Eötvös Loránd Tudományegyetem
Informatikai Kar
Numerikus Analízis Tanszék

A Ljapunov-Schmidt-módszer

Dr. Kovács Sándor
Adjunktus

Lipták Bence Gábor
Programtervező Informatikus MSc

Budapest, 2018.

Tartalomjegyzék

1. fejezet

Bevezetés

2. fejezet

Funkcionálanalízis kiegészítés

Ahhoz, hogy a Ljapunov-Schmidt-módszert ismertethessük szükségünk van a Fredholm-operátorok fogalmára, amihez elengedhetetlenek a faktorterek és a kompakt operátorok. A módszerhez emellett még az implicit függvény tétel (Banach-terekben) is szükséges.

TODO jelölések szekció: Lin op, korl Lin op halmazai, esetleg skaláris szorzás jelölése, ha kell

TODO ebből mi maradjon meg? - kinek a szintjére kell belőni a részletességet, szükséges-e az, hogy pl egy évfolyamtárs megérthesse belőle az egészet? faktortér def talán szükséges, Fredholm-op valószínűleg, Frechét-differenciálás és implicit fv tétel szintén

2.1. Faktorterek

Először is ismertessük a faktorterek definícióját, és az alkalmazásunk szempontjából fontos tulajdonságait, a [1] könyv 4.2 fejezete alapján, ahol a bizonyítások is megtalálhatóak.

2.1.1. Definíció (Faktortér). *Legyen V egy $\mathbb{K}$ feletti lineáris tér, $U \subset V$ pedig egy altere. A V tér U szerinti* ***faktortere*** *vagy* ***hányadostere***

$$V/U := \{v + U \mid v \in V\}, \tag{2.1}$$

ahol

$$v + U := \{v + u \mid u \in U\}. \tag{2.2}$$

Így egy lineáris térben egy altér segítségével definiáltunk egy halmazrendszert. A következő állítással megfogalmazzuk, hogy a kapott halmazok és az U altér között mi az összefüggés.

2.1.1. Állítás. *Ha V egy $\mathbb{K}$ feletti lineáris tér, $U \subset V$ egy altere, akkor $\forall v, v' \in V$-re*

$$v + U = v' + U \qquad \Leftrightarrow \qquad v - v' \in U. \tag{2.3}$$

Ennek segítségével belátható, hogy ha "$v - v' \in U$" feltétellel definiálunk egy relációt V elemein, akkor az egy ekvivalenciareláció és az ekvivalenciaosztályok pedig a V/U faktortér elemei. Ezután definiáljunk műveleteket a faktortéren.

2.1.1. Tétel. *Legyen V egy $\mathbb{K}$ feletti lineáris tér, $U \subset V$ egy altere, ekkor*

- *Megadunk*

  $$\begin{aligned} V/U \times V/U &\longrightarrow V/U \\ \mathbb{K} \times V/U &\longrightarrow V/U \end{aligned}$$

  leképezéseket a következő módon

  $$(v_1 + U) + (v_2 + U) := (v_1 + v_2) + U \tag{2.4}$$
  $$\alpha(v + U) := \alpha v + U \tag{2.5}$$

  melyek jól definiáltak.

- *A V/U faktortér ezekkel a műveletekkel egy $\mathbb{K}$ feletti lineáris tér.*

- *π_U az úgynevezett* ***kanonikus leképezés****, melyet*

  $$\pi_U(v) := v + U \qquad (v \in V)$$

  módon definiálunk lineáris operátor V és V/U között.

A faktortér konstrukciója nagyon hasonlít az egész számok körében létesített maradékosztályokra, és rögzített $U \subset V$ esetén ugyanaz a jelölés is alkalmazható:

$$\overline{v} := v + U \qquad (v \in V),$$

ezzel a jelöléssel a műveletek:

$$\overline{v} + \overline{w} = \overline{v + w} \qquad (v, w \in V)$$
$$\alpha\overline{v} = \overline{\alpha v} \qquad (\alpha \in \mathbb{K}, v \in V).$$

Még fontos észrevétel, hogy a π_U leképezés magtere pontosan az U halmaz, valamint az operátor szürjektív is, amiből kapunk a faktortér dimenziójára egy összefüggést:

2.1.2. Tétel. *Legyen V egy $\mathbb{K}$ feletti lineáris tér, $U \subset V$ egy altere, ekkor*

$$\dim V/U + \dim U = \dim V. \tag{2.6}$$

Ha egy $v \in V$ elemet egy $u \in U$ elemmel eltolunk ($U \subset V$ altér), akkor a V/U faktortérbeli π_U általi képe változatlan, ez a konstrukció alkalmas arra, hogy olyan függvényeket vizsgáljunk, amiknek az értéke az U altéren konstans, speciális esetben 0. Az ilyen leképezésekről szól a következő tétel:

2.1.3. Tétel (Homomorfiatétel vektorterekre). *Legyen V egy $\mathbb{K}$ feletti lineáris tér, $F : V \to W$ egy lineáris leképezés, $U \subset V$ egy altér amire $U \subset \operatorname{Ker} F$. Ekkor egyértelműen létezik $F' : V/U \to W$ amivel $F = F' \circ \pi_U$. Emellett*

- $\operatorname{Im} F = \operatorname{Im} F'$*, illetve F' pontosan akkor szürjektív, amikor F is,*
- $\operatorname{Ker} F' = (\operatorname{Ker} F)/U$*, illetve F' pontosan akkor injektív, amikor* $U = \operatorname{Ker} F$.

F'-t az ***F által indukált homomorfizmusnak*** *nevezzük.*

A faktortérnek van egy hasznos tulajdonsága, amivel nem halmazrendszerként, hanem altérként lehet kezelni.

2.1.4. Tétel. *Legyen V egy $\mathbb{K}$ feletti lineáris tér, $U \subset V$ egy altere, $W \subset V$ pedig az U komplemens altere (tehát $V = W \oplus U$). Ekkor a π_U kanonikus leképezés leszűkítése W-re*

$$\pi_{|_U} : W \longrightarrow V/U, \ \pi_{|_U}(w) = w + U$$

izomorfia, azaz $W \cong V/U$.

2.2. Kompakt operátorok

A Fredholm-operátorok konstrukciójához érdemes feleleveníteni a kompakt operátorok fogalmát és néhány, a gyakorlat szempontjából hasznos tulajdonságukat. A következők során $(X, \|.\|_X)$ és $(Y, \|.\|_Y)$ normált terek.

2.2.1. Definíció (Kompakt operátor). *$A : X \to Y$ operátor **kompakt**, ha bármely $U \subset X$ korlátos halmaznak a képe prekompakt, azaz $\overline{A[U]} \subset Y$ kompakt, valamint ha A korlátos, akkor **teljesen folytonosnak** is nevezzük. [2]*

A továbbiakban az $X \to Y$ közötti kompakt és lineáris operátorok halmazát $K(X,Y)$-al, $X = Y$ esetén $K(X)$-szel jelöljük, ez zárt alteret alkot $L(X,Y)$-ban.

2.2.2. Definíció. *$A \in L(X,Y)$ operátor **véges rangú**, ha a képtere véges dimenziós ($\dim \operatorname{Im} A < \infty$). A véges rangú operátorok halmazát $K_{fin}(X,Y)$-al rövidítjük. [2, 3]*

Belátható ([2]), hogy minden véges rangú operátor kompakt (és így a jelölés indokolt).

A kompakt operátorok bizonyos esetekben közelíthetőek véges rangú operátorokkal:

2.2.1. Tétel. *Ha Y-ban van Schauder-bázis, akkor $A \in L(X,Y)$ pontosan akkor kompakt, ha határértéke véges rangú operátorok valamely sorozatának, azaz $K(X,Y) = \overline{K_{fin}(X,Y)}$. [3]*

Ezek a feltételek teljesülnek például szeparábilis Hilbert-terekben vagy L^p-terekben ($p \geq 1$).

Még tegyünk egy megállapítást a kompakt operátorok adjungáltjával kapcsolatban:

2.2.2. Tétel. *Legyenek $(X, \|.\|_X)$ és $(Y, \|.\|_Y)$ Banach-terek, $A \in L(X,Y)$, ekkor*

$$A \in K(X,Y) \Leftrightarrow A^* \in K(Y^*, X^*),$$

azaz A pontosan akkor kompakt, ha A^* adjungált operátora kompakt. [2, 4]

2.3. Fredholm-operátorok

Végül beszéljünk a Fredholm-operárokról és lehetőségekről az előállításukra. A továbbiakban $(X, \|.\|_X)$ és $(Y, \|.\|_Y)$ Banach-terek.

2.3.1. Definíció (Fredholm-operátor). *$T \in L(X, Y)$* ***Fredholm-operátor****, ha az alábbiak teljesülnek:*

- $\dim \operatorname{Ker} T < \infty$*,*
- *T[X] zárt Y-ban,*
- $\dim(Y/T[X]) < \infty$.

Ekkor a T operátor ***indexe*** $\operatorname{ind} T := \dim \operatorname{Ker} T - \dim(Y/T[X]) \in \mathbb{Z}$*, T* ***cokernele*** $\operatorname{coker} T := Y/T[X]$ *(azaz Y-ban a T képtere szerinti faktortér), valamint a cokernel dimenziója az operátor* ***kodimenziója*** $\operatorname{codim} T := \dim \operatorname{coker} T$*. [1, 3, 4, 5]*

Az X és Y közötti Fredholm-operátorok halmazát a továbbiakban $\mathcal{F}(X, Y)$-al jelöljük. Belátható, hogy a második feltétel (T képterének a zártsága) a másik kettőből következik [4, 5].

Most nézzük meg, hogy bizonyos függvény műveletek hatására változik-e a Fredholm-tulajdonság.

2.3.1. Tétel. *Legyenek $(X, \|.\|_X)$, $(Y, \|.\|_Y)$ és $(Z, \|.\|_Z)$ Banach-terek, ekkor:*

- *$A \in \mathcal{F}(X, Y)$ és $B \in \mathcal{F}(Y, Z)$, ekkor $B \circ A \in \mathcal{F}(X, Z)$ és* $\operatorname{ind}(B \circ A) = \operatorname{ind} B + \operatorname{ind} A$*,*
- *$A \in \mathcal{F}(X, Y)$, ekkor $A^* \in \mathcal{F}(X^*, Y^*)$ és* $\operatorname{ind} A^* = -\operatorname{ind} A$*,*
- *$\mathcal{F}(X, Y)$ nyílt részhalmaza L(X, Y)-nak, és az* $\operatorname{ind} : \mathcal{F}(X, Y) \to \mathbb{Z}$ *függvény lokálisan konstans.*

Tehát Fredholm-operátorok kompozíciója Fredholm-operátor, valamint Fredholm-operátor adjungáltja is Fredholm-operátor. [3, 5]

Korábban említettük a kompakt operátorok és a Fredholm-operátorok kapcsolatát, erről szól a következő állítás.

2.3.2. Tétel. *$T \in L(X, Y)$ bijektív, $K \in L(X, Y)$ kompakt, ekkor $T + K$ Fredholm-operátor és* $\operatorname{ind}(T + K) = 0$*. Ennek speciális esete amikor $(X, \|.\|_X) = (Y, \|.\|_Y)$ és T az identitás X-en. [3, 5]*

Amennyiben ilyen módon kaptunk egy Fredholm-operátort, akkor ahhoz (a kompakt operátorok altér-tulajdonságából kifolyólag) egy kompakt operátort hozzáadva is Fredholm-operátort kapunk, ez igaz tetszőleges konstrukció esetén is:

2.3.3. Tétel. *$K \in K(X,Y)$ és $F \in \mathcal{F}(X,Y)$ esetén $K + F \in \mathcal{F}(X,Y)$, valamint $\operatorname{ind}(K+F) = \operatorname{ind} F$. [3]*

Mivel a Fredholm-operátoroknál nem feltétel, hogy a magterük csak a tér nullelemét tartalmazza, ezért általában nem invertálhatóak, de egy hasonló tulajdonságot megadhatunk:

2.3.4. Tétel. *$T \in L(X,Y)$ pontosan akkor Fredholm-operátor, ha létezik $B \in L(Y,X)$, $K_X \in K(X)$, $K_Y \in K(Y)$ úgy, hogy*

$$BT = I_{|_X} + K_X, TB = I_{|_Y} + K_Y.$$

Azaz a Fredholm-tulajdonság lényegében az invertálhatóság modulo kompakt operátort jelenti. [3, 5]

2.4. Implicit függvény tétel

A módszer használata során az eredmény eléréséhez szükségünk lesz az implicit függvény tételre Banach-terekben, illetve ahhoz kötődően a Fréchet-derivált fogalmára. $(X, \|.\|_X)$, $(Y, \|.\|_Y)$ és $(Z, \|.\|_Z)$ a következők során Banach-terek.

2.4.1. Definíció. *$F : X \times Y \to Z$ **Fréchet-differenciálható** X-ben az (u_0, v_0) pontban, ha létezik $(D_xF)(u_0, v_0) \in L(X,Z)$ úgy, hogy*

$$\lim_{h \to 0} \frac{\|F(u_0 + h, v_0) - F(u_0, v_0) - (D_xF)(u_0, v_0)h\|_Z}{\|h\|_X} = 0.$$

Látható, hogy egy ponthoz tartozó derivált (a valós, többdimenziós esethez hasonlóan) egy függvény.

2.4.1. Tétel (Implicit függvény tétel Banach-terekben). *$F : X \times Y \to Z$ folytonos, $(u_0, v_0) \in X \times Y$, $F(u_0, v_0) = 0$, $(D_xF)(u_0, v_0)$ bijektív és folytonos. Ekkor létezik (u_0, v_0)-nak olyan $U \times V \subset X \times Y$ környezete és $G : V \to U$ függvény, amivel $G(v_0) = u_0$ és*

$$F(G(v), v) = 0 \qquad (\forall v \in V).$$

Ezen felül minden $U \times V$-beli megoldás ebben a formában áll elő. [6]

Az ilyen tulajdonságokkal rendelkező D_xF függvényeket lineáris homeomorfizmusnak nevezzük:

2.4.2. Definíció. *Az A leképezés* ***lineáris homeomorfizmus****, ha folytonos, bijektív és az inverze is folytonos.*

Az inverz folytonossága pedig a Banach-féle inverz tételből (vagy Banach-féle homeomorfia-tételből) következik:

2.4.2. Tétel. $A \in L(X,Y)$ *Banach-terek közötti bijektív operátor, ekkor* $A^{-1} \in L(Y,X)$. *([2] 6.1.4)*

3. fejezet

A Ljapunov-Schmidt-módszer és alkalmazásai

Először is vizsgáljunk meg egy bifurkációs problémát [7] alapján, ezen keresztül szemléltetve a módszer lényegét. Tekintsük a következő egyenletet:

$$F(\lambda, x) = 0$$

ahol $\lambda \in \mathbb{R}$ valós paraméter, $x \in X$ állapotváltozó, X Banach-tér, Y Banach-tér, $0 \in Y$ az ő nulleleme, F pedig kétszer folytonosan differenciálható operátor. A feladat meghatározni azon $(\lambda, x) \in \mathbb{R} \times X$ párokat, amelyek kielégítik az egyenletet, lehetőség szerint az x-eket λ függvényében.

Feltesszük, hogy létezik megoldás, valamint azt, hogy minden $x = 0$ esetén minden $\lambda \in \mathbb{R}$ megoldása az egyenletnek (az úgynevezett triviális megoldások). Ezen kívül tegyük fel azt, hogy $(\lambda_0, 0) \in \mathbb{R} \times X$ bármely környezetében van nemtriviális megoldás, azaz $(\lambda_0, 0)$ bifurkációs pont. Ez maga után vonja, hogy $F_x(\lambda_0, 0)$ Fréchet-derivált nem invertálható.

Legyen

$$\begin{aligned} L &:= F_x(\lambda_0, x_0) : X \to Y, \\ K &:= \operatorname{Ker} L, \\ R &:= \operatorname{Im} L. \end{aligned}$$

Tegyük fel, hogy K és R zárt alterek X-ben és Y-ban, emiatt vannak komplemens altereik, azaz létezik $W \subset X$ zárt altér, amellyel $K \oplus W = X$, illetve létezik $Z \subset Y$ szintén zárt altér, amellyel $R \oplus Z = Y$, és bármely $x \in X$ egyértelműen felírható

$x = u + v, u \in K, v \in W$ alakban, valamint bármely $y \in Y$ egyértelműen felírható $y = r + z, r \in R, z \in Z$ alakban. Ez teljesül például akkor, hogyha K és R véges dimenziós alterek, azaz ha L Fredholm-operátor. Vegyük ezenfelül a $Q : Y \to R$ és $P : Y \to Z$ projekciókat.

Írjuk fel az eredeti egyenlet Taylor-polinomját:

$$0 = F(\lambda, x) = Lx + \phi(\lambda, x)$$

(ahol $\phi(\lambda, x) = F(\lambda, x) - Lx$ a megfelelő maradéktag), és ezekbe írjuk be az $x = u + v$ felírást, valamint vetítsük őket az R és a Z alterekre, így kapjuk az alábbi két egyenletet:

$$\begin{aligned} 0 &= QL(u + v) + Q\phi(\lambda, u + v) = Lv + Q\phi(\lambda, u + v), \\ 0 &= PL(u + v) + P\phi(\lambda, u + v). \end{aligned}$$

Az első egyenlet így egy 3-változós függvényt ír le:

$$\Phi(\lambda, u, v) := Lv + Q\phi(\lambda, u + v),$$

ami folytonosan differenciálható, és deriváltja a 3. változó szerint az $u = v = 0$ helyen

$$\Phi_v(\lambda_0, 0, 0) : v \to Lv + Q\phi_x(\lambda_0, 0)v.$$

Mivel $\phi(\lambda, x) = F(\lambda, x) - Lx$, így

$$\phi_x(\lambda_0, 0) = F_x(\lambda_0, 0) - L = L - L = 0,$$

ezért

$$\Phi_v(\lambda_0, 0, 0) = L_{|W},$$

viszont $\operatorname{Ker} L_{|W} = \{0\}$ és $\operatorname{Im} L = R$, így $\Phi_v(\lambda_0, 0, 0)$ folytonos bijekció W és R között. Alkalmazható az implicit függvény tétel, tehát van $(\lambda_0, 0, 0)$-nak egy olyan $\Lambda \times \mathcal{K} \times \mathcal{W}$ környezete, amiben egy $\gamma : \Lambda \times \mathcal{K} \to \mathcal{W}$ függvény meghatározza a $\Phi_v(\lambda, u, v) = 0$ összes megoldását $\Phi_v(\lambda, u, \gamma(\lambda, u))$ alakban. Ezt behelyettesítve az eredeti egyenletbe kapjuk a

$$0 = PF(\lambda, u + \gamma(\lambda, u))$$

egyenletet. Mivel $u \in K$ és $\dim K < \infty$, valamint $\operatorname{Im} P = Z$, $\dim Z < \infty$, így az eredeti egyenletet sikerült redukálnunk egy véges dimenzión értelmezett, véges dimenziós értékkészletű egyenletre, amit könnyebb megoldani.

3.1. Többpontos peremfeladat közönséges nemlineáris differenciálegyenletre

Mutassuk be a Ljapunov-Schmidt módszer egy alkalmazását [8] alapján. A feladat egy n-edrendű, nemlineáris differenciálegyenlet megoldása, homogén peremfeltéttel:

$$y^{(n)}(t) + a_{n-1}(t)y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_0(t)y(t) = g(y(t)) \quad (0 \le t \le 1) \tag{3.1}$$

$$\sum_{j=1}^{n} b_{ij}(0)y^{(j-1)}(0) + \sum_{j=1}^{n} b_{ij}(1)y^{(j-1)}(t_1) + \cdots + \sum_{j=1}^{n} b_{ij}(N)y^{(j-1)}(t_N) = 0 \quad (i = 1, \ldots, n) \tag{3.2}$$

ahol b_{ij} valós számok, $0 = t_0 < t_1 < \cdots < t_N = 1$ rögzítettek. Feltesszük, hogy g és $a_0, \ldots, a_{n-1}$ valósak, folytonosak, a teljes $\mathbb{R}$-en értelmezettek, g Lipschitz-folytonos, valamint $a_0(t) \neq 0$ $(0 \le t \le 1)$. Azt is feltesszük, hogy $\lim_{t\to\infty} g(t)$ és $\lim_{t\to-\infty} g(t)$ létezik és véges, ezeket $g(\infty)$-nel illetve $g(-\infty)$-nel fogjuk jelölni.
A vizsgálat során fontos szerepet fog játszani a homogén probléma megoldása:

$$y^{(n)}(t) + a_{n-1}y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_0 y(t) = 0 \quad (0 \le t \le 1). \tag{3.3}$$

Első lépésként fogalmazzuk át a problémát, a magasabbrendű egyenlet helyett kezeljünk egyenletrendszert. Ehhez vezessük be az alábbi jelöléseket:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ y' \\ \vdots \\ y^{(n-1)} \end{bmatrix}$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -a_0(t) & -a_1(t) & -a_2(t) & \ldots & -a_{n-1}(t) \end{bmatrix}$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ g(x_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ g(y) \end{bmatrix}$$

$$B_k = \begin{bmatrix} b_{11}(k) & b_{12}(k) & \dots & b_{1n}(k) \\ b_{21}(k) & b_{22}(k) & \dots & b_{2n}(k) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1}(k) & b_{n2}(k) & \dots & b_{nn}(k) \end{bmatrix}$$

Így a differenciálegyenletet felírhatjuk

$$x'(t) = A(t)x(t) + f(x(t)) \quad (0 \leq t \leq 1) \tag{3.4}$$

alakban, a homogén egyenletet

$$x'(t) = A(t)x(t) \quad (0 \leq t \leq 1) \tag{3.5}$$

alakban, a peremfeltételt pedig

$$B_0x(0) + B_1x(t_1) + \cdots + B_{N-1}x(t_{N-1}) + B_Nx(1) = 0 \tag{3.6}$$

formában. Legyen Φ a homogén egyenlet alaprendszere (azaz $\Phi'(t) = A(t)\Phi(t)$ $(0 \leq t \leq 1)$), és $\Phi(0) = I$ (ahol I az $N \times N$ méretű egységmátrix). Ezt felhasználva még legyen

$$D = B_0 + B_1\Phi(t_1) + \cdots + B_{N-1}\Phi(t_{N-1}) + B_N\Phi(1).$$

Emellett még szükséges az inhomogén, lineáris egyenlet vizsgálata:

$$x'(t) = A(t)x(t) + h(t) \quad (0 \leq t \leq 1). \tag{3.7}$$

Az állandók variálásával (3.7)-(3.6)-nak x megoldása pontosan akkor, ha

$$x(t) = \Phi(t)x(0) + \Phi(t)\int_0^1 \Phi^{-1}(s)h(s)ds \qquad \text{és}$$

$$B_0x(0) + B_1x(t_1) + \cdots + B_{N-1}x(t_{N-1}) + B_Nx(1) = 0.$$

Ha a második egyenletben x-be behelyettesítünk az első egyenletből, akkor

$$\begin{aligned}
0 &= B_0x(0) + B_1x(t_1) + \cdots + B_{N-1}x(t_{N-1}) + B_Nx(1) = \\
&= B_0x(0) + B_1\Phi(t_1)\left(x(0) + \int_0^{t_1} \Phi^{-1}(s)h(s)ds\right) + \cdots + \\
&+ B_N\Phi(t_{N-1})\left(x(0) + \int_0^{t_{N-1}} \Phi^{-1}(s)h(s)ds\right) + B_N\Phi(1)\left(x(0) + \int_0^{1} \Phi^{-1}(s)h(s)ds\right) = \\
&= B_0x(0) + B_1\Phi(t_1)x(0) + \cdots + B_N\Phi(1)x(0) + \\
&+ B_1\Phi(t_1)\int_0^{t_1} \Phi^{-1}(s)h(s)ds + \cdots + B_N\Phi(1)\int_0^{1} \Phi^{-1}(s)h(s)ds.
\end{aligned}$$

Mivel

$$Dx(0) = B_0x(0) + B_1\Phi(t_1)x(0) + \cdots + B_{N-1}\Phi(t_{N-1})x(0) + B_N\Phi(1)x(0),$$

ezért az előbbit átrendezve

$$Dx(0) = -\left(B_1\Phi(t_1)\int_0^{t_1} \Phi^{-1}(s)h(s)ds + \cdots + B_N\Phi(1)\int_0^{1} \Phi^{-1}(s)h(s)ds\right).$$

Tehát

$$B_1\Phi(t_1)\int_0^{t_1} \Phi^{-1}(s)h(s)ds + \cdots + B_N\Phi(1)\int_0^{1} \Phi^{-1}(s)h(s)ds$$

benne van D képterében. Mivel $\operatorname{Im} D \perp \operatorname{Ker} D^T$, ezért ha $p \in \operatorname{Ker} D^T$, akkor

$$0 = p^T\left(B_1\Phi(t_1)\int_0^{t_1} \Phi^{-1}(s)h(s)ds + \cdots + B_N\Phi(1)\int_0^{1} \Phi^{-1}(s)h(s)ds\right).$$

Ezután vizsgáljuk meg (3.5)-(3.6) feladatot, ez pontosan akkor oldható meg, ha

$$\begin{aligned}
&x(t) = \Phi(t)x(0) && \text{és} \\
&B_0x(0) + B_1x(t_1) + \cdots + B_{N-1}x(t_{N-1}) + B_Nx(1) = 0
\end{aligned}$$

A második egyenlet átírható

$$\begin{aligned}
0 &= B_0x(0) + B_1x(t_1) + \cdots + B_{N-1}x(t_{N-1}) + B_Nx(1) = \\
&= B_0x(0) + B_1\Phi(t_1)x(0) + \cdots + B_{N-1}\Phi(t_{N-1})x(0) + B_N\Phi(1)x(0) = \\
&= Dx(0)
\end{aligned}$$

alakra, tehát x pontosan akkor megoldása a homogén peremfeladatnak, ha $x(0) \in \operatorname{Ker} D$. Ebből az is kiderült, hogy a megoldástér ugyanannyi dimenziós, mint $\operatorname{Ker} D$. A továbbiakban feltesszük, hogy $\dim \operatorname{Ker} D = 1$, $\hat{p} \in \operatorname{Ker} D$, $\|\hat{p}\| = 1$, és legyen $u(t) := \Phi(t)\hat{p}$.
Definiáljunk operátorokat, legyen $(L^2[0,1], \mathbb{R}^n)$ az $L^2[0,1]$-ből $\mathbb{R}^n$-be képező függvények halmaza, $F : (L^2[0,1], \mathbb{R}^n) \to (L^2[0,1], \mathbb{R}^n)$: $(Fx)(t) := f(x(t))$. F-ről látható, hogy f folytonossága miatt ő is folytonos. Legyen $L : \operatorname{Dom} L \to (L^2[0,1], \mathbb{R}^n)$, ahol

$$\operatorname{Dom} L = \left\{ \phi : [0,1] \to \mathbb{R}^n : \phi \text{ abszolút folytonos}, \phi' \in (L^2[0,1], \mathbb{R}^n), \sum_{k=1}^{N} B_k \phi(t_k) = 0 \right\}$$

és $(Lx)(t) := x'(t) - A(t)x(t)$. Tehát L értelmezési tartományában azok a függvények vannak, amelyek kielégítik a (3.6) peremfeltételt, és a (3.4) egyenletnek megfelel az

$$Lx = Fx \tag{3.8}$$

egyenlet. Erre fogjuk a Ljapunov-Schmidt módszert alkalmazni.
A korábbi levezetésünkből és L definíciójából következik, hogy $x \in \operatorname{Ker} L$ pontosan akkor, ha $x(t) = \Phi(t)\hat{p}$ (ami egybevág u-nak a definíciójával, tehát $u \in \operatorname{Ker} L$).
Konstruáljunk meg egy $\psi : [0,1] \to \mathbb{R}^n$ függvényt úgy, hogy az ő merőleges kiegészítője $\operatorname{Im} L$ legyen. Legyen $p \in \operatorname{Ker}(D^T) \setminus \{\mathbf{0}\}$, és legyen

$$\psi(t) = \begin{cases} \left[(B_N\Phi(1))\,\Phi^{-1}(t)\right]^T p & \text{ha } t \in (t_{N-1}, 1] \\ \left[(B_{N-1}\Phi(t_{N-1}) + B_N\Phi(1))\,\Phi^{-1}(t)\right]^T p & \text{ha } t \in (t_{N-2}, t_{N-1}] \\ \vdots & \\ \left[(B_2\Phi(t_2) + \cdots + B_{N-1}\Phi(t_{N-1}) + B_N\Phi(1))\,\Phi^{-1}(t)\right]^T p & \text{ha } t \in (t_1, t_2] \\ \left[(B_1\Phi(t_1) + B_2\Phi(t_2) + \cdots + B_{N-1}\Phi(t_{N-1}) + B_N\Phi(1))\,\Phi^{-1}(t)\right]^T p & \text{ha } t \in [0, t_1]. \end{cases}$$

Ellenőrizzük, hogy $\psi(t) = 0$ $(t \in [0,1])$ lehetséges-e. Először nézzük meg, hogy $(t_{N-1}, 1]$ intervallumon ez mit jelentene:

$$0 = \psi(t) = \left[B_N\Phi(1)\Phi^{-1}(t)\right]^T p = \Phi^{-T}(t)\Phi^T(1)B_N^T p,$$

ami pontosan akkor teljesül, ha $p \in \operatorname{Ker} B_N^T$. Ezt feltéve és továbbhaladva, $(t_{N-2}, t_{N-1}]$ intervallumon nézzük:

$$\begin{aligned} 0 = \psi(t) &= \left[(B_{N-1}\Phi(t_{N-1}) + B_N\Phi(1))\,\Phi^{-1}(t)\right]^T p = \\ &= \Phi^{-T}(t)\left(B_{N-1}^T\Phi^T(t_{N-1}) + \Phi^T(1)B_N^T\right)p = \Phi^{-T}(t)\Phi^T(t_{N-1})B_{N-1}^T p, \end{aligned}$$

ami akkor teljesül, ha $p \in \operatorname{Ker} B_{N-1}^T$. Ezt ismét feltételezve és $i = N-3, \dots, 1$ tovább folytatva azt kapjuk, hogy ha $\psi(t) = 0$ $(t \in [0,1])$, abból az következik, hogy $p \in \operatorname{Ker} B_i^T$. A továbbiakban feltesszük, hogy $\cap_{i=1}^N \operatorname{Ker} B_i^T = \{\mathbf{0}\}$, így ψ nem az azonosan $\mathbf{0}$ függvény, valamint hogy $p \in \operatorname{Ker}(D^T)$-at úgy választjuk, hogy $\|\psi\|_{L^2} = 1$. Belátható, hogy $\operatorname{Im} L = \psi^{\perp}$. Ennek segítségével állítsuk elő az $E : (L^2[0,1], \mathbb{R}^n) \to \operatorname{Im} L$ projekciós operátort:

$$(Ex)(t) = x(t) - \psi(t)\int_0^1 \psi^T(s)x(s)ds = x(t) - \psi(t)\langle x, \psi\rangle_{L^2}.$$

Ezzel értelemszerűen $ELx = Lx$ $(x \in \operatorname{Dom} L)$.
Emellett vezessük be a $P : (L^2[0,1], \mathbb{R}^n) \to \operatorname{Ker} L$ projekciót is:

$$(Px)(t) = u(t)\int_0^1 u^T(s)x(s)ds = u(t)\langle x, u\rangle_{L^2},$$

ahol u volt az a vektor, ami kifeszíti $\operatorname{Ker} L$-et. Így bármely $x \in (L^2[0,1], \mathbb{R}^n)$-re $Px = \alpha u$, ahol α megfelelő (x-től függő) valós szám.
Magától értetődő, hogy ha L-et leszűkítjük $\operatorname{Dom} L \cap (\operatorname{Ker} L)^{\perp}$-re, akkor az bijekció $\operatorname{Dom} L \cap (\operatorname{Ker} L)^{\perp}$ és $\operatorname{Im} L$ között. Így létezik $M : \operatorname{Im} L \to \operatorname{Dom} L \cap (\operatorname{Ker} L)^{\perp}$ leképezés, ami ennek a megszorításnak az inverze:

$$\begin{aligned} &LMh = h && (h \in \operatorname{Im} L) \\ &MLx = (I - P)x && (x \in \operatorname{Dom} L). \end{aligned}$$

Lássunk neki az $Lx = Fx$ egyenlet megoldhatóságának vizsgálatához. Először vetítsük az egyenletet $\operatorname{Im} L$-re E felhasználásával:

$$Lx = EFx.$$

Ezután írjuk fel x-et a P projekció segítségével, és helyettesítsük be a levetített feladatot, illetve a $\operatorname{Ker} L$-et kifeszítő u-t.

$$x = Px + (I - P)x = Px + MLx = Px + MEFx = \alpha u + MEFx.$$

Az $Lx = Fx$ ekvivalens $Lx - Fx = 0$-val, ami ekvivalens

$$\begin{aligned} E(Lx - Fx) &= 0 \quad \text{és} \\ (I - E)(Lx - Fx) &= 0. \end{aligned}$$

Az első egyenlet azt jelenti, hogy $F(x) \in \operatorname{Im} L$, és mivel ψ ortogonális $\operatorname{Im} L$-re, ezért pontosan akkor teljesül, ha

$$\int_0^1 (f(x(t)))^T \psi(t) dt = 0.$$

Vezessük be az alábbi jelöléseket:

- $u(t)$ első komponensét jelöljük $s(t)$-vel,
- $MEF(x)$ első komponensét jelöljük $w(x)$-szel,
- $\psi(t)$ n. komponensét jelöljük $v(t)$-vel.

Mivel f az a függvény, aminek az első $n-1$ komponense azonosan 0, az n. komponense pedig $f_n(x) = g(x_1)$, emellett x_1 felírható $x_1(t) = \alpha s(t) + w(x(t))$ alakban, így az integrál átalakítható:

$$0 = \int_0^1 (f(x(t)))^T \psi(t) dt = \int_0^1 v(t) g(x_1(t)) dt = \int_0^1 v(t) g(\alpha s(t) + w(x(t))) dt.$$

Mivel $\{t : s(t) = 0\}$ 0-mértékű, ezért az integrál felbontható:

$$\int_0^1 v(t)g(\alpha s(t)+w(x(t)))dt = \int_{\{s(t)>0\}} v(t)g(\alpha s(t)+w(x(t)))dt + \int_{\{s(t)<0\}} v(t)g(\alpha s(t)+w(x(t)))dt$$

M, E és g korlátossága miatt w is korlátos, írjuk fel $\alpha \to \pm\infty$ esetén az egyenletet:

$$\begin{aligned} \lim_{\alpha \to \infty} \int_0^1 v(t) g(\alpha s(t) + w(x(t))) dt &= g(\infty) \int_{s(t)>0} v(t) dt + g(-\infty) \int_{s(t)<0} v(t) dt =: J_1 \\ \lim_{\alpha \to -\infty} \int_0^1 v(t) g(\alpha s(t) + w(x(t))) dt &= g(-\infty) \int_{s(t)>0} v(t) dt + g(\infty) \int_{s(t)<0} v(t) dt =: J_2. \end{aligned}$$

Tegyük fel, hogy $J_2 < 0 < J_1$ ($J_1 < 0 < J_2$ esetén analóg módon folytatható, de $J_1 J_2 < 0$ szükséges). Így létezik α_0, amivel

$$\begin{aligned} &\int_0^1 v(t)g(\alpha s(t) + w(x(t)))dt > 0 && \text{ha } \alpha \geq \alpha_0, \\ &\int_0^1 v(t)g(\alpha s(t) + w(x(t)))dt < 0 && \text{ha } \alpha \leq -\alpha_0. \end{aligned} \tag{3.9}$$

Definiáljuk az alábbi operátorokat:

$$\begin{aligned} &H_1 : (L^2[0,1], \mathbb{R}^n) \times \mathbb{R} \to (L^2[0,1], \mathbb{R}^n) \\ &H_1(x, \alpha) := \alpha u + MEF(x) \\ &H_2 : (L^2[0,1], \mathbb{R}^n) \times \mathbb{R} \to \mathbb{R} \\ &H_2(x, \alpha) := \alpha - \int_0^1 v(t)g(\alpha s(t) + w(x(t)))dt \\ &H : (L^2[0,1], \mathbb{R}^n) \times \mathbb{R} \to (L^2[0,1], \mathbb{R}^n) \times \mathbb{R} \\ &H(x, \alpha) := (H_1(x, \alpha), H_2(x, \alpha)). \end{aligned}$$

Ezzel a szétválasztással x-nek a $\operatorname{Ker} L$ irányú komponensét az α reprezentálja. $(L^2[0,1], \mathbb{R}^n) \times \mathbb{R}$-en a norma amit használunk $\|(x, \alpha)\| := \max\{\|x\|_{L^2}, |\alpha|\}$. Jól látható, hogy az eredeti (3.4)-(3.6) peremfeladat megoldhatósága a H fixpontjának létezésével hozható összefüggésbe.

Legyen $r := \sup_{t \in \mathbb{R}} |g(t)|$, $m := \sup_{t \in [0,1]} |v(t)|$. Ezekből következik, hogy

$$\left| \int_0^1 v(t)g(\alpha s(t) + w(x(t)))dt \right| \leq rm.$$

Válasszunk α_0-át úgy, hogy (3.9) egyenletek teljesüljenek és $\alpha_0 > rm$, legyen $\delta := \alpha_0 + rm$. u, g és ME korlátossága miatt ha $|\alpha| \leq \delta$ és $x \in L^2[0,1]$, akkor

$$\|H_1(x, \alpha)\| = \|\alpha u + MEF(x)\| \leq |\alpha| \|u\| \|MEF(x)\| \leq |\alpha| \|u\| \|ME\| |g(x_1)| \leq b_1$$

megfelelő b_1 választásával. Legyen

$$\mathcal{B} = \left\{ (x, \alpha) \in L^2[0,1] \times \mathbb{R} : \|x\| \leq b_1 \text{ és } |\alpha| \leq \delta \right\},$$

így $\mathcal{B}$ egy zárt, korlátos, konvex halmaz. A cél megmutatni, hogy H a $\mathcal{B}$ halmazt önmagába képezi. $\|H_1(x, \alpha)\| \leq b_1$-et az előbb beláttuk, nézzük $\|H_2(x, \alpha)\| \leq \delta$-t.

Először legyen $\alpha_0 \le \alpha \le \delta$, a feltételünk miatt

$$\int_0^1 v(t)g(\alpha s(t) + w(x(t)))dt > 0,$$

így

$$H_2(x,\alpha) = \alpha - \int_0^1 v(t)g(\alpha s(t) + w(x(t)))dt \ge \alpha_0 - rm > 0,$$

így $H_2(x,\alpha) \in [0, \alpha_0 - rm] \subset [-\delta, \delta]$.
Ha $0 \le \alpha < \alpha_0$, akkor

$$\begin{aligned}|H_2(x,\alpha)| &= \left|\alpha - \int_0^1 v(t)g(\alpha s(t) + w(x(t)))dt\right| \le \\ &\le |\alpha| + \left|\int_0^1 v(t)g(\alpha s(t) + w(x(t)))dt\right| \le \alpha_0 + rm = \delta,\end{aligned}$$

így $H_2(x,\alpha) \in [-\delta, \delta]$, tehát ha $0 \le \alpha \le \delta$ és $x \in L^2[0,1]$, akkor $H(x,\alpha) \in \mathcal{B}$. Analóg módon belátható, hogy ha $-\delta \le \alpha \le 0$, akkor ugyanez fenn áll.
Így tehát $H(\mathcal{B}) \subset \mathcal{B}$. H kompaktsága következik MEF kompaktságából, és így a Schauder fixpont-tétel értelmében H-nak van fixpontja $\mathcal{B}$-ben, ami egyben azt jelenti, hogy az eredeti (3.4)-(3.6) peremfeladat is megoldható.

4. fejezet

A Ljapunov-Schmidt-módszer mint numerikus módszer

A következő fejezetben ismertetjük a Ljapunov-Schmidt módszernek egy numerikus módszerkénti felhasználását bizonyos peremérték-feladatok esetén [9] alapján. Tekintsük az alábbi egyenletet:

$$Lu(x) = Nu(x), \ x \in [a, b] \tag{4.1}$$

ahol L úgynevezett Sturm-Liouville operátor:

$$Lu = \frac{1}{w}(-(pu')' + qu),$$

ahol $p(x) > 0, w(x) > 0$ $(x \in [a, b])$, p, q, w adott analitikus függvények, valamint u-ra a következő peremfeltételek teljesülnek:

$$\alpha_{11}u(a) + \alpha_{12}u'(a) = 0,$$
$$\alpha_{21}u(b) + \alpha_{22}u'(b) = 0.$$

Ezek a kikötések azért szükségesek, mert a későbbiekben az ilyen L-ekhez adunk meg egy módszert (a Csebisev-Tau-módszert [10]), amivel a sajátfüggvényeit elő tudjuk állítani.
Emellett feltesszük a következőket:

- S valós, szeparábilis Hilbert-tér, $L : \operatorname{Dom} L \subset S \to S$ lineáris operátor, $N : \operatorname{Dom} N \subset S \to S$ nemlineáris operátor,

- L zárt leképezés (amivel ekvivalens [2]: $x_n \to x$ és $Lx_n \to y$-ból következik hogy

$x \in \operatorname{Dom} L$ és $Lx = y$), önadjungált, $\operatorname{Dom} L$ sűrű S-ben, $\operatorname{Ker} L = p > 0$ véges,

- L-nek a sajátértékei $\lambda_1 = \cdots = \lambda_p = 0 < \lambda_{p+1}$, $\lambda_i \leq \lambda_{i+1}$, $\lim_{i\to\infty} \lambda_i = \infty$, és a hozzájuk tartozó $\Phi_1, \Phi_2, \ldots$ sajátfüggvények S-ben egy teljes ortonormált rendszert alkotnak - ezeket a tulajdonságokat a Sturm-Liouville-operátor biztosítja,

- létezik egy $S' \subset S$ altér, ami egy μ normával teljes, $\operatorname{Dom} L \subset S'$, minden $x \in \operatorname{Dom} L$ esetén a Φ_i-szerinti Fourier-sora ($\sum_{k=1}^{\infty} \langle x, \Phi_k \rangle \Phi_k$) μ-ben konvergál x-hez és $\{\mu(\Phi_k)/\lambda_k\}_{k>p} \in l_2$, valamint létezik $\alpha > 0$, amivel $x \in S'$ esetén $\|x\|_S \leq \alpha\mu(x)$ (tehát μ α-szorosa felső becslése az eredeti normának, és μ-beli konvergenciából következik, hogy az adott sorozat az eredeti normában is konvergens),

- $\operatorname{Dom} L \cap \operatorname{Dom} N \neq \emptyset$, $\operatorname{Dom} N \subset S'$ és altér S'-ben, $\operatorname{Dom} N$ zárt μ szerint,

- bármely $R > 0$-hoz létezik $\beta_R > 0, b_R > 0$, amelyekkel azon $x, y \in \operatorname{Dom} N$-ekre, amelyekre $\mu(x) \leq R, \mu(y) \leq R$ teljesül, $\mu(Nx - Ny) \leq \beta_R \mu(x - y)$ és $\mu(Nx) \leq b_R$, tehát tetszőleges μ-szerinti gömb N-szerinti képe korlátos (μ normával), valamint ezen gömbbeli elemek környezetének képének átmérője arányos a környezet átmérőjével; ezek a feltételek biztosítják majd az kisegítő egyenletünk kontrakció tulajdonságát.

Az (4.1) egyenlet megoldásait $\operatorname{Dom} L \cap \operatorname{Dom} N$-ben keressük. Legyen $m \geq p$ és

$$S_m := \operatorname{span}\{\Phi_1, \ldots, \Phi_m\}, \quad S_0 := \{0\},$$

azaz S_m az első m sajátfüggvény által kifeszített altér, $S_m \subset \operatorname{Dom} L$. Definiáljuk a következő operátorokat, amennyiben $u = \sum_{k=1}^{\infty} \langle u, \Phi_k \rangle, \Phi_k$ ($u \in S$):

$$P_m u := \sum_{k=1}^{m} \langle u, \Phi_k \rangle, \Phi_k,$$

tehát P_m az S_m-re történő ortogonális projekció, valamint

$$H_m u := \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle u, \Phi_k \rangle, \Phi_k.$$

H_m Dom L-be képez (mivel $\Phi_k \in \operatorname{Dom} L$ $(k = 0, \dots, m+1, \dots)$), lássuk be róla, hogy lineáris $(x, y \in S,\ \alpha \in \mathbb{R})$:

$$\begin{aligned}
H_m(\alpha x + y) &= \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle \alpha x + y, \Phi_k \rangle \Phi_k = \\
&= \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} (\langle \alpha x, \Phi_k \rangle + \langle y, \Phi_k \rangle) \Phi_k = \\
&= \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle \alpha x, \Phi_k \rangle \Phi_k + \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle y, \Phi_k \rangle \Phi_k = \\
&= \alpha \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle x, \Phi_k \rangle \Phi_k + \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle y, \Phi_k \rangle \Phi_k = \\
&= \alpha H_m x + H_m y.
\end{aligned}$$

H_m az L egy leszűkítésének inverze, pontosabban $H_m = (L_{|S_m^\perp})^{-1}$, értelemszerűen $S_m^\perp = \operatorname{span}\{\Phi_{m+1}, \Phi_{m+2}, \dots\}$, így a linearitás miatt elég Φ_n-ra nézni $(n > m)$:

$$\begin{aligned}
L H_m \Phi_n &= L \left(\sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle \Phi_n, \Phi_k \rangle \Phi_k \right) = \\
&= L \left(\frac{1}{\lambda_n} \Phi_n \right) = \frac{1}{\lambda_n} \lambda_n \Phi_n = \Phi_n.
\end{aligned}$$

$H_m L u = (I - P_m) u$, ahol I az identitás operátor, ezt szintén elég Φ_n-re vizsgálni $(n = 1, 2, \dots)$:

$$\begin{aligned}
H_m L \Phi_n = H_m(\lambda_n \Phi_n) &= \lambda_n \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle \Phi_n, \Phi_k \rangle \Phi_k = \\
&= \begin{cases} \mathbf{0}, & \text{ha } n \le m \\ \Phi_n, & \text{ha } n \ge m+1. \end{cases}
\end{aligned}$$

H_m S-szerinti normája $\frac{1}{\lambda_{m+1}}$, ehhez felhasználjuk, hogy L sajátértékei növekvő sorrendben vannak indexelve, valamint hogy $\|I - P_m\| \le 1$ az ortogonális projekció tulajdonsága miatt:

$$\begin{aligned}\|H_m u\| = \left\| \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle u, \Phi_k \rangle \Phi_k \right\| \leq \\ \leq \frac{1}{\lambda_{m+1}} \|(I - P_m)u\| \leq \frac{1}{\lambda_{m+1}} \|u\|\end{aligned}$$

és $u = \Phi_{m+1}$ esetén teljesül az egyenlőség:

$$\begin{aligned}\|H_m \Phi_{m+1}\| = \left\| \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle \Phi_{m+1}, \Phi_k \rangle \Phi_k \right\| = \\ = \left\| \frac{1}{\lambda_{m+1}} \Phi_{m+1} \right\| = \frac{1}{\lambda_{m+1}} \|\Phi_{m+1}\|.\end{aligned}$$

Még nézzük meg H_m μ-szerinti normáját: $\mu(H_m) \leq \alpha\sigma(m)$, ahol $\sigma(m) = \left(\sum_{k=m+1}^{\infty} \left(\frac{\mu(\Phi_k)}{\lambda_k} \right)^2 \right)^{1/2}$:

$$\begin{aligned}\mu(H_m u) &= \mu \left(\sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle u, \Phi_k \rangle \Phi_k \right) \leq \\ &\leq \left| \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k} \langle u, \Phi_k \rangle \mu(\Phi_k) \right| = \left| \sum_{k=m+1}^{\infty} \frac{\mu(\Phi_k)}{\lambda_k} \langle u, \Phi_k \rangle \right| \leq \\ &\leq \left| \left(\frac{\mu(\Phi_k)}{\lambda_k}, \langle u, \Phi_k \rangle \right)_{l_2} \right| \leq \left\| \frac{\mu(\Phi_k)}{\lambda_k} \right\|_{l_2} \|\langle u, \Phi_k \rangle\|_{l_2} = \\ &= \sigma(m)\|u\| \leq \sigma(m)\alpha\mu(u)\end{aligned}$$

ahol $(\cdot,\cdot)_{l_2}$ az l_2-beli skaláris szorzást jelöli. A levezetés során alkalmaztuk a Cauchy-Bunyakovsky-Schwarz-egyenlőtlenséget és a Parseval-egyenlőséget. Ebből az is következik, hogy $\lim_{m\to\infty} \mu(H_m) = 0$. A korábbi feltételeinket egészítsük ki még azzal, így $\operatorname{Im} H_m \subset \operatorname{Dom} N$ és $S_m \subset \operatorname{Dom} N$, hogy a P_m és a H_m alkalmazása után tudjuk az N-et is még alkalmazni.
Tegyük fel, hogy $\overline{u} \in \operatorname{Dom} N \cap \operatorname{Dom} L$ megoldása az (4.1) egyenletnek, tehát

$$L\overline{u} = N\overline{u}. \tag{4.2}$$

Erre először alkalmazzuk H_m-et:

$$\begin{aligned} H_m L\overline{u} &= H_m N\overline{u}, \\ (I - P_m)\overline{u} &= H_m N\overline{u}, \\ \overline{u} &= P_m\overline{u} + H_m N\overline{u}, \end{aligned} \tag{4.3}$$

ez a kisegítő egyenlet. Ezután alkalmazzuk (4.2)-re P_m-et:

$$P_m(L\overline{u} - N\overline{u}) = 0, \tag{4.4}$$

ami a bifurkációs egyenlet. Az összes olyan $\overline{u} \in \operatorname{Dom} L \cap \operatorname{Dom} N$, ami megoldása a kisegítő és a bifurkációs egyenletnek, az megoldása az eredeti (4.1) feladatnak.
Legyenek $a > 0, b > 0$ valós számok, és legyen u_0 egy közelítő megoldása az $Lu = Nu$ egyenletnek úgy, hogy létezik $u^* \in S_m$ ($u^* = \sum_{k=1}^{m} a_k \Phi_k$ valamely a_k számokra, $k = 1, \ldots, m$), amivel $\mu(u^* - u_0) \leq a$. Vegyük a következő halmazt:

$$S_{u^*}^b := \{u \in \operatorname{Dom} N \mid P_m u = u^*, \mu((I - P_m)u) \leq b\},$$

tehát $S_{u^*}^b$ azon u-kat tartalmazza, melyek S_m-re levetítve u^*-ba esnek, és u^*-tól μ-szerinti távolságuk legfeljebb b. Ezen elemek μ-normája korlátos:

$$\mu(u) = \mu(P_m u + (I - P_m)u) \leq \mu(u^*) + \mu((I - P_m)u) \leq \mu(u^*) + b.$$

Ezután definiáljuk a következő operátort:

$$\begin{aligned} T_{u^*}^b &: S_{u^*}^b \to S, \\ T_{u^*}^b(u) &:= u^* + H_m N u. \end{aligned}$$

Lássuk be $T_{u^*}^b$-ről, hogy bizonyos feltételek mellett kontrakció, legyen $x, y \in S_{u^*}^b$:

$$\begin{aligned} \mu(T_{u^*}^b(x) - T_{u^*}^b(y)) &= \mu((u^* + H_m N x) - (u^* + H_m N y)) = \\ &= \mu(H_m(Nx - Ny)) \leq \\ &\leq \mu(H_m)\mu(Nx - Ny) \leq \\ &\leq \mu(H_m)\beta_R \mu(x - y), \end{aligned}$$

ahol $R = \mu(u^*) + b$, tehát u^*-tól és b-től függő konstans, és a kezdeti kikötéseink alapján β_R egy R-től függő konstans. Mivel $\lim_{m\to\infty} \mu(H_m) = 0$, ezért elég nagy m esetén

$\mu(H_m)\beta_R < 1$. Annak, hogy $\operatorname{Im} T^b_{u^*} \subset S^b_{u^*}$ (tehát lehet $T^b_{u^*}$-t iteratívan alkalmazni) elégséges feltétele, hogy $\mu(H_m)^2\mu(L)b_R \leq b$, ami kellően nagy m-re szintén teljesül. Tehát ha m elég nagy, akkor $T^b_{u^*}$ kontrakció, így a Banach-Tyihonov-Cacciopoli-tétel miatt van fixpontja. Ezt az u^*-tól függő fixpontot jelöljük $y(u^*)$-al, és asszociált elemnek nevezzük. $y(u^*)$-ról könnyen belátható, hogy megoldása az (4.3) egyenletnek.
Vezessük be a $c_k := \langle u^*, \Phi_k\rangle$ $(k = 1, \ldots, m)$ jelölést, amivel $u^* = \sum_{k=1}^m c_k\Phi_k$. Nézzük meg, hogy milyen feltételek mellett lesz $y(u^*)$ megoldása a (4.4) bifurkációs egyenletnek?

$$
\begin{aligned}
0 &= P_m(Ly(u^*) - Ny(u^*)) = P_mLy(u^*) - P_mNy(u^*),\\
P_mLy(u^*) &= P_mL(u^* + H_mNy(u^*)) = P_mLu^* + P_mLH_mNy(u^*) =\\
&= P_mL(\sum_{k=1}^m c_k\Phi_k) + P_mL\sum_{k=m+1}^{\infty}\langle Ny(u^*), \Phi_k\rangle\Phi_k =\\
&= P_m(\sum_{k=1}^m c_k\lambda_k\Phi_k) + P_m\sum_{k=m+1}^{\infty}\langle Ny(u^*), \Phi_k\rangle\lambda_k\Phi_k =\\
&= P_m(\sum_{k=1}^m c_k\lambda_k\Phi_k) + \sum_{k=m+1}^{\infty}\langle Ny(u^*), \Phi_k\rangle\lambda_kP_m\Phi_k =\\
&= P_m(\sum_{k=1}^m c_k\lambda_k\Phi_k),
\end{aligned}
$$

tehát

$$0 = P_m(\sum_{k=1}^m c_k\lambda_k\Phi_k - Ny(u^*)),$$

ami pontosan akkor teljesül, ha

$$
\begin{aligned}
0 &= \langle\sum_{j=1}^m c_j\lambda_j\Phi_j - Ny(u^*), \Phi_k\rangle && (k = 1, \ldots, m),\ \text{azaz}\\
0 &= \langle c_k\lambda_k\Phi_k - Ny(u^*), \Phi_k\rangle && (k = 1, \ldots, m), \text{vagy}\\
0 &= \langle\lambda_k u^* - Ny(u^*), \Phi_k\rangle && (k = 1, \ldots, m). \qquad (4.5)
\end{aligned}
$$

Ez utóbbi egy m-változós (c_k $(k = 1, \ldots, m)$ számok meghatározzák u^*-ot), m egyenletből álló egyenletrendszer. Ezek eredményeként megállapíthatjuk, hogy ha a, b, m elég nagyok, akkor az eredeti (4.1) egyenletnek $\overline{u}$ pontosan akkor megoldása, ha az (4.5) egyenletnek u^* megoldása és $\overline{u} = y(u^*)$.
Ezzel mindenünk megvan ahhoz, hogy a feladat numerikus megoldását ismertessük.

Legyen $N \geq m$. Az $Lu = Nu$ feladat megoldásait

$$u = \sum_{k=1}^{N} c_k \Phi_k = \sum_{k=1}^{m} c_k \Phi_k + \sum_{k=m+1}^{N} c_k \Phi_k$$

alakban keressük, tehát N növelésével a megoldás pontosságát javítjuk (a műveletigény rovására). H_m-en is hasonlóképpen módosítunk:

$$H_m u := \sum_{k=m+1}^{N} \frac{c_k}{\lambda_k} \Phi_k$$

Maga az algoritmus a következő:

1. Állítsuk elő L-hez $\Phi_k (k = 1, \ldots, N)$ sajátfüggvényeket.
2. Rögzítsünk egy kezdeti $u^* = \sum_{k=1}^{m} c_k \Phi_k$ kiinduló értéket.
3. Állítsuk elő $y(u^*)$-ot a fixpontiterációval: $y_0 := u^*$, $y_{i+1} := u^* + H_m N y_i$, $(i = 1, \ldots, S)$.
4. Oldjuk meg az $Lu^* = P_m N y_{S+1}$ egyenletet u^*-ra, például Newton-módszerrel.
5. Az így kapott u^*-ból kiindulva ismételjük 3.-4. lépéseket, amíg a kívánt pontosságot el nem érjük (amit $Lu^* - Nu^*$ normájával lehet jellemezni).

Előfordulhat, hogy a 3. vagy a 4. lépésben nincs konvergencia, ekkor m növelése szükséges lehet (ami miatt N-et is lehet, hogy növelni kell).
A peremfeltételeket u-ra azzal garantáljuk, hogy a homogén peremfeltételt kikényszerítjük a Φ_k sajátfüggvényekre, így az ő lineáris kombinációjukkal előálló függvényre is teljesülni fognak. A következő szekcióban taglaljuk, hogy hogyan találjuk meg a sajátfüggvényeket.

4.1. Csebisev-Tau-módszer a sajátfüggvények előállítására

A fejezet elején előrebocsátottuk, hogy az L alakjára vonatkozó megkötésekre azért van szükség, mert az ilyen operátorokhoz tudunk sajátfüggvényeket numerikusan könnyen előállítani. A [10] és [11] cikkek alapján ezt bemutatjuk. Ennek az eljárásnak az eredményeként ugyan nem ortonormált rendszert kapunk, de a Gram-Schmidt-módszerrel át lehet megfelelően alakítani.

Legyen L egy Sturm-Liouville operátor:

$$Lu = \frac{1}{w}(-(pu')' + qu),$$

és tegyük fel, hogy az intervallum amin dolgozunk a $(-1,1)$. A peremfeltételeink a következők:

$$\alpha_{11}u(a) + \alpha_{12}u'(a) = 0,$$
$$\alpha_{21}u(b) + \alpha_{22}u'(b) = 0.$$

Ha L-nek λ sajátértéke, v pedig a hozzá tartozó sajátvektor, akkor $Lv = \lambda v$, azaz

$$\frac{1}{w}(-(pv')' + qv) = \lambda v,$$
$$-pv'' - p'v' + qv = \lambda wv. \tag{4.6}$$

Jelöljük $T_n(x)$-el a $(-1,1)$-en értelmezett Csebisev-polinomokat: $T_n(x) = \cos(n \arccos(x))$. Ezekről tudjuk, hogy ortogonális rendszert alkotnak az $\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ súlyfüggvénnyel, és van rekurzív képletük ($T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x)$). A cél az, hogy ilyen polinomok véges lineáris kombinációjával közelítsük a sajátfüggvényt:

$$v(x) = \sum_{k=0}^{N} a_k T_k(x) = \mathbf{a}^T \mathbf{t},$$

ahol $\mathbf{a}^T = [a_0, a_1, \ldots, a_N]$ és $\mathbf{t} = [T_0(x), T_1(x), \ldots, T_N(x)]^T$, így az együtthatók $\mathbf{a}$ vektora egyértelműen meghatározza a $v(x)$ függvényt.
Mivel L-nek szüksége van v deriváltjaira, vizsgáljuk meg, hogy a deriválás milyen (mátrixszal leírható) változást eredményez az együtthatók vektorán:

$$v'(x) = \sum_{k=0}^{N} a_k T_k'(x) = \sum_{k=0}^{N} b_k T_k(x) = \mathbf{b}^T \mathbf{t} \tag{4.7}$$

Először is nézzük meg, hogy mi a kapcsolat a Csebisev-polinomok és a deriváltak között. Az áttekinthetőség kedvéért használjuk a $\theta := \arccos x$ jelölést (amivel $\sin\theta =$

$\sqrt{1-x^2}$).

$$\begin{aligned}
T_n(x) &= \cos(n\theta)\\
T_n'(x) &= \sin(n\theta)n\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}\\
\frac{1}{n+1}T_{n+1}'(x) &= \sin((n+1)\theta)\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}\\
\frac{1}{n-1}T_{n-1}'(x) &= \sin((n-1)\theta)\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}\\
\frac{1}{n+1}T_{n+1}'(x) - \frac{1}{n-1}T_{n-1}'(x) &= \frac{\sin((n+1)\theta) - \sin((n-1)\theta)}{\sqrt{1-x^2}}\\
\sin((n+1)\theta) - \sin((n-1)\theta) &= 2\cos(n\theta)\sin\theta = 2T_n(x)\sqrt{1-x^2}\\
\frac{1}{n+1}T_{n+1}'(x) - \frac{1}{n-1}T_{n-1}'(x) &= 2T_n(x)
\end{aligned}$$

Ez működik $n \geq 2$ esetén, kis n-ekre pedig egyszerű a dolog:

$$\begin{aligned}
&T_0'(x) = 0,\\
&T_1'(x) = 1 = T_0(x),\\
&T_2'(x) = 4x = 4T_1(x).
\end{aligned}$$

Helyettesítsük be (4.7)-be a $T_k(x)$-ek helyére az így kapott képleteket:

$$\begin{aligned}
v' = \sum_{n=0}^{N} b_n T_n &= b_0 T_1' + \frac{b_1}{4}T_2' + \sum_{n=2}^{N}\frac{b_n}{2(n+1)}T_{n+1}' - \sum_{n=2}^{N}\frac{b_n}{2(n-1)}T_{n-1}' =\\
&= \left(b_0 - \frac{b_2}{2}\right)T_1' + \sum_{n=2}^{N-1}\frac{b_{n-1}-b_{n+1}}{2n}T_n' + \frac{b_{N-1}}{2N}T_N' + \frac{b_N}{2(N+1)}T_{N+1}'.
\end{aligned}$$

Így már látható az összefüggés a_n és b_n között:

$$\begin{aligned}
b_N &= 0\\
b_{N-1} &= 2Na_N\\
b_{n-1} &= b_{n+1} + 2na_n \ (n = N-1, \dots, 2)\\
b_0 &= \frac{b_2}{2} + a_1.
\end{aligned}$$

Belátható, hogy az alábbi mátrix kielégíti a $\hat{D}\mathbf{a} = \mathbf{b}$ egyenletet $(k, l = 0, \ldots, N)$:

$$\hat{D}_{kl} = \begin{cases} l, & \text{ha } k = 0 \text{ és } l \text{ páratlan} \\ 2l, & \text{ha } l \geq k \geq 1 \text{ és } l + k \text{ páratlan} \\ 0, & \text{különben,} \end{cases}$$

azaz ennek a mátrixnak a segítségével tudjuk a polinomsorral felírt függvényeket deriválni:

$$v' = \mathbf{b}^T\mathbf{t} = (\hat{D}\mathbf{a})^T\mathbf{t}.$$

Ezután vizsgáljuk meg, hogy az x-szel történő szorzás milyen változást eredményez. Ezt már csak közelítőleg tudjuk megadni:

$$xv(x) = \sum_{k=0}^{N} a_k x T_k(x) \approx \sum_{k=0}^{N} c_k T_k(x).$$

Itt a Csebisev-polinomok rekurziójából gyorsan kijön a megoldás:

$$\begin{aligned} xT_0(x) &= T_1(x) \\ xT_n(x) &= \frac{1}{2}\left(T_{n+1} + T_{n-1}\right) \ (n \geq 1) \end{aligned}$$

Ezt behelyettesítve kapjuk:

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{a_1}{2} \\ c_1 &= a_0 + \frac{a_2}{2} \\ c_n &= \frac{a_{n-1} + a_{n+1}}{2} \ (n = 2, \ldots, N-1) \\ c_N &\approx \frac{a_{N-1}}{2} \end{aligned}$$

Így az alábbi mátrix közelítőleg megvalósítja a $M\mathbf{a} \approx \mathbf{c}$ szorzást $(k, l = 0, \ldots, N)$:

$$M_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{ha } (k, l) = (1, 0) \\ \frac{1}{2}l, & \text{ha } l \geq 2 \text{ és } |k - l| = 1 \\ 0, & \text{különben,} \end{cases}$$

tehát

$$xv(x) \approx \mathbf{c}^T\mathbf{t} \approx (M\mathbf{a})^T\mathbf{t}.$$

Ezenfelül, ha f analitikus függvény, akkor $f(x)v(x) \approx (f(M)\mathbf{c})^T\mathbf{t}$.
Ezek segítségével írjuk fel az (4.6) egyenletet az együtthatók vektorán végzett mátrixműveletként:

$$\hat{L}\mathbf{a} := \Big(-p(M)\hat{D}^2 - p'(M)\hat{D} + q(M)\Big)\,\mathbf{a}.$$

A (4.6) egyenlet jobb oldala ebben a formában pedig $\lambda w(M)\mathbf{a}$, jelölésként $\mathbf{B} := w(M)$.
Még hasonlóképpen meg kell fogalmaznunk a peremfeltételeinket, ehhez felhasználjuk, hogy $\mathbf{t}$ egy vektorértékű függvény, $[a,b] = [-1,1]$, és ennek az intervallumnak a végpontjain $T_n(-1) = (-1)^n$, $T_n(1) = 1$. Legyen

$$\begin{aligned} h_1^T &= \alpha_{11}(\mathbf{t}(-1))^T + \alpha_{12}(\mathbf{t}(-1))^T\hat{D}, \\ h_2^T &= \alpha_{21}(\mathbf{t}(1))^T + \alpha_{22}(\mathbf{t}(1))^T\hat{D} \end{aligned}$$

amivel (ismét a $\hat{D}\mathbf{a} = \mathbf{b}$ jelölést alkalmazva)

$$\begin{aligned} h_1^T\mathbf{a} &= \alpha_{11}(\mathbf{a}^T\mathbf{t}(-1))^T + \alpha_{12}(\mathbf{b}^T\mathbf{t}(-1))^T = \alpha_{11}v(-1) + \alpha_{12}v'(-1), \\ h_2^T\mathbf{a} &= \alpha_{21}(\mathbf{a}^T\mathbf{t}(1))^T + \alpha_{22}(\mathbf{b}^T\mathbf{t}(1))^T = \alpha_{21}v(1) + \alpha_{22}v'(1). \end{aligned}$$

Legyen $H = (h_1, h_2)^T$, így a peremfeltétel megfogalmazható $H\mathbf{a} = \mathbf{0}$ formában.
Legyen $\hat{A}$ az a mátrix, amit úgy kapunk, hogy $\hat{L}$ utolsó két sorát elhagyjuk (tehát $N-1 \times N+1$ mátrix), és állítsuk elő $\hat{B}$-t ugyanígy $\mathbf{B}$-ből. Az alábbi egyenletrendszer megoldásaként megkapjuk a sajátfüggvényekhez tartozó együtthatósorozatokat (ezt általánosított sajátérték feladatnak is nevezik):

$$\begin{pmatrix} \hat{A} \\ H \end{pmatrix} \mathbf{a} = \lambda \begin{pmatrix} \hat{B} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \mathbf{a}.$$

Az egyenlet jobb oldalán javíthatunk, ha $\mathbf{0}$ helyett $\frac{1}{\lambda_*}H$-t használunk, ahol λ_* egy nagy szám, ami nem sajátértéke L-nek. Így a jobb oldal mátrixának $\begin{pmatrix} \hat{B} \\ \frac{1}{\lambda_*}H \end{pmatrix}$ nincsenek csupa 0 sorai.
Még fontos megjegyezni, hogy ha az eredeti intervallumunk nem a $[-1,1]$, hanem valamely $[a,b]$ intervallum, akkor a deriválás mátrix egy kicsit máshogy fog kinézni: $D := \frac{1}{\alpha}\hat{D}$, ahol α az intervallum középpontja ($\alpha = \frac{b-a}{2}$).

4.2. Példa a numerikus alkalmazásra

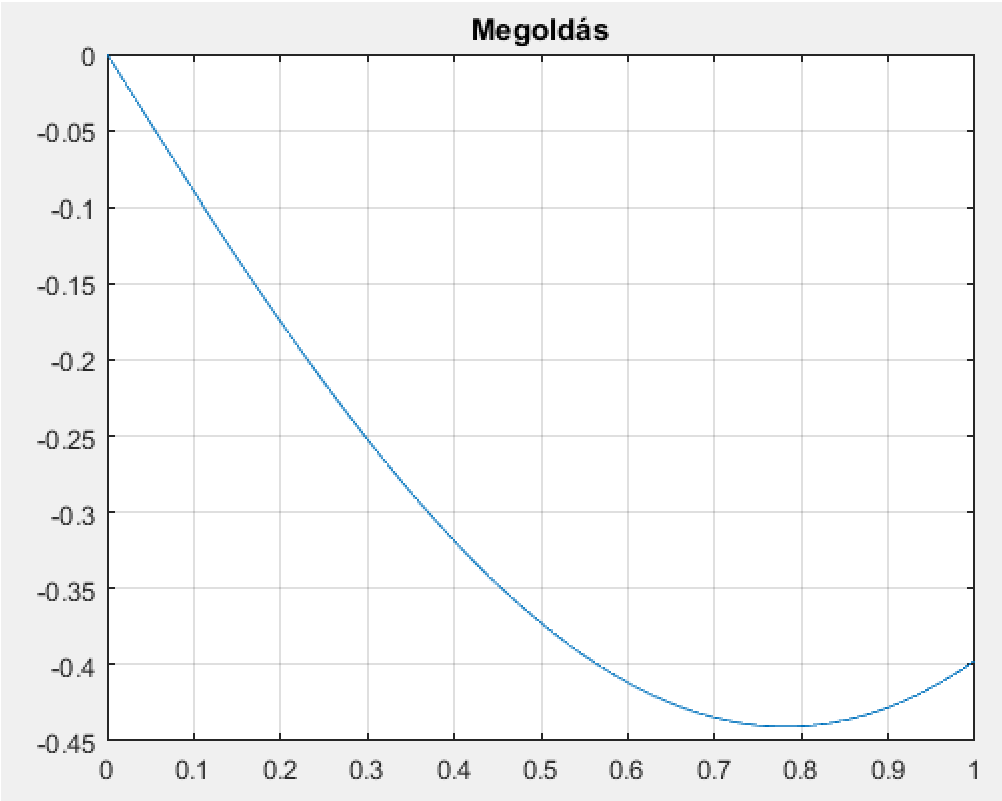
Most mutassunk két példát a módszer gyakorlati alkalmazására, felhasználva a [9] cikkhez készült MATLAB csomagot.
Tekintsük az

$$-u''(x) - 2u(x) = \frac{1}{3}u^3 - \sqrt{x}$$

egyenletet a $[0, 1]$ intervallumon a

$$u(0) = 0$$
$$u(1) + u'(1) = 0$$

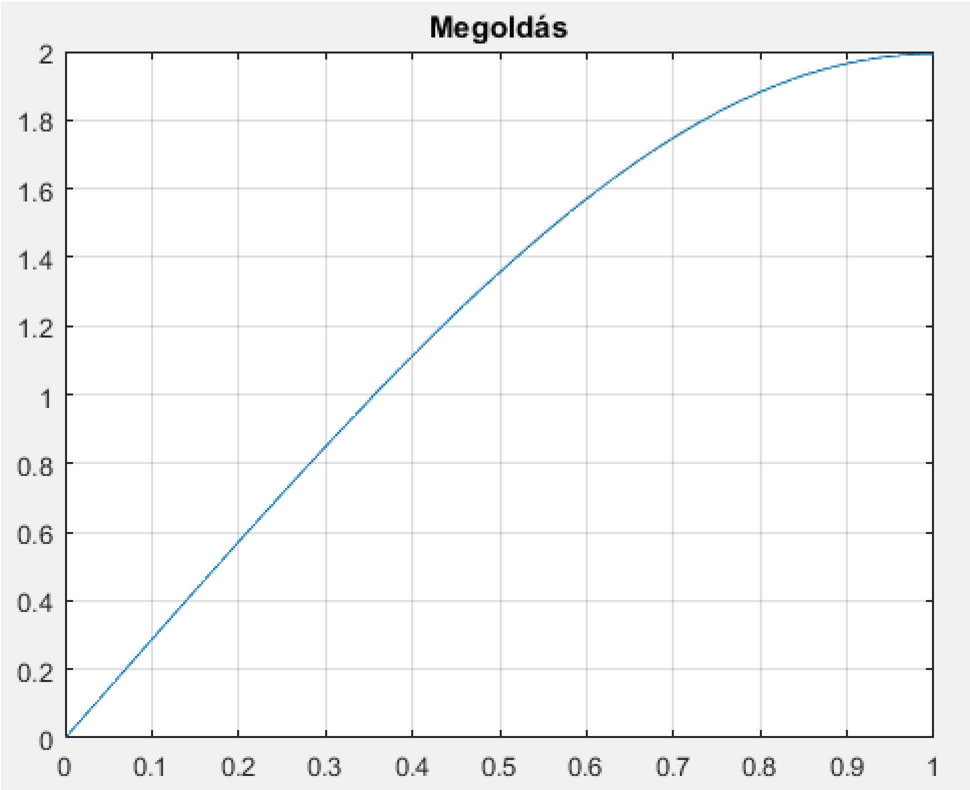
peremfeltételekkel. Erre a feladatra a kiszámolt megoldás a következő, legfeljebb 10^{-5} hibát megengedve:



Ehhez az $m = 0$ választás elegendő volt. Ezzel szemben, ha változtatunk a peremfeltételen, és az intervallum jobb oldalán a

$$u'(1) = 0$$

feltételt követeljük meg, akkor $m = 0$ esetén nincs konvergencia, és még $m = 1$ esetén is problémás a helyzet, mert a Newton-iteráció nem konvergál, ezért meg kell adni kezdeti feltételt. A cinit = [1] paraméterrel, azaz a Φ_1 komponens kezdeti együtthatóját 1-re változtatva viszont már van konvergencia, és megkapjuk a megoldást:



Irodalomjegyzék

[1] R. Scharlau, *TODO*. TODO, 2006 (?)TODO.

[2] K. Sándor, *Funkcionálanalízis feladatokban*. TODO, 2013.

[3] TODO, *Notex on Fredholm (and compact) operators*. TODO, 2009.

[4] TODO, *TODO lectures16and17*. TODO, TODO.

[5] C. Frantzen, *Diffun2, Fredholm Operators (?)TODO*. TODO, 2012.

[6] TODO, *TODO Implicit Functions and Lyapnov-Schmidt*. TODO, TODO.

[7] TODO, *Cambridge Studies in Advanced Mathemathics*. TODO, 1995.

[8] P. T. Jesús Rodriguez, „Multipoint boundary value problems for nonlinear ordinary differential equations," vol. 68, pp. 3465–3474, 2008.

[9] D. Trif, „The lyapunov-schmidt method for two-point boundary value problems," vol. 6, pp. 119–132, 2005.

[10] M. Liefvendahl, „A chebyshev tau spectral method for the calculation of eigenvalues and pseudospectra,"

[11] D. Trif, „Lisc - a matlab package for linear differential problems," vol. 2, pp. 203–208, 2006.