

Ostatnio zastanawialiśmy się nad taką sytuacją, że mieliśmy operator $P_a(x)$ i on miał być zwężający.

$$P_a(x) : X \rightarrow X - \text{zwężający}.$$

$$c \in X : \{c, P_a(c), P_a(P_a(c)) \rightarrow \tilde{x}(a)\}, \text{ gdzie } P(\tilde{x}(a)) = \tilde{x}(a).$$

Dowód. Chcemy pokazać, że

$$\forall_{\varepsilon > 0} \cdot \exists_{\delta > 0} \cdot \forall_{a'} \cdot d(a, a') < \delta \implies d(\tilde{x}(a), \tilde{x}(a')) < \varepsilon.$$

Wiemy, że P_a - ciągła ze względu na a :

$$\forall_{\varepsilon_1 > 0} \cdot \exists_{\delta_1 > 0} \cdot \forall_{a'} \cdot d(a, a') < \delta_1 \implies d(P_a, P_{a'}) < \varepsilon \quad (1)$$

Wiemy, że $\forall_{c' \in X}$ ciąg $\{c', P_{a'}(c'), P_{a'}(P_{a'}(c')) \dots\} \rightarrow \tilde{x}(a')$ Ale, jeżeli przyjmiemy za $c = \tilde{x}(a')$, to ciąg:

$$\{\tilde{x}(a'), P_a(\tilde{x}(a')), P_a(P_a(\tilde{x}(a')))\} \rightarrow \tilde{x}(a).$$

Ale z zasady banacha wiemy, że jeżeli P_a - zwężający, to

$$d(\tilde{x}(a), x_0) \leq \frac{1}{1-q} d(x_1, x_0).$$

Wyberzmy $x_0 = \tilde{x}(a')$. Wówczas

$$\begin{aligned} d(\tilde{x}(a), \tilde{x}(a')) &\leq \frac{1}{1-q} d(P_a(\tilde{x}(a')), \tilde{x}(a')) = \\ &= \frac{1}{1-q} d(P_a(\tilde{x}(a')), P_{a'}(\tilde{x}(a'))). \end{aligned}$$

Pytanie 1. Jak ten obiekt ma się do $d(P_a, P_{a'})$?

$$d(P_a, P_{a'}) = \sup_{x \in X} d(P_a(x), P_{a'}(x)).$$

Więc, jeżeli $d(P_{a'}, P_a) < \varepsilon_1$, to znaczy, że $d(P_a(\tilde{x}(a')), P_{a'}(\tilde{x}(a'))) < \varepsilon_1$

$$\text{Czyli } d(\tilde{x}(a), \tilde{x}(a')) \leq \frac{1}{1-q} \varepsilon_1.$$

Czyli jeżeli otrzymamy ε_1 , to biorąc ε_1 taki, że $\varepsilon_1 \frac{1}{1-q} < \varepsilon$ i znajdujemy δ_1 z zależności 1 i wiemy, że jeżeli

$$d(a', a) < \delta_1 \implies d(\tilde{x}(a'), \tilde{x}(a)) < \varepsilon \quad \square.$$

□

Przykład 1. (odwzorowanie zwężające)

$$\int \frac{dx(t)}{dt} = f(t, x), x(t_0) = x_0.$$

Wiemy, że $x(t)$ jest punktem stałym odwzorowania

$$P(g) = x_0 + \int_{t_0}^t f(s, g(s)) ds \implies g_0, P(g_0), P(P(g_0)) \dots \rightarrow x(t).$$

$$\frac{dx}{dt} = t + x, x(0) = 0.$$

$$f(t, x) = t + x, t_0 = 0, x_0 = 0.$$

Czy f jest lipszycowalna?

$$\forall_{t \in [a, b]} \|t + x - (t + x')\| = \|x - x'\| = 1 \|x - x'\| \implies L = 1.$$

Czyli jest. Policzmy kilka wyrazów ciągu

$$g_0, P(g_0), P(P(g_0)), \dots$$

$$x^0(t) = x_0(t) = 0$$

$$x^1(t) = P(x^0(t)) = P(0) = 0 + \int_0^t f(s, x^0(s)) ds = \int_0^t s ds = \frac{t^2}{2}$$

$$x^2(t) = P(x^1(t)) = P\left(\frac{t^2}{2}\right) = 0 + \int_0^t f(s, x^1(s)) ds = \int_0^t \left(s + \frac{s^2}{2}\right) ds = \frac{t^2}{2} + \frac{t^3}{2 \times 3}$$

$$x^3(t) = P(x^2(t)) = 0 + \int_0^t \left(s + \frac{s^2}{2} + \frac{s^3}{2 \times 3}\right) ds = \frac{t^2}{2} + \frac{t^3}{2 \times 3} + \frac{t^4}{2 \times 3 \times 4}$$

\vdots

$\vdots \rightarrow \infty$

$$e^t - t - 1.$$

Przykład 2. $\frac{dx}{dt} = 2tx, \quad x(0) = 1$, czyli $f(t, x) = 2tx, \quad t_0 = 0$
dla $\forall_{t \in [a, b]}$

$$\|2tx - 2tx'\| \leq \sup_{t \in [a, b]} |t| 2 \|x - x'\|.$$

Czyli f - lipszycowalna z $L = \sup_{t \in [a, b]} |t| \times 2$

$$x^0(t) = 1$$

$$x^1(t) = P(x^0(t)) = 1 + \int_0^t f(s, 1) ds = 1 + \int_0^t 2s ds = 1 + t^2$$

$$x^2(t) = P(x^1(t)) = 1 + \int_0^t 2s(1 + s^2) ds = 1 + t^2 + \frac{t^4}{2}$$

$$x^3(t) = P(x^2(t)) = 1 + \int_0^t 2s\left(1 + s^2 + \frac{t^4}{2}\right) ds = 1 + t^2 + \frac{t^4}{2} + \frac{t^6}{3}$$

$\vdots \rightarrow \infty$

$$e^{t^2}.$$

Przykład 3.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ -x_1(t) \end{bmatrix}, x_1(0) = 0, x_2(0) = 1.$$

$$f(t, x) = f(t, \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}.$$

$$x^0(t) = \begin{bmatrix} x_1^0(t) \\ x_2^0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x^1(t) = P(x^0(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \int_0^t \begin{bmatrix} 1 \\ -0 \end{bmatrix} ds = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x^2(t) = P\left(\begin{bmatrix} x_1^1 \\ x_2^1 \end{bmatrix}\right) = P\left(\begin{bmatrix} t \\ 1 \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \int_0^1 \begin{bmatrix} 1 \\ -s \end{bmatrix} ds = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t \\ -\frac{t^2}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t \\ 1 - \frac{t^2}{2} \end{bmatrix}$$

$$x^3 = P\left(\begin{bmatrix} x_1^2 \\ x_2^2 \end{bmatrix}\right) = P\left(\begin{bmatrix} t \\ 1 - \frac{t^2}{2} \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \int_0^t \begin{bmatrix} 1 - \frac{s^2}{2} \\ -s \end{bmatrix} ds = \begin{bmatrix} t - \frac{t^3}{2 \times 3} \\ 1 - \frac{t^2}{2} \end{bmatrix}$$

$$\vdots \rightarrow \infty$$

$$\begin{bmatrix} \sin t \\ \cos t \end{bmatrix}.$$

"../img/"fig_29.png

Rysunek 1

Twierdzenie 1. *Jeżeli odwzorowania*

$$t \in [a, b] \rightarrow A(t)$$

$$t \in [a, b] \rightarrow b(t).$$

Gdzie $A(t) \in L(x, x), b(t) : \mathbb{R}^1 \rightarrow X$ są ciągłe, to równanie

$$\frac{d}{dt}x(t) = A(t)x(t) + b(t), \quad x(t_0) = x_0.$$

Ma dla dowolnych $t_0 \in [a, b], x_0 \in X$ jednoznacznie określone rozwiązanie na $t \in]a, b[$. Czym to się różni od twierdzenia o jednoznaczności warunku Cauchy? Nie ma tutaj mowy o żadnej lipszycowalności. Zawężono za to klasę funkcji występującej w równaniu.

Zamiast $]t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon[\times \mathcal{O}$, mamy $]a, b[\times X$

Dowód. Chcemy sprawdzić, czy $f(t, x) = A(t)x(t) + b(t)$ spełnia warunek Lipschitza. Wie-

my, że $A(t)$ i $b(t)$ są ciągłe na przedziale domkniętym $[a, b]$. Zatem, istnieje $\sup_{t \in [a, b]} \|b(t)\| = C$, a $A : X \rightarrow X$ i A jest liniowe zatem istnieje norma tego odwzorowania

$$\sup_{t \in [a, b]} \|A(t)\| = L.$$

Zatem

$$\forall_{t \in [a, b]} \|A(t)x + b(t) - (A(t)x' + b(t))\| = \|A(t)(x - x')\| \leq \sup_{t \in [a, b]} \|A(t)\| \|x - x'\| = L\|x - x'\|.$$

Z twierdzenia o jednoznaczności wiemy, że istnieją przedziały $]t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon[$ oraz $\mathcal{O} = K(x_0, r_2)$ takie, że dla

$$\varepsilon = \min \left\{ |a - t_0|, r_1, \frac{r_2}{M}, |b - t_0|, \frac{1}{L} \right\} \quad (2)$$

Gdzie r_1, r_2 były takie, że na zbiorze $K(t_0, r_1) \times K(x_0, r_2)$ funkcja $f(t, x)$ była ograniczona. Zależy nam na tym, aby w warunku 2 wyeliminować r_2

Ale $\|A(t)x + b(t)\| \leq \|A(t)x\| + \|b(t)\|$ dla $x \in K(x_0, r_2)$

$$\begin{aligned} &= \|A(t)x\| + C \leq L\|x\| + C = \\ &= L\|x - x_0 + x_0\| + C \leq \\ &\leq L\|x - x_0\| + L\|x_0\| + C \leq \\ &\leq Lr_2 + L\|x_0\| + C. \end{aligned}$$

□