آخر تحديث: November 1, 2026

عن هذه الدورة

يتضمن هذا المقرر المجاني 10 وحدات و6 مختبرات. هذه الأعداد الحقيقية وليست منهجًا أطول جرى اختصاره.

التحقق هو رقم أو نتيجة برمجية في صفحة مقرر يعيد سكربت حسابها قبل النشر. يجب أن يطابق الرقم المعروض الرقم المعاد حسابه.

هذا مخطط دورة مجانية للتعلّم الذاتي كتبته Saving Planets. وهو ليس مقررًا جامعيًا، ولا يمنح ساعات معتمدة، ولا تشارك فيه أي مؤسسة تعليمية.

يتبع نطاقه مقررًا فصليًا للسنة الأخيرة في ديناميكا الطيران والتحكم لمهندسي الطيران والفضاء. وهو مبني على موضوعات ومستوى MIT 16.333 Aircraft Stability and Control وMIT 16.06 Principles of Automatic Control وMIT 16.30 Feedback Control Systems (مجانية على MIT OpenCourseWare)، ويستخدم Beginner’s Guide to Aeronautics المجاني من NASA Glenn، ونضع رابطه حيث يفيد. لا يؤيد أيٌّ من هؤلاء المؤلفين أو المؤسسات أو الهيئات هذه الصفحة.

ما نضيفه: كل وحدة مرتبطة بعمل حقيقي بمصدر عام موثّق (اختبارات طيران X-59 التابعة لناسا، ونظام التوجيه في هابل، والطائرة المروحية دراغونفلاي)، وكل رقم في الصفحة يعاد حسابه بنص تحقق برمجي قبل النشر، ولكل مختبر محاكاة مجانية أو جدول بيانات.

تابعها بالترتيب. في كل وحدة أهداف وأفكار أساسية ومعادلات وأمثلة خطوة بخطوة وتمارين بإجابات كاملة وأخطاء شائعة وبطاقات تعليمية واختبار قصير. يُحفظ تقدّمك في هذا المتصفح فقط.

كيف تساعد هذه الدورة في إنقاذ الكوكب

المركبات المستقرة والمحكومة جيدًا تطير في مسارات فعّالة، والأفكار نفسها في التحكم توجّه أقمار رصد الأرض والتلسكوبات بدقة كافية لقياس كوكبنا والكون.

وهندسة التحكم تجعل أيضًا طائرات جديدة أهدأ وأكثر استقلالية ممكنة. تنتهي كل وحدة بقسم قصير موثّق. القيم التي لا تأتي من مصدر موسومة بأنها قيم نموذجية أو مرجعية.

للمعلمين

يمكنك تدريس هذا المقرر، أو أن يتابعه الطالب وحده. إنه مجاني. Saving Planets لا تمنح درجة ولا ساعات معتمدة.

- هذه الصفحة هي المقرر كاملًا: 10 وحدات و6 مختبرات (AERO 420).
- خطّط لخمسة عشر أسبوعًا، نحو 6 إلى 9 ساعات في الأسبوع، بما في ذلك أسابيع المختبر.

- اتبع جدول الخمسة عشر أسبوعًا. اقرأ الوحدة، حلّ التمارين على الورق، ثم افتح الإجابة. في أسبوع المختبر، نفّذ المختبر أو نسخته المنزلية.
- التحقق هو رقم أو نتيجة برمجية في الصفحة يعيد سكربت حسابها قبل النشر. يجب أن يطابق الرقم الظاهر الرقم المعاد حسابه.
- استخدم طباعة هذه الصفحة، أو نزّل دليل الدراسة PDF. ورقة القوانين قرب النهاية.
- اسأل: كيف تساعد هذه الوحدة الناس والكوكب؟ في كل وحدة مربع أخضر فيه حقيقة مع مصدرها.
- انسخ نموذج دليل المعلم واكتب اسم صفك والوقت المتاح والأسئلة التي ستطرحها. افتح نموذج دليل المعلم

قبل أن تبدأ

المتطلبات السابقة

- الديناميكا: دوران الأجسام الصلبة، وعزوم القصور الذاتي، والزخم الزاوي.
- المعادلات التفاضلية: المعادلات التفاضلية العادية الخطية وتحويل لابلاس.
- الجبر الخطي: المصفوفات والقيم الذاتية.
- الديناميكا الهوائية I وأداء الطائرات: الرفع والسحب والعزوم والطيران المنعطف.

كيف تذاكر

- ارسم محاور الجسم ومركز الثقل قبل كتابة أي معادلة عزوم.
- أبقِ الزوايا بالراديان داخل الصيغ؛ وحوّلها إلى درجات للإجابة فقط.
- افصل الاستقرار الساكن (الميل الأول بعد الاضطراب) عن الاستقرار الديناميكي (ما يحدث مع الوقت).
- ارسم الأقطاب في المستوى s لكل نظام تصادفه.
- تحقّق من كل إجابة بالحسّ الفيزيائي: الأنظمة المستقرة تستقر، وغير المستقرة تتنامى.
- حل كل تمرين على الورق قبل فتح الإجابة، وأعد الاختبارات القصيرة بعد بضعة أيام.

ماذا تحتاج

- حاسوب أو جهاز لوحي لمحاكاتي PhET المجانيتين Balancing Act وMasses and Springs.
- برنامج جداول بيانات (أي برنامج مجاني يفي بالغرض)، أو Python.
- صفحات Beginner’s Guide to Aeronautics من NASA Glenn في متصفح ويب.
- آلة حاسبة.

جدول مقترح من 15 أسبوعًا

نحو 6 إلى 9 ساعات أسبوعيًا: قراءة وتمارين، وفي أسابيع المختبر، المختبر.

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
1	المحاور والدورانات والعزوم	المحاور ومركز الثقل والعزوم؛ المختبر A	NASA Glenn
2	الاستقرار الساكن الطولي	الاستقرار الساكن الطولي	MIT 16.333
3	الموازنة والتحكم بالرافع	الموازنة والرافع؛ المختبر B	NASA Glenn
4	الاستقرار الجانبي-الاتجاهي والانعطافات	الاستقرار الجانبي-الاتجاهي والانعطافات	MIT 16.333

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
5	معادلات الحركة والأنماط الديناميكية	معادلات الحركة والتخطيط الخطي	MIT 16.333
6	معادلات الحركة والأنماط الديناميكية	الأنماط الديناميكية؛ المختبر C	MIT 16.333
7	تحويلات لابلاس ودوال النقل	دوال النقل؛ تدريب لاختبار منتصف الفصل	MIT 16.06
8	الاستجابة الزمنية من الرتبة الثانية	الاستجابة من الرتبة الثانية؛ المختبر D	MIT 16.06
9	التغذية الراجعة والتحكم PID	التغذية الراجعة وPID	MIT 16.06
10	التغذية الراجعة والتحكم PID	تصميم الطيار الآلي؛ المختبر E	MIT 16.30
11	تحليل الاستقرار: روث ومحل الجذور والهوامش	روث ومحل الجذور والهوامش	MIT 16.06
12	تحديد وضع المركبات الفضائية والتحكم فيه	ديناميكا الوضع والمستشعرات	MIT 16.30
13	تحديد وضع المركبات الفضائية والتحكم فيه	عجلات رد الفعل ومناورات الدوران؛ المختبر F	NASA Hubble
14	تحديد وضع المركبات الفضائية والتحكم فيه	الاستقلالية والاستجابة للأعطال	NASA Dragonfly
15	تحديد وضع المركبات الفضائية والتحكم فيه	المراجعة؛ تدريب للامتحان النهائي	MIT 16.06

تقدّمك

ضع علامة على الوحدات والمختبرات عند إنهائها، وخض الاختبارات. يُحفظ التقدم ونتائج الاختبارات في هذا المتصفح فقط، ولا تُرسل إلينا أبدًا.

الوحدات

المحاور والدورانات والعزوم

محاور الجسم عبر مركز الثقل، والدحرجة والانحدار والانعراج، وأسطح التحكم والعزوم التي تولّدها، وإيجاد مركز الثقل، وزوايا أويلر.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- عرّف محاور الدحرجة والانحدار والانعراج.
- حدّد مركز الثقل من كتل المكوّنات.
- احسب عزم قوة تحكم.
- طابق كل سطح تحكم مع عزمه.

المفاهيم الأساسية

- في الطيران تدور الطائرة حول مركز ثقلها (cg)، أي الموضع المتوسط لكتلتها.
- محاور الجسم: الدحرجة نحو المقدمة، والانحدار نحو طرف الجناح الأيمن، والانعراج نحو أسفل الطائرة.
- تولّد أسطح التحكم قوى ديناميكية هوائية على مسافة من مركز الثقل فتنتج عزومًا: الرافع للانحدار، والدفة للانعراج، والجنيحات للدحرجة.
- مركز ثقل عدة كتل هو x_cg = Σm_ix_i/Σm_i؛ وتحريكه يغيّر الاستقرار والتحكم.
- زوايا أويلر (الانعراج ψ، والانحدار θ، والدحرجة ϕ، بهذا الترتيب) تصف الوضع بالنسبة إلى الأرض.

المعادلات الأساسية

$$x_{cg} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}$$

```
x_cg=( m_ix_i)/( m_i)
```

مركز الثقل

$$M = Fd$$

```
M=Fd
```

عزم القوة

$$L,\ M,\ N$$

عزوم الدحرجة والانحدار والانعراج

$$\psi \to \theta \to \phi$$

ترتيب زوايا أويلر

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 1.1 قوة ذيل مقدارها 2000 N تؤثر على بعد 6 m خلف مركز الثقل (قيم نموذجية). أوجد عزم الانحدار.

1. M = 2000 × 6 = 12,000 N·m.

الإجابة: 12,000 N·m.

مثال 1.2 كتل 1000 kg عند 2 m و500 kg عند 6 m و300 kg عند 10 m من المقدمة (قيم نموذجية). أوجد مركز الثقل.

1. Σm = 1800 kg.
2. Σmx = 2000 + 3000 + 3000 = 8000 kg·m.

الإجابة: x_cg = 4.44 m.

مثال 1.3 أي سطح يُدحرج الطائرة؟

1. تنحرف الجنيحات في اتجاهين متعاكسين على كل جناح.

الإجابة: تنتج الجنيحات عزم دحرجة.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. عزم 500 N عند 4 m؟

   2000 N·m.

2. أي سطح يحرّك المقدمة يمينًا ويسارًا؟

   الدفة.

3. أضف 200 kg عند 10 m إلى المثال. ما مركز الثقل الجديد؟

   10,000/2000 = 5.0 m.

4. حول أي نقطة تدور الطائرة الورقية؟

   نقطة اللجام.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: تدور الطائرات حول مقدمتها.

في الحقيقة: تدور حول مركز الثقل.

خرافة: الرافع يُدحرج الطائرة.

في الحقيقة: بل يغيّر انحدارها.

خرافة: ترتيب زوايا أويلر لا يهم.

في الحقيقة: الدورانات غير تبديلية.

بطاقات تعليمية

cg

الموضع المتوسط للكتلة.

الدحرجة

الدوران حول محور المقدمة.

الانحدار

المقدمة إلى أعلى أو أسفل.

Yaw

المقدمة من جانب إلى آخر.

العزم

القوة × المسافة.

زوايا أويلر

ψ, θ, ϕ.

اختبار ذاتي

1. تدور الطائرات حول...

مركز الثقل

المقدمة

الذيل

طرف الجناح

مركز الثقل. NASA Glenn.

2. الدفة تولّد...

الانعراج

الدحرجة

الانحدار

رفعًا فقط

الانعراج. عزم انعراج.

3. مركز ثقل المثال...

4.44 m

6 m

2 m

10 m

.4.44 m. 8000/1800

4. يشير محور الانحدار نحو...

طرف الجناح الأيمن

المقدمة

الأسفل

الأعلى

طرف الجناح الأيمن. التعريف.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح NASA Glenn أن أسطح التحكم تولّد قوى عند مراكز ضغطها، على مسافة من مركز الثقل، فتنشئ عزومًا حول المحاور الرئيسية: الرافع للانحدار، والدفة للانعراج، والجنيحات للدحرجة. وأول طائرة أظهرت تحكمًا فعّالًا حول المحاور الثلاثة كانت طائرة الأخوين رايت الشراعية عام 1902.

وكل طائرة ركاب حديثة فعّالة وكل طائرة لرصد الأرض لا تزال تستخدم هذه العزوم الثلاثة، وغالبًا ما تُصدر أوامرها اليوم حواسيب التحكم في الطيران.

على Saving Planets: الديناميكا الهوائية 1 · الديناميكا

المصادر: NASA Glenn Beginner’s Guide: Aircraft rotations (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-rotations/) · NASA Glenn Beginner’s Guide: Center of gravity (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/center-of-gravity/)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn Beginner’s Guide: Aircraft rotations (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-rotations/): شرح مجاني من NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.333 Aircraft Stability and Control (Fall 2004) (https://ocw.mit.edu/courses/16-333-aircraft-stability-and-control-fall-2004/): محاضرات MIT مجانية.

☐ **أنهيت هذه الوحدة**

الاستقرار الساكن الطولي

معامل عزم الانحدار، ومشتقة الاستقرار C_mα، والنقطة المحايدة، والهامش الساكن، وكيف يحدد موضع مركز الثقل وحجم الذيل الاستقرار.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- اذكر شرط الاستقرار الساكن في الانحدار.
- احسب الهامش الساكن.
- اربط الهامش الساكن بـ C_mα.
- اشرح أثر تحريك مركز الثقل.

المفاهيم الأساسية

- الاستقرار الساكن هو الميل الأول بعد الاضطراب: الطائرة المستقرة سكونيًا تولّد عزمًا يعيدها.
- في الانحدار يلزم C_mα < 0: زيادة زاوية الهجوم تولّد عزمًا يخفض المقدمة.
- النقطة المحايدة هي موضع مركز الثقل الذي يكون عنده C_mα = 0.
- الهامش الساكن SM = (x_np − x_cg)/c؛ القيمة الموجبة تعني الاستقرار. وتقريبيًا C_mα = −C_Lα × SM.
- تحريك مركز الثقل إلى الخلف يقلل الاستقرار وقوى التحكم؛ وإذا أُبعد كثيرًا تصبح الطائرة غير مستقرة ما لم يثبّتها حاسوب.

المعادلات الأساسية

$$C_{m_\alpha} = \frac{\partial C_m}{\partial \alpha} < 0$$

C_m_α=(C_m)/(α)<0

الاستقرار في الانحدار

$$SM = \frac{x_{np} - x_{cg}}{\bar{c}}$$

SM=_np-x_cg c

الهامش الساكن

$$C_{m_\alpha} = -C_{L_\alpha} SM$$

C_m_α=-C_L_αSM

مشتقة الاستقرار

$$M = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S \bar{c} C_m$$

M=12ρ V^2S cC_m

عزم الانحدار

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 2.1 النقطة المحايدة عند 0.35c ومركز الثقل عند 0.25c (قيم نموذجية). أوجد الهامش الساكن.

1. SM = 0.35 − 0.25 = 0.10 (10%).

الإجابة: SM = 0.10 (10%).

مثال 2.2 مع C_Lα = 5.5 لكل راديان، أوجد C_mα.

1. C_mα = −5.5 × 0.10 = −0.55.

الإجابة: C_mα = −0.55 لكل راديان: مستقر.

مثال 2.3 انقل مركز الثقل إلى 0.30c. أوجد C_mα الجديد.

1. SM = 0.05; −5.5 × 0.05 = −0.275 لكل راديان: نصف الصلابة.

الإجابة: 0.275− لكل راديان: نصف الصلابة.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ما SM ومركز الثقل عند 0.35c؟

   0: استقرار محايد.

2. ما إشارة C_mα ومركز الثقل عند 0.40c؟

   موجبة: غير مستقر.

3. هل يحرّك ذيل أكبر النقطة المحايدة إلى الأمام أم إلى الخلف؟

   إلى الخلف، ما يرفع الهامش الساكن.

4. لماذا نطير بهوامش صغيرة؟

   سحب موازنة أقل وتحكم أخف.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الاستقرار الساكن يضمن الاستقرار الديناميكي.
في الحقيقة: إنه الميل الأول فقط.

خرافة: مركز الثقل الخلفي أكثر أمانًا دائمًا.
في الحقيقة: إنه يقلل الاستقرار.

خرافة: يجب أن يكون $C_{m\alpha}$ موجبًا.
في الحقيقة: السالب مستقر.

بطاقات تعليمية

الاستقرار الساكن

الميل الأول للعودة.

$C_{m\alpha}$

صلابة الانحدار.

النقطة المحايدة

مركز الثقل حيث $C_{m\alpha} = 0$.

الهامش الساكن

$(x_{np} - x_{cg})/\bar{c}$.

الوتر المتوسط $\bar{c}$

طول مرجعي.

الاستقرار المخفَّف

هامش صغير أو سالب بمساعدة حاسوب.

اختبار ذاتي

1. مستقر في الانحدار إذا كان $C_{m\alpha}$...

- < 0
- > 0
- $= 1$
- $= 0$
- < 0. مُعيد.

2. مثال SM...

0.10

0.35

0.25

0.60

.0.10. 0.35 – 0.25

3. النقطة المحايدة: C_mα = ...

0

1

−1

∞

0. التعريف.

4. تحريك مركز الثقل إلى الخلف...

يقلل SM

يرفع SM

لا تغيير

يضيف رفعًا

يقلل SM. يتقلص الهامش.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تفيد ناسا بأنه بعد 25 رحلة تتطابق خصائص طيران X-59 الفعلية تطابقًا وثيقًا مع المحاكاة، بما في ذلك خصائص المناورة وهامش الاستقرار، الذي تصفه ناسا بأنه مدى قرب الطائرة من فقدان الاستقرار في ظروف معينة.

صُمم شكل X-59 لتحويل دوي اختراق الصوت العالي إلى خبطة هادئة، وتأكيد هامش استقرارها في الطيران جزء من إثبات أن الطيران الأسرع من الصوت الأهدأ عملي.

على Saving Planets: الديناميكا الهوائية 1 · أداء الطائرات

المصادر: NASA: X-59 aircraft builds momentum through 25th flight (Sept. 4, 2026) (https://www.nasa.gov/blogs/quess/t/2026/09/04/nasas-x-59-aircraft-builds-momentum-through-25th-flight/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.333 Aircraft Stability and Control (Fall 2004) (https://ocw.mit.edu/courses/16-333-aircraft-stability-and-control-fall-2004/): محاضرات MIT مجانية.
- NASA Glenn Beginner’s Guide: Center of gravity (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/center-of-gravity/): شرح مجاني من NASA.

أنهيت هذه الوحدة

الموازنة والتحكم بالرافع

الموازنة بوصفها عزم انحدار صافيًا صفريًا، وفعالية الرافع، وزاوية الرافع للموازنة، والحمل السفلي للذيل وسحب الموازنة، والاستقرار مع ثبات عصا التحكم مقابل تحررها.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- اكتب شرط الموازنة.
- احسب زاوية الرافع للموازنة.
- اشرح لماذا تدفع الذيول غالبًا إلى الأسفل.
- صف سحب الموازنة.

المفاهيم الأساسية

- الموازنة تعني عزم انحدار صافيًا صفريًا: C_m = C_m0 + C_mα α + C_mδe δ_e = 0.
- فعالية الرافع C_mδe سالبة للرافع الذيلي: خفض الحافة الخلفية يخفض المقدمة.
- يؤثر رفع الرافع على مسافة من مركز الثقل، فيولّد عزمًا وتدور الطائرة حول مركز ثقلها.
- كثيرًا ما تحمل الذيول الحديثة رفعًا سالبًا لإبقاء المقدمة مرفوعة، وعلى الجناح تعويضه برفع إضافي.
- هذا الرفع الإضافي يكلّف سحبًا مستحثًا يسمى سحب الموازنة؛ والهامش الساكن الأصغر يقلله.

المعادلات الأساسية

$$C_m = C_{m_0} + C_{m_\alpha}\alpha + C_{m_{\delta_e}}\delta_e = 0$$

C_m=C_m_0+C_m_αα+C_m__e_e=0

شرط الموازنة

$$\delta_e = -\frac{C_{m_0} + C_{m_\alpha}\alpha}{C_{m_{\delta_e}}}$$

_e=-_m_0+C_m_ααC_m__e

الرافع للموازنة

$$C_L = C_{L_\alpha}\alpha$$

C_L=C_L_αα

ميل الرفع

$$L = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_L$$

L=12ρ V^2SC_L

الرفع

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 3.1 $C_{m0} = 0.05$، $C_{m\alpha} = -0.55$، $C_{m\delta e} = -1.2$ لكل راديان (قيم نموذجية). أوجد δ_e للموازنة عند $\alpha = 0.05$ rad.

1. $0.05 - 0.0275 - 1.2\delta_e = 0$.
2. $\delta_e = 0.0225/1.2$.

الإجابة: $\delta_e = 0.01875$ rad $= 1.07°$.

مثال 3.2 ما زاوية الهجوم التي توازن مع رافع صفري؟

1. $\alpha = 0.05/0.55$.

الإجابة: $\alpha = 0.0909$ rad $= 5.21°$.

مثال 3.3 أوجد C_L عند هذه الموازنة مع $C_{L\alpha} = 5.5$.

1. 0.0909×5.5.

الإجابة: $C_L = 0.50$.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ما δ_e للموازنة عند $\alpha = 0.1$ rad؟

   -0.00417 rad ($-0.24°$).

2. اصطلاح الإشارة لـ δ_e؟

   خفض الحافة الخلفية موجب.

3. لماذا يكلّف الحمل السفلي للذيل وقودًا؟

   يولّد الجناح رفعًا أكبر فيزيد السحب المستحث.

4. أين كان رافع Wright Flyer؟

   في المقدمة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الموازنة تعني الطيران الأفقي.

في الحقيقة: تعني عزمًا صافيًا صفريًا في أي حالة مستقرة.

خرافة: الذيول ترفع دائمًا إلى الأعلى.

في الحقيقة: كثير منها يدفع إلى الأسفل.

خرافة: الرافع يغيّر زاوية الانحدار فقط.

في الحقيقة: إنه يحدد زاوية الهجوم والسرعة المتوازنتين.

بطاقات تعليمية

الموازنة (Trim)

عزم صافٍ صفري.

$C_{m\delta e}$

فعالية الرافع.

الرافع

سطح التحكم في الانحدار.

الحمل السفلي للذيل

رفع سالب للذيل.

سحب الموازنة

سحب ناتج عن الموازنة.

الكنارد

سطح رافع أمامي.

اختبار ذاتي

1. الموازنة: $C_m = \dots$

0

1

C_L

$C_{m\alpha}$

0. لا عزم صافيًا.

2. δ_e في المثال...

1.07°

10°

0°

−5°

1.07°. محلول.

3. ينتج سحب الموازنة عن...

رفع إضافي للجناح

الاحتكاك فقط

المحركات

العجلات

رفع إضافي للجناح. مستحث.

4. $C_{m\delta e}$ للذيل...

سالبة

موجبة

صفر

لانهائيًا

سالبة. خفض المقدمة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح NASA Glenn أن المثبّت الأفقي في الطائرات الحديثة يُثبَّت عادةً بزاوية سالبة، فيولّد قوة إلى الأسفل تبقي الذيل منخفضًا والطائرة متوازنة، وأن هذه القوة السالبة يجب التغلب عليها برفع أكبر من الجناح.

كل رفع إضافي يزيد السحب واستهلاك الوقود، لذا فإن الموازنة الدقيقة وإدارة مركز الثقل وسيلتان صغيرتان لكن حقيقيتان لخفض انبعاثات الطيران.

على Saving Planets: أداء الطائرات · الحلول

المصادر: NASA Glenn Beginner’s Guide: Aircraft elevator interactive (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-elevator-interactive/)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn Beginner’s Guide: Aircraft elevator interactive (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-elevator-interactive/): أداة تفاعلية مجانية من ناسا.
- MIT OpenCourseWare 16.333 Aircraft Stability and Control (Fall 2004) (https://ocw.mit.edu/courses/16-333-aircraft-stability-and-control-fall-2004/): محاضرات MIT مجانية.

أنهيت هذه الوحدة

الاستقرار الجانبي-الاتجاهي والانعطافات

استقرار دوارة الريح (الاتجاهي)، وأثر الزاوية الزوجية، والتحكم في الدحرجة بالجنيحات، وتخميد الدحرجة ونمط الدحرجة، والانعراج المعاكس، والانعطاف المنسَّق.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- اذكر شرطي الاستقرار الاتجاهي واستقرار الدحرجة.
- احسب الثابت الزمني لنمط الدحرجة ومعدل الدحرجة الثابت.
- أوجد زاوية الميل ومعامل الحمل في انعطاف منسَّق.
- اشرح الانعراج المعاكس.

المفاهيم الأساسية

- الاستقرار الاتجاهي (دوارة الريح) يتطلب C_nβ > 0: الانزلاق الجانبي يعيد المقدمة نحو الريح.
- أثر الزاوية الزوجية يتطلب C_lβ < 0: الانزلاق الجانبي يُدحرج الطائرة بعيدًا عن الانزلاق.
- تنحرف الجنيحات في اتجاهين متعاكسين لتولّد عزم دحرجة؛ ويقاوم تخميد الدحرجة L_p معدل الدحرجة، فينشأ نمط الدحرجة بـ τ = 1/|L_p|.
- الجنيح النازل يولّد رفعًا وسحبًا أكبر، فينعرج بالمقدمة بعيدًا عن الانعطاف (الانعراج المعاكس)؛ والدفة تصلح ذلك.
- في انعطاف أفقي منسَّق tan ϕ = V²/(gR) ومعامل الحمل n = 1/cos ϕ.

المعادلات الأساسية

$$C_{n_\beta} > 0,\ C_{l_\beta} < 0$$

الاستقرار الجانبي-الاتجاهي

$$p_{ss} = -\frac{L_{\delta_a}}{L_p}\delta_a$$

p_ss=-__aL_p_a

معدل الدحرجة الثابت

$$\tan\phi = \frac{V^2}{gR}$$

=(V^2)/(gR)

الانعطاف المنسَّق

$$n = \frac{1}{\cos\phi}$$

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 4.1 انعطاف عند 100 m/s بنصف قطر 2000 m (قيم نموذجية). أوجد زاوية الميل.

1. $\tan\phi = 100^2/(9.80665 \times 2000) = 0.510$.

الإجابة: $\phi = 27.0^\circ$.

مثال 4.2 أوجد معامل الحمل.

1. $n = 1/\cos 27.0^\circ$.

الإجابة: $n = 1.122$.

مثال 4.3 $L_{\delta a} = 2.0\ s^{-2}$، $L_p = -4.0\ s^{-1}$ (قيم نموذجية)، $\delta_a = 0.1$ rad. أوجد τ ومعدل الدحرجة الثابت.

1. $\tau = 1/4$.
2. $p = 2.0 \times 0.1/4.0$.

الإجابة: $\tau = 0.25$ s؛ $p = 0.05$ rad/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. معامل الحمل عند ميل 60°؟

2.0.

2. نصف القطر عند 100 m/s وميل 45°؟

1020 m.

3. ماذا تفعل الزاوية الزوجية؟

تعيد الطائرة إلى الوضع الأفقي بعد انزلاق جانبي.

4. لماذا تُستخدم الدفة في الانعطاف؟

لإلغاء الانعراج المعاكس.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الجنيحات وحدها تنتج انعطافًا نظيفًا.
في الحقيقة: الانعراج المعاكس يحتاج إلى الدفة.

خرافة: زاوية الميل مستقلة عن السرعة.
في الحقيقة: تزداد مع V^2 لنصف قطر ثابت.

خرافة: يجب أن يكون $C_{n\beta}$ سالبًا.
في الحقيقة: الموجب مستقر.

بطاقات تعليمية

الانزلاق الجانبي β

زاوية الريح من الجانب.

$C_{n\beta}$

الاستقرار الاتجاهي.

$C_{l\beta}$

أثر الزاوية الزوجية.

تخميد الدحرجة

L_p.

الانعراج المعاكس

انعراج معاكس للدحرجة.

معامل الحمل

الرفع/الوزن.

اختبار ذاتي

1. مستقر كدوارة الريح إذا...

$C_{n\beta} > 0$

$C_{n\beta} < 0$

$C_{l\beta} > 0$

$L_p > 0$

$C_{n\beta} > 0$. انعراج مُعيد.

2. ميل المثال...

27.0°

45°

10°

60°

.27.0°. $\tan^{-1}$ 0.51

3. n عند ميل 60°...

2

1

1.5

3

.2. 1/cos

4. τ لنمط الدحرجة...

1/|L_p|

L_p

L_δa

2π

|L_p|/1. الرتبة الأولى.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يوضح دليل NASA Glenn أن الجنيحات تعمل عادةً بشكل متعاكس، أحدها إلى أعلى والآخر إلى أسفل، لتغيير الرفع على كل جناح، وأن الطائرات تنعطف بسبب الميل الذي تحدثه الجنيحات لا بسبب الدفة: فالميل يُميل رفع الجناح ويحني مسار الطيران.

معادلة الانعطاف في هذه الوحدة هي هذه الفكرة بالأرقام. الانعطافات المنسَّقة والفعّالة تبقي السحب الإضافي، ومن ثم استهلاك الوقود الإضافي، صغيرًا.

على Saving Planets: أداء الطائرات · الديناميكا الهوائية 1

المصادر: · NASA Glenn Beginner’s Guide: Ailerons (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ailerons/) NASA Glenn Beginner’s Guide: Aircraft rotations (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-rotations/)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn Beginner’s Guide: Ailerons (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ailerons/): شرح مجاني من NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.333 Aircraft Stability and Control (Fall 2004) (https://ocw.mit.edu/courses/16-333-aircraft-stability-and-control-fall-2004/): محاضرات MIT مجانية.

أنهيت هذه الوحدة

معادلات الحركة والأنماط الديناميكية

معادلات بست درجات حرية، والتخطيط الخطي للاضطرابات الصغيرة، وصيغة فضاء الحالة، والقيم الذاتية، وأنماط الدورة القصيرة والفوغويد والدحرجة واللولب والدحرجة الهولندية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- خطّط المعادلات حول نقطة الموازنة.
- اكتب صيغة فضاء الحالة.
- أوجد التردد الطبيعي والتخميد من معادلة مميزة.
- قدّر دورة الفوغويد.

المفاهيم الأساسية

- قوانين نيوتن في محاور الجسم تعطي ست معادلات غير خطية مترابطة؛ وللاضطرابات الصغيرة حول الموازنة تصبح خطية.
- صيغة فضاء الحالة ẋ = Ax + Bu؛ والقيم الذاتية لـ A هي الأنماط.
- الأنماط الطولية: دورة قصيرة سريعة جيدة التخميد (انحدار) وفوغويد بطيء ضعيف التخميد (تبادل السرعة والارتفاع).
- الأنماط الجانبية: نمط دحرجة سريع، ونمط لولبي بطيء، والدحرجة الهولندية المتذبذبة.
- نمط من الرتبة الثانية s² + 2ζω_n s + ω_n² له تردد طبيعي ω_n ونسبة تخميد ζ. وتقريب الفوغويد هو ω_n ≈ √2 g/V.

المعادلات الأساسية

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

x=Ax+Bu

فضاء الحالة

$$\det(sI - A) = 0$$

(sI-A)=0

المعادلة المميزة

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0$$

s^2+2ω_ns+ω_n^2=0

نمط من الرتبة الثانية

$$\omega_{ph} \approx \frac{\sqrt{2}g}{V}$$

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 5.1 نمط الدورة القصيرة له $s^2 + 2.8s + 16 = 0$ (قيم نموذجية). أوجد ω_n وζ.

1. $\omega_n = \sqrt{16}$.
2. $\zeta = 2.8/(2 \times 4)$.

الإجابة: $\omega_n = 4$ rad/s؛ $\zeta = 0.35$.

مثال 5.2 قدّر تردد الفوغويد ودورته عند 100 m/s.

1. $\omega = 1.4142 \times 9.80665/100$.
2. $T = 2\pi/\omega$.

الإجابة: $\omega = 0.1387$ rad/s؛ $T = 45.3$ s.

مثال 5.3 أوجد التردد المخمَّد للدورة القصيرة.

1. $\omega_d = 4\sqrt{(1 - 0.35^2)}$.

الإجابة: $\omega_d = 3.75$ rad/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. دورة الفوغويد عند 200 m/s؟

   90.6 s.

2. ζ لـ $s^2 + 4s + 16$؟

   0.5.

3. أي نمط يبادل السرعة بالارتفاع؟

   الفوغويد.

4. أي نمط جانبي يتذبذب؟

   الدحرجة الهولندية.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: النماذج الخطية تصلح في أي حالة.
في الحقيقة: قرب نقطة الموازنة فقط.

خرافة: كل الأنماط تتذبذب.
في الحقيقة: الدحرجة واللولب غير متذبذبين.

خرافة: الفوغويد سريع.
في الحقيقة: يستغرق عشرات الثواني.

بطاقات تعليمية

الدورة القصيرة

نمط انحدار سريع.

الفوغويد

نمط بطيء للسرعة والارتفاع.

الدحرجة الهولندية

تذبذب انعراج-دحرجة.

النمط اللولبي

تباعد أو تقارب بطيء للميل.

ω_n

التردد الطبيعي.

ζ

نسبة التخميد.

اختبار ذاتي

1. ζ في المثال...

0.35

0.7

4

2.8

.0.35. 2.8/8

2. دورة الفوغويد عند 100 m/s...

45.3 s

4.5 s

453 s

1 s

45.3 s. تقريبًا.

3. الأنماط هي...

القيم الذاتية لـ A

عناصر B

المدخلات

الكسوب

القيم الذاتية لـ A. فضاء الحالة.

4. الدورة القصيرة...

انحدار سريع

سرعة بطيئة

الدحرجة

الانعراج

انحدار سريع. التعريف.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تقول ناسا إن فريق X-59 يستخدم توأمًا رقميًا آنيًا يقارن بيانات الطيران بالتنبؤات المحاكاة، وإن الطائرة لم تُظهر ظواهر غير متوقعة مثل عدم الاستقرار أو الاهتزاز المفرط استجابةً للقوى الديناميكية الهوائية.

تفيد ناسا بأن X-59 بلغت سرعة التطواف المستهدفة Mach 1.4 (924 mph) على ارتفاع 55000 قدم في وقت مبكر نسبيًا من الاختبارات. والنماذج المبنية من المعادلات الخطية في هذه الوحدة هي ما يقارن به التوأم الرقمي.

على Saving Planets: المعادلات التفاضلية · الجبر الخطي

المصادر: NASA: X-59 aircraft builds momentum through 25th flight (Sept. 4, 2026) (https://www.nasa.gov/blogs/quess/t/2026/09/04/nasas-x-59-aircraft-builds-momentum-through-25th-flight/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.333 Aircraft Stability and Control (Fall 2004) (https://ocw.mit.edu/courses/16-333-aircraft-stability-and-control-fall-2004/): محاضرات MIT مجانية.
- MIT OpenCourseWare 16.30 Feedback Control Systems (Fall 2010) (https://ocw.mit.edu/courses/16-30-feedback-control-systems-fall-2010/): مقرر MIT مجاني.

أنهيت هذه الوحدة

تحويلات لابلاس ودوال النقل

دوال النقل، والأقطاب والأصفار، والمخططات الكتلية، وأنظمة الرتبة الأولى، والثوابت الزمنية، والكسب الساكن، ونظرية القيمة النهائية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- اكتب دالة نقل من معادلة تفاضلية عادية.
- أوجد الأقطاب والكسب الساكن والثابت الزمني.
- استخدم نظرية القيمة النهائية.
- بسّط مخططات كتلية بسيطة.

المفاهيم الأساسية

- مع شروط ابتدائية صفرية، يحوّل تحويل لابلاس المعادلة التفاضلية الخطية إلى جبر: Y(s) = G(s)U(s).
- الأقطاب (جذور المقام) تحدد الاستجابة الطبيعية؛ أقطاب نصف المستوى الأيسر تضمحل، وأقطاب نصف المستوى الأيمن تتنامى.
- نظام الرتبة الأولى K/(τs + 1) يبلغ 63.2% من قيمته النهائية عند t = τ ونحو 98% عند 4τ.
- نظرية القيمة النهائية: y(∞) = lim s→0 sY(s)، إذا كان النظام مستقرًا. ولخطوة واحدية y(∞) = G(0).
- الكتل المتسلسلة تُضرب؛ وحلقة التغذية الراجعة السالبة تعطي G/(1 + GH).

المعادلات الأساسية

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

```
G(s)=(Y(s))/(U(s))
```

دالة النقل

$$y(t) = K(1 - e^{-t/\tau})$$

```
y(t)=K(1-e^-t/τ)
```

استجابة الخطوة من الرتبة الأولى

$$y(\infty) = \lim_{s \to 0} sY(s)$$

```
y(∞)=_s0sY(s)
```

نظرية القيمة النهائية

$$T = \frac{G}{1 + GH}$$

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 6.1 أوجد القطب والثابت الزمني والكسب الساكن لـ $G(s) = 5/(s + 2)$.

1. القطب عند $s = -2$.
2. $\tau = 1/2$.
3. $G(0) = 5/2$.

الإجابة: القطب -2؛ $\tau = 0.5$ s؛ الكسب 2.5.

مثال 6.2 أوجد استجابته للخطوة الواحدية عند $t = 0.5$ s و1 s.

1. $y = 2.5(1 - e^{-2t})$.

الإجابة: $y(0.5) = 1.580$; $y(1) = 2.162$.

مثال 6.3 أغلق حلقة تغذية راجعة واحدية حول G. أوجد الكسب الساكن للحلقة المغلقة.

1. $T = 5/(s + 7)$.

الإجابة: $T(0) = 0.714$.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. زمن الاستقرار 2% لـ G؟

   نحو $4\tau = 2$ s.

2. النسبة المبلوغة عند $t = \tau$؟

   63.2%.

3. هل القطب عند $+1$ مستقر؟

   لا؛ يتنامى مثل e^{t}.

4. كتلتان 2 و$3/(s+1)$ على التسلسل؟

6/(s+1).

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: نظرية القيمة النهائية تنطبق دائمًا.
في الحقيقة: على الأنظمة المستقرة فقط.

خرافة: الأصفار تحدد الاستقرار.
في الحقيقة: الأقطاب هي التي تحدده.

خرافة: τ هو زمن الاستقرار.
في الحقيقة: زمن الاستقرار نحو 4τ.

بطاقات تعليمية

دالة النقل

المخرج/المدخل في s.

القطب

جذر المقام.

الصفر

جذر البسط.

الثابت الزمني

τ.

الكسب الساكن

G(0).

نظرية القيمة النهائية

lim sY(s).

اختبار ذاتي

1. G(0) لـ 5/(s+2)...

2.5

5

2

0.4

2.5. الكسب الساكن.

2. At t = τ...

63.2%

50%

100%

98%

.63.2%. 1 − e^{-1}

3. تقع الأقطاب المستقرة...

في نصف المستوى الأيسر

في نصف المستوى الأيمن

على المحور الحقيقي فقط

في اللانهاية

في نصف المستوى الأيسر. اضمحلال.

4. الحلقة المغلقة...

G/(1+GH)

GH

G − H

1/G

G/(1+GH). التغذية الراجعة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح ناسا أن جيروسكوبات هابل تقيس معدلات دوران التلسكوب وهي جزء من النظام الذي يحدد ويتحكم في الاتجاه الذي يشير إليه التلسكوب.

مستشعرات كهذه هي كتل القياس في مخططات هذه الوحدة: لا يمكن للمتحكم أن يكون أفضل من المعدلات والزوايا التي يقيسها.

على Saving Planets: المعادلات التفاضلية · رصد الأرض

المصادر: NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (June 4, 2024) (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.06 Principles of Automatic Control (Fall 2012) (https://ocw.mit.edu/courses/16-06-principles-of-automatic-control-fall-2012/): محاضرات MIT مجانية.
- MIT OpenCourseWare 16.30 Feedback Control Systems (Fall 2010) (https://ocw.mit.edu/courses/16-30-feedback-control-systems-fall-2010/): مقرر MIT مجاني.

شاهد المحاضرة

Lecture 6 laplace transform (https://ocw.mit.edu/courses/6-003-signals-and-systems-fall-2011/resources/lecture-6-laplace-transform/) (باللغة الإنجليزية)

MIT 6.003 Signals and Systems (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. الترخيص: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · شروط الاستخدام (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

أنهيت هذه الوحدة

الاستجابة الزمنية من الرتبة الثانية

استجابة الخطوة دون الحرجة، والتجاوز، وزمن الذروة، وزمن الاستقرار، ونسبة التخميد والتردد الطبيعي، وأهداف خصائص المناورة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب نسبة التجاوز المئوية من ζ.
- احسب زمني الذروة والاستقرار.
- اقرأ ζ وω_n من مواقع الأقطاب.
- اختر التخميد لاستجابة جيدة.

المفاهيم الأساسية

- الأقطاب عند −ζω_n ± jω_n√(1 − ζ²) مع 0 < ζ < 1 تعطي استجابة متذبذبة تضمحل.
- نسبة التجاوز المئوية تعتمد على ζ فقط: M_p = exp(−ζπ/√(1 − ζ²)).
- زمن الذروة t_p = π/ω_d، مع ω_d = ω_n√(1 − ζ²).
- زمن الاستقرار (2%) نحو t_s = 4/(ζω_n)، ويحدده الجزء الحقيقي للأقطاب.
- تخميد قرب 0.7 يعطي تجاوزًا صغيرًا (نحو 4.6%) مع صعود سريع؛ والطيارون لا يحبون الاستجابات البطيئة ولا المتذبذبة.

المعادلات الأساسية

$$M_p = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}$$

M_p=e^-π/1-^2

التجاوز

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}}$$

t_p=πω_n1-^2

زمن الذروة

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta\omega_n}$$

زمن الاستقرار

$$s = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

s=-ω_n jω_n1-^2

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 7.1 للدورة القصيرة في الوحدة 5 ($\omega_n = 4$، $\zeta = 0.35$)، أوجد التجاوز.

1. $M_p = \exp(-0.35\pi/\sqrt{1 - 0.1225})$.

الإجابة: 30.9%.

مثال 7.2 أوجد زمني الذروة والاستقرار لها.

1. $t_p = \pi/3.747$.
2. $t_s = 4/(0.35 \times 4)$.

الإجابة: $t_p = 0.838$ s; $t_s = 2.86$ s.

مثال 7.3 أوجد التجاوز عند $\zeta = 0.7$.

1. $\exp(-0.7\pi/\sqrt{0.51})$.

الإجابة: 4.6%.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. التجاوز عند $\zeta = 0.25$؟

   44.4%.

2. الأقطاب عند $\omega_n = 4$، $\zeta = 0.35$؟

   $-1.4 \pm 3.75j$.

3. التجاوز عند $\zeta = 1$؟

   لا شيء (تخميد حرج).

4. ما الذي يحدد زمن الاستقرار؟

   الجزء الحقيقي $\zeta\omega_n$.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: المزيد من التخميد أفضل دائمًا.
في الحقيقة: الإفراط فيه يجعل الاستجابة بطيئة.

خرافة: التجاوز يعتمد على ω_n.
في الحقيقة: على ζ فقط.

خرافة: زمن الذروة يستخدم ω_n.
في الحقيقة: بل يستخدم ω_d.

بطاقات تعليمية

التجاوز

الذروة فوق القيمة النهائية.

زمن الذروة

π/ω_d.

زمن الاستقرار

≈4/(ζω_n).

ω_d

التردد المخمَّد.

التخميد الحرج

ζ = 1.

خصائص المناورة

مدى سهولة قيادة الطيارين لمركبة.

اختبار ذاتي

1. M_p عند ζ = 0.35...

30.9%

4.6%

50%

0%

30.9%. صيغة.

2. $t_s \approx$ ...

$4/(\zeta\omega_n)$

π/ω_n

ζ/ω_n

$1/\omega_n$

$4/(\zeta\omega_n)$. قاعدة 2%.

3. التجاوز عند $\zeta = 0.7$...

4.6%

30%

0%

70%

4.6%. صيغة.

4. يعتمد التجاوز على...

ζ فقط

ω_n فقط

الكسب

المدخل

ζ فقط. صيغة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تفيد ناسا بأن المهندسين أجروا بين رحلات اختبار X-59 تعديلات طفيفة على برمجيات التحكم في الطائرة، وأن خصائص طيرانها، أي قابليتها للتحكم، طابقت المحاكاة بدقة.

ضبط سرعة الاستجابة والتخميد، وهما كميتا هذه الوحدة، هو الطريقة التي تحوّل بها برمجيات التحكم شكلًا جذريًا للطيران الأسرع من الصوت الهادئ إلى طائرة يصفها الطيارون بأنها «مثيرة لكن بلا مفاجآت».

على Saving Planets: المعادلات التفاضلية · أداء الطائرات

المصادر: NASA: X-59 aircraft builds momentum through 25th flight (Sept. 4, 2026) (https://www.nasa.gov/blogs/quess/t/2026/09/04/nasas-x-59-aircraft-builds-momentum-through-25th-flight)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.06 Principles of Automatic Control (Fall 2012) (https://ocw.mit.edu/courses/16-06-principles-of-automatic-control-fall-2012/): محاضرات MIT مجانية.
- PhET: Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs): تذبذب مخمَّد.

شاهد المحاضرة

Lecture 11 continuous time ct frequency response and bode plot (https://ocw.mit.edu/courses/6-003-signals-and-systems-fall-2011/resources/lecture-11-continuous-time-ct-frequency-response-and-bode-plot/) (باللغة الإنجليزية)

MIT 6.003 Signals and Systems (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. الترخيص: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · شروط الاستخدام (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

☐ **أنهيت هذه الوحدة**

التغذية الراجعة والتحكم PID

لماذا التغذية الراجعة، والفعل التناسبي والتكاملي والتفاضلي، وخطأ الحالة المستقرة ونوع النظام، واختيار الكسب للتخميد، ومثال طيار آلي لوضع الانحدار.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- أغلق حلقة وأوجد المعادلة المميزة.
- اختر كسبًا لتخميد مستهدف.
- احسب خطأ الحالة المستقرة.
- اشرح ما يضيفه الحدّان D وا.

المفاهيم الأساسية

- تقارن التغذية الراجعة المخرج المقيس بالأمر وتعمل على الخطأ، فتقلل الحساسية للاضطرابات وأخطاء النموذج.
- الكسب التناسبي يسرّع الاستجابة لكنه قد يقلل التخميد؛ والفعل التفاضلي يضيف تخميدًا؛ والفعل التكاملي يزيل خطأ الحالة المستقرة.
- لمنظومة 1/(s(s + 2)) بكسب K، الحلقة المغلقة هي s² + 2s + K = 0، إذن ω_n = √K و ζ = 1/√K.
- نوع النظام (المكاملات في الحلقة) يحدد خطأ الحالة المستقرة: حلقة من النوع 1 لها خطأ خطوة صفري وخطأ منحدر a/K لهذه المنظومة.
- PID: u = K_p e + K_i∫e dt + K_d de/dt.

المعادلات الأساسية

$$u = K_p e + K_i \int e\,dt + K_d \dot{e}$$

u=K_pe+K_i e dt+K_d e

قانون PID

$$1 + KG(s) = 0$$

1+KG(s)=0

المعادلة المميزة للحلقة المغلقة

$$s^2 + (2 + K_d)s + K_p = 0$$

s^2+(2+K_d)s+K_p=0

PD على 1/(s(s+2))

$$e_{ss,ramp} = \frac{2}{K}$$

`e_ss,ramp=2/K`

خطأ المنحدر (هذه المنظومة)

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 8.1 مع K = 16 على 1/(s(s + 2))، أوجد ω_n وζ.

1. $s^2 + 2s + 16$.
2. $\omega_n = 4;\ \zeta = 2/8$.

الإجابة: $\omega_n = 4$ rad/s؛ $\zeta = 0.25$ (تجاوز 44%).

مثال 8.2 ما K الذي يعطي ζ = 0.7؟

1. $2\zeta\omega_n = 2 \Rightarrow \omega_n = 1/0.7 = 1.429$.
2. $K = \omega_n^2$.

الإجابة: K = 2.04 (استجابة أبطأ).

مثال 8.3 أبقِ $K_p = 16$ وأضف كسبًا تفاضليًا لـ ζ = 0.7.

1. $2 + K_d = 2 \times 0.7 \times 4$.

الإجابة: $K_d = 3.6$: سريع وجيد التخميد.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. خطأ المنحدر مع K = 16؟

   0.125.

2. خطأ الخطوة لهذه الحلقة من النوع 1؟

   صفر.

3. ماذا يصلح الفعل التكاملي؟

   خطأ الحالة المستقرة.

4. خطر الكسب التفاضلي المفرط؟

تضخيم الضوضاء.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الكسب الأعلى يساعد دائمًا.
في الحقيقة: قد يقلل التخميد والهوامش.

خرافة: التفاضلي يزيل الخطأ.
في الحقيقة: التكاملي هو الذي يزيله.

خرافة: التغذية الراجعة تحتاج إلى نموذج مثالي.
في الحقيقة: إنها تتحمل أخطاء النموذج.

بطاقات تعليمية

التغذية الراجعة

العمل على الخطأ المقيس.

K_p

الكسب التناسبي.

K_i

الكسب التكاملي.

K_d

الكسب التفاضلي.

نوع النظام

عدد المكاملات في الحلقة.

خطأ الحالة المستقرة

الخطأ بعد العابرات.

اختبار ذاتي

1. ζ مع K = 16 ...

0.25

0.7

4

1

0.25. 1/√K.

2. الفعل التكاملي...

يزيل الخطأ الثابت

يضيف تخميدًا

يضيف ضوضاء فقط

لا شيء

يزيل الخطأ الثابت. PID.

3. K_d لـ $\zeta = 0.7$ عند $K_p = 16$...

3.6

16

0.7

2

3.6. محلول.

4. خطأ المنحدر $K = 16$...

0.125

0

1

2

$2/K$. 0.125.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تفيد ناسا بأن دراغونفلاي أكملت مؤخرًا أشمل «رحلة أولى» محاكاة لها على إلكترونيات طيران مماثلة للطيران في Johns Hopkins APL، ببرمجيات طيران تستخدم بيانات محاكاة من كاميرا الملاحة ووحدة القياس بالقصور الذاتي والليدار؛ ومن المقرر أن

تصل الطائرة المروحية إلى تيتان، قمر زحل، عام 2034.

يشير مسؤول التنقل في ناسا إلى أن كل ما تفعله دراغونفلاي على تيتان يجب أن يتم ذاتيًا، دون مساعدة آنية من الأرض. والتغذية الراجعة بالحلقة المغلقة مثل التي في هذه الوحدة هي ما يجعل ذلك ممكنًا.

على Saving Planets: الحلول · ميكانيكا المدارات

المصادر: 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/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.06 Principles of Automatic Control (Fall 2012) (https://ocw.mit.edu/courses/16-06-principles-of-automatic-control-fall-2012/): محاضرات MIT مجانية.
- MIT OpenCourseWare 16.30 Feedback Control Systems (Fall 2010) (https://ocw.mit.edu/courses/16-30-feedback-control-systems-fall-2010/): مقرر MIT مجاني.

شاهد المحاضرة

Lecture 10 feedback and control (https://ocw.mit.edu/courses/6-003-signals-and-systems-fall-2011/resources/lecture-10-feedback-and-control/) (باللغة الإنجليزية)

MIT 6.003 Signals and Systems (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. الترخيص: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · شروط الاستخدام (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

أنهيت هذه الوحدة

تحليل الاستقرار: روث ومحل الجذور والهوامش

اختبار روث-هورفيتز، ورسم محل الجذور، والاستجابة الترددية ومخططات بود، وهامشا الكسب والطور، والعلاقة بين هامش الطور والتخميد.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- طبّق اختبار روث لإيجاد حد الكسب.
- ارسم كيف تتحرك الأقطاب مع الكسب.
- احسب هامش طور.
- اربط هامش الطور بالتخميد.

المفاهيم الأساسية

- يحدد روث-هورفيتز عدد الأقطاب في نصف المستوى الأيمن دون حل كثيرة الحدود.
- يبيّن محل الجذور مسارات أقطاب الحلقة المغلقة مع ارتفاع الكسب من 0 إلى ∞.
- تبيّن مخططات بود كسب الحلقة وطورها مقابل التردد؛ وهامشا الكسب والطور يقيسان البعد عن عدم الاستقرار.
- هامش الطور PM = 180° + ∠G(jω_c) عند تردد العبور حيث |G| = 1.
- قاعدة تقريبية لحلقات الرتبة الثانية: ζ ≈ PM/100 (PM بالدرجات).

المعادلات الأساسية

$$s^3 + 6s^2 + 11s + (6 + K) = 0$$

```
s^3+6s^2+11s+(6+K)=0
```

مثال على معادلة مميزة

$$66 > 6 + K$$

شرط روث

$$PM = 180^\circ + \angle G(j\omega_c)$$

```
PM=180^+ G(jω_c)
```

هامش الطور

$$\zeta \approx PM/100$$

قاعدة تقريبية

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 9.1 تغذية راجعة واحدية حول $K/((s+1)(s+2)(s+3))$. أوجد حد K.

1. المميزة: $s^3 + 6s^2 + 11s + 6 + K$.
2. روث: $11 \times 6 > 6 + K$.

الإجابة: مستقر عند $K < 60$.

مثال 9.2 عند $K = 60$، بأي تردد يتذبذب؟

1. المساعدة $6s^2 + 66 = 0$.

الإجابة: $\omega = \sqrt{11} = 3.317$ rad/s.

مثال 9.3 أوجد هامش الطور لـ $16/(s(s+2))$.

1. $|G| = 1$ عند $\omega_c = 3.758$ rad/s.
2. $PM = 90° - \tan^{-1}(3.758/2)$.

الإجابة: $PM = 28.0°$، إذن $\zeta \approx 0.28$ (القيمة الدقيقة 0.25).

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. هل $K = 30$ مستقر في المثال؟

   Yes.

2. هامش الكسب عند $K = 30$؟

   2 (60/30).

3. ماذا يحدث لمحل الجذور عندما $K \to \infty$ هنا؟

   يعبر فرعان إلى نصف المستوى الأيمن.

4. الهدف المعتاد لـ PM؟

   نحو 45°–60°.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الاستقرار عند كسب واحد يعني الاستقرار عند الجميع.
في الحقيقة: حدود الكسب شائعة.

خرافة: يقاس هامش الطور عند عبور °180.
في الحقيقة: عند عبور الكسب.

خرافة: روث يعطي مواقع الأقطاب.
في الحقيقة: يعدّها فقط.

بطاقات تعليمية

اختبار روث

يعدّ أقطاب نصف المستوى الأيمن.

محل الجذور

مسارات الأقطاب مع الكسب.

مخطط بود

الكسب والطور مقابل التردد.

هامش الكسب

عامل الكسب حتى عدم الاستقرار.

هامش الطور

الطور حتى عدم الاستقرار.

العبور

.|G| = 1.

اختبار ذاتي

1. مثال حد K…

60

6

11

66

60. روث.

2. التذبذب عند K = 60…

3.317 rad/s

6 rad/s

1 rad/s

60 rad/s

√11 rad/s. .3.317

3. مثال PM…

28°

45°

90°

0°

28°. محلول.

4. ζ ≈ …

PM/100

PM

1/PM

GM

PM/100. القاعدة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تقول ناسا إن مهندسي دراغونفلاي سيختبرون مسارات طيران أخرى ويُدخلون أعطالًا عمدًا للتأكد من أن الطائرة المروحية تستطيع الاستجابة ذاتيًا إذا حدث خلل.

الهوامش هي جواب الهندسة عن «ماذا لو»: الحلقة ذات هامشي كسب وطور جيدين تواصل العمل حين تتقادم القطع أو تنجرف المستشعرات أو تفاجئها البيئة.

على Saving Planets: الجبر الخطي · الحلول

المصادر: 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/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.06 Principles of Automatic Control (Fall 2012) (https://ocw.mit.edu/courses/16-06-principles-of-automatic-control-fall-2012/): محاضرات MIT مجانية.
- MIT OpenCourseWare 16.30 Feedback Control Systems (Fall 2010) (https://ocw.mit.edu/courses/16-30-feedback-control-systems-fall-2010/): مقرر MIT مجاني.

أنهيت هذه الوحدة

تحديد وضع المركبات الفضائية والتحكم فيه

دوران الأجسام الصلبة، ومستشعرات الوضع (الجيروسكوبات ومتتبعات النجوم)، وعجلات رد الفعل والزخم، ومناورات الدوران بنمط تشغيل-إيقاف، والأنماط الآمنة، والتوجيه لعلوم الأرض والفضاء.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- استخدم τ = Iα لمناورات الدوران حول محور واحد.
- احسب مناورة دوران بأقل زمن.
- احسب زخم العجلة.
- اشرح دور الجيروسكوبات والأنماط الآمنة.

المفاهيم الأساسية

- الدوران حول محور واحد: العزم τ = Iα؛ والزخم الزاوي H = Iω.
- مناورة تشغيل-إيقاف تتسارع لنصف الزاوية وتكبح للنصف الآخر: t = 2√(θ/α).
- عجلات رد الفعل تتبادل الزخم مع المركبة؛ وهي تتشبع ويجب تفريغها بالدوافع أو بعزّامات مغناطيسية.
- الجيروسكوبات تقيس المعدلات ومتتبعات النجوم تقيس الوضع؛ والمرشحات تدمجها.
- الأنماط الآمنة تضع المركبة الفضائية في وضع بسيط موجب الطاقة حين يبدو أن شيئًا ما خطأ.

المعادلات الأساسية

$$\tau = I\alpha$$

قانون نيوتن للدوران

$$t = 2\sqrt{\theta/\alpha}$$

زمن مناورة تشغيل-إيقاف

$$H = I\omega$$

كمية الحركة الزاوية

$$\omega_{max} = \alpha t/2$$

```
ω_max=α t/2
```

أقصى معدل دوران

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 10.1 مركبة فضائية بـ $I = 1000\ \text{kg·m}^2$ لديها $0.5\ \text{N·m}$ من عزم العجلات (قيم نموذجية). أوجد α وزمن مناورة $90°$.

1. $\alpha = 0.5/1000 = 5 \times 10^{-4}\ \text{rad/s}^2$.
2. $t = 2\sqrt{(1.5708/0.0005)}$.

الإجابة: $t = 112.1\ \text{s}$.

مثال 10.2 أوجد أقصى معدل خلال تلك المناورة.

1. $\omega = 0.0005 \times 112.1/2$.

الإجابة: $0.0280\ \text{rad/s}$ ($1.61°/\text{s}$).

مثال 10.3 عجلة بـ $I = 0.1\ \text{kg·m}^2$ تدور عند $600\ \text{rad/s}$ (قيم نموذجية). أوجد زخمها.

1. $H = 0.1 \times 600$.

الإجابة: $60\ \text{N·m·s}$.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. زمن مناورة $45°$؟

   $79.3\ \text{s}$.

2. الزمن اللازم لـ $0.5\ \text{N·m}$ لبناء $60\ \text{N·m·s}$؟

   $120\ \text{s}$.

3. ماذا تقيس الجيروسكوبات؟

   معدلات الدوران.

4. لماذا تُفرَّغ العجلات؟

   لأنها تتشبع عند السرعة القصوى.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: زمن المناورة يتناسب مع الزاوية.

في الحقيقة: يتناسب مع θv في نمط تشغيل-إيقاف.

خرافة: العجلات تضيف زخمًا إلى ما لا نهاية.

في الحقيقة: إنها تتشبع.

خرافة: الجيروسكوبات تعطي الوضع المطلق.

في الحقيقة: تعطي المعدلات؛ ومتتبعات النجوم تعطي الوضع.

بطاقات تعليمية

عجلة رد الفعل

مشغّل لتبادل الزخم.

متتبع النجوم

الوضع من النجوم.

الجيروسكوب

مستشعر معدل.

تشغيل-إيقاف

عزم كامل ثم عكس كامل.

التشبع

عجلة عند السرعة القصوى.

النمط الآمن

حالة احتياطية حامية.

اختبار ذاتي

1. مثال مناورة 90°…

112.1 s

11 s

1000 s

56 s

.112.1 s. 2√(θ/α)

2. H = …

Iω

Iα

τt²

m v

Iω. الزخم.

3. مثال H للعجلة...

60 N·m·s

6

600

0.1

60 N·m·s. 0.1 × 600.

4. يتوجّه هابل الآن باستخدام...

جيروسكوب واحد

ستة جيروسكوبات

بلا جيروسكوبات

الدوافع فقط

جيروسكوب واحد. NASA 2024.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

أعلنت ناسا في يونيو 2024 أن هابل سينتقل إلى العمل بجيروسكوب واحد مع إبقاء آخر احتياطيًا، بعد أن بدأ أحد الجيروسكوبات «يتشبع» (أي يقرأ أقصى معدل دوران بغض النظر عن الحركة الفعلية) وأدخل التلسكوب مرارًا في النمط الآمن. وقالت ناسا إن معظم الأرصاد لن تتأثر، مع مناورات أطول ومرونة توجيه أقل وعدم تتبع الأجسام المتحركة الأقرب من المريخ.

والأفكار نفسها في التحكم بالوضع توجّه أقمار رصد الأرض مثل GOES-19 وLandsat نحو الكوكب الذي تقيسه.

على GOES-19: Saving Planets · ميكانيكا المدارات

المصادر: NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (June 4, 2024) (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.30 Feedback Control Systems (Fall 2010) (https://ocw.mit.edu/courses/16-30-feedback-control-systems-fall-2010/): مقرر MIT مجاني.
- NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (June 4, 2024) (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/): مقال من ناسا.

أنهيت هذه الوحدة

مجموعات المسائل

هذه التمارين داخل كل وحدة. حلّها على الورق أولًا، ثم افتح الإجابة.

1. المحاور والدورانات والعزوم
   4 مسائل
2. الاستقرار الساكن الطولي
   4 مسائل
3. الموازنة والتحكم بالرافع
   4 مسائل
4. الاستقرار الجانبي-الاتجاهي والانعطافات
   4 مسائل
5. معادلات الحركة والأنماط الديناميكية
   4 مسائل
6. تحويلات لابلاس ودوال النقل
   4 مسائل
7. الاستجابة الزمنية من الرتبة الثانية
   4 مسائل
8. التغذية الراجعة والتحكم PID
   4 مسائل
9. تحليل الاستقرار: روث ومحل الجذور والهوامش
   4 مسائل
10. تحديد وضع المركبات الفضائية والتحكم فيه
    4 مسائل

المختبر (Flight dynamics and controls lab)

المختبر هو الجزء العملي من المقرر. وهو هنا مجاني وللتدريب فقط، دون ساعات معتمدة.

كل مختبر يُجرى في محاكاة مجانية أو جدول بيانات، فلا توجد مخاطر مادية. لا تبنِ طائرات مسيّرة أو نماذج ولا تطيّرها لهذا المقرر. خذ استراحات من الشاشة، واجلس بوضعية سليمة، وأبعد الكابلات عن الممرات.

مرجع السلامة: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

المختبر A: موازنة العزوم وإيجاد مركز الثقل

الأسبوع 1

الهدف: وازن كتلًا على لوح في PhET Balancing Act، ثم احسب مركز ثقل بأسلوب الطائرات في جدول بيانات.

$$x_{cg} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}$$

```
x_cg=( m_ix_i)/( m_i)
```

مركز الثقل

الإجراء

1. في PhET Balancing Act، ضع 10 kg عند 1 m على جانب وأوجد أين توازنها 5 kg.
2. سجّل العزم = الكتلة × المسافة على كل جانب.
3. في جدول بيانات، أدرج كتل ومسافات الوحدة 1 واحسب x_cg.
4. أضف 200 kg عند 10 m وأعد الحساب.

جدول البيانات

الحالة	Σm (kg)	x_cg (m)
الأساس	1800	4.44
+200 kg عند 10 m	2000	5.00

قيم نموذجية محسوبة.

مثال حسابي

1. 8000/1800 = 4.44 m.
2. 10,000/2000 = 5.00 m.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يصلح أي متصفح وجدول بيانات.

PhET: Balancing Act (https://phet.colorado.edu/en/simulations/balancing-act) · NASA Glenn Beginner’s Guide: Center of gravity (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/center-of-gravity/)

الصلة بالكوكب: NASA Glenn: في الطيران تدور الطائرات والصواريخ حول مراكز ثقلها. NASA Glenn Beginner’s Guide: Center of gravity (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/center-of-gravity/)

- [ ] أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)

المختبر B: الهامش الساكن ومسح الموازنة

الأسبوع 3

الهدف: غيّر موضع مركز الثقل واحسب الهامش الساكن وC_mα وزاوية الموازنة مع رافع صفري.

$$\alpha_{trim} = \frac{C_{m_0}}{C_{L_\alpha} SM}$$

α_trim=_m_0C_L_αSM

زاوية الموازنة مع رافع صفري

الإجراء

1. استخدم x̄_np = 0.35c، C_Lα = 5.5 /rad، C_m0 = 0.05 (قيم نموذجية).
2. غيّر x_cg من 0.20 إلى 0.40 c.
3. احسب SM وC_mα وα_trim.
4. لاحظ ما يحدث عند النقطة المحايدة وما بعدها.

جدول البيانات

x̄_cg/c	SM	C_mα (/rad)	α_trim (rad)
0.20	0.15	−0.825	0.0606
0.25	0.10	−0.55	0.0909
0.30	0.05	−0.275	0.182

قيم نموذجية محسوبة؛ لا توجد موازنة مستقرة عند النقطة المحايدة أو خلفها.

مثال حسابي

1. C_mα = −5.5 × 0.15 = −0.825.
2. α = 0.05/0.275 = 0.182 rad.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

NASA Glenn Beginner’s Guide: Aircraft elevator interactive (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-elevator-interactive/)

الصلة بالكوكب: تفيد ناسا بأن هامش استقرار X-59 طابق التنبؤات في الطيران. NASA: X-59 aircraft builds momentum through 25th flight (Sept. 4, 2026) (https://www.nasa.gov/blogs/quesst/2026/09/04/nasas-x-59-aircraft-builds-momentum-through-25th-flight/)

- [ ] **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر C: التذبذب المخمَّد بوصفه نمطًا من الرتبة الثانية

الأسبوع 6

الهدف: راقب تذبذبًا مخمَّدًا في PhET Masses and Springs وقارنه بصيغ الرتبة الثانية.

$$\omega_n = \sqrt{k/m},\ \zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

ω_n=/m,\ =2

كتلة-نابض-مخمِّد

الإجراء

1. في PhET Masses and Springs، علّق كتلة وأضف بعض التخميد واسحبها إلى الأسفل.
2. وقّت عدة دورات وقدّر الدورة والاضمحلال.
3. في جدول بيانات، احسب ω_n وζ والدورة والتجاوز لـ m = 0.5 kg، k = 20 N/m، c = 1 N·s/m (قيم نموذجية).
4. اشرح كيف يطابق ذلك نمط الدورة القصيرة.

جدول البيانات

الكمية	القيمة
ω_n	6.32 rad/s
ζ	0.158
الدورة المخمَّدة	1.006 s
التجاوز	60.5%

قيم نموذجية محسوبة؛ ستختلف قراءات المحاكاة.

مثال حسابي

1. ω_n = √40 = 6.32.
2. ζ = 1/(2√10) = 0.158.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يصلح أي متصفح وجدول بيانات.

PhET: Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs)

الصلة بالكوكب: تقول ناسا إن X-59 لم تُظهر عدم استقرار غير متوقع أو اهتزازًا مفرطًا. NASA: X-59 aircraft builds momentum through 25th flight (Sept. 4, 2026) (https://www.nasa.gov/blogs/quesst/2026/09/04/nasas-x-59-aircraft-builds-momentum-through-25th-flight/)

- [ ] **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر D: استجابات الخطوة بالتقدم الزمني

الأسبوع 8

الهدف: حاكِ استجابات الخطوة من الرتبتين الأولى والثانية بخطوات أويلر صغيرة وقارنها بالصيغ.

$$x_{k+1} = x_k + \Delta t\, \dot{x}_k$$

```
x_k+1=x_k+Δ t x_k
```

خطوة أويلر

الإجراء

1. حاكِ ẏ = −2y + 5 بدءًا من y = 0 مع Δt = 0.001 s.
2. حاكِ ÿ + 2.8ẏ + 16y = 16 بدءًا من السكون.
3. أوجد y(0.5) للأولى، والذروة وزمن الذروة للثانية.
4. قارن بالصيغ الدقيقة.

جدول البيانات

الكمية	التامة
الرتبة الأولى y(0.5)	1.580
ذروة الرتبة الثانية	1.309
زمن الذروة	0.838 s
الاستقرار (2%)	2.86 s

قيم محسوبة؛ الخطوات الصغيرة تتطابق بدقة.

مثال حسابي

1. $2.5(1 - e^{-1}) = 1.580$.
2. $1 + 0.309 = 1.309$.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يصلح أي جدول بيانات أو Python.

MIT OpenCourseWare 16.06 Principles of Automatic Control (Fall 2012) (https://ocw.mit.edu/courses/16-06-pr/inciples-of-automatic-control-fall-2012/)

الصلة بالكوكب: يقارن فريق X-59 في ناسا بيانات الطيران بتوأم رقمي آني. NASA: X-59 aircraft builds momentum through 25th flight (Sept. 4, 2026) (https://www.nasa.gov/blogs/quesst/2026/09/04/nasas-x-59-aircraft-builds-momen/tum-through-25th-flight)

- [ ] **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر E: ضبط طيار آلي لوضع الانحدار

الأسبوع 10

الهدف: قارن بالمحاكاة بين التحكم P وPD للمنظومة 1/(s(s + 2)).

$$s^2 + (2 + K_d)s + K_p = 0$$

```
s^2+(2+K_d)s+K_p=0
```

حلقة مغلقة مع PD

الإجراء

1. حاكِ θ̈ + 2θ̇ = u مع u = K_p(θ_cmd − θ) − K_dθ̇.
2. جرّب K_p = 16، K_d = 0؛ ثم K_p = 2.04؛ ثم K_p = 16، K_d = 3.6.
3. سجّل التجاوز وزمن الاستقرار.
4. اختر أفضل تصميم واشرح السبب.

جدول البيانات

التصميم	التجاوز	الاستقرار (s)
K_p = 16	44.4%	4.0
K_p = 2.04	4.6%	4.0
K_p = 16, K_d = 3.6	4.6%	1.43

محسوب من صيغ الرتبة الثانية.

مثال حسابي

1. ζ = 0.25 ⇒ 44.4%; t_s = 4/(0.25 × 4) = 4.0 s.
2. PD: t_s = 4/(0.7 × 4) = 1.43 s.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يصلح أي جدول بيانات أو Python.

MIT OpenCourseWare 16.30 Feedback Control Systems (Fall 2010) (https://ocw.mit.edu/courses/16-30-feedback-control-systems-fall-2010/)

الصلة بالكوكب: ناسا: يجب أن تطير دراغونفلاي ذاتيًا على تيتان دون مساعدة آنية من الأرض. 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/)

- [ ] **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر F: مخطّط مناورات بعجلات رد الفعل

الأسبوع 13

الهدف: خطّط مناورات تشغيل-إيقاف لمركبة فضائية وتحقق من أقصى المعدلات وزخم العجلات.

$$t = 2\sqrt{\theta/\alpha}$$

زمن مناورة تشغيل-إيقاف

الإجراء

1. اضبط I = 1000 kg·m² وτ = 0.5 N·m (قيم نموذجية).
2. احسب أزمنة المناورة لـ 30° و90° و180°.
3. احسب أقصى معدل والزخم الذي يجب أن تمتصه العجلات.
4. ناقش كيف سيغيّر فقدان مستشعر التخطيط.

جدول البيانات

المناورة	الزمن (s)
30°	64.7
90°	112.1
180°	158.5

قيم نموذجية محسوبة.

مثال حسابي

1. t = 2√(0.5236/0.0005) = 64.7 s.
2. t = 2√(3.1416/0.0005) = 158.5 s.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (June 4, 2024) (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/)

الصلة بالكوكب: ناسا: في نمط الجيروسكوب الواحد يحتاج هابل إلى وقت أطول للدوران والتثبت على الأهداف. NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (June 4, 2024) (https://science.nasa.gov/missions/hu

bble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

مجموعات تدريب للامتحان

وقّت نفسك: نحو 10 دقائق لكل مسألة. ثم قارن بالحلول الكاملة.

مجموعة تمارين منتصف الفصل (الوحدات 5–1)

1. كتل 600 kg عند 3 m و400 kg عند 8 m. أوجد مركز الثقل.

   1. (1800 + 3200)/1000.

   الإجابة: 5.0 m.

2. $\bar{x}_{np} = 0.40c$، $\bar{x}_{cg} = 0.28c$، $C_{L\alpha} = 5$ /rad. أوجد SM و$C_{m\alpha}$.

   1. $SM = 0.12$.
   2. 0.12×-5.

   الإجابة: $SM = 0.12$؛ $C_{m\alpha} = -0.60$ /rad.

3. $C_{m0} = 0.04$، $C_{m\alpha} = -0.6$، $C_{m\delta e} = -1.0$. أوجد δ_e للموازنة عند $\alpha = 0.05$ rad.

   1. $0.04 - 0.03 - \delta_e = 0$.

   الإجابة: $\delta_e = 0.01$ rad (0.57°).

4. زاوية الميل لانعطاف بنصف قطر 1500 m عند 80 m/s؟

   1. $\tan\phi = 6400/14710$.

   الإجابة: 23.5°.

5. أوجد ω_n وζ لـ $s^2 + 3s + 25$.

   1. $\omega_n = 5;\ \zeta = 3/10$.

   الإجابة: $\omega_n = 5$ rad/s؛ $\zeta = 0.3$.

مجموعة التدريب النهائية (الوحدات 10–1)

1. استجابة الخطوة لـ $4/(s + 4)$ عند $t = 0.25$ s؟

   1. $1 - e^{-1}$.

   الإجابة: 0.632.

2. التجاوز وزمن الاستقرار لـ $\omega_n = 5$، $\zeta = 0.3$؟

.1 $\exp(-0.3\pi/\sqrt{0.91})$.
.2 4/1.5.

الإجابة: 37.2%؛ 2.67 s.

3. K على $1/(s(s+4))$ لـ $\zeta = 0.5$؟

.1 $\omega_n = 4 \Rightarrow 2\zeta\omega_n = 4$.

الإجابة: $K = 16$.

4. أقصى K لـ $s^3 + 3s^2 + 2s + K$؟

.1 $K < 2 \times 3$.

الإجابة: $K < 6$.

5. زمن مناورة 60° مع $\alpha = 0.001$ rad/s²؟

.1 $2\sqrt{(1.0472/0.001)}$.

الإجابة: 64.7 s.

6. زخم عجلة 0.05 kg·m² عند 400 rad/s؟

.1 400×0.05.

الإجابة: 20 N·m·s.

ورقة الصيغ

$$x_{cg} = \sum m_i x_i / \sum m_i,\ M = Fd$$

$$SM = (x_{np} - x_{cg})/\bar{c},\ C_{m_\alpha} = -C_{L_\alpha} SM$$

$$\delta_e = -(C_{m_0} + C_{m_\alpha}\alpha)/C_{m_{\delta_e}}$$

$$\tan\phi = V^2/(gR),\ n = 1/\cos\phi,\ \tau_r = 1/|L_p|$$

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2,\ \omega_{ph} \approx \sqrt{2}g/V$$

$$y = K(1 - e^{-t/\tau}),\ y(\infty) = G(0)$$

$$M_p = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}},\ t_p = \pi/\omega_d,\ t_s \approx 4/(\zeta\omega_n)$$

$$u = K_p e + K_i \int e + K_d \dot{e},\ T = G/(1 + GH)$$

$$PM = 180^\circ + \angle G(j\omega_c),\ \zeta \approx PM/100$$

$$\tau = I\alpha,\ H = I\omega,\ t = 2\sqrt{\theta/\alpha}$$

الثوابت

الثابت	القيمة
الجاذبية المعيارية	$g_0 = 9.80665\ m/s^2$
1 راديان	57.2958°
1 ft	0.3048 m
قاعدة زمن الاستقرار (مرجعية)	$t_s \approx 4/(\zeta\omega_n)$ لاستقرار 2%
خطوة الرتبة الأولى	$t = \tau$ عند 63.2% من القيمة النهائية
كثافة الهواء عند مستوى سطح البحر (الغلاف الجوي القياسي)	$1.225\ kg/m^3$

المصدر: NIST Guide to the SI, Appendix B.9: conversion factors (https://www.nist.gov/pml/special-publication-811/nist-guide-si-appendix-b-conversion-factors/nist-guide-si-appendix-b9)

نصوص ومحاكاة مجانية

استخدم هذه المحاضرات المجانية وأدلة NASA والمحاكاة إلى جانب المقرر.

- MIT OpenCourseWare 16.333 Aircraft Stability and Control (Fall 2004) (https://ocw.mit.edu/courses/16-333-aircraft-stability-and-control-fall-2004/): محاضرات MIT مجانية في الاستقرار والتحكم.
- MIT OpenCourseWare 16.06 Principles of Automatic Control (Fall 2012) (https://ocw.mit.edu/courses/16-06-principles-of-automatic-control-fall-2012/): محاضرات ومسائل MIT مجانية في التحكم.
- MIT OpenCourseWare 16.30 Feedback Control Systems (Fall 2010) (https://ocw.mit.edu/courses/16-30-feedback-control-systems-fall-2010/): مقرر MIT مجاني في التحكم بالتغذية الراجعة.
- NASA Glenn Beginner’s Guide: Aircraft rotations (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-rotations/): شرح مجاني من NASA.
- NASA Glenn Beginner’s Guide: Center of gravity (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/center-of-gravity/): شرح مجاني من NASA.
- PhET: Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs): التذبذب المخمَّد بشكل تفاعلي.

مسرد المصطلحات

الجنيح
سطح التحكم في الدحرجة.

مركز الثقل
الموضع المتوسط للكتلة.

نسبة التخميد
ζ، مدى سرعة اضمحلال التذبذبات.

الدحرجة الهولندية
تذبذب مترابط انعراج-دحرجة.

الرافع

سطح التحكم في الانحدار.

هامش الكسب
زيادة الكسب حتى عدم الاستقرار.

الجيروسكوب
مستشعر يقيس معدل الدوران.

التردد الطبيعي
ω_n لنمط غير مخمَّد.

النقطة المحايدة
موضع مركز الثقل ذو الاستقرار المحايد في الانحدار.

التجاوز
الذروة فوق القيمة النهائية.

متحكم PID
تحكم تناسبي-تكاملي-تفاضلي.

هامش الطور
تأخر طور إضافي حتى عدم الاستقرار.

الفوغويد
نمط بطيء للسرعة والارتفاع.

عجلة رد الفعل
عجلة دوّارة للتحكم في الوضع.

محل الجذور
مسارات أقطاب الحلقة المغلقة مع الكسب.

الدفة
سطح التحكم في الانعراج.

الدورة القصيرة
نمط انحدار سريع.

الهامش الساكن
المسافة من مركز الثقل إلى النقطة المحايدة مقسومة على الوتر.

دالة النقل
المخرج على المدخل في مجال لابلاس.

الموازنة (Trim)
عزم صافٍ صفري.

معايير التقييم الذاتي

لا تُمنح درجة ولا ساعات معتمدة. استخدم هذا لتقيّم بصدق أين أنت في كل وحدة.

المستوى	كيف يبدو
4 · إتقان	يرسم المحاور والمخططات الكتلية، ويختار النموذج الصحيح، ويتحقق من الأقطاب والتخميد والهوامش، ويشرح مقايضات المناورة والسلامة بلغة واضحة.
3 · متمكن	يحل مسائل التدريب مع هفوات عرضية في الإشارات أو الوحدات.
2 · قيد التطور	يتبع الأمثلة المحلولة لكنه يخلط بين الاستقرار الساكن والديناميكي، أو بين ω_n وω_d.
1 · مبتدئ	يعوّض الأرقام في الصيغ دون مخطط؛ ويحتاج إلى مراجعة الوحدة.

الأوزان المقترحة إذا أردت درجة

الجزء	الوزن
تمارين	20%
المختبرات	25%
مجموعة تدريب منتصف الفصل	25%
مجموعة التدريب النهائية	30%

استهدف المستوى 3 أو أعلى في كل وحدة قبل الانتقال إلى الدورة التالية.

دورات ذات صلة

- الدفع AERO 410
- تصميم المركبات الفضائية AERO 430
- انتقال الحرارة AERO 440
- كل الدورات