Ultimo aggiornamento: November 1, 2026

🗺️ Percorso di quattro anni · Anno 4, Autunno

Informazioni sul corso

Questo corso gratuito ha 10 unità e 6 laboratori. Sono i totali reali, non un programma più lungo accorciato.

Un controllo è un numero o un risultato di codice in una pagina del corso che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero stampato e quello ricalcolato devono coincidere.

> Questo è lo schema di un corso gratuito di autoapprendimento scritto da Saving Planets. Non è un corso universitario, non dà crediti accademici e nessuna scuola è coinvolta.
>
> Il suo ambito segue un corso semestrale dell'ultimo anno in avionica e ingegneria dei sistemi. È modellato sugli argomenti e sulla profondità di MIT 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (gratuito su MIT OpenCourseWare) e del NASA Systems Engineering Handbook, che citiamo dove utili. Né il MIT né la NASA approvano questa pagina.
>
> Cosa aggiungiamo: ogni unità è collegata a un lavoro reale con una fonte pubblica citata (Landsat 9, Hubble, Dragonfly e il sistema di traffico aereo della FAA), ogni numero della pagina viene ricalcolato da uno script di controllo prima della pubblicazione e ogni laboratorio ha una simulazione gratuita o un foglio di calcolo.
>
> Seguilo in ordine. Ogni unità ha obiettivi, idee chiave, equazioni, esempi passo per passo, esercizi con soluzioni complete, errori comuni, flashcard e un quiz. I tuoi progressi sono salvati solo in questo browser.

Come questo corso aiuta a salvare il pianeta

I satelliti di osservazione della Terra, i veicoli meteorologici e un traffico aereo efficiente dipendono tutti da un'avionica che funziona per anni senza interventi di riparazione e da un'ingegneria dei sistemi che fa comportare migliaia di parti come un tutt'uno.

Buoni requisiti, ridondanza e collaudi permettono a un satellite di continuare a misurare foreste, ghiacci e oceani ben oltre la sua vita di progetto. Ogni unità termina con una breve sezione con fonti. I valori che non provengono da una fonte sono indicati come valori di esempio o da manuale.

Per gli insegnanti

Puoi insegnare questo corso, oppure lasciare che uno studente lo faccia da solo. È gratis. Saving Planets non dà un voto né crediti scolastici.

- Questa pagina è l'intero corso: 10 unità e 6 laboratori (AERO 450).
- Prevedi 15 settimane, circa 6–9 ore a settimana, comprese le settimane di laboratorio.
- Segui il calendario di 15 settimane. Leggi l'unità, fai la pratica su carta, poi apri la risposta. Nella settimana di laboratorio, fai il laboratorio o la versione a casa.
- Un controllo è un numero o un risultato di codice nella pagina che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero che vedi e quello ricalcolato devono coincidere.
- Usa Stampa questa pagina, oppure scarica la guida di studio PDF. Il formulario è verso la fine.
- Chiedi: in che modo questa unità aiuta le persone e il pianeta? Ogni unità ha un riquadro verde con un fatto e la sua fonte.
- Copia il modello di guida per insegnanti e scrivi il nome della classe, il tempo che hai e le domande che farai. Apri il modello di guida per insegnanti

Prima di iniziare

Prerequisiti

- Circuiti: tensione, corrente, resistenza e segnali digitali.
- Probabilità e statistica: regole di probabilità, distribuzione esponenziale e varianza.
- Dinamica del volo e controlli: retroazione, sensori e attuatori.
- Introduzione alla programmazione: cicli, funzioni e temporizzazione.

Come studiare

- Inizia ogni problema dal requisito che serve.
- Disegna schemi a blocchi e interfacce prima di calcolare qualsiasi cosa.
- Mantieni le probabilità come numeri tra 0 e 1 e verifica che ci restino.
- Tieni traccia delle unità: bit, byte, secondi, hertz, decibel.
- Chiediti «cosa succede se questa parte si guasta?» per ogni blocco che disegni.
- Fai ogni esercizio su carta prima di aprire la risposta e ripeti i quiz qualche giorno dopo.

Che cosa ti serve

- Un computer o un tablet per la simulazione gratuita PhET Circuit Construction Kit: DC.
- Un foglio di calcolo (va bene qualsiasi gratuito), oppure Python.
- Il NASA Systems Engineering Handbook gratuito in un browser web.
- Una calcolatrice.

Programma suggerito di 15 settimane

Circa 6-9 ore a settimana: lettura, esercizi e, nelle settimane di laboratorio, il laboratorio.

Settimana	Unità	Argomenti	Lettura
1	Il ciclo di vita dell'ingegneria dei sistemi e i requisiti	Ciclo di vita e requisiti	NASA SE Handbook
2	Architettura, interfacce e integrazione	Architettura e interfacce; Laboratorio A	MIT 16.842
3	Affidabilità e ridondanza	Modelli di affidabilità	NASA SE Handbook
4	Affidabilità e ridondanza	Ridondanza; Laboratorio B	NASA Hubble
5	Analisi di sicurezza: FMEA e alberi dei guasti	FMEA e alberi dei guasti; Laboratorio C	NASA SE Handbook
6	Avionica digitale e bus dati	Avionica digitale	MIT 16.842
7	Avionica digitale e bus dati	Bus dati; Laboratorio D; esercitazione per il parziale	NASA Landsat 9
8	Sensori di navigazione: IMU, GNSS, telecamere e lidar	Sensori di navigazione	NASA Dragonfly
9	Fusione sensoriale e filtro di Kalman	Fusione sensoriale e filtri di Kalman; Laboratorio E	MIT 16.842
10	Comunicazione e sorveglianza: ADS-B	Comunicazione e ADS-B	FAA ADS-B
11	Software di volo in tempo reale	Software in tempo reale	MIT 16.842
12	Software di volo in tempo reale	Protezione dai guasti; Laboratorio F	NASA Hubble
13	Integrazione, verifica e operazioni	Integrazione e verifica	NASA SE Handbook
14	Integrazione, verifica e operazioni	Banchi di prova e iniezione di guasti	NASA Dragonfly
15	Integrazione, verifica e operazioni	Ripasso; esercitazione per l'esame finale	MIT 16.842

I tuoi progressi

Spunta unità e laboratori man mano che li finisci, e fai i quiz. Progressi e punteggi sono salvati solo in questo browser e non ci vengono mai inviati.

Unità

Il ciclo di vita dell’ingegneria dei sistemi e i requisiti

Stakeholder, modello a V, fasi del ciclo di vita e revisioni, buoni requisiti, misure di prestazione tecnica e margini.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Descrivere il modello a V.
- Scrivere requisiti verificabili.
- Calcolare i margini rispetto a un requisito.
- Monitorare una misura di prestazione tecnica.

Concetti chiave

- L’ingegneria dei sistemi trasforma le esigenze degli stakeholder in un sistema che funziona, nei tempi e nel budget, per tutta la sua vita.
- Il modello a V scende sul lato sinistro (requisiti, architettura, progetto) e risale sul destro (integrazione, verifica, validazione).
- Un buon requisito è necessario, chiaro, fattibile e verificabile, con un numero, un’unità e un metodo di prova.
- Misure di prestazione tecnica come massa, potenza e velocità dati vengono monitorate rispetto alle allocazioni con margine.
- Le revisioni (concetto, progetto preliminare, progetto critico) regolano ogni fase; gli studenti di MIT 16.842 preparano un progetto al livello di una revisione di progetto preliminare.

Equazioni chiave

$$\text{Margin} = \frac{C - N}{N}$$

```
Margin=(C-N)/(N)
```

Margine sul fabbisogno

$$m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

```
m_alloc=m_est(1+M)
```

Allocazione con margine

$$S = \sum w_i s_i$$

```
S= w_is_i
```

Punteggio di compromesso pesato

$$\sum w_i = 1$$

`w_i=1`

I pesi sommano a uno

Esempi svolti passo passo

Esempio 1.1 La NASA richiede che Landsat 9 raccolga almeno 400 scene al giorno; ne raccoglie 740. Trova il margine.

1. (740 − 400)/400.

Risposta: 85% sopra il requisito.

Esempio 1.2 Una scatola avionica è stimata in 12 kg. Alloca con un margine del 25% (valori di esempio).

1. 12 × 1.25.

Risposta: 15 kg.

Esempio 1.3 L'opzione A ottiene 7 (costo) e 8 (affidabilità); B ottiene 9 e 6. Pesi 0.3 e 0.7. Quale vince?

1. A = 2.1 + 5.6 = 7.7.
2. B = 2.7 + 4.2 = 6.9.

Risposta: A, 7.7 contro 6.9.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. La vita di progetto di Landsat 9 è di 5 anni e i materiali di consumo durano 10 anni. Rapporto?

   2.

2. Alloca 400 W di potenza con un margine del 30%.

   520 W.

3. Riscrivi «la radio deve essere veloce» come requisito verificabile.

   Per esempio: «La radio deve trasmettere in downlink almeno 300 Mbit/s, verificato mediante prova.»

4. Quale lato della V contiene la verifica?

   Il lato destro.

Errori concettuali comuni

Mito: I requisiti descrivono il progetto.
In realtà: Dicono cosa serve, non come.

Mito: Il margine è uno spreco.
In realtà: Assorbe crescita e sorprese.

Mito: Verifica e validazione sono la stessa cosa.
In realtà: Verifica: costruito bene; validazione: costruita la cosa giusta.

Flashcard

Modello a V

Scomporre scendendo, integrare e verificare risalendo.

Requisito

Esigenza verificabile.

TPM

Misura di prestazione tecnica monitorata.

PDR

Revisione di progetto preliminare.

Verifica

Costruito bene.

Validazione

Costruita la cosa giusta.

Quiz di autoverifica

1. Margine di Landsat 9...

85%

74%

40%

185%

85%. (740 − 400)/400.

2. 12 kg + 25%...

15 kg

13 kg

12.25 kg

16 kg

15 kg. Moltiplica.

3. Vincitore del compromesso...

A

B

parità

nessuno dei due

A. 7.7 > 6.9.

4. Un buon requisito è...

verificabile

vago

un progetto

facoltativo

verificabile. Collaudabile.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA elenca i requisiti di Landsat 9, tra cui almeno 400 scene al giorno e una vita di progetto di 5 anni; Landsat 9 raccoglie 740 scene al giorno, quasi il doppio del minimo, e porta carburante sufficiente per operare almeno 10 anni.

Insieme a Landsat 8 osserva lo stesso luogo ogni 8 giorni, consentendo allerte quasi settimanali sulla deforestazione tropicale, il monitoraggio della qualità dell'acqua e rapporti sulle colture, frutti di requisiti scritti e rispettati con margine.

Su Saving Planets: Osservazione della Terra · Progettazione di veicoli spaziali

Fonti: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA, sezioni 3–4.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Lezioni gratuite del MIT.

Guarda la lezione

Lecture 21: Systems Engineering for Space Shuttle Payloads (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2005/resources/lecture-21/) (in inglese)

MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2005), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d'uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Architettura, interfacce e integrazione

Architettura funzionale e fisica, controllo delle interfacce, diagrammi N², ingegneria dei sistemi basata su modelli e perché le interfacce crescono rapidamente.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Associare le funzioni ai componenti.
- Contare le interfacce potenziali.
- Leggere un diagramma N².
- Spiegare l'ingegneria dei sistemi basata su modelli.

Concetti chiave

- Un'architettura funzionale dice cosa fa il sistema; un'architettura fisica dice quali scatole lo fanno.
- Ogni coppia di componenti potrebbe richiedere un'interfaccia, quindi le interfacce potenziali crescono come n(n − 1)/2.
- Un diagramma N² mette i componenti sulla diagonale e i dati o l'alimentazione tra di essi fuori diagonale.
- I documenti di controllo delle interfacce fissano connettori, segnali, temporizzazione e formati dei dati affinché i team possano costruire in parallelo.
- La NASA osserva che l'aggiornamento del suo manuale include l'ingegneria dei sistemi basata su modelli (MBSE), che mantiene requisiti, architettura e analisi in un unico modello collegato.

Equazioni chiave

$$I = \frac{n(n-1)}{2}$$

```
I=(n(n-1))/(2)
```

Interfacce bidirezionali potenziali

$$N_{cells} = n(n-1)$$

```
N_cells=n(n-1)
```

Celle N² fuori diagonale

$$B = \sum_{i} r_i$$

```
B=_i r_i
```

Carico totale del bus

$$U = B/B_{max}$$

`U=B/B_max`

Utilizzo del bus

Esempi svolti passo passo

Esempio 2.1 Una suite avionica ha 8 scatole. Quante interfacce potenziali?

1. 8 × 7/2.

Risposta: 28.

Esempio 2.2 Aggiungi 4 scatole (n = 12).

1. 12 × 11/2.

Risposta: 66, più del doppio.

Esempio 2.3 Tre scatole inviano 20, 35 e 15 kbit/s su un bus da 100 kbit/s. Utilizzo?

1. 70/100.

Risposta: 70%.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Celle N^2 fuori diagonale per n = 8?

   56.

2. Interfacce per n = 4?

   6.

3. Perché tenere l’utilizzo del bus sotto il 100%?

   Spazio per crescita, ritrasmissioni e jitter temporale.

4. Che cos’è un ICD?

   Documento di controllo delle interfacce.

Errori concettuali comuni

Mito: Le interfacce crescono linearmente.

In realtà: Crescono all’incirca come n^2.

Mito: L’architettura è solo un elenco di parti.

In realtà: Include funzioni e collegamenti.

Mito: L’MBSE sostituisce gli ingegneri.

In realtà: Collega il loro lavoro.

Flashcard

Architettura

Funzioni associate ai componenti.

Diagramma N²

Matrice delle interfacce.

ICD

Documento di controllo delle interfacce.

MBSE

Ingegneria dei sistemi basata su modelli.

Integrazione

Unione dei componenti.

Carico del bus

Somma delle velocità dati.

Quiz di autoverifica

1. Interfacce per 8 scatole...

28

56

16

64

28. n(n − 1)/2.

2. Per 12 scatole...

66

132

24

144

66. 12 × 11/2.

3. Utilizzo del bus...

70%

35%

100%

7%

70%. 70/100.

4. MBSE significa...

ingegneria dei sistemi basata su modelli

budget di massa

baseline di missione

errore medio del bus

ingegneria dei sistemi basata su modelli. NASA.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che il suo Systems Engineering Handbook è stato aggiornato per includere l'ingegneria dei sistemi basata su modelli, attingendo alle lezioni di missioni e incidenti.

Interfacce chiare permettono ai team degli strumenti e del veicolo di costruire in parallelo, ed è così che missioni di osservazione della Terra come Landsat 9 arrivano in orbita nei tempi.

Su Saving Planets: Progettazione di veicoli spaziali · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA, sezione 4.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Lezioni gratuite del MIT.

Guarda la lezione

Session 8: Systems Integration and Interface Management (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/resources/session-8-systems-integration-and-interface-management/) (in inglese)

MIT 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d'uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Affidabilità e ridondanza

Tassi di guasto, affidabilità esponenziale, MTBF, sistemi in serie e in parallelo, ridondanza modulare tripla, sistemi k su n e disponibilità.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare l'affidabilità da un tasso di guasto.
- Combinare blocchi in serie e in parallelo.
- Calcolare l'affidabilità di un voto 2 su 3.
- Calcolare la disponibilità.

Concetti chiave

- Con un tasso di guasto costante λ, l'affidabilità cala come e^(−λt) e il tempo medio tra i guasti è 1/λ.
- I sistemi in serie si guastano se si guasta una qualsiasi parte, quindi le affidabilità si moltiplicano.
- I sistemi in parallelo (ridondanti) si guastano solo se si guastano tutte le parti.
- La ridondanza modulare tripla vota 2 su 3; batte un'unità singola a inizio vita ma non dopo che R scende sotto 0.5.
- La disponibilità è la frazione di tempo in cui un sistema funziona: MTBF/(MTBF + MTTR).

Equazioni chiave

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

```
R(t)=e^- t
```

Affidabilità esponenziale

$$R_s = \prod R_i,\ R_p = 1 - \prod (1 - R_i)$$

```
R_s= R_i,\ R_p=1-(1-R_i)
```

Serie e parallelo

$$R_{2/3} = 3R^2 - 2R^3$$

```
R_2/3=3R^2-2R^3
```

Voto due su tre

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

A=(MTBF)/(MTBF+MTTR)

Disponibilità

Esempi svolti passo passo

Esempio 3.1 Un'unità ha $\lambda = 10^{-5}$ all'ora. Affidabilità su 10000 h?

1. e^(−0.1).

Risposta: 0.905.

Esempio 3.2 Due unità di questo tipo in parallelo?

1. $1 - (1 - 0.9048)^2$.

Risposta: 0.991.

Esempio 3.3 Tre unità con voto 2 su 3?

1. $3(0.9048)^2 - 2(0.9048)^3$.

Risposta: 0.975.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. MTBF per $\lambda = 10^{-5}$ /h?

   100,000 h.

2. Unità singola, doppia e TMR a 50000 h?

   0.607, 0.845, 0.657.

3. Disponibilità con MTBF di 1000 h e MTTR di 2 h?

   0.998.

4. Hubble ha bisogno di uno su tre giroscopi funzionanti. Quale modello?

   1 su 3 (parallelo).

Errori concettuali comuni

Mito: La ridondanza aiuta sempre.

In realtà: La TMR perde contro un'unità singola quando R < 0.5.

Mito: L'MTBF è una vita garantita.

In realtà: È una media; molti si guastano prima.

Mito: L'affidabilità in serie si somma.

In realtà: Si moltiplica.

Flashcard

Tasso di guasto

Guasti all'ora.

MTBF

Tempo medio tra i guasti.

Ridondanza

Unità di riserva.

TMR

Ridondanza modulare tripla, voto 2 su 3.

Disponibilità

Frazione di tempo in funzione.

k su n

Funziona se funzionano k su n.

Quiz di autoverifica

1. R(10,000 h)...

0.905

0.990

0.1

0.5

0.905. e^(−0.1).

2. Coppia in parallelo...

0.991

0.819

0.905

1

$0.991.\ 1 - 0.0952^2$.

3. TMR...

0.975

0.905

0.991

0.857

$0.975.\ 3R^2 - 2R^3$.

4. MTBF...

100,000 h

10,000 h

1000 h

10^{-5} h

$100{,}000\ h.\ 1/\lambda$.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che Hubble ha ricevuto sei nuovi giroscopi nel 2009, che tre sono rimasti operativi e che, quando uno ha fornito letture errate, la NASA ha portato Hubble in modalità a un giroscopio

tenendone un altro di riserva.

Lanciato nel 1990, Hubble ha più che raddoppiato la sua vita di progetto prevista; una ridondanza pianificata decenni prima mantiene in orbita un osservatorio funzionante invece di un sostituto.

Su Saving Planets: Dinamica del volo e controlli · Progettazione di veicoli spaziali

Fonti: NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA.
- NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/): Articolo della NASA sui giroscopi di Hubble.

☐ **Ho finito questa unità**

Analisi di sicurezza: FMEA e alberi dei guasti

Pericoli, analisi dei modi di guasto e dei loro effetti, numeri di priorità del rischio, alberi dei guasti con porte AND e OR, e progettazione critica per la sicurezza.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Svolgere una FMEA semplice.
- Calcolare un numero di priorità del rischio.
- Valutare porte AND e OR.
- Scegliere le mitigazioni.

Concetti chiave

- La FMEA procede dal basso verso l'alto: per ogni parte, elenca come può guastarsi, l'effetto e come verrà rilevato.
- Un numero di priorità del rischio moltiplica i punteggi di gravità, occorrenza e rilevabilità (ciascuno da 1–10, scala da manuale).
- Un albero dei guasti procede dall'alto verso il basso da un evento indesiderato; le porte OR aggiungono rischio, le porte AND (ridondanza) lo riducono.
- Per probabilità piccole e indipendenti, una porta OR è quasi la somma e una porta AND è il prodotto.
- Le lezioni degli incidenti plasmano la pratica; la NASA osserva che il suo manuale ha attinto al Columbia Accident Investigation Board e ad altri rapporti.

Equazioni chiave

$$RPN = S \times O \times D$$

`RPN=S× O× D`

Numero di priorità del rischio

$$P_{OR} = 1 - \prod (1 - p_i)$$

`P_OR=1-(1-p_i)`

Porta OR

$$P_{AND} = \prod p_i$$

`P_AND= p_i`

Porta AND

$$P_{OR} \approx \sum p_i$$

Approssimazione degli eventi rari

Esempi svolti passo passo

Esempio 4.1 Un guasto di sensore ha S = 8, O = 4, D = 5. RPN?

1. 8 × 4 × 5.

Risposta: 160.

Esempio 4.2 Uno qualsiasi di due guasti ($p = 10^{-3}$ e 2×10^{-3}) causa perdita di dati. Probabilità?

1. 1 − (0.999)(0.998).

Risposta: 2.998×10^{-3}.

Esempio 4.3 La perdita richiede entrambi i guasti (progetto ridondante).

1. $10^{-3} \times 2 \times 10^{-3}$.

Risposta: 2×10^{-6}.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Un rilevamento migliore porta D a 2. Nuovo RPN?

   64.

2. Approssimazione degli eventi rari per la porta OR?

   3×10^{-3}.

3. Quale porta crea la ridondanza?

   AND.

4. Dall’alto o dal basso: albero dei guasti?

   Dall’alto verso il basso.

Errori concettuali comuni

Mito: L’RPN è una probabilità.
In realtà: È un punteggio di classificazione.

Mito: Le porte OR moltiplicano.
In realtà: Sono le porte AND a moltiplicare.

Mito: Le parti ridondanti si guastano indipendentemente.
In realtà: Cause comuni possono guastarle entrambe.

Flashcard

FMEA

Analisi dei modi di guasto e dei loro effetti.

RPN

Gravità × occorrenza × rilevabilità.

Albero dei guasti

Logica del guasto dall’alto verso il basso.

Porta OR

Qualsiasi ingresso causa l’evento.

Porta AND

Servono tutti gli ingressi.

Causa comune

Un evento che guasta più parti.

Quiz di autoverifica

1. RPN...

160

17

40

320

160. 8 × 4 × 5.

2. Porta OR...

≈ 3×10^{-3}

2×10^{-6}

10^{-3}

0.5

≈ 3×10^{-3}. 1 − ∏(1 − p).

3. Porta AND...

2×10^{-6}

3×10^{-3}

10^{-3}

2×10^{-3}

2×10^{-6}. Prodotto.

4. La FMEA procede...

dal basso verso l’alto

dall’alto verso il basso

di lato

a caso

dal basso verso l’alto. Parte per parte.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che le lezioni documentate dal Columbia Accident Investigation Board, dal NASA Integrated Action Team e da altri, insieme agli incidenti nelle operazioni a terra e nei voli spaziali commerciali, hanno dato forma al suo manuale di ingegneria dei sistemi.

Gli stessi strumenti di sicurezza proteggono i satelliti che seguono incendi, tempeste e ghiaccio marino. Le probabilità in questa unità sono valori di esempio.

Su Saving Planets: Soluzioni · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA, sezione 6.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Lezioni gratuite del MIT.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Avionica digitale e bus dati

Dati binari, conversione analogico-digitale, quantizzazione, bus dati seriali (ARINC 429, MIL-STD-1553), temporizzazione dei messaggi e volume di dati.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare risoluzione e SNR di un ADC.
- Calcolare il tempo di trasmissione di un messaggio.
- Confrontare tipi di bus.
- Stimare il volume di dati.

Concetti chiave

- Un convertitore a N bit divide il suo intervallo di ingresso in 2^N livelli; un passo è il bit meno significativo.
- L'SNR di quantizzazione ideale è circa 6.02N + 1.76 dB.
- ARINC 429 è un bus a un trasmettitore e molti ricevitori a 100 kbit/s in alta velocità (valore da manuale); MIL-STD-1553 è un bus comando/risposta a 1 Mbit/s (valore da manuale).
- Il tempo di un messaggio è il numero di bit diviso la velocità in bit; overhead e intervalli si aggiungono.
- Una maggiore risoluzione radiometrica (più bit) mostra differenze più fini ma produce più dati.

Equazioni chiave

$$\Delta V = \frac{V_{FS}}{2^N}$$

`Δ V=_FS2^N`

Passo dell'ADC

$$SNR \approx 6.02N + 1.76 \text{ dB}$$

SNR di quantizzazione

$$t = \frac{bits}{R_b}$$

`t=(bits)/(R_b)`

Tempo di trasmissione

$$L = 2^N$$

`L=2^N`

Numero di livelli

Esempi svolti passo passo

Esempio 5.1 Un ADC a 12 bit copre 10 V. Ampiezza del passo?

1. 10/4096.

Risposta: 2.44 mV.

Esempio 5.2 Il suo SNR ideale?

1. 6.02 × 12 + 1.76.

Risposta: 74.0 dB.

Esempio 5.3 Quanto dura una parola ARINC 429 da 32 bit a 100 kbit/s?

1. 32/100,000.

Risposta: 0.32 ms.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Landsat 9 ha una risoluzione radiometrica di 14 bit. Livelli?

   16,384.

2. SNR per 8 bit?

   49.9 dB.

3. Stessa parola da 32 bit su un bus da 1 Mbit/s?

   0.032 ms.

4. Passo per 16 bit su 10 V?

0.153 mV.

Errori concettuali comuni

Mito: Più bit significano automaticamente più accuratezza.

In realtà: Anche rumore e calibrazione la limitano.

Mito: La velocità in bit è uguale alla velocità dei dati utili.

In realtà: L'overhead ne occupa una parte.

Mito: Un solo bus va bene per tutto.

In realtà: Scegli in base a temporizzazione, integrità e costo.

Flashcard

ADC

Convertitore analogico-digitale.

LSB

Passo del bit meno significativo.

ARINC 429

Bus avionico unidirezionale.

MIL-STD-1553

Bus comando/risposta.

Quantizzazione

Arrotondamento ai livelli.

Velocità in bit

Bit al secondo.

Quiz di autoverifica

1. Passo a 12 bit su 10 V...

2.44 mV

24.4 mV

0.244 mV

10 mV

2.44 mV. 10/4096.

2. SNR a 12 bit...

74.0 dB

72 dB

49.9 dB

98 dB

74.0 dB. 6.02N + 1.76.

3. Durata di una parola ARINC...

0.32 ms

3.2 ms

32 ms

0.032 ms

0.32 ms. $32/10^5$.

4. Livelli a 14 bit...

16,384

4096

65,536

14

16,384. 2^{14}.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA indica per Landsat 9 una risoluzione radiometrica di 14 bit, 11 bande spettrali e oltre 700 scene al giorno, ciascuna di 185 km per 180 km.

Passi radiometrici fini permettono agli scienziati di vedere cambiamenti sottili nella qualità dell'acqua e nella salute della vegetazione, al costo di più dati da memorizzare e trasmettere per l'avionica.

Su Saving Planets: Osservazione della Terra · Circuiti

Fonti: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Lezioni gratuite del MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA.

☐ **Ho finito questa unità**

Sensori di navigazione: IMU, GNSS, telecamere e lidar

Giroscopi e accelerometri, deriva della navigazione inerziale, misura di distanza con la navigazione satellitare, e sensori di visione e lidar per l’autonomia.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare la deriva da un bias dell’accelerometro.
- Collegare l’errore di tempo all’errore di distanza.
- Confrontare i punti di forza dei sensori.
- Spiegare perché si combinano i sensori.

Concetti chiave

- Un’unità di misura inerziale (IMU) misura le velocità di rotazione (giroscopi) e la forza specifica (accelerometri).
- Integrare due volte trasforma un piccolo bias dell’accelerometro in un errore di posizione che cresce con t^2.
- La navigazione satellitare misura la distanza dal tempo di percorrenza del segnale; 1 µs di errore d’orologio equivale a circa 300 m di distanza.
- Telecamere e lidar misurano direttamente l’ambiente circostante, fornendo informazioni di posizione e pericolo che non derivano.
- Nessun sensore basta da solo: le IMU sono veloci ma derivano; i sensori esterni sono più lenti ma limitati.

Equazioni chiave

$$e = \tfrac{1}{2} b t^2$$

```
e=12bt^2
```

Errore di posizione da bias dell’accelerometro

$$\rho = c\,\Delta t$$

```
ρ=c Δ t
```

Distanza dal tempo di percorrenza

$$\theta_e = \omega_b t$$

```
θ_e=ω_bt
```

Errore di prua da bias del giroscopio

$$b = 10^{-3} g$$

`b=10^-3g`

Bias di esempio di 1 milli-g

Esempi svolti passo passo

Esempio 6.1 Un bias di accelerometro di 1 milli-g (9.807×10^{-3} m/s²) resta non corretto per 60 s. Errore di posizione?

1. ½ × $9.807 \times 10^{-3} \times 60^2$.

Risposta: 17.7 m.

Esempio 6.2 Dopo 600 s?

1. ½ × $9.807 \times 10^{-3} \times 600^2$.

Risposta: 1765 m, 100 volte peggio per un tempo 10 volte maggiore.

Esempio 6.3 L’orologio di un ricevitore è sfasato di 1 µs. Errore di distanza?

1. $299{,}792{,}458 \times 10^{-6}$.

Risposta: 300 m.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Errore dopo 10 s con lo stesso bias?

   0.49 m.

2. Bias del giroscopio di 0.01°/h per 10 h?

   0.1° di prua.

3. Perché Dragonfly ha bisogno del lidar su Titano?

Per misurare quota e pendenza del terreno e individuare i pericoli.

4. Errore d’orologio per 3 m di distanza?

   10 ns.

Errori concettuali comuni

Mito: Le IMU non richiedono mai correzioni.
In realtà: I loro errori crescono nel tempo.

Mito: Il GNSS funziona ovunque.
In realtà: Non al chiuso, sott’acqua o su Titano.

Mito: La deriva cresce linearmente.
In realtà: La deriva da bias cresce con t^2.

Flashcard

IMU

Giroscopi e accelerometri.

Navigazione stimata

Navigazione per integrazione.

GNSS

Navigazione satellitare.

Lidar

Telemetria laser.

Bias

Scostamento costante del sensore.

Pseudodistanza

Distanza che include l’errore d’orologio.

Quiz di autoverifica

1. Errore a 60 s...

17.7 m

0.59 m

1765 m

35 m

17.7 m. ½bt².

2. Errore a 600 s…

1765 m

177 m

17.7 km

600 m

1765 m. 100×.

3. Errore d’orologio di 1 µs…

300 m

3 m

30 km

0.3 m

300 m. c Δt.

4. Sensore che deriva…

IMU

lidar

corrispondenza con mappa tramite telecamera

GNSS

IMU. Integrazione.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che il recente test di «primo volo» di Dragonfly ha eseguito il software di volo e un'avionica rappresentativa del volo con dati simulati delle telecamere di navigazione, delle unità di misura inerziale e del lidar.

Il lidar misura quota e pendenza del terreno e individua i pericoli, permettendo al velivolo ad ala rotante di scegliere un sito di atterraggio sicuro su Titano, dove dovrebbe arrivare nel 2034.

Su Saving Planets: Dinamica del volo e controlli · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Articolo della NASA su Dragonfly.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Lezioni gratuite del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Fusione sensoriale e filtro di Kalman

Combinazione di misure rumorose, pesatura con l'inverso della varianza, il filtro di Kalman scalare e il suo ciclo di predizione e aggiornamento.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Fondere due misure in base alla varianza.
- Calcolare un guadagno di Kalman.
- Eseguire un passo di predizione e aggiornamento.
- Spiegare perché la fusione batte ciascun sensore.

Concetti chiave

- Due stime indipendenti si combinano al meglio pesando ciascuna con l'inverso della sua varianza.
- La varianza fusa è minore di ciascuna varianza in ingresso.
- Il filtro di Kalman predice lo stato in avanti, poi lo corregge con una misura usando il guadagno K.
- K = P/(P + R): fidati di più della misura quando la predizione è incerta (P grande) e il sensore è buono (R piccolo).
- I sistemi di navigazione fondono le predizioni rapide dell'IMU con aggiornamenti più lenti da telecamera, lidar o GNSS.

Equazioni chiave

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

Varianza fusa

$$K = \frac{P}{P + R}$$

```
K=(P)/(P+R)
```

Guadagno di Kalman scalare

$$\hat{x}^+ = \hat{x}^- + K(z - \hat{x}^-)$$

```
x^+= x^-+K(z- x^-)
```

Aggiornamento

$$P^+ = (1 - K)P$$

`P^+=(1-K)P`

Varianza aggiornata

Esempi svolti passo passo

Esempio 7.1 Si fondono sensori con $\sigma = 4$ m e 3 m. σ fusa?

1. $\sigma^2 = 16 \times 9/25 = 5.76$.
2. $\sigma = \sqrt{5.76}$.

Risposta: 2.4 m.

Esempio 7.2 Varianza di predizione $P = 16$ m², misura $R = 9$ m². Guadagno?

1. 16/25.

Risposta: 0.64.

Esempio 7.3 Predizione 100 m, misura 105 m. Aggiornamento e nuova varianza?

1. $x = 100 + 0.64 \times 5 = 103.2$ m.
2. $P = 0.36 \times 16$.

Risposta: 103.2 m con varianza 5.76 m².

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Fondi due sensori uguali con $\sigma = 2$ m.

   $\sigma = 1.41$ m.

2. Guadagno se $R = 0$?

   1: fidarsi completamente della misura.

3. Guadagno se R è enorme?

   Vicino a 0: mantenere la predizione.

4. Che cosa fa crescere P tra gli aggiornamenti?

Il rumore di processo nella predizione.

Errori concettuali comuni

Mito: Mediare i sensori in modo uguale.

In realtà: Pesa con l'inverso della varianza.

Mito: La fusione non può battere il sensore migliore.

In realtà: Li batte entrambi.

Mito: I filtri di Kalman eliminano ogni errore.

In realtà: Minimizzano la varianza sotto certe ipotesi.

Flashcard

Fusione sensoriale

Combinazione di misure.

Guadagno di Kalman

Peso dato alla misura.

Covarianza

Incertezza della stima.

Predizione

Propagare lo stato.

Aggiornamento

Correggere con una misura.

Innovazione

Misura meno predizione.

Quiz di autoverifica

1. σ fusa...

2.4 m

3.5 m

1 m

5 m

2.4 m. √5.76.

2. Guadagno di Kalman...

0.64

0.36

1.78

0.5

0.64. P/(P + R).

3. Stima aggiornata...

103.2 m

105 m

100 m

102.5 m

103.2 m. 100 + 0.64 × 5.

4. Nuova varianza...

5.76 m^2

16 m^2

9 m^2

25 m^2

5.76 m^2. (1 − K)P.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA riferisce che il team di Dragonfly ha aggiunto sensori e funzionalità passo dopo passo, terminando con il lidar, l'ultimo pezzo necessario per simulare completamente ciò che il velivolo

incontrerà su Titano.

Un emulatore di telecamera ha reso ogni scena simulata di Titano con tempi di esposizione di circa 20–70 millisecondi, quelli che useranno le telecamere, così che il software di fusione vedesse una temporizzazione realistica. Le varianze in questa unità sono valori di esempio.

Su Saving Planets: Dinamica del volo e controlli · Progettazione di veicoli spaziali

Fonti: NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Lezioni gratuite del MIT.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Articolo della NASA su Dragonfly.

☐ **Ho finito questa unità**

Comunicazione e sorveglianza: ADS-B

Radio di bordo, portata in linea di vista, attenuazione nello spazio libero, ADS-B Out e In, e come la sorveglianza supporta il controllo del traffico aereo.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare la portata dell'orizzonte radio.
- Calcolare l'attenuazione nello spazio libero.
- Spiegare ADS-B Out e In.
- Mettere in scala i numeri del traffico FAA.

Concetti chiave

- La VHF e le frequenze più alte viaggiano in linea di vista, quindi la portata dipende dall'altezza delle antenne.
- L'attenuazione nello spazio libero cresce con distanza e frequenza, $20\log_{10}(4\pi d/\lambda)$.
- Con l'ADS-B Out, un aeromobile trasmette la propria posizione ricavata dai satelliti; l'ADS-B In permette ad altri aeromobili e a terra di riceverla.
- La FAA definisce l'ADS-B in tempo reale il metodo di sorveglianza preferito per il controllo del traffico aereo nel National Airspace System.
- Negli Stati Uniti gli aeromobili devono avere l'ADS-B Out per volare nello spazio aereo definito dal 14 CFR 91.225.

Equazioni chiave

$$d \approx 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})\ \text{km}$$

Orizzonte radio (h in m)

$$L = 20\log_{10}\frac{4\pi d}{\lambda}$$

`L=20_10(4π d)/()`

Attenuazione nello spazio libero

$$\lambda = c/f$$

Lunghezza d'onda

$$\bar{n} = N/24$$

n=N/24

Voli medi all’ora

Esempi svolti passo passo

Esempio 8.1 Un aeromobile a 10000 m e un’antenna a terra a 10 m. Orizzonte radio?

1. 4.12(100 + 3.162).

Risposta: 425 km.

Esempio 8.2 Attenuazione di percorso a 1090 MHz su 200 km.

1. $\lambda = 0.2750$ m.
2. $20 \log_{10}(4\pi \times 2 \times 10^{5}/0.2750)$.

Risposta: 139.2 dB.

Esempio 8.3 La FAA gestisce oltre 44000 voli al giorno. Media all’ora?

1. 44,000/24.

Risposta: Circa 1833.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Raddoppia la distanza: attenuazione aggiuntiva?

   6.02 dB.

2. Lunghezza d’onda a 1090 MHz?

   0.275 m.

3. Passeggeri per volo da 3 milioni e 44000?

   Circa 68.

4. Che cosa richiede a bordo l’ADS-B Out?

   Un trasmettitore che diffonda la posizione.

Errori concettuali comuni

Mito: La portata radio è illimitata.

In realtà: La linea di vista la limita.

Mito: L'ADS-B usa il radar.

In realtà: Gli aeromobili trasmettono la propria posizione.

Mito: L'attenuazione di percorso è lineare con la distanza.

In realtà: Cresce come $20 \log_{10} d$.

Flashcard

ADS-B

Sorveglianza dipendente automatica in modalità broadcast.

ADS-B Out

Trasmette la propria posizione.

ADS-B In

Riceve traffico e meteo.

Attenuazione di tratta

Perdita per dispersione del segnale.

Orizzonte radio

Limite della linea di vista.

NAS

Sistema nazionale dello spazio aereo degli Stati Uniti.

Quiz di autoverifica

1. Orizzonte radio...

425 km

42.5 km

4250 km

100 km

425 km. 4.12 × 103.2.

2. Attenuazione di percorso...

139.2 dB

119 dB

160 dB

13.9 dB

139.2 dB. 20 $\log_{10}(4\pi d/\lambda)$.

3. Voli all'ora...

≈ 1833

≈ 440

≈ 44,000

≈ 183

≈ 1833. 44,000/24.

4. L'ADS-B Out serve a...

trasmettere la posizione

disturbare il radar

seguire solo il meteo

far atterrare l'aereo

trasmettere la posizione. FAA.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La FAA afferma che l’ADS-B migliora sicurezza ed efficienza in volo e sulle piste, riduce i costi e attenua gli effetti dannosi sull’ambiente.

L’Air Traffic Organization della FAA gestisce oltre 44000 voli e oltre 3 milioni di passeggeri di linea al giorno su oltre 29 milioni di miglia quadrate di spazio aereo (dati FY24), quindi piccoli guadagni di efficienza si sommano.

Su Saving Planets: Prestazioni dei velivoli · Soluzioni

Fonti: FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb) · FAA: Air Traffic By The Numbers (https://www.faa.gov/air_traffic/by_the_numbers)

Risorse di apprendimento gratuite

- FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb): Panoramica della FAA.
- FAA: Air Traffic By The Numbers (https://www.faa.gov/air_traffic/by_the_numbers): Dati della FAA.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Software di volo in tempo reale

Task, periodi e scadenze, utilizzo della CPU, schedulazione rate-monotonic, frequenze di frame, watchdog e protezione dai guasti.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare l'utilizzo della CPU.
- Applicare il limite rate-monotonic.
- Collegare frequenza di frame e periodo.
- Descrivere la protezione dai guasti.

Concetti chiave

- Il software di volo esegue task periodici che devono terminare prima delle loro scadenze, non solo essere veloci in media.
- L'utilizzo è la somma del tempo di esecuzione di ciascun task diviso per il suo periodo.
- La schedulazione rate-monotonic dà priorità più alta ai periodi più brevi; è garantita quando U ≤ n(2^(1/n) − 1).
- I timer watchdog riavviano un processore che smette di rispondere; la protezione dai guasti mette un veicolo spaziale in modalità sicura.
- L'autonomia conta quando l'aiuto da terra è lontano; la NASA afferma che Dragonfly deve volare senza aiuto in tempo reale dalla Terra.

Equazioni chiave

$$U = \sum \frac{C_i}{T_i}$$

`U=(C_i)/(T_i)`

Utilizzo

$$U \leq n(2^{1/n} - 1)$$

Limite rate-monotonic

$$f = 1/T$$

`f=1/T`

Frequenza di frame

$$\text{slack} = 1 - U$$

```
slack=1-U
```

Capacità di riserva

Esempi svolti passo passo

Esempio 9.1 I task durano 2, 3 e 5 ms con periodi di 10, 20 e 50 ms. Utilizzo?

1. 0.2 + 0.15 + 0.1.

Risposta: 0.45.

Esempio 9.2 Limite rate-monotonic per tre task?

1. 3(2^(1/3) − 1).

Risposta: 0.780, quindi 0.45 è schedulabile con garanzia.

Esempio 9.3 Le esposizioni delle telecamere di Dragonfly durano circa 20–70 ms. Frequenze di frame corrispondenti?

1. 1/0.07 e 1/0.02.

Risposta: Circa da 14.3 a 50 Hz.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Limite per n = 2?

   0.828.

2. Limite per n = 4?

   0.757.

3. Margine con U = 0.45?

   0.55.

4. Perché la modalità sicura?

   Per mantenere stabile il veicolo e attendere aiuto o una correzione.

Errori concettuali comuni

Mito: Essere veloci in media basta.

In realtà: Ogni scadenza conta.

Mito: $U \leq 1$ significa sempre schedulabile con RMS.

In realtà: Solo il limite lo garantisce.

Mito: Modalità sicura significa guasto.

In realtà: Protegge la missione.

Flashcard

Scadenza

Istante di fine più tardivo.

Utilizzo

Frazione di CPU usata.

Rate-monotonic

Periodo più breve, priorità più alta.

Watchdog

Timer di reset.

Modo di sicurezza

Configurazione protettiva.

Autonomia

Agire senza aiuto da terra.

Quiz di autoverifica

1. Utilizzo...

0.45

0.10

1.0

0.78

0.45. Sum C/T.

2. Limite RM per n = 3...

0.780

0.693

0.828

1

0.780. n(2^(1/n) − 1).

3. Frame da 70 ms...

14.3 Hz

70 Hz

7 Hz

50 Hz

14.3 Hz. 1/0.07.

4. Il watchdog...

riavvia un processore bloccato

conta i bit

misura i giroscopi

raffredda le scatole

riavvia un processore bloccato. Timer.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA riferisce che Hubble è entrato più volte in modalità sicura quando un giroscopio forniva letture errate, sospendendo la scienza in attesa di istruzioni; la protezione dai guasti lo ha mantenuto al sicuro.

La NASA afferma che gli ingegneri di Dragonfly introdurranno deliberatamente guasti nei test affinché il velivolo possa reagire in modo autonomo, perché tutto ciò che fa su Titano deve avvenire senza aiuto in tempo reale dalla Terra.

Su Saving Planets: Introduzione alla programmazione · Dinamica del volo e controlli

Fonti: NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/) · NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Lezioni gratuite del MIT.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Articolo della NASA su Dragonfly.

☐ **Ho finito questa unità**

Integrazione, verifica e operazioni

Integrazione incrementale, metodi di verifica, prove hardware-in-the-loop, iniezione di guasti, messa in servizio ed estensione della vita.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Nominare i quattro metodi di verifica.
- Pianificare un'integrazione incrementale.
- Spiegare le prove hardware-in-the-loop.
- Collegare le operazioni alla vita della missione.

Concetti chiave

- I requisiti si verificano mediante prova, analisi, ispezione o dimostrazione.
- L'integrazione procede passo dopo passo, così un problema può essere ricondotto all'ultimo elemento aggiunto.
- Hardware-in-the-loop e banchi rappresentativi del volo eseguono il vero software di volo con sensori simulati.
- Le prove di iniezione di guasti dimostrano che il sistema reagisce correttamente quando qualcosa si rompe.
- Buone operazioni, ricambi e materiali di consumo possono estendere una missione ben oltre la sua vita di progetto.

Equazioni chiave

$$t_{arr} = t_{launch} + t_{cruise}$$

`t_arr=t_launch+t_cruise`

Anno di arrivo

$$L_{ext} = \frac{L_{actual}}{L_{design}}$$

`L_ext=_actualL_design`

Rapporto di estensione della vita

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

`A=(MTBF)/(MTBF+MTTR)`

Disponibilità

$$V = \{T, A, I, D\}$$

V=,A,I,D\

Metodi di verifica

Esempi svolti passo passo

Esempio 10.1 La NASA afferma che Dragonfly partirà non prima del 2028 per un viaggio di sei anni. Arrivo più precoce?

1. 2028 + 6.

Risposta: 2034, in linea con la NASA.

Esempio 10.2 I materiali di consumo di Landsat 9 durano almeno 10 anni contro una vita di progetto di 5 anni. Rapporto di estensione?

1. 10/5.

Risposta: 2.

Esempio 10.3 Dragonfly trascorrerà tre anni volando su Titano. Fine missione al più presto?

1. 2034 + 3.

Risposta: 2037 (calcolato).

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Nominare i quattro metodi di verifica.

   Prova, analisi, ispezione, dimostrazione.

2. Perché integrare in modo incrementale?

   Per ricondurre i problemi all’ultima modifica.

3. Hubble è stato lanciato nel 1990; in che anno cadeva il suo 34° anniversario?

   2024.

4. Che cos'è l'iniezione di guasti?

   Provocare deliberatamente guasti in prova.

Errori concettuali comuni

Mito: Collaudare tutto alla fine.
In realtà: Integra e collauda per passi.

Mito: L'analisi vale meno della prova.
In realtà: Ogni metodo si adatta a requisiti diversi.

Mito: La vita di progetto è la fine.
In realtà: Le missioni spesso durano di più.

Flashcard

Verifica mediante prova

Misurarlo.

Analisi

Dimostrare con il calcolo.

Ispezione

Osservarlo.

Dimostrazione

Mostrare che funziona.

HIL

Hardware-in-the-loop.

Messa in servizio

Verifica dopo il lancio.

Quiz di autoverifica

1. Arrivo di Dragonfly...

2034

2028

2030

2040

2034. 2028 + 6.

2. Rapporto di Landsat 9...

2

0.5

5

10

2. 10/5.

3. Numero di metodi...

4

2

3

6

4. T, A, I, D.

4. Banco di prova con software reale...

hardware-in-the-loop

FMEA

Diagramma N^2

studio di trade-off

hardware-in-the-loop. HIL.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che il team di Dragonfly ha costruito le capacità di volo in modo incrementale, dalla rotazione di un singolo rotore fino a un primo volo simulato completo, e prevede di ripeterlo sul vero sistema di volo.

La NASA osserva che la calibrazione a bordo e la ridondanza di Landsat 9 mantengono i suoi dati accurati e affidabili per tutta la vita della missione, estendendo la più lunga serie di osservazioni della Terra.

Su Saving Planets: Osservazione della Terra · Progettazione di veicoli spaziali

Fonti: NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/) · NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA, sezione 5.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Lezioni gratuite del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Esercizi

Questi esercizi stanno dentro ogni unità. Falli su carta, poi apri la risposta.

1. Il ciclo di vita dell’ingegneria dei sistemi e i requisiti
   4 esercizi
2. Architettura, interfacce e integrazione
   4 esercizi
3. Affidabilità e ridondanza
   4 esercizi
4. Analisi di sicurezza: FMEA e alberi dei guasti
   4 esercizi
5. Avionica digitale e bus dati
   4 esercizi
6. Sensori di navigazione: IMU, GNSS, telecamere e lidar
   4 esercizi
7. Fusione sensoriale e filtro di Kalman
   4 esercizi
8. Comunicazione e sorveglianza: ADS-B
   4 esercizi
9. Software di volo in tempo reale

4 esercizi

10. Integrazione, verifica e operazioni
    4 esercizi

Il laboratorio (Avionics and systems lab)

Il laboratorio è la parte pratica del corso. Qui è gratuito e solo per esercitarsi, senza crediti.

Ogni laboratorio si svolge in una simulazione gratuita o in un foglio di calcolo, quindi non ci sono rischi elettrici. Non aprire né modificare l'elettronica di veri aerei, droni o veicoli per questo corso. Fai pause dallo schermo, mantieni una buona postura e tieni i cavi fuori dai passaggi.

Riferimento per la sicurezza: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

Laboratorio A: Crescita delle interfacce e un diagramma N²

SETTIMANA 2

Obiettivo: Costruisci un diagramma N² per una piccola suite avionica e osserva come crescono le interfacce potenziali con il numero di scatole.

$$I = n(n-1)/2$$

I=n(n-1)/2

Interfacce potenziali

Procedimento

1. Elenca le scatole: computer di volo, IMU, ricevitore GNSS, radio, display, unità di alimentazione, dati aria, autopilota.
2. Disegna una griglia 8 × 8 con le scatole sulla diagonale e segna le coppie che scambiano dati.
3. Calcola n(n − 1)/2 per n = 4, 8 e 12.
4. Conta le celle segnate e confrontale con il massimo.

Tabella dei dati

Scatole n	Interfacce potenziali
4	6
8	28
12	66

Valori calcolati.

Calcolo di esempio

1. 8 × 7/2 = 28.
2. 12 × 11/2 = 66.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

Legame con il pianeta: NASA: l'aggiornamento del suo manuale include l'ingegneria dei sistemi basata su modelli. NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio B: Affidabilità di unità singole, doppie e triple

SETTIMANA 4

Obiettivo: Confronta in un foglio di calcolo un'unità singola, una coppia in parallelo e un voto 2 su 3 nel tempo.

$$R_{2/3} = 3R^2 - 2R^3$$

R_2/3=3R^2-2R^3

Voto due su tre

Procedimento

1. Inserisci λ = 10^{-5} all'ora.
2. Calcola R = e^(−λt) per t = 1000, 10000 e 50000 h.
3. Calcola la coppia in parallelo e il voto 2 su 3.
4. Trova dove il 2 su 3 scende sotto l'unità singola (R = 0.5).

Tabella dei dati

t (h)	Singola	Doppia	2 su 3
1000	0.990	0.9999	0.9997
10,000	0.905	0.991	0.975
50,000	0.607	0.845	0.657

Valori d'esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. R(50,000) = e^(−0.5) = 0.607.
2. 2 su 3 = $3(0.607)^2 - 2(0.607)^3$ = 0.657.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

Legame con il pianeta: NASA: Hubble può fare osservazioni scientifiche con un solo giroscopio funzionante. NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio C: Circuiti ridondanti

SETTIMANA 5

Obiettivo: Usa PhET Circuit Construction Kit: DC per confrontare lampadine in serie e in parallelo quando una si guasta.

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

`R_p=(R_1R_2)/(R_1+R_2)`

Resistenza in parallelo

Procedimento

1. Monta due lampadine da 10 Ω in serie su una batteria da 12 V, poi interrompi un filo.
2. Rimontale in parallelo e interrompi un ramo.
3. Misura la corrente prima e dopo ogni guasto.
4. Collega il risultato all'affidabilità in serie e in parallelo.

Tabella dei dati

Circuito	Resistenza (Ω)	Corrente a 12 V (A)
Parallelo, entrambe buone	5	2.4
Parallelo, una guasta	10	1.2
Serie, entrambe buone	20	0.6

Valori d'esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. 10 × 10/20 = 5 Ω.
2. 12/5 = 2.4 A.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Funziona in un browser web.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc)

Legame con il pianeta: NASA: la ridondanza a bordo di Landsat 9 mantiene affidabili i suoi dati.
NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

☐ **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio D: Risoluzione dell’ADC e volume di dati

SETTIMANA 7

Obiettivo: Calcola ampiezza del passo e SNR per diverse risoluzioni del convertitore.

$$\Delta V = V_{FS}/2^N$$

Δ V=V_FS/2^N

Passo dell’ADC

Procedimento

1. Inserisci un fondo scala di 10 V.
2. Calcola passo e SNR per 8, 12 e 16 bit.
3. Calcola la durata di una parola da 32 bit a 100 kbit/s e a 1 Mbit/s.
4. Discuti perché Landsat 9 usa 14 bit.

Tabella dei dati

Bit	Passo (mV)	SNR (dB)
8	39.06	49.9
12	2.441	74.0
16	0.1526	98.1

Valori calcolati.

Calcolo di esempio

1. 10/256 = 39.06 mV.
2. 6.02 × 16 + 1.76 = 98.1 dB.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Legame con il pianeta: NASA: Landsat 9 ha una risoluzione radiometrica di 14 bit. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio E: Deriva inerziale e fusione sensoriale

SETTIMANA 9

Obiettivo: Modella la deriva di posizione da un bias dell’accelerometro, poi fondi due sensori di posizione.

$$e = \tfrac{1}{2} b t^2$$

```
e=12bt^2
```

Deriva da bias

Procedimento

1. Inserisci b = 9.807 × 10⁻³ m/s² (1 milli-g).
2. Calcola l’errore a 10, 60 e 600 s.
3. Fondi sensori con σ = 4 m e 3 m e calcola il guadagno di Kalman per P = 16, R = 9.
4. Aggiungi rumore con una colonna di numeri casuali e osserva il filtro.

Tabella dei dati

t (s)	Errore (m)
10	0.49
60	17.65
600	1765

Valori d’esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. ½ × 9.807 × 10⁻³ × 100 = 0.49 m.
2. σ fusa = √5.76 = 2.4 m.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Legame con il pianeta: NASA: il test di Dragonfly ha usato dati simulati di telecamera, IMU e lidar. NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio F: Schedulabilità rate-monotonic

SETTIMANA 12

Obiettivo: Calcola i limiti di utilizzo e prova insiemi di task in un foglio di calcolo.

$$U \leq n(2^{1/n} - 1)$$

Limite rate-monotonic

Procedimento

1. Calcola il limite per n = 1 a 4.
2. Inserisci l’insieme di task dell’unità 9 e calcola U.
3. Aggiungi un task finché U supera il limite.
4. Discuti cosa fare quando il limite non è rispettato.

Tabella dei dati

n	Limite
1	1.000
2	0.828
3	0.780
4	0.757

Valori calcolati.

Calcolo di esempio

1. 2(√2 − 1) = 0.828.
2. 4(2^(1/4) − 1) = 0.757.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/)

Legame con il pianeta: NASA: Dragonfly deve volare in modo autonomo, senza aiuto in tempo reale dalla Terra. NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Serie di esercizi per gli esami

Cronometrati: circa 10 minuti per problema. Poi confronta con le soluzioni complete.

Esercizi di preparazione all'esame intermedio (unità 1–5)

1. Interfacce potenziali per 10 scatole?

    1. 10 × 9/2.

    Risposta: 45.

2. Coppia in parallelo, $\lambda = 2 \times 10^{-5}$ /h su 5000 h?

    1. R = e^(−0.1) = 0.905.
    2. $1 - 0.095^2$.

    Risposta: 0.991.

3. RPN per S = 6, O = 3, D = 7?

    1. 6 × 3 × 7.

    Risposta: 126.

4. Passo di un ADC a 10 bit su 5 V?

    1. 5/1024.

    Risposta: 4.88 mV.

5. SNR ideale per 10 bit?

    1. 6.02 × 10 + 1.76.

    Risposta: 62.0 dB.

Serie finale di esercizi (unità 1–10)

1. Deriva dopo 30 s con un bias di 2 milli-g?

    1. ½ × 0.01961 × 900.

Risposta: 8.83 m.

2. Fondi due sensori con σ = 5 m.

    1. $\sigma^2 = 12.5$.

    Risposta: 3.54 m.

3. Guadagno di Kalman per P = 4, R = 1?

    1. 4/5.

    Risposta: 0.8.

4. Orizzonte radio da 1000 m verso un’antenna a 10 m?

    1. 4.12(31.62 + 3.162).

    Risposta: 143.3 km.

5. Utilizzo per i task 1/5, 2/10, 3/30 ms?

    1. 0.2 + 0.2 + 0.1.

    Risposta: 0.5.

6. Disponibilità, MTBF 500 h, MTTR 5 h?

    1. 500/505.

    Risposta: 0.990.

Formulario

$$\text{Margin} = (C - N)/N,\ m_{alloc} = m_{est}(1 + M) \qquad I = n(n-1)/2,\ U_{bus} = B/B_{max}$$

$$R = e^{-\lambda t},\ R_p = 1 - \prod(1 - R_i),\ R_{2/3} = 3R^2 - 2R \qquad RPN = SOD,\ P_{OR} = 1 - \prod(1 - p_i),\ P_{AND} = \prod$$

$$\Delta V = V_{FS}/2^N,\ SNR = 6.02N + 1.76 \qquad e = \tfrac{1}{2}bt^2,\ \rho = c\Delta t$$

$$\sigma^2 = \sigma_1^2\sigma_2^2/(\sigma_1^2 + \sigma_2^2),\ K = P/(P + R) \qquad d = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),\ L = 20\log_{10}(4\pi d/\lambda)$$

$$U = \sum C_i/T_i \le n(2^{1/n} - 1) \qquad A = MTBF/(MTBF + MTTR)$$

Costanti

Costante	Valore
Velocità della luce	c = 299792458 m/s (esatto)
Gravità standard	g = 9.80665 m/s²
Frequenza ADS-B (valore da manuale)	1090 MHz
ARINC 429 alta velocità (valore da manuale)	100 kbit/s
MIL-STD-1553 (valore da manuale)	1 Mbit/s
Ore all'anno	8760 h

Fonte: NIST: CODATA value, speed of light in vacuum (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c)

Testi e simulazioni gratuiti

Usa questi testi, lezioni e simulazioni gratuiti insieme al corso.

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Lezioni gratuite del MIT.
- FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb): Panoramica della FAA.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Circuiti e ridondanza.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Articolo sui test di avionica.
- NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/): La ridondanza nella pratica.

Glossario

ADS-B
Sorveglianza dipendente automatica in modalità broadcast.

ARINC 429
Bus dati avionico unidirezionale.

Disponibilità
Frazione di tempo in cui un sistema funziona.

FMEA
Analisi dei modi di guasto e dei loro effetti.

Albero dei guasti
Logica dei guasti dall'alto verso il basso.

Hardware-in-the-loop
Software e hardware reali con ingressi simulati.

IMU
Unità di misura inerziale.

Documento di controllo delle interfacce
Accordo su un'interfaccia.

Filtro di Kalman
Stimatore ricorsivo ottimo.

Lidar
Telemetria laser.

MBSE
Ingegneria dei sistemi basata su modelli.

MIL-STD-1553
Bus dati comando/risposta.

MTBF
Tempo medio tra i guasti.

Diagramma N²
Matrice delle interfacce.

Schedulazione rate-monotonic
Il periodo più breve riceve la priorità più alta.

Ridondanza
Unità aggiuntive di riserva.

Requisito
Enunciato verificabile di un bisogno.

Modo di sicurezza
Configurazione protettiva di un veicolo spaziale.

Modello a V
Scomporre, poi integrare e verificare.

Timer watchdog
Riavvia un processore bloccato.

Griglia di autovalutazione

Non si assegnano voti né crediti. Usala per valutare onestamente a che punto sei in ogni unità.

Livello	Come si presenta
4 · Padronanza	Collega ogni scelta di progetto a un requisito, controlla interfacce e casi di guasto, mantiene coerenti unità e probabilità e spiega i compromessi in parole semplici.
3 · Competente	Risolve le serie di esercizi e d’esame con piccoli errori e controlla le unità.
2 · In sviluppo	Segue gli esempi svolti ma confonde affidabilità in serie e in parallelo, o porte OR e AND.
1 · Principiante	Calcola senza un requisito né uno schema a blocchi; deve rivedere l’unità.

Pesi suggeriti se vuoi un punteggio

Parte	Peso
Esercizi	20%
Laboratori	25%
Serie di esercizi di metà corso	25%
Serie di esercizi finale	30%

Punta al livello 3 o superiore in ogni unità prima di passare al corso successivo.

Corsi correlati

- Trasmissione del calore AERO 440
- Progetto finale (velivolo o CubeSat) AERO 490
- Propulsione AERO 410
- Tutti i corsi