

Lineær algebra
4. kursusgang

Vi betragter et lineært ligningssystem (af m ligninger med n ubekendte)

$$A\mathbf{x} = \mathbf{b}.$$

Ligningssystemet antages at være inkonsistent (ingen løsninger) fordi tallene er fremkommet som måleresultater med målefejl.

Vi skal derfor finde en mindste kvadraters løsning $\hat{\mathbf{x}}$ som opfylder

$$A\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{b}},$$

hvor $\hat{\mathbf{b}}$ er den vektor i $\text{Col } A$ hvis afstand til \mathbf{b} er mindst.

$\hat{\mathbf{b}}$ er altså ortogonal projektionen af \mathbf{b} på $\text{Col } A$.

Vi beregner ikke $\hat{\mathbf{b}}$.

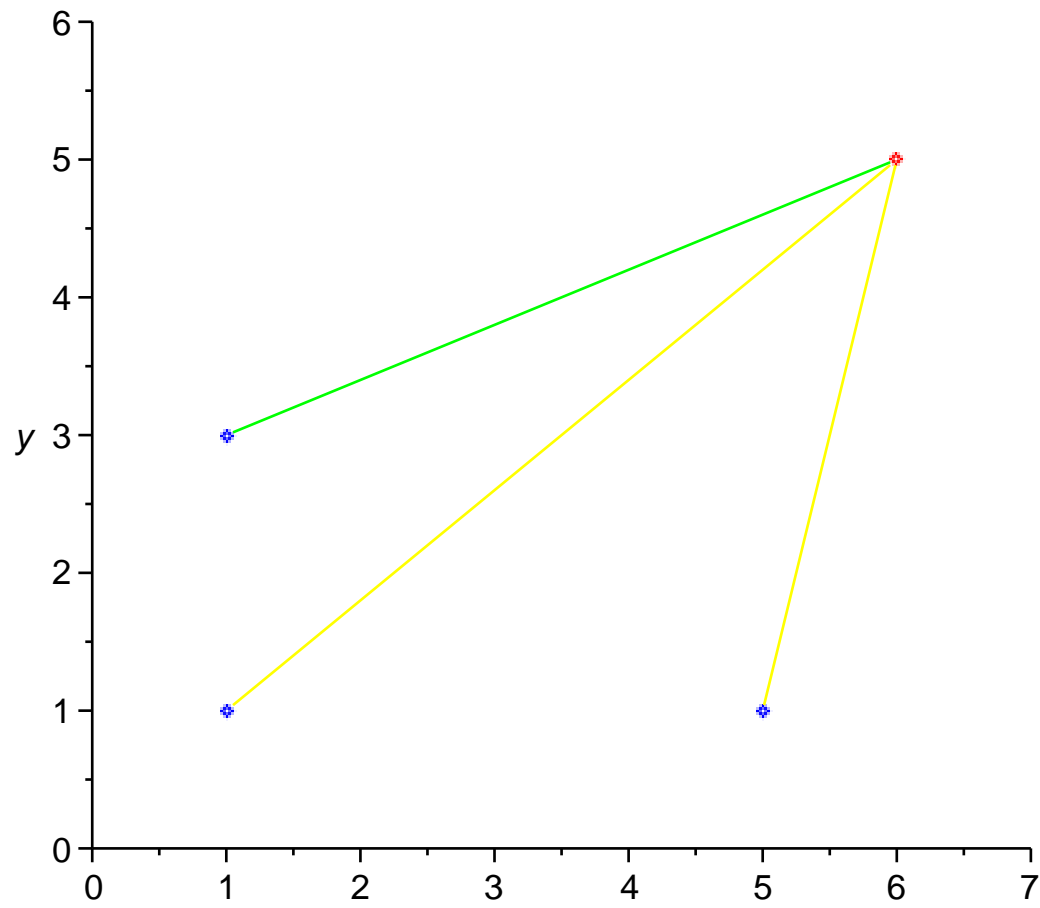
En vektor \mathbf{x} er mindste kvadraters løsning til $A\mathbf{x} = \mathbf{b}$ hvis og kun hvis den er løsning til *normalligningen*


$$(A^T A)\mathbf{x} = A^T \mathbf{b}.$$

Når en mindste kvadraters løsning $\hat{\mathbf{x}}$ er fundet ved at løse normalligningen kan eventuelt bestemmes $\hat{\mathbf{b}} = A\hat{\mathbf{x}}$.

Fremgangsmåden virker kun for *lineære* ligninger.

Ikke-lineære problemer.



 $\sqrt{(x-1)^2 + (y-3)^2}$

Vi kender de præcise koordinater for et antal punkter (blå på figuren på forrige side). Desuden er der et ukendt punkt (rødt).

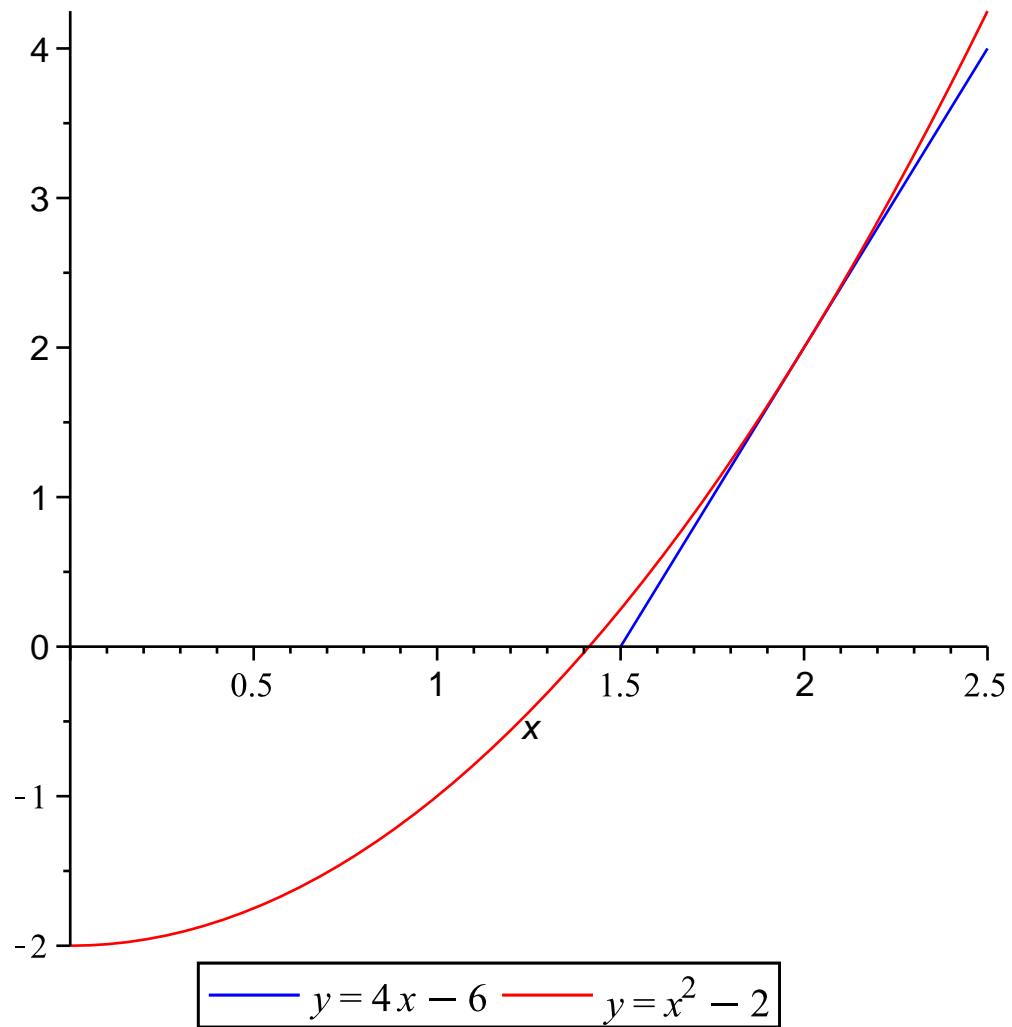
Afstanden mellem det kendte punkt $(1, 3)$ og det ukendte punkt (x, y) måles til værdien b . Vi har altså følgende ligning (hvis vi ser bort fra målefejl):

$$\sqrt{(x - 1)^2 + (y - 3)^2} = b.$$

Tilsvarende ligninger fås ved måling af afstanden til andre kendte punkter.

Men disse ligninger er ikke-lineære.

Lineær Approximation



Lineær approximation af funktion af én variabel

Ligningen for tangenten til grafen for $f(x)$ i punktet $(a, f(a))$ er

$$y = f(a) + f'(a)(x - a).$$

Lineær approximation for x tæt på a :

$$f(x) \approx f(a) + f'(a)(x - a).$$

F.eks. hvis $f(x) = x^2 - 2$, $a = 2$ så er $f'(x) = 2x$

og tangentens ligning er:

$$y = 2 + 4(x - 2) \text{ eller } y = 4x - 6.$$

Løsning af ligning ved hjælp af lineær approximation (Newtons metode):

Eksempel. Løs ligning $f(x) = 0$ hvor $f(x) = x^2 - 2$.

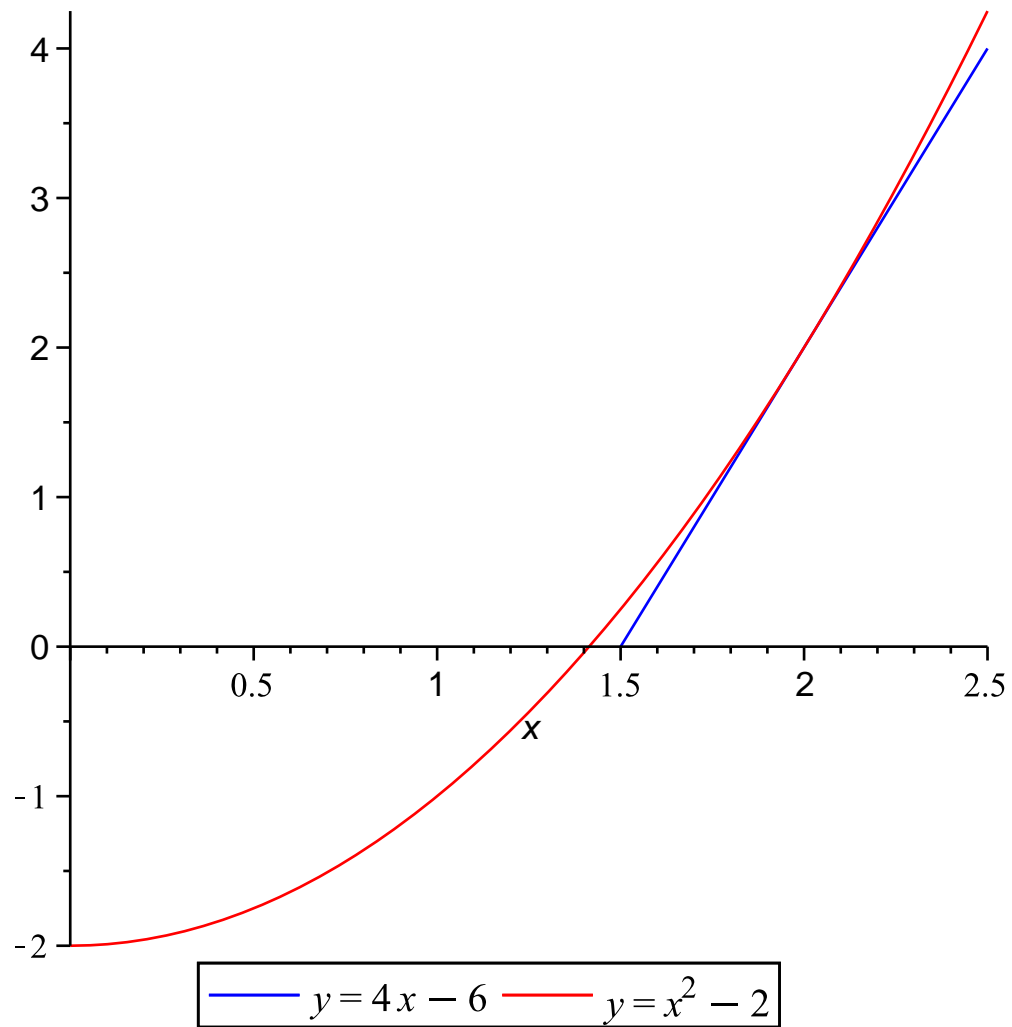
Vi vil bestemme en følge af tal $x^0, x^1, x^2, x^3, \dots$, der konvergerer mod den præcise løsning.

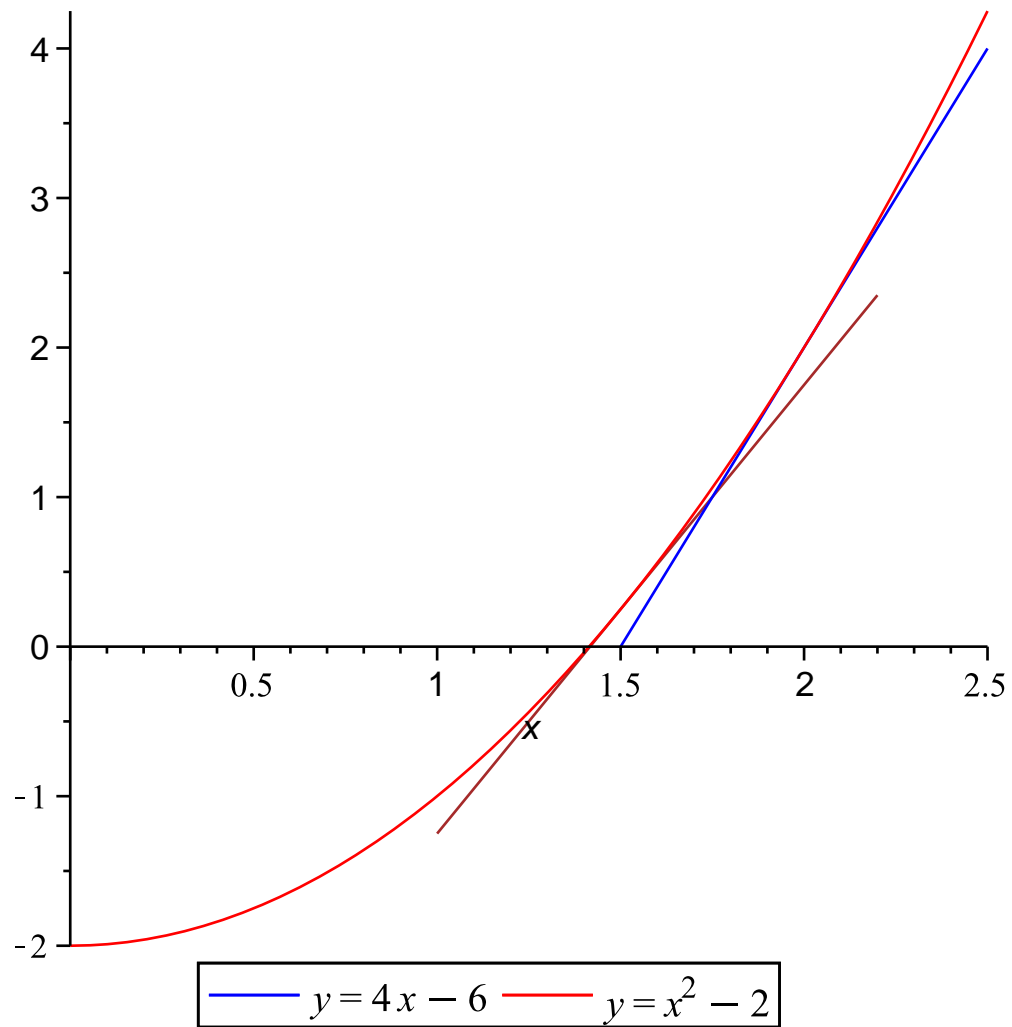
x^0 er vores første gæt på en løsning: $x^0 = 2$.

I nærheden af x^0 er $f(x) \approx f(x^0) + f'(x^0)(x - x^0) = 4x - 6$.

Da løsningen formodes at ligge tæt på x^0 kan vi løse ligningen $4x - 6 = 0$ i stedet for den ikke-lineære ligning.

Denne ligning har løsning $x^1 = 1.5$.





I nærheden af x^1 er $f(x) \approx f(x^1) + f'(x^1)(x - x^1) = 3x - 4.25$.

I stedet for den ikke-lineære ligning løser vi ligningen $3x - 4.25 = 0$ som har løsning $x^2 = 1.4166666$.

Dernæst fås

$$x^3 = 1.4142156$$

og

$$x^4 = 1.4142135.$$

Funktion af to variable

$f(x, y)$: en funktion af to variable med partielle afledede

$$f_x(x, y) = \frac{\partial f}{\partial x} \quad \text{og} \quad f_y(x, y) = \frac{\partial f}{\partial y}.$$

Tilvæksten af $f(x, y)$ ud fra punktet (a, b) :

$$\Delta f = f(a + \Delta x, b + \Delta y) - f(a, b)$$

approximeres af *differentialet*

$$df = f_x(a, b)\Delta x + f_y(a, b)\Delta y.$$

Differentialet kan fremkomme som prikprodukt af gradient vektoren $\nabla f(a, b) = \langle f_x(a, b), f_y(a, b) \rangle$ og vektoren $\langle \Delta x, \Delta y \rangle$:

$$df = \nabla f(a, b) \cdot \langle \Delta x, \Delta y \rangle.$$

Lineær approximation for funktion af to variable

$$f(a + \Delta x, b + \Delta y) \approx f(a, b) + f_x(a, b)\Delta x + f_y(a, b)\Delta y,$$

Eller, når (x, y) er tilstrækkeligt tæt på (a, b) :

$$f(x, y) \approx f(a, b) + f_x(a, b)(x - a) + f_y(a, b)(y - b).$$

Lad $f(x, y)$ være afstanden mellem (x, y) og et fast punkt (x_1, y_1) .

$$f(x, y) = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}.$$

Så er

$$f_x(x, y) = \frac{x - x_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}}, \quad f_y(x, y) = \frac{y - y_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}}.$$

For (x, y) i nærheden af punktet (x^0, y^0) er

$$f(x, y) \approx f(x^0, y^0) + f_x(x^0, y^0)(x - x^0) + f_y(x^0, y^0)(y - y^0).$$

Vi kender de præcise koordinater for et antal punkter:

$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$.

Desuden er der et punkt med ukendte koordinater (x_P, y_P) .

Vi har målt afstanden fra dette punkt til de n kendte punkter og får værdierne henholdsvis b_1, b_2, \dots, b_n .

Altså:

$$\sqrt{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2} = b_1$$

$$\sqrt{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_2)^2} = b_2$$

⋮

$$\sqrt{(x_P - x_n)^2 + (y_P - y_n)^2} = b_n$$

P.g.a. målefejl er der ikke noget punkt (x_P, y_P) der passer med alle ligninger.

Vi ønsker at finde et punkt, der passer bedst muligt.

Idé:

Gæt et punkt (x_P^0, y_P^0) .

Da (x_P, y_P) formodes at være tæt på (x_P^0, y_P^0) kan venstre side i ovenstående ligninger erstattes med den lineære approximation i punktet (x_P^0, y_P^0) .

Derved fås (inkonsistent) lineært ligningssystem med n ligninger. Lad (x_P^1, y_P^1) være en mindste kvadraters løsning til dette ligningssystem.

(x_P^1, y_P^1) er så forhåbentligt tættere på den rigtige løsning end vores første gæt var.

Gentag ovenstående med (x_P^0, y_P^0) erstattet af (x_P^1, y_P^1) og find derved (x_P^2, y_P^2) .

Gentag indtil (x_P^i, y_P^i) nærmer sig et bestemt punkt, som så er (x_P, y_P) .

Funktion af n variable

$F_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$: en funktion af n variable.

$\mathbf{x}^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$: fast punkt/vektor.

$\mathbf{j}_i = (j_{i1}, j_{i2}, \dots, j_{in}) = \nabla F_i(\mathbf{x}^0)$ er gradientvektoren af F_i i punktet \mathbf{x}^0 , hvor $j_{i\ell}$ er $\frac{\partial F_i}{\partial x_\ell}$ udregnet i punktet \mathbf{x}^0 .

For et punkt $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ i nærheden af \mathbf{x}^0 er

$$F_i(\mathbf{x}) \approx F_i(\mathbf{x}^0) + \nabla F_i(\mathbf{x}^0) \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) = b_i^0 + \mathbf{j}_i \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^0),$$

hvor $b_i^0 = F_i(\mathbf{x}^0)$.

Vi har m observationer:

$$F_1(x_1, \dots, x_n) = b_1$$

$$F_2(x_1, \dots, x_n) = b_2$$

⋮

$$F_m(x_1, \dots, x_n) = b_m.$$

Venstresiderne erstattes af deres lineære approximationer i punktet \mathbf{x}^0 :

$$b_1^0 + \mathbf{j}_1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) = b_1$$

$$b_2^0 + \mathbf{j}_2 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) = b_2$$

⋮

$$b_m^0 + \mathbf{j}_m \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) = b_m.$$

$$\begin{aligned} \mathbf{j}_1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) &= b_1 - b_1^0 \\ &\vdots \\ \mathbf{j}_m \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) &= b_m - b_m^0. \end{aligned}$$

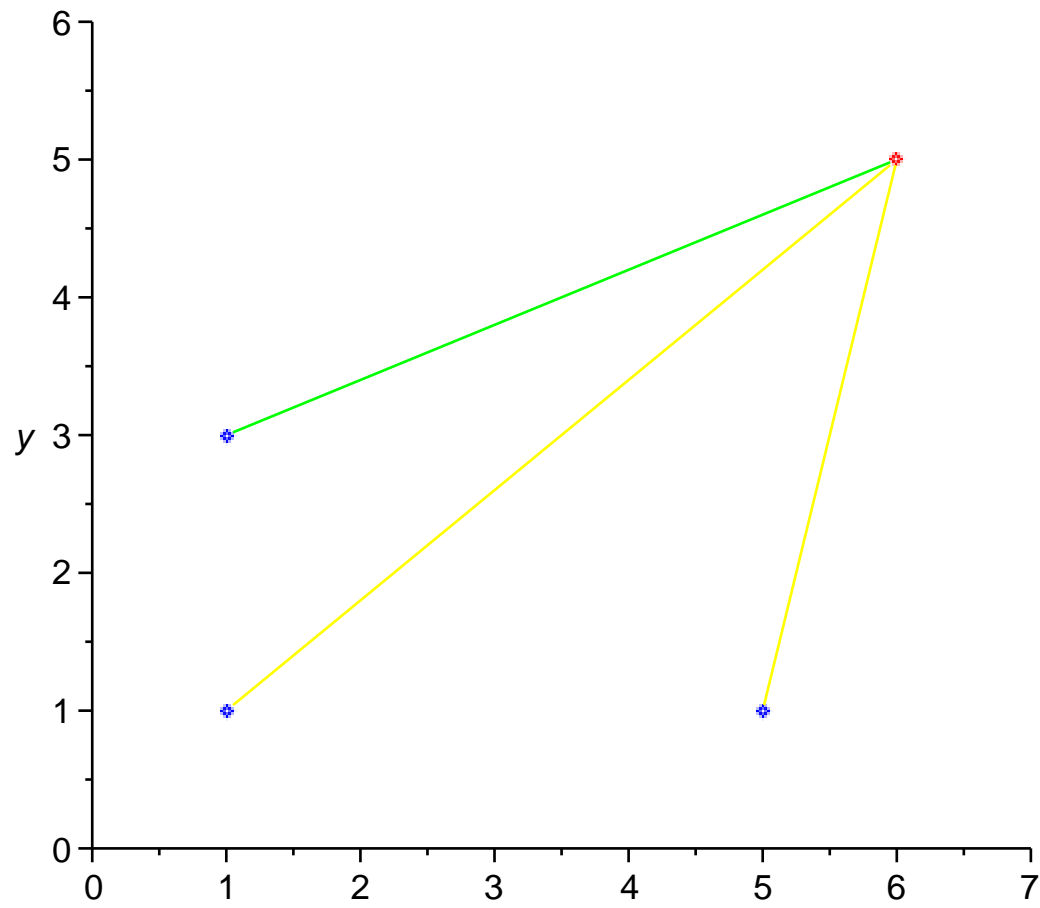
På matrixform: $A(\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) = \mathbf{b}$, hvor


$$A = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & \cdots & j_{1n} \\ j_{21} & j_{22} & \cdots & j_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ j_{m1} & j_{m2} & \cdots & j_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{og} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 - b_1^0 \\ b_2 - b_2^0 \\ \vdots \\ b_m - b_m^0 \end{bmatrix}.$$

Med residualvektoren $\hat{\mathbf{r}}$ fås observationsligningen

$$A(\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) = \mathbf{b} + \hat{\mathbf{r}}.$$

A kaldes designmatricen.



 $\sqrt{(x-1)^2 + (y-3)^2}$

Der er tre kendte punkter: $(1, 3)$, $(1, 1)$ og $(5, 1)$ samt et ukendt punkt (x_P, y_P) med afstande til de tre kendte punkter målt til henholdsvis 4, 6 og 5.

$$F_1(x, y) := \sqrt{(x - 1)^2 + (y - 3)^2}$$

$$F_2(x, y) := \sqrt{(x - 1)^2 + (y - 1)^2}$$

$$F_3(x, y) := \sqrt{(x - 5)^2 + (y - 1)^2}$$

$$F_1(x_P, y_P) = 4, \quad F_2(x_P, y_P) = 6, \quad F_3(x_P, y_P) = 5.$$

$$\mathbf{j}_1 = \nabla F_1(x_P^0, y_P^0) =$$

$$\left(\frac{x_P^0 - 1}{\sqrt{(x_P^0 - 1)^2 + (y_P^0 - 3)^2}}, \frac{y_P^0 - 3}{\sqrt{(x_P^0 - 1)^2 + (y_P^0 - 3)^2}} \right) = \left(\frac{x_P^0 - 1}{b_1^0}, \frac{y_P^0 - 3}{b_1^0} \right)$$

$$\mathbf{j}_2 = \nabla F_2(x_P^0, y_P^0) = \left(\frac{x_P^0 - 1}{b_2^0}, \frac{y_P^0 - 1}{b_2^0} \right)$$

$$\mathbf{j}_3 = \nabla F_3(x_P^0, y_P^0) = \left(\frac{x_P^0 - 5}{b_3^0}, \frac{y_P^0 - 1}{b_3^0} \right),$$

hvor $b_i^0 = F_i(x_P^0, y_P^0)$.

Vi gætter en første værdi $(x_P^0, y_P^0) = (6, 5)$ og udregner

$$b_1^0 = F_1(6, 5) = \sqrt{(6-1)^2 + (5-3)^2} = \sqrt{29}$$

$$b_2^0 = F_2(6, 5) = \sqrt{(6-1)^2 + (5-1)^2} = \sqrt{41}$$

$$b_3^0 = F_1(6, 5) = \sqrt{(6-5)^2 + (5-1)^2} = \sqrt{17}$$

$$\mathbf{j}_1 = \left(\frac{6-1}{\sqrt{29}}, \frac{5-3}{\sqrt{29}} \right) = (0.927, 0.372)$$

$$\mathbf{j}_2 = \left(\frac{6-1}{\sqrt{41}}, \frac{5-1}{\sqrt{41}} \right) = (0.781, 0.625)$$

$$\mathbf{j}_3 = \left(\frac{6-5}{\sqrt{17}}, \frac{5-1}{\sqrt{17}} \right) = (0.242, 0.968)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 4 \\ 6 \\ 5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sqrt{29} \\ \sqrt{41} \\ \sqrt{17} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.39 \\ -0.40 \\ 0.88 \end{bmatrix}$$

Observationsligning (uden residualer):

$$\begin{bmatrix} 0.927 & 0.372 \\ 0.781 & 0.625 \\ 0.242 & 0.968 \end{bmatrix} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = \begin{bmatrix} -1.39 \\ -0.40 \\ 0.88 \end{bmatrix}.$$

Normalligning $(A^T A)(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = A^T \mathbf{b}$:

$$\begin{bmatrix} 1.531 & 1.068 \\ 1.068 & 1.469 \end{bmatrix} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = \begin{bmatrix} -1.388 \\ 0.0847 \end{bmatrix}.$$

Løsning:

$$\mathbf{x} - \mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} -1.92 \\ 1.46 \end{bmatrix}.$$

Altså:

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} x_P^1 \\ y_P^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_P^0 \\ y_P^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1.92 \\ 1.46 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.078 \\ 6.454 \end{bmatrix}.$$

Gentag med (x_P^0, y_P^0) erstattet af (x_P^1, y_P^1) .

$$\text{Så fås: } \begin{bmatrix} x_P^2 \\ y_P^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_P^1 \\ y_P^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.113 \\ -0.496 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.965 \\ 5.958 \end{bmatrix}.$$

$$\text{Dernæst: } \begin{bmatrix} x_P^3 \\ y_P^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_P^2 \\ y_P^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.007 \\ -0.00003 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.958 \\ 5.958 \end{bmatrix}.$$

Så er

$$F_1(x_P^3, y_P^3) = 4.183, \quad F_2(x_P^3, y_P^3) = 5.773, \quad F_3(x_P^3, y_P^3) = 5.066.$$