642-1](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1). Italian translation: Robotica – Modellistica, Pianificazione e Controllo, [McGraw-Hill Libri Italia](#), Milano, I, 2008
- B. Siciliano, Robotics Foundations I, MOOC disponibile in inglese sulla piattaforma [www.federica.eu](http://www.federica.eu)
- B. Siciliano, Robotics Foundations II, MOOC disponibile in inglese sulla piattaforma [www.federica.eu](http://www.federica.eu)
- Materiale disponibile alla pagina <https://prisma.dieti.unina.it/index.php/education/education-courses/34-robots-foundations>

#### MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa il 70% delle ore totali, b) esercitazioni in aula per circa il 30% delle ore totali

#### VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

##### Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	X
discussione di elaborato progettuale	X
altro	

Al colloquio orale si viene ammessi dopo lo svolgimento di un elaborato progettuale in Matlab/Simulink® riguardante la simulazione di algoritmi di inversione cinematica e sistemi di controllo per robot manipolatori. L'esame consiste in una discussione critica dell'elaborato e nell'accertamento dell'acquisizione dei concetti e dei contenuti introdotti durante le lezioni.

##### Modalità di valutazione:

Lo svolgimento dell'elaborato è vincolante ai fini dell'accesso alla prova orale. L'elaborato e la prova orale contribuiscono ognuna per il 50% della valutazione finale e, pertanto, lo svolgimento dell'elaborato non è sufficiente per il superamento dell'esame.

# MODELLI E METODI DELLA RICERCA OPERATIVA

## SSD MAT/09

### OBIETTIVI FORMATIVI

Obiettivo del corso è ampliare le conoscenze modellistiche ed algoritmiche necessarie per analizzare sistemi complessi e ottimizzare il loro funzionamento al fine di risolvere problemi reali di carattere industriale (ad esempio pianificazione della produzione, allocazione delle risorse e schedulazione delle attività). Lo studio teorico sarà inoltre completato dall'introduzione all'utilizzo di ambienti software di ottimizzazione.

Al termine del corso lo studente avrà acquisito gli strumenti necessari a formulare e risolvere in modo esatto o approssimato un problema decisionale, emergente in un contesto industriale automatizzato, mediante un modello di programmazione matematica e algoritmi di ottimizzazione.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Il percorso formativo ha l'obiettivo di fornire agli studenti le metodologie di ottimizzazione continua, intera e mista-intera necessarie per la modellazione e risoluzione esatta di problemi ingegneristici in ambito industriale, con particolare riferimento a problemi di pianificazione della produzione, allocazione risorse e schedulazione delle attività/task. Lo studente deve dimostrare di aver acquisito gli strumenti necessari a formulare un problema decisionale mediante un modello di programmazione matematica con variabile intere e continue, e deve essere in grado di individuare e/o sviluppare autonomamente il miglior metodo di soluzioni esatto o approssimato, in relazione alle caratteristiche e alla complessità del problema.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Il percorso formativo è orientato a trasmettere gli strumenti metodologici e operativi necessari ad applicare concretamente le conoscenze di ottimizzazione continua, intera e combinatoria, a problemi di ottimizzazione emergenti in un contesto industriale automatizzato. In particolare, lo studente deve dimostrare di saper sviluppare tutte le fasi di un processo decisionale: analisi del sistema (definizione delle sue componenti, dei parametri che lo caratterizzano, assunzioni e specifiche di funzionamento); definizione del problema decisionale; selezione/costruzione di un modello matematico di simulazione del sistema; implementazione e risoluzione del modello tramite un algoritmo e/o un software di ottimizzazione; analisi ed interpretazione dei risultati al fine di valutare i range di variazione della soluzione ottenuta e implementare meccanismi di feedback per il miglioramento della sua qualità.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

- Introduzione all'ottimizzazione: Processi decisionali, Problem Solving, Programmazione matematica.
- Problemi di ottimizzazione continua. Ottimizzazione non lineare mono e multidimensionale (non vincolata e vincolata).
- Ottimizzazione lineare continua. Formulazione di problemi di programmazione lineare (P.L.); algoritmo del Simplex; struttura algebrica della PL; teoria della dualità; analisi post-ottimale; cenni di ottimizzazione multi-criteria, metodi multi-attributo e multi-obiettivo (con e senza priorità).
- Ottimizzazione lineare intera. Formulazione di problemi di programmazione lineare intera (P.L.I.) e binaria; metodi di ottimizzazione intera (branch-and-bound, piani di taglio, metodi a generazione di righe e di

colonne); problemi noti di P.L.I. (cutting stock, zaino, assegnamento); modellazione di problemi industriali (e.g. allocazione ottima, schedulazione delle operazioni, pianificazione della produzione).

- Teoria dei grafi e Ottimizzazione su rete. Elementi di teoria dei grafi; struttura dati di un grafo e algoritmi di visita; modellazione di problemi di ottimizzazione su rete e algoritmi risolutivi; problemi di percorso, flusso e progetto; modellazione di problemi industriali su rete (e.g. smart grid, controllo e equilibrio dei flussi).

- Tecniche reticolari di programmazione e controllo. PERT e CPM.

Il corso ha anche una connotazione laboratoriale e prevede anche l'utilizzo da parte degli studenti di strumenti software, tra cui OPL-Cplex e Xpress-IVE.

### MATERIALE DIDATTICO

- M. Caramia, S. Giordani, F. Guerriero, R. Musmanno, D. Pacciarelli, "Ricerca Operativa", Isedi, Italia, 2014.
- C. Guéret, C. Prins, M. Sevaux, Applications of optimization with Xpress-MP, Dash Optimization Ltd., 2010.
- F. S. Hillier, G. J. Lieberman, Ricerca operativa - Fondamenti, 9/ed., McGraw-Hill, 2010.
- A. Sforza, Modelli e Metodi della Ricerca Operativa, 3a ed., ESI, Napoli, 2018.
- Materiale didattico integrativo fornito durante il corso.

### MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà: lezioni frontali (60%), seminari (10%), esercitazioni di tipo numerico e di introduzione all'uso di software di ottimizzazione (30%).

### VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

#### Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	X
solo scritta	
solo orale	
discussione di elaborato progettuale	
Altro	

In caso di prova scritta i quesiti sono	A risposta multipla	
	A risposta libera	X
	Esercizi numerici	X

La prova scritta è volta a verificare l'acquisizione da parte dello studente della capacità di utilizzare in modo autonomo i concetti e le tecniche illustrate durante il corso attraverso la risoluzione di diversi problemi di ottimizzazione vincolata lineare e non lineare, continua ed intera. Tipicamente lo studente ha a disposizione 3 ore per la prova scritta. Il colloquio orale segue la prova scritta ed ha un duplice finalità: far argomentare allo studente le soluzioni proposte ai problemi risolti nella prova scritta; accertare l'acquisizione dei concetti e delle metodologie illustrati durante le lezioni.

#### Modalità di valutazione:

L'esito della prova scritta è vincolante ai fini dell'accesso alla prova orale. La prova scritta e quella orale contribuiscono ognuna per il 50% della valutazione finale. Il superamento della prova scritta non è sufficiente per il superamento dell'esame.

# MODELLI NUMERICI PER I CAMPI

## SSD ING-IND/31

### OBIETTIVI FORMATIVI

Il corso ha l'obiettivo di illustrare gli aspetti fondamentali della modellistica numerica d'interesse per un ingegnere elettrico e dell'Informazione, fornendo gli strumenti di base per la risoluzione con il calcolatore di problemi di campo. L'approccio seguito si propone di mediare tra il rigore richiesto da una corretta impostazione matematica e la necessità di condurre gli allievi a risolvere problemi applicativi più direttamente legati ai loro specifici interessi. Il linguaggio di programmazione MATLAB® è utilizzato nel laboratorio numerico.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Il corso intende fornire agli studenti le conoscenze e gli strumenti metodologici necessari per affrontare la risoluzione di un problema di campo al calcolatore e valutare criticamente le caratteristiche attese di una soluzione numerica di un problema di campo, quale anche quella ottenibile direttamente con codici commerciali.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve dimostrare di essere in grado di utilizzare concretamente le conoscenze acquisite, dando prova di saperle applicare nella impostazione della soluzione di un problema di campo al calcolatore e nella valutazione critica delle caratteristiche attese dalla soluzione numerica, quale anche quella ottenibile direttamente con codici commerciali.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

#### 1. RICHIAMI DI ALGEBRA LINEARE

Spazi lineari a dimensioni finite. Matrici. Matrici simmetriche, hermitiane, normali, unitarie, ortogonali. Determinante. Autovalori ed autovettori. Autovettori linearmente indipendenti. Diagonalizzazione. Localizzazione degli autovalori. Primo e secondo teorema di Gershgorin. Predominanza diagonale. Matrici definite positive. Prodotto scalare. Norme vettoriali. Quoziente di Rayleigh–Ritz. Equivalenza delle norme. Continuità della norma. Norme matriciali Decomposizione a valori singolari (SVD). Condizionamento di una matrice

#### 2. PROBLEMI DIFFERENZIALI E INTEGRALI

Generalità sui modelli descritti da equazioni alle derivate parziali. Linee caratteristiche. Classificazione delle equazioni quasi lineari. Linee caratteristiche per le equazioni iperboliche. Cenni sulle equazioni integrali. Formulazione integrale del problema esterno per il potenziale elettrostatico. Esempio applicativo: il problema delle risonanze elettrostatiche di un oggetto di permittività uniforme.

#### 3. METODO DELLE DIFFERENZE FINITE

Approssimazione della derivata prima e seconda. Soluzione dell'equazione di Poisson con il metodo delle differenze finite. Consistenza, stabilità e convergenza.

#### 4. METODO DEGLI ELEMENTI FINITI

Formulazioni del problema di campo: forma forte e forma debole; Formulazioni variazionali. Introduzione al metodo degli elementi finiti. Equazione di Poisson. Interpolazione polinomiale. Polinomi di Lagrange. Splines lineari a tratti. Errore di interpolazione. Formulazioni variazionali e formulazioni deboli. Il metodo di Galerkin. Convergenza del metodo degli elementi finiti. Funzioni di forma lineari e coordinate baricentriche. Elementi isoparametrici di ordine superiore a 1.

5. INTEGRAZIONE NUMERICA  
Integrazione numerica. Formula dei rettangoli; formula dei trapezi, formula di Simpson. Errore di discretizzazione. Formule di Gauss Legendre.
6. SISTEMI DI EQUAZIONI ALGEBRICHE LINEARI  
Risoluzione di sistemi di equazioni algebriche. Metodi diretti. Il metodo di eliminazione di Gauss con Pivot parziale. Fattorizzazione LU. Fattorizzazione mediante successione di matrici. Fattorizzazione  $LL^H$ . Il Metodo di Cholesky. Matrici sparse e matrici bandate. Cenni al problema della riduzione della banda. Cenni al problema del condizionamento e della stabilità numerica. Soluzione di sistemi di equazioni algebriche ai minimi quadrati. Equazioni normali. Soluzioni numerica delle equazioni normali. Soluzione mediante il metodo QR. Soluzione mediante decomposizione in valori singolari. Matrice pseudoinversa. Cenni alla soluzione di problemi di ottimizzazione vincolata con il metodo dei moltiplicatori di Lagrange. Cenni alla regolarizzazione di Tihonov. Risoluzione di sistemi lineari con metodi iterativi. Convergenza del metodo iterativo. Velocità di convergenza. Condizioni di arresto dell'iterazione. Metodi di Jacobi e di Gauss-Seidel. Il metodo di rilassamento. Convergenza e stima dell'errore. Il metodo del gradiente e del gradiente coniugato
7. SISTEMI DI EQUAZIONI ALGEBRICHE NON LINEARI  
Sistemi di equazioni algebriche non lineari. Metodo della bisezione. Iterazione del punto fisso. Metodo di Newton Raphson. Convergenza, Stima dell'errore, velocità di convergenza.
8. SISTEMI DI EQUAZIONI DIFFERENZIALI DEL PRIMO ORDINE A DERIVATE ORDINARIE  
Metodi numerici. Metodi di sviluppo in serie. Il metodo di Eulero. Errore di discretizzazione locale. Consistenza del metodo. Studio della convergenza. Errore globale e stabilità numerica. Il metodo di Eulero implicito. Il metodo theta. Influenza degli errori di arrotondamento. Cenni sui metodi di Runge-Kutta.
9. CENNI SUL "MACHINE LEARNING"  
Introduzione al "machine learning". Elementi di unsupervised learning: analisi alle componenti principali. Reti Neurali: definizioni, topologia. Percettrone ad uno o più layers. Proprietà di interpolazione universale. Algoritmo Stochastic Gradient Descent (SGD). Introduzione al toolbox di Matlab per la progettazione di algoritmi di machine learning basati su reti neurali. Risoluzione numerica di problemi di interpolazione con reti neurali. Algoritmo di Back Propagation (BP) per il calcolo del gradiente della "loss function" di una rete neurale. Automatic Differentiation (AD): modalità forward e modalità backward. Grafo computazionale. Connessioni tra AD e BP
10. SULLA SOLUZIONE NUMERICA DELLE EQUAZIONI DI MAXWELL  
Equazioni di Maxwell nel limite quasi stazionario. L'equazione della diffusione del campo magnetico. Soluzione con il metodo delle differenze finite. Il metodo di Eulero esplicito, implicito e theta. Stabilità. Equazioni delle onde. Formula di D'Alembert. Integrazione esplicita. Analisi di stabilità. Condizione di Courant-Friedrichs-Lewy. Il problema della dispersione numerica. Formulazioni agli elementi finiti per le equazioni di Maxwell. Cenni sugli edge elements.

## MATERIALE DIDATTICO

### Testi di riferimento

- [1] F. Trevisan, F. Villone, Modelli numerici per campi e circuiti, SGE Padova
- [2] G. Miano, Modelli Numerici per i Campi, Napoli, settembre 2009, dispense disponibili in formato pdf sul sito [www.elettrotecnica.unina.it](http://www.elettrotecnica.unina.it) alla pagina del corso del prof. G. Miano
- [3] Ulteriore materiale didattico (incluso il software utilizzato nelle ore di laboratorio) è disponibile sul sito [www.elettrotecnica.unina.it](http://www.elettrotecnica.unina.it) e su TEAMS all'indirizzo del corso. Eventuali ulteriori riferimenti potranno essere dati durante lo svolgimento del corso.

### Testi di consultazione

- [1] V. Comincioli. Analisi numerica: Metodi Modelli Applicazioni. Nuova edizione, in formato e-book, 981 pp. Apogeo, Feltrinelli Milano, 2005
- [2] A. Quarteroni, R. Sacco, F. Saleri, Numerical Mathematics (Texts in Applied Mathematics Book 37) Springer 2017.
- [3] A. Quarteroni, Numerical Models for Differential Problems (MS&A Book 16) 3rd Edition, Springer 2017

## MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Lezioni frontali (85% circa), esercitazioni e laboratorio informatico con uso di software scritto in MATLAB® (15% circa)

## VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	X
discussione di elaborato progettuale (opzionale)	X
Altro	



# MODELLISTICA E DINAMICA DEI CAMPI

## SSD ING-INF/02

### OBIETTIVI FORMATIVI

Con principale riferimento all'elettromagnetismo e alla dinamica del continuo che descrive possibili mezzi materiali, l'insegnamento ha lo scopo di fornire i fondamenti fisico-matematici necessari alla comprensione delle proprietà dei campi quali modelli per la descrizione macroscopica dei fenomeni elettromagnetici, dei mezzi materiali e della loro interazione.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Lo studente dovrà mostrare di aver acquisito gli strumenti metodologici fondamentali della teoria dei campi. Dovrà inoltre dimostrare conoscenza delle principali tecniche numeriche per la soluzione di semplici equazioni differenziali del primo e del secondo ordine, discutendone accuratezza e stabilità.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente dovrà mostrare di saper applicare le conoscenze acquisite all'impostazione di semplici problemi e alla loro risoluzione numerica, facendo riferimento a schemi algoritmici relativi alle geometrie più semplici e agli approcci utili all'accelerazione del calcolo.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

*Richiami di algebra e analisi tensoriale. Descrizione microscopica e macroscopica di un sistema fisico. Il concetto di campo nella descrizione dei sistemi continui e il concetto di forza [1 CFU].*

*Il Campo Elettromagnetico. Conservazione della carica elettrica. Densità di carica e di corrente. Le Equazioni di Maxwell. La Forza di Lorentz. Le Equazioni di Maxwell nei mezzi materiali: equazioni costitutive e loro proprietà. Le Equazioni di Maxwell nel dominio della frequenza e dei fasori. Il Campo Elettromagnetico ed il concetto di energia: i teoremi di Poynting. Impostazione di un problema elettromagnetico. Applicazioni [2 CFU].*

*Introduzione alla Meccanica del Continuo. Le leggi di bilancio. Le equazioni costitutive dei materiali. Impostazione di un problema di meccanica del continuo. Applicazioni [2 CFU].*

*Un modello di sistema fisico la cui descrizione richiede l'utilizzo congiunto delle leggi fisico-matematiche dell'elettromagnetismo e della dinamica del continuo [1 CFU].*

*Soluzione numerica di un problema di dinamica dei campi: gli approcci FEM, FDTD e MoM. Accelerazione algoritmica del calcolo numerico. Accelerazione del calcolo numerico basata sull'impiego di piattaforme per High Performance Computing. Il GPU Computing [3 CFU].*

### MATERIALE DIDATTICO

SI VEDA SITO WEB DEL DOCENTE DELLA MATERIA

### MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Lezioni frontali ed esercitazioni in aula e in laboratorio.

### VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	X
discussione di elaborato progettuale	
altro	

# NONLINEAR DYNAMICS AND CONTROL

## SSD ING-INF/04

### EVENTUALI PREREQUISITI

**Conoscenze di base sui sistemi dinamici lineari e sui sistemi di controllo a ciclo chiuso; elementi di calcolo differenziale e algebra lineare**

### OBIETTIVI FORMATIVI

Il corso si propone di introdurre gli studenti ai fondamenti dell'analisi e del controllo dei sistemi non lineari e di illustrarne le applicazioni più rappresentative. Si introdurranno inoltre i problemi del consenso e del controllo di coordinamento di reti e di sistemi complessi.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Il percorso formativo intende fornire agli studenti gli strumenti metodologici per l'analisi della dinamica di sistemi non lineari e la sintesi di strategie di controllo non lineare. Verranno introdotti i concetti fondamentali per sviluppare tali strategie e analizzarne performance, robustezza e stabilità. Lo studente dovrà dimostrare di avere appreso come analizzare un sistema descritto da un campo vettoriale non lineare, di essere in grado di sviluppare il progetto di un controllore per questa classe di sistemi e di validarne l'efficacia al calcolatore o attraverso prototipi sperimentali.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve dimostrare di sapere applicare metodi avanzati per l'analisi dei sistemi non lineari e la sintesi di strategie di controllo per lo studio di un sistema di interesse procedendo attraverso tutte le fasi richieste dall'analisi a ciclo aperto alla validazione numerica del sistema di controllo non lineare. Lo studente dovrà mostrare la capacità di sviluppare strategie di controllo non lineare per un sistema applicativo di interesse progettandone le caratteristiche, analizzandone la performance, la stabilità e la robustezza e procedendo alla implementazione numerica del sistema progettato al calcolatore.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

- Introduzione ai sistemi dinamici non lineari
- Applicazioni rappresentative e casi studio
- Analisi nel piano delle fasi: equilibri e cicli limite
  - Il metodo della linearizzazione
  - esistenza di cicli limite ed altri insiemi invarianti
- Stabilità nello stato
  - metodo di Lyapunov diretto ed indiretto
- Stabilità esterna e passività
- Stabilità strutturale e teoria delle biforcazioni
- Introduzione al problema della sintesi di controllori non lineari
- Controllo Geometrico e Feedback Linearization
- Controllo Ibrido e discontinuo
- Controllo Intelligente e Adattativo
- Introduzione al controllo di sistemi su rete e sistemi multiagente

### MATERIALE DIDATTICO

Appunti delle lezioni disponibili sul sito docenti;

Li, Slotine, "Applied Nonlinear Control", Prentice Hall, 1991

Khalil, "Nonlinear Systems", Prentice Hall 2002

Strogatz, "Nonlinear Dynamics and Chaos", Perseus publishing, 1994

## MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa il 70% delle ore totali, b) esercitazioni in aula mediante l'utilizzo MATLAB/SIMULINK per circa il 30% delle ore totali.

## VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

### Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	
discussione di elaborato progettuale	X
altro	

La prova di esame si basa sulla discussione di un elaborato progettuale svolto su un sistema applicativo scelto dallo studente ed è rivolta a verificare la capacità dello studente di analizzare un sistema nonlineare e progettare strategie di controllo come quelle presentate durante il corso. La prova consiste nella consegna di un elaborato progettuale che viene poi discusso insieme ad approfondimenti sugli argomenti trattati nel corso.

# PROGETTO E SVILUPPO DI SISTEMI IN TEMPO REALE

## SSD ING-INF/05

### EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenze di base di programmazione

### OBIETTIVI FORMATIVI

Il corso fornisce le conoscenze di base sui sistemi in tempo reale, sulla schedulazione di task real-time, sulla gestione delle risorse, sulle reti di calcolatori e sui sistemi operativi adottati in ambito industriale. Fornisce inoltre le competenze necessarie alla progettazione, il dimensionamento e lo sviluppo di sistemi in tempo reale. Le esercitazioni consistono in applicazioni di programmazione concorrente con task real-time sviluppate in diversi ambienti (real-time LINUX, FreeRTOS, ChibiOS) e progettazione OO di software real-time attraverso SysML e il profilo OMG MARTE.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Lo studente deve dimostrare: di conoscere le problematiche dell'elaborazione in tempo reale, di saper illustrare i fondamenti teorici relativi agli algoritmi per lo scheduling di task periodici e aperiodici e per la gestione delle risorse condivise con vincoli temporali, e relativi test di fattibilità, di saper riconoscere le principali soluzioni per la comunicazione in rete con vincoli temporali, di comprendere i principi di programmazione concorrente applicati ai sistemi real-time.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve dimostrare di saper astrarre problemi di progettazione di sistemi in tempo reale e di ricondurli ad opportuni modelli teorici atti alla verifica della fattibilità, di saper risolvere problemi di dimensionamento di sistemi real-time attraverso le metodologie e gli algoritmi appresi, di saper progettare sistemi complessi attraverso strumenti di astrazione e modellazione di alto livello, di saper implementare sistemi software real-time utilizzando primitive per la gestione dei task periodici e aperiodici e per l'inter-process communication in tempo reale.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

**Concetti Introduttivi.** Introduzione ai sistemi in tempo reale: campi applicativi. dimensionamento, deadline, sistemi hard e soft real-time, caratteristiche desiderabili; problematiche di progetto e sviluppo.

**Prevedibilità dei sistemi di calcolo.** Fonti di non determinismo hardware e del Sistema Operativo. Introduzione allo Scheduling. Processo e programma. Schedulazione, fattibilità, schedulabilità, ottimalità, preemption.

**Scheduling di task real time.** Algoritmo di Jackson, algoritmo di Horn, algoritmo di Bratley. Scheduling con vincoli di precedenza. Timeline Scheduling, Rate Monotonic (RM). Earliest Deadline First (EDF), Deadline Monotonic. Ottimalità e test di garanzia. Response Time Analysis. Processor Demand Criterion per EDF.

**Accesso a risorse condivise.** Il problema della priority inversion. Non-preemptive protocol. Highest locker priority. Priority Inheritance e Priority Ceiling. Analisi di schedulabilità, calcolo dei tempi di bloccaggio. Stack Resource Policy.

**Server aperiodici.** Schedulazione in background. Polling Server (PS). Deferrable Server (DS), Sporadic Server (SS), Slack Stealer. Dynamic Sporadic Server (DSS), Total Bandwidth Server (TBS), Costant Bandwidth Server (CBS).

**Gestione dei sovraccarichi.** Carico, valore cumulativo, fattore competitivo. Admission control; robust scheduling, resource reservation con CBS. Algoritmo RED. Job skipping, period adaptation e service adaptation.

**Comunicazione Real-time.** I protocolli CSMA/CD e Token Ring. Modelli di traffico real-time. Fonti di non determinismo nelle reti. Controller Area Network (CAN), ProfiNET ed Ethernet Power Link. RTNet. Weighted Fair Queuing, RSVP e RTP (cenni). RTPS e Standard DDS. Esempi applicativi.

**Analisi del Worst Case Execution Time.** Metodi statici e metodi measurement-based. Bound calculation: path-based, structure-based e implicit path enumeration (IPET). Esempi di tool statici e measurement-based.

**Real Time Operating Systems (RTOS):** Primitive per la programmazione di applicazioni concorrenti in ambiente real-time. Colloquio con le periferiche, RTOS commerciali ed Open Source, introduzione a FreeRTOS, ChibiOS e Linux real-time. Sviluppo di applicazioni concorrenti real-time in tali ambienti.

**Standard e Certificazioni.** La standardizzazione, standard per RTOS: RT-POSIX, OSEK, AUTOSAR, ARINC, MICRO-ITRON. Standard di certificazione: DO-178B, IEC61508.

**Progettazione di Sistemi Real Time con SysML e OMG MARTE.** Model driven engineering. UML2 ed estensioni: profili, metamodelli e stereotipi. Progettazione con SysML. Specifica MARTE. Esempi in ambiente integrato (Papyrus).

## MATERIALE DIDATTICO

- Libro di testo:
  - G. Buttazzo “Sistemi in tempo reale”, Pitagora editrice
- trasparenze delle lezioni, dispense didattiche ed articoli scientifici di approfondimento disponibili sul sito docente.

## MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

La didattica è erogata a) per il 70% con lezioni frontali e b) per il 30% con esercitazioni guidate in aula per approfondire praticamente gli aspetti relativi all'utilizzo di sistemi operativi real-time e alla programmazione di task real-time.

Gli argomenti delle lezioni frontali e dei seminari sono esposti con l'ausilio di trasparenze dettagliate, messe a disposizione dello studente nel materiale didattico tramite il sito web ufficiale del docente.

## VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

**Modalità di esame:**

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	X
solo scritta	
solo orale	
discussione di elaborato progettuale	
altro	

In caso di prova scritta i quesiti sono	A risposta multipla	
	A risposta libera	X
	Esercizi numerici	X

La prova scritta è suddivisa in due parti: 1) risoluzione di esercizi numerici e 2) un esercizio di programmazione concorrente real-time. La parte 2) può essere sostituita dallo svolgimento di due prove di programmazione in itinere, durante lo svolgimento del corso. Il codice consegnato durante il corso sarà oggetto di discussione all'orale.

**Modalità di valutazione:**

L'esito della prova scritta è vincolante ai fini dell'accesso alla prova orale. Il voto finale è stabilito come media degli esiti delle prove scritte e dell'orale.

# PROPULSIONE DEI VEICOLI ELETTRICI

## SSD ING-IND/32

### EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenze di base su:

- macchine elettriche;
- elettronica di potenza;
- convertitori statici di energia elettrica;
- sistemi di controllo a ciclo chiuso.

### OBIETTIVI FORMATIVI

Obiettivo dell'insegnamento è quello di fornire agli studenti competenze avanzate sul dimensionamento, sul controllo e sull'esercizio di veicoli elettrici ed ibridi che consentano sia l'analisi delle prestazioni energetiche e dinamiche dei veicoli, tenendo conto delle diverse tipologie di sorgenti di bordo sia a batterie che a celle a combustibile.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Lo studente deve dimostrare di:

- aver appreso gli strumenti metodologici per l'analisi e il dimensionamento sia dei singoli sottosistemi di un veicolo elettrico ed ibrido- con particolare riferimento alle architetture dei veicoli e la loro gestione ottimizzata dei flussi di potenza in presenza di una o più sorgenti di bordo;
- conoscere i punti di forza e le criticità delle diverse architetture di veicoli elettrici ed ibridi basati su differenti tipologie di macchine elettriche, convertitori e strategie di controllo.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve dimostrare di:

- sapere utilizzare in autonomia gli strumenti metodologici acquisiti al fine individuare le soluzioni più idonee nel caso di nuove installazioni, con particolare riferimento ai sistemi automotive;
- saper implementare programmi di simulazione in ambiente Matlab/Simulink per l'analisi preventiva delle prestazioni dinamiche ed energetiche di un veicolo;
- saper applicare le conoscenze teoriche acquisite attraverso esercitazioni analitiche ed esperienze sperimentali su veicoli reali

### PROGRAMMA-SYLLABUS

Introduzione – Parte Generale

- Storia di EV
- Gap di EV rispetto a ICE
- Classificazione veicoli ibridi e elettrici

- Tipologie di EV
- Veicoli elettrici ibridi (HEV)
- Architetture HEV

Descrizione generale del movimento del veicolo

- Resistenza del veicolo
- Equazione dinamica
- Adesione pneumatico-terreno e massimo sforzo di trazione
- Sforzo di trazione del treno di potenza e velocità del veicolo
- Caratteristiche della centrale elettrica e della trasmissione del veicolo
- Prestazioni del veicolo
- Utilizzo di risparmio di carburante Risparmio di carburante
- Prestazioni della frenata

Modellazione Veicolo Ibrido (HEV)

- Concetto di trasmissione elettrica ibrida
- Architetture di trasmissioni ibride elettriche serie e Parallela
- Modellazione per l'Analisi Energetica
- Analisi energetica a livello di veicolo
- Equazioni del moto
- Approcci di modellazione avanti e indietro
- Bilancio energetico del veicolo
- Cicli di guida

Componenti del gruppo propulsore

- Motore a combustione interna
- Rapporti di trasmissione e cambio meccanico
- Sistemi di trasmissione planetari
- Macchine elettriche
- Motori IM, Motori PM-BR, Motori DC
- Convertitori di potenza o Inverter Dc/Ac e Chopper Dc/Dc
- Accumulo di energia
- UC-Ultracondensatori e batterie
- Celle a combustibile

Veicoli elettrici

- Configurazioni di Veicoli Elettrici
- Performance dei Veicoli Elettrici
- Sforzo di trazione nella guida normale
- Consumo di energia
- Architettura del gruppo propulsore
- Batterie: Panoramica Tecnologie, Caratterizzazione della batteria, Modelli matematici, Sistemi di gestione della batteria

Strategia di controllo della potenza del veicolo (VPCS) ed Energy Management System (EMS) di HEV

- Concetti di base di VPCS ed EMS
- Metodologia da implementare
- Vantaggi della gestione dell'energia

- Classificazione delle strategie di gestione dell'energia
- Il problema del controllo ottimale in HEV: Formulazione generale del problema
- Principio minimo di Pontryagin per l'EMP negli HEV
- Consumo equivalente (ECMS)
- Strategia di minimizzazione
- Equivalenza tra Pontryagin Principio minimo e ECMS
- Correzione del consumo di carburante e variazione SOC
- Controllo ottimale adattativo
- Metodi di controllo: Adattamento basato sul feedback di SOC, Analisi e Confronto dei Metodi A-PMP, Calibrazione di strategie adattive

#### Casi di studio

- Architettura parallela
- Modello Powertrain
- Implementazione del modello in Advisor tool : Matlab-Simulink
- Risultati

### MATERIALE DIDATTICO

- Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel cell Vehicles: Fundamental, Theory and Design  
M Ehsani, Y Gao, A Emadi
- Hybrid Electric Vehicles - Energy Management Strategies  
Simona Onori • Lorenzo Serrao • Giorgio Rizzoni
- Hybrid Electric Vehicles  
Chris Mi, Abil Masrur and David Wenzhong Gao  
Wiley

### MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà:

- lezioni frontali per circa l'80% delle ore totali
- esercitazioni in aula e in laboratorio per circa il 20% delle ore totali

### VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	X
discussione di elaborato progettuale	X
altro	

In caso di prova scritta i quesiti sono	A risposta multipla	
	A risposta libera	
	Esercizi numerici	

L'esame si articola in due momenti distinti, seppur contigui dal punto di vista temporale:



- 3) verifica di un elaborato progettuale consistente in un programma di simulazione realizzato e implementato da ciascuno studente per la modellizzazione di architetture di veicoli ibridi (peso 1/4);
- 4) tre domande teoriche relative ai contenuti fondamentali in cui si articola il corso (peso 3/4).

**a) Modalità di valutazione:**

La verifica del programma di simulazione di cui al precedente punto 1) ha come obiettivo l'accertamento della capacità dello studente di modellare e controllare correttamente il sistema di propulsione di un veicolo ibrido ed elettrico al fine di prevederne le prestazioni, sia energetiche che dinamiche. Le domande di cui al punto 2) hanno l'obiettivo di evidenziare il livello di approfondimento e consapevolezza raggiunto dallo studente nello studio della materia.

# PROTOTIPAZIONE VIRTUALE

## SSD ING-IND/15

### EVENTUALI PREREQUISITI

Concetti fondamentali della Meccanica Classica; conoscenze di base delle problematiche, legate al funzionamento delle macchine.

### OBIETTIVI FORMATIVI

L'obiettivo del corso è quello di educare lo studente alle problematiche di progettazione di macchine e sistemi meccanici mediante l'impiego di prototipi virtuali. Al termine del corso lo studente sarà in grado di: Impostare e sviluppare i modelli 3D di assiemi meccanici. Leggere ed interpretare correttamente un disegno meccanico. Operare la scelta dei mezzi di comunicazione tecnica per la progettazione dei prodotti industriali. Rappresentare per esigenze costruttive particolari meccanici e per esigenze funzionali e di montaggio complessivi semplici. Realizzare in maniera interattiva disegni costruttivi e schemi di assemblaggio a partire dai modelli CAD tridimensionali. Assegnare e valutare caratteristiche e proprietà di sistemi meccanici in ambiente virtuale: forme, proporzioni, materiali, tolleranze. Riconoscere gli elementi normalizzati. Gestire protocolli di riferimento per lo scambio-dati. Simulare ed analizzare in ambiente virtuale il comportamento cinematico di sistemi meccanici. Eseguire analisi strutturali agli elementi finiti (FEM) in ambiente virtuale su parti ed assiemi meccanici. Conoscere i sistemi di gestione dei dati del prodotto (PDM) e del ciclo di vita del prodotto (PLM). Impiegare le tecnologie di prototipazione virtuale e di Human modeling per l'analisi e la validazione di prodotti industriali.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Il percorso formativo intende fornire agli studenti gli strumenti metodologici per la progettazione e lo sviluppo di prodotti industriali mediante l'impiego di prototipi virtuali. Lo studente deve dimostrare di avere appreso quali sono i requisiti peculiari dei sistemi hardware e software dedicati alle varie fasi del processo di sviluppo prodotto ed alla gestione del suo ciclo di vita. Lo studente dovrà inoltre dimostrare la conoscenza delle fasi principali di progettazione di un sistema meccanico, dalla identificazione dei requisiti, alla costruzione del prototipo virtuale ed alla sua validazione mediante strumenti di simulazione.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve dimostrare di saper costruire prototipi virtuali mediante software specifici per la gestione del ciclo di vita del prodotto, la modellazione geometrica, la simulazione cinematica del modello digitale (DMU), l'analisi strutturale e la validazione ergonomica. Lo studente dovrà mostrare la capacità di sviluppare un progetto concettuale di un sistema meccanico in ambiente virtuale, identificando elementi normalizzati e parti da progettare, gestendo i protocolli di riferimento per lo scambio dati e valutando i sistemi di simulazione idonei allo sviluppo ed alla validazione del progetto.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

- Introduzione al corso: Obiettivi, contenuti, modalità d'esame.
- Il Digital Mock-Up (DMU), Ingegneria sequenziale e concorrente, il ciclo di sviluppo prodotto basato sul DMU. Metodologie di progettazione e pianificazione delle attività di progetto.
- Richiami di disegno tecnico industriale: metodo delle proiezioni ortogonali, sezioni, quotatura.
- Metodi di modellazione assistita da calcolatore.
- Modellazione basata sulla geometria: Drafting 2D, Modellazione 3D Wireframe, Primitive di modellazione, B-Rep, CSG, per superfici, ibrida.
- Introduzione alla piattaforma CAD: Impostazioni di base, Descrizione Albero del modello.
- Modellazione basata sulla conoscenza: approccio parametrico e variazionale, Modellazione solida

basata su caratteristiche (Feature Based).

- Paradigma parametrico-associativo. Struttura di prodotto: parti, componenti, assiemi.
- Modellazione di parti: concetti di Feature, Body, Gruppi Geometrici. Strumenti per la gestione delle Feature Basate su schizzi. Gestione dei Vincoli. Strumenti di analisi dello schizzo.
- Strumenti per la creazione e la gestione delle feature avanzate: Feature di dettagliatura, Feature di trasformazione, Feature booleane, Modellazione Multi-Body. Principi di corretta modellazione.
- Metodi di rappresentazione di Curve e Superfici a forma libera: Rappresentazione analitica e parametrica, Curve e superfici di HERMITE, BEZIER, B-SPLINE, NURBS. Strumenti CAD per la creazione, l'analisi e la manipolazione di superfici.
- Modellazione di Assiemi. Approcci Bottom-Up e Top-Down. Gestione del salvataggio. Analisi dell'assieme. Feature d'assieme. Configurazione di prodotto e tabelle di progetto. Problematiche di scambio dati.
- Generazione di disegni e documentazione di prodotto a partire da modelli CAD. La distinta base.
- Richiami sulle tolleranze dimensionali. Catene di tolleranze. Analisi e sintesi delle tolleranze. Cenni di GD&T.
- Richiami sui collegamenti albero-mozzo. Dimensionamento di chiavette e linguette.
- Cuscinetti.
- La trasmissione del moto: dimensionamento e modellazione di ruote dentate.
- Simulazione di cinematici.
- Sistemi per la gestione dei dati di prodotto (PDM) e per la gestione del ciclo di vita del prodotto (PLM): Definizioni e scopi; Funzionalità; Architettura.
- Applicazione di metodologie di progettazione: modellazione, dimensionamento preliminare e verifiche nominali di organi meccanici. Indicazioni generali per individuare i criteri di scelta di diversi componenti e dispositivi meccanici.
- Verifica strutturale nominale assistita da calcolatore; preprocessing: realizzazione della mesh, condizioni vincolari, applicazione dei carichi; post-processing: valutazione dello stato tensionale e delle deformazioni.
- Legame CAD-CAM.
- Digital Human modeling: misure antropometriche convenzionali e task oriented; modelli cinematici; assegnazione di compiti umani e metodi di valutazione delle performance; analisi delle forze e dei momenti; indici di valutazione posturale.
- La Realtà Virtuale nella progettazione industriale: la visione stereoscopica, sistemi di visualizzazione, sistemi di tracking, sistemi di navigazione, sistemi di manipolazione, sistemi haptic. Elaborazione dei modelli geometrici per la prototipazione virtuale: tassellazione, Rendering e Texture mapping. Applicazioni in ambito ferroviario, automobilistico, aeronautico ed energetico. Augmented e Mixed Reality.

## **MATERIALE DIDATTICO**

E. Chirone, S. Tornincasa, Disegno Tecnico Industriale (2 volumi), Editore: Il Capitello;

Caputo Francesco, Di Gironimo Giuseppe, La Realtà Virtuale nella Progettazione Industriale, Aracne, 2007.

Gary R. Bertoline, Eric N. Wiebe, Fondamenti di comunicazione grafica, McGraw Hill, 2003

Mortenson M.E., Geometric Modeling, Ed. John Wiley & Sons, 1997

Tavole di esercitazione (sito docente); Slides e dispense integrative fornite dal docente (sito docente).

## **MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO**

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa il 60% delle ore totali, b) esercitazioni in aula mediante l'utilizzo di tool di progettazione (modellazione geometrica CAD 3D e 2D, simulazioni cinematiche, analisi strutturali FEM, analisi ergonomiche) per circa il 40% delle ore totali.

## VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

### Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	X
solo scritta	
solo orale	
discussione di elaborato progettuale	X
altro	

In caso di prova scritta i quesiti sono	A risposta multipla	
	A risposta libera	X
	Esercizi numerici	

La prova scritta è rivolta a verificare la capacità dello studente di sviluppare prototipi virtuali di semplici assiemi meccanici, simularne il comportamento cinematico, analizzarne le caratteristiche strutturali e generare la documentazione di prodotto e la relativa distinta base. Tipicamente lo studente ha a disposizione 3 ore per la prova scritta.

Il colloquio orale segue la prova scritta ed è rivolto ad una discussione critica della/e soluzione/i data/e dallo studente ai problemi proposti nella prova scritta, alla presentazione di un elaborato progettuale ed all'accertamento dell'acquisizione dei concetti e dei contenuti introdotti durante le lezioni.

### Modalità di valutazione:

L'esito della prova scritta è vincolante ai fini dell'accesso alla prova orale. Le prova scritta e quella orale contribuiscono ognuna per il 50% della valutazione finale; pertanto, il superamento della prova scritta non è sufficiente per il superamento dell'esame.

# ROBOTICA MEDICA

## SSD ING-IND/34

### EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenze di base sulle tecniche di programmazione; conoscenze di base sui sistemi di controllo a ciclo chiuso.

### OBIETTIVI FORMATIVI

Il corso di Robotica Medica si pone l'obiettivo di fornire le nozioni e le basi di progettazione, realizzazione e controllo di sistemi robotici per applicazioni mediche (e.g., in chirurgia e riabilitazione). Oltre all'utilizzo di metodi per la modellazione e il controllo di sistemi robotici costituiti da catene cinematiche rigide, come alcuni robot manipolatori attualmente utilizzati in chirurgia e riabilitazione, saranno forniti metodi teorici per la modellazione e il controllo di sistemi che prevedono parti soffici integrate nella struttura o strutture completamente soffici, robot capaci di riconfigurarsi e adattarsi all'ambiente, nonché robot indossabili come protesi ed esoscheletri. Attraverso applicazioni pratiche delle conoscenze acquisite mediante l'utilizzo di simulatori per casi studio, saranno fornite conoscenze di base dei software più comuni usati per la programmazione di robot.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Lo studente deve dimostrare di conoscere i sistemi robotici attualmente utilizzati in chirurgia e riabilitazione, in particolare la struttura meccanica e le sue caratteristiche, i tipici sistemi di controllo e i software utilizzati per la programmazione. Lo studente deve dimostrare di conoscere le problematiche relative all'interazione paziente/robot-medico/robot e i conseguenti requisiti necessari al corretto ed efficace funzionamento dei sistemi robotici. Lo studente deve dimostrare di aver acquisito le tecniche di modellazione e controllo di sistemi robotici caratterizzati da strutture soft che interagiscono in stretto contatto fisico con l'essere umano, includendo i sistemi miniminvasivi per la chirurgia e i sistemi indossabili per la riabilitazione.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve dimostrare di saper progettare un sistema di controllo, scelto tra i sistemi classici studiati, per adattarlo ad una particolare applicazione medica utilizzando uno dei sistemi robotici più diffusi in chirurgia e/o in riabilitazione (come il da Vinci, il KUKA etc). Lo studente deve essere in grado di saper implementare tale sistema di controllo utilizzando strumenti di simulazione forniti durante il corso. A tal fine, lo studente deve dimostrare di saper utilizzare strumenti software tipicamente utilizzati in robotica (tra cui ROS, Gazebo, Matlab/Simulink, C++, Python, CoppeliaSim). Inoltre, lo studente deve dimostrare di avere conoscenza di base di tipici strumenti open-source di prototipazione rapida, elettronica e stampa 3D.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

1. Introduzione alla robotica medica. 2. Classificazione di robot chirurgici e applicazioni. 3. Controllo dell'interazione (controllo di impedenza e forza; controllo di impedenza variabile, gestione della priorità di più task in manipolatori ridondanti). 4. Teleoperazione unilaterale e bilaterale: passività e stabilità. 5. Interfacce aptiche. 6. Controllo condiviso e semi-autonomo. 7. Sistema robotico da Vinci e da Vinci Research Kit (cinematica, dinamica, architettura di controllo, software per il controllo). 8. Esercitazioni sul sistema da Vinci Research Kit. 9. Esempi di tecniche di apprendimento applicate al controllo di robot per applicazioni chirurgiche. 10. Introduzione all'impiego di robot continui e snake-like alla chirurgia robotica. 11. Modellazione di meccanismi continui. 12. Controllo della interazione e della locomozione di robot continui iper-ridondanti. 13. Introduzione alla robotica soft. 14. Modellazione di robot soft. 15. Controllo di robot soft. 16. Introduzione alla robotica riabilitativa e alla robotica per assistenza. 17. Esercitazioni sul robot KUKA MED. 18. Materiali e metodi per la misura di segnali fisiologici (EMG, EEG, ECoG, eye tracking). 19. Esoscheletri e robotica

indossabile: principi costruttivi e strategie di controllo. 20. Attuatori ad impedenza variabile. 21. Protesi robotiche: mani e gambe robotiche. 22. Principi di controllo della locomozione. 23. Progetto meccanico di mani robotiche, modellazione, sensoristica e attuazione. 24. Esercitazioni sulla PRISMA Hand II. 25. Controllo della presa e della manipolazione. 26. Esempi di tecniche di apprendimento applicate alla manipolazione e alla locomozione.

### MATERIALE DIDATTICO

B. Siciliano, O. Khatib (Eds.), Springer Handbook of Robotics, 2nd Edition, Springer, Berlin, 2016, ISBN 978-3-319-32552-1.

K.M. Lynch, F.C. Park, Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control, Cambridge University Press, 2017, ISBN 9781107156302.

J. Rosen, B. Hannaford, R.M. Satava (Eds.), Surgical Robotics: Systems, Applications, and Visions, Springer, 2011 ISBN 9781441911261.

A. Schweikard, F. Ernst, Medical Robotics, Springer, 2015, ISBN 9783319228914.

Appunti dalle lezioni, disponibili agli studenti iscritti al corso tramite Segrepass.

### MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà: a) lezioni frontali per circa il 70% delle ore totali, b) esercitazioni in aula mediante l'utilizzo di strumenti di simulazione di robot noti per la chirurgia e la riabilitazione, basati su ROS, Gazebo e CoppeliaSim, c) 3/4 seminari di 2 ore tenuti da medici, ricercatori robotici e rappresentanti dell'industria di robot medicali.

### VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

#### Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	x
discussione di elaborato progettuale	x
altro	

In caso di prova scritta i quesiti sono	A risposta multipla	
	A risposta libera	x
	Esercizi numerici	

L'elaborato in simulazione deve essere consegnato al docente una settimana prima della prova orale e poi discusso all'orale mediante una presentazione dei risultati ottenuti. L'elaborato ha l'obiettivo di verificare la capacità dello studente di progettare semplici algoritmi di controllo per applicazioni di robotica medica (a scelta chirurgica o riabilitativa), utilizzando uno dei simulatori (a scelta dello studente), basati su ROS, Gazebo e CoppeliaSim, i quali sono stati introdotti e utilizzati durante le esercitazioni del corso. Il colloquio orale segue la discussione dell'elaborato ed è rivolto ad una discussione critica della/e soluzione/i data/e dallo studente ai problemi proposti nell'elaborato in simulazione, ed all'accertamento dell'acquisizione dei concetti e dei contenuti introdotti durante le lezioni.

#### Modalità di valutazione:

L'elaborato è obbligatorio per accedere all'orale, esso contribuisce al 25% della valutazione finale.

### EVENTUALI PREREQUISITI.

Utilizzo base del sistema operativo Linux; Conoscenza base di programmazione a oggetti.

### OBIETTIVI FORMATIVI

L'obiettivo del corso è di fornire allo studente gli strumenti base per la programmazione di sistemi robotici avanzati, con particolare attenzione ai robot mobili terrestri e aerei e ai bracci robotici industriali. Durante il corso, lo studente apprenderà le tecniche base di programmazione del paradigma "percezione-azione" per il controllo di uno o di un gruppo di robot, applicando gli algoritmi sviluppati a piattaforma simulate in ambienti di simulazione dinamici.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

Il percorso formativo ha lo scopo di fornire agli studenti gli strumenti metodologici per l'implementazione di algoritmi per il controllo di robot mobili e industriali basati su linguaggio di programmazione in C++, eseguiti su sistemi operativi Linux. Verrà inizialmente introdotto il principio alla base della programmazione di sistemi robotici e diverse librerie software dedicate a questo scopo. Successivamente verranno approfonditi i framework di programmazione ROS e ROS2 (Robot Operating System) studiandone il funzionamento, la filosofia e l'integrazione con sistemi robotici simulati. Lo studente deve dimostrare di aver appreso quali sono i principi di progettazione di un algoritmo per il controllo di un robot e i requisiti fondamentali relativi alla piattaforma robotica da controllare e a seguito del compito da eseguire. Lo studente dovrà inoltre dimostrare di aver acquisito la conoscenza sull'utilizzo delle principali librerie software dedicate alla risoluzione di problemi relativi alla programmazione di robot. Infine, lo studente dovrà acquisire una conoscenza base sull'utilizzo dei principali sensori utilizzati sui robot avanzati, sul loro interfacciamento con la piattaforma robotica e le principali tecniche di elaborazione dei dati sensoriali per controllare le azioni dei robot.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve dimostrare di essere in grado di implementare un sistema di controllo in linguaggio di programmazione C++ che gestisca le azioni di un sistema robotico nell'esecuzione di un tipico compito della robotica di servizio. Il sistema di controllo deve essere sviluppato a partire da una serie di specifiche di funzionamento. Lo studente dovrà essere in grado di predisporre l'ambiente e il sistema robotico nell'ambiente di simulazione.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

- Introduzione al sistema operativo Linux
  - Introduzione alla configurazione e ai comandi base del sistema operativo Linux
- Introduzione alla programmazione a oggetti
  - Paradigma di programmazione a oggetti
  - Strutture dati dinamiche
  - Compilazione e integrazione di librerie software esterne
  - Sviluppo di algoritmi multi-threading
    - Implementazione di un ciclo di controllo sense-plan-act
- Utilizzo di software per il controllo di versioni
  - Gestione del codice mediante Git
- Robot Operating System (ROS)
  - Filosofia di programmazione in ROS e concetti base
  - Installazione e configurazione di ROS
  - Message-passing in ROS

- Protocolli di publish/subscribe e client/server
- Utilizzo di sensori per applicazioni robotiche
  - Camere digitali
  - LIDAR
  - Sensori di profondità
- Simulatori di sistemi robotici dinamici
  - Gazebo
  - CoppeliaSim e MuJoCo
- Controllori per l'attuazione di robot
  - Controllori di posizione/velocità/forza
  - Simulazione di controllori in ROS e Gazebo
- Algoritmi di controllo di robot industriali
  - Soluzioni automatiche per la cinematica diretta e inversa
  - Soluzioni automatiche per la dinamica diretta e inversa
- Navigazione di robot mobili
  - Localizzazione di robot mediante sensori LIDAR
  - Localizzazione e mapping (SLAM) 2D
  - Generazione di percorsi liberi da ostacoli in due dimensioni
  - Controllo di una base mobile con attuazione differenziale
- Robotica aerea
  - Simulazione di piattaforme aeree a decollo e atterraggio verticale
  - Localizzazione e mapping (SLAM) 3D
  - Generazione di percorsi liberi da ostacolo in tre dimensioni
  - Autopilota PixHawk e sua simulazione in Gazebo
- Robot Operating System 2 (ROS2)
  - Introduzione a ROS2
  - Differenze tra ROS e ROS2
  - Porting di applicazioni ROS in ROS2
  - Applicazioni real time e comunicazione stabile tra diverse applicazioni
- Sistemi di controllo di robot distribuiti
  - Sistemi multi robot
  - Sistemi distribuiti per il controllo di una singola piattaforma
- Controllo dei robot e machine learning
  - Deep Reinforcement learning libero dal modello

## MATERIALE DIDATTICO

Materiale fornito dal docente

J. Lentin, J. Cacace, Mastering Ros for Robotics Programming - Third edition. Packt Publishing, 2021

## MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Il docente utilizzerà lezioni frontali per il totale delle ore a disposizione. Durante le lezioni saranno svolte brevi esercitazioni al computer.

## VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	X
discussione di elaborato progettuale	X
altro	



<b>In caso di prova scritta i quesiti sono</b>	<b>A risposta multipla</b>	
	<b>A risposta libera</b>	
	<b>Esercizi numerici</b>	

Le conoscenze acquisite dello studente vengono verificate in un colloquio orale che consiste nella discussione di un elaborato progettuale da lui sviluppato autonomamente. Durante il colloquio verrà discusso in modo critico l'operato dello studente in modo da accertarne l'acquisizione dei concetti discussi durante le lezioni. La conoscenza di altri concetti introdotti durante le lezioni non contestuali all'elaborato progettuale verrà verificata durante il colloquio orale.

**Modalità di valutazione:**

Il corretto svolgimento dell'elaborato tecnico è vincolante ai fini dell'accesso alla prova orale, in quanto la valutazione dell'elaborato tecnico contribuisce al 70% della valutazione finale.

# STATISTICAL LEARNING AND DATA MINING

## SSD SECS-S/01

### EVENTUALI PREREQUISITI

Conoscenza di base di matematica e algebra lineare, modelli di probabilità.

### OBIETTIVI FORMATIVI

Il corso si propone di fornire agli studenti la logica della statistica e le competenze metodologiche del paradigma dello Statistical Learning: Data Mining, Inferenza e Predizione, nei domini applicativi dell'Ingegneria e delle Scienze di Base. Nello specifico, gli studenti vengono esposti e formati sui metodi fondamentali per l'analisi esplorativa dei dati e la modellazione statistica per l'inferenza e la previsione nei problemi di classificazione e regressione.

Il ritmo di apprendimento è mantenuto da esercitazioni pratiche svolte con linguaggi di programmazione open-source, in modo che l'acquisizione di tali metodi e competenze sia rafforzata attraverso lo sviluppo di opportuni casi di studio basati su dati del mondo reale.

### RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI (DESCRITTORI DI DUBLINO)

#### Conoscenza e capacità di comprensione

The course provides students with the statistical methodology for learning from data, how to transform the real problem questions into statistical challenges, how to explore data and extract important patterns, how to build up models for decision-making and prediction, how to validate the results, how to interpret and communicate the outcomes of the statistical data analysis.

The student needs to show that he/she learned how to choose the suitable approach and method, implement the algorithm and know its requirements to address real problem questions using statistical methodology.

Il corso fornisce agli studenti la metodologia statistica per l'apprendimento dai dati, come trasformare i problemi reali in sfide statistiche, come esplorare i dati ed estrarre importanti tipologie, come costruire modelli per il processo decisionale e predittivo, come validare i risultati, come interpretare e comunicare i risultati dell'analisi statistica dei dati.

Lo studente deve dimostrare di aver imparato a scegliere l'approccio e il metodo adatti, a implementare l'algoritmo e ne conosce i requisiti per affrontare problemi reali utilizzando la metodologia statistica.

#### Capacità di applicare conoscenza e comprensione

Lo studente deve inoltre dimostrare la conoscenza delle fasi principali dell'analisi dei dati statistici in un *project work* utilizzando set di dati del mondo reale o pianificando uno studio di simulazione. Lo studente dimostra la sua abilità nel processo di apprendimento presentando lo storytelling quantitativo con i risultati e fornendo le corrette interpretazioni dei risultati.

### PROGRAMMA-SYLLABUS

- Introduzione alla Statistica, *Technè-Logia*, Analisi dei Dati (0.50 CFU\*)
  - Fondamenti di Statistica
    - Tipo di variabili e terminologia
    - Approccio esplorativo *versus* approccio confermativo
    - Statistica descrittiva *versus* Inferenza
  - *Technè-Logia*

- La logica della strategia di apprendimento statistico: da teoria a pratica
    - Approccio euristico *versus* approccio algoritmico
  - Analisi dei Dati
    - I “passaggi chiave” nell’apprendimento dai dati
    - Introduzione al *Data Mining* secondo D. Hand
    - Introduzione alla Teoria dello *Statistical Learning* secondo Vapnik
- Apprendimento Non-Supervisionato (1 CFU)
  - Metodi di Clustering o Analisi dei Gruppi
    - Metodi gerarchici
    - Metodi non gerarchici (*K-Means Clustering*, *K-Medoids Clustering*)
    - *Soft K-Means Clustering* e *Fuzzy Clustering*
    - Validazione interna e validazione esterna
  - Metodi Fattoriali
    - Analisi delle Componenti Principali
    - Analisi delle Componenti Indipendenti e *Projection Pursuit*
- Introduzione all’Apprendimento Supervisionato (0.50 CFU)
  - Teoria dell’Apprendimento Statistico di Vapnik
    - Macchina di apprendimento, funzione perdita e rischio funzionale
    - Problemi di regressione/classificazione/stima di densità
    - Principio della minimizzazione del rischio empirico e principio della minimizzazione del rischio strutturale
    - La VC (Vapnik and Chervonenkis) dimensionalità e misura dell’abilità della macchina di apprendimento
    - *Trade-off* Accuratezza-Complessità del modello
    - *Trade-off* Distorsione-Varianza
  - Overview dei Modelli Statistici, Apprendimento Supervisionato e Approssimazione di Funzioni
    - Metodi Parametrici *versus* Metodi Non Parametrici
    - Accuratezza *versus* Interpretabilità
    - Valutazione del modello *versus* Selezione del modello
- Metodi lineari (1 CFU)
  - Regressione lineare e diagnostica di regressione
  - Modelli lineari per l’analisi delle serie temporali
  - Regressione logistica
  - Analisi discriminante
- Selezione del modello lineare (0.25 CFU)
  - Algoritmi selettivi e *Stepwise Regression*
  - Metodi di riduzione della dimensionalità
    - Principal Component Regression
    - Partial Least Squares Regression
  - Metodi *Shrinkage*
    - *Ridge Regression*
    - *Lasso Regression*
    - *Elastic-Net Regression*
- Metodi di ricampionamento (0.25 CFU)
  - Valutazione del modello *via* Bootstrap
  - Selezione del modello *via* Cross-validation
- Metodi basati su strutture ad albero (0.75 CFU)
  - Alberi di classificazione e regressione
    - Procedure di partizione ricorsiva
    - Pruning e selezione dell’albero di decisione
  - Metodi *Ensemble*

- *Bagging*
- *Boosting*
- *Random Forest*
- Metodi per gestire la non linearità (1 CFU)
  - Espansioni di base e regolarizzazione
    - Regressione polinomiale e funzioni gradino
    - Regressione polinomiale a tratti
    - *Smoothing Splines*
  - Metodi di *Kernel Smoothing*
    - *Kernel Smoother* e regression locale
    - Stima di densità con il *Kernel*
  - Modelli Additivi Generalizzati
    - Algoritmo *Backfitting*
    - Algoritmo *Local Scoring*
- *Machine Learning* (0.75 CFU)
  - *Support Vector Machines*
  - *Projection Pursuit Regression*
  - Reti neurali e *Deep Learning*

\*1 CFU = 8 Hours

## MATERIALE DIDATTICO

*The elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction.* Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman, Springer (2009). (Available for free in pdf, url: <https://web.stanford.edu/~hastie/Papers/ESLII.pdf>)

*Introduction to Statistical Learning, with applications in R.* James Gareth, Daniela Witten, Trevor Hastie, Robert Tibshirani (2009). (Available for free in pdf, url: <http://www-bcf.usc.edu/~gareth/ISL/> )

Slide e materiale didattico a cura del docente.

## MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DELL'INSEGNAMENTO

Descrivere le modalità in cui verrà erogata la didattica: lezioni frontali, esercitazioni, laboratorio, tirocinio o stage seminari, altro.

Eventualmente indicare anche la strumentazione adottata (lezioni registrate, supporti multimediali, software specialistico, materiale on line ecc.).

The teaching activities will be organized as follows: a) lectures for about 70% of the total hours, b) practical exercise in the classroom for about 30% of the total hours.

## VERIFICA DI APPRENDIMENTO E CRITERI DI VALUTAZIONE

Modalità di esame:

L'esame si articola in prova	
scritta e orale	
solo scritta	
solo orale	
discussione di elaborato progettuale	X
altro	