

Metoda konečných prvků

Matěj Popdákunik

April 16, 2024

Contents

1	Úvod	3
1.1	Značení	3
1.2	Vztahy	3
1.3	Sobolevovy prostory	4
2	Okrajová úloha	4
2.1	Výchozí vlastnosti	4
2.2	Silně eliptický operátor	5
2.3	Slabá formulace	5
2.4	Galerkinova metoda	6
2.5	Postup MKP pro řešení 2 na konkrétní oblasti	7
3	Základní aspekty MKP (Ciarlet str. 38)	10
3.1	Příklady:	11
3.1.1	1D prvek s nejvýše lineárními polynomy:	11
3.1.2	1D prvek s nejvýše kvadratickými polynomy:	12
4	Nejpoužívanější typy konečných prvků	14
4.1	Lagrangeův prvek	14
4.1.1	Lineární Lagrangeův prvek	14
4.2	Kvadratický Lagrangeův prvek	16
4.3	Hermiteův prvek	16
4.4	Argyrisův prvek	17
5	Interpolant	17
6	Dodatek	20
6.1	Úkol 1 - Příklad 9	20
6.1.1	Vzorce použité z přednášky	20
6.1.2	Řešení	21
6.1.3	Výsledek	22
6.2	Úkol 2 - Příklad 11	23
6.2.1	Zadání	23
6.2.2	Řešení	23
6.3	Úkol 3 - Příklad 11	24
6.3.1	Zadání	24
6.3.2	Řešení	25
6.4	Úkol 4 - Příklad 3	27
6.4.1	Zadání	27
6.4.2	Řešení	27

1 Úvod

1.1 Značení

- $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ omezená oblast
- $\partial\Omega$ Liepschitzovská oblast - lze pokrýt konečně mnoha grafy Liepschitzovských zobrazení, tj. $(|\phi(x) - \phi(y)| < L||x - y||)$
- $\bar{\Omega}$ - uzávěr oblasti Ω
- $\mathcal{C}^{(k)}(\Omega)$ spojitě funkce s derivacemi do k-tého řádu spojitě na Ω
- $\mathcal{C}^{(\infty)}(\Omega)$ hladké funkce na Ω
- $\mathcal{C}_0^{(\infty)}(\Omega)$ hladké funkce na Ω s kompaktním nosičem
- $f \in \mathcal{C}^{(k)}(\Omega), \frac{\partial^{|\alpha|}}{\partial^{\alpha_1} x_1 \partial^{\alpha_2} x_2 \dots \partial^{\alpha_n} x_n} f = \mathcal{D}^\alpha, \alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n], |\alpha| = \sum_i \alpha_i$

Lebesgueovy prostory

- $\mathbb{L}_p(\Omega) = \{f : \Omega \mapsto \mathbb{R} | \text{měřitelné}, \int_{\Omega} |f(x)|^p dx < +\infty\} \quad p \in [1, +\infty)$
- $\mathbb{L}_{\infty}(\Omega) = \{f : \Omega \mapsto \mathbb{R} | \text{měřitelné}, (\exists K > 0)(s.v.x \in \Omega)(|f(x)| \leq K)\}$

1.2 Vztahy

Věta 1.1 (Minkowského nerovnost).

$$\left(\int_{\Omega} |f(x) + g(x)|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} \leq \left(\int_{\Omega} |f(x)|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} + \left(\int_{\Omega} |g(x)|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

Věta 1.2 (Holderova nerovnost). Necht $\left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1\right), f \in \mathbb{L}_p(\Omega), g \in \mathbb{L}_q(\Omega)$

$$\int_{\Omega} |f(x)g(x)| dx \leq \left(\int_{\Omega} |f(x)|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} * \left(\int_{\Omega} |g(x)|^q dx \right)^{\frac{1}{q}} \quad (2)$$

Věta 1.3 (Vnoření L_p prostorů). $p_2 > p_1 \geq 1 \implies \mathbb{L}_{p_2}(\Omega) \subset \mathbb{L}_{p_1}(\Omega)$

Důkaz:

$$\int_{\Omega} |f(x)|^{p_1} dx \leq \text{Holder (2)} \leq \left(\int_{\Omega} (|f(x)|^{p_1})^{\frac{p_1}{p_2}} dx \right)^{\frac{p_2}{p_1}} * \left(\int_{\Omega} 1^q dx \right)^{\frac{1}{q}}$$

$$\int_{\Omega} |f(x)|^{p_1} dx \leq \left(\int_{\Omega} |f(x)|^{p_2} dx \right)^{\frac{p_1}{p_2}} * |\Omega|$$

$$\int_{\Omega} |f(x)|^{p_1} dx \leq |\Omega| \int_{\Omega} |f(x)|^{p_2}$$

□

1.3 Sobolevovy prostory

$$\mathbb{D} = \mathcal{C}^{(\infty)}(\Omega)$$

$$\text{norma: } \|u\|_{W_p^{(k)}(\Omega)} = \sum_{|\alpha| \leq k} \|D^\alpha u\|_{\mathbb{L}_p(\Omega)}$$

$$\text{normovaný prostor: } S_p^{(k)}(\Omega) = (\mathbb{D}; \|\cdot\|_{W_p^{(k)}(\Omega)})$$

Tento prostor není úplný, proto použijeme standartní zúplňovací proceduru a dostaneme: $\mathbb{W}_p^{(k)}(\Omega)$

Obdobně můžeme postupovat pro $\mathbb{D} = \mathcal{C}_0^{(\infty)}(\Omega)$ a dostaneme $\mathbb{W}_p^{0(k)}(\Omega)$

Věta 1.4 (Věta o stopách). Ω - omezená oblast, $\partial\Omega$ - Lipschitzovská

$$\exists_1 T : \mathbb{W}_2^{(1)}(\Omega) \mapsto \mathbb{L}_p(\partial\Omega), \text{ omezený lineární operátor tak, že}$$

$$\forall f \in C(\bar{\Omega}), Tf = f|_{\partial\Omega}$$

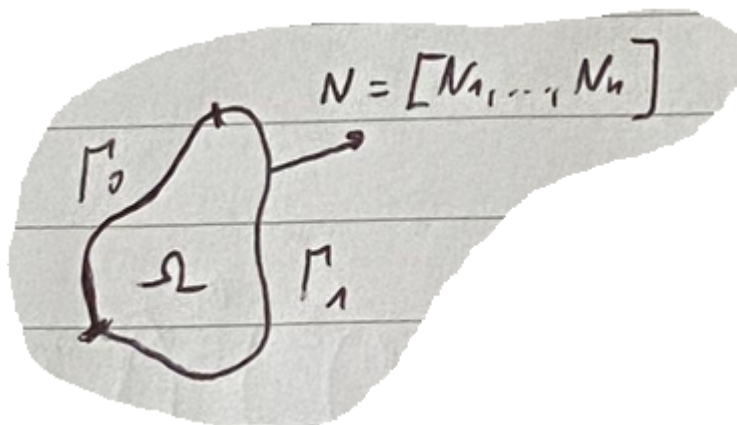
2 Okrajová úloha

$\Omega \subset \mathbb{R}^n$ - omezená oblast, $\partial\Omega$ - Lipschitzovská

$$-\sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j} \right) + q(x) * u = f \quad \text{v } \Omega \quad (3)$$

$$u|_{\Gamma_0} = g_0 \quad \text{na } \Gamma_0 \quad (\text{Dirichletova část}) \quad (4)$$

$$\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j} |_{\Gamma_1} = g_1 \quad \text{na } \Gamma_1 \quad (\text{Neumannova část}) \quad (5)$$



2.1 Výchozí vlastnosti

- $f, g \in \mathcal{C}(\bar{\Omega})$
- $a_{ij} \in \mathcal{C}^{(1)}(\bar{\Omega})$
- $g_{0,1} \in \mathcal{C}(\partial\Omega)$

2.2 Silně eliptický operátor

$$(\exists C_0 > 0)(\forall \xi \in \mathbb{R}^n)(\forall x \in \Omega)(\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x)\xi^i\xi^j \geq c_0 \sum_{i=1}^n |\xi^i|^2)$$

Klasické řešení 2 je funkce $u \in C^{(2)}(\bar{\Omega})$ splňující 2 bodově.

2.3 Slabá formulace

Vezmeme 3 a +- ji přenásobíme testovací funkcí

Nechť $i \in C^{(2)}(\bar{\Omega}), v \in C^{(\infty)}(\bar{\Omega}), v|_{\Gamma_0=0}$

$$-\int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j} \right) dx + \int_{\Omega} q(x) * u * v dx = \int_{\Omega} f * v dx \quad (6)$$

Na první člen použijeme Greenovu identitu

$$\begin{aligned} -\int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j} N_i v dS + \int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j} \frac{\partial u}{\partial x_i} dx + \int_{\Omega} q(x) * u * v dx = \\ = \int_{\Omega} f * v dx \quad (7) \end{aligned}$$

První člen díky (4) a (5) upravíme na $-\int_{\Gamma_1} g_1 v dS$ a pak ho přesuneme na druhou stranu.

Dostaneme:

$$\int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j} \frac{\partial u}{\partial x_i} dx + \int_{\Omega} q(x) * u * v dx = \int_{\Omega} f * v dx + \int_{\Gamma_1} g_1 v dS \quad (8)$$

První část označme $a(u, v)$ a druhou $\tilde{F}(v)$

$$a(u, v) = \tilde{F}(v)$$

a použijeme $w \in \mathbb{W}_2^{(1)}(\Omega) : Tw|_{\Gamma_0} = g_0 : u = w + z$. A tedy:

$$a(z, w) = F(v) - a(w, v)$$

a označme $V = \left\{ z \in \mathbb{W}_2^{(1)}(\Omega) | Tz|_{\Gamma_0} = 0 \right\}$

Věta 2.1. Funkce $u \in \mathbb{W}_2^{(1)}(\Omega)$ je slabé řešení 2, pokud

$$(\exists w \in \mathbb{W}_2^{(1)}(\Omega))(Tw|_{\Gamma_0} = g_0), u = w + z$$

a z je řešení variační úlohy $(\forall v \in V)(a(z, v) = F(v))$

Poznámka. Pro zajištění existence řešení:

$$a_{ij} \in L_{\infty}(\Omega), q \in L_{\infty}(\Omega), f \in L_2(\Omega), g_1 \in L_2(\Gamma_1), g_0 \in T(\mathbb{W}_2^{(1)}(\Omega))$$

check that
like the 3
lines above
are correct

Věta 2.2 (Lax-Milgramova věta). Nechť V je Hilbertův prostor, $a(\cdot, \cdot)$ je bilineární forma, F je spojitý lineární funkcionál na V a platí:

1. $a(\cdot, \cdot)$ je omezená: $(\exists K > 0)(\forall u, v \in V)(|a(u, v)| \leq K\|u\|\|v\|)$
2. $a(\cdot, \cdot)$ je V -eliptická: $(\exists \alpha > 0)(\forall v \in V)(a(v, v) \geq \alpha\|v\|^2)$

Pak $(\exists_1 z \in V)(\forall v \in V)(a(z, v) = F(v))$

Poznámka. Splnění požadavků Lax-Milgramovy věty:

- F je spojitý, lineární:
 $|F(v)| = | -a(w, v) + \int_{\omega} f(x)v dx + \int_{\Gamma_1} g_1(x)v dS |$
 $- a(w, v)$ je dáno vlastností $a(\cdot, \cdot)$
 $- |\int_{\omega} f(x)v dx| \leq (\int_{\Omega} |f(x)|^2 dx)^{\frac{1}{2}} (\int_{\Omega} |v(x)|^2 dx)^{\frac{1}{2}} =$
 $= \|f\|_{L_2(\Omega)} \|v\|_{L_2(\Omega)}$
 $- |\int_{\Gamma_1} g_1(x)v dS| \leq (\int_{\Gamma_1} |g_1(x)|^2 dS)^{\frac{1}{2}} (\int_{\Gamma_1} |Tv(x)|^2 dS)^{\frac{1}{2}} =$
 $= \|g_1\|_{L_2(\Gamma_1)} \times K_t \|v\|_{\mathbb{W}_2^{(1)}(\Omega)}$
- $a(\cdot, \cdot)$ je omezená:
 $|a(u, v)| = \left| \int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j} \frac{\partial v}{\partial x_i} + q(x)uv dx \right| \leq$
 $\leq K_{a,q} \left(\sum_{i,j=1}^n \left\| \frac{\partial u}{\partial x_j} \right\|_{L_2(\Omega)} \left\| \frac{\partial v}{\partial x_i} \right\|_{L_2(\Omega)} + \|u\|_{L_2(\Omega)} \|v\|_{L_2(\Omega)} \right) \leq$
 $\leq K_{a,q}(u^2 + 1) \|u\|_{\mathbb{W}_2^{(1)}(\Omega)} \|v\|_{\mathbb{W}_2^{(1)}(\Omega)}$
- $a(\cdot, \cdot)$ je V -eliptická:
 $a(u, u) = \sum_{i,j=1}^n \int_{\Omega} a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j} \frac{\partial u}{\partial x_i} + q(x)u^2 dx = (\text{chybi barevne}) \implies$
 $\implies a(n, n) \geq c_0 \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \left| \frac{\partial u}{\partial x_i} \right|^2 dx + d_0 \int_{\Omega} |u|^2 dx \geq$
 $\geq \min\{c_0, d_0\} \|u\|_{\mathbb{W}_2^{(1)}(\Omega)}^2$

chybi
barevne

2.4 Galerkinova metoda

Galerkinova metoda pro přibližné řešení variační úlohy 2.3 $(\forall v \in V)(a(z, v) = F(v))$

Nechť $V_h \subset V$ je konečně-rozměrný podprostor V a hledáme aproximaci z_h řešení z úlohy 2.3 v prostoru V_h tak, aby $(\forall v \in V_h)(a(z_h, v) = F(v))$

Poznámka. Řešení 2.4 jednoznačně existuje díky Laxově-Milgramově větě.

Poznámka. Budeme zkoumat chybu Galerkinovy metody (později v kontextu MKP): $z - z_h$

Věta 2.3 (Céova). Nechť pro $a(\cdot, \cdot)$ a F platí výše uvedené předpoklady a z řeší 2.3. Pak pro řešení z_h úlohy 2.4 platí

$$\|z_h - z\|_V \leq \frac{K}{\alpha} \min\{\|z - v\|_V | v \in V_h\} \quad (9)$$

Důkaz:

Z 2.3 a 2.4 platí $a(z, v) = F(v) \wedge a(z_h, v) = F(v)$ pro $v \in V_h \implies$

$\implies a(z, v) - a(z_h, v) = 0 \implies a(z - z_h, v) = 0$

Platí že $a(\cdot, \cdot)$ je V-eliptická:

$\alpha \|z - z_h\|_V^2 \leq a(z - z_h, z - z_h) =$ vkládáme $v \in V_h = a(z - v, z - z_h) + a(v - z_h, z - z_h) = (\star)$

Platí že $z - v \in V$ a $v - z_h \in V_h$, dále vidíme že druhý sčítanec je 0 díky prvnímu řádku důkazu.

$(\star) \leq a(z - v, z - z_h) \leq K \|z - v\|_V \|z - z_h\|_V \implies$

$\implies \alpha \|z - z_h\|_V \leq K \|z - v\|_V \forall v \in V_h$ (konečně rozměrný) $\implies$

$\implies \|z - z_h\|_V \leq \frac{K}{\alpha} \min\{\|z - v\|_V | v \in V_h\}$

□

Tady možná
ten obrázek
koule lol

2.5 Postup MKP pro řešení 2 na konkrétní oblasti

Z 2.3 máme $a(z, v) = F(v) \forall v \in V$

1. Diskretizace Ω

- základní rozdělení Ω podle jejího tvaru
- Pravidlo zjemňování, např. podle středů stran
- 2. • Konstrukce prostrou V_h - určíme bázi $V_h = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]_\lambda$, kde ϕ_j budou po částech lineární (nebo později polynomiální) tak, aby ϕ_j byly = 1 v jednom uzlu a = 0 ve všech ostatních
- Zároveň platí že $\text{supp}\phi_j \cap \phi_k \neq \emptyset$ pro sousední uzly
- 3. • Konstrukce soustavy algebraických rovnic pro nalezení Galerkinovy aproximace $z_h \in V_k$
- tj. hledáme $z_n = \sum_{j=1}^D \alpha_j \phi_j$ a za v dosadíme $\phi_l, l = 1, 2, \dots, D \implies a(\sum_{j=1}^D \alpha_j \phi_j, \phi_l) = F(\phi_l), l = 1, \dots, D$
- $\implies (\alpha_j)_{j=1}^D$ nalezneme ze soustavy lineárních rovnic:

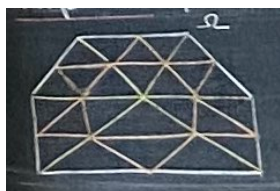
$$\sum_{j=1}^D \alpha_j a(\phi_j, \phi_k) = F(\phi_l) \quad (10)$$

- kde $a(\phi_j, \phi_k) = \int_{\Omega} \sum_{i,k=1}^2 a_{ik}(x) \frac{\partial \phi_j}{\partial x_i} \frac{\partial \phi_k}{\partial x_k} + q(x) \phi_j \phi_k \, dx = 0$
pro $(\text{supp}\phi_j)^\circ \cap (\text{supp}\phi_k)^\circ = \emptyset$
- $\implies$ matice soustavy 10 je řídká.

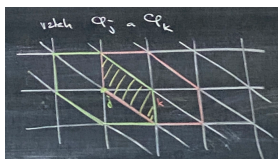
Vlastnost aproximace z_h :

Možná
vyměň
obrázky

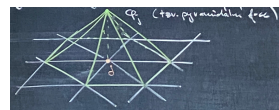
$$z_h(x_J) = \sum_{j=1}^D \alpha_j \phi_j(x_J) = \sum_{j=1}^D \alpha_j \delta_{jJ} = \alpha_J \quad (11)$$



(a) Diskretizace Ω
Bíla je původní oblast,
žlutě základní rozdělení,
červeně zjemnění



(b) Vztah ϕ_j a ϕ_k

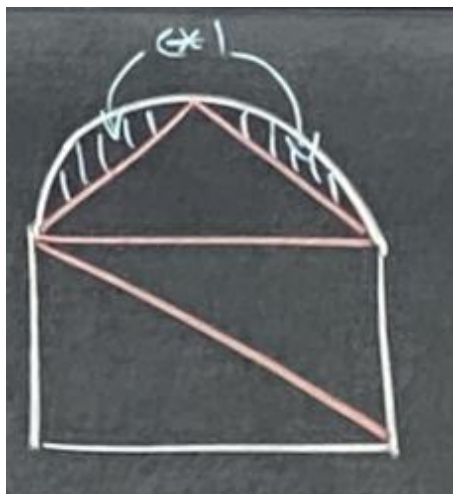


(c) Graf funkce ϕ_j

Obrázek 1

Poznámka (Zpracování zaoblených částí $\partial\Omega$).

Buď se modré části z 2a se převedou pomocí konformních zobrazení na $\triangle$ nebo tvar Ω aproximujeme polygonem, viz 2b



(a) Příklad zaoblené oblasti



(b) Aproximace zaoblení trojúhelníky

Obrázek 2

Příklad (MKP v 1D). Okrajová úloha (tj. 2)

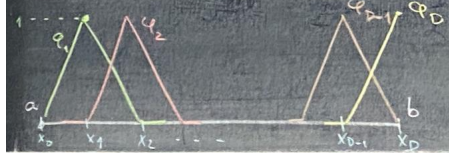
$$-(p(x)u')' + q(x)u = f(x), \text{ na } (a, b) \quad (12)$$

$$u(a) = 0, u'(b) = 0 \quad (13)$$

Variační formulace (tj. 2.3):

$$a(u, v) = \int_a^b p(x)u'v' + q(x)uv \, dx, F(v) = \int_a^b f(x)v \, dx \implies \\ \implies V = \{v \in \mathbb{W}_2^{(1)}(a, b) | v|_{x=a} = 0\}, a(u, v) = F(v) \forall v \in V \quad (14)$$

MKP pro 14: (a,b) dělíme stejnoměrně (viz obrázek 3b) kde $h = \frac{b-a}{D}$
Dostáváme funkce ϕ_k jako v obrázku 3a



(a) Funkce ϕ_k na 1D oblasti



(b) Příklad diskretizace 1D oblasti

Obrázek 3

Z toho vidíme že platí:

$$a(\phi_j, \phi_l) = \begin{cases} 0 & \text{pro } l \neq j-1, j, j+1 \\ \int_{x_{j-1}}^{x_{j+1}} & \text{pro } l = j-1 \\ \int_{x_j}^{x_{j+1}} & \text{pro } l = j+1 \end{cases} \quad (15)$$

Tvar bazické funkce:

$$\phi_j(x) = \begin{cases} \frac{x-x_{j-1}}{x_j-x_{j-1}} & \text{na } < x_{j-1}, x_j > \\ \frac{x_{j+1}-x}{x_{j+1}-x_j} & \text{na } < x_j, x_{j+1} > \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (16)$$

Pak:

$$a(\phi_j, \phi_j) = \int_{x_{j-1}}^{x_j} p(x) \left(\frac{1}{x_j - x_{j-1}} \right)^2 + q(x) \left(\frac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \right)^2 dx + \\ + \int_{x_j}^{x_{j+1}} p(x) \left(\frac{-1}{x_{j+1} - x_j} \right)^2 + q(x) \left(\frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j} \right)^2 dx \quad (17)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j-1}) = \int_{x_{j-1}}^{x_j} p(x) \left(\frac{1}{x_j - x_{j-1}} \right) \left(\frac{-1}{x_j - x_{j-1}} \right) + \\ + q(x) \left(\frac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \right) \left(\frac{x_j - x}{x_j - x_{j-1}} \right) dx \quad (18)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j+1}) = \int_{x_j}^{x_{j+1}} p(x) \left(\frac{-1}{x_{j+1} - x_j} \right) \left(\frac{1}{x_{j+1} - x_j} \right) + \\ + q(x) \left(\frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j} \right) \left(\frac{x - x_j}{x_{j+1} - x_j} \right) dx \quad (19)$$

Použijeme substituci:

$$y = \frac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \text{ na } \langle x_{j-1}, x_j \rangle \mapsto \langle 0, 1 \rangle \quad (20)$$

$$y = \frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j} \text{ na } \langle x_j, x_{j+1} \rangle \mapsto \langle 0, 1 \rangle \quad (21)$$

Pak:

Byla chyba
na tabuli v
substituci

$$a(\phi_j, \phi_j) = \int_0^1 p((x_j - x_{j-1})y + x_{j-1}) \frac{dy}{x_j - x_{j-1}} + \\ + \int_0^1 q((x_j - x_{j-1})y + x_{j-1}) y^2 (x_j - x_{j-1}) dy - \\ - \int_0^1 p(-(x_{j+1} - x_j)y + x_{j+1}) \frac{dy}{x_{j+1} - x_j} - \\ - \int_0^1 q(-(x_{j+1} - x_j)y + x_{j+1}) y^2 (x_{j+1} - x_j) dy \quad (22)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j-1}) = - \int_0^1 p((x_j - x_{j-1})y + x_{j-1}) \frac{dy}{x_j - x_{j-1}} - \\ - \int_0^1 q((x_j - x_{j-1})y + x_{j-1}) y(1 - y)(x_j - x_{j-1}) dy \quad (23)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j+1}) = - \int_0^1 p(-(x_{j+1} - x_j)y + x_{j+1}) \frac{dy}{x_{j+1} - x_j} - \\ - \int_0^1 q(-(x_{j+1} - x_j)y + x_{j+1}) y(1 - y)(x_{j+1} - x_j) dy \quad (24)$$

Z toho je poznat že matice $a(\phi_j, \phi_l)$ je symetrická

3 Základní aspekty MKP (Ciarlet str. 38)

Věta 3.1 (MKP1). Množina $\bar{\Omega}$ (z 2) je rozdělena triangulací $\mathcal{T}_h$ na konečný počet podmnožin K (oblastí konečných prvků) tak, že

1. $\bar{\Omega} = \bigcup_{K \in \mathcal{T}_h} \bar{K}$
2. $(\forall K \in \mathcal{T}_h)(K \neq \emptyset \text{ a } K \text{ je oblast})$
3. $(\forall K_1, K_2 \in \mathcal{T}_h)(K_1 \neq K_2 \implies K_1 \cap K_2 = \emptyset)$
4. $(\forall K \in \mathcal{T}_h)(\partial K \text{ je Lipschitzovská})$

Věta 3.2 (MKP2). Na každé množině $K \in \mathcal{T}_h$ definujeme vhodné funkce sloužící k aproximaci řešení variační úlohy 2.3. Tyto funkce jsou polynomy, nebo "blízké" polynomům

Věta 3.3 (MKP3). Aproximaci řešení variační úlohy 2.3 hledáme pomocí bazických funkcí, jejichž nosič je co nejmenší při zachování shodného popisu tvaru těchto funkcí.

Definice 3.1 (Konečný prvek). Necht

1. $K \subset \mathbb{R}^n$ je omezená oblast s po částech hladkou hranicí
2. $\mathcal{P}$ je konečně rozměrný prostor funkcí na $\bar{K}$
3. $\mathcal{N} = \{N_1, \dots, N_2\}$ je báze $\mathcal{P}^\#$

Pak $(K, \mathcal{P}, \mathcal{N})$ se nazývá konečný prvek, K je oblast prvku, $\mathcal{P}$ jsou tvarové funkce a $\mathcal{N}$ uzlové proměnné.

Báze v $\mathcal{P}$ duální k $\mathcal{N}$ se nazývá nulová báze.

Duální báze k $\mathcal{N} = (N_1, \dots, N_d)$ v $\mathcal{P} : (\Phi_1, \dots, \Phi_d)$, kde $N_i(\Phi_j) = \delta_{ij}$

3.1 Příklady:

3.1.1 1D prvek s nejvýše lineárními polynomy:

$K = (0, 1), \mathcal{P} = \{v : (0, 1) \rightarrow \mathbb{R} \mid v(x) = a + bx, a, b \in \mathbb{R}\} \implies \dim(\mathcal{P}) = 2 \implies \mathcal{N} = (N_1, N_2)$

Proto zvolíme: $N_1(v) = v(0), N_2(v) = v(1)$

Lemma 3.4. Pak $(K, \mathcal{P}, \mathcal{N})$ je KP

Důkaz: • $K = (0, 1)$ je omezená oblast v $\mathbb{R}$ ✓

• $\mathcal{P}$ má dimenzi 2 ✓

• Je $\mathcal{N}$ báze $\mathcal{P}^\#$? tj LN?:

Necht $v_0(x) = a + bx$ je libovolný, $\implies (N_1(v_0) = v_0(0) = a) \wedge N_2(v_0) = v_0(1) = a + b$ a necht $N_1(v_0) = 0 \wedge N_2(v_0) = 0$

$\implies (a = 0) \wedge (a + b = 0) \implies a = b = 0 \implies v_0(x) = 0 \implies (N_1, N_2)$ je LN ✓

□

Definice 3.2. Tento prvek nazýváme jako tzv. lineární Lagrangeův prvek

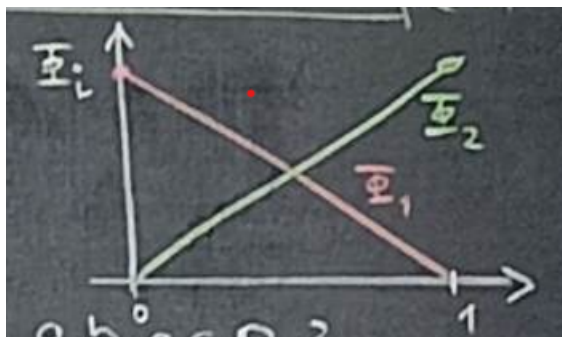
Definice 3.3 (Duální (uzlové) báze). $N_i(\Phi_j) = \delta_{ij}$ označme $\Phi_i(x) = a_i + b_i x, i = 1, 2 \implies$

Highlight
prave s hl
strany +
align

$$\begin{aligned} N_1(\Phi_1) = 1(\Phi_1(0) = 1) : a_1 = 1 & \quad N_1(\Phi_2) = 0(\Phi_2(0) = 0) : a_2 = 0 \\ N_2(\Phi_1) = 0(\Phi_1(1) = 0) : a_1 + b_1 = 0 & \quad N_2(\Phi_2) = 1(\Phi_2(1) = 1) : a_2 + b_2 = 1 \end{aligned} \quad (25)$$

Zapišme dohromady že se zvýrazněné strany rovnají.

$$\left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{array} \right) \sim \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 \end{array} \right) \implies \begin{aligned} \Phi_1(x) &= 1 - x \\ \Phi_2(x) &= x \end{aligned} \quad (26)$$



Obrázek 4: Vzhled 1D Lagrangeovského prvku

3.1.2 1D prvek s nejvýše kvadratickými polynomy:

$K = (0, 1), \mathcal{P} = \{v : (0, 1) \mapsto \mathbb{R} | v(x) = a + bx + cx^2, a, b, c \in \mathbb{R}\} \implies \dim(\mathcal{P}) = 3 \implies \mathcal{N} = (N_1, N_2, N_3)$ Například zvolme $N_1(v) = v(0), N_2(v) = v(1), N_3(v) = v(\frac{1}{2})$

Lemma 3.5. $(K, \mathcal{P}, \mathcal{N})$ je KP

Důkaz: • $K = (0, 1)$ je omezená oblast v $\mathbb{R}$ ✓

• $\mathcal{P}$ má dimenzi 3, obsahuje polynomy ✓

• Je $\mathcal{N}$ báze $\mathcal{P}^\#$? tj LN?:

Nechť $v_0(x) = a + bx + cx^2$ je libovolný, v situaci $N_1(v_0) = 0 \wedge N_2(v_0) = 0 \wedge N_3(v_0) = 0$ máme

$$\implies (a = 0) \wedge (a + b + c = 0) \wedge (a + \frac{1}{2}b + \frac{1}{4}c = 0) \implies a = b = c = 0 \implies (N_1, N_2, N_3) \text{ je LN } \checkmark$$

□

Definice 3.4. Toto nazýváme kvadratickým Lagrangeovským prvkem.

Definice 3.5 (Duální báze). Chceme $N_i(\Phi_j) = \delta_{ij}$, označme $\Phi_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2$. Dostáváme následující rovnice.

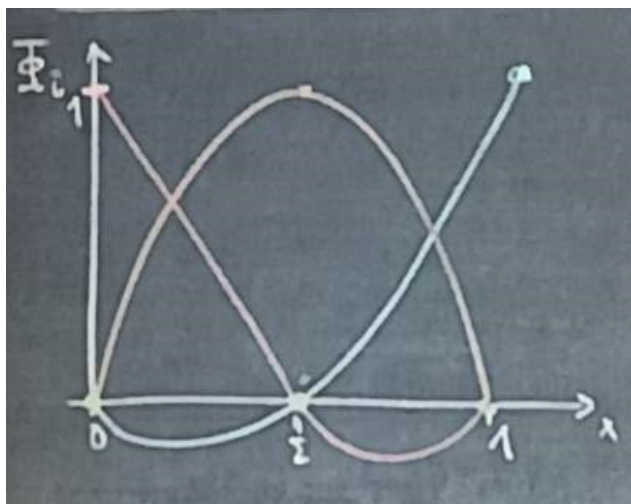
$$\begin{aligned} \Phi : a_1 = 1 \Phi_2 : a_2 = 0 \Phi_3 : a_3 = 0 \\ a_1 + b_1 + c_1 = 0 a_2 + b_2 + c_3 = 1 a_3 + b_3 + c_3 = 0 \\ a_1 + \frac{1}{2}b_1 + \frac{1}{4}c_1 = 0 a_2 + \frac{1}{2}b_2 + \frac{1}{4}c_2 = 0 a_1 + \frac{1}{2}b_1 + \frac{1}{4}c_1 = 1 \end{aligned} \quad (27)$$

Zapišme tento systém jako matici:

matice

Dostáváme následující:

$$\Phi_1(x) = 1 - 3x + 2x^2, \Phi_2(x) = -x + 2x^2, \Phi_3(x) = 4x - 4x^2 \quad (28)$$



Obrázek 5: Vzhled 1D kvadratického Lagrangeovského prvku

Poznámka. Pro vlastnost 3. jsme použili kritérium LN v $\mathcal{P}^\#$
 $(N_1, \dots, N_d)$ je LN $\iff [(\forall v_0 \in \mathcal{P})(\forall j \in \{1, \dots, d\})(N_j(v_0) = 0) \implies v_0 \equiv 0]$

maybe fix the last 0

Poznámka. Budeme využívat zužování polynomů na lineární nadplochy v $\mathbb{R}^n$ popsatelné pomocí lineárních funkcionalů:
 $M \subset \mathbb{R}^n$ je lineární nadplocha $\iff (\exists \alpha \in \mathbb{R})(\exists f \in (\mathbb{R}^n)^\#)(M \equiv \{x \in \mathbb{R}^n | f(x) = \alpha\})$

Pro jednoduchost níže zvolíme $\alpha = 0$ (Případným posunem počátku souřadnic)

Lemma 3.6 (O redukci). Necht $\mathcal{P}$ je polynom stupně $\mathcal{D} \geq 1$ v n proměnných, který je roven 0 v nadrovině V , která je popsána funkcionallem $L \in (\mathbb{R}^n)^\#$ (tj. $V \equiv \{x \in \mathbb{R}^n | L(x) = 0\}$). Pak existuje polynom Q stupně $\mathcal{D} - 1$ tak, že $(\forall x \in \mathbb{R}^n)(P(x) = L(x) * Q(x))$

Důkaz: Záměna proměnných tak, že $L(x) = L(\hat{x}, x_n) = x_n$ (kde $\hat{x} = [x_1, \dots, x_{n-1}]$), pak $V \equiv x_n = 0$

Pak $P(x) = P(\hat{x}, x_n) = \sum_{j=0}^{\mathcal{D}} \sum_{|\hat{j}|=0}^{\mathcal{D}-j} c_{\hat{j}j} \cdot \hat{x}^{\hat{j}} \cdot x_n^j$ kde $\hat{j} = [j_1, \dots, j_{n-1}]$, $|\hat{j}| = \sum_{k=1}^{n-1} j_k$, $\hat{x}^{\hat{j}} = \prod_{l=1}^{n-1} x_l^{j_l}$

Z podmínky $P|_V = 0 \implies P|_V = P(\hat{x}, 0) = \sum_{j=0}^{\mathcal{D}} \sum_{|\hat{j}|=0}^{\mathcal{D}-j} c_{\hat{j}j} \cdot \hat{x}^{\hat{j}} \cdot 0^j$
 $\implies \sum_{|\hat{j}|=0}^{\mathcal{D}-j} c_{\hat{j}0} \cdot \hat{x}^{\hat{j}} \equiv 0, \forall \hat{x} \in \mathbb{R}^{n-1}$

$\implies c_{\hat{j}0} = 0 \forall j$

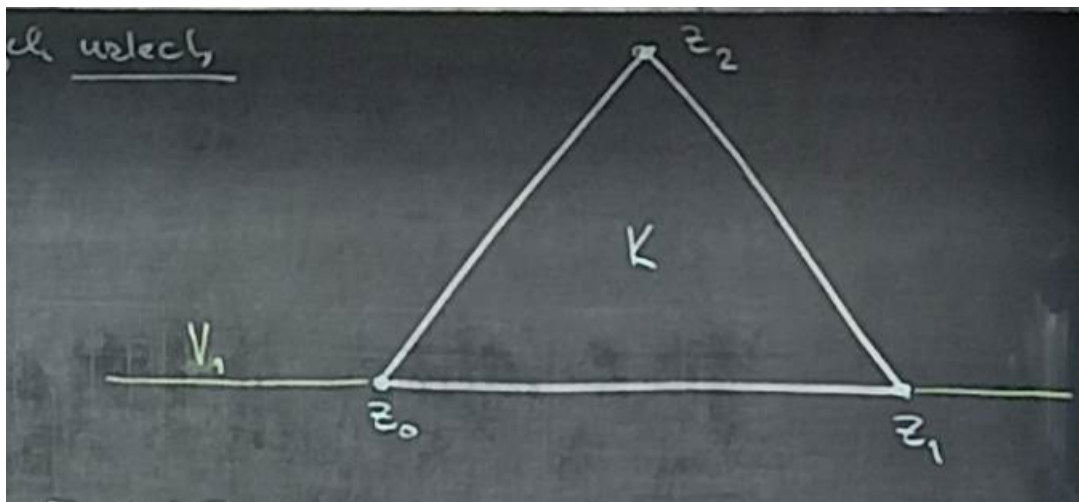
$\implies P(\hat{x}, x_n) = \sum_{j=1}^{\mathcal{D}} \sum_{|\hat{j}|=0}^{\mathcal{D}-j} c_{\hat{j}j} \cdot \hat{x}^{\hat{j}} \cdot x_n^j = x_n \sum_{j=1}^{\mathcal{D}} \sum_{|\hat{j}|=0}^{\mathcal{D}-j} c_{\hat{j}j} \cdot \hat{x}^{\hat{j}} \cdot x_n^{j-1}$

x_n je námi hledané $L(x)$, zbytek označme jako $Q(x)$ $\square$

4 Nejpoužívanější typy konečných prvků

Poznámka. Ukážeme v $\mathbb{R}^2$, $\mathcal{K}$ bude simplex s vrcholy z_1, z_2, z_3 .

Lineární polynom v $\mathbb{R}^2$: $v_0(x_1, x_2) = a + bx_1 + cx_2$ Kvadratický polynom v $\mathbb{R}^2$: $v_0(x_1, x_2) = a + bx_1 + cx_2 + dx_1^2 + ex_1x_2 + fx_2^2$



Obrázek 6: Simplex ve 2D

4.1 Lagrangeův prvek

Uzlové proměnné poskytují hodnoty funkcí v $\mathcal{P}$ ve vybraných uzlech

4.1.1 Lineární Lagrangeův prvek

$\mathcal{P}$ obsahuje nejvýše lineární polynomy v $\mathbb{R}^n$

- K je simplex ✓
- $\mathcal{P}$ má dimenzi 3 ✓
- Jako bázi $\mathcal{N}$ navrhne $N_1(v) = v(z_0), N_2(v) = v(z_1), N_3(v) = v(z_2)$

Lemma 4.1. Pak $(K, \mathcal{P}, \mathcal{N})$ je KP

Důkaz: Ukážeme LN (N_1, N_2, N_3) pomocí kritéria výše:

Nechť pro všechna $v \in \mathcal{P} : N_j(v) = 0, j \in \{1, 2, 3\} \implies v(z_j) = 0$

Argument jedné proměnné:

Protože $v(z_0) = 0 \wedge v(z_1) = 0 \wedge v \in \mathcal{P}$ je lineární polynom $\implies v|_{V_1}$ je lineární polynom jedné proměnné

tj: $V_1 \equiv \begin{cases} x_1(s) &= z_0^1 + (z_1^1 - z_0^1)s \\ x_2(s) &= z_0^2 + (z_1^2 - z_0^2)s \end{cases}, s \in \mathbb{R} \implies v|_{V_1} = v(x_1(s), x_2(s))$ je

lineární polynom proměnné s , přitom se rovná 0 pro $s = 0, 1$

$\implies v|_{V_1} \equiv 0$ všude na V_1

□

Lemma 4.2 (Redukční lemma). $v(x_1, x_2) = L_1(x_1, x_2) \cdot \hat{v}(x_1, x_2)$, kde $V_1 \equiv L_1(x_1, x_2) = 0$, $\hat{v}$ má stupeň 0

Protože $L_1(z_2) \neq 0 (z_2 \notin V_1)$ a přitom $v(z_2) = 0 \implies$ jedině $\hat{v}(z_2) = 0$

Předchozí implikuje: $\hat{v} \equiv 0 \implies v \equiv 0 \implies (N_1, N_2, N_3)$ jsou LN

Obrázek 7: $N_j(v) = v(z_{j-1})$ opět vyjde že splníme definici konečného prvku

Poznámka (K lineárnímu Lagrangeovu prvku). K čemu to je? Porovnejme jak vypadá pokud budeme KP skládat

(a) Takto prvky vypadají v případě, že uzly jsou v rozích trojúhelníků. všimněme si že funkce je spojitá

(b) Takto prvky vypadají v případě, že uzly nejsou v rozích trojúhelníků. Jsou spojitě v jedné hodnotě ale jinak větší-nou nejsou.

Většinou doporučujeme používat uzly v rozích z důvodů nespojitosti, ale existují příklady kdy se používá druhá možnost. Například se zmiňuje o tzv. Cruzeix-Raviartův prvek. Ten se používá v problematice proudění u tzv. nekonformní metody konečných prvků.

4.2 Kvadratický Lagrangeův prvek

$\mathcal{P}$ obsahuje polynomy stupně menší než 2

$$v \in \mathcal{P} \implies v(x_1, x_2) = a + bx_1 + cx_1 + dx_1^2 + ex_1x_2 + fx_2^2 \implies \dim \mathcal{P} = 6 \quad (29)$$

$$\mathcal{N} = (N_1, \dots, N_6) : N_j(v) = v(z_{j-1}), j = 1, \dots, 6 \text{ pro } v \in C(\bar{K})$$

Tvrzení 4.1. $\mathcal{N}$ je báze $\mathcal{P}^\#$

Obrázek 9: Kvadratický Lagrangeův prvek

Důkaz: Použijeme opět kritérium: $(N_j(v) = 0 \forall j = 1, \dots, 6) \implies v \equiv 0$.

Tedy necht: $v(z_5) = 0, v(z_n) = 0, \dots, v(z_0) = 0$

V_1 dána funkcionálem $L_1 : V_1 \equiv L_1(x_1, x_2) = 0$ a $\dim V_1 = 1$ a $v(z_0) = 0, v(z_1) = 0, v(z_3)$, tj. Kvadratický polynom 1 proměnné se rovná 0 ve 3 bodech, $\implies v|_{V_1} \equiv 0$

Použijeme lemma o redukcí: $v(x_1, x_2) = L_1(x_1, x_2)w_1(x_1, x_2)$, w_1 je lineární polynom, kde $L_1(z_j) \neq 0$ pro $j = 2, 4, 5$

Protože $v(z_j) = 0, j = 2, 4, 5 \implies w_1(z_j) = 0, j = 2, 4, 5$

$w_1(z_2) = 0, w_1(z_4) = 0$ a $w_1|_{V_2}$ je lineární polynom jedné proměnné = 0 ve 2 bodech $\implies w_1|_{V_2} \equiv 0 \implies (V_2 \equiv L_2(x_1, x_2) = 0) \implies$

$\implies w_1(x_1, x_2) = L_2(x_1, x_2) * w_2(x_1, x_2), w_2 \equiv \text{const}$ a $w_2(z_5) = 0 \implies v = L_1L_2w_2 \equiv 0$ všude $\implies \mathcal{N}$ je báze

□

(a) Lagrangeovy prvky stupně 3

(b) Lagrangeovy prvky stupně 4

Poznámka (Lagrangeovy prvky stupně $\mathcal{D} > 2$).

4.3 Hermiteův prvek

Obrázek 11: Hermiteův prvek

Funkcionály v $\mathcal{N}$ používající hodnoty funkcí a jejich derivací (tj. $\mathcal{P}$ obsahuje alespoň kubické polynomy)

Necht tedy $\dim \mathcal{P} = 10$ (kubické) $\implies \mathcal{N} = (N_1, \dots, N_{10}) :$

$$N_j(v) = v(z_{j-1}), j = 1, 2, 3, N_4(v) = v(z_3) \text{ a } v'(z_0) = \begin{pmatrix} N_4(v) \\ N_5(v) \end{pmatrix}, v'(z_1) = \begin{pmatrix} N_6(v) \\ N_7(v) \end{pmatrix}, v'(z_2) = \begin{pmatrix} N_8(v) \\ N_9(v) \end{pmatrix},$$

Tvrzení 4.2. $\mathcal{N}$ je báze $\mathcal{P}^\#$

Důkaz: využití redukce: na V_1 : $v|_{V_1}$ je kubický polynom 1 proměnné jehož 2 hodnoty a 2 derivace = 0. $\implies v|_{V_1} \implies v = L_1 w_1$, w_1 je Kvadratický

$w_1|_{V_2}$ je kvadratický (1 hodnota, 2 derivace = 0) $\implies w|_{V_2} \equiv 0 \implies w_1 = L_2 w_2$, w_2 je lineární, $w_2|_{V_3}$ je lineární polynom (derivace = 0) $\implies$ je konstantní.

Nakonec použijme $z_3 \implies v = L_1 L_2 L_3 w_3 \equiv 0 \implies \mathcal{N}$ je báze. $\square$

Rozmysleme jak se přenáší v' na $w'_{1,2}$

4.4 Argyrisův prvek

Obrázek 12: Argyrisův prvek

Funkcionály používající hodnoty 1. a 2. derivace argumentu.

$\mathcal{P}$ obsahuje polynomy stupně menší nebo rovno 5 $\implies \dim \mathcal{P} = 21$, tj.

$$N_j(v) = v(z_{j-1}), j = 1, 2, 3, v'(z_0) = \begin{pmatrix} N_4(v) \\ N_5(v) \end{pmatrix}, v'(z_1) = \begin{pmatrix} N_6(v) \\ N_7(v) \end{pmatrix}, v'(z_2) = \begin{pmatrix} N_8(v) \\ N_9(v) \end{pmatrix}, v''(z_0) = \begin{pmatrix} N_{10}(v) N_{12}(v) \\ N_{11}(v) N_{13}(v) \end{pmatrix}, v''(z_1) = \begin{pmatrix} N_{14}(v) N_{15}(v) \\ N_{16}(v) N_{17}(v) \end{pmatrix}, v''(z_2) = \begin{pmatrix} N_{18}(v) N_{19}(v) \\ N_{20}(v) N_{21}(v) \end{pmatrix}, N_{19}(v) = \partial_n v(z_3), N_{20}(v) = \partial_n v(z_4), N_{21}(v) = \partial_n v(z_5), \text{ kde } \partial_n v(z_j) = v'(z_j) \cdot \vec{n}(z_j)$$

Tvrzení 4.3. $\mathcal{N}$ je báze $\mathcal{P}^\#$

Poznámka. Hermite/Agryis: používáme $v'(z_j) \in \mathbb{R}^2, v''(z_j) \in \mathbb{R}^{2,2}$, například $v'(z_j) = \begin{pmatrix} \partial_{x_1} v(z_j) \\ \partial_{x_2} v(z_j) \end{pmatrix}$ nebo $v'(z_j) = \begin{pmatrix} \partial_{s_1} v(z_j) \\ \partial_{s_2} v(z_j) \end{pmatrix}$. Porovnání můžeme vidět v [13](#)

Obrázek 13: Rozdíl mezi lokální a globální bází

5 Interpolant

Poznámka. Obecnější funkce budeme promítat do $\mathcal{P}$ (nejdříve na jediném konečném prvku, pak na síti)

Definice 5.1. Necht $(\mathcal{K}, \mathcal{P}, \mathcal{N})$ je konečný prvek, $\dim \mathcal{P} = d$, $(\Phi_1, \dots, \Phi_d)$ je uzlová báze, D_{N_j} je definiční obor funkcionálu $N_j \in \mathcal{N}, j = 1, \dots, d$

Pak výraz $y_k u = \sum_{j=1}^d N_j(u) \Phi_j$ pro $u \in \bigcap_{j=1}^d D_{N_j}$ se nazývá lokální interpolant funkce u

Poznámka. Jde o souřadnicové vyjádření v bázi $(\Phi_1, \dots, \Phi_d)$, tj pro $\hat{u} \in \mathcal{P}$ je $\sum_{j=1}^d N_j(\hat{u}) \Phi_j = \hat{u}$, ale pro $\hat{i} \notin \mathcal{P}$ nikoliv

Obrázek 14

Příklad. Lineární Lagrange $(\mathcal{K}, \mathcal{P}, \mathcal{N})$, $N_1(v) = v(0, 0)$, $N_2(v) = v(1, 0)$, $N_3(v) = v(0, 1)$

Určíme nulovou bázi, $\Phi_j(x_1, x_2) = c_{1j} + c_{2j}x_1 + c_{3j}x_2$: $N_j(\Phi_l) = \delta_{jl}$

Rovnice:

$$j = 1c_{11} = 1j = 2 \quad c_{12} = 0j = 3 \quad c_{13} = 0 \quad (30)$$

$$c_{11} + c_{21} = 0 \quad c_{12} + c_{22} = 1 \quad c_{13} + c_{23} = 0 \quad (31)$$

$$c_{11} + c_{31} = 0 \quad c_{12} + c_{32} = 0 \quad c_{13} + c_{33} = 1 \quad (32)$$

Z čehož dostaneme:

$$\Phi_1(x_1, x_2) = 1 - x_1 - x_2, \Phi_2(x_1, x_2) = x_1, \Phi_3(x_1, x_2) = x_2 \quad (33)$$

Důkaz:

Pro druhou část tvrzení:

$$\mathbb{W}_{\infty}^{(r+1)}(\Omega) = \{v \in_{\infty}(\Omega) | (\forall |\alpha| \leq r+1)(\mathcal{D}^{\alpha}v \in L_{\infty})\},$$

$$L_{\infty}(\Omega) = \{v : (\Omega) \mapsto \mathbb{R} | (\exists K > 0)(\forall x \in \Omega)(|v(x)| \leq K)\}$$

Provedeme pro $r = 0$ (Lagrange), víme: $\mathcal{Y}_{\mathcal{J}}u \in \mathcal{C}^{(0)}$ z předchozí vlastnosti a $\mathcal{Y}_{\mathcal{J}}u(x) = \mathcal{Y}_Ku(x)$ pro $x \in \bar{K}$, $K \in \mathcal{J}$ a $\mathcal{Y}_Ku(x) \in \mathcal{P}_K$ (tj je polynom), tj. $\mathcal{Y}_Ku(x) \in \mathcal{C}^{(\infty)}(\bar{K})$

Prozkoumáme možnost derivování $\mathcal{Y}_{\mathcal{J}}u$ v Ω (pomocí derivací ve smyslu distribucí)

Pro $k \in \hat{n}$:

$$\implies \partial_{x_k} \mathcal{Y}_{\mathcal{J}}u \in L_{\infty}(\Omega), tj. \mathcal{Y}_{\mathcal{J}}u \in \mathbb{W}_{\infty}^{(1)}(\Omega)$$

□

Poznámka. Pro $\mathcal{J}$ triangulaci Ω :

Definice 5.2. Necht $(\mathcal{K}, \mathcal{P}, \mathcal{N})$ a $(\tilde{\mathcal{K}}, \tilde{\mathcal{P}}, \tilde{\mathcal{N}})$ jsou KP, $F(x) = \mathbb{A}x + b$ je afinní zobrazení $\mathcal{K} \mapsto \tilde{\mathcal{K}}$, $\mathbb{A}$ je regulární.

Pokud:

1. $F(\mathcal{K} = \tilde{\mathcal{K}})$
2. $F^*(\tilde{\mathcal{P}}) = \mathcal{P}$, kde $F^*(\tilde{v}) = \tilde{v} \cdot F$ pro $\tilde{v} \in \tilde{\mathcal{P}}$
3. $F_x(\mathcal{N}) = \tilde{\mathcal{N}}$, kde $(F_*N)(\tilde{v}) = N(\tilde{v} \cdot F)$ pro $N \in \mathcal{N}$

Pak říkáme, že $(\mathcal{K}, \mathcal{P}, \mathcal{N})$ a $(\tilde{\mathcal{K}}, \tilde{\mathcal{P}}, \tilde{\mathcal{N}})$ jsou afinně ekvivalentní.

Budeme značit $\sim^A$

Příklad (Lineární Lagrange). $\bar{K}_1 = [z_1, z_2, z_3]_{\mathcal{H}}$, $\bar{K}_2 = [u_1, u_2, u_3]$

$$\bar{K}_1 = \left\{x \in \mathbb{R}^2 | (\exists \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in <0, 1>, \sum_{j=1}^3 \alpha_j = 1)(x = \sum_{j=1}^3 \alpha_j z_j)\right\}$$

$$\text{Pak } F(x) = F(\sum_{j=1}^3 \alpha_j z_j) = \mathbb{A}(\sum_{j=1}^3 \alpha_j z_j) + b = \sum_{j=1}^3 \alpha_j \mathbb{A}z_j + 1 \cdot b = \sum_{j=1}^3 \alpha_j \mathbb{A}z_j + \sum_{j=1}^3 \alpha_j b = \sum_{j=1}^3 \alpha_j (\mathbb{A}z_j + b)$$

Tak vzniká soustava rovnic pro prvky $\mathbb{A}$ a b

fix align

Chybí cele lol

chybí první část

obrázek

$\mathbb{A}z_i + b = u_j, j = 1, 2, 3$ při zadaných $z_j, u_j, j = 1, 2, 3$, řešitelné jednoznačně
 $\implies F(\bar{K}_1) = \bar{K}_2$

$\mathcal{P}_{1,2}$ polynomy stupně ≤ 1 na $\bar{K}_1, \bar{K}_2$, pro $\tilde{v} \in \mathcal{P}_2$ je $(\tilde{v} \cdot F)(x) = \{x \in \bar{K}_1\} = \tilde{v}(F(x))$ je polynom stupně ≤ 1 na $\bar{K}_1$

$\implies F^*(\mathcal{P}_2) \subset \mathcal{P}_1$ a pro $v \in \mathcal{P}_\infty \implies v(x) = v(F^{-1}(\tilde{x}))$ polynom stupně ≤ 1 na $\bar{K}_2 \implies v \cdot F^{-1} \in \mathcal{P}_2 \implies F^*(\mathcal{P}_2) = \mathcal{P}_1$

Pro $N_j \in \mathcal{N}_{K_1} \implies N_j(v) = v(z_j)$ a pro $\tilde{v} \in \mathcal{P}_2$ je $\tilde{v}(u_j) = \tilde{N}_j = \tilde{v}(F(z_j)) = (\tilde{v} \cdot F)(z_j) = N_j(\tilde{v} \cdot F) \implies \tilde{N}_j = F_*(N_j)$

Každé 2 lineární Lagrangeovy prvky jsou afinně ekvivalentní.

Příklad (Kvadratické Lagrangeovy prvky). Pro $\sim^A$:

První bod:

$F = F(x)$ najdeme opět pomocí $z_j, u_j, j = 1, 2, 3 \implies F(\bar{K}_1) = \bar{K}_2$

Druhý bod:

1. pro $\tilde{v} \in \mathcal{P}_2$ (stupně ≤ 2) $\implies \tilde{v} \circ F(x)$ je stupně ≤ 2 na $\bar{K}_1 \implies \tilde{v} \circ F(x) \in \mathcal{P}_\infty \implies F^*(\mathcal{P}_2) \subset \mathcal{P}_1$

2. pro $v \in \mathcal{P}_1 \implies v(x) = v(F^{-1}(y)) = (v \circ F^{-1})(y)$

To dohromady dává $F^*(\mathcal{P}_2) = \mathcal{P}_1$

Třetí bod:

Nechť $N_j \in \mathcal{N}_1, j = 1, 2, 3$, pak pro $\tilde{v} \in \mathcal{P}_2$ je $\tilde{v}(u_j) = \tilde{N}_j(\tilde{v}) = \tilde{v}(F(z_j)) = (\tilde{v} \circ F)(z_j) = N_j(\tilde{v} \circ F) \implies F_*(N_j) = \tilde{N}_j$

Pro $\sim^A$ je tedy nutné, aby $u_j = F(z_j), j = 4, 5, 6$, tj, barycentrické souřadnice musí být stejné $\implies$ pak $\tilde{N}_j = F_*(N_j)$, pro $j = 4, 5, 6 \implies \sim^A$

Příklad (Hermiteův prvek).

místo cdot
to má být
composition,
asi před-
chozích pět
řádku

6 Dodatek

6.1 Úkol 1 - Příklad 9

Určete prvky matice lineární soustavy rovnic pro okrajovou úlohu řešenou metodou konečných prvků

$$-(\lambda(x)u')' + q(x)u = f(x) \text{ v } (a, b) \quad (34)$$

$$u|_{x=a} = 0, u|_{x=b} = 0 \quad (35)$$

kde $a = 2, b = 3, \lambda(x) = 1 + x, q(x) = 2$ a síť MKP je rovnoměrná a daná uzly:

$$x_j = a + jh, h = \frac{b-a}{m} \quad (36)$$

kde $m \in \mathbb{N}$ je počet prvků diskretizující interval (a, b) , který je obecným parametrem.

6.1.1 Vzorce použité z přednášky

$$\begin{aligned} a(\phi_j, \phi_j) = & \int_0^1 p((x_j - x_{j-1})y + x_{j-1}) \frac{dy}{x_j - x_{j-1}} + \\ & + \int_0^1 q((x_j - x_{j-1})y + x_{j-1}) y^2 (x_j - x_{j-1}) dy - \\ & - \int_0^1 p(-(x_{j+1} - x_j)y + x_{j+1}) \frac{dy}{x_{j+1} - x_j} - \\ & - \int_0^1 q(-(x_{j+1} - x_j)y + x_{j+1}) y^2 (x_{j+1} - x_j) dy \quad (37) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a(\phi_j, \phi_{j-1}) = & - \int_0^1 p((x_j - x_{j-1})y + x_{j-1}) \frac{dy}{x_j - x_{j-1}} - \\ & - \int_0^1 q((x_j - x_{j-1})y + x_{j-1}) y(1-y)(x_j - x_{j-1}) dy \quad (38) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a(\phi_j, \phi_{j+1}) = & - \int_0^1 p(-(x_{j+1} - x_j)y + x_{j+1}) \frac{dy}{x_{j+1} - x_j} - \\ & - \int_0^1 q(-(x_{j+1} - x_j)y + x_{j+1}) y(1-y)(x_{j+1} - x_j) dy \quad (39) \end{aligned}$$

V tomhle vzorci je chyba, přednášející se upsál, ale nechci to opravovat

6.1.2 Řešení

Ze zadání vidíme následující užitečné vztahy:

$$h = \frac{1}{m} \quad (40)$$

$$x_j - x_{j-1} = h = x_{j+1} - x_j \quad (41)$$

$$x_{j-1} - x_{j+1} = -2h \quad (42)$$

Dosazením zadání do (37) a použitím (41) dostaneme:

$$\begin{aligned} a(\phi_j, \phi_j) = & \int_0^1 (1 + hy + x_{j-1}) \frac{dy}{h} + \int_0^1 2y^2(h) dy - \\ & - \int_0^1 (1 - hy + x_{j+1}) \frac{dy}{h} - \int_0^1 2y^2(h) dy \end{aligned} \quad (43)$$

$$a(\phi_j, \phi_j) = \int_0^1 \frac{1}{h} (1 + hy + x_{j-1}) + 2hy^2 - \frac{1}{h} (1 - hy + x_{j+1}) - 2hy^2 dy \quad (44)$$

$$a(\phi_j, \phi_j) = \int_0^1 \frac{1 + x_{j-1}}{h} + y + 2hy^2 - \frac{1 + x_{j+1}}{h} + y - 2hy^2 dy \quad (45)$$

$$a(\phi_j, \phi_j) = \int_0^1 \frac{x_{j-1} - x_{j+1}}{h} + 2y + 0y^2 dy \quad (46)$$

Použijeme vztah (42)

$$a(\phi_j, \phi_j) = \int_0^1 \frac{-2h}{h} + 2y dy \quad (47)$$

$$a(\phi_j, \phi_j) = \int_0^1 -2 + 2y dy \quad (48)$$

$$a(\phi_j, \phi_j) = -2 + 1 = -1 \quad (49)$$

Stejným způsobem spočtíme (38):

$$a(\phi_j, \phi_{j-1}) = - \int_0^1 (1 + hy + x_{j-1}) \frac{dy}{h} - \int_0^1 2y(1-y)(h) dy \quad (50)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j-1}) = - \int_0^1 \frac{1 + x_{j-1}}{h} + y + 2hy(1-y) dy \quad (51)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j-1}) = - \int_0^1 \frac{1 + x_{j-1}}{h} + (1 + 2h)y - 2hy^2 dy \quad (52)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j-1}) = - \frac{1 + x_{j-1}}{h} - \frac{(1 + 2h)}{2} + \frac{2h}{3} \quad (53)$$

Dosaďme za $x_{j-1} = 2 + (j-1)h$:

$$a(\phi_j, \phi_{j-1}) = -\frac{3}{h} - (j-1) - \frac{(1+2h)}{2} + \frac{2h}{3} \quad (54)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j-1}) = -j + \frac{1}{2} - \frac{3}{h} - \frac{h}{3} \quad (55)$$

Nakonec ještě použijeme (40):

$$a(\phi_j, \phi_{j-1}) = -j + \frac{1}{2} - 3m - \frac{1}{3m} \quad (56)$$

Pro (39) buď využijme toho že matice je symetrická nebo jednoduše spočtěme:

$$a(\phi_j, \phi_{j+1}) = -\int_0^1 (1 - hy + x_{j+1}) \frac{dy}{h} - \int_0^1 2hy(1-y) dy \quad (57)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j+1}) = -\int_0^1 \frac{(1 - hy + x_{j+1})}{h} + 2hy(1-y) dy \quad (58)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j+1}) = -\int_0^1 \frac{(1 + x_{j+1})}{h} + (2h-1)y - 2hy^2 dy \quad (59)$$

Opět dosaďme za $x_{j+1} = 2 + (j+1)h$:

$$a(\phi_j, \phi_{j+1}) = -\int_0^1 \frac{(3 + (j+1)h)}{h} + (2h-1)y - 2hy^2 dy \quad (60)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j+1}) = -\left(\frac{(3 + (j+1)h)}{h} + \frac{2h-1}{2} - \frac{2h}{3} \right) \quad (61)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j+1}) = -\frac{(3 + (j+1)h)}{h} - \frac{1}{2} + \frac{2h}{6} \quad (62)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j+1}) = -\frac{3}{h} - j - \frac{1}{2} + \frac{2h}{6} \quad (63)$$

A opět použijeme (40):

$$a(\phi_j, \phi_{j+1}) = -3m - j - \frac{1}{2} + \frac{1}{3m} \quad (64)$$

6.1.3 Výsledek

Nakonec tedy dostáváme:

$$a(\phi_j, \phi_j) = -1 \quad (65)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j-1}) = -j + \frac{1}{2} - 3m - \frac{1}{3m} \quad (66)$$

$$a(\phi_j, \phi_{j+1}) = -3m - j - \frac{1}{2} + \frac{1}{3m} \quad (67)$$

6.2 Úkol 2 - Příklad 11

6.2.1 Zadání

Nechť $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ je omezená oblast, $n = 2, p = 2, k = 5$. Dokažte ekvivalenci výrazů

$$\sum_{|\alpha| \leq k} \|\mathcal{D}^\alpha u\|_{L_p(\Omega)} \quad (68)$$

a

$$\left(\sum_{|\alpha| \leq k} \int_{\Omega} |\mathcal{D}^\alpha(x)|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} \quad (69)$$

pro $u \in \mathbb{W}_p^{(k)}(\Omega)$. Nalezněte přitom konkrétní podobu konstant ekvivalence.

6.2.2 Řešení

Nejprve dosaďte zadání do výrazů, dostaneme:

$$\|u\|_1 := \sum_{|\alpha| \leq 5} \|\mathcal{D}^\alpha u\|_{L_2(\Omega)} \quad (70)$$

a

$$\|u\|_2 := \left(\sum_{|\alpha| \leq 5} \int_{\Omega} |\mathcal{D}^\alpha(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \quad (71)$$

V (70) poznáváme normu Sobolevova prostoru $\mathbb{W}_2^{(5)}$, můžeme ji rozepsat jako

$$\|u\|_1 = \sum_{|\alpha| \leq 5} \left(\int_{\Omega} |\mathcal{D}^\alpha u|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \quad (72)$$

Ukazujeme tedy ekvivalenci norem,
tj. chceme ukázat že $\exists a, b \in \mathbb{R}$ tak, že $a\|u\|_2 \leq \|u\|_1 \leq b\|u\|_2$
Ukažme první nerovnost:

$$a \left(\sum_{|\alpha| \leq 5} \int_{\Omega} |\mathcal{D}^\alpha(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \leq \sum_{|\alpha| \leq 5} \|\mathcal{D}^\alpha u\|_{L_2(\Omega)}$$

S použitím Minkowského nerovnosti máme:

$$\sum_{|\alpha| \leq 5} \|\mathcal{D}^\alpha u\|_{L_2(\Omega)} \geq \left\| \sum_{|\alpha| \leq 5} \mathcal{D}^\alpha u \right\|_{L_2(\Omega)} = \left(\int_{\Omega} \left| \sum_{|\alpha| \leq 5} \mathcal{D}^\alpha(x) \right|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \geq \quad (73)$$

Dále využijeme faktu, že $(\sum_i x_i)^2 \geq \sum_i (x_i)^2$

$$\geq \left(\int_{\Omega} \sum_{|\alpha| \leq 5} |\mathcal{D}^{\alpha}(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\sum_{|\alpha| \leq 5} \int_{\Omega} |\mathcal{D}^{\alpha}(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \quad (74)$$

Jako a tedy můžeme zvolit $a = 1$

Ukažme druhou nerovnost:

$$\sum_{|\alpha| \leq 5} \left(\int_{\Omega} |\mathcal{D}^{\alpha} u|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \leq b \left(\sum_{|\alpha| \leq 5} \int_{\Omega} |\mathcal{D}^{\alpha}(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}}$$

Využijeme toho že pro $y_i > 0, i \in \hat{n}$ platí

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n y_i} \geq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{y_i} \quad (75)$$

Z toho máme:

$$\left(\sum_{|\alpha| \leq 5} \int_{\Omega} |\mathcal{D}^{\alpha}(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \geq \frac{1}{\sum_{|\alpha| \leq 5} 1} \sum_{|\alpha| \leq 5} \left(\int_{\Omega} |\mathcal{D}^{\alpha} u|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \quad (76)$$

Z toho vidíme:

$$b = \sum_{|\alpha| \leq 5} 1 = 21$$

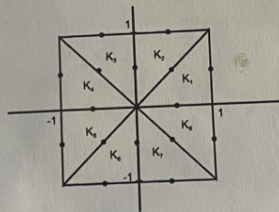
Tedy nakonec platí:

$$\|u\|_2 \leq \|u\|_1 \leq 21 \|u\|_2 \quad (77)$$

6.3 Úkol 3 - Příklad 11

6.3.1 Zadání

11. **příklad:** Pomocí uzlové báze prostoru polynomů nejvýše druhého stupně pro Lagrangeovy prvky, jejichž oblasti K_5 a K_6 jsou dány obrázkem a jejichž uzly jsou rozmístěny rovnoměrně na hranách a ve vrcholech, vyjádřete globální interpolant funkce $(x+y)^3$.



6.3.2 Řešení

Označme $f(x, y) = (x + y)^3$.

Nejprve najdeme lokální interpolant pro K_6 .

Začněme nalezením uzlové báze. Máme následující:

- $N_1(f) = f(0, 0) = 0$
- $N_2(f) = f(0, -1/2) = -1/8$
- $N_3(f) = f(0, -1) = -1$
- $N_4(f) = f(-1/2, -1) = -27/8$
- $N_5(f) = f(-1, -1) = -8$
- $N_6(f) = f(-1/2, -1/2) = -1$

Hledáme bázi:

$$\Phi_j(x, y) = a_j + b_j x + c_j x + d_j x^2 + e_j y^2 + f_j xy \quad (78)$$

a vyžadujeme podmínku $N_j(I_l) = \delta_{jl}$

Z toho dostáváme následující soustavu rovnic $\forall j \in \hat{6}$

$$\begin{aligned} a_j &= \delta_{1j} \\ a_j - \frac{1}{2}c_j + \frac{1}{4}e_j &= \delta_{2j} \\ a_j - c_j + e_j &= \delta_{3j} \\ a_j - \frac{1}{2}b_j - c_j + \frac{1}{4}d_j + e_j + \frac{1}{2} &= \delta_{4j} \\ a_j - b_j - c_j + d_j + e_j + f_j &= \delta_{5j} \\ a_j - \frac{1}{2}b_j - \frac{1}{2}c_j + \frac{1}{4}d_j + \frac{1}{4}e_j + \frac{1}{4}f_j &= \delta_{6j} \end{aligned}$$

Tuto soustavu můžeme úsporněji napsat jako:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{4} & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{2} \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & d_5 & d_6 \\ e_1 & e_2 & e_3 & e_4 & e_5 & e_6 \\ f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Po vyřešení dostaneme:

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & d_5 & d_6 \\ e_1 & e_2 & e_3 & e_4 & e_5 & e_6 \\ f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & -1 & 0 & 1 & -4 \\ 3 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & -4 & 4 & 0 & -4 \end{pmatrix}$$

Tedy dostaneme následující uzlové funkce:

- $\Phi_1(x, y) = 1 + 3y + 2y^2$
- $\Phi_2(x, y) = 4x - 4y - 4y^2 + 4xy$
- $\Phi_3(x, y) = -x + y + 2x^2 + 2y^2 - 4xy$
- $\Phi_4(x, y) = -4x^2 + 4xy$
- $\Phi_5(x, y) = x + 2x^2$
- $\Phi_6(x, y) = -4x - 4xy$

Nakonec nalezneme interpolant:

$$\mathcal{I}_{K_6}(x, y) = \sum_{j=1}^6 N_j(f) \Phi_j(x, y) = -\frac{7}{2}x - \frac{1}{2}y - \frac{9}{2}x^2 - \frac{3}{2}y^2 - 6xy \quad (79)$$

Naprostu stejně můžeme postupovat pro K_5 , hledáním báze pro:

- $N_1(f) = f(0, 0) = 0$
- $N_2(f) = f(-1/2, 0) = -1/8$
- $N_3(f) = f(-1, 0) = -1$
- $N_4(f) = f(-1, -1/2) = -27/8$
- $N_5(f) = f(-1, -1) = -8$
- $N_6(f) = f(-1/2, -1/2) = -1$

A pak bychom řešili $\forall j \in \hat{6}$

$$\begin{aligned}
a_j &= \delta_{1j} \\
a_j - \frac{1}{2}b_j + \frac{1}{4}d_j &= \delta_{2j} \\
a_j - b_j + d_j &= \delta_{3j} \\
a_j - b_j - \frac{1}{2}c_j + d_j + \frac{1}{4}e_j + \frac{1}{2} &= \delta_{4j} \\
a_j - b_j - c_j + d_j + e_j + f_j &= \delta_{5j} \\
a_j - \frac{1}{2}b_j - \frac{1}{2}c_j + \frac{1}{4}d_j + \frac{1}{4}e_j + \frac{1}{4}f_j &= \delta_{6j}
\end{aligned}$$

Nebo si všimneme symetrie úlohy a uvědomíme si, že máme stejnou soustavu rovnic jako pro K_6 , pokud bychom v (78) zaměnili x a y .

Z toho plyne, že jako interpolant dostaneme:

$$\mathcal{I}_{K_5}(x, y) = -\frac{1}{2}x - \frac{7}{2}y - \frac{3}{2}x^2 - \frac{9}{2}y^2 - 6xy \quad (80)$$

Jako globální interpolant tedy dostáváme:

$$\mathcal{I}_{K_5 \cap K_6} = \begin{cases} -\frac{1}{2}x - \frac{7}{2}y - \frac{3}{2}x^2 - \frac{9}{2}y^2 - 6xy & , \text{ na } K_5 \\ -\frac{7}{2}x - \frac{1}{2}y - \frac{9}{2}x^2 - \frac{3}{2}y^2 - 6xy & , \text{ na } K_6 \end{cases} \quad (81)$$

6.4 Úkol 4 - Příklad 3

6.4.1 Zadání

Rozviňte do Taylorova polynomu typu 4 v bodě $[0, 0]$ funkci $\sin(x^2 - y^2)$.

6.4.2 Řešení

Z definice hledáme:

$$T_{[0,0]}^{(4)} \sin(x^2 - y^2) = \sum_{|\alpha| < 4} \frac{1}{\alpha!} D^\alpha \sin(x^2 - y^2)|_{[0,0]} x_1^\alpha y_2^\alpha$$

Pro zjednodušení zápisu označme $f(x, y) = \sin(x^2 - y^2)$

Využíváme toho že můžeme zaměňovat pořadí derivací.

Spočtíme tedy derivace až do 3. řádu včetně, vyhodnocené v $[0, 0]$:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sin(x^2 - y^2)}{\partial x} \Big|_{[0,0]} &= 2x \cos(x^2 - y^2) \Big|_{[0,0]} = 0 \\
\frac{\partial \sin(x^2 - y^2)}{\partial y} \Big|_{[0,0]} &= -2y \cos(x^2 - y^2) \Big|_{[0,0]} = 0 \\
\frac{\partial \sin(x^2 - y^2)}{\partial x \partial y} \Big|_{[0,0]} &= 4xy \sin(x^2 - y^2) \Big|_{[0,0]} = 0 \\
\frac{\partial \sin(x^2 - y^2)}{\partial x^2} \Big|_{[0,0]} &= 2 \cos(x^2 - y^2) - 4x^2 \sin(x^2 - y^2) \Big|_{[0,0]} = 2 \\
\frac{\partial \sin(x^2 - y^2)}{\partial y^2} \Big|_{[0,0]} &= -2 \cos(x^2 - y^2) + 4y^2 \sin(x^2 - y^2) \Big|_{[0,0]} = -2 \\
\frac{\partial \sin(x^2 - y^2)}{\partial x^3} \Big|_{[0,0]} &= -4x \sin(x^2 - y^2) - 8x \sin(x^2 - y^2) - 8x^3 \cos(x^2 - y^2) \Big|_{[0,0]} = 0 \\
\frac{\partial \sin(x^2 - y^2)}{\partial y^3} \Big|_{[0,0]} &= -4y \sin(x^2 - y^2) - 8y \sin(x^2 - y^2) + 8y^3 \cos(x^2 - y^2) \Big|_{[0,0]} = 0 \\
\frac{\partial \sin(x^2 - y^2)}{\partial x^2 \partial y} \Big|_{[0,0]} &= 4y \sin(x^2 - y^2) + 8x^2 y \cos(x^2 - y^2) \Big|_{[0,0]} = 0 \\
\frac{\partial \sin(x^2 - y^2)}{\partial x \partial y^2} \Big|_{[0,0]} &= 4x \sin(x^2 - y^2) - 8xy^2 \cos(x^2 - y^2) \Big|_{[0,0]} = 0
\end{aligned}$$

Spočtené hodnoty dosadíme do definice a dostaneme:

$$T_{[0,0]}^{(4)} \sin(x^2 - y^2) = \frac{2}{2}x^2 + \frac{-2}{2}y^2 = x^2 - y^2$$