מבוא לאופטימיזציות

תרגול 11

אופטימיזציות

- **זמן**
- זיכרון
- גישות לdisk
- power

תוך שימור ההתנהגות של התכנית

האופטימיזציות שנציע יהיו שמרניות
- לא נזהה את כל המקרים שניתן לשפר, אבל
- אם ביצענו שינוי כלשהו, מובטח שמשמעות התכנית לא תשתנה.

ככלל, עדיף תכנית פחות יעילה על פני תכנית לא נכונה.

אופטימיזציות

מתי לבצע אופטימיזציות?

- AST
  - יתרונות: לא תלוי מכונה
  - חסרונות: מעט מדי מידע מכדי להועיל
- קוד בשפת הביניים
  - יתרונות: לא תלוי מכונה, חושף מספיק כדי להועיל
  - חסרונות: לעיתים עדיין ניתן לבצע אופטימיזציות ספציפיות למכונה מסויימת, שלא ניתן לבצע בשלב זה.
- קוד המכונה
  - יתרונות: חושף הרבה הזדמנויות לייעול
  - חסרונות: תלוי מכונה, יש לממש לכל מכונה בנפרד
- במהלך הריצה (JIT)
  - יתרונות: ניתן לנצל מידע הקיים רק בזמן ריצה ולא קומפילציה (פרמטרים חוזרים, פונקציות פופולריות)
  - חסרונות: מתבצע על חשבון זמן ריצה

תזכורת - שפת ביניים

נעבוד עם 4 סוגי פקודות בלבד:

1. פעולה אריתמטית: $t_1 := t_2 \text{ binop } t_3$
2. קפיצה לא-מותנית: goto label
3. קפיצה מותנית: if t_1 relop t_2 goto label
4. תווית: label:

בלוק בסיסי

בלוק בסיסי הוא רצף פקודות מקסימלי כך ש:

- אינו מכיל labels, פרט לפקודה הראשונה (יעדי קפיצה)
- אינו מכיל קפיצות, פרט לפקודה האחרונה

הרעיון: בלוק בסיסי הוא רצף קוד "לינארי" – מכיל נקודת כניסה יחידה ונקודת יציאה יחידה, ולכן הביצוע בו "צפוי".

Control Flow Graph (CFG)

- גרף מכוון המייצג את זרימת בקרת התוכנית
  - אחד הייצוגים הנפוצים של תכנית.
- צמתים: בלוקים בסיסיים
  - קיים בלוק כניסה יחיד
- קשתות: יש קשת מבלוק A לבלוק B אם:
  - A מסתיים בקפיצה (אולי מותנית) ל-B , <u>או</u>
  - A מסתיים בקפיצה מותנית או ללא קפיצה ו-B מופיע אחרי A בקוד המקורי.

כלומר קיים ביצוע (אולי) שעובר מהשורה האחרונה בבלוק A לשורה הראשונה בבלוק B.

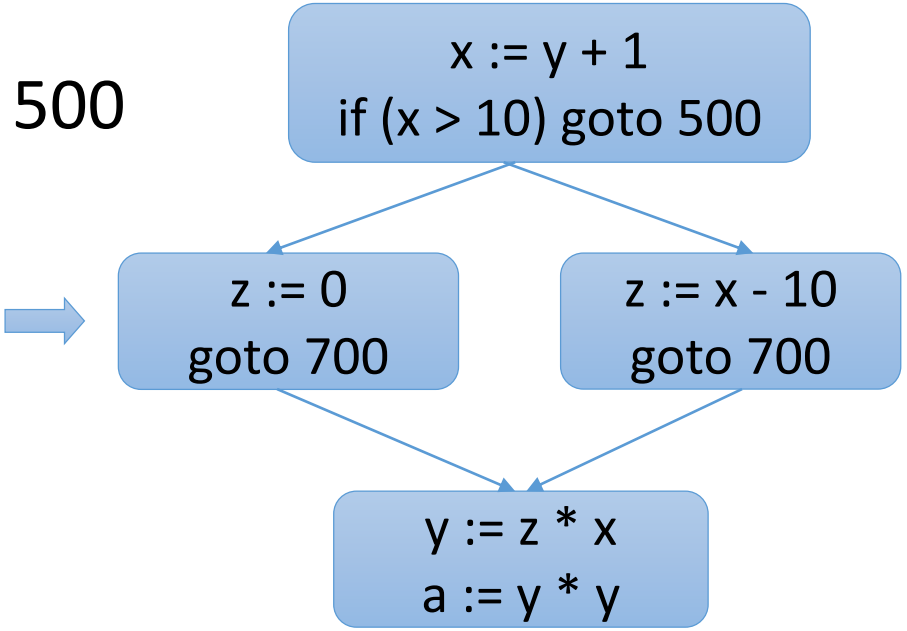
כל מתודה בתכנית תיוצג ע"י CFG כאשר הבלוק ההתחלתי יהיה הבלוק המייצג את נקודת הכניסה של המתודה

Control Flow Graph (CFG)

- לעתים נתעניין ב-CFG בו כל צומת מכיל פקודה יחידה.
- לעתים נניח כי לבלוק הראשון בתכנית אין קשתות נכנסות ולבלוק אחרון אין קשתות יוצאות
  - תמיד ניתן להוסיף בלוקים ריקים בהתחלה ובסוף.

דוגמא - CFG

```
100:   x := y + 1
200:   if (x > 10) goto 500
300:   z := 0
400:   goto 700
500:   z := x - 10
600:   goto 700
700:   y := z * x
800:   a := y * y
```



איך בונים CFG?

נגדיר:

leader - כל פקודה המקיימת אחת הדרישות:

- מופיעה מייד אחרי קפיצה (מותנית או לא מותנית).
- יעד של קפיצה (מותנית או לא מותנית).
- פקודה ראשונה בתכנית.

```
100:    x := y + 1
200:    if (x > 10) goto 500
300:    z := 0
400:    goto 700
500:    z := x - 10
600:    goto 700
700:    y := z * x
800:    a := y * y
```

בדוגמה: פקודות בכתובות

100, 300, 500, 700

אלגוריתם לבניית CFG

1. מצא את כל ה-leaders בתכנית.
2. עבור כל leader: הבלוק הבסיסי של ה-leader הינו:
   - סדרת הפקודות החל ממנו (כולל) ועד ל-leader הבא (לא כולל).
   - או עד לסוף התכנית.
3. הוסף קשתות בהתאם לקפיצות בסוף כל בלוק בסיסי.

שאלה ממבחן – אביב 2015 א

```
1.  if (?) goto 6;
2.  c=2;
3.  d=3;
4.  d=a+1;
5.  if(?) goto 9
6.  e=3*b
7.  a=b+c;
8.  goto 6;
9.  d=b+c;
10. if(?) goto 11
11. e=b+c;
12. if (?) goto 9;
13. g=e*1
14. f=g*e
15. e=d+6
16. g=e*8
17. b=e-2
18. g=f+d
19. b=d+g
20. a=e+b
21. if (?) goto 3;
22. goto 6;
```

נתון הקוד ביניים הבא, שהוא גוף של פונקציה foo(a,b,c,d,e,f,g)

א. (3 נק') ציירו CFG לקוד הנתון כאשר כל צומת הוא בלוק בסיסי.

שאלה ממבחן – אביב 2015 א

```
1.  if (?) goto 6;
2.  c=2;
3.  d=3;
4.  d=a+1;
5.  if(?) goto 9
6.  e=3*b
7.  a=b+c;
8.  goto 6;
9.  d=b+c;
10.if(?) goto 11
11.e=b+c;
12.if (?) goto 9;
13.g=e*1
14.f=g*e
15.e=d+6
16.g=e*8
17.b=e-2
18.g=f+d
19.b=d+g
20.a=e+b
21.if (?) goto 3;
22.goto 6;
```

1. מצא את כל ה-leaders בתכנית.

שאלה ממבחן – אביב 2015 א

```
1.  if (?) goto 6;
2.  c=2;
3.  d=3;
4.  d=a+1;
5.  if(?) goto 9
6.  e=3*b
7.  a=b+c;
8.  goto 6;
9.  d=b+c;
10.if(?) goto 11
11.e=b+c;
12.if (?) goto 9;
13.g=e*1
14.f=g*e
15.e=d+6
16.g=e*8
17.b=e-2
18.g=f+d
19.b=d+g
20.a=e+b
21.if (?) goto 3;
22.goto 6;
```

1. מצא את כל ה-leaders בתכנית.

שאלה ממבחן – אביב 2015 א

2. עבור כל leader: הבלוק הבסיסי של ה-leader הינו:
   - סדרת הפקודות החל ממנו (כולל) ועד ל-leader הבא (לא כולל).
   - או עד לסוף התכנית.

```
1.  if (?) goto 6;
```

```
2.  c=2;
```

```
3.  d=3;
4.  d=a+1;
5.  if(?) goto 9
```

```
6.  e=3*b
7.  a=b+c;
8.  goto 6;
```

```
9.  d=b+c;
10.if(?) goto 11
```

```
11.e=b+c;
12.if (?) goto 9;
```

```
13.g=e*1
14.f=g*e
15.e=d+6
16.g=e*8
17.b=e-2
18.g=f+d
19.b=d+g
20.a=e+b
21.if (?) goto 3;
```

```
22.goto 6;
```

שאלה ממבחן – אביב 2015 א

3. הוסף קשתות בהתאם לקפיצות בסוף כל בלוק בסיסי.

```
1. if (?) goto 6;
```

```
2. c=2;
```

```
3. d=3;
4. d=a+1;
5. if(?) goto 9
```

```
6. e=3*b
7. a=b+c;
8. goto 6;
```

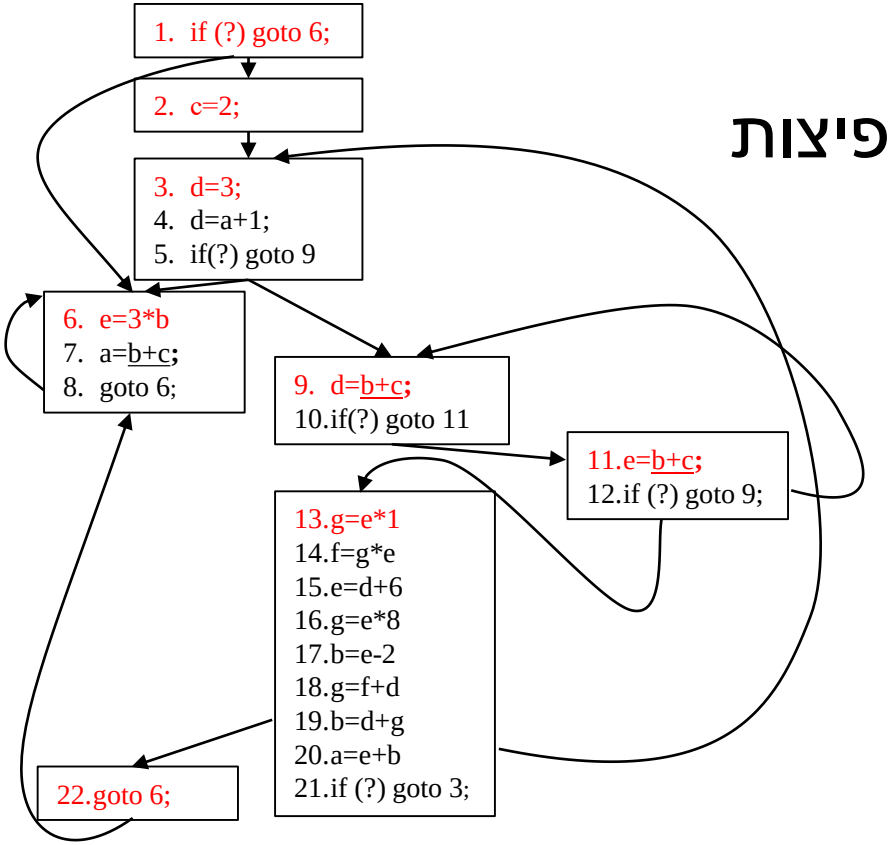
```
9. d=b+c;
10.if(?) goto 11
```

```
11.e=b+c;
12.if (?) goto 9;
```

```
13.g=e*1
14.f=g*e
15.e=d+6
16.g=e*8
17.b=e-2
18.g=f+d
19.b=d+g
20.a=e+b
21.if (?) goto 3;
```

```
22.goto 6;
```

שאלה ממבחן – אביב 2015 א



3. הוסף קשתות בהתאם לקפיצות בסוף כל בלוק בסיסי.

סוגי אופטימיזציות בזמן קומפילציה

- **לוקאליות**

  מתייחסות לבלוק בסיסי יחיד. כמעט כל הקומפיילרים מבצעים אותן.

- **גלובאליות**

  מתייחסות לגוף מתודה (ה-CFG) שלה. כלומר **אינן גלובליות בתכנית כולה, רק במתודה**. קומפיילרים רבים מבצעים אותן.

- **Inter-Procedural**

  מתייחסות גם ליחסים בין מתודות. מסובך למימוש והתועלת נמוכה יחסית.

אופטימיזציות לוקאליות

אופטימיזציות לוקאליות

- **Constant Propagation**

פעפוע קבועים (בתנאי ש-a לא השתנה בין הפקודות)

מתבסס על האנליזה שראינו בשיעור 9

- **Copy propagation**

בתנאי ש-a,b לא משתנים בין הפקודות.

נראה מיותר, אבל בשילוב

עם אופטימיזציות אחרות יהיה

יעיל (למשל מחיקת ההשמה

(a = b

- מתבסס על האנליזה שראינו בתרגול 9

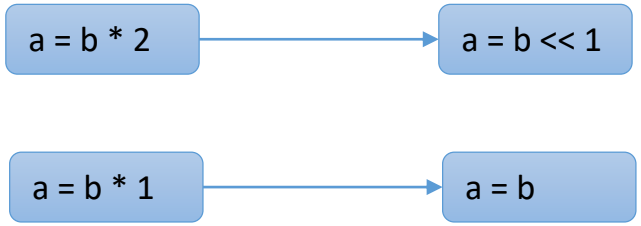
אופטימיזציות לוקאליות

- **Common sub-expression elimination**

  אם x,y,z לא משתנים בין הפקודות
  השינוי נאות, והורדנו חישוב
  חוזר מיותר

- **Algebraic Simplification**

  פישוטים אלגבריים שונים
  המובילים לריצה מהירה יותר או
  לאופטימיזציות אחרות



  - מתבסס על ידע מוקדם לגבי המעבד
    - למשל, b<<1 יותר מהיר מb*2

אופטימיזציות לוקאליות

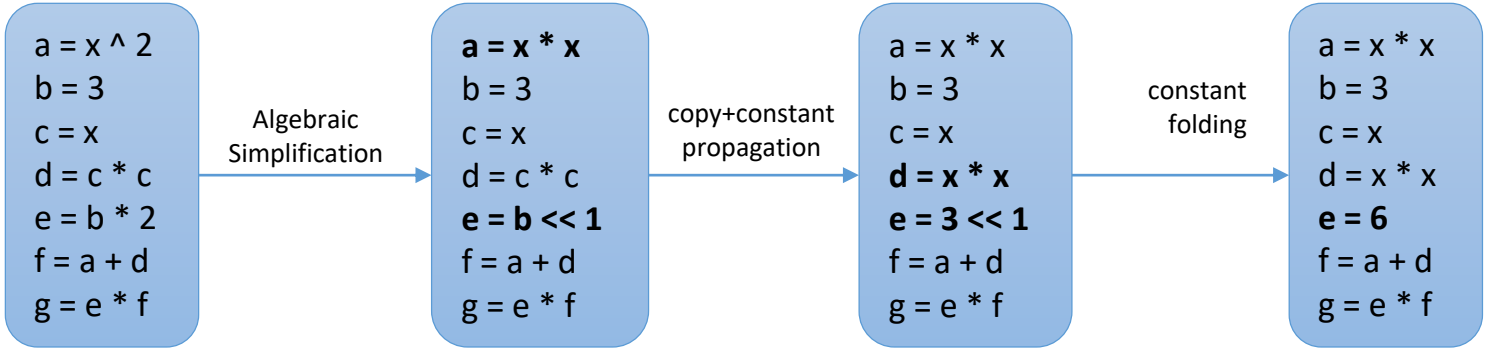
- **Constant Folding**

  פישוט ביטויים המכילים קבועים בלבד

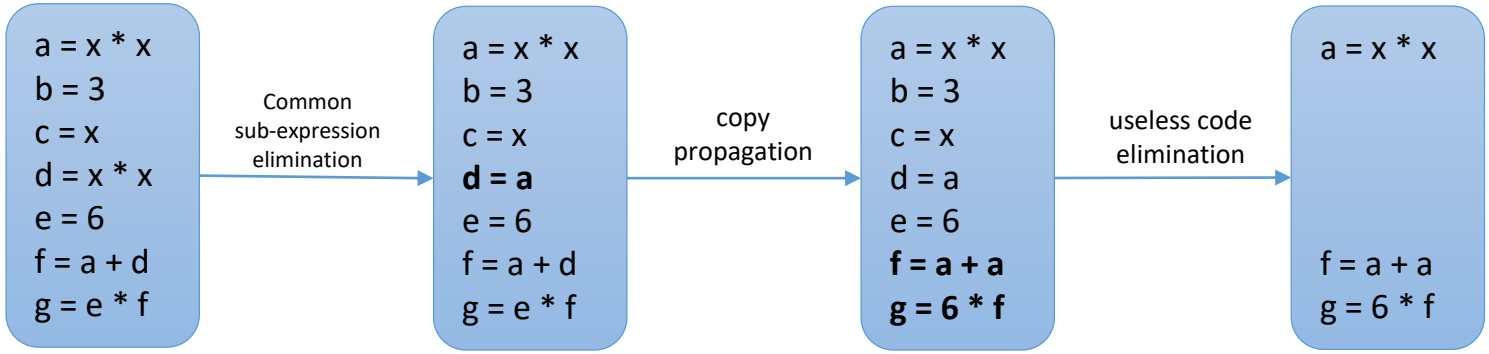
- **Useless code elimination**

  אם w=rhs מופיע ולאחר מכן אין שימוש נוסף
  של w בקוד לפני השמה נוספת ל-w,
  ניתן להשמיט פקודה זו
  - על בסיס אנליזת חיות שראינו בתרגול 9

אופטימיזציות לוקאליות - דוגמא



אופטימיזציות לוקאליות – דוגמא (המשך)



- אופטימיזציה אלגברית נוספת אפשרית:

```
a = x * x
g = 12 * a
```

שאלה ממבחן (המשך) – אביב 2015 א

```
1.  if (?) goto 6;
2.  c=2;
3.  d=3;
4.  d=a+1;
5.  if(?) goto 9
6.  e=3*b
7.  a=b+c;
8.  goto 6;
9.  d=b+c;
10.if(?) goto 11
11.e=b+c;
12.if (?) goto 9;
13.g=e*1
14.f=g*e
15.e=d+6
16.g=e*8
17.b=e-2
18.g=f+d
19.b=d+g
20.a=e+b
21.if (?) goto 3;
22.goto 6;
```

ג. (7 נק') עבור הבלוק שמכיל את שורה 13 בצעו מספר פעמים גדול ככל שתוכלו את פעולות האופטימיזציות:

- הפצת העתקות (Copy propagation)
- פישוטים אלגבריים (Algebraic Simplification) על פקודה בודדת.
- ביטול קוד ללא שימוש (Useless Code Elimination)

עבור כל פעולת אופטימזציה רשמו במפורש דוגמה אחת לפחות לשימוש בה.
ורשמו את הקוד המתקבל בסוף הפעלת כל האופטימיזציות שצויינו עבור הבלוק שמכיל את שורה 13.

שאלה ממבחן (המשך) – אביב 2015 א

```
13.g=e*1
14.f=g*e
15.e=d+6
16.g=e*8
17.b=e-2
18.g=f+d
19.b=d+g
20.a=e+b
21.if (?) goto 3
```

Algebraic Simplification →

```
13.g=e
14.f=g*e
15.e=d+6
16.g=e<<3
17.b=e-2
18.g=f+d
19.b=d+g
20.a=e+b
21.if (?) goto 3
```

Copy Propagation →

```
13.g=e
14.f=e*e
15.e=d+6
16.g=e<<3
17.b=e-2
18.g=f+d
19.b=d+g
20.a=e+b
21.if (?) goto 3
```

Useless Code Elimination →

```
14.  f=e*e
15.e=d+6

18.  g=f+d
19.b=d+g
20.a=e+b
21.if (?) goto 3
```

אנליזות לצורך אופטימיזציות

- חלק מהאופטימיזציות שראינו מתבססות על אנליזות DFA (לאו דווקא gen/kill)
- מה הדומיין הרלוונטי לכל אחת מהאופטימיזציות?
  - Copy propagation

    $N = \{(x, y) | x \text{ is a var}, y \text{ is a var}\}$
  - Constant propagation

    $N = \{(x, y) | x \text{ is a var}, y \text{ is a number}\}$
  - Common sub-expression elimination

    $N = \{(x, y) | x \text{ is a var}, y \text{ is an expression}\}$
- 3 האנליזות הללו הן בעיות must עם זרימה קדמית
- וגם בעיית may עם זרימה אחורית:
  - Liveness (ניתוח חיות)

    $N = \{x | x \text{ is a var}\}$

אנליזות לצורך אופטימיזציות

```
x := 8
z := x * 2
if (y < 18) goto ?
```

$in_{CP} = \{x \mapsto \top, y \mapsto \top, z \mapsto \top\}$
$out_{live} = \{y\}$

$out_{CP} = \{x \mapsto 8, y \mapsto \top, z \mapsto \top\}$
$in_{live} = \{x, y, z\}$

$in_{CP} = \{x \mapsto 8, y \mapsto \top, z \mapsto \top\}$
$out_{live} = \{x, y, z\}$

```
print y
```

$out_{CP} = \{x \mapsto 8, y \mapsto \top, z \mapsto \top\}$
$in_{live} = \{x, z\}$

$in_{CP} = \{x \mapsto 8, y \mapsto \top, z \mapsto \top\}$
$out_{live} = \{x, y, z\}$

```
w = x + 10
print w
print y
```

$out_{CP} = \{x \mapsto 8, y \mapsto \top, z \mapsto \top\}$
$in_{live} = \{x, z\}$

```
x := x * 2
print z
```

$in_{CP} = \{x \mapsto 8, y \mapsto \top, z \mapsto \top\}$
$out_{live} = \{x, z\}$

$out_{CP} = \{x \mapsto 16, y \mapsto \top, z \mapsto \top\}$
$in_{live} = \emptyset$

אופטימיזציה לוקאלית מושפעת

```
1: x := 8
2: z := x * 2
3: if (y < 18) goto ?
```

$in_{CP} = \{x \mapsto \mathrm{T}, y \mapsto \mathrm{T}, z \mapsto \mathrm{T}\}$
$out_{live} = \{y\}$

$out_{CP} = \{x \mapsto 8, y \mapsto \mathrm{T}, z \mapsto \mathrm{T}\}$
$in_{live} = \{x, y, z\}$

- נרצה לבצע לוקאלית
  - Constant Propagation
  - Constant Folding
  - Algebraic Simplification
  - Useless code elimination
- ללא מידע מאנליזות:
  - נמחק את שורה 1
  - נמחק את שורה 2
- האם מותר לנו למחוק את שורה 2?

אופטימיזציה לוקאלית מושפעת

$in_{CP} = \{x \mapsto 8, y \mapsto \top, z \mapsto \top\}$

$out_{live} = \{x, y, z\}$

```
1: w := 18
2: print 18
3: print y
```

$out_{CP} = \{x \mapsto 8, y \mapsto \top, z \mapsto \top\}$

$in_{live} = \{x, z\}$

- נרצה לבצע לוקאלית
  - Constant Propagation
  - Constant folding
  - Algebraic Simplification
  - Useless code elimination
- ללא מידע מאנליזות:
  - לא ניתן לבצע CF+CP על שורה 1
  - לא ניתן לבצע CP על שורה 2
- האם ניתן לבצע אותם?

אופטימיזציה לוקאלית מושפעת

```
x := x * 2
print z
```

$in_{CP} = \{x \mapsto 8, y \mapsto \mathrm{T}, z \mapsto \mathrm{T}\}$
$out_{live} = \{x, z\}$

$out_{CP} = \{x \mapsto 16, y \mapsto \mathrm{T}, z \mapsto \mathrm{T}\}$
$in_{live} = \emptyset$

- נרצה לבצע לוקאלית
  - Constant Propagation
  - Constant Folding
  - Algebraic Simplification
  - Useless code elimination

- ללא מידע מאנליזות:
  - Algebraic simplification

```
x := x << 1
print z
```

- בהתחשבות באנליזות:

```
print z
```

- למה?

בשבוע הבא

- עוד אופטימיזציות!