

VILNIAUS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR INFORMATIKOS FAKULTETAS

Laboratorinis darbas 3

Netiesinis programavimas

Nikita Gainulin

VILNIUS 2024

Turinys

1	Įvadas	2
2	Nagrinėjama problema	2
3	Netiesinis optimizavimas ir problemos sprendimo algoritmas	3
3.1	Netiesinis optimizavimas	3
3.2	Baudos metodas	3
3.3	Algoritmo kodas	4
4	Rezultatai ir jų analizė	5
4.1	Minimumo taškai	5
4.2	Funkcijos reikšmės	8
4.3	Greitis	11
4.4	Efektyvumas	14
5	Išvada	17
6	Priedas	17

1 Įvadas

Savo ankstesniame laboratoriniame darbe gilinausi į optimizavimą be apribojimų. Kaip jau nustaciau, jo algoritmai be jokių apribojimų nagrinėja visą funkciją ir gali rasti minimumo tašką beveik bet kurioje jos vietoje. Šiame laboratoriniame darbe gilinsiuosi į netiesinį optimizavimą. Vėl susidursime su tam tikrais apribojimais, tačiau šį kartą jie bus pagrįsti tikra, realia problema, kitaip nei vienmačio optimizavimo atveju, kai apribojimai kyla iš pačių algoritmų intervalų pavidalu. Ir kaip ir ankstesnio laboratorinio darbo optimizavimo tipe, toliau veiksime daugiamatėje erdvėje.

2 Nagrinėjama problema

Kaip įprasta, apibrėžkime šiuo metu nagrinėjamą problemą:

Kokia turėtų būti stačiakampio gretasienio formos dėžė, kad vienetiniam paviršiaus plotui jos tūris būtų maksimalus?

Pati problema, palyginti su ankstesniu laboratoriniu darbu, nepasikeitė, tačiau optimizavimo, kitaip tariant, sprendimo būdas skirsis. Prieš tęsdami toliau, pažvelkime į išvadą, kurią gavau optimizavęs šį uždavinį be apribojimų: **dėžė turi būti kubas, kurio viena į kitą atgręžtų sienų plotų sumos, kurių yra 3, lygūs $\frac{1}{3}$ paviršiaus vieneto ploto, t.y. $2ab = 2bc = 2ac = \frac{1}{3}$, kur a, b, c - atitinkamai ilgis, plotis ir aukštis.**

Nors šis atsakymas ir yra teisingas, ar jis neskambėtų šiek tiek painiai, jei iš tikrųjų bandytume spręsti šią problemą realiaame pasaulyje? Ar negalėtume rasti glaustesnio atsakymo, kuriame būtų tiesiai nurodytas konkretus dėžės ilgis, plotis ir aukštis? Netiesinis optimizavimas puikiai tinka tokio tipo problemoms spręsti.

Pirmiausia turėsime iš naujo apibrėžti tikslo funkciją, jei norime gauti daug glaustesnį atsakymą. Tačiau daug transformacijų atlikti nereikės, nes tūrio formulėje ($V = a \cdot b \cdot c$) yra viskas, ko mums reikia:

$$f(X) = -(x_0 \cdot x_1 \cdot x_2) \quad (1)$$

kur x_0 - ilgis a , x_1 - plotis b , x_2 - dėžės aukštis c . Svarbu nepamiršti minuso ženklo, nes, norėdami rasti didžiausią tūrį, turėsime funkciją minimizuoti.

Dabar, kai turime tikslo funkciją, gali kilti klausimas, kodėl pasirinkome būtent netiesinį optimizavimą? Ar negalime rasti dėžės parametrų bet kuriuo kitu optimizavimo tipu? Tiesa, tikrai yra keletas sprendimo būdų, kaip gauti norimus rezultatus, tačiau, kaip minėjau anksčiau, netiesinis optimizavimas puikiai tinka dėl to, kad pačiame uždavinyje jau yra tam tikri apribojimai, kurių turime laikytis. Pažvelkime į juos.

Pirmiausia - lygybinis apribojimas. Pagal užduotį norime rasti didžiausią reikšmę dėžutės ploto vienetui, todėl galime sudaryti tokią funkciją $g_i(X)$, kuri užtikrintų, kad mūsų algoritmo pasirinktos reikšmės neišeitų iš ribų:

$$g_i(X) = 2 \cdot (x_0x_1 + x_0x_2 + x_1x_2) - 1 \quad (2)$$

Toliau - nelygybės apribojimas. Kadangi realiaame gyvenime dėžutės ilgis, plotis ir aukštis negali būti neigiami, turime tokią nelygybę:

$$x_0, x_1, x_2 \geq 0$$

Pagalvokime apie tai, kaip galime paversti šią nelygybę info funkcija. Pagal bendrąjį standartą žinome, kad funkcija bus tokio pavidalo - $h_i(x) \leq 0$, todėl belieka tik padauginti duotą nelygybę iš

-1, tam, kad gautume nelygybę $-x_0, -x_1, -x_2 \leq 0$, kuri funkcijos pavidalu atrodo taip:

$$h_i(X) = [-x_0, -x_1, -x_2] \quad (3)$$

Čia Python kalba sukūriau savo pasirinktinę klasę, skirtą šios problemos tikslo (1) ir apribojimų (2), (3) funkcijoms:

```
class Optimization:
    counter = 0

    def __init__(self):
        pass

    def f(self, x):
        Optimization.counter += 1
        return -(x[0]*x[1]*x[2])

    def g(self, x):
        Optimization.counter += 1
        return 2*(x[0]*x[1]+x[0]*x[2]+x[1]*x[2])-1

    def h(self, x):
        Optimization.counter += 1
        return [-x[0], -x[1], -x[2]]

    def reset(self):
        Optimization.counter = 0
```

3 Netiesinis optimizavimas ir problemos sprendimo algoritmas

3.1 Netiesinis optimizavimas

Pirmiausia norėčiau dar kartą trumpai paminėti netiesinį optimizavimą. Kaip minėta anksčiau, tai viena iš optimizavimo rūšių, skirta dirbti su uždaviniję pateiktais arba iš jo išvestais apribojimais. Kadangi pačiame termino pavadinime yra žodis „netiesinis“, svarbu nepamiršti, kad tikslo arba bent viena iš apribojimų funkcijų turi būti netiesinė, t. y. būti kokios nors kitos formos nei $f(x) = ax + b$. Mūsų pavyzdyje tiek tikslo funkcija (1), tiek lygybės apribojimo funkcija (2) yra netiesinės dėl kelių nežinomų kintamųjų daugybos, todėl pasirinktas netiesinis optimizavimas.

Dabar, kai jau turime tikslo ir apribojimų funkcijas, yra keletas optimizavimo metodų.

3.2 Baudos metodas

Šiame laboratoriniame darbe optimizavimo uždavinį spręsimė taikydami baudos metodą. Pradėsime nuo pradinio taško X_1 , kuris yra apribojimais apibrėžtoje įgyvendinamoje srityje arba netoli jos. Naudodami neapriboto optimizavimo metodą (mūsų atveju Nelderio-Medo simplekso metodą), iteratyviai ieškosime tikslo funkcijos lokalaus minimumo. Tačiau tiesiogiai taikant neribotąjį metodą galima gauti sprendinius, kurie pažeidžia apribojimus.

Siekdami išspręsti šią problemą, įvedame baudos funkciją, kuri modifikuoja pradinę tikslo funkciją, pridėdant narius, baudžiančius už apribojimų pažeidimus. Šios baudos užtikrina, kad optimizavimo

procesas palaipsniui nukreiptų paiešką į galimą sprendinį, kuris tenkina visus apribojimus. Mažėjant baudos parametru, metodas konverguoja į minimumo tašką, kuris yra problemos apribojimų apibrėžtose ribose.

Štai kaip atrodo mano Python įgyvendinta kvadratinės baudos funkcija:

```
def penalty(obj: Optimization, x, r):
    bX = 0
    bX += obj.g(x)**2

    for h in obj.h(x):
        bX += max(0, h)**2

    return obj.f(x) + (1/r)*bX
```

Pirma skaičiuojamas lygybės apribojimo pažeidimas (jei toks yra), o vėliau nelygybės apribojimų pažeidimai tikrinami su sąlyga, kad pažeidimas atsiranda tik tada, kai apribojimas nėra tenkinamas. Grąžinama tikslo funkcijos reikšmė, pakoreguota atsižvelgiant į apribojimų pažeidimus, o baudos svoris kontroliuojamas parametru r , taip vadinamu baudos koeficientu.

3.3 Algoritmo kodas

Dabar, kai žinome pagrindinę šio netiesinio optimizavimo metodo darbo eigą, pažvelkime, kaip aš įgyvendinau visą algoritmą:

```
def minPen(obj: Optimization, x0, initR=10, eps=1e-6):
    # initR - baudos koeficientas
    results = {
        "points": [],
        "funcVals": [],
        "niter": [],
        "neval": [],
        "rVals": []
    }

    class PenaltyObjectiveFunction:
        def f(self, x):
            return penalty(obj, x, r)

    penaltyObjFunc = PenaltyObjectiveFunction()
    currX = x0
    r = initR

    while True:
        point, funcVal, iterations = simplex(penaltyObjFunc, currX)

        results["points"].append(point)
        results["funcVals"].append(funcVal)
        results["niter"].append(iterations)
        results["neval"].append(Optimization.counter)
        results["rVals"].append(r)

        if sum([obj.g(point)**2] + [max(0, h)**2 for h in obj.h(point)]) < eps:
            break

        if np.linalg.norm(np.array(point) - np.array(currX)) < eps:
            break
```

```

r *= 0.2
obj.reset()
currX = point

```

x_0 - pradinis taškas, initR - baudos koeficientas, eps - tikslumo reikšmė ε .

Prieš pradėdamas pagrindinį ciklą, turėjau sukurti papildomą apgaubiančiąją klasę aplink baudų funkciją, nes mano simplekso algoritmo įgyvendinimas iš esmės nepasikeitė nuo to, kaip jis atrodė antrajame laboratoriniame darbe - jis vis dar kviečia tikslo funkciją per $f(X)$ metodą, kuris, nors ir yra baudos funkcijoje, pats savaime nėra pakankamas, kaip matyti iš jos įgyvendinimo.

Pagrindiniame cikle iteracija po iteracijos konverguojame prie mažiausio taško, optimizuodami baudos funkcijos rezultatus simplekso algoritmu ir perpus sumažindami baudos koeficientą. Baudos koeficientas r yra labai svarbus metodo dalis, nes jis reguliuoja, kaip stipriai tikslo funkcija yra „baudžiama“ už apribojimų pažeidimus. Didėjant r reikšmei (arba mažėjant baudos narių svoriui), optimizavimo procesas tampa labiau orientuotas į tikslo funkcijos minimizavimą, tačiau gali ignoruoti apribojimus. Priešingai, mažėjant r , apribojimų pažeidimai yra stipriau baudžiami, o optimizavimo procesas daugiau dėmesio skiria sprendinių paieškai apribojimų apibrėžtoje srityje.

Galiausiai, algoritmas turės kažkaip sustoti, ir už tai atsakingi šie du sąlyginiai teiginiai:

```

if sum([obj.g(point)**2]+[max(0, h)**2 for h in obj.h(point)])<eps:
    break

if np.linalg.norm(np.array(point)-np.array(currX))<eps:
    break

```

Pirma sąlyga tikrina, ar sprendinys tenkina visus apribojimus. Lygybiniai apribojimai $g_i(x)$ ir nelygybiniai apribojimai $h_i(x)$ yra vertinami pagal tai, kiek stipriai jie pažeidžiami. Jei visų apribojimų pažeidimų kvadratų suma tampa mažesnė už ε , laikoma, kad sprendinys praktiškai atitinka visus apribojimus.

Antra sąlyga tikrina sprendinių pokytį tarp dabartinės ir ankstesnės iteracijos. Jei dviejų taškų atstumas yra mažesnis už ε , laikoma, kad algoritmas pasiekė minimumo tašką - sprendinys daugiau reikšmingai nesikeičia.

4 Rezultatai ir jų analizė

Šiame skyriuje stebėsime algoritmo rezultatus ir bandysime rasti bei paaiškinti jų prasmę.

Išnagrinėsime šiuos tris pradinius taškus: (0, 0, 0), (1, 1, 1), (0.1, 0.5, 0.7). Be to, pabandysime atkreipti dėmesį į rezultatų skirtumą, jei padauginsime baudos koeficientą r iš skirtingų reikšmių - 0.5, 0.2 ir 0.75. Pats baudos koeficientas r išliks pastovus - 10.

4.1 Minimumo taškai

Pažvelkime į šias minimumo taškų lenteles:

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = \frac{r}{5}$	10	[0.525502, 0.525468, 0.525496]	[0.525469, 0.525508, 0.52551]	[0.525488, 0.52545, 0.525507]
	2	[0.429636, 0.429582, 0.429622]	[0.429591, 0.429648, 0.429603]	[0.42966, 0.429592, 0.429581]
	0.4	[0.412497, 0.412373, 0.41245]	[0.412401, 0.412456, 0.412456]	[0.412443, 0.412414, 0.412456]
	0.08	[0.409097, 0.409097, 0.409052]	[0.409075, 0.409037, 0.409136]	[0.409059, 0.409132, 0.409057]
	0.016	[0.408417, 0.408392, 0.408435]	[0.408461, 0.408378, 0.408406]	[0.408416, 0.408386, 0.408443]

1 lentelė: Minimumo taškai, kai baudos koeficientas r dalijamas iš 5

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = \frac{r}{2}$	10	[0.525502, 0.525468, 0.525496]	[0.525469, 0.525508, 0.52551]	[0.525488, 0.52545, 0.525507]
	5	[0.463604, 0.463687, 0.463645]	[0.463669, 0.463595, 0.46365]	[0.463633, 0.463635, 0.46363]
	2.5	[0.435049, 0.435148, 0.435151]	[0.435141, 0.435088, 0.435125]	[0.43513, 0.435102, 0.435142]
	1.25	[0.421432, 0.421497, 0.421495]	[0.421496, 0.421443, 0.421489]	[0.421477, 0.421475, 0.421482]
	0.625	[0.414818, 0.414817, 0.414804]	[0.414806, 0.4148, 0.414833]	[0.414814, 0.414808, 0.414803]
	0.3125	[0.411154, 0.4111519, 0.411493]	[0.4111542, 0.411497, 0.4111514]	[0.4111523, 0.411532, 0.411489]
	0.15625	[0.409904, 0.40987, 0.409864]	[0.409848, 0.409922, 0.409863]	[0.409893, 0.40989, 0.409859]
	0.078125	[0.409079, 0.409046, 0.409065]	[0.409098, 0.409054, 0.409038]	[0.409069, 0.409051, 0.409068]
	0.0390625	[0.408647, 0.408697, 0.408624]	[0.408686, 0.408666, 0.408615]	[0.408648, 0.408684, 0.408632]
	0.01953125	[0.408458, 0.408423, 0.408473]	[0.408424, 0.408449, 0.408482]	[0.408443, 0.408445, 0.408465]

2 lentelė: Minimumo taškai, kai baudos koeficientas r dalijamas iš 2

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = r \cdot \frac{3}{4}$	10	[0.525502, 0.525468, 0.525496]	[0.525469, 0.525508, 0.52551]	[0.525488, 0.52545, 0.525507]
	7.5	[0.493744, 0.493845, 0.493745]	[0.493763, 0.493773, 0.493777]	[0.493799, 0.493783, 0.493778]
	5.625	[0.471085, 0.470962, 0.471027]	[0.470993, 0.471005, 0.471062]	[0.470953, 0.471043, 0.471037]
	4.21875	[0.454545, 0.45457, 0.454526]	[0.454536, 0.454531, 0.454592]	[0.454562, 0.454603, 0.454488]
	3.1640625	[0.442553, 0.442488, 0.442572]	[0.442537, 0.442514, 0.442535]	[0.442542, 0.442517, 0.442546]
	2.373046875	[0.433669, 0.433738, 0.433728]	[0.433679, 0.433731, 0.433732]	[0.433706, 0.433747, 0.4337]
	1.77978515625	[0.427158, 0.427298, 0.42718]	[0.42721, 0.427229, 0.427178]	[0.427212, 0.427244, 0.427177]
	1.3348388671875	[0.422425, 0.422345, 0.422401]	[0.42238, 0.422394, 0.422386]	[0.422366, 0.422406, 0.422406]
	1.001129150390625	[0.418747, 0.418844, 0.418836]	[0.418841, 0.418767, 0.418818]	[0.418838, 0.418775, 0.418824]
	0.7508468627929688	[0.416129, 0.41613, 0.416183]	[0.416096, 0.41615, 0.416182]	[0.416177, 0.416163, 0.416097]
	0.5631351470947266	[0.414173, 0.414134, 0.41417]	[0.414161, 0.414165, 0.414151]	[0.414135, 0.414156, 0.414173]
	0.4223513603210449	[0.412644, 0.412699, 0.412673]	[0.412679, 0.412658, 0.412684]	[0.412694, 0.412648, 0.412671]
	0.3167635202407837	[0.411521, 0.411609, 0.411556]	[0.411587, 0.411562, 0.411533]	[0.411598, 0.411513, 0.411572]
	0.23757264018058777	[0.41074, 0.41071, 0.410739]	[0.410759, 0.410726, 0.410711]	[0.410742, 0.410689, 0.41076]
	0.17817948013544083	[0.410044, 0.410074, 0.410207]	[0.410073, 0.410114, 0.41014]	[0.410101, 0.41014, 0.410087]
	0.13363461010158062	[0.409627, 0.409645, 0.409651]	[0.409655, 0.40962, 0.409655]	[0.409659, 0.409585, 0.409682]
	0.10022595757618546	[0.409261, 0.409304, 0.409316]	[0.409293, 0.409293, 0.409291]	[0.409287, 0.409326, 0.409269]
	0.0751694681821391	[0.409018, 0.409048, 0.409027]	[0.409051, 0.409076, 0.408969]	[0.409061, 0.409003, 0.409036]
	0.056377101136604324	[0.408805, 0.40884, 0.408862]	[0.408778, 0.40882, 0.40891]	[0.408822, 0.408812, 0.408873]
	0.04228282585245324	[0.408652, 0.408671, 0.408743]	[0.408674, 0.408656, 0.408737]	[0.408687, 0.408653, 0.408728]
	0.03171211938933993	[0.408509, 0.408594, 0.408636]	[0.408595, 0.408586, 0.408554]	[0.408502, 0.408592, 0.40864]
	0.02378408954200495	[0.408459, 0.408529, 0.408501]	[0.408511, 0.408521, 0.408456]	[0.408481, 0.408493, 0.408512]
	0.017838067156503712	[0.408399, 0.408469, 0.408434]	[0.408434, 0.408479, 0.408389]	[0.408454, 0.408443, 0.408405]

3 lentelė: Minimumo taškai, kai baudos koeficientas r dauginamas iš $\frac{3}{4}$

4.2 Funkcijos reikšmės

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = \frac{r}{5}$	10	-0.101965	-0.101965	-0.101965
	2	-0.073525	-0.073525	-0.073525
	0.4	-0.069094	-0.069094	-0.069094
	0.08	-0.06825	-0.06825	-0.06825
	0.016	-0.068083	-0.068083	-0.068083

4 lentelė: Funkcijos reikšmės, kai baudos koeficientas r dalijamas iš 5

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = \frac{r}{2}$	10	-0.101965	-0.101965	-0.101965
	5	-0.082871	-0.082871	-0.082871
	2.5	-0.074985	-0.074985	-0.074985
	1.25	-0.071403	-0.071403	-0.071403
	0.625	-0.069695	-0.069695	-0.069695
	0.3125	-0.068862	-0.068862	-0.068862
	0.15625	-0.06845	-0.06845	-0.06845
	0.078125	-0.068245	-0.068245	-0.068245
	0.0390625	-0.068143	-0.068143	-0.068143
	0.01953125	-0.068092	-0.068092	-0.068092

5 lentelė: Funkcijos reikšmės, kai baudos koeficientas r dalijamas iš 2

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = r \cdot \frac{3}{4}$	10	-0.101965	-0.101965	-0.101965
	7.5	-0.091821	-0.091821	-0.091821
	5.625	-0.085004	-0.085004	-0.085004
	4.21875	-0.080299	-0.080299	-0.080299
	3.1640625	-0.076983	-0.076983	-0.076983
	2.373046875	-0.074611	-0.074611	-0.074611
	1.77978515625	-0.072893	-0.072893	-0.072893
	1.3348388671875	-0.071639	-0.071639	-0.071639
	1.001129150390625	-0.070716	-0.070716	-0.070716
	0.7508468627929688	-0.070035	-0.070035	-0.070035
	0.5631351470947266	-0.069529	-0.069529	-0.069529
	0.4223513603210449	-0.069153	-0.069153	-0.069153
	0.3167635202407837	-0.068873	-0.068873	-0.068873
	0.23757264018058777	-0.068664	-0.068664	-0.068664
	0.17817948013544083	-0.068508	-0.068508	-0.068508
	0.13363461010158062	-0.068391	-0.068391	-0.068391
	0.10022595757618546	-0.068303	-0.068303	-0.068303
	0.0751694681821391	-0.068238	-0.068238	-0.068238
	0.056377101136604324	-0.068188	-0.068188	-0.068188
	0.04228282585245324	-0.068152	-0.068152	-0.068152
	0.03171211938933993	-0.068124	-0.068124	-0.068124
	0.02378408954200495	-0.068103	-0.068103	-0.068103
	0.017838067156503712	-0.068088	-0.068088	-0.068088

6 lentelė: Funkcijos reikšmės, kai baudos koeficientas r dauginamas iš $\frac{3}{4}$

4.3 Greitis

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = \frac{r}{5}$	10	116	87	79
	2	78	81	81
	0.4	52	56	55
	0.08	51	47	51
	0.016	59	58	58

7 lentelė: Iteracijų skaičius, kai baudos koeficientas r dalijamas iš 5

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = \frac{r}{2}$	10	116	87	79
	5	64	61	60
	2.5	56	61	58
	1.25	53	54	52
	0.625	76	75	77
	0,3125	52	51	51
	0.15625	66	64	60
	0.078125	60	58	62
	0.0390625	61	62	63
	0.01953125	65	65	56

8 lentelė: Iteracijų skaičius, kai baudos koeficientas r dalijamas iš 2

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = r \cdot \frac{3}{4}$	10	116	87	79
	7.5	56	54	60
	5.625	48	46	44
	4.21875	48	50	47
	3.1640625	52	52	55
	2.373046875	43	47	48
	1.77978515625	45	44	44
	1.3348388671875	45	40	45
	1.001129150390625	41	40	40
	0.7508468627929688	50	49	50
	0.5631351470947266	69	72	72
	0.4223513603210449	58	58	71
	0.3167635202407837	55	49	53
	0.23757264018058777	59	56	61
	0.17817948013544083	38	42	40
	0.13363461010158062	48	50	50
	0.10022595757618546	39	42	37
	0.0751694681821391	46	44	43
	0.056377101136604324	41	38	36
	0.04228282585245324	40	42	40
	0.03171211938933993	47	51	47
	0.02378408954200495	48	50	50
	0.017838067156503712	47	46	51

9 lentelė: Iteracijų skaičius, kai baudos koeficientas r dauginamas iš $\frac{3}{4}$

4.4 Efektyvumas

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = \frac{r}{5}$	10	618	480	444
	2	414	435	441
	0.4	288	315	309
	0.08	294	276	294
	0.016	321	309	312

10 lentelė: Funkcijų iškviatimų skaičius, kai baudos koeficientas r dalijamas iš 5

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = \frac{r}{2}$	10	618	480	444
	5	354	336	333
	2.5	300	324	309
	1.25	282	285	279
	0.625	429	423	429
	0.3125	288	282	282
	0.15625	354	348	324
	0.078125	333	315	339
	0.0390625	342	345	348
	0.01953125	357	354	312

11 lentelė: Funkcijų iškvietyimų skaičius, kai baudos koeficientas r dalijamas iš 2

		Pradiniai taškai x_0		
		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.5, 0.7)
$r = r \cdot \frac{3}{4}$	10	618	480	444
	7.5	303	294	327
	5.625	276	267	255
	4.21875	261	270	261
	3.1640625	288	285	309
	2.373046875	234	243	252
	1.77978515625	252	252	252
	1.3348388671875	252	228	258
	1.001129150390625	240	231	231
	0.7508468627929688	270	264	267
	0.5631351470947266	369	393	381
	0.4223513603210449	312	315	378
	0.3167635202407837	300	267	294
	0.23757264018058777	327	306	330
	0.17817948013544083	222	243	234
	0.13363461010158062	276	282	282
	0.10022595757618546	228	231	216
	0.0751694681821391	252	243	240
	0.056377101136604324	234	216	207
	0.04228282585245324	225	237	225
	0.03171211938933993	264	279	261
	0.02378408954200495	255	276	267
	0.017838067156503712	252	255	276

12 lentelė: Funkcijų iškviatimų skaičius, kai baudos koeficientas r dauginamas iš $\frac{3}{4}$

5 Išvada

6 Priedas