

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Računalništvo in matematika – 2. stopnja

Kevin Štampar

**ORODJE ZA GRAFIČNI PRIKAZ
KONCEPTOV BEZIERJEVIH IN PH KRIVULJ**

Magistrsko delo

Mentor: prof. dr. Emil Žagar

Ljubljana, 2024

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju za zelo sproščen odnos!

Kazalo

1	Uvod	1
2	Bezierjeve krivulje	1
2.1	Bernsteinovi polinomi	1
2.2	Večdimenzionalne oznake	5
2.3	Bezierjeve krivulje	5
2.4	Decasteljau	7
2.5	Metode Bezierjevih krivulj	8
2.5.1	Subdivizija	9
2.5.2	Ekstrapolacija	9
2.5.3	Višanje stopnje	10
2.6	Racionalne Bezierjeve krivulje	13
2.6.1	Metode racionalnih Bezierjevih krivulj	15
2.6.2	Decasteljaujev algoritem za racionalne Bezierjeve krivulje . . .	15
2.6.3	Farinove točke	16
2.6.4	Izsek krožnice	17
3	Zlepki Bezierjevih krivulj	20
3.1	Alfa parametrizacije	21
4	PH Krivulje	22
4.1	Dolžina krivulje kot racionalna funkcija	22
4.2	Polinomska parametrična hitrost	22
4.3	Kontrolne točke Bezierjevih PH krivulj	24
4.4	Parametrična hitrost in dolžina krivulje	26
4.5	Enakomerna parametrizacija	27
4.6	Tangenta, normala in ukrivljenost	28
4.7	Racionalne odmične krivulje	29
5	Orodje za grafični prikaz konceptov	30
5.1	Implementacija konceptov magistrskega dela	30
6	Integrali po ω-kompleksih	31
6.1	Definicija	31

Program dela

Mentor naj napiše program dela skupaj z osnovno literaturo.

Podpis mentorja:

Orodje za grafični prikaz konceptov Bezierjevih in PH krivulj

POVZETEK

Tukaj napišemo povzetek vsebine. Sem sodi razlaga vsebine in ne opis tega, kako je delo organizirano.

Tool for graphically displaying concepts of Bezier and PH curves

ABSTRACT

An abstract of the work is written here. This includes a short description of the content and not the structure of your work.

Math. Subj. Class. (2020): 74B05, 65N99

Ključne besede: integracija, kompleks

Keywords: integration, complex

1 Uvod

Napišite kratek zgodovinski in matematični uvod. Pojasnite motivacijo za problem, kje nastopa, kje vse je bil obravnavan. Na koncu opišite tudi organizacijo dela – kaj je v katerem razdelku.

Ker je v okviru magistrskega dela nastalo orodje za grafični prikaz konceptov, bo delo zelo polno s slikovnimi primeri.

2 Bezierjeve krivulje

V tem razdelku bomo predstavili Bezierjeve krivulje in njihove ključne lastnosti za rabo v CAGD sistemih. Začeli bomo z Bernsteinovimi polinomi, ki jih bomo uporabili pri definiciji Bezierjevih krivulj. Predstavili bomo Decasteljaujev algoritem, ki omogoča stabilno računanje točk Bezierjevih krivulj. Nadaljevali pa bomo z nekaj metodami na Bezierjevih krivuljah, ki so ključne za njihovo rabo v CAGD sistemih.

2.1 Bernsteinovi polinomi

Bernsteinove polinome je najprej uporabil Sergei Bernstein pri dokazu Weierstrasovega izreka. Kasneje jih je Pierre Bezier uporabil pri definiciji Bezierjeve krivulje. V tem razdelku bomo predstavili nekaj njihovih osnovnih lastnosti, ki jih bomo uporabili pri Bezierjevih krivuljah. Za začetek jih definirajmo.

Definicija 2.1. Za naravno število n je i -ti *Bernsteinov bazni polinom* podan s predpisom

$$B_i^n(t) := \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}.$$

Linearni kombinaciji takšnih polinomov t.j. $\sum_{i=0}^n \beta_i B_i^n(t)$, pravimo *Bernsteinov polinom* stopnje n .

Opomba 2.2. V definiciji Bernsteinovega polinoma smo uporabili le bazne polinome z indeksi $i = 0, \dots, n$. Iz definicije je namreč očitno, da so Bernsteinovi bazni polinomi za indekse $i > n$, oziroma $i < 0$, enaki 0.

Primer 2.3. Poglejmo si najprej, kako Bernsteinovi bazni polinomi izgledajo pri stopnjah $n = 0, 1, 2, 3$. Njihovi funkcijski zapisi so naslednji

$$n = 0 : B_0^0(t) = 1$$

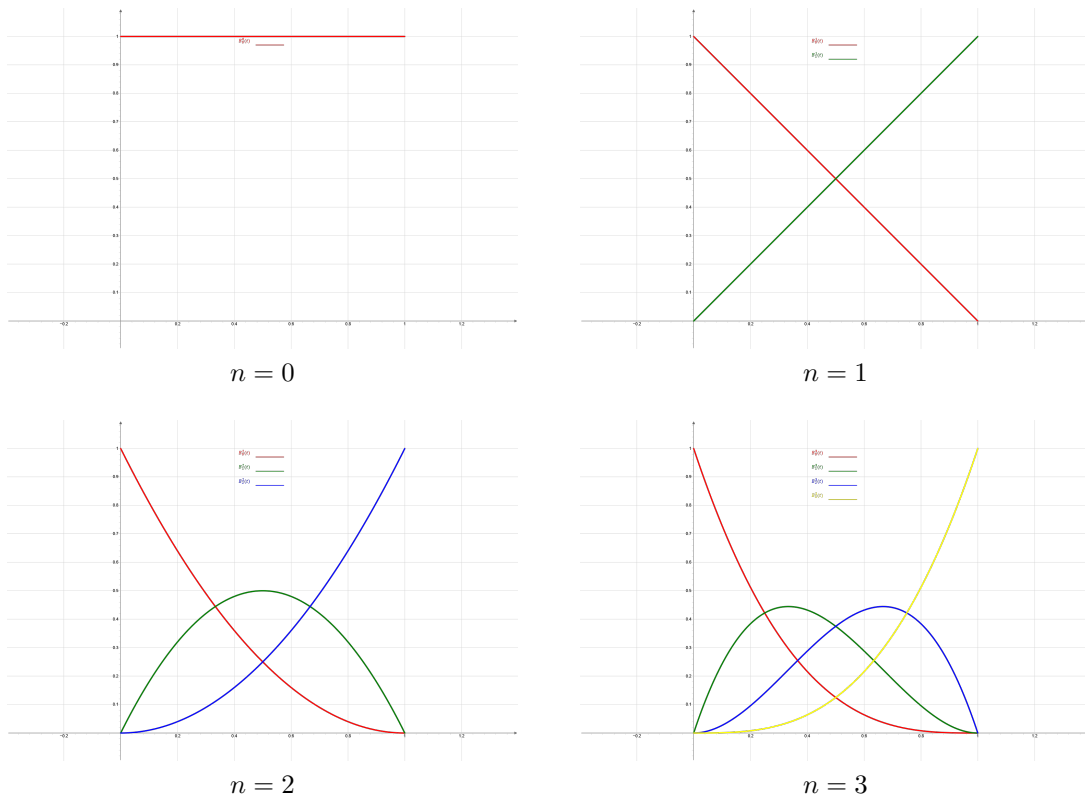
$$n = 1 : B_0^1(t) = 1 - t, \quad B_1^1(t) = t$$

$$n = 2 : B_0^2(t) = (1 - t)^2, \quad B_1^2(t) = 2t(1 - t), \quad B_2^2(t) = t^2$$

$$n = 3 : B_0^3(t) = (1 - t)^3, \quad B_1^3(t) = 3t(1 - t)^2, \quad B_2^3(t) = 3t^2(1 - t), \quad B_3^3(t) = t^3.$$

Konstantni polinom, ki ga dobimo pri $n = 0$ ni kaj preveč zanimiv. Zanimiva sta polinoma pri stopnji $n = 1$, saj predstavljata **komponente?** linearne interpolacije. Polinomi pri stopnjah $n = 2, 3$ so tudi povezani z linearno interpolacijo, kar bomo utemeljili kasneje. Za sedaj si pa oglejmo še grafe polinomov iz primera na sliki 1.

◇



Slika 1: Bernsteinovi bazni polinomi

V izreku 2.4 bomo našli nekaj osnovnih lastnosti Bernsteinovih baznih polinomov, ki bodo ključne pri upeljavi Bezierjevih krivulj.

Izrek 2.4. *Za Bernsteinove bazne polinome velja naslednje.*

1. So nenegativni na intervalu $[0, 1]$.
2. $B_i^n(0) = \delta_{i,0}$ in $B_i^n(1) = \delta_{i,n}$, kjer je $\delta_{i,j} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$.
3. So simetrični t.j. $B_i^n(1-t) = B_{n-i}^n(t)$, $\forall t \in \mathbb{R}$
4. So razčlenitev enote t.j. $\sum_{i=0}^n B_i^n(t) = 1$, $\forall t \in \mathbb{R}$.

Dokaz. Lastnost (1) očitno izhaja iz lastnosti binomskega simbola, lastnost (2) pa iz definicije. Dokažimo simetričnost in razčlenitev enote.

(3) Namesto spremenljivke t v enačbo za Bernsteinov bazni polinom $B_i^n(t)$ vstavimo izraz $1-t$ in uporabimo lastnost binomskega simbola $\binom{n}{i} = \binom{n}{n-i}$, dobimo

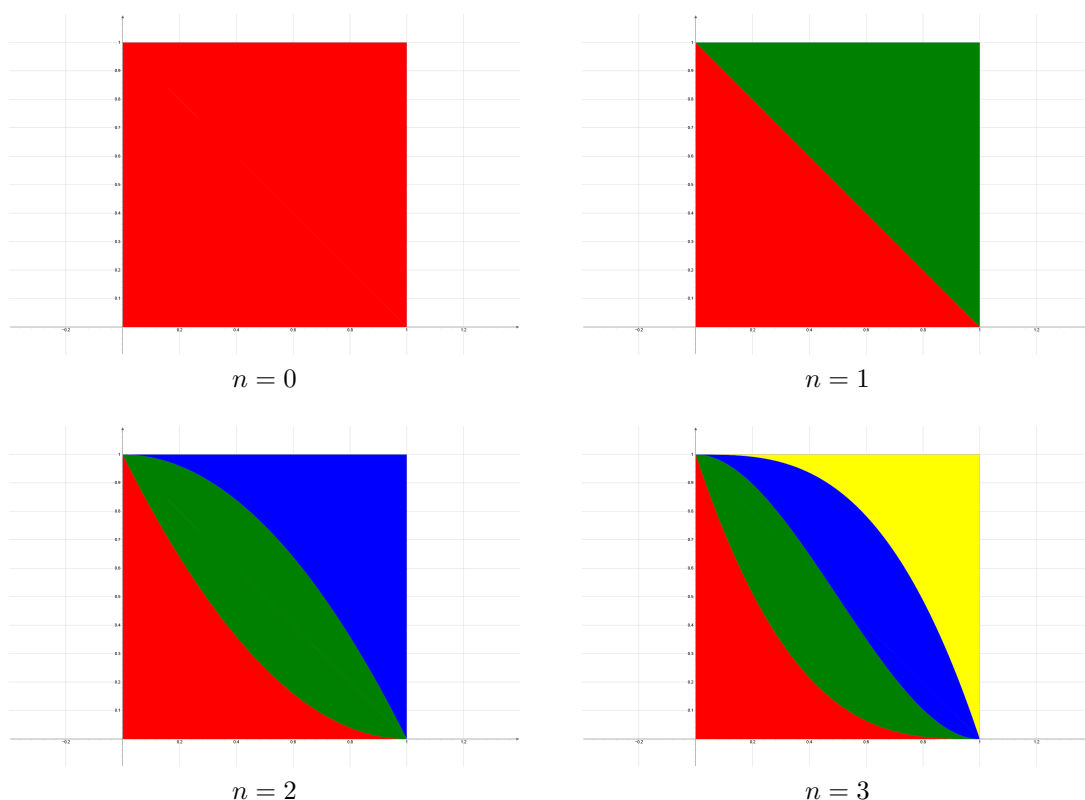
$$B_i^n(1-t) = \binom{n}{i} (1-t)^i (1-(1-t))^{n-i} = \binom{n}{n-i} (1-t)^i t^{n-i} = B_{n-i}^n(t).$$

(5) Za $1 = 1^n = (1-t+t)^n = ((1-t)+t)^n$ uporabimo binomski izrek, dobimo

$$((1-t)+t)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} = \sum_{i=0}^n B_i^n(t).$$

□

Lastnosti (1),(2) in (3) je možno opaziti tudi na prej ogledani sliki 1. Lastnost (5) je pa lažje videti na sliki 2. Na njej so narisani **sumgrafi -Naloženi ploščinski grafikoni** Bernsteinovih baznih polinomov za $n = 0, 1, 2, 3$, ki nam pri določenem številu $t \in [0, 1]$ povejo, koliko vsak izmed polinomov $B_i^n(t)$ prispeva pri razčlenitvi enote.



Slika 2: Naloženi ploščinski grafikoni Bernsteinovih baznih polinomov

V primeru 2.3 smo napovedali povezanost Bernsteinovih polinomov z linearno interpolacijo. Povezavo sedaj podajmo z izrekom.

Izrek 2.5. *Bernsteinovi bazni polinomi ustrezajo rekurzivni zvezi*

$$B_i^n(t) = (1-t)B_i^{n-1}(t) + tB_{i-1}^{n-1}(t), \quad \forall t \in \mathbb{R}.$$

Komentiram izgled rekurzivne zveze in jo povezem z linearno interpolacijo. Zvezo tudi dokažimo.

Dokaz. Desni del rekurzivne zveze manipuliramo, da pridemo do levega

$$\begin{aligned}
(1-t)B_i^{n-1} + tB_{i-1}^{n-1} &= (1-t)\binom{n-1}{i}t^i(1-t)^{n-i-1} + t\binom{n-1}{i-1}t^{i-1}(1-t)^{n-i} \\
&= \binom{n-1}{i}t^i(1-t)^{n-i} + \binom{n-1}{i-1}t^i(1-t)^{n-i} \\
&\stackrel{(1)}{=} \binom{n}{i}t^i(1-t)^{n-i} \\
&= B_i^n(t),
\end{aligned}$$

kjer smo pri enakosti (1) uporabili lastnost binomskega simbola $\binom{n-1}{i} + \binom{n-1}{i-1} = \binom{n}{i}$. \square

V kasnejših razdelkih bomo potrebovali odvode Bernsteinovih baznih polinomov. Izkaže se, da lahko tudi te računamo s pomočjo rekurzivne zveze. Zvezo podamo z naslednjim izrekom.

Izrek 2.6. *Za odvode Bernsteinovih baznih polinomov velja rekurzivna zveza*

$$B_i^{n'}(t) = n(B_{i-1}^{n-1}(t) - B_i^{n-1}(t)), \quad \forall t \in \mathbb{R}.$$

Dokaz. Bernsteinov bazni polinom najprej odvajamo da dobimo

$$B_i^{n'}(t) = \binom{n}{i} \left(it^{i-1}(1-t)^{n-i} - (n-i)t^i(1-t)^{n-i-1} \right).$$

Ker velja $\binom{n}{i}i = \frac{n!i}{(n-i)!} = \frac{n(n-1)!}{(n-i)(i-1)!} = n\binom{n-1}{i-1}$ in $\binom{n}{i}(n-i) = \frac{n!(n-i)}{(n-i)!} = \frac{n(n-1)!}{(n-i-1)!} = n\binom{n-1}{i}$ \square

1. Njihov odvod ustreza rekurzivni zvezi $B_i^{n'}(t) = n(B_{i-1}^{n-1}(t) - B_i^{n-1}(t))$.
2. Za zmnožek njihovih linearnih kombinacij, t.j Bernsteinovih polinomov $f(t) = \sum_{i=0}^m B_i^m(t)$ in $g(t) = \sum_{i=0}^n B_i^n(t)$, velja

$$f(t)g(t) = \sum_{i=0}^{m+n} \left(\sum_{j=\max(0, i-n)}^{\min(m, i)} \frac{\binom{m}{j}\binom{n}{i-j}}{\binom{m+n}{i}} \alpha_j \beta_{i-j} \right) B_i^{m+n}(t).$$

3. Tvorijo bazo prostora polinomov \mathbb{P}_n .

Dokaz. **Dodaj dokaze!!**

(9) Naj bosta $f(t) = \sum_{i=0}^m \alpha_i B_i^m(t)$ in $g(t) = \sum_{i=0}^n \beta_i B_i^n(t)$ Bernsteinova polinoma.

$$\begin{aligned}
f(t)g(t) &= \sum_{i=0}^m \alpha_i B_i^m(t) \sum_{j=0}^n \beta_j B_j^n(t) = \sum_{k=0}^{m+n} \sum_{l=0}^k \alpha_l B_l^m(t) \beta_{k-l} B_{k-l}^n(t) \\
&= \sum_{k=0}^{m+n} \sum_{l=0}^k \alpha_l \binom{m}{l} t^l (1-t)^{m-l} \beta_{k-l} \binom{n}{k-l} t^{k-l} (1-t)^{n-k+l} \\
&= \sum_{k=0}^{m+n} \sum_{l=0}^k \alpha_l \beta_{k-l} \binom{m}{l} \binom{n}{k-l} t^k (1-t)^{m+n-k} \\
&= \sum_{k=0}^{m+n} \left(\sum_{l=0}^k \alpha_l \beta_{k-l} \frac{\binom{m}{l} \binom{n}{k-l}}{\binom{m+n}{k}} \right) \binom{m+n}{k} t^k (1-t)^{m+n-k}.
\end{aligned}$$

V primerih, ko velja $l > m$ ali $k - l > n$ imamo v števcu ulomka 0, kar privede do zapisa iz izreka.

(8) Ker je polinomov

□

2.2 Večdimenzionalne oznake

Z željo po krajših, bolj preglednih zapisih, bomo uvedli večdimenzionalne oznake. Večdimenzionalnost bomo ponazarjali z odebelitvijo črke. Tako bomo večdimenzionalnost točke označili z $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_n)$, večdimenzionalnost funkcije $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^{n+1}$ pa z $\mathbf{f}(x) = (f_0(x), f_1(x), \dots, f_n(x))$.

2.3 Bezierjeve krivulje

Če v Bernsteinov polinom n -te stopnje namesto skalarjev β_i vstavimo točke $\mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^d$, dobimo predpis za parametrizacijo Bezierjeve krivulje.

Definicija 2.7. Bezierjeva krivulja n -te stopnje je podana s točkami \mathbf{p}_i za $i = 0, 1, \dots, n$ in parametrizacijo

$$\mathbf{B}_n(t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i B_i^n(t).$$

Točkam \mathbf{p}_i pravimo *kontrolne točke*. Če zaporedne kontrolne točke povežemo, dobimo *kontrolni poligon*.

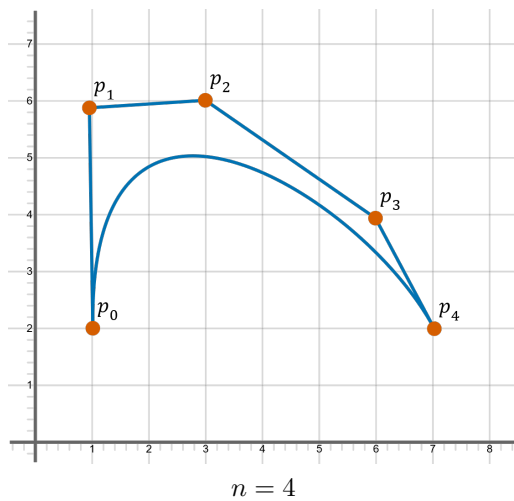
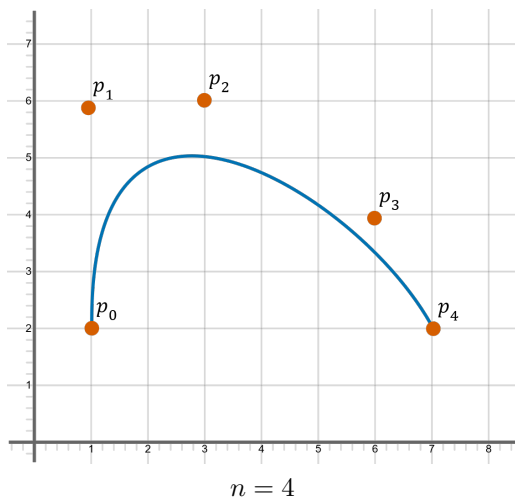
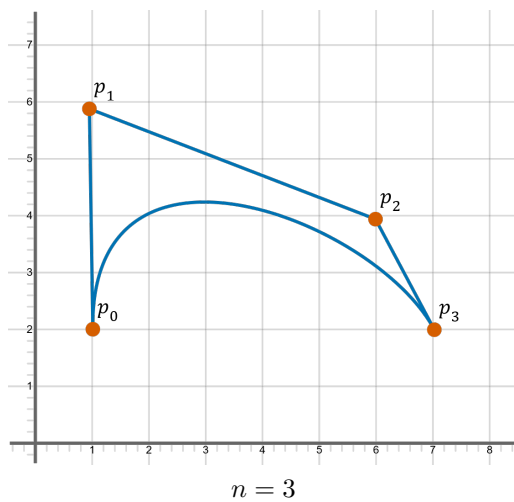
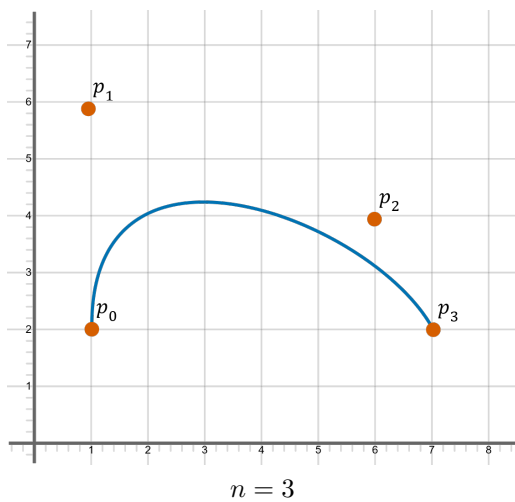
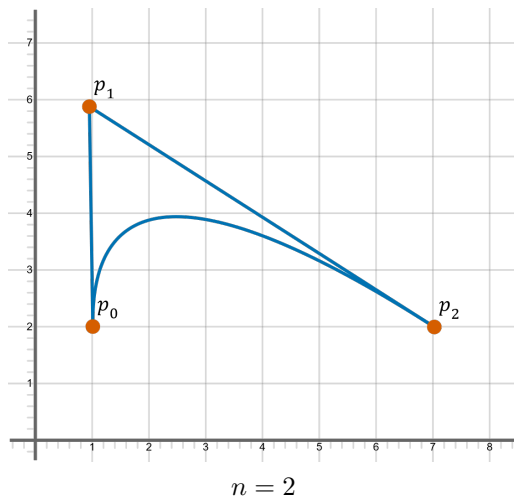
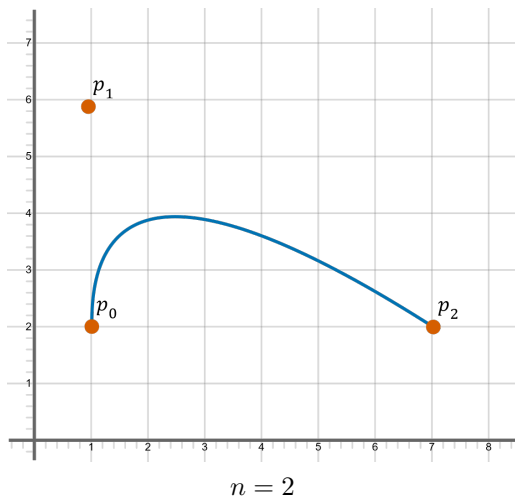
Opomba 2.8. Pri slikovnem prikazovanju raznih konceptov Bezierjevih krivulj, se bomo omejili na $d = 2$, torej na Bezierjeve krivulje v ravnini.

Preden se lotimo lastnosti Bezierjevih krivulj, si na sliki 3 oglejmo primere teh za $n = 1, 2, 3, 4$. Opazimo lahko, da krivulje interpolirajo začetno ter končno kontrolno točko, ostale kontrolne točke pa določajo obliko krivulje. Zapišimo sedaj nekaj osnovnih lastnosti Bezierjevih krivulj.

Izrek 2.9. *Lastnosti Bezierjevih krivulj*

1. $\mathbf{B}_n(0) = \mathbf{p}_0$ in $\mathbf{B}_n(1) = \mathbf{p}_n$, interpolacija končnih točk
2. $\varphi(\sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i B_i^n(t)) = \sum_{i=0}^n \varphi(\mathbf{p}_i) B_i^n(t)$, afina invarianca
3. Krivulja leži znotraj konveksne ovojnice svojih kontrolnih točk.

Preden izrek dokažemo, povejmo zakaj so zgornje lastnosti pomembne za CAGD sisteme. Interpolacija končnih točk omogoča, da uporabniku damo kontrolo nad tem, kje se krivulja začne in kje konča. Afina invarianca je pomembna za to, da lahko uporabnik transformira krivuljo, saj se uporabnikove transformacije krivulje enostavno prevedejo v afine preslikave kontrolnih točk. Tretja lastnost pa uporabniku s kontrolnimi točkami omogoča kontrolo nad krivuljo, kjer je krivulja zmerom v bližini svojih kontrolnih točk.



Slika 3: Bezierjeve krivulje za $n = 1, 2, 3, 4$ na levi strani, z njihovimi kontrolnimi poligoni na desni

Dokaz.

(1) $\mathbf{B}_n(0) = \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i B_i^n(t)(0) = \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i \delta_{0,i} = \mathbf{p}_0$. Enako lahko naredimo tudi za

$\mathbf{B}_n(1)$.

(2) Naj bo φ afina preslikava, velja torej $\varphi(x) = A\mathbf{x} + \mathbf{b}$.

$$\begin{aligned}\varphi\left(\sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i B_i^n(t)(t)\right) &= A\left(\sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i B_i^n(t)(t)\right) + \mathbf{b} = \sum_{i=0}^n A\mathbf{p}_i B_i^n(t)(t) + \mathbf{b} \\ &= \sum_{i=0}^n A\mathbf{p}_i B_i^n(t)(t) + \sum_{i=0}^n \mathbf{b} B_i^n(t)(t) = \sum_{i=0}^n (A\mathbf{p}_i + \mathbf{b}) B_i^n(t)(t) \\ &= \sum_{i=0}^n \varphi(\mathbf{p}_i) B_i^n(t)\end{aligned}$$

(3) Konveksna ovojnica kontrolnih točk Bezierjeve krivulje je množica vseh konveksnih kombinacij teh točk t.j. $\sum_{i=0}^n \lambda_i \mathbf{p}_i$, kjer so λ_i pozitivna realna števila za katere velja $\lambda_0 + \lambda_1 + \dots + \lambda_n = 1$. Ker so Bernsteinovi polinomi za poljuben $t \in [0, 1]$ razčlenitev enote in velja $B_i^n(t) \geq 0$, lahko zapišemo $\lambda_i = B_i^n(t)$. \square

2.4 Decasteljau

Računanje Bernsteinovih polinomov direktno preko njihovih enačb je precej nestabilno****, za rabo v računalništvu pa je pomembno, da uporabljamo stabilne metode računanja. S pomočjo Decasteljauevega algoritma lahko računamo točke Bezierjevih krivulj stabilno****, zanj pa potrebujemo naslednji izrek.

Izrek 2.10. *Naj bo $\mathbf{B}(t)_{[\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n]}$ parametrizacija Bezierjeve krivulje n -te stopnje s kontrolnimi točkami $\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n$. Potem lahko njene točke rekurzivno računamo s pomočjo naslednjega izraza*

$$\mathbf{B}(t)_{[\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n]} = (1-t)\mathbf{B}(t)_{[\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{n-1}]} + t\mathbf{B}(t)_{[\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n]}.$$

Izrek tudi dokažimo.

Dokaz.

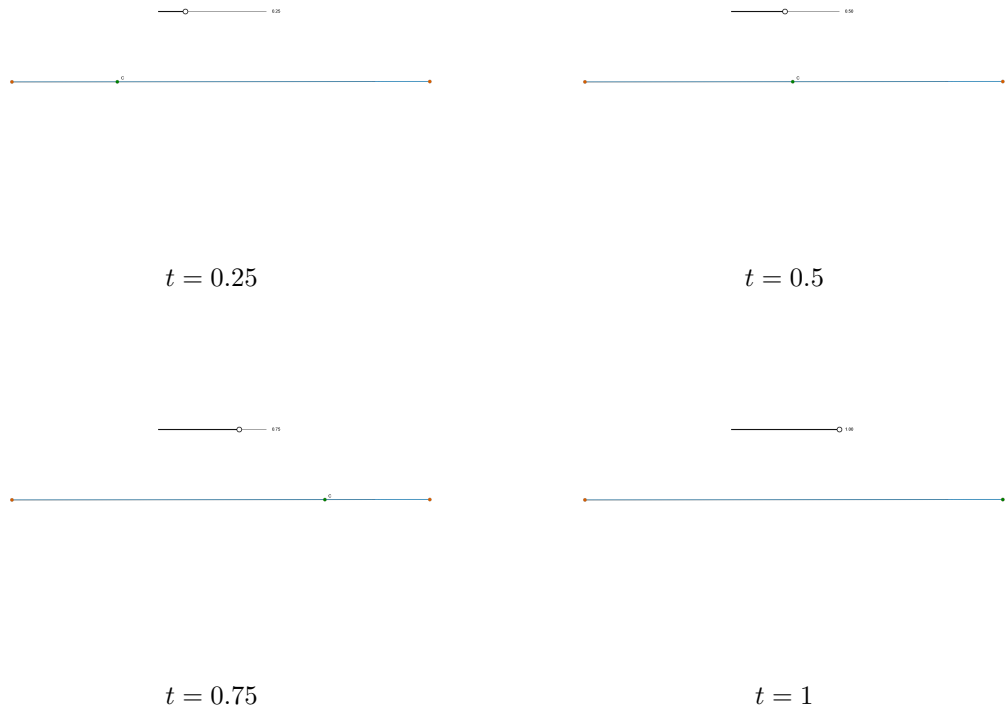
$$\begin{aligned}(1-t)\mathbf{B}(t)_{[\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{n-1}]} + t\mathbf{B}(t)_{[\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n]} &= \\ &= (1-t) \sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{p}_i B_i^{n-1}(t) + t \sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{p}_{i+1} B_i^{n-1} \\ &= (1-t) \sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{p}_i B_i^{n-1}(t) + t \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i B_{i-1}^{n-1} \\ &= \mathbf{p}_0(1-t)B_0^{n-1}(t) + \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{p}_i(1-t)B_i^{n-1} + \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{p}_i t B_{i-1}^{n-1} + \mathbf{p}_n B_{n-1}^{n-1}(t) \\ &= \mathbf{p}_0(1-t)B_0^{n-1}(t) + \sum_{i=1}^{n-1} \left((1-t)B_i^{n-1} + t B_{i-1}^{n-1}\right) \mathbf{p}_i + \mathbf{p}_n B_{n-1}^{n-1}(t) \\ &= \mathbf{p}_0 B_0^n(t) + \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{p}_i B_i^n(t) + \mathbf{p}_n B_n^n(t) \\ &= \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i B_i^n(t)\end{aligned}$$

\square

Algoritem 1 Decasteljau

```
 $\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n$ 
for  $i = 0, 1, \dots, n$  do
   $\mathbf{p}_i^0(t) = \mathbf{p}_i$ 
end for
for  $r = 1, 2, \dots, n$  do
  for  $i = 0, 1, \dots, n - r$  do
     $\mathbf{p}_i^r(t) = (1 - t)\mathbf{p}_i^{r-1}(t) + t\mathbf{p}_{i+1}^{r-1}(t)$ 
  end for
end for
return  $\mathbf{p}_0^n(t)$ 
```

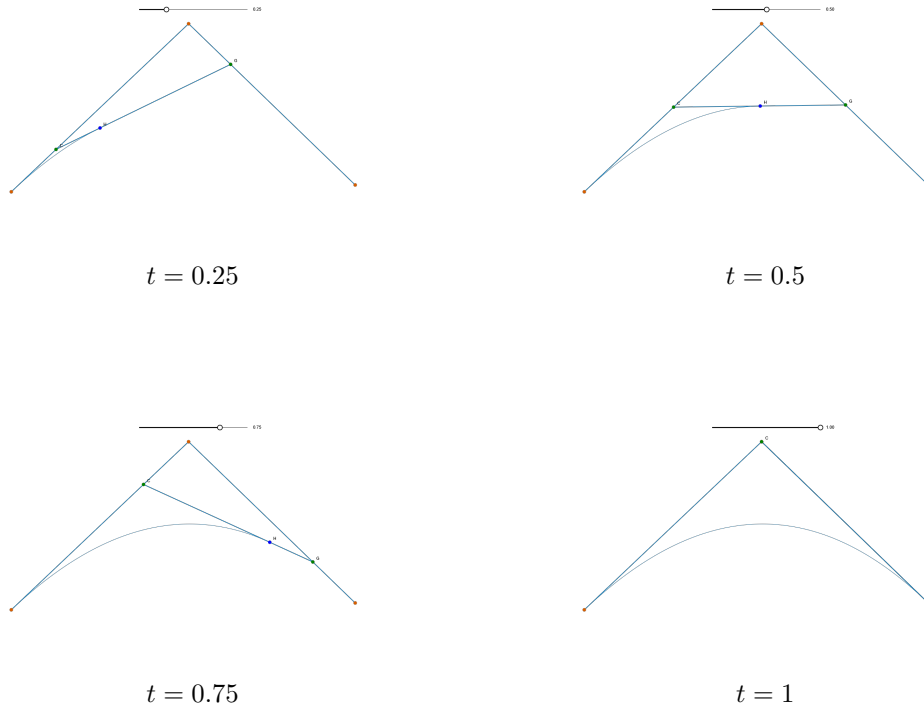
Decasteljaujev algoritem ima tudi geometrijski pomen. Pri $n = 1$ se algoritem prevede na interpolacijo dveh točk, kar lahko vidimo na sliki 4. Prvi višjih n , pa lahko na slikah 5, 6 in 7 vidimo interpolacijo sosednjih točk na r -tem nivoju.



Slika 4: Decasteljaujev algoritem za $n = 1$

2.5 Metode Bezierjevih krivulj

V tem razdelku bomo predstavili nekaj metod Bezierjevih krivulj, ki so uporabne pri grafičnem oblikovanju.



Slika 5: Decasteljaujev algoritem za $n = 2$

2.5.1 Subdivizija

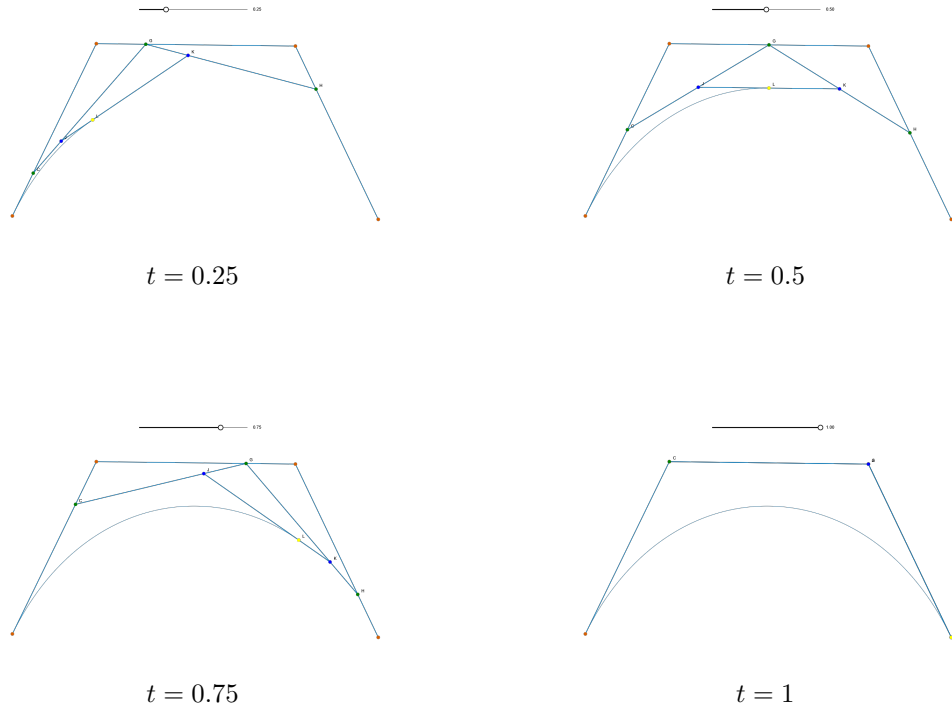
Recimo, da smo se kot računalniški grafik znašli v situaciji, ko bi želeli obdržati le en kos Bezierjeve krivulje B . Naj bo to kos krivulje, ki ga dobimo tako, da za prvotno krivuljo B omejimo parameter t na interval $[0, t_0]$ za neko fiksno realno število $t_0 < 1$. Označimo ga z B_{t_0} , zanj pa velja $B_{t_0}(t) = B(t_0 t)$. Vrnimo se nazaj k sliki sheme Decasteljaujevega algoritma 8. Na njej lahko opazimo, da pri parametru t_0 točke označene z A,F,J,M in O tvorijo kontrolni poligon bezierjeve krivulje B_{t_0} . Pokažimo, da je to res.

$$B_{t_0}(t) = B(t_0 t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i \binom{n}{i} (t_0 t)^i (1 - t t_0)^{n-i}$$

$$\sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i t_0^i \left(\frac{1 - t t_0}{1 - t} \right)^{n-i} \binom{n}{i} t^i (1 - t)^{n-i}$$

2.5.2 Ekstrapolacija

Motivacija: Zelimo podaljsati krivuljo..... Kr neki. Realno je to bolj kot ne nekaj, kar lahko kasneje uporabimo pri izpeljavi cesa, Graficno je pa to skoraj useless in se pokaze samo kot nekaj, kar tudi deluje.

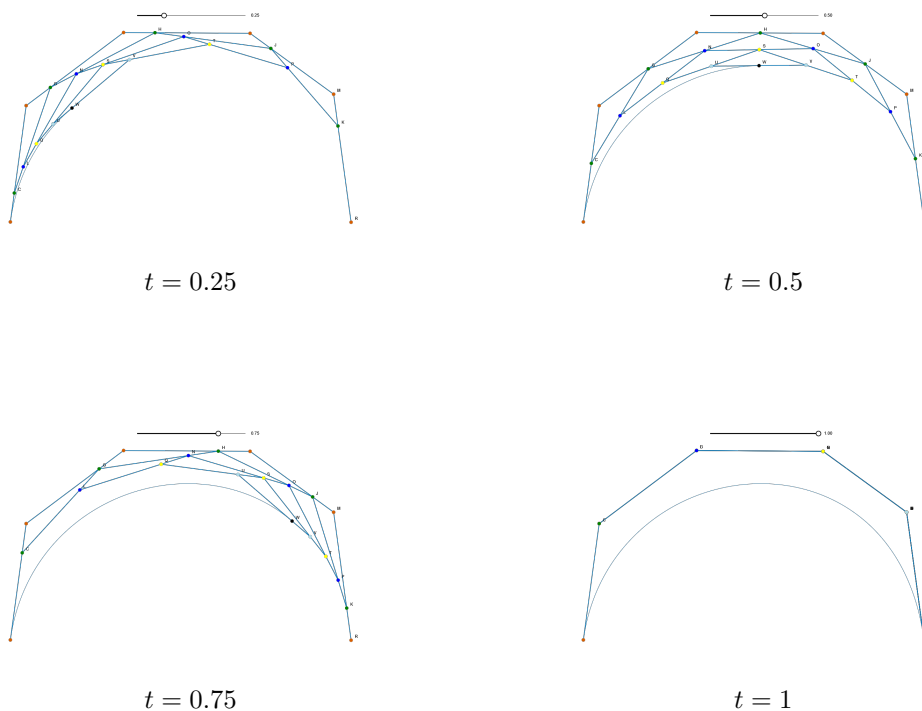


Slika 6: Decasteljaujev algoritem za $n = 3$

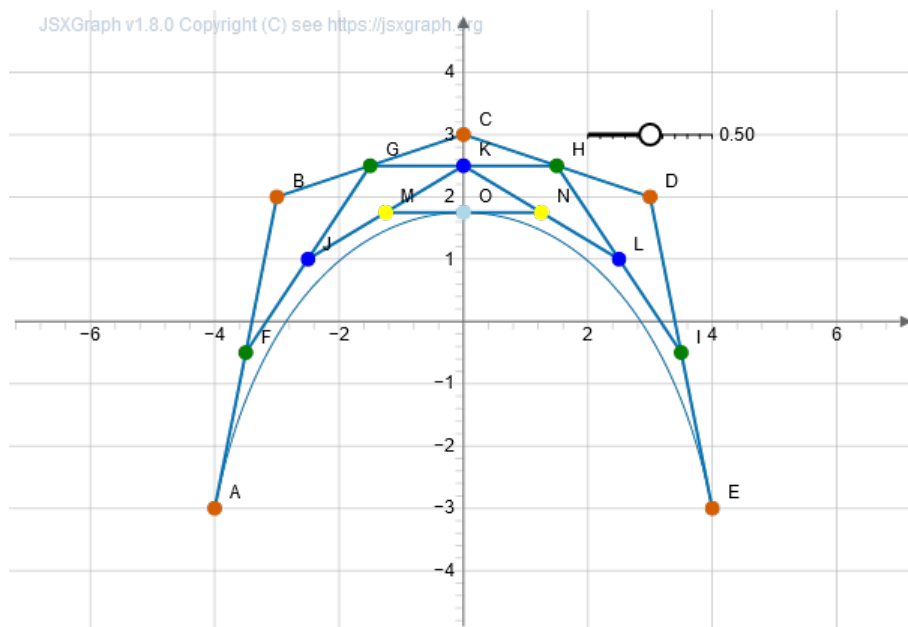
2.5.3 Višanje stopnje

TODO: DOKAZ NI PRAVILEN, nekje sem neki zajebal, malce zamakjeno bi moralo bit! Nekateri algoritmi, ki delajo z Bezierjevimi krivuljami, za vhod potrebujejo dve Bezierjevi krivulji iste stopnje. Recimo, da imamo Bezierjevo krivuljo B stopnje n , ki jo želimo spraviti na stopnjo $n + 1$. Ker velja $1 - t + t = 1$ lahko Bezierjevo krivuljo $B(t)$ zapišemo tudi kot $B(t) = (1 - t)B(t) + tB(t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i(1 - t)B_i^n(t) + \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i t B_i^n(t)$. Razpišimo najprej prvi del.

$$\begin{aligned}
 (1 - t)B_i^n(t) &= (1 - t) \binom{n}{i} t^i (1 - t)^{n-i} \\
 &= \frac{n!}{(n - i)! i!} t^i (1 - t)^{n+1-i} \\
 &= \frac{n + 1 - i}{n + 1} \frac{(n + 1)!}{(n + 1 - i)! i!} t^i (1 - t)^{n+1-i} \\
 &= \frac{n + 1 - i}{n + 1} \binom{n + 1}{i} t^i (1 - t)^{n+1-i} \\
 &= \frac{n + 1 - i}{n + 1} B_i^{n+1}(t)
 \end{aligned}$$



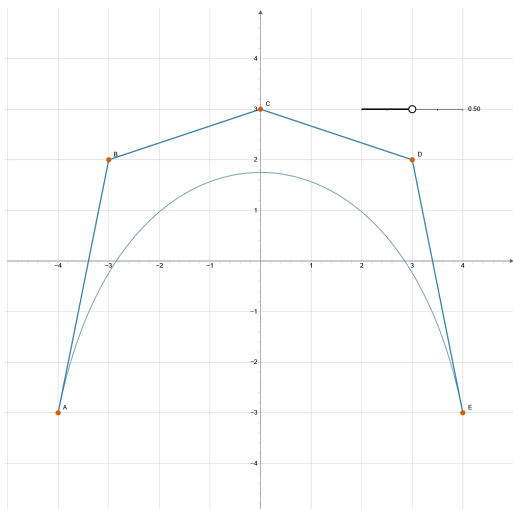
Slika 7: Decasteljaujev algoritem za $n = 5$



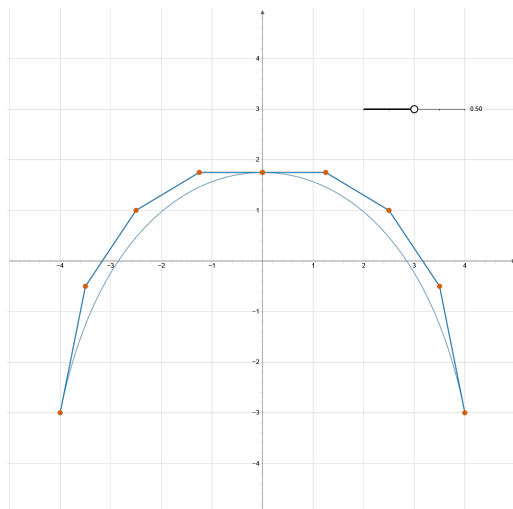
Slika 8: Subdivizija

Sedaj pa še za drugega.

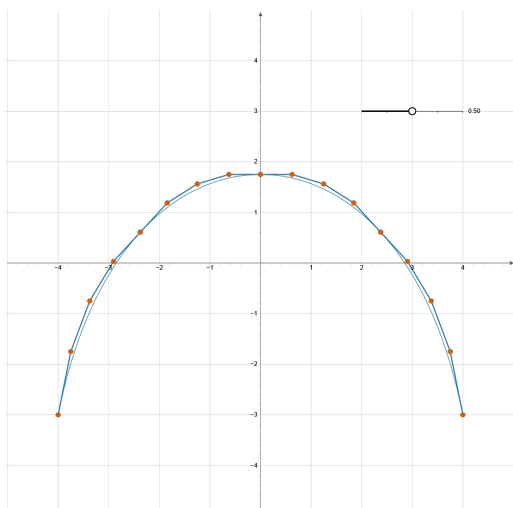
$$\begin{aligned}
 tB_i^n(t) &= t \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \\
 &= \frac{n!}{(n-i)!i!} t^{i+1} (1-t)^{n+1-i-1} \\
 &= \frac{i+1}{n+1} \frac{(n+1)!}{(n-i)!(i+1)!} t^{i+1} (1-t)^{n+1-i-1} \\
 &= \frac{i+1}{n+1} B_{i+1}^{n+1}(t)
 \end{aligned}$$



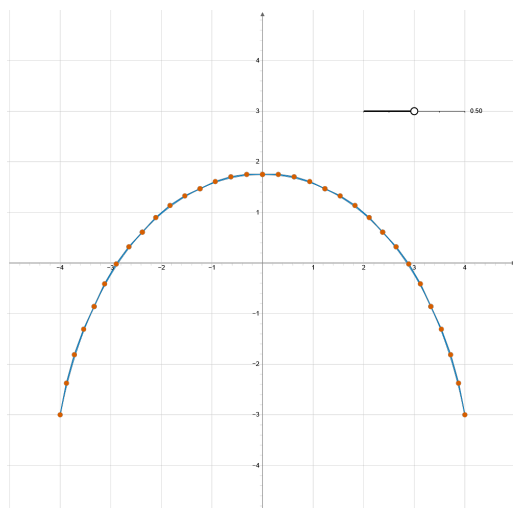
(a) Začetna krivulja s kontrolnim polinomom



(b) 2 krivulji, pridobljeni s subdivizijo



(c) 4 krivulje, pridobljene s subdivizijo



(d) 8 krivulj, pridobljenih s subdivizijo

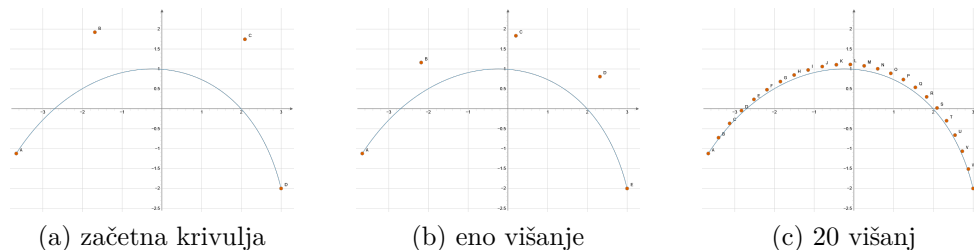
Slika 9: Ponavljanje subdivizije na krivulji

Vstavimo v $B(t)$.

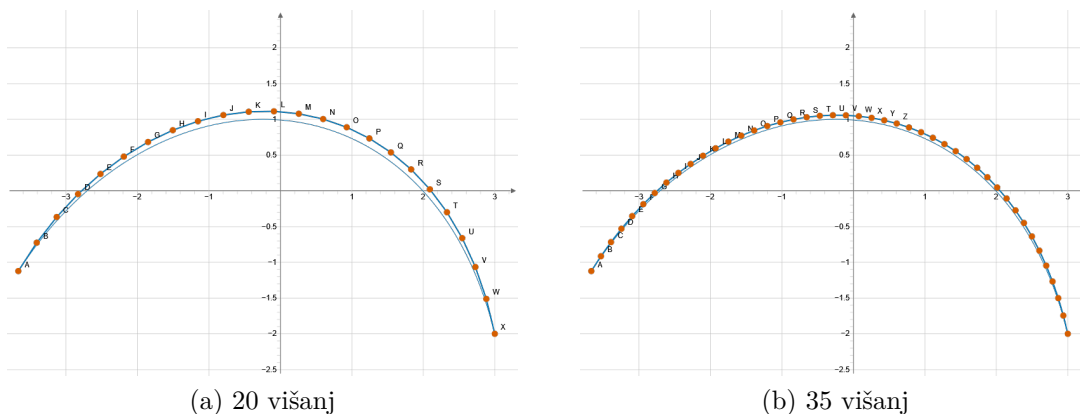
$$\begin{aligned}
 B(t) &= \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i \frac{n+1-i}{n+1} B_i^{n+1}(t) + \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i \frac{i+1}{n+1} B_{i+1}^{n+1}(t) \\
 &= \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i \frac{n+1-i}{n+1} B_i^{n+1}(t) + \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{p}_{i-1} \frac{i}{n+1} B_i^{n+1}(t) \\
 &= \mathbf{p}_0 + \sum_{i=1}^n \left(\mathbf{p}_i \frac{n+1-i}{n+1} + \mathbf{p}_{i-1} \frac{i}{n+1} \right) B_i^{n+1}(t) + \mathbf{p}_n
 \end{aligned}$$

Oglejmo si kako višanje stopnje izgleda na neki krivulji. Na sliki 10 imamo na prvem grafu narisano začetno Bezierjevo krivuljo stopnje 3. Na drugem grafu, smo stopnjo začetne krivulje zvišali za 1. Na tretjem, pa smo naredili 20 višanj stopnje začetne krivulje. Krivulja je na vseh grafih enaka, imamo le več kontrolnih točk. Opaziti je tudi možno, da so kontrolne točke z vsakim višanjem bližje začetni krivulji, njihov

kontrolni poligon pa se zato z vsakim višanjem bolj prilega začetni krivulji. Slednje je možno videti na sliki 11.



Slika 10: Višanje Bezierjeve krivulje



Slika 11: Prileganje kontrolnega poligona

2.6 Racionalne Bezierjeve krivulje

Vseh krivulj se ne da opisati z navadnimi Bezierjevimi krivuljami. Med njimi so tudi takšne, ki so za CAGD sisteme zelo pomembne, na primer razni izseki krožnice. Za opis takšnih krivulj, lahko posežemo po racionalnih Bezierjevih krivuljah. Racionalno Bezierjevo krivuljo stopnje n v \mathbb{R}^d dobimo tako, da Bezierjevo krivuljo stopnje n v \mathbb{R}^{d+1} projiciramo na hiperravnino $w = 1$. Točke iz \mathbb{R}^{d+1} pri tem definiramo kot (w, x_1, \dots, x_n) , projekcijo pa s predpisom $(w, \mathbf{x}) \rightarrow (1, \frac{\mathbf{x}}{w})$. Takšna projekcija privede do naslednje definicije.

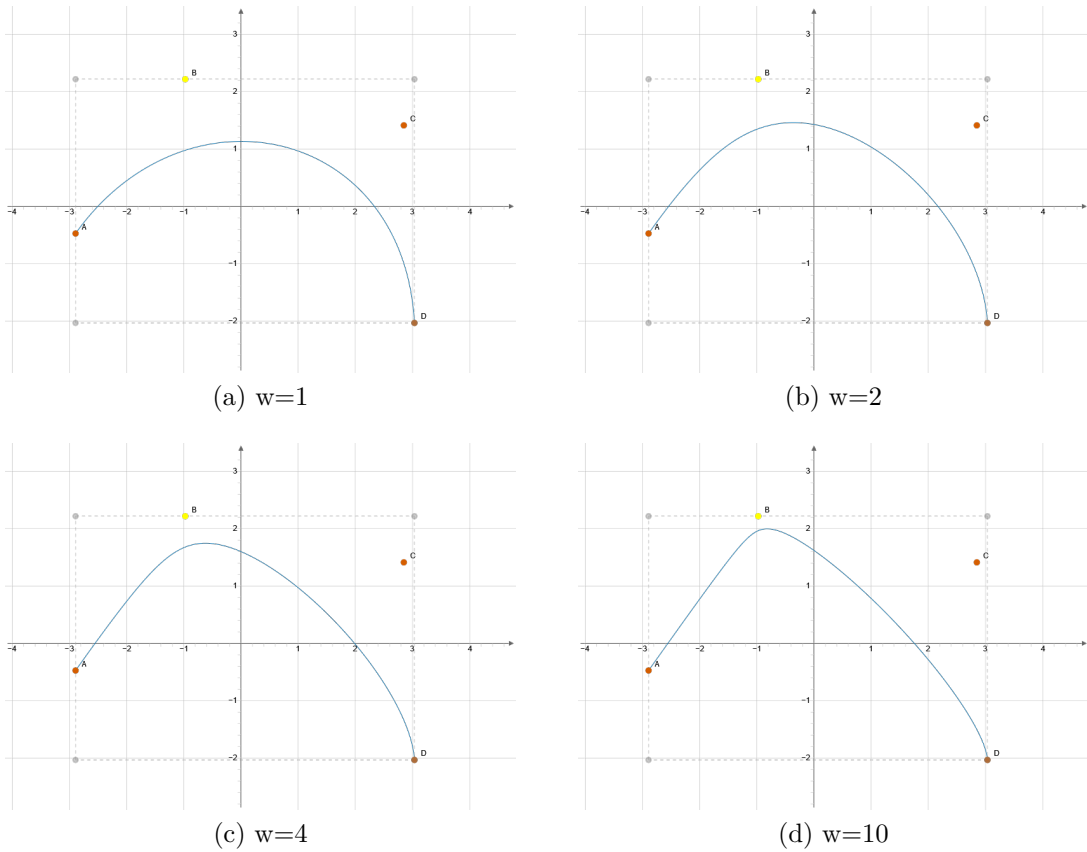
Definicija 2.11. Racionalna Bezierjeva krivulja stopnje $n \in \mathbb{N}$ je podana s parametrizacijo $\mathbf{R} : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^d$ določeno s predpisom

$$\mathbf{R}(t) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i \mathbf{p}_i B_i^n(t)}{\sum_{i=0}^n w_i B_i^n(t)},$$

kjer so kontrolne točke $\mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^d$ in uteži $w_i \in \mathbb{R}$.

Uteži so prosti parametri, ki jih lahko uporabimo pri oblikovanju. Kadar so vse uteži enake, je racionalna Bezierjeva krivulja enaka Bezierjevi krivulji z istimi kontrolnimi točkami. Da bi se izognili težavam pri deljenju z 0 ponavadi privzamemo,

da so vse uteži pozitivne. Vpliv uteži si pogledjmo na sliki 12. Utež spreminjamo le pri rumeni točki, vse ostale uteži puščamo enake 1. Na grafu (a) je utež nastavljena na število 1, krivulja na sliki je zato navadna Bezierjeva krivulja. Na grafu (b) je utež nastavljena na število 2, krivulja je zato bližje rumeni točki kakor na grafu (a). Na grafih (c) in (d) pa lahko vidimo, da se z višanjem uteži, krivulja še bolj bliža rumeni točki. Iz zapisa parametrizacije v definiciji 2.11 lahko hitro vidimo,



Slika 12: Vpliv uteži

da množenje vseh uteži s poljubnim neničelnim številom parametrizacije krivulje ne spremeni. Tako lahko brez izgube splošnosti poljubno utež fiksiramo na 1. Ni pa očitno to, da lahko to storimo za dve uteži. Pogledjmo si naslednji izrek.

Izrek 2.12. *Racionalno Bezierjevo krivuljo s pozitivnimi utežmi w_i in parametrizacijo \mathbf{R} , lahko reparametriziramo v parametrizacijo $\tilde{\mathbf{R}}$ s pozitivnimi utežmi \tilde{w}_i tako, da velja $\tilde{w}_0 = \tilde{w}_n = 1$.*

Izrek nam pove, da smo z uvedbo racionalnih Bezierjevih krivulj dobili dobili le $n - 1$ dodatnih prostih parametrov, glede na navadne Bezierjeve krivulje. Dokaz izreka bo konstrukcijske narave. Našli bomo torej uteži \tilde{w}_i , katere lahko zamenjamo z utežmi w_i , tako da ohranimo isto krivuljo.

Dokaz. Uporabimo reparametrizacijsko funkcijo $\varphi(t) : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ s predpisom $\varphi(t) = \frac{t}{\rho(1-t)+t}$, kjer je ρ pozitivno realno število. Če reparametrizacijsko funkcijo

vstavimo v i -ti Bernsteinov bazni polinom dobimo naslednje

$$\begin{aligned} B_i^n(\varphi(t)) &= \binom{n}{i} \left(\frac{t}{\rho(1-t) + t} \right)^i \left(1 - \frac{t}{\rho(1-t) + t} \right)^{n-i} \\ B_i^n(\varphi(t)) &= \binom{n}{i} \left(\frac{t}{\rho(1-t) + t} \right)^i \left(\frac{\rho(1-t)}{\rho(1-t) + t} \right)^{n-i} \\ &= \binom{n}{i} \frac{\rho^{n-1} t^i (1-t)^{n-i}}{(\rho(1-t) + t)^n} = \frac{\rho^{n-1}}{(\rho(1-t) + t)^n} B_i^n(t). \end{aligned}$$

Reparametrizirane Bernsteinove bazne polinome sedaj vstavimo v parametrizacijo racionalne Bezierjeve krivulje da dobimo

$$\mathbf{R}(\varphi(t)) = \frac{\sum_{i=0}^n \rho^{n-i} w_i \mathbf{p}_i B_i^n(t)}{\sum_{i=0}^n \rho^{n-i} w_i B_i^n(t)}.$$

S starimi utežmi izrazimo nove uteži $\hat{w}_i = \rho^{n-i} w_i$. Želimo, da bi veljalo $\hat{w}_0 = \hat{w}_n$, zato nastavimo $\rho = \sqrt[n]{\frac{w_n}{w_0}}$. Ker velja $\hat{w}_n = w_n$ lahko uteži \hat{w}_i delimo z utežjo w_n , da dobimo željene uteži

$$\tilde{w}_i = \frac{1}{w_n} \hat{w}_i = \frac{w_i}{\sqrt[n]{w_n^i w_0^{n-i}}}.$$

□

Opomba 2.13. Če velja $w_0 = w_n = 1$ pravimo, da je racionalna Bezierjeva krivulja predstavljena v *standardni formi*.

Lastnosti Bezierjevih krivulj, ki smo jih podali v izreku 2.9 veljajo tudi za racionalne Bezierjeve krivulje s pozitivnimi utežmi. Interpolacijo točk lahko dokažemo na podoben način, kakor smo to storili pri dokazu izreka 2.9. Da dokažemo, da je racionalna Bezierjeva krivulja afino invariantna, ter da leži znotraj konveksne ovojnice svojih kontrolnih točk, pa posežemo po naslednjem zapisu.

$$\mathbf{R}(t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i N_i^n, \quad N_i^n(t) := \frac{w_i B_i^n(t)}{\sum_{i=0}^n w_i B_i^n(t)}$$

Če pri dokazu izreka 2.9 namesto Bernsteinovih polinomov $B_i^n(t)$ vstavimo funkcijo N_i^n iz zgornjega zapisa, dobimo dokaz lastnosti za racionalne Bezierjeve krivulje.

2.6.1 Metode racionalnih Bezierjevih krivulj

Racionalne Bezierjeve krivulje $\in \mathbb{R}^d$ so projekcije Bezierjevih krivulj $\in \mathbb{R}^{d+1}$. Metode, ki smo jih predstavili na Bezierjevih krivuljah, lahko enostavno razširimo tudi na racionalne Bezierjeve krivulje. To storimo tako, da metode uporabimo na Bezierjevi krivulji $\in \mathbb{R}^{d+1}$ ter jo nato projiciramo nazaj v ravnino $\in \mathbb{R}^d$.

2.6.2 Decasteljaujev algoritem za racionalne Bezierjeve krivulje

Točke racionalnih Bezierjevih krivulj bi lahko računali tako, kakor smo pokazali za metode. Takšno računanje je nestabilno*****, zato tudi tukaj podamo stabilnejši način računanja, ki je razširitev Decasteljaujevega algoritma.

Dokažimo

Algoritem 2 Racionalni Decasteljaujev algoritem

```
p  $\leftarrow$  p0, p1, ..., pn
w  $\leftarrow$  p0, p1, ..., pn
for  $i = 0, 1, \dots, n$  do
    pi0(t) = pi
    wi0(t) = wi
end for
for  $r = 1, 2, \dots, n$  do
    for  $i = 0, 1, \dots, n - r$  do
        wir(t) = (1 - t)wir-1(t) + twi+1r-1(t)
        pir(t) = (1 - t) $\frac{w_i^{r-1}(t)}{w_i^r(t)}$ pir-1(t) + t $\frac{w_{i+1}^{r-1}(t)}{w_i^r(t)}$ pi+1r-1(t)
    end for
end for
return p0n(t)
```

2.6.3 Farinove točke

Ročno nastavljanje uteži z vpisovanjem, bi bilo za uporabnika CAGD sistema zamudno in nenaravno. Uporabniku želimo delo olajšati tako, da pridelamo bolj naraven način kontroliranja uteži. Izkaže se, da imajo uteži racionalne Bezierjeve krivulje geometrijski pomeni, ki ga lahko za to uporabimo. Uteži lahko kontroliramo s t.i. *Farinovimi točkami*. Farinove točke ležijo na daljicah kontrolnega poligona in jih je toliko, kolikor je prostih parametrov uteži t.j. $n - 1$. i -ta Farinova točka, leži na i -ti daljici kontrolnega poligona in jo deli v razmerju $w_{i+1} : w_i$. Slednje označimo z $\frac{|\mathbf{f}_i - \mathbf{p}_i|}{|\mathbf{f}_i - \mathbf{p}_{i+1}|} = \frac{w_{i+1}}{w_i}$. S kontrolnimi točkami in utežmi jih lahko izrazimo takole

$$\mathbf{f}_i := \frac{w_i}{w_i + w_{i+1}} \mathbf{p}_i + \frac{w_{i+1}}{w_i + w_{i+1}} \mathbf{p}_{i+1}.$$

Želimo pa obratno – s Farinovimi točkami želimo izraziti uteži. Brez izgube splošnosti lahko za prvo utež izberemo $w_0 = 1$. Ostale točke lahko nato rekurzivno izračunamo s pomočjo naslednjega izraza

$$w_{i+1} = w_i \frac{|\mathbf{f}_i - \mathbf{p}_i|}{|\mathbf{f}_i - \mathbf{p}_{i+1}|}.$$

Po želji lahko točke nato še standardiziramo s pomočjo formule,

$$\tilde{w}_i = \frac{w_i}{\sqrt[n]{w_n^i}},$$

ki sledi iz dokaza 2.6.

Na sliki 13 si lahko ogledamo Farinove točke v akciji. Uteži na sliki niso standardizirane zato, da lahko bolj vidimo razmerja med njimi. Na grafu (a) lahko vidimo, da i -ta Farinova točka leži točno na sredini med kontrolima točkama \mathbf{p}_i in \mathbf{p}_{i+1} . Ker so vsa razmerja $|\mathbf{p}_i - \mathbf{f}_i| : |\mathbf{p}_{i+1} - \mathbf{f}_i|$ enaka, so vse uteži enake 1. Na grafu (b) lahko vidimo, da se s premikom prve Farinove točke bližje k točki \mathbf{p}_0 , k njej približa tudi krivulja. Utež w_1 , ki predstavlja razmerje $|\mathbf{p}_0 - \mathbf{f}_0| : |\mathbf{p}_1 - \mathbf{f}_0|$, je zato manjša kot

1. Na grafu (c) lahko vidimo premik Farinove točke bližje k točki \mathbf{p}_1 . Krivulja se točki približa, utež w_1 pa se poveča na več kot 1. Ker na grafoma (b) in (c) druga in tretja Farinova točka ležita na sredini svojih daljic, so uteži w_1, w_2 in w_3 enake. Na grafoma (d) in (e) lahko vidimo, kako se krivulja in uteži obnašajo ob premiku druge Farinove točke. Na grafoma (f) ter (g) pa lahko vidimo obnašanje, ko premaknemo prvo ter tretjo Farinovo točko hkrati gor ali dol. Poglejmo si še, kaj se zgodi, če vse tri točke premaknemo pomaknemo tako, da so razmerja na vseh daljicah enaka. Na levem grafu slike 14 lahko vidimo, da krivulja izgleda kakor začetna. Če uteži standardiziramo, kar smo storili na desnem grafu, vidimo, da je temu res tako. Da bi preprečili takšno izbiro Farinovih točk, lahko po vsakem premiku Farinove točke uteži standardiziramo, ter ponovno izračunamo Farinove točke.

2.6.4 Izsek krožnice

V uvodu podrazdelka smo povedali, da se nekaterih krivulj ne da opisati z navadnimi Bezierjevimi krivuljami. Kot enega izmed primerov smo podali izsek krožnice. V tem delu podrazdelka bomo izpeljali kontrolne točke in uteži racionalne Bezierjeve krivulje, da bo krivulja predstavljala izsek enotske krožnice s **kotom α** . Izsek krožnice bomo podali s kvadratičnimi racionalnimi Bezierjevimi krivuljami. Za konstrukcijo imamo na voljo kontrolne točke $\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1$ in \mathbf{p}_2 , ter uteži w_0, w_1 in w_2 . Iz izreka 2.12 sledi, da lahko robni uteži fiksiramo na $w_0 = w_2 = 1$. Točki \mathbf{p}_0 in \mathbf{p}_2 morata ležati na začetku ter koncu izseka krožnice, saj racionalne Bezierjeve krivulje interpolirajo končne točke. Da bo temu tako, mora veljati $\mathbf{p}_2 = (\cos(\alpha), \sin(\alpha))$. Ker je krožni izsek simetričen čez premico z naklonom $\frac{\alpha}{2}$, krivulja pa parabola, lahko pričakujemo, da bo točka \mathbf{p}_1 ležala na premici med točkama \mathbf{p}_0 in \mathbf{p}_2 t.j. $\mathbf{p}_1 = \left(R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right), R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)$. Sedaj je cilj najti vrednosti R in w_1 . Najprej po komponentah zapišimo parametrizacijo željene krivulje

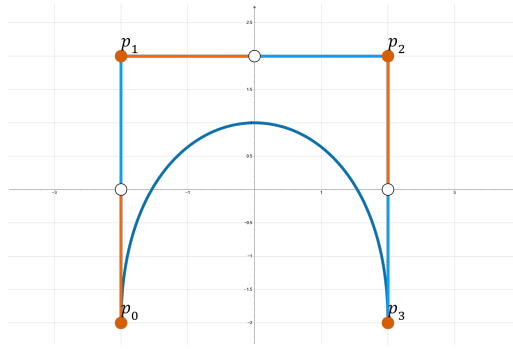
$$\mathbf{R}(t) = \frac{\sum_{i=0}^2 w_i \mathbf{p}_i B_i^2(t)}{\sum_{i=0}^2 w_i B_i^2(t)} = \frac{\mathbf{p}_0(1-t)^2 + w_1 \mathbf{p}_1 2t(1-t) + \mathbf{p}_2 t^2}{(1-t)^2 + w_1 2t(1-t) + t^2},$$

ki po komponentah izgleda takole

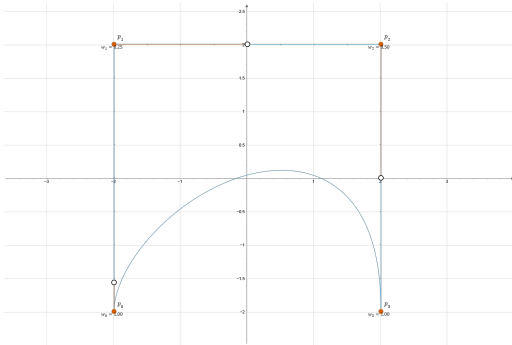
$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{(1-t)^2 + w_1 R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) 2t(1-t) + \cos(\alpha)t^2}{(1-t)^2 + w_1 2t(1-t) + t^2} \\ y(t) &= \frac{w_1 2t(1-t) R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \sin(\alpha)t^2}{(1-t)^2 + w_1 2t(1-t) + t^2}. \end{aligned}$$

Tangenta na enotsko krožnico je v točki $(1, 0)$ vzporedna z ordinatno osjo, zato mora veljati $x'(0) = 0$. **Odvod racionalne Bezierjeve krivulje v točki $(1, 0)$ je enak $2(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0) = 2\left(R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - r, R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)$.** Iz česar sledi $R = \frac{r}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$.

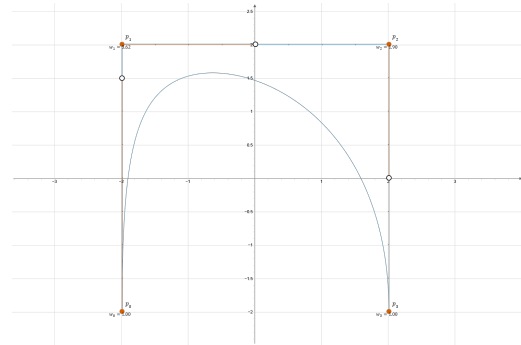
$$\begin{aligned} w_1 \left(\frac{r}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - r \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{r}{2} \sin(\alpha) \\ w_1 &= \frac{r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{r}{2} \sin(\alpha)}{\left(\frac{r}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - r \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \end{aligned}$$



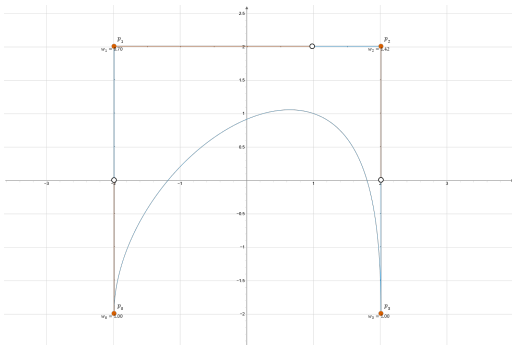
(a)



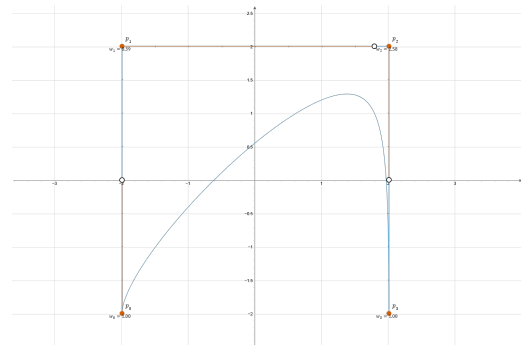
(b)



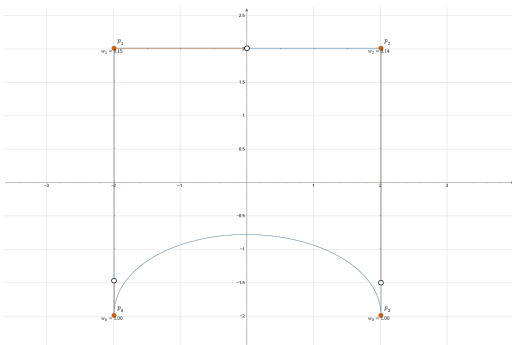
(c)



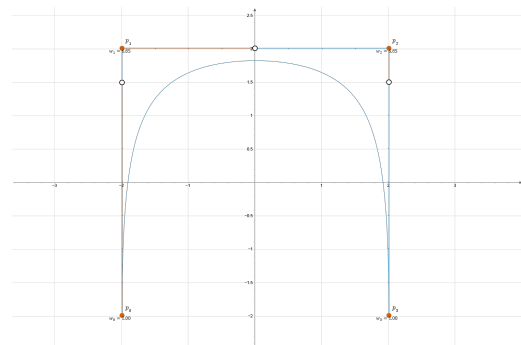
(d)



(e)



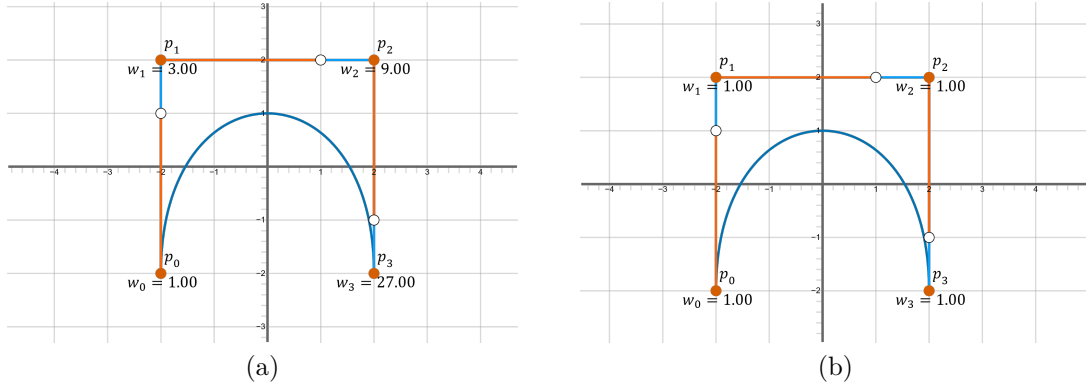
(f)



(g)

Slika 13: Kontroliranje krivulje s Farinovimi točkami

Zaradi simetrije mora krivulja v $t = \frac{1}{2}$ interpolirati točko $\left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right), \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)$ iz



Slika 14: Krivulja z enakimi premiki vseh Farinovih točk, pred in po standardizaciji

česar sledi

$$x\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}w_1R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{1}{4} \cos(\alpha)}{\frac{1}{4} + w_1\frac{1}{2} + \frac{1}{4}} = \frac{\frac{1}{2} + w_1R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{1}{2} \cos(\alpha)}{1 + w_1} = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$y\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\frac{w_1}{2}R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{1}{4} \sin(\alpha)}{\frac{1}{4} + w_1\frac{1}{2} + \frac{1}{4}} = \frac{w_1R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{1}{2} \sin(\alpha)}{1 + w_1} = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right).$$

Iz enačbe izpostavimo w_1

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} + w_1R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{1}{2} \cos(\alpha) &= (1 + w_1) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ w_1R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - w_1 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(\alpha) \\ w_1(R - 1) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= \left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(\alpha)\right) \end{aligned}$$

NEXT

$$\begin{aligned} w_1R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{1}{2} \sin(\alpha) &= (1 + w_1) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ w_1(R - 1) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{1}{2} \sin(\alpha) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{r}{2} + w_1R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{r}{2} \cos(\alpha) &= (1 + w_1)r \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ w_1R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - w_1r \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= r \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{r}{2} \cos(\alpha) - \frac{r}{2} \\ w_1(R - r) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= r \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{r}{2} \cos(\alpha) - \frac{r}{2} \\ w_1 &= \frac{r \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{r}{2} \cos(\alpha) - \frac{r}{2}}{(R - r) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \\ w_1 &= \frac{r \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{r}{2} \cos(\alpha) - \frac{r}{2}}{\left(R = \frac{r}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - r\right) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \end{aligned}$$

$$w_1 \left(\frac{r}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - r \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{r}{2} \sin(\alpha)$$

$$w_1 = \frac{r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{r}{2} \sin(\alpha)}{\left(\frac{r}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - r \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Izračunajmo sedaj za $r = 1$ in $\alpha = \frac{\pi}{2}$. $R = \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{4}\right)} = \sqrt{2}$.

$$w_1 = \frac{\frac{\sqrt{2}-1}{2}}{(\sqrt{2}-1)\frac{\sqrt{2}}{2}} = \frac{\sqrt{2}-1}{(\sqrt{2}-1)\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

3 Zlepki Bezierjevih krivulj

Če si ponovno ogledamo Decasteljaujev algoritem 2.4, lahko hitro opazimo, da je časovna kompleksnost algoritma $O(n^2)$. Računanje točk Bezierjevih krivulj pri visokih stopnjah n je zato lahko zamudno. Takšne krivulje se zato v CAD sistemih izkažejo za neuporabne. Da bi ohranili čim večjo kontrolo krivulj s čim manj računanja, posežemo po zlepkih Bezierjevih krivulj.

Definicija 3.1. Zlepek krivulj $\mathbf{S} : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^d$ stopnje n nad zaporedjem stičnih točk $a = u_0 < u_1 < \dots < u_{m-1} < u_m = b$ je odsekoma polinomska krivulja, za katero velja $\mathbf{S}|_{[u_{l-1}, u_l]} \in \mathbb{P}_n^d$.

Želimo si tudi, da bi naši zlepki tvorili neprekinjeno krivuljo brez kolen, saj so takšne krivulje v CAGD sistemih najbolj uporabne. Krivulja je po definiciji na posameznih odsekih polinomska in zato tudi gladka, problem je le v stičnih točkah. Naj bo

$$\mathbf{s}(u) = \begin{cases} \mathbf{s}_1(u) = \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i^{(1)} B_i^n\left(\frac{u-u_0}{\Delta u_0}\right), & u \in [u_0, u_1], \\ \mathbf{s}_2(u) = \sum_{i=0}^n \mathbf{p}_i^{(2)} B_i^n\left(\frac{u-u_1}{\Delta u_1}\right), & u \in [u_1, u_2] \end{cases}$$

zlepek dveh Bezierjevih krivulj. Da bo zlepek zvezen, mora v stični točki u_1 veljati $\mathbf{s}_1(u_1) = \mathbf{s}_2(u_1)$ oziroma $\mathbf{p}_n^{(1)} = \mathbf{p}_0^{(2)}$. Takšen zlepek, si lahko ogledamo na sliki 15. Vidimo lahko, da takšen zlepek v CAGD sistemih ne bo najbolj uporaben, saj ima v stični točki koleno. Če želimo, da bo zlepek vsaj zvezno odvedljiv, mora veljati prejšnje, morata pa v stični točki sovpadati tudi odvoda $\mathbf{s}_1'(u_1) = \mathbf{s}_2'(u_1)$. Iz RE-FBEZIERODVOD sledi, da mora zato veljati $\mathbf{p}_n^{(1)} - \mathbf{p}_{n-1}^{(1)} = \mathbf{p}_1^{(2)} - \mathbf{p}_0^{(2)}$. Upoštevajoč $\mathbf{p}_n^{(1)} = \mathbf{p}_0^{(2)}$, lahko enačbo zapišemo tudi kot $\mathbf{p}_n^{(1)} = \mathbf{p}_0^{(2)} = \frac{\mathbf{p}_1^{(2)} + \mathbf{p}_{n-1}^{(1)}}{2}$. Takšen zlepek si lahko ogledamo na sliki 16. Opaziti je možno tudi geometrijski pomen pogoja, saj stična kontrolna točka leži točno na sredini med kontrolnima točkama. Kaj pa, če točka ne bi bila točno na sredini? Izkaže se, da za to, da kolena v stični točki ne bi bilo, ne potrebujemo zvezne odvedljivosti v analitičnem pomenu, dovolj je zvezna odvedljivost v geometrijskem pomenu.

Definicija 3.2. Zlepek krivulj

$$\mathbf{s}(u) = \begin{cases} \mathbf{s}_1(u), & u \in [u_0, u_1), \\ \mathbf{s}_2(u), & u \in [u_1, u_2] \end{cases}$$

je n -krat geometrijsko zvezno odvedljiv, če lahko krivulji reparametriziramo v takšni parametrizaciji $\tilde{\mathbf{s}}_1$ in $\tilde{\mathbf{s}}_2$, da je zlepek krivulj

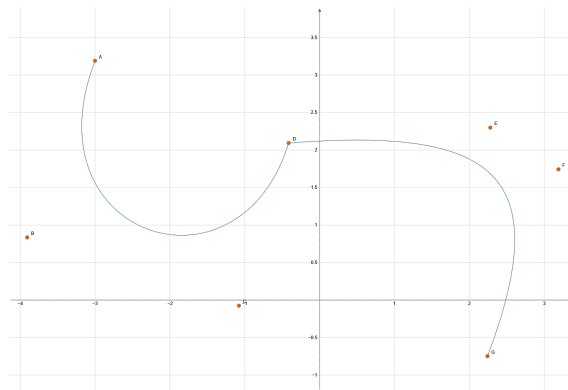
$$\tilde{\mathbf{s}}(u) = \begin{cases} \tilde{\mathbf{s}}_1(u), & u \in [u_0, u_1), \\ \tilde{\mathbf{s}}_2(u), & u \in [u_1, u_2] \end{cases}$$

n -krat zvezno odvedljiv.

Takšna definicija, nam ne pomaga. **<- ne bomo tako pustili .. :D.** Pogoje za geometrijsko zveznost lahko prevedemo na enačbe imenovane *beta pogoji*. Zapišimo sedaj beta pogoje za geometrijsko odvedljivost stopnje 2. Zlepek iz definicije 3.2 je

1. G^0 , natanko tedaj, ko je zvezen v analitičnem smislu.
2. G^1 , natanko tedaj, ko velja (1) in obstaja realno število $\beta_1 > 0$, da velja $\mathbf{s}'_1(u_1) = \beta_1 \mathbf{s}'_2(u_1)$.
3. G^2 , natanko tedaj, ko velja (2) in obstaja realno število β_2 , da velja $\mathbf{s}''_1(u_1) = \beta_1^2 \mathbf{s}''_2(u_1) + \beta_2 \mathbf{s}'_2(u_1)$.

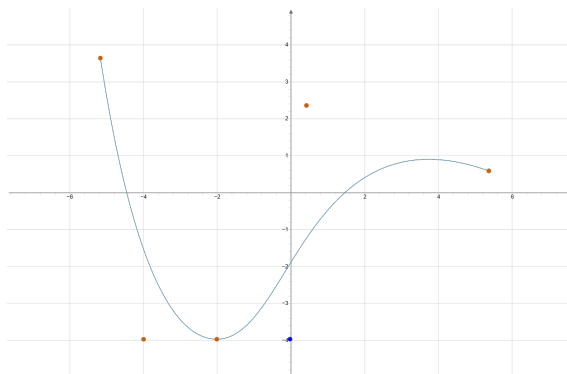
Bom dokazal to? Nevem..... Verjetno samo ustvarim parametrizacijo na podlagi pogoja (t-> bt) vstavim not in bo? Pogoj za G^1 nam pogoj za zveznost ****dodajref** spremeni v to, da mora stična točka ležati na daljici med drugima kontrolnima točkama **nekako referencirat prave**. S tem, smo pridobili prosti parameter, ki ga lahko v CAGD sistemih uporabimo za dodatno kontrolo nad krivuljo. G^1 zlepek si lahko ogledamo na sliki 17.



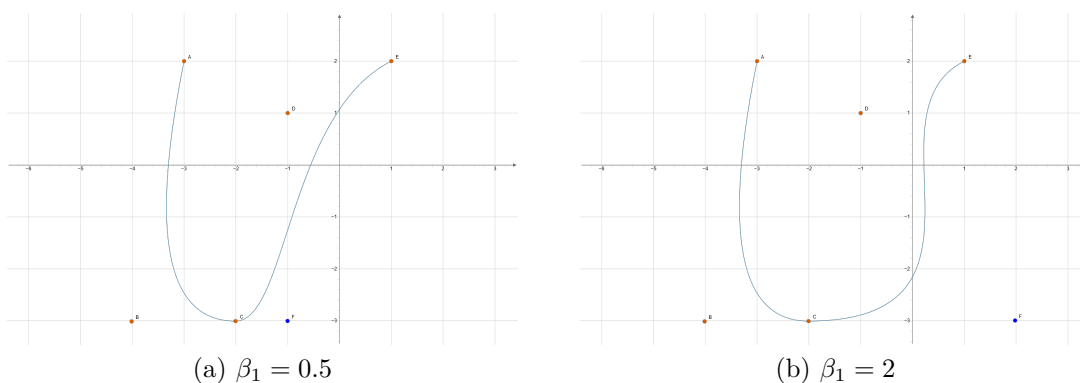
Slika 15: C^0 zlepek dveh Bezierjevih krivulj

3.1 Alfa parametrizacije

NE NE NE Tisto je bilo nekaj drugega. Te alfa parametrizacije so za zlepke!! Ma mentor je najbrz mislil, da bi ne o tem a? Ker to bi prislo prav, ce naredim tudi zlepke PH krivulj (kar nacelema ne bi smelo bit tako problematicno...).



Slika 16: C^1 zlepek dveh Bezierjevih krivulj



Slika 17: Vpliv izbora β_1 pri G^1 zlepku

4 PH Krivulje

Motivacija: fajn so nam takšne parametrizacije, da se isto hitro premikamo po njih. (ce karkoli rises recimo) V poglavju se bomo osredotočili (mogoče celo samo govorili?) o krivuljah v \mathbb{R}^2 .

4.1 Dolžina krivulje kot racionalna funkcija

Dolžina krivulje podane s parametrizacijo $\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t))$ je definirana z enačbo $\int_0^t \sqrt{x'^2(t) + y'^2(t)}$. Integrandu v enačbi pravimo *parametrična hitrost* krivulje, označimo ga z $\sigma(t)$. Idealno bi bilo, da je hitrost $\sigma(t) = 1$ za vsak $t \in [0, t_0]$, saj bi v tem primeru veljalo $s(t) = t$. Takšna parametrizacija je zlahka dosegljiva za preme črte, tudi za odseke krožnice (z rabo trigonometričnih funkcij), v splošnem pa ne. Dokaz da nobena krivulja ne more biti parametrizirana z racionalnimi funkcijami svoje dolžine.???

4.2 Polinomska parametrična hitrost

Kot smo zgoraj dokazali, ne moremo doseči racionalne parametrizacije krivulje, ki bi imela hitrost enako 1. Če krivulje nekoliko omejimo, lahko dosežemo, da bo funkcija hitrosti vsaj polinom. To dosežemo tako, da zahtevamo, da je polinom $x'^2(t) +$

$y'^2(t)$ popoln kvadrat. V takšnem primeru se namreč koren v integrandu izraza REFNAENACBO pokrajša, pod integralom pa ostane polinom. Krivuljam za katere to drži pravimo *krivulje s pitagorejskimi hodografi* oziroma *PH krivulje*. Integral polinoma je tudi polinom, iz česar sledi, da lahko dolžino PH krivulje izračunamo tako, da evalviramo polinom. V naslednjih razdelkih bomo videli, da nam tale lastnost omogoča več, kot samo

Definicija 4.1. Hodograf krivulje podane s parametrizacijo $\mathbf{r}(t) \in \mathbb{R}^n$ je krivulja katere parametrizacija je odvod parametrizacije prvotne krivulje. **V primeru, da komponente parametrizacije hodografa krivulje tvorijo Krivulja podana s parametrizacijo $\mathbf{r}(t) \in \mathbb{R}^n$ je krivulja s pitagorejskim hodografom, če komponente hodografa tvorijo pitagorejsko $(n + 1)$ -terko. (???????????????? se tako rece?)**

Pri konstrukciji Bezierjevih PH krivulj bomo potrebovali polinome, ki tvorijo pitagorejske trojice. Pomagali si bomo z naslednjim izrekom.

Izrek 4.2. Polinomi a, b in c tvorijo pitagorejsko trojico, t.j. zadoščajo enačbi

$$a^2(t) + b^2(t) = c^2(t), \quad (4.1)$$

natanko tedaj, ko obstajata tuja si polinoma u in v ter nek polinom w za katere velja

$$\begin{aligned} a(t) &= [u^2(t) - v^2(t)]w(t), \\ b(t) &= 2u(t)v(t)w(t), \\ c(t) &= [u^2(t) + v^2(t)]w(t). \end{aligned} \quad (4.2)$$

Izrek tudi dokažimo.

Dokaz.

(\Leftarrow) Dokaz je enostaven, saj lahko vrednosti polinomov a, b in c iz enačbe (4.2) vstavimo v enačbo (4.1) in preverimo.

(\Rightarrow) Najprej definiramo polinom $w(t) = \gcd(a(t), b(t), c(t))$. Pri tako definiranim polinomu w , so si polinomi $\tilde{a}(t) = \frac{a(t)}{w(t)}$, $\tilde{b}(t) = \frac{b(t)}{w(t)}$, $\tilde{c}(t) = \frac{c(t)}{w(t)}$ tuji in zadoščajo enačbi $\tilde{a}^2(t) + \tilde{b}^2(t) = \tilde{c}^2(t)$. Enačbo zapišemo nekoliko drugače

$$\tilde{b}^2(t) = \tilde{c}^2(t) - \tilde{a}^2(t) = [\tilde{c}(t) + \tilde{a}(t)][\tilde{c}(t) - \tilde{a}(t)].$$

Polinoma $\tilde{c}(t) + \tilde{a}(t)$ in $\tilde{c}(t) - \tilde{a}(t)$ ne moreta imeti skupnih ničel, saj bi to impliciralo skupne ničle polinomov $\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c}$, kar bi bilo v nasprotju z njihovo definicijo. Ker skupnih ničel nimata, mora biti vsaka ničla polinoma \tilde{b} tudi ničla sode stopnje enega izmed polinomov $\tilde{c}(t) + \tilde{a}(t)$ ali $\tilde{c}(t) - \tilde{a}(t)$. Tako lahko definiramo tuja si polinoma u in v , da velja $\tilde{c}(t) + \tilde{a}(t) = 2u^2(t)$ in $\tilde{c}(t) - \tilde{a}(t) = 2v^2(t)$. Iz enačb potem hitro sledi

$$\tilde{a} = u^2(t) - v^2(t), \quad \tilde{b}(t) = 2u(t)v(t), \quad \tilde{c}(t) = u^2(t) + v^2(t).$$

Če enačbe pomnožimo s polinomom w dobimo željeno obliko (4.2). \square

Iz konstrukcije dokaza lahko hitro vidimo, da je za pitagorejske trojice pri katerih je največji skupni delitelj konstanta, konstanten tudi polinom w ter $\gcd(u(t), v(t))$. Takšnim trojicam pravimo *primitivne pitagorejske trojice*. Parametrizacijo ravninske PH krivulje $\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t))$ lahko dobimo tako, da vstavimo tuja si polinoma u, v in polinom w v izraza

$$x'(t) = [u^2(t) - v^2(t)]w(t), \quad y'(t) = 2u(t)v(t)w(t) \quad (4.3)$$

in integriramo. Brez izgube splošnosti lahko x' oziroma y' asociiramo z a ali b ***** (pac kateri izraz kateremo pripopamo, ma je treba to dokazat). Nekateri izbori polinomov u, v, w porodijo izrojene(????) krivulje, takšne izbore bi radi izločili. Izbori, ki porodijo izrojene krivulje so sledeči:

1. $w(t) = 0$ ali $u(t) = v(t) = 0$, hodograf je v takšnem primeru enak $x'(t) = y'(t) = 0$. Takšen hodograf ne definira krivulje ampak točko.
2. Če so polinomi $w(t), u(t), v(t)$ konstantni in ne ustrezajo točki (a), potem je konstanten tudi hodograf. Takšen hodograf definira enakomerno parametrizirano premo črto.
3. Če sta polinoma u in v konstantna ter vsaj en neničelen, polinom w pa ni konstanten. Potem hodograf spet definira premo črto, a tokrat parametrizacija ni enakomerna. (hitrost ni konstanta)
4. Enako kot v točki (c) dobimo tudi v primeru, ko je polinom w neničelen in en izmed polinomov u in v je ničelen.

Neizrojene PH krivulje dobimo torej pri izborih neničelnih polinomov u, v in w , kjer vsaj en izmed polinomov u in v ni konstanten.

S številom λ označimo stopnjo polinoma w , s številom μ pa $\max(\deg(u(t)), \deg(v(t)))$. PH krivulja, pridobljena z integracijo zgornjega hodografa, je stopnje $n = \lambda + 2\mu + 1$. Prostih parametrov pa je manj. Vsak izmed polinomov u in v je namreč definiran z največ $\mu + 1$ parametri. Brez izgube splošnosti lahko vodilni koeficient polinoma w fiksiramo na 1. Polinom w je zato definiran z λ parametri. Integracijska konstanta pri integriranju hodografa nam poda še 2 prosta parametra. Skupno je prostih parametrov zato $\lambda + 2(\mu + 1) + 2 = \lambda + 2\mu + 4 = n + 3$. Kjer zadnja enakost sledi iz zgornje enačbe za stopnjo PH krivulje. Vseh parametrov ne moremo porabiti za obliko krivulje. Dva parametra nam določi izbor začetne točke, en parameter nam določi usmerjenost/rotacija/(???) krivulje, še dva nam določi izbor parametrizacije, saj substitucija $t \rightarrow at + b$ ne spremeni oblike ali stopnje krivulje. Ostane nam $n - 2$ prostih parametrov za obliko krivulje.

4.3 Kontrolne točke Bezierjevih PH krivulj

V tem podrazdelku bomo s kontrolnimi točkami Bezierjevih krivulj karakterizirali *Bezierjeve PH krivulje*, to so Bezierjeve krivulje katerih hodograf je pitagorejska trojica. Osredotočili se bomo na hodografe primitivnih pitagorejskih trojic. Takšni hodografi definirajo regularne PH krivulje, saj za njih velja $\mathbf{r}(t) \neq 0$ pri vsakem realnem številu t . Tako dobljene PH krivulje so lihe stopnje $n = 2\mu + 1$.

Najbolj osnovne netrivialne PH krivulje dobimo tako, da za polinoma u in v izberemo Bernsteinova polinoma

$$u(t) = u_0 B_0^1(t) + u_1 B_1^1(t), \quad v(t) = v_0 B_0^1(t) + v_1 B_1^1(t)$$

pri katerih mora veljati $u_0v_1 - u_1v_0 \neq 0$ in $(u_1 - u_0)^2 + (v_1 - v_0)^2 \neq 0$, da sta si polinoma u in v tuja, ter da vsaj en od njiju ni konstanten. Za polinom w izberemo konstanten polinom $w(t) = 1$. Ko polinome vstavimo v enačbo REFERENCANAENACBO, dobimo hodograf

$$\begin{aligned}x'(t) &= (u_0^2 - v_0^2)B_0^2(t) + (u_0u_1 - v_0v_1)B_1^2(t) + (u_1^2 - v_1^2)B_2^2(t) \\y'(t) &= 2u_0v_0B_0^2(t) + (u_0v_1 + u_1v_0)B_1^2(t) + 2u_1v_1B_2^2(t).\end{aligned}$$

Hodograf sedaj integriramo tako, da uporabimo lastnost ?? iz izreka 2.4. Če upoštevamo še, da so Bernsteinovi polinomi razčlenitev enote dobimo

$$\begin{aligned}x(t) &= x_0(B_0^3(t) + B_1^3(t) + B_2^3(t) + B_3^3(t)) \\&\quad + \frac{1}{3}(u_0^2 - v_0^2)(B_1^3(t) + B_2^3(t) + B_3^3(t)) \\&\quad + \frac{1}{3}(u_0u_1 - v_0v_1)(B_2^3(t) + B_3^3(t)) \\&\quad + \frac{1}{3}(u_1^2 - v_1^2)B_3^3(t) \\y(t) &= y_0(B_0^3(t) + B_1^3(t) + B_2^3(t) + B_3^3(t)) \\&\quad + \frac{1}{3}2u_0v_0(B_1^3(t) + B_2^3(t) + B_3^3(t)) \\&\quad + \frac{1}{3}(u_0v_1 + u_1v_0)(B_2^3(t) + B_3^3(t)) \\&\quad + \frac{1}{3}2u_1v_1B_3^3(t),\end{aligned}$$

kar ustreza Bezierjevi krivulji s kontrolnimi točkami

$$\begin{aligned}\mathbf{p}_1 &= \mathbf{p}_0 + \frac{1}{3}(u_0^2 - v_0^2, 2u_0v_0), \\ \mathbf{p}_2 &= \mathbf{p}_1 + \frac{1}{3}(u_0u_1 - v_0v_1, u_0v_1 + u_1v_0), \\ \mathbf{p}_3 &= \mathbf{p}_2 + \frac{1}{3}(u_1^2 - v_1^2, 2u_1v_1)\end{aligned}\tag{4.4}$$

kjer je točka $\mathbf{p}_0 = (x_0, y_0)$, x_0 in y_0 pa sta integracijski konstanti.

Kontrolni poligoni, karakterizirani z enačbo (4.4) imajo tudi geometrijsko interpretacijo....

Kam zdej zapeljat? Se bomo sli kompleksnih števil ali ne? Mater tezka odlocitev.... pogledat je treba racionalne odmike in shit, ce je slucjano treba dejansko nujno zapeljat v kompleksne vode.... sej so lepe samo nocem prevec balasta.

Kot smo v prejšnjem razdelku povedali, ima PH krivulja n -te stopnje $n - 2$ parametrov, ki jih definirajo obliko. Pri pravkar definiranih krivuljah to pomeni, da ima krivulja le en prosti parameter, ki jih definira obliko. Takšne krivulje so v CAD sistemih neuporabne, saj uporabniku ne nudijo dovolj kontrole. Če želimo podoben nivo kontrole, kakor pri kubičnih Bezierjevih krivuljah, moramo poseči po *kvintičnih* Bezierjevih PH krivuljah. Podobno kakor prej, za polinom w izberemo $w(t) = 1$, za

polinoma u in v pa izberemo Bernsteinova polinoma, le da tokrat izberemo polinoma stopnje 2

$$u(t) = u_0 B_0^2(t) + u_1 B_1^2(t) + u_2 B_2^2(t), \quad v(t) = v_0 B_0^2(t) + v_1 B_1^2(t) + v_2 B_2^2(t).$$

Da sta si polinoma u in v tuja, mora tukaj veljati $(u_2 v_0 - u_0 v_2)^2 \neq 4(u_0 v_1 - u_1 v_0)(u_1 v_2 - u_2 v_1)$. Vstavimo ju v hodograf in integriramo, da dobimo Bezierjevo krivuljo z naslednjimi kontrolnimi točkami

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1 &= \mathbf{p}_0 + \frac{1}{5}(u_0^2 - v_0^2, 2u_0 v_0), \\ \mathbf{p}_2 &= \mathbf{p}_1 + \frac{1}{5}(u_0 u_1 - v_0 v_1, u_0 v_1 + u_1 v_0), \\ \mathbf{p}_3 &= \mathbf{p}_2 + \frac{2}{5}(u_1^2 - v_1^2, 2u_1 v_1) + \frac{1}{5}(u_0 u_2 - v_0 v_2, u_0 v_2 + u_2 v_0) \\ \mathbf{p}_4 &= \mathbf{p}_3 + \frac{1}{5}(u_1 u_2 - v_1 v_2, u_1 v_2 + u_2 v_1), \\ \mathbf{p}_5 &= \mathbf{p}_4 + \frac{1}{5}(u_2^2 - v_2^2, 2u_2 v_2). \end{aligned} \quad (4.5)$$

Lema 4.3. Kvintična Bezierjeva PH krivulja, definirana s kontrolnimi točkami podanimi z izrazi (4.5) ima ali dva prevoja, ali pa prevoja nima, odvisno od pozitivnosti števila

$$\Delta = (u_2 v_0 - u_0 v_2)^2 - 4(u_0 v_1 - u_1 v_0)(u_1 v_2 - u_2 v_1).$$

Dokaz. **DRUGAČE, referenciraj se na hodograf kvintične krivulje.... Odvajaj tisto.... bedno bo, tak je lajf.**

Ker smo za polinom w izbrali konstanten polinom $w(t) = 1$, velja $x'(t) = u^2(t) - v^2(t)$, $y'(t) = 2u(t)v(t)$. Če polinoma x' in y' odvajamo, dobimo $x''(t) = 2(u(t) - v(t))$ in $y''(t) = 2(u'(t)v(t) + u(t)v'(t))$. Polinome x', y', x'' in y'' vstavimo v enačbo za ukrivljenost $k = \frac{x'y'' - y'x''}{(x'^2 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}$. Ker je imenoalec zmeraj pozitiven, nas zanima le števec.

$$x'(t)y''(t) - y'(t)x''(t) = 2(u^2(t) - v^2(t))(u'(t)v(t) + u(t)v'(t)) - 4u(t)v(t)(u(t) - v(t))$$

□

4.4 Parametrična hitrost in dolžina krivulje

Parametrična hitrost PH krivulje podane s parametrizacijo $\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t))$ je dana s polinomom

$$\sigma(t) = |\mathbf{r}'(t)| = \sqrt{x'^2(t) + y'^2(t)} = u^2(t) + v^2(t).$$

Če je krivulja stopnje n , potem morata biti polinoma u in v stopnje $m = \frac{1}{2}(n - 1)$. Zapišimo polinome u, v in σ v Bernsteinovi obliki

$$u(t) = \sum_{j=0}^m u_j B_j^m, \quad v(t) = \sum_{j=0}^m v_j B_j^m, \quad \sigma(t) = \sum_{j=0}^{n-1} \sigma_j B_{j,m}$$

S pomočjo pravila za množenje Bernsteinovih polinomov iz izreka 2.4, lahko koeficiente σ_j izrazimo s koeficienti polinomov u in v :

$$\sigma_j = \sum_{k=\max(0, j-m)}^{\min(m, j)} = \frac{\binom{m}{k} \binom{m}{j-k}}{\binom{n-1}{j}} (u_k u_{j-k} + v_k v_{j-k}).$$

Pridobili smo funkcijo parametrične hitrosti PH krivulje, ki je zapisana v Bernsteinovi bazi. To je zelo super(enadrugabeseda dej), saj znamo vrednosti takšnih polinomov računati hitro*** in stabilno*****, poleg tega pa takšen zapis dopušča enostavno integracijo v zaprte sisteme. Izpeljimo še funkcijo dolžine PH krivulje. Da pridobimo dolžino PH krivulje moramo izračunati določeni itegral polinoma hitrosti $\int_0^t \sigma(\tau) d\tau = s(t)$. Integral izračunamo s pomočjo integracijskega pravila iz izreka ???. Tako dobimo dolžino PH krivulje izraženo kot polinom v Bernsteinovi bazi

$$s(t) = \sum_{k=0}^n s_k \binom{n}{k} (1-t)^{n-k} t^k,$$

kjer je koeficient $s_0 = 0$ in koeficienti $s_k = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{k-1} \sigma_j$. Iz zapisa je hitro mogoče videti, da je dolžina Bezierjeve PH krivulje enaka $s(1) = \frac{\sigma_0 + \sigma_1 + \dots + \sigma_{n-1}}{n}$. Ker velja $\int_a^b \sigma(t) dt = \int_0^b \sigma(t) dt - \int_0^a \sigma(t) dt = s(b) - s(a)$, lahko dolžino odseka izračunamo tako, da Bernsteinov polinom s evalviramo v točkah b in a ter vzamemo razliko. To je seveda spet super, ker je takšno računanje hitro in natančno (pri navadnih polinomih ponavadi uporabljamo aproksimacije). Lastnosti funkcije s bomo v naslednjem podrazdelku uporabili tudi pri enakomerni parametrizaciji.

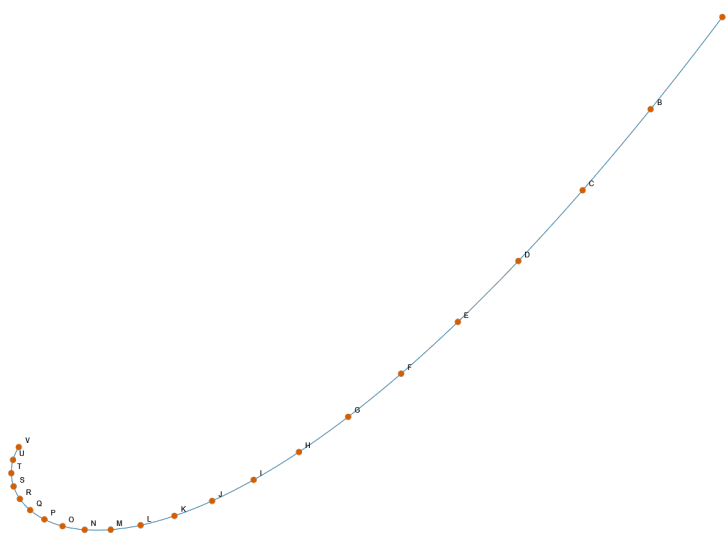
4.5 Enakomerna parametrizacija

MOTIVACIJA: Želimo definirati enakomerno oddaljene točke na krivulji. Takšni problemi se naravno pojavijo pri

Krivuljo želimo s parametri $\{t_i\}_{i=0}^N$ razdeliti na N kosov. Če to naredimo tako, da parametre t_i postavimo ekvidistantno, t.j. $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ je enak za vse i , točke na krivulji ne bodo enako oddaljene druga od druge (glede na dolžino odseka med njima), ker parametrična hitrost krivulje $\sigma(t)$ ni konstantna. Slednje lahko vidimo na sliki 18. Čeprav parametrična hitrost PH krivulje niti ni konstantna, lahko njen enostaven izračun izkoristimo, da najdemo parametre $\{t_i\}_{i=0}^N$ za katere velja $s(t_k) = k\Delta s$, kjer je $\Delta s = \frac{s(1)}{N}$. Ker je parametrična hitrost $\sigma(t) = s'(t)$ pozitivna za vsa realna števila $t \in [0, 1]$ (ko sta u, v tuja... ampak a ni da to smo mi ze privzeli prej(?) :/), je funkcija dolžine krivulje pri parametru t , $s(t)$, strogo naraščajoča. Parametri t_i so zato enolično določeni in ležijo med t_{i-1} in 1. Uporabimo lahko Newton-Raphsonovo iteracijo. Za začetni približek vzamemo $t_k^{(0)} = t_{k-1} + \frac{\Delta s}{\sigma(t_{k-1})}$ popravljamo pa ga z iteriranjem

$$t_k^{(r)} = t_k^{(r-1)} - \frac{s(t_k^{(r-1)}) - k\Delta s}{\sigma(t_k^{(r-1)})}, \quad r = 1, 2, \dots$$

Takšna iteracija pri začetnih približkih, ki so dovolj blizu parametra t_k , konvergira s kvadratično hitrostjo. (referenca na bor plestenjak? :D) Za večino primerov zato izračun približka t_k , do natančnosti reda 10^{-12} , potrebuje le dva do tri korake iteracije.



Slika 18: 20 točk na krivulji pri ekvidistantnih t_i

V praksi so takšni približki ponavadi zadovoljivi. Točke na PH krivulji pridobljene s takšnimi približki si lahko ogledamo na sliki 19.

4.6 Tangenta, normala in ukrivljenost

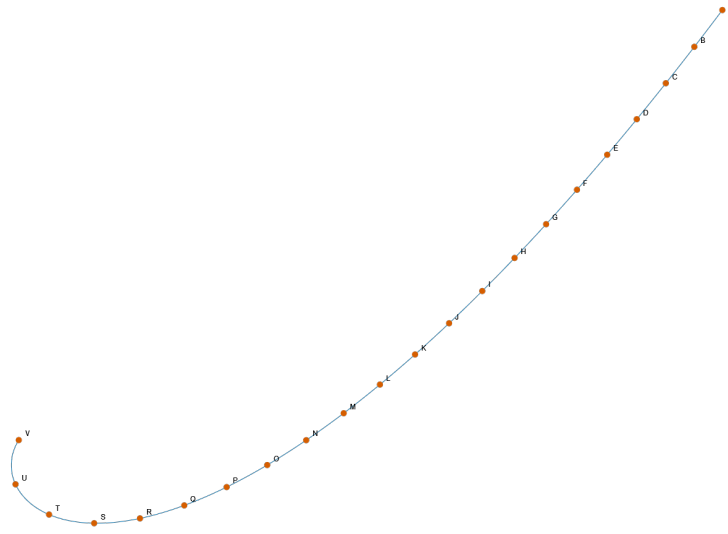
V prejšnjem razdelku smo pokazali, da je parametrična hitrost PH krivulje (pridobljene točno s tistim integralom...) σ polinom. V tem razdelku bomo pa pokazali, da so tangenta, normala in ukrivljenost PH krivulje racionalne funkcije.

Izrek 4.4. *Tangenta, normala in ukrivljenost PH krivulje, glede na parameter t so izražene kot racionalne funkcije*

$$\mathbf{t} = \frac{(u^2 - v^2, 2uv)}{\sigma}, \quad \mathbf{n} = \frac{(2uv, v^2 - u^2)}{\sigma}, \quad \kappa = 2 \frac{uv' - u'v}{\sigma^2}.$$

Izrek tudi dokažimo.

Dokaz. Dokaza za tangento in normalo sta enostavna, saj hodograf REFNAHODOGRAFA le vstavimo v enačbi in upoštevamo, da je polinom $\sigma = u^2 + v^2$ da dobimo željeno. Dokažimo za ukrivljenost κ . V enačbo za ukrivljenost $\kappa = \frac{x'y'' - y'x''}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}}$ vstavimo hodograf REFNAHODOGRAFA, ter druga odvoda $x'' = 2(uu' - vv')$ in



Slika 19: 20 točk na krivulji pri ekvidistantnih t_i

$$y'' = 2(u'v + uv').$$

$$\begin{aligned} \kappa &= 2 \frac{(u^2 - v^2)(u'v + uv') - 2uv(uu' - vv')}{(\sigma^2)^{3/2}} \\ &= 2 \frac{u^2vu' + u^3v' - v^3u' - v^2uv' - 2u^2vu' + 2uv^2v'}{\sigma^3} \\ &= 2 \frac{(u^2 - v^2 + 2v^2)uv' - (-u^2 + v^2 + 2u^2)u'v}{\sigma^3} \\ &= 2 \frac{(u^2 + v^2)uv' - (u^2 + v^2)u'v}{\sigma^3} \\ &= 2 \frac{(u^2 + v^2)(uv' - u'v)}{\sigma^3} = 2 \frac{uv' - u'v}{\sigma^2} \end{aligned}$$

□

4.7 Racionalne odmične krivulje

Odmična krivulja z razdaljo d od krivulje $\mathbf{r}(t)$, je krivulja podana s parametrizacijo

$$\mathbf{r}_d(t) = \mathbf{r}(t) + d\mathbf{n}(t).$$

Takšne krivulje v splošnem niso racionalne, saj v imenovalcu enačbe za smer normale $\mathbf{n}(t)$ nastopa koren. V prejšnjem razdelku smo pokazali, da je smer normale $\mathbf{n}(t)$ za PH krivulje racionalna funkcija, iz česar sledi, da je tudi odmična krivulja PH krivulje racionalna funkcija. Še več, takšno odmično krivuljo lahko izrazimo kot racionalno Bezierjevo krivuljo s kontrolnimi točkami, ki jih lahko izrazimo s kontrolnimi točkami PH krivulje. Zapišimo kontrolne točke PH krivulje $\mathbf{r}(t)$ v homogenih koordinatah

$$\mathbf{P}_k = (W_k, X_k, Y_k) = (1, x_k, y_k), \quad k = 0, 1, \dots, n.$$

Preme difference takšnih točk izgledajo takole

$$\Delta \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k+1} - \mathbf{P}_k = (0, \Delta x_k, \Delta y_k), \quad k = 0, 1, \dots, n-1.$$

Označimo še pravokotno smer $\Delta \mathbf{P}_k^\perp = (0, \Delta y_k, -\Delta x_k)$. Parametrizacijo odmične krivulje lahko izrazimo kot

$$\mathbf{r}_d(t) = \left(\frac{X(t)}{W(t)}, \frac{Y(t)}{W(t)} \right),$$

kjer so polinomi W, X in Y stopnje $2n-1$, njihovi koeficienti (v Bernsteinovi bazi??)

$$\mathbf{O}_k = (W_k, X_k, Y_k), \quad k = 0, \dots, 2n-1$$

pa definirajo kontrolne točke odmične racionalne Bezierjeve krivulje v homogenih koordinatah. Homogene koordinate odmične krivulje \mathbf{O}_k lahko v zaključeni obliki izrazimo s kontrolnimi točkami prvotne krivulje

$$\mathbf{O}_k = \sum_{j=\max(0, k-n)}^{\min(n-1, k)} \frac{\binom{n-1}{j} \binom{n}{k-j}}{\binom{2n-1}{k}} (\sigma_j \mathbf{P}_{k-j} + dn \Delta \mathbf{P}_j^\perp), \quad k = 0, \dots, 2n-1.$$

Za pokušino si sedaj oglejmo kako izgledajo kontrolne točke odmične krivulje kubične PH krivulje. **Ostalih stopenj ne bomo razpisali, saj bomo v nadaljevanju predstavili zapis, ki bo vse to olajšal.**

$$\mathbf{O}_0 = \sigma_0 \mathbf{P}_0 + 3d \Delta \mathbf{P}_0^\perp,$$

$$\mathbf{O}_1 = \frac{1}{5} \left[2\sigma_1 \mathbf{P}_0 + 3\sigma_0 \mathbf{P}_1 + 3d(3\Delta \mathbf{P}_0^\perp + 2\Delta \mathbf{P}_1^\perp) \right],$$

$$\mathbf{O}_2 = \frac{1}{10} \left[\sigma_2 \mathbf{P}_0 + 6\sigma_1 \mathbf{P}_1 + 3\sigma_0 \mathbf{P}_2 + 3d(3\Delta \mathbf{P}_0^\perp + 6\Delta \mathbf{P}_1^\perp + \Delta \mathbf{P}_2^\perp) \right],$$

$$\mathbf{O}_3 = \frac{1}{10} \left[3\sigma_2 \mathbf{P}_1 + 6\sigma_1 \mathbf{P}_2 + 3\sigma_0 \mathbf{P}_3 + 3d(\Delta \mathbf{P}_0^\perp + 6\Delta \mathbf{P}_1^\perp + 3\Delta \mathbf{P}_2^\perp) \right],$$

$$\mathbf{O}_4 = \frac{1}{5} \left[3\sigma_2 \mathbf{P}_2 + 2\sigma_1 \mathbf{P}_3 + 3d(2\Delta \mathbf{P}_1^\perp + 3\Delta \mathbf{P}_2^\perp) \right],$$

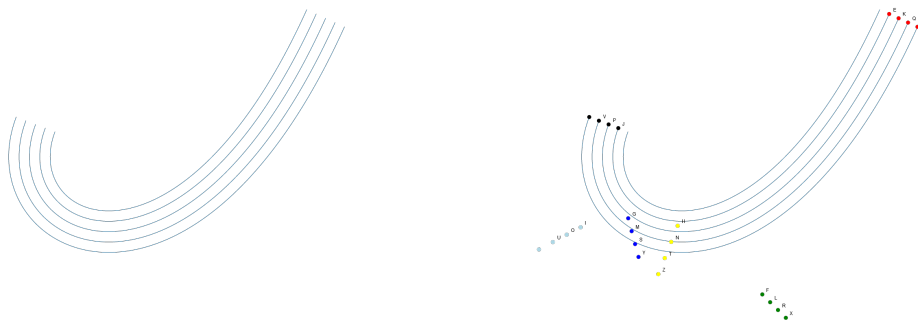
$$\mathbf{O}_5 = \sigma_2 \mathbf{P}_3 + 3d \Delta \mathbf{P}_2^\perp$$

Tukaj lahko razpišem \mathbf{O}_k za kvintične in kubične PH. Dodam slike različnih offsetov in kontrolne poligone. Lahko dodam v program, da se narisejo te crtkane crte po katerih se premikajo kontrolne točke te odmične krivulje... Na sliki 20 lahko vidimo, da se kontrolne točke odmične krivulje v odvisnosti od razdalje premikajo po premicah.

5 Orodje za grafični prikaz konceptov

Vsi koncepti predstavljeni v magistrskem delu so tudi implementirani na spletni strani. Slikovno gradivo skozi magistrsko delo je bilo ustvarjeno s pomočjo orodja. Za risanje grafov sem uporabil odprtokodno knjižnico JSxGraph. Za oblikovanje spletne strani sem uporabil ogrodje bootstrap. Za ogrodje same spletne strani pa React.

5.1 Implementacija konceptov magistrskega dela



Slika 20: Odmične krivulje (levo) skupaj z njihovimi kontrolnimi točkami (desno)

6 Integrali po ω -kompleksih

6.1 Definicija

Definicija 6.1. Neskončno zaporedje kompleksnih števil, označeno z $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots)$, se imenuje ω -kompleks.¹

Črni blok zgoraj je tam namenoma. Označuje, da L^AT_EX ni znal vrstice prelomiti pravilno in vas na to opozarja. Preoblikujte stavek ali mu pomagajte deliti problematično besedo z ukazom `\hyphenation{an-ti-ko-mu-ta-ti-ven}` v preambuli.

Trditev 6.2 (Znano ime ali avtor). *Obstaja vsaj en ω -kompleks.*

Dokaz. Naštejmo nekaj primerov:

$$\begin{aligned} \omega &= (0, 0, 0, & = \dots), & (6.1) \\ \omega &= (1, i, & = -1, -i, 1, \dots), \\ \omega &= (0, & = 1, 2, 3, \dots). & \square \end{aligned}$$

¹To ime je izmišljeno.

