

数理工学実験レポート

第 6 章（連続最適化）

学籍番号 1029366161 中塚一瑛

2025 年 12 月 15 日

目次

1	課題 15：ニュートン法および二分法による多項式の零点計算	2
1.1	原理と方法	2
1.2	実験方法	2
1.3	結果	3
1.4	考察	3
2	課題 16：最急降下法およびニュートン法による停留点計算	4
3	課題 16	4
3.1	原理と方法	4
3.2	実装	4
3.3	結果	4
3.4	考察	5
付録 A	ソースコード	5
A.1	課題 15 のコード	5
A.2	課題 16 のコード	8

はじめに

今回は連続最適化の様々な手法を用いて、与えられた関数の最小値を求める課題に取り組む。

1 課題 15：ニュートン法および二分法による多項式の零点計算

本課題では、多項式

$$f(x) = x^3 + 2x^2 - 5x - 6 \quad (1)$$

の零点を数値的に求める。まず関数のグラフを描画して零点の存在を確認し、その後、二分法およびニュートン法を用いて零点を計算する。

1.1 原理と方法

1.1.1 二分法

二分法は、区間 $[a, b]$ において $f(a)$ と $f(b)$ の符号が異なるとき、その区間内に零点が存在することを利用した反復法である。中点 $c = (a + b)/2$ を取り、 $f(c)$ の符号に応じて零点を含む半区間に更新する操作を繰り返すことで、区間幅を徐々に縮小し零点へ収束させる。零点を挟む区間が与えられれば必ず収束するが、収束速度は比較的遅い。

1.1.2 ニュートン法

ニュートン法は、関数がある点 x_k の周りで一次近似し、その接線と x 軸の交点を次の近似値とする方法である。反復公式は

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (2)$$

で与えられる。一般に収束は速いが、初期値の選び方によっては収束しない場合がある。本課題で用いた導関数は

$$f'(x) = 3x^2 + 4x - 5 \quad (3)$$

である。

1.2 実験方法

Python を用いて $x \in [-10, 10]$ の範囲で $f(x)$ を描画し、グラフから零点が $x \approx -3, -1, 2$ 付近に存在することを確認した。二分法では、それぞれの零点を挟む区間として

$$[-4, -2], [-2, 0], [1, 3]$$

を与えた。ニュートン法では初期値として

$$x_0 = -2.5, -0.5, 1.5$$

を用いた。停止条件は $|f(x)| \leq 10^{-10}$ とした。

1.3 結果

1.3.1 関数のグラフ

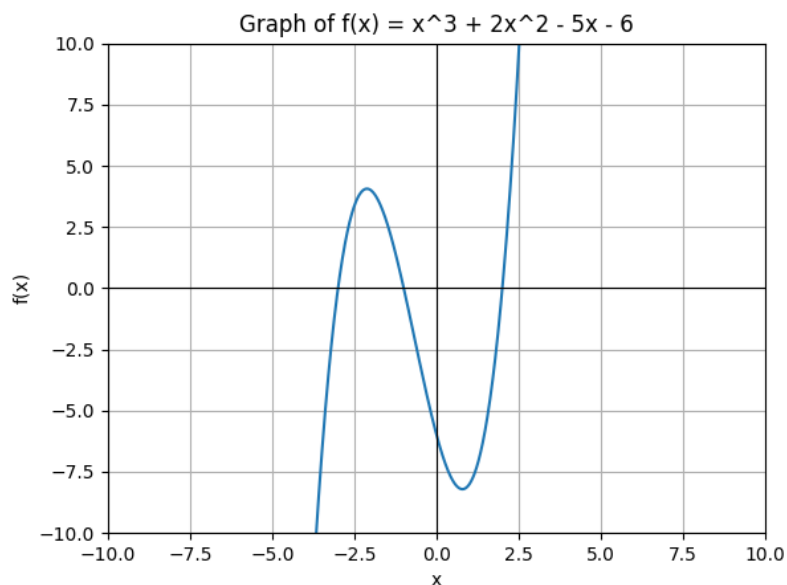


図 1: $f(x) = x^3 + 2x^2 - 5x - 6$ のグラフ

1.3.2 零点

数値計算によって得られた零点を表 1 に示す.

表 1: 二分法およびニュートン法で求めた零点

手法	近似解 x	残差 $f(x)$
二分法	-3.000	0
二分法	-1.000	0
二分法	2.000	0
ニュートン法	-3.000	0
ニュートン法	-1.000	0
ニュートン法	2.000	1.421×10^{-14}

1.4 考察

$f(x) = 0$ は因数分解により

$$f(x) = (x + 3)(x + 1)(x - 2)$$

と書け, 解析解は $x = -3, -1, 2$ である. 数値計算によって得られた零点はこれらと一致しており, 手法が正しく実装されていることが確認できる. ニュートン法において残差が完全に 0 とならない場合があるのは, 浮動小数点演算誤差によるものである.

2 課題 16：最急降下法およびニュートン法による停留点計算

3 課題 16

3.1 原理と方法

本課題では、次の関数

$$f(x) := \frac{1}{3}x^3 - x^2 - 3x + \frac{5}{3} \quad (4)$$

の停留点 ($f'(x) = 0$ を満たす点) を, (a) 最急降下法, (b) ニュートン法により数値的に求める. まず微分は

$$f'(x) = x^2 - 2x - 3 = (x - 3)(x + 1), \quad (5)$$

$$f''(x) = 2x - 2 \quad (6)$$

である. 従って停留点は解析的には $x = -1, 3$ の 2 点である.

3.1.1 (a) 最急降下法

1 次元では勾配 $\nabla f(x)$ は $f'(x)$ に一致するため, 最急降下法は

$$x_{k+1} = x_k - t_k f'(x_k), \quad t_k = \frac{1}{k+1} \quad (7)$$

で与えられる. 初期点は $x_0 = 1/2$ とする. 停止判定は $|f'(x_k)| \leq \varepsilon$ ($\varepsilon = 10^{-8}$) とし, 最大反復回数も設ける.

3.1.2 (b) ニュートン法

停留点探索 ($f'(x) = 0$ の零点探索) としてのニュートン法は

$$x_{k+1} = x_k - t_k \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)}, \quad t_k = 1 \quad (8)$$

で与えられる. 初期点は $x_0 = 5$ とし, (a) と同様に $|f'(x_k)| \leq \varepsilon$ を停止判定とした. なお, 本問題では $f''(x) = 0$ (すなわち $x = 1$) で更新が不能となるため, 実装では $f''(x_k) = 0$ の場合を例外として扱う.

3.2 実装

Python により f, f', f'' をそれぞれ関数として実装し, (a) と (b) の更新式をそのまま反復した. 各反復で $(x_k, f(x_k), |f'(x_k)|)$ を履歴として保存し, 収束挙動の可視化に用いた.

3.3 結果

(a) 最急降下法 ($x_0 = 0.5, t_k = 1/(k+1)$) および (b) ニュートン法 ($x_0 = 5, t_k = 1$) の結果を表 2 に示す. 両手法とも停留点 $x^* = 3$ に収束した (もう一つの停留点 $x = -1$ には到達しなかった).

表 2: 課題 16 の計算結果 ($\varepsilon = 10^{-8}$)

手法	初期値 x_0	近似解 x^*	$f(x^*)$	反復回数 k
最急降下法	0.5000	3.000	-7.333	193
ニュートン法	5.000	3.000	-7.333	5

両方法による反復点の推移を、関数 $y = f(x)$ 上に重ねて図 2 に示す。

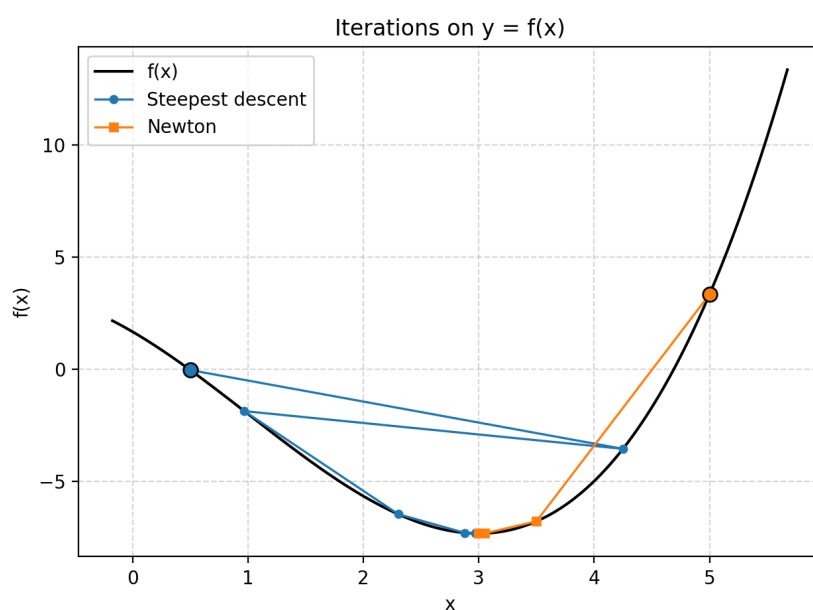


図 2: 関数 $y = f(x)$ 上における反復点の推移. 青丸は最急降下法, 橙四角はニュートン法による反復点を表す.

3.4 考察

図 2 より, 最急降下法では反復点が谷に沿って緩やかに移動しており, ステップサイズ $t_k = 1/(k+1)$ が減少することで後半の収束が遅くなっていることが視覚的に確認できる. 一方, ニュートン法では局所的な 2 次近似に基づき更新が行われるため, 停留点近傍では大きなジャンプを伴い, 極めて高速に収束している.

結論

付録 A ソースコード

コード作成、レポート作成の一部に GitHub Copilot を使用した。

A.1 課題 15 のコード

```

1  #!/usr/bin/env python
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3
4  import numpy as np
5  import matplotlib.pyplot as plt
6
7  # -----
8  # 課題15: 関数の定義
9  #  $f(x) = x^3 + 2x^2 - 5x - 6$ 
10 # -----
11
12 def f(x):
13     return x**3 + 2*x**2 - 5*x - 6
14
15 def df(x):
16     """ $f(x)$  の導関数:  $f'(x) = 3x^2 + 4x - 5$ """
17     return 3*x**2 + 4*x - 5
18
19
20 # -----
21 # (a) グラフ描画
22 # -----
23
24 def plot_function():
25     x = np.linspace(-10, 10, 2000)
26     y = f(x)
27
28     plt.figure()
29     plt.plot(x, y)
30     plt.axhline(0, color="black", linewidth=0.8) # x軸
31     plt.axvline(0, color="black", linewidth=0.8) # y軸
32     plt.xlim(-10, 10)
33     plt.ylim(-10, 10)
34     plt.xlabel("x")
35     plt.ylabel("f(x)")
36     plt.title("Graph of  $f(x) = x^3 + 2x^2 - 5x - 6$ ")
37     plt.grid(True)
38     plt.savefig("graphs/task15.png")
39     plt.show()
40
41
42 # -----
43 # (b) 二分法
44 # -----
45
46 def bisection(f, a, b, eps=1e-10, max_iter=1000):
47     """[a, b] で二分法により  $f(x) = 0$  の解を求める。
48      $f(a)$  と  $f(b)$  の符号は異なることが前提。
49     """
50     fa = f(a)
51     fb = f(b)
52     if fa * fb > 0:
53         raise ValueError("f(a) と f(b) の符号が同じです: a={}, b={}".format(a, b))
54
55     for _ in range(max_iter):
56         c = 0.5 * (a + b)
57         fc = f(c)

```

```

58
59     if abs(fc) <= eps or 0.5 * (b - a) < eps:
60         return c
61
62     # 符号でどちらの区間を残すか決める
63     if fa * fc < 0:
64         b = c
65         fb = fc
66     else:
67         a = c
68         fa = fc
69
70     # 最大反復に達した場合
71     return 0.5 * (a + b)
72
73
74 def solve_with_bisection():
75     # グラフから零点が -3, -1, 2 付近にあることが分かるので
76     # それを挟む区間を手で指定する
77     intervals = [
78         (-4.0, -2.0), # -3 付近
79         (-2.0, 0.0), # -1 付近
80         (1.0, 3.0), # 2 付近
81     ]
82
83     roots = []
84     for (a, b) in intervals:
85         r = bisection(f, a, b)
86         roots.append(r)
87     return roots
88
89
90 # -----
91 # (c) ニュートン法
92 # -----
93
94 def newton(f, df, x0, eps=1e-10, max_iter=1000):
95     """ニュートン法: f(x) = 0 の解を初期値 x0 から探索."""
96     x = x0
97     for _ in range(max_iter):
98         fx = f(x)
99         dfx = df(x)
100
101         if abs(fx) <= eps:
102             return x
103
104         if dfx == 0:
105             # 導関数が 0 になると更新できない
106             raise ZeroDivisionError("f'(x) = 0 となったため打ち切り (x={})".format(x))
107
108         x = x - fx / dfx
109
110     return x # 収束しなかった場合は最後の値を返す
111
112
113 def solve_with_newton():
114     # グラフから零点が -3, -1, 2 付近にあることを利用
115     initial_points = [-2.5, -0.5, 1.5]

```

```

116     roots = []
117     for x0 in initial_points:
118         r = newton(f, df, x0)
119         roots.append(r)
120     return roots
121
122
123 # -----
124 # メイン
125 # -----
126
127 def main():
128     # (a) グラフ描画
129     plot_function()
130
131     # (b) 二分法
132     bisection_roots = solve_with_bisection()
133     print("Bisection method roots:")
134     for r in bisection_roots:
135         print(" x ≈ {:.10f}, f(x) ≈ {:.3e}".format(r, f(r)))
136
137     # (c) ニュートン法
138     newton_roots = solve_with_newton()
139     print("\nNewton method roots:")
140     for r in newton_roots:
141         print(" x0 -> root ≈ {:.10f}, f(x) ≈ {:.3e}".format(r, f(r)))
142
143
144 if __name__ == "__main__":
145     main()

```

A.2 課題 16 のコード

```

1  #!/usr/bin/env python
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3
4  # 課題16
5  # f(x) = (1/3)x^3 - x^2 - 3x + 5/3 の停留点を求める
6  # (a) 最急降下法 (x0 = 1/2, tk = 1/(k+1))
7  # (b) ニュートン法 (x0 = 5, tk = 1)
8
9  from __future__ import annotations
10
11 from dataclasses import dataclass
12 from pathlib import Path
13
14
15 def f(x):
16     """目的関数 f(x) = 1/3 x^3 - x^2 - 3x + 5/3"""
17     return (1.0 / 3.0) * x**3 - x**2 - 3.0 * x + 5.0 / 3.0
18
19
20 def df(x):
21     """1階微分 f'(x) = x^2 - 2x - 3"""
22     return x**2 - 2.0 * x - 3.0
23

```



```

24
25 def d2f(x):
26     """2階微分 f''(x) = 2x - 2"""
27     return 2.0 * x - 2.0
28
29
30 @dataclass(frozen=True)
31 class IterationHistory:
32     x: list[float]
33     f: list[float]
34     grad_abs: list[float]
35
36
37 # -----
38 # (a) 最急降下法
39 # -----
40
41
42 def steepest_descent(x0, eps=1e-8, max_iter=1000, *, return_history=False):
43     """
44     最急降下法 (1次元版)
45      $x_{k+1} = x_k - t_k * f'(x_k)$ 
46      $t_k = 1 / (k+1)$ 
47     """
48     x = x0
49     history_x = [float(x)]
50     history_f = [float(f(x))]
51     history_grad_abs = [float(abs(df(x)))]
52
53     for k in range(max_iter):
54         g = df(x) # 勾配 (1次元なので単なる導関数)
55         if abs(g) <= eps:
56             # 停留点に到達したとみなす
57             if return_history:
58                 return x, k, IterationHistory(history_x, history_f, history_grad_abs)
59             return x, k
60
61         t_k = 1.0 / (k + 1) # 指定どおりのステップ幅
62         x = x - t_k * g
63
64         history_x.append(float(x))
65         history_f.append(float(f(x)))
66         history_grad_abs.append(float(abs(df(x))))
67
68     # 最大反復に到達した場合
69     if return_history:
70         return x, max_iter, IterationHistory(history_x, history_f, history_grad_abs)
71     return x, max_iter
72
73
74 # -----
75 # (b) ニュートン法
76 # -----
77
78
79 def newton_method(x0, eps=1e-8, max_iter=1000, *, return_history=False):
80     """
81     ニュートン法

```

```

82     x_{k+1} = x_k - t_k * f'(x_k) / f''(x_k)
83     ここでは t_k = 1
84     """
85     x = x0
86     history_x = [float(x)]
87     history_f = [float(f(x))]
88     history_grad_abs = [float(abs(df(x)))]
89
90     for k in range(max_iter):
91         g = df(x)
92         h = d2f(x)
93
94         if abs(g) <= eps:
95             # 停留点に到達したとみなす
96             if return_history:
97                 return x, k, IterationHistory(history_x, history_f, history_grad_abs)
98             return x, k
99
100         if h == 0.0:
101             raise ZeroDivisionError(f"f''(x) = 0 となったため更新できません (x = {x})")
102
103         t_k = 1.0 # 指定どおり常に1
104         x = x - t_k * g / h
105
106         history_x.append(float(x))
107         history_f.append(float(f(x)))
108         history_grad_abs.append(float(abs(df(x))))
109
110     if return_history:
111         return x, max_iter, IterationHistory(history_x, history_f, history_grad_abs)
112     return x, max_iter
113
114 # -----
115 # メイン
116 # -----
117
118
119
120 def main():
121     print("=== (a) 最急降下法 ===")
122     x0_sd = 0.5 # 初期点 x0 = 1/2
123     x_star_sd, it_sd, hist_sd = steepest_descent(x0_sd, return_history=True)
124     print("初期値 x0 = {:.6f}".format(x0_sd))
125     print("近似停留点 x* ? {:.10f}".format(x_star_sd))
126     print("f'(x*) ? {:.3e}".format(df(x_star_sd)))
127     print("反復回数 k =", it_sd)
128     print()
129
130     print("=== (b) ニュートン法 ===")
131     x0_nt = 5.0 # 初期点 x0 = 5
132     x_star_nt, it_nt, hist_nt = newton_method(x0_nt, return_history=True)
133     print("初期値 x0 = {:.6f}".format(x0_nt))
134     print("近似停留点 x* ? {:.10f}".format(x_star_nt))
135     print("f'(x*) ? {:.3e}".format(df(x_star_nt)))
136     print("反復回数 k =", it_nt)
137     print()
138

```

```

139 # y=f(x) 上で、反復点が収束していく様子を同一グラフにプロット
140 try:
141     import matplotlib.pyplot as plt
142 except ImportError:
143     print("matplotlib が見つからないため、プロットをスキップします。")
144     return
145
146 all_x = hist_sd.x + hist_nt.x
147 x_min = min(all_x)
148 x_max = max(all_x)
149 margin = 0.15 * (x_max - x_min) if x_max > x_min else 1.0
150 x_left = x_min - margin
151 x_right = x_max + margin
152
153 n = 600
154 xs = [x_left + (x_right - x_left) * i / n for i in range(n + 1)]
155 ys = [f(x) for x in xs]
156
157 plt.figure()
158 plt.plot(xs, ys, color="black", linewidth=1.5, label="f(x)")
159
160 plt.plot(hist_sd.x, hist_sd.f, marker="o", markersize=4, linewidth=1.2, label="
    Steepest descent")
161 plt.plot(hist_nt.x, hist_nt.f, marker="s", markersize=4, linewidth=1.2, label="
    Newton")
162
163 plt.scatter([hist_sd.x[0]], [hist_sd.f[0]], s=60, edgecolors="black", zorder=3)
164 plt.scatter([hist_nt.x[0]], [hist_nt.f[0]], s=60, edgecolors="black", zorder=3)
165
166 plt.xlabel("x")
167 plt.ylabel("f(x)")
168 plt.title("Iterations on y = f(x)")
169 plt.grid(True, linestyle="--", alpha=0.5)
170 plt.legend()
171
172 out_path = Path(__file__).with_name("task16.png")
173 plt.tight_layout()
174 plt.savefig(out_path, dpi=200)
175 print(f"プロットを保存しました: {out_path}")
176 import matplotlib
177
178 if "agg" not in matplotlib.get_backend().lower():
179     plt.show()
180
181
182 if __name__ == "__main__":
183     main()

```

参考文献

参考文献

[1] 数理工学実験（2025 年度配布資料）.