Контрольна Робота. Частина #1

Захаров Дмитро

12 вересня, 2024

Умова

Задана наступна динамічна система:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_1 - 2x_2 - u, \\ \dot{x}_2 = 2x_1 - 4x_2 + 4u \end{cases}$$

1. Для заданої системи перевірити умову Калмана.
2. Для заданої системи перевірити, що не існує власного вектору матриці A^*, ортогонального усім стовпцям матриці B.
3. Знайти матрицю керованості N і довести, що вона додатно визначена або має обернену.
4. Знайти керування, яке переводить систему з точки[1] $\mathbf{x}_0 = (-2, 0)$ у точку $\mathbf{x}_T = \mathbf{0}$ за заданий час $T = 4$.
5. Побудувати чисельно траєкторію як параметрично задану функцію.

Розв'язання

Пункт 1

Для цього і наступних пунктів перепишемо нашу систему у більш стандартному для нас вигляді. Отже, нехай $\mathbf{x} := (x_1, x_2)$. Тоді наша система має вигляд:

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + B\mathbf{u}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ 2 & -4 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -1 \\ 4 \end{bmatrix}$$

Для перевірки умови Калмана, складемо матрицю Калмана:

$$K = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix},$$

проте в нашому випадку все дуже просто, оскільки $n = 2$, і тому $K = \begin{bmatrix} B & AB \end{bmatrix}$. Добуток AB знайти дуже просто:

$$AB = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ 2 & -4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \cdot (-1) + (-2) \cdot 4 \\ 2 \cdot (-1) + (-4) \cdot 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9 \\ -18 \end{bmatrix}$$

[1] Під позначенням $(x_1, \dots, x_n)$ надалі розуміємо матрицю-колонку $[x_1, \dots, x_n]^\top$.

Тому наша матриця має вигляд:

$$K = \begin{bmatrix} -1 & -9 \\ 4 & -18 \end{bmatrix}$$

Тепер власне згадаємо, навіщо нам ця матриця. Критерій Калмана стверджує, що система є повністю керованою на $[0, T]$ тоді і тільки тоді, коли $\operatorname{rank}(K) = n$ ($n = 2$ в нашому випадку). В цілому, це вже видно з самої матриці K, проте давайте все ж таки це покажемо формально. Для цього достатньо довести лінійну незалежність, скажімо, стовпців матриці. Отже, розглядаємо лінійну комбінацію $\alpha(-1, 4) + \beta(-9, -18) = (-\alpha - 9\beta, 4\alpha - 18\beta)$. Це дорівнює нулю тоді, коли $\alpha = -9\beta$ (щоб занулити першу компоненту) і тоді для другої компоненти $(-36 - 18)\beta = -54\beta = 0$, звідки $\alpha = \beta = 0$. Отже, стовпці матриці K лінійно незалежні, що дає $\operatorname{rank}(K) = 2$, і тому система є повністю керованою.

Пункт 2

Спочатку знайдемо A^*:

$$A^* = A^\top = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -2 & -4 \end{bmatrix}$$

Щоб знайти власні вектори цієї матриці, спочатку знайдемо власні числа з характеристичного рівняння. Для цього розглядаємо характеристичний поліном:

$$\chi_{A^*}(\lambda) = \det(A^* - \lambda E_{2\times 2}) = \det \begin{bmatrix} 1-\lambda & 2 \\ -2 & -4-\lambda \end{bmatrix} = \lambda(\lambda + 3)$$

Звідси одразу власні значення $\lambda_1 = 0$ і $\lambda_2 = -3$. Тепер знаходимо власні вектори. Для цього розглядаємо рівняння $A^*\mathbf{v} = \lambda_j \mathbf{v}$, $j \in \{1, 2\}$. Маємо:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -2 & -4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad \text{звідки} \quad \begin{cases} v_1 + 2v_2 = 0, \\ -2v_1 - 4v_2 = 0 \end{cases}$$

Тому якщо покладемо $v_2 := t$, то $v_1 = -2t$ і тому маємо множину власних векторів $(-2, 1)t$. Далі, для $\lambda_2 = -3$ маємо:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -2 & -4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = -3 \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad \text{звідки} \quad \begin{cases} v_1 + 2v_2 = -3v_1, \\ -2v_1 - 4v_2 = -3v_2 \end{cases}$$

Достатньо розглянути перше рівняння (оскільки друге є однаковим), звідки $2v_1 + v_2 = 0$ і тому поклавши $v_1 := u$, маємо $v_2 = -2u$. Звідси маємо інший набір векторів $(1, -2)u$.

Отже, підсумовуючи, маємо два сімейства власних векторів (що відповідають, відповідно, власним числам $\lambda_1 = 0$ і $\lambda_2 = -3$):

$$\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} -2t \\ t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} u \\ -2u \end{bmatrix}, \quad t, u \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$$

Нагадаємо, що у нас $B = (-1, 4)$, і нам потрібно показати, що він не ортогональний усім власним векторам. Для цього достатньо показати, що скалярні добутки $\langle B, \mathbf{v}_1 \rangle \neq 0$ і $\langle B, \mathbf{v}_2 \rangle \neq 0$. Дійсно, маємо:

$$\langle B, \mathbf{v}_1 \rangle = (-1)(-2t) + 4t = 2t + 4t = 6t \neq 0,$$
$$\langle B, \mathbf{v}_2 \rangle = (-1)u + 4(-2u) = -u - 8u = -9u \neq 0$$

Отже, B не ортогональний усім власним векторам матриці A^*.

Пункт 3

Нагадаємо, що матриця керованості визначається як

$$N(T) = \int_0^T U(t)U^*(t)dt, \; U(t) = e^{-At}B$$

Зазначимо, що рахувати таку матрицю буде теоретично дуже муторно. Ми це зробимо, бо там є цікаві моменти, але далі ми наведемо програму, яка це зробить чисельно. Так чи інакше, починаємо ми з теоретичного розрахунку.

Знаходження матричної експоненти. Отже, спочатку нам потрібно знайти $\exp(-At)$. Для цього діагоналізуємо матрицю A (ми це можемо зробити, оскільки $\lambda_1 \neq \lambda_2$):

$$A = T\Lambda T^{-1}, \quad \Lambda = \begin{bmatrix} -3 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad P^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 2 & -1 \end{bmatrix}$$

В такому разі маємо:

$$e^{-At} = e^{-T\Lambda T^{-1}t} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-T\Lambda T^{-1}t)^k}{k!} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k t^k (T\Lambda T^{-1})^k}{k!}$$

Тепер помічаємо, що $(T\Lambda T^{-1})^k = T\Lambda^k T^{-1}$ і тому

$$e^{-At} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k t^k T\Lambda^k T^{-1}}{k!} = T\left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k t^k \Lambda^k}{k!}\right)T^{-1}$$

Сума в дужках рахується тепер дуже просто:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k t^k \Lambda^k}{k!} = E_{2\times 2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k t^k}{k!}\begin{bmatrix} (-3)^k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{3^k t^k}{k!} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{3t} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Отже, маємо:

$$e^{-At} = T\begin{bmatrix} e^{3t} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}T^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e^{3t} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 2 & -1 \end{bmatrix} = -\frac{1}{3}e^{3t}A + F,$$

де $F = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 4 & -2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}$. Можна помітити, що $F = \frac{A}{3} + E_{2\times 2}$, тому остаточно:

$$\boxed{e^{-At} = \frac{A}{3}(1 - e^{3t}) + E_{2\times 2}}$$

Інтегрування. Тепер, множимо це на вектор B, щоб отримати $U(t)$:

$$U(t) = e^{-At}B = \frac{AB}{3}(1 - e^{3t}) + B$$

Транспонуємо це, щоб отримати $U^*(t)$:

$$U^*(t) = U^\top = \frac{B^\top A^\top}{3}(1 - e^{3t}) + B^\top$$

Отже, тепер можемо знайти матрицю керованості:

$$N(T) = \int_0^T U(t)U^*(t)dt = \int_0^T \left(\frac{AB}{3}(1-e^{3t})+B\right)\left(\frac{B^\top A^\top}{3}(1-e^{3t})+B^\top\right)dt$$

Далі пропоную просто розкрити дужки:

$$N(T) = \int_0^T \left(\frac{ABB^\top A^\top}{9}(1-e^{3t})^2 + \frac{ABB^\top}{3}(1-e^{3t}) + \frac{BB^\top A^\top}{3}(1-e^{3t}) + BB^\top\right)dt$$

Оскільки $T=4$, то інтеграл виходить так собі через доданки з e^{3t}. А саме:

$$\gamma := \int_0^T \frac{1-e^{3t}}{3} = \frac{13-e^{12}}{9} \approx -6.027\times 10^3,$$

$$\delta := \int_0^T \frac{(1-e^{3t})^2}{9} = \frac{e^{24}-4e^{12}+27}{54} \approx 4.905\times 10^8$$

В такому разі маємо:

$$N(T) = ABB^\top A^\top\delta + ABB^\top\gamma + BB^\top A^\top\gamma + 4BB^\top$$

Цей вираз дуже неприємний. Але, можна скористатися тим, що δ на 5 порядків більший за γ та значно більший за коефіцієнти всіх матриць. Тому, наближено (ми це потім чисельно перевіримо), можна вважати

$$N(T) \approx \hat{N}(T) = ABB^\top A^\top\delta = \delta VV^\top \text{ для } V = AB$$

Матриця $VV^\top$ є додатно визначеною[2], тому і $\hat{N}(T)$ додатно визначена. Звичайно, строго кажучи, звідси не випливає, що і $N(T)$ є додатно визначеною, тому давайте проведемо все те саме, але чисельно.

Чисельний розрахунок. Для цього скористаємося наступним кодом:

```
A = {{1, -2}, {2, -4}};
B = {{-1}, {4}};
t1 = 4;
U[t_] = MatrixExp[-A*t].B;
ControlMatrix[T_] = Integrate[U[t].Transpose[U[t]], {t, 0, T}];
```

Тут через t1 ми позначили час $T=4$. Тепер можемо знайти $N(T)$ для $T=4$:

```
N[ControlMatrix[t1]]

> {{3.97324*10^10, 7.94657*10^10}, {7.94657*10^10, 1.58933*10^11}}
```

Також, одразу можемо порівняти з нашою оцінкою $\hat{N}(T)$:

```
d[T_] = Integrate[(1-Exp[3*t])^2/9, {t, 0, T}];
PredictedControlMatrix[T_] = d[T]*A.B.Transpose[B].Transpose[A];
N[PredictedControlMatrix[t1]]

> {{3.97327*10^10, 7.94654*10^10}, {7.94654*10^10, 1.58931*10^11}}
```

[2]взагалі кажучи, напівдодатно визначеною, але в нашому випадку вона додатно визначена.

Для цікавості, можемо вивести відносне відхилення. Для цього покладемо це відхилення як $\varepsilon := \|N - \hat{N}\|/\|N\|$. Тоді матимемо:

```
e = N[Norm[ControlMatrix[t1]-PredictedControlMatrix[t1]] /
 ↪ Norm[ControlMatrix[t1]]]

> 0.0000132869
```

Як бачимо, воно доволі мале. Тепер щоб показати, що матриця $N(T)$ має обернену, можемо використати наступний код:

```
InverseControlMatrix[T_] = Inverse[ControlMatrix[T]];
N[InverseControlMatrix[t1]]

> {{0.033333, -0.0166663}, {-0.0166663, 0.00833304}}
```

На здивування, доволі простий вираз. Отже матриця керованості дійсно має обернену. Окрім того, додатну визначеність можемо побачити з критерію Сильвестра. Дійсно, верхній лівий елемент та визначник додатний. Це можна побачити з наступного коду:

```
D1 = N[ControlMatrix[t1][[1]][[1]]];
D2 = N[Det[ControlMatrix[t1]]];
positiveDefinite = (D1 > 0) && (D2 > 0)

> True
```

Пункт 4

Для знаходження керування, яке переводить систему з точки $\mathbf{x}_0 = (-2, 0)$ у точку $\mathbf{x}_T = \mathbf{0}$ за час $T = 4$, можемо скористатися формулою:

$$\mathbf{u}(t) = U^*(t)N^{-1}(T)\left(e^{-AT}\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_0\right)$$

Оскільки в нас $\mathbf{x}_T = \mathbf{0}$, то це спрощується до

$$\mathbf{u}(t) = -U^*(t)N^{-1}(T)\mathbf{x}_0$$

Вирази страшні, тому рахуємо чисельно:

```
x0 = {{-2}, {0}};
u[t_] = -Transpose[U[t]].InverseControlMatrix[t1].x0;
u[t_] = Simplify[u[t][[1]][[1]]];
```

Якщо вивести $u(t)$, то вийде вираз $u(t) = \alpha(\beta - 30e^{3t} + 6e^{3(4+t)})$ для $\alpha \approx 2.51 \times 10^{-12}, \beta \approx -7.95 \times 10^{10}$, але звичайно, що аналітично це тягати ми не будемо.

Пункт 5

Тепер наш порахований $u(t)$ підставимо у систему рівнянь, щоб отримати траєкторію. Для цього скористаємося наступним кодом:

```
solution = DSolve[{x1'[t] == x1[t] - 2*x2[t] - u[t], x2'[t] == 2*x1[t] - 4*x2[t] + 4*u[t], x1[0] == -2, x2[0] == 0}, {x1[t], x2[t]}, t];
x1[t_] = solution[[1]][[1]][[2]];
x2[t_] = solution[[1]][[2]][[2]];
```

Результативні аналітичні функції $x_1(t), x_2(t)$ дуже об'ємні, але наведені у прикріпленому коді. Тепер давайте побудуємо графік траєкторії:

```
trajectory[t_] = Evaluate[{x1[t], x2[t]} /. solution];

Show[
    ParametricPlot[trajectory[t], {t, 0, 4}, PlotStyle -> Directive[Blue, Thickness[0.005]]] /. Line[x_] :> {Arrowheads[{0., 0.05, 0.05, 0.05, 0.}], Arrow[x]},
    ListPlot[{Labeled[{-2, 0}, "x_0"], Labeled[{0, 0}, "x_T"]},
    PlotStyle -> Directive[Blue, PointSize[0.02]],
    LabelStyle -> {20, Bold}],
    GridLines -> Automatic,
    ImageSize -> 600,
    AxesLabel -> {"x_1", "x_2"},
    LabelStyle -> {14, FontFamily},
    AxesStyle -> Arrowheads[{0.0, 0.05}],
    PlotRange -> {{-2.5, 0.5}, {-1.5, 0.5}}
]
```

Отримуємо Рисунок 1.

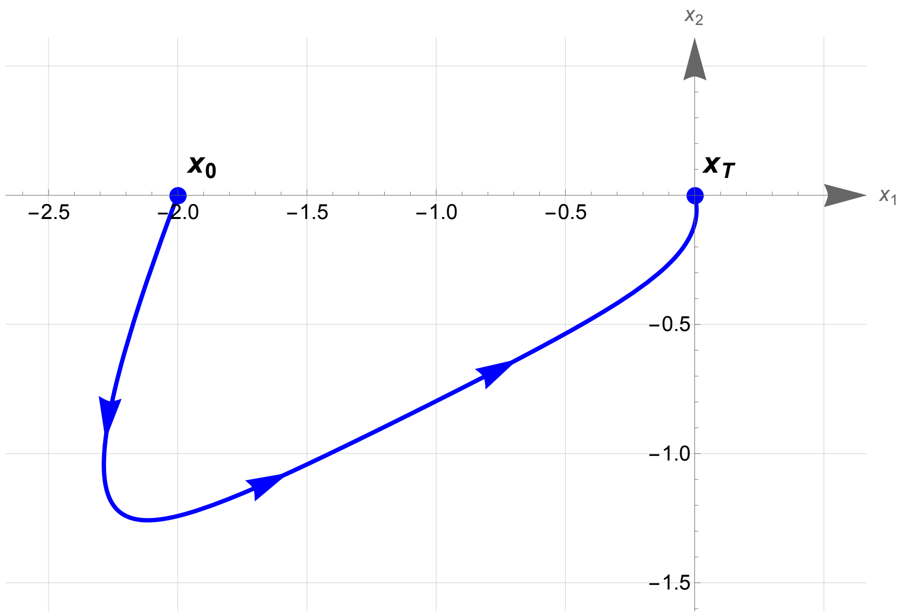

Рис. 1: Траєкторія системи