

# Linjära system av differentialekvationer

## 1 Inledning

Vi har redan i förra läsperioden sett på allmänna system av differentialekvationer med begynnelsevillkor

$$\begin{cases} \mathbf{u}'(t) = \mathbf{f}(t, \mathbf{u}(t)), & a \leq t \leq b \\ \mathbf{u}(a) = \mathbf{u}_a \end{cases}$$

Vi har också lärt oss att lösa dem i MATLAB med Euler framåtmetoden eller t.ex. `ode45`. I den här laborationen kommer vi se på allmänna *linjära system* av differentialekvationer

$$\begin{cases} \mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t), & a \leq t \leq b \\ \mathbf{u}(a) = \mathbf{u}_a \end{cases} \quad (1)$$

där  $\mathbf{A}$  är en konstant  $n \times n$ -matris. Sambandet mellan  $\mathbf{f}$  och matrisen  $\mathbf{A}$  ges av

$$\mathbf{f}(t, \mathbf{u}) = \mathbf{A}\mathbf{u}$$

Det är enkelt att lösa system (1) numeriskt i MATLAB enligt

```
>> f=@(t,u)A*u  
>> [t,U]=ode45(f,[a,b],ua)
```

Till skillnad från de flesta icke-linjära system så kan vi lösa de linjära analytiskt (dvs. exakt) med *egenvärdesmetoden*, se Lay kapitel 5.7.

## 2 Riktningsfält och fasporträtt

För att få en lite bättre uppfattning av vilka egenskaper systemet (1) har så skall vi titta närmare på högerledet:  $\mathbf{f}(\mathbf{u}) = \mathbf{A}\mathbf{u}$ . Funktionen  $\mathbf{f}$  är exempel på en vektorvärd funktion och kallas *vektorfält* (dessa kommer att studeras mer i kursen i flervariabelanalys).

För varje initialvärde till (1) så har vi en (okänd) lösning  $\mathbf{u}(t)$ . Från differentialekvationen har vi

$$\mathbf{u}' = \mathbf{A}\mathbf{u} = \mathbf{f}(\mathbf{u}) \quad (2)$$

Vektorfältet  $\mathbf{f}$  ger oss i varje punkt  $\mathbf{u}$  den riktning i vilken lösningen förändras och dess längd ger förändringstakten. Genom att i ett lämpligt antal punkter  $\mathbf{u}$  markera styrka och riktning för vektorn  $\mathbf{f}(\mathbf{u})$  med en pil så får vi ett *riktningsfält*.

Genom att rita upp detta riktningsfält får vi ungefärlig information om hur lösningen  $\mathbf{u}(t)$  till ekvationen beter sig för samtliga möjliga startvärden. Vi kan alltså skapa kurvan  $\mathbf{u}(t)$  genom att sätta pennan på den startpunkt  $\mathbf{u}_a$  vi önskar och sedan följa pilarna.

För att rita vektorfält i planet använder vi kommandot `quiver`. Men först måste vi skapa ett gitter (grid) med de punkter i vilka vi vill sätta ut pilar (som beskriver vektorfältets storlek och riktning i respektive punkt).

Som exempel tar vi (från laboration 4, förra läsperioden): Volterra-Lotka-ekvationerna  $\mathbf{u}'(t) = \mathbf{f}(\mathbf{u}(t))$  med

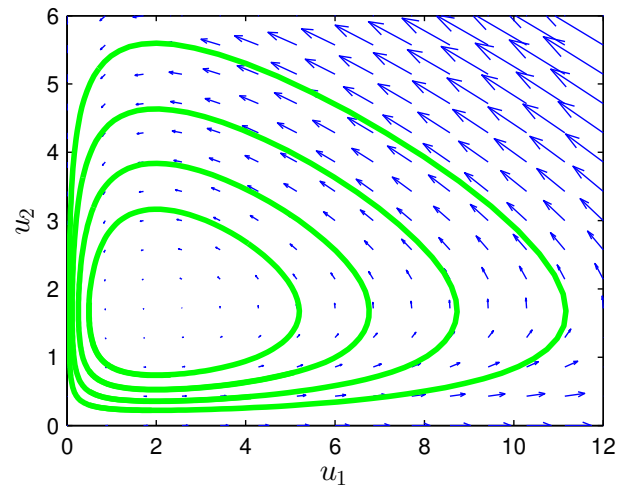
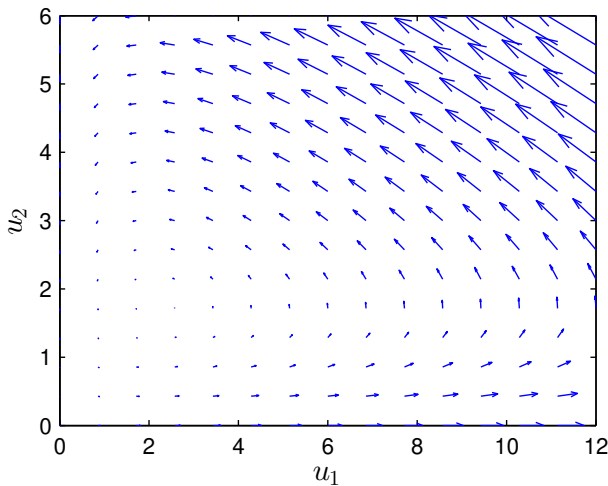
$$\mathbf{f}(\mathbf{u}(t)) = \begin{bmatrix} a u_1(t) - b u_1(t) u_2(t) \\ -c u_2(t) + d u_1(t) u_2(t) \end{bmatrix}$$

där  $a, b, c, d$  är konstanter.

Vi ritar riktningsfältet enligt

```
>> a=0.5; b=0.3; c=0.2; d=0.1;
>> u1=linspace(0,12,15); u2=linspace(0,6,15);
>> [U1,U2]=meshgrid(u1,u2);
>> f1=@(u1,u2)a*u1-b*u1.*u2; f2=@(u1,u2)-c*u2+d*u1.*u2;
>> s=2;          % s - skalfaktor som förlänger pilarna.
>> quiver(U1,U2,f1(U1,U2),f2(U1,U2),s)
>> axis([0 12 0 6]), hold on
```

och får en bild där pilarnas riktning visar fältets riktning.



Vi kan också lägga till några *strömlinjer* (lösningbanor) med funktionen `streamline`, som bygger på approximationen

$$\mathbf{u}(t+h) \approx \mathbf{u}(t) + h\mathbf{f}(\mathbf{u}(t))$$

vilket vi känner igen som Euler framåtmetoden på systemet (2). Vi väljer dock att följa noggrannare med `ode45` enligt

```
>> f=@(t,u)[f1(u(1),u(2)); f2(u(1),u(2))];
>> T=30; tspan=linspace(0,T,200);
>> U0=[2.0;0.3];
>> [t,U]=ode45(f,tspan,U0);
>> plot(U(:,1),U(:,2),'g','LineWidth',2)
```

Vi löser för några ytterligare startvärden och får figuren ovan till höger.

Tidigare har vi främst ritat ut graferna för koordinatfunktionerna  $u_1(t)$  och  $u_2(t)$ , men det är också naturligt att visualisera lösningen i ett så kallat *fasporträtt* där vi ritar  $u_1(t)$  mot  $u_2(t)$ . Det blir extra intressant att rita in en sådan kurva (bana) i ett riktningsfält.

Som exempel på ett linjärt system tar vi (Lay, Exempel 2, kapitel 5.7)

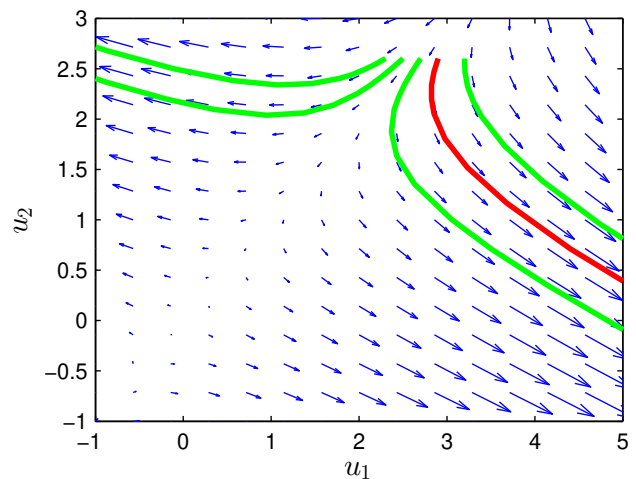
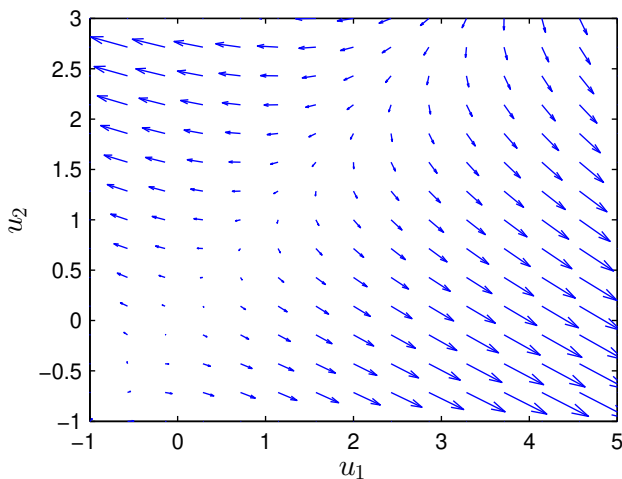
$$\begin{cases} \mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t), & 0 \leq t \leq T \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \end{cases}$$

där

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 4 & -5 \\ -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} 2.9 \\ 2.6 \end{bmatrix}$$

Vi ritar riktningsfältet

```
>> A=[4 -5;-2 1];
>> u1=linspace(-1,5,20);u2=linspace(-1,3,20);
>> [U1,U2]=meshgrid(u1,u2);
>> F1=A(1,1)*U1+A(1,2)*U2;
>> F2=A(2,1)*U1+A(2,2)*U2;
>> quiver(U1,U2,F1,F2,1.5)
>> axis([-1 5 -1 3]), hold on
```



En (numerisk) lösning får vi enligt följande:

```
>> f=@(t,u)A*u;
>> u0=[2.9;2.6];
>> [t,U]=ode45(f,[0 5],u0);
>> plot(U(:,1),U(:,2),'r','LineWidth',2)
```

Vi ser hur lösningen  $\mathbf{u}(t)$  följer fältets riktning i figuren ovan till höger. Där har vi även ritat ut lösningar för några andra begynnelsevillkor.

**Uppgift 1.** Betrakta begynnelsevärdesproblemet:

$$\begin{cases} \mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t), & 0 \leq t \leq T \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \end{cases}$$

Rita riktningsfält och fasporträtt då

$$(a). \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ 3 & -4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} -3 \\ 5 \end{bmatrix} \text{ och } \mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} 3 \\ -5 \end{bmatrix}, \quad T = 5.$$

$$(b). \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ -3 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.1 \end{bmatrix}, \quad T = 7.$$

### 3 Egenvärdesmetoden

Antag att  $\mathbf{A}$  är en diagonaliserbar  $2 \times 2$ -matris med en bas av egenvektorer  $\mathbf{v}_1$  och  $\mathbf{v}_2$  och med tillhörande egenvärden  $\lambda_1$  respektive  $\lambda_2$ . Då ges lösningen till

$$\begin{cases} \mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t), & 0 \leq t \leq T \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \end{cases}$$

av formeln

$$\mathbf{u}(t) = c_1 \mathbf{v}_1 \exp(\lambda_1 t) + c_2 \mathbf{v}_2 \exp(\lambda_2 t),$$

där koefficienterna  $c_1$  och  $c_2$  bestäms av startvärdena  $\mathbf{u}_0$ .

Vi sätter  $t = 0$  och får

$$\mathbf{u}(0) = c_1 \mathbf{v}_1 + c_2 \mathbf{v}_2 = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2] \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}.$$

Detta visar att

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \mathbf{V}^{-1} \mathbf{u}_0, \quad (\mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0),$$

där matrisen  $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2]$  (kolonnerna är egenvektorerna till matrisen  $\mathbf{A}$ ).

Som exempel ser vi åter på

$$\begin{cases} \mathbf{u}' = \mathbf{A}\mathbf{u}, & 0 \leq t \leq T \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \end{cases}$$

där

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 4 & -5 \\ -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} 2.9 \\ 2.6 \end{bmatrix}$$

Med MATLAB löser vi egenvärdesproblemet och ritar lösning enligt

```
>> A=[4 -5;-2 1]; u0=[2.9;2.6]; T=10;
>> [V,D]=eig(A)
>> t=linspace(0,T);
>> c=V\u0;
>> U=c(1)*V(:,1)*exp(D(1,1)*t)+c(2)*V(:,2)*exp(D(2,2)*t);
>> plot(U(1,:),U(2,:), 'r')
```

Vi beräknar alla egenvärden och egenvektorer med `eig` enligt `[V,D]=eig(A)`. Egenvärdena för matrisen  $\mathbf{A}$  hamnar längs diagonalen i  $\mathbf{D}$  och egenvektorerna blir kolonner i  $\mathbf{V}$ .

Lägg märke till hur vi bygger upp  $\mathbf{U}$ , vektorn  $\mathbf{t}$  är en radvektor och t.ex.  $\mathbf{V}(:,1)$  är en kolonn så att  $\mathbf{V}(:,1) \cdot \exp(\mathbf{D}(1,1) \cdot \mathbf{t})$  blir en matris. Längs första raden i  $\mathbf{U}$ , dvs.  $\mathbf{U}(1,:)$ , kommer  $u_1(t)$ -värden finnas för de olika  $t$ -värden i vektorn  $\mathbf{t}$  och på andra raden, dvs.  $\mathbf{U}(2,:)$ , finner vi motsvarande  $u_2(t)$ -värden.

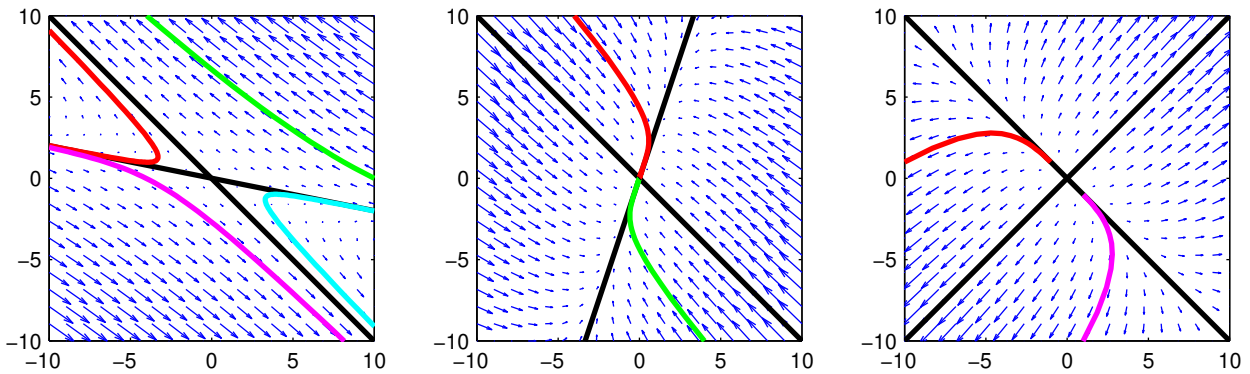
**Uppgift 2.** Undersök systemet  $\mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t)$  för matriserna  $\mathbf{A}$  nedan. Rita i samma graf egenvektorerna till  $\mathbf{A}$  och jämför riktningfältets egenskaper med egenvektorerna och motsvarande egenvärden. Förklara sambandet mellan riktningfältet och matrisens egenvärden och egenvektorer.

Matriserna nedan har reella egenvärden. När utgör origo en *källa* (alla lösningar strömmar från origo), en *sänka* (alla lösningar strömmar till origo) eller en *sadelpunkt* (lösningarna går mot origo men avviker sedan)?

Rita också lösningen till differentialekvationen för några startvärden som ni hittar på själva. Använd ett lagom långt  $t$ -intervall.

$$(a). \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2 & -5 \\ 1 & 4 \end{bmatrix} \quad (b). \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -4 & 1 \\ 3 & -2 \end{bmatrix} \quad (c). \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 5 & 3 \\ 3 & 5 \end{bmatrix}$$

När egenvärdena är reella har egenvektorerna en speciell betydelse (förutom att de bygger upp lösningarna). Om vi ritar linjer genom origo i egenvektorernas riktning får vi en uppdelning av fasplanet i sektorer ut från origo. En lösningskurva kan aldrig korsa en uppdelningslinje, den blir alltid kvar i samma sektor.



Här ovan har vi ritat dessa egenvektorslinjer, som delar upp i sektorer, för matriserna från uppgiften ovan.

**Uppgift 3.** Undersök systemet  $\mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t)$  för matriserna  $\mathbf{A}$  nedan. Nu har vi komplexa egenvärden så origo kommer vara en *spiralpunkt* (lösningarna går i spiral kring origo).

Rita riktningfältet tillsammans med lösningen till differentialekvationen för några startvärden som ni hittar på själva.

$$(a). \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 4 \\ -9 & 1 \end{bmatrix} \quad (b). \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ -8 & 2 \end{bmatrix}$$